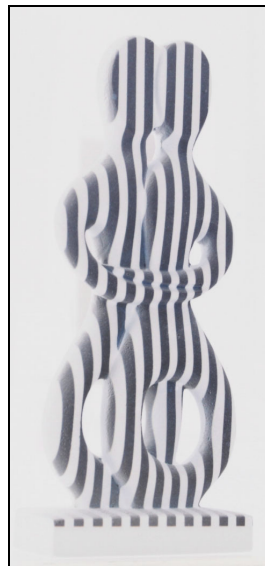


Δημιουργία Οπτικού–Φωτογραμμετρικού Σαρωτή για την Αυτόματη 3D Ανακατασκευή Μικρών Αντικειμένων

ΤΕΛΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
(χρηματοδότηση: εσωτερικό πρόγραμμα “Θαλής” του ΤΕΙ Αθήνας)



Επιστημονική Υπεύθυνος

Έλλη Πέτσα, Καθηγήτρια ΤΕΙ Αθήνας

Ερευνητική Ομάδα

Δρ. Λάζαρος Γραμματικόπουλος, Καθηγητής Εφαρμογών ΤΕΙ Αθήνας

Δρ. Ηλίας Καλησπεράκης, Επιστημονικός Συνεργάτης ΤΕΙ Αθήνας

Γιώργος Καρράς, Καθηγητής ΕΜΠ

Ιούλιος 2011

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	2
2. Αντικείμενο και μεθοδολογία της έρευνας	4
3. Περιγραφή του συστήματος	5
4. Βαθμονόμηση του συστήματος	5
4.1 Εντοπισμός τυπωμένων στόχων	6
4.2 Εντοπισμός κορυφών προβαλλόμενου κανάβου	6
4.3 Συνόρθωση δέσμης	7
5. Αντιστοίχιση ψηφίδων προβολέα και μηχανής	8
6. Πειραματικά αποτελέσματα	11
7. Συμπεράσματα και προοπτικές	11
8. Βιβλιογραφία	12

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, ένα από τα σημαντικότερα πεδία έρευνας του Τοπογράφου Μηχανικού αλλά και άλλων επιστημονικών περιοχών (όπως η Όραση Υπολογιστών ή τα Γραφικά Υπολογιστών και η Επεξεργασία Εικόνας) είναι η πλήρως αυτόματη ανακατασκευή της επιφάνειας σύνθετων 3D αντικειμένων. Μια από τις αποδοτικότερες προσεγγίσεις είναι εκείνη των λεγόμενων οπτικών σαρωτών που στηρίζονται σε τεχνικές προβολής δομημένου φωτός (*structured light*). Οι μέθοδοι αυτές συνδυάζουν τον αυτοματισμό με την υψηλή ακρίβεια και το μικρό κόστος, χάρη και στην συνεχή πτώση των τιμών των ψηφιακών μηχανών και των προβολέων βίντεο. Το θεμέλιο της όλης διαδικασίας είναι η κατάλληλη “κωδικοποίηση” της επιφάνειας του αντικειμένου μέσω προβολής φωτεινού σχηματισμού (*pattern*), η απεικόνισή της από μια ή περισσότερες μηχανές και η 3D ανακατασκευή της επιφάνειας μέσω της αυτόματης αντιστοίχισης του προβαλλόμενου σχηματισμού με τις εικονοψηφίδες (*pixel*) των ψηφιακών εικόνων. Συνάμα είναι δυνατόν να παραχθούν και 3D μοντέλα επενδεδυμένα με πραγματική φωτοϋφή (*photo-texture*), που προσομοιάζουν την εντύπωση του πραγματικού 3D κόσμου.

Σε αυτό το πλαίσιο, αντικείμενο της έρευνας στο παρόν έργο ήταν η σύνθεση υπαρχόντων αλγορίθμων και η ανάπτυξη νέων, προκειμένου να κατασκευαστεί απλή διάταξη ώστε – με χρήση ενός απλού προβολέα παρουσιάσεων [*video projector*] και μιας απλής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής DSLR – να είναι δυνατή η αυτόματη 3D ανακατασκευή του απεικονιζόμενου τμήματος του αντικειμένου. Η συγχώνευση επιμέρους ανακατασκευών από διαφορετικές εικόνες επιτρέπει την τελική πλήρη 3D ανακατασκευή της επιφάνειας του αντικειμένου. Η τεχνική αυτή έκθεση παρουσιάζει τις βασικές αρχές της σάρωσης μέσω δομημένου φωτός (*structured light scanning – SLS*) και τους απαραίτητους αλγορίθμους αυτόματης βαθμονόμησης, κωδικοποίησης και ανακατασκευής τους οποίους υλοποίησε η ερευνητική ομάδα, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται και αξιολογούνται πρακτικά αποτελέσματα που δηλώνουν τις δυνατότητες της μεθόδου.

- Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος προέκυψε η ακόλουθη δημοσίευση:
Kalisperakis I., Grammatikopoulos L., Petsa E., Karras G., 2011. A structured-light approach for the reconstruction of complex objects. *33rd International CIPA Symposium*, Prague, Czech Republic, September 12-16 (έχει γίνει δεκτό για παρουσίαση).

1. Εισαγωγή

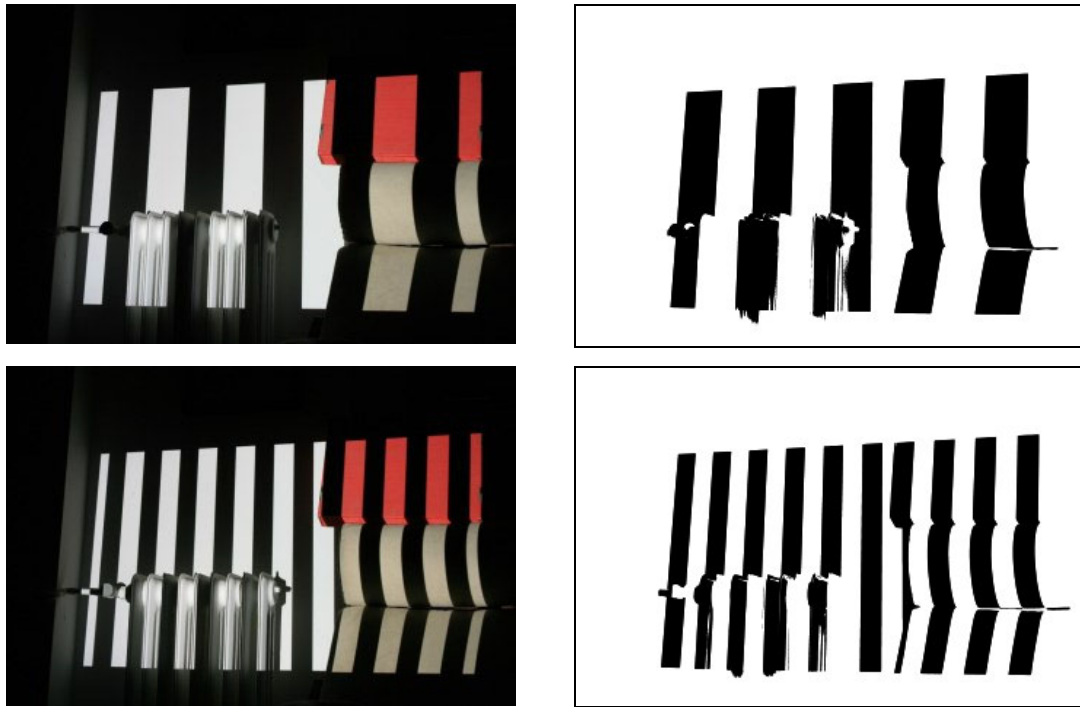
Η πλήρης 3D ανακατασκευή, ή και η ρεαλιστική αναπαράσταση, αντικειμένων σύνθετης μορφολογίας μέσω πυκνών νεφών σημείων (*point clouds*) συνιστά ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα πεδία της περιοχής του Τοπογράφου Μηχανικού όσο και άλλων συναφών ειδικοτήτων. Έτσι, πρόσφατα γινόμαστε μάρτυρες της εντεινόμενης ζήτησης για 3D πληροφορία υψηλής ακρίβειας και λεπτομέρειας σε ποικιλία πεδίων εφαρμογής και κλιμάκων, τα οποία εκτείνονται από την παραγωγή μοντέλων πόλεων [*city models*] (Xiao et al., 2009), την βιομηχανική μετρολογία (Teutsch, 2007) ή την ρομποτική (Claes & Bruyninckx, 2007), την ιατρική και την οδοποιία έως φυσικά τις σύγχρονες εφαρμογές “εμπλουτισμένης πραγματικότητας” (*augmented reality*) και των οπτικών εφέ στον χώρο πχ. του κινηματογράφου, των παιχνιδιών και γενικότερα της βιομηχανίας του ελεύθερου χρόνου.

Μεταξύ αυτών των πεδίων εφαρμογής εξέχουσα θέση καταλαμβάνει η παραγωγή 3D μοντέλων για την τεκμηρίωση της πολιτιστικής κληρονομιάς (Cignoni & Scopigno, 2008 – βλ. ακόμα τα αναφερόμενα στην βιβλιογραφία ερευνητικά έργα *CyArk Project* και *3D-COFORM*). Τις περισσότερες φορές οι αναπαραστάσεις της 3D πληροφορίας παίρνουν εδώ την μορφή λεπτομερών 3D μοντέλων επιφανείας (συνήθως νέφη σημείων ή τριγωνισμένες επιφάνειες), επενδεδυμένων με φωτοϋφή από πραγματικές εικόνες. Στην ιδεατή περίπτωση, τα 3D μοντέλα πρέπει να δημιουργούνται αυτόματα με ταχύτητα και ακρίβεια. Η ανταπόκριση σε αυτή την ανάγκη εκδηλώνεται με την δημιουργία διαφορετικών μεθόδων και τεχνολογιών για την 3D σάρωση, που διακρίνονται συνήθως σε δύο κατηγορίες, των “παθητικών” και των “ενεργητικών” μεθόδων. Οι πρώτες βασίζονται στην επεξεργασία της καταγραφής ανακλώμενου διάχυτου φωτισμού. Αυτές περιλαμβάνουν την διεικονική στερεοσκοπική προσέγγιση, και γενικότερα την μοντελοποίηση βάσει εικόνων [*image-based modeling*] (Seitz et al., 2006, Strecha et al., 2006, Furukawa & Ponce, 2007, Vu et al., 2009), αλλά και προσεγγίσεις όπως η εξαγωγή σχήματος από περιγράμματα [*shape from silhouettes*] (Mercier & Meneveau, 2005) και σχήματος από σκίαση [*shape from shading*] (Prados & Faugeras, 2003, Tankus et al., 2003).

Από την μεριά τους, οι ενεργητικές μέθοδοι ανακατασκευής χρησιμοποιούν ακτινοβολία – συνήθως laser ή κοινό φως – που εκπέμπεται επί της επιφάνειας του αντικείμενου και τριγωνίζεται με τις οπτικές ακτίνες της εικόνας. Μεταξύ αυτών των μεθόδων, συνηθέστερες είναι η 3D σάρωση laser [*laser scanning*], η μονοεικονική σάρωση σχισμής [*single-image slit-scanning*] και η σάρωση δομημένου φωτός [*SLS*]. Έτσι, υπάρχουν σαρωτές που εκπέμπουν συγκεκριμένο σήμα, συνήθως laser, και υπολογίζουν αποστάσεις στο αντικείμενο βάσει της διαφοράς χρόνου [*time-of-flight*] (πχ. συσκευές εταιρειών Leica, Trimble, Topcon) ή και από τις διαφορές φάσης [*phase-shift*] (πχ. συσκευές εταιρειών Leica, Faro) του επιστρεφόμενου σήματος. Υπάρχουν ακόμα σαρωτές τριγωνισμού που προβάλλουν ακτίνες laser στο υπό μέτρηση αντικείμενο, οι οποίες καταγράφονται και εντοπίζονται αυτόματα σε ψηφιακές εικόνες. Εν συνεχεία, οι 3D συντεταγμένες των σημείων του αντικείμενου υπολογίζονται με τριγωνισμό, ως η τομή δύο ευθειών στον χώρο (πχ. συσκευή εταιρείας Minolta).

Στην αρχή του τριγωνισμού στηρίζονται και τα συστήματα οπτικών σαρωτών [*optical scanners*], ειδικότερα μάλιστα των *SLS*, τα οποία κυρίως ενδιαφέρουν την παρούσα έρευνα. Συνήθως τα συστήματα αυτά αποτελούνται αφενός από έναν προβολέα βίντεο [*video projector*] που προβάλλει μια αλληλουχία συγκεκριμένων προτύπων (ασπρόμαυρες, γκριζες ή έγχρωμες λωρίδες ή στόχους) στο αντικείμενο, και αφετέρου μια ψηφιακή μηχανή (ή και περισσότερες), η οποία καταγράφει ταυτόχρονα την επιφάνεια του αντικείμενου και τα πρότυπα όπως αυτά παραμορφώνονται λόγω του αναγλύφου της (βλ. ενδεικτικά Εικ. 1). Κατάλληλη κωδικοποίηση των προτύπων του προβολέα επιτρέπει να αντιστοιχιστούν οι εικονοψηφίδες του προβολέα με εκείνες

της φωτογραφικής μηχανής. Έτσι, η γνώση της εσωτερικής γεωμετρίας του προβολέα και της φωτογραφικής μηχανής καθώς και της σχετικής θέσης τους στον χώρο επιτρέπουν να ανακατασκευαστεί η επιφάνεια του αντικειμένου με τριγωνισμό των ομόλογων ακτίνων. Στην αγορά διατίθενται αρκετά συστήματα σαρωτών *SLS* (πχ. των εταιρειών 3D-SHAPE, ABW, Breuckmann, GF Messtechnik, GOM, LIMESS, OSIF, Polygon Technology, Steinbichler, Imetric 3D GmbH), πολλά από τα οποία είναι σχεδιασμένα για ειδικές εφαρμογές (σάρωση βιομηχανικών εξαρτημάτων, προσώπων κ.λπ.).



Εικόνα 1. Εικόνες της ερευνητικής ομάδας με προβολή λωρίδων διαφορετικού πάχους στο αντικείμενο (αριστερά) και αντίστοιχες δυαδικές εικόνες (δεξιά).

Το κόστος των εμπορικών σαρωτών (οπτικών αλλά και laser) παραμένει ακόμα αρκετά υψηλό. Τελευταία όμως έχουν παρουσιαστεί συστήματα “αυτοσχέδιων” 3D σαρωτών, τα οποία λειτουργούν με απλά μέσα – όπως μια βιντεοκάμερα και ένα απλό σύστημα φωτισμού (Bouquet & Perona, 1998), μία ή δύο web-cameras και ένα σύστημα που προβάλλει μια γραμμή laser (Winkelbach et al., 2006, Prokos et al., 2010 και 2011) ή, τέλος, μία webcam και έναν προβολέα βίντεο (<http://mesh.brown.edu/byo3d/source.html>) – που επιτρέπουν 3D καταγραφή μικρών αντικειμένων με χαμηλό κόστος. Ειδικότερα όσον αφορά τα συστήματα *SLS*, οι Gühring (2001), Rocchini et al. (2001), Tchou (2002) και Scharstein & Szeliski (2003), μεταξύ άλλων, έχουν δείξει ότι και οι προβολείς βίντεο του εμπορίου όσο και οι κοινές ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν σε συνδυασμό με ίδιους αλγορίθμους για την δημιουργία συστημάτων που δίνουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα, συγκρίσιμα με εκείνα από εμπορικά συστήματα υψηλού κόστους.

Έτσι, μολονότι πράγματι υπάρχουν αρκετά συστήματα *SLS*, σημαντική έρευνα βρίσκεται σε εξέλιξη σχετικά με ανοιχτά θέματα που αφορούν την ανάπτυξη και υλοποίηση νέων συστημάτων, η οποία δείχνει πως η 3D ανακατασκευή με τεχνικές *SLS* πολύ απέχει από το να θεωρείται θέμα λυμένο. Ενδεικτικά, οι καινοτομίες αφορούν την μορφή των προβαλλόμενων σχηματι-

σμών ώστε να βελτιωθεί είτε η ακρίβεια της σάρωσης (Fechteler et al., 2007, Peng & Gupta, 2007) είτε η σάρωση σε πραγματικό χρόνο (Koninckx et al., 2003, Peisen & Zhang, 2006, Chen et al., 2008, Liu et al., 2010, Zhang, 2010). Σε αυτό το πλαίσιο, οι Schmalz & Angelopoulou (2010) χρησιμοποιούν έναν μόνον σχηματισμό για την καταγραφή κινούμενων αντικειμένων. Επιπλέον, οι Furukawa & Kawasaki (2005) και Aliaga & Xu (2008) αντιμετωπίζουν το ζήτημα της χρήσης μη βαθμονομημένου συστήματος μηχανής-προβολέα, επιλύοντας ταυτόχρονα τα προβλήματα της βαθμονόμησης και της συνένωσης νεφών σημείων από διαφορετικές στάσεις. Χαρακτηριστικό για αυτήν την έντονη ερευνητική αναζήτηση είναι, τέλος, και η ύπαρξη της ειδικής ετήσιας συνάντησης PROCAMS (IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems: www.procams.org)

2. Αντικείμενο και μεθοδολογία της έρευνας

Σε αυτό το πλαίσιο, στόχος της παρούσας πρότασης ήταν η ανάπτυξη ενός λογισμικού που θα επιτρέψει να υλοποιηθεί και να εφαρμοστεί ένα σύστημα οπτικού σαρωτή δομημένου φωτός (SLS), βασιζόμενου σε μία ψηφιακή φωτογραφική μηχανή υψηλής ανάλυσης και έναν κοινό προβολέα παρουσιάσεων (*video projector*).

Η γεωμετρική αρχή λειτουργίας ενός οπτικού σαρωτή είναι παρόμοια με την φωτογραμμετρική ανακατασκευή 3D αντικειμένων από δύο επικαλυπτόμενες εικόνες. Δύο εικόνες είναι ουσιαστικά δύο προοπτικές απεικονίσεις της πραγματικότητας. Εάν είναι γνωστή η θέση των προβολικών κέντρων ως προς τα επίπεδα των εικόνων και η θέση των δύο εικόνων στον χώρο, τότε είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι 3D συντεταγμένες των σημείων που απεικονίζονται σε αυτές. Εντοπίζοντας κανείς το ίδιο σημείο του αντικειμένου στις δύο εικόνες, μπορεί να ορίσει μαθηματικά τις εξισώσεις των αντίστοιχων οπτικών ακτίνων στον χώρο, και από την τομή τους ορίζεται τελικά το 3D σημείο (εμπροσθοτομία). Εάν η διαδικασία αυτή επαναληφθεί για περισσότερα σημεία, μπορεί κανείς να αποκτήσει ένα νέφος σημείων που περιγράφουν το 3D αντικείμενο. Η δυσκολία να αυτοματοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα έγκειται στην δυσκολία να εντοπιστούν αυτόματα αντιστοιχίες σημείων στις δύο εικόνες, δηλαδή στην εύρεση της διαφορετικής θέσης σε κάθε εικόνα των σημείων του φυσικού αντικειμένου (κάτι που γίνεται πρακτικά αδύνατο σε αντικείμενα με ομοιογενή υφή).

Στην περίπτωση ενός οπτικού σαρωτή το πρόβλημα αυτό λύνεται με αντικατάσταση της μιας εικόνας από έναν προβολέα που φωτίζει το αντικείμενο με αλληλουχία κωδικοποιημένων προτύπων (πχ. αλληλουχία λευκών και μαύρων γραμμών διαφορετικού πάχους, διαφορετικοί τόνοι του γκριζου γνωστής ημιτονοειδούς κατανομής, διαφορετικά χρώματα). Μία ψηφιακή μηχανή φωτογραφίζει από ένα σταθερό σημείο το αντικείμενο υπό τις διαφορετικές προβολές, και μέσω της γνωστής κωδικοποίησης των προτύπων αποκαθίσταται αυτόματα η ομολογία μεταξύ κάθε εικονοψηφίδας (*pixel*) του προβολέα και της μηχανής. Μέσω τριγωνισμού είναι κατόπιν δυνατόν να υπολογιστούν οι 3D συντεταγμένες των σημείων (Besl, 1989, Vuytsteke et al., 1990, Curless et al., 1995, Chen et al., 1997, Horn & Kiryati, 1997, Battle et al., 1998, Proesmans et al., 1998, Puli, 1998, Chuang et al., 2000, Blais, 2004, Peng et al., 2005).

Συνοπτικά, το σύστημα της ερευνητικής ομάδας βαθμονομείται σε ένα βήμα με προβολή έγχρωμου κανάβου τύπου σκακιέρας σε επίπεδη επιφάνεια με στόχους. Η επιφάνεια αυτή στρέφεται στον χώρο, δημιουργώντας διαφορετικές προοπτικές απεικονίσεις από την μηχανή λήψης. Οι στόχοι όσο και οι κορυφές του προβαλλόμενου κανάβου αναγνωρίζονται αυτόματα στις εικόνες με υποψηφιακή (*sub-pixel*) ακρίβεια, επιτρέποντας τον ταυτόχρονο ακριβή προσδιορισμό των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων του συστήματος με την μέθοδο της συνόρ-

θωσης δέσμης (*bundle adjustment*). Η διαδικασία σάρωσης πραγματοποιείται με προβολή ενός δυαδικού κωδικοποιημένου σχηματισμού Gray (*binary Gray coded pattern*) – οριζόντιων και κατακόρυφων λωρίδων – στην άγνωστη 3D επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η συντάυτιση (*matching*) ομόλογων ψηφίδων της εικόνας και του προβολέα, χωρίς περίσσεια. Επιπλέον, οι ομολογίες αποκαθίστανται με υποψηφιακή ακρίβεια για να αυξηθεί η ακρίβεια και η ομαλότητα (*smoothness*) της τελικής 3D ανακατασκευής, η οποία πραγματοποιείται με τυπική φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία. Στην ενότητα 3 περιγράφονται οι κύριες συνιστώσες του 3D σαρωτή της ερευνητικής ομάδας, ενώ οι ενότητες 4 και 5 περιγράφουν λεπτομερέστερα τους αλγόριθμους για την βαθμονόμηση και την αυτόματη αποκατάσταση ομολογιών μεταξύ των σημείων. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για την 3D μοντελοποίηση διαφορετικών αντικειμένων, της οποίας τα αποτελέσματα αναφέρονται στην ενότητα 6. Τέλος, η ενότητα 7 περιλαμβάνει συμπεράσματα και σκέψεις για την συνέχιση της έρευνας. Η τεχνική έκθεση ολοκληρώνεται με την χρησιμοποιηθείσα βιβλιογραφία.

3. Περιγραφή του συστήματος

Οι συνιστώσες του συστήματος που υλοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα και χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές εφαρμογές είναι οι εξής:

- ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon EOS 400D DSLR (ανάλυση 3888×2592)
- προβολέας βίντεο Mitsubishi XD600 DLP (ανάλυση 1024×768)
- πεδίο βαθμονόμησης (λευκό μη ανακλαστικό επίπεδο, με τουλάχιστον 4 ασπρόμαυρους συμμετρικούς στόχους, τυπωμένους με εκτυπωτή laser).

Στην διάρκεια της σάρωσης η σχετική θέση μηχανής–προβολέα πρέπει να παραμένει αμετάβλητη. Το σύστημα είναι ευέλικτο όσον αφορά τις συνιστώσες του καθώς μπορεί να ανταποκριθεί στον οποιονδήποτε συνδυασμό απλού προβολέα και μηχανής (με την προϋπόθεση ότι θα ελέγχονται από έναν προσωπικό υπολογιστή). Επιπλέον, μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να σαρώσει αντικείμενα σε διαφορετικές κλίμακες με αλλαγή του μεγέθους του πεδίου βαθμονόμησης και της απόστασης προβολέα–μηχανής (βάση του συστήματος) καθώς και με κατάλληλη αλλαγή της εστίασης και των δύο συσκευών.

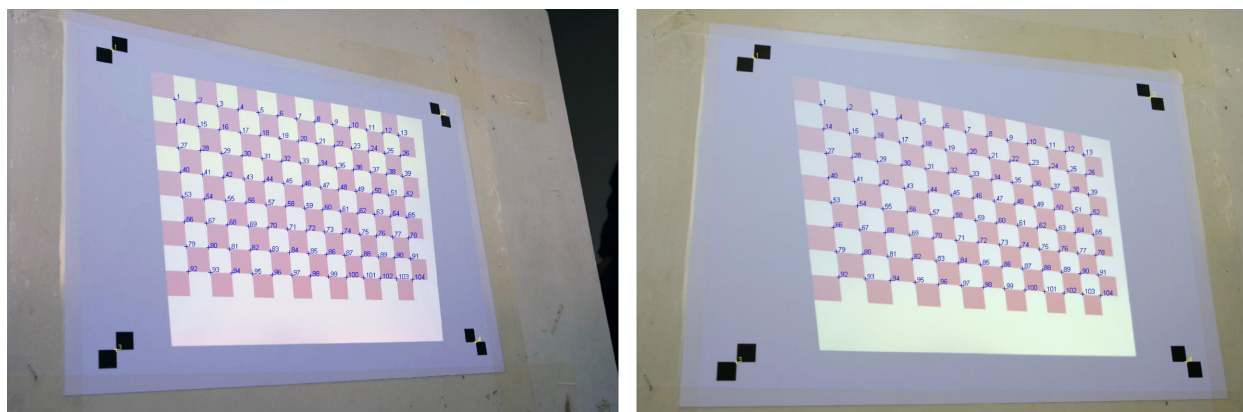
4. Βαθμονόμηση του συστήματος

Αποφασιστικής σημασίας για τον 3D τριγωνισμό με συστήματα *SLS* είναι η βαθμονόμησή τους, ήτοι ο προσδιορισμός του εσωτερικού προσανατολισμού (εστιακή απόσταση, θέση πρωτεύοντος σημείου, πολυώνυμο διαστροφής του φακού) του προβολέα και της μηχανής καθώς και ο σχετικός προσανατολισμός τους στον χώρο (με την σωστή κλίμακα). Στην τυπική περίπτωση, η βαθμονόμηση μηχανής–προβολέα πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Κατ' αρχάς προσδιορίζεται ο εσωτερικός προσανατολισμός της μηχανής, και στην συνέχεια βρίσκονται ο εσωτερικός προσανατολισμός του προβολέα και ο σχετικός προσανατολισμός των δύο συσκευών. Στο πνεύμα αυτό, οι Gao et al. (2008) χρησιμοποιούν μια επίπεδη επιφάνεια και συνδυασμό εκτυπωμένων κυκλικών φωτοσταθερών σημείων και προβαλλόμενων στόχων για να πραγματοποιήσουν βαθμονόμηση μηχανής μέσω επιπέδων (*plane-based calibration*). Μετά, αξιοποιώντας την επιπολική γεωμετρία, αποκαθιστούν ομολογίες μεταξύ των ψηφίδων της μηχανής και του προβολέα ώστε να βαθμονομηθεί και ο προβολέας. Στην περίπτωση των Zhang & Huang (2006) βαθμονομείται η μηχανή και έπειτα πραγματοποιείται πλήρης σάρωση *SLS* ενός επιπέδου αντικείμενου που περιλαμβάνει στόχους ώστε να βρεθούν ομολογίες μεταξύ των ψηφίδων του προβο-

λέα και της μηχανής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με διαφορετικούς προσανατολισμούς της επίπεδης επιφάνειας, και υπολογίζονται συνθετικές εικόνες του τι θα απεικόνιζε ο προβολέας εάν ήταν φωτογραφική μηχανή, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την βαθμονόμησή του. Τέλος, ο Knyaz (2010) υιοθετεί την ίδια λογική των “εικονικών” εικόνων του προβολέα, ενώ προτείνεται και εναλλακτική μέθοδος, κατά την οποία χρησιμοποιείται βαθμονομημένη στερεοσκοπική διάταξη μηχανών για να προσδιοριστούν οι 3D συντεταγμένες ενός προβαλλόμενου σχηματισμού σε διαφορετικούς προσανατολισμούς του επιπέδου αντικειμένου, οι οποίες κατόπιν αξιοποιούνται για την βαθμονόμηση του προβολέα.

Στην παρούσα έρευνα προτείνεται η ταυτόχρονη βαθμονόμηση της μηχανής και του προβολέα μαζί με τον προσδιορισμό του σχετικού προσανατολισμού μηχανής–προβολέα. Ο υλοποιημένος αλγόριθμος περιλαμβάνει:

- Την προβολή έγχρωμου κανάβου τύπου σκακιέρας (κόκκινα και λευκά τετράγωνα) σε επίπεδη επιφάνεια, που περιλαμβάνει κατ’ ελάχιστον 4 (ασπρόμαυρους) τυπωμένους στόχους, και την απεικόνιση αυτών των προβολών με την μηχανή. Τούτο επαναλαμβάνεται για έναν αριθμό διαφορετικών προσανατολισμών της επίπεδης επιφάνειας ως προς το ακίνητο σύστημα προβολής και απεικόνισης (ενδεικτικές εικόνες φαίνονται στην Εικ. 2).
- Τον αυτόματο εντοπισμό (με υποψηφιδική ακρίβεια) των στόχων και των κορυφών του απεικονιζόμενου έγχρωμου κανάβου.
- Την συνόρθωση δέσμης για την βέλτιστη εκτίμηση των παραμέτρων της βαθμονόμησης. Αρχικές τιμές βρίσκονται με την μεθοδολογία λογισμικού για την πλήρως αυτόματη βαθμονόμηση μηχανής που έχει αναπτύξει η ερευνητική μας ομάδα, το οποίο μάλιστα διατίθεται ελεύθερα στο Διαδίκτυο (Douskos et al., 2009).

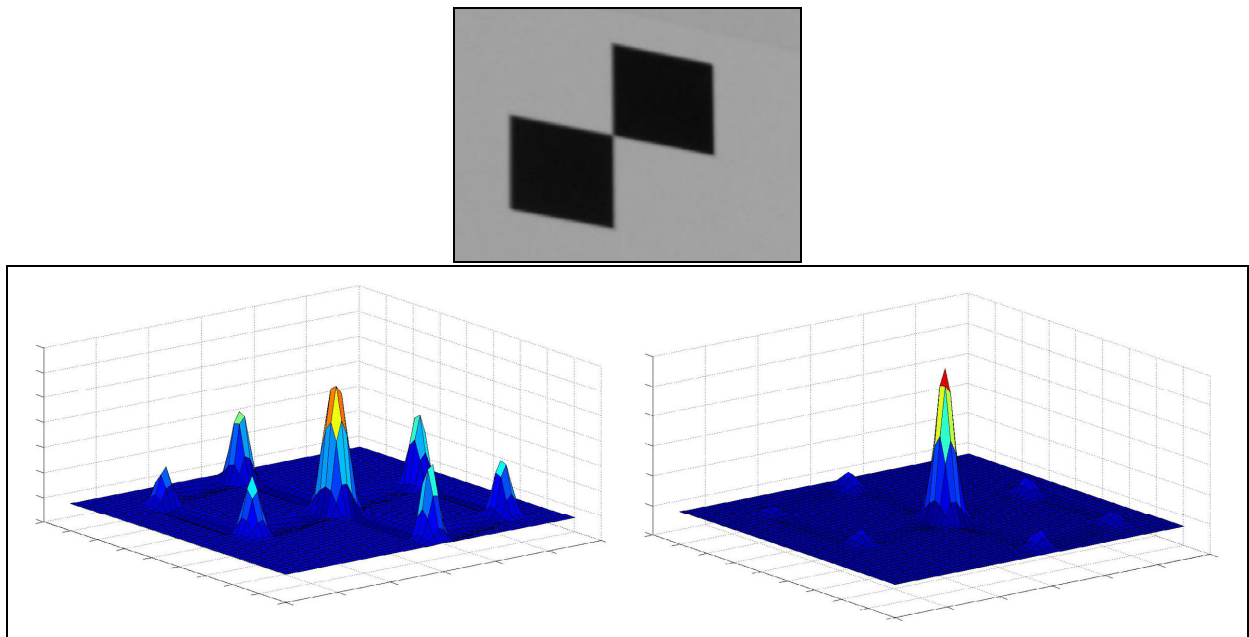


Εικόνα 2. Χαρακτηριστικές εικόνες για την βαθμονόμηση του συστήματος μηχανής–προβολέα.

4.1 Εντοπισμός τυπωμένων στόχων

Προκειμένου να εντοπιστούν αυτόματα οι 4 (ή περισσότεροι) τυπωμένοι στόχοι (βλ. Εικ. 3, πάνω) στις εικόνες βαθμονόμησης εξάγονται κατ’ αρχάς σημεία με τον σημειακό τελεστή Harris. Οι πιθανές περιοχές των στόχων αναγνωρίζονται με κατωφλίωση (*thresholding*) των τιμών της έντασης στα τρία κανάλια RGB. Οι εντοπισμένες περιοχές ενδιαφέροντος επεκτείνονται με μορφολογική επεξεργασία διαστολής (*morphological dilation*). Όσα σημεία βρίσκονται εκτός αυτών αγνοούνται. Ωστόσο, λόγω της συμμετρικής δομής των στόχων σε κάθε στόχο αντιστοιχούν περισσότερα σημεία. Όπως δείχνει και η Εικ. 3 (κάτω αριστερά), τα 7 μέγιστα του μέτρου “σημειακότητας” αντιστοιχούν στα 7 σημεία Harris που έχουν εξαχθεί στις γωνίες και το κέντρο του στό-

χου. Εκείνο όμως που διαφοροποιεί το κεντρικό σημείο από τα υπόλοιπα είναι οι έντονα συμμετρικές τιμές έντασης του περιβάλλοντός του. Υπολογίζεται έτσι εδώ ένας περιγραφέας (*descriptor*), ο οποίος ποσοτικοποιεί την συμμετρία ενός παραθύρου περί κάθε εικονοψηφίδα ως το αντίστροφο της νόρμας των διαφορών έντασης εικονοψηφίδων αντιδιαμετρικών ως προς το κέντρο του παραθύρου. Για να αποφευχθούν ομοιογενείς περιοχές της εικόνας, οι τιμές του περιγραφέα πολλαπλασιάζονται με την τοπική τυπική απόκλιση και το μέτρο “σημειακότητας”. Η Εικ. 3 (κάτω δεξιά) παρουσιάζει τις τιμές του περιγραφέα στην περιοχή του στόχου. Με τον τρόπο αυτό, το κεντρικό σημείο (που επιδεικνύει την μεγαλύτερη τιμή) αντιστοιχίζεται με τον στόχο. Τελικά, στην θέση αυτή εντοπίζεται σημείο με υποψηφιακή ακρίβεια. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιούνται κατοπτρικοί στόχοι στο αριστερό και το δεξιό τμήμα της επίπεδης επιφάνειας για να εξασφαλιστεί μοναδική αναγνώριση της διάταξης των στόχων υπό διαφορετικές προοπτικές.



Εικόνα 3. Απεικόνιση στόχου βαθμονόμησης (πάνω), μέτρο “σημειακότητας” Harris (κάτω αριστερά) και “περιγραφέας συμμετρίας” (κάτω δεξιά).

4.2 Εντοπισμός κορυφών προβαλλόμενου κανάβου

Ο εντοπισμός του προβαλλόμενου έγχρωμου κανάβου είναι απλούστερος δεδομένου ότι η μηχανή και ο προβολέας δεν έχουν μεγάλες σχετικές στροφές, οπότε δεν υπάρχουν πολύ έντονες προοπτικές παραμορφώσεις σε διαφορετικές λήψεις (οι οριζόντιες γραμμές προβάλλονται σχεδόν οριζόντιες). Ο προβαλλόμενος ερυθρόλευκος σχηματισμός τύπου σκακιέρας διαφοροποιείται από τους τυπωμένους ασπρόμαυρους στόχους βαθμονόμησης με κατωφλίωση στον χώρο χρώματος HSV. Οι κόμβοι της σκακιέρας εντοπίζονται πρώτα με υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης βάσει δεδομένου προτύπου. Έτσι, με σύνδεση και ομαδοποίηση (*connecting and labeling*) των εικονοψηφίδων υψηλής συσχέτισης δημιουργούνται “κηλίδες” (*blobs*), και εκτιμώνται θέσεις σημείων με υποψηφιακή ακρίβεια στο κέντρο βάρους κάθε “κηλίδας”. Οι εξαθθέντες κόμβοι φέρονται, τελικά, σε ομολογία προς τους αντίστοιχους κόμβους του κανάβου με διαδικασία κατάταξης (*ordering*) καθοδηγούμενη από το κυρτό περίβλημά τους (*convex hull*).

4.3 Συνόρθωση δέσμης

Η διαδικασία εντοπισμού και κατάταξης σημείων επιτρέπει να οριστικοποιηθούν οι ομολογίες μεταξύ των ψηφίδων της μηχανής και του προβολέα. Κατά την διαδικασία βαθμονόμησης το επίπεδο αντικείμενο μεταβάλλεται κατά προσανατολισμό και θέση στον 3D χώρο ως προς το σταθερό σύστημα μηχανής–προβολέα, πράγμα που βέβαια ισοδυναμεί με κίνηση του συστήματος ως προς ένα επίπεδο σταθερό στον χώρο. Υπ’ αυτή την έννοια, οι 4 στόχοι αντιστοιχούν σε 4 σταθερά σημεία επί επιπέδου με γνωστές συντεταγμένες. Οι κόμβοι του προβαλλόμενου σχηματισμού σε κάθε διαδοχική εικόνα αντιστοιχούν σε διαφορετικά σημεία του χώρου, όλα κείμενα σε επίπεδο οριζόμενο από τους 4 στόχους. Έτσι, είναι δυνατή η συνόρθωση δέσμης. Οι στόχοι λειτουργούν ως πλήρη φωτοσταθερά, οι δε κόμβοι του κανάβου ως (συνεπίπεδα) σημεία σύνδεσης με δύο άγνωστες συντεταγμένες. Άγνωστες είναι ακόμα οι 6 παράμετροι του προσανατολισμού προβολέα–μηχανής και οι 10 (δηλαδή 2×5) παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού της μηχανής και του προβολέα. Σε όλες τις επιλύσεις βαθμονόμησης το τυπικό σφάλμα της συνόρθωσης (σ_0) ήταν κάτω των 0.2 pixel. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης για τις πρακτικές εφαρμογές που περιγράφονται στην ενότητα 6. Στον Πίνακα c είναι η σταθερά του φακού (το αντίστοιχο της εστιακής απόστασης), x_0 , y_0 οι εικονοσυντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου της εικόνας, k_1 , k_2 οι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστrophής του φακού, B_x , B_y , B_z οι συνιστώσες της βάσης του συστήματος και ω , φ , κ οι σχετικές στροφές μηχανής–προβολέα.

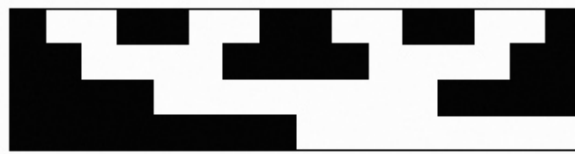
Πίνακας 1. Αποτελέσματα βαθμονόμησης (6 εικόνες)

$\sigma_0 = \pm 0.08 \text{ pixel}$		
	<i>μηχανή</i>	<i>προβολέας</i>
c (pix)	4620.85 ± 1.87	2177.01 ± 1.16
x_0 (pix)	-43.90 ± 1.02	16.02 ± 0.51
y_0 (pix)	3.25 ± 0.60	-462.96 ± 0.62
$k_1 (\times 10^{-09})$	-2.84 ± 0.07	-7.32 ± 0.07
$k_2 (\times 10^{-16})$	1.29 ± 0.18	-48.71 ± 2.13
<i>σχετικός προσανατολισμός συστήματος</i>		
B_x (cm)	30.27 ± 0.01	
B_y (cm)	-8.78 ± 0.00	
B_z (cm)	-11.40 ± 0.02	
ω (°)	-5.01 ± 0.02	
φ (°)	30.40 ± 0.02	
κ (°)	-2.04 ± 0.01	

5. Αντιστοίχιση ψηφίδων προβολέα και μηχανής

Κρίσιμο βήμα στα συστήματα SLS είναι, βέβαια, η αποκατάσταση σωστών ομολογιών μεταξύ των ψηφίδων προβολέα και μηχανής, αφού η ακρίβεια αυτής της αντιστοίχισης προφανώς επηρεάζει την ακρίβεια της 3D ανακατασκευής. Η έως τώρα υλοποιημένη προσέγγισή μας βασίζεται στους Scharstein & Szeliski (2003) και χρησιμοποιεί διαδοχικές προβολές δυαδικών κωδικοποιημένων σχηματισμών Gray (Εικ. 4), δηλαδή ασπρόμαυρων οριζόντιων και κατακόρυφων λωρίδων μεταβλητού πάχους (Εικ. 5). Κάθε προβολή καταγράφεται από την μηχανή, και εντοπίζονται οι φωτεινές και σκοτεινές περιοχές στην εικόνα. Καθώς κάθε ψηφίδα του προβολέα χα-

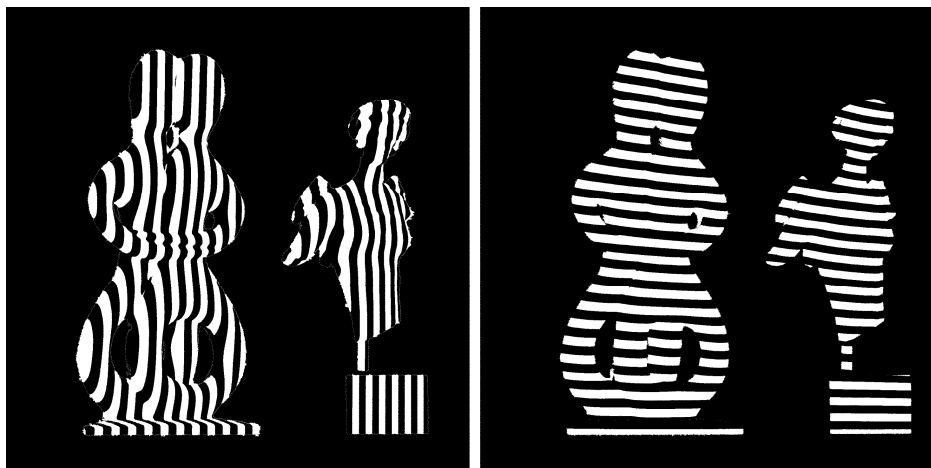
ρακτηρίζεται από μια μοναδική διαδοχή λευκών και μαύρων τιμών, η αναγνώριση της διαδοχής μεγάλων και μικρών τιμών έντασης για κάθε ψηφίδα της μηχανής επιτρέπει απευθείας να αποκατασταθούν οι ομολογίες μηχανής και προβολέα. Ειδικότερα, απαιτούνται $\log_2(n)$ σχηματισμοί για να μοντελοποιηθούν μοναδικά n διαφορετικές οντότητες. Για προβολέα ανάλυσης 1024×768 χρειάζονται έτσι 10 σχηματισμοί σε κάθε διεύθυνση. Προκειμένου να διαπιστωθεί πιο αξιόπιστα εάν μια εικονοψηφίδα αντιστοιχεί σε σκοτεινή ή φωτεινή προβαλλόμενη περιοχή, προβάλλεται και το αντίστροφο (αρνητικό) κάθε σχηματισμού κωδικοποίησης Gray. Συνεπώς, χρησιμοποιούνται συνολικά 40 διαφορετικοί σχηματισμοί κωδικοποίησης. Μια εικονοψηφίδα χαρακτηρίζεται ως φωτιζόμενη με λευκό χρώμα από έναν συγκεκριμένο σχηματισμό εάν η διαφορά των τιμών έντασης της που αναφέρονται στον αντίστοιχο κανονικό και αντίστροφο σχηματισμό είναι θετική, αλλιώς αποδίδεται στην εικονοψηφίδα μαύρο χρώμα (Εικ. 6). Εικονοψηφίδες με απόλυτη διαφορά κάτω ενός ορίου (πχ. 4 τιμές γκρίζου) απορρίπτονται ως χονδροειδή σφάλματα.



Εικόνα 4. Δυαδική κωδικοποίηση Gray.

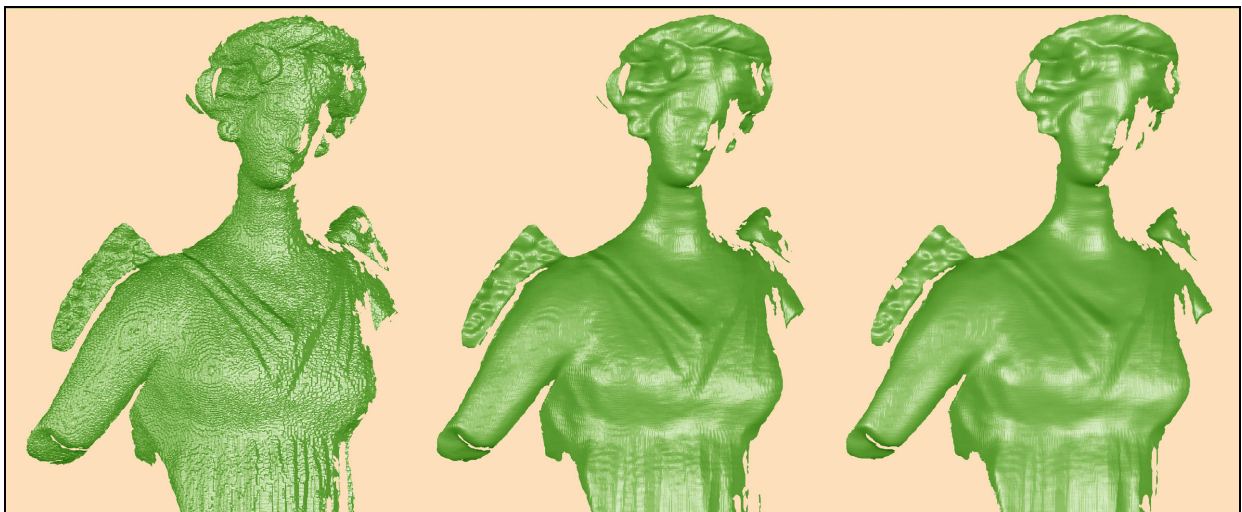


Εικόνα 5. Παραδείγματα προβολής οριζόντιων και κατακόρυφων σχηματισμών.

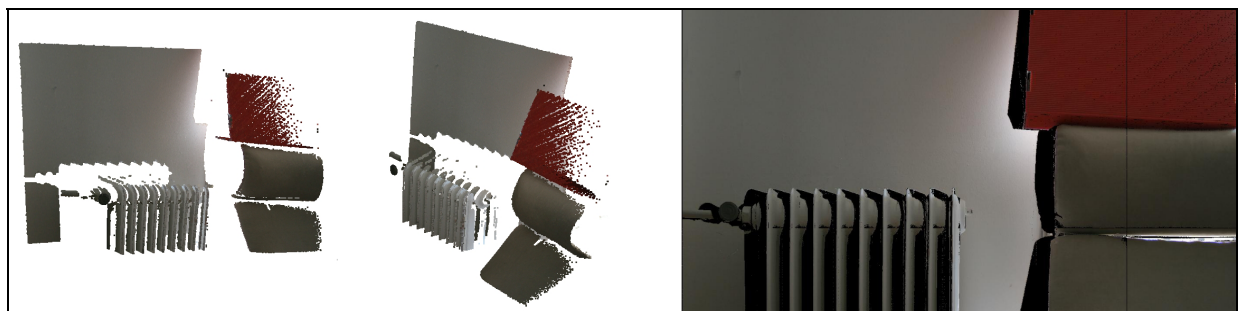


Εικόνα 6. Εντοπισμός φωτιζόμενων και σκοτεινών περιοχών.

Εξαιτίας της διαφορετικής ανάλυσης που έχουν η μηχανή και ο προβολέας (οι μηχανές έχουν συνήθως υψηλότερη ανάλυση) ενδέχεται στην ίδια ψηφίδα του προβολέα να αντιστοιχιστούν περισσότερες εικονοψηφίδες. Αυτό οδηγεί σε 3D ανακατασκευές με διακριτά βήματα (“σκαλοπάτια”) και παρουσία έντονων φαινομένων μοιρέ (Εικ. 7, αριστερά). Έτσι, προκειμένου να εξασφαλίσει κανείς πιο ακριβείς και ομαλές 3D επιφάνειες, κάθε εικονοψηφίδα πρέπει να αντιστοιχιστεί με ένα μοναδικό υποψηφιδικό σημείο του εστιακού επιπέδου του προβολέα. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται διαφορετικές τεχνικές για να εξασφαλίσει κανείς τέτοιες υποψηφιδικές ομολογίες (για την κατηγοριοποίηση σύγχρονων σχετικών μεθόδων βλ. Salvi et al., 2010). Εδώ έχουμε υιοθετήσει την προσέγγιση των Scharstein & Szeliski (2003) οι οποίοι, μετά από την αποκατάσταση ομολογιών σε επίπεδο ψηφίδας, κάνουν παρεμβολή στις ακέραιες τιμές συντεταγμένων του προβολέα με 1D φίλτρο μέσου όρου (7×1 pixel) σε διεύθυνση κάθετη σε εκείνη του προβαλλόμενου σχηματισμού. Στην δική μας υλοποίηση χρησιμοποιούνται 2D φίλτρα συνέλιξης μέσου όρου (11×7 , 15×7) για να εξασφαλιστούν πιο εξομαλυμένα αποτελέσματα και συνέχεια μεταξύ διαφορετικών γραμμών σάρωσης (Εικ. 7, κέντρο και δεξιά). Άπαξ και έχουν αποκατασταθεί οι ομολογίες ψηφίδας (ή υποψηφιδικές), η θέση των απεικονιζόμενων σημείων στον 3D χώρο υπολογίζεται με απλό τριγωνισμό των ομόλογων οπτικών ακτίνων. Απευθείας διαθέσιμες από τις ψηφιακές εικόνες είναι και τιμές χρώματος για αυτά τα ανακατασκευασμένα σημεία, οπότε μπορούν πλέον να παράγονται και φωτορεαλιστικά 3D νέφη σημείων με πραγματική φωτοϋφή (Εικ. 8 και 9).



Εικόνα 7. Βελτίωση της ανακατασκευής με εύρεση υποψηφιδικών ομολογιών.



Εικόνα 8. Παράδειγμα 3D νέφους σημείων με πραγματική φωτοϋφή.



Εικόνα 9. Παραδείγματα 3D νεφών σημείων με πραγματική φωτοϋφή.

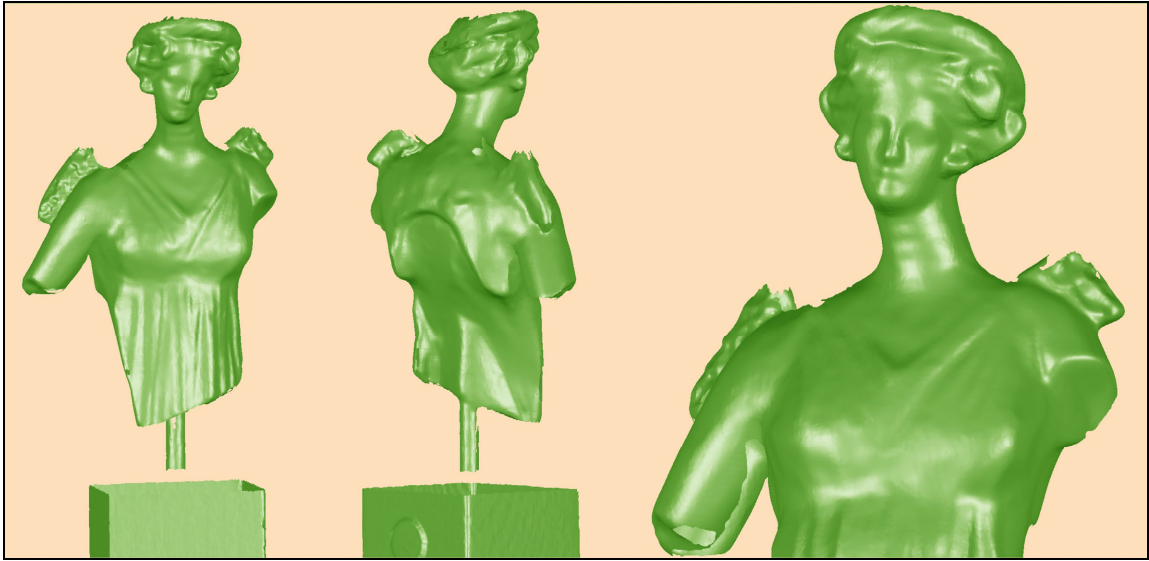
6. Πειραματικά αποτελέσματα

Για να αξιολογηθεί η απόδοση και η αποτελεσματικότητα του συστήματος σάρωσης βάσει δομημένου φωτός που έχει υλοποιήσει η ερευνητική ομάδα έως τώρα, σαρώθηκαν δύο μικρά αγάλματα (ύψους ~20 cm και ~12 cm). Και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκαν 11 διαφορετικές σαρώσεις, και τα ανακατασκευασμένα 3D νέφη σημείων συνενώθηκαν σε ένα ενιαίο νέφος. Οι μέσες τετραγωνικές ακρίβειες συνένωσης (RMS) ήταν 0.06 mm και 0.08 mm, τιμές που δίνουν μια ένδειξη για την ακρίβεια της 3D ανακατασκευής. Τέλος, για κάθε επιφάνεια δημιουργήθηκαν τα τελικά 3D μοντέλα (3D mesh), τα οποία φαίνονται στις Εικ. 10 και 11.

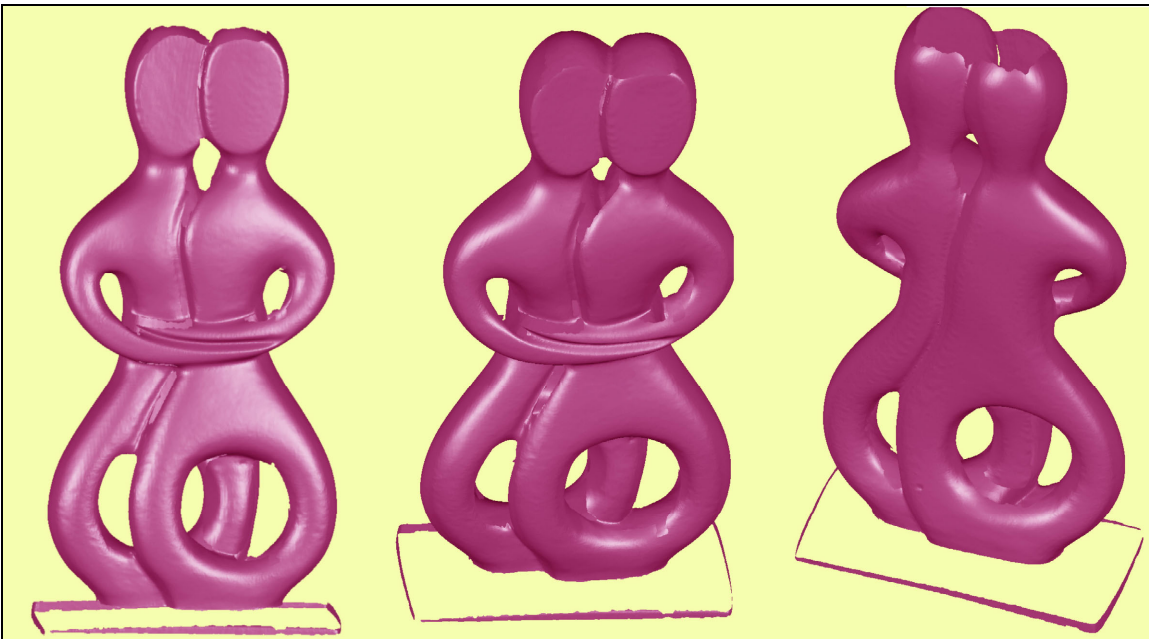
7. Συμπεράσματα και προοπτικές

Σε αυτή την έρευνα παρουσιάστηκε η υλοποίηση ενός οπτικού σαρωτή δομημένου φωτός με απλές συσκευές του εμπορίου (προβολέας βίντεο και ψηφιακή μηχανή) για την αυτόματη 3D καταγραφή μικρών αντικειμένων. Συζητήθηκαν οι λεπτομέρειες των αλγορίθμων που αφορούν την βαθμονόμηση του συστήματος και την αντιστοίχιση των σημείων της εικόνας με εκείνα του προβολέα. Ακόμα, παρουσιάστηκαν πειραματικά αποτελέσματα για να δείξουν τις δυνατότητες του συστήματος. Η πρωτοτυπία στην προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζεται κυρίως στην διαδικασία βαθμονόμησης που πραγματοποιείται σε ένα βήμα για τον προβολέα και την μηχανή, απλοποιώντας έτσι σημαντικά την λειτουργικότητα ενός τέτοιου συστήματος. Πιθανές επεκτάσεις της μεθόδου στο πλαίσιο της συνεχιζόμενης ερευνητικής προσπάθειας περιλαμβάνουν:

- την εισαγωγή και δεύτερης μηχανής
- την διερεύνηση εναλλακτικών μεθόδων για την επίτευξη υποψηφιακής ακρίβειας
- τον αυτόματο εντοπισμό αποκρύψεων, την συμπλήρωση κενών (*hole-filling*) και τον συνδυασμό της τεχνικής δομημένου φωτός με μεθόδους πυκνής συνταύτισης εικόνας (*dense-stereo matching*) με την επιδίωξη για υψηλότερη ακρίβεια
- την αυτόματη συνένωση σαρώσεων από διαφορετικές στάσεις
- και, τέλος, την διερεύνηση των δυνατοτήτων που έχουν τα βαθμονομημένα συστήματα μηχανής-σαρωτή.



Εικόνα 10. Όψεις του ενός 3D μοντέλου (από 11 σαρώσεις).



Εικόνα 11. Όψεις του άλλου 3D μοντέλου (επίσης από 11 σαρώσεις).

8. Βιβλιογραφία

- Aliaga D., Xu Y., 2008. Photogeometric structured light: a self-calibrating and multi-viewpoint framework for accurate 3D modelling. *Proc. IEEE CVPR*.
- Battle J., Mouaddib E., Salvi J., 1998. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey. *Pattern Recognition*, 31(7):963-982.
- Besl P., 1989. Active optical range imaging sensors. *Advances in Machine Vision*, J.L.C. Sanz (ed.), pp. 1-63.
- Blais F., 2004. Review of 20 years of range sensor development. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):231-240.

- Bouquet, J.-Y., Perona, P., 1998. 3D photography on your desk. *Proc. ICCV*, pp. 43-50.
- Chen C., Hung Y., Chiang C., Wu J., 1997. Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision. *Image and Vision Computing*, 15(6):445-456.
- Chen S.Y., Li Y.F., Zhang J., 2008. Vision processing for realtime 3-D data acquisition based on coded structured light. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(2):167-176.
- Chuang Y.-Y., 2000. Environment matting extensions: towards higher accuracy and real-time capture. *SIGGRAPH 2000*, pp. 121-130.
- Cignoni P., Scopigno R., 2008. Sampled 3D models for CH applications: A viable and enabling new medium or just a technological exercise? *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 1(1).
- Claes K., Bruyninckx H., 2007. Robot positioning using structured light patterns suitable for self calibration and 3D tracking. *International Conference on Advanced Robotics*, Jeju, Korea.
- Curless B., Levoy M., 1995. Better optical triangulation through spacetime analysis. *ICCV '95*, pp. 987-994.
- CyArk Project, <http://archive.cyark.org/about>
- Douskos V., Grammatikopoulos L., Kalisperakis I., Karras G., Petsa E., 2009. FAUCCAL: An open source toolbox for fully automatic camera calibration. *XXII CIPA Symposium on Digital Documentation, Interpretation & Presentation of Cultural Heritage*, Kyoto, Japan.
- Fechteler P., Eisert P., Rurainsky J., 2007. Fast and high resolution 3D face scanning. *ICIP*.
- Furukawa R., Kawasaki H., 2005. Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning. *Proc. 5th 3DIM '05*, pp. 302-309.
- Furukawa Y., Ponce J., 2007. Accurate, dense and robust multi-view stereopsis. *CVPR*, pp. 1-8.
- Gao W., Wang L., Hu Z., 2008. Flexible calibration of a portable structured light system through surface plane. *Acta Automatica Sinica*, 34(11):1358-1362.
- Gühring, J., 2001. Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*, pp. 220-231.
- Horn E., Kiryati N., 1997. Toward optimal structured light patterns. *Intl. Conf. Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 28-35.
- Knyaz K.L., 2010. Multi-media projector – single camera photogrammetric system for fast 3D reconstruction. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 343-348.
- Koninckx T., Griesser A., van Gool L., 2003. Real-time range scanning of deformable surfaces by adaptively coded structured light. *3-D Digital Imaging & Modelling*, Banff, pp. 293-300.
- Liu K., Wang Y., Lau D.L., Hao Q., Hassebrook L.G., 2010. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement. *Optical Express*, 18:5229-5244.
- Mercier B., Meneveaux D., 2005. Shape from silhouette: Image pixels for marching cubes. *Journal of WSCG*, 13:12-118.
- Peisen S., Zhang H.S., 2006. Fast three-step phase-shifting algorithm. *Applied Optics*, 45(21): 5086-5091.
- Peng T., Gupta S.K., 2007. Model and algorithms for point cloud construction using digital projection patterns. *Journal of Computing & Information Science in Engineering*, 7(4):372-381.
- Peng T., Gupta S.K., Lau K., 2005. Algorithms for constructing 3-D point clouds using multiple digital fringe projection patterns. *Proc. CAD Conference*, Bangkok, Thailand.
- Prados E., Faugeras O., 2003. Perspective shape from shading and viscosity solutions. *Proc. 9th IEEE ICCV*, vol. II, Nice, pp. 826-831.
- Proesmans M., van Gool L., Defoort F., 1998. Reading between the lines - a method for extracting dynamic 3D with texture. *ICCV '98*, pp. 1081-1086.

- Pulli K., 1998. Acquisition and visualization of colored 3D objects. *ICPR '98*, pp. 11-15.
- Prokos A., Karras G., Petsa E., 2010. Automatic 3D surface reconstruction by combining stereovision with the slit-scanner approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 505-509.
- Prokos A., Kalisperakis I., Karras G., 2011. Automatic point cloud generation and registration with a stereovision slit-scanner. *4th International Workshop 3D-ARCH 2011 on 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 2-4 March, Trento, Italy.
- Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P., Scopigno R., 2001. A low cost 3D scanner based on structured light. *EUROGRAPHICS 2001*, 20(3).
- Salvi J., Fernandez S., Pribanic T., Llado X., 2010. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. *Pattern Recognition*, 43(8):2666-2680.
- Scharstein D., Szeliski R., 2003. High-accuracy stereo depth maps using structured light. *Proc. IEEE CVPR*, 1:195-202.
- Schmalz C., Angelopoulou E., 2010. A graph-based approach for robust single-shot structured light. *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems*.
- Seitz S.M., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R., 2006. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Proceedings CVPR*, 1:519-528.
- Strecha C., Fransens R., van Gool L., 2006. Combined depth and outlier estimation in multi-view stereo. *Proceedings CVPR*, 2:2394-2401.
- Tankus A., Sochen N., Yeshurun Y., 2003. A new perspective on shape from-shading. *Proc. 9th IEEE ICCV*, vol. II, Nice, pp. 862-869.
- Tchou C., 2002. *Image-Based Models: Geometry and Reflectance Acquisition Systems*, University at Berkeley, M.Sc. Thesis.
- Teutsch C., 2007 *Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners*. PhD Thesis, Magdeburger Schriften zur Visualisierung, Shaker Verlag.
- Vu H.H., Keriven R., Labatut P., Pons J.-P., 2009. Towards high-resolution large-scale multi-view stereo. *Proc. CVPR*.
- Vuylsteke P., Oosterlinck A., 1990. Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 12(2):148-164.
- Winkelbach S., Molkenstruck S., Wahl F.M., 2006. Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. *Proc. DAGM '06, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4174, Springer, pp. 718-728.
- Xiao J., Fang T., Zhao P., Lhuillier M., Quan L., 2009. Image-based street-side city modelling. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(5).
- Zhang S., 2010. Recent progresses on real-time 3-d shape measurement using digital fringe projection techniques. *Optics and Lasers in Engineering*, 40:149-158.
- Zhang S., Huang P.S., 2006. Novel method for structured light system calibration. *Optical Engineering*, 45(8).
- 3D-COFORM, <http://www.3dcoform.eu/>