



ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΒΑΣΕΙ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ
ΚΑΙ
ΜΡΕG-7 ΜΕΤΑΔΕΔΟΜΕΝΩΝ



Ανέστης Κ. Κουτσούδης

Επιβλέπων: Καθηγητής Χριστόδουλος Χαμζάς

Ξάνθη, 2010

Στους γονείς μου,
στη Άννα & στον αδερφό μου Νίκο

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί τμήμα των παραδοτέων του έργου με τίτλο «*Αρχειοθέτηση και Ανάκτηση Πολυμεσικών Δεδομένων Βάσει Περιεχομένου και MPEG-7 Μεταδεδομένων*» και κωδικό 03ΕΔ679. Το συγκεκριμένο έργο συγχρηματοδοτήθηκε κατά:

- 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- Και από τον Ιδιωτικό Τομέα στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινωνικό Πλαίσιο Στήριξης.

Τίτλος έργου : Αρχειοθέτηση και Ανάκτηση Πολυμεσικών Δεδομένων Βάσει Περιεχομένου και Mpeg-7 Μεταπληροφορίας

Κωδικός έργου: 03ΕΔ679

Ανάδοχος: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης ΝΠΔΔ

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Χριστόδουλος Χαμζάς

Μέτρο: 8.3

Δράση: 8.3.1

Θεματικός Τομέας: Τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας

Αρμόδια Διεύθυνση ΓΓΕΤ: Υποστήριξης Ερευνητικών Προγραμμάτων

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Ο Επιβλέπων

Χριστόδουλος Χαμζάς
Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Τα Μέλη

Θεόδωρος Παπαθεοδώρου
Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Πατρών

Ιωάννης Λυγούρας
Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Νικόλαος Παπαμάρκος
Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Θεοχάρης Θεοχάρης
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Αθηνών

Πάυλος Εφραιμίδης
Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Γεώργιος Παυλίδης
Ερευνητής Β' – ΙΠΕΤ/Ε.Κ. «Αθηνά»

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή είναι αποτέλεσμα μελέτης, επίμονης προσπάθειας και έρευνας που πραγματοποιήθηκε τα τελευταία τέσσερα χρόνια. Είναι βέβαιο πως η ολοκλήρωση της δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη αλλά και την ανεκτικότητα κάποιων ανθρώπων τους οποίους και επιθυμώ να μνημονεύσω και να ευχαριστήσω μέσα από τις παρακάτω γραμμές.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Χριστόδουλο Χαμζά, για τη συνεχή ηθική, πνευματική και επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη που έχει δείξει απέναντι στο πρόσωπο μου τα τελευταία δέκα χρόνια. Ομοίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Νικόλαο Παπαμάρκο για την επικοινωνιακή συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια του.

Ένα ευχαριστώ οφείλω στους φίλους και συνεργάτες Γεώργιο Παυλίδη, Φώτη Αρναούτογλου, Κωνσταντίνο Σταυρόγλου, Χριστίνα Μακαρονά, Βασιλική Λιάμη, Δέσποινα Τζιαφάκη και Νέστωρ Τσιρλιγκάνη για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε ο καθένας με τον δικό του τρόπο.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Βαγγέλη Μουτσελάκη και Αναστασία Γεωργιάδου για την πολύτιμη βοήθεια τους τόσο στα προπτυχιακά όσο και στα μεταπτυχιακά μαθήματα που παρακολουθήσαμε μαζί κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, στην Άννα και στον αδερφό μου Νίκο για την αδιάλειπτη υποστήριξη τους σε όλες τις επιλογές της ζωής μου καθώς και για την υπομονή και ανοχή που έδειξαν τα τελευταία τέσσερα χρόνια απέναντι σε όλες τις *ιδιαιτερότητες* που παρουσιάζει ένας υποψήφιος διδάκτορας.

Δημοσιεύσεις

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

1. A. Koutsoudis, G. Pavlidis, V. Liami, D. Tsiafakis, C. Chamzas, *3D Pottery Content Based Retrieval Based on Pose Normalisation and Segmentation*, Journal of Cultural Heritage, accepted for publication, in press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2010.02.002>
2. A. Koutsoudis, G. Pavlidis, F. Arnaoutoglou, D. Tsiafakis, C. Chamzas, *QP: A Tool for Generating 3D Models of Ancient Greek Pottery*, Journal of Cultural Heritage 10 (2009), pp. 281-295.
3. A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, *On 3D Reconstruction of the old city of Xanthi*, Journal of Cultural Heritage, Journal of Cultural Heritage, Volume 8, Issue 1, January-March 2007, pp. 26-31.

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά υπό κρίση

1. A. Koutsoudis, C. Makarona, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, C. Chamzas, *Content Based Retrieval of Artefacts in Real Time 3D Environments: The Case of a Pottery Museum*, Journal of Cultural Heritage.
2. A. Koutsoudis, C. Chamzas, *3D Pottery Shape Matching Using Depth Map Images*, Journal of Cultural Heritage.

Άρθρα σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων/ημερίδων

1. A. Koutsoudis, C. Chamzas, *A 3D Pottery Content Based Retrieval Method*, Workshop on 3D Object Retrieval, Eurographics '09, 29 March 2009, Munich, Germany.
2. A. Koutsoudis, C. Chamzas, *3D Pottery Shape Similarity Matching Based on Digital Signatures*, in Procs. of the 37th Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (CAA 2009), Williamsburg, Virginia, USA, March 22-26, 2009.
3. A. Koutsoudis, G. Pavlidis, F. Arnaoutoglou, D. Tsiafakis, C. Chamzas, *A 3D Pottery Database for Benchmarking Content Based Retrieval Mechanisms*, in Procs. of Eurographics 2008 - Workshop on 3D Object Retrieval, Crete, Hersonisos, Greece, 15 April, 2008.
4. A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, *Process Evaluation of 3D Reconstruction Methodologies Targeted to Web based Virtual Reality*, XXI CIPA International Symposium, (Athens, Greece), Oct. 1-6, 2007.

Άρθρα σε πρακτικά εθνικών συνεδρίων/ημερίδων

1. C. Chamzas, A. Koutsoudis, G. Pavlidis, *Applying 3D Digitisation Technologies in the Culture Heritage Domain*, in Procs. of the International Symposium Information & Communication Technologies in Cultural Heritage, 16-18 November 2008, Ioannina, Greece.

Περίληψη

Η ανάκτηση τρισδιάστατων αντικειμένων βάσει περιεχομένου αποτελεί σήμερα ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο. Αυτό οφείλεται στη βελτίωση των επιταχυντών απεικόνισης τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου καθώς και στην αύξηση των τρισδιάστατων ψηφιακών αντιγράφων πραγματικών αντικειμένων. Σήμερα, τα συστήματα τρισδιάστατης ψηφιοποίησης βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλους επιστημονικούς τομείς. Ανάμεσα τους είναι και η επιστήμη της αρχαιολογίας όπου η τρισδιάστατη αποτύπωση αποτελεί κοινή πρακτική.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην εφαρμογή των τεχνολογιών ανάκτησης βάσει περιεχομένου στο χώρο της κεραμικής. Εστιάζει στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας εντοπισμού μορφολογικής συνάφειας ανάμεσα σε τρισδιάστατα ψηφιακά αντίγραφα αγγείων. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο τόσο για τον αρχαιολόγο όσο και για τον μελετητή κεραμικών.

Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε μία βάση δεδομένων τρισδιάστατων αγγείων η οποία είναι προσβάσιμη διαμέσου ενός πρότυπου Διαδικτυακού συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιλαμβάνει ψηφιοποιημένα αλλά και μοντελοποιημένα τρισδιάστατα αγγεία. Κάποια από αυτά έχουν προκύψει από μία γεννήτρια τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων η οποία υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Προτείνεται μια νέα μέθοδος κανονικοποίησης της κλίμακας, της θέσης και του προσανατολισμού ενός αγγείου από την οποία δύναται να προκύψουν περιγραφείς που ειδικεύονται στην κωδικοποίηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών που φέρουν τα αγγεία. Οι περιγραφείς εκμεταλλεύονται την αξονική συμμετρία των αγγείων οδηγώντας σε συνεπτυγμένες κωδικοποιήσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών του βασικού σώματος και των προσαρτημάτων τους. Μέσα από μία σειρά πειραμάτων αποτίμησης της απόδοσης των προτεινόμενων περιγραφέων επαληθεύεται πως η ανάπτυξη μεθόδων περιγραφής που ειδικεύονται σε κάποια κατηγορία αντικειμένων, οδηγεί στη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας ενός συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου.

Abstract

Nowadays, 3D content based retrieval is an active research field. The evolution of 3D computer graphics accelerators and the progress of 3D digitisation systems resulted an increase in the number of artefact's digital replicas. It is a fact that 3D digitisation is a common practice in the cultural heritage domain.

The objective of this thesis is to investigate the application of 3D content based retrieval mechanisms in the area of pottery. Automating the procedure of matching vessels's morphological features may lead to an important software tool that will enhance the research performed by archaeologists and ceramic researchers.

To this end, a calibrated ground truth database with 3D vessels has been created. The database can be accessed though a prototype Web-based 3D content based retrieval search engine. The database contains both digitized and modeled vessels. Some of the modelled vessels have been produced by a random 3D vessel generator which has been developed within this thesis framework.

A novel pose normalisation algorithm applicable to 3D vessels algorithm is proposed. Novel 3D shape descriptors were derived by exploiting this pose normalisation approach. These descriptors are specially designed for complete or nearly complete 3D vessels. They produce compact encodings of the vessels' morphological features by taking under consideration their axial-symmetry. The performance evaluation results indicate that a specific method produces better results when compared to generic methods.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Πεδίο ορισμού του προβλήματος	2
1.3 Στόχοι της διατριβής	3
1.4 Οργάνωση της διατριβής	5
Κεφάλαιο 2 Γενικές Έννοιες	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Μέθοδοι περιγραφής τρισδιάστατων αντικειμένων	7
2.3 Απεικόνιση τρισδιάστατων μοντέλων.....	12
2.4 Μορφολογικά χαρακτηριστικά αγγείων	15
2.5 Χαρακτηριστικά συστημάτων ανάκτησης βάσει περιεχομένου	16
2.5.1 Ταύτιση τρισδιάστατων αντικειμένων	17
2.5.2 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης	19
2.5.3 Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών	22
2.5.4 Μετρικές ομοιότητας αντικειμένων	25
2.5.5 Μέτρα αποτίμησης αποτελεσμάτων ανάκτησης	26
2.6 Το πρότυπο MPEG-7.....	29
Κεφάλαιο 3 Ανασκόπηση Ερευνητικού Πεδίου	33
3.1 Εισαγωγή.....	33
3.2 Κατηγορίες περιγραφέντων τρισδιάστατων αντικειμένων.....	33
3.2.1 Περιγραφείς μορφολογικών χαρακτηριστικών	34
3.2.2 Γράφοι.....	42
3.2.3 Άλλες τεχνικές.....	47
3.3 Τεχνολογίες ταύτισης μορφολογικών χαρακτηριστικών αρχαιολογικών ευρημάτων	50
3.4 Ερευνητικές κατευθύνσεις	53
Κεφάλαιο 4 Πρότυπη Βαθμονομημένη Βάση Δεδομένων 3D Αγγείων	55
4.1 Εισαγωγή.....	55
4.2 Βαθμονομημένες βάσεις δεδομένων 3D αντικειμένων.....	56
4.3 Συλλέγοντας 3D μοντέλα αγγείων.....	58
4.4 QR – Γεννήτρια τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων	59
4.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογής.....	59
4.4.2 Ανάλυση μεθόδου κατασκευής 3D αγγείων.....	65
4.4.3 Δημιουργία τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων	76
4.4.4 Αποτίμηση απόδοσης αλγορίθμων	80
4.4.5 Μεταδεδομένα ψηφιακών αντιγράφων αγγείων	83
4.5 Βαθμονόμηση της πρότυπης βάσης δεδομένων	86
Κεφάλαιο 5 Κανονικοποίηση Κλίμακας και Προσανατολισμού Τρισδιάστατων Αγγείων	89
5.1 Εισαγωγή.....	89
5.2 Κανονικοποίηση κλίμακας	91
5.3 Κανονικοποίηση προσανατολισμού	94
5.3.1 Εντοπισμός του άξονα συμμετρίας	94
5.3.2 Κανονικοποίηση θέσης προσαρτημάτων	104
5.3.3 Αναγνώριση θέσης στομίου	105
5.3.4 Χαρακτηριστικά αλγορίθμου	107
5.4 Υλοποίηση αλγορίθμου κανονικοποίησης.....	109

Κεφάλαιο 6 Κωδικοποίηση μορφολογικών χαρακτηριστικών 3D αγγείων.....	113
6.1 Εισαγωγή.....	113
6.2 Περιγραφέας VMBA.....	113
6.2.1 Μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα VMBA.....	115
6.2.2 Δείκτης πολυπλοκότητας μορφολογίας αγγείου.....	118
6.2.3 Διάλυση κατεύθυνσης προσαρτημάτων.....	119
6.3 VMBA MPEG-7 Σχήμα.....	119
6.4 Περιγραφείς κωδικοποίησης χαρτών βάθους.....	123
6.4.1 Κωδικοποίηση Χάρτη Βάθους με Ακολουθίες Χαρακτήρων.....	125
6.4.2 Μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα CBDM.....	127
6.4.3 CBDM MPEG-7 Σχήμα.....	130
6.4.4 Περιγραφέας ZMDM.....	130
6.4.5 ZMDB MPEG-7 Σχήμα.....	134
Κεφάλαιο 7 Αποτίμηση Απόδοσης Πρότυπου Συστήματος Ανάκτησης Τρισδιάστατων Αγγείων.....	135
7.1 Εισαγωγή.....	135
7.2 Περιγραφή πρότυπου συστήματος ανάκτησης.....	135
7.2.1 Επερώτηση βάσει σκίτσου.....	138
7.3 Απεικόνιση σχηματικής απόκλισης αγγείων.....	140
7.4 Αποτίμησης απόδοσης συστήματος ανάκτησης.....	144
7.4.1 Αποτελέσματα αποτίμησης απόδοσης του συστήματος ανάκτησης.....	147
Κεφάλαιο 8 Ανάκτηση βάσει περιεχομένου 3D αντικειμένων σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας.....	167
8.1 Εισαγωγή.....	167
8.2 Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος της παλιάς πόλης της Ξάνθης.....	168
8.2.1 Μελέτη οικισμού και φωτογράφιση.....	169
8.2.2 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων.....	170
8.2.3 Φωτογραμμετρία και 3D ανακατασκευή.....	172
8.3 Ανάκτηση βάσει περιεχομένου σε τρισδιάστατο περιβάλλον διεπαφής.....	177
Κεφάλαιο 9 Επίλογος.....	183
9.1 Σύνοψη.....	183
Βιβλιογραφία.....	187
Παραρτήματα.....	203
1. Ομογενείς συντεταγμένες.....	203
2. Ορθογραφική προβολή.....	204
3. Συσχετισμένοι μετασχηματισμοί.....	206
4. Αλγόριθμος Douglas και Peucker.....	210
5. Κυκλική παρεμβολή.....	212
6. Χάραξη ισοϋψών καμπυλών σε τριγωνικό πλέγμα.....	214
7. Αλγόριθμος ομαδοποίησης σημείων σε μία ακολουθία.....	216
8. Ανάλυση ιδιαζουσών τιμών - Singular Value Decomposition (SVD).....	220
9. Διαδικτυακές Διευθύνσεις.....	222
10. Περιεχόμενα Πολυμορφικού Δίσκου.....	223

Σχήματα

Σχήμα 2-1 Μέθοδοι απεικόνισης τρισδιάστατων αντικειμένων.....	11
Σχήμα 2-2 Κύρια τμήματα ακολουθίας δημιουργίας και προβολής 3D γραφικών σε δισδιάστατη μονάδα εξόδου.	14
Σχήμα 2-3 Ονοματολογία βασικών τμημάτων ενός αγγείου [8].....	16
Σχήμα 2-4 Διαφορετικά επίπεδα ομοιότητας [9].....	17
Σχήμα 2-5 Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών και αναζήτησης 3D αντικειμένων.	18
Σχήμα 2-6 Αρχιτεκτονική και οντολογική δομή ενός συστήματος ανάκτησης 3D αντικειμένων βάσει περιεχομένου.	20
Σχήμα 2-7 Απεικόνιση διαδικασίας εξαγωγής του περιγραφέα ενός 3D αντικειμένου.	22
Σχήμα 2-8 Σύνολο τρισδιάστατων αντικειμένων και τα υποσύνολα τους.	27
Σχήμα 3-1 Ταξινόμηση τεχνικών ταύτισης γεωμετρικών χαρακτηριστικών.	34
Σχήμα 3-2 Κλίμακα δεικτοδότησης (Shape Index) για την αναπαράσταση βασικών καμπύλων επιφανειών.	41
Σχήμα 3-3 Τρισδιάστατα αντικείμενα, κατά τμήματα αναπαράσταση και γράφοι ARG.	44
Σχήμα 3-4 Παράδειγμα γράφου Reeb.....	45
Σχήμα 3-5 Ογκομετρικά μοντέλα και οι σκελετικοί τους γράφοι.	47
Σχήμα 4-1 Αρχιτεκτονική εφαρμογής και διάγραμμα ροής δεδομένων.....	61
Σχήμα 4-2 Διαδικασίες δημιουργίας τρισδιάστατων αγγείων.....	62
Σχήμα 4-3 Προσέγγιση ψηφιογραφικού προφίλ μετατοπίζοντας τα σημεία ελέγχου της αλυσίδα πολυωνύμων.....	62
Σχήμα 4-4 Τρισδιάστατα αγγεία κατασκευασμένα με το <i>QP</i> . Φωτορεαλιστική απόδοση με χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα <i>Blender</i>	64
Σχήμα 4-5 Περιβάλλον διεπαφής της εφαρμογής μοντελοποίησης 3D αγγείων <i>QP</i>	64
Σχήμα 4-6 Παράδειγμα Ερμιτιανής καμπύλης.	66
Σχήμα 4-7 Ερμιτιανά πολυώνυμα 3ου βαθμού.	67
Σχήμα 4-8 Αλυσίδα Ερμιτιανών πολυωνύμων παρεμβολής.	67
Σχήμα 4-9 Δημιουργία του νέφους σημείων που περιγράφει το βασικό σώμα ενός αγγείου με τη μέθοδο «Επιφάνειες εκ περιστροφής μίας γενέτειρας».	70
Σχήμα 4-10 Εξώθηση κατά μήκος μίας προκαθορισμένης πορείας.	71
Σχήμα 4-11 Δείγματα βάσεων διατομής διαφορετικών τύπων λαβών.	72
Σχήμα 4-12 Δημιουργία σωληνοειδούς νέφους σημείων της λαβής ενός αγγείου.	74
Σχήμα 4-13 Μεθοδολογία τριγωνοποίησης νέφους σημείων.	76
Σχήμα 4-14 Μέθοδοι τυχαιοποίησης τρισδιάστατων αγγείων.....	79
Σχήμα 4-15 Απόδοση αλγορίθμου « <i>Επιφάνειες εκ περιστροφής μίας γενέτειρας</i> ».	80
Σχήμα 4-16 Γραμμική σχέση σημείων ελέγχου και κορυφών νέφους σημείων.	81
Σχήμα 4-17 Απόδοση αλγορίθμου « <i>Εξώθησης κατά μήκος προκαθορισμένης πορείας</i> ».	81
Σχήμα 4-18 Γραμμική σχέση σημείων ελέγχου και κορυφών νέφους σημείων.	82
Σχήμα 4-19 Απόδοση αλγορίθμου τριγωνοποίησης νέφους σημείων.	82
Σχήμα 4-20 Στιγμιότυπο της εφαρμογής επεξεργασίας μεταδεδομένων τρισδιάστατων αντιγράφων αγγείων.	87
Σχήμα 5-1 Κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού αγγείων.	90
Σχήμα 5-2 Διάγραμμα ροή αλγορίθμου κανονικοποίησης.	91
Σχήμα 5-3 Περιπτώσεις απόκλισης του πρώτου κύριου άξονα (P_a) από τον πραγματικό άξονα συμμετρίας (V_a).	96
Σχήμα 5-4 Χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος των κυρίων αξόνων P_a , P_b και P_c	97
Σχήμα 5-5 Οργάνωση υποακολουθιών σε ομάδες.	100
Σχήμα 5-6 Παράδειγμα περιοχής όπου παρατηρείται η εξέλιξη των προσαρτημάτων από το βασικό σώμα ενός Αμφορέα.....	102

Σχήμα 5-7 Επιλογή των υποακολουθιών που ανήκουν στην πρώτη 1^{η} ομάδα. Τα κέντρα των κύκλων παρεμβολής των υποακολουθιών θα χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό του προσωρινού άξονα συμμετρίας (V_{at}).....	102
Σχήμα 5-8 Υπολογισμός των κλίσεων του προσωρινού άξονα V_{at} προς τα επίπεδα C_x-C_y και C_z-C_y αντίστοιχα.....	103
Σχήμα 5-9 Υπολογισμός απόστασης των εξαρτημάτων από τον άξονα συμμετρίας του αγγείου (σημείο O) σε ένα επίπεδο χάραξης.....	104
Σχήμα 5-10 Παραδείγματα κανονικοποίησης θέσης προσαρτημάτων ως προς τον άξονα C_x	105
Σχήμα 5-11 Αναγνώριση της θέσης του στομίου ενός αγγείου.....	106
Σχήμα 5-12 Υπολογισμός κυκλικής παρεμβολής με τη μέθοδο του <i>Robert Israel</i> (5° Παράρτημα) σε ακολουθίες κορυφών όπου αναπαριστούν τομές του βασικού σώματος ενός αγγείου που διασώζεται αποσπασματικά.....	107
Σχήμα 5-13 Κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού αγγείου που διασώζεται αποσπασματικά (διασώζεται το προφίλ του).....	108
Σχήμα 5-14 Μεταβολή της κλιμάκωσης του αγγείου μέσα στη μοναδιαία σφαίρα κατά τη σταδιακή αφαίρεση τμημάτων από την περιοχή του στομίου της Ληκύθου. Παρατηρείτε η σταδιακή μεγέθυνση των ακτίνων των κύκλων παρεμβολής.....	109
Σχήμα 5-15 Στιγμιότυπο της εφαρμογής κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού τρισδιάστατων αγγείων. Το δευτερεύον παράθυρο (κάτω δεξιά) επιτρέπει την προσπέλαση των ισοϋψών καμπυλών χάραξης έτσι ο χρήστης να έχει πρόσβαση στα χαρακτηριστικά των αντικειμένων σε κάθε επίπεδο χάραξης.....	110
Σχήμα 5-16 Χρόνοι κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού αγγείων.....	111
Σχήμα 5-17 Διακύμανση μεγέθους των αρχείων (Λογαριθμική κλίμακα).....	112
Σχήμα 6-1 Δομή περιγραφέα VMBA με 32 επίπεδα χάραξης ισοϋψών καμπυλών.....	114
Σχήμα 6-2 Δείκτης πολυπλοκότητας προσαρτημάτων.....	118
Σχήμα 6-3 Επίπεδα ορθογραφικής προβολής.....	124
Σχήμα 6-4 Παράδειγμα κωδικοποίησης χάρτη βάθους σε ακολουθίες χαρακτήρων. (Το πλήθος των χαρακτήρων στις ακολουθίες του σχήματος έχει μειωθεί για λόγους ευκρίνειας).....	126
Σχήμα 6-5 Αμεταβλητότητα 2D ροπών <i>Zernike</i> σε περιστροφή γύρω από το κέντρο της ψηφιογραφικής εικόνας.....	133
Σχήμα 7-1 Αρχιτεκτονική πρότυπου συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου 3D αγγείων.....	137
Σχήμα 7-2 Στιγμιότυπο της πρότυπης μηχανής αναζήτησης βάσει περιεχομένου.....	137
Σχήμα 7-3 Επερώτηση βάσει σκίτσου – Στιγμιότυπο του καμβά σχεδίασης του προφίλ ενός αγγείου. Δεξιά του άξονα συμμετρίας παρουσιάζεται ένα πρότυπο σχέδιο για διευκόλυνση του χρήστη.....	138
Σχήμα 7-4 Εντοπισμός ελαχίστων και μεγίστων συντεταγμένων του αγγείου, υπολογισμός ελάχιστου περικλείοντος κύκλου σε κάθε επίπεδο και κανονικοποίηση αποστάσεων εικονοστοιχείων από τον άξονα συμμετρίας.....	140
Σχήμα 7-5 Αποτύπωση πλευρικής όψης μίας Ληκύθου από συγκεκριμένη οπτική γωνία με την τεχνική χάρτη βάθους (χρήση ορθογραφικής προβολής).....	142
Σχήμα 7-6 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα VMBA.....	149
Σχήμα 7-7 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα MPEG-7 3D SSD.....	150
Σχήμα 7-8 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα Light field LIFD [69].....	151
Σχήμα 7-9 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα ZMDM.....	152
Σχήμα 7-10 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 64x64.....	153
Σχήμα 7-11 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 32x32.....	154
Σχήμα 7-12 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 16x16.....	155

Σχήμα 7-13 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 8x8.....	156
Σχήμα 7-14 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση εικόνας 8x8,16x16, 32x32 και 64x64.	157
Σχήμα 7-15 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσου όρου ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τους περιγραφείς MPEG-7 3D SSD, ZMDM, LIFD, CBDM με ανάλυση εικόνας 64x64 και VMBA.	158
Σχήμα 7-16 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για όλες τις κατηγορίες αγγείων ως προς τον κάθε περιγραφέα (MPEG-7 3D SSD, ZMDM, LIFD, CBDM με ανάλυση εικόνας 64x64 και VMBA).....	159
Σχήμα 7-17 Γραφήματα μέσων τιμών του μονόμετρο F-Score σε κάθε θέση κατάταξης. Υπολογισμένα ανεξάρτητα για κάθε περιγραφέα ως μέση τιμή των πέντε κατηγοριών αγγείων.	160
Σχήμα 7-18 Γραφήματα μέσων τιμών του μονόμετρο <i>F2-Score</i> σε κάθε θέση κατάταξης. Υπολογισμένα ανεξάρτητα για κάθε περιγραφέα ως η μέση τιμή για τις επιλεγμένες κατηγορίες αγγείων.	161
Σχήμα 7-19 Αποτελέσματα <i>επερώτησης-βάσει-παραδείγματος</i> εφαρμόζοντας τον VMBA.	164
Σχήμα 8-1 Παραμόρφωση ειδώλου: α) μηδενική παραμόρφωση, β) θετική παραμόρφωση γ) αρνητική (βαρελοειδή) παραμόρφωση.	171
Σχήμα 8-2 Αρχική και προοπτικά διορθωμένη εικόνα.	171
Σχήμα 8-3 Παραδείγματα συγκεντρωτικών εικόνων πληροφορίας υφής.	172
Σχήμα 8-4 Στιγμιότυπο από την εφαρμογή <i>ptricker</i> . Αντιστοίχιση ομολογων σημείων ανάμεσα σε δύο εικόνες και οργάνωση τους σε τρίγωνα.	173
Σχήμα 8-5 Στιγμιότυπο από το λογισμικό Blender κατά τη διαδικασία ανακατασκευής της παλιάς πόλης της Ξάνθης.	175
Σχήμα 8-6 Στιγμιότυπα από την τρισδιάστατη ανακατασκευή της παλιάς πόλης της Ξάνθης.....	176
Σχήμα 8-7 Τεχνολογίες που συμβάλλουν στην υλοποίηση του συστήματος.....	177
Σχήμα 8-8 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης.....	178
Σχήμα 8-9 Διαδικασίες επικοινωνίας ανάμεσα στο χρήστη και στο διακομιστή.....	182
Σχήμα 8-10 Στιγμιότυπα από τα 3D περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας.....	181

Πίνακες

Πίνακας 4-1 Βαθμονομημένες βάσεις δεδομένων τρισδιάστατων αντικειμένων για υλοποιήσεις πειραμάτων αποτίμησης απόδοσης μεθόδων ανάκτησης βάσει περιεχομένου.	57
Πίνακας 4-2 Διαδικτυακές πηγές τρισδιάστατων αγγείων.....	59
Πίνακας 4-3 Ενδεικτικοί τύποι αγγείων που μοντελοποιήθηκαν με το <i>QP</i>	83
Πίνακας 4-4 Το ThreeDVDS σχήμα συμμορφούμενο με το πρότυπο MPEG-7.....	86
Πίνακας 4-5 Πλήθος αντικειμένων σε κάθε κατηγορία αγγείου.....	88
Πίνακας 5-1 Μέσες τιμές απόδοσης.....	112
Πίνακας 6-1 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα VMBA (εκτεταμένη έκδοση).....	121
Πίνακας 6-2 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα VMBA (συνεπτυγμένη έκδοση).....	123
Πίνακας 6-3 Παράδειγμα υπολογισμού βαθμού ταύτισης ακολουθιών χαρακτήρων με τον αλγόριθμο Needleman-Wunsch [68].....	128
Πίνακας 6-4 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα CBDM.....	130
Πίνακας 6-5 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα ZMDB.....	134
Πίνακας 7-1 Διαθέσιμοι τρόποι αναζήτησης.....	136
Πίνακας 7-2 Γραφική αναπαράσταση της σχηματικής απόκλισης των αγγείων ανά κατηγορία.	144
Πίνακας 7-3 Συγκεντρωτικός πίνακας μονόμετρων απόδοσης για όλους τους περιγραφείς.....	162

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η βελτίωση της απόδοσης των υπολογιστικών συστημάτων σχετίζεται άμεσα με τη συνεχή ανάπτυξη τους σε υλικοτεχνικό και λογισμικό επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία δραματική βελτίωση στο τομέα των επιταχυντών απεικόνισης τρισδιάστατων (3D) γραφικών. Οι κατασκευάστριες εταιρίες συμμετέχουν σε έναν αδιάλειπτο αγώνα εξέλιξης και επέκτασης των προϊόντων τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στη βιομηχανία ηλεκτρονικών παιχνιδιών που εκμεταλλεύεται άμεσα τις όποιες νέες δυνατότητες προκύπτουν. Σε κάθε περίπτωση βασικός στόχος είναι η αύξηση ρεαλισμού των 3D γραφικών.

Από την άλλη, η εμφάνιση προσιτών εμπορικών συστημάτων 3D ψηφιοποίησης οδήγησε στη ραγδαία αύξηση του ρυθμού παραγωγής 3D ψηφιακών αντιγράφων. Τα σύγχρονα συστήματα ψηφιοποίησης καταγράφουν το ανάγλυφο και το χρώμα της επιφάνειας ενός αντικειμένου σχεδόν αυτοματοποιημένα επιτρέποντας τη δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων υψηλής ακρίβειας.

Επιπρόσθετα, η εξάπλωση των ευρυζωνικών συνδέσεων συνέβαλε στη δημιουργία Διαδικτυακών προτύπων απεικόνισης 3D γραφικών που με τη σειρά τους οδήγησαν στη δημιουργία πολυάριθμων Διαδικτυακών χώρων εναπόθεσης 3D αντικείμενων. Είναι βέβαιο πως στο άμεσο μέλλον τα 3D μοντέλα, ψηφιοποιημένα

και μη, θα αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των Διαδικτυακών ψηφιακών βιβλιοθηκών. Η ανάγκη για αποδοτική διαχείριση των συγκεκριμένων δεδομένων επιβάλλει τον εμπλουτισμό των μηχανισμών αναζήτησης που στηρίζονται σε κείμενο με νέες μεθόδους ανάκτησης που αναλύουν και εκμεταλλεύονται το πλούσιο περιεχόμενο των 3D δεδομένων.

Η ανάκτηση 3D αντικειμένων βάσει περιεχομένου (3D Content Based Retrieval – 3DCBR) αποτελεί ένα υποπεδίο της ανάκτησης πολυμεσικής πληροφορίας. Ένας από τους βασικούς της στόχους είναι η ανάπτυξη μεθοδολογιών που επιτρέπουν τον εντοπισμό συνάφειας ανάμεσα στα μορφολογικά χαρακτηριστικά που φέρουν τα 3D αντικείμενα. Το συγκεκριμένο πεδίο αποτελεί αποτέλεσμα όσμωσης ερευνητικών χώρων όπως είναι η επεξεργασία ψηφιακών σημάτων, τα 3D γραφικά και οι πολυμεσικές βάσεις δεδομένων.

Γενικά, η ανάκτηση 3D αντικειμένων βάσει περιεχομένου μπορεί να βρει εφαρμογές σε χώρους όπως είναι η μηχανολογία, η αρχιτεκτονική, η όραση υπολογιστών, η εικονική πραγματικότητα, η μοριακή βιολογία, η αρχαιολογία και το ηλεκτρονικό εμπόριο.

1.2 Πεδίο ορισμού του προβλήματος

Το περιεχόμενο του Διαδικτύου χαρακτηρίζεται σήμερα ως πολυμεσικό αφού πέρα από το κείμενο περιέχει δεδομένα όπως εικόνες, ήχος, εικονοσειρές και 3D αντικείμενα. Οι περισσότεροι χρήστες του Διαδικτύου είναι εξοικειωμένοι με τις ταχύτερες μηχανές αναζήτησης που βασίζονται στο κείμενο (λέξεις κλειδιά). Η αναζήτηση πολυμεσικών δεδομένων με χρήση *λέξεων κλειδιά* είναι αλληλένδετη με τη διαδικασία *σχολιασμού* (annotation). Τα μεταδεδομένα που απορρέουν από τη διαδικασία αυτή αποβλέπουν στη λεπτομερή περιγραφή του περιεχομένου του εκάστοτε πολυμεσικού αρχείου. Ο σχολιασμός γίνεται σε μία ή και περισσότερες γλώσσες. Σε περιπτώσεις όπου ο χρήστης στηρίζει την *επερώτηση* (query) του σε λέξεις κλειδιά που ανήκουν σε μία αλλότρια γλώσσα τότε η μηχανή αναζήτησης αδυνατεί να εντοπίσει τα σχετικά αρχεία. Καθώς ο σχολιασμός των δεδομένων αλλά και η ονοματολογία των αρχείων εξαρτώνται άμεσα από παράγοντες όπως η γλώσσα και οι γνώσεις του δημιουργού τους είναι αναπόφευκτο να παρατηρείται μια ανομοιογένεια στα μεταδεδομένα. Η ανομοιογένεια αυτή εντοπίζεται σε

επίπεδα εξειδίκευσης και ασάφειας της περιγραφής. Αν για παράδειγμα ο χρήστης βασίζει μία επερώτηση στη λέξη-κλειδί «*αυτοκίνητα*» και τα αρχεία περιλαμβάνουν ονομασίες όπως «*Peugeot 106*» ή «*Fiat Punto*» τότε είναι αδύνατο για τη μηχανή αναζήτησης να αναγνωρίσει ως συναφή τα συγκεκριμένα αρχεία χωρίς την ύπαρξη επιπρόσθετων μεταδεδομένων.

Ως εκ τούτου, η αναζήτηση και ανάκτηση πολυμεσικών δεδομένων είναι αδύνατο να βασίζεται αποκλειστικά στην ονομασία των αρχείων και στο χειροκίνητό σχολιασμό τους. Επιπλέον, η χρήση κειμένου δεν αποτελεί πάντα τη βέλτιστη λύση για τον σχηματισμό μίας επερώτησης ιδιαίτερα όταν αυτή πραγματεύεται μορφολογικούς περιορισμούς.

Οι μέθοδοι ανάκτησης βάσει περιεχομένου προσπαθούν να δώσουν απαντήσεις στα παραπάνω προβλήματα αντικαθιστώντας τις λέξεις κλειδιά με τα ίδια τα πολυμεσικά δεδομένα. Στην περίπτωση της ανάκτησης τρισδιάστατων αντικειμένων ως επερώτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο με το οποίο ο χρήστης ζητά από το σύστημα να εντοπίσει τα μορφολογικά συναφή αντικείμενα. Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου κωδικοποιούνται-περιγράφονται εφαρμόζοντας κάποια μέθοδο. Η μέθοδος αυτή καλείται *περιγραφέας* (descriptor). Ο βαθμός της μορφολογικής ταύτισης ανάμεσα σε δύο αντικείμενα προκύπτει από την εφαρμογή ενός *μέτρου ομοιότητας* (similarity metric) που υπολογίζεται πάνω στα κωδικοποιημένα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους.

Κάποια από τα προβλήματα που προσπαθούν να απαντηθούν μέσα από την έρευνα στο συγκεκριμένο χώρο αφορούν στην ανάπτυξη μεθόδων συνεπτυγμένης κωδικοποίησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων καθώς και στον ορισμό του κατάλληλου μέτρου ομοιότητας που θα οδηγήσει στη βελτιστοποίηση της διακριτικής ικανότητας μίας μηχανής αναζήτησης.

1.3 Στόχοι της διατριβής

Στόχοι της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη και η αποτίμηση νέων μεθόδων ανάκτησης βάσει περιεχομένου τρισδιάστατων αντικειμένων που προέρχονται από το χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της διατριβής δημιουργήθηκε μια πρότυπη βάση δεδομένων με 1,012 τρισδιάστατα αγγεία. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων αποτελεί την πλατφόρμα εκτέλεσης πειραμάτων αποτίμησης της απόδοσης των μεθόδων ανάκτησης που ειδικεύονται σε αγγεία.

Τα δεδομένα που περιέχει η βάση δεδομένων είναι προϊόν 3D ψηφιοποίησης, χειροκίνητης 3D μοντελοποίησης και μοντελοποίησης με ένα ειδικευμένο στη κατασκευή 3D αγγείων λογισμικό. Το λογισμικό αυτό φέρει την ονομασία *QP* και αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Το *QP* διευκολύνει τον χρήστη που δεν διαθέτει γνώσεις 3D μοντελοποίησης να κατασκευάσει μέσα από ένα απλοποιημένο περιβάλλον διεπαφής (user interface) 3D αγγεία. Ταυτόχρονα, το *QP* μπορεί να λειτουργήσει και ως μία ημι-αυτοματοποιημένη γεννήτρια τυχαίων αγγείων. Τα 3D αγγεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πειράματα αποτίμησης μεθόδων ανάκτησης βάσει περιεχομένου και ακολουθούνται από μεταδεδομένα που συμφωνούν με το πρότυπο MPEG-7.

Η πρόσβαση στη βάση δεδομένων πραγματοποιείται μέσω ενός Διαδικτυακού συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου υλοποιημένο με τεχνολογίες λογισμικού ανοικτού κώδικα. Το σύστημα υποστηρίζει επερωτήσεις διαφορετικών τύπων όπως *επερώτηση-βάσει-παραδείγματος (query-by-example)* και *επερώτηση-βάσει-σκίτσου (query-by-sketch)*. Η κωδικοποίηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αγγείων στηρίζεται σε νέους περιγραφείς. Αυτοί προκύπτουν μετά την προεπεξεργασία ενός 3D αγγείου με έναν νέο αλγόριθμο κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αναγνωρίζει τον άξονα συμμετρίας ενός αγγείου και το προσανατολίζει λαμβάνοντας υπόψη του τις θέσεις των προσαρτημάτων καθώς και τη θέση του στομίου του.

Ένας από τους προτεινόμενους περιγραφείς αναλαμβάνει να κωδικοποιήσει το βασικό σώμα και τα προσαρτήματα (π.χ. λαβές, πόδια, κλπ) του αγγείου χρησιμοποιώντας διανύσματα και δισδιάστατους δυαδικούς πίνακες. Το μέτρο ομοιότητας που ακολουθεί τον περιγραφέα επιτρέπει τη *μερική ταύτιση (partial matching)* προσδίδοντας διαφορετικό ειδικό βάρος στη σημασία της μορφολογικής ταύτισης στα επίπεδα του βασικού σώματος και των προσαρτημάτων ενός αγγείου.

Από την άλλη, η εφαρμογή του αλγόριθμου κανονικοποίησης των αγγείων οδήγησε στην ανάπτυξη δύο περιγραφέων που βασίζονται στην κωδικοποίηση εικόνων *χάρτες-βάθους* (depth map images). Ο πρώτος αποτελεί παραλλαγή του περιγραφέα των Chaouch et al. [67] και κωδικοποιεί τις κλίσεις τις εξωτερικής επιφάνειας ενός αγγείου χρησιμοποιώντας ένα προκαθορισμένο σύνολο χαρακτήρων. Ο δεύτερος περιγραφέας προτείνει την κωδικοποίηση των σχημάτων που εμφανίζουν οι χάρτες βάθους με δισδιάστατες ροπές *Zernike* μετασχηματίζοντας το αρχικά τρισδιάστατο πρόβλημα κωδικοποίησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών των αγγείων σε δυσδιάστατο.

Καθώς η τεχνολογία των τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου επιτρέπει σήμερα τη ρεαλιστική απεικόνιση μνημείων και αρχιτεκτονικών συνόλων πολιτιστικής αξίας παρουσιάζεται μια πρώτη προσέγγιση της ιδέας επέκτασης της αναζήτησης τρισδιάστατων αντικειμένων βάσει περιεχομένου μέσα σε ένα διαδραστικό περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Ως εκ τούτου δημιουργήθηκε ένα Διαδικτυακά προσπελάσιμο πειραματικό σύστημα αναζήτησης τρισδιάστατων αντικειμένων που επιτρέπει στον *εικονικό επισκέπτη* (avatar) να περιηγηθεί μέσα σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον και να υποβάλει *επερωτήσεις-βάσει-παραδείγματος*. Το σύστημα δύναται να ενημερώσει τον χρήστη σχετικά με τις χωρικές συντεταγμένες στον τρισδιάστατο χώρο όπου βρίσκονται τα μορφολογικά συναφή αντικείμενα.

1.4 Οργάνωση της διατριβής

Η διατριβή αποτελείται από εννέα κεφάλαια συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγής. Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές απεικόνισης 3D γραφικών και γίνονται αναφορές στα χαρακτηριστικά ενός τυπικού συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Στα χαρακτηριστικά αυτά συγκαταλέγονται οι μεθοδολογίες εξαγωγής και κωδικοποίησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών, τα μέτρα ομοιότητας που καθορίζουν το βαθμό μορφολογικής συνάφειας δύο αντικειμένων καθώς και οι μετρικές αποτίμησης της απόδοσης ενός συστήματος ανάκτησης.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση του ερευνητικού πεδίου και παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας. Το

κεφάλαιο πραγματεύεται επίσης εργασίες που περιγράφουν την εφαρμογή μεθόδων ανάκτησης στο πεδίο της αρχαιολογίας.

Το τέταρτο κεφάλαιο πραγματεύεται τη μεθοδολογία δημιουργίας και βαθμονόμησης μίας πρότυπης βάσης δεδομένων τρισδιάστατων αγγείων καθώς και την ανάλυση του μηχανισμού λειτουργίας της γεννήτριας τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η προτεινόμενη μέθοδος κανονικοποίησης της κλίμακας και προσανατολισμού τρισδιάστατων αγγείων. Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των προτεινόμενων περιγραφέων ενώ στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αποτίμησης της απόδοσης του προτεινόμενων περιγραφέων σε συνδυασμό με τους περιγραφείς MPEG-7 *3D Shape Spectrum* [13][14] και *Light field* [69].

Στο όγδοο κεφάλαιο της διατριβής περιγράφεται μια πρώτη προσέγγιση της ιδέας ανάκτησης βάσει περιεχομένου μέσα σε ένα τρισδιάστατο διαδραστικό περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Η διατριβή ολοκληρώνεται στο ένατο κεφάλαιο που αποτελεί και τον επίλογο της.

Κεφάλαιο 2

Γενικές Έννοιες

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στην ορολογία που αφορά στο χώρο των 3D γραφικών. Καθώς η ορολογία αυτή έχει τις ρίζες της στην Αγγλική γλώσσα και η απόδοση της στην Ελληνική δεν έχει σταθεροποιηθεί, θεωρείται χρήσιμο να υπάρχει μια παράγραφος που συγκεντρώνει τους βασικούς ορισμούς αυξάνοντας έτσι την αυτονομία του κειμένου. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνονται αναφορές στις μεθόδους δόμησης 3D διακριτών επιφανειών (3D models data structures) καθώς και στη διαδικασία απεικόνισης (visualisation) τους.

Επιπλέον, παρατίθενται περιληπτικά τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της αρχαίας Ελληνικής κεραμικής σε συνδυασμό με τις παραδοχές που υλοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής και αφορούν στην ονοματολογία των τμημάτων ενός αγγείου. Το κεφαλαίο συνεχίζει περιγράφοντας τη δομή και τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου ενώ καταλήγει με αναφορές στο πρότυπο MPEG-7.

2.2 Μέθοδοι περιγραφής τρισδιάστατων αντικειμένων

Το σχήμα ορισμένο ως «η μορφολογία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου» έχει μελετηθεί από φιλοσόφους, ψυχολόγους, μαθηματικούς και μηχανικούς. Καθώς η εκάστοτε επιστήμη αντιμετωπίζει τον όρο από διαφορετική

οπτική γωνία είναι αναμενόμενη η ύπαρξη πολλαπλών εννοιολογικών ερμηνειών [1]. Στον ώριμο πλέον χώρο των 3D γραφικών ένας ορισμός για το σχήμα θα μπορούσε να είναι ο ακόλουθος:

«Έστω ένας διακριτός χώρος n διαστάσεων. Το σχήμα ενός αντικειμένου που βρίσκεται στο χώρο αυτό καταλαμβάνει υποχρεωτικά ένα τμήμα του. Το τμήμα αυτό καθορίζεται από το εξωτερικά όρια της επιφάνειας του ίδιου του αντικειμένου καθώς επίσης και από μία σειρά χωρικών ιδιοτήτων του όπως είναι οι συντεταγμένες θέσης του, ο προσανατολισμός του και η κλίμακα του.»

Η αναπαράσταση 3D διακριτών επιφανειών πραγματοποιείται από πληθώρα μεθόδων. Στόχος της εκάστοτε μεθόδου είναι η εκπλήρωση διαφορετικών αναγκών απεικόνισης. Απαραίτητη για την πληρότητα της παρούσας διατριβής είναι η απόδοση κάποιων βασικών ορισμών που αφορούν σε οντότητες και τεχνικές αναπαράστασης 3D διακριτών επιφανειών. Ως εκ τούτου, ορίζονται ως:

- **Ευθύγραμμο Τμήμα** (Line) και **κορυφές** (Vertices): Η ευθεία που συνδέει δύο σημεία στον χώρο \mathbb{R}^3 . Χαρακτηρίζεται από το απειροελάχιστο πλάτος της, τη σταθερή πυκνότητα καθώς και από το ζεύγος *κορυφών* του οποίου οι συντεταγμένες οριοθετούν την αρχή και το τέλος της ευθείας μέσα στον \mathbb{R}^3 .
- **Έδρα** (Facet): Ορίζεται ως η τυχαίου σχήματος επιφάνεια που προκύπτει από τη σύνδεση-οργάνωση τουλάχιστον τριών κορυφών σε ευθύγραμμα τμήματα.
- **Κανονικό Διάνυσμα επιφάνειας** (*surface normal*): Ορίζεται ως το μοναδιαίο διάνυσμα που προσδιορίζει τον προσανατολισμό της κάθε επιφάνειας μέσα στο \mathbb{R}^3 χώρο.
- **Νέφος σημείων** (*Point cloud*): Ορίζεται ως ένα σύνολο κορυφών που μοιράζονται το ίδιο τρισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Κάθε κορυφή ορίζεται από τρεις συντεταγμένες κινητής υποδιαστολής, μία για κάθε άξονα $P_{(x,y,z)}$ (Σχήμα 2-1.α). Οι περισσότερες βιβλιοθήκες επιτάχυνσης 3D γραφικών ακολουθούν σύστημα κανονικοποιημένων *ομογενών συντεταγμένων* (1^ο Παράρτημα) με αποτέλεσμα το κάθε σημείο να αναπαριστάται από τέσσερις συντεταγμένες $P(x,y,z,w)$. Η μέθοδος αυτή ορίζει ένα σημείο στο τρισδιάστατο

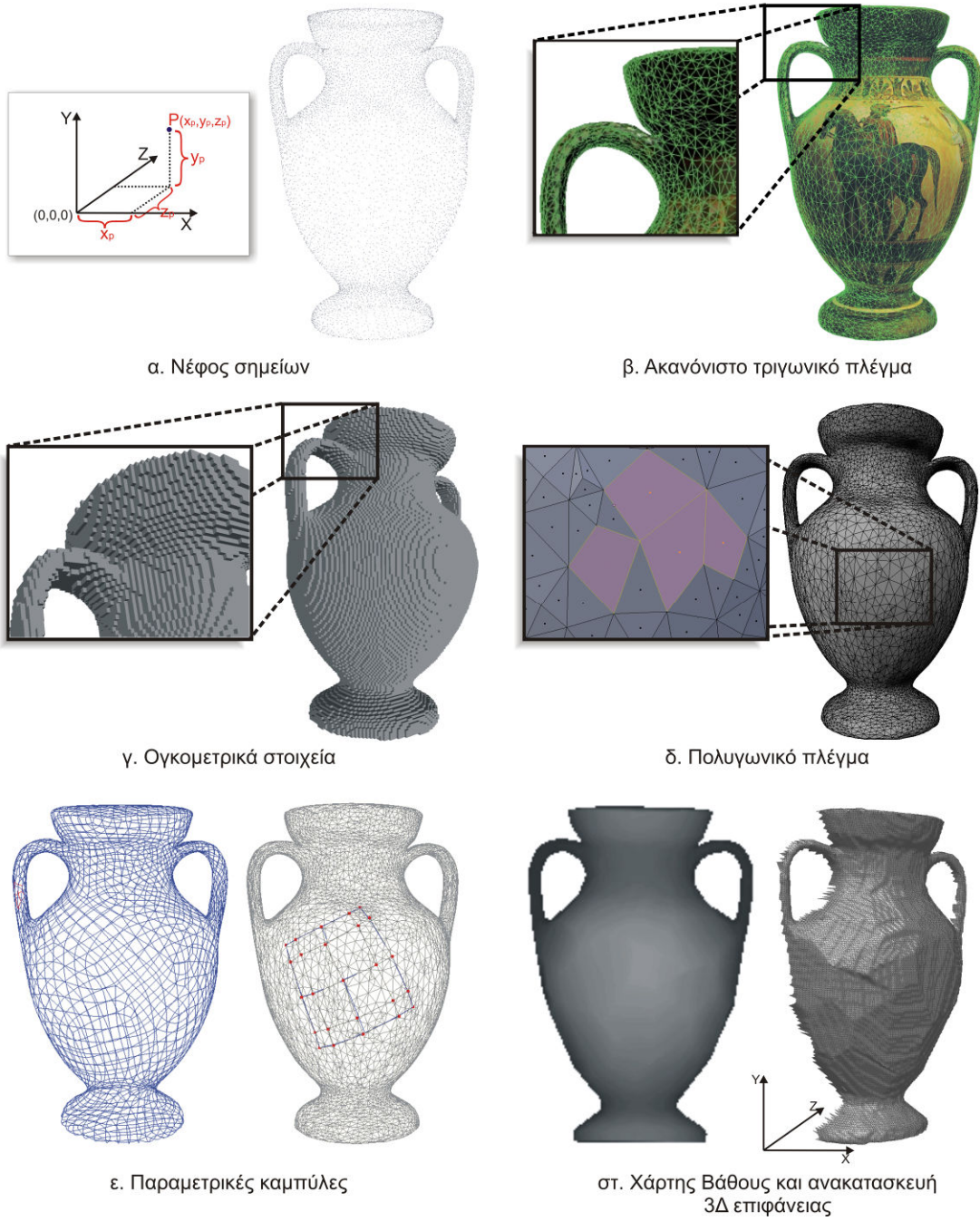
χώρο με συντεταγμένες $(x/w, y/w, z/w)$ και $w=1$. Για τις περισσότερες εφαρμογές απεικόνισης τρισδιάστατων αντικειμένων, η οπτική πληροφορία που προσφέρει το νέφος σημείων συνήθως δεν επαρκεί, όσο πυκνό και αν είναι. Πολλές φορές εκτός από τις συντεταγμένες θέσης η εκάστοτε κορυφή συνοδεύεται από τρεις χρωματικές συνιστώσες (π.χ. R, G, B). Τότε, το συγκεκριμένο αποκαλείται *έγχρωμο νέφος σημείων*. Για τη διευκόλυνση του χρήστη στην κατανόηση της οπτικής πληροφορίας που παρέχει ένα νέφος σημείων χρησιμοποιείται η τεχνική κλιμάκωσης της φωτεινότητας ή του μεγέθους των κορυφών, ανάλογα με την απόστασή του σημείου από το επίπεδο προβολής της θέσης παρατήρησης.

- **Ακανόνιστο τριγωνικό πλέγμα (Triangular Mesh):** Αποτελεί μία από τις πλέον δημοφιλείς τεχνικές απόδοσης 3D αντικειμένων εξαιτίας του χαρακτηριστικού των τριγώνων να ορίζουν πάντα ένα επίπεδο (συνεπίπεδες κορυφές). Το χαρακτηριστικό αυτό παίζει σημαντικό ρόλο για τους αλγορίθμους *φωτοσκίασης* (rendering), *ανίχνευσης συγκρούσεων* (collision detection) και *γεωμετρικής αποκοπής* (clipping). Είναι γεγονός πως οποιοδήποτε ανάγλυφο της επιφάνειας ενός αντικειμένου μπορεί να προσεγγισθεί από ένα πλήθος τριγώνων (Σχήμα 2-1.β). Το ακανόνιστο τριγωνικό πλέγμα αποτελεί συνήθως ένα από τα βασικότερα παράγωγα του πρωτογενούς υλικού ενός συστήματος 3D σάρωσης. Η *δομή δεδομένων* (data structure) ενός τριγωνικού πλέγματος περιλαμβάνει την επιπρόσθετη πληροφορία της *οργάνωσης των κορυφών σε τριάδες*¹. Η πληροφορία αυτή μπορεί να αποθηκευτεί είτε ως συμπληρωματική της πληροφορίας των συντεταγμένων των κορυφών ορίζοντας την τριάδα κορυφών που σχηματίζουν ένα τρίγωνο, είτε εκφράζοντας ανεξάρτητα τις συντεταγμένες των κορυφών του κάθε τριγώνου αγνοώντας την ύπαρξη κοινών κορυφών. Η δεύτερη προσέγγιση είναι γνωστή ως *ακατέργαστη* (raw) και είναι πλέον ξεπερασμένη αφού χαρακτηρίζεται ως ασύμφορη.
- **Ογκομετρικό στοιχείο (Volumetric element – Voxel):** Η ογκομετρική αναπαράσταση προκύπτει από τη χρήση *μονάδων όγκου* (ογκομετρικών

¹ Η διαδικασία είναι γνωστή και ως *τριγωνοποίηση* ή τριγωνισμός (triangulation)

στοιχείων). Ένα *voxel* μπορεί να θεωρηθεί ως αντίστοιχο του εικονοστοιχείου με τη διαφορά ότι καταλαμβάνει συγκεκριμένο όγκο στον \mathbb{R}^3 χώρο (Σχήμα 2-1.γ).

- **Πολυγωνικό πλέγμα** (*Polygonal mesh*): Για τη δημιουργία ακανόνιστων πλεγμάτων χρησιμοποιούνται και άλλα πολύγωνα όπως τα τετράπλευρα (*quadrilaterals*) (Σχήμα 2-1.δ). Πολλές από τις σύγχρονες εφαρμογές απεικόνισης 3D γραφικών υποστηρίζουν ταυτόχρονα τρίγωνα και τετράπλευρα με απώτερο σκοπό την εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων των δύο τεχνικών αναπαράστασης.
- **Παραμετρικές καμπύλες και επιφάνειες** (*Parametric surfaces*): Κάθε περιοχή μπορεί να θεωρηθεί ως σύνολο από καμπύλες που δημιουργούνται κρατώντας μια παράμετρο τους σταθερή και μεταβάλλοντας τις άλλες (Σχήμα 2-1.ε). Ο προσδιορισμός του σχήματος της καμπύλης προκύπτει από τις συντεταγμένες των *σημείων ελέγχου* (*control points*). Οι πολυωνυμικές καμπύλες και επιφάνειες χρησιμοποιούνται με την προϋπόθεση ότι μπορεί να υπολογιστούν οι παράγωγοι τους σε κάθε σημείο αναλυτικά. Ως εκ τούτου, είναι συνεχείς εκτός από τα σημεία ένωσης δύο διαδοχικών καμπυλών. Ο βαθμός του πολυωνύμου που χρησιμοποιείται καθορίζει το βαθμό ελευθερίας της καμπύλης αρά και την ευελιξία της ως προς τον προσδιορισμό του ανάγλυφου μίας επιφάνειας.
- **Μέθοδος Απεικόνισης Χάρτη Βάθους** (*Depth map*): Αποτελεί μια μέθοδο απεικόνισης ενός τρισδιάστατου μοντέλου με μία ιδιαίτερη τεχνική φωτοσκίασης. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή το κάθε σημείο της επιφάνειας ενός αντικειμένου εκφράζεται ως εικονοστοιχείο σε μία ψηφιογραφική εικόνα και φέρει τιμές από μία κλίμακα διαβαθμίσεων του γκρι (*greyscale*). Η τιμή καθορίζεται από την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στο σημείο της επιφάνειας και του *επίπεδου προβολής* (*projection plane*) ή *εστίασης* (*focal plane*) που ορίζει μία θέση παρατήρησης (Σχήμα 2-1.στ). Η τεχνική αυτή είναι γνωστή με την ονομασία *Z-buffer*.



Σχήμα 2-1 Μέθοδοι απεικόνισης 3D διακριτών επιφανειών.

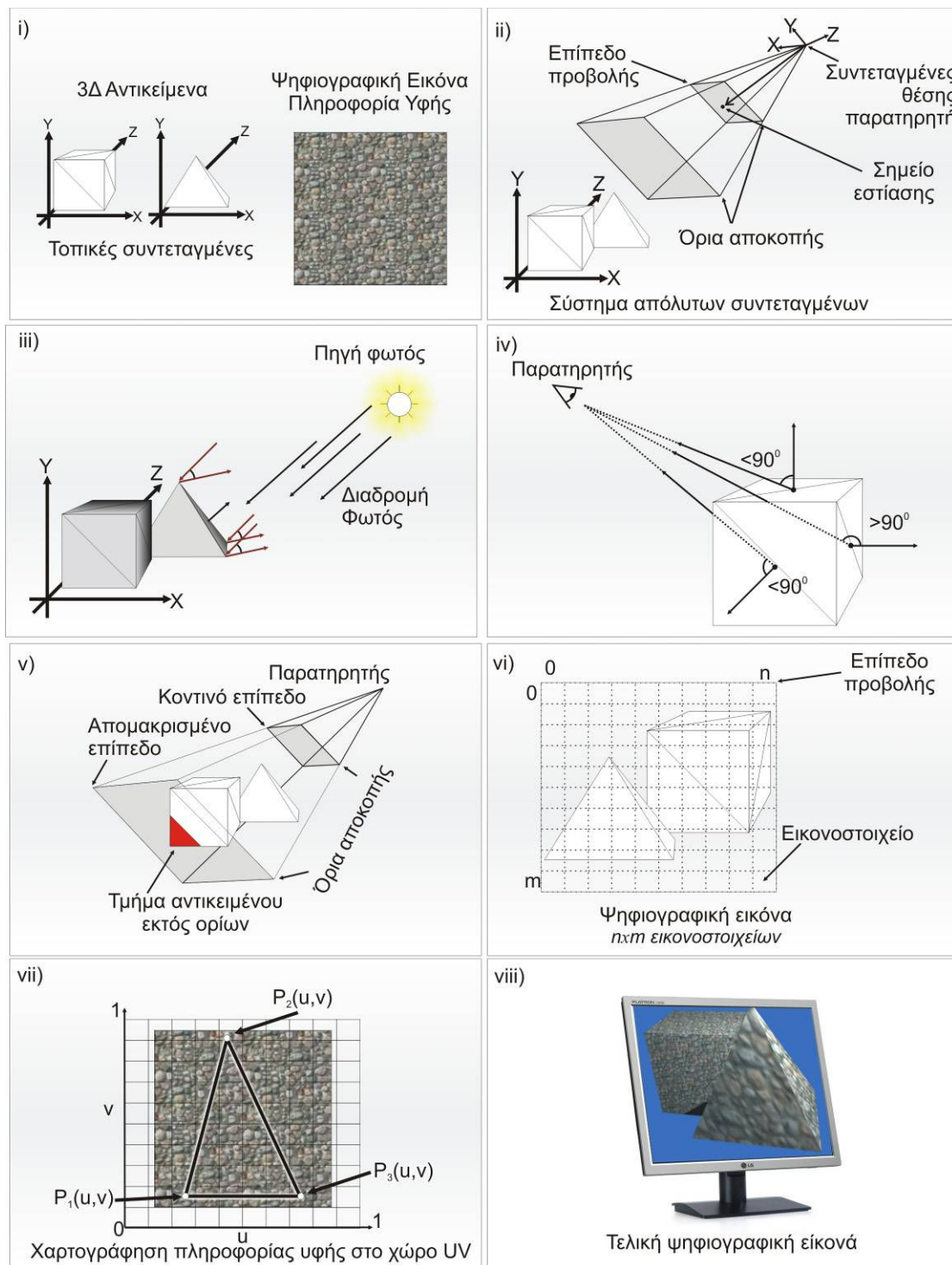
2.3 Απεικόνιση τρισδιάστατων μοντέλων

Η διαδικασία της *απεικόνισης ενός 3D μοντέλου* (3D graphics pipeline) ανεξάρτητα από τις τεχνικές αναπαράστασης που χρησιμοποιούνται βασίζεται σε μια ακολουθία βημάτων (Σχήμα 2-2). Αυτά είναι τα εξής:

- i. **Ορισμός αντικειμένων και τρισδιάστατης σκηνής** (Σχήμα 2-2.i): Η σκηνή αποτελείται από ένα σύνολο 3D αντικειμένων καθώς και από δεδομένα που ορίζουν την πληροφορία υφής (texture map) των επιφανειών των αντικειμένων. Επιπλέον περιγράφονται οι συνθήκες φωτισμού, η θέση και η μέθοδος παρατήρησης της σκηνής και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται τα αντικείμενα ως προς τη θέση και τη μορφή τους (animation). Οι δομές δεδομένων των αντικείμενων καθορίζονται χρησιμοποιώντας μία από τις προηγούμενες τεχνικές αναπαράστασης και ορίζονται αρχικά σε ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων εφαρμόζοντας *συσχετισμένους μετασχηματισμούς* (affine transforms) (3^ο Παράρτημα).
- ii. **Γεωμετρικός Μετασχηματισμός Μοντέλων** (Σχήμα 2-2.ii): Κατά τη διαδικασία αυτή εφαρμόζονται μια ακολουθία συσχετισμένων μετασχηματισμών με στόχο την προσαρμογή των τρισδιάστατων αντικειμένων στο σύστημα συντεταγμένων του *παρατηρητή* (σύστημα απολύτων συντεταγμένων). Ο παρατηρητής εκλαμβάνεται ως μία εικονική κάμερα για την οποία ορίζονται ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν τις συνθήκες παρατήρησης της τρισδιάστατης σκηνής. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν στη θέση του παρατηρητή μέσα στο χώρο, το τρόπο προβολής της σκηνής (ορθογραφική ή προοπτική) πάνω στο επίπεδο παρατήρησης, το σημείο εστίασης αλλά και τα όρια του χώρου που αποτυπώνονται πάνω σε αυτό το επίπεδο (όρια αποκοπής - clipping).
- iii. **Υπολογισμός Φωτισμού** (Σχήμα 2-2.iii): Υπολογίζεται ο φωτισμός των επιφανειών (π.χ. αναδρομική αντανάκλαση φωτός ανάμεσα στις επιφάνειες των αντικειμένων υπολογισμένη σημειακά με χρήση ενός πεπερασμένου πλήθους προσπιπτουσών και ανακλώμενων ακτινών) σύμφωνα με τις θέσεις και τα χαρακτηριστικά που φέρουν οι προκαθορισμένες πυγές φωτός και οι επιφάνειες των αντικειμένων (πχ. δείκτες ανάκλασης, διάθλασης και τραχύτητας). Οι

σύγχρονοι επιταχυντές γραφικών διαθέτουν υλικοτεχνικές υλοποιήσεις αλγορίθμων που περατώνουν τις διαδικασίες αυτές σε μικρούς χρόνους υπολογίζοντας τα χαρακτηριστικά φωτισμού μονό στις κορυφές των επιφανειών της 3D γεωμετρίας. Όλες οι ενδιάμεσες τιμές πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου υπολογίζονται με διαδικασίες παρεμβολής (interpolation). Η προσέγγιση αυτή συμβάλει στην ικανότητα των επιταχυντών τρισδιάστατων γραφικών να παρουσιάζουν ρεαλιστικά φωτοσκιασμένες 3D σκηνές σε πραγματικό χρόνο.

- iv. **Απαλοιφή κρυφών επιφανειών** (Σχήμα 2-2.iv): Μια επιφάνεια αποκόπτεται όταν το μοναδιαίο διάνυσμα που προσδιορίζει τον προσανατολισμό της σχηματίζει γωνία >90 μοιρών με το διάνυσμα θέσης του παρατηρητή.
- v. **Αποκοπή τμημάτων αντικειμένων που βρίσκονται εκτός ορίων** (Σχήμα 2-2.v): Η θέση του παρατηρητή περιλαμβάνει παραμέτρους που καθορίζουν το τμήμα του 3D χώρου (όγκος αποκοπής) το οποίο θα προβληθεί πάνω στο επίπεδο προβολής. Τα τμήματα των αντικειμένων που βρίσκονται εκτός των ορίων του συγκεκριμένου χώρου αποκόπτονται και δεν λαμβάνονται υπόψη στα επόμενα βήματα.
- vi. **Μετατροπή Σάρωσης** (Σχήμα 2-2.vi): Περιλαμβάνει τη διαδικασία μετασχηματισμού της 3D σκηνής σε δισδιάστατη ψηφιογραφική εικόνα το περιεχόμενο της οποίας προκύπτει από τον μετασχηματισμό προβολής της 3D σκηνής στο δυσδιάστατο επίπεδο προβολής που ορίζεται από της παραμέτρους του παρατηρητή.
- vii. **Απόδοση Πληροφορίας Υφής** (Σχήμα 2-2.vii): Για κάθε ένα από τα εικονοστοιχεία της δισδιάστατης εικόνας υπολογίζεται το χρώμα το οποίο προκύπτει από τη χαρτογράφηση ψηφιογραφικών εικόνων πάνω στις επιφάνειες των τρισδιάστατων μοντέλων. Η χαρτογράφηση πολυγωνικών επιφανειών πραγματοποιείται σε έναν δισδιάστατο κανονικοποιημένο χώρο με την ονομασία *UV space*. Ένας σύγχρονος επιταχυντής τρισδιάστατων γραφικών μπορεί να αναπαραστήσει περισσότερα από 30 δισεκατομμύρια εικονοστοιχεία με πληροφορία υφής ανά δευτερόλεπτο (texture fill rate).
- viii. **Προβολή – Απεικόνιση** (Σχήμα 2-2.viii): Η τελική εικόνα προβάλλεται στο χρήστη μέσω μίας μονάδας εξόδου όπως είναι η οθόνη ή ο εκτυπωτής.



Σχήμα 2-2 Δημιουργία και προβολή 3Δ γραφικών σε 2Δ μονάδα εξόδου.

2.4 Μορφολογικά χαρακτηριστικά αγγείων

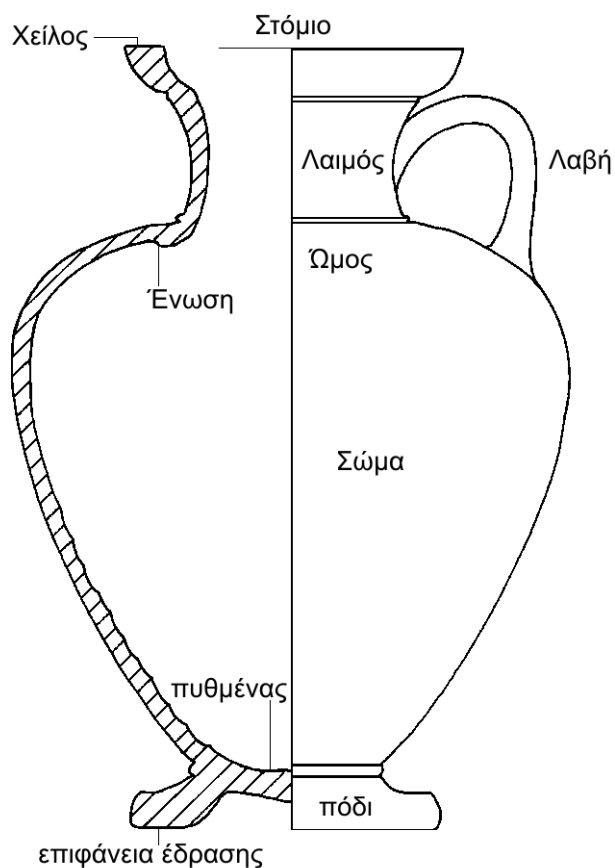
Η αρχαιοελληνική κεραμική αποτελεί εδώ και αιώνες αντικείμενο θαυμασμού για όσους ασχολούνται με τον κλασικό πολιτισμό και ειδικότερα για τους ιστορικούς της τέχνης [7].

Τα αγγεία αποτελούν μια ανεξάντλητη πηγή πληροφοριών για την καθημερινή ζωή, τη θρησκεία, τη μυθολογία, το θέατρο, κ.α. Το σώμα των αγγείων αρχικά κατασκευάζονταν στον τροχό, ακολουθούσε η ένωση των προσαρτημάτων, το στέγνωμα, η διακόσμηση και τέλος το ψήσιμο. Η πλειοψηφία των αρχαίων αγγείων, διακοσμημένων ή όχι, δεν αποτελούσαν διακοσμητικά αντικείμενα, αλλά κατασκευάζονταν για να εξυπηρετήσουν πρακτικές ανάγκες της καθημερινής δημόσιας ή ιδιωτικής ζωής των αρχαίων. Οι αρχαίοι Έλληνες κεραμείς είχαν δημιουργήσει μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων αγγείων με κύριο σκοπό να εξυπηρετήσουν καλύτερα πρακτικές ανάγκες της καθημερινής ζωής, χωρίς όμως να παραμελήσουν ποτέ την αισθητική εμφάνιση των δημιουργημάτων τους. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι αρχαίες ονομασίες των επιμέρους τμημάτων των αγγείων προέρχονται από το ανθρώπινο σώμα, τονίζοντας έτσι τον ανθρωποκεντρικό χαρακτήρα της αρχαίας ελληνικής τέχνης. Έτσι υπάρχουν τμήματα όπως το «χείλος», ο «λαιμός», ο «ώμος», το «σώμα» και το «πόδι» (Σχήμα 2-3). Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούν τη λέξη «αυτιά» για να περιγράψουν τις λαβές των αγγείων.

Στα πλαίσια της διατριβής και πιο συγκεκριμένα σε ότι αφορά την τμηματοποίηση ενός αγγείου γίνεται μια παραδοχή ως προς τις ονομασίες των τμημάτων ενός αγγείου. Για λόγους απλοποίησης αλλά και κατανόησης του τρόπου λειτουργίας του προτεινόμενου αλγορίθμου τμηματοποίησης τα μέρη ενός αγγείου διακρίνονται σε δύο. Αυτά είναι το *βασικό σώμα* και τα *προσαρτήματα*. Ως εκ τούτου, στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2-3) η λαβή χαρακτηρίζεται ως προσάρτημα ενώ όλα τα υπόλοιπα μέρη του αγγείου αναφέρονται ως βασικό σώμα.

Από την άλλη, το αγγείο του οποίου *διασώζεται το προφίλ* ενδέχεται να είναι πλήρες αλλά μπορεί να είναι και εκείνο του οποίου ενώ λείπουν τμήματα είτε από το βασικό του σώμα είτε από τα προσάρτημα του, ο αρχαιολόγος δύναται να εξαγάγει το πλήρες προφίλ του. Επίσης, όταν στο κείμενο γίνονται αναφορές σε

μορφολογικά χαρακτηριστικά του αγγείου αυτά αφορούν μόνο στη τρισδιάστατη γεωμετρική δομή του αγγείου και όχι στο διάκοσμο του (χρωματική πληροφορία και σχήματα).

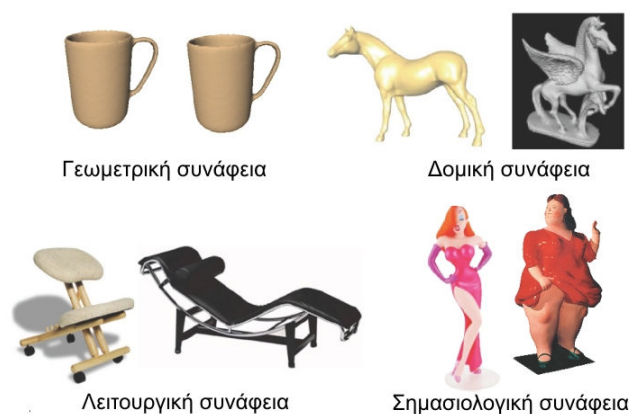


Σχήμα 2-3 Ονοματολογία βασικών τμημάτων ενός αγγείου [8].

2.5 Χαρακτηριστικά συστημάτων ανάκτησης βάσει περιεχομένου

Η ομοιότητα ανάμεσα σε δύο αντικείμενα δεν είναι απαραίτητο να περιορίζεται αποκλειστικά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Στην πραγματικότητα υπάρχουν διαφορετικά επίπεδα *συνάφειας* ανάμεσα σε δύο αντικείμενα. Σύμφωνα με τους Marini et al. [9] τα επίπεδα συνάφειας διαχωρίζονται σε τέσσερα. Αυτά είναι η συνάφεια σε επίπεδο *γεωμετρίας* (Geometric congruence), *δομής* (structural equivalence), *λειτουργίας* (functional) και *σημασιολογίας* (semantic equivalence) (Σχήμα 2-4). Παρόλα αυτά η συνάφεια ανάμεσα σε δύο αντικείμενα, ανεξάρτητα από το επίπεδο ορισμού της, παραμένει υποκειμενική αφού εξαρτάται τόσο από

τον ίδιο τον χρήστη όσο και από το πεδίο εφαρμογής. Στη συγκριμένη διδακτορική διατριβή το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο πρώτο επίπεδο, αυτό της γεωμετρικής συνάφειας. Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί πως οι μέθοδοι εντοπισμού γεωμετρικής συνάφειας ανάμεσα σε 3D αντικείμενα δεν λαμβάνουν υπόψη τους την όποια μονάδα μέτρησης είναι εκφρασμένες οι συντεταγμένες των κορυφών του μοντέλου. Πρότυπα όπως αυτά των VRML, OBJ, 3DS, κλπ δεν περιλαμβάνουν αυτή την πληροφορία. Σε λογισμικά επεξεργασίας ψηφιοποιημένων αντικειμένων απαιτείται από τον χρήστη να δηλώσει τη μονάδα μέτρησης στην οποία εκφράζονται οι αποστάσεις ανάμεσα στις κορυφές (π.χ. χιλιοστά, εκατοστά, κτλ). Ως εκ τούτου η γεωμετρική συνάφεια εντοπίζεται ανεξάρτητα από τη κλίμακα μεγέθους στην οποία ανήκει το αντικείμενο. Στις ακόλουθες υποπαραγράφους (2.5.1 έως και 2.5.5) παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και η αρχιτεκτονική ενός τυπικού συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου.

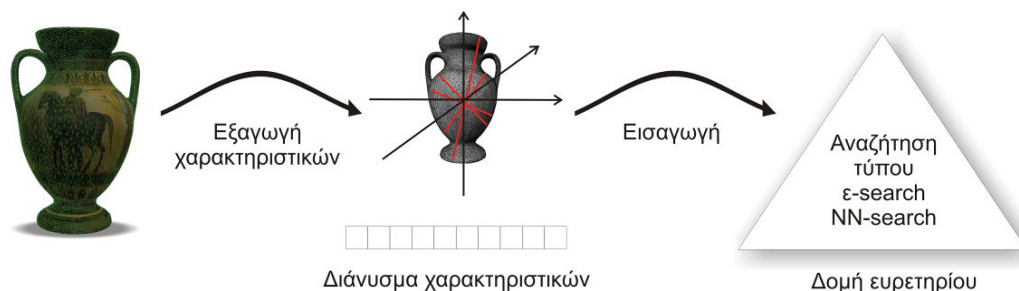


Σχήμα 2-4 Διαφορετικά επίπεδα ομοιότητας [9].

2.5.1 Ταύτιση τρισδιάστατων αντικειμένων

Η ταύτιση 3D αντικειμένων σε επίπεδο γεωμετρικής συνάφειας προκύπτει από την εξαγωγή συγκεκριμένων μορφολογικών χαρακτηριστικών τα οποία περιγράφουν με συνεπτυγμένο τρόπο την καθολική γεωμετρία ενός αντικειμένου. Τα χαρακτηριστικά αυτά κωδικοποιούνται με κάποια συγκεκριμένη μεθοδολογία και αποτελούν τον *περιγραφέα* (descriptor) του αντικειμένου. Τα δεδομένα που φέρουν οι περιγραφείς είναι αυτά που χρησιμοποιεί το σύστημα για τον εντοπισμό

μορφολογικών ομοιοτήτων. Η διαδικασία ανάκτησης βάσει περιεχομένου υλοποιείται συνήθως σε τρία διαδοχικά βήματα (Σχήμα 2-5).



Σχήμα 2-5 Διαδικασία εξαγωγής χαρακτηριστικών και αναζήτησης 3Δ αντικειμένων.

Αυτά είναι τα εξής:

i. Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών

Στη διεθνή βιβλιογραφία περιγράφονται πολλές τεχνικές εξαγωγής γεωμετρικών μορφολογικών χαρακτηριστικών. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται στην ιδέα περιγραφής του αντικειμένου σε κάποιον πολυδιάστατο χώρο.

ii. Δημιουργία ψηφιακής υπογραφής - περιγραφέα

Για κάθε ένα αντικείμενο δημιουργείτε μία *ψηφιακή υπογραφή* γνωστή και ως περιγραφέας. Η υπογραφή αυτή αποτελεί μία αποδοτικότερη μορφή περιγραφής των δεδομένων και επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών ανάκτησης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου μπορεί να αναπαρίστανται ως ένα ιστόγραμμα, ένα διάνυσμα, ένας γράφος ή ακόμα και ως ένας πίνακας δεδομένων. Σε ένα σύστημα ανάκτησης βάσει περιεχομένου, οι περιγραφείς αποθηκεύονται συνήθως σε εσωτερικούς τύπους δεδομένων με αποτέλεσμα την αδυναμία προσπέλασης των δεδομένων από αλλότρια συστήματα. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να λυθεί με την ανάπτυξη του κατάλληλου λογισμικού που θα αναλάβει τον μετασχηματισμό των δεδομένων σε μία γνώριμη, προς το ξένο σύστημα, δομή. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση και ως εκ τούτου ένας από τους βασικούς στόχους του πρότυπου MPEG-7 είναι να δημιουργήσει ένα πλήθος τυποποιημένων πολυμεσικών

περιγραφών που θα εξασφαλίζουν τη συμβατότητα σε επίπεδο προσπέλασης των δεδομένων από διαφορετικά συστήματα.

iii. Μηχανή Αναζήτησης

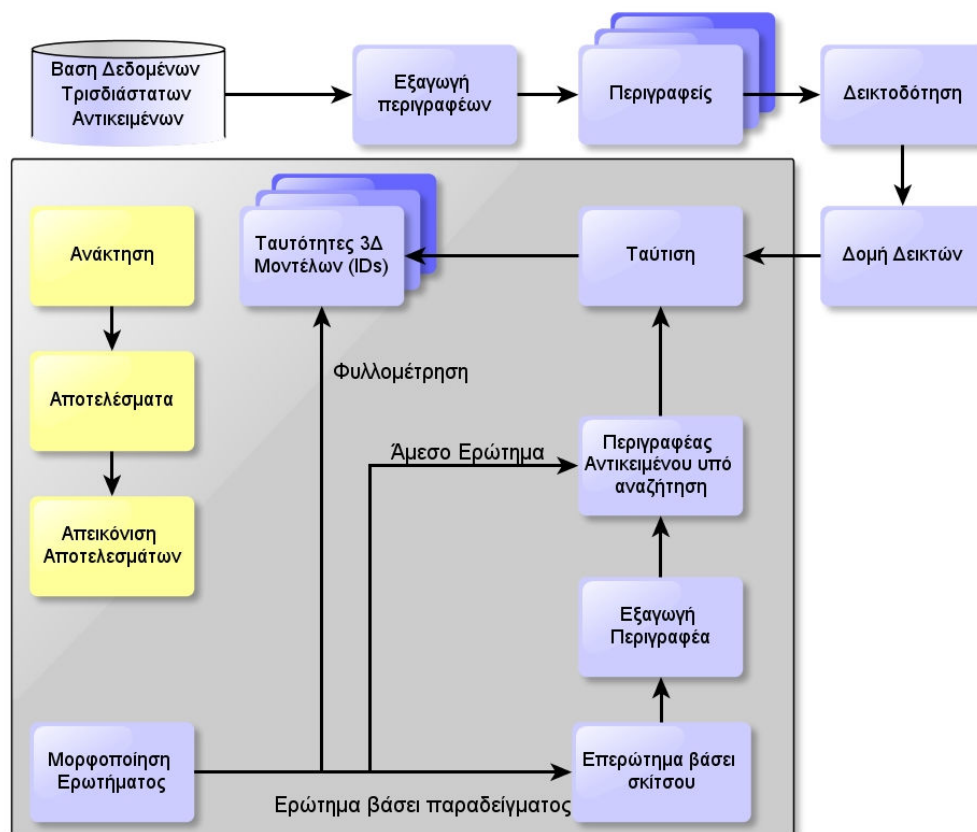
Η μηχανή αναζήτησης συνήθως υλοποιείται ως μία Διαδικτυακά προσβάσιμη εφαρμογή η οποία δέχεται ως επερώτηση (query) ένα αντικείμενο ή ένα σκίτσο για την οποία θα αναλάβει να εντοπίσει τα αντικείμενα που παρουσιάζουν γεωμετρική συνάφεια. Η ταύτιση υλοποιείται εφαρμόζοντας ενός μέτρο ομοιότητας το οποίο υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των περιγραφών. Γενικά, οι τρόποι αναζήτησης χωρίζονται στην *εύρεση του κοντινότερου γείτονα (Nearest Neighbour Search – NN Search)* και στην ανάκτηση όλων των αντικειμένων (*ε-Search*) όπου ο βαθμός ομοιότητας τους με το *υπό αναζήτηση αντικείμενο* (query object) είναι μεγαλύτερος από ένα προκαθορισμένο κατώφλι [10].

2.5.2 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης

Στο σχήμα 2-6 παρουσιάζεται μία εκδοχή της αρχιτεκτονικής και οντολογικής δομής ενός συστήματος ανάκτησης. Το σύστημα αποτελείται από δύο ανεξάρτητα τμήματα επεξεργασίας. Το μεν πρώτο περιλαμβάνει διαδικασίες που εκτελούνται για κάθε ένα αντικείμενο μια φορά εκ των προτέρων (εκτός Διαδικτύου ενέργειες), ενώ το δεύτερο τμήμα αναλαμβάνει το σημαντικό ρόλο της αναζήτησης και εκτελείται για κάθε επερώτηση που θέτει ο χρήστης στο σύστημα (ενέργειες πάνω από το Διαδίκτυο).

Το πρώτο τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει τις διαδικασίες εξαγωγής και αποθήκευσης των περιγραφών για όλα τα αντικείμενα που υπάρχουν στη βάση δεδομένων. Όταν ο χρήστης υποβάλει μια επερώτηση, το σύστημα ενεργοποιεί τη διαδικασία εξαγωγής του περιγραφέα του νέου αντικειμένου και του υπολογισμού του βαθμού ομοιότητας του *υπό αναζήτηση αντικειμένου* με τα υπόλοιπα αντικείμενα. Σύμφωνα με τα παραδείγματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, η αναζήτηση τρισδιάστατων αντικειμένων συνηθίζεται να πραγματοποιείται με τέσσερις διαφορετικές μεθόδους. Αυτές είναι οι εξής:

- i. Πλοήγηση στα περιεχόμενα της βάσης δεδομένων με χρήση δισδιάστατων μικρογραφιών που παρουσιάζουν τα 3D μοντέλα (Rendered Thumbnails). Η επιλογή μίας μικρογραφίας αντιστοιχεί στην υποβολή επερώτησης στο σύστημα με τον περιγραφέα του εικονιζόμενου 3D αντικειμένου.
- ii. Άμεση αναζήτηση με την υποβολή ενός περιγραφέα ως επερώτηση προς το σύστημα.
- iii. Υποβολή επερώτησης με τη *μεταφόρτωση* (upload) ενός νέου 3D μοντέλου για το οποίο θα εξαχθεί αυτόματα ο περιγραφέας του και θα χρησιμοποιηθεί ως επερώτηση στη βάση δεδομένων.
- iv. Αναζήτηση βάσει σκίτσου (query-by-sketch) το οποίο θα δημιουργήσει ο χρήστης σε ένα ειδικά διαμορφωμένο περιβάλλον διεπαφής.



Διαδικασίες που εκτελούνται μέσω Διαδικτύου

Σχήμα 2-6 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός συστήματος ανάκτησης πέρα από τη διακριτική του ικανότητα είναι η αποδοτικότητα του σε επίπεδο αλληλεπίδρασης με

τον χρήση. Η μορφολογική ταύτιση μέσω διαδοχικής σύγκρισης των περιγραφών του *υπό αναζήτησης* αντικείμενου με τους περιγραφείς όλων των αντικείμενων μίας πολυπληθούς βάσης δεδομένων κάθε άλλο παρά αποδοτική μπορεί να χαρακτηριστεί. Η αναζήτηση και η ανάκτηση θεωρούνται διαδικασίες που πρέπει να πραγματοποιούνται άμεσα. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί η ταχύτερη απόκριση του συστήματος στην επερώτηση ενός χρήστη, είναι επιβεβλημένη η περεταίρω επεξεργασία των περιγραφών (Δεικτοδότηση - Indexing). Η διαδικασία αυτή θα δημιουργήσει ένα βελτιστοποιημένο κατάλογο περιεχομένων η χρήση του οποίου θα επιτρέπει στο σύστημα να συμπεριφέρεται σε χρόνους παρόμοιους με αυτούς ενός συστήματος πραγματικού χρόνου.

Σε συστήματα όπου επιτρέπεται η μεταφόρτωση *υπό αναζήτησης* αντικείμενων, τότε η εξαγωγή του περιγραφέα είναι επίσης σημαντικό να γίνεται άμεσα ώστε να επιτυγχάνεται και πάλι η διαδραστικότητα ανάμεσα στον χρήστη και στο σύστημα. Σε περιπτώσεις ψηφιοποιημένων αντικείμενων που περιγράφονται από μεγάλους όγκους δεδομένων (>20MB), η διαδικασία μεταφόρτωσης του μοντέλου στο διακομιστή είναι απαγορευτική. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η εξαγωγή του περιγραφέα πραγματοποιείται με τη χρήση μίας αυτόνομης εφαρμογής που εκτελεί ο χρήστης τοπικά και στη συνέχεια μεταφορτώνει τον ίδιο τον περιγραφέα στο σύστημα μειώνοντας δραματικά τον μεταφερόμενο όγκο δεδομένων.

Από την άλλη, κάποιοι περιγραφείς επιτρέπουν τη *μερική ταύτιση* ανάμεσα στα τμήματα των τρισδιάστατων αντικείμενων. Η μερική ταύτιση έχει εφαρμογές στην αναζήτηση τμημάτων μέσα σε αντικείμενα ή μέσα σε τρισδιάστατες σκηνές (πλήθος τρισδιάστατων αντικείμενων που περιγράφουν κάποιο χώρο π.χ. εικονικό μουσείο ή τρισδιάστατη αναπαράσταση μιας πόλης) καθώς και στα ημιτελή αντικείμενα τα οποία έχουν αποτυπωθεί με κάποιο σύστημα τρισδιάστατης σάρωσης. Στην τρισδιάστατη αποτύπωση ενός αγγείου για παράδειγμα, οι εσωτερικές επιφάνειες δεν αποτυπώνονται πάντα λόγω των περιορισμών που επιβάλλει το οπτικό σύστημα του σαρωτή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη ημιτελών τρισδιάστατων ψηφιακών αντιγράφων.

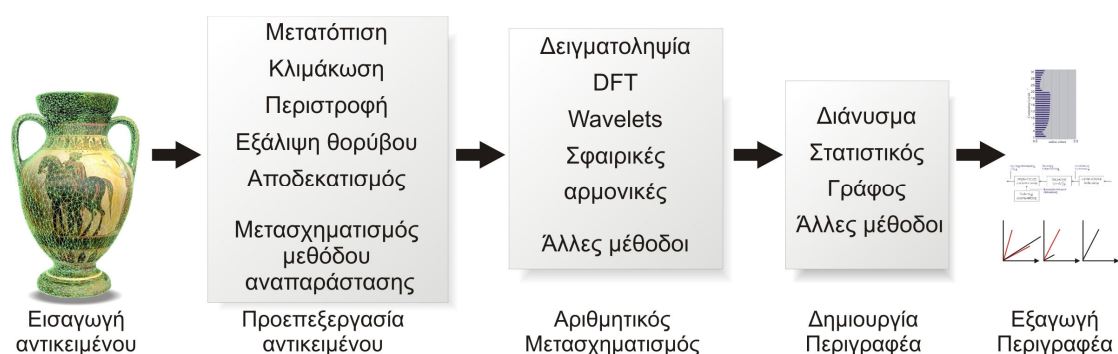
Η ευρωστία του συστήματος ανάκτησης και γενικότερα η ικανότητα του περιγραφέα να παραμένει ανεπηρέαστος από το θόρυβο που φέρουν τα ψηφιοποιημένα τρισδιάστατα μοντέλα αποτελεί άλλο ένα σημαντικό

χαρακτηριστικό ενός συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Ο θόρυβος στα 3D αντικείμενα εμφανίζεται με τη μορφή μετατόπισης των κορυφών (vertice displacement).

Επιπρόσθετα, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αναζήτησης το σύστημα εμφανίζει τα αποτελέσματα οργανωμένα υπό τη μορφή δισδιάστατων μικρογραφιών (thumbnail images) εξαιτίας του μεγάλου όγκου δεδομένων που θα απαιτούσε η προβολή 3D μικρογραφιών των αντικείμενων. Ο χρήστης μπορεί να μελετήσει οποιοδήποτε από τα αντικείμενα επιλέγοντας τη μικρογραφία του. Η διαδικασία αυτή ενεργοποιεί τη μεταφόρτωση του 3D μοντέλου από τον διακομιστή προς τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του χρήστη. Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση των αντικειμένων πραγματοποιείται συνήθως με τη βοήθεια ενός λογισμικού οπτικοποίησης αρχείων VRML/X3D ή με τη χρήση τεχνολογιών 3D PDF [11] ή Flash 3D [12]. Όλες οι συγκεκριμένες τεχνολογίες λειτουργούν ως πρόσθετες εφαρμογές (plug-ins) στους διάφορους φυλλομετρητές ιστοσελίδων.

2.5.3 Εξαγωγή μορφολογικών χαρακτηριστικών

Η μέθοδος εξαγωγής των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου και η κωδικοποίηση τους σε ένα περιγραφέα αποτελούν τα βασικά τμήματα ενός συστήματος ανάκτησης. Το σχήμα 2-7 αναπαριστά τα βήματα της διαδικασίας εξαγωγής ενός περιγραφέα.



Σχήμα 2-7 Απεικόνιση διαδικασίας εξαγωγής του περιγραφέα ενός 3D αντικειμένου.

Σε αρκετές από τις μεθοδολογίες είναι σύνηθες να περιλαμβάνετε ένα βήμα *προεπεξεργασίας* (Mesh pre-processing stage) του 3D αντικειμένου. Η ύπαρξη της

διαδικασίας προεπεξεργασίας αποσκοπεί στην κανονικοποίηση των τιμών των διανυσματικών μεταβλητών που θα φέρει ο περιγραφέας του κάθε αντικείμενου έτσι ώστε αυτές να επιδέχονται σύγκριση. Η ύπαρξη της συγκεκριμένης διαδικασίας αποτελεί και βασικό λόγο διαχωρισμού των μεθόδων εξαγωγής περιγραφών σε κατηγορίες. Αυτές είναι οι παρακάτω:

- i. Μέθοδοι προεπεξεργασίας που αποσκοπούν στην κανονικοποίηση της κλίμακας, της θέσης και του προσανατολισμού των αντικείμενων με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Η κανονικοποίηση αυτή αφορά στην εφαρμογή *συσχετισμένων μετασχηματισμών* (Affine Transformations) (3^ο Παράρτημα):
 - **Μετατόπιση** (Translation): Πολλές φορές προκύπτει από τον υπολογισμό του κέντρου βάρους ενός αντικείμενου χρησιμοποιώντας είτε τις υπάρχουσες κορυφές ή δημιουργώντας νέες κορυφές πάνω στην επιφάνεια των τριγώνων επιτυγχάνοντας την κανονική κατανομή των κορυφών σε όλη την επιφάνεια του αντικείμενου. Το αντικείμενο μετατοπίζεται έτσι ώστε το κέντρο βάρους του να συμπίπτει με το κέντρο ενός τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.
 - **Κλιμάκωση** (Scaling): Το 3D αντικείμενο κλιμακώνεται ώστε να εμπεριέχεται ολόκληρο μέσα στα όρια που καθορίζει ένα άλλο 3D αντικείμενο όπως μια *περικλείουσα σφαίρα* (bounding sphere) ή ένας *περικλείων κύβος* (bounding cube). Τα αντικείμενα τα οποία φέρουν κάποιο *προεξέχον τμήμα* (outlier) (π.χ. μία κεραία ραδιοφώνου σε ένα αυτοκίνητο) προκαλούν τη σμίκρυνση του κύριου σώματος του αντικείμενου μέσα στο περικλείων γεωμετρικό στερεό.
 - **Προσανατολισμός** (Orientation): Για την κανονικοποίηση του προσανατολισμού των αντικείμενων πολλές φορές εφαρμόζεται η *ανάλυση κυρίων συνιστωσών* (Principal Component Analysis). Το αντικείμενο περιστρέφεται ώστε οι προκύπτοντες κύριοι άξονες να ταυτίζονται με αυτούς του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Η μέθοδος παρουσιάζει εγγενή προβλήματα όπως η αδυναμία καθορισμού της φοράς του αντικείμενου και της αλληλουχίας των κύριων αξόνων. Από την άλλη τα αποτελέσματα της είναι ευαίσθητα προς το θόρυβο των

δεδομένων ενώ η διαφοροποίηση της αναλυτικότητας των ακανόνιστων πλεγμάτων (τριγωνικών και πολυγωνικών) δημιουργεί πόλωση προς κάποια κατεύθυνση. Το τελευταίο βρίσκει μερική λύση με την εφαρμογή μίας παραλλαγής της μεθόδου που ακούει στο όνομα *Συνεχής Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών* (Continuous Principal Component Analysis) [16].

Ένα μεγάλο τμήμα των μεθόδων που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία εφαρμόζουν διαδικασίες κανονικοποίησης ως προς τη μετατόπιση και την κλιμάκωση. Σε περιπτώσεις όπου δεν εφαρμόζονται μέθοδοι κανονικοποίησης τότε θα πρέπει επιβεβλημένα η μέθοδος να προσφέρει εγγενή ανεξαρτησία (αμεταβλητότητα) στους συγκεκριμένους συσχετισμένους μετασχηματισμούς. Χωρίς την αμεταβλητότητα η ορθή σύγκριση των περιγραφέων καθίσταται αδύνατη.

- ii. Μέθοδοι εξαγωγής περιγραφέων άμεσης εφαρμογής στη γεωμετρία των αντικειμένων χωρίς καμία ανάγκη προεπεξεργασίας του αντικειμένου ως προς την κανονικοποίηση της θέσης και του προσανατολισμού του αντικειμένου αλλά όχι όμως και ως προς τη μετατόπιση και την κλιμάκωση οι οποίες και θεωρούνται απαραίτητες για τις περισσότερες μεθόδους.
- iii. Μέθοδοι εξαγωγής περιγραφέων που εφαρμόζονται άμεσα στα αντικείμενα χωρίς την οποιαδήποτε ανάγκη προεπεξεργασίας που αφορά σε περιστροφή, κλιμάκωση και μετατόπιση. Δύο από αυτούς είναι ο *3D Shape Spectrum Descriptor* [13][14] και ο *3D Perceptual Descriptor* [15] που περιλαμβάνει το πρότυπο MPEG-7.

Πολλές φορές για την αντιμετώπιση του μεγάλου όγκου δεδομένων που φέρουν τα τρισδιάστατα ψηφιοποιημένα αντικείμενα εφαρμόζεται ένα βήμα *αποδεκατισμού* (Decimation) του τριγωνικού πλέγματος με στόχο τη μείωση των κορυφών του. Οι αλγόριθμοι αποδεκατισμού τριγωνικών πλεγμάτων βασίζονται στη πυκνότητα των κορυφών και της καμπυλότητας που εμφανίζουν οι επιφάνειες ενός αντικειμένου.

Άλλες φορές, η εξαγωγή ενός περιγραφέα μπορεί να απαιτεί και το μετασχηματισμό της μεθόδου αναπαράστασης της γεωμετρίας του αντικειμένου.

Σύνηθες στη διεθνή βιβλιογραφία είναι η απαίτηση μετασχηματισμού ενός ακανόνιστου τριγωνικού πλέγματος σε ογκομετρικά στοιχεία.

Γενικότερα, η μεθοδολογία εξαγωγής των μορφολογικών χαρακτηριστικών θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από την ανθεκτικότητα της στο θόρυβο των δεδομένων. Η ανθεκτικότητα στο θόρυβο έρχεται σε αντίθεση με τη διακριτική ικανότητα αφού η ενίσχυση της πρώτης συνήθως επιφέρει μείωση της δεύτερης και αντίστροφα. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτούνται σειρές πειραμάτων στο πεδίο εφαρμογής που θα υποδείξουν ένα βέλτιστο σημείο (equilibrium) ανάμεσα στις δύο παραμέτρους.

2.5.4 Μετρικές ομοιότητας αντικειμένων

Ο βαθμός ομοιότητας δύο αντικείμενων προκύπτει από την εφαρμογή ενός *μέτρου ομοιότητας*. Ίσως από μία μαθηματική σκοπιά η ονομασία «μέτρο ανομοιότητας» να θεωρείται ορθότερη αφού τις περισσότερες φορές η μικρή διαφορά ανάμεσα σε δύο περιγραφείς αποτελεί ένδειξη μεγάλου βαθμού μορφολογικής συνάφειας ενώ αντίθετα η μεγάλη διαφορά υποδεικνύει μικρή μορφολογική συνάφεια. Παρόλα αυτά συνηθίζεται ο όρος μέτρο ομοιότητας, το οποίο ορίζεται ως μια συνάρτηση ανάμεσα σε δύο περιγραφείς. Έστω d το μέτρο ομοιότητας ενός συνόλου $\mathcal{3D}$ αντικειμένων S . Τότε, ισχύει $d : S \times S \rightarrow \mathbb{R}$ ενώ η συνάρτηση d θα πρέπει να ικανοποιεί τα παρακάτω αξιώματα:

Ταυτότητα: Για κάθε $x \in S, d(x, x) = 0$ και $x, y \in S, d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$

Θετικότητα: Για κάθε $x \neq y$ του S , ισχύει $d(x, y) \geq 0$.

Συμμετρία: Για κάθε $x, y \in S, d(x, y) = d(y, x)$.

Τριγωνική Ανισότητα: Για κάθε $x, y, z \in S, d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$.

Αμεταβλητότητα σε μετασχηματισμούς: Για ένα πλήθος μετασχηματισμών G , για όλα τα $x, y, z \in S, g \in G$ ισχύει $d(g(x), g(y)) = d(x, y)$.

Πιο συγκεκριμένα, το αξίωμα της ταυτότητας υποδεικνύει πώς ένα $\mathcal{3D}$ αντικείμενο είναι απόλυτα όμοιο με τον εαυτό του, ενώ το αξίωμα της θετικότητας τονίζει το γεγονός ότι δύο διαφορετικά αντικείμενα δεν θα είναι ποτέ όμοια. Το αξίωμα της θετικότητας είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό για έναν περιγραφέα με υψηλή

διακριτική ικανότητα ασχέτως με το ότι τις περισσότερες φορές αυτό δεν ικανοποιείτε [10]. Κάτι τέτοιο δεν έχει ιδιαίτερες επιπτώσεις όταν η διαφορά δύο αντικείμενων εντοπίζεται σε μικρές λεπτομέρειες. Επιπρόσθετα, η συμμετρία είναι ένα αξίωμα που δεν είναι πάντα επιθυμητό. Ακόμα και ο άνθρωπος συγκρίνοντας δύο αντικείμενα (π.χ. x και y) μπορεί να μην καταλήξει στο ίδιο συμπέρασμα ομοιότητας με αν επαναλάμβανε τη διαδικασία σύγκρισης αντίστροφα (π.χ. y και x). Το μέτρο ομοιότητας σε καταστάσεις μερικής ταύτισης θα επιστρέψει μικρή διαφορά $d(x,y)$ εάν το x ταυτίζεται ολοκληρωτικά με ένα τμήμα του y . Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν ισχύει η τριγωνική ανισότητα.

Όπως προαναφέρθηκε, η ευρωστία ενός περιγραφέα επιτυγχάνεται μόνο με την αμεταβλητότητα του στους συσχετισμένους μετασχηματισμούς και στο θόρυβο. Έτσι ανεξάρτητα της εφαρμογής οποιοδήποτε συσχετισμένου μετασχηματισμού από ένα πλήθος μετασχηματισμών G , για όλα τα $x, y, z \in S, g \in G$ θα πρέπει να ισχύει $d(g(x), y) = d(x, y)$.

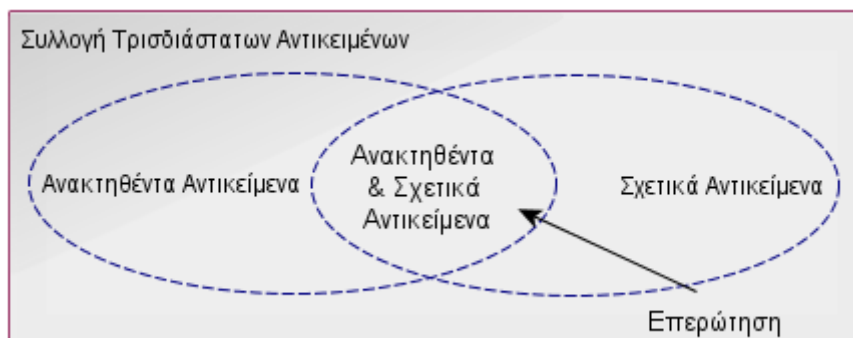
Το μέτρο ομοιότητας που ικανοποιεί τα αξιώματα (i) έως (iv) ονομάζεται *μετρικό* (metric). Επιπρόσθετα, ως *ψευδό-μετρικό* ορίζεται το μέτρο που συνδυάζει τα αξιώματα (i), (iii) και (iv) ενώ ως *ημι-μετρικό* όταν ικανοποιούνται τα αξιώματα (i), (ii) και (iii). Σε περιπτώσεις όπου το μέτρο ομοιότητας είναι *ψευδό-μετρικό* τότε με την εφαρμογή του αξιώματος ανισότητας τριγώνων ενισχύεται η αποτελεσματικότητα της ταύτισης [10].

2.5.5 Μέτρα αποτίμησης αποτελεσμάτων ανάκτησης

Η *σχετικότητα* (relevance) ενός αντικείμενου ως προς κάποια επερώτηση είναι κάτι υποκειμενικό. Η αποτίμηση των αποτελεσμάτων ενός συστήματος ανάκτησης αποτελεί σημαντικό ερευνητικό αντικείμενο. Οι μέθοδοι αποτίμησης χωρίζονται στα διαγράμματα και στα μονόμετρα μεγέθη. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν την επίδοση ενός συστήματος σε όλες τις θέσεις κατάταξης (similarity ranking positions) των αντικείμενων μετά από μία αναζήτηση. Τα μονόμετρα μεγέθη από την άλλη παρέχουν μια εύρωστη μέθοδο σύγκρισης της απόδοσης ανταγωνιστικών τεχνικών ανάκτησης εστιάζοντας σε συγκεκριμένα τμήματα του συνόλου θέσεων κατάταξης των αντικειμένων.

Ένα από τα πλέον σύνηθες μέτρα αποτίμησης των αποτελεσμάτων ανάκτησης βάσει περιεχομένου είναι το διάγραμμα *ακρίβειας και ανάκτησης* (Precision & Recall graph). Ο βαθμός ανάκτησης χαρακτηρίζει την ικανότητα του συστήματος να αναγνωρίσει όλα τα σχετικά, με το *υπό αναζήτηση*, αντικείμενα. Ο βαθμός *ακρίβειας* χαρακτηρίζει την ικανότητα του συστήματος να ανακτήσει μόνο τα σχετικά προς το *υπό αναζήτηση* αντικείμενα. Στόχος του εκάστοτε συστήματος ανάκτησης είναι η μεγιστοποίηση και των δύο. Ως εκ τούτου προκύπτουν οι παρακάτω λόγοι:

- **Βαθμός Ανάκτησης** = πλήθος σχετικών αντικειμένων που ανακτήθηκαν / συνολικό πλήθος των σχετικών αντικειμένων στη βάση δεδομένων
- **Βαθμός Ακρίβειας** = πλήθος σχετικών αντικειμένων που ανακτήθηκαν / πλήθος όλων των αντικειμένων που ανακτήθηκαν (σχετικά και μη-σχετικά)



Σχήμα 2-8 Σύνολο τρισδιάστατων αντικειμένων και τα υποσύνολα τους.

Θεωρώντας ότι το σύνολο A περιλαμβάνει όλα τα σχετικά αντικείμενα ενώ το σύνολο B όλα τα αντικείμενα που επέστρεψε το σύστημα τότε η ακρίβεια ορίζεται ως $\frac{A \cap B}{B}$ ενώ ο βαθμός ανάκτησης ως $\frac{A \cap B}{A}$.

Το μέτρο F -score (γνωστό και ως F -measure) αποτελεί ένα στατιστικό μονόμετρο (scalar) που σχετίζεται και αυτό με τη διακριτική ικανότητα του συστήματος. Είναι ο αρμονικός μέσος όρος ανάμεσα στους βαθμούς ακρίβειας και ανάκτησης. Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F = 2 \frac{\textit{precision} * \textit{recall}}{\textit{precision} + \textit{recall}} \quad (2.15)$$

Τα μονόμετρα *First tier* (Tier1) και *Second tier* (Tier2) καθώς επίσης και αυτό του άμεσου γείτονα (Nearest Neighbour – NN) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου ανάμεσα στα σχετικά ανακτηθέντα αντικείμενα και στα εσφαλμένα (μη-σχετικά) μέχρι ένα συγκεκριμένο πλήθος ανακτηθέντων αντικειμένων k . Έστω ότι σε μία συγκεκριμένη κατηγορία αντικειμένων υπάρχουν συνολικά 20 αντικείμενα για τον άμεσο γείτονα το $k=1$ ενώ για το Tier1 το k παίρνει τιμές, $k=20-1$ και για το Tier2, το $k=2*(20-1)$.

Το μονόμετρο *E-measure* είναι προσανατολισμένο προς τον χρήστη αφού προέρχεται από τη θεώρηση ότι αυτός ενδιαφέρεται περισσότερο για την πρώτη σελίδα των αποτελεσμάτων μίας επερώτησης. Το συγκεκριμένο μονόμετρο αποτελεί έναν δείκτη της απόδοσης του συστήματος για ένα συγκεκριμένο πλήθος αντικειμένων (π.χ. τα πρώτα 64 αντικείμενα που έχουν ανακτηθεί) και ορίζεται ως:

$$E = 1 - \frac{2}{\frac{1}{\textit{Ακρίβεια}_{64}} + \frac{1}{\textit{Ανάκτηση}_{64}}} \quad (2.16)$$

Ο μέσος όρος ακρίβειας (Averaged Precision – AP) είναι ο μέσος όρος των τιμών ακρίβειας σε κάθε θέση κατάταξης όπου συναντούμε ένα σχετικό αντικείμενο. Υποθέτοντας ότι μετά από μία επερώτηση το σύστημα κατατάσσει τρία σχετικά αντικείμενα στις θέσεις (ranks) 1^ο, 2^ο και 4^ο, η ακρίβεια που υπολογίζεται για τη κάθε θέση είναι 1, 1, 0.75 και 0.75. Έτσι ο μέσος όρος ακρίβειας για τη συγκεκριμένη επερώτηση είναι ίσος με 0.87 μονάδες.

Το συσσωρευμένο κέρδος (Cumulated Gain – CG) προκύπτει από την ιδέα πως ένα σχετικό αντικείμενο που εμφανίζεται σε χαμηλή θέση κατάταξης έχει λιγότερες πιθανότητες να πέσει στην αντίληψη του χρήστη για πολλαπλούς λόγους (χρόνος, κόπος, μεγάλος όγκος πληροφορίας που έχει ήδη συγκεντρώσει ο χρήστης από τα προηγούμενα αντικείμενα της απάντησης). Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου μονόμετρου προϋποθέτει τη δυαδική απεικόνιση της κατάταξης των αντικειμένων. Ένα ενεργοποιημένο δυφίο (1) υποδεικνύει ένα σχετικό αντικείμενο ενώ ένα ανενεργό δυφίο (0) υποδεικνύει το αντίθετο. Το συσσωρευμένο κέρδος

υπολογίζεται ως το δεκαδικό άθροισμα των ενεργοποιημένων δυφίων μέχρι μία συγκεκριμένη θέση (i) στην κατάταξη. Υποθέτοντας πως το αποτέλεσμα μίας ερώτησης είναι $R_{binary} = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_i\}$, τότε το συσσωρευμένο κέρδος για ένα δεδομένο i υπολογίζεται ως εξής:

$$CG = \sum_1^i R_i \quad (2.17)$$

Μια παραλλαγή του συγκεκριμένου μονόμετρου λαμβάνει υπόψη του τη θέση που επιστρέφει το σχετικό αντικείμενο εισάγοντας στο παρονομαστή ένα συντελεστή βάρους:

$$DCG = \sum_1^i \frac{R_i}{\log_2 i} \quad (2.18)$$

Τα παραπάνω μέτρα προτείνονται ως μέτρα σύγκρισης στον ετήσιο διαγωνισμό ανάπτυξης περιγραφών ανάκτησης 3D αντικειμένων [17] ενώ έχουν εφαρμοστεί και στο κεφάλαιο αποτίμησης της απόδοσης των προτεινόμενων περιγραφών (Κεφάλαιο 7ο).

2.6 Το πρότυπο MPEG-7

Το MPEG-7 (Multimedia Content Description Interface (ISO/IEC 15938) αποτελεί ένα πρότυπο για την περιγραφή του περιεχομένου πολυμεσικών δεδομένων προκειμένου να καλυφθούν οι εκάστοτε ανάγκες διαχείρισης. Το MPEG-7 απευθύνεται σε *μη-λεκτικού περιεχομένου* τύπους δεδομένων όπως είναι: ψηφιογραφικές εικόνες, 3D αντικείμενα, ήχος, ομιλία, εικονοσειρές αλλά και συνδυασμοί αυτών. Εκτός από την περιγραφή του πολυμεσικού περιεχομένου και την ευέλικτη διαχείριση των δεδομένων, το MPEG-7 καλύπτει την ανάγκη διαλειτουργικότητας ανάμεσα σε συστήματα διαφορετικής αρχιτεκτονικής απαλείφοντας την ανάγκη ύπαρξης μεσάζοντος λογισμικού για τη πρόσβαση στα δεδομένα τους. Το MPEG-7 καθορίζει τον τρόπο περιγραφής των διαφόρων μορφών πολυμεσικής πληροφορίας, ανεξάρτητα από τη μέθοδο αναπαράστασης (μορφότυπος αρχείου) και μέσου αποθήκευσης που χρησιμοποιείται. Η δομή του προτύπου απαρτίζεται από δώδεκα μέρη. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

- i. **ISO/IEC 15938-1 (2002) MPEG-7 Systems:** Καθορίζει τις λειτουργίες του προτύπου σε επίπεδο συστήματος που αφορούν στην προετοιμασία και οργάνωση των περιγραφών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η αποδοτική αποθήκευση και μεταφορά τους.
- ii. **ISO/IEC 15938-2 (2002) MPEG-7 Description Definition Language (DDL):** Η προτυποποιημένη γλώσσα προσδιορισμού της περιγραφής επιτρέπει την επέκταση των υπάρχοντων σχημάτων περιγραφής και τη δημιουργία νέων.
- iii. **ISO/IEC 15938-3 (2002) MPEG-7 Visual:** Το τμήμα αυτό του προτύπου προδιαγράφει ένα σύνολο περιγραφών οι οποίες πραγματεύονται χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου ψηφιογραφικών εικόνων και εικονοσειρών όπως χρώμα, υφή, σχήμα, ακμές, κίνηση αντικειμένων, τροχιά, χρονικές και χωρικές συσχετίσεις αντικειμένων. Στο συγκεκριμένο τμήμα του προτύπου περιλαμβάνονται και οι περιγραφείς τρισδιάστατων αντικειμένων *3D Shape Spectrum* [13][14] και *Perceptual 3D Shape* [15].
- iv. **ISO/IEC 15938-4 (2002) MPEG-7 Audio:** Προδιαγράφει το σύνολο περιγραφών οι οποίες σχετίζονται με ηχητικά σήματα τα οποία και διαχωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: καθαρή ομιλία, καθαρή μουσική, ηχητικά εφέ και τυχαία ίχνη ήχου (arbitrary soundtracks). Οι περιγραφείς πραγματεύονται χαρακτηριστικά όπως η σιωπή, το περιεχόμενο του προφορικού λόγου, το ηχόχρωμα, τη μελωδία, κ.α.
- v. **ISO/IEC 15938-5 (2003) MPEG-7 Multimedia Description Schemes (MDS):** Περιλαμβάνει τα *πολυμεσικά σχήματα περιγραφών* που αφορούν στις δομές μεταδεδομένων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή και τον σχολιασμό (annotation) του οπτικοακουστικού υλικού.
- vi. **ISO/IEC 15938-6 (2003) MPEG-7 Reference Software:** Στόχος του συγκεκριμένου τμήματος είναι να παρέχει μια σειρά εφαρμογών που σχετίζονται με τους περιγραφείς του MPEG-7. Το *Experimentation Software*, όπως ονομάζεται

παρέχει υλοποιήσεις σε επίπεδο πηγαίου κώδικα που επιτρέπουν την εξαγωγή και την ταύτιση περιγραφέντων που συμπεριλαμβάνονται στο σχήμα του προτύπου.

- vii. **ISO/IEC 15938-7 (2003 - 2008 τελευταία τροποποίηση) MPEG-7 Conformance Testing:** Το συγκεκριμένο σχήμα παρέχει μεθόδους και διαδικασίες ελέγχου συμβατότητας των εφαρμογών που συμφωνούν με το πρότυπο MPEG-7.
- viii. **ISO/IEC 15938-8 (2002 - 2007 τελευταία τροποποίηση) Extraction and use of MPEG-7 descriptions:** Περιλαμβάνει οδηγίες και παραδείγματα για την εξαγωγή των περιγραφέντων από πολυμεσικά δεδομένα και τρόπους χρήσης τους σε πολυμεσικές εφαρμογές.
- ix. **ISO/IEC 15938-9 (2005) Profiles and levels:** Περιγράφει μηχανισμούς επιλογής και περιορισμού των περιγραφέντων σε επίπεδο τύπων δεδομένων, μεγέθους περιγραφής ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.
- x. **ISO/IEC 15938-10 (2005) Schema Definition:** Καθορίζει το σύστημα μεταδεδομένων για την περιγραφή πολυμεσικών δεδομένων.
- xi. **ISO/IEC TR 15938-11 (2005) MPEG-7 profile schemas:** Περιλαμβάνει τα σχήματα όλων των προφίλ του ISO/IEC 15938-9 με συγκεκριμένη δομή-μορφή (XSD).
- xii. **ISO/IEC 15938-12 (2008) Query format:** Περιγράφει τον τρόπο δημιουργίας ερωτήσεων και παρέχει ένα τυποποιημένο τρόπο διασύνδεσης με βάσεις δεδομένων που συμφωνούν με το πρότυπο MPEG-7.

Γενικά, το MPEG-7 καθορίζει ένα σύνολο ψηφιακών περιγραφέντων και σχημάτων περιγραφής (description schemes) μέσω των οποίων καθιστάτε εφικτή η περιγραφή του περιεχομένου πολυμεσικών δεδομένων. Οι περιγραφείς που περιέχει το πρότυπο μπορεί να είναι χαμηλού επιπέδου και να περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όμως η μορφή ενός 3D αντικειμένου, το κυρίαρχο χρώμα σε μία εικόνα, η αρμονία

σε ένα μουσικό κομμάτι ή υψηλού επιπέδου και να αφορούν σε ένα γεγονός που λαμβάνει χώρα σε μια εικονοσειρά ή στις σχέσεις ανάμεσα στα πρόσωπα που εμφανίζονται σε αυτή. Η δομή ενός περιγραφέα καθορίζεται από ένα σχήμα (Multimedia Description Scheme - DSs) το οποίο αναφέρει ρητά τα στοιχεία του. Η γλώσσα ορισμού της δομής ενός περιγραφέα είναι η Description Definition Language (DDL) η οποία και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία νέων περιγραφέων που αποτελούν επεκτάσεις του προτύπου [18]-[22].

Κεφάλαιο 3

Ανασκόπηση Ερευνητικού Πεδίου

3.1 Εισαγωγή

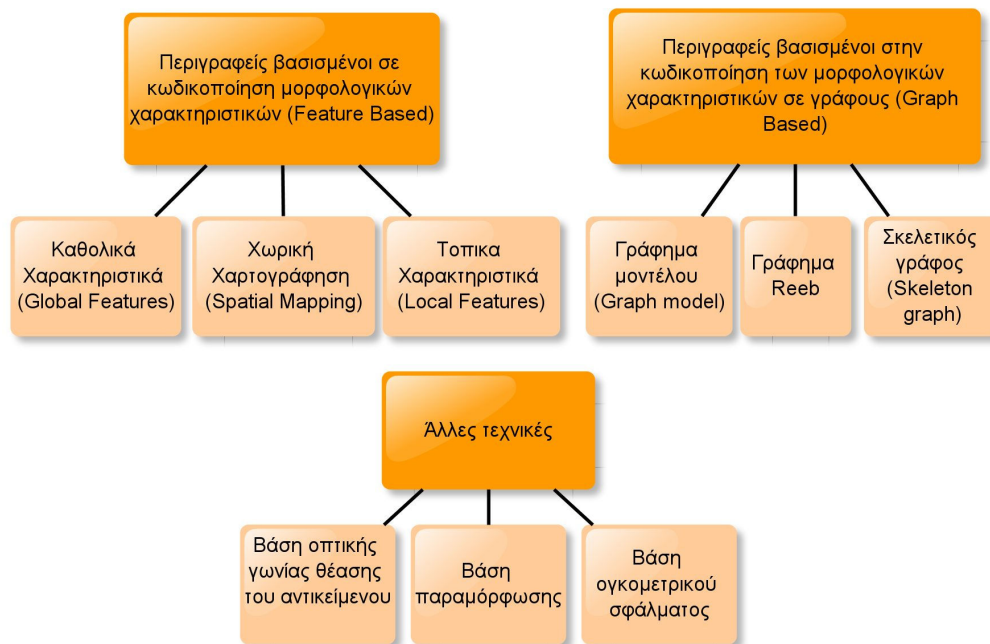
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις σημαντικότερες μεθόδους εξαγωγής μορφολογικών χαρακτηριστικών από 3D αντικείμενα και της κωδικοποίησής τους. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η αναφορά των πλέον σημαντικών τεχνικών που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Γίνονται επίσης αναφορές σε εφαρμογές της τεχνολογίας ανάκτησης βάσει περιεχομένου τρισδιάστατων αντικειμένων στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς. Το κεφάλαιο καταλήγει με αναφορές σε ερευνητικές κατευθύνσεις που αφορούν στο συγκεκριμένο χώρο.

3.2 Κατηγορίες περιγραφέντων τρισδιάστατων αντικειμένων

Σύμφωνα με τους Tangelder et al. [10] οι περιγραφείς τρισδιάστατων μορφολογικών χαρακτηριστικών διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες οι οποίες όμως ανεξάρτητα από τον τρόπο αναπαράστασής τους στο σχήμα 3-1 παρουσιάζουν αλληλοεπικάλυψη.

Οι περιγραφείς που κωδικοποιούν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων (Feature Based methods) βασίζονται σε μαθηματικούς μετασχηματισμούς. Από την άλλη, οι περιγραφείς που βασίζονται σε γράφους (Graph Based methods) κωδικοποιούν τη γεωμετρική δομή ενός αντικειμένου με τη

χρήση λογικών γραφημάτων. Στις άλλες τεχνικές συμπεριλαμβάνονται περιγραφείς που δεν εμπίπτουν ξεκάθαρα σε κάποια από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες.



Σχήμα 3-1 Ταξινόμηση τεχνικών ταύτισης γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απόλυτος με αποτέλεσμα πολλές από τις τεχνικές να εντάσσονται σε περισσότερες από μία κατηγορία. Ένας περιγραφέας για παράδειγμα που βασίζεται σε κάποιο είδους γράφου συνεχίζει να περιγράφει κατά κάποιο τρόπο τα καθολικά χαρακτηριστικά (Global Features) ενός αντικειμένου.

3.2.1 Περιγραφείς μορφολογικών χαρακτηριστικών – Feature Based

Βασική αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων μεθόδων είναι η κωδικοποίηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου σε κάποιο διάνυσμα n διαστάσεων. Συνήθως η κωδικοποίηση περιλαμβάνει τη δειγματοληψία της 3D γεωμετρίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μη τίθενται περιορισμοί στα σχήματα των αντικειμένων που μπορούν να κωδικοποιηθούν. Το εκάστοτε γεωμετρικό χαρακτηριστικό ορίζεται ως κάποιο σημείο σε ένα πολυδιάστατο χώρο. Δύο αντικείμενα θεωρούνται παρόμοια όταν τα διανύσματα των περιγραφών τους βρίσκονται κοντά μέσα σε αυτόν το χώρο.

Οι μέθοδοι περιγραφής των μορφολογικών χαρακτηριστικών διακρίνονται σε τρεις υποομάδες σύμφωνα με τον τρόπο καταγραφής που ακολουθούν. Αυτές είναι:

- Καθολικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Global Features)
- Χωρική χαρτογράφηση χαρακτηριστικών (Spatial Mapping)
- Τοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Local Features)

3.2.1.1 Καθολικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Τα καθολικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κωδικοποιούν το πλήρες γεωμετρικό σχήμα ενός 3D αντικειμένου με μεθόδους όπως είναι: ο όγκος του, οι γεωμετρικές ροπές καθώς και οι συντελεστές του μετασχηματισμού Fourier υπολογισμένα απευθείας στις κορυφές του πολυγωνικού πλέγματος ή στα ογκομετρικά στοιχεία ενός αντικειμένου [23]. Οι Cybenko et al. [24] περιγράφουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου το οποίο είναι κανονικοποιημένο ως προς τους συσχετισμένους μετασχηματισμούς μετατόπισης, κλιμάκωσης, προσανατολισμού και περιστροφής, χρησιμοποιώντας 3D ροπές 2^{ης} τάξης και σφαιρικές ροπές οι οποίες είναι αμετάβλητες σε περιστροφές. Επιπρόσθετα, ο περιγραφέας που προτείνουν περιλαμβάνει και τις διαστάσεις του ελάχιστου περικλείοντος κύβου, τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους και το εμβαδό της επιφάνειας του αντικειμένου.

Οι Corney et al. [25] προτείνουν την ιδέα των κυρτών περιγεγραμμένων επιφανειών (κυρτό σύνολο - convex hull) και των μετρικών δεικτών όπως είναι η αναλογία του εμβαδού επιφάνειας του αντικειμένου σε σχέση με το κυρτό σύνολο (Hull Crumbliness), το ποσοστό του κυρτού συνόλου που δεν καταλαμβάνεται από την επιφάνεια του αντικειμένου (Hull Packing) και το λόγο των ογκομετρικών στοιχείων του αντικειμένου ως προς τον όγκο του κυρτού συνόλου (Hull Compactness). Οι Rea et al. [26] προτείνουν τη συνεπτυγμένη περιγραφή ενός 3D αντικειμένου με γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως είναι το εμβαδό της επιφάνειας του, ο όγκος του, το πλήθος των εδρών του πολυγωνικού πλέγματος, κ.α. Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία [26] αποτελεί μία προσπάθεια προσομοίωσης του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου σε προβλήματα εντοπισμού αντικειμένων με μορφολογική συνάφεια. Προτείνουν ένα δυαδικό τρόπο

περιγραφής της σιλουέτας του αντικειμένου συνδυάζοντας χαρακτηριστικά όπως είναι ο λόγος των πλευρών του. Οι Elad et al. [28] χρησιμοποιούν 3D γεωμετρικές ροπές σε αντικείμενα κανονικοποιημένα ως προς τους συσχετισμένους μετασχηματισμούς. Το μέτρο ομοιότητας που εφαρμόζουν είναι η σταθμισμένη ευκλείδεια απόσταση (Weighted Euclidean distance). Οι Kazhdan et al. [29] μνημονεύουν έναν περιγραφέα που βασίζεται στη συμμετρία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αντικειμένου. Η συμμετρία ορίζεται ως προς κάποιο επίπεδο και ως προς το κέντρο βάρους του αντικειμένου. Κάθε τιμή που προκύπτει, αποτελεί ένα χαρακτηριστικό της συμμετρίας του σχήματος του αντικειμένου το οποίο και αποτελεί μία τιμή σε ένα ιστόγραμμα. Οι υψηλές τιμές προσδιορίζουν επίπεδα που βρίσκονται κοντά στα σημεία συμμετρίας της γεωμετρίας του αντικειμένου ενώ οι χαμηλές τιμές ακριβώς το αντίθετο. Μέσα από μια σειρά πειραμάτων κατέληξαν ότι ο συνδυασμός της συγκεκριμένης τεχνικής με άλλες μεθοδολογίες μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας βελτιώνει την απόδοση ενός συστήματος ανάκτησης.

Βασικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτής της κατηγορίας είναι η ανικανότητα επίτευξης μερικής ταύτισης. Κύριος λόγος είναι η αδυναμία κωδικοποίησης συσχετισμών ανάμεσα στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στις περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου από όπου αυτά προέρχονται. Αυτό έχει ως επιπρόσθετο αποτέλεσμα τη χαμηλή διακριτική ικανότητα τους. Από την άλλη, η υλοποίηση τους χαρακτηρίζεται ως σχετικά απλή. Ως εκ τούτου, πολλές φορές εφαρμόζονται ως ένα αρχικό φίλτρο για τη δημιουργία ενός υποσυνόλου αντικειμένων στα οποία θα εφαρμοσθούν στη συνέχεια περιγραφείς με μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα.

Στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται εργασίες που αφορούν στη καταγραφή των κατανομών των καθολικών χαρακτηριστικών βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια των αποτελεσμάτων μορφολογικής ταύτισης. Οι Mademlis et al. [30] επεκτείνουν την ιδέα των γεωμετρικών ροπών εισάγοντας τις τρισδιάστατες ροπές *Krawtchouk* οι οποίες έχουν το πλεονέκτημα να αναγνωρίζουν έντονες αλλαγές στην καμπυλότητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου. Ως εκ τούτου, η μορφή ενός αντικειμένου περιγράφεται από ένα μικρό αριθμό συντελεστών. Οι Daras et al. [31] παρουσιάζουν μια μέθοδο εξαγωγής των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός

αντικειμένου εφαρμόζοντας δύο παραλλαγές του γενικευμένου μετασχηματισμού *Radon*. Αυτές είναι ο μετασχηματισμός *ακτινικής ολοκλήρωσης* (Radial Integration Transform) και ο μετασχηματισμός *σφαιρικής ολοκλήρωσης* (Spherical Integration Transform). Η εφαρμογή των μετασχηματισμών αυτών προϋποθέτει την κανονικοποίηση του αντικειμένου ως προς τους συσχετισμένους μετασχηματισμούς.

Οι Raquet et al. [32] προτείνουν περιγραφείς βασισμένους σε απλά γεωμετρικά σχήματα όπως είναι το ελάχιστο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που περικλείει ένα αντικείμενο (bounding box limits), οι γεωμετρικές ροπές καθώς και ο μετασχηματισμός κυματιδίων (wavelets). Παρομοίως στην εργασία [33] εφαρμόζεται ο σφαιρικός μετασχηματισμός κυματιδίων που αποτελεί επέκταση των 3D ροπών Zernike.

Οι Osada et al. [34] προτείνουν την ιδέα σύγκρισης των κατανομών των καθολικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών βασιζόμενοι σε αποστάσεις, εμβαδά, γωνίες και όγκους μεταξύ τυχαίων περιοχών της επιφάνειας ενός αντικειμένου. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους αποδείχτηκε πως ένας περιγραφέας που περιέχει ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα σε τυχαία σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου αποδίδει αρκετά καλά. Στην εργασία [35] εξετάζουν τη χρήση πολλαπλών ιστογραμμάτων για την περιγραφή ενός αντικειμένου. Τα ιστογράμματα αυτά καλύπτουν διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά κατά μήκος των κύριων αξόνων του αντικειμένου. Ο περιγραφέας που προτείνουν αποτελείται από τρία ιστογράμματα που περιλαμβάνουν τις ροπές αδράνειας, τη μέση απόσταση της επιφάνειας του αντικειμένου και τη διασπορά της απόστασης της επιφάνειας του αντικειμένου. Οι υπολογισμοί αυτοί υλοποιούνται ως προς τον κάθε κύριο άξονα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσίασαν υψηλά επίπεδα απόδοσης μόνο σε αντικείμενα που φέρουν κάποιας μορφής αξονικής συμμετρίας (π.χ. αγγεία). Οι Ip et al. [36] ασχολήθηκαν με την ανάκτηση 3D μοντέλων CAD βελτιώνοντας τον περιγραφέα των Osada et al. [34]. Η διακριτική ικανότητα του περιγραφέα βελτιώθηκε από την εισαγωγή της διαδικασίας χαρακτηρισμού τυχαίων ζευγών κορυφών. Οι κορυφές χαρακτηρίζονται ανάλογα με το αν το ευθύγραμμο τμήμα που τις ενώνει βρίσκεται εξ ολοκλήρου εντός, εκτός ή ταυτόχρονα εντός και εκτός από την περιοχή που ορίζουν οι επιφάνειες του μοντέλου (όγκος του μοντέλου). Η

προτεινόμενη τεχνική προαπαιτεί την περιγραφή του αντικειμένου με ογκομετρικά στοιχεία ενώ ο βαθμός ομοιότητας ανάμεσα στις κατανομές υπολογίζεται ξεχωριστά για τους τρεις τύπους αποστάσεων επιτρέποντας έτσι τη χρήση διαφορετικών συντελεστών βάρους για τη κάθε μία. Οι Ohbuchi et al. [37] προτείνουν άλλη μια επέκταση του αλγορίθμου της εργασίας [34] όπου οι αποστάσεις των τυχαίων ζευγών σημείων περιγράφονται σε ένα ιστόγραμμα οι τιμές του οποίου είναι προϊόν δύο συνιστωσών. Η μεν πρώτη αντιπροσωπεύει την ευκλείδεια απόσταση ανάμεσα στο ζεύγος κορυφών ενώ η δεύτερη το εσωτερικό γινόμενο των μοναδιαίων διανυσμάτων των κορυφών. Η μικρή αύξηση του υπολογιστικού κόστους είναι αμελητέα σε σχέση με τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος ανάκτησης.

Συνοψίζοντας, οι περιγραφείς καθολικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών μπορούν να εφαρμοσθούν για το διαχωρισμό αντικειμένων σε γενικές κατηγορίες όπως οχήματα, σκάφη, ζώα, κτλ. Από την άλλη όμως δεν μπορούν να εφαρμοσθούν για την αναγνώριση λεπτομερειών [10].

3.2.1.2 Χωρική χαρτογράφηση χαρακτηριστικών

Οι περιγραφείς της παρούσας υποκατηγορίας καταγράφουν τις θέσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αντικειμένων σε κάποιας μορφής χάρτη. Οι εγγραφές στον εκάστοτε χάρτη αποτελούν τμήματα του αντικειμένου και είναι οργανωμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται οι σχετικές τους θέσεις και αποστάσεις [10]. Οι περιγραφείς της συγκεκριμένης κατηγορίας απαιτούν την προεπεξεργασία του αντικειμένου ως προς τους συσχετισμένους μετασχηματισμούς

Οι Ankerst et al. [38] προτείνουν την εφαρμογή ιστογραμμάτων που προκύπτουν από την ομοιόμορφη κατανομή κορυφών πάνω στις επιφάνειες τρισδιάστατων μοριακών δομών. Τα ιστογράμματα οργανώνονται σε ομόκεντρους τομείς γύρω από το κέντρο βάρους του αντικειμένου ενώ το μέτρο ομοιότητας που εφαρμόζουν λαμβάνει υπόψη του τις αποστάσεις ανάμεσα σε αυτούς τους τομείς. Οι Vranic et al. [39] περιγράφουν μία 3D επιφάνεια συσχετίζοντας ένα πλήθος ακτίνων που διέρχονται από το κέντρο βάρους του αντικειμένου με τις ευκλείδειες αποστάσεις της κάθε ακτίνας που ξεκινά από το κέντρο βάρους του αντικειμένου και καταλήγει στο σημείο που τέμνει για τελευταία φορά την επιφάνεια του. Στη

συνέχεια τα σημεία τομής ομαδοποιούνται ανάλογα με τις αποστάσεις τους ώστε να σχηματίσουν ομόκεντρες σφαίρες. Για κάθε μία από τις σφαίρες αυτές υπολογίζονται οι σφαιρικές αρμονικές. Παρόμοια είναι και η προσέγγιση που προτείνουν οι Yu et al. [40]. Ο περιγραφέας τους προκύπτει από τη προβολή ακτινών από το κέντρο βάρους του αντικειμένου προς τυχαίες κατευθύνσεις. Ο χάρτης αποστάσεων που δημιουργείται περιλαμβάνει τα μεγέθη των ευθειών που σχηματίζονται ανάμεσα στο κέντρο βάρους του αντικειμένου και του σημείου τομής της επιφάνειας του αντικειμένου από μία ακτίνα. Επιπρόσθετα υπολογίζονται οι αποστάσεις ανάμεσα στα σημεία τομής της επιφάνειας του αντικειμένου και στα σημεία όπου η επέκταση της ίδιας ακτίνας τέμνει μία μοναδιαία σφαίρα που εμπεριέχει το αντικείμενο. Οι ευκλείδειες αποστάσεις ανάμεσα στην επιφάνεια του αντικειμένου και την επιφάνεια της μοναδιαίας σφαίρας αναπαριστούν το μέγεθος του έργου που απαιτείται για τη μεταμόρφωση (morphing) του αντικειμένου σε σφαίρα.

Οι Kazhdan et al. [41] περιγράφουν μια προσέγγιση με στόχο να βελτιώσουν περιγραφείς που βασίζονται σε σφαιρικές αρμονικές ως προς την αμεταβλητότητα του προσανατολισμού τους. Γενικά, οι μέθοδοι που αναφέρονται σε σφαιρικές αρμονικές αποτελούν ουσιαστικά επέκταση του μετασχηματισμού *Fourier* και βασίζονται σε ιδιοσυναρτήσεις *Laplace-Beltrami*. Η μέθοδος που προτείνουν αφορά στην περιγραφή μια σφαιρικής συνάρτησης ως ποσότητες ενέργειας που περιλαμβάνονται στις εκατοστές συχνότητες. Οι τιμές αυτές είναι αμετάβλητες ως προς την περιστροφή του αντικειμένου γύρω από το κέντρο βάρους του. Η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει την περιγραφή του αντικειμένου με ογκομετρικά στοιχεία. Η χρήση ογκομετρικών στοιχείων χαρακτηρίζεται από τον Vranic [39] ως καταστροφική για τις λεπτομέρειες που φέρει το αρχικό τριγωνικό πλέγμα του αντικειμένου. Το απέδειξε συγκρίνοντας τη μέθοδο του, που λειτουργεί σε τριγωνικό πλέγμα, με αυτή του Funkhouser et al. [42] που περιλαμβάνει τον μετασχηματισμό του πλέγματος σε ογκομετρικά στοιχεία. Οι Kriegel et al. [43] προτείνουν τη δημιουργία ενός χάρτη που προκύπτει από τον διαχωρισμό των ογκομετρικών στοιχείων ενός αντικείμενου σε ιδίου μεγέθους υποχώρους. Για κάθε υποχώρο υπολογίζονται τα ποσοστά του όγκου του αντικειμένου που ανήκουν σε αυτόν, η κυρτότητα του τμήματος του αντικειμένου που εμπίπτει στον εκάστοτε

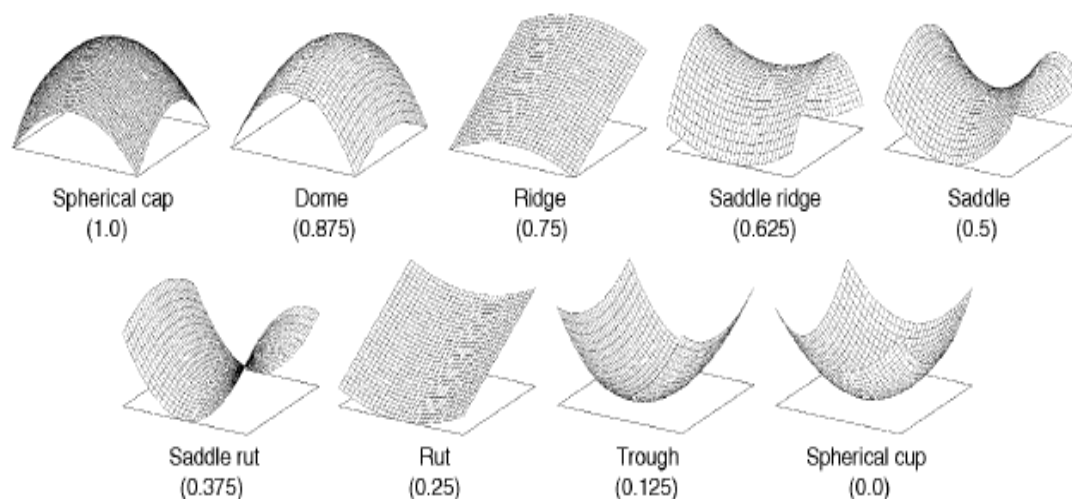
υποχώρο καθώς και οι ιδιοτιμές του πίνακα αδράνειας για το συγκεκριμένο υποχώρο. Κάθε υποχώρος αντιστοιχεί σε κάποια κλάση (bin) ενός ιστογράμματος. Το πλήθος των υποχώρων καθορίζει το βαθμό λεπτομέρειας που καταγράφεται στο ιστόγραμμα. Ο βαθμός ομοιότητας ανάμεσα σε δύο μοντέλα υπολογίζεται συγκρίνοντας το πλήθος των ογκομετρικών στοιχείων που υπάρχουν σε κάθε υποχώρο και στον υπολογισμό της κοιλότητας και την κυρτότητας του καθενός. Στην εργασία τους [44] επεκτείνουν την ιδέα συσχετίζοντας τη μέθοδο διαχωρισμού του χώρου με τη μορφολογία του εκάστοτε αντικειμένου. Στην πραγματικότητα επιτρέπουν τον διαχωρισμό του αντικειμένου σε ασύμμετρα παραλληλεπίπεδα τμήματα τα οποία δύναται να έχουν και αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές. Με το συγκεκριμένο τρόπο χωρικού διαχωρισμού βελτίωσαν τη διακριτική ικανότητα της μεθόδου.

3.2.1.3 Τοπικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Οι περιγραφείς της υποκατηγορίας αυτής βασίζονται στην καταγραφή της μορφολογίας που φέρει η επιφάνεια ενός αντικειμένου σε τοπικό επίπεδο. Οι Shum et al. [45] χρησιμοποιούν το σφαιρικό σύστημα συντεταγμένων για τη χαρτογράφηση-απεικόνιση της μορφολογίας τμημάτων της επιφάνειας ενός αντικειμένου πάνω σε μια μοναδιαία σφαίρα. Για την απεικόνιση του μοντέλου στη σφαίρα πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της σφαίρας σε περιοχές που προκύπτουν από τις επιφάνειες ενός εικοσάεδρου. Αρχικά το μοντέλο επιδέχεται ένα μετασχηματισμό *ψηφοθέτησης* (tessellation) ώστε να επιτευχθεί μια σχεδόν κανονική κατανομή τριγώνων πάνω στην επιφάνεια του. Τα τοπικά χαρακτηριστικά καμπυλότητας του κάθε τμήματος (node) υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις σχετικές θέσεις των γειτονικών τμημάτων. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αποκλειστική εφαρμογή της σε αντικείμενα που διαθέτουν πολυγωνικά ή τριγωνικά πλέγματα που δεν παρουσιάζουν ασυνέχειες (watertight models).

Οι Chua et al. [46] προτείνουν την ιδέα των *σημειακών υπογραφών* (point signatures) όπου κωδικοποιούν τοπικά την επιφάνεια ενός αντικειμένου βασιζόμενοι στη μορφολογία των γειτονικών κορυφών. Μία σημαντική επέκταση της ιδέας αυτής προτείνουν οι Zaharia και Preteux [14] με τον περιγραφέα *3D Shape Spectrum Descriptor* (3D SSD) ο οποίος συμπεριλαμβάνεται στο πρότυπο του

MPEG-7. Ο περιγραφέας 3D SSD κωδικοποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που φέρει ένα αντικείμενο σε τοπικό επίπεδο και αποτελείται από ένα ιστόγραμμα που περιλαμβάνει μια ακολουθία από δείκτες καμπυλότητας που υπολογίζονται για όλη την επιφάνεια του αντικειμένου. Οι δείκτες καμπυλότητας περιγράφουν κάποιες βασικές κατηγορίες καμπύλων σχημάτων τα όποια έχουν προκαθοριστεί (δεικτοδοτηθεί). Οι κατηγορίες των σχημάτων είναι *spherical cup*, *trough*, *rut*, *saddle rut*, *saddle*, *saddle ridge*, *ridge*, *dome*, *spherical cap* και παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 3-2). Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στις προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούν τα τριγωνικά πλέγματα προκειμένου να επιτυγχάνεται η εξαγωγή των δεικτών καμπυλότητας. Μία από αυτές είναι η μεγάλη αναλυτικότητα της επιφάνειας. Για την αύξηση της αναλυτικότητας προτείνουν την εφαρμογή του αλγορίθμου ψηφοθέτησης του Loop [47].



Σχήμα 3-2 Κλίμακα δεικτοδότησης (Shape Index) για την αναπαράσταση βασικών καμπύλων επιφανειών.

Οι Zagralas et al. [48] προτείνουν ένα πλαίσιο δημιουργίας διανυσμάτων τα οποία είναι αμετάβλητα στην περιστροφή των αντικειμένων και βασίζονται στο *Σφαιρικό Μετασχηματισμό Ίχνους* (Spherical Trace Transform). Για την εξαγωγή του συγκεκριμένου περιγραφέα τα 3D αντικείμενα μετατοπίζονται έτσι ώστε το κέντρο βάρους τους να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων ενός τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και κλιμακώνονται έτσι ώστε η μέγιστη διάστασή τους να έχει την τιμή ένα. Στη συνέχεια ένα σύνολο συναρτήσεων και

συναρτησιακών μετασχηματισμών (functionals) εφαρμόζονται πάνω στο αντικείμενο δημιουργώντας ένα πεδίο ομόκεντρων σφαιρών πάνω στο οποίο τελικά υπολογίζονται ομάδες συναρτησιακών με συγκεκριμένες ιδιότητες παράγοντας διανύσματα περιγραφής μορφολογικών χαρακτηριστικών τα οποία είναι ανεξάρτητα του προσανατολισμού των αντικειμένων.

Συνοψίζοντας, οι περιγραφείς της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι λιγότερο αποδοτικοί από αυτούς των καθολικών χαρακτηριστικών σε επίπεδο ταύτισης μορφολογικών χαρακτηριστικών ενώ οι απαιτούμενες διαδικασίες δεικτοδότησης είναι πιο απαιτητικές σε υπολογιστική ισχύ [10].

3.2.2 Γράφοι

Οι περιγραφείς της υποκατηγορίας αυτής προσπαθούν να αποδώσουν τα τοπικά μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αντικείμενου με γράφους. Στη βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί τρεις γενικές κατηγορίες γράφων. Αυτές είναι οι: *γράφοι μοντέλων* (model graphs), *γράφοι Reeb* (Reeb graphs) και *σκελετικοί γράφοι* (skeleton graphs).

3.2.2.1 Γράφοι μοντέλων

Οι συγκεκριμένες τεχνικές εφαρμόζονται κυρίως σε 3D μοντέλα CAD τα οποία και προκύπτουν από ειδικές μεθόδους αναπαράστασης της γεωμετρικής δομής τους. Μία τέτοια μέθοδος είναι η *Αναπαράσταση Ορίων* (Boundary Representation) όπου οι έδρες του αντικείμενου μπορούν να είναι οποιασδήποτε μορφής σε αντίθεση με τις επίπεδες έδρες των τριγωνικών πλεγμάτων. Μία άλλη διαδεδομένη μέθοδος είναι η *Κατασκευαστική Γεωμετρία Στερεών* (Constructive Solid Geometry) όπου το αντικείμενο περιγράφεται από σειρές τρισδιάστατων τελεστών *Boolean* (ένωση, διαφορά, τομή) που εφαρμόζονται σε γεωμετρικά στερεά όπως είναι οι κύβοι και οι κύλινδροι.

Οι εργασίες των Elison et al. [49][48] καθώς και των Cicirello et al.[50] περιγράφουν μεθοδολογίες αναγνώρισης ομοιοτήτων ανάμεσα σε 3D μοντέλα CAD συγκρίνοντας γράφους που περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά *γνωρίσματα κατασκευής* (manufacturing features). Η διαδικασία που προτείνουν προσεγγίζει το

πρόβλημα από τη σκοπιά της ταύτισης τμημάτων του μηχανολογικού σχεδίου των αντικειμένων. Οι El-Mehalawi et al. [51][52] καθώς επίσης και οι McWerther et al. [53] χρησιμοποιούν γράφους για την ταυτόχρονη κωδικοποίηση της δομής των αντικειμένων με ένα σύνολο μηχανολογικών χαρακτηριστικών. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί στην ταυτόχρονη ταύτιση μορφολογικών ομοιοτήτων και χαρακτηριστικών υψηλότερου επιπέδου όπως είναι τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα κατασκευής.

Είναι γεγονός ότι οι τεχνικές που βασίζονται σε γράφους είναι δύσκολο να εφαρμοσθούν σε άλλους τύπους αντικειμένων. Εξάιρεση στον κανόνα αποτελεί η εργασία των Zuckerberger et al. [54] όπου γίνεται μια προσπάθεια αποσύνθεσης της γεωμετρίας ενός 3D αντικείμενου (μη-μηχανολογικού) σε μία δομή που περιλαμβάνει αρχέτυπα γεωμετρικά στερεά. Επιπρόσθετα, οι Kim et al. [55] ανέπτυξαν τον περιγραφέα *Perceptual 3D Shape* (P3DS) ο οποίος και υιοθετήθηκε από το πρότυπο MPEG-7 ως ακόμα ένας τυποποιημένος περιγραφέας για ανάκτηση 3D αντικείμενων. Για την αναπαράσταση της δομής των μοντέλων χρησιμοποιούνται *ελλειψοειδή* (blobs). Η αναπαράσταση (κατά τμήματα) αυτή εκφράζεται με τη βοήθεια των *Γράφων Παραστάσεων Σχέσης* (Attributed Relation Graphs - ARG) οι οποίοι συσχετίζουν τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων. Στο σχήμα 3-3, εμφανίζονται επτά αντικείμενα και η κατά τμήματα αναπαράσταση του καθενός με γράφους τύπου ARG. Η τμηματοποίηση και η ανάλυση που υπόκεινται τα αντικείμενα βασίζονται στην ίδια τη μορφολογία τους. Κάθε κόμβος αναπαριστά ένα σημαντικό τμήμα της γεωμετρίας του αντικείμενου και αντικαθίσταται από ένα ελλειψοειδές το οποίο έχει παραμετροποιηθεί σε σχέση με τον όγκο του, την κυρτότητα και τις δύο παραμέτρους εκκεντρότητας του [56]. Πιο συγκεκριμένα, η κυρτότητα ορίζεται ως ο λόγος του όγκου σε ένα κόμβο προς το κυρτό σύνολο (convex hull) που περικλείει το αντικείμενο. Ενώ η εκκεντρότητα είναι ένα μέγεθος που χαρακτηρίζει μία κωνική τομή και ουσιαστικά αποτελεί το μέτρο απόστασης μίας κωνικής τομής από έναν τέλειο κύκλο.



Σχήμα 3-3 Τρισδιάστατα αντικείμενα, κατά τμήματα αναπαράσταση και οι γράφοι ARG αντίστοιχα [55].

Οι Shamir et al. [57] προτείνουν ένα παρόμοιο περιγραφέα ο οποίος δομεί ιεραρχικά τυχαίες περιοχές της επιφάνειας του αντικειμένου σε ένα γράφο που αποτελείται από παραμετροποιημένες σφαίρες. Τα σημεία δεικτοδοτούνται με ειδικά βάρη που υπολογίζονται σύμφωνα με την ακρίβεια της σφαιρικής προσέγγισης του κάθε τμήματος. Εκμεταλλευόμενοι τη συγκεκριμένη γεωμετρική προσέγγιση της μορφής του μοντέλου με σφαίρες υλοποίησαν έναν αλγόριθμο για ταυτόχρονη κανονικοποίηση θέσης και αναγνώρισης μορφολογικών συναφειών.

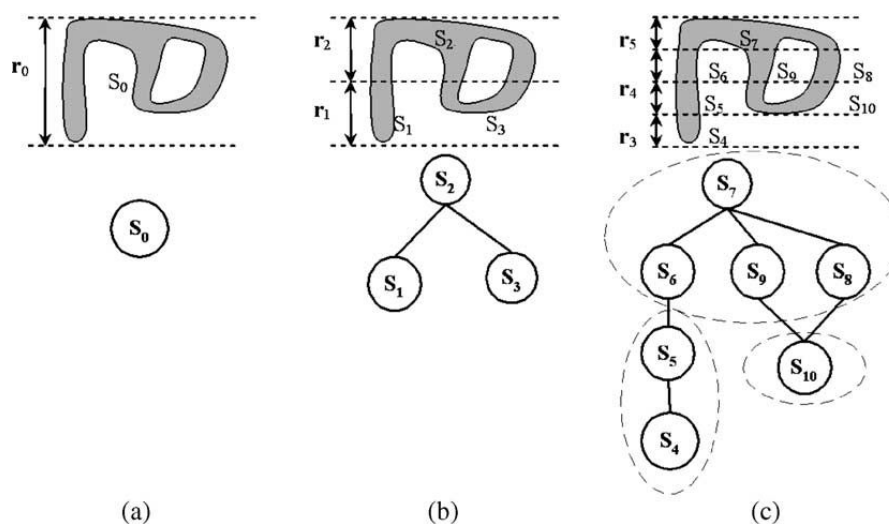
3.2.2.2 Γράφοι Reeb

Οι συγκεκριμένοι γράφοι ορίζονται στο χώρο της ανάλυσης 3D αντικειμένων ως μια συνάρτηση f με πεδίο ορισμού την επιφάνεια του αντικειμένου και ως c μια διαμέριση του πεδίου τιμών της συνάρτησης. Γενικά οι μέθοδοι που βασίζονται στους γράφους *Reeb* στοχεύουν στην ταύτιση τοπολογικών μορφολογικών χαρακτηριστικών αρθρωτών αντικειμένων.

Οι Hilaga et al. [58], Biasotti et al. [59] και Bespalov et al. [60] προτείνουν τους γράφους *Reeb* ως μία βάση για τη δημιουργία περιγραφέων. Οι Biasotti et al. [59] επισημαίνουν τη σημασία επιλογής της συνάρτησης που θα αποτελέσει τη βάση κατασκευής του γράφου. Για παράδειγμα η χρήση του ολοκληρώματος των

γεωδαιτικών αποστάσεων² μεταξύ των κορυφών του αντικειμένου ως συνάρτηση ορισμού του γράφου *Reeb*, έχει εφαρμογές σε ταύτιση αρθρωτών αντικειμένων ανεξαρτήτου στάσης. Από την άλλη η χρήση του ολοκληρώματος των ευκλείδειων αποστάσεων ανάμεσα στις κορυφές του αντικειμένου και του κέντρου βάρους του οδηγεί σε ένα περιγραφέα που μπορεί να εντοπίσει συγκεκριμένες στάσεις αρθρωτών αντικειμένων. Στην εργασία [58] προτείνεται η ιδέα των γράφων *Reeb* πολλαπλών επιπέδων. Το κάθε αντικείμενο περιγράφεται ως μια ακολουθία γράφων *Reeb*. Ο κάθε γράφος χαρακτηρίζεται ως κόμβος και αναπαριστά ένα τμήμα της συνάρτησης (Σχήμα 3-4). Η εφαρμογή πολλαπλών διαμερίσεων του πεδίου τιμών της συνάρτησης επιτρέπει την περιγραφή του αντικειμένου με διαφορετικά επίπεδα αναλυτικότητας.

Επιπρόσθετα, οι Chen et al. [61] διατυπώνουν την επέκταση της μεθοδολογίας των γράφων *Reeb* πολλαπλής αναλυτικότητας εισάγοντας ένα βήμα ψηφοθέτησης του τριγωνικού πλέγματος το οποίο ενώ βελτιώνει την ακρίβεια προσδιορισμού του γράφου αυξάνει τον συνολικό χρόνο εξαγωγής του περιγραφέα.



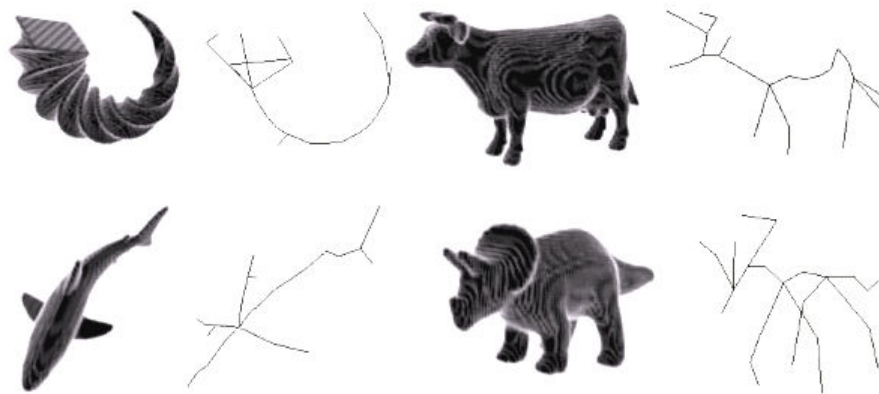
Σχήμα 3-4 Παράδειγμα γράφου Reeb.

² Ως γεωδαιτική απόσταση ορίζεται το μήκος της μικρότερης καμπύλης που ενώνει δύο απομακρυσμένα σημεία μίας επιφάνειας. Σε ένα τριγωνικό πλέγμα αυτή μπορεί να υπολογιστεί με τη μέθοδο του *συντομότερου μονοπατιού* (shortest path). Για γειτονικά σημεία, η γεωδαιτική τους απόσταση ταυτίζεται με την ευκλείδεια απόσταση.

3.2.2.3 Σκελετικοί γράφοι

Προϋπόθεση για τους περισσότερους από τους περιγραφείς της κατηγορίας αυτής είναι ο μετασχηματισμός των τριγωνικών ή πολυγωνικών πλεγμάτων που περιγράφουν ένα αντικείμενο σε ογκομετρικά στοιχεία. Το κάθε τμήμα του γράφου είναι μια μονοπαραμετρική καμπύλη η οποία υπολογίζεται πάνω στα ογκομετρικά στοιχεία εφαρμόζοντας αλγόριθμους *λέπτυνσης* (thinning). Η λέπτυνση του γράφου προκύπτει από τον υπολογισμό των ευκλείδειων αποστάσεων ανάμεσα στα ογκομετρικά στοιχεία και στα χωρικά όρια του αντικειμένου. Τα τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας σκελετικός γράφος προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγόριθμου *Ελάχιστων Γεννητορικών Δένδρων* (Minimum Spanning Algorithm). Γενικά, η μείωση της επίδρασης του αλγόριθμου λέπτυνσης στο ογκομετρικό μοντέλο αυξάνει την πυκνότητα του σκελετικού γράφου ενώ οι διαφορετικές τιμές των παραμέτρων της διαδικασίας μετασχηματισμού του αντικειμένου σε ογκομετρικά στοιχεία οδηγούν σε διαφορετικούς γράφους. Επιπρόσθετα, οι περιγραφείς αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν πάντα συσχετισμούς που αφορούν στην τοπολογία των τμημάτων καθώς και στο τρόπο συνδεσμολογίας τους.

Οι Sundar et al [62] προτείνουν μια μέθοδο σύγκρισης σκελετικών γράφων που βασίζεται στην ταύτιση των κατανομών των θέσεων των κόμβων (σημεία έναρξης και λήξης των εκάστοτε τμημάτων του σκελετικού γράφου). Ένα από τα βασικότερα προβλήματα της χρήσης των σκελετικών γραφημάτων σε εφαρμογές μερικής σχηματικής ταύτισης είναι η αναπόφευκτη ταύτιση απλών μορφολογικά αντικειμένων με τμήματα σύνθετων αντικειμένων [62]. Παρόμοιοι περιγραφείς αναφέρονται και στην εργασία των Messmer et al. [63]. Οι Iyer et al. [64] περιγράφουν μία υβριδική μέθοδο που συνδυάζει σκελετικούς γράφους με γενικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά που συναντούμε στους καθολικούς περιγραφείς ενώ οι Agathos et. al. [65] αναφέρονται σε μία μέθοδο ταύτισης αρθρωτών αντικειμένων ανεξάρτητα από τη θέση και τον προσανατολισμό τους.



Σχήμα 3-5 Ογκομετρικά μοντέλα και οι σκελετικοί τους γράφοι.

3.2.3 Άλλες τεχνικές

Στη συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνονται υβριδικές τεχνικές και περιγραφείς που για λόγους συνάφειας δεν εμπίπτουν στις προηγούμενες κατηγορίες.

Αρκετές εργασίες προτείνουν την ιδέα μείωσης των διαστάσεων του προβλήματος γεωμετρικής ταύτισης ώστε να εφαρμοσθούν μέθοδοι που έχουν ήδη αποδείξει την αποτελεσματικότητά τους σε δυσδιάστατα προβλήματα. Είναι γεγονός πως δύο αντικείμενα είναι όμοια όταν φαίνονται όμοια από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Οι Funkhouser et al. [66] προτείνουν ένα περιγραφέα που προκύπτει από ένα σύνολο εικόνων οι οποίες απεικονίζουν το αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Ο χρήστης σχεδιάζει το περίγραμμα του αντικειμένου το οποίο αναζητά από μία έως και τρεις διαφορετικές οπτικές γωνίες. Στη συνέχεια με την εφαρμογή μετρικών σύγκρισης διδιάστατων δυαδικών εικόνων επιτυγχάνουν την ταύτιση ανάμεσα στα σκίτσα του χρήστη και τις εικόνες του κάθε αντικειμένου. Οι Chaouch et al. [67] προτείνουν τη δημιουργία ενός περιγραφέα από 12 εικόνες χάρτη βάθους που απεικονίζουν το αντικείμενο όπως αυτό αποτυπώνεται στο ορθογραφικό επίπεδο προβολής των σημείων παρατήρησης με συντεταγμένες τα κέντρα των εδρών ενός δωδεκάεδρου. Στη συνέχεια, οι εικόνες κωδικοποιούνται σε ακολουθίες προκαθορισμένων χαρακτήρων. Ο κάθε χαρακτήρας αναπαριστά την κλίση της πρώτης παραγώγου της βαθμωτής συνάρτησης που περιγράφεται από τις τιμές των εικονοστοιχείων σε κάθε γραμμή και στήλη των εικόνων. Ως μέτρο ομοιότητας δύο αντικειμένων προτείνουν τον αλγόριθμο *Needleman-Wunsch* που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ολικής

στοίχισης ακολουθιών (global sequence alignment) για επίλυση προβλημάτων βιοπληροφορικής [68]. Οι Chen et al. [69] αναφέρονται στον περιγραφέα *Light field* κατά τον οποίο για κάθε αντικείμενο δημιουργούνται εικονοσειρές από εκατό θέσεις παρατήρησης του αντικειμένου κατανεμημένες σχεδόν ομοιόμορφα πάνω στην επιφάνεια μίας σφαίρας. Από κάθε εικόνα εξάγονται 2D ροπές *Zernike* καθώς και οι συντελεστές του 2D μετασχηματισμού *Fourier*. Η ταύτιση ανάμεσα σε δύο αντικείμενα πραγματοποιείται υπολογίζοντας τις ομοιότητες όλων των δυνατών συνδυασμών των εικόνων. Καθώς όμως η συγκεκριμένη διαδικασία σύγκρισης χαρακτηρίζεται ανεπαρκής για να εφαρμοστεί σε ένα πραγματικό σύστημα αναζήτησης προτείνουν μία αλγοριθμική μέθοδο άμεσης απόρριψης των ανόμοιων αντικειμένων.

Επιπρόσθετα, στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται τεχνικές ταύτισης που υπολογίζουν το βαθμό γεωμετρικής παραμόρφωσης του σχήματος ενός αντικειμένου που απαιτείται ώστε να ταυτιστεί μορφολογικά με κάποιο άλλο. Ο Raif Rustamov [70] περιγράφει μία μέθοδο κατά την οποία τα χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου χαρτογραφούνται πάνω σε ένα τυχαίο πρότυπο επιφάνειας (surface template) με χρήση της μεθόδου παρεμβολής μέσης τιμής (mean-value interpolation). Στη συνέχεια με τη χρήση αρμονικών (point-based manifold harmonics) που βασίζονται σε ιδιοσυναρτήσεις *Laplace-Beltrami* δημιουργεί ένα περιγραφέα που περιλαμβάνει μόνο το τμήμα των χαμηλών συχνοτήτων αποφεύγοντας έτσι το πιθανό θόρυβο των δεδομένων ενώ ταυτόχρονα αποτυπώνει μια ομαλοποιημένη έκδοση της γεωμετρίας του αντικειμένου. Από την άλλη, οι Novotni και Klein [71] περιγράφουν μία μέθοδο κατά την οποία προσδιορίζεται το ογκομετρικό σφάλμα (volumetric error) ανάμεσα σε δύο αντικείμενα. Παρομοίως, οι Sanchez-Cruz και Bribiesca [72] αναφέρονται στον υπολογισμό του πλήθους των βημάτων και της απόστασης που απαιτείται για τη μετακίνηση των ογκομετρικών στοιχείων ενός μοντέλου έτσι ώστε να ταυτιστεί μορφολογικά με κάποιο άλλο. Ο απαιτούμενος χρόνος για τον υπολογισμό των αποστάσεων μετακίνησης των ογκομετρικών στοιχείων του αντικειμένου χαρακτηρίζει την τεχνική ως πολύ αργή αφού απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς.

Οι Dey et al. [73] εστιάζουν σε μία μέθοδο κατάτμησης του μοντέλου ανάλογα με την τοπική καμπυλότητα που περιγράφεται από το πολυγωνικό του

πλέγμα. Στη συνέχεια επιλέγονται τυχαίες κορυφές στο κάθε τμήμα του αντικειμένου οι οποίες σχετίζονται με ειδικά βάρη που υπολογίζονται με το λόγο του όγκου του συγκεκριμένου τμήματος προς τον συνολικό όγκο του αντικειμένου. Ο βαθμός ομοιότητας ανάμεσα σε δύο αντικείμενα προκύπτει από ένα εξειδικευμένο μέτρο που αντιμετωπίζει το διαφορετικό πλήθος τμημάτων από τα οποία αποτελείται το εκάστοτε μοντέλο. Οι Tangelder και Veltkamp [74] επεκτείνουν την ίδια ιδέα εφαρμόζοντας τη δειγματοληψία μόνο σε περιοχές υψηλής εναλλαγής της καμπυλότητας ενώ εφαρμόζουν τη μέθοδο *μεταφοράς χώματος* (Earth mover's distance) [75] για την ταύτιση αντικειμένων.

Οι Min et al. [76] περιγράφουν μία υβριδική μέθοδο που συνδυάζει μηχανισμούς ανάκτησης βάσει κειμένου και βάσει περιεχομένου. Μέσα από τα πειράματα τους κατέληξαν πως τα αποτελέσματα που αποδίδει η εκάστοτε μέθοδος είναι ανεξάρτητα με αποτέλεσμα ο συνδυασμός τους με χρήση *μεθόδων σύντηξης δεδομένων* (data fusion) να βελτιώνει το επίπεδο ακρίβειας των αποτελεσμάτων ανάκτησης.

Οι Park et al. [77] προτείνουν την κωδικοποίηση δισδιάστατων σχημάτων που προκύπτουν από το τεμαχισμό του αντικείμενου σε διαφορετικά επίπεδα. Η μέθοδος τους περιλαμβάνει την κανονικοποίηση του προσανατολισμού του αντικειμένου με τη μέθοδο ανάλυσης κυρίων συνιστωσών. Στη συνέχεια το αντικείμενο τεμαχίζεται σε διάφορα επίπεδα. Σε κάθε επίπεδο προκύπτουν τυχαία σχήματα που αντικατοπτρίζουν τη μορφολογία του αντικειμένου. Ο περιγραφέας που προτείνουν περιλαμβάνει τις ευκλείδειες αποστάσεις από την αρχή των αξόνων του δυσδιάστατου καρτεσιανού συστήματος προς τα πλέον απομακρυσμένα σημεία των αντικειμένων-σχημάτων που προκύπτουν από την επαναληπτική περιστροφή μίας ευθείας ως προς κάποια γωνία.

Οι Papadakis et al. [78] προτείνουν ένα υβριδικό περιγραφέα που συνδυάζει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που αποτυπώνονται με τη εφαρμογή σφαιρικών αρμονικών σε χάρτες βάθους. Η κανονικοποίηση του προσανατολισμού των μοντέλων βασίζεται στην ανάλυση κυρίων συνιστωσών. Η εφαρμογή της κωδικοποίησης του περιγραφέα τους κατά *Huffman* οδηγεί στη συνεπτυγμένη περιγραφή της γεωμετρικής δομής ενός αντικειμένου. Το μέτρο ομοιότητας που προτείνουν χωρίζεται σε δύο τμήματα. Το μεν πρώτο αφορά στην ομοιότητα των

τρισδιάστατων μορφολογικών χαρακτηριστικών που προκύπτουν από τις σφαιρικές αρμονικές ενώ το δεύτερο από τα δισδιάστατα μορφολογικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τους χάρτες βάθους.

Οι Ruggeri et al. [79] περιγράφουν μια μέθοδο δειγματοληψίας κορυφών πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου για τις οποίες υπολογίζονται οι γεωδαιτικές τους αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές οργανωμένες σε ένα πίνακα αποτελούν τον περιγραφέα. Κάθε σειρά του πίνακα περιέχει τις τιμές ενός ιστογράμματος. Το σύνολο των ιστογραμμάτων περιγράφει το σχήμα της επιφάνειας του αντικειμένου.

Πολύ πρόσφατα, παρουσιάστηκε η ιδέα ταύτισης 3D αντικειμένων σε επίπεδο χάρτη υφής (texture map). Ακόμα και σήμερα, το κόστος της έγχρωμης τρισδιάστατης ψηφιοποίησης είναι υψηλό ενώ οι τεχνικές αναπαράστασης της χρωματικής πληροφορίας ποικίλουν. Εκτός από τη κλασική μέθοδο χαρτογράφησης δισδιάστατων ψηφιογραφικών εικόνων πάνω σε πολυγωνικές επιφάνειες (UV space texture mapping) τα σύγχρονα συστήματα ψηφιοποίησης ταυτίζουν το εκάστοτε σημείο μέτρησης με τη χρωματική τιμή έτσι ώστε να επιτυγχάνεται απόλυτη ταύτιση ανάμεσα στη γεωμετρία και στο χρώμα. Τα έγχρωμα αυτά νέφη σημείων εκμεταλλεύονται οι Kanezaki et al. [80] όπου προτείνουν την ιδέα της μερικής χρωματικής ταύτισης σε ένα έγχρωμο νέφος σημείων.

3.3 Τεχνολογίες ταύτισης μορφολογικών χαρακτηριστικών αρχαιολογικών ευρημάτων

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγικό κεφάλαιο οι τεχνολογίες των 3D γραφικών υπολογιστών και της 3D ψηφιοποίησης αποτελούν σήμερα κοινή πρακτική στο χώρο της τεκμηρίωσης και διάδοσης της πολιτιστικής κληρονομιάς. Η ανάγκη για διαχείριση και δεικτοδότηση των συγκεκριμένων δεδομένων καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη μεθόδων που θα ανταπεξέλθουν στα υψηλά επίπεδα μορφολογικής ταύτισης που απαιτούνται. Η εφαρμογή της τεχνολογίας ανάκτησης βάσει περιεχομένου αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για τη βελτίωση των μεθοδολογιών έρευνας και μελέτης του πολιτιστικού θησαυρού. Η αρχαιολογία είναι μία επιστήμη που στηρίζεται στην εξαγωγή συμπερασμάτων που προκύπτουν από τον εντοπισμό μορφολογικών ομοιοτήτων ανάμεσα σε ευρήματα. Η εφαρμογή της ανάκτησης

βάσει περιεχομένου προσπαθεί να δώσει αυτοματοποιημένες λύσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Η τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι η τεχνολογία που επιτρέπει αρχαιολόγους να μελετούν ταυτόχρονα ένα εύρημα χρησιμοποιώντας ένα υψηλής ακρίβειας ψηφιακό αντίγραφο. Επιπρόσθετα, οι σύγχρονοι μηχανισμοί πρόσβασης στη πληροφορία (π.χ. Διαδίκτυο) οδηγούν στην αποδοτικότερη διάδοση των αρχαιολογικών δεδομένων και προϊόντων έρευνας.

Το μεγαλύτερο τμήμα των εργασιών που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία εστιάζουν στο χώρο της αρχαίας κεραμικής αφού αποτελεί μία από τις πλέον σύνθετες κατηγορίες αρχαίων ευρημάτων και προσφέρει μεγάλο όγκο πληροφορίας σχετικά με την κοινωνία, τον ιδιωτικό τομέα και τη γενικότερη μελέτη των παρελθόντων πολιτισμών. Γενικά, η θεματολογία που συναντάτε στη βιβλιογραφία αφορά στις προσπάθειες διευκόλυνσης διαδικασιών όπως είναι η ταύτιση οστράκων που ανήκουν σε κάποιο αγγείο [81], η τρισδιάστατη ανακατασκευή αγγείων με βάση δυσδιάστατα προφίλ [82]-[85], η ανάλυση καμπυλότητας αγγείων και ο υπολογισμός απόκλισης γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους [86]-[87], η ανακατασκευή τρισδιάστατων αγγείων από τρισδιάστατα ψηφιοποιημένα όστρακα [84], [88]-[94] καθώς και η δημιουργία δυσδιάστατων προφίλ από όστρακα [95].

Η εφαρμογή της ιδέας ταύτισης 3D ψηφιακών αντιγράφων αγγείων μέσω μιας Διαδικτυακής μηχανής αναζήτησης που θα λειτουργήσει ως εργαλείο έρευνας αρχαιολόγων και μελετητών κεραμικής εξαρτάται απόλυτα από τη διαθεσιμότητα των συγκεκριμένων δεδομένων. Το πλήθος των εργασιών που σχετίζονται με το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι μικρό. Οι Horr και Brunnett [96] εστίασαν το ερευνητικό τους ενδιαφέρον στην ανάπτυξη μεθόδων ταύτισης 3D αγγείων. Η μεθοδολογία τους βασίζεται στο διαχωρισμό των τμημάτων του αγγείου και της κωδικοποίησής τους σε ένα ιστόγραμμα. Στο ιστόγραμμα αυτό κωδικοποιούν εκτός από το ύψος και τις διαμέτρους του αγγείου σε διαφορετικά επίπεδα και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των προσαρτημάτων (λαβές, πόδια, κτλ). Οι Gilboa et al. [97] προτείνουν ένα τρόπο τυπολογικής ανάλυσης των αγγείων βασιζόμενοι σε δισδιάστατα προφίλ. Οι Shiao et al. [98] εστιάζουν στην ανάπτυξη μεθοδολογιών τρισδιάστατης απεικόνισης ψηφιακών αντιγράφων αγγείων. Παρουσίασαν ένα

τρισεπίστας γραφικό περιβάλλον μέσα στο οποίο ο επισκέπτης μπορεί να δει οργανωμένα 3D αντίγραφα αγγείων με τη δυνατότητα να εστιάσει σε κάποιο από αυτά χωρίς όμως να χάνει επαφή από τον υπόλοιπο τρισεπίστας χώρο (*focus plus context*). Οι Raquet et al. [99] υλοποίησαν ένα υβριδικό σύστημα ανάκτησης βάσει περιεχομένου για τον χώρο του πολιτισμού που επιτρέπει ταυτόχρονα την αναζήτηση δισεπίστας (φωτογραφίες, προφίλ αγγείων, πίνακες ζωγραφικής, κλπ) και τρισεπίστας ψηφιοποιημένων αντιγράφων ευρημάτων που βρίσκονται στο μουσείο του Λούβρου.

Οι υψηλές απαιτήσεις σε επίπεδο διακριτικής ικανότητας του συγκεκριμένου χώρου οδήγησαν τους Gorisse et al. [100] στην ανάπτυξη ενός περιγραφέα που αναλαμβάνει τον διαχωρισμό συγκεκριμένων τύπων αγαλματιδίων (Μητρικές θεότητες και αγαλματίδια της Αφροδίτης). Ο περιγραφέας που ανέπτυξαν εκμεταλλεύεται τον τρισεπίστας μετασχηματισμού *Hough* και προσπαθεί να αναγνωρίσει την ύπαρξη ενός ή δύο παιδιών στην αγκαλιά των μητρικών θεοτήτων καθώς και αν κάποιο από τα παιδιά κρατά ή όχι το χέρι της θεότητας.

Οι Cao et al. [101] εστιάζουν στην ταύτιση οστράκων από αγγεία αλλά και την τρισεπίστας ανακατασκευή τους εκμεταλλευόμενοι την αξονική συμμετρία που φέρουν τα αγγεία. Οι Dezhilov et al. [102][103] ανακτούν παρόμοια αγγεία που δεν φέρουν προσαρτήματα (λαβές ή πόδια) περιγράφοντας το σώμα του αγγείου με καμπύλες και επιφάνειες *Non-uniform rational basis splines* (NURBS). Ταυτόχρονα, προτείνουν και τη χρήση ενός σχήματος XML για την οργάνωση των μεταδεδομένων που συνοδεύουν το εκάστοτε ψηφιακό αντίγραφο αγγείου. Οι Mara et al. [104] καταφέρνουν να αναγνωρίσουν τον προσανατολισμό ενός οστράκου από τις διευθύνσεις των μοναδιαίων διανυσμάτων που φέρουν τα τρίγωνα του ψηφιακού αντίγραφου ενώ προτείνουν και αυτοί τη χρήση ενός XML σχήματος για την οργάνωση των συνοδευτικών μεταδεδομένων.

3.4 Ερευνητικές κατευθύνσεις

Οι βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις στο χώρο της ανάκτησης βάσει περιεχομένου προσδιορίζονται προς την:

- i. Ανάπτυξη μεθόδων συγκριτικής αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας ενός περιγραφέα (benchmarks).
- ii. Ανάπτυξη περιγραφέων με αμεταβλητότητα σε συσχετισμένους μετασχηματισμούς (προσανατολισμός, περιστροφή, κλιμάκωση, μετατόπιση).
- iii. Εξέλιξη μεθόδων μερικής ταύτισης γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- iv. Βελτίωση των μεθόδων δεικτοδότησης.
- v. Δημιουργία υβριδικών περιγραφέων με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων ανάκτησης.
- vi. Εισαγωγή μεθόδων εκπαίδευσης της μηχανής αναζήτησης.
- vii. Βελτίωση της αρχικής επερώτησης με *τεχνικές σχετικής ανατροφοδότησης* (relevance feedback) και *συγχώνευσης γνώσης* (data fusion).

Οι Tangelder et al. [10] αναφέρουν πως η μελέτη και η έρευνα θα πρέπει να προχωρήσει προς την ανάπτυξη μεθοδολογιών που βασίζονται σε τοπικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας των αντικειμένων αλλά και προς μεθοδολογίες που κωδικοποιούν τη μορφή του αντικειμένου σε ιστογράμματα. Οι Liu et al. [105] προτείνουν ένα σύστημα σχετικής ανατροφοδότησης όπου ο χρήστης εκτός από τις υποδείξεις ως προς τις λανθασμένες απαντήσεις του συστήματος μπορεί και χαρακτηρίζει τα τμήματα του αντικειμένου τα οποία δεν ταυτίζονται γεωμετρικά.

Οι υβριδικές μέθοδοι μπορεί να οδηγήσουν στη βελτίωση της απόδοσης μίας μηχανής ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Γενικά, οι περιγραφείς που βασίζονται στα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αντικειμένου χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα υπολογισμού τους και την ευρωστία τους. Από την άλλη οι τεχνικές γραφημάτων αξιοποιούν καλύτερα κάποιους ισχυρότερους αλγορίθμους μορφολογικής ταύτισης. Ο συσχετισμός της τοπολογίας των μορφολογικών χαρακτηριστικών σε συνδυασμό με τα ίδια τα χαρακτηριστικά αλλά και τη χρωματική πληροφορία (texture map data) ενός αντικειμένου αποτελούν ένα πρόσφορο έδαφος για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη νέων μεθόδων

μορφολογικής ταύτισης 3Δ αντικειμένων. Οι Akbar et al. [106] προτείνουν μια υβριδική μέθοδο που συνδυάζει περιγραφείς όπως είναι οι σφαιρικές αρμονικές, ο 2Δ μετασχηματισμός *Fourier* και οι 2Δ ροπές *Zernike* σε εικόνες χάρτη βάθους. Ταυτόχρονα προτείνουν και την εφαρμογή μίας μεθόδου ανάδρασης κατά την οποία ο χρήστης επιλέγει τα σχετικά αντικείμενα από μία απάντηση του συστήματος ώστε να υποδείξει στο σύστημα ποιά είναι τα αντικείμενα του ενδιαφέροντος του και στη συνέχεια το σύστημα να επαναπροσδιορίσει την απάντηση του.

Ολοκληρώνοντας, η ανάκτηση βάσει περιεχομένου είναι ένα ενεργό πεδίο έρευνας και αυτό αποδεικνύεται εκτός από το συνεχές αυξανόμενο πλήθος εργασιών που εστιάζουν σε πολύ ειδικές εφαρμογές και στην ύπαρξη ενός ετήσιου διαγωνισμού για την ανάδειξη του βέλτιστου περιγραφέα ανάκτησης τρισδιάστατων δεδομένων.

Κεφάλαιο 4

Πρότυπη Βαθμονομημένη Βάση Δεδομένων 3Δ Αγγείων

4.1 Εισαγωγή

Η αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων ανάκτησης βάσει περιεχομένου προϋποθέτει την ύπαρξη βαθμονομημένων βάσεων δεδομένων, γνωστών και ως *βάσεις δεδομένης αλήθειας* (ground truth databases). Η βαθμονόμηση τους περιλαμβάνει τον διαχωρισμό των αντικειμένων σε κατηγορίες. Ο διαχωρισμός αυτός βοηθά στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού των συντελεστών απόδοσης (π.χ. καμπύλες ακρίβειας-ανάκτησης, μονόμετρα). Πολλές φορές, η διαδικασία βαθμονόμησης των αντικειμένων υλοποιείται μέσα από την ανάπτυξη συνοδευτικών μεταδεδομένων. Τα μεταδεδομένα αυτά περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ταξινόμηση και τον διαχωρισμό των αντικειμένων σε ομάδες. Ως εκ τούτου, η ταξινόμηση-τεκμηρίωση μπορεί να σχετίζεται με κάποια ιδιότητα του αντικειμένου, με το σχήμα του ή απλά με την αντιστοίχιση του σε κάποια γενική κατηγορία. Ο *μηχανισμός αποτίμησης της απόδοσης* αναλαμβάνει να προσπελάσει τα μεταδομένα των αντικειμένων που έχει επιστρέψει το σύστημα μετά από την υποβολή μίας επερώτησης. Μέσα από αυτά θα καταφέρει αυτόματα να αναγνωρίσει ποιά ανήκουν στην ίδια κατηγορία με το *υπό αναζήτηση* αντικείμενο και ποιά όχι. Το πλήθος των αντικειμένων που ανήκουν στην ίδια κατηγορία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βαθμού διακριτικής ικανότητας ενός περιγραφέα.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις διαθέσιμες βάσεις δεδομένων 3D αντικειμένων και στην ανάγκη δημιουργίας μίας πρότυπης βάσης δεδομένων με αγγεία. Περιγράφονται η μεθοδολογία αναζήτησης και συγκέντρωσης τρισδιάστατων αγγείων από άλλες ερευνητικές ομάδες, η ανάπτυξη μιας γεννήτριας τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων και τέλος παρουσιάζεται η μεθοδολογία βαθμονόμησης του περιεχομένου της πρότυπης βάσης δεδομένων.

4.2 Βαθμονομημένες βάσεις δεδομένων 3D αντικειμένων

Καθώς ο ερευνητικός χώρος της ανάκτησης δεδομένων είναι ιδιαίτερα ενεργός και δη αυτός την ανάκτησης 3D αντικειμένων έχουν παρουσιαστεί αρκετές βαθμονομημένες βάσεις δεδομένων. Το κίνητρο για τη δημιουργία βαθμονομημένων βάσεων δεδομένων ελεύθερης προσπέλασης προκύπτει από την ανάγκη *συγκριτικής αξιολόγησης* (benchmarking) και υπολογισμού της διακριτικής ικανότητας των διαφόρων τεχνικών μορφολογικής ταύτισης που παρουσιάζονται ή θα παρουσιαστούν στη διεθνή βιβλιογραφία.

Το περιεχόμενο των συγκεκριμένων βάσεων δεδομένων μπορεί να περιλαμβάνει μία ή και περισσότερες θεματικές περιοχές. Οι περιοχές αυτές συνήθως περιλαμβάνουν αντικείμενα όπως αυτοκίνητα, μοτοσικλέτες, συμβατικά και μη αεροπλάνα, έπιπλα, φυτά, έντομα, φρούτα, ζώα, ανθρωποειδή, φανταστικές μορφές, μηχανικά μέρη (CAD) κ.α.. Τα περισσότερα από τα μοντέλα είναι κατασκευασμένα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (computer generated) και διατίθενται ελεύθερα στο Διαδίκτυο. Από την άλλη, το ποσοστό των ελεύθερα διαθέσιμων μέσω Διαδικτύου ψηφιακών αντίγραφων πραγματικών αντικειμένων είναι σαφώς μικρότερο. Τις περισσότερες φορές τα ψηφιοποιημένα αντικείμενα διατίθενται ως ημιτελή ή ως κατακερματισμένες (decimated) εκδόσεις των αρχικά υψηλής αναλυτικότητας μοντέλων. Κάποιοι από τους λόγους που οδηγούν στον περιορισμό των συγκεκριμένων δεδομένων είναι η ύπαρξη πνευματικών δικαιωμάτων, το κόστος ψηφιοποίησης σε επίπεδο ανθρωποωρών ή ακόμα και η ανάγκη περιορισμού του όγκου δεδομένων. Επιπρόσθετα, η πλέον συνήθης δομή δεδομένων που συναντάται στα δεδομένα των βάσεων δεδομένων είναι τα ακανόνιστα τριγωνικά πλέγματα. Τα αντικείμενα συνήθως συνοδεύονται από πληροφορία υψής σε μορφή *χρωματισμού-κορυφών* (vertex-painted) και σε μορφή

ψηφιογραφικών εικόνων (UV space texture maps). Σπάνια συναντώνται αντικείμενα όπου η τρισδιάστατη γεωμετρία τους περιγράφεται με ογκομετρικά στοιχεία. Το πλήθος των αντικειμένων που περιέχουν συνήθως οι βάσεις δεδομένων ποικίλει. Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει μερικές από τις πλέον γνωστές βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση μεθόδων ανάκτησης 3D αντικειμένων αλλά και τους ελεύθερα προσβάσιμους Διαδικτυακούς χώρους εναπόθεσης 3D αντικειμένων.

Όνομασία Βάσης Δεδομένων	Θεματολογία	Πλήθος Μοντέλων	Τύποι Δεδομένων		Διαδικτυακή Διεύθυνση
			Τριγωνικά Πλέγματα	Ογκομετρικά στοιχεία	
Princeton Shape Benchmark	Διάφορα	1,814	✓		http://shape.cs.princeton.edu/benchmark
3D Archive	- -	582	✓		http://www.the3darchive.com
Inria Gamma Group	- -	82,000	✓		http://www-c.inria.fr/gamma
McGill 3D Shape Benchmark	- -	505	✓	✓	http://www.cim.mcgill.ca/~shape/benchmark
NTU 3D Database	- -	10,911	✓		http://3d.csie.ntu.edu.tw/~dynamic/database/index.html
Signal Analysis & Machine Perception Lab	- -	230	✓		http://sampl.ece.ohio-state.edu/data/3DDB/Models/index.htm
UK VR – SIG 3D Archive	- -	435	✓		http://www.martinreddy.net/ukvrsig
RC CAD Collection	Αεροπλάνα	700	✓		http://www.rccad.com/Gallery.htm
Avatara	Διάφορα	152	✓		http://www.avatara.com/avatars
Design Repository	- -	663	✓		http://www.designrepository.org
Shape Lab Database	Μηχανολογικά αντικείμενα	478	✓		http://shapelab.ecn.purdue.edu/Benchmark.aspx
Utrecht University 3D Shape Search Engine	Διάφορα	684	✓		http://www.cs.uu.nl/centers/give/multimedia/3Drecog
ITI 3D Models Database	- -	603	✓		http://3d-search.iti.gr/3DSearch
Télécom Paris Image-based Digitized 3D Models Archive	Πολιτιστικά αντικείμενα	68	✓		http://www.tsi.enst.fr/3dmodels
3DVIA Models Collection	Διάφορα	1,559	✓		http://www.3dvia.com/3dmodels

Πίνακας 4-1 Βαθμονομημένες βάσεις δεδομένων τρισδιάστατων αντικειμένων για υλοποιήσεις πειραμάτων αποτίμησης απόδοσης μεθόδων ανάκτησης βάσει περιεχομένου.

Στις βάσεις δεδομένων που παρουσιάζονται στον πίνακα 4-1, ο αριθμός των αντικειμένων που προέρχονται από το χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι περιορισμένος. Οι βάσεις δεδομένων οι οποίες περιέχουν αντικείμενα της συγκεκριμένης θεματικής κατηγορίας είναι αυτές των *Inria Gamma Group*, *Télécom Paris* και *3DVIA Models Collection*.

4.3 Συλλέγοντας 3D μοντέλα αγγείων

Η ανάπτυξη μίας βάσης δεδομένων στα πλαίσια της διατριβής, με θεματολογία σχετική με την κεραμική και γενικότερα τα αγγεία, ήταν απαραίτητη. Μία τέτοια βάση δεδομένων αποτελεί την πλατφόρμα υλοποίησης πειραμάτων για την αξιολόγηση της απόδοσης των προτεινόμενων μεθόδων ανάκτησης. Τα τρισδιάστατα δεδομένα τα οποία συγκεντρώθηκαν για την ανάπτυξη της πρότυπης βαθμονομημένης βάσης δεδομένων τρισδιάστατων αγγείων προήλθαν από:

- i. Ψηφιοποίηση αντιγράφων αγγείων χρησιμοποιώντας τον εξοπλισμό του κέντρου ψηφιοποίησης πολιτιστικού αποθέματος *Κλεψύδρα*³ που ανήκει στο Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας του Ερευνητικού Κέντρου 'Αθηνά' εφαρμόζοντας τεχνολογίες *τριγωνοποίησης με λέιζερ* και *σχήμα από σιλουέτα*.
- ii. Ψηφιοποιημένα και μοντελοποιημένα με χρήση Η/Υ αγγεία ελεύθερα διαθέσιμα στο διαδίκτυο.
- iii. Ψηφιοποιημένα και μοντελοποιημένα αγγεία με χρήση Η/Υ τα οποία παραχωρήθηκαν για ερευνητικούς σκοπούς από άλλες ερευνητικές ομάδες.
- iv. Μοντελοποιημένα αγγεία βάσει ψηφιακών φωτογραφιών από πραγματικά αγγεία που φιλοξενούνται σε μουσεία. Οι ίδιες φωτογραφίες χρησιμοποιήθηκαν ως χάρτες πληροφορίας υφής για τα συγκεκριμένα μοντέλα.
- v. Ανάπτυξη εφαρμογής με την ονομασία *QP* που επιτρέπει την ημι-αυτοματοποιημένη κατασκευή τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων.

Στον πίνακα 4-2 παρουσιάζονται οι διαδικτυακές πηγές από όπου συγκεντρώθηκαν κάποια από τα 3D μοντέλα. Πολλά από τα δεδομένα που περιλαμβάνει η

³ Κλεψύδρα – Κέντρο Ψηφιοποίησης Πολιτιστικού Αποθέματος –<http://clepsydra.ipet.gr/>

συγκεκριμένη βάση δεδομένων καλύπτονται από πνευματικά δικαιώματα καθώς ανήκουν σε άλλες ερευνητικές ομάδες ή μουσεία και ως εκ τούτου η ελεύθερη διάθεση της βάσης δεδομένων μέσω Διαδικτύου ακόμα και για ερευνητικούς σκοπούς παραμένει αδύνατη.

Όνομασία Πηγής Δεδομένων	Διαδικτυακή Διεύθυνση
Clepsydra – Digitisation Centre	http://clepsydra.ipet.gr
Cultural and Educational Technology Institute	http://www.ceti.gr
Virtual Hampson Museum	http://hampsonmuseum.cast.uark.edu
3D Vase Museum (Prof. Robert Jacob)	http://www.cs.tufts.edu
Archaeology Saxony's	http://www.archsax.sachsen.de
SweetHome3D Free 3D models	http://www.sweethome3d.eu
AIM@SHAPE	http://www.aimatshape.net/resources
Image-based 3D Models Archive, Télécom Paris	http://www.tsi.enst.fr/3dmodels
NTU 3D Meshes Research Repository	http://www-c.inria.fr/gamma/download
INT3D Interactive Scene	http://int3d.com
Google 3D warehouse	http://sketchup.google.com/3dwarehouse
FileForest	http://fileforst.narod.ru
Artist 3D	http://artist-3d.com
Archive3D	http://archive3d.net
Blender Model Repository	http://e2-productions.com/repository
Princeton Shape Benchmark 3D Repository	http://shape.cs.princeton.edu/benchmark
3D Millennium	http://www.m3corp.com

Πίνακας 4-2 Διαδικτυακές πηγές τρισδιάστατων αγγείων.

4.4 QP – Γεννήτρια τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων

Στη παρούσα παράγραφο γίνεται ανάλυση του τρόπου λειτουργίας ενός λογισμικού με την ονομασία *QP*, το οποίο διαθέτει διττό τρόπο λειτουργίας. Το *QP* επιτρέπει σε χρήστες, που δεν διαθέτουν γνώσεις τρισδιάστατης μοντελοποίησης, να κατασκευάσουν τρισδιάστατα αγγεία μέσα από ένα απλό περιβάλλον διεπαφής. Από την άλλη, το λογισμικό λειτουργεί ως μια ημιαυτόματη γεννήτρια τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πεδίο δοκιμών απόδοσης νέων τεχνικών ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Τα τυχαία αγγεία προκύπτουν δυναμικά εφαρμόζοντας μεθόδους ελεγχόμενης παραμετρικά τυχαιοποίησης ενός πρότυπου σχήματος - προφίλ αγγείου.

4.4.1 Γενικά χαρακτηριστικά εφαρμογής

Το *QP* είναι μία αυτόνομη εφαρμογή που αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού *Borland Delphi 2005* χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη 3D γραφικών *OpenGL*. Η τρέχουσα έκδοση της εφαρμογής είναι συμβατή με το

λειτουργικό σύστημα *Microsoft Windows XP*. Η εφαρμογή αποτελείται από τέσσερις λογικές οντότητες (Σχήμα 4-1). Αυτές είναι οι εξής:

- i. Η οντότητα *3D γραφικών* που περιλαμβάνει τις υλοποιήσεις των αλγορίθμων κατασκευής των τρισδιάστατων μοντέλων.
- ii. Η οντότητα *προφίλ ενός αγγείου* που περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες δημιουργίας και επεξεργασίας του προφίλ ενός αγγείου.
- iii. Η οντότητα του *διαδραστικού γραφικού περιβάλλοντος διεπαφής*.
- iv. Η οντότητα *διαχείρισης αρχείων και αποθήκευσης* που είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία και αποθήκευση των 3D μοντέλων και μεταδεδομένων που συμφωνούν με το πρότυπο MPEG-7.

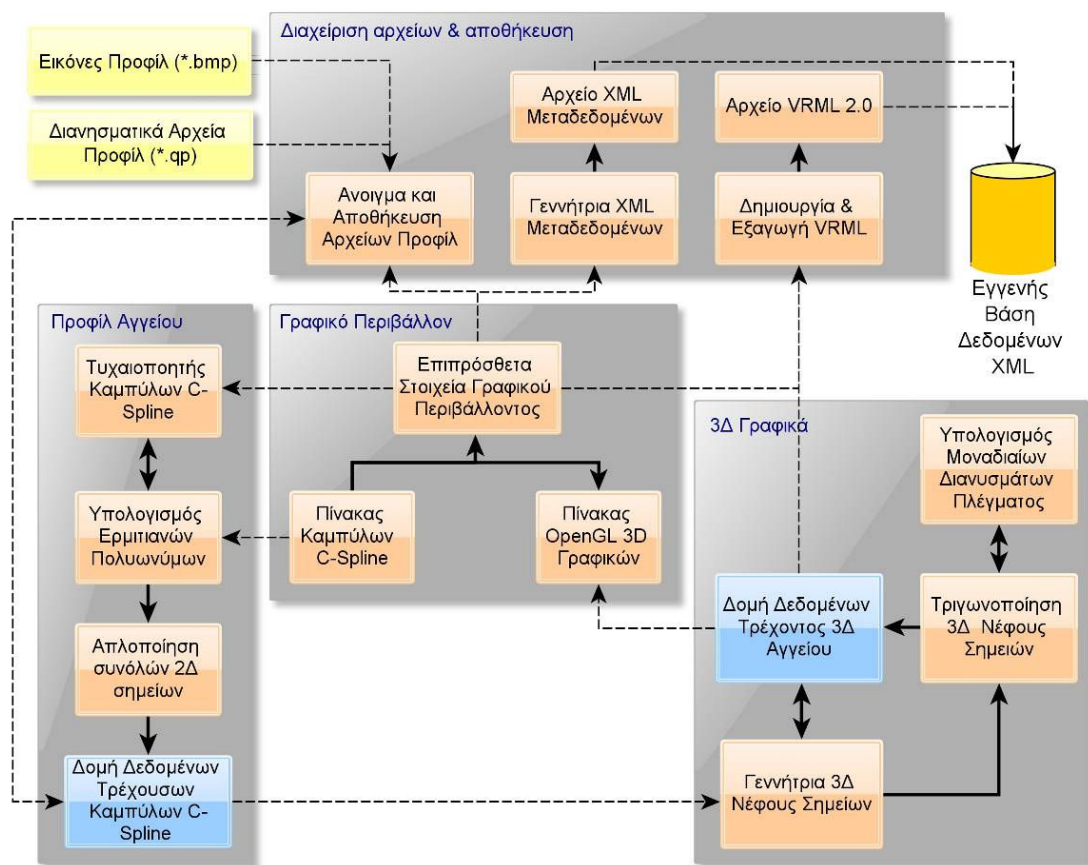
Στο σχήμα 4-1 παρουσιάζονται επίσης με συνεχείς και διακεκομμένες γραμμές οι κατευθύνσεις ροής των δεδομένων ανάμεσα στις οντότητες του λογισμικού. Οι συνεχείς γραμμές καταδεικνύουν την πρόσβαση των συναρτήσεων της κάθε οντότητας στις εσωτερικές δομές δεδομένων. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τη μεταφορά δεδομένων ανάμεσα σε συναρτήσεις που ανήκουν σε διαφορετικές οντότητες. Στο σχήμα 4-2 αναπαρίστανται γραφικά οι διαδικασίες δημιουργίας των τρισδιάστατων αγγείων. Το *QP* μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας *εικονικός τροχός κατασκευής αγγείων* ή ως μία *γεννήτρια τυχαίων αγγείων*. Και οι δύο καταστάσεις λειτουργίας προϋποθέτουν μια κοινή ακολουθία βημάτων που πρέπει να εκτελέσει ο χρήστης⁴. Αυτά περιγράφονται παρακάτω. Αρχικά, ο χρήστης μπορεί:

- i. Να φορτώσει στο λογισμικό μια ψηφιογραφική εικόνα που παρουσιάζει το προφίλ ενός αγγείου. Η *εικόνα-οδηγός* θα χρησιμοποιηθεί ως *σχέδιο αναφοράς* και θα προσεγγισθεί διανυσματικά από το χρήστη με τη βοήθεια παραμετρικών καμπύλων.
- ii. Να σχεδιάσει ελεύθερα ένα νέο προφίλ αγγείου χωρίς να βασίζεται σε κάποια εικόνα-οδηγό.

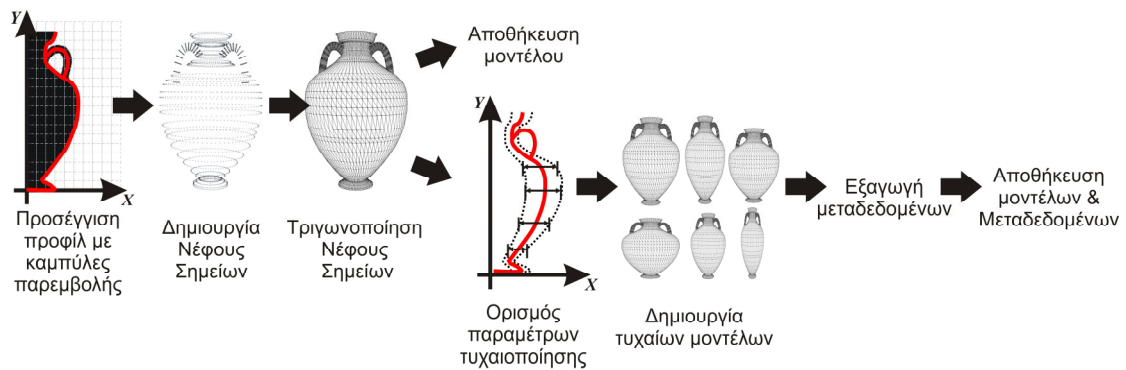
⁴ Στην περίπτωση λειτουργίας του *QP* ως *γεννήτρια τυχαίων αγγείων* ο χρήστης εκτελεί επιπρόσθετα την ακολουθία βημάτων που περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 4.4.3.

- iii. Να φορτώσει το διανυσματικό προφίλ ενός αγγείου που είχε σχεδιάσει σε προηγούμενους χρόνους με στόχο την περαιτέρω επεξεργασία του.

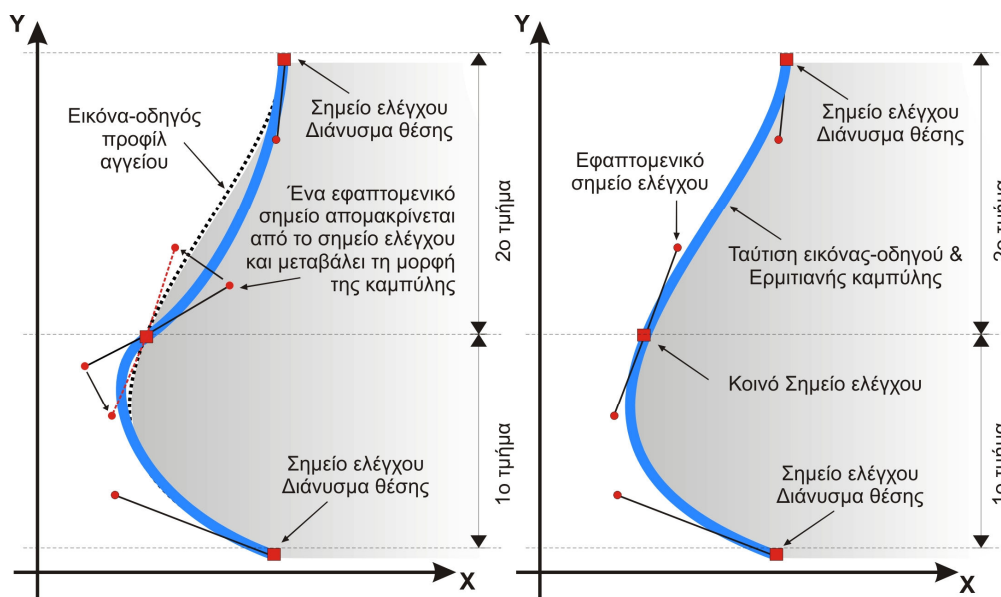
Στις περιπτώσεις (i) και (ii) ορίζονται οι συντεταγμένες μίας ακολουθίας σημείων ελέγχου πάνω σε ένα δισδιάστατο καρτεσιανό επίπεδο από τα οποία και θα περάσουν οι καμπύλες που περιγράφουν το προφίλ του αγγείου. Στο ίδιο επίπεδο προβάλλεται στο παρασκήνιο η ψηφιογραφική εικόνα που φέρει το προφίλ του αγγείου που θα προσεγγισθεί (Σχήμα 4-3). Η χωρική μετατόπιση των σημείων ελέγχου επηρεάζει τη μορφή των παραμετρικών καμπύλων επιτρέποντας την προσέγγιση του σχήματος οποιοδήποτε προφίλ (Σχήμα 4-3). Η τρέχουσα έκδοση του *QR* δεν διαθέτει κάποιο μέτρο εκτίμησης της ακρίβειας προσέγγισης της εικόνας-οδηγός με αποτέλεσμα αυτή να βασίζεται εξολοκλήρου στην ανθρώπινη κρίση.



Σχήμα 4-1 Αρχιτεκτονική εφαρμογής και διάγραμμα ροής δεδομένων.



Σχήμα 4-2 Διαδικασίες δημιουργίας τρισδιάστατων αγγείων.



Σχήμα 4-3 Προσέγγιση του ψηφιογραφικού προφίλ μετατοπίζοντας τα σημεία ελέγχου της αλυσίδας πολυωνύμων.

Σε περιπτώσεις όπου το αγγείο φέρει λαβές τότε μια δεύτερη ακολουθία καμπύλων χρησιμοποιείτε για την προσέγγιση τους. Η τρέχουσα έκδοση του λογισμικού υποστηρίζει τη μοντελοποίηση κατακόρυφων λαβών⁵. Ο μέγιστος αριθμός λαβών που μπορεί να φέρει ένα αγγείο είναι δύο. Οι δύο αυτές λαβές είναι υποχρεωτικά συμμετρικές και αντιθετικές. Επίσης, το QP υποστηρίζει συγκεκριμένες διατομές λαβών (κυκλική, ελλειπτική και κοίλη) τα χαρακτηριστικά των οποίων μπορούν να τροποποιηθούν. Η κατασκευή της επιφάνειας του αγγείου είναι μία αυτοματοποιημένη διαδικασία η οποία όμως επιδέχεται παραμετροποίηση ως προς

⁵ Τύπος λαβών που εξελίσσεται χωρικά παράλληλα με τον άξονα συμμετρίας του αγγείου.

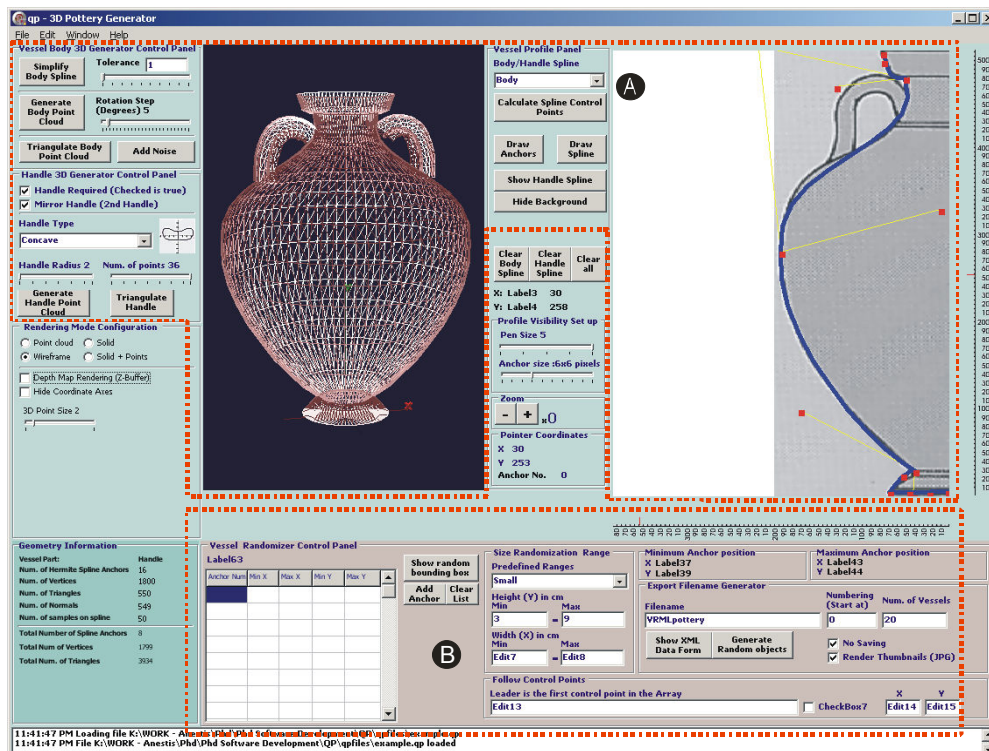
την αναλυτικότητα του παραγόμενου τριγωνικού πλέγματος. Επιπλέον, οι αλλαγές που επιδέχονται τα σημεία ελέγχου των καμπυλών αντικατοπτρίζονται άμεσα στο τρισδιάστατο τριγωνικό πλέγμα λόγω των μικρών χρόνων που απαιτούνται για την εκτέλεση των αλγορίθμων κατασκευής του.

Τα 3D μοντέλα που προκύπτουν συμφωνούν με το πρότυπο *VRML 2.0* και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλες εφαρμογές ανάπτυξης 3D γραφικών (Σχήμα 4-4). Το κάθε μοντέλο συνοδεύει ένα αρχείο μεταδεδομένων σύμφωνα με το πρότυπο *MPEG-7*. Τα μεταδεδομένα αυτά περιγράφουν χαρακτηριστικά του μοντέλου όπως το πλήθος των κορυφών και των τριγώνων του, την ημερομηνία κατασκευής του, γενικά σχόλια του χρήστη, κ.α. Επίσης περιλαμβάνουν τον περιγραφέα *3D Shape Spectrum* του προτύπου *MPEG-7*. Ο συγκεκριμένος περιγραφέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως βάση για την αποτίμηση απόδοσης νέων μεθόδων ανάκτησης. Επιπλέον για κάθε αγγείο που προκύπτει, το λογισμικό αποθηκεύει μια ψηφιογραφική εικόνα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μικρογραφία (rendered thumbnail) σε μια Διαδικτυακή μηχανή αναζήτησης.

Ένα δείγμα από το γραφικό περιβάλλον διεπαφής της εφαρμογής κατά τη διαδικασία δημιουργίας ενός Παναθηναϊκού Αμφορέα παρουσιάζεται στο σχήμα 4-5. Το περιβάλλον είναι οργανωμένο σε δύο τμήματα (*A* και *B*). Το τμήμα *A* περιλαμβάνει την περιοχή επεξεργασίας του προφίλ καθώς και το χώρο προβολής του τρισδιάστατου αγγείου το οποίο παρέχει όλους τους απαραίτητους, για την επισκόπηση του τρισδιάστατου μοντέλου, συσχετισμένους μετασχηματισμούς (προσανατολισμός, μετατόπιση και κλιμάκωση). Από την άλλη, η περιοχή *B* περιλαμβάνει τον πίνακα ελέγχου της γεννήτριας τυχαίων αγγείων. Όταν το λογισμικό λειτουργεί σε κατάσταση *εικονικού τροχού κατασκευής αγγείων* το *B* τμήμα του περιβάλλοντος δεν χρησιμοποιείται. Ως εκ τούτου η μικρή πολυπλοκότητα του τμήματος *A* σε συνδυασμό με την ελάχιστη *προαπαιτούμενη γνώση χειρισμού του λογισμικού* (Application Usage Knowledge Overhead) οδηγούν σε μια απλοϊκή σε επίπεδο χειρισμού λύση τρισδιάστατης μοντελοποίησης αγγείων.



Σχήμα 4-4 Τρισδιάστατα αγγεία κατασκευασμένα με το QP. Φωτορεαλιστική απόδοση με χρήση του λογισμικού ανοικτού κώδικα Blender⁶.



Σχήμα 4-5 Περιβάλλον διεπαφής της εφαρμογής μοντελοποίησης 3D αγγείων QP.

⁶ Blender – <http://www.blender.org>

4.4.2 Ανάλυση μεθόδου κατασκευής 3Δ αγγείων

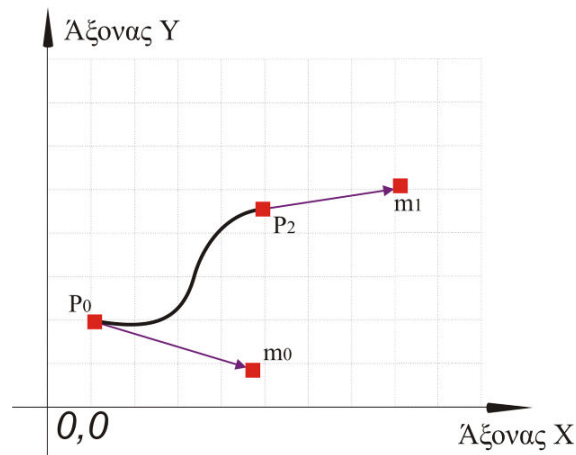
Σύμφωνα με τον Staudek [107], η δομή ενός αγγείου δύναται να παραμετροποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά του. Αυτά είναι η αξονική συμμετρία του βασικού σώματος καθώς και η σωληνοειδής μορφή που διαγράφουν οι λαβές του. Η τρισδιάστατη δομή του βασικού σώματος ενός αγγείου μπορεί να δημιουργηθεί με την περιστροφή μίας ακολουθίας σημείων (γενέτειρα) γύρω από κάποιον άξονα συμμετρίας. Στο QP , η προσέγγιση του προφίλ ενός αγγείου βασίζεται στις κυβικές παραμετρικές Ερμιτιανές καμπύλες παρεμβολής γνωστές και ως *Cubic Hermite splines* ή συντομογραφικά *csplines*. Το ψηφιογραφικό προφίλ ενός αγγείου προσεγγίζεται διανυσματικά από μία ακολουθία καμπύλων τύπου *cspline*. Από την περιστροφή των καμπυλών στον τρισδιάστατο χώρο προκύπτει ένα νέφος σημείων που αποτελεί τη 3Δ δομή του βασικού σώματος του αγγείου. Ακολούθως, οι κορυφές του νέφους οργανώνονται σε τριάδες δημιουργώντας το τριγωνικό πλέγμα που περιγράφει την επιφάνεια του αγγείου.

4.4.2.1 Δημιουργία νέφους σημείων

Οι Ερμιτιανές καμπύλες έχουν πάρει το όνομα τους από τον Γάλλο μαθηματικό του 19ου αιώνα, *Charles Hermite*, ο οποίος ασχολήθηκε μεταξύ άλλων και με προβλήματα πολυωνυμικής παρεμβολής κατά τμήματα. Μια τμηματική κυβική Ερμιτιανή καμπύλη (*cspline*) περιγράφεται από Ερμιτιανά ορθογώνια πολυώνυμα. Τα συγκεκριμένα πολυώνυμα έχουν τη μορφή

$$p(t) = H_0^3(t)\overline{p_0} + H_1^3(t)m_0 + H_2^3(t)\overline{p_1} + H_3^3(t)m_1 \quad (4.1)$$

και απαρτίζονται από δύο διανύσματα θέσης (σημεία ελέγχου) P_0 , P_1 και δύο εφαπτομενικά διανύσματα m_0 , m_1 . Στο σχήμα 4-6 τα P_0 και P_1 αναπαριστούν τα σημεία ελέγχου της καμπύλης. Το P_0 υποδεικνύει την αρχή της καμπύλης ενώ το P_1 το τέλος της. Το εφαπτομενικό διάνυσμα m_0 καθορίζει την κατεύθυνση της καμπύλης από το σημείο έναρξης ενώ το m_1 την κατεύθυνση της καμπύλης ως προς το τέλος της. Τα σημεία από τα οποία αποτελείται η καμπύλη στο σχήμα 4-6 είναι προϊόν παρεμβολής με Ερμιτιανό πολυώνυμο.



Σχήμα 4-6 Παράδειγμα Ερμιτιανής καμπύλης.

Η συγκεκριμένη καμπύλη έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας οι οποίοι ορίζονται από τα P_0, P_1, m_0, m_1 . Τα Ερμιτιανά πολυώνυμα τρίτου βαθμού $H_0^3, H_1^3, H_2^3, H_3^3$ ορίζονται ως εξής:

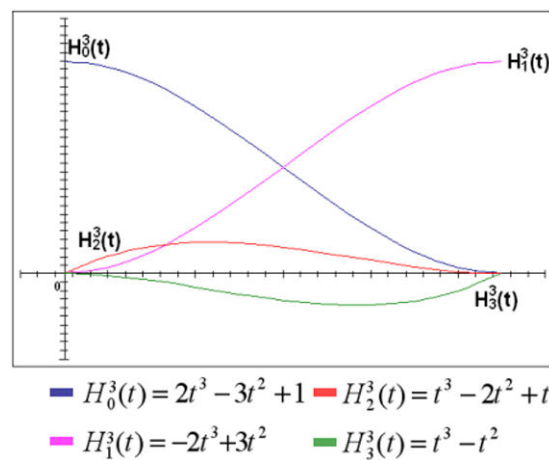
$$\begin{aligned}
 H_0^3(t) &= 2t^3 - 3t^2 + 1 = (1+2t)(1-t)^2 \\
 H_1^3(t) &= t^3 - 2t^2 + t = t(1-t)^2 \\
 H_2^3(t) &= -2t^3 + 3t^2 = t^2(3-2t) \\
 H_3^3(t) &= t^3 - t^2 = t^2(t-1)
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Έτσι με πεδίο ορισμού το μοναδιαίο διάστημα και δεδομένου ενός σημείου έναρξης της καμπύλης P_0 για $t=0$ και ενός καταληκτικού σημείου P_1 για $t=1$, το πολυώνυμο παρεμβολής παίρνει τη μορφή

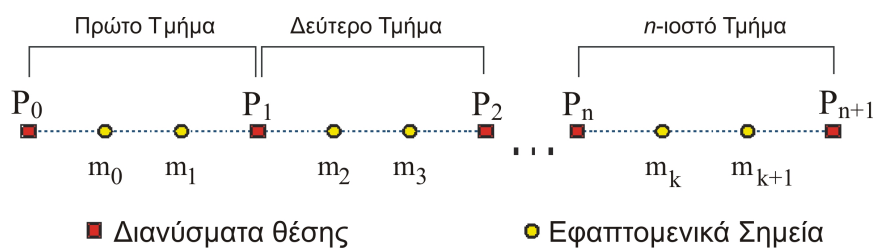
$$p(t) = (2t^3 - 3t^2 + 1)p_0 + (t^3 - 2t^2 + t)m_0 + (-2t^3 + 3t^2)p_1 + (t^3 - t^2)m_1, \text{ με } t \in [0,1].
 \tag{4.3}$$

Στο σχήμα 4-6 παρουσιάζονται γραφικά οι παρεμβολές των τεσσάρων Ερμιτιανών συναρτήσεων στο μοναδιαίο διάστημα, $t \in [0,1]$. Παρατηρείτε πως για $t=0$ μόνο το πολυώνυμο H_0^3 επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης καθώς τα υπόλοιπα τρία είναι μηδενικά. Μόλις το t πάρει τιμές μεγαλύτερες του μηδενός τότε η μορφή της καμπύλης καθορίζεται και από τα τέσσερα πολυώνυμα.

Η προσέγγιση του προφίλ ενός αγγείου πραγματοποιείται με τη χρήση πολλαπλών πολυωνύμων παρεμβολής δημιουργώντας μια αλυσίδα παρεμβολής (interpolant chain). Ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πολυώνυμα-τμήματα υπάρχει ένα κοινό διάνυσμα θέσης. Ως εκ τούτου, το διάνυσμα θέσης τέλους του προηγούμενου πολυωνύμου είναι όμοιο με το διάνυσμα θέσης αρχής του επόμενου πολυωνύμου. Το σχήμα 4-8 παρουσιάζει μια αλυσίδα πολυωνύμων παρεμβολής. Το διάνυσμα θέσης P_1 αποτελεί το σημείο τέλους του πρώτου πολυωνύμου ενώ ταυτόχρονα αποτελεί τη θέση αρχής για το δεύτερο πολυώνυμο.



Σχήμα 4-7 Ερμιτιανά πολυώνυμα 3ου βαθμού.



Σχήμα 4-8 Αλυσίδα Ερμιτιανών πολυωνύμων παρεμβολής.

Ο χρήστης ορίζει τις συντεταγμένες μίας ακολουθίας διανυσμάτων θέσης (σημείων ελέγχου) τα οποία βρίσκονται πάνω στο ψηφιογραφικό προφίλ του αγγείου (εικόνα-οδηγός). Η αλυσίδα πολυωνύμων διέρχεται πάνω από τις συντεταγμένες των συγκεκριμένων σημείων. Από την άλλη, οι συντεταγμένες των εφαπτομενικών διανυσμάτων για κάθε τμήμα υπολογίζονται μέσα από μία διαδικασία αρχικοποίησης. Κατά τη διαδικασία αυτή οι συντεταγμένες τους καθορίζονται πάνω

στα ευθύγραμμα τμήματα που ορίζουν οι συντεταγμένες δύο διαδοχικών διανυσμάτων θέσης. Ο υπολογισμός των συντεταγμένων των εφαπτομενικών θέσεων προκύπτει από τη διαίρεση του εκάστοτε ευθύγραμμου τμήματος σε τρία όμοια μέρη. Έτσι οι συντεταγμένες των m_0 και m_1 που βρίσκονται ανάμεσα στα διανύσματα θέσης P_0 και P_1 (Σχήμα 4-8) υπολογίζονται σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$m_0^x = \frac{P_1^x + 2P_0^x}{2}, m_0^y = \frac{P_1^y + 2P_0^y}{2}, m_1^x = \frac{2P_1^x + P_0^x}{2}, m_1^y = \frac{2P_1^y + P_0^y}{2} \quad (4.4)$$

Οι συντεταγμένες των διανυσμάτων θέσης και των εφαπτομενικών θέσεων μεταβάλλονται από το χρήστη μέσω του περιβάλλοντος διεπαφής με συγκεκριμένο τρόπο υποχρεώνοντας τα σημεία που προκύπτουν από την παρεμβολή Ερμιτιανών καμπυλών να διέρχονται πάνω από το ψηφιογραφικό προφίλ του αγγείου.

Δύο ανεξάρτητες αλυσίδες παρεμβολής χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του βασικού σώματος ενός αγγείου και των λαβών του. Ως εκ τούτου, P ορίζεται μια ακολουθία σημείων στον \mathbb{R}^2 χώρο που δημιουργήθηκε από την παρεμβολή της αλυσίδας πολυωνύμων που περιγράφει το βασικό σώμα του αγγείου. Ομοίως ως P' ορίζεται μία δεύτερη ακολουθία σημείων στον \mathbb{R}^2 χώρο που δημιουργήθηκε από την παρεμβολή της δεύτερης αλυσίδας πολυωνύμων που περιγράφει τη μορφή της λαβής του αγγείου. Οι ακολουθίες P και P' διαχωρίζουν τα δύο βασικά τμήματα παραμετροποίησης του προφίλ ενός αγγείου.

Το πλήθος των σημείων που περιέχει η κάθε ακολουθία (P και P') καθορίζεται από το επαυξητικό βήμα (incremental step) t που ορίζεται στο μοναδιαίο διάστημα παρεμβολής των Ερμιτιανών πολυωνύμων. Η ακριβής προσέγγιση ενός προφίλ απαιτεί μικρές τιμές της αυξητικής t με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλα πλήθη σημείων στις δύο ακολουθίες P και P' . Ως εκ τούτου η εφαρμογή ενός αλγορίθμου αναγνώρισης των σημαντικότερων σημείων και εξάλειψης των περιττών λεπτομερειών από τις ακολουθίες είναι απαραίτητη. Η εφαρμογή ενός τέτοιου αλγορίθμου επιτρέπει την παραμετροποίηση της αναλυτικότητας του τελικού τριγωνικού πλέγματος που θα περιγράφει το αγγείο. Ο αλγόριθμος των Douglas και Peucker θεωρείται από τους βέλτιστους αλγορίθμους αναγνώρισης και εξάλειψης περιττών σημείων σε μία ακολουθία. Σχεδιάστηκε για

να αντιμετωπίσει το πρόβλημα απαλοιφής των πλεοναζόντων κορυφών μίας χαρτογραφικής γραμμής κατά τη διαδικασία ψηφιοποίησης της. Ο αλγόριθμος των Douglas και Peucker εφαρμόζεται και στις δύο ακολουθίες P και P' δημιουργώντας δύο νέες ακολουθίες P_s, P'_s για τις οποίες ισχύει πάντα $P_s \subset P, P'_s \subset P'$. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου των Douglas και Peucker περιγράφεται αναλυτικά στο 4^ο παράρτημα.

4.4.2.2 Επιφάνειες εκ περιστροφής μιας γενέτειρας

Η ακολουθία σημείων P_s αποτελεί τη *βάση* (γενέτειρα) για τη δημιουργία του νέφους σημείων που περιγραφεί το βασικό σώμα του αγγείου. Για τη μοντελοποίηση του βασικού σώματος εφαρμόζεται μία τεχνική που είναι ιδιαίτερα γνωστή στο χώρο της μοντελοποίησης 3D γραφικών. Η τεχνική αυτή φέρει τις ονομασίες «*Επιφάνειες εκ περιστροφής μιας γενέτειρας*» (*revolve*) ή «*Τροχός αγγειοπλάστη*» (*lathe*). Ο τρόπος λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου εξασφαλίζει την αζιμουθιακή συμμετρία του βασικού σώματος ενός αγγείου.

Αν υποθεθεί πως ως γενέτειρα για την κατασκευή μίας επιφάνειας χρησιμοποιούνται δύο παραμετρικές συναρτήσεις $x(t)$ και $y(t)$, που ορίζονται στο διάστημα $[\alpha, \beta]$ γύρω από τον άξονα Y ενός τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και με την $x(t)$ να μην παίρνει ποτέ αρνητικές τιμές τότε το εμβαδό της επιφάνειας αυτής υπολογίζεται ως εξής:

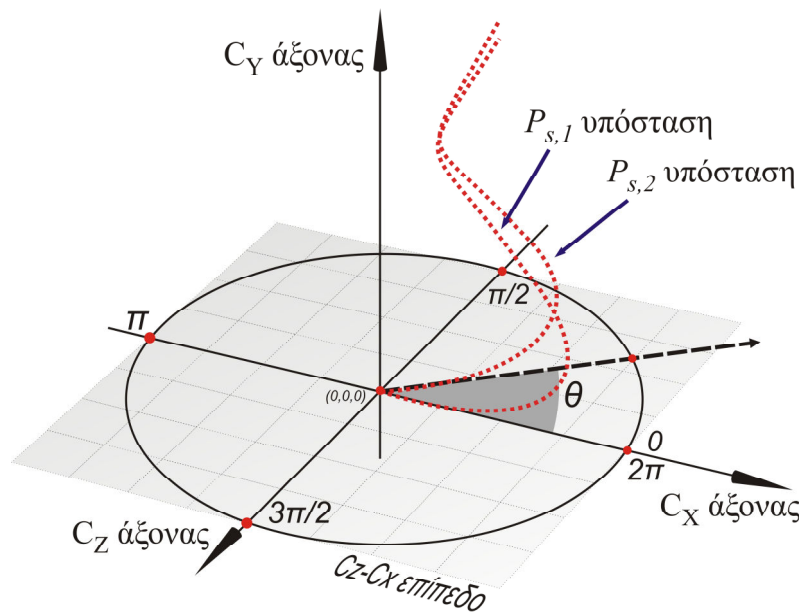
$$S_{area} = 2\pi \int_a^b x(t) \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt, \quad (4.5)$$

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική, το βασικό σώμα ενός αγγείου δομείται από ένα σύνολο *υποστάσεων* (instances) της ακολουθίας P_s , τα σημεία της οποίας έχουν υποβληθεί σε μετασχηματισμούς περιστροφής στον \mathbb{R}^3 . Στο σχήμα 4-9 παρουσιάζονται δύο υποστάσεις της P_s . Αυτές είναι οι $P_{s,1}$ και $P_{s,2}$. Η υπόσταση $P_{s,2}$ παρουσιάζεται περιστρεμμένη γύρω από τον καρτεσιανό άξονα C_y αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού κατά μία γωνία $\theta \in (0, 2\pi]$. Οι υποστάσεις $P_{s,j}$ προκύπτουν εφαρμόζοντας ένα μετασχηματισμό περιστροφής γύρω από τον άξονα C_y για κάθε ένα σημείο της P_s . Το σύνολο των υποστάσεων ($P_{s,1}$ έως $P_{s,l}$) που

προκύπτουν είναι ίσο με το ακέραιο τμήμα του λόγου $\theta/2\pi$. Επιπλέον να σημειωθεί πως αφού η αρχική ακολουθία P ορίζεται σε ένα επίπεδο και ισχύει ότι $P_s \subset P'$, οι συντεταγμένες όλων των σημείων της γενέτειρας ως προς τον άξονα C_z είναι ίσες με το μηδέν. Έστω ότι η ακολουθία $P_{s,1}$ με πλήθος σημείων ίσο n αποτελεί τη γενέτειρα της επιφάνειας του βασικού σώματος του αγγείου και $j \in \left(1 \dots \frac{\theta}{2\pi}\right), \frac{\theta}{2\pi} \in \mathbb{N}$, $i \in (1 \dots n)$ τότε οι συντεταγμένες των σημείων που φέρουν οι νέες υποστάσεις της γενέτειρας προκύπτουν από το παρακάτω, σε μορφή πινάκων, μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} P_{s,j} x_i \\ P_{s,j} y_i \\ P_{s,j} z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{s,1} x_i \\ P_{s,1} y_i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Σε επίπεδο υλοποίησης του αλγορίθμου, ο χρήστης ορίζει το επαυξητικό βήμα περιστροφής (γωνία θ) προσδίδοντας έτσι στο σύστημα άλλη μια παράμετρο για τη διαφοροποίηση της αναλυτικότητας του προκύπτοντος νέφους σημείων.

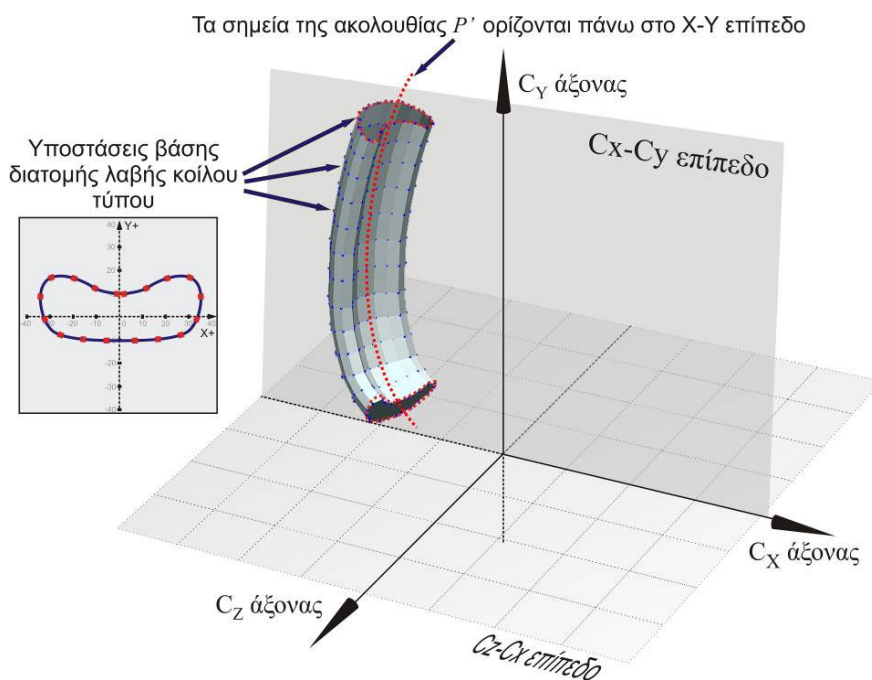


Σχήμα 4-9 Δημιουργία του νέφους σημείων που περιγράφει το βασικό σώμα ενός αγγείου με τη μέθοδο «Επιφάνειες εκ περιστροφής μίας γενέτειρας».

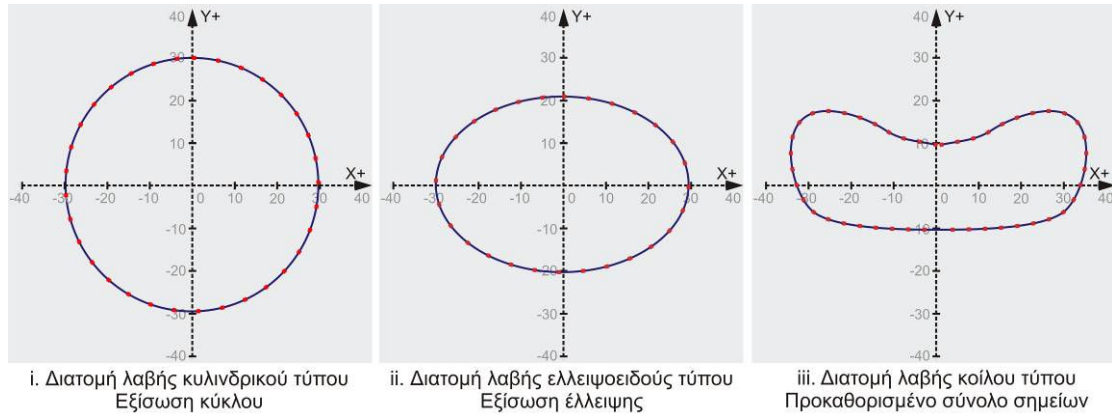
4.4.2.3 Εξώθηση κατά μήκος προκαθορισμένης πορείας

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση των λαβών ενός αγγείου απορρέει από τον αλγόριθμο *εξώθησης κατά μήκος προκαθορισμένης πορείας* (*Extrude Along Path*). Η τεχνική αυτή επιτρέπει την κατασκευή της σωληνοειδής μορφής που ακολουθούν οι λαβές ενός αγγείου ενώ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο 3D μοντελοποίησης που συναντάται σε πλήθος εφαρμογών. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4-10 η λαβή του αγγείου συμβαδίζει με την κλίση της καμπύλης που περιγράφουν τα σημεία της ακολουθίας P'_s ορισμένα πάνω στο C_x-C_y επίπεδο. Για κάθε ένα σημείο της ακολουθίας P'_s , ο αλγόριθμος τοποθετεί στο χώρο υποστάσεις ενός νέφους σημείων οι οποίες προέρχονται από κάποια *προκαθορισμένη βάση διατομής* (Σχήμα 4-11). Οι βάσεις διατομής περιγράφουν διαφορετικούς τύπους λαβών και αποτελούνται από ένα σύνολο σημείων που ορίζονται αρχικά στο επίπεδο C_z-C_y από:

- Παραμετρικές εξισώσεις: *Κύκλου* $x = x_0 + \rho \cos t, y = y_0 + \rho \sin t$ με $0 \leq t \leq 2\pi$, *Ελλειψης* $x = \alpha \cos(t), y = \beta \sin(t)$ με $0 \leq t \leq 2\pi$ (Σχήμα 4-11.i,ii).
- Προκαθορισμένο σύνολο σημείων (Σχήμα 4-11.iii).



Σχήμα 4-10 Εξώθηση κατά μήκος μίας προκαθορισμένης πορείας.



Σχήμα 4-11 Δείγματα βάσεων διατομής διαφορετικών τύπων λαβών.

Στο σχήμα 4-12 παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαφορετικά στάδια λειτουργίας του αλγορίθμου. Έστω ότι η ακολουθία P'_s αποτελείται από μόνο τέσσερα σημεία ($n=4$) τα οποία είναι ορισμένα πάνω στο επίπεδο C_x-C_y (Σχήμα 4-12.i). Οι συντεταγμένες του κάθε σημείου της ακολουθίας P'_s συμπίπτουν με τις συντεταγμένες του κέντρου της εκάστοτε υπόστασης διατομής λαβής. Για να επιτευχθεί αυτό εισάγονται δύο νέα σημεία $P'_s(x_0, y_0)$ και $P'_s(x_5, y_5)$ τα οποία αποτελούν επέκταση των ευθύγραμμων τμημάτων που ορίζονται από το πρώτο και το τελευταίο ζεύγος σημείων της P'_s . Στο παράδειγμα του σχήματος 4-12.ii αυτά είναι τα $\overline{P'_s(x_1, y_1)P'_s(x_2, y_2)}$ και $\overline{P'_s(x_3, y_3)P'_s(x_4, y_4)}$. Οι συντεταγμένες των νέων σημείων προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{P'_s(y_2) - P'_s(y_1)}{P'_s(x_2) - P'_s(x_1)} \\ P'_s(x_0) &= P'_s(x_1) + a, a \in \mathfrak{R} \end{aligned} \right\} P'_s(y_0) = \mu \cdot P'_s(x_0) + P'_s(y_1) \quad (4.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu' &= \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{P'_s(y_n) - P'_s(y_{n-1})}{P'_s(x_n) - P'_s(x_{n-1})} \\ P'_s(x_{n+1}) &= P'_s(x_n) + a, a \in \mathfrak{R} \end{aligned} \right\} P'_s(y_{n+1}) = \mu' \cdot P'_s(x_{n+1}) + P'_s(y_{n-1}) \quad (4.8)$$

Ακολούθως υπολογίζονται οι κλίσεις όλων των ευθύγραμμων τμημάτων που προκύπτουν από κάθε ένα διαδοχικό ζεύγος σημείων της P'_s (Σχήμα 4-12.iii). Ο συντελεστής διεύθυνσης του εκάστοτε ευθύγραμμου τμήματος προκύπτει από

$$\phi = \arctan\left(\frac{P'_s(y_\beta) - P'_s(y_a)}{P'_s(x_\beta) - P'_s(x_a)}\right) - \frac{\pi}{2}, \quad (4.9)$$

όπου τα α και β ορίζουν δύο διαδοχικά σημεία της P'_s . Η μέθοδος αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μια προσέγγιση της πρώτης παραγώγου μίας συνεχούς συνάρτησης f ορισμένης σε ένα διάστημα Δ που είναι παραγωγίσιμη στο $x_0 \in \Delta$ όταν ισχύει $f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$. Ο αριθμός που προκύπτει είναι ίσος με την κλίση της

εφαπτομένης της γραφικής παράστασης της καμπύλης στο σημείο $(x_0, f(x_0))$.

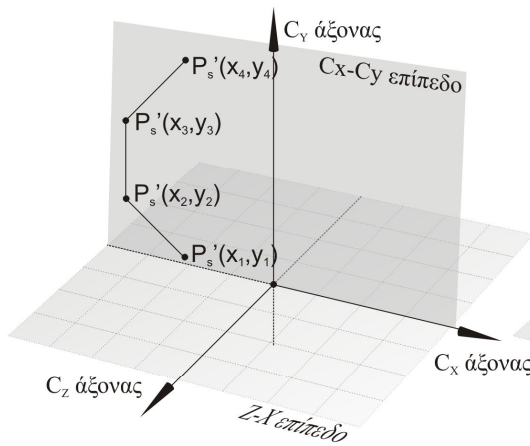
Στο τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου η κάθε υπόσταση διατομής ορίζεται αρχικά πάνω στο επίπεδο $C_z - C_x$ με το κέντρο της να συμπίπτει με την αρχή των αξόνων του τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 4-12.iv). Στη συνέχεια εφαρμόζεται στα σημεία της κάθε υπόστασης διατομής ένας συνδυασμός μετασχηματισμών περιστροφής και μετατόπισης. Ο μετασχηματισμός περιστροφής καθορίζει την κλίση των σημείων της υπόστασης διατομής γύρω από τον άξονα C_z κατά μία γωνιά ϕ που υπολογίσθηκε για κάθε τμήμα της P'_s ενώ με το μετασχηματισμό μετατόπισης επιτυγχάνεται η ταύτιση του κέντρου της υπόστασης διατομής με το δεύτερο σημείο του εκάστοτε ευθύγραμμου τμήματος. Ο συνδυασμός των μετασχηματισμών αποδίδεται με τη μορφή πινάκων ως:

$$\begin{bmatrix} H'_j x_i \\ H'_j y_i \\ H'_j z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_j x_i \\ H_j y_i \\ H_j z_i \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & C_H x - P'_{s,n} x \\ 0 & 1 & 0 & C_H y - P'_{s,n} y \\ 0 & 0 & 1 & C_H z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

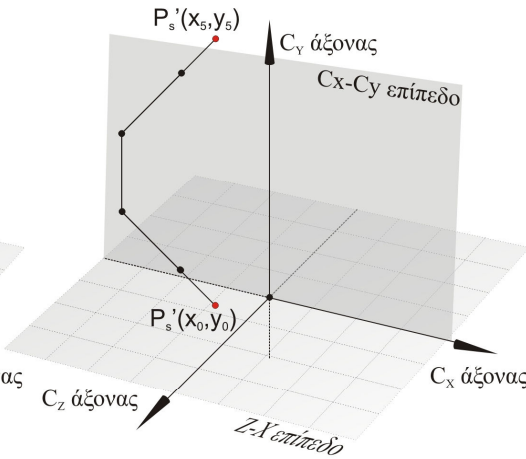
όπου:

- H_j : Η ακολουθία σημείων της j -όστης υπόστασης βάσης διατομής.
- i : Το πλήθος των σημείων της ακολουθίας της βάσης διατομής.
- n : Το πλήθος των σημείων της ακολουθίας P'_s .
- $C_H(x, y, z)$: Οι αρχικές συντεταγμένες του κέντρου της υπόστασης.
- $P'_{s,n}$: Οι συντεταγμένες του n -οστού σημείου της ακολουθίας P'_s .

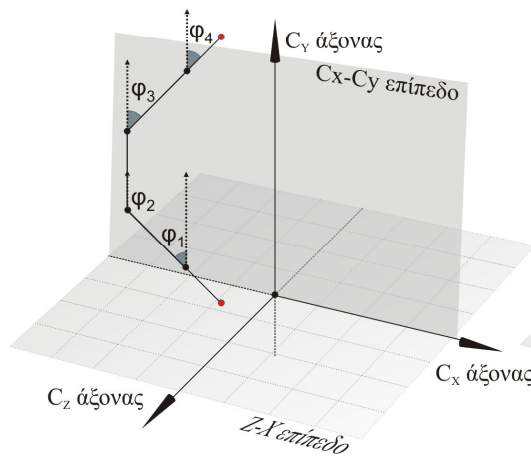
i) Τέσσερα σημεία που ανήκουν στο P_s'



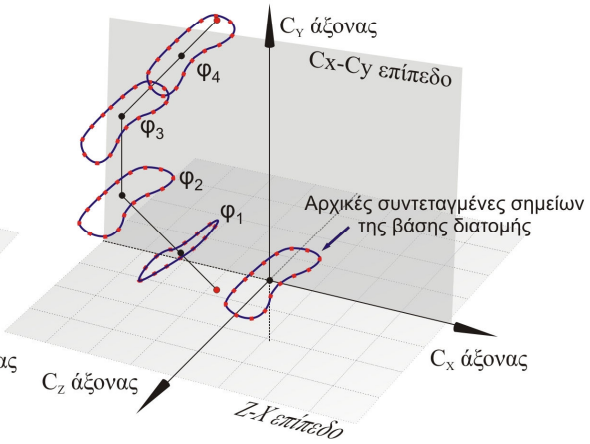
ii) Εισαγωγή δύο νέων σημείων $P_s'(x_0, y_0)$ και $P_s'(x_5, y_5)$



iii) Υπολογισμός γωνίας φ για κάθε ζεύγος σημείων



iv) Περιστροφή των σημείων της βάσης διατομής ως προς τη γωνία φ γύρω από τον άξονα Cz



Σχήμα 4-12 Δημιουργία σωληνοειδούς νέφους σημείων της λαβής ενός αγγείου.

Επιπρόσθετα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει το πάχος της λαβής επηρεάζοντας τις συντεταγμένες των σημείων των βάσεων διατομής. Σε περιπτώσεις παραμετρικών βάσεων διατομής αυτό επιτυγχάνεται σε επίπεδο μεταβλητής (π.χ. μεταβολή ακτίνας κύκλου) ενώ σε περιπτώσεις προκαθορισμένου νέφους σημείων (π.χ. κοίλος τύπος) τότε εφαρμόζεται μετασχηματισμός κλιμάκωσης στα σημεία που περιγράφουν τη βάση διατομής όταν αυτά βρίσκονται στις αρχικές τους συντεταγμένες (πάνω στο επίπεδο $Cz-Cx$).

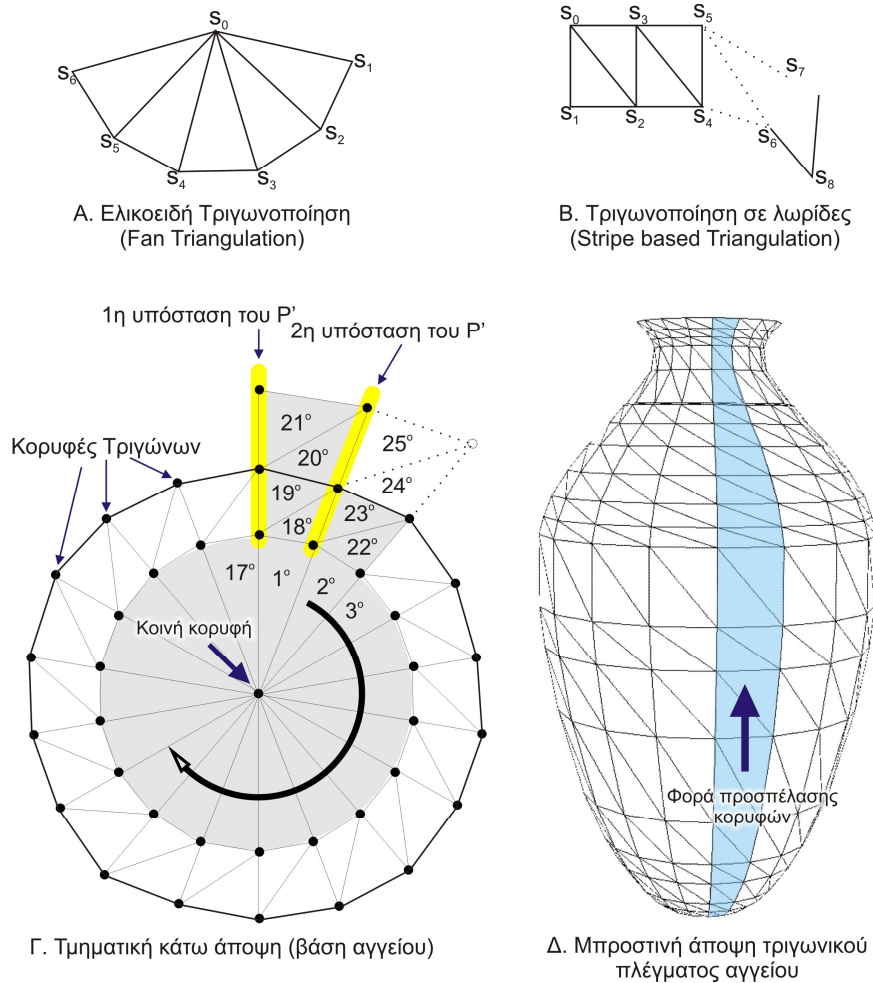
4.4.2.4 Τριγωνοποίηση νέφους σημείων

Μετά την ολοκλήρωση της εφαρμογής των προηγούμενων δύο μεθόδων (επιφάνειες εκ περιστροφής μιας γενέτειρας και εξώθησης κατά μήκος

προκαθορισμένης πορείας) προκύπτουν δύο νέες ακολουθίες σημείων B_{cloud} και H_{cloud} με συντεταγμένες ορισμένες στο χώρο \mathbb{R}^3 . Οι δύο ακολουθίες αποτελούν τα νέφη σημείων που περιγράφουν το βασικό σώμα του αγγείου και τις λαβές του. Οι B_{cloud} και H_{cloud} αποτελούνται από υποστάσεις των P_s, P'_s . Κατά συνέπεια ισχύει $B_{cloud} = (P_{s,1}, P_{s,2}, \dots, P_{s,j})$ και $H_{cloud} = (H'_1, H'_2, \dots, H'_j)$. Η τριγωνοποίηση του νέφους σημείων πραγματοποιείται με αλγόριθμους που εκμεταλλεύονται την κατάταξη των ακολουθιών των σημείων μέσα στις B_{cloud} και H_{cloud} . Χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους το σύνολο των υποστάσεων P_s, P'_s καθώς και το πλήθος των σημείων που περιέχει η κάθε ακολουθία, τα σημεία των B_{cloud} και H_{cloud} οργανώνονται σε τριάδες. Το σχήμα 4-13 απεικονίζει τον τρόπο προσπέλασης των σημείων καθώς και τον τρόπο οργάνωσής τους σε κορυφές τριγώνων. Αρχικά η βάση του αγγείου οργανώνεται σε τρίγωνα εφαρμόζοντας την *ελικοειδή* τριγωνοποίηση (fan based triangulation) όπου όλα τα τρίγωνα μοιράζονται μία κορυφή. Η κορυφή αυτή έχει κοινές συντεταγμένες με το πρώτο σημείο όλων των υποστάσεων $P_{s,1}, P_{s,2}, \dots, P_{s,j}$ της B_{cloud} . Στη συνέχεια ο αλγόριθμος οργανώνει τις κορυφές του νέφους σε *λωρίδες τριγώνων* (strip based triangulation) ανάμεσα σε διαδοχικά ζεύγη υποστάσεων των P_s . Από την άλλη, για την τριγωνοποίηση των λαβών εφαρμόζεται μόνο ο αλγόριθμος τριγωνοποίησης σε λωρίδες. Ενώ σε περίπτωση που το αγγείο φέρει και δεύτερη λαβή τότε αυτή αποτελεί αντίγραφο της πρώτης. Κατά συνέπεια αποφεύγεται η επανάληψη της διαδικασίας τριγωνοποίησης για τη δεύτερη λαβή.

Τα μοναδιαία διανύσματα που καθορίζουν τη φορά των τριγώνων ορίζονται στο κέντρο βάρους του κάθε τριγώνου (*sharp normals*). Δεδομένης μίας τριάδας κορυφών (p_1, p_2, p_3) ορισμένων στον \mathbb{R}^3 , το κανονικοποιημένο διάνυσμα κατεύθυνσης υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 n &= (p_2 - p_1) \times (p_3 - p_1), \\
 \|n\| &= \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}, \\
 n &= \left(\frac{n_x}{\|n\|}, \frac{n_y}{\|n\|}, \frac{n_z}{\|n\|} \right)
 \end{aligned} \tag{4.11}$$



Σχήμα 4-13 Μεθοδολογία τριγωνοποίησης νέφους σημείων.

4.4.3 Δημιουργία τυχαίων τρισδιάστατων αγγείων

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου κάθε χωρική μετατόπιση των σημείων ελέγχου της αλυσίδας πολυωνύμων επηρεάζει τη μορφή του 3D μοντέλου. Ως εκ τούτου, τα τυχαία αγγεία προκύπτουν από την ελεγχόμενη μετατόπιση των σημείων ελέγχου των αλυσίδων πολυωνύμων που τα περιγράφουν. Οι νέες συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ανήκουν σε προκαθορισμένα διαστήματα τιμών το οποίο εξασφαλίζουν τη δημιουργία λογικών αγγείων. Η παραγωγή των τυχαίων συντεταγμένων στηρίζεται στον αλγόριθμο του *Lehmer* σύμφωνα με τον οποίο ορίζεται μια ακολουθία ακεραίων Z_1, Z_2, \dots, Z_i που προκύπτουν από την αναδρομική σχέση:

$$Z_i = (a \cdot Z_{i-1} + c) \pmod{m} \tag{4.12}$$

όπου a ο πολλαπλασιαστής, c μια σταθερά, m ο διαιρέτης και Z_0 η αρχική τιμή (seed) είναι θετικοί ακέραιοι. Σύμφωνα με τη σχέση 4.13 οι τιμές των Z_i προκύπτουν από το υπόλοιπο της λόγου $(a \cdot Z_{i-1} + c)$ προς m . Συνεπώς ισχύει πως τα $Z_i \in (0, m-1)$ και οι τυχαίοι αριθμοί U_i για $i=1,2,\dots$ στο μοναδιαίο διάστημα προκύπτει από το λόγο $U_i = Z_i / m$. Σε επίπεδο υλοποίησης οι μεταβλητές της σχέσης 4.13 ορίζονται από την *Borland Delphi 2005* ως εξής $a=134775813$, $c=1$ και $m = 2^{32}$.

Το *QP* διαθέτει τέσσερις μεθόδους τυχαιοποίησης των συντεταγμένων των σημείων ελέγχου. Αυτές είναι οι παρακάτω:

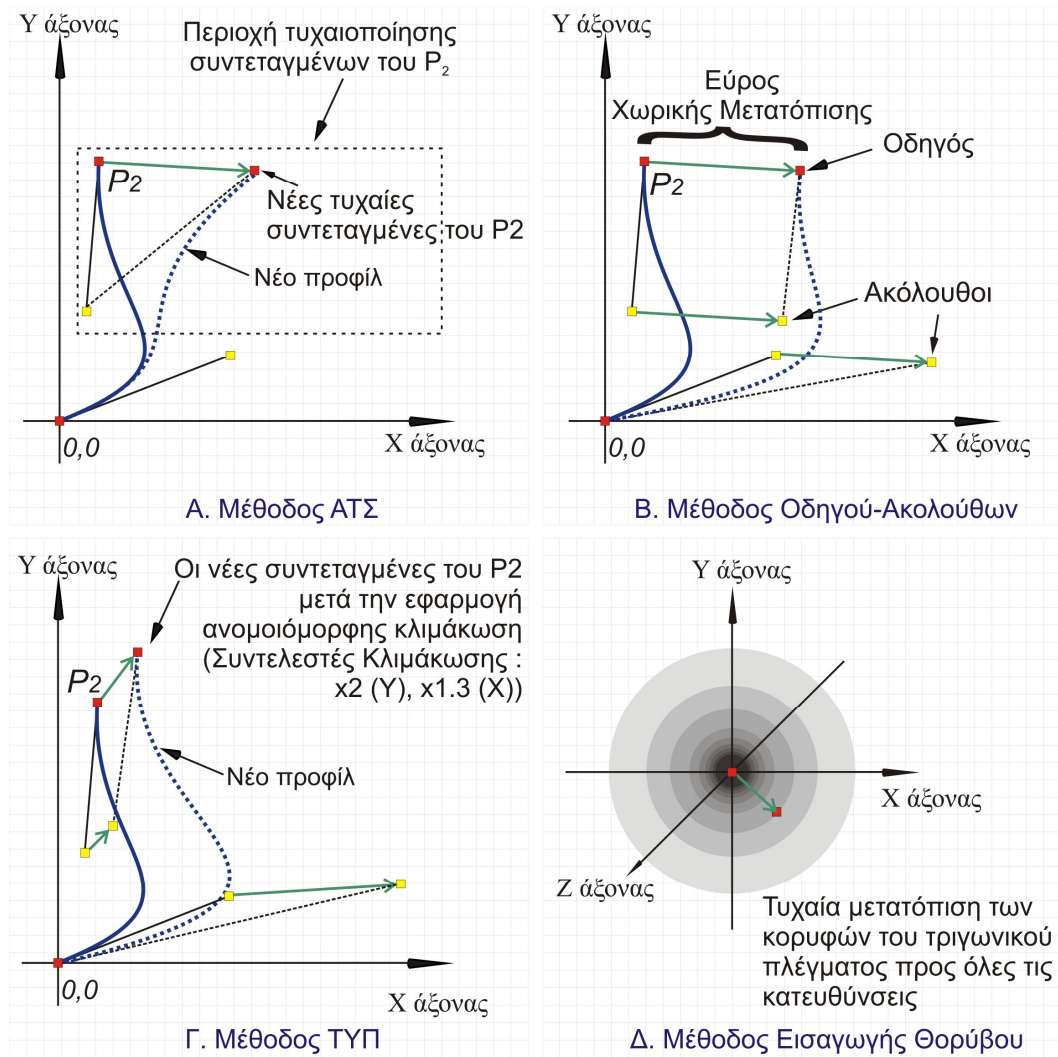
- i. **Απόδοση Τυχαίων Συντεταγμένων (ΑΤΣ):** Τα σημεία ελέγχου λαμβάνουν νέες τυχαίες συντεταγμένες ορισμένες σε διαστήματα που καθορίζονται από το χρήστη (Σχήμα 4-14.α). Έστω $P_0(x,y)$, $P_1(x,y)$ και $P_2(x,y)$ οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου μίας αλυσίδας Ερμιτιανών πολυωνύμων παρεμβολής. Έστω και τα τυχαία διαστήματα $a_x \in (0,10)$, $a_y \in (0,10)$, $b_x \in (20,40)$, $b_y \in (40,60)$, $c_x \in (22,34)$, $c_y \in (50,65)$. Οι νέες συντεταγμένες του πρώτου σημείου ελέγχου προκύπτουν από $P_0^{x'} = rand(i), i \in a_x$, $P_0^{y'} = rand(i), i \in a_y$. Ομοίως προκύπτουν και οι συντεταγμένες των υπόλοιπων σημείων περιορίζοντας τις νέες τιμές στα αντίστοιχα διαστήματα.
- ii. **Μέθοδος Οδηγού – Ακολουθών:** Η συγκεκριμένη μέθοδος προϋποθέτει τον ορισμό ενός σημείου ελέγχου ως τον *οδηγό* (leader) και λαμβάνει τυχαίες συντεταγμένες από ένα προκαθορισμένο από το χρήστη διάστημα τιμών. Επιπρόσθετα ένα σύνολο από σημεία ελέγχου χαρακτηρίζονται ως *ακόλουθοι* (followers). Σε κάθε νέο ζεύγος συντεταγμένων (x,y) που προσδίδεται στον οδηγό, υπολογίζεται η χωρική μετατόπιση του σε σχέση με την προηγούμενη θέση που κατείχε στο δισδιάστατο καρτεσιανό σύστημα. Η χωρική αυτή μετατόπιση εφαρμόζεται στις συντεταγμένες όλων των σημείων που έχουν χαρακτηριστεί ως ακόλουθοι. Η συγκεκριμένη μέθοδος επιτρέπει τη διατήρηση της μορφής συγκεκριμένων τμημάτων ενός προφίλ όπως είναι το στόμιο, ο λαιμός ή ακόμα και η βάση ενός αγγείου. Έστω $P_0(x,y)$ το σημείο οδηγός και $P_1(x,y)$, $P_2(x,y)$ τα σημεία ακόλουθοι. Έστω $\Delta_x = P_0^x - P_0^{x'}$, $\Delta_y = P_0^y - P_0^{y'}$ οι

μεταβολές των συντεταγμένων του οδηγού ως προς τους δύο άξονες. Οι νέες συντεταγμένες του $P_1(x,y)$ υπολογίζονται ως εξής: $P_1^{x'} = P_1^x + \Delta_x$, $P_1^{y'} = P_1^y + \Delta_y$. Ομοίως υπολογίζονται και οι συντεταγμένες των υπολοίπων ακολούθων σημείων ελέγχου.

- iii. **Τυχαία Ασύμμετρη Κλιμάκωση Ύψους και Πλάτους (ΤΥΠ):** Μετά την κατασκευή του τριγωνικού πλέγματος ενός αγγείου, το τελικό 3Δ μοντέλο δύναται να κλιμακωθεί ασύμμετρα ως προς τους τρεις άξονες του τρισδιάστατου καρτεσιανού χρησιμοποιώντας κάποια προκαθορισμένα όρια ελάχιστης και μέγιστης κλιμάκωσης. Οι νέες συντεταγμένες των κορυφών του τριγωνικού πλέγματος προκύπτουν από την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού κλιμάκωσης (είτε συμμετρικού είτε ασύμμετρου). Έστω V η ακολουθία κορυφών από τις οποίες αποτελείται το τριγωνικό πλέγμα του αγγείου και οι συντελεστές κλιμάκωσης ως προς τους άξονες Y και X $s_x=2$, $s_y=1.3$, $s_z=1$. Οι συντεταγμένες της εκάστοτε κορυφής προκύπτουν από τον παρακάτω μετασχηματισμό

$$\text{κλιμάκωσης } V_i = \begin{bmatrix} V_{i,x} \\ V_{i,y} \\ V_{i,z} \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

- iv. **Μέθοδος Εισαγωγής Θορύβου:** Προκύπτει από τη τυχαία μετατόπιση των κορυφών του τελικού 3Δ μοντέλου ως προς οποιοδήποτε κατεύθυνση με στόχο την προσομοίωση του θορύβου που συναντάται σε ψηφιοποιημένα αντικείμενα.

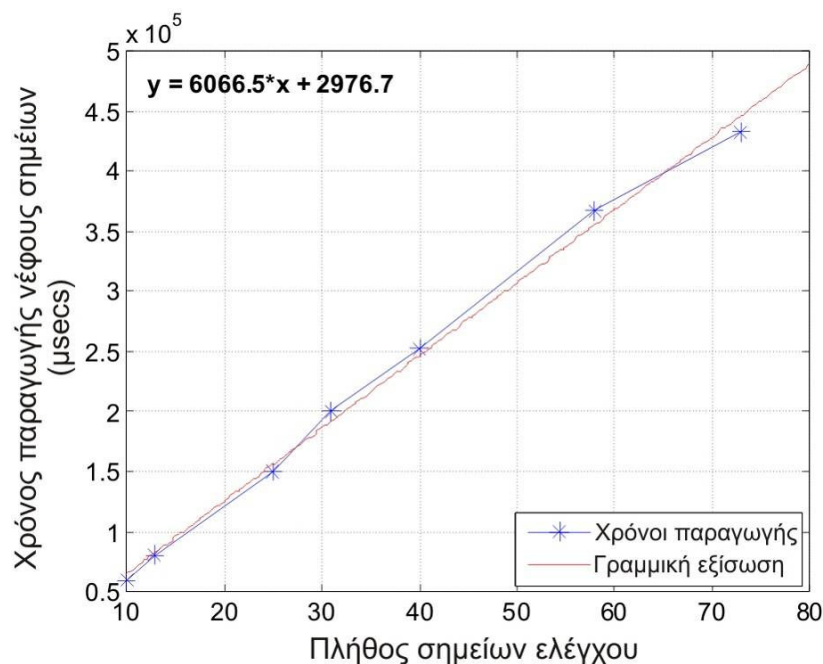


Σχήμα 4-14 Μέθοδοι τυχαιοποίησης τρισδιάστατων αγγείων.

4.4.4 Αποτίμηση απόδοσης αλγορίθμων

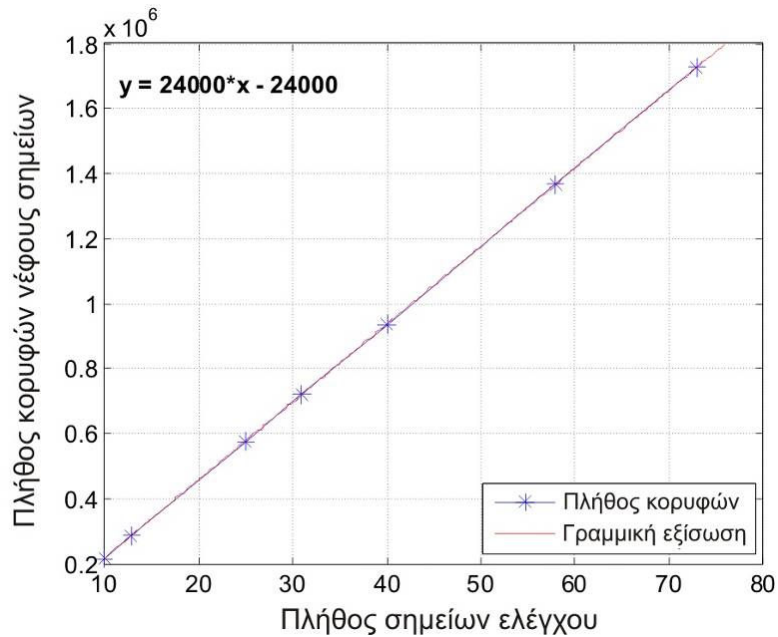
Η εκτίμηση απόδοσης των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή *QP*, πραγματοποιήθηκε σε ένα υπολογιστικό σύστημα με επεξεργαστή *AMD Athlon 64 X2 4200+*, μνήμη *2GB* και κάρτα γραφικών *Nvidia Geforce 7800 GT*. Η μεθοδολογία εκτίμησης της απόδοσης του αλγορίθμου δημιουργίας *επιφανειών εκ περιστροφής μιας γενέτειρας* περιελάμβανε τη δημιουργία του βασικού σώματος ενός Παναθηναϊκού Αμφορέα αυξάνοντας σταδιακά το πλήθος των σημείων ελέγχου της αλυσίδας πολυωνύμων που περιγράφουν το προφίλ του. Η αύξηση του πλήθους των σημείων ελέγχου ισοδυναμεί με την αύξηση της μορφολογικής πολυπλοκότητας του προφίλ ενός αγγείου.

Το σχήμα 4-15 απεικονίζει την καμπύλη των απαιτούμενων για τη δημιουργία του νέφους σημείων χρόνων καθώς σταδιακά αυξάνεται το πλήθος των σημείων ελέγχου. Παρατηρείται η σχεδόν γραμμική πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης υλοποίησης.



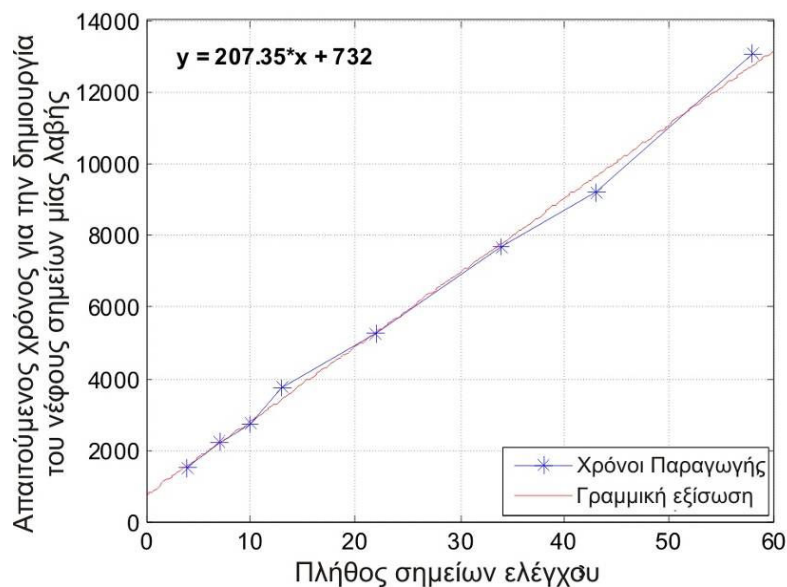
Σχήμα 4-15 Απόδοση αλγορίθμου «*Επιφάνειες εκ περιστροφής μιας γενέτειρας*».

Στο σχήμα 4-16 απεικονίζεται η γραμμική σχέση ανάμεσα στο πλήθος των σημείων ελέγχου και του πλήθους των σημείων του νέφους.



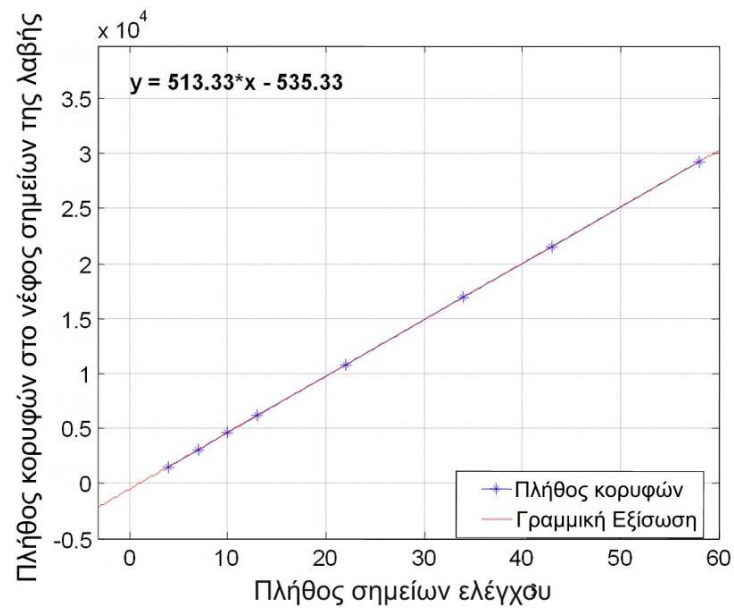
Σχήμα 4-16 Γραμμική σχέση σημείων ελέγχου και κορυφών νέφους σημείων.

Παρόμοια μέθοδος εφαρμόστηκε για την εκτίμηση της απόδοσης του αλγορίθμου *εξώθησης κατά μήκος μίας προκαθορισμένης πορείας*. Καταγράφηκαν οι απαιτούμενοι χρόνοι για τη δημιουργία του νέφους σημείων μίας λαβής με διατομή κοίλου τύπου (44 κορυφές) αυξάνοντας σταδιακά το πλήθος των υποστάσεων της διατομής που περιγράφουν τη λαβή. Για άλλη μια φορά παρατηρείτε η σχεδόν γραμμική πολυπλοκότητα του υλοποιημένου αλγορίθμου.



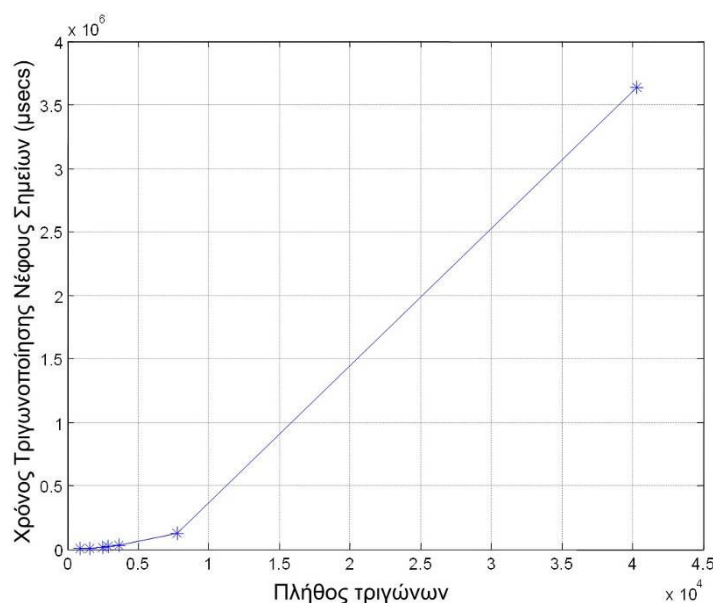
Σχήμα 4-17 Απόδοση αλγορίθμου «Εξώθησης κατά μήκος προκαθορισμένης πορείας».

Στο σχήμα 4-18 απεικονίζεται όπως και πριν η γραμμική σχέση ανάμεσα στο πλήθος των σημείων ελέγχου και του πλήθους των σημείων του νέφους.







Σχήμα 4-18 Γραμμική σχέση σημείων ελέγχου και κορυφών νέφους σημείων.

Από την άλλη, η χρονική ασυμπτωτική πολυπλοκότητα του αλγόριθμου τριγωνοποίησης ανήκει στην τάξη του $O(n^2)$ αφού η γραφική καμπύλη των απαιτούμενων χρόνων για τη δημιουργία του πλέγματος σε σχέση με το πλήθος των τριγώνων είναι παρόμοια με την καμπύλη μίας δευτεροβάθμιας εξίσωσης.



Σχήμα 4-19 Απόδοση αλγόριθμου τριγωνοποίησης νέφους σημείων.

Επίσης, στα πλαίσια της αποτίμησης της απόδοσης των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν για το *QP* δημιουργήθηκαν σειρές τυχαίων αρχαίων Ελληνικών αγγείων. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποια από τα χαρακτηριστικά απόδοσης του λογισμικού για τέσσερις κατηγορίες αγγείων. Θα πρέπει να σημειωθεί πως οι μέσοι χρόνοι κατασκευής των αγγείων περιλαμβάνουν και τους χρόνους αποθήκευσης τους με το πρότυπο VRML 2.0.

Σχήμα αγγείου	Πλήθος σημείων ελέγχου	Μέσος χρόνος κατασκευής 3D αγγείου (δευτερόλεπτα)	Συνολικός όγκος 3D δεδομένων (bytes)	Συνολικός όγκος μεταδεδομένων (bytes)
 Αλάβαστρον	28	14.75	5,199,631	63,511
 Αμφορέας	20 (Σώμα:16, Λαβή:4)	19.78	10,184,572	62,548
 Κάλαθος	13	1.528	3,293,849	62,299
 Ψυκτήρ	31	21.89	9,706,008	62,856

Πίνακας 4-3 Ενδεικτικοί τύποι αγγείων που μοντελοποιήθηκαν με το *QP*.

4.4.5 Μεταδεδομένα ψηφιακών αντιγράφων αγγείων

Τα μεταδεδομένα παίζουν σημαντικό ρόλο για ένα 3D ψηφιακό αντίγραφο ενός αρχαιολογικού ευρήματος. Αποτελούν κύριο συνοδευτικό υλικό και αξιοποιούνται από ερευνητές κατά τη διεξαγωγή μελετών. Δεν είναι άλλωστε τυχαία η αλληλένδετη σχέση των διαδικασιών τρισδιάστατης ψηφιοποίησης και τεκμηρίωσης.

Όπως προαναφέρθηκε, το *QP* αποθηκεύει μαζί με κάθε 3D αγγείο που κατασκευάζει και ένα αρχείο μεταδεδομένων το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικές με το αγγείο. Στα πλαίσια του διδακτορικού αναπτύχθηκε ένα σχήμα μεταδεδομένων συμβατό με το πρότυπο MPEG-7 το οποίο μπορεί να καλύψει τις βασικές ανάγκες τεκμηρίωσης-σχολιασμού ενός 3D ψηφιακού αντίγραφου αγγείου. Το ίδιο σχήμα μπορεί να εφαρμοσθεί και σε τρισδιάστατα *συνθετικά* αγγεία που προκύπτουν από εφαρμογές όπως το *QP* αγνοώντας κάποια από τα πεδία τα οποία

αναφέρονται αποκλειστικά σε πραγματικά ευρήματα. Πιο συγκεκριμένα, το προτεινόμενο σχήμα έχει την ονομασία *3D Vessel Description Schema (ThreeDVDS)* και μπορεί να θεωρηθεί ως μια προέκταση του προτύπου MPEG-7 η οποία ειδικεύεται σε ένα συγκεκριμένο τύπο δεδομένων. Οι επιλογές των συγκεκριμένων πεδίων μεταπληροφορίας πραγματοποιήθηκαν σε συνεργασία με αρχαιολόγους του τμήματος πολιτιστικής κληρονομιάς του ΙΠΕΤ/ΕΚ 'Αθηνά'. Τα πεδία που περιλαμβάνει το προτεινόμενο σχήμα είναι:

- i. **Σχήμα (Shape):** Η γενική κατηγορία σχήματος στην οποία ανήκει ένα αγγείο, π.χ. Αμφορέας, Κύλικα, Σκύφος κτλ.
- ii. **Τύπος σχήματος (Type of shape):** Ο τύπος του σχήματος στον οποίο ανήκει κάθε αγγείο. Παράλληλα με τις γενικές κατηγορίες σχημάτων, τα περισσότερα από αυτά διακρίνονται σε επιμέρους τύπους, η γνώση των οποίων είναι πολύ σημαντική για τη μελέτη της εξέλιξης τους, τη χρονολόγηση των σχημάτων τους αλλά και για τη μελέτη των τεχνικών κατασκευής.
- iii. **Κατάσταση διατήρησης (Preservation State):** Η κατάσταση στην οποία διατηρείται το αγγείο (ακέραιο ή αποσπασματικό).
- iv. **Διαστάσεις (Dimensions):** Οι σωζόμενες διαστάσεις του αγγείου. Η γνώση τους επιτρέπει τη σωστή αντίληψη του μεγέθους και της μορφής των αγγείων.
- v. **Τεχνική (Technique):** Η τεχνική με την οποία έχει κατασκευαστεί ή διακοσμηθεί το κάθε αγγείο (π.χ. τροχήλατη / χειροποίητη, ερυθρόμορφη/μελανόμορφη κτλ.).
- vi. **Απόδοση (Attribution):** Ο αγγειογράφος ή η ομάδα στην οποία αποδίδεται η κατασκευή ενός αγγείου. Η πληροφορία σχετίζεται με την τεχνική κατασκευής ενός αγγείου, τη χρονολόγησή του, αλλά και με το άτομο και την κοινωνία που το κατασκεύασε.
- vii. **Εργαστήριο (WorkShop):** Το εργαστήριο στο οποίο κατασκευάστηκε ένα αγγείο. Η γνώση του εργαστηρίου παραγωγής επιτρέπει στους αρχαιολόγους να παρακολουθούν την παραγωγή του στην πορεία του χρόνου και στη συνέχεια να αναγνωρίζουν την προέλευση και τη χρονολόγηση παρόμοιων παραδειγμάτων.
- viii. **Χρονολόγηση (Dating):** Η χρονολόγηση του κάθε αγγείου. Η γνώση του χρόνου που κατασκευάστηκε ένα αγγείο επιτρέπει τη μελέτη της εξέλιξης της

τυπολογίας ενός σχήματος και προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την εποχή και την κοινωνία που το κατασκεύασε. Σε περιπτώσεις όπου το αγγείο είναι *συνθετικό* (κατασκευασμένο σε Η/Υ) χρησιμοποιείται η ημερομηνία κατασκευής του 3D μοντέλου.

- ix. **Σχόλια (Comments):** Το πεδίο αυτό επιλέχθηκε για την προσθήκη οποιονδήποτε συμπληρωματικών πληροφοριών θεωρούνται απαραίτητες για το αγγείο.
- x. **Προφίλ Αγγείου (Vessel Profile):** Ονομασία αρχείου που περιλαμβάνει το διανυσματικό προφίλ του αγγείου (Μορφότυπος αρχείου: .JPG).
- xi. **QPProfile:** Ονομασία αρχείου του διανυσματικού προφίλ του αγγείου που κατασκευάστηκε με το *QP* (Μορφότυπος αρχείου: .QP).
- xii. **ThreeDVThumb:** Ονομασία αρχείου ψηφιογραφικής μικρογραφίας του 3D μοντέλου (Μορφότυπος αρχείου: .JPG).
- xiii. **ThreeDVModel:** Ονομασία αρχείου 3D μοντέλου του αγγείου.
- xiv. **ThreeDVFileSize:** Μέγεθος αρχείου 3D μοντέλου.
- xv. **ThreeDVTriangles:** Πλήθος τριγώνων του 3D μοντέλου.
- xvi. **ThreeDVVertices:** Πλήθος κορυφών του 3D μοντέλου.
- xvii. **ThreeDVGenTime:** Απαιτούμενος χρόνος για τη δημιουργία του 3D μοντέλου (χρήση κυρίως από το *QP*).
- xviii. **ThreeDVHeight:** Ύψος 3D αγγείου.
- xix. **ThreeDVWidth:** Πλάτος 3D αγγείου (Μέγιστο σημείο).
- xx. **ThreeDVShapeDis:** Το ιστόγραμμα του MPEG-7 3D Shape Spectrum περιγραφέα.

Τα πεδία *x*, *xi*, *xii*, *xvii*, *xviii*, *xix* αφορούν την εφαρμογή *QP* και μπορεί να παραληφθούν όταν το προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές. Στον πίνακα 4-4 παρουσιάζεται το σχήμα *ThreeDVDS* σε γλώσσα *Description Definition Language* (DDL).

```

1. <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2. <schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:mpeg7="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004"
3. xmlns:TSRDNS="ThreeDVDSNS" targetNamespace="ThreeDVDSNS">
4. <import namespace="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004" schemaLocation="Mpeg7-2004.xsd"/>
5. <complexType name="ThreeDVDS" final="#all">
6.   <complexContent>
7.     <complexType name="VesselData">
8.       <extension base="mpeg7:VisualDType">
9.         <sequence>
10.          <element name="Id" type="mpeg7:unsigned32" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
11.          <element name="Shape" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
12.          <element name="TypeOfShape" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
13.            maxOccurs="1"/>
14.          <element name="PreservationState" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
15.            maxOccurs="1"/>
16.          <element name="Dimensions" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
17.            maxOccurs="1"/>
18.          <element name="Technique" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
19.            maxOccurs="1"/>
20.          <element name="Attribution" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
21.            maxOccurs="1"/>
22.          <element name="WorkShop" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
23.            maxOccurs="1"/>
24.          <element name="Dating" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
25.          <element name="Comments" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
26.            maxOccurs="1"/>
27.          <element name="VesselProfile" type="mpeg7:MediaLocatorType" minOccurs="0"
28.            maxOccurs="1"/>
29.          <element name="QPPProfile" type="mpeg7:MediaLocatorType" minOccurs="0"
30.            maxOccurs="1"/>
31.          <element name="ThreeDVThumb" type="mpeg7:MediaLocatorType" minOccurs="0"
32.            maxOccurs="1"/>
33.          <element name="ThreeDVModel" type="mpeg7:MediaLocatorType" minOccurs="1"
34.            maxOccurs="1"/>
35.          <element name="ThreeDVFileSize" type="mpeg7:float" minOccurs="0"
36.            maxOccurs="1"/>
37.          <element name="ThreeDVTriangles" type="mpeg7:unsigned32" minOccurs="0"
38.            maxOccurs="1"/>
39.          <element name="ThreeDVVertices" type="mpeg7:unsigned32" minOccurs="0"
40.            maxOccurs="1"/>
41.          <element name="ThreeDVGenTime" type="mpeg7:float" minOccurs="0"
42.            maxOccurs="1"/>
43.          <element name="ThreeDVHeight" type="mpeg7:float" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
44.          <element name="ThreeDVWidth" type="mpeg7:float" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
45.          <element name="Date" type="mpeg7:Date" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
46.          <complexType>
47.            <element name="ThreeDVShapeDis" type="mpeg7:Shape3DType" minOccurs="0"
48.              maxOccurs="1"/>
49.          </complexType>
50.        </sequence>
51.      </extension>
52.    </complexContent>
53.  </complexType>
54. </schema>

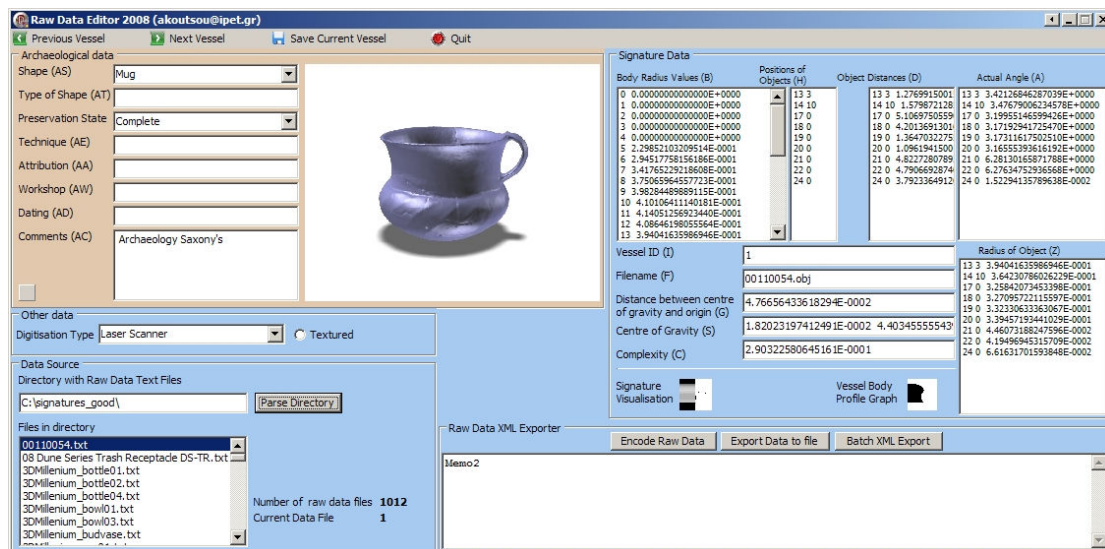
```

Πίνακας 4-4 Το ThreeDVDS σχήμα συμμορφούμενο με το πρότυπο MPEG-7.

4.5 Βαθμονόμηση της πρότυπης βάσης δεδομένων
































Η βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε αποτελείται από 1,012 αγγεία, 94 από αυτά είναι ψηφιοποιημένα αντίγραφα πραγματικών αγγείων και τα υπόλοιπα 718 μοντελοποιημένα χειροκίνητα σε Η/Υ και 200 μοντελοποιημένα με το *QP*. Η τυπολογία των αγγείων καλύπτει κατηγορίες αρχαίων Ελληνικών, Ρωμαϊκών, Αμερικάνων ιθαγενών καθώς και μοντέρνας κεραμικής. Η τελευταία κατηγορία εκλαμβάνεται ως *θόρυβος* και έχει ως στόχο την ενίσχυση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων αποτίμησης της απόδοσης των μεθόδων ανάκτησης. Στα πλαίσια της διαδικασίας ταξινόμησης των αγγείων αναπτύχθηκε επίσης μια αυτόνομη

εφαρμογή σε γλώσσα προγραμματισμού *Borland Delphi 2005* που επιτρέπει την επεξεργασία των μεταδεδομένων των αγγείων. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής. Τα μεταδεδομένα του εκάστοτε αγγείου προβάλλονται στο χρήστη.



Σχήμα 4-20 Στιγμιότυπο της εφαρμογής επεξεργασίας μεταδεδομένων τρισδιάστατων αντιγράφων αγγείων.

Ο πίνακας 4-5 περιλαμβάνει το σύνολο των αγγείων που υπάρχουν σε κάθε μια από τις κατηγορίες. Η τεκμηρίωση των αγγείων πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο κατηγοριοποίησης σχήματος των αγγείων αλλά και σε επίπεδο σχολιασμού με μεταδεδομένα που συμφωνούν με το σχήμα *ThreeDVDS*. Η τεκμηρίωση του περιεχομένου της βάσης δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε συνεργασία με αρχαιολόγους του τμήματος πολιτιστικής κληρονομιάς του Ι.Π.Ε.Τ/Ε.Κ. «Αθηνά».

Σχήμα	Ονομασία	Πλήθος	Σχήμα	Ονομασία	Πλήθος
	Αλάβαστρον	55		Λυδίων	1
	Αμφορέας	96		Μαστός	1
	Αρύβαλλος	1		Κούπα	1
	Αωτο σκυφίδιο	8		Νεστορίς	1
	Δίνος	2		Οινοχόη	25
	Σκύφος	3		Πελίκη	12
	Στάμνος	1		Πίθος	6
	Υδρία	26		Ψυκτήρ	49
	Κάλαθος	54		Πυξίς	6
	Κάνθαρος	3		Σκύφος	3
	Κρατήρας	17		Πλατύστομο δοχείο - Αμερικάνων ιθαγενών	5
	Κύαθος	1		Ομοίωμα (Effigy) - Αμερικάνων ιθαγενών	5
	Κύλικα	20		Κούπα (bowl) - Αμερικάνων ιθαγενών	2
	Λάγυνος	1		Φιάλη (Bottle) - Αμερικάνων ιθαγενών	36
	Λέβης	2		Διάφορα μοντέρνα σχήματα	548
	Λήκυθος	21			

Πίνακας 4-5 Πλήθος αντικειμένων σε κάθε κατηγορία αγγείου.

Κεφάλαιο 5

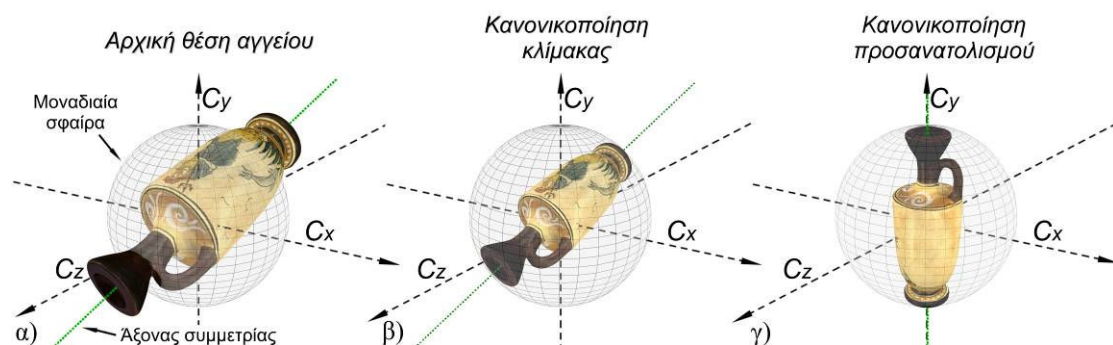
Κανονικοποίηση Κλίμακας και Προσανατολισμού Τρισδιάστατων Αγγείων

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται μία πρότυπη μέθοδος κανονικοποίησης της κλίμακας και του προσανατολισμού ενός ακέραιου ή σχεδόν ακέραιου τρισδιάστατου αγγείου. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε επιφάνειες τρισδιάστατων αντικειμένων που περιγράφονται από ακανόνιστα τριγωνικά πλέγματα. Η διαδικασία κανονικοποίησης στοχεύει στην τοποθέτηση του αγγείου σε μια προκαθορισμένη θέση, με την κατάλληλη κλίμακα και με προσανατολισμό που σχετίζεται με τη θέση του στομίου και των προσαρτημάτων που αυτό φέρει. Η εφαρμογή της διαδικασίας κανονικοποίησης στα αγγεία της πρότυπης βάσης δεδομένων επιτρέπει την εξαγωγή συγκρίσιμων μορφολογικών χαρακτηριστικών. Η λειτουργία της μεθόδου στηρίζεται στην αξονική συμμετρία των αγγείων η οποία θεωρείται και ένα από τα πλέον ιδιαίτερα μορφολογικά χαρακτηριστικά τους αφού διατηρείται (σε κάποιο βαθμό) ακόμα και όταν το αγγείο δεν έχει κατασκευαστεί σε τροχό. Η αναγνώριση του άξονα συμμετρίας που απαιτεί ο αλγόριθμος κανονικοποίησης προκύπτει από διαδικασίες *χάραξης ισοϋψών καμπυλών* (Plane-based Contouring) στην επιφάνεια του τριγωνικού πλέγματος και στη μετέπειτα τμηματοποίηση (segmentation) τους. Για την ανάλυση της μεθόδου και της αποτελεσματικότερης γραφικής αναπαράστασης της λειτουργίας της μεθόδου

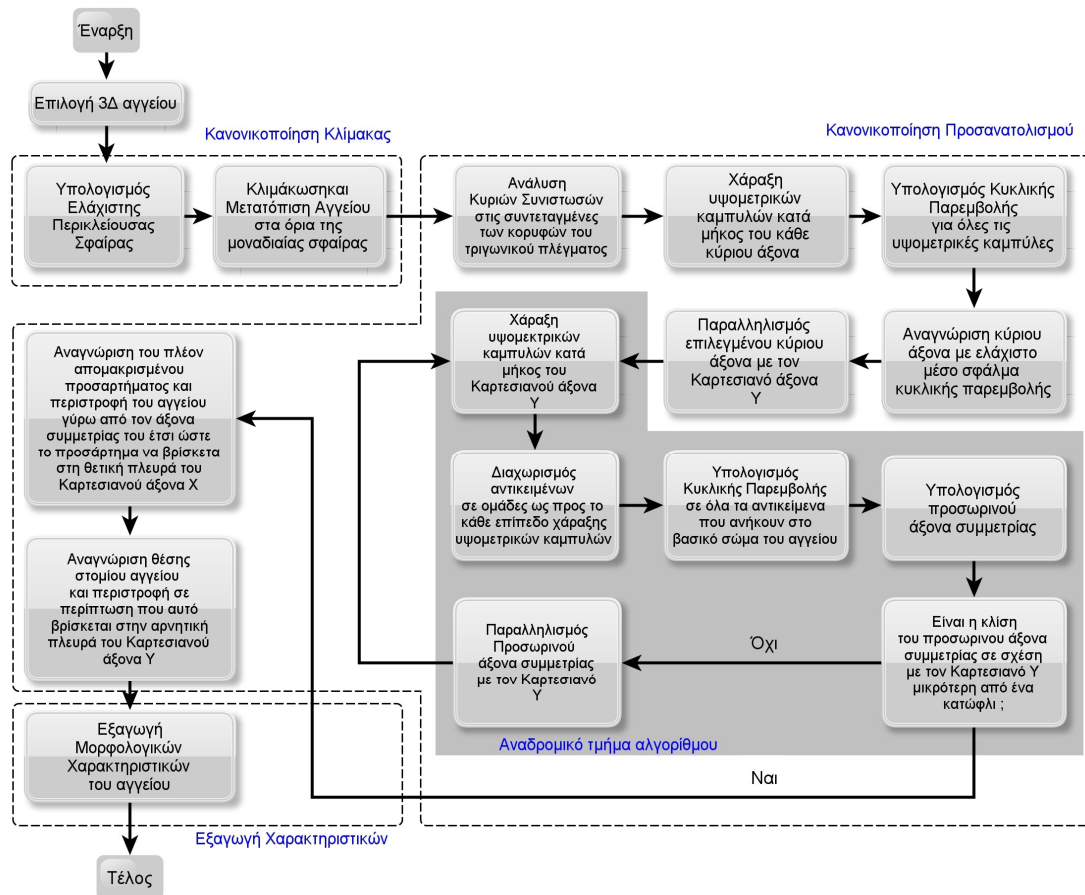
χρησιμοποιούνται εναλλακτικά δύο τύποι αγγείων (Λήκυθος και Αμφορέας) οι οποίοι διαθέτουν συγκεκριμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά.

Στο σχήμα 5-1 απεικονίζονται τα βασικά στάδια της προτεινόμενης μεθόδου. Αρχικά το τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο του αγγείου βρίσκεται σε μία τυχαία θέση μέσα στο 3D χώρο με τον άξονα συμμετρίας του προσανατολισμένο προς μία επίσης τυχαία κατεύθυνση (Σχήμα 5-1.α). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντεταγμένες του κέντρου και η ακτίνα της *ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας* (Minimum bounding sphere) του αγγείου. Ακολούθως εφαρμόζονται στις κορυφές του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου μία σειρά μετασχηματισμών κλιμάκωσης και μετατόπισης που θα οδηγήσουν στον περιορισμό του μέσα σε μία μοναδιαία σφαίρα (Σχήμα 5-1.β). Το τελικό στάδιο της διαδικασίας κανονικοποίησης επιτυγχάνεται διαμέσου ενός αναδρομικού αλγορίθμου σύμφωνα με τον οποίο αναγνωρίζεται ο άξονας συμμετρίας του αγγείου και με την εφαρμογή κατάλληλων μετασχηματισμών περιστροφής τίθεται σε κατεύθυνση παράλληλη με αυτή του καρτεσιανού άξονα C_y (Σχήμα 5-1.γ). Επίσης στο τελικό στάδιο της διαδικασίας κανονικοποίησης εφαρμόζονται μία ακολουθία μετασχηματισμών περιστροφής οι οποίοι θέτουν το στόμιο του αγγείου στη θετική πλευρά του άξονα C_y και το πλέον απομακρυσμένο προσάρτημα του αγγείου στη θετική πλευρά του άξονα C_x . Στη Λήκυθο του παρακάτω σχήματος, το μοναδικό προσάρτημα είναι η λαβή της, η οποία και εμφανίζεται μετά την ολοκλήρωση της κανονικοποίησης στη θετική πλευρά του άξονα C_x .



Σχήμα 5-1 Κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού αγγείων.

Το σχήμα 5-2 απεικονίζει το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου κανονικοποίησης. Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου αναλύονται λεπτομερώς οι διαδικασίες κανονικοποίησης σύμφωνα με τη σειρά που παρουσιάζονται στο διάγραμμα.



Σχήμα 5-2 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου κανονικοποίησης.

5.2 Κανονικοποίηση κλίμακας

Η κανονικοποίηση της κλίμακας του τρισδιάστατου μοντέλου ενός αγγείου βασίζεται στον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας. Ο υπολογισμός της αποτελεί κλασικό πρόβλημα της *υπολογιστικής γεωμετρίας* (Computational Geometry). Μία σφαίρα στο χώρο ορίζεται μοναδικά από τέσσερα μη συνεπίεδα σημεία. Για τα τέσσερα αυτά μη-συνεπίεδα σημεία $P(x_1, y_1, z_1)$, $P(x_2, y_2, z_2)$, $P(x_3, y_3, z_3)$, $P(x_4, y_4, z_4)$ υπάρχει μία μοναδική σφαίρα η επιφάνεια της οποίας περνάει από αυτά και προκύπτει από την ισότητα της ορίζουσας του παρακάτω πίνακα:

$$\begin{vmatrix} x^2 + y^2 + z^2 & x & y & z & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 & x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 & x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 & x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.1)$$

Η ισότητα μπορεί να λυθεί υπολογίζοντας τις υποορίζουσες την πρώτης γραμμής της ορίζουσας του παραπάνω πίνακα. Ως εκ τούτου, η ισότητα μπορεί να γραφεί ως εξής: $(x^2 + y^2 + z^2) \cdot M_{11} - xM_{12} + yM_{13} - zM_{14} + M_{15} = 0$ και αφού από την εξίσωση της σφαίρας ισχύει πως $r^2 = (x^2 + y^2 + z^2)$, η εξίσωση απλοποιείται και παίρνει τη μορφή:

$$r^2 - \frac{xM_{12}}{M_{11}} + \frac{yM_{13}}{M_{11}} - \frac{zM_{14}}{M_{11}} + \frac{M_{15}}{M_{11}} = 0 \quad (5.2)$$

Η εξίσωση μίας σφαίρας με ακτίνα r_0 και κέντρο (x_0, y_0, z_0) έχει τη μορφή

$$\begin{aligned} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - r^2 &= 0 \Leftrightarrow \\ (x^2 - 2x \cdot x_0 + x_0^2) + (y^2 - 2y \cdot y_0 + y_0^2) + (z^2 - 2z \cdot z_0 + z_0^2) - r^2 &= 0 \Leftrightarrow \\ r^2 - 2x \cdot x_0 - 2y \cdot y_0 - 2z \cdot z_0 + x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - r_0^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Εξισώνοντας του όμοιους όρους της 5.3 με αυτούς της 5.2 προκύπτουν:

$$\begin{aligned} x_0 &= 0.5 \frac{M_{12}}{M_{11}}, y_0 = -0.5 \frac{M_{13}}{M_{11}}, z_0 = 0.5 \frac{M_{14}}{M_{11}} \\ r_0^2 &= x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - \frac{M_{15}}{M_{11}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Σε περιπτώσεις όπου η υποορίζουσα M_{11} είναι μηδενική τότε τα σημεία δεν βρίσκονται στην επιφάνεια της σφαίρας ίσως επειδή είναι συνεπίπεδα ή ίσως επειδή τρία από αυτά ανήκουν στην ίδια ευθεία στο χώρο.

Μία εξαντλητική μέθοδος (brute force) υπολογισμού της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας μίας ακολουθίας σημείων μπορεί να προκύψει από τον υπολογισμό των σφαιρών που προκύπτουν από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τεσσάρων σημείων. Από τις προκύπτουσες σφαίρες χαρακτηρίζονται ως αποδεκτές λύσεις οι σφαίρες που περιέχουν όλα τα σημεία της ακολουθίας. Η ίδια διαδικασία

πραγματοποιείται για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τριών σημείων και δύο σημείων. Η ελάχιστη περικλείουσα σφαίρα τριών σημείων προκύπτει από τον υπολογισμό του ελάχιστου κύκλου που βρίσκεται πάνω στο επίπεδο που ορίζει το τρίγωνο που ορίζεται από τα ίδια τα σημεία. Για δύο σημεία το κέντρο της ελάχιστης σφαίρας συμπίπτει με το κέντρο βάρους τους. Από το σύνολο όλων των αποδεκτών σφαιρών η ελάχιστη περικλείουσα σφαίρα είναι εκείνη που έχει τη μικρότερη ακτίνα και περιλαμβάνει όλα τα σημεία της ακολουθίας. Η χρονική ασυμπτωτική πολυπλοκότητα της συγκεκριμένης προσέγγισης ανήκει στη τάξη του $O(n^5)$ με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται άμεσα ως μία μη αποδοτική λύση [108].

Ο αλγόριθμος του Welzl [110] υπόσχεται μία γραμμική συμπεριφορά. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προκύπτει από τη θεώρηση πως για μια ελάχιστη σφαίρα S που περικλείει όλα τα σημεία της ακολουθίας P και ένα νέο σημείο Q , υπάρχει ανάγκη υπολογισμού της νέας σφαίρας μόνο όταν το Q βρίσκεται εκτός των ορίων της S . Βασιζόμενος σε αυτή την παρατήρηση ο αλγόριθμος του Welzl διατηρεί δύο ακολουθίες σημείων, αυτή που περιέχει όλα τα σημεία (L) για τα οποία αναζητείται η ελάχιστη περικλείουσα σφαίρα και μία δεύτερη (B) που περιλαμβάνει τα σημεία που βρίσκονται πάνω στα όρια της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας. Ο αλγόριθμος υπολογίζει την ελάχιστη σφαίρα ξεκινώντας από ένα τυχαίο σημείο και προσθέτει κάθε φορά ένα νέο σημείο από την ακολουθία L [110]. Η αποδοτικότητα του αλγορίθμου του Welzl προκύπτει από την αναδρομική ταξινόμηση των *σημαντικών* σημείων μέσα στην ακολουθία L . Ως σημαντικά ορίζονται τα πλέον απομακρυσμένα σημεία από το κέντρο της τρέχουσας ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας. Η διαδικασία ταξινόμησης αναλαμβάνει να φέρει αυτά τα σημεία στην αρχή της ακολουθίας με στόχο να συμπεριληφθούν νωρίς στον υπολογισμό της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας μειώνοντας έτσι το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση οδηγεί τον αλγόριθμο να αυξήσει πολύ σύντομα το μέγεθος της ακτίνας της σφαίρας.

Μετά τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας υπολογίζονται ο μετασχηματισμός μετατόπισης που θα επιτρέψει τις συντεταγμένες του κέντρου της να συμπίπτουν με την αρχή των αξόνων καθώς και ο μετασχηματισμός κλιμάκωσης που θα περιορίσει το μέγεθος της ακτίνας της σφαίρας σε 0.5 μονάδες. Οι μετασχηματισμοί αυτοί εφαρμόζονται σε όλες τις

κορυφές του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου περιορίζοντας το μέσα στα όρια της μοναδιαίας σφαίρας (Σχήμα 5-1.β). Έστω V η ακολουθία κορυφών του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου, n το πλήθος κορυφών, D το διάνυσμα που καθορίζει την απόσταση του κέντρου της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας από την αρχή των αξόνων και V_s ο παράγοντας κλιμάκωσης, τότε οι νέες συντεταγμένες των κορυφών προκύπτουν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V'_{x_i} \\ V'_{y_i} \\ V'_{z_i} \\ 1 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} V_{x_i} \\ V_{y_i} \\ V_{z_i} \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \\ 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} V_s \\ V_s \\ V_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

5.3 Κανονικοποίηση προσανατολισμού

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας κανονικοποίησης της κλίμακας εκτελείται ο αλγόριθμος κανονικοποίησης προσανατολισμού του αγγείου ως προς τη θέση του άξονα συμμετρίας του, τις θέσεις των προσαρτημάτων που φέρει καθώς και της θέσης του στομίου του (Σχήμα 5-1.γ). Βασικός στόχος του αλγορίθμου είναι η αναγνώριση του άξονα συμμετρίας του αγγείου (V_a) και η εφαρμογή των κατάλληλων μετασχηματισμών περιστροφής που θα παραλληλίσουν τον V_a με τον άξονα Cy του τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος.

Καθώς τα ψηφιακά αντίγραφα πραγματικών αγγείων φέρουν ατέλειες που προκύπτουν κατά τη διαδικασία κατασκευής τους ή από την επακόλουθη διάβρωση μέσα στο πέρασμα του χρόνου, ο αλγόριθμος επιχειρεί να συγκλίνει σε έναν βέλτιστο άξονα συμμετρίας.

5.3.1 Εντοπισμός του άξονα συμμετρίας

Η αρχικοποίηση της διαδικασίας κανονικοποίησης προσανατολισμού περιλαμβάνει την *ανάλυση κυρίων συνιστωσών* (ΑΚΣ). Στόχος της εφαρμογής της ΑΚΣ είναι ο εντοπισμός του κύριου άξονα που προσεγγίζει βέλτιστα την κατεύθυνση του πραγματικού άξονα συμμετρίας (V_a) του αγγείου. Ο εντοπισμός αυτός συνεισφέρει στη μείωση του πλήθους των επαναλήψεων που εκτελούνται στο αναδρομικό τμήμα του αλγορίθμου (Σχήμα 5-2).

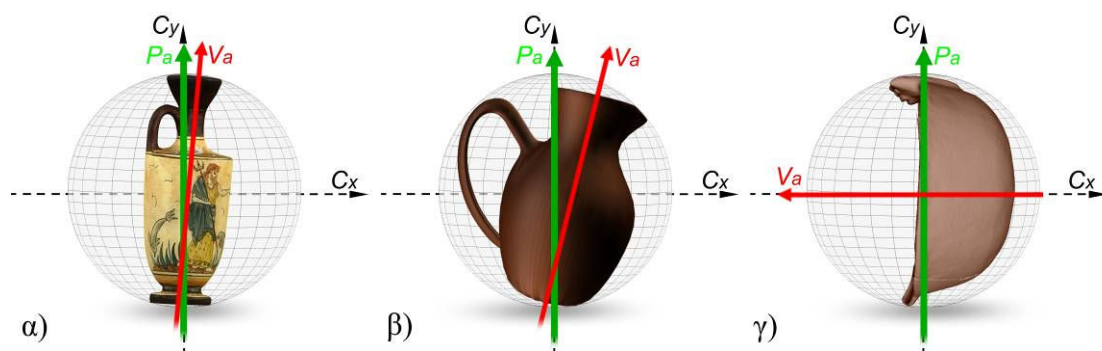
Η ΑΚΣ δεν μπορεί να αποτελέσει από μόνη της αξιόπιστη μέθοδο αναγνώρισης του πραγματικού άξονα συμμετρίας (V_a) ενός αγγείου. Τα αποτελέσματα της ΑΚΣ επηρεάζονται από παράγοντες όπως είναι η μη-κανονική κατανομή των κορυφών στην επιφάνεια του τριγωνικού πλέγματος και η ύπαρξη προσαρτημάτων. Επίσης υπάρχουν κατηγορίες αγγείων όπου η διεύθυνση του πρώτου κύριου άξονα δεν αποτελεί τη βέλτιστη προσέγγιση του V_a με αποτέλεσμα να τίθεται επιπλέον το ερώτημα για το «*Ποιος από τους τρεις κύριους άξονες είναι τελικά αυτός που προσεγγίζει βέλτιστα τη κατεύθυνση του V_a* ».

Η μη-κανονική κατανομή των κορυφών ενός τριγωνικού πλέγματος είναι συνηθισμένο φαινόμενο για ένα μοντέλο που αποτελεί προϊόν τρισδιάστατης ψηφιοποίησης. Το φαινόμενο αυτό προκύπτει συνήθως από την εφαρμογή ενός προσαρμοστικού αλγόριθμου *αποδεκατισμού* (decimation) του πλήθους των κορυφών. Οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν υπόψη τους το βαθμό καμπυλότητας της επιφάνειας του αντικειμένου σε γειτονιές τριγώνων και με μια απωλεστική (*lossy*) διαδικασία καταλήγουν σε ένα συμβιβασμό ανάμεσα στις λεπτομέρειες του πλέγματος και του όγκου δεδομένων που απαιτούνται για την περιγραφή του. Ως εκ τούτου περιοχές χωρίς έντονες μεταβολές περιγράφονται με μικρότερο πλήθος κορυφών και καθώς η ΑΚΣ υπολογίζεται πάνω στις κορυφές του πλέγματος, η μη-κανονική κατανομή επηρεάζει τις κατευθύνσεις των κυρίων αξόνων. Τα αποτελέσματα της ΑΚΣ μπορεί να βελτιωθούν δημιουργώντας νέες κορυφές στην επιφάνεια του κάθε τριγώνου, το πλήθος των οποίων είναι ανάλογο του εμβαδού του. Παρόλα αυτά σε αγγεία που φέρουν ένα μόνο προσάρτημα (π.χ. μία μόνο λαβή), τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης παραλλαγής παραμένουν αναξιόπιστα καθώς θα υπάρχει και πάλι πόλωση προς την κατεύθυνση του προσαρτήματος.

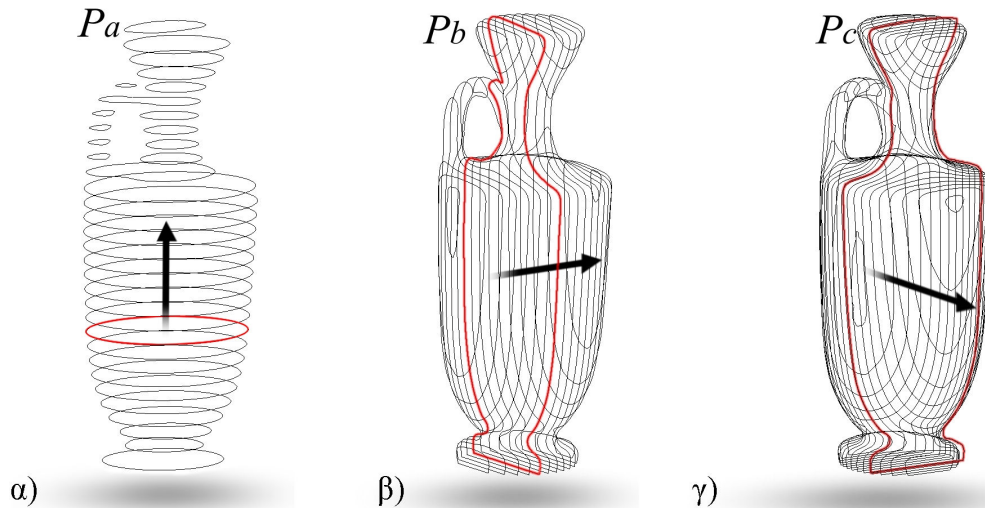
Παρακάτω απεικονίζονται δύο παραδείγματα απόκλισης του πρώτου κύριου άξονα από τον πραγματικό άξονα συμμετρίας (Σχήμα 5-3.α και Σχήμα 5-3.β) καθώς και μία περίπτωση όπου ο πρώτος κύριος άξονας δεν είναι αυτός που προσεγγίζει βέλτιστα την κατεύθυνση του V_a (Σχήμα 5-3.γ). Η αβεβαιότητα της βέλτιστης προσέγγισης του V_a από τον πρώτο κύριο άξονα (P_a) (Σχήμα 5-3.γ) επιβάλλει την εφαρμογή του επόμενου βήματος του αλγορίθμου, που εκμεταλλεύεται το χαρακτηριστικό της αξονικής συμμετρίας που φέρουν τα αγγεία και οδηγεί στην

ασφαλή αναγνώριση του κύριου άξονα (P_a , P_b ή P_c) που προσεγγίζει βέλτιστα την κατεύθυνση του V_a .

Η αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου τμήματος του αλγορίθμου στηρίζεται στο ελλειψοειδές σχήμα που θα φέρουν οι καμπύλες που προκύπτουν από τη χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος ενός άξονα (6^ο Παράρτημα) που έχει διεύθυνση παρόμοια με αυτή του άξονα V_a του αγγείου. Η χάραξη των ισοϋψών καμπυλών εκτελείται κατά μήκος του κάθε κύριου άξονα (P_a , P_b και P_c) με κάποιο επαυξητικό βήμα. Στο σχήμα 5-4 απεικονίζονται οι καμπύλες που προκύπτουν από τη χάραξη του πλέγματος κατά μήκος του εκάστοτε κύριου άξονα. Σε κάθε επίπεδο χάραξης του τριγωνικού πλέγματος προκύπτει ένα πλήθος *αντικειμένων* (καμπύλες που περιγράφονται τμηματικά από κορυφές οργανωμένες σε ευθύγραμμα τμήματα) η μορφή των οποίων ταυτίζεται με τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αγγείου στα σημεία χάραξης. Τα αντικείμενα αυτά ορίζονται πάνω σε κάθε επίπεδο χάραξης αρχικά ως μία *ακολουθία κορυφών* για τις οποίες εκτός από τις συντεταγμένες τους είναι γνωστοί και οι δείκτες οργάνωσης τους σε ευθύγραμμα τμήματα. Συνεπώς εφαρμόζεται μία προσέγγιση παρόμοια με αυτή που συναντάτε στη δομή των τριγωνικών πλεγμάτων με μόνη διαφορά την οργάνωση των κορυφών σε ζεύγη και όχι σε τριάδες.



Σχήμα 5-3 Περιπτώσεις απόκλισης του πρώτου κύριου άξονα (P_a) από τον πραγματικό άξονα συμμετρίας (V_a).



Σχήμα 5-4 Χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος των κυρίων αξόνων P_a , P_b και P_c

Για τον εντοπισμό του κύριου άξονα που προσεγγίζει βέλτιστα τον V_a είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός (τμηματοποίηση) των αντικειμένων που προκύπτουν σε κάθε επίπεδο χάραξης. Ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι άλλος από την τμηματοποίηση της αρχικής ακολουθίας κορυφών ενός επιπέδου χάραξης σε ένα πλήθος υποακολουθιών. Η κάθε νέα υποακολουθία περιγράφει είτε κάποιο τμήμα του βασικού σώματος του αγγείου είτε κάποιο τμήμα ενός προσαρτήματος. Οι δείκτες οργάνωσης των κορυφών σε ζεύγη αποτελούν τη βασική πληροφορία που εκμεταλλεύεται ο αλγόριθμος τμηματοποίησης η υλοποίηση του οποίου περιγράφεται αναλυτικά στο 5^ο Παράρτημα. Οι υποακολουθίες που προκύπτουν οργανώνονται σε τρεις διαφορετικές ομάδες. Η κάθε ομάδα αποτελείται από τις υποακολουθίες που προέκυψαν από τη χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος των τριών κύριων αξόνων. Για τις υποακολουθίες της κάθε ομάδας εφαρμόζεται κυκλική παρεμβολή (circular regression - 5^ο Παράρτημα) χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των κορυφών τους και υπολογίζεται η απόκλιση του σχήματος (BCF_j) τους από το τέλειο κύκλο. Για κάθε κύριο άξονα προκύπτει ένας μέσος όρος κυκλικής απόκλισης:

$$P_{x-error} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m BCF_j}{w}, \quad (5.6)$$

Όπου n : το πλήθος των επιπέδων χάραξης, m : το πλήθος των υποακολουθιών σε κάθε επίπεδο χάραξης και w το συνολικό πλήθος υποακολουθιών σε όλα τα επίπεδα. Όπως είναι αναμενόμενο η ελάχιστη κυκλική απόκλιση αναμένετε να εντοπιστεί στο κύριο άξονα που έχει κατεύθυνση παρόμοια με αυτή του πραγματικού άξονα συμμετρίας (V_a). Στην περίπτωση της Ληκύθου (Σχήμα 5-4), η χαμηλότερη απόκλιση εντοπίζεται στον άξονα P_a αφού οι προκύπτουσες τιμές είναι $P_{a-error} = 0.02783$, $P_{b-error} = 0.04698$ και $P_{c-error} = 0.04411$. Μετά τον εντοπισμό του κύριου άξονα, ο αλγόριθμος περιστρέφει το αγγείο έτσι ώστε ο συγκεκριμένος κύριος άξονας να παραλληλιστεί με τον C_y άξονα.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος κανονικοποίησης θέσης εισέρχεται στο αναδρομικό του τμήμα που θα ολοκληρωθεί με την αναγνώριση του πραγματικού άξονα συμμετρίας του αγγείου V_a και του παραλληλισμού του με τον άξονα C_y . Τα βήματα τα οποία επαναλαμβάνονται κατά τη διάρκεια του αναδρομικού τμήματος είναι τα εξής:

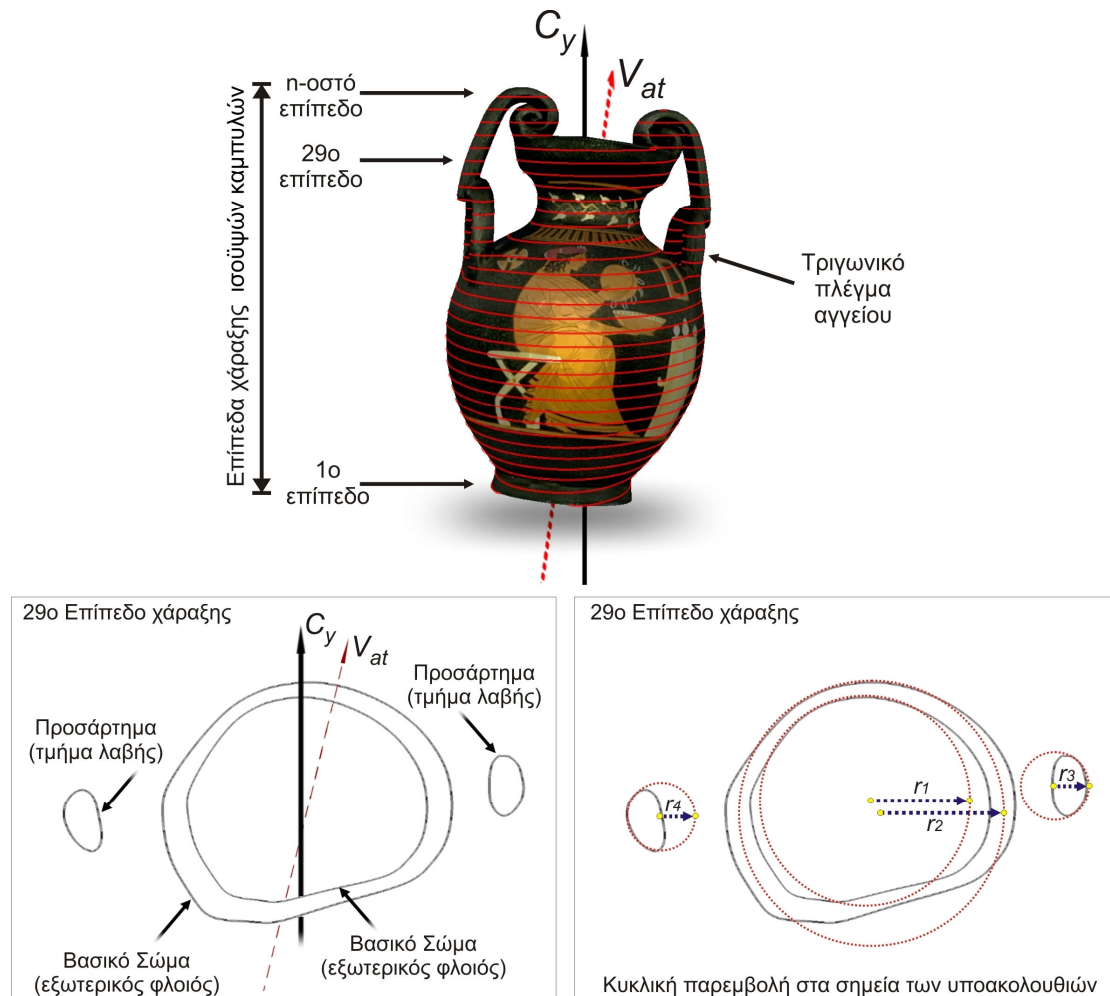
- i. Χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος του άξονα C_y .
- ii. Τμηματοποίηση της ακολουθίας κορυφών σε υποακολουθίες σε κάθε επίπεδο χάραξης.
- iii. Οργάνωση των υποακολουθιών σε ομάδες και εφαρμογή της κυκλικής παρεμβολής.
- iv. Αναγνώριση του *προσωρινού άξονα συμμετρίας* (V_{at}) του αγγείου.
- v. Εφαρμογή των κατάλληλων μετασχηματισμών περιστροφής έτσι ώστε να ισχύει $V_{at} \parallel C_y$.

Πιο συγκεκριμένα, μετά την ολοκλήρωση της χάραξης των ισοϋψών καμπυλών (βήμα i) εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της τμηματοποίησης των ακολουθιών κορυφών σε κάθε επίπεδο χάραξης (βήμα ii). Στη συνέχεια εκτελείτε η ομαδοποίηση των υποακολουθιών (βήμα iii). Οι δύο βασικές ομάδες στις οποίες οργανώνονται οι υποακολουθίες είναι οι παρακάτω:

- **Πρώτη Ομάδα:** Υποακολουθίες που αναπαριστούν τα εξωτερικά τμήματα του βασικού σώματος του αγγείου (Εξωτερικός φλοιός).

- **Δεύτερη Ομάδα:** Υποακολουθίες που αναπαριστούν τα εσωτερικά τμήματα του βασικού σώματος του αγγείου (Εσωτερικός φλοιός).
- **Τρίτη Ομάδα:** Υποακολουθίες που αναπαριστούν τμήματα των προσαρτημάτων του αγγείου.

Ο διαχωρισμός των υποακολουθιών υλοποιείται σύμφωνα με δύο κριτήρια. Οι υποακολουθίες που ανήκουν στις δύο πρώτες ομάδες έχουν το χαρακτηριστικό ότι ο άξονας C_r διαπερνά τους κύκλους παρεμβολής τους σε αντίθεση με αυτούς των υποακολουθιών της τρίτης ομάδας. Από την άλλη ο διαχωρισμός ανάμεσα στη πρώτη και στη δεύτερη ομάδα προκύπτει από το μέγεθος της ακτίνας του κύκλου παρεμβολής. Ο κύκλος με τη μεγαλύτερη ακτίνα υποδεικνύει την υποακολουθία που περιγράφει τον εξωτερικό φλοιό του αγγείου. Ο διαχωρισμός των υποακολουθιών στις ομάδες ένα και δύο είναι απαραίτητος αφού τα συστήματα τρισδιάστατης σάρωσης έχουν την ικανότητα να αποτυπώνουν, έστω και μερικώς, τμήματα της εσωτερικής επιφάνειας του αγγείου. Γενικά, η ικανότητα του συστήματος ψηφιοποίησης να αποτυπώνει τις εσωτερικές επιφάνειες ενός αγγείου εξαρτάται από τους περιορισμούς του οπτικού του συστήματος καθώς και από το ίδιο το σχήμα του αγγείου. Σε περιπτώσεις κλειστών σχημάτων, όπως μία Λήκυθος (Σχήμα 5-1), η εφαρμογή ενός συστήματος σάρωσης τριγωνισμού λέιζερ θα περιοριστεί μόνο στις εσωτερικές επιφάνειες του στομίου του αδυνατώντας να διεισδύσει περεταίρω στο εσωτερικό του αγγείου. Στο σχήμα 5-4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ομαδοποίησης των υποακολουθιών που προκύπτουν από τη χάραξη καμπύλων στο τριγωνικό πλέγμα ενός Αμφορέα με ελκωτές λαβές.



Σχήμα 5-5 Οργάνωση υποακολουθιών σε ομάδες.

Στο επόμενο βήμα (*iv*) του αναδρομικού τμήματος του αλγορίθμου πραγματοποιείται ο εντοπισμός της κατεύθυνσης του *προσωρινού άξονα συμμετρίας* (V_{at}). Για την εύρεση των εξισώσεων που περιγράφουν της ευθεία του άξονα V_{at} στο χώρο εφαρμόζεται η μέθοδος ορθογώνιας παρεμβολής (orthogonal regression) στις συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων παρεμβολής που ανήκουν στην πρώτη ομάδα (Εξωτερικός φλοιός βασικού σώματος του αγγείου). Η μέθοδος προσπαθεί να εντοπίσει την ευθεία εκείνη για την οποία ελαχιστοποιείται η απόσταση της από τα κέντρα των κύκλων. Η λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου *Ανάλυσης Ιδιαζουσών Τιμών* (Singular Value Decomposition - SVD) (8^ο Παράρτημα). Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για την επίλυση προβλημάτων ελαχίστων τετραγώνων. Έστω ότι οι συντεταγμένες

ενός σημείου πάνω σε μία ευθεία στο χώρο ορίζονται παραμετρικά από τις εξισώσεις:

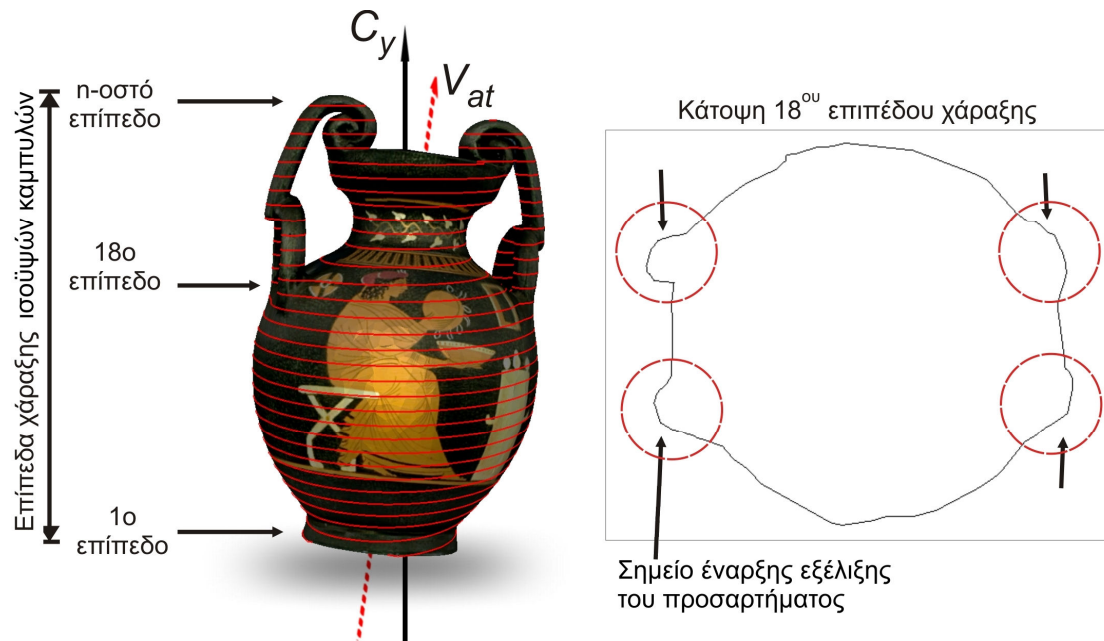
$$\begin{aligned}x &= m_1 + p_1 * t \\y &= m_2 + p_2 * t \\z &= m_3 + p_3 * t\end{aligned}\tag{5.7}$$

Έστω A ένας πίνακας $3 \times n$ ($n =$ πλήθος επιπέδων χάραξης ισοϋψών καμπυλών) που περιέχει τις συντεταγμένες των κέντρων των κύκλων παρεμβολής που ανήκουν στην πρώτη ομάδα (εξωτερικός φλοιός βασικού σώματος αγγείου):

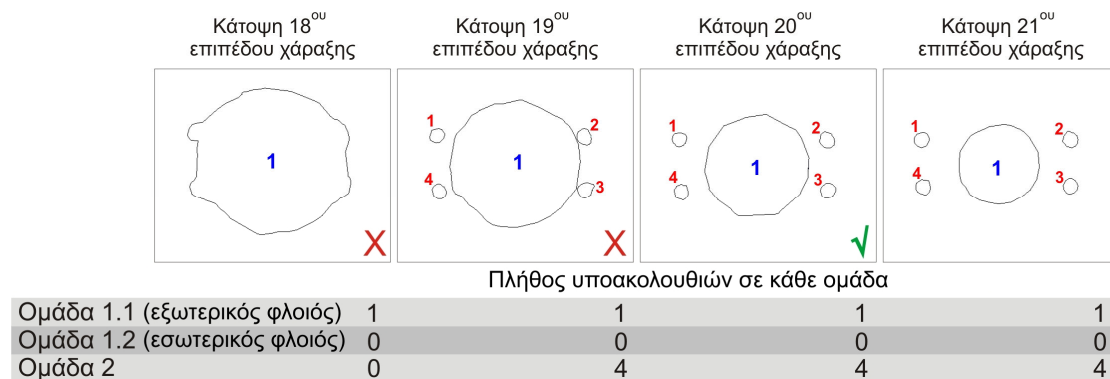
$$A = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ z_1 & z_2 & \dots & z_n \end{bmatrix}\tag{5.8}$$

Τότε εφαρμόζοντας τη συγκεκριμένη μέθοδο αποσύνθεσης ο πίνακας A εκφράζεται ως το γινόμενο τριών πινάκων U , S και V . Η κάθε στήλη του πίνακα U περιέχει τα ιδιοδιανύσματα του πίνακα AA^T . Οι τρεις ιδιοτιμές της πρώτης στήλης αντιστοιχούν στους συντελεστές p_1 , p_2 και p_3 των παραμετρικών εξισώσεων της ευθείας ενώ οι τιμές των συντελεστών m_1 , m_2 , m_3 υπολογίζονται ως η μέση τιμή των συντεταγμένων του κάθε άξονα.

Για τον ορθότερο υπολογισμό της εξίσωσης της ευθείας του V_{at} αποφεύγονται τα τμήματα του αγγείου στα οποία ξεκινούν να *εξελίσσονται* χωρικά τα προσαρτήματα του αγγείου. Μια τέτοια περίπτωση προκύπτει στο 18° επίπεδο χάραξης του Αμφορέα (Σχήμα 5-6). Ο λόγος αποφυγής των συγκεκριμένων τμημάτων απορρέει από το γεγονός ότι ο κύκλος που προκύπτει σε ένα τέτοιο επίπεδο διαθέτει ελαφρώς μετατοπισμένο κέντρο εξαιτίας της ενσωμάτωσης τμήματος του προσαρτήματος στο βασικό σώμα του αγγείου. Κατά συνέπεια, μία υποακολουθία κορυφών που αποτελεί τμήμα του εξωτερικού φλοιού του αγγείου (Ομάδα 1) χαρακτηρίζεται *χρήσιμη* για την εκτίμηση του V_{at} αν και μόνο αν τα πλήθη των υποακολουθιών του τρέχοντος επιπέδου χάραξης σε κάθε ομάδα συμπίπτουν με αυτά του προηγούμενου και του επόμενου επιπέδου χάραξης (Σχήμα 5-7).

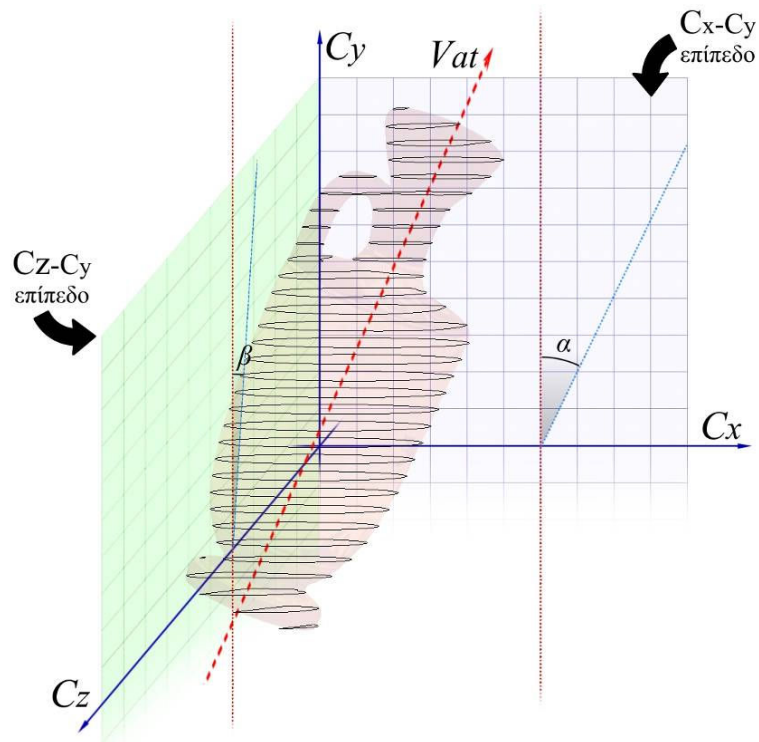


Σχήμα 5-6 Παράδειγμα περιοχής όπου παρατηρείται η εξέλιξη των προσαρτημάτων από το βασικό σώμα ενός Αμφορέα.



Σχήμα 5-7 Επιλογή των υποακολουθιών που ανήκουν στην πρώτη I'' ομάδα. Τα κέντρα των κύκλων παρεμβολής των υποακολουθιών θα χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό του προσωρινού άξονα συμμετρίας (V_{at}).

Μετά την εύρεση της εξίσωσης ευθείας του προσωρινού άξονα συμμετρίας (V_{at}), υπολογίζονται οι κλίσεις του ως προς τα επίπεδα (C_x-C_y) και (C_z-C_y). Το επόμενο σχήμα απεικονίζει τις προβολές του V_{at} μίας Ληκύθου πάνω στα δύο επίπεδα (C_x-C_y και C_z-C_y) καθώς και τις κλίσεις του σε σχέση με τον άξονα C_y .



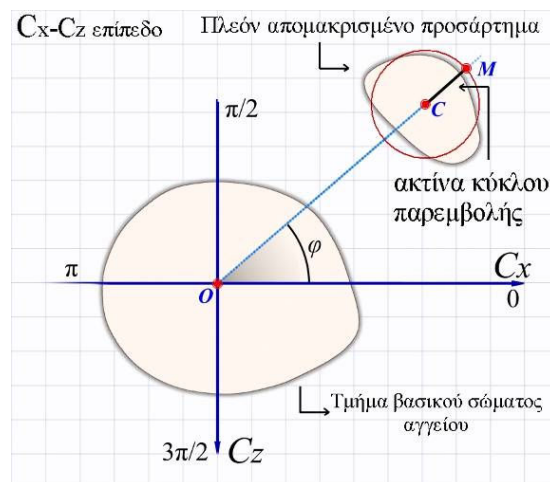
Σχήμα 5-8 Υπολογισμός των κλίσεων του προσωρινού άξονα V_{at} προς τα επίπεδα C_x-C_y και C_z-C_y αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός των κλίσεων προκύπτει από την ορθογραφική προβολή (2^ο Παράρτημα) του V_{at} αρχικά πάνω στο επίπεδο (C_x-C_y) . Υπολογίζεται η γωνία κλίσης α του V_{at} ως προς τον άξονα C_x και ο άξονας V_{at} υποβάλλεται σε μετασχηματισμό περιστροφής γύρω από τον άξονα C_z κατά μία γωνία $\pi/2-\alpha$. Στη συνέχεια ο περιστρεμμένος V_{at} προβάλλεται ορθογραφικά πάνω στο επίπεδο (C_z-C_y) και υπολογίζεται η γωνία κλίσης β ως προς τον άξονα C_x . Οι δύο αυτές κλίσεις χρησιμοποιούνται για την περιστροφή του αγγείου γύρω από τους άξονες C_x και C_z που οδηγούν στον παραλληλισμό του V_{at} με τον C_y .

Το αναδρομικό τμήμα του αλγορίθμου επαναλαμβάνεται έως ότου οι προκύπτουσες κλίσεις του προσωρινού άξονα συμμετρίας V_{at} καταλήξουν να είναι μικρότερες από ένα κατώφλι (στη παρούσα υλοποίηση 0.01°) ή μετά από ένα συγκεκριμένο πλήθος επαναλήψεων (20 επαναλήψεις στην παρούσα υλοποίηση) που υποδεικνύει ταλάντωση του αλγορίθμου (*algorithm oscillation*). Μετά τον τερματισμό του αναδρομικού τμήματος, ο τελευταίος προσωρινός άξονας συμμετρίας V_{at} θεωρείται ως ο πραγματικός άξονας συμμετρίας του αγγείου και ισχύει πως $V_{at} \parallel V_a \parallel C_y$.

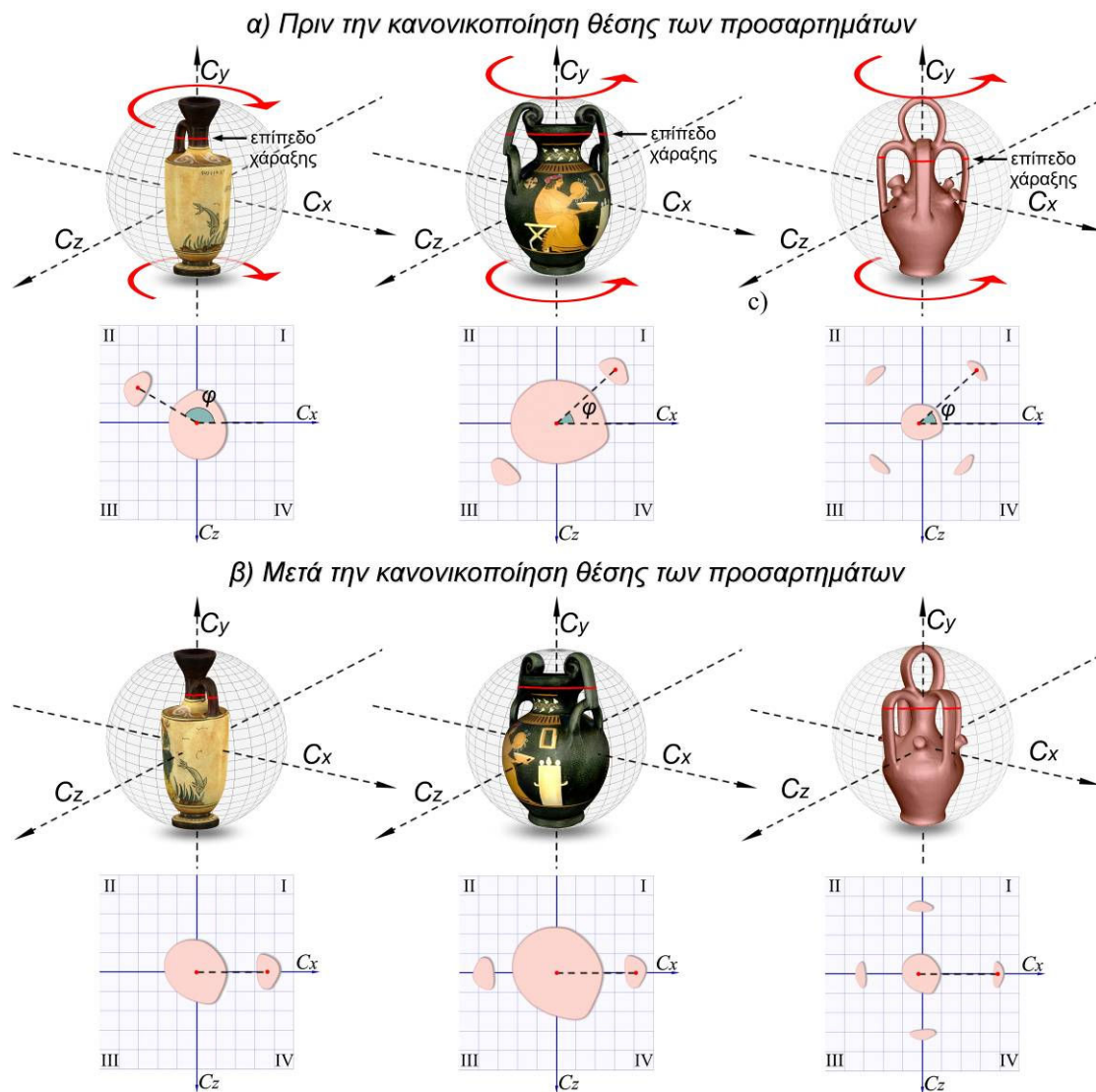
5.3.2 Κανονικοποίηση θέσης προσαρτημάτων

Το συγκεκριμένο βήμα του αλγορίθμου κανονικοποίησης της θέσης του αγγείου εκτελείται μόνο εφόσον έχουν εντοπιστεί προσαρτήματα. Το συμπέρασμα αυτό απορρέει από το πλήθος των υποακολουθιών που ανήκουν στην τρίτη ομάδα. Κατά την κανονικοποίηση της θέσης των προσαρτημάτων εφαρμόζονται στο τριγωνικό πλέγμα του αγγείου μετασχηματισμοί περιστροφής γύρω από τον άξονα C_y κατά μία γωνία ϕ (Σχήμα 5-9). Η περιστροφή αυτή μεταφέρει το κέντρο του πλέον απομακρυσμένου από τον άξονα συμμετρίας κύκλου παρεμβολής μίας υποακολουθίας που ανήκει στην τρίτη ομάδα στη θετική πλευρά του C_x . Μετά την περιστροφή, η συντεταγμένη του κέντρου του κύκλου παρεμβολής ως προς τον άξονα C_z είναι μηδενική. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5-9 ο υπολογισμός της απόστασης ενός προσαρτήματος από τον άξονα συμμετρίας V_a προκύπτει από το άθροισμα των ευθύγραμμων τμημάτων $d = |\overline{OC}| + |\overline{CM}|$.



Σχήμα 5-9 Υπολογισμός απόστασης των εξαρτημάτων από τον άξονα συμμετρίας του αγγείου (σημείο O) σε ένα επίπεδο χάραξης.

Σε περιπτώσεις όπου το αγγείο φέρει δύο αντιθετικές λάβες, αυτές τοποθετούνται στην αρνητική και θετική πλευρά του άξονα C_x ενώ σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, το πλέον απομακρυσμένο από τον V_a προσάρτημα χαρακτηρίζεται ως το κυρίαρχο και τοποθετείται στη θετική πλευρά του C_x . Στο σχήμα 5-10 παρουσιάζονται κάποιες από τις πιθανές περιπτώσεις.

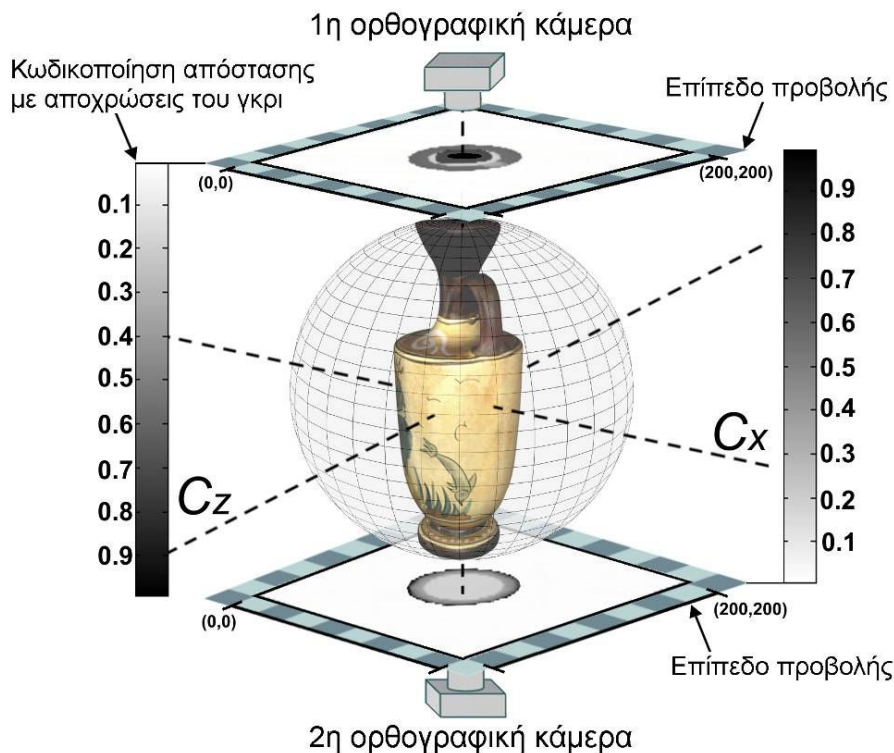


Σχήμα 5-10 Παραδείγματα κανονικοποίησης της θέσης των προσαρτημάτων ως προς τον άξονα C_x .

5.3.3 Αναγνώριση θέσης στομίου

Η αναγνώριση της θέσης του στομίου ενός αγγείου στηρίζεται στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο τμήμα τους φέρουν μία κοιλότητα η οποία οδηγεί στο εσωτερικό τους. Ο εντοπισμός της κοιλότητας προϋποθέτει την απεικόνιση του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου με τη μέθοδο *χάρτη-βάθους* (depth map rendering). Όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, δύο αντίθετες θέσεις παρατήρησης βρίσκονται τοποθετημένες έξω από τη μοναδιαία σφαίρα πάνω στη θετική και αρνητική πλευρά του άξονα συμμετρίας (V_a) του αγγείου. Οι ορθογραφικές προβολές του αντικειμένου καταγράφονται πάνω στα επίπεδα προβολής των θέσεων

παρατήρησης εφαρμόζοντας τη μέθοδο χάρτη-βάθους για τη φωτοσκίαση των επιφανειών του αγγείου. Στη συνέχεια ορίζεται μια κυκλική περιοχή ενδιαφέροντος (ακτίνα 0.05 μονάδες στην υλοποίηση του αλγορίθμου) πάνω στο επίπεδο προβολής της κάθε θέσης παρατήρησης με κέντρο τον άξονα συμμετρίας V_a .



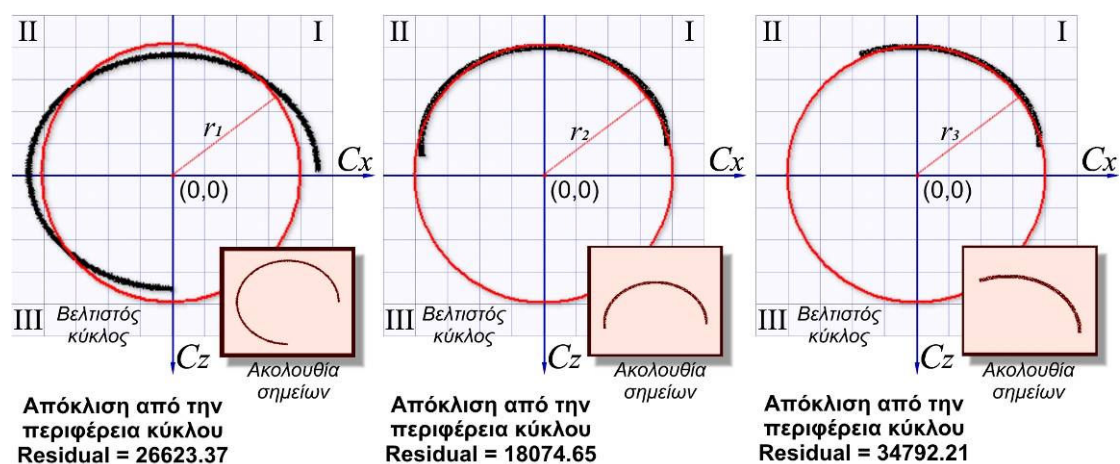
Σχήμα 5-11 Αναγνώριση της θέσης του στομίου ενός αγγείου.

Σε κάθε κυκλική περιοχή αθροίζονται οι τιμές που φέρουν τα εικονοστοιχεία. Τα πλέον απομακρυσμένα τμήματα της επιφάνειας του αγγείου παρουσιάζονται με διαβαθμίσεις κοντά στο μαύρο χρώμα. Το στόμιο του αγγείου προβάλλεται στη θέση παρατήρησης όπου το σύνολο των τιμών των εικονοστοιχείων της προκαθορισμένης κυκλικής περιοχής είναι μικρότερο. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι σε μια από τις δύο προβολές θα εμφανίζεται ένα τμήμα της βάσης του αγγείου μέσα από το κοιλότητα του στομίου. Η συγκεκριμένη επιφάνεια είναι πλέον απομακρυσμένη από το επίπεδο προβολής και άρα σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου χάρτης-βάθους τα εικονοστοιχεία αυτά θα φέρουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με το αντίθετο επίπεδο προβολής. Στην περίπτωση όπου το στόμιο του αγγείου εντοπιστεί στην αρνητική πλευρά του άξονα συμμετρίας του αγγείου τότε εφαρμόζεται ένας μετασχηματισμός περιστροφής του

αγγείου γύρω από τον άξονα C_x κατά 180° . Μετά την αναγνώριση της θέσης του στομίου του αγγείου, ολοκληρώνεται η διαδικασία προεπεξεργασίας του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου. Όπως προαναφέρθηκε η προεπεξεργασία είναι απαραίτητη για την εξαγωγή συγκρίσιμων μορφολογικών χαρακτηριστικών.

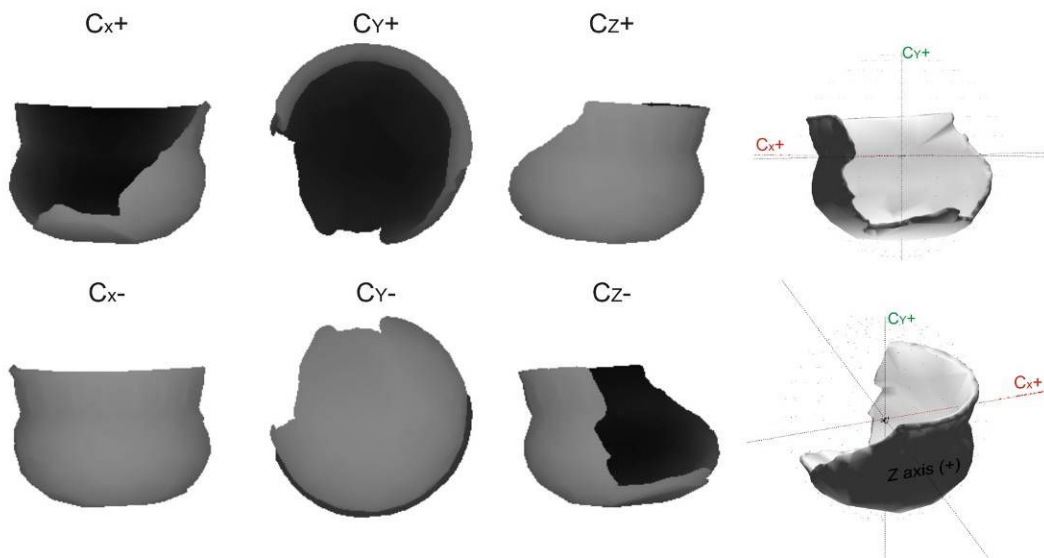
5.3.4 Χαρακτηριστικά αλγόριθμου

Η μέθοδος κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους έχει εφαρμογή σε αγγεία τα οποία είναι είτε ακέραια είτε *διασώζεται το προφίλ* τους (Παράγραφος 2.4). Η εφαρμογή της σε όστρακα αγγείων είναι ανεπιτυχής. Σε περιπτώσεις απουσίας τμημάτων από το αγγείο η χρήση της μεθόδου κυκλικής παρεμβολής καταφέρνει να ξεπεράσει μερικώς το πρόβλημα. Όπως παρουσιάζεται και στο επόμενο σχήμα, η μέθοδος κυκλικής παρεμβολής επιτυγχάνει να υπολογίσει τα χαρακτηριστικά του κύκλου ακόμα και όταν λείπουν τμήματα από τις υποακολουθίες κορυφών (Σχήμα 5-12). Στο σχήμα 5-13 παρουσιάζεται μια επιτυχής κανονικοποίηση μίας Λεκάνης της οποίας διασώζεται το προφίλ και ένα τμήμα από τη βάση της. Ο αλγόριθμος καταφέρνει να κανονικοποιήσει το αντικείμενο ως προς τον προσανατολισμό του εξαιτίας της ικανότητας της μεθόδου παρεμβολής κύκλων να λειτουργεί ακόμα και με ελλιπής πληροφορία.

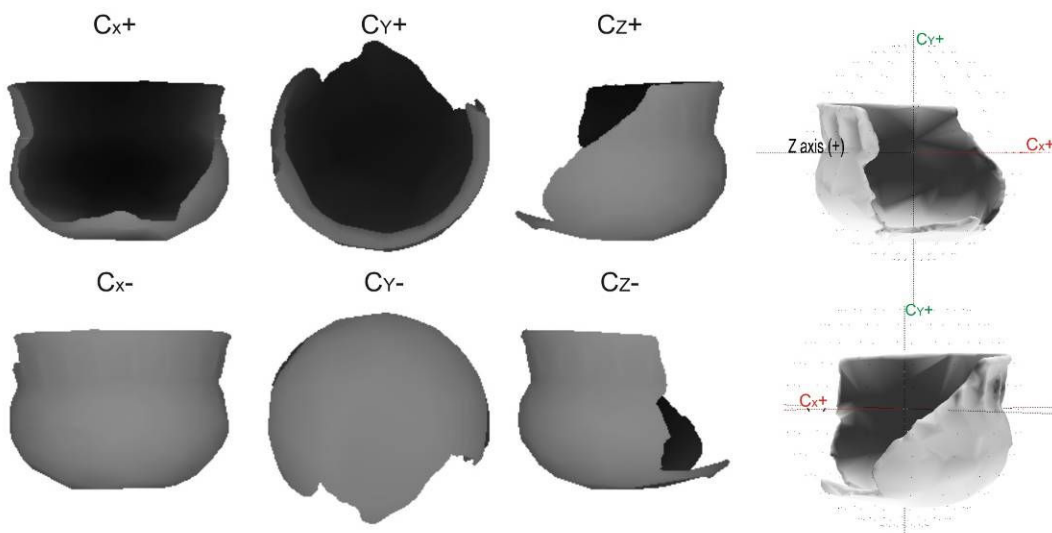


Σχήμα 5-12 Υπολογισμός κυκλικής παρεμβολής με τη μέθοδο του *Robert Israel* (5^ο Παράρτημα) σε ακολουθίες κορυφών όπου αναπαριστούν τομές του βασικού σώματος ενός αγγείου που διασώζεται αποσπασματικά.

Πριν την κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού



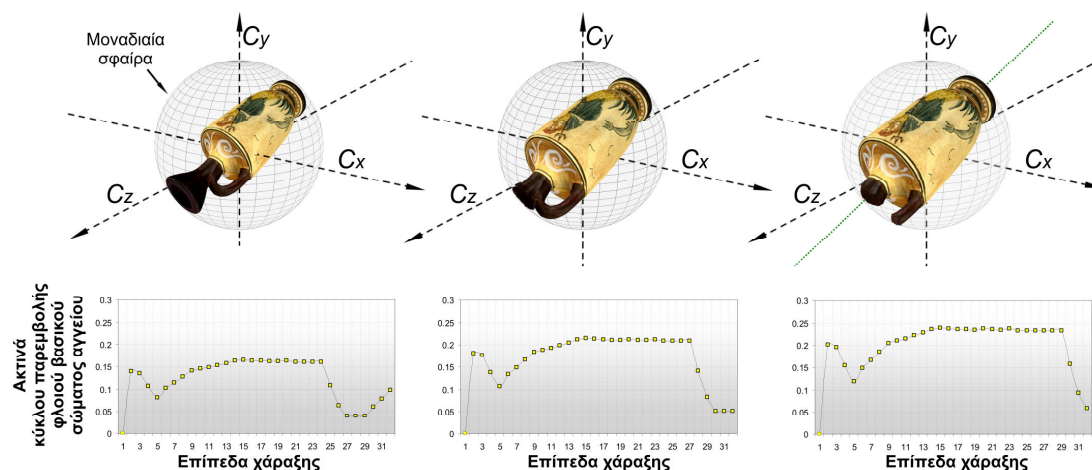
Μετά την κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού



Σχήμα 5-13 Κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού αγγείου που διασώζεται αποσπασματικά (διασώζεται το προφίλ του).

Ο αλγόριθμος κανονικοποίησης μπορεί να εφαρμοστεί και σε αποσπασματικά αγγεία για τα οποία δεν διασώζεται το προφίλ του αγγείου. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο θα επηρεάσει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά που θα εξαχθούν από το 3D μοντέλο (Κεφάλαιο 6). Πιο συγκεκριμένα, αν υποθέσουμε ότι απουσιάζει ένα τμήμα κοντά το στόμιο μίας Ληκύθου τότε, παρόλο που ο αλγόριθμος κανονικοποίησης θα λειτουργήσει κανονικά, το αγγείο θα εμφανιστεί μεγαλύτερο μέσα στη μοναδιαία σφαίρα. Η απόκλιση της κλίμακας επηρεάζει τη διαδικασία εξαγωγής

μορφολογικών χαρακτηριστικών. Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται η σταδιακή μεγέθυνση των ακτίνων των κύκλων παρεμβολής των υποακολουθιών κορυφών που ανήκουν στον εξωτερικό φλοιό του αγγείου καθώς αφαιρούνται σταδιακά τμήματα κοντά στην περιοχή του στομίου.



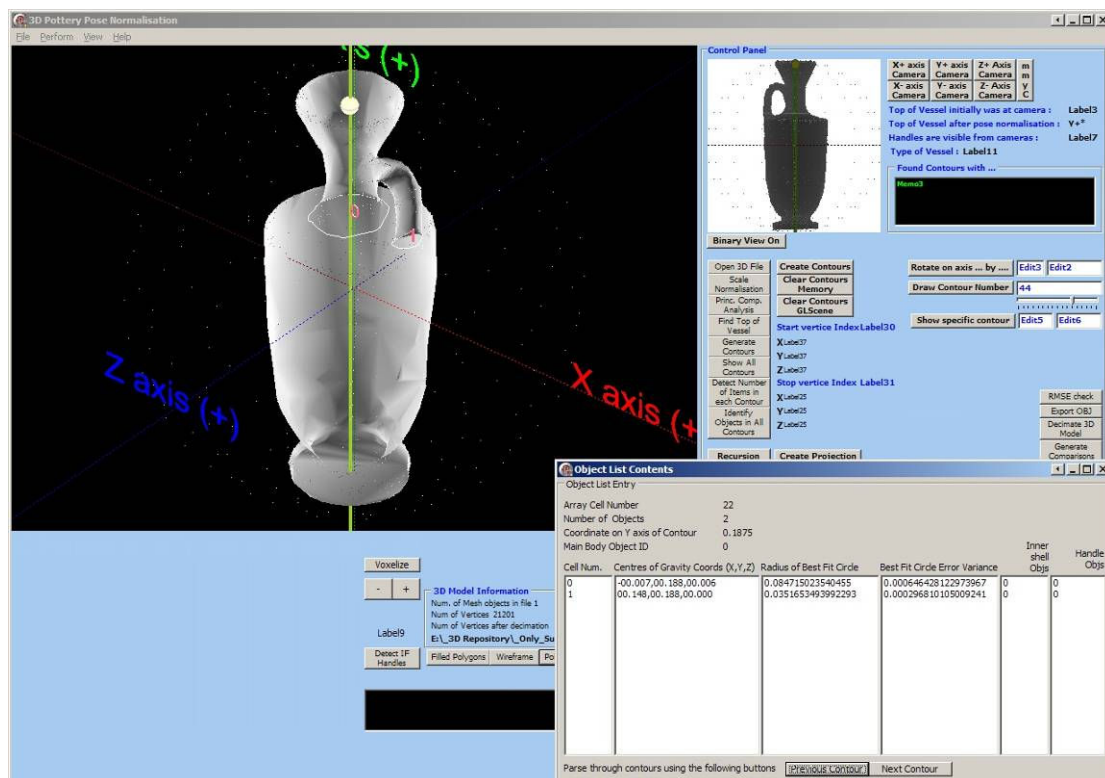
Σχήμα 5-14 Μεταβολή της κλιμάκωσης του αγγείου μέσα στη μοναδιαία σφαίρα κατά τη σταδιακή αφαίρεση τμημάτων από την περιοχή του στομίου της Ληκύθου. Παρατηρείτε η σταδιακή μεγέθυνση των ακτίνων των κύκλων παρεμβολής.

Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος αποτυγχάνει να αναγνωρίσει τη θέση του στομίου του αγγείου σε περιπτώσεις όπου το τρισδιάστατο μοντέλο δεν φέρει την απαραίτητη κοιλότητα. Αυτό μπορεί να συμβεί σε τρισδιάστατα μοντέλα τα οποία έχουν προκύψει από τη μέθοδο τρισδιάστατης ανακατασκευής αντικειμένων από εικόνες, «Σχήμα από σιλουέτα». Η συγκεκριμένη μέθοδος αδυνατεί να ανακατασκευάσει κοιλότητες οι οποίες δεν είναι εμφανείς στη σιλουέτα του αντικειμένου. Η εφαρμογή της στην ψηφιοποίηση αγγείων οδηγεί σε τρισδιάστατα αντίγραφα τα οποία δεν φέρουν κοιλότητες στομίου και βάσης. Τα εμπορικά λογισμικά που υποστηρίζουν τη συγκεκριμένη μέθοδο προσφέρουν στο χρήστη ειδικές συναρτήσεις για τη επεξεργασία των μοντέλων και τη δημιουργία των συγκεκριμένων κοιλοτήτων κατά προσέγγιση.

5.4 Υλοποίηση αλγορίθμου κανονικοποίησης

Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε ως μια ανεξάρτητη εφαρμογή για τα λειτουργικά συστήματα *Microsoft Windows XP* και συμβατά. Για την ανάπτυξη της εφαρμογής

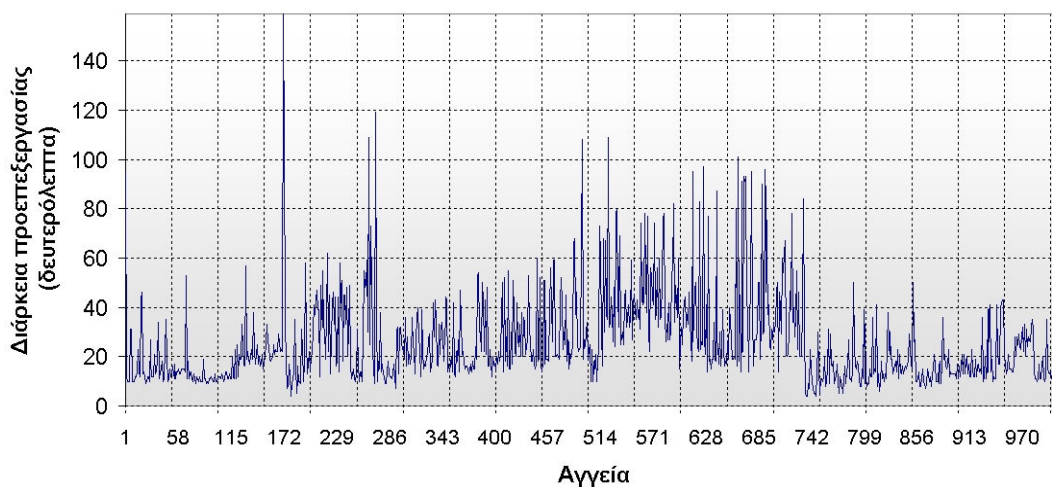
χρησιμοποιήθηκαν οι γλώσσες προγραμματισμού *Borland Delphi 2005* και *Microsoft Visual Studio 2008 C++*, οι ειδικές βιβλιοθήκες προγραμματισμού τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου *GLScene* [141] και *Visualisation Toolkit* [142] καθώς και η βιβλιοθήκη *ALGLIB* [143] επίλυσης προβλημάτων μαθηματικής ανάλυσης. Αρκετές από τις διαδικασίες επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου υλοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες εφαρμογές γραμμής εντολών στη γλώσσα *C++* οι οποίες και καλούνται δυναμικά από την κεντρική εφαρμογή που είναι υλοποιημένη στη γλώσσα *Borland Delphi*. Το γραφικό περιβάλλον την εφαρμογής επιτρέπει την απεικόνιση της προόδου της διαδικασίας κανονικοποίησης ενός αγγείου σε πραγματικό χρόνο. Για τον υπολογισμό της ελάχιστης περικλείουσας σφαίρας έγινε χρήση της υλοποίησης του B. Gärtner [112] σε γλώσσα *C++*. Εκτός από τις διαδικασίες κανονικοποίησης θέσης, προσανατολισμού και εξαγωγής των μορφολογικών χαρακτηριστικών του αγγείου (Κεφάλαιο 6, παράγραφος 6.1) η εφαρμογή μπορεί να φανεί χρήσιμη σε αρχαιολόγους ή μελετητές κεραμικής.



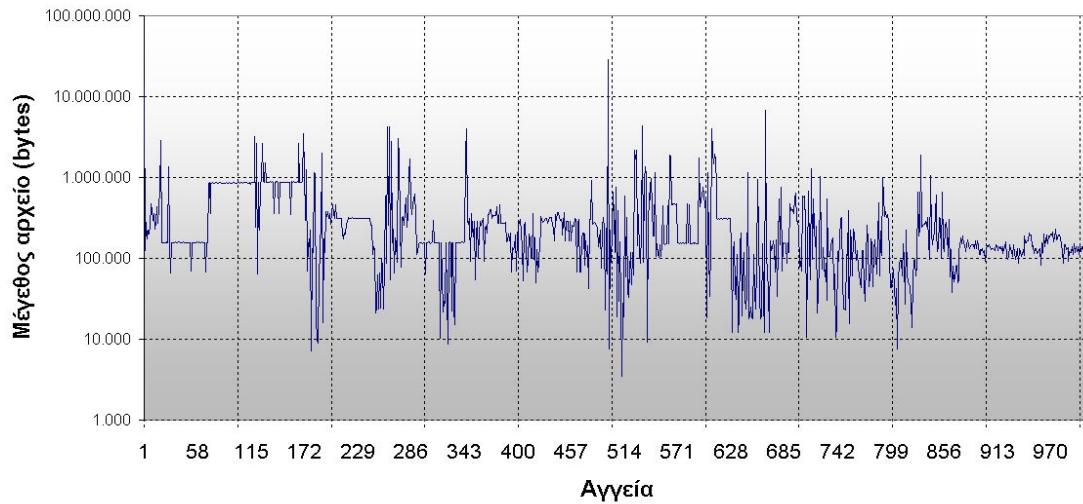
Σχήμα 5-15 Στιγμιότυπο της εφαρμογής κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού τρισδιάστατων αγγείων. Το δευτερεύον παράθυρο (κάτω δεξιά) επιτρέπει την προσπέλαση των ισουψών καμπυλών χάραξης έτσι ο χρήστης να έχει πρόσβαση στα χαρακτηριστικά των αντικειμένων σε κάθε επίπεδο χάραξης.

Η εφαρμογή επιτρέπει στο χρήστη να προσπελάσει τις ισοϋψείς καμπύλες σε κάθε επίπεδο χάραξης και να πάρει πληροφορίες όπως οι συντεταγμένες κέντρου και το μέγεθος της ακτίνας των κύκλων παρεμβολής της κάθε υποακολουθίας καθώς επίσης και το βαθμό της κυκλικής απόκλισης του σχήματος της κάθε υποακολουθίας (Σχήμα 5-15).

Το σχήμα 5-16 απεικονίζει τους χρόνους που απαιτήθηκαν για την κανονικοποίηση κλίμακας και προσανατολισμού των αγγείων που περιέχει η βαθμονομημένη βάση τρισδιάστατων αγγείων. Το σχήμα 5-17 παρουσιάζει τη διακύμανση του μεγέθους του αρχείου του κάθε αντικειμένου. Παρατηρείται πως ο απαιτούμενος χρόνος για την κανονικοποίηση ενός αγγείου επηρεάζεται κυρίως από τη μορφολογία του αντικειμένου και λιγότερο από τον αρχικό όγκο των δεδομένων. Αυτό οφείλεται στην εφαρμογή ενός προσαρμοστικού αλγόριθμου αποδεκατισμού (decimation) που εκτελείται πριν την έναρξη του αλγόριθμου κανονικοποίησης [142]. Ο αλγόριθμος αποδεκατισμού του μοντέλου επιτρέπει στο λογισμικό να λειτουργεί και με ψηφιοποιημένα μοντέλα που φέρουν αρχικά μεγάλο όγκο δεδομένων. Στον πίνακα 5-1 παρουσιάζονται οι μέσοι χρόνοι εκτέλεσης του αλγόριθμου. Ο υπολογισμός τους πραγματοποιήθηκε σε ένα υπολογιστικό σύστημα με επεξεργαστή *AMD Athlon* στα *2.2Ghz* με διαθέσιμη μνήμη *2GB*, κάρτα γραφικών *Nvidia GeForce 7800 GT (256 MB)* και λειτουργικό σύστημα *Microsoft Windows XP*.



Σχήμα 5-16 Χρόνοι κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού αγγείων.



Σχήμα 5-17 Διακύμανση μεγέθους των αρχείων (Λογαριθμική κλίμακα).

Μέσος χρόνος εκτέλεσης	Μέγιστος χρόνος εκτέλεσης	Ελάχιστος χρόνος εκτέλεσης
25.67 δευτερόλεπτα	159 δευτερόλεπτα	4 δευτερόλεπτα
Μέσο μέγεθος αρχείου	Μέγιστο μέγεθος αρχείου	Ελάχιστο μέγεθος αρχείου
385,105 Bytes	28,836,404 Bytes	3,480 Bytes

Πίνακας 5-1 Μέσες τιμές απόδοσης.

Κεφάλαιο 6

Κωδικοποίηση μορφολογικών χαρακτηριστικών 3Δ αγγείων

6.1 Εισαγωγή

Η ολοκλήρωση της προεπεξεργασίας του τριγωνικού πλέγματος ενός αγγείου επιτρέπει την εφαρμογή των μεθόδων εξαγωγής και κωδικοποίησης των μορφολογικών χαρακτηριστικών που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση τριών περιγραφέντων μορφολογικών χαρακτηριστικών αγγείων που προϋποθέτουν την εφαρμογή του αλγόριθμου κανονικοποίησης. Ο πρώτος περιγραφέας (VMBA) κωδικοποιεί τα χαρακτηριστικά των υποακολουθιών που προκύπτουν από την χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος του άξονα συμμετρίας ενός αγγείου. Οι άλλοι δύο (CBDM και ZMDM) προκύπτουν από την κωδικοποίηση ψηφιογραφικών εικόνων που παρουσιάζουν το αγγείο από διαφορετικές οπτικές γωνίες φωτοσκιασμένο με την τεχνική χάρτη-βάθους.

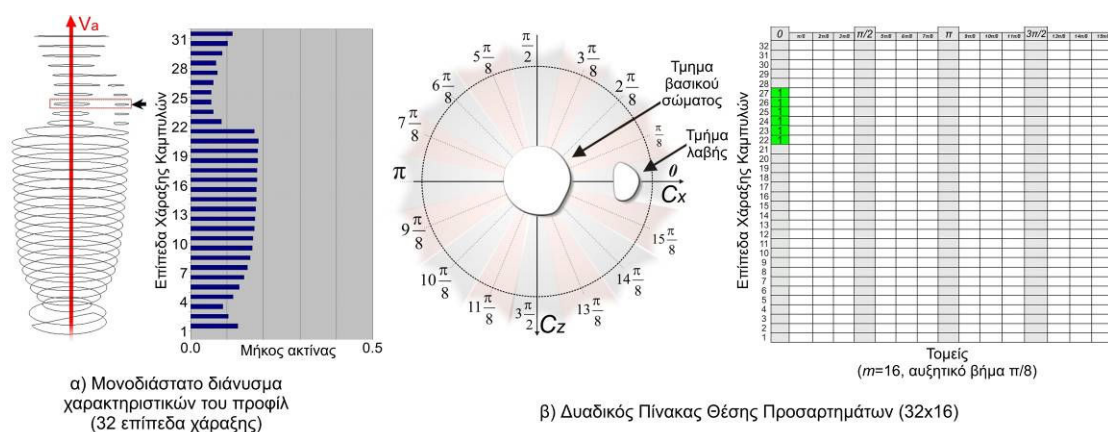
6.2 Περιγραφέας VMBA

Μετά την ολοκλήρωση της κανονικοποίησης του αγγείου πραγματοποιείται μία νέα χάραξη ισοϋψών καμπυλών κατά μήκος του άξονα C_z . Στη συνέχεια εκτελείται ο διαχωρισμός της ακολουθίας κορυφών που προκύπτει σε κάθε επίπεδο χάραξης σε υποακολουθίες. Όπως και στη διαδικασία αναγνώρισης του άξονα συμμετρίας του

αγγείου, η κάθε μια υποακολουθία περιγράφει κάποιο τμήμα του αγγείου το οποίο ανήκει είτε στο βασικό του σώμα (πρώτη και δεύτερη ομάδα) είτε σε προσαρτήματα (τρίτη ομάδα). Σε κάθε υποακολουθία εφαρμόζεται και πάλι κυκλική παρεμβολή. Από τη διαδικασία προκύπτουν χαρακτηριστικά όπως οι συντεταγμένες του κέντρου και η ακτίνα του βέλτιστου κύκλου καθώς και ο βαθμός κυκλικής απόκλισης του σχήματος που ορίζουν οι κορυφές της κάθε υποακολουθίας. Ο προτεινόμενος περιγραφέας *Vessel Main Body and Appendages (VMBA)* βασίζεται στην κωδικοποίηση των χαρακτηριστικών αυτών. Ο περιγραφέας *VMBA* αποτελείται από δύο μέρη. Αυτά είναι τα εξής:

- Διάνυσμα χαρακτηριστικών του προφίλ του βασικού σώματος αγγείου
- Δυαδικός πίνακας θέσης προσαρτημάτων ($n \times m$ διαστάσεων)

Στο διάνυσμα χαρακτηριστικών του προφίλ $\vec{p} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$, $r_1, \dots, r_n \in \mathbb{R}$ το κάθε στοιχείο r φέρει την τιμή της ακτίνας του κύκλου παρεμβολής της υποακολουθίας και αντιπροσωπεύει τον εξωτερικό φλοιό του βασικού σώματος του αγγείου σε κάθε ένα από τα επίπεδα χάραξης. Το πλήθος των στοιχείων του διανύσματος n είναι ίσο με το πλήθος των επιπέδων χάραξης ισοϋψών καμπύλων. Η μορφή της γραφικής παράστασης του διανύσματος αποτελεί μια κβαντισμένη έκδοση του προφίλ του βασικού σώματος του αγγείου (Σχήμα 6-1.α).



Σχήμα 6-1 Δομή περιγραφέα VMBA με 32 επίπεδα χάραξης ισοϋψών καμπύλων.

Από την άλλη, η θέση των προσαρτημάτων σε κάθε επίπεδο χάραξης κωδικοποιείται στο δυαδικό πίνακα θέσης προσαρτημάτων (Σχήμα 6-1.β). Το

πλήθος των σειρών του συγκεκριμένου πίνακα είναι όμοιο με το πλήθος των επιπέδων χάραξης ενώ το πλήθος των στηλών προκύπτει από τον διαχωρισμό του τριγωνομετρικού κύκλου σε τομείς (Σχήμα 6-1.β). Το πλήθος των τομέων καθορίζεται από ένα αυξητικό βήμα (π.χ. με βήμα $\pi/8$ προκύπτουν σε 16 τομείς στον μοναδιαίο κύκλο). Από τις συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου παρεμβολής των υποακολουθιών που ανήκουν στην ομάδα προσαρτημάτων προκύπτει ο τομέας στον οποίο εμπίπτει. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η γωνία ανάμεσα στον άξονα C_x και στο ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από ένα σημείο πάνω στο άξονα συμμετρίας του αγγείου V_a στο συγκεκριμένο επίπεδο χάραξης και από το κέντρο του κύκλου παρεμβολής της κάθε υποακολουθίας της ομάδας προσαρτημάτων. Έστω ϕ η γωνία της ευθείας, το αυξητικό βήμα $\tau = \pi/8$, A ένα σύνολο πραγματικών αριθμών $A = \{\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{15}\}$ με $\alpha_0 = 0$ και $\alpha_{i+1} = \alpha_i + \tau$, τότε ο δείκτης του τομέα p στον οποίο ανήκει ένα τμήμα προσαρτήματος προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{cases} p = 0 & \text{εάν } (\phi > 2\pi - \tau) \text{ και } \phi < 0 \text{ και } \left(2\pi - \tau > \frac{\tau}{2}\right) \\ p = 1 & \text{εάν } (\phi > 2\pi - \tau) \text{ και } \phi < 0 \text{ και } \left(2\pi - \tau < \frac{\tau}{2}\right) \\ p = i & \min\{|\phi - \alpha_i|\}, i \in (0 \dots 15) \end{cases} \quad (6.1)$$

Οι συντεταγμένες που καθορίζουν το κελί του πίνακα, στο οποίο το δυφίο θα πάρει την τιμή ένα, προκύπτουν από το επίπεδο χάραξης (γραμμή πίνακα) και τον τομέα στον οποίο αυτό ανήκει (στήλη πίνακα). Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 6-1.β, οι υποακολουθίες κορυφών που περιγράφουν τη λαβή της Ληκύθου ενεργοποιούν τα δυφία των κελιών που βρίσκονται στις συντεταγμένες του πίνακα $(22,0)$ έως $(27,0)$.

Να σημειωθεί πως ο συγκεκριμένος περιγραφέας δεν αποτελεί τον μοναδικό τρόπο οργάνωσης της παραπάνω πληροφορίας και ως εκ τούτου από τη χάραξη ισοϋψών καμπυλών δύναται να προκύψουν άλλες προσεγγίσεις κωδικοποίησης.

6.2.1 Μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα VMBA

Για τη σύγκριση δύο ψηφιακών υπογραφών του περιγραφέα VMBA αναπτύχθηκε ένα μέτρο το οποίο αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό του βαθμού ομοιότητας ανάμεσα στα διανύσματα

χαρακτηριστικών του προφίλ του αγγείου ενώ το δεύτερο για τον υπολογισμό του βαθμού ομοιότητας των δυαδικών πινάκων θέσης προσαρτημάτων. Ο βαθμός ομοιότητας που προκύπτει από το κάθε τμήμα του μέτρου κανονικοποιείται και πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή ειδικού βάρους. Ο συντελεστής αυτός επιτρέπει τη διαφοροποίηση της σημαντικότητας των δύο τμημάτων του περιγραφέα κατά τη διαδικασία υπολογισμού της μορφολογικής ταύτισης δύο αγγείων. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της διαφοράς ανάμεσα σε δύο διανύσματα χαρακτηριστικών του προφίλ δύο αντικειμένων α και β επιλέχθηκε η $L2$ νόρμα (ευκλείδεια απόσταση):

$$d(\alpha, \beta) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (\alpha_i - \beta_i)^2} \quad (6.1)$$

Μετά από μια σειρά πειραμάτων αποτίμησης της απόδοσης ενός πειραματικού συστήματος ανάκτησης σε συγκεκριμένες κατηγορίες αγγείων προέκυψε πως η $L2$ νόρμα αποδίδει τα βέλτιστα αποτελέσματα και ταυτόχρονα διαθέτει ένα από τα χαμηλότερα υπολογιστικά κόστη. Τα αμέσως επόμενα σε επιδόσεις μετρικά ήταν αυτά της κανονικοποιημένης και σταθμισμένης ευκλείδειας απόστασης. Η χαμηλή απόδοση του μετρικού απόστασης *ελαχίστου έργου* (Earth Mover's distance) [113] κατέδειξε την ακαταλληλότητα του.

Από την άλλη, η σύγκριση των δυαδικών πινάκων θέσης προσαρτημάτων προκύπτει από τον υπολογισμό της απόστασης Hamming $h(\alpha, \beta)$. Το συγκεκριμένο μέτρο χαρακτηρίζεται από τις χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις αλλά και από την αδυναμία του να αντιμετωπίσει καταστάσεις μετατόπισης δυφίων (bit shifting) σε γειτονικά κελία. Στο δυαδικό πίνακα όμως οι γειτονικές στήλες αντιπροσωπεύουν διαδοχικούς τομείς ενώ οι γειτονικές γραμμές διαδοχικά επίπεδα χάραξης ισοϋψών καμπυλών. Ως εκ τούτου είναι σημαντικό για το μέτρο του δυαδικού πίνακα να δύναται να αντιμετωπίσει καταστάσεις μετατόπισης δυφίων σε γειτονικά κελιά αφού ο κβαντισμός της θέσης ενός προσαρτήματος σε κάποιο γειτονικό τομέα μπορεί να προκύψει εξαιτίας των ατελειών της μορφολογίας ενός αγγείου. Για το λόγο αυτό, κατά τη διάρκεια υπολογισμού του μέτρου ομοιότητας εφαρμόζεται στο πίνακα ένα φίλτρο *δυαδικής μορφολογικής διαστολής* (dilation). Η εφαρμογή του φίλτρου αποσκοπεί στην αντιμετώπιση της αδυναμίας του μέτρου, εισάγοντας στα

δεδομένα του πίνακα ασάφεια (fuzziness). Η διαδικασία μορφολογικής διαστολής χρησιμοποιεί ένα στοιχείο δόμησης 3×3 εικονοστοιχείων. Το μέγεθος του δυαδικού πίνακα σε συνδυασμό με το μικρό στοιχείο δόμησης του φίλτρου επιτρέπει την εκτέλεση της μορφολογικής διαστολής κατά τη διαδικασία σύγκρισης των ψηφιακών υπογραφών σε ένα σύστημα ανάκτησης. Οι δύο ανεξάρτητοι βαθμοί ομοιότητας, $d(a, \beta)$ και $h(a, \beta)$, που προκύπτουν κανονικοποιούνται στη μονάδα χρησιμοποιώντας το μέγιστο εμβαδό (P_{max} και AF_{max}) που μπορούν να περιγραφούν από τα δύο τμήματα του VMBA. Στη περίπτωση του διανύσματος χαρακτηριστικών του προφίλ του αγγείου το εμβαδό προκύπτει:

$$P_{max} = \text{πλήθος επιπέδων χάραξης ισοψών καμπυλών} \times \text{ακτίνα μοναδιαίας σφαίρας} \quad (6.2)$$

Ενώ στη περίπτωση του δυαδικού πίνακα θέσης προσαρτημάτων το εμβαδό είναι ίσο με το πλήθος των στοιχείων του πίνακα. Για τη διαφοροποίηση της σημαντικότητας των δύο τμημάτων του περιγραφέα, ορίζονται δύο ειδικά βάρη (P_w και AF_w) τα οποία και πολλαπλασιάζονται με τα κανονικοποιημένα σφάλματα ομοιότητας. Με τον τρόπο αυτό δύναται να ενισχυθεί η σημαντικότητα ενός από τα δύο τμήματα του περιγραφέα. Κάτι τέτοιο επιτρέπει τον υπολογισμό του βαθμού ομοιότητας ανάμεσα σε δύο αγγεία εκλαμβάνοντας το σχήμα του βασικού σώματος του αγγείου ως σημαντικότερη συνιστώσα σε σχέση με τα προσαρτήματα ή και το αντίστροφο. Τα δύο σταθμισμένα σφάλματα ομοιότητας αθροίζονται και προκύπτει ο τελικός βαθμός ομοιότητας ανάμεσα σε δύο αγγεία $D(a, \beta)$:

$$D(a, \beta) = \left(P_w \frac{d(a, \beta)}{P_{max}} + AF_w \frac{h(a, \beta)}{AF_{max}} \right) \quad (6.3)$$

Όπως αναφέρθηκε και στη παράγραφο 5.4, η αποτυχία αναγνώρισης της θέσης του στομίου ενός αγγείου μπορεί να οδηγήσει σε αντίστροφο προσανατολισμό του αγγείου ως προς τον άξονα C_y (Καρτεσιανός άξονας παράλληλος με τον άξονα συμμετρίας του αγγείου). Η αντιστροφή αυτή επηρεάζει τα δεδομένα του περιγραφέα τα οποία και εμφανίζονται με αντίστροφη φορά. Για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος το μέτρο εφαρμόζεται δύο φορές. Κατά τη δεύτερη εκτέλεση του, αντιστρέφονται τα περιεχόμενα ενός εκ των δύο περιγραφέων. Η αντιστροφή σε επίπεδο υλοποίησης πραγματοποιείται αλλάζοντας

απλά τη φορά των βρόχων που υποδεικνύουν τη θέση ενός συντελεστή μέσα στο διάνυσμα χαρακτηριστικών του προφίλ καθώς και τη γραμμή ενός κελιού στο δυαδικό πίνακα διανυσμάτων. Το ελάχιστο σφάλμα ανάμεσα στις δύο μετρήσεις είναι αυτό που θεωρείται ως ο τελικός βαθμός ομοιότητας. Ο μικρός όγκος και η δομή δεδομένων του περιγραφέα επιτρέπουν την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου χωρίς να προκύπτουν απαγορευτικοί χρόνοι κατά τη διαδικασία υπολογισμού του βαθμού ομοιότητας (Παράγραφος 7.4.1).

6.2.2 Δείκτης πολυπλοκότητας μορφολογίας αγγείου

Ο συγκεκριμένος δείκτης εκφράζει αριθμητικά τη μορφολογική πολυπλοκότητα των προσαρτημάτων ενός αγγείου. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου δείκτη απορρέει από την ομαδοποίηση των υποακολουθιών κορυφών που προκύπτουν από την χάραξη ισοϋψών καμπυλών. Ο δείκτης υπολογίζεται ως ο λόγος του πλήθους των καμπυλών που ανήκουν στην ομάδα προσαρτημάτων (τρίτη ομάδα) προς το πλήθος των επιπέδων χάραξης. Ο δείκτης πολυπλοκότητας μπορεί να βρει εφαρμογή σε διαδικασίες ταξινόμησης συγκεκριμένων ομάδων αγγείων. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται μια σειρά από αγγεία με τον δείκτη πολυπλοκότητας τους σε φθίνουσα διάταξη.



Σχήμα 6-2 Δείκτης πολυπλοκότητας προσαρτημάτων.

6.2.3 Διάνυσμα κατεύθυνσης προσαρτημάτων

Ο υπολογισμός του κέντρου βάρους ενός αγγείου χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των κορυφών ενός νέφους σημείων ή ενός τριγωνικού πλέγματος τείνει να πολώνεται προς τη περιοχή όπου συναντάτε η μέγιστη πυκνότητα των κορυφών. Στις περιπτώσεις των αγγείων που φέρουν προσαρτήματα (π.χ. λαβές) παρατηρείται μία μετατόπιση των συντεταγμένων του κέντρου βάρους προς τη κατεύθυνση όπου βρίσκονται τα προσαρτήματα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι το βασικό σώμα του αγγείου είναι συμμετρικό και η κατανομή των κορυφών πάνω σε αυτό τείνει να χαρακτηριστεί σχεδόν κανονική. Η ύπαρξη όμως προσαρτημάτων επηρεάζει την κανονικότητα της. Δεδομένης της διαδικασίας κανονικοποίησης κλίμακας και θέσης ενός αγγείου που φέρει υψηλό δείκτη πολυπλοκότητας, υπάρχει ένα διάνυσμα στο χώρο το οποίο ξεκινά από την αρχή των αξόνων και καταλήγει στο κέντρο βάρους του αγγείου υποδεικνύοντας έμμεσα τη διεύθυνση προς την οποία βρίσκονται τα προσαρτήματα. Η ορθή διεύθυνση του διανύσματος κατεύθυνσης προσαρτημάτων σχετίζεται άμεσα με την επιτυχή αναγνώριση της θέσης του στομίου ενός αγγείου.

6.3 VMBA MPEG-7 Σχήμα

Στη παράγραφο αυτή παρατίθενται δύο εκδοχές του περιγραφέα VMBA σε γλώσσα *Description Definition Language* (DDL) και μπορούν να αποτελέσουν επεκτάσεις του MPEG-7 σχήματος. Η εκτεταμένη εκδοχή (Πίνακας 6-1) διαφοροποιείται από τη συνεπτυγμένη (Πίνακας 6-2) ως προς τον όγκο πληροφορίας που αφορά στην ομάδα των προσαρτημάτων ενός αγγείου. Η εκτεταμένη εκδοχή περιγράφει ανεξάρτητα όλα τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων που ανήκουν στην ομάδα των προσαρτημάτων (Παράγραφος 5.4) καθώς και τα αρχαιολογικά χαρακτηριστικά του αγγείου.

```

1. <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2. <schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:mpeg7="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004"
3. xmlns:TSRDNS="VMBANS" targetNamespace="VMBANS">
4. <import namespace="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004" schemaLocation="Mpeg7-2004.xsd"/>
5. <complexType name="apendages">
6.   <sequence>
7.     <element name="contourLevel">
8.       <simpleType>
9.         <restriction base="nonNegativeInteger">
10.          <minInclusive value="0"/>
11.          <maxInclusive value="31"/>
12.        </restriction>
13.      </simpleType>

```

```

14.     </element>
15.     <element name="quantizedPosition">
16.       <simpleType>
17.         <restriction base="nonNegativeInteger">
18.           <minInclusive value="0"/>
19.           <maxInclusive value="15"/>
20.         </restriction>
21.       </simpleType>
22.     </element>
23.     <element name="angle" type="float">
24.       <simpleType>
25.         <restriction base="float">
26.           <minInclusive value="0"/>
27.           <maxInclusive value="6.28318531"/>
28.         </restriction>
29.       </simpleType>
30.     </element>
31.     <element name="distanceFromAxis" type="float">
32.       <simpleType>
33.         <restriction>
34.           <minInclusive value="0"/>
35.           <maxInclusive value="0.5"/>
36.         </restriction>
37.       </simpleType>
38.     </element>
39.     <element name="objectRadius">
40.       <simpleType>
41.         <restriction base="float">
42.           <minInclusive value="0.009"/>
43.           <maxInclusive value="0.5"/>
44.         </restriction>
45.       </simpleType>
46.     </element>
47.   </sequence>
48. </complexType>
49. <complexType name="archaeologicalinfo">
50.   <sequence>
51.     <element name="shape" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
52.     <element name="shapetype" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
53.     <element name="technique" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
54.     <element name="attrib" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
55.     <element name="workshop" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
56.     <element name="dating" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
57.     <element name="comments" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
58.     <element name="prestate" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0" maxOccurs="1"/>
59.   </sequence>
60. </complexType>
61. <complexType name="VMBAType" final="#all">
62.   <complexContent>
63.     <extension base="mpeg7:VisualDType">
64.       <sequence>
65.         <element name="id" minOccurs="1" maxOccurs="1">
66.           <simpleType>
67.             <restriction base="nonNegativeInteger">
68.               <minInclusive value="0"/>
69.             </restriction>
70.           </simpleType>
71.         </element>
72.         <element name="filename" type="mpeg7:MediaLocatorType" minOccurs="0"
73.           maxOccurs="1"/>
74.         <element name="body" minOccurs="1" maxOccurs="1">
75.           <simpleType>
76.             <restriction>
77.               <simpleType>
78.                 <list itemType="mpeg7:FloatVector"/>
79.               </simpleType>
80.               <length value="32"/>
81.             </restriction>
82.           </simpleType>
83.         </element>
84.         <element name="app" type="Appendages" minOccurs="1" maxOccurs="320"/>
85.         <element name="archoinfo" type="archaeologicalinfo" minOccurs="0"
86.           maxOccurs="1"/>
87.         <element name="complexity">
88.           <simpleType>
89.             <restriction base="float">
90.               <minInclusive value="0"/>
91.             </restriction>
92.           </simpleType>
93.         </element>
94.         <element name="direction" type="mpeg7:TextualType" minOccurs="0"
95.           maxOccurs="1"/>
96.         <element name="gravityCentre">
97.           <simpleType>
98.             <restriction base="mpeg7:FloatVector">
99.               <maxLength value="4"/>
100.            </restriction>
101.           </simpleType>

```

```

102.         </element>
103.     </sequence>
104. </extension>
105. </complexContent>
106. </complexType>
107. </schema>

```

Πίνακας 6-1 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα VMBA (εκτεταμένη έκδοση).

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου παρεμβολής της κάθε υποακολουθίας κορυφών, η ευκλείδεια απόσταση του κέντρου του κύκλου παρεμβολής από τον άξονα συμμετρίας του αγγείου και η γωνία ϕ^7 . Καθώς η εκτεταμένη εκδοχή συγκεντρώνει το σύνολο των χαρακτηριστικών που εξάγει το λογισμικό μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη άλλων μεθόδων οργάνωσης της πληροφορίας. Η εκτεταμένη εκδοχή προτείνεται για εφαρμογές μη πραγματικού χρόνου όπου θα μπορούν να εφαρμοσθούν διαφορετικά από το προτεινόμενο μέτρα ομοιότητας τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τους όλη τη διαθέσιμη πληροφορία. Τα όρια των τιμών που επιβάλλει η εκτεταμένη εκδοχή (Πίνακας 6-1) προκύπτουν από την υλοποίηση του αλγορίθμου κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού. Ως εκ τούτου μπορούν να τροποποιηθούν σύμφωνα πάντα με την υλοποίηση του συγκεκριμένου αλγορίθμου. Παρακάτω παρατίθενται αναλυτικά οι προκύπτοντες περιορισμοί:

- Το πλήθος των στοιχείων που φέρει το διάνυσμα χαρακτηριστικών του βασικού σώματος του αγγείου είναι ίσο με το πλήθος των επιπέδων χάραξης ισοϋψών καμπυλών (Πίνακας 6-1, 80^n γραμμή).
- Το μέγιστο πλήθος των στοιχείων που περιγράφουν τα προσαρτήματα ενός αγγείου προκύπτουν από το γινόμενο των επιπέδων χάραξης ισοϋψών καμπύλων (32) με το πλήθος των αντικειμένων (10) που επιτρέπει η υλοποίηση του αλγορίθμου να αποθηκευτούν σε κάθε ένα επίπεδο χάραξης (Πίνακας 6-1, 84^n γραμμή).
- Η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου πολυπλοκότητας ενός αγγείου είναι ίση με το μηδέν (Πίνακας 6-1, 90^n γραμμή).

⁷ Η γωνία που προκύπτει ανάμεσα στο άξονα C_x και το ευθύγραμμο τμήμα ανάμεσα στον άξονα συμμετρίας του αγγείου και του κέντρου του βέλτιστου κύκλου (Σχήμα 5-9).

- Το διάνυσμα των συντεταγμένων του κέντρου του κύκλου παρεμβολής μίας υποακολουθίας κορυφών ενός προσαρτήματος σε κάποιο επίπεδο χάραξης μπορεί να αποδοθεί είτε σε καρτεσιανές είτε σε ομογενείς συντεταγμένες (Πίνακας 6-1, 99^η γραμμή).
- Η τιμές που μπορεί να δεχθεί το πεδίο ορισμού του επιπέδου χάραξης περιορίζεται σε ακέραιες θετικές τιμές (0,31) (Πίνακας 6-1, 10^η-11^η γραμμή).
- Η γωνία θέσης του προσαρτήματος εκφράζεται σε ακτίνια και περιορίζεται σε τιμές κινητής υποδιαστολής (Πίνακας 6-1, 26^η-27^η γραμμή).
- Η μέγιστη απόσταση ενός αντικειμένου από τον άξονα συμμετρίας ενός αγγείου αντιστοιχεί στην ακτίνα της μοναδιαίας περικλείουσας σφαίρας (0.5 μονάδες) (Πίνακας 6-1, 34^η-35^η γραμμή).
- Η ελάχιστη ακτίνα που μπορεί να φέρει ένας κύκλος παρεμβολής μίας υποακολουθίας συμπίπτει με το κατώφλι που καθορίζει το εύρος του θόρυβου. Οι υποακολουθίες κορυφών όπου ο κύκλος παρεμβολής τους έχει ακτίνα μικρότερη από το συγκεκριμένο κατώφλι θεωρούνται θόρυβος και μπορούν να μη ληφθούν υπόψη από το μέτρο ομοιότητας (Πίνακας 6-1, 42^η γραμμή).

Από την άλλη, η συνεπτυγμένη εκδοχή προτείνεται για διαδικτυακά συστήματα ανάκτησης πραγματικού χρόνου όπου ο μικρός χρόνος απόκρισης σε μία επερώτηση αποτελεί βασική προϋπόθεση του συστήματος. Η συνεπτυγμένη εκδοχή του περιγραφέα περιλαμβάνει την κωδικοποίηση των θέσεων των προσαρτημάτων σε ένα δυαδικό πίνακα (Παράγραφος 6.2).


```

1. <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2. <schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:mpeg7="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004"
3. xmlns:TSRDNS="VMBANS" targetNamespace="VMBANS">
4. <import namespace="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004" schemaLocation="Mpeg7-2004.xsd"/>
5. <simpleType name="IntegerMatrix32x16" base="integer" derivedBy="list">
6. <mpeg7:dimension value="32 16" />
7. </simpleType>
8. <complexType name="VMBAType" final="#all">
9. <complexContent>
10. <extension base="mpeg7:VisualDType">
11. <sequence>
12. <element name="body" minOccurs="1" maxOccurs="1">
13. <simpleType>
14. <restriction>
15. <simpleType>
16. <list itemType="mpeg7:FloatVector"/>
17. </simpleType>
18. <length value="32"/>
19. </restriction>
20. </simpleType>
21. </element>
22. <element name="AppendagesArray" type="IntegerMatrix32x16" minOccurs="1"
23. maxOccurs="1"/>
24. <element name="complexity">
25. <simpleType>
26. <restriction base="mpeg7:float">
27. <minInclusive value="0"/>
28. </restriction>
29. </simpleType>
30. </element>
31. <element name="gravityCentre">
32. <simpleType>
33. <restriction base="mpeg7:FloatVector">
34. <maxLength value="4"/>
35. </restriction>
36. </simpleType>
37. </element>
38. </sequence>
39. </extension>
40. </complexContent>
41. </complexType>
42. </schema>

```

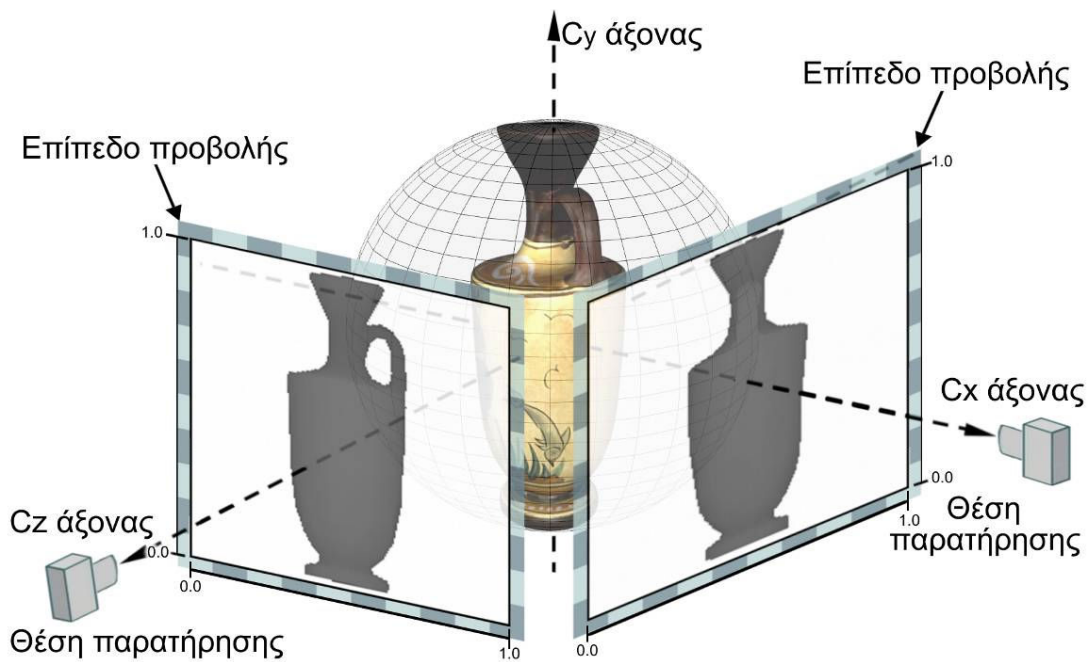
Πίνακας 6-2 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα VMBA (συνεπτυγμένη εκδοχή).

6.4 Περιγραφείς κωδικοποίησης χαρτών βάθους

Πολλές φορές για την επίλυση ενός πολυδιάστατου προβλήματος εφαρμόζονται μετασχηματισμοί προβολής των δεδομένων σε χώρους μικρότερων διαστάσεων. Στόχος των μετασχηματισμών είναι η μέγιστη δυνατή μείωση του πλήθους των διαστάσεων των δεδομένων και ταυτόχρονα η διατήρηση ισοδύναμων ή κοντινά ισοδύναμων χαρακτηριστικών από τα οποία θα προκύπτει η απαραίτητη, για την επίλυση του προβλήματος πληροφορία.

Δύο από τα σημαντικότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά των αγγείων από τα οποία μπορεί να προκύψει μείωση στις διαστάσεις των δεδομένων εντοπίζεται στην αξονική τους συμμετρία και στον προσανατολισμό των προσαρτημάτων σε αντιθετικές θέσεις γύρω από τον άξονα συμμετρίας τους (κανονικοποίηση προσανατολισμού).

Η ανάπτυξη των ακόλουθων περιγραφών απορρέει από την παραδοχή ότι τα σημαντικότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αγγείου μπορούν να αποτυπωθούν από δύο μόνο θέσης παρατήρησης (Σχήμα 6-3). Βασική προϋπόθεση αποτελεί η κανονικοποίηση του αγγείου ως προς την κλίμακα και τον προσανατολισμό του εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο που περιγράφεται στο πέμπτο κεφάλαιο. Μετά την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου, για κάθε αγγείο αποθηκεύονται δύο ψηφιογραφικές εικόνες που περιέχουν τον χάρτη βάθους της ορθογραφικής προβολής (2^ο Παράρτημα) του αγγείου. Τα επίπεδα ορθογραφικής προβολής βρίσκονται πάνω στη θετική πλευρά των αξόνων C_z και C_x έχοντας ως διεύθυνση παρατήρησης την αρχή των αξόνων του τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων.



Σχήμα 6-3 Επίπεδα ορθογραφικής προβολής.

Οι δύο ακόλουθοι περιγραφείς δεν είναι οι μοναδικοί που μπορεί να εφαρμοστούν στο συγκεκριμένο ζεύγος εικόνων καθώς με τη προτεινόμενη μέθοδο το πρόβλημα ταύτισης τρισδιάστατων αγγείων μετασχηματίζεται σε πρόβλημα ταύτισης σχημάτων δισδιάστατων ψηφιογραφικών εικόνων γκρίζων τόνων.

6.4.1 Κωδικοποίηση Χάρτη Βάθους με Ακολουθίες Χαρακτήρων

Ο περιγραφέας «Κωδικοποίηση χάρτη βάθους με ακολουθίες χαρακτήρων» (Character Based Depth Map Encoding – CBDM) αποτελεί μια παραλλαγή του περιγραφέα των Chaouch et al. [67]. Αρχικά, ο περιγραφέας των Chaouch et al. βασιζόταν σε δώδεκα εικόνες οι οποίες προκύπτουν από την τοποθέτηση της θέσης παρατήρησης στο κέντρο των εδρών ενός δωδεκαέδρου. Οι εικόνες αυτές κωδικοποιούνται σε ακολουθίες χαρακτήρων που αντιπροσωπεύουν την κλίση της καμπύλης που καθορίζουν οι τιμές των εικονοστοιχείων της κάθε εικόνας. Στην εργασία τους αναφέρουν [67] πως ο εντοπισμός του σημείου βέλτιστης απόδοσης του περιγραφέα σε σχέση με το πλήθος και τις διαστάσεις των εικόνων αποτελεί ακόμα αντικείμενο έρευνας. Η παραλλαγή που προτείνεται στη παρούσα διατριβή έχει ως στόχο τη μείωση του μεγέθους της ψηφιακής υπογραφής (περιγραφέας). Η παραλλαγή στηρίζεται στην παραδοχή ότι τα σημαντικότερα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αγγείου μπορούν να αποτυπωθούν από δύο μόνο θέσεις παρατήρησης εφόσον αυτό έχει κανονικοποιηθεί ως προς την κλίμακα και τον προσανατολισμό του. Στα πλαίσια της διατριβής υλοποιήθηκε ο αλγόριθμος κωδικοποίησης του χάρτη βάθους σε ακολουθίες χαρακτήρων με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που περιγράφεται στην εργασία των Chaouch et al. [67]. Σύμφωνα με τη μέθοδο γίνεται χρήση ενός προκαθορισμένου συνόλου χαρακτήρων σύμφωνα με τον οποίο κωδικοποιούνται τα εικονοστοιχεία με τους ακόλουθους τρόπους:

i. Περιοχές φόντου

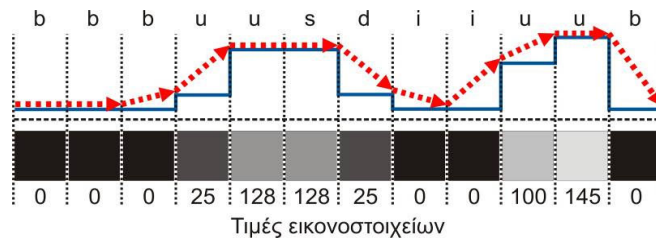
- a. ***b***: Ο χαρακτήρας *b* (background pixel) εκφράζει ότι το εικονοστοιχείο ανήκει σε τμήμα της εικόνας το οποίο αποτελεί μέρος του φόντου της (στη πραγματικότητα είναι το επίπεδο προβολής της γεωμετρίας του αγγείου).
- b. ***i***: Ο χαρακτήρας *i* (interior background pixel) εκφράζει ότι το εικονοστοιχείο ανήκει σε τμήμα του φόντου το οποίο όμως περιβάλλεται από τμήμα του αντικειμένου (π.χ. το διάστημα ανάμεσα στο βασικό σώμα και στη λαβή του αγγείου (Σχήμα 6-4)).

ii. Περιοχές επιφάνειας αγγείου

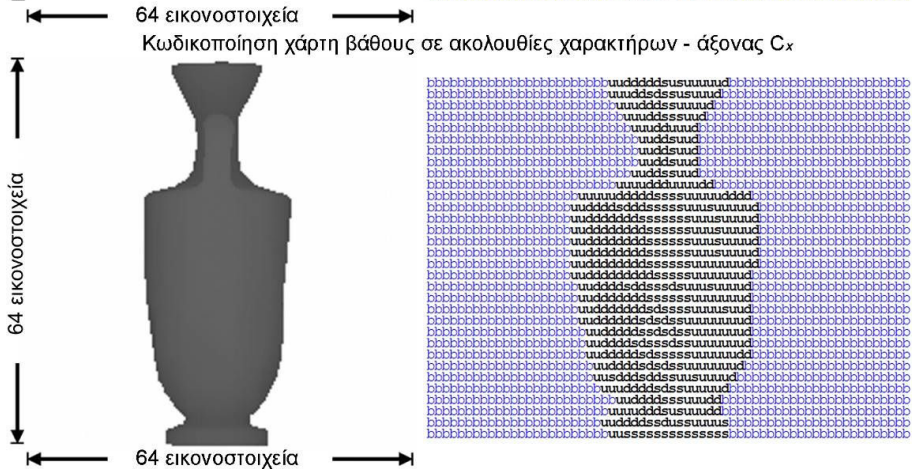
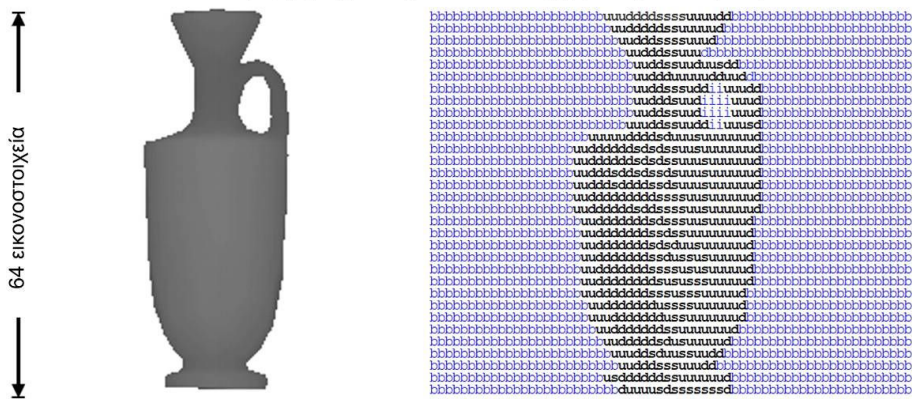
- a. ***u***: Ο χαρακτήρας *u* (upward slope) εκφράζει τη θετική κλίση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εικονοστοιχεία.

- b. *s*: Ο χαρακτήρας *s* (steady) εκφράζει τη μη-μεταβολή της κλίσης ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εικονοστοιχεία.
- c. *d*: Ο χαρακτήρας *d* (downward slope) εκφράζει την αρνητική κλίση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εικονοστοιχεία.

Η κωδικοποίηση των χαρτών πραγματοποιείται ανά γραμμή εικονοστοιχείων (scan line) και ανά στήλη εικονοστοιχείων (scan column) για κάθε εικόνα ξεχωριστά. Έτσι για δύο εικόνες με διαστάσεις $n \times n$ εικονοστοιχείων, προκύπτουν $2 \times 2 \times n$ ακολουθίες χαρακτήρων οι οποίες αποτελούν τον περιγραφέα του αγγείου.



Κωδικοποίηση χάρτη βάθους σε ακολουθίες χαρακτήρων - άξονας Cz



Σχήμα 6-4 Παράδειγμα κωδικοποίησης χάρτη βάθους σε ακολουθίες χαρακτήρων. (Το πλήθος των χαρακτήρων στις ακολουθίες του σχήματος έχει μειωθεί για λόγους ευκρίνειας).

Πιο συγκεκριμένα, από κάθε εικόνα προκύπτουν δύο *συγκεντρωτικές ακολουθίες χαρακτήρων*. Η κάθε *συγκεντρωτική ακολουθία* προκύπτει από τη διαδοχική τοποθέτηση (ενοποίηση) των ακολουθιών χαρακτήρων ανά σειρά εικονοστοιχείων (scan line) και ανά στήλη εικονοστοιχείων (scan row). Ως εκ τούτου ο περιγραφέας του κάθε αγγείου αποτελείται από τέσσερις ακολουθίες χαρακτήρων. Αυτές προκύπτουν από την *άθροιση αλφαριθμητικών* όπως αυτή νοείται σε προγραμματιστικό επίπεδο:

1. $S_{row}^{Cz} = \sum_{i=1}^n Cz_{row}^i$, όπου Cz_{row}^i : Η ακολουθία χαρακτήρων της *i-οστής* σειράς της εικόνας από τη θέση παρατήρησης στον άξονα Cz.
2. $S_{column}^{Cz} = \sum_{i=1}^n Cz_{column}^i$, όπου Cz_{column}^i : Η ακολουθία χαρακτήρων της *i-οστής* στήλης της εικόνας από τη θέση παρατήρησης στον άξονα Cz.
3. $S_{row}^{Cx} = \sum_{i=1}^n Cx_{row}^i$, όπου Cx_{row}^i : Η ακολουθία χαρακτήρων της *i-οστής* σειράς της εικόνας από τη θέση παρατήρησης στον άξονα Cx.
4. $S_{column}^{Cx} = \sum_{i=1}^n Cx_{column}^i$, όπου Cx_{column}^i : Η ακολουθία χαρακτήρων της *i-οστής* στήλης της εικόνας από τη θέση παρατήρησης στον άξονα Cx.

6.4.2 Μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα CBDM

Ο αλγόριθμος *Needleman-Wunsch* [68] αποτελεί το μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα CBDM. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για τη στοίχιση ακολουθιών χαρακτήρων (συμβολοσειρών). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί μία διαδικασία ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές βιοπληροφορικής καθώς εξυπηρετεί τη στοίχιση αμινοξέων με υπολογιστικό κόστος ανάλογο του γινομένου του μήκους των συγκεκριμένων ακολουθιών. Με τη χρήση ενός σεναρίου βαθμολόγησης ο αλγόριθμος καθορίζει τον τρόπο που βαθμολογούνται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- i. Βαθμός ταύτισης δύο χαρακτήρων (*matched characters*)
- ii. Βαθμός μη-ταύτισης δύο χαρακτήρων (*unmatched characters*)
- iii. Ποινή εισαγωγής κενού (*gap penalty*)

Ο αλγόριθμος εκτελείται σε τρία διακριτά βήματα. Αυτά είναι η αρχικοποίηση ενός δισδιάστατου πίνακα, η βαθμολογία του εκάστοτε κελιού και η ευθυγράμμιση των ακολουθιών. Στη περίπτωση χρήσης του αλγορίθμου ως μέτρου ομοιότητας το τελευταίο βήμα του αλγορίθμου αγνοείται. Σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου αρχικά ορίζεται ένας δισδιάστατος πίνακας. Έστω δύο ακολουθίες με πλήθος χαρακτήρων n και m αντίστοιχα, $S_1=\{b,u,u,s,d,b\}$ και $S_2=\{b,b,u,s,d,b\}$, με βαθμό ταύτισης δύο χαρακτήρων ($t=3$), μη ταύτισης ($t=0$) και ποινή εισαγωγής κενού ($g=-1$). Οι διαστάσεις του πίνακα που προκύπτει είναι $n+1 \times n+1$. Η πρώτη γραμμή και η πρώτη στήλη του πίνακα γεμίζουν με τις τιμές που προκύπτουν από το γινόμενο της ποινής εισαγωγής κενού με την εκάστοτε συντεταγμένη του κελιού. Ως εκ τούτου η πρώτη γραμμή και στήλη του πίνακα παίρνουν τις τιμές $(-1, -2, -3, -4, -5, -6)$ αντίστοιχα. Στη συνέχεια η τιμή m του κάθε κελιού προκύπτει από τον τύπο:

$$m_{n,m} = \max\{m_{n-1,m-1} + t_{n,m}, m_{n,m-1} + g, m_{n-1,m} + g\} \quad (6.4)$$

Στο επόμενο πίνακα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα υπολογισμού της βαθμολογίας ταύτισης των δύο ακολουθιών s_1 και s_2 (Τελική Βαθμολογία = 15). Να σημειωθεί πως η τελική βαθμολογία είναι απόλυτα αλληλένδετη με το σενάριο βαθμολόγησης.

		$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	
		b	u	u	s	d	b	
		0	-1	-2	-3	-4	-5	-6
$m=1$	b	-1	3	2	1	0	-1	-2
$m=2$	b	-2	2	3	2	1	0	-1
$m=3$	u	-3	1	5	6	5	4	3
$m=4$	s	-4	0	4	5	9	8	7
$m=5$	d	-5	-1	3	4	8	12	11
$m=6$	b	-6	-2	2	3	7	11	15

Πίνακας 6-3 Παράδειγμα υπολογισμού βαθμού ταύτισης ακολουθιών χαρακτήρων με τον αλγόριθμο Needleman-Wunsch [68].

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου *Needleman-Wunsch* τον κατατάσσει ως ένα μη εφαρμόσιμο μέτρο για συστήματα ανάκτησης πραγματικού χρόνου. Έτσι η αποτίμηση της απόδοσης του συγκεκριμένου μέτρου υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο *πινάκων ανεύρεσης* (lookup tables) που περιέχουν τις βαθμολογίες ταύτισης όλων των πιθανών συγκρίσεων των αγγείων που

προϋπάρχουν μέσα στη βάση δεδομένων. Ο βαθμός ομοιότητας D ανάμεσα σε δύο αγγεία i και j προκύπτει από το άθροισμα των βαθμών ταύτισης των συγκεντρωτικών ακολουθιών χαρακτήρων:

$$D(i, j) = \left[NW_{score} \left(S_{row,i}^{Cz}, S_{row,j}^{Cz} \right) + NW_{score} \left(S_{column,i}^{Cz}, S_{column,j}^{Cz} \right) \right] + \left[NW_{score} \left(S_{row,i}^{Cx}, S_{row,j}^{Cx} \right) + NW_{score} \left(S_{column,i}^{Cx}, S_{column,j}^{Cx} \right) \right] \quad (6.5)$$

Όπου:

NW_{score} : Ο βαθμός ταύτισης δύο ακολουθιών χαρακτήρων εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο *Needleman-Wunsch*.

$S_{row,i}^{Cz}$ και $S_{row,j}^{Cz}$: Οι συγκεντρωτικές ακολουθίες χαρακτήρων *ανά σειρά εικονοστοιχείων* (scan line) της εικόνας από τη θέση παρατήρησης που βρίσκεται στον άξονα Cz των αντικειμένων i και j αντίστοιχα.

$S_{column,i}^{Cz}$ και $S_{column,j}^{Cz}$: Οι συγκεντρωτικές ακολουθίες χαρακτήρων *ανά στήλη εικονοστοιχείων* (scan line) της εικόνας από τη θέση παρατήρησης που βρίσκεται στον άξονα Cz των αντικειμένων i και j αντίστοιχα.

$S_{row,i}^{Cx}$ και $S_{row,j}^{Cx}$: Οι συγκεντρωτικές ακολουθίες χαρακτήρων *ανά σειρά εικονοστοιχείων* (scan line) της εικόνας από τη θέση παρατήρησης που βρίσκεται στον άξονα Cx των αντικειμένων i και j αντίστοιχα.

$S_{column,i}^{Cx}$ και $S_{column,j}^{Cx}$: Οι συγκεντρωτικές ακολουθίες χαρακτήρων *ανά στήλη εικονοστοιχείων* (scan line) της εικόνας από τη θέση παρατήρησης που βρίσκεται στον άξονα Cx των αντικειμένων i και j αντίστοιχα.

6.4.3 CBDM MPEG-7 Σχήμα

Παρακάτω παρατίθενται μια εκδοχή του περιγραφέα CBDM σε γλώσσα *Description Definition Language* (DDL) και μπορεί να αποτελέσει επέκταση του MPEG-7 σχήματος.

```

1. <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2. <schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:mpeg7="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004"
3. xmlns:TSRDNS="CBDMNS" targetNamespace="CBDMNS">
4. <import namespace="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004" schemaLocation="Mpeg7-2004.xsd"/>
5. <complexType name="CBDMType" final="#all">
6.   <complexContent>
7.     <extension base="mpeg7:VisualDType">
8.       <sequence>
9.         <element name="characterSequenceRow" minOccurs="1" maxOccurs="1">
10.          <simpleType>
11.            <restriction base="string"/>
12.            <pattern value="(U|D|S|B|I)"/>
13.          </restriction>
14.          </simpleType>
15.        </element>
16.        <element name="characterSequenceColumn" minOccurs="1" maxOccurs="1">
17.          <simpleType>
18.            <restriction base="string"/>
19.            <pattern value="(U|D|S|B|I)"/>
20.          </restriction>
21.          </simpleType>
22.        </element>
23.      </sequence>
24.    </extension>
25.  </complexContent>
26. </complexType>
27. </schema>

```

Πίνακας 6-4 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα CBDM.

Ο περιορισμός των χαρακτήρων που μπορεί να εμφανίζονται μέσα στην ακολουθία χαρακτήρων (Πίνακας 6-4, γραμμή 12^η) προκύπτει από τη μέθοδο κωδικοποίησης των χαρτών βάθους. Το παραπάνω σχήμα προϋποθέτει την οργάνωση των ακολουθιών χαρακτήρων που προκύπτουν από τις δύο εικόνες σε δύο συγκεντρωτικές ακολουθίες στις οποίες εφαρμόζεται ανεξάρτητα ο αλγόριθμος *Needleman-Wunsch*.

6.4.4 Περιγραφέας ZMDM

Οι ροπές *Zernike* έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία τόσο σε εφαρμογές ανακατασκευής του περιεχόμενου μίας εικόνας όσο και σε εφαρμογές ανάκτησης βάσει περιεχομένου ψηφιογραφικών εικόνων καθώς έχουν αποδειχθεί δυνατοί περιγραφείς των χαρακτηριστικών των σχημάτων. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα τους καθιστά πολλές φορές την εφαρμογή τους μη δυνατή ειδικά όταν πρόκειται για συστήματα πραγματικού χρόνου (real time systems). Στη διεθνή βιβλιογραφία

εμφανίζονται περιγραφείς που αποτελούνται από συντελεστές ροπών Zernike και συντελεστές μετασχηματισμού Fourier. Οι πρώτοι περιγράφουν τα σχήματα μίας εικόνας ανά περιοχή (region shape descriptor) ενώ οι δεύτεροι τα περιγράμματα των σχημάτων (contour shape descriptor) [69][148]. Το πρότυπο MPEG-7 περιλαμβάνει έναν περιγραφέα δυοδιάστατων ροπών Zernike με την ονομασία *RegionShape* [149].

Ο προτεινόμενος περιγραφέας «Κωδικοποίησης χάρτη βάθους με δισδιάστατες ροπές Zernike 13^{ης} τάξης» (2D Zernike Moment Depth Map Encoding - ZMDM) δεν αποτελεί ένα νέο περιγραφέα αλλά ένα παράδειγμα εφαρμογής μίας μεθόδου που προέρχεται από το χώρο της ανάκτησης ψηφιογραφικών εικόνων βάσει περιεχομένου. Οι ροπές Zernike είναι αμετάβλητες ως προς την περιστροφή της εικόνας και σε συνδυασμό με μία διαδικασία κανονικοποίησης μεγέθους και θέσης σχηματίζουν ένα σταθερό αμετάβλητο διανυσματικό περιγραφέα χαρακτηριστικών.

Έστω ότι $f(i,j)$ είναι η συνάρτηση μίας ψηφιογραφικής εικόνας διαστάσεων $m \times n$, τότε η ροπή της n -οστής τάξης με επανάληψη /ορίζεται ως:

$$Z_{nl} = \frac{n+1}{\pi} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(i,j) \cdot R_{nl}(r_{ij}) \cdot e^{-x \cdot l \cdot \theta_{ij}} \quad (6.5)$$

Όπου οι διακριτές πολικές συντεταγμένες προκύπτουν από:

$$r_{ij} = \sqrt{x_j^2 + y_i^2}, \theta_{ij} = \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right) \quad (6.6)$$

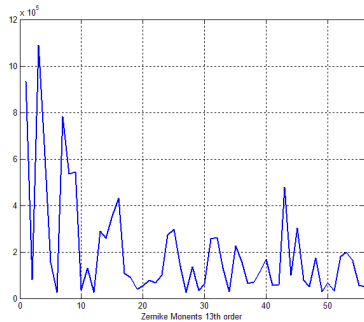
Το πλήθος των συντελεστών των ροπών Zernike μίας συγκεκριμένης τάξης προκύπτει από τον τύπο:

$$N_{\text{ροπών } n} = \sum_{n=0}^{\text{Max}} \left\{ \left\lceil \frac{n}{2} \right\rceil + 1 \right\} \quad (6.7)$$

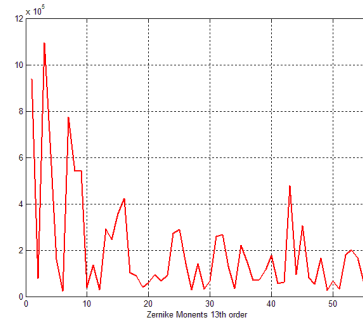
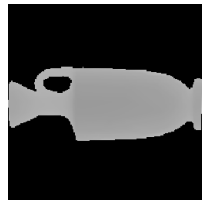
Οι ροπές 13^{ης} τάξης που εφαρμόστηκαν στον περιγραφέα ZMDM αποτελούνται από 56 στοιχεία. Καθώς προκύπτουν 56 συντελεστές από κάθε εικόνα το σύνολο των ροπών που αποθηκεύονται για ένα αγγείο είναι 112 αριθμοί κινητής υποδιαστολής.

Ως εκ τούτου, ο περιγραφέας ZMDM αποτελείται από ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών 112 συντελεστών.

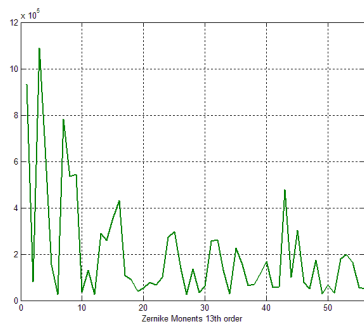
Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται η αμεταβλητότητα των απόλυτων τιμών των ροπών *Zernike* (13^{ης} τάξης) σε περιστροφές. Οι χάρτες βάθους προέκυψαν από την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού περιστροφής σε ένα κανονικοποιημένο ως προς την κλίμακα και τον προσανατολισμό τρισδιάστατο μοντέλο μίας Ληκύθου. Όπως φαίνεται και στα γραφήματα οι απόλυτες τιμές των ροπών παραμένουν αμετάβλητες. Ως εκ τούτου, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου ο αλγόριθμος αναγνώρισης της θέσης του στομίου (παράγραφος 5.3.3) αποτύχει και το αντικείμενο εμφανίζεται με λανθασμένο προσανατολισμό ο συγκεκριμένος περιγραφέας συνεχίζει να παραμένει αμετάβλητος.



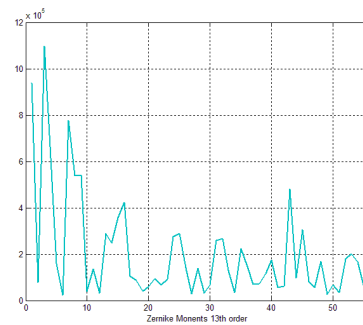
Αρχική θέση αγγείου



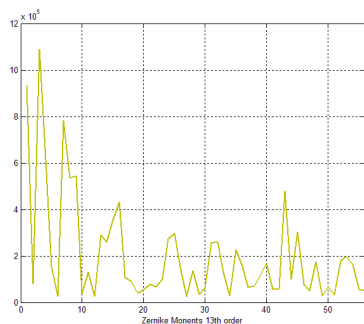
Περιστροφή γύρω από τον άξονα C_z κατά 50°



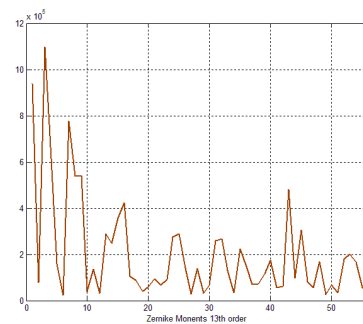
Περιστροφή γύρω από τον άξονα C_z κατά 100°



Περιστροφή γύρω από τον άξονα C_z κατά 150°



Περιστροφή γύρω από τον άξονα C_z κατά 180°



Περιστροφή γύρω από τον άξονα C_z κατά 240°

Σχήμα 6-5 Αμεταβλητότητα 2D ροπών Zernike σε περιστροφή γύρω από το κέντρο της ψηφιογραφικής εικόνας.

6.4.5 ZMDB MPEG-7 Σχήμα

Παρακάτω παρατίθεται μια εκδοχή του περιγραφέα ZMDB σε γλώσσα *Description Definition Language* (DDL) και μπορεί να αποτελέσει επέκταση του MPEG-7 σχήματος.

```
1. <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2. <schema xmlns="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:mpeg7="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004"
3. xmlns:TSRDNS="ZMDBNS" targetNamespace="ZMDBNS">
4. <import namespace="urn:mpeg:mpeg7:schema:2004" schemaLocation="Mpeg7-2004.xsd"/>
5. <complexType name="ZMDBType" final="#all">
6.   <complexContent>
7.     <extension base="mpeg7:VisualDType">
8.       <sequence>
9.         <element name="ZernikeMoments" minOccurs="1" maxOccurs="1">
10.          <simpleType>
11.            <restriction base="mpeg7:floatVector"/>
12.            <length value="112"/>
13.          </restriction>
14.          </simpleType>
15.        </element>
16.      </sequence>
17.    </extension>
18.  </complexContent>
19. </complexType>
20. </schema>
```

Πίνακας 6-5 MPEG-7 DDL σχήμα του περιγραφέα ZMDB.

Το μέγεθος του διανύσματος περιορίζεται στα 112 στοιχεία το οποίο προκύπτει από το πλήθος των ροπών *Zernike 13^{ης}* τάξης που υπολογίζονται στους δύο χάρτες βάθους (Πίνακας 6-5, γραμμή 12^η).

Κεφάλαιο 7

Αποτίμηση Απόδοσης Πρότυπου Συστήματος Ανάκτησης Τρισδιάστατων Αγγείων

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το πρότυπο σύστημα ανάκτησης τρισδιάστατων αγγείων βάσει περιεχομένου σε επίπεδο αρχιτεκτονικής και λειτουργικότητας. Επίσης γίνεται εκτενής αναφορά στα σενάρια και στα μέτρα [17] που εφαρμόστηκαν για την αποτίμηση της απόδοσης των περιγραφών που χρησιμοποιούνται στο σύστημα. Περιγράφεται επίσης μια μέθοδος απεικόνισης της σχηματικής απόκλισης των αγγείων η οποία ως στόχο έχει την ενίσχυση των αποτελεσμάτων απόδοσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για έναν μελετητή κεραμικών αφού η οπτικοποίηση της σχηματικής απόκλισης εμπίπτει στα ενδιαφέροντα του.

7.2 Περιγραφή πρότυπου συστήματος ανάκτησης

Το πρότυπο σύστημα ανάκτησης τρισδιάστατων αγγείων υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ανοικτές τεχνολογίες όπως αυτές των Apache HTTP⁸, PHP⁹, eXist¹⁰ και Java¹¹. Η μηχανή αναζήτησης αναπτύχθηκε ως μια δυναμική ιστοσελίδα η οποία

⁸ Apache HTTP - Διακομιστής ιστοσελίδων - <http://httpd.apache.org>

⁹ PHP - Γλώσσα προγραμματισμού ιστοσελίδων δυναμικού περιεχομένου - <http://php.net>

¹⁰ eXist - Εγγενείς XML βάση δεδομένων - <http://exist.sourceforge.net>

¹¹ Java - Αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού της Sun Microsystems - <http://java.sun.com>

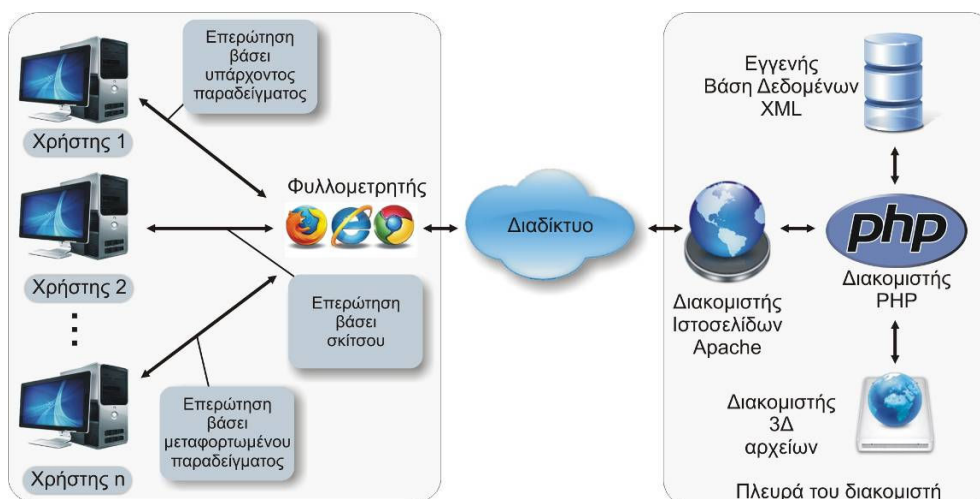
παρέχει στο χρήστη διάφορους μηχανισμούς αναζήτησης. Οι σημαντικότεροι από αυτούς παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7-1). Τα εικονίδια αριστερά των περιγραφών είναι αυτά που συναντά ο χρήστης στην ιστοσελίδα. Η Διαδικτυακή της διεύθυνση είναι <http://www.ipet.gr/3DPSE>.

Εικονίδιο	Περιγραφή της μεθόδου αναζήτησης
	Επερώτηση-βάσει-παραδείγματος με μεταφόρτωση αρχείου στο διακομιστή
	Επερώτηση-βάσει-σκίτσου
	Ταξινόμηση αγγείων βάσει αριθμού ταυτότητας ID
	Ταξινόμηση αγγείων βάσει δείκτη πολυπλοκότητας προσαρτημάτων
	Προβολή ψηφιοποιημένων αγγείων
	Προβολή μοντελοποιημένων αγγείων
	Προβολή αγγείων που φέρουν πληροφορία υφής
Επιλογή σε κάθε μικρογραφία	Επερώτηση-βάσει-παραδείγματος που υπάρχει ήδη μέσα στη βάση δεδομένων
Μενού πολλαπλών επιλογών	Προβολή αγγείων συγκεκριμένης κατηγορίας χρησιμοποιώντας την πληροφορία των μεταδεδομένων

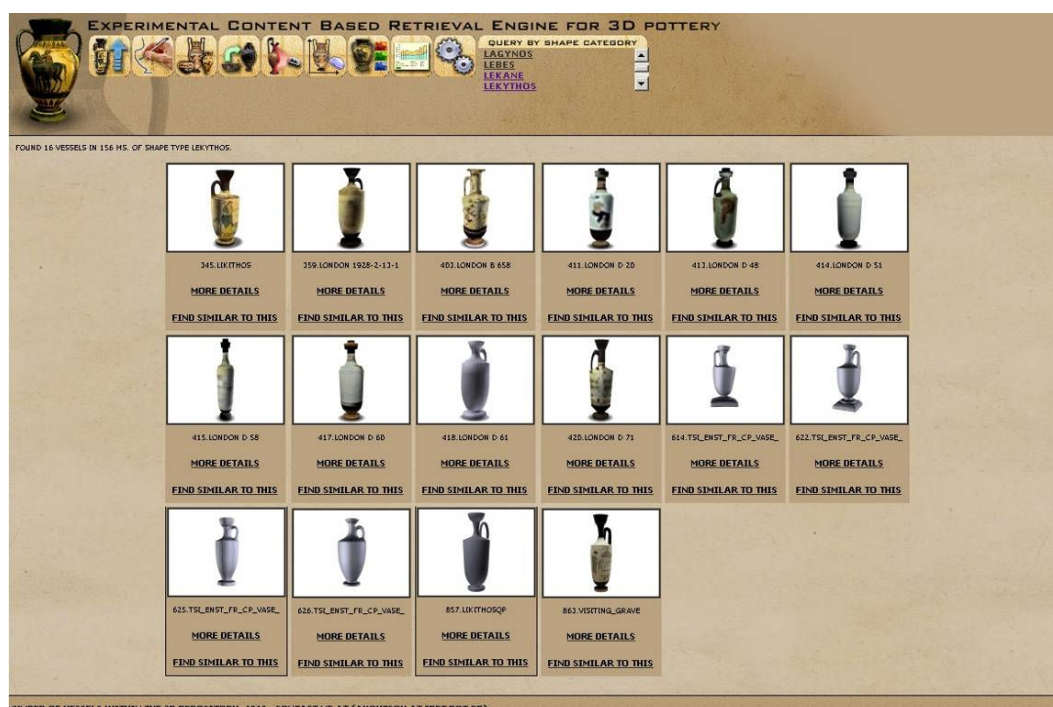
Πίνακας 7-1 Διαθέσιμοι τρόποι αναζήτησης.

Το σύστημα ανάκτησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7-1, ακολουθεί την κλασική αρχιτεκτονική *χρήστη-διακομιστή* (client-server). Οι περιγραφείς των αγγείων και τα μεταδεδομένα που τα ακολουθούν βρίσκονται οργανωμένα στην εγγενή βάση δεδομένων XML, eXist. Στη γλώσσα PHP έχουν υλοποιηθεί οι συναρτήσεις για τη σύγκριση των περιγραφών, την κατάταξη των ανακτηθέντων αγγείων σύμφωνα με το βαθμό ομοιότητας τους καθώς και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων προς τον χρήστη. Στο σχήμα 7-2 προβάλλεται ένα στιγμιότυπο της μηχανής αναζήτησης

μετά από την υποβολή επερώτησης για την προβολή των αγγείων που ανήκουν στη γενική κατηγορία των Ληκύθων. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί το τρισδιάστατο αγγείο επιλέγοντας τη ψηφιογραφική μικρογραφία του. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη λογισμικού προβολής αρχείων VRML. Τα μεταδεδομένα που συνοδεύουν το κάθε αγγείο εμφανίζονται σε ένα αναδυόμενο παράθυρο εφόσον ο χρήστης μεταφέρει τον δείκτη του ποντικιού πάνω από την επιλογή κειμένου «*More Details*».



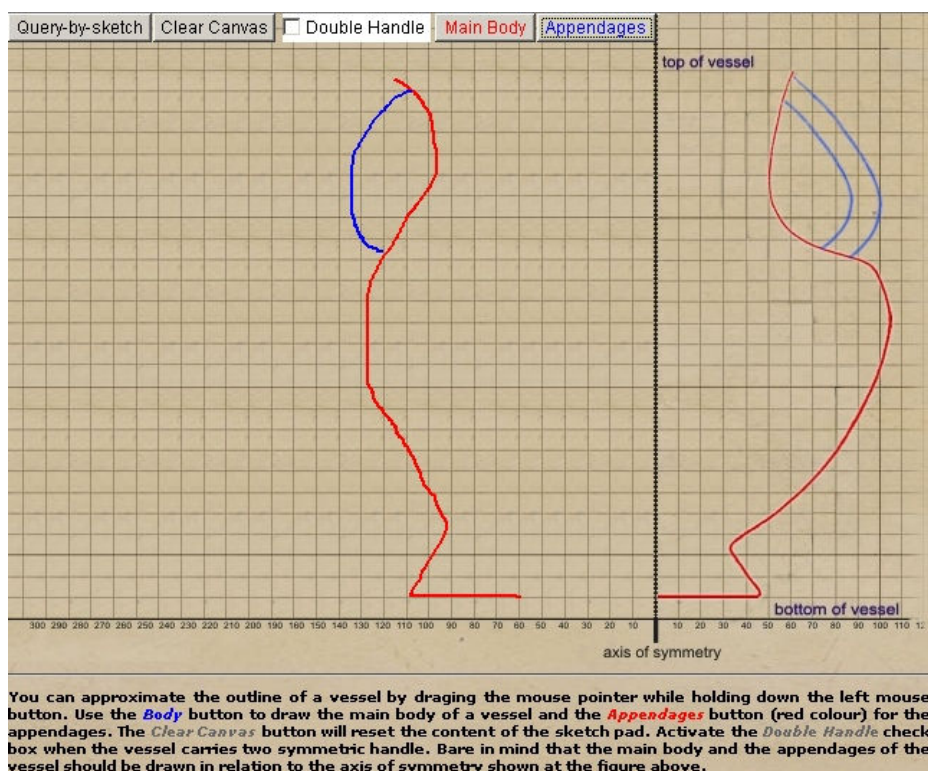
Σχήμα 7-1 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου 3Δ αγγείων.



Σχήμα 7-2 Στιγμιότυπο της πρότυπης μηχανής αναζήτησης βάσει περιεχομένου.

7.2.1 Επερώτηση βάσει σκίτσου

Η μέθοδος *επερώτησης βάσει σκίτσου* (query-by-sketch) αναπτύχθηκε ως ένα *Java applet*. Η συγκεκριμένη υλοποίηση έρχεται να συμπληρώσει τις βασικές μεθόδους υποβολής επερώτησης που συναντούμε σε συστήματα ανάκτησης βάσει περιεχομένου. Η συγκεκριμένη μέθοδος επερώτησης χαρακτηρίζεται ως δευτερεύουσα αφού ο μελετητής κεραμικών στον οποίο απευθύνεται κατά κύριο λόγο το προτεινόμενο σύστημα ανάκτησης σπάνια θα επιλέξει τη συγκεκριμένη μέθοδο για να αποδώσει τα μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός αγγείου. Ο χρήστης σχεδιάζει ελεύθερα πάνω σε ένα ψηφιακό καμβά το μισό προφίλ ενός αγγείου λαμβάνοντας υπόψη του τη θέση απεικόνισης ενός άξονα συμμετρίας (Σχήμα 7-3). Ο διαχωρισμός του βασικού σώματος ενός αγγείου από τα προσαρτήματα σε επίπεδο σκίτσου υλοποιείται με τη χρήση εικονοστοιχείων διαφορετικών χρωμάτων.



Σχήμα 7-3 Επερώτηση βάσει σκίτσου - Στιγμιότυπο του καμβά σχεδίασης του προφίλ ενός αγγείου. Δεξιά του άξονα συμμετρίας παρουσιάζεται ένα πρότυπο σχέδιο για διευκόλυνση του χρήστη.

Ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τη χρωματική διαφοροποίηση για να εξάγει τα

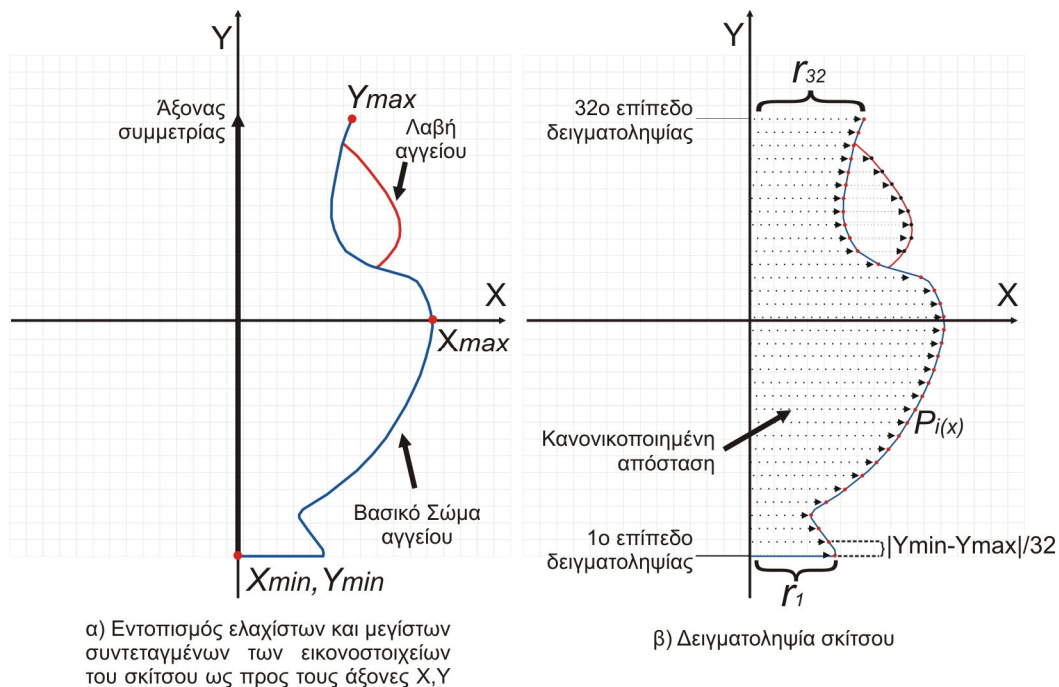
χαρακτηριστικά των δύο τμημάτων του αγγείου. Οι ελάχιστες και μέγιστες συντεταγμένες των εικονοστοιχείων του σκίτσου ως προς τους δύο άξονες του καμβά ορίζουν την περιοχή όπου θα εφαρμοσθεί μία διαδικασία δειγματοληψίας του σχεδίου που θα οδηγήσει στην κατασκευή του περιγραφέα *VMBA* (Παράγραφος 6.2). Η διαδικασία δειγματοληψίας του σκίτσου είναι παρόμοια με τη μεθοδολογία χάραξης ισοϋψών καμπυλών σε τρισδιάστατο μοντέλο. Το πλήθος των επιπέδων χάραξης του σκίτσου είναι όμοιο με το πλήθος των επιπέδων χάραξης του τρισδιάστατου μοντέλου. Έστω X_{max} , X_{min} , Y_{max} και Y_{min} οι μέγιστες και ελάχιστες συντεταγμένες των εικονοστοιχείων του σκίτσου (Σχήμα 7-4). Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων αυτών λαμβάνονται υπόψη και τα δύο τμήματα του σκίτσου. Με τη βοήθεια των συντεταγμένων αυτών προκύπτει η ακτίνα του βέλτιστου περικλείοντος κύκλου από τον τύπο:

$$r = \max \left\{ \left| \frac{Y_{min} - Y_{max}}{2} \right|, |X_{min} - X_{max}| \right\} \quad (7.1)$$

Η συντεταγμένη του πρώτου επιπέδου χάραξης ως προς τον άξονα Y είναι ίση με τη συντεταγμένη της Y_{min} . Οι επόμενες προκύπτουν προσθέτοντας κάθε φορά το επαυξητικό βήμα $|Y_{min} - Y_{max}|/32$. Σε κάθε επίπεδο χάραξης του σκίτσου, εντοπίζεται το πλέον απομακρυσμένο από τον άξονα συμμετρίας εικονοστοιχείο. Ως άξονας συμμετρίας ορίζεται η στήλη εικονοστοιχείων της εικόνας με συντεταγμένη X_{min} . Η ευκλείδεια απόσταση του συγκεκριμένου εικονοστοιχείου από τον άξονα συμμετρίας υποδεικνύει την ακτίνα του βέλτιστου κύκλου που περικλείει το συγκεκριμένο τμήμα του βασικού σώματος του αγγείου. Η απόσταση αυτή κανονικοποιείται στο διάστημα $(0,0.5)$ έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμη με τις τιμές που φέρουν οι περιγραφείς των τρισδιάστατων αγγείων στη βάση δεδομένων. Έστω $r' = 0.5$ η ακτίνα του μοναδιαίου κύκλου. Ισχύει πως $\frac{r}{k} = r'$, όπου k ο παράγοντας κλιμάκωσης για την κανονικοποίηση των τιμών. Αφού $k = \frac{r'}{r}$, τότε η κανονικοποιημένη απόσταση ανάμεσα στο πλέον απομακρυσμένο από τον άξονα συμμετρίας εικονοστοιχείο προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$d_{normalised} = \frac{|P_i(x) - X_{min}|}{2r} \quad (7.2)$$

Από την άλλη, οι λαβές του αγγείου που περιγράφει το σκίτσο βρίσκονται πάντα μέσα σε δυο συγκεκριμένους τομείς του τριγωνομετρικού κύκλου εξαιτίας του διαστάτου επιπέδου σχεδίασης. Δεδομένου του διαχωρισμού του τριγωνομετρικού κύκλου σε 16 τομείς (Παράγραφος 6.2) οι συντεταγμένες των στηλών του πίνακα είναι πάντα $(x, 0)$ ή (x, y) , όπου x το επίπεδο δειγματοληψίας του σκίτσου που συναντάται το πλέον απομακρυσμένο από τον άξονα συμμετρίας εικονοστοιχείο που ανήκει σε προσάρτημα.



Σχήμα 7-4 Εντοπισμός ελαχίστων και μεγίστων συντεταγμένων του αγγείου, υπολογισμός ελάχιστου περικλείοντος κύκλου σε κάθε επίπεδο και κανονικοποίηση αποστάσεων εικονοστοιχείων από τον άξονα συμμετρίας.

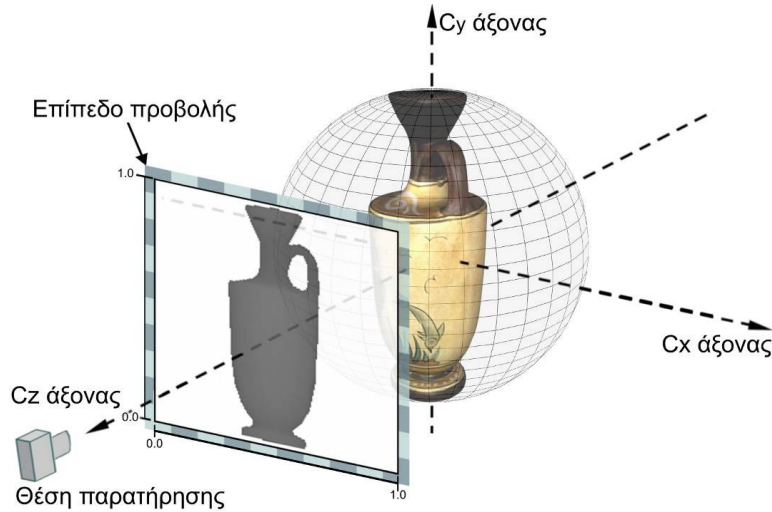
7.3 Απεικόνιση σχηματικής απόκλισης αγγείων

Για την ενίσχυση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων αποτίμησης των μεθόδων ανάκτησης αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία απεικόνισης της σχηματικής απόκλισης των αγγείων.

Η δυνατότητα απεικόνισης της σχηματικής απόκλισης με έναν σαφή γραφικό τρόπο μπορεί να κατευθύνει τον μελετητή κεραμικών σε σημαντικά συμπεράσματα

που σχετίζονται είτε με τη πορεία των αγγείων είτε με τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο κατασκευής τους. Παρόμοια μεθοδολογία εφαρμόζεται εδώ και χρόνια σε πραγματικά αγγεία χρησιμοποιώντας χειροκίνητες μεθόδους. Ακόμα και η προσπάθεια όμως προσέγγισης των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με χειροκίνητες μετρήσεις πάνω σε πραγματικά αγγεία ή πάνω σε φωτογραφίες είναι υπερβολικά χρονοβόρα. Από την άλλη, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προϋποθέτει την ύπαρξη τρισδιάστατων ψηφιακών αντιγράφων.

Πιο συγκεκριμένα, μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού ενός αγγείου (Κεφάλαιο 5), αποθηκεύεται μια ψηφιογραφική εικόνα που περιέχει την ορθογραφική προβολή του αγγείου με τη τεχνική χάρτη βάθους. Το επίπεδο προβολής του παρατηρητή βρίσκεται πάνω στη θετική πλευρά του άξονα C_z και με διεύθυνση παρατήρησης προς την αρχή των αξόνων του δεξιόχειρου τρισδιάστατου καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων (Σχήμα 7-5). Η ορθογραφική προβολή ενός σημείου της επιφάνειας του αγγείου δεν επηρεάζεται από την απόσταση του από το επίπεδο προβολής (απόσταση ως στον άξονα C_z - βάθος). Οι διαστάσεις του επιπέδου προβολής είναι κανονικοποιημένες στη μονάδα ενώ η απόσταση του από την αρχή των αξόνων ως προς τον άξονα C_z είναι 0.5 μονάδες. Η απόσταση των σημείων της επιφάνειας του αντικειμένου ως προς το επίπεδο προβολής υπολογίζεται κβαντισμένη αντιστοιχώντας μία από τις προκαθορισμένες τιμές (256 διαβαθμίσεις του γκρι). Το σύνολο των εικόνων που ανήκουν σε μια συγκεκριμένη κατηγορία αγγείων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του βαθμού σχηματικής απόκλισης.



Σχήμα 7-5 Αποτύπωση πλευρικής όψης μίας Ληκύθου από συγκεκριμένη οπτική γωνία με την τεχνική χάρτη βάθους (χρήση ορθογραφικής προβολής).

Έστω n το πλήθος των αγγείων που ανήκουν σε μια κατηγορία m . Αρχικά οι τιμές των εικονοστοιχείων της κάθε εικόνας χάρτη-βάθους κανονικοποιούνται στη μονάδα. Στη συνέχεια οι τιμές των αντίστοιχων εικονοστοιχείων σε κάθε εικόνα $P_k(i,j)$ με $i=(1,2,\dots,n)$ αθροίζονται και προκύπτει μια νέα εικόνα $Q(i,j)$.

$$Q_{(i,j)} = \sum_{k=1}^n P_k(i,j) \quad (7.7)$$

Ο βαθμός της σχηματικής απόκλισης D_v μίας κατηγορίας προκύπτει από τον λόγο:

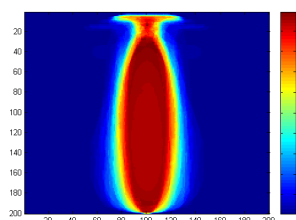
$$D_v = \frac{\text{Πλήθος εικονοστοιχείων με τιμή } \leq \text{κατώφλι και } > 0}{\text{Πλήθος εικονοστοιχείων με τιμή } > 0} \quad (7.8)$$

Ένα εικονοστοιχείο με μηδενική τιμή εκλαμβάνεται ως τμήμα του φόντου και δεν συμμετέχει στον υπολογισμό του βαθμού απόκλισης D_v . Το κατώφλι ορίζει το κατώτερο όριο τιμών των εικονοστοιχείων που εκλαμβάνονται ως τμήμα της επιφάνειας σχηματικής ταύτισης μίας συγκεκριμένης κατηγορίας αγγείων. Οποιαδήποτε εικονοστοιχείο της εικόνας $Q(i,j)$ με τιμή μεγαλύτερη από το κατώφλι αποτελεί τμήμα της επιφάνειας ταύτισης. Έτσι ως επιφάνεια σχηματικής ταύτισης ανάμεσα στα αγγεία εκλαμβάνονται όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας $Q(i,j)$ με τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με το κατώφλι. Για τον υπολογισμό του D_v των αγγείων της βάσης δεδομένων ορίσθηκε η τιμή του κατωφλιού στις 0.8 μονάδες. Καθώς η

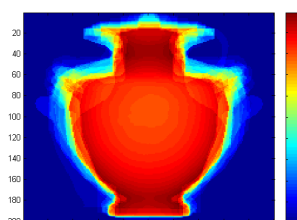
εικόνα $Q(i,j)$ προκύπτει από το άθροισμα των χαρτών βάθους, ο υπολογισμός του D_V υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την τρισδιάστατη επιφάνεια του αγγείου που αποτυπώνεται από τη συγκεκριμένη θέση παρατήρησης του αγγείου. Η προσέγγιση αυτή αποδίδει αντικειμενικότερα αποτελέσματα σε σχέση με μεθοδολογίες που βασίζονται στο δισδιάστατο προφίλ ενός αγγείου ή σε δυαδικές εικόνες σιλουέτας.

Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 7-2) παρουσιάζονται οι εικόνες σχηματικής απόκλισης $Q(i,j)$ των αγγείων που περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων. Το μέγεθος του βαθμού σχηματικής απόκλισης καταδεικνύει το εύρος των σχηματικών διακυμάνσεων που φέρουν τα αγγεία της κάθε κατηγορίας. Οι περιοχές όπου παρατηρείται επιφανειακή σχηματική ταύτιση εμφανίζονται με διαβαθμίσεις του κόκκινου χρώματος. Ένα από τα μειονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται στο γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη της μόνο τη γεωμετρία της εξωτερικής επιφάνειας του αγγείου.

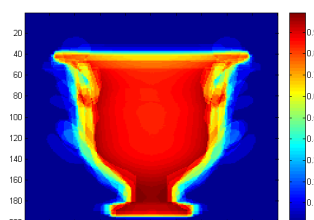
Αλάβαστρο, $D_V = 0.6320$



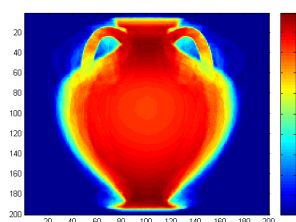
Υδρία, $D_V = 0.4579$



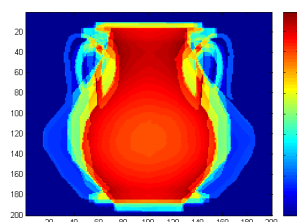
Κρατήρας, $D_V = 0.5125$



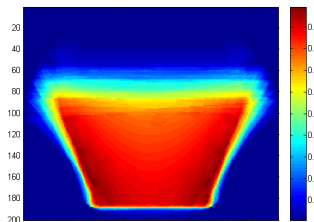
Αμφορέας $D_V = 0.5036$



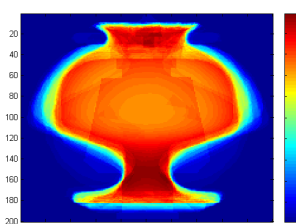
Πελίκη, $D_V = 0.5068$



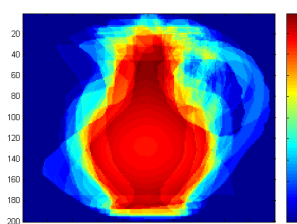
Κάλαθος, $D_V = 0.6475$



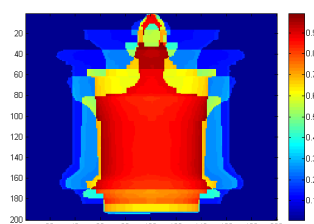
Ψυκτήρ, $D_V = 0.7769$

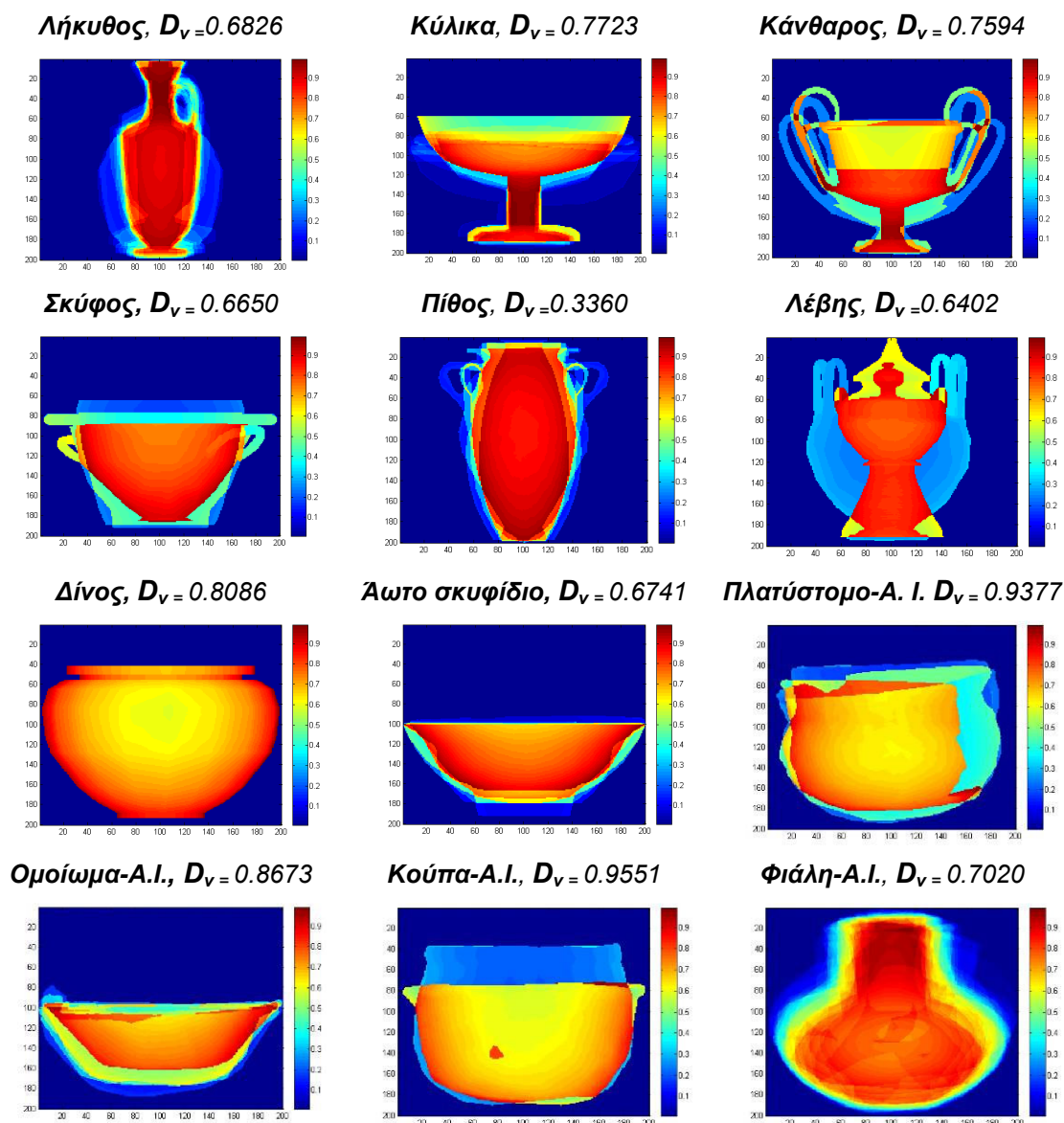


Οινοχόη, $D_V = 0.6534$



Πυξίς, $D_V = 0.5907$





Πίνακας 7-2 Γραφική αναπαράσταση της σχηματικής απόκλισης των αγγείων ανά κατηγορία.

7.4 Αποτίμησης απόδοσης συστήματος ανάκτησης

Η αποτίμηση της απόδοσης του πρότυπου συστήματος ανάκτησης βασίστηκε στην εφαρμογή πολλαπλών ακολουθιών επερωτήσεων βάσει παραδείγματος. Επιλέχτηκαν πέντε κατηγορίες αγγείων βάση του συγκριτικά μεγάλου πλήθους αντικειμένων που περιέχουν. Αυτές είναι οι *Αμφορέας*, *Λήκυθος*, *Ψυκτήρας*, *Υδρία* και *Αλάβαστρον*. Σύμφωνα με το σενάριο αποτίμησης της απόδοσης του συστήματος, το κάθε αγγείο της εκάστοτε κατηγορίας χρησιμοποιείται ως επερώτηση προς το σύστημα. Για κάθε επερώτηση υπολογίσθηκαν τα γραφήματα

ακρίβειας-ανάκτησης καθώς και τα μονόμετρα της παραγράφου 2.5.5 χρησιμοποιώντας πέντε διαφορετικούς περιγραφείς. Αυτοί είναι οι ακόλουθοι:

- s-i. *Βασικό Σώμα και Προσαρτήματα Αγγείου (Vessel's Main Body and Appendage - VMBA)* χρησιμοποιώντας το μετρικό ομοιότητας της παραγράφου 6.2.1 με ειδικά βάρη P_w και AF_{max} ίσα με τη μονάδα.
- s-ii. *Κωδικοποίηση Χάρτη Βάθους με Χαρακτήρες (Character Based Depth Map Encoding - CBDM)* με μετρικό ομοιότητας των αλγόριθμο *Needleman-Wunsch* [68] (παράγραφος 6.4.2).
- s-iii. *Κωδικοποίηση Χάρτη Βάθους με δισδιάστατε ροπές Zernike 13^{ου} βαθμού (2D Zernike Moment Depth Map Encoding - ZMDM)* με μετρικό ομοιότητας την L_2 νόρμα.
- s-iv. *Περιγραφέας MPEG-7 3D Shape Spectrum (3D SSD)* [14] με μέθοδο εξαγωγής το MPEG-7 Experimentation Model (*XM version 6.1*) και μετρικό ομοιότητας την L_2 νόρμα (6.1). Το πλήθος των κλάσεων (*bins*) του ιστογράμματος του περιγραφέα 3D SSD ορίσθηκε στις 64 κλάσεις καθώς η απόδοση του είναι καλύτερη σε σχέση με την εξορισμού τιμή των (100 bins) [13].
- s-v. *Light Field Descriptor (LIFD)* με μέθοδο εξαγωγής και μετρικό ομοιότητας υλοποιημένα σε λογισμικό που παρέχει ο ίδιος συγγραφέας της συγκεκριμένης εργασίας. Η επιλογή του συγκεκριμένου περιγραφέα εντοπίζεται στη πολύ καλή απόδοση που παρουσιάζει η εργασία [69].

Για κάθε μια από τις κατηγορίες αγγείων υπολογίσθηκε ο μέσος όρος του γραφήματος ακρίβειας-ανάκτησης και ο μέσος όρος των μονόμετρων. Τέλος, υπολογίσθηκαν οι συνολικές αποδόσεις του συστήματος για κάθε ένα περιγραφέα υπολογίζοντας το συνολικό μέσο όρο των γραφημάτων ακρίβειας-ανάκτησης και τους συνολικούς μέσους όρους των μονόμετρων και για τις πέντε κατηγορίες αγγείων.

Πιο συγκεκριμένα, οι μέσες τιμές των μονόμετρων *First-tier (F^1)*, *Second-Tier (F^2)*, *Average Mean Precision (AMP)*, *E-Measure⁶⁴ (E^{64})*, *Cumulated Gain (CG)*, *Discounting Cumulated Gain (DCG)* και *Nearest Neighbour (NN)* υπολογίστηκαν

εφαρμόζοντας ένα περιγραφέα τύπου s , σε πλήθος αγγείων n που ανήκουν σε μια κατηγορία m και επερώτηση το αγγείο $i=\{1,2,\dots,n\}$ από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_{m,s}^1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^1, F_{m,s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^2, AMP_{m,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AMP_i, \\ E^{64} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i^{64}, CG_{m,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CG_i, DCG_{m,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DCG_i, NN_{m,s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n NN_i \end{aligned} \quad (7.3)$$

Όπου $F_i^1, F_i^2, AMP_i, E_i^{64}, CG_i, DCG_i, NN_i$ οι τιμές του εκάστοτε μονόμετρου που προκύπτουν θέτοντας το i -στο αγγείο της κατηγορίας m ως επερώτηση στο σύστημα και χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα s . Επίσης οι αντίστοιχοι συνολικοί μέσοι όροι των μονόμετρων για τις πέντε επιλεγμένες κατηγορίες αγγείων $m=\{1,2,\dots,5\}$ όπου εφαρμόσθηκε ο περιγραφέας s προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} F_{average,s}^1 &= \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 F_{m,s}^1, F_{average,s}^2 = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 F_{m,s}^2, AMP_{average,s} = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 AMP_{m,s}, \\ E_{average,s}^{64} &= \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 E_{m,s}^{64}, CG_{average,s} = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 CG_{m,s}, DCG_{average,s} = \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 DCG_{m,s}, \\ NN_{average,s} &= \frac{1}{5} \sum_{m=1}^5 NN_{m,s} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Ομοίως υπολογίζονται οι μέσες τιμές που φέρουν οι συνιστώσες των γραφήματων ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων. Έστω $\overline{P}_i = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n\}$ οι τιμές της συνιστώσας ακρίβειας και $\overline{R}_i = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ οι τιμές της συνιστώσας ανάκτησης ενός γραφήματος ακρίβειας-ανάκτησης που προέκυψε από την υποβολή του i -στου αγγείου μίας κατηγορίας αγγείων m ως επερώτηση στο σύστημα χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα s . Οι μέσοι όροι των συνιστωσών του γραφήματος ακρίβειας-ανάκτησης όλων των αγγείων $i=\{1,2,\dots,n\}$ που ανήκουν σε μία κατηγορία m προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$P_{m,s} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{P}_i}{n}, R_{m,s} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{R}_i}{n} \quad (7.5)$$

Οι μέσες τιμές των συνιστωσών του γραφήματος ακρίβειας-ανάκτησης για τις πέντε κατηγορίες αγγείων $m=(1,2,\dots,5)$ για ένα συγκεκριμένο περιγραφέα s προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{average,s} = \frac{\sum_{m=1}^5 \overline{P_m}}{5}, R_{average,s} = \frac{\sum_{m=1}^5 \overline{R_m}}{5} \quad (7.6)$$

7.4.1 Αποτελέσματα αποτίμησης απόδοσης του συστήματος ανάκτησης

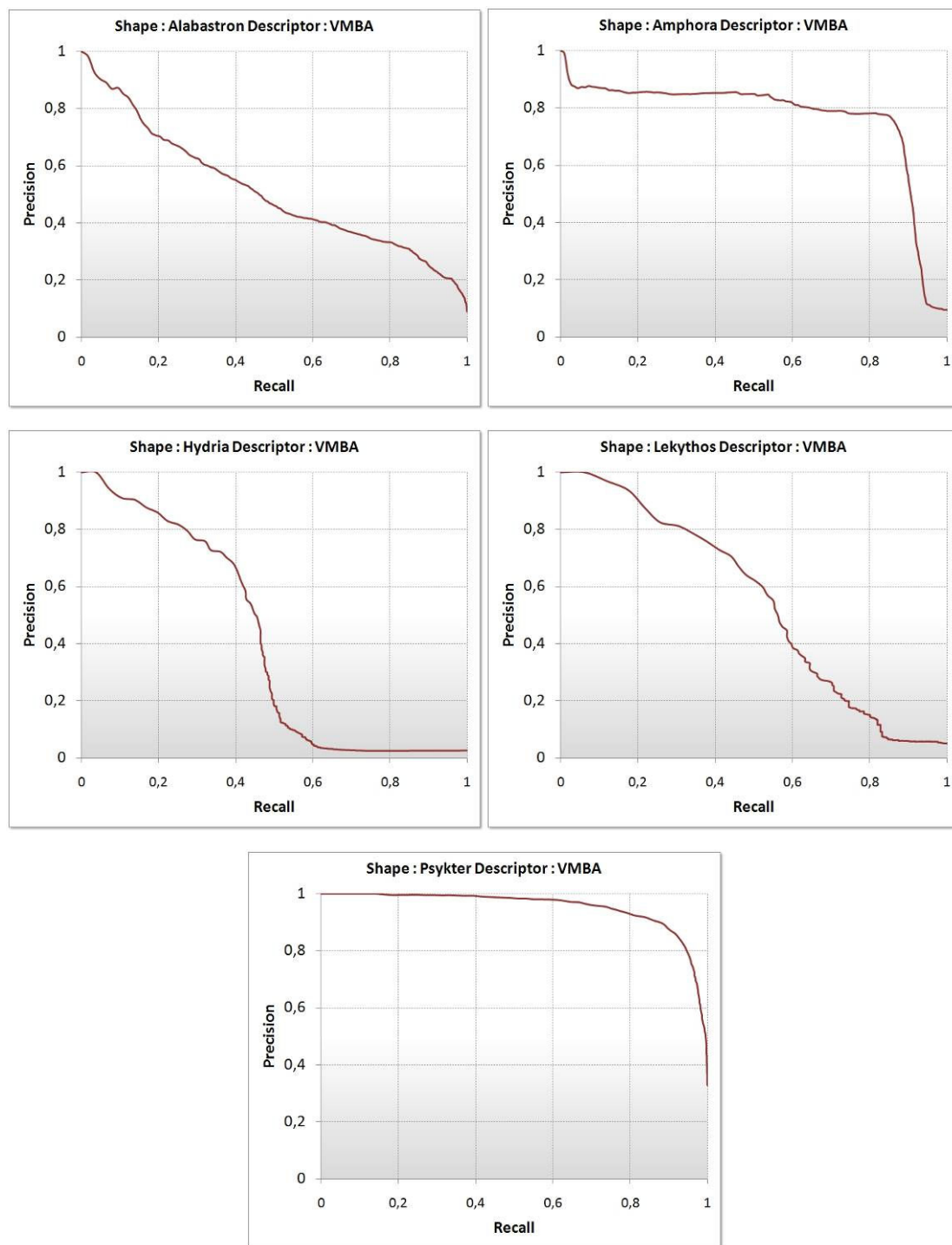
Στα σχήματα 7-6 έως 7-13 παρουσιάζονται τα γραφήματα μέσου όρου ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μία από τις πέντε επιλεγμένες κατηγορίες αγγείων. Τα γραφήματα απεικονίζουν τη μέση απόδοση του συστήματος για κάθε μία κατηγορία αγγείων και για κάθε ένα περιγραφέα ξεχωριστά. Ως εκ τούτου, το κάθε γράφημα απεικονίζει τις μέσες τιμές των δύο συνιστωσών (ακρίβεια, ανάκτηση) που φέρουν όλα τα γραφήματα ακρίβειας-ανάκτησης που προκύπτουν από την υποβολή επερωτήσεων στο σύστημα χρησιμοποιώντας όλα τα αγγεία της εκάστοτε κατηγορίας. Η διαδικασία υποβολής επερωτήσεων με όλα τα μοντέλα που ανήκουν σε μία κατηγορία αγγείων επαναλαμβάνεται εφαρμόζοντας κάθε φορά έναν διαφορετικό περιγραφέα. Η σειρά με την οποία είναι οργωμένες οι καμπύλες ακρίβειας-ανάκτησης στα σχήματα 7-6 έως 7-13 είναι *Αλάβαστρον*, *Αμφορέας*, *Υδρία*, *Λήκυθος* και *Ψυκτήρ*.

Στο σχήμα 7-14 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η μεταβολή της απόδοσης του συστήματος ανάκτησης καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ψηφιακής υπογραφής του περιγραφέα CBDM. Όπως και πριν κάθε καμπύλη ακρίβειας-ανάκτησης εκφράζει τη μέση τιμή των συνιστωσών ακρίβειας-ανάκτησης μίας συγκεκριμένης κατηγορίας αγγείων όπου το κάθε αγγείο έχει χρησιμοποιηθεί ως επερώτηση. Και στις πέντε κατηγορίες αγγείων παρατηρείται μια μείωση της απόδοσης του συστήματος, η οποία γίνεται εντονότερη στις κατηγορίες αγγείων (Λήκυθος, Υδρία) που φέρουν λεπτομερή προσαρτήματα όπως είναι οι μικρές λαβές. Οι λεπτομέρειες αυτές αναπόφευκτα απαλείφονται λόγω της μείωσης της ανάλυσης της ψηφιακής

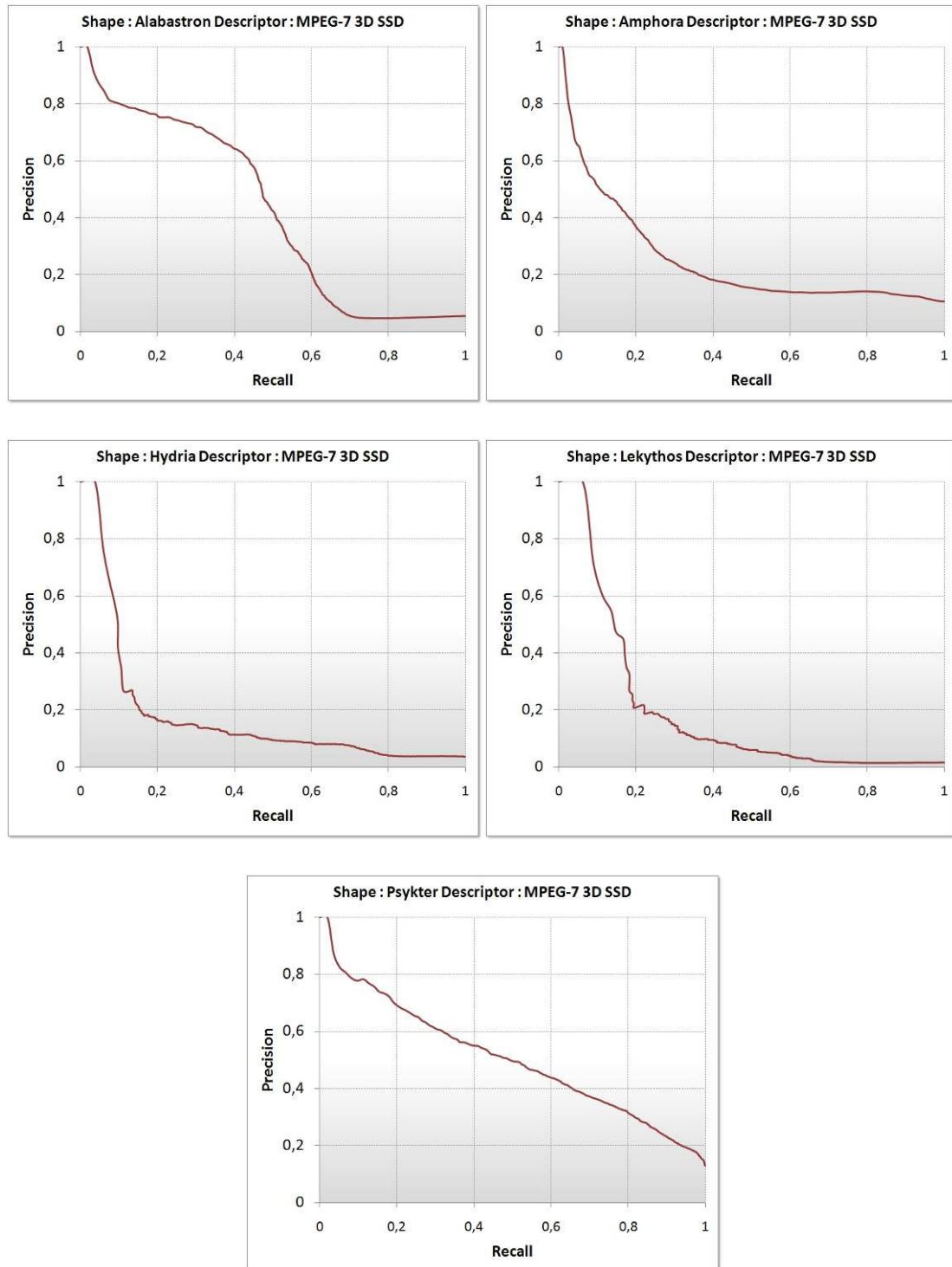
υπογραφής. Η μεταβολή της διακριτικής ικανότητας του περιγραφέα CBDM προκύπτει από τη μείωση των διαστάσεων των εικόνων χάρτη-βάθους.

Η συνολική μέση καμπύλη ακρίβειας-ανάκτησης του συστήματος ως προς όλες τις κατηγορίες αγγείων παρουσιάζεται στα γραφήματα του σχήματος 7-16. Η μέση απόδοση του συστήματος για κάθε ένα περιγραφέα παρουσιάζεται ταυτόχρονα σε ανεξάρτητα γραφήματα αλλά και σε ένα συγκεντρωτικό γράφημα όπου διακρίνεται ότι η βέλτιστη απόδοση του συστήματος για τις συγκεκριμένες κατηγορίες αγγείων προκύπτει εφαρμόζοντας τον περιγραφέα VMBA. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι συνιστώσες ακρίβειας ανάκτησης παραμένουν υψηλότερες σε σχέση με αυτές των άλλων μεθόδων. Σύμφωνα με τις επιδόσεις τους ακολουθούν οι περιγραφείς LIFD, CBDM (64x64), ZMDM και MPEG-7 3D SSD.

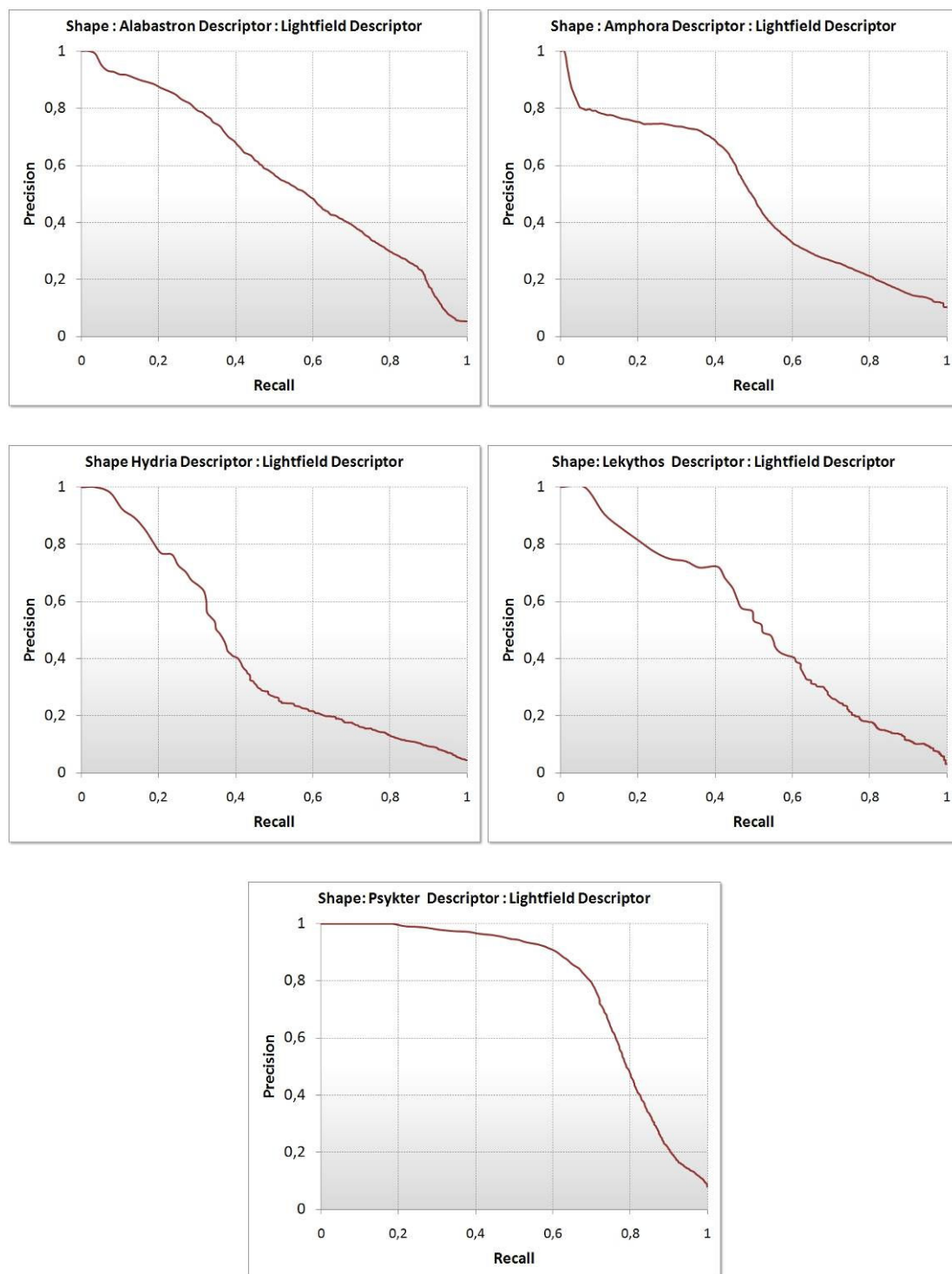
Στα σχήματα 7-17 και 7-18 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές που λαμβάνουν τα μονόμετρα *F-Score* και *F2-Score* σε κάθε θέση κατάταξης των αγγείων. Για κάθε ένα περιγραφέα έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές που λαμβάνει το εκάστοτε μονόμετρο για όλες τις κατηγορίες. Από τα συγκεντρωτικά γραφήματα προκύπτει πως η βέλτιστη απόδοση του συστήματος ως προς τα συγκεκριμένα μονόμετρα επιτυγχάνεται και πάλι με τον περιγραφέα VMBA. Ακολουθούν ομοίως οι περιγραφείς LIFD, CBDM (64x64), ZMDM και MPEG-7 3D SSD.



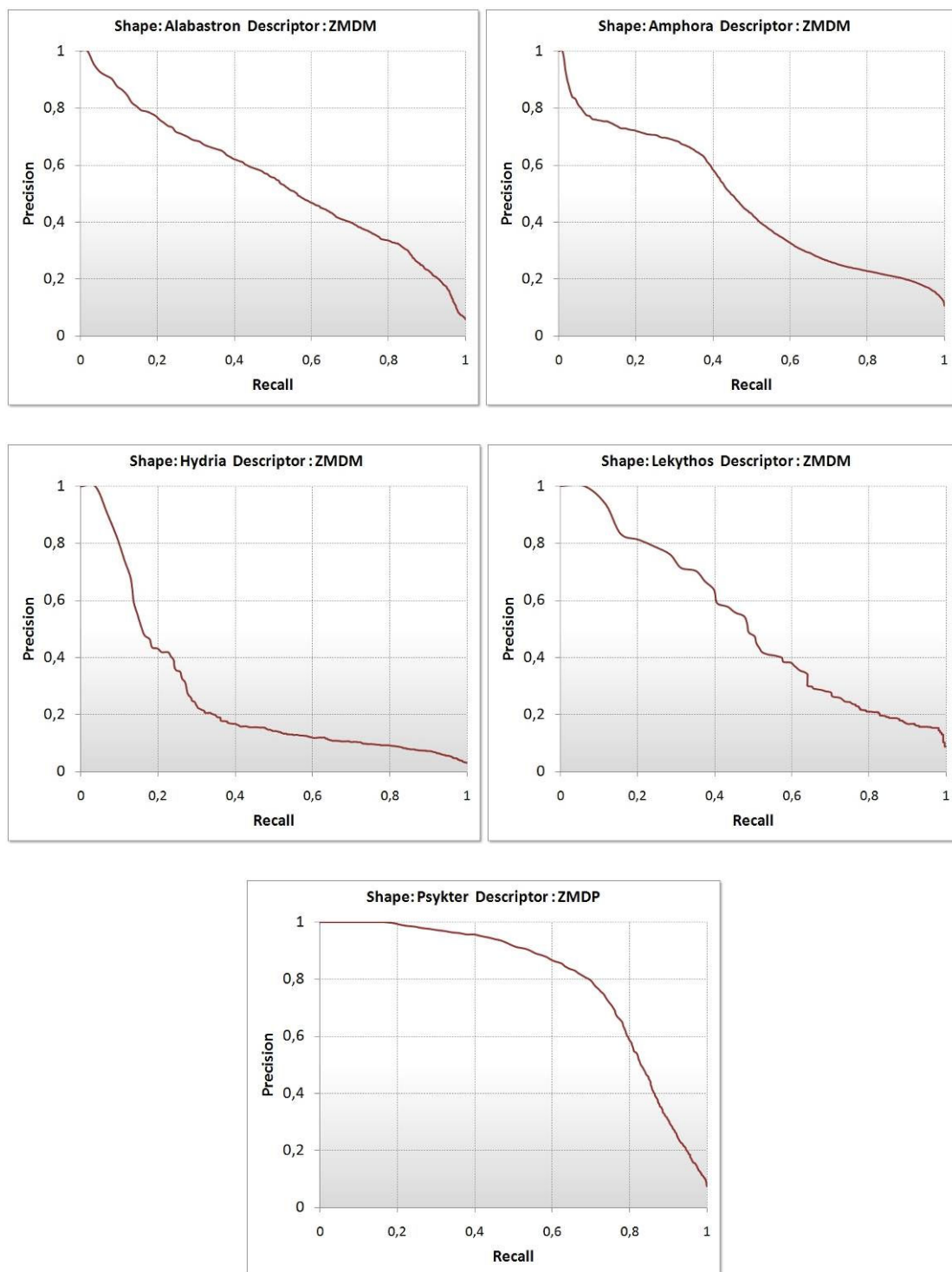
Σχήμα 7-6 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα VMBA.



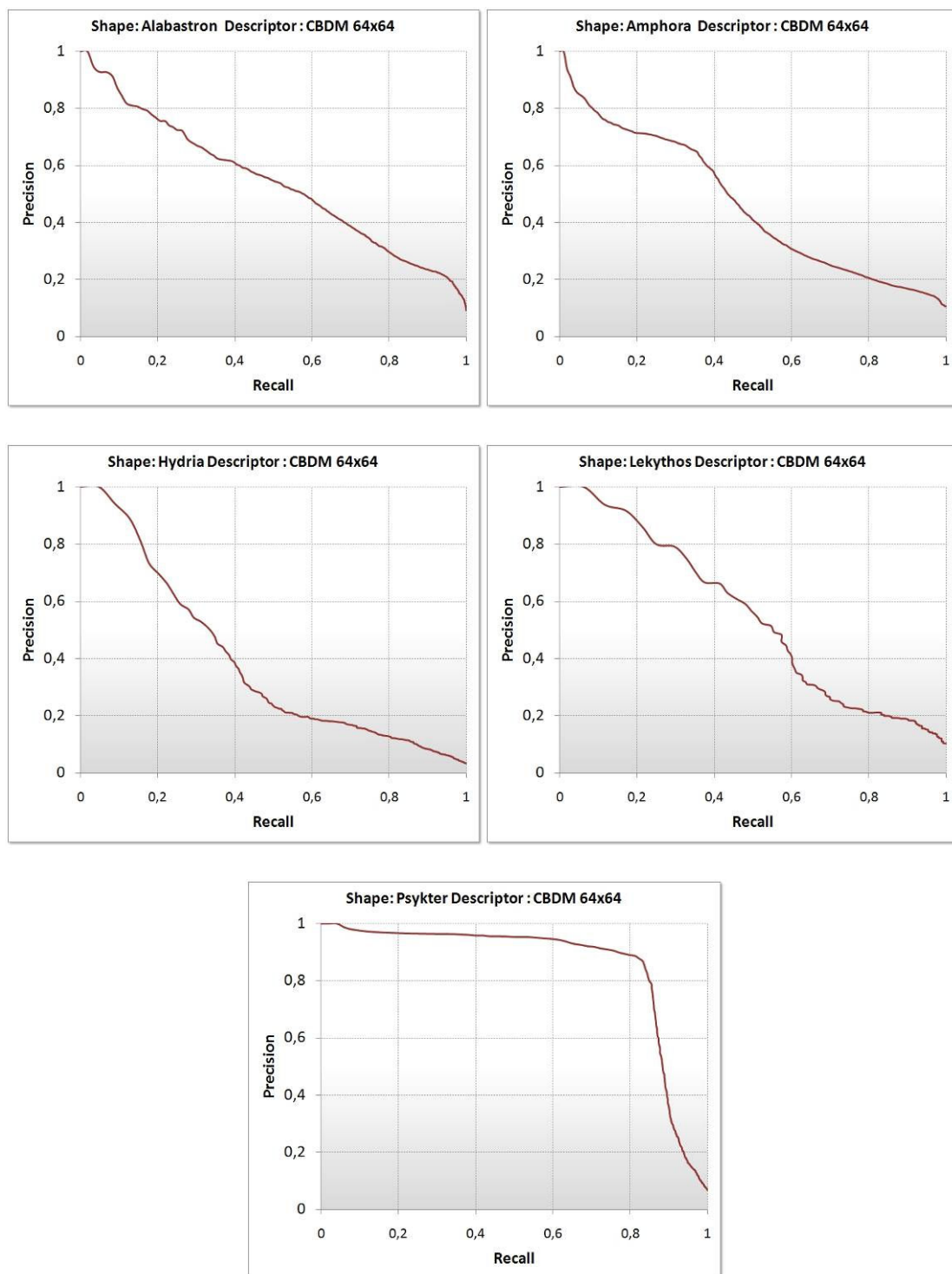
Σχήμα 7-7 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα MPEG-7 3D SSD.



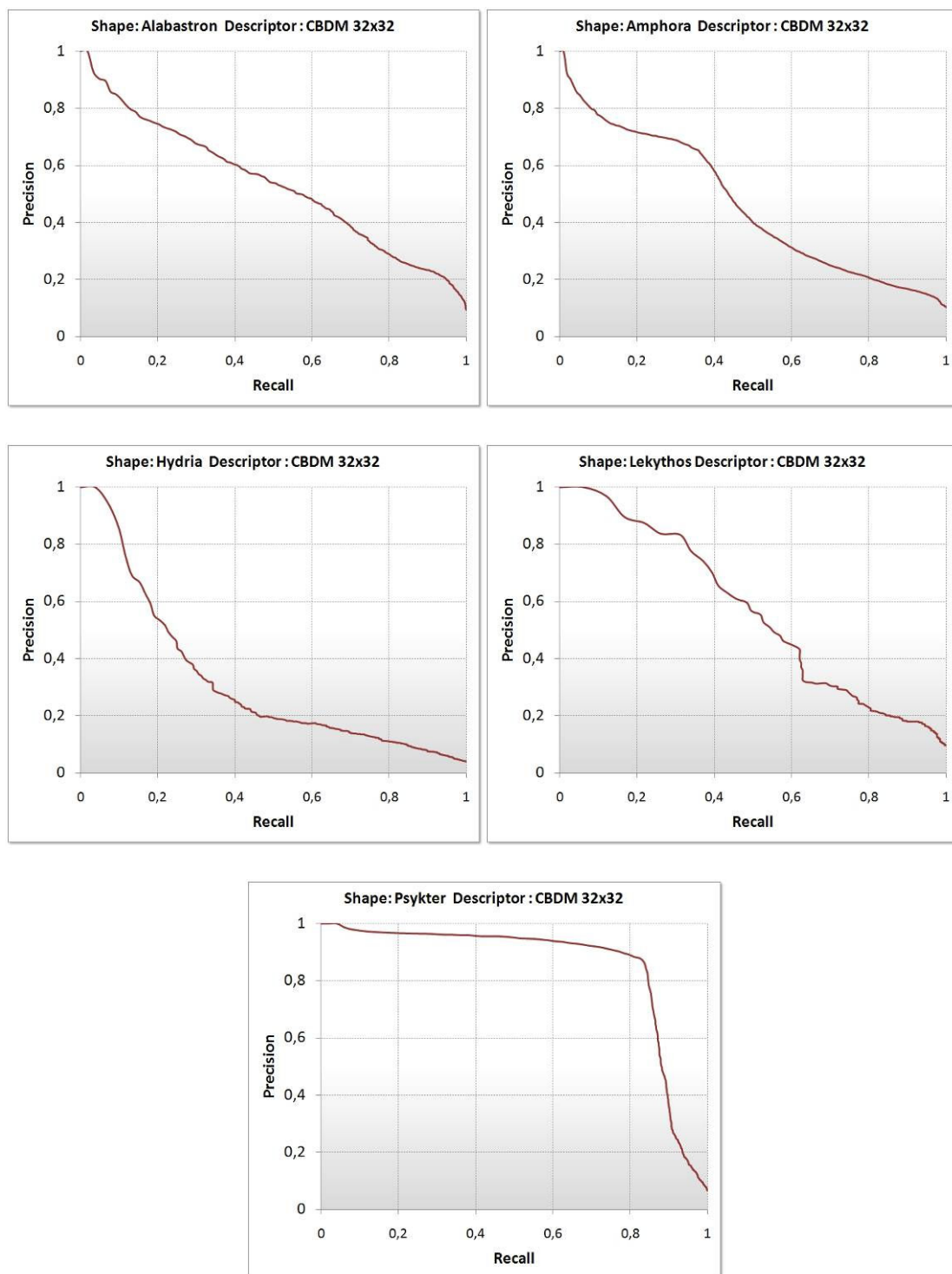
Σχήμα 7-8 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα Light field LIFD [69].



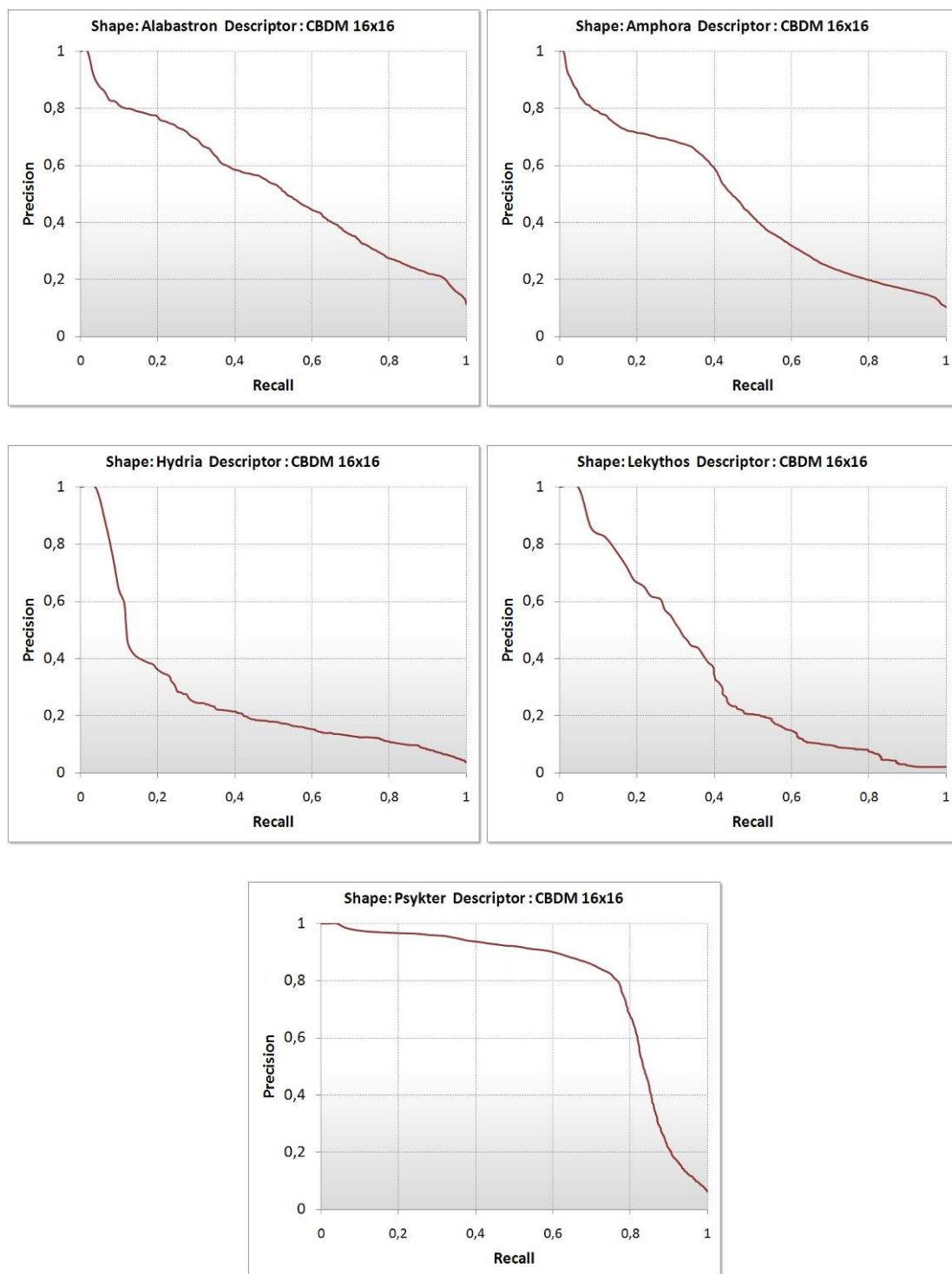
Σχήμα 7-9 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα ZMDM.



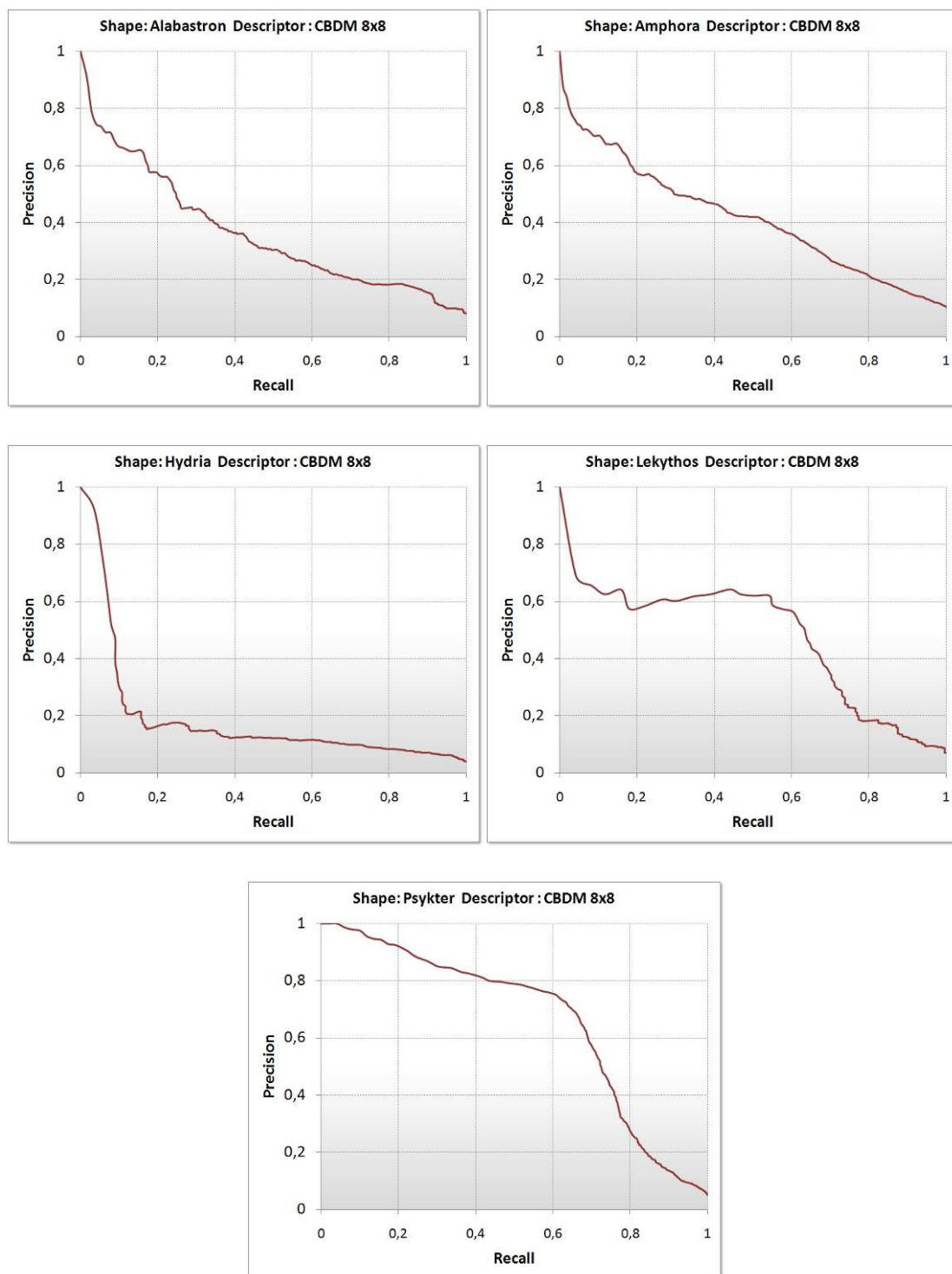
Σχήμα 7-10 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 64x64.



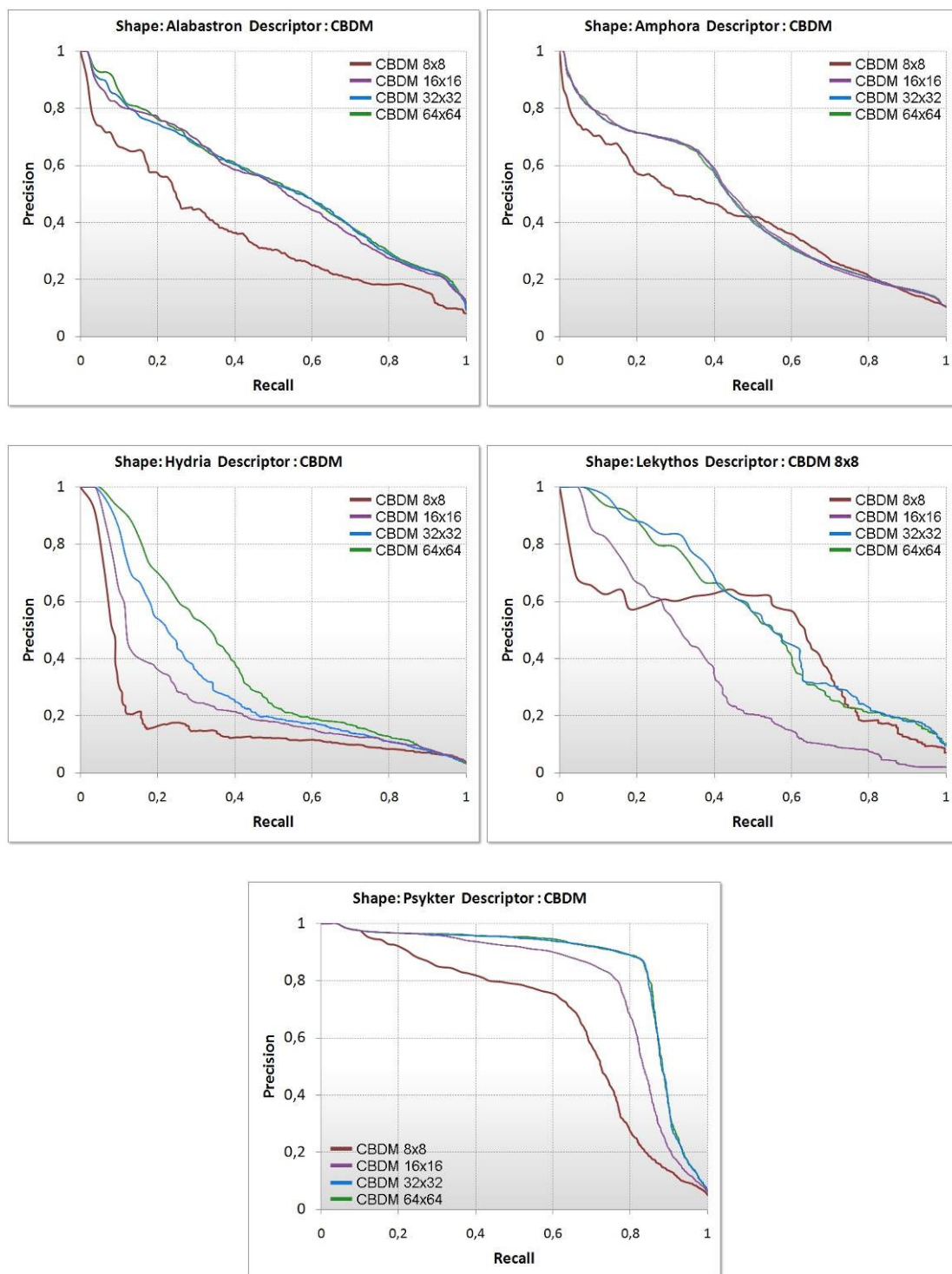
Σχήμα 7-11 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 32x32.



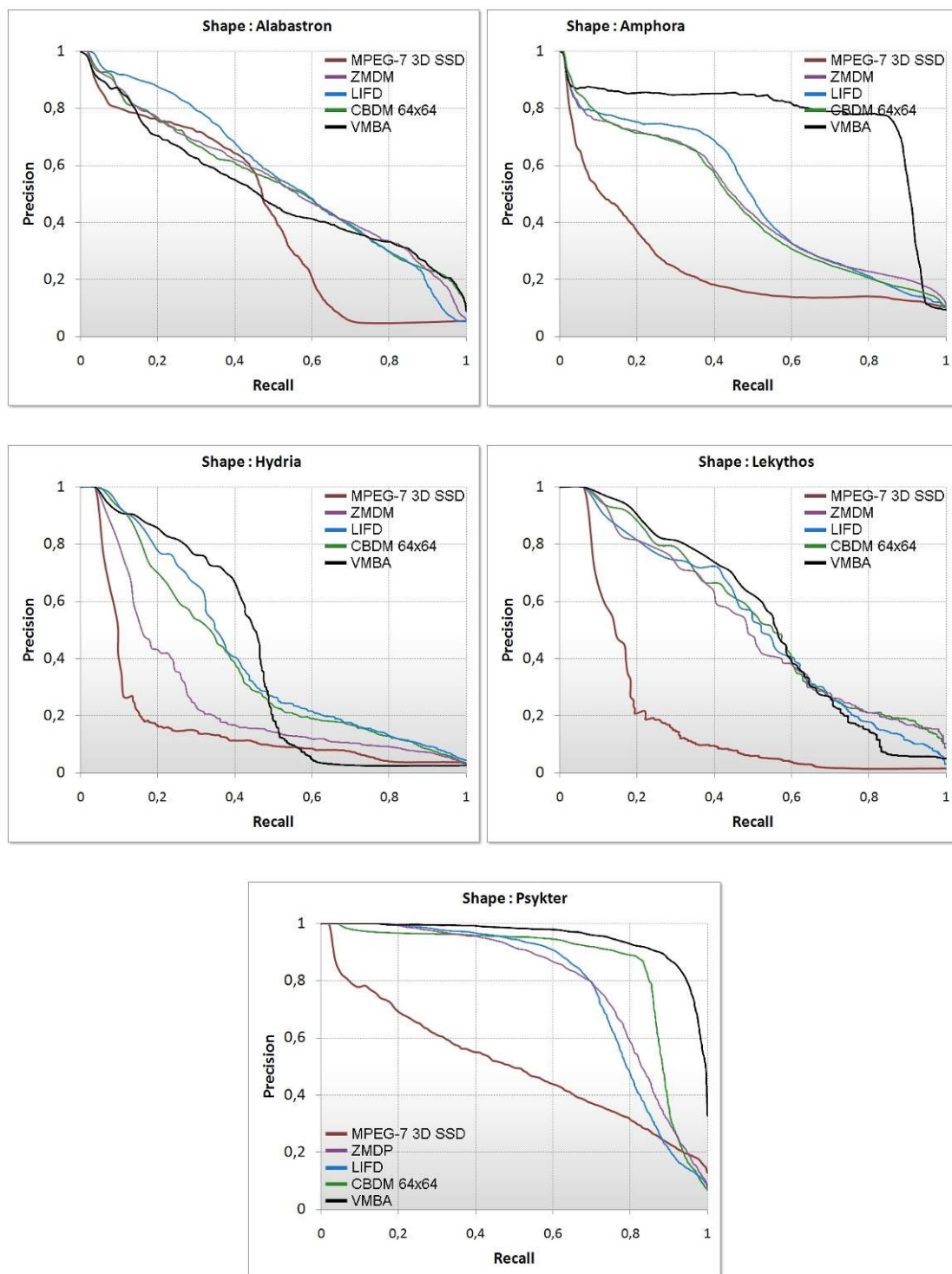
Σχήμα 7-12 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 16x16.



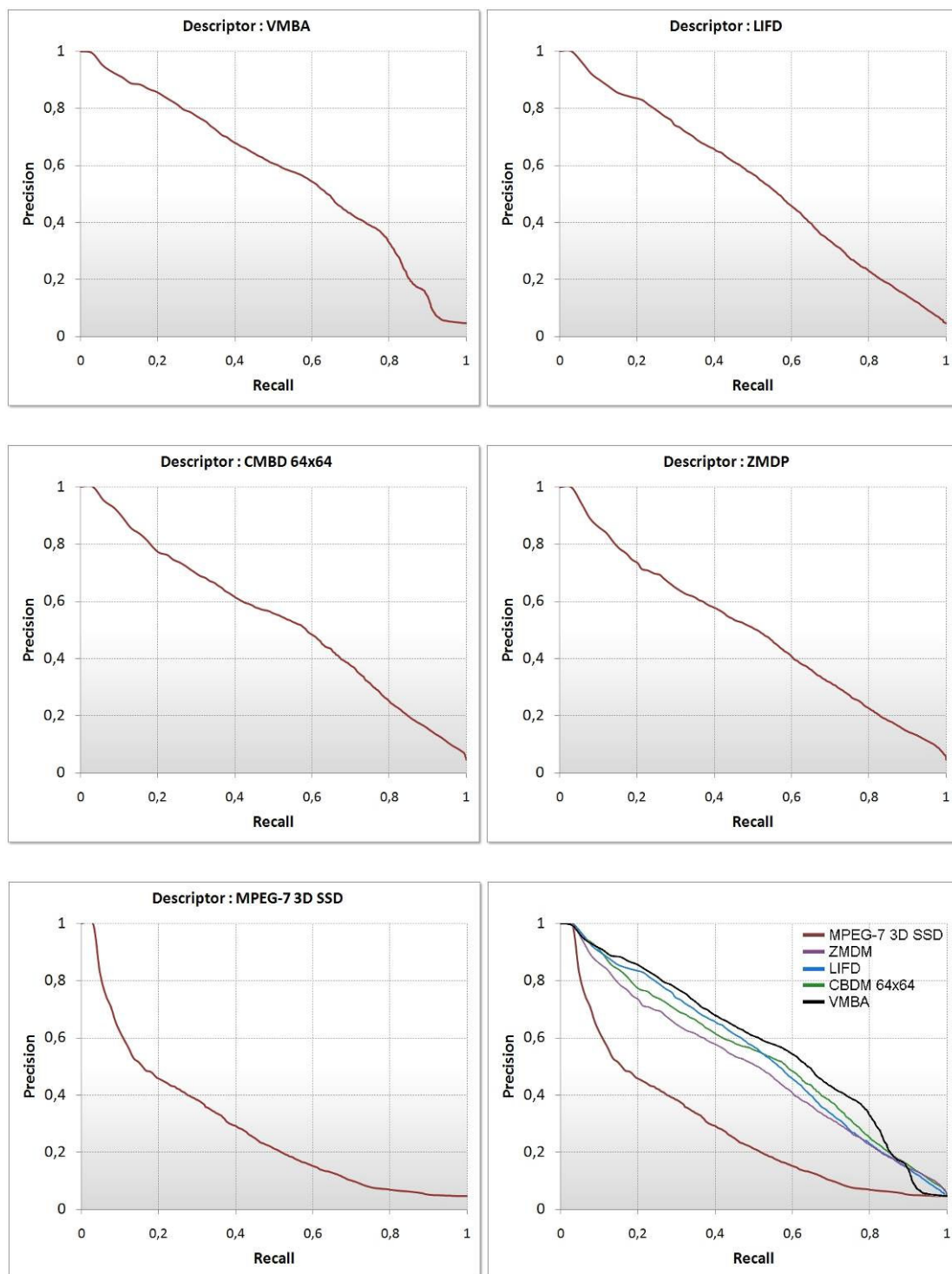
Σχήμα 7-13 Γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση υπογραφής 8x8.



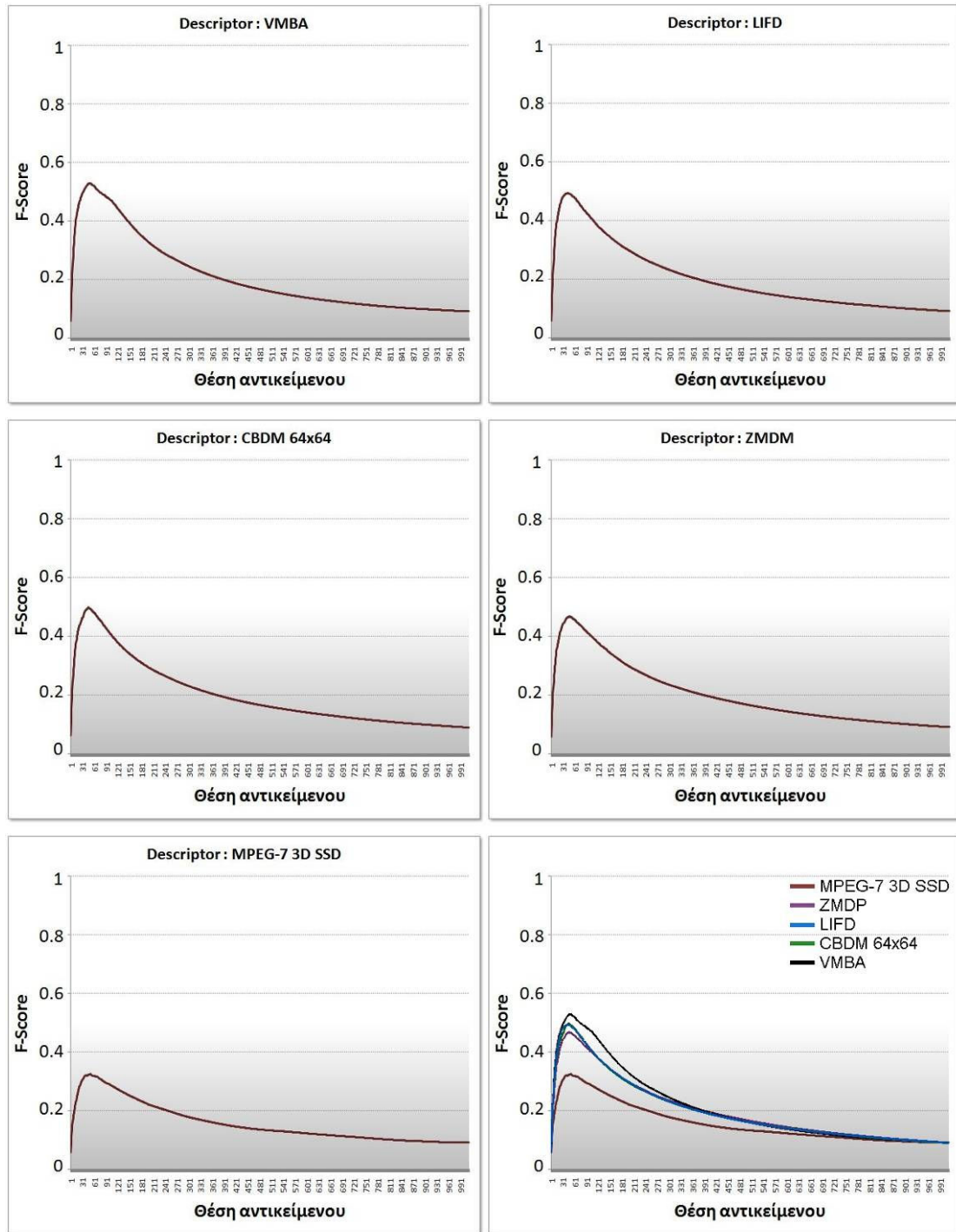
Σχήμα 7-14 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τον περιγραφέα CBDM με ανάλυση εικόνας 8x8, 16x16, 32x32 και 64x64.



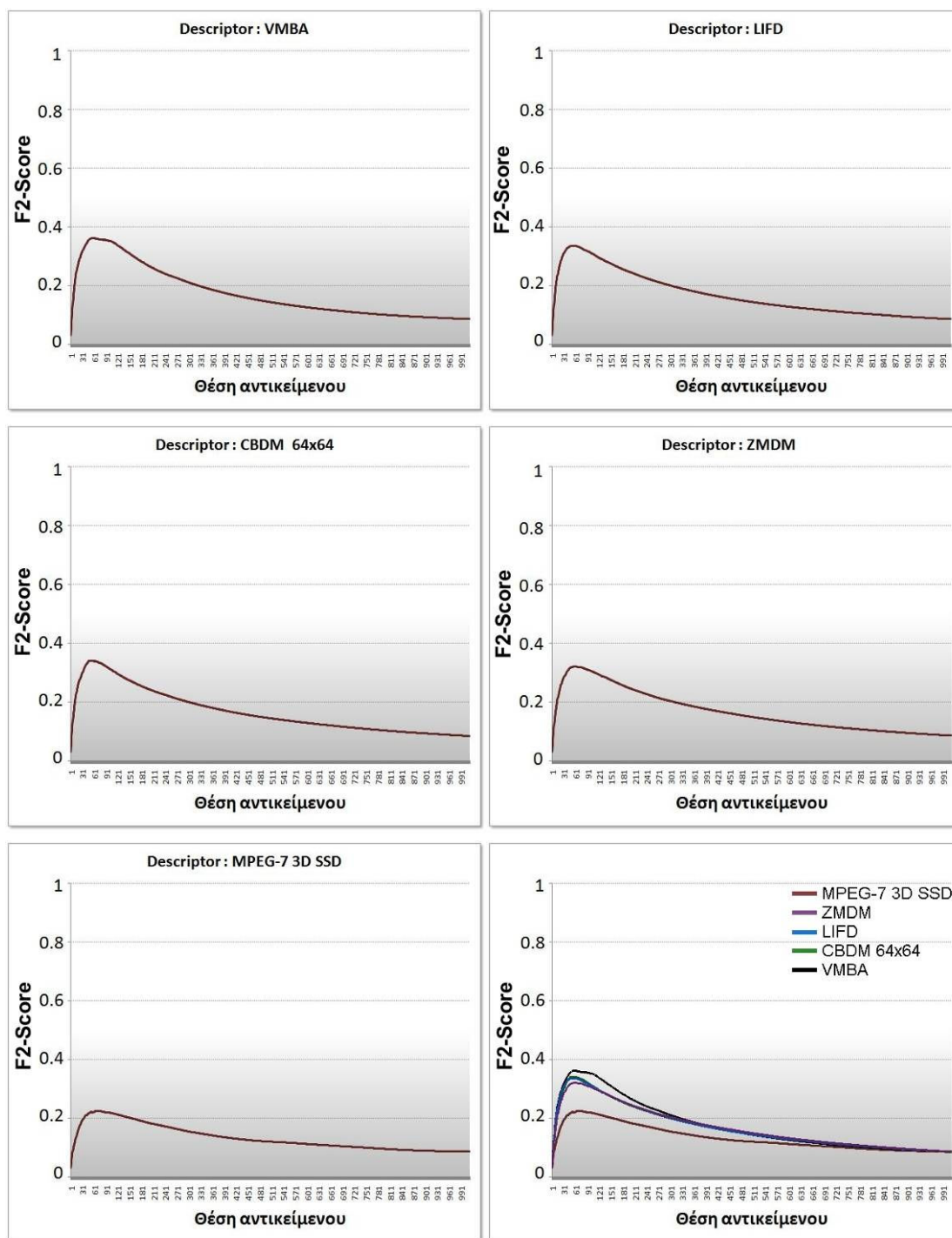
Σχήμα 7-15 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσου όρου ακρίβειας-ανάκτησης για κάθε μια κατηγορία αγγείων εφαρμόζοντας τους περιγραφείς MPEG-7 3D SSD, ZMDM, LIFD, CBDM με ανάλυση εικόνας 64x64 και VMBA.



Σχήμα 7-16 Συγκεντρωτικά γραφήματα μέσης τιμής ακρίβειας-ανάκτησης για όλες τις κατηγορίες αγγείων ως προς τον κάθε περιγραφέα (MPEG-7 3D SSD, ZMDM, LIFD, CBDM με ανάλυση εικόνας 64x64 και VMBA).



Σχήμα 7-17 Γραφήματα μέσω των τιμών του μονόμετρο F-Score σε κάθε θέση κατάταξης. Υπολογισμένα ανεξάρτητα για κάθε περιγραφέα ως μέση τιμή των πέντε κατηγοριών αγγείων.



Σχήμα 7-18 Γραφήματα μέσω των τιμών του μονόμετρο $F2-Score$ σε κάθε θέση κατάταξης. Υπολογισμένα ανεξάρτητα για κάθε περιγραφέα ως η μέση τιμή για τις επιλεγμένες κατηγορίες αγγείων.

Στον πίνακα 7-3 συγκεντρώνονται οι μέσες τιμές των μονόμετρων που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση της απόδοσης του συστήματος. Με έντονους χαρακτήρες παρουσιάζονται οι μέσες τιμές του κάθε μονόμετρου ως προς το σύνολο των κατηγοριών των αγγείων και με πράσινο χρώμα οι βέλτιστες τιμές.

	1st-Tier	2nd-Tier	Average Mean Precision	E ⁶⁴	Cumulated Gain (64)	Discounting Cumulated Gain	NN
Περιγραφέας VMBA							
Αλάβαστρο	47,80	36,06	0,46	0,51	28,56	7,49	0,87
Αμφορέας	78,02	45,54	0,75	0,33	53,10	12,45	0,84
Υδρία	46,15	24,40	0,33	0,71	12,96	4,32	0,88
Λήκυθος	55,07	32,22	0,43	0,70	11,93	3,83	0,93
Ψυκτήρ	88,97	49,76	0,86	0,17	46,37	11,80	1,00
M.O	63,20	37,60	0,57	0,48	30,58	7,98	0,90
Περιγραφέας MPEG-7 3D SSD							
Αλάβαστρο	47,4	28,16	0,43	0,54	27,32	7,33	0,83
Αμφορέας	26,76	19,04	0,25	0,73	21,30	5,46	0,78
Υδρία	17,75	14,86	0,13	0,80	8,69	2,07	0,53
Λήκυθος	21,48	14,84	0,11	0,84	6,18	1,61	0,43
Ψυκτήρ	49,73	36,11	0,46	0,49	28,33	7,26	0,75
M.O	32,624	22,602	0,276	0,68	18,364	4,746	0,664
Περιγραφέας LIFD							
Αλάβαστρο	53,78	36,47	0,53	0,46	32,07	8,44	0,98
Αμφορέας	49,58	31,11	0,49	0,48	41,42	9,99	0,86
Υδρία	40,38	25,59	0,34	0,67	14,76	4,35	0,96
Λήκυθος	51,95	32,42	0,41	0,69	12,37	3,82	0,81
Ψυκτήρ	72,13	40,95	0,70	0,34	36,95	9,97	1
M.O	53,56	33,31	0,49	0,52	27,52	7,31	0,92
Περιγραφέας ZMDM							
Αλάβαστρο	52,92	37,12	0,50	0,47	31,36	8,12	0,90
Αμφορέας	46,87	31,03	0,48	0,52	38,01	9,31	0,84
Υδρία	27,66	18,12	0,21	0,76	10,57	2,92	0,80
Λήκυθος	48,82	32,03	0,40	0,67	13,18	3,82	0,87
Ψυκτήρ	73,78	42,77	0,72	0,31	38,22	10,16	1
M.O	50,01	32,21	0,46	0,55	26,27	6,87	0,88
Περιγραφέας CBDM 8x8							
Αλάβαστρο	37,65	27,43	0,34	0,61	23,16	6,05	0,67
Αμφορέας	43,43	32,21	0,41	0,60	31,48	7,85	0,81
Υδρία	16,71	14,79	0,14	0,79	9,19	2,07	0,57
Λήκυθος	57,42	34,96	0,39	0,69	12,37	3,88	0,62
Ψυκτήρ	66,84	38,21	0,63	0,38	34,31	9,12	1
M.O	44,41	29,52	0,38	0,61	22,10	5,79	0,73
Περιγραφέας CBDM 16x16							
Αλάβαστρο	51,96	35,30	0,48	0,48	30,69	7,91	0,83
Αμφορέας	46,84	30,77	0,47	0,52	38,13	9,41	0,86
Υδρία	27,51	20,85	0,20	0,73	11,80	2,94	0,73
Λήκυθος	38,54	22,90	0,28	0,66	8,85	2,98	0,71
Ψυκτήρ	77,56	42,49	0,74	0,30	39,18	10,29	1
M.O	48,48	30,46	0,43	0,54	25,73	6,71	0,82
Περιγραφέας CBDM 32x32							
Αλάβαστρο	52,46	36,04	0,49	0,46	31,78	8,13	0,85
Αμφορέας	45,89	30,47	0,47	0,52	37,89	9,38	0,84
Υδρία	32,54	22,04	0,26	0,71	12,65	3,46	0,88
Λήκυθος	52,73	31,83	0,43	0,66	13,37	4,02	0,93
Ψυκτήρ	84,11	44,61	0,79	0,25	41,54	10,79	1
M.O	53,55	33,00	0,49	0,52	27,44	7,16	0,90
Περιγραφέας CBDM 64x64							
Αλάβαστρο	52,72	36,31	0,49	0,46	31,90	8,22	0,89
Αμφορέας	46,21	30,31	0,47	0,53	37,56	9,30	0,87
Υδρία	38,98	24,53	0,31	0,71	12,28	3,54	0,88
Λήκυθος	52,34	31,83	0,41	0,66	13,31	4,03	0,87
Ψυκτήρ	83,98	44,48	0,79	0,25	41,60	10,81	1
M.O	54,85	33,49	0,50	0,52	27,33	7,18	0,90

Πίνακας 7-3 Συγκεντρωτικός πίνακας μονόμετρων απόδοσης για όλους τους περιγραφείς.

Για όλα τα μονόμετρα εκτός από αυτό του *E-measure* η μεγαλύτερη τιμή υποδεικνύει σε καλύτερη συμπεριφορά του συστήματος ανάκτησης. Σύμφωνα με τα συγκεκριμένα μονόμετρα ο περιγραφέας VMBA αποδίδει κατά μέσο όρο καλύτερα σε όλα τα σημεία εκτός από το μονόμετρο του κοντινότερου γείτονα (NN) όπου ο περιγραφέας LIFD αποδίδει καλύτερα κατά ένα ποσοστό 0.02 (2%) μονάδων.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, το πρότυπο σύστημα ανάκτησης απέδωσε βέλτιστα στα συγκεκριμένα σενάρια αποτίμησης χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα VMBA, ακολουθεί ο περιγραφέας LIFD και στη συνέχεια οι CMDDB (64x64) και ZMDM. Στο σχήμα 7-19 παρουσιάζονται ταξινομημένα αποτελέσματα κάποιων επερωτήσεων βάσει παραδείγματος που υποβλήθηκαν στο σύστημα χρησιμοποιώντας τον περιγραφέα VMBA. Οι μικρογραφίες των αγγείων που περικλείονται μέσα στους κύκλους αποτελούν το αντικείμενο επερώτησης ενώ το αμέσως επόμενο χαρακτηρίζεται ως ο κοντινότερος γείτονας σύμφωνα με το μέτρο ομοιότητας του περιγραφέα VMBA.

Επιπρόσθετα, στα πλαίσια αποτίμησης των περιγραφέων υπολογίσθηκαν οι μέσοι χρόνοι που απαιτούνται για τον υπολογισμό των μέτρων ομοιότητας τους καθώς και ο όγκος των δεδομένων του εκάστοτε περιγραφέα (Πίνακας 7-4). Καθώς τα μέτρα ομοιότητας έχουν υλοποιηθεί σε διαφορετικές πλατφόρμες (VMBA, ZMDM και MPEG-7 3D SSD σε PHP script ενώ LIFD και CMDDB σε C++) οι απαιτούμενοι χρόνοι δεν μπορούν να χαρακτηριστούν απολύτως αντικειμενικοί. Από την άλλη ο όγκος των ωφέλιμων δεδομένων του εκάστοτε περιγραφέα έχει υπολογιστεί συμφωνά με τη δομή δεδομένων που χρησιμοποιούν για την απόδοση των εκάστοτε συντελεστών και όχι σύμφωνα με το χώρο που καταλαμβάνουν σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο. Ο απαιτούμενος χρόνος για τον υπολογισμό του μέτρου ομοιότητας του περιγραφέα VMBA αφορά στη συνεπτυγμένη εκδοχή του όπου υπάρχει ήδη κατασκευασμένος ο δυαδικός πίνακας προσαρτημάτων. Επίσης συμπεριλαμβάνει την εκτέλεση του φίλτρου δυαδικής διαστολής (dilation) καθώς και την επανάληψη του μέτρου στα αντεστραμμένα δεδομένα του περιγραφέα για την αντιμετώπιση των περιπτώσεων όπου δεν έχει εντοπιστεί σωστά η θέση του στομίου και οι συντελεστές του περιγραφέα εμφανίζονται αντίστροφα (Παράγραφος 6.2.1). Η αντιστροφή επιτυγχάνεται άμεσα με την αντίθετη φορά προσπέλασης των δεδομένων.

Αγγείο επερώτηση	Κοντινότερος γείτονας				
					
					
					
					
					
					
					
					
					
					
					
					

Σχήμα 7-19 Αποτελέσματα επερώτησης-βάσει-παραδείγματος εφαρμόζοντας τον περιγραφέα VMBA.

	Μέσος χρόνος υπολογισμού μέτρου ομοιότητας	Μέσος χρόνος εξαγωγής περιγραφεία	Ωφέλιμος όγκος δεδομένων ¹²
VMBA	5.048 msec	25.6 sec	320 bytes
LIFD	45 msec	4 sec	4500 bytes
CMDB 64x64	382 msec	25.61509 sec	8912 bytes
CMDB 32x32	248 msec	25.61203 sec	2048 bytes
CMDB 16x16	104 msec	25.60731 sec	512 bytes
CMDB 8x8	90 msec	25.600329 sec	128 bytes
ZMDM	0.30 msec	33.95 sec	1248 bytes
MPEG-7 3D SSD (64 bins)	1.598 msec	9.3 sec	96 bytes
MPEG-7 3D SSD (100 bins)	1.6 msec	10.37 sec	150 bytes

Πίνακας 7-4 Χαρακτηριστικά περιγραφείων.

Οι περιγραφείες που βασίζονται στην προτεινόμενη διαδικασία κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού απαιτούν πολύ περισσότερο χρόνο κατά τη διάρκεια εξαγωγής του (VMBA, CMDB και ZMDM). Από την άλλη ο όγκος δεδομένων που απαιτούν για την περιγραφή των αγγείων είναι μικρότερος. Ο υπολογισμός τους πραγματοποιήθηκε σε ένα υπολογιστικό σύστημα με επεξεργαστή *AMD Athlon* στα *2.2Ghz* με διαθέσιμη μνήμη *2GB*, κάρτα γραφικών *NVidia GeForce 7800 GT (256 MB)* και λειτουργικό σύστημα *Microsoft Windows XP*.

¹² Οι υπολογισμοί έχουν βασιστεί στο πρότυπο IEEE 754 όπου αναφέρει πως το μέγεθος ενός αριθμού κινητής υποδιαστολής διπλής ακρίβειας καταλαμβάνει 64 bit μνήμης.

Κεφάλαιο 8

Ανάκτηση βάσει περιεχομένου 3D αντικειμένων σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας

8.1 Εισαγωγή

Οι πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο των τεχνολογιών τρισδιάστατων γραφικών και των μετρητικών οργάνων σε συνδυασμό με τις πολυμεσικές βάσεις δεδομένων και τα ευρυζωνικά δίκτυα, προσφέρουν σήμερα νέες δυνατότητες για την ολοκληρωμένη περιγραφή του πολιτιστικού μας αποθέματος. Οι τρισδιάστατες ανακατασκευές αρχιτεκτονικών συνόλων πολιτιστικού και αρχαιολογικού περιεχομένου, επιτρέπουν στο χρήστη να πραγματοποιεί εικονικές περιηγήσεις μέσα σε αυτούς διαθέτοντας ελευθερία κινήσεων παρόμοια με αυτή που θα διέθετε σε μια πραγματική επίσκεψη. Τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία εργασίες που αφορούν στην τρισδιάστατη ανακατασκευή μνημείων αλλά και αστικών περιοχών [115]-[122]. Σε κάποιες εργασίες γίνονται αναφορές σε τρισδιάστατες ανακατασκευές με χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την εικονική επίσκεψη μέσω του Διαδικτύου [123]-[129]. Από την άλλη, το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει κεντρίσει η ιδέα τρισδιάστατης ανακατασκευής μνημείων που δεν διασώζονται σήμερα [130][131].

Καθώς οι τρισδιάστατες τεχνολογίες έχουν εισβάλει στην υπηρεσία του *παγκόσμιου ιστού* (WWW) και οι Διαδικτυακά προσβάσιμες τρισδιάστατες αναπαραστάσεις χώρων συνεχώς πληθαίνουν πραγματοποιήθηκε έρευνα προς τη κατεύθυνση επέκτασης του δισδιάστατου περιβάλλοντος διεπαφής μίας μηχανής

αναζήτησης σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας. Στο προτεινόμενο αυτό περιβάλλον διεπαφής ο χρήστης δύναται να περιηγηθεί στο τρισδιάστατο χώρο και να υποβάλει *επερωτήσεις βάσει παραδείγματος* επιλέγοντας κάποιο από τα αντικείμενα που συναντά κατά την πλοήγηση του μέσα στην τρισδιάστατη σκηνή. Ο τρόπος με τον οποίο απαντά το σύστημά ανάκτησης σε μία επερώτηση του χρήστη σαφώς και διαφοροποιείται από αυτόν που συναντάτε σε ένα δισδιάστατο περιβάλλον διεπαφής. Η διαφοροποίηση αυτή εντοπίζεται στην εμφάνιση δεικτών μέσα στην τρισδιάστατη σκηνή που υποδεικνύουν τις θέσεις των αντικειμένων στις οποίες βρίσκονται παρόμοια αντικείμενα. Ένα τέτοιο περιβάλλον διεπαφής παρέχει στον χρήστη την ικανότητα να εστιάσει σε κάποιο αντικείμενο χωρίς να απομακρύνεται από το τρισδιάστατο σύνολο στο οποίο αυτό εμπεριέχεται. Η τεχνική αυτή ονομάζεται *focus-plus-context* [132].

Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναφορά σε ένα πειραματικό σύστημα ανάκτησης τρισδιάστατων αντικειμένων το οποίο υλοποιήθηκε συνδυάζοντας τεχνολογίες ελεύθερου λογισμικού όπως *Apache HTTP*, *PHP*, *eXist* με το εμπορικό λογισμικό ανάπτυξης εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας *Quest 3D*¹³. Ο εικονικός επισκέπτης μπορεί να περιηγηθεί ελεύθερα σε ένα τρισδιάστατα ανακατασκευασμένο τμήμα της παλιάς πόλης της Ξάνθης ή σε ένα εικονικό μουσείο όπου μπορεί να υποβάλει επερωτήσεις στο σύστημα χρησιμοποιώντας κάποια από τα αντικείμενα που εμφανίζονται στην τρισδιάστατη σκηνή. Καθώς η ταύτιση των αντικειμένων προκύπτει από τον περιγραφέα *CMDB* και *VMBA* οι τύποι των αντικειμένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως επερωτήσεις είναι αγγεία ή αντικείμενα τα οποία φέρουν κάποια αξονική συμμετρία (ακολουθούν τη μέθοδο *επιφάνειες εκ περιστροφής μίας γενέτειρας*).

8.2 Τρισδιάστατη ανακατασκευή τμήματος της παλιάς πόλης της Ξάνθης

Η παλιά πόλη της Ξάνθης αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους παραδοσιακούς οικισμούς της Ελλάδας που έχει την ιδιαιτερότητα να επιδεικνύει ένα μείγμα

¹³ Quest 3D – Πλατφόρμα ανάπτυξης τρισδιάστατων διαδραστικών εφαρμογών εικονικής πραγματικότητας - <http://quest3d.com>

παραδοσιακών Ελληνικών, Ευρωπαϊκών αλλά και Ανατολίτικων αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών. Η πλειοψηφία των κατοικιών της πόλης ανακατασκευάστηκαν στην περίοδο 1830 - 1840 μετά από δύο καταστροφικούς σεισμούς που έλαβαν χώρα το Μάρτιο και το Απρίλιο του 1829.

Σύμφωνα με εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας, έχει αποδειχτεί πως οι ανακατασκευές πολιτιστικών χώρων με τρισδιάστατα μοντέλα χαμηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας και υψηλής λεπτομέρειας πληροφορία υφής (texture maps) χαρακτηρίζονται επαρκή όταν ο σκοπός κατασκευής τους είναι η τουριστική προβολή του χώρου και όχι η ψηφιακή αρχειοθέτηση ή η διεξαγωγή επιστημονικών μελετών πάνω στο ψηφιακό μοντέλο [133]-[135]. Για την ανακατασκευή του τμήματος της παλιάς πόλης ακολουθήθηκε μια εμπειρική μέθοδος η οποία περιλαμβάνει την χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα και χωρίζεται σε τέσσερις διαδοχικές διαδικασίες. Αυτές είναι οι εξής:

- Μελέτη οικισμού και φωτογράφιση (Παράγραφος 8.2.1)
- Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων (Παράγραφος 8.2.2)
- 3D ανακατασκευή του χώρου με φωτογραμμετρία (Παράγραφος 8.2.3)

8.2.1 Μελέτη οικισμού και φωτογράφιση

Η πρώτη διαδικασία περιελάμβανε τη μελέτη του πραγματικού οικισμού για τον προσδιορισμό των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κτιρίων που θα προσεγγισθούν με χαμηλής αναλυτικότητας γεωμετρικά μοντέλα. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία εντοπίζονται οι θέσεις φωτογράφισης-αποτύπωσης των χαρακτηριστικών των προσόψεων των κτιρίων. Η επιλογή των θέσεων φωτογράφισης σχετίζεται με τη χρονική διάρκεια της διαδικασίας επεξεργασίας των φωτογραφιών για τη δημιουργία της πληροφορίας υφής που θα χαρτογραφηθεί πάνω στις επιφάνειες του τρισδιάστατου μοντέλου. Ως εκ τούτου οι θέσεις επιλέγονται έχοντας ως βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση της κλίσης των προσόψεων του κάθε κτιρίου ως προς το επίπεδο αποτύπωσης (CCD) της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.

Η φωτογράφιση είναι μία ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία καθώς οι στενοί δρόμοι σε συνδυασμό με τη μη ύπαρξη σκαλωσιών και ευρυγώνιων φακών εισήγαγαν περιορισμούς στο πεδίο λήψης.

8.2.2 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων

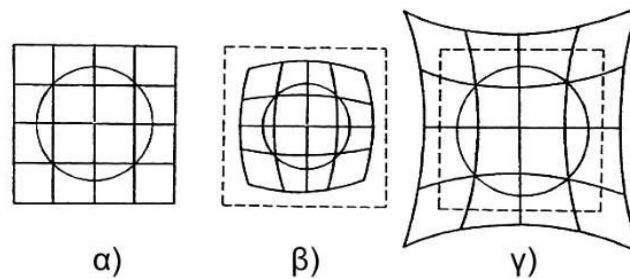
Στόχος της διαδικασίας είναι η δημιουργία των εικόνων που θα χαρτογραφηθούν πάνω στις επιφάνειες του τριγωνικού πλέγματος και θα αποτελέσουν την πληροφορία υφής (texture maps) του τρισδιάστατου μοντέλου. Για την επίτευξη του στόχου εφαρμόστηκαν μια ακολουθία μετασχηματισμών στις ψηφιογραφικές εικόνες και σε συνδυασμό με χειροκίνητη ψηφιακή επεξεργασία δημιουργήθηκαν οι *συγκεντρωτικές εικόνες πληροφορίας υφής* του κάθε κτιρίου.

Αρχικά εκτελέστηκε η *επιδιόρθωση της παραμόρφωσης ειδώλου* που προκαλείται από το φακό της φωτογραφικής μηχανής. Η παραμόρφωση ειδώλου εμφανίζεται ως μετατόπιση των σημείων (Σχήμα 8-1) ενώ για την επιδιόρθωση της χρησιμοποιείται το μοντέλο παραμόρφωσης του Brown [137]. Ακολούθως εφαρμόστηκαν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί για την επιδιόρθωση της προοπτικής των προσώπων των κτιρίων. Σύμφωνα με τον Garland [136], όταν το αντικείμενο μελέτης αποτελείται από επίπεδες οριζόντιες ή κατακόρυφες επιφάνειες και υπάρχουν ορατά δύο τουλάχιστον ζεύγη οριζόντιων και κατακόρυφων γραμμών είναι αρκετή η μέτρηση μίας ή δύο αποστάσεων παράλληλα προς το οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο για να δημιουργηθεί η *ανηγμένη* εικόνα (rectified image) με επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων της προοπτικής γεωμετρίας (Σχήμα 8-2).

Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν χειροκίνητα από τις φωτογραφίες κάποια εμπόδια και άλλα ανεπιθύμητα στοιχεία που είχαν αποτυπωθεί μπροστά από τις προσόψεις των κτιρίων. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία αφαιρούνται στοιχεία από κάθε εικόνα χρησιμοποιώντας πληροφορία από γειτονικά τμήματα των στοιχείων. Θα μπορούσε κανείς να χαρακτηρίσει το αποτέλεσμα της μεθόδου ως αντίστοιχο με αυτό της τεχνικής *content aware fill - inpainting* [138].

Τέλος, εφαρμόζοντας χειροκίνητη ενοποίηση διαφόρων τμημάτων των ανηγμένων ψηφιογραφικών εικόνων δημιουργήθηκαν οι *συγκεντρωτικές εικόνες πληροφορίας υφής* για κάθε κτίριο (Σχήμα 8-3). Όλες οι παραπάνω διαδικασίες

επεξεργασίας των εικόνων πραγματοποιήθηκαν με ελεύθερο λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα για την επιδιόρθωση της παραμόρφωσης ειδώλου και προοπτικής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Panorama Tools*¹⁴ ενώ για τις δημιουργία των συγκεντρωτικών εικόνων το *The Gimp*¹⁵.



Σχήμα 8-1 Παραμόρφωση ειδώλου: α) μηδενική παραμόρφωση, β) θετική παραμόρφωση γ) αρνητική (βαρελοειδή) παραμόρφωση.



Σχήμα 8-2 Αρχική και προοπτικά διορθωμένη εικόνα.

¹⁴ Panorama Tools – <http://panotools.sourceforge.net>

¹⁵ The Gimp – <http://www.gimp.org>



Σχήμα 8-3 Παραδείγματα συγκεντρωτικών εικόνων πληροφορίας υψής.

8.2.3 Φωτογραμμετρία και 3D ανακατασκευή

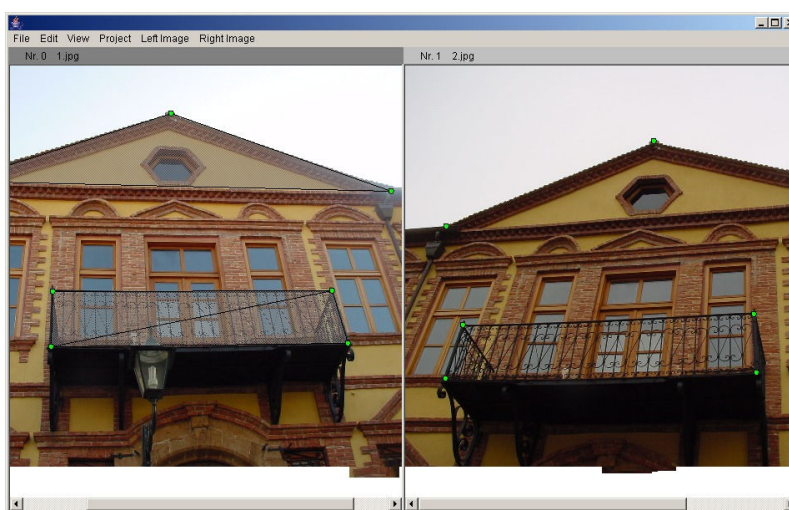
Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της τρισδιάστατης ανακατασκευής με χρήση ψηφιογραφικών εικόνων είναι το γεγονός ότι κανένα από τα προς ανακατασκευή αντικείμενα δεν αγγίζονται. Κάτι τέτοιο είναι πολύ σημαντικό για την εφαρμογή της μεθόδου στο χώρο της πολιτιστικής κληρονομιάς.

Για την ανακατασκευή των κτιρίων εφαρμόσθηκε η μέθοδος *πολυεικονικής μη στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας*. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου εφόσον έχει προσδιοριστεί ο εξωτερικός προσανατολισμός για κάθε εικόνα και είναι γνωστή η εσωτερική γεωμετρία της φωτογραφικής μηχανής μπορεί με χρήση των εξισώσεων συγγραμμικότητας που έχουν τη μορφή

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \cdot \frac{(X - X_o) \cdot R_{11} + (Y - Y_o) \cdot R_{12} + (Z - Z_o) \cdot R_{13}}{(X - X_o) \cdot R_{31} + (Y - Y_o) \cdot R_{32} + (Z - Z_o) \cdot R_{33}} \\ y &= y_0 - c \cdot \frac{(X - X_o) \cdot R_{21} + (Y - Y_o) \cdot R_{22} + (Z - Z_o) \cdot R_{23}}{(X - X_o) \cdot R_{31} + (Y - Y_o) \cdot R_{32} + (Z - Z_o) \cdot R_{33}} \end{aligned} \quad (8.1)$$

να οδηγηθούμε στον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο. Οι σχέσεις αυτές συνδέουν τις φωτογραφικές συντεταγμένες (x, y) της εικόνας ενός σημείου στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίγειες συντεταγμένες του (X, Y, Z) μέσω των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτογραφικής μηχανής (c, x_0, y_0) και των συντεταγμένων θέσης (X_0, Y_0, Z_0) της φωτογραφικής μηχανής στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής $R(\omega, \phi, \kappa)$ ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού). Όπου $R(\omega, \phi, \kappa)$ είναι μια μήτρα 3×3 που αποτελείται από αθροίσματα τριγωνομετρικών συναρτήσεων των γωνιών στροφής ω, ϕ και κ των αξόνων X, Y, Z και c η απόσταση (εστιακή απόσταση) ανάμεσα στο κέντρο του φακού και του φωτογραφικού επιπέδου του αισθητήρα (CCD) [19].

Για την ανακατασκευή του τμήματος της παλιάς πόλης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *ptstereo* που αποτελεί τμήμα του *Panorama tools*. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της πολυεικονικής μη στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας επιλέγονται χειροκίνητα ένα πλήθος *αντίστοιχων* (ομόλογων) σημείων ανάμεσα σε εικόνες που προβάλλουν το εκάστοτε κτίριο από διαφορετικές οπτικές γωνίες (Σχήμα 8-4). Χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των σημείων αυτών στις εξισώσεις συγγραμμικότητας, και εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, προκύπτουν οι συντεταγμένες των σημείων αυτών στο χώρο [19].

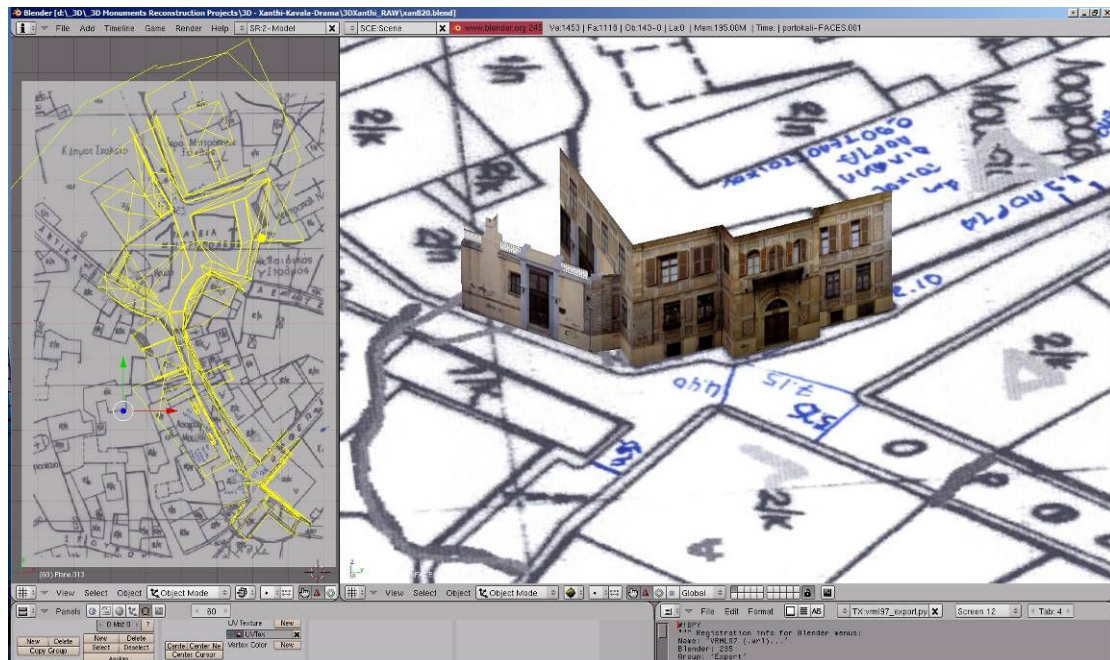


Σχήμα 8-4 Στιγμιότυπο από την εφαρμογή *ptpicker*. Αντιστοίχιση ομόλογων σημείων ανάμεσα σε δύο εικόνες και οργάνωσή τους σε τρίγωνα.

Η μερική ανακατασκευή των κτιρίων προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως:

- i. Τα τμήματα των κτιρίων που είναι ορατά στο οπτικό πεδίο του εικονικού επισκέπτη σε συνδυασμό με τους περιορισμούς ελευθερίας κινήσεων του συγκεκριμένου μέσα στον εικονικό χώρο.
- ii. Τα χαρακτηριστικά του κάθε οικοδομήματος που είναι εμφανή στο οπτικό πεδίο του εικονικού επισκέπτη.
- iii. Το περίγραμμα (contour line) της πρόσοψης του κτιρίου (πολύγωνο ή τετράπλευρο).

Το μικρό πλήθος κορυφών που περιγράφουν το κάθε κτίριο είναι επαρκές για τους αρχικούς στόχους της ανακατασκευής αφού οι λεπτομέρειες των χαρακτηριστικών των προσόψεων αποδίδονται μέσα από την πληροφορία υψής. Τα τρισδιάστατα τμήματα των κτιρίων οργανώνονται μέσα στο λογισμικό τρισδιάστατης μοντελοποίησης *Blender* χρησιμοποιώντας ένα τοπογραφικό σχέδιο της περιοχής ως βάση για την τοποθέτηση τους (Σχήμα 8-5). Επιπρόσθετα, εμπειρικές μετρήσεις ανάμεσα σε συγκεκριμένα σημεία των κτιρίων υλοποιήθηκαν με χρήση μετροταινίας. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τις αποστάσεις που προσφέρει το τοπογραφικό σχέδιο για τη διαδικασία οργάνωσης των κτιρίων μέσα στο τρισδιάστατο χώρο. Οι συγκεντρωτικές εικόνες χαρτογραφούνται πάνω στις πολυγωνικές επιφάνειες του μοντέλου με τη βοήθεια του *Blender* προσδίδοντας ρεαλισμό στο χαμηλής γεωμετρικής πολυπλοκότητας μοντέλο. Το σύνολο των εικόνων που συνθέτουν την πληροφορία υψής αποθηκεύονται σε μορφότυπο όπως αυτά των *jpeg* και *png*. Το δεύτερο είναι απαραίτητο για την ικανότητα προσδιορισμού διαφάνειας σε αντικείμενα όπως το φύλλωμα δέντρων.



Σχήμα 8-5 Στιγμιότυπο από το λογισμικό Blender κατά τη διαδικασία ανακατασκευής της παλιάς πόλης της Ξάνθης.

Η πληροφορία υφής αποτελεί το 80% του συνολικού όγκου δεδομένων του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου. Ως εκ τούτου ο βαθμός ρεαλισμού της τρισδιάστατης αναπαράστασης εξαρτάται κυρίως από τη πληροφορία υφής. Οποιαδήποτε μεταβολή στις διαστάσεις ή στο βαθμό συμπίεσης της ψηφιογραφικών εικόνων που περιέχουν τη πληροφορία υφής επηρεάζει άμεσα τον ρεαλισμό του μοντέλου.

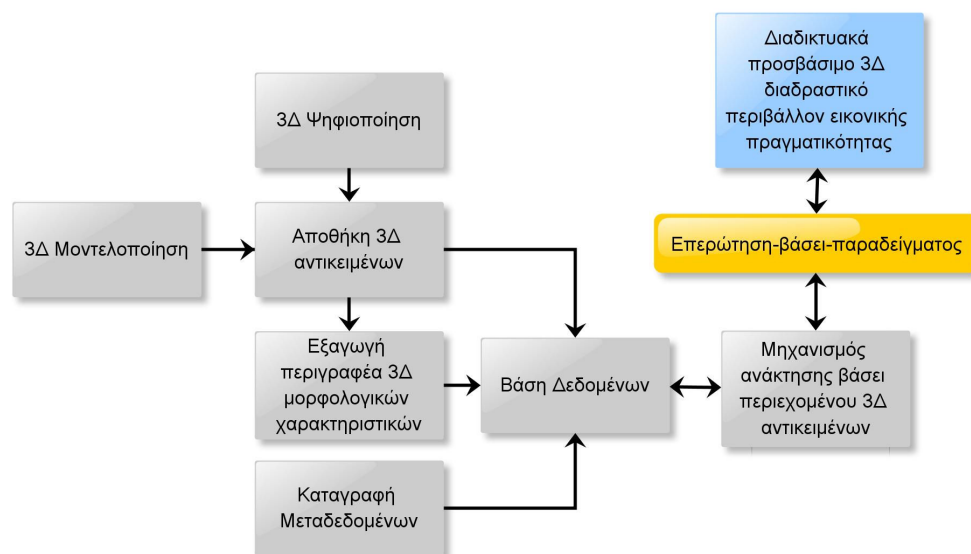
Από την άλλη, η ακρίβεια της γεωμετρίας του μοντέλου είναι σαφώς κατώτερη από το αποτέλεσμα που θα προέκυπτε από τη χρήση επίγειων συστημάτων τρισδιάστατης σάρωσης πεδίου. Μερικά στιγμιότυπα από την τρισδιάστατη ανακατασκευή παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 8-6 Στιγμιότυπα από την τρισδιάστατη ανακατασκευή της παλιάς πόλης της Εφύρας.

8.3 Ανάκτηση βάσει περιεχομένου σε τρισδιάστατο περιβάλλον διεπαφής

Το σχήμα 8-7 απεικονίζει τις τεχνολογίες οι οποίες συμβάλουν στην υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος. Βασική προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη τρισδιάστατων αντικειμένων τα οποία προκύπτουν από τρισδιάστατη ψηφιοποίηση ή μοντελοποίηση σε Η/Υ. Τα αντικείμενα αυτά οργανώνονται σε μία πολυμεσική βάση δεδομένων. Ακολουθούνται από μεταδεδομένα που περιέχουν εκτός από σημασιολογικά στοιχεία και κάποιο περιγραφέα τρισδιάστατων μορφολογικών χαρακτηριστικών καθώς και τις χωρικές συντεταγμένες του αντικειμένου. Μία Διαδικτυακά προσβάσιμη μηχανή ανάκτησης βάσει περιεχομένου αναλαμβάνει να εξυπηρετήσει τις *επερωτήσεις-βάσει-παραδείγματος* που υποβάλλει ο εκάστοτε χρήστης. Μία μηχανή τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου αναλαμβάνει την οπτικοποίηση ενός διαδραστικού εικονικού περιβάλλοντος παρέχοντας στον εικονικό επισκέπτη μηχανισμούς διαδραστικής περιήγησης.

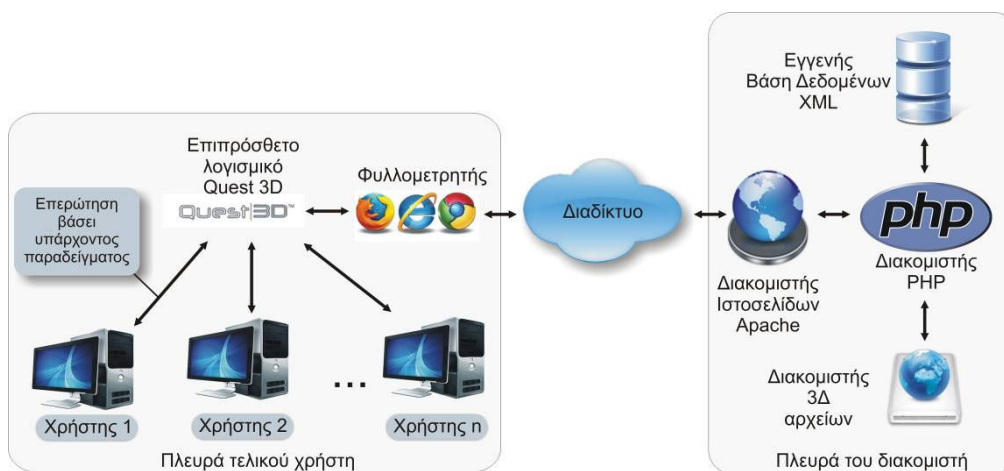


Σχήμα 8-7 Τεχνολογίες που συνέβαλαν στην υλοποίηση του συστήματος.

Το πειραματικό σύστημα ανάκτησης βασίζεται στη παραδοχή ότι το περιεχόμενο της τρισδιάστατης σκηνής έχει ήδη τμηματοποιηθεί και οι περιγραφείς μορφολογικών χαρακτηριστικών υπολογίζονται για κάθε ένα από τα τμήματα αυτά ξεχωριστά. Η παραδοχή της τμηματοποίησης του τρισδιάστατου μοντέλου δεν

αποδυναμώνει τη σημαντικότητα του προτεινόμενου συστήματος αφού σύνθετα τρισδιάστατα μοντέλα όπως αυτό ενός παραδοσιακού οικισμού ή αυτό ενός εικονικού μουσείου αναπτύσσονται τμηματικά όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Τα μη-τμηματοποιημένα μοντέλα που είναι προϊόν τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αποτελούν ακατέργαστα δεδομένα τα οποία δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές τέτοιου τύπου. Η ανάκτηση βάσει περιεχομένου σε μη-τμηματοποιημένα σύνθετα αντικείμενα αποτελεί ένα διαφορετικό αντικείμενο έρευνας το οποίο απαιτεί την ανάπτυξη μεθόδων τμηματοποίησης των ακατέργαστων δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική του παρόντος συστήματος διαφοροποιείται από το σύστημα που περιγράφηκε στο 7^ο κεφάλαιο ως προς την πλευρά του τελικού χρήστη (client side). Το συγκεκριμένο σύστημα προϋποθέτει εκτός από τον φυλλομετρητή και την ύπαρξη ενός *plug-in* που θα αναλάβει την απεικόνιση του 3D εικονικού χώρου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτό είναι το *Quest 3D web browser plug-in* (Σχήμα 8-8).



Σχήμα 8-8 Αρχιτεκτονική συστήματος ανάκτησης.

Θεωρώντας δεδομένη την ύπαρξη μίας πολυμεσικής βάσης δεδομένων τρισδιάστατων αντικειμένων, το σύστημα ανακτά τα αντικείμενα και τα τοποθετεί μέσα στο τρισδιάστατο μοντέλο (πχ παλιά πόλης της Ξάνθης, εικονικό μουσείο αγγείων) χρησιμοποιώντας τις χωρικές συντεταγμένες που περιλαμβάνονται στα μεταδεδομένα του κάθε αντικειμένου. Το κάθε αντικείμενο εντοπίζεται από το χρήστη καθώς αυτός μετακινείται μέσα στον τρισδιάστατο χώρο. Ο χρήστης

αντλαμβάνεται τα *ενεργά* αντικείμενα καθώς η μεταφορά του δείκτη του ποντικιού πάνω από αυτά εκκινεί μια διαδικασία εμφάνισης των μεταδεδομένων του αντικειμένου (Σχήμα 8-10.α). Η συγκεκριμένη τεχνική είναι γνωστή στο χώρο των παιχνιδιών Η/Υ ως *display on mouse over*. Η επιλογή ενός αντικειμένου από το χρήστη ενεργοποιεί τη διαδικασία υποβολής μίας επερώτησης προς το σύστημα χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα το επιλεγμένο ενεργό αντικείμενο.

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη *διαδικασία αρχικοποίησης* του συστήματος στη πλευρά του χρήστη, αποστέλλεται αίτημα προς τον διακομιστή που αφορά στην αποστολή των μοντέλων που περιέχει το 3D περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας (Σχήμα 8-9.α). Μετά την αποστολή των μοντέλων, ο χρήστης αποστέλλει δεύτερο αίτημα προς τον διακομιστή. Αυτή τη φορά αναζητά τα μεταδεδομένα που ακολουθούν το εκάστοτε μοντέλο. Ο διακομιστής απαντά στο χρήστη παρέχοντας πληροφορίες που ακολουθούν μια απλοϊκή δομή XML και αφορούν σε:

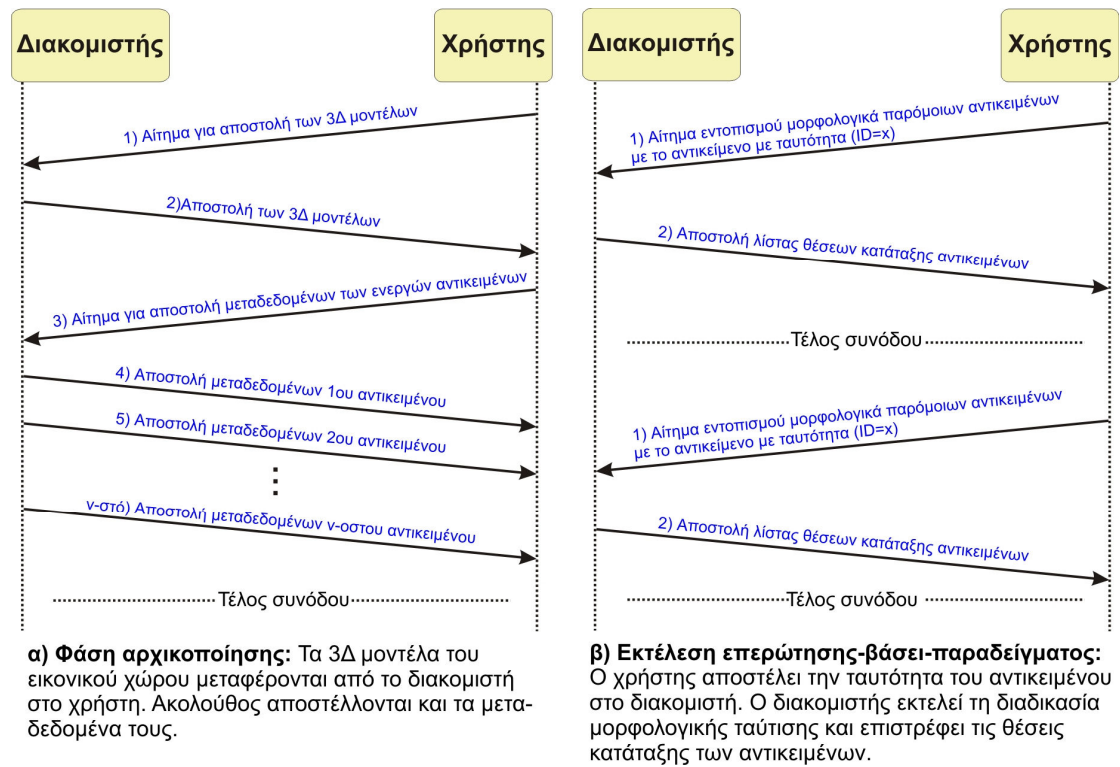
- i. Ταυτότητα αντικειμένου (Unique ID).
- ii. Πληροφορίες σχετικά με το αντικείμενο σε μορφή κειμένου (π.χ. αρχαιολογική τεκμηρίωση ευρήματος).
- iii. Προκαθορισμένες χωρικές συντεταγμένες του αντικειμένου που θα χρησιμοποιηθούν από τη μηχανή 3D γραφικών στην πλευρά του χρήστη ώστε να τοποθετηθεί το αντικείμενο στην κατάλληλη θέση.

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αρχικοποίησης του συστήματος, ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί ελεύθερα μέσα στον τρισδιάστατο χώρο. Με την επιλογή ενός ενεργού αντικειμένου, η διαδικασία αποστολής μίας επερώτησης-βάσει-παραδείγματος προς τον διακομιστή ενεργοποιείται (Σχήμα 8-9.β). Ο χρήστης ενημερώνει τον διακομιστή για την ταυτότητα του αντικειμένου (ID) για το οποίο αναζητά παρόμοια αντικείμενα. Το τμήμα του διακομιστή (server side) αναλαμβάνει να σχηματίσει την απάντηση στην επερώτηση του χρήστη συγκρίνοντας την ψηφιακή υπογραφή του αντικειμένου επερώτησης με τα υπόλοιπα αντικείμενα που εμφανίζονται μέσα στον 3D χώρο. Μετά την ολοκλήρωση της σύγκρισης επιστρέφει ταξινομημένους τους αριθμούς ταυτότητας (IDs) των σχετικών με την επερώτηση αντικειμένων σύμφωνα με το βαθμό ομοιότητας τους (Σχήμα 8-9.β). Η απάντηση

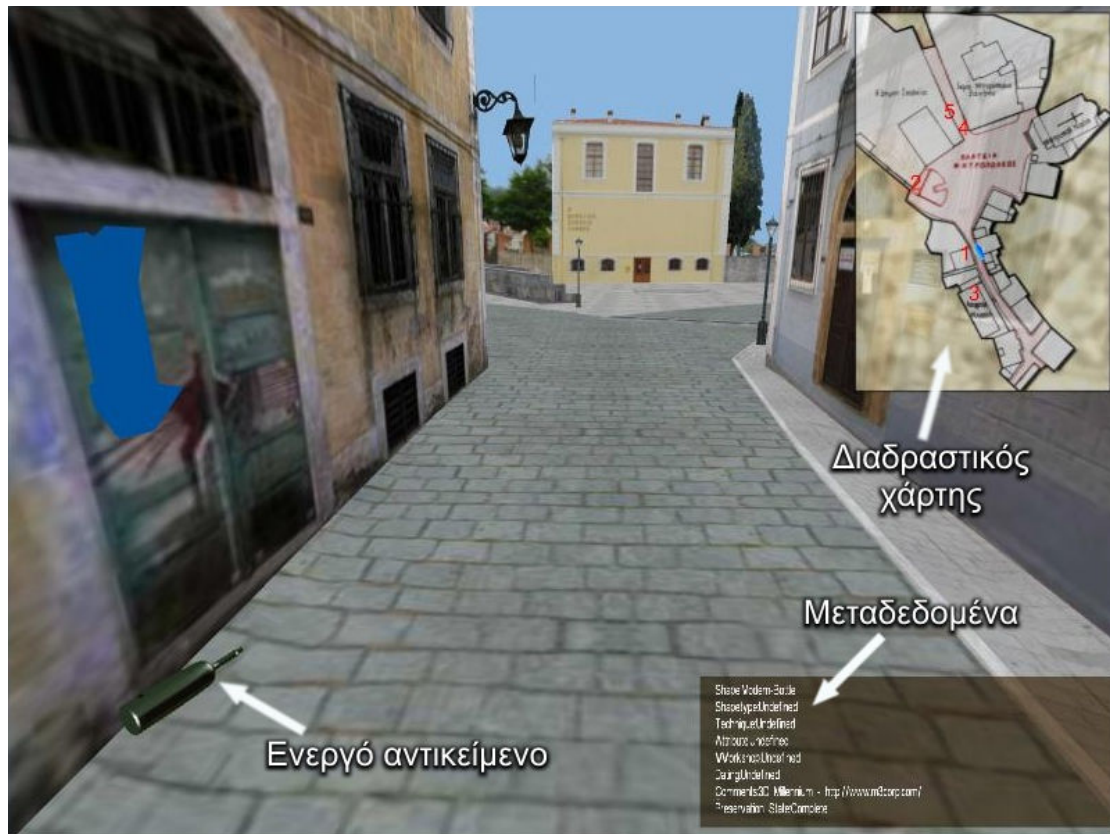
στην επερώτηση του χρήστη παρουσιάζεται ως μια ακολουθία από κινούμενους δείκτες που εμφανίζονται πάνω από κάθε σχετικό αντικείμενο (Σχήμα 8-10.β). Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα κατώφλι για να ορίσει την ελάχιστη επιτρεπόμενη διαφορά του βαθμού ομοιότητας ανάμεσα σε δύο αντικείμενα. Ως εκ τούτου, αποτρέπεται η εμφάνιση δεικτών σε αντικείμενα όπου ο βαθμός ομοιότητας τους είναι χαμηλότερος από το προκαθορισμένο κατώφλι.

Ταυτόχρονα ο χρήστης παρακολουθεί τη θέση του στο χώρο μέσα από ένα δισδιάστατο διαδραστικό χάρτη (Σχήμα 8-10.α και Σχήμα 8-10.β). Ο χάρτης εκτός από τη θέση του εικονικού επισκέπτη παρουσιάζει και τον αριθμό κατάταξης (similarity ranking score) του κάθε αντικειμένου σε σχέση με το *υπό αναζήτηση* αντικείμενο. Οι θέσεις των αριθμών κατάταξης πάνω στο δισδιάστατο χάρτη συμπίπτουν με τις χωρικές συντεταγμένες των θέσεων των αντικειμένων στο τρισδιάστατο χώρο επιτρέποντας στο χρήστη να αναγνωρίζει τότε πλησιάζει σε κάποιο αντικείμενο του ενδιαφέροντος του.

Η πειραματική μηχανή αναζήτησης με το 3D μοντέλο της παλιάς πόλης της Ξάνθης βρίσκεται στην ιστοσελίδα <http://polymnia.ipet.gr/akoutsou/xanthi> ενώ αυτή με το εικονικό μουσείο αγγείων στην ιστοσελίδα <http://polymnia.ipet.gr/akoutsou/museum>. Στην περίπτωση του εικονικού μουσείου, το οποίο διαθέτει και τον μεγαλύτερο όγκο δεδομένων απαιτούνται *2 λεπτά και 31 δευτερόλεπτα* για τη διαδικασία αρχικοποίησης του εικονικού περιβάλλοντος όταν χρησιμοποιείται ευζωνική σύνδεσης της τάξης των 2Mbps και η πληροφορία επίβλεψης του πρωτοκόλλου (overhead) καταλαμβάνει το 25% του συγκεκριμένου εύρους.



Σχήμα 8-9 Διαδικασίες επικοινωνίας ανάμεσα στο χρήστη και στο διακομιστή



α) Στιγμιότυπο της τρισδιάστατης αναπαράστασης τμήματος της παλιάς πόλης της Ξάνθης



β) Στιγμιότυπο του τρισδιάστατου εικονικού μουσείου ψηφιακών αντιγράφων αγγείων

Σχήμα 8-10 Στιγμιότυπα από τα 3Δ περιβάλλοντα εικονικής πραγματικότητας

Κεφάλαιο 9

Επίλογος

9.1 Σύνοψη

Τα πολυμεσικά δεδομένα σε συνδυασμό με τη γνώση που εμπεριέχουν αποτελούν ένα από τα πολυτιμότερα αγαθά της κοινωνίας της πληροφορίας. Βασική προϋπόθεση για την ορθή εκμετάλλευση τους αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδων που συνεισφέρουν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση τους. Η παρούσα διατριβή επικεντρώθηκε στη διερεύνηση και ανάπτυξη καινοτόμων μεθόδων ανάλυσης και ανάκτησης βάσει περιεχομένου τρισδιάστατων ψηφιακών αντιγράφων αγγείων. Ο χώρος της πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί ένα από τα πλέον αξιόλογα πεδία εφαρμογής των συγκεκριμένων μεθόδων αφού σύμφωνα με αναφορές της διεθνούς βιβλιογραφίας ο όγκος των ψηφιακών αντιγράφων συνεχώς αυξάνεται.

Στο πλαίσιο της διατριβής δημιουργήθηκε μία πρότυπη βαθμονομημένη βάση δεδομένων τρισδιάστατων αγγείων η οποία αποτέλεσε την πλατφόρμα εκτέλεσης πειραμάτων ανάκτησης και αποτίμησης των προτεινόμενων μεθόδων κωδικοποίησης μορφολογικών χαρακτηριστικών αγγείων. Η βάση δεδομένων περιέχει τρισδιάστατα αντίγραφα πραγματικών αγγείων καθώς και μοντελοποιημένα αγγεία που έχουν κατασκευαστεί με τη βοήθεια φωτογραφιών και σκίτσων προφίλ. Επίσης αναπτύχθηκε μία γεννήτρια τυχαίων τρισδιάστατων

αγγείων. Το συγκεκριμένο λογισμικό διαθέτει ένα απλοποιημένο περιβάλλον διεπαφής που απαιτεί χαμηλό γνωσιακό υπόβαθρο (knowledge overhead). Στοχεύει σε αρχαιολόγους και μελετητές κεραμικής που δεν διαθέτουν τις απαιτούμενες γνώσεις χρήσης λογισμικών 3D μοντελοποίησης αλλά επιθυμούν να επωφεληθούν από τις τεχνολογίες τρισδιάστατων γραφικών. Η εφαρμογή διαθέτει δύο τρόπους λειτουργίας. Ο πρώτος συμβάλει στην απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής τρισδιάστατων αγγείων με βάση ένα σκίτσο στο οποίο παρουσιάζεται το προφίλ ενός αγγείου. Από την άλλη το λογισμικό προσφέρει μηχανισμούς σχηματικής τυχαιοποίησης για την ημιαυτόματη κατασκευή νέων αγγείων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μία βάση για πειράματα ανάκτησης βάσει περιεχομένου.

Οι βασικές συνεισφορές της διατριβής εντοπίζονται στην ανάπτυξη ενός αλγορίθμου κανονικοποίησης του προσανατολισμού ενός τρισδιάστατου ψηφιακού αντίγραφου αγγείου και στην ανάπτυξη ενός συνεπτυγμένου περιγραφέα που ειδικεύεται στην ανεξάρτητη κωδικοποίηση των μορφολογικών χαρακτηριστικών του βασικού σώματος και των προσαρτημάτων ενός αγγείου. Το μικρό μέγεθος του περιγραφέα επιτρέπει την εφαρμογή του σε συστήματα ανάκτησης βάσει περιεχομένου πραγματικού χρόνου. Ο περιγραφέας *VMBA (Vessel Main Body and Appendages)* (Παράγραφος 6.2) προκύπτει από τη χάραξη ισοϋψών καμπυλών πάνω στην επιφάνεια του τριγωνικού πλέγματος του αγγείου κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του. Το προτεινόμενο μέτρο ομοιότητας διαθέτει την ικανότητα μερικής ταύτισης των μορφολογικών χαρακτηριστικών ενός αγγείου στα επίπεδα του βασικού σώματος και των προσαρτημάτων του. Επιπρόσθετα διαθέτει ανεξάρτητα ειδικά βάρη τα οποία επιτρέπουν στο χρήστη να ευνοήσει ένα από τα δύο βασικά μέρη του περιγραφέα VMBA. Έτσι, μπορεί να θέσει το βασικό σώμα ενός αγγείου ως ένα σημαντικότερη συνιστώσα στη διαδικασία μορφολογικής ταύτισης από ότι τα προσαρτήματα ή και το αντίθετο.

Σε συνδυασμό με τον προτεινόμενο αλγόριθμο κανονικοποίησης του προσανατολισμού τρισδιάστατων αγγείων έγινε μια προσπάθεια μείωσης των διαστάσεων του προβλήματος ταύτισης των μορφολογικών χαρακτηριστικών τους λαμβάνοντας υπόψη την αξονική τους συμμετρία. Οι μέθοδοι που προτάθηκαν βασίζονται στο γεγονός ότι τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά ενός

κανονικοποιημένου αγγείου μπορούν να αποτυπωθούν ικανοποιητικά από δύο μόνο οπτικές γωνίες.

Ως εκ τούτου, αποτιμήθηκε η απόδοση του συστήματος ανάκτησης εφαρμόζοντας ένα περιγραφέα που κωδικοποιεί τα μορφολογικά χαρακτηριστικά του αγγείου με δισδιάστατες ροπές *Zernike* 13^{ης} τάξης. Οι ροπές υπολογίζονται σε ζεύγη εικόνων στις οποίες προβάλλεται το αγγείο από προκαθορισμένες οπτικές γωνίες με την τεχνική χάρτη βάθους. Προς την ίδια ερευνητική κατεύθυνση αποτιμήθηκε και η απόδοση μίας παραλλαγής του περιγραφέα των *Chaouch et al.* [67]. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου οι κλίσεις των επιφανειών ενός αγγείου που αποτυπώνονται σε ένα ζεύγος εικόνων χάρτη βάθους κωδικοποιείται σε ακολουθίες χαρακτήρων. Ο κάθε χαρακτήρας προσδιορίζει την κατάσταση κλίσης της επιφάνειας του αγγείου σε ένα σημείο υπολογίζοντας τη διαφορά των τιμών που φέρουν δύο διαδοχικά εικονοστοιχεία. Ως μέτρο ομοιότητας των ακολουθιών χαρακτήρων χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος στοίχισης συμβολοσειρών Needleman-Wunsch [68].

Τα πειράματα αποτίμησης της απόδοσης ενός πρότυπου συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου τρισδιάστατων αγγείων, που βρίσκεται στη Διαδικτυακή διεύθυνση <http://www.ipet.gr/3DPSE>, καταδεικνύουν την ανάγκη ανάπτυξης περιγραφέων που λαμβάνουν υπόψη τους τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων αντικειμένων. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει πως ο περιγραφέας VMBA διαθέτει τον καλύτερο μέσο όρο απόδοσης στις πέντε κατηγορίες αγγείων. Ταυτόχρονα, το μικρό του μέγεθος σε συνδυασμό με το χαμηλής πολυπλοκότητας μέτρο ομοιότητας επιτρέπει την εφαρμογή του σε Διαδικτυακά συστήματα ανάκτησης. Μέσα από τα αποτελέσματα της αποτίμησης επιβεβαιώνεται πως η χρήση ενός ειδικευμένου περιγραφέα που διαθέτει αυξημένη διακριτική ικανότητα για αντικείμενα μίας συγκεκριμένης κατηγορίας βελτιώνει τις επιδόσεις ενός συστήματος ανάκτησης.

Η διατριβή ολοκληρώνεται παρουσιάζοντας μια πρώτη πειραματική υλοποίηση ενός συστήματος ανάκτησης βάσει περιεχομένου που εκμεταλλεύεται ένα τρισδιάστατο περιβάλλον διεπαφής. Το σύστημα βρίσκεται στη Διαδικτυακή διεύθυνση <http://polymnia.ipet.gr/akoutsou/museum> και επιτρέπει στο χρήστη να περιηγηθεί σε ένα τρισδιάστατο χώρο και να υποβάλει επερωτήσεις βάσει

παραδείγματος επιλέγοντας τα αντικείμενα που παρατηρεί μέσα στην τρισδιάστατη διαδραστική σκηνή.

Ολοκληρώνοντας, ως μελλοντική εξέλιξη του περιγραφέα τρισδιάστατων αγγείων *IMBA* μπορεί να θεωρηθεί η επέκταση του με διανύσματα χαρακτηριστικών που θα σχετίζονται με την κωδικοποίηση της χρωματικής πληροφορίας της επιφάνειας ενός αγγείου καθώς και των μορφών που φέρει ο διάκοσμος τους. Επιπλέον, νέοι περιγραφείς μπορεί να προκύψουν από τα δεδομένα που αποφέρει η διαδικασία χάραξης ισοΰψών καμπυλών στην επιφάνεια

Βιβλιογραφία

- [1] N. Ieyr, S. Jayanti, K. Lou, Y. Kalyanaraman, K. Ramani, *Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends*, International Conference on Computer Aided Design. 7-11 November, 2004.
- [2] J. Bloomenthal, J. Rokne, *Homogeneous coordinates*, The Visual Computer, 1994.
- [3] J. D. Foley, A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes, *Computer Graphics Principles and Practice – Second Edition in C*, Addison-Wesley, ISBN 0-201-84840.
- [4] Ν. Μπιλάλης, *Μελέτη Σχεδίαση με Χρήση Η/Υ (CAD)*, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, σημειώσεις μαθήματος, <http://www.cadlab.tuc.gr/courses/cad/chap2.pdf>
- [5] Γ. Παπαϊωάννου, *Αυτόματη Ανακατασκευή Τρισδιάστατων Αντικειμένων με Μεθόδους Γραφικών*, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών.
- [6] Θ. Θεοχάρης, *Γραφικά με Υπολογιστή*, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, <http://alexandra.di.uoa.gr/Dienst/UI/2.0/ListYears/1900?authority=uoa.sci.di>
- [7] J. Boardman, *Η ιστορία των αρχαίων ελληνικών αγγείων*, εκδόσεις Πατάκη, ISBN 9789601617626.

- [8] T. Schreiber, *Athenian Vase Construction. A Potter's Analysis*, Getty Publications, ISBN-13: 978-0892364657, California, 1999.
- [9] S. Marini, M. Spagnuolo, D. Giorgi, S. Biasotti, *Shape Matching and Retrieval*, Int. Summer School on Shape Modelling and Reasoning, CNR-IMAGE-GE, June 18-22, 2007, Genova, Italy.
- [10] J. W. H. Tangelder, R. C. Veltkamp, *A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods*, Proceedings of Shape Modelling International, June 7-9, 2004, Palazzo Ducale, Genova, Italy, pp. 145-156.
- [11] Adobe 3D PDF, <http://www.adobe.com/products/acrobatproextended/>
- [12] Adobe Flash 3D, www.adobe.com/devnet/flash/3d_animation.html
- [13] C. Grana, R. Cucchiara, *Performance of the MPEG-7 Shape Spectrum Descriptor for 3D objects retrieval*, in procs. of the Italian Research Conference on Digital Library Management Systems (IRCDL), January 27, 2006, Padova, Italy.
- [14] T. Zaharia and F. Preteux, *3D shape-based retrieval within the MPEG-7 framework*, in procs. of the SPIE Conference on Visualization and Data Analysis, January 20-25, 2002, San Jose Convention Center, San Jose, California, USA, pp 133-145.
- [15] D. H. Kim, I. K. Park, I. D. Yunand Sang Uk Lee, *A New MPEG-7 Standard: Perceptual 3-D Shape Descriptor*, Advances in Multimedia Information Processing - PCM 2004, Volume 3332, 2005, pp. 238-245.
- [16] D. V. Vranic, *3D Model Retrieval*, PhD Thesis, University of Leipzig, 2004.
- [17] *SHREC Annual Content Based Retrieval Contest*, <http://www.itl.nist.gov/iad/vug/sharp/benchmark/shrecGeneric/index.html>.
- [18] B. Smanjunath, P. Salembier, T. Sikora, *Introduction to MPEG7*, J.Wiley & Sons, Ltd, England, 2002.
- [19] *Digitech III-2 Μελέτη Τεχνολογιών Τρισδιάστατης Ψηφιοποίησης*, Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας /Ε.Κ. 'Αθηνά', <http://www.ipet.gr/digitech2>
- [20] *MPEG-7 Overview*, <http://www.chiariglione.org/mpeg/standards/mpeg-7/mpeg-7.htm>, τελευταία πρόσβαση Νοέμβριος 2009.

- [21] Λ. Παπαχριστόπουλος, *Το πρότυπο MPEG-7*, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Αρχαιονομίας Βιβλιοθηκονομίας,
http://dlib.ionio.gr/ctheses/0506tab522a/Papachristopoulos_MPEG7.doc
- [22] J. Hunter, *MPEG-7 Behind the Scenes*, D-Lib Magazine, Vol. 5(9), September 1999, ISSN 1082-9873.
- [23] C. Zhang, T. Chen, *Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation*, in procs. of the International Conference on Image Processing 2001, (ICIP 2001), October 7-10, Thessaloniki, Greece, Vol. 3, pp.935-938.
- [24] G. Cybenko, A. Bhasin, K. Cohen, *Pattern recognition of 3D CAD objects: Towards an Electronic Yellow Pages of Mechanical Parts*, Electronic Yellow Pages of Mechanical Parts, International Journal of Intelligent Engineering Systems, Vol. 95, 1996, pp.1-13.
- [25] J. Corney, H. Rea, D. Clark, J. Pritchard, M. Breaks, R. Macleod, *Coarse filters for shape matching*, IEEE Computer Graphics and Applications, 22(3), 2002, pp. 65–74.
- [26] H. Rea, J. Corney, D. Clark, J. Pritchard, M. Breaks, R. MacLeod, *Part sourcing in a global market*, in procs. of the ICeCE'01, January 2001, Beijing, China, pp. 192-201.
- [27] Kolonias, D. Tzovaras, S. Malasiotis, M. G. Strintzis, *Fast Content-Based Search of VRML Models Based on Shape Descriptors*, IEEE Trans. on Multimedia, Vol. 7(1), February 2005, pp. 114-126.
- [28] M. Elad, A. Tal, S. Ar, *Content based retrieval of VRML objects - an iterative and interactive approach*, in procs. of the Eurographics Multimedia Workshop, September 8-9, Manchester, UK, 2001, pp. 97-108.
- [29] M. Kazhdan, B. Chazelle, D. Dobkin, T. Funkhouser, S. Rusinkiewicz, *A reflective symmetry descriptor for 3D models*, Algorithmica, Vol. 38(1), 2004, pp. 201-225.
- [30] Mademlis, A. Axenopoulos, P. Daras, D. Tzovaras, M.G.Strintzis, *3D Content-based Search based on 3D Krawtchouk moments*, in procs. of the 3D Data Processing, Visualization & Transmission (3DPVT 2006), June 14-16, 2006, University of North Carolina, Chapel Hill, USA, pp. 743-749.

- [31] P. Daras, D. Zarpalas, D. Tzovaras, M.G. Strintzis, *Efficient 3-D model search and retrieval using generalized 3-D radon transforms*, IEEE Transactions on Multimedia, Vol.8(1), February 2006, pp.101-114.
- [32] E. Paquet, A. Murching, T. Naveen, A. Tabatabai, M. Rioux, *Description of shape information for 2-D and 3-D object*, IEEE Signal Processing: Image Communication, Vol. 16, 2000, pp.103-122.
- [33] H. Laga, H. Takahashi, M. Nakajima, *Spherical Wavelet Descriptors for Content-based 3D Model Retrieval*, in procs of the IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications, (SMI'06), June 14-16, 2006, Matsushima, Japan, pp.15.
- [34] R. Osada, T. Funkhouser, B. Chazelle, D. Dobkin, *Shape distributions*, ACM Transactions on Graphics, Vol. 21(4), 2002, pp. 807-832.
- [35] R. Ohbuchi, T. Otagiri, M. Ibato, T. Takei, *Shape-similarity search of three-dimensional models using parameterized statistics*, in procs. of the Pacific Graphics, October 9-11, 2002, Beijing, China, pp. 265-274.
- [36] C. Y. Ip, D. Lapadat, L. Sieger, W. C. Regli, *Using shape distributions to compare solid models*, in procs of the Solid Modeling '02, 7th Symposium on Solid Modelling and Applications, June 17-21, 2002, Saarbrücken, Germany, pp. 273-280.
- [37] R. Ohbuchi, T. Takei, *Shape-similarity comparison of 3D models using alpha shapes*, in procs. of the 11th Pacific conference on Computer Graphics and Applications, October 8-10, 2003, Canmore, Canada, pp. 293-302.
- [38] M. Ankerst, G. Kastenmuller, H.-P. Kriegel, T. Seidl, *3D shape histograms for similarity search and classification in spatial databases*, in procs. of the 6th International Symposium on Spatial Databases,(SSD'99), July 1999, Hong Kong, China, pp. 207-226.
- [39] D. V. Vranic, *An improvement of rotation invariant 3D shape descriptor based on functions on concentric spheres*, in procs. of the ICIP 2003, International Conference on Image Processing, September 14-17, 2003, Barcelona, Spain, pp.757-760.
- [40] M. Yu, I. Atmosukarto, W. K. Leow, Z. Huang, R. Xu, *3D model retrieval with morphing-based geometric and topological feature maps*, in procs. of the

- CVPR03*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-22, 2003, Madison, Wisconsin, Vol. II, pp. 656-661.
- [41] M. Kazhdan, T. Funkhouser, S. Rusinkiewicz, ***Rotation invariant spherical harmonic representation of 3D shape descriptors***, in procs. of the Symposium on Geometry Processing, June 23-25, 2003, Aachen, Germany, pp. 156-164.
- [42] T. A. Funkhouser, P. Min, M. M. Kazhdan, J. Chen, J. A. Halderman, D. P. Dobkin, D. Pokrass Jacobs, ***A search engine for 3D models***, ACM Trans. Graph. Vol. 22(1), 2003, pp. 83-105.
- [43] H.-P. Kriegel, S. Brecheisen, P. Kroger, M. Pfeile, M. Schubert, ***Using sets of feature vectors for similarity search on voxelized CAD objects***, in procs. of the 22th ACM SIGMOD International Conference on Management of Data / Principles of Database Systems, June 9-12, 2003, San Diego, California, pp. 587-598.
- [44] H.-P. Kriegel, P. Kroger, Z.Mashael, M. Pfeile, M. Potke, T. Seidl, ***Effective similarity search on voxelized CAD objects***, in procs. of the 8th International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA '03), March 26-28, 2003, Kyoto, Japan, pp. 27.
- [45] H.-Y. Shum, M. Hebert, K. Ikeuchi, ***On 3D shape similarity***, in procs. of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, June 17-22, 1996, San Francisco, California, USA, pp. 526-531.
- [46] S. J. Chua, R. Jarvis, ***Point signatures: a new representation for 3D object recognition***, International Journal of Computer Vision, Vol. 25(1), 1997, pp. 63-85.
- [47] C. Loop, ***Smooth Subdivision Surfaces Based on Triangles***, Master's thesis, University of Utah, Department of Mathematics, 1987.
- [48] D. Zarpalas, P.Daras, A.Axenopoulos, D.Tzovaras, M.G.Strintzis, ***3D Model Search and Retrieval Using the Spherical Trace Transform***, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Vol. 2007(1), pp.207.
- [49] Elinson, D. S. Nau, W.C. Regli, ***Feature-based similarity assessment of solid models***, in procs. of the 4th Symposium on Solid Modelling and Applications, May 14-16, 1997, Atlanta, Georgia, USA, pp. 297-310.

- [50] V. Cicirello, W.C. Regli, *Matching feature-based comparisons of mechanical parts*, in procs. of the Shape Modelling 2001, May 7-11, 2001, Genova, Italy, pp. 176-185.
- [51] M. El-Mehalawi, R. A. Miller, *A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. part I: representation*, Journal of Computer-Aided Design, Vol. 35(1), January 2003, pp. 83-94.
- [52] M. El-Mehalawi, R. A. Miller, *A database system of mechanical components based on geometric and topological similarity. part II: indexing, retrieval, matching and similarity assessment*, Journal of Computer-Aided Design, Vol. 35(1), January 2003, pp. 95-105.
- [53] D. McWherter, M. Peabody, A. Shokoufandeh, W. C. Regli, *Database techniques for archival of solid models*, in procs. of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, June 4-8, 2001, Ann Arbor, Michigan, USA, pp. 78-87.
- [54] E. Zuckerberger, A. Tal, S. Shlafman, *Polyhedral surface decomposition with applications*, Computers and Graphics, Vol. 26(5), 2002, pp. 733-743.
- [55] D.H. Kim, I. D.Yun, S.U. Lee, *A Comparative Study on Attributed Relational Graph, Matching Algorithms for Perceptual 3-D Shape Descriptor in MPEG-7*, in procs. of the MM '04, October 10-16, 2004, New York, USA, pp. 700-707.
- [56] Λ. Παπαχριστόπουλος, *Το πρότυπο MPEG-7*, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Αρχειονομίας Βιβλιοθηκονομίας, Ιόνιο Πανεπιστήμιο.
- [57] Shamir, A. Sotzio, D. Cohen-Or, *Enhanced hierarchical shape matching for shape transformation*, International Journal for Shape Modeling IJSM, Vol. 9(2), 2003, pp. 203-222.
- [58] M. Hilaga, Y. Shinagawa, T. Kohmura, T.L. Kunii, *Topology matching for fully automatic similarity estimation of 3D shapes*, in procs. of the SIGGRAPH.: ACM Press, 12-17 August, 2001, Los Angeles, California, USA, pp. 203-12.
- [59] S. Biasotti, S. Marini, M. Mortara, G. Patané, M. Spagnuolo, B. Falcidieno. *3D shape matching through topological structures*, in procs. of the 11th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery Conference (DGCI 2003), November 19-21, 2003, Napoli, Italy, pp. 194-203.

- [60] D. Bespalov, A. Shokoufandeh, W. C. Regli, W. Sun, *Scale-space representation of 3D models and topological matching*, in procs. of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, June 4-8, 2003, Washington, USA, pp. 208-215.
- [61] D-Y Chen, M. Ouhyoung, *A 3D Object Retrieval System Based on Multi-Resolution Reeb Graph*, in procs. of the Computer Graphics Workshop, June 26-27, 2002, Taiwan, pp.16-20.
- [62] H. Sundar, D. Silver, N. Gagvani, S. Dickenson, *Skeleton based shape matching and retrieval*, in procs. of the 5th International Conference on Shape Modelling, May 12-15, 2003, Seoul, Korea, pp. 130–139.
- [63] B. T. Messmer, H. Bunke, *A decision tree approach to graph and subgraph isomorphism detection*, Pattern Recognition, Vol. 32, 1999, pp. 1979-1998.
- [64] N. Iyer, Y. Kalyanaraman, K. Lou, S. Janyanti, K. Ramani, *A reconfigurable 3D engineering shape search system part I: shape representation*, in procs. of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference September 2-6, 2003, Chicago, Illinois, USA.
- [65] Agathos, I. Pratikakis, P. Papadakis, S. Perantonis, P. Azariadis, N. Sapidis, *Retrieval of 3D Articulated Objects Using a graph-based representation*, in procs. of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, March 29th, 2009, Munich, Germany, pp 29-36.
- [66] T. A. Funkhouser, P. Min, M. M. Kazhdan, J. Chen, J. Alex Halderman, D. P. Dobkin, D. Pokrass Jacobs, *A search engine for 3D models*, ACM Trans. Graph, Vol. 22(1), 2003, pp. 83-105.
- [67] M. Chaouch, A. Verroust-Blondet, *A New Descriptor for 2D Image Indexing and 3D Model Retrieval*, in procs. of the ICIP 2007, September 16-19, 2007, San Antonio, Texas, USA, pp. 373-376.
- [68] S. Needleman, C. Wunsch, *A General Method Applicable to the Search for Similarities in the Amino Acid Sequence of two proteins*, Journal of Molecular Biology, Vol. 48(3), 1970, pp. 443-453.

- [69] D.-Y. Chen, X.-P. Tian, Y.-T. Shen, and M. Ouhyoung, *On visual similarity based 3D model retrieval*, Computer Graphics Forum, Vol. 22(3), September 2003, pp. 223-232.
- [70] R.M. Rustamov, *Template Based Shape Descriptor*, in Procs. Of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, March 29th, 2009, Munich, Germany, pp. 1-7.
- [71] M. Novotni, R. Klein, *A geometric approach to 3D object comparison*, in procs. of the 6th ACM Symposium on Solid Modeling and Applications, June 4-8, 2001, Michigan, USA, pp. 154–166.
- [72] H. Sanchez-Cruz, E. Bribiesca, *A method of optimum transformation of 3D objects used as a measure of shape dissimilarity*, Image and Vision Computing, Vol. 21(11), 2003, pp.1027–103.
- [73] T. K. Dey, J. Giesen, S. Goswami, *Shape segmentation and matching with flow discretization*, In Workshop on Algorithms and Data Structures, Lecture Notes in Computer Science 2748, Springer, 2003, pp.25-36.
- [74] J. W. H. Tangelder, R. C. Veltkamp, *Polyhedral model retrieval using weighted point sets*, International Journal of Image and Graphics, Vol. 3(1), 2003, pp. 209– 229.
- [75] S. D. Cohen and L. J. Guibas, *The earth mover's distance under transformation set*, in procs. of the 7th IEEE International Conference on Computer Vision, (ICCV'99), September 202-7, 1999, Kerkyra, Greece, , pp. 1076-1083.
- [76] P. Min, M. Kazhdan, T. Funkhouser, *A Comparison of Text and Shape Matching for Retrieval of Online 3D Models*, in procs. of the European Conference on Digital Libraries. September 2004.
- [77] Y.-S. Park, Y.-I. Yun, and J.-S. Choi, *A New Shape Descriptor using Sliced Image Histogram for 3D Model Retrieval*, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 55, No. 1, Feb. 2009.
- [78] P. Papadakis, I. Pratikakis, T. Theoharis, G. Passalis, S. Perantonis, *3D Object Retrieval Using an Efficient and Compact Hybrid Shape Descriptor*, in procs. of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, April 15th, 2008, Crete, Greece, pp. 9-16.

- [79] M. R. Ruggeri, D. Saupe, *Isometry-invariant matching of point set surfaces*, in procs. of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, April 15th, 2008, Crete, Greece, pp. 17-24.
- [80] Kanezaki, T. Harada, Y. Kuniyoshi, *Partial Matching for Real Textured 3D Objects using Color Cubic Higher-order Local Auto-Correlation Features*, in procs. of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval, March 29th, 2009, Munich, Germany, pp. 9-12.
- [81] Marie, H. Qasrawi, *Virtual assembly of pottery fragments using moiré surface profile measurements*, Journal of Archaeological. Science, Vol.32, 2005, pp. 1527–1533.
- [82] G. Han, J. Hwang, S. Choi, G. J. Kim, *AR Pottery: Experiencing Pottery Making in the Augmented Space*, HCI (14) 2007, pp. 642-650.
- [83] S. B. Sanjay Goel, Siddharth Batra, *Computer Vision Aided Pottery Classification and Reconstruction*, INDO US Science and Technology Forum on Digital Archaeology, November, 2005.
- [84] M. Kampel, R. Sablatnig, *Virtual Reconstruction of broken and unbroken Pottery*, in procs. of the Fourth International Conference on 3D Digital Imaging and Modelling (3DIM'03), October 6-10, 2003, Banff, Canada, pp 318-325.
- [85] C. Maiza, V. Gaildrat, *SemanticArcheo: A Symbolic Approach of Pottery Classification*, in procs. of the International Conference Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage (VAST 2006), October 30 - November 4, 2006, Nicosia, Cyprus, pp. 227-233.
- [86] H. Mara, R. Sablatnig, A. Karasik, U. Smilansky, *The Uniformity of Wheel Produced Pottery Deduced from 3D Image Processing and Scanning*, in procs. of the Electronic Imaging and the Visual Arts, (EVA'04), November 29 – December 3, 2004, Moscow, Russia, pp.250-255.
- [87] Karasik, H. Mara, R. Sablatnig, I. Sharon, U. Smilansky, *Measuring Deformations of Wheel-Produced Ceramics Using High Resolution 3D Reconstructions*, in procs. of the Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (CAA'05), March 21-24, 2005, Tomar, Portugal.

- [88] M. Kampel, R. Sablatnig, *On 3D Mosaicing of Rotationally Symmetric Ceramic Fragments*, in procs. of the 17th International Conference on Pattern Recognition, (ICPR 2004), August 23-26, 2004, Cambridge, UK, Vol.2, pp.265-268.
- [89] F. Melero, A. Leon, F. Contreras, J.C. Torres, *A new system for interactive vessel reconstruction and drawing*, Bar International Series, 2004, Vol. 1227, pp. 78-81.
- [90] C. Laugerotte, N. Warzee, *An environment for the analysis and reconstruction of archaeological objects*, in procs. of the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage (VAST 2004), December 7-10, 2004, Oudenaarde, Belgium, pp.175-183.
- [91] R. Sablatnig, C. Menard, *3D Reconstruction of Archaeological Pottery Using Profile Primitives*, in procs. of the International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three-Dimensional Imaging, September 5-9, 1997, Rhodes, Greece, pp. 93-96.
- [92] H. Mara, M. Kampel, *Automated extraction of profiles from 3d-models of archaeological fragments*, in procs. of the CIPA 2003 XIXth International Symposium, September 30 – October 4, 2003, Antalya, Turkey.
- [93] C. Maiza, V. Gaildrat, *Automatic Classification of Archaeological Potsherds*, in procs. of the 8th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence, 3IA'2005, May 11-12, 2005, Limoges, France, pp. 135-147.
- [94] F. J. Melero, J.C. Torres, A. Leon, *On the Interactive 3D Reconstruction of Iberian Vessels*, in procs. of the 4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, VAST (2003), November 5-7, 2003 Brighton, UK, pp.71-78.
- [95] Karasik, U. Smilansky, *3D Scanning Technology as a Standard Archaeological Tool for Pottery Analysis: Practice and Theory*, Journal of Archaeological Science, Vol. 35, Issue 5, May 2008, pp. 1148-1168.
- [96] Hörr, G. Brunnett, *Similarity Estimation on Ancient Vessels*, In procs. Of GraphiCon 2008, June 23-27, 2008, Moscow State University, Russia, pp. 94-100.

- [97] Gilboa, A. Karasik, I. Sharon, U. Smilansky, *Towards computerized typology and classification of ceramics*, Journal of Archaeological Science, 31, pp. 681-694.
- [98] H.Y. Shiaw, R. J.K. Jacob, G. R. Crane, *The 3D Vase Museum: A New Approach to Context in a Digital Library*, in procs. of the ACM/IEEE Conference on Digital Libraries (JCDL'04), June 7-11, 2004, Tucson, Arizona, USA, pp. 125 -134.
- [99] E. Paquet, C. Lahanier, D. Pitzalis, G. Aitken, S. Peters, H.L. Viktor, *Content-based Indexing and Retrieval of Cultural Heritage Data: an Integrated Approach to Documentation with Application to the EROS Database*, in procs. of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualisation and Transmission (3DPVT'06), June 14-16, 2006, Chapel Hill, USA.
- [100] D. Gorisse, C. J. Gorisse, S. M., P. Foliguet, *3D Content-Based Retrieval in Artwork Databases*, in procs. of the 3DTV-Conference, May 7-9, 2007, Kos Island, Greece, pp. 1-4.
- [101] Y. Cao, D. Mumford, *Geometric Structure Estimation of Axially Symmetric Pots from Small Fragments*, in procs. of the Intl. Conference on Signal Processing, Pattern Recognition and Applications, June 25-28, 2002, Crete, Greece, pp. 92–97.
- [102] L. Dezhi, A. Razdan, *Knowledge-Based Search Engine for Specific 3D models*, in procs. of the International Symposium on Computational and Information Science, CIS 2004, December 16-18, 2004, Shanghai, China, pp. 530-537.
- [103] L. Dezhi, R. Anshuman, S. Arleyn, B. Myungsoo, *An XML-based information model for archaeological pottery*, Journal of Zhejiang University Science, 6A(5), 2005, pp.447-453.
- [104] H. Mara, R. Sablatnig, *Orientation of Fragments of Rotationally Symmetrical 3D-shapes for Archaeological Documentation*, in procs. of the 3rd International Symposium on 3D Data Processing, Visualisation and Transmission (3DPVT'06), June 14-16, 2006, Uni. Of North Carolina, Chapel Hill, USA, pp. 1064-1071.
- [105] H. B. Liu Yusheng, G. Shuming Hu Jing, *Partial Relevance Feedback for 3D Model Retrieval*, in procs. of the IEEE International Symposium on Computer

- Science and Computational Technology, December 20-22, 2008, Shanghai, China, pp. 198-201.
- [106] S. Akbar, J. Küng, R. Wagner, *Multifeature integration on 3D model similarity retrieval*, in procs. of the 1st International Conference on Digital Information Management (ICDIM), December 6, 2006, Christ College, Bangalore, India, pp. 151-156.
- [107] T. Staudek, *On Birkhoff's Aesthetic Measure of Vase*, Technical Report, Faculty of Informatics, Masaryk University, Czech, 1999.
- [108] S. Schmitt, *Center and Radius of a Sphere from Four Points*, Mathematics Tutorials and Software, <http://home.att.net/~srschmitt/sphere4pts.html>
- [109] C. Ericson, *Real Time Collision Detection*, ISBN-13: 978-1-55860-732-3, Elsevier.
- [110] E. Welzl, *Smallest Enclosing Disks (balls and ellipsoids)*, Results and New Trends in Computer Science, Springer-Verlag, 1991, pp. 359-370.
- [111] Gärtner, *Fast and Robust Smallest Enclosing Balls*, Lecture Notes In Computer Science, Vol. 1643, pp. 325-338.
- [112] B. Gärtner, *Smallest Enclosing Balls of Points - Fast and Robust in C++*, <http://www.inf.ethz.ch/personal/gaertner/miniball.html>
- [113] Y. Rybner, C. Tomasi, L. Guibas, *The Earth's Mover's Distance as a Metric for Image Retrieval*, Journal of Computer Vision, 40 (2), 2000, pp. 99-121.
- [114] D.-Y. Chen, X.-P. Tian, Y.-T. Shen, M. Ouhyoung, *Light Field Descriptor software*, <http://3d.csie.ntu.edu.tw/~dynamic/3DRetrieval/index.html>
- [115] N. Lianos, S. Spatalas, V. Tsioukas, E. Gounari, *3D Modelling of the Old Town of Xanthi in Greece*, in procs. of the XXth ISPRS Congress, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey, pp. 542.
- [116] Y. Alshwabkeh, *Using Terrestrial Laser Scanning For The 3D Reconstruction of Petra – Jordan*, Photogrammetric Week 2005, Wichmann, pp. 39-48.
- [117] D. Fritsch, R. Spiller, *Virtual Cities And Landscape Models – What Has Photogrammetry To Offer?*, in procs. of the Photogrammetric Week 99, Wichmann Verlag, Heidelberg, Germany, pp. 3-14.
- [118] Th. Kersten, C. A. Pardo, M. Lindstaedt, *3D Acquisition, Modelling and Visualization of North German Castles by Digital Architectural*

- Photogrammetry*, in procs. of the Scene Modelling and Virtual Reality, XXth ISPRS Congress, July 12-23, 2004, Istanbul, Turkey, pp. 126-131.
- [119] J. L. Lerma, A. García, C. Pérez, *3D Reconstruction and Modelling of Architectural Domes*, in procs. of the CIPA 2005 XX International Symposium, September 26 - October 1, 2005, Torino, Italy.
- [120] V. Sundstedt, A. Chalmers, P. Martinez, *A High Fidelity Reconstruction of Ancient Egypt - The Temple Of Kalabsha*, in procs. of the SIGGRAPH 2003, ACM SIGGRAPH: Conference Abstracts And Applications, July 27-31, 2003, San Diego, California, USA, pp.107-113.
- [121] Y. Takase, Y. Sasaki, O. Yamada, M. Nakagawa, R. Shibasaki, M. Shimizu, T. Izumi, *Reconstruction with Laser Scanning And 3d Visualization of Roman Monuments And Remains in Tyre, Lebanon*, International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol 34, Part 5/W12, pp. 325-329.
- [122] D. Gutierrez, F. J. Seron, J. A. Magallon, E. J. Sobreviela, P. Latorre, *Archaeological and cultural heritage: bringing life to an unearthed Muslim suburb in an immersive environment*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 5, 2004, pp.63-74.
- [123] V. Tsioukas, N. Tsirliganis, G. Pavlidis, F. Arnaoutoglou, C. Chamzas, E. Mpakourou, A. Mexia, *Photogrammetric Modelling of Byzantine Churches*, in procs. of the XX International Symposium of CIPA, 26 September – 01 October, 2005, Torino, Italy.
- [124] Thomas, W. A. Carey, S., *Actual/Virtual Visits: What are the Links?*, in procs. of the International Conference on Museums and the Web 2005, April 13-16, 2005, Vancouver, British Columbia, Canada.
- [125] G. Guidi, B. Frischer, M. De Simone, A. Cioci, A. Spinetti, Luca Carosso, L. L. Micoli, M. Russo, T. Grasso, *Virtualizing Ancient Rome: 3D acquisition and modeling of a large plaster-of-Paris model of imperial Rome*, in procs. of SPIE, Vol. 5665, January 18, 2005, San Jose, CA, USA, pp. 119-133.
- [126] M. Zuffo, M. Cabral, L. Nomura, M. Nagamura, F. Andrade, S. Ghirotti, O. Belloc, *X3D Experiences on Historical Architectural Digital Reconstruction: A Case Study of Sao Paulo city in 1911*, in procs. of the IEEE Virtual Reality 2007-

- Workshop 1: The Future Standards For Immersive VR, Charlotte, North Carolina.
- [127] J. Jacobson, J. Vadnal, *The Virtual Pompeii Project*, in procs. of the World Conference on E-Learning in Corporate, Government, Healthcare, and Higher Education 2005, October 24-28, 2005, Vancouver, Canada, pp. 1644-1649.
- [128] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, V. Tsioukas, C. Chamzas, *Creating Internet Friendly 3D Tours Using 3D Range Scanner Data*, in procs. of the 3D Colour Laser Scanning Conference, 27-28 March, 2008, UCL, London, UK.
- [129] A. Koutsoudis, F. Arnaoutoglou, G. Pavlidis, D. Tsiafakis, C. Chamzas, *A Versatile Workflow for 3D Reconstructions and Modelling of Cultural Heritage Sites Based on Open Source Software*, in procs. of the 14th VSMM 2008 conference, October 20th - 25th, 2008, Cyprus University of Technology, Limassol, Cyprus, pp. 238-244.
- [130] C. de Kadt, J. Gain, P. Marais, *Revisiting district six: a case study of digital heritage reconstruction from archival photographs*, in procs. of the 6th international Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and interaction in Africa, February 4-6, 2009, Pretoria, South Africa, pp. 13-21.
- [131] G. Pavlidis, F. Arnaoutoglou, A. Koutsoudis, C. Chamzas, *Virtual Walkthrough in a Lost Town – The Virtual Argostoli*, accepted for the Computer Graphics and Imaging conference (CGIM 2010), February 17-19, 2010, Innsbruck, Austria.
- [132] P. Baudisch, N. Good, P. Stewart, *Focus Plus Context Screens: Combining Display Technology with Visualisation Techniques*, in procs. of the UIST 2001, November, 2001, Orlando, Florida, pp. 31-40.
- [133] J.A. Ferwerda, S.N. Pattanaik, P. Shirley, D.P. Greenberg, *A model of visual masking for computer graphics*, in procs. of the SIGGRAPH 97, August 3-8, 1997, Los Angeles, pp. 143-152.
- [134] M. Soucy, G. Godin, M. Rioux, *A texture-mapping approach for the compression of colored 3D triangulations*, The Visual Computer 12 (1996), pp. 503-513.

- [135] H. Rushmeier, B. Rogowitz, C. Piatko, *Perceptual issues in substituting texture for geometry*, in procs. of Human Vision and Electronic Imaging, Vol. 3959, SPIE, San Jose, California USA, 2000, pp. 372-383.
- [136] M. Garland, P. S. Heckbert, *Surface Simplification Using Quadric Error Metrics*, in procs. of the 24th SIGGRAPH, Los Angeles, CA, USA, August 3-8, 1997, pp. 209-216.
- [137] Brown DC, *Decentering distortion of lenses*, Photogrammetric Engineering, Vol. 7, 1966, pp. 444-462.
- [138] M. Bertalmio, G. Sapiro, V. Caselles, C. Ballester, *Image Inpainting*, in procs. of the SIGGRAPH 2000, July 23-28, 2000, New Orleans, USA, pp.417-424.
- [139] H. de Bruijn, *Best Fit Circles made Easy*,
<http://hdebruijn.soo.dto.tudelft.nl/jaar2006/kromming.pdf>
- [140] H. de Bruijn, *Best Circle Fit using Robert's Israel approach*,
<http://hdebruijn.soo.dto.tudelft.nl/jaar2006/KROMMING.ZIP>
- [141] *GLScene, OpenGL Solution for Delphi*,
<http://glscene.sourceforge.net/wikka/HomePage>
- [142] *The Visualisation Toolkit*, <http://www.vtk.org>
- [143] *ALGLIB - A multilingual collection of algorithms designed for numeric analysis*,
<http://www.alglib.net>
- [144] Μ. Λαπιδάκης, *Μέθοδοι ελαχιστοποίησης για την επίλυση αλγεβρικών γραμμικών συστημάτων και εφαρμογή τους στην ρ-κυκλική περίπτωση*, μεταπτυχιακή εργασία, Τμήμα Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- [145] Μ. Μιχαλόπουλος, *Ανάπτυξη Μηχανισμού Εκτίμησης Ελλιπούς Πληροφορίας σε Υπηρεσίες Κινητού Υπολογισμού*, Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Μεταπτυχιακή εξειδίκευση στα πληροφοριακά συστήματα, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- [146] J. Shlens, *A tutorial on Principal Components Analysis*, Lecture Notes, Centre for Neural Science, New York University,
<http://www.snl.salk.edu/~shlens/pub/notes/pca.pdf>.
- [147] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*, 2nd Edition, pp.59-70.

- [148] P. Daras, A. Axenopoulos, *A Compact Multi-View Descriptor for 3D Object Retrieval*, in procs. of the 7th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing, June 3-5, 2009, Chania, Crete, Greece, pp. 115-119.
- [149] S. Jeannin, L. Cieplinski, J. R. Ohm and M. Kim, MPEG-7 Visual part of eXperimentation Model Version 7.0, ISO/IEC JTC/SC29/WG11/N3521, July 2000, Beijing, China.

Παραρτήματα

1. Ομογενείς συντεταγμένες

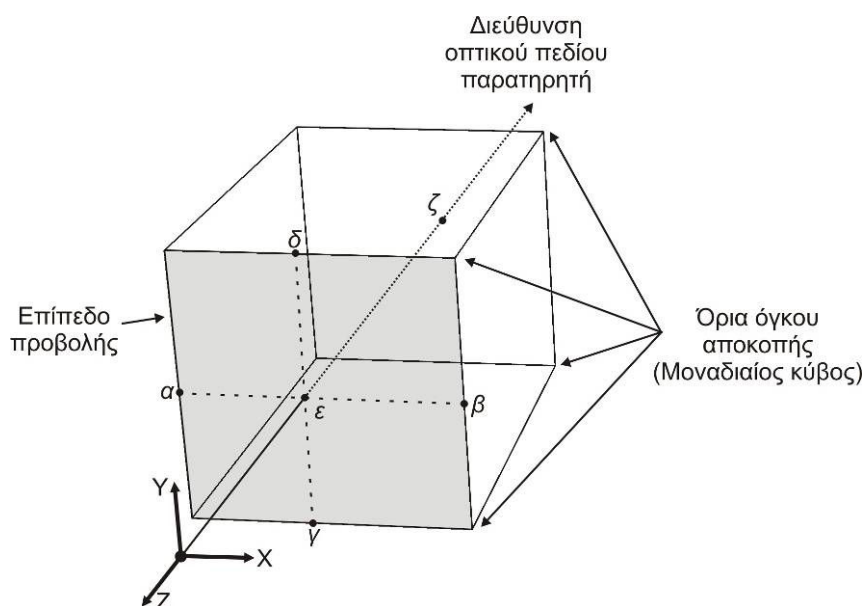
Οι ομογενείς συντεταγμένες έχουν ευρεία εφαρμογή στο χώρο των τρισδιάστατων γραφικών αφού αποτελούν βάση της *προβολικής γεωμετρίας* (projective geometry) [2]. Αποτελούν επίσης λύση στο πρόβλημα υλοποίησης του μετασχηματισμού μετατόπισης που είναι ο μοναδικός που προκύπτει από την πράξη της πρόσθεσης. Χρησιμοποιώντας ομογενείς συντεταγμένες όλοι οι μετασχηματισμοί υλοποιούνται με πολλαπλασιασμούς πινάκων επιτρέποντας έτσι τον συνδυασμό τους σε ένα μόνο πίνακα [3]. Ένα διάνυσμα σε καρτεσιανές συντεταγμένες περιγράφεται ως $P = x_i + y_j + z_k$. Το ίδιο διάνυσμα σε ομογενείς συντεταγμένες εκφράζεται ως εξής:

$$p = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ h \end{pmatrix} \text{ όπου } x' = h \cdot x, y' = h \cdot y, z' = h \cdot z \text{ και } h \text{ ο συντελεστής κλίμακας.} \quad (\Pi.1)$$

Στο χώρο των ομογενών συντεταγμένων η απεικόνιση του σημείου είναι μη μονοσήμαντη εξαιτίας του συντελεστή κλίμακας. Ως εκ τούτου αν εφαρμόζεται ο μοναδιαίος συντελεστής κλίμακας, τότε οι καρτεσιανές και οι ομογενείς συντεταγμένες ενός διανύσματος συμπίπτουν [4].

2. Ορθογραφική προβολή

Οι προβολές μετασχηματίζουν ένα σημείο που ορίζεται σε ένα σύστημα συντεταγμένων n διαστάσεων, σε ένα σημείο που ορίζεται σε ένα σύστημα με διαστάσεις λιγότερες του n . Οι πλέον συνήθεις τύποι προβολών είναι η *προοπτική* και η *ορθογραφική* προβολή. Σύμφωνα με τον μετασχηματισμό της πρώτης κάθε ζεύγος, μη-παράλληλων προς το επίπεδο προβολής, ευθειών συγκλίνουν σε ένα σημείο διαφυγής. Η προοπτική προβολή στηρίζεται στη θεώρηση ότι το αντικείμενο προβάλλεται μέσα από μια ιδανική σημειακή (pinhole) κάμερα. Από την άλλη η ορθογραφική προβολή βασίζεται σε ένα μετασχηματισμό παραλληλεπίπεδης προβολής σε ένα επίπεδο και εφαρμόζεται στους αλγορίθμους που αναλύονται στη παρούσα διατριβή.



Σχήμα Παραρτήματος 1 Μοντέλο ορθογραφικής προβολής σε μοναδιαίο κύβο

Τα όρια του όγκου αποκοπής καθορίζονται από τα επίπεδα ενός μοναδιαίου κύβου: $x_{min}=a$, $x_{max}=\beta$, $y_{min}=\gamma$, $y_{max}=\delta$, $z_{min}=\zeta$, $z_{max}=\epsilon$ με $a<\beta$, $\gamma<\delta$ και $\epsilon<\zeta$. Η ορθογραφική προβολή υλοποιείται με τον πολλαπλασιασμό των συντεταγμένων του κάθε σημείου με τον παρακάτω πίνακα ο οποίος χρησιμοποιείται από το πρότυπο τρισδιάστατων γραφικών OpenGL:

$$M_{\text{ορθοπροβολής}} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\beta - \alpha} & 0 & 0 & -\frac{\beta + \alpha}{\beta - \alpha} \\ 0 & \frac{2}{\delta - \gamma} & 0 & -\frac{\delta + \gamma}{\delta - \gamma} \\ 0 & 0 & \frac{2}{\zeta - \varepsilon} & -\frac{\zeta + \varepsilon}{\zeta - \varepsilon} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Π.2})$$

Στην ειδική περίπτωση όπου ο όγκος προβολής είναι συμμετρικός τότε ισχύει πως $\beta = -\alpha$, $\delta = -\gamma$ και ως εκ τούτου ο πίνακας απλοποιείται ως εξής:

$$\begin{cases} \beta + \alpha = 0 \\ \beta - \alpha = 2\beta \end{cases} \begin{cases} \delta + \gamma = 0 \\ \delta - \gamma = 2\delta \end{cases}$$

$$M'_{\text{ορθοπροβολής}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-2}{\zeta - \varepsilon} & -\frac{\zeta + \varepsilon}{\zeta - \varepsilon} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Π.3})$$

Στην ορθογραφική προβολή, η απόσταση του αντικειμένου από το επίπεδο προβολής της θέσης παρατήρησης (εικονική κάμερα) δεν επηρεάζει την προβολή του και έτσι αυτή δεν μπορεί να εκτιμηθεί. Επίσης η γραμμικότητα των σχέσεων της ορθογραφικής προβολής κάνει σαφώς πιο εύκολη την ανάπτυξη αλγορίθμων [3]-[5].

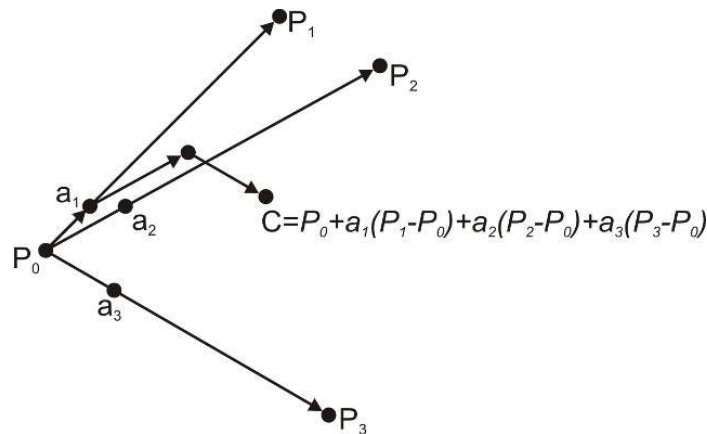
3. Συσχετισμένοι μετασχηματισμοί

Ο *συσχετισμένος* (ή βαρυκεντρικός) *συνδυασμός* (affine combination) C , ενός συνόλου σημείων $P_0, \dots, P_n \in \mathbb{R}^3$ είναι ένα σημείο που ορίζεται ως

$$C = \sum_{i=0}^n a_i \cdot P_i, \quad (\Pi.4)$$

όταν για τις συσχετισμένες συντεταγμένες $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}$ ισχύει $\sum_{i=0}^n a_i = 1$. Ισοδύναμα όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 2-1 ισχύει

$$C = P_0 + \sum_{i=1}^n a_i (P_i - P_0). \quad (\Pi.5)$$



Σχήμα Παραρτήματος 2 Συσχετισμένος (ή Βαρυκεντρικός) συνδυασμός σημείων

Ένας *συσχετισμένος μετασχηματισμός* $\Phi: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, αποτελείται από ένα συνδυασμό γεωμετρικών μετασχηματισμών (περιστροφή, κλιμάκωση, κύρτωση) και ενός μετασχηματισμού μετατόπισης (translation). Οι συσχετισμένοι συνδυασμοί παραμένουν αμετάβλητοι μετά την εφαρμογή ενός συσχετισμένου μετασχηματισμού. Ως εκ τούτου, για τον συσχετισμένο συνδυασμό $C = \sum_{i=0}^n a_i P_i$, ισχύει

$$\Phi(C) = \sum_{i=0}^n a_i \Phi(P_i) \quad (\Pi.6)$$

Ένας συσχετισμένος μετασχηματισμός στον ευκλείδειο χώρο διαφυλάσσει τη συγγραμμικότητα των σημείων (π.χ. τρία συγγραμικά σημεία θα παραμείνουν συγγραμικά και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού). Επιπλέον διατηρεί τις αναλογίες απόστασης πάνω σε μία ευθεία (π.χ. Ο λόγος τριών συγγραμμικών σημείων, $\frac{|P_0 - P_1|}{|P_2 - P_3|}$) [6]. Σε μορφή πινάκων, το κάθε μετασχηματισμένο σημείο

μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P'_n = \Phi \cdot P + T \quad (\Pi.7)$$

ή ως ο αντίστροφος μετασχηματισμός

$$P_n = \Phi^{-1} \cdot (P'_n - T) \quad (\Pi.8)$$

Η εφαρμογή ενός συσχετισμένου μετασχηματισμού σε ένα τρισδιάστατο αντικείμενο είναι αλληλένδετη με τη μεθοδολογία αναπαράστασης που ακολουθεί. Κατά συνέπεια ένας συσχετισμένος μετασχηματισμός εφαρμόζεται ως εξής:

- **Τριγωνικά & Πολυγωνικά Πλέγματα** → Εφαρμογή στις κορυφές των τριγώνων ή πολυγώνων.
- **Νέφη σημείων & Ογκομετρικά νέφη** → Εφαρμογή στο σύνολο των κορυφών (σημεία) από τα οποία αποτελείται το κάθε νέφος.

Οι βασικοί γεωμετρικοί μετασχηματισμοί που εφαρμόζονται εκφρασμένοι σε μορφή πινάκων και εξισώσεων είναι οι παρακάτω:

Περιστροφή γύρω από τους άξονες x , y και z αντίστοιχα

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{cases} x' = x \\ y' = y \cdot \cos \theta - z \cdot \sin \theta \\ z' = y \cdot \sin \theta + z \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (\Pi.9)$$

$$R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{cases} x' = z \cdot \sin \theta + x \cdot \cos \theta \\ y' = y \\ z' = z \cdot \cos \theta - x \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (\Pi.10)$$

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{cases} x' = z \cdot \sin \theta + x \cdot \cos \theta \\ y' = x \cdot \sin \theta + y \cdot \cos \theta \\ z' = z \end{cases} \quad (\Pi.11)$$

Μετατόπιση κατά ένα διάνυσμα $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z, 1)$ εκφρασμένη ως ολίσθηση σε ομογενείς συντεταγμένες έχει τη μορφή ,

$$T_{\vec{u}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_x \\ 0 & 1 & 0 & u_y \\ 0 & 0 & 1 & u_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{cases} x' = x + u_x \\ y' = y + u_y \\ z' = z + u_z \end{cases} \quad (\Pi.12)$$

Κλιμάκωση κατά τους παράγοντες S_x, S_y, S_z ως προς τους άξονες x, y και z ,

$$S_{S_x, S_y, S_z} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{cases} x' = x \cdot S_x \\ y' = y \cdot S_y \\ z' = z \cdot S_z \end{cases} \quad (\Pi.13)$$

Σύνθετοι μετασχηματισμοί μπορούν να προκύψουν από το συνδυασμό των βασικών γεωμετρικών μετασχηματισμών. Η σειρά πολλαπλασιασμού μπορεί να είναι οποιαδήποτε. Έτσι ο αντίστροφος ενός σύνθετου μετασχηματισμού της μορφής $C = C_1 \cdot C_2 \dots C_{n-1} \cdot C_n$ είναι ο

$$C^{-1} = C_n^{-1} \cdot C_{n-1}^{-1} \dots C_2^{-1} \cdot C_1^{-1}. \quad (\Pi.14)$$

Ομοίως, οι κανόνες που ισχύουν για την αντιστροφή των γεωμετρικών μετασχηματισμών είναι οι εξής:

$$R_{x,\theta}^{-1} = R_{x,-\theta}, \quad R_{y,\theta}^{-1} = R_{y,-\theta}, \quad R_{z,\theta}^{-1} = R_{z,-\theta} \quad (\Pi.15)$$

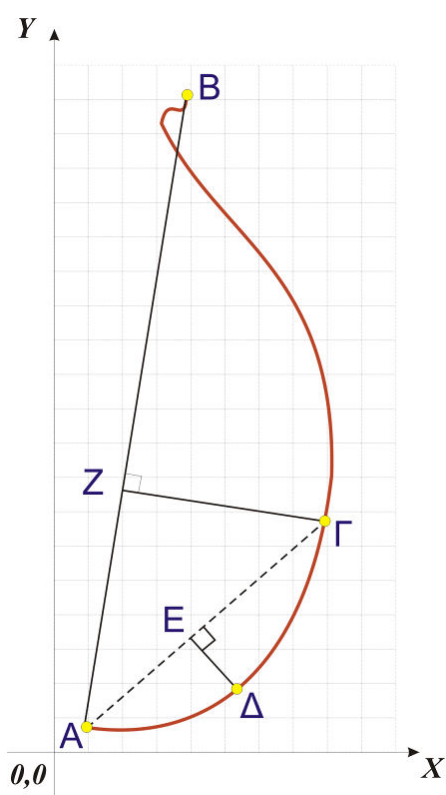
$$T_{\bar{u}}^{-1} = T_{-\bar{u}} \quad (\Pi.16)$$

$$S_{s_x, s_y, s_z}^{-1} = S_{\frac{1}{s_x}, \frac{1}{s_y}, \frac{1}{s_z}} \quad (\Pi.17)$$

[5][6].

4. Αλγόριθμος Douglas και Peucker

Έστω ότι η καμπύλη που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα αποτελεί τη γραφική παράσταση των σημείων μίας ακολουθίας P . Το πρώτο σημείο (A) χαρακτηρίζεται ως το *σημείο αγκίστρωσης* ενώ το σημείο (B) ορίζεται ως *κινούμενο σημείο*. Ο αλγόριθμος διατρέχει όλη την ακολουθία και υπολογίζει την απόσταση ανάμεσα στο κάθε σημείο και στο ευθύγραμμο τμήμα βάσης \overline{AB} . Στόχος του αλγορίθμου είναι να αναγνωρίσει το σημείο με τη μέγιστη απόσταση από το ευθύγραμμο τμήμα AB . Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα αυτό ισχύει για το σημείο Γ .



Σχήμα Παραρτήματος 3 Αλγόριθμος απαλοιφής λεπτομερειών Douglas και Peucker.

Για τον υπολογισμό της ευκλείδειας απόστασης ανάμεσα στο ευθεία \overline{AB} και Γ απαιτούνται οι συντεταγμένες του σημείου Z οι οποίες και προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned} x_Z &= x_A + u(x_B - x_A) \\ y_Z &= y_A + u(y_B - y_A) \end{aligned} \tag{Π.18}$$

$$u = \frac{(x_{\Gamma} - x_A)(x_B - x_A) + (y_{\Gamma} - y_A)(y_B - y_A)}{\|A - B\|^2} \quad (\Pi.19)$$

Σε περίπτωση όπου το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{Z\Gamma}$ έχει μήκος μεγαλύτερο από αυτό που ορίζει ένα κατώφλι, τότε το σημείο Γ χαρακτηρίζεται ως *απαραίτητο*. Ο αλγόριθμος ορίζει το Γ ως το νέο κινούμενο σημείο και συνεχίζει αναζητώντας το νέο σημείο που θα έχει τη μέγιστη απόσταση από το νέο ευθύγραμμο τμήμα βάσης $\overline{A\Gamma}$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αυτό συμβαίνει για το σημείο Δ . Το ευθύγραμμο τμήμα $\overline{E\Delta}$ είναι αυτό που έχει τη μέγιστη απόσταση από το νέο τμήμα βάσης $\overline{A\Gamma}$. Εάν η συγκεκριμένη απόσταση είναι μεγαλύτερη από το κατώφλι τότε και το σημείο Δ χαρακτηρίζεται ως *απαραίτητο* και ορίζεται ως το νέο κινούμενο σημείο. Ο αλγόριθμος καταλήγει όταν όλα τα σημεία της ακολουθίας P έχουν προσπελαστεί. Να σημειωθεί πως όλα τα σημεία που δεν έχουν χαρακτηριστεί ως *απαραίτητα* εξαλείφονται. Το μέγεθος του κατωφλιού είναι η παράμετρος που καθορίζει την πυκνότητα των σημείων που περιγράφουν την επιφάνειες του αγγείου.

5. Κυκλική παρεμβολή

Η μέθοδος κυκλικής παρεμβολής που εφαρμόσθηκε είναι αυτή που προτείνεται από τον Robert Israel [140]. Στόχος της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της ακτίνας και των συντεταγμένων κέντρου ενός κύκλου για τον οποίο όλα τα σημεία του συνόλου απέχουν κατά το ελάχιστο από την περίμετρο του.

Σύμφωνα με τον R. Israel και επιλέγοντας μία συγκεκριμένη ακτίνα R για την οποία ισχύει, $R^2 = C + a^2 + b^2$ η εξίσωση ενός κύκλου είναι $(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$ γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} (x - a)^2 + (y - b)^2 &= C + a^2 + b^2 \Rightarrow \\ x^2 - 2xa + a^2 + y^2 - 2yb + b^2 &= C + a^2 + b^2 \Rightarrow \\ x(x - 2a) + a^2 + y(y - 2b) + b^2 &= C + a^2 + b^2 \Rightarrow \\ x(x - 2a) + y(y - 2b) &= C \end{aligned} \quad (\text{Π.20})$$

και ο τύπος της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων είναι ως εξής:

$$\sum_i w_i [x_i(x_i - 2a) + y_i(y_i - 2b) - C]^2 = \min(a, b, C). \quad (\text{Π.21})$$

Για τον υπολογισμό των ελαχίστων τιμών για τις μεταβλητές a , b , C , υπολογίζεται η μερική παράγωγος ως προς κάθε μεταβλητή:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a} \min(a, b, C) &= \sum_i w_i x_i [x_i(x_i - 2a) + y_i(y_i - 2b) - C] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \min(a, b, C) &= \sum_i w_i y_i [x_i(x_i - 2a) + y_i(y_i - 2b) - C] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial C} \min(a, b, C) &= \sum_i w_i [x_i(x_i - 2a) + y_i(y_i - 2b) - C] = 0 \end{aligned} \quad (\text{Π.22})$$

Σε μορφή πινάκων οι εξισώσεις γράφονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \mu_x \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & \mu_y \\ \mu_x & \mu_y & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2a \\ 2b \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xxx} + \sigma_{yyy} \\ \sigma_{xxy} + \sigma_{yyx} \\ \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \end{bmatrix}, \quad (\text{Π.23})$$

όπου σ είναι τα αθροίσματα των συντεταγμένων όλων των σημείων του συνόλου ως προς ένα σημείο μ :

$$\mu_p = \frac{\sum_i w_i p_i}{\sum_i w_i}, \sigma_{pq} = \frac{\sum_i w_i p_i q_i}{\sum_i w_i}, \sigma_{pqr} = \frac{\sum_i w_i p_i q_i r_i}{\sum_i w_i} \quad (\text{Π.24})$$

Είναι σημαντικό να γίνεται η επιλογή των συντεταγμένων μ_x, μ_y με συγκεκριμένο τρόπο. Σύμφωνα με τον Israel αυτές θα πρέπει να είναι το κέντρο βάρους του συνόλου των σημείων. Αν τοποθετηθεί το μ στην αρχή των αξόνων ($\mu_x=0, \mu_y=0$) τότε το σύστημα των τριών γραμμικών εξισώσεων γίνεται:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2a \\ 2b \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xxx} + \sigma_{yyy} \\ \sigma_{xxy} + \sigma_{yyx} \\ \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \end{bmatrix}, \quad (\text{Π.25})$$

το οποίο μπορεί να διαχωριστεί και γραφεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 2a \\ 2b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xxx} + \sigma_{xyy} \\ \sigma_{xxy} + \sigma_{yyx} \end{bmatrix} \quad (\text{Π.26})$$

και

$$C = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} \quad (\text{Π.27})$$

Οι μεταβλητές a και b υπολογίζονται ως:

$$2 \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{yy} & -\sigma_{xy} \\ -\sigma_{xy} & \sigma_{xx} \end{bmatrix} / \text{Det} \begin{bmatrix} \sigma_{xxx} + \sigma_{xyy} \\ \sigma_{xxy} + \sigma_{yyx} \end{bmatrix}, \quad (\text{Π.28})$$

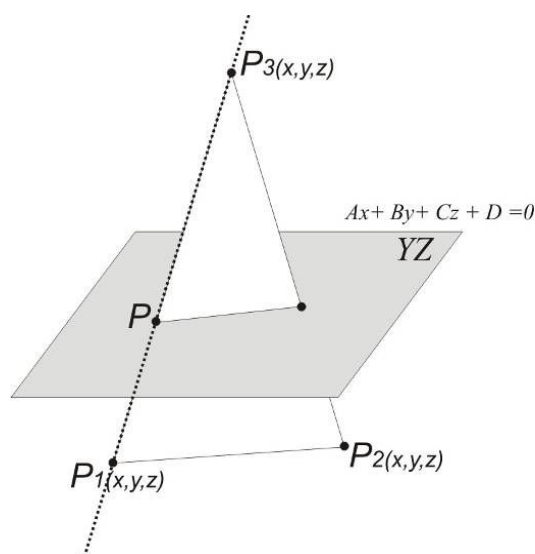
όπου $\text{Det} = \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xy}^2$ η ορίζουσα του αριθμητή που θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Τέλος, η ακτίνα του κύκλου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R = \sqrt{C + a^2 + b^2} = \sqrt{(\sigma_{xx} + a^2) + (\sigma_{yy} + b^2)}. \quad (\text{Π.29})$$

Οι συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου πάνω στο επίπεδο προκύπτουν από ($a + \mu_x, b + \mu_y$). Η υλοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια ανάπτυξης του αλγορίθμου κανονικοποίησης κλίμακας και προσανατολισμού αγγείων προέρχεται από τον Ham de Bruijn [140].

6. Χάραξη ισοϋψών καμπυλών σε τριγωνικό πλέγμα

Η χάραξη ισοϋψών καμπυλών σε ένα τριγωνικό πλέγμα υλοποιείται με τον εντοπισμό των συντεταγμένων του σημείου τομής μια ευθείας (πλευρά τριγώνου) ως προς ένα επίπεδο. Όπως απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα, έστω ένα τρίγωνο το οποίο ορίζεται από τρεις κορυφές (P_1, P_2 και P_3) και YZ ένα επίπεδο. Έστω $A_x + B_y + C_z + D = 0$ η εξίσωση του επιπέδου.



Σχήμα Παραρτήματος 4 Εντοπισμός συντεταγμένων σημείου τομής επιπέδου από μία ευθεία στο χώρο.

Έστω ότι τα σημεία $P_1(x_1, y_1, z_1)$ και $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ορίζουν την ευθεία η οποία τέμνει σε κάποιο σημείο το επίπεδο. Έστω ότι P είναι το σημείο πάνω στην ευθεία $\overline{P_1P_3}$ το οποίο τέμνει το επίπεδο. Οι συντεταγμένες του σημείου P προκύπτουν από την εξίσωση $P = P_1 + u(P_3 - P_1)$. Αντικαθιστώντας τις συντεταγμένες των δύο σημείων P_1 και P_3 στην εξίσωση του επιπέδου προκύπτει πως

$$A(x_1 + u(x_3 - x_1)) + B(y_1 + u(y_3 - y_1)) + C(z_1 + u(z_3 - z_1)) + D = 0. \quad (\text{Π.30})$$

Λύνοντας ως προς u προκύπτει πως

$$u = \frac{Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D}{A(x_1 - x_3) + B(y_1 - y_3) + C(z_1 - z_3)}. \quad (\text{Π.31})$$

Αντικαθιστώντας το u στην εξίσωση ευθείας που περνάει από τα δύο σημεία P_1, P_3 , $P=P_1+u(P_3-P_1)$, προκύπτουν οι συντεταγμένες του P . Όταν προκύπτουν τιμές του u διάφορες του μηδενός τότε αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η ευθεία τέμνει το επίπεδο σε κάποιο σημείο της.

Η χάραξη των ισοϋψών καμπύλων υλοποιείται από το φίλτρο *vtkCutter* της βιβλιοθήκης *Visualisation Toolkit* (VTK) [141]. Ο αλγόριθμος εφαρμόζει την προηγούμενη μέθοδο σε όλα τα τρίγωνα τα οποία φέρουν κορυφές από τις οποίες κάποιες βρίσκονται πάνω και κάποιες κάτω από το συγκεκριμένο επίπεδο ως προς τη συντεταγμένη του άξονα C_y . Για κάθε δύο σημεία που προκύπτουν από ένα τρίγωνο, ο αλγόριθμος εξάγει ένα ζεύγος δεικτών που καθορίζει ότι τα δύο αυτά σημεία αποτελούν την αρχή και το τέλος ενός ευθύγραμμου τμήματος. Επίσης, ανάμεσα σε δύο γειτονικά τρίγωνα προκύπτει ένα σημείο το οποίο ανήκει στην κοινή πλευρά των δύο τριγώνων.

7. Αλγόριθμος ομαδοποίησης σημείων σε μία ακολουθία

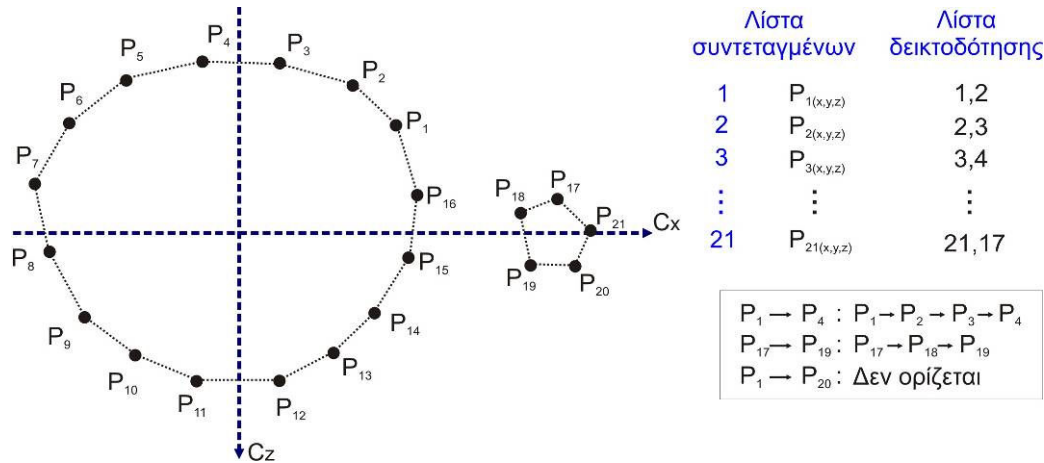
Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αναπτύχθηκε για το διαχωρισμό της κάθε ακολουθίας κορυφών, που προκύπτουν σε ένα επίπεδο χάραξης ισοϋψών καμπυλών, σε υποακολουθίες. Η χάραξη των ισοϋψών καμπύλων υλοποιείται από το φίλτρο *vtkCutter* της βιβλιοθήκης *Visualisation Toolkit* (VTK) [141]. Το συγκεκριμένο φίλτρο υλοποιεί την τομή ενός πολυγωνικού πλέγματος επιστρέφοντας την καμπύλη που προκύπτει πάνω στο επίπεδο τομής. Το φίλτρο επιστρέφει την καμπύλη ως μια ακολουθία κορυφών συνοδευόμενη από τους δείκτες οργάνωσης των κορυφών σε ζεύγη τα οποία αναπαριστούν ευθύγραμμα τμήματα πάνω στο επίπεδο. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι παρόμοια με αυτή της οργάνωσης ενός τριγωνικού πλέγματος με διαφορά ότι οι κορυφές οργανώνονται σε ζεύγη και ορίζουν ευθύγραμμα τμήματα που βρίσκονται πάντα πάνω στο επίπεδο χάραξης.

Η οργάνωση της ακολουθίας κορυφών ενός επιπέδου χάραξης σε υποακολουθίες κορυφών στηρίζεται στη δεικτοδότηση. Η οργάνωση των υποακολουθιών απορρέει από το γεγονός πως ανάμεσα στις κορυφές οι οποίες ανήκουν στην ίδια υποακολουθία (ένα αντικείμενο πάνω στο επίπεδο τομής) δύναται να ορισθούν μονοπάτια που προκύπτουν από τα ζεύγη δεικτοδότησης και τα οποία επιτρέπουν τη μετάβαση από μία οποιαδήποτε κορυφή της υποακολουθίας σε κάποια άλλη. Αντίθετα ανάμεσα σε κορυφές που ανήκουν σε διαφορετικές υποακολουθίες τα συγκεκριμένα μονοπάτια δεν ορίζονται.

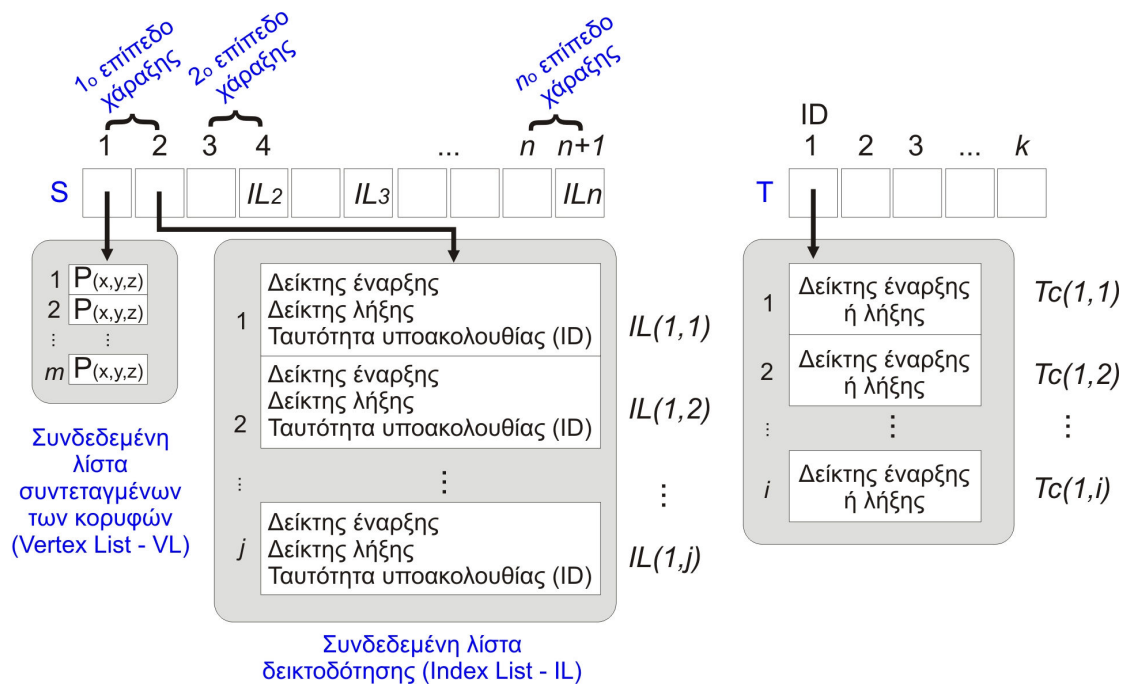
Για την υλοποίηση του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκαν δυναμικές δομές δεδομένων. Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στην υλοποίηση που παρουσιάζεται στον πηγαίο κώδικα που ακολουθεί την παρούσα διατριβή. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει γραφικά τη δομή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε.

Έστω, S ένας μονοδιάστατος πίνακας με πλήθος κελίων διπλάσιο του πλήθους επιπέδων χάραξης ισοϋψών καμπυλών. Σε κάθε δύο διαδοχικά κελιά του S αποθηκεύονται δύο συνδεδεμένες λίστες (linked lists) από τις οποίες η πρώτη (*Vertex List -VL*) περιέχει τις συντεταγμένες των κορυφών της ακολουθίας ενός επιπέδου χάραξης και η δεύτερη τους δείκτες οργάνωσης των κορυφών σε ζεύγη (*Index List -IL*). Το κάθε ζεύγος δεικτών (έναρξης και λήξης) ακολουθεί ένας δείκτης με την *ταυτότητα του αντικειμένου (ID)*. Έστω και ένας δεύτερος πίνακας T στον

οποίον φυλάσσονται προσωρινά οι λίστες που θα περιέχουν τους δείκτες (έναρξης και λήξης) των κορυφών που ανήκουν σε μία υποακολουθία. Κάθε κελί του πίνακα T περιλαμβάνει μια διασυνδεδεμένη λίστα που περιέχει στους δείκτες των κορυφών που ανήκουν σε μία υποακολουθία (κάποιο τμήμα του αγγείου).



Σχήμα Παραρτήματος 5 Ορισμός μονοπατιών ανάμεσα στις κορυφές της ακολουθίας.



Σχήμα Παραρτήματος 6 Απεικόνιση της δομής δεδομένων που αποτελείται από τις λίστες συντεταγμένων κορυφών (VL), τις λίστες δεικτοδότησης σε κάθε επίπεδο χάραξης ισοϋψών καμπυλών (IL_j) και τον πίνακα T.

Η περιγραφή λειτουργίας του αλγορίθμου που αναπτύσσεται παρακάτω αποτελεί και τη βάση υλοποίησης του αλγορίθμου σε επίπεδο ψευδοκώδικα.

1. Αρχικοποίηση

- i. Αρχικοποίηση όλων των πεδίων ταυτότητας υποακολουθιών (IDs) σε όλες τις συνδεδεμένες λίστες δεικτοδότησης IL_1 έως IL_j . Μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης όλες οι ταυτότητες (IDs) των υποακολουθιών έχουν τιμή ίση με το μηδέν.
- ii. Ορισμός του τρέχοντος επιπέδου χάραξης (αρχικά είναι το πρώτο επίπεδο). Άρα η τρέχουσα λίστα δεικτοδότησης είναι η IL_1 .
- iii. Ορισμός τρέχουσας ταυτότητας υποακολουθίας $C_{ID}=1$.
- iv. Αρχικοποίηση της τιμής του δείκτη του τρέχοντος κελιού του πίνακα T , $T_c(1,1)$.

2. Αναγνώριση αντικειμένων

- i. Εκχώρηση της τρέχουσας τιμής της ταυτότητας υποακολουθίας (C_{ID}), $IL_{(1,1)}.ID = C_{ID}$ στην ταυτότητα της υποακολουθίας του πρώτου κελιού της συνδεδεμένης λίστας δεικτοδότησης IL_1 .
- ii. Αντιγραφή των δεικτών (έναρξης και λήξης) της κορυφής $IL_{(1,ID)}$ στις θέσεις $T_c(1,1)$ και $T_c(1,2)$.
- iii. Εκχώρηση στη μεταβλητή τρέχουσας κορυφής ελέγχου (T_{CID}) την τιμή της θέσης $T_c(1,1)$.
- iv. Αναζήτηση σε όλη τη λίστα IL_1 (θέσεις $IL_{(1,1)}$ έως $IL_{(1,j)}$) για τα κελιά στα οποία παρατηρείται ταύτιση ανάμεσα σε έναν από τους δύο δείκτες (έναρξης ή λήξης) και τον δείκτη που περιέχει το κελί T_{CID} .
- v. Για τις κορυφές όπου ισχύει αυτό γίνεται έλεγχος για αν υπάρχει ήδη σε κάποιο κελί του πίνακα T ο μη-ταυτισμένος δείκτης τους. Οι μη-ταυτισμένοι δείκτες που δεν περιέχονται εισάγονται σε θέσεις της λίστας T_c σύμφωνα με τη σειρά που αυτοί εντοπίζονται.
- vi. Εκχώρηση της τιμής που φέρει η μεταβλητή C_{ID} στο πεδίο ταυτότητα υποακολουθίας (ID) του $IL_{(1,1)}$.

- vii. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τα βήματα *iii* έως *vi*, ορίζοντας κάθε φορά ως τρέχουσα κορυφή ελέγχου (T_{CID}) την τιμή που περιέχουν οι θέσεις της λίστας T_c .
- viii. Μετά την ολοκλήρωση ελέγχου όλων των δεικτών της λίστας T_c αυξάνεται η τιμή της *τρέχουσας ταυτότητας υποακολουθίας* $C_{ID} = C_{ID} + 1$ και ορίζεται η νέα στήλη του προσωρινού πίνακα T , $T_c(2,1)$ που τη δεδομένη στιγμή είναι κενή.
- ix. Πραγματοποιείται αναζήτηση στην τρέχουσα συνδεδεμένη λίστα δεικτοδότησης IL_1 για την κορυφή (C_{ID}) η οποία ανήκει στην υποακολουθία με ταυτότητα $ID = 0$.
- x. Επανάληψη των βημάτων *ii* έως *ix* έως ότου δεν υπάρχει κανένα ζεύγος δεικτών στη IL_1 το οποίο φέρει αριθμό ταυτότητας $ID = 0$.
- xi. Όλα τα παραπάνω βήματα επαναλαμβάνονται για κάθε μία από τις λίστες δεικτοδότησης IL .

$$\begin{aligned}U * U &= I (m \times m) \\V * V &= I (n \times n) \\ \Sigma_{ij} &= \begin{cases} \sigma_i \geq 0 \text{ για } i = j \\ 0 \text{ για } i \neq j \end{cases}\end{aligned} \tag{Π.33}$$

Το υπολογιστικό κόστος της SVD είναι $O(Nm^2+m^3)$ ενώ αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη μέθοδο για την *ανάλυση κυρίων συνιστωσών* (PCA) [147].

9. Διαδικτυακές Διευθύνσεις

1. Μηχανή αναζήτησης 3D αγγείων βάσει περιεχομένου – <http://www.ipet.gr/3DPSE>
2. Μηχανή αναζήτησης σε 3D διαδραστικό περιβάλλον – Παλιά Πόλη Ν. Ξάνθης – <http://polymnia.ipet.gr/akoutsou/xanthi>
3. Μηχανή αναζήτησης σε 3D διαδραστικό περιβάλλον – Εικονικό Μουσείο 3D Αγγείων – <http://polymnia.ipet.gr/akoutsou/museum>
4. QR – Γεννήτρια 3D αγγείων – <http://www.ipet.gr/~akoutsou/qr>
5. 3D Ανακατασκευή τμήματος της Παλιάς Πόλης της Ξάνθης – <http://www.67100.gr>

10. Περιεχόμενα Ψηφιακού Δίσκου

Ο συνημμένος ψηφιακός πολυμορφικός δίσκος περιέχει:

1. Ψηφιακό αντίγραφο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.
2. Ψηφιακά αντίγραφα των δημοσιευμένων εργασιών.
3. Αντίγραφο της εφαρμογής *QP: A 3D Random Vessel Generator*.
4. Αντίγραφο της εφαρμογής κανονικοποίησης προσανατολισμού και κλίμακας τρισδιάστατων αγγείων και εξαγωγής του περιγραφέα VMBA.