Ατομική Διπλωματική Εργασία

3D OBJECT SCANNING USING ACTIVE SENSOR TECHNOLOGIES

Αλεξία Κολόσοβα

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μάιος 2011

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

3D OBJECT SCANNING USING ACTIVE SENSOR TECHNOLOGIES

Αλεξία Κολόσοβα

Επιβλέπων Καθηγητής
κ. Γιώργος Χρυσάνθου

Η Ατομική Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων απόκτησης του πτυχίου Πληροφορικής του Τμήματος Πληροφορικής του Πανεπιστημίου Κύπρου

Μάιος 2011

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Επιβλέποντα Καθηγητή μου Δρα. Γιώργο Χρυσάνθου για την ευκαιρία που μου δόθηκε για την επίτευξη της μελέτης αυτής.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Υπεύθυνο καθηγητή μου Δρα Χαράλαμπο Πουλλή, χωρίς τη βοήθεια και τη στήριξη του οποίου δε θα ήταν εφικτή η πραγματοποίηση της εργασίας αυτής. Η βαθιά του γνώση για το αντικείμενο, καθώς και οι συμβουλές και η σωστή καθοδήγηση του ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Οι γνώσεις που έχω αποκομίσει από τη συνεργασία μας είναι πολύτιμες.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον που στάθηκε δίπλα μου καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, γιατί χωρίς τη στήριξη και την ηθική συμπαράστασή τους τίποτα δε θα ήταν κατορθωτό.

Περίληψη

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με σκοπό να μελετηθούν εναλλακτικές μεθόδοι για την τρισδιάστατη αναδόμηση της μορφής αντικειμένων του πραγματικού κόσμου, σε σχέση με τις υψηλού κόστους εφαρμογές που υπάρχουν αυτή τη στιγμή στην αγορά. Στόχος ήταν να υλοποιηθεί μία μέθοδος η οποία να συνδυάζει χαμηλό κόστος και υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων, ενώ επιπρόσθετα να έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί κάτω υπό διαφορετικές συνθήκες του περιβάλλοντος, παράγοντας την ίδια ποιότητα αποτελεσμάτων με άλλες εμπορικές εφαρμογές.

Για την επίτευξη του στόχου αυτού έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές πειραματικές δοκιμές κάτω υπό διαφορετικές συνθήκες φωτός και με χρήση ειδικου laser, από τις οποίες έχουν εξαχθεί τα ζητούμενα αποτελέσματα. Έγινε επίσης χρήση των κατάλληλων εργαλείων υλικού και λογισμικού για την εξαγωγή, επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων αυτών.

Η μελέτη αυτή έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία. Έχει επιτευχθεί ο στόχος που είχε τεθεί εφόσον η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι αρκετά ικανοποιητική, το κόστος των εργαλείων που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρό και η ταχύτητα ανάδρασης του συστήματος είναι σχετικά μικρή σε σχέση με άλλες χρονοβόρες εφαρμογές.

Αναμένεται στο μέλλον να υπάρξει κάποια βελτίωση σε σχέση με τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πιο ευρύ φάσμα αντικειμένων καθώς επίσης και η επίτευξη χρήσης της τεχνικής αυτής υπό διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο **1** **Εισαγωγή**…… **1**

1.1 Γενικά 1

1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας 4

Κεφάλαιο **2** **Background/ Related Work** ..……..... **4**

2.1 Εισαγωγή 4

2.2 Κατηγορίες Μεθόδων 5

2.3 Σάρωση Αντικειμένων 9

2.4 Επεξεργασία Δεδομένων 17

2.5 Σύγκριση Μεθοδολογιών 18

Κεφάλαιο **3** **System Overview**……..... **20**

3.1 Εισαγωγή 20

3.2 Διάγραμμα Ροής Διαδικασιών 21

3.3 Συστατικά Μέρη Διαδικασίας 22

Κεφάλαιο **4** **Apparatus Calibration**…….……..... **25**

4.1 Εισαγωγή 25

4.2 Camera Calibration 25

4.3 Lens Distortion 30

4.4 Camera Setup Calibration 33

4.5 Extrinsic Parameters 35

4.6 Extrinsic Calibration 39

Κεφάλαιο **5** **Scanning**……..... **41**

5.1 Εισαγωγή 41

5.2 Γενική Μεθοδολογία 42

5.3 Περιγραφή Μεθόδου 43

5.4 Spatial and Temporal Light Edge Localization 48

5.5 Spatial Light Edge Localization 49

5.6 Temporal Light Edge localization 52
5.7 Laser Plane Estimation Π(t) 56

ΚΕΦΑΛΑΙΟ **6** **Reconstruction** ……..... **59**
6.1 Εισαγωγή 59
6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο 61
6.3 Ray-Plane Intersection 64
6.4 Pixel to Ray 67
6.5 Εφαρμογή στην Παρούσα Μελέτη 68
6.6 Post Processing και Visualization 68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ **7** **Αποτελέσματα** …….. **69**
6.1 Εισαγωγή 69
6.2 Ακρίβεια Calibration 70
6.3 Αποτελέσματα Σάρωσης 73
6.4 Τελικά Αποτελέσματα 76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ **8** **Συμπεράσματα** …….. **79**
6.1 Εισαγωγή 79
6.2 Γενικά Συμπεράσματα 79
6.3 Μελλοντική Έρευνα 80

Β ι β λ ι ο γ ρ α φ ί α …… **81**

Κεφάλαιο 1

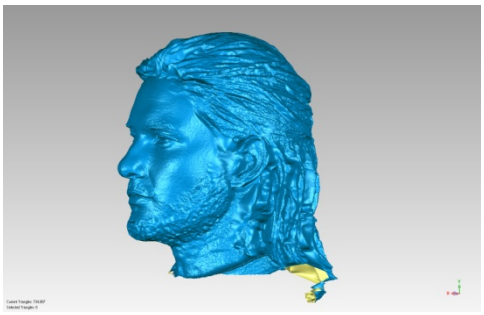
Εισαγωγή

1.1 Γενικά 1
1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας 3

1.1 Γενικά

Μία από τις πιο πολύτιμες λειτουργίες του οπτικού μας συστήματος είναι η ικανότητα της επίγνωσης του σχήματος των αντικειμένων που βρίσκονται γύρω μας. Ζούμε σε ένα τρισδιάστατο κόσμο, έτσι μπορούμε πιο εύκολα βλέποντας το σχήμα ενός αντικειμένου, να κατανοήσουμε την έννοια του, να το αναγνωρίσουμε ή να το χειριστούμε. Πλέον οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, λόγω της μεγάλης ανάπτυξης που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στον τομέα των γραφικών αλλά και λόγω της ευρείας διάδοσης του διαδικτύου, έχουν επιδείξει μεγάλο ενδιαφέρον στην τρισδιάστατη αναπαράσταση του σχήματος και της υφής αντικειμένων του πραγματικού κόσμου.

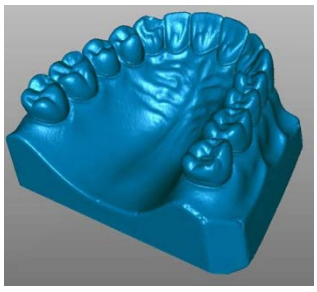
Αυτή τη στιγμή υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός εφαρμογών οι οποίες βασίζονται σε 3D αναπαράσταση αντικειμένων. Οι τομείς στους οποίους επικεντρώνονται είναι σε μεγάλο βαθμό η ψυχαγωγία, καθότι τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλο ενδιαφέρον στην παραγωγή ταινιών με τρισδιάστατα εφφέ και animation (βλ. Σ), όπως επίσης και σε ηλεκτρονικά παιχνίδια, διαφημίσεις, ντοκυμαντέρ και στο marketing. Μπορούν να επεκταθούν φυσικά και σε άλλους τομείς όπως η εκπαίδευση και οι επιστήμες.

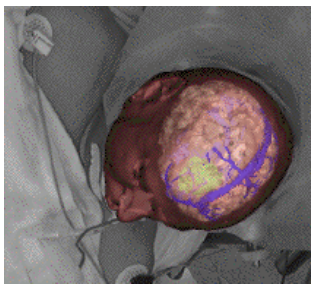


Σχήμα 1.1: Το 3D scanning παρέχει τον πιο γρήγορο τρόπο για δημιουργία ρεαλιστικών μοντέλων στην παραγωγή ταινιών.

Οι τεχνολογικές εφαρμογές στον τομέα της Εκπαίδευσης έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό τα τελευταία χρόνια, λόγω της σημαντικής προσπάθειας που καταβάλλεται για τον εμπλουτισμό και την υποβοήθηση της σύγχρονης διδασκαλίας στα σχολεία. Ο τομέας των γραφικών μπορεί να συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην προσπάθεια αυτή, οπτικοποιώντας ή και αναπαριστώντας δυσνόητες έννοιες ή δρώντας σε ειδικές περιοχές της μάθησης, συμβάλλοντας έτσι στην αποδοτικότερη κατανόηση και εκμάθηση των αντικειμένων διδασκαλίας.

Εφαρμογές τέτοιου είδους στις Επιστήμες, μπορούν να έχουν πολύ θετική επίδραση στη βελτίωση της διαχείρισης της γνώσης όσον αφορά ιατρικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα εφαρμογές απεικόνισης της ανθρώπινης ανατομίας (X-ray, CT, MRI) (βλ. **Σχήμα 1.2(α)**). Περεταίρω ανάπτυξη και εμβάθυνση τέτοιων εφαρμογών μπορεί να επιφέρει δραστικές αλλαγές στον τρόπο που η επιστημονική σκέψη εφαρμόζεται, υποβοηθώντας τις οποιεσδήποτε ιατρικές ενέργειες, όπως η εξαγωγή διάγνωσης και η πραγματοποίηση επεμβάσεων μέσω της 3D αναπαράστασης (surgical planning) (βλ. **Σχήμα 1.2(β)**).





(α) (β)

Σχήμα 1.2: (α) 3D αναπαράσταση της ανθρώπινης οδοντοστοιχίας, (β): Μέσω του 3D scanning μπορεί να γίνει μία προεπισκόπηση της περιοχής του σώματος στην οποία θα πραγματοποιηθεί η επέμβαση.

1.2 Στόχος Διπλωματικής Εργασίας

Οι βασικές παραμέτροι για την κατηγοριοποίηση και εκτίμηση τέτοιων εφαρμογών είναι το κόστος, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που παρέχουν(accuracy) , η ευκολία στη χρήση της εφαρμογής αλλά και ο χρόνος εξαγωγής των αποτελεσμάτων (speed of acquisition). Το πρόβλημα είναι ότι πολλές εμπορικές εφαρμογές, λόγω του ότι δίνουν προτεραιότητα στην ακρίβεια του αποτελέσματος, είναι αρκετά ακριβές παρόλο που η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι πολύ υψηλή.

Προσεγγίζοντας αυτές τις εφαρμογές από άποψη κόστους, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας εφαρμογών οι οποίες δίνουν έμφαση στο χαμηλό κόστος και την απλότητα χρήσης ενώ παράλληλα παρέχουν υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων. Η βασική τεχνική που χρησιμοποιείται είναι αυτή του structured light, δηλαδή του δομημένου φωτός. Αυτό μπορεί να είναι είτε μία ακτίνα laser είτε κάποιο είδος weak structured light (αδύνατο δομημένο φως) όπως για παράδειγμα μία δομημένη σκιά, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη σάρωση του αντικειμένου. Επιπλέον οι απαιτήσεις σε hardware είναι πολύ μικρές, εφόσον βασικά εργαλεία είναι, εκτός από τον Η/Υ, μία απλή webcam, ένα επίπεδο checkerboard και (σε αυτή την εργασία) ένα laser line. Επίσης απαραίτητος είναι ο ανθρώπινος παράγοντας ο οποίος πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί τη ρίψη του δομημένου φωτός κατά μήκος της επιφάνειας του αντικειμένου.

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν να εφαρμόσει την τεχνική αυτή έτσι ώστε να εξαχθεί το συμπέρασμα κατά πόσο είναι εφικτή η δημιουργία ενός τέτοιου 3D scanner και σε ποιο βαθμό ακριβείας επιτυγχάνεται το αποτέλεσμα που εξάγεται. Η εργασία βασίζεται στην εφαρμογή του συνδιασμού των τεχνικών temporal και spatial shadow processing, η οποία χρησιμοποιεί δομημένη σκιά για σαρωτή, ενώ στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση ενός line laser.

Κεφάλαιο 2

Background/Related Work

2.1 Εισαγωγή 4
2.2 Κατηγορίες Μεθόδων 5
2.3 Σάρωση Αντικειμένων 9
2.4 Επεξεργασία Δεδομένων 17
2.5 Σύγκριση Μεθοδολογιών 18

2.1 Εισαγωγή

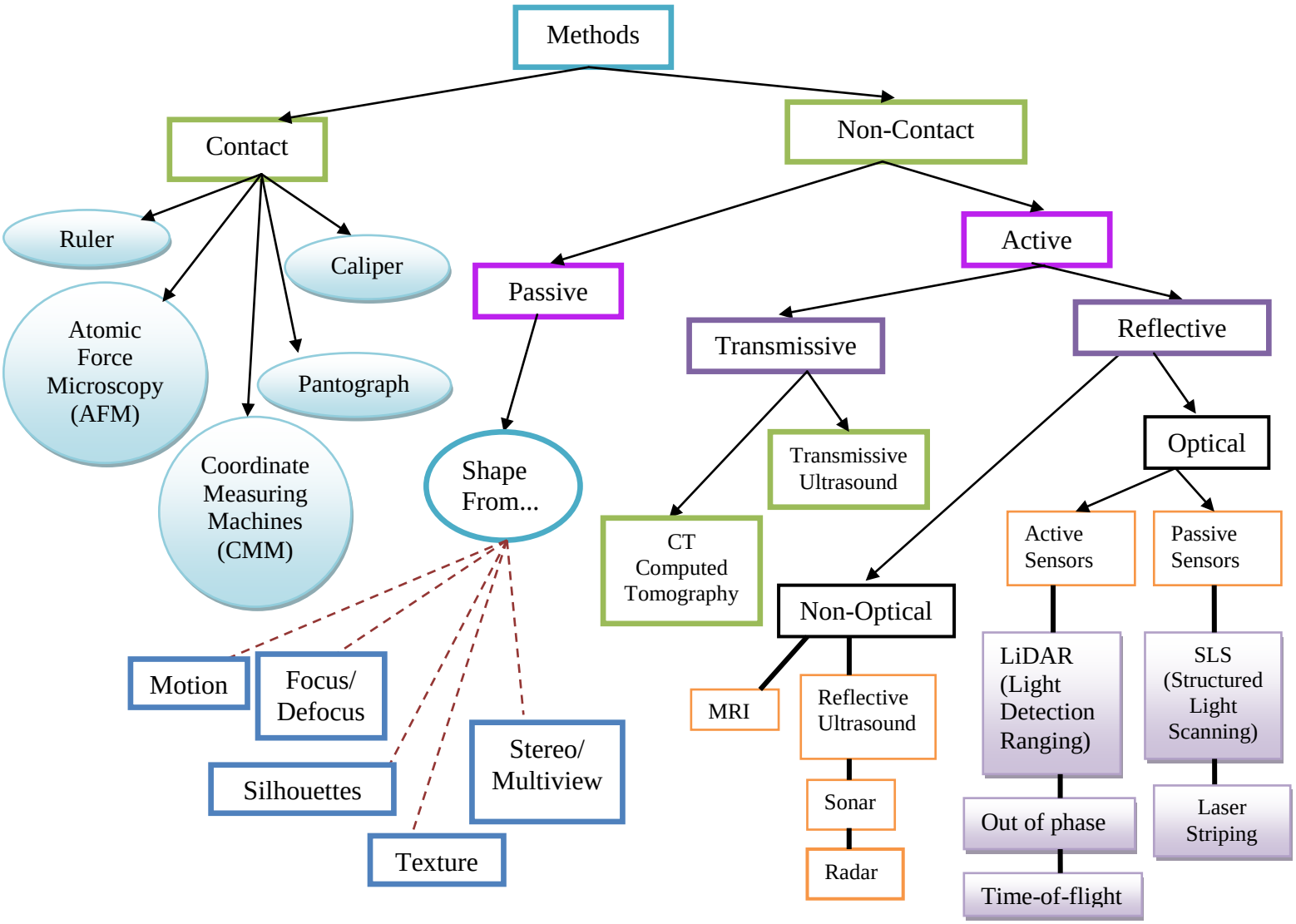
Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές οι οποίες στοχεύουν στην έγκυρη και ακριβή αναπαράσταση αντικειμένων του πραγματικού κόσμου σε 3D μορφή με τη χρήση απλών συσκευών. Παρ'όλα αυτά το πεδίο της τρισδιάστατης αναπαράστασης αποτελεί ακόμη ένα πεδίο με πολλές προοπτικές για βελτίωση, για το λόγο ότι είναι απαραίτητο σε τέτοιου είδους εφαρμογές να επιτυγχάνεται ταυτόχρονα ταχύτητα, αυτοματοποίηση, ακρίβεια και χαμηλό κόστος. Αυτό όμως είναι κάτι που είναι δύσκολο να επιτευχθεί με μεγάλη επιτυχία, εφόσον προς το παρόν οι μέθοδοι που εξετάζονται δίνουν έμφαση σε μία ή δύο από τις τέσσερις αυτές παραμέτρους. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο δύσκολο όταν καλούμαστε να αναπαραστήσουμε αντικείμενα τα οποία είναι πολύπλοκα ή έχουν ιδιαίτερες ιδιότητες, όπως για παράδειγμα ανακλαστικότητα ή διαφάνεια. Πολλές μεθόδοι έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα οι οποίες ανταποκρίνονται στις περισσότερες απαιτήσεις αυτών των εφαρμογών και οι οποίες θα μελετηθούν στη συνέχεια.

Αρχικά θα δοθεί μία γενική εικόνα των τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα και οι κατηγορίες στις οποίες μπορούν να χωριστούν. Ακολούθως θα δοθεί μία εκτεταμένη αναφορά για την έννοια της σάρωσης αντικειμένων, η οποία είναι η επικρατέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα για την τρισδιάστατη αναδόμηση αντικειμένων. Θα αναλυθούν οι βασικές κατηγορίες στις οποίες εμπίπτουν οι διάφορες

τεχνικές σάρωσης αντικειμένων, ενώ στη συνέχεια θα ακολουθήσει μία γενική ανάλυση των τρόπων αναδόμησης αντικειμένων και στις μεθόδους που χρησιμοποιούν. Τέλος, θα δοθεί αναλυτικά μία σύγκριση οποιωνδήποτε τεχνικών παρόμοιων με την τεχνική που χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία, ως προς τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η δεύτερη.

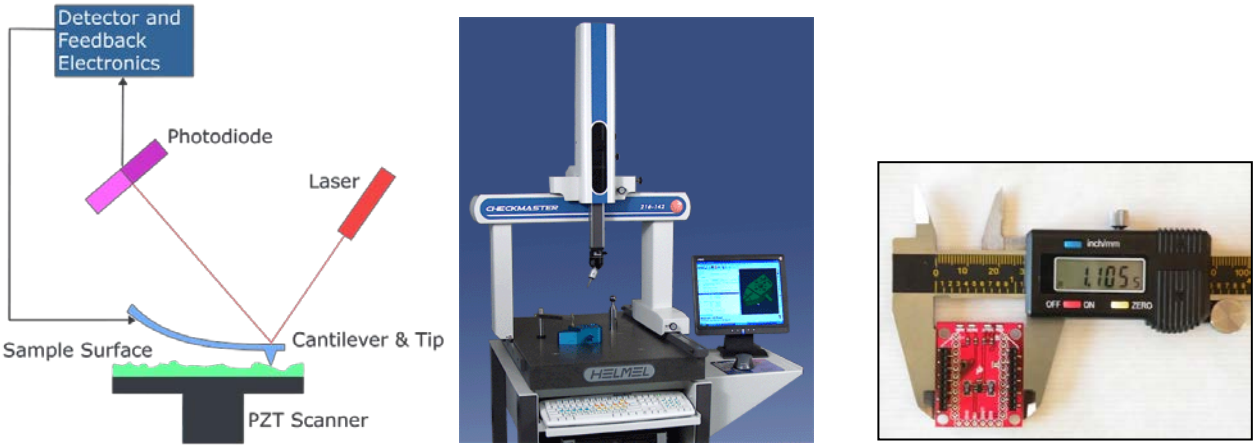
2.2 Κατηγορίες Μεθόδων

Το **Σχήμα 2.1** που ακολουθεί συνοψίζει όλες τις μεθοδολογίες που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα, διαχωρίζοντας τις σε κατηγορίες ανάλογα με το είδος τους και τον τρόπο εφαρμογής τους. Θα δοθεί αναλυτική επεξήγηση για την κάθε μεθοδολογία στη συνέχεια.



Σχήμα 2.1: Κατηγοριοποίηση των Μεθοδολογιών 3D αναδόμησης αντικειμένων.

Η δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες εμπίπτουν όλες οι τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα, μπορούν να συνοψιστούν στις contact methods, δηλαδή στις μεθόδους που προϋποθέτουν κάποια επαφή των συσκευών με το αντικείμενο, και στις non-contact methods, οι οποίες δεν προϋποθέτουν κάποια επαφή. Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν άμεσες μετρήσεις του αντικειμένου, γι' αυτό και προαπαιτούνται ειδικά αντικείμενα μέτρησης, όπως ρίγες, διαβήτες, παντογράφοι, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων CMM (Coordinate Measuring Machines) καθώς και το AFM(Atomic Force Microscopy). Στο **Σχήμα 2.2** μπορούμε να διακρίνουμε ορισμένα από αυτά τα αντικείμενα.



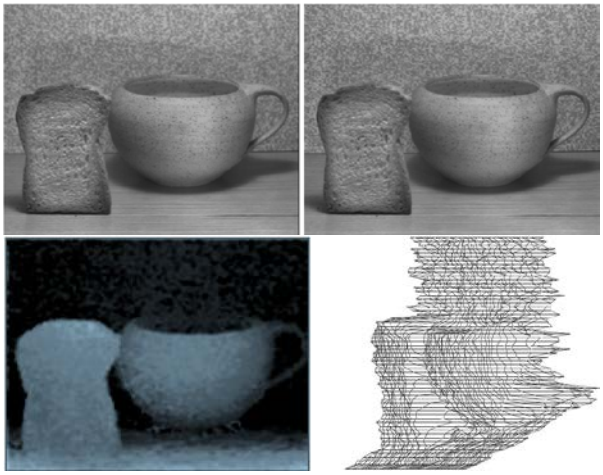
(α) (β) (γ)

Σχήμα 2.2: (α) μία τυπική AFM διάταξη η οποία χρησιμοποιεί laser και φωτοδίοδο, (β) μία μηχανή μέτρησης συντεταγμένων CMM, (γ) χρήση ρίγας για άμεση μέτρηση του αντικειμένου .

Η χρήση contact μεθόδων μπορεί να επιτύχει μοντελοποίηση μεγάλης ακριβείας αλλά ο χρόνος ανάκτησης δεδομένων μπορεί να είναι πολύ μεγάλος, ανάλογα με το μέγεθος του αντικειμένου. Υπάρχει ακόμη ο κίνδυνος να ληφθούν λανθασμένες μετρήσεις όταν το αντικείμενο που χρησιμοποιείται είναι πολύ μαλακό. Σήμερα, οι περισσότερες μοντελοποιήσεις γίνονται βάσει των non-contact συσκευών, οι οποίες αποτελούν και το θέμα προς εξέτασην αυτής της εργασίας, γι' αυτό το λόγο θα επικεντρωθούμε σε αυτές.

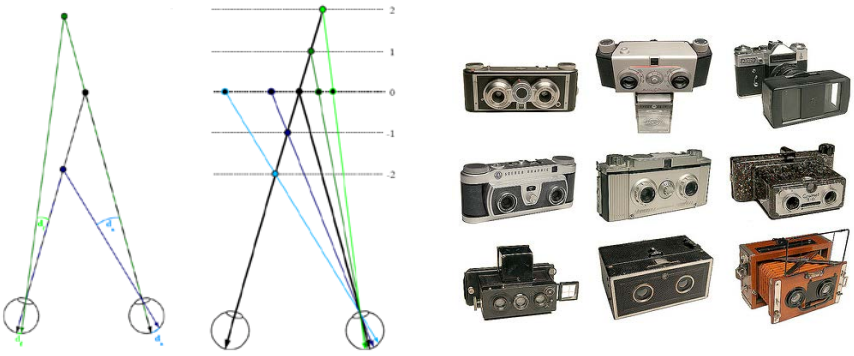
Οι non-contact μέθοδοι μπορούν να διαχωριστούν σε μεθόδους οι οποίες είναι Παθητικές (Passive) και σε μεθόδους οι οποίες είναι Ενεργητικές (Active). Οι Passive μεθόδοι βασίζονται εξ' ολοκλήρου στην επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνει η κάμερα ως εισόδους (παθητικός δέκτης). Γνωστές παθητικές μεθόδοι οι οποίες εφαρμόζονται είναι οι ακόλουθες:

- Shape from focus/ defocus: είναι μία μέθοδος η οποία βασίζεται στους διαφορετικούς τρόπους εστίασης πάνω σε κάποιο αντικείμενο [1], το οποίο είναι ο κύριος παράγοντας για την εξαγωγή του βάθους του αντικειμενου (βλ. **Σχήμα 2.3**).



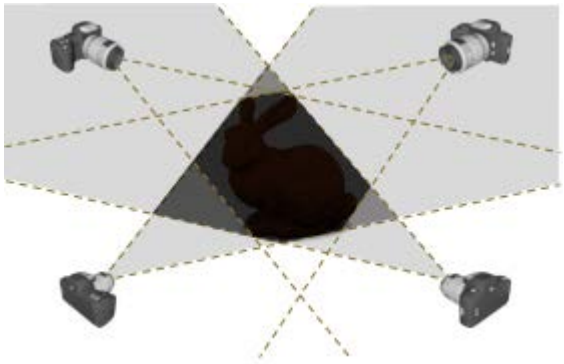
Σχήμα 2.3: Πάνω(αριστερά) εικόνα σε κοντινό focus. Πάνω (δεξιά) εικόνα σε μακρινό focus. Κάτω φαίνεται η αναδόμηση του βάθους του αντικειμένου (αριστερά, μεγάλη φωτεινότητα συνεπάγεται μικρό focus, δεξιά ένα πλέγμα (smooth mesh) του αντικειμένου .

- Shape from Stereo/Multiview Photography: Είναι μία μέθοδος η οποία ανακτά το σχήμα του αντικειμένου βάσει της όψης του από πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες. Γι' αυτό το λόγο γίνεται χρήση ενός μεγάλου αριθμού από κάμερες [2] (βλ. **Σχήμα 2.4**)



Σχήμα 2.4: Τεχνική του Multiview Photography και κάμερες που χρησιμοποιούνται.

- Shape from silhouette: Μέθοδος η οποία βασίζεται στην αναδόμηση ενός αντικειμένου βάσει του σχήματος του, το οποίο λαμβάνεται από πολλές διαφορετικές τοποθεσίες και ακολούθως γίνεται μία επεξεργασία αυτών των δεδομένων τα οποία οδηγούν στην ανάκτηση της τρισδιάστατης του μορφής. [3]



Σχήμα 2.5: Εφαρμογή της τεχνικής του Shape From Silhouette.

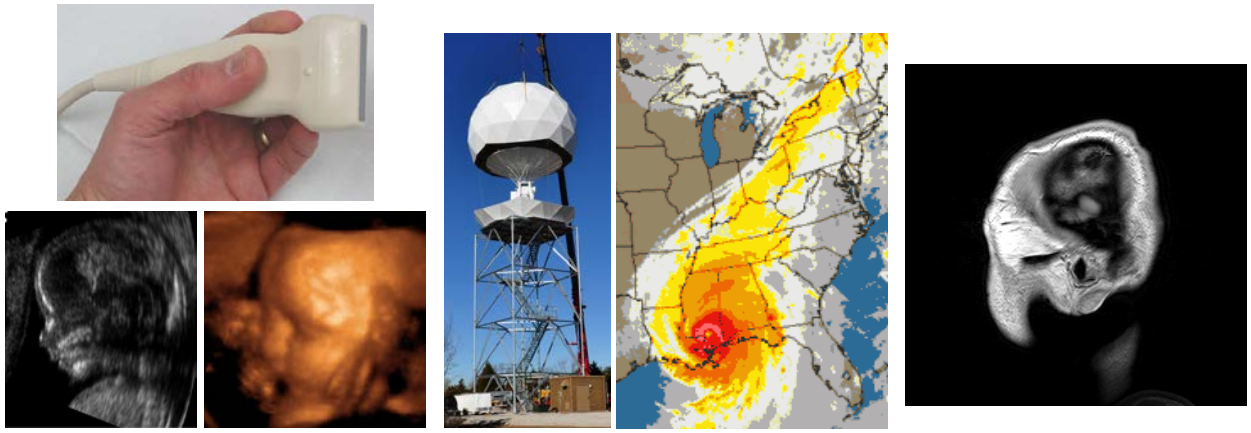
Υπάρχουν ακόμη οι τεχνικές shape From Motion [4], Shape from Texture [5], Shape from shading [6] οι οποίες εφαρμόζονται με ανάλογες μεθόδους, οι οποίες όμως βασίζονται πάντα στα δεδομένα εισόδου τα οποία λαμβάνει η κάμερα.

Παρόλο που οι μέθοδοι αυτοί μελετούνται και βρίσκονται υπό εξέλιξη για να παρέχουν ακόμη καλύτερη ποιότητα αποτελεσμάτων, εντούτοις οι πιο διαδεδομένες τεχνικές είναι αυτές που ανήκουν στην κατηγορία των Active μεθόδων. Οι μέθοδοι αυτές, λόγω του ότι ενεργούν με κάποιο τρόπο πάνω στο αντικείμενο του οποίου θα ανακτηθεί το σχήμα, χρειάζονται περισσότερο hardware από μία απλή κάμερα. Ειδικά μηχανήματα και εργαλεία έχουν δημιουργηθεί και χρησιμοποιούνται με σκοπό την αποτελεσματικότερη ανάκτηση δεδομένων για τη μετέπειτα επεξεργασία τους.

Οι Active μεθόδοι που εφαρμόζονται, χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις Transmissive, δηλαδή τις μεταβιβαστικές και τις Reflective, δηλαδή τις ανακλαστικές. Παραδείγματα Transmissive Μεθόδων είναι το Computed Tomography (CT) (βλ. **Σχήμα 2.6**.) και το Transmissive Ultrasound, οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για ιατρικούς σκοπούς.

Σχήμα 2.6: Χρήση της μεθόδου Computed Tomography για την τρισδιάστατη αναπαράσταση της ανατομίας του ανθρώπινου σώματος.

Οι ανακλαστικές μέθοδοι είναι αυτές που χρησιμοποιούν εργαλεία τα οποία εκπέμπουν κάποιου είδους ενέργεια πάνω στο αντικείμενο, όπως για παράδειγμα φωτισμό. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες ανακλαστικών μεθόδων: Οι μη-οπτικές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, ραδιοκύματα κτλ., όπως είναι οι τεχνικές με radar, sonar, MRI, και reflective ultrasound (βλ. **Σχήμα 2.7**). Οι δύο τελευταίες τεχνικές έχουν ως κύριο πεδίο μελέτης την ιατρική, αφού οι περισσότερες σύγχρονες ιατρικές εφαρμογές υποβοηθούνται από τον τομέα της 3D αναπαράστασης.



Σχήμα 2.7: Μη-οπτικές μέθοδοι αναπαράστασης της τρισδιάστατης μορφής οργάνων σε ιατρικές εφαρμογές.(Αριστερά: εφαρμογή τεχνικής ultrasound για υποβοήθηση ιατρικής διάγνωσης σε εγκυμοσύνη, Κέντρο: τεχνική Radar για μελέτη φυσικών φαινομένων, Δεξιά: τεχνική MRI για ιατρικούς σκοπούς)

Στη συνέχεια θα μελετηθούν οι Ανακλαστικές Οπτικές τεχνικές οι οποίες αποτελούν τις βασικότερες εφαρμογές στο πεδίο της τρισδιάστατης αναδόμησης σήμερα, εφόσον χρησιμοποιούν τη μέθοδο της τρισδιάστατης σάρωσης.

2.3 Σάρωση Αντικειμένων

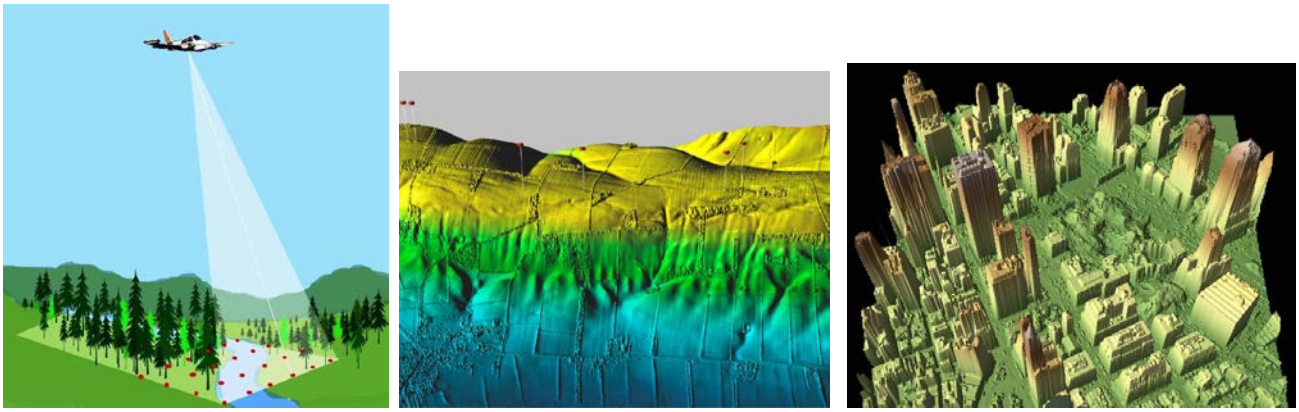
Θα γίνει αρχικά μία εισαγωγή στην έννοια της σάρωσης η οποία αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνική στις σημερινές εφαρμογές τρισδιάστατης αναδόμησης αντικειμένων. Η τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning) μετατρέπει τα πραγματικά αντικείμενα σε δεδομένα υπολογιστή τα οποία έχουν τρισδιάστατη μορφή. Χρησιμοποιώντας 3D προγράμματα μοντελοποίησης, τα τρισδιάστατα αντικείμενα μπορούν να περιστραφούν και να επεξεργαστούν σε μία οθόνη του υπολογιστή. Θα μπορούσε να αναρωτηθεί κάποιος γιατί αυτή η τεχνική είναι πιο διαδεδομένη από άλλες μεθόδους οι οποίες ίσως παρέχουν ήδη ακριβή και ποιοτικά αποτελέσματα. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στον άνθρωπο να δημιουργήσει γρήγορα μία τρισδιάστατη μορφή, να την αναλύσει γρήγορα και χωρίς σημαντική απώλεια δεδομένων. Συνδυάζει δηλαδή τις παραμέτρους ταχύτητα και ακρίβεια οι οποίες είναι τα κύρια ζητούμενα σε μεθόδους 3D αναπαράστασης.

Τα αντικείμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης μπορεί να είναι σχεδόν οτιδήποτε. Παραδείγματα αντικειμένων τα οποία μπορούν να σαρωθούν περιλαμβάνουν μεγάλα κτίρια [7], αυτοκίνητα, άνθρωποι (βλ.**Σχήμα 1.1**), καταναλωτικά προϊόντα, παιχνίδια, αντικείμενα μουσείων, αρχαιολογικά τοπία, αγάλματα [8], γλυπτά και ανθρώπινα όργανα. Όταν ένα αντικείμενο σαρωθεί και το επεξεργαστεί κάποιος αλγόριθμος αναδόμησης, τα δεδομένα του μπορούν να αποθηκευτούν σε κάποια ειδικά format τα οποία θα πρέπει να επεξεργαστούν ειδικά εργαλεία απεικόνισης τρισδιάστατης αναπαράστασης. Όσον αφορά τους χρήστες της 3D σάρωσης, αυτοί είναι κυρίως σχεδιαστές μεγάλων εταιριών οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνική αυτή για σκοπούς σχεδίασης, ιατρικούς σκοπούς, animation, εκπαίδευση, παραγωγή αγαθών και για σύγκριση ποιότητας αποτελεσμάτων σε άλλες πειραματικές χρήσεις.

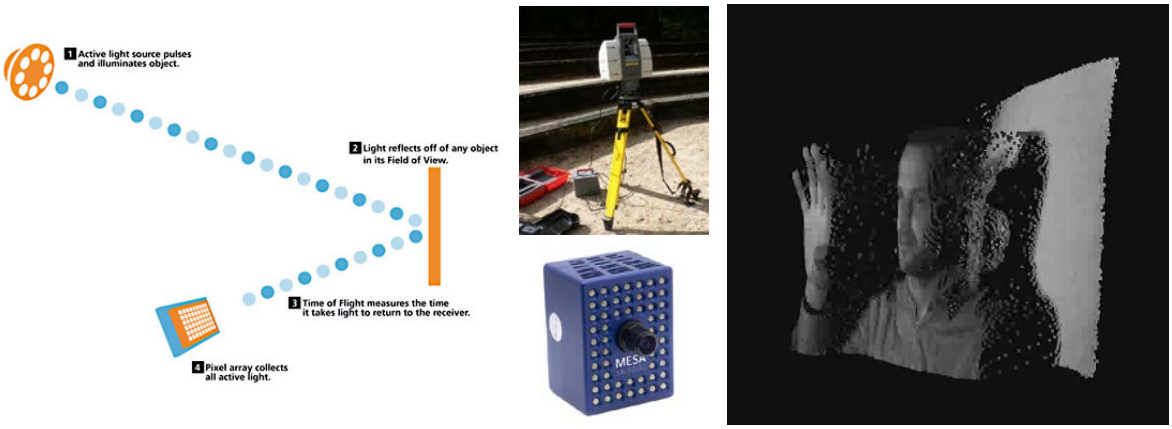
Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να αναλυθούν οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στις μεθοδολογίες σάρωσης είναι οι Active Sensors και οι Passive Sensors. Active Sensors χρησιμοποιούν οι τεχνολογίες LiDAR (Light Detection and Ranging) οι οποίες είναι ουσιαστικά ένας οπτικός κινούμενος αισθητήρας, ο οποίος μπορεί να υπολογίσει την απόσταση ενός αντικειμένου ή άλλες ιδιότητές του, φωτίζοντας το αντικείμενο αυτό με κάποια πηγή φωτός, χρησιμοποιώντας συνήθως παλμούς από laser [9]. Η τεχνολογία αυτή έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, καθώς παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στο πεδίο ερευνών για τη σάρωση ολόκληρων πόλεων, με σκοπό την τρισδιάστατη αναδόμησή τους(βλ. **Σχήμα 2.8**).

Επίσης, υπάρχει η τεχνική time-of-flight. Στην τεχνική αυτή χρησιμοπιείται μία time-of-light camera, η οποία είναι ένα σύστημα το οποίο δημιουργεί δεδομένα για εξεύρεση αποστάσεων, βασισμένη στην αρχή του time-of-flight. Η διαφορά με την τεχνολογία LiDAR είναι ότι αντί η σκηνή να σαρώνεται με ένα κινούμενο laser, ολόκληρη η σκηνή μπορεί να ανακτηθεί με κάθε laser ή παλμό φωτός (light pulse) (βλ.**Σχήμα 2.9**). Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε μελέτες όπου τα αντικείμενα είναι αρκετά μεγάλα, π.χ. για αναπαράσταση αγαλμάτων [8]. Βασίζεται στο χρόνο που το φως διαδίδεται διαμέσου του αέρα και με αυτό τον τρόπο υπολογίζει το βάθος σε κάποιο σημείο του αντικειμένου. Στο [10] χρησιμοποιείται αυτή η τεχνική για την αποκατάσταση της γεωμετρίας ενός ευρύτερου περιβάλλοντος από αντικείμενα. Η τεχνική αυτή δε συνίσταται για μικρά αντικείμενα, καθότι το σφάλμα που προκύπτει είναι σχετικά μεγάλο.

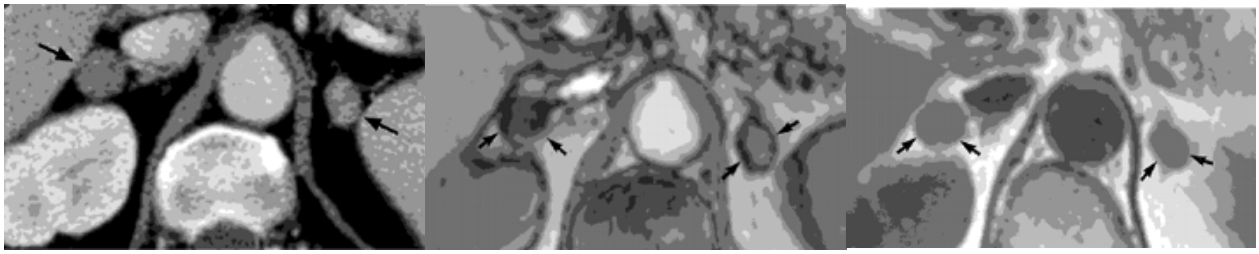
Υπάρχει ακόμη η τεχνική του Out Of phase, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδιασμό με το Computed Tomography (CT) και το magnetic resonance imaging (MRI) για ιατρικές εφαρμογές (βλ. **Σχήμα 2.10**).



Σχήμα 2.8: Η χρήση των τεχνολογιών LiDAR για την τρισδιάστατη αναδόμηση πόλεων. Αριστερά φαίνεται η χρήση ειδικού Pulse laser το οποίο εφαρμόζεται για την ανίχνευση του βάθους των σημείων του εδάφους για την αναδόμηση κάποιας περιοχής, όπως αναπαριστάται στο κέντρο και στα δεξιά.



Σχήμα 2.9: Χρήση της τεχνικής time-of-flight για την τρισδιάστατη αναδόμηση ολόκληρης σκηνής. Αριστερά, η ακτίνα φωτός προσπίπτει στο αντικείμενο και έπειτα ανακλάται από το αντικείμενο. Το time-of-flight υπολογίζει το χρόνο της επιστροφής ενώ η κάμερα συλλέγει τη σκηνή με το φωτισμένο αντικείμενο. Στο κέντρο, time-of-flight κάμερες και στα δεξιά αναπαράσταση του αποτελέσματος της τεχνικής αυτής.



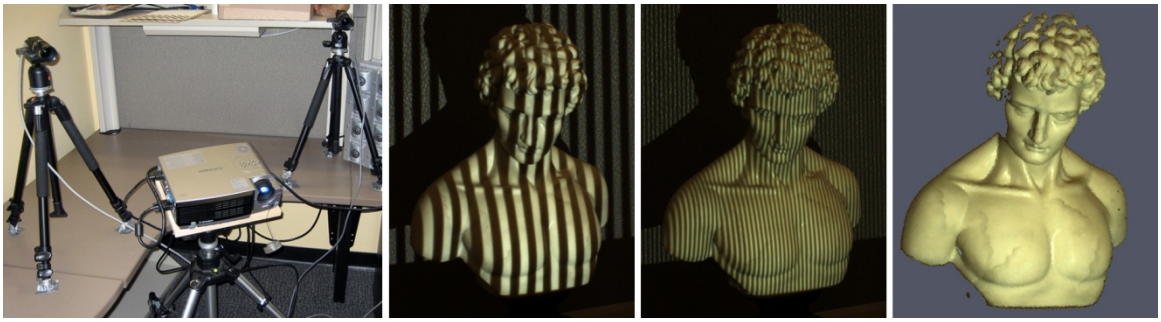
Σχήμα 2.10: Εφαρμογή τεχνικής Out-of-phase σε συνδιασμό με τις τεχνικές MRI και CT για έλεγχο αδενώματος.

Οι Active μεθόδοι έχουν επιφέρει μεγάλη ανάπτυξη στο πεδίο των Γραφικών και του Computer Vision, εφόσον χρησιμοποιούνται σε υπερσύγχρονες μελέτες, παρέχοντας θεαματικά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, εφαρμογή τέτοιων μεθόδων συνεπάγεται μεγάλο κόστος, κάτι που θεωρείται ως μεγάλο μειονέκτημα σε μελέτες μικρής εμβέλειας, γι' αυτό και η χρήση τους γι' αυτό το σκοπό δε συνίσταται.

Για τέτοιου είδους μελέτες, οι οποίες μπορούν να συνδιάσουν υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων και χαμηλό κόστος, ιδανικές είναι οι μεθόδοι που χρησιμοποιούν Passive Sensors, όπως είναι το SLS(Structured Light Scanning) και το laser striping. Πρόκειται για μεθόδους οι οποίες έχουν ως κύρια δομικά στοιχεία τα εξής:

Α) μια συσκευή(εκπομπός) η οποία εκπέμπει κάποιου είδους ενέργεια πάνω στο αντικείμενο, όπως για παράδειγμα φωτισμό.
Β) έναν αισθητήρα (digital still camera ή video camera) η οποία καταγράφει τη φωτεινότητα του αντικειμένου.

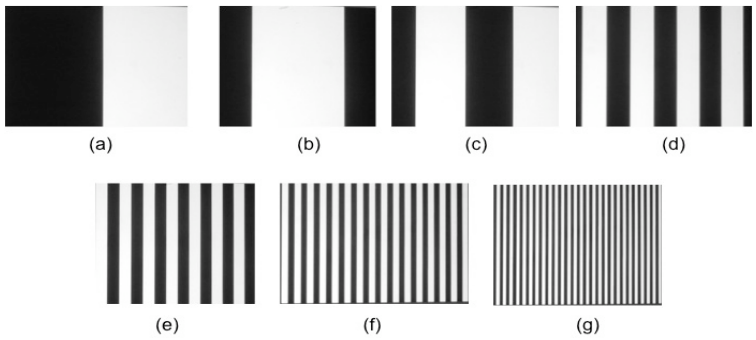
Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για την επίτευξη της προβολής της ενέργειας αυτής στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Ορισμένες από αυτές χρησιμοποιούν projectors (βλ. **Σχήμα 2.11**) για να προβάλουν κάποια μοτίβα φωτός πάνω στο αντικείμενο (structured light patterns). Χρησιμοποιούνται είτε απλά white light projectors, είτε slide projectors ή ακόμη και digital video projectors. Τα τελευταία έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προβάλουν πολλαπλά μοτίβα φωτός πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, αν και το κόστος τους είναι υψηλότερο από τα κανονικά, ενώ επίσης παρέχουν μεγαλύτερη ευκρίνεια.



Σχήμα 2.11: Προβολή δομημένου φωτός (structured light pattern) πάνω σε ένα αντικειμενο για την τρισδιάστατη αναδόμησή του.

Έχουν γίνει επίσης αρκετές έρευνες οι οποίες χρησιμοποίησαν την τεχνική SLS, προσεγγίζοντάς την όμως με διαφορετικούς τρόπους. Μία από αυτές αποτελεί η μελέτη [11], όπου χρησιμοποιεί video projector εισάγοντας παράλληλα τη μέθοδο των coloured stripe patterns. Χρησιμοποιώντας χρωματιστά μοτίβα φωτός γίνεται πιο εύκολα η αντιστοίχιση των ριγών φωτός (stripes) του μοτίβου που προβάλλεται, ενώ η μέθοδος αναδόμησης του αντικειμένου γίνεται παρόμοια με αυτήν του laser scanning. Επίσης επιτρέπει την καλύτερη μοντελοποίηση αντικειμένων με χρώματα.

Πολύ διαδεδομένη είναι η μέθοδος των coded light patterns (βλ. **Σχήμα 2.12**) όπου κωδικοποιούνται τα μοτίβα που προβάλλονται πάνω στο αντικείμενο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κατά την ώρα της μετάφρασης να απαιτούνται μόνο λίγα frames για την αποκωδικοποίηση των patterns και την απόκτηση του σχήματος του αντικειμένου. Τεχνικές κωδικοποίησης που ακολουθούνται είναι τα Binary coded patterns και Gray-Code binary patterns.



Decimal Value	Binary Code	Gray Code
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

Σχήμα 2.12: Στα αριστερά παρουσιάζονται κάποια Gray code structure light patterns για τα διαφορετικά binary patterns τα οποία προβάλλονται πάνω σε άσπρο φόντο. Στα δεξιά φαίνεται η αναπαράσταση του Binary code και Gray code.

Μερικές μέθοδοι προβάλλουν πολύπλοκα μοτίβα (multiple-stripe patterns) πάνω στο αντικείμενο για να επιταχύνουν τη μέθοδο της απόκτησης του σχήματός του. Φυσικά με αυτό τον τρόπο η αναδόμηση ενός τέτοιου μοτίβου γίνεται πιο πολύπλοκη και μπορεί επίσης να αποτύχει αν το αντικείμενο περιέχει περιοχές που καλύπτονται μεταξύ τους ή κάποια ασυνέχεια στο σχήμα του.

Το βασικό μειονέκτημα των πιο πάνω των μεθόδων είναι ο περιορισμός ότι τα αντικείμενα πρέπει να είναι σχεδόν επίπεδα για να αποδοθούν καλά αποτελέσματα. Δηλαδή δεν πρέπει να υπάρχει μεγάλη κυρτότητα στο αντικείμενο ούτε απότομες αλλαγές βάθους γιατί μπορεί να προκληθεί αντιστροφή της σειράς των stripe patterns και έτσι κατά τη μετάφραση πολλά σημεία να μην αποδοθούν σωστά. Αυτό δεν ισχύει τόσο σε coloured stripe patterns όσο σε binary patterns.

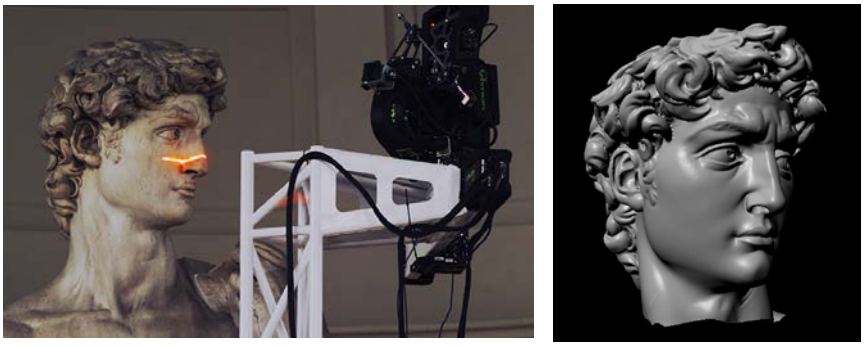
Μία άλλη προσέγγιση αυτής της μεθόδου χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο μοτίβο το οποίο προβάλλεται πάνω στο αντικείμενο και στη συνέχεια γίνεται αναζήτηση και αντιστοίχιση του συγκεκριμένου μοτίβου από διαφορετικές οπτικές γωνίες, χρησιμοποιώντας στερεοσκοπικά συστήματα [12]. Παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιείται και στο [13] όπου υπάρχει ο συνδιασμός projector και μίας κάμερας όπου η μία από τις δύο συσκευές κινείται γύρω από το αντικείμενο, λαμβάνοντας έτσι σημεία του αντικειμένου από πολλές οπτικές γωνίες. Έπειτα εισάγεται μία νέα τεχνική όπου χρησιμοποιούνται καθρέπτες για να αποκαταστήσουν την κίνηση των συσκευών γύρω από το αντικείμενο, διατηρώντας όμως τις ίδιες δυνατότητες σάρωσης του αντικειμένου.

Σε γενικές γραμμές, μία συσκευή laser αποδίδει ακριβέστερα αποτελέσματα από ένα projector το οποίο προβάλλει patterns, όταν και οι 2 συσκευές εκπέμπουν φως έχοντας την ίδια απόσταση από το αντικείμενο. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι η σκιά είναι πολύ ευαίσθητη σε σχέση με την ακτίνα ενός laser, για λόγους που θα αναλυθούν επεξηγηματικά αργότερα, στο υποκεφάλαιο 2.5.

Οι τεχνικές του laser scanning είναι αυτές που χρησιμοποιούν laser για το κομμάτι της διάταξης που αντιπροσωπεύει τον εκπομπό. Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που βασίζονται στη χρήση των laser [14], ενώ μερικές από αυτές έγιναν απαραίτητες για την επίτευξη μεγάλων ερευνών, όπως για παράδειγμα η έρευνα του Michelangelo [8](βλ. **Σχήμα 2.13**).

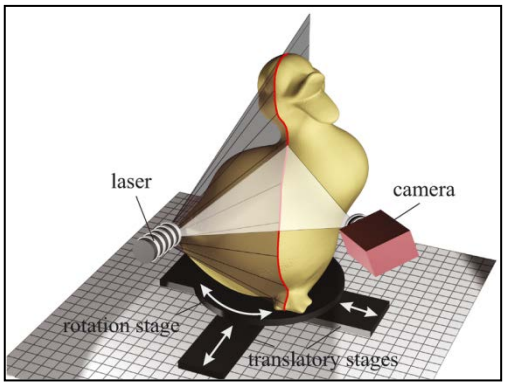
Η πιο απλή μορφή όσον αφορά τις τεχνικές laser είναι το Single Point Laser Scanner, το οποίο σε συνδιασμό με CCD συσκευές μπορεί να δώσει πολύ ακριβή αποτελέσματα και μεγαλύτερη ευκρίνεια σε σχέση με άλλες συσκευές laser. Παρ'όλα αυτά αποτελεί μία από τις πιο αργές μεθόδους scanning, αφού κάθε φορά γίνεται αναδόμηση ενός μόνο σημείου

του αντικειμένου. Ένα άλλο βασικό μειονέκτημα είναι το μεγάλο κόστος της μεθόδου αυτής, γιατί εκτός από το laser χρειάζονται επιπλέον συσκευές για την ολοκλήρωση της διάταξης, όπως γαλβανόμετρα και συσκευές CCD.



Σχήμα 2.13: Αριστερά, εφαρμογή του Laser Scanning στο Project του Michelangelo, ενώ δεξιά παρουσιάζεται η τρισδιάστατη αναδόμησή του.

Το slit scanner (βλ. **Σχήμα 2.14**) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος αναδόμησης αντικειμένου, λόγω της απλότητας και του μικρού της κόστους. Θεωρείται πιο αποδοτική από το single point laser για το λόγο ότι προβάλλοντας ένα laser stripe πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου, μπορεί για ένα frame να γίνει απόκτηση πολλών σημείων του αντικειμένου ταυτόχρονα. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί σε έρευνες όπως η [8].



Σχήμα 2.14: Slit Scanning

Φυσικά για τη μέθοδο αυτή πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψην κάποιες ευαίσθητες παραμέτροι, όπως είναι η γωνιά που σχηματίζει το laser και η κάμερα, έτσι ώστε κατά το scanning να μη «χάνονται» περιοχές του αντικειμένου από τυχόν occlusions. Ένας επίσης σημαντικός παράγοντας είναι οι περιορισμοί αυτής της μεθόδου όσον αφορά το εξωτερικό

φως. Σε εξωτερικό περιβάλλον όπου υπάρχει έντονη ακτινοβολία, η αλλοίωση που προκαλεί το φως στα αποτελέσματα είναι μεγάλη. Φυσικά εμείς θα επικεντρωθούμε σε scanning που θα πραγματοποιηθεί σε εσωτερικό περιβάλλον, οπότε αυτός ο παράγοντας δε μας επηρεάζει.

Άλλες έρευνες που ακολούθησαν αυτή τη μέθοδο είναι η [15], στην οποία γίνεται χρήση ενός laser stripe scanner για την απόκτηση της γεωμετρίας του αντικειμένου. Στην [16] χρησιμοποιείται επίσης το laser-stripe scanner με μία διαφορετική προσέγγιση, όπου χρησιμοποιούνται 2 κάμερες στα δεξιά και αριστερά του laser για την αποκατάσταση της θέσης του όταν αυτό κινείται, κι έτσι περιορίζεται η ανάγκη για calibration της κίνησης του laser.

2.4 Επεξεργασία Δεδομένων

Οι βασική μέθοδος για την επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου αναδόμησης του αντικειμένου, είναι η τεχνική του Triangulation. Έπειτα από την προβολή κάποιας μορφής φωτός στην επιφάνεια του αντικειμένου, εφαρμόζεται στον αλγόριθμο για την απόκτηση και αναπαράσταση των αντίστοιχων 3D σημείων. Για να γίνει αυτό εφικτό, στις περισσότερες περιπτώσεις προαπαιτείται γνώση της θέσης του εκπομπού καθώς και του αισθητήρα (κάμερας).Το triangulation αποτελεί μία από τις πιο απλοποιημένες και παράλληλα αποδοτικές μεθόδους αποκατάστασης της γεωμετρίας του αντικειμένων και έχει χρησιμοποιηθεί από την πλειοψηφία των ερευνών που χρησιμοποιούν τεχνικές laser scanning. Η μέθοδος αυτή θα αναλυθεί αργότερα, στο Κεφάλαιο 6.

2.5 Σύγκριση Μεθοδολογιών

Η μέθοδος στην οποία θα επικεντρωθεί αυτή η μελέτη περιλαμβάνει ένα laser-stripe scanner σε συνδιασμό με τη χρήση απλής digital κάμερας. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η τεχνική είναι η ευκολία χρήσης, το μικρό κόστος των συσκευών καθώς και ο μικρός χρόνος απόκρισης σε σχέση με χρονοβόρες τεχνικές που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Επίσης, σε σχέση με High Resolution κάμερες και Active Sensors που κοστίζουν ιδιαίτερα ακριβά, η ευκρίνεια των αποτελεσμάτων μπορεί να μην είναι η υψηλότερη, αλλά μπορούν να αποδοθούν έγκυρα και ακριβή αποτελέσματα σε καλή ποιότητα που ανταποκρίνεται στις ανάγκες της έρευνάς μας.

Έχουν αναλυθεί αρκετές μεθόδοι οι οποίες εφαρμόζουν πάνω στο αντικείμενο κάποια μορφή δομημένης σκιάς. Παρ'όλα αυτά έχει αναφερθεί ότι η χρήση ενός laser μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων.Σε αυτή τη μελέτη προτείνεται η χρήση της μεθόδου που εφαρμόζει το laser για την αναδόμηση του τρισδιάστατου αντικειμένου έναντι οποιασδήποτε άλλης μεθόδου που κάνει χρήση τεχνικών δομημένης σκιάς, για τους λόγους που αναλύονται στη συνέχεια.

Αρχικά η σκιά είναι ένας ευαίσθητος παράγοντας τόσο στον εξωτερικό αλλά και στον εσωτερικό χώρο. Μία σκιά είναι πολύ ευαίσθητη στην απότομη αλλαγή φωτός. Η αλλαγή στο φωτισμό μπορεί να προκληθεί από οποιαδήποτε αλλαγή στην κίνηση ενός αντικειμένου ή ακόμη λόγω φυσικών παραγόντων, π.χ. του ήλιου ή της σκιάς που προκαλούν τα σύννεφα. Στον εσωτερικό χώρο, αντίθετα, η σταθερότητα του φωτός μπορεί να ρυθμιστεί. Όμως υπάρχουν αρκετοί εξωγενείς παράγοντες (πιθανές σκιές που προκαλούνται από αντικείμενα του χώρου) που μπορούν να επηρεάσουν το φωτισμό της σκηνής, επισκιάζοντας κάποιες περιοχές. Ως συνέπεια, κάποια σημεία λαμβάνονται λανθασμένα ως σημεία υπό σκίαση ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι, απλά και μόνο επειδή ξεπερνούν το συγκεκριμένο threshold που έχει οριστεί. Αντιθέτως, το λέιζερ λόγω της μεγάλης διαφοράς στη φωτεινότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία της εικόνας, μπορεί να ανιχνευθεί επιτυχώς σε ένα frame, περιορίζοντας το ποσοστό σφάλματος και οδηγώντας σε ακριβέστερη και εγκυρότερη ανάκτηση του αντικειμένου.

Ένας άλλος λόγος είναι ότι το λέιζερ μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω υπό συνθήκες που η απλή σκιά είναι πολύ δύσκολο ή ακόμη και αδύνατο να χρησιμοποιηθεί. Για

παράδειγμα, σε κάποια γνωστή περιοχή του χώρου (μεταξύ των plane boundaries) μπορεί να χρησιμοποιηθεί το laser χωρίς την ύπαρξη οποιασδήποτε άλλης πηγής φωτός, δηλαδή στο σκοτάδι, κάτι που είναι αδύνατο να επιτευχθεί με τη χρήση δομημένης σκιάς. Σε αυτή την περίπτωση η ανίχνευση των σημείων γίνεται ακόμη πιο ακριβής, εφόσον η διαφορά της φωτεινότητας ενός σημείου θα είναι τεράστια σε σχέση με κάποιο μη φωτεινό σημείο. Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι το laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έρευνες που γίνονται υποθαλάσσια με σκοπό την απόκτηση του τρισδιάστατου σχήματος αντικειμένων του βυθού, κάτι το οποίο είναι αρκετά δύσκολο να πραγματοποιηθεί με χρήση τεχνικών σκιάς. Αυτό γίνεται εφικτό επειδή η φωτεινότητα της ακτίνας δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στο νερό. Υπάρχουν ακόμη ειδικά laser τα οποία χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις και έχουν κατασκευστεί έτσι ώστε να μην επηρεάζονται από τους διάφορους παράγοντες που επικρατούν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η χρήση του laser μπορεί ακόμη να επεκταθεί για την πραγματοποίηση μεγάλων ερευνών [19] χρησιμοποιώντας ακτίνες δομημένου φωτός μεγάλης έκτασης, οι οποίες δομούνται ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ευκολία και αποδοτικότητα στην εξαγωγή αποτελεσμάτων. Αυτό είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές δομημένης σκιάς.

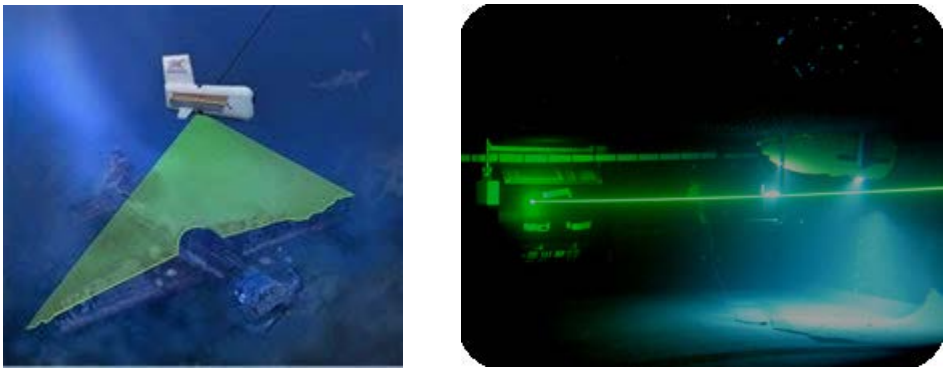


Figure 5.1: Το underwater scanning σε συνθήκες φωτός και σκοταδιού μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές laser.

Κεφάλαιο 3

System Overview

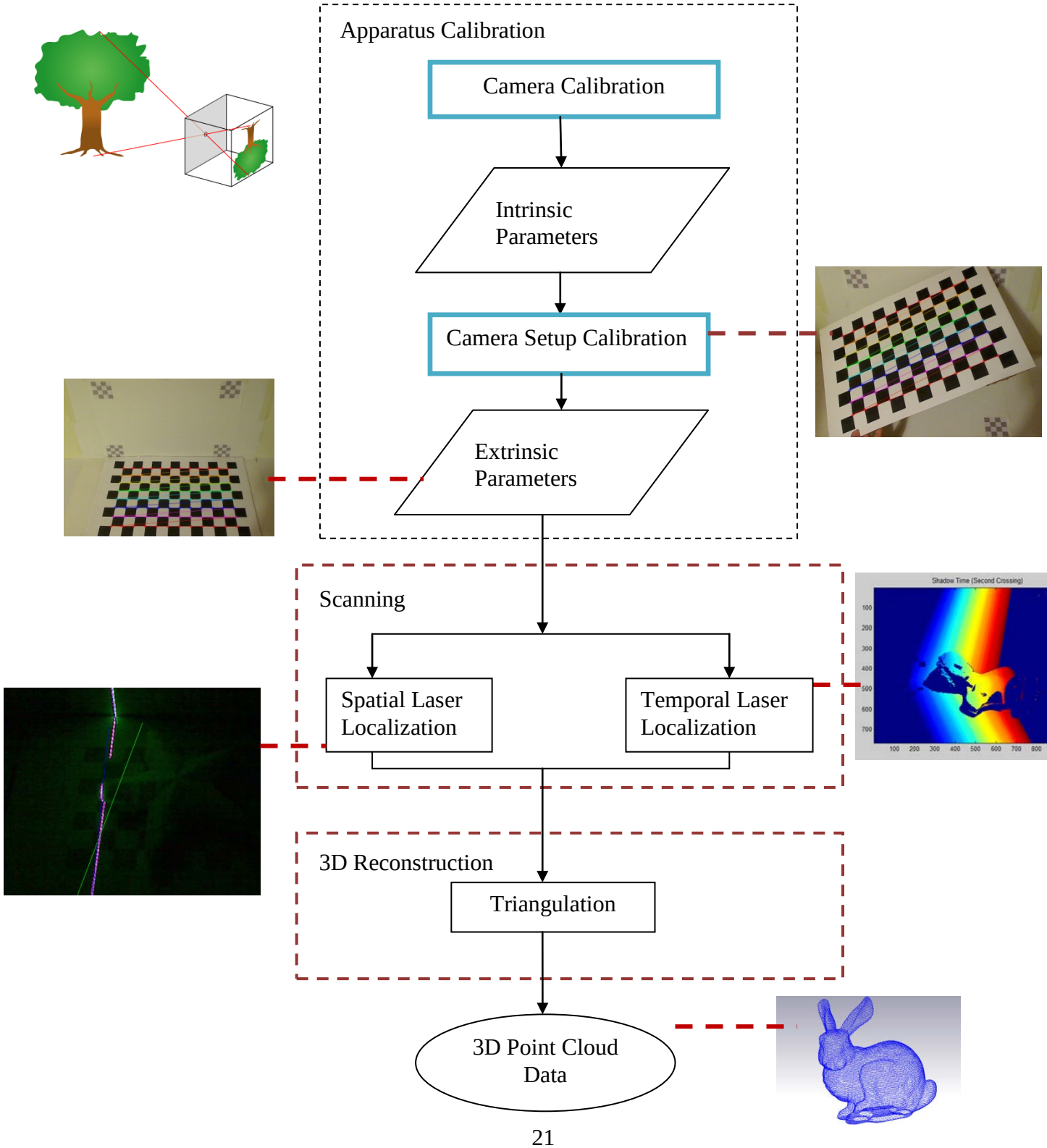
3.1 Εισαγωγή 20
3.2 Διάγραμμα Ροής Διεργασιών 21
3.3 Συστατικά Μέρη Διαδικασίας 22

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί μία σύντομη επισκόπηση της δομής του συστήματος καθώς και των συστατικών μελών που το αποτελούν. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στη σειρά της ροής των διεργασιών που θα πρέπει να πραγματοποιηθούν έτσι ώστε να εξαχθεί επιτυχώς το τελικό αποτέλεσμα.Επίσης δίνεται μία σύντομη αναφορά στα δεδομένα εισόδου και εξόδου της κάθε διεργασίας ξεχωριστά για περεταίρω κατανόηση της λειτουργίας της.

3.2 Διάγραμμα Ροής Διεργασιών

Πιο κάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η ροή της εκτέλεσης των διαδικασιών του προγράμματος. Θα ακολουθήσει αναλυτική περιγραφή της κάθε διαδικασίας στη συνέχεια.



3.3 Συστατικά Μέρη Διαδικασίας

Τα συστατικά μέρη από τα οποία αποτελείται η μελέτη αυτή στο σύνολό της, μπορούν να περιγραφούν σε τρία βασικά βήματα. Τα βήματα αυτά είναι το Apparatus Calibration, το Scanning (Data Acquisition) και τέλος είναι το Reconstruction, τα οποία θα περιγραφούν αναλυτικά στη συνέχεια.

Το Apparatus Calibration το οποίο θα εξεταστεί στο **Κεφάλαιο 4**, είναι η εφαρμογή μίας τεχνικής η οποία μας επιτρέπει, εφόσον το πρόγραμμα κάνει χρήση μίας κάμερας, να γνωρίζουμε τις βασικές, γεωμετρικές παραμέτρους αυτής έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να την τοποθετήσουμε στις συντεταγμένες του τρισδιάστατου χώρου. Εφαρμόζεται λοιπόν το Camera Calibration για την ανίχνευση των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας, καθώς επίσης και των αλλοιώσεων που πιθανόν να προκύπτουν από τον ενσωματωμένο φακό. Αυτές οι αλλοιώσεις είναι πιθανόν να ανατρέψουν τα αποτελέσματα του προγράμματος, έτσι θα πρέπει να είμαστε σε θέση να τις ανιχνεύσουμε και να τις εξαλείψουμε. Ως είσοδοι για αυτή τη διαδικασία λαμβάνονται 20 εικόνες οι οποίες περιέχουν ένα επίπεδο checkerboard, το οποίο είναι τοποθετημένο σε γνωστή περιοχή του χώρου. Η ανίχνευση των εσωτερικών παραμέτρων γίνεται επιτυχώς αφού το πρόγραμμα επεξεργαστεί τις εικόνες αυτές και εξάγει τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας και τις αλλοιώσεις που προκύπτουν.

Το δεύτερο μέρος της διαδικασίας αυτής αποτελεί την ανίχνευση των εξωτερικών παραμέτρων (extrinsic parameters) της κάμερας, που έχει ως αποτέλεσμα την επίγνωση της τοποθεσίας ενός γνωστού αντικειμένου στο χώρο. Η θέση ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο μπορεί να περιγραφεί στις συντεταγμένες της κάμερας (δισδιάστατος χώρος) ως μία σχέση της περιστροφής του αντικειμένου αυτού σε συνδιασμό με τη γραμμική μετατόπιση του στο χώρο. Οι παραμέτροι αυτοί θα πρέπει να εξαχθούν από το πρόγραμμα για τον εντοπισμό της πραγματικής τοποθεσίας του κάθετου και οριζόντιου επιπέδου, τα οποία αποτελούν τη γνωστή περιοχή της διάταξης στο χώρο. Εφόσον ανακτηθούν οι παραμέτροι αυτοί, μπορούν να εισαχθούν στη διαδικασία του Reconstruction που θα αναφερθεί στη συνέχεια, για τον τελικό εντοπισμό της θέσης των

σημείων του αντικειμένου στο χώρο. Τα δύο αυτά μέρη που εφαρμόζουν τη διαδικασία του Calibration ονομάζονται στο σύνολό τους ως Apparatus Calibration.

Ακολούθως θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του Scanning, η οποία αποτελεί τη βασική τεχνική που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των δεδομένων τα οποία θα πρέπει να επεξεργαστούν για την ανάκτηση των τρισδιάστατων σημείων ενός αντικειμένου. Η διαδικασία αναλύεται στο **Κεφάλαιο 5**. Αρχικά γίνεται τοποθέτηση του αντικειμένου στη γνωστή περιοχή του χώρου, πάνω στο οριζόντιο επίπεδο. Για τις ανάγκες της διαδικασίας αυτής γίνεται χρήση ενός line laser, το οποίο σαρώνει το αντικείμενο κατά μήκος της επιφάνειας του και εξάγει εικόνες, οι οποίες περιγράφουν την όλη διαδικασία μέσω μίας ακολουθίας από frames.

Έπειτα ακολουθεί η ανάλυση των βασικών τεχνικών που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα, οι οποίες αναφέρονται ως Spatial και Temporal Laser Localization. Και στις δύο διαδικασίες εισάγονται ως δεδομένα εισόδου η ακολουθία των frames που έχουν εξαχθεί από τη διαδικασία του scanning. Η πρώτη διαδικασία επιδρά πάνω στις συντεταγμένες του χώρου ενώ η δεύτερη επιδρά πάνω στις συντεταγμένες του χρόνου. Οι εικόνες αυτές τυγχάνουν επεξεργασίας από τις πιο πάνω τεχνικές ξεχωριστά, με βασικό στόχο την περιγραφή σε συντεταγμένες της κάμερας, της τοποθεσίας των ακτίνων φωτός που προσπίπτουν στο αντικείμενο για κάθε διακριτή χρονική στιγμή. Η πρώτη τεχνική αφορά τον προσδιορισμό της θέσης των ορίων της ακτίνας του laser σε συνάρτηση με το χρόνο, για κάθε frame που λαμβάνεται από την κάμερα, ενώ η δεύτερη τεχνική αφορά τον προσδιορισμό του χρόνου στον οποίο η ακτίνα φωτός διαπερνά κάποιο συγκεκριμένο pixel στην εικόνα. Οι διαδικασίες αυτές θα πρέπει να είναι συμβατές, δηλαδή να είναι σε θέση να εξάγουν το ίδιο αποτέλεσμα όταν επιδρούν σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο στην εικόνα.
Στη συνέχεια, εφόσον έχουν εξαχθεί επιτυχώς τα αποτελέσματα αυτά, χρησιμοποιούνται σε συνδιασμό με την τοποθεσία του οριζόντιου και κάθετου πλάνου στην εικόνα για να γίνει ανίχνευση της πραγματικής τοποθεσίας των ακτίνων που προσπίπτουν από το laser στη σκηνή για την κάθε χρονική στιγμή t. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας τις τρισδιάστατες συντεταγμένες των γραμμών των ακτίνων, θα πρέπει να γίνει ανίχνευση του πλάνου που σχηματίζει το laser με την ακτίνα που προσπίπτει στην επιφάνεια του αντικειμένου, για όλες τις εικόνες της ακολουθίας που λάμβάνονται από την κάμερα. Η διαδικασία αυτή εντάσσεται στη διαδικασία του Laser Plane Estimation η οποία εφαρμόζεται στο σημείο

αυτό για να εξαχθεί για κάθε χρονική στιγμή αυτό το πλάνο. Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τα δεδομένα εξόδου από τη διαδικασία του Scanning.

Τέλος, ακολουθεί η διαδικασία του Reconstructuion στο **Κεφάλαιο 6**, η οποία εφαρμόζεται για να εξαχθεί η πραγματική τοποθεσία των σημείων P στο χώρο, σε σχέση με κάθε σημείο p της εικόνας στις συντεταγμένες της κάμερας. Η διαδικασία αυτή κάνει εφαρμογή της μεθόδου του Triangulation, η οποία ορίζει την τομή μίας οπτικής ακτίνας που δημιουργείται εφαρμόζοντας τις κατάλληλες μετατροπές πάνω στα δισδιάστατα σημεία της εικόνας, με το πλάνο που έχει εξαχθεί από τη διαδικασία του Scanning για την ανίχνευση του βάθους του κάθε σημείου P.

Το αποτέλεσμα είναι τα τρισδιάστατα σημεία του χώρου που αναπαριστούν το σχήμα του αντικειμένου, τα οποία δημιουργούν ένα point cloud το οποίο ακολούθως εξάγεται σε αρχείο και εισάγεται σε κατάλληλο λογισμικό για τη μετατροπή του σε πλέγμα, για την απεικόνιση του τελικού αποτελέσματος.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στο **Κεφάλαιο 7**. Ακολούθως εξάγονται τα γενικά συμπεράσματα τα οποία αναλύονται στο **Κεφάλαιο 8**.

Κεφάλαιο 4

Apparatus Calibration

4.1 Εισαγωγή 25
4.2 Camera Calibration 25
4.3 Lens Distortion 30
4.4 Camera Setup Calibration 33
4.5 Extrinsic Parameters 35
4.6 Extrinsic Calibration 39

4.1 Εισαγωγή

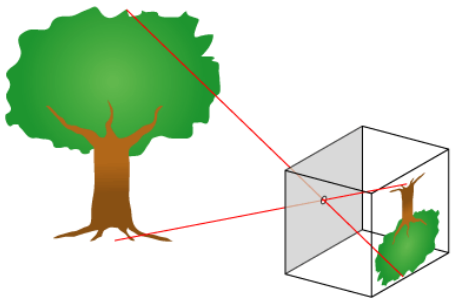
Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στις τεχνικές αναδόμησης αντικειμένων οι οποίες χρησιμοποιούν κάμερα, με απώτερο στόχο την εξαγωγή των εσωτερικών και εσωτερικών της παραμέτρων, οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία των δεδομένων για εξαγωγή της τρισδιάστατης μορφής ενός αντικειμένου. Αρχικά θα δοθεί μία γενική περιγραφή της έννοιας του Camera Calibration και ακολούθως θα αναλυθούν οι Εσωτερικές Παραμέτροι, το Camera Setup Calibration καθώς και οι Εξωτερικές Παραμέτροι.

4.2 Camera Calibration

Το Camera Calibration αποτελεί μία περιοχή με μεγάλο ενδιαφέρον στο πεδίο του Computer Vision. Αφορά τη συσχέτιση των 3D συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου (x,y,z) με τις 2D συντεταγμένες του επιπέδου (x’,y’), την εύρεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της κάμερας και τον υπολογισμό των αλλοιώσεων που προκαλούνται στην εικόνα λόγω του φακού. Για να είμαστε σε θέση να εξάγουμε τρισδιάστατες πληροφορίες, θα πρέπει να γνωρίζουμε τις σχετικές θέσεις και παραμέτρους των συσκευών μας. Για την ανεύρεση των πληροφοριών αυτών χρειαζόμαστε ένα μαθηματικό

μοντέλο το οποίο να μπορεί να περιγράψει τη λειτουργία της διάταξης που έχει δημιουργήθεί. Αυτή τη δυνατότητα μας τη δίνει το Camera Calibration.

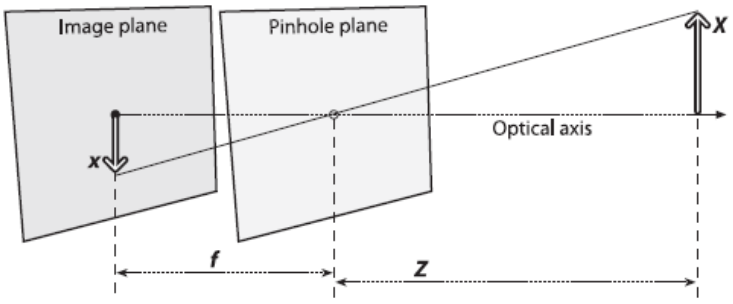
Το μοντέλο της κάμερας που χρησιμοποιείται στη διαδικασία του Calibration είναι το pinhole camera model(βλ. **Σχήμα 4.1**), το οποίο είναι ένα απλό μοντέλο που δίνει μία έμπιστη περιγραφή του πως η κάμερα απεικονίζει μία 3D σκηνή. Συγκεκριμένα, περιγράφει τη μαθηματική σχέση μεταξύ των συντεταγμένων ενός 3D σημείου του χώρου και της προβολής του πάνω στο 2D επίπεδο μίας Pinhole κάμερας.



Σχήμα 4.1: Η μετατροπή από 3D σε 2D συντεταγμένες η οποία περιγράφεται από το μοντέλο της pinhole camera είναι μία προοπτική προβολή η οποία ακολουθείται από μία περιστροφή του επιπέδου της εικόνας κατά 180° μοίρες.

Το pinhole model περιγράφεται από ένα επίπεδο, στο κέντρο του οποίου υπάρχει μία μικρή οπή η οποία εμποδίζει τις ακτίνες φωτός να διαπεράσουν το επίπεδο, με εξαίρεση τις ακτίνες που περνούν διαμέσου αυτής της οπής. Οι ακτίνες αυτές «προβάλλουν» το κάθε σημείο του αντικειμένου σε ένα εικονικό επίπεδο που βρίσκεται πίσω από το pinhole plane.

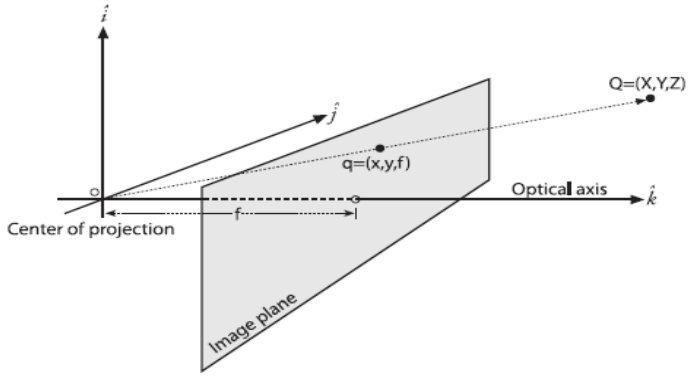
Το μέγεθος x του αντικειμένου που προβάλλεται στην εικόνα πίσω από το Pinhole, μπορεί να ανακτηθεί αν είναι γνωστή η απόσταση του επιπέδου προβολής από την οπή του pinhole(βλ. **Σχήμα 4.2**). Ιδανικά, η απόσταση αυτή ορίζεται ως το focal length f. Γνωρίζοντας και την απόσταση μεταξύ του pinhole και του αντικειμένου, έστω Z καθώς και το μέγεθος του πραγματικού αντικειμένου X μπορεί να ανακτηθεί το εικονικό του μέγεθος.



Σχήμα 4.2: Οι ακτίνες φωτός που περνούν διαμέσου της μικρής οπής που βρίσκεται πάνω στο Pinhole Plane, προβάλλονται πάνω στο image plane το οποίο βρίσκεται πίσω από το pinhole και σχηματίζουν την εικόνα του φυσικού αντικειμένου ως μία 2D προβολή.

Μία πιο βοηθητική και πιο κατανοητή προσέγγιση της συσχέτισης του Pinhole camera model με τη διαδικασία του camera calibration, είναι μια επαναδιάταξη του pinhole model με τέτοιο τρόπο ώστε η εικόνα που προβάλλεται πάνω στο 2D επίπεδο να μη βρίσκεται αναποδογυρισμένη αλλά σε ορθή θέση. Γι' αυτό το λόγο γίνεται ανταλλαγή της θέσης του 2D επιπέδου προβολής με το pinhole επίπεδο(βλ. **Σχήμα 4.3**), έτσι ώστε το επίπεδο προβολής να βρίσκεται μπροστά από το pinhole στην ίδια απόσταση που βρισκόταν και πριν(σε απόσταση focal length). Εστιάζοντας σε αυτό το μοντέλο, η οπή του pinhole επιπέδου γίνεται το κέντρο προβολής, ή αλλιώς το center of projection. Ορίζεται επίσης ένας νοητός άξονας ο οποίος ξεκινά από το κέντρο προβολής και τέμνει κάθετα το εικονικό επίπεδο προβολής.Το σημείο στο οποίο τέμνονται ονομάζεται principal point και ιδανικά είναι το κέντρο της εικόνας. Αυτή η παράμετρος πορεί να εντοπιστεί μέσω της διαδικασίας του camera calibration, όπου επιστρέφεται προσεγγιστικά (με κάποια τυπική απόκλιση) η τιμή της πραγματικής θέσης του principal point.

Αναλύοντας περεταίρω το μοντέλο αυτό, από κάθε σημείο (X,Y,Z) του πραγματικού αντικειμένου ξεκινά μία ακτίνα φωτός η οποία τέμνεται με το center of projection εφόσον πρώτα περάσει διαμέσου του επιπέδου της εικόνας. Το σημείο στο οποίο τέμνεται η ακτίνα αυτή με το επίπεδο αποτελεί την προβολή του συγκεκριμένου σημείου σε 2D μορφή (x,y,f).



Σχήμα 4.3: Για μαθηματική ευκολία και πιο αντιπροσωπευτική αναπαράσταση του μοντέλου της κάμερας, γίνεται αντιστροφή του επιπέδου προβολής και το κέντρου προβολής.

Η σχέση που συνδέει ένα σημείο Q_i του φυσικού 3D χώρου με συντεταγμένες (X_i, Y_i, Z_i), με αυτά του 2D επιπέδου προβολής με συντεταγμένες (x_i, y_i) ονομάζεται projective transform ή αλλιώς προοπτικός μετασχηματισμός. Εδώ θα μπορούσε να εισαχθεί η έννοια των ομοιογενών συντεταγμένων, μέσω των οποίων διευκολύνεται αυτή η αναπαράσταση.

Σε οποιοδήποτε χώρο προβολής με διαστάσεις N, τα Homogeneous Coordinates μπορούν να οριστούν ως ένα vector N+1 διαστάσεων. Αυτό μας επιτρέπει να ορίσουμε για το επίπεδο προβολής το οποίο έχει 2 διαστάσεις, ένα vector 3 διαστάσεων $q = (q_1, q_2, q_3)$, αναπαριστώντας το έτσι σε homogeneous coordinates.

Η προβολή των σημείων από το φυσικό κόσμο στις συντεταγμένες της κάμερας μπορεί να συνοψιστεί στην ακόλουθη απλή σχέση:

$$q = MQ, \quad \text{where} \quad q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Όπου το Q αποτελεί την αναπαράσταση ενός 3D σημείου σε Homogeneous coordinates, ενώ το q αποτελεί την αντίστοιχη αναπαράσταση του 2D σημείου. Ο πίνακας M ο οποίος έχει διαστάσεις 3x3, ονομάζεται Intrinsic Matrix και περιέχει τις εσωτερικές παραμέτρους που προσδιορίζουν την κάμερά μας οι οποίες είναι το principal point (cx,cy) και το focal length (fx,fy), τα οποία δίνονται σε pixels.

Ο χώρος στον οποίο ορίζεται ένα 3D σημείο έχει ως μονάδα μέτρησης το εκατοστό, το μέτρο κτλ. Όσον αφορά το χώρο προβολής της κάμερας, μονάδα μέτρησης θεωρείται το pixel. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι πέρα από τη συσχέτιση των δύο διαστάσεων, γίνεται και μία συσχέτιση μεταξύ των φυσικών μέσων, δηλαδή των εκατοστών/μέτρων και των pixels.

Επιλύοντας την εξίσωση, το w ισούται με το Z. Επειδή το σημείο q δίνεται σε ομοιογενείς συντεταγμένες, για να ανακτηθούν οι πραγματικές τιμές στη φυσική μονάδα μέτρησης της κάμερας, δηλαδή σε pixels, αρκεί να διαιρεθεί ο πίνακας q με την παράμετρο q3, η οποία αντιστοιχεί στην τιμή w ή Z. Από την εξίσωση αυτή και θεωρώντας ότι οποιαδήποτε 2 σημεία που έχουν ανάλογες τιμές είναι ισοδύναμα, μπορεί να ορισθεί μία ισοδυναμία δύο αντικειμένων από διαφορετικούς χώρους προβολής έπειτα από κάποιο (μη μηδενικό) κλιμακωτό πολλαπλασιασμό.

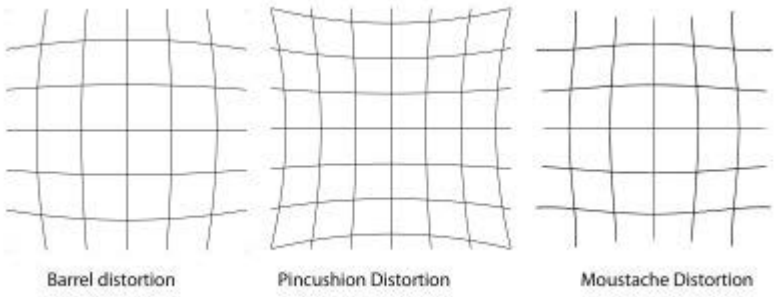
Έχει γίνει αναφορά μέχρι τώρα στο απλό pinhole model και στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να συσχετιστούν 2 διαφορετικοί χώροι προβολής. Η χρήση του pinhole camera model ωστόσο δεν ενδείκνυται από μόνη της για τη διαδικασία του camera calibration, αλλά χρησιμοποιείται μόνο ως μια πρώτη προσέγγιση για τον μετασχηματισμό από μία 3D σκηνή σε μία 2D εικόνα, εφόσον μία μικρή οπή δε μπορεί να επικεντρώσει αρκετό φως έτσι ώστε να συλλέξουμε μία ικανοποιητικά φωτεινή εικόνα. Για τη συγκέντρωση αρκετού φωτός γίνεται χρήση φακού, η εισαγωγή του οποίου περιπλέκει τη διαδικασία εισάγοντας την έννοια του lens distortion, δηλαδή της αλλοίωσης της εικόνας.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάμερας (focal length, principal point, skew coefficient) καθώς και τα στοιχεία του distortion που προκαλείται από το φακό, αποτελούν γενικότερα τις εσωτερικές παραμέτρους της κάμερας ή αλλιώς τα intrinsic parameters. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να υπολογιστούν μόνο μία φορά, εφόσον τα στοιχεία αυτα δε μεταβάλλονται καθ' όλη τη διάρκεια του Calibration.Η συλλογή αυτών των 2 παραμέτρων αποσκοπεί κυρίως στη διόρθωση του lens distortion αλλά και στη γνώση της γεωμετρίας της κάμερας. Εσωτερικό χαρακτηριστικό της κάμερας θωρείται ακόμη το skew coefficient, το οποίο προσδιορίζει τη γωνία μεταξύ των x και y αξόνων των pixels. Ο τρόπος αναπαράστασής της είναι μέσω μίας κλιμακωτής τιμής.

4.3 Lens Distortion

Το Camera Calibration εφαρμόζεται με σκοπό να διορθώσει οποιεσδήποτε διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα του απλού Pinhole Camera Model, τα οποία προκαλούνται από τη χρήση του φακού. Υπάρχουν 2 βασικές μορφές αλλοιώσεων που μπορεί να προκύψουν. Η $1^{η}$ μορφή αλλοίωσης είναι το **radial distortion**, το οποίο προκαλείται λόγω του σχήματος του φακού, ενώ η $2^{η}$ μορφή αλλοίωσης είναι το **tangential distortion** που προκαλείται από ατέλειες κατασκευής στη διαδικασία συνένωσης των συστατικών μερών της κάμερας.

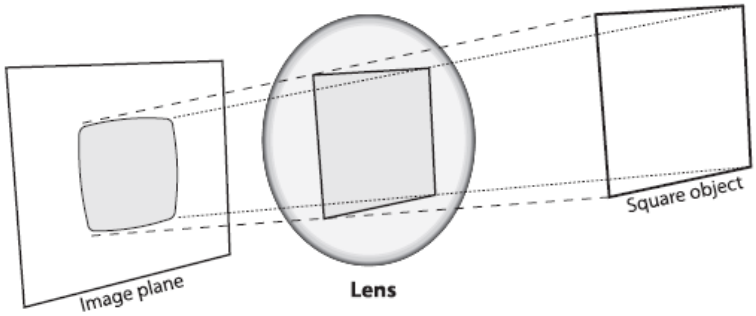
Το radial distortion εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα που έχει η κάμερα. Συνήθως στις κάμερες χαμηλού κόστους, η εγκυρότητα του αποτελέσματος μειώνεται από το κέντρο της κάμερας προς τα άκρα, όσο αυξάνεται το lens distortion, προκαλώντας αλλαγές στην πραγματική τοποθεσία των pixels. Οι αλλοιώσεις φαίνονται καθαρά στις πιο κάτω εικόνες:



Σχήμα 4.4: Ανάλογα με την αλλοίωση που υφίσταται μία εικόνα λόγω του lens distortion, μπορεί να πάρει τις εξής μορφές: a) barrel distortion, b)pincushion distortion, c) moustache distortion(σε πολύ ειδικές περιπτώσεις)

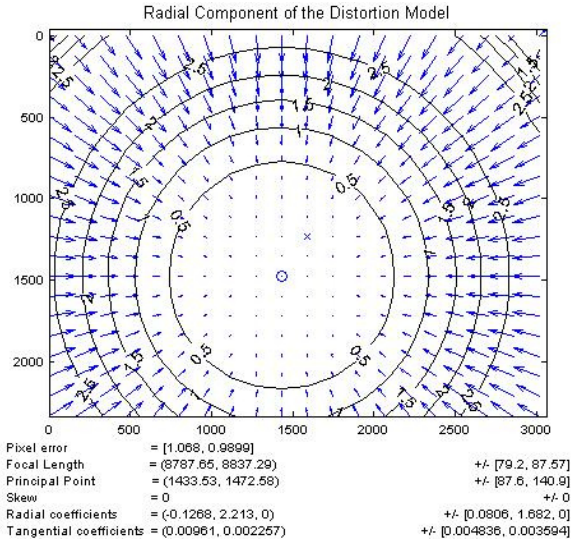
Πιο συγκεκριμένα, μερικοί φακοί είναι κατασκευασμένοι με τέτοιο τρόπο, που οι ακτίνες οι οποίες περνούν διαμέσου του φακού στα άκρα του, έχουν την τάση να γίνονται πιο καμπυλωτές από αυτές που διαπερνούν το φακό στο κέντρο(βλ. **Σχήμα 4.4**). Αυτό συμβαίνει γιατί ένας τυπικός φακός στα άκρα τείνει να είναι πιο δυνατός απ' όσο θα έπρεπε. Όσο κινούμαστε προς τα άκρα το πάχος του φακού μειώνεται. Έτσι, η αλλοίωση στο κέντρο της απεικόνισης ισούται με μηδέν, ενώ όσο μετακινούμαστε προς την περιφέρεια αυξάνεται.

Στο πιο κάτω σχήμα γίνεται περισσότερο εμφανής ο λόγος για τον οποίο δημιουργείται το radial distortion.



Σχήμα 4.5: Οι ακτίνες οι οποίες διαπερνούν το φακό στα άκρα έχουν την τάση να καμπυλώνουν περισσότερο από αυτές που διαπερνούν το φακό στο κέντρο, με αποτέλεσμα οι γωνίες ενός τετράγωνου αντικειμένου να φαίνονται πιο κυρτές πάνω στο επίπεδο της εικόνας.

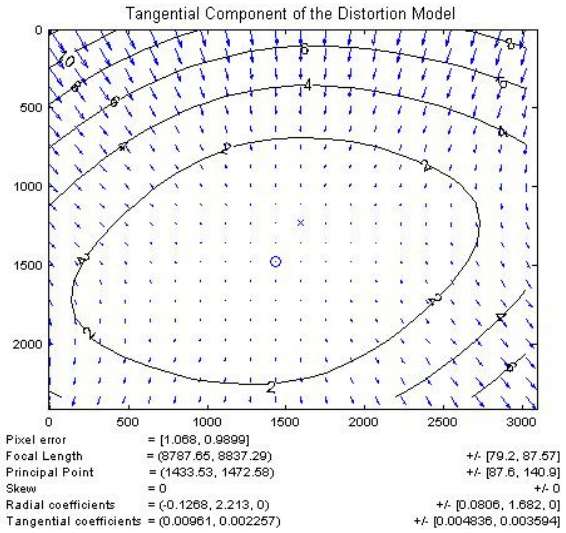
Η αλλοίωση που προκαλεί το radial distortion σε μία απεικόνιση για κάποιο συγκεκριμένο φακό είναι η εξής:



Σχήμα 4.6 Αναπαράσταση του Radial Distortion που έχει προκληθεί από κάποιο συγκεκριμένο φακό.

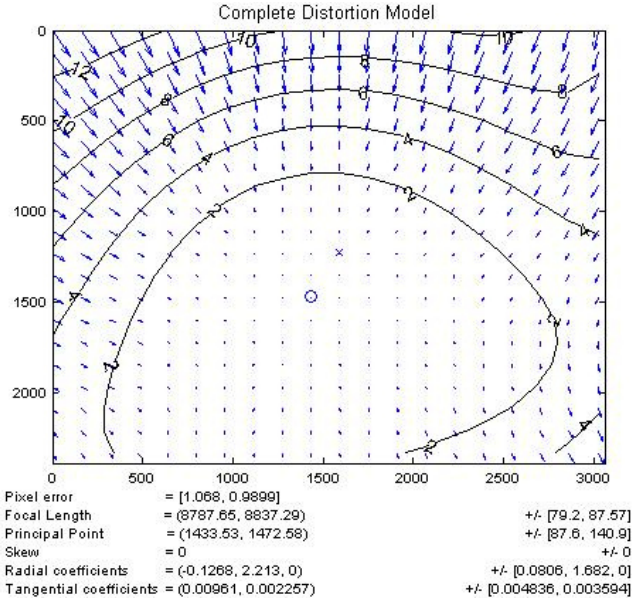
Το tangential distortion είναι μία αλλοίωση που προκαλείται από κατασκευαστικές ατέλειες οι οποίες προκύπτουν από το γεγονός ότι ο φακός της κάμερας δεν είναι ακριβώς παράλληλος με το επίπεδο της προβολής. Ο συμβολισμός που δίνεται για την αλλοίωση αυτή είναι το p1,p2. Ως αποτέλεσμα αυτής της αλλοίωσης προκύπτει η μετατόπιση των σημείων με ελλειπτικό τρόπο ως μία συνάρτηση της τοποθεσίας τους και της ακτίνας.

Μπορούμε να διακρίνουμε την αλλοίωση που προκαλεί το tangential distortion στο **Σχήμα 4.6** .



Σχήμα 4.6 : Αναπαράσταση του Tangential Distortion που προκαλείται από κάποιο συγκεκριμένο φακό.

Η αναπαράσταση του γενικού distortion είναι ένα vector το οποίο περιέχει και τους 5 πιο πάνω συντελεστές αλλοίωσης με την ακόλουθη σειρά: [k1 k2 p1 p2 k3]. Μία αναπαράσταση του γενικού distortion φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



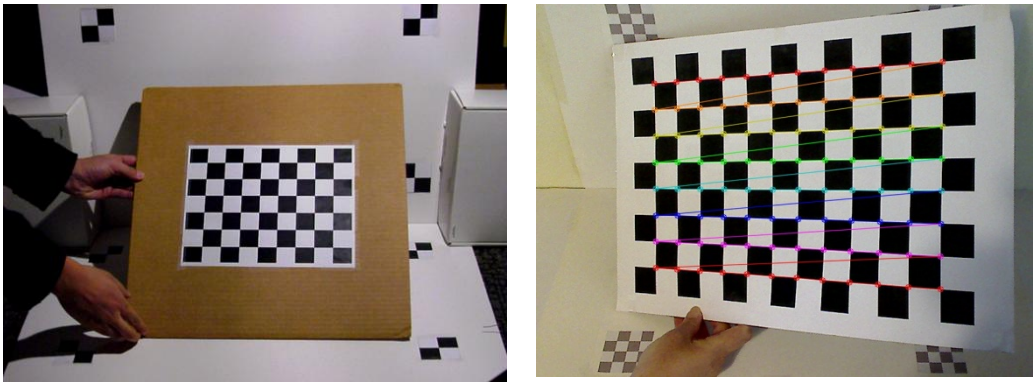
Σχήμα 4.7: Ολοκληρωμένο μοντέλο αλλοίωσης

Υπάρχουν πολλά άλλα είδη αλλοιώσεων που προκύπτουν στα συστήματα απεικόνισης, τα οποία όμως έχουν λιγότερες επιδράσεις από τα radial και tangential distortions, γι' αυτό και το calibration δεν ασχολείται περεταίρω με την ανεύρεσή τους.

4.4 Camera Setup Calibration

Για την επιτυχή εκτέλεση της διαδικασίας του Calibration θα πρέπει αρχικά να δημιουργηθεί μία διάταξη που θα περιλαμβάνει μία κάμερα υψηλής ποιότητας η οποία να βρίσκεται σε σταθερή θέση. Γίνεται επίσης χρήση ενός γνωστού μοτίβου, πιο συγκεκριμένα ενός checkerboard picture το οποίο θα αποτελεί κάθε φορά το αντικείμενο προς εντοπισμό. Το checkerboard είναι ένα επίπεδο αντικείμενο το οποίο περιέχει ένα μοτίβο από εναλλασσόμενα μαύρα και άσπρα τετράγωνα. Αυτο γίνεται γιατί η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιεί το calibration είναι ο εντοπισμός μίας γνωστής δομής η οποία να έχει πολλά ατομικά και ευδιάκριτα σημεία. Θεωρητικά οποιοδήποτε αντικείμενο που είναι εύκολο να χαρακτηρισθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά γίνεται επιλογή του checkerboard για λόγους απλότητας. Επίσης η δομή αυτή μας εγγυάται τον ακριβή εντοπισμό κάποιας εσωτερικής γωνίας, λόγω της μεγάλης αντίθεσης μεταξύ των εναλλασσόμενων μαύρων και άσπρων τετραγώνων.

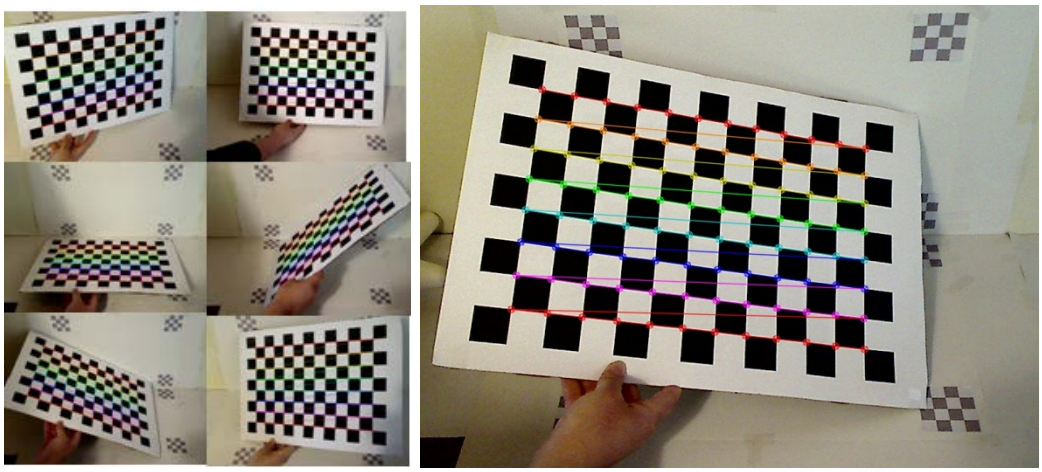
Δεδομένου ότι η κάμερα παραμένει σε σταθερή θέση, έχοντας μία εικόνα του chessboard και ένα απλό φόντο(συνήθως το φόντο είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία του scanning), μπορούν να εντοπιστούν οι εσωτερικές γωνίες ενός chessboard(βλ. **Σχήμα 4.8**), οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία του camera calibration για τον εντοπισμό των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας. Απαραίτητο στοιχείο που θα πρέπει να είναι γνωστό πριν τη διαδικασία εντοπισμού είναι το μέγεθος του μοτίβου. Εφόσον είναι γνωστός ο αριθμός των τετραγώνων σε κάθε διάσταση, οριζόντια και κάθετα στο μοτίβο, θα μπορούν να ανιχνευθούν επιτυχώς οι εσωτερικές γωνίες.



Σχήμα 4.8 Εφαρμογή του Calibration για εξαγωγή των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας.

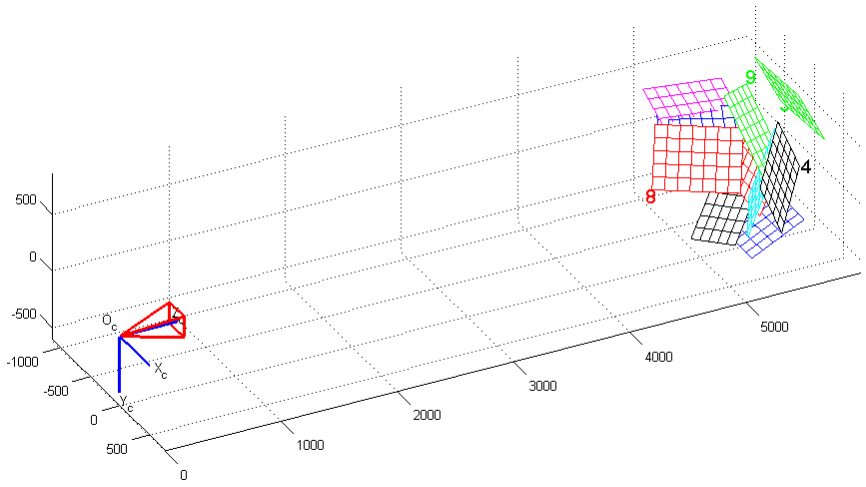
Οι τιμές των εσωτερικών γωνιών επιστρέφονται σε pixels, δηλαδή στη φυσική μονάδα μέτρησης της κάμερας. Όμως,επειδή η διαδικασία του Calibration απαιτεί εισαγωγή της ακριβούς τοποθεσίας των τιμών αυτών και όχι απλά μίας προσέγγισης της τοποθεσίας αυτής, θα πρέπει να προηγηθεί μία διαδικασία επανεξέτασης των τιμών των γωνιών για τον καθορισμό ακριβέστερων αποτελεσμάτων. Η μέθοδος που εφαρμόζεται είναι αυτή του Sub pixel Accuracy όπου γίνεται υπολογισμός της τοποθεσίας με ακρίβεια μεγαλύτερη του ενός pixel.

Βλέποντας αυτή τη δομή από διαφορετικές οπτικές γωνίες(βλ. **Σχήμα 4.9**), είναι δυνατόν να υπολογιστεί η σχετική τοποθεσία και ο προσανατολισμός της κάμερας για κάθε εικόνα, καθώς επίσης και τα εσωτερικά χαρακτηριστικά της κάμερας. Για τη λήψη πολλαπλών όψεων από διαφορετικές οπτικές γωνίες, θα πρέπει το αντικείμενο να περιστρέφεται και να μετακινείται γραμμικά στο χώρο. Επίσης θα πρέπει να καλύπτει όλο το φάσμα της φωτογραφίας για να μπορεί να υπολογιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η αλλοίωση που προκαλείται στα άκρα.



Σχήμα 4.9 : *Λήψη ενός αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες*

Οι εικόνες ενός αντικειμένου το οποίο προβάλλεται από πολλές διαφορετικές όψεις μπορούν να παρέχουν επαρκείς πληροφορίες για τον ακριβή εντοπισμό των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας και για τον ακριβή εντοπισμό των αντικειμένων στο χώρο, σε σχέση με την κάμερα.

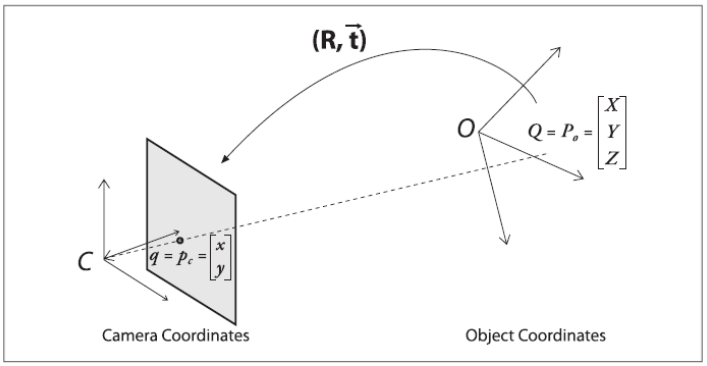


Σχήμα 4.10 *Η θέση της κάμερας στον πραγματικό, τρισδιάστατο χώρο και η θέση των αντικειμένων στο χώρο σε σχέση με τις συντεταγμένες της κάμερας.*

4.5 Extrinsic Parameters

Τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την τοποθεσία και τον προσανατολισμό της κάμερας στο σύστημα συντεταγμένων της σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων του χώρου, ορίζονται ως οι εξωτερικές παραμέτροι της κάμερας. Για κάθε εικόνα που λαμβάνει η κάμερα για μία συγκεκριμένη όψη ενός αντικειμένου, μπορεί να περιγραφεί η θέση του αντικειμένου στο χώρο σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της κάμερας ως μία μετάφραση περιστροφής και γραμμικής μετατόπισης στο χώρο.

Συγκεκριμένα, για να γίνει μετατροπή των συντεταγμένων του αντικειμένου σε συντεταγμένες της κάμερας, κάποιο 2D σημείο p του σημείου προβολής μπορεί να περιγραφεί ως προς το αντίστοιχο του σημείο P στο χώρο, αναπαριστώντας το σημείο P ως έναν πίνακα περιστροφής R και ένα μονοδιάστατο πίνακα γραμμικής μετατόπισης t του σημείου P.



Σχήμα 4.11 Η αναπαράσταση του σημείου p ως προς το αντίστοιχο του σημείο P στο χώρο μπορεί να περιγραφεί ως μία μετάφραση του σημείου P ως προς την περιστροφή του και τη γραμμική του μετατόπιση στο χώρο.

Σε οποιεσδήποτε διαστάσεις, μία περιστροφή μπορεί να περιγραφεί ως ένας πολλαπλασιασμός ενός μονοδιάστατου πίνακα των συντεταγμένων του σημείου, με ένα τετραγωνικό πίνακα των ίδιων διαστάσεων. Ουσιαστικά, μία περιστροφή ισοδυναμεί με την περιγραφή της τοποθεσίας ενός σημείου σε κάποιο διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων.

Η περιστροφή σε 3 διαστάσεις μπορεί να περιγραφεί ως μία 2D περιστροφή γύρω από κάθε άξονα Rx, Ry, Rz. Αν περιστραφεί δηλαδή, το σύστημα συντεταγμένων στους άξονες X,Y και Z κατά μία γωνία ψ, φ και θ αντίστοιχα, το αποτέλεσμα της περιστροφής σε τρισδιάστατη μορφή προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των τριών πινάκων περιστροφής. Οι 3 πίνακες περιστροφής έχουν την εξής μορφή:

$$R_y(\varphi)=\begin{bmatrix}\cos\varphi & 0 & -\sin\varphi\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\varphi & 0 & \cos\varphi\end{bmatrix} \quad R_x(\psi)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\psi & \sin\psi\\ 0 & -\sin\psi & \cos\psi\end{bmatrix} \quad R_z(\theta)=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta & 0\\ -\sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

Πολλαπλασιάζοντας τους 3 αυτούς πίνακες, δίνεται ο τελικός πίνακας περιστροφής που αντιστοιχεί σε περιστροφή στις 3 διαστάσεις. Επομένως, μία 3D περιστροφή είναι σε θέση να περιγραφεί γνωρίζοντας τις 3 γωνίες για την περιστροφή γύρω από κάθε άξονα X,Y,Z.
Ο πίνακας γραμμικής μετατόπισης ή αλλιώς translation vector, αποτελεί μία αναπαράσταση γραμμικής μετατόπισης από ένα σύστημα συντεταγμένων σε κάποιο άλλο, στο οποίο το αρχικό σημείο έχει μετατοπιστεί. Περιγράφει δηλαδή τη διαφορά της απόστασης μεταξύ του κεντρικού σημείου του ενός συστήματος συντεταγμένων από το κεντρικό σημείο του 2^{ου} συστήματος συντεταγμένων.

Η διαδικασία εξαγωγής των εξωτερικών παραμέτρων χρησιμοποιά το translation vector για να εξάγει τη μετατόπιση μεταξύ 2 διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων, αυτό που έχει ως κέντρο το αντικείμενο και αυτό που έχει ως κέντρο την κάμερα. Δηλαδή βασικός στόχος είναι να υπολογίσει τη μετατόπιση μεταξύ του κεντρικού σημείου (origin) του αντικειμένου και του κεντρικού σημείου της κάμερας. Επομένως, ένα σημείο στο σύστημα των συντεταγμένων του αντικειμένου, έστω Po έχει συντεταγμένες Pc στις συντεταγμένες της κάμερας.

Η εξίσωση που περιγράφει τη μετατόπιση αυτή είναι η ακόλουθη:

$$P_c = RP_o + T$$

Δηλαδή ένα σημείο στις συντεταγμένες της κάμερας αποτελεί την αναπαράσταση ενός πίνακα περιστροφής R επί τη μετατόπιση του τρισδιάστατου σημείου από το κεντρικό σημείο του αντικειμένου. Η αναπαράσταση αυτή μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια τριών παραμέτρων(x,y,z).

Το βασικό σύστημα εξισώσεων που θα πρέπει να επιλυθεί , αποτελεί συνδυασμό της πιο πάνω εξίσωσης που περιγράφει τις εξωτερικές παραμέτρους, με την εξίσωση που περιγράφει τις εσωτερικές παραμέτρους. Έτσι έχουμε ότι:

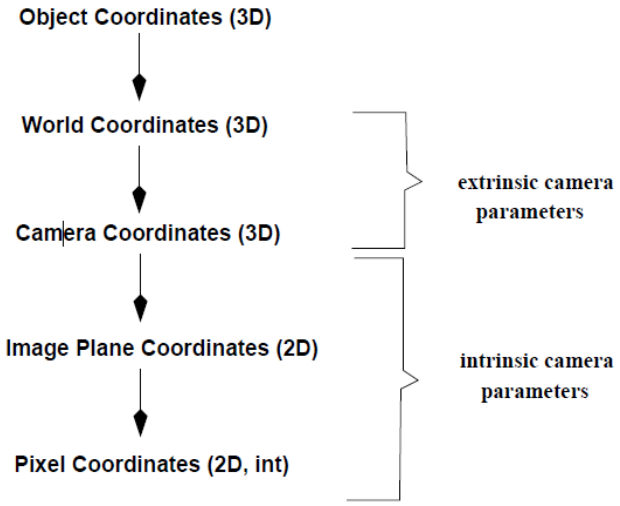
$$s\ m' = A[R|t]M'$$

Ή πιο αναλυτικά:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Η συσχέτιση των 3D σημείων και των 2D προβολών τους μπορεί να θεωρηθεί ως ένας γραμμικός μετασχηματισμός μεταξύ του χώρου προβολής [X Y Z 1] και του επιπέδου προβολής [u v w]. Το A αναπαριστά τον πίνακα εσωτερικών παραμέτρων, το R αναπαριστά το rotation matrix, ενώ το t αναπαριστά το translation Vector. Το s αποτελεί το scale.

Εφόσον για κάποιο αντικείμενο έχουν εξαχθεί οι εσωτερικές παραμέτροι της κάμερας, οι οποίες δεν αλλοιώνονται μεταξύ των διαφορετικών όψεων, θα πρέπει για κάθε όψη να εντοπιστούν επιπρόσθετα οι 3 γωνίες που χαρακτηρίζουν την περιστροφή στον τρισδιάστατο χώρο καθώς και οι 3 παραμέτροι για την αναπαράσταση της 3D μετατόπισης στο χώρο μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων.



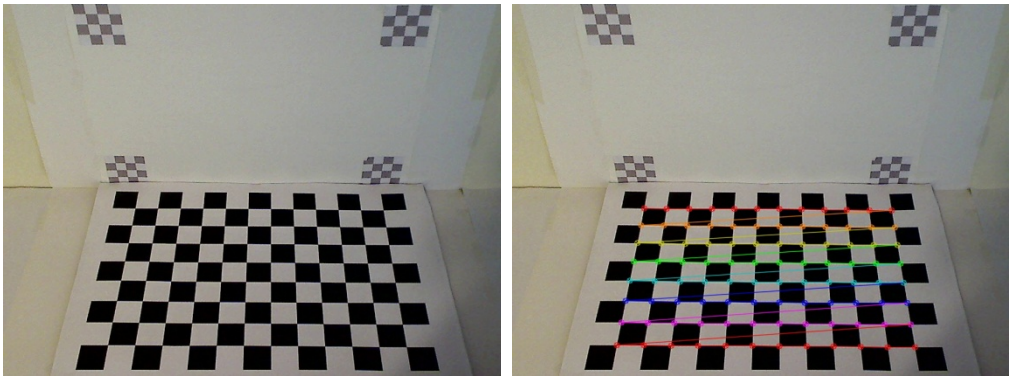
Σχήμα 4.12: Συσχέτιση των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας με τις συντεταγμένες στις οποίες εφαρμόζονται.

Μια πιο εμφανής σύνδεση των εσωτερικών και εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα. Οι εσωτερικές παραμέτροι είναι απαραίτητες για τη διασύνδεση του συστήματος συντεταγμένων μίας εικόνας η οποία δίνεται σε pixel, με τις αντίστοιχες 3D συντεταγμένες του συστήματος αναφοράς της κάμερας. Οι εξωτερικές παραμέτροι στοχεύουν στον προσδιορισμό της τοποθεσίας και προσανατολισμού της κάμερας στο σύστημα των συντεταγμένων της, ως προς το σύστημα συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου.

4.6 Extrinsic Calibration

Εφόσον έχουν ανιχνευθεί επιτυχώς οι εσωτερικές παραμέτροι της κάμερας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση των εξωτερικών παραμέτρων της κάμερας, λόγω του ότι οι εσωτερικές παραμέτροι μένουν οι ίδιες μεταξύ των διαφορετικών όψεων των αντικειμένων. Παρόλα αυτά, οι εξωτερικές παράμετροι της κάμερας κατά την αρχική διαδικασία του Calibration δε χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, απλά εξάγονται για τον υπολογισμό των εσωτερικών παραμέτρων οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε αυτό το στάδιο.

Στόχος της εύρεσης των εξωτερικών παραμέτρων είναι η ανάκτηση της τοποθεσίας του οριζόντιου επιπέδου Π στον τρισδιάστατο χώρο, πάνω στο οποίο θα τοποθετηθούν τα αντικείμενα κατά τη διαδικασία του scanning. Για την ανίχνευση του επιπέδου στην εικόνα, αρχικά θα πρέπει να τοποθετηθεί το επίπεδο chessboard πάνω σε αυτό.



Σχήμα 4.13: Ανίχνευση μόνο των εξωτερικών παραμέτρων χρησιμοποιώντας τις εσωτερικές παραμέτρους.

Έπειτα γίνεται χρήση των εσωτερικών παραμέτρων που είχαν υπολογιστεί αρχικά, με στόχο την εύρεση μόνο των εξωτερικών παραμέτρων. Λαμβάνοντας μία μόνο όψη του αντικειμένου δεν είναι κανείς σε θέση να υπολογίσει ορθά τις εσωτερικές παραμέτρους και πιο συγκεκριμένα το principal point, το οποίο σε αυτή την περίπτωση θεωρεί ότι είναι το κέντρο της εικόνας το οποίο τέμνεται με τον οπτικό άξονα.Γι’ αυτό και γίνεται χρήση εσωτερικών παραμέτρων οι οποίες έχουν προκύψει βάσει πολλαπλών όψεων του αντικειμένου, οι οποίες είναι απόλυτα ακριβείς.

Η εύρεση των εξωτερικών παραμέτρων της συγκεκριμένης όψης, δίνει ως αποτέλεσμα ένα μονοδιάστατο πίνακα w ο οποίος περιγράφει το επίπεδο Πhorizontal στις συντεταγμένες του χώρου. Το επίπεδο αυτό είναι κάθετο στο επίπεδο Πvertical, του οποίου ο πίνακας περιγραφής μπορεί να εξαχθεί μέσω του πρώτου. Η γνώση της τοποθεσίας αυτών των δύο επιπέδων στο χώρο είναι απαραίτητη για τη μετέπειτα διαδικασία του scanning.

Κεφάλαιο 5

Scanning

5.1Εισαγωγή 41
5.2 Γενική Μεθοδολογία 42
5.3 Περιγραφή Μεθόδου 43
5.4 Spatial and Temporal Light Edge Localization 48
5.5 Spatial light Edge Localization 49
5.6 Temporal Light Edge Localization 52
5.7 Laser Plane Estimation Π(t) 56

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί μία τεχνική η οποία έχει ως στόχο τη σάρωση απλών αντικειμένων για την απόκτηση του τρισδιάστατου σχήματός τους. Η απόκτηση του 3D σχήματος ενός αντικειμένου επιτυγχάνεται μέσω Active/Passive sensor τεχνολογιών και πιο συγκεκριμένα γίνεται χρήση ενός line laser. Για τις ανάγκες της τεχνικής αυτής δημιουργείται ένα απλό και χαμηλό σε κόστος scanner, το οποίο αν και απλό, είναι σε θέση να δώσει έγκυρα και ακριβή αποτελέσματα.

Στη συνέχεια περιγράφεται η γενική διάταξη που έχει δημιουργηθεί και έπειτα ακολουθεί αναλυτική επεξήγηση της μεθόδου που χρησιμοποιείται.

5.2 Γενική Μεθοδολογία

Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής δεν έχει πολλές απαιτήσεις σε hardware, αφού τα βασικά αντικείμενα που απαιτούνται είναι, εκτός από την κάμερα, το line laser και ένα επίπεδο checkerboard για τη διαδικασία του calibration.
Ακολουθεί η μορφή της γενικής διάταξης όπως διαφαίνεται στις πιο κάτω εικόνες:

(a)

(b)

Σχήμα 5.1 General Setup: Η γενική διάταξη την οποία χρησιμοποιεί αυτή η μέθοδος (α) και (β) τα 2 κάθετα πλάνα που ορίζουν τη γνωστή τοποθεσία στο χώρο μέσω των markers (μικρά checkerboards) και η τοποθέτηση των αντικειμένων που θα σαρωθούν πάνω στο οριζόντιο επίπεδο.

Το αντικείμενο το οποίο πρόκειται να «σαρωθεί», τοποθετείται πάνω σε μία διάταξη η οποία αποτελείται από ένα οριζόντιο και ένα κάθετο πλάνο τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους, σχηματίζουν δηλαδή γωνία 90° ακριβώς. Το αντικείμενο θα πρέπει να τοποθετηθεί στο κέντρο του οριζόντιου επιπέδου και θα πρέπει να διακρίνεται από το φόντο, γι' αυτό και τα πλάνα που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να είναι ουδέτερου χρώματος (λευκά) για να μην επηρεάζεται η όλη διαδικασία. Το οριζόντιο και κάθετο πλάνο ορίζουν το «γνωστό» χώρο της διάταξης στον οποίο θα εφαρμοστεί η διαδικασία του scanning, και γι' αυτό περιέχουν συγκεκριμένα markers (βλ.Σχήμα 5.1(β)). Τα markers αυτά εντοπίζονται στην αρχή της διαδικασίας της σάρωσης και αποτελούν σημεία αναφοράς για την υλοποίηση της υπόλοιπης διαδικασίας. Η κάμερα που χρησιμοποιείται είναι μία απλή webcam η οποία βρίσκεται σε σταθερή θέση(πάνω σε ένα tripod) μπροστά από τη σκηνή (βλ. Σχήμα 5.1 (α)) καθόλη τη διάρκεια της διαδικασίας, από το calibration μέχρι και το

τέλος της διαδικασίας του scanning. Οι εικόνες που λαμβάνει περιέχουν τη σκηνή μαζί με το αντικείμενο το οποίο φωτίζεται από τις ακτίνες του laser.

Όσον αφορά το αντικείμενο που θα χρησιμοποιηθεί, αυτό θα πρέπει να είναι μέτριου μεγέθους ενώ θα πρέπει να έχει ανοικτόχρωμη επιφάνεια χωρίς πολλές χρωματικές διαφοροποιήσεις. Συνήθως γίνεται χρήση λευκών ή ανοικτόχρωμων αντικειμένων τα οποία διευκολύνουν τον εντοπισμό της φωτεινής ακτίνας (ή της δομημένης σκιάς) στην επιφάνειά τους. Θα πρέπει επίσης να ληφθουν υπόψην οι ανακλαστικές ιδιότητες του αντικειμένου, δηλαδή το αντικείμενο δεν θα πρέπει να απορροφά την ακτίνα φωτός (να μην είναι διαφανές) αλλά ούτε και να την αντανακλά σε μεγάλο βαθμό. Σημαντικός παράγοντας επίσης θεωρείται η ομαλότητα της επιφάνειας ενός αντικειμένου. Χρησιμοποιούνται συνήθως αντικείμενα τα οποία δεν έχουν self-occlusions (εμφράξεις), απότομες αλλαγές ή κάποια ασυνέχεια στο σχήμα τους, αλλά τείνουν να έχουν πιο κυρτή και ομαλή επιφάνεια.
Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας γίνεται χρήση ενός αγάλματος, δύο αντικειμένων από πολυστερίνη και ενός ανοιχτόχρωμου κοχυλιού.

5.3 Περιγραφή Μεθόδου

Στην πιο κάτω εικόνα φαίνεται η χρήση του laser line για τη μέθοδο του scanning:

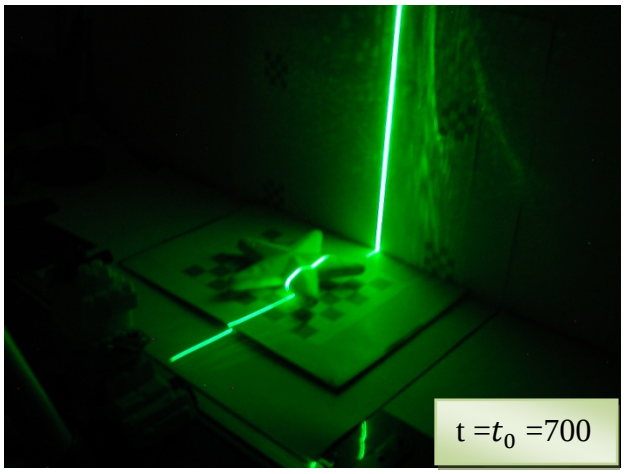
Σχήμα 5.2: Η γενική μέθοδος scanning ενός αντικειμένου

Εφόσον πραγματοποιηθεί η διαδικασία του calibration η οποία έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθεί η διαδικασία του scanning. Το αντικείμενο

τοποθετείται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο της διάταξης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2. Όταν κάποιος μετακινεί το laser μπροστά από την κάμερα και πάνω στο αντικείμενο, δημιουργείται μία ακτίνα φωτός η οποία κινείται κατά μήκος της επιφάνειας του αντικειμένου. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η σάρωση της σκηνής στα όρια της περιοχής του χώρου που θεωρείται γνωστή από το πρόγραμμα. Η κάμερα λαμβάνει μία ακολουθία εικόνων I(x,y,t) (όπου x,y το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας και t η συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή ο αύξων αριθμός του frame) που περιέχουν την παραμορφωμένη ακτίνα(βλ. Σχήμα 5.3), και οι εικόνες αυτές εισάγονται στο πρόγραμμα με στόχο την απόκτηση της τρισδιάστατης μορφής του αντικειμένου.

Το τρισδιάστατο σχήμα του αντικειμένου και της σκηνής γενικότερα μπορεί να αναδομηθεί χρησιμοποιώντας τις χωρικές(spatial) και χρονικές(temporal) ιδιότητες του ορίου της ακτίνας φωτός που προσπίπτει στο αντικείμενο την κάθε χρονική στιγμή. Γίνεταί δηλαδή ένας χωρικός και χρονικός προσδιορισμός της τοποθεσίας της φωτεινής ακτίνας η οποία «σαρώνει» το αντικείμενο.

Ένα παράδειγμα του τρόπου λειτουργίας της διαδικασίας του scanning διαφαίνεται στην πιο κάτω εικόνα:



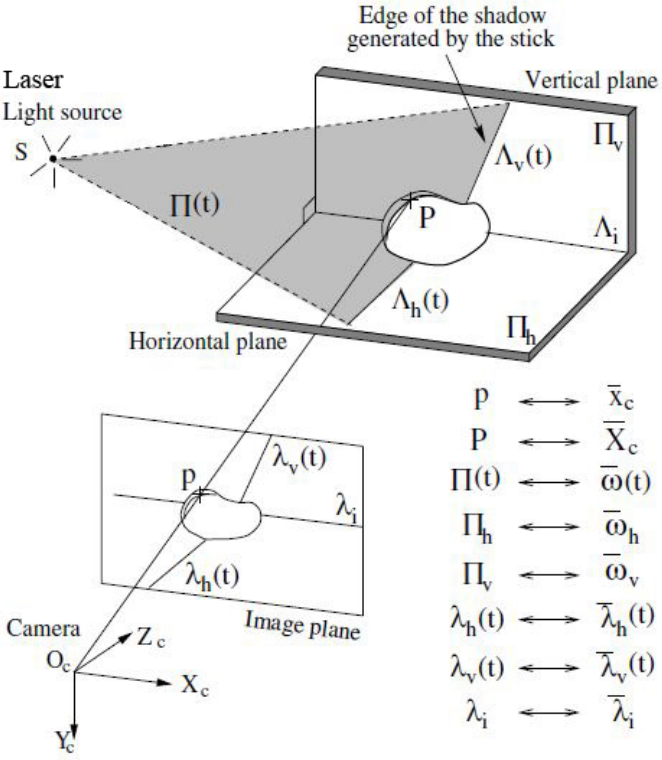
Σχήμα 5.3: Η εικόνα αυτή δείχνει τα δεδομένα ενός frame που εισάγονται ως εισόδοι στο σύστημα για κάποια δεδομένη χρονική στιγμή t(αριθμός frame).

Συνοπτικά, τα βασικά βήματα τα οποία θα πρέπει να ακολουθηθούν για την ολοκλήρωση της διαδικασίας σάρωσης είναι τα εξής:

1. Εντοπισμός των γραμμών αναφοράς λh(t) και λv(t) (βλ. **Σχήμα 5.4**)σε συντεταγμένες εικόνας για την κάθε χρονική στιγμή t. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται spatial processing (χωρική επεξεργασία) και αναλύεται στο **Υποκεφάλαιο 5.5**.
2. Έπειτα θα πρέπει να γίνει υπολογισμός του χρόνου στον οποίο η ακτίνα του laser διαπερνά το κάθε pixel στην εικόνα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται temporal processing (χρονική επεξεργασία) και αναλύεται στο **Υποκεφάλαιο 5.6** .
3. Υπολογισμός του πλάνου Π(t) που δημιουργεί η ακτίνα του laser σε κάθε χρονική στιγμή την κάθε χρονική στιγμή t. Η διαδικασία αναλύεται στο **Υποκεφάλαιο 5.7.**
4. Εφαρμογή της μεθόδου triangulation για τον υπολογισμό του βάθους των σημείων. Η διαδικασία αναλύεται στο **Κεφάλαιο 6**.

Τελικός στόχος είναι να εξαχθεί το βάθος των σημείων του αντικειμένου για το κάθε σημείο της εικόνας.

Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική επεξήγηση των γεωμετρικών αρχών στις οποίες βασίζεται η διαδικασία σάρωσης καθώς και η γενική προσέγγιση της διαδικασίας.

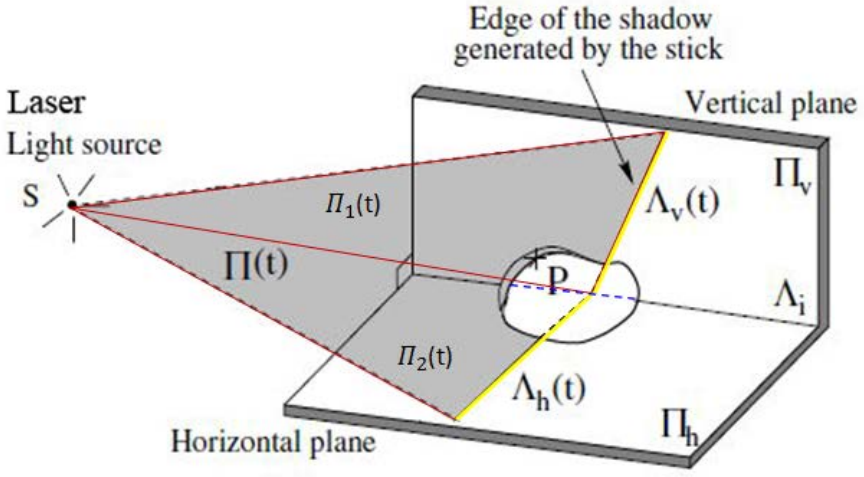


Σχήμα 5.4: Οι αρχές της γεωμετρίας στις οποίες βασίζεται η τεχνική σάρωσης [17].

Το **Σχήμα 5.4** δείχνει την τυπική διάταξη της διαδικασίας. Περιγράφει με απλό τρόπο τις γεωμετρικές αρχές στις οποίες βασίζεται η μέθοδος αυτή καθώς και τη συσχέτιση του συστήματος συντεταγμένων του χώρου σε σχέση με το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας και την αναπαράσταση των διαφόρων παραμέτρων.

Το σημείο P ορίζεται ως ένα τυχαίο σημείο πάνω στο αντικείμενο το οποίο βρίσκεται στον τρισδιάστατο χώρο ενώ το σημείο p ορίζει το αντίστοιχο σημείο του αντικειμένου σε συντεταγμένες εικόνας. Το κέντρο της κάμερας ή αλλιώς το κέντρο προβολής απεικονίζεται με το σημείο Q_c. Το Π_v ορίζεται ως το κάθετο πλάνο και το Π_h το οριζόντιο πλάνο, τα οποία σχηματίζουν μεταξύ τους ορθή γωνία. Η γραμμή που διαχωρίζει τα 2 πλάνα στον πραγματικό κόσμο απεικονίζεται ως η Λ_i ενώ σε συντεταγμένες κάμερας ορίζεται ως η λ_i.

Το κινούμενο σημείο που αντιπροσωπεύει το laser (σημείο S) καθώς και η ακτίνα η οποία προσπίπτει στο αντικείμενο, προσδιορίζουν για κάθε χρονική στιγμή ένα πλάνο. Το πλάνο αυτό διαφαίνεται στο Σχήμα 5.4 ως η σκιασμένη περιοχή Π(t). Επομένως, το όριο της ακτίνας του laser που προσπίπτει πάνω στο αντικείμενο, ορίζεται ως η τομή του πλάνου αυτού με την επιφάνεια του αντικειμένου. Η γνώση αυτής της γεωμετρίας αποτελεί το βασικό δεδομένο στο οποίο στηρίζεται η όλη διαδικασία.



Σχήμα 5.5: Το πλάνο Π(t) χωρίζεται από τη διαχωριστική γραμμή Λ_i σε 2 άλλα πλάνα Π_1(t) και Π_2(t) τα οποία τέμνονται με το κάθετο και οριζόντιο πλάνο, σχηματίζοντας τις 2 γραμμές Λ_v(t) και Λ_h(t) αντίστοιχα.

Καθώς η ακτίνα του laser προσπίπτει στη σκηνή, η διαχωριστική γραμμή του οριζόντιου και κάθετου πλάνου Λ_i χωρίζει το πλάνο του laser σε 2 μέρη(βλ. Σχήμα 5.5). Το πρώτο μέρος είναι το πλάνο που προσπίπτει στο κάθετο επίπεδο της διάταξης και η τομή του με αυτό προσδιορίζει μία γραμμή Λν(t) η οποία αντιπροσωπεύει τα όρια της ακτίνας στο κάθετο επίπεδο. Παρόμοια, η τομή του πλάνου με το οριζόντιο επίπεδο προσδιορίζει το άκρο της ακτίνας Λh(t) για το οριζόντιο επίπεδο. Οι αντίστοιχες απεικονίσεις σε συντεταγμένες εικόνας είναι το λν(t) και λh(t), για το κάθετο και οριζόντιο επίπεδο αντίστοιχα (βλ.Σχήμα 5.4).

Η τοποθεσία του πλάνου Πh στο σύστημα συντεταγμένων της κάμερας γίνεται γνωστή μέσω της διαδικασίας του extrinsic calibration. Η τοποθεσία του πλάνου Πν στην εικόνα μπορεί να εξαχθεί εφόσον γνωρίζουμε τη γραμμή λi (βλ. Σχήμα 5.4), η οποία είναι η προβολή της γραμμής Λi που αποτελεί την τομή των δύο πλάνων Πh και Πν. Έτσι ορίζεται μία αντιστοιχία συντεταγμένων η οποία θα βοηθήσει στην αντιστοίχιση της θέσης ενός τρισδιάστατου σημείου στο χώρο σε σχέση με το αντίστοιχο pixel στην εικόνα της κάμερας.

Έστω ότι t είναι ο χρόνος στον οποίο το όριο της ακτίνας διαπερνά ένα συγκεκριμένο pixel p (χρόνος διάβασης από ένα σημείο ή crossing time). Επίσης δηλώνουμε το πλάνο Π(t) ως το αντίστοιχο πλάνο που σχηματίζει η ακτίνα τη συγκεκριμένη στιγμή t. Ακόμη υποθέτουμε τις γραμμές λh(t) και λν(t) οι οποίες αποτελούν την προβολή της τομής των δύο μερών του πλάνου της ακτίνας με τα δύο πλάνα Πh και Πν. Έχοντας αυτές τις γραμμές μπορεί να γίνει εξαγωγή της πραγματικής τοποθεσίας αυτών των δύο εικονικών γραμμών Λh(t) και Λν(t) στο χώρο, τέμνοντας τα πλάνα που σχηματίζονται από το κέντρο της κάμερας και τις δύο γραμμές που εμφανίζονται στο κάθε πλάνο ξεχωριστά με τα δύο πλάνα. Δηλαδή τέμνοντας τα πλάνα (Oc, λh(t)) και (Oc, λν(t)) με τα αντίστοιχα πλάνα Πh και Πν.

Τότε μπορεί να γίνει προσδιορισμός του πλάνου Π(t) με τη βοήθεια των δύο μη-παράλληλων γραμμών του χώρου Λh(t) και Λν(t). Το σημείο P το οποίο αντιπροσωπεύει κάποιο σημείο στον πραγματικό χώρο μπορεί να ανακτηθεί τέμνοντας το πλάνο Π(t) με την οπτική ακτίνα (Oc, p), δηλαδή την ευθεία που σχηματίζεται από το κέντρο της κάμερας και το αντίστοιχο σημείο p στην εικόνα της κάμερας.

Το τελικό αυτό στάδιο είναι η τεχνική του triangulation η οποία θα μελετηθεί στο επόμενο κεφάλαιο.Ακολουθεί αναλυτική επεξήγηση της μεθόδου που χρησιμοποιείται για την εύρεση των παραμέτρων λ_vi και λ_hi.

5.4 Spatial and Temporal Light Edge Localization

Για την ορθή ανίχνευση των γραμμών που σχηματίζει το πλάνο της ακτίνας που προσπίπτει στην εικόνα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα μοναδικό κριτήριο το οποίο θα μπορεί να περιγράφει ταυτόχρονα τα όρια της ακτίνας στο χώρο (σε συντεταγμένες εικόνας) και στο χρόνο, χωρίς να υπάρχουν συγκρούσεις μεταξύ των δύο αποτελεσμάτων. Επίσης απαιτείται μία μέθοδος η οποία να μην επηρεάζεται από αλλαγές στην αντανακλαστικότητα της επιφάνειας του αντικειμένου(albedo) ούτε αλλαγές στον προσανατολισμό της επιφάνειας του αντικειμένου.

Αυτή η απλή τεχνική που χρησιμοποιείται εδώ και η οποία ικανοποιά αυτή την ιδιότητα, είναι η λεγόμενη spatio-temporal thresholding. Γίνεται δηλαδή μία συλλογή στοιχείων βάσει κάποιου προκαθορισμένου threshold(που αφορά την κάθε τεχνική ξεχωριστά), σε συνάρτηση με το χώρο και το χρόνο.

Εφόσον λοιπόν έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς η συλλογή των εικόνων από τη διαδικασία του scanning, θα πρέπει να γίνει επεξεργασία των εικόνων εισόδου μέσω των δύο πιο κάτω βημάτων:

1. Προσδιορισμός του χρόνου στον οποίο η ακτίνα φωτός διαπερνά κάποιο συγκεκριμένο pixel στην εικόνα(temporal processing)
2. Προσδιορισμός της θέσης των ορίων της σκιάς σε συνάρτηση με το χρόνο, για κάθε frame που λαμβάνεται από την κάμερα(spatial processing).

Εφαρμόζεται δηλαδή μία χωρο-χρονική προσέγγιση ως μέθοδος ανίχνευσης. Και οι δύο τεχνικές αποσκοπούν στην εξαγωγή των ορίων της ακτίνας λv(t) και λh(t), για να μπορεί στη συνέχεια να γίνει εξαγωγή των πραγματικών γραμμών Λh(t) και Λv(t) στο χώρο, καθώς και εντοπισμός του πλάνου Π(t) που σχηματίζει το laser για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή t.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται επειδή θεωρείται ότι παράγει καλύτερα αποτελέσματα από άλλες μεθόδους ανίχνευσης γωνιών (όπως για παράδειγμα το Canny Edge Detector)

για το λόγο ότι διατηρεί τις απότομες ασυνέχειες στην επιφάνεια του αντικειμένου χωρίς να αλλοιώνει το σχήμα του αποτελέσματος σε αυτές τις περιοχές.

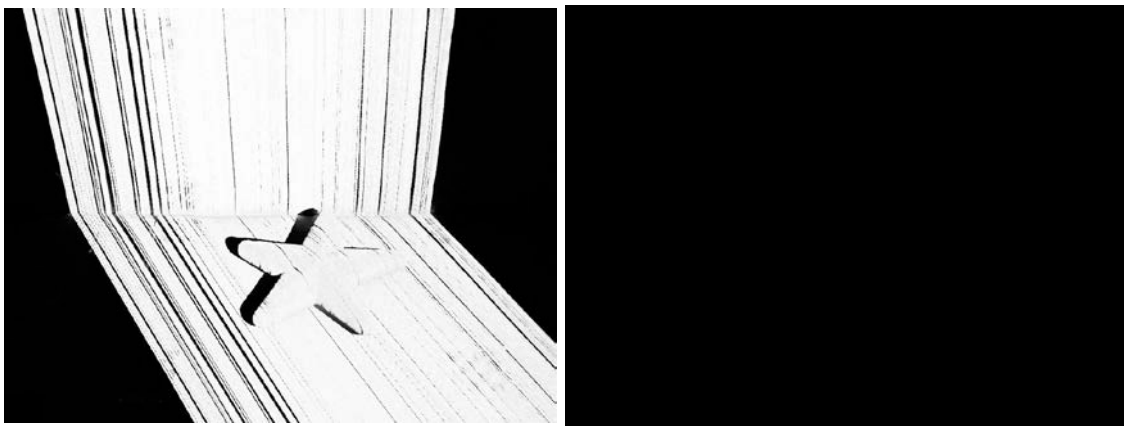
5.5 Spatial Light Edge Localization

Ο βασικός στόχος αυτού του σταδίου είναι η ανίχνευση των γραμμών της τομής του πλάνου Π(t) που σχηματίζει το laser με τα 2 πλάνα Πh και Πv. Μία απλή προσέγγιση για την εξαγωγή του λh(t) και του λv(h) μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον γνωρίζουμε ότι στο πάνω και στο κάτω μέρος της εικόνας που λαμβάνει η κάμερα υπάρχουν σειρές από pixel στα οποία δεν περιέχεται το αντικείμενο αλλά μόνο το φόντο, στο οποίο προσπίπτει η ακτίνα φωτός. Θα πρέπει τότε να εντοπιστούν τα άκρα της ακτίνας λ(h)t και λv(t) που προβάλλονται απευθείας πάνω στις περιοχές του κάθετου και οριζόντιου πλάνου στην εικόνα, για κάθε διακριτή χρονική στιγμή t (η οποία αντιστοιχεί σε κάθε frame).

Αρχικά θα πρέπει να εφαρμοστεί μία διαδικασία εξαγωγής μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης τιμής για κάθε pixel x_c με συγτεταγμένες (x,y), σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας του scanning, δηλαδή για όλες τις εικόνες της ακολουθίας. Η διαδικασία αυτή είναι βασισμένη στην ακόλουθη παρατήρηση: καθώς η ακτίνα του laser σαρώνει το αντικείμενο κατά μήκος της εικόνας, κάθε pixel (x,y) βλέπει τη φωτεινότητα του να αλλάζει από κάποια αρχική ελάχιστη τιμή I_{min} (x,y) (κατά την οποία δεν υπάρχει η ακτίνα ακόμη) να μετατρέπεται σε κάποια μέγιστη τιμή I_{max}(x,y), όταν η ακτίνα διαπερνά το συγκεκριμένο pixel (δηλαδή το pixel βρίσκεται εντός των ορίων της ακτίνας), και έπειτα ξανά πίσω στην αρχική του τιμή όταν η ακτίνα απομακρύνεται από το σημείο αυτό.

Οι πιο κάτω ισότητες περιγράφουν αυτή την συσχέτιση της τελικής εικόνας μεγίστων και ελαχίστων τιμών με τις παραμέτρους ενός frame για όλες τις χρονικές στιγμές t.

$$I_{\max}(x,y) \triangleq \max_t I(x,y,t) \qquad I_{\min}(x,y) \triangleq \min_t I(x,y,t)$$

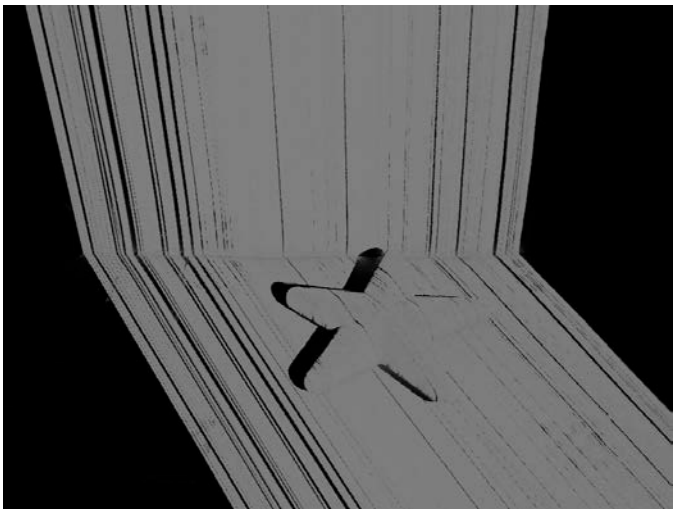


Σχήμα 5.8: Εύρεση της μέγιστης (αριστερά) και ελάχιστης (δεξιά) τιμής για κάθε pixel της εικόνας για όλη την ακολουθία των frames που έλαβε η κάμερα καθόλη τη διάρκεια του scanning.

Στη συνέχεια για την εξωγωγή των ορίων της ακτίνας που προσπίπτει στη σκηνή για κάθε frame, θα πρέπει να οριστεί μία light threshold εικόνα η οποία ορίζεται ως εξής:

$$I_{\text{shadow}}(x,y) \triangleq \frac{I_{\max}(x,y) + I_{\min}(x,y)}{2}.$$

Η εικόνα αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατώφλι (threshold) για το κάθε pixel της εικόνας, είναι δηλαδή ένας μέσος όρος της μέγιστης και ελάχιστης τιμής αυτού του σημείου. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να υπολογιστεί που ακριβώς σε κάποιο τυχαίο frame f βρίσκεται η γραμμή στην οποία προσπίπτει η ακτίνα φωτός.



Σχήμα 5.9: Η εικόνα που αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή του κάθε pixel η οποία αφορά όλη την ακολουθία εικόνων που λαμβάνεται από το scanning.

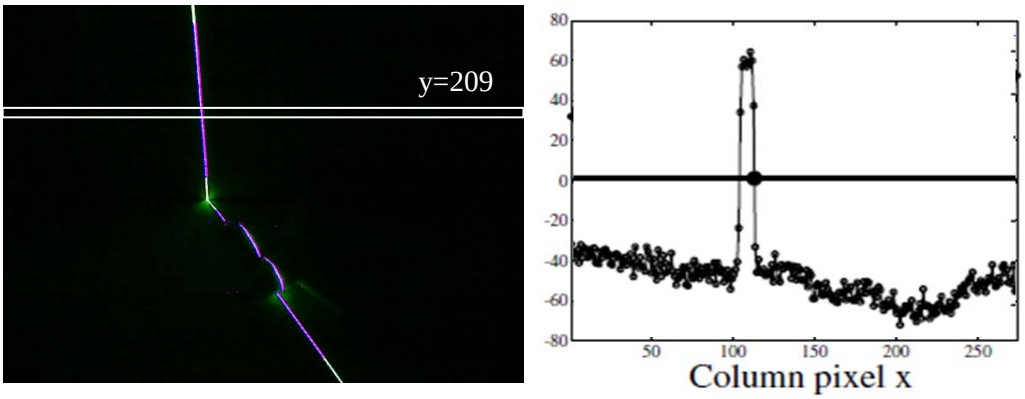
Τα δεδομένα αυτά λαμβάνονται βάσει της πιο κάτω εξίσωσης:

$$\Delta I(x,y,t) \triangleq I(x,y,t) - I_{\text{shadow}}(x,y),$$

Πιο συγκεκριμένα, το όριο της γραμμής για κάποιο συγκεκριμένο frame f = t, μπορεί να εντοπιστεί στην εικόνα ως εξής: Αν στην εικόνα διαφοράς ΔI για κάποια στήλη τιμών j η τιμή κάποιου pixel είναι μικρότερη του μηδεν, ενώ στην προηγούμενη στήλη η τιμή είναι μεγαλύτερη του μηδέν, τοτε το σημείο αυτό στη στήλη j-1 θεωρείται ως το όριο της ακτίνας το οποίο εισέρχεται μέσα στην εικόνα. Παρόμοια, αν στην εικόνα διαφοράς ΔI για κάποια στήλη τιμών j η τιμή κάποιου pixel είναι μεγαλύτερη του μηδέν, ενώ στην προηγούμενη στήλη η τιμή είναι μικρότερη από το μηδέν, τότε το σημείο αυτό στη στήλη j αποτελεί το όριο της ακτίνας η οποία φεύγει από το συγκεκριμένο frame.

Αυτό συμβαίνει εφόσον γνωρίζουμε ότι τα σημεία στα οποία προσπίπτει το φως της ακτίνας είναι πολύ πιο φωτεινά από οποιαδήποτε άλλα σημεία της εικόνας. Ουσιαστικά η τιμή φωτεινότητας που παίρνουν αυτά τα σημεία είναι η μεγαλύτερη τιμή που μπορούν να πάρουν σε ολόκληρη την ακολουθία των frames. Βάσει αυτής της διαφοράς των τιμών μπορεί εύκολα να γίνει εντοπισμός των ορίων της ακτίνας μέσα στο κάθε frame της ακολουθίας. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί και ως το zero crossing μίας εικόνας διαφοράς ΔI(x,y,t).

Μία πιο αναλυτική επεξήγηση της τεχνικής αυτής διαφαίνεται στο πιο κάτω διάγραμμα:



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα spatial shadow localization

Το πιο πάνω διάγραμμα απεικονίζει την ανίχνευση των ορίων της ακτίνας στις συντεταγμένες του χώρου(που αντιστοιχούν στην κάμερα) για τον υπολογισμό των γραμμών λh(t) και λv(t). Το διάγραμμα αναφέρεται στη χρονική στιγμή $t_0 = 288s$ (frame 288) και στη γραμμή y= 209 σε σχέση με τη στήλη x(για όλες τις στήλες του frame 288). Στο σχεδιάγραμμα παρατηρείται ότι η 2^{η} διασταύρωση με το μηδέν αποτελεί ένα σημείο x (114.51, 209) το οποίο έχει ανιχνευθεί ως σημείο πάνω στο όριο της ακτίνας που εξέρχεται στο frame. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται για όλες τις γραμμές που ανήκουν στη γνωστή περιοχή του χώρου (στο κάθετο και στο οριζόντιο επίπεδο ξεχωριστά) έτσι ώστε να ανιχνευθεί ολόκληρη η γραμμή της ακτίνας για την περιοχή αυτή. Τα αποτελέσματα για το spatial light edge localization τα οποία εξάγονται από το πρόγραμμα περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 7 το οποίο αφορά τα γενικά αποτελέσματα.

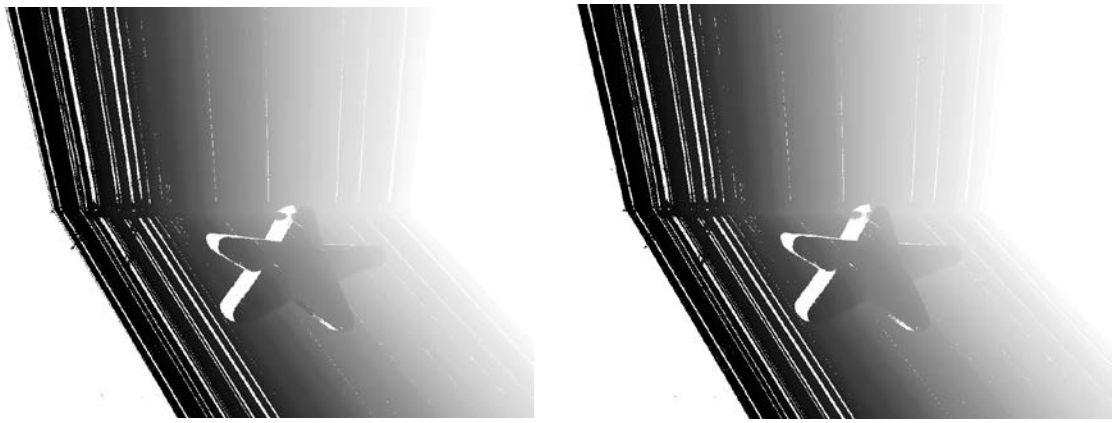
5.6 Temporal Light Edge Localization

Εφόσον έχουν ανιχνευθεί επιτυχώς τα όρια της σκιάς για το κάθε frame της ακολουθίας, θα πρέπει στη συνέχεια να προσδιοριστεί ο χρόνος στον οποίο η ακτίνα φωτός διαπερνά κάποιο συγκεκριμένο pixel στην εικόνα (laser time). Απαιτείται δηλαδή να γνωρίζουμε σε ποια χρονική στιγμή κάποιο pixel εισήλθε στην περιοχή της ακτίνας φωτός. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως χρονική επεξεργασία λόγω του ότι εφαρμόζεται στις διαστάσεις του χρόνου και όχι του χώρου, όπως η προηγούμενη. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά και στην έννοια του zero crossing, που ορίζεται ως η στιγμή που μία θετική τιμή μετατρέπεται σε αρνητική εφόσον περάσει από το μηδέν, και αντίστροφα.

Αντί να εφαρμόζεται ένας υπολογισμός zero-crossing σε κάθε γραμμή για ένα συγκεκριμένο frame, θα πρέπει να ανιχνευθεί ο χρόνος ανά pixel χρησιμοποιώντας τα zero-crossings της εικόνας διαφοράς ΔI(x,y,t) για κάθε pixel (x,y) ως μία συνάρτηση του χρόνου t. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας φαίνεται στο Σχήμα 5.12 όπου οι χρόνοι της διάβασης της ακτίνας (shadow crossing times) έχουν κβαντοποιηθεί σε 32 τιμές, με το μπλε χρώμα να δείχνει τους αρχικούς χρόνους και το κόκκινο τους τελικούς.

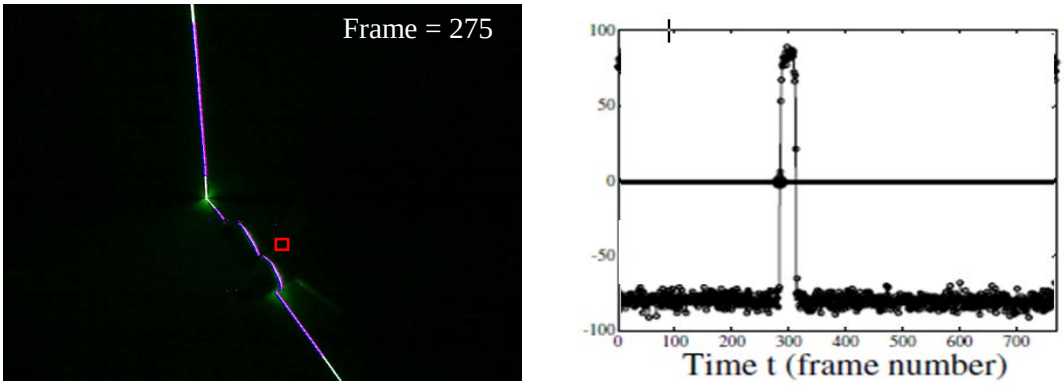
Λόγω του ότι μπορεί να υπάρξει λανθασμένη ανίχνευση για κάποια pixels, γίνεται χρήση ενός συγκεκριμένου ευρετικού το οποίο είναι σε θέση να μειώσει τα σφάλματα. Το ευρετικό αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι σκοτεινές περιοχές της εικόνας δε μπορούν να

δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα για το χρόνο που η σκιά προσπίπτει σε αυτές. Έτσι, αυτές οι περιοχές οι οποίες δεν έχουν ξεκάθαρη ή ανεπαρκή αντίθεση φωτεινότητας, μπορούν να μη ληφθούν υπόψην.



***Σχήμα 5.12**: Στα αριστερά, το αποτέλεσμα του first zero crossing (entering laser line) και δεξιά το αποτέλεσμα του second zero crossing (leaving laser line). Το ευρύ φάσμα χρωμάτων αντιπροσωπεύει το χρόνο στον οποίο η φωτεινή ακτίνα διαπερνά κάποιο pixel.*

Το πιο κάτω σχεδιάγραμμα απεικονίζει το temporal shadow localization, την ανίχνευση δηλαδή της ακτίνας στην εικόνα για κάποιο συγκεκριμένο χρόνο t:



Σχήμα 5.13: Χρονικός εντοπισμός της ακτίνας του φωτός για κάποιο συγκεκριμένο σημείο.

Το σχεδιάγραμμα αυτό δείχνει για το σημείο x = (133,120) το χρονικό του προφίλ ΔI(x,y,t) σε συνάρτηση με το χρόνο t(αριθμός συγκεκριμένου frame). Ο χρόνος στον οποίο η ακτίνα προσπίπτει σε αυτό το σημείο μπορεί να προσδιοριστεί ως η πρώτη zero crossing τοποθεσία αυτού του προφίλ t_{light}(133,20) = 287.95. Δηλαδή, στο χρόνο αυτό

(ο οποίος υπολογίζεται σε ακρίβεια μεγαλύτερη του frame number), η εικόνα διαφοράς για το σημείο αυτό έχει τιμή μεγαλύτερη του μηδενός.

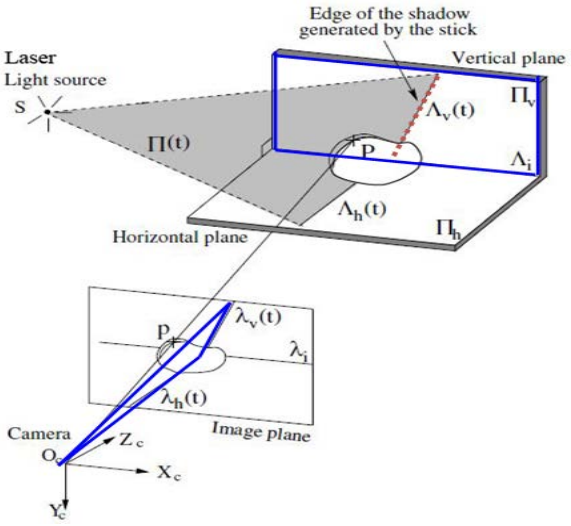
Τα σημεία στην εικόνα τα οποία αντιστοιχούν σε περιοχές που δεν διαφαίνονται (έχουν φραχθεί) στην εικόνα, δε μπορούν να δώσουν κάποια σχετική πληροφορία για το βάθος ενός σημείου. Έτσι, τα μόνα σημεία της εικόνας τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν είναι αυτά που έχουν τιμή αντίθεσης μεγαλύτερη ενός προκαθορισμένου threshold. Η τιμή αντίθεσης ορίζεται ως εξής:

$$I_{contrast}\,(x,y) = I_{max}\,(x,y) - I_{min}(x,y)$$

Λαμβάνοντας υπόψην και το θόρυβο ο οποίος υπάρχει στις εικόνες, μία ιδανική προκαθορισμένη τιμή threshold για την παρούσα διαδικασία είναι το $I_{thresh} = 50$ η οποία χρησιμοποιείται σε όλο το πρόγραμμα.

Οι δύο διαδικασίες, παρόλο που αποσκοπούν στο ίδιο αποτέλεσμα, επιδρούν πάνω σε διαφορετικούς χώρους αναζήτησης. Η μία τεχνική ενεργεί πάνω στις συντεταγμένες του χώρου (συντεταγμένες της εικόνας) και η άλλη στις συντεταγμένες του χρόνου. Παρόλο που φαίνονται ανεξάρτητες, θα πρέπει οι δύο διαδικασίες αναζήτησης να είναι συμβατές. Δηλαδή αν σε κάποιο χρόνο t_0 το όριο της ακτίνας προσπίπτει πάνω στο pixel x = (x,y), τότε οι δύο διαδικασίες θα πρέπει να εντοπίσουν ακριβώς το ίδιο σημείο (x,y,t) σε διαστάσεις χώρου/χρόνου.

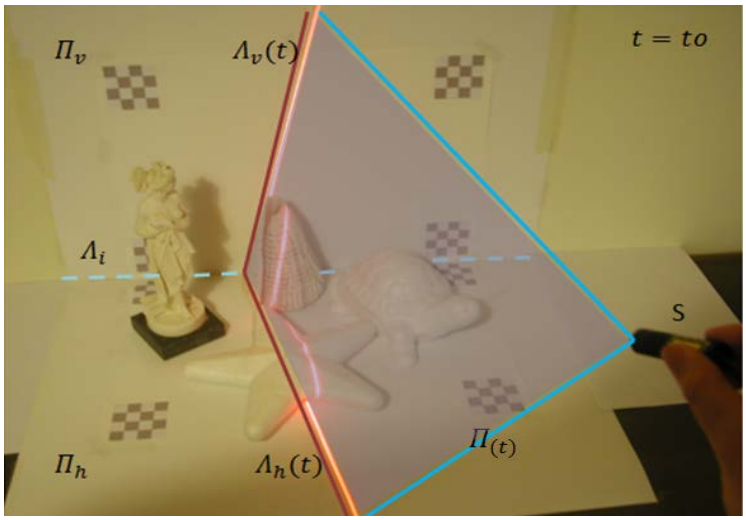
Εφόσον οι γραμμές λ_{vi} και λ_{hi} ανιχνευθούν επιτυχώς για το κάθε frame της ακολουθίας, εφαρμόζεται μία διαδικασία για την εξαγωγή της τοποθεσίας των πραγματικών γραμμών Λ_{vi} και Λ_{hi} στο χώρο, όπου το i αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε frame της ακολουθίας. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται τέμνοντας για κάθε frame, τα πλάνα που σχηματίζονται από το κέντρο της κάμερας (ή κέντρο προβολής) O_c και τις δύο γραμμές λ_{vi} και λ_{hi} με τα αντίστοιχα πλάνα Π_v και Π_h. Η τοποθεσία του οριζόντιου πλάνου ως προς τις συντεταγμένες της εικόνας είναι γνωστή από τη διαδικασία του calibration, όπως έχει περιγραφεί στο **Κεφάλαιο 4**.Έπειτα μπορούμε να διακρίνουμε στην εικόνα το πλάνο Π_v το οποίο ορίζεται ως η απόσταση από το πάνω μέρος της εικόνας προς τη διαχωριστική γραμμή λ_i. Αντίστοιχα, η απόσταση από τη διαχωριστική γραμμή μέχρι το κάτω μέρος της εικόνας ορίζει το πλάνο Π_h. Στο επόμενο σχήμα επεξηγείται καλύτερα η μέθοδος αυτή:



Σχήμα 5.14: Τομή του πλάνου (O_c, $\lambda_h(t)$) με το πλάνο Π_h για την εξαγωγή της πραγματικής τοποθεσίας της γραμμής $\Lambda_h(t)$ στο χώρο.

Στο πιο πάνω σχεδιάγραμμα παρατηρείται η τομή του πλάνου που σχηματίζεται από το κέντρο της κάμερας και τη γραμμή λ_h(t) με το πλάνο Π_h, η τοποθεσία του οποίου ανιχνεύεται μέσω της διαδικασίας του extrinsic calibration. Η τομή αυτή δίνει ως αποτέλεσμα την πραγματική τοποθεσία της γραμμής Λ_h(t) στο χώρο. Το αντίστοιχο ισχύει και για την τομή του πλάνου (O_c, λ_v(t)) με το αντίστοιχο πλάνο Π_v για την ανίχνευση της γραμμής Λ_v(t) στο χώρο.

Έχοντας εξάγει την πραγματική τοποθεσία των ορίων της ακτίνας στο χώρο της διάταξης, μπορεί κανείς να ανιχνεύσει τα πλάνα $\Pi_{entering(t)}$ και $\Pi_{leaving(t)}$ τα οποία σχηματίζονται από την ακτίνα που προσπίπτει στη σκηνή την κάθε χρονική στιγμή t.

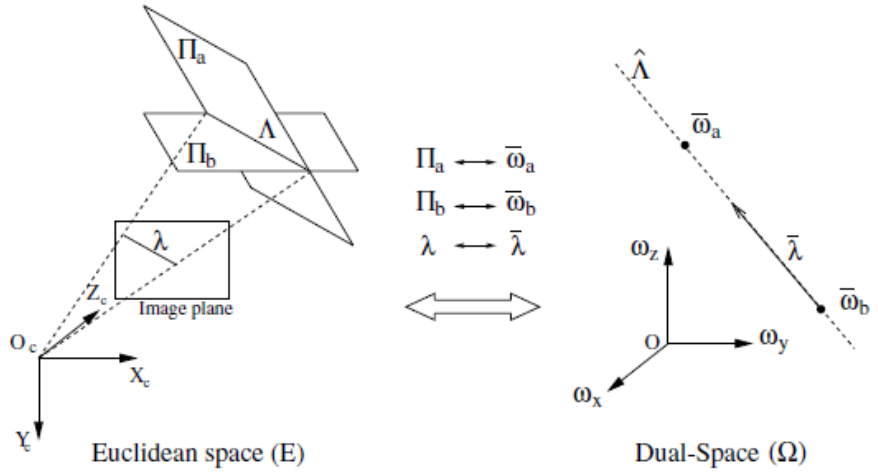


Σχήμα 5.15: Γνωρίζοντας την πραγματική τοποθεσία των γραμμών $\Lambda_h(t)$ και $\Lambda_v(t)$, μπορεί να γίνει ανίχνευση των πλάνων entering και leaving που σχηματίζει η ακτίνα που προσπίπτει στη σκηνή από το laser.

5.7 Laser Plane Estimation Π(t)

Μία πιο αναλυτική επεξήγηση της ανίχνευσης των πραγματικών ορίων της γραμμής που σχηματίζει η ακτίνα καθώς και της ανίχνευσης των πλάνων που σχηματίζεται από αυτές τις γραμμές, είναι αυτή που ακολουθεί. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά στην έννοια του dual space. Οποιοδήποτε vector V στο χώρο, μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός αντίστοιχου dual vector space (διπλού χώρου), το οποίο αποτελείται μόνο από γραμμικές συναρτήσεις του Vector αυτού.

Το πιο κάτω σχήμα κάνει πιο κατανοητή την έννοια του dual space.

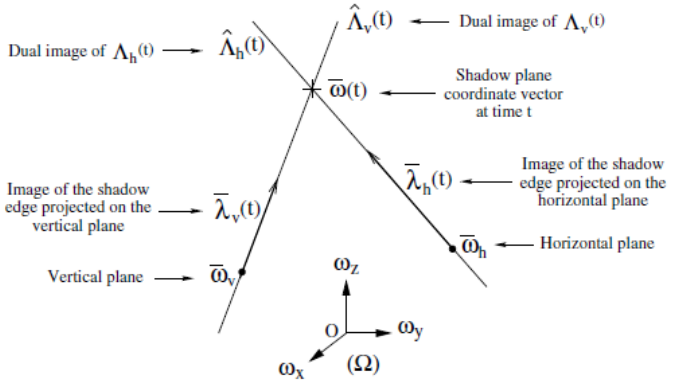


Σχήμα 5.16: Περιγραφή του Ευκλείδιου χώρου στον οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η Ευκλείδια γεωμετρία, και η περιγραφή του dual-space. Η κατεύθυνση της γραμμής που ενώνει τα 2 vectors ω_α και ω_b στο dual-space είναι ακριβώς το $\bar{\lambda}$ το οποίο αποτελεί το vector συντεταγμένων της προοπτικής προβολής λ της γραμμής Λ στον Ευκλείδιο χώρο.

Η έκφραση ενός πλάνου Π(t) σε συντεταγμένες εικόνας ορίζεται ως ένα vector ω(t). Επίσης θεωρούμε τα vector $\overline{\lambda_h}$ και $\overline{\lambda_v}$ που αναφέρονται στις αντίστοιχες προβολές λ_h και λ_v των γραμμών στην εικόνα για κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t. Εφόσον η γραμμή λ_h(t) αποτελεί την προβολή της γραμμής της τομής Λ_h(t) μεταξύ του κάθετου και οριζόντιου πλάνου(στον Ευκλείδιο χώρο), τότε το $\bar{\omega}(t)$ το οποίο αποτελεί το vector συντεταγμένων του πλάνου της ακτίνας, βρίσκεται πάνω στην ευθεία που περνά από το $\overline{\omega_h}$(οριζόντιο πλάνο) έχοντας κατεύθυνση $\overline{\lambda_h}$(t) στο dual space.

Η γραμμή αυτή η οποία ορίζεται ως $\widehat{\Lambda_h}$(t) αποτελεί το dual image της γραμμής Λ_h(t) στο dual space. Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να παρατηρηθεί ότι το vector συντεταγμένων $\bar{\omega}(t)$

βρίσκεται και στη γραμμή $\widehat{\Lambda_v}$(t) η οποία περνά διαμέσου του vector $\overline{\omega_v}$ με κατεύθυνση $\overline{\lambda_v}$(t). Επομένως, στο dual-space, το vector συντεταγμένων $\bar{\omega}(t)$ που αντιπροσωπεύει το πλάνο της ακτίνας, βρίσκεται στην τομή των δύο ήδη γνωστών γραμμών $\widehat{\Lambda_h}$ και $\widehat{\Lambda_v}$. Το σχήμα 5.17 δίνει μια πιο επεξηγηματική απεικόνιση της εφαρμογής αυτής.



<u>Σχήμα 5.17:</u> Προσδιορισμός του πλάνου της ακτίνας με τη χρήση οριζόντιου και κάθετου πλάνου. Το vector συντεταγμένων του πλάνου της ακτίνας $\bar{\omega}(t)$ είναι το σημείο τομής μεταξύ των dual γραμμών $\widehat{\Lambda_h}$ και $\widehat{\Lambda_v}$ στο dual space.

Η προσέγγιση αυτή αφορά έναν ιδανικό χώρο εφαρμογής. Επειδή όμως στην πραγματικότητα μπορεί να υπάρχει θόρυβος μεταξύ των δύο γραμμών $\widehat{\Lambda_h}$ *και* $\widehat{\Lambda_v}$, υπάρχει πιθανότητα να μην τέμνονται ακριβώς. Παρόμοια, οι γραμμές λ_i, $\lambda_v(t)$ και $\lambda_h(t)$ δεν είναι απαραίτητο ότι τέμνονται σε ένα σημείο πάνω στο επίπεδο της εικόνας ή ότι τα vector συντεταγμένων τους $\overline{\lambda_\iota}$, $\overline{\lambda_h}$ και $\overline{\lambda_v}$ δεν είναι συνεπίπεδα (έχουν γεωμετρία στο ίδιο πλάνο). Τότε μπορεί να ανιχνευθεί το $\bar{\omega}(t)$ με κάποιο σημείο το οποίο είναι το κοντινότερο στις γραμμές $\widehat{\Lambda_h}$ *και* $\widehat{\Lambda_v}$, εφαρμόζοντάς τη μέθοδο least squares. Η λύση στο πρόβλημα περιγράφεται με τις πιο κάτω εξισώσεις:

$$\overline{\omega}(t) = \frac{1}{2}\left(\overline{\omega}_1(t) + \overline{\omega}_2(t)\right),$$

Όπου τα $\overline{\omega_1}\,(t)$ και $\overline{\omega_2}\,(t)$ ορίζονται ως εξής:

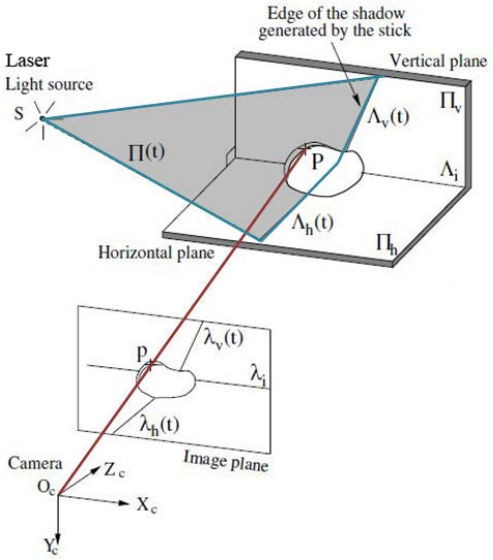
$$\begin{aligned} \overline{\omega}_1(t) &\doteq \overline{\omega}_h + \alpha_h \overline{\lambda}_h(t) \\ \overline{\omega}_2(t) &\doteq \overline{\omega}_v + \alpha_v \overline{\lambda}_v(t) \end{aligned}$$

Τα a_h και a_v προσδιορίζονται ως $[a_h\ a_v]^T = A^{-1}\mathrm{b}$ όπου τα A και b ορίζονται ως ακολούθως:

$$\mathbf{A} \doteq \begin{bmatrix} \langle \overline{\lambda}_h, \overline{\lambda}_h \rangle & -\langle \overline{\lambda}_h, \overline{\lambda}_v \rangle \\ -\langle \overline{\lambda}_h, \overline{\lambda}_v \rangle & \langle \overline{\lambda}_v, \overline{\lambda}_v \rangle \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} \doteq \begin{bmatrix} \langle \overline{\lambda}_h, \overline{\omega}_v - \overline{\omega}_h \rangle \\ \langle \overline{\lambda}_v, \overline{\omega}_h - \overline{\omega}_v \rangle \end{bmatrix}$$

Τα vector $\overline{\omega_1}(t)$ και $\overline{\omega_2}(t)$ είναι οι ορθογωνικές προβολές του $\overline{\omega}(t)$ πάνω στις ευθείες $\widehat{\Lambda_h}(t)$ *και* $\widehat{\Lambda_v}(t)$ αντίστοιχα. Η διαφορά αυτών των 2 vectors μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως ένας υπολογισμός του σφάλματος για τον προσδιορισμό του πλάνου Π(t).

Υπάρχουν μέθοδοι οι οποίες δεν χρησιμοποιούν το κάθετο πλάνο Πv επειδή το σημείο από το οποίο εκπέμπεται το φως είναι σταθερό και γνωστό στον τρισδιάστατο χώρο. Σε αυτή την περίπτωση, λόγω του ότι το Laser βρίσκεται σε κίνηση κατά τη διάρκεια του scanning (δεν έχει δηλαδή μία σταθερή θέση), το κάθετο πλάνο Πv είναι απαραίτητο για την εξαγωγή της τοποθεσίας του πλάνου της ακτίνας στο χώρο.



Σχήμα 5.18: Το τελικό στάδιο της ανάκτησης της πραγματικής τοποθεσίας ενός σημείου στο χώρο είναι η τομή της ευθείας (O_c, p) με το πλάνο που σχηματίζεται από το laser και την ακτίνα που προσπίπτει στη σκηνή.

Εφόσον έχουν εξαχθεί οι συντεταγμένες των πλάνων(entering και leaving) που σχηματίζει η ακτίνα του laser όταν προσπίπτει στην εικόνα, είναι πλέον εφικτός ο υπολογισμός του τρισδιάστατου σημείου P στο χώρο μέσω της τομής της ακτίνας (O_c, p) (όπου p η προβολή του σημείου P στην εικόνα της κάμερας) με το πλάνο Π(t) (entering ή leaving ή και με τα δύο) για κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t (βλ. **Σχήμα 5.18**). Η τεχνική αυτή ονομάζεται triangulation και είναι το αντικείμενο της μελέτης του κεφαλαίου που ακολουθεί.

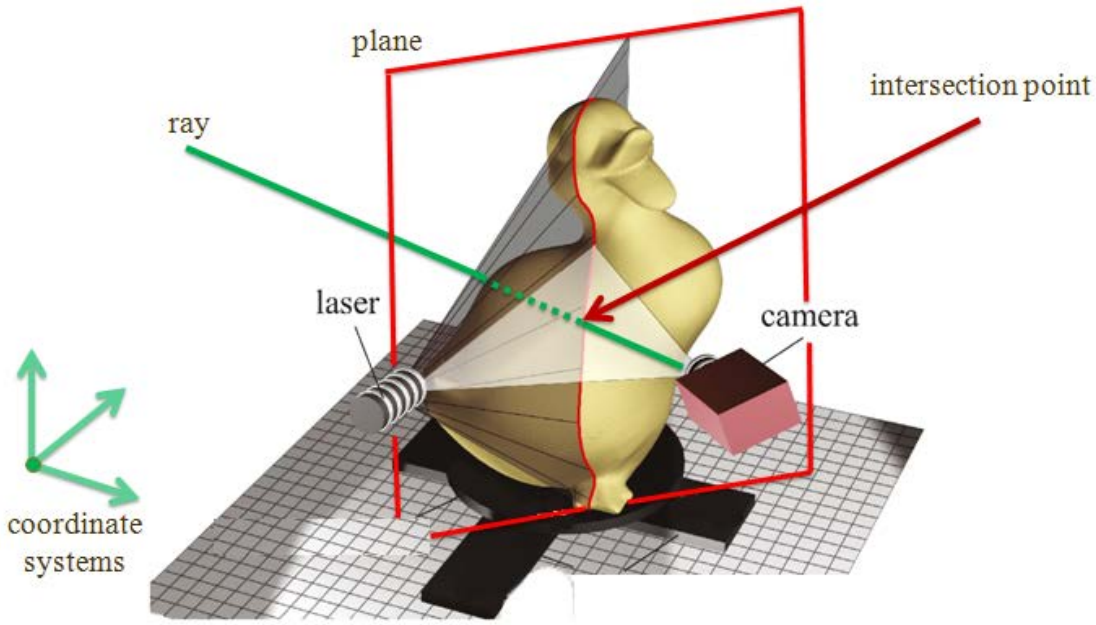
Κεφάλαιο 6

Reconstruction

6.1 Εισαγωγή 59
6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο 61
6.3 Ray-Plane Intersection 64
6.4 Pixel To Ray 67
6.5 Εφαρμογή στην Παρούσα Μελέτη 68
6.6 Post Processing και Visualization 68

6.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθεί μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της 3D τοποθεσίας των σημείων P στο χώρο, για τα αντίστοιχα σημεία p της εικόνας της κάμερας. Η τεχνική αυτή ονομάζεται Triangulation και είναι ευρέως γνωστή στις μελέτες αναδόμησης αντικειμένων μέσω ανακλαστικών, active τεχνολογιών. Αρχικά θα δοθεί μία ανάλυση της μεθόδου του triangulation σε θεωρητικό επίπεδο ενώ στη συνέχεια θα ακολουθήσουν αναφορές σε μεθόδους που εφαρμόζει το triangulation. Ακολούθως θα αναλυθεί πιο επεξηγηματικά η εφαρμογή της τεχνικής στη μελέτη αυτή.

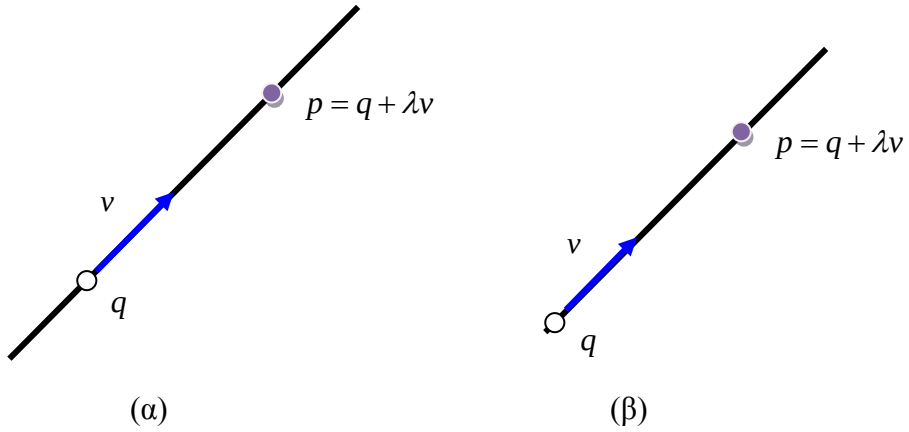


Σχήμα 6.1*:* Μία από τις τεχνικές εφαρμογής του triangulation είναι το ray-plane intersection, δηλαδή η τομή του πλάνου που σχηματίζει το laser και η ακτίνα που προσπίπτει στο αντικείμενο με κάποια οπτική ακτίνα η οποία ξεκινά από το κέντρο της κάμερας, τέμνεται με το σημείο p στην εικόνα και με το σημείο P στον τρισδιάστατο χώρο.

Στο **Σχήμα 6.1** μπορεί να συνοψιστεί η έννοια του Triangulation και να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος που χρησιμοποιείται σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Υπάρχουν πολλές γεωμετρικές μεθόδοι που βασίζονται στο Triangulation. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση, η επίγνωση της θέσης (στο χώρο) του πλάνου που δημιουργείται από το Laser και την ακτίνα που προσπίπτει στο αντικείμενο, μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε την τεχνική ray-plane intersection για να εξάγουμε το βάθος του κάθε σημείου.

6.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Για να γίνει πιο κατανοητή η εφαρμογή της μεθόδου αυτής, η οποία στηρίζεται στις αρχές της γεωμετρίας, θα πρέπει αρχικά να παρουσιαστούν βασικές γεωμετρικές έννοιες και οι μοντελοποιήσεις τους στις διαστάσεις του χώρου. Γίνεται αρχή με την αναπαράσταση των γραμμών (lines) και των ακτινών (rays).



Σχήμα 6.2: Παραμετρική αναπαράσταση (α) μίας γραμμής και (β) μίας ακτίνας

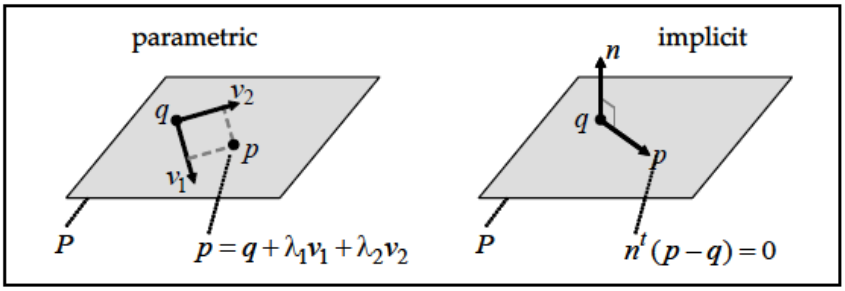
Ένας μονοδιάστατος πίνακας ή Vector , μπορεί να αναπαρασταθεί στο χώρο μέσω ενός βέλους v. Μπορούμε να πούμε ότι δύο Vectors v_1 και v_2 είναι γραμμικά εξαρτώμενα όταν το ένα είναι βαθμωτό πολλαπλάσιο του άλλου, αν και μόνο αν όταν πολλαπλασιάσουμε τα δύο Vectors v_1 και v_2 μας δίνουν αποτέλεσμα μηδέν. Επομένως τα Vectors μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους, αφού μπορούν να πολλαπλασιαστούν με βαθμωτές τιμές και να προστεθούν μεταξύ τους. Τα σημεία όμως δεν έχουν αυτή την ιδιότητα. Μπορεί όμως ένα σημείο να περιγραφεί βάσει ενός άλλου σημείου, χρησιμοποιώντας Vectors. Αν σε ένα vector προστεθεί ένα σημείο, προκύπτει ένα άλλο σημείο. Επίσης, η διαφορά μεταξύ δύο σημείων αποτελεί ένα vector. Ακόμη, αν p είναι ένα σημείο και λ είναι μία τιμή βαθμωτού τύπου, τότε η εξίσωση q =p + λv είναι ένα καινούργιο σημείο. (βλ. **Σχήμα 6.2**) Με αυτό τον τρόπο, μία γραμμή στο χώρο μπορεί να προσδιοριστεί εφόσον γνωρίζουμε ένα σημείο της q και ένα vector το οποίο προσδιορίζει την κατεύθυνση της γραμμής. (βλ. **Σχήμα 6.2**) Οποιοδήποτε άλλο σημείο p της γραμμής L μπορεί να αναπαρασταθεί ως το αποτέλεσμα της πρόσθεσης του σημείου p και ενός πολλαπλασιασμού που αποτελείται από μία βαθμωτή τιμή λ και ένα vector v, δηλαδή του γινομένου λv. Η βαθμωτή τιμή λ μπορεί να είναι είτε θετική, είτε αρνητική είτε ίση με το μηδέν. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να οριστεί παραμετρικά μία γραμμή.

Μία ακτίνα ορίζεται ως το μισό τμήμα μίας γραμμής. Ενώ στην περιγραφή της γραμμής L η παράμετρος λ μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, στην περιγραφή της ακτίνας μπορεί να πάρει μόνο θετικές τιμές. Αυτό διαφαίνεται και στο **Σχήμα 6.2** όπου το σημείο q θεωρείται ως το αρχικό σημείο της ακτίνας (origin). Οι εξισώσεις που περιγράφουν μία γραμμή και μία ακτίνα είναι οι ακόλουθες:

Εξίσωση γραμμής L: $$L = \{p = q + \lambda v \ : \ \lambda \in \mathbb{R}\} \ .$$

Εξίσωση ακτίνας R: $$R = \{p = q + \lambda v \ : \ \lambda \geq 0\}$$

Στην περίπτωση της γραμμής, η αναπαράσταση αυτή βάσει της κλιμακωτής τιμής λ δεν είναι μοναδική, καθώς το σημείο q μπορεί να αντικατασταθεί με οποιοδήποτε άλλο σημείο της γραμμής και το vector v μπορεί να αντικατασταθεί με κάποιο πολλαπλάσιο vector του, έτσι ώστε η γραμμή L να είναι η ίδια με πριν. Στην περίπτωση της ακτίνας R, αν το σημείο q αντικατασταθεί με κάποιο άλλο πάνω στην ακτίνα, τότε πρόκειται για διαφορετική ακτίνα. Το vector v μπορεί να αντικατασταθεί από ένα θετικό ακέραιο πολλαπλάσιο του αλλά όχι από ένα αρνητικό, επειδή τότε θα πρόκειται για μία ακτίνα αντίθετη της πρώτης.



Σχήμα 6.3: Παραμετρική και implicit αναπαράσταση ενός πλάνου

Ακολούθως μπορεί να οριστεί η παραμετρική αναπαράσταση ενός πλάνου Π(βλ. **Σχήμα 6.3**).

Ένα πλάνο Π μπορεί να περιγραφεί σε παραμετρική μορφή εφόσον προσδιοριστεί ένα από τα σημεία του q καθώς επίσης και δύο γραμμικά ανεξάρτητα vectors v_1 και v_2. Οποιοδήποτε άλλο σημείο πάνω στο πλάνο αυτό μπορεί να περιγραφεί ως το αποτέλεσμα της πρόσθεσης στο σημείο q, δύο γινομένων $\lambda_1 v_1$ και $\lambda_2 v_2$, ως ακολούθως:

$$P = \{p = q + \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 \ : \ \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}\}$$

Όπως και στην περίπτωση των γραμμών, η αναπαράσταση αυτή του πλάνου δεν είναι μοναδική , εφόσον αν το σημείο q αντικατασταθεί με ένα οποιοδήποτε άλλο σημείο στο επίπεδο και τα vectors v_1 και v_2 αντικατασταθούν από τα ανάλογα πολλαπλάσια vector v_1' και v_2', τότε μπορεί να προκύψει το ίδιο πλάνο P.

Στη συνέχεια θα περιγραφεί μία διαφορετική αναπαράσταση ενός πλάνου, με την έννοια του implicit representation. Μπορεί δηλαδή ένα πλάνο να περιγραφεί ως μία γραμμική ισότητα τριών μεταβλητών με το μηδέν. Γεωμετρικά ένα πλάνο μπορεί να περιγραφεί από ένα σημείο του q και ένα κάθετο vector n. Ένα σημείο p ανήκει στο πλάνο P αν και μόνο αν τα vector p-q και n είναι κάθετα μεταξύ τους, έτσι ώστε να ισχύει η εξίσωση:

$$P = \{p \ : \ n^t(p-q) = 0\} \ .$$

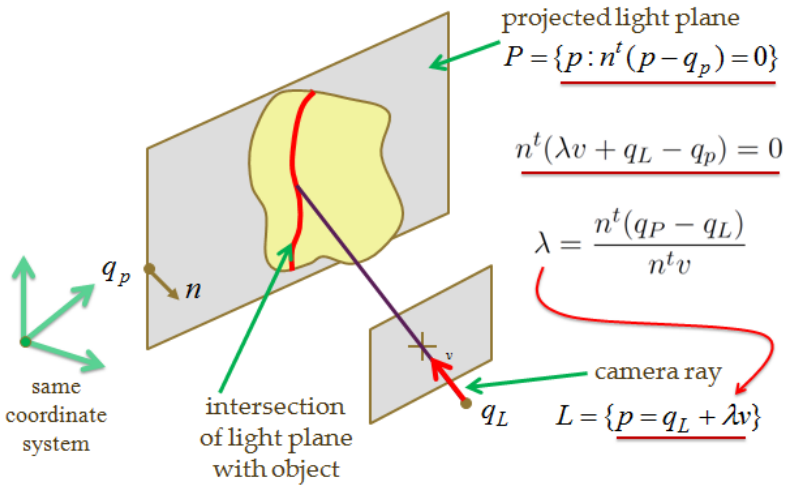
Με παρόμοιο τρόπο μπορεί να αναπαρασταθεί και μία γραμμή L σε Implicit Representation, ως η τομή δύο επιπέδων (τα οποία ορίζονται επίσης σε implicit μορφή), ως ακολούθως:

$$L = \{p \ : \ n_1^t(p-q) = n_2^t(p-q) = 0\},$$

Όπου τα δύο vectors n_1 και n_2 είναι γραμμικά ανεξάρτητα.

6.3 Ray-Plane Intersection

Ακολουθεί μία αναλυτική περιγραφή της μεθόδου **Line-Plane Intersection** η οποία αποτελεί τη βασική μέθοδο που εφαρμόζεται κατά τη διαδικασία του triangulation στην εργασία αυτή.



Σχήμα 6.4: Εφαρμογή της μεθόδου του triangulation μέσω Line-Plane Intersection

Ο υπολογισμός της τομής μίας γραμμής και ενός επιπέδου μπορεί να δοθεί ευθέως όταν η γραμμή αναπαριστάται σε παραμετρική μορφή και το επίπεδο αναπαριστάται σε implicit μορφή:

$$L = \{p = q_L + \lambda v \ : \ \lambda \in \mathbb{R}\},$$
$$P = \{p \ : \ n^t(p - q_P) = 0\} \ .$$

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις που φαίνοναι στο **Σχήμα 6.4**, μπορεί από την implicit αναπαράσταση του πλάνου να εξαχθεί η βαθμωτού τύπου τιμή λ, η οποία χρησιμοποιείται στην εξίσωση της γραμμής L για τον υπολογισμό της ακτίνας που εξέρχεται από το κέντρο της κάμερας.

Υπάρχει περίπτωση το πλάνο και η γραμμή να μην έχουν κάποιο σημείο τομής, και στην περίπτωση αυτή μπορούμε να πούμε ότι η γραμμή και το πλάνο είναι παράλληλα. Αυτό προκύπτει όταν τα vector v και n είναι κάθετα μεταξύ τους και έτσι το n^tv ισούται με μηδέν. Όμως τα vectors v και n είναι επίσης κάθετα όταν η γραμμή L περιέχεται στο επίπεδο P, δηλαδή εφάπτεται της επιφάνειάς του. Ισχύουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις, η περίπτωση στην οποία το σημείο q_L ανήκει στο επίπεδο και στην περίπτωση που δεν

ανήκει. Αν τα vectors v και n δεν είναι κάθετα μεταξύ τους, τότε η τομή του πλάνου μαζί με την ακτίνα περιέχει μόνο ένα σημείο p. Εφόσον αυτό το σημείο ανήκει στη γραμμή, μπορεί να γραφτεί και ως $p = q_L + \lambda_v$, για μία τιμή λ η οποία θα πρέπει να προσδιοριστεί. Εφόσον το σημείο αυτό ανήκει και στη γραμμή, τότε η τιμή λ θα πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

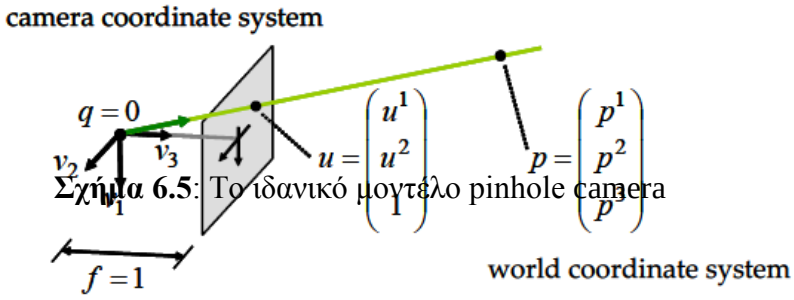
$$n^t(p - q_p) = n^t(\lambda v + q_L - q_p) = 0 \ ,$$

η οποία ισοδυναμεί αντίστοιχα με την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{n^t(q_P - q_L)}{n^t v}$$

Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εξαχθεί το λ για να υπολογιστεί η ακτίνα της κάμερας που έχει αναφερθεί πιο πάνω. Αν υποθέσουμε ότι η γραμμή και το επίπεδο δεν είναι παράλληλα, τότε είναι εφικτή η εφαρμογή μίας τέτοιας τεχνικής για την ανεύρεση του ζητούμενου σημείου.

Εφόσον έχει βρεθεί μία εφικτή λύση για την εύρεση του σημείου P του πραγματικού κόσμου, θα πρέπει επίσης να δοθεί μία αντίστοιχη συσχέτιση ανάμεσα στις συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου και στις συντεταγμένες της κάμερας, έτσι ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή της μεθόδου αυτής στη διάταξη που έχουμε ορίσει. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται οι ομοιογενείς συντεταγμένες οι οποίες έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, καθώς επίσης και το μοντέλο του Pinhole Camera.



Σχήμα 6.5: Το ιδανικό μοντέλο pinhole camera

Η συσχέτιση των συντεταγμένων της κάμερας με τις συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου μπορεί να συνοψιστεί στο **Σχήμα 6.5**. Έστω ότι υπάρχει ένα μοντέλο pinhole το οποίο έχει κέντρο προβολής το σημείο ο και το επίπεδο της κάμερας ορίζεται από τη συσχέτιση

$$\text{P} = \{p = q + u^1 v_1 + u^2 v_2 : u^1, u^2 \in \mathbb{R}\}.$$

Τότε , οποιοδήποτε σημείο p το οποίο είναι τρισδιάστατο, έχει συντεταγμένες (p_1, p_2 , p_3). Επίσης στο επίπεδο της εικόνας, το σημείο q και τα vector v_1 και v_2 καθορίζουν το

δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες εικόνας για ένα σημείο p το οποίο ισούται με $p = q + u^1 v_1 + u^2 v_2$, είναι οι παραμέτροι u^1και u^2 οι οποίες φαίνονται στο Σχήμα 6.5 ως ένα τρισδιάστατο vector u. Το σημείο p τότε μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix} = [v_1|v_2|q] \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Ένα σημείο p σε 3D συντεταγμένες, ανήκει στο επίπεδο της εικόνας μόνο εάν η παράμετρος p^3 ισούται με μηδέν, αλλιώς προβάλλεται πάνω σε ένα άλλο επίπεδο εικόνας το οποίο συσχετίζεται με το επίπεδο της κάμερας ως εξής:

$$\begin{aligned} u^1 &= p^1/p^3 \\ u^2 &= p^2/p^3 \end{aligned}$$

Αυτή λοιπόν είναι η συσχέτιση ενός σημείου στον τρισδιάστατο χώρο με τις συντεταγμένες της κάμερας.Όμως το κέντρο της pinhole camera στην πραγματικότητα μπορεί να μην είναι το κέντρο συντεταγμένων του πραγματικού κόσμου αλλά μπορει να έχει κάποιο άλλο προσανατολισμό. Για το λόγο αυτό ένα σημείο στις συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου $p_W = ({p^1}_{W,}{p^2}_{W,}{p^3}_{W,})$ μπορεί να συσχετιστεί με το αντίστοιχο του σημείο στις συντεταγμένες της κάμερας $p_C = ({p^1}_{C,}{p^2}_{C,}{p^3}_{C,})$ μέσω ενός μετασχηματισμού ο οποίος ορίζεται από τις εξωτερικές παραμέτρους της κάμερας rotation matrix R και Translation vector T που έχουν ερευνηθεί στο Κεφάλαιο 4. Οι παραμέτροι αυτές ορίζουν τον προσανατολισμό της κάμερας σε σχέση με τις συντεταγμένες του χώρου. Ο μετασχηματισμός αυτός ορίζεται ως εξής:

$$p_C = R\,p_W + T\ .$$

Επίσης, σε συντεταγμένες της κάμερας, η συσχέτιση μεταξύ των 3D συντεταγμένων και των 2D συντεταγμένων της εικόνας μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση προβολής του pinhole camera που ορίζεται ώς:

$$\lambda \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p^1 \\ p^2 \\ p^3 \end{pmatrix}$$

Αντικαθιστώντας το σημείο p_C με λu, η σχέση σε συντεταγμένες του χώρου γίνεται η ακόλουθη:

$$\lambda\, u = R\,p_W + T\ .$$

Όμως επειδή η εξίσωση αυτή ισχύει για το ιδανικό μοντέλο του pinhole camera το οποίο δεν υφίσταται αλλοιώσεις, στην εξίσωση εμπλέκεται και ο πίνακας των εσωτερικών

παραμέτρων K (intrinsic matrix) ο οποίος επίσης έχει ερευνηθεί στο Κεφάλαιο 4, για την αποκατάσταση της ισότητας σε μη ιδανικές συνθήκες. Έτσι η συσχέτιση γίνεται

$$\lambda u = K(R p_W + T)$$

Όπου $K = \begin{pmatrix} f s_1 & f s_\theta & o^1 \\ 0 & f s_2 & o^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

6.4 Pixel To Ray

Η εξαγωγή μίας γραμμής από κάποιο σημείο της εικόνας μπορεί να εφαρμοστεί ως ακολούθως. Ένα σημείο με συντεταγμένες εικόνας u = $(u^1, u^2, 1)$ προσδιορίζει μία μοναδική γραμμή από το σημείο αυτό στο κέντρο προβολής. Το ζητούμενο είναι να εξαχθεί η παραμετρική ισότητα της γραμμής αυτής η οποία είναι η ακολουθη:

$$L = \{p = q + \lambda v : \quad \lambda \in \mathbb{R}\}$$

Εφόσον αυτή η γραμμή θα πρέπει να περιέχει το κέντρο προβολής, η προβολή όλων των σημείων τα οποία συνδέει θα πρέπει να έχουν τις ίδιες συντεταγμένες εικόνας. Αν το p_W είναι ένα vector πραγματικών συντεταγμένων για ένα σημείο το οποίο περιέχεται σε αυτή τη γραμμή, τότε οι συντεταγμένες του κόσμου και της εικόνας μπορούν να συνδεθούν με την εξίσωση

$$\lambda u = R p_W + T .$$

Εφόσον το R αποτελεί τον πίνακα περιστροφής, μπορούμε να πούμε ότι $R^{-1} = R^t$ και έτσι να ισχύει η $p_W = (-R^t T) + \lambda (R^t u)$ εξίσωση . Επομένως η γραμμή η οποία θα πρέπει να εξαχθεί, μπορεί να περιγραφεί από το σημείο p με συντεταγμένες $p_W = (-R^t T)$, το οποίο είναι το κέντρο προβολής, και το vector v το οποίο έχει συντεταγμένες $u_W = R^t u$.

6.5 Εφαρμογή στην Παρούσα Μελέτη

Εφόσον έχουν εξαχθεί επιτυχώς τα αποτελέσματα της διαδικασίας του Scanning, τα οποία αποτελούν τις συντεταγμένες των πλάνων entering και leaving που δημιουργούνται την κάθε χρονική στιγμή από το laser και την ακτίνα που προσπίπτει πάνω στο αντικείμενο, θα πρέπει να γινει εξαγωγή του τρισδιάστατου σχήματος του αντικειμένου.
Αυτό επιτυγχάνεται βάσει της τομής της ακτίνας που ξεκινά από το κέντρο προβολής και περνά από το κάθε σημείο της εικόνας της κάμερας, με τας πλάνα που σχηματίζονται από την ακτίνα ακολουθώντας την πιο κάτω προσέγγιση:

Αν για κάποιο συγκεκριμένο εικονίδιο στην εικόνα υπάρχει μόνο χρονική τιμή έλευσης σε αυτό, τότε εφαρμόζεται Ray-Plane Intersection με τη συγκεκριμένη ακτίνα και το πλάνο που δημιουργεί η ακτίνα όταν εισέρχεται στο συγκεκριμένο σημείο.
Αντίστοιχα, αν για κάποιο συγκεκριμένο εικονίδιο στην εικόνα υπάρχει μόνο χρονική τιμή για έξοδο από αυτό, τότε εφαρμόζεται Ray-Plane Intersection με τη συγκεκριμένη ακτίνα και το πλάνο που δημιουργεί η ακτίνα όταν εξέρχεται από το συγκεκριμένο σημείο.
Αν και οι δύο τιμές (για έλευση και έξοδο από το συγκεκριμένο εικονίδιο) υπάρχουν, τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος των τομών της ακτίνας με τα δύο πλάνα που δημιουργά η ακτίνα όταν εισέρχεται και όταν εξέρχεται στην εικόνα στο σημείο αυτό.
Αλλιώς αν δεν υπάρχει τιμή έλευσης ούτε εξόδου, το σημείο αυτό αγνοείται.

6.6 Post Processing και Visualization

Εφόσον πραγματοποιηθεί η εξαγωγή των τρισδιάστατων σημείων, γίνεται ένας καθορισμός του αποδεκτού πεδίου τιμών, το οποίο αντιστοιχεί στη γνωστή περιοχή του χώρου. Ακολούθως επιλέγονται τα σημεία τα οποία εμπίπτουν μέσα στα όρια του πεδίου αυτού και ανιχνεύεται ο χρωματισμός τους. Στη συνέχεια εξάγονται τα σημεία αυτά μαζί με τις τιμές χρωματισμού τους σε ένα αρχείο XYZRGB, το οποίο εισάγεται σε λογισμικό (έχει γίνει χρήση του VRMesh) για την αναπαράσταση ως Point Cloud σε τρισδιάστατο χώρο.

Κεφάλαιο 7

Αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή 69
7.2 Ακρίβεια Calibration 70
7.3 Αποτελέσματα Σάρωσης 73
7.4 Τελικά Αποτελέσματα 76

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα τα οποία έχουν εξαχθεί καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής. Συγκεκριμένα θα δοθούν τα αποτελέσματα του Camera Calibration, του Scanning (Temporal και Spatial) ενώ στη συνέχεια θα δοθούν όλες οι πειραματικές εφαρμογές και τα αποτελέσματα που παρουσίασαν.

7.2. **Ακρίβεια Calibration**

Για τη διάταξη που έχει δημιουργηθεί, έχουν ληφθεί από την κάμερα 7 εικόνες οι οποίες περιέχουν το επίπεδο checkerboard υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες. Το επίπεδο αυτό αποτελείται από 48 εμφανείς γωνίες και αποτελείται από ένα πλέγμα 13x9 τετραγώνων, το καθένα από τα οποία είχε πλευρά 30mm. Οι εσωτερικές γωνίες του checkerboard έχουν ανιχνευθεί επιτυχώς για κάθε μία από τις 7 εικόνες, και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τη διαδικασία του calibration.

Η διαδικασία του Calibration πραγματοποιήθηκε σε 2 φάσεις. Κατά τη διάρκεια της πρώτης χρησιμοποιήθηκαν οι εικόνες του checkerboard για τον ακριβή εντοπισμό των εσωτερικών παραμέτρων της κάμερας(intrinsic parameters). Τα αποτελέσματα που έχουν εξαχθεί φαίνονται στους πίνακες 7.1 και 7.2:

Πίνακας 7.1 : Εσωγενή Χαρακτηριστικά:

Παράμετρος	Πραγματική Τιμή	Ιδανική Τιμή	Απόκλιση (βάσει γενικών μετρήσεων)
Focal Length	2901.940186 1509.252563	-	$\pm$1000
Principal Point	487.9919 317.206451	480 360	$\pm$50 $\pm$50

Πίνακας 7.2: Παράμετροι αλλοίωσης

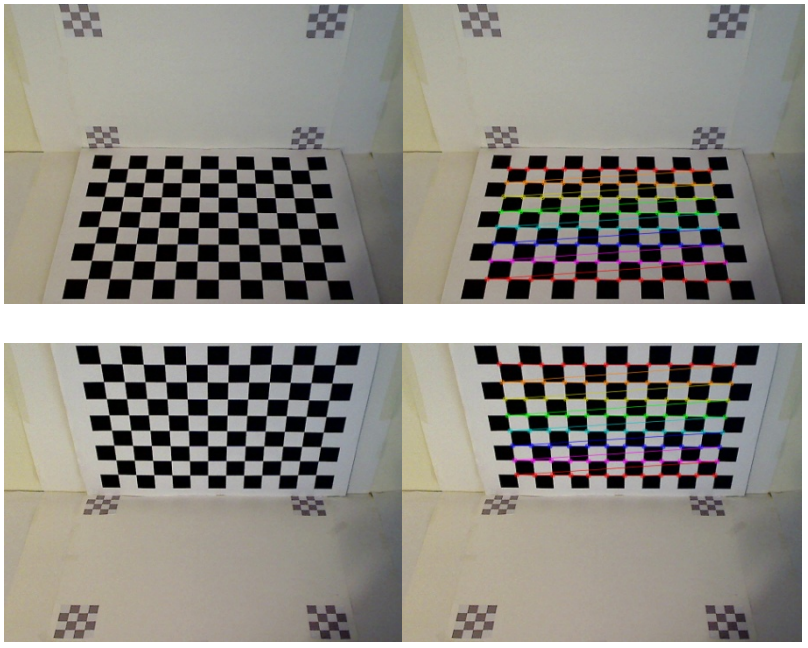
radial1	radial2	tangential1	tangential2	radial3
-0.008427	-0.018165	-0.722584	29.280724	-0.008427

Οι παράμετροι αυτοί ιδανικά θα πρέπει να προσεγγίζουν το μηδέν.

Πιο κάτω (βλ. **Σχήμα 7.1**) φαίνονται λήψεις από τη διαδικασία του Calibration.

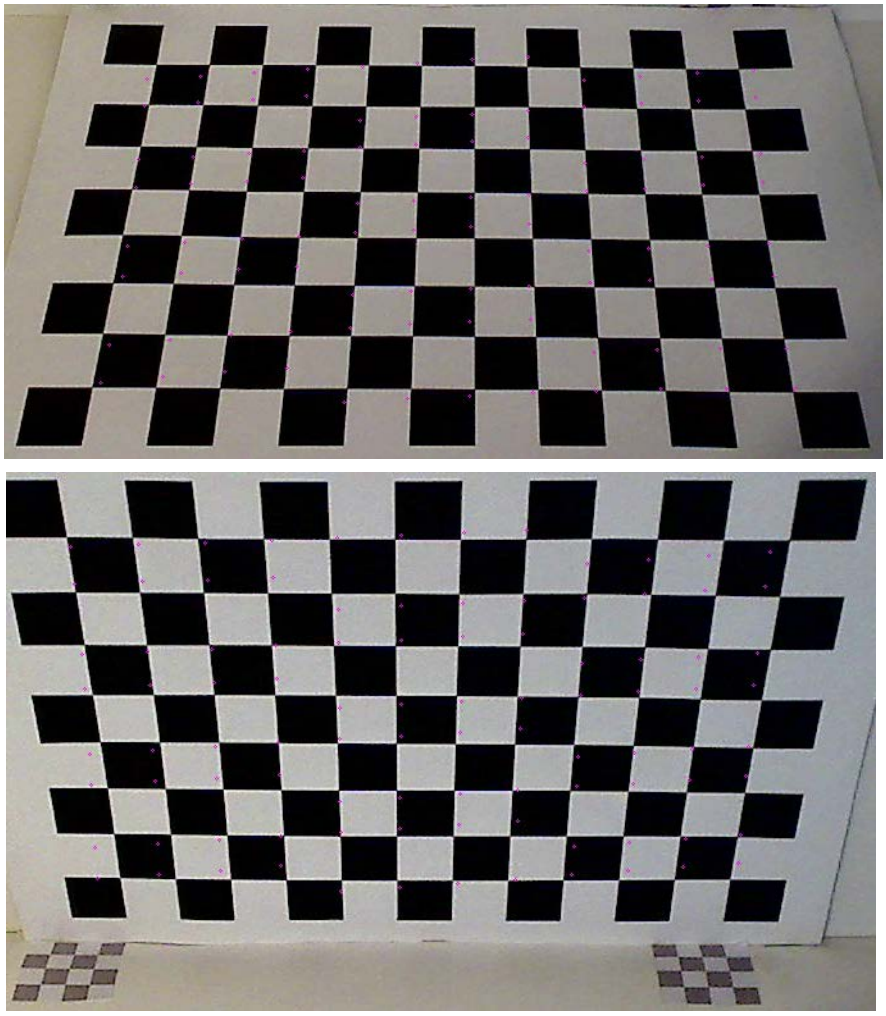
Σχήμα 7.1 Στιγμιότυπα από τη Διαδικασία του Camera Calibration

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης φάσης, χρησιμοποιήθηκαν οι ήδη υπάρχουσες εσωγενείς παράμετροι για την ανίχνευση των εξωγενών παραμέτρων που προσδιόρισαν την 3D τοποθεσία του κάθετου και οριζόντιου πλάνου ως προς το κέντρο συντεταγμένων της κάμερας. Στο **Σχήμα 7.2** φαίνεται η ανίχνευση των εξωγενών παραμέτρων:



Σχήμα 7.2: Πάνω: Ανίχνευση 3Δ τοποθεσίας για οριζόντιο πλάνο
Κάτω: Ανίχνευση 3Δ τοποθεσίας για κάθετο πλάνο

Η μέθοδος αξιολόγησης για την ορθότητα των αποτελεσμάτων έγινε βάσει της χρήσης του Reprojection Error. Συγκεκριμένα, η 3Δ τοποθεσία των γωνιών που ανιχνεύθηκε από τη διαδικασία του Camera Calibration, χρησιμοποιήθηκε μαζί με τις εσωγενείς και εξωγενείς παραμέτρους για να υπολογιστεί η προβολή της κάθε γωνίας ξανά πάνω στο checkerboard. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο **Σχήμα 7.3**:



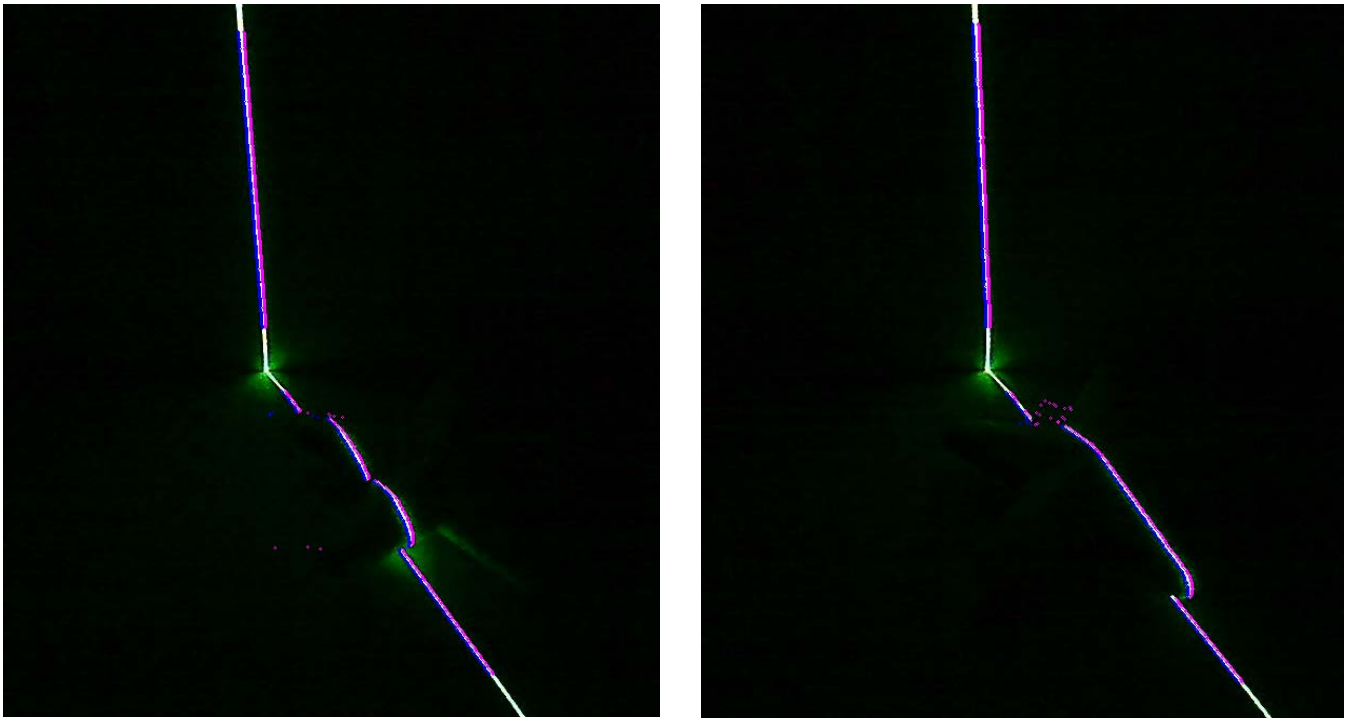
Σχήμα 7.3: Πάνω: Τα αποτελέσματα του reprojection error για το οριζόντιο πλάνο. Κάτω: Τα αποτελέσματα του reprojection error για το κάθετο πλάνο.

Τα αποτελέσματα της εύρεσης της τρισδιάστατης τοποθεσίας των πλάνων σε σχέση με την κάμερα δεν ήταν τα ιδανικά και αυτό φαίνεται ξεκάθαρα από τη μέθοδο αξιολόγησης που χρησιμοποιήθηκε. Παρόλα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί για το λόγο ότι θεωρήθηκαν αρκετά καλά σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις που έχουν γίνει.

7.3 Αποτελέσματα Σάρωσης

Έχουν γίνει αρκετά πειράματα σάρωσης χρησιμοποιώντας πολλά διαφορετικά αντικείμενα καθώς και διαφορετικά laser. Παρόλα αυτά προτιμήθηκε η χρήση του πράσινου Laser αντί του κόκκινου για λόγους που θα εξηγηθούν στο **Κεφάλαιο 8**.

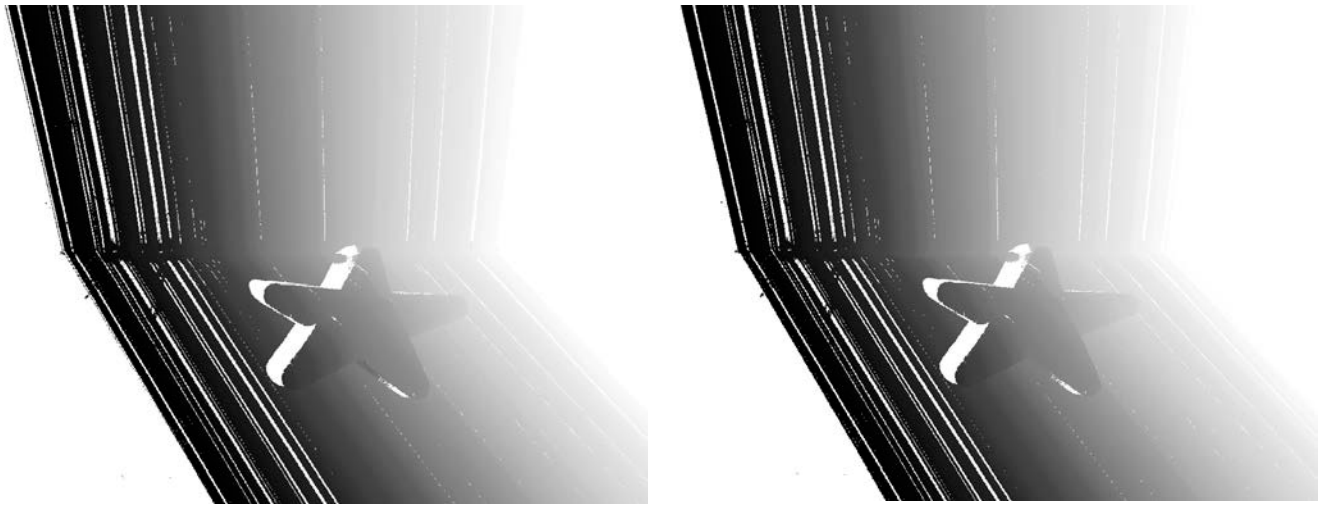
Τα αποτελέσματα του **Spatial Processing** για Green Laser σε σκοτάδι παρουσιάζονται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 7.4: Ανίχνευση των Ορίων της Ακτίνας για σάρωση στο σκοτάδι με χρήση πράσινης ακτίνας laser.

Η τεχνική αυτή είναι σε θέση να ανιχνεύσει επιτυχώς τα όρια της ακτίνας (entering με ροζ και leaving με μπλε), με πολύ μικρό ποσοστό λανθασμένων ανιχνεύσεων, όπως φαίνεται και στο πιο πάνω σχήμα. Γενική παρατήρηση για όλα τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν είναι ότι η γραμμή ανιχνεύεται επιτυχώς σε όλες τις περιπτώσεις, επομένως η μέθοδος αυτή θεωρείται κατάλληλη για τον εντοπισμό της ακτίνας στην εικόνα.

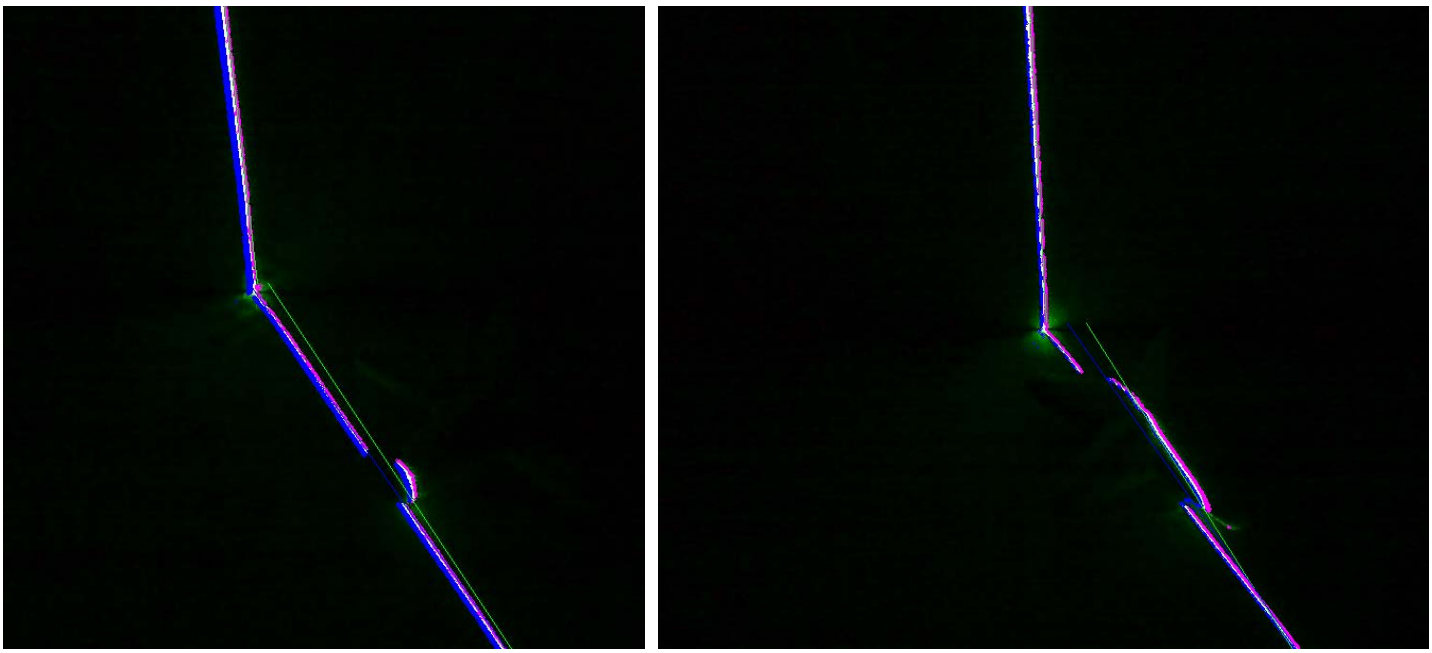
Τα αποτελέσματα του **Temporal Shadow Processing** φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 7.5: Η εικόνα αριστερά παρουσιάζει το χρόνο στον οποίο κάθε εικονίδιο φωτίζεται από την ακτίνα τη στιγμή που αυτή εισέρχεται σε αυτό ενώ η εικόνα δεξιά παρουσιάζει το χρόνο στον οποίο η ακτίνα εξέρχεται από συγκεκριμένο pixel.

Η τεχνική αυτή είναι επίσης ορθή γιατί οι τιμές που παίρνει το κάθε εικονίδιο κατά μήκος της εικόνας αυξάνονται όσο αυξάνεται και ο αριθμός εικονιδίων στον άξονα x. Μεγαλύτερη φωτεινότητα συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο, αφού έχει υψηλότερη τιμή και ο χρόνος αυξάνεται κατά frame. Έχει εφαρμοστεί συνάρτηση normalize για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αφού τα frames ήταν μεγαλύτερα από 1000, για να γίνει εμφανές το πεδίο σε grayscale μορφή.Η τεχνική αυτή θεωρείται επίσης ορθή για το λόγο ότι εντοπίζει ορθά τα χρονικά πλαίσια στα οποία ένα pixel φωτίζεται.

Στη συνέχεια (βλ **Σχήμα 7.6**) δίνονται κάποια γενικά αποτελέσματα της διαδικασίας του Scanning τα οποία συνδιάζουν τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων που έχουν αναφερθεί πιο πάνω, αποδεικνύοντας έτσι ότι είναι συμβατές μεταξύ τους.



Σχήμα 7.6: Αποτέλεσμα συνδιασμού των δύο τεχνικών για την ανίχνευση της ακτίνας στην κάθε εικόνα.

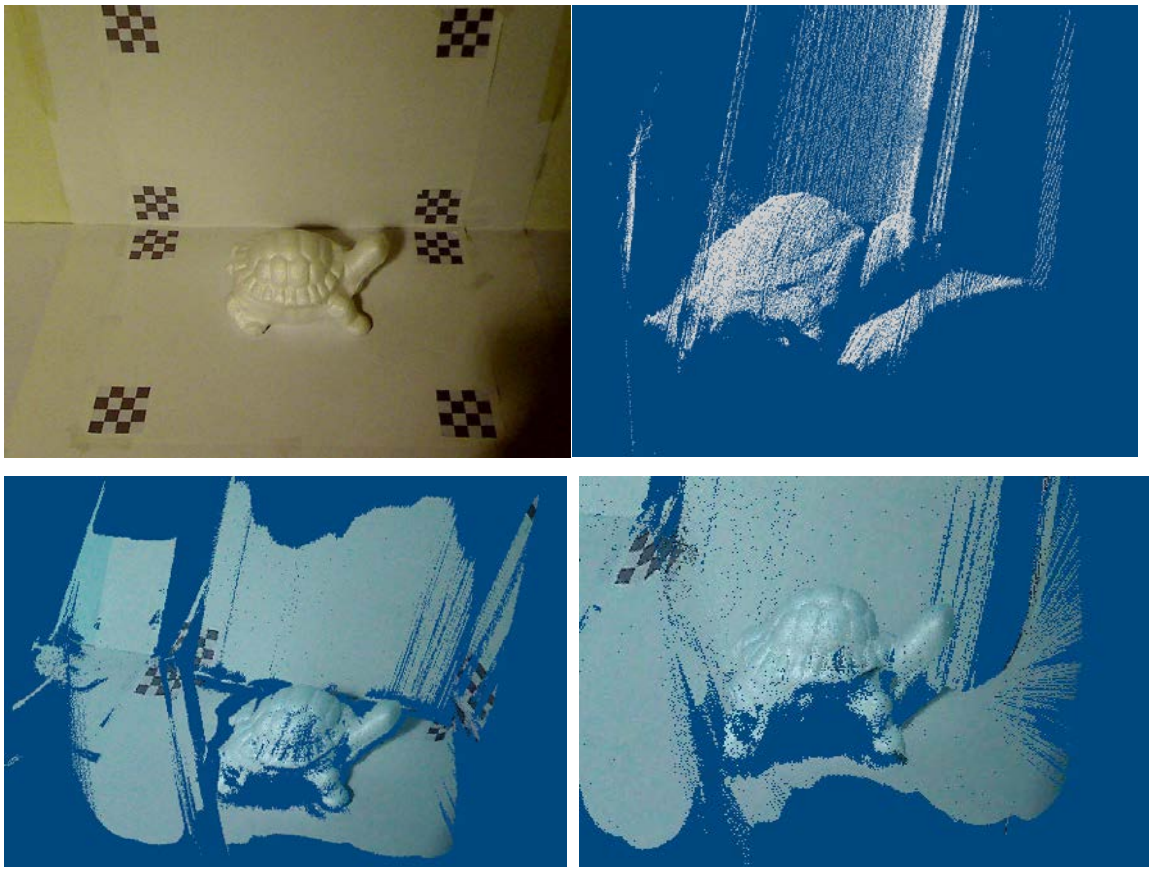
Εφόσον η ακτίνα ανιχνεύεται ορθά και με τους δύο τρόπους, θεωρείται ότι η χρήση αυτής της τεχνικής ικανοποιεί απόλυτα το σκοπό της.

7.3 Τελικά Αποτελέσματα

Έχουν σαρωθεί επτά αντικείμενα, τα τέσσερα από τα οποία είναι ανοιχτόχρωμα ενώ τα άλλα τρία είναι σκουρόχρωμα. Παρατηρήθηκε επιτυχής αναπαράσταση των ανοιχτόχρωμων αντικειμένων σε αντίθεση με τα σκουρόχρωμα τα οποία δεν ήταν δυνατό να αναπαρασταθούν επιτυχώς.Αιτία ήταν η ευαισθησία ως προς τη φωτεινότητα στην τεχνική Spatial Laser Localization, η οποία απαιτούσε ελάχιστη διαφορά φωτεινότητας διάστημα 50 τιμών. Έχουν εξεταστεί επιτυχώς τα τρία ακόλουθα σενάρια:

Σενάριο 1

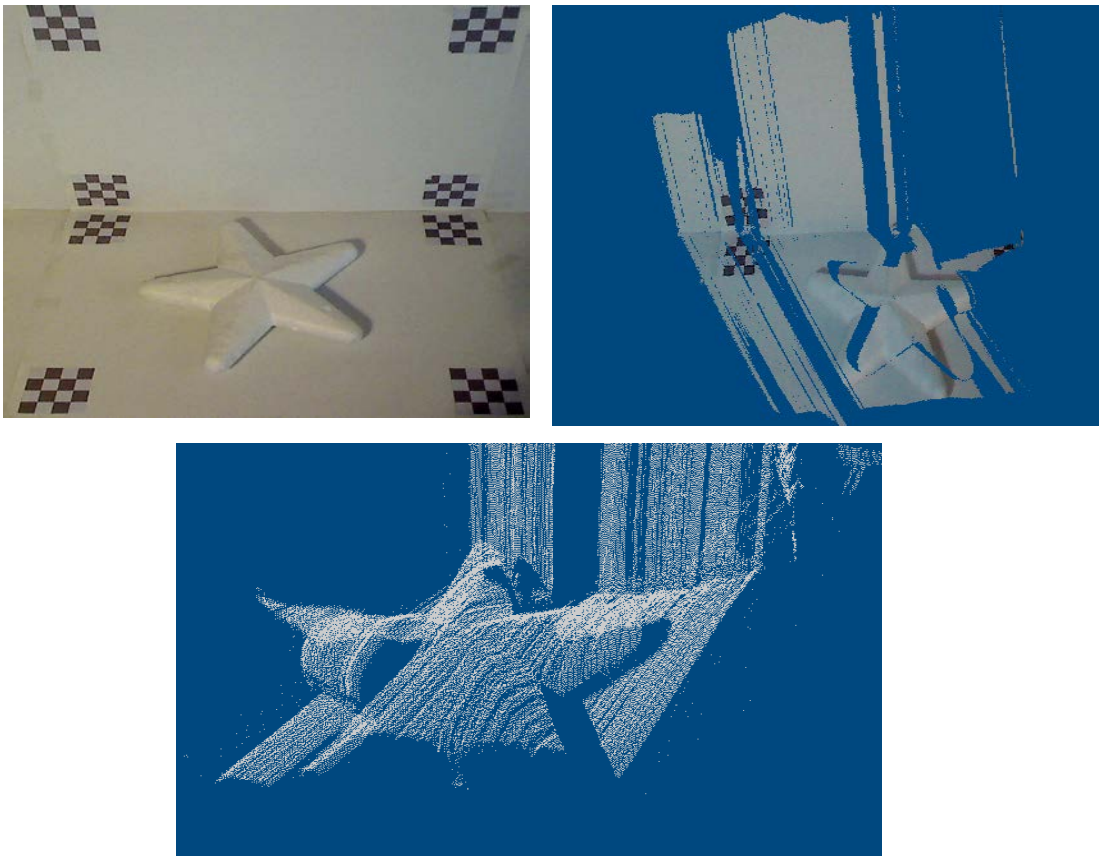
Αντικείμενο: Χελώνα



Σχήμα 7.7: Πάνω αριστερά φαίνεται το πραγματικό Αντικείμενο, πάνω δεξιά η αναπαράσταση του σε point cloud, κάτω αριστερά η αναπαράσταση του σε χρωματισμένο Point cloud και κάτω δεξιά λεπτομέρεια από το καβούκι της χελώνας ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Σενάριο 2

Αντικείμενο: Αστερίας



Σχήμα 7.8: Πάνω αριστερά φαίνεται το πραγματικό Αντικείμενο, πάνω δεξιά η αναπαράσταση του σε χρωματισμένο point cloud, ενώ κάτω η αναπαράσταση του σε απλό Point cloud**.**

Σενάριο 3

Αντικείμενο: Άγαλμα

Σχήμα 7.9: Αριστερά φαίνεται το πραγματικό αντικείμενο, ενώ δεξιά η αναπαράσταση του σε point cloud.

Παρατηρούμε ότι και στα τρία σενάρια ένα ποσοστό 70-80% των σημείων του αντικειμένου ανιχνεύθηκε επιτυχώς, παρόλο που η θέση των επιπέδων στο χώρο δεν είναι η ιδανική. Γι' αυτό θεωρούμε ότι ο στόχος της εργασίας αυτής έχει επιτευχθεί εφόσον τα αποτελέσματα είναι αρκετά ικανοποιητικά, αν ληφθεί υπόψην το γεγονός ότι έγινε χρήση ενός απλού Line laser και μίας webcam.

Αντικείμενα τα οποία δεν μπορούσαν να αναπαρασταθούν σε τρισδιάστατη μορφή λόγω της μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

Σχήμα 7.10 Σκουρόχρωμα αντικείμενα δεν εντοπίζονται ορθά από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα 73

8.1 Εισαγωγή 79
8.2 Γενικά Συμπεράσματα 79
8.3 Μελλοντική Έρευνα 80

8.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό θα δοθούν τα γενικά συμπεράσματα από την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν καθώς επίσης και αναφορές σε μελλοντική έρευνα που πιθανόν να μελετηθεί.

8.2 Γενικά Συμπεράσματα

Η μελέτη αυτή έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία. Αρχικός σκοπός ήταν να μελετηθεί μία μέθοδος η οποία να συνδιάζει χαμηλό κόστος, υψηλή ακρίβεια αποτελεσμάτων αλλά και γρήγορη απόκριση του συστήματος. Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι αρκετά ικανοποιητικά παρόλο που μπορούν να βελτιωθούν ακόμη περισσότερο, γι’ αυτό θεωρούμε ότι η διπλωματική αυτή εργασία έχει επιτύχει το σκοπό της.

Οι δυσκολίες που έχουν αντιμετωπιστεί κατά τη διάρκεια της έρευνας αυτής ήταν αρκετές. Αρχικά κάθε μέθοδος που χρησιμοποιά Laser δεν είναι σε θέση να σαρώσει αντικείμενα τα οποία είναι είτε διάφανα είτε έχουν κάποιου είδους αντικατοπτρισμό, όπως για παράδειγμα ο καθρέφτης ή γυάλινα αντικείμενα. Επίσης τα σκουρόχρωμα αντικείμενα δε μπορούν να αναπαρασταθούν επιτυχώς λόγω της τεχνικής που χρησιμοποιείται. Ένα άλλο πρόβλημα ήταν η χρήση του κόκκινου laser το οποίο προκαλούσε το φαινόμενο του subsurface scattering, εισχωρούσε δηλαδή η ακτίνα φωτός στο αντικείμενο και φώτιζε την περιοχή του αντικειμένου γύρω από την ακτίνα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε στη

συνέχεια πράσινη ακτίνα laser η οποία εκπέμπει σε διαφορετικό μήκος κύματος και δεν επηρεάζει τόσο τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν. Ακόμη ένα πρόβλημα ήταν η σάρωση υπό συνθήκες φωτός, όπου ήταν αρκετά δύσκολο να ανιχνευθεί επιτυχώς η ακτίνα λόγω της μικρής διαφοράς που υπήρχε μεταξύ των φωτισμένων και μη φωτισμένων εικονιδίων. Τέλος, λόγω του ότι έγινε χρήση της OpenCV, για τον εντοπισμό των eigenvalues και eigenvectors σε μία συγκεκριμένη συνάρτηση έγινε χρήση συνάρτησης της OpenCV η οποία δεν μπορούσε να αποδώσει τα ζητούμενα αποτελέσματα. Για αυτό το λόγο έγινε εισαγωγή της βιβλιοθήκης Alglib, με τη βοήθεια των συναρτήσεων της οποίας επιλύθηκε το πρόβλημα.

8.3 Μελλοντική Έρευνα

Μελλοντική έρευνα πάνω σε αυτή τη μελέτη ενδέχεται να επιλύσει προβλήματα ως προς την ευαισθησία των τεχνικών που χρησιμοποιούνται, αλλά και να δοκιμαστεί ως προς ένα ευρύτερο πεδίο αντικειμένων και σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, με τη χρήση περισσότερων δοκιμών για περεταίρω βελτίωση των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

[1] S. Chaudhuri and A. Rajagopalan. *Depth from defocus: a real aperture imaging approach*, Springer Verlag, 1999.

[2] G. Vogiatzis, P. H. S. Torr, and R. Cipolla. Multi-view stereo via volumetric graph-cuts. In CVPR, volume 1, pages 391–398, 2005.

[3] H. Lensch, W. Heidrich, H. P. Seidel, A silhouette-based algorithm for texture registration and stitching, Journal of Graphical Models (2001) 245.262.

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

[5] A. P. Witkin, "Recovering surface shape and orientation from texture," Artificial Intelligence, vol. 17, pp. 17-45, 1981.

[6] V.S. Ramachandran, "Perception of shape from shading," *Nature*, vol. 331, 1988, pp. 163-166.

[7] Charalambos Poullis, Paul E. Debevec, Chris Tchou, Andrew Gardner Making "The Parthenon": Digitization and Reunification of The Parthenon and its Sculptures, University of Southern California

[8] Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade and Duane Fulk, The Digital Michaelangelo Project: 3D Scanning Of Large Statues

[9] James Davis and Xing Chen, A Laser Range Scanner Designed for Minimum Calibration Complexity, Computer Graphics Lab, Stanford University

[10] Chad Hantak, 3D Laser Stripe Scanner

[11] C.Rochchini , P.Cignoni, C.Montani, P.Pingi and R.Scopigno, A Low Cost 3D Scanner Based On Structured Light, EUROGRAPHICS 2001

[12] Paul Bourke. A portable rear projection stereoscopic display. http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/exhibition/vpac/theory.html. Last visited: 2007-06-17.

[13] Emric Epstein, Martin Granger-Piche and Pierre Poulin,Exploiting Mirrors in Interactive Reconstruction with Structured Light

[14] Andrew Gardner, Chris Tchou, Tim Hawkins, Paul Debevec, Linear Light Source Reflectometry, University Of Southern California Institute for Creative Technologies Graphics Laboratory

[15] C.Rochchini , P.Cignoni, C.Montani, P.Pingi and R.Scopigno, A Low Cost 3D Scanner Based On Structured Light, EUROGRAPHICS 2001

[16] *James Davis and Xing Chen, A Laser Range Scanner Designed for Minimum Calibration Complexity, Computer Graphics Lab, Stanford University*

[17]Jean-Yves Bouguet and Pietro Perona, 3D Photography using Shadows In Dual-Space Geometry, California Institute of Technology, 136-93, 1999, pp.129-149

[18] Chris Boehnen and Patrick Flynn, Accuracy of 3D Scanning Technologies in a Face Scanning Scenario

[19] Bradley Atcheson, Ivo Ihrke, Wolfgang Heidrich, Art Tevs, Derek Bradley, Marcus Magnor and Hans-Peter Seidel, Time-resolved 3D Capture of Non-stationary Gas Flows

[20] Kern Tornslev, 3D Scanning Using Multibeam Laser, Lyngby 2005

[21] Douglas Lanman and Gabriel Taubin, Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography For Beginners, SIGGRAPH 2009

[22] Blais F., Review of 20 Years of Range Sensor Development, National Research Council Canada, Institute Of Information Technology, Journal Of Electronic Imaging, 13(1): 231-240, January 2004, NRC 46531

[22] Sam Calabrese, Abhishek Gandhi and Changy in Zhou, Full 3D Body Scanning