

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός τριών διαστάσεων σαρωτή. (3D scanner) .

Λουμάκης Δημήτριος

Μπάρδης Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Σωτήριος Τσίρκας

Δεκέμβριος 2015

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ. Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και αναφέρεται στην μελέτη και κατασκευή μηχανήματος τρισδιάστατης σάρωσης αντικειμένων (3D scanner).

Αρχικά αναλύονται βασικές αρχές τριγωνομετρίας και φωτομετρίας που καθιστούν δυνατή την μεταφορά ενός πραγματικού αντικειμένου σε ένα ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Στη συνέχεια αναλύεται η κατασκευή, ο τρόπος λειτουργίας της, καθώς και το υπολογιστικό πρόγραμμα που επιλέχθηκε για την ψηφιοποίηση του αντικειμένου. Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Σωτήριο Τσίρκα, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μας προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας αυτής.

Λουμάκης Δημήτριος / Γεώργιος Μπάρδης

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Πτυχιακή εργασία αναφέρεται στην μελέτη και κατασκευή ενός τρισδιάστατου σαρωτή αντικειμένων ο οποίος στην σύγχρονη εποχή βρίσκει πολλές πρακτικές εφαρμογές. Το μηχάνημα αυτό συλλέγει πληροφορίες από ένα αντικείμενο ή περιβάλλον που βρίσκεται στον πραγματικό κόσμο και τα μετατρέπει σε ένα σύνολο ψηφιακών δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα μπορούν αργότερα να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία ενός ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου. Οι χρήσεις ενός τέτοιου μηχανήματος είναι αναρίθμητες. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσεων μπορούν να βρεθούν στην αντίστροφη μηχανική, στη ψηφιοποίηση, στη βιοϊατρική, στην αρχαιολογία, στο ποιοτικό έλεγχο, στη τοπογραφία κ.α.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία (3) κεφάλαια. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της τρισδιάστατης σάρωσης και ψηφιοποίησης καθώς επίσης και μια ιστορική αναδρομή στις μεθόδους που χρησιμοποιούνταν μέχρι πρότείνως.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται οι υπάρχουσες μέθοδοι σάρωσης αντικειμένων σε βάθος.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επιλέγεται η διαδικασία σάρωσης που καλύπτει τις ανάγκες της εργασίας, ενώ στην συνέχεια αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπλήρωσή της.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται σε βάθος το πρόγραμμα ψηφιοποίησης που επιλέχθηκε, καθώς και η διαδικασία ψηφιοποίησης αντικειμένων με τη χρήση του.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Χθες και σήμερα.....	1
2. Ψηφιοποίηση αντικειμένων.....	3
3. Ορισμός τρισδιάστατης σάρωσης.....	4
4. Τύποι τρισδιάστατων σαρωτών.....	5

### 1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΑΡΩΤΕΣ ΜΗ-ΕΠΑΦΗΣ

1.1 Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ (triangulation).....	7
1.2 Σαρωτές δομημένου φωτός (structured light).....	16
1.3 Σαρωτές στερεοσκοπικής φωτογράφισης (στερεοφωτογράφιση).....	22
1.4 Σαρωτές φωτοσκίασης.....	26
1.5 Σαρωτές φωτομετρικής στερεοφωτογράφισης.....	27
1.6 Σαρωτές μεταβαλλόμενης εστίασης.....	29

### 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (Α) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΑΡΩΤΗ

2.1 Επιλογή βέλτιστης μεθοδολογίας σάρωσης.....	32
2.2 Επιλογή βέλτιστων εξαρτημάτων κατασκευής σαρωτή τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ.....	35
2.3 Κατασκευή τρισδιάστατου σαρωτή.....	41

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (Β) ΣΑΡΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

3.1 Γνωριμία με το πρόγραμμα ψηφιοποίησης.....	46
3.2 Διαδικασία βαθμονόμησης.....	49
3.3 Βελτιστοποίηση ρυθμίσεων σαρωτή.....	50
3.4 Διαδικασία σάρωσης.....	51
3.5 Δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου.....	52
3.6 Ανάλυση κόστους κατασκευής και σύγκριση με προϊόντα του εμπορίου.....	56
3.7 Συμπεράσματα.....	57

### 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΦΙΑ.....59

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1. ΧΘΕΣ ΚΑΙ ΣΗΜΕΡΑ

Η επιθυμία των ανθρώπων να αποτυπώσουν αντικείμενα και σχήματα με οπτικά μέσα χρονολογείται στις αρχές του 19ου αιώνα την ίδια ακριβώς περίοδο που συναντάμε τις ρίζες της φωτογραφικής τέχνης. Από τότε η τεχνολογία αποτύπωσης πραγματικών αντικειμένων έχει προχωρήσει με ραγδαίους ρυθμούς, κυρίως λόγω της συνεχούς εξέλιξης των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών και των μετρητικών διατάξεων.

Παλαιότερα, η επίλυση του προβλήματος ήταν δύσκολη και οι τρόποι προσέγγισης ιδιαίτερα χρονοβόροι. Μέχρι πριν από μερικά χρόνια, όταν η τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των μετρητικών διατάξεων δεν ήταν τόσο εξελιγμένη όσο σήμερα, η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων κτηρίων ή αντικειμένων ήταν μια πολύ δύσκολη εργασία. Η δυσκολία αυτή οφειλόταν τόσο στην διαδικασία της αποτύπωσης με ικανοποιητική ακρίβεια του υπό μελέτη τρισδιάστατου αντικειμένου όσο και η οπτικοποίηση του μοντέλου του. Κοινή πρακτική για την αποτύπωση των αντικειμένων ήταν η χρήση μη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για την μέτρηση χαρακτηριστικών σημείων του αντικειμένου χρησιμοποιώντας απλές μετρητικές διατάξεις όπως π.χ. μιας μετροταινίας ή ενός γεωδαιτικού σταθμού όσον αφορά στην αποτύπωση μεγάλων ακινήτων αντικειμένων, ή ενός υποδεκάμετρου σε συνδυασμό με ένα παχύμετρο για την μέτρηση μικρότερων αντικειμένων. Τα παραγόμενα προϊόντα σε αυτή την περίπτωση δεν παρουσίαζαν το συνολικό τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου, αλλά συνήθως παρουσίαζαν την αποτύπωση σε έναν χάρτινο φορέα υπό κλίμακα των χαρακτηριστικών όψεων, κατόψεων και τομών του αντικειμένου.

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ενός τρισδιάστατου αντικειμένου έγινε πραγματικότητα με την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την αναπαράσταση των αντικειμένων στις επιστήμες που ασχολούνται με την μελέτη τους (π.χ. τοπογραφία, αρχιτεκτονική, αρχαιολογία). Ειδικότερα η ανάπτυξη εφαρμογών τρισδιάστατης παρουσίασης και οπτικοποίησης στην οθόνη ενός υπολογιστή ενός τρισδιάστατου μοντέλου, ώθησε την χρήση ψηφιακών τεχνικών τρισδιάστατης αποτύπωσης και μετρήσεων με χρήση νέων εξελιγμένων μετρητικών διατάξεων που είναι σε θέση να παρέχουν με αυτοματοποιημένες διαδικασίες τη θέση στον χώρο ενός μεγάλου αριθμού χαρακτηριστικών σημείων που απαρτίζουν την εξωτερική επιφάνεια και οριοθετούν το αντικείμενο.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την δημιουργία των τρισδιάστατων μοντέλων των αντικειμένων είναι πάρα πολλά και σημαντικά και ωθούν ολοένα και περισσότερο στην χρήση νέων ψηφιακών τεχνικών αποτύπωσης από πολλούς και διαφορετικούς κλάδους επιστημών.

Ενδεικτικά θα μπορούσαν να αναφερθούν:

- Ιατρική
- Μηχανική
- Αρχαιολογία
- Αρχιτεκτονική
- Γεωδαισία

## 2. ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

Η διαδικασία απόκτησης τρισδιάστατων δεδομένων από πραγματικά αντικείμενα αποτελεί πλέον μείζον πρόβλημα, ιδιαίτερα όταν η γεωμετρική τους πολυπλοκότητα ξεπερνά τα ήδη γνωστά πρότυπα αντικείμενα (σφαίρες, κύβους κτλ.). Παλαιότερα η επίλυση του προβλήματος ήταν δύσκολη και οι τρόποι προσέγγισης χρονοβόροι. Η ανάπτυξη όμως ισχυρών υπολογιστικών συστημάτων και ψηφιακών μετρικών διατάξεων κατάφερα να καθιερώσουν μια συνεχώς εξελίξιμη αγορά τρισδιάστατων σαρωτών. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την καταγραφή της γεωμετρικής αλλά και χρωματικής πληροφορίας που φέρουν τα αντικείμενα, μέσα σε ελάχιστο χρόνο.

Οι αρχές λειτουργίας τους βασίζονται στην εφαρμογή γεωμετρικών αξιωμάτων και συναρτήσεων που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. Πρότυπα ακαδημαϊκά αλλά και εμπορικά συστήματα επιδιώκουν να δώσουν απάντηση στην τρισδιάστατη αποτύπωση, το καθένα από την δική του σκοπιά, κάνοντας συγκεκριμένες παραδοχές. Το μεγάλο ενδιαφέρον της παγκόσμιας ερευνητικής κοινότητας εστιάζεται στην ανάλυση των μεθόδων αποτύπωσης αλλά και στην ανάπτυξη αλγορίθμων που θα επιτρέψουν την επεξεργασία των δεδομένων με αποδοτικότερους τρόπους. Η ανάπτυξη των τρισδιάστατων σαρωτών είναι αποτέλεσμα της συνολικής δουλειάς επιστημόνων από διάφορα ερευνητικά πεδία όπως είναι αυτά της όρασης υπολογιστών, των τρισδιάστατων γραφικών, της μηχανολογίας, των μετρήσεων με ηλεκτρονικά αισθητήρια, της φωτογραμμετρίας και φυσικά των μαθηματικών.

Βασικό ρόλο στην αύξηση της δημοτικότητας των τρισδιάστατων σαρωτών παίζει η δραματική βελτίωση των υπολογιστών στον τομέα των τρισδιάστατων γραφικών πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα διαχείρισης πολύπλοκης τρισδιάστατης γεωμετρίας σε πλατφόρμες σχετικά χαμηλού κόστους βρίσκει άμεση εφαρμογή στην απεικόνιση λεπτομερών και υψηλής ακρίβειας τρισδιάστατων μοντέλων που δημιουργούν οι σαρωτικές συσκευές.

Απώτερος σκοπός όλων των ερευνητικών προσπαθειών είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου αποτύπωσης ενός αντικειμένου σε συνδυασμό με ένα υψηλής πιστότητας αποτελέσματα.

### 3. ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ

Η ποικιλία των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου έχει οδηγήσει σε μια άστοχη φιλονικία για το αν τελικά η τρισδιάστατη σάρωση, ως έννοια, ανήκει στις γεωδαιτικές μελέτες ή στην φωτογραμμετρία και την όραση των υπολογιστών. Από την σκοπιά του χρήστη όμως το αποτέλεσμα είναι αυτό που μετράει ανεξάρτητα από την μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε.

Γενικότερα, ως τρισδιάστατο σαρωτή θα μπορούσαμε να ορίσουμε οποιαδήποτε συσκευή δύναται να συλλέξει τρισδιάστατες συντεταγμένες από μια δεδομένη περιοχή πάνω στην επιφάνεια ενός αντικειμένου, η οποία πληρεί τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ακολουθεί μια αυτοματοποιημένη διαδικασία που βασίζεται σε κάποιο πρότυπο
- Πραγματοποιεί δειγματοληψία υψηλού ρυθμού (εκατοντάδες έως χιλιάδες σημεία ανά δευτερόλεπτο)
- Επιταχύνει την διαδικασία ώστε να πραγματοποιείται σε πραγματικό (σχεδόν) χρόνο
- Δύναται να διακρίνει χρωματική πληροφορία αλλά και πληροφορία υψής .

Ο τρόπος χρήσης μιας τέτοιας συσκευής μπορεί να είναι:

- Σταθερός σε κάποια συγκεκριμένη θέση
- Πάνω σε κάποιο κλασσικό, φωτογραφικού τύπου, τρίποδα
- Είτε πάνω σε παρόμοιου τύπου μεταφερόμενες βάσεις.

Η σάρωση ενός αντικειμένου είναι πολλές φορές το πιο εύκολο τμήμα μιας εργασίας ψηφιοποίησης. Η δημιουργία πιστών τρισδιάστατων αναπαραστάσεων που αποτελούνται από ακανόνιστες επιφάνειες απαιτούν συνήθως πολύ χρόνο και πολύ εργασία. Ο χρόνος που απαιτείται για την επεξεργασία των δεδομένων αυτών καθώς και για την δημιουργία ενός υψηλής πιστότητας μοντέλου είναι πολλές φορές μεγαλύτερος από τον χρόνο σάρωσης.



#### 4. ΤΥΠΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΣΑΡΩΤΩΝ

Υπάρχουν πολλοί τύποι τρισδιάστατων σαρωτών, με τον κάθε τύπο να έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες και προτεινόμενες χρήσεις. Οι τύποι των συσκευών αυτών μπορούν να διαχωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες ανάλογα με την αλληλεπίδραση τους με το ως προς σάρωση αντικείμενο, βάσει της πλέον κοινά αποδεκτής κατηγοριοποίησης του BrianCurless.

##### Σαρωτές επαφής

Οι σαρωτές επαφής είναι διατάξεις κατάλληλα εξοπλισμένες με μηχανικούς βραχίονες και μια σειρά από ηλεκτρονικούς αισθητήρες θέσης. Κατά την διαδικασία της σάρωσης ο βραχίονας έρχεται σε επαφή με ένα σημείο της επιφάνειας του προς ψηφιοποίηση αντικείμενου και οι αισθητήρες καταγράφουν την θέση των αξόνων στήριξης του βραχίονα σε καρτεσιανό επίπεδο. Μετά από διαδοχικές επαφές του βραχίονα με το αντικείμενο, υπολογίζεται αντιστρόφως από τα σημεία επαφής σε σχέση με την σχετική τους απόσταση και την μεταξύ τους γωνία το απαιτούμενο νέφος σημείων για την δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου του. Η προαναφερθείσα μέθοδος έχει ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια και χρησιμοποιείται εκτενώς σε βιομηχανικές εφαρμογές. Μεγάλο μειονέκτημα της του συγκεκριμένου τύπου σαρωτών είναι η φυσική αλληλεπίδραση του προς εξέταση αντικείμενου, αφού κάτι τέτοιο θα μπορούσε να οδηγήσει σε αλλοίωση ή ακόμα και καταστροφή του δοκιμίου. Μια τυπική συσκευή σάρωσης με την μέθοδο της επαφής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Τρισδιάστατος σαρωτής επαφής

## Σαρωτές Μη-επαφής

Οι σαρωτές μη-επαφής βασίζονται στην εκπομπή κάποιου μήκους κύματος ή φωτός και ανιχνεύοντας την ανάκλαση του πάνω στο δοκίμιο, καταφέρνουν να υπολογίσουν τις διαστάσεις του αλλά και την γεωμετρία του ως προς τον ήδη γνωστό χώρο . Μια μεγάλη ποικιλία τέτοιων συσκευών είναι διαθέσιμη στο εμπόριο και ενδεικτικά αναφέρονται κάποιες στην συνέχεια.

Οι Time-of-flight σαρωτές είναι ουσιαστικά η μετεξέλιξη των Time-of-flight cameras. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούν ένα laser εκπομπής φωτεινού παλμού. Η συσκευή υπολογίζει τον απαιτούμενο χρόνο επιστροφής του φωτεινού παλμού στην πηγή ύστερα από την ανάκλαση του στο δοκίμιο. Ο χρόνος αυτός επί την ταχύτητα του φωτός είναι η συνολική απόσταση που ταξίδεψε ο παλμός και συνεπώς το μισό της, είναι η απόσταση εκείνου του σημείου του αντικειμένου στο οποίο προσέκρουσε, από το σημείο εκπομπής. Με σειρά διαδοχικών εκπομπών σε μια ευρεία περιοχή που υπερκαλύπτει το ύψος και πλάτους του δοκιμίου καταλήγουμε στην συλλογή αρκετών σημείων αναφοράς για την δημιουργία μιας άποψης του τρισδιάστατου μοντέλου του δοκιμίου. Τέτοιου είδους συσκευές δύνανται να σαρώσουν έως και ολόκληρα κτήρια σε ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να προτιμούνται συνήθως από κατασκευαστικές εταιρίες. Μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ο χρόνος που απαιτείται για υψηλής ανάλυσης λήψεις καθώς και οι συχνές μικρό-στρεβλώσεις που παρατηρούνται στην τελική πληροφορία όταν η γεωμετρία του προς σάρωση αντικειμένου παρουσιάζει ιδιομορφίες. Ένας από τους πιο δημοφιλείς σαρωτές της κατηγορίας φαίνεται στην Εικόνα 2.



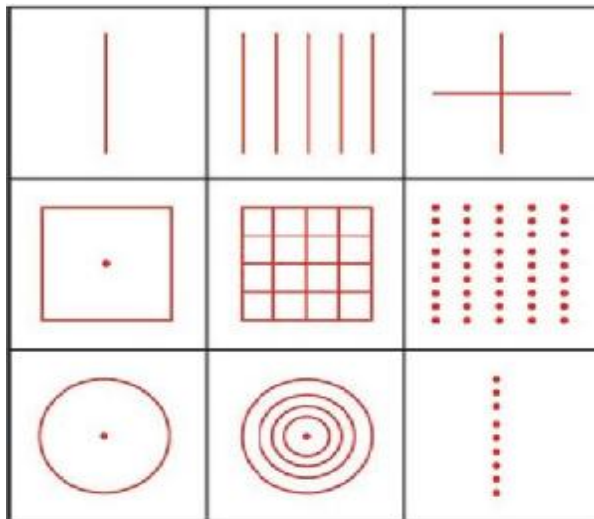
Εικόνα 2: Τρισδιάστατος σαρωτής μη-επαφής

# 1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΑΡΩΣΗΣ ΜΕ ΣΑΡΩΤΕΣ ΜΗ-ΕΠΑΦΗΣ

## 1.1 Σαρωτές τριγωνοποίησης με ακτίνες λέιζερ (triangulation)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τριγώνων αποτελούν την βάση για πολλές τεχνικές μετρήσεων. Από τις βασικές μετρήσεις γεωδαισίας που πραγματοποιούνταν στην αρχαία Ελλάδα μέχρι και σήμερα με τους τρισδιάστατους σαρωτές λέιζερ, η χρήση των τριγώνων είναι θεμελιώδης. Το βασικότερο γεωμετρικό θεώρημα που μας παρέχει άμεση λύση στο πρόβλημα της τριγωνοποίησης είναι ο νόμος των συνημίτονων (Θαλής 6<sup>ος</sup> αιώνας π.Χ.)

Οι πηγές ακτίνων λέιζερ έχουν μεγάλη εφαρμογή στην τρισδιάστατη σάρωση λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά μιας δέσμης φωτός λέιζερ είναι η μικρή της διασπορά-απόκλιση, η μεγάλη και συγκεντρωμένη ισχύς της, που διατηρείται σε μεγάλες αποστάσεις και η εκπομπή της σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Οι ιδιότητες αυτές των ακτίνων λέιζερ τις καθιστούν την ιδανικότερη μέθοδο σάρωσης Μη-επαφής. Τα συστήματα που βασίζονται στην εκπομπή ακτίνων λέιζερ χρησιμοποιούν διαφορετικά μοτίβα φωτός. Στην παρακάτω Εικόνα (3) παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα μοτίβων προβολής.



Εικόνα 3: Μοτίβα προβολής σαρωτών λέιζερ

Οι σαρωτές αντικειμένων που βασίζονται σε ακτίνες λέιζερ χρησιμοποιούνται κυρίως σε αποστάσεις μικρότερες των δέκα μέτρων και θα μπορούσαμε να τους κατατάξουμε σε κατηγορίες ανάλογα με το πλήθος των οπτικών αισθητήρων που χρησιμοποιούν.

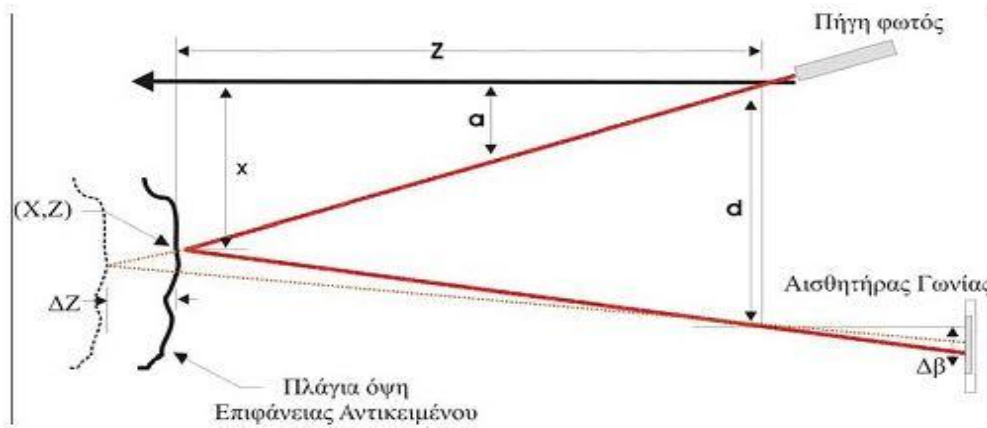
Έτσι σε σαρωτές με έναν αισθητήρα εικόνας, υπάρχει μια πηγή που προβάλλει την ακτίνα λέιζερ σε μια συγκεκριμένη και μεταβαλλόμενη προς την επιφάνεια του αντικειμένου γωνία. Ένας αισθητήρας εικόνας CCD ή CMOS βρίσκεται στην άλλη άκρη της βάσης του συστήματος και αναλαμβάνει τον εντοπισμό του σημείου ή της περιοχής που περιγράφει η ακτίνα του λέιζερ καθώς ανακλάται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η προβολή της ακτίνας μπορεί να σχηματίζει απλά ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα μοτίβο από ρίγες ή και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα. Η τρισδιάστατη θέση της επιφάνειας του αντικειμένου που αντανακλά την ακτίνα μπορεί να βρεθεί με το ιδεατό τρίγωνο που δημιουργείται. Η ακρίβεια μέτρησης βάθους μειώνεται ανάλογα με την απόσταση ανάμεσα στον σαρωτή και το αντικείμενο. Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση ανάμεσα στους οπτικούς αισθητήρες και στην πηγή της ακτίνας λέιζερ δεν μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα.

Η χρήση δύο οπτικών αισθητήρων αποτελεί μια παραλλαγή της αρχικής ιδέας τριγωνοποίησης. Οι αισθητήρες βρίσκονται στα δύο άκρα της βάσης του σαρωτή. Το σημείο αντανάκλασης της ακτίνας λέιζερ γίνεται αντιληπτό και από τους δύο αισθητήρες. Η γεωμετρική λύση είναι ίδια με αυτήν του ενός αισθητήρα άρα και τα αποτελέσματα έχουν την ίδια ακρίβεια. Ο δεύτερος αισθητήρας χρησιμοποιείται για την γρηγορότερη σάρωση αφού η πολυμορφία της επιφάνειας των αντικειμένων προκαλεί συχνά την αδυναμία του ενός αισθητήρα να φτάσει σε κάποια σημεία που την ίδια στιγμή μπορεί να είναι εμφανή στο δεύτερο αισθητήρα λόγω της διαφορετικής του θέσης και γωνίας.

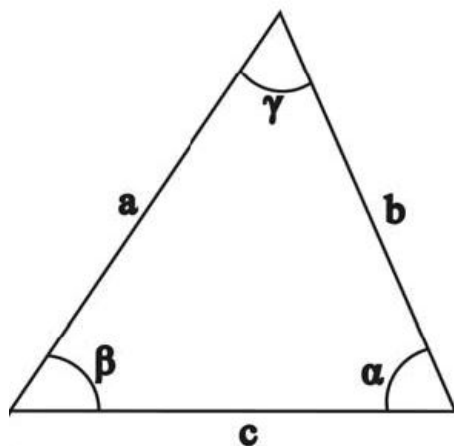
Η οπτική τριγωνοποίηση είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται για περισσότερα από είκοσι χρόνια για την μέτρηση αποστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως η ανάπτυξη γεωμετρικά σταθερών αισθητήρων και διόδων φωτός βελτίωσε κατά πολύ την ακρίβεια και την ταχύτητα της εν λόγω τεχνικής. Η ποικιλία στους σαρωτές τριγωνοποίησης βασίζεται κυρίως:

- Στη δομή του φωτισμού (σημείο, ακτίνα λέιζερ, πλέγμα κ.α.)
- Στη μορφή του αισθητήρα (πίνακας, πλέγμα, CMOS, CCD)
- Στη μέθοδο σάρωσης (μετακίνηση αντικειμένου γύρω από την πηγή φωτός ή μετακίνηση συστήματος γύρω από το αντικείμενο).

Η βασική γεωμετρική αρχή των συστημάτων τριγωνοποίησης περιγράφεται στην Εικόνα 4. Μπορούμε να διακρίνουμε το συσχετισμό ανάμεσα στο σχήμα αυτό και στο σχήμα που περιγράφει τον νόμο των συνημίτονων (Εικόνα 5). Γνωρίζοντας τις δύο γωνίες ( $\alpha$  και  $\Delta\beta$ ) ενός τριγώνου που είναι πάντα σχετικές με τη βάση του ( $d$ ) τότε όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του τριγώνου μπορούν να οριστούν πλήρως. Σε κάθε αλλαγή της απόστασης  $\Delta Z$ , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία  $\Delta\beta$  με το θεώρημα των αντίθετων γωνιών, θεωρώντας ότι το  $\alpha$  είναι πάντα σταθερό. Ο αισθητήρας γωνίας είναι σταθερός. Για τον υπολογισμό της θέσης της επιφάνειας του αντικειμένου απαιτείται η σάρωση της κάθε διαδιάστατης εικόνας που αποτυπώνει ο οπτικός αισθητήρας, ώστε να βρεθεί το σημείο με την μέγιστη συγκέντρωση φωτός. Η διάταξη που παρουσιάζει η Εικόνα 4 είναι γνωστή ως σύστημα μονού σημείου ακτίνας λέιζερ.



Εικόνα 4: Σύστημα μονού σημείου ακτίνας λέιζερ



$$\frac{a}{\eta\mu(\alpha)} = \frac{b}{\eta\mu(\beta)} = \frac{c}{\eta\mu(\gamma)}$$

Εικόνα 5: Νόμος συνημίτονων

Σε πολλές εφαρμογές αποτύπωσης αντικειμένων, εκτός από τη γεωμετρία, η απόκτηση πληροφορίας υψής είναι απαραίτητη, καθώς προσφέρει μεγάλο ρεαλισμό, ιδιαίτερα όταν τα αντικείμενα φέρουν κάποιες μορφής διακόσμηση. Με την χαρτογράφηση της πληροφορίας υψής πάνω στην γεωμετρία επιτυγχάνεται μια φωτορεαλιστική απόδοση του αντικειμένου. Μερικοί σαρωτές μπορούν και καταγράφουν την ένταση του επιστρεφόμενου σήματος προς τον οπτικό αισθητήρα. Αυτή η πληροφορία, όμως, δεν είναι αρκετή για την ρεαλιστική απόδοση της υψής. Οι περισσότεροι εμπορικοί σαρωτές τριγωνοποίησης έχουν βελτιστοποιηθεί για την αναγνώριση της ακτίνας λέιζερ και του σημείου που καταδεικνύει και όχι για την αποτύπωση της πληροφορία υψής στο συγκεκριμένο σημείο. Υπάρχουν χρήστες που απαιτούν την ύπαρξη υψηλής ποιότητας φωτογραφικών μηχανών μέσα στο ίδιο σύστημα σάρωσης. Η λύση αυτή είναι όμως δαπανηρή και κάποιοι εκ των χρηστών δεν είναι έτοιμοι να ανταποκριθούν στο κόστος μιας τέτοιας επιπρόσθετης λειτουργίας. Μια τυπική λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα, που ακολουθείται από αρκετές εταιρείες, είναι η τοποθέτηση εξωτερικής ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής πάνω στο σαρωτή με χρήση κάποιου συστήματος στήριξης και προσαρμογής. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η γνώση της σχετικής απόστασης σαρωτή και ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση τους. Η βαθμονόμηση και των δύο θα επιτρέψει την χαρτογράφηση (UV mapping) των δυσδιάστατων εικόνων πάνω στην επιφάνεια του πολυγωνικού πλέγματος ή του νέφους σημείων.

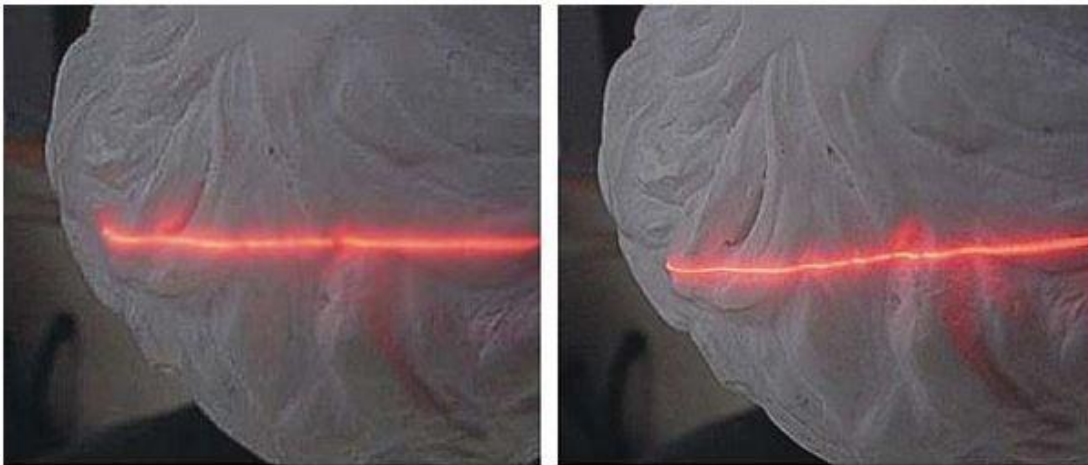
## **Η διαδικασία της βαθμονόμησης**

Η διαδικασία βαθμονόμησης του ψηφιακού οπτικού συστήματος που χρησιμοποιεί ένας σαρωτής λέιζερ κοντινών αποστάσεων είναι βασικός παράγοντας της ορθής λειτουργίας του. Η διαδικασία βαθμονόμησης είναι συνήθως τυποποιημένη και περιλαμβάνει την αναγνώριση των εσωτερικών και εξωτερικών χαρακτηριστικών του οπτικού συστήματος με την βοήθεια ενός πραγματικού αντικείμενου που τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά είναι γνωστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά βοηθούν στην εύρεση εκείνου του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει την εστιακή απόσταση, τις παραμορφώσεις που εισάγει ο φακός στην εικόνα, καθώς και άλλες παραμέτρους που έχουν εφαρμογή στη σάρωση. Μετά τη σάρωση του γνωστού αντικείμενου η ακρίβεια και οι ανοχές μέτρησης του συστήματος μπορούν να υπολογιστούν. Αυτή η διαδικασία αποτελεί και τη φάση επαλήθευσης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων.

Η ακρίβεια του συστήματος μπορεί να υπολογισθεί μέσω του γνωστού αντικειμένου βαθμονόμησης το οποίο αποτυπώνεται από διαφορετικές θέσεις και προσανατολισμούς. Ένας γενικός κανόνας που ακολουθείται στη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πως τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου βαθμονόμησης πρέπει να είναι γνωστά με ακρίβεια δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που αποτυπώνει το ψηφιακό οπτικό σύστημα του σαρωτή.

### Ανάλυση του σαρωτή

Η τελική ανάλυση ενός αντικειμένου είναι θεωρητικά μια συνάρτηση του μεγέθους των γωνιακών μεταβολών που μπορεί να αντιληφθεί το σύστημα καθώς η ακτίνα λέιζερ μετακινείται πάνω στις επιφάνειες. Μια πιο πρακτικής αξίας επεξήγηση της ανάλυσης σχετίζεται με το μέγεθος του στίγματος της ακτίνας λέιζερ που αντανακλάται. Αν η υψηλή ανάλυση είναι βασική προϋπόθεση σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης, τότε θα πρέπει με μεγάλη προσοχή να ελεγχθεί η βέλτιστη ικανότητα εστίασης της ακτίνας πάνω στο αντικείμενο είτε χειροκίνητα είτε μέσω κάποιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας που φέρει ο σαρωτής, έτσι, ώστε η αποτύπωση της γεωμετρίας του αντικειμένου να γίνει με την υψηλότερη δυνατή ανάλυση. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται στιγμιότυπο από διαδικασία ψηφιοποίησης στο επάνω τμήμα μιας προτομής. Η ρύθμιση της εστίασης γίνεται χειροκίνητα. Εμφανέστατη είναι η διαφορά έντασης της δέσμης καθώς ο σαρωτής πλησιάζει προς το σημείο βέλτιστης εστίασης.

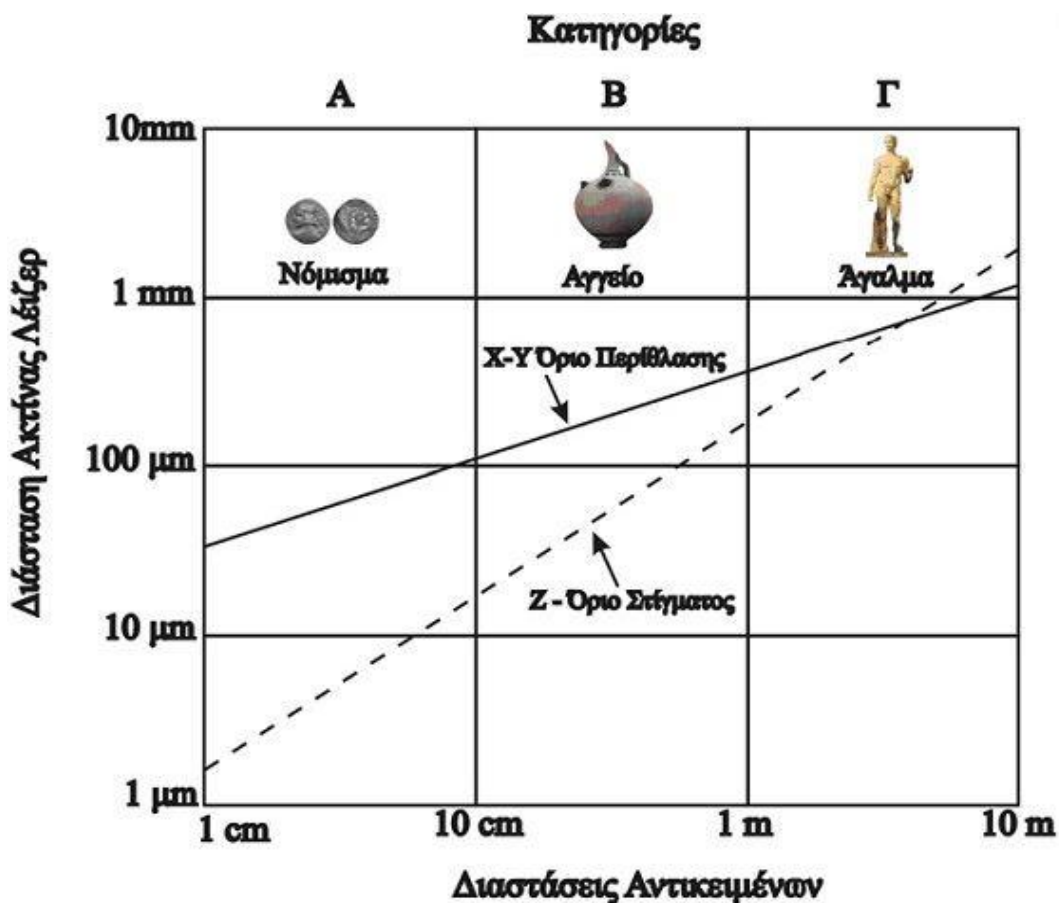


α) Η ακτίνα βρίσκεται εκτός εστίασης λόγω της απόστασης του σαρωτή από το αντικείμενο.

β) Η ακτίνα σε σωστή εστιακή απόσταση από το αντικείμενο.

Εικόνα 6: Διαφορετικοί βαθμοί εστίασης της δέσμης λέιζερ του σαρωτή

Η ανάλυση της οπτικής τριγωνοποίησης περιορίζεται από την περίθλαση της ακτίνας. Ακόμα και σε βέλτιστες περιπτώσεις εκπομπής, η δέσμη φωτός δεν διατηρεί τον απόλυτη ευθυγράμμιση με τον στόχο της. Στην πραγματικότητα, όσο μικρότερη είναι η ακτίνα λέιζερ τόσο μεγαλύτερη είναι η απόκλιση που δημιουργείται εξαιτίας της περίθλασης. Η περίθλαση της δέσμης επιβάλλει έναν περιορισμό στην ισχύ της ακτίνας λέιζερ. Το γράφημα στην Εικόνα 6 περιγράφει το βαθμό διάθλασης της ακτίνας καθώς μεταβάλλεται το μέγεθος των αντικειμένων. Ο διαχωρισμός των αντικειμένων έγινε με βάση τις διαστάσεις τους σε τρεις βασικές κατηγορίες. Ο περιορισμός αυτός έχει να κάνει με τα όρια ανάκτησης της δέσμης από τους αισθητήρες καθώς η δέσμη κινείται κατά μήκος των αξόνων  $x$  και  $y$ . Στην περίπτωση του άξονα  $z$  θα περίμενε κανείς μια συνεχόμενη βελτίωση καθώς η ισχύς της ακτίνας αυξάνεται και πλησιάζει την επιφάνεια του αντικειμένου. Δυστυχώς όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Μια λεπτομερής ανάλυση για τα χαρακτηριστικά της διάδοσης της δέσμης φωτός μπορεί να βρεθεί στην εργασία των Beraldin[1].



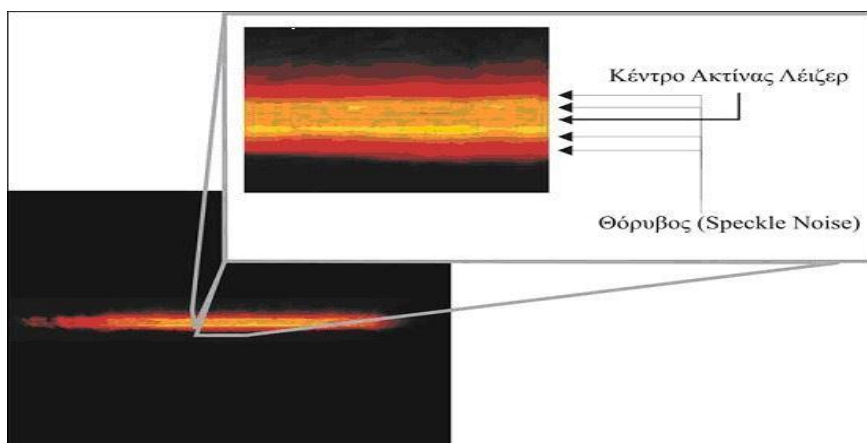
Εικόνα 6: Βαθμός διάθλασης δέσμης φωτός ανά μέγεθος αντικειμένου



## Ο Θόρυβος της δέσμης φωτός

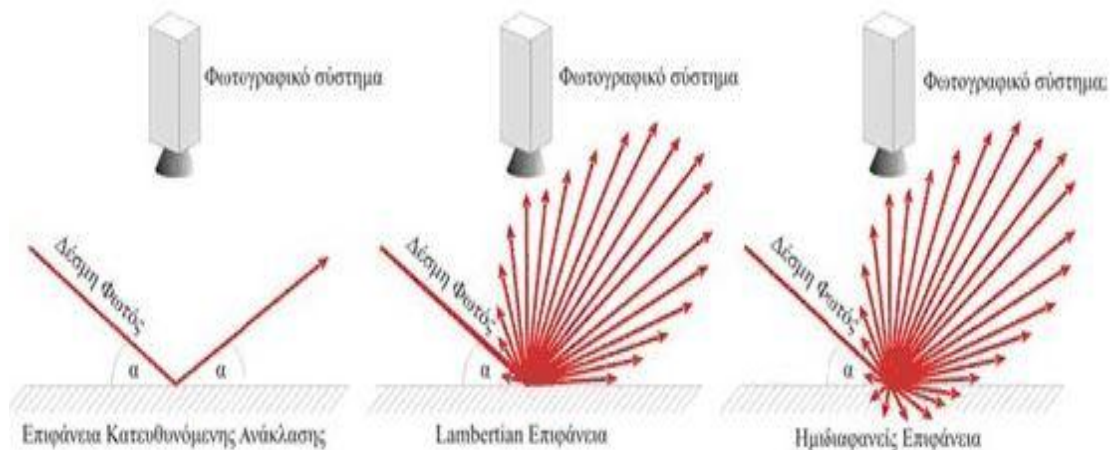
Σε συστήματα τριγωνοποίησης κοντινών αποστάσεων, η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται σε μέγιστο βαθμό από την ορθή ερμηνεία της θέσης της ακτίνας λέιζερ. Η δέσμη φωτός δημιουργεί ένα Gaussian προφίλ πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Πιο συγκεκριμένα, η χωρική κατανομή της δέσμης φωτός σε ένα σημείο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση καταστροφικών παρεμβολών που περιορίζουν τη δυνατότητα ανάκτησης της δέσμης από τους οπτικούς αισθητήρες. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό και ως speckle effect και εμφανίζεται με την μορφή τυχαίας διάχυσης της δέσμης. Υπεύθυνη για το θόρυβο είναι μεταξύ άλλων η επιφάνεια του αντικειμένου και, κυρίως, η τραχύτητα της. Ο θόρυβος αυτός (speckle noise) ο οποίος εμφανίζεται στη δέσμη του φωτός μεταφέρεται και στα τελικά δεδομένα (Εικόνα 7).

Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις συνέπειες του θορύβου στον καθορισμό αποστάσεων με τριγωνοποίηση και έχουν καταλήξει στο αξίωμα ύπαρξης ενός θεμελιώδους ορίου που αποτελεί και το φράγμα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ο θόρυβος δύναται να μειωθεί με την εφαρμογή συγκεκριμένων τεχνικών. Οι γραμμικές τεχνικές φιλτραρίσματος που βασίζονται σε χρονικούς τελεστές και βρίσκουν εφαρμογή στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας δεν αποδίδουν στην συγκεκριμένη περίπτωση και δεν μπορούν να μειώσουν τέτοιου είδους θόρυβο. Η διόρθωση γίνεται με τεχνικές φιλτραρίσματος στο πεδίο της εικόνας. Τα φίλτρα αυτά είναι γνωστά από τους χώρους της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και ως χωρικά φίλτρα. Μια κλασική μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος ορθής ερμηνείας της θέσης, αποτελεί η εύρεση του κέντρου του μονοδιάστατου παλμού της δέσμης. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής είναι σωστά μόνο όταν η επιφάνεια σάρωσης είναι επίπεδη. Καταλήγουμε λοιπόν στον κανόνα ότι «τα οπτικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας ενός αντικειμένου επηρεάζουν τις επιδόσεις του σαρωτή λέιζερ».



Εικόνα 7: Εμφάνιση θορύβου (speckle noise) σε αντικείμενο

Ο βέλτιστος τύπος επιφάνειας για ψηφιοποίηση με ακτίνες λέιζερ είναι αυτός που φέρει χαρακτηριστικά Lambert (ματ) και ταυτόχρονα έχει υψηλό δείκτη ανάκλασης. Στην Εικόνα 8 περιγράφεται ο τρόπος που συμπεριφέρονται οι δέσμες φωτός καθώς ανακλώνται σε μια επιφάνεια κατευθυνόμενης ανάκλασης (specular) (Εικόνα 8α), σε μια Lambertian επιφάνεια (Εικόνα 8β) και μια ημιδιαφανή επιφάνεια (π.χ. μάρμαρο) (Εικόνα 8γ).



Εικόνα 8: Ανάκλαση δέσμης φωτός σε διαφορετικές επιφάνειες

Σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια το φως διεισδύει μέσα στα υποστρώματα του αντικείμενου σε βάθος ανάλογο της ισχύος του. Επιπρόσθετα, τα φως διαχέεται μέσα στα υποστρώματα του αντικείμενου και δημιουργεί διασκορπισμό. Στην ημιδιαφανή επιφάνεια το οπτικό σύστημα του σαρωτή συλλέγει πλήθος από ανακλάσεις φωτός που περιέχουν κορυφές. Αν η ένταση της δέσμης μειωθεί, ο θόρυβος γίνεται ακόμα πιο εμφανής και αυτό μειώνει περισσότερο την ποιότητα ανακατασκευής του τρισδιάστατου μοντέλου. Γενικά, θόρυβος στα δεδομένα εμφανίζεται όταν:

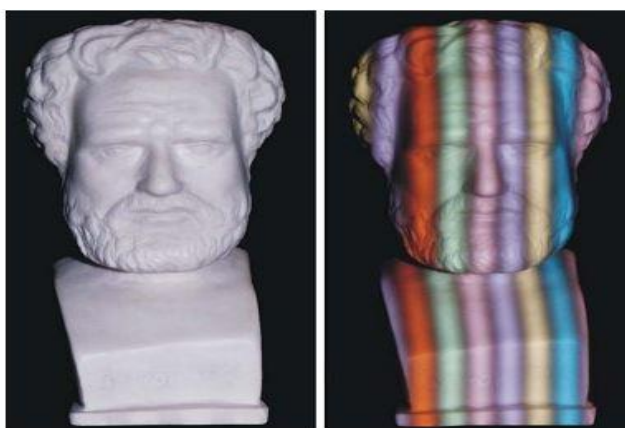
- η ανακλαστικότητα της επιφάνειας ποικίλει και μεταβάλλεται
- η γεωμετρία της επιφάνειας παρεκκλίνει έντονα από επίπεδο σε επίπεδο
- η πορεία της δέσμης φωτός μέχρι τον αισθητήρα παρεμποδίζεται
- η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί θόρυβο στην δέσμη φωτός

Ανακεφαλαιώνοντας, ο θόρυβος στην δέσμη φωτός είναι η κύρια πηγή σφαλμάτων και εμφανίζεται εξαιτίας των αντανάκλασεων της δέσμης από επιφάνειες που αποδεικνύονται τραχιές για το μήκος κύματος της δέσμης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του αντικειμένου εισάγει τυχαίες αποκλίσεις στις διαδρομές της οπτικής πορείας (τροχιάς). Οι αποκλίσεις αυτές προκαλούν τυχαία σχήματα παραμόρφωσης στην τελική γεωμετρία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο παλμός της δέσμης φωτός που αποτυπώνεται στην εικόνα και χρησιμοποιείται αργότερα από τον σαρωτή για την ανάκτηση της τρίτης διάστασης (βάθος) εμπεριέχει το θόρυβο, ο οποίος επηρεάζει την αναγνώριση του κέντρου της δέσμης. Κάτι τέτοιο αποφέρει σφάλματα ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια είναι επίπεδη. Συνολικά μπορούμε να αναγνωρίσουμε τρεις διαφορετικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν την αποτύπωση με ακτίνες λέιζερ. Αυτές οι πηγές είναι ο ηλεκτρικός θόρυβος, ο θόρυβος κβαντισμού και ο θόρυβος από τη διάχυση της δέσμης φωτός. Οι δύο πρώτες πηγές θορύβου σχετίζονται με τον αισθητήρα αποτύπωσης της εικόνας που χρησιμοποιείται. Σε περιπτώσεις όπου είναι χαμηλή η ισχύς της δέσμης φωτός, ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal-to-noise ratio) είναι μικρός, και έτσι, οι δύο αυτές πηγές θορύβου επηρεάζουν στο μέγιστο τα αποτελέσματα αποτύπωσης. Τέλος, ο θόρυβος από διάχυση της δέσμης σχετίζεται απόλυτα με την ίδια την φύση της ακτίνας λέιζερ.

Σε περιπτώσεις όπου η αποτύπωση πολύπλοκων επιφανειών είναι αναγκαία, τότε τα νέφη σημείων περιέχουν, συνήθως, θόρυβο. Ο θόρυβος παρουσιάζεται στο νέφος υπό την μορφή σημείων που ενώ θα έπρεπε να βρίσκονται πάνω στο ίδιο νοητό επίπεδο, αυτά αποκλίνουν προς τυχαίες διευθύνσεις γύρω από αυτό. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί δυσκολίες κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων αφού επιβάλουν την χρήση φίλτρων ομαλοποίησης (smoothing) και απλοποίησης (simplification). Στόχος των φίλτρων είναι να αφαιρέσουν το θόρυβο, να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα, να διατηρήσουν άθικτα τα περιθώρια των επιφανειών και τον όγκο του αντικειμένου.

## 1.2 ΣΑΡΩΤΕΣ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου είναι απλή. Η ανάκτηση της πληροφορίας βάθους πραγματοποιείται με την προβολή ενός μοτίβου φωτός πάνω σε ένα αντικείμενο, από γνωστή οπτική γωνία. Η σάρωση με χρήση δομημένου φωτός βασίζεται στην τριγωνοποίηση, όπως και η σάρωση με ακτίνες λέιζερ. Οι δύο μεθοδολογίες έχουν παρεμφερή χαρακτηριστικά ενώ οι εμπορικές υλικοτεχνικές κατασκευές πολλές φορές ταυτίζονται μεταξύ τους. Εξαίρεση αποτελεί η αντικατάσταση της πηγής λέιζερ από μια συσκευή προβολής εικόνας. Για την τρισδιάστατη αποτύπωση πραγματοποιούνται προβολές από φωτεινά μοτίβα που περιέχουν πολλαπλές ρίγες, πλέγματα ή ακόμα και ελλείψεις. Σε κάποιες περιπτώσεις συναντούμε και χρωματικά κωδικοποιημένα μοτίβα. Η χρωματική κωδικοποίηση βοηθά τον σαρωτή να ξεχωρίσει ευκολότερα τις μεταβολές που δέχεται το μοτίβο, καθώς προβάλλεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει με ποικίλες μεθόδους. Δημοφιλέστερες είναι η μεταβλητή φωτεινότητα χρωμάτων και η μεταβλητή πυκνότητα των σχημάτων που φέρει ένα μοτίβο. Ο κύριος στόχος της προβολής των κωδικοποιημένων μοτίβων είναι ο εύκολος διαχωρισμός του εικονοστοιχείων. Από τη στιγμή λοιπόν που το μοτίβο είναι κωδικοποιημένο, οι αντιστοιχίες ανάμεσα στις θέσεις των εικονοστοιχείων που αποτυπώνει ο σαρωτής και των αρχικών σημείων του μοτίβου μπορούν να συγκριθούν. Με την σύγκριση υπολογίζονται όλες οι αποκλίσεις στα αντίστοιχα σημεία και μπορεί, με τον έμμεσο αυτό τρόπο, να ανακτηθεί η τρίτη διάσταση. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται μια τυπική προβολή μοτίβου δομημένου φωτός πάνω σε ένα αντικείμενο.



Εικόνα 9: Προβολή μοτίβου δομημένου φωτός

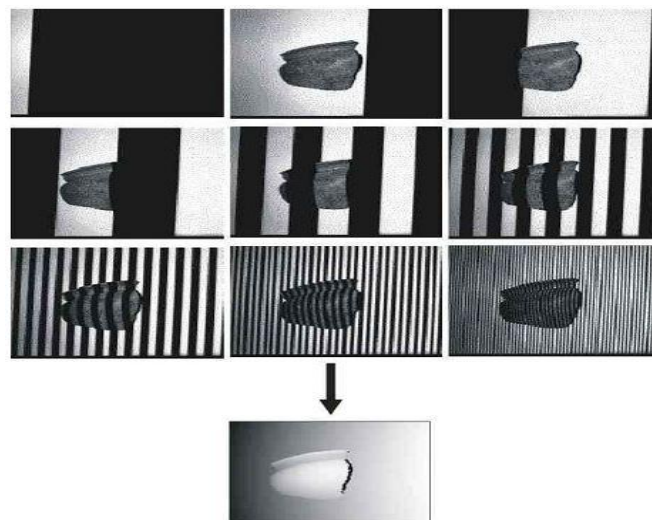
Οι Salvi, Pages και Battle [2] έχουν οργανώσει τις μεθόδους πολύπλεξης χρόνου σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το είδος των λέξεων-κλειδιών που χρησιμοποιούνται, ενώ συγκεντρωτικά μπορούμε να διακρίνουμε συνολικά τέσσερις κατηγορίες:

- Δυαδικοί κώδικες.
- Κώδικες n-ψηφίων.
- Διαβαθμίσεις του γκρι σε συνδυασμό με διαφορά φάσης.
- Υβριδικές μέθοδοι.

### Δυαδικοί κώδικες

Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιούνται δύο μόνο επίπεδα φωτισμού, τα οποία κωδικοποιούνται συνήθως ως 0 και 1. Κάθε εικονοστοιχείο του μοτίβου έχει τη δική του λέξη κλειδί, που διαμορφώνεται από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 και 1). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνικής αυτής είναι ότι το μοτίβο κωδικοποιείται μόνο σε έναν άξονα κάθε φορά.

Πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση. Το 1982 οι Posdamer και Altschuler [3] ήταν οι πρώτοι που πρότειναν την προβολή μιας ακολουθίας  $m$  μοτίβων για να κωδικοποιηθούν  $2m$  κάθετες ρίγες, χρησιμοποιώντας δυαδικές λέξεις κλειδιά. Ως εκ τούτου, η λέξη κλειδί που σχετίζεται με κάθε εικονοστοιχείο είναι μια δυαδική ακολουθία που παράχθηκε από  $m$  μοτίβα. Ο μέγιστος αριθμός των μοτίβων προβολής καθορίζεται από την ανάλυση των εικονοστοιχείων της συσκευής προβολής. Στην Εικόνα 9 δίνεται ένα παράδειγμα ανακατασκευής τμήματος αντικειμένου με χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής.



Εικόνα 9: Σάρωση αντικειμένου με χρήση δυαδικών κώδικων

### **Κώδικες n-ψηφίων**

Η τεχνική αυτή έρχεται να καλύψει το πρόβλημα χρήσης πολλών μοτίβων που εμφανίζει η δυαδική κωδικοποίηση. Ο Caspi [4] παρουσίασε έναν κώδικα πολλών χρωματικών επιπέδων, ο οποίος βασίζεται σε αλφάβητο που αποτελείται από n σύμβολα, όπου το κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε μία χρωματική τιμή. Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται δραματική μείωση του πλήθους των απαιτούμενων μοτίβων. Έχει, επίσης,δειχθεί ότι η κωδικοποίηση n-ψηφίων επιτυγχάνει ακρίβεια μέτρησης και αντοχή στο θόρυβο παρόμοια με αυτή της δυαδικής κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας πολύ λιγότερα μοτίβα.

### **Διαβαθμίσεις του γκρι σε συνδυασμό με διαφορά φάσης**

Η ενσωμάτωση των τεχνικών διαβαθμίσεων του γκρι και διαφοράς φάσης καταλήγουν σε μια τεχνική με τα πλεονεκτήματα και των δύο, οδηγώντας σε σαφή και ορθή κωδικοποίηση του μοτίβου διασφαλίζοντας ταυτόχρονα και υψηλή ανάλυση. Ο Guhring [5] ανέπτυξε ένα σύστημα βασισμένο σε LCD και DMD προβολείς εικόνας. Τα αποτελέσματα του συστήματος άγγιξαν ένα μέσω όρο σφάλματος κοντά στα 30μm με μέγιστη απόκλιση 0.281mm.

### **Υβριδικές Τεχνικές**

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μέθοδοι που βασίζονται στην πολλαπλή προβολή μοτίβων, στην πολύπλεξη χρόνου αλλά ταυτόχρονα και στην πληροφορία που μπορούν να παρέχουν γειτονικά εικονοστοιχεία. Οι Hall-Holt και Rusinkiewicz [6] εφάρμοσαν το διαχωρισμό τεσσάρων μοτίβων σε συνολικά 111 κάθετες ασπρόμαυρες ρίγες. Το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό αυτής της τεχνικής είναι ότι μπορεί να υποστηρίξει την τρισδιάστατη αποτύπωση τόσο αντικείμενων όσο και ολόκληρων χώρων που κινούνται ομαλά. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην έξυπνη κωδικοποίηση που εφαρμόζεται, καθώς και τη δυνατότητα αναγνώρισης των ριγών ανάμεσα στα διαφορετικά μοτίβα.

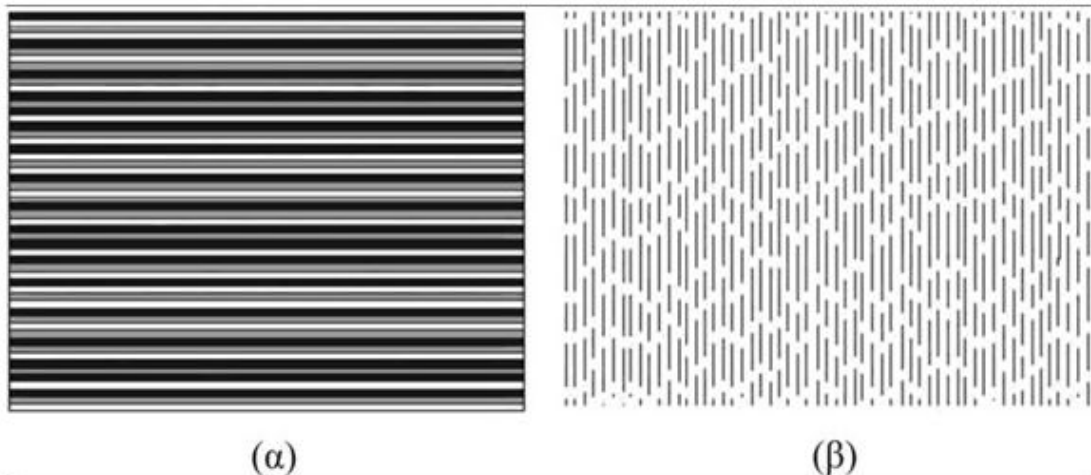
### **Κωδικοποίηση γειτονικών στοιχείων**

Όλες σχεδόν οι τεχνικές που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιούν ένα μοτίβο. Η λέξη κλειδί ενός συγκεκριμένου σημείου στο μοτίβο δημιουργείται από τα γειτονικά του σημεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δυσκολότερη αποκωδικοποίηση, αφού πολλές φορές δεν είναι εφικτό να αναγνωριστούν όλα τα σημεία, και εισάγονται, έτσι, γεωμετρικά σφάλματα. Όπως και η προηγούμενη ενότητα τεχνικών κωδικοποίησης, αναγνωρίζουμε διάφορες τεχνικές:

- Μη-τυπική κωδικοποίηση
- Ακολουθίες DeBruijn
- Μαθηματικοί πίνακες

### **Μη-τυπική κωδικοποίηση**

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση μοτίβων που είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαιρούνται σε ένα συγκεκριμένο πλήθος περιοχών. Οι Maruyama και Abe [7] σχεδίασαν ένα μοτίβο με τυχαία κατανομημένα κενά (Εικόνα 10). Τα τυχαία αυτά κενά δημιουργούν ένα σύνολο από γραμμικά τμήματα, όπου η θέση του κάθε τμήματος υπολογίζεται από το μήκος του και από το μήκος των γειτονικών τμημάτων. Η τεχνική αυτή έχει εφαρμογή σε αντικείμενα των οποίων η επιφάνεια παρουσιάζει ομαλές μεταβολές βάθους.



Εικόνα 10: Μοτίβο μη-τυπικής κωδικοποίησης

### **Ακολουθίες DeBruijn**

Για την κωδικοποίηση των μοτίβων χρησιμοποιούνται επίσης και οι ακολουθίες DeBruijn. Πολλές είναι ερευνητικές εργασίες που πραγματεύονται το συγκεκριμένο τρόπο κωδικοποίησης. Οι πιο σημαντικές είναι των Salvi, Petriu και Lavoieetal [8]. Πρόσφατα οι Zhangetal. [9] ανέπτυξαν άλλη μια τεχνική βασισμένη στην κωδικοποίηση DeBruijn, η οποία επιφέρει υψηλής ποιότητας αποτελέσματα.

### **Μαθηματικοί πίνακες**

Εφαρμογή στη σάρωση με προβολή μοτίβων έχουν βρει και οι μαθηματικοί πίνακες αφού τα χαρακτηριστικά τους βοηθούν στη διαδικασία κωδικοποίησης. Η χρήση πινάκων για κωδικοποίηση των σημείων του μοτίβου προϋποθέτει την αμφίδρομη κωδικοποίηση και στους δύο άξονες (x,y), αφού κάθε σημείο του μοτίβου φέρει διαφορετική λέξη κλειδί για τις κάθετες και οριζόντιες συντεταγμένες. Σημαντικές εργασίες στη συγκεκριμένη τεχνική είναι αυτές των Petriuetal. [10], Sroelderetal. [11] και Griffinetal. [12]. Η κωδικοποίηση με βάση τους μαθηματικούς πίνακες μπορεί να εφαρμοστεί σε αντικείμενα όπου άλλες τεχνικές όπως τα χρωματιστά μοτίβα δεν λειτουργούν ικανοποιητικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρωματική ποικιλομορφία που παρουσιάζει η επιφάνεια ενός αντικειμένου εμποδίζει την αναγνώριση των παραμορφώσεων που δέχεται το μοτίβο.

## **Άμεση κωδικοποίηση**

Η αρχή αυτής της μεθοδολογίας σχετίζεται με τη δημιουργία ενός μοτίβου, όπου κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να περιγραφεί από τη χρωματική πληροφορία που αυτό φέρει. Η άμεση κωδικοποίηση εφαρμόζεται κυρίως σε μονόχρωμα αντικείμενα χωρίς έντονες επιφανειακές ανακλάσεις και προαπαιτεί μια διαδικασία βαθμονόμησης για την αναγνώριση όλου του χρωματικού φάσματος που παρουσιάζει το αντικείμενο. Γενικά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν την άμεση κωδικοποίηση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Κωδικοποίηση βασισμένη σε διαβαθμίσεις του γκρι.
- Κωδικοποίηση βασισμένη σε χρώμα.

### **Κωδικοποίηση βασισμένη σε διαβαθμίσεις του γκρι**

Οι Carrihill και Hummel [13] ανέπτυξαν ένα σύστημα, το οποίο ονόμασαν αισθητήρας βάθους βασιζόμενος στο λόγο έντασης (intensityratiodepthsensor). Το μοτίβο αποτελείται από ένα σύνολο στηλών που περιέχουν χρωματικές διαβαθμίσεις του γκρι. Ο λόγος έντασης της απόχρωσης του γκρι υπολογίζεται σε όλα τα εικονοστοιχεία του μοτίβου. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πολύ χαμηλής ποιότητας αφού η κλίμακα του σφάλματος αγγίζει το 1 εκατοστό.

### **Κωδικοποίηση βασισμένη σε χρώμα**

Η μέθοδος βασίζεται στην ίδια αρχή με την προηγούμενη, με μοναδική διαφορά στο ότι το πλήρες χρωματικό φάσμα έρχεται να αντικαταστήσει τις διαβαθμίσεις του γκρι. Οι Tajima και Iwakawa [14] χρησιμοποίησαν τα χρώματα του ουράνιου τόξου.

Οι πειραματικές συγκρίσεις που επιχείρησαν οι Salvi et al [15] καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι σαρωτές που βασίζονται στην πολύπλεξη χρόνου αποφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα είναι εύκολη η υλοποίησή τους τόσο από πλευράς λογισμικού όσο και τεχνικού εξοπλισμού. Τα συστήματα που βασίζονται σε μοτίβα διαβαθμίσεων του γκρι αποφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αλλά η μέγιστη ανάλυση που μπορεί να προσφέρει το σύστημα προβολής του μοτίβου δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στην πράξη. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων των σαρωτών βασίζονται στη μέγιστη δυνατή ανάλυση της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και του προβολικού συστήματος που χρησιμοποιούνται. Ο ρυθμός ψηφιοποίησης εξαρτάται από την ταχύτητα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής και την ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων προς το υπολογιστικό σύστημα που θα πραγματοποιήσει την επεξεργασία των δεδομένων. Ο μέγιστος όγκος που μπορεί να ψηφιοποιηθεί χωρίς να μετακινηθεί το σύστημα ή το αντικείμενο εξαρτάται από την ικανότητα εστίασης του προβολικού συστήματος. Ένας από τους βασικότερους περιορισμούς αυτών των συστημάτων είναι το μικρό βάθος πεδίου του προβολικού που περιορίζει το εύρος δυνατοτήτων αποτύπωσης, αφού επιτρέπει ουσιαστικά μία μόνο σάρωση.



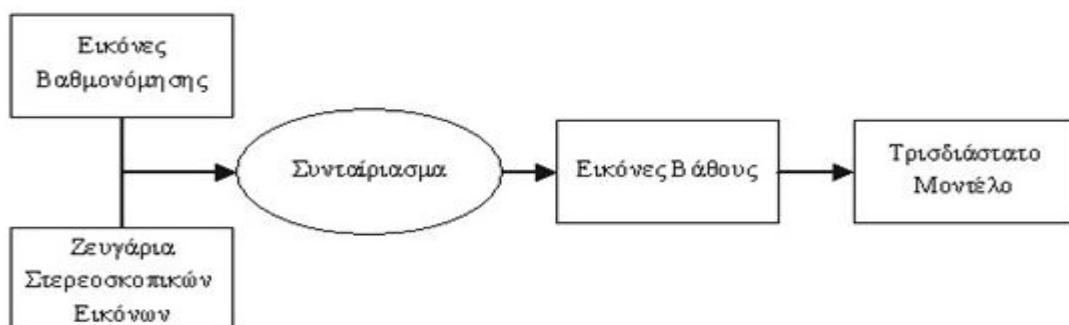
Συνοψίζοντας, η ακρίβεια των συστημάτων χρήσης δομημένου φωτός εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Οπτική ποιότητα του προβολικού συστήματος, που βασίζεται κυρίως στο φακό που χρησιμοποιείται.
- Ποιότητα της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής (ανάλυση εικόνας και πιστότητας απόδοσης χρωμάτων).
- Γωνία τοποθέτησης του προβολικού σύστημα έναντι του αντικειμένου και οι σκιές που δημιουργούνται βάση αυτής της γωνίας πάνω στα αντικείμενα.
- Χαρακτηριστικά της επιφάνειας των αντικειμένων.
- Τα προβολικά συστήματα δεν μπορούν να εστιάσουν σε μικρές αποστάσεις (π.χ. μικρότερες από 50 cm) και αυτό μειώνει την πυκνότητα δειγματοληψίας της επιφάνειας των αντικειμένων. Η χρήση διαφορετικών φακών μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να διορθώσει αυτό το πρόβλημα.

### 1.3 ΣΑΡΩΤΕΣ ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

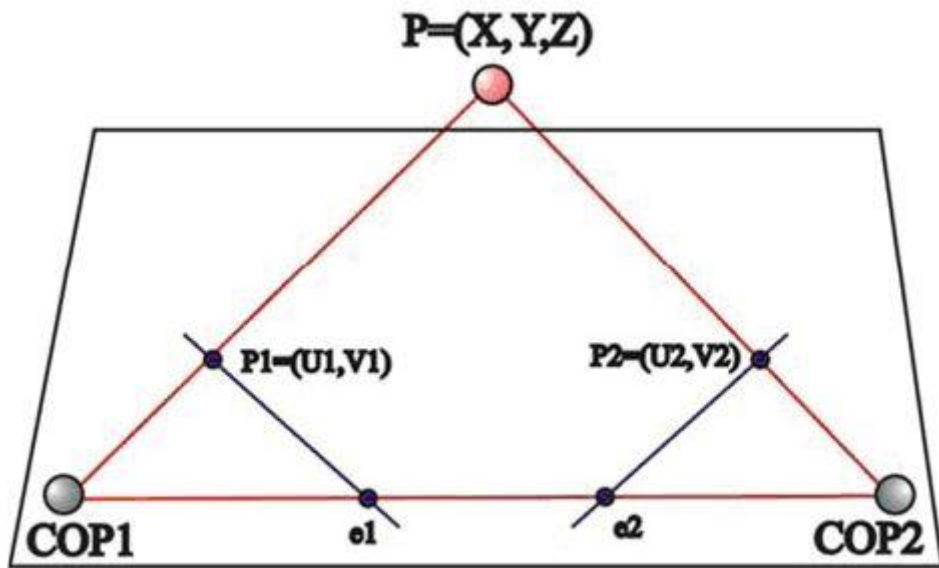
Η ιδέα απόκτησης τρισδιάστατων μοντέλων από φωτογραφίες υπάρχει εδώ και πολλές δεκαετίες. Βασικός στόχος της μεθόδου είναι η εξαγωγή όσο το δυνατό περισσότερης γεωμετρικής πληροφορίας από ένα ζεύγος φωτογραφιών με γνωστή τοποθέτηση στο χώρο. Η εξαγόμενη πληροφορία θα χρησιμοποιηθεί για την τρισδιάστατη ανακατασκευή του περιεχομένου των εικόνων.

Η στερεοσκοπική φωτογράφιση έχει μεγάλη εφαρμογή στο χώρο της όρασης υπολογιστών. Αποτελεί μια υλικοτεχνική προσπάθεια εξομίωσης του τρόπου λειτουργίας του ανθρώπινου συστήματος όρασης. Πράγματι, η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται σε ζεύγος φωτογραφιών που παρουσιάζουν ένα αντικείμενο από διαφορετικές οπτικές γωνίες, προσεγγίζοντας τις εικόνες που λαμβάνονται από τα ανθρώπινα μάτια. Συγκεκριμένα τμήματα του αντικειμένου είναι εμφανή και στις δύο φωτογραφίες. Οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι των οπτικών συστημάτων χρησιμοποιούνται για την διαδικασία βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση επιτρέπει την ανάκτηση της τρίτης διάστασης ενός σημείου που είναι κοινό ανάμεσα στις δύο φωτογραφίες. Η αναγνώριση των κοινών σημείων πάνω στις εικόνες πραγματοποιείται με μεθόδους αυτόματες ή χειροκίνητες. Η ανάκτηση του βάθους γίνεται με μαθηματικούς αλγορίθμους που χρησιμοποιούν παραμέτρους από τη βαθμονόμηση και τη διαφορά θέσης των κοινών σημείων ανάμεσα στις δύο εικόνες. Μια απλοποιημένη μορφή της διαδικασίας, σε μορφή διαγράμματος ροής, που ακολουθείται για την ανακατασκευή γεωμετρίας από στερεοφωτογράφιση φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Διαδικασία ανακατασκευής γεωμετρίας από στερεοφωτογράφιση

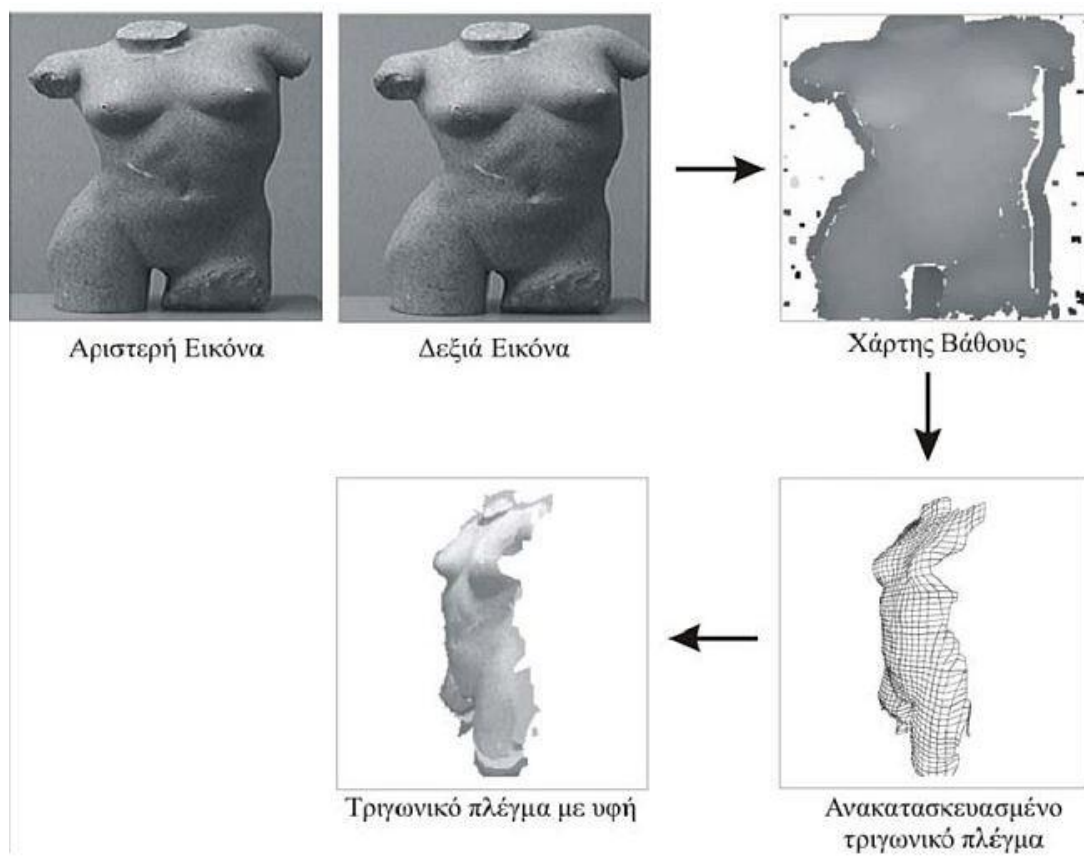
Οι μαθηματικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία προέρχονται από το χώρο της προβολικής γεωμετρίας. Η λύση του προβλήματος απεικονίζεται απλοποιημένα στην Εικόνα 12. Τα τρία σημεία COP1, COP2 και P σχηματίζουν ένα επιπολικό πεδίο. Τα κέντρα προβολής των σημείων (COP1 και COP2) συνδέονται από μία νοητή γραμμή που τέμνει τα επίπεδα πάνω στα οποία βρίσκονται οι φωτογραφίες. Τα συζυγή σημεία τομής είναι τα  $e_1$  και  $e_2$ , τα οποία ονομάζονται επιπολικά. Το σημείο P υπολογίζεται από την εύρεση του σημείου όπου τέμνονται, στον τρισδιάστατο χώρο, οι προβολές των P1 και P2.



Εικόνα 12

Το πιο δύσκολο πρόβλημα της στερεοσκοπικής ανάλυσης είναι η εξακρίβωση των εικονοστοιχείων ανάμεσα στις δύο εικόνες που αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο στο χώρο. Αυτό το πρόβλημα είναι γνωστό και ως πρόβλημα αντιστοιχίας. Διάφοροι αλγόριθμοι αναλαμβάνουν να αντιστοιχήσουν την πληροφορία που προσφέρουν οι εικόνες, ώστε να κατασκευάσουν τους χάρτες ανομοιότητας, από όπου θα υπολογισθεί, με τη μέθοδο της τριγωνοποίησης, η γεωμετρία της επιφάνειας του αντικειμένου.

Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας χάρτης βάθους (depthmap). Κάθε εικονοστοιχείο του χάρτη περιγράφει την απόσταση (σε κάποια μετρική μονάδα) από την επιφάνεια του αντικειμένου έως το κέντρο του φακού της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Στην Εικόνα 13 εξηγούνται τα βήματα ανακατασκευής ενός αγάλματος. Η αριστερή και η δεξιά εικόνα χρησιμοποιούνται ως πηγές πληροφορίας για τη δημιουργία του χάρτη βάθους, από όπου θα προκύψει το πολυγωνικό πλέγμα πάνω στο οποίο θα προβληθεί η πληροφορία υφής.



Εικόνα 13:  
Ανακατασκευή ενός αγάλματος με την μέθοδο της στερεοφωτογράφισης

Δύο είναι τα πλεονεκτήματα της τεχνικής της στερεοσκοπικής φωτογράφισης:

- Ανήκει στην κατηγορία των παθητικών τεχνικών τρισδιάστατης αποτύπωσης.
- Βασίζεται σε φτηνό εξοπλισμό που μπορεί να περιορισθεί σε δύο μόνο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές.

Από την άλλη, σημαντικά μειονεκτήματα της τεχνικής είναι:

- Το βάθος υπολογίζεται μόνο σε σημεία που περιέχουν αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά και,
- Οι χάρτες βάθους περιέχουν συχνά θόρυβο αφού η ποικιλία της πληροφορίας των φωτογραφιών κάνει την διαδικασία αντιστοίχισης πολύ δύσκολη.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου γύρω από πιθανές σιλουέτες που εμφανίζουν τα αντικείμενα δεν είναι ενθαρρυντικά. Εκτός από αυτό αντιμετωπίζει και προβλήματα σε επιφάνειες όπου η διάχυση του φωτός δεν είναι ομαλή. Η πληροφορία βάθους που εξάγεται από τα ζεύγη φωτογραφιών χαρακτηρίζεται  $2\frac{1}{2}D$  (διάστασης 2,5) αντί για 3D και αυτό γιατί το αντικείμενο χαρτογραφείται τρισδιάστατα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς που είναι σχεδόν κάθετο στους δύο οπτικούς άξονες των εικόνων. Για μια πλήρως τρισδιάστατη απεικόνιση ενός αντικειμένου απαιτούνται πολλά ζεύγη φωτογραφιών.

## 1.4 ΣΑΡΩΤΕΣ ΦΩΤΟΣΚΙΑΣΗΣ

Η φωτοσκίαση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντίληψη του βάθους. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να εξομοιώσουν τον τρόπο που λειτουργεί το ανθρώπινο σύστημα όρασης για να ανακτήσουν το βάθος με τη βοήθεια των φωτοσκιάσεων. Η ανάκτηση βάθους με τη μέθοδο της φωτοσκίασης απαιτεί μία μόνο οπτική γωνία λήψης. Φυσικά για την πλήρη αποτύπωση του αντικειμένου απαιτούνται περισσότερες.

Η τεχνική αυτή χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες:

- τεχνικές ελαχιστοποίησης
- τεχνικές μετάδοσης
- τεχνικές περιοχής
- γραμμικές τεχνικές

Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται με βάση τις εννοιολογικές διαφορές που παρουσιάζει η κάθε αλγοριθμική προσέγγιση της βασικής ιδέας. Οι μέθοδοι ελαχιστοποίησης καταλήγουν σε λύση του προβλήματος με την εφαρμογή μίας συνάρτησης ενέργειας, ενώ οι τεχνικές μετάδοσης μελετούν τη μετάδοση της πληροφορίας των σχημάτων από ένα σύνολο σημείων που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου. Από την άλλη, οι τεχνικές περιοχής παράγουν το βάθος βασισμένες σε υποθέσεις που αφορούν τον τύπο της επιφάνειας.

Οι γραμμικές μέθοδοι υπολογίζουν την λύση του προβλήματος βασιζόμενες σε μαθηματικούς χάρτες αντανάκλασης.

Οι περισσότερες τεχνικές υποθέτουν ότι η πηγή φωτός ακολουθεί μια γνωστή και συγκεκριμένη πορεία και δημιουργεί πολύ συγκεκριμένες ανακλάσεις. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των αλγορίθμων είναι ότι δεν μπορούν να ανακτήσουν πληροφορία από σκιασμένες περιοχές καθώς αυτές δεν προσφέρουν αρκετής έντασης χρωματική πληροφορία. Μέσα από μια εκτενή μελέτη που πραγματοποίησαν οι Zhang et al. [16] κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα που αφορούν όλες τις τεχνικές φωτοσκίασης:

- Όλοι οι αλγόριθμοι παράγουν γενικά μη ικανοποιητικά αποτελέσματα όταν τους δίνονται τεχνητά δεδομένα.
- Τα αποτελέσματα τους είναι ακόμα χειρότερα σε πραγματικές εικόνες.
- Τα αποτελέσματα σε τεχνητά δεδομένα γενικά δεν λειτουργούν προβλεπτικά για τα αποτελέσματα σε πραγματικά δεδομένα.

## 1.5 ΣΑΡΩΤΕΣ ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΟΦΩΤΟΓΡΑΦΗΣΗΣ

Η μέθοδος φωτομετρικής στερεοφωτογράφισης βασίζεται σε μια παραλλαγή της μεθόδου φωτοσκίασης. Η διαφορά τους βρίσκεται στο πλήθος φωτογραφιών που χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του βάθους.

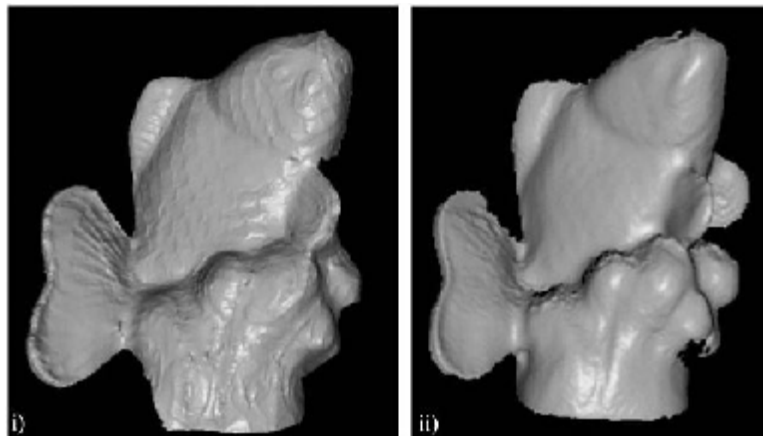
Στην παρούσα μεθοδολογία οι εικόνες εμφανίζουν το αντικείμενο από την ίδια οπτική γωνία αλλά υπό μεταβλητές συνθήκες φωτισμού. Η φωτομετρική μέθοδος δύναται να ανακτήσει γρήγορα τον προσανατολισμό της επιφάνειας του αντικειμένου από εικόνες φωτεινότητας (διαβαθμίσεις του γκρι). Για να πετύχει κάτι τέτοιο χρησιμοποιεί άλλοτε βαθμονομημένες πηγές φωτός και άλλοτε όχι. Η επιλογή γίνεται ανάλογα με την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου που εφαρμόζεται. Οι βαθμονομημένες συνθήκες φωτισμού είναι εφικτές μονό σε περιβάλλον εργαστηρίου. Ερευνητικές προσπάθειες γίνονται, ώστε να μπορεί να λειτουργήσει η τεχνική σε περιβάλλον με γενικό φωτισμό.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόσφατη ερευνητική εργασία των Hertzmann και Seitz [17] στην οποία γίνεται χρήση γνωστών γεωμετρικών αντικειμένων τα οποία φωτογραφίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού δίπλα στο πραγματικό αντικείμενο που πρόκειται να αποτυπωθεί. Σε ένα από τα πειράματα τους φωτογραφίζουν ένα αντικείμενο που παρουσιάζει την μορφή ενός ψαριού και φέρει πολύπλοκη πληροφορία υψής. Ως αντικείμενα οδηγούς χρησιμοποιούν δύο σφαίρες. Η πρώτη σφαίρα είναι χρώματος γκρι και η επιφάνειάς της επιτρέπει την ομαλή διάχυση του φωτός. Η δεύτερη είναι μαύρη με επιφάνεια υψηλής ανακλαστικότητας. Για την ανακατασκευή του αντικειμένου χρησιμοποιήθηκαν δεκατέσσερις (14) φωτογραφίες κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού. Τα αποτελέσματα της τεχνικής τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 14. Καθώς το τρισδιάστατο μοντέλο είναι εντυπωσιακά ρεαλιστικό αποφάσισαν να το συγκρίνουν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο του ίδιου αντικειμένου κατασκευασμένο από σαρωτή ακτίνων λέιζερ κοντινών αποστάσεων. Χρησιμοποιήθηκε, λοιπόν, ένας σαρωτής της εταιρίας Cyberware18. Τα συμπεράσματα των ερευνητών καταλήγουν στο ότι η μέθοδος τους καταφέρνει και εξάγει μεγαλύτερο όγκο πληροφορίας από την επιφάνεια του αντικειμένου σε σύγκριση με τον σαρωτή λέιζερ (Εικόνα 15). Επισημαίνουν επίσης την πιθανότητα πως κάποια από την γεωμετρική πληροφορία που φέρει το φωτομετρικό μοντέλο να οφείλεται στο γεγονός της υψηλότερης ανάλυσης της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής που χρησιμοποίησαν.

Άλλη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι πως το συγκεκριμένο αντικείμενο είναι καλυμμένο με ένα λεπτό στρώμα από βερνίκι. Η μέθοδος τους είναι πολύ πιθανό να αντιλαμβάνεται την επιφάνεια κάτω από το βερνίκι σε αντίθεση με τον σαρωτή που αντιλαμβάνεται την ομαλοποιημένη και βερνικωμένη εξωτερική επιφάνεια. Θα πρέπει ακόμα σημειωθεί ότι για να ψηφιοποιηθεί το αντικείμενο με το σαρωτή λείζερ χρειάστηκε να καλυφθεί με ένα στρώμα λευκής σκόνης που επιτρέπει την αναγνώριση της δέσμης φωτός. Αυτός είναι άλλος ένας παράγοντας της έντονης διαφοροποίησης ανάμεσα στα δύο τελικά τρισδιάστατα μοντέλα.



Εικόνα 14: Φωτογράφηση αντικειμένου και σφαιρών

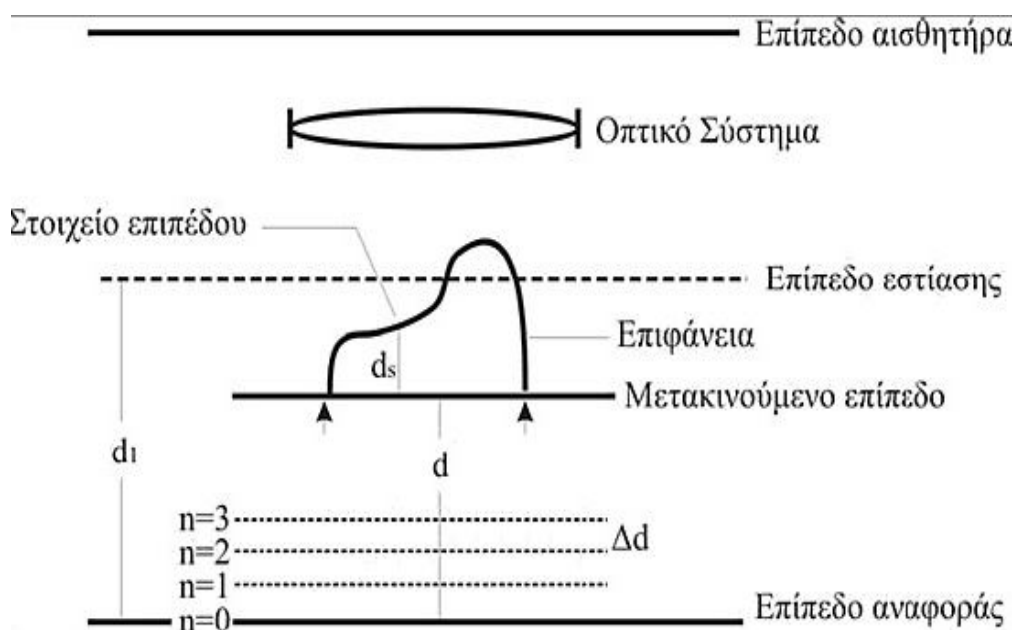


Εικόνα 15: Σύγκριση τρισδιάστατων μοντέλων



## 1.6 ΣΑΡΩΤΕΣ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗΣ ΕΣΤΙΑΣΗΣ

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών έχει επικεντρωθεί σε μια τεχνική που ανακτά την τρίτη διάσταση από μια εικόνα χρησιμοποιώντας το βάθος πεδίου. Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου αυτής φαίνεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16: Αρχή λειτουργίας μεθόδου σάρωσης μεταβαλλόμενης εστίασης

Ένα αντικείμενο με άγνωστα γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχει τοποθετηθεί πάνω σε μία επίπεδη βάση που δύναται να μετατοπιστεί σε ύψος. Το χαμηλότερο επίπεδο που μπορεί να μετακινηθεί η βάση παρουσιάζεται ως επίπεδο αναφοράς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί και το αρχικό σημείο από όπου ξεκίνησε η κίνηση της βάσης που μεταφέρει το αντικείμενο προς ψηφιοποίηση. Η διαμόρφωση του οπτικού συστήματος και του αισθητήρα (CCD) ορίζουν ένα νοητό επίπεδο που ονομάζεται επίπεδο εστίασης και παρουσιάζεται με τη μορφή διακεκομμένης γραμμής. Στο επίπεδο εστίασης βρίσκονται κάποια από τα τμήματα της επιφάνειας του αντικειμένου. Το οπτικό σύστημα επιτρέπει την αποτύπωση των τμημάτων αυτών από τον αισθητήρα με τη μέγιστη δυνατή εστίαση. Η απόσταση  $d_1$  ανάμεσα στο επίπεδο εστίασης και το επίπεδο αναφοράς είναι πάντα γνωστή.

Έστω τώρα ότι  $s$  ονομάζουμε το στοιχείο επιπέδου που βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια του αντικειμένου  $S$ . Αν το μετακινούμενο επίπεδο προχωρήσει και άλλο προς το επίπεδο εστίασης τότε το  $s$  θα αυξήσει τον βαθμό εστίασης του και θα εστιαστεί τέλεια όταν βρεθεί στο ίδιο ακριβώς επίπεδο με το επίπεδο εστίασης. Οποιαδήποτε περαιτέρω κίνηση προς το οπτικό σύστημα θα φέρει το σημείο  $s$  και πάλι εκτός εστίασης. Παρατηρώντας τις μεταβολές που δέχονται οι εικόνες στο σημείο που βρίσκεται το  $s$  και καταγράφοντας το επίπεδο μετατόπισης  $d$  στο σημείο της μέγιστης εστίασης, τότε το ύψος  $d_s$  του σημείου  $s$  μπορεί να υπολογισθεί με βάση το επίπεδο αναφοράς. Έτσι ισχύει ότι  $d_s = d_1 - \text{επίπεδο μετατόπισης}$ . Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα σημεία της επιφάνειας του αντικειμένου  $S$ . Με τον τρόπο αυτό ανακτάται το βάθος της επιφάνειας του αντικειμένου.

Οι ακόλουθες παρατηρήσεις είναι κοινά αποδεκτές από όλους τους ερευνητές που έχουν συμμετάσχει στη μελέτη και ανάπτυξη τέτοιων σαρωτών:

- Η ανάλυση και η ακρίβεια της τεχνικής μεταβαλλόμενης εστίασης είναι περιορισμένη σε σύγκριση με τις τεχνικές τριγωνοποίησης.
- Αντίθετα με τις μεθόδους τριγωνοποίησης, αποφεύγουν την τεχνική ταιριάσματος και αντιστοίχισης σημείων.
- Τα αποτελέσματα της χαρακτηρίζονται, γενικά, αξιόπιστα.

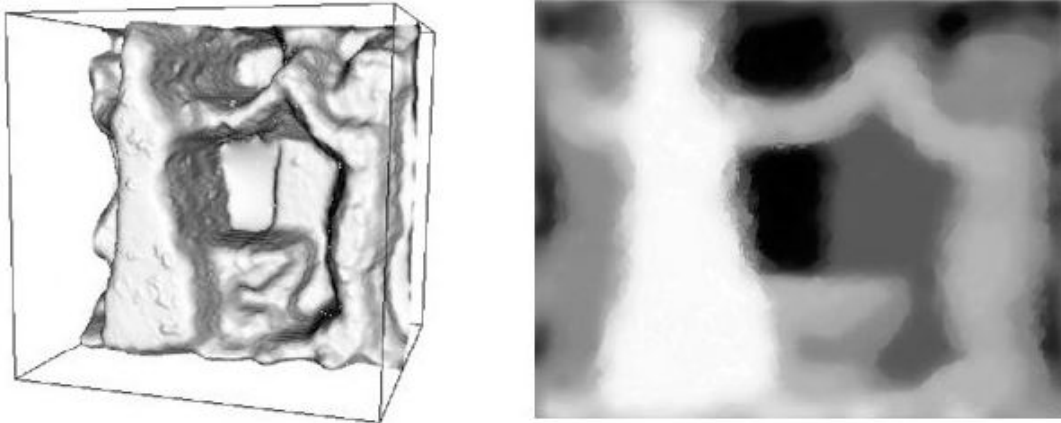
Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες εκτός εστίασης και οι ανακατασκευασμένες τρισδιάστατες επιφάνειες τους.

Στην Εικόνα 17 παρουσιάζονται δύο φωτογραφίες με εστίαση σε διαφορετικό βάθος. Η φωτογραφία στα αριστερά είναι εστιασμένη στο βάθος ενώ η φωτογραφία στα δεξιά είναι εστιασμένη στα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στην κάμερα.



Εικόνα 17: Φωτογραφίες σε διαφορετικό βάθος εστίασης

Στην Εικόνα 18 παρουσιάζεται ο ανακτώμενος χάρτης βάθους (δεξιά) και η αναγνωρισμένη γεωμετρική δομή (αριστερά).



Εικόνα 18: Γεωμετρική δομή και ανακτώμενος χάρτης σάρωσης μεταβαλλόμενης εστίασης

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας όπου στη γεωμετρία έχει προστεθεί και η πληροφορία υψής της επιφάνειας.



Εικόνα 19: Αποτέλεσμα ψηφιοποίησης μεθόδου μεταβαλλόμενης εστίασης

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (Α) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΑΡΩΤΗ

### 2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΑΡΩΣΗΣ

Με τα σημερινά δεδομένα είναι αδύνατη η ανάδειξη μιας μεθοδολογίας ως βέλτιστη. Κύριο αντικείμενο σύγκρισης στο κεφάλαιο αυτό αποτελούν οι μέθοδοι που επικράτησαν ως εμπορικές λύσεις. Αυτές είναι οι εξής:

- Σαρωτές ακτίνων λέιζερ κοντινών αποστάσεων
- Σαρωτές προβολής μοτίβου
- Σαρωτές φωτογραφικών μεθόδων (στερεοφωτογράφιση)

Η σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και από την υποκειμενική κατηγοριοποίηση της ποιότητας των τρισδιάστατων μοντέλων. Η μέθοδος ψηφιοποίησης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων αποφέρει τα ακριβέστερα γεωμετρικά αποτελέσματα.

Από την άλλη, η μέθοδος προβολής δομημένου φωτισμού αποδίδει καλύτερη γεωμετρία από τη μέθοδο στερεοσκοπικής φωτογράφισης αλλά όχι καλύτερη από τα συστήματα λέιζερ. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δομημένου φωτός είναι ανώτερα από αυτά της μεθόδου στερεοσκοπικής φωτογράφισης αφού καταφέρνει να ανακτήσει γεωμετρία από κοίλες επιφάνειες. Θα μπορούσαμε να πούμε πως η μέθοδος δομημένου φωτός είναι η τεχνική που συνδυάζει κάποια από τα στοιχεία αυτοματισμού της στερεοσκοπικής φωτογράφισης με τη δυνατότητα αποδεκτής ακρίβειας γεωμετρικών αποτελεσμάτων. Επίσης, «συμπεριφέρεται» καλύτερα από τους σαρωτές λέιζερ σε ημιδιαφανή και χρωματιστά αντικείμενα αλλά όχι καλύτερα από ότι η στερεοσκοπική φωτογράφιση. Η στερεοφωτογράφιση προσφέρει ένα γρήγορο τρόπο «αντίστροφης μοντελοποίησης» αντικειμένων από φωτογραφίες, όπου, όμως, η πυκνότητα των σημείων του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου δεν είναι συνήθως μεγάλη, με αποτέλεσμα να μην αποφέρει τα αποτελέσματα που φέρει η σάρωση με δομημένο φως. Βασικό πλεονέκτημα της τεχνικής είναι η απόκρυψη της χαμηλής ποιότητας γεωμετρικής πληροφορίας μετά τη χρήση πληροφορίας υψής.

Πολλές φορές συναντούμε και συνδυασμούς δύο μεθόδων για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων. Ένας συνδυασμός, ο οποίος αποφέρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα καλύπτοντας υψηλής ανάλυσης γεωμετρία και πληροφορίας υψής είναι η μέθοδος που προτείνουν οι Hernandez και Schmitt [18]. Η μέθοδος συνδυάζει τον αυτοματισμό της τεχνικής δομημένου φωτός και την ποιότητα τρισδιάστατης γεωμετρίας που προσφέρει η στερεοφωτογράφιση.

Η μέθοδος ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες, καθώς προσφέρει σχεδόν αυτοματοποιημένα αποτελέσματα χωρίς την ανάγκη μετά-επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων έρχεται να δώσει απάντηση στο πρόβλημα της στερεοφωτογράφισης στη μοντελοποίηση κοίλων επιφανειών. Ίσως είναι η μοναδική μέθοδος που ξεχωρίζει για την ποιότητα των αποτελεσμάτων της και της αυτοματοποιημένης διαδικασίας αποτύπωσης. Δυστυχώς δεν υπάρχει ακόμα κάποιο εμπορικό σύστημα επεξεργασίας των ψηφιακών δεδομένων που να βασίζεται στην συγκεκριμένη τεχνική.

Γενικότερα, οι υπάρχουσες μέθοδοι τρισδιάστατης αποτύπωσης υποφέρουν από πολλούς περιορισμούς. Ακόμα και με τη χρήση των πιο σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων και λογισμικού, συγκεκριμένα βήματα επεξεργασίας γίνονται μόνο όταν ο όγκος πληροφορίας δεν ξεπερνά κάποια συγκεκριμένα όρια. Αν η ανάπτυξη του εξοπλισμού και του λογισμικού συνεχίσουν στους ρυθμούς των προηγούμενων χρόνων τότε αρκετά προβλήματα θα έχουν ξεπεραστεί μέσα στα επόμενα χρόνια. Ίσως ακόμα επιτευχθεί και ο συνδυασμός της ψηφιοποίησης ακτίνων λείζερ με φωτογραμμετρικά δεδομένα υψής για αποτύπωση μεγάλων και πολύπλοκων αντικειμένων που οι διαστάσεις τους ξεπερνάνε τα 5 m. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μπορεί να αποφέρει πολλά πλεονεκτήματα.

Τα βασικά κριτήρια επιλογής μιας μεθόδου τρισδιάστατης σάρωσης αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω:

- Ακρίβεια αποτύπωσης τρισδιάστατης γεωμετρίας
- Συνολικός απαιτούμενος χρόνος σάρωσης
- Βαθμός αυτοματοποίησης μεθόδου
- Δείκτης συμβατότητας των χαρακτηριστικών της επιφάνειας ενός αντικειμένου και της μεθόδου ψηφιοποίησης
- Επίπεδο φιλικότητας προς το χρήστη
- Διαδικασία βαθμονόμησης (απαιτούμενος χρόνος και ευκολία αποπεράτωσης)
- Μέσος όρος συνολικού χρόνου επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου
- Φορητότητα του συστήματος
- Υπολογιστικές απαιτήσεις
- Κόστος συστήματος

Έχοντας ως δεδομένο πως η παρούσα εργασία εκπονείται στα πλαίσια ακαδημαϊκών υποχρεώσεων του τμήματος μηχανολογίας, θέτουμε τους παρακάτω περιορισμούς στις απαιτήσεις μας:

- Επίπεδο ακρίβειας σάρωσης < 1mm
- Μέγεθος αντικειμένων σάρωσης 40mm – 400 mm
- Χρόνος σάρωσης αντικειμένου < 20 min
- Υπολογιστικές απαιτήσεις πλησίον του μετρίου
- Κόστος συστήματος < 500 €

Είναι λοιπόν προφανές πως βάσει των απαιτήσεων μας, η μέθοδος τρισδιάστατης σάρωσης που καλύπτει τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, είναι αυτή της τρισδιάστατης σάρωσης με ακτίνες λέιζερ κοντινών αποστάσεων.

## **2.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΑΡΩΤΗ ΤΡΙΓΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΚΤΙΝΕΣ ΛΕΙΖΕΡ**

Το σημαντικότερο ίσως κομμάτι κατά την μελέτη κατασκευής ενός τρισδιάστατου σαρωτή, είναι η επιλογή των κατάλληλων εκείνων εξαρτημάτων που ανταποκρίνονται πλήρως στις απαιτήσεις του χρήστη, ενώ συγχρόνως κρατούν το κόστος κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα χωρίς συμβιβασμούς στην ποιότητα του αποτελέσματος.

Μία τυπική συσκευή τρισδιάστατης σάρωσης με ακτίνες λέιζερ αποτελείται από μία πηγή ακτινών λέιζερ και έναν αισθητήρα εικόνας CCD ή CMOS. Η παρούσα πτυχιακή εργασία συνδυάζει τα δύο αυτά εξαρτήματα, παρέχοντας παράλληλα την δυνατότητα αυτοματοποίησης του συστήματος, μέσω της χρήσης ενός αυτόνομου μικρο-ελεγκτή και ενός βηματικού μοτέρ.

### **Επιλογή βέλτιστης πηγής ακτινών λέιζερ**

Κατά την διαδικασία επιλογής πηγής ακτινών λέιζερ πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κάποιες βασικές παράμετροι. Επιγραμματικά αναφέρονται παρακάτω:

- Μήκος κύματος πηγής φωτός
- Προβαλλόμενο μοτίβο
- Δυνατότητα ρύθμισης εστιακής απόστασης
- Ποσοστό διάχυσης εκπεμπόμενης δέσμης φωτός
- Τάση λειτουργίας
- Ισχύς

Έπειτα από μελέτη των εμπορικά διαθέσιμων πηγών ακτινών λέιζερ, επελέχθη πηγή γραμμικής προβολής ακτίνας λέιζερ, μήκους κύματος 650nm (κόκκινο), με δυνατότητα ρύθμισης εστιακής απόστασης, τάσης λειτουργίας 3.3V και ισχύος 40 mA.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πηγής ακτινών λέιζερ που επελέχθη δίνονται παρακάτω (Εικόνα 20):

Adjustable focal length of laser 5 mw red dot Industrial laser module with a built-in laser drive circuit can be straight 3 ~ 5 v dc power supply for a long time use.

- used to red laser pointer, flashlight, laser positioning, range finder, medical equipment, electronic production fans, etc

Technical parameters

Model: LD - G650A03

Output: dotted red (650 nm)

Size: 12.0 x35mm Φ

Line length: 135 mm

Net weight: 13.5 g

Voltage: 3.0 V to 5 V

Current: 40 ma (Max)

Purpose: industrial location

Εικόνα 20: Τεχνικά χαρακτηριστικά πηγής ακτινών λέιζερ

### **Επιλογή βέλτιστου αισθητήρα εικόνας**

Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερη η δυνατότητα ανάλυσης της εικόνας από τον αισθητήρα, τόσο πιο λεπτομερής θα είναι η ψηφιακή αποτύπωση του αντικειμένου. Η παραδοχή αυτή εγείρει ένα μεγάλο πρόβλημα όσο αναφορά στο κοστολόγιο της κατασκευής, αφού αισθητήρες τύπου CCD ή CMOS μέτριας ανάλυσης, θα ξεπερνούσαν κατά πολύ το χρηματικό όριο που θέσαμε παραπάνω.

Με την κατάλληλη επιλογή λογισμικού προγράμματος ανάλυσης των ψηφιακών δεδομένων όμως, είμαστε σε θέση να χρησιμοποιήσουμε μια συμβατικού τύπου κάμερα, υψηλής ανάλυσης, που θα κρατήσει το κόστος της κατασκευής στα προβλεπόμενα όρια. Η δυνατότητα αυτή μας δόθηκε καθώς το επιλεγμένο λογισμικό πρόγραμμα, προσομοιάζει ηλεκτρονικά έναν αισθητήρα τύπου CCD, κάνοντας χρήση ενός pixel απεικόνισης ανά 6 pixel προβολής.



Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα εικόνας που επελέγη δίνονται παρακάτω (Εικόνα 21):

Camera Specifications	
Available Image(s)	Click for [Front Image]
Connection Type	USB
USB Type	USB 2.0
USB VID_PID	082C
UVC Support	Yes
Microphone	Yes
Microphone Type	Mono
Lens and Sensor Type	Glass
Focus Type	Auto
Optical Resolution	True = 2MP, Interpolated = 8MP
Diagonal Field of view (FDV)	74°
Focal Length	N/A
Image Capture (4:3 SD)	640 x 480, 1.2 MP, 2.0 MP, 8 MP
Image Capture (16:9 W)	300°, 400°, 720°, 1080°
Video Capture (4:3 SD)	350 x 240, 340 x 480
Video Capture (16:9 W)	960P, 480P, 720P, 1080P
Frame Rate (max)	30 FPS @640 x 480
Right Light	Yes
Video Effects (VFX)	N/A
Buttons	N/A
Indicator Lights (LED)	Yes
Privacy Shade	Yes
Tripod Mounting Option	Yes
Universal Clip Adjustability (range)	1-200 degrees
Cable Length	3 feet (01.4m) long with an extension cable of 3 feet (01.4m). Total length with extension cable is 6 feet (182.9cm)

Εικόνα 21: Τεχνικά χαρακτηριστικά αισθητήρα εικόνας

## Επιλογή μικρο-ελεγκτή

Πληθώρα αυτόνομων μικροελεγκτών έχει κατακλύσει τα τελευταία χρόνια το εμπόριο. Καθημερινά, συνεχώς ταχύτεροι και μικρότεροι μικροελεγκτές αναπτύσσονται από εταιρίες προγραμματισμού, με σκοπό να καλύψουν τις όλο ένα αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών.

Για την επιλογή του κατάλληλου μικροελεγκτή της κατασκευής μας, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι παρακάτω παράμετροι:

- Δυνατότητα σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή
- Επεξεργαστική δύναμη >8 MHz
- Δυνατότητα οδήγησης βηματικού μοτέρ εύρους παλμώντάσης 12V
- Δυνατότητα οδήγησης πηγής φωτός σταθερής τάσης 3.3V
- Δυνατότητα εισόδου ψηφιακών καθώς και αναλογικών σημάτων

Έπειτα από μελέτη των εμπορικά διαθέσιμων μικροελεγκτών που πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και έχοντας ως γνώμονα επιλογής το βαθμό δυσκολίας προγραμματισμού του αλλά και το χαμηλό κόστος, καταλήξαμε στην επιλογή ενός μικροελεγκτή της εταιρίας Arduino και συγκεκριμένα στο μοντέλο Arduino Micro.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή που επελέχθη δίνονται παρακάτω (Εικόνα 22):

## Technical specs

Microcontroller	ATmega32U4
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	20
PWM Channels	7
Analog Input Channels	12
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega32U4) of which 4 KB used by bootloader
SRAM	2.5 KB (ATmega32U4)
EEPROM	1 KB (ATmega32U4)
Clock Speed	16 MHz
Length	48 mm
Width	18 mm
Weight	13 g

Εικόνα 22: Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροελεγκτή

## Επιλογή βηματικού μοτέρ

Κατά την διαδικασία αυτοματοποίησης μιας τρισδιάστατης σάρωσης τον σημαντικότερο ίσως ρόλο στο όλο εγχείρημα καταλαμβάνει το βηματικό μοτέρ. Ο κινητήρας αυτός είναι υπεύθυνος για την κίνηση της πηγής ακτινών λέιζερ. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να επιλεγεί κινητήρας με χαμηλούς κραδασμούς, ώστε να μην αυξηθεί ο θόρυβος της δέσμης φωτός, αλλά επίσης και μικρού βήματος ώστε να αυξηθεί το επίπεδο ανάλυσης της σάρωσης. Άκρως επιθυμητή είναι επίσης η ύπαρξη αποσβεστήρα του φαινομένου κραδασμού του τελικού βήματος πριν ο κινητήρας τεθεί εκτός λειτουργίας (backlash). Για να πληρωθούν τα ανωτέρω κριτήρια χρειάζεται να επιλεγεί μοτέρ με βήμα κίνησης μικρότερο των 2°.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του βηματικού κινητήρα που επελέχθη δίνονται παρακάτω (Εικόνα 23):

### **Motor Properties**

Motor Type	Bipolar Stepper
Manufacturer Part Number	42STH38-1684A / 36JXS30K100G
Step Angle	0.018°
Step Accuracy	5 %
Holding Torque	48 kg·cm
Rated Torque	48 kg·cm
Maximum Speed (w/1063 Motor Controller)	6.2 RPM
Maximum Speed (w/1067 Motor Controller)	44 RPM
Acceleration at Max Speed (w/1067 Motor Controller)	460000 1/16 steps/sec <sup>2</sup>

### **Electrical Properties**

Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	1.7 A
Coil Resistance	1.7 Ω
Phase Inductance	3.2 mH

### **Physical Properties**

Shaft Diameter	8 mm
Mounting Plate Size	NEMA - 17
Weight	568 g
Number of Leads	4
Wire Length	300 mm

### **Gearbox Properties**

Gearbox Type	Planetary
Gear Ratio	99 1044/2057 : 1
Backlash Error	3°
Maximum Strength of Gears	48 kg·cm
Shaft Maximum Axial Load	49.1 N
Shaft Maximum Radial Load	98.1 N

Εικόνα 23: Τεχνικά χαρακτηριστικά βηματικού μοτέρ

## Επιλογή κυκλώματος οδήγησης βηματικού μοτέρ

Για την επίτευξη της ελεγχόμενης κίνησης ενός μοτέρ από έναν μικροελεγκτή απαραίτητη είναι η παρουσία ενός κυκλώματος οδήγησης. Το συγκεκριμένο κύκλωμα λειτουργεί ως «μεσολαβητής» ανάμεσα στον μικροελεγκτή και το βηματικό μοτέρ, μεταφράζοντας την τάση εξόδου του μικροελεγκτή σε εύρος παλμών, ώστε να κινηθεί το μοτέρ κατά τα απαιτούμενα βήματα. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά την επιλογή κυκλώματος οδήγησης ώστε να είναι ικανό να κινήσει το επιλεγμένο μοτέρ. Στην κατασκευή μας επιλέχθηκε κύκλωμα οδήγησης με δυνατότητα τάσης εξόδου έως 35V και ισχύος έως 2A ανά φάση.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κυκλώματος οδήγησης που επελέχθη δίνονται παρακάτω (Εικόνα 24):

### Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	$V_{ES}$		35	V
Output Current	$I_{OUT}$		$\pm 2$	A
Logic Input Voltage	$V_{IN}$		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	$V_{DD}$		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	$V_{SENSE}$		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	$V_{REF}$		5.5	V
Operating Ambient Temperature	$T_A$	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	$T_{STG}$		-55 to 150	°C

Εικόνα 24: Τεχνικά χαρακτηριστικά κυκλώματος οδήγησης

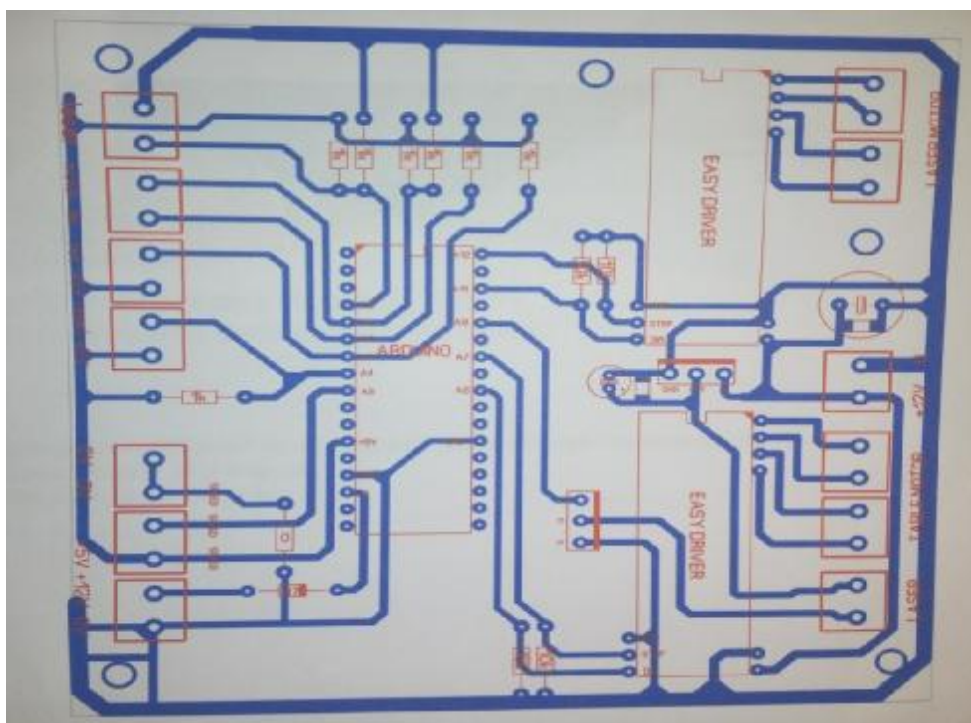
## 2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΑΡΩΤΗ

Η κατασκευή της παρούσας πτυχιακής εργασίας απαιτεί έναν συνδυασμό γνώσεων τριγωνομετρίας, μηχανικής, προγραμματισμού και ηλεκτροτεχνίας.

### Ηλεκτρονική πλακέτα

Η καρδιά της συσκευής αποτελείται από μια ηλεκτρονική πλακέτα (Εικόνα 25) η οποία στεγάζει τον μικροελεγκτή, το κύκλωμα οδήγησης του βηματικού μοτέρ καθώς και το κύκλωμα οδήγησης της πηγής ακτινών λέιζερ. Περιμετρικά της πλακέτας έχουν τοποθετηθεί ρευματολήπτες που καθιστούν την δυνατότητα διασύνδεσής της με το μοτέρ ευκολότερη.

Για την λειτουργία της συσκευής υπεύθυνος είναι ο κώδικας που έχει δημιουργηθεί και φορτωθεί στον μικροελεγκτή, γραμμένος σε μια παραλλαγή της γλώσσας προγραμματισμού C++.



Εικόνα 25: Ηλεκτρονική πλακέτα ελέγχου

## Συσκευή σάρωσης

Κατά την κατασκευή της συσκευής σάρωσης, πολλοί παράγοντες χρειάζεται να ληφθούν υπ' όψιν.

Η διατήρηση μιας σχετικής γωνίας πρόσπτωσης  $30^\circ$  των ακτινών λέιζερ ως προς τον αισθητήρα εικόνας είναι ίσως ο βασικότερος παράγοντας για την επίτευξη ενός άρτιου αποτελέσματος. Στον άξονα στήριξης του βηματικού μοτέρ έχει προσαρμοστεί απλός μηχανισμός με σφιγκτήρες ώστε να υπάρχει δυνατότητα προσαρμογής του ύψους του προς επίτευξη της βέλτιστης γωνίας πρόσπτωσης.

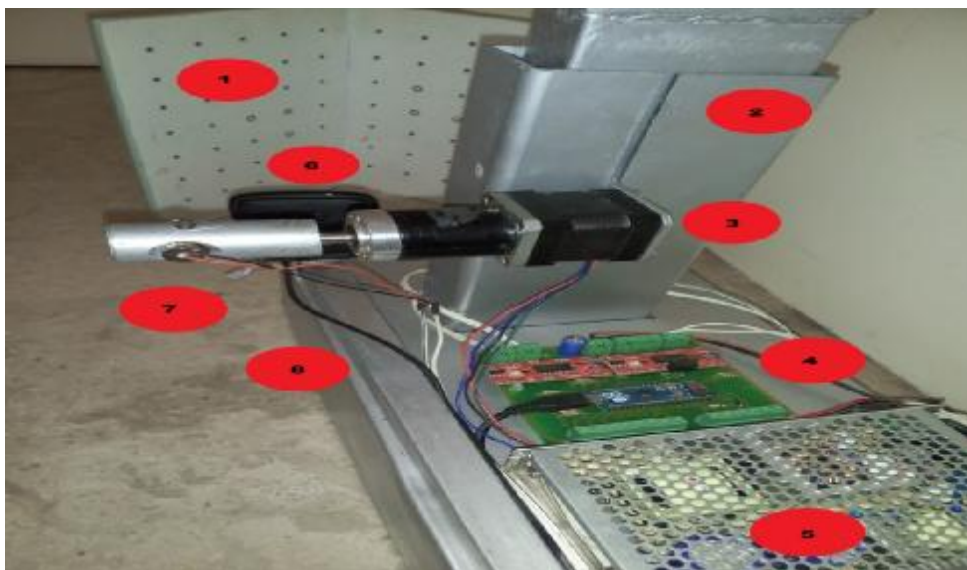
Ένας επιπλέον παράγοντας που ελήφθη υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό του πλαισίου της συσκευής ήταν η δυνατότητα σάρωσης αντικειμένων εύρους μεγέθους 40mm-400mm. Αυτό επετεύχθη τοποθετώντας την βάση στήριξης του αισθητήρα εικόνας πάνω σε οδηγό με δυνατότητα ρύθμισης της απόστασής του ως προς το αντικείμενο που θέλουμε να σαρώσουμε.

Τέλος, στο σύνολό της η κατασκευή θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα σταθερή ώστε να αποσβήνονται τυχόν κραδασμοί κατά την λειτουργία του μοτέρ, προς αποφυγή δημιουργίας θορύβου στο ψηφιακό μοντέλο.

Το πρόβλημα του ψηφιακού θορύβου προέκυψε από τις πρώτες κιόλας πειραματικές σαρώσεις καθώς παρατηρήθηκαν παραμορφώσεις στην ψηφιακή απεικόνιση του αντικειμένου.

Λύση δόθηκε με την επιλογή δύσκαμπτων υλικών με μεγάλο βάρος για την δημιουργία του σκελετού στήριξης (κοιλοδοκοί χάλυβα), καθιστώντας στην συσκευή ιδιαίτερα στιβαρή.

Στην παρακάτω Εικόνα 26 παρουσιάζεται η δική μας εκδοχή μιας συσκευής που πληρεί τα παραπάνω κριτήρια.



Εικόνα 26: Συσκευή σάρωσης

Ειδικότερα στην Εικόνα 26, η συσκευή μπορεί να αναλυθεί σε 8 επιμέρους τμήματα:

1. Πάνελ βαθμονόμησης συσκευής κατασκευασμένο απο διπλό γυαλί που εξασφαλίζει απόλυτη καθετότητα μεταξύ των δύο πλευρών (Εικόνα 27)



Εικόνα 27: Πάνελ βαθμονόμησης

2. Χωνευτή σιδηροκατασκευή για την δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης ακτινών λέιζερ, μεταβάλλοντας τη θέση της πηγής καθ' ύψος (Εικόνα 28)



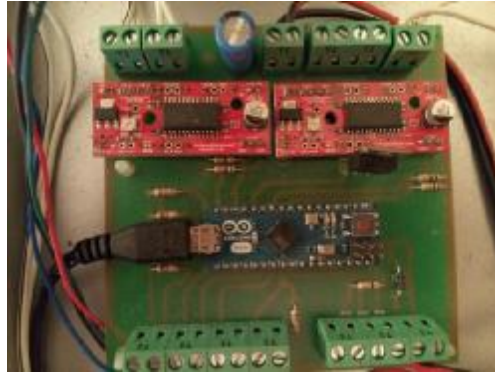
Εικόνα 28: Κατασκευή για ρύθμιση ύψους πηγής ακτινών λέιζερ

3. Ένα βηματικό μοτέρ με ενσωματωμένο σασμάν σχέσης 99:1 υπεύθυνο για την περιστροφική κίνηση της δέσμης των ακτινών λέιζερ (Εικόνα 29)



Εικόνα 29: Βηματικό μοτέρ

4. Τον μικροελεγκτή καθώς και τα κυκλώματα οδήγησης του βηματικού μοτέρ τοποθετημένα σε ηλεκτρονική πλακέτα δικού μας σχεδιασμού και ανάπτυξης (Εικόνα 30)



Εικόνα 30: Ηλεκτρονική πλακέτα ελέγχου συσκευής

5. Ένα τροφοδοτικό για την μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (Εικόνα 31)



Εικόνα 31: Τροφοδοτικό συσκευής

6. Τον αισθητήρα εικόνας μέγιστης ανάλυσης 1080p (Εικόνα 32)



Εικόνα 32: Ηλεκτρονικός αισθητήρας εικόνας



7. Την πηγή της δέσμης ακτινών λέιζερ ερυθρού χρώματος με ενσωματωμένο ρυθμιστή εστίασης, συγκρατούμενη από ιδιοκατασκευή με δυο βίδες τύπου άλεν στον άξονα του βυματικού μοτέρ (Εικόνα 33)



Εικόνα 33: Πηγή δέσμης ακτινών λέιζερ και μέθοδος συγκράτησης

8. Ράουλο για την χειροκίνητη ρύθμιση της απόστασης μεταξύ του αισθητήρα εικόνας και του προς σάρωση αντικειμένου, για την δυνατότητα σάρωσης διαφορετικού μεγέθους αντικειμένων (Εικόνα 34)



Εικόνα 34: Ράουλο στήριξης αισθητήρα εικόνας

Στην Εικόνα 35 φαίνεται η συσκευή σάρωσης κατά την λειτουργία της.



Εικόνα 35: Η συσκευή σάρωσης κατά την λειτουργία

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ (B) ΣΑΡΩΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ

#### 3.1 ΓΝΩΡΙΜΙΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Πληθώρα προγραμμάτων που έχουν αναπτυχθεί με στόχο την τρισδιάστατη ψηφιοποίηση είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα. Ενδεικτικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε τα παρακάτω:

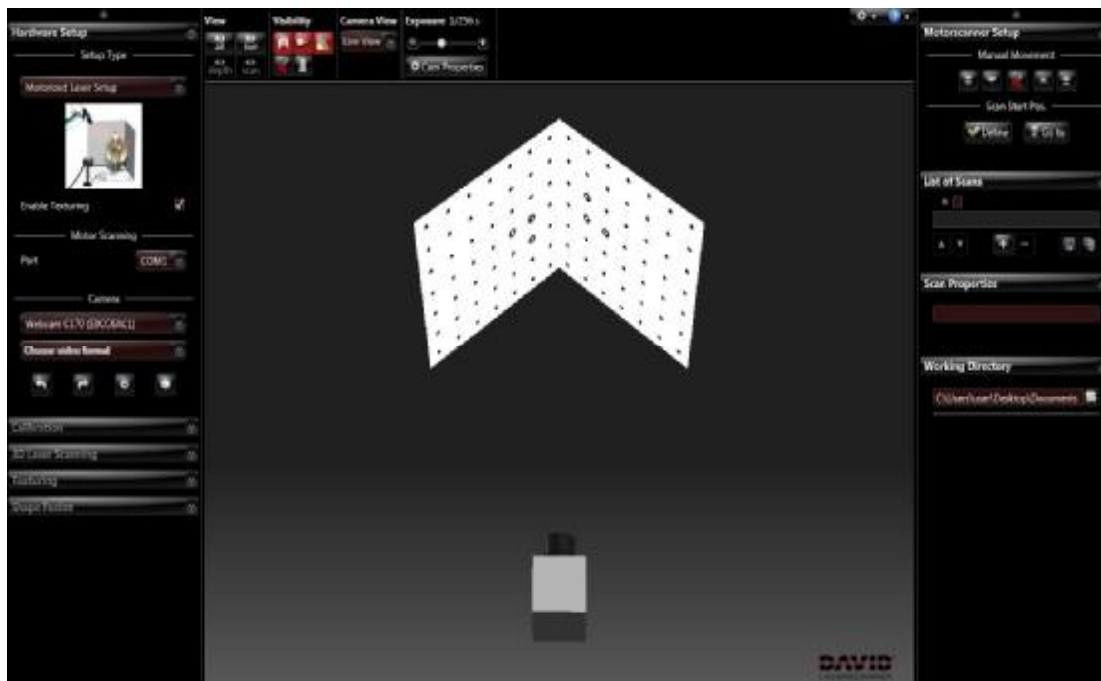
- *123D Catch* της Autodesk
- *ReconstructMe* της Profactor
- *Scanect 3D Scanning* της Occipital

Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν τέτοιου είδους προγράμματα είναι η αποκλειστική τους χρήση με συγκεκριμένα εξαρτήματα εμπορικών εταιριών (Microsoft Kinect, Apple Iphone), η αδυναμία προσαρμογής της συσκευής στις ανάγκες του χρήστη, καθώς και η αρκετά υψηλή τους τιμή.

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας έπειτα από μελέτη των εμπορικά διαθέσιμων λύσεων, καταλήξαμε στην επιλογή του προγράμματος *DAVID*, μια εφαρμογή τρισδιάστατης ψηφιοποίησης η οποία αναπτύχθηκε από γερμανούς φοιτητές ως πτυχιακή εργασία. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου προγράμματος είναι αφενός το χαμηλό του κόστος (δυνατότητα χρήσης δωρεάν έκδοσης), αφετέρου η δυνατότητα χρήσης συμβατικής κάμερας υψηλής ανάλυσης έναντι κάποιας ακριβότερης επιλογής τύπου CCD.

Μειονεκτήματα της συγκεκριμένης εφαρμογής μπορούν να θεωρηθούν οι υπολογιστικές τις απαιτήσεις (8GB RAM) καθώς και η απουσία δυνατότητας αποθήκευσης του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου για την δωρεάν έκδοση.

## Περιβάλλον χρήστη προγράμματος DAVID



Εικόνα 35: Περιβάλλον χρήστη προγράμματος DAVID

Το περιβάλλον χρήστη του επιλεγμένου προγράμματος (Εικόνα 35) διακρίνεται από την ιδιαίτερη απλότητα που το διακατέχει ενώ παράλληλα δίνει την δυνατότητα πρόσβασης σε πληθώρα ρυθμίσεων στην αρχική του οθόνη. Ειδικότερα, το περιβάλλον χρήστη θα μπορούσε να διαχωριστεί σε 3 στήλες. Στην αριστερή στήλη, ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω, συναντάμε πέντε ομάδες ρυθμίσεων:

- Επιλογή τύπου σάρωσης
- Βαθμονόμηση
- Διαδικασία σάρωσης
- Υφή επιφάνειας
- Συρραφή επιφάνειας

Στην μεσαία στήλη, ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά, συναντάμε πέντε ομάδες ρυθμίσεων:

- Επιλογή τροφοδοτούμενης εικόνας από την κάμερα
- Επιλογή ορατότητας βοηθημάτων σάρωσης
- Επιλογή τροφοδοτούμενης εικόνας σε πραγματικό χρόνο
- Ιδιότητες κάμερας
- Επιλογές προχωρημένων ρυθμίσεων

Τέλος, στην δεξιά στήλη, ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω, συναντάμε τέσσερις ομάδες ρυθμίσεων:

- Επιλογές χειροκίνητης κίνησης πηγής ακτινών λέιζερ
- Λίστα αποθηκευμένων σαρώσεων
- Ιδιότητες σάρωσης
- Θέση αποθήκευσης σαρώσεων στον δίσκο

### 3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ

Αφού επιλέξουμε τον τύπο σάρωσης της προτίμησής μας (μηχανοκίνητο), και επιλέξουμε την θύρα επικοινωνίας μεταξύ του υπολογιστή και της κάμερας, σειρά έχει η βαθμονόμηση της συσκευής.

Το συγκεκριμένο βήμα της διαδικασίας σάρωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του αποτελέσματός της.

Κατά την διαδικασία βαθμονόμησης πρέπει να επιτευχθεί η σωστή εστίαση του αισθητήρα εικόνας στο αντικείμενο προς σάρωση καθώς και η βέλτιστη απόσταση μεταξύ αισθητήρα και πάνελ βαθμονόμησης. Αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας τη θέση του αισθητήρα εικόνας σε σχέση με τη θέση του πάνελ βαθμονόμησης.

Στην συνέχεια, επιλέγοντας κάποιο από τα προεγκατεστημένα μοτίβα βαθμονόμησης και πατώντας το κουμπί «Calibrate», ρυθμίζουμε την συσκευή.

Στην Εικόνα 36 φαίνεται μια επιτυχής διαδικασία βαθμονόμησης της συσκευής.



Εικόνα 36: Επιτυχής βαθμονόμηση συσκευής

### 3.3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΡΥΘΜΙΣΕΩΝ ΣΑΡΩΤΗ

Μετά την επιτυχή βαθμονόμηση της συσκευής σειρά έχει ένα επίσης κρίσιμο κομμάτι της διαδικασίας σάρωσης.

Για την βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων του σαρωτή είναι σημαντικό να βρεθεί η ιδανική θέση ύψους της πηγής ακτινών λέιζερ ώστε κατά την διαδικασία της σάρωσης η γωνία πρόσπτωσης να κυμαίνεται μεταξύ των  $30^{\circ}$  -  $40^{\circ}$ , ενώ παράλληλα πρέπει να βρεθεί η ιδανική απόσταση του αντικειμένου σε σχέση με το πάνελ βαθμονόμησης, ώστε να επιτυγχάνεται πλήρης ορατότητα του αντικειμένου από τον αισθητήρα εικόνας.

Επόμενο σημαντικό βήμα είναι η εστίαση της γραμμής λέιζερ πάνω στο προς σάρωση αντικείμενο ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την παρουσία θορύβου στο ψηφιακό μας μοντέλο.

Κάτι τέτοιο σε πολλές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα δύσκολο να επιτευχθεί καθώς το μέγεθος αλλά και η φυσιολογία του εκάστοτε αντικειμένου μπορούν να αποτελέσουν αρνητικό παράγοντα.

Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται μια επιτυχής ρύθμιση των προαναφερθέντων παραμέτρων.



Εικόνα 37: Επιτυχής ρύθμιση ανατροφοδότησης εικόνας

### 3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΑΡΩΣΗΣ

Επιλέγοντας την καρτέλα της διαδικασίας σάρωσης, περισσότερες επιλογές γίνονται διαθέσιμες. Σε αυτό το σημείο πραγματοποιούμε μια πρώτη ολική σάρωση του αντικειμένου έχοντας επιλέξει την καταγραφή της κίνησης απο τον μικροελεγκτή, ώστε η δυνατότητα επανάληψης της ακριβώς ίδιας κίνησης σάρωσης να είναι εφικτή. Με την κίνηση σάρωσης για το συγκεκριμένο αντικείμενο αποθηκευμένη στην μνήμη του μικροελεγκτή, είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στην σάρωση του επιθυμητού αντικειμένου. Πρώτο βήμα για την ομαλή σάρωση του αντικειμένου είναι η επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας κίνησης της πηγής δέσμης λέιζερ. Κάτι τέτοιο μπορεί να ρυθμιστεί και απο την καρτέλα των προχωρημένων ρυθμίσεων, αλλά δίνεται η επιλογή και σε αυτό το σημείο. Γενικότερα θα πρέπει να επιλεγεί μια ταχύτητα κίνησης ικανή να αποφέρει ένα λεπτομερές αποτέλεσμα σε μια ικανοποιητική διάρκεια χρόνου, αναλογίας του μεγέθους του αντικειμένου προς σάρωση. Στην συνέχεια, δίνεται η δυνατότητα επιλογής του μήκους κύματος των ακτινών λέιζερ που θα χρησιμοποιηθούν (κόκκινο, 650nm), και η δυνατότητα ρύθμισης φίλτρων του αισθητήρα εικόνας όπως το ποσοστό παρεμβολής της ληφθείσας εικόνας καθώς και η μείωση του φαινόμενου θορύβου μέσω του “smoothing average”. Στόχος των φίλτρων είναι να αφαιρέσουν το θόρυβο, να μειώσουν τον όγκο των δεδομένων, αλλά ταυτόχρονα, να διατηρήσουν άθικτα τα περιθώρια των επιφανειών και τον όγκο του αντικειμένου.

Τέλος, πατώντας το κουμπί της έναρξης σάρωσης ξεκινά η διαδικασία. Κατά την διαδικασία της σάρωσης είναι δυνατή η περαιτέρω ρύθμιση των φίλτρων του αισθητήρα εικόνας αλλά και η ταχύτητα κίνησης της δέσμης λέιζερ ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια στην συγκεκριμένη όψη του τρισδιάστατου μοντέλου. Στην Εικόνα 38 φαίνεται μια επιτυχής σάρωση.



Εικόνα 38: Αποτέλεσμα επιτυχούς σάρωσης αντικειμένου

### 3.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για την δημιουργία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου απαιτούνται ψηφιοποιήσεις του, από πολλές και διαφορετικές προοπτικές. Πειραματικά έχει διαπιστωθεί πως περίπου 12 σαρώσεις περιμετρικά του αντικειμένου είναι αρκετές ώστε να δημιουργηθεί ένα ευκρινές τρισδιάστατο μοντέλο, ωστόσο γεωμετρίες που παροθιάζουν πολυπλοκότητα μπορεί να χρειαστούν περισσότερες.

Κατά την διαδικασία δημιουργίας του τρισδιάστατου μοντέλου πρώτο βήμα είναι η ευθυγράμμιση των διαφορετικών σαρώσεων σε ένα επίπεδο εργασίας που θα είναι και το τελικό αρχείο. Το πρόγραμμα που έχει επιλεγεί, στην αντίστοιχη καρτέλα, μας δίνει τέσσερις διαφορετικές μεθόδους ευθυγράμμισης των σαρώσεων:

- Ελεύθερη
- Γύρω από τον άξονα  $yy'$
- Με χρήση κοινών σημείων
- Με χρήση κοινών σημείων του περιβάλλοντος

Αποτελεσματικότερη φαίνεται να είναι η ευθυγράμμιση με χρήση κοινών σημείων αναφοράς μεταξύ των διαφορετικών σαρώσεων καθώς και η ευθυγράμμιση των που χρησιμοποιεί ως άξονα αναφοράς τον  $yy'$ .

Επόμενο βήμα είναι η συρραφή όλων των σαρώσεων σε ένα ενιαίο μοντέλο. Για να καταστεί αυτό δυνατό θα πρέπει πρώτα όλες οι σαρώσεις αφού έχουν ευθυγραμμιστεί, να καθαριστούν από τυχόν ανεπιθύμητα σημεία στον χώρο. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα και απαιτεί περίπου τα 3/4 του συνολικού απαιτούμενου χρόνου. Πατώντας τον κουμπί «ένωση», ξεκινά η δημιουργία του τελικού τρισδιάστατου μοντέλου, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα κάλυψης ασυνεχειών που τυχόν να εμφανιστούν στην επιφάνεια του. Αυτή η διαδικασία είναι η πιο απαιτητική σε υπολογιστικό επίπεδο καθώς εκατομμύρια σημεία στον χώρο επεξεργάζονται ταυτόχρονα, εξαντλώντας την μνήμη τυχαίας προσπέλασης των μέσων υπολογιστικών συστημάτων. Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία συρραφής και προσθέτοντας όσες σαρώσεις θεωρηθούν απαραίτητες, καταλήγουμε στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο. Στην δωρεάν έκδοση του προγράμματος που έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία δεν δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης του τελικού αποτελέσματος. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται μια σειρά από σαρώσεις ενός μηχανολογικού εξαρτήματος, καθώς και το τελικό αποτέλεσμα της συρραφής τους σε ένα ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο.



Στην Εικόνα 39 φαίνεται το μηχανολογικό εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε ως μοντέλο για την παρουσίαση της πτυχιακής εργασίας. Συγκεκριμένα πρόκειται για ένα γρανάζι με 6 ακτίνες, εξωτερικής διαμέτρου 13 εκατοστών, με εσωτερική διάμετρο 12 εκατοστά και 48 δόντια.



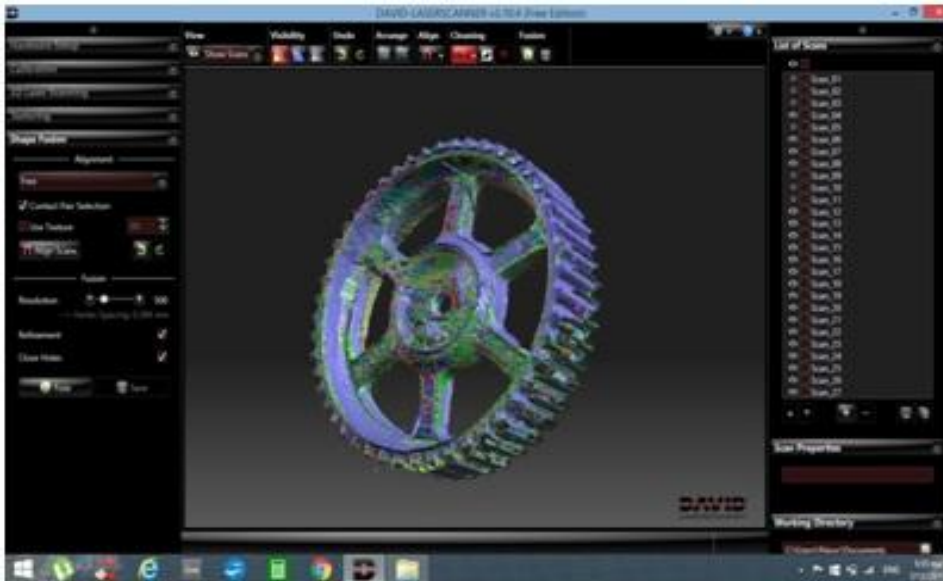
Εικόνα 39: Εξάρτημα που χρησιμοποιήθηκε

Στην συνέχεια ακολουθούν φωτογραφίες απο πλήθος σαρώσεων του συγκεκριμένου δοκιμίου, υπό διαφορετικές προοπτικές, ώστε να καλυφθούν όλες οι επιφάνειές του.



Εικόνα 40: Στιγμιότυπα απο την διαδικασία συρραφής του πλήθους των σαρώσεων

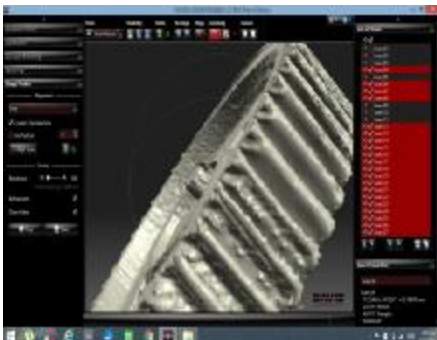
Στην Εικόνα 41 φαίνεται το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης όλων των σαρώσεων οι οποίες είναι ακόμα ευδιάκριτες χάριν της διαφορετικής τους απόχρωσης.



Εικόνα 41: Αποτέλεσμα ευθυγράμμισης σαρώσεων

Σε αυτό το σημείο της διαδικασίας, θα εντοπιστούν και θα διορθωθούν τυχών λάθη στο νέφος των σημείων που απαρτίζουν το μοντέλο και λοιπές λεπτομέρειες στο σχήμα.

Τέλος ακολουθεί η συρραφή των ευθυγραμμισμένων σαρώσεων, η συμπλήρωση υλικού στις κενές περιοχές του μοντέλου, και το τελικό φινίρισμα. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται αναλυτικά το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 42: Ολοκληρωμένη αποτύπωση αντικειμένου σε τρισδιάστατη ψηφιακή μορφή



### 3.6 Ανάλυση κόστους κατασκευής και σύγκριση με προϊόντα του εμπορίου

Στον παρακάτω πίνακα αναφέρεται το κόστος κατασκευής της συγκεκριμένης λύσης και συγκρίνεται με εναλλακτικές επιλογές διαθέσιμες στο εμπόριο.

Εξάρτημα/Διαδικασία	Κόστος	Εναλλακτικές Λύσεις	Κόστος Λύσης
Bipolar Stepper Motor Driver	17,82	David starter Kit	667,3
NEMA 17 Stepper Motor	38,25	ReconstructMe	599
Arduino	24,63	Skaneet 3D Scanning	499
Ηλεκτρονική Πλακέτα	45		
Αισθητήρας εικόνας	76,9		
Τροφοδοτικό	15,6		
Πάνελ βαθμονόμησης	20		
Πηγή δέσμης λέιζερ	17,67		
Πρώτες ύλες	30		
Εργασία σε μηχανουργείο	50		
<b>Σύνολο</b>	<b>335,87</b>		

Είναι φανερό πως η παρούσα κατασκευή είναι αρκετά οικονομικότερη από την αμέσως επόμενη εμπορικά διαθέσιμη, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει ένα άκρως ανταγωνιστικό αποτέλεσμα συγκριτικά με όλες τις διαθέσιμες λύσεις. Πιο συγκεκριμένα θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε πως το κόστος της συγκεκριμένης λύσης κυμαίνεται στην μισή τιμή από την αμέσως ακριβότερη εμπορικά διαθέσιμη λύση. Μια ανακατασκευή της παρούσας εργασίας, με στόχο την βελτιστοποίηση του σκελετού της, θα αύξανε το κόστος της κατά 83,45 € με τελικό εκτιμώμενο κόστος: 419,32 €. Μία τέτοια μετατροπή δεν χαρακτηρίζεται αποτρεπτική καθώς η συσκευή θα παραμένει ανταγωνιστική σε σχέση με την αμέσως επόμενη διαθέσιμη πρόταση τόσο από άποψη ταχύτητας ανάλυσης και ψηφιοποίησης δεδομένων, όσο πλέον και αισθητικά.

### 3.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η τεχνική της τρισδιάστατης σάρωσης και να κατασκευασθεί μια μηχανή σάρωσης αντικειμένων. Τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας λοιπόν θα μπορούσαν να κινηθούν γύρω από δύο ευδιάκριτους άξονες:

Αναφορικά με την διαδικασία τρισδιάστατης ψηφιοποίησης και την εξέλιξή της κατά την διάρκεια του χρόνου, είναι ασφαλές να διατυπωθεί πως με την χρήση υπολογιστικών συστημάτων σε συνδυασμό με την ταχύτερη εξέλιξη που παρουσιάζουν οι δυνατότητες των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στην εποχή μας, έχει επιτευχθεί η δυνατότητα υψηλού επιπέδου ανάλυσης και μεταφοράς πραγματικών αντικειμένων σε ψηφιακό περιβάλλον. Τα παραγόμενα τρισδιάστατα μοντέλα έχουν επιτύχει τόσο υψηλή ακρίβεια που σε ερευνητικούς κύκλους το επίπεδο ψηφιοποίησης αντικειμένων αγγίζει το μοριακό. Είναι προφανές πως με την ολοένα αυξανόμενη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ σε συνδυασμό με την δημιουργία βιβλιοθηκών των καταγεγραμμένων αντικειμένων, η ψηφιοποίηση ακμάζει, δίνοντάς μας την δυνατότητα μεταφοράς ενός ολοένα και μεγαλύτερου ποσοστού του πραγματικού κόσμου στον ψηφιακό.

Όσο αναφορά στην κατασκευή της παρούσας εργασίας, πρόκειται για μια ολοκληρωμένη λύση τρισδιάστατης σάρωσης και ψηφιοποίησης αντικειμένων, που όμως υπάγεται σε περιορισμούς ενώ ταυτόχρονα επιδέχεται μια πληθώρα βελτιώσεων. Καθώς οι περιορισμοί έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, σε αυτό το σημείο θα επικεντρωθούμε στις δυνατότητες βελτίωσης αφενός της συσκευής και αφετέρου του τελικού αποτελέσματος.

Όπως έχει προαναφερθεί είναι γνωστό πως με την χρήση ενός αισθητήρα εικόνας υψηλότερης ανάλυσης τα αποτελέσματα θα ήταν εμφανώς καλύτερα. Επίσης χρήση ακτινών λέιζερ μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες) επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα αλλά ανεβάζουν το κόστος κατασκευής.

Με δεδομένη την ύπαρξη μικροελεκτη στην συσκευή, μας δίνεται μια πληθώρα επιλογών περαιτέρω βελτίωσης της διαδικασίας. Επιγραμματικά αναφέρονται:

- Αυτοματοποίηση και συγχρονισμός περιστροφής αντικειμένου γύρω από τον άξονά του κατά την διαδικασία σάρωσης
- Δυνατότητα ρύθμισης ταχύτητας και κατεύθυνσης κίνησης δεσμών λέιζερ μέσω φυσικών κουμπιών.

- Δυνατότητα ρύθμισης παραμέτρων όπως το ύψος της δέσμης ακτινών λέιζερ αλλά και το βάθος του αισθητήρα εικόνας με την χρήση επιπλέον ηλεκτρικών μοτέρ.

Τέλος, μεγάλο ποσοστό βελτίωσης επιδέχεται η βάση της συσκευής, όπου προτιμήθηκαν φτηνότερα υλικά με γνώμονα την οικονομία. Μία κατασκευή από αλουμίνιο και εμπορικά διαθέσιμα ράουλα, θα καθιστούσε την συσκευή ελαφρότερη, θα προσέδιδε φορητότητα ενώ θα αναβάθμιζε και το οπτικό αποτέλεσμα επί του συνόλου.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. G.FARIN. Curves and surfaces for Computer Aided Geometric Design. Academic press, Third edition,1993
2. L.PIEGL. Fundamental Developments in Computer Aided Geometric Design. Academic press,1993
3. 3D systems, [www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com)
4. 'Generic Fourier Descriptor for Shape-based image Retrieval', Dengsheng Zhang and Guojun Lu
5. 'Fully automatic Registration of 3D Point Clouds', Ameesh Makadia, Alexander Patterson IV, and Kostas Daniilidis
6. 3D Scanning Basics – Karol Hatzilias, <http://karol.hatzilias.com/3d-scanning-basics-w/>
7. Laser Scanning Forum, <http://www.laserscanning.org.uk>
8. Structured Light 3D Scanning, <http://www.instructables.com/id/Structured-Light-3d-scanning/>
9. Stanford 3D Scanning Repository, <http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>
10. Meshing point clouds, <http://meshlabstuff.blogspot.com/2009/09/meshing-point-clouds.html>
11. David Laser Scanner, [http://wiki.david-3d.com/david3\\_user\\_manual/overview](http://wiki.david-3d.com/david3_user_manual/overview)
12. 'Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach', Simon Winkelbach, Sven Molkenstruck, Friedrich M. Wahl
13. 'Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry-The Last Decade and beyond', Beraldin, Jean-Angelo
14. Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner)
15. Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon\\_mesh](https://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh)
16. Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας, <http://ipet.gr/>
17. 'Direct Dimensions, Inc', [http://www.dirdim.com/lm\\_everything.htm](http://www.dirdim.com/lm_everything.htm)
18. '3D-Scanners – A guide to 3D scanner technology' [www.rapidform.com/3d-scanners/](http://www.rapidform.com/3d-scanners/)