



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Διπλωματική Εργασία
Ανάπτυξη Συστήματος
Στερεοσκοπικής Απεικόνισης
Στην Ενδοσκόπηση

Μαυράκης Μάριος

Επιτροπή:

Καθηγητής Μπάλας Κωνσταντίνος (Επιβλέπων)
Αναπλ. Καθηγήτρια Μανιά Αικατερίνη
Δρ. Κορτσαλιουδάκης Ναθαναήλ (Μέλος ΕΔΙΠ)

Electrical and Computer Engineering School
Technical University Of Crete
Greece

Χανιά, Δεκέμβριος 2020

Περίληψη

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τη διάσταση του βάθους εξαιτίας ενός συνόλου οπτικών ερεθισμάτων, από τα οποία το πιο σημαντικό είναι η διοφθαλμική παράλλαξη. Το οπτικό σύστημα του ανθρώπου λαμβάνει δύο οπτικά σήματα από τους οφθαλμούς και ο εγκέφαλος από τη σύντηξη αυτών των σημάτων αντλεί πληροφορία για το βάθος. Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην ανάπτυξη ενός στερεοσκοπικού συστήματος απεικόνισης για την ενδοσκόπηση. Η υλοποίηση του βασίζεται στην ικανότητα του οπτικού συστήματος να δημιουργεί την διάσταση του βάθους από την προβολή μιας ελαφρώς διαφορετικής εικόνας του ίδιου αντικειμένου στο κάθε μάτι.

Η εικόνα που λαμβάνει το ενδοσκόπιο χωρίζεται σε δύο εικόνες δημιουργώντας ένα στερεοσκοπικό ζεύγος με την κατάλληλη παράλλαξη, ώστε να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερη αίσθηση του βάθους. Με την υλοποίηση του κατάλληλου λογισμικού γίνεται η ρύθμιση των παραμέτρων της κάμερας, καθώς επίσης δημιουργείται και η κατάλληλη διάταξη για να γίνει η προβολή του στερεοσκοπικού ζεύγους στην οθόνη κεφαλής σε πραγματικό χρόνο. Με την υλοποίηση αυτή αυξάνεται η ακρίβεια διάγνωσης και κίνησης στο χώρο, συγκριτικά με τα δισδιάστατα ενδοσκοπικά συστήματα.

Λέξεις-Κλειδιά

Βάθος, Διοφθαλμική όραση, Παράλλαξη, Ενδοσκόπιο, Στερεοσκοπικό σύστημα απεικόνισης, Στερεοσκοπικό ζεύγος, Οθόνη κεφαλής

Abstract

The human perception of the dimension of depth is due to a number of visual cues of which most important is binocular parallax. Human's optical system receives two visual signals from the eyes. Then the brain because of the fusion of these signals derive information about depth. This diploma thesis refers to the development of a stereoscopic system in endoscopy. Its implementation is based on our optical system ability to create the dimension of depth from the projection of a slightly different image of the same object in each eye.

Due to the need to configure both constitute the stereoscopic pair in a suitable format to be able to project on the head-mounted display, an appropriate software is being developed. Furthermore the system is real time. Finally is increased the accuracy of diagnosis and movement in space, compared to two-dimensional endoscopic systems.

Keywords

Depth, Binocular Vision, Parallax, Endoscope, Stereoscopic imaging system, Stereoscopic pair, Head-mounted display

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Κατάλογος Εικόνων	6
Κατάλογος Πινάκων	8
1 Εισαγωγή	10
2 Βασικές Αρχές Στερεοσκοπίας	12
2.1 Διόφθαλμη Όραση	12
2.2 Οι βαθμοί της διόφθαλμης όρασης	12
2.3 Ορόπτερο (Horopter)	13
2.4 Χώρος Panum	14
2.5 Αμφιβληστροειδικά σημεία	15
2.6 Οπτικά Ερεθίσματα (Visual Cues)	15
2.6.1 Διοφθαλμικά Ερεθίσματα	15
2.6.2 Μονοφθαλμικά Ερεθίσματα	17
2.7 Πρότυπο κάμερας οπής καρφίτσας (Pinhole Camera Model)	20
2.8 Επιπολική Γεωμετρία	20
3 Μέθοδοι Στερεοσκοπικής Απεικόνισης	22
3.1 Στερεοσκοπικές Μέθοδοι	22
3.1.1 Στερεοσκόπιο	22
3.1.2 Σύστημα Ενεργού Κλείστρου	23
3.1.3 Σύστημα Πολωμένων Φίλτρων	25
3.1.4 Ανάγλυφο	26
3.1.5 ColorCode 3D	26
3.1.6 Σύστημα Με Φίλτρα Παρεμβολής	27
3.1.7 Μέθοδος Πάνω-Κάτω Σ(Over/Under)	27

3.2	Στερεοσκοπικές Οθόνες	29
3.2.1	Πολύπλευροι φακοί (Lenticular Lenses)	29
3.2.2	Ολόγραμμα	30
3.2.3	Ογκομετρική Οθόνη	31
3.2.4	Οθόνη Αμφιβληστροειδούς	31
3.2.5	Ολοκληρωτική Απεικόνιση (Integral Imaging)	32
3.2.6	Φράγμα Παράλλαξης (Parallax barrier)	33
3.2.7	HR3D (High rank 3D)	34
3.2.8	Οθόνη Κεφαλής (Head-Mounted Display)	35
3.3	Τεχνικές Δημιουργίας Βάθους	38
3.3.1	Ελεύθερη Προβολή (Freeviewing)	38
3.3.2	Σύστημα Chromadepth	39
3.3.3	Μέθοδος Pulfrich	40
3.3.4	Αυτοστερεόγραμμα (Autostereogram)	41
3.3.5	Κινούμενη Στερεογραφία	41
4	Ενδοσκόπιο	42
4.1	Στερεοσκοπικά συστήματα ενδοσκοπίου	42
4.1.1	Συστήματα με δύο αισθητήρες	43
4.1.2	Συστήματα με ένα αισθητήρα	44
5	Υλοποίηση Λογισμικού	45
5.1	Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI)	45
5.1.1	Κύριο Παράθυρο	45
5.1.2	Παράθυρο Ρυθμίσεων	46
5.1.3	Παράθυρο Πληροφοριών	47
5.2	Εξαγωγή Χάρτη Παράλλαξης-Βάθους	48
5.2.1	Βαθμονόμηση Καμερών (Camera Calibration)	49
5.2.2	Διόρθωση των εικόνων (Stereo Rectification)	50
5.2.3	Στερεοσκοπική αντιστοίχιση (Stereo Matching)	50
5.2.4	Χάρτης Βάθους (Depth Map)	52
6	Πειραματικές Διατάξεις	54
6.1	Σύστημα δύο καμερών σε ράγα	54
6.1.1	Περιεχόμενα συστήματος	54
6.1.2	Περιγραφή Συστήματος	54
6.1.3	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	55
6.2	Διάταξη με κύβο διαχωρισμού δέσμης	57
6.2.1	Περιεχόμενα συστήματος	57
6.2.2	Περιγραφή Συστήματος	59
6.2.3	Αποτελέσματα και Συμπεράσματα	60

7	Σύστημα στερεοσκοπικού Ενδοσκοπίου	62
7.1	Περιεχόμενα Συστήματος	62
7.1.1	Αντάπτορας Ενδοσκοπίου	62
7.1.2	Πηγή φωτός Αλογόνου και Οπτική Ίνα	62
7.1.3	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής	63
7.1.4	Οθόνη κεφαλής	63
7.2	Περιγραφή Συστήματος	64
7.3	Αποτελέσματα-Συμπεράσματα	66
8	Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις συστήματος	68
	Βιβλιογραφία	72

Κατάλογος Εικόνων

2.1	Εύρος οπτικής γωνίας διόφθαλμης όρασης	13
2.2	Τα τρία στάδια της διόφθαλμης όρασης [1]	13
2.3	Ορόπτερο	14
2.4	Χώρος Panum	15
2.5	Σύγκλιση-Απόκλιση Οφθαλμών	16
2.6	Διοφθαλμική Παράλλαξη [2]	17
2.7	Διοφθαλμική Παράλλαξη	17
2.8	Μονοφθαλμικά Ερεθίσματα	19
2.9	Πρότυπο κάμερας οπής-καρφίτσας [3]	20
2.10	Επιπολική Γεωμετρία [4]	21
3.1	(Πηγή ιστοσελίδα: https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope/media/File:Pocket_stereoscope.jpg)	23
3.2	Στερεοσκόπιο	23
3.3	Σύστημα Ενεργού Κλείστρου	24
3.4	Σύστημα Πολύπλευρων Φακών	30
3.5	Ογκομετρική Οθόνη	31
3.6	Σύστημα Οθόνης Αμφιβληστροειδούς [5]	32
3.7	Σχεδιάγραμμα Συστήματος Ολοκληρωτικής Απεικόνισης	33
3.8	Φράγμα Παραλλαξής	34
3.9	HR3D (High rank 3D) [6]	35
3.10	Οθόνη Κεφαλής	35
3.11	Chromadepth Εικόνα	40
3.12	Μέθοδος Pulfrich [7]	41
4.1	Εύκαμπτο και άκαμπτο ενδοσκόπιο	42
4.2	Ενδοσκόπιο ρομποτικού χειρουργικού συστήματος Da Vinci [8]	43
4.3	Ενδοσκοπικό σύστημα με δύο αισθητήρες της xigen LLC [8]	44
4.4	Ενδοσκοπικό σύστημα με έναν αισθητήρα και δύο οπτικά κανάλια. [8]	44
4.5	Ενδοσκοπικό σύστημα με έναν αισθητήρα και δύο δύο ίριδες. [8]	44

5.1	Κύριο παράθυρο με τη μπάρα εργαλείων.	46
5.2	Μπάρα εργαλείων	46
5.3	Παράθυρο Ρυθμίσεων Κάμερας	47
5.4	Παράθυρο Πληροφοριών	48
5.5	Εξαγωγή Χάρτη Παράλλαξης-Βάθους	49
5.6	Stereo Camera Calibrator App	50
5.7	Στερεοσκοπική Διόρθωση [9]	51
5.8	Στερεοσκοπική Αντιστοίχιση [10]	51
5.9	Στερεοσκοπικό ζευγάρι εικόνων	52
5.10	Κλίμακα του γκρι	52
5.11	Έγχρωμη κλίμακα	53
6.1	Διάταξη δυο κάμερες με ράγα	55
6.2	Στερεοσκοπικό Ζεύγος 1	56
6.3	Στερεοσκοπικό Ζεύγος 2	57
6.4	Χάρτες για 1,2 στερεοσκοπικά ζεύγη	57
6.5	Διαχωριστής δέσμης σε μορφή κύβου	58
6.6	Φακός Μεταβίβασης	59
6.7	Διάταξη με διαχωριστή δέσμης	60
6.8	Στερεοσκοπικό ζεύγος διάταξης με διαχωριστή δέσμης	61
7.1	Πρώιμο σύστημα Ενδοσκοπίου	64
7.2	Περιεχόμενα Συστήματος Ενδοσκοπίου	65
7.3	Ζεύγη εικόνων ενδοσκοπίου	67

Κατάλογος Πινάκων

3.1	Σύγκριση στερεοσκοπικών μεθόδων	28
3.2	Σύγκριση στερεοσκοπικών οθονών	36
6.1	Χαρακτηριστικά Φακού	55
7.1	Χαρακτηριστικά Κάμερας	63
7.2	Χαρακτηριστικά οθόνης κεφαλής	64

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η τεχνολογία εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς, έτσι και στον τομέα των ιατρικών απεικονιστικών συστημάτων έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια πληθώρα νέων ιδεών καθώς και βελτιώσεις συστημάτων, αυτό οφείλεται στην ανάγκη έγκαιρης και ακριβούς διάγνωσης. Στην εργασία αυτή αναπτύσσεται ένα στερεοσκοπικό σύστημα ενδοσκοπίου το οποίο προσφέρει πληροφορία για το βάθος, την οποία τα περισσότερα συστήματα ενδοσκοπίου ακόμα και σήμερα δεν διαθέτουν. Τα κλασσικά συστήματα ενδοσκοπίων προβάλλουν δισδιάστατη εικόνα στο χρήστη με αποτέλεσμα να προσφέρουν μειωμένη χωρική αντίληψη. Για κατανοήσει κανείς την πολυπλοκότητα του φυσικού τρισδιάστατου κόσμου θα πρέπει απαραίτητα να έχει πρόσβαση και στις τρεις διαστάσεις του χώρου. Στο σύστημα που περιγράφεται εδώ στον κάθε οφθαλμό προβάλλεται μια ελαφρώς διαφορετική δύο διαστάσεων εικόνα, όπως συμβαίνει και στην ανθρώπινη όραση. Αυτές οι δύο εικόνες συνδυάζονται στον εγκέφαλο και δημιουργούν μια ενιαία τρισδιάστατη εικόνα που παρέχει πληροφορία για όλες τις διαστάσεις.

Υπάρχουν αρκετά συστήματα που έχουν εμφανιστεί στην στερεοσκοπική ενδοσκόπηση από τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί λίγα ευρέως, αφού τα μειονεκτήματα και ο διαφορετικός τρόπος λειτουργίας τους, τα κάνουν δυσλειτουργικά και αποτρέπουν τους γιατρούς να εξοικειωθούν με αυτά. Ένα αξιοσημείωτο σύστημα είναι το χειρουργικό σύστημα Da Vinci [8] που αναπτύχθηκε από την εταιρία Intuitive Surgical και εγκρίθηκε η χρήση του το 2000. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει ενδοσκόπιο που προσφέρει στο χρήστη τρισδιάστατη εικόνα που προκύπτει από τους δύο αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι στη βάση του. Άλλο ένα σύστημα που αξίζει να αναφερθεί είναι της εταιρίας Xigen LLC [8], η οποία κατασκεύασε και κυκλοφόρησε ένα ενδοσκόπιο που προσφέρει στερεοσκοπική απεικόνιση λόγω των δύο αισθητήρων CMOS που περιέχει στην άκρη του. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι η πολύ μικρή διάμετρος του, μόλις 2.8 mm, που επιτρέπει την εισαγωγή του στις κοιλότητες του σώματος με μικρό κίνδυνο τραυματισμού των γύρω ιστών.

Διάρθρωση εργασίας

Το **Κεφάλαιο 2** περιέχει τις βασικές αρχές και έννοιες στερεοσκοπίας που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της παρούσας εργασίας. Περιγράφεται η γεωμετρία που ορίζει το στερεοσκοπικό σύστημα καθώς και τα βασικά οπτικά ερεθίσματα που λαμβάνει το οπτικό σύστημα του ανθρώπου και συμβάλλουν στη αντίληψη του βάθους από τον εγκέφαλο.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύονται οι μέθοδοι και οι τεχνικές στερεοσκοπικής προβολής καθώς και τα είδη στερεοσκοπικών οθονών. Επίσης αναφέρονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που έχει η καθεμία.

Η περιγραφή της λειτουργίας καθώς και τα είδη του ενδοσκοπίου με βάση τη θέση της κάμερας καταγράφονται στο **Κεφάλαιο 4**.

Ο σχεδιασμός του λογισμικού που υλοποιήθηκε για το σύστημα στερεοσκοπικού ενδοσκοπίου περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 5**. Πιο συγκεκριμένα περιγράφεται η γραφική διεπαφή που υλοποιήθηκε για την επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα. Μέσω αυτής η εικόνα από την κάμερα του ενδοσκοπίου ρυθμίζεται κατάλληλα, και προσαρμόζεται η διάταξη για την προβολή του ζεύγους στη οθόνη. Σε αυτό το κεφάλαιο επίσης περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης της κάμερας στο περιβάλλον της Matlab, καθώς επίσης και οι διαδικασίες της στερεοσκοπικής διόρθωσης και αντιστοίχισης για την παραγωγή του χάρτη παράλλαξης.

Το **Κεφάλαιο 6** περιγράφει τις πειραματικές διατάξεις που υλοποιήθηκαν κατά εκπόνηση της εργασίας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τα στερεοσκοπικά συστήματα και τον βαθμό αντίληψης του βάθους. Περιλαμβάνονται δύο βασικές διατάξεις, για την καθεμία γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Στο **Κεφάλαιο 7** περιγράφεται το τελικό σύστημα ενδοσκοπίου με τα μέρη που το αποτελούν. Επίσης περιέχονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την περάτωση αυτής τη διπλωματικής εργασίας περιέχονται στο **Κεφάλαιο 8**. Επιπλέον έχουν γίνει κάποιες προτάσεις για μελλοντική βελτίωση του συστήματος.

Κεφάλαιο 2

Βασικές Αρχές Στερεοσκοπίας

2.1 Διόφθαλμη Όραση

Διόφθαλμη όραση ονομάζουμε τη συνδυασμένη χρήση των δύο οφθαλμών προκειμένου να δημιουργηθεί μια ενιαία και μοναδική εγκεφαλική εντύπωση. Ουσιαστικά αποτελεί το σύνολο των εγκεφαλικών διεργασιών που καταλήγουν στην ενοποίηση των δύο αμφιβληστροειδικών εικόνων και συνεπώς στην αντίληψή τους ως μια. Άνθρωποι χωρίς διόφθαλμη όραση παρουσιάζουν παραμόρφωση στην αντίληψη του βάθους και τη μέτρηση της απόστασης.

Στερεοσκοπική όραση ή στερέοψη ονομάζεται η ικανότητα της κατάταξης των αντικειμένων που βλέπουμε στον τρισδιάστατο χώρο. Ουσιαστικά είναι η ικανότητα για εκτίμηση του βάθους.

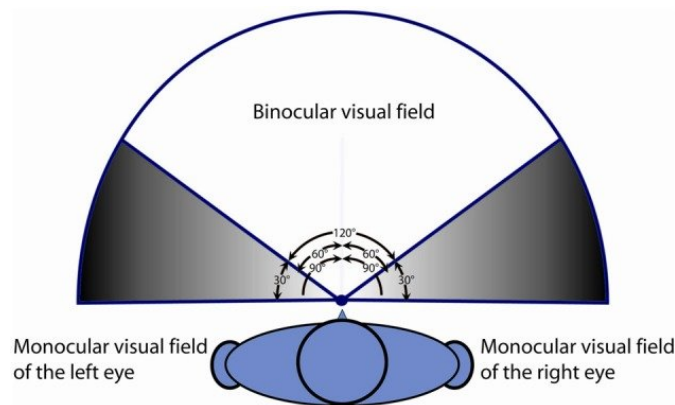
Ένα στερεό αντικείμενο που βρίσκεται στη μέση μπροστά από τους οφθαλμούς, σχηματίζει ελαφρά ανόμοιες εικόνες στους δύο αμφιβληστροειδείς. Αυτό συμβαίνει λόγω του οριζόντιου διαχωρισμού των δύο οφθαλμών δηλαδή της διαχωρικής απόστασης, οπότε ο καθένας βλέπει το αντικείμενο από διαφορετική θέση. Αν το αντικείμενο βρίσκεται μέσα στα όρια του χώρου rapum , οι δύο εικόνες παρότι ανόμοιες μπορούν να υποστούν αισθητηριακή ταύτιση. Αυτή ακριβώς η ταύτιση των δύο ανόμοιων εικόνων οδηγεί στην αντίληψη της τρίτης διάστασης, δηλαδή την στερεοσκοπική όραση.[11]

2.2 Οι βαθμοί της διόφθαλμης όρασης

Ο Claude Worth είχε ταξινομήσει τη διόφθαλμη όραση σε 3 βαθμούς.[11]

1ος βαθμός

Ο πρώτος βαθμός της διόφθαλμης όρασης είναι η ταυτόχρονη αντίληψη των δύο αμφιβληστροειδικών εικόνων, όχι όμως απαραίτητα η ενοποίηση τους σε μία. Αυτός ο βαθμός φαίνεται στο σχήμα 2.2 και είναι η περίπτωση **A**.

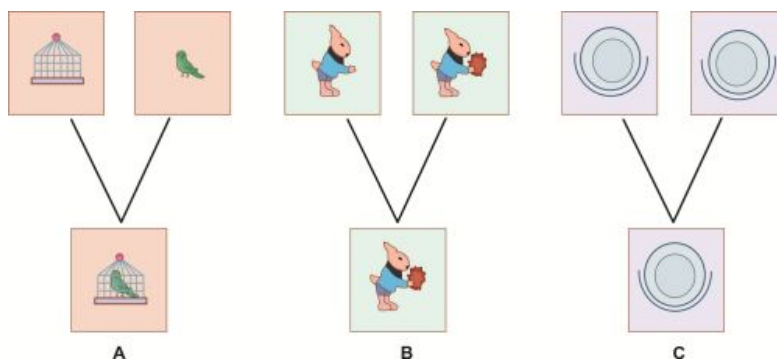


(Πηγή ιστοσελίδα: <https://alishbaimran.medium.com/how-display-technologies-work-in-ar-vr-6448445fc9ca>)

Σχήμα 2.1: Εύρος οπτικής γωνίας διόφθαλμης όρασης

2ος βαθμός Ο δεύτερος βαθμός διόφθαλμης όρασης είναι η ικανότητα της ενοποίησης δύο όμοιων αμφιβληστροειδικών εικόνων, δηλαδή η αισθητηριακή τους ταύτιση. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.2 και είναι η περίπτωση **B**.

3ος βαθμός Ο τρίτος βαθμός διόφθαλμης όρασης είναι η στερεοσκοπική όραση, όπου γίνεται πλήρης αισθητηριακή ταύτιση. Αυτή την περίπτωση που μπορούμε να διακρίνουμε στο σχήμα 2.2 στο **C**.



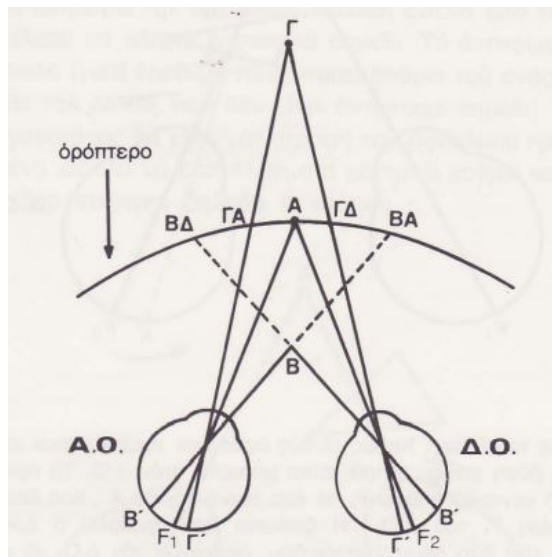
Σχήμα 2.2: Τα τρία στάδια της διόφθαλμης όρασης [1]

2.3 Ορόπτερο (Horoptyer)

Ορόπτερο ονομάζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων του φυσικού χώρου που ερεθίζουν αντίστοιχα αμφιβληστροειδικά σημεία των δύο οφθαλμών. Πιο συγκεκριμένα, είναι μια κυρτή επιφάνεια, με το κοίλο στραμμένο προς τους οφθαλμούς, που

περνάει το σημείο προσήλωσης (fixation point) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Σημείο προσήλωσης είναι αυτό που ερεθίζει τα κεντρικά βοθρία των δύο οφθαλμών (σε κατ'ευθείαν εμπρός προβολή αποτελούν αντίστοιχα αμφιβληστροειδικά σημεία), ή πιο απλά, το σημείο τομής των οπτικών αξόνων.

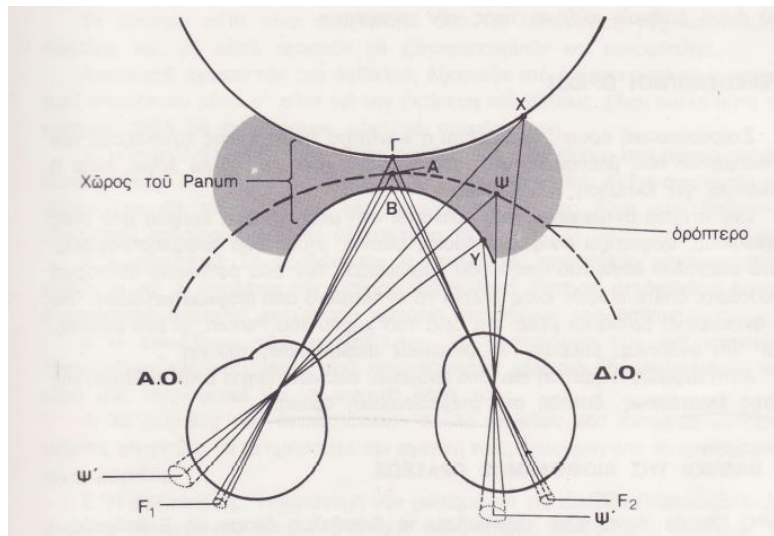
Ένα αντικείμενο που δεν βρίσκεται πάνω στο ορόπτερο, ερεθίζει μη αντίστοιχα αμφιβληστροειδικά σημεία των δύο οφθαλμών, με αποτέλεσμα ο κάθε οφθαλμός να προβάλλει την εικόνα του αντικειμένου σε διαφορετικό σημείο του χώρου. Έτσι το αντικείμενο αυτό φαίνεται διπλό, αυτό το φαινόμενο είναι φυσιολογικό και ονομάζεται φυσιολογική διπλωπία. Η φυσιολογική διπλωπία, παρόλο που είναι πάντα παρούσα, αφού πάντα θα υπάρχει κάποιο αντικείμενο πιο κοντά ή πιο μακριά από το σημείο προσήλωσης, δεν μας ενοχλεί αφού συνήθως δεν την προσέχουμε.[12]



Σχήμα 2.3: Ορόπτερο

2.4 Χώρος Panum

Σύμφωνα με την θεωρία του Panum κάθε σημείο του ενός αμφιβληστροειδούς δεν αντιστοιχεί μόνο με ένα σημείο του άλλου, αλλά με μια μικρή ελλειπτική περιοχή που περιβάλλει το ακριβώς αντίστοιχο αμφιβληστροειδικό σημείο. Το μέγεθος αυτών των περιοχών αυξάνει όσο περιφερικότερα βρίσκονται.[12]



Σχήμα 2.4: Χώρος Panum

2.5 Αμφιβληστροειδικά σημεία

Για κάθε αμφιβληστροειδικό σημείο του ενός οφθαλμού, υπάρχει ένα αμφιβληστροειδικό σημείο του άλλου οφθαλμού που έχει την ίδια προβολική ιδιότητα. Τα αμφιβληστροειδικά στοιχεία των δύο οφθαλμών που είναι ερεθισμένα από το ίδιο σημείο του χώρου, ονομάζονται αντίστοιχα αμφιβληστροειδικά σημεία. Το φαινόμενο της ύπαρξης αντίστοιχων αμφιβληστροειδικών σημείων ονομάζεται αμφιβληστροειδική αντιστοιχία και είναι η βάση της διόφθαλμης όρασης.

Για να γίνει αισθητηριακή ταύτιση, δεν αρκεί μόνο ο ερεθισμός δύο αντίστοιχων σημείων, πρέπει οι δύο εικόνες να είναι αρκετά όμοιες σε μέγεθος, σχήμα και ευκρίνεια ώστε τα ενοποιηθούν αισθητηριακά.^[12]

2.6 Οπτικά Ερεθίσματα (Visual Cues)

Τα ανθρώπινο οπτικό σύστημα βασίζεται σε ένα σύνολο οπτικών ερεθισμάτων για την εκτίμηση της απόστασης και την αντίληψη του βάθους των αντικειμένων που βρίσκονται στο χώρο. Τα οπτικά ερεθίσματα ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες τα μονοφθαλμικά και διοφθαλμικά.^[13]

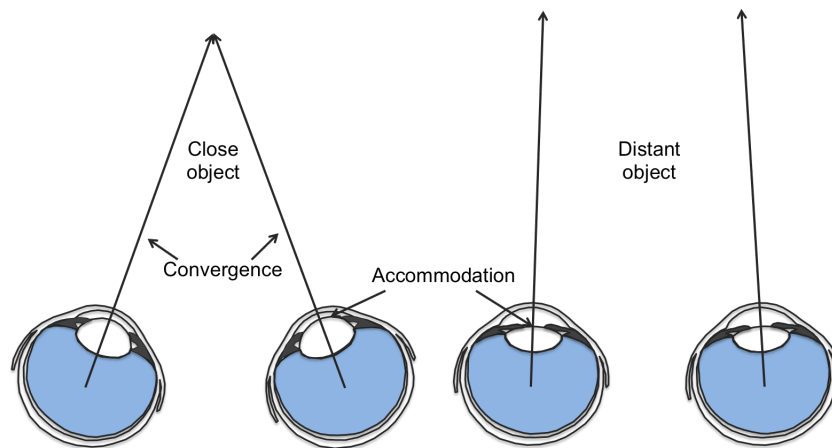
2.6.1 Διοφθαλμικά Ερεθίσματα

Τα διοφθαλμικά οπτικά ερεθίσματα απαιτούν την ενοποίηση των πληροφοριών που συλλέγονται από τα δύο μάτια. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η σύγκλιση των

οφθαλμών και η διοφθαλμική παράλλαξη.[13]

Σύγκλιση οφθαλμών

Οι οφθαλμοί συγκλίνουν ή αποκλίνουν ανάλογα πόσο κοντά στον παρατηρητή βρίσκεται ένα αντικείμενο. Ο εγκέφαλος ερμηνεύει την μυική ένταση της κίνησης των οφθαλμών για να προσεγγίσει την απόσταση ενός αντικειμένου.

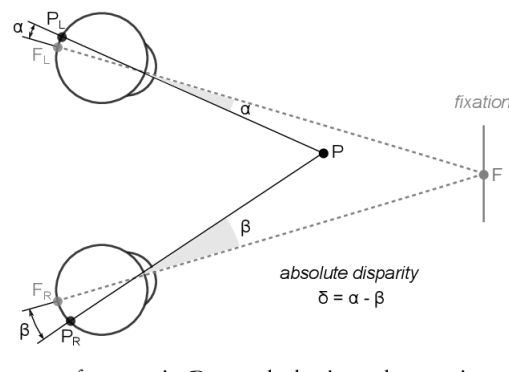


(Πηγή Ιστοσελίδα: <https://www.binocularsguru.com/binocular-cues-vs-monocular-cues-difference-and-uses>)

Σχήμα 2.5: Σύγκλιση-Απόκλιση Οφθαλμών

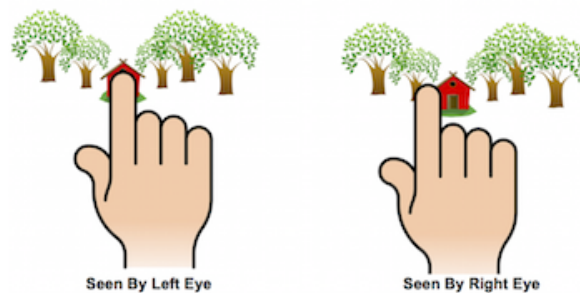
Διοφθαλμική Παράλλαξη(Binocular Disparity)

Επειδή οι οφθαλμοί βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις στο ανθρώπινο κρανίο, λαμβάνουν ελαφρώς διαφορετικές εικόνες της σκηνής ή του αντικειμένου που παρατηρείται. Η κάθε εικόνα προβάλλεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του αντίστοιχου οφθαλμού και ο συνδυασμός τους ερμηνεύεται από τον εγκέφαλο ως τρισδιάστατη σκηνή και παράγεται η πληροφορία του βάθους.[13]



Σχήμα 2.6: Διοφθαλμική Παράλλαξη [2]

Ο βαθμός που διαφέρουν οι δύο εικόνες εξαρτάται από την διαφορά οπτικής γωνίας που παρατηρείται από το κάθε μάτι το αντικείμενο. Η διαφορά των εικόνων ονομάζεται διόφθαλμη παράλλαξη. Όσο μεγαλύτερη είναι η παράλλαξη των εικόνων τόσο πιο κοντά βρίσκεται το αντικείμενο παρατήρησης.



(Πηγή ιστοσελίδα: https://study.com/cimages/multimages/16/retinal_disparity_view.png)

Σχήμα 2.7: Διοφθαλμική Παράλλαξη

2.6.2 Μονοφθαλμικά Ερεθίσματα

Για την εκτίμηση του βάθους και τον εντοπισμό των αντικειμένων στον τρισδιάστατο χώρο υπάρχουν και να μονοφθαλμικά ερεθίσματα-κριτήρια. Για να τα αντιληφθούμε αρκεί η παρατήρηση τους από τον ένα οφθαλμό. Παρακάτω περιγράφονται τα πιο σημαντικά από αυτά καθώς επίσης παρουσιάζονται και στο σχήμα 2.8. [13]

Σχετικό Μέγεθος

Αντικείμενα που έχουν το ίδιο μέγεθος φαίνονται μεγαλύτερα ή μικρότερα ανάλογα πόσο μακριά η κοντά στον παρατηρητή βρίσκονται.

Υφή

Όσο τα αντικείμενα μιας σκηνής απομακρύνονται από τον παρατηρητή τόσο λιγότερο εμφανής είναι η υφή τους. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν το αντικείμενο απομακρύνεται δεν διακρίνουμε με την ίδια λεπτομέρεια την επιφάνεια του.

Επικάλυψη

Όταν σε μια σκηνή ένα αντικείμενο Α επικαλύπτει ένα αντικείμενο Β, θεωρούμε πως το αντικείμενο Α βρίσκεται πιο κοντά στον παρατηρητή.

Γραμμική Προοπτική

Οι παράλληλες γραμμές συγκλίνουν όσο η απόσταση μεγαλώνει, μέχρι ένα σημείο που η απόσταση γίνεται σταθερή και οι γραμμές τείνουν να ενωθούν, αυτό το σημείο ονομάζεται σημείο εκμηδενισμού.

Κατανομή φωτός και σκιάς

Η σκιά των αντικειμένων μιας σκηνής μας βοηθάει να ερμηνεύσουμε την τρισδιάστατη δομή τους στο χώρο.

Πραγματικό Μέγεθος

Το πραγματικό μέγεθος ενός αντικειμένου συμβάλει στην αντίληψη του βάθους, αφού παρατηρώντας το μέγεθος που εμφανίζεται καταλαβαίνουμε σε τι απόσταση περίπου βρίσκεται.

Εναέρια Προοπτική

Τα αντικείμενα που φαίνονται θολά συνήθως βρίσκονται μακριά, αυτό συμβαίνει λόγω της ατμόσφαιρας.

Παράλλαξη Κίνησης

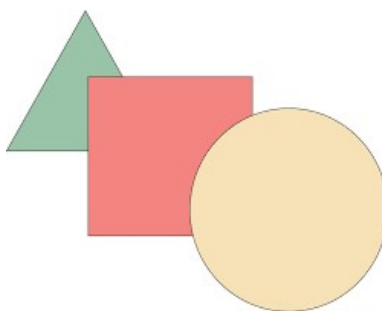
Όταν κοιτάμε δύο αντικείμενα που βρίσκονται σε διαφορετικές από εμάς αποστάσεις, και μετακινηθούμε, τα αντικείμενα θα παρουσιάζουν μια φαινομενική κίνηση. Αυτό που βρίσκεται μακρύτερα φαίνεται ότι κάνει μικρότερη διαδρομή.



(α') Σχετικό Μέγεθος



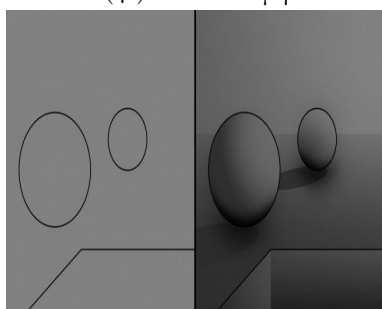
(β') Υφή



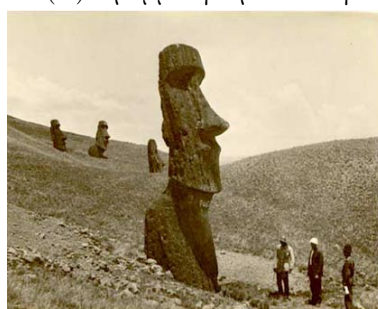
(γ') Επικάλυψη



(δ') Γραμμική Προοπτική



(ε') Κατανομή Φωτός και Σκιάς



(ς') Πραγματικό μέγεθος



(ζ') Εναέρια Προοπτική



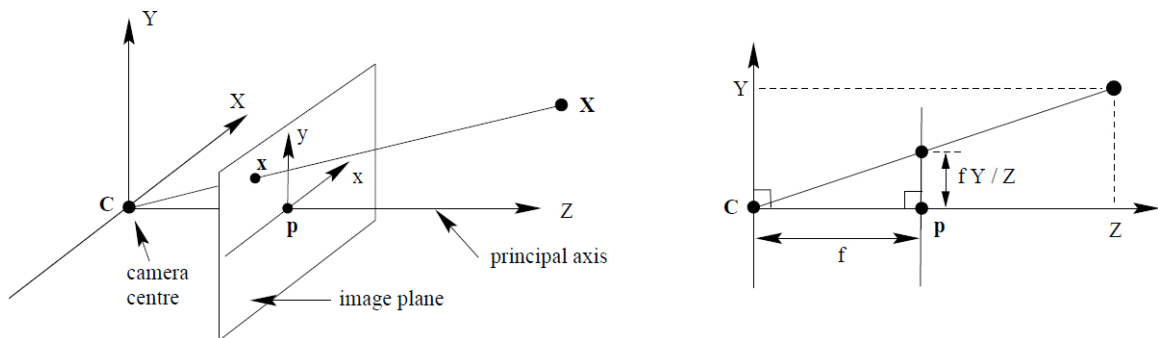
(η') Παράλλαξη Κίνησης

Σχήμα 2.8: Μονοφθαλμικά Ερεθίσματα

2.7 Πρότυπο κάμερας οπής καρφίτσας (Pinhole Camera Model)

Το πρότυπο οπή καρφίτσας είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο κάμερας που χρησιμοποιούμε συνήθως για τη μοντελοποίηση συστημάτων μηχανικής όρασης. Το άνοιγμα (aperture) της κάμερας παριστάνεται από ένα σημείο και δεν υπάρχει φακός, οπότε δεν εμφανίζεται παραμόρφωση η θόλωση λόγω του φακού. Όσο πιο μικρή είναι η οπή τόσο πιο καθαρή είναι η εικόνα, αλλά μέχρι ένα ελάχιστο επίπεδο, αφού μετά αυτό λόγω περίθλασης η εικόνα θολώνει.

Η κάμερα οπή καρφίτσα περιγράφεται από το οπτικό κέντρο C της κάμερας και το επίπεδο της εικόνας. Η απόσταση του επιπέδου της εικόνας από το οπτικό κέντρο C ονομάζεται εστιακό μήκος (focal length). Η γραμμή από το κέντρο της κάμερας που είναι κάθετη στο επίπεδο της εικόνας ονομάζεται οπτικός ή κύριος άξονας της κάμερας. [3, 14]



Σχήμα 2.9: Πρότυπο κάμερας οπής-καρφίτσας [3]

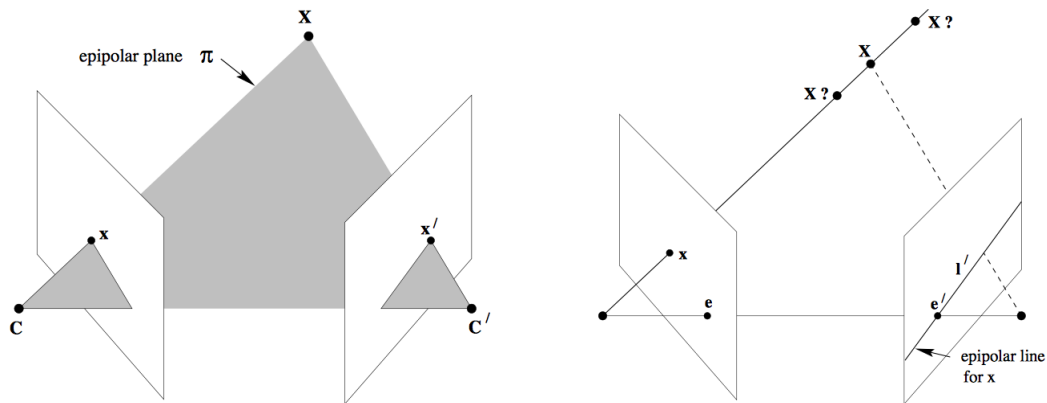
2.8 Επιπολική Γεωμετρία

Η επιπολική γεωμετρία είναι η εγγενής γεωμετρία δύο διαφορετικών προοπτικών της ίδιας τρισδιάστατης σκηνής. Οι δύο προοπτικές μπορούν να λαμβάνονται συγχρόνως, για παράδειγμα σε ένα στερεοσκοπικό σύστημα ή ετεροχρονισμένα μετακινώντας την κάμερα. Από γεωμετρικής απόψεως τα δύο συστήματα είναι ισοδύναμα. Η επιπολική γεωμετρία βασίζεται στην υπόθεση ότι οι κάμερες προσεγγίζουν το πρότυπο οπής-καρφίτσας (Pinhole Camera Model) και εξαρτάται από τις ενδογενείς παραμέτρους της κάμερας και τη σχετική της θέση, αλλά καθόλου από τη δομή της σκηνής.

Για να περιγράψουμε την επιπολική γεωμετρία θα αναφερθούμε στους όρους της με τη χρήση της εικόνας 2.10. Τα σημεία C και C' αποτελούν τα οπτικά κέντρα των καμερών και το σημείο X είναι ένα σημείο της τρισδιάστατης σκηνής. Το ευθύγραμμο τμήμα CC' ονομάζεται βασική γραμμή (Baseline) και είναι η απόσταση που απέχουν

τα οπτικά κέντρα. Το επιπολικό επίπεδο π ορίζεται από τα οπτικά κέντρα των καμερών και το σημείο X , δηλαδή το CXC' . Τα σημεία x και x' είναι οι προβολές του σημείου X στα δύο επίπεδα των εικόνων και τα σημεία e και e' είναι τα σημεία στα οποία η βασική γραμμή τέμνει τα δύο επίπεδα. Τα τελευταία σημεία ονομάζονται επιπολικά σημεία και οι ευθείες που περιέχουν τα ευθύγραμμα τμήματα ex και ex' αντίστοιχα είναι οι επιπολικές ευθείες. Το κάθε σημείο της φυσικής σκηνής αντιστοιχεί σε διαφορετική επιπολική γραμμή και σε διαφορετικό επιπολικό επίπεδο. Το σύνολο των επιπολικών γραμμών του κάθε επιπέδου εικόνας τέμνονται στο αντίστοιχο επιπολικό σημείο.

Για οποιοδήποτε σημείο x στην πρώτη εικόνα υπάρχει αντίστοιχο σημείο x' στην δεύτερη το οποίο βρίσκεται πάνω στην επιπολική γραμμή της δεύτερης. Μπορούμε να εκφράσουμε μαθηματικά τη σχέση μεταξύ των δύο σημείων χρησιμοποιώντας το θεμελιώδη η βασικό πίνακα της επιπολικής γεωμετρίας. Αυτός ο πίνακας περιγράφει την εσωτερική γεωμετρία μεταξύ των εικόνων. Η επιπολική γεωμετρία είναι απαραίτητη για την επίλυση του προβλήματος της στερεοσκοπικής αντιστοίχισης, αφού απλοποιεί την αναζήτηση των αντίστοιχων σημείων μεταξύ των εικόνων από δισδιάστατη σε μονοδιάστατη. Πιο συγκεκριμένα η αναζήτηση γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων επιπολικών γραμμών. [3]



Σχήμα 2.10: Επιπολική Γεωμετρία [4]

Κεφάλαιο 3

Μέθοδοι Στερεοσκοπικής Απεικόνισης

Οι περισσότερες μέθοδοι-οιθόνες στερεοσκοπικής προβολής βασίζονται στην λειτουργία της φυσιολογικής όρασης. Ειδικότερα προβάλλουν δύο εικόνες στον παρατηρητή, τη μια στο δεξί και την άλλη στον αριστερό του οφθαλμό. Αυτές οι δύο εικόνες συνδυάζονται από τον εγκέφαλο και δημιουργούν την αίσθηση του βάθους.

3.1 Στερεοσκοπικές Μέθοδοι

Στις μεθόδους στερεοσκοπικής απεικόνισης κωδικοποιούμε το στερεοσκοπικό ζεύγος των εικόνων με κάποιο τρόπο και με ένα αντίστοιχο ζευγάρι γυαλιών κάθε φορά αποκωδικοποιούμε την εικόνα που προορίζεται για τον κάθε οφθαλμό.

3.1.1 Στερεοσκόπιο

Είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την προβολή ενός ζεύγους στερεοσκοπικών εικόνων. Κάθε εικόνα προβάλλεται από ένα φακό του οργάνου και η απόσταση μεταξύ των κέντρων των δύο εικόνων είναι όση και η απόσταση των ανθρώπινων οφθαλμών. Με αυτό τον τρόπο ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται την αίσθηση του βάθους της σκηνής, που απεικονίζουν οι δύο δισδιάστατες εικόνες. Το ζεύγος των εικόνων που εισάγεται στο στερεοσκόπιο βρίσκεται πάνω σε μια κάρτα την οποία ονομάζεται στερεογραφική. Μία υποκατηγορία στερεοσκοπίων δέχονται διαφάνειες στερεοσκοπικών ζευγών. Αυτά τα στερεοσκόπια ονομάζονται προβολείς διαφανειών. Το στερεοσκόπιο είναι η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την προβολή 3D από τον Άγγλο Φυσικό Charles Wheatstone το 1838.[15]



Σχήμα 3.1: (Πηγή ιστοσελίδας: https://en.wikipedia.org/wiki/Stereoscope/media/File:Pocket_stereoscope.jpg)

Σχήμα 3.2: Στερεοσκοπείο

3.1.2 Σύστημα Ενεργού Κλείστρου

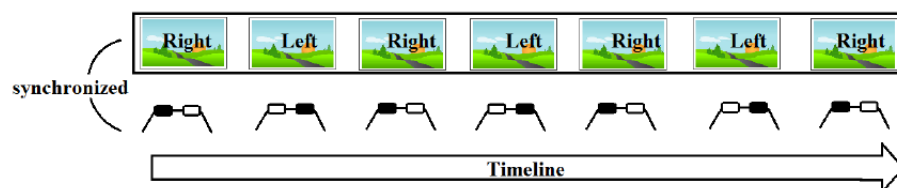
Το ανθρώπινο οπτικό σύστημα μπορεί να συγχωνεύσει τα συστατικά μέρη ενός στερεοσκοπικού ζεύγους με χρονική υστέρηση ως 50ms . Αυτό το φαινόμενο μνήμης αξιοποιείται από τη μέθοδο στερεοσκοπικής απεικόνισης ενεργού κλείστρου. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή τη μέθοδο τη στιγμή που το ένα μάτι βλέπει την εικόνα που αντιστοιχεί σε αυτό το άλλο δεν βλέπει τίποτα. Η εναλλαγή αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς με ρυθμό ίσο με τον ρυθμό ανανέωσης της οθόνης. Για να επιτευχθεί αυτό οι φακοί των γυαλιών που χρησιμοποιούνται είναι κατασκευασμένοι από υγρούς κρυστάλλους (LC) . Οι υγροί κρύσταλλοι έχουν την ιδιότητα να γίνονται αδιαφανείς όταν εφαρμόζεται σε αυτούς τάση. Με τον συγχρονισμό των γυαλιών με τη συσκευή απεικόνισης των εικόνων επιλέγεται τότε προβάλλεται η εικόνα για το δεξί και τότε για το αριστερό μάτι. [16, 17, 18]

Πλεονεκτήματα

- Σε αντίθεση με τα γυαλιά του ανάγλυφου συστήματος, τα γυαλιά ενεργού κλείστρου είναι χρωματικά ουδέτερα, οπότε επιτρέπουν την προβολή σε όλο το χρωματικό φάσμα.
- Σε αντίθεση με το σύστημα πολωμένων φίλτρων, όπου συνήθως η οριζόντια χωρική ανάλυση είναι η μισή, στα συστήματα ενεργού κλείστρου και για τους δύο οφθαλμούς η προβολή γίνεται σε ολόκληρη την ανάλυση τη οθόνης.

Μειονεκτήματα

- Μπορεί να παρατηρηθεί τρεμόπαιγμα. Αυτό συμβαίνει επειδή το κάθε μάτι λαμβάνει το μισό από το ρυθμό ανανέωσης της οθόνης. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να εξαλειφθεί αν ο ρυθμός ανανέωσης είναι πολύ μεγάλος.
- Έχει μεγάλο κόστος συγκριτικά με άλλες μεθόδους.
- Η εικόνα που προβάλλεται είναι ελαφρώς σκοτεινή αφού τα γυαλιά περιέχουν πολωμένους φακούς.
- Ο ρυθμός ανανέωσης πλαισίων της οθόνης πρέπει να είναι διπλάσιος συγκριτικά με την δισδιάστατη προβολή καθώς επίσης από ότι των συστημάτων πολωμένων φίλτρων και ανάγλυφου για να έχουμε ισοδύναμο αποτέλεσμα. Αυτό σημαίνει ότι οι απαιτήσεις υλικού είναι μεγάλες.
- Παρόλο της προοδευτικής πτώσης των τιμών, εξαιτίας της εξέλιξης των ηλεκτρονικών το σύστημα του ενεργού κλείστρου παραμένει ακριβό συγκριτικά με άλλα στερεοσκοπικά συστήματα.
- Λόγω των ηλεκτρονικών και των μπαταριών που περιλαμβάνουν τα γυαλιά ενεργού κλείστρου έχουν μεγάλο βάρος και κόστος. Ωστόσο, οι διάφορες βελτιώσεις στον σχεδιασμό έχουν σαν αποτέλεσμα μείωση του βάρους συγκριτικά με τα αρχικά συστήματα που εμφανίστηκαν.
- Ανάλογα την εταιρία κατασκευής, τα γυαλιά ενεργού κλείστρου χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους συγχρονισμού και πρωτόκολλα σαν συνέπεια να μην είναι συμβατά με όλες τις συσκευές προβολής.



(Simultaneous 2D and 3D Video Rendering - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/3D-display-with-active-shutter-glasses_fig5_291957245 [accessed 28 Mar, 2021])

Σχήμα 3.3: Σύστημα Ενεργού Κλείστρου

3.1.3 Σύστημα Πολωμένων Φίλτρων

Στο παθητικό ή πολωμένων φίλτρων στερεοσκοπικό σύστημα προβάλλονται δύο εικόνες στο ίδιο απεικονιστικό μέσο. Η μια εικόνα επικαλύπτει την άλλη αλλά έχουν διαφορετική πόλωση μεταξύ τους. Με τη χρήση γυαλιών τα οποία περιέχουν φακούς με φίλτρα πόλωσης μπορεί κάποιος να δει στην οθόνη την τρισδιάστατη εικόνα. Το φίλτρο πόλωσης του κάθε φακού αντιστοιχεί στην πόλωση της μια εικόνας και με αυτό τον τρόπο στο κάθε μάτι προβάλλεται η εικόνα που προορίζεται για αυτό. Το σύστημα ονομάζεται και παθητικό αφού τα γυαλιά δεν διαθέτουν ενσωματωμένα ηλεκτρονικά και δεν εκτελούν καμία επεξεργασία. Το παθητικό στερεοσκοπικό σύστημα χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα το είδος της πόλωσης, η μια ονομάζεται γραμμική και η άλλη κυκλική πόλωση.

Κατά τη γραμμική πόλωση η προβολή των δύο εικόνων γίνεται διαμέσου ορθογώνιων πολωτικών φίλτρων. Τα γυαλιά του θεατή επίσης περιέχουν γραμμικά πολωτικά φίλτρα. Από κάθε φίλτρο περνάει το φως που είναι ίδιας πόλωσης και μπλοκάρετε το ορθογώνια σε αυτό πολωμένο. Το μειονέκτημα του γραμμικού πολωτικού συστήματος έγκειται στο περιορισμό κινήσεων του θεατή αφού πρέπει να διατηρεί την κλίση του κεφαλιού του σταθερή, αλλιώς υπάρχει κίνδυνος έγχυσης της μιας εικόνας στην άλλη. Αυτό θα επηρεάσει την στερεοσκοπική αντίληψη.

Το σύστημα κυκλικής πόλωσης είναι πιο πρόσφατο από το γραμμικής. Για την προβολή σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούνται κυκλικά πολωτικά φίλτρα στα οποία η μια γραμμή πολώνεται σύμφωνα με την ωρολογιακή φορά και η άλλη αντίθετα. Τα γυαλιά του χρήστη περιέχουν κυκλικά πολωτικά φίλτρα τα οποία αφήνουν να περνάει το φως ίδιας πόλωσης και μπλοκάρουν αυτό της αντίθετης. Η διαφορά σε αυτό το σύστημα σε σχέση με το γραμμικό είναι ότι ο θεατής μπορεί να μετακινεί το κεφάλι του χωρίς να επηρεαστεί η ποιότητα προβολής.[18]

Πλεονεκτήματα

- Το κόστος του συστήματος είναι χαμηλό.
- Τα γυαλιά του συστήματος δεν απαιτούν παροχή ενέργειας.
- Δεν χρειάζεται να γίνει κάποιος συγχρονισμός με το απεικονιστικό μέσο, σε αντίθεση με το σύστημα ενεργού κλείστρου.
- Αντίθετα με το σύστημα ενεργού κλείστρου δεν υπάρχει τρεμόπαιγμα στην εικόνα.
- Τα γυαλιά έχουν μικρό βάρος.

Μειονεκτήματα

- Τα πλαίσια της κάθε εικόνας καταλαμβάνουν τη μισή οθόνη, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κάθε οφθαλμός να εκμεταλλεύεται την μισή ανάλυση της.

3.1.4 Ανάγλυφο

Το ανάγλυφο 3D είναι μια τεχνική στερεοσκοπικής προβολής στην οποία οι δύο εικόνες που αντιστοιχούν στο δεξιό και αριστερό οφθαλμό κωδικοποιούνται με φίλτρα συμπληρωματικών μεταξύ τους χρωμάτων. Ο παρατηρητής φοράει αντίστοιχα γυαλιά με φίλτρα χρώματος για τον διαχωρισμό των εικόνων. Το πιο συνηθισμένο ζευγάρι τέτοιων χρωμάτων είναι το κόκκινο και το κυανό. Το κόκκινο φίλτρο επιτρέπει μόνο το κόκκινο χρώμα ενώ το κυανό επιτρέπει το μπλε και το πράσινο χρώμα μπλοκάροντας το κόκκινο.[19, 17, 20]

Πλεονεκτήματα

- Το κόστος των γυαλιών είναι πολύ χαμηλό συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους.
- Είναι δυνατή η προβολή σε οποιοδήποτε μέσο εφόσον ο χρήστης διαθέτει τα κατάλληλα γυαλιά.

Μειονεκτήματα

- Παρουσιάζεται το φαινόμενο της παρεμβολής μεταξύ των εικόνων.
- Συχνά παρατηρείται ανταγωνισμός αμφιβληστροειδούς.
- Υπάρχει μεγάλη απώλεια της πραγματικής χρωματικής πληροφορίας στην προβλλόμενη εικόνα.

3.1.5 ColorCode 3D

Το ColorCode 3D είναι η πιο πρόσφατη εξέλιξη του ανάγλυφου. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μπλε χρώμα για το ένα φίλτρο και χρώμα κεχριμπαří για το άλλο, δηλαδή 450 nm και 600-615 nm αντίστοιχα μήκη κύματος του ορατού φάσματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η διαφορά του με το κλασσικό ανάγλυφο σύστημα είναι ότι η προβολή είναι πλήρως έγχρωμη.[17]

Πλεονεκτήματα

- Πολύ χαμηλό κόστος.
- Είναι δυνατή η προβολή σε οποιοδήποτε μέσο εφόσον ο χρήστης διαθέτει τα κατάλληλα γυαλιά.
- Προσφέρει καλής ποιότητας 3D .

3.1.6 Σύστημα Με Φίλτρα Παρεμβολής

Το σύστημα με φίλτρα παρεμβολής είναι μια τεχνική στερεοσκοπικής απεικόνισης η οποία χρησιμοποιεί πολυπλεξία στο μήκος κύματος. Πιο συγκεκριμένα κωδικοποιεί την καθεμία από τις δύο εικόνες σε διαφορετικά φασματικά εύρη του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε χρώματος. Τα γυαλιά του παρατηρητή αποτελούνται από φίλτρα στενής ζώνης ώστε να γίνεται η αποκωδικοποίηση και ο διαχωρισμός των εικόνων του στερεοσκοπικού ζεύγους. Η τεχνική αυτή στηρίζεται στο ότι η οπτική επεξεργασία του φωτός στο ανθρώπινο μάτι χαρακτηρίζεται από την παρουσία τριών τύπων δέκτη που σχετίζονται με τις πρωτεύουσες αποχρώσεις του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε.[21, 22]

Πλεονεκτήματα

- Η έξοδος του συστήματος είναι μια στερεοσκοπική εικόνα πλήρους χρώματος.

Μειονεκτήματα

- Το κόστος των γυαλιών δεν είναι μικρό, αλλά δεν ξεπερνάει των γυαλιών ενεργού κλείστρου, αφού και αυτό αποτελεί παθητικό σύστημα.
- Η προβολή μπορεί να γίνει μόνο με προβολέα στον οποίο προσαρμόζεται φίλτρο για την κωδικοποίηση των εικόνων.

3.1.7 Μέθοδος Πάνω-Κάτω Σ(Over/Under)

Πρόκειται για μια διάταξη στερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων, όπου οι εικόνες τοποθετούνται κάθετα, με την εικόνα του αριστερού οφθαλμού να βρίσκεται πάνω και αυτή του δεξιού κάτω. Για την προβολή των δύο εικόνων χρησιμοποιούνται ειδικά γυαλιά με πρίσματα, ώστε το αριστερό μάτι να βλέπει ελαφρώς πάνω και το δεξί ελαφρώς κάτω. Ένας άλλος τρόπος να δούμε αυτή την διάταξη εικόνων είναι με τη χρήση οθόνης κεφαλής.[23]

Πίνακας 3.1: Σύγκριση στερεοσκοπικών μεθόδων

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Σύστημα Ενεργού Κλείστρου	<ul style="list-style-type: none"> • Χρωματικά Ουδέτερα Γυαλιά. • Προβολή σε όλη την ανάλυση της οθόνης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Τρεμόπαιγμα. • Μεγάλο κόστος. • Ελαφρώς σκοτεινή εικόνα. • Διπλάσιος ρυθμός ανανέωσης οθόνης. • Βάρος γυαλιών.
Σύστημα Πολωμένων Φίλτρων	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος. • Τα γυαλιά δεν χρειάζονται παροχή ενέργειας. • Δεν χρειάζεται συγχρονισμός με το μέσο απεικόνισης. • Μικρό βάρος. • Δεν παρουσιάζεται τρεμόπαιγμα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Κάθε οφθαλμός βλέπει τη μισή ανάλυση οθόνης.
Ανάγλυφο	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος. • Προβολή σε οποιοδήποτε μέσο. 	<ul style="list-style-type: none"> • Παρεμβολή μεταξύ των εικόνων. • Ανταγωνισμός αμβληστροειδούς. • Απώλεια πραγματικής χρωματικής πληροφορίας.

ColorCode 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ χαμηλό κόστος. • Προβολή σε οποιοδήποτε μέσο. • Καλή χρωματική πληροφορία. 	
Σύστημα με Φίλτρα Παρεμβολής	<ul style="list-style-type: none"> • Πλήρους χρώματος στερεοσκοπική εικόνα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερο κόστος γυαλιών από το σύστημα πολωμένων φίλτρων. • Η προβολή γίνεται μόνο με προβολέα.

3.2 Στερεοσκοπικές Οθόνες

3.2.1 Πολύπλευροι φακοί (Lenticular Lenses)

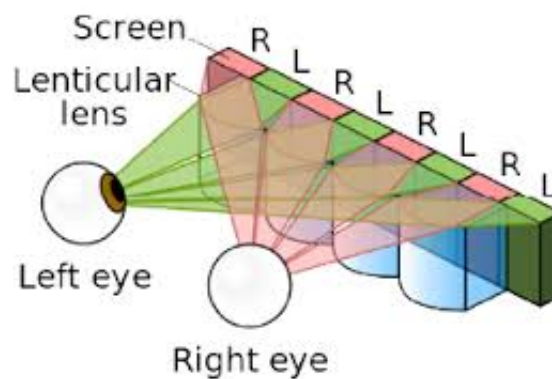
Το στερεοσκοπικό σύστημα πολύπλευρων φακών αποτελείται από μια οθόνη υγρών κρυστάλλων και μια μάσκα κυλινδρικών φακών η οποία εφαρμόζεται μπροστά από την οθόνη με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κυλινδρικοί φακοί να ευθυγραμμίζονται κάθετα με τις στήλες των εικονοστοιχείων. Η διάταξη των εικόνων που προβάλλονται διαμορφώνεται κατάλληλα ανάλογα τον αριθμό των σημείων θέασης. Ο ελάχιστος αριθμός αυτών των σημείων είναι δύο και η θέση του παρατηρητή πρέπει να είναι σταθερή και συγκεκριμένη. Με αυτό τον τρόπο το ανθρώπινο οπτικό σύστημα λαμβάνει δύο ελαφρώς διαφορετικές εικόνες, οι οποίες αποτελούν το στερεοσκοπικό ζεύγος για τη δημιουργία της τρισδιάστατης σκηνής.^[17]

Πλεονεκτήματα

- Το κόστος του συστήματος είναι αρκετά χαμηλό.
- Χρησιμοποιείται κοινή οθόνη υγρών κρυστάλλων ως απεικονιστικό μέσο.
- Υψηλότερη φωτεινότητα συγκριτικά με το σύστημα με φράγμα παράλλαξης.

Μειονεκτήματα

- Χρειάζεται ειδική επεξεργασία ώστε να απεικονίζονται με τον κατάλληλο τρόπο οι δύο εικόνες στην οθόνη.
- Χωρίς το στρώμα των κυλινδρικών φακών εμφανίζεται θολή διπλή εικόνα.
- Δεν είναι εύκολη η διαδικασία ευθυγράμμισης της μάσκας με την οθόνη.
- Παρουσιάζεται παρεμβολή μεταξύ των σημείων θέασης, με αποτέλεσμα μέρος της εικόνας που προορίζεται για το ένα μάτι να είναι ορατό από το άλλο.
- Η ανάλυση της οθόνης για N σημεία θέασης, γίνεται $1/N$ της αρχικής ανάλυσης. Για το σύστημα με δύο σημεία θέασης η ανάλυση γίνεται η μισή.



Πηγή ιστοσελίδας: https://en.wikipedia.org/wiki/Talk%3ALenticular_lens#/media/File:Parallax
)

Σχήμα 3.4: Σύστημα Πολύπλευρων Φακών

3.2.2 Ολόγραμμα

Είναι μια τεχνική στερεοσκοπικής απεικόνισης κατά την οποία καταγράφονται τα κύματα του φωτός που προκύπτουν από τη σκέδαση σε ένα αντικείμενο και στη συνέχεια ανακατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο παρατηρητής να μπορεί να δει στερεοσκοπική εικόνα του αντικειμένου, ακόμα και όταν αυτό δεν είναι παρόν. Ιδανικά το ολόγραμμα δεν έχει καμία διαφορά από το φυσικό αντικείμενο.[17]

Πλεονεκτήματα

- Το αποτέλεσμα του ολογράμματος είναι πιστή αντιγραφή του τρισδιάστατου αντικειμένου.

Μειονεκτήματα

- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές.

3.2.3 Ογκομετρική Οθόνη

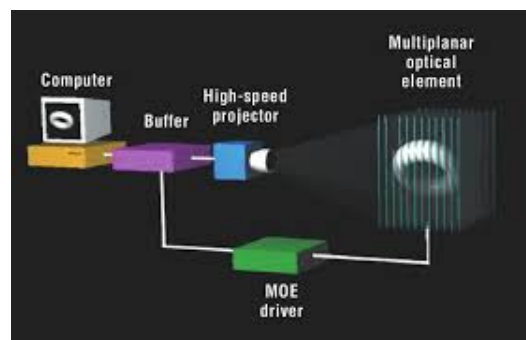
Είναι μια συσκευή γραφικής απεικόνισης που σχηματίζει μια οπτική αναπαράσταση ενός αντικειμένου σε τρεις φυσικές διαστάσεις. Η εικόνα αποτελείται από τρισδιάστατα εικονοστοιχεία (Voxels) τα οποία είναι τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία (pixels) στην επίπεδη οθόνη. [17]

Πλεονεκτήματα

- Η εικόνα είναι ορατή από όλες τις γωνίες.

Μειονεκτήματα

- Πολύ μεγάλο κόστος



(Πηγή ιστοσελίδα: <https://nl.pinterest.com/pin/486811040956151916>)

Σχήμα 3.5: Ογκομετρική Οθόνη

3.2.4 Οθόνη Αμφιβληστροειδούς

Είναι μια τεχνολογία απεικόνισης απευθείας στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του οφθαλμού. Σαρώνει το διαμορφωμένο φως λέιζερ στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού του

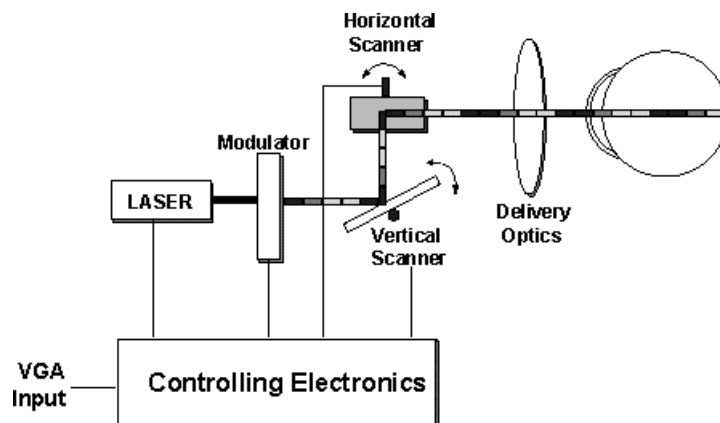
θεατή για να δημιουργήσει μια εικόνα. Το σήμα λαμβάνεται από μια κάρτα γραφικών ή μια κάμερα και ο θεατής έχει την αίσθηση ότι στέκεται ακριβώς μπροστά από οθόνη ή προβολέα υψηλής ανάλυσης.[24]

Πλεονεκτήματα

- Υψηλή ανάλυση εικόνας.
- Υψηλή αντίθεση και φωτεινότητα.

Μειονεκτήματα

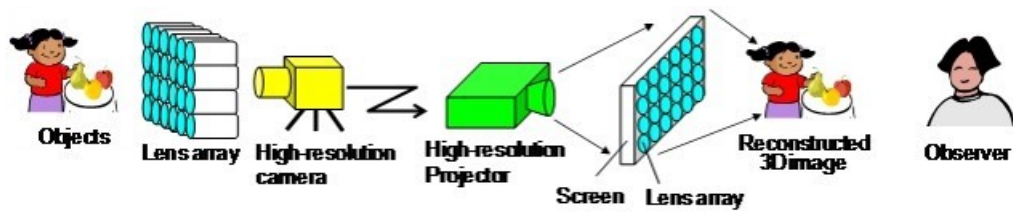
- Η περιοχή μεταξύ της πηγής φωτός και του οφθαλμού είναι τόσο μικρή που μπορεί να προκληθεί βλάβη σε αυτόν.



Σχήμα 3.6: Σύστημα Οθόνης Αμφιβληστροειδούς [5]

3.2.5 Ολοκληρωτική Απεικόνιση (Integral Imaging)

Η ολοκληρωτική απεικόνιση αποτελεί μια μέθοδο στερεοσκοπικής απεικόνισης στην οποία έχουμε πλήρη παράλλαξη τόσο οριζόντια όσο και κάθετα. Στο στάδιο καταγραφής της εικόνας χρησιμοποιείται μια συστοιχία σφαιρικών φακών όπου ο καθένας καταγράφει μια στοιχειώδη δισδιάστατη εικόνα, η οποία εξαρτάται από την οπτική γωνία που βρίσκεται ο φακός σε σχέση με το αντικείμενο που καταγράφει. Αυτές οι εικόνες προβάλλονται με τη χρήση μιας αντίστοιχης συστοιχίας φακών και ο παρατηρητής με αυτό τον τρόπο αντιλαμβάνεται μια τρισδιάστατη εικόνα η οποία αλλάζει ανάλογα με τη γωνία θέασης.[17]



Σχήμα 3.7: Σχεδιάγραμμα Συστήματος Ολοκληρωτικής Απεικόνισης

Πλεονεκτήματα

- Η εικόνα είναι ορατή ανεξάρτητα από τη θέση παρατήρησης.
- Συγκριτικά με άλλες μεθόδους σε αυτή έχουμε παράλλαξη οριζόντια και κάθετα της εικόνας.

Μειονεκτήματα

- Εμφανίζεται παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών στοιχειωδών εικόνων. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με την τοποθέτηση οπτικών φραγμάτων μεταξύ των γειτονικών φακών κατά την αναπαραγωγή της εικόνας.
- Η ανάλυση μιας εικόνας μακριά από τον πίνακα φακών υποβαθμίζεται. Αυτό το πρόβλημα οφείλεται στην διάθλαση από κάθε φακό.
- Όσο βελτιώνεται η ανάλυση τόσο μειώνεται η αντίληψη του βάθους και το αντίστροφο.

3.2.6 Φράγμα Παράλλαξης (Parallax barrier)

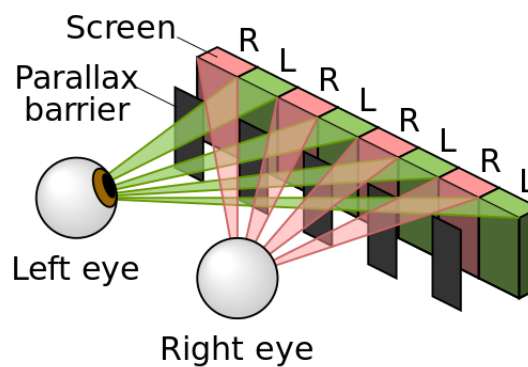
Σε αυτή τη μέθοδο τοποθετείται μια μάσκα οπών μπροστά από το την οθόνη, η οποία επιτρέπει σε κάθε μάτι να δει συγκεκριμένες περιοχές της οθόνης οι οποίες περιέχουν πληροφορία για αυτό. Στην οθόνη το προβαλλόμενο στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων διαμορφώνεται σε διάταξη κατάλληλη για να επιτευχθεί αυτό. [17]

Πλεονεκτήματα

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλή οθόνη υγρών κρυστάλλων με την προσθήκη μιας μάσκας με οπές και φράγματα.

Μειονεκτήματα

- Ο παρατηρητής πρέπει να έχει συγκεκριμένη σταθερή θέση μπροστά στην οθόνη. Αυτό το πρόβλημα διορθώνεται με συστήματα ανίχνευσης θέσης.
- Η ανάλυση της οθόνης που βλέπει το κάθε μάτι είναι η μισή.
- Μόνο ένα μικρό ποσοστό του εκπεμπόμενου φωτός από την οθόνη διέρχεται από τα φράγματα της μάσκας με αποτέλεσμα τη μείωση της φωτεινότητας.



(Πηγή ιστοσελίδα: <https://static.digit.in/default/1293f979295eec0eb63682da2b52fd87bf7eab2d.jp>)

Σχήμα 3.8: Φράγμα Παραλλαξής

3.2.7 HR3D (High rank 3D)

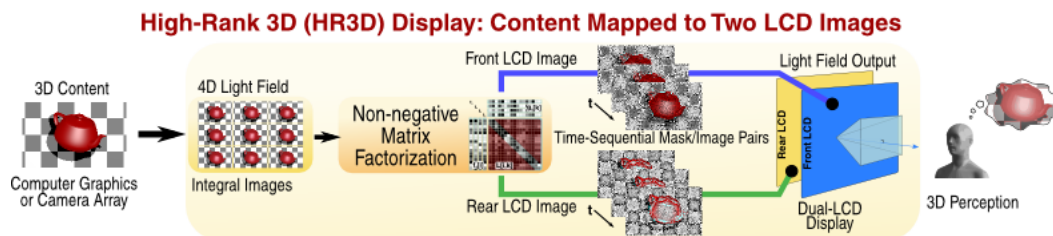
Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί δύο LCD οθόνες τη μια πάνω στην άλλη. Στην οθόνη που βρίσκεται μπροστά έχει αφαιρεθεί ο οπίσθιος φωτισμός και είναι διαφανής. Η κάθε οθόνη απεικονίζει μια εικόνα βασισμένη στην αρχική και ο συνδυασμός τους συμπληρώνει την αρχική εικόνα. [6]

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερη φωτεινότητα συγκριτικά με το σύστημα με φράγμα παράλλαξης.
- Καλύτερη χωρική ανάλυση
- Δεν χρειάζεται ο θεατής να έχει συγκεκριμένη θέση.

Μειονεκτήματα

- Μεγαλύτερο κόστος συγκριτικά με το σύστημα με φράγμα παράλλαξης.



Σχήμα 3.9: HR3D (High rank 3D) [6]

3.2.8 Οθόνη Κεφαλής (Head-Mounted Display)

Είναι συσκευή η οποία τοποθετείται στο κεφάλι και περιλαμβάνει οθόνη που είναι τοποθετημένη με τέτοιο τρόπο ώστε να καταλαμβάνει ολόκληρο το οπτικό πεδίο του χρήστη. Η μορφή της συσκευής ποικίλει, μπορεί να περιλαμβάνει ενιαία οθόνη για τα δύο μάτια, είτε δύο χωριστές μια για κάθε οφθαλμό. Επίσης μπορεί να έχει τη μορφή μάσκας είτε κράνους που φοριέται στο κεφάλι. Δημιουργεί την αίσθηση του βάθους μιας σκηνής προβάλλοντας διαφορετική εικόνα σε κάθε μάτι. Η διάταξη των εικόνων που προβάλλονται σε αυτή τη συσκευή μπορεί να είναι είτε side by side είτε Over/Under .[17]



(Πηγή ιστοσελίδα: https://www.bhphotovideo.com/images/images2500x2500/Zeiss_1909_127_Carl_Zeiss)

Σχήμα 3.10: Οθόνη Κεφαλής

Πίνακας 3.2: Σύγκριση στερεοσκοπικών οθονών

	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολύπλευροι Φακοί	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος συστήματος. • Χρησιμοποιείται απλή οθόνη υγρών κρυστάλλων. • Υψηλότερη φωτεινότητα από το σύστημα με φράγμα παράλλαξης. 	<ul style="list-style-type: none"> • Χρειάζονται κατάλληλη επεξεργασία για την προβολή τους οι εικόνες. • Χωρίς τη συστοιχία φακών εμφανίζεται διπλή θολή εικόνα. • Δυσκολία στην ευθυγράμμιση των φακών με την οθόνη. • Παρεμβολή μεταξύ των εικόνων. • Η ανάλυση της οθόνης διαιρείται ανάλογα τα επιθυμητά σημεία θέασης.
Ολόγραμμα	<ul style="list-style-type: none"> • Το αποτέλεσμα είναι πιστή αντιγραφή του τρισδιάστατου αντικειμένου. 	<ul style="list-style-type: none"> • Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές.
Ογκομετρική Οθόνη	<ul style="list-style-type: none"> • Η εικόνα είναι ορατή από όλες τις γωνίες. 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλο κόστος.
Οθόνη αμφιβληστροειδούς	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ανάλυση οθόνης. • Υψηλή αντίθεση και φωτεινότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Η περιοχή μεταξύ της πηγής φωτός και του οφθαλμού είναι τόσο μικρή που μπορεί να προκληθεί βλάβη σε αυτόν.

Ολοκληρωτική απεικόνιση	<ul style="list-style-type: none"> • Η εικόνα είναι ορατή ανεξάρτητα από τη θέση παρατήρησης. • Συγκριτικά με άλλες μεθόδους σε αυτή έχουμε παράλλαξη οριζόντια και κάθετα της εικόνας. 	<ul style="list-style-type: none"> • Παρεμβολή μεταξύ των γειτονικών στοιχειωδών εικόνων. • Η ανάλυση μιας εικόνας μακριά από τον πίνακα φακών υποβαθμίζεται. Αυτό το πρόβλημα οφείλεται στην διάθλαση από κάθε φακό. • Όσο βελτιώνεται η ανάλυση τόσο μειώνεται η αντίληψη του βάθους και το αντίστροφο.
Φράγμα παράλλαξης	<ul style="list-style-type: none"> • Μπορεί να χρησιμοποιηθεί απλή οθόνη υγρών κρυστάλλων με την προσθήκη μιας μάσκας με οπές και φράγματα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ο παρατηρητής πρέπει να έχει συγκεκριμένη σταθερή θέση μπροστά στην οθόνη. • Η ανάλυση της οθόνης που βλέπει το κάθε μάτι είναι η μισή • Μόνο ένα μικρό ποσοστό του εκπεμπόμενου φωτός από την οθόνη διέρχεται από τα φράγματα της μάσκας με αποτέλεσμα τη μείωση της φωτεινότητας.

High rank 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερη φωτεινότητα συγκριτικά με το σύστημα με φράγμα παράλλαξης. • Καλή χωρική ανάλυση. • Δεν χρειάζεται ο θεατής να έχει συγκεκριμένη θέση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγαλύτερο κόστος συγκριτικά με το σύστημα με φράγμα παράλλαξης.
Οθόνη κεφαλής	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ανάλυση. • Ενίσχυση στερεοσκοπικής αίσθησης. • Προσεγγίζει καλύτερα από τις άλλες οθόνες τη στερεοσκοπική όραση. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλό κόστος.

3.3 Τεχνικές Δημιουργίας Βάθους

Οι τεχνικές δημιουργίας βάθους είναι κάποιοι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει προβολή μιας εικόνας η σκηνής με τέτοιο τρόπο ώστε ο εγκέφαλος να αντιληφθεί την διάσταση του βάθους χωρίς να υφίσταται στην πραγματικότητα. Αυτό γίνεται επειδή δίνουμε ένα ενισχυμένο οπτικό ερέθισμα στον εγκέφαλο.

3.3.1 Ελεύθερη Προβολή (Freeviewing)

Το όρο ελεύθερη προβολή τον χρησιμοποιούμε για να αναφερθούμε στις μεθόδους που δεν χρησιμοποιούν καμία συσκευή προβολής.

Παράλληλη προβολή (Parallel viewing)

Σε αυτή τη μέθοδο η εικόνα που αντιστοιχεί στον αριστερό οφθαλμό τοποθετείται αριστερά και αυτή που αντιστοιχεί στο δεξιό στα δεξιά. Ο παρατηρητής κοιτάζει τις εικόνες παράλληλα σαν να είναι μια πραγματική σκηνή. Αυτό λόγω της φυσικής όρασης είναι δύσκολο διότι η εστίαση των ματιών και η διοφθαλμική σύγκλιση συνήθως

συντονίζονται. Για να επιτευχθεί αυτό οι εικόνες πρέπει να παρατηρηθούν από πολύ κοντά με χαλαρούς τους οφθαλμούς. Επίσης δεν πρέπει να γίνεται προσπάθεια εστίασης και σύγκλισης μέχρι τη στιγμή που θα εμφανιστεί μια τρίτη εικόνα η οποία είναι η σύντηξη των δύο. Αφού γίνει αυτό πρέπει ο παρατηρητής να απομακρυνθεί λίγο από τις εικόνες και έτσι θα δει μια τρισδιάστατη εικόνα. [25]

Διασταυρωμένη προβολή (Cross-eyed viewing)

Στην διασταυρωμένη προβολή οι εικόνες τοποθετούνται αντίστροφα, δηλαδή η εικόνα του δεξιού οφθαλμού στα αριστερά και αντίστοιχα του αριστερού δεξιά. Για να επιτευχθεί αυτή η μέθοδος ο παρατηρητής πρέπει να τοποθετήσει το δάκτυλό του ανάμεσα στις δύο εικόνες στην οθόνη. Στη συνέχεια αφού φέρει το δάκτυλο προς το μέρος του διατηρώντας το βλέμμα του στο δάκτυλο, σε μια συγκεκριμένη απόσταση θα αρχίσει να εμφανίζεται μια τρισδιάστατη σκηνή.[25]

3.3.2 Σύστημα Chromadepth

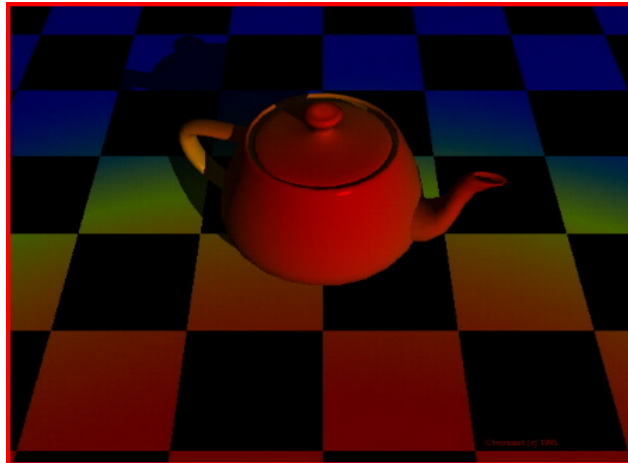
Αποτελεί μια τεχνική που δημιουργεί ψευδαίσθηση τρισδιάστατης αντίληψης. Σε αυτό το σύστημα οι φακοί των γυαλιών είναι κατασκευασμένοι από μικροσκοπικά πρίσματα και λόγω της διάθλασης του κάθε χρώματος σε αυτά δημιουργείται η ψευδαίσθηση ότι το κάθε χρώμα παίρνει διαφορετική θέση στο χώρο.[26]

Πλεονεκτήματα

- Χωρίς τη χρήση γυαλιών η εικόνα φαίνεται δισδιάστατη.
- Για την αντίληψη του βάθους απαιτείται μόνο μια εικόνα.
- Τα γυαλιά έχουν χαμηλό κόστος.

Μειονεκτήματα

- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε σοβαρή εφαρμογή, αφού τα χρώματα και το βάθος τους είναι προκαθορισμένο.



(Πηγή ιστοσελίδα: <https://blenderartists.org/uploads/default/original/3X/1/9/199b9bd40214cc>)

Σχήμα 3.11: Chromadepth Εικόνα

3.3.3 Μέθοδος Pulfrich

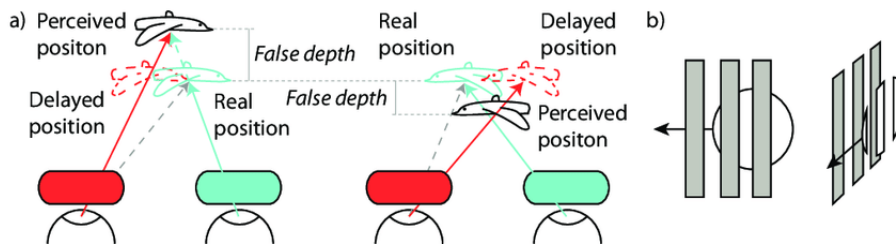
Αυτή η μέθοδος στηρίζεται στο φαινόμενο Pulfrich , κατά το οποίο όταν τα μάτια λαμβάνουν το οπτικό σήμα με χρονική διαφορά μεταξύ τους και ένα αντικείμενο κινείται οριζόντια τότε αυτό ερμηνεύεται από τον εγκέφαλο ως βάθος. Τα γυαλιά που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μέθοδο αποτελούνται από ένα κανονικό και ένα σκοτεινό φακό. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται η χρονική διαφορά που λαμβάνεται το οπτικό σήμα.[27]

Πλεονεκτήματα

- Χωρίς την χρήση των γυαλιών η εικόνα φαίνεται δισδιάστατη.

Μειονεκτήματα

- Δεν έχει πολλές εφαρμογές, αφού το φαινόμενο λειτουργεί μόνο κατά την οριζόντια κίνηση.



Σχήμα 3.12: Μέθοδος Pulfrich [7]

3.3.4 Αυτοστερεόγραμμα (Autostereogram)

Το αυτοστερεόγραμμα είναι ένα στερεόγραμμα στο οποίο ο θεατής δεν χρησιμοποιεί στερεοσκόπιο για την παρατήρηση του. Δημιουργεί την ψευδαίσθηση της τρισδιάστατης σκηνής από μια δισδιάστατη εικόνα η οποία αποτελείται από σχέδια τα οποία επαναλαμβάνονται οριζόντια. Όταν ο παρατηρητής τα κοιτάει φαίνεται τα σχέδια να μετακινούνται. Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους μπορεί κάποιος να δει ένα αυτοστερεόγραμμα. Ο πρώτος είναι με την απόκλιση των οφθαλμών από τη μύτη και ο δεύτερος με τη σύγκλιση των οφθαλμών. Τα περισσότερα αυτόστερεογράμματα είναι φτιαγμένα για να παρατηρούνται μόνο με τον πρώτο τρόπο.[28]

3.3.5 Κινούμενη Στερεογραφία

Η κινούμενη στερεογραφία είναι μια τεχνική στερεοσκοπικής απεικόνισης στην οποία οι εικόνες ενός στερεοσκοπικού ζεύγους εναλλάσσονται γρήγορα με αποτέλεσμα ο εγκέφαλος να το ερμηνεύει ως τρισδιάστατη εικόνα. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ένα οπτικό τέχνασμα και όχι πραγματική τρισδιάστατη εικόνα.[29]

Κεφάλαιο 4

Ενδοσκόπιο

Το ενδοσκόπιο είναι ένα σωληνοειδές όργανο το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην ιατρική για οπτική εξέταση μέσα στο ανθρώπινο σώμα διαμέσου φυσικών κοιλοτήτων ή τεχνητών οπών. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελάχιστα επεμβατική χειρουργική αφού το μέγεθος του σωλήνα είναι συνήθως μερικά χιλιοστά, οπότε απαιτείται μικρή οπή για την εισαγωγή του. Τα συστήματα ενδοσκοπίου περιλαμβάνουν αισθητήρες για την καταγραφή και απεικόνιση σε κάποιου είδους οθόνη της εικόνας που λαμβάνουν. Μέσω του σωλήνα μεταφέρεται φως προς τη μια κατεύθυνση και λαμβάνεται η εικόνα από την άλλη. Ο σωλήνας του ενδοσκοπίου μπορεί να είναι είτε εύκαμπτος είτε άκαμπτος καθώς και το σχήμα ή το μήκος μπορεί να αλλάζει ανάλογα την χρήση του. Η εξέταση με τη χρήση του ενδοσκοπίου αναφέρεται ως ενδοσκόπηση.



Σχήμα 4.1: Εύκαμπτο και άκαμπτο ενδοσκόπιο

4.1 Στερεοσκοπικά συστήματα ενδοσκοπίου

Ο φυσικός κόσμος είναι τρισδιάστατος, οπότε τα 2D ενδοσκόπια χάνουν την πληροφορία βάθους. Αυτός ο περιορισμός μας στερεί τη δυνατότητα να αντιλαμβανόμαστε

την πολυπλοκότητα των αντικειμένων του πραγματικού κόσμου καθώς και να κατανοούμε τη σχέση μεταξύ τους. Οπότε η κατασκευή στερεοσκοπικών συστημάτων ενδοσκοπίου είναι απαραίτητη ώστε να μπορεί ο γιατρός να προσδιορίσει το μέγεθος, το σχήμα και την ακριβή θέση των ανατομικών δομών.

4.1.1 Συστήματα με δύο αισθητήρες

- **Οι Αισθητήρες τοποθετούνται στη βάση του ενδοσκοπίου**

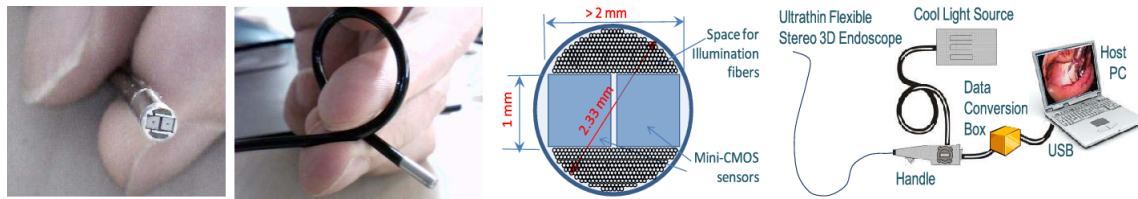
Μερικοί αισθητήρες υψηλής επίδοσης λόγω του μεγάλου μεγέθους τους και τον περιορισμό της διαμέτρου του ενδοσκοπίου τοποθετούνται στη βάση ενδοσκοπίου. Υπάρχουν αρκετά συστήματα που χρησιμοποιούν αυτό το σχεδιασμό, το πιο γνωστό από αυτά είναι το χειρουργικό σύστημα Da Vinci [8].

- **Οι αισθητήρες τοποθετούνται στην άκρη του ενδοσκοπίου**

Η πρόσφατη εξέλιξη των μικροσκοπικών αισθητήρων cmos καθιστά εφικτή τη δημιουργία στερεοσκοπικού συστήματος ενδοσκοπίου όπου οι δύο αισθητήρες τοποθετούνται στην άκρη του. Η εταιρία Xigen LLC [8] έχει αναπτύξει ένα μικροσκοπικής διαμέτρου εύκαμπτο στερεοσκοπικό ενδοσκόπιο με διάμετρο 2,8mm.



Σχήμα 4.2: Ενδοσκόπιο ρομποτικού χειρουργικού συστήματος Da Vinci [8]



Σχήμα 4.3: Ενδοσκοπικό σύστημα με δύο αισθητήρες της xigen LLC [8]

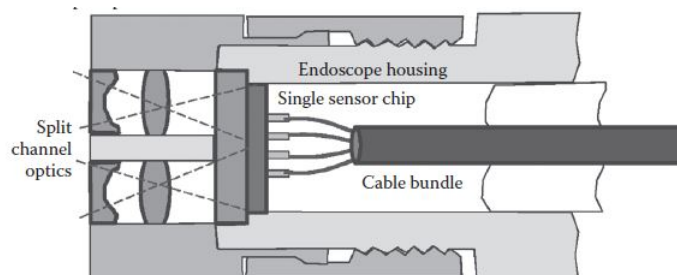
4.1.2 Συστήματα με ένα αισθητήρα

- **Χωριστά οπτικά κανάλια**

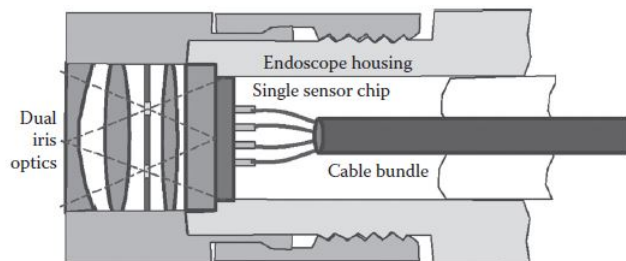
Αντί για τη χρήση δύο αισθητήρων για την απόκτηση του στερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων, πολλά συστήματα χωρίζουν την περιοχή ενός αισθητήρα σε δύο μέρη χρησιμοποιώντας ειδικά σχεδιασμένα οπτικά για τον διαχωρισμό της εικόνας και εν τέλει την απόκτηση του ζεύγους.[8]

- **Δύο ίριδες**

Άλλη μια σχεδίαση με ένα αισθητήρα περιλαμβάνει ένα οπτικό κανάλι αλλά δύο ίριδες. Οι εικόνες που προέρχονται από διαφορετικές ίριδες καταγράφονται σε διαφορετικό σημείο στην ενεργή περιοχή του αισθητήρα με αποτέλεσμα να λαμβάνουμε πάλι το ζεύγος.[8]



Σχήμα 4.4: Ενδοσκοπικό σύστημα με έναν αισθητήρα και δύο οπτικά κανάλια. [8]



Σχήμα 4.5: Ενδοσκοπικό σύστημα με έναν αισθητήρα και δύο δύο ίριδες. [8]

Κεφάλαιο 5

Υλοποίηση Λογισμικού

Αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή του λογισμικού που δημιουργήθηκε σε αυτή την εργασία. Αποτελείται από δύο ενότητες, όπου στην πρώτη περιγράφεται η δημιουργία μιας γραφικής διεπαφής για το χειρισμό του υλικού. Η δεύτερη ενότητα περιέχει τα βήματα και τους αλγόριθμους για την διαδικασία στερεοσκοπικής αντιστοίχισης και την εξαγωγή του χάρτη παράλλαξης.

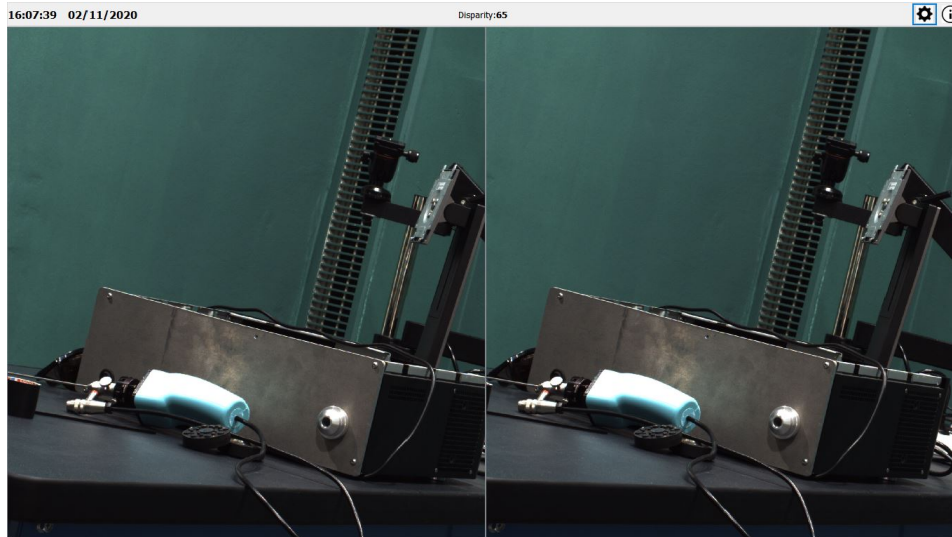
5.1 Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI)

Το κομμάτι του λογισμικού που αναφέρεται στην διεπαφή του χρήστη υλοποιήθηκε στην πλατφόρμα Qt Creator στην γλώσσα προγραμματισμού C++ . Στόχος του είναι η διάταξη των εικόνων η μια δίπλα στην άλλη για την προβολή τους στην οθόνη κεφαλής. Εκτός από αυτό, προσφέρει στο χρήστη του συστήματος διάφορες λειτουργίες και τη δυνατότητα να ρυθμίζει τις παραμέτρους των καμερών. Οι λειτουργίες του προγράμματος αναφέρονται στην μετακίνηση των εικόνων των παραθύρων, στους δύο άξονες, την μεγέθυνση και σμίκρυνση τους, καθώς και την καταγραφή βίντεο και εικόνων που αποθηκεύονται σε ένα φάκελο στο σκληρό δίσκο. Με τον όρο παραμέτροι καμερών εννοούμε το Gain, το Exposure , το White Balance και τη φωτεινότητα.

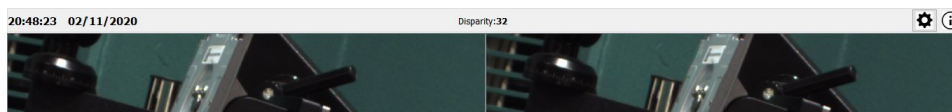
5.1.1 Κύριο Παράθυρο

Το κύριο παράθυρο της εφαρμογής αποτελείται από δύο παράθυρα όπου το καθένα καταλαμβάνει το μισό της οθόνης και μια μπάρα εργαλείων. Στα παράθυρα προβάλλονται οι εικόνες από την δεξιά και την αριστερή κάμερα. Η μπάρα εργαλείων αποτελείται από δύο μπουτόν όπου το ένα ανοίγει το παράθυρο ρυθμίσεων των παραμέτρων των καμερών και το άλλο ανοίγει ένα παράθυρο που αναφέρει πληροφορίες σχετικά με τις συντομεύσεις του πληκτρολογίου που εκτελούν τις υπόλοιπες λειτουργίες του προγράμματος. Η μπάρα εργαλείων έχει τη δυνατότητα να αποκρύπτεται,

ώστε να μην εμποδίζει την εικόνα όταν δίνεται ως είσοδος στην οθόνη κεφαλής. Επίσης στη μπάρα εμφανίζεται η ημερομηνία, η ώρα και η οριζόντια παράλλαξη του στερεοσκοπικού ζεύγους μετρημένη σε εικονοστοιχεία.



Σχήμα 5.1: Κύριο παράθυρο με τη μπάρα εργαλείων.



Σχήμα 5.2: Μπάρα εργαλείων

5.1.2 Παράθυρο Ρυθμίσεων

Το παράθυρο ρυθμίσεων περιλαμβάνει τις ρυθμίσεις των παραμέτρων για τις κάμερες.

- **Exposure**

Αναφέρεται στο ποσοστό του φωτός ανά μονάδα επιφάνειας που φτάνει στον αισθητήρα της κάμερας. Το αποτέλεσμα στην αύξηση της τιμής της παραμέτρου είναι η αύξηση της φωτεινότητας και η μείωση του ρυθμού καταγραφής αφού μειώνονται τα πλαίσια που καταγράφουμε ανά μονάδα χρόνου. [30]

- **Gain**

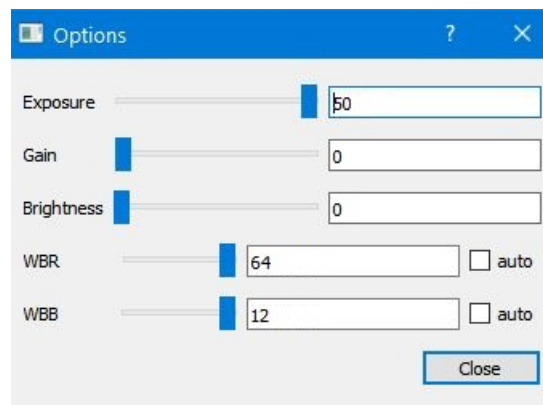
Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στο κέρδος από την ενίσχυση του σήματος της κάμερας ηλεκτρονικά. Η εικόνα εξόδου γίνεται πιο φωτεινή, αλλά μαζί με το χρήσιμο σήμα ενισχύεται και ο θόρυβος.[30]

- **Brightness**

Αλλάζοντας αυτή την τιμή αυξάνουμε ή μειώνουμε τη φωτεινότητα της εικόνας. [30]

- **WBR-WBB (White Balance)**

Είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας του χρώματος της εικόνας. Κατά τη ρύθμιση αυτή εισάγεται αντίθετης θερμοκρασίας χρώμα, όσο χρειάζεται ώστε η θερμοκρασία να γίνει ουδέτερη. [30]



Σχήμα 5.3: Παράθυρο Ρυθμίσεων Κάμερας

5.1.3 Παράθυρο Πληροφοριών

Το παράθυρο αυτό ανοίγει από το μπουτόν στην μπάρα εργαλείων του κύριου παραθύρου. Περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν τις λειτουργίες του προγράμματος και τα πλήκτρα από το πληκτρολόγιο που τις εκτελούν.

- **Καταγραφή Εικόνας**

Η καταγραφή εικόνας γίνεται με το πλήκτρο F1 , έπειτα η εικόνα αποθηκεύεται σε διάταξη τέτοια ώστε να είναι δυνατή η προβολή της στην οθόνη.

- **Καταγραφή Βίντεο**

Η καταγραφή βίντεο ξεκινάει πατώντας το πλήκτρο F2 και σταματάει πατώντας το πλήκτρο F3 .

- **Έξοδος**

Η έξοδος από την εκτέλεση του προγράμματος γίνεται πατώντας το πλήκτρο Esc ή το πλήκτρο Q. Η διαφορά τους είναι ότι με το δεύτερο πλήκτρο γίνεται αποθήκευση των καταγραφών που έχουμε κάνει από την αρχή της εκτέλεσης του προγράμματος. Σε διαφορετική περίπτωση οι καταγραφές χάνονται.

- **Μετακίνηση εικόνων**

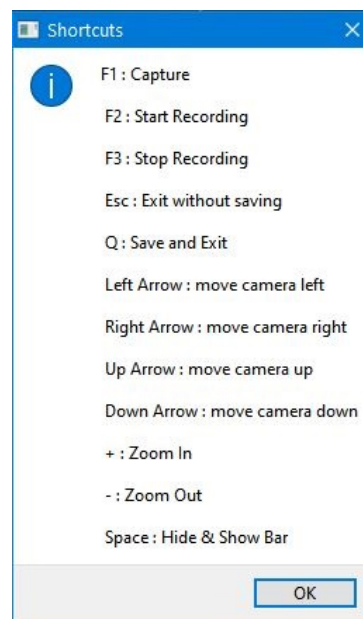
Οι εικόνες από τις κάμερες μπορούν να μετακινηθούν στους δύο άξονες ανεξάρτητα ή μια από την άλλη. Αυτό επιτυγχάνεται κάνοντας αριστερό κλικ στην εικόνα που θέλουμε να μετακινήσουμε και στη συνέχεια πατώντας τα αντίστοιχα πλήκτρα βελάκια από το πληκτρολόγιο εκτελείται η αντίστοιχη κίνηση. Η οριζόντια κίνηση χρησιμοποιείται για την αλλαγή της παράλλαξης. Η παράλλαξη των δύο όψεων φαίνεται στην μπάρα εργαλείων.

- **Μεγέθυνση-Σμίκρυνση**

Η μεγέθυνση επιτυγχάνεται με το πλήκτρο + του πληκτρολογίου και αντίστοιχα η σμίκρυνση με το πλήκτρο -. Οι εικόνες από τις κάμερες εκτελούν αυτή τη λειτουργία ταυτόχρονα μεταξύ τους.

- **Απόκρυψη-Εμφάνιση μπάρας εργαλείων**

Η απόκρυψη και η εμφάνιση της μπάρας εργαλείων του κύριου παραθύρου εκτελείται με το πλήκτρο space. Σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι η προβολή των εικόνων στην οθόνη κεφαλής σε 3D λειτουργία.



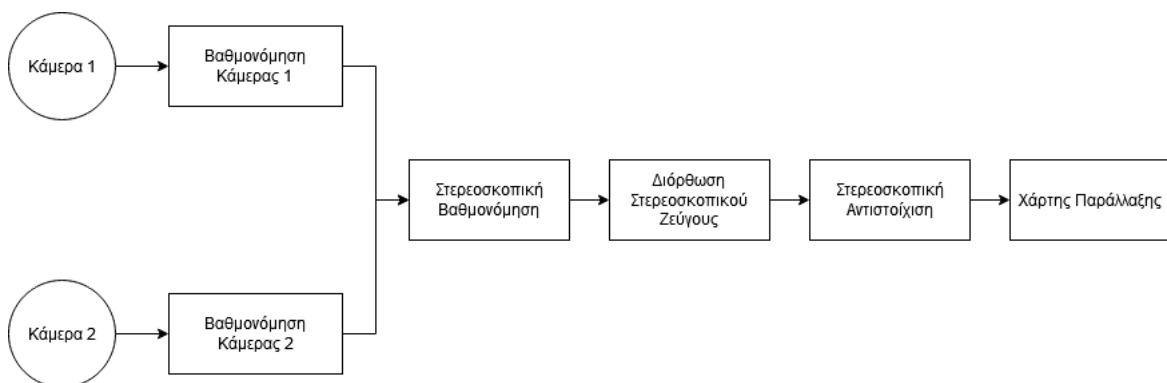
Σχήμα 5.4: Παράθυρο Πληροφοριών

5.2 Εξαγωγή Χάρτη Παράλλαξης-Βάθους

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία για την εξαγωγή του χάρτη βάθους από το στερεοσκοπικό ζεύγος των εικόνων. Για τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται

το περιβάλλον της Matlab η έκδοση R2018a.

Η διαδικασία για την εξαγωγή του χάρτη βάθους περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων τα οποία φαίνονται στο διάγραμμα 5.5. Αρχικά γίνεται βαθμονόμηση των καμερών για την εξαγωγή των εγγενών και εξωγενών παραμέτρων. Στη συνέχεια με τη χρήση των παραμέτρων εκτελείται ένας αλγόριθμος στερεοσκοπικής διόρθωσης για την ευθυγράμμιση του στερεοσκοπικού ζεύγους των εικόνων στο ίδιο επιπολικό επίπεδο. Στο επόμενο βήμα είναι δυνατή η εφαρμογή ενός αλγορίθμου στερεοσκοπικής αντιστοίχισης, αφού με τη διόρθωση έχει εξαλειφθεί η κάθετη ανισότητα. Με τη διαδικασία της στερεοσκοπικής αντιστοίχισης γίνεται η εξαγωγή του χάρτη παράλλαξης και έπειτα η μετατροπή του σε χάρτη βάθους.

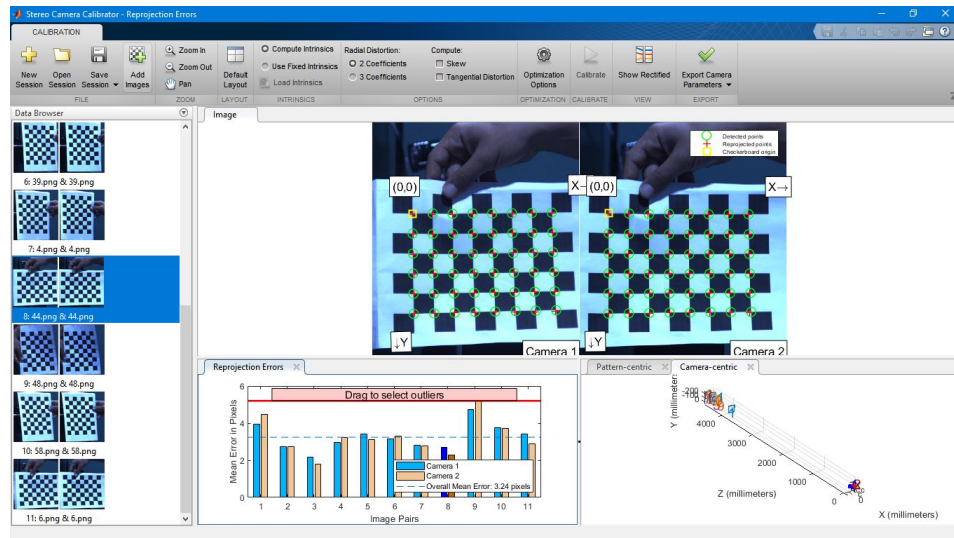


Σχήμα 5.5: Εξαγωγή Χάρτη Παράλλαξης-Βάθους

5.2.1 Βαθμονόμηση Καμερών (Camera Calibration)

Η διαδικασία της βαθμονόμησης περιλαμβάνει τη βαθμονόμηση της κάθε κάμερας χωριστά, καθώς και τη βαθμονόμηση του στερεοσκοπικού ζεύγους. Από το πρώτο κομμάτι της βαθμονόμησης προσδιορίζονται οι ενδογενείς παράμετροι της κάθε κάμερας όπως είναι το εστιακό μήκος (focal length), το οπτικό κέντρο (Optical Center), οι συντελεστές παραμόρφωσης (Distortion coefficients), και ο λόγος πλάτος προς μήκος (Aspect ratio). Η βαθμονόμηση του ζεύγους των εικόνων αναφέρεται στην διαδικασία προσδιορισμού των εξωγενών παραμέτρων, δηλαδή του προσανατολισμού και της θέσης που έχουν οι δύο κάμερες στο χώρο.

Για τη βαθμονόμηση στις κάμερες χρησιμοποιούμε την εφαρμογή Stereo Camera Calibrator της Matlab. Για να εκτελέσουμε την βαθμονόμηση εισάγουμε στην εφαρμογή ζεύγη εικόνων που έχουμε καταγράψει όπου φαίνεται ένα σχέδιο σκακιέρας σε διάφορες θέσεις καθώς και τις πραγματικές διαστάσεις του τετραγώνου του σχεδίου. Η εφαρμογή για καλύτερο αποτέλεσμα απαιτεί 10 με 20 τουλάχιστον τέτοια ζεύγη. Στην συνέχεια της διαδικασίας παράγονται ο πίνακας με τις παραμέτρους της ενδογενούς και εξωγενούς βαθμονόμησης.



Σχήμα 5.6: Stereo Camera Calibrator App

5.2.2 Διόρθωση των εικόνων (Stereo Rectification)

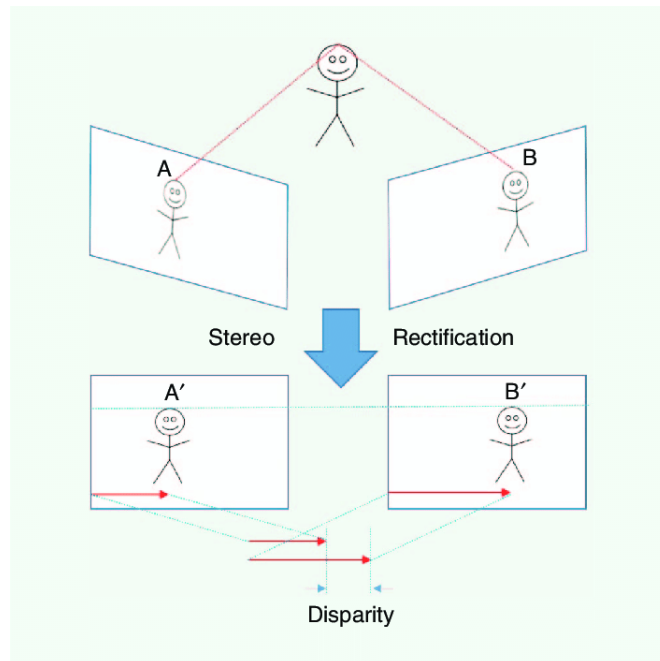
Η διόρθωση του ζεύγους των εικόνων είναι η διαδικασία κατά την οποία οι δύο εικόνες ευθυγραμμίζονται έτσι ώστε να μην υπάρχει κατακόρυφη ανισότητα και έρχονται στο ίδιο επιπολικό επίπεδο. Τα αποτελέσματα της εξωγενούς βαθμονόμησης είναι απαραίτητα στους περισσότερους αλγόριθμους που εκτελούν στερεοσκοπική διόρθωση. Κάποιοι από τους πιο γνωστούς είναι οι Fussiello, Hartley, Bouguet .

Για τη διόρθωση των εικόνων χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `rectifyStereoImages` της Matlab όπου σαν είσοδο δέχεται ένα οποιοδήποτε ζεύγος εικόνων καταγεγραμμένο από την συγκεκριμένη διάταξη και τον πίνακα με τις παραμέτρους βαθμονόμησης. Ως έξοδο της συνάρτησης παίρνουμε ένα ζευγάρι διορθωμένων εικόνων.

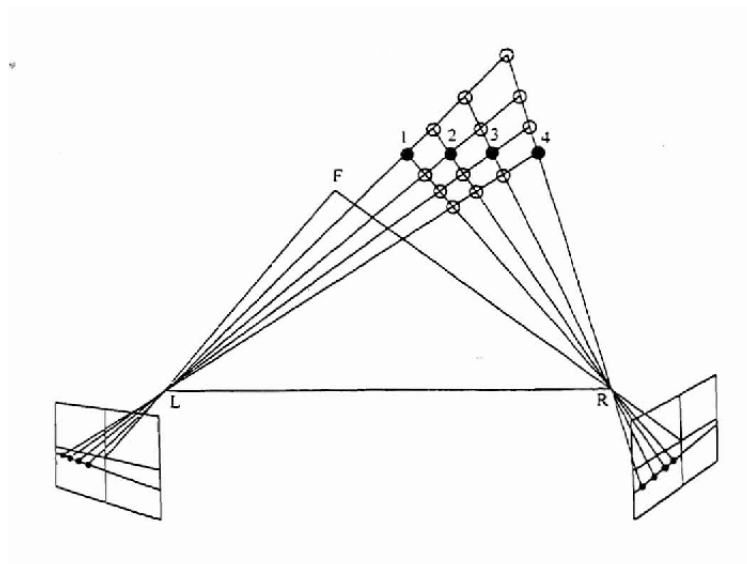
5.2.3 Στερεοσκοπική αντιστοίχιση (Stereo Matching)

Στερεοσκοπική αντιστοίχιση είναι η διαδικασία αντιστοίχισης των σημείων των δύο εικόνων, ώστε να υπολογίσουμε την διαφορά της θέσης σε κάθε σημείο, δηλαδή την οριζόντια παράλλαξη. Το αποτέλεσμα της αντιστοίχισης είναι ο χάρτης παράλλαξης-βάθους. Κάποιοι αλγόριθμοι για στερεοσκοπική αντιστοίχιση είναι οι Feature Matching, Block Matching και Dynamic Programming.

Για τη στερεοσκοπική αντιστοίχιση χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `StereoBM` η οποία χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Block Matching . Στην συνάρτηση αυτή δίνουμε ως είσοδο τις δύο διορθωμένες εικόνες καθώς και κάποιες τιμές για το εύρος και το μέγεθος του Block .Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι ο χάρτης παράλλαξης.



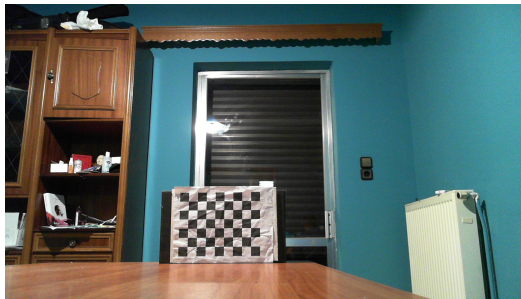
Σχήμα 5.7: Στερεοσκοπική Διόρθωση [9]



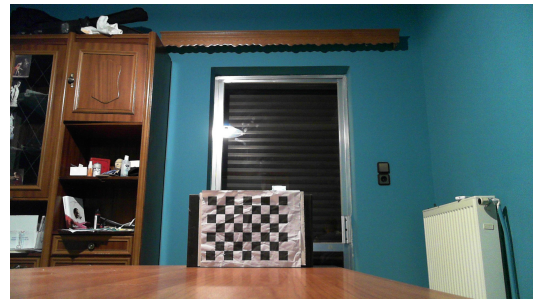
Σχήμα 5.8: Στερεοσκοπική Αντιστοίχιση [10]

5.2.4 Χάρτης Βάθους (Depth Map)

Ο χάρτης παράλλαξης-βάθους είναι μια δισδιάστατη απεικόνιση των επιπέδων βάθους μιας τρισδιάστατης σκηνής. Πιο συγκεκριμένα το κάθε σημείο του χάρτη αντιπροσωπεύει τη μετατόπιση συντεταγμένων ενός σημείου της σκηνής ανάμεσα στις δύο προοπτικές και απεικονίζεται στην κλίμακα του γκρι. Όσο πιο κοντά εμφανίζεται ένα σημείο τόσο μεγαλύτερη παράλλαξη έχουμε και τόσο πιο φωτεινή απόχρωση χρησιμοποιείται για τον χρωματισμό του. Τα σημεία με τις πιο σκοτεινές αποχρώσεις βρίσκονται δηλαδή σε μεγαλύτερο βάθος. Εκτός την κλίμακα του γκρι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιαδήποτε χρωματική κλίμακα και τα αποτελέσματα θα είναι ανάλογα με τη φωτεινότητα των αποχρώσεων.

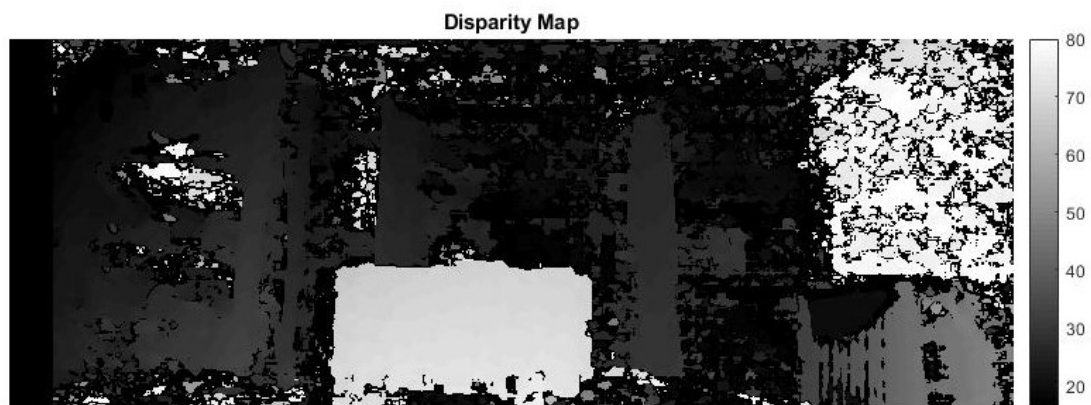


(α') Αριστερή Εικόνα

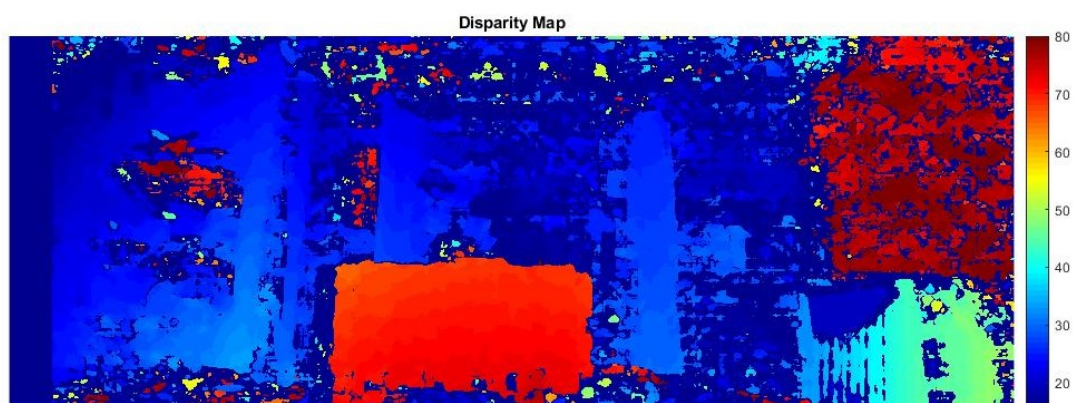


(β') Δεξιά Εικόνα

Σχήμα 5.9: Στερεοσκοπικό ζευγάρι εικόνων



Σχήμα 5.10: Κλίμακα του γκρι



Σχήμα 5.11: Έγχρωμη κλίμακα

Κεφάλαιο 6

Πειραματικές Διατάξεις

Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την μελέτη και ανάπτυξη δύο στερεοσκοπικών συστημάτων. Σκοπός των συγκεκριμένων διατάξεων είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργία των στερεοσκοπικών συστημάτων, τα οποία είναι απαραίτητα για την υλοποίηση του συστήματος του ενδοσκοπίου που αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

6.1 Σύστημα δύο καμερών σε ράγα

6.1.1 Περιεχόμενα συστήματος

- **Κάμερα Omegon veLOX 178 C Color**
Ο πίνακας 7.1 περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάμερας.
- **Φακός Edmund optics 25mm C series** Ο πίνακας 6.1 περιέχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φακού.
- **Βάση στήριξης σε ράγα για τις κάμερες.**

6.1.2 Περιγραφή Συστήματος

Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει δύο κάμερες οι οποίες τοποθετούνται παράλληλα μεταξύ τους επάνω σε μια ράγα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της απόστασης μεταξύ τους όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1. Στις κάμερες τοποθετούνται οι δύο φακοί των οποίων τα χαρακτηριστικά αναφέρονται στον πίνακα 6.1. Αποτελεί ένα απλό στερεοσκοπικό σύστημα όπου η κάθε κάμερα καταγράφει μια εικόνα που αντιστοιχεί στον ένα οφθαλμό.

Οι δύο οφθαλμοί λαμβάνουν δύο ελαφρώς διαφορετικές εικόνες. Μετακινώντας τις κάμερες μπορούμε να αλλάξουμε την απόσταση μεταξύ τους και κατά συνέπεια την

Πίνακας 6.1: Χαρακτηριστικά Φακού

Focal Length	25mm
Aperture	f/1.4 - f/17
Magnification Range	0X - 0.025X
Coating	425 - 675nm BBAR
Numerical Aperture NA, Object Side	0.023
Iris Option	Variable
Mount	C-Mount
Length (mm)	30.5
Weight (g)	49



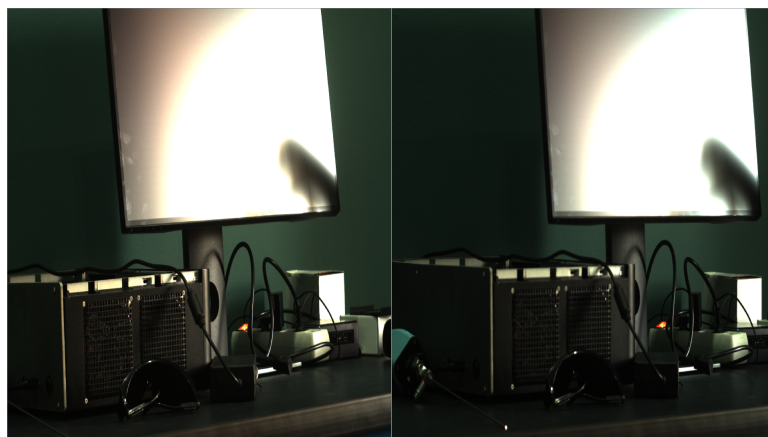
Σχήμα 6.1: Διάταξη δυο κάμερες με ράγα

παράλλαξη των εικόνων που λαμβάνει το οπτικό σύστημα. Οι κάμερες συνδέονται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και με την διεπαφή που περιγράφηκε στην ενότητα 5.1. Μέσω της διεπαφής γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων των καμερών και οι δύο εικόνες από τις κάμερες προβάλλονται στην οθόνη κεφαλής στον οφθαλμό για τον οποίο προορίζεται η καθεμία.

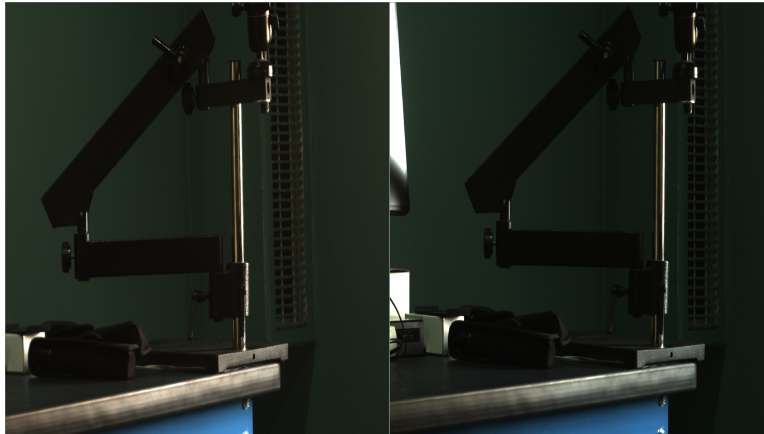
6.1.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Με τη διάταξη αυτή κάναμε δοκιμές για τον προσδιορισμό της απόστασης μεταξύ των καμερών, ώστε να έχουμε τη μέγιστη αίσθηση βάθους. Καταλήξαμε ότι για βάθος σκηνής 5 έως 8 μέτρα (μέση τιμή=6,5 m) η βέλτιστη απόσταση των καμερών αντιστοιχεί στο εύρος 5 ως 10 cm (μέση τιμή=7,5 cm). Μέσα σε αυτό το εύρος έχουμε περίπου την ίδια αντίληψη βάθους και η διαφορά δεν είναι ανιχνεύσιμη οπτικά. Όπως

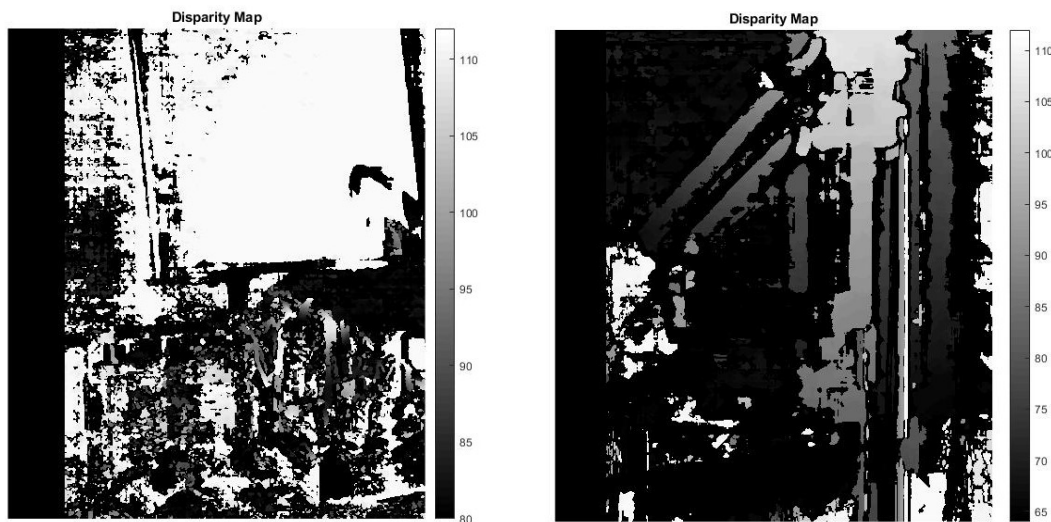
παρατηρούμε σε αυτό το εύρος είναι και η απόσταση μεταξύ των ανθρώπινων οφθαλμών, όπου σε πολλές εφαρμογές θεωρείται η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των οπτικών κέντρων στις κάμερες ενός στερεοσκοπικού συστήματος. Για μεγαλύτερο βάθος σκηνής η απόσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη, αφού και οι ανθρώπινοι οφθαλμοί αποκλίνουν. Για να έχουμε μια καλή εκτίμηση για την απόσταση αυτή μπορούμε να την επιλέξουμε, έτσι ώστε να διατηρούμε το λόγο βάθους προς απόσταση σταθερό. Δηλαδή αν ορίσουμε κτον λόγο αυτό, τότε $k = 6.5m/7.5cm \Rightarrow k = 86.6$. Επιπλέον ελέγξαμε αν μπορεί να δημιουργηθεί στερεοσκοπικό ζεύγος από μια κάμερα και να έχουμε επαρκή αίσθηση βάθους. Το ζεύγος το δημιουργήσαμε από την μια εικόνα, παίρνοντας λίγο μικρότερη περιοχή ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε τις μονοοφθαλμικές ζώνες και την παράλλαξη. Η αίσθηση του βάθους που έχουμε από την προβολή του νέου ζεύγους δεν είναι το ίδιο έντονη, όσα εικονοστοιχεία οριζόντια παράλλαξη και αν δημιουργήσουμε.



Σχήμα 6.2: Στερεοσκοπικό Ζεύγος 1



Σχήμα 6.3: Στερεοσκοπικό Ζεύγος 2



Σχήμα 6.4: Χάρτες για 1,2 στερεοσκοπικά ζεύγη

6.2 Διάταξη με κύβο διαχωρισμού δέσμης

6.2.1 Περιεχόμενα συστήματος

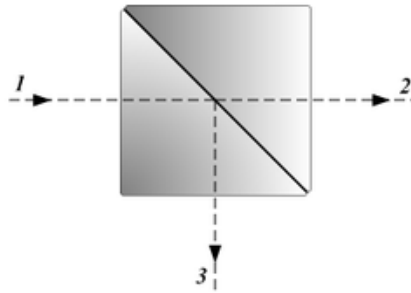
- **Κάμερα Omegon veLOX 178 C Color**

Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιείται η κάμερα χωρίς το περίβλημα της και ο αισθητήρας καταγράφει απευθείας από το cube χωρίς τη χρήση φακού.

- **Διαχωριστής δέσμης τύπου κύβου (Cube beam splitter)**

Ένας διαχωριστής δέσμης είναι μια οπτική συσκευή η οποία μπορεί να χωρίσει

μια προσπίπτουσα δέσμη φωτός σε δύο. Ο διαχωριστής δέσμης μπορεί να έχει είτε μορφή κύβου είτε μορφή πλάκας. Ο διαχωριστής τύπου κύβου αποτελείται από δύο τριγωνικά πρίσματα κολλημένα μεταξύ τους.[31]



(Πηγή ιστοσελίδα: <https://media.cheggcdn.com/media/f68/f680a91f-78ca-4ad0-9b2e-6c5a09fe94e7/php91EKAU>)

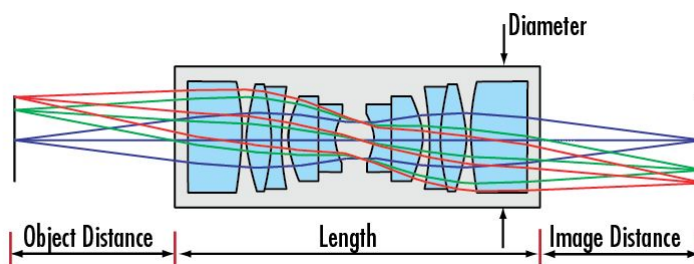
Σχήμα 6.5: Διαχωριστής δέσμης σε μορφή κύβου

- **Φακός Edmund optics 25mm C series**

Τα χαρακτηριστικά του φακού φαίνονται στον πίνακα 6.1.

- **Φακοί Μεταβίβασης(Relay lens)**

Οι φακοί μεταβίβασης χρησιμοποιούνται για την επέκταση των συστημάτων απεικόνισης ή για την αντιστροφή των εικόνων. Τους συναντάμε συχνά σε συστήματα ενδοσκοπίου, μικροσκοπίου και τηλεσκοπίου όπου το αντικείμενο που θέλουμε να απεικονίσουμε βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από το απεικονιστικό μέσο. Για την ακρίβεια μπορούμε να καταγράψουμε την ίδια ακριβώς εικόνα που θα είχαμε αν το σύστημα καταγραφής ήταν πιο κοντά στο αντικείμενο, όμως αυτό σε πολλές εφαρμογές δεν είναι δυνατό. Άλλη χρήση των φακών αυτών είναι η αύξηση του αριθμητικού ανοίγματος (numerical aperture) σε συστήματα όπου η διάμετρος εισόδου είναι μικρή. Ο τρόπος κατασκευής δεν είναι μοναδικός, καθώς υπάρχουν πολλές παραλλαγές για μεγάλο εύρος εφαρμογών.



(Πηγή ιστοσελίδας: <https://productimages.edmundoptics.com/4615.gif?ver=637525547634290296>)

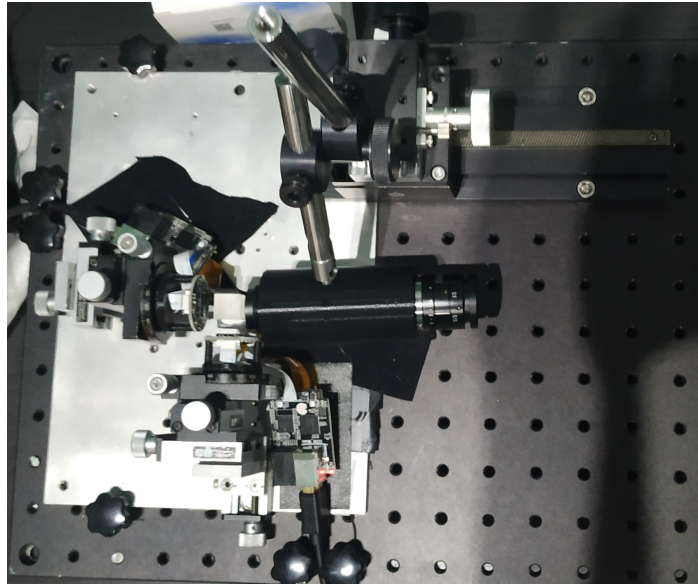
Σχήμα 6.6: Φακός Μεταβίβασης

6.2.2 Περιγραφή Συστήματος

Στη διάταξη αυτή οι αισθητήρες εικόνες τοποθετούνται κάθετα μεταξύ τους έτσι ώστε οι εξόδοι του κύβου, που λειτουργεί σαν διαχωριστής δέσμης, να βρίσκονται απέναντι από αυτούς. Επίσης είναι στερεωμένοι σε βάσεις οι οποίες επιτρέπουν την κίνηση τους στους τρεις άξονες του χώρου. Ο φακός μεταβίβασης είναι τοποθετημένος μπροστά από την είσοδο του διαχωριστή δέσμης και ακολουθείται από τον φακό, ο οποίος είναι προσαρτημένος στην μια άκρη του.

Η διάταξη αυτή μας δίνει σαν αποτέλεσμα ένα στερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων οι οποίες προέρχονται από τις εξόδους του κύβου. Ο διαχωριστής δέσμης τύπου κύβου λαμβάνει στην είσοδο του μια εικόνα η οποία προέρχεται από την συστοιχία φακών και στη συνέχεια την χωρίζει σε δύο εικόνες οι οποίες καταγράφονται από τους δύο αισθητήρες. Την θέση των αισθητήρων την ρυθμίζουμε ώστε στους άξονες y και z να έχουν ίδια θέση σε σχέση με τον κύβο. Τη θέση στον άξονα x την αλλάζουμε ώστε να επιτύχουμε την κατάλληλη παράλλαξη.

Οι δύο εικόνες από τους αισθητήρες διαμορφώνονται κατάλληλα η μια δίπλα στην άλλη με τη χρήση του λογισμικού της ενότητας 5.1, έπειτα γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση των παραμέτρων των αισθητήρων και δίνονται ως είσοδος στην οθόνη κεφαλής όπου προβάλλονται.



Σχήμα 6.7: Διάταξη με διαχωριστή δέσμης

6.2.3 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Το στερεοσκοπικό ζεύγος που καταγράφει η συγκεκριμένη διάταξη φαίνεται στο σχήμα 6.8 και η παράλλαξη ρυθμίζεται μετακινώντας τους αισθητήρες στον οριζόντιο άξονα. Η αίσθηση του βάθους είναι αντιληπτή σε ένα εύρος παράλλαξης, και είναι ισοδύναμη με το αντίστοιχο σύστημα που περιλαμβάνει έναν αισθητήρα και λείπει ο κύβος διαχωρισμού δέσμης, όπου η παράλλαξη γίνεται μέσω του λογισμικού με τη χρήση του πληκτρολογίου. Αυτό οφείλεται στην μικρή διαφοράς οπτικής γωνίας μεταξύ των προοπτικών που δεν του επιτρέπει να είναι μέσα στο χώρο Panum . Δεν προκύπτει δηλαδή πλήρης στερεοσκοπική όραση.



Σχήμα 6.8: Στερεοσκοπικό ζεύγος διάταξης με διαχωριστή δέσμης

Κεφάλαιο 7

Σύστημα στερεοσκοπικού Ενδοσκοπίου

7.1 Περιεχόμενα Συστήματος

- Κάμερα Omegon veLOX 178 C Color
Τα χαρακτηριστικά της κάμερας βρίσκονται στον πίνακα 7.1
- Άκαμπτο Ενδοσκόπιο
- Συζεύκτης ενδοσκοπικού σωλήνα (Endoscope coupler)
- Πηγή φωτός Αλογόνου και Οπτική Ίνα
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
- Οθόνη κεφαλής

7.1.1 Αντάπτορας Ενδοσκοπίου

Ο αντάπτορας χρησιμοποιείται σαν σύνδεσμος του ενδοσκοπίου με την κάμερα. Πολλές φορές περιλαμβάνει ρύθμιση εστιακού μήκους καθώς και λειτουργία εστίασης. Ο σύνδεσμος που χρησιμοποιούμε σε αυτό το σύστημα έχει c-mount υποδοχή για την κάμερα καθώς περιλαμβάνει και τις ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν.

7.1.2 Πηγή φωτός Αλογόνου και Οπτική Ίνα

Για να λάβει η κάμερα την εικόνα από το ενδοσκόπιο είναι απαραίτητος ο φωτισμός του αντικειμένου που θέλουμε να απεικονίσουμε. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε

Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά Κάμερας

Sensor type	CMOS Chip (Sony IMX178)
Size of chip (mm)	7.4×4.9
Pixel size	2.4
Chip - Diagonal (mm)	8.9
Resolution Photograph (Pixel)	3096×2080
Megapixel	6.4
Bit depth (Bit)	14
Images per second	59 (at full resolution)
Operating temperature	-10°C - +50°C
Connection	C-Mount
Length (mm)	71
Diameter (mm)	41
Weight (g)	90
Outer material	Aluminium
Colour camera	yes

πηγή αλογόνου η οποία συνδέεται με το ενδοσκόπιο μέσω μιας οπτικής ίνας. Η πηγή φωτός είναι ρυθμιζόμενης έντασης ώστε να προσαρμόζουμε τον φωτισμό στις συνθήκες.

7.1.3 Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

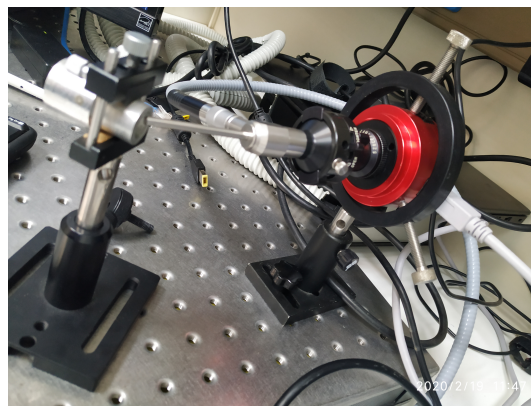
Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής είναι απαραίτητο κομμάτι του συστήματος. Σε αυτόν συνδέουμε με USB την κάμερα και με DisplayPort 1.4 την οθόνη κεφαλής. Στον υπολογιστή τα πλαίσια που καταγράφονται από την κάμερα, αφού γίνει η κατάλληλη επεξεργασία προβάλλονται στην οθόνη.

7.1.4 Οθόνη κεφαλής

Η Οθόνη που χρησιμοποιούμε είναι η Pimax 5K PLUS VR HEADSET της οποίας τα χαρακτηριστικά φαίνονται στον πίνακα 7.2. Η οθόνη κεφαλής αποτελείται από δύο οθόνες, μια για κάθε μάτι. Η απόσταση μεταξύ των ματιών μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα τις απαιτήσεις του χρήστη, ώστε οι οθόνες να ευθυγραμμίζονται με τους οφθαλμούς. Η επικοινωνία της οθόνης με τον χρήστη γίνεται μέσω του λογισμικού που προσφέρει η εταιρία Pimax όπου μέσω αυτού χρησιμοποιούμε την εφαρμογή BigScreen. Η εφαρμογή αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να προβάλλουμε στη μάσκα ότι εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή. Η ανάλυση που προσφέρει η οθόνη περιορίζεται από την ανάλυση της οθόνης του υπολογιστή.

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά οθόνης κεφαλής

Resolution	2×2560×1440(5K)
Field Of View (FOV)	200°
Refresh rate	until 144 Hz
MTP	<11ms
Screen type	Dual CLPL Panel
Ports	USB 2.0/3.0, DP 1.4
Body Size	28.1×10.8×13.6
Body Weight	470g
Software	Pitool v1.0.1.260



Σχήμα 7.1: Πρώιμο σύστημα Ενδοσκοπίου

7.2 Περιγραφή Συστήματος

Σε αυτή την υπό-ενότητα περιγράφεται η υλοποίηση του συστήματος του ενδοσκοπίου με την διασύνδεση των περιεχόμενων μερών που αναφέρθηκαν.

Ο ενδοσκοπικός σωλήνας συνδέεται μέσω του συνδέσμου με την κάμερα, καθώς επίσης συνδέεται μέσω της οπτικής ίνας με την πηγή φωτός αλογόνου. Στη συνέχεια συνδέουμε την κάμερα με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή για την μεταφορά και την επεξεργασία της εικόνας που καταγράφεται.

Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή εκτελούμε την διεπαφή-λογισμικό που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5. Στην διεπαφή γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις στις παραμέτρους της κάμερας και διαμορφώνεται ένα στερεοσκοπικό ζεύγος για την προβολή του στην οθόνη κεφαλής σε side by side διάταξη. Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούμε έναν αισθητήρα, οπότε δημιουργούμε από τη μια εικόνα που λαμβάνουμε το στερεοσκοπικό ζευγάρι χρησιμοποιώντας ένα μέρος της εικόνας ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη μετατόπιση συντεταγμένων (παράλλαξη).



(α') Ενδοσκοπικός Σωλήνας και σύνδεσμος για κάμερα



(β') Κάμερα



(Πηγή ιστοσελίδα:

https://www.thorlabs.com/image_xl.jpg)

(γ') Πηγή Αλογόνου και Οπτική Ίνα



(δ') Οθόνη Κεφαλής

Σχήμα 7.2: Περιεχόμενα Συστήματος Ενδοσκοπίου

Για να δημιουργήσουμε το στερεοσκοπικό ζευγάρι από τον ένα αισθητήρα, διαμορφώνουμε κατάλληλα τις δύο εικόνες, ώστε το αποτέλεσμα να προσεγγίζει την είσοδο του οπτικού συστήματος, στην φυσιολογική όραση. Ειδικότερα, ορίζουμε τις δύο εικόνες, έτσι ώστε το 60-70% του οπτικού πεδίου να καταλαμβάνεται από την διόφθαλμική ζώνη και το 15-20% από τις δύο μονοφθαλμικές ζώνες δεξιά και αριστερά του οπτικού πεδίου. Τα ποσοστά συμπίπτουν με το εύρος οπτικής γωνίας που φαίνεται στο σχήμα 2.1, όπου η διόφθαλμη όραση αντιστοιχεί σε 120° και η μονόφθαλμη για κάθε μάτι αντιστοιχεί σε 30° . Άλλος ένας τρόπος προσέγγισης της κατάλληλης παράλλαξης, είναι να χρησιμοποιήσουμε το λόγο που προκύπτει από την πρώτη πειραματική διάταξη στην ενότητα 6.1, αλλά αυτός ο λόγος μπορεί να φανεί χρήσιμος σε συστήματα με δύο αισθητήρες ώστε να προσδιορίσουμε τη απόσταση μεταξύ τους όταν τοποθετούνται παράλληλα.

Η μετάδοση της εικόνας γίνεται σε πραγματικό χρόνο και μεταφέρεται στην οθόνη κεφαλής. Ο χρήστης του ενδοσκοπίου αφού προσαρμόσει τη οθόνη στο κεφάλι του βλέπει τρισδιάστατα ό,τι λαμβάνει το ενδοσκόπιο.

7.3 Αποτελέσματα-Συμπεράσματα

Όπως διαπιστώνουμε και στην δεύτερη πειραματική διάταξη στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο χάρτης βάθους δεν αποτελεί μέτρο σύγκρισης της αίσθησης του βάθους, αφού ο βαθμός διαφοράς-παράλλαξης μεταξύ των εικόνων του στερεοσκοπικού ζεύγους δεν αποτελεί από μόνος του κριτήριο για την ικανοποιητική διόφθαλμη όραση.

Για να επιτευχθεί πλήρως η διόφθαλμη όραση θα πρέπει η διαφορά οπτικής γωνίας των εικόνων, να είναι τόσο ώστε οι εικόνες που τροφοδοτούμε στους αμφιβλαιοειδείς να ικανοποιούν την θεωρία του Panum και να προβάλλονται τα αντίστοιχα σημεία τους, σε αντίστοιχα αμφιβλαιοειδή σημεία στους δύο οφθαλμούς.

Στην περίπτωση του στερεοσκοπικού ενδοσκοπικού συστήματος που μελετάμε, έχουμε έναν αισθητήρα και την παράλλαξη την δημιουργούμε με την βοήθεια του λογισμικού-διεπαφής που έχουμε υλοποιήσει. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, παρόλο που η παράλλαξη είναι ορισμένη σωστά με διάφορες δοκιμές στο εύρος που πρέπει, να μην μας δίνει ικανοποιητικό αποτέλεσμα στην αίσθηση του βάθους. Σύμφωνα με τα στάδια που όρισε για την διόφθαλμη όραση ο Claude Worth βρισκόμαστε στο δεύτερο στάδιο όπου έχει γίνει η αισθητηριακή ταύτιση των εικόνων αλλά δεν έχουμε πλήρη διόφθαλμη όραση. Για να επιτευχθεί πλήρως η διόφθαλμη όραση, δηλαδή το τρίτο στάδιο, θα πρέπει οι εικόνες να καταγράφονται από δύο διαφορετικούς αισθητήρες τοποθετημένους παράλληλα. Συνεπώς να έχουμε ελαφρώς διαφορετική οπτική γωνία που να επιτρέπει να εκλαμβάνεται ένα αντικείμενο του χώρου εξέτασης στερεοσκοπικά, άρα να καταγράφεται μια ελαφρώς διαφορετική πλευρά του για την κάθε εικόνα του ζεύγους.



Σχήμα 7.3: Ζεύγη εικόνων ενδοσκοπίου

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και μελλοντικές βελτιώσεις συστήματος

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία αναπτύξαμε ένα σύστημα στερεοσκοπικής απεικόνισης στην ενδοσκόπηση. Ο σκοπός της εργασίας είναι η δημιουργία του συστήματος με στόχο να βελτιώσουμε την ακρίβεια απεικόνισης που έχουν τα συμβατικά δισδιάστατα ενδοσκοπικά συστήματα, καθώς και να αποφύγουμε προβλήματα που υπάρχουν σε άλλα στερεοσκοπικά συστήματα.

Συγκριτικά με τα συστήματα ενδοσκοπίου δισδιάστατης απεικόνισης, σε αυτό το σύστημα ο χρήστης μπορεί με ακρίβεια να μετακινήσει το ενδοσκόπιο κατά την εξέταση ή την χειρουργική επέμβαση, αφού αντιλαμβάνεται καλύτερα το χώρο. Επιπλέον δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση, το σχήμα και το μέγεθος των ανατομικών δομών με τη χρήση συμβατικού ενδοσκοπίου.

Πολλά στερεοσκοπικά συστήματα ενδοσκοπίου χρησιμοποιούν την μέθοδο του ανάγλυφου 3D για την προβολή του ζεύγους των εικόνων, η οποία παρουσιάζει δύο βασικά μειονεκτήματα που την καθιστούν ακατάλληλη για μια τέτοια εφαρμογή. Καταρχάς εμφανίζεται μεγάλη απώλεια χρωματικής πληροφορίας στην προβαλλόμενη εικόνα, καθώς επίσης συχνά παρουσιάζεται το φαινόμενο της παρεμβολής μεταξύ των εικόνων του στερεοσκοπικού ζεύγους. Αυτό συμβαίνει λόγω λάθους φιλτραρίσματος από τα γυαλιά. Εκτός την μέθοδο του ανάγλυφου, υπάρχουν ενδοσκοπικά συστήματα που χρησιμοποιούν την μέθοδο του ενεργού κλείστρου. Συγκρίνοντας την με τη οθόνη κεφαλής τα μειονεκτήματα που εντοπίζουμε αναφέρονται στο τρεμόπαιγμα που εμφανίζεται πολλές φορές στην εικόνα, και στην προβολή που είναι ελαφρώς σκοτεινή λόγω των γυαλιών υγρών κρυστάλλων. Επιπλέον τα γυαλιά ενεργού κλείστρου είναι συμβατά με συγκεκριμένες οθόνες προβολής, γεγονός που μειώνει την ευελιξία του συστήματος. Ακόμη η μέθοδος με φίλτρα πόλωσης χρησιμοποιείται συχνά σε παρόμοια συστήματα. Το πλεονέκτημα της οθόνης κεφαλής συγκριτικά με το σύστημα πολωμένων φίλτρων είναι η πιο ζωντανή απεικόνιση, αφού φορώντας ο χρήστης την οθόνη κεφαλής μπορεί να επικεντρωθεί στην εξέταση, αφού δεν επηρεάζεται από τα

εξωτερικά ερεθίσματα.

Η προβολή με τη χρήση οθόνης κεφαλής, προσφέρει ζωντανή απεικόνιση της κοιλότητας, αφού ο γιατρός-χρήστης του συστήματος αισθάνεται σαν να βλέπει με τα μάτια του μια φυσική σκηνή. Η κοντινή απόσταση που βρίσκεται η οθόνη από τον χρήστη ενισχύει την αίσθηση του βάθους. Εκτός από αυτά με την οθόνη κεφαλής δεν έχουμε προβλήματα παρεμβολής των εικόνων, αφού ο κάθε οφθαλμός έχει χωριστή οθόνη.

Παρόλο που η ανάλυση της οθόνης κεφαλής είναι 2.5K για το κάθε μάτι, η εικόνα που προβάλλουμε στην οθόνη δεν αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή ανάλυση, αφού ο τρόπος που χρησιμοποιούμε για τη μεταφορά εικόνας από την κάμερα του ενδοσκοπίου στην οθόνη, είναι μέσω ενός προγράμματος το οποίο μεταδίδει στην οθόνη ότι εμφανίζεται στην επιφάνεια εργασίας. Η συνέπεια αυτού είναι να επιτυγχάνουμε μέγιστη ανάλυση όση η ανάλυση της οθόνης του υπολογιστή. Για την αξιοποίηση ολόκληρης της ανάλυσης θα μπορούσε μελλοντικά να υλοποιηθεί ένα λογισμικό σε περιβάλλον Unity, το οποίο θα συνδέεται με το πρόγραμμα που έχει υλοποιηθεί στο κεφάλαιο 4. Σκοπός αυτού του προγράμματος θα είναι η μεταφορά της εικόνας απευθείας στην οθόνη κεφαλιού.

Μια απαραίτητη βελτίωση που πρέπει να εφαρμοστεί στο σύστημα του ενδοσκοπίου, αφορά τη αλλαγή του ενδοσκοπικού σωλήνα σε διπλό, έτσι ώστε οι εικόνες να καταγράφονται από διαφορετικούς αισθητήρες για να μπορεί να επιτευχθεί ικανοποιητική διαφορά οπτικής γωνίας. Η παράλλαξη δηλαδή να προκύπτει χωρίς κάποια επεξεργασία και συνεπώς το αποτέλεσμα να προσεγγίζει τη φυσιολογική όραση. Ουσιαστικά να μπορεί να γίνεται πλήρη αισθητηριακή ταύτιση και να έχουμε στερεοσκοπική όραση.

Βιβλιογραφία

- [1] A. Khurana, *Comprehensive ophthalmology*. Jaypee Brothers Medical Publishers, 2019.
- [2] N. Reis Goncalves, *Neural computation of depth from binocular disparity*. PhD thesis, University of Cambridge, 2018.
- [3] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge university press, 2003.
- [4] A. Bhatti, “Current advancements in stereo vision,”
- [5] E. Viirre, H. Pryor, S. Nagata, and T. Furness, “The virtual retinal display: a new technology for virtual reality and augmented vision in medicine.,” *Studies in health technology and informatics*, vol. 50, pp. 252–7, 1998.
- [6] D. Lanman, M. Hirsch, Y. Kim, and R. Raskar, “Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3d displays using low-rank light field factorization,” *ACM Trans. Graph.*, vol. 29, no. 6, pp. 163:1–163:10, 2010.
- [7] P. Kellnhofer, *Perceptual modeling for stereoscopic 3D*. PhD thesis, 01 2016.
- [8] I. Geng, “Three-dimensional endoscopic surface imaging techniques,” *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*, vol. 335, 2013.
- [9] S. Wang, S.-c. Cheung, and H. Sajid, “Visual bubble: Protecting privacy in wearable cameras,” *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 7, pp. 95–105, 01 2018.
- [10] S. Pollard, J. Mayhew, and J. Frisby, “Pmf: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit,” *Perception*, vol. 14, pp. 449 – 470, 1985.
- [11] A. Hatzipantelis, “Stereoscopic vision.” <http://www.eao.gr/wp-content/uploads/2017/06/Stereoskopiki-orasi.pdf>. [Online; accessed 10-August-2020].

-
- [12] “Human eye.” <https://www.britannica.com/science/human-eye/Electrophysiology-of-the-visual-centres>. [Online; accessed 12-September-2020].
 - [13] S. Reichelt, R. Häussler, G. Fütterer, and N. Leister, “Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays,” in *Three-Dimensional Imaging, Visualization, and Display 2010 and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics IV* (B. Javidi, J.-Y. Son, J. T. Thomas, and D. D. Desjardins, eds.), vol. 7690, pp. 92 – 103, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2010.
 - [14] A. Fusiello, “Elements of geometric computer vision,” Available from: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/FUSIELLO4/tutorial.html, 2006.
 - [15] R. D. King, “A brief history of stereoscopy,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 5, no. 4, pp. 334–340, 2013.
 - [16] J.-C. Liou, K. Lee, F.-G. Tseng, J.-F. Huang, W.-T. Yen, and W.-L. Hsu, “Shutter glasses stereo LCD with a dynamic backlight,” in *Stereoscopic Displays and Applications XX* (A. J. Woods, N. S. Holliman, and J. O. Merritt, eds.), SPIE, feb 2009.
 - [17] J. Geng, “Three-dimensional display technologies,” *Adv. Opt. Photon.*, vol. 5, pp. 456–535, Dec 2013.
 - [18] “The advantages of using polarized 3d technology for surgeries.” https://www.eizo.com/library/healthcare/the_advantages_of_using_polarized_3d_technology_for_surgeries. [Online; accessed 03-May-2020].
 - [19] A. J. Woods and T. Rourke, “Ghosting in anaglyphic stereoscopic images,” in *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI* (M. T. Bolas, A. J. Woods, J. O. Merritt, and S. A. Benton, eds.), vol. 5291, pp. 354 – 365, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2004.
 - [20] A. J. Woods and T. Rourke, “Ghosting in anaglyphic stereoscopic images,” in *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI* (M. T. Bolas, A. J. Woods, J. O. Merritt, and S. A. Benton, eds.), vol. 5291, pp. 354 – 365, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2004.
 - [21] A. Simon and H. Jorke, “25.1: Interference filter system for high-brightness and natural-color stereoscopic imaging,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 42, no. 1, pp. 317–319, 2011.
-

-
- [22] H. Jorke, A. Simon, and M. Fritz, “Advanced stereo projection using interference filters,” in *2008 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video*, pp. 177–180, 2008.
- [23] “Over/under format.” <https://www.berezin.com/3d/Glossary.html>. [Online; accessed 05-May-2020].
- [24] T. A. Furness III and J. S. Kollin, “Virtual retinal display,” Dec. 28 1999. US Patent 6,008,781.
- [25] “Free viewing stereo.” <https://www.studio3d.com/pages2/freeview.html>. [Online; accessed 05-May-2020].
- [26] C. Ucke, “3-d vision with chromadepth glasses,” 01 1999.
- [27] M. J. Morgan and P. Thompson, “Apparent motion and the pulfrich effect,” vol. 4, pp. 3–18, 1975. PMID: 1099530.
- [28] C. W. Tyler and M. B. Clarke, “Autostereogram,” in *Stereoscopic Displays and Applications* (J. O. Merritt and S. S. Fisher, eds.), vol. 1256, pp. 182 – 197, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 1990.
- [29] N. Ogawa, T. Narumi, and M. Hirose, “Swinging 3d lamps: a projection technique to convert a static 2d picture to 3d using wiggle stereoscopy,” 2017.
- [30] “Basics of digital camera settings.” <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/basics-of-digital-camera-settings-for-improved-imaging-results>. [Online; accessed 19-September-2020].
- [31] R. Paschotta, “Beam splitters.” https://www.rp-photonics.com/beam_splitters.html. [Online; accessed 10-June-2020].