



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &**

**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ  
ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ  
ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΚΟΥΛΟΥΜΕΝΤΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ**



**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:**

**ΖΕΡΒΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ 2014**



**Στην οικογένειά μου**



**Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:**

**Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μιχάλη Ζερβάκη για την πολύτιμη βοήθειά του, και την καθοδήγησή του για την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.**

**Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για τη διαρκή υποστήριξη, μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας.**

**Τον βοηθό και υποψήφιο διδάκτορα του εργαστηρίου Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος και Εικόνας κ. Γιώργο Λιβανό για την πολύτιμη βοήθειά του, την υπομονή του και τον χρόνο που διέθεσε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας.**



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>9</b>
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑ.....	10
1.2 ΕΡΕΥΝΑ ΣΤΟ ΘΕΜΑ ΤΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΛΕΙΖΕΡ ΚΑΙ ΚΑΜΕΡΩΝ.....	13
1.2.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΥΡΕΣΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ.....	14
1.2.2 ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΜΕΡΩΝ.....	15
1.2.3 Η ΕΠΙΠΟΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....	17
<b>2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....</b>	<b>18</b>
2.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΟΥ.....	18
2.1.1 ΟΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ.....	18
2.1.2 Ο ΠΡΟΒΟΛΕΑΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ.....	19
2.1.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΟΠΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	21
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	34
2.2.1 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΛΕΙΖΕΡ ΑΠΟ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΕΣ.....	34
2.2.2 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ PIXEL BY PIXEL.....	37
2.2.3 3D ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ.....	31
2.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	41
<b>3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>43</b>
3.1 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΠΟΛΛΑ ΕΠΙΠΕΔΑ.....	43
3.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	45
<b>4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>82</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>85</b>





## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η **μηχανική όραση**, **υπολογιστική όραση** ή **τεχνητή όραση** είναι ένα επιστημονικό πεδίο της τεχνικής νοημοσύνης, το οποίο επιχειρεί να αναπαράγει αλγοριθμικά την αίσθηση της όρασης, συνήθως σε ηλεκτρονικό \_υπολογιστή ή ρομπότ. Η μηχανική όραση σχετίζεται με τη θεωρία και την τεχνολογία που εμπλέκονται στη σχεδίαση και κατασκευή συστημάτων που λαμβάνουν και αναλύουν δεδομένα από ψηφιακές εικόνες. Τα εν λόγω δεδομένα μπορούν να είναι φωτογραφίες, βίντεο, όψεις από πολλαπλές κάμερες, πολυδιάστατες εικόνες από ιατρικό σαρωτή κλπ.

Η μηχανική όραση επιδιώκει να εφαρμόσει θεωρίες και μοντέλα στην κατασκευή μηχανικών συστημάτων με δυνατότητα όρασης.

Η μηχανική όραση μπορεί επίσης να περιγραφεί ως συμπλήρωμα (αλλά όχι απαραίτητως αντίθετο) της βιολογικής όρασης. Στην τελευταία, μελετώνται η οπτική αντίληψη στους ανθρώπους και τα ζώα με αποτέλεσμα μοντέλα για το πώς αυτά τα συστήματα λειτουργούν υπό το πρίσμα των φυσιολογικών διαδικασιών.

Η μηχανική όραση από την άλλη μελετά και περιγράφει το τεχνητά συστήματα όρασης που εφαρμόζονται σε λογισμικό ή/και σε υλικό υπολογιστών. Η διεπιστημονική ανταλλαγή μεταξύ της βιολογικής και υπολογιστικής όρασης αποδεικνύεται όλο και περισσότερο καρποφόρα και για τους δύο τομείς.

Ιστορικά, η *υπολογιστική όραση* αναδύθηκε μετά το 1980 ως αποτέλεσμα επέκτασης του πεδίου της πληροφορικής, το οποίο καλείται ψηφιακή επεξεργασία εικόνων, σε αλγορίθμους ανάλυσης και κατανόησης εικόνων. Είχαν προηγηθεί η μαθηματική μοντελοποίηση της φυσικής όρασης, έστω σε ένα βασικό επίπεδο, και οι πρώτες προσπάθειες για αναπαραγωγή της αίσθησης της όρασης σε αυτόνομα ρομπότ. Ως τότε ο όρος *μηχανική όραση* σχετιζόταν με την ηλεκτρολογία και τη ρομποτική, συνήθως σε βιομηχανικό πλαίσιο. Κατά τη δεκαετία του 1980, μετά την εμφάνιση της υπολογιστικής όρασης, οι δύο όροι σταδιακά συνέκλιναν και συγχωνεύθηκαν ως επιστημονικά πεδία, σαν διακριτός τομέας της τεχνητής νοημοσύνης με εφαρμογές όχι μόνο στη ρομποτική αλλά και σε δεκάδες ακόμα κλάδους.[1]

Ένα από τα θέματα με τα οποία καταπιάνεται τα τελευταία κυρίως χρόνια ο τομέας της μηχανικής όρασης είναι και οι εφαρμογές της στη βιομηχανία, όπου η ,προς επεξεργασία, πληροφορία εξάγεται κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής διαδικασίας. Ένα παράδειγμα είναι η εφαρμογή της μηχανικής όρασης στον τομέα παραγωγής και επεξεργασίας υλικών, και συγκεκριμένα στον έλεγχο ποιότητας των υλικών. Η συγκεκριμένη εφαρμογή της μηχανικής όρασης, η οποία είναι σε άμεση σύνδεση με το θέμα της παρούσας εργασίας, έχει στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα λάθη που προκύπτουν, ως αποτέλεσμα της επεξεργασίας των υλικών. Η ανάπτυξη αλγορίθμων για τέτοιου είδους ελέγχους, μπορεί να αφορούν είτε κάποιες λεπτομέρειες των υλικών, είτε το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την επεξεργασία του υλικού. [2][16]

Η **τρισδιάστατη οπτικοποίηση** άρχισε να αποκτά έδαφος στις πρόσφατες εξελίξεις της τεχνολογίας. Πολλές είναι οι περιπτώσεις όπου η γνώση της τρισδιάστατης δομής ενός αντικειμένου ή ενός χώρου κρίνεται απαραίτητη. Ενδεικτικά αναφέρονται οι τομείς της ρομποτικής, της ιατρικής και της ψηφιακής επεξεργασίας γενικότερα. Εφαρμογές όπως η εικονική περιήγηση σε κτίρια, τα τρισδιάστατα γραφικά στους υπολογιστές και η δημιουργία οπτικών εφέ σε ταινίες είναι κάποιες αναμενόμενες χρήσεις του τομέα που αφορά την τρισδιάστατη αναπαράσταση.[16]

Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών συνέβαλε στην επίτευξη του στόχου για ακριβής και ποιοτική αναπαράσταση αντικειμένων. Είναι δυνατό πλέον, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, να απεικονιστούν σύνθετες τρισδιάστατες σκηνές σε πραγματικό χρόνο, το οποίο κάποια χρόνια πριν ήταν ανέφικτο, καθώς επίσης και η επεξεργασία ψηφιακών εικόνων πολύ υψηλής ανάλυσης, που συνεπάγεται μεγάλο όγκο δεδομένων. Αυτή η εξέλιξη προκαλεί μια σημαντική αξίωση για πιο σύνθετα και ρεαλιστικά μοντέλα. Το πρόβλημα είναι ότι ακόμα κι αν τα εργαλεία που είναι διαθέσιμα γίνονται περισσότερο ισχυρά, η σύνθεση των ρεαλιστικών τρισδιάστατων μοντέλων είναι δύσκολη και χρονοβόρα, με αποτέλεσμα να είναι και ακριβή.

Παραταύτα η μεγάλη ερευνητική προσπάθεια έχει οδηγήσει στη δημιουργία πολλών τεχνικών, κάποιες από τις οποίες έχουν εξελιχθεί και γίνονται πλέον hardware.[3]

### **1.1. Σκοπός της διπλωματικής και συνοπτική περιγραφή του θέματος**

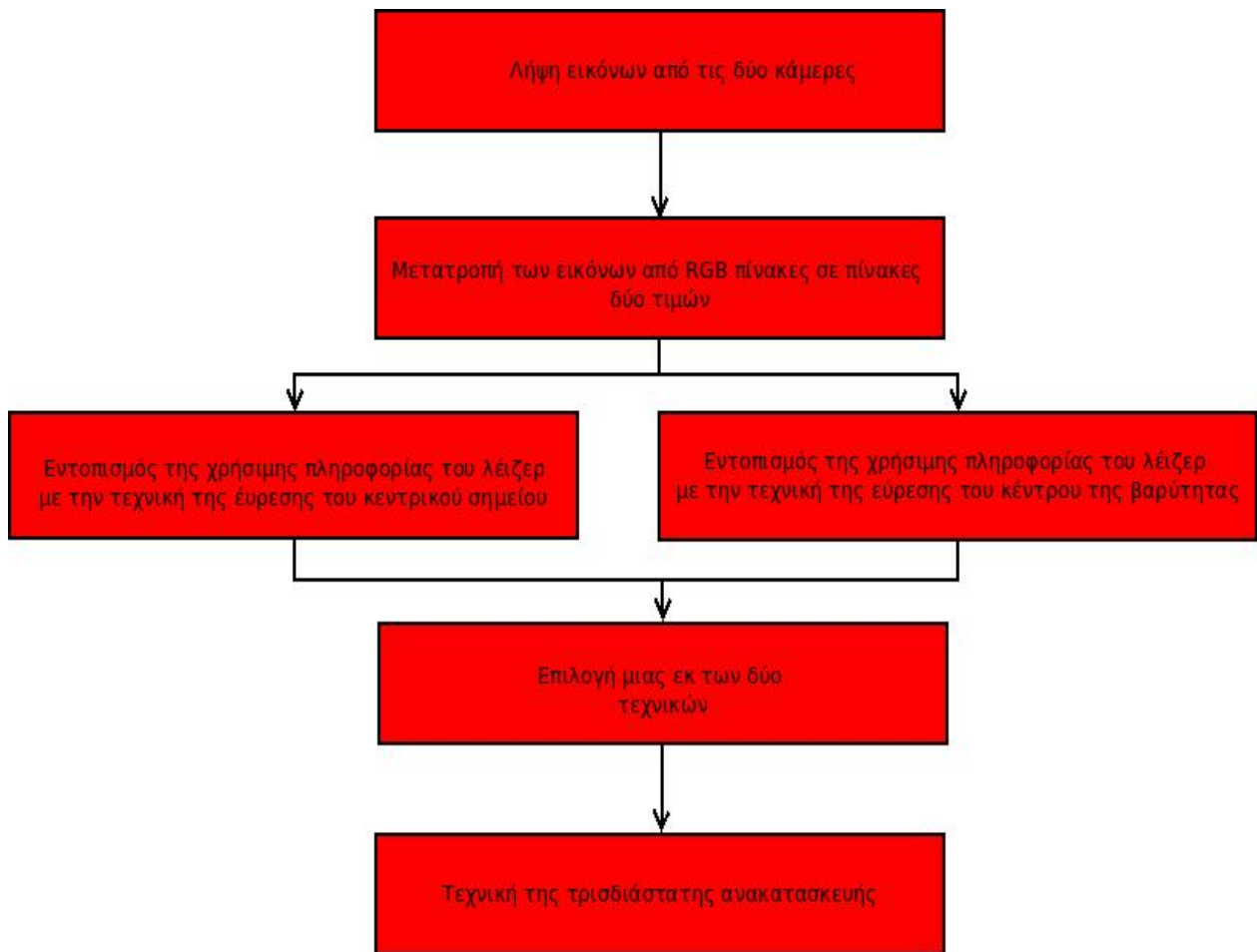
Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου **Συνεργασία II - " Παραμορφώσιμα Εργαλεία Μικροκοπής, Μεταβλητής Γεωμετρίας Αποτελούμενα από Κοπτικά Νανοσωματίδια"**, στην οποία συντονιστής φορέας είναι το Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Μοντελοποίησης του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη οπτικού συστήματος το οποίο θα ελέγχει την ποιότητα του φρεζαρίσματος ενός αντικειμένου. Συγκεκριμένα, το υλικό την στιγμή που θα υπόκειται στην επεξεργασία από τη φρέζα, θα ελέγχεται από το οπτικό σύστημα για την εύρεση των λαθών που έγιναν κατά τη διάρκεια του φρεζαρίσματος. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να γίνεται με χρήση καμερών και λέιζερ.

Η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί παρακάτω απαιτεί το λιγότερο δύο κάμερες και μια συσκευή παραγωγής γραμμής λέιζερ, η οποία θα προσπίπτει πάνω στο τμήμα του αντικειμένου το οποίο δέχεται την επεξεργασία της φρέζας. Εννοείται ότι σκοπός της μεθοδολογίας είναι η απόκτηση της γνώσης για τις ακριβείς διαστάσεις του κάθε σημείου του αντικειμένου, το οποίο σκανάρεται από το σύστημα των

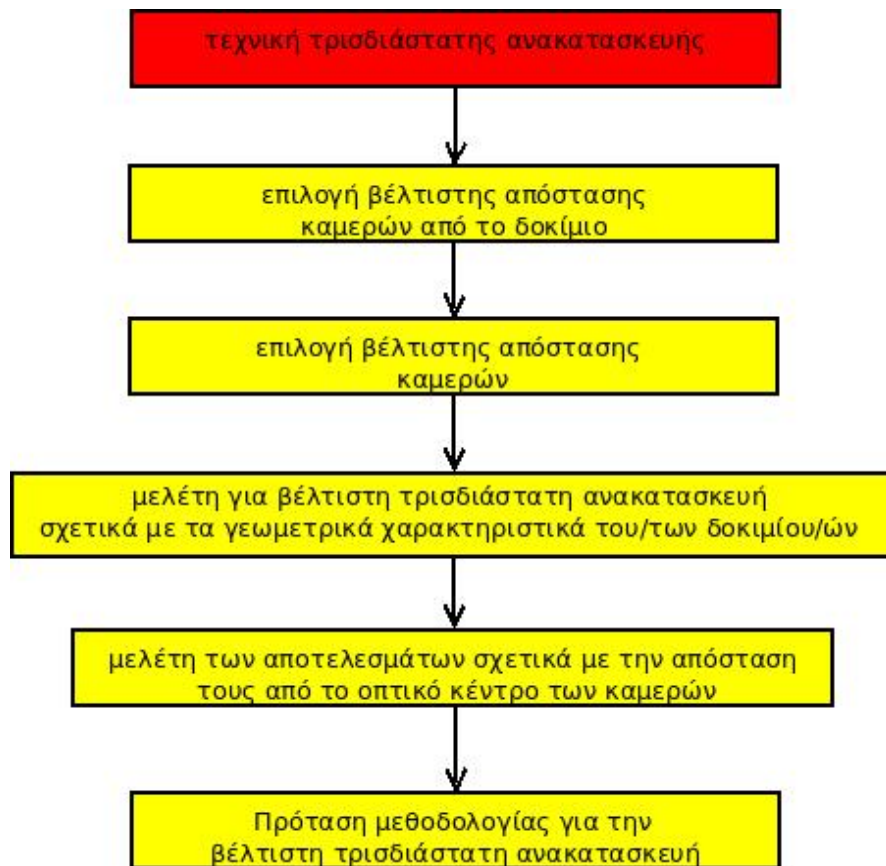
καμερών και της γραμμής λείζερ. Επομένως κάνοντας μια αφαίρεση, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι βαθύτερος σκοπός της εργασίας είναι η υλοποίηση ενός τρισδιάστατου σαρωτή, αντικειμένων με χρήση δύο ή και περισσότερων αισθητήρων, οι οποίοι λαμβάνουν στερεοσκοπικές εικόνες από το λείζερ, και μετά από την επεξεργασία των εικόνων επιτυγχάνεται η τρισδιάστατη ανακατασκευή του αντικειμένου. **Αξίζει να τονιστεί, ότι η διαφορά του τρισδιάστατου αυτού σαρωτή σε σχέση με αυτούς του εμπορίου είναι ότι ο πρώτος είναι πιο οικονομικός καθώς χρησιμοποιούνται δύο απλές CCD κάμερες και ένας προβολέας γραμμής λείζερ του εμπορίου, από αυτούς που χρησιμοποιούνται για το αλφάδιασμα κατασκευών.**

Μεταξύ άλλων σε αυτή την εργασία πραγματοποιείται και μια μελέτη για την καλύτερη δυνατή διάταξη του οπτικού συστήματος. Αυτή η μελέτη αφορά στην εύρεση της καλύτερης δυνατής απόστασης των δύο καμερών και την εύρεση της καλύτερης δυνατής απόστασης των καμερών από το αντικείμενο που σαρώνεται **(ενότητα 2.1.3)**. Επίσης παρουσιάζονται απαραίτητες τεχνικές για την επεξεργασία των στερεοσκοπικών εικόνων. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν τη μετατροπή τους από RGB εικόνες σε δισδιάστατους πίνακες κι τη μετέπειτα επεξεργασία τους. Έπεται η υλοποίηση δύο τεχνικών για την άντληση της χρήσιμης πληροφορίας σχετικά με τη θέση του λείζερ, η σύγκρισή τους και η υλοποίηση της μιας εκ των δύο. Οι δύο αυτές τεχνικές είναι η τεχνική του κεντρικού σημείου, και η τεχνική του κέντρου βάρους. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε η τεχνική του ταιριάσματος των σημείων των δύο εικόνων, και τέλος η υλοποίηση της τεχνικής για την τρισδιάστατη ανακατασκευή **(Ενότητα 2.2)**. Σε σχέση με τις υλοποιήσεις τρισδιάστατων σαρωτών με χρήση λείζερ και καμερών και τις μελέτες όπου υπάρχουν στην μέχρι τώρα βιβλιογραφία, η συνεισφορά της εργασίας αυτής έγκειται στην παρουσίαση συγκριτικών μελετών, οι οποίες αφορούν στην βέλτιστη δυνατή εγκατάσταση του οπτικού συστήματος. Επίσης θα γίνει στην αρχή μια παρουσίαση και έπειτα συλλογή όλων εκείνων των χαρακτηριστικών μεγεθών, τα οποία επιρεάζουν τα αποτελέσματα του τρισδιάστατου σαρωτή, όσον αφορά την εμφάνιση ή μη σφαλμάτων στα τρισδιάστατα ανακατασκευασμένα σημεία. Αυτά τα σημεία αφορούν κυρίως γωνίες, οι οποίες δεν φαίνονται. Η ίδια μελέτη αφορά και σχηματισμούς, για τους οποίους επιτυγχάνεται καλύτερη ανακατασκευή. Τέλος η μελέτη περιλαμβάνει μια συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων σχετικά με την απόσταση τους από το οπτικό κέντρο των καμερών.

Όλα τα παραπάνω συντελούν στην πρόταση μιας μεθοδολογίας **(ενότητα 2.3)** για την καλύτερη δυνατή τρισδιάστατη ανακατασκευή ενός αντικειμένου το οποίο σαρώνεται από το οπτικό σύστημα και συνοψίζονται συνοπτικά στα παρακάτω διαγράμματα ροής:



**Διάγραμμα 1.1.: Μέθοδος τρισδιάστατης ανακατασκευής**



**Διάγραμμα 1.2.: Η ακολουθία βημάτων για την επιλογή της μεθοδολογίας που θα προταθεί**

## **1.2. Έρευνα στο θέμα της τρισδιάστατης ανακατασκευής με χρήση λέιζερ και καμερών**

Η τρισδιάστατη ανακατασκευή έχει απασχολήσει τους επιστήμονες, που αχολούνται με τον τομέα της μηχανικής όρασης. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί στηρίζονται στην ιδέα ότι για να επιτευχθεί η τρισδιάστατη ανακατασκευή σημείων που σαρώνονται, είναι αναγκαία η καταγραφή τους από πολλαπλές οπτικές γωνίες. Μέχρι στιγμής στις συντριπτικές αναφορές στη βιβλιογραφία αναφέρονται σε υλοποιήσεις τρισδιάστατης οπτικοποίησης σημείων που έχουν εντοπιστεί από κάμερες, που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις για καλύτερη τρισδιάστατη απεικόνιση. Οι περισσότερες από αυτές τις υλοποιήσεις εντοπίζουν την αντιστοιχία των σημείων στις δύο κάμερες χρησιμοποιώντας αλγόριθμους εύρεσης κρίσιμων σημείων, τα οποία σημεία συνήθως είναι γωνίες και εντοπίζονται με την εύρεση ακραίων μεταβολών του φωτισμού σε grayscaled εικόνες. Προκειμένου να γίνει η εύρεση των αντίστοιχων σημείων οι περισσότεροι αλγόριθμοι τρισδιάστατης ανακατασκευής, χρησιμοποιούν μεγέθη, τα οποία καθορίζουν τις ακριβείς θέσεις των συστημάτων αξόνων των καμερών, ως προς ένα και μοναδικό σύστημα αξόνων. Έτσι χρησιμοποιούν πίνακες μετασχηματισμών μετατόπισης και

περιστροφής των συστημάτων αξόνων. Οι πίνακες αυτοί μαζί με τις ενδογενείς και εξωγενείς παραμέτρους των καμερών (ενότητα 1.2.2) χρησιμοποιούνται στην παραμετροποίηση των καμερών (calibration). Αφού υπολογιστούν αυτές οι παράμετροι το επόμενο βήμα είναι η υλοποίηση του αλγόριθμου της τρισδιάστατης ανακατασκευής που θα εξηγηθεί παρακάτω. Στην παρούσα εργασία η μόνη παράμετρος που απαιτείται όπως θα εξηγηθεί αργότερα είναι οι διαστάσεις των εικονοστοιχείων της εικόνας. Επίσης ο αλγόριθμος της ανακατασκευής που χρησιμοποιείται είναι ευρέως γνωστός στην βιβλιογραφία [1]. Οι παρακάτω ενότητες επιχειρούν μια σύντομη περιγραφή της στάθμης της γνώσης σχετικά με τις μεθόδους εύρεσης του βάθους (ενότητα 1.2.1), τα χαρακτηριστικά των καμερών (ενότητα 1.2.2) και την επιπολική γεωμετρία (ενότητα 1.2.3). Η υλοποίηση του αλγόριθμου ανακατασκευής κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πιο αναλυτικά σε επόμενη ενότητα (ενότητα 2.2.), αφού παίζει κρίσιμο ρόλο στην υλοποίηση του προτεινόμενου οπτικού συστήματος. [4] [5] [6] [7]

### 1.2.1. Μέθοδοι εύρεσης του βάθους

Έχοντας ως δεδομένες εικόνες του αντικειμένου, από διαφορετικές σκοπιές, παρέχεται αρκετή γνώση για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του. Εφόσον παρέχεται εκ των προτέρων κάποια πληροφορία για την σκηνή τότε **είναι δυνατόν να υπολογιστεί** το βάθος ακόμα και από μία μόνο φωτογραφία (αυτό δεν θα απασχολήσει την εργασία σε αυτό το σημείο). Δεδομένα που μπορεί γενικά να αποκαλύπτουν στοιχεία σχετικά με το βάθος και την απόσταση των αντικείμενων που απεικονίζονται είναι η υφή, οι ακμές, η σκίαση, οι μεταβολές του φωτισμού κλπ. Ανάλογα με τα στοιχεία των εικόνων που αποφασίζονται να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή της επιθυμητής πληροφορίας, οι κύριες παθητικές μέθοδοι εύρεσης απόστασης μπορούν να υπαχθούν στις εξής κατηγορίες[3]:

- Στερεοσκοπική Όραση(Stereo Vision),
- Δομή από Κίνηση (Structure from Motion)( ταυτόχρονη εκτίμηση της 3Δ δομής και της 3Δ θέσης των καμερών από αντιστοιχίες εικόνων) [20],
- Σχήμα από Σκίαση (Shape from Shading),
- Βάθος από Εστίαση (Range from Focus),
- Βάθος από Μη Εστίαση (Depth from Defocus),
- Σχήμα από Υφή (Shape from Texture).

Η παρούσα εργασία καταπιάνεται κατά βάση με την **στερεοσκοπική όραση**, η οποία αποτελεί ουσιαστικά μια εξειδίκευση της **δομής από κίνηση**.

Ένα **στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων** προκύπτει από δυο κάμερες οι οποίες έχουν προκαθορισμένη σχετική θέση, και συγκεκριμένα, η δεύτερη κάμερα έχει μετακινηθεί σε σχέση με την πρώτη μόνο κατά μια πλευρική μετατόπιση. Η διάταξη αυτή των καμερών, προσομοιώνει ουσιαστικά την διάταξη στην οποία είναι τοποθετημένα τα μάτια στον άνθρωπο. Αυτή η τεχνική έχει βασιστεί στην ικανότητα του ανθρώπου να αντιλαμβάνεται τα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά του

περιβάλλοντος. Όπως προαναφέρθηκε, μερικές μόνο από τις πληροφορίες που χρησιμοποιεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος για την εκτίμηση της απόστασης αντικειμένων είναι η υφή, οι ακμές, η προοπτική της σκηνής, η απόκρυψη αντικειμένων, οι μεταβολές φωτεινότητας, οι σκιές, αλλά και οι διαφορές που παρουσιάζονται στις δύο εικόνες του ανθρώπινου στερεοσκοπικού ζεύγους που προκύπτουν ξεχωριστά από το κάθε μάτι. Η χρήση του τελευταίου είναι καταλυτικής σημασίας στην Στερεοσκοπική Όραση. Αναγνωρίζοντας προβολές του ίδιου σημείου στις δύο εικόνες και παίρνοντας τη 'διαφορά' που προκύπτει από την θέση στην πρώτη εικόνα και την αντίστοιχη θέση στην δεύτερη έχουμε ένα στοιχείο που αποδίδει το βάθος. Η διαφορά της θέσης των αναγνωρισμένων σημείων της σκηνής στις εικόνες υπάρχει λόγω της διαφορετικής θέσης που έχουν οι κάμερες στον χώρο. Η στερεοσκοπική όραση είναι μία πολύ ισχυρή τεχνική λόγω κυρίως της απαίτησης να υπάρχει συγκεκριμένη διάταξη των δύο καμερών. Η μέθοδος αυτή υστερεί στο στάδιο της αντιστοίχισης των χαρακτηριστικών σημείων στις δύο εικόνες που είναι οι προβολές του ίδιου σημείου της σκηνής.

Όπως προαναφέρθηκε, η τεχνική της **δομής από κίνηση** είναι μία γενίκευση της Στερεοσκοπικής Όρασης. Εδώ χρησιμοποιούνται δυο τουλάχιστον κάμερες, ή μια κάμερα η οποία κινείται ελεύθερα στο χώρο και καταγράφει στοιχεία της σκηνής, οπότε προκύπτουν τυχαίες σχετικές θέσεις της κάμερας για κάθε εικόνα. Και πάλι, το στοιχείο που θα μας δώσει την λύση είναι η μεταβολή στις θέσεις στις οποίες προβάλλονται κάποια αναγνωρισμένα χαρακτηριστικά σημεία ενδιαφέροντος της σκηνής. Η **Δομή από Κίνηση** είναι μία τεχνική που έχει πολλά πλεονεκτήματα, σε σχέση με την στερεοσκοπική όραση, επειδή είναι πιο γενική περίπτωση και δε χρειάζεται συγκεκριμένη διάταξη στις κάμερες. Όμως αντιμετωπίζει και αυτή το ίδιο πρόβλημα στο στάδιο της αντιστοίχισης.[3]

Από μία μόνο εικόνα μπορούν να γίνουν γνωστές αρκετές πληροφορίες, εντούτοις αυτές δεν είναι αρκετές για να αναδημιουργηθεί η αντίστοιχη τρισδιάστατη σκηνή (τουλάχιστον όχι χωρίς να γίνει ένας σημαντικός αριθμός υποθέσεων στη δομή της σκηνής). Αυτό οφείλεται στη φύση της διαδικασίας από την οποία προκύπτει η εικόνα. Εάν ληφθεί μια προβολή της παρατηρηθείσας τρισδιάστατης σκηνής, επάνω σε μια δισδιάστατη εικόνα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χαθεί το βάθος. Το τρισδιάστατο σημείο που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο της εικόνας, είναι αναγκασμένο να είναι πάνω στον οπτικό άξονα. Όμως, ενώ ξέρουμε την ευθεία πάνω στην οποία βρίσκεται το τρισδιάστατο σημείο, δεν γνωρίζουμε την ακριβή θέση του. Εάν είναι διαθέσιμες δύο (ή περισσότερες) εικόνες, από διαφορετικές όψεις, τότε το τρισδιάστατο σημείο μπορεί να ληφθεί ως τομή των δύο (ή περισσότερων) οπτικών αξόνων. Προφανώς, το σημείο το οποίο επιθυμείται να ανακατασκευαστεί πρέπει να είναι αναγνωρίσιμο σε όλες τις εικόνες.

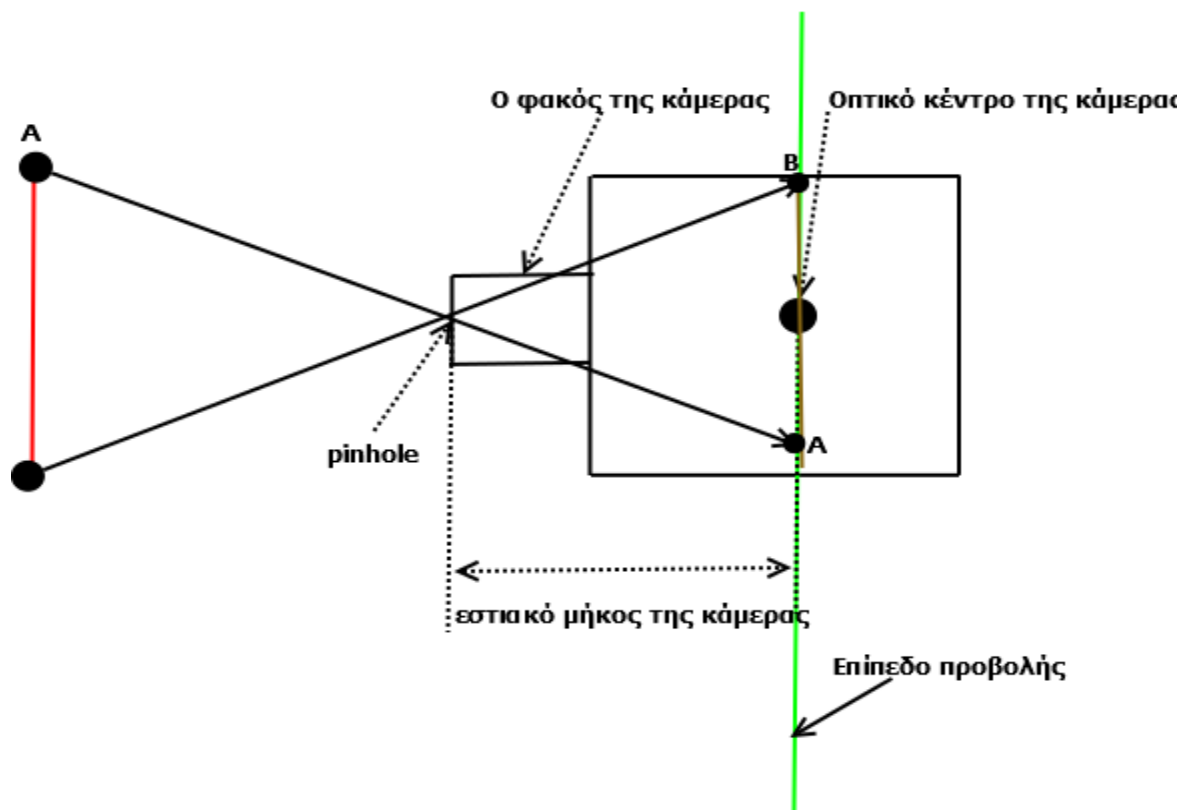
### 1.2.2. Τα χαρακτηριστικά των καμερών

Η σχέση μεταξύ ενός σημείου εικόνας και του οπτικού άξονα του, δίνεται από το μοντέλο καμερών (π.χ. pinhole camera) και τις παραμέτρους βαθμονόμησης. Αυτές



οι παράμετροι καλούνται συχνά **ενδογενείς παράμετροι (intrinsic parameters)** καμερών, ενώ η θέση και ο προσανατολισμός της κάμερας καλούνται γενικά **εξωγενείς παράμετροι (extrinsic parameters)**. Όλα αυτά τα στοιχεία μπορούν να ανακτηθούν από τις εικόνες. Οι συσχετίσεις σημείων μεταξύ των διαθέσιμων όψεων, υπαινίσσεται ότι τα αντιστοιχισμένα σύνολα σημείων υπόκεινται σε κάποια δομή και ότι αυτή η δομή συσχετίζεται με την τοποθέτηση και τη βαθμονόμηση της κάμερας.

Η δημιουργία της εικόνας, μέσα από μία κοινή κάμερα, υπακούει στους κανόνες της προοπτικής προβολής. Η προοπτική προβολή είναι η προβολή ενός σημείου του χώρου σε ένα επίπεδο, διαμέσου ενός κέντρου προβολής. Στην περίπτωση κατά την οποία δημιουργούμε μία εικόνα, το σημείο του χώρου αντιστοιχίζεται με το σημείο της σκηνής που καταγράφηκε, το κέντρο προβολής είναι το κέντρο του φακού της κάμερας και το επίπεδο είναι το επίπεδο της εικόνας. Το προοπτικό μοντέλο προβολής που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της εικόνας μέσα από αισθητήρα όρασης, ονομάζεται μοντέλο κάμερας μικρής οπής (pinhole camera model). Η κάμερα που αντιστοιχεί σε αυτό το μοντέλο είναι η ιδανική κάμερα μικρής οπής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο οπτικός άξονας βρίσκεται κάθετος στο επίπεδο της εικόνας και διέρχεται από το κέντρο του φακού (κέντρο προβολής). **Η απόσταση  $f$  του κέντρου προβολής από το επίπεδο εικόνας ονομάζεται εστιακή απόσταση (focal length)** και αποτελεί μία από τις παραμέτρους της κάμερας (**σχήμα 1.1**). Οι περισσότερες κάμερες περιγράφονται αρκετά καλά από το μοντέλο μικρής οπής. Αυτός είναι ο λόγος που θα χρησιμοποιηθεί και στην συγκεκριμένη εργασία [3][13]. Η λειτουργία του μοντέλου μιας pinhole κάμερας φαίνεται στο **σχήμα 1.2** [18].



**Σχήμα 1.1: Pinhole camera**



Στη τρισδιάστατη οπτικοποίηση από εικόνες, μπορούν να προκύψουν πολλά προβλήματα. Κάποια από αυτά μπορούν να αντιμετωπισθούν, άλλα όμως περιορίζουν σημαντικά τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί. Ένα σημαντικό πρόβλημα, παραδείγματος χάριν, που μπορεί να προκύψει, προκαλείται όταν η διαδικασία απεικόνισης δεν ικανοποιεί το μοντέλο καμερών που χρησιμοποιείται. Αυτό σημαίνει ότι όταν γίνει η υπόθεση της pinhole κάμερας και αυτή, στην συγκεκριμένη περίπτωση, δεν ικανοποιείται, τότε δεν μπορεί να αποφευχθεί αρκετή παραποίηση των αποτελεσμάτων, σε σχέση με αυτό που περιμέναμε ιδανικά. Είναι εντούτοις δυνατό να επεκταθεί το μοντέλο για να λάβει υπ' όψη τη παραποίηση. Αρκετά δύσκολες περιπτώσεις, επίσης, είναι οι εικόνες με παρεμβολές κινούμενων αντικειμένων, με ασυνέχειες, με αντανakλάσεις, με διαφανείς επιφάνειες, όπως επίσης και εικόνες όπου ένα σημαντικό μέρος της σκηνής δεν είναι εστιασμένο. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα μπορούν, ωστόσο, να αποφευχθούν προσέχοντας τον τρόπο με τον οποίο θα ληφθούν οι εικόνες.

### 1.2.3. Η επιπολική γεωμετρία

Η επιπολική γεωμετρία ανάμεσα σε δύο διαδοχικές λήψεις μίας φωτογραφικής κάμερας, ορίζεται ως η γεωμετρία της τομής των επιπέδων των δύο εικόνων με το σύνολο των επιπέδων που έχουν τη γραμμή η οποία συνδέει τα κέντρα των δύο καμερών (των δύο θέσεων της κάμερας) σαν άξονα περιστροφής. Η μελέτη ξεκινά από το γεγονός ότι κάθε σημείο του χώρου που προβάλλεται σε δύο λήψεις ορίζει μαζί με τις δύο προβολές του ένα επίπεδο.

Θεωρούμε ένα σημείο  $X$  στον τρισδιάστατο χώρο, το οποίο προβάλλεται σε δύο λήψεις. Στην πρώτη λήψη στο σημείο  $q_1$  και στη δεύτερη λήψη στο σημείο  $q_2$ . Αυτό το οποίο καλούμαστε να μελετήσουμε είναι η σχέση που διέπει τα δύο σημεία των εικόνων  $q_1$  και  $q_2$ . Πιο συγκεκριμένα, ορίζουμε τα ακόλουθα:

**Επίπολο  $e$ :** Είναι το σημείο της τομής της γραμμής που συνδέει τα δύο οπτικά κέντρα (baseline) με το επίπεδο της εικόνας.

**Επιπολικό επίπεδο  $\pi$ :** Οι δύο προβολές του ίδιου τρισδιάστατου σημείου σε δύο λήψεις,  $q_1$  και  $q_2$ , και το οπτικό κέντρο της κάμερας ανήκουν πάντα στο ίδιο επίπεδο. Η οικογένεια αυτών των επιπέδων έχει κοινή γραμμή την γραμμή baseline στη βιβλιογραφία) που συνδέει τα οπτικά κέντρα της κάμερας στις δύο λήψεις.

**Επιπολική γραμμή  $l$ :** Είναι η τομή του επιπολικού επιπέδου με το επίπεδο της εικόνας. Ένα επιπολικό επίπεδο (που αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο χώρο) τέμνει τα επίπεδα της εικόνας στα δεξιά και αριστερά επίπολα αντίστοιχα και ορίζει την αντιστοιχία ανάμεσα στις επιπολικές γραμμές. [8][17][18][19]

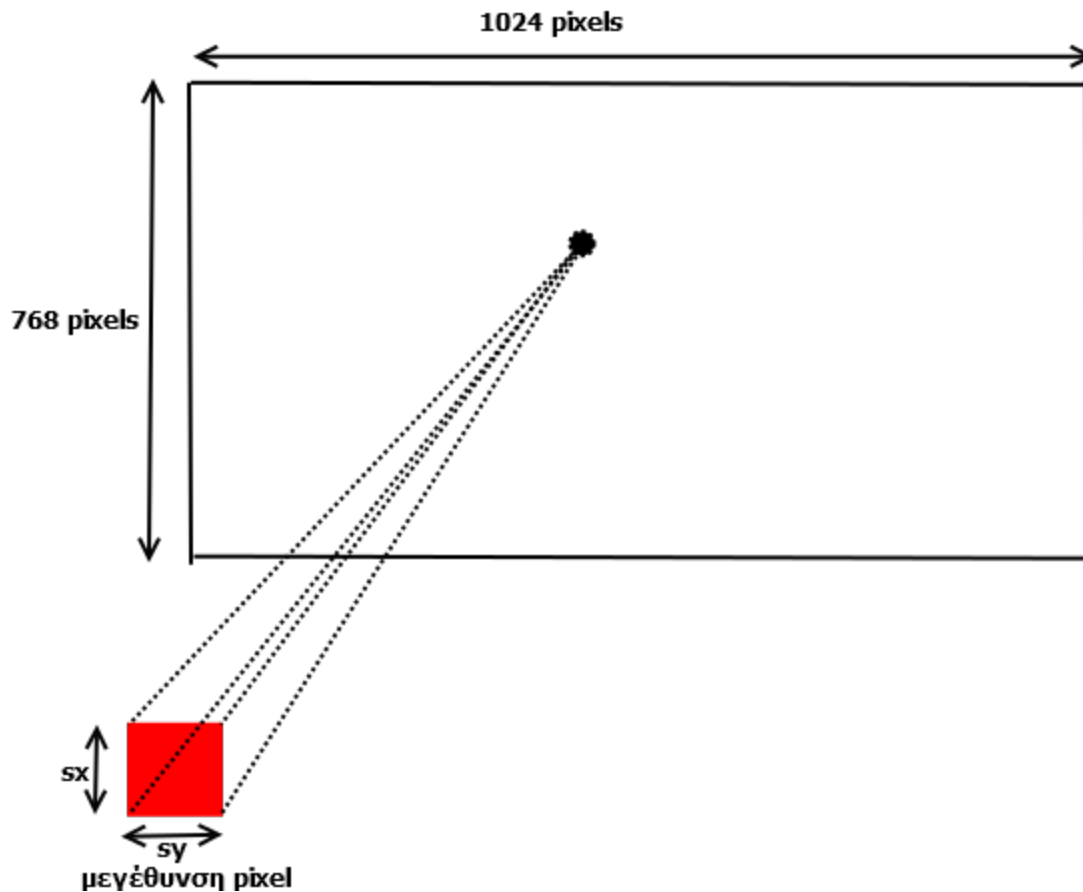
## 2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 2.1. Αναλυτική περιγραφή του οπτικού συστήματος και της εγκατάστασής του

Το οπτικό σύστημα στο επίπεδο αποτελείται από ένα σετ 2 καμερών, οι οποίες βλέπουν κάθετα ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, και από ένα προβολέα γραμμής λέιζερ. Από εδώ και στο εξής, όταν θα γίνεται αναφορά σε οπτικό σύστημα, θα εννοούνται αυτά τα τρία συστατικά μέρη τα οποία και εξετάζονται στην παρούσα ενότητα.

#### 2.1.1 Οι αισθητήρες

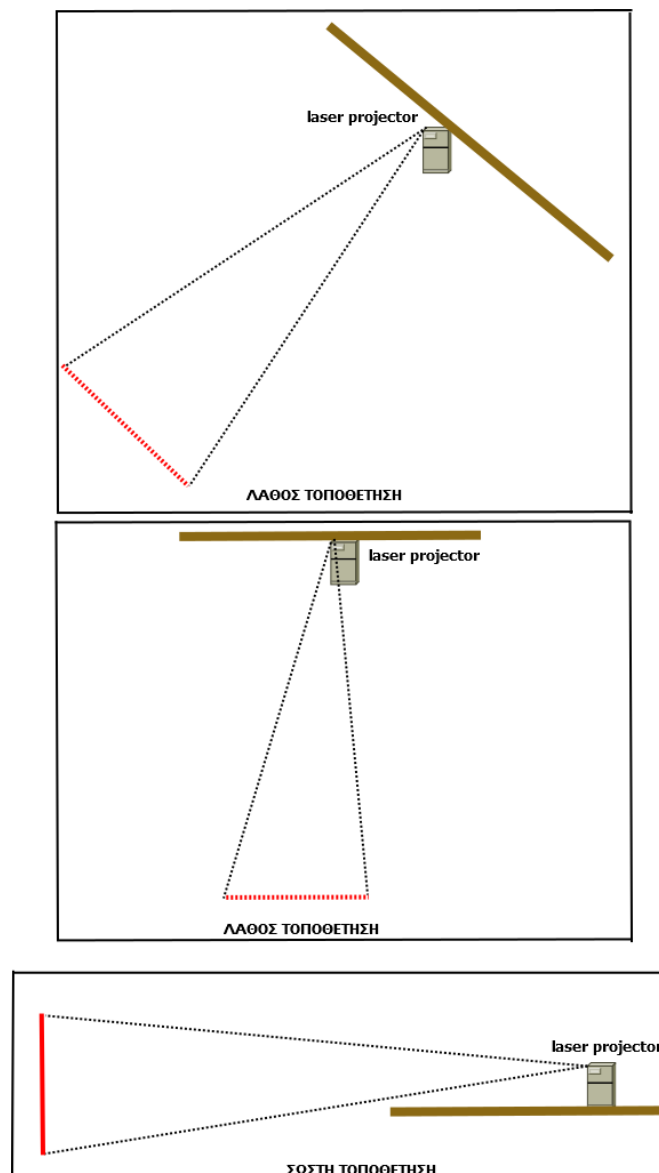
Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν, είναι **CCD κάμερες (Charge – Coupled Devises)**, και συγκεκριμένα το μοντέλο **prosilica GC1020** της ALLIED. Οι κάμερες αυτές επιλέχθηκαν επειδή έχουν ικανοποιητικά υψηλή ανάλυση (**768 x 1024**), γεγονός που δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην τρισδιάστατη ανακατασκευή. Αυτό συμβαίνει καθώς ένας αισθητήρας με μεγάλη ανάλυση, μπορεί και εστιάζει εντός ενός σχετικά μικρού πεδίου γύρω από το οπτικό κέντρο της κάμερας, δίνοντας όμως πιο πολύ λεπτομέρεια. Αυτή η ιδιότητα των CCD καμερών έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερα , όπως αναφέρθηκε αποτελέσματα στην ανακατασκευή, αλλά δημιουργεί και κάποια προβλήματα τα οποία αφορούν τις αποστάσεις των καμερών από το δοκίμιο, και τις αποστάσεις των καμερών μεταξύ τους. Τα προβλήματα αυτά θα συζητηθούν στη συνέχεια της εργασίας όπου θα προταθεί και μεθοδολογία για την αντιμετώπισή τους. Άλλα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν είναι το εστιακό μήκος  $f$  που δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι  $f = 25\text{mm}$ , οι διαστάσεις του pixel (**Σχήμα 2.1**) για τον συγκεκριμένο τύπο κάμερας, που είναι  $s_x = s_y = 4.65\mu\text{m}$ . Η αναφορά στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των καμερών γίνεται γιατί τα χαρακτηριστικά αυτά παίζουν ενεργό ρόλο στην μεθοδολογία που θα χρησιμοποιηθεί, και κάποια από αυτά παίζουν ρόλο στα σφάλματα που θα προκύψουν.[9]



**Σχήμα 2.1:** Η αναπαράσταση της εξόδου των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται, ως πίνακες εικονοστοιχείων, και οι διαστάσεις των τελευταίων

### 2.1.2 Ο προβολέας γραμμής laser

Ο προβολέας γραμμής laser που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας κλασσικός προβολέας του εμπορίου, με χρηστική αξία αλφαδιού. Αυτό δημιούργησε κάποια προβλήματα όσον αφορά την εγκατάσταση του οπτικού συστήματος. Συγκεκριμένα ο προβολέας laser πρέπει να είναι τοποθετημένος σε επιφάνεια παράλληλη με το έδαφος. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται δύο εσφαλμένες τοποθετήσεις του προβολέα γραμμής λέιζερ, και η σωστή.



**Σχήμα 2.2: Η σωστή εγκατάσταση του προβολέα Laser**

Ένα άλλο μειονέκτημα του λέιζερ, με το οποίο έγιναν τα πειράματα, ήταν ότι η ένταση της γραμμής λέιζερ, ήταν αρκετά μεγάλη, και μάλιστα ήταν σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρχε δυνατότητα μεταβολής της. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, η προσπίπτουσα ακτίνα πάνω στο δοκίμιο να έχει μεγάλη διάχυση, με αποτέλεσμα να υπάρχουν αρκετά σφάλματα στην άντληση της χρήσιμης πληροφορίας, η οποία σε επίπεδο επεξεργασίας εικόνας, όπως θα εξηγηθεί στην **ενότητα 2.2.1** απαιτείται να είναι γραμμή πάχους ενός pixel.



**Εικόνα 2.1.: Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του οπτικού συστήματος**



**Εικόνα 2.2.: Ο προβολέας γραμμής laser που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του οπτικού συστήματος [10]**

### **2.1.3 Εγκατάσταση οπτικού συστήματος**

Αφού έγινε αναλυτική περιγραφή των επιμέρους συνιστωσών του οπτικού συστήματος, είναι καιρός να γίνει αναλυτική περιγραφή της εγκατάστασής του.

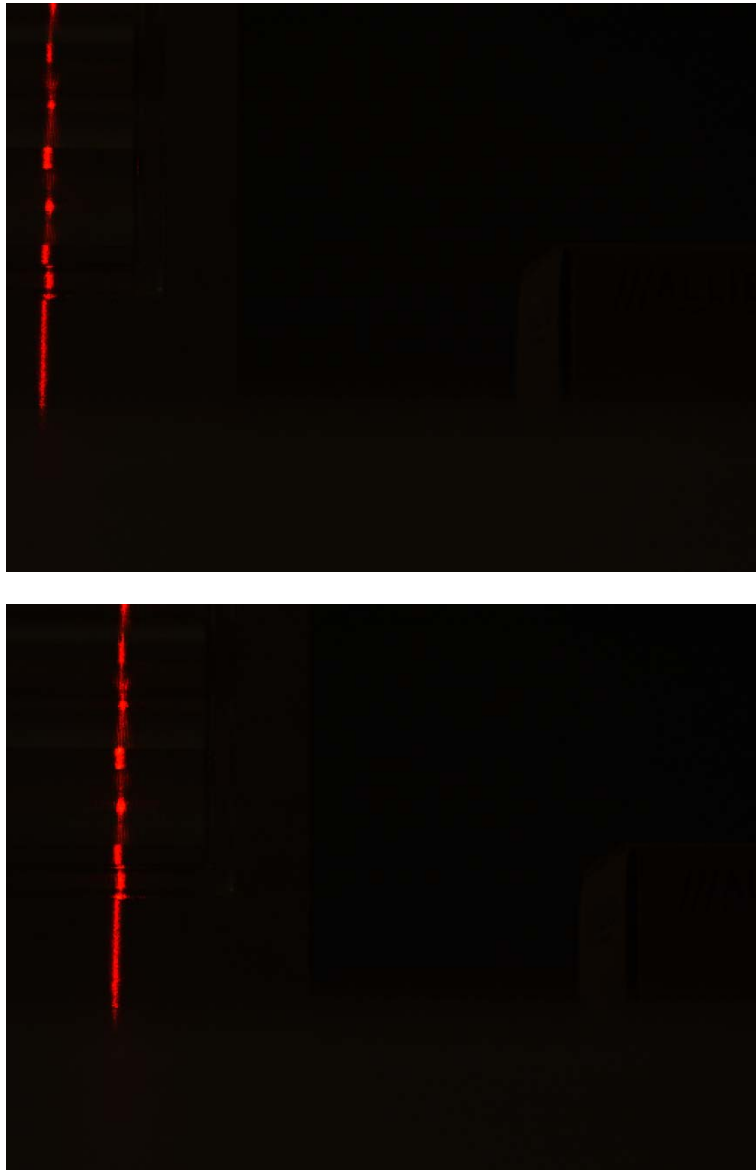
Το οπτικό σύστημα απαρτίζεται από έναν αριθμό set καμερών, ένα λέιζερ παραγωγής γραμμής λέιζερ, και το δοκίμιο που σκανάρεται. Κάθε set καμερών απαρτίζεται από 2 κάμερες. Για την εγκατάσταση του οπτικού συστήματος, θα μελετηθεί η επίδραση, που έχουν στα αποτελέσματα τα ακόλουθα:

- **Απόσταση μεταξύ των καμερών**
- **Αριθμός sets καμερών ανά επίπεδο**
- **Απόσταση των καμερών από το δοκίμιο**
- **Περιοχή οπτικού πεδίου στο οποίο αναμένονται καλύτερα αποτελέσματα**

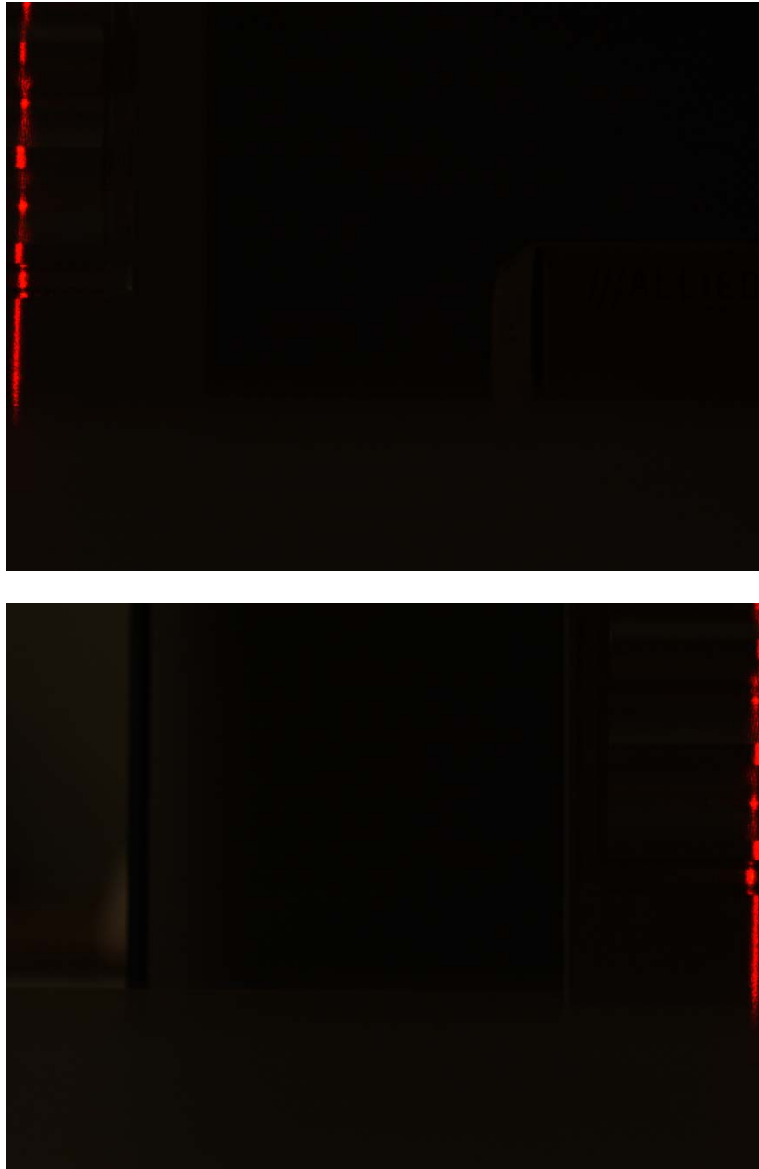
- Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η απόσταση μεταξύ των καμερών παίζει σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Ειδικά στην προκειμένη περίπτωση, όπου οι κάμερες που χρησιμοποιούνται είναι κάμερες υψηλής ανάλυσης και επομένως το οπτικό πεδίο των καμερών είναι αρκετά μικρό, οι αποστάσεις πρέπει να είναι μεγάλες. Ο λόγος είναι ότι όταν μια κάμερα εστιάζει σε μια μικρή περιοχή της γραμμής laser που προσπίπτει πάνω στο δοκίμιο, σε συνδυασμό, με την διάχυση της προσπίπτουσας δέσμης, οι εικόνες που βλέπουν οι δύο αυτές κάμερες ομοιάζουν περισσότερο όταν αυτές οι κάμερες βρίσκονται σε μικρή απόσταση και διαφοροποιούνται περισσότερο, όσο η απόσταση αυτή μεγαλώνει.

- Αυτό που ενδιαφέρει στην προκειμένη περίπτωση είναι να γίνει σύγκριση μεταξύ εικόνων που θα ληφθούν από διαφορετικές κάμερες. Η μέθοδος αυτής της σύγκρισης, δεν μας ενδιαφέρει στην παρούσα ενότητα, και θα συζητηθεί στην επόμενη όπου θα περιγραφούν αναλυτικά οι αλγόριθμοι της ανακατασκευής. Το ουσιαστικό είναι ότι όσο διαφοροποιημένες είναι οι εικόνες που συγκρίνονται μεταξύ τους προκειμένου να ανακατασκευαστούν, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό, γενικά προτιμάται οι αποστάσεις των καμερών να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλες. Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμο οι αποστάσεις αυτές να είναι ακραίες προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή διαφοροποίηση των εικόνων.

Παρατίθενται οι παρακάτω εικόνες, οι οποίες ελήφθησαν από κάμερες με διαφορετικές αποστάσεις:



**Εικόνα 2.3. Φωτογραφίες με τις κάμερες σε μικρές αποστάσεις**



**Εικόνα 2.4.: Φωτογραφίες με τις κάμερες σε μεγάλες αποστάσεις**

Η **εικόνα 2.3** παρουσιάζει τις δύο λήψεις από ένα σετ καμερών απόστασης L1 ενώ η **εικόνα 2.4.** δείχνει τις δύο λήψεις από ένα άλλο σετ καμερών απόστασης L2>>L1 από το αντικείμενο. Αυτό που φαίνεται στην πρώτη από τις δύο εικόνες, είναι ότι η έξοδος των αισθητήρων δείχνει τη γραμμή του laser σχεδόν ίδια αλλά σε διαφορετική θέση. Αντίθετα στην **εικόνα 2.4.** η έξοδος του ενός αισθητήρα είναι φανερά διαφοροποιημένη από την έξοδο του δεύτερου αισθητήρα. Μάλιστα αφού οι δύο αισθητήρες δίνουν στην έξοδό τους τη γραμμή laser σε οριακά σημεία της εικόνας, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες είναι συμμετρικά τοποθετημένοι ως προς τη γραμμή του laser. Αυτή η συμμετρία φαίνεται και στις εξόδους των αισθητήρων στην **εικόνα 2.4.**

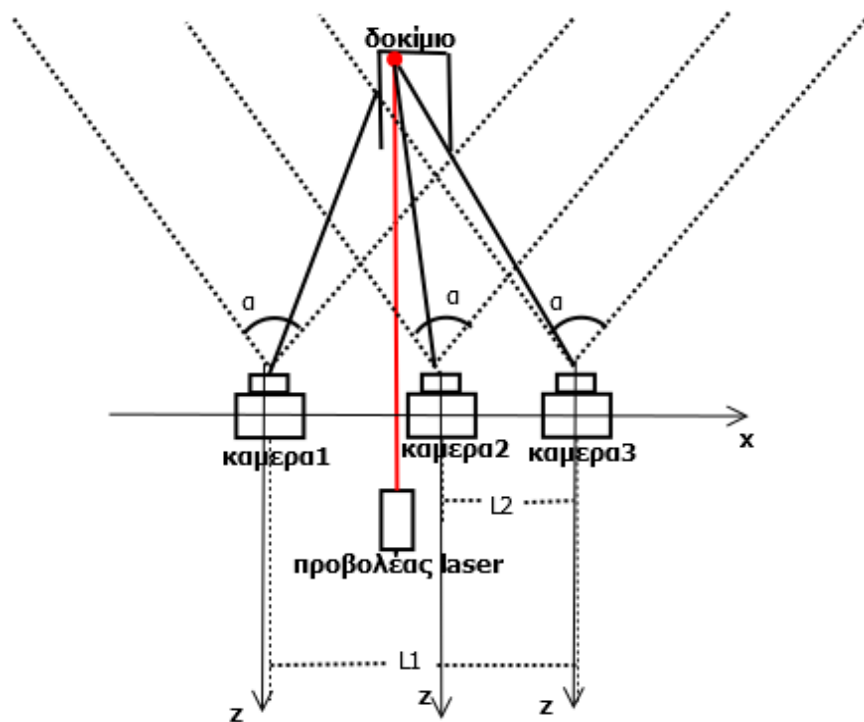
Παρ' όλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις όπου ενδείκνυται η μείωση των αποστάσεων των καμερών. Ενδεικτικά αναφέρονται δύο από αυτές.



### A. Περιπτώσεις σάρωσης με βάση τη γεωμετρία του αντικειμένου

Όταν η γεωμετρία του αντικειμένου δεν επιτρέπει στους αισθητήρες στη μέγιστη απόσταση να αντλήσουν την πληροφορία στο σύνολό της, τότε επιβάλλεται να μειωθεί η απόσταση των καμερών. Με τον τρόπο αυτό είναι λογικό το αποτέλεσμα να έχει αρκετά μεγάλο σφάλμα, αλλά προσεγγίζει καλύτερα τη γεωμετρία του δοκιμίου που σαρώνεται.

Τα παραπάνω μπορούν να γίνουν κατανοητά στην περίπτωση σημείων με μεγάλο βάθος ή γενικότερα στη περίπτωση σημείων όπου η πληροφορία κρύβεται από τους αισθητήρες και δεν υπάρχει οπτική επαφή (σχήμα 2.3.).

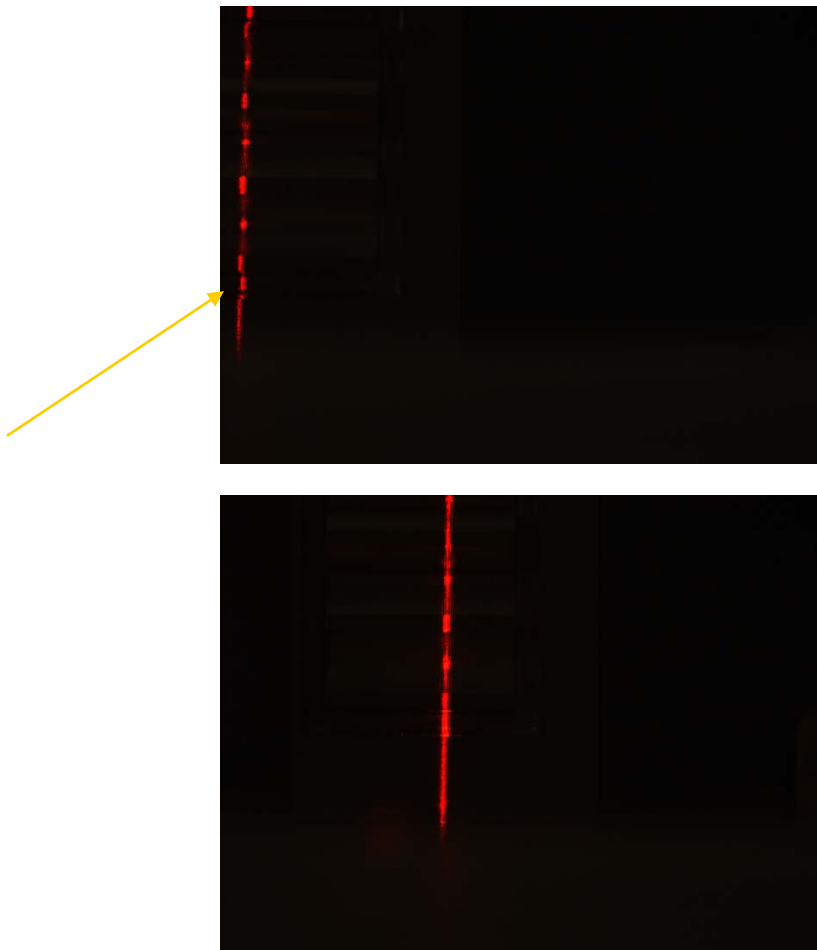


**Σχήμα 2.3.: Σχήμα που δείχνει την αδυναμία κάποιων σκευών να ανακατασκευάσουν συγκεκριμένα σημεία ανάλογα με τη θέση τους στον άξονα των x**

Στο σχήμα 2.3. φαίνονται 2 οπτικά συστήματα. Το οπτικό σύστημα (**κάμερα1-κάμερα3**) και το οπτικό σύστημα (**κάμερα2- κάμερα3**) φαίνεται καθαρά ότι ενώ το σημείο, που πρόκειται να υποστεί επεξεργασία προκειμένου να βρεθούν οι διαστάσεις του, βρίσκεται εντός του οπτικού πεδίου της κάμερας 1, αυτή η επεξεργασία δεν πρόκειται να γίνει διότι το εν λόγω σημείο δεν το βλέπει η κάμερα1 λόγω του βάθους του. Το οπτικό σύστημα (**κάμερα2-κάμερα3**) παρόλο που είναι οπτικό σύστημα καμερών μικρότερων αποστάσεων από το πρώτο οπτικό σύστημα, φαίνεται να μπορεί να ανακατασκευάσει το εν λόγω σημείο.

Στις περιπτώσεις αυτές το σύνολο των πληροφοριών που χάνονται σε σημεία μακριά από τον προβολέα της γραμμής laser μπορεί να ανακτηθεί όταν μικρύνει η απόστασή του αισθητήρα από τον προβολέα. Αυτό σημαίνει ότι η γραμμή του λέιζερ θα εμφανιστεί στην έξοδο της εικόνας που θα παραχθεί από τον εκάστοτε αισθητήρα πιο κοντά στο οπτικό κέντρο της κάμερας. Επομένως σε αυτές τις περιπτώσεις επιβάλλεται η μείωση της απόστασης του οπτικού κέντρου του κάθε αισθητήρα από την γραμμή του λέιζερ.

Η **εικόνα 2.5.** αποδεικνύει αυτόν τον ισχυρισμό:



**Εικόνα 2.5.:** Η φωτογραφία δείχνει την αδυναμία να γίνουν αντιληπτά κάποια σημεία που βρίσκονται μακριά από το οπτικό κέντρο της κάμερας

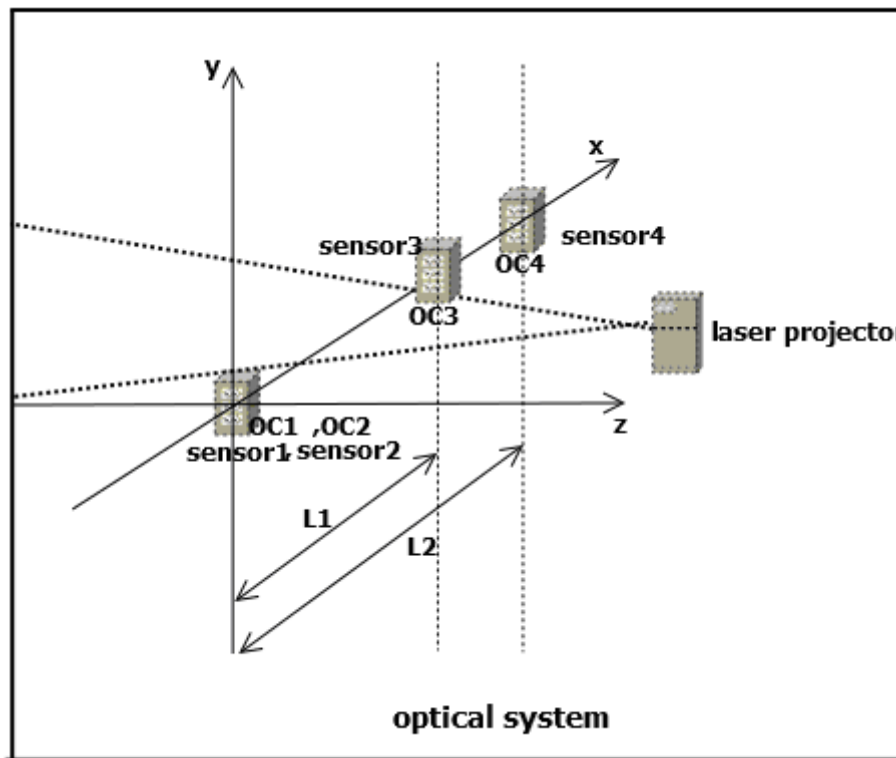
Στην **εικόνα 2.4.** φαίνεται η γραμμή του λέιζερ σε μια οριακή θέση που σημαίνει ότι το οπτικό κέντρο του αισθητήρα είναι αρκετά απομακρυσμένο από την κάθετη στο δοκίμιο γραμμή λέιζερ. Όπως φαίνεται στην **εικόνα 2.5.** όσο η γραμμή λέιζερ που φαίνεται στην έξοδο των εικόνων πλησιάζει στο οπτικό κέντρο της κάμερας, τόσο περισσότερο τείνει η γραμμή του λέιζερ να γίνει ενιαία, και η πληροφορία που είχε χαθεί όσο το λέιζερ βρισκόταν μακριά από το οπτικό κέντρο των καμερών, έχει ανακτηθεί. Βέβαια σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή γεωμετρία για τα σημεία όπου σε μεγάλες αποστάσεις δεν υπάρχει πληροφορία, αλλά το σφάλμα των αποτελεσμάτων είναι μεγαλύτερο λόγω του ότι η γραμμή του

λείζερ που φαίνεται στην **εικόνα 2.5**, δεν προδίδει κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας του δοκιμίου στα υπόλοιπα σημεία του.

## **B. Συνδυασμός αποτελέσματος ενός σετ καμερών**

Ο δεύτερος λόγος για τον οποίο κρίνεται σκόπιμο να μειωθεί η απόσταση είναι τα σφάλματα, που λόγω διάφορων εξωγενών παραγόντων που θα αναλυθούν στην πορεία επιφέρει η υλοποίηση της μεθοδολογίας με τις κάμερες στη μέγιστη απόσταση. Το γεγονός ότι η εγκατάσταση των καμερών σε μεγάλη απόσταση επιφέρει τα λιγότερα δυνατά σφάλματα **όπως εξηγήθηκε προηγουμένως στην παρούσα ενότητα** και τα αποτελέσματα αυτής της μεθοδολογίας είναι πιο πιστά στην πραγματική γεωμετρία του αντικειμένου που σαρώνεται, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν σφάλματα όσον αφορά την εύρεση του βάθους των σημείων. Αυτά τα σφάλματα μπορεί να οφείλονται στον φωτισμό ή στη διάχυση της προσπίπτουσας ακτίνας, η οποία οφείλεται στη υψηλή ένταση του λείζερ, είτε στην αστάθεια του συστήματος, η οποία επηρεάζει την κάμερα. Ένα μέτρο που λήφθηκε προκειμένου να αποσφαλματωθεί το αποτέλεσμα σε ένα επίπεδο, είναι να προστεθεί άλλο ένα σετ καμερών στο επίπεδο αυτό. Αφού η απόσταση των καμερών του πρώτου σετ είναι η μεγαλύτερη δυνατή, έχουμε και τα λιγότερα δυνατά σφάλματα. Οι κάμερες του δεύτερου σετ καμερών έχουν λίγο αλλά αισθητά μικρότερη απόσταση από τις κάμερες του πρώτου σετ. Αυτό κάνει τα αποτελέσματα του δεύτερου σετ καμερών, να έχουν περισσότερα σφάλματα. Αν υπολογιστεί ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων του πρώτου σετ καμερών με το δεύτερο σετ καμερών στο επίπεδο, το αποτέλεσμα θα είναι η μέση τρισδιάστατη ανακατασκευή με έναν υπολογίσιμο αριθμό σφαλμάτων να έχει σβηστεί. Επομένως η προτεινόμενη εγκατάσταση του οπτικού συστήματος στο επίπεδο, είναι 4 κάμερες, **OC1, OC2, OC3, OC4**.

Στο **σχήμα 2.4**, φαίνεται η διάταξη των δύο σετ καμερών στο ίδιο επίπεδο. Το πρώτο σετ απαρτίζεται από τις κάμερες (**OC1-OC3**) και το δεύτερο σετ απαρτίζεται από τις κάμερες (**OC2-OC4**).

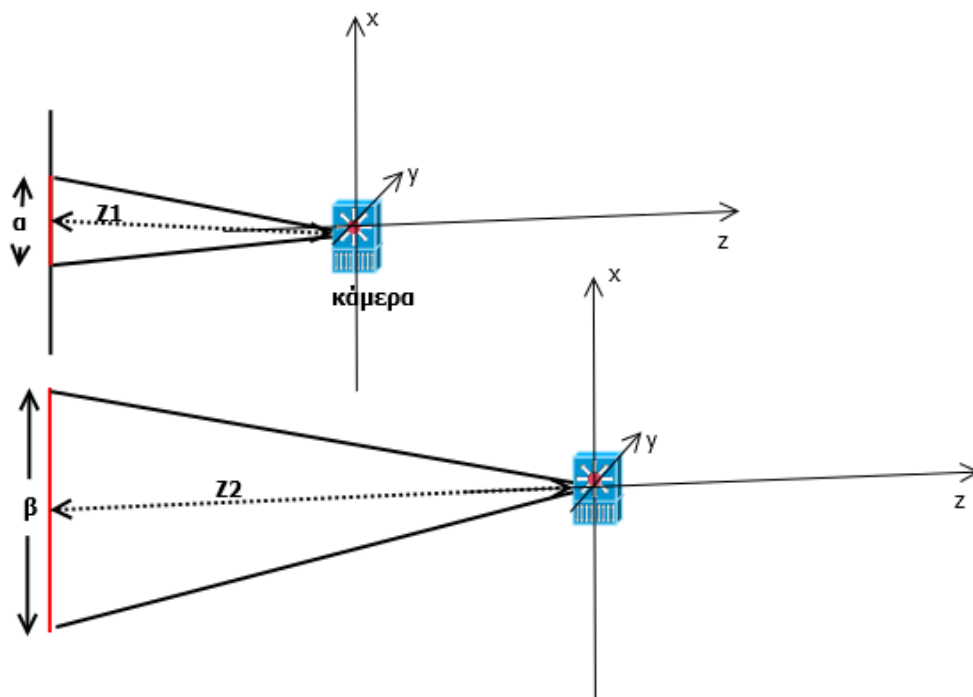


**Σχήμα 2.4: Τα δύο οπτικά συστήματα τοποθετημένα στο επίπεδο**

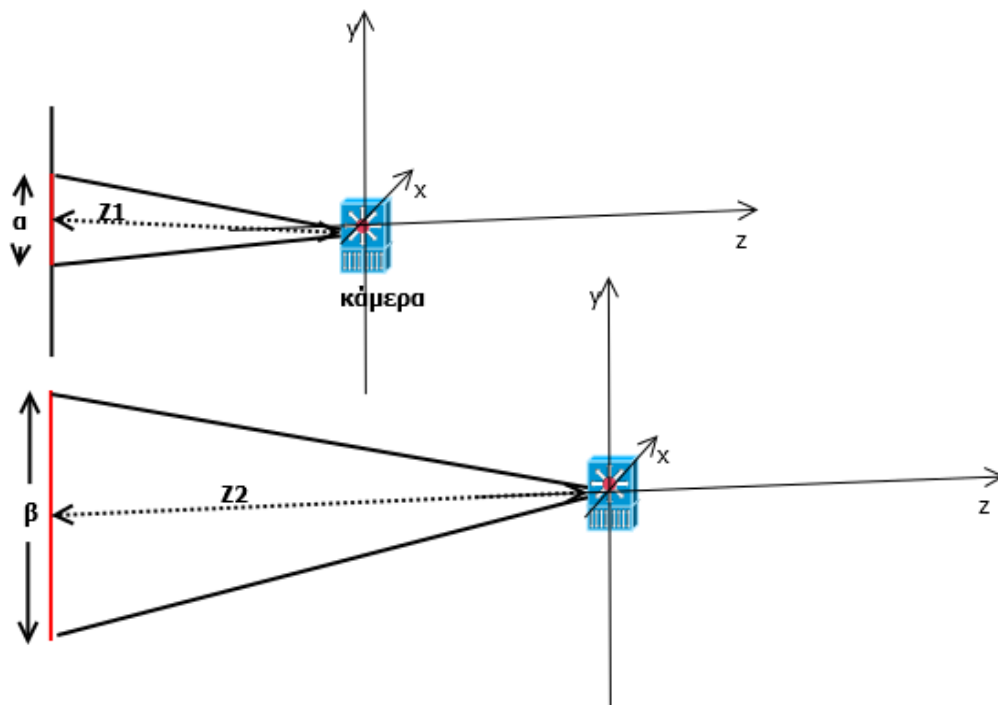
Στο σχήμα φαίνεται να υπάρχει ταύτιση των καμερών **OC1,OC2**. Αυτό συμβαίνει διότι προτείνεται για οικονομία υλικού, η προσομοίωση των 2 σετ καμερών, να γίνει με 2 κάμερες. Οι αριστερές κάμερες του πρώτου και του δεύτερου σετ προτείνεται να είναι μια σταθερή κάμερα και οι δεξιές κάμερες του πρώτου και του δεύτερου σετ είναι επίσης μια κάμερα, η οποία μετά την εκτέλεση της μεθοδολογίας της τρισδιάστατης ανακατασκευής που θα περιγραφεί παρακάτω, θα μετατοπιστεί κατά  $\Delta x$  με κατεύθυνση προς την **OC3**.

-Αφού ορίστηκε η απόσταση των καμερών του πρώτου σετ καμερών στο επίπεδο, και ορίστηκε και ο αριθμός των σετ στο επίπεδο, ήρθε η ώρα να γίνει μια μελέτη που να δείχνει την επίδραση της απόστασης των καμερών από το δοκίμιο, στο επίπεδο.

Η απόσταση των καμερών από το δοκίμιο παίζει λόγο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων για την εύρεση του βάθους του κάθε σημείου. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει η απόσταση των καμερών από το δοκίμιο, το οπτικό πεδίο της κάθε κάμερας, συμπεριλαμβάνει περισσότερο χώρο από το δοκίμιο. Στο **σχήμα 2.5**, φαίνεται η μεταβολή του οπτικού πεδίου στον άξονα των y ενώ στο **σχήμα 2.6**, η μεταβολή του οπτικού πεδίου στον άξονα των x.



Σχήμα 2.5: Η μεταβολή του οπτικού πεδίου στον άξονα των  $x$  ανάλογα με την απόσταση των καμερών από το δοκίμιο



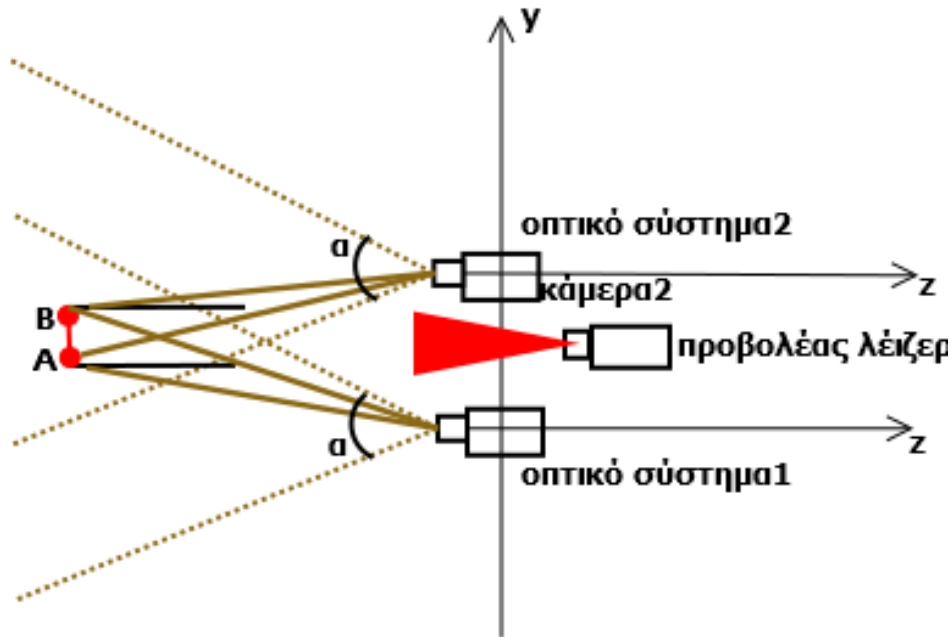
Σχήμα 2.6: Η μεταβολή του οπτικού πεδίου στον άξονα των  $y$  ανάλογα με την απόσταση των καμερών από το δοκίμιο

Το **σχήμα 2.5**, δείχνει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση των καμερών από το δοκίμιο, τόσο μεγαλώνει το κομμάτι του δοκιμίου που βλέπει ο αισθητήρας στον άξονα των  $x$ . Αυτό σημαίνει ότι η κάμερα έχει μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης στον άξονα των  $x$  προκειμένου να δει την γραμμή του laser η οποία είναι παράλληλη στον άξονα του ύψους. Επομένως, οι κάμερες έχουν την δυνατότητα να έχουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτό οδηγεί την μεθοδολογία σε πιο ασφαλή αποτελέσματα, για τον λόγο που εξηγήθηκε παραπάνω. Άρα, επιλέγεται η διάταξη να είναι όσο το δυνατόν πιο απομακρυσμένη από το δοκίμιο προκειμένου να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα και εξοικονόμηση χρόνου.

Το **σχήμα 2.6**, δείχνει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση των καμερών από το δοκίμιο, σε τόσο πιο μεγάλο κομμάτι το δοκιμίου μπορεί να γίνει η απαραίτητη επεξεργασία και να εφαρμοστεί η τεχνική της τρισδιάστατης ανακατασκευής. Επομένως για οικονομία στη μεθοδολογία συμφέρει η μεγάλη απόσταση αφού με λιγότερες εφαρμογές της μεθοδολογίας μπορεί να επιτευχθεί ολοκληρωμένα η σάρωση του δοκιμίου.

-Λόγω του ότι όπως αναφέρθηκε, τα καλύτερα αποτελέσματα φαίνονται σε μια περιοχή γύρω από το κέντρο του οπτικού πεδίου της κάθε κάμερας, μια καλή αναπαράσταση της τρισδιάστατης δομής του δοκιμίου που σαρώνεται θα γίνει μέσω του σαρώματος του δοκιμίου, σε παραπάνω από ένα επίπεδα. Κάθε ένα επίπεδο, είναι στην ουσία, η εφαρμογή του αλγορίθμου που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, σε μια υψομετρική διαφορά Δh από το προηγούμενο πείραμα. Αφού σε κάθε επίπεδο, έχουμε την εκτέλεση δύο πειραμάτων, συνολικά έχουμε  $2 \cdot n$  εκτελέσεις πειραμάτων, όπου  $n$  είναι ο αριθμός των επιπέδων.

Εξηγώντας λίγο πιο αναλυτικά την καλύτερη τρισδιάστατη αναπαράσταση σημείων που εντοπίζονται κοντά στο οπτικό κέντρο των καμερών μπορούμε να πούμε ότι ο λόγος για τον οποίο προτείνεται η σάρωση ενός δοκιμίου σε παραπάνω από ένα επίπεδα, είναι ότι πολλές φορές κάποια σημεία που σαρώνονται από τον προβολέα γραμμής laser, δεν φαίνονται από τις κάμερες όταν αυτές βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν αυτά τα σημεία βρίσκονται σε μεγάλο βάθος και ιδιαίτερα όταν αυτά είναι εντός μιας μικρής περιοχής κοντά σε γωνίες του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.7**. Αυτό που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα είναι ότι η πιθανότητα εντοπισμού αυτών των σημείων από μια περιοχή κοντά στο οπτικό κέντρο των καμερών είναι φανερά πιο μεγάλη από την πιθανότητα εντοπισμού τους από περιοχές μακριά από το οπτικό κέντρο. Ο τρόπος για να εντοπιστούν κατά το δυνατόν περισσότερα σημεία, είναι να μετακινούνται οι αισθητήρες (άρα και τα οπτικά τους κέντρα) κατά μήκος του σαρωμένου δοκιμίου, στον άξονα του ύψους [11]. Επομένως να υλοποιηθεί ο αλγόριθμος της ανακατασκευής σε παραπάνω από ένα επίπεδα.



**Σχήμα 2.7.:** Στο σχήμα φαίνεται η αδυναμία να συλληφθούν κάποια σημεία από ένα μόνο επίπεδο. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί προσθέτοντας άλλο ένα οπτικό σύστημα ανάμεσα στα δύο οπτικά συστήματα που φαίνονται στο σχήμα, το οποίο μεταξύ των άλλων θα εντοπίζει τα σημεία A και B

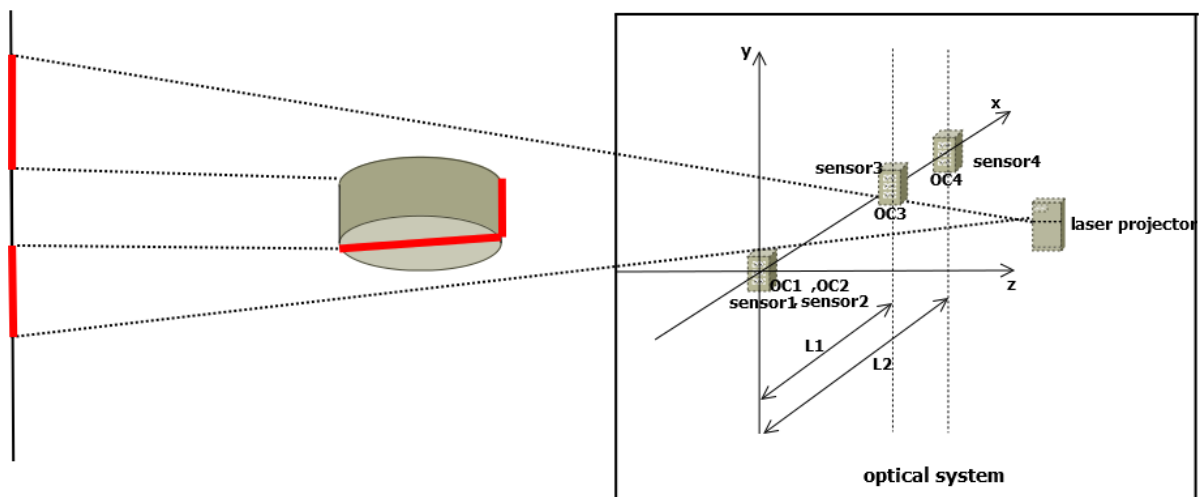
Στο **σχήμα 2.7.** τα οπτικά συστήματα 1,2 βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο. Επίσης τα σημεία A,B που σαρώνονται από τον προβολέα γραμμής λέιζερ, βρίσκονται εντός του οπτικού πεδίου όλων των καμερών και των δύο επιπέδων. Παρ' όλα αυτά οι κάμερες του οπτικού συστήματος1 εντοπίζουν το σημείο B ενώ το σημείο A δεν εντοπίζεται από το εν λόγω οπτικό σύστημα. Αντίστοιχα, οι κάμερες του οπτικού συστήματος2 εντοπίζουν το σημείο B ενώ το A δεν εντοπίζεται από το εν λόγω οπτικό σύστημα. Άρα προκειμένου να γίνει σωστά η ανακατασκευή του ευθύγραμμου τμήματος (AB) πρέπει η μεθοδολογία να περιλαμβάνει το λιγότερο 2 επίπεδα εκτέλεσης του αλγορίθμου τρισδιάστατης ανακατασκευής. Γενικά ανάλογα με τη γεωμετρία του δοκιμίου που πρέπει να σαρωθεί, προτείνεται να γίνει και κατάλληλη προσαρμογή της μεθοδολογίας στον αριθμό των επιπέδων στα οποία αυτή πρέπει να εφαρμοστεί.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει την διάταξη του ενός σετ καμερών σε γνωστή απόσταση L και γνωστό ύψος Y.



**Εικόνα 2.6:** Η διάταξη ενός σκετ καμερών με τις θήκες για την σταθεροποίηση των καμερών. Η εν λόγω διάταξη κατασκευάσθηκε στο εργαστήριο m3.

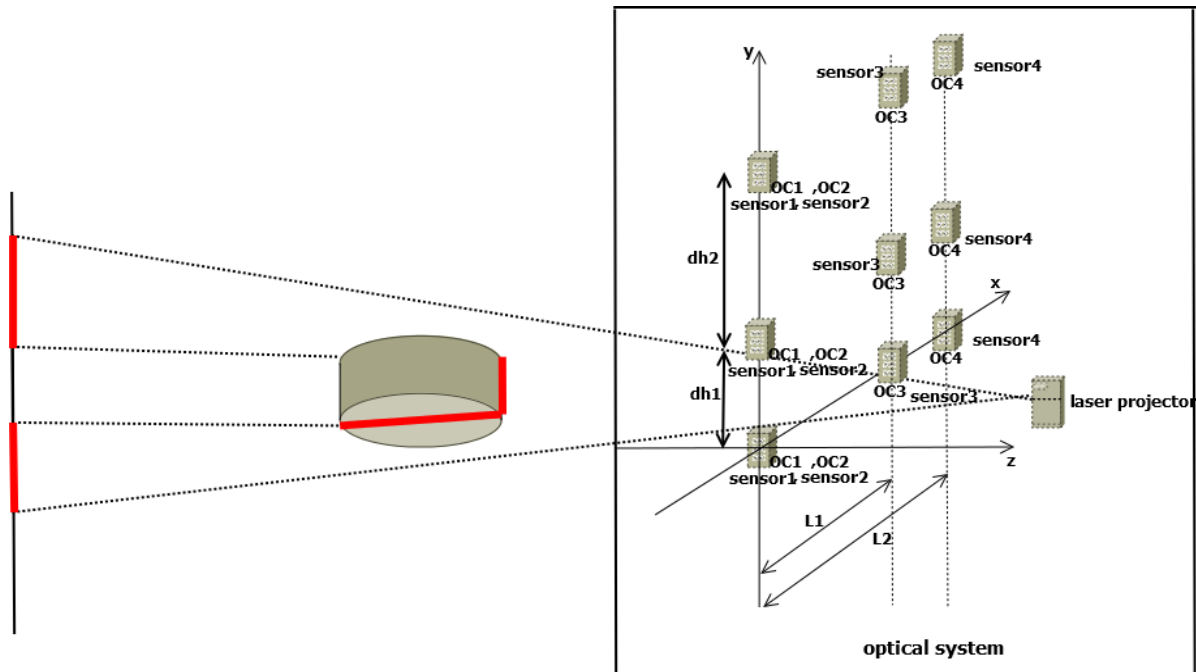
Στο επόμενο σχήμα (**Σχήμα 2.8**) φαίνεται ολοκληρωμένο το οπτικό σύστημα με τα 2 σύνολα των καμερών σε ένα επίπεδο.



**Σχήμα 2.8:** Το οπτικό σύστημα ολοκληρωμένο με τα δύο σκετ καμερών στο ένα επίπεδο



Στο επόμενο σχήμα (**Σχήμα 2.9**) φαίνεται ολοκληρωμένο το οπτικό σύστημα με τα δύο σύνολα καμερών σε δύο ή περισσότερα επίπεδα.



**Σχήμα 2.9:** Τα οπτικά συστήματα, απεικονισμένα σε παραπάνω από ένα επίπεδα

Όμοια με το σχήμα που φαίνεται στην **εικόνα 2.9**, μπορούν να προστεθούν και άλλα επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία που υλοποιείται υποστηρίζει μέχρι 6 διαφορετικά επίπεδα.

## 2.2. Περιγραφή των αλγορίθμων

Ο αλγόριθμος ανακατασκευής είναι το πιο σημαντικό κομμάτι καθώς είναι υπεύθυνος για τον ακριβή υπολογισμό των συντεταγμένων ενός σημείου όταν αυτό φαίνεται και στις δύο φωτογραφίες. Ο αλγόριθμος που προτείνεται είναι μια πρόταση για τρισδιάστατη ανακατασκευή σημείο προς σημείο.

### 2.2.1 Εντοπισμός της γραμμής λείζερ από τις εικόνες που λαμβάνονται από τις δύο κάμερες και εντοπισμός της χρήσιμης πληροφορίας της γραμμής λείζερ.

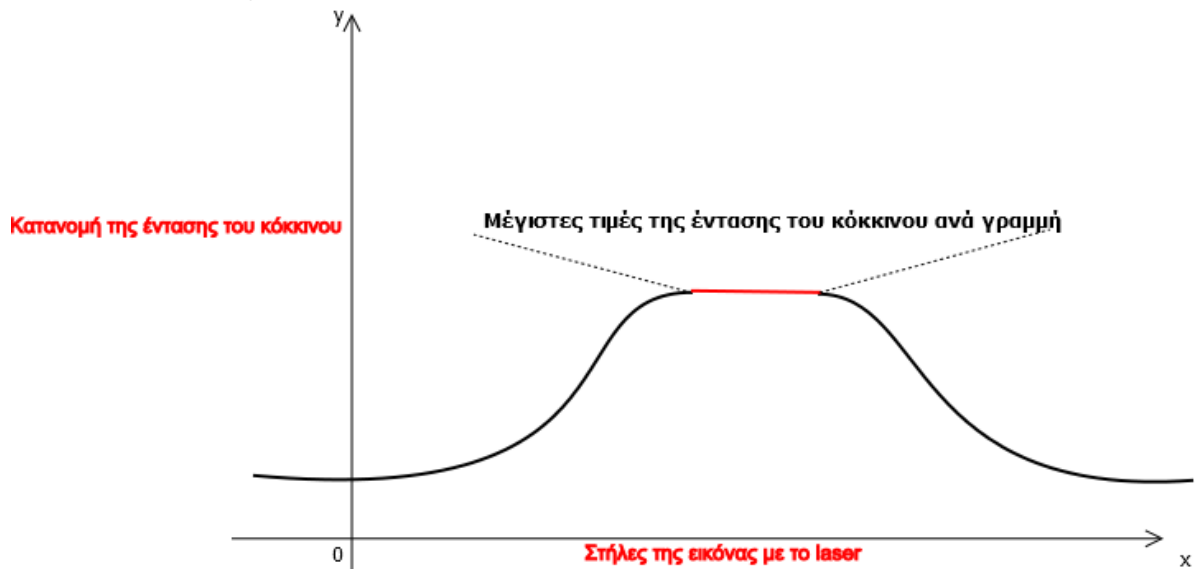
Το βήμα αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς από τον εντοπισμό της χρήσιμης πληροφορίας, εξαρτάται η όσο το δυνατόν πιο ορθή ανάκτηση της τρισδιάστατης δομής του αντικειμένου που σκανάρεται. Για τον σκοπό αυτό, υλοποιήθηκαν δυο τεχνικές:

**-Η τεχνική εύρεσης μέγιστου αθροίσματος**

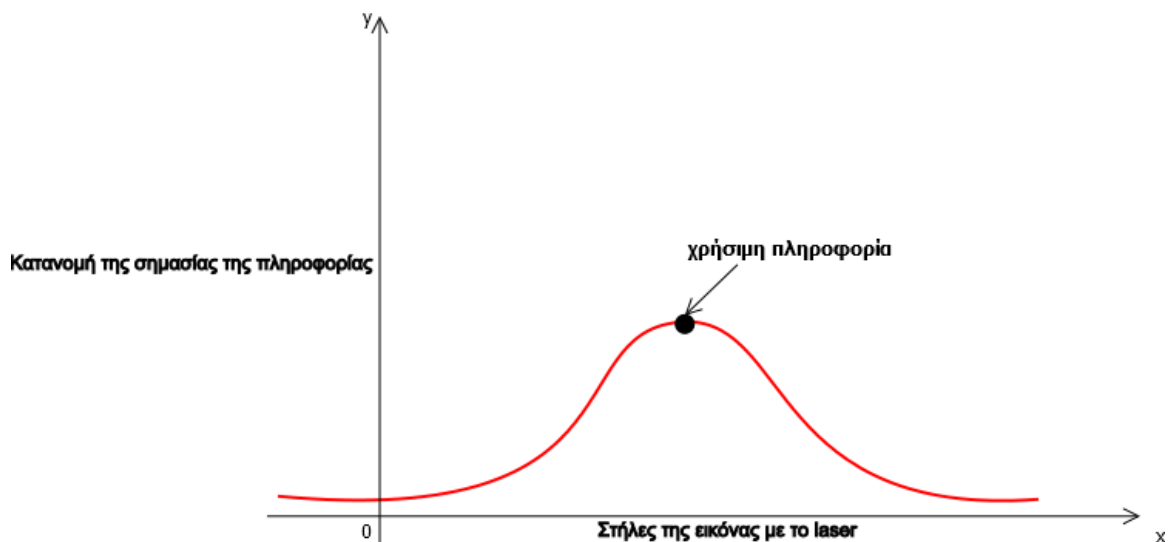
**-Η τεχνική του κέντρου της βαρύτητας (Center Of Gravity)**

- 1 **Η τεχνική εύρεσης μέγιστου αθροίσματος.** Η πρώτη τεχνική, εντοπίζει τη γραμμή λείζερ, σαρώνοντας τις εικόνες που λαμβάνουν οι κάμερες, σειριακά, γραμμή – γραμμή. Η αναζήτηση της γραμμής του λείζερ, η οποία φροντίζουμε να είναι κάθετη στην ευθεία που ορίζουν τα δύο οπτικά κέντρα των δύο καμερών, γίνεται αναζητώντας τις μέγιστες τιμές της τιμής του χρώματος του λείζερ (στην περίπτωση μας κόκκινο). Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας μια  $(1 \times n)$  μάσκα μονάδων  $[1 \dots 1 \dots 1]$  η οποία διατρέχει τον πίνακα των RGB τιμών της εικόνας και υπολογίζει τα αθροίσματα των τιμών της συνιστώσας του κόκκινου (εφόσον αυτό είναι το χρώμα του laser) εντός της γειτονιάς μεγέθους  $n$  του εξεταζόμενου, κάθε φορά, εικονοστοιχείου. Στην ουσία πρόκειται για μια συνέλιξη της μάσκας με τον πίνακα τιμών της R (Red) χρωματικής συνιστώσας της εικόνας εκφρασμένης στον RGB χρωματικό χώρο. Το αποτέλεσμα της συνέλιξης αυτής είναι ένας πίνακας 2 διαστάσεων με αριθμό γραμμών ίσο με τον αριθμό των γραμμών της εικόνας και αριθμό στηλών ίσο με τον αριθμό των στηλών της εικόνας. Διατρέχοντας τον πίνακα αυτό γραμμή- γραμμή, ο αλγόριθμος «ψάχνει» για τις μέγιστες τιμές (τα μέγιστα αθροίσματα). Στις συντεταγμένες του πίνακα που βρίσκονται οι μέγιστες τιμές θέτουμε μια τιμή (ενδεικτικά 255,0,0) σε RGB κωδικοποίηση, ενώ στις υπόλοιπες θέτουμε την τιμή (0,0,0) σε RGB κωδικοποίηση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ψηφιοποίηση σε δυαδική μορφή (binarization) της εικόνας μεταξύ δύο τιμών, και μια (όχι και τόσο καλή) εκτίμηση της γραμμής λείζερ. Αφού ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, η χρήσιμη πληροφορία του λείζερ ανά γραμμή θα είναι, ιδεατά το κεντρικό pixel μεταξύ των pixels που έχουν την τιμή (255,0,0) σε RGB κωδικοποίηση. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται όλη αυτή η διαδικασία, είναι ότι το λείζερ μοιραία έχει κάποια διάχυση η οποία πρέπει να εξαλειφθεί. Έτσι γίνεται η αποδοχή ότι η πληροφορία που δίνει η προστίπτουσα γραμμή laser είναι μια

κανονική κατανομή (σχήμα 2.9), η κορυφή της οποίας θα πρέπει να είναι η χρήσιμη πληροφορία.(σχήμα 2.10) [12]



Σχήμα 2.9: Η κατανομή της έντασης του λέιζερ συναρτήσει των στηλών της εικόνας



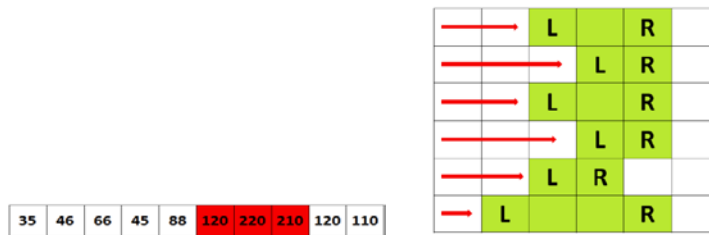
Σχήμα 2.10: Η κατανομή της σημασίας της πληροφορίας συναρτήσει των στηλών της εικόνας

- 2 **Η τεχνική κέντρου βάρους (Center of Gravity).** Όπως γίνεται αντιληπτό, στη τεχνική εύρεσης μέγιστου αθροίσματος γίνεται μια υπόθεση, η οποία στην πραγματική ζωή δεν ισχύει και μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις ούτε κατά προσέγγιση. Η υπόθεση αυτή έχει να κάνει με την κατανομή της έντασης της τιμής του ζητούμενου χρώματος όταν αυτό είναι το χρώμα της προσπίπτουσας σε μια επιφάνεια γραμμής λέιζερ. Επίσης ούτε η αποδοχή που έγινε για την κατανομή της σημασίας της πληροφορίας είναι σωστή, καθώς και αυτή η υπόθεση αφορά ιδανικές συνθήκες, οι οποίες διαφέρουν κατά πολύ από τις πραγματικές συνθήκες υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας. Ως μια προσπάθεια βελτίωσης του αποτελέσματος της προηγούμενης μεθόδου, γίνονται δύο βήματα επιπλέον ώστε να γίνει καλύτερη προσέγγιση της κεντρικής γραμμής εκτίμησης του λέιζερ.

Έχοντας μια πρώτη εκτίμηση του κεντρικού εικονοστοιχείου της γραμμής ακτίνας φωτός από την προηγούμενη τεχνική, στη νέα αυτή εικόνα εφαρμόζεται ένας τελεστής ανίχνευσης ακμών ώστε να ενισχυθούν οι λεπτομέρειες της εικόνας στην περιοχή που προσπίπτει το λείζερ. Οι συντελεστές της μάσκας (φίλτρου) αυτής περιγράφονται από τη **σχέση (18)** [12] [14]:

$$Verticalmask = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Horizontalmask = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Εφόσον έχει υπάρξει μια πρώτη εκτίμηση του κεντρικού εικονοστοιχείου της ακτίνας ανά γραμμή, ορίζεται ένα παράθυρο εύρους  $w$  γύρω από αυτό το εικονοστοιχείο (αριστερά και δεξιά) στο οποίο αναζητείται η μέγιστη τιμή, βρίσκοντας τη θέση του "αριστερού" ορίου L και του "δεξιού" R, σύμφωνα με το **σχήμα 2.11**.



**Σχήμα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση εύρεσης αριστερού και δεξιού ορίου γύρω από το εκτιμώμενο κεντρικό εικονοστοιχείο της ακτίνας laser**

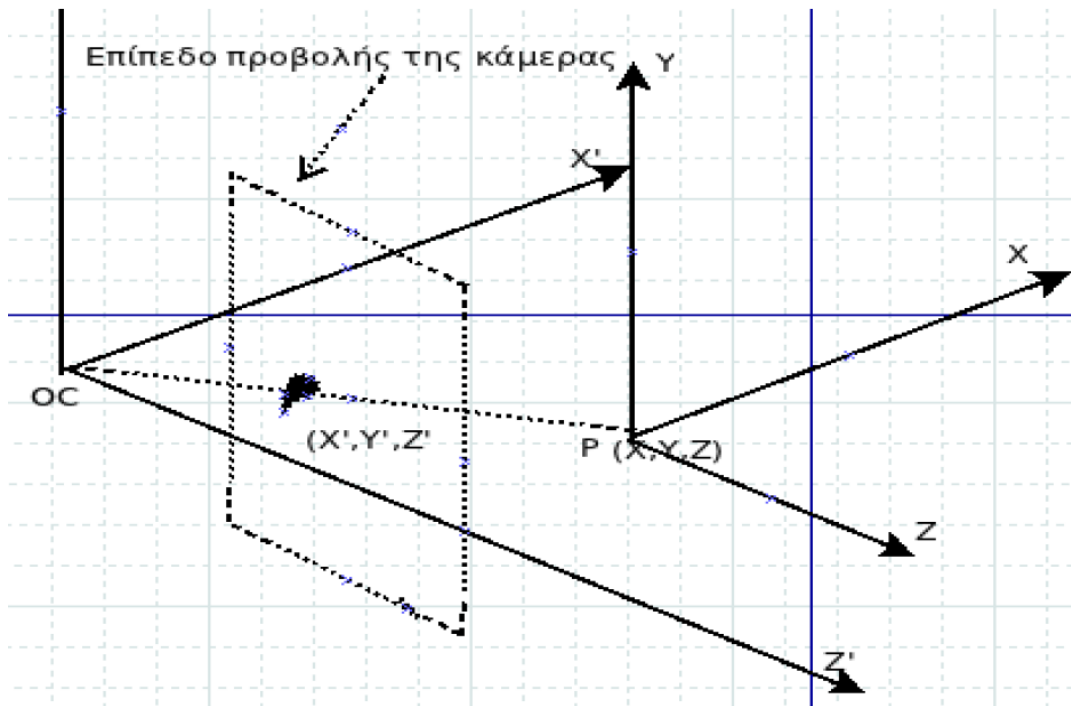
Εφόσον σε κάθε γραμμή έχει υπολογιστεί η πιθανή κεντρική, αριστερή και δεξιά θέση του laser, βρίσκουμε το κέντρο βάρους της περιοχής αυτής χρησιμοποιώντας ως "βάρος" της τιμές της συνέλιξης της εικόνας στην οποία είχε εφαρμοστεί η μάσκα 1η με τον τελεστή ανίχνευσης ακμών. Ο υπολογισμός αυτός της νέας θέσης παρέχει καλύτερη προσέγγιση της κεντρικής γραμμής laser πάχους μίας γραμμής.

### 2.2.2. Αντιστοίχιση pixel by pixel

Αφού για κάθε εικόνα (αριστερή και δεξιά λήψη κάθε σετ καμερών) εντοπίστηκε η χρήσιμη πληροφορία (έχουμε για κάθε εικόνα μια γραμμή του ενός pixel), το επόμενο βήμα είναι η αντιστοίχιση pixel by pixel των γραμμών λείζερ. Σε αυτό το μέρος γίνεται κατανοητός ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται οι κάμερες σε κάθε εκτέλεση του πειράματος να βρίσκονται στο ίδιο ύψος  $Y$ . Ο λόγος για τον οποίο οι δύο κάμερες βρίσκονται στο ίδιο ύψος, είναι γιατί μόνο με αυτόν τον τρόπο αυτές θα μπορούν να λαμβάνουν την ίδια πληροφορία από διαφορετική οπτική γωνία. Έτσι εύκολα μπορεί να γίνει η αντιστοίχιση pixel της δεξιάς εικόνας με το pixel τις αριστερής εικόνας, εφόσον έχει την ίδια τιμή (255,0,0) σε RGB κωδικοποίηση, και βρίσκεται στην ίδια στήλη. Προηγουμένως κρίνεται σκόπιμο να οριστεί το κομμάτι εκείνο της εικόνας στο οποίο απεικονίζεται το λείζερ που πέφτει πάνω στο κομμάτι που θέλουμε να ανακατασκευάσουμε τρισδιάστατα.

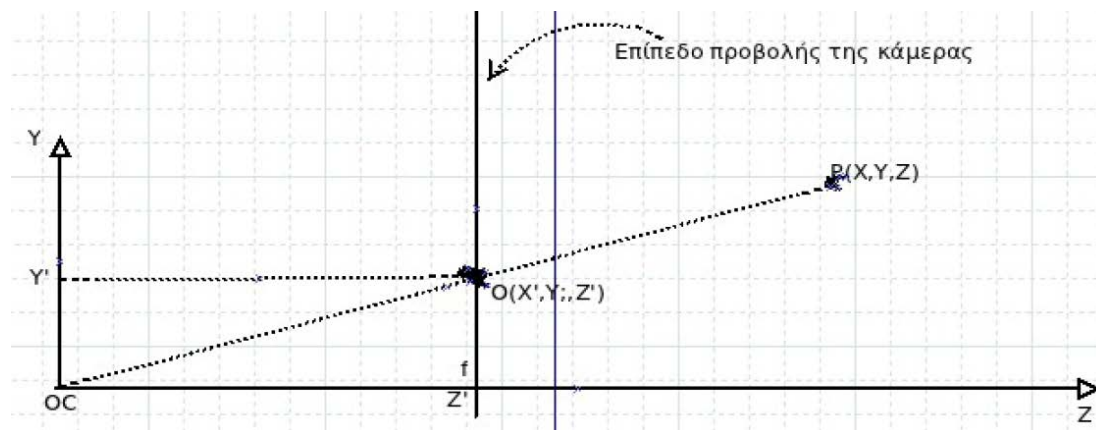
### 2.2.3. 3D ανακατασκευή της εικόνας.

Με βάση αυτά τα ταιριάσματα λαμβάνονται τα γνωστά πλέον σημεία των επιπέδων προβολής των δύο καμερών  $C1$  &  $C2$ . Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αξιοποιηθεί η θεωρία της επιπολικής γεωμετρίας από την οποία έχουμε τα εξής στοιχεία: Έχουμε δύο κάμερες των οποίων η απόσταση  $L$  είναι γνωστή και εύκολα υπολογίσιμη. Επίσης η απόσταση του οπτικού κέντρου της κάθε κάμερας από το επίπεδο προβολής, το οποίο είναι στην ουσία η επιφάνεια με τις πληροφορίες όπου αυτή μπορεί να παρέχει, στην οποία προβάλλονται τα σημεία των γνωστών συντεταγμένων. Η απόσταση αυτή είναι το εστιακό μήκος  $f$  της κάμερας το οποίο είναι γνωστό από τον κατασκευαστή της κάμερας και είναι κοινό και για τις δύο κάμερες. Επίσης είναι γνωστό το μέγεθος του εικονοστοιχείου το οποίο είναι  **$s_x = s_y = 0.00046 \text{ cm}$** . Αυτό το μέγεθος θα αξιοποιηθεί για την μετατροπή των μεγεθών από τον κόσμο της εικόνας, όπου τα πάντα μετρώνται σε pixel στον πραγματικό κόσμο όπου τα πάντα μετρώνται σε κλάσματα του μέτρου. Στην εργασία αυτή επιλέγεται το εκατοστό σαν μονάδα μέτρησης. Η εικόνα που μας δίνει την σχέση του "κόσμου" της μιας κάμερας, με τον "κόσμο" του σημείου όπου η κάμερα αυτή συλλαμβάνει και με την προβολή του σημείου αυτού με στο επίπεδο προβολής της κάμερας είναι η παρακάτω **(σχήμα 2.12)** [12][13][18][19]:



**Σχήμα 2.12:** Η σχέση του "κόσμου" της μιας κάμερας, με τον "κόσμο" του σημείου, όπου η κάμερα αυτή συλλαμβάνει και με την προβολή του σημείου αυτού με στο επίπεδο προβολής της κάμερας

Αν κάποιος δει τα παραπάνω συστήματα αξόνων ως προς Y,Z θα έχει το παρακάτω σχήμα προς απλούστευση του προβλήματος:



**Σχήμα 2.13:** Η οπτική του συστήματος(οπτικό κέντρο κάμερας – επίπεδο προβολής της κάμερας – σημείο που εντοπίζεται) στο σύστημα αξόνων y-z

Ενώ αν δει κάποιος το σύστημα αξόνων ως προς X, Z θα έχει το παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 2.14:** Η οπτική του συστήματος(οπτικό κέντρο κάμερας – επίπεδο προβολής της κάμερας – σημείο που εντοπίζεται) στο σύστημα αξόνων x-z

Χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των όμοιων τριγώνων στα δύο παραπάνω σχήματα (**Σχήμα 2.13, Σχήμα 2.14**) έχουμε ότι:

$$X/X1' = Z/Z' \quad (1)$$

$$Y/Y1' = Z/Z' \quad (2)$$

και από **(1),(2)** έχουμε:

$$X/X1' = Y/Y1' = Z/Z' = t \quad (3)$$

Για την άλλη κάμερα ισχύουν ακριβώς τις ίδιες σχέσεις μόνο που πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η απόσταση L των καμερών στον άξονα x. Έτσι έχουμε:

$$X-L/(X2'-L) = Y/Y2' = Z/Z' = s \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις **(3)** , **(4)** και διαιρώντας κατά μέλη έχουμε τον παρακάτω τύπο:

$$X*(X2'-L) / X1'*(X-L) = (Y*Y2')/(Y* Y1') \Rightarrow ..... \\ \Rightarrow t = (Y2'*L) / (X1'*Y2 - X2*Y1+L*Y1) \quad (5)$$

Αφού λοιπόν είναι γνωστά οι τιμές t και οι ακριβείς συντεταγμένες της προβολής των σημείων στα επίπεδα προβολής των δυο καμερών, μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των συντεταγμένων του σημείου στον πραγματικό κόσμο. Έτσι έχουμε για το σημείο P:

$$X = X1't \quad (6)$$

$$Y = Y1't \quad (7)$$

$$Z = Z1't \quad (8)$$

Προφανώς οι τιμές  $X1'$ ,  $Y1'$  και  $Z1'$  είναι εκπεφρασμένες σε pixel που είναι η μονάδα μέτρησης των εικονοστοιχείων. Εδώ λοιπόν απαιτείται άλλος ένας μετασχηματισμός, οποίος θα εκφράσει τα εικονοστοιχεία σε τιμές του πραγματικού κόσμου. Έτσι αν τα σημεία στην εικόνα έχουν συντεταγμένες  $E (U,V)$  , οι συντεταγμένες των σημείων της εικόνας της μιας κάμερας είναι:

$$\begin{bmatrix} X1' \\ Y1' \\ Z1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sx & 0 & (-w/2) * sx \\ 0 & sy & (-h/2) * sy \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix}$$

ενώ της εικόνας της άλλης κάμερας οι συντεταγμένες είναι:

$$\begin{bmatrix} X2' \\ Y2' \\ Z2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sx & 0 & (-w/2) * sx + L \\ 0 & sy & (-h/2) * sy \\ 0 & 0 & f \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix}$$



## 2.3 Προτεινόμενη μεθοδολογία

Σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν μέχρι τώρα, η μεθοδολογία που προτείνεται είναι η εξής:

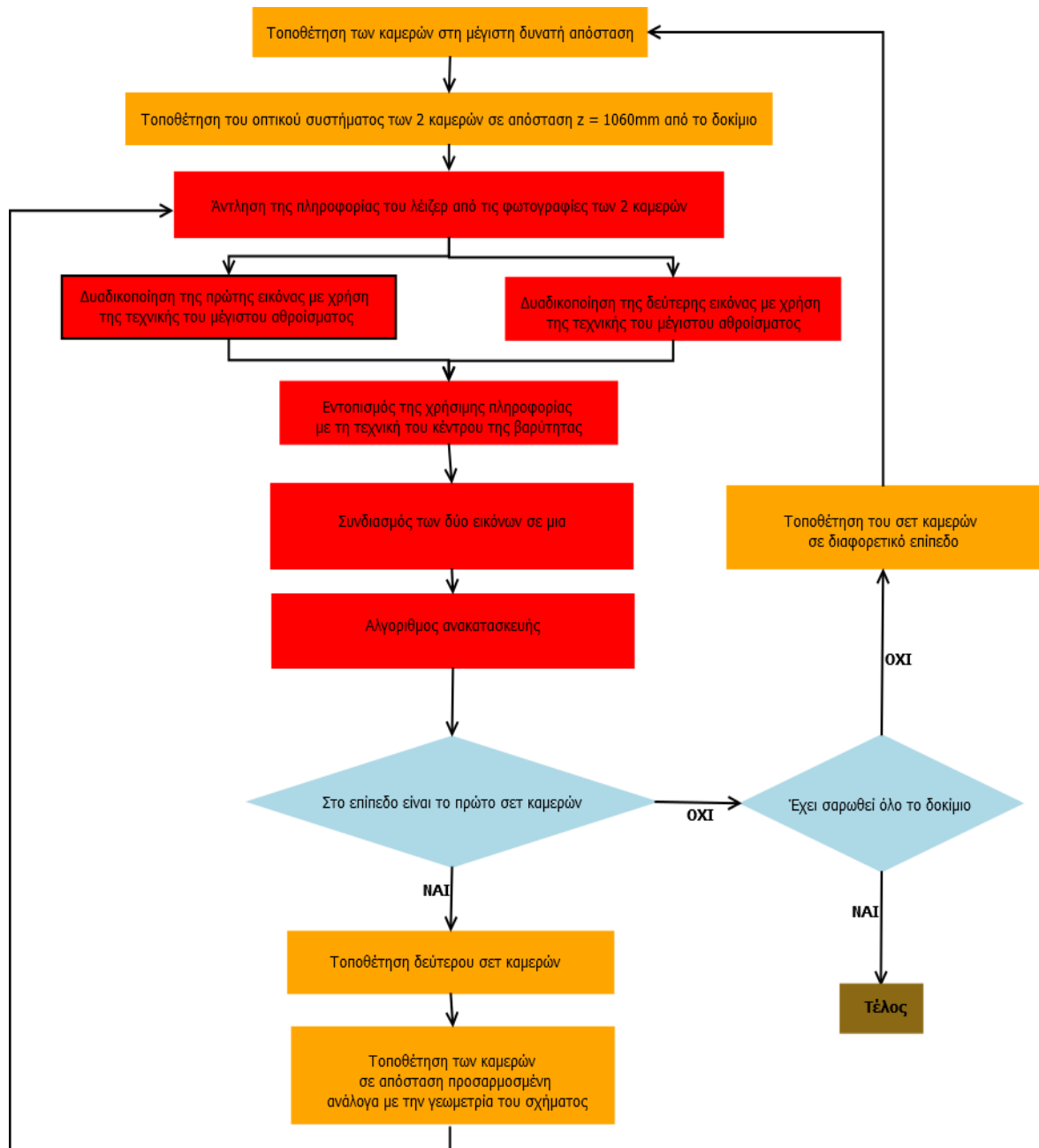
1. Ανά επίπεδο: Ανά επίπεδο εκτελείται το αλγόριθμος ανακατασκευής 2 φορές. Την πρώτη φορά προτείνεται οι αποστάσεις των καμερών να είναι οριακά μεγάλες. Αυτό θα επιφέρει τα καλύτερα από άποψη σφαλμάτων αποτελέσματα. Η δεύτερη εφαρμογή στο επίπεδο, γίνεται με κάμερες που απέχουν μεταξύ τους μικρότερες αποστάσεις. Η δεύτερη εφαρμογή, γίνεται με απόσταση καμερών, τέτοια, ώστε να γίνονται αντιληπτά και από τις δύο κάμερες του οπτικού συστήματος, όλα τα σημεία που σαρώνονται από τον προβολέα λέιζερ.

Στο επίπεδο, τα οπτικά συστήματα που αποτελούν συνιστώσες του ολικού οπτικού συστήματος, πρέπει να βρίσκονται στην μέγιστη δυνατή απόσταση, (προτείνεται απόσταση **Z = 1060mm**).

2. Ο αριθμός των επιπέδων όπου εκτελείται ο αλγόριθμος της τρισδιάστατης ανακατασκευής του σαρωμένου δοκιμίου, είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπεται ο εντοπισμός όσο το δυνατόν περισσότερων σημείων της επιφάνειας που σαρώνεται και να ανακατασκευάζονται όσο το δυνατόν περισσότερα σημεία. Αυτός ο αριθμός διαφέρει από δοκίμιο σε δοκίμιο.
3. Εφαρμογή του αλγορίθμου ανακατασκευής. Ο αλγόριθμος της ανακατασκευής αφορά το τελικό στάδιο (μετά την τοποθέτηση του οπτικού συστήματος), το οποίο υπολογίζει τις τρεις διαστάσεις του κάθε σημείου. Αυτός ο αλγόριθμος, απαρτίζεται από την τεχνική της δυαδικοποίησης (binarization) της εικόνας, την τεχνική εύρεσης της χρήσιμης πληροφορίας από τη διαχεόμενη προσπίπτουσα γραμμή λέιζερ και την ανακατασκευή της δισδιάστατης πληροφορίας σε τρισδιάστατη.

Για την δυαδικοποίηση της εικόνας προτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής του μέγιστου αθροίσματος που περιγράφηκε στην **ενότητα 2.2.1**, ενώ για την εύρεση της χρήσιμης πληροφορίας προτείνεται η τεχνική του κέντρου της βαρύτητας που περιγράφηκε στην ίδια ενότητα, για τους λόγους που αναφέρθηκαν.

Συνοψίζοντας, μπορεί να περιγραφεί η παραπάνω μεθοδολογία ικανοποιητικά, στο παρακάτω διάγραμμα ροής:



### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη ενότητα, θα παρουσιαστεί μια υλοποίηση της παραπάνω προτεινόμενης τεχνικής, καθώς και τα τελικά αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής και της εφαρμογής της. Η φωτογραφίες τραβήχτηκαν σε συνθήκες κανονικού φωτισμού και με τις προδιαγραφές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η επεξεργασία των εικόνων και η ανακατασκευή υλοποιήθηκαν με τη χρήση του εργαλείου MATLAB 2013B και με τη χρήση συναρτήσεων της βιβλιοθήκης vision που υποστηρίζεται από τη MATLAB.

#### 3.1 Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε πολλά επίπεδα

Όπως έχει αναφερθεί στη προηγούμενη ενότητα, τα περισσότερα σημεία εντοπίζονται κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας. Αυτό οδηγεί αυτόματα στο συμπέρασμα ότι αν γίνεται η εφαρμογή της τεχνικής που περιγράφηκε παραπάνω, σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού αυτού πεδίου, τότε θα επιτευχθεί καλύτερη ανακατασκευή, η οποία ενώ μπορεί να μην διαφέρει τόσο στα σφάλματα με την τεχνική εφαρμογής της μεθοδολογίας σε όλο το εύρος του οπτικού πεδίου των καμερών, σίγουρα όμως θα έχουν ανακατασκευαστεί περισσότερα σημεία, και το αποτέλεσμα θα προσεγγίζει περισσότερο την πραγματική γεωμετρία του δοκιμίου.

Προφανώς αυτή η εφαρμογή της τεχνικής απαιτεί περισσότερα επίπεδα υλοποίησης της προτεινόμενης μεθοδολογίας, που σημαίνει ότι θα υπάρχει κόστος στον χρόνο υλοποίησης του τρισδιάστατου σαρώματος του δοκιμίου.

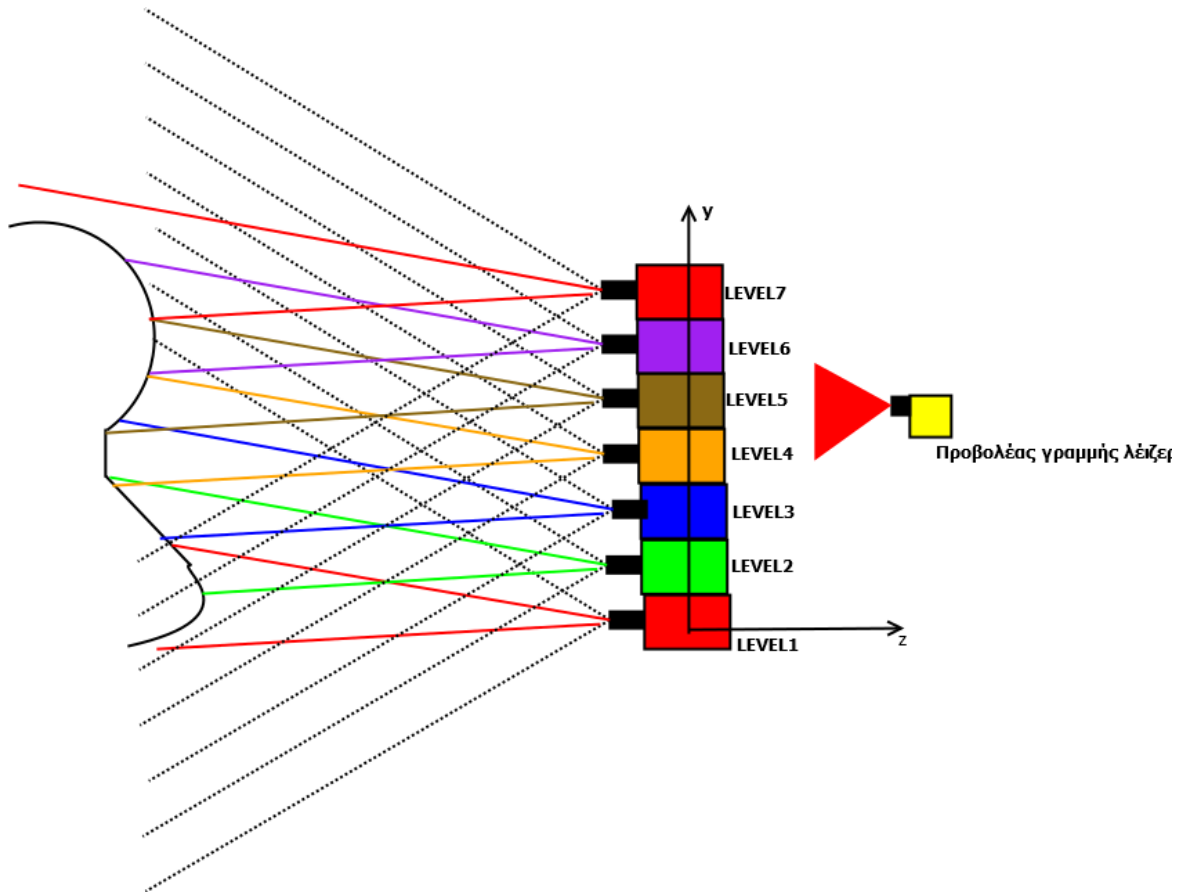
Για να πετύχουμε την απομόνωση του εύρους γύρω από το κέντρο του οπτικού πεδίου των καμερών έγινε «κόψιμο» των εικόνων σε μια περιοχή περίπου 400 εικονοστοιχείων γύρω από το κέντρο της εικόνας. Προφανώς αυτό το μέρος της εικόνας αφορά μόνο τον κατακόρυφο άξονα  $y$  του συστήματος αξόνων της κάμερας. Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για το κόψιμο των εικόνων είναι η `imcrop` της MATLAB.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η εφαρμογή της τρισδιάστατης απεικόνισης του σαρωμένου από τη γραμμή λείζερ δοκιμίου σε πολλά επίπεδα και με μειωμένο το εύρος επεξεργασίας της εικόνας σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου των καμερών.

Η επιλογή των επιπέδων γίνεται με βάση δύο γνώμονες:

A) Μέγεθος του δοκιμίου στον άξονα των  $y$  (Όσο πιο μεγάλο τόσο πιο πολλά επίπεδα)

**Β)** Απόδοση στα σφάλματα. Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα(2.1.3) συμφέρει το σπάσιμο του προβλήματος της τρισδιάστατης απεικόνισης σε πολλά επίπεδα, γιατί η επεξεργασία γίνεται σε μια πληροφορία συγκεντρωμένη σε ένα πεδίο γύρω από το οπτικό κέντρο της κάμερας.



**Σχήμα 3.1.:** Αναπαράσταση των οπτικών κέντρων σε επτά επίπεδα γιατί τόσα απαιτούνται για την πλήρη σάρωση του δοκιμίου του σχήματος (γνώμονας Α). Κάθε κάμερα στο σχήμα είναι δύο οπτικά συστήματα των δύο καμερών. Στο σχήμα αναπαριστάται το εύρος που αξιοποιείται για επεξεργασία, στο χρώμα της κάμερας στην οποία ανήκει.

### **3.2 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων**

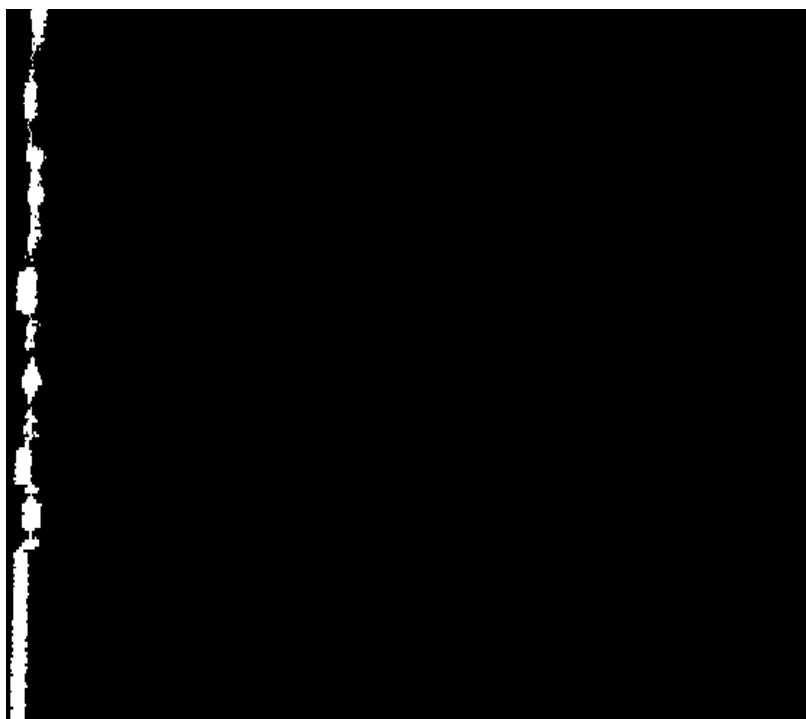
Οι εικόνες που λαμβάνουν οι δύο κάμερες ανά level σε συνθήκες κανονικού φωτισμού:



**Εικόνα 3.1.: Αριστερή κάμερα στο πρώτο επίπεδο**

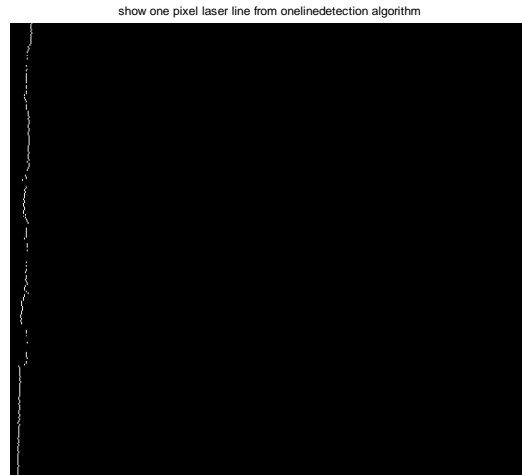


**Εικόνα 3.2.: Δεξιά κάμερα στο πρώτο επίπεδο**

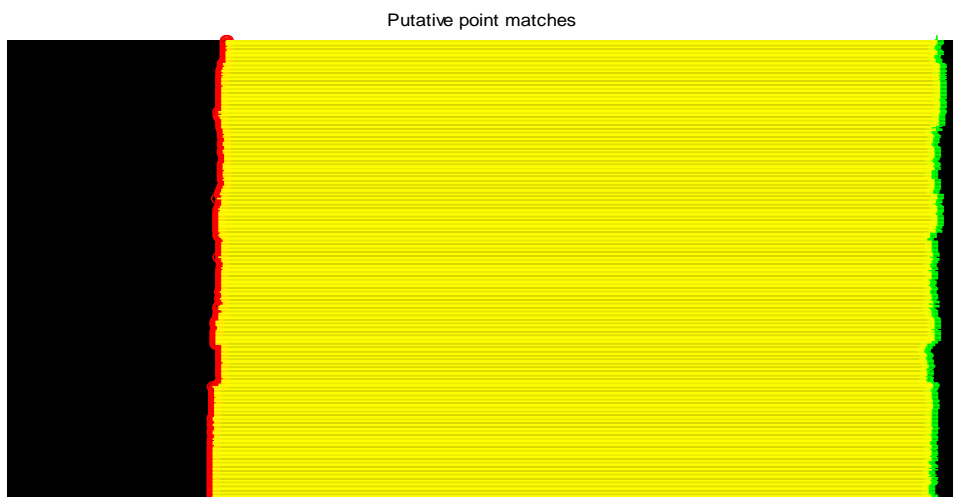


**Εικόνα 3.3.: Διαδικτοποίηση της μιας εικόνας με το λέιζερ να φαίνεται με την διάχυσή του**

Εικόνες με βάση την τεχνική εύρεσης της γραμμής του λέιζερ του ενός εικονοστοιχείου βάση της οποίας βρίσκονται ανά γραμμή οι μέγιστες τιμές του κόκκινου (χρώμα λέιζερ), και έπειτα παίρνουμε από αυτές το μεσαίο pixel ανά γραμμή.



**Εικόνα 3.4:** Η εκτίμηση της γραμμής του ενός pixel του λέιζερ της μιας εικόνας με βάση την τεχνική της εύρεσης του κεντρικού σημείου για τον εντοπισμό της χρήσιμης πληροφορίας



**Εικόνα 3.5:** Η αντιστοίχιση pixel by pixel των γραμμών των δύο εικόνων

## -Η επιλογή της απόστασης

Για την επιλογή της απόστασης των καμερών μεταξύ τους ,εκτελέστηκαν πειράματα με τοποθετημένες τις κάμερες σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους: Οι αποστάσεις που πήραμε είναι οι παρακάτω:  $L0 = 193\text{mm}$   $L1 = 185\text{mm}$   $L2 = 173\text{mm}$   $L3 = 122\text{mm}$   $L4 = 115\text{mm}$ . Τα αποτελέσματα που πήραμε από κάθε πείραμα αντίστοιχα είναι ένα νέφος σημείων το οποίο αναπαριστά τις εκτιμήσεις της τρισδιάστατης κατάστασης του κάθε σημείου. Ο λόγος που τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σαν νέφος σημείων και όχι σαν μια γραμμή μεταξύ του άξονα του ύψους(οριζόντιος άξονας) και του άξονα του βάθους(κάθετος άξονας), είναι η παρουσία σφαλμάτων.

Στην προκειμένη περίπτωση το σφάλμα ορίζεται ως η μέση απόκλιση των σημείων από την θεωρητική θέση του εκάστοτε σημείου. Πιο ειδικά μπορεί να θεωρηθεί ως σφάλμα, οποιοδήποτε σημείο δεν βρίσκεται πάνω στην θεωρητική γεωμετρία του δοκιμίου που σαρώνεται. Ο υπολογισμός του σφάλματος του σημείου αυτού γίνεται με την σχέση 3.1 [15]

$$error = \frac{\sqrt{(y_{th} - y)^2 + (z_{th} - z)^2}}{N} \quad (3.1)$$

**Όπου:**

**$y_{th}$  = Η θεωρητική τιμή του σημείου που σαρώνεται στον άξονα του ύψους**

**$y$  = Η εκτίμηση της θέσης του σημείου που σαρώνεται στον άξονα του ύψους**

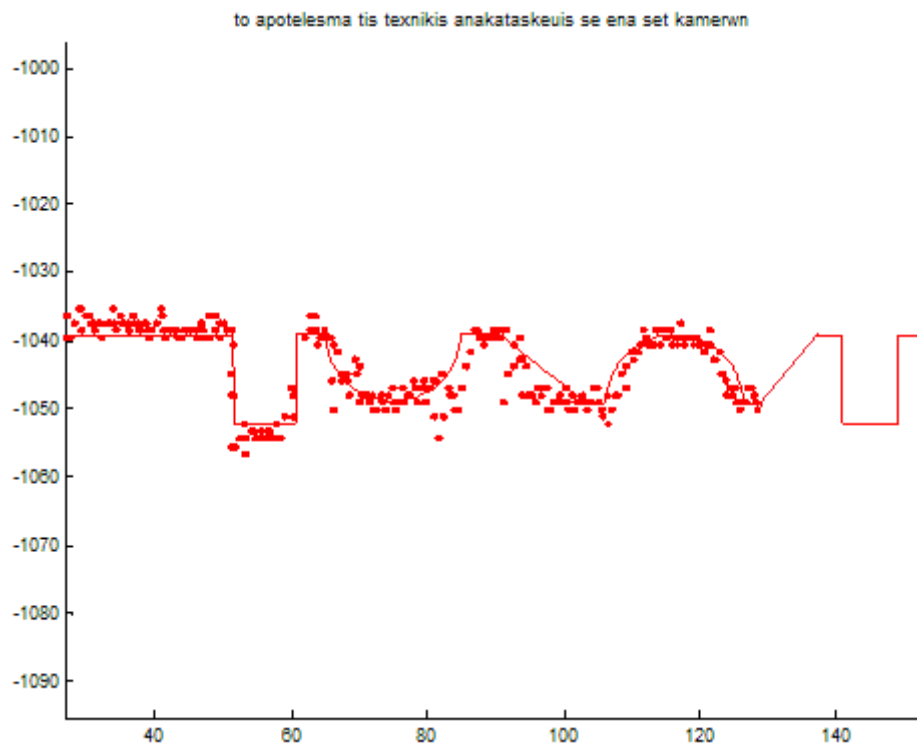
**$z_{th}$  = Η θεωρητική τιμή του σημείου που σαρώνεται στον άξονα του βάθους**

**$z$  = Η εκτίμηση της θέσης του σημείου που σαρώνεται στον άξονα του βάθους**

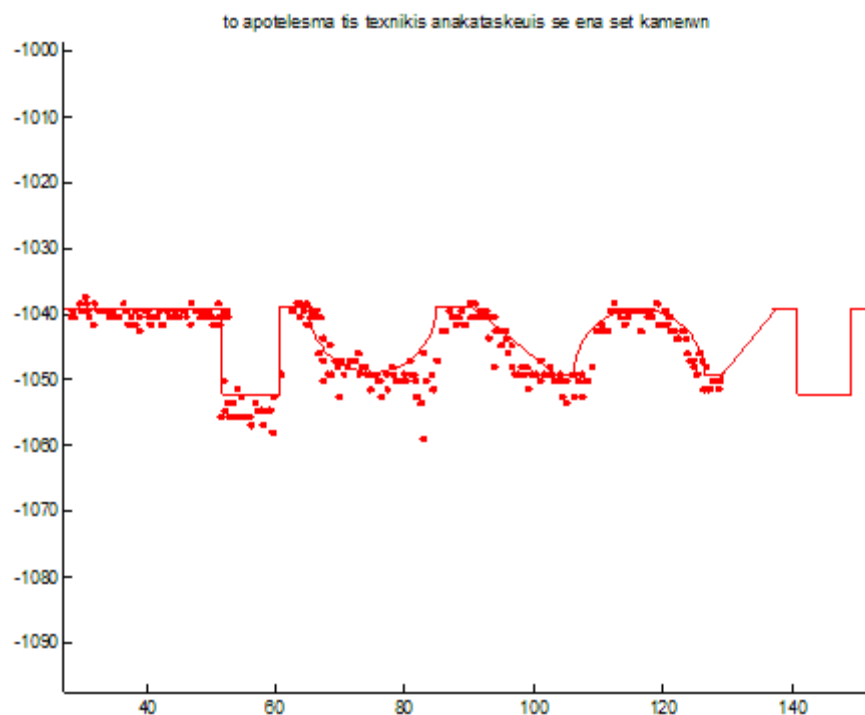
**$N$  = Ο αριθμός των σημείων που σαρώνονται**



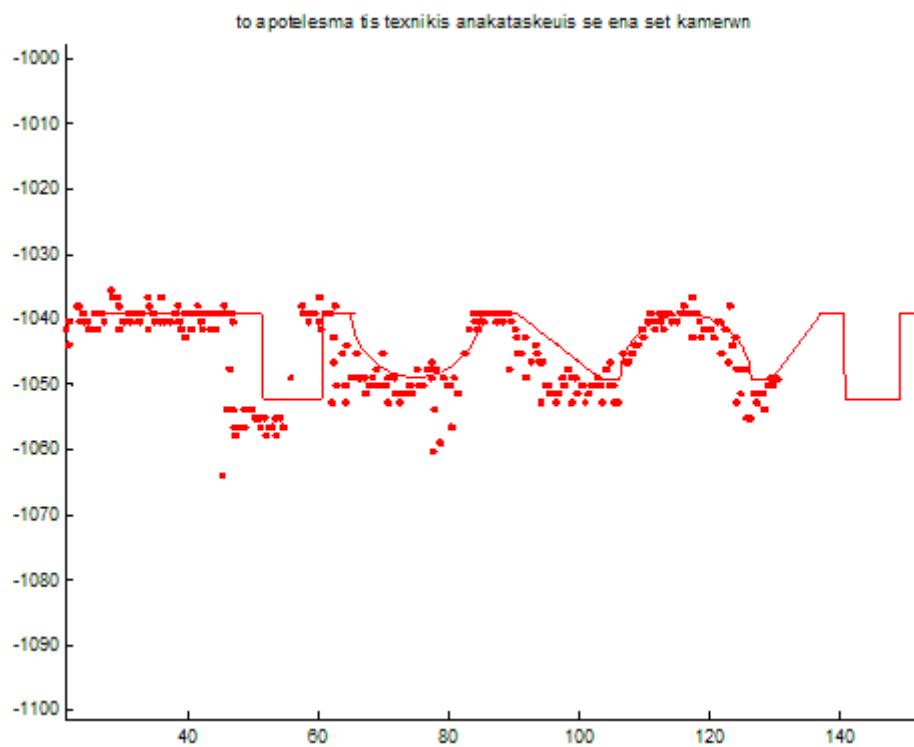
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καθώς ανά απόσταση καθώς και οι αντίστοιχοι πίνακες των σφαλμάτων.



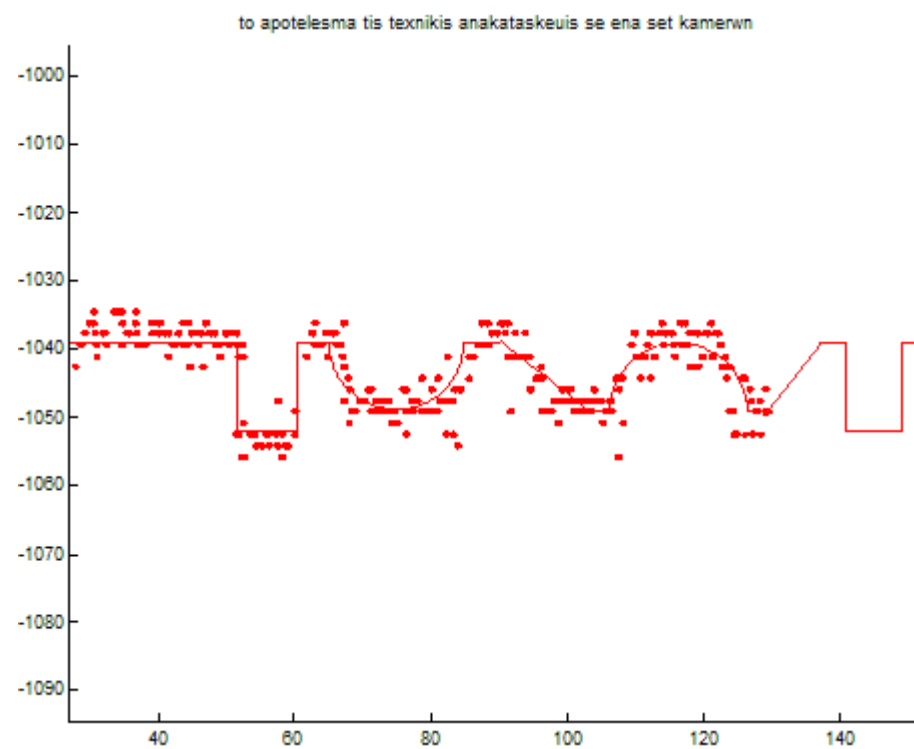
**Εικόνα 3.6: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση  $L_0 = 193\text{mm}$**



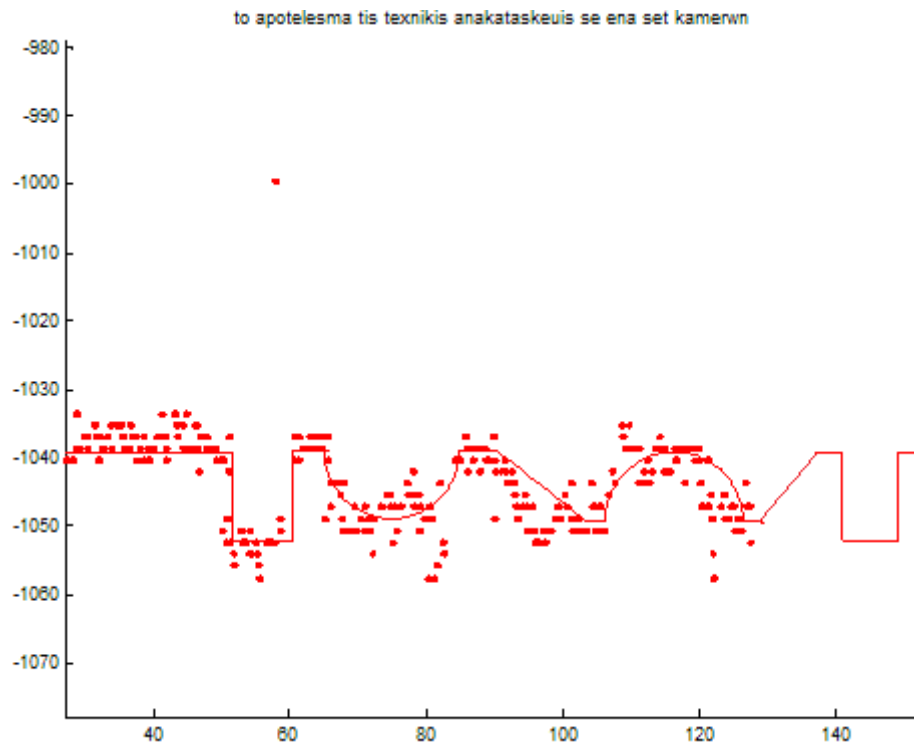
**Εικόνα 3.7: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση  $L_1 = 185\text{mm}$**



**Εικόνα 3.8: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση  $L2 = 173\text{mm}$**



**Εικόνα 3.9: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση  $L3 = 122\text{mm}$**



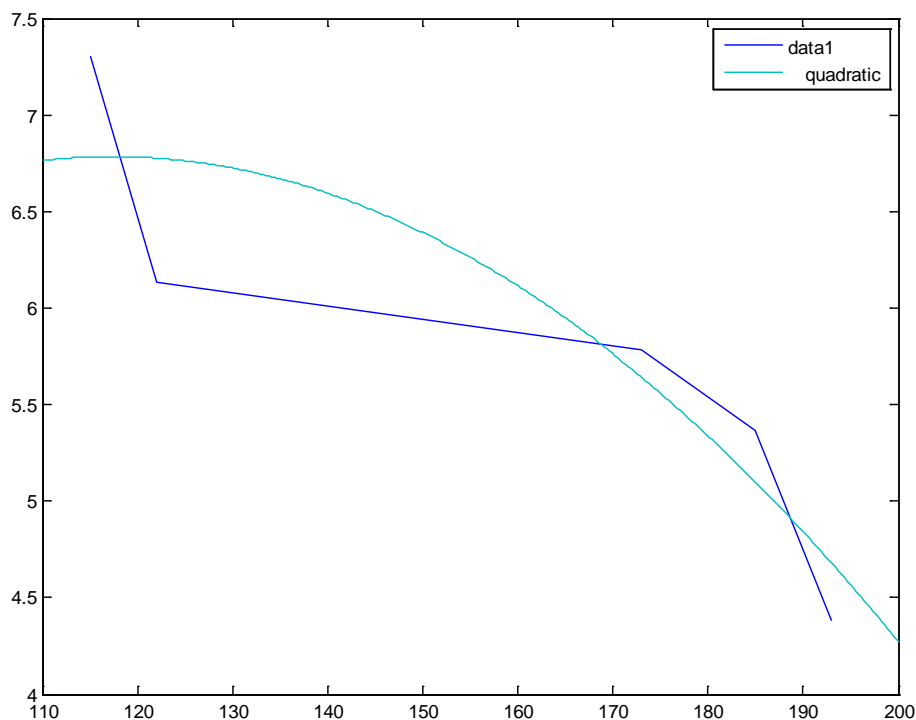
**Εικόνα 3.10: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση  $L_4 = 115\text{mm}$**

Τα σφάλματα των πειραμάτων για τις διάφορες αποστάσεις φαίνονται στον πίνακα παρακάτω:

Αποστάσεις (mm)	Σφάλμα (mm)
$L_0 = 193$	4.3841
$L_1 = 185$	5.3695
$L_2 = 173$	5.7868
$L_3 = 122$	6.136
$L_4 = 115$	7.3

**Πίνακας 3.1: Τα σφάλματα που εμφανίζονται στην υλοποίηση του αλγορίθμου με τις κάμερες τοποθετημένες σε διαφορετικές μεταξύ τους αποστάσεις**

Αυτό που παρατηρούμε στον πίνακα 3.1 είναι ότι όσο μικραίνει η απόσταση των δύο καμερών, τόσο πιο μεγάλο είναι το σφάλμα των αποτελεσμάτων μας, με τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



**Διάγραμμα 3.1: Διάγραμμα που δείχνει την μείωση του σφάλματος(κάθετος άξονας), συναρτήσει της αύξησης των αποστάσεων(οριζόντιος άξονας). Το διάγραμμα έχει υποστεί επεξεργασία προκειμένου να υπάρχει μια άποψη σχετικά με ένα ικανοποιητικό δείγμα πειραμάτων(πράσινη γραμμή)**

Αυτό το γεγονός μας οδηγεί στην ανάγκη να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των δύο καμερών.

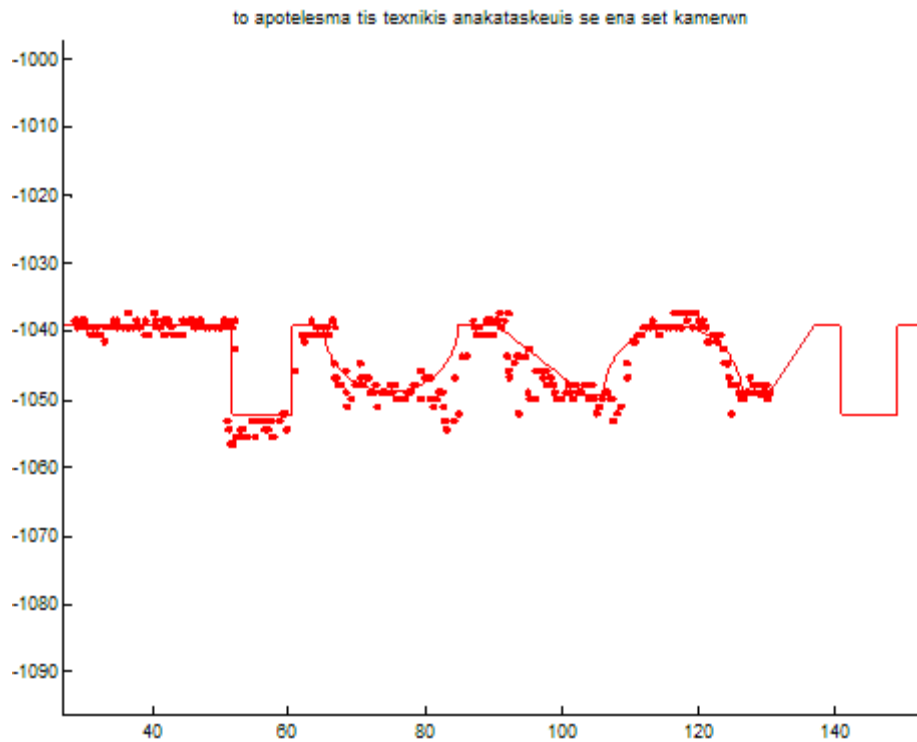
#### **-Η εύρεση της απόστασης του δοκιμίου από το οπτικό κέντρο των καμερών**

Αφού πειραματικά αποδείχτηκε ότι όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις μεταξύ των δύο καμερών τόσο πιο μικρό είναι το σφάλμα, πάμε να εντοπίσουμε την καλύτερη δυνατή απόσταση που πρέπει να έχει το αντικείμενο που σκανάρεται από το οπτικό κέντρο των καμερών. Για την ώρα δεν μας ενδιαφέρει η πλήρης ανακατασκευή του δοκιμίου. Έτσι κάνουμε την αφαίρεση ότι θα εντοπίσουμε την καλύτερη δυνατή απόσταση με δεδομένο το σφάλμα που θα έχει το αποτέλεσμα μας στην απόσταση αυτή, προσπαθώντας να γίνει ανακατασκευή του κομματιού του δοκιμίου που εντοπίζει η κάμερα.

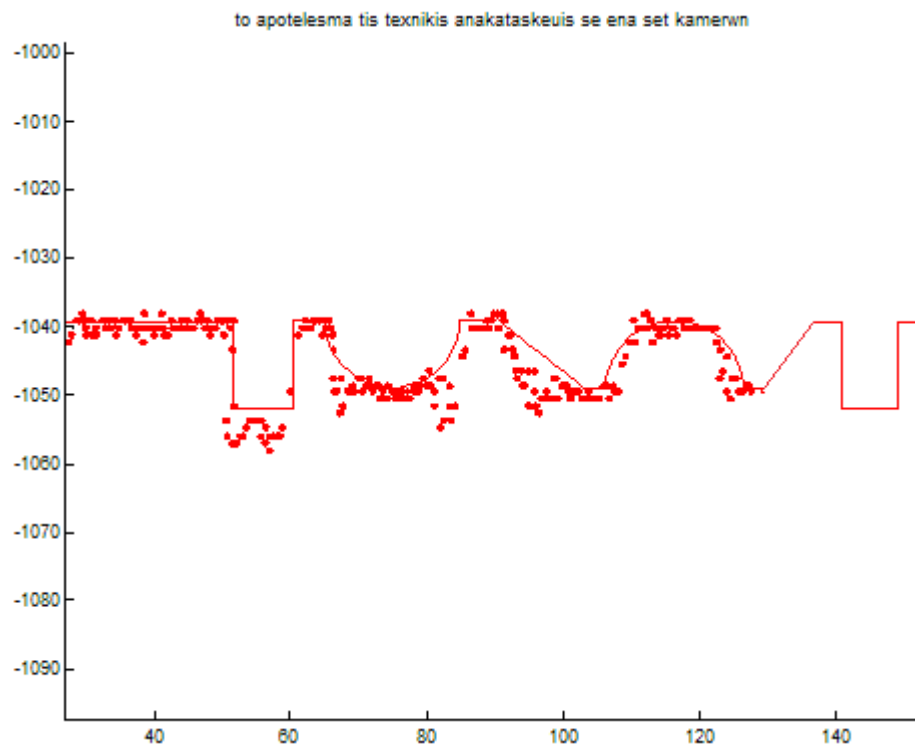
Τα αποτελέσματα εμφανίζονται παρακάτω με την σειρά για τις εξής αποστάσεις:  **$Z_0 = 1060\text{mm}$ ,  $Z_1 = 1040\text{mm}$ ,  $Z_2 = 1020\text{mm}$ ,  $Z_3 = 980\text{mm}$ ,  $Z_4 = 960\text{mm}$ ,  $Z_5 = 920\text{mm}$ , και  $Z_6 = 900$ .**

Οι αντίστοιχες αποστάσεις των καμερών είναι: **L0 = 193mm, L1 = 187mm, L2 = 185mm, L3 = 177mm, L4 = 171mm, L5 = 163mm, L6 = 162**

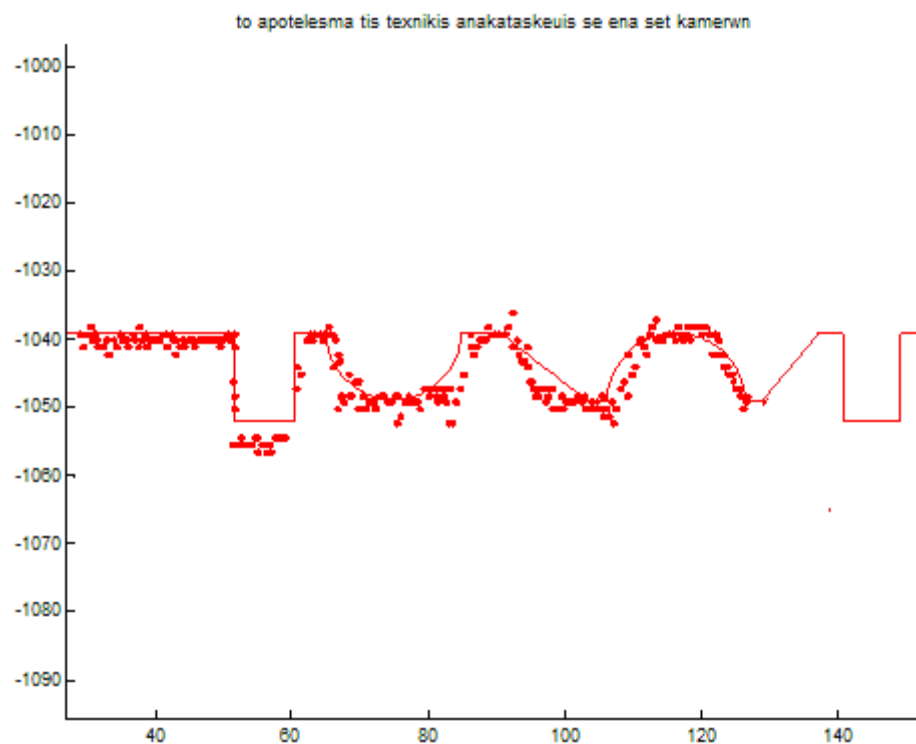
Τα αποτελέσματα των εικόνων με την σειρά που αναφέρθηκε είναι τα παρακάτω:



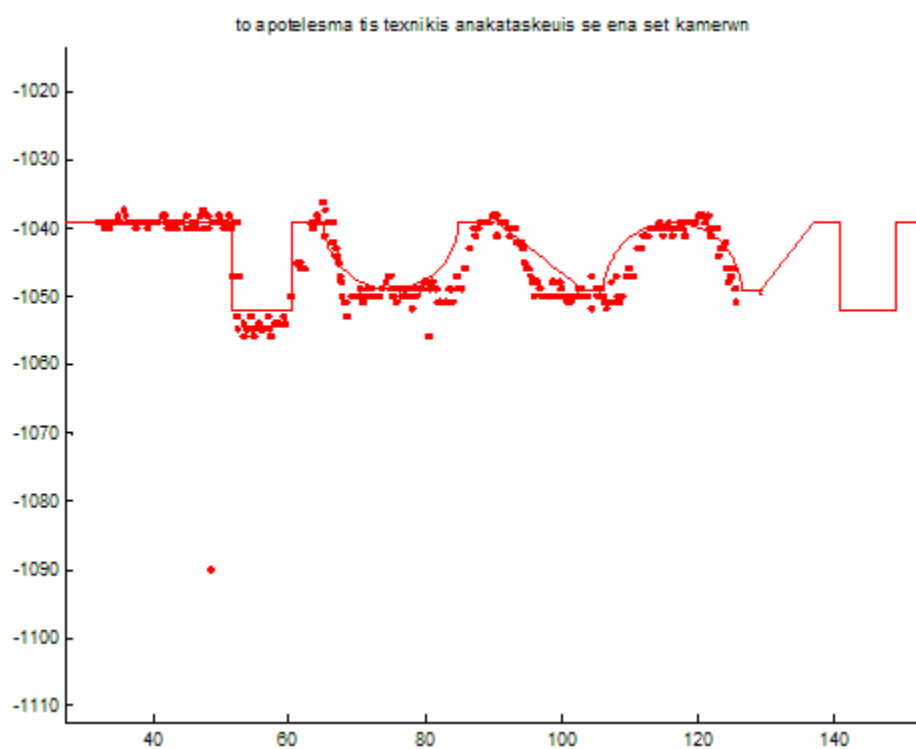
**Εικόνα 3.11: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z0**



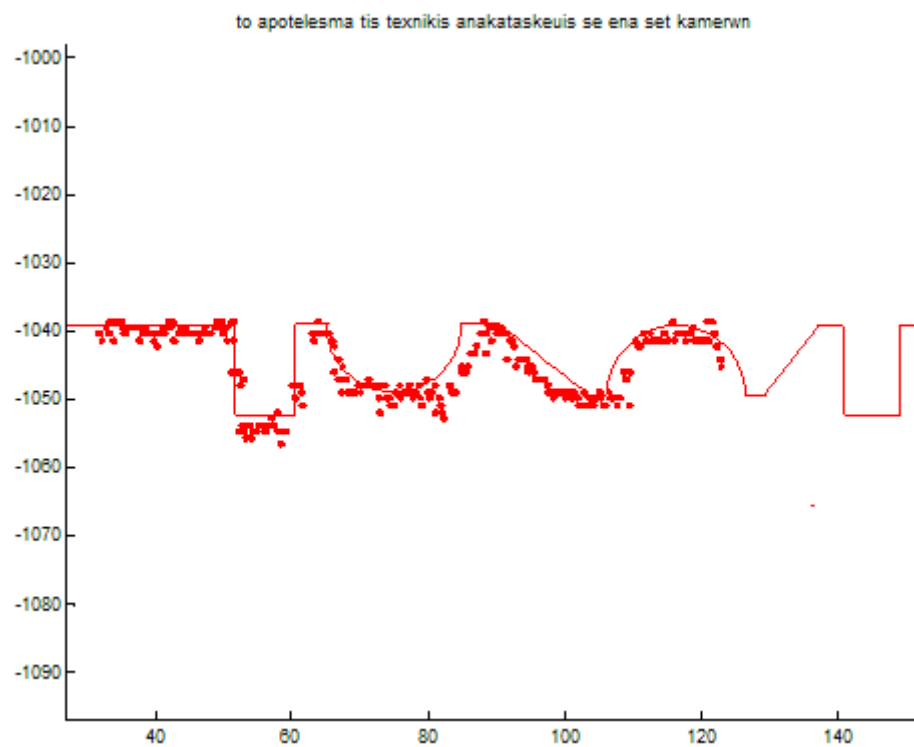
**Εικόνα 3.12: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z1**



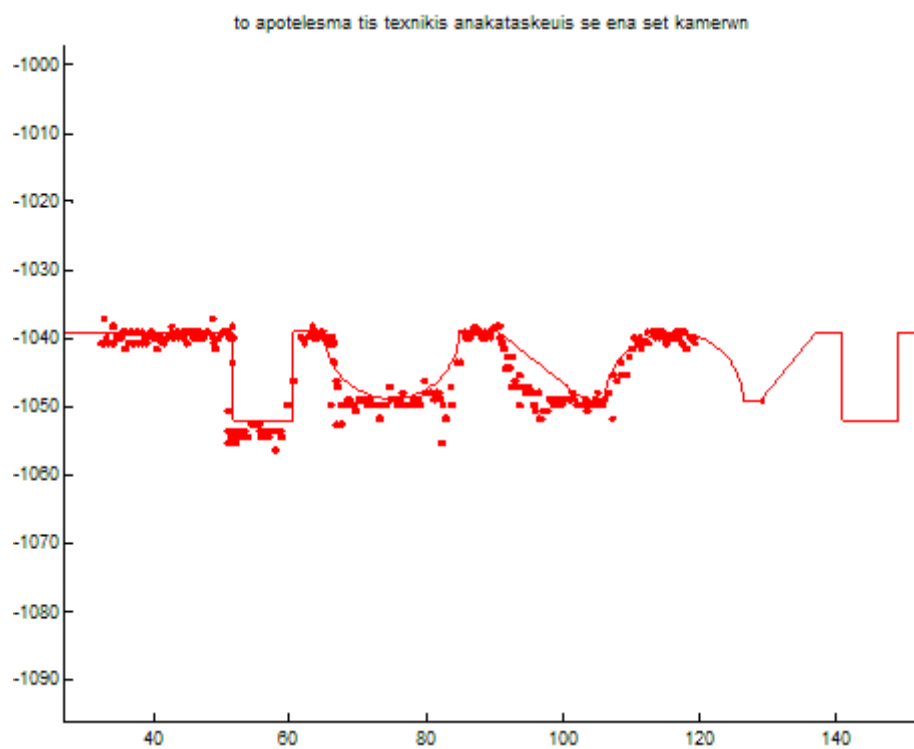
**Εικόνα 3.13: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z2**



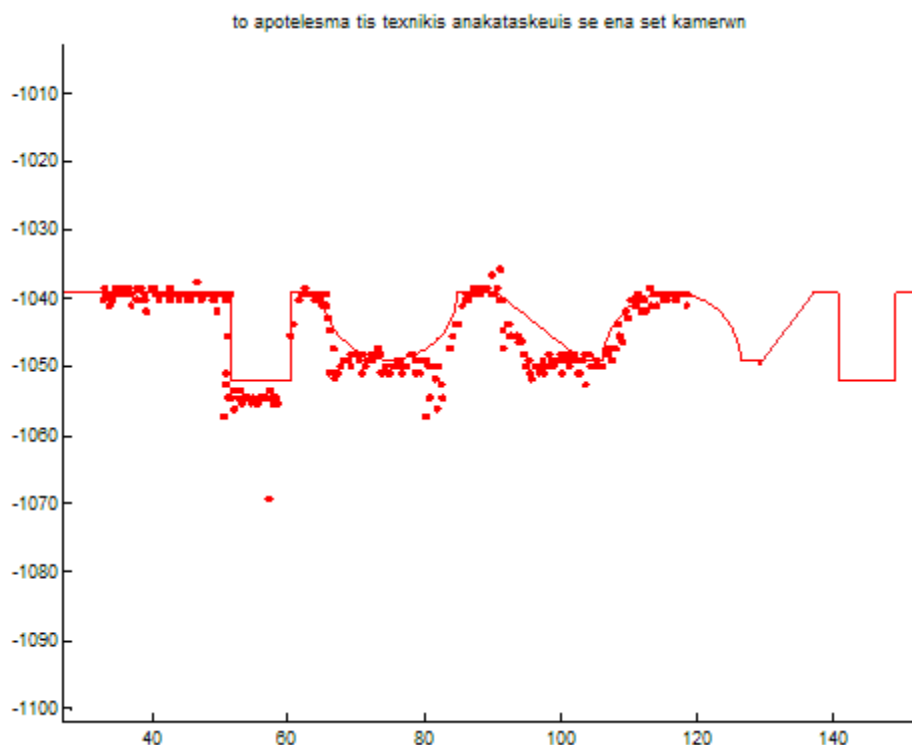
**Εικόνα 3.14: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z3**



**Εικόνα 3.15: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z4**



**Εικόνα 3.16: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z5**



**Εικόνα 3.17: Αποτέλεσμα ανακατασκευής με απόσταση από το δοκίμιο Z6**

Τα σφάλματα συναρτήσει των αποστάσεων των καμερών μεταξύ τους και των αποστάσεων των καμερών από το δοκίμιο εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Απόσταση δοκιμίου(mm)	Μέγιστη απόσταση καμερών(mm)	Σφάλμα αποτελέσματος(mm)
Z <sub>0</sub> = 1060	L <sub>0</sub> = 193	4.8497
Z <sub>1</sub> = 1040	L <sub>1</sub> = 187	5.4337
Z <sub>2</sub> = 1020	L <sub>2</sub> = 185	5.0041
Z <sub>3</sub> = 980	L <sub>3</sub> = 177	5.0591
Z <sub>4</sub> = 960	L <sub>4</sub> = 171	5.2043
Z <sub>5</sub> = 920	L <sub>5</sub> = 163	5.1992
Z <sub>6</sub> = 900	L <sub>6</sub> = 162	5.4112

**Πίνακας 3.2: Τα σφάλματα του αλγορίθμου με το οπτικό σύστημα τοποθετημένο σε διαφορετικές αποστάσεις από το δοκίμιο**

Στον πίνακα 3.2 παρατηρούμε ότι σε γενικές γραμμές το σφάλμα των πειραμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση των οπτικών κέντρων των καμερών από το δοκίμιο. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση του δοκιμίου από τα οπτικά κέντρα των καμερών, τόσο μεγαλύτερο είναι το οπτικό πεδίο των καμερών σε σχέση με το δοκίμιο. Αυτό επιτρέπει την ολοένα και μεγαλύτερη απόσταση των οπτικών κέντρων, γεγονός που όπως αποδείχτηκε, οδηγεί στην μείωση των σφαλμάτων. Ωστόσο όμως επειδή δεν υπάρχει απεριόριστη δυνατότητα χώρου, επιλέγουμε το μέγιστο **Z<sub>0</sub> = 1060mm** ως απόσταση του δοκιμίου από τις κάμερες, ως μια καλή απόσταση, η οποία στη



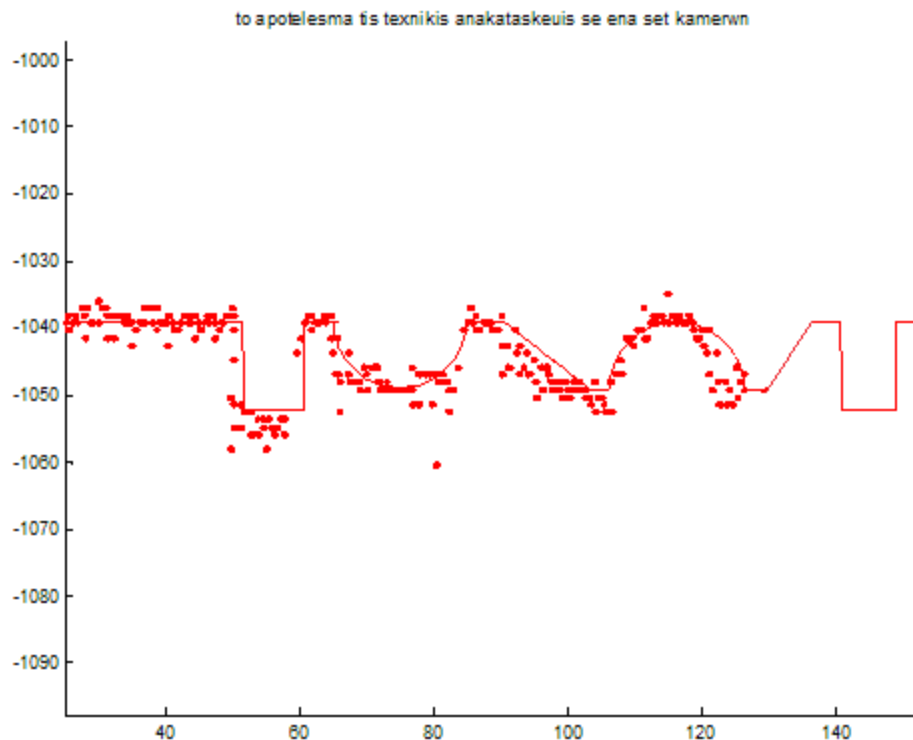
μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί πιο κάτω θα φέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### Μεθοδολογία για τα βέλτιστα δυνατά αποτελέσματα

Αφού ορίστηκε η ακριβής τοποθέτηση των καμερών μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι το αποτέλεσμα ,βάσει των υπολογισμένων σφαλμάτων συνεχίζει να μην είναι το καλύτερο δυνατό. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα αν γίνει η διασπορά των αποτελεσμάτων μικρή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εφόσον τοποθετηθεί άλλο ένα set καμερών με διαφορετική απόσταση  $L'$  από αυτή που έχει το πρώτο set  $L$ . Εφόσον  $L' < L$  περιμένουμε η μέση απόκλιση του δεύτερου set καμερών να είναι μεγαλύτερη από αυτή του πρώτου. Όσο πιο κοντά είναι η τιμή της απόστασης του δεύτερου set καμερών σε αυτή του πρώτου set, τόσο πιο κοντά θα είναι η απόκλιση τους. Παίρνοντας τις μέσες τιμές των αποτελεσμάτων των δύο σετ καμερών του νέου μας πλέον οπτικού συστήματος, πολλές από τις τιμές που έχουν μεγάλη απόκλιση από την θεωρητικές τιμές, θα αναιρεθούν. Αυτή η μέθοδος μειώνει σημαντικά το σφάλμα. Παρακάτω παρουσιάζεται η εκτέλεση των δύο πειραμάτων (ένα για κάθε set καμερών)



**Εικόνα 3.18:** Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου της ανακατασκευής του πρώτου σετ καμερών στο πρώτο επίπεδο



**Εικόνα 3.19:** Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου της ανακατασκευής του δεύτερου σετ καμερών στο πρώτο επίπεδο

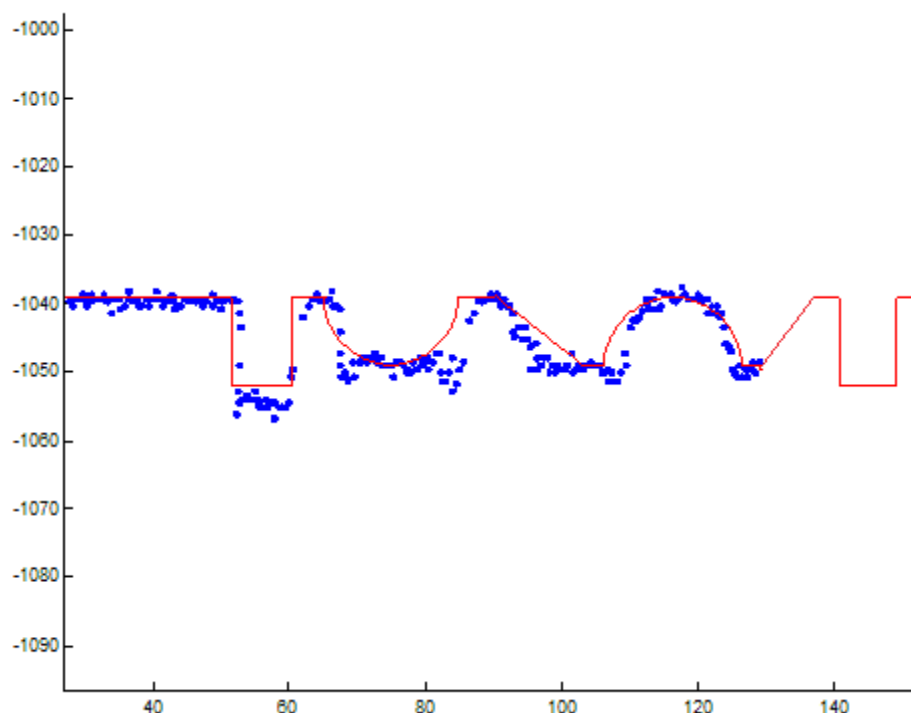
Παρουσιάζεται ο πίνακας με τα σφάλματα των δύο set καμερών

Set καμερών	Σφάλμα
Πρώτο	1.0950mm
Δεύτερο	1.2529 mm

**Πίνακας 3.3:** Τα σφάλματα των δύο οπτικών συστημάτων στο ίδιο επίπεδο

Να παρατηρήσουμε ότι το σφάλμα στο δεύτερο set καμερών είναι μεγαλύτερο, γεγονός που εξηγείται αφού στο δεύτερο set μίκρυνε η απόσταση των αισθητήρων.

Αφού στη δεδομένη προτεινόμενη απόσταση, των οπτικών συστημάτων από το δοκίμιο δεν συλλαμβάνονται όλα τα σημεία του δοκιμίου από τις κάμερες, κρίνεται απαραίτητη η προσθήκη δύο ακόμα οπτικών συστημάτων(2 set καμερών) σε ένα δεύτερο επίπεδο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 3.20. Αξίζει να σημειωθεί ότι σφάλμα ανα επίπεδο, θεωρείται το μέσο σφάλμα των δύο οπτικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται ανά επίπεδο.



**Εικόνα 3.20: Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου της ανακατασκευής πρώτου επιπέδου παίρνοντας τους μέσους όρους των αποτελεσμάτων των δύο επιπέδων**

Ο πίνακας με την παρουσίαση των σφαλμάτων ανά set καμερών καθώς και το σφάλμα του μέσου όρου των αποτελεσμάτων του κάθε set παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

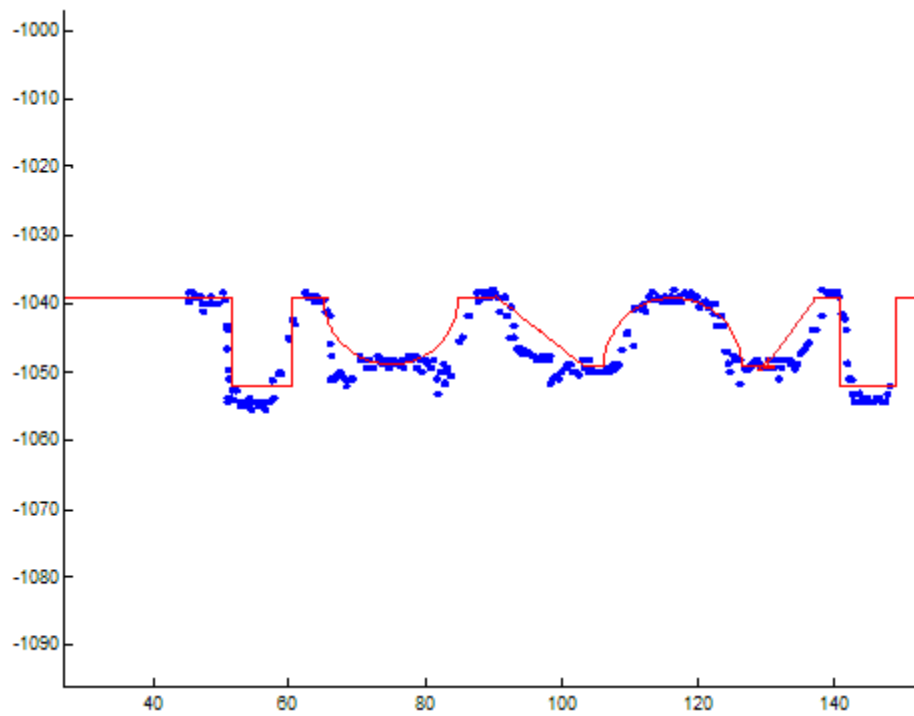
<b>Πρώτο επίπεδο</b>	
Σετ καμερών – ενοποίηση των σετ των καμερών σε ένα	Σφάλματα(mm)
1ο set	<b>1.0950</b>
2ο set	<b>1.2529</b>
Μέσος όρος των sets	<b>1.2282</b>

**Πίνακας 3.4 Τα σφάλματα των δύο οπτικών συστημάτων του πρώτου επιπέδου, και το σφάλμα των συνδιασμένων αποτελεσμάτων των δύο οπτικών συστημάτων στο επίπεδο**

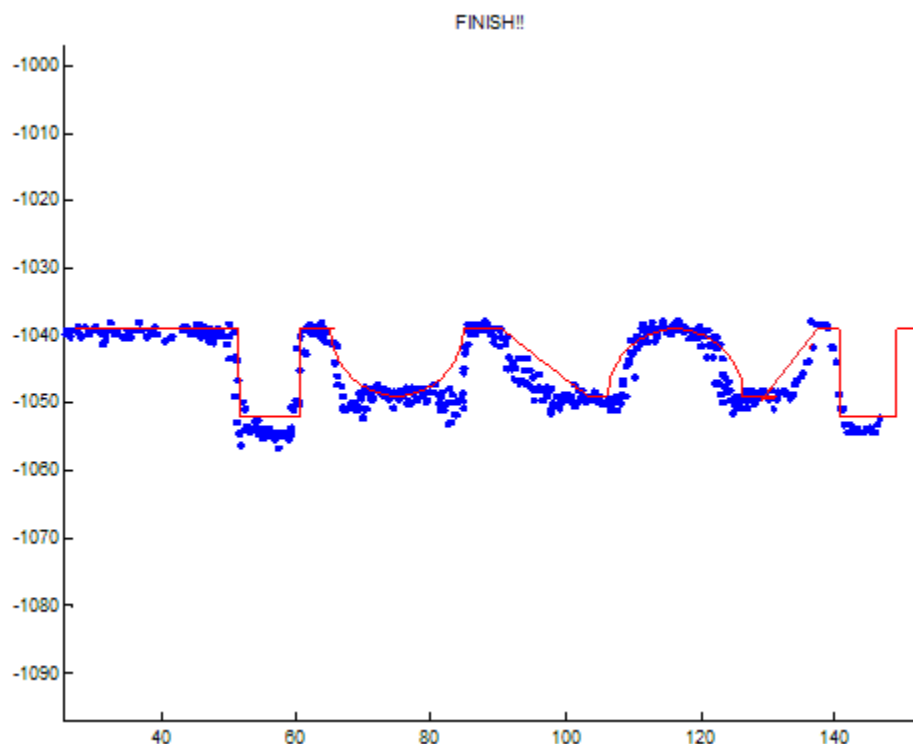
Να παρατηρήσουμε ότι το σφάλμα του πρώτου set καμερών είναι μικρότερο από το δεύτερο καθώς το δεύτερο είναι set καμερών μικρότερης απόστασης από το πρώτο.

Η τρισδιάστατη ανακατασκευή ωστόσο επιτεύχθηκε μέχρι το σημείο όπου εντόπισαν τα δύο set καμερών στο επίπεδο όπου βρίσκονταν. Προκειμένου να ανακατασκευαστεί ολόκληρο το δοκίμιο, επαναλαμβάνουμε τον παραπάνω αλγόριθμο με τις ίδιες αποστάσεις μεταξύ των καμερών και με την τεχνική της

εύρεσης του μεσαίου εικονοστοιχείου για την εύρεση της γραμμής εικονοστοιχείων, και σε ανώτερο επίπεδο το οποίο θα μπορεί να εντοπίσει τα σημεία που δεν εντόπισαν τα σετ των καμερών στο πρώτο επίπεδο. Τα ανακατασκευασμένα πλέον αποτελέσματα των δύο sets καμερών του δεύτερου επιπέδου είναι τα παρακάτω:



**Εικόνα 3.21: Δεύτερο επίπεδο ανακατασκευασμένο**



**Εικόνα 3.22: Το πρώτο και το δεύτερο επίπεδο ανακατασκευασμένα και συνδυασμένα**

<b>Επίπεδα</b>	<b>Σφάλματα (mm)</b>
<b>1ο επίπεδο</b>	<b>1.2282</b>
<b>2<sup>ο</sup> επίπεδο</b>	<b>1.4418</b>
<b>Συνένωση των δύο επιπέδων σε ένα πέρνοντας τους μέσους όρους</b>	<b>1.3595</b>

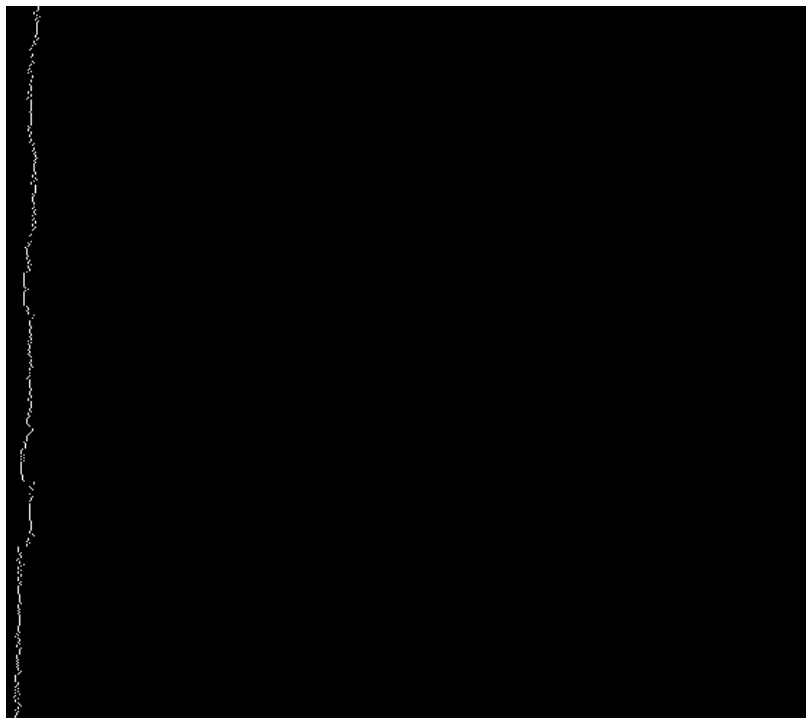
**Πίνακας 3.5: Τα σφάλματα των δύο οπτικών συστημάτων του δεύτερου επιπέδου, και το σφάλμα των συνδυασμένων αποτελεσμάτων των δύο οπτικών συστημάτων στο δεύτερο επίπεδο**

Ενώ φαίνεται ότι η συνένωση των δύο επιπέδων βελτιώνει κάπως τα σφάλματα συγκριτικά με τα αποτελέσματα ανά επίπεδο, τα αποτελέσματα παραμένουν μη ικανοποιητικά, σχετικά με το επιθυμητό δυνατό αποτέλεσμα.

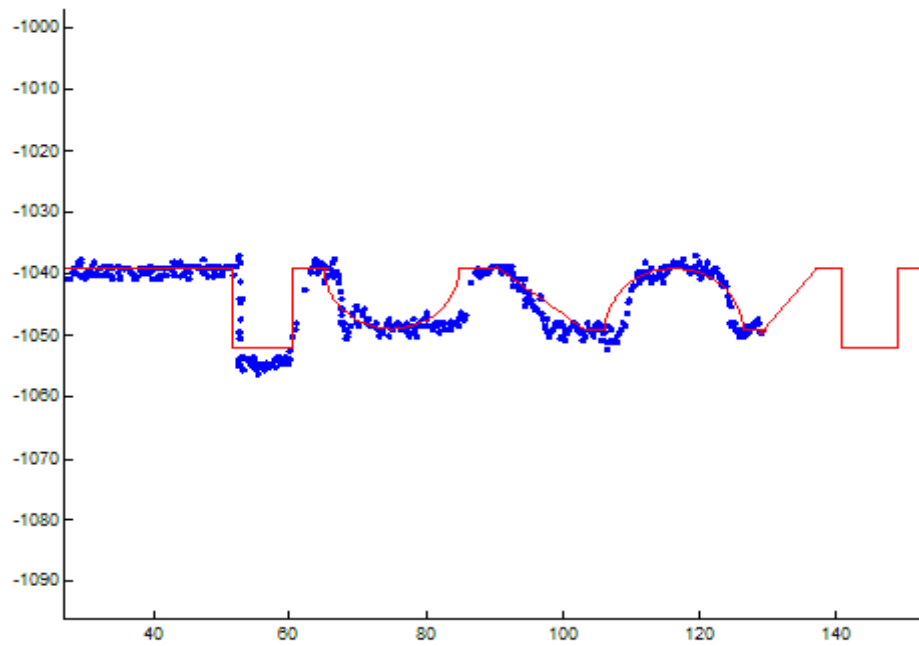
Το επόμενο βήμα θα είναι να ελεγχθεί ο αλγόριθμος ανακατασκευής όπως έχει παρουσιαστεί ως τώρα χρησιμοποιώντας όμως μια άλλη τεχνική για την εύρεση της γραμμής του λείζερ του ενός εικονοστοιχείου. Η τεχνική αυτή όπως έχει αναφερθεί ονομάζεται **Center Of Gravity**.

**-Αποτελέσματα με βάση την center of gravity τεχνική για την εύρεση του ενός pixel laser.**

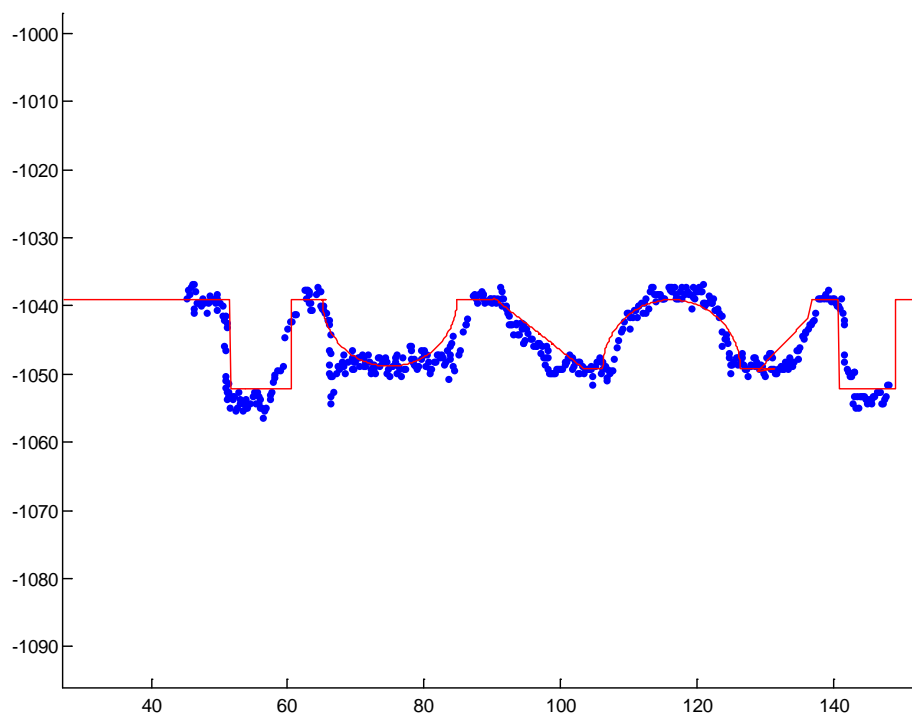
to apotelesma tis grammis laser apo tin texniki Center of Gravity



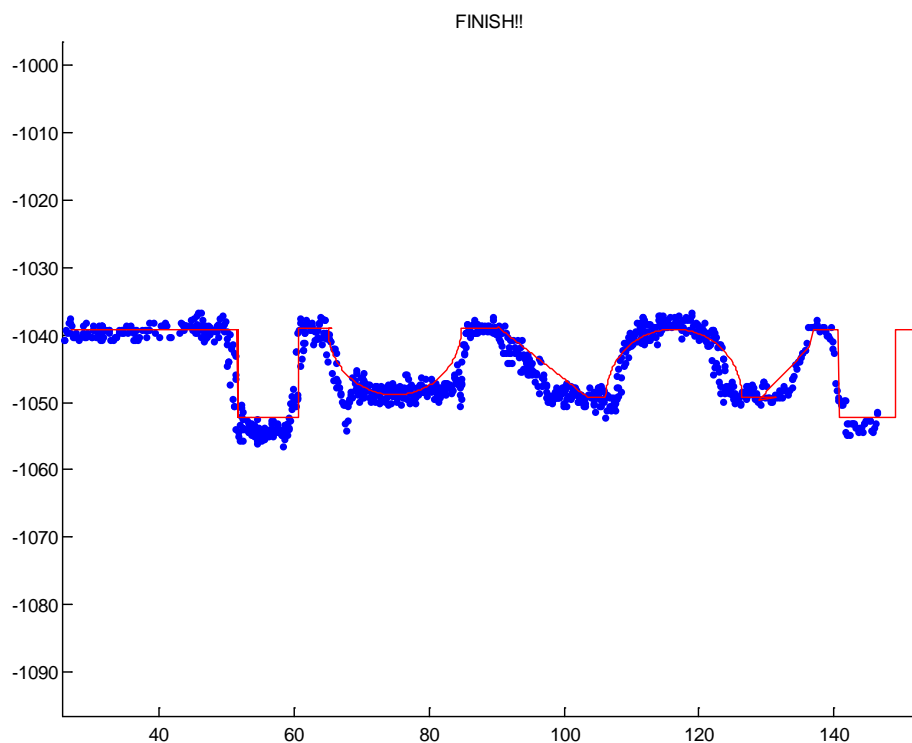
**Εικόνα 3.23: Η εκτίμηση της γραμμής λέιζερ ενός εικονοστοιχείου με βάση τον αλγόριθμο Center Of Gravity**



**Εικόνα 3.24: Πρώτο επίπεδο Σφάλμα = 1.0997mm**



**Εικόνα 3.25: Δεύτερο επίπεδο Σφάλμα = 1.1874mm**



**Εικόνα 3.26: Τα δύο επίπεδα ανακατασκευασμένα Σφάλμα = 1.1513mm**

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα σφάλματα των υλοποιήσεων στα δύο επίπεδα με την τεχνική του κέντρου της βαρύτητας:

<b>Επίπεδα</b>	<b>Σφάλματα (mm)</b>
1ο επίπεδο	1.0997
2 <sup>ο</sup> επίπεδο	1.1874
Συνένωση των δύο επιπέδων σε ένα πέρνοντας τους μέσους όρους	1.1513

**Πίνακας 3.6: Τα σφάλματα των υλοποιήσεων στα δύο επίπεδα με την τεχνική του κέντρου της βαρύτητας**



Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα σφάλματα των υλοποιήσεων στα δύο επίπεδα με την τεχνική του κεντρικού σημείου και του κέντρου της βαρύτητας:

<b>Κεντρικό σημείο</b>	<b>Σφάλματα (mm)</b>
1ο επίπεδο	1.2282
2ο επίπεδο	1.4418
Συνένωση των δύο επιπέδων σε ένα πέρνοντας τους μέσους όρους	1.3595
<b>Κέντρο της Βαρύτητας</b>	<b>Σφάλματα (mm)</b>
1ο επίπεδο	1.0997
2 <sup>ο</sup> επίπεδο	1.1874
Συνένωση των δύο επιπέδων σε ένα πέρνοντας τους μέσους όρους	1.1513

**Πίνακας 3.7: Τα σφάλματα των υλοποιήσεων στα δύο επίπεδα με την τεχνική του κεντρικού σημείου και του κέντρου της βαρύτητας**

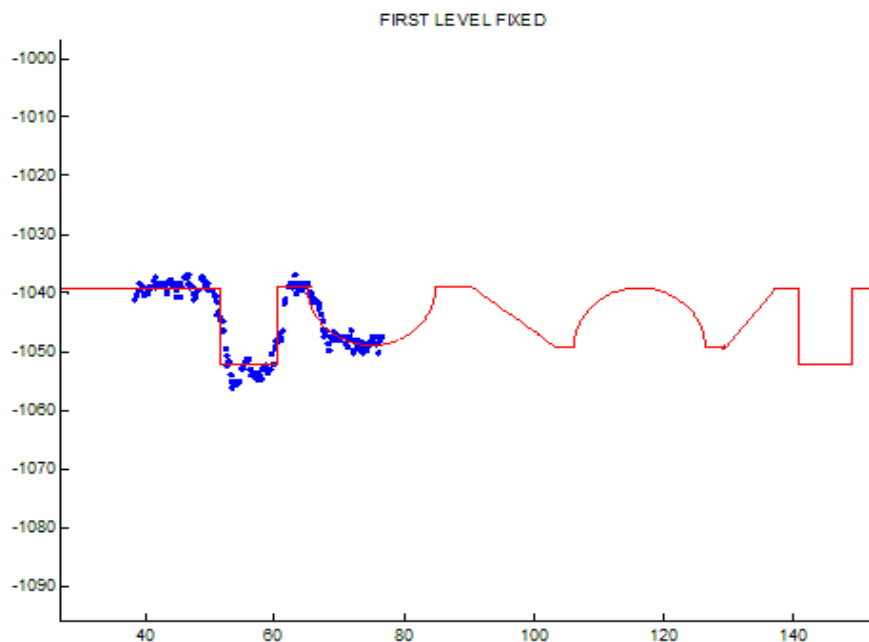
Συμπερασματικά από την ένωση των αποτελεσμάτων με τις δύο τεχνικές φαίνεται και στη πράξη ότι η τεχνική του κέντρου της βαρύτητας δίνει καλύτερα αποτελέσματα αφού τα μέσα σφάλματα είναι σαφώς μικρότερα από αυτά της τεχνικής εύρεσης της γραμμής εικονοστοιχείων με τη χρήση του κεντρικού Pixel.

### 3.3 Παρατηρήσεις και βελτίωση των αποτελεσμάτων

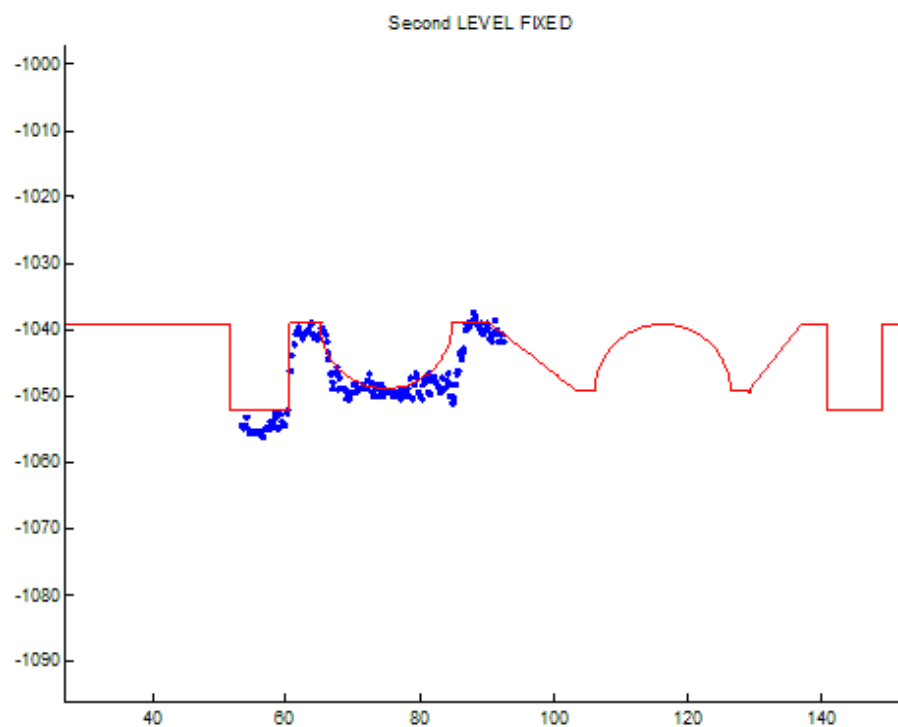
Όπως φαίνεται στα παραπάνω αποτελέσματα των 2 επιπέδων (**Ενότητα 3.2**), τα καλύτερα αποτελέσματα δίνονται με την τεχνική του κέντρου της βαρύτητας για την εύρεση της γραμμής του ενός εικονοστοιχείου, και μάλιστα σε μια περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών. Ένα βήμα λοιπόν για την καλύτερη τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας που σαρώνεται είναι να σπάσει το πρόβλημα σε αρκετά μικρά υποπροβλήματα ακολουθώντας την τεχνική Center Of Gravity. Αυτό στην προκειμένη περίπτωση σημαίνει ότι θα εκτελεστεί ο αλγόριθμος πολλές φορές, τόσες όσα και τα επίπεδα. Άρα θα σαρωθεί το αντικείμενο σε παραπάνω από τρία επίπεδα. Η ανάλυση που περιγράφηκε παραπάνω θα γίνει σε μια μικρή(όσο πιο μικρή τόσο καλύτερα) περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών.

Στην προκειμένη περίπτωση το σέτ των τεσσάρων καμερών μετακινήθηκε στον άξονα των Y , έξι φορές. Άρα τα επίπεδα εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι 6. Έπειτα απομονώθηκε το σήμα που λήφθηκε από τις κάμερες σε μια περιοχή (κοινή για όλες τις κάμερες) κοντά στο οπτικό κέντρο. Για την ακρίβεια ενώ οι εικόνες που ελήφθησαν ήταν πίνακες των 768 x 1024 pixel, με την συνάρτηση `imcrop` λήφθηκε ένα μικρό κομμάτι των 79 Pixel στον κάθετο άξονα του συστήματος αξόνων της κάθε κάμερας.

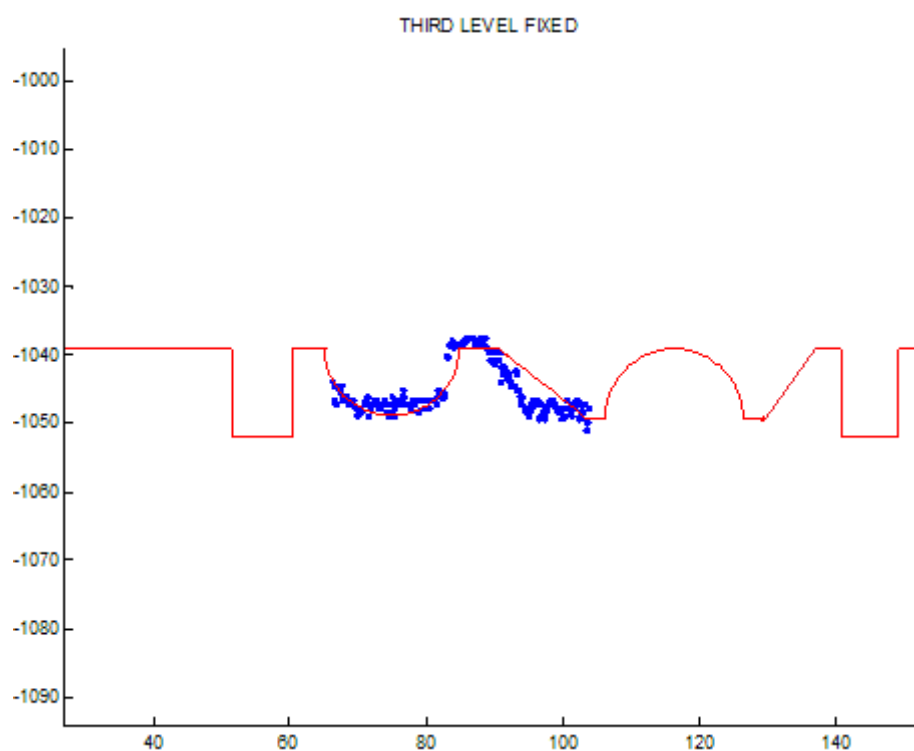
Η επεξεργασία και η εφαρμογή του αλγορίθμου που περιγράφηκε παραπάνω, έγινε σε αυτό το μικρό κομμάτι. Τα αποτελέσματα ανά επίπεδο, και στα έξι επίπεδα, φαίνονται παρακάτω.



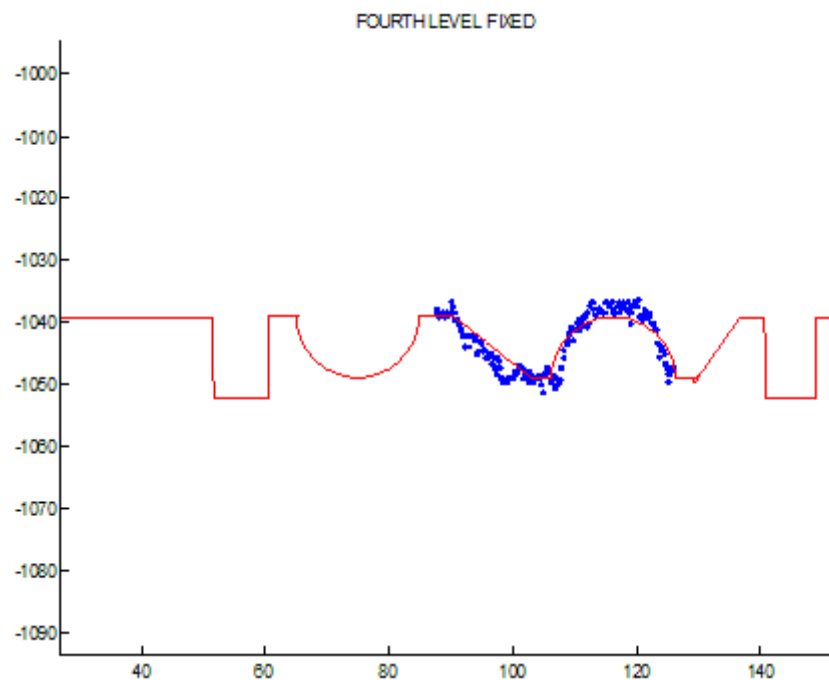
**Εικόνα 3.27:** Πρώτο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας



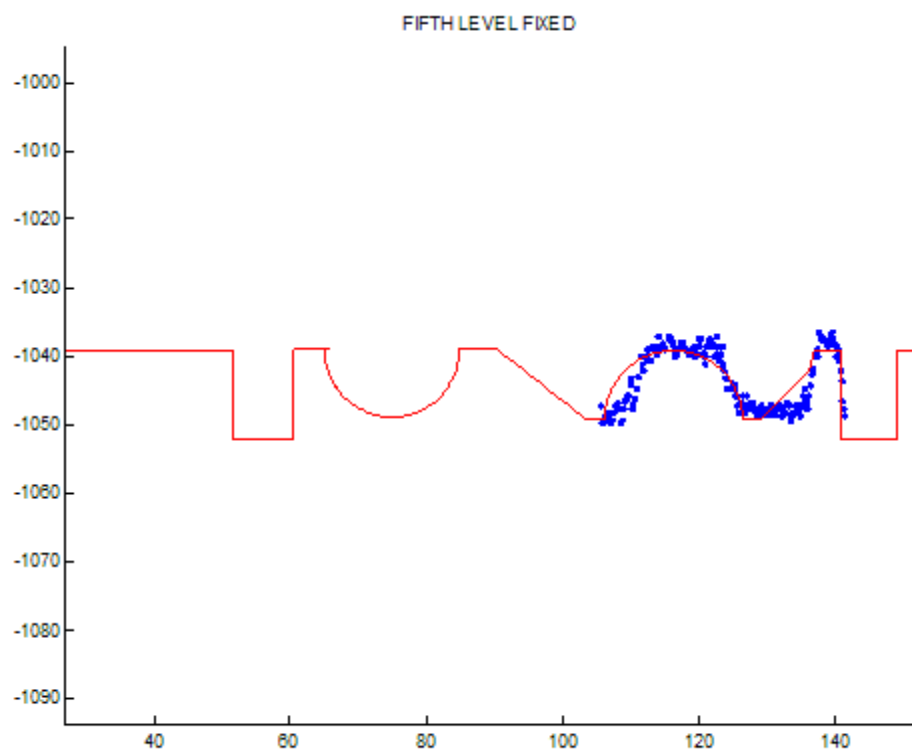
**Εικόνα 3.28: Δεύτερο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας**



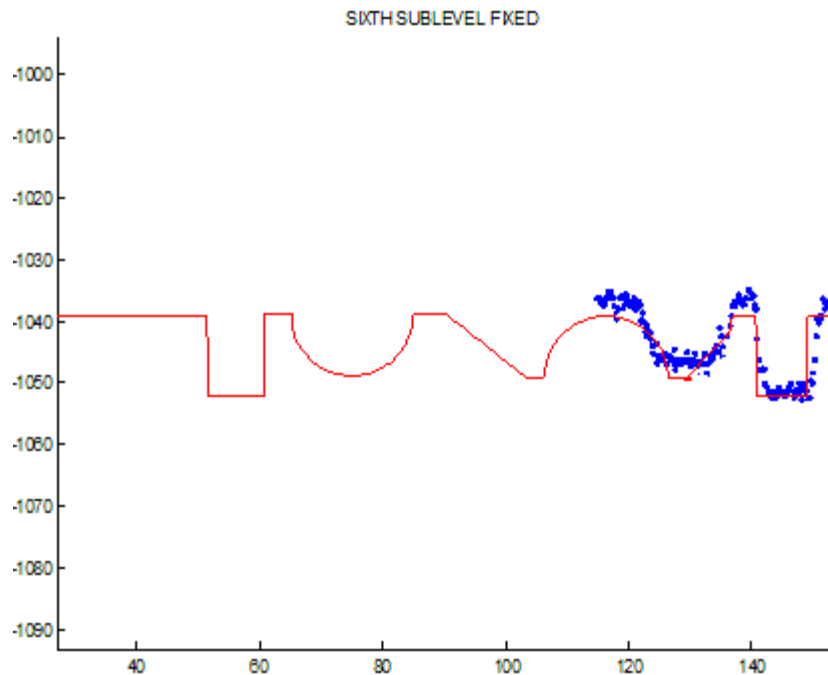
**Εικόνα 3.29: Τρίτο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας**



**Εικόνα 3.30: Τέταρτο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας**



**Εικόνα 3.31: Πέμπτο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας**



**Εικόνα 3.32: Έκτο επίπεδο με αποτέλεσμα κοντά σε μια περιοχή κοντά στο κέντρο του οπτικού πεδίου της κάμερας**

Αφού έγινε η παραπάνω επεξεργασία, παρουσιάζεται ο πίνακας για κάθε κεντραρισμένο πια επίπεδο:

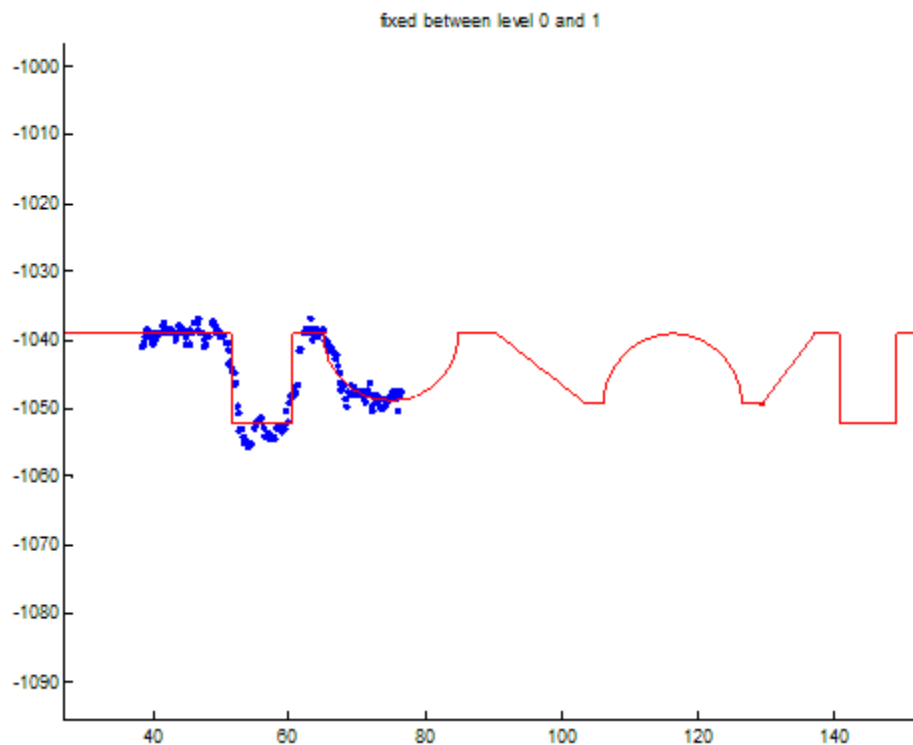
Επίπεδο	Σφάλμα σε μια περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών
πρώτο	0.9219mm
δεύτερο	1.2994mm
τρίτο	1.1967mm
τέταρτο	1.6499mm
πέμπτο	1.6379mm
έκτο	1.1760mm
Μέσος όρος σφάλματος επιπέδων	1.3136 mm

**Πίνακας 3.8: Τα σφάλματα της μεθοδολογίας με έξι κεντραρισμένα επίπεδα**

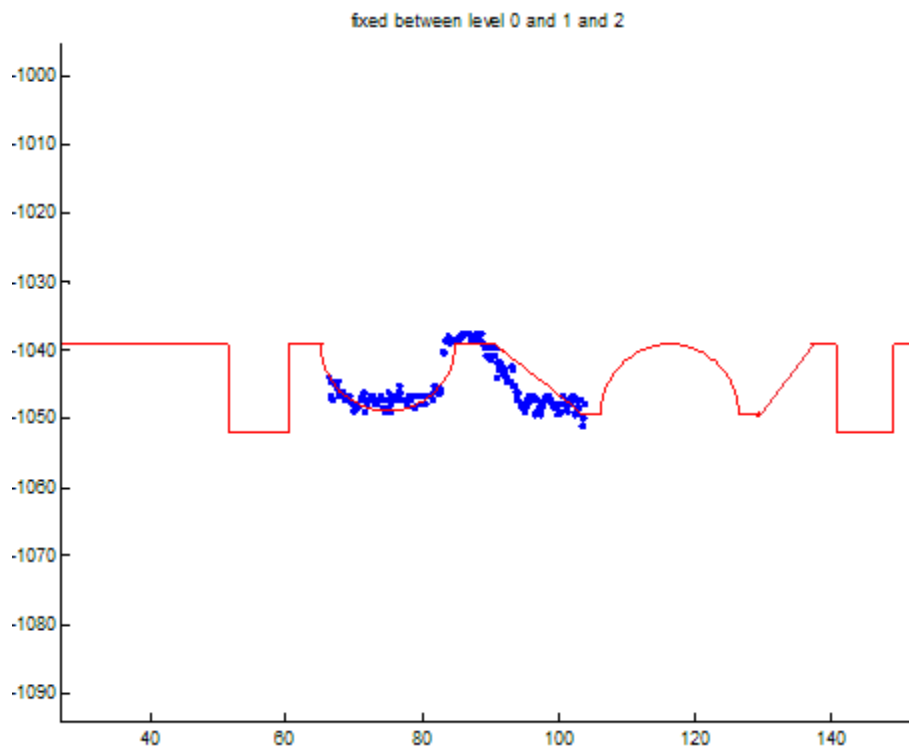
Αφού έγινε η παραπάνω εκτέλεση των πειραμάτων ακολούθησε η σύνθεση των αποτελεσμάτων ανά επίπεδο. Η σύνθεση έγινε με τον εξής τρόπο:

Στα δύο πρώτα επίπεδα και στο κομμάτι όπου υπάρχει επικάλυψη στον άξονα του ύψους(Υ) υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές. Τα μέρη χωρίς επικάλυψη έμειναν ως έχουν. Έτσι έγινε συνένωση των πινάκων των αποτελεσμάτων του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου σε έναν πίνακα Α. Με τον ίδιο τρόπο έγινε και με το τρίτο επίπεδο μόνο που η αποσφαλμάτωση και συνένωση έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων του τρίτου επιπέδου και του πίνακα Α. Έτσι σταδιακά, έγινε η

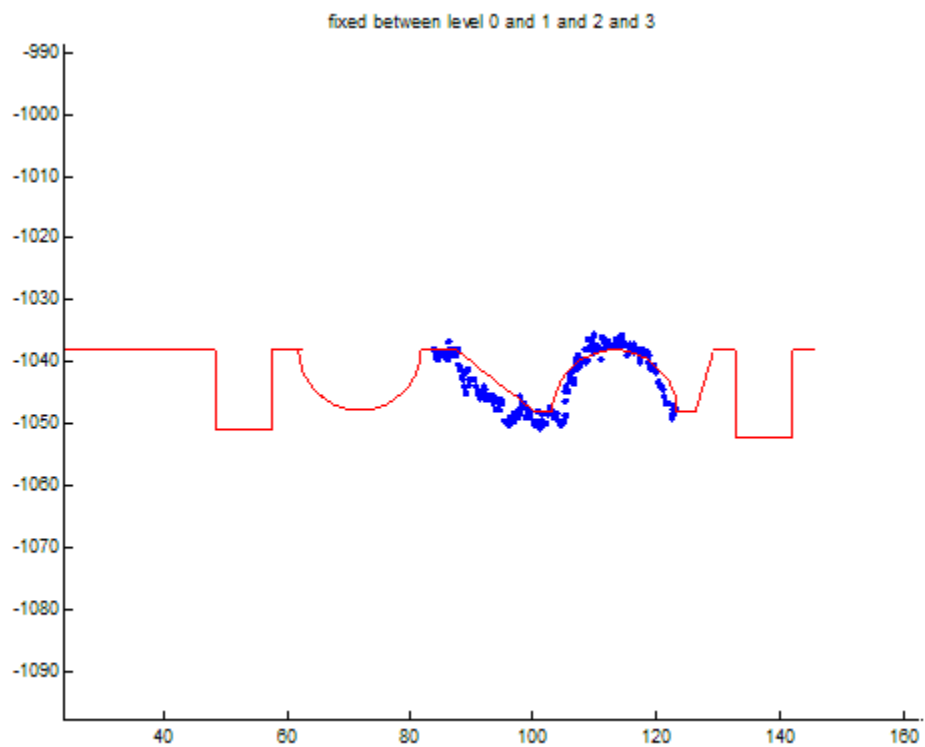
σύνθεση των αποτελεσμάτων όλων των επιπέδων. Αυτή η σταδιακή συνένωση φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



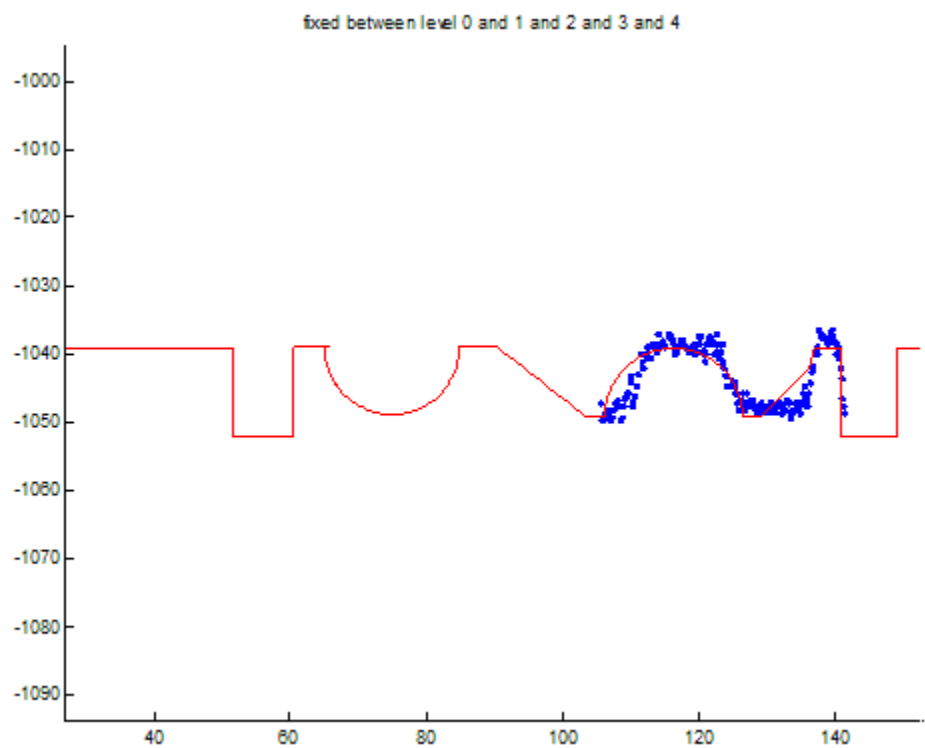
**Εικόνα3.33: Συνένωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του επιπέδου 1,2**



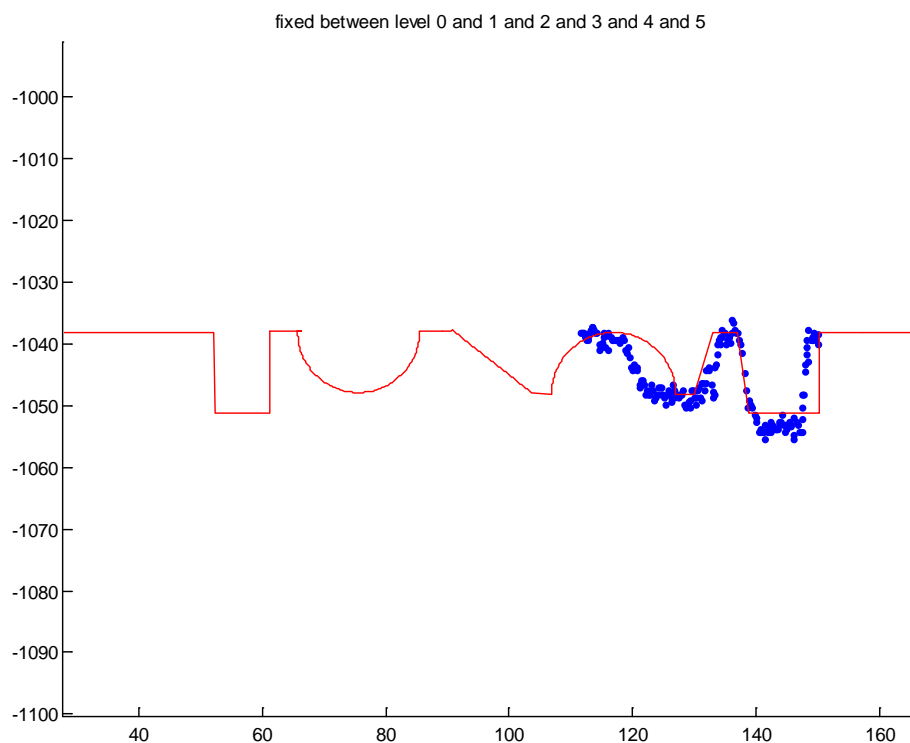
**Εικόνα 3.34: Συνένωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του επιπέδου 1,2,3**



**Εικόνα 3.35: Συνένωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του επιπέδου 1,2,3,4**



**Εικόνα 3.36: Συνένωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του επιπέδου 1,2,3,4,5**



**Εικόνα 3.37: Συνένωση των αποτελεσμάτων μεταξύ του επιπέδου 1,2,3,4,5,6**

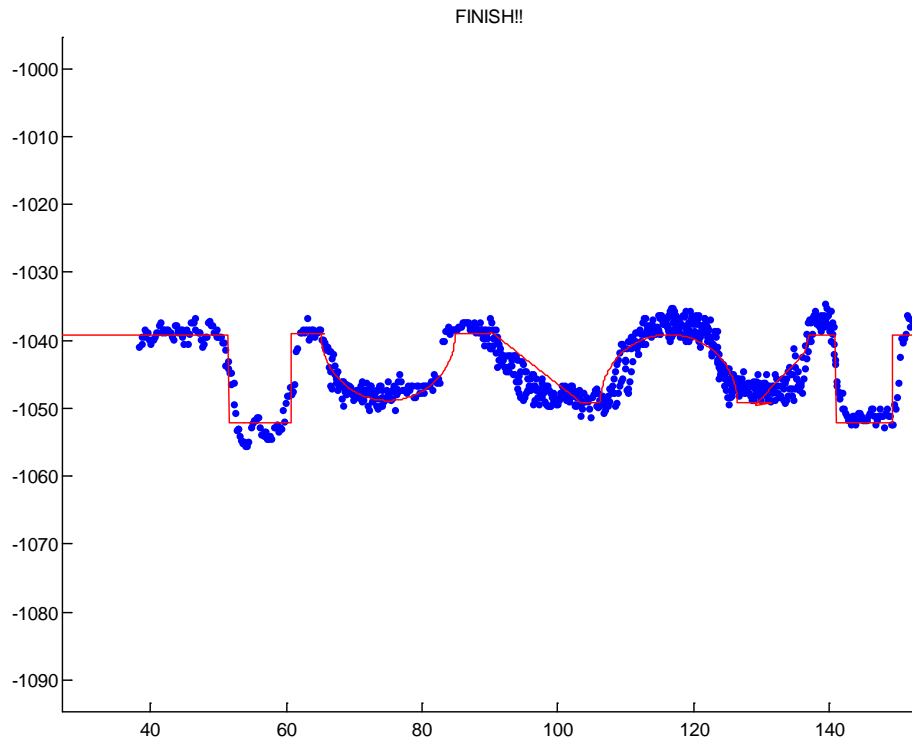
Τα αποτελέσματα των διαδοχικά ανακατασκευασμένων επιπέδων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ανακατασκευή των επιπέδων:	Σφάλμα σε μια περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών(mm)
Πρώτο-δεύτερο	0.9257
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο	1.1087
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο	1.1424
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο-πέμπτο	1.1697
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο-πέμπτο-έκτο	1.1760
Μέσος όρος σφαλμάτων ανακατασκευασμένων επιπέδων	1.1045

**Πίνακας 3.9: Σφάλματα των σταδιακά ανακατασκευασμένων κεντραρισμένων επιπέδων και μέσο σφάλμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας**



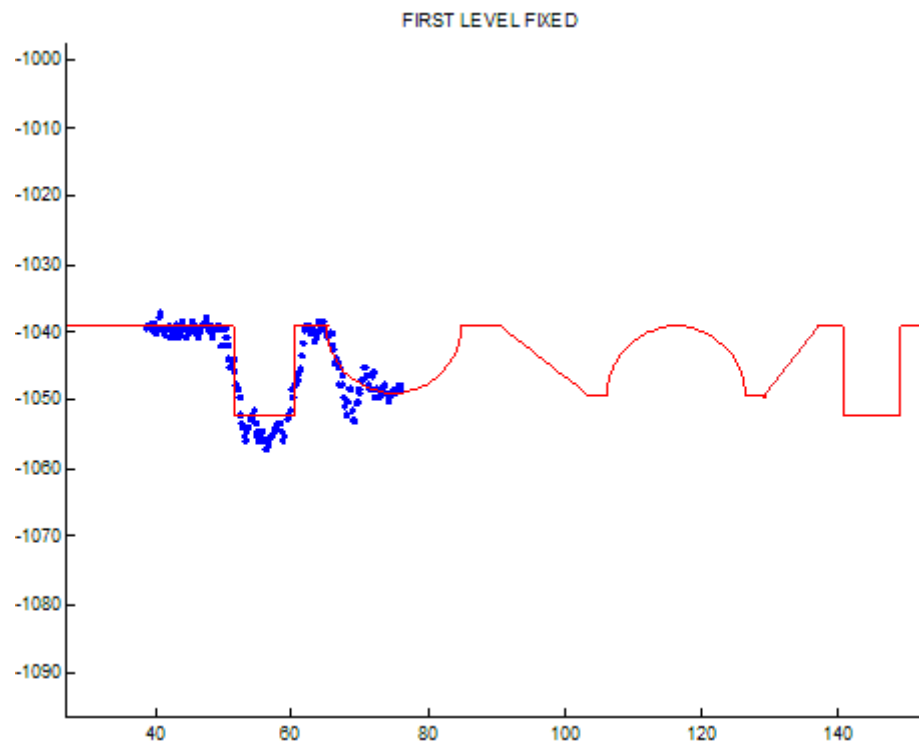
Από αυτή τη διαδικασία πάρθηκαν 5 πίνακες αποτελεσμάτων (έναν από κάθε συνένωση ) οι οποίοι αφού συνενώθηκαν σε έναν έδωσαν το παρακάτω αποτέλεσμα το οποίο είναι και το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας:



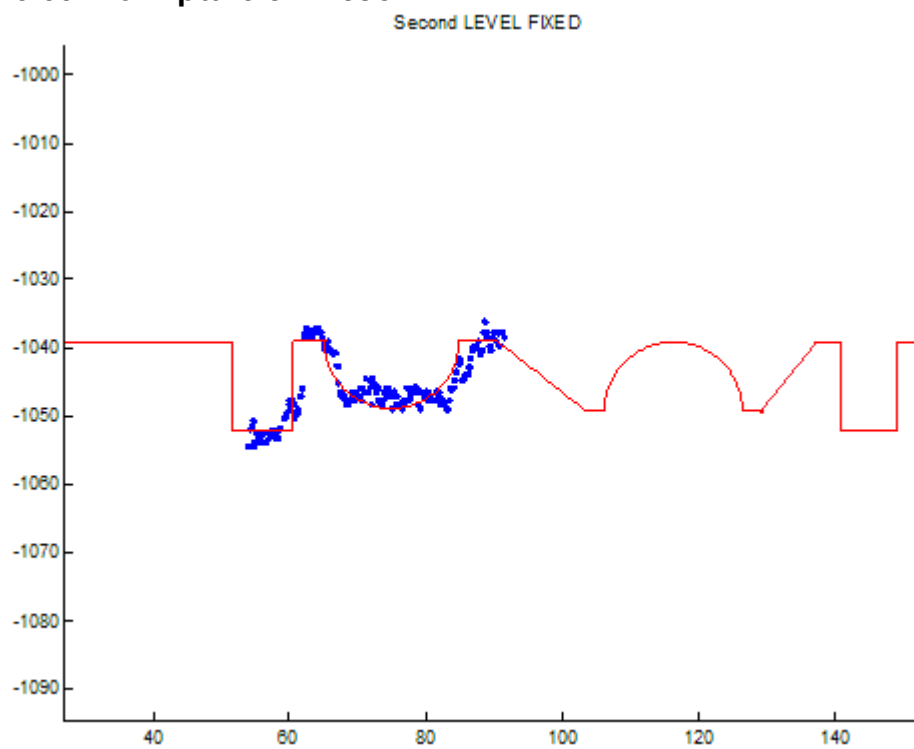
**Εικόνα 3.38: Τελικό αποτέλεσμα Σφάλμα = 1.1059mm**

### **Επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας με set καμερών με μικρότερες αποστάσεις**

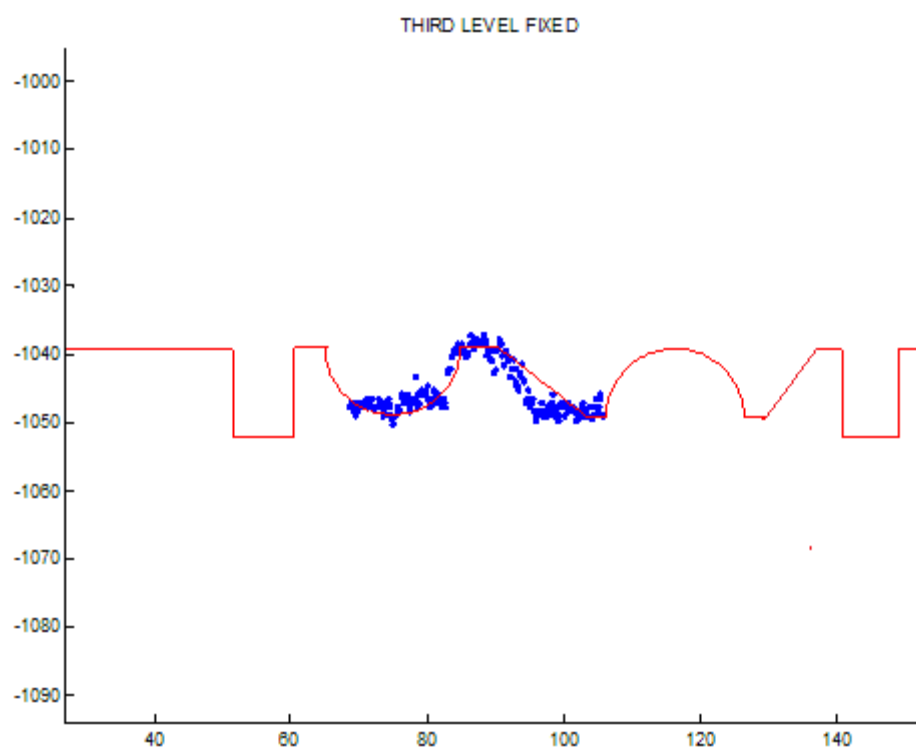
Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται η ίδια προσέγγιση με μικρότερες αποστάσεις καμερών είναι ότι στα σημεία του δοκιμίου και οποιουδήποτε αντικειμένου όπου εμφανίζεται μεγάλο βάθος, οι κάμερες με μεγάλες αποστάσεις θα αδυνατούν να εντοπίσουν την γραμμή λέιζερ εντός του βάθους. Έτσι μικραίνοντας τις αποστάσεις των καμερών, τοποθετείται το οπτικό κέντρο της κάμερας μπροστά από το σημείο όπου υπάρχει βάθος, έχοντας ο αισθητήρας την δυνατότητα να εντοπίσει καλύτερα το σύνολο της επιφάνειας των εν λόγω σημείων. Έτσι για αυτά τα σημεία(σημεία με μεγάλο βάθος) μπορεί να γίνει καλύτερη τρισδιάστατη αναπαράσταση με τις κάμερες σε μικρή απόσταση απότι σε μεγάλη. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι στα υπόλοιπα σημεία θα υπάρχουν σφάλματα αρκετά μεγάλα πολλές φορές. Παρατίθενται τα αποτελέσματα για αποστάσεις  $L_0 = 156\text{mm}$  και  $L_1 = 163\text{mm}$



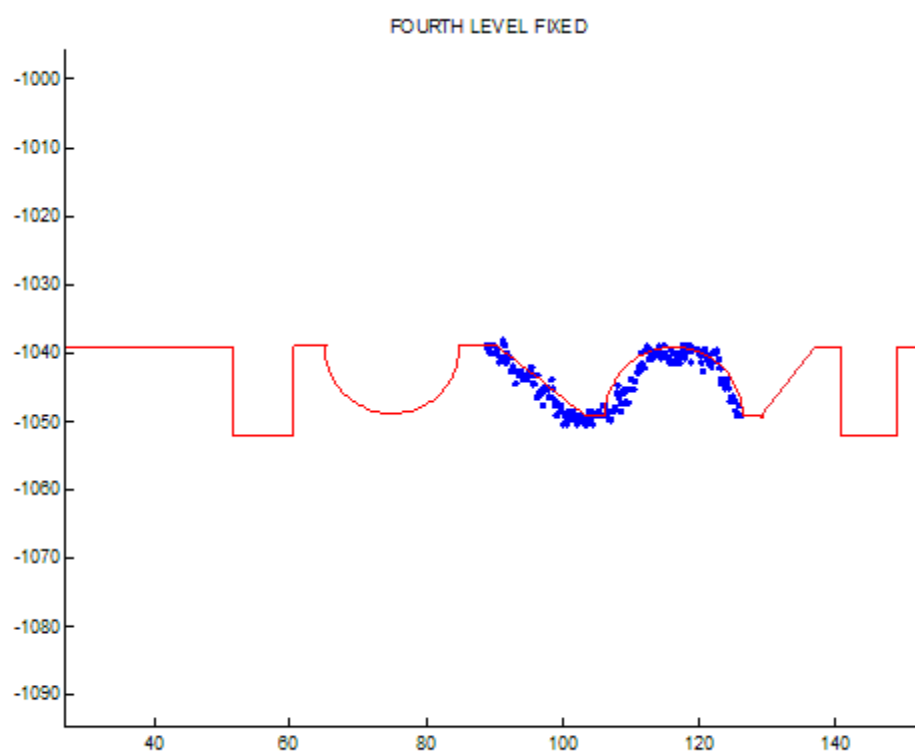
**Εικόνα 3.39: Το πρώτο επίπεδο**



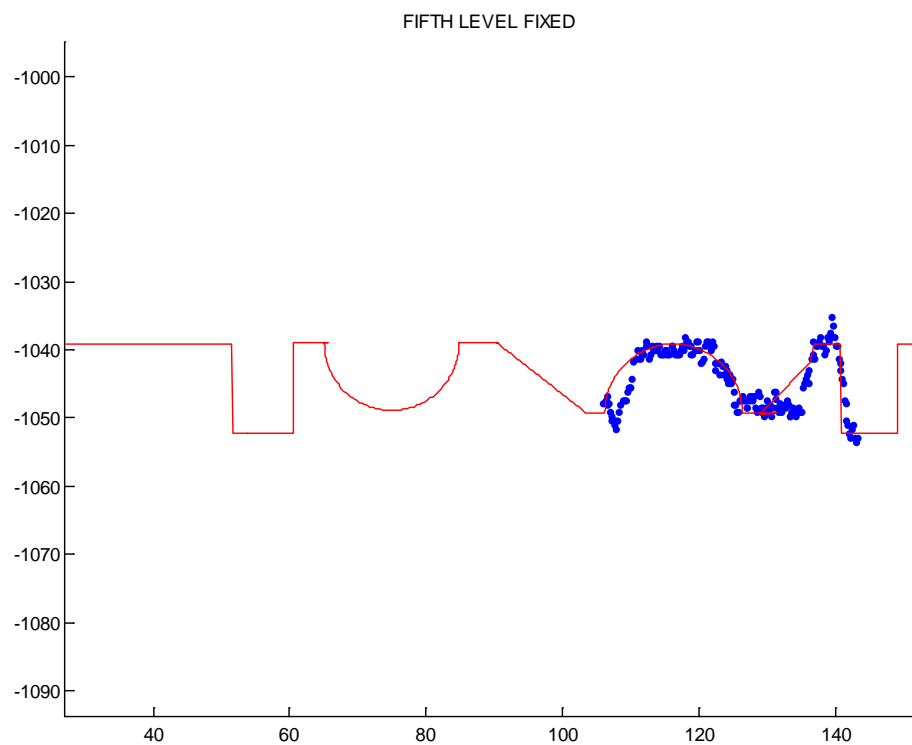
**Εικόνα 3.40: Το δεύτερο επίπεδο**



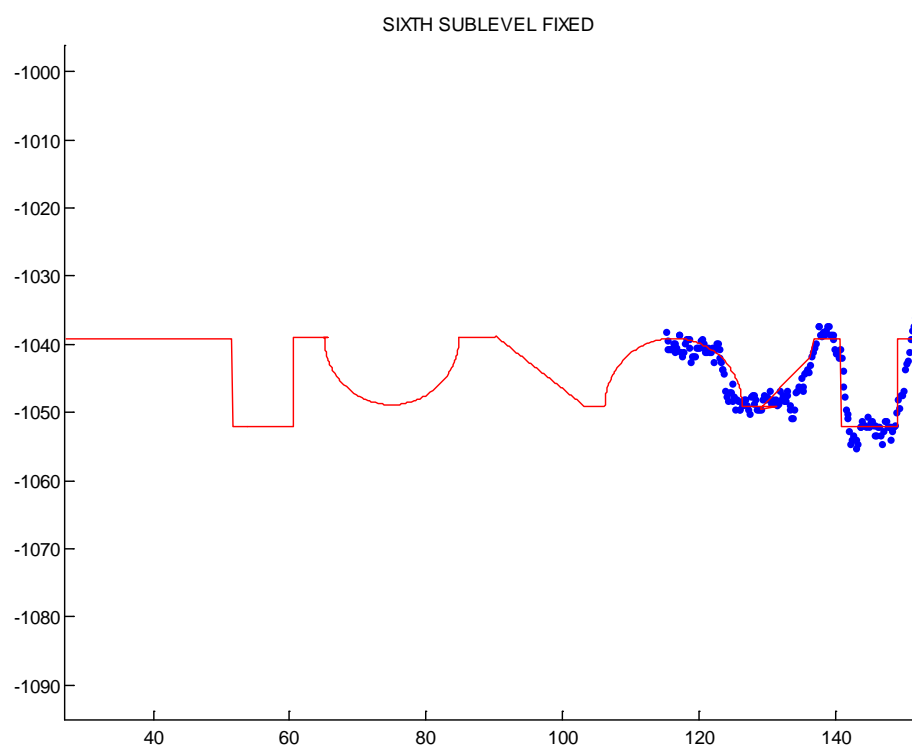
**Εικόνα 3.41: Το τρίτο επίπεδο**



**Εικόνα 3.42: Το τέταρτο επίπεδο**



**Εικόνα 3.43: Το πέμπτο επίπεδο**



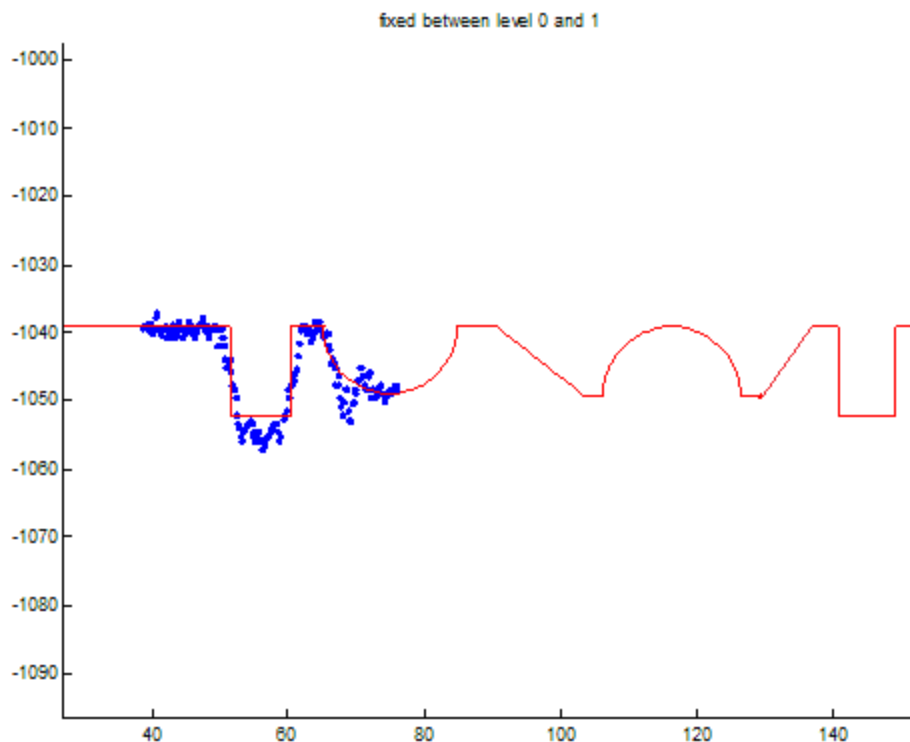
**Εικόνα 3.44: Το έκτο επίπεδο**

Παρατίθεται και ο πίνακας με τα αποτελέσματα ανα επίπεδο:

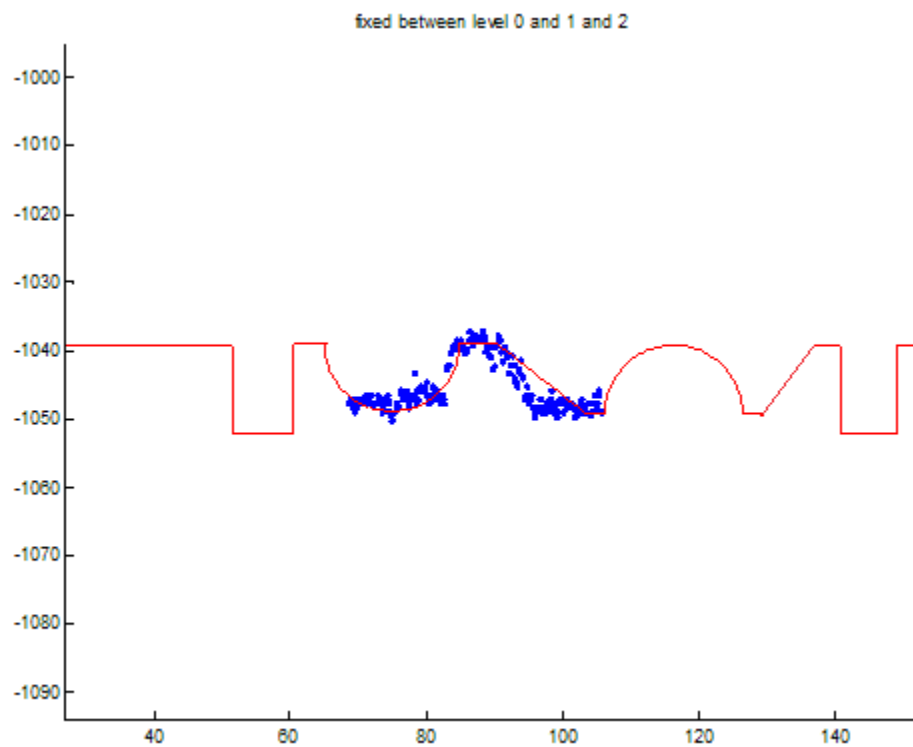
Επίπεδο	Σφάλμα
Πρώτο	1.1766mm
Δεύτερο	1.7549mm
Τρίτο	1.1426mm
Τέταρτο	2.0248mm
Πέμπτο	2.1715
Έκτο	1.0069mm
Μέσο Σφάλμα	1.1462

**Πίνακας 3.10: : Σφάλματα των κεντραρισμένων επιπέδων και μέσο σφάλμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τις κάμερες των οπτικών συστημάτων τοποθετημένες σε μικρότερη απόσταση**

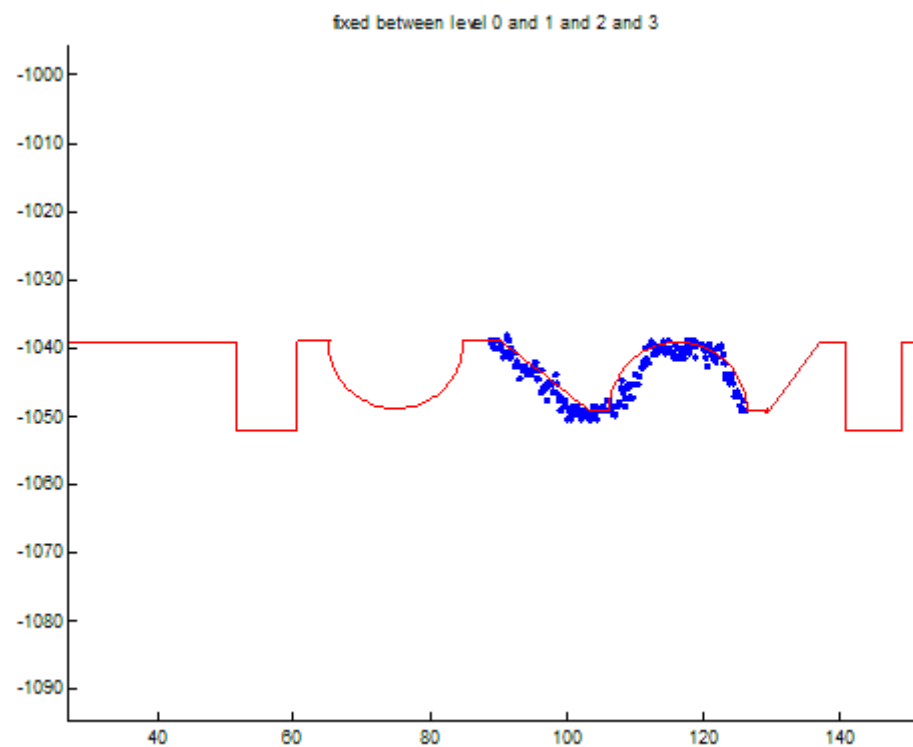
Παρατίθενται τα αποτελέσματα των ανακατασκευασμένων επιπέδων και ο αντίστοιχος πίνακας



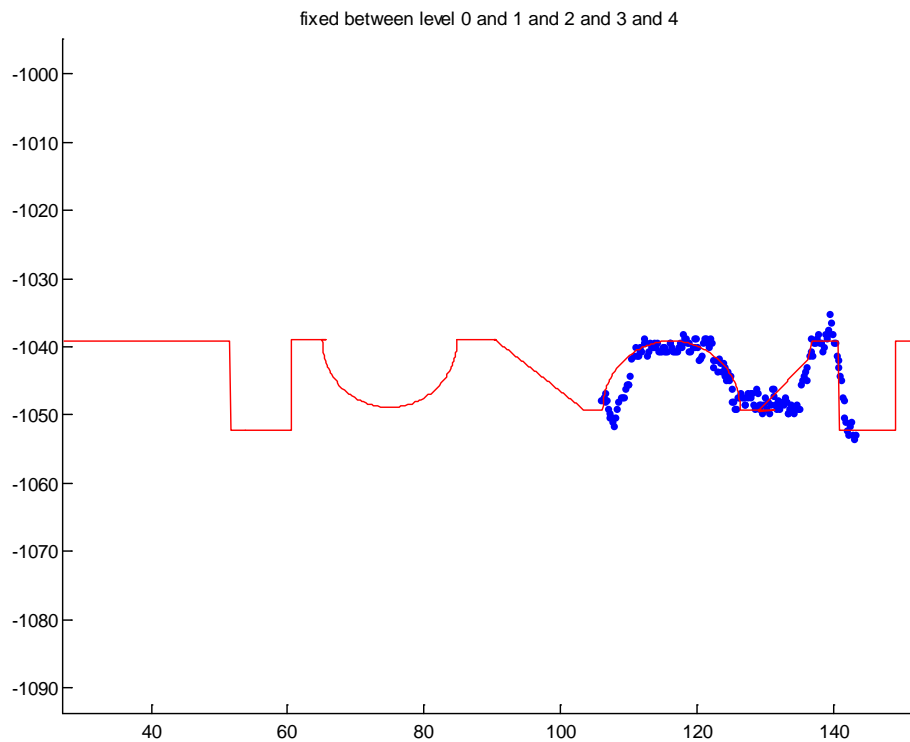
**Εικόνα 3.44: Ανακατασκευασμένο επίπεδο 1-2 με σφάλμα = 1.1923mm**



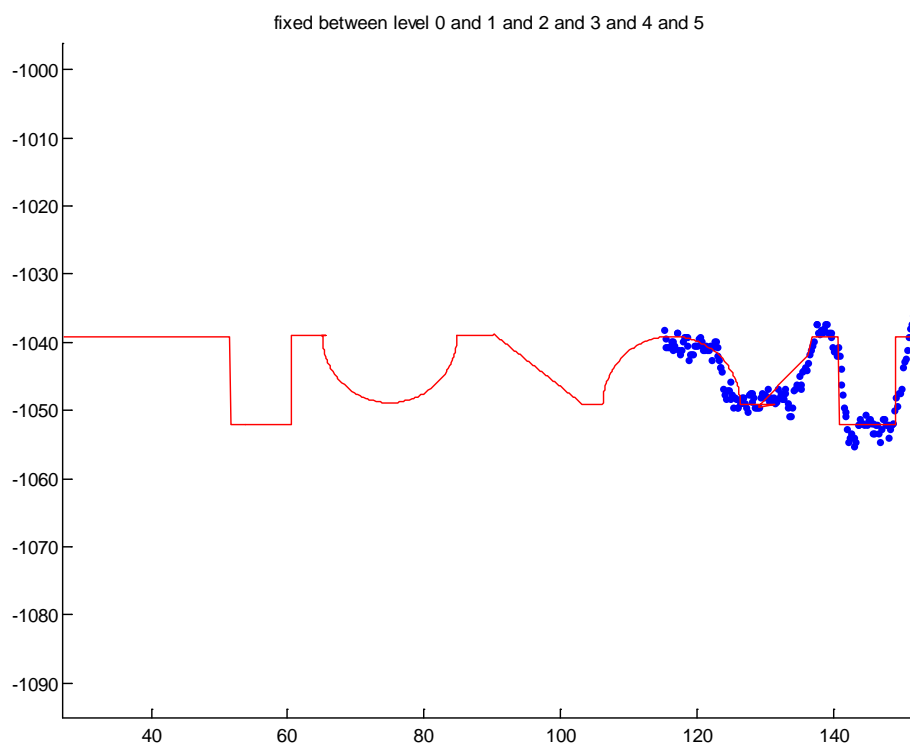
**Εικόνα 3.45: Ανακατασκευασμένο επίπεδο 1-2-3 με σφάλμα = 1.3321mm**



**Εικόνα 3.46: Ανακατασκευασμένο επίπεδο 1-2-3-4 με σφάλμα = 1.0325mm**



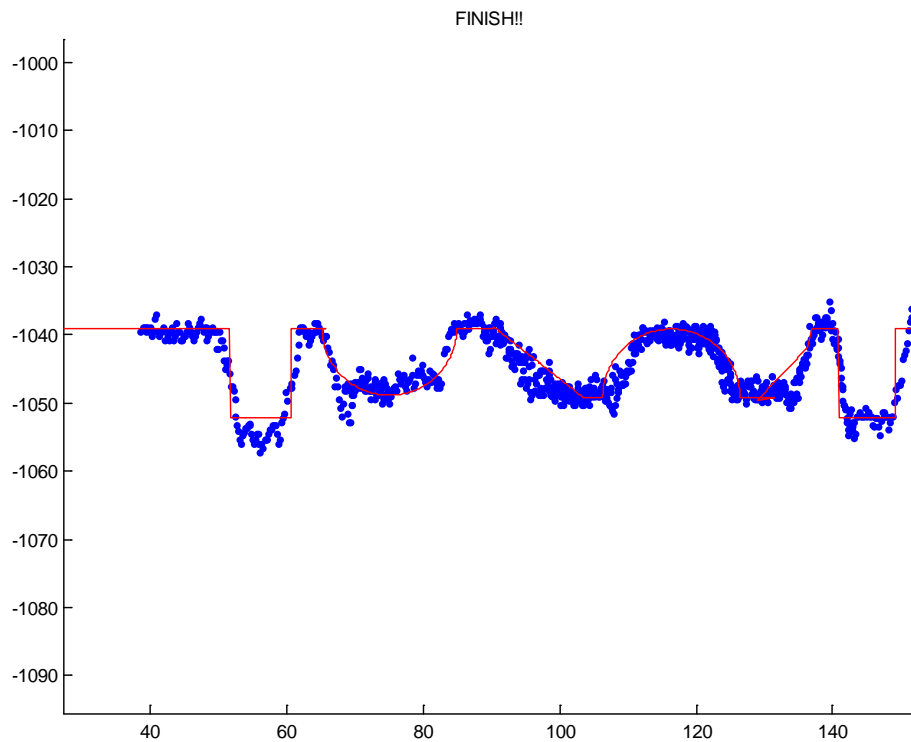
**Εικόνα 3.47: Ανακατασκευασμένο επίπεδο 1-2-3-4-5 με σφάλμα = 1.0050mm**



**Εικόνα 3.48: Ανακατασκευασμένο επίπεδο 1-2-3-4-5-5**

Διαδοχικά Ανακατασκευασμένα επίπεδα	Σφάλματα
1-2	1.1923
1-2-3	1.3321
1-2-3-4	1.0325
1-2-3-4-5	1.0050
1-2-3-4-5-6	1.0069
Μέσο ανακατασκευασμένων σφάλμα	1.17536

**Πίνακας 3.11:** : Σφάλματα των σταδιακά ανακατασκευασμένων κεντραρισμένων επιπέδων και μέσο σφάλμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας με τις κάμερες των οπτικών συστημάτων τοποθετημένες σε μικρότερη απόσταση.



**Εικόνα 3.49:** Τελικό ανακατασκευασμένο Σφάλμα = 1.1168mm



Στον παρακάτω πίνακα, φαίνεται η συνένωση των πινάκων 3.9 και 3.11

<b>Διαδοχικά Ανακατασκευασμένα επίπεδα:</b>	<b>Σφάλμα σε μια περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών(mm)</b>
Πρώτο-δεύτερο	0.9257
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο	1.1087
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο	1.1424
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο-πέμπτο	1.1697
Πρώτο-δεύτερο-τρίτο-τέταρτο-πέμπτο-έκτο	1.1760
Μέσος όρος σφαλμάτων ανακατασκευασμένων επιπέδων	1.1045
<b>Διαδοχικά Ανακατασκευασμένα επίπεδα μικρότερων αποστάσεων:</b>	<b>Σφάλμα σε μια περιοχή γύρω από το οπτικό κέντρο των καμερών(mm)</b>
1-2	1.1923
1-2-3	1.3321
1-2-3-4	1.0325
1-2-3-4-5	1.0050
1-2-3-4-5-6	1.0069
Μέσο σφάλμα ανακατασκευασμένων	1.17536

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία φαίνεται να δουλεύει καλύτερα με τις κάμερες σε μεγάλες αποστάσεις όπως είναι αναμενόμενο, αλλά στην ανακατασκευή του τελευταίου επιπέδου (εικόνα 3.48) φαίνεται να λειτουργεί καλύτερα η μεθοδολογία με τις κάμερες σε μικρές αποστάσεις. Ο λόγος είναι ότι όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.1.3 (σελ. 27) της παρούσας εργασίας, πολλές φορές κάποια σημεία που σαρώνονται από τον προβολέα γραμμής laser, δεν φαίνονται από τις κάμερες όταν αυτές βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν αυτά τα σημεία βρίσκονται σε μεγάλο βάθος και ιδιαίτερα όταν αυτά είναι εντός μιας μικρής περιοχής κοντά σε γωνίες του δοκιμίου, όπως συμβαίνει στο τελευταίο (έκτο) επίπεδο. Αυτά τα σημεία είναι δυνατό να εντοπιστούν από τις κάμερες όταν αυτές είναι τοποθετημένες σε μικρότερες αποστάσεις, φέρνοντας το οπτικό κέντρο τους πιο κοντά στα προς εντοπισμό σημεία, στον άξονα x.

#### 4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Συνοψίζοντας, η εργασία υλοποίησε έναν τρισδιάστατο σαρωτή, χρησιμοποιώντας οπτικά συστήματα των δύο καμερών. Η μεθοδολογία που υλοποιήθηκε, αφήνει μια σχετική ελευθερία στον χρήστη να χρησιμοποιεί όσα οπτικά συστήματα θέλει. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει όσα επίπεδα επιθυμεί ο ίδιος ο χρήστης, προκειμένου να επιτύχει την, όσο το πιο δυνατό, πιο πιστή τρισδιάστατη αναπαράσταση γίνεται.

Ένα επιπρόσθετο στοιχείο που έχει η προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι η ευκολία που παρέχει στον χρήστη όταν ο ίδιος επιθυμεί να την χρησιμοποιήσει προκειμένου να ανακαλύψει την τρισδιάστατη δομή ενός σαρωμένου από το λέιζερ αντικειμένου. Πολλές από τις μέχρι στιγμής μεθοδολογίες, κατά τη διαδικασία της δυαδικοποίησης της εικόνας και της μετέπειτα επεξεργασίας της, χρησιμοποιούν διαφόρων ειδών κατωφλιώσεις (thresholds), τις οποίες είναι υποχρεωμένος ο ίδιος ο χρήστης να θέτει σαν παραμέτρους στις συναρτήσεις που χρησιμοποιεί. Αυτές οι παράμετροι βέβαια, απαιτούν κάποιες στοιχειώδεις γνώσεις πάνω στο αντικείμενο της επεξεργασίας εικόνας.

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιεί η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η **onlinedetection(image1,image2)** η οποία επιστρέφει τους δύο πίνακες που αναπαριστούν μια εκτίμηση των γραμμών λέιζερ από τις δύο εικόνες που είχαν σαν έξοδο οι αισθητήρες. Η **one\_pixel\_laser\_line\_estimation(πίνακας)**, η οποία παίρνει σαν όρισμα τον έναν από τους δύο πίνακες που επιστρέφει η **onlinedetection()** και επιστρέφει την γραμμή σημείων χρησιμοποιώντας την μέθοδο του κέντρου της βαρύτητας. Αυτή η γραμμή σημείων είναι η χρήσιμη πληροφορία της μιας εικόνας. Αφού αντληθεί η χρήσιμη πληροφορία και από τις δύο εικόνες, υλοποιήθηκε η συνάρτηση για το ταίριασμα των σημείων των δύο εικόνων, το οποίο ταίριασμα γίνεται pixel ανά pixel. Η τελευταία συνάρτηση είναι η **matching\_pixelbypixel(pinakas1, pinakas2, nums of pixels of line1, nums of pixels of line1)**. Τα ορίσματα που παίρνει η συνάρτηση αυτή είναι ο πίνακας της μιας γραμμής χρήσιμης πληροφορίας, ο πίνακας της δεύτερης γραμμής χρήσιμης πληροφορίας, και ο αριθμός των σημείων ανά γραμμή. Το αποτέλεσμα της παραπάνω συνάρτησης είναι οι δύο γραμμές αναπαράστασης της χρήσιμης πληροφορίας, ενωμένες σημείο ανά σημείο. Αυτή η αντιστοίχιση δείχνει ποια σημεία της μιας εικόνας αντιστοιχούν με τα σημεία της δεύτερης εικόνας. Αυτά τα «ζευγάρια» σημείων που επιστρέφονται από την **matching\_pixelbypixel(...)**, αξιοποιούνται σαν ορίσματα για την επόμενη και τελευταία συνάρτηση που υλοποιήθηκε που ήταν η **threeDreconstruction(f,L,a,b,matchedpoints1,matchedpoints2,X1,X2,Y1,Y2)**. Η τελευταία συνάρτηση χρησιμοποιεί σαν ορίσματα με την σειρά που εμφανίζονται:

το εστιακό μήκος των καμερών, την απόσταση ενός σετ καμερών, τα ζεύγη των σημείων των χρήσιμων πληροφοριών των λείζερ (**matchedpoints1,matchedpoints2**) και τα σημεία όπου κόβεται η εικόνα μέσω της συνάρτησης `imcrop(...)`. Αυτές οι τέσσερις συναρτήσεις επιτυγχάνουν τη τρισδιάστατη ανακατασκευή των σημείων από ένα σετ δύο καμερών. Από κει και πέρα σε κάθε επίπεδο οι συναρτήσεις αυτές εφαρμόζονται δύο φορές για κάθε σετ εικόνων, και ο χρήστης μπορεί να τα εφαρμόσει όσα επίπεδα επιθυμεί προκειμένου να επιτύχει την ανακατασκευή ολόκληρου του δοκιμίου.

Οι συναρτήσεις αυτές όπως φάνηκε και από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρουσιάζουν κάποια σφάλματα τα οποία φαίνεται να οφείλονται σε μια σειρά παραγόντες που συμβάλλουν στην παρουσίαση μιας σειράς λαθών.

Ένας παράγοντας εξ' αιτίας του οποίου φαίνεται να υπάρχουν σφάλματα, είναι η μεγάλη ένταση Laser που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Η μεγάλη διάχυση του laser οδηγεί μοιραία σε κάποια σφάλματα όσον αφορά την εύρεση της χρήσιμης πληροφορίας του λείζερ.

Κάτι άλλο που συνέβαλλε αρνητικά στην εξαγωγή των σωστών αποτελεσμάτων ήταν οι συνθήκες φωτισμού. Επειδή η εφαρμογή του οπτικού συστήματος, θα γίνει σε εργαστήριο, και κάτω από συνθήκες φυσιολογικού φωτισμού, η υλοποίηση του οπτικού συστήματος έγινε κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Έπειτα μεγάλη σημασία στην εφαρμογή της μεθοδολογίας χωρίς λάθη παίζει η ευστάθεια του συστήματος. Η ευστάθεια του συστήματος παίζει ρόλο λόγω του ότι, οι κάμερες είναι υψηλής ανάλυσης, και τη παραμικρή μεταβολή της κάμερας, όπως και το παραμικρό ελάττωμα στην επιφάνεια όπου πατάει η κάμερα, αν και μπορεί να μην είναι ορατά με το μάτι, η κάμερα τα αντιλαμβάνεται και αυτό παίζει ρόλο στην εμφάνιση των σφαλμάτων στα αποτελέσματα.

Επίσης σημαντικό ρόλο έπαιξαν η αδυναμία να μετρηθούν με μεγάλη ακρίβεια οι αποστάσεις των καμερών καθώς και η αδυναμία να επιτευχθεί καθετότητα μεταξύ του οπτικού συστήματος(κάμερα1 – κάμερα2 – προβολεάς λείζερ), και του δοκιμίου που σαρώνεται.

Πολλά από τα παραπάνω προβλήματα είναι δυνατόν να λυθούν με την εφαρμογή της μεθοδολογίας στο εργαστήριο, όπου είναι ζητούμενο να επιτευχθεί μεγάλη ευστάθεια του οπτικού συστήματος, καθώς και να γίνουν ακριβείς μετρήσεις των αποστάσεων των καμερών. Αυτά πιθανόν να λύσουν πολλά από τα προβλήματα που υπήρξαν στο εργαστήριο όπου έγινε η υλοποίηση και να βελτιώσουν τα αποτελέσματα σε επίπεδο σφάλματος.

Η έρευνα πάνω στην τρισδιάστατη απεικόνιση σημείων από στερεοσκοπικές φωτογραφίες προφανώς δεν σταματάει εδώ. Σε επίπεδο έρευνας, κρίνεται σκόπιμο

να γίνει μια εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, αλλά με τη μόνη διαφορά ότι οι κάμερες θα βλέπουν υπό γωνία. Αυτό θα μπορούσε βεβαίως να δώσει πιο μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των καμερών, και επομένως να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρόλα αυτά κρίνεται σκόπιμο, να υπάρξει μια συγκριτική μελέτη μεταξύ των μεθοδολογιών για ακόμα πιο καλά αποτελέσματα.

Θα μπορούσε να γίνει μια έρευνα σχετικά με αλγορίθμους που εντοπίζουν ακόμα καλύτερα την γραμμή λείζερ, και την χρήσιμη πληροφορία από αυτή. Ίσως ένας αλγόριθμος που εντοπίζει καλύτερα την χρήσιμη πληροφορία του λείζερ να αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] *Computer and Machine Vision --- Theory, Algorithms, Practicalities*, E. R. Davies, 2012
- [2] COMPUTER VISION APPLICATION IN INDUSTRIES Wg Cdr N. Padhakrishnan
- [3] Τρισδιάστατη ανακατασκευή αντικειμένων από φωτογραφίες (με χρήση MATLAB) ΦΑΚΑ ΣΟΦΙΑ , Πάτρα 2010 (σελ.1-2,3,4)
- [4] 3D Reconstruction and Camera Calibration from 2D Images by Arne Henrichsen UNIVERSITY OF CAPE TOWN December 2000
- [5] Bundled Depth-Map Merging for Multi-View Stereo Jianguo Li, Eric Li, Yurong Chen, Lin Xu --Intel Labs China
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_reconstruction\\_from\\_multiple\\_images](http://en.wikipedia.org/wiki/3D_reconstruction_from_multiple_images)
- [7] AUTOMATIC 3D MODELING FROM IMAGE SEQUENCES by Marc Pollefeys, Maarten Vergauwen and Luc Van Gool, Amsterdam 2000
- [8] Οπτικός προσανατολισμός ρομποτικού οχήματος, Κώττα Δημητρίου του Γεωργίου, ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2010
- [9] <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/gigabit-ethernet/prosilica-gc/gc1020.html>
- [10] <http://www.onlinediystore.co.uk/dewalt-dw087k-self-levelling-line-laser-horizontal-vertical-8509-p.asp>
- [11] Visual modeling with a hand-held camera by MARC POLLEFEYS, Department of Computer Science, University of North Carolina, Chapel Hill
- [12] Build 3D Scanner System based on Binocular Stereo Vision by Zhihua Lv  
College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China , Zhiyi Zhang College of Information Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China
- [13] Gary Bradski, Adrian Kaebler, "Learning OpenCV - Computer Vision with the OpenCV Library", September 2008: First Edition.
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/Sobel\\_operator](http://en.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator)
- [15] ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ , ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ. ΑΘΗΝΑ 1014

[16] [http://en.wikipedia.org/wiki/3d\\_scanner](http://en.wikipedia.org/wiki/3d_scanner)

[17] Epipolar geometry in projective and euclidean space , Καλησπεράκης, Ηλίας Γεώργιος, 2010

[18] 3D RECONSTRUCTION slides by proff. Georgy Gimel'farb (source: <https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci773s1c/lectures/CS773S1C-3DReconstruction.pdf>)

[19] 3D SCENE RECONSTRUCTION BY STEREO IMAGING ,slides by Karthik Malasani (source: <http://www.mat.ucsb.edu/~g.legrady/academic/courses/09s594/pdf/3DSceneReconstructionbyStereoImaging.pdf>)

[20] Τρισδιάστατη Ανακατασκευή Αντικειμένων και Κτηρίων με Γεωμετρία Πολλαπλών Όψεων, Γεωργία Γκιοζάρη , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ιούλιος 2010