



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΓΛΥΠΤΟΥ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ
ΕΙΚΟΝΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΡΑΒΑΝΗ ΝΙΚΟΛΕΤΤΑ

Αθήνα, Ιούνιος 2018

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ανδρέα Γεωργόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Στάματη Πολύδωρα, Μηχανολόγο Μηχανικό, τον κύριο Δημήτρη Τσακατίκα, Μηχανολόγο Μηχανικό και την εταιρεία NeoMech, για την προσθετική κατασκευή (3D εκτύπωση) του γλυπτού. Τέλος, την οικογένειά μου και το Δημήτρη, για την υποστήριξη και τη βοήθειά τους όλον αυτόν τον καιρό.

Περίληψη

Τα αντικείμενα τέχνης και τα μνημεία αποτελούσαν εδώ και εκατοντάδες χρόνια αντικείμενο μελέτης και ψυχαγωγίας αλλά και σημαντικό κομμάτι της ιστορίας και της κληρονομιάς προς τις επόμενες γενιές. Ως αποτέλεσμα, η ανάγκη για τη διατήρηση και την προστασία τους είναι μεγάλη. Είναι, λοιπόν, πολύ σημαντική η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών δημιουργίας μοντέλων των αντικειμένων, που θα διευκολύνουν τη μελέτη τους και θα βοηθήσουν ώστε να διατηρηθούν τα πρωτότυπα ανέπαφα σε βάθος χρόνου. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, η δημιουργία τέτοιων μοντέλων διευκολύνθηκε, και πλέον μπορεί να γίνει ψηφιακά, με γρήγορους και οικονομικούς τρόπους και με προϊόντα υψηλής ακρίβειας.

Οι δύο πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η Επίγεια Σάρωση με Laser (Terrestrial Laser Scanning-TLS) και η μέθοδος Δομής από κίνηση (Structure from Motion-SfM). Η πρώτη είναι περισσότερο διαδεδομένη για τέτοιου είδους εργασίες, λόγω της υψηλής ακρίβειας που προσφέρει. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο και η μέθοδος SfM, η οποία διέπεται από τις ίδιες αρχές με τη Φωτογραμμετρία, και προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα με εύκολο και οικονομικό τρόπο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξετάζεται η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ενός γλυπτού, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο SfM, καθώς επίσης και κάποιιο τρόποι παρουσίασης και αναπαράστασης των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση στο μοντέλο και η μελέτη του ανά πάσα στιγμή.

Abstract

3D Docuementation of sculpture using digital images

Cultural heritage pieces and monuments have always been an object of recreation and study, and a fundamental part of peoples' history and legacy to the next generations. Therefore, it is very important of methods and techniques to be created, which will create object models that could be used to facilitate the study of such pieces, without harming the original works of art. Given the technology development of the past decades, the creation of such models can be done digitally, using quick and economical methods, with products of high quality.

In the direction of digital models creation, there are two main methods: Terrestrial Laser Scanning-TLS and Structure from Motion-SfM. The former has been used to a greater extend, because of the very high quality of its products. The latter has been increasingly used in the most recent years, and it gives very reliable results with an easy and economical way, based on the same principles as those of Photogrammetry.

In this paper, a digital model of a statue is created by using the SfM method, and certain visualization ways are presented, that allow the access and study of the model at any time.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
1. Εισαγωγή.....	7
1.1. Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	7
1.2. Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	7
2. Η μοντελοποίηση της Πολιτισμικής Κληρονομιάς.....	9
2.1. Η σημασία της Πολιτισμικής Κληρονομιάς και η ανάγκη για μοντελοποίησή της.....	9
2.2. Πλεονεκτήματα της ψηφιακής αναπαράστασης έργων πολιτισμικής κληρονομιάς.....	11
2.3. Η οικονομική όψη της διατήρησης της πολιτισμικής κληρονομιάς.....	12
2.4. Προκλήσεις στη διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς με ψηφιακά μέσα.....	13
2.5. Το Εικονικό Μουσείο.....	14
3. Ψηφιακή απεικόνιση αντικειμένων.....	16
3.1. Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια.....	16
3.2. Ανακατασκευή επιφάνειας και μοντελοποίηση.....	16
3.3. Μέθοδοι απόκτησης ναφών σημείων (απόκτηση δεδομένων).....	18
3.3.1. Επίγεια Σάρωση με Laser (Terrestrial Laser Scanning-TLS).....	19
3.3.2. Φωτογραμμετρική Ανακατασκευή και διαδικασία μοντελοποίησης Μέθοδος Structure from Motion(SfM).....	20
3.4. Συμπέρασμα.....	23
3.5. Τρόποι παρουσίασης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων.....	24
4. Προηγούμενες εργασίες αποτύπωσης γλυπτών.....	27
4.1. Το πρόγραμμα του ‘Ψηφιακού Μιχαήλ Άγγελου’.....	27
4.2. 3D τεκμηρίωση του αγάλματος του χάσκι στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρική προσέγγιση κλειστού εύρους.....	33
4.3. Φαραώ Πεπη 1(Peri I Meryre): Τεκμηρίωση των αρχαιότερων γνωστών μεταλλικών γλυπτών φυσικού μεγέθους, με χρήση επίγειου Laser Scanner και Φωτογραμμετρίας-2001.....	37
4.4. 3D Σάρωση και Μοντελοποίηση του Μνημείου Βίσμαρκ με Επίγειο Σαρωτή Laser για ενσωμάτωση στο 3D μοντέλο της πόλης του Αμβούργου.....	42
5. Ο αλγόριθμος SfM.....	47
5.1. Εισαγωγή.....	47
5.2. Εισαγωγικές έννοιες.....	48
5.2.1. Προβολή εικόνας.....	48
5.2.2. Βαθμονόμηση της μηχανής.....	50
5.2.3. Το πρόβλημα των ομόλογων σημείων.....	50
5.2.4. Γεωμετρία δύο λήψεων.....	51
5.2.5. Ο επιπολικός πίνακας (πίνακας F).....	51
5.2.6. Τριγωνισμός.....	52
5.2.7. SfM πολλών λήψεων.....	53
5.2.7.1. Sequential αλγόριθμοι.....	53
5.2.7.2. Αλγόριθμοι Factorization.....	54
5.2.8. Bundle Adjustment.....	54
5.3. Structure from Motion (SfM).....	55
5.3.1. Εισαγωγή.....	55
5.3.2. Διάγραμμα ροής της μεθόδου.....	56
5.3.2.1. Απόκτηση εικόνων και εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων (keypoints).....	56

5.3.2.2.Συνταύτιση εικόνων(Matching)	58
5.3.2.3.Ανάκτηση δομής από κίνηση (SfM δύο λήψεων).....	60
5.3.2.4.Αρχικοποίηση SfM.....	61
5.3.2.5.Αρχικοποίηση της δομής.....	61
5.3.2.6.Ανανέωση SfM.....	62
5.3.2.7.Υπολογισμός προβολικής θέσης.....	62
5.3.2.8.Βελτίωση και επέκταση υπάρχουσας δομής	62
5.3.2.9.Βελτίωση δομής από κίνηση	63
6.Πρακτική εφαρμογή.....	64
6.1.Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων.....	64
6.1.1.Το αντικείμενο μελέτης.....	64
6.1.2.Το Photoscan.....	65
6.1.3.Συλλογή δεδομένων	67
6.2.Επεξεργασία δεδομένων	68
6.2.1.Το πρόγραμμα Geomagic	71
6.2.2.Υφή και τελικές διορθώσεις.....	72
6.3.Τρόποι παρουσίασης	75
7.Προσθετική κατασκευή (3D εκτύπωση)	79
7.1.Εισαγωγή.....	79
7.2.Ιστορικά στοιχεία και ορολογία.....	79
7.3.Διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής.....	80
7.4.Υλικά ΠΚ και εφαρμογές της.....	80
7.5.Οφέλη της προσθετικής κατασκευής.....	81
7.6.Προσθετική κατασκευή του γλυπτού “Αυτοκράτωρ και Βάρβαρος”	83
8. Συμπεράσματα.....	86
8.1. Συμπεράσματα.....	86
8.2. Μελλοντικές κατευθύνσεις.....	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ψηφιακή δημιουργία του μοντέλου ενός έργου τέχνης-συγκεκριμένα ενός γλυπτού της Ρωμαϊκής Εποχής, καθώς και κάποιοι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν το μοντέλο αυτό να αναπαρασταθεί και να μελετηθεί. Τέτοιου είδους μοντέλα είναι πολύ χρήσιμα για την προστασία και τη διατήρηση των έργων τέχνης, ενώ συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη μελέτη τους και στη βαθύτερη γνώση του παρελθόντος.

Η ανακατασκευή του μοντέλου μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους απόκτησης των δεδομένων, πιο διαδεδομένοι από τους οποίους είναι η Επίγεια Σάρωση με Laser (Terrestrial Laser Scanning-TLS) και η Δομή από Κίνηση (Structure from Motion-SfM). Για την εν λόγω εργασία, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος, και το μοντέλο ανακατασκευάστηκε με βάση ένα σύνολο φωτογραφιών οι οποίες ελήφθησαν από το αντικείμενο. Το σύνολο αυτό των φωτογραφιών θεωρήθηκε μη οργανωμένο-με άγνωστες θέσεις λήψης των φωτογραφιών και εσωτερικές παραμέτρους της φωτογραφικής μηχανής-και, επομένως, το σύνολο αυτό ήταν η μόνη μορφή πληροφορίας που χρησιμοποιήθηκε για την εργασία αυτή. Οι φωτογραφίες επεξεργάστηκαν ψηφιακά, και το προϊόν της επεξεργασίας τους ήταν ένα ακριβές μοντέλο του γλυπτού με υφή, το οποίο κατόπιν αναπαραστάθηκε με διάφορους τρόπους-ισοϋψείς, 3D PDF, τομές-ενώ, τελικώς, εκτυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή.

Τα προϊόντα που δίνουν οι τρόποι αναπαράστασης του μοντέλου-και, σε μεγαλύτερο βαθμό το τρισδιάστατο, εκτυπωμένο μοντέλο-είναι πολύ χρήσιμα στη διατήρηση του αυθεντικού γλυπτού και στη διευκόλυνση της μελέτης του-τεχνοτροπία, εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του-αφού όλες οι εργασίες που αφορούν το γλυπτό, αλλά και η έκθεσή του στο κοινό, μπορούν να γίνουν με τη βοήθεια του μοντέλου. Ακόμα, ένα τέτοιο μοντέλο είναι πολύ χρήσιμο, σε περίπτωση που, στο μέλλον, χρειαστεί να γίνει προσπάθεια κατασκευής κάποιων κομματιών που λείπουν από το γλυπτό και ανακατασκευής του όπως ήταν κατά την περίοδο δημιουργίας του.

1.2. Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται στα παρακάτω μέρη: αρχικά, γίνεται αναφορά στη σημασία της πολιτιστικής κληρονομιάς και της ανάγκης για τη διατήρησή της και το πέρασμά της στις επόμενες γενεές (κεφ.2). Γίνεται αναφορά στη νέα, ψηφιακή εποχή που εγκαινιάστηκε πριν μερικές δεκαετίες, και στη συνεισφορά της σε όλους τους κλάδους και στην ίδια τη διατήρηση των έργων τέχνης εν γένει. Τονίζεται, τέλος, η σημασία της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς για την ψυχαγωγία και την εκπαίδευση των ατόμων, αλλά και για την οικονομία μιας χώρας, ενώ παρουσιάζονται επιγραμματικά τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν κατά την προσπάθεια της ψηφιακής καταγραφής και ανακατασκευής των έργων τέχνης.

Ακολουθεί μια θεωρητική προσέγγιση των τρόπων με τους οποίους μπορεί να γίνει ψηφιακά η ανακατασκευή ενός μοντέλου (κεφ.3). Αναφέρονται οι κυριότεροι τρόποι απόκτησης των απαραίτητων για την ψηφιακή ανακατασκευή δεδομένων (νέφη σημείων), (TLS και SfM), καθώς και οι μέθοδοι για την επεξεργασία αυτών των δεδομένων, που οδηγεί στη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου. Τέλος, γίνεται αναφορά σε κάποιους από τους μέχρι τώρα τρόπους που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση των ψηφιακών μοντέλων (ισοϋψείς, 3D PDF, τομές, 3D εκτύπωση).

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Εξετάζονται παρόμοιες εργασίες που είχαν εκπονηθεί κατά το παρελθόν, με σκοπό την ψηφιακή ανακατασκευή μοντέλων έργων τέχνης με τη βοήθεια της υπάρχουσας, για κάθε εργασία, τεχνολογίας. Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται εργασίες που ήρθαν εις πέρας με τη βοήθεια της μεθόδου SfM αλλά και του TLS.

Στο κεφάλαιο 5 εξετάζεται ο αλγόριθμος SfM, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Αρχικά γίνεται αποσαφήνιση κάποιων εισαγωγικών εννοιών, στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του αλγορίθμου SfM, και, κατόπιν, περιγράφεται το διάγραμμα ροής των εργασιών του αλγορίθμου.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται η πρακτική εφαρμογή όλων των παραπάνω, η δημιουργία, δηλαδή, του ψηφιακού μοντέλου του γλυπτού “Αυτοκράτωρ και Βάρβαρος”, η οποία περιλαμβάνει τη συλλογή των δεδομένων, την επεξεργασία τους και, τέλος, τους τρόπους παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 περιγράφεται η Προσθετική Κατασκευή-περισσότερο γνωστή ως 3D εκτύπωση-του μοντέλου. Αναφέρονται επιγραμματικά κάποια ιστορικά στοιχεία, η διαδικασία της προσθετικής κατασκευής και τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται. Το κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή της προσθετικής κατασκευής του γλυπτού “Αυτοκράτωρ και Βάρβαρος”.

Στο τελευταίο κεφάλαιο (κεφ.8), περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις.

2. Η μοντελοποίηση της Πολιτισμικής Κληρονομιάς

2.1. Η σημασία της Πολιτισμικής Κληρονομιάς και η ανάγκη για μοντελοποίησή της

Η έννοια της πολιτισμικής κληρονομιάς και της σημασίας της υποδηλώνει μια συνεχή σχέση με το παρελθόν, μια προσπάθεια ερμηνείας του και μια τάση ανάπτυξης ενός ουσιαστικού διαλόγου για την πολιτιστική και κοινωνική διάστασή του στο παρόν και στο μέλλον. Υποδηλώνει ακόμα μια διαδικασία εκπαίδευσης, ψυχαγωγίας και αυτοπραγμάτωσης σε ατομικό επίπεδο, αλλά και ενδυνάμωσης των δεσμών μεταξύ λαών και κρατών σε παγκόσμιο επίπεδο. Η άμεση επαφή με έργα τέχνης και τους τόπους από όπου αυτά προέρχονται αποτελεί σημαντικό κομμάτι της εκπαιδευτικής διαδικασίας, από το σχολείο ακόμη, αλλά και της δια βίου μάθησης κάθε ατόμου. Παρόλα αυτά, η πρόσβαση των ανθρώπων σε αυτά είναι περιορισμένη, κυρίως λόγω γεωγραφικών και οικονομικών αιτιών. Επιπρόσθετα, πολλά από τα ίδια τα μνημεία δεν είναι ανοιχτά στο κοινό, είτε είναι ανοιχτά για περιορισμένο χρονικό διάστημα, λόγω της φθοράς που έχουν υποστεί (από κακή χρήση, φυσικές καταστροφές, καιρικές συνθήκες κ.λπ.), και έτσι είναι συχνά απαραίτητη η προσέγγιση και η μελέτη τους με άλλους τρόπους.



Εικόνα 1 Η διάσημη Μόνα Λίζα του Λεονάρντο Ντα Βίντσι

Ως απόρροια όλων των παραπάνω, η αναγνώριση της σημασίας αλλά και της οικουμενικότητας της πολιτισμικής κληρονομιάς και η σταδιακή ενεργοποίηση της διεθνούς κοινότητας για την ευαισθητοποίηση των πολιτών είναι ζωτικής σημασίας. Στην προσπάθεια αυτή, σημαντικά έχει συμβάλει και η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνολογίας των τελευταίων δεκαετιών (<https://www.archaiologia.gr/>).



Εικόνα 2 Αριστερά η Νίκη της Σαμοθράκης και δεξιά ψηφιδωτό από το μουσείο του Δίου

Πράγματι, η νέα ψηφιακή εποχή που ξεκίνησε τον 21^ο αιώνα, έδωσε τη δυνατότητα σε μια άνευ προηγουμένου ανοιχτή πρόσβαση σε κάθε είδους πληροφορία, εγείροντας ταυτόχρονα ερωτήματα ως προς τον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατή η πλοήγηση σε τόσο μεγάλη ποσότητα πληροφορίας, αλλά και την αποτελεσματικότητα της ερμηνείας της. Ο πολλαπλασιασμός των ψηφιακών μέσων γενικά, και των τεχνικών 3D ανακατασκευής ειδικότερα, σε συνδυασμό με την ανάγκη αρχειοθέτησης αυτών των πληροφοριών και της εύκολης επικοινωνίας τους στο κοινό, είχε ως αποτέλεσμα να τεθούν οι βάσεις της εφαρμογής της τεχνολογίας και σε άλλους τομείς από αυτούς όπου μέχρι τότε είχε εφαρμοστεί. Έτσι, από τη δεκαετία του '90 και μετά, όταν η τεχνολογία των υπολογιστών εξελίχθηκε σε ένα εργαλείο δουλειάς και προσανατολίστηκε στην επίλυση προβλημάτων διαχείρισης δεδομένων, άρχισε να μετατρέπεται και σε ένα μέσο ερμηνείας και καθορισμού του περιεχομένου και της γλώσσας της μελέτης του παρελθόντος. Ήταν η απαρχή της προσέγγισης αρχαιολογικών προβλημάτων μέσω της επιστήμης των υπολογιστών.



Εικόνα 3 Επάνω η αρχαία πόλη του Μάτσου Πίτσου και κάτω ο Παρθενώνας

Το πεδίο αυτό της επιστήμης, το οποίο ονομάστηκε Εικονική Αρχαιολογία (Virtual Archaeology) αφορά στην ανάλυση των διαδικασιών διαχείρισης και παρουσίασης αρχαιολογικών στοιχείων μέσω τεχνικών τρισδιάστατης απεικόνισης σε υπο-

λογιστή (Stanco et al., 2017), και στοχεύει στην ψηφιακή ανακατασκευή αρχαιολογικών και μη έργων τέχνης και μνημείων, τόσο για ερευνητικούς και εκπαιδευτικούς σκοπούς, όσο και για τη συμβολή στη διατήρηση και προστασία της πολιτισμικής κληρονομιάς. Από τότε και μέχρι σήμερα, η επιστήμη αυτή εξελίχθηκε, και η πιο ολοκληρωμένη μορφή της, είναι η δημιουργία των Εικονικών Μουσείων (Virtual Museums).



Εικόνα 4 Εικονικά μουσεία του Smithsonian Natural Museum of Natural History στις ΗΠΑ και του μουσείου του Γαλιλαίου στη Φλωρεντία

2.2.Πλεονεκτήματα της ψηφιακής αναπαράστασης έργων πολιτισμικής κληρονομιάς

Αδιαμφισβήτητα, η άμεση επαφή με τα έργα τέχνης και τους τόπους όπου αυτά βρίσκονται έχει πολύ μεγάλη αξία· συμβάλλουν στη μόρφωση και την αισθητική των επισκεπτών σε ατομικό επίπεδο, ενώ τονώνουν την οικονομική και κοινωνική ζωή σε τοπικό επίπεδο.



Εικόνα 5 Το Στόουνχετζ

Παρ' όλα αυτά, η εκ του σύνεγγυς επαφή με επισκέπτες μπορεί να προκαλέσει φθορές σε κάποια μνημεία, οι οποίες, σε συνδυασμό και με τις φθορές που μπορεί να έχουν υποστεί λόγω εξωτερικών συνθηκών (καιρικών φαινομένων, πολέμων κ.ά.), μπορεί να προκαλέσουν την απαγόρευση των επισκέψεων του κοινού, ή ακόμα και την καταστροφή τους (Stanco et al., 2017). Ακόμα, όπως προαναφέρθηκε, η επίσκεψη σε πολλούς τόπους ιστορικού ενδιαφέροντος δεν είναι εύκολη σε όλους. Τέλος, η μελέτη των σημείων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος που μπορεί να γίνει επιτόπου, βασίζεται στην παρούσα κατάσταση των έργων και μνημείων, η οποία πολλές φορές απέχει αρκετά από την αρχική τους κατάσταση.

Η ψηφιακή αναπαράσταση και μοντελοποίηση των έργων τέχνης έρχεται να δώσει λύση στα προβλήματα αυτά, δημιουργώντας πολυδιάστατα μοντέλα του εκάστοτε αντικειμένου, καταγράφοντας τα λεπτομερώς και βοηθώντας την βαθύτερη κα-

τανόηση και μελέτη τους. Συμβάλλει επομένως στην καταγραφή, τη διατήρηση και την προώθησή τους ηλεκτρονικά, ενώ γίνεται πολύ χρήσιμο όργανο για αυτούς που συμμετέχουν στην ευρύτερη θεωρητική καταγραφή του παρελθόντος. Επιπλέον, κάθε δείγμα φυσικής και ανθρώπινης δραστηριότητας που αξίζει να περάσει στις επόμενες γενιές, είναι δυνατόν να αναπαρασταθεί ψηφιακά, να είναι διαθέσιμο σε όλους εύκολα και οικονομικά, χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφεί ή να αλλοιωθεί από τους επισκέπτες. Μέσω της ψηφιακής τους απεικόνισης, και σε συνδυασμό με άλλες επιστήμες, μπορούν να γίνουν διαθέσιμες στο κοινό και εικόνες των έργων στη μορφή που ήταν όταν πρωτοκατασκευάστηκαν, φιλοτεχνήθηκαν ή και ήκμασαν, αλλά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την περάτωσή τους. Οι τεχνολογικές μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί μέχρι τώρα (φωτογραμμετρικές μέθοδοι, χρήση laser scanner ή και συνδυασμός τους) έχουν επιφέρει ακριβή και ποιοτικά αποτελέσματα, η επιστήμη όμως αυτή αναπτύχθηκε την τελευταία 20ετία· τα επόμενα χρόνια θα φέρουν περαιτέρω βελτίωση της τεχνολογίας και πιο εξειδικευμένη γνώση στον συγκεκριμένο τομέα.



Εικόνα 6 Το ψηφιακό μοντέλο του Ατλαντα

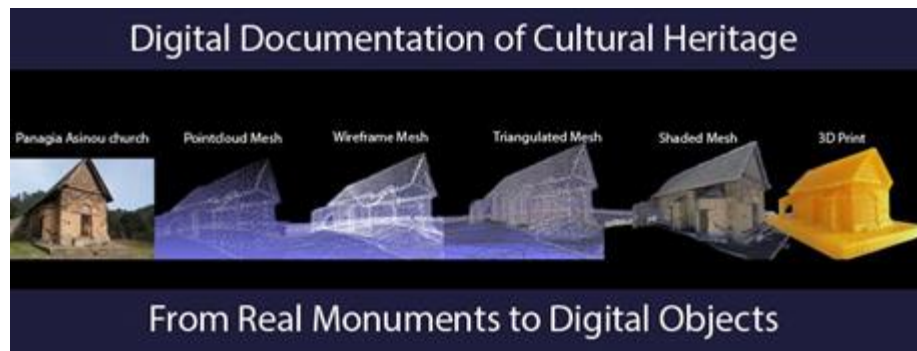
2.3. Η οικονομική όψη της διατήρησης της πολιτισμικής κληρονομιάς

Πολλές φορές, η διατήρηση και η προώθηση της πολιτισμικής κληρονομιάς δεν θεωρείται ζήτημα κύριας σημασίας στα περισσότερα κράτη, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα η χρηματοδότηση για αυτές να είναι μικρή. Τα οφέλη, όμως, από την ανάδειξη του πολιτισμικού πλούτου ενός τόπου είναι μεγάλα, και δεν αφορούν μόνο στην ανάπτυξη του τουρισμού. Η κοινωνική και οικονομική προσφορά σε μια χώρα αφορά στη βελτίωση του επιπέδου εκπαίδευσης και της ποιότητας ζωής, την ενδυνάμωση των δεσμών με άλλες χώρες, ενώ δημιουργεί κατάλληλες προϋποθέσεις για βιώσιμη ανάπτυξη, συνεισφέροντας στην αύξηση της απασχόλησης και δημιουργώντας ευκαιρίες για ανάληψη καινοτόμων επιχειρηματικών πρωτοβουλιών και αξιοποίησης πόρων σε τοπικό, εθνικό και διεθνές επίπεδο. Τα τελευταία χρόνια, άλλωστε, έχουν γίνει πολλά βήματα για την προσπάθεια διάδοσης του πολιτισμικού τουρισμού, ο οποίος συνδυάζει την ανάδειξη ιστορικών τοπίων, περιοχών φυσικού κάλλους, σύγχρονων χαρακτηριστικών της περιοχής και τοπικών προϊόντων και τα δια-

χειρίζεται ως ενιαίο σύνολο, προσφέροντας έτσι μια ολοκληρωμένη εικόνα ενός τόπου, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον για τους επισκέπτες (<https://olympia.gr/>).

2.4. Προκλήσεις στη διατήρηση της πολιτισμικής κληρονομιάς με ψηφιακά μέσα

Από τα πρώτα βήματα των ανθρώπων στη γη έως και σήμερα, αναρίθμητα είναι τα αντικείμενα, τα έργα τέχνης και τα κτίσματα τα οποία διασώθηκαν και είναι σημαντικό να περάσουν αναλλοίωτα στις επόμενες γενιές. Ο ρόλος της διατήρησης της κληρονομιάς με τη χρήση ψηφιακών μέσων είναι να αναπαραστήσει το εκάστοτε στοιχείο με ακρίβεια, ενάργεια και αξιοπιστία τόσο του ίδιου του αντικειμένου, όσο και του φυσικού ή τεχνητού περιβάλλοντος στο οποίο αυτό ανήκε ή κατασκευάστηκε.



Εικόνα 7 Ψηφιακή αναπαράσταση έργου

Η εξέλιξη της τεχνολογίας διευκόλυνε σε μεγάλο βαθμό τη διάσωση και παρουσίαση των έργων τέχνης· ωστόσο υπάρχουν ακόμα ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και να αντιμετωπιστούν. Ένα από αυτά είναι το γεγονός ότι, για την αναπαράσταση έργων τέχνης με ψηφιακό τρόπο, χρησιμοποιούνται εφαρμογές των οποίων το λογισμικό είναι ευμετάβλητο και χρήζει συχνών αλλαγών. Έτσι, νεότερες εκδόσεις προγραμμάτων μοντελοποίησης και παρουσίασης μπορεί να μην είναι συμβατές με παλαιότερους υπολογιστές. Ακόμα, καθώς κάθε αντικείμενο προς επεξεργασία έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες, ένα έτοιμο πρόγραμμα μπορεί να μην καλύπτει μέρος αυτών, και να μην είναι εύκολο ή δυνατό, να προσαρμοστεί σε αυτές. Αντικείμενο προβληματισμού αποτελεί και η κλίμακα των αποτελεσμάτων. Τα εξαγόμενα αρχεία είναι πολύ μεγάλα, και είναι σημαντικό να υπάρχουν τρόποι ελάττωσης της πληροφορίας, χωρίς όμως να πληγεί η ακρίβεια και η σταθερότητα των αντιγράφων, δημιουργώντας έτσι ψηφιακές αποθήκες με επαρκή και εύχρηστα στοιχεία. Από την άλλη, κάποιες φορές, η χρήση της τεχνολογίας, και ιδιαίτερα στους αρχαιολογικούς χώρους, αφαιρεί το αίσθημα της αυθεντικότητας και της πνευματικότητας των έργων τέχνης, για αυτό και πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά, και όχι να υποκαταστήσει τις επισκέψεις σε αρχαιολογικούς χώρους. Η οικονομική πλευρά του ζητήματος είναι, τέλος, ζωτικής σημασίας, ειδικότερα σε χώρες που βρίσκονται σε οικονομική κρίση, όπως είναι η Ελλάδα τα τελευταία χρόνια, καθώς το κόστος των προγραμμάτων συντήρησης είναι αρκετά υψηλό. Το κόστος αυτό έχει να κάνει τόσο με τη δημιουργία τους, όσο και με τη συλλογή των δεδομένων, την αποθήκευση και τη διαχείρισή τους, αλλά και τη στελέχωση των οργα-

νισμών που αναλαμβάνουν την ψηφιοποίηση ενός έργου τέχνης. Το κόστος φαίνεται να είναι μεγαλύτερο, από το γεγονός ότι τα οφέλη των εργασιών αυτών αποδίδονται κυρίως σε μελλοντικές γενιές.

2.5. Το Εικονικό Μουσείο

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η χρήση της στην πολιτική προώθησης της πολιτισμικής κληρονομιάς και η δημιουργία όλο και περισσότερων πολυδιάστατων μοντέλων έργων τέχνης λειτούργησαν ως βάση της ιδέας των Εικονικών Μουσείων (Virtual Museums). Η χρήση τους είναι επικουρική στη λειτουργία των μουσείων, και εφαρμόζεται σε τέσσερα κυρίως πεδία:

- Βελτιωμένες/εμπλουτισμένες παρουσιάσεις (χάρτες, οδηγοί, μεταφράσεις).
- Αύξηση πρόσβασης στις συλλογές (τρόποι παρουσίασης και προσέγγισής τους, ή και συμπλήρωσής τους σε περίπτωση έλλειψης κάποιων κομματιών).
- Εκπαίδευση.
- Δημοσιεύσεις (πληροφορίες για εκθέσεις, συλλογές κ.λπ.)

Το εικονικό μουσείο βασίζεται κυρίως στα όλο και περισσότερο διαδεδομένα τα τελευταία χρόνια γυαλιά εικονικής πραγματικότητας (VR). Χρησιμοποιώντας ένα ζευγάρι τέτοιων γυαλιών, ο χρήστης μπορεί να περιηγηθεί σε μια εικονική έκθεση και να έχει σφαιρική άποψη των αντικειμένων που ανήκουν σε αυτή. Στην απλή περιήγηση και κατόπτευση των αντικειμένων μπορεί να προστεθεί και ιστορικό-επεξηγηματικό κείμενο, καθώς επίσης και οδηγοί, ακουστικό υλικό κ.λπ. (<https://eclass.pat.teiwest.gr/eclass/modules/document/>).



Εικόνα 8 Το εικονικό μουσείο του Βατικανό

Η εικονική πραγματικότητα επιτρέπει στο χρήστη μια εντελώς καινούρια εμπειρία, με άμεσο τρόπο, πάντα εύκολα προσβάσιμη, χωρίς γεωγραφικά εμπόδια. Για κάθε αντικείμενο που επιλέγει ο χρήστης να παρατηρήσει, η εφαρμογή μπορεί να τον παραπέμψει σε άλλα, παρόμοια αντικείμενα που ίσως τον ενδιαφέρουν, ενώ μπορεί να του παρουσιάσει πληροφορίες και στοιχεία που υπάρχουν στο μουσείο αλλά δεν είναι ανοιχτές στο κοινό. Μέσω της εικονικής πραγματικότητας, ακόμα, είναι διαθέσιμα όλα τα αντικείμενα ενός μουσείου, χωρίς χωρικό περιορισμό, και επεξεργασμένα με τέτοιον τρόπο ώστε να μπορούν να ζουμαριστούν, να μελετηθούν από κάθε

σκοπιά, χωρίς όρια και προστατευτικά τζάμια. Τέλος, σε υψηλότερο επίπεδο, μπορούν να αναπαρασταθούν οπτικά ολόκληρα κτίρια, αλλά και χώροι στους οποίους ανήκει κάθε αντικείμενο, καθώς και οι ιστορικές συνθήκες κάτω από τις οποίες ένα αντικείμενο κατασκευάστηκε, ή, σε κάποια άλλη εποχή, ανακαλύφθηκε.

Η εκπαίδευση είναι ένας από τους βασικότερους τομείς στους οποίους μπορεί να συμβάλει η εφαρμογή του εικονικού μουσείου. Μέσω αυτής, εκπαιδευόμενοι και καθηγητές θα έχουν πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων που θα περιέχει χρήσιμες πληροφορίες και που θα ανανεώνεται και θα εμπλουτίζεται συνεχώς. Μαθητές και φοιτητές από όλο τον κόσμο θα έχουν πρόσβαση σε μουσεία τέχνης, φυσικής ιστορίας, ιστορικά μνημεία και οποιονδήποτε άλλο χώρο, χωρίς πρακτικά να μετακινούνται από τις τάξεις τους. Η είσοδος τέτοιων προγραμμάτων στα σχολεία θα κάνει την εκμάθηση μαθημάτων όπως η Τέχνη και η Ιστορία πιο προσιτά και ευχάριστα στους μαθητές, αφού θα μπορούν να περιηγηθούν σε νέους τόπους και μέρη και πραγματικά να δουν πολλά πράγματα και όχι απλώς να ακούσουν ή να διαβάσουν για αυτά, ενώ, αν η περιήγηση συνδυαστεί και με γραπτές πληροφορίες ή ακουστικό υλικό (μουσική, αφηγήσεις-περιγραφές), η εκπαιδευτική διαδικασία θα γίνει πιο ευχάριστη και πιο ουσιαστική. Από την άλλη, όφελος θα μπορούσαν να έχουν και φοιτητές και εκπαιδευτικοί, καθώς η τεχνολογία αυτή διευκολύνει την έρευνα και δίνει πρόσβαση σε πολλές κοιτίδες τέχνης και πολιτισμού μέσω μόνο ενός υπολογιστή. Αναμφίβολα, τα εργαλεία που θα στηρίζουν τη είσοδο των εικονικών μουσείων στην εκπαίδευση θα πρέπει να σχεδιαστούν προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη την ενσωμάτωση λειτουργιών όπως μαθησιακές αναλύσεις, εξόρυξη δεδομένων κ.ά., έτσι ώστε να προωθήσουν την υιοθέτηση προηγμένων εκπαιδευτικών μεθόδων (π.χ. εξατομικευμένη-συνεργατική εκπαίδευση, ενεργή μάθηση, ανακάλυψη γνώσης και όχι απλά αποστήθιση κ.λπ.). Αυτές οι δυνατότητες θα πρέπει να είναι αναπόσπαστο κομμάτι των εικονικών μουσείων, έτσι ώστε να μετατραπεί η εικονική επίσκεψη σε ένα μουσείο σε μια νέα μαθησιακή εμπειρία.



Εικόνα 9 Το εικονικό Μουσείο του Λούβρου

Τέλος, δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται η συμβολή των εικονικών μουσείων στην εκπαίδευση αλλά και την ψυχαγωγία ατόμων με κινητικές δυσκολίες και γενικότερα ατόμων ΜΕΑ, τα οποία δεν έχουν συχνά την ευκαιρία επίσκεψης χώρων τέχνης, λόγω δυσκολιών μετακίνησης, αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον ή λόγω έλλειψης των κατάλληλων υποδομών στους παραπάνω χώρους.

3. Ψηφιακή απεικόνιση αντικειμένων

3.1. Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια

Η κατασκευή ψηφιακών μοντέλων που αναπαριστούν αντικείμενα της πραγματικότητας γίνεται με ανακατασκευή επιφανειών ακριβείας από μη οργανωμένα νέφη σημείων. Τα νέφη αυτά μπορούν να αποκτηθούν κυρίως από σάρωση με σαρωτή laser και φωτογραμμετρικές μεθόδους (close range photogrammetry) που θα περιγραφούν παρακάτω. Αυτό είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα εν γένει, και, αν ακόμη τα δεδομένα είναι αποσπασματικά, δεν επαρκούν ή έχουν πολύ θόρυβο, η επίλυση του προβλήματος μπορεί να είναι αδύνατη. Η επεξεργασία των νεφών αυτών γίνεται με λογισμικά τα οποία δημιουργούν ένα πολυγωνικό πλέγμα (συνήθως τρίγωνα) βασισμένο στα σημεία που έχουν μετρηθεί, το οποίο αναπαριστά την επιφάνεια του αντικειμένου. Τομείς όπως ο κινηματογράφος, οι εταιρείες δημιουργίας Video games και εφαρμογών VR, το ηλεκτρονικό εμπόριο, χρησιμοποιούν εδώ και χρόνια τέτοιες τεχνικές, ενώ ο κατάλογος ολοένα και μεγαλώνει (Remondino, 2004).



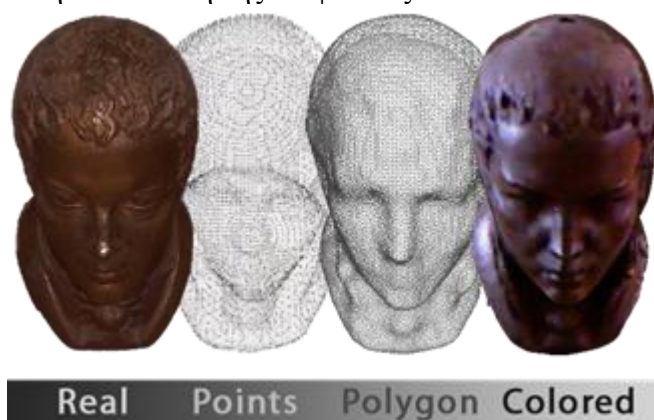
Εικόνα 10 Από το νέφος σημείων στην επιφάνεια

Γενικά, οι μέθοδοι ανακατασκευής ενός μοντέλου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν απαιτούνται ή όχι μετρήσεις, για την εξαγωγή της 3D πληροφορίας. Οι μέθοδοι που βασίζονται σε μετρήσεις, χρησιμοποιούν δεδομένα από εικόνες ή 3D αισθητήρες. Οι μέθοδοι που δεν απαιτούν μετρήσεις, επιτρέπουν τη γένεση 3D μοντέλου ξεκινώντας από απλά στοιχεία, όπως πολυγωνικά κουτιά, χωρίς να χρησιμοποιούν καμία μέτρηση που να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως σε Video games και ταινίες (Remondino, 2004). Παρακάτω θα γίνει αναφορά μόνο στις μεθόδους που χρησιμοποιούν μετρήσεις.

3.2. Ανακατασκευή επιφάνειας και μοντελοποίηση

Ο τρόπος ανακατασκευής μιας επιφάνειας, είναι, ουσιαστικά, ο εξής: δεδομένων των μετρημένων σημείων P τα οποία βρίσκονται πάνω σε μια επιφάνεια S , ο αλγόριθμος πρέπει να κατασκευάσει μια επιφάνεια S' που να προσεγγίζει την S . Οι δύο

επιφάνειες δεν μπορεί ποτέ να ταυτιστούν απόλυτα, βέβαια, αφού οι μετρήσεις αποτελούνται από πεπερασμένο αριθμό σημείων P , για αυτό και, όσο πιο πυκνό είναι το δείγμα των σημείων που έχουν καταγραφεί, και με όσο μικρότερο θόρυβο, τόσο καλύτερη θα είναι η τελική απεικόνιση της επιφάνειας S .



Εικόνα 11 Από το πρωτότυπο στο ανακατασκευασμένο μοντέλο

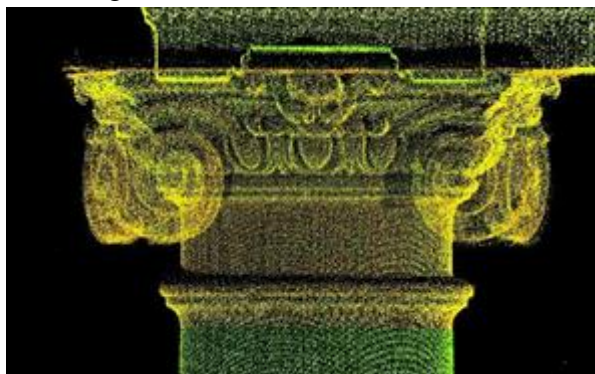
Το πρόβλημα της ανακατασκευής μιας επιφάνειας είναι ένα δύσκολο πρόβλημα, κυρίως γιατί τα σημεία που μετρώνται είναι ανοργάνωτα και σχεδόν πάντα περιέχουν θόρυβο, ενώ η επιφάνεια συχνά είναι αυθαίρετη, χωρίς τοπολογικό τύπο και με σαφή (sharp) χαρακτηριστικά. Επομένως, η μέθοδος θα πρέπει να συμπεράνει τη σωστή γεωμετρία, την τοπολογία και τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου μόνο από ένα πεπερασμένο δείγμα μετρήσεων. Αν τα δεδομένα δεν είναι καλής ποιότητας-σε πυκνότητα, διασπορά και θόρυβο, τότε το αποτέλεσμα δεν θα είναι το επιθυμητό. Έτσι, η κατάλληλη μέθοδος ανακατασκευής εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή, και για κάθε εφαρμογή, υπάρχει ο κατάλληλος αλγόριθμος. Οι αλγόριθμοι αυτοί διαχωρίζονται με βάση τον τύπο των δεδομένων που διατίθενται, τον τύπο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων, τη χωρική υποδιαίρεση των δεδομένων (ανοιχτές ή κλειστές επιφάνειες) (Remondino, 2004) κ.ά.

Η μετατροπή από μετρημένα δεδομένα σε μια συνεχή πολυγωνική επιφάνεια γίνεται σε τέσσερα βασικά βήματα:

- Προεπεξεργασία: απορρίπτονται τα εσφαλμένα δεδομένα ή λαμβάνεται δείγμα των σημείων ώστε να μειωθεί ο χρόνος επεξεργασίας.
- Προσδιορισμός της γενικής τοπολογίας της επιφάνειας του αντικειμένου: προσδιορίζονται οι σχέσεις γειτνίασης μεταξύ όμορων κομματιών της επιφάνειας. Εδώ συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο βήμα ταξινόμησης (sorting step) και ίσως κάποιοι περιορισμοί (όπως οι breaklines) κυρίως για τη διατήρηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών όπως οι γωνίες, οι ακμές κ.τ.λ.
- Δημιουργία της πολυγωνικής επιφάνειας: δημιουργούνται τριγωνικά (συνήθως) πλέγματα, ικανοποιώντας κάποιες ποιοτικές προϋποθέσεις.
- Μετά την επεξεργασία: όταν δημιουργηθεί το μοντέλο, υπόκειται σε επεξεργασία ώστε να ομαλοποιηθεί και να τελειοποιηθεί το πολυγωνικό πλέγμα (Remondino, 2004).

3.3.Μέθοδοι απόκτησης νεφών σημείων (απόκτηση δεδομένων)

Όπως αναφέρθηκε, η απόκτηση ψηφιακών μοντέλων είναι η διαδικασία απόκτησης μιας ψηφιακής αναπαράστασης ενός αντικειμένου με επαρκείς λεπτομέρειες και ακρίβεια, ώστε να αποτελεί ένα χρήσιμο αντίγραφο του αντίστοιχου πραγματικού κόσμου, που συνήθως παρουσιάζεται ως τρισδιάστατο μοντέλο. Συνήθως, οι επικρατέστερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την απόκτηση των μετρήσεων που είναι απαραίτητες για τη διαδικασία αυτή, είναι η επίγεια σάρωση με συσκευές λέιζερ (TLS-Terrestrial Laser Scanning)



Εικόνα 12 Νέφος σημείων από laser scanner

και η Μοντελοποίηση μέσω εικόνων (IBM-Image Based Modelling) και ειδικότερα η αναπαράσταση της δομής μέσω κίνησης στη φωτογραμμετρία (SfM-Structure from Motion).

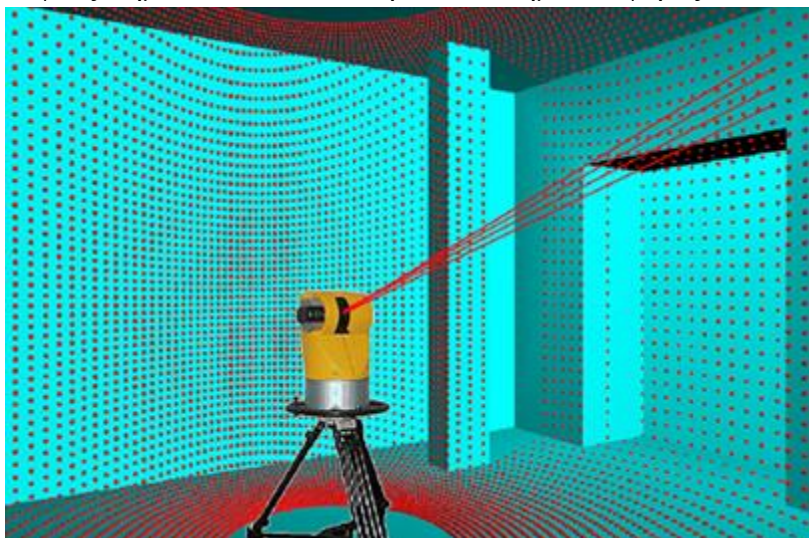


Εικόνα 13 Νέφος σημείων από φωτογραμμετρική μέθοδο

Η χρήση των laser scanner διαδόθηκε σε μεγάλο βαθμό στο παρελθόν στις γεωεπιστήμες, ενώ η μέθοδος SfM εφαρμόστηκε πρόσφατα στην απόκτηση δεδομένων για ψηφιακή αναπαράσταση, με πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Δεν υπάρχει σίγουρος τρόπος διεκρίνησης της καλύτερης μεθόδου και οι δύο έχουν θετικές και αρνητικές πτυχές, και η χρήση τους εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή.

3.3.1. Επίγεια Σάρωση με Laser (Terrestrial Laser Scanning-TLS)

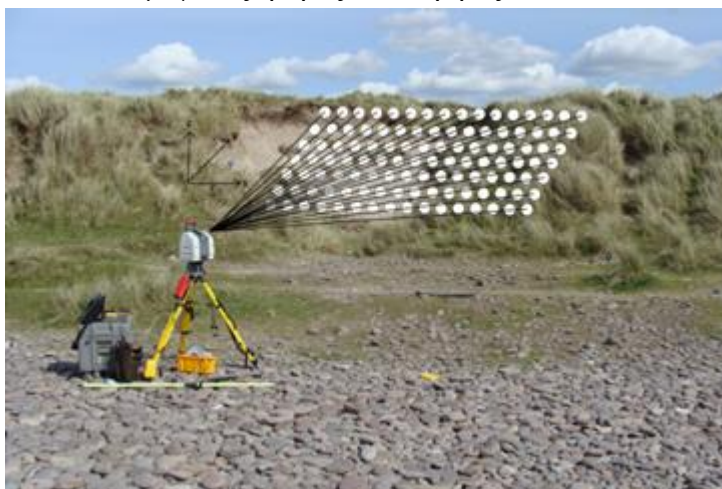
Το TLS, που είναι περισσότερο γνωστό από τον τρόπο μέτρησης που χρησιμοποιεί (lidar-light detection and ranging-ανίχνευση και εύρεση φωτός) έχει χρησιμοποιηθεί για τοπογραφική χαρτογράφηση από τα μέσα της δεκαετίας του 1990. Ο στόχος της μεθόδου αυτής, περιγράφεται εν συντομία ως εξής: με δεδομένα τα σημεία P_i (μετρήσεις), καλείται να φτιάξει το μοντέλο S' της επιφάνειας S . Όσο περισσότερα σημεία μετρηθούν, τόσο περισσότερο η επιφάνεια S' θα προσεγγίζει την S (χωρίς ποτέ να ταυτίζεται, αφού ο αριθμός των μετρήσεων, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι πεπερασμένος). Το ίδιο το Lidar χρησιμοποιεί μια σειρά τεχνικών μέτρησης με βάση το λέιζερ για τον προσδιορισμό συντεταγμένων τρισδιάστατων σημείων σε μια επιφάνεια-αντικείμενο σε σχέση με το όργανο, χρησιμοποιώντας τρεις τεχνικές ("pulse", "phase based", "triangulation"). Στις γεωεπιστήμες και την τοπογραφική χαρτογράφηση, η τεχνική "pulse" χρησιμοποιείται συχνότερα, δεδομένου ότι επιτρέπει μεγαλύτερο εύρος από τη "phase based" (πολύ γρήγορη λήψη και πυκνό σύννεφο σημείων, αλλά περιορισμένο βεληνεκές) και την "triangulation" (υψηλή ακρίβεια και πυκνότητα, αλλά πολύ μικρό βεληνεκές, <2 m) (Chandler & Buckley, 2016). Τα όργανα χρησιμοποιούν παλμούς φωτός λέιζερ και EDM χωρίς ανακλαστήρα, ενώ ένας μηχανισμός σάρωσης παρέχει γωνίες εκτροπής χρησιμοποιώντας ένα σύστημα καθρεφτών και / ή περιστρεφόμενη κεφαλή. Έτσι, τα γνωστά διανύσματα δίνουν τις μεμονωμένες τρισδιάστατες συντεταγμένες και, όταν συνδυαστούν, επιτρέπουν την απόκτηση ενός νέφους σημείων σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς.



Εικόνα 14 Ο τρόπος με τον οποίο σαρώνεται μια επιφάνεια από ένα laser scanner

Δεκάδες έως εκατοντάδες χιλιάδες σημεία συλλέγονται ανά δευτερόλεπτο, ενώ πολλαπλές σαρώσεις συλλέγονται από διαφορετικές θέσεις για να επιτευχθεί η πλήρης κάλυψη ενός αντικειμένου. Βέβαια, τα δεδομένα που καταγράφονται δεν είναι οργανωμένα, ενώ πολλές φορές περιέχουν θόρυβο ή δεν είναι επαρκή για να καταγράψουν μια επιφάνεια. Την εμφάνιση της τεχνολογίας των laser scanner όμως, ακολούθησαν γρήγορες και σημαντικές αλλαγές που βελτίωσαν την απόδοσή τους, όπως η ενσωμάτωση της ψηφιακής κάμερας για απόκτηση έγχρωμων δεδομένων, η αύξηση του ρυθμού απόκτησης δεδομένων, η ευκολία στη μεταφορά των οργάνων και η με-

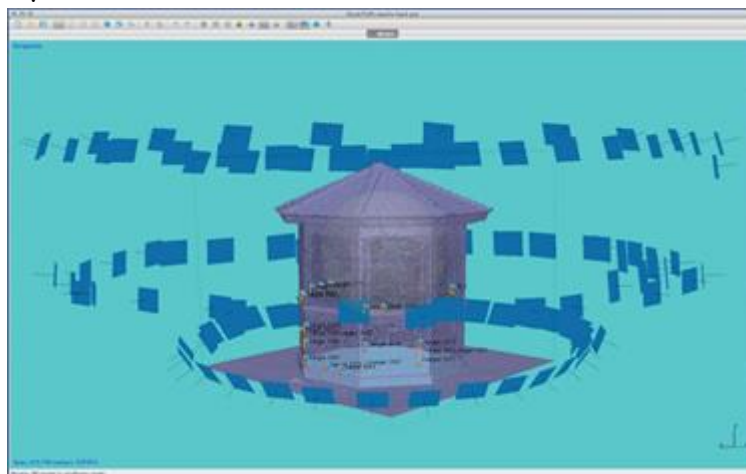
γαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους. Πιο πρόσφατα, η τεχνολογία επέτρεψε την καταγραφή πολλαπλών επιστροφών σε ένα μόνο αποτύπωμα laser, και την ενσωμάτωση των οργάνων με άλλους αισθητήρες, όπως οι κάμερες υψηλής ανάλυσης, καθιστώντας κάποια από αυτά μη κατάλληλα για ορισμένες εφαρμογές. Απαραίτητος είναι επομένως κάθε φορά ο σχεδιασμός του καταλληλότερου συνδυασμού ακρίβειας και εύρους για την κάθε εφαρμογή (Chandler & Buckley, 2016). Παρά την εξέλιξη της τεχνολογίας, βέβαια, υπάρχουν ακόμα περιθώρια βελτίωσης, κυρίως στο γεγονός ότι ο εξοπλισμός είναι πολύ μεγάλος, βαρύς και ακριβός.



Εικόνα 15 Σάρωση με Laser στο ύπαιθρο

3.3.2. Φωτογραμμετρική Ανακατασκευή και διαδικασία μοντελοποίησης Μέθοδος Structure from Motion (SfM)

Η διαδικασία της φωτογραμμετρικής ανακατασκευής χρησιμοποιεί μετρήσεις από μία ή περισσότερες εικόνες. Είναι αρκετά χρονοβόρα, απαιτεί διαδικασίες βαθμονόμησης της μηχανής και προσανατολισμού, δίνει όμως πολύ ακριβή αποτελέσματα, είναι οικονομική και προσαρμόσιμη σε κάθε εφαρμογή, από το πιο μικρό έως το πιο μεγάλο αντικείμενο.

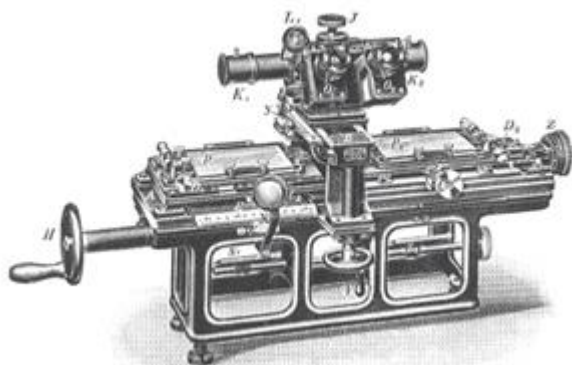


Εικόνα 16 Νέφος σημείων από φωτογραφίες

Σήμερα, η ανακατασκευή μέσω εικόνων είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη, για παράδειγμα με την ψηφιακή συνταύτιση των ομόλογων σημείων που χρη-

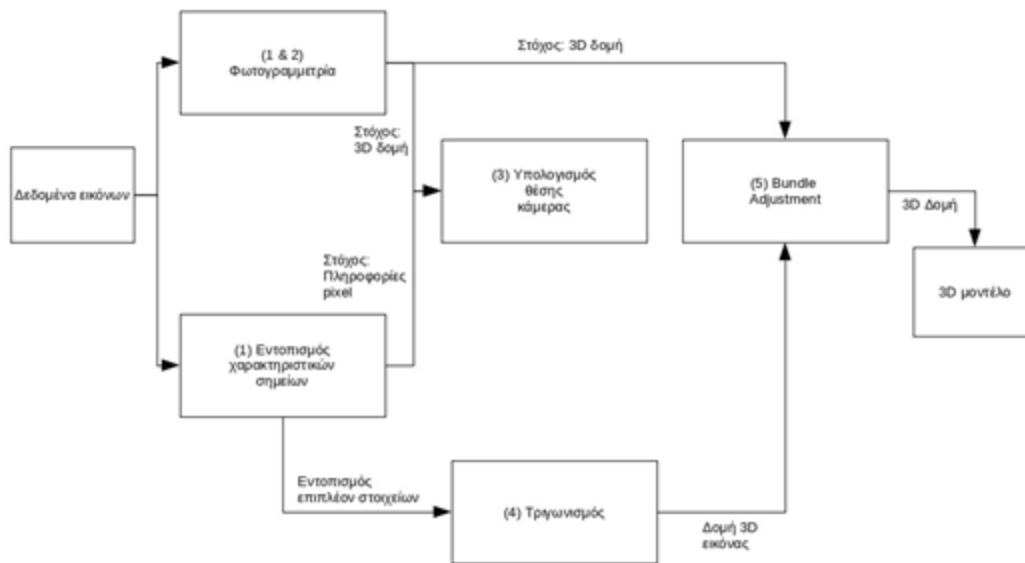
σιμοποιούνται για την ανακατασκευή του μοντέλου. Το γεγονός αυτό έχει μειώσει το χρόνο και δημιουργεί πυκνά νέφη σημείων, χωρίς αυτό να σημαίνει πως δεν υπάρχουν χονδροειδή λάθη, όπως για παράδειγμα, λάθος ομολογίες σημείων. Ακόμη, επειδή δουλεύουν με περιορισμούς ομαλοποίησης (smoothing constraints) είναι δύσκολο να δημιουργήσουν τυχαία παραγόμενα νέφη σημείων σε ποιοτική δομή, χωρίς την απώλεια χρήσιμης πληροφορίας. Παρόλα αυτά, η διαδικασία δίνει πολύ ποιοτικά αποτελέσματα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος φωτογραμμετρικής ανακατασκευής είναι η “Μέθοδος Δομής από Κίνηση” ή “Structure from Motion”.

Ο όρος “Structure from Motion” εξελίχθηκε από την κοινότητα της όρασης των υπολογιστών, ειδικά για την παρακολούθηση σημείων σε αλληλουχίες εικόνων που λαμβάνονται από διαφορετικές θέσεις. Ωστόσο, η μέθοδος SfM οφείλει την ύπαρξή της σε μαθηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν πριν από πολλά χρόνια στη Φωτογραμμετρία. Η φωτογραμμετρία είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει τους χάρτες του κόσμου από τη δεκαετία του 1920 και έχει εξελιχθεί τόσο ώστε να εκμεταλλευτεί τις ψηφιακές επεξεργασίας εικόνες για την αυτόματη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων και ορθοφωτογραφιών, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στο Google Earth (Chandler & Buckley, 2016).



Εικόνα 17 Η μηχανή Stereocomparator, του Carl Pulrich (Zeiss Jena, 1901), μία από τις πρώτες συσκευές που επέτρεψαν τη στερεοσκοπική φωτογραμμετρία

Με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων, αναγνωρίζονται και ταυτίζονται χαρακτηριστικά σημεία που εμφανίζονται σε πολλές εικόνες και καθορίζεται η χωρική σχέση μεταξύ των αρχικών θέσεων της κάμερας σε ένα αυθαίρετο και χωρίς κλίμακα σύστημα αναφοράς. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται μια μέθοδος εμπροσθοτομίας και παράγεται ένα αραιό σύνολο συντεταγμένων που περιγράφουν το αντικείμενο. Η πυκνότητα των σημείων ενισχύεται με διαδικασίες πυκνής συνταύτισης και γεννάται ένα νέφος σημείων υψηλής ανάλυσης και χρώματος από τα αρχικά δεδομένα (Chandler & Buckley, 2016).



Εικόνα 18 Δημιουργία ενός 3D μοντέλου με Φωτογραμμετρία

Η χρήση της μεθόδου SfM, παρότι δεν προσφέρει σε πολλές περιπτώσεις την υψηλή ακρίβεια των laser scanner, έχει πολλά πλεονεκτήματα (η μέθοδος TLS παρέχει δεδομένα με εσωτερική εγκυρότητα-intrinsically validated-και πιο εύρωστη (robust) διαδικασία απόκτησης δεδομένων σε μεγάλο φάσμα εφαρμογών).

SfM		TLS	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Οικονομική μέθοδος	Εξάρτηση αποτελεσμάτων από την ακρίβεια των εικόνων	Εύρωστη διαδικασία	Ακριβή μέθοδος
Εύχρηστος εξοπλισμός	Χρονοβόρα διαδικασία	Υψηλή αξιοπιστία	Βαρύς και ακριβός εξοπλισμός
Μεγάλη ακρίβεια		Πολύ μεγάλη ακρίβεια	Μη οργανωμένα δεδομένα
Ευελιξία κλίμακας		Κατάλληλη ακόμα και για ομοιόμορφες επιφάνειες	Ύπαρξη τυφλών σημείων

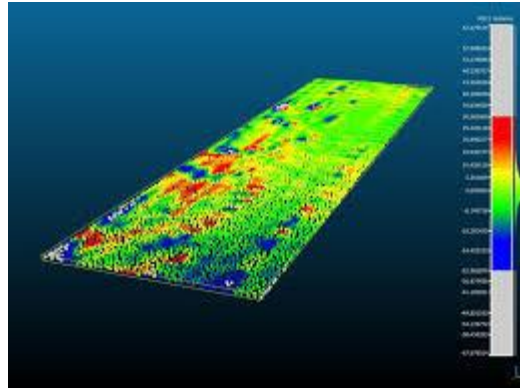
Εικόνα 19 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων TLS και SfM

Τα σύνολα δεδομένων που καταγράφονται με τη μέθοδο SfM μπορεί να περιέχουν συστηματικές ανακρίβειες σε σχέση με αυτά που καταγράφονται από laser scanner. Αυτές οι ανακρίβειες σχετίζονται με την προσέγγιση τριγωνισμού της δομής από κίνηση, η οποία διαφέρει από την παλμική προσέγγιση που χρησιμοποιεί το laser scanner. Απαιτείται μια περίπλοκη προσέγγιση ώστε η μέθοδος SfM να δώσει συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά του laser scanner, στις περισσότερες περιπτώσεις.

Από την άλλη, σαν μέθοδος είναι πιο οικονομική και εύκολα προσαρμόσιμη στην εκάστοτε εφαρμογή και έχει πιο ελαφρύ εξοπλισμό. Ακόμα, το γεγονός ότι λαμβάνονται κάθε φορά πολλές εικόνες από διαφορετικές θέσεις λήψης έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται τα «τυφλά σημεία» που μπορεί να δημιουργηθούν στο παράγωγο αποτέλεσμα, επειδή το laser δεν μπορεί να καταγράψει κάποια σκοτεινά σημεία. Σε αυτό θα πρέπει να προστεθεί και η ευελιξία της κλίμακας των φωτογραμμετρικών μεθόδων. Η ακρίβεια κάθε φωτογραμμετρικής επίλυσης είναι ευθέως σχετιζόμενη με τη γεωμετρία και την κλίμακα των εικόνων που έχουν ληφθεί, επομένως η ακρίβεια είναι ανάλογη της κλίμακας και αν η γεωμετρία των εικόνων και η βαθμονόμηση της φωτογραφικής μηχανής είναι κατάλληλες, τότε μια φωτογραμμετρική λύση μπορεί να αποφέρει αποτελέσματα υψηλότερης ακρίβειας από ό,τι η επίλυση με laser scanner. Αναμφίβολα, για να παραχθούν υψηλής ποιότητας αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να είναι και οι εικόνες υψηλής ποιότητας, να είναι εστιασμένες και με όσο το δυνατόν λιγότερο θόρυβο. Πρέπει ακόμη να παρέχουν κατάλληλη κάλυψη (κάθε σημείο αναφοράς να εντοπίζεται σε τουλάχιστον τρεις λήψεις) και να έχουν την κατάλληλη γεωμετρία (να αποκτηθούν δηλαδή από διαφορετικές θέσεις λήψης). Σε περίπτωση που η τελευταία προϋπόθεση δεν είναι εφικτή, οι εικόνες λαμβάνονται με εγγενώς αδύναμη γεωμετρία, και, σε συνδυασμό με τις ανακρίβειες που συνήθως υπάρχουν στη βαθμονόμηση της κάμερας, θα οδηγήσουν σε ανακρίβειες και στην απόδοση του αντικειμένου. Τέλος, καθώς η φωτογραμμετρία SfM βασίζεται σε πανομοιότυπα χαρακτηριστικά που βρίσκονται μεταξύ πολλαπλών εικόνων, ενδέχεται να μην είναι κατάλληλη για τη δημιουργία 3D δεδομένων από επιφάνειες αντικειμένων με ομοιόμορφο χρώμα ή υφή, σε αντίθεση με την μέθοδο TLS (Chandler & Buckley, 2016).

3.4.Συμπέρασμα

Ο σαρωτής laser προσφέρει πλεονεκτήματα σε όρους ακρίβειας, επαναληψιμότητας και αξιοπιστίας και μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ως το "χρυσό πρότυπο" για 3D μετρήσεις. Η μέθοδος SfM είναι οικονομικότερη, γρηγορότερη, αυτοματοποιημένη και επιτρέπει σαφή καταγραφή εικόνας, καθιστώντας την τεχνική ανταγωνιστικότητα και τη χρήση της όλο και πιο διαδεδομένη, ιδιαίτερα σε αντικείμενα μικρού και μεσαίου μεγέθους, και σε σχετικά μικρές αποστάσεις. Και για τις δύο μεθόδους, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι επεξεργασίας δεδομένων και ανακατασκευής 3D επιφανειών, που χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την ποιότητα (τύπο) των δεδομένων, τον τρόπο αναπαράστασης της επιφάνειας κ.ά. Έτσι, η μέθοδος που ενδείκνυται κάθε φορά, εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Τέλος, το γεγονός ότι και οι δύο τεχνικές μπορούν να δημιουργήσουν νέφη σημείων πολύ υψηλής ανάλυσης, αποτελούμενα από εκατομμύρια 3D σημεία, δημιουργεί προκλήσεις όσον αφορά την αποθήκευση δεδομένων και το υλικό επεξεργασίας και οι χρήστες πρέπει να εξετάσουν κάθε φορά ποιες πληροφορίες είναι απαραίτητο να εξάγονται, πέρα από την απλή απεικόνιση.



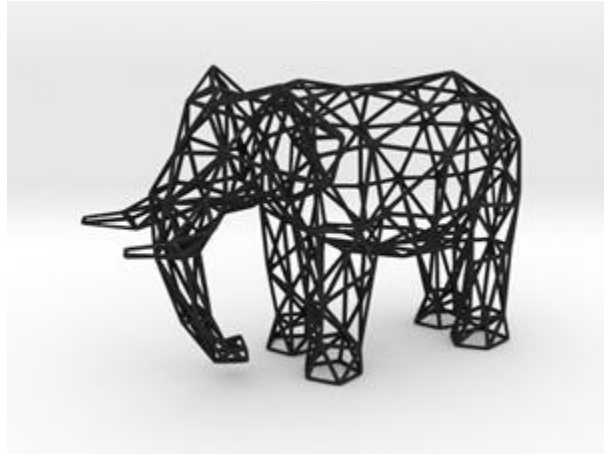
Εικόνα 20 Νέφη σημείων από φωτογραφίες (μπροστά) και σάρωση με laser (πίσω)

3.5. Τρόποι παρουσίασης και απεικόνισης των αποτελεσμάτων

Σε πολλές εφαρμογές, όπως στην παρακολούθηση σωματιδίων, στην αναπαράσταση ομίχλης, βροχής και σύννεφων και σε πολύ μεγάλα νέφη σημείων, τα δεδομένα μπορούν να παρουσιαστούν με απλή σχεδίαση των δειγμάτων. Όμως, για την πλειονότητα των περιπτώσεων, η τεχνική αυτή δε δίνει πολύ καλά και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η οπτικοποίηση ενός 3D μοντέλου είναι συχνά το μόνο προϊόν που ενδιαφέρει, ενώ αποτελεί και τη μόνη σύνδεση με το μοντέλο, επομένως πρέπει να είναι ακριβής και ρεαλιστική. Στη φωτογραμμετρική κοινότητα, οι πρώτες προσπάθειες για οπτικοποίηση έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του 90. Εκτέθηκαν μικρά αντικείμενα σε μορφή wireframe (μόνο ο σκελετός μιας κατασκευής) ή χρησιμοποιώντας πακέτα CAD, ενώ οπτικοποιήθηκαν μοντέλα εδάφους με μορφή σκελετού και τη βοήθεια ορθοφωτογραφιών ή ορθοφωτοχαρτών. Σήμερα, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, έχουν προστεθεί στις κατασκευές σκιά και χρώμα, όμως προκειμένου να οπτικοποιηθούν με ακρίβεια μεγάλα σετ δεδομένων, πρέπει να μειωθεί πολλή πληροφορία που περιέχεται σε φωτογραμμετρικά μοντέλα. Ως αποτέλεσμα, μειώνεται η ακρίβεια, και άρα η γεωαναφορά (τα περισσότερα προγράμματα έχουν δικό τους σύστημα συντεταγμένων) δεν είναι απολύτως επιτυχής, ενώ οι υφές υψηλής ανάλυσης δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, επειδή έχουν πάρα πολλές λεπτομέρειες.

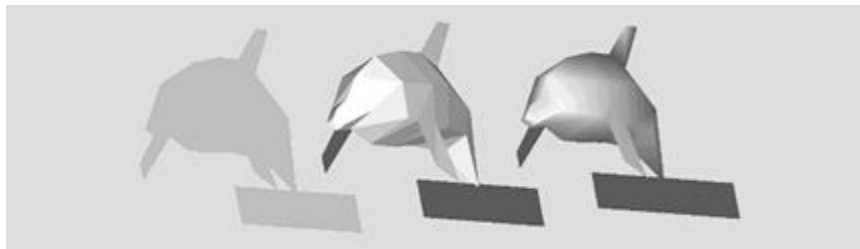
Σήμερα, υπάρχουν πολλοί τρόποι παρουσίασης ενός ψηφιακού μοντέλου, κάποιιοι από τους οποίους παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

Wireframe (σκελετός κατασκευής): είναι ο πιο εύκολος τρόπος. Αποτελείται από σημεία, γραμμές και καμπύλες που περιγράφουν μόνο τις γωνίες σε ένα διαφανές σχέδιο, χωρίς υφή ή πληροφορία χρώματος. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως σε πακέτα CAD.



Εικόνα 21 Wireframe οπτικοποίηση 3D μοντέλου

Σκίαση (shaded mode): είναι μέθοδος βασισμένη στην οπτική θεωρία που λέει ότι η φωτεινότητα κάθε μικρού αντικειμένου (πολυγώνου) μιας απόλυτα διάχυτης κυματοειδούς επιφάνειας προκύπτει ως το συνημίτονο της γωνίας του προσπίπτοντος παράλληλου φωτός. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι αυτού του είδους, με γνωστότερους τους flat shading και τους smooth shading. Οι αλγόριθμοι flat shading χρησιμοποιούνται κυρίως για μικρά αντικείμενα και αν η πηγή φωτός και ο παρατηρητής είναι στο άπειρο. Οι πιο κλασσικές προσεγγίσεις smooth shading είναι οι Gouraud και Phong. Η πρώτη δίνει ένα χρώμα σε κάθε κορυφή και πολύγωνο και μετά τα ενδιάμεσα χρώματα σε κάθε γωνία με παρεμβολή ανάμεσα στις κορυφές. Η δεύτερη απαιτεί μια κανονικοποιημένη παρεμβολή για κάθε pixel, πράγμα που την κάνει υπερβολικά χρονοβόρα.



Εικόνα 22 Shaded οπτικοποίηση 3D μοντέλου

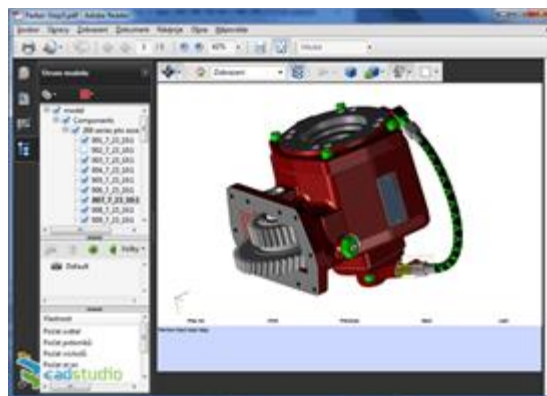
Υφή (textured mode): χρησιμοποιείται για φωτορεαλιστικές απεικονίσεις των 3D μοντέλων (απεικόνιση με βάση εικόνες). Η αντιστοίχιση υφής (texture mapping) στην πιο απλή μορφή της περιλαμβάνει μια μοναδική υφή (εικόνα, ορθοφωτογραφία) που αντιστοιχίζεται στην επιφάνεια που αποτελείται από ένα ή περισσότερα πολύγωνα. Όταν αντιστοιχίζεται μία εικόνα σε ένα αντικείμενο, το χρώμα του αντικειμένου σε κάθε pixel τροποποιείται από το αντίστοιχο χρώμα που εξάγεται από την υφή. Σε σχέση με την τεχνική Flat Shading, η αντιστοίχιση υφής μπορεί να μειώσει τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων πολυγώνων, αλλά αυξάνει το βάρος του μοντέλου.



Εικόνα 23 Textured οπτικοποίηση 3D μοντέλου

Τέλος, σε περίπτωση μοντέλου εδάφους (DTM), άλλοι συνηθισμένοι τρόποι παρουσίασης είναι οι χάρτες ισοϋψών, τα μοντέλα απόχρωσης (υψομετρική σκίαση) και οι χάρτες κλίσης (Remondino, 2004).

Δημοσίευση σε PDF: τα τελευταία χρόνια, τα έγγραφα PDF δίνουν τη δυνατότητα δημοσίευσης δεδομένων 3D, και μάλιστα με ενσωματωμένες πληροφορίες και σχολιασμούς για το κάθε αρχείο, ακόμα και link προς σχετικές ιστοσελίδες. Οι μορφές που υποστηρίζονται είναι όψεις από σημεία ή όλο το μοντέλο, διαφανείς ή στέρρες όψεις του μοντέλου, όψεις του σκελετού, φωτισμός, χρώμα, θέσεις κάμερας κ.λπ., όπως επίσης και πρόσθετες μορφές που δεν υπάρχουν στο αρχικό 3D προϊόν, όπως 3D γεωμετρία ή 2D γραφικά. Περισσότερη επεξεργασία, είναι βέβαια απαραίτητη, όσο περισσότερα χαρακτηριστικά είναι επιθυμητό να περιέχει το PDF έγγραφο, κάτι που βέβαια το καθιστά πιο μεγάλο σαν αρχείο, και πιο αργό στη χρήση του.



Εικόνα 24 3D μοντέλο σε αρχείο 3D PDF

Γενικά, η δημιουργία ρεαλιστικών 3D μοντέλων (απόχρωσης ή υφής) βοηθά στην απεικόνιση των αποτελεσμάτων πολύ καλύτερα από ό,τι με μια μακέτα σκελετού, στην οποία δεν είναι εύκολο να διακρίνει κανείς από ποιο σημεία φαίνεται το μοντέλο. Η απόφαση για το ποιος τύπος μοντέλου πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι ανάγκες της εργασίας, ο διαθέσιμος χρόνος, και τα διαθέσιμα λογισμικά.

4. Προηγούμενες εργασίες αποτύπωσης γλυπτών

Στη συνέχεια παρουσιάζονται παραδείγματα 3D μοντελοποίησης έργων τέχνης, που έγιναν με μεθόδους φωτογραμμετρίας ή σαρώσεων laser, ή ακόμα και με συνδυασμό των δύο μεθόδων. Οι εργασίες αυτές πραγματοποιήθηκαν αρκετά χρόνια πριν· έτσι, η τεχνολογία που χρησιμοποιούν έχει πλέον εξελιχθεί και βελτιωθεί κατά πολύ στα χρόνια που ακολούθησαν. Παρόλα αυτά, αποτελούν πηγές βαθιάς επιστημονικής γνώσης και χρησιμοποιούνται ως παραδείγματα και ως σημείο αναφοράς.

4.1. Το πρόγραμμα του 'Ψηφιακού Μιχαήλ Άγγελου'



Εικόνα 25 Ο Δαυίδ του Μιχαήλ Άγγελου

Αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα παρόμοιων εργασιών και η απόκτηση των απαραίτητων δεδομένων έγινε με χρήση μόνο laser scanner. Πραγματοποιήθηκε το 1998-1999, από μία ομάδα 30 ατόμων των πανεπιστημίων του Στάνφορντ και της Ουάσινγκτον. Αντικείμενο έρευνας αποτελούσε ένας αριθμός έργων του Μιχαήλ Άγγελου, με σκοπό την καταγραφή και μελέτη του έργου του γλύπτη στο σύνολό του. Πιο συγκεκριμένα, καταγράφηκαν με χρήση laser scanner 10 αγάλματα, δύο εσωτερικά κτιρίων και τα 1163 κομμάτια της Forma Urbis Romae, ενός γιγάντιου μαρμάρινου χάρτη της αρχαίας Ρώμης (Levoy et al., 2000).

Σκοπός της εργασίας αυτής δεν ήταν μόνο η καταγραφή του σχήματος και του χρώματος των γλυπτών, αλλά η αρχειοθέτηση όσο γινόταν περισσότερων έργων τέχνης με όσο περισσότερη λεπτομέρεια επέτρεπε η τότε υπάρχουσα τεχνολογία, αλλά και η μελέτη της ίδιας της τεχνοτροπίας του καλλιτέχνη, έτσι ώστε να είναι πιθανώς δυνατή ακόμη και η ανακατασκευή κομματιών που λείπουν, στο μέλλον. Εκτός από

το σχήμα, επιθυμητή ήταν και η καταγραφή χρώματος, ή, πιο σωστά, η καταγραφή της επιφανειακής αντανάκλασης κάθε σημείου στα αγάλματα που σαρώθηκαν. Αν και αυτή η τεχνική είναι πιο δύσκολη από την απλή καταγραφή χρώματος, επιτρέπει το φωτισμό του αγάλματος κατά την ερμηνεία του, ενώ αποτελεί μια πολύ χρήσιμη πηγή επιστημονικής γνώσης: τα αρχαία αγάλματα είναι καλυμμένα με ένα πλέγμα από φλέβες μαρμάρου, σκόνη, κερία από προηγούμενες προσπάθειες ανακατασκευής και συντήρησης και έχουν υποστεί αποχρωματισμό και φθορά από τη μακροχρόνια έκθεσή τους στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Όλα αυτά δίνουν στοιχεία για την ιστορία κάθε αγάλματος, από τη σφυρηλάτησή τους και μετά. Για αυτό το λόγο, ο Δαβίδ σαρώθηκε κάτω από λευκό και υπεριώδη φωτισμό ξεχωριστά.

Για τις ανάγκες της εν λόγω εργασίας κατασκευάστηκε ένας σαρωτής τριγωνισμού και ένας μηχανοκίνητος γερανός, ειδικά για την ψηφιοποίηση μεγάλων αγαλμάτων. Κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο γιατί οι απαιτήσεις του έργου ήταν μεγάλες: έπρεπε να καταγραφούν σημάδια σμίλης μικρότερα του 1mm, από ασφαλή απόσταση, και έπρεπε να καταγραφεί ολόκληρο το άγαλμα του Δαβίδ, που ήταν ύψους 7m μαζί με τη βάση του. Επιλέχθηκε να κατασκευαστεί μοντέλο laser scanner τεχνολογίας τριγωνισμού σε λωρίδες (laser-stripe triangulation), καθώς αυτή προσέφερε τον καλύτερο συνδυασμό ακρίβειας, όγκου εργασίας, στιβαρότητας και φορητότητας εξοπλισμού. Κατασκευάστηκε επίσης έτσι, ώστε να είναι ελάχιστη δυνατή η γραμμή βάσης, και, ως αποτέλεσμα, ελάχιστη δυνατή και η κεφαλή σάρωσης.



Εικόνα 26 Ο σαρωτής laser και ο γερανός που κατασκευάστηκαν

Όσον αφορά την ακρίβεια, μετά από δοκιμές, αποφασίστηκε η Y απόσταση δειγμάτων να είναι 1/4mm (κατά μήκος της λωρίδας σάρωσης) και η Z ανάλυση (βάθος) τουλάχιστον διπλάσια από αυτή την τιμή, έτσι ώστε να υπάρχει μέγιστη ακρίβεια και ο όγκος των δεδομένων να είναι διαχειρίσιμος. Με ανάλογο τρόπο επιλέχθηκε και η απόσταση τοποθέτησης της κεφαλής σάρωσης: επιλέχθηκε να τοποθετηθεί στα 112 cm από το άγαλμα, έτσι ώστε να υπάρχει ακριβής καταγραφή δεδομένων από ασφαλή για το άγαλμα απόσταση, χωρίς αυτό να σημαίνει πως η απόσταση αυτή ήταν άριστη, καθώς πολλές φορές κάποιο κομμάτι έπρεπε να σαρωθεί από πιο μακριά ή από πιο κοντά.

Για την καταγραφή χρώματος, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί διαφορετικός αισθητήρας, ανεξάρτητα από την καταγραφής της γεωμετρίας, με μια κάμερα υψηλής ανάλυσης.



Εικόνα 27 Φωτογραφία του αγάλματος κάτω από υπεριώδη φωτισμό

Η εστίαση της κάμερας κλειδώθηκε στα 112cm, και χρησιμοποιήθηκε φακός 25 mm, ο οποίος έδωσε οπτικό πεδίο 25cmx19cm στην επιφάνεια του αγάλματος. Καταγράφηκε επίσης χρώμα σε μεγαλύτερη ανάλυση από τα δεδομένα γεωμετρίας, και τα αποτελέσματα συγχωνεύτηκαν, πράγμα που διευκόλυνε κατόπιν τη 3D παρουσίαση του μοντέλου, αφού το χρώμα αποδόθηκε σε κάθε κορυφή τριγώνου και όχι σαν υφή στα τρίγωνα του πλέγματος που δημιουργήθηκε ακολούθως κατά την επεξεργασία των δεδομένων.

Η διαδικασία σάρωσης γινόταν σε δωρες βάρδιες, στη διάρκεια των οποίων πραγματοποιούνταν 10-15 σαρώσεις. Η επιφάνεια σάρωσης καθοριζόταν κάθε φορά βάσει του οπτικού πεδίου και των περιορισμών στην κίνηση του σαρωτή, της πτώσης της ποιότητας της σάρωσης με την αύξηση της κλίσης του λέιζερ, των αποκρύψεων λόγω του λέιζερ ή της οπτικής γραμμής της κάμερας και των φυσικών εμποδίων, όπως τοίχοι, ο γερανός ή και το ίδιο το άγαλμα.

Σάρωση γεωμετρίας: η καταγραφή έγινε σε σειρές σάρωσης με επικάλυψη 40% μεταξύ τους, που αποτελούνταν από κυρτά κελύφη διαστάσεων με επικάλυψη 15 %.

Σάρωση χρώματος: δεδομένου ότι το οπτικό πεδίο και το βάθος πεδίου της έγχρωμης κάμερας ήταν μεγαλύτερο από αυτό της μηχανής εύρους, οι εικόνες χρώματος ελήφθησαν πιο αραιά σε σχέση με τις εικόνες γεωμετρίας.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε σε αυτή την εργασία ήταν η έλλειψη σχεδιασμού για τον τρόπο σάρωσης, έτσι ώστε να καλυφθούν όλες οι τρύπες σωστά. Εφόσον δε υπήρχε άλλος τρόπος, οι σαρώσεις υπολογίζονταν με το μάτι, μια διαδικασία αργή και επιρρεπής σε λάθη, που υπολογίστηκε πως προσέθεσε 25% περισσότερες-περιττές-εργατοώρες στο εγχείρημα. Ακόμα, για τις δυσπρόσιτες περιοχές, χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητος σαρωτής laser, ο οποίος ήταν βαρύς στη χρήση, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αδύνατη η απόκτηση ομαλών δεδομένων και να εισαχθούν σφάλματα στις μετρήσεις εύρους, που κατέστησαν δύσκολη τη μετέπειτα επεξεργασία. Η τεχνική αυτή δεν χρησιμοποιήθηκε για τον Δαβίδ.

Ένα ακόμη θέμα που προέκυψε ήταν η προστασία των γλυπτών. Ο σαρωτής laser δεν έρχεται σε επαφή με τα έργα τέχνης. Όμως το φως και η θερμότητα του laser μπορούν να τα βλάψουν, για αυτό και η ισχύς τους πρέπει να ορίζεται με προσοχή. Με προσοχή έπρεπε ακόμη να τοποθετηθεί και ο επιπλέον φωτισμός, έτσι ώστε να μην επηρεάσει το άγαλμα κατά την καταγραφή χρώματος. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με τη χρήση ενός καλωδίου οπτικών ινών που μετέφερε το φως στην κεφαλή σάρωσης και εμπόδιζε τη θερμότητα προς την κατεύθυνση των έργων τέχνης. Τέλος,

ο σοβαρότερος κίνδυνος που έπρεπε να αντιμετωπιστεί ήταν αυτός της σύγκρουσης των μηχανημάτων με το άγαλμα, στις περιπτώσεις όπου η σάρωση έπρεπε να γίνει από πολύ μικρή απόσταση. Έτσι, ο σχεδιασμός των κινήσεων της κεφαλής σάρωσης έγινε με το χέρι και όχι με χρήση λογισμικού, τοποθετήθηκαν διακόπτες διακοπής κίνησης στις οριζόντιες και κάθετες ράγες κίνησης της κεφαλής σάρωσης, και ένα μέλος της ομάδας κατόπτευε συνεχώς τις εργασίες.

Μετά από κάθε σάρωση, το αποτέλεσμα υφίστατο μια πολύπλοκη διαδικασία, τελικός σκοπός της οποίας ήταν η παραγωγή ενός πολυγωνικού πλέγματος με τιμές ανάκλασης για κάθε κορυφή τριγώνου.

Για την επεξεργασία των δεδομένων εύρους, οι σαρώσεις προσανατολιζόνταν, συγχωνεύονταν έτσι ώστε να κατασκευαστεί μια συνεχόμενη επιφάνεια, και κατόπιν γινόταν το κλείσιμο των τρυπών, οι οποίες ήταν αρκετές λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας των γλυπτών. Γενικά, η διαδικασία της επεξεργασίας ήταν αρκετά επιτυχής, ήταν όμως χρονοβόρα. Ο χρόνος επεξεργασίας θα μπορούσε να είναι μικρότερος, αν είχε γίνει καλύτερος υπολογισμός της θέσης και του προσανατολισμού του γερανού. Ακόμα, κάποια λάθη κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης έγιναν φανερά σαν σφάλματα στον προσανατολισμό των σαρώσεων, αντισταθμίστηκαν όμως από την ευρωστία του λογισμικού που εκτέλεσε τον προσανατολισμό των σαρώσεων.

Η επεξεργασία των δεδομένων χρώματος περιελάμβανε γεωμετρική και ραδιομετρική διόρθωση του χρώματος, απορρίπτοντας τα εικονοστοιχεία που αποκρύπτονταν σε σχέση με την κάμερα ή το φως, προβάλλοντας όλα τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία στο πλέγμα, και μετατρέποντας το χρώμα σε ανάκλαση. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας ήταν μια τριπλέτα RGB ανάκλασης για κάθε κορυφή του πλέγματος. Αρχικά, οι αντίστοιχες εικόνες που είχαν ληφθεί με και χωρίς προβολέα αφαιρούνταν, και το αποτέλεσμα ήταν μία εικόνα κατάλληλα φωτισμένη, η οποία διορθωνόταν για γεωμετρική διαστροφή, χρωματική εκτροπή και ραδιομετρική επίδραση. Στη συνέχεια, γινόταν έλεγχος για το ποιες κορυφές του πλέγματος έβλεπαν και την κάμερα και την πηγή φωτισμού, και, όσες πληρούσαν αυτό τον κανόνα, προβάλλονταν πίσω στην εικόνα της κάμερας και από εκεί έπαιρναν το αντίστοιχο χρώμα. Αφού κάθε κορυφή είχε συνδεθεί με ένα χρώμα, γινόταν ένας αντίστροφος υπολογισμός φωτισμού, για να μετατραπεί το χρώμα σε ανάκλαση. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται 'deshading'. Κάθε κορυφή του πλέγματος 'έβλεπε' συνήθως πολλές χρωματιστές εικόνες. Αν η επιφάνεια ήταν ιδανική, τότε οι υπολογιζόμενες τιμές ανάκλασης θα συμφωνούσαν μεταξύ τους. Όμως, οι παρατηρήσεις περιείχαν θόρυβο, λανθασμένη βαθμονόμηση και άλλου είδους σφάλματα, επομένως οι ανακλάσεις έπρεπε να αναμιχθούν, έτσι ώστε να δώσουν μία τελική τιμή σε κάθε κορυφή.



Εικόνα 28 Ψηφιακό μοντέλο του Δαβίδ

Η μεγαλύτερη πρόκληση που παρουσιάστηκε, ήταν το μέγεθος των αρχείων δεδομένων, από τα οποία το μεγαλύτερο ήταν αυτό για τον Δαβίδ-2 δισεκατομμύρια πολύγωνα και 7000 έγχρωμες εικόνες. Κατά την επεξεργασία των δεδομένων, το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με τη χρήση ενός αλγορίθμου συνολικού προσανατολισμού (global alignment). Και η διαδικασία σάρωσης έθεσε επιπλέον προκλήσεις. Για να σχεδιαστούν οι σαρώσεις για ένα άγαλμα, έπρεπε να φορτωθεί το 3D μοντέλο του στη μνήμη του υπολογιστή. Κάθε ολοκληρωμένη σάρωση, έπρεπε να προστεθεί γρήγορα στο μοντέλο. Κατά την περίοδο διεξαγωγής της εργασίας, δεν υπήρχε πρόγραμμα μοντελοποίησης το οποίο να μπορεί να διαχειριστεί αρχεία των 2 δις. πολύγωνων, ούτε γνωστός αλγόριθμος απλοποίησης που να μπορούσε να 'τρέξει' σε ένα πλέγμα αυτού του μεγέθους. Έτσι, ξοδεύτηκε πολύς χρόνος στο να γραφτεί κώδικας που να μπορεί να διαχειριστεί τόσο μεγάλα αρχεία, κάτι το οποίο επιτεύχθηκε, μετά από αρκετές δοκιμές.

Παραπάνω περιγράφηκε ένα σύστημα ψηφιοποίησης του σχήματος και του χρώματος μεγάλων αγαλμάτων, με χρήση της πιο σύγχρονης για την εποχή τεχνολογίας, και η εφαρμογή του στο έργο του Μιχαήλ Άγγελου. Στην προσπάθεια απόκτησης και επεξεργασίας των δεδομένων, εφευρέθηκαν νέοι τρόποι προσανατολισμού, συγχώνευσης, παρουσίασης και οπτικοποίησης μεγάλων 3D μοντέλων. Παρά τις δυσκολίες που προέκυψαν και την αδυναμία επίλυσης μερικών από αυτές, το έργο αυτό

αποτελεί καινοτόμο βήμα για την εποχή που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε, και είναι ακόμη και σήμερα χρήσιμο παράδειγμα και οδηγός για παρόμοιες εργασίες (Levoy et al., 2000).

4.2.3D τεκμηρίωση του αγάλματος του χάσκι στο Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν χρησιμοποιώντας φωτογραμμετρική προσέγγιση κλειστού εύρους



Εικόνα 29 Το γλυπτό του χάσκι στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν

Το φθινόπωρο του 2014, το άγαλμα ενός σκύλου χάσκι ύψους 3m ανεγέρθηκε στην πανεπιστημιούπολη του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου του Μίσιγκαν. Το χάσκι είναι η μασκότε του πανεπιστημίου, και ένα σύμβολο των χιονισμένων δασών όπου βρίσκεται η πανεπιστημιούπολη. Μία ομάδα τελειόφοιτων αποφάσισε να χρησιμοποιήσει φωτογραμμετρία για τη δημιουργία του μοντέλου του αγάλματος, με σκοπό την πραγματοποίηση μεγάλης ακρίβειας μετρήσεων επιφάνειας και όγκου (Champion et al., 2015). Ακόμα, υπήρχε η επιθυμία της δημοσίευσης του μοντέλου στο διαδίκτυο, έτσι ώστε μαθητές και φίλοι του πανεπιστημίου να μπορούν να δουν το τελευταίο απόκτημά του χωρίς να είναι απαραίτητο να ταξιδέψουν εκεί, αλλά και η δημιουργία μιας φόρμας με πληροφορίες διαστάσεων, εύκολα προσβάσιμης από άλλα εκπαιδευτικά ιδρύματα ή μεμονωμένα άτομα. Στην εν λόγω εργασία εξετάζονται δύο πακέτα λογισμικού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν το φωτογραμμετρικό μοντέλο ενός αγάλματος: το MicMac, που είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που τρέχει σε περιβάλλον Linux, και το Agisoft Photoscan, το οποίο είναι ένα εμπορικό λογισμικό Windows-το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε και για το πρακτικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Για την απόκτηση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η ψηφιακή κάμερα Panasonic FZ1000, με σταθερό ζουμ και χωρίς καθρέφτη. Χρησιμοποιεί έναν υψηλής ποιότητας αισθητήρα μίας ίντσας κατασκευασμένο από τη Sony, και ένα σύστημα φακών Leica, επίσης υψηλής ποιότητας, που επιτρέπουν την αποτύπωση καθαρών εικόνων με ελαφρώς μη εστιασμένο φόντο.



Εικόνα 30 Η ψηφιακή κάμερα FZ1000

Στις περιπτώσεις 3D μοντελοποίησης, ενδείκνυται η απόκτηση πλήθους δεδομένων, επομένως ελήφθη μεγάλος αριθμός φωτογραφιών, με περισσότερο από 60% επικάλυψη, περιμετρικά του αγάλματος, από διαφορετικές οπτικές γωνίες και αποστάσεις. Για πιο λεπτομερή σημεία, ήταν απαραίτητη η λήψη περισσότερων φωτογραφιών. Επειδή το άγαλμα είναι κατασκευασμένο από μπρούντζο, μεγάλη προσοχή έπρεπε να δοθεί στο φωτισμό κατά τη διάρκεια της φωτογράφισης, έτσι ώστε να μην υπάρχουν αντανακλάσεις στο φακό. Έχοντας αυτό υπόψη, οι φωτογραφίες ελήφθησαν μεσημέρι, έτσι ώστε η διάχυση του φωτός να είναι η κατάλληλη, πάνω από το άγαλμα. Λόγω του μεγάλου ύψους του, χρειάστηκε και η χρήση ενός μικρού τριπόδου για τις φωτογραφίες από τα υψηλότερα μέρη. Οι φωτογραφίες λαμβάνονταν με χειριστήριο, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας, και την αποφυγή πιθανών μετακινήσεων κατά των ορισμό χρονομέτρου, ταχύτητας κλείστρου και εστίασης χειροκίνητα. Τα ίδια ακριβώς δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο λογισμικά.

MicMac: η βασική διαφορά του MicMac από παρόμοια ελεύθερα λογισμικά είναι ότι βασίζεται περισσότερο στους στιβαρούς φωτογραμμετρικούς αλγορίθμους, παρά σε αυτούς της όρασης υπολογιστών και κάνει χρήση διαφορετικών μοντέλων βαθμονόμησης κάμερας. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας επεξεργασίας αποτελείται από την αυτοματοποιημένη εξαγωγή των σημείων σύνδεσης. Τα σημεία σύνδεσης υπολογίζονται με ένα είδος αλγόριθμου SIFT, ο οποίος έχει εξαιρετικά αποτελέσματα ακόμα και για την περίπτωση αυτή, όπου το αντικείμενο που φωτογραφίζεται είναι ογκώδες και πολύπλοκο, με σημεία που αντανακλούν πολύ φως και σημεία που βρίσκονται σε σκιά, με την προϋπόθεση ότι η επικάλυψη είναι μεγαλύτερη από 80%. Μετά από αυτό το βήμα, ο σχετικός προσανατολισμός (bundle adjustment) και οι εσωτερικές παράμετροι της κάμερας υπολογίζονται και πραγματοποιείται ανακατασκευή επιφάνειας μέσω αντιστοίχισης των εικόνων. Τέλος, μπορούν να παραχθούν ορθοφωτογραφίες και ό,τι άλλο προϊόν είναι επιθυμητό.



Εικόνα 31 Το νέφος σημείων που ελήφθη από το MicMac

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων στο MicMac προέκυψαν κάποια μικρά προβλήματα. Καταρχάς, η βαθμονόμηση και ο σχετικός προσανατολισμός έγιναν σε βήματα, προσανατολίστηκε πρώτα μια μικρή ομάδα εικόνων και έπειτα όλες μαζί. Σε αυτό το σημείο έγιναν αρκετές προσπάθειες να οριστεί ο τελικός προσανατολισμός και κάποιες εικόνες έπρεπε να απορριφθούν. Η συνταύτιση έγινε επίσης σε βήματα, έτσι ώστε να επιτευχθεί μέγιστη λεπτομέρεια σε κάθε σημείο. Τέλος, για τη συγχώνευση των νεφών σημείων απαιτήθηκε μεγάλη επεξεργασία για να καθαριστούν από λάθος σημεία χειροκίνητα. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν πολύ ποιοτικό και εφάμιλλο του αποτελέσματος από το Photoscan.

Για την επεξεργασία των δεδομένων εισήχθησαν στο πρόγραμμα 142 φωτογραφίες με 80% επικάλυψη, οι οποίες προσανατολίστηκαν αυτοματοποιημένα και δημιουργήθηκε ένα αραιό νέφος σημείων. Η κλίμακα ορίστηκε από μια μετρημένη απόσταση. Κατόπιν δημιουργήθηκε το πυκνό νέφος σημείων, διαδικασία η οποία είναι και η πιο χρονοβόρα, ανάλογα βέβαια και με τις απαιτήσεις για την ανάλυση του αποτελέσματος και ανάλογα με τις δυνατότητες του υπολογιστή. Τέλος, από το πυκνό νέφος σημείων, δημιουργήθηκε και το πλέγμα των πολυγώνων.



Εικόνα 32 Το νέφος σημείων που ελήφθη από το Photoscan

Για να γίνει δυνατή η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων, πρέπει πρώτα να επισημανθούν οι διαφορές στις διαδικασίες. Το Photoscan είναι γνωστό ως ένα απλό, ευέλικτο και πολύ αποτελεσματικό λογισμικό, και όλα του τα θετικά χαρακτηριστικά επιβεβαιώθηκαν κατά τη διαδικασία επεξεργασίας και κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Χρειάστηκαν 240 ώρες αυτοματοποιημένης διαδικασίας, με έναν υπολογιστή με 8GB RAM και CORE i7 επεξεργαστή, για την εξαγωγή ενός νέφους 32,5 εκατομμύριων σημείων υψηλής ανάλυσης, από το οποίο επιτεύχθηκε ένα ολοκληρωμένο πλέγμα πολυγώνων.

Συγκριτικά, η χρήση του MicMac απαιτεί μεγάλη αλληλεπίδραση μεταξύ του εργαλείου και του χρήστη. Όπως αναφέρθηκε, για τον εσωτερικό και το σχετικό προσανατολισμό ήταν απαραίτητο να επιλεγθούν πρώτα κάποιες εικόνες, από τις οποίες ορίστηκαν οι παράμετροι του σχετικού και του εσωτερικού προσανατολισμού του συνόλου των εικόνων. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί το λογισμικό δεν είναι σε θέση να ξεχωρίσει τις εικόνες κακής ποιότητας. Το μοναδικό βήμα δηλαδή στο Photoscan, χρειάζεται δύο βήματα στο MicMac, και αυτό καθιστά το τελευταίο ιδανικό λογισμικό για ελεγχόμενες διαδικασίες. Γενικότερα, το συγκεκριμένο λογισμικό βασίζεται σε χειροκίνητες κινήσεις: για τα νέφη σημείων, τοποθετήθηκαν μάσκες σε 20 επιλεγμένες εικόνες, και από αυτά έγινε η παραγωγή των pixel-ένα για κάθε σημείο. Κατόπιν,

τα νέφη αυτά ενώθηκαν, και δημιουργήθηκε το τελικό αποτέλεσμα, σε πολύ μικρότερο χρόνο, και χωρίς κόστος, αφού το λογισμικό είναι ελεύθερο. Για να συγκριθούν καλύτερα τα δύο αποτελέσματα, ήρθαν στην ίδια κλίμακα από τη μετρημένη απόσταση, και έγιναν σε αυτά κάποιες μετρήσεις. Διαπιστώθηκε ότι τα νέφη σημείων ήταν σχεδόν εξίσου πυκνά-με το νέφος του MicMac πυκνότερο-ενώ η μέση διαφορά μεταξύ των δύο νεφών ήταν περίπου 6mm ($\sigma=23,460\text{mm}$).

Όπως έγινε φανερό, παρά το γεγονός ότι νέες τεχνολογίες όπως τα LiDAR έχουν ευρεία χρήση σε παρόμοιες εφαρμογές, η μέθοδος της Φωτογραμμετρίας έχει πολύ ακριβή αποτελέσματα, χωρίς την απαίτηση εξειδικευμένου και ακριβού εξοπλισμού. Το MicMac είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που δίνει μεγάλη ελευθερία χειρισμών στο χρήστη, ενώ το Photoscan περιλαμβάνει μια αυτοματοποιημένη και πολύ απλή διαδικασία για τη δημιουργία των ψηφιακών μοντέλων. Και οι δύο μέθοδοι έδωσαν υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα, τα οποία είναι δυνατόν να επεξεργαστούν με τρόπο κατάλληλο ώστε να ανέβουν στο διαδίκτυο με αρκετές λεπτομέρειες και να είναι διαθέσιμα για μετρήσεις σε όλους τους ενδιαφερόμενους (Champion et al., 2015).



Εικόνα 33 Οψεις του πλέγματος και της υφής του γλυπτού από το MicMac



Εικόνα 34 3D πλέγμα και υφή από το Photoscan

4.3.Φαραώ Πεπη 1(Pepi I Meryre):Τεκμηρίωση των αρχαιότερων γνωστών μεταλλικών γλυπτών φυσικού μεγέθους, με χρήση επίγειου Lasser Scanner και Φωτογραμμετρίας-2001



Εικόνα 35 Το άγαλμα του Πέπη Ι

Το 1897 ήρθαν στο φως τα δύο αρχαιότερα γλυπτά από μέταλλο που έχουν βρεθεί-έως σήμερα-στον κόσμο. Πρόκειται για δύο αγάλματα του Φαραώ Πεπη Ι , σε φυσικό μέγεθος, χρονολογούμενα περίπου στα 2300 χρόνια π.Χ, τα οποία βρέθηκαν στην αρχαία πόλη Ιεράκων της Αιγύπτου, και φιλοξενούνται μέχρι και σήμερα στο μουσείο του Καΐρου. Το μεγαλύτερο από αυτά έχει ύψος 1,78m, ενώ το μικρότερο 0,78m. Μετά από αρκετά χρόνια ανακατασκευών, συντήρησης και τεχνολογικής έρευνας, που ξεκίνησαν το 1996, τα γλυπτά τεκμηριώθηκαν γεωμετρικά το 2001. Για την τεκμηρίωσή τους χρησιμοποιήθηκαν ένας 3D σαρωτής laser για την καταγραφή της μορφής των γλυπτών, ενώ για λεπτομέρειες όπως οι ραφές των φύλλων χαλκού από τα οποία αποτελούνται τα αγάλματα, χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος της φωτογραμμετρίας. Μετά τη δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου, κάθε είδους μέτρηση μεταξύ σημείων της επιφάνειας των αγαλμάτων είναι πλέον δυνατή (Heinz, 2004). Η ακρίβεια του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε ήταν στα 0,7mm και δεν ήταν αρκετή για την απεικόνιση των λεπτών φύλλων χαλκού και των συνδέσεων μεταξύ τους, για αυτό το λόγο τα αντίστοιχα σημεία των γλυπτών καταγράφηκαν και με φωτογραμμετρικές μεθόδους. Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων μπορούν αργότερα να συνδυαστούν, έτσι ώστε να δημιουργηθούν διάφορες απεικονίσεις του γλυπτού συμπεριλαμβανομένης της ψηφιακής ανακατασκευής των εξαφανισμένων τμημάτων των αγαλμάτων όπως του στέμματος ή του λινού χιτώνα, που ήταν αρχικά κατασκευασμένα από ξύλο καλυμμένο με ένα στρώμα γύψου με χρυσό χρώμα.

Τα γλυπτά σαρώθηκαν με έναν σαρωτή MENSIS S25, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εύρος 2-20m, και να δώσει ακρίβεια έως και 0,3mm σε μικρές αποστά-

σεις και με ευνοϊκές συνθήκες. Ο συγκεκριμένος σαρωτής, είναι σαρωτής τριγωνισμού και έτσι η ακρίβεια των μετρήσεων του εξαρτάται από την απόστασή του από το αντικείμενο ενδιαφέροντος. Καθώς η βαθμονόμηση του σαρωτή δεν ήταν η βέλτιστη για κοντινές αποστάσεις κατά την περίοδο των εργασιών, η αναμενόμενη ακρίβεια ήταν της τάξης του 0,5mm. Αυτή η ακρίβεια ήταν αρκετή για μετρήσεις από το μοντέλο-όπως, για παράδειγμα, μετρήσεις αποστάσεων στην επιφάνειά του-αλλά δεν αρκεί για μια λεπτομερή ανακατασκευή του μοντέλου, κάτι το οποίο δεν αποτελούσε στόχο για τη συγκεκριμένη εργασία, τη συγκεκριμένη εποχή.

Η διαδικασία σάρωσης του μεγάλου αγάλματος διήρκησε 6 μέρες. Συνολικά καταγράφηκαν 1,8 εκατομμύρια σημεία στην επιφάνεια του γλυπτού από 29 σημεία παρατήρησης. Οι σαρώσεις πραγματοποιήθηκαν με ένα μέσο πλέγμα σημείων στην επιφάνεια του αγάλματος, με απόσταση μεταξύ τους περίπου 1,0mm. Αυτό το πλέγμα γίνεται τελικά πυκνότερο, αφού κάθε σημείο της επιφάνειας σαρώνεται πολλές φορές, από διαφορετικά σημεία στάσης του σαρωτή. Όσον αφορά το μικρότερο άγαλμα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια. Επειδή όμως το συγκεκριμένο γλυπτό ήταν τοποθετημένο σε μια βάση από πλεξιγκλάς η οποία δεν μπορούσε να αφαιρεθεί, δημιουργήθηκαν προβλήματα κατά τη σάρωση λόγω της διάθλασης του φωτός μέσα από αυτή. Τελικά, τα δεδομένα σάρωσης από το μικρότερο γλυπτό δε χρησιμοποιήθηκαν καθόλου.

Όσον αφορά στην επεξεργασία των δεδομένων, η ταχύτητα και η ακρίβειά της εξαρτώνται από το λογισμικό που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό. Ο σαρωτής MENSΙ διαθέτει το λογισμικό 3Dipsos, το οποίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να εξάγει αρχεία CAD από το νέφος των σημείων. Κάθε σάρωση καταγράφεται σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων χρησιμοποιώντας κόκκινες σφαίρες τοποθετημένες γύρω από το γλυπτό, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως κοινά σημεία σύνδεσης. Απαιτούνται τουλάχιστον τρεις σφαίρες για κάθε σημείο παρατήρησης. Η ακρίβεια των μετασχηματισμών αυτών εξαρτάται από την ακρίβεια τοποθέτησης των σημείων και δεν είναι, ειδικά σε περιπτώσεις επίγειας φωτογραμμετρίας, όπως η συγκεκριμένη, πολύ υψηλή. Τα νέφη σημείων των μεμονωμένων σαρώσεων καταγράφηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας τα ίδια τα νέφη για τον υπολογισμό των παραμέτρων μετασχηματισμού, όπως δίνονται από το λογισμικό του 3Dipsos. Το αποτέλεσμα ήταν ένα προσανατολισμένο νέφος σημείων του γλυπτού. Εξαιτίας των επικαλυπτόμενων σαρώσεων, η πυκνότητα των σημείων έπρεπε να μειωθεί έτσι ώστε να δώσει ένα νέο νέφος με διάστημα 1mm μεταξύ των σημείων. Το τελικό μοντέλο αποτελούνταν από περίπου 1 εκατομμύριο σημεία. Το 3Dipsos παρέχει δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για την τριγωνισμό των νεφών σημείων. Η πρώτη είναι ένας πραγματικός 3D τριγωνισμός που απαιτεί ένα νέφος σημείων σε τακτά χωρικά διαστήματα. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί επιφάνειες προβολής όπως επίπεδα, κυλίνδρους ή σφαίρες και δημιουργεί ένα πλέγμα τριγώνων 2,5D σε αυτήν την επιφάνεια αναφοράς. Αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι χρήσιμη για την κατασκευή του πλέγματος, π.χ. για ένα μέρος ενός βραχίονα, αλλά από την άλλη πλευρά οδηγεί σε μεμονωμένα πλέγματα που πρέπει να ενωθούν για να επιτευχθεί ένα πλήρες μοντέλο του αγάλματος. Ο χρόνος που χρειάστηκε για την παραγωγή του μοντέλου ήταν πολλαπλάσιος σε σχέση με το χρόνο σάρωσης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην κακή

βαθμονόμηση του σαρωτή που οδήγησε σε υψηλότερο θόρυβο στα καταγεγραμμένα σημεία και στο λογισμικό, το οποίο παρέχει μόνο βασική υποστήριξη για τη δημιουργία μοντέλων με τριγωνισμό επιφάνειας, και, έτσι, δεν ήταν κατάλληλο για την περίπτωση αυτή. Ο θόρυβος στα ίδια τα δεδομένα οδήγησε επίσης σε ανάγκη για μεγαλύτερο χρόνο δημιουργίας του μοντέλου, καθώς απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια στην προκαταρκτική επεξεργασία του νέφους (καθαρισμός, φιλτράρισμα) πριν από τη μοντελοποίηση της επιφάνειας.

Τα σημεία του γλυπτού που περιέχουν ραφές μεταξύ των φύλλων χαλκού καταγράφηκαν χρησιμοποιώντας μια αναλογική μετρητική κάμερα Rollei 6008.



Εικόνα 36 Η αναλογική κάμερα Rollei 6008

Για τη διαδικασία προσανατολισμού των μεμονωμένων στερεομοντέλων τοποθετήθηκαν στόχοι πάνω στο γλυπτό, των οποίων οι αποστάσεις μετρήθηκαν, έτσι ώστε να εισαχθεί κλίμακα στις μετρήσεις. Εκτός από τα συμβατικά στερεομοντέλα, ελήφθησαν και 16 συγκλίνουσες εικόνες. Μετά τη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων των σημείων ελέγχου πραγματοποιήθηκε η συνόρθωση δέσμης (bundle adjustment), έτσι ώστε να υπολογιστούν οι τρισδιάστατες συντεταγμένες των σημείων αυτών. Η ακρίβεια του προσδιορισμού των συντεταγμένων ήταν 0,3mm. Τα χαρακτηριστικά του γλυπτού σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας πρόγραμμα CAD. Τα χαρακτηριστικά που έπρεπε να σχεδιαστούν αποδόθηκαν πολύ απλά, χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα στο AutoCad (layers). Τα τελικά 3D δεδομένα μπορούν να προβληθούν με διάφορους τρόπους.

Για όλες τις περαιτέρω διαδικασίες απεικόνισης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό απεικόνισης και animation 3D Studio Max®, η μεταφορά των δεδομένων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τύπους αρχείων OBJ και DXF. Πολλοί τρόποι απεικόνισης μπορούν να εφαρμοστούν από εδώ και πέρα, με τον απλούστερο να περιλαμβάνει την εφαρμογή υφής (texture) στο άγαλμα, παρόμοιας με εκείνη που εικάζεται πως θα ήταν η υφή του όταν πρωτοκατασκευάστηκε, ή με εκείνη που έχει τη στιγμή της ανακατασκευής του. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί και η δημιουργία βίντεο, περιστρέφοντας για παράδειγμα την κάμερα γύρω από το άγαλμα. Έτσι, ο παρατηρητής μπορεί να έχει μια πολύ καλή εποπτεία του αγάλματος. Επιπλέον, το μοντέλο επιφάνειας μπορεί να συνδυαστεί με τα διανυσματικά στοιχεία: αν εφαρμοστεί ημι-διάφανη επιφάνεια στο μοντέλο, είναι ορατές και οι τρισδιάστατες θέσεις των ραφών και των ενώσεων, ακόμη και αν δεν είναι ορατές στην πραγματικότητα. Τέ-

λος, μπορούν να ανακατασκευαστούν ψηφιακά και να παρουσιαστούν ξεχωριστά κομμάτια του γλυπτού που δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα, ή να συμπληρώσουν το αρχικό αντικείμενο. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να παρουσιαστεί η πιθανότερη αρχική μορφή του γλυπτού χωρίς να αλλάξει ή να φθαρεί με οποιονδήποτε τρόπο το ίδιο το γλυπτό. Για παράδειγμα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, το στέμμα και ο χιτώνας δημιουργήθηκαν με φωτογραφίες από παρόμοια αγάλματα.



Εικόνα 37 Αριστερά το νέφος σημείων από το σαρωτή Laser, δεξιά μια όψη του μοντέλου

Μετά τη δημιουργία του μοντέλου, μπορούν να γίνουν πάνω σε αυτό μετρήσεις που δεν είναι δυνατόν να γίνουν πάνω στο ίδιο το αντικείμενο, με πολύ καλή ακρίβεια. Χρησιμοποιώντας απλά εργαλεία, συντεταγμένες σημείων και αποστάσεις μεταξύ σημείων μπορούν να μετρηθούν ως τρισδιάστατες αποστάσεις ή διαφορές παράλληλες ως προς επιλεγμένους άξονες. Έτσι, μετρήσεις θα μπορούν να γίνονται ακόμα και όταν το άγαλμα θα επιστραφεί στο μουσείο ή ακόμα και αν δεν είναι καθόλου διαθέσιμο για περαιτέρω έρευνα.

Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τη γεωμετρική τεκμηρίωση του γλυπτού του Πέπη συνδυάζει τις δύο γνωστότερες μεθόδους για την εν λόγω εργασία. Η τεκμηρίωση των λεπτομερειών με φωτογραμμετρία αντιπροσωπεύει πιο καθιερωμένες μεθόδους. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε από τη σάρωση με laser επιτρέπει μετρήσεις από τη μία, και είναι κατάλληλο για διαφορετικές απεικονίσεις από την άλλη. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι δυνατή η ανακατασκευή κομματιών που δεν υπάρχουν πια, και η παρουσίαση του μοντέλου μέσω κινούμενων εικόνων (animation). Η ακρίβεια του ψηφιακού μοντέλου δεν είναι επαρκής για μια ακριβή αναπαραγωγή του γλυπτού, κάτι το οποίο δεν ήταν ζητούμενο έτσι κι αλλιώς. Για μια τέτοια περίπτωση, ένα διαφορετικό laser scanner θα ήταν κατάλληλο (π.χ. σαρωτής δομημένου φωτός-structured light). Συγκριτικά με ένα απλό σχέδιο των γραμμών του γλυπτού

και των σημείων ένωσης των φύλλων χαλκού, ο συνδυασμός γραμμικού σχεδίου και 3D μοντέλου είναι σαφώς πιο λεπτομερής και εύχρηστος, αφού είναι πολύ πιο εύκολο στο χρήστη να συσχετίσει τις γραμμές του μοντέλου με αυτές του γλυπτού, αλλά και να δει σημεία που ίσως δεν θα μπορούσε με γυμνό μάτι, ενώ είναι ευκολότερες και οι μετρήσεις πάνω σε αυτό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

Το γεγονός ότι η βαθμονόμηση του σαρωτή δεν ήταν βέλτιστη για εφαρμογές κοντινής εμβέλειας, παρά τη βαθμονόμηση του κατασκευαστή αμέσως πριν από το έργο, οδήγησε σε μειωμένη ακρίβεια των σαρωμένων σημείων και υψηλότερη δαπάνη για τη δημιουργία του μοντέλου. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν κατάλληλο για τη δημιουργία μοντέλων πολύπλοκων αντικειμένων, για την εποχή εκείνη, απείχε όμως αρκετά από το βέλτιστο. Ολόκληρος ο εξοπλισμός ήταν βαρύς (150 kgf περίπου), ενώ έπρεπε να μεταφερθεί στην Αίγυπτο από τη Γερμανία. Ο χρόνος μεταφοράς του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των καθυστερήσεων, πρέπει να θεωρηθεί ως χρόνος όπου ο εξοπλισμός δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (Heinz, 2004).

4.4.3D Σάρωση και Μοντελοποίηση του Μνημείου Βίσμαρκ με Επίγειο Σαρωτή Laser για ενσωμάτωση στο 3D μοντέλο της πόλης του Αμβούργου



Εικόνα 38 Το μνημείο Βίσμαρκ σε αεροφωτογραφία, και το γλυπτό του Βίσμαρκ

Το 2001 ξεκίνησε η δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου του Αμβούργου, έργο πολύ χρήσιμο για πόλεις σαν αυτή, που έχουν μεγάλη τουριστική αξία. Το χαρακτηριστικό τοπίο της Χανσεατικής πόλης, το οποίο περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό μνημείων, είναι δυνατό να παρουσιαστεί σαν ένα εικονικό μοντέλο πόλης και να είναι διαθέσιμο μέσω υπολογιστή στο χρήστη. Το έργο αφορά ολόκληρη την περιοχή του Αμβούργου (755 km²) και περιλαμβάνει 320.000 κτίρια, μόνο ως απλά σχέδια και με πληροφορία ύψους για το κάθε ένα. Σε επιλεγμένα κτίρια έχει αποδοθεί και υφή, έτσι ώστε να είναι διαθέσιμο ένα πλήρες αρχιτεκτονικό μοντέλο.

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, ψηφιοποιήθηκε και το μνημείο Βίσμαρκ του Αμβούργου, ένα από τα δεκάδες μνημεία που χτίστηκαν σε πολλές γερμανικές και μη πόλεις κατά τον 19ο αιώνα, προς τιμήν του Καγκελάρου Όττο Βίσμαρκ. Ένα από τα πιο γνωστά από αυτά τα μνημεία είναι και αυτό του Αμβούργου, είναι δε και το μεγαλύτερο μνημείο της πόλης, με ύψος 34,3m και βάρος 625 τόνων. Αναπαριστά τον ίδιο το Βίσμαρκ με τη μορφή ενός γλυπτού Roland, ενός γλυπτού-ιππότη, δηλαδή, το οποίο θεωρούνταν σύμβολο δημοτικών δικαιωμάτων. Στη βάση του αγάλματος, υπάρχουν οκτώ φηγούρες, οι οποίες συμβολίζουν τα οκτώ γερμανικά φύλα (Kersten, 2010).

Το εν λόγω μνημείο έπρεπε να ενσωματωθεί στο εικονικό μοντέλο της πόλης με το μικρότερο δυνατό όγκο δεδομένων, επομένως η καλύτερη λύση ήταν να γίνει ένας συνδυασμός τριγωνικού πλέγματος και σχεδιασμού CAD. Ο βαθμός στον οποίο ήταν δυνατό να μειωθούν τα ψηφιοποιημένα δεδομένα, έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι γεωμετρικά σωστό και οπτικά άρτιο, δεν ήταν γνωστός, επομένως ήταν κάτι που έπρεπε να διερευνηθεί. Τέλος, εκτός από την ένταξή του στο ψηφιακό μοντέλο της πόλης, το μοντέλο προετοιμάστηκε κατάλληλα και για διαδραστική οπτικοποίηση-μετρήσεις πάνω στο γλυπτό κ.λπ.



Εικόνα 39 Κομμάτι του κοιλώματος του αγάλματος (αριστερά), διατομές του γεωμετρικού αντικειμένου (δεξιά πάνω), και μοντέλο CAD του κοιλώματος (δεξιά πάνω)

Για ολόκληρο το έργο, οι χρόνοι κάθε ξεχωριστής διαδικασίας καταγράφηκαν, έτσι ώστε να εξαχθούν και τα οικονομικά στοιχεία του. Έτσι, μπορούν να εξαχθούν από αυτή την εργασία συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικά προγράμματα που έχουν στόχο την καταγραφή, μοντελοποίηση και οπτικοποίηση ιστορικών κτιρίων και μνημείων, χρησιμοποιώντας παρόμοιες διαδικασίες και παρόμοια τεχνολογία.

Η καταγραφή των δεδομένων έγινε με έναν σαρωτή laser IMAGER 5006 (των Zoller + Fröhlich) τον Αύγουστο του 2008. Κατά τη διάρκεια της σάρωσης, ελήφθησαν και μετρήσεις GPS με σύστημα GPS Leica 500 για το γεωδαιτικό δίκτυο (5 επιπλέον σημεία), ενώ οι στόχοι μετρήθηκαν με γεωδαιτικό σταθμό. Συνολικά, τοποθετήθηκαν 16 ασπρόμαυροι στόχοι και 4 λευκές σφαίρες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως σημεία ελέγχου (control points) για την καταγραφή και τη γεωαναφορά των 17 στάσεων του σαρωτή, πάνω και γύρω από το άγαλμα, σε ειδικά τρίποδα. Επίσης, ελήφθησαν φωτογραφίες με μία φωτογραφική μηχανή Nikon D70, για να χρησιμοποιηθούν σε πιθανή απόδοση υψής στο άγαλμα. Για μεταγενέστερο έλεγχο ποιότητας του 3D μοντέλου, καταγράφηκαν ακόμη 74 σημεία ελέγχου (check points) από γεωδαιτικό σταθμό, σε τρεις στάσεις περιμετρικά του μνημείου.



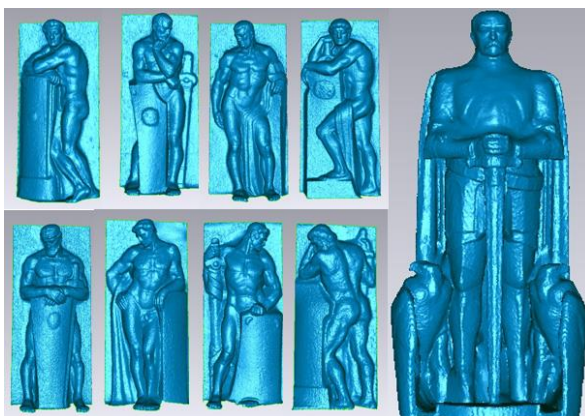
Εικόνα 40 Ο σαρωτής IMAGER 5006, Z+F, το σύστημα GPS 500, Leica, και η φωτογραφική μηχανή Nikon D70

Συνολικά σαρώθηκαν 180 εκατομμύρια σημεία. Η καταγραφή και γεωαναφορά των 17 στάσεων του σαρωτή έγιναν ταυτόχρονα, με το λογισμικό LaserControl (των Zoller + Fröhlich). Όλοι οι ασπρόμαυροι στόχοι και οι σφαίρες (127 μετρήσεις) μετρήθηκαν ημι-αυτόματα στις διαφορετικές σαρώσεις και έπειτα μετασχηματίστηκαν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων, χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου, μέσω της διαδικασίας της προσαρμογής δέσμης (Bundle Adjustment). Η μέση απόκλιση στα σημεία ελέγχου ήταν 13mm, ενώ 13 μετρήσεις με απόκλιση μεγαλύτερη από 30mm εξαιρέθηκαν από τον υπολογισμό. Το χαμηλής ποιότητας α-

ποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο, αφού την ημέρα των μετρήσεων υπήρχε πολύς αέρας που μετακινούσε συχνά τις σφαίρες και έτσι προκλήθηκαν ασυμφωνίες στο γεωδαιτικό δίκτυο. Παρόλα αυτά, το αποτέλεσμα αυτό ήταν αρκετό για το εν λόγω έργο. Το ανώτερο κομμάτι του αγάλματος δεν υποστηρίχτηκε ομοιόμορφα από τα σημεία ελέγχου εξ αιτίας της χωρικής κατανομής των στόχων. Έτσι αποκαλύφθηκαν διαφορές μέχρι και 40mm μεταξύ των σαρώσεων, αλλά μόνο στην περιοχή του κεφαλιού του αγάλματος. Ωστόσο, η διαφορά αυτή δεν αποτέλεσε πρόβλημα για τη μετέπειτα μοντελοποίηση του μνημείου.

Το σύνολο των δεδομένων χωρίστηκε σε τρεις περιοχές: πλατφόρμα, κοίλωμα και άγαλμα, και εξήχθησαν αναλόγως σε τρία τμήματα. Κατά την εξαγωγή τους διορθώθηκαν χρησιμοποιώντας τις τυπικές παραμέτρους φίλτρου του LaserControl, και, συνεπώς, οι όγκοι ήταν ήδη μειωμένοι. Στη συνέχεια, στα χωρισμένα νέφη σημείων εξαλείφθηκαν τα περιττά σημεία, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RealWorks Survey.

Για την ψηφιοποίηση, χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός ψηφιοποίησης CAD και τριγωνικού πλέγματος, ο οποίος προσέφερε την καλύτερη λύση για τη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου το αντικείμενο μελέτης είναι πολύ μεγάλο και έχει περίπλοκη γεωμετρία. Η χρήση του μοντέλου CAD είναι κατάλληλη για απλά γεωμετρικά αντικείμενα, όπως είναι η πλατφόρμα και το κοίλωμα του αγάλματος, ενώ το τριγωνικό πλέγμα απεδείχθη χρήσιμο για πιο πολύπλοκη γεωμετρία, όπως αυτή του αγάλματος του Βίσμαρκ και των φιγούρων που πλαισιώνουν το κοίλωμα του μνημείου. Έτσι, έχει ήδη επιτευχθεί σημαντική μείωση δεδομένων από την ψηφιοποίηση κύριων μερών του μνημείου με CAD, κάτι το οποίο επιτρέπει καλύτερο χειρισμό των δεδομένων για την οπτικοποίηση του αντικειμένου σε επόμενο επίπεδο. Το άγαλμα του Βίσμαρκ και οι οκτώ φιγούρες ψηφιοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τριγωνικό πλέγμα, με το πρόγραμμα Geomagic.



Εικόνα 41 Οι οκτώ μοντελοποιημένες φιγούρες που συμβολίζουν τα γερμανικά φύλα, και το μοντέλο του αγάλματος του Βίσμαρκ

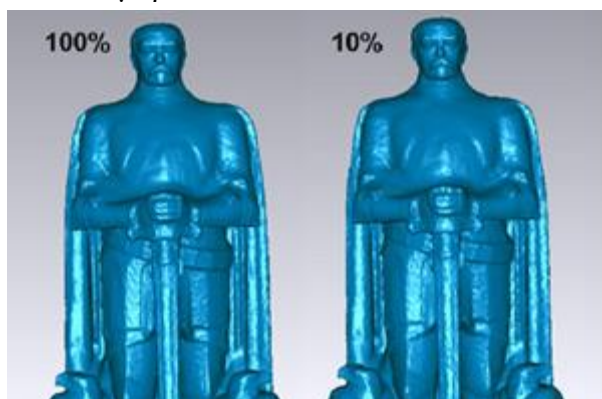
Πριν από αυτό, εφαρμόστηκαν φίλτρα για να εξαλειφθούν λανθασμένα σημεία και τυχόν θόρυβος στα δεδομένα. Ο υπολογισμός του πλέγματος έγινε αυτοματοποιημένα, και το αποτέλεσμα βελτιώθηκε στη συνέχεια έτσι ώστε να κλείσουν οι τρύπες και να ομαλοποιηθεί η επιφάνεια. Οι μεγάλες τρύπες στο ανώτερο σημείο του αγάλματος του Βίσμαρκ, το οποίο δεν ήταν δυνατό να σαρωθεί λόγω σκίασης από το μεγάλο ύψος του αγάλματος, γέμισαν αργότερα με τη βοήθεια ενός υπολογισμού με βά-

ση την καμπυλότητα, ωστόσο, τα σημεία γεφύρωσης ορίστηκαν χειροκίνητα εκ των προτέρων, λόγω του μεγέθους αυτών των τρυπών. Τελικά, όλα τα ψηφιοποιημένα κομμάτια ενώθηκαν σε ένα ενιαίο, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MicroStation V8, το οποίο ενσωματώθηκε στο μοντέλο της πόλης του Αμβούργου.



Εικόνα 42 Το ενσωματωμένο γλυπτό στο 3D μοντέλο της πόλης του Αμβούργου

Προκειμένου να είναι δυνατή μια σημαντική μείωση των δεδομένων, έπρεπε να επιτευχθεί ένας πολυγωνικός αποδεκατισμός (polygon decimation) του πλέγματος, ο οποίος παρείχε ένα αποτέλεσμα σωστό, τόσο γεωμετρικά όσο και οπτικά. Μετά από δοκιμές στο Geomagic, μια μείωση στο 10% των πολυγώνων πληροί και τα δύο αυτά κριτήρια για το άγαλμα του Βίσμαρκ.

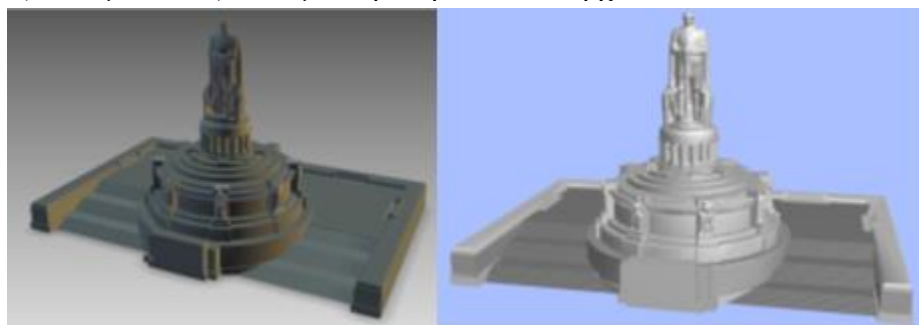


Εικόνα 43 Σύγκριση των ψηφιακών μοντέλων με όλη την πληροφορία (δεξιά) και μετά από μείωση της (αριστερά), στο Geomagic

Για τα υπόλοιπα μέρη του μνημείου, κρατήθηκε το 5% της πληροφορίας, χωρίς σημαντική απώλεια σε γεωμετρική και οπτική ποιότητα. Η ανάλυση ακρίβειας των ψηφιοποιημένων σημείων ελέγχου τα οποία βρίσκονταν διάσπαρτα σε όλο το μνημείο, προσδιορίστηκε με γεωδαιτικό σταθμό. Οι αποκλίσεις μεταξύ μοντέλου και αναφοράς ήταν κατά μέσο όρο 3-10cm κατά τη διεύθυνση XY και για το ύψος, ήταν δηλαδή κατάλληλες για να ενσωματωθεί το μοντέλο στο μοντέλο της πόλης, και βέβαια πληρούσε τον περιορισμό των 30cm των απαιτήσεων ακρίβειας.

Το παραχθέν 3D μοντέλο του μνημείου οπτικοποιήθηκε με διαφορετικούς τρόπους και με διαφορετικά εργαλεία. Μια απλή διαδραστική παρουσίαση δόθηκε σε μορφή VRML, με διαφορετικές αναλύσεις (38 MB για το κούλωμα με τις φιγούρες, 9 MB χωρίς αυτές). Λόγω του ενιαίου γκριζου χρώματος του μνημείου, δεν έγινε απόδοση υψής. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό AECVIZ, στο οποίο φορτώθηκε

το μοντέλο ως αρχείο DXF, και οπτικοποιήθηκε διαδραστικά ως εκτελέσιμο πρόγραμμα (*.exe με 4 MB), ενώ μετατράπηκε και σε αρχείο 3D PDF.



Εικόνα 44 Παρουσίαση του 3D μοντέλου σε μορφή VRML (αριστερά) και οπτικοποίηση του μνημείου ως 3D PDF (δεξιά)

Πολύπλοκα αντικείμενα όπως το μνημείο του Βίσμαρκ μπορούν να καταγραφούν με μεγάλη λεπτομέρεια από επίγειους σαρωτές laser σε μικρό χρονικό διάστημα, όπως έγινε φανερό και από την παραπάνω μελέτη, η επεξεργασία όμως των δεδομένων για την ψηφιοποίησή τους γίνεται σε μεγάλο βαθμό χειροκίνητα, κάτι που κοστίζει τόσο σε χρόνο όσο και σε χρήμα. Είναι, λοιπόν, σημαντική η βελτιστοποίηση σε όλες τις διαδικασίες, έτσι ώστε να μειωθεί το συνολικό κόστος σε παρόμοιες εργασίες. Η αποκτηθείσα ακρίβεια (3-10cm) καλύπτει τις ανάγκες της ενσωμάτωσης του μνημείου στο μοντέλο της πόλης, και είναι κατάλληλη και για περαιτέρω εφαρμογές απεικόνισης, χωρίς προβλήματα. Παρότι υπήρχαν περιοχές που δεν ήταν δυνατό να σαρωθούν λόγω σκιάσεων από το μεγάλο ύψος του αγάλματος, τα κομμάτια που έλειπαν συμπληρώθηκαν υπολογιστικά με το κατάλληλο λογισμικό. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκαν πολλά πακέτα λογισμικού (LaserControl, RealWorks Survey, AutoCad/PointCloud, Geomagic, Microstation) για την παραγωγή του τελικού αποτελέσματος, αφού δεν υπήρχε κανένα πρόγραμμα που να καλύπτει όλες τις ανάγκες της εργασίας με βέλτιστο τρόπο, τουλάχιστον με την τότε υπάρχουσα τεχνολογία (Keirsten, 2010).

5.0 αλγόριθμος SfM

5.1.Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθόδων για την αυτοματοποίηση της μοντελοποίησης και της απόδοσης αντικειμένων, κτιρίων, κατασκευών κ.λπ. Μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιούνταν σχεδόν πάντα μέθοδοι laser scanning· σήμερα, με την αυξανόμενη απαίτηση για τρισδιάστατα μοντέλα σε γραφικά υπολογιστών, εικονική πραγματικότητα και επικοινωνίες, έχουν αλλάξει και οι απαιτήσεις για τη δημιουργία τέτοιων μοντέλων. Υπάρχει σημαντική ζήτηση για απλές, οικονομικές και ευέλικτες διαδικασίες απόκτησης δεδομένων, ενώ είναι απαραίτητα τα εξαγόμενα μοντέλα να είναι υψηλής ποιότητας (Pollefeys et al., 2004). Ακόμη, πολλές εφαρμογές απαιτούν εύρωστα αλλά οικονομικά συστήματα καταγραφής δεδομένων. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και την ανάπτυξη των αλγορίθμων υπολογιστικής όρασης, έφεραν στο προσκήνιο τη χρήση φωτογραφιών ή βίντεο. Ο χρήστης μπορεί να αποκτήσει τις απαραίτητες εικόνες κινώντας ελεύθερα την κάμερα γύρω από το αντικείμενο, χωρίς να είναι απαραίτητος γνωστός η θέση της μηχανής και οι ρυθμίσεις της κάμερας, ενώ η βαθμονόμηση μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα ή και να παραληφθεί. Η απόκτηση, βέβαια, τρισδιάστατης γεωμετρικής πληροφορίας μιας σκηνής από δισδιάστατες εικόνες είναι μια αρκετά δύσκολη διαδικασία, καθώς η διαδικασία σχηματισμού εικόνας δεν είναι, γενικά, αντιστρέψιμη: από την προβαλλόμενη θέση του στο επίπεδο μιας εικόνας, ένα σημείο μπορεί να ανακτηθεί μόνο με μία παράμετρο, δηλαδή την απόστασή του από την κάμερα. Επομένως, απαιτούνται πρόσθετες πληροφορίες για την επίλυση του προβλήματος της ανακατασκευής.

Μια λύση για την επίλυση αυτού του προβλήματος, είναι η αξιοποίηση ήδη γνωστών δεδομένων για τη σκηνή, έτσι ώστε να μειωθούν οι βαθμοί ελευθερίας. Για παράδειγμα, περιορισμοί παραλληλίας ή συνεπιπεδότητας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή απλών γεωμετρικών σχημάτων όπως γραμμών ή επίπεδων πολυγώνων, από τις προβαλλόμενες θέσεις τους σε μεμονωμένες εικόνες (Harris and Stephens. 1988). Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθούν ομόλογες εικόνες σημείων σε πολλαπλές φωτογραφικές λήψεις. Με δεδομένη την εικόνα του σε δύο ή περισσότερες λήψεις, ένα τρισδιάστατο σημείο μπορεί να ανακατασκευαστεί με τριγωνισμό. Απαραίτητη προϋπόθεση σε αυτή την περίπτωση, είναι ο προσδιορισμός της βαθμονόμησης και της θέσης της κάμερας, που μπορούν να εκφραστούν με τον προβολικό πίνακα (ένας για κάθε εικόνα). Η μέθοδος αυτή, που ονομάζεται Δομή από Κίνηση (Structure from Motion-SfM), καθώς και οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε αυτή, και χρησιμοποιούνται στη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων, θα περιγραφούν παρακάτω. Η γεωμετρική θεωρία της SfM επιτρέπει τον ταυτόχρονο υπολογισμό των προβολικών πινάκων των εικόνων και των 3D σημείων, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα μόνο τις μετρήσεις των ομόλογων σημείων (<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>).

5.2.Εισαγωγικές έννοιες

Παρακάτω περιγράφονται κάποιες έννοιες που είναι απαραίτητες για την ευκολότερη κατανόηση της γεωμετρικής θεωρίας στην οποία βασίζονται οι αλγόριθμοι SfM.

5.2.1.Προβολή εικόνας

Ο τρόπος που μια φωτογραφική μηχανή προβάλλει ένα σημείο στο επίπεδο της εικόνας λέγεται Προβολή Σημειακής Οπής (Pinhole Projection) ή απλούστερα Κεντρική Προβολή. Σύμφωνα με αυτό το προβολικό μοντέλο, η σχέση μεταξύ του κάθε τρισδιάστατου σημείου με το αντίστοιχο δισδιάστατο σημείο στην εικόνα έχει τρεις παραμέτρους:

Το μετασχηματισμό που συνδέει σημεία στο σύστημα συντεταγμένων της πραγματικότητας με το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Όπου ο \mathbf{R} είναι ένας 3×3 πίνακας στροφής που αντιπροσωπεύει τον προσανατολισμό της κάμερας και ο \mathbf{T} είναι ένα τρισδιάστατο διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τη μετάθεση της κάμερας, δηλαδή τη θέση του σημείου O στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας. Μαζί, τα παραπάνω στοιχεία είναι γνωστά ως εξωτερικές παράμετροι και περιγράφουν τη θέση της κάμερας.

Το μετασχηματισμό που συνδέει σημεία στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας με τα δισδιάστατα σημεία στο επίπεδο της εικόνας.

$$x = f \frac{X_c}{Z_c} \quad y = f \frac{Y_c}{Z_c}$$

Όπου f είναι το εστιακό μήκος. Αν αλλάξει η τιμή του f , το μόνο που θα αλλάξει είναι η κλίμακα της εικόνας, επομένως μπορεί να θεωρηθεί $f=1$ και να υπολογιστεί ο συντελεστής κλίμακας που λείπει μέσα στον πίνακα βαθμονόμησης της κάμερας. Έπειτα, χρησιμοποιώντας ομογενείς συντεταγμένες, η σχέση μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω εξίσωση πινάκων.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Τέλος, το μετασχηματισμό που συνδέει τα σημεία στο επίπεδο της εικόνας με τις συντεταγμένες σε pixel. Η σχέση γράφεται ως εξής:

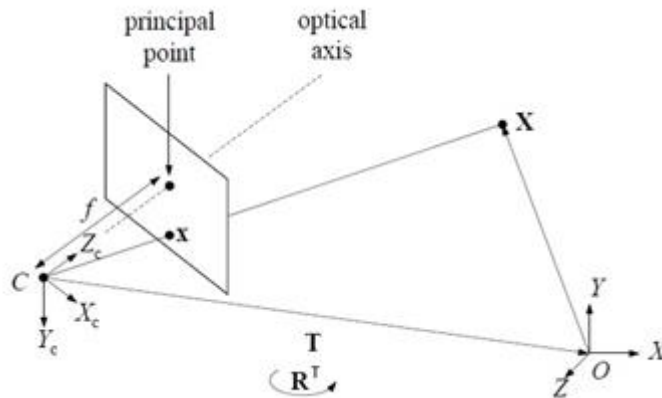
$$\tilde{\mathbf{u}} \sim \mathbf{K}\tilde{\mathbf{x}}$$

Όπου ο K είναι ένας άνω τριγωνικός πίνακας βαθμονόμησης της κάμερας της μορφής

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_u & s & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Όπου α_u και α_v είναι παράγοντες κλίμακας, το s είναι η λοξότητα και (u_0, v_0) είναι το πρωτεύον σημείο. Αυτές είναι οι εσωτερικές παράμετροι της κάμερας. Συνήθως, τα εικονοστοιχεία θεωρούνται τετράγωνα, οπότε $\alpha_u = \alpha_v = \alpha$ και $s=0$, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ότι το α είναι το εστιακό μήκος του φακού, εκφρασμένο σε μονάδες διαστάσεων εικονοστοιχείων. Το πρωτεύον σημείο είναι εκεί όπου ο οπτικός άξονας τέμνει το επίπεδο της εικόνας της κάμερας. Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, $\tilde{u} = P\tilde{X}$, όπου $P \sim [RT]$ είναι ο προβολικός πίνακας.

Επιπρόσθετα, οι προβολές που δημιουργούνται από φωτογραφικές μηχανές πρέπει συχνά να διορθωθούν από την επίδραση μη γραμμικών φαινομένων, κυρίότερο από τα οποία είναι η διαστροφή του φακού. Αυτό σημαίνει πως τα σημεία προβάλλονται σε διαφορετική θέση από αυτή που αναμένεται ιδανικά, και η πιο συχνή μορφή διαστροφής είναι η ακτινική διαστροφή, όπου τα σημεία μετατοπίζονται σε ακτινική διεύθυνση από το κέντρο διαστροφής. Πολλές φορές, η γραμμική εξίσωση του προβολικού πίνακα διορθώνεται σημαντικά, λαμβάνοντας υπόψη την ακτινική διαστροφή.



Εικόνα 45 Προβολή Σημειακής Οπής ή Κεντρική Προβολή

Προβολή σημειακής οπής ενός 3D σημείου σε ένα επίπεδο εικόνας κάμερας. R είναι οι εξωτερικές παράμετροι της κάμερας, ο T αντιπροσωπεύει τη μετάθεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων XYZ (με αρχή αξόνων το O) και του συστήματος συντεταγμένων της κάμερας $X_c Y_c Z_c$ (με αρχή αξόνων το C). Το επίπεδο της εικόνας φαίνεται εδώ μπροστά από το οπτικό κέντρο C , ενώ σε μια πραγματική κάμερα, το επίπεδο της εικόνας θα ήταν πίσω από το οπτικό κέντρο, και η εικόνα (είδωλο) θα ήταν αντεστραμμένη.

5.2.2.Βαθμονόμηση της μηχανής

Οι εξωτερικές και οι εσωτερικές παράμετροι της μηχανής μπορούν, για κάθε συνδυασμό κάμερας και φακού, να προσδιοριστούν, φωτογραφίζοντας μια συγκεκριμένη στιγμή ένα αντικείμενο (αντικείμενο βαθμονόμησης). Η διαδικασία αυτή είναι χρονοβόρα, και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, προτιμάται γενικά να αποφεύγεται στις διαδικασίες εξαγωγής 3D μοντέλων αντικειμένων.

5.2.3.Το πρόβλημα των ομόλογων σημείων

Η γεωμετρική θεωρία της SfM προϋποθέτει ότι είναι δυνατό να εντοπιστούν ομόλογα σημεία στις φωτογραφίες, δηλαδή σημεία τα οποία αποτελούν εικόνες του ίδιου τρισδιάστατου σημείου. Τα σημεία μπορούν να εντοπιστούν χειροκίνητα, με το χρήστη να καλείται να ταυτοποιήσει απλά γεωμετρικά σχήματα, έτσι, ταυτόχρονα με τα ομόλογα σημεία καθορίζονται και επιφάνειες. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι είναι χρονοβόρα, ενώ η ακρίβειά της εξαρτάται από την ακρίβεια αναγνώρισης των σημείων από το χρήστη.

Γενικά, είναι δύσκολο να εντοπιστούν ομόλογα σημεία μέσω αυτοματοποιημένης διαδικασίας. Οι αλγόριθμοι που εντοπίζουν ομόλογα σημεία δουλεύουν υπολογίζοντας κάποιο συμφωνημένο μέγεθος-που έχει να κάνει, για παράδειγμα, με το χρώμα ή την ένταση (ή άλλη τιμή)-μεταξύ των pixels. Επειδή δεν είναι δυνατό να συγκριθεί κάθε pixel μιας εικόνας με όλα τα pixels μιας δεύτερης εικόνας, λόγω πολυπλοκότητας της διαδικασίας αλλά και επειδή δεν είναι όλα τα pixels κατάλληλα για αντιστοίχιση, χρησιμοποιούνται συνήθως χαρακτηριστικά τοπικής κλίμακας. Η αντιστοίχιση χαρακτηριστικών λειτουργεί ανιχνεύοντας σημεία ενδιαφέροντος στις εικόνες. Αφού εντοπιστούν τα σημεία ενδιαφέροντος, η γύρω περιοχή τους στην εικόνα χαρακτηρίζεται από έναν κατάλληλο περιγραφέα. Τα χαρακτηριστικά με παρόμοιους περιγραφείς είναι πιθανότερο να ταυτοποιούνται. Οι αλγόριθμοι αντιστοίχισης χαρακτηριστικών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: περιορισμένης και ευρείας βάσης (narrow- και wide-baseline αντιστοιχία).

Αντιστοίχιση περιορισμένης βάσης: υπό την προϋπόθεση ότι οι αλλαγές στη θέση και τον προσανατολισμό της κάμερας παραμένουν πολύ μικρές, η τοπική περιοχή γύρω από ένα σημείο ενδιαφέροντος παραμένει ίδια σε δύο κοντινές λήψεις. Έτσι, μπορούν να περιγραφούν χαρακτηριστικά της εικόνας από ένα σύνολο τιμών έντασης των εικονοστοιχείων, το οποίο έχει ληφθεί ως δείγμα από ένα ορθογώνιο τετράγωνο με κέντρο το σημείο ενδιαφέροντος. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ελάχιστα τετράγωνα. (Kanade & Okutomi, 1994). Ένα μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το γεγονός ότι ο υπολογισμός του βάθους είναι ευαίσθητος σε τυχόν θόρυβο που μπορεί να έχουν οι μετρήσεις των συντεταγμένων στην εικόνα, όταν τα σημεία λήψεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

Αντιστοίχιση ευρείας βάσης: ενώ οι αλγόριθμοι περιορισμένης βάσης έχουν πολύ καλά αποτελέσματα για εικόνες από κοντινά σημεία λήψης (π.χ. καρέ από βίντεο), δεν είναι εφαρμόσιμοι σε περιπτώσεις που οι εικόνες έχουν ληφθεί από πιο τυχαία σημεία λήψης. Όταν η γραμμή βάσης είναι πολύ μεγάλη, οι επιφάνειες στις δύο

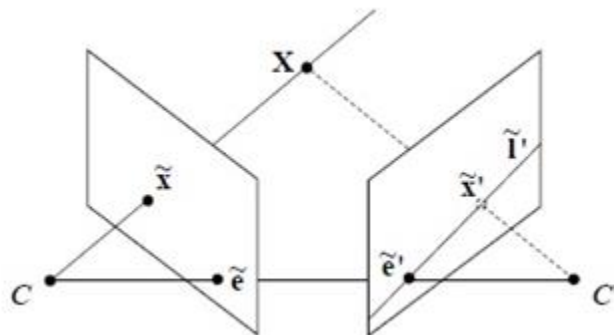
εικόνες μπορεί να παρουσιάσουν σημαντική διαφορά στην κλίμακα, ανισότητες ή αποκρύψεις. Αυτοί οι παράγοντες καθιστούν ακόμη πιο δύσκολη την εύρεση ομόλογων σημείων αυτοματοποιημένα. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για την ανάπτυξη αλγορίθμων ανεξάρτητων των μεταθέσεων των εικόνων (image transformation) (Schmid et al., 1998, Dufournaud et al., 2000, Lowe, 1999, Pritchett & Zisserman, 1998).

5.2.4.Γεωμετρία δύο λήψεων

Με δεδομένες τις εικόνες πέντε διαφορετικών σημείων σε ένα ζευγάρι φωτογραφιών, μπορούν να ανακτηθούν η σχετική θέση και ο προσανατολισμός των φωτογραφικών μηχανών, καθώς επίσης και οι θέσεις των σημείων, σε αυθαίρετη κλίμακα (Kruppa, 1913). Από τουλάχιστον οκτώ ομόλογα σημεία μπορεί να υπολογιστεί ο Επιπολικός Πίνακας (Fundamental matrix-F), (Κυπαρίσση, 2011), με την επίλυση μιας γραμμικής εξίσωσης, ο οποίος μπορεί να αναλυθεί και να δώσει το σχετικό προσανατολισμό της κάμερας και τη θέση της (Longuet-Higgins, 1981).

5.2.5.Ο επιπολικός πίνακας (πίνακας F)

Δεδομένης της προβολής ενός τρισδιάστατου σημείου σε μία εικόνα, η προβολή του σε μια δεύτερη εικόνα περιορίζεται στην αντίστοιχη επιπολική ακτίνα. Η επιπολική γεωμετρία των εικόνων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 46 Επιπολική γεωμετρία δύο εικόνων

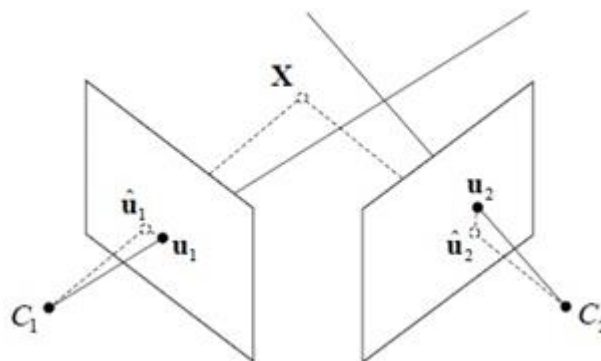
Επιπολική γεωμετρία για δύο κάμερες: δεδομένης της προβολής \tilde{x} ενός 3D σημείου X στην πρώτη εικόνα του ζεύγους, η προβολή του, \tilde{x}' , στη δεύτερη εικόνα θα πρέπει αναγκαστικά να βρίσκεται πάνω στην ευθεία \tilde{I}' . Η ευθεία αυτή είναι η προβολή στη δεύτερη εικόνα της ευθείας που διέρχεται από το οπτικό κέντρο C της πρώτης εικόνας, την προβολή \tilde{x} στην πρώτη εικόνα και το τρισδιάστατο σημείο X . Όλες οι επιπολικές ευθείες σε μια εικόνα περνούν από ένα κοινό σημείο, το οποίο ονομάζεται επιπολικό κέντρο και αποτελεί την προβολή του οπτικού κέντρου της άλλης εικόνας στην εν λόγω εικόνα (e και e' αντίστοιχα). Η επιπολική γεωμετρία του ζεύγους των εικόνων εκφράζεται μέσω του Επιπολικού Πίνακα F (Fundamental matrix). Για τον υπολογισμό του πίνακα F είναι απαραίτητα 8 ζεύγη ομόλογων σημείων. Ο πίνακας αυτός εξαρτάται από τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό του ζεύγους των εικόνων, και μπορεί να υπολογιστεί γραμμικά, εκτός από την περίπτωση όπου τα κέντρα

των μηχανών βρίσκονται σε ένα τετράγωνο ή βρίσκονται όλα στο ίδιο επίπεδο (Faugeras & Maybank, 1990). Από αυτόν λαμβάνεται η κίνηση της κάμερας και, κατά συνέπεια, οι προβολικοί πίνακες.

Αν οι πίνακες βαθμονόμησης της κάμερας είναι γνωστοί, είναι δυνατή η ανάκτηση ενός ζεύγους συμβατών προβολικών πινάκων με ασάφεια μέχρι μίας παραμέτρου, που αντιστοιχούν σε μια άγνωστη κλίμακα για τη μετάθεση της κάμερας. Αν είναι γνωστοί οι πίνακες βαθμονόμησης των δύο εικόνων K, K' , τότε ο πίνακας γίνεται Δεσμευμένος Επιτολικός Πίνακας E (Essential matrix), (Κυπαρίσση, 2011), ο οποίος μπορεί να αναλυθεί σε έναν συμμετρικό ως προς τη λοξότητα, πίνακα που αντιστοιχεί στη μετάθεση και έναν ορθοκανονικό πίνακα που αντιστοιχεί στη στροφή μεταξύ των δύο όψεων.

5.2.6. Τριγωνισμός

Αν είναι γνωστοί οι προβολικοί πίνακες, τα τρισδιάστατα σημεία μπορούν να υπολογιστούν από τις μετρημένες θέσεις τους σε μία ή περισσότερες εικόνες, με μια διαδικασία που ονομάζεται τριγωνισμός. Ιδανικά, τα τρισδιάστατα σημεία αναμένεται να βρίσκονται στο σημείο τομής των ακτινών που προβάλλονται ανάποδα (back projected rays). Κάτι τέτοιο, όμως, δε συμβαίνει, εξ αιτίας του θορύβου που υπάρχει στις μετρήσεις, έτσι, τα σημεία πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα (minimize an appropriate error metric). Για ένα ζεύγος λήψεων, η διαδικασία γίνεται χωρίς επαναλήψεις, και περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των διαφορών μεταξύ των μετρημένων και των αναμενόμενων θέσεων των σημείων πάνω στις εικόνες (Hartley & Sturm, 1994). Για περισσότερες από δύο προβολές, η ελαχιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί επαναληπτικά, με μη γραμμική βελτιστοποίηση.



Εικόνα 47 Τριγωνισμός

Με γνωστούς τους προβολικούς πίνακες, ένα τρισδιάστατο σημείο μπορεί να υπολογιστεί από τις μετρημένες θέσεις του σε μία ή περισσότερες εικόνες (μετρήσεις σε pixel). Όπως αναφέρθηκε, ιδανικά τα σημεία θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω στην τομή των προβαλλόμενων ακτινών, όμως οι ακτίνες συνήθως δεν τέμνονται, λόγω του θορύβου των μετρήσεων.

5.2.7.SfM πολλών λήψεων

Ο επιπολικός πίνακας περιέχει τη γεωμετρική πληροφορία που συνδέει ζεύγη φωτογραφιών. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία της επίλυσης της δομής και της κίνησης για έναν πεπερασμένο αριθμό εικόνων. Οι δύο βασικές μέθοδοι που ακολουθούν οι αλγόριθμοι είναι η διαδοχική μέθοδος (sequential algorithms) και η παραγοντοποίηση (factorization methods).

5.2.7.1.Sequential αλγόριθμοι

Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι οι πιο δημοφιλείς. Δουλεύουν ενσωματώνοντας συνεχόμενες εικόνες, μία κάθε φορά. Κατά την καταγραφή κάθε μιας εικόνας, γίνεται μερική ανακατασκευή του αρχικού αντικειμένου η οποία σιγά σιγά επεκτείνεται-με την πρόσθεση κάθε νέας εικόνας-μέσω του υπολογισμού της θέσης όλων των τρισδιάστατων σημείων που είναι ορατά σε δύο ή περισσότερες εικόνες, χρησιμοποιώντας τριγωνισμό. Η μέθοδος αυτή απαιτεί κατάλληλη αρχικοποίηση, η οποία επιτυγχάνεται με την αποσύνθεση του επιπολικού πίνακα που συνδέει τις δύο πρώτες εικόνες της ακολουθίας. Για την καταγραφή διαδοχικών όψεων, μετά την αρχικοποίηση, υπάρχουν αρκετές στρατηγικές:

Επιπολικοί περιορισμοί: μία πιθανότητα είναι να αξιοποιηθεί η επιπολική γεωμετρία των δύο λήψεων που ενώνει κάθε εικόνα με την αμέσως προηγούμενή της. Για παράδειγμα, όπου είναι γνωστές οι εσωτερικές παράμετροι της μηχανής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι επιπολικοί πίνακες. Οι πίνακες αυτοί υπολογίζονται γραμμικά χρησιμοποιώντας τουλάχιστον οκτώ ομολογίες σημείων, και μπορούν να αναλυθούν για να δώσουν το σχετικό προσανατολισμό της κάμερας και τη διεύθυνση της μετάθεσης της κάμερας. Το μέγεθος της μετάθεσης μπορεί να διορθωθεί χρησιμοποιώντας την εικόνα μόνο ενός γνωστού σημείου στη νέα λήψη, π.χ. ενός σημείου που έχει ήδη ανακατασκευαστεί από τις εικόνες του σε προηγούμενες λήψεις.

Οπισθοτομία (resection): μια άλλη μέθοδος είναι να καθοριστεί η θέση κάθε προστιθέμενης λήψης χρησιμοποιώντας ήδη καταγεγραμμένα τρισδιάστατα σημεία. Όπως είναι γνωστό, 6 ή περισσότερες 3D σε 2D αντιστοιχίσεις επιτρέπουν γραμμική λύση για τα 12 στοιχεία του προβολικού πίνακα.

Συγχώνευση μερικών ανακατασκευών: αυτό γίνεται με τη χρήση ομολογων 3D σημείων. Συνήθως, οι ανακατασκευές δύο ή τριών λήψεων επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας παρακείμενα ζεύγη ή τριπλέτες εικόνων, και ύστερα συγχωνεύονται χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα σημεία. Μεγαλύτερες ανακατασκευές μπορούν να επιτευχθούν ενώνοντας μεγαλύτερες ακολουθίες εικόνων.

Οι μέθοδοι αυτές έχουν κάποιους σημαντικούς περιορισμούς. Στα διαδραστικά συστήματα μοντελοποίησης, σημαντικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι πρέπει σε κάθε λήψη να ορίζεται ένας μεγάλος αριθμός ομολογων σημείων-τουλάχιστον 7 σημεία σε κάθε μία από αυτές. Δεδομένου μάλιστα ότι κάθε σημείο πρέπει να εμφανίζεται σε τρεις ή περισσότερες εικόνες, είναι απαραίτητο αυτές να λαμβάνονται με μεγάλη επικάλυψη. Από την άλλη, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εφαρμογή μιας μεθόδου και, κατά συνέπεια, ενός από τους συνηθισμένους αλγόριθμους SfM, θα αποτύ-

χει, όπως για παράδειγμα όταν υπάρχει στροφή κάμερας χωρίς μετάθεση, όταν τα αντικείμενα φωτογράφησης είναι πολύ επίπεδα ή όταν ένα σημείο βρίσκεται πάνω στην ευθεία που διέρχεται από τα οπτικά κέντρα των καμερών από τις οποίες είναι ορατό. Στην πράξη, βέβαια, είναι δύσκολο να αποφευχθούν πάντα τέτοιες περιπτώσεις, για αυτό και οι λήψεις των φωτογραφιών θα πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά (<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>).

5.2.7.2. Αλγόριθμοι *Factorization*

Οι μέθοδοι αυτές δουλεύουν υπολογίζοντας ταυτόχρονα τη θέση της κάμερας και τη γεωμετρία της σκηνής, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από όλες τις εικόνες ταυτόχρονα. Ένα πλεονέκτημα των εν λόγω μεθόδων είναι ότι τα σφάλματα της ανακατασκευής μπορούν να κατανεμηθούν σε όλες τις μετρήσεις και έτσι τα χονδροειδή σφάλματα που σχετίζονται με το κλείσιμο των αλληλουχιών των εικόνων μπορούν να αποφευχθούν. Οι αλγόριθμοι αυτοί ανήκουν σε μια ευρύτερη οικογένεια αλγορίθμων, που ονομάζονται αλγόριθμοι παρτίδας (*batch algorithms*), και προτάθηκαν αρχικά από τους Tomasi & Kanade (1992). Οι αλγόριθμοι αυτοί, μέχρι πρόσφατα, δεν μπορούσαν να εφαρμοστούν σε εικόνες που προέρχονται από καθημερινές κάμερες, αφού οι φακοί που χρησιμοποιούν είναι υπερβολικά ευρυγώνιοι. Τον τελευταίο καιρό, όμως, έχουν προταθεί κάποιοι αλγόριθμοι τύπου-*Factorization* για τις προοπτικές κάμερες (Sturn & Triggs, 1996, Heyden, 1997, Schaffalitzky, 2000 κ.λπ.). ενώ όμως οι αρχικές μέθοδοι έδιναν γραμμικά αποτελέσματα, οι πιο πρόσφατες είναι επαναληπτικές και δεν είναι πάντα σίγουρο ότι θα συγκλίνουν στην βέλτιστη λύση. Και πάλι υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στις οποίες μπορεί οι αλγόριθμοι αυτοί να αποτύχουν, ενώ δεν μπορούν να αποδώσουν ορθή λύση σε περίπτωση που λείπουν δεδομένα. Συνήθως, δηλαδή, είναι απαραίτητο τα 3D σημεία να είναι ορατά σε όλες τις εικόνες, και ως εκ τούτου δεν είναι κατάλληλες για περιπτώσεις αραιής μοντελοποίησης (<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>).

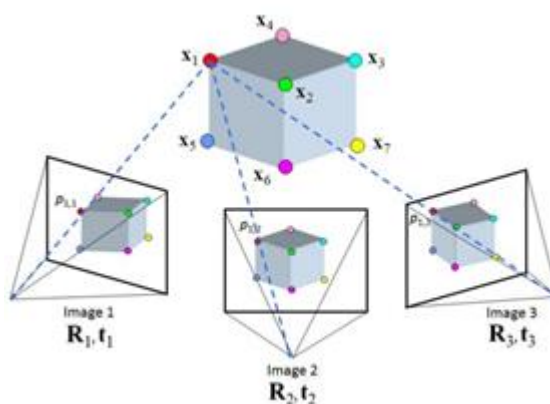
5.2.8. Bundle Adjustment

Από τις μετρήσεις u_{ij} στις εικόνες οι αλγόριθμοι SfM δίνουν μια αρχική εκτίμηση των προβολικών πινάκων P_i και των τρισδιάστατων σημείων X_j . Συνήθως ακολουθεί μια επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης, που ονομάζεται *Bundle Adjustment*. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η βέλτιστη εκτίμηση ενός συνόλου παραμέτρων, με δεδομένο ένα σύνολο παρατηρήσεων που περιέχουν θόρυβο. Οι περισσότερες παράμετροι δεν μπορούν να καταγραφούν άμεσα, όπως οι προβολικοί πίνακες και οι τρισδιάστατες συντεταγμένες. Αντί αυτού, επιτρέπουν να γίνουν προβλέψεις που μπορούν να παρατηρηθούν, όπως είναι, για παράδειγμα, οι μετρημένες συντεταγμένες σε pixel των απεικονιζόμενων τρισδιάστατων σημείων.

5.3. Structure from Motion (SfM)

5.3.1. Εισαγωγή

Η μέθοδος SfM-Δομή από κίνηση, είναι μια μέθοδος ανάκτησης της 3D δομής ενός αντικειμένου από έναν αριθμό-συνήθως μεγάλο-από επικαλυπτόμενες φωτογραφίες. Ο τρόπος με τον οποίο δουλεύει, σε γενικές γραμμές, είναι ο εξής: αρχικά εντοπίζονται ομόλογα σημεία σε γειτονικές εικόνες. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας αυτά αλλά και την αλλαγή στη θέση της κάμερας για κάθε εικόνα που λαμβάνεται, υπολογίζεται η διαφορά θέσης (motion) ανάμεσα σε αυτές, και, ταυτόχρονα, με τριγωνισμό, υπολογίζονται σε ένα τοπικό σύστημα οι τρισδιάστατες θέσεις των ομόλογων σημείων που εντοπίζονται στις επικαλυπτόμενες εικόνες. Η μέθοδος SfM διέπεται από τις ίδιες αρχές με τη στερεοσκοπική φωτογραμμετρία, αφού, όπως αναφέρθηκε, η τρισδιάστατη δομή ανακτάται από επικαλυπτόμενες εικόνες. Εντούτοις, μια σημαντική διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι η γεωμετρία της σκηνής, οι θέσεις της κάμερας και ο προσανατολισμός επιλύονται αυτοματοποιημένα. Όλα επιλύονται ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας μία επαναληπτική διαδικασία με βάση ένα μεγάλο σύνολο χαρακτηριστικών σημείων εξαγόμενων από τις επικαλυπτόμενες εικόνες (Bundle Adjustment) (Snavely, 2008).



Εικόνα 48 Απεικόνιση της μεθόδου SfM

Ανεπτυγμένη για πρώτη φορά στα 1990, η τεχνική αυτή προήλθε από την κοινότητα της όρασης των υπολογιστών (Spetsakis, Aloimonos, 1991, Boufama et al., 1993, Szeliski, Kang, 1994) και την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων αλγορίθμων συνταύτισης σημείων της προηγούμενης δεκαετίας (Förstner, 1986, Harris και Stephens, 1988). Οι δυνατότητές της είναι πολλές, και στα χρόνια που ακολούθησαν αναπτύχθηκε περαιτέρω και εφαρμόστηκε σε πολλούς τομείς, όπως στις γεωεπιστήμες, τις τέχνες, τις εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας και σε κάθε άλλη περίπτωση όπου είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου (Westoby et al., 2012).

Με δεδομένο το γεγονός ότι δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται στόχοι γνωστών συντεταγμένων, τα τρισδιάστατα νέφη σημείων που προκύπτουν από την SfM συνήθως δεν έχουν κλίμακα και προσανατολισμό. Συνεπώς, τα νέφη σημείων

δημιουργούνται σε ένα σχετικό σύστημα συντεταγμένων, το σύστημα της εικόνας, το οποίο πρέπει να συνδεθεί με το πραγματικό σύστημα συντεταγμένων. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, η μετατροπή των συντεταγμένων της εικόνας σε πραγματικές συντεταγμένες γίνεται με έναν μετασχηματισμό ομοιότητας, ο οποίος βασίζεται σε ένα μικρό αριθμό σημείων με γνωστές τρισδιάστατες συντεταγμένες (ground control points-GCP) εντελώς αντίστοιχα με τις διαδικασίες της κλασικής Φωτογραμμετρίας. Τα σημεία αυτά μπορούν να προκύψουν μετά τη διαδικασία, αναγνωρίζοντας χαρακτηριστικά σημεία ορατά στο νέφος σημείων και στο πεδίο, όπου η μέτρηση των συντεταγμένων του γίνεται με τοπογραφικές τεχνικές. Στην πράξη, βέβαια, είναι ευκολότερη η τοποθέτηση ευδιάκριτων στόχων στο πεδίο, πριν την απόκτηση των φωτογραφιών.

5.3.2.Διάγραμμα ροής της μεθόδου

5.3.2.1.Απόκτηση εικόνων και εξαγωγή χαρακτηριστικών σημείων (keypoints)

Το βασικό πρόβλημα της SfM έγκειται στον καθορισμό της τρισδιάστατης «περιοχής» των ομόλογων χαρακτηριστικών σε ένα σύνολο από φωτογραφίες που έχουν ληφθεί από διαφορετικά σημεία. Πρώτο βήμα για την επίλυσή του, είναι η αναγνώριση στις φωτογραφίες χαρακτηριστικών σημείων (σημείων ενδιαφέροντος) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αντιστοίχιση των εικόνων. Για να μπορεί ένα σημείο να χρησιμοποιηθεί ως σημείο ενδιαφέροντος είναι απαραίτητο να διακρίνεται από το υπόβαθρο και από τη γειτονιά του, δηλαδή τα παραπλήσια σημεία. Τα σημεία αυτά, ακόμα, είναι αμετάβλητα και δεν επηρεάζονται από διαφοροποιήσεις στην κλίμακα της εικόνας ή από στροφή της, ούτε από κάθε άλλη γεωμετρική ή ραδιομετρική παραμόρφωσή τους, από το θόρυβο που ενδεχομένως υπάρχει στις εικόνες, ενώ είναι μερικώς αμετάβλητα και στις αλλαγές των συνθηκών φωτισμού (Lowe, 2004). Για τον εντοπισμό των σημείων ενδιαφέροντος χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοί, που ονομάζονται Interest Operators, και δουλεύουν εντοπίζοντας χαρακτηριστικά σημεία στην εικόνα σε σημεία, ακμές ή περιοχές. Στη μέθοδο SfM, συνήθως χρησιμοποιούνται οι αλγόριθμοι SIFT (Scale Invariant Feature Transform) και SURF (Speed Up Robust Features). Και οι δύο περιλαμβάνουν ανιχνευτές που εντοπίζουν σημεία ενδιαφέροντος στις εικόνες. Οι ανιχνευτές αυτοί λειτουργούν διαφορετικά για τους δύο αλγόριθμους, τα αποτελέσματά τους όμως είναι και στις δύο περιπτώσεις μια παρουσίαση της γειτονιάς γύρω από ένα σημείο ενδιαφέροντος ως ένα περιγραφικό διάνυσμα (descriptor vector). Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι ενδεδειγμένοι για εφαρμογές όπου χρειάζεται να συσχετιστούν εικόνες, καθώς δίνουν τη δυνατότητα διαχείρισης προβλημάτων όπως οι αποκρύψεις και αντικείμενα που λείπουν (Westoby, 2012).

Αλγόριθμος SIFT: αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Lowe το 1999 και λειτουργεί εντοπίζοντας, περιγράφοντας και εξάγοντας από μια εικόνα χαρακτηριστικά σημεία το οποία αργότερα χρησιμοποιούνται για τη συνταύτιση των εικόνων και την αναγνώριση αντικειμένων. Κάθε χαρακτηριστικό σημείο περιγράφεται από ένα

διάνυσμα που ονομάζεται feature descriptor. Για κάθε εφαρμογή υπάρχουν διαφορετικές διαδικασίες, όμως η πιο κοινή είναι ο υπολογισμός του εγγύτερου γείτονα ενός χαρακτηριστικού και αμέσως μετά ο έλεγχος για το αν ο δεύτερος εγγύτερος γείτονας είναι πιο μακριά από κάποια τιμή κατωφλίου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δίνει αποτελέσματα υψηλής ακρίβειας και έχει σχετικά μικρό χρόνο υπολογισμών, παρόλα αυτά η πειραματική εφαρμογή του έχει δείξει πως δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε εφαρμογές κλειστού χώρου και όχι στο ύπαιθρο (Andreasson & Duckett, 2004). Τα βήματα που ακολουθεί ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι τα παρακάτω:

- ✓ Αρχικά δημιουργείται μια πυραμίδα εικόνων διαφορετικής κλίμακας. Σε κάθε επίπεδο αυτής της πυραμίδας εφαρμόζονται γκαουσιανά φίλτρα εξομάλυνσης διαφορετικής τυπικής απόκλισης, και τα σημεία ενδιαφέροντος εντοπίζονται ως μέγιστα ή ελάχιστα της συνάρτησης διαφοράς των διαδοχικών εξομαλυμένων εικόνων (Difference of Gaussian DoG).
 - ✓ Έπειτα προσδιορίζονται οι θέσεις των σημείων ενδιαφέροντος με υποψηφιακή ακρίβεια, παρεμβάλλοντας πολυώνυμα δευτέρου βαθμού στη συνάρτηση διαφοράς των εικόνων.
 - ✓ Για κάθε σημείο υπολογίζεται ο προσανατολισμός και το μέτρο των τοπικών κλίσεων στην κλίμακα του επιπέδου της πυραμίδας όπου αυτό εντοπίστηκε. Έτσι προκύπτει ένα nx4 διάνυσμα, όπου n είναι το πλήθος των εξαγόμενων σημείων με τις συντεταγμένες της θέσης, την κλίμακα και τον προσανατολισμό του κάθε σημείου.
 - ✓ Για κάθε σημείο υπολογίζονται τα περιγραφικά χαρακτηριστικά του, με τη χρήση ενός παραθύρου γύρω από αυτό, με κέντρο το ίδιο το σημείο και στραμμένο βάσει του προσανατολισμού του. μέσα σε αυτό το παράθυρο υπολογίζονται τα μέτρα και οι διευθύνσεις των τοπικών κλίσεων της εικόνας.
 - ✓ Το μέτρο της ομοιότητας των χαρακτηριστικών που χρησιμοποιούνται για τη συνταύτιση των σημείων είναι ο υπολογισμός της ευκλείδειας απόστασης των διανυσμάτων των ιδιοτήτων τους. Οι αντιστοιχίες μεταξύ των χαρακτηριστικών προκύπτουν με τη μέθοδο του εγγύτερου γείτονα (Κοντογιάννη, 2014).
- Αλγόριθμος SURF: παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Bay, Tuytelaars και Van Gool το 2006. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ταχύτερα υπολογιζόμενων εύρωστων χαρακτηριστικών ο οποίος μοιάζει με αλγόριθμους που είχαν προταθεί πριν από αυτόν, δίνει όμως καλύτερα αποτελέσματα. Περιλαμβάνει κάποιες απλοποιημένες μεθόδους παλαιότερων αλγορίθμων και έναν ειδικό τρόπο αναπαράστασης της εικόνας, τη λεγόμενη Αθροιστική Εικόνα (Integral Image), με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου εύρεσης ομόλογων σημείων (Κοντογιάννη, 2014). Ο SURF χρησιμοποιεί τον ίδιο τρόπο αντιστοίχισης σημείων με τον SIFT, με μια επιπλέον βελτίωση: περιλαμβάνει τη Λαπλασιανή (the sign of the Laplacian), δηλαδή επιτρέπει μια γρήγορη διαφοροποίηση μεταξύ φω-

τεινών χαρακτηριστικών σημείων σε σκοτεινό υπόβαθρο και σκοτεινών χαρακτηριστικών σημείων σε φωτεινό υπόβαθρο, το οποίο έχει ως απώροια τη γρηγορότερη αντιστοίχιση των χαρακτηριστικών σημείων. Τα αποτελέσματα που δίνει είναι συγκρίσιμα και, πολλές φορές, καλύτερα σε σχέση με αυτά του SIFT, ενώ δίνει αποτελέσματα με μικρότερο υπολογιστικό χρόνο (Valgren, Lilienthal, 2014). Ο τρόπος λειτουργίας του είναι ο εξής: ένας ανιχνευτής εντοπίζει σημεία ενδιαφέροντος, ενώ ένας περιγραφέας περιγράφει τη γειτονιά τους χωρίς να χρησιμοποιεί πληροφορία χρώματος. Ο ανιχνευτής και ο περιγραφέας είναι ανεξάρτητοι από την κλίμακα και την περιστροφή και έτσι τα σημεία ενδιαφέροντος που εντοπίζονται είναι αναλλοίωτα στους μετασχηματισμούς κλίμακας και περιστροφής, σε εικόνες που έχουν ληφθεί με διαφορετικές γωνίες στροφής, που έχουν διαφορετική κλίμακα ή που απεικονίζουν μόνο ένα κομμάτι του αντικειμένου. Τα σημεία αυτά μπορούν κατόπιν να ταυτιστούν με βάση τις πληροφορίες του περιγραφέα κατά τη διαδικασία εύρεσης ομόλογων σημείων. Ο περιγραφέας είναι ανεξάρτητος από τις μεταβολές του φωτισμού και της αντίθεσης, ενώ, λόγω της ευρωστίας του, αντισταθμίζονται τα προβλήματα της μη ορθογωνικότητας των pixels, η ανισοτροπική κλίμακα και οι διάφορες προοπτικές επιδράσεις (Κοντογιάννη, 2014). Ο αριθμός των σημείων ενδιαφέροντος σε μια εικόνα εξαρτάται από την υφή και τη ανάλυσή της, έτσι οι εικόνες που είναι πιο πολύπλοκες, με μεγαλύτερη ανάλυση, θα δώσουν περισσότερα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, η πυκνότητα, η σαφήνεια και η ανάλυση του συνόλου των εικόνων, μαζί με το εύρος των υφών στη φωτογραφούμενη σκηνή, θα καθορίσουν τελικά την ποιότητα του εξαγόμενου νέφους σημείων. Διαφοροποιήσεις στην πολυπλοκότητα, το φωτισμό και τα υλικά του πεδίου επηρεάζουν την υφή της εικόνας, επομένως είναι αδύνατο να καθοριστεί ένας ακριβής αριθμός φωτογραφιών για την τρισδιάστατη ανακατασκευή. Τα χαρακτηριστικά σημεία είναι απαραίτητο να είναι ορατά σε τουλάχιστον τρεις εικόνες, εντούτοις συνιστάται η απόκτηση όσο το δυνατόν περισσότερων εικόνων, καθώς έτσι βελτιστοποιούνται οι ομολογίες των χαρακτηριστικών σημείων (Westoby, 2012). Το πρόγραμμα PhotoScan, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μοντέλου στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο εντοπισμού σημείων ενδιαφέροντος ο οποίος έχει πολλές ομοιότητες με τον αλγόριθμο SIFT.

5.3.2.2. Συνταύτιση εικόνων (*Matching*)

Αμέσως μετά την αναγνώριση των σημείων ενδιαφέροντος, ακολουθεί η συνταύτιση των εικόνων, κατά την οποία εντοπίζονται ομόλογα σημεία μεταξύ τους. Τα σημεία στις φωτογραφίες ταυτίζονται με τη χρήση των αλγορίθμων του Εγγύτερου Γείτονα (Arya et.al, 1998) και RANSAC (Random Sample Consensus, Fischler & Bolles, 1987), (Westoby, 2012). Το πρόβλημα της συνταύτισης των εικόνων είναι

αρκετά πολύπλοκο, λόγω του ότι μπορεί να υπάρχουν αποκρύψεις (ένα σημείο να φαίνεται σε μία εικόνα και όχι στις επόμενες εξ αιτίας αλλαγών στην προοπτική ή στο φωτισμό κ.λπ.) ή πολλαπλές λύσεις (δηλαδή ένα σημείο σε μια εικόνα να ταιριάζει με ένα ή περισσότερα σημεία σε επόμενες εικόνες), ή μπορεί η λύση να είναι ασταθής λόγω θορύβου ή αδύναμης υφής (Κοντογιάννη, 2014).



Εικόνα 49 Ομόλογα σημεία από το γλυπτό "Αυτοκράτωρ και Δούλος"

Οι αλγόριθμοι συνταύτισης χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- **Area Based Matching:** οι αλγόριθμοι αυτοί συσχετίζουν τις τιμές έντασης μεταξύ των εικόνων χρησιμοποιώντας παράθυρα pixel, χρησιμοποιώντας μία εικόνα αναφοράς και μία εικόνα αναζήτησης. Το παράθυρο pixel που εφαρμόζεται στην κάθε μία ονομάζονται πρότυπο παράθυρο και παράθυρο αναζήτησης αντίστοιχα, και οι διαστάσεις τους μπορεί να είναι από μερικά pixel έως μερικές δεκάδες pixel, ανάλογα με την εφαρμογή. Χρησιμοποιούνται μέτρα συσχέτισης όπως το άθροισμα των απολύτων διαφορών, το άθροισμα των τετραγωνικών διαφορών συσχέτισης κ.λπ., για να ελεγχθεί αν τα δύο παράθυρα ταιριάζουν ή όχι, ενώ για την επίτευξη υποψηφιακής ακρίβειας χρησιμοποιείται η MET, επειδή η μέθοδος αυτή εξαρτάται μόνο από τις τιμές έντασης και έτσι είναι πολύ ευαίσθητη στις ραδιομετρικές μεταβολές.
- **Feature Based matching:** εδώ η συνταύτιση δε βασίζεται στις τιμές έντασης, αλλά συγκρίνονται στοιχεία όπως σημεία, γραμμές και πολύγωνα, λαμβάνοντας υπόψη τα γειτονικά χαρακτηριστικά. Τα στοιχεία αυτά περιγράφονται βάσει κάποιων κριτηρίων όπως ο προσανατολισμός και οι πληροφορίες κλίσης και καμπυλότητας, και τα χαρακτηριστικά σημεία συγκρίνονται και θεωρείται ότι αποτελούν ένα ομόλογο ζεύγος αν και μόνο αν η απόσταση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά είναι η ελάχιστη.
- **Relational Matching:** Η συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται στη συνταύτιση σχετικών χαρακτηριστικών (γεωμετρικών, ραδιομετρικών ή τοπολογικών), με βάση μετρήσεις ομοιότητας ανάμεσα στις ιδιότητες των χαρακτηριστικών αυτών. Η τεχνική αυτή μειώνει το πρόβλημα της ασάφειας μεταξύ των σχετικών περιγραφών και δίνει καλά αποτελέσματα, ενώ συνήθως χρησιμοποιεί δέντρα αναζήτησης (Κοντογιάννη, 2014).

Το 1913, ο Kruppa απέδειξε ότι, με δεδομένες τις δύο εικόνες πέντε διαφορετικών τρισδιάστατων σημείων, είναι δυνατή η ανάκτηση της σχετικής θέσης και του προσανατολισμού των καμερών και οι θέσεις των σημείων σε μια αυθαίρετη κλίμακα. Οι Longuet-Higgins απέδειξαν στις αρχές του 1980 ότι ο δεσμευμένος επιπολικός πίνακας (essential matrix) μπορεί να υπολογιστεί από οκτώ ή περισσότερες ομολογίες σημείων επιλύοντας μια γραμμική εξίσωση και ακόμα πως μπορεί να αναλυθεί για να δώσει τον προσανατολισμό και τη θέση της κάμερας.

Η γεωμετρία δύο λήψεων είναι πολύ χρήσιμη στην ανάκτηση πληροφοριών για τη σχετική θέση μεταξύ των δύο εικόνων αλλά και για την απόκλιση λάθος ομολογιών, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η περαιτέρω διαδικασία. Με δεδομένο έναν αριθμό ομόλογων σημείων, μπορεί να υπολογιστεί ο επιπολικός πίνακας F , μέσω της σχέσης

$$[xx' \ yx'x' \ xy' \ yy'y' \ x \ y \ 1]f = 0$$

Όπου f είναι το διάνυσμα που περιέχει τα στοιχεία του F . Οκτώ ή περισσότερες εξισώσεις επιτρέπουν τη γραμμική λύση του πίνακα. Σύμφωνα με τον Hartley, είναι σημαντική η κανονικοποίηση των συντεταγμένων των εικόνων πριν από την επίλυση των γραμμικών εξισώσεων, για αποφυγή σφαλμάτων, και αυτό γίνεται συνήθως μέσω της ελαχιστοποίησης του παρακάτω κριτηρίου:

$$C(F) = \sum (d(x', Fx)^2 + d(x, F^T, x')^2)$$

το οποίο μπορεί να ελαχιστοποιηθεί μέσω του αλγόριθμου Levenberg-Marquard, ενώ καλύτερη προσέγγιση προσφέρει ο υπολογισμός μιας εκτίμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας, ελαχιστοποιώντας το ακόλουθο κριτήριο:

$$C(F, \check{x}, \check{x}') = \sum (d(\check{x}, x)^2 + d(\check{x}', x')^2)$$

Για τον υπολογισμό του F από μια σειρά ζευγών σημείων που ανακτήθηκαν αυτοματοποιημένα από δύο εικόνες, πρέπει να μην υπάρχουν ακραίες τιμές, καθώς σε αντίθετη περίπτωση το αποτέλεσμα δεν θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση του αλγόριθμου RANSAC (Fischler και Bolles, 1987). Ένα μικρό μέρος των δεδομένων επιλέγεται τυχαία και η λύση που προκύπτει από αυτό χρησιμοποιείται για να χωρίσει τα δεδομένα σε ακραίες και μη ακραίες τιμές. Αν το αρχικό σετ δεδομένων δεν περιέχει ακραίες τιμές, αναμένεται ότι ένας σημαντικός αριθμός από αποδεκτές τιμές θα υποστηρίξει τη λύση, αλλιώς το αρχικό σετ μάλλον περιέχει ακραίες τιμές. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να δοθεί ικανοποιητική λύση. Αυτό για παράδειγμα μπορεί να οριστεί ως η πιθανότητα 95% ότι ένα καλό υποσύνολο έχει επιλεγεί. Η έκφραση αυτής της πιθανότητας είναι $\Gamma = 1(1 - \gamma^P)^m$, όπου γ είναι το κλάσμα (fraction) των αποδεκτών τιμών, p ο αριθμός των χαρακτηριστικών σημείων σε κάθε δείγμα και m ο αριθμός των επαναλήψεων.

Από τη στιγμή που έχει υπολογιστεί η επιπολική γεωμετρία, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για τις επόμενες συσχετίσεις. Σε αυτό το σημείο, μόνο σημεία κοντινά στην επιπολική ευθεία μπορούν να συνταυτιστούν (Κοντογιάννη, 2014).

5.3.2.3. Ανάκτηση δομής από κίνηση (SfM δύο λήψεων)

Προηγουμένως περιγράφηκε ο τρόπος με τον οποίο δύο λήψεις μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους. Σε αυτή την παράγραφο, η συσχέτιση μεταξύ των εικόνων και οι αντιστοιχίες των χαρακτηριστικών σημείων θα χρησιμοποιηθούν για την ανά-

κτηση του αντικειμένου και την κίνηση της κάμερας. Το πρόβλημα αυτό ονομάζεται Δομή και Κίνηση (Structure and Motion).

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, επιλέγεται ένα κατάλληλο σύνολο εικόνων και δημιουργείται ένα αρχικό μοντέλο ανακατασκευής. Έπειτα, προσδιορίζεται η θέση της κάμερας για τις άλλες λήψεις σε αυτό το μοντέλο και κάθε φορά η αρχική κατασκευή βελτιώνεται και εμπλουτίζεται. Με αυτό τον τρόπο δύναται να γίνει και ο υπολογισμός της θέσης εικόνων που δεν έχουν κοινά σημεία με τις εικόνες-αναφοράς. Θεωρητικά, κάθε εικόνα συσχετίζεται με την αμέσως προηγούμενή της. Στις περισσότερες περιπτώσεις η τεχνική αυτή δίνει αρκετά καλά αποτελέσματα, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις (όπως στην περίπτωση που η κάμερα κινείται μπρος-πίσω) είναι χρήσιμη η συνταύτιση μιας νέας εικόνας με περισσότερες επιπλέον εικόνες. Αφού η δομή και η κίνηση προσδιοριστούν για το σύνολο των εικόνων, το αποτέλεσμα πρέπει να βελτιωθεί κατάλληλα, και αυτό γίνεται με τη χρήση του Bundle Adjustment.

5.3.2.4. Αρχικοποίηση SfM

Το πρώτο βήμα για την ανάκτηση της γεωμετρίας του αντικειμένου της εκάστοτε εργασίας είναι η επιλογή δύο κατάλληλων εικόνων για την αρχικοποίηση του υπολογισμού της δομής από κίνηση. Ένα ζεύγος εικόνων είναι κατάλληλο για την αρχικοποίηση αν υπάρχουν σε αυτές αρκετά χαρακτηριστικά σημεία τα οποία να μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους και αν δεν είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της αρχικής δομής. Το πρώτο από αυτά τα κριτήρια είναι εύκολο να ικανοποιηθεί, ενώ το δεύτερο όχι και τόσο, σε φωτογραφίες που δεν έχουν βαθμονομηθεί. Η απόσταση ανάμεσα στις εικόνες είναι η μέση απόσταση μεταξύ των σημείων, η οποία μεταφέρεται μέσω μια μέσης επίπεδης ομογραφίας. Στην πράξη, η επιλογή του αρχικού σκελετού μπορεί να γίνει με τη μεγιστοποίηση του αριθμού των ομολογιών και της απόστασης στις εικόνες, όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω.

Αρχικός σκελετός: ένα ζεύγος εικόνων χρησιμοποιείται σαν πλαίσιο αναφοράς, ένας σκελετός αναφοράς (frame). Ο σκελετός αυτός προσανατολίζεται βάσει της πρώτης εικόνας. Έπειτα, η δεύτερη εικόνα (κάμερα) επιλέγεται έτσι ώστε η επιπολική γεωμετρία να αντιστοιχεί στον ανακτηθέντα πίνακα F των εικόνων.

5.3.2.5. Αρχικοποίηση της δομής

Αφού οι δύο προβολικοί πίνακες έχουν προσδιοριστεί, οι ομολογίες μπορούν να ανασκευαστούν μέσω του τριγωνισμού. Όπως αναφέρθηκε, εξαιτίας του θορύβου, οι οπτικές ακτίνες δε θα τέμνονται ορθά. Στην περίπτωση της άγνωστης γεωμετρίας (uncalibrated images), οι ελαχιστοποιήσεις πρέπει να γίνουν στις εικόνες και όχι στο χώρο. Έτσι, η απόσταση μεταξύ των επαναπροβαλλόμενων τρισδιάστατων σημείων και των σημείων στις εικόνες θα πρέπει να είναι η ελάχιστη.

Σύμφωνα με τους Hartley και Sturm, το μόνο σημαντικό βήμα είναι η επιλογή του επιπολικού επιπέδου στο οποίο θα ανασκευαστεί το κάθε σημείο. Έπειτα, πρέπει

να επιλεγθεί το βέλτιστο σημείο του επιπέδου. Μια δέσμη επιπολικών επιπέδων έχουν μόνο μία παράμετρο, έτσι το πρόβλημα μεταφέρεται από τις τρεις διαστάσεις στη μία. Σε κάθε εικόνα επιλέγεται το σημείο των επιπολικών ευθειών l_1, l_2 που είναι πιο κοντά στα σημεία m_1 και m_2 αντίστοιχα, και, αφού τα σημεία αυτά βρίσκονται σε επιπολική ακολουθία, οι οπτικές ευθείες τους συναντώνται στο τρισδιάστατο σημείο.

5.3.2.6.Ανανέωση SfM

Αφού έχει αποκτηθεί μια αρχική ανακατασκευή από δύο εικόνες, μετά μπορούν να προστεθούν εικόνες στην αρχική κατασκευή. Αρχικά υπολογίζεται η θέση της κάμερας, και έπειτα η δομή ανανεώνεται βάσει της νέας εικόνας και νέα σημεία αρχικοποιούνται.

5.3.2.7.Υπολογισμός προβολικής θέσης

Για κάθε νέα λήψη, προσδιορίζεται η θέση της σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα κατασκευή και έπειτα γίνεται ενημέρωσή της. Το πρώτο βήμα αποτελείται από την εύρεση της επιπολικής γεωμετρίας, ενώ ακολούθως οι ομολογίες που αντιστοιχούν σε ήδη ανακατασκευασμένα σημεία χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώσουν αντιστοιχίες μεταξύ τρισδιάστατων και δισδιάστατων σημείων. Βάσει αυτού, δημιουργείται ο προβολικός πίνακας P χρησιμοποιώντας μια εύρωστη διαδικασία παρόμοια με εκείνη του υπολογισμού της γεωμετρίας δύο εικόνων. Σε αυτή την περίπτωση, χρειάζονται τουλάχιστον 6 ομολογίες σημείων για τον υπολογισμό του P . Ένα σημείο θεωρείται ότι είναι αποδεκτό αν υπάρχει τρισδιάστατο σημείο που προβάλλεται σωστά σε όλες τις συμμετέχουσες εικόνες. Αυτό απαιτεί τη βελτίωση της αρχικής λύσης, έτσι ώστε να συμπεριληφθούν όλες οι παρατηρήσεις, ακόμα και η τελευταία. Επειδή κάτι τέτοιο κοστίζει υπολογιστικά, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος RANSAC. Αφού προσδιοριστεί ο P , οι προβολές των ήδη ανακατασκευασμένων σημείων μπορούν να προβλεφθούν, έτσι μπορούν να αποκτηθούν και κάποιες επιπλέον ομολογίες σημείων. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το πεδίο έρευνας μειώνεται από ολόκληρη την εικόνα στην επιπολική ευθεία και τέλος στην προβλεπόμενη προβολή του σημείου.

Με αυτή τη διαδικασία, κάθε εικόνα συνδέεται μόνο με την αμέσως προηγούμενή της. Γενικά, λαμβάνεται ως δεδομένο ότι, μόλις ένα σημείο δεν είναι πια ορατό, δε θα ξαναφανεί, κάτι το οποίο δεν είναι πάντα αληθές. Έστω ότι ένα σημείο δεν είναι ορατό αλλά εμφανίζεται ξανά στις τελευταίες δύο λήψεις. Σε αυτή την περίπτωση θα δημιουργηθεί ένα νέο σημείο, κάτι που μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, αφού αυτά τα σημεία, που δε σχετίζονται στο σύστημα, δεν είναι απαραίτητο ότι θα ταυτιστούν.

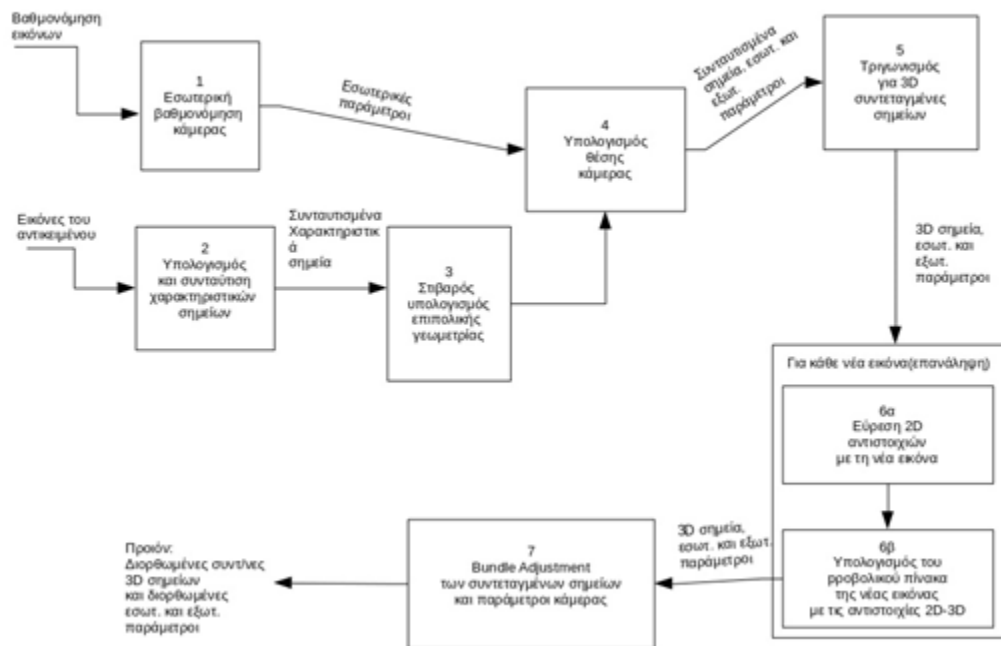
5.3.2.8.Βελτίωση και επέκταση υπάρχουσας δομής

Η δομή βελτιώνεται χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ανακατασκευής σε κάθε σημείο. Αν ένα τρισδιάστατο σημείο δεν παρατηρηθεί, η θέση του δεν ενημερώνεται. Σε αυτή την περίπτωση είναι δυνατός ο έλεγχος για το αν το σημείο είναι ορατό σε έναν επαρκή αριθμό εικόνων, έτσι ώστε να συμπεριληφθεί στην

τελική ανακατασκευή. Έτσι αποφεύγεται ένας μεγάλος αριθμός ακραίων τιμών λόγω λανθασμένων ομολογιών. Βέβαια, σε κάθε νέα εικόνα αναμένεται να εμφανιστούν κάποια καινούρια χαρακτηριστικά σημεία. Αν είναι διαθέσιμες αντιστοιχίσεις σημείων που δεν είχαν σύνδεση με τα υπάρχοντα σημεία της δομής, τότε θα αρχικοποιηθεί ένα νέο σημείο.

5.3.2.9.Βελτίωση δομής από κίνηση

Αφού ανακτηθεί η δομή και η κίνηση για ολόκληρη την ακολουθία των εικόπων, γίνεται η βελτίωσή της μέσω ενός βήματος καθολικής ελαχιστοποίησης. Χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος μέγιστης πιθανοφάνειας που στην ουσία είναι η συνόρθωση δέσμης (Bundle Adjustment). Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι να βρεθούν οι παράμετροι του προβολικού πίνακα (P) και τα τρισδιάστατα σημεία (M) για τα οποία οι μέσες τετραγωνικές αποστάσεις μεταξύ των παρατηρούμενων μετρήσεων στην εικόνα m_{ij} και των προβαλλόμενων σημείων της εικόνας $P_i (M_i)$ είναι ελάχιστες. Στο προβολικό μοντέλο της κάμερας θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη η ακτινική διαστροφή (Pollefeys et al., 2004).



Εικόνα 50 Διάγραμμα ροής της μεθόδου SfM

6. Πρακτική εφαρμογή

6.1. Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων

6.1.1. Το αντικείμενο μελέτης

Η Ρωμαϊκή Αγορά

Η Ρωμαϊκή Αγορά της Αθήνας χτίστηκε μεταξύ 19 και 11 π.Χ., ως συνέχεια της Αρχαίας Αγοράς, και για την ικανοποίηση των αναγκών της καθημερινής ζωής της πόλης. Η δημιουργία της έγινε από τις δωρεές του Ιουλίου Καίσαρα και του Αυγούστου, ενώ κατά τα χρόνια του Αδριανού ανακαινίστηκε και επεκτάθηκε, με την αγάπη των Ρωμαίων για την πολυτέλεια να είναι εμφανής σε πολλά από τα έργα της. Μετά την εισβολή των Ερούλων και την καταστροφή της πόλης, τέλη 3ου αιώνα μ.Χ., οι οικονομικές δραστηριότητες στη Ρωμαϊκή Αγορά περιορίστηκαν εντός του γνωστού Υστερορωμαϊκού Τείχους. Τους επόμενους αιώνες και μέχρι την Τουρκοκρατία, στο χώρο κτίστηκαν σπίτια, εργαστήρια, χριστιανικές εκκλησίες και το Φετιχιέ Τζαμί, ενώ η οικονομική και εμπορική της δραστηριότητα συνεχίστηκε. Μάλιστα, την περίοδο της τουρκοκρατίας ήταν γνωστή ως Σταροπάζαρο γιατί εκεί αποθήκευαν σιτάρι και άλλα αγροτικά προϊόντα. Τον 20ο αιώνα ανακαλύφθηκε και ανασκάφθηκε από τους αρχαιολόγους. Τα κυριότερα σημεία του χώρου είναι το Ωρολόγιο του Κυρρήστου ή αλλιώς Ο Πύργος των Αέρηδων και η Δυτική Πύλη, η οποία σώζεται σε καλή κατάσταση (http://odysseus.culture.gr/h/3/gh351.jsp?obj_id=2402).

Αυτοκράτορας και Βάρβαρος

Πρόκειται για ένα γλυπτό που χρονολογείται στον 1ο αιώνα μ.Χ. Είναι φτιαγμένο από λευκό μάρμαρο, και απεικονίζει έναν αυτοκράτορα όρθιο, και στα πόδια του, σε υποτακτική θέση, έναν βάρβαρο στραμμένο προς τον αυτοκράτορα, με τα χέρια του δεμένα πίσω. Από το γλυπτό λείπει μεγάλο μέρος, κυρίως από τον κορμό και το πάνω του αυτοκράτορα, διακρίνονται όμως οι κυνηγητικές μπότες από δέρμα πάνθηρα και μέρος της ενδυμασίας του, της οποίας κομμάτι έχει σωθεί, όμως είναι αδύνατον να αποκατασταθεί λόγω του μεγάλου βάρους της. Το γλυπτό είναι σε μεγαλύτερη κλίμακα από το φυσικό σώμα, και στο πίσω μέρος του υπάρχει στήριγμα. Ίσως να πρόκειται για τον Τραϊανό ή τον Αδριανό, οι οποίοι υπήρξαν αυτοκράτορες της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

(<http://www.agathe.gr/>)

Το γλυπτό ανακαλύφθηκε το 1972, κατά τη διάρκεια των ανασκαφών στη Στοά της Βιβλιοθήκης του Πανταίνου. Η χρονολογία κατασκευής του συμπίπτει πάνω-κάτω με αυτήν της κατασκευής του ίδιου του κτιρίου, συνεπώς εικάζεται πώς το γλυπτό ανήκε στον αρχικό διάκοσμο της βιβλιοθήκης. Όπως αναφέρθηκε, το γλυπτό είναι σε μεγάλο βαθμό κατεστραμμένο, πιθανότατα από την επιδρομή των Ερούλων κατά το 267 μ.Χ. Από το κομμάτι που έχει διασωθεί, αλλά και από το μέγεθός του, που είναι μεγαλύτερο από το φυσικό μέγεθος του ανθρώπινου σώματος, διαφαίνεται πώς πρόκειται για ένα αυτοκρατορικό γλυπτό. Από τις μπότες και τα κομμάτια του

μανδύα και του χιτώνα που έχουν απομείνει, γίνεται φανερό πως η ενδυμασία είναι πολεμική.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον, εντούτοις, από τη μορφή του αυτοκράτορα, παρουσιάζει η μορφή του αιχμάλωτου βάρβαρου που γονατίζει στο δεξί του πόδι. Ο αιχμάλωτος γονατίζει στο αριστερό του γόνατο, ελαφρώς σκυμμένος μπροστά, σε μια στάση που υποδεικνύει πως μάλλον είχε δεμένα τα χέρια του στην πλάτη του. Το πρόσωπο, δυναμικό και εντυπωσιακό, δίνει την αίσθηση του αυστηρού ρεαλισμού, στην πραγματικότητα, όμως, αποτελείται από χαρακτηριστικά που συχνά απέδιδαν οι Ρωμαίοι γλύπτες στους βαρβάρους: τα μεγάλα, βαθουλωμένα μάτια, οι αυλακίες στη γέφυρα της μύτης, τα χαμηλά φρύδια, τα τραχιά, γωνιώδη χαρακτηριστικά του προσώπου, τα λιπόσαρκα μάγουλα και τα δασιά, απείθαρχα μαλλιά. Στο πρόσωπό του διαφαίνεται η αγωνία της ήττας του· παρά την υποτακτική του θέση, όμως, δε δειλιάζει μπροστά στο διώκτη του, αλλά κοιτά προς τα πάνω με υπερηφάνεια, ενώ στα μάτια του ανακλάται η σπίθα της οργής ενός ανθρώπου που δε δέχεται εύκολα την ήττα. Αυτός ήταν ένας δύσκολος και γενναίος εχθρός, του οποίου η υποδούλωση φέρνει ακόμα μεγαλύτερη δόξα στον κατακτητή, είναι το πορτρέτο του ευγενούς “αγρίου”, του οποίου η αντιμετώπιση με οίκτο από τα χέρια του κατακτητή στοχεύει στο να φανεί τελικά ως ευγενής ο τελευταίος.

Παρότι η εικόνα του βαρβάρου είναι μάλλον γενικευμένη, παρά προσωπική, είναι πιθανό ο γλύπτης να θέλει να υπενθυμίσει με το έργο του μια συγκεκριμένη νίκη ενάντια σε κάποιο συγκεκριμένο βαρβαρικό φύλο. Η ενδυμασία και τα χαρακτηριστικά του, παραπέμπουν στις αναπαραστάσεις της φυλής των Δάκων από το Φόρουμ (Αγορά) του Τραϊανού, στη Ρώμη. Φιγούρες με παρόμοια ενδυμασία απεικονίζονται συχνά στη Στήλη του Τραϊανού, όπως επίσης και στις ελεύθερες και ανάγλυφες φιγούρες του Τραϊανού στην Αψίδα του Κωνσταντίνου. Εντυπωσιακά παρόμοιες μορφές που απεικονίζουν Δάκους, υπάρχουν στη μεγάλη ζωφόρο του Τραϊανού και σε ένα ανάγλυφο στη Villa Medici. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, το γλυπτό μπορεί να αναγνωριστεί ως ένα πορτρέτο του αυτοκράτορα Τραϊανού, με έναν αιχμάλωτο Δάκο γονατισμένο στα πόδια του, κάτι που δεν επιβεβαιώνεται όμως από τα εναπομείναντα κτίρια του χώρου, ή από γνωστά πορτρέτα του Τραϊανού. Τα διαθέσιμα στοιχεία υποδεικνύουν ότι το γλυπτό είναι παρόμοιο-στη στάση και την ενδυμασία με το ανάγλυφο πορτρέτο του Τραϊανού στη ζωφόρο της Αψίδας του Κωνσταντίνου. Θα μπορούσε να έχει αναγερθεί σε μία από τις κύριες αίθουσες της Βιβλιοθήκης του Πανταίνου, κατά τα πρώτα χρόνια μετά τους Δακικούς Πολέμους (101-2, 105-6 .X.). Το κτίριο αυτό ήταν αφιερωμένο στον Τραϊανό, όπως επίσης και στη θεά Αθηνά, και είναι λογικό, ανάμεσά στα γλυπτά που το κοσμούσαν, να υπήρχε και ένα περίοπτο άγαλμα του αυτοκράτορα Τραϊανού.

(<http://www.ascsa.edu.gr/pdf/uploads/hesperia/147463.pdf>)

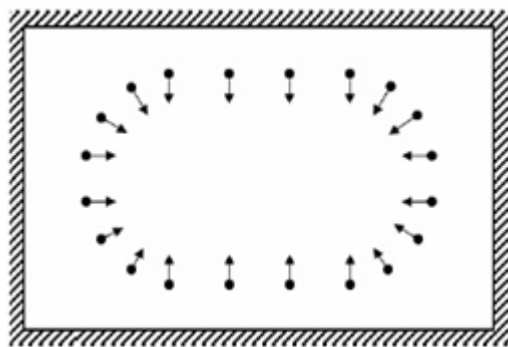
6.1.2. Το PhotoScan

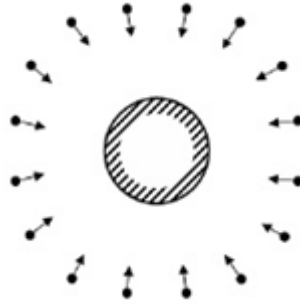
Το Agisoft PhotoScan είναι ένα πρόγραμμα 3D-μοντελοποίησης, με στόχο την παραγωγή 3D περιεχομένου υψηλής ποιότητας, από στατικές εικόνες. Βασίζεται στις πλέον πρόσφατες τεχνολογίες 3D ανακατασκευής, με χρήση αυθαίρετων σε κατανο-

μή στο χώρο εικόνων, από τις οποίες η μοντελοποίηση γίνεται αυτοματοποιημένα, και έχει ως παράγωγο ένα ανακατασκευασμένο μοντέλο με φωτογραφική υφή (texture). Η αυτοματοποιημένη αυτή διαδικασία, χωρίζεται σε τέσσερα βασικά βήματα: αρχικά, το πρόγραμμα εντοπίζει τα κοινά σημεία στις εικόνες και τα ταυτοποιεί, ενώ βρίσκει και τη θέση και τον προσανατολισμό της μηχανής για κάθε εικόνα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, η οποία ονομάζεται προσανατολισμός (alignment), είναι ένα αραιό νέφος σημείων και ένας πίνακας με τις θέσεις της κάμερας σε κάποιο σύστημα αναφοράς. Βάσει αυτών των θέσεων και των ίδιων των εικόνων, δημιουργείται ένα πυκνό νέφος σημείων, και, στη συνέχεια, το πρόγραμμα χτίζει από αυτό ένα πλέγμα από πολύγωνα (συνήθως τρίγωνα), τα οποία αναπαριστούν την επιφάνεια του αντικειμένου (mesh). Μετά την ανακατασκευή του mesh (δηλαδή της γεωμετρίας της επιφάνειας του αντικειμένου), μπορεί να αποδοθεί η υφή του αντικειμένου (texture) και, εφόσον είναι επιθυμητό, να παραχθούν ορθοφωτογραφίες. Τα εξαγόμενα 3D δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές GIS, για εργασίες τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς, παραγωγή οπτικών εφέ καθώς και για έμμεσες μετρήσεις αντικειμένων οποιασδήποτε κλίμακας.

Είναι σημαντικό τα αντικείμενα των οποίων οι φωτογραφίες θα υποστούν επεξεργασία μέσω του PhotoScan για να δώσουν το τρισδιάστατο μοντέλο τους, να έχουν αρκετή υφή, να μην είναι διαφανή ή γυαλιστερά και να φωτίζονται κατάλληλα. Είναι, ακόμα, προτιμότερο, οι φωτογραφίες που εισάγονται στο PhotoScan για επεξεργασία, να έχουν ληφθεί με όσο το δυνατό υψηλότερη ανάλυση-κάτι που εξαρτάται, βέβαια, από την εκάστοτε φωτογραφική μηχανή, ενώ συνιστάται να επιλέγονται σταθεροί φακοί εστιακού μήκους 20-80mm και, εφόσον χρησιμοποιούνται φακοί ζουμ, να μη γίνονται αλλαγές στην εστιακή απόσταση κατά τη διάρκεια της λήψης των φωτογραφιών, για καλύτερα και πιο πιστά στην πραγματικότητα αποτελέσματα. Τέλος, επειδή το PhotoScan δουλεύει με τις αρχικές φωτογραφίες και διαβάζει πληροφορίες από το αρχείο EXIF που τις συνοδεύει, αυτές δεν πρέπει να κοπούν, να περιστραφούν ή να αλλάξουν σε μέγεθος, πριν από την εισαγωγή τους για επεξεργασία.

Οι εικόνες πρέπει να λαμβάνονται περιμετρικά του αντικειμένου και με μεγάλη επικάλυψη, ενώ ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δοθεί στα λεγόμενα «τυφλά» σημεία, τα οποία θα πρέπει να απεικονίζονται επαρκώς έτσι ώστε να αποδοθούν από το πρόγραμμα. Δεν υπάρχει συγκεκριμένος αριθμός φωτογραφιών που θα πρέπει να ληφθούν, εξαρτάται από την εφαρμογή, αλλά γενικά είναι καλό να λαμβάνονται όσο το δυνατόν περισσότερες (http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf).





Εικόνα 51 Περιμετρικές λήψεις φωτογραφιών

6.1.3. Συλλογή δεδομένων

Το γλυπτό «Αυτοκράτορας και Δούλος», το οποίο ήταν το αντικείμενο μελέτης της εν λόγω εργασίας, βρίσκεται στη Ρωμαϊκή Αγορά της Αθήνας. Η συλλογή δεδομένων έγινε σε ένα από τα εργαστήρια της Αρχαίας Αγοράς, όπου είχε τοποθετηθεί το άγαλμα, πάνω σε ξύλινη παλέτα, κατά τις πρωινές ώρες, με φωτισμό νέον, του εσωτερικού χώρου του μουσείου. Για τη φωτογράφιση χρησιμοποιήθηκε μηχανή Canon MIII 1Ds full frame αγνώστου εσωτερικού προσανατολισμού, και φακός 50 mm.



Εικόνα 52 Canon EOS 1Ds Mark III

Το άνοιγμα του φακού επιλέχθηκε να είναι τέτοιο, ώστε να επιτευχθεί κατάλληλο βάθος πεδίου, ενώ η ταχύτητα του κλείστρου δεν είναι πολύ μικρή, έτσι ώστε να παραχθούν ευκρινείς και όχι θολές εικόνες. Καθώς το γλυπτό ήταν πολύ βαρύ για να μετακινείται, τοποθετήθηκε στο κέντρο της αίθουσας, και οι φωτογραφίες ελήφθησαν περιμετρικά, σε απόσταση 1-2m, χωρίς ζουμ και χωρίς φλας. Συνολικά ελήφθησαν 169 φωτογραφίες, ενώ τοποθετήθηκαν δίπλα στο άγαλμα τρεις μεταλλικοί χάρακες με στόχους σε γνωστές αποστάσεις μεταξύ τους, έτσι ώστε να αποδοθεί κλίμακα στο μοντέλο.

Οι εικόνες ήταν σε μορφή RAW της Canon (CR2), καθώς η πιο συμπεσμένη μορφή JPEG είναι πιθανό να προσθέσει θόρυβο στις εικόνες.



Εικόνα 53 Φωτογραφία του γλυπτού-1



Εικόνα 54 Φωτογραφία του γλυπτού-2

6.2.Επεξεργασία δεδομένων

Οι φωτογραφίες εισήχθησαν στο πρόγραμμα Photoscan, του οποίου ο βασικός τρόπος λειτουργίας περιγράφηκε παραπάνω, σε περιβάλλον windows. Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία τους, ήταν να εντοπίσει το πρόγραμμα τη θέση της κάμερας για κάθε εικόνα καθώς και το σχετικό προσανατολισμό της, να τις συσχετίσει με τη διαδικασία του προσανατολισμού (alignment), και να δώσει το πρώτο, αραιό, νέφος σημείων.



Εικόνα 55 Αραιό νέφος σημείων-1

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε δύο φορές, μία με χαμηλή ποιότητα αποτελέσματος, έτσι ώστε να εξακριβωθεί αν το εξαγόμενο προϊόν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, και μία με υψηλή ποιότητα αποτελέσματος, το οποίο και χρησιμοποιήθηκε στην περαιτέρω επεξεργασία.



Εικόνα 56 Αραιό νέφος σημείων-2

Το επόμενο βήμα, ήταν η εισαγωγή κλίμακας, χρησιμοποιώντας τις γνωστές αποστάσεις των στόχων στους μεταλλικούς χάρακες που είχαν προστεθεί σε κάποιες φωτογραφίες, και, έπειτα, η αφαίρεση (χοντρικά, χειροκίνητα) όλων των σημείων που δεν ανήκαν στο ίδιο το αντικείμενο αλλά στο περιβάλλον του, και η τοποθέτηση μασκών γύρω από αυτό, έτσι ώστε, κατά τους υπολογισμούς, να εξαιρεθούν τυχόν σημεία που δεν ανήκαν σε αυτό και δεν είχαν αφαιρεθεί με την προηγούμενη διαδικασία (θόρυβος). Για αυτή τη διαδικασία, επιλέγεται χειροκίνητα μόνο το κομμάτι της εικόνας που ενδιαφέρει για την επεξεργασία, και αποκλείονται όλα τα άλλα αντικείμενα που φαίνονται στις εικόνες-είτε αυτά είναι ορατά σε κάθε εικόνα, είτε φωτογραφήθηκαν τυχαία σε ορισμένες από αυτές.



Εικόνα 57 Εικόνα με μάσκα και κλίμακα

Ακολουθεί η δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων. Η διαδικασία διήρκησε περίπου 80 ώρες, και είχε ως αποτέλεσμα ένα σύνολο σημείων σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Όλες οι ενέργειες που ακολουθούν, είναι βασισμένες σε αυτό ακριβώς το πυκνό νέφος σημείων, με την κλίμακα που έχει εισαχθεί σε αυτό-και όχι στο αραιό νέφος που κατασκευάστηκε αρχικά.



Εικόνα 58 Όψεις του πυκνού νέφους σημείων

Το νέφος των σημείων, χρειάζεται διορθώσεις, οι οποίες έγιναν στο πρόγραμμα Geomagic-η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω. Ακόμα, στο Geomagic έγινε και η δημιουργία του πλέγματος των τριγώνων στην επιφάνεια του μοντέλου. Το διορθωμένο μοντέλο εισήχθη και πάλι στο πρόγραμμα Photoscan, όπου εφαρμόστηκε, με τη βοήθεια των εικόνων, η υφή του αντικειμένου (texture). Για αυτή τη διαδικασία, δόθηκε εντολή στο πρόγραμμα να υπολογίσει την ποιότητα κάθε εικόνας (βάσει της καθαρότητας, του φωτισμού και της ποιότητας κάθε μίας), και, όσες είχαν ακρίβεια μικρότερη από 0.5 (μονάδες υπολογισμού του προγράμματος) αποκλείστηκαν. Αποκλείστηκαν ακόμη κάποιες εικόνες που περιείχαν χάρακες που έδιναν λάθος υφή στο

μοντέλο (λόγω του ότι το πρόγραμμα εφαρμόζει την υφή του χάρακα και όχι του ίδιου του γλυπτού σε κάποια σημεία).

Το παραχθέν νέφος σημείων υπόκειται σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να μπορέσει να μετασχηματιστεί στο τελικό προϊόν, που μπορεί να είναι απλώς το νέφος σημείων, δισδιάστατα σχέδια έως και τρισδιάστατα και με υφή, μοντέλα των αντικειμένων.

6.2.1. Το πρόγραμμα Geomagic

Το Geomagic είναι ένα λογισμικό που επικεντρώνεται στο σχεδιασμό τρισδιάστατων αντικειμένων μέσω Η/Υ, με δεδομένα που προέρχονται κυρίως-αλλά όχι αποκλειστικά-από laser scanning, το οποίο δημιουργήθηκε το 1996. Μέσω του εύχρηστου περιβάλλοντός του, γίνεται η απαραίτητη επεξεργασία των νεφών σημείων και η προετοιμασία τους για τη μετέπειτα εφαρμογή της υφής (texture).

Για την εν λόγω εργασία, το νέφος των σημείων εισήχθη στο πρόγραμμα Geomagic σε μορφή .ply. Η πρώτη κίνηση μετά την εισαγωγή του αρχείου, είναι ο καθαρισμός του από ακραίες τιμές και θόρυβο. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα οι ενέργειες αυτές να γίνουν αυτοματοποιημένα, κάτι τέτοιο όμως δε συστήνεται επειδή μπορεί να εισαγάγει νέα σφάλματα κατά την επεξεργασία: οι διορθώσεις, επομένως, γίνονται χειροκίνητα.

Αφού καθαριστεί το αρχείο από το θόρυβο, επιλέγονται και διαγράφονται οι ακραίες τιμές (outliers), σημεία, δηλαδή, που δεν ανήκουν στην επιφάνεια του αντικειμένου, και ακολουθεί η ομαλοποίηση της επιφάνειας (smoothing), η οποία γίνεται επαναληπτικά. Οι διορθώσεις αυτές γίνονται μέσα από εντολές του Geomagic, πρέπει όμως να δοθεί προσοχή στις τιμές και τις επαναλήψεις που γίνονται, οι οποίες ορίζονται με δοκιμές από το χρήστη, έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να περιέχει επαρκείς λεπτομέρειες. Τέλος, γίνεται resampling, επιλογή, δηλαδή, κάποιων σημείων, ούτως ώστε να μειωθεί ο αρχικός όγκος τους. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί, κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του πλέγματος, το Geomagic δημιουργεί δύο τρίγωνα για κάθε σημείο, έτσι, αν τα σημεία είναι υπερβολικά πολλά, η δημιουργία του πλέγματος θα χρειαστεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο και περισσότερη μνήμη (Quintero et al., 2008). Τέλος, δημιουργείται το πλέγμα των πολυγώνων (συνήθως τρίγωνα), και αποθηκεύεται σε ένα αρχείο .wrap.

Στη συνέχεια, γίνεται το κλείσιμο των τρυπών. Λόγω έλλειψης επαρκούς πληροφορίας από τις αρχικές φωτογραφίες, ανεπαρκούς φωτισμού, θορύβου κ.λπ., το πλέγμα της επιφάνειας δεν μπορεί να είναι απολύτως άρτιο, αλλά σχεδόν πάντα περιέχει τρύπες (Quintero et al., 2008). Έτσι, τομείς που δεν περιέχουν επαρκή πληροφορία-ή και καθόλου πληροφορία-σε σημεία, δεν μπορούν να δημιουργήσουν επιφάνειες. Οι τρύπες αυτές είναι απαραίτητο να κλείσουν και να κλείσουν σωστά, ειδάλλως δεν θα είναι δυνατή η δημιουργία υφής, η δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου κ.λπ. Το πρώτο βήμα για το κλείσιμο των τρυπών είναι η αφαίρεση τυχόν ασύνδετων τριγώνων. Οι μικρές τρύπες μπορούν να κλείσουν αυτοματοποιημένα και ταυτόχρονα, ενώ οι μεγαλύτερες είναι προτιμότερο να κλείνουν χειροκίνητα. Αφού ολοκληρω-

θεί και αυτό το βήμα, αφαιρούνται τυχόν τρίγωνα (spikes) που μπορεί να υπάρχουν στην επιφάνεια, για εξομάλυνση της επιφάνειας.

Στην εν λόγω εργασία, το αρχείο φορτώθηκε στο πρόγραμμα Geomagic και, αφού έγινε η επεξεργασία του με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, δημιουργήθηκε το πλέγμα των τριγώνων. Συνολικά, δημιουργήθηκαν περίπου τέσσερα εκατομμύρια τρίγωνα, ενώ αμέσως μετά ξεκίνησε το γέμισμα των τρυπών. Από καταμέτρηση του λογισμικού, βρέθηκαν περίπου 170 τρύπες. Από αυτές, οι 122, που ήταν πολύ μικρές, έκλεισαν ικανοποιητικά με μία εντολή, ταυτόχρονα. Οι υπόλοιπες, έπρεπε να κλείσουν χειροκίνητα και με μεγάλη προσοχή. Η διαδικασία για το κλείσιμο των μεγάλων τρυπών χρειάστηκε πολλές φορές να επαναληφθεί, επειδή σε κάποιες περιπτώσεις, κατά την κάλυψη των κενών, χρησιμοποιούνταν από το πρόγραμμα τρίγωνα από το εσωτερικό της επιφάνειας, και όχι από το εξωτερικό, όπως θα έπρεπε. Συνεπώς, οι τρύπες αυτές θα δημιουργούσαν πρόβλημα στη δημιουργία υφής, ακόμα και καλυμμένες. Σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκαν και οι εικόνες, έτσι ώστε να είναι σίγουρο πως κομμάτια του μοντέλου που περιείχαν τρύπες αποκαταστάθηκαν με τρόπο που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, ή, αν αυτό δεν είναι δυνατό να συμβεί, να εξασφαλιστεί ότι τυχόν μικρές διαφορές δε θα επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 59 Τρύπες στην επιφάνεια του γλυπτού, που καλύφθηκαν στο μοντέλο με τη βοήθεια των φωτογραφιών-1

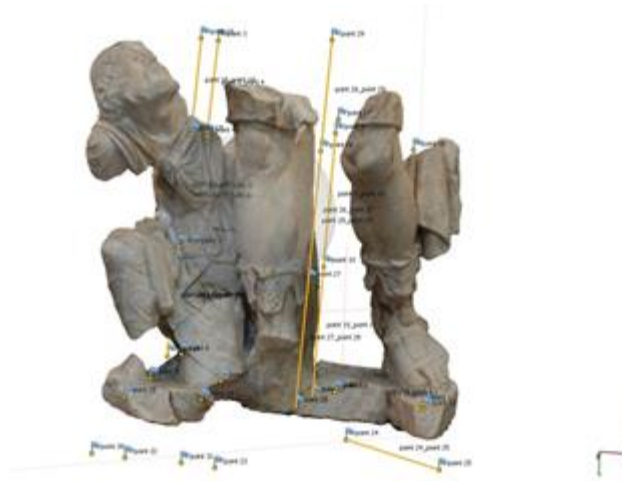


Εικόνα 60 Τρύπες στην επιφάνεια του γλυπτού που καλύφθηκαν στο μοντέλο με τη βοήθεια των φωτογραφιών-2

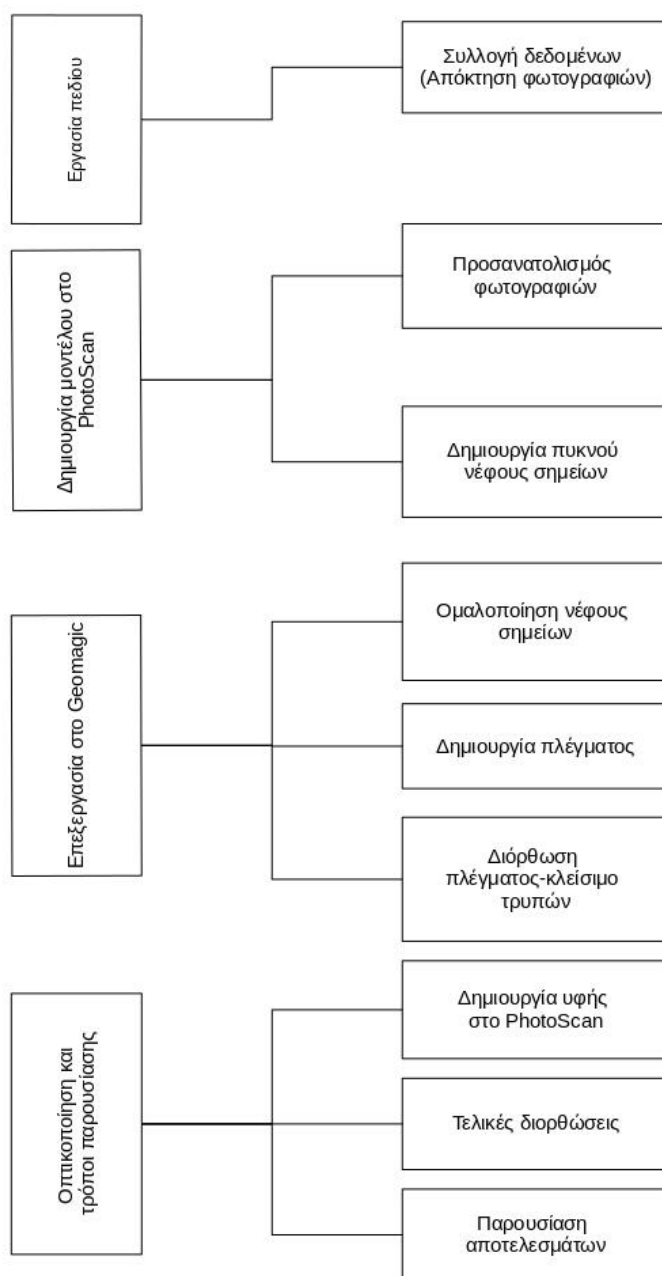
6.2.2.Υφή και τελικές διορθώσεις

Αφού επιβεβαιώθηκε πως δεν περιέχει καμία τρύπα και η επιφάνειά του είναι ομαλή, το αρχείο με το πλέγμα των τριγώνων φορτώθηκε ξανά στο PhotoScan, στο

αρχείο με τις εικόνες και τις πληροφορίες κλίμακας. Σε αυτό το σημείο δημιουργήθηκε η υφή του μοντέλου. Επειδή η υφή κάθε μοντέλου λαμβάνεται από τις φωτογραφίες του, σε αυτό το βήμα προτείνεται να εξαιρούνται όσες φωτογραφίες έχουν ακρίβεια μικρότερη από 0,5(μονάδες PhotoScan, όπως υπολογίζονται από το ίδιο το λογισμικό), πράγμα το οποίο έγινε. Συνολικά, εξαιρέθηκαν από τη διαδικασία 17 εικόνες. Ακόμα, επειδή στην επιφάνεια του μοντέλου διαγραφόταν η υφή από τους χάρακες που ήταν ορατοί σε κάποιες φωτογραφίες, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν μάσκες γύρω από αυτούς, έτσι ώστε να μη ληφθούν υπόψη στη δημιουργία της τελικής υφής. Μετά και τη δημιουργία της υφής, το μοντέλο είναι έτοιμο για οποιαδήποτε περαιτέρω επεξεργασία, απεικόνιση και παρουσίαση.



Εικόνα 61 Το μοντέλο με υφή



Εικόνα 62 Διάγραμμα ροής της διαδικασίας

6.3. Τρόποι παρουσίασης

Υπάρχουν πολλοί τρόποι απεικόνισης και παρουσίασης των ψηφιακών μοντέλων, ανάλογα με την εφαρμογή. Για τη συγκεκριμένη εργασία, το μοντέλο εξήχθη σε αρχείο 3D PDF, όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα χειριστεί το μοντέλο και να το μελετήσει στις τρεις διαστάσεις.

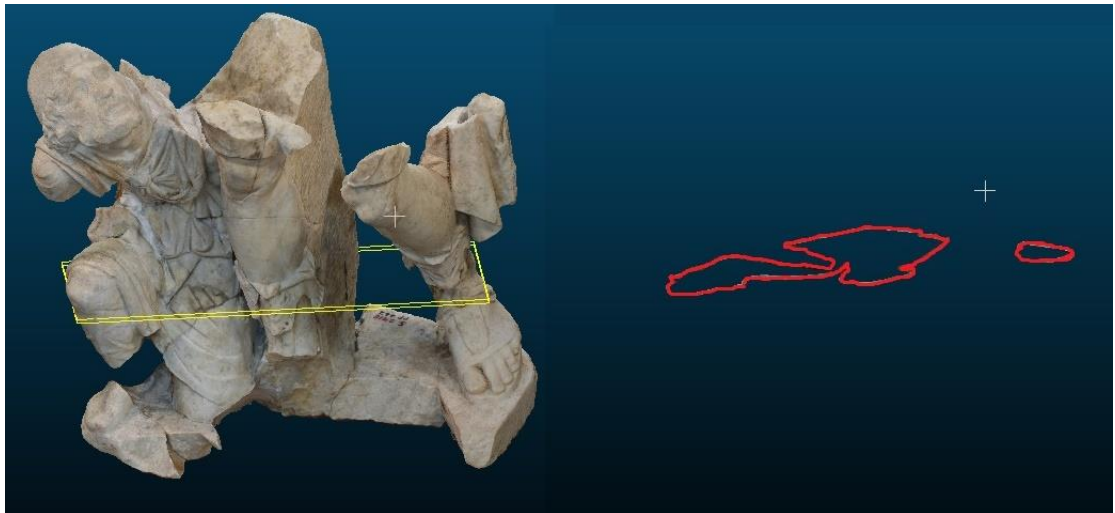
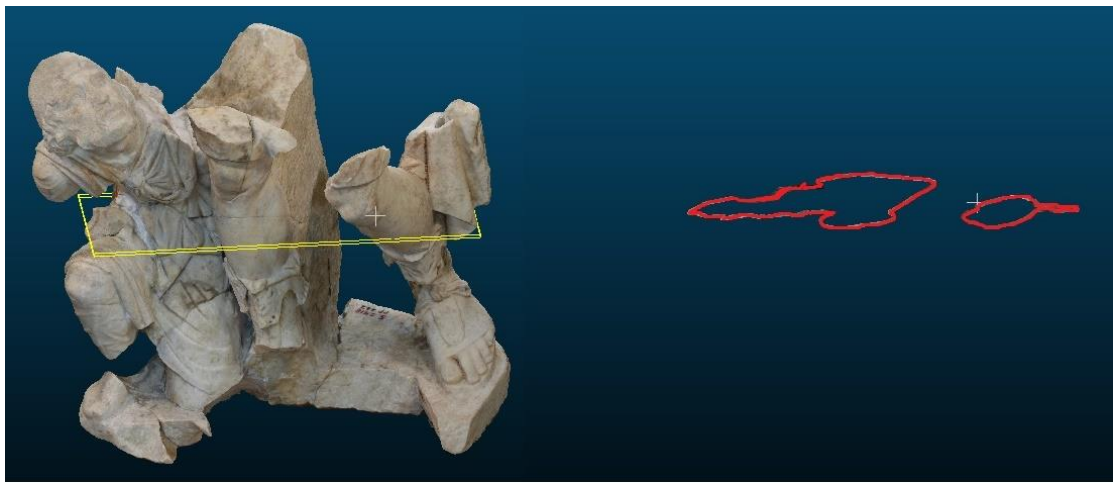


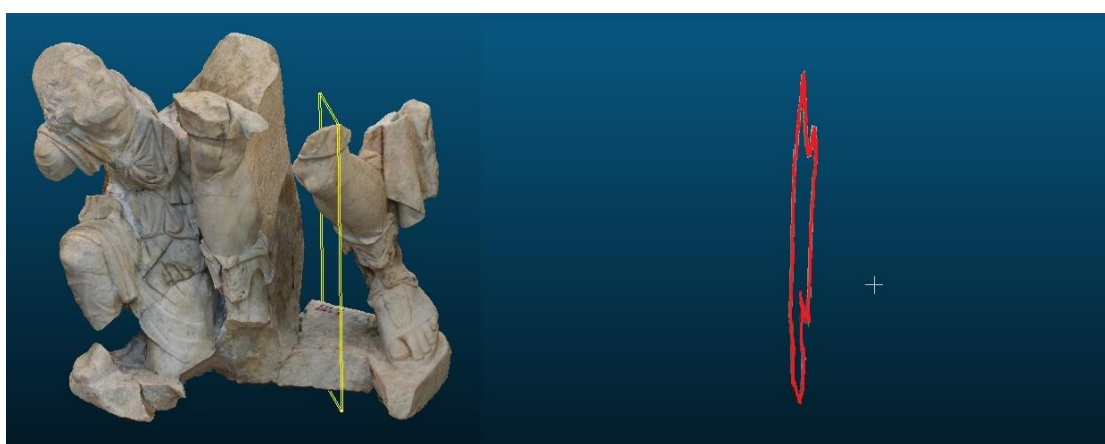
Εικόνα 63 3D PDF

Ακόμα, στο PhotoScan δημιουργήθηκε το DEM του μοντέλου (Digital Elevation Model, δηλαδή μια ψηφιακή αναπαράσταση του μοντέλου επιφανείας στον κάναβο υψών), και, βάσει αυτού δημιουργήθηκαν ισοϋψείς στην επιφάνεια του μοντέλου, με βήμα 0,005m. Στο πρόγραμμα CloudCompare έγιναν οριζόντιες και κατακόρυφες τομές του μοντέλου, ενώ εξήχθησαν και ορθοφωτογραφίες του γλυπτού-οι οποίες εντούτοις δεν χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο παρουσίασης του γλυπτού. Τέλος, έγινε 3D εκτύπωση του μοντέλου, και η διαδικασία περιγράφεται παρακάτω.



Εικόνα 64 Ισοϋψείς





Εικόνες 65-69 Οριζόντιες και κάθετες τομές





Εικόνα 70-71 Ορθοφωτογραφίες

7. Προσθετική κατασκευή (3D εκτύπωση)

7.1. Εισαγωγή

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, η δημιουργία των πρώτων διατάξεων Προσθετικής Κατασκευής (ΠΚ), γνωστής ευρύτερα και ως 3D Εκτύπωση, έφερε επανάσταση στο χώρο της δημιουργίας φυσικών αντικειμένων. Το φάσμα τεχνολογιών ΠΚ έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα, και πλέον δε χρησιμοποιείται μόνο από σχεδιαστές και μηχανικούς για την ταχεία κατασκευή πρωτοτύπων, εξαρτημάτων, εργαλείων και κατασκευών, αλλά έχει βρει εφαρμογές και σε πολλούς άλλους τομείς.

7.2. Ιστορικά στοιχεία και ορολογία

Τη δεκαετία του 1980 κατοχυρώθηκε πρώτη η τεχνολογία της Στερεολιθογραφίας (SLA) και πρωτοεμφανίστηκαν οι λεγόμενες διατάξεις Στερεολιθογραφίας (SLA), (Πολύδωρας, 2013).



Εικόνα 72 SLA-1, η πρώτη διάταξη Rapid Prototyping, που δημιουργήθηκε το 1983

Στην SLA πραγματοποιείται αυτοματοποιημένη κατασκευή φυσικού αντικειμένου με διαδοχική διαστρωμάτωση επιπέδων φωτοπολυμεριζόμενης ρητίνης που τοπικά στερεοποιούνται με laser. Τα φυσικά αντικείμενα αυτά κατασκευάζονται με βάση 3D μοντέλα CAD από Η/Υ. Από τότε μέχρι σήμερα, έχουν εμφανιστεί δεκάδες ακόμη εναλλακτικές τεχνολογίες ΠΚ που και αυτές ακολουθούν την αρχή της διαστρωματικής κατασκευής (π.χ. SLS, FDM, LOM κ.ά.). Για όλες αυτές, αρχικά καθιερώθηκε ο όρος Ταχεία Κατασκευή Πρωτοτύπων (ΤΚΠ)-Rapid Prototyping (RP), που εν μέρει χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Σήμερα οι σχετικές τεχνολογίες έχουν επίσημα κατά ISO καθιερωθεί με τον όρο Προσθετική Κατασκευή (ΠΚ)-Additive Manufacturing (AM), ενώ ευρύτερα και συχνότερα, με αναφορά σε χαμηλού κόστους επιτραπέζιες μηχανές, χρησιμοποιείται και η ορολογία 3D Εκτύπωση-3D Printing και 3D εκτυπωτές για τα αντίστοιχα μηχανήματα (Πολύδωρας, 2013).

7.3. Διαδικασία Προσθετικής Κατασκευής

Στην ΠΚ η κύρια διαδικασία δημιουργίας αντικειμένων βασίζεται στην οδηγούμενη από Η/Υ αυτοματοποιημένη διαδοχική εναπόθεση στερεού υλικού. Ο τρόπος και ο χρόνος στερεοποίησης των στρώσεων διαφέρει ανάλογα με την υιοθετούμενη τεχνολογία. Για την απόδοση της επιθυμητής γεωμετρίας στις στρώσεις, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη 3D σχεδίου CAD του αντικειμένου και ο αλγοριθμικός διαχωρισμός του στις προς κατασκευήν στρώσεις κατά τη διαδικασία της προετοιμασίας (pre-processing).

Η μεταφορά της γεωμετρίας του εκάστοτε αρχείου 3D CAD στο λογισμικό προετοιμασίας στρώσεων γίνεται με ουδέτερα αρχεία μορφής πλέγματος, συνήθως τριγωνικών στοιχείων, κυρίως STL, αλλά πλέον και άλλων, όπως OBJ, VRML, 3MF, PLY κ.λπ. Συνήθως, στο λογισμικό προετοιμασίας στρώσεων, δεν συντελείται μόνο ο διαχωρισμός τους (slicing), αλλά και η πλήρης παραμετροποίηση της διαδικασίας κατασκευής που θα ακολουθήσει (π.χ. προσανατολισμός, πάχος τοιχωμάτων, πυκνότητα και μορφή εσωτερικού, στηρίξεις). Τα αποτελέσματα της προετοιμασίας οδηγούν σε συγκεκριμένο για κάθε διαθέσιμη μηχανή ΠΚ αρχείο οδήγησής του (G-code file) δια του οποίου θα υλοποιηθεί η κατασκευή. Η κατασκευή συντελείται στον διαθέσιμο 3D εκτυπωτή. Το υλικό αντικείμενο που λαμβάνεται, συχνά χρειάζεται κάποιου τύπου μετά-επεξεργασία (post-processing), είτε για αφαίρεση βάσης ή στηρίξεως κατασκευής, είτε για λείανση ή στεγάνωση της επιφάνειάς του, είτε για βελτίωση των υλικών, ανακούφιση τάσεων κ.λπ., και κατόπιν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να αξιοποιηθεί, ανάλογα με τις ανάγκες των χρηστών του.



Εικόνα 73 Η διαδικασία της ΠΚ-3D Εκτύπωσης

7.4. Υλικά ΠΚ και εφαρμογές της

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πολύ περισσότερα από ό,τι στο πρόσφατο παρελθόν και συνεχώς διευρύνονται. Στην πλειονότητά τους αποτελούν τεχνικά και βιομηχανικά υλικά, κυρίως μέταλλα, πλαστικά και πολυμερή, κεραμικά και πυριτιούχα. Κατά τις πρώτες δύο δεκαετίες από την εμφάνισή τους, οι τεχνολογίες ΠΚ χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον από τους μηχανικούς (κυρίως Μηχανολόγους) και τη βιομηχανία-παραγωγή για την ταχεία πρωτοτυποποίηση μηχανολογικών εξαρτημάτων, κατασκευών και μηχανών και την υποστήριξη κατασκευής εργαλείων (π.χ. καλουπιών) για την παραγωγή τους. Σταδιακά, η αξιοποίηση της ΠΚ στα επόμενα χρόνια

επεκτάθηκε και σε κλάδους όπως η αρχιτεκτονική, η ιατρική, η βιοϊατρική, η οδοντιατρική, η οδοντοτεχνική, η κοσμηματοποιεία, η αρχαιολογία η παλαιοντολογία, η γεωπληροφορική, η τοπογραφία, η τέχνη, η μόδα, ακόμα και η ιατροδικαστική έρευνα κ.λπ.



Εικόνα 74 Εφαρμογές 3D εκτύπωσης στη μόδα, την κοσμηματοποιεία, την αρχιτεκτονική

7.5.Οφέλη της προσθετικής κατασκευής

Η ΠΚ δύναται να προσφέρει αρκετά οφέλη στην κατασκευή αντικειμένων σε σχέση με συμβατικές μεθόδους κατασκευής τις οποίες όλο και περισσότερο υποκαθιστά, λόγω μιας σειράς πλεονεκτημάτων που προσφέρει και που συνοψίζονται στα παρακάτω:

- **Ταχύτητα:** αν και αρχικά η απόδοση μιας στρώσης για κάποιους ίσως φαίνεται αργή, η συνολική κατασκευή αντικειμένων πολύπλοκης γεωμετρίας αποδεικνύεται τελικά πολύ γρήγορη σε σχέση με κάθε εναλλακτική (λίγες ώρες ή ακόμα και μέρες). Επιτυγχάνεται έτσι ενιαία κατασκευή πολυσύνθετων εξαρτημάτων και μη συμβατικά κατασκευασμένων, σε ρεαλιστικούς χρόνους.
- **Υψηλή αυτοματοποίηση:** μετά την αυτοματοποίηση και πριν τη μεταεπεξεργασία, η κύρια διαδικασία ΠΚ είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, απαιτώντας μόνο περιοδική παρακολούθηση από πλευράς χρήστη/χειριστή, η οποία μάλιστα μπορεί να είναι και απομακρυσμένη, με τη χρήση τοπικού δικτύου, κάμερας κ.λπ.
- **Κόστος:** το κόστος κατασκευής επιμερίζεται σε τέσσερις κατηγορίες: κόστος απόκτησης μηχανής, κόστος λειτουργίας μηχανής, κόστος υλικού και εργατικό κόστος.
 - ✓ Κόστος απόκτησης μηχανής: το κόστος απόκτησης μηχανής είναι αρκετά υψηλό, μειώνεται όμως συνεχώς, με την εξέλιξη των τεχνολογιών και τη διεύρυνση των τομέων στους οποίους βρίσκει εφαρμογή η ΠΚ.
 - ✓ Κόστος λειτουργίας μηχανής: οι περισσότεροι 3D επιτραπέζιοι εκτυπωτές καταναλώνουν την ενέργεια που χρειάζεται ένας προσωπικός υπολογιστής. Οι βιομηχανικές τεχνολογίες ΠΚ, ειδικά του μετάλλου, χρειάζονται μεγάλα ποσά ενέργειας για την παραγωγή κάθε κομματιού, έχουν όμως το θετικό της κατασκευής πολύπλοκων εξαρτημάτων σε ένα μόνο βήμα, κάτι το οποίο αντισταθμίζει αυτή την κατανάλωση ενέργειας. Τα έξοδα

λειτουργίας των μηχανών έχουν συνήθως τη μικρότερη συνεισφορά στο συνολικό κόστος της κατασκευής.

- ✓ Κόστος υλικού: το κόστος ποικίλλει αρκετά, ανάλογα με την κλάση του εξοπλισμού. Στους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές πλαστικών, το κόστος συνήθως είναι πολύ χαμηλό. Το κόστος υλικών επαγγελματικών συστημάτων ρητίνης και μετάλλου είναι ιδιαίτερος υψηλό και γίνονται διεθνώς προσπάθειες να μειωθεί.
- ✓ Εργατικό κόστος: το εργατικό κόστος είναι αρκετά μικρό στην προσθετική κατασκευή. Δεδομένης της υψηλής αυτοματοποίησης της κύριας διαδικασίας, συνίσταται κυρίως στις εργατοώρες προσωπικού για προ και μετά-επεξεργασία των κατασκευών. Σε κάθε περίπτωση εκτιμάται ως αισθητά μικρότερο σε σχέση με τις συμβατικές μηχανουργικές ή χειρωνακτικές και χειροποίητες κατασκευές.

Ως γενικός κανόνας, ισχύει ότι η ΠΚ είναι οικονομικά ανταγωνιστική για μικρού και μέσου μεγέθους πολύπλοκα αντικείμενα, ενώ οι συμβατικές τεχνικές παραμένουν οικονομικότερες για μεγάλου όγκου ή/και απλής γεωμετρίας αντικείμενα, συνήθως μαζικής παραγωγής (π.χ. άξονες, πύροι, ροδέλες κ.λπ.).

- Μείωση κινδύνου: η δημιουργία νέων εξαρτημάτων και προϊόντων με σφάλματα ή ελαττώματα σχεδιασμού κοστίζει σε χρόνο και χρήμα. Ακόμη και η παραμικρή αλλαγή σε ένα καλούπι ή ένα εργαλείο παραγωγής τους μπορεί να έχει μεγάλη οικονομική επίπτωση. Η δυνατότητα έγκαιρης επαλήθευσης ενός σχεδίου με την 3D εκτύπωση ενός πρωτοτύπου του πριν από την επένδυση σε ακριβό εξοπλισμό κατασκευής (π.χ. καλούπια και εργαλεία) εξαλείφει σε μεγάλο βαθμό τον κίνδυνο εμφάνισης σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας μαζικής παραγωγής.
- Κατασκευασιμότητα και ελευθερία σχεδιασμού: οι περιορισμοί που επιβάλλονται στις συμβατικές μεθόδους παραγωγής γενικά δεν δεσμεύουν την προσθετική κατασκευή, καθώς τα αντικείμενα κατασκευάζονται σε στρώσεις. Παρότι υπάρχουν κάποιοι άλλοι περιορισμοί π.χ. το μικρότερο μέγεθος ή πάχος που μπορεί να εκτυπωθεί με επιτυχία, οι περισσότεροι περιορισμοί συγκεντρώνονται γύρω από θέματα που έχουν να κάνουν με το πώς να προσανατολιστεί καλύτερα το αντικείμενο για ελάχιστη υποστήριξή του και η πιθανότητα αποτυχίας της εκτύπωσης. Αυτό αυξάνει δραστικά τη σχεδιαστική ελευθερία επιτρέποντας την εύκολη δημιουργία εξαρτημάτων με σύνθετη μορφή και πολύπλοκη γεωμετρία.
- Εξατομίκευση: πέραν της αυξημένης σχεδιαστικής ελευθερίας, η ΠΚ δίνει τη δυνατότητα πλήρους εξατομίκευσης εξαρτημάτων και κατασκευών, καθώς η απόδοση της γεωμετρίας προκύπτει μόνο από ψηφιακά δεδομένα, χωρίς φυσικές δεσμεύσεις (π.χ. καλούπια). Έτσι επιτρέπει την κατασκευή μοναδικών αντικειμένων (one-off) και πολύ μικρών σειρών. Τα παραπάνω βρίσκουν ιδιαίτερη εφαρμογή στην ιατρι-

κή και την οδοντιατρική, με την κατασκευή προσθετικών μελών και εμφυτευμάτων, στην κατασκευή αθλητικών εργαλείων, στη βιομηχανία της μόδας, στη συντήρηση τεχνουργημάτων και σε άλλους τομείς.

- Αυξανόμενη ευκολία πρόσβασης: σε αντίθεση με συνήθη βιομηχανικό εξοπλισμό (π.χ. SLC μηχανές), η ραγδαία διάδοση της ΠΚ, ειδικά στην περιοχή των χαμηλού κόστους επιτραπέζιων 3D εκτυπωτών, καθιστά σημαντικά πιο εύκολη την πρόσβαση σχεδιαστών και δημιουργών σε αυτή. Αυτό που μέχρι πριν λίγα χρόνια ήταν μια εξειδικευμένη τεχνολογία, προσβάσιμη σε ένα μικρό τμήμα της κατασκευαστικής βιομηχανίας είναι τώρα ένα άμεσα διαθέσιμο και οικονομικά ανταγωνιστικό δημιουργικό εργαλείο που χρησιμοποιείται από ένα ευρύ φάσμα του τεχνικού κόσμου, αλλά ήδη και για μεμονωμένους δημιουργούς και σύντομα για το ευρύ κοινό, όπως ακριβώς και οι 2D εκτυπωτές μελανιού.
- Αειφορία: οι μηχανουργικές μέθοδοι αποδίδουν αντικείμενα με αφαίρεση υλικού και αναπόφευκτη δημιουργία αποβλήτου υλικού. Οι μέθοδοι ΠΚ είναι στην πλειονότητά τους δοσομετρικές και με υλικά υψηλής επαναχρησιμοποίησης και ανακυκλωσιμότητας. Έτσι, η ΠΚ συμβάλλει στην αειφορία και προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. (<https://www.tth.com>,<https://www.3dhubs.com/>,<https://www.additive3d.com/>).

7.6.Προσθετική κατασκευή του γλυπτού “Αυτοκράτωρ και Βάρβαρος”

Για την προσθετική κατασκευή του γλυπτού “Αυτοκράτωρ και Βάρβαρος” για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε ένας επιτραπέζιος εκτυπωτής του οίκου Ultimaker, μοντέλο Ultimaker 3Extended, της εταιρείας NeoMech (www.neomech.gr), επίσημου αντιπροσώπου της Ultimaker για την Ελλάδα και την Κύπρο (<https://ultimaker.com>). Τη χρήση του συγκεκριμένου 3D εκτυπωτή και τα απαιτούμενα για την κατασκευή του γλυπτού υλικά, ευγενικά χορήγησε για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικές, η εταιρία Neomech.



Εικόνα 75 Ο εκτυπωτής Ultimaker 3 Extended

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή ήταν θερμοπλαστικό PLA (polylactic acid) της Ultimaker, χρώματος pearl white, ενώ η κατασκευή υποστηρίχθηκε με υλικό PVA (polyvinyl alcohol) που είναι υδατοδιαλυτό συνθετικό πολυμερές υλικό. Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής του αγάλματος, το PVA διαλύθηκε σε λίγες ώρες με εμβάπτιση του αντικειμένου σε απλό νερό βρύσης. Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά της κατασκευής δίνονται παρακάτω:

- Χρόνος: χρειάστηκαν συνολικά 73 ώρες για την κατασκευή του αντικειμένου.
- Ανάλωση υλικών: χρειάστηκαν 25,58m PLA και 21,81m PVA

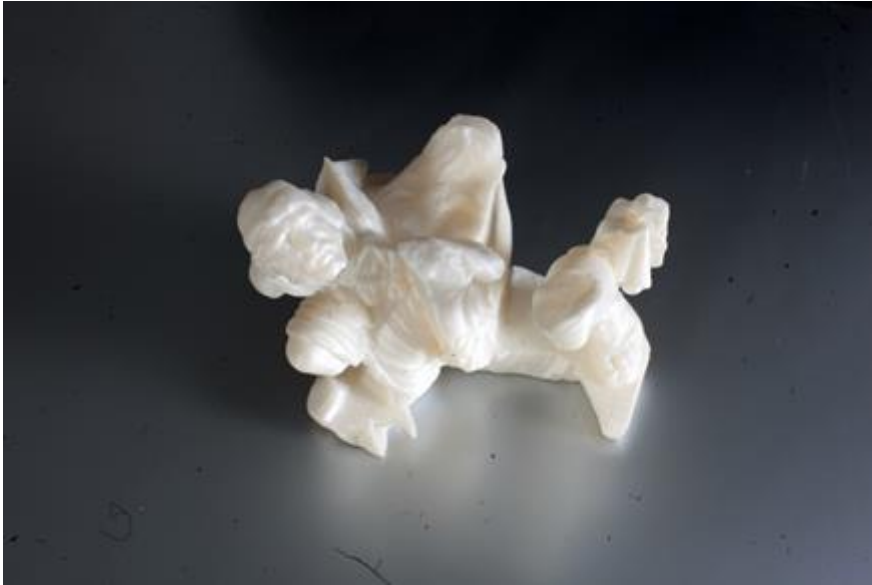
Το αντικείμενο εσωτερικά, για οικονομία χρόνου και υλικού, διαμορφώθηκε κατά το στάδιο της προετοιμασίας σε μορφή αραιού πλέγματος. Η εν λόγω διαμόρφωση και η πλήρης προετοιμασία όλων των παραμέτρων της κατασκευής για τη δημιουργία του G-κώδικα οδήγησης της μηχανής, συντελέστηκαν στο λογισμικό Ultimaker Cura, όπου δύναται να καθοριστούν παράμετροι όπως:

- Τα πάχη των στρώσεων.
- Ο προσανατολισμός της κατασκευής.
- Η κλίμακα-αν αυτό είναι επιθυμητό.
- Η μορφή και η πυκνότητα του εσωτερικού υλικού.
- Η ταχύτητα εναπόθεσης του υλικού.
- Η θέση κατασκευής του αντικειμένου.
- Το πάχος των εξωτερικών τοιχωμάτων.
- Λοιπές παράμετροι και ρυθμίσεις.

Το αποτέλεσμα της εκτύπωσης κρίθηκε αντιπροσωπευτικό του γλυπτού και εξαιρετικά ακριβές, και παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 76 Το εκτυπωμένο μοντέλο-1



Εικόνα 77 Το εκτυπωμένο μοντέλο-2

8. Συμπεράσματα

8.1. Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής ήταν η δημιουργία ενός πιστού ψηφιακού μοντέλου ενός γλυπτού, και, μετέπειτα, η παρουσίαση του μοντέλου αυτού με διάφορους τρόπους, έτσι ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση σε αυτό, η μελέτη του και η παρουσίασή του.

Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε μία από τις δύο πιο διαδεδομένες μεθόδους-SfM-για εργασίες τέτοιου είδους, με πολύ καλά αποτελέσματα στη δημιουργία της κλειστής επιφάνειας του μοντέλου-μεγάλη ακρίβεια, δημιουργία αρκετά πιστού μοντέλου του αντικειμένου και μικρά σφάλματα, κυρίως σε τμήματα του αντικειμένου που δε φωτογραφήθηκαν σωστά. Τέτοιο πρόβλημα δημιουργήθηκε σε κάποια σημεία του γλυπτού όπου η επιφάνεια ήταν αρκετά πολύπλοκη και με ανώμαλη γεωμετρία, καθώς το γλυπτό είναι αρκετά σπασμένο και έχει υποστεί μεγάλη φθορά από τη στιγμή της δημιουργίας του. Το πρόβλημα αυτό, εντούτοις, δεν επηρέασε την ποιότητα του αποτελέσματος, καθώς αντιμετωπίστηκε επαρκώς κατά τη δημιουργία της υψής του μοντέλου, με πληροφορία που εξήχθη από απευθείας παρατήρηση των υπάρχουσών φωτογραφιών. Το τελικό αποτέλεσμα, ήταν, επομένως αρκετά ικανοποιητικό, όσον αφορά την κλειστή επιφάνεια του μοντέλου, γεγονός που επέτρεψε και την άρτια προσθετική κατασκευή (3D εκτύπωση) του μοντέλου.

Το μόνο ζήτημα που προέκυψε ήταν σε σχέση με το χρόνο: χρειάστηκαν περισσότερες από τρεις ημέρες επεξεργασίας των δεδομένων (περίπου 80 ώρες), για τη δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων του αντικειμένου, ενώ ο αριθμός των φωτογραφιών ήταν σχετικά μικρός (169 φωτογραφίες).

Σε γενικές γραμμές, η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου στέφθηκε με επιτυχία, αφού το εκτυπωμένο αντικείμενο ήταν υψηλής ποιότητας και πιστό στο πρωτότυπο, και είναι δυνατή η χρήση του για οποιονδήποτε ερευνητικό σκοπό, στο μέλλον.

Όσον αφορά τους τρόπους παρουσίασης, είναι φανερό πως η 3D εκτύπωση είναι λεπτομερέστερη και άρα η καταλληλότερη για μελλοντική μελέτη και χρησιμοποίηση σε διάφορες εφαρμογές.

8.2. Μελλοντικές κατευθύνσεις

Το πρόβλημα της ψηφιακής ανακατασκευής αντικειμένων είναι ένα αρκετά πολύπλοκο πρόβλημα το οποίο έχει μελετηθεί διεξοδικώς τις τελευταίες δεκαετίες. Με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, έχουν γίνει σημαντικά βήματα και σε αυτόν τον τομέα, με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται να δίνουν ποιοτικά αποτελέσματα με σχετικά χαμηλό κόστος. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ακόμα σημαντικά βήματα που θα μπορούσαν να γίνουν, τόσο για την ανακατασκευή μοντέλων, όσο και για τους τρόπους αναπαράστασής τους.

Όσον αφορά στην ψηφιακή ανακατασκευή των μοντέλων με τη μέθοδο SfM, που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, βασικό της μειονέκτημα είναι ο χρόνος. Παρότι γενικά είναι μία μέθοδος οικονομική και εύχρηστη, και οι αλγόριθμοι που χρη-

σιμοποιούνται επεξεργάζονται με επιτυχία και μεγάλη ακρίβεια τα δεδομένα, εντούτοις οι χρόνοι επεξεργασίας είναι μεγάλοι, έως πολύ μεγάλοι για μεγάλα αντικείμενα-κτίρια. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται, λοιπόν, επιδέχονται βελτίωσης, έτσι ώστε να μειωθεί δραστικά και ο χρόνος επεξεργασίας.

Επιπρόσθετα, ο όγκος των δεδομένων είναι αρκετά μεγάλος, και ειδικά στην περίπτωση μεγάλων κτιρίων, κάτι που όχι μόνο κάνει αργή την επεξεργασία τους αλλά και τη διαχείριση του τελικού προϊόντος. Ενώ υπάρχουν προγράμματα μείωσης της πληροφορίας ενός μοντέλου, σε περίπτωση που αυτό ανέβει στο διαδίκτυο, θα ήταν πολύ χρήσιμη μια τέτοια δυνατότητα από τα ίδια τα προγράμματα επεξεργασίας, που θα προσέφερε τη επιλογή ελάττωσης της πληροφορίας, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή.

Τέλος, όσον αφορά τους τρόπους απεικόνισης του μοντέλου, σημαντικότερος εξ αυτών είναι η προσθετική κατασκευή. Η προσθετική κατασκευή δίνει, βέβαια, αποτελέσματα εξαιρετικής ποιότητας στην επιθυμητή κλίμακα, παραμένει όμως μια διαδικασία χρονοβόρα και ακριβή. Σημαντική λοιπόν πρέπει να είναι η προσπάθεια μείωσης του κόστους-χρησιμοποιώντας, π.χ., οικονομικότερα υλικά-για την ελάττωση και του συνολικού κόστους μιας 3D εκτύπωσης. Είναι, ακόμα, αναμενόμενο, εφόσον η τεχνολογία πια το επιτρέπει, να επέλθει η στροφή σε μεθόδους τρισδιάστατης απεικόνισης, που δίνουν περισσότερη λεπτομέρεια και καλύτερη κατόπτευση των αντικειμένων, ενώ μέθοδοι όπως οι ορθοφωτογραφίες, σιγά σιγά δεν θα χρησιμοποιούνται, καθώς δεν προσφέρουν αρκετή πληροφορία στο χρήστη.

Βιβλιογραφία

Andreasson H. and Duckett T., 2004, Topological localization for mobile robots using omni-directional vision and local features. In Proc. IAV 2004, the 5th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon, Portugal.

Arya, S., Mount, D.M., Netanyahu, N.S., Silverman, R., Wu, A.Y., 1998. An optimal algorithm for approximate nearest neighbour searching fixed dimensions. *Journal of the Association for Computing Machinery* 45, 891–923.

Boufama, B., Mohr, R., Veillon, F., 1993. Euclidean constraints on uncalibrated reconstruction. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany, pp. 466–470.

Champion, Z & Chiabrando, F & Harrington, Jeremiah. (2015). 3D modeling of the Michigan Tech Husky statue using a close-range photogrammetric approach. *Imaging and Geospatial Technology Forum, IGTF 2015 - ASPRS Annual Conference and co-located JACIE Workshop*. 243-254.

Chandler, J.H. and Buckley, S., 2016. Structure from motion (SFM) photogrammetry vs terrestrial laser scanning. IN: Carpenter, M.B. and Keane, C.M. (eds.) *Geoscience Handbook 2016: AGI Data Sheets*, 5th ed. Alexandria, VA: American Geosciences Institute, Section 20.1.

Dufournaud, Y., Schmid, C. and Horaud, R., 2000. Matching images with different resolutions. In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'00)*, pages 612–618.

Faugeras O.D. and Maybank S.J., 1990, Motion from point matches: multiplicity of solutions. *International Journal of Computer Vision*, 4(3):255–246.

Fischler, M.A., Bolles, R.C., 1987. Random Sample Consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: Martin, A.F., Oscar, F. (Eds.), *Readings in Computer Vision: Issues, Problems, Principles, and Paradigms*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., London, pp. 726–740.

Förstner, W., 1986. A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 26, 150–166.

Harris, C., Stephens, M., 1988. A combined corner and edge detector. *Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester, pp. 147–151.

Hartley R.I. and Sturm P., 1994, Triangulation. In American Image Understanding Workshop, pages 957–966.

Heinz, Guido. (2004). PHARAOH PEPI I.: Documentation of the oldest known life-size metal sculpture using laser scanning and photogrammetry. (Geometrische Dokumentation und Visualisierung zweier antiker Statuen. Master Thesis, 2004, Mainz University of Applied Sciences. Unpublished).

Heyden A., 1997, Projective structure and motion from image sequences using subspace methods. In Scandinavian Conference on Image Analysis, pages 963–968.

Kanade T. and Okutomi M., 1994, A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(9):920–932.

Kersten T.P. (2010) 3D Scanning and Modelling of the Bismarck Monument by Terrestrial Laser Scanning for Integration into a 3D City Model of Hamburg. In: Ioannides M., Fellner D., Georgopoulos A., Hadjimitsis D.G. (eds) Digital Heritage. EuroMed 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6436. Springer, Berlin, Heidelberg.

Levoy, Marc, Pulli, Kari, Curless, Brian, Rusinkiewicz, Szymon, Koller, David, Pereira, Lucas, Ginzton, Matt, Anderson, Sean, Davis, James, Ginsberg, Jeremy, Shade, Jonathan and Fulk, Duane. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pp. 131-144, July 2000.

Longuet-Higgins H. C., 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. Nature, 293:133–135.

Lowe, D. G., 1999. Object recognition from local scale-invariant features. In International Conference on Computer Vision (ICCV'99), pages 1150–1157.

Lowe, D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 2:91–110.

Pollefeys, Marc & Van Gool, Luc & Vergauwen, Maarten & Verbiest, Frank & Cornelis, Kurt & Tops, Jan & Koch, Reinhard. (2004). Visual Modeling with a Hand-Held Camera. International Journal of Computer Vision. 59. 207-232. 10.1023/B:VISI.0000025798.50602.3a.

Pritchett P. and Zisserman A., 1998. Wide baseline stereo matching. In International Conference on Computer Vision (ICCV'98), pages 754–760.

Quintero Santana, Lerma Mario, Heine Jose Luis, Erwin, & Van Genechten, Björn. (2008). Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications (4th ed.). Universidad Politécnica de Valencia Editorial; Valencia, Spain.

Remondino, Fabio, (2004). From point cloud to surface: The modeling and visualization problem. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 34. 10.3929/ethz-a-004655782.

Schaffalitzky F., Zisserman A., Hartley R.I., and Torr P.H.S., 2000, A six point solution for structure and motion. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'00)*, pages 632–648.

Schmid, S., Mohr R., and Bauckhage, C., 1998, Comparing and evaluating interest points. In *International Conference on Computer Vision (ICCV'98)*, pages 230–235.

Snavely, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections, unpublished PhD thesis, University of Washington, USA.

Spetsakis, M.E., Aloimonos, Y., 1991. A multi-frame approach to visual motion perception. *International Journal of Computer Vision* 6, 245–255.

Stanco, Filippo, Battiato, Sebastiano, Gallo, Giovanni, 2017, *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks*, CRC Press, Florida, USA, 523 pages.

Sturm P.F. and Triggs W., 1996, A factorization based algorithm for multi-image projective structure and motion. In *European Conference on Computer Vision (ECCV'96)*, pages 709–720.

Szeliski, R., Kang, S.B., 1994. Recovering 3-D shape and motion from image streams using nonlinear least squares. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 5, 10–28.

Tomasi C. and Kanade T., 1992, Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method. *International Journal of Computer Vision*, 9(2):137–154.

Valgren, Christoffer & Lilienthal, Achim. (2014). *Presentation@ECMR 2007: SIFT, SURF and Seasons: Long-term Outdoor Localization Using Local Features*.

Westoby, Matt & Brasington, James & Glasser, Neil & Hambrey, Michael & Reynolds, John. (2012). Structure-from-Motion photogrammetry: a novel, low-cost tool for geomorphological applications. 936.

Κοντογιάννη, Γ., 2014, Ο Αλγόριθμος SfM, Θέμα στα πλαίσια του μαθήματος “Ψηφιακές Φωτογραμμετρικές Μέθοδοι”, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, ΔΜΠΣ Γεωπληροφορική, 21 σελ.

Κυπαρίσση, Β., 2011, Συνένωση νεφών σημείων από ομολογίες εικόνων, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών, ΕΜΠ, 120 σελ.

Πολύδωρας, Σ., 2013, Συμβολή στη συμπίεση του χρόνου και του κόστους ανάπτυξης νέων προϊόντων με τη βοήθεια των τεχνολογιών ταχείας κατασκευής πρωτοτύπων και εργαλείων, Διδακτορική Εργασία, Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών και Αυτόματου Ελέγχου, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 311 σελ.

Ιστοσελίδες

www.archaiologia.gr

<https://olympia.gr/>

<https://ultimaker.com>

<https://www.tth.com>

<https://www.3dhubs.com/>

<https://www.additive3d.com/>

<https://neomech.gr>

<http://www.agathe.gr/>

<http://www.tovima.gr/opinions/article/?aid=631168>

http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf

<https://eclass.pat.teiwest.gr/eclass/modules/document/>

<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>

http://odysseus.culture.gr/h/3/gh351.jsp?obj_id=2402

<http://www.ascsa.edu.gr/pdf/uploads/hesperia/147463.pdf>

Όλες οι εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, είναι από το διαδίκτυο.