



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών
Γεωπληροφορικής
Τομέας Τοπογραφίας - Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας

Διπλωματική Εργασία

Αποτύπωση Αντικειμένων μικρού ανάγλυφου με χρήση του μετασχηματισμού ανάκλασης

ΒΕΡΝΑΡΔΑΚΗ ΕΥΜΟΡΦΙΑ-NEMESIS

Επιβλέπων καθηγητής: Ανδρέας Γεωργόπουλος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε πειραματική εφαρμογή της μεθόδου RTI η οποία χρησιμοποιεί την συνάρτηση ανακλαστικότητας των επιφανειών για να υπολογίσει τα κάθετα στην επιφάνεια διανύσματα. Τα διανύσματα αυτά αναπαριστούν την υφή και την γεωμετρία της επιφάνειας.

Αρχικά έγινε λήψη εικόνων από πέντε αντικείμενα, τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν στο πρόγραμμα RTI builder το οποίο χρησιμοποιεί δύο αλγόριθμους προσαρμογής για τη μοντελοποίηση της συνάρτησης ανακλαστικότητας. Τα τελικά προϊόντα προβάλλονται από το πρόγραμμα RTI viewer. Οι παραπάνω έννοιες εξηγούνται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον παρουσιάζονται οι λειτουργίες των προγραμμάτων, γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων τους, παράθεση συμπερασμάτων και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Τέλος, μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση δίνεται η δυνατότητα να αναλυθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε πολλές εφαρμογές.



National Technical University of Athens
School of Rural and Surveying Engineering
Department of Surveying Engineering
Laboratory of Photogrammetry

Documentation of surface detail from bas relief objects

Diploma Thesis

Vernardaki Nemesis-Evmorfia

Supervisor: Andreas Georgopoulos, Professor NTUA
Athens, 2022

Abstract

This diploma thesis focuses on an experimental use of the RTI, which makes use of the BRDF to compute the normals of surfaces. These normals project both geometry and texture of a given surface. At first, RGB images of five different objects were taken, whose data were processed using the RTI builder program. The RTI program uses two different rendering technics (PTM, HSH) to construct the BRDF. The final product made, is viewed via RTI viewer. Additionally, this diploma thesis, shows the operation of those programs as well as their results and conclusions as such suggestions given for furthermore study. Last but not least, in the case study section the opportunity is given to outline the efficiency of the RTI in multiple cases.

Πίνακας περιεχομένων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1. Σκοπός της εργασίας	10
1.2. Διάρθρωση της εργασίας	10
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	11
2.1. Photometric Stereo	12
2.2. BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)	12
2.3. Normals and Normal maps	13
2.4. RTIViewer.....	14
2.4.1. Μέθοδοι απόδοσης	15
2.5. RTI Builder	20
2.5.1. Στάδια επεξεργασίας.....	20
2.6. Μέθοδος RTI	21
2.6.1. Χρησιμότητα της μεθόδου RTI στη αποτύπωση πολιτιστικής κληρονομιάς	21
2.6.2. Πλεονεκτήματα μεθόδου	22
2.6.3. Βασική λειτουργία.....	22
2.6.4. Highlight RTI	23
2.7. Αλγόριθμοι προσαρμογής	24
2.7.1. PTM	25
2.7.2. Τι είναι μια εικόνα .ptm	25
2.7.3. Hemispherical Harmonics	26
2.8. Σύγκριση PTM-HSH	29
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	30
3.1. Αποτύπωση νομισμάτων με την μέθοδο RTI.....	30
3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου RTI ,λέιζερ σαρωτή και Φωτομετρικής στερεομετρίας	32
3.3. Αποτύπωση έργων τέχνης με την μέθοδο RTI και ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων.....	33
3.4. Συνδιασμός μεθόδων RTI & SFM	34
3.5. Συνδιασμός 2D, 3D και RTI δεδομένων για την παραγωγή 3D πληροφορίας.....	37
3.6. Εφαρμογή της μεθόδου RTI σε υποβρύχιο περιβάλλον	38
4. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ	42
4.1. Γενικά στοιχεία	42
4.2. Συλλογή των εικόνων	42
4.3. Επεξεργασία - πρόγραμμα RTI builder	44
4.4. Αποτελέσματα	45
4.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	52

4.6. Προβλήματα κατά τη διαδικασία	53
4.7. Τρόποι βελτιστοποίησης του αποτελέσματος	53
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ	54
5.1. Συμπεράσματα	54
5.2. Περαιτέρω έρευνα	55
Βιβλιογραφία.....	56

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Φαίνονται γραφικά οι συντελεστές της συνάντησης ανακλαστικότητας ενός αντικειμένου, η προσπίπτουσα ακτινοβολία, η ανακλώμενη ακτινοβολία και οι γωνίες που σχετίζονται με το κάθε μέγεθος.	13
Εικόνα 2. Αναπαράσταση κάθετων διανυσμάτων στην επιφάνεια.....	14
Εικόνα 3. Σχεδιάγραμμα ψευδοχρωμάτων σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας ενός ημισφαιρικού αντικειμένου.	16
Εικόνα 4. Εμφανίζεται μία γυαλιστερή σφαίρα και το φωτεινό σημείο της (highlights). Στο σχήμα ισχύει ότι V είναι το διάνυσμα προς το σημείο λήψης, N το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα, L το άγνωστο κανονικοποιημένο διάνυσμα.	24
Εικόνα 5. Οι πρώτες εννιά εξισώσεις ορθογωνίας βάσης των hemispherical harmonics	26
Εικόνα 6. Οι πρώτες 3 τάξεις των hemispherical harmonics	28
Εικόνα 7. Bronze Roman Imperial Aes depicting 'Julian Star'	31
Εικόνα 8. Gold Merovingian Triens	31
Εικόνα 9. Silver Roman Republican Denarius.....	31
Εικόνα 10. Πάνω αριστερά: απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων τα οποία έχουν παραχθεί με Arius 3D scanner, Πάνω δεξιά: μέθοδος RTI, Κάτω αριστερά: PS με 64 φωτισμούς, Κάτω δεξιά: PS με επιλεγμένες τριπλές φωτισμού.....	32
Εικόνα 11. Πυραμίδα με παραλληλεπίπεδη βάση που αντιπροσωπεύει την περιοχή (όγκος) του στατιστικού ορίου εντός του οποίου ένα κάθετο διάνυσμα μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν έχει αλλάξει.....	33
Εικόνα 12. Απεικόνιση των αλλαγών κατά x (a) κατά y (c) του κανονικού: τα μπλε εικονοστοιχεία αντιπροσωπεύουν τις κατεστραμμένες περιοχές. Στο (b) παρίσταται η κανονική εικόνα μετά τις αλλοιώσεις: τα λευκά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν στις κατεστραμμένες περιοχές που προσδιορίζονται από τη μέθοδο.....	34
Εικόνα 13. Αριστερά: μέθοδος RTI με μέθοδο απόδοσης Specular Enhancement, Κέντρο: μέθοδος SFM Radiance Scaling, Δεξιά: 3D αποτύπωση σταυρού	35
Εικόνα 14. Αριστερά αποτύπωση με την μέθοδο SFM Δεξιά αποτύπωση με την RTI	36
Εικόνα 15. Αριστερά μέθοδος RTI σε αποτύπωμα σφραγίδας σε πηλό Δεξιά μέθοδος SFM και χρήση φίλτρου για παραγωγή εικόνας Lambertian Radiance Scaling with Coloured Descriptor.....	37
Εικόνα 16. Διάγραμμα διαδικασιών	38
Εικόνα 17. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι τοποθετημένη η μηχανή λήψης των φωτογραφιών στο τρίποδο επάνω από το αντικείμενο, η γυαλιστερή σφαίρα για την διαδικασία Highlight RTI αλλά και ο δύτης που φωτίζει το αντικείμενο από διάφορες θέσεις για την λήψη των εικόνων.....	39
Εικόνα 18. Ο θόλος όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD.	40
Εικόνα 19. Τελική μορφή κατασκευασμένου θόλου.	40
Εικόνα 20. Παράδειγμα μεταβολής της θολότητας του νερού με σταδιακή προσθήκη αργύρου μπετονίτη.	41
Εικόνα 21. Φωτογραφία από την στιγμή της φωτογράφισης	42
Εικόνα 22. Φωτογραφία από την στιγμή της φωτογράφισης	42
Εικόνα 23. Οπτική αναπαράσταση εύρους μεταβολής της γωνίας φωτεινής πηγής αντικειμένου και ενδεικτικές θέσεις της	44
Εικόνα 24. Πρώτο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.	46
Εικόνα 25. Πρώτο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.....	46
Εικόνα 26. Δεύτερο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.	47
Εικόνα 27. Δεύτερο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.....	47

Εικόνα 28. Τρίτο και τέταρτο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.....	48
Εικόνα 29. Τρίτο και τέταρτο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.	48
Εικόνα 30. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.....	49
Εικόνα 31. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απλή απεικόνιση RGB.....	49
Εικόνα 32. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.....	50
Εικόνα 33. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απλή απεικόνιση RGB.	50
Εικόνα 34. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απεικόνιση σε μεγέθυνση.	51
Εικόνα 35. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση σε μεγέθυνση.....	51
Εικόνα 36. Πέμπτο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση με τη βασική μέθοδο αποδοσης Specular Enhancement.....	51

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Βασικές μέθοδοι απόδοσης	16
Πίνακας 2. Μέθοδοι ενίσχυσης εικόνων	17
Πίνακας 3. Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού.....	19

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου ως φοιτήτρια της σχολής Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Οφείλω ευχαριστίες για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την επιστημονική του καθοδήγηση και τη στήριξη στη διεξαγωγή και τελική ετοιμασία της εργασίας αυτής, στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. Τον ευχαριστώ για όλο τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και για την ουσιαστική και πολύτιμη καθοδήγηση που μου παρείχε, καθώς επίσης και για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Την παρούσα διπλωματική εργασία την αφιερώνω στην οικογένεια και στους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου σε όλες τις επιλογές μου καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Σκοπός της εργασίας

Η ανάγκη για ψηφιακή αποτύπωση και τεκμηρίωση πολιτιστικών, επιστημονικών και καλλιτεχνικών κειμηλίων είναι συνεχώς αυξανόμενη. Έτσι μια πρωτοποριακή κατηγορία τεχνικών απεικόνισης που ονομάζεται Reflectance Transformation Imaging (RTI), άρχισε να χρησιμοποιείται στην τεκμηρίωση και διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Μέσω αυτής γίνονται εμφανείς και μπορούν να μελετηθούν λεπτομέρειες των επιφανειών που μπορεί ακόμα και να μην είναι ορατές στο ανθρώπινο μάτι. Επιπλέον, καθώς δεν είναι καθόλου επεμβατική και το μοναδικό δεδομένο που λαμβάνεται είναι εικόνες του αντικειμένου, ενδείκνυται για αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς τα οποία ενδέχεται να είναι πολύ καταπονημένα από το χρόνο. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό των συντελεστών της συνάρτησης ανακλαστικότητας η οποία περιγράφει τον τόπο που ανακλά μία επιφάνεια το φως. Για την μοντελοποίηση της χρησιμοποιούνται δύο αλγόριθμοι προσαρμογής, οι HSH και PTM. Γνωρίζοντας λοιπόν τον ακριβή τρόπο με τον οποίο μια επιφάνεια ανακλά το φως αλλά και τη θέση της φωτεινής πηγής από την οποία προέρχεται αυτό το φως είναι δυνατό να υπολογιστεί η κλίση αυτής της επιφάνειας σε σχέση με την φωτεινή πηγή άρα και το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα normal. Τα διανύσματα αυτά που αντιστοιχούν ένα σε κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας δημιουργούν normal maps οι οποίοι είναι το τελικό αποτέλεσμα που δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να αναλύσουν, να φωτίσουν από όποιο σημείο επιθυμούν και να βελτιώσουν μαθηματικά την αναπαράσταση της επιφάνειας του αντικειμένου. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη, την παρουσίαση της μεθόδου RTI και την αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων της. Επιπλέον μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθόδου σε διάφορα περιβάλλοντα και αντικείμενα με ποικίλες ιδιότητες ώστε να δοθεί μια γενική αντίληψη του εύρους που μπορεί να καλύψει με επιτυχία. Ακόμα και προοπτικές εξέλιξης ή συνδυασμού της με άλλες μεθόδους όπως η SFM. Ένας ακόμη λόγος ενασχόλησης με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η ευκολία για το χαμηλό κόστος χρήσης της, η οποία δίνει τη δυνατότητα σε οποιονδήποτε χρήστη να ασχοληθεί με την αποτύπωση ιδιαίτερα σε συνδυασμό με την δυσκολία την οποία παρουσιάζει η μελέτη των μεθόδων και αλγορίθμων που υποστηρίζουν την διαδικασία.

1.2. Διάρθρωση της εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει πέντε κεφάλαια. Το δεύτερο κεφάλαιο περιέχει το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο αναλύονται βασικές έννοιες για την κατανόηση της λειτουργίας της μεθόδου, παρουσιάζονται η βασική λειτουργία της, οι αλγόριθμοι προσαρμογής, οι μορφές των αποτελεσμάτων, μέθοδοι απόδοσης για την παρατήρηση των αντικειμένων και την ανάδειξη των λεπτομερειών των επιφανειών τους και δίνονται πληροφορίες για τα προγράμματα RTI builder και RTI viewer. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στην πρακτική εφαρμογή. Αυτή περιλαμβάνει την διαδικασία συλλογής δεδομένων στο εργαστήριο φωτογραμμετρίας της σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, την επεξεργασία τους στο πρόγραμμα, την αξιολόγηση τους και συμπεράσματα από τα παραπάνω. Στο τέταρτο κεφάλαιο βρίσκεται η Βιβλιογραφική Ανασκόπηση με στόχο να παρουσιαστεί το ευρύ φάσμα αντικειμένων και συνθηκών που έχει εφαρμογή, η μέθοδος αλλά και τα αποτελέσματα τους. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται σχόλια, συμπεράσματα αλλά και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. Photometric Stereo

Φωτομετρική στερεομετρία ονομάζεται η μέθοδος κατά την οποία υπολογίζονται τα κάθετα διανύσματα στα επαπτόμενα επίπεδα στα σημεία μίας επιφάνειας [1]. Για να συμβεί αυτό το εκάστοτε αντικείμενο παρατηρείται-φωτογραφίζεται κάτω από διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Στην απλούστερη μορφή, μια επιφάνεια με την ιδιότητα να διαχέει το φως φωτογραφίζεται από σταθερό σημείο, κατ' ελάχιστον τρεις φορές υπό διαφορετική φωτιστική συνθήκη, με αυτόν τον τρόπο και υπό κάποιες προϋποθέσεις είναι δυνατός ο υπολογισμός των κλίσεων της επιφάνειας του αντικειμένου για κάθε εικονοστοιχείο.

Οι παράγοντες που συμβάλλουν στην εικόνα την οποία ένα αντικείμενο θα δημιουργήσει είναι το πραγματικό του σχήμα, η ανακλαστικότητα του αλλά και η διεύθυνση της προσπίπτουσας σε αυτό ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Με βάση τα παραπάνω παρατηρούνται τρεις πολύ συνηθισμένες πηγές προβλημάτων κατά την διαδικασία αποτύπωσης:

- Άγνωστο φωτιστικό μοντέλο
- Πολύπλοκη συνάρτηση ανακλαστικότητας
- Ανεξέλεγκτες συνθήκες

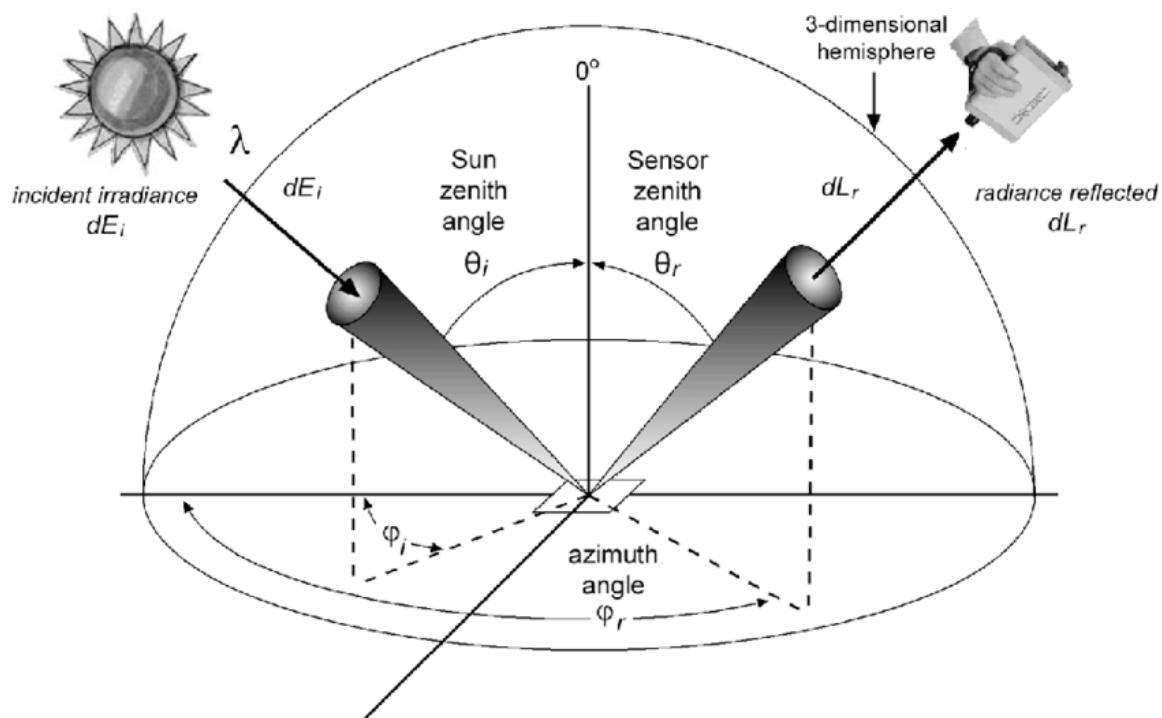
2.2. BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)

Ονομάζεται η συνάρτηση που περιγράφει την ανακλαστικότητα ενός αντικειμένου και εξαρτάται από τη ποσότητα και την στερεά γωνία του φωτός που ανακλάται από αυτή σε σχέση με αυτό που προσπίπτει. Χρησιμοποιείται ευρέως σε γραφικά υπολογιστών, στην τηλεπισκόπηση, στην περιβαλλοντική παρακολούθηση, στην μοντελοποίηση χαρακτηριστικών των αντικειμένων και άλλα πεδία επιστημονικής έρευνας. Παραδείγματος χάρη η συνάρτηση BRDF χρησιμοποιείται για τη μελέτη ανακλαστικής ιδιότητας της επιφάνειας αντικειμένων και παρέχει έτσι σημαντική διευκόλυνση στην ανίχνευση και αναγνώριση αντικειμένων. Για τον υπολογισμό του BRDF γίνεται συνήθως πειραματική μέτρηση δηλαδή φωτογράφιση των αντικειμένων. Είναι μία τετραδιάστατη εξίσωση με συντελεστές τις γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης του φωτός ως προς την στοιχειώδη επιφάνεια.

$$BRDF = \frac{dL_r}{dE_i} = f(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$$

,όπου dL_r μετριέται σε (W/m² sr) και dE_i μετριέται σε (W/m²).

Ωστόσο, όσο πιο σύνθετες είναι η ανακλαστικότητα των υπό παρατήρηση αντικειμένων αλλά και η φωτιστική συνθήκη μπορούν να ενταχθούν περισσότεροι συντελεστές.



Εικόνα 1. Φαίνονται γραφικά οι συντελεστές της συνάντησης ανακλαστικότητας ενός αντικειμένου, η προσπίπτουσα ακτινοβολία, η ανακλώμενη ακτινοβολία και οι γωνίες που σχετίζονται με το κάθε μέγεθος.

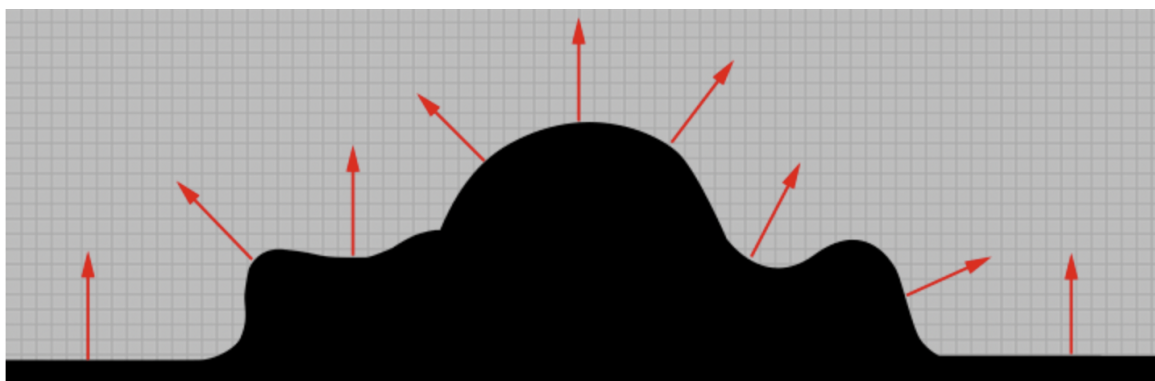
Πηγή :Temporal Modeling of Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) in Coastal Vegetation (<https://www.researchgate.net/publication/>)

2.3. Normals and Normal maps

Από μαθηματική σκοπιά, η κάθετη διεύθυνση στην επιφάνεια ενός αντικειμένου σε οποιοδήποτε σημείο του αναπαριστάται από ένα διάνυσμα το οποίο ονομάζεται normal ή κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα [5]. Πρακτικά είναι ένα διάνυσμα κάθετο στο εφαπτόμενο επίπεδο οποιουδήποτε σημείου της επιφάνειας όπως φαίνεται και στο σχήμα.

Οπότε Normal maps στον τομέα γραφικών υπολογιστών ονομάζονται δισδιάστατες εικόνες που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η γωνία ανάκλασης του φωτός από μία επιφάνεια σε επίπεδο εικονοστοιχείου [11]. Σε κάθε εικονοστοιχείο αποθηκεύονται οι συντεταγμένες X, Y, Z της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στο πραγματικό σημείο της επιφάνειας και την προβολή του στον αισθητήρα της μηχανής. Οι συντεταγμένες αντιστοιχούν σε τιμές RGB. Με αυτές τις πληροφορίες

είναι δυνατό να δημιουργηθεί η ψευδαίσθηση των πολύ λεπτομερών υφών όταν υπολογίζεται ο φωτισμός της εικόνας, για μια επιφάνεια με σχετικά λίγα σημεία.



Εικόνα 2. Αναπαράσταση κάθετων διανυσμάτων στην επιφάνεια

2.4. RTIViewer

Το πρόγραμμα αρχικά σχεδιάστηκε από το Italian National Research Council's (CNR) Institute for Information Science and Technology's (ISTI) Visual Computing Laboratory. Η πλειονότητα της χρηματοδότησης προήλθε από το US Institute of Museum and Library Services και το πρόγραμμα National Leadership Grant αλλά συνέδραμε και το Cultural Heritage Imaging. Στην ανάπτυξη λογισμικού και την σχεδίαση έχουν συμβάλει επίσης το πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στην Santa Cruz, τα πανεπιστήμια do Minho στην Πορτογαλία, ο Tom Malzbender και το Cultural Heritage Imaging. Αυτό το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να προβληθούν και να εξεταστούν εικόνες που έχουν δημιουργηθεί με την τεχνική reflectance transformation imaging όπως:

- Polynomial Texture Map (PTM file)
- Reflectance Transformation Imaging (RTI file)
- Multi-view RTI (MVIEW file), η οποία είναι μια συλλογή εικόνων μαζί με δεδομένα οπτικής ροής για την δημιουργία ενδιάμεσων απεικονίσεων.

Προσφέρει διαδραστικές εικόνες στις οποίες ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τη διεύθυνση του προσπίπτοντος φωτός και το τμήμα της εικόνας που προβάλλεται [3]. Επίσης, προσφέρει κάποιες δυνατότητες ενίσχυσης, οι οποίες εφαρμόζουν μαθηματικούς μετασχηματισμούς στα εικονιστικά δεδομένα ώστε να ενισχύονται συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του αντικειμένου.

2.4.1. Μέθοδοι απόδοσης

Το πρόγραμμα RTIViewer δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής φίλτρων τόσο στην ραδιομετρική πληροφορία (RGB color) όσο και στην μετρητική (κάθετα διανύσματα στην επιφάνεια). Αυτά τα εργαλεία ονομάζονται μέθοδοι απόδοσης και χρησιμοποιούν πληροφορίες για το σχήμα, το χρώμα της επιφάνειας - σε συνδυασμό η ξεχωριστά ώστε να αποκαλύψουν περισσότερες πληροφορίες - και το φωτογραφούμενο αντικείμενο, τέτοιες που θα αναδείκνυαν φίλτρα απλής ραδιομετρικής επεξεργασίας. Διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι εξής:

Βασικές μέθοδοι απόδοσης: Η ομάδα μεθόδων που αφορά τις κύριες ανακλαστικές ιδιότητες των αντικειμένων και συμβάλλουν στην καλύτερη κατανόηση του σχήματος.

Μέθοδοι ενίσχυσης εικόνων: Χρησιμοποιούν μάσκες Unsharp με στόχο την ανάδειξη λεπτομερειών υψηλής συχνότητας και την ανίχνευση ακμών της επιφάνειας. Για αυτό το σκοπό οι αλγόριθμοι της κατηγορίας ανιχνεύουν ασυνέχειες στα δεδομένα που συνήθως υποδεικνύουν τα παραπάνω.

Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού: Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορετικές θέσεις του προσπίπτοντος φωτός για συγκεκριμένα μέρη του αντικείμενου με στόχο την ταυτόχρονη και αποτελεσματική ανάδειξη τους. Υπάρχει δυνατότητα για στατική ή δυναμική λειτουργία. Για την πρώτη εφαρμόζεται ο αλγόριθμος με βάση τη θέση της φωτεινής πηγής που έχει δοθεί εξ αρχής και παράγεται μια στατική εικόνα υψηλής αντίθεσης, καλά φωτισμένη, κατάλληλη για παρατήρηση, εκτύπωση υψηλής ποιότητας κλπ. Η δυναμική λειτουργία δίνει την δυνατότητα διαδραστικής μεταβολής της πηγής φωτισμού. Αυτή η λειτουργία επιτρέπει πιο λεπτομερή έλεγχο, αλλά μπορεί επίσης να εμφανίσει οπτικά αντικείμενα (χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε μια εικόνα αλλά δεν υπάρχουν στο αρχικό αντικείμενο) όπου υπάρχουν μεγάλες παραλλαγές φωτισμού στην εικόνα.

Μέθοδος απεικόνισης των κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων (normals): Σε αυτή τη μέθοδο κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας λαμβάνει ένα χρώμα που αντιστοιχεί στον προσανατολισμό που έχει υπολογιστεί ότι έχει η επιφάνεια στο σημείο αυτό. Στην απόδοση αυτή οι συντελεστές X,Y και Z του κάθετου στην επιφάνεια διανύσματος εμφανίζονται με χρώμα κόκκινο ,πράσινο και μπλε αντίστοιχα. Οπότε η διεύθυνση του κάθε εικονοστοιχείου αναπαρίσταται με τα παρακάτω ψευδοχρώματα.



Εικόνα 3. Σχεδιάγραμμα ψευδοχρωμάτων σύμφωνα με την κλίση της επιφάνειας ενός ημισφαιρικού αντικειμένου.

(Πηγή: http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/rtiviewer/RTIViewer_Guide_v1_1.pdf)

Βασικές μέθοδοι απόδοσης	Περιγραφή
Default	Απλή παρουσίαση της εικόνας
Diffuse gain	Η μέθοδος αυξάνει την αίσθηση του βάθους την επιφάνειας του αντικειμένου, ενισχύοντας τον ρυθμό μεταβολής των κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.
Specular enhancement	Αυτός ο αλγόριθμος διαχωρίζει τις περιοχές του αντικειμένου που ανακλούν ολικά το φως από αυτές που το διαχέουν και δίνει τη δυνατότητα προβολής των ανακλάσεων και του χρώματος του αντικειμένου είτε ταυτόχρονα είτε ξεχωριστά. Η μέθοδος δίνει καλύτερη αντίληψη του σχήματος της επιφάνειας.

Βασικές μέθοδοι απόδοσης	Περιγραφή
Specular enhancement (cont'd)	<p>Kd: ρυθμίζει το ποσοστό της χρωματικής RGB πληροφορίας που προβάλλεται.</p> <p>Ks: ρυθμίζει το ποσοστό των οπτικών ανακλάσεων, δεδομένων του σχήματος της επιφάνειας και της ανάκλασης του φωτός μίας δοθείσας διεύθυνσης.</p> <p>N: περιγράφει το μέγεθος της περιοχής που παρουσιάζει κατοπτρικές ανακλήσεις. Οπότε χαμηλό N δημιουργεί επιφάνειες που διαχέουν το φως (ματ) ενώ το αντίθετο εμφανίζει μικρές έντονα φωτεινές περιοχές.</p>

Πίνακας 1. Βασικές μέθοδοι απόδοσης

Μέθοδοι ενίσχυσης εικόνων	Περιγραφή
Normal Unsharp Masking	<p>Η μέθοδος αυτή δημιουργεί και εφαρμόζει μια μάσκα ενίσχυσης στα κάθετα διανύσματα μιας επιφάνειας.</p> <p><u>Παράμετροι:</u> Gain: ρυθμίζει το πόσο θα ενισχυθεί η εικόνα. Environment: ρυθμίζει τη ποσότητα του διάχυτου φωτός που φωτίζει το αντικείμενο.</p>
Image Unsharp Masking	<p>Η μέθοδος αυτή δημιουργεί και εφαρμόζει μια μάσκα ενίσχυσης στο Y κανάλι (φωτεινότητα) του χρωματικού χώρου YUV.</p> <p><u>Παράμετροι:</u> Gain: ρυθμίζει το πόσο θα ενισχυθεί η εικόνα.</p>

Μέθοδοι ενίσχυσης εικόνων	Περιγραφή
Luminance Unsharp Masking	<p>Η μέθοδος αυτή δημιουργεί και εφαρμόζει μια μάσκα ενίσχυσης στο στοιχείο της φωτεινότητας μιας LRGB PTM εικόνας.</p> <p><u>Παράμετροι:</u> Gain: ρυθμίζει το πόσο θα ενισχυθεί η εικόνα.</p>
Coefficient Unsharp Masking	<p>Η μέθοδος αυτή δημιουργεί και εφαρμόζει μια μάσκα ενίσχυσης στους συντελεστές του πολυωνύμου του PTM.</p> <p><u>Παράμετροι:</u> Gain: ρυθμίζει το πόσο θα ενισχυθεί η εικόνα.</p>

Πίνακας 2. Μέθοδοι ενίσχυσης εικόνων

Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού	
Local offset (static) Offset (1-20o) (dynamic)	Μπορεί να επιλέγει μια τιμή από 0.0 % ως 1.0 %.
Tile size (px)	<p>Τα μέρη στα οποία έχει διαιρεθεί η εικόνα έχουν το μέγεθος ενός συγκεκριμένου αριθμού εικονοστοιχείων.</p> <p>Για τη στατική μέθοδο μπορούν να επιλεγθούν:</p> <p>8 16 32</p> <p>Για τη δυναμική μέθοδο μπορούν να επιλεγθούν:</p> <p>8 16 24 32</p>

Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού	
N. initial tiles	<p>Ρυθμίζει τον αρχικό αριθμό πλακιδίων για στατική λειτουργία. Αυτό περιορίζει την επιλογή των κατευθύνσεων φωτός για να αποφευχθεί η απόδοση ατελειών. Για την στατική μέθοδο μπορούν να επιλεγθούν:</p> <p style="text-align: center;">4 16 64</p>
Sharpness operator	<p>Η μέθοδος χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το πόσο έντονη είναι η αντίθεση των χρωμάτων σε κάθε κομμάτι της διαιρεμένης εικόνας. Μπορεί να επιλεγθεί μια από τις παρακάτω:</p> <p style="text-align: center;">Max Laplacian Max Energy of Laplacian L1 norm Sobel L2 norm Sobel</p>
Light sampling	<p>Χρησιμοποιείται για να επιλεγθεί η κατεύθυνση του φωτός ως</p> <p style="text-align: center;">Isotropic Anisotropic</p>
K1 (Sharpness)(0-1)	<p>Ο σταθμισμένος συντελεστής της τιμής της αντίθεσης των χρωμάτων. Μπορεί να επιλέγει μια τιμή από 0.0 % ως 1.0 %.</p>
K2 (Lightness)(0-1)	<p>Ο σταθμισμένος συντελεστής της τιμής της φωτεινότητας. Μπορεί να επιλέγει μια τιμή από 0.0 % ως 1.0 %.</p>
Threshold (0-1)	<p>Συντελεστής που επηρεάζει την επιλογή της φωτεινής πηγής που αναδεικνύει καλύτερα κάθε περιοχή. Μπορεί να επιλέγει μια τιμή από 0.0 % ως 1.0 %.</p>

Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού	
Smoothing filter	<p>Το μέγεθος του φίλτρου που χρησιμοποιείται για να διαχυθεί το φως μίας συγκεκριμένης φωτεινής πηγής σε όλη την εικόνα:</p> <p style="text-align: center;">3x3 5x5 7x7</p> <p>Τα μεγέθη αναφέρονται σε κομμάτια της διαιρεμένης εικόνας</p>
N. iteration smoothing	<p>Πόσες φορές θα εφαρμοστεί το φίλτρο. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 έως 10.</p>

Πίνακας 3. Μέθοδοι ενίσχυσης με πολλές πηγές φωτισμού

2.5. RTI Builder

Το RTI Builder χρησιμοποιεί ένα σύνολο εργαλείων για την επεξεργασία του συνόλου των αρχικών φωτογραφιών, με στόχο τη δημιουργία του τελικού αρχείου RTI. Έχει προγραμματιστεί σε γλώσσα Java και δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας του αρχείου με αλγόριθμο είτε Polynomial Texture Map (PTM) είτε Hemispherical Harmonics (HSH) [2].

2.5.1. Στάδια επεξεργασίας

1. Δημιουργία πρότζεκτ: Επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί και εισαγωγή των κατάλληλων εικόνων.
2. Αυτόματη εύρεση θέσεων της φωτεινής πηγής: Αναγνώριση των σφαιρών στις εικόνες και λειτουργία του αλγορίθμου αναγνώρισης των φωτεινών σημείων.

3. Περικοπή εικόνων: Αποκοπή του μέρους της εικόνας με τις σφαίρες, επειδή η επεξεργασία πρέπει να είναι εστιασμένη μόνο στο αντικείμενο.
4. Παραγωγή RTI: Η τελική διαδικασία κατά την οποία η σειρά των αρχικών εικόνων μετατρέπεται στο τελικό PTM ή RTI αρχείο.
5. Επανεπεξεργασία: Επαναφόρτωση του ίδιου αρχικού υλικού για την δημιουργία παρεμφερών αρχείων με διαφορετικές ρυθμίσεις.

2.6. Μέθοδος RTI

Σύμφωνα με το Cultural Heritage Imaging (CHI) με τον όρο RTI γίνεται αναφορά στο εργαλείο φωτογραμμετρίας (computational photography) το οποίο αποδίδει το σχήμα και το χρώμα μιας επιφάνειας αλλά και την ανακλαστική ιδιότητα του υλικού αυτής στις τρεις διαστάσεις. Είναι μία διαδραστική μέθοδος που δίνει τη δυνατότητα επαναπροσδιορισμού της θέσης της φωτεινής πηγής, επιπλέον όμως ενισχύει με μαθηματικούς μετασχηματισμούς τα χαρακτηριστικά του σχήματος και του χρώματος της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της μεθόδου αποκαλούνται μοντέλα 2.5 διαστάσεων αφού αποτυπώνουν σε μία δισδιάστατη εικόνα τρισδιάστατη πληροφορία δηλαδή τα τρισδιάστατα κάθετα στην επιφάνεια διανύσματα.

2.6.1. Χρησιμότητα της μεθόδου RTI στη αποτύπωση πολιτιστικής κληρονομιάς

Στον τομέα της αποτύπωσης πολιτιστικής κληρονομιάς η μέθοδος RTI παρακάμπτει πολλά από τα εμπόδια που σχετίζονται με την απόδοση της τρισδιάστατης γεωμετρίας ενός αντικειμένου [4]. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου ανήκουν η δυνατότητα μη επαφής με το αντικείμενο κατά την λήψη των δεδομένων, η ξεκάθαρη απεικόνιση των τρισδιάστατων χαρακτηριστικών της επιφάνειας λόγω των διαδραστικών μέσων προβολής, η βελτίωση της διάκρισης των δεδομένων με άμεση ανάλυση μέσω ενίσχυσης συναρτήσεων RTI, ο μηδενισμός της απώλειας δεδομένων λόγω σκιών και θορύβου, η υψηλή ανάλυση - πυκνότητες δειγματοληψίας πάνω από 20,500 ανά τετραγωνικό χιλιοστό, ο αυτόματος προσδιορισμός των κατευθύνσεων φωτισμού που δίνουν το μεγαλύτερο ποσοστό πληροφορίας, η εύκολη διαδικασία με απλή και εφικτή σειρά επεξεργασιών για την δημιουργία του τελικού προϊόντος (εικόνας RTI) και η εύκολη διαδικτυακή επικοινωνία.

2.6.2. Πλεονεκτήματα μεθόδου

- Το χαμηλό κόστος της μεθόδου RTI συμβάλλει καθοριστικά στην χρήση της για τεκμηρίωση, παρακολούθηση και παρατήρηση από ευρύ φάσμα καταναλωτών. Αυτό συμβαίνει λόγω του τυποποιημένου εξοπλισμού για απόκτηση δεδομένων και του ελεύθερου λογισμικού επεξεργασίας.
- Η απόκτηση δεδομένων δεν επιβάλλει επαφή με το αντικείμενο.
- Σε σύγκριση με μία απλή φωτογραφία δίνει πολύ μεγαλύτερη πληθώρα πληροφοριών. Οι πληροφορίες αυτές αναδεικνύουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα αρχαιολογικών κειμηλίων, ιδίως νομισμάτων, που επιδεικνύουν πολύπλοκη επιφανειακή τοπογραφία και δυσκολία στην απόδοση λόγω της φύσης των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα.
- Δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων λόγω σκιών και ανακλάσεων γυαλιστερών επιφανειών.
- Όχι μόνο καταγράφει ανωμαλίες στην επιφάνεια, που παραδοσιακά δεν αποτυπώνονται λόγω της κατοπτρικής ανάκλασης, αλλά και την υφή της επιφάνειας.
- Είναι δυνατός ο αυτόματος προσδιορισμός των πιο πλούσιων σε πληροφορίες φωτιστικών συνθηκών.
- Οι λειτουργίες ενίσχυσης που παρέχονται από το πρόγραμμα rti viewer διευκολύνουν την επόπτευση χαρακτηριστικών της επιφάνειας ακόμα και σε σχέση με την άμεση φυσική εξέταση.
- Είναι εύκολος ο συνδυασμός της με άλλες μεθόδους αποτύπωσης.
- Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι μία δισδιάστατη εικόνα με τρισδιάστατη πληροφορία.
- Σε περίπτωση συστηματικής παρακολούθησης αντικειμένων η μέθοδος αναδεικνύει περιοχές που έχουν υποστεί μεταβολές, όπως φθορές.

2.6.3. Βασική λειτουργία

Η διεύθυνση που είναι κάθετη σε κάθε δοσμένο σημείο της επιφάνειας ονομάζεται κάθετο διάνυσμα ή normal [5]. Έτσι όταν το φως προσπίπτει στην επιφάνεια, η γωνία πρόσπτωσης και ανάκλασης είναι ίσες εκατέρωθεν του κάθετου διανύσματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η κάμερα είναι σε σταθερή θέση, η φωτεινή πηγή είναι σε γνωστή θέση για κάθε λήψη και υπάρχουν λήψεις με διαφορετικές κατευθύνσεις φωτός, στο λογισμικό μπορούν να υπολογιστούν τα κάθετα διανύσματα σε κάθε εικονοηφίο της εικόνας. Η μαθηματική αναπαράσταση του κάθετου διανύσματος μαζί με την ραδιομετρική πληροφορία RGB (red-green-blue) μιας κανονικής εικόνας αποθηκεύονται σε κάθε εικονοηφίο της εικόνας RTI.

2.6.4. Highlight RTI

Εάν η θέση των φωτεινών πηγών των φωτογραφιών δε δίνεται πριν πραγματοποιηθεί η λήψη τους τότε στο κάδρο των εικόνων προστίθενται δίπλα στο αντικείμενο δύο γυαλιστερές σφαίρες. Επιπρόσθετα, για την ορθή εύρεση των θέσεων των φωτεινών πυλών απαιτείται η φωτογράφιση να γίνει από σταθερό σημείο λήψης, υπό διαφορετικό φωτισμό και σταθερές ρυθμίσεις έκθεσης της φωτογραφικής μηχανής. Έπειτα υπολογίζονται οι θέσεις με τον παρακάτω τρόπο. Όπως αναφέρεται στο άρθρο “New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art” των Mark Mudge, Tom Malzbender, Carla Schroer, Marlin έχοντας ως δεδομένο ότι η απόσταση κάμερας- αντικείμενου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη γεωμετρία του δευτέρου για την απλούστευση της λύσης, η διαδικασία που ακολουθείται για την εύρεση της άγνωστης θέσης L της φωτεινής πηγής είναι η παρακάτω [4]. Αρχικά γίνεται η μέτρηση της απόστασης του κέντρου της σφαίρας (C_x, C_y) , της ακτίνας r και των κέντρων των τοπικών φωτεινών σημείων highlights (H_x, H_y) στην εικόνα, όπως φαίνεται και στην *Εικόνα 4*. Έπειτα, κανονικοποιείται η θέση των τοπικών φωτεινών σημείων highlights στο διάστημα $(-1, 1)$

$$S_x = (H_x - C_x)/r$$

$$S_y = (H_y - C_y)/r$$

Το κανονικοποιημένο διάνυσμα δίνεται

$$S_x, S_y, \sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2}$$

Αν εφαρμοστεί μετασχηματισμός από καρτεσιανές σε πολικές συντεταγμένες, η κλίση του κάθετου στην επιφάνεια διανύσματος είναι

$$\Phi = \cos^{-1}(\sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2})$$

Γνωρίζοντας την κλίση και δεδομένου του ότι η κλίση Φ_L της θέσης της φωτεινής πηγής είναι αυτή του κάθετου στην επιφάνεια διανύσματος, ισχύει ότι

$$\Phi_L = 2\cos^{-1}(\sqrt{1 - S_x^2 - S_y^2})$$

Για $y > 0$ η άλλη γωνία μετρημένη σε σφαιρικές συντεταγμένες δίνεται ως

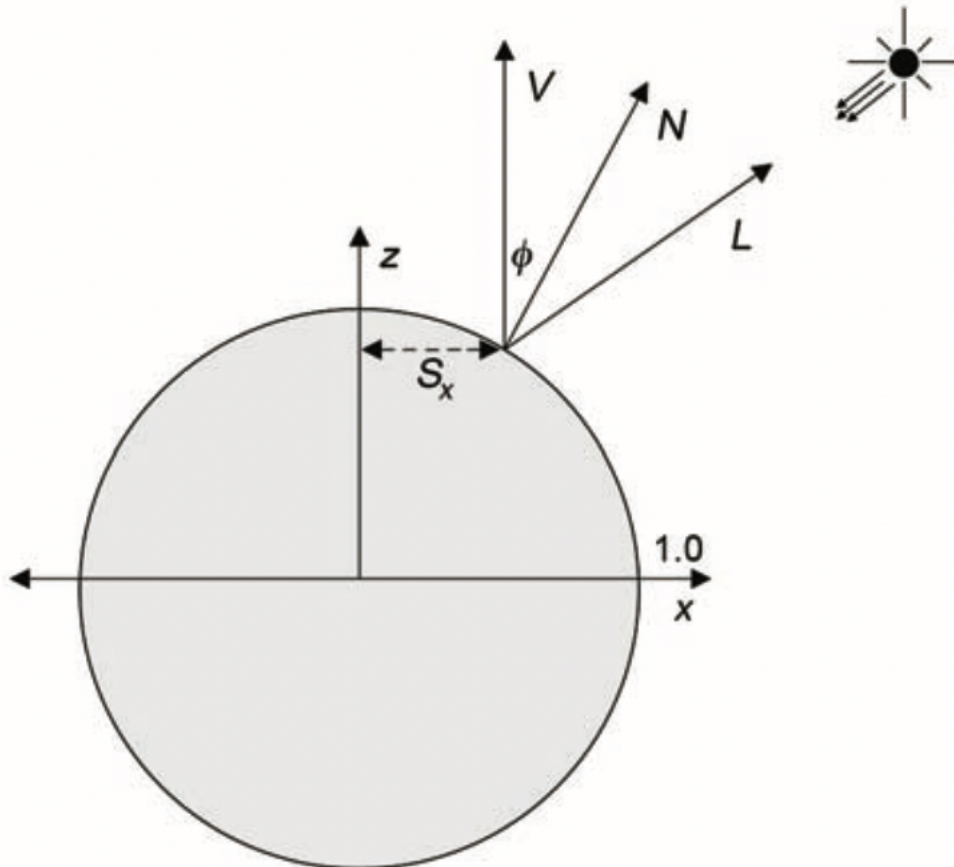
$$\Theta_L = \sin^{-1}(y/\sin(\Phi))$$

Οπότε το κανονικοποιημένο διάνυσμα L δίνεται ως

$$L_x = \sin(\Phi_L)\cos(\Theta_L)$$

$$L_y = \sin(\Phi_L)\sin(\Theta_L)$$

$$L_z = \sin(\Phi_L)$$



Εικόνα 4. Εμφανίζεται μία γυαλιστερή σφαίρα και το φωτεινό σημείο της (highlights). Στο σχήμα ισχύει ότι V είναι το διάνυσμα προς το σημείο λήψης, N το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα, L το άγνωστο κανονικοποιημένο διάνυσμα.

(Πηγή : <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/25748/1/Mudgeetal2006.pdf>"<https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/25748/1/Mudgeetal2006.pdf>)

2.7. Αλγόριθμοι προσαρμογής

Με τον όρο αλγόριθμοι προσαρμογής αναφέρονται οι αλγόριθμοι PTM και HSH που επεξεργάζονται τα σετ αρχικών δεδομένων (εικόνες) και τις υπολογισμένες θέσεις των φωτεινών πηγών για την δημιουργία του τελικού αρχείου RTI. Αυτό σημαίνει ότι περιγράφουν την συνάρτηση ανακλαστικότητας.

2.7.1. PTM

Η μέθοδος επινοήθηκε από τον Malzbender το 2001 [7]. Η ανάπτυξη της βασίστηκε στα μοντέλα bidirectional texture function (BTF) και απλοποιήθηκε θεωρώντας την ανακλώμενη γωνία πάντα προς την κατεύθυνση του σημείου λήψης (που διατηρείται σταθερό). Ο αλγόριθμος εφαρμόζει ένα παραμετρικό πολυώνυμο στο σύνολο φωτεινότητων που αντιστοιχούν στη θέση του κάθε εικονοστοιχείου στις αρχικές εικόνες. Έτσι η ένταση κάθε εικονοψηφείου στο τελικό αρχείο δίνεται από την συνάρτηση

$$I = I_{r,g,b}(\theta_i, \varphi_i, u, v)$$

,όπου θ_i, φ_i πολικές συντεταγμένες της πηγής του προσπίπτοντος φωτός και (u, v) δύο χωρικές μεταβλητές. Στην παραπάνω περίπτωση η ένταση I παρουσιάζεται ανεξάρτητη της ανακλώμενης φωτεινής ροής, οπότε φαινόμενα που σχετίζονται με την θέση του σημείου λήψης όπως η ανάκλαση (όπου η προσπίπτουσα ακτίνα ανακλάται σε μία μοναδική κατεύθυνση specularity) δεν μπορούν να αποδοθούν για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος και γι αυτό εντάσσεται στην εξίσωση ένας συντελεστής που συσχετίζει την φωτεινότητα με την θέση της φωτεινής πηγής

$$I = I_{r,g,b}(\theta_i, \varphi_i, u, v)R(u, v)$$

Αυτός ο συντελεστής μοντελοποιείται από την διτετράγωνη εξίσωση

$$L(u, v, l_u, l_v) = a_0(u, v)l_u^2 + a_1(u, v)l_v^2 + a_2(u, v)l_u l_v + a_3(u, v)l_u + a_4(u, v)l_v + a_5(u, v)$$

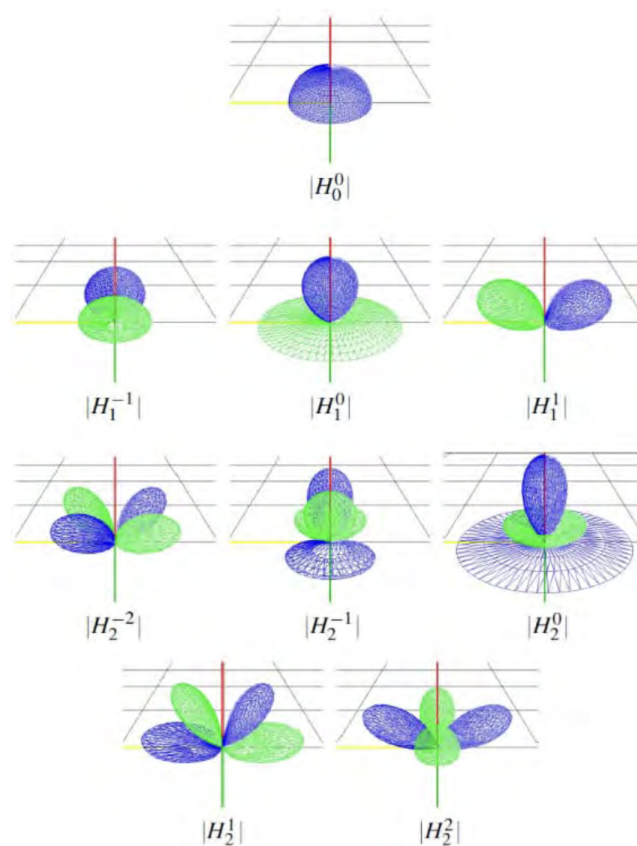
,όπου (l_u, l_v) προβολές των κανονικοποιημένων διανυσμάτων θέσης της φωτεινής πηγής στο σύστημα τοπικών συντεταγμένων (u, v) και L η προκύπτουσα φωτεινότητα της επιφάνειας. Δεδομένου ότι οι αρχικές εικόνες είναι $n+1$, χρησιμοποιείται ανάλυση πίνακα σε ιδιάζουσες τιμές (SVD) για την καλύτερη προσέγγιση κάθε τιμής εικονοψηφείου. Ως εκ τούτου οι συντελεστές $(a_0 - a_5)$ προσαρμόζονται στα δεδομένα της εικόνας σε κάθε εικονοψηφείο σαν χωρικός χάρτης όπου ονομάζεται Polynomial Texture Map (PTM) - Πολυωνυμικός χάρτης υφής.

2.7.2. Τι είναι μια εικόνα .ptm

Τα αρχεία Polynomial Texture Map (PTM) διακρίνονται σε LRGB και RGB. Στα LRGB αποθηκεύονται 9 bytes ανά εικονοστοιχείο όπου 3 τα RGB χρωματικά κανάλια και 6 συντελεστές του παραπάνω πολυωνύμου ενώ στα RGB αποθηκεύονται 18 bytes ανά εικονοστοιχείο αρκετοί για την αποθήκευση 6 πολυωνυμικών συντελεστών ανά χρωματικό κανάλι [7].

2.7.3. Hemispherical Harmonics

Ο αλγόριθμος προσαρμογής HSH αναπτύχθηκε στο University of California, Santa Cruz, Computer Science Department σε συνεργασία με το Cultural Heritage Imaging, το οποίο παρείχε χρηματοδότηση από το US Institute of Museum and Library Services (IMLS) National Leadership Grant Program (Award Number LG-25-06-010706). Επίσης στην ανάπτυξη συνέβαλε ο Tom Malzbender της Hewlett Packard Labs. Το πρόγραμμα RTI Builder χρησιμοποιεί αυτήν την μέθοδο και τα παραγόμενα αρχεία της από το 2009 ως σήμερα.



Εικόνα 5. Οι πρώτες εννιά εξισώσεις ορθογώνιας βάσης των hemispherical harmonics

(Πηγή: Gautron et al, 2004).

Η μέθοδος βασίζεται στα σχετικά πολυώνυμα Legendre τα οποία έχουν δημιουργηθεί για να μοντελοποιούν γεωδαιτικές και πλανητικές σχέσεις [6]. Αυτά τα πολυώνυμα αποτελούνται από εξισώσεις ορθογώνιας βάσης ορισμένες σε χώρο δύο διαστάσεων πάνω από μία σφαιρική επιφάνεια. Ένα σταθμισμένο άθροισμα αυτών των εξισώσεων μπορεί να προσαρμοστεί ως προσέγγιση σε οποιαδήποτε σφαιρική κατανομή μιας αξίας. Για κατανομές που ισχύουν μόνο σε ένα ημισφαίριο, είναι πιο αποτελεσματική και αξιόπιστη η προσαρμογή τους σε ένα ημισφαίριο αντί για

ολόκληρη τη σφαίρα, ειδικότερα στο άνω μισό της σφαίρας στην περιοχή με γεωγραφικό πλάτος $[0, \pi/2]$ (εικόνα 5).

Η χρήση της μεθόδου HSH έχει υιοθετηθεί ευρέως για μια ποικιλία εφαρμογών γραφικών σε υπολογιστές, όπως η αναπαράσταση ανισοτροπικών BRDF, η απόδοση περιβαλλοντικών χαρτών μη διάχυτων επιφανειών και ο υπολογισμός διάχυτου φωτισμού. Οι συντελεστές της HSH εκφράζονται ως συναρτήσεις των γωνιών με αζιμούθιο φ και γεωγραφικό πλάτος θ πάνω στο ημισφαίριο σύμφωνα με τα l_u, l_v (συντελεστές συσχέτισης φωτεινότητας με την θέση της φωτεινή πηγή)

$$\varphi = \text{atan2}(l_v, l_u)$$

$$\theta = \text{acos}(\sqrt{1 - l_u^2 - l_v^2})$$

Οι εξισώσεις βάσης $H_l^m(\theta, \varphi)$, οι οποίες είναι ορθογώνιες στον δισδιάστατο χώρο $[0, \pi/2] \times [0, 2\pi]$ αντίστοιχα. Ορίζονται ως

$$H_l^m(\theta, \varphi) = \begin{cases} \sqrt{2} \widetilde{K}_l^m \cos(m\varphi) \widetilde{P}_l^m(\cos \theta) & \text{if } m > 0 \\ \sqrt{2} \widetilde{K}_l^m \sin(-m\varphi) \widetilde{P}_l^m(\cos \theta) & \text{if } m < 0 \\ \widetilde{K}_l^0 \widetilde{P}_l^0(\cos \theta) & \text{if } m = 0 \end{cases}$$

$$\widetilde{P}_l^m(\cos \theta) = P_l^m(2 \cos \theta - 1)$$

Όπου \widetilde{P}_l^m σχετίζεται με το πολυώνυμο Legendre P_l^m μετασχηματισμένο από την σφαίρα στο ημισφαίριο

$$\widetilde{K}_l^m = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-|m|)!}{2\pi(l+|m|)!}} = \sqrt{2} K_l^m$$

Και η τιμή κανονικοποίησης

$$x = \sin \theta \cos \varphi, y = \sin \theta \sin \varphi, z = \cos \theta$$

Στην στοιχειώδη σφαίρα οι καρτεσιανές συντεταγμένες μπορούν να οριστούν σε σχέση με τα θ, φ ως

$$x' = 2 \cos \varphi \sqrt{\cos \varphi - \cos^2 \theta} y' = 2 \sin \varphi \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta} z' = 2 \cos \theta - 1$$

Αφού μετατραπούν οι μεταβλητές από σφαιρικό σε ημισφαιρικό σύστημα έχουμε

Εικόνα 5. Οι πρώτες εννιά εξισώσεις ορθογώνιας βάσης των hemispherical harmonics

(Πηγή: Gautron et al, 2004).

Τα αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με δεκαέξι συντελεστές, οι οποίοι περιλαμβάνουν μία σταθερά συν τρεις όρους πρώτης τάξης, πέντε δεύτερης και επτά όρους τρίτης τάξης. Αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα 6 ως συναρτήσεις είτε των θ, φ είτε των x', y', z' . Η προσαρμογή των συντελεστών ακολουθεί τον ίδιο Αλγόριθμο ανάλυσης πίνακα σε ιδιάζουσες τιμές (SVD) όπως για το PTM και μπορεί να εφαρμοστεί στις φωτεινότητες της εικόνας (σταθμισμένο άθροισμα καναλιών R, G, B) για τον υπολογισμό των κλίσεων σε κάθε εικονοστοιχείο. Εναλλακτικά, με δαπάνη μεγαλύτερης αποθηκευτικής ικανότητας, η προσαρμογή μπορεί να εφαρμόζεται σε καθένα από τα κανάλια R, G, B ανεξάρτητα.

Table 2.2: The first three orders of hemispherical harmonics

FIRST-ORDER	$h_0 = H_0^0 = \sqrt{1/2\pi}$
	$h_1 = H_1^1 = \sqrt{3/2\pi} x' = \sqrt{6/\pi} \cos \varphi \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta}$
	$h_2 = H_1^0 = \sqrt{3/2\pi} z' = \sqrt{3/2\pi} (2 \cos \theta - 1)$
	$h_3 = H_1^{-1} = \sqrt{3/2\pi} y' = \sqrt{6/\pi} \sin \varphi \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta}$
SECOND-ORDER	$h_4 = H_2^2 = \sqrt{15/8\pi} (x'^2 - y'^2) = \sqrt{30/\pi} \cos 2\varphi (\cos^2 \theta - \cos \theta)$
	$h_5 = H_2^1 = \sqrt{15/2\pi} x'z' = \sqrt{30/\pi} \cos \varphi (2 \cos \theta - 1) \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta}$
	$h_6 = H_2^0 = \sqrt{5/8\pi} (-x'^2 - y'^2 + 2z'^2)$ $= \sqrt{5/2\pi} (1 - 6 (\cos \theta - \cos^2 \theta) \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta})$
	$h_7 = H_2^{-1} = \sqrt{15/2\pi} y'z' = \sqrt{30/\pi} \sin \varphi (2 \cos \theta - 1) \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta}$
THIRD-ORDER	$h_8 = H_2^{-2} = \sqrt{15/8\pi} x'y' = \sqrt{30/\pi} \sin 2\varphi (\cos^2 \theta - \cos \theta)$
	$h_9 = H_3^3 = \sqrt{35/16\pi} y'(3x'^2 - y'^2) = \sqrt{140/\pi} \cos 3\varphi (\sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta})^3$
	$h_{10} = H_3^2 = \sqrt{105/8\pi} z'(x'^2 - y'^2) = \sqrt{210/\pi} \cos 2\varphi (1 - 2 \cos \theta) (\cos \theta - \cos^2 \theta)$
	$h_{11} = H_3^1 = \sqrt{21/16\pi} x'(4z'^2 - x'^2 - y'^2)$ $= \sqrt{84/\pi} \cos \varphi \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta} (1 - 5(\cos \theta - \cos^2 \theta))$
	$h_{12} = H_3^0 = \sqrt{7/8\pi} z'(2z'^2 - 3x'^2 - 3y'^2)$ $= \sqrt{7/2\pi} (12 \cos \theta - 1 - 30 \cos^2 \theta + 20 \cos^3 \theta)$
	$h_{13} = H_3^{-1} = \sqrt{21/16\pi} y'(4z'^2 - x'^2 - y'^2)$ $= \sqrt{84/\pi} \sin \varphi \sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta} (1 - 5(\cos \theta - \cos^2 \theta))$
$h_{14} = H_3^{-2} = \sqrt{105/2\pi} x'y'z' = \sqrt{210/\pi} \sin 2\varphi (1 - 2\cos(\theta)) (\cos \theta - \cos^2 \theta)$	
$h_{15} = H_3^{-3} = \sqrt{35/16\pi} x'(x'^2 - 3y'^2) = \sqrt{140/\pi} \sin 3\varphi (\sqrt{\cos \theta - \cos^2 \theta})^3$	

PhD Thesis, October 2014 – Lindsay W. MacDonald, Faculty of Engineering, UCL

Εικόνα 6. Οι πρώτες 3 τάξεις των hemispherical harmonics

2.8. Σύγκριση PTM-HSH

Συνοψίζοντας υπάρχουν δύο τύποι αρχείων RTI στα *.ptm, μία διτετράγωνη συνάρτηση για την περιγραφή της συνάρτησης ανακλαστικότητας του αντικειμένου ενώ στα .rti γίνεται χρήση ενός πολωνύμου Legendre πρώτου, δεύτερου ή τρίτου βαθμού. Έτσι, η προσέγγιση με την μέθοδο HSH είναι καλύτερη για αντικείμενα με πολύπλοκη τρισδιάστατη πληροφορία αφού χρησιμοποιεί ως και δεκαέξι συντελεστές αντί για έξι που χρησιμοποιούνται όταν γίνεται χρήση της μεθόδου PTM. Επιπρόσθετα, αποδίδει καλύτερα σε αντικείμενα τα οποία λόγω αναγλύφου δημιουργούν σκιάσεις σε σημεία τους. Ωστόσο, τα αρχεία .ptm είναι μικρότερα σε μέγεθος άρα απαιτούν λιγότερη υπολογιστική ισχύ και το πρόγραμμα rti viewer υποστηρίζει περισσότερες λειτουργίες θέασης για τα τελευταία.

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η αυξανόμενη ανάγκη για μη επεμβατική παρατήρηση και προσβασιμότητα σε αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς έχουν καταστήσει την χρήση μεθόδων αποτύπωσης αναγκαία. Αυτό συμβαίνει διότι αποδίδεται ένα πιο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα από τις κλασικές φωτογραφικές μεθόδους για ένα πλήθος αντικειμένων και εκθεμάτων. Η μέθοδος που παρουσιάζεται χρησιμοποιεί την διαφοροποίηση της κατεύθυνσης του φωτισμού στις εικόνες για την ανάκτηση του προσανατολισμού της επιφάνειας (των κάθετων διανυσμάτων). Το ανακλαστικό μοντέλο είναι άγνωστο και για να τον προσδιορισμό των παραπάνω είναι απαραίτητη η λήψη τουλάχιστον 20 εικόνων. Στα αποτελέσματα πέρα από ρεαλιστική απεικόνιση προσφέρεται δυνατότητα επιλογής οποιασδήποτε κατεύθυνσης φωτισμού. Έτσι δίνεται η δυνατότητα να παρατηρηθούν λεπτομέρειες που θα ήταν αδύνατο να παρατηρηθούν από μία εικόνα και αρκετά δύσκολο να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι.

Παρακάτω παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθόδου σε πλήθος διαφορετικών αντικειμένων, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικά μεγέθη, υλικά κατασκευής και ανάγλυφο. Επιπλέον η λήψη των δεδομένων για την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να έχει γίνει σε πού ελεγχόμενες συνθήκες όπως μέσα σε ένα τεχνητό θόλο ή και σε δύσκολα ελεγχόμενες όπως είναι οι εξωτερικές λήψεις ακόμα και υποθαλάσσια. Άλλο ένα χαρακτηριστικό που μελετάται είναι αν οι θέσεις των φωτεινών πηγών είναι προκαθορισμένες (RTI) ή υπολογίζονται κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των εικόνων (H-RTI). Στην δεύτερη περίπτωση εισάγονται σφάλματα στην διαδικασία όπως αυτά της σκόπευσης των σφαιρών και των σημείων που ανακλούν το φως σε αυτές. Επιπρόσθετα σε πολλές ερευνητικές εργασίες έχει γίνει προσπάθεια να υπολογιστεί η ακρίβεια την οποία έχουν οι τελικές εικόνες RTI. Τέλος με την σύγκριση της με άλλες μεθόδους φαίνεται πού αυτή υπερτερεί και πού η χρήση μιας άλλης μεθόδου είναι αναγκαία.

3.1. Αποτύπωση νομισμάτων με την μέθοδο RTI

Η αποτύπωση νομισμάτων είναι μία πολύ απαιτητική διαδικασία λόγω της μεταλλικής όψης, του μικρού σχήματος και ανάγλυφου. Αυτά συντελούν σε ανάγκη για πολύ μεγάλη ακρίβεια αλλά ακόμα και τότε η εικόνα και η ανάλυση επηρεάζεται από τις ανακλάσεις που δημιουργεί το μέταλλο. Λύση για αυτό αποτελούσε η αυτοπρόσωπη παρατήρηση τους κάτι που πλέον δεν επιτρέπεται για λόγους ασφαλείας των κειμηλίων, αλλά δεν αποτελεί και πρακτική λύση αφού απαιτεί την παρουσία όποιου θέλει να τα μελετήσει. Σε αυτήν την εργασία [8] αποτυπώθηκαν νομίσματα από την νομισματική συλλογή του μοναστηριού Grand St. Bernard που βρίσκεται στα ιταλοελβετικά σύνορα, 2472 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η συλλογή περιέχει νομίσματα από την εποχή του μεγάλου Αλεξάνδρου ως τον 19 αιώνα. Από αυτά αποτυπώθηκαν οι δύο όψεις επτά νομισμάτων με την μέθοδο PTM. Για την λήψη των φωτογραφιών μία κάμερα στήθηκε στην κορυφή του

νοητού ημισφαιρίου στο οποίο τοποθετήθηκαν οι φωτεινές πηγές και είκοσι εικόνες ελήφθησαν με τους αντίστοιχους διαφορετικούς φωτισμούς για την δημιουργία των τελικών αρχείων. Τελικά τα αρχεία αυτά αναρτήθηκαν στον ιστότοπο της εκκλησίας του Grand St. Bernard και στον ιστότοπο του Cultural Heritage Imaging. Ενδεικτικά τρία από τα νομίσματα εμφανίζονται στις Εικόνες 7, 8 και 9.



Εικόνα 7. Bronze Roman Imperial Aes depicting 'Julian Star'

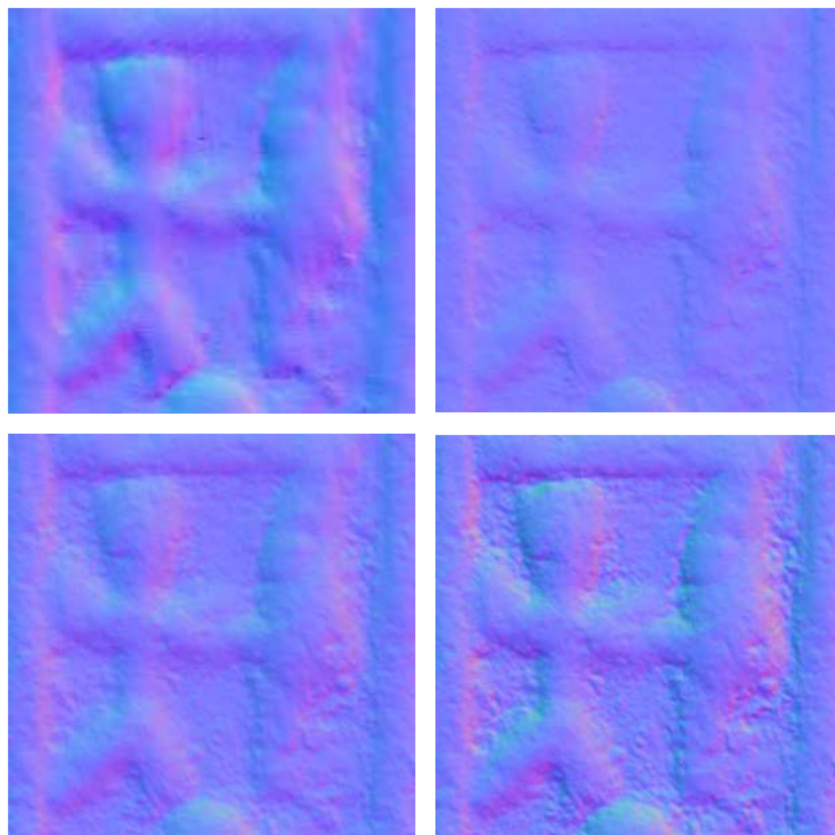


Εικόνα 8. Gold Merovingian Triens



Εικόνα 9. Silver Roman Republican Denarius

3.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου RTI, λέιζερ σαρωτή και Φωτομετρικής στερεομετρίας



Εικόνα 10. Πάνω αριστερά: απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων τα οποία έχουν παραχθεί με Agius 3D scanner, Πάνω δεξιά: μέθοδος RTI, Κάτω αριστερά: PS με 64 φωτισμούς, Κάτω δεξιά: PS με επιλεγμένες τριπλέτες φωτισμού.

Αυτή η ερευνητική εργασία έχει στόχο την σύγκριση τριών μεθόδων αποτύπωσης με βάση την ακρίβεια των κάθετων διανυσμάτων που θα προκύψουν από την κάθε μία [9]. Οι μέθοδοι είναι:

1. νέφη σημείων από σαρωτή Agius 3D
2. RTI
3. Φωτομετρική στερεομετρία.

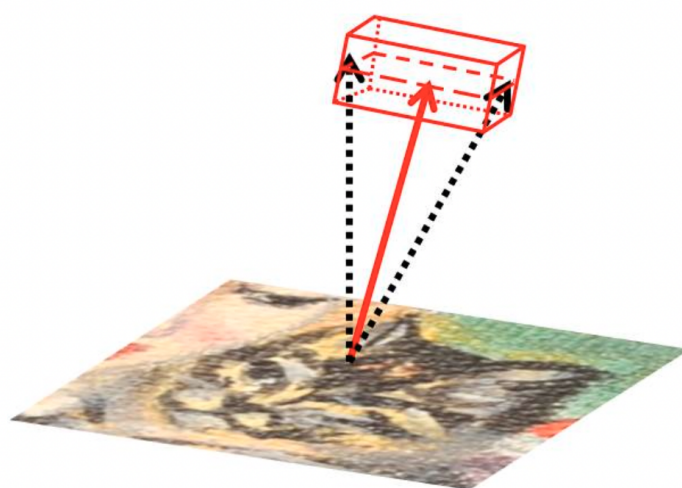
Το αντικείμενο που μελετήθηκε ανήκει στην συλλογή του UCL Petrie Museum, αποτελεί μέρος αιγυπτιακού τάφου του 1200 π.Χ. και έχει ακτίνα 10 εκατοστών. Στην πρώτη περίπτωση το αντικείμενο σαρώθηκε με ακρίβεια 0.2 mm ενώ για τις άλλες δύο περιπτώσεις ισχύει η ίδια χωρική ανάλυση για το τελικό προϊόν με κάθε μία από τις αρχικές εικόνες, 15 pixels/mm. Η μέθοδος RTI εμφανίζει χαμηλή ανάλυση στον γωνιακό χώρο του προσπίπτοντος φωτισμού, επειδή οι διευθύνσεις των επιφανειών προσεγγίζονται μόνο με 6 συντελεστές για κάθε εικονοστοιχείο. Επιπλέον, για τις δύο τελευταίες μεθόδους ελήφθησαν 64 εικόνες με χρήση ημισφαιρικού θόλου στον οποίο

τοποθετήθηκαν φωτεινές πηγές των οποίων οι θέσεις μετρήθηκαν με γεωδαιτικές μεθόδους. Για την καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων μία περιοχή 20x20mm φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 10).

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10 τα κάθετα διανύσματα που έχουν παραχθεί με την μέθοδο RTI υστερούν σε αντίθεση και υψηλές συχνότητες των άλλων δύο μεθόδων. Ο λόγος αυτών των απωλειών είναι η κανονικοποίηση που δημιουργεί η δικυβική εξίσωση που χρησιμοποιείται στην δημιουργία των PTM. Ωστόσο ακόμα και τα κάθετα διανύσματα που προκύπτουν από τον σαρωτή είναι μειωμένης ακρίβειας αφού κατά την παραγωγή των επιφανειών από τα νέφη σημείων χάνεται κάποια πληροφορία.

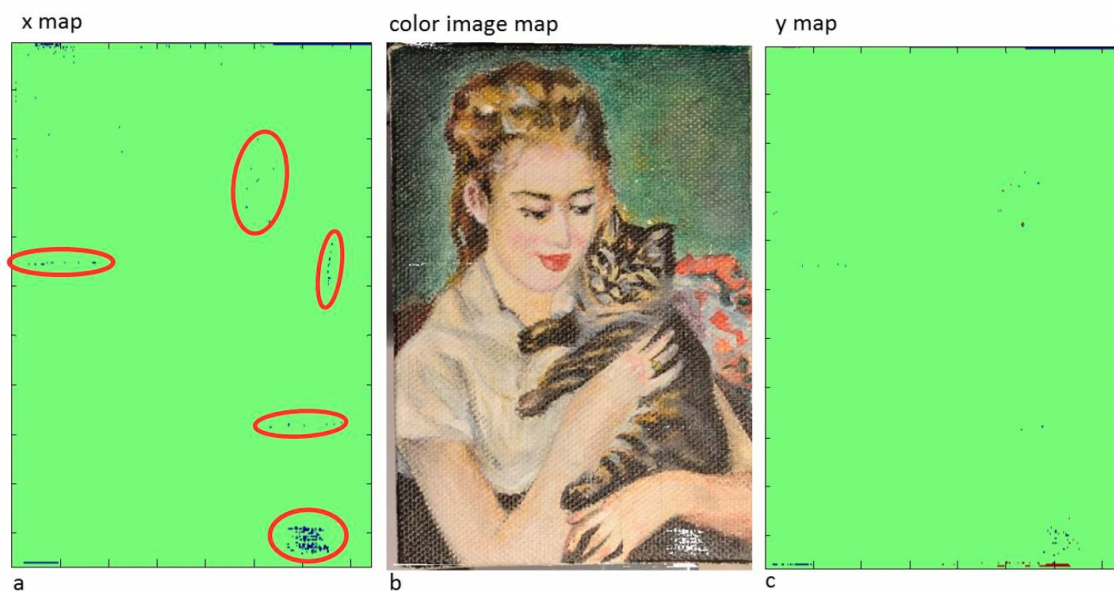
3.3. Αποτύπωση έργων τέχνης με την μέθοδο RTI και ποσοτικοποίηση των σφαλμάτων

Στόχος αυτής της μελέτης είναι η αντικειμενική εκτίμηση των αλλαγών και φθορών που υφίσταται ένα έργο τέχνης με την πάροδο του χρόνου. Για να επιτευχθεί αυτό γίνεται αποτύπωση ενός έργου με την μέθοδο RTI, έπειτα σε αυτό προκαλούνται τεχνίτες φθορές και αποτυπώνεται ξανά [10]. Έτσι, οι μορφολογικές αλλαγές που έχει υποστεί αποτυπώνονται στις εικόνες κάθετων διανυσμάτων που δημιουργούνται. Οι δύο εικόνες συγκρίνονται και εάν η τιμή στην δεύτερη εικόνα βρίσκεται εκτός της περιοχής στατιστικού ελέγχου, που ορίζεται ως 3σ γύρω από τη μέση τιμή κάθε εικονοστοιχείου, (όπου σ η τυπική απόκλιση του υπό ελέγχου εικονοστοιχείου από την αρχική εικόνα) τότε θεωρείται πως το κάθετο διάνυσμα έχει υποστεί μεταβολή.



Εικόνα 11. Πυραμίδα με παραλληλεπίπεδη βάση που αντιπροσωπεύει την περιοχή (όγκος) του στατιστικού ορίου εντός του οποίου ένα κάθετο διάνυσμα μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν έχει αλλάξει.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε μορφή εικόνας όπου τα αλλοιωμένα εικονοστοιχεία εμφανίζονται με διαφορετικό χρώμα από τα υπόλοιπα. Για την διαδικασία αυτή ελήφθησαν 48–52 εικόνες 4608×3072 pixels και ανάλυσης 254 dpi με εδαφομηφίδα 0.1 mm σε κάθε φάση και η επεξεργασία έγινε με τον αλγόριθμο HSH. Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το ότι οι αλλοιώσεις που δημιουργήθηκαν αναπαρίστανται με περίπου 2–3 pixels συντελούν στο γεγονός ότι η ακρίβεια της ανίχνευσης είναι ακόμα μικρότερη των 0.3 mm. Οι μεταβολές που ανιχνεύονται είναι είτε μορφολογικές όπως (ανοίγματα, ρωγμές ή κάμψη του υλικού) είτε μεταβολές στο χρώμα (σημείο που έχει καταστραφεί λόγω τριβής). Τέλος, αν υπάρχει ανάγκη αύξησης της ακρίβειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία κάμερα καλύτερων χαρακτηριστικών αφού η απόδοση της κάμερας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανάλυση της μεθόδου. Η ποσοτική απεικόνιση περιλαμβάνει την ανάπτυξη, τυποποίηση και βελτιστοποίηση πρωτοκόλλων λήψης απεικόνισης, ανάλυση δεδομένων και ερμηνεία αποτελεσμάτων, προκειμένου να έχουμε μια επικυρωμένη, αξιόπιστη και ακριβή μέθοδο.



Εικόνα 12. Απεικόνιση των αλλαγών κατά x (a) κατά y (c) του κανονικού: τα μπλε εικονοστοιχεία αντιπροσωπεύουν τις κατεστραμμένες περιοχές. Στο (b) παρίσταται η κανονική εικόνα μετά τις αλλοιώσεις: τα λευκά εικονοστοιχεία αντιστοιχούν στις κατεστραμμένες περιοχές που προσδιορίζονται από τη μέθοδο.

3.4. Συνδιασμός μεθόδων RTI & SFM

Σε αυτήν την μελέτη παρουσιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν συμπληρωματικά οι δύο μέθοδοι αποτύπωσης RTI και Structure from motion SFM. Αυτό συνέβη γιατί οι Βερναρδάκη Ευμορφία-Νέμεσις, ΑΘΗΝΑ 2022

ερευνητές αποφάσισαν ότι λόγω συνθηκών που επικρατούν και του είδους των αντικειμένων που θα περιγραφούν αναλυτικότερα παρακάτω, είναι αναγκαία η χρήση και των δύο μεθόδων καθώς καμία δεν μπορεί να δώσει επαρκή αποτελέσματα. Οι περιπτώσεις αντικειμένων που μελετήθηκαν είναι τέσσερις [11].

- Η εκκλησία της Αγίας Ελένης στην Ιερουσαλήμ

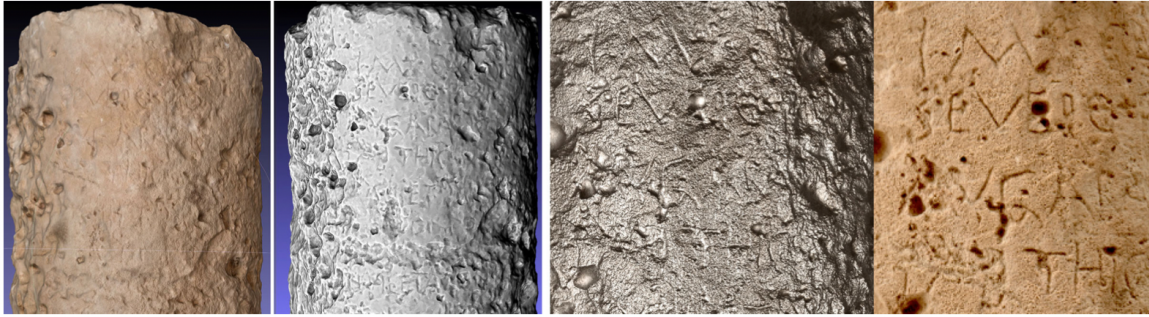
Χιλιάδες σταυροί βρέθηκαν χαραγμένοι στους τοίχους και πίσω από την Αγία τράπεζα της εκκλησίας της Αγίας Ελένης στην Ιερουσαλήμ, που χρονολογούνται ανάμεσα στον 12 και 13 αιώνα μ.Χ. Για την αποτύπωση τους χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο μέθοδοι αφού τα αποτελέσματα της μεθόδου RTI δεν ήταν ικανοποιητικά. Αυτό προκλήθηκε λόγω των δυσκολιών στην λήψη των εικόνων. Η τοποθέτηση των τριπόδων ή η μετακίνηση της πηγής φωτός στην απαιτούμενη ημισφαιρική κατεύθυνση δεν ήταν εύκολες λόγω έλλειψης χώρου. Επίσης οι συνθήκες φωτισμού και η εξαιρετικά παχιά σκόνη εξαιτίας των εργασιών που διεξάγονταν δυσχέραιναν το έργο. Παρόλα αυτά κάποια σημεία έδωσαν πολύ αξιόλογα αποτελέσματα. Όμως σε τέτοιες περιπτώσεις που η φωτογράφιση από πολύ κοντά αθετείται η μέθοδος SFM δίνει καλύτερα αποτελέσματα όπως φαίνεται στην εικόνα 13.



Εικόνα 13. Αριστερά: μέθοδος RTI με μέθοδο απόδοσης Specular Enhancement, Κέντρο: μέθοδος SFM Radiance Scaling, Δεξιά: 3D αποτύπωση σταυρού

- Ρωμαϊκά αντικείμενα από τον Δρόμο εμπορίου μπαχαρικών, Έρημος Νεγκέβ

Τα αντικείμενα ρωμαϊκής εποχής που ανακαλύφθηκαν τον χειμώνα του 2018 στην Έρημο Νεγκέβ υφίστανται αλλοιώσεις εδώ και δύο χιλιάδες χρόνια οπότε οι επιγραφές που υπάρχουν χαραγμένες σε αυτά έχουν υποστεί μεγάλες φθορές. Με στόχο λοιπόν την αποτελεσματικότερη αποτύπωση τους επιλέχθηκε η μέθοδος RTI. Βέβαια αυτό δεν ήταν αρκετό καθώς η μέθοδος αυτή λειτουργεί σε δύο διαστάσεις και τα αντικείμενα μελέτης είναι κυλινδρικά οπότε για την συνολική τους αποτύπωση χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SFM σε συνδυασμό με κάποια εργαλεία το προγράμματος Meshlab (όπως το Phong shading και το Radiance Scaling) τα οποία βοήθησαν στην ανάδειξη των γραμμάτων των επιγραφών. Το αποτέλεσμα της αποτύπωσης φαίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14. Αριστερά αποτύπωση με την μέθοδο SFM Δεξιά αποτύπωση με την μέθοδο RTI

- Εβραϊκές επιτύμβιες στήλες στην Γερμανία

Οι επιτύμβιες στήλες βρίσκονται σε αρκετές μικρές γερμανικές κοινότητες. Όλες αυτές οι κοινότητες χάθηκαν κατά τη διάρκεια του Ολοκαυτώματος, και μέχρι πρόσφατα, και τα νεκροταφεία τους παρήκμασαν ή ακόμη χειρότερα υπέστησαν βανδαλισμούς. Για την διατήρησή τους ως μέρος της πολιτιστικής κληρονομιάς έγινε φωτογραφική τεκμηρίωσή τους με τη συμμετοχή ομάδων νεαρών μαθητών από τα τοπικά γερμανικά σχολεία μαζί με μαθητές από το Ισραήλ και μικρές ομάδες από το Ινστιτούτο για τη Διατήρηση της Πολιτιστικής Κληρονομιάς στο Πανεπιστήμιο Yale και το Ακαδημαϊκό Κολλέγιο Hadassah της Ιερουσαλήμ. Τα δεδομένα αναρτήθηκαν στο διαδίκτυο. Και όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η μέθοδος RTI ανέδειξε τα ξεθωριασμένα γράμματα στις επιτύμβιες στήλες ενώ όταν χρειάστηκε να αποτυπωθεί η συνολική κατάσταση των στηλών (κατάσταση της πέτρας, ρωγμές της και καθιζήσεις) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος SFM.

- Κυλινδρικές σφραγίδες από το μουσείο του Ισραήλ

Οι κυλινδρικές σφραγίδες είναι αντικείμενα που χρησιμοποιούνταν για την αποτύπωση σε υγρό πηλό στοιχείων ιδιοκτησίας ή ταυτότητας. Οι σφραγίδες αυτές παρουσιάζουν δυσκολία στην παρατήρηση άρα και την αποκρυπτογράφηση λόγω της ιδιομορφίας τους. Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν είναι : πολύ μικρό μέγεθος, από ένα έως τέσσερα εκατοστά, ιδιαίτερα υλικά κατασκευής τα οποία κάνουν τις επιφάνειες τους γυαλιστερές και σκουρόχρωμες και πολύ μικρό ανάγλυφο. Ακόμα όμως και αν οι επιφάνειες απεικονιστούν από ένα σημείο αυτό θα αποκαλύψει μόνο ένα μικρό τμήμα τους. Για τους παραπάνω λόγους επιλέγεται συνήθως για την παρατήρησή τους να κυλιούνται σε μαλακό πηλό και να παρατηρείται το αποτύπωμά τους. Αυτή η μέθοδος είναι εξαιρετικά παρεμβατική και δεν δίνει την δυνατότητα παρατήρησης των ίδιων των αντικειμένων. Οπότε αποφασίστηκε να εφαρμοστούν οι δύο μέθοδοι RTI και SFM. Η πρώτη έδωσε πολύ καλά αποτελέσματα όταν εφαρμόστηκε σε αποτύπωμα σφραγίδας σε πηλό, όμως στις ίδιες τις κυλινδρικές σφραγίδες αποκαλύφθηκαν λιγιστές πληροφορίες με πολύ χαμηλή ακρίβεια. Η δεύτερη μέθοδος παρόλο που είναι λιγότερο λεπτομερής απέδωσε μια ακριβή προβολή της κυλινδρικής επιφάνειας, οπότε σε συνδυασμό με την εφαρμογή φίλτρων

του προγράμματος Meshlab (π.χ. Lambertian Radiance Scaling και Ambient Occlusion) δόθηκε η δυνατότητα να παρατηρηθεί καθαρά η υφή της επιφάνειας. Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων απεικονίζονται στην εικόνα 15. Τέλος, από τα αντικείμενα που επεξεργάστηκαν και με τις δύο μεθόδους μπορεί να συμπεραθεί ότι οι δύο μέθοδοι λειτουργούν συμπληρωματικά αφού έχουν και οι δύο τους περιορισμούς τους οι οποίοι όμως καθοδηγούν τους χρήστες στη επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου για κάθε αντικείμενο και ανάγκη.

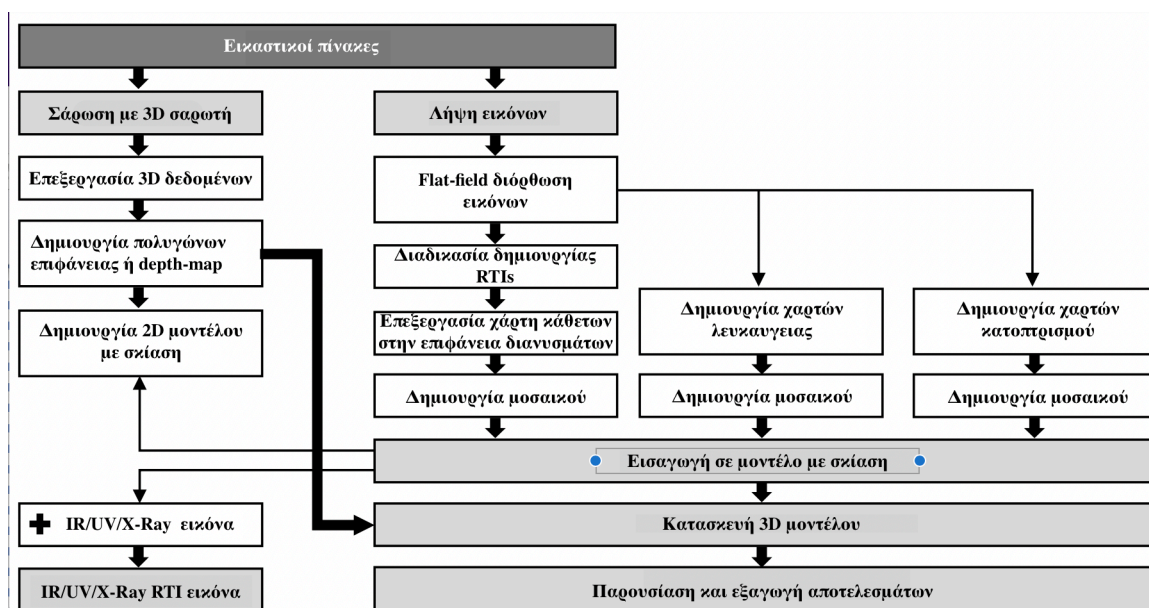


Εικόνα 15. Αριστερά μέθοδος RTI σε αποτύπωμα σφραγίδας σε πηλό Δεξιά μέθοδος SFM και χρήση φίλτρου για παραγωγή εικόνας Lambertian Radiance Scaling with Coloured Descriptor

3.5. Συνδιασμός 2D, 3D και RTI δεδομένων για την παραγωγή 3D πληροφορίας

Για την Εθνική πινακοθήκη του Λονδίνου αποφασίστηκε να αποτυπωθούν οι εικαστικοί πίνακες με τρισδιάστατο σαρωτή. Από την διαδικασία αυτή παράχθηκαν τρισδιάστατα νέφη σημείων και επιφάνειες τόσο πολύπλοκες ώστε για να γίνει η επεξεργασία τους σε πραγματικό χρόνο απαιτούνταν πολύ μεγάλη υπολογιστική δύναμη, δηλαδή πολύ ακριβό υλισμικό υπολογιστών, το οποίο είναι πιθανό να είναι απαγορευτικό από πλευράς κόστους ακόμη και σε σημαντικά ιδρύματα πολιτιστικής κληρονομιάς [12]. Η λύση σε αυτό δόθηκε με την χρήση τεχνικών από την βιομηχανία ηλεκτρονικών παιχνιδιών ώστε να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικά αποδοτικό οπτικό περιβάλλον στα εξαιρετικά λεπτομερή τρισδιάστατα μοντέλα της επιφάνειας των έργων ζωγραφικής. Αυτό σημαίνει ότι όταν οι εικόνες, που έχουν παραχθεί με τη μέθοδο RTI και απεικονίζουν τα κάθετα διανύσματα στις επιφάνειες των έργων τέχνης, τοποθετηθούν πάνω στα τρισδιάστατα μοντέλα δίνεται η εντύπωση πολύ λεπτομερούς υφής χωρίς τους περιορισμούς ενός πολύ πυκνού νέφους. Για την αποτύπωση χρησιμοποιήθηκαν ένας τρισδιάστατος σαρωτής υψηλής ανάλυση τελικού προϊόντος 254 DPI (100 μm) και μία ψηφιακή κάμερα με φακό 50 mm και ανάλυση 660 DPI. Προσαρτημένη σε θόλο με 90 φώτα LED που

χρησιμοποιούν ως οι φωτιστικές πηγές για κάθε μία από τις 90 φωτογραφίες που θα χρησιμοποιηθούν, αλλά και τέσσερα διαφορετικά προγράμματα τα οποία επεξεργάζονται τα αρχικά δεδομένα, τις εικόνες με τα κάθετα στην επιφάνεια διανύσματα (normal maps) και τις μετατρέπουν σε τρισδιάστατα μοντέλα. Η λεπτομερής διαδικασία που ακολουθήθηκε φαίνεται στο σχεδιάγραμμα του σχήματος στην Εικόνα 16.

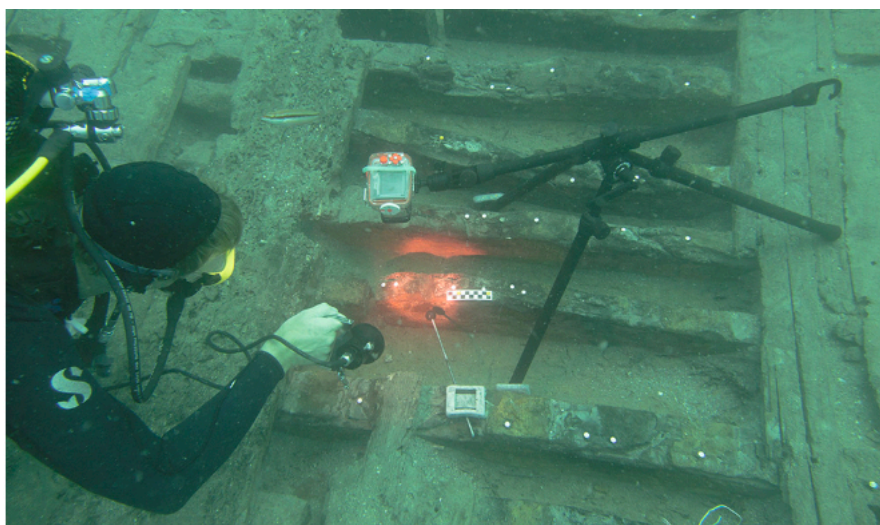


Εικόνα 16. Διάγραμμα διαδικασιών

3.6. Εφαρμογή της μεθόδου RTI σε υποβρύχιο περιβάλλον

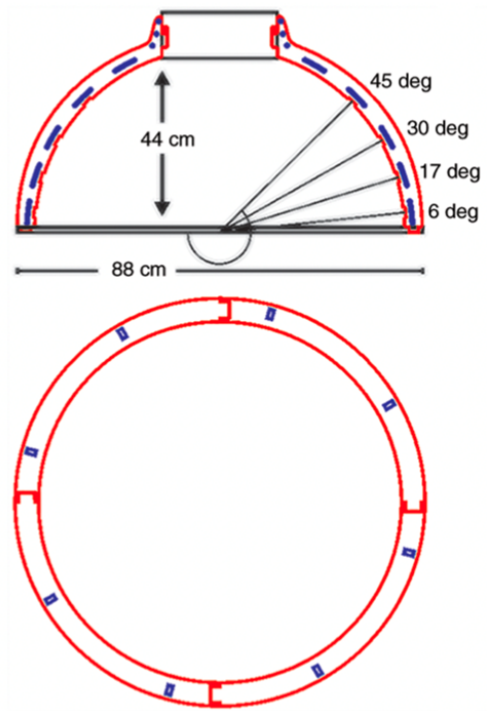
Στη μελέτη τεκμηριώνεται η πρώτη εφαρμογή των πρωτοκόλλων RTI στο υποβρύχιο περιβάλλον. Αρχικά, έγινε αποτύπωση δύο ναυαγίων του HMS Invincible του 18ου αιώνα που βρίσκεται στο πορθμό Solent του Ηνωμένου Βασιλείου και του Cap del Vol, ενός ρωμαϊκού ναυαγίου του πρώτου αιώνα 27 π.Χ. στη δυτική Μεσόγειο. Πάνω από 10,000 εικόνες λήφθηκαν εκ των οποίων το 15% παρουσιάστηκε εκτός εστίασης και αφαιρέθηκε [13]. Για την λήψη χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εξοπλισμός με αυτόν που προβλέπεται στη μέθοδο Highlight RTI και εμφανίζεται λεπτομερώς στην Εικόνα 17. Η απόρροια της λήψης έδειξε ότι η μέθοδος URTI (Underwater reflectance transformation imaging) είναι δυνατό να αποδώσει αποτελέσματα με ακρίβεια κάτω του χιλιοστού. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι ο χρόνος που απαιτήθηκε

για κάθε αποτύπωση είναι τριάντα λεπτά για την υποθαλάσσια λήψη των εικόνων και άλλη μία ώρα για την επεξεργασία του υποσυνόλου των εικόνων που επιλέχθηκαν.

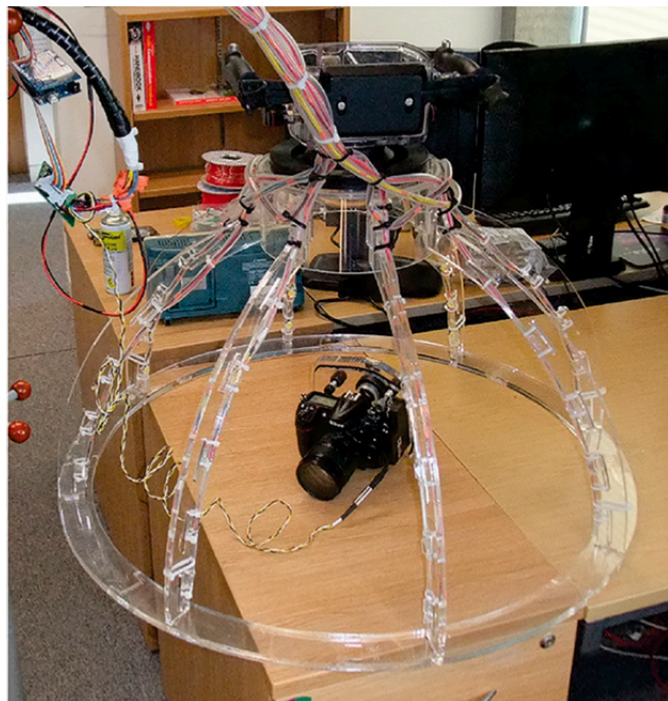


Εικόνα 17. Παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι τοποθετημένη η μηχανή λήψης των φωτογραφιών στο τρίποδο επάνω από το αντικείμενο, η γυαλιστερή σφαίρα για την διαδικασία Highlight RTI αλλά και ο δύτες που φωτίζει το αντικείμενο από διάφορες θέσεις για την λήψη των εικόνων.

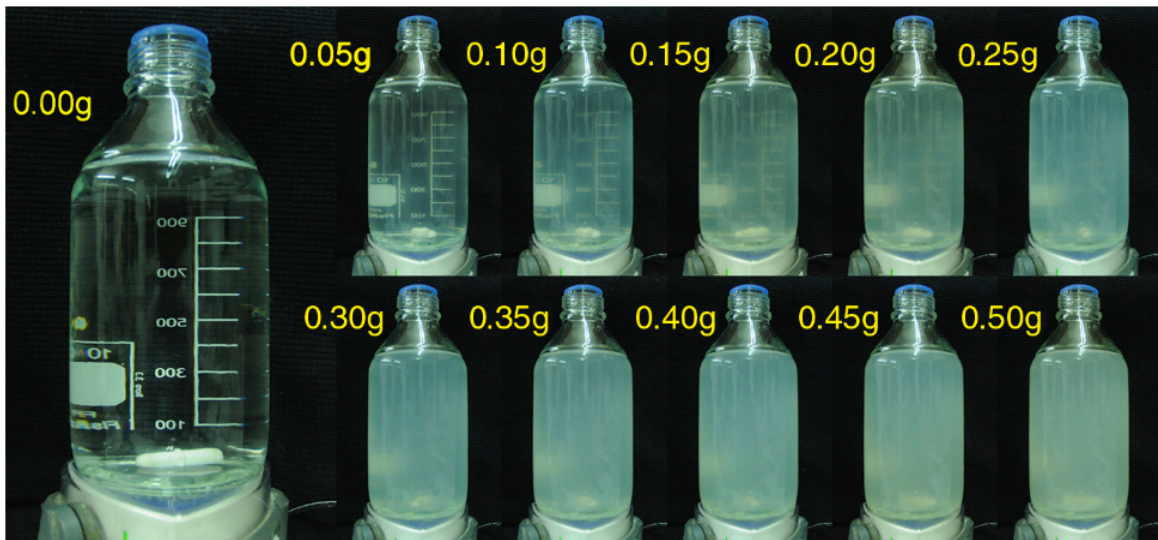
Σε δεύτερο χρόνο ερευνήθηκε η επίδραση που έχει η θολότητα του νερού στο αποτέλεσμα της διαδικασίας. Για να συμβεί αυτό δημιουργήθηκε ένας θόλος RTI όπως φαίνεται στις Εικόνες 18 και 19, ο οποίος τοποθετήθηκε σε δεξαμενή καθαρού νερού στην οποία σταδιακά αυξανόταν η θολότητα (Εικόνα 20), δεκαπέντε λήψεις δεδομένων έγιναν στην διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Αυτά τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τον αλγόριθμο PTM και δημιούργησαν εικόνες URTI. Έτσι αποκαλύφθηκε ότι παρόλο που οι αρχικές εικόνες RGB επηρεάστηκαν αρκετά από τη θολότητα του νερού, η γεωμετρία του αντικειμένου URTI που υπολογίστηκε από αυτές δεν επηρεάστηκε τόσο. Οπότε το URTI αποδεικνύεται ότι είναι ικανό να παρέχει χρήσιμες λεπτομέρειες σε επίπεδο αντικειμένου σε συνθήκες που θα καθιστούσαν τη συνηθισμένη υποβρύχια φωτογραφία να μην μπορεί να αποδώσει.



Εικόνα 18. Ο θόλος όπως σχεδιάστηκε σε περιβάλλον CAD.



Εικόνα 19. Τελική μορφή κατασκευασμένου θόλου.



Εικόνα 20. Παράδειγμα μεταβολής της θολότητας του νερού με σταδιακή προσθήκη αργίλου μπετονίτη.

4. ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

4.1. Γενικά στοιχεία

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε πρακτική εφαρμογή συλλογής εικόνων με στόχο την τρισδιάστατη ανακατασκευή του ανάγλυφου της επιφάνειας διαφόρων μικρών αντικειμένων. Η εφαρμογή αυτή διεξήχθη σε δύο επιμέρους στάδια, τη συλλογή των εικόνων και την επεξεργασία αυτών για τη δημιουργία του αρχείου rti. Τα παραπάνω συνοδεύονται από αξιολόγηση των τελικών προϊόντων, προσδιορισμό των σφαλμάτων κατά την διαδικασία και προτάσεις για την αποφυγή τους.

4.2. Συλλογή των εικόνων



Εικόνα 21. Φωτογραφία από την στιγμή της φωτογράφισης



Εικόνα 22. Φωτογραφία από την στιγμή της φωτογράφισης

Η λήψη των εικόνων είναι μια απλή αλλά ακριβής διαδικασία. Ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι:

- μια κάμερα DSLR
- Ένας φακός
- Ένα τρίποδο
- Ένα αποσπώμενο φλας που χρησιμεύει ως φωτεινή πηγή
- Ένα χειριστήριο για απομακρυσμένη απελευθέρωση κλείστρου, ώστε να μην υπόκειται η μηχανή σε κραδασμούς
- Δύο μικρές μαύρες σφαίρες έντονης ανακλαστικότητας.
- ColorChecker Passport Photo 2 για την μετέπειτα ραδιομετρική διόρθωση των εικόνων, αν απαιτείται.

Ειδικότερα η τοποθέτηση και η σχετική θέση των αντικειμένων είναι μείζονος σημασίας και δεν πρέπει να μεταβληθεί ενδιάμεσα των λήψεων. Αυτό σημαίνει ότι η κάμερα πρέπει να στηθεί στο τρίποδο και η σχετική θέση της με την σκηνή, δηλαδή τα αντικείμενα που θα απεικονιστούν, αλλά και η σχετική θέση σφαιρών και αντικειμένων της σκηνής να μην μεταβληθεί στην περίοδο των λήψεων.

Ακόμα η απόσταση της φωτεινής πηγής από την σκηνή πρέπει να είναι σταθερή παρόλο που η γωνία μεταβάλλεται από την μία λήψη στην άλλη. Το εύρος μεταβολής της παραπάνω γωνίας είναι από 15 έως 65 μοίρες από την νοητή κάθετο στο επίπεδο του αντικειμένου όπως φαίνεται στην εικόνα 23. Η απόσταση λήψης καθορίζεται από το μέγεθος των ανακλαστικών σφαιρών οι οποίες πρέπει να έχουν διάμετρο τουλάχιστον 250 εικονοσηφία στις εικόνες, έτσι λόγω και της χρήσης φακού με $c=50\text{mm}$ η απόσταση λήψης ορίστηκε μισό μέτρο. Ο υπολογισμός έγινε ως εξής:

Γνωρίζοντας ότι ο αισθητήρας έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 6 μm και η πραγματική διάμετρος της σφαίρας είναι 17mm, υπολογίζεται εδαφοσηφίδα

$$GSD = \frac{17}{250} = 0,068\text{mm}$$

Οπότε ο συντελεστής κλίμακας δίνεται ως

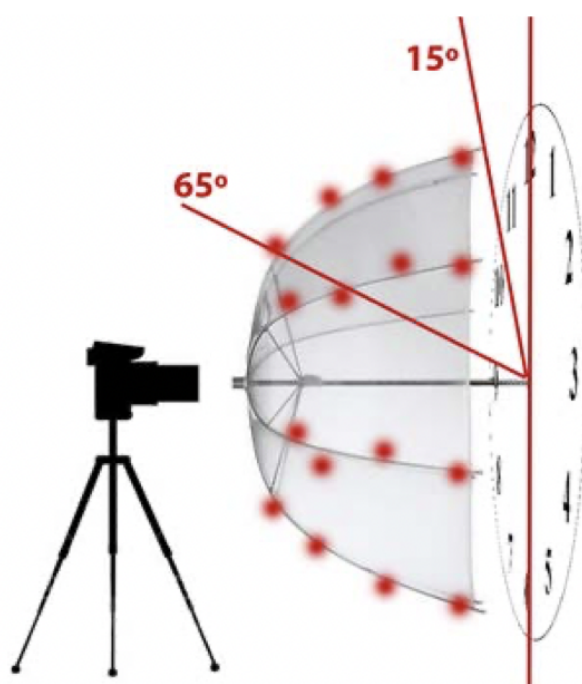
$$\kappa = 0,068/6 \cdot 10^{-3} = 11,3$$

Επιπλέον η απόσταση λήψης είναι

$$H = c \cdot \kappa = 50 \cdot 11,3 = 565\text{mm}$$

ή περίπου 0,6μ. Όπως φαίνεται από τους υπολογισμούς δεν υπάρχει μοναδικό ζευγάρι c και H που ικανοποιεί την ακρίβεια που πρέπει να επιτευχθεί, οπότε η επιλογή του συγκεκριμένου φακού έγινε λόγω του διαθέσιμου εξοπλισμού.

Επιπλέον, η κάμερα πρέπει να είναι σε ρύθμιση χειροκίνητης λειτουργίας, με σταθερή εστίαση, διάφραγμα και ταχύτητα κλείστρου. Οι παραπάνω ρυθμίσεις (κλείστρου και διαφράγματος) πρέπει συντελούν ώστε ο περιβάλλον φωτισμός να έχει μικρή ή καθόλου επίδραση στις εικόνες. Μετά την λήψη του εκάστοτε σετ φωτογραφιών οι ρυθμίσεις πρέπει να διαφοροποιούνται ελαφρώς ανάλογα με τον τύπο και το ύψος της επιφάνειας που αποτυπώνεται. Τέλος, για την παραγωγή σωστού αποτελέσματος είναι απαραίτητη η συλλογή 24 έως 60 φωτογραφιών.



Εικόνα 23. Οπτική αναπαράσταση εύρους μεταβολής της γωνίας φωτεινής πηγής αντικειμένου και ενδεικτικές θέσεις της.

(Πηγή : <http://culturalheritageimaging.org/What We Offer/Downloads/RTI Hlt Capture Guide v2 0.pdf>)

4.3. Επεξεργασία - πρόγραμμα RTI builder

Η διαδικασία της επεξεργασίας ξεκίνησε με την επιλογή των εικόνων προς χρήση και την απόρριψη αυτών που είναι ακατάλληλες. Σαν ακατάλληλες χαρακτηρίζονται εικόνες που κατά τη λήψη τους έγινε κάποιο λάθος από τους χειριστές. Έπειτα έγινε η εξαγωγή του αρχείου διορθώσεων χρώματος με βάση το ColorChecker Passport που χρησιμοποιήθηκε στην πρώτη λήψη και οι εικόνες εισήχθησαν για επεξεργασία στο

πρόγραμμα RTI builder το οποίο θα δώσει το τελικό αρχείο που θα περιέχει τα κάθετα διανύσματα της επιφάνειας. Στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα επιλογής υπομεθοδολογίας, υπολογισμού της τρισδιάστατης ανακλαστικότητας των αντικειμένων, Polynomial Texture Mapping (PTM) ή Hemispherical Harmonics (HSH). Δημιουργήθηκαν αρχεία και των δύο μεθόδων για σύγκριση. Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται από το πρόγραμμα ανίχνευση των σφαιρών και των φωτεινών σημείων τους επιλέγεται η περιοχή που θα περιέχεται στο τελικό αρχείο και στην περίπτωση του HSH , η τάξη του η οποία δηλώνει πόσες μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση της μαθηματικής περιγραφής του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας (1η τάξη 4 μεταβλητές ,2η τάξη 9 μεταβλητές ,3η τάξη 16 μεταβλητές). Τέλος δημιουργήθηκε το αρχείο rti.

4.4. Αποτελέσματα

Παρακάτω φαίνονται τα τέσσερα αντικείμενα που η επεξεργασία τους έγινε μόνο με τη μέθοδο Hemispherical Harmonics. Σχετικά με τα αντικείμενα, τα τρία εκ των τεσσάρων είναι γυαλιστερά, εκκλησιαστικές εικόνες ή άλλα, ενώ το τέταρτο είναι μια ματ μικρογραφία κτιρίου. Μετέπειτα εικονίζονται τα τρία αντικείμενα του τρίτου σετ, τα οποία επίσης είναι γυαλιστερά. Σε αυτά επιλέχθηκε να εφαρμοστεί και η δεύτερη μέθοδος PTM για να γίνει εκ των υστέρων μία σύγκριση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Σχετικά με τους τρόπους απεικόνισης, η πρώτη εικόνα κάθε αντικειμένου απεικονίζει τα κάθετα στην επιφάνεια διανύσματα (normals) με ένα ψευδοχρωματικό σύστημα σύμφωνα με το ενδεικτικό σχέδιο στην εικόνα 3. Στην δεύτερη απεικόνιση φαίνεται το αποτέλεσμα σε απλή αναπαράσταση υπό ένα συγκεκριμένο και διαφορετικό για κάθε αντικείμενο φωτισμό, επιλεγμένο για να αναδεικνύει αποτελεσματικότερα τις λεπτομέρειες του καθενός. Ο στόχος των απεικονίσεων είναι η παρατήρηση και η οπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 24. Πρώτο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.



Εικόνα 25. Πρώτο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.



Εικόνα 26. Δεύτερο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.



Εικόνα 27. Δεύτερο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.



Εικόνα 28. Τρίτο και τέταρτο αντικείμενο, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια διανυσμάτων.



Εικόνα 29. Τρίτο και τέταρτο αντικείμενο, απλή απεικόνιση RGB.



Εικόνα 30. Πέμπτο, έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια



Εικόνα 31. Πέμπτο, έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απλή απεικόνιση RGB.



Εικόνα 32. Πέμπτο, έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση κάθετων στην επιφάνεια



Εικόνα 33. Πέμπτο, έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απλή απεικόνιση RGB.



Εικόνα 34. Έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος HSH, απεικόνιση σε μεγέθυνση.



Εικόνα 35. Έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση σε μεγέθυνση.



Εικόνα 36. Έκτο και έβδομο αντικείμενο, αλγόριθμος PTM, απεικόνιση με τη βασική μέθοδο απόδοσης Specular Enhancement.

4.5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- Τα πρώτα δύο αντικείμενα φωτογραφήθηκαν ταυτόχρονα, αυτό οδήγησε το δεύτερο αντικείμενο να εμφανιστεί θολό στην εικόνα. Οπότε η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μεθόδου είναι άσκοπη σε αυτό. Το πρώτο αντικείμενο εμφανίζει μέτρια ποιότητα αφού λεπτομέρειες όπως τα μάτια των προσώπων δεν διακρίνονται καθαρά παρόλο που έχουν απεικονισθεί στις αρχικές εικόνες.
- Τα δύο δεύτερα αντικείμενα εμφανίζουν σαφώς καλύτερο αποτέλεσμα. Σε αυτά εμφανίζονται όλες οι λεπτομέρειες και οι προσανατολισμοί των επιμέρους επιφανειών φαίνονται σωστοί με βάση τη μορφολογία των αντικειμένων. Επιπλέον, σε αυτό το σετ είναι πολύ σημαντικό να παρατηρηθεί πόσο θόρυβο προσθέτει η απεικόνιση μιας γυαλιστερής σε σχέση με μια ματ επιφάνεια όταν ακολουθηθεί η ίδια ακριβώς προσέγγιση (λήψη εικόνων εξοπλισμός και επεξεργασία).
- Στο τρίτο σετ παράχθηκε το καλύτερο αποτέλεσμα οπότε σε αυτό έγινε η επεξεργασία και με την δεύτερη μέθοδο που μελετήθηκε (Polynomial Texture Map), η οποία θεωρείται χειρότερη από πλευράς ακρίβειας αφού χρησιμοποιεί λιγότερους συντελεστές για τον υπολογισμό της συνάρτησης ανακλαστικότητας της επιφάνειας. Ωστόσο, στη προκειμένη περίπτωση έδωσε εξαιρετικά αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος δεν παραπλανήθηκε από τη χρωματική μεταβολή που εμφανίζει το μεγαλύτερο αντικείμενο του σετ και έτσι απέδωσε το ανάγλυφο του σωστά σε σχέση με τον πρώτο αλγόριθμο (HSH) ο οποίος έχει αποδώσει μέρος της χρωματικής πληροφορίας ως ανάγλυφο. Το δεύτερο και τρίτο αντικείμενο έχουν αποδοθεί καλύτερα από την μέθοδο Hemispherical Harmonics αφού σε αυτή φαίνονται πολύ καθαρότερα λεπτομέρειες πολύ μικρού ανάγλυφου που υπάρχουν στα αντικείμενα. Βέβαια όπως φαίνεται στην εικόνα 22 και το αποτέλεσμα του αλγόριθμου PTM εμφανίζει εξίσου καλά τις πληροφορίες αλλά μόνο με χρήση κάποιας μεθόδου ενίσχυσης όπως η Specular enhancement.
- Σε όλα τα σετ παρατηρείται ότι οι σκιές των αντικειμένων επηρεάζουν το αποτέλεσμα στα σημεία που βρίσκονται οπότε δεν πρέπει τα αντικείμενα μας ή μέρος τους να σκιάζονται σε καμία λήψη γιατί αυτό θα αλλοιώσει το αποτέλεσμα. Αλλά και οι μεταλλικές σφαίρες αναπαρίστανται αρκετά λανθασμένα σε σχέση με το ενδεικτικό σχήμα, λόγω της έντονης ανακλαστικότητας τους. Αυτό είναι κάτι το οποίο θέτει όρια στο πόσο γυαλιστερά μπορούν να είναι τα αντικείμενα που θα απεικονιστούν, ώστε το αποτέλεσμα να είναι αντιπροσωπευτικό.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους λοιπόν, συμπεραίνεται ότι όντως η μέθοδος Hemispherical Harmonics έχει υψηλότερη ακρίβεια άρα αποτυπώνει πολύ μικρότερες μεταβολές ανάγλυφου από ότι η Polynomial Texture Map. Ωστόσο επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολή στην απόχρωση του αντικειμένου η οποία

επιδρά στην ανακλαστικότητα της περιοχής και υπολογίζεται λανθασμένα έχοντας διαφορετικό προσανατολισμό στο σημείο. Επιπλέον και οι δύο μέθοδοι επηρεάζονται πολύ από τα αρχικά δεδομένα.

4.6. Προβλήματα κατά τη διαδικασία

Η φωτεινή πηγή δεν ήταν δυνατό να στηθεί σε κάποια σημεία που ήταν απαραίτητο για την σωστή δειγματοληψία.

Η διαδικασία εστίασης αν και έγινε με την δέουσα προσοχή δεν απέδωσε στον απαραίτητο βαθμό. Δηλαδή αντικείμενα του ίδιου σετ λήψεων παρουσιάζονται συστηματικά ανεστίαστα (θολά) όταν αυτά εμφάνιζαν υψομετρική διαφορά μεταξύ τους. Σε αυτό συνέβαλε η μικρή απόσταση αντικειμένου σημείου λήψης αλλά και το μικρό βάθος πεδίου.

4.7. Τρόποι βελτιστοποίησης του αποτελέσματος

Για να βελτιστοποιηθεί το αποτέλεσμα πρέπει να γίνουν οι εξής διαδικασίες:

- Λήψη περισσότερων φωτογραφιών ώστε το πρόγραμμα να έχει περισσότερα δεδομένα (50 ή και παραπάνω λήψεις) που η επεξεργασία τους να δώσει καλύτερο αποτέλεσμα.
- Προσεκτικότερη φωτογράφιση και φωτογράφιση ξεχωριστά κάθε αντικειμένου για την αποφυγή αντικειμένων που αποτυπώνονται ανεστίαστα.
- Αναβάθμιση του εξοπλισμού με αγορά νέας μηχανής με μεγαλύτερο μέγεθος εικονοστοιχείου, ώστε και η απόσταση αντικειμένου και μηχανής να είναι μεγαλύτερη για την ίδια ακρίβεια αλλά και να υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μικρότερου διαφράγματος το οποίο θα δώσει μεγαλύτερο βάθος πεδίου στην εικόνα.
- Αγορά ή κατασκευή ενός εξειδικευμένου θόλου με συγκεκριμένες θέσεις για τις φωτιστικές πηγές οι οποίες θα μπορούσαν να έχουν γεωδαιτικά υπολογισμένες συντεταγμένες. Αυτό θα αίρει και την ανάγκη χρήσης των σφαιρών και υπολογισμού από αυτές το οποίο προσθέτει σφάλμα στο τελικό αποτέλεσμα.
- Βελτίωση των συνθηκών λήψης όπως η ελαχιστοποίηση του διάχυτου φωτισμού.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

5.1. Συμπεράσματα

Για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής εργασίας διερευνήθηκε μέρος της αγγλικής βιβλιογραφίας με θέμα τις εφαρμογές και τα θεωρητικά ζητήματα της μεθόδου Reflectance Transformation Imaging (RTI) σε συνδυασμό με πρακτική εφαρμογή της σε πληθώρα αντικειμένων. Από τα παραπάνω διαπιστώθηκε ότι η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου είναι πολύ υψηλή σε πληθώρα επιφανειών που η αποτύπωση τους χαρακτηρίζεται ως δύσκολη όπως γυαλιστερές μεταλλικές επιφάνειες. Για την επίτευξη του παραπάνω, βασική προϋπόθεση είναι η λήψη και επεξεργασία των δεδομένων με την απαραίτητη προσοχή. Επιπλέον, όσο αυξάνεται η ικανότητα να ελεγχθούν οι συνθήκες φωτισμού τόσο το αποτέλεσμα είναι καλύτερο χωρίς αυτό να καθιστά τις εξωτερικές λήψεις (λιγότερο ελεγχόμενες συνθήκες φωτισμού) αδύνατες ή τα αποτελέσματα τους κακής ποιότητας. Αυτό οδηγεί την μέθοδο να βγει από το εργαστήριο και να χρησιμοποιηθεί σε μεγαλύτερο πλήθος εφαρμογών, όπως αντικείμενα μεγαλύτερης επιφάνειας ή που είναι αδύνατο να αφαιρεθούν από το περιβάλλον τους. Μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση παρατηρήθηκε επίσης ότι είναι δυνατός ο συνδυασμός της μεθόδου με άλλες παθητικές μεθόδους όπως η Δομή από κίνηση (Structure from motion, SfM), με αυτόν τον τρόπο οι δύο μέθοδοι που παρουσιάζουν διαφορετικά δυνατά και αδύναμα σημεία συμπληρώνουν η μία την άλλη και συναινούν σε ένα αποτέλεσμα πιο πλήρες. Ακόμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και συμπληρωματικά ώστε το τελικό αποτέλεσμα να καταλαμβάνει μικρότερο αποθηκευτικό χώρο. Γεγονός, το οποίο βοηθά και στην περαιτέρω επεξεργασία του αλλά και στην μεταφόρτωση τους σε διαδικτυακές πλατφόρμες ώστε σε αυτά να έχει πρόσβαση μεγαλύτερο κοινό, κάτι πολύ σημαντικό για αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς. Το μικρό μέγεθος που έχουν τα αρχεία σε σχέση με άλλους τρόπους απεικόνισης ανάγλυφου καθιστά την παραγωγή και την επεξεργασία τους πιο φθηνή με χρήση υπολογιστών χαμηλότερων αποδόσεων (πχ ένα κοινό λαπτοπ) αλλά και πιο γρήγορη. Πολύ σημαντικό είναι επίσης ότι λόγω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής αποτελεσμάτων είναι προσιτή σε όλους τους χρήστες ανεξάρτητα με την γνώση στο αντικείμενο (φωτογραμμετρία, μέθοδοι απεικόνισης κλπ) που αυτοί διαθέτουν. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που για να παραχθεί ακριβές αποτέλεσμα χρειάζονται προσεχτική επεξεργασία και επίβλεψη από τον χρήστη.

5.2. Περαιτέρω έρευνα

Μελλοντικά θα ήταν πολύ χρήσιμη η παραγωγή νέφους σημείων από τις εικόνες RTI. Αυτό θα βοηθούσε στην εξαγωγή τρισδιάστατης πληροφορίας για γυαλιστερές επιφάνειες το οποίο με τις υπόλοιπες μεθόδους παρουσιάζει δυσκολίες και σφάλματα. Επιπλέον, σημαντικό θα ήταν να διερευνηθούν τα σφάλματα που υπάρχουν στο τελικό αποτέλεσμα δηλαδή να γίνει ποσοτικοποίηση τους, σύγκριση αποτελεσμάτων από την μέθοδο με άλλες φωτογραμμετρικές μεθόδους, ώστε να υπολογιστεί αν και υπό ποιες προϋποθέσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος έναντι μιας άλλης, και σύγκριση αποτελεσμάτων από δεδομένα που έχουν ληφθεί σε λιγότερο ή περισσότερο ελεγχόμενες συνθήκες για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των συνθηκών φωτισμού πάνω στο αποτέλεσμα.

Βιβλιογραφία

- [1] Ackermann J., Goesele M., "A Survey of Photometric Stereo Techniques", *Foundation and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2013, vol. 9, no. 3-4, pp. 149-254, DOI: 10.1561/06000000065.
- [2] "GUIDE TO HIGHLIGHT IMAGE PROCESSING v1.4", *Cultural Heritage Imaging*, 2011. [Online]. Available: <http://CulturalHeritageImaging.org/Learn/http://CulturalHeritageImaging.org/Learn/>. [Accessed 3 2022].
- [3] "GUIDE TO RTVIEWER v1.0.2", *Cultural Heritage Imaging and Visual Computing Lab, ISTI - Italian National Research Council*, 2010. [Online]. Available: <http://CulturalHeritageImaging.org/Learn/>. [Accessed 3 2022].
- [4] Mudge M., Malzbender T., Schroer C., Lum M. "New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple - Viewpoint Display," *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, USA, 2006, January, pp. 195-202, DOI: 10.2312, [Online], Available: <https://www.researchgate.net/publication/220955256>. [Accessed 3 2022].
- [5] M. L. W., "<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>", October, 2014.
- [6] MacDonald L. W., "Realistic Visualisation of Cultural Heritage Objects," *Department of Civil, Environmental and Geometric Engineering, University College London*, 2014, October, [Online], Available: <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/>.
- [7] Malzbender T., Gelb D., Wolters H., "Polynomial Texture Maps," *HP Laboratories Palo Alto, Client and Media Systems Laboratory, HPL-2001-33, Los Angeles CA, USA*, 2001, May 16, DOI: 10.1145/383259.383320, [Online], Available: <https://www.researchgate.net/publication/220720751>. [Accessed 3 2022].
- [8] Mudge M., Voutaz J. P., Schroer C., Lum M., "Reflection Transformation Imaging and Virtual Representations of Coins from the Hospice of the Grand St. Bernard," in *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage Imaging*, Italy, 2005, January, pp. 29-39, DOI: 10.2312, Available: <https://www.researchgate.net/publication/220955469>. [Accessed 3 2022].
- [9] MacDonald L. W., "Visualising an Egyptian Artefact in 3D: Comparing RTI with Laser Scanning," *Photogrammetry, 3D Imaging and Metrology Research Centre Dept. of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London*, 2011, January. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265939451>. [Accessed 3 2022].
- [10] Manfredi M., Bearman G., Williamson G., Kronkright D., Doehne E., Jacobs M., Marengo E., "A New Quantitative Method for the Non-Invasive Documentation of Morphological Damage in Paintings Using RTI Surface Normals," *Sensors*, 2014, June 9, pp. 12271-12284, DOI: 10.3390/s140712271, [Online], Available: <https://www.researchgate.net/publication/263448994>.
- [11] Altaratz D., Caine M., Maggen M., "Combining RTI & SFM. A Multi-Faceted approach to Inscription Analysis," 2019, May, [Online], Available: <https://www.researchgate.net/publication/333017139>. [Accessed 3 2022].
- [12] Aure X., O'Dowd P. J., Padfield J., "Generating 3D Models of Paintings, Through The Combination of 2D, 3D and RTI Data," *Electronic Visualisation and the Arts*, 2017, July, 11-13, DOI: 10.14236/ewic/EVA2017.4, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/345703870_Generating_3D_Models_of_Paintings_through_the_Combination_of_2D_3D_and_RTI_Data[Accessed 3 2022].

[13] Selmo D., Sturt F., Miles J., Basford P., Malzbender T., Martinez K., Thompson C., Earl G., Bevan G., "Underwater reflectance transformation imaging: a technology for in situ underwater cultural heritage object-level recording," J Electron Imaging, 26, 2017, January/February, DOI: 10.1117/1.JEI.26.1.011029, [Online], [Accessed 3 2022].

[14]"Multi-light Imaging. Highlight-Reflectance Transformation Imaging (H-RTI) for Cultural Heritage", Historic England, 2018, December, [Online]. Available: [HistoricEngland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/](https://historicengland.org.uk/advice/technical-advice/recording-heritage/)