



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβολή στην Ανάλυση και Κωδικοποίηση Συστοιχίας
Εικόνων Τρισδιάστατης Απεικόνισης

Νικόλαος Π. Σγούρος

ΑΘΗΝΑ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2007

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συμβολή στην Ανάλυση και Κωδικοποίηση Συστοιχίας Εικόνων Τρισδιάστατης
Απεικόνισης

Νικόλαος Π. Σγούρος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Εμμανουήλ Σαγκριώτης, Αν. Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Εμμανουήλ Σαγκριώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

Νικηφόρος Θεοφάνους, Καθηγητής ΕΚΠΑ

Κωσταντίνος Καρούμπαλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αγγελική Αραπογιάννη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Δημήτριος Μαρούλης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

Σέργιος Θεοδωρίδης
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Εμμανουήλ Σαγκριώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

Νικηφόρος Θεοφάνους
Καθηγητής ΕΚΠΑ

Κυριάκος Χιτζανίδης
Καθηγητής ΕΜΠ

Θεοχάρης Θεοχάρης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τρισδιάστατα (3D) συστήματα απεικόνισης αποτελούν σήμερα το κύριο μέσο παρατήρησης για ένα πλήθος από εξειδικευμένες εφαρμογές και με την εξέλιξη των τεχνολογικών τους παραμέτρων και των δικτυακών υποδομών αναμένεται να αποτελέσουν στο άμεσο μέλλον την κύρια μέθοδο απεικόνισης για ένα ακόμη μεγαλύτερο πλήθος από καθημερινές εφαρμογές.

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αποτελεί μία προχωρημένη μελέτη για ένα συγκεκριμένο είδος μεθόδου 3D απεικόνισης που ονομάζεται Ολοκληρωτική Φωτογράφιση (Integral Photography - IP).

Στο πρώτο τμήμα της μελέτης εξετάστηκαν οι δυνατότητες της μεθόδου και αναπτύχθηκε ένα πρωτότυπο ψηφιακό σύστημα καταγραφής εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης (ΟΦ) πραγματικών αντικειμένων του εγγύς πεδίου της συσκευής με χρήση ενός επίπεδου σαρωτή, ικανό να παράγει εικόνες με ιδιαίτερα υψηλή ανάλυση, σε σχέση με τα μέχρι τούδε προταθέντα ψηφιακά συστήματα.

Στο δεύτερο τμήμα της παρούσας έρευνας αναπτύχθηκε, για πρώτη φορά, ένα αυτόματο σύστημα ευθυγράμμισης των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται με τα οπτικά μέρη του συστήματος, το οποίο δεν προϋποθέτει καμία γνώση για τα χαρακτηριστικά του συστήματος χρησιμοποιώντας ένα πλήθος τεχνικών ανάλυσης εικόνας και αναγνώρισης προτύπων. Η παρούσα έρευνα ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη εξειδικευμένων αλγορίθμων κωδικοποίησης των εικόνων ΟΦ, οι οποίες καταφέρνουν να μειώσουν σε εξαιρετικό βαθμό τον εγγενή πλεονασμό που περιέχουν αυτές.

ABSTRACT

Three-Dimensional (3D) visualization systems are used in many specialized applications where 3D observation is required. Technological achievements in the areas of integrated optics with sensors and network infrastructures guarantee that these systems will be used soon in a large number of different applications.

This dissertation summarizes the author's research on the major aspects of a specific 3D visualization method, called Integral Photography (IP).

The first part of this dissertation contains a background study on the theory and practice of IP and other stereoscopic systems, and describes the implementation of a prototype device capable of producing high resolution, near field, IP images of real 3D objects based on a flatbed scanner.

The objective of the second part of this thesis is to develop an automated method for calibration of the sensors and the optics used in an IP acquisition device without prior knowledge of the system's characteristics. This is accomplished by post-processing of the acquired IP images using image analysis and pattern recognition methods.

Finally, the thesis develops two types of IP image encoders that fully exploit the inherent redundancy of an IP image and achieve high performance in a rate distortion sense.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, χρηματοδοτούμενη κατά το μεγαλύτερο μέρος της από το πρόγραμμα «*Ηράκλειτος*» με προτεραιότητα στη βασική έρευνα (70/3/7157) του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων. Σημαντικός αρωγός στην παραπάνω προσπάθεια στάθηκε ο Αναπληρωτής καθηγητής του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών και άμεσος επιβλέπων της διδακτορικής διατριβής κ. Εμ. Σαγκριώτης ο οποίος βοήθησε με τις πολύτιμες γνώσεις του και την ιδιαίτερη ηθική του συμπαράσταση σε όλα τα στάδια την έρευνας. Επίσης ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συνεισφορά του Καθηγητή του ίδιου τμήματος κ. Νικηφ. Θεοφάνους και μέλους της τριμελούς επιτροπής ο οποίος βοήθησε τόσο με τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, όπως ακόμη και με την παροχή του χώρου και μεγάλου τμήματος του εξοπλισμού που απαιτήθηκε για τη διενέργεια του πειραματικού μέρους της έρευνας. Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ομότιμο Καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Κ. Καρούμπαλο για τις μακροσκελείς συζητήσεις οι οποίες ήταν καθοριστικές όχι μόνο για το στενό πεδίο της διατριβής αλλά διεύρυναν γενικότερα και τους ορίζοντες του συγγραφέα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	-1-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ	-3-
1.1 Γενικά	-3-
1.2 Στόχοι της Διατριβής	-4-
1.3 Δομή της Διατριβής	-5-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΟΡΑΣΗ	-9-
2.1 Ανατομία οφθαλμού	-9-
2.2 Η διαδικασία της όρασης	-10-
2.3 Στερεοσκοπία	-11-
2.4 Ψυχοοπτικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες	-11-
2.4.1 Σχετικό Μέγεθος των Ειδώλων στον Αμφιβληστροειδή	-12-
2.4.2 Φωτισμός και Σκίαση	-13-
2.4.3 Αποκλεισμός	-14-
2.4.4 Προοπτική ατμόσφαιρας	-14-
2.4.5 Διαβάθμιση υψής	-15-
2.4.6 Γραμμική προοπτική	-16-
2.4.7 Συνδυασμένοι ψυχοοπτικοί παράγοντες	-16-
2.5 Φυσιολογικοί παράγοντες τρισδιάστατης αντίληψης	-16-
2.5.1 Διόφθαλμη Ανομοιότητα	-17-
2.5.2 Παράλλαξη κίνησης	-19-
2.5.3 Σύγκλιση και Προσαρμογή	-19-
2.6 Στερέωση	-21-
2.7 Τεχνητή στερεοσκοπική όραση	-22-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	-29-
3.1 Στερεοσκοπικές Τεχνικές	-29-
3.2 Κλασσικές Στερεοσκοπικές Τεχνικές	-29-
3.3 Αυτοστερεοσκοπικές Τεχνικές	-32-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ ...	-49-
4.1 Εισαγωγή	-49-
4.2 Αναλογική Ολοκληρωτική Φωτογράφιση	-49-
4.3 Ψηφιακή Ολοκληρωτική Φωτογράφιση	-56-
4.4 Ψηφιακά συστήματα καταγραφής και αναπαραγωγής εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-61-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-69-
5.1 Εισαγωγή	-69-
5.2 Γενικοί περιορισμοί διάταξης ψηφιακής καταγραφής εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-70-
5.3 Ψηφιακό Σύστημα Καταγραφής Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-71-
5.4 Χαρακτηριστικά Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών	-72-
5.5 Χαρακτηριστικά Φωτοευαίσθητων Αισθητήρων Επίπεδου Σαρωτή	-74-
5.6 Αξιολόγηση Χαρακτηριστικών Λειτουργίας Επίπεδου Σαρωτή	-78-
5.7 Υλοποίηση Ψηφιακής Διάταξης Καταγραφής Αντικειμένων με τη Μέθοδο της Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-79-
5.8 Γενικά Χαρακτηριστικά εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-83-
5.9 Διόρθωση Ψευδοσκοπίας και Αφαίρεση Θορύβου	-85-
5.10 Υλοποίηση και Αξιολόγηση Ψηφιακής Διάταξης Παραγωγής Πολυστερεοσκοπικών ζευγών	-88-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-91-
6.1 Εισαγωγή	-91-
6.2 Γενική Περιγραφή της Μεθόδου	-93-
6.3 Προεπεξεργασία Εικόνας Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-93-
6.4 Προσδιορισμός και Διόρθωση της Γωνίας Εκτροπής	-95-
6.4.1 Μετασχηματισμός Hough	-96-
6.4.2 Προσδιορισμός Γωνίας Εκτροπής Παράλληλης Δέσμης Ευθειών	-100-
6.5 Προσδιορισμός Θέσης Ευθειών Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών	-104-
6.5.1 Προεπεξεργασία Διορθωμένης Εικόνας και Ανίχνευση Ευθειών	-104-
6.5.2 Μοντελοποίηση του Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών	-107-
6.5.3 Ταυτοποίηση του Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών	-109-
6.6 Αποτελέσματα	-112-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ	
 ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-115-
7.1 Εισαγωγή	-115-
7.2 Βασικές Αρχές Κωδικοποίησης Δεδομένων	-116-
7.2.1 Πλεονασμός μεταξύ Γειτονικών Εικονοστοιχείων	-118-
7.2.2 Πλεονασμός Κινούμενης Εικόνας	-119-
7.2.3 Πλεονασμός μεταξύ γειτονικών Στοιχειωδών Εικόνων	-121-
7.2.4 Ψυχοοπτικός Πλεονασμός	-124-
7.2.5 Πλεονασμός Κωδικοποιητή	-124-
7.3 Πρότυπα Κωδικοποίησης Στατικής και Κινούμενης Εικόνας	-125-
7.3.1 Πρότυπο Κωδικοποίησης Στατικών Δισδιάστατων Εικόνων	-126-
7.3.2 Πρότυπο Κωδικοποίησης Κινούμενης Εικόνας	-130-
7.4 Προτεινόμενος Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης με Αντιστάθμιση της Ανομοιότητας	-132-
7.4.1 Αντιστάθμιση Ανομοιότητας	-132-

7.4.2	Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογραφίας με Αντιστάθμιση Ανομοιότητας	-134-
7.5	Αποτελέσματα	-136-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗΣ

ΠΟΛΥΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΖΕΥΓΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ -139-

8.1	Εισαγωγή	-139-
8.2	Σχηματισμός της Τρισδιάστατης Δομής Δεδομένων και Εκτίμηση Διασποράς Εικονοστοιχείων	-140-
8.2.1	Σχηματισμός Τρισδιάστατης Δομής Δεδομένων	-140-
8.2.2	Εκτίμηση της Διασποράς και Δημιουργία του Χάρτη Διασπορών	-142-
8.3	Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης με χρήση του 3D-DCT	-145-
8.3.1	Μονάδα Υλοποίησης του Τρισδιάστατου Μετασχηματισμού Συνημιτόνου	-145-
8.3.2	Μονάδα Πρόβλεψης της Κατευθυντικότητας των Συντελεστών του 3D-DCT	-147-
8.3.3	Μονάδα Τρισδιάστατου Κβαντιστή	-149-
8.3.4	Μονάδα Κωδικοποιητή Εντροπίας	-150-
8.4	Αποτελέσματα	-151-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ -155-

9.1	Γενικά Συμπεράσματα	-155-
9.2	Μελλοντικοί Στόχοι	-156-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑ -157-

A.1	Υπολογισμός Διακριτικής Ικανότητας Βάθους	-157-
A.2	Υπολογισμός Διαστάσεων Στερεοσκοπικού Παραθύρου	-159-

A.3	Αλγόριθμος Smith-Waterman	-164-
-----	---------------------------------	-------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης – Αξιολόγηση

	Σαρωτή	-169-
B.1	Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης	-169-
B.2	Αξιολόγηση Σαρωτή	-170-
B.3	Πολυστερεοσκοπικές Καταγραφές.....	-175-
	ΟΡΟΛΟΓΙΑ	-177-
	ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	-181-
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ	-185-

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΟΡΑΣΗ	-9-
Σχήμα 2.1: Ανατομία ανθρώπινου οφθαλμού	-9-
Σχήμα 2.2: Σχηματισμός ειδώλου ενός αντικειμένου	-10-
Σχήμα 2.3: Σχετικό μέγεθος ειδώλων στον αμφιβληστροειδή	-12-
Σχήμα 2.4: (α) Φαινομενικά κυρτά και (β) Φαινομενικά κοίλα τμήματα σφαιρών σε σχέση με μία επιφάνεια. (γ) Σκίαση μίας σφαίρας που καθορίζει την επιφάνεια στην οποία βρίσκεται	-13-
Σχήμα 2.5: Αποκλεισμός	-14-
Σχήμα 2.6: Διόφθαλμη ανομοιότητα	-18-
Σχήμα 2.7: Αντίληψη του χώρου από τον ανθρώπινο οφθαλμό	-20-
Σχήμα 2.8: Στερέωση	-22-
Σχήμα 2.9: Οπτικό πεδίο	-22-
Σχήμα 2.10: Διαδικασία λήψης στερεοζεύγους	-24-
Σχήμα 2.11: Διαδικασία προβολής στερεοζεύγους	-24-
Σχήμα 2.12: Διακριτική ικανότητα βάθους	-26-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	-29-
Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας πολωτικών φίλτρων	-30-
Σχήμα 3.2: Δημιουργία χρωμοστερεοεικόνας	-30-
Σχήμα 3.3: Φράγμα Παράλλαξης	-34-
Σχήμα 3.4: Συστοιχία Κυλινδρικών Φακών	-35-
Σχήμα 3.5: Συστοιχία βασικών χρωματικών κυψελίδων ΣΦΕΜΚ	-37-
Σχήμα 3.6: Σύστημα ΣΦΕΜΚ	-38-
Σχήμα 3.7: Κατανομή των χρωματικών συνιστωσών οχτώ εικόνων στα εικονοστοιχεία της οθόνης προβολής	-39-
Σχήμα 3.8: Κωδικοποίηση και διεύθυνση χρωματικών συνιστωσών ΣΦΕΜΚ	-40-

Σχήμα 3.9: Αρχή ολογραφικού καταγραφικού συστήματος	-42-
Σχήμα 3.10: Αρχή συστήματος ανασύστασης όγκου	-44-
Σχήμα 3.11: Κατηγοριοποίηση στερεοσκοπικών και αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων	-44-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ ...	-49-
Σχήμα 4.1: Αρχή λειτουργίας καταγραφικού συστήματος ΟΦ	-50-
Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας απεικονιστικού συστήματος ΟΦ	-51-
Σχήμα 4.3: ΟΦ δύο σταδίων για διόρθωση της ψευδοσκοπίας	-52-
Σχήμα 4.4: (α) ΟΦ ενός σταδίου για διόρθωση της ψευδοσκοπίας, (β) Η πορεία των ακτίνων μέσα από τη διπλή ΣΣΦ	-53-
Σχήμα 4.5: Παράμετροι αναλογικού συστήματος καταγραφής ΟΦ	-55-
Σχήμα 4.6: Ψηφιακή διαδικασία καταγραφής-αναπαραγωγής ΟΦ	-56-
Σχήμα 4.7: Υπολογιστική διαδικασία δημιουργίας πραγματικών ορθοσκοπικών ειδώλων	-57-
Σχήμα 4.8: Συστοιχία ΣΕ	-58-
Σχήμα 4.9: Αντιστοιχία εικονοστοιχείων μεταξύ των συστοιχιών ΣΕ (1) και ΣΕ (2)	-60-
Σχήμα 4.10: Απεικονιστικό σύστημα ΟΦ	-62-
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα εικονοστοιχείων οθόνης προβολής	-64-
Σχήμα 4.12: Χαρακτηριστική καμπύλη συστήματος ψηφιακής αναπαραγωγής ΟΦ	-67-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	
 ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-69-
Σχήμα 5.1: Ψηφιακή διάταξη καταγραφής ΟΦ βασισμένη σε επίπεδο σαρωτή	-72-
Σχήμα 5.2: Τοπολογίες ΣΣΦ	-73-
Σχήμα 5.3: Ηλεκτρομηχανικά μέρη επίπεδου σαρωτή	-75-
Σχήμα 5.4: Εξαγωνική διάταξη ψηφίδων αισθητήρα επίπεδου σαρωτή	-77-
Σχήμα 5.5: Σχηματικό διάγραμμα σαρωτή ΟΦ	-81-

Σχήμα 5.6: Μετατόπιση ενός σημείου μεταξύ φακών	-85-
Σχήμα 5.7: Διακύμανση φωτεινότητας, (α) Αρχική εικόνα ΟΦ, (β) Μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής	-88-
Σχήμα 5.8: Αρχή λειτουργίας 3Δ σαρωτή πολυστερεοσκοπικών ζευγών	-88-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-91-
Σχήμα 6.1: Στροφή πλέγματος ΣΣΦ σε σχέση με το πλέγμα των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τη συστοιχία των ΣΕ στον ψηφιακό φωτοευαίσθητο αισθητήρα	-91-
Σχήμα 6.2: (α) Αρχικό ιστόγραμμα Εικόνας 5.3.δ, (β) Ισοστάθμιση ιστογράμματος για βελτίωση της αντίθεσης με την τεχνική CLAHE	-94-
Σχήμα 6.3: (α) Τμήμα μιας ασπρόμαυρης εικόνας ΟΦ, (β) Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny, (γ) Εφαρμογή κατακόρυφου και (δ) Εφαρμογή οριζόντιου 1Δ φίλτρου ενδιάμεσης τιμής	-95-
Σχήμα 6.4: Μετασχηματισμός Hough	-98-
Σχήμα 6.5: Μετασχηματισμός Hough τεσσάρων συνευθειακών σημείων	-98-
Σχήμα 6.6: Μετασχηματισμός Hough δέσμης N παραλλήλων ευθειών	-100-
Σχήμα 6.7: (α) Μετασχηματισμός Hough, $\theta \in [-10^{\circ}, 10^{\circ}]$, $\Delta\theta=1^{\circ}$, (β) Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης στο ίδιο διάστημα	-102-
Σχήμα 6.8: (α) Μετασχηματισμός Hough, $\theta \in [1^{\circ}, 5^{\circ}]$, $\Delta\theta=0.05^{\circ}$, (β) Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης στο ίδιο διάστημα	-103-
Σχήμα 6.9: (α) Διορθωμένη για τη γωνία εκτροπής εικόνα ΟΦ, (β) Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny, (γ) Εφαρμογή κατακόρυφου και (δ) Εφαρμογή οριζόντιου 1Δ φίλτρου ενδιάμεσης τιμής	-105-
Σχήμα 6.10: Κανονικοποιημένο διάγραμμα κατακόρυφης προβολής των εικονοστοιχείων της εικόνας 5.3 (δ)	-106-
Σχήμα 6.11: Κατωφλιωμένο (30%) και κανονικοποιημένο διάγραμμα κατακόρυφης προβολής των εικονοστοιχείων της εικόνας 5.3 (δ)	-107-
Σχήμα 6.12: Κανονικοποιημένο ιστόγραμμα αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών ευθειών	-110-

Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ ακολουθίας θέσεων ευθειών ΟΠΕ με ένα σύνολο πρότυπων ακολουθιών -112-

Σχήμα 6.14: Τμήματα εικόνας ΟΦ με διορθωμένη ψευδοσκοπία. (α) Με χρήση ΣΕ σταθερού μεγέθους και (β) με χρήση ΣΕ μεταβλητού μεγέθους ... -113-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ -115-

Σχήμα 7.1: Κοινό ιστόγραμμα φωτεινότητας γειτονικών εικονοστοιχείων -119-

Σχήμα 7.2: (α),(β) Διαδοχικά εικονοπλαίσια μιας πρότυπης σειράς κινούμενης εικόνας, (γ) Η απόλυτη τιμή της διαφοράς φωτεινότητας των δύο διαδοχικών εικονοπλαισίων -120-

Σχήμα 7.3: (α)Τμήμα εικόνας ΟΦ μεγέθους 3 x 3 ΣΕ, (β) ιστόγραμμα φωτεινότητας γειτονικών εικονοστοιχείων για την κεντρική ΣΕ -122-

Σχήμα 7.4: Συντελεστής συσχέτισης κεντρικού τμήματος μιας ΣΕ μιας εικόνας ΟΦ σε σχέση με αντίστοιχα τμήματα των οκτώ πρώτων γειτόνων του -123-

Σχήμα 7.5: Σχηματικό διάγραμμα (α) κωδικοποιητή και (β) αποκωδικοποιητή JPEG -126-

Σχήμα 7.6: Σχήμα αναδιάταξης συντελεστών του 2D-DCT -129-

Σχήμα 7.7: Ανομοιότητα μεταξύ διαδοχικών ΣΕ -133-

Σχήμα 7.8: Ομάδα κωδικοποίησης ΣΕ -134-

Σχήμα 7.9: Κωδικοποιητής Εικόνων ΟΦ με AA -135-

Σχήμα 7.10: Αποκωδικοποιητής Εικόνων ΟΦ με AA -135-

Σχήμα 7.11: Σύγκριση Κωδικοποιητή Εικόνων ΟΦ με AA και JPEG -137-

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 : ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗΣ

ΠΟΛΥΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΖΕΥΓΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ -139-

Σχήμα 8.1: Καταγραφή πολυστερεοσκοπικών ζευγών με χρήση κινούμενης μηχανής λήψης, (α) με συγκλίνοντες και (β) με παράλληλους άξονες λήψης -141-

Σχήμα 8.2: Διευθέτηση εικόνων που αποτελούν το πολυστερεοσκοπικό στερεοζεύγος για τη δημιουργία της $3\Delta^3$	-142-
Σχήμα 8.3: Σπειροειδές σχέδιο σάρωσης των ΣΕ για τη δημιουργία της $3\Delta^3$	-142-
Σχήμα 8.4: (α) Πολυστερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων, (β) Χάρτης Διασπορών	-144-
Σχήμα 8.5: (α) Προσαρμοστικός κωδικοποιητής 3D-DCT, (β) Αποκωδικοποιητής 3D-DCT	-146-
Σχήμα 8.6: Κατανομή πλάτους των 64 συντελεστών του 2D-DCT	-148-
Σχήμα 8.7: Σχέδιο αναδιάταξης Συντελεστών όταν (α) $R \in [0^\circ - 30^\circ]$ και (β) $R \in [60^\circ - 90^\circ]$	-151-
Σχήμα 8.8: Κωδικοποίηση πολυστερεοσκοπικού ζεύγους με χρήση 3D-DCT	-152-
Σχήμα 8.9: Κωδικοποίηση Εικόνας ΟΦ με χρήση 3D-DCT	-153-
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑ	-157-
Σχήμα Α.2.1: Εύρεση ελάχιστης απόστασης παρατηρητή	-160-
Σχήμα Α.2.2: Εύρεση μεγέθους οπτικού παραθύρου	-161-
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης – Αξιολόγηση Σαρωτή	-169-
Σχήμα Β.2.1: Τονική απόκριση σαρωτή	-171-
Σχήμα Β.2.2: Χαρακτηριστικά θορύβου	-172-
Σχήμα Β.2.3: Κατατομή κεκλιμένης ακμής	-173-
Σχήμα Β.2.4: Χωρική συχνοτική απόκριση	-173-

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΟΡΑΣΗ	-9-
Εικόνα 2.1: Προοπτική ατμόσφαιρας	-15-
Εικόνα 2.2: Διαβάθμιση υφής	-15-
Εικόνα 2.3: Γραμμική προοπτική	-16-
Εικόνα 2.4: Συνδυασμένοι ψυχοοπτικοί παράγοντες	-17-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-69-
Εικόνα 5.1: Στόχοι προσδιορισμού χαρακτηριστικών επίπεδου σαρωτή, (α) Ανακλαστικός στόχος ISO-16067-1, (β) USAF 1951 1x, (γ) Χρωματικός ανακλαστικός στόχος	-79-
Εικόνα 5.2: Υλοποίηση Σαρωτή ΟΦ	-82-
Εικόνα 5.3: Σάρωση (α),(β) με χρήση εσωτερικής πηγής φωτός και (γ),(δ) με χρήση εξωτερικής πηγής φωτός	-83-
Εικόνα 5.4: (α),(β) Αρχικό 3Δ αντικείμενο και (γ),(δ) ΟΦ του ίδιου αντικειμένου ..	-84-
Εικόνα 5.5: (α) Εικόνα ΟΦ ενός ζαριού, (β) Περιοχή που αποτελείται από 3 x 3 ΣΕ η οποία παρουσιάζει διάφορα είδη κρουστικού θορύβου, (γ) Η αρχική εικόνα ΟΦ μετά την επίδραση του φίλτρου, (δ) Μεγέθυνση της ίδιας περιοχής της αρχικής εικόνας ΟΦ μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής	-87-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-115-
Εικόνα 7.1: Πρότυπη εικόνα, 512 x 512 εικονοστοιχεία, 256 επίπεδα φωτεινότητας	-118-

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης – Αξιολόγηση

Σαρωτή -169-

Εικόνα Β.1.1: (α),(β),(γ) Εικόνες 3Δ αντικειμένων, (δ),(ε),(στ) Εικόνες ΟΦ των
αντίστοιχων αντικειμένων -169-

Εικόνα Β.2.1: Τμήμα στόχου ISO-16067-1 για μέτρηση τονικής απόκρισης -170-

Εικόνα Β.3.1: Πολυστερεοσκοπική καταγραφή -175-

Εικόνα Β.3.2: Σύνθεση Πολυστερεοσκοπικού Στερεοζεύγους -175-

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΟΡΑΣΗ	-9-
Πίνακας 2.1: Φυσιολογικοί και ψυχοοπτικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες	-11-
Πίνακας 2.2: Είδη στερεοσκοπικής όρασης σε σχέση με την τοποθέτηση του στερεοζεύγους	-26-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ	-29-
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά Φυσιολογικής Όρασης	-45-
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά μεθόδων με χρήση πολλαπλών Στερεοζευγών	-45-
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά Ολογραφικών Μεθόδων	-46-
Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά Ολοσκοπικών Μεθόδων	-46-
Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά Μεθόδων Ανασύστασης Όγκου	-47-
Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Μεθόδων με χρήση ενός Στερεοζεύγους	-47-
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ	-69-
Πίνακας 5.1: Τοπολογίες Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών	-74-
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά των Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών	-80-

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αποτέλεσε την ευκαιρία για την ενασχόληση του συγγραφέα με ένα ευρύ πεδίο από διαφορετικά προβλήματα. Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής απαιτήθηκε η εκτενής μελέτη ενός μεγάλου πλήθους ερευνητικών πεδίων από τις επιστήμες της Φυσικής και της Πληροφορικής, όπως η Οπτική, η Θεωρία Πληροφορίας και Επεξεργασίας Σήματος, καθώς επίσης και ο συνδυασμός των.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα επίσης να σημειώσω την πολύτιμη βοήθεια του Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρονικής του ΤΕΙ Πειραιά κ. Π.Π. Παπαγέωργα, για την πολυδιάστατη συνεισφορά του σε όλα τα στάδια της διατριβής, και των συναδέλφων στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών, κ.κ. Σ. Αθηναίο, και Α. Τσιαμπούλα για την πολύτιμη συμβολή τους στη διαμόρφωση των πειραματικών διατάξεων αλλά και την επίλυση διαφόρων τεχνικών και άλλων θεμάτων. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή του τμήματος Μαθηματικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης όπως και τον Δρ. Αντώνιο Δημάκη για την παροχή κάθε υποστήριξης κατά τη διάρκεια και μετά την ολοκλήρωση του προγράμματος TDIS.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που έχει σταθεί δίπλα μου σε όλη την πορεία της ζωής μου και ιδιαίτερα στην τελευταία αυτή περίοδο με όλες της τις δυνάμεις.

Αθήνα 2007

Νικόλαος Π. Σγούρος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η όραση είναι αναμφισβήτητη η κυριότερη και πιο σύνθετη αίσθηση του ανθρώπου. Ο τρόπος με τον οποίο είναι δομημένα τα αισθητήρια της όρασης επιτρέπει την τρισδιάστατη (3Δ) αντίληψη των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα στο οπτικό πεδίο του ανθρώπου. Η στερεοσκοπία, δηλαδή η δυνατότητα της αντίληψης της τρίτης διάστασης με τη χρήση δύο ταυτόχρονων παρατηρήσεων, προσδίδει την αίσθηση της απόστασης μεταξύ των παρατηρούμενων αντικειμένων, όπως επίσης και της θέσης τους στο χώρο, δημιουργώντας μια ιδιαίτερα πραγματική αντίληψη για τα παρατηρούμενα αντικείμενα ή σκηνές.

Το πρώτο στερεοσκόπιο κατασκευάστηκε από τον Wheatstone το 1838, ο οποίος σε δύο εργασίες του [1,2] προς την ακαδημία επιστημών του Λονδίνου, ανέλυσε τα βασικά χαρακτηριστικά της στερεοσκοπικής όρασης. Παρόλα αυτά τα κύρια μέσα παρατήρησης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, όπως η τηλεόραση και άλλα μέσα οπτικής επικοινωνίας, στερούνται της παροχής 3Δ περιεχομένου στο χρήστη. Η δεδομένη ανάγκη του ανθρώπου για αυξημένο ρεαλισμό σε εφαρμογές οπτικής επικοινωνίας, έχει δημιουργήσει ένα χώρο έρευνας, που με βάση τις σύγχρονες τεχνολογικές εξελίξεις, έχει εξελίξει τεχνικές όπως το κλασσικό στερεοσκόπιο σε προϊόντα που προορίζονται για την παροχή 3Δ περιεχομένου στους χρήστες τους.

Ένα πλήθος από ιατρικές, εκπαιδευτικές, βιομηχανικές, στρατιωτικές και ψυχαγωγικές εφαρμογές ωφελούνται καθημερινά από την 3Δ πληροφορία που παρέχεται χρησιμοποιώντας κλασσικά ή περισσότερο εξελιγμένα στερεοσκοπικά συστήματα [3-6].

Πολλές από τις παραπάνω τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τη χρήση σε συστήματα 3Δ παρατήρησης βασίζονται στην ιδιότητα που έχει ο ανθρώπινος εγκέφαλος να συνθέσει μια σκηνή από δύο διαφορετικές λήψεις οι οποίες διαφέρουν χωρικά. Τα κλασσικά ή πιο σύγχρονα συστήματα που βασίζονται σε αυτή την ιδιότητα του εγκεφάλου δεν παρέχουν πραγματική 3Δ αντίληψη, η οποία περιέχει μέσα της επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως η παράλλαξη.

Μία καινοτόμος τεχνική που μπορεί να παράγει 3Δ εικόνες οι οποίες παρουσιάζουν συνεχή παράλλαξη είχε προταθεί αρχικά το 1908, από το Νομπελίστα φυσικό G. Lippmann [7] με το όνομα Ολοκληρωτική Φωτογράφιση (ΟΦ) (Integral Photography-IP).

Στη συγκεκριμένη τεχνική, η 3D πληροφορία μιας σκηνής καταγράφεται σε μία επίπεδη επιφάνεια ως μία σειρά από στοιχειώδεις εικόνες (ΣΕ). Η διαδικασία σύλληψης της σκηνής είναι στιγμιαία, όπως επίσης στιγμιαία μπορεί να παραχθεί η απεικόνιση της σκηνής στην περίπτωση που, πλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ψηφιακά μέσα. Η αξία της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή 3D περιεχομένου υψηλής ανάλυσης με τη δυνατότητα δισδιάστατης συνεχούς παράλλαξης, όπως επίσης και 3D κινούμενων εικόνων (Video).

Η συγκεκριμένη τεχνική αν και προτάθηκε πολύ νωρίς αναπτύχθηκε ραγδαία με την έλευση της ψηφιακής τεχνολογίας στα μέσα σύλληψης και αναπαραγωγής εικόνων και την ανάπτυξη τεχνικών υψηλής ακριβείας για την κατασκευή των οπτικών μερών του συστήματος. Δεδομένης της πρόσφατης αυτής ανάπτυξης στον τομέα της ΟΦ υπάρχουν πολλά ανοιχτά προβλήματα που αφορούν την ανάλυση, επεξεργασία και κωδικοποίηση εικόνων που έχουν παραχθεί με την τεχνική της ΟΦ.

Μία εκτίμηση του μεγέθους του χώρου προβλημάτων που προκύπτουν στην τεχνική της ΟΦ, μπορεί να προκύψει αν αναλογιστούμε το ότι πρέπει να αντιμετωπιστούν όλα τα προβλήματα που κάποιος αντιμετωπίζει στις κλασσικές δισδιάστατες (2D) απεικονίσεις γενικεύοντας τις λύσεις στις τρεις διαστάσεις. Επιπρόσθετα, υπάρχουν προβλήματα που προκύπτουν από την ιδιαίτερη φύση των συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη λήψη και την αναπαραγωγή των εικόνων ΟΦ, τα οποία δεν παρουσιάζονται στην περίπτωση των 2D εικόνων και για τα οποία πρέπει να αναπτυχθούν καινοτόμες λύσεις. Ορισμένα από τα προβλήματα που έχουν αντιμετωπιστεί με κλασσικές μεθόδους επεξεργασίας εικόνας, όπως και μία ανάλυση διαφόρων βελτιστοποιημένων συστημάτων ΟΦ περιλαμβάνονται στην αναφορά [8] .

1.2 Στόχοι της Διατριβής

Ένα από τα κυριότερα ζητήματα στην μετάδοση και αποθήκευση των πρωτογενών δεδομένων ΟΦ είναι ο μεγάλος όγκος που αυτά καταλαμβάνουν. Η συμπίεση των δεδομένων αυτών αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την εύρυθμη και αποτελεσματική λειτουργία ενός συστήματος ΟΦ. Επιπλέον, τα πρωτογενή δεδομένα ΟΦ απαιτούν ένα ή περισσότερα στάδια επεξεργασίας ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή απεικόνιση τους, όπως είναι η εξάλειψη του θορύβου και ιδιαίτερα στάδια επεξεργασίας που εξαρτώνται από τη φύση της τεχνικής, όπως η εξάλειψη της ψευδοσκοπίας κ.ά. Πέρα από τη θεωρητική μελέτη διαφόρων φαινομένων οπτικής που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των συστημάτων σύλληψης και αναπαραγωγής και τις βασικές αρχές που

πρέπει να εφαρμοστούν για την επεξεργασία ενός πολυδιάστατου στη φύση του σήματος, η παραγωγή πρωτογενών δεδομένων ΟΦ αποτελεί μία βασική συνιστώσα για την έρευνα στη συγκεκριμένη περιοχή. Υπάρχουν στις μέρες μας αρκετές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την σύλληψη ΟΦ [9-17], ωστόσο δεν υπάρχουν προσβάσιμα πρότυπα δεδομένα ΟΦ, με σκοπό την αξιολόγηση των διαφόρων αλγορίθμων που αναπτύσσονται.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία πρότυπη μέθοδος παραγωγής πρωτογενών δεδομένων ΟΦ βασισμένη σε ένα επίπεδο σαρωτή υψηλής ανάλυσης και μία συστοιχία στοιχειωδών φακών (Microlens Array). Σε δεύτερο στάδιο υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι μείωσης του θορύβου σε εικόνες ΟΦ και αυτόματης ανάλυσης των χαρακτηριστικών τους ώστε να διευκολυνθεί η περαιτέρω επεξεργασία τους. Τέλος αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι συμπίεσης των εικόνων ΟΦ όπως επίσης και εικόνων που προέρχονται από πολυστερεοσκοπικά συστήματα παρατήρησης που στοχεύουν στη μείωση του εγγενούς πλεονασμού των συγκεκριμένων εικόνων.

1.3 Δομή της Διατριβής

Η παρούσα εργασία είναι δομημένη σε εννέα κεφάλαια. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε συνοπτικά η ανάγκη που υπάρχει για χρήση συστημάτων στερεοσκοπικής παρατήρησης σε ένα πλήθος εφαρμογών, η τεχνική της ΟΦ που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη για την παραγωγή 3Δ αναπαραστάσεων, τα προβλήματα που παρουσιάζονται στη σύλληψη 3Δ αντικειμένων με την παραπάνω τεχνική, όπως επίσης και οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν για την αντιμετώπισή τους.

Το κεφάλαιο 2 συνοψίζει τις βασικές ψυχοφυσιολογικές λειτουργικές αρχές που διέπουν τη στερεοσκοπική όραση και παρέχει μία σύνοψη των στερεοσκοπικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται σήμερα, ενώ το κεφάλαιο 3 παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων ώστε να υπάρχει άμεση σύγκριση μεταξύ των χρησιμοποιούμενων τεχνικών. Το επόμενο κεφάλαιο αποτελεί μία σύνοψη των αρχών και μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για αναλογικά και ψηφιακά συστήματα ΟΦ .

Στο κεφάλαιο 5 αναλύεται το πρότυπο σύστημα που αναπτύχθηκε για την καταγραφή πραγματικών 3Δ αντικειμένων και σκηνών με την τεχνική της ΟΦ και τη χρήση ενός σαρωτή υψηλής ανάλυσης. Επιπρόσθετα, περιγράφεται η υπολογιστική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την διόρθωση της ψευδοσκοπίας όπως επίσης και για τη

αφαίρεση του θορύβου που οφείλεται στις σημειακές ατέλειες της συστοιχίας στοιχειωδών φακών (ΣΣΦ) που χρησιμοποιήθηκε. Στο ίδιο κεφάλαιο περιγράφεται και μία μέθοδος σύλληψης γενικευμένων πολυστερεοσκοπικών απεικονίσεων που παρουσιάζει μονοδιάστατη παράλλαξη χρησιμοποιώντας τον ίδιο σαρωτή και λαμβάνοντας πολλαπλές διαφορετικές λήψεις του ίδιου αντικειμένου.

Στο κεφάλαιο 6 αναλύεται η διαδικασία ανίχνευσης των πλεγματικών γραμμών που δημιουργούνται από τη στοίχιση των στοιχειωδών φακών της συστοιχίας. Στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας πραγματοποιείται διόρθωση της γωνίας εκτροπής (skew angle), η οποία συνίσταται σε μικρή περιστροφή των πλεγματικών γραμμών της ΣΣΦ σε σχέση με τον αντίστοιχο προσανατολισμό του πλέγματος του ψηφιακού αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε. Στο δεύτερο στάδιο υπολογίζεται αυτόματα το μέσο μέγεθος κάθε στοιχειώδους εικόνας (ΣΕ) και ακριβώς η ακριβής θέση κάθε πλεγματικής γραμμής, με μια διαδικασία ταυτοποίησης των πλεγματικών γραμμών με ένα σύνολο από πρότυπα πλέγματα που δημιουργούνται με βάση τη μέση τιμή που υπολογίστηκε αρχικά.

Στο Κεφάλαιο 7 υλοποιείται ο κωδικοποιητής εικόνων ΟΦ ο οποίος βασίστηκε σε τεχνικές εκτίμησης της ανομοιότητας μεταξύ των διαδοχικών ΣΕ και ο οποίος εκμεταλλεύεται τις χαρακτηριστικές ιδιότητες των εικόνων ΟΦ. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί στο πρότυπο MPEG-2, οι οποίες έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της πολυπλοκότητας του τμήματος που πραγματοποιεί την εύρεση του βέλτιστου ταιριάσματος μεταξύ δύο περιοχών που ανήκουν σε γειτονικές ΣΕ. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται, ακόμα, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου σχήματος κωδικοποίησης σε σχέση με τις κλασσικές δισδιάστατες τεχνικές συμπίεσης και γίνεται σύγκριση της πολυπλοκότητας του κλασσικού σχήματος MPEG-2 σε σχέση με τον προτεινόμενο αλγόριθμο.

Η ανάγκη για τη συμπίεση εικόνων ΟΦ οι οποίες διαθέτουν πολύ μικρό μέγεθος ΣΕ, όπου είναι αναποτελεσματικό το πρότυπο MPEG-2, όπως επίσης και γενικότερων πολυστερεοσκοπικών απεικονίσεων, οδήγησε στην υλοποίηση ενός προσαρμοστικού κωδικοποιητή βασισμένου στον 3D διακριτό μετασχηματισμό συνημιτόνου (3D Discrete Cosine Transform- 3D DCT), ο οποίος παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 8 και είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για εικόνες που παρουσιάζουν μικρή παράλλαξη μεταξύ των γειτονικών λήψεων. Στο ίδιο κεφάλαιο αξιολογείται και η συγκεκριμένη τεχνική για τις περιπτώσεις αυτές, τόσο σε σχέση με τα κλασσικά πρότυπα δισδιάστατων εικόνων όσο και με το πρότυπο MPEG-2.

Συμβολή στην Ανάλυση και Κωδικοποίηση Συστοιχίας Εικόνων Τρισδιάστατης Απεικόνισης

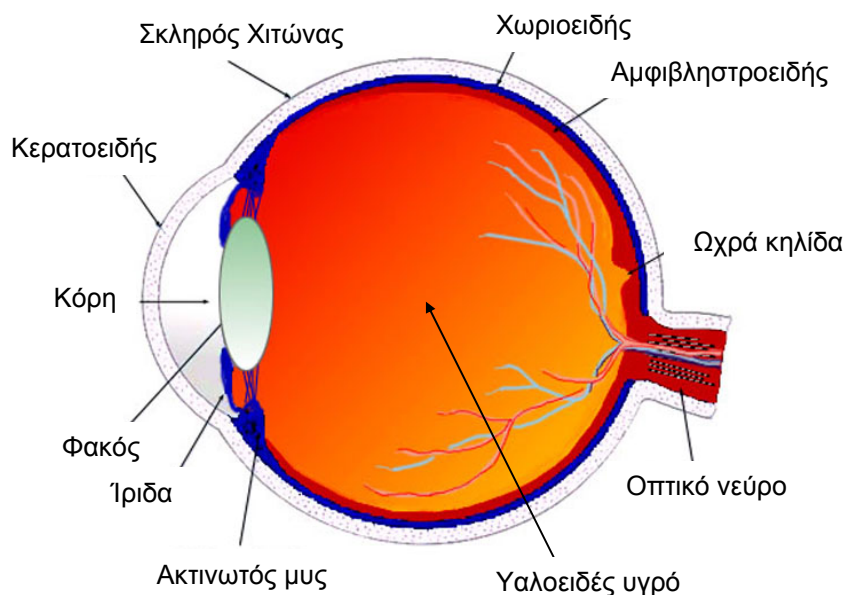
Τα συμπεράσματα, οι μελλοντικοί στόχοι και κατευθύνσεις της παρούσας έρευνας συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 9 με το οποίο ολοκληρώνεται η διατριβή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΗ ΟΡΑΣΗ

2.1 Ανατομία οφθαλμού

Το μεγαλύτερο μέρος των γνώσεων για τον περιβάλλοντα κόσμο μας παρέχεται μέσω των οφθαλμών. Οι οφθαλμοί μαζί με τα εκατομμύρια νευρικών ινών και τις οπτικές περιοχές του φλοιού του εγκεφάλου όπου αναδομείται η εικόνα-είδωλο του εξωτερικού κόσμου αποτελούν τις τρεις συνιστώσες της όρασης. Η ανατομία του ανθρώπινου οφθαλμού απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Ανατομία ανθρώπινου οφθαλμού

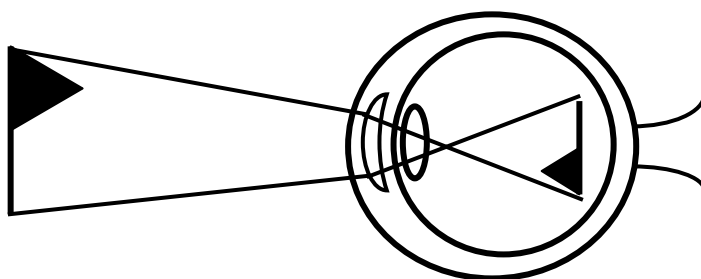
Ο οφθαλμός αποτελείται από τον κερατοειδή, ο οποίος είναι διαφανής και δρα σαν ένας συγκλίνων φακός για το φως που θα προσπέσει σε αυτόν και θα εισέλθει στην κόρη. Η κόρη, η οποία βρίσκεται ακριβώς πίσω από τον κερατοειδή, συνιστά ένα διάφραγμα για το φως, το οποίο τελικά εισέρχεται στον οφθαλμό. Η κόρη περιβάλλεται από έναν κυκλικό μυ, ο οποίος ονομάζεται ίριδα και μπορεί να διαστέλλεται και να συστέλλεται δημιουργώντας έτσι έναν εξελιγμένο φωτοφράχτη. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να ρυθμιστεί η ποσότητα του φωτός που εισέρχεται στον οφθαλμό. Στη συνέχεια της πορείας του, το φως διέρχεται μέσα από τον φακό του οφθαλμού, ο οποίος λειτουργεί

ως ένας αμφίκυρτος συγκλίνων φακός. Η εστιακή απόσταση του φακού ρυθμίζεται κατάλληλα από τον ακτινωτό μυ κάθε οφθαλμού, επηρεάζοντας κατά συνέπεια και το σημείο στο οποίο εστιάζουν οι εισερχόμενες ακτίνες. Εάν θεωρήσουμε ένα φυσιολογικό οφθαλμό, οι ακτίνες εστιάζουν στον αμφιβληστροειδή, ο οποίος βρίσκεται στην οπίσθια εσωτερική περιοχή του οφθαλμικού βολβού.

Ο αμφιβληστροειδής με τη σειρά του περιέχει τους κατάλληλους φωτοϋποδοχείς και τους νευρώνες, που μετατρέπουν τελικά τα φωτεινά ερεθίσματα σε ηλεκτρικούς παλμούς. Εμβαθύνοντας στη φυσιολογία των φωτοϋποδοχέων μπορούμε να τους διαχωρίσουμε στα κωνία και στα ραβδία. Τα κωνία συγκεντρώνονται σε μια μικρή περιοχή του αμφιβληστροειδή, η οποία καλείται ωχρά κηλίδα και είναι υπεύθυνα για την παροχή της χρωματικής πληροφορίας και της οπτικής αντίληψης σε έντονες συνθήκες φωτισμού [18]. Τα ραβδία είναι φωτοϋποδοχείς υψηλής ευαισθησίας, χωρίς όμως να παρέχουν χρωματική πληροφορία.

2.2 Η διαδικασία της όρασης

Η όραση αποτελεί μία από τις σημαντικότερες αισθήσεις του ανθρώπου και χρησιμοποιείται σαν το κύριο μέσο για την αντίληψη του τρισδιάστατου χώρου. Κατά τη διαδικασία της όρασης οι ακτίνες φωτός που ξεκινούν από κάποιο αντικείμενο, εισέρχονται στον οφθαλμό μέσω του κερατοειδή χιτώνα και έπειτα περνούν μέσα από την κόρη που είναι ένα κυκλικό άνοιγμα στην ίριδα. Τα κύματα φωτός συγκλίνουν πρώτα από τον κερατοειδή και έπειτα από τον κρυσταλλικό φακό ακριβώς πίσω από την επιφάνεια του κερατοειδή. Σε αυτό το σημείο το είδωλο είναι ανεστραμμένο όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2 [2].



Σχήμα 2.2: Σχηματισμός ειδώλου ενός αντικειμένου.

2.3 Στερεοσκοπία

Με τον όρο στερεοσκοπία (Stereoscopy) ορίζουμε την «παρατήρηση των αντικειμένων» με τρισδιάστατο τρόπο και αυτό γίνεται με την πληροφορία βάθους που παίρνουμε από τα αντικείμενα του χώρου που μας περιβάλλει.

Οι βασικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες που συντελούν στην ικανότητα μας να μπορούμε να αντιλαμβανόμαστε τα αντικείμενα του χώρου τρισδιάστατα, δηλαδή να μας παρέχουν ικανή πληροφορία βάθους, χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους παράγοντες εκείνους που σχετίζονται με την φυσιολογία του ανθρώπινου οπτικού συστήματος, ενώ η δεύτερη αφορά τους ψυχοοπτικούς παράγοντες, οι οποίοι είναι σε θέση να ενισχύσουν την αντιληπτική ικανότητα της τρίτης διάστασης (βάθος) ή να υποκαταστήσουν πολλούς από τους φυσιολογικούς μηχανισμούς σε παθολογικές καταστάσεις [20]. Οι φυσιολογικοί και ψυχοοπτικοί παράγοντες συνοψίζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Φυσιολογικοί και ψυχοοπτικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες

Ψυχοοπτικοί Παράγοντες	Φυσιολογικοί Παράγοντες
Μέγεθος Ειδώλου στον Αμφιβληστροειδή	
Φωτισμός και Σκίαση	Διόφθαλμη ανομοιότητα
Αποκλεισμός	Παράλλαξη κίνησης
Προοπτική Ατμόσφαιρας	Σύγκλιση και Προσαρμογή
Διαβάθμιση Υφής	
Γραμμική Προοπτική	

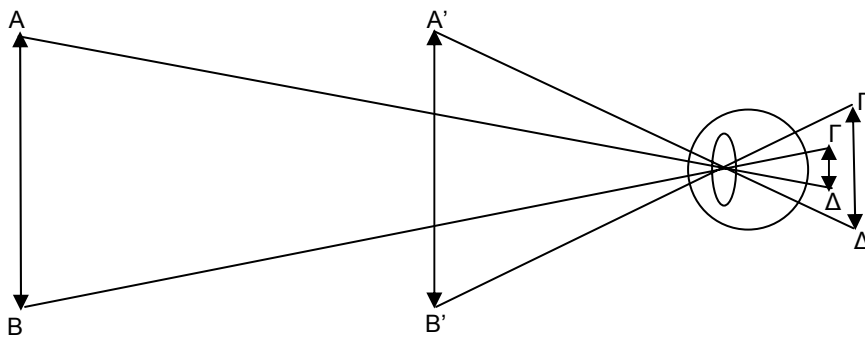
2.4 Ψυχοοπτικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες

Οι ψυχοοπτικοί παράγοντες [21] είναι απαραίτητοι για την αντίληψη του βάθους στις οπτικές απεικονίσεις. Οι παράγοντες αυτοί δεν εξαρτώνται από τα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του παρατηρητή αλλά από την εμπειρική γνώση για τα αντικείμενα του χώρου που τον περιβάλλει και λογικές υποθέσεις για τη σχετική θέση μεταξύ των

παρατηρούμενων αντικειμένων. Δεδομένης της απλής υλοποίησης τους είναι σημαντικοί για τη δημιουργία 3D εικόνων σε όλο το φάσμα των στερεοσκοπικών εφαρμογών. Οι παραπάνω παράγοντες όταν συνδυαστούν κατάλληλα, μπορούν να έχουν σχεδόν το ίδιο αποτέλεσμα με την κλασικά νοούμενη στερεοσκοπική όραση, όσον αφορά στην αντίληψη του βάθους ενός αντικειμένου. Αναλυτικότερα, οι ψυχοοπτικοί παράγοντες συνοψίζονται στις ακόλουθες παραγράφους.

2.4.1 Σχετικό Μέγεθος των Ειδώλων στον Αμφιβληστροειδή

Όπως είναι εύκολα κατανοητό ανάλογα με την απόσταση που απέχει ένα αντικείμενο από τον παρατηρητή διαφέρει και το μέγεθος του ειδώλου που δημιουργεί στον αμφιβληστροειδή. Είναι δυνατό, επίσης, να παρατηρήσουμε ότι το ίδιο αντικείμενο όταν απομακρυνθεί από τον παρατηρητή δημιουργεί μικρότερο είδωλο από ότι αν το ίδιο αντικείμενο βρίσκεται σε κοντινότερη απόσταση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.

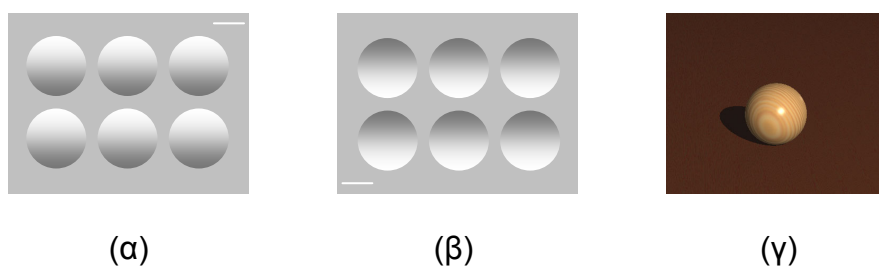


Σχήμα 2.3: Σχετικό μέγεθος ειδώλων στον αμφιβληστροειδή.

Στο συγκεκριμένο σχήμα τα ευθύγραμμα τμήματα AB και $A'B'$ είναι ίσα, αλλά βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από τον παρατηρητή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα $\Gamma\Delta < \Gamma'\Delta'$ το οποίο μεταφράζεται υποσυνείδητα σε διαφορετική απόσταση των AB , $A'B'$. Το σχετικό μέγεθος των αντικειμένων δημιουργεί την αίσθηση ότι τα μακρινά αντικείμενα είναι μικρά ενώ τα κοντινά είναι μεγαλύτερα σε μέγεθος. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η εμπειρία μας, με αποτέλεσμα όταν βλέπουμε ένα αντικείμενο, το μέγεθος του οποίου γνωρίζουμε, να μπορούμε να προσδιορίσουμε σε μεγάλο βαθμό την απόσταση του από εμάς [21].

2.4.2 Φωτισμός και Σκίαση

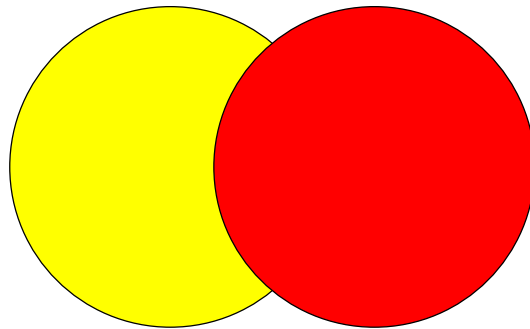
Όταν γνωρίζουμε τη θέση μιας πηγής φωτός που πέφτει σε δύο αντικείμενα, εκ των οποίων το ένα βρίσκεται στη σκιά του άλλου, τότε αντιλαμβανόμαστε το αντικείμενο που σκιάζεται πιο μακριά σε σχέση με το πρώτο, γεγονός το οποίο οφείλεται στον τρόπο φωτισμού της σκηνής. Ένα φωτεινό αντικείμενο εμφανίζεται φαινομενικά πιο κοντά σε εμάς από ένα σκοτεινό. Επιπρόσθετα, εκτιμάται και η φαινόμενη πορεία των φωτεινών ακτίνων που προσπίπτουν σε ένα αντικείμενο. Ένας παρατηρητής θεωρεί συνήθως ότι η πηγή φωτός που φωτίζει ένα αντικείμενο βρίσκεται επάνω από το αντικείμενο αυτό. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει ένα πλήθος από οφθαλμαπάτες, όπως αυτές που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 (α),(β). Στην πραγματικότητα το Σχήμα 2.4 (β) αποτελεί την περιστροφή του αντικειμένου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4 (α) κατά 180ο. Παρόλα αυτά, ένας παρατηρητής αντιλαμβανόμενος την πορεία των ακτίνων του φωτός από κάποιο σημείο μπροστά από το επίπεδο του αντικειμένου και πάνω από αυτόν χαρακτηρίζει τους κυκλικούς δίσκους στο Σχήμα 2.4 (α) σαν κυρτές περιοχές, οι οποίες βρίσκονται εμπρός από το επίπεδο, ενώ χαρακτηρίζει ως κοίλες περιοχές τους ίδιους δίσκους που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4 (β). Η σκιά ενός αντικειμένου προσδιορίζει επίσης την επιφάνεια πάνω στην οποία βρίσκεται αυτό. Το Σχήμα 2.4 (γ) απεικονίζει μία σφαίρα η οποία έχει ένα ομογενές φόντο. Αν τοποθετηθεί μία πηγή φωτός μπροστά και ψηλότερα από το νοητό επίπεδο στο οποίο τοποθετείται η σφαίρα η σκιά που δημιουργείται προσδιορίζει το φόντο ως την επιφάνεια πάνω στην οποία είναι τοποθετημένη η σφαίρα.



Σχήμα 2.4: (α) Φαινομενικά κυρτά και (β) Φαινομενικά κοίλα τμήματα σφαιρών σε σχέση με μία επιφάνεια. (γ) Σκίαση μίας σφαίρας που καθορίζει την επιφάνεια στην οποία βρίσκεται.

2.4.3 Αποκλεισμός

Όταν ένα αντικείμενο καλύπτει ένα άλλο τότε το αντικείμενο αυτό χωριοθετείται φαινομενικά πιο κοντά σε εμάς. Ένα απλό παράδειγμα είναι αυτό το κείμενο το οποίο βρίσκεται πιο κοντά από οτιδήποτε άλλο κάτω από αυτό, όπως το γραφείο μας. Στο Σχήμα 2.5 αντιλαμβανόμαστε τον κόκκινο δίσκο μπροστά από τον κίτρινο δίσκο, αφού τον καλύπτει, αποκόπτοντας ένα τμήμα του δημιουργώντας έτσι το φαινόμενο του αποκλεισμού.



Σχήμα 2.5: Αποκλεισμός.

2.4.4 Προοπτική ατμόσφαιρας

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες παραγράφους, η εικόνα ενός αντικειμένου σχηματίζεται από τις ακτίνες του φωτός που προσλαμβάνει το οπτικό σύστημα του παρατηρητή. Στην περίπτωση που το αντικείμενο είναι αυτόφωτο οι ακτίνες πηγάζουν από αυτό, ενώ στην περίπτωση που είναι ετερόφωτο ανακλώνται στις επιφάνειες του οι ακτίνες μίας εξωτερικής πηγής φωτός. Σε οποιαδήποτε από τις δύο περιπτώσεις οι ακτίνες διανύουν την απόσταση που χωρίζει το αντικείμενο από τον παρατηρητή περνώντας μέσα από το ατμοσφαιρικό στρώμα που παρεμβάλλεται και το οποίο ονομάζεται οπτική μάζα. Η οπτική μάζα προκαλεί απορρόφηση και διάχυση της ακτινοβολίας, η οποία οφείλεται κατά κύριο λόγο σε πολλαπλές σκεδάσεις, ανακλάσεις και διαθλάσεις από τα σωματίδια τα οποία περιέχονται στην οπτική μάζα. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες λαμβάνονται υπόψη για την απορρόφηση στο νόμο Beer-Lambert [22]. Στα παραπάνω φαινόμενα οφείλεται το κυανό χρώμα του ουρανού, και κατ' αντιστοιχία το κυανό χρώμα που προσδίδεται σε αντικείμενα που απέχουν μεγάλες αποστάσεις. Είναι χαρακτηριστικό ότι σε μία φυσική σκηνή όπως αυτή που απεικονίζεται στην Εικόνα 2.1, τα όρη που βρίσκονται κοντά στον παρατηρητή παρουσιάζουν ένα πρασινωπό χρώμα, που οφείλεται στη βλάστηση, ενώ τα

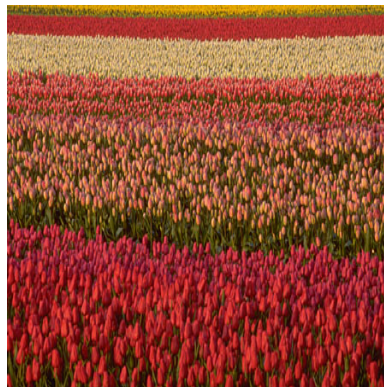
απομακρυσμένα όρη στο δεξί άκρο της εικόνας έχουν χρώμα που πλησιάζει προς το κυανό λόγω της οπτικής μάζας που παρεμβάλλεται.



Εικόνα 2.1: Προοπτική ατμόσφαιρας.

2.4.5 Διαβάθμιση υφής

Ο συγκεκριμένος παράγοντας οφείλει την ύπαρξη του στη λεπτομέρεια της υφής των αντικειμένων, την οποία μπορεί να διακρίνει ένας παρατηρητής σε σχέση με την απόσταση τους από αυτόν. Η υφή των κοντινών αντικειμένων στον παρατηρητή είναι περισσότερο ευδιάκριτη σε σχέση με τα αντικείμενα που βρίσκονται μακριά. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα των αντικειμένων που είναι μακριά προκαλεί στον παρατηρητή την αίσθηση ότι είναι μεγαλύτερη από εκείνη αυτών που είναι πιο κοντά του. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα απεικονίζεται στην Εικόνα 2.2 στην οποία όσο μακρύτερα βρίσκονται τα λουλούδια από τον παρατηρητή τόσο πυκνότερα γίνονται αντιληπτά.



Εικόνα 2.2: Διαβάθμιση υφής.

2.4.6 Γραμμική προοπτική

Η γραμμική προοπτική είναι ένας από τους πιο σημαντικούς στερεοσκοπικούς παράγοντες. Αναφέρεται στην σταδιακή μείωση του μεγέθους των αντικειμένων με αύξηση της απόστασης από τον παρατηρητή. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό και από την Εικόνα 2.3, το μέγεθος των δέντρων στην άκρη του δρόμου μειώνεται όσο αυτά απομακρύνονται από τον παρατηρητή, ενώ παράλληλα το πλάτος του απεικονιζόμενου δρόμου τείνει να μηδενιστεί, στο σημείο του ορίζοντα του παρατηρητή.



Εικόνα 2.3: Γραμμική προοπτική.

2.4.7 Συνδυασμένοι ψυχοοπτικοί παράγοντες

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο οι παραπάνω παράγοντες συντελούν στην διαισθητική 3Δ αντίληψη του ορατού κόσμου και αξιοποιούν λογικά συμπεράσματα που συνάγει ο εγκέφαλος βασιζόμενος στην παρατήρηση των αντικειμένων που περιβάλλουν ένα παρατηρητή, όπως επίσης και στην εμπειρία που διαθέτει αυτός. Η ύπαρξη ενός μεγάλου πλήθους από τους παραπάνω παράγοντες σε μία φυσική 3Δ σκηνή ή ο αποτελεσματικός συνδυασμός τους σε υπολογιστικά κατασκευασμένες 3Δ σκηνές συμβάλλει στη δημιουργία ορθής 3Δ αντίληψης στον παρατηρητή. Ένας συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.4.

2.5 Φυσιολογικοί παράγοντες τρισδιάστατης αντίληψης

Οι φυσιολογικοί στερεοσκοπικοί παράγοντες οφείλουν την ύπαρξη τους σε συγκεκριμένα φυσιολογικά χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος του κάθε

παρατηρητή. Αποτελούν δε εγγενή ανατομικά χαρακτηριστικά του οπτικού συστήματος και με τη σειρά τους επηρεάζουν άμεσα την αντίληψη βάθους των αντικειμένων.



Εικόνα 2.4: Συνδυασμένοι ψυχοοπτικοί παράγοντες.

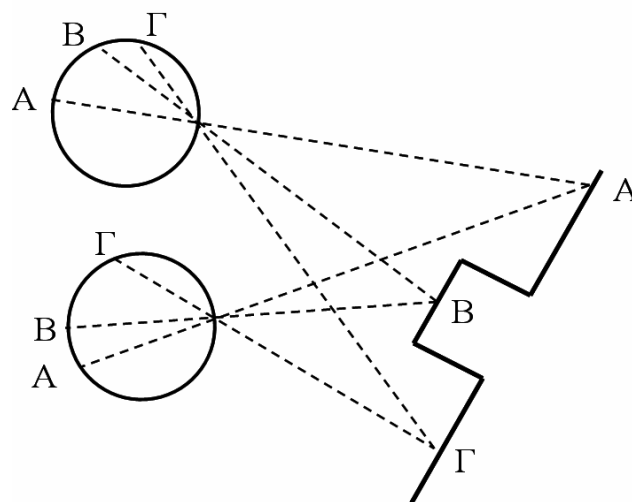
Οι συγκεκριμένοι παράγοντες δεν συνδέονται με τη σχετική διάταξη των αντικειμένων στο χώρο ή άλλους ψυχοοπτικούς παράγοντες, αλλά είναι σημαντικότεροι στην παρατήρηση και επιτυχή 3D αντίληψη του πραγματικού κόσμου. Υπάρχουν τρεις φυσιολογικοί παράγοντες βάθους, οι οποίοι ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό συμβάλλουν καθοριστικά στην 3D αντίληψη των αντικειμένων και χρησιμοποιούνται στη στερεοσκοπία για να επιτύχουν τεχνητή στερεοσκοπική όραση. Αν και αποτελούν τη βάση της στερεοσκοπικής όρασης μπορούν ως ένα βαθμό να υποκατασταθούν από τους ψυχοοπτικούς παράγοντες σε συγκεκριμένες καταστάσεις. Οι παράγοντες αυτοί περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

2.5.1 Διόφθαλμη Ανομοιότητα

Η διόφθαλμη ανομοιότητα (Binocular Disparity) είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας από όλους τους ψυχοοπτικούς και φυσιολογικούς παράγοντες. Οφείλεται στο γεγονός ότι για κάθε ανθρώπινο παρατηρητή η διοφθαλμική απόσταση είναι σταθερή με φυσιολογικές τιμές στο διάστημα 6.4-7 cm. Η χωρική απόσταση των δύο οφθαλμών έχει ως συνέπεια τη δημιουργία δύο ελάχιστα διαφορετικών εικόνων στους αμφιβληστροειδείς των δύο οφθαλμών. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος λαμβάνει τις δύο αυτές διαφορετικές εικόνες του ίδιου αντικειμένου μέσω του οπτικού νεύρου κάθε οφθαλμού και τις συγχωνεύει σε μία, αναπαράγοντας με τον τρόπο αυτό μία μοναδική τρισδιάστατη αναπαράσταση. Πρέπει

να σημειωθεί ότι η διόρθωση διαθλαστικών και άλλων ανωμαλιών που προκαλούνται από τους φακούς των δύο οφθαλμών στις δύο εικόνες, όπως επίσης και η εύρεση σε αυτές ομόλογων σημείων για τη σύντηξη (fusion) των δύο εικόνων σε μία, πραγματοποιείται σε ελάχιστο χρόνο παρόλη την πολύπλοκη διαδικασία που πραγματοποιείται. Η συγκεκριμένη παρατήρηση επιτρέπει στα συστήματα στερεοσκοπικής λήψης που χρησιμοποιούν σε βάση το συγκεκριμένο παράγοντα να έχουν αποκλίσεις από την ιδεατή περίπτωση με αποτέλεσμα την υψηλή ανοχή των διαδικασιών λήψης 3Δ σκηνών σε σφάλματα.

Η συνολική λειτουργία των φυσιολογικών παραγόντων στερεοσκοπικής όρασης και η σύνδεση της με τα διάφορα τεχνητά συστήματα στερεοσκοπικής παρατήρησης αναλύεται σε επόμενο εδάφιο. Ωστόσο, όσον αφορά τη διόφθαλμη ανομοιότητα γίνεται εύκολα αντιληπτή με τη χρήση απλών προβολών σημείων αφού όσο πιο κοντά είναι ένα αντικείμενο στο επίπεδο των οφθαλμών τόσο πιο μεγάλη είναι η ανομοιότητα που παρουσιάζει, η οποία τείνει να μηδενιστεί για πολύ μακρινά αντικείμενα. Στο Σχήμα 2.6 μπορούμε να παρατηρήσουμε πώς οι δύο οφθαλμοί καταγράφουν διαφορετικές εικόνες για τα τρία σημεία A, B, Γ του ίδιου αντικειμένου. Στο παράδειγμα αυτό τα είδωλα των τριών σημείων σχηματίζονται σε διαφορετικά σημεία του αμφιβληστροειδή, δημιουργώντας κατ' αυτόν τον τρόπο δυο εικόνες του ίδιου αντικειμένου από διαφορετικές οπτικές γωνίες.



Σχήμα 2.6: Διόφθαλμη ανομοιότητα.

2.5.2 Παράλλαξη κίνησης

Η παράλλαξη κίνησης είναι ο δεύτερος φυσιολογικός μηχανισμός και ενεργοποιείται καθώς ο παρατηρητής κινείται σε σχέση με το αντικείμενο. Η αίσθηση της κίνησης ενός αντικειμένου, είναι πιο έντονη για έναν κινούμενο παρατηρητή, όταν το αντικείμενο είναι πιο κοντά του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η παρατήρηση αντικειμένων μέσα από το τζάμι ενός κινούμενου αυτοκινήτου. Κοντινά αντικείμενα στον παρατηρητή όπως δέντρα που βρίσκονται στην άκρη του δρόμου μεταβάλλουν τη θέση τους πολύ γρήγορα σε σχέση με τον παρατηρητή εντός του αυτοκινήτου, σε αντίθεση με μακρινά αντικείμενα που τοποθετούνται νοητά στον ορίζοντα του παρατηρητή, όπως ορεινοί όγκοι των οποίων η φαινόμενη θέση μεταβάλλεται με πολύ αργό ρυθμό.

2.5.3 Σύγκλιση και Προσαρμογή

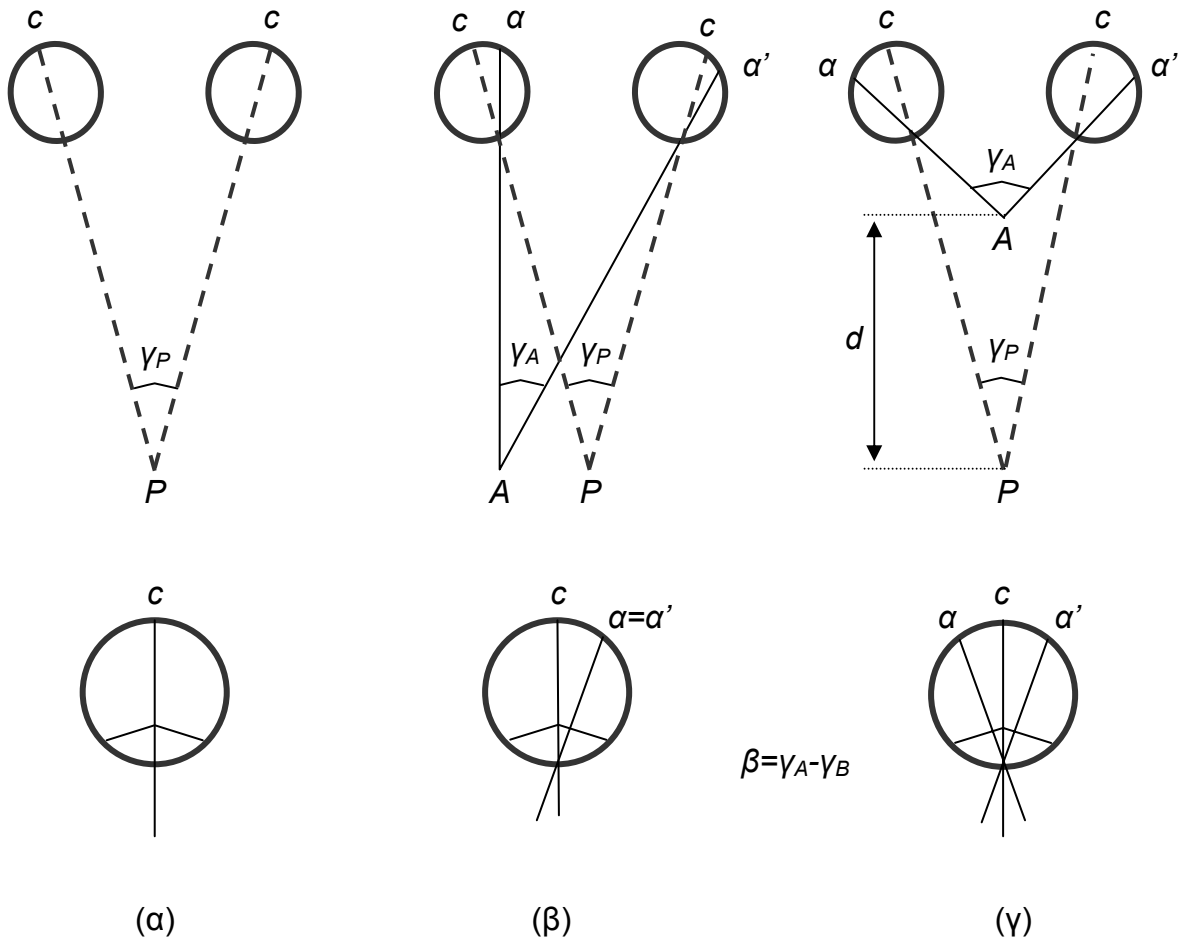
Η σύγκλιση των οπτικών αξόνων των οφθαλμών και η προσαρμογή του φακού εστίασης των οφθαλμών ενός παρατηρητή αποτελούν του δύο τελευταίους φυσιολογικούς παράγοντες που συμμετέχουν στην 3Δ αντίληψη των αντικειμένων του χώρου.

Έστω P ένα σημείο του χώρου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 (α) στο οποίο εστιάζουν οι οφθαλμοί ενός παρατηρητή με την βοήθεια των μυών σύγκλισης. Οι μύες αυτοί στρέφουν τους οφθαλμούς ώστε ο οπτικός άξονας τους να συμπίπτει με την ευθεία cP , όπου c είναι το κέντρο του αμφιβληστροειδούς χιτώνα (σημείο απόληξης του οπτικού νεύρου), το σημείο δηλαδή που σχηματίζεται το είδωλο του σημείου P . Η γωνία σύγκλισης γ_P των δύο οπτικών αξόνων ονομάζεται παραλλακτική γωνία, η δε αίσθηση της μυϊκής τάσης για τον σχηματισμό της παραλλακτικής γωνίας γ_P μεταφράζεται στον ανθρώπινο εγκέφαλο σε ένδειξη της απόστασης του σημείου P από τον παρατηρητή.

Αν A είναι ένα δεύτερο σημείο του χώρου όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 (β) και α , α' οι αντίστοιχες εικόνες του στους αμφιβληστροειδείς των δύο οφθαλμών, τότε στην περίπτωση που οι εικόνες α και α' σχηματίζονται στο ίδιο σημείο του αμφιβληστροειδούς στους δύο οφθαλμούς, ο εγκέφαλος σχηματίζει την εντύπωση ότι τα σημεία A και P απέχουν εξ' ίσου από τον παρατηρητή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή οι δύο παραλλακτικές γωνίες γ_A και γ_P είναι ίσες μεταξύ τους [23].

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7 (γ) και ενώ οι οφθαλμοί είναι εστιασμένοι στο σημείο P εισάγουμε και ένα δεύτερο σημειακό αντικείμενο A σε απόσταση d από το P . Τότε οι εικόνες α και α' δε σχηματίζονται στο ίδιο σημείο του αμφιβληστροειδούς, η δε γωνία β

που σχηματίζουν είναι ίση με την διαφορά των παραλλακτικών γωνιών. Στην περίπτωση αυτή ο εγκέφαλος αντιλαμβάνεται ότι τα δύο σημεία απέχουν διαφορετικές αποστάσεις από τον παρατηρητή, με πιο κοντινό το σημείο που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραλλακτική γωνία.



Σχήμα 2.7: Αντίληψη του χώρου από τον ανθρώπινο οφθαλμό.

Τέλος, η προσαρμογή, δηλαδή η δυνατότητα του ανθρώπινου οφθαλμού να αυξομειώνει την εστιακή του απόσταση για να επιτύχει ευκρινές είδωλο στον αμφιβληστροειδή χιτώνα είναι ο δεύτερος φυσιολογικός μονοσκοπικός παράγοντας όρασης ο οποίος συμμετέχει στη στερεοσκοπική όραση. Σημεία σε διαφορετικές αποστάσεις από τον οφθαλμό απαιτούν διαφορετικές τάσεις των μυών για την προσαρμογή του φακού ώστε να επιτευχθεί η σωστή εστίαση, γεγονός που δίνει στον εγκέφαλο την εντύπωση της διαφορετικής απόστασης. Η εντύπωση αυτή του χώρου από τον ένα μόνο οφθαλμό παρέχει μόνο σχετικές αποστάσεις των αντικειμένων, ειδικά σε αποστάσεις μεγαλύτερες του ενός μέτρου. Σε αντίθεση, τέλος, με την μονοσκοπική

όραση όπου η διακριτική ικανότητα του ενός οφθαλμού είναι μόλις 2", η διακριτική ικανότητα της στερεοσκοπικής όρασης είναι 33'-80'.

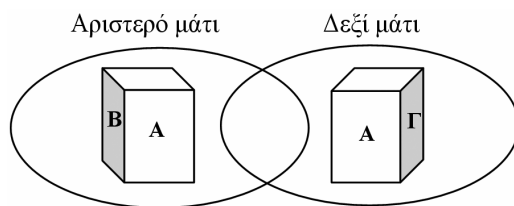
Στην μονοσκοπική όραση, η διακριτική ικανότητα του οφθαλμού (2") στην ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασης των 25 cm αντιστοιχεί σε ένα μήκος περίπου 0.08 mm. Αυτό σημαίνει ότι δύο παράλληλες γραμμές μπορούν να διαχωριστούν αν απέχουν μεταξύ τους περίπου το ένα τέταρτο της παραπάνω τιμής, δηλαδή 0.02mm [3],[5].

Η στερεοσκοπική όραση δεν είναι δυνατή για αποστάσεις αντικειμένου από τον οφθαλμό μικρότερες των 25 cm (ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασης), γιατί ο ανθρώπινος οφθαλμός δεν μπορεί να εστιάσει σε μικρότερες αποστάσεις. Για κανονική απόσταση μεταξύ των δύο οφθαλμών 6.4-7 cm και για την απόσταση της ευκρινούς όρασης, η μέγιστη τιμή της παραλλακτικής γωνίας υπολογίζεται σε 150. Η ελάχιστη εξάλλου τιμή της παραλλακτικής γωνίας είναι 10"-20", η οποία αντιστοιχεί σε απόσταση 600-800 m. Η αντίληψη του βάθους με στερεοσκοπική όραση δεν είναι δυνατή για αποστάσεις μεγαλύτερες των 700 m περίπου γιατί η παραλλακτική γωνία είναι πολύ μικρή. Για να γίνει αντιληπτό το βάθος των αντικειμένων σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 700 m απαιτείται η τεχνητή αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο οφθαλμών τεχνητά, π.χ. με την χρήση κυαλιών.

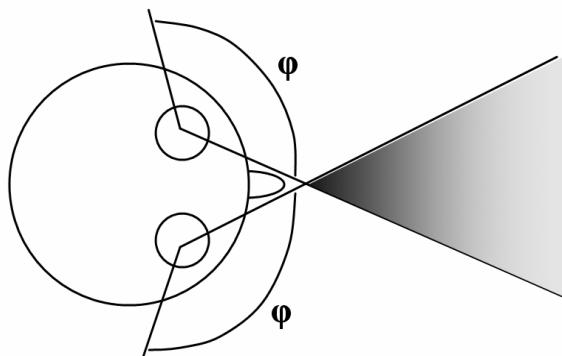
2.6 Στερέωση

Όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα υπάρχουν δύο ειδών παράγοντες βάθους, οι ψυχοοπτικοί και οι φυσιολογικοί. Η τρισδιάστατη αντίληψη των αντικειμένων που μας περιβάλλουν είναι μια διαδικασία του εγκεφάλου η οποία λαμβάνει υπόψη της το σύνολο των παραπάνω παραγόντων και καλείται στερέωση. Το ανθρώπινο οπτικό σύστημα έχει την ικανότητα να συγχωνεύει τις δύο διαφορετικές εικόνες, που λαμβάνονται στους αμφιβληστροειδείς των δύο οφθαλμών, σε μια στερεοσκοπική εικόνα στον εγκέφαλο. Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζεται η διαδικασία, στην οποία οι δύο οφθαλμοί λαμβάνουν τις δύο διαφορετικές εικόνες ενός αντικειμένου.

Το οπτικό πεδίο του κάθε οφθαλμού προσδιορίζεται από τη γωνία φ . Όπως παρατηρούμε κάθε ένα από τα δύο πεδία ανταποκρίνεται σε διαφορετική περιοχή του χώρου, αλλά περιλαμβάνουν και μια κοινή περιοχή, όπως απεικονίζεται στο σκιασμένο τμήμα του Σχ. 2.9. Η κοινή αυτή περιοχή αντιστοιχεί στην επιφάνεια A του κύβου στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8: Στερέοψη.



Σχήμα 2.9: Οπτικό πεδίο.

Αναλυτικά στο Σχήμα 2.8 παρατηρούμε ότι το ίδιο αντικείμενο γίνεται αντιληπτό από τον παρατηρητή σαν δύο ελαφρώς διαφορετικές εικόνες [1]. Χαρακτηριστικά ενώ η πλευρά *A* του κύβου είναι ορατή και από τους δύο οφθαλμούς, η πλευρά *B* είναι αθέατη στον δεξιό οφθαλμό ενώ η πλευρά *Γ* είναι αθέατη στον αριστερό. Η συγχώνευση των διαφορετικών αυτών εικόνων δίνει την απαραίτητη πληροφορία βάθους στον εγκέφαλο ώστε να μπορούμε να δούμε το αντικείμενο με τρισδιάστατο τρόπο. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διαδικασία εύρεσης ομόλογων σημείων στο ζεύγος εικόνων που ανακτάται από τους οφθαλμούς και σύνθεσης της τελικής 3Δ εικόνας λαμβάνει χώρα σε πραγματικό χρόνο και είναι ανεκτή σε λάθη που προέρχονται από ατέλειες του ανθρώπινου οπτικού συστήματος όπως επίσης και σε κινήσεις της κεφαλής.

2.7 Τεχνητή στερεοσκοπική όραση

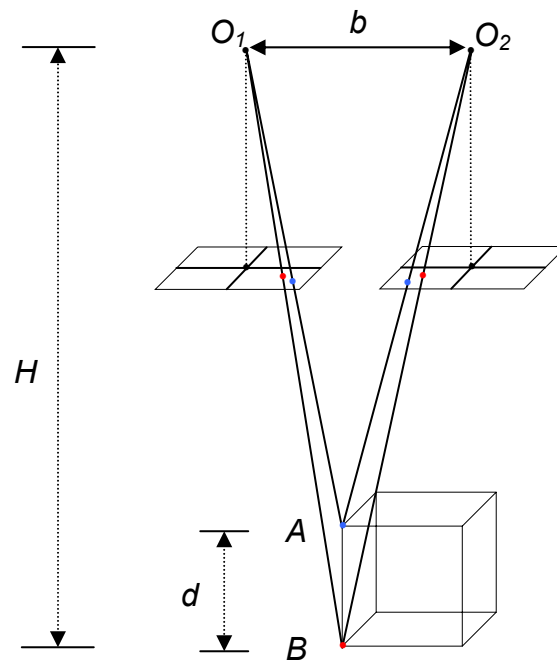
Η στερεοσκοπική παρατήρηση ενός 3Δ αντικειμένου έχει ως απαραίτητη προϋπόθεση την ύπαρξη ενός τουλάχιστον στερεοζεύγους, δηλαδή δύο λήψεων του ίδιου αντικειμένου από διαφορετικά σημεία του χώρου τα οποία παρουσιάζουν ένα ποσοστό

επικάλυψης. Η παραπάνω προσέγγιση αποτελεί ένα τεχνητό ανάλογο της φυσικής στερεοσκοπικής όρασης, βασιζόμενο στον κυριότερο φυσιολογικό παράγοντα της διόφθαλμης ανομοιότητας και στην ιδιότητα της στερέωσης. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται σήμερα για την υλοποίηση συστημάτων που παρέχουν τεχνητή στερεοσκοπική παρατήρηση έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τους περισσότερους χρήστες και καλύπτουν τους περισσότερους σκοπούς στους οποίους απαιτείται 3D παρατήρηση. Υπάρχουν όμως και ορισμένες ειδικές εφαρμογές, οι οποίες χρειάζονται αυξημένη διακριτική ικανότητα, ελευθερία στην κίνηση του παρατηρητή και άλλες ειδικές απαιτήσεις, οι οποίες επιβάλλουν περιορισμούς στο πλήθος και το είδος των μεθόδων που μπορούν να αξιοποιηθούν.

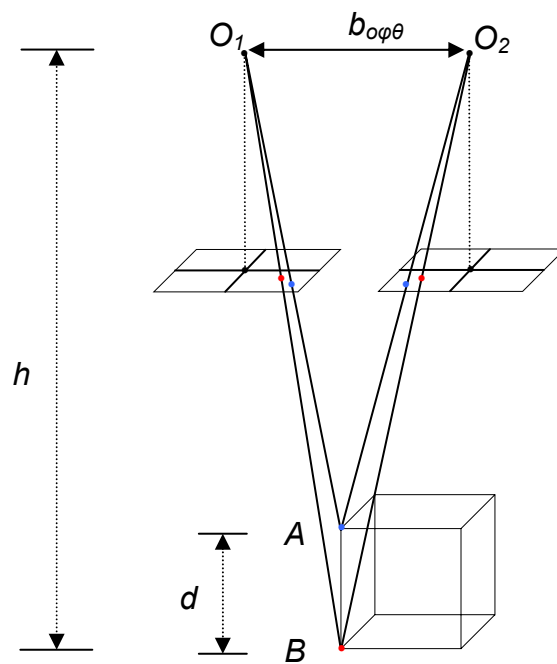
Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζεται η βασική στερεοσκοπική αρχή που πρέπει να πληροί ένα σύστημα παρατήρησης, καθώς επίσης και οι αρχές λειτουργίας των βασικότερων στερεοσκοπικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Το στερεοζεύγος αποτελεί την ελάχιστη πληροφορία που απαιτείται για τη δημιουργία ενός στερεοσκοπικού ειδώλου στον παρατηρητή και αποτελεί τη βασική αρχή όλων των στερεοσκοπικών συστημάτων. Στο Σχήμα 2.10 ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών με κάποιο ποσοστό επικάλυψης έχει ληφθεί από τις θέσεις O_1 και O_2 σε απόσταση H από το αντικείμενο. Η απόσταση b μεταξύ των δύο λήψεων ονομάζεται βάση του στερεοζεύγους. Δύο σημεία A και B τα οποία αποτελούν το εγγύτερο και πιο απομακρυσμένο σημείο του αντικειμένου προς το επίπεδο λήψης απεικονίζονται και στις δύο φωτογραφίες και έχουν μεταξύ τους διαφορά βάθους d , η οποία είναι ίση με το βάθος του αντικειμένου. Κατά τη διαδικασία της προβολής των δύο λήψεων, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11 οι φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από τις εικόνες των σημείων A και B καταλήγουν στους οφθαλμούς, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση $b_{οφθ}$ την οποία αποκαλούμε βάση του προσοφθάλμιου συστήματος. Η τεχνική στερεοσκοπική όραση επιτυγχάνεται όταν οι ακτίνες που προέρχονται από την αριστερή λήψη κατευθύνονται μόνο στον αριστερό οφθαλμό και αντίστοιχα οι ακτίνες από τη δεξιά λήψη μόνο στον δεξί οφθαλμό.

Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό τα σημεία του κύβου που βρίσκονται εγγύτερα στο παρατηρητή, όπως το σημείο A , αντιστοιχούν σε παραλλακτικές γωνίες γ_A οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις παραλλακτικές γωνίες γ_B που σχηματίζουν τα σημεία της βάσης του κύβου όπως το σημείο B . Σημειώνεται, ακόμη, ότι το βάθος που αντιλαμβάνεται ο παρατηρητής εξαρτάται από τη διαφορά των παραλλακτικών γωνιών $\gamma_A - \gamma_B$.



Σχήμα 2.10: Διαδικασία λήψης στερεοζεύγους.



Σχήμα 2.11: Διαδικασία προβολής στερεοζεύγους.

Ένα τυχαίο σημείο ρ του κύβου που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11 σχηματίζει παραλλακτική γωνία γ_ρ η οποία δίνεται από την Εξίσωση 2.1.

$$\gamma_\rho = 2 \cdot \arctan \frac{b_{\text{οφθ}}}{2 \cdot (h - h_\rho)} \quad (2.1)$$

Θεωρώντας ότι ο λόγος της βάσης b της συσκευής λήψης προς τη βάση του προσοφθάλμιου $b_{\text{οφθ}}$ είναι k τότε άμεσα προκύπτει η Εξίσωση 2.2.

$$\frac{b_{\text{οφθ}}}{b} = \frac{h - h_\rho}{H - H_\rho} \quad (2.2)$$

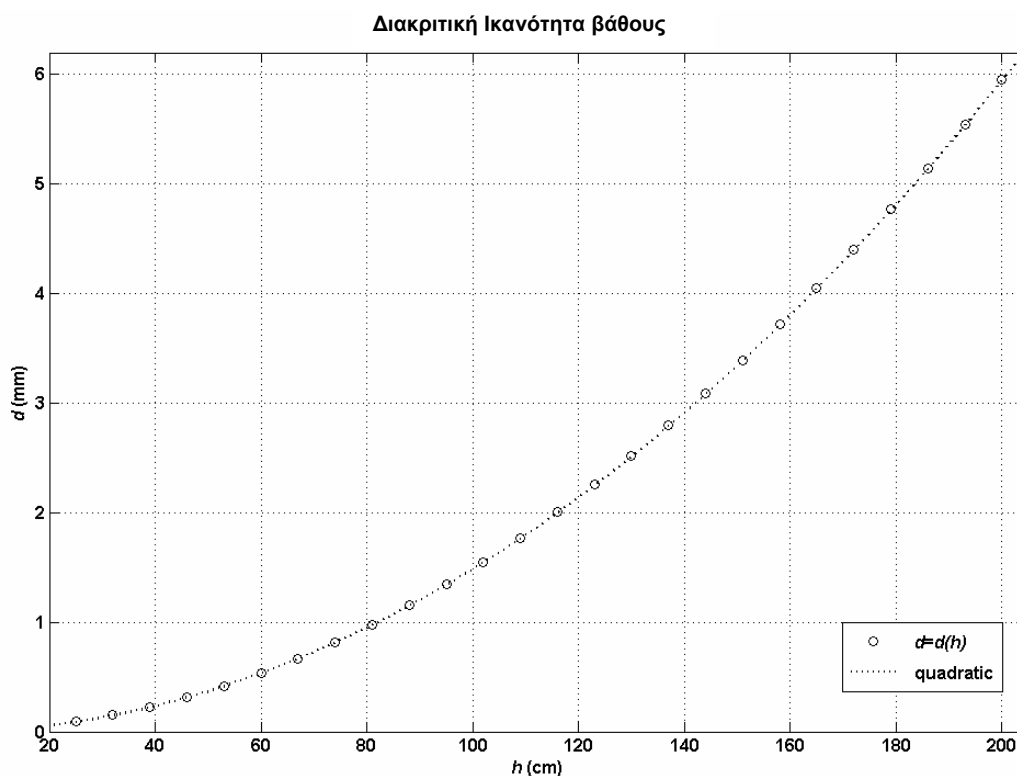
Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.1-2.2 άμεσα προκύπτει ότι οι παραλλακτικές γωνίες για το σημείο ρ είναι ίδιες και άρα η σχετική απόσταση των σημείων A και B παραμένει σταθερή. Αν ορίσουμε την στερεοσκοπική οπτική οξύτητα ως $\delta = \gamma_A - \gamma_B$ είναι δυνατό να υπολογιστεί η διακριτική ικανότητα βάθους που αντιστοιχεί στην απόσταση d που απέχουν τα σημεία A και B του κύβου στο Σχήμα 2.11. Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.1 προκύπτει τελικά (Παράρτημα Α.1) ότι:

$$d = h - \frac{\frac{b_{\text{οφθ}}}{2} \left(1 - \frac{b_{\text{οφθ}}}{2 \cdot h} \cdot \tan \frac{\delta}{2} \right)}{\frac{b_{\text{οφθ}}}{2 \cdot h} + \tan \frac{\delta}{2}} \quad (2.3)$$

Ένα πλήθος μελετών αποδίδει τιμές της στερεοσκοπικής οπτικής οξύτητας [24],[25] στο εύρος $\delta=2''-60''$. Χρησιμοποιώντας σαν τυπική τιμή $\delta_r=20''$ και αντικαθιστώντας στην Εξίσωση 2.3 προκύπτει η στερεοσκοπική οπτική οξύτητα σε μονάδες απόστασης δύο σημείων, όταν η απόσταση του παρατηρητή είναι h , όπως αυτή σημειώνεται στο Σχήμα 2.11. Η μεταβολή της ποσότητας d για διάφορες τιμές της απόστασης h απεικονίζεται στο Σχήμα 2.12. Η συνεχής μεταβολή της παραλλακτικής γωνίας σε ένα ζεύγος μερικώς επικαλυπτόμενων εικόνων ενισχύει την εντύπωση ενός συνεχόμενου 3Δ χώρου για τον παρατηρητή.

Μία σημαντική παράμετρος η οποία αφορά το σύστημα προβολής, είναι ο τρόπος με τον οποίο η αριστερή (L) και δεξιά (R) εικόνα τοποθετούνται στο στερεοσκοπικό

σύστημα προβολής. Οι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατή η τοποθέτηση των δύο εικόνων που αποτελούν το στερεοζεύγος συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2.



Σχήμα 2.12: Διακριτική ικανότητα βάθους.

Πίνακας 2.2: Είδη στερεοσκοπικής όρασης σε σχέση με την τοποθέτηση του στερεοζεύγους

Τοποθέτηση Εικόνων Σύστημα Προβολής	Τύπος Όρασης			Αποτέλεσμα
	ορθή	Αντίστροφη	Κατοπτρική	
ορθή	LR	RL	RL	Ορθοσκοπική
Αντιμετάθεση	RL	LR	LR	Ψευδοσκοπική
Στροφή (90°)	└┐	┐└	┐└	Αδύνατη

Διακρίνουμε τρεις διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης των δύο εικόνων του στερεοζεύγους και τρεις διαφορετικούς τύπους με τους οποίους ο παρατηρητής μπορεί να τοποθετηθεί σε σχέση με το σύστημα προβολής. Εκτός από την πρώτη περίπτωση της ορθούς οράσεως, ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η τρίτη περίπτωση όπου οι εικόνες τοποθετούνται με στροφή 90° στο στερεοσκόπιο. Στην περίπτωση αυτή, στην οριζόντια πλέον διάσταση, η παράλλαξη των αντικειμένων είναι μηδενική, ενώ παρουσιάζεται παράλλαξη στον κατακόρυφο άξονα της εικόνας, η οποία δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή και άρα είναι αδύνατη η στερεοσκοπική παρατήρηση του αντικειμένου. Επίσης, χαρακτηριστική είναι και η δεύτερη περίπτωση του παραπάνω πίνακα στην οποία όλα τα ζεύγη εικόνων αντιστοιχούν στους αντίθετους οφθαλμούς σε σχέση με τη λήψη. Ως αποτέλεσμα της παραπάνω περίπτωσης ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται μία αντιστροφή του βάθους της εικόνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ

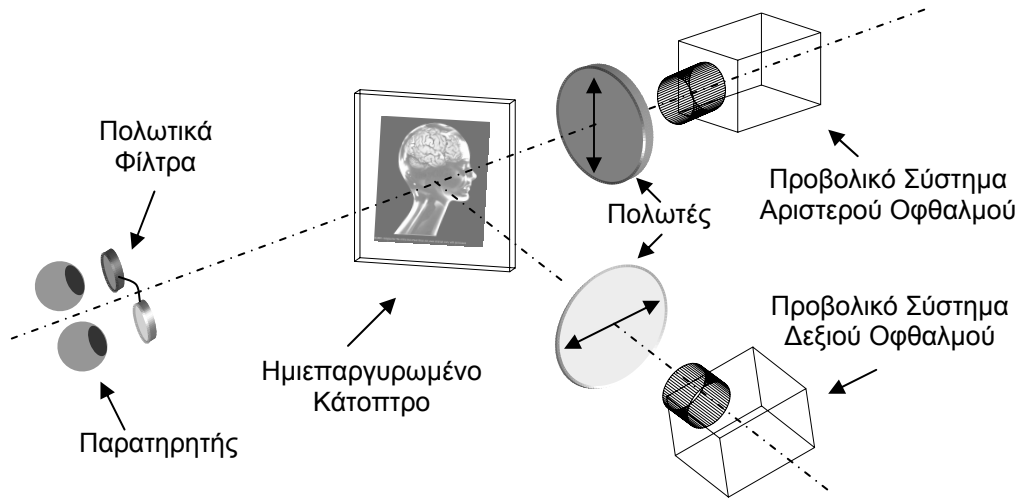
3.1 Στερεοσκοπικές Τεχνικές

Το σύνολο των τεχνικών που έχουν χρησιμοποιηθεί ή χρησιμοποιούνται σήμερα ή πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για τη διανομή 3D περιεχομένου πρέπει να υπακούει στις αρχές του προηγούμενου κεφαλαίου για να ανταποκρίνεται σε αυτό που ο εγκέφαλος ερμηνεύει ως 3D όραση. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται ή όχι ειδικά βοηθήματα παρατήρησης, όπως γυαλιά ή ειδικά κράνη. Στο πρώτο είδος τεχνικών, που χρησιμοποιούν τα βοηθήματα που αναφέρθηκαν, ανήκουν αυτές που θα αποκαλούμε στο εξής κλασσικές στερεοσκοπικές τεχνικές, ή απλά στερεοσκοπικές τεχνικές, ενώ στο δεύτερο είδος ανήκουν οι τεχνικές όπου δεν χρησιμοποιείται κανενός είδους συσκευής από την πλευρά του χρήστη για να επιτευχθεί η 3D παρατήρηση και τις οποίες θα ονομάζουμε αυτοστερεοσκοπικές τεχνικές. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ιδιαίτερη μνεία στα αυτοστερεοσκοπικά συστήματα παρατήρησης δεδομένου ότι αυτά αποτελούν τις πλέον σύγχρονες και πιο αποδεκτές τεχνικές για 3D παρατήρηση.

3.2 Κλασσικές Στερεοσκοπικές Τεχνικές

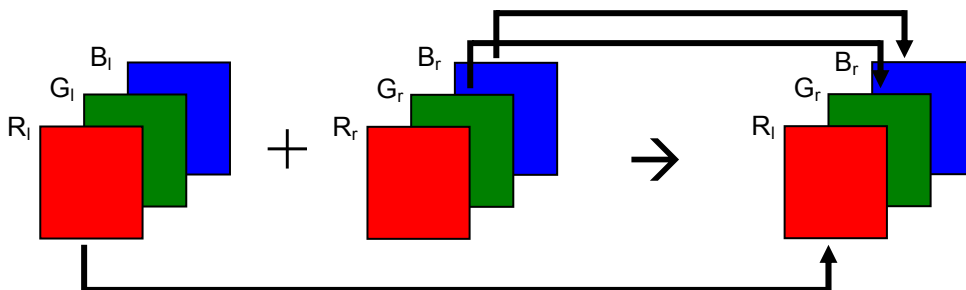
Όλες οι χρησιμοποιούμενες κλασσικές στερεοσκοπικές τεχνικές χρησιμοποιούν ένα στερεοζεύγος για την προβολή του 3D περιεχομένου στο χρήστη. Ένας τρόπος για να πετύχουμε τη σωστή προβολή του στερεοζεύγους είναι να προβάλλουμε τις δύο εικόνες που το αποτελούν τη μία επάνω στην άλλη, χρησιμοποιώντας δύο φωτεινές πηγές που εκπέμπουν φωτισμό πολωμένο κατά 90° [26]. Με την χρήση δύο πολωτών μπροστά από τους οφθαλμούς του παρατηρητή επιτρέπουμε την διέλευση μόνο του αντίστοιχα πολωμένου φωτισμού. Με αυτόν τον τρόπο, αν η αριστερή εικόνα προβάλλεται με οριζόντια πολωμένο φωτισμό και η δεξιά με κατακόρυφο, ο οριζόντιος πολωτής μπροστά από τον αριστερό οφθαλμό επιτρέπει την διέλευση μόνο των φωτεινών ακτινών της αριστερής εικόνας, ενώ εμποδίζει εκείνες που προέρχονται από τη δεξιά εικόνα. Αντίστοιχα στον δεξί οφθαλμό φτάνουν ακτίνες μόνο από τη δεξιά εικόνα. Αυτή η μέθοδος αποτελεί μία από τις βασικότερες κλασσικές στερεοσκοπικές μεθόδους όπου ο παρατηρητής φορά ένα ζεύγος γυαλιών με κατάλληλα πολωτικά φίλτρα ώστε να

καταστεί δυνατή η παρατήρηση της τρισδιάστατης σκηνής. Η αρχή της παραπάνω μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1: Αρχή λειτουργίας πολωτικών φίλτρων.

Μία δεύτερη μεθοδολογία βασίζεται επίσης στην ταυτόχρονη προβολή των δύο εικόνων, αλλά σε διαφορετικά (συμπληρωματικά) χρώματα (αρχή του αναγλύφου) [27]. Με τη χρήση αντίστοιχων χρωματικών φίλτρων στους δύο οφθαλμούς το ανάγλυφο, μπορεί να εξετασθεί στερεοσκοπικά καθώς κάθε οφθαλμός βλέπει μόνον ένα χρώμα, δηλαδή την μία μόνο εικόνα. Η βασική αρχή σύνθεσης της παραπάνω αναπαράστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Δημιουργία χρωμοστερεοεικόνας.

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται οι τρεις χρωματικές συνιστώσες της κάθε εικόνας του στερεοζεύγους ($R_i, G_i, B_i, i=l,r$) και ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται τα κανάλια για τη σύνθεση της τελικής χρωμοστερεοεικόνας στην περίπτωση όπου χρησιμοποιηθούν γυαλιά με ερυθρό και ιώδες χρωματικό φίλτρο για τον αριστερό και δεξί οφθαλμό αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που το χρώμα των φίλτρων που χρησιμοποιεί ο παρατηρητής είναι ανεστραμμένο, δηλαδή ιώδες για τον αριστερό οφθαλμό και ερυθρό για τον δεξί τα συμπληρωματικά χρωματικά κανάλια της κάθε εικόνας του στερεοζεύγους πρέπει να επιλεγούν, σε σχέση με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης.

Τα γυαλιά χρωματικών φίλτρων είναι εξίσου διαδεδομένα με αυτά που χρησιμοποιούν πολωτικά φίλτρα. παρουσιάζοντας το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται ειδική προβολή από πηγές με κάθετη μεταξύ τους πόλωση. Παρόλα αυτά, επειδή διατηρούνται μόνο ορισμένα κανάλια χρώματος, παρατηρείται έντονη χρωματική παραμόρφωση στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση έγχρωμων εικόνων.

Μια τρίτη τεχνική βασίζεται στη χρήση μίας συσκευής συγχρονισμένων κλείστρων για την εναλλασσόμενη προβολή της αριστερής και της δεξιάς εικόνας στον αριστερό και το δεξί οφθαλμό αντίστοιχα [28]. Με τον τρόπο αυτό κάθε οφθαλμός βλέπει μόνο μία εικόνα. Αν η ταχύτητα με την οποία εναλλάσσονται οι εικόνες είναι μεγαλύτερη από την οπτική υστέρηση του εγκεφάλου, τότε δημιουργείται η εντύπωση της συνεχούς εικόνας αφού οι δύο διαδοχικές εικόνες που προβάλλονται (μία σε κάθε οφθαλμό) συνδυάζονται από τον εγκέφαλο μέσω της διαδικασίας της στερέωσης για να αποδώσουν το 3D περιεχόμενο της σκηνής. Σημειώνεται ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να απεικονίσει σωστά τα χρώματα μιας τρισδιάστατης σκηνής, σε αντίθεση με τα χρωματικά φίλτρα, αφού δεν αφαιρείται πληροφορία χρώματος από τις εικόνες που αποτελούν το στερεοζεύγος, ενώ υπερέχει και σε σχέση με τα γυαλιά που χρησιμοποιούν πολωτικά φίλτρα, αφού δεν απαιτείται ειδική συσκευή προβολής, αλλά αρκεί ο συγχρονισμός των κλείστρων με τη συχνότητα ανανέωσης της οθόνης προβολής. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η χρήση αισθητήρων συγχρονισμού μεταξύ πομπού, ο οποίος συνδέεται στην οθόνη προβολής και του δέκτη ο οποίος βρίσκεται στο σύστημα γυαλιών που φοράει ο παρατηρητής.

Στην παραπάνω κατηγορία της χρήσης κάποιου είδους φίλτρου ανήκουν και οι τεχνικές που βασίζονται στο φαινόμενο Pulfrich [29,30]. Κατά τη μέθοδο αυτή προβάλλεται μία εικόνα και στους δύο οφθαλμούς αλλά τοποθετείται ένα φίλτρο μπροστά από τον ένα οφθαλμό έτσι ώστε να μειωθεί η φωτεινότητα των εικόνων που προσλαμβάνει. Η

διαφορά στη φωτεινότητα δύο εικόνων που συλλαμβάνονται από τον κάθε οφθαλμό δημιουργεί μία υστέρηση στην επεξεργασία των εικόνων αυτών από τον εγκέφαλο επιτυγχάνοντας με τον τρόπο αυτό την 3D αίσθηση.

Μια πιο σύγχρονη και πιο εξελιγμένη τεχνική που παρέχει υψηλής ανάλυσης εικόνες βασίζεται στη χρήση ενός είδους κράνους το οποίο φέρει δύο μικρές οθόνες υγρών κρυστάλλων (Liquid Crystal Displays-LCD) που καλύπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό το οπτικό πεδίο του κάθε οφθαλμού [31]. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται κανενός είδους πολυπλεξία των εικόνων που θα προβληθούν στον κάθε οφθαλμό, παράγοντας έτσι υψηλής ποιότητας στερεοσκοπικές απεικονίσεις. Σημειώνεται παρόλα αυτά ότι λόγω της διακριτικής ικανότητας του οφθαλμού ειδικοί τύποι LCD ή άλλες τεχνικές, σε συνδυασμό με ειδικά οπτικά συστήματα πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να μην είναι διακριτός ο κόκκος της οθόνης στην απόσταση παρατήρησης. Η συγκεκριμένη τεχνική βρίσκει χρήση σε ειδικές εφαρμογές όπου δεν ενδιαφέρουν μειονεκτήματα, όπως το αυξημένο βάρος της συσκευής που πρέπει να φορά ο παρατηρητής, και το απαγορευτικό κόστος που συνεπάγεται η τεχνολογία κατασκευής.

Τέλος, πρέπει να γίνει αναφορά και στις τεχνικές των στερεογραμμάτων (Stereograms) και ειδικότερα στα στερεογράμματα τυχαίας κουκκίδας (Random Dot Stereograms) [32] στα οποία οι δύο εικόνες του στερεοζεύγους αποτελούνται από αντίγραφα ενός τυχαίου μοτίβου από κουκκίδες. Η συγκεκριμένη τεχνική που τυχαία ανακαλύφθηκε από τον B.Julesz είναι αξιοσημείωτη, διότι απέδειξε ότι είναι δυνατό ο ανθρώπινος εγκέφαλος να ανακαλύψει αντιστοιχίες σημείων μεταξύ εικόνων με τυχαία μοτίβα. Με τον τρόπο αυτό κατέδειξε τη διαδικασία της στερέωσης στην 3D όραση. Πράγματι, εάν επιλεγούν τεχνητά ορισμένα τμήματα από τις εικόνες αυτές και ολισθήσουν κατά κάποιες διευθύνσεις, τότε είναι δυνατό ένας παρατηρητής να αποκτήσει την αίσθηση ότι τα συγκεκριμένα τμήματα βρίσκονται μπροστά ή πίσω από το νοητό επίπεδο των εικόνων ανάλογα με τη διεύθυνση την κίνησης και την εικόνα στην οποία πραγματοποιήθηκε αυτή.

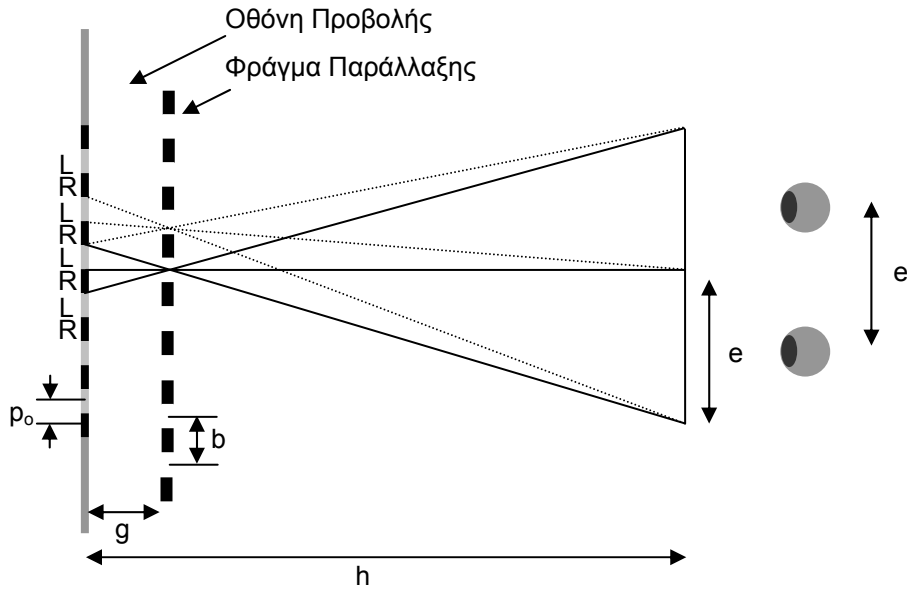
3.3 Αυτοστερεοσκοπικές Τεχνικές

Οι αυτοστερεοσκοπικές τεχνικές μπορούν να διαχωριστούν επίσης σε κατηγορίες, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούν στερεοζεύγη για να πετύχουν την 3D απεικόνιση ή άλλες μεθόδους οι οποίες στοχεύουν στην ανασύσταση του αρχικού αντικειμένου στο χώρο παρατήρησης με τη μορφή ενός 3D ειδώλου. Στην κατηγορία των τεχνικών που χρησιμοποιούν στερεοζεύγη κατατάσσονται οι τεχνικές που χρησιμοποιούν φράγματα

παράλλαξης (Parallax barriers) [33,34] και στην εξέλιξη τους αυτές που χρησιμοποιούν συστοιχίες κυλινδρικών φακών (Lenticular Arrays) [35], όπως επίσης τεχνικές που χρησιμοποιούν συστοιχίες φίλτρων επιλογής μήκους κύματος (Wavelength Selective Filter Arrays) [36] και ορισμένες κατηγορίες στερεογραμμάτων τις οποίες ονομάζουμε αυτοστερεογράμματα (Autostereograms) [37]. Στην κατηγορία των τεχνικών που πραγματοποιούν πλήρη ανασύσταση του 3D αντικειμένου που βρίσκεται στο οπτικό πεδίο της συσκευής, διακρίνουμε τις Ολογραφικές (Holographic) [38], τις Ολοσκοπικές (Holoscopic) [7,8] καθώς επίσης τις υβριδικές Ολογραφικές - Ολοσκοπικές [39] και τις μεθόδους ανασύστασης όγκου (Volumetric) [40].

Στην πρώτη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερα στερεοζεύγη τα οποία πολυπλέκονται μεταξύ τους στο επίπεδο της οθόνης προβολής και ανακατευθύνονται κατάλληλα στους οφθαλμούς του παρατηρητή. Ως οθόνες προβολής χρησιμοποιούνται συνήθως οθόνες τύπου LCD, οι οποίες διαθέτουν ιδιαίτερα σταθερά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τα αντίστοιχα οπτικά τμήματα που αναφέρονται σε κάθε τεχνική. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι οθόνες, συμπεριλαμβανομένων και των LCD εκπέμπουν διάχυτη ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολούν προς όλες τις κατευθύνσεις. Για την κατασκευή της απλούστερης στερεοσκοπικής διάταξης όπου γίνεται χρήση ενός στερεοζεύγους τα μισά από τα εικονοστοιχεία της οθόνης θα πρέπει να ακτινοβολούν προς τον ένα οφθαλμό και τα άλλα μισά προς τον άλλο. Στην απλούστερη περίπτωση όπου θα χρησιμοποιηθεί ένα φράγμα παράλλαξης η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.

Οι δύο εικόνες που αποτελούν το στερεοζεύγος εναλλάσσονται κατά στήλες στην οθόνη LCD και το φράγμα παράλλαξης λειτουργεί ως παρεμποδιστής για όλες τις διευθύνσεις ακτινοβολίας των εικονοστοιχείων εκτός από αυτές που βρίσκονται στο οπτικό παράθυρο του αριστερού και του δεξιού οφθαλμού. Με τον όρο οπτικό παράθυρο νοείται κάθε παράθυρο θέασης μέσα στο οποίο κινούμενος ο παρατηρητής μπορεί να αντιλαμβάνεται την ίδια στερεοσκοπική αναπαράσταση. Το μέγεθος του οπτικού παραθύρου στη συγκεκριμένη περίπτωση συμβολίζεται με e και αντιστοιχεί στη μέση διοφθαλμική απόσταση. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από το παραπάνω σχήμα, το κεντρικό παράθυρο επαναλαμβάνεται και προς τις δύο πλευρές του, δημιουργώντας αντίστοιχα παράθυρα που μπορούν να υποστηρίξουν ταυτόχρονα πολλούς διαφορετικούς παρατηρητές.



Σχήμα 3.3: Φράγμα Παράλλαξης.

Τα εικονοστοιχεία της οθόνης και το φράγμα παράλλαξης είναι ευθυγραμμισμένα ώστε το κεντρικό σημείο κάθε ζεύγους εικονοστοιχείων που αντιστοιχεί σε ένα στερεοζεύγος να είναι ορατό στο κέντρο κάθε οπτικού παραθύρου. Με βάση τη γεωμετρία στο Σχήμα 3.3 άμεσα προκύπτει με βάση τα όμοια ορθογώνια τρίγωνα που σχηματίζονται ότι:

$$\frac{b}{h-g} = \frac{2 \cdot p_0}{h} \quad (3.1)$$

όπου p_0 το βήμα κουκκίδας της οθόνης προβολής, h η απόσταση του παρατηρητή από την οθόνη προβολής, g το διάκενο μεταξύ της οθόνης προβολής και του φράγματος παράλλαξης και b το βήμα του φράγματος παράλλαξης.

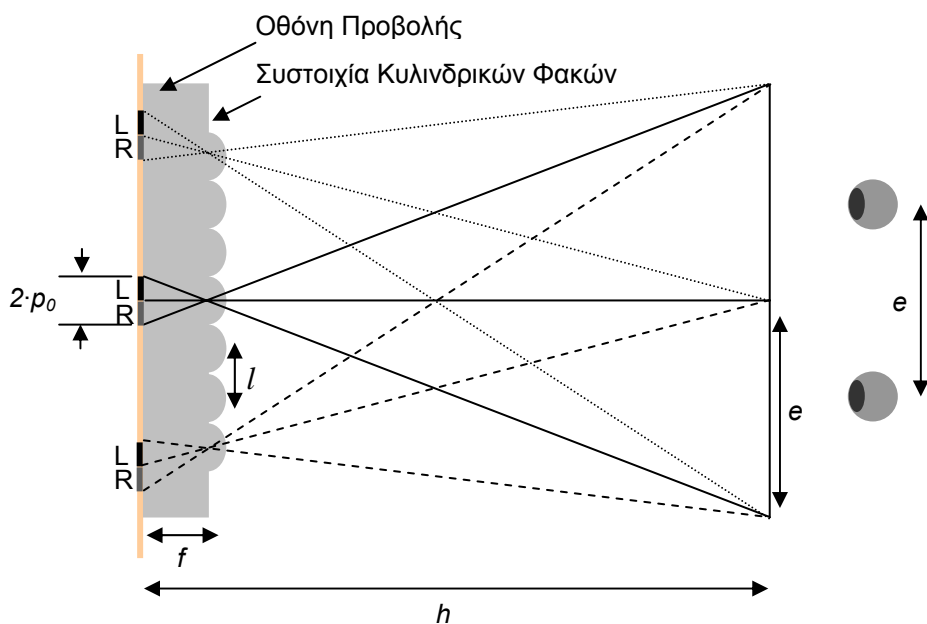
Επίσης, από το ίδιο σχήμα προκύπτει και πάλι με βάση την ομοιότητα τριγώνων και το γεγονός ότι το παράθυρο θέασης περιορίζεται από τη μέση απόσταση μεταξύ των οφθαλμών e , ότι:

$$\frac{p_0}{g} = \frac{e}{h-g} \quad (3.2)$$

Με δεδομένα χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως το ελάχιστο επιτρεπτό διάκενο, το βήμα κουκκίδας της οθόνης προβολής και τη μέση απόσταση μεταξύ των οφθαλμών,

προκύπτουν άμεσα -με χρήση των εξισώσεων 3.1 και 3.2- οι τιμές για το βήμα του φράγματος παράλληλης και της ελάχιστη απόσταση του παρατηρητή.

Επειδή τα φράγματα παράλληλης αποκόπτουν αρκετό τμήμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τα εικονοστοιχεία της οθόνης προβολής, είναι προτιμότερη πλέον η χρήση ενός συστήματος κυλινδρικών φακών των οποίων η αρχή λειτουργίας είναι παρόμοια με αυτή των φραγμάτων παράλληλης και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Συστοιχία Κυλινδρικών Φακών.

Σε πλήρη αντιστοιχία με την προηγούμενη μελέτη για τα φράγματα παράλληλης εξάγουμε τις εξισώσεις 3.3,3.4.

$$\frac{l}{h-f} = \frac{2 \cdot \rho_0}{h} \quad (3.3)$$

και

$$\frac{\rho_0}{f} = \frac{e}{h-f} \quad (3.4)$$

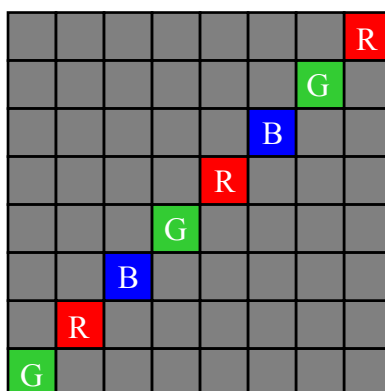
όπου ρ_0 το βήμα κουκκίδας της οθόνης προβολής, h η απόσταση του παρατηρητή από την οθόνη προβολής, f η εστιακή απόσταση των φακών της συστοιχίας, l το βήμα των φακών της συστοιχίας και e η μέση διοφθαλμική απόσταση.

Παρά την απλοποιημένη μελέτη που προηγήθηκε και οι δύο κατηγορίες αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων που περιγράφηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προβολή περισσοτέρων του ενός στερεοζευγών. Τα συγκεκριμένα συστήματα προβάλλουν διαφορετικά στερεοζεύγη στα διαδοχικά παράθυρα θέασης που δημιουργούνται εκατέρωθεν του κεντρικού, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Ως άμεσο επακόλουθο, τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν ένα μεγάλο πλήθος παρατηρητών οι οποίοι βλέπουν διαφορετική στερεοσκοπική άποψη ενός αντικειμένου που απεικονίζεται στην οθόνη προβολής, ανάλογα με τη θέση τους, ενώ κατά την αλλαγή παραθύρου ο παρατηρητής αποκτά την αίσθηση της παράλλαξης κίνησης. Παρόλα αυτά η μετάβαση μεταξύ παραθύρων συνοδεύεται από μία απότομη αλλαγή στην παράλλαξη η οποία είναι ανεπιθύμητη αφού μειώνει την αίσθηση της ομαλότητας της παρατήρησης. Αυτό συμβαίνει διότι κατά τη μετάβαση μεταξύ διαδοχικών παραθύρων οι οφθαλμοί λαμβάνουν εικόνες από αντίθετα προς αυτούς παράθυρα [41]. Στην περίπτωση αυτή ο παρατηρητής εκλαμβάνει ένα ψευδοσκοπικό είδωλο της αρχικής 3Δ σκηνής όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.1. Στην περίπτωση των στερεοσκοπικών συστημάτων στα οποία πολυπλέκονται περισσότερα από ένα στερεοζεύγη [42], οι εικόνες που αποτελούν τα στερεοζεύγη πολυπλέκονται στο επίπεδο της οθόνης προβολής ώστε να κατευθύνονται προς τα κατάλληλα παράθυρα παρατήρησης. Αν χρησιμοποιηθεί μία συστοιχία κυλινδρικών φακών όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4, τότε στην περίπτωση που απαιτείται η απεικόνιση πέντε διαφορετικών προοπτικών ενός 3Δ αντικειμένου, κάθε εικονοστοιχείο από κάθε ομάδα πέντε εικονοστοιχείων κατευθύνεται σε διαφορετικό παράθυρο. Η παραπάνω διαδικασία υποδεικνύει τον τρόπο πολυπλεξίας των εικόνων που αποτελούν τις διαφορετικές προοπτικές του 3Δ αντικειμένου. Ας ορίσουμε τα πέντε παράθυρα ως Π_i , $i=1,2,\dots,5$. Με κατάλληλο σχεδιασμό κάθε ζεύγος το οποίο απέχει μία εικόνα αποτελεί ένα στερεοζεύγος (π.χ. Π_1, Π_3). Με τον τρόπο αυτό, ο παρατηρητής μπορεί να έχει σωστή στερεοσκοπική απεικόνιση του 3Δ αντικειμένου. Κατά την κίνηση του δε στο ίδιο επίπεδο και μεταβαίνοντας στο παράθυρο όπου προβάλλονται οι εικόνες Π_2, Π_4 ο παρατηρητής ανακτά μία διαφορετική στερεοσκοπική προοπτική του 3Δ αντικειμένου. Κάνοντας χρήση των ίδιων γεωμετρικών κανόνων με την προηγούμενη περίπτωση του απλού στερεοζεύγους άμεσα προκύπτει ότι η Σχέση 3.3 μετασχηματίζεται στη μορφή

$$\frac{l}{h-f} = \frac{N \cdot p_0}{h} \quad (3.5)$$

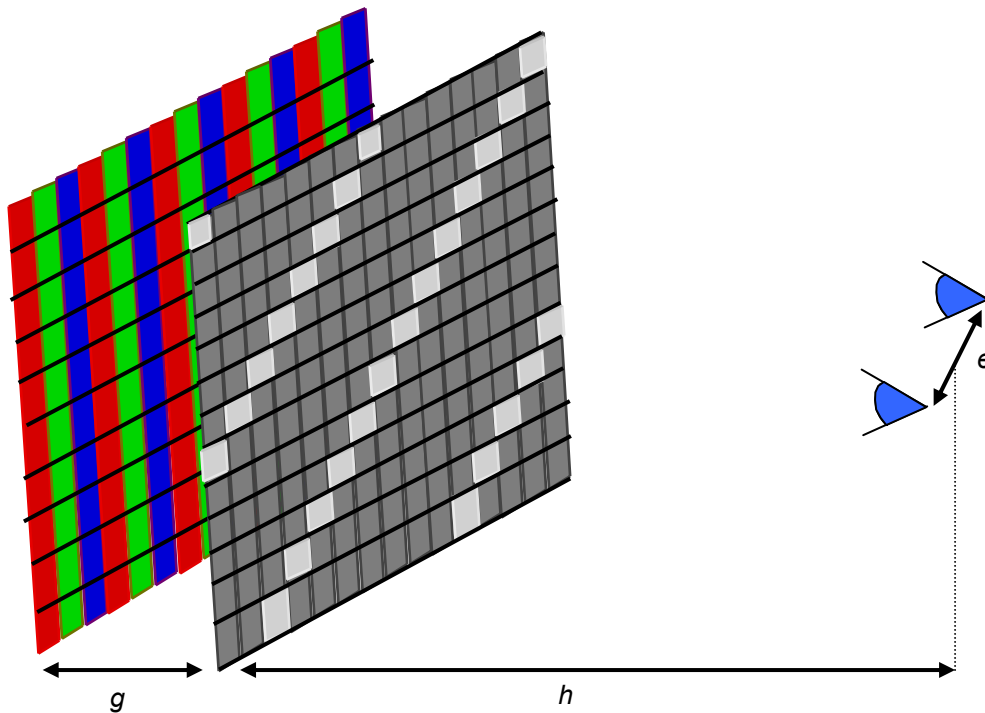
όπου N είναι το πλήθος των διαφορετικών παραθύρων που απαιτούνται από την εφαρμογή. Η χωρική πολυπλεξία των εικόνων που αποτελούν τα διαφορετικά στερεοζεύγη στο επίπεδο της μειώνει την ανάλυση της κάθε εικόνας, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει το πλήθος των παραθύρων. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη τεχνική έχει ιδιαίτερη χρησιμότητα σε πλήθος εφαρμογών, αφού υποστηρίζει ένα μεγάλο πλήθος παρατηρητών και επιτρέπει την ελευθερία κινήσεων, με αποτέλεσμα να αναπτυχθεί πλήθος μεθόδων για τη βελτίωση της ποιότητας απεικόνισης που παρέχεται [43,44,45].

Στην παραπάνω κατηγορία αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων, συγκαταλέγονται και τα συστήματα που χρησιμοποιούν συστοιχίες φίλτρων επιλογής μήκους κύματος (ΣΦΕΜΚ) [46] και οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούν ένα μεγάλο πλήθος από εικόνες. Η συστοιχία φίλτρων ΣΦΕΜΚ αποτελεί μια δισδιάστατη κατανομή διαφορετικών χρωματικών φίλτρων τα οποία αποτελούνται από κυψελίδες μεγέθους 3×3 στοιχείων. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται μια περιοχή της συστοιχίας που περιέχει μερικές βασικές χρωματικές κυψελίδες με σημειωμένη τη χρωματική συνιστώσα που αφήνει να περνά το κάθε χρωματικό φίλτρο.



Σχήμα 3.5: Συστοιχία βασικών χρωματικών κυψελίδων ΣΦΕΜΚ.

Όπως και στα προηγούμενα συστήματα στα οποία χρησιμοποιούνται φράγματα παράλληλης ή συστοιχίες κυλινδρικών φακών, έτσι και στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιείται ως οθόνη προβολής μία οθόνη LCD στην οποία τοποθετείται η ΣΦΕΜΚ. Θεωρώντας ότι τα εικονοστοιχεία της οθόνης προβολής ακολουθούν διάταξη RGB το τελικό σύστημα με την υπέρθεση της ΣΦΕΜΚ απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Σύστημα ΣΦΕΜΚ.

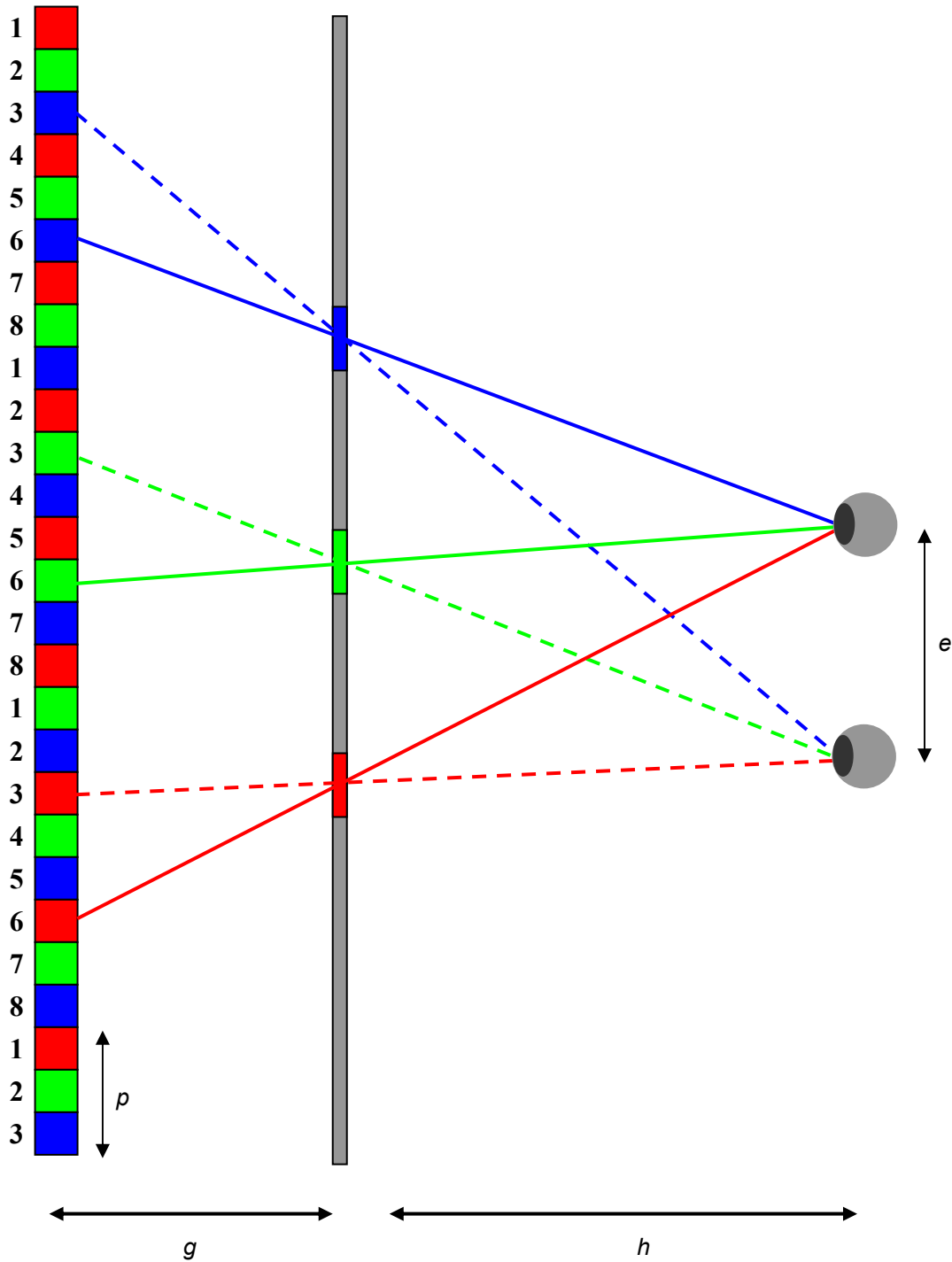
Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη μελέτη για τα βασικές παραμέτρους του συστήματος ορίζουμε τα αντίστοιχα μεγέθη για μια συστοιχία ΣΦΕΜΚ. Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν το σύστημα είναι η απόσταση της οθόνης προβολής από τη ΣΦΕΜΚ g , η απόσταση του παρατηρητή από το σύστημα h , και η απόσταση μεταξύ των οφθαλμών του παρατηρητή e .

Η παραπάνω τεχνική επιτρέπει την πολυπλεξία πολλών εικόνων για τη δημιουργία πολλαπλών στερεοζευγών αξιοποιώντας με τον τρόπο αυτό πλήρως το στερεοσκοπικό μηχανισμό της παράλλαξης. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται δυνατότητα περιήγησης μέσα σε μια τρισδιάστατη σκηνή. Η μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται αυτό βασίζεται στην πολυπλεξία οχτώ εικόνων ή τεσσάρων στερεοζευγών, ενώ το σύστημα μπορεί να απεικονίσει έως τριάντα δύο εικόνες, δηλαδή δεκαέξι στερεοζεύγη. Παρόλα αυτά στην παρακάτω μελέτη θα αναπτύξουμε την περίπτωση της πολυπλεξίας οχτώ εικόνων. Η κατανομή των οχτώ εικόνων σε ένα τμήμα της οθόνης προβολής απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7. Το γραμμοσκιασμένο τμήμα στο Σχήμα 3.7 αποδίδει την κωδικοποίηση των χρωματικών συνιστωσών σε μία κυψελίδα ΣΦΕΜΚ.

1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1
3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3
5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5
7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1
3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3
5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5
7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6
8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7

Σχήμα 3.7: Κατανομή των χρωματικών συνιστωσών οχτώ εικόνων στα εικονοστοιχεία της οθόνης προβολής.

Η υπέρθεση της ΣΦΕΜΚ εξασφαλίζει ότι οι κατάλληλες χρωματικές συνιστώσες θα κατευθυνθούν στις κατάλληλες διευθύνσεις για να σχηματίσουν τα στερεοζεύγη που πρέπει να δημιουργηθούν στο κατάλληλο παράθυρο παρατήρησης. Η παραπάνω διάταξη των χρωματικών συνιστωσών των οχτώ εικόνων σε συνδυασμό με τη ΣΦΕΜΚ δημιουργεί υπέρθεση των τριών χρωματικών συνιστωσών ενός εικονοστοιχείου της αρχικής εικόνας σε συγκεκριμένη διεύθυνση στο χώρο με βάση την αρχή που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Σημειώνεται ότι το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου συμβολίζεται με p . Στο σχήμα αυτό απεικονίζονται οι ακτίνες που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός σημείου της εικόνας, ώστε να δημιουργηθεί ένα στερεοζεύγος. Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3.8 οι εικόνες με αριθμούς τρία και έξι αποτελούν ένα στερεοζεύγος με αποτέλεσμα να έχουν κωδικοποιηθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι ακτίνες από τις χρωματικές συνιστώσες των εικόνων αυτών να κατευθύνονται στο κατάλληλο παράθυρο παρατήρησης του κάθε οφθαλμού.



Σχήμα 3.8: Κωδικοποίηση και διεύθυνση χρωματικών συνιστωσών ΣΦΕΜΚ.

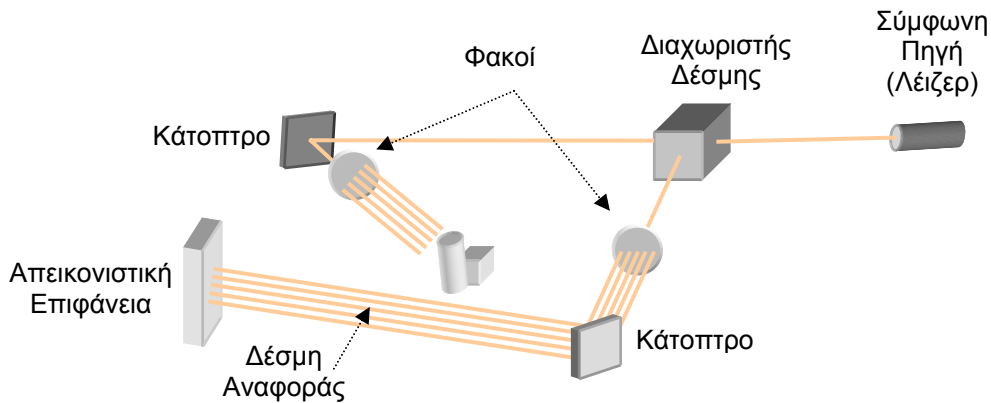
Με τη χρήση και των υπολοίπων κατάλληλα διατεταγμένων συνιστωσών του στερεοζεύγους δημιουργείται ένα οπτικό παράθυρο παρατήρησης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω σύστημα πολυπλέκει τις χρωματικές συνιστώσες του κάθε εικονοστοιχείου του ζεύγους εικόνων με μια πιο πολύπλοκη διαδικασία σε σχέση με αυτή των προηγούμενων συστημάτων. Ομοίως με τα προηγούμενα συστήματα, ο παρατηρητής μπορεί να μετακινείται μέσα στο οπτικό παράθυρο και παρατηρώντας

διαφορετικά στερεοζεύγη να έχει το αίσθημα της παράλλαξης της σκηνής όπως θα ανέμενε και στην πραγματικότητα. Παρόλα αυτά και εδώ παρατηρείται το φαινόμενο της ψευδοσκοπίας κατά την αλλαγή παραθύρου. Όμως, η συγκεκριμένη μετάβαση είναι πιο ομαλή σε σχέση με τα κλασσικά συστήματα φράγματος παράλλαξης και συστοιχιών κυλινδρικών φακών λόγω του γεγονότος ότι τα φίλτρα δεν σχηματίζουν οριζόντιες και κατακόρυφες στήλες αλλά βρίσκονται σε διαγώνια διάταξη. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί και στη βελτίωση των προηγούμενων τεχνικών όπου τα φράγματα παράλλαξης ή οι κυλινδρικοί φακοί τοποθετούνται με τον κύριο άξονα τους σε κλίση σε σχέση με το ορθογώνιο πλέγμα των εικονοστοιχείων της οθόνης προβολής [43]. Η αναλυτική μελέτη του συστήματος για τον προσδιορισμό των διαστάσεων του στερεοσκοπικού παραθύρου περιλαμβάνονται στο Παράτημα Α.2.

Η τελευταία τεχνική στην κατηγορία όπου πολυπλέκεται ένα πλήθος από διακριτές λήψεις είναι το αυτοστερεόγραμμα. Η συγκεκριμένη τεχνική βασίζεται στις ίδιες αρχές με τα κλασσικά στερεογράμματα με τη διαφορά ότι κωδικοποιείται η ανομοιότητα (Disparity) του στερεοζεύγους και μία νέα εικόνα κατασκευάζεται η οποία αποτελεί ένα χάρτη ανομοιότητας (Disparity Map). Ένα προεπιλεγμένο μοτίβο χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί μία νέα εικόνα, σε κάθε εικονοστοιχείο της οποίας το μοτίβο είναι ολισθημένο ανάλογα με την τιμή που έχει σε εκείνο το σημείο η ανομοιότητα η οποία προκύπτει από τον αντίστοιχο χάρτη ανομοιότητας. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει περιορισμένες εφαρμογές επειδή κατά την εφαρμογή της απαιτείται να καθοριστεί τεχνητά η εστίαση των οφθαλμών σε σημεία μπροστά ή πίσω από το αυτοστερεόγραμμα ώστε να καταστεί δυνατή η παρατήρηση του. Η συγκεκριμένη διαδικασία επιβάλλει σαφείς περιορισμούς στην εφαρμογή της τεχνικής για περιπτώσεις όπου απαιτείται 3D παρατήρηση χωρίς ειδική εκπαίδευση του παρατηρητή.

Ο πρώτος αντιπρόσωπος στην κατηγορία των αυτοστερεοσκοπικών τεχνικών όπου πραγματοποιείται πλήρης ανασύσταση του 3D αντικειμένου της αρχικής σκηνής είναι η ολογραφία. Η μέθοδος της ολογραφίας προτάθηκε αρχικά από τον Gabor το 1948, και επιτρέπει τη σύλληψη 3D αντικειμένων και την αναπαραγωγή τους με πλήρη (2D) παράλλαξη μέσα σε μια μεγάλη ζώνη θέασης. Αυτό επιτυγχάνεται με την καταγραφή τόσο της έντασης της ακτινοβολίας που προέρχεται από κάποιο σημείο του αντικειμένου όσο και της φάσης της. Δεδομένου ότι η τεχνική απαιτεί χωροχρονικά σύμφωνες πηγές ακτινοβολίας η πλήρης ανάπτυξη της ολογραφίας άρχισε μετά την εισαγωγή των πηγών λέιζερ. Η ολογραφική απεικονιστική επιφάνεια αποτυπώνει τη συμβολή των δύο παραπάνω πηγών λέιζερ. Πρακτικά οι δύο δέσμες προέρχονται από την ίδια πηγή αλλά

η μία εκ των δύο αποτελεί το μέτωπο κύματος που σκεδάζεται στο αντικείμενο, ενώ η άλλη προσπίπτει απευθείας στην απεικονιστική επιφάνεια και αποκαλείται δέσμη αναφοράς. Οι δύο δέσμες διαχωρίζονται με τη χρήση ενός διαχωριστή δέσμης, ενώ κατάλληλοι φακοί αποκλίνουν τις καλά εστιασμένες δέσμες για να καλύψουν μεγαλύτερη επιφάνεια. Η παραπάνω αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Αρχή ολογραφικού καταγραφικού συστήματος.

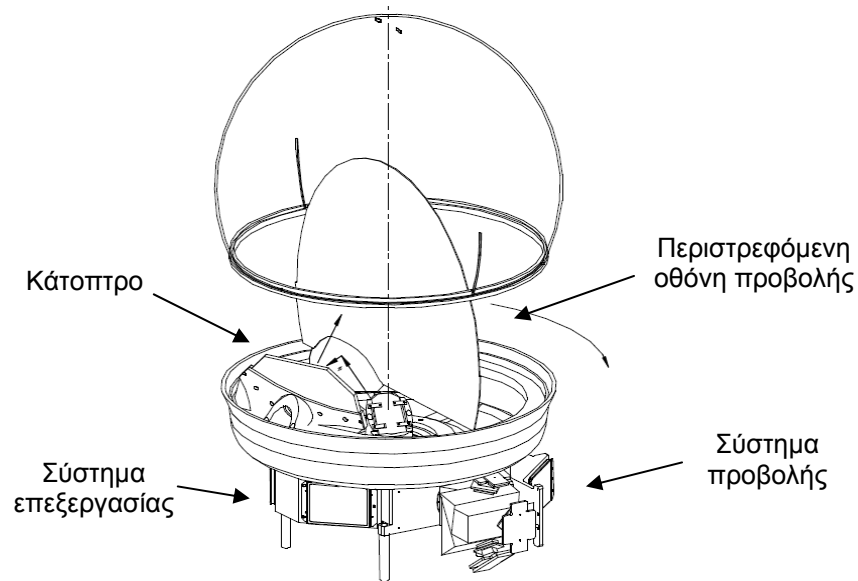
Η παραπάνω μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ολογραμμάτων τα οποία αποκαλούνται ολογράμματα εκπομπής (Transmission Holograms), για τα οποία υπάρχει η ειδική απαίτηση της ύπαρξης σύμφωνης ακτινοβολίας και κατά το στάδιο της αναπαραγωγής. Εξέλιξη της μεθόδου αποτελούν τα ολογράμματα ανάκλασης (Reflective Holograms) τα οποία βασίζονται σε παρόμοια με την προηγούμενη μέθοδο καταγραφής, αλλά δεν απαιτούν την ύπαρξη σύμφωνης ακτινοβολίας κατά την αναπαραγωγή. Η τεχνική της ολογραφίας εστιάζεται κυρίως στην παραγωγή ακίνητων 3D εικόνων με υψηλή ανάλυση και πολύ καλή ανάλυση βάθους. Η δημιουργία αντίστοιχων συσκευών για την αναπαράσταση δυναμικών κινούμενων εικόνων ενός 3D αντικειμένου ή σκηνής παρουσιάζει δυσεπίλυτα προβλήματα. Ορισμένα από αυτά αφορούν τον όγκο πληροφορίας που περιέχει το ολόγραμμα μιας στατικής σκηνής, όπως επίσης και τη δυνατότητα κατασκευής των ειδικών οθονών προβολής που απαιτούνται οι οποίες να παρέχουν τη δυνατότητα ανανέωσης ώστε να υποστηρίξουν εφαρμογές κινούμενης εικόνας [47]. Παρόλα αυτά η τεχνική της ολογραφίας αναπτύσσεται δυναμικά με τεχνικές που επιτρέπουν τη μείωση του όγκου της πληροφορίας που περιέχεται σε ένα ολόγραμμα [48] ώστε να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος. Τα συγκεκριμένα συστήματα παρουσιάζουν συνήθως αυξημένη πολυπλοκότητα, ενώ και η υψηλή επεξεργαστική ισχύς απαιτείται για την επίτευξη των

συνθηκών αναπαραγωγής κινούμενης εικόνας. Ένα επιπλέον θέμα αφορά τις μεθόδους καταγραφής, οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη σύμφωνης πηγής ακτινοβολίας για το φωτισμό των αντικειμένων, γεγονός το οποίο καθιστά απαγορευτική την εφαρμογή της τεχνικής σε πραγματικές συνθήκες. Για τους λόγους αυτούς οι ολογραφικές μέθοδοι περιορίζονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η ολοσκοπική μέθοδος η οποία πρακτικά αντιστοιχεί στη μέθοδο της ΟΦ μπορεί επίσης να ομαδοποιηθεί με την ολογραφία. Οι παράμετροι της μεθόδου θα μελετηθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Η συγκεκριμένη τεχνική χαρακτηρίζεται από την απλότητα των συσκευών καταγραφής και απεικόνισης, ενώ παράγει αποτελέσματα που προορίζονται για απεικονίσεις υψηλής ποιότητας. Στην ίδια κατηγορία με τις παραπάνω μεθόδους εντάσσονται και οι υβριδικές τεχνικές, οι οποίες συνδυάζουν την ολογραφία με την ολοσκοπία για την παραγωγή ολογραμμάτων τα οποία δεν εξαρτώνται από την ύπαρξη σύμφωνης πηγής φωτός.

Τη συγκεκριμένη ομάδα ολοκληρώνει μία τεχνική η οποία επιτυγχάνει την πλήρη (360°) ανασύσταση του όγκου των 3Δ αντικειμένων της αρχικής σκηνής και η οποία επιτρέπει την παρατήρηση του 3Δ ειδώλου από μεγάλο πλήθος παρατηρητών ταυτόχρονα. Η απεικονιστική διάταξη αποτελείται από μία ταχέως περιστρεφόμενη οθόνη προβολής, ένα περιστρεφόμενο κάτοπτρο το οποίο ανακλά τις 3Δ εικόνες που προβάλλει το σύστημα προβολής και ένα ισχυρό σύστημα επεξεργασίας το οποίο δημιουργεί την προβολή που πρόκειται να προβληθεί στην περιστρεφόμενη οθόνη, ανάλογα με τη θέση της. Η οθόνη προβάλλει περίπου διακόσιες εικόνες για κάθε πλήρη περιστροφή της, δηλαδή διακόσιες προβολές του 3Δ αντικειμένου. Η γρήγορη περιστροφή της οθόνης προβολής παράγει την κατάλληλη συμπαγή μορφή του ειδώλου στο θόλο της συσκευής απεικόνισης. Παρά την ικανότητα της τεχνικής να παρέχει πολύ σωστή απεικόνιση του 3Δ αντικειμένου, έχει περιορισμένη δυνατότητα αναπαραστάσης πραγματικών αντικειμένων, αφού βασίζεται σε υπολογιστικά κατασκευασμένα μοντέλα για την εξαγωγή των κατάλληλων όψεων που προβάλλονται στην περιστρεφόμενη οθόνη προβολής. Η αρχή λειτουργίας της συσκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.10.

Από τις παραπάνω τεχνικές ένα μεγάλο πλήθος μοιράζεται κοινά χαρακτηριστικά. Πολλά από αυτά τα συστήματα έχουν μελετηθεί διεξοδικά και αποτελεσματικοί αλγόριθμοι έχουν υλοποιηθεί για την ανάλυση, επεξεργασία και κωδικοποίηση των δεδομένων τους, όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει για τα συστήματα που χρησιμοποιούν κλασσικά στερεοζεύγη [49,50].



Σχήμα 3.10: Αρχή συστήματος ανασύστασης όγκου.

Παρόλα αυτά ένα μεγάλο πλήθος από ανοιχτά προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν για τις περιπτώσεις των αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων. Η κατηγοριοποίηση των στερεοσκοπικών και αυτοστερεοσκοπικών τεχνικών που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.11 και μία σύνοψη των χαρακτηριστικών των παραπάνω συστημάτων σε σχέση με τα χαρακτηριστικά της φυσικής όρασης παρουσιάζεται στους Πίνακες 3.1-3.6. Με βάση την παραπάνω ομαδοποίηση κατηγοριοποιούνται και τα αντίστοιχα προβλήματα που παρουσιάζονται.



Σχήμα 3.11: Κατηγοριοποίηση στερεοσκοπικών και αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά Φυσιολογικής Όρασης

Πλήθος επιπέδων βάθους	Πολύ υψηλό
Απόσταση αντικειμένων	Από 15 cm έως το άπειρο
Χρωματικό Φάσμα	Ορατά μήκη κύματος
Μέγεθος αντικειμένου	Χωρίς περιορισμούς
Ελευθερία κίνησης	Απεριόριστη
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Περιορισμοί από τη θέση των παρατηρητών
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Παράλλαξη κίνησης	Πάντα

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά μεθόδων με χρήση πολλαπλών Στερεοζευγών

Πλήθος επιπέδων βάθους	Θεωρητικά απεριόριστο
Απόσταση αντικειμένων	έως το άπειρο
Χρωματικό Φάσμα	Περιορισμένο από το βάθος χρώματος της συσκευής
Μέγεθος αντικειμένου	Περιορισμένο από το μέγεθος της συσκευής
Ελευθερία κίνησης	Εξαρτάται από τον αριθμό των πολυπλεγμένων στερεοζευγών
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Πολλοί, με θέσεις που εξαρτώνται από τον αριθμό των στερεοζευγών
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στην επιφάνεια της οθόνης
Παράλλαξη κίνησης	Πάντα, εξαρτώμενη από τον αριθμό των στερεοζευγών.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά Ολογραφικών Μεθόδων

Πλήθος επιπέδων βάθους	Περιορισμοί από τη χωρική ανάλυση του συστήματος προβολής
Απόσταση αντικειμένων	Μέσα στο χώρο προβολής
Χρωματικό Φάσμα	Υψηλή χρωματική ανάλυση
Μέγεθος αντικειμένου	Περιορισμένο από το μέγεθος του χώρου προβολής
Ελευθερία κίνησης	Απεριόριστη
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Περιορισμοί από τη θέση του κάθε παρατηρητή
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Παράλλαξη κίνησης	Πάντα

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά Ολοσκοπικών Μεθόδων

Πλήθος επιπέδων βάθους	Περιορισμοί από τη χωρική ανάλυση του συστήματος προβολής
Απόσταση αντικειμένων	Μέσα στο χώρο προβολής
Χρωματικό Φάσμα	Χαμηλή χρωματική ανάλυση
Μέγεθος αντικειμένου	Περιορισμένο από το μέγεθος του χώρου προβολής
Ελευθερία κίνησης	Απεριόριστη εντός του Οπτικού Παραθύρου
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Περιορισμοί από τη θέση του κάθε παρατηρητή
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Παράλλαξη κίνησης	Πάντα

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικά Μεθόδων Ανασύστασης Όγκου

Πλήθος επιπέδων βάθους	Περιορισμένο από τις ταχύτητες προβολής και περιστροφής
Απόσταση αντικειμένων	Μέσα στο χώρο προβολής
Χρωματικό Φάσμα	Περιορισμένο από το βάθος χρώματος της συσκευής
Μέγεθος αντικειμένου	Περιορισμένο από το μέγεθος του χώρου προβολής
Ελευθερία κίνησης	Απεριόριστη
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Απεριόριστος
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Παράλλαξη κίνησης	Πάντα

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικά Μεθόδων με χρήση ενός Στερεοζεύγους

Πλήθος επιπέδων βάθους	Θεωρητικά απεριόριστο
Απόσταση αντικειμένων	έως το άπειρο
Χρωματικό Φάσμα	Περιορισμένο από το βάθος χρώματος της συσκευής
Μέγεθος αντικειμένου	Περιορισμένο από το μέγεθος της συσκευής
Ελευθερία κίνησης	Μέγεθος παραθύρου ίσο με την διοφθαλμική απόσταση
Αριθμός πιθανών παρατηρητών	Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συσκευής
Ανομοιότητα ειδώλων αμφιβληστροειδούς	Πάντα
Σύγκλιση	Στο εστιασμένο αντικείμενο
Προσαρμογή	Στην επιφάνεια της οθόνης
Παράλλαξη κίνησης	Καμία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Ένας παρατηρητής αναμένει από ένα σύστημα παρατήρησης την απόδοση της σκηνής που παρατηρεί με τη μεγαλύτερη δυνατή φυσικότητα. Για το λόγο αυτό ένας παρατηρητής προτιμά ένα σύστημα 3D παρατήρησης, το οποίο παρέχει μία φυσική αναπαράσταση του βάθους των αντικειμένων μιας σκηνής, σε σχέση με τα κλασικά συστήματα δισδιάστατης παρατήρησης. Για το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες κλάσεις συστημάτων τρισδιάστατης παρατήρησης, από διάφορα ερευνητικά εργαστήρια και μεγάλες εταιρίες, που αφορούν εξειδικευμένες εφαρμογές ή γενικευμένα συστήματα τρισδιάστατης παρατήρησης. Πολλά από τα συστήματα αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί μία σύνοψη της αρχής λειτουργίας της καταγραφικής και απεικονιστικής διάταξης ενός συστήματος ΟΦ. Η ΟΦ αποτελεί μία από τις αυτοστερεοσκοπικές μεθόδους που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ η απλότητα των συσκευών λήψης και αναπαραγωγής εικόνων την καθιστούν μία από τις πιο σημαντικές επερχόμενες μεθόδους στο χώρο της 3D απεικόνισης [51]. Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια για τα αναλογικά, ψηφιακά και υβριδικά συστήματα ΟΦ. Ωστόσο η διείσδυση των ψηφιακών τεχνικών στο χώρο της ΟΦ και η άμεση λήψη ψηφιακών εικόνων ΟΦ διευκολύνει την έρευνα στους τομείς της ανάλυσης, επεξεργασίας και κωδικοποίησης εικόνων ΟΦ και ως εκ τούτου θα αποτελέσουν το κύριο αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

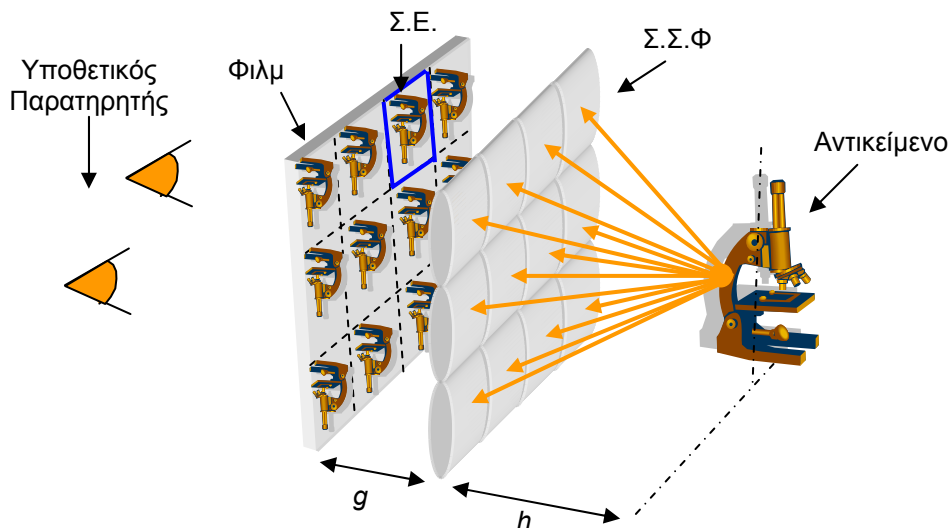
4.2 Αναλογική Ολοκληρωτική Φωτογράφιση

Η καταγραφή και αναπαράσταση πραγματικών 3D σκηνών με τη χρήση της τεχνικής της ΟΦ αναπτύχθηκε αρχικά από το νομπελίστα G.Lippmann [7]. Η αναλογική τεχνική χρησιμοποιεί μια 2D ΣΣΦ καταγράφοντας με τον τρόπο μια σειρά από ΣΕ που αντιστοιχούν σε τμήματα ενός τρισδιάστατου αντικειμένου σε ένα φιλμ, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1. Οι αποστάσεις που σημειώνονται στο σχήμα συνδέονται μεταξύ τους με την Εξίσωση 4.1

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{h} = \frac{1}{f} \quad (4.1)$$

όπου f η κοινή εστιακή απόσταση των φακών της ΣΣΦ.

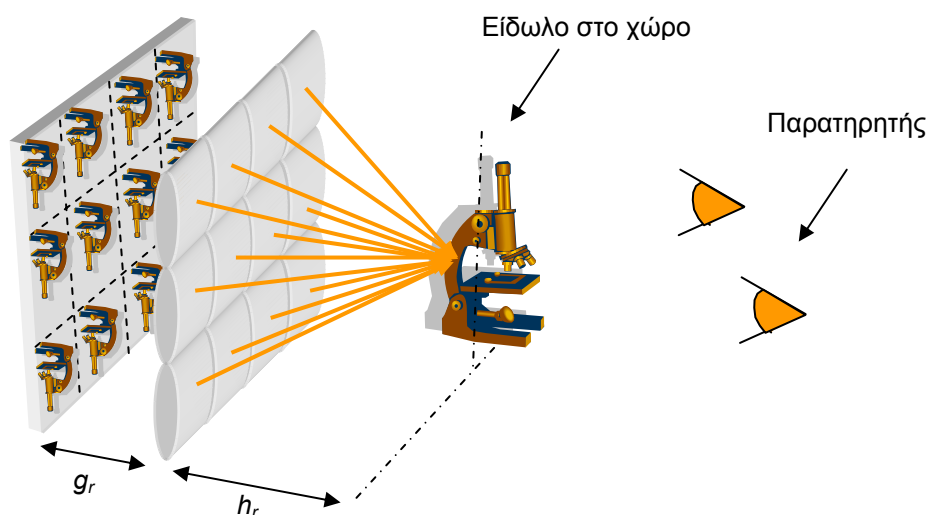
Για τη διαδικασία αναπαραγωγής μία αντίστοιχη ΣΣΦ τοποθετείται μπροστά από το επεξεργασμένο φιλμ το οποίο φωτίζεται κατάλληλα από διάχυτο φωτισμό, αναπαράγοντας το αρχικό αντικείμενο στο χώρο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Αν χρησιμοποιηθεί η ίδια ΣΣΦ για την αναπαραγωγή και τοποθετηθεί σε απόσταση $g=g$ από την επιφάνεια του φιλμ τότε σχηματίζεται ένα ψευδοσκοπικό είδωλο στο χώρο μεταξύ του παρατηρητή και της οθόνης προβολής σε απόσταση $h=h$ όπως προκύπτει από την Εξίσωση 4.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι το παραγόμενο είδωλο χαρακτηρίζεται πραγματικό όταν σχηματίζεται στο χώρο μεταξύ της οθόνης προβολής, ενώ χαρακτηρίζεται φανταστικό στην περίπτωση που σχηματίζεται πίσω από την οθόνη προβολής [52].



Σχήμα 4.1: Αρχή λειτουργίας καταγραφικού συστήματος ΟΦ.

Με τον τρόπο αυτό ο θεατής αντιλαμβάνεται τελικά μία κατοπτρική εικόνα του αρχικού αντικειμένου με ανεστραμμένο το βάθος. Η συγκεκριμένη μορφή απεικόνισης αποκαλείται ψευδοσκοπική ΟΦ. Αυτό είναι αποτέλεσμα της πορείας των φωτεινών ακτίνων κατά τις διαδικασίες της καταγραφής και της απεικόνισης. Αναλυτικά, κατά τη διαδικασία της καταγραφής ένα πραγματικό και ανεστραμμένο είδωλο του αρχικού αντικειμένου έχει αποτυπωθεί στην επιφάνεια του φιλμ. Κατά τη διαδικασία της απεικόνισης ένα πραγματικό είδωλο δημιουργείται στο χώρο μεταξύ του συστήματος προβολής και του παρατηρητή, με τη διαφορά ότι το αντικείμενο έχει ανεστραμμένο

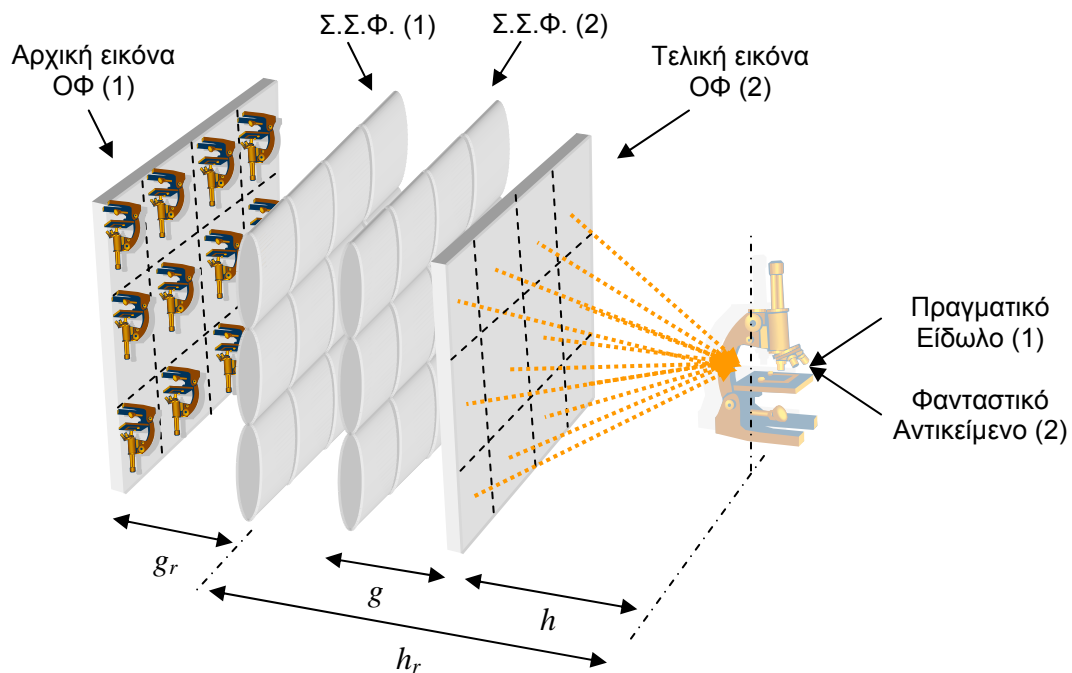
βάθος δεδομένου ότι ο υποθετικός παρατηρητής κατά τη λήψη βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση από ότι στην αναπαραγωγή.



Σχήμα 4.2: Αρχή λειτουργίας απεικονιστικού συστήματος ΟΦ.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με ένα πλήθος τεχνικών. Μία από αυτές είναι η τεχνική της ΟΦ δύο σταδίων όπου η διαδικασία επαναλαμβάνεται μετά την πρώτη καταγραφή για την απεικόνιση που αποτυπώθηκε στο φιλμ. Η τεχνική αυτή προτάθηκε αρχικά από τον Ives [53]. Η αναπαραγωγή της απεικόνισης που προέρχεται από την διαδικασία δύο επιπέδων παράγει τελικά μία πραγματική ορθοσκοπική απεικόνιση της 3Δ του αρχικού αντικειμένου. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3. Ειδικότερα, η αρχική εικόνα ΟΦ (1) που έχει ληφθεί με την τεχνική που υποδεικνύεται στο Σχήμα 4.1 προβάλλεται μέσω του ΣΣΦ (1) και δημιουργεί ένα πραγματικό είδωλο σε απόσταση h_r από τη ΣΣΦ (1). Το πραγματικό είδωλο (1) λειτουργεί ως φανταστικό αντικείμενο (2) για τη ΣΣΦ (2) και δημιουργεί στην επιφάνεια του φιλμ την τελική εικόνα ΟΦ (2) στην οποία έχει διορθωθεί η ψευδοσκοπία. Η παραπάνω τεχνική παρουσιάζει επιπλέον το πλεονέκτημα ότι η τελική εικόνα ΟΦ κατά την προβολή της μέσα από ένα αντίστοιχο σύστημα με αυτό που απεικονίζει το Σχήμα 4.2 παράγει ένα ορθοσκοπικό αλλά πραγματικό είδωλο, δηλαδή ο παρατηρητής έχει την αίσθηση ότι το απεικονιζόμενο αντικείμενο τοποθετείται χωρικά μπροστά από την επιφάνεια της οθόνης προβολής και σε απόσταση h_r από αυτή. Ωστόσο η συγκεκριμένη τεχνική οδηγεί σε υποβάθμιση της ποιότητας του τελικού ειδώλου λόγω προβλημάτων ευθυγράμμισης των ΣΣΦ (1) και ΣΣΦ (2) όπως επίσης και λόγω των πολλαπλών διαθλάσεων στις επιφάνειες ΣΣΦ (1) και ΣΣΦ (2). Τέλος, η παραπάνω τεχνική

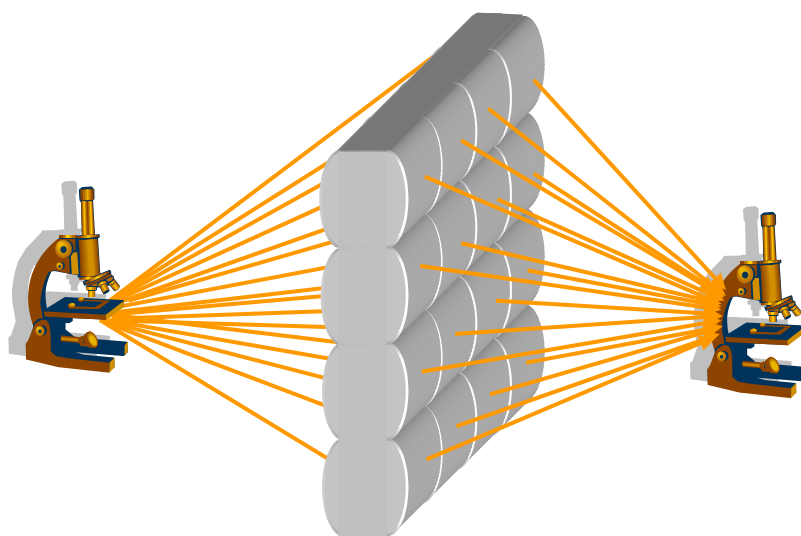
αντενδείκνυται για την παραγωγή εικόνων ΟΦ σε πραγματικό χρόνο, το οποίο ενδιαφέρει στην περίπτωση των ψηφιακών συστημάτων που θα αναλυθούν στη συνέχεια, αφού η διαδικασία των δύο σταδίων πρέπει να εκτελεστεί σειριακά μετά τη λήψη της αρχικής εικόνας ΟΦ (1).



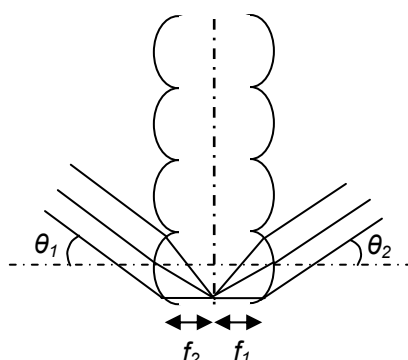
Σχήμα 4.3: ΟΦ δύο σταδίων για διόρθωση της ψευδοσκοπίας.

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων έχει προταθεί ένα πλήθος από τεχνικές ενός σταδίου οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για συστήματα ΟΦ που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο. Χαρακτηριστικά, η πρώτη από τις μεθόδους που έχει προταθεί [54] κάνει χρήση ενός διπλού συστήματος παράλληλων ΣΣΦ όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4. Το σύστημα των διπλών ΣΣΦ, των οποίων οι φακοί έχουν την ίδια εστιακή απόσταση, δηλαδή $f_1=f_2$, έχει την ιδιότητα να στρέφει τις προσπίπτουσες ακτίνες ώστε η διεύθυνση διάδοσης των εξερχόμενων ακτίνων να σχηματίζει με τον άξονα των φακών της ΣΣΦ την ίδια γωνία με την διεύθυνση διάδοσης των προσπίπτουσων ακτίνων, δηλαδή $\theta_1=\theta_2$. Το είδωλο που προκύπτει έχει ανεστραμμένο βάθος και όταν πραγματοποιηθεί σύλληψη με την τεχνική που απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1 κατά την αναπαραγωγή προκύπτουν ορθοσκοπικά είδωλα τα οποία είναι φανταστικά. Παρότι η μέθοδος δεν απαιτεί τη σειριακή διαδικασία των δύο βημάτων, αλλά μπορεί να

πραγματοποιηθεί σε ένα στάδιο, συνεχίζει να παρουσιάζει έντονα διαθλαστικά σφάλματα υποβαθμίζοντας την ποιότητα του τελικού ειδώλου.



(α)



(β)

Σχήμα 4.4: (α) ΟΦ ενός σταδίου για διόρθωση της ψευδοσκοπίας, (β) Η πορεία των ακτίνων μέσα από τη διπλή ΣΣΦ.

Άλλες μέθοδοι, που έχουν προταθεί για τη διόρθωση της ψευδοσκοπίας, περιλαμβάνουν τη χρήση ειδικών συστοιχιών στοιχειωδών κατόπτρων [55], ή άλλες σύνθετες οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις [56]. Επίσης, έχει προταθεί η χρήση ΣΣΦ οι οποίες αποτελούνται από φακούς με μεταβλητό δείκτη διάθλασης ανάλογης κατασκευής με τις πολυρυθμικές οπτικές ίνες [57]. Η τελευταία τεχνική επιτυγχάνει και την αποτελεσματική οπτική απομόνωση των γειτονικών φακών, δρώντας ως ένα οπτικό φράγμα και εμποδίζοντας τα φαινόμενα αλληλοεπικάλυψης των γειτονικών ΣΕ. Τέλος,

από τις καθαρά οπτικές λύσεις για τη διόρθωση της ψευδοσκοπίας πρέπει να αναφερθεί και μία τεχνική ανάλογη της διπλής ΣΣΦ όπου χρησιμοποιείται ένα μεγάλος συγκλίνων φακός αντί της διπλής ΣΣΦ [58]. Η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι παράγει πραγματικές ορθοσκοπικές εικόνες κατά την προβολή, αλλά εισάγει σημαντικές παραμορφώσεις λόγω της μεγέθυνσης που προκαλεί ο φακός.

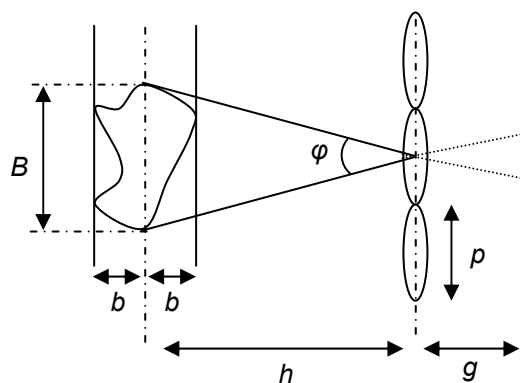
Θεωρώντας ότι χρησιμοποιείται αναλογικό φιλμ για την καταγραφή των ειδώλων που προκύπτουν είναι δυνατό να υπολογιστούν οι περιορισμοί που εισάγει η ΣΣΦ στην ανάλυση της τελικής απεικόνισης [59] όπως επίσης και οι ατέλειες στην κατασκευή μιας ΣΣΦ [60]. Για τον υπολογισμό των παραπάνω περιορισμών, θεωρείται μία ΣΣΦ η οποία αποτελείται από φακούς οι οποίοι παρουσιάζουν τετραγωνική γεωμετρία στη βάση τους. Θεωρούμε επίσης, ότι η απόσταση του αντικειμένου από τη ΣΣΦ είναι πολύ μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του αντικειμένου, και ότι κάθε φακός δρα ως μία τετράγωνη οπή η οποία λόγω περίθλασης παράγει ένα δευτερογενές μέτωπο κύματος. Το πλάτος της έντασης του μετώπου στο επίπεδο του φιλμ, το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στη ΣΣΦ, υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα Fresnel-Kirchhoff [61]. Με διαδοχικές προσεγγίσεις στον παραπάνω υπολογισμό τελικά προκύπτει ότι το βέλτιστο μέγεθος p_{opt} για τους φακούς της ΣΣΦ κατά τη λήψη δίνεται από την Εξίσωση 4.2.

$$p_{opt,\lambda} = 1.24 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{b}} \quad (4.2)$$

Στην παραπάνω σχέση η ποσότητα h συμβολίζει την απόσταση ενός επιπέδου παράλληλο στο επίπεδο της ΣΣΦ που διέρχεται από το κέντρο του αντικειμένου, από το επίπεδο της ΣΣΦ, το λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αντικείμενο ενώ η ποσότητα $d=2 \cdot b$ εκφράζει το συνολικό βάθος του αντικειμένου όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.5. Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς η τιμή για το βέλτιστο μέγεθος των φακών κυμαίνεται μεταξύ 1.75-2.32 mm για τα ορατά μήκη κύματος, όταν $h=0.5m$ και $b=0.05m$.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των μικρών γωνιών προκύπτει ότι η γωνία ϕ με την οποία βλέπει ένας φακός ένα αντικείμενο μεγέθους B όταν αυτό βρίσκεται σε απόσταση h δίνεται από την Εξίσωση 4.3.

$$\phi \approx \frac{B}{h} \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.5: Παράμετροι αναλογικού συστήματος καταγραφής ΟΦ.

Επεκτείνοντας τα αποτελέσματα για την μέγιστη ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί στην εικόνα που παράγει η παραπάνω διάταξη καταγραφής, προκύπτει ότι η ανάλυση αυτή μετρημένη σε ζεύγη γραμμών ανά χιλιοστόμετρο (line pairs/mm) θα δίνεται από την Εξίσωση 4.4.

$$R_{\lambda} = \frac{B}{3,18 \cdot p_{opt,\lambda} \cdot \sqrt{\lambda \cdot b}} \text{ (lp/mm)} \quad (4.4)$$

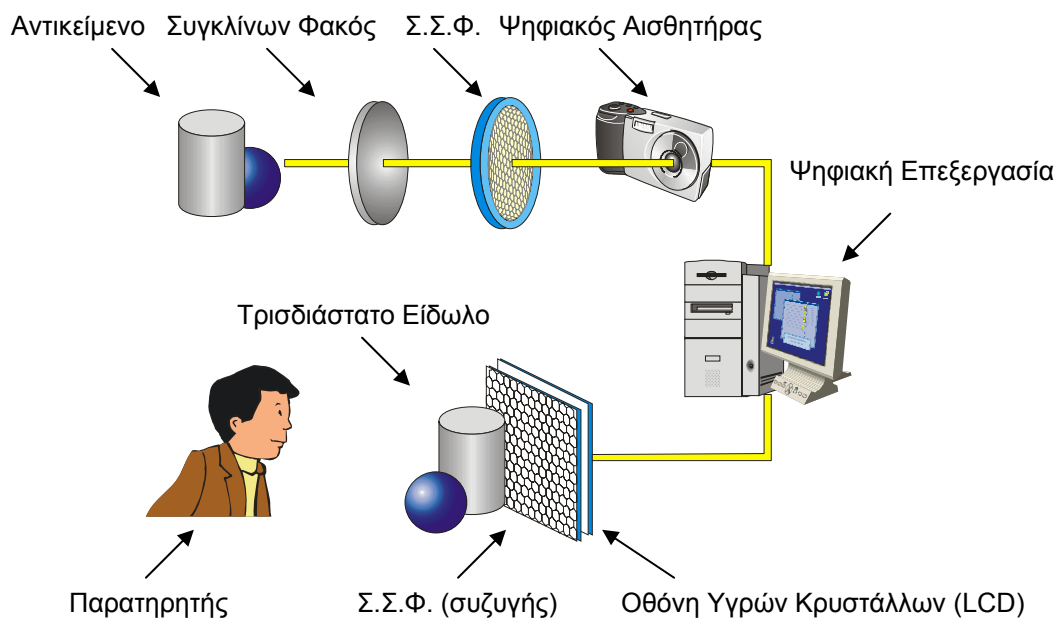
Άμεσα προκύπτει από την παραπάνω ότι το κάτω και το άνω όριο για την ανάλυση του συστήματος είναι 130 lp/mm και 228 lp/mm αντίστοιχα, με μέση τιμή 179 lp/mm. Με τον επιπρόσθετο προσδιορισμό ότι απαιτείται και ένα δεύτερο στάδιο για τη μετατροπή του ψευδοσκοπικού ειδώλου σε ορθοσκοπικό προκύπτει μία επιπλέον μείωση στις παραπάνω τιμές για την ανάλυση με ένα παράγοντα ίσο με $\sqrt{2}$. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές για την ανάλυση του ολοκληρωμένου συστήματος κυμαίνονται στο διάστημα από 92 lp/mm έως 160 lp/mm. Τέλος, εισάγεται περιορισμός στη διάσταση στην οποία εκτείνεται μία ΣΕ στο φιλμ, η οποία μπορεί να υπολογιστεί με την προσέγγιση των μικρών γωνιών με αναφορά στο Σχήμα 4.4 ως:

$$\phi_{max} \approx \frac{p_{opt}}{g} \quad (4.5)$$

Σημειώνεται ότι η γωνία φ_{max} μπορεί να παίρνει τιμές μεγαλύτερες από την υπολογισμένη με βάση την Εξίσωση 4.3 και έτσι με τον τρόπο να μειώνεται η απότομη μεταβολή όταν ο παρατηρητής κινείται μεταξύ διαδοχικών οπτικών παραθύρων.

4.3 Ψηφιακή Ολοκληρωτική Φωτογράφιση

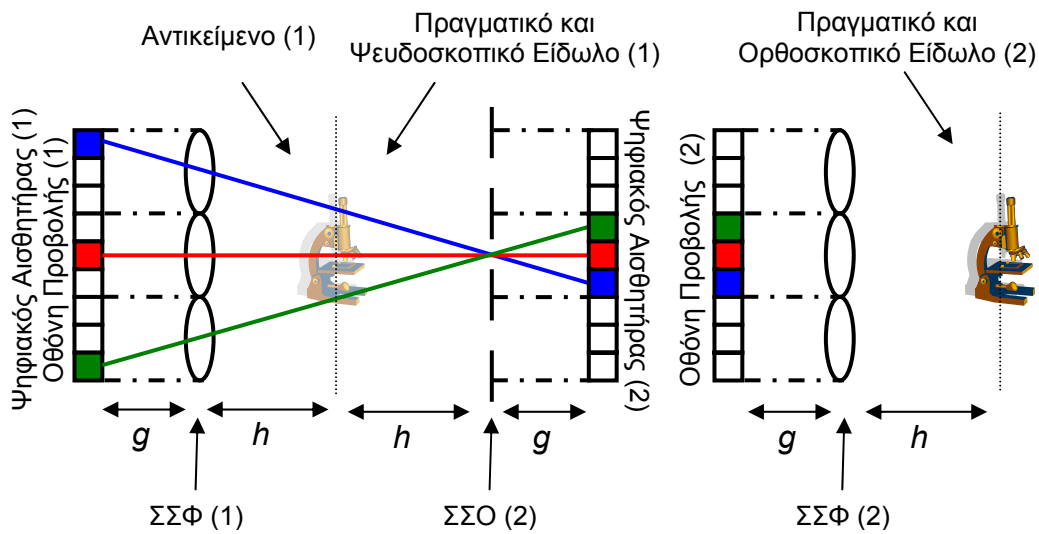
Η ψηφιακή ΟΦ μοιράζεται τις ίδιες αρχές με την αναλογική ΟΦ, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούνται ψηφιακοί αισθητήρες αντί για αναλογικό φιλμ. Η συνολική διαδικασία της ψηφιακής ΟΦ η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6, συνήθως περιλαμβάνει και ψηφιακές οθόνες προβολής, όπως οθόνες υγρών κρυστάλλων.



Σχήμα 4.6: Ψηφιακή διαδικασία καταγραφής-αναπαραγωγής ΟΦ.

Πρέπει να αναφερθεί επίσης ότι πολλές από τις οπτικές διαδικασίες, όπως η αναστροφή της ψευδοσκοπίας [10] ή η μετατροπή των φανταστικών σε πραγματικά είδωλα [62] μπορούν να υλοποιηθούν υπολογιστικά. Αναλυτικότερα, όπως περιγράφεται στο [10], είναι δυνατό να διορθωθεί η ψευδοσκοπία με περιστροφή της κάθε ΣΕ σε γωνία 180° γύρω από τον κεντρικό της άξονα. Γίνεται λοιπόν προφανές ότι η παραπάνω διαδικασία αποτελεί μία τοπική εναλλαγή μεταξύ των θέσεων των εικονοστοιχείων της κάθε ΣΕ. Οι εικόνες που προκύπτουν με την τεχνική αυτή είναι ορθοσκοπικές, πλην όμως παράγουν φανταστικά είδωλα, με δεδομένο ότι η αρχική εικόνα ΟΦ που καταγράφηκε ήταν μία

ψευδοσκοπική εικόνα ΟΦ που παρήγαγε πραγματικό είδωλο. Η διόρθωση του ειδώλου από φανταστικό σε πραγματικό μπορεί να συντελεστεί με βάση μία διαδικασία η οποία περιλαμβάνει επίσης μία εναλλαγή των θέσεων των εικονοστοιχείων, η οποία όμως πλέον επεκτείνεται και σε γειτονικές ΣΕ. Η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί ένα ελαφρώς τροποποιημένο υπολογιστικό ανάλογο της μεθόδου των δύο σταδίων η οποία προτάθηκε από τον Ives [53]. Το κύριο πλεονέκτημα της ψηφιακής μεθόδου είναι ότι δεν υποβαθμίζει την ποιότητα του τελικού ειδώλου αφού δεν μεσολαβούν τα οπτικά μέρη τα οποία ήταν η αιτία για την υποβάθμιση αυτή. Τα στάδια της διαδικασίας περιγράφονται στο Σχήμα 4.7.

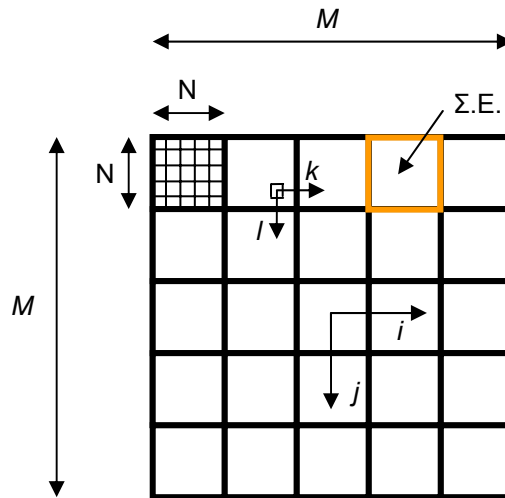


Σχήμα 4.7: Υπολογιστική διαδικασία δημιουργίας πραγματικών ορθοσκοπικών ειδώλων.

Κατά την παραπάνω διαδικασία ένα αντικείμενο (1) καταγράφεται σε ένα ψηφιακό αισθητήρα (1) μέσω της ΣΣΦ (1). Κατά την αναπαραγωγή του πρώτου σταδίου καταγραφής τα εικονοστοιχεία προβάλλονται μέσω της ΣΣΦ (1) και ανασυνθέτουν ένα πραγματικό ψευδοσκοπικό είδωλο (1). Μία συστοιχία από σημειακές οπές (ΣΣΟ) (Pinhole Array) (2) τοποθετημένη σε απόσταση $2 \cdot h$ από την ΣΣΦ (1) καταγράφει το πραγματικό είδωλο (1) σε ένα νέο ψηφιακό αισθητήρα (2) και οι ΣΕ που έχουν προκύψει προβάλλονται μέσω της ΣΣΦ (2), αναπαράγοντας ένα πραγματικό ορθοσκοπικό είδωλο (2) για τον παρατηρητή. Κάθε σημειακή οπή της συστοιχίας είναι ευθυγραμμισμένη με τον άξονα του κάθε φακού της ΣΣΦ (1). Οι κατευθύνσεις των

ακτίνων μέσα από τις ΣΣΦ και τη ΣΣΟ μπορούν υπολογιστικά να θεωρηθούν ως ανακατανομές των εικονοστοιχείων της κάθε ΣΕ σε μία καινούργια ομάδα από ΣΕ.

Στην παρούσα διατριβή, επεκτείνεται η παραπάνω μέθοδος για την περίπτωση μίας δισδιάστατης τετραγωνικής συστοιχίας ΣΕ που δημιουργείται από μία αντίστοιχη ΣΣΦ όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8. Στο σχήμα αυτό συμβολίζεται με M το πλήθος των εικόνων της συστοιχίας ΣΕ σε κάθε διάσταση και με N το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά ΣΕ.



Σχήμα 4.8: Συστοιχία ΣΕ.

Για την αποφυγή προβλημάτων λόγω μεγάλης επικάλυψης μεταξύ γειτονικών ΣΕ, δηλαδή περιορισμού της αλλοίωσης (aliasing), το πλήθος των φακών της ΣΣΦ επιλέγεται με βάση το λόγο των πλευρών των τριγώνων $AB\Gamma$ και $\Gamma\Delta E$ που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.7 και υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.6, ενώ το πλήθος των εικονοστοιχείων σε κάθε ΣΕ υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.7:

$$M = \left\lfloor \frac{2 \cdot h}{g} \right\rfloor \quad (4.6)$$

$$N = m \cdot M \quad (4.7)$$

όπου m ένας θετικός ακέραιος. Αν θεωρήσουμε ένα εικονοστοιχείο A της συστοιχίας ΣΕ (1) το οποίο ανήκει στη ΣΕ με δείκτες i, j και τη θέση του μέσα στη ΣΕ να δίνεται από

τους δείκτες k, l τότε το εικονοστοιχείο B που αντιστοιχεί στο A και βρίσκεται στο επίπεδο της συστοιχίας ΣΕ (2) θα ανήκει σε μία ΣΕ με δείκτες i', j' και σε θέση k', l' μέσα σε αυτή. Η αντιστοιχία των δύο εικονοστοιχείων θα δίνεται από την Εξίσωση 4.8

$${}^{i',j'}B_{k',l'} = {}^{i,j}A_{k,l} \quad (4.8)$$

Θεωρώντας τα δύο διανύσματα συντεταγμένων $\mathbf{u} = [i, j, k, l]^T$ και $\mathbf{u}' = [i', j', k', l']^T$ για τα δύο επίπεδα συστοιχιών ΣΕ στα οποία ανήκουν τα εικονοστοιχεία A και B αντίστοιχα τότε το διάνυσμα \mathbf{u}' μπορεί να υπολογιστεί μέσω του γραμμικού συστήματος εξισώσεων που περιγράφει η Εξίσωση 4.9.

$$\mathbf{u}' = \mathbf{H} \cdot \mathbf{u} + \mathbf{R}_{(M)} \quad (4.9)$$

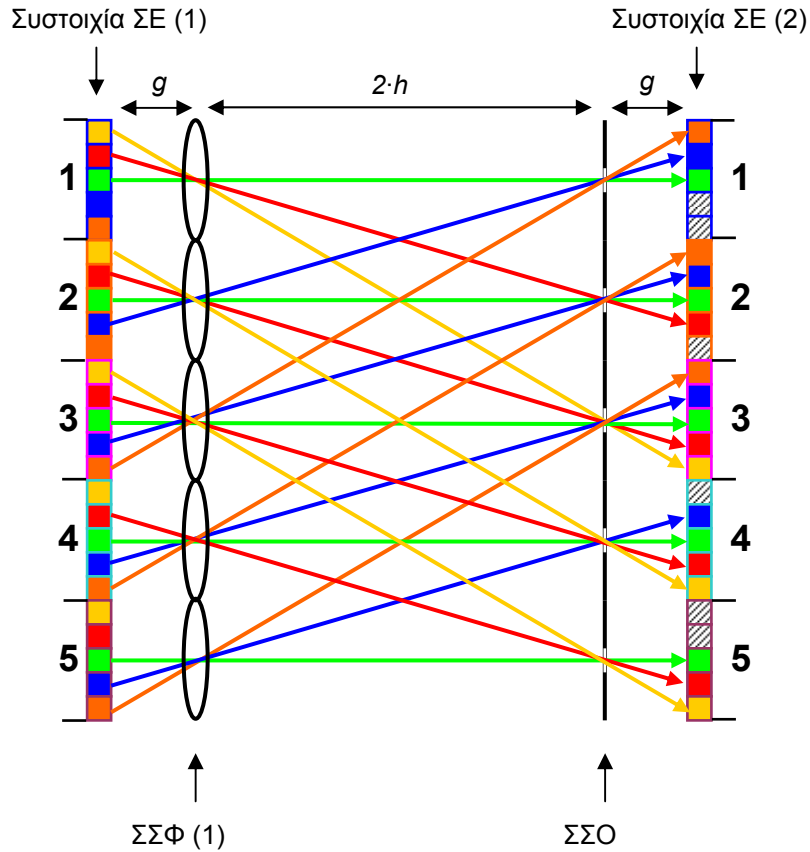
Στην παραπάνω εξίσωση όπου \mathbf{H} ο πίνακας μετασχηματισμού του συστήματος συντεταγμένων, ο οποίος έχει μορφή πίνακα Toeplitz.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Επίσης ο πίνακας $\mathbf{R}_{(M)}$, για M περιττό, δίνεται από την Εξίσωση 4.11.

$$\mathbf{R}_{(M)} = \frac{M+1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Η εφαρμογή του παραπάνω μετασχηματισμού σε μία εικόνα ΟΦ για τη μονοδιάστατη περίπτωση όπου $M=5$ και $m=1$ παράγει τις αντιστοιχίες που παρουσιάζονται με χρωματικό κώδικα στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Αντιστοιχία εικονοστοιχείων μεταξύ των συστοιχιών ΣΕ (1) και ΣΕ (2).

Είναι εύκολα αντιληπτό ότι δεν υπάρχει πλήρης αντιστοιχία των εικονοστοιχείων της συστοιχίας ΣΕ (1) και των εικονοστοιχείων της συστοιχίας ΣΕ (2). Αυτό συμβαίνει γιατί η διάδοση των ακτίνων μέσω της ΣΣΦ (1) από ορισμένα εικονοστοιχεία της συστοιχίας ΣΕ (1) πραγματοποιείται προς φακούς που βρίσκονται εκτός του παραθύρου των πέντε ΣΕ που θεωρήσαμε. Η συνθήκη αυτή ισχύει για όλα τα εικονοστοιχεία με συντεταγμένες k, l για τα οποία προκύπτει ότι τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία παίρνουν τιμές σε ΣΕ για τις οποίες ισχύει $i', j' > M$ ή $i', j' < 1$. Ο περιορισμός αυτός υποδηλώνει ότι με βάση την τεχνική αυτή θα προκύψουν κενές περιοχές στο επίπεδο της συστοιχίας ΣΕ (2) οι οποίες εμφανίζονται ως γραμμοσκιασμένες περιοχές στο Σχήμα 4.9. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να εξαλειφθεί αν ληφθούν περισσότερες ΣΕ από τη συστοιχία ΣΕ (2) για να καλυφθούν οι ακραίες περιοχές στη συστοιχία ΣΕ (2).

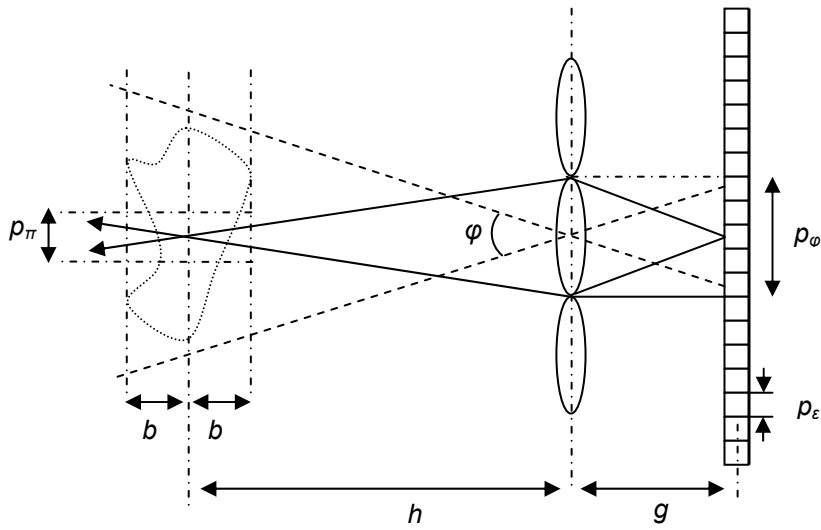
4.4 Ψηφιακά συστήματα καταγραφής και αναπαραγωγής εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Η ψηφιακή λήψη εικόνων ΟΦ μπορεί να πραγματοποιηθεί με συσκευές πολύ υψηλής ανάλυσης, όπως είναι οι κατάλληλα τροποποιημένες ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές λήψης στατικής και κινούμενης εικόνας με ιδιαίτερα μεγάλη πυκνότητα εικονοστοιχείων. Ένα πλήθος από διαφορετικές υλοποιήσεις οι οποίες βασίζονται σε υψηλής ανάλυσης ψηφιακούς αισθητήρες οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με κατάλληλες ΣΣΦ έχουν προταθεί [63-74], όπως επίσης και από ένα σύνολο τεχνικών παραγωγής υπολογιστικών εικόνων ΟΦ [75-80]. Επίσης είναι δυνατή η ψηφιοποίηση εικόνων αναλογικής ΟΦ με ειδικούς ψηφιακούς σαρωτές (Digital Scanners). Η πλήρης ανάλυση ενός ψηφιακού συστήματος καταγραφής πραγματοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής όπου αναπτύσσεται μία πρωτότυπη μέθοδος καταγραφής εικόνων ΟΦ πολύ υψηλής ανάλυσης πραγματικών αντικειμένων με χρήση ψηφιακού σαρωτή και ειδικές ΣΣΦ

Για την αναπαραγωγή των εικόνων ΟΦ μπορεί να χρησιμοποιηθεί το επεξεργασμένο, ή εκτυπωμένο φιλμ στην περίπτωση της αναλογικής φωτογραφίας, όπως επίσης οθόνες προβολής LCD ή εκτυπώσεις σε εκτυπωτές υψηλής ανάλυσης, για την περίπτωση της ψηφιακής ΟΦ. Δεδομένου ότι ελάχιστα αναλογικά συστήματα χρησιμοποιούνται πλέον, θα εστιαστούμε στις προδιαγραφές των ψηφιακών συστημάτων αναπαραγωγής ΟΦ. Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που χαρακτηρίζουν όλα τα αυτοστερεοσκοπικά συστήματα και δεν περιορίζονται μόνο στα συστήματα ΟΦ, είναι η μέγιστη γωνία παρατήρησης που επιτρέπει το σύστημα, η ανάλυση της εικόνας (2Δ) και το βάθος που μπορεί να απεικονίσει το σύστημα. Συγκεκριμένα θα προσδιορίσουμε τις ελάχιστες προδιαγραφές για τα τρία αυτά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούνται από τα ψηφιακά μέρη ενός συστήματος απεικόνισης ώστε αυτό να μπορέσει να αποδώσει τον όγκο πληροφορίας που εμπεριέχει μία εικόνα ΟΦ υψηλής ανάλυσης. Ένας προσεγγιστικός υπολογισμός των βασικών χαρακτηριστικών ενός συστήματος αναπαραγωγής εικόνων ΟΦ μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση απλούς κανόνες γεωμετρικής οπτικής [81]. Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι ενός τέτοιου συστήματος.

Στο συγκεκριμένο σχήμα με p_ϕ σημειώνεται το βήμα των φακών της ΣΣΦ που θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαραγωγή, με p_e το βήμα κουκκίδας (dot pitch), δηλαδή το μέγεθος κάθε εικονοστοιχείου, της οθόνης προβολής και p_π και το βήμα του κάθε εικονοστοιχείου στο χώρο παρατήρησης. Επίσης όπως ορίστηκε και στο Σχήμα 4.5 το μέγεθος $d=2\cdot b$ αποτελεί το συνολικό βάθος του αντικειμένου στο χώρο προβολής, ενώ g

είναι η απόσταση της ΣΣΦ από το επίπεδο των εικονοστοιχείων της οθόνης προβολής και h η απόσταση του κεντρικού επιπέδου του αντικειμένου από τη ΣΣΦ.



Σχήμα 4.10: Απεικονιστικό σύστημα ΟΦ.

Θεωρώντας ότι το κάθε εικονοστοιχείο της οθόνης προβολής με εγκάρσια διάσταση ρ_ε , δίνει ένα είδωλο στο χώρο παρατήρησης με εγκάρσια διάσταση ρ_π τότε είναι γνωστό [61] ότι για την εγκάρσια μεγέθυνση που προκαλεί ένας φακός ισχύει η Εξίσωση 4.12.

$$\frac{\rho_\pi}{\rho_\varepsilon} = \frac{h}{g} \quad (4.12)$$

Με βάση την παραπάνω μπορεί να υπολογιστεί το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου στο χώρο του ειδώλου αναδιατάσσοντας την Εξίσωση 4.12.

$$\rho_\pi = \frac{h \cdot \rho_\varepsilon}{g} \quad (4.13)$$

Επίσης, αν οριστεί η ανάλυση της οθόνης προβολής ως

$$R_\varepsilon = \frac{1}{\rho_\varepsilon} \quad (4.14)$$

όπως επίσης και η ανάλυση της απεικόνισης στο χώρο παρατήρησης του αντικειμένου ως

$$R_{\pi} = \frac{1}{\rho_{\pi}} \quad (4.15)$$

με στοιχειώδη επεξεργασία των Εξισώσεων 4.13-4.15 προκύπτει άμεσα η σχέση μεταξύ της ανάλυσης στο χώρο του ειδώλου σε σχέση με την οθόνη προβολής.

$$R_{\pi} = \frac{g}{h} \cdot R_{\varepsilon} \quad (4.16)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ανάλυση εξαρτάται άμεσα με την απόσταση της ΣΣΦ από το επίπεδο της οθόνης προβολής όπως επίσης και με την απόσταση στην οποία σχηματίζεται το είδωλο από αυτή. Επιπλέον η μέγιστη ανάλυση που μπορεί να επιτευχθεί περιορίζεται από το σχετικό μέγεθος των εικονοστοιχείων και του βήματος των φακών της ΣΣΦ όπως επίσης και από περιθλαστικά φαινόμενα. Στην περίπτωση που το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου της οθόνης προβολής είναι μεγαλύτερο από το μέγεθος του φακού της ΣΣΦ τότε η ανάλυση του ειδώλου θα δίνεται από τη εξίσωση 4.17

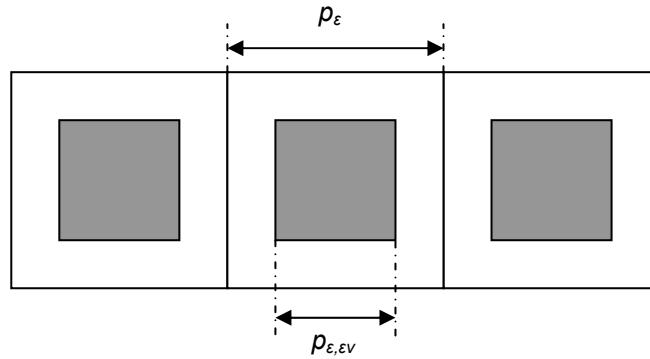
$$R_{\pi} = \frac{1}{\rho_{\phi}} \quad (4.17)$$

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε εικονοστοιχείο της οθόνης προβολής αποτελείται από μία ενεργή και μία παθητική περιοχή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11.

Θεωρώντας εικονοστοιχεία τετράγωνης γεωμετρίας για τα οποία η ενεργή περιοχή έχει εμβαδό $\rho_{\varepsilon, \varepsilon V}^2$ και η συνολική επιφάνεια του εικονοστοιχείου εμβαδό ρ_{ε}^2 ορίζεται ο συντελεστής κάλυψης (Fill Factor) του εικονοστοιχείου ως

$$s = \frac{\rho_{\varepsilon, \varepsilon V}^2}{\rho_{\varepsilon}^2} \quad (4.18)$$

Ο παραπάνω παράγοντας πρέπει να ληφθεί υπόψη σε έναν ακριβή υπολογισμό της ανάλυσης του συστήματος καθότι για μικρές τιμές του λόγου s περιορίζονται τα περιθλαστικά φαινόμενα που δημιουργούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης (Crosstalk) μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα εικονοστοιχείων οθόνης προβολής.

Η μέγιστη γωνία παρατήρησης ϕ όπως υπολογίζεται από τα όμοια τρίγωνα στο Σχήμα 4.9 δίνεται από την Εξίσωση 4.19.

$$\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{\rho_\phi}{2 \cdot g} \quad (4.19)$$

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των μικρών γωνιών η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στο ίδιο αποτέλεσμα με την Εξίσωση 4.5. Δεδομένου ότι η παραπάνω σχέση αφορά ένα ψηφιακό σύστημα αναπαραγωγής ΟΦ η παραπάνω εξίσωση μπορεί να επαναδιατυπωθεί εκφρασμένη με βάση το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά φακό της ΣΣΦ. Με βάση την τελευταία παρατήρηση η Εξίσωση 4.19 μπορεί να διατυπωθεί στη μορφή

$$\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = \frac{k \cdot \rho_\epsilon}{2 \cdot g} \quad (4.20)$$

όπου k είναι το πλήθος των εικονοστοιχείων που περιλαμβάνονται ανά διάσταση του φακού της ΣΣΦ. Το βασικό συμπέρασμα από την τελευταία σχέση είναι ότι η μέγιστη γωνία παρατήρησης είναι αντιστρόφως ανάλογη από την απόσταση της ΣΣΦ από την ψηφιακή οθόνη προβολής ενώ είναι ανάλογη του βήματος του φακού ή αντίστοιχα του

βήματος κουκκίδας, δηλαδή του μεγέθους των εικονοστοιχείων, της οθόνης προβολής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω εξίσωση προκύπτει υπό την απλή θεώρηση ότι η συνολική εικόνα ΟΦ αποτελείται από το είδωλο ενός σημείου ενός φακού και όχι από το σύνολο των φακών της ΣΣΦ. Στην πράξη η μέγιστη γωνία παρατήρησης εξαρτάται από ένα πλήθος παραγόντων οι οποίοι περιορίζουν τελικά την τιμή της περισσότερο από την τιμή που προσδιορίστηκε από την Εξίσωση 4.20. Παρόλα αυτά η παραπάνω εξίσωση αποδίδει σωστά την τάση μείωσης της γωνίας παρατήρησης και θέτει το ανώτατο όριο για την τιμή της.

Όπως αναφέρθηκε και στην μελέτη που προηγήθηκε για την αναλογική περίπτωση, η εγκάρσια ανάλυση του συστήματος εξαρτάται από την απόσταση που απέχει το επίπεδο ανασύστασης της εικόνας από τη ΣΣΦ και μειώνεται όσο η απόσταση αυτή μεγαλώνει. Δεδομένου δε ότι το είδωλο έχει ένα κεντρικό επίπεδο βέλτιστης εστίασης σε απόσταση h από το επίπεδο της ΣΣΦ η ανάλυση θα μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτό. Για το λόγο αυτό είναι σκόπιμο να υπολογιστεί το μέγιστο όριο για την απόσταση $d=2 \cdot b$ που μπορούν να απέχουν τα δύο ακραία επίπεδα ανασύστασης από το κεντρικό επίπεδο. Από τα όμοια τρίγωνα που σχηματίζονται στο Σχήμα 4.9 προκύπτει ότι:

$$\frac{b}{p_{\pi}} = \frac{h}{p_{\phi}} \quad (4.21)$$

Από την τελευταία προκύπτει ότι το βάθος της εικόνας του ειδώλου δίνεται τελικά από την Εξίσωση 4.22.

$$d = \frac{2 \cdot h \cdot p_{\pi}}{p_{\phi}} \quad (4.22)$$

Με βάση την τελευταία εξίσωση, το βάθος του ειδώλου είναι ανάλογο της απόστασης του κεντρικού επιπέδου του ειδώλου από τη ΣΣΦ όπως επίσης και του μεγέθους του εικονοστοιχείου στο επίπεδο ανασύστασης, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογο του μεγέθους των φακών της ΣΣΦ. Τέλος, συνδυάζοντας κατάλληλα τις Εξισώσεις 4.16, 4.20 και 4.22 προκύπτει η Εξίσωση 4.23 η οποία αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση του συστήματος.

$$R_{\pi}^2 \cdot d \cdot \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) = R_{\varepsilon} \quad (4.23)$$

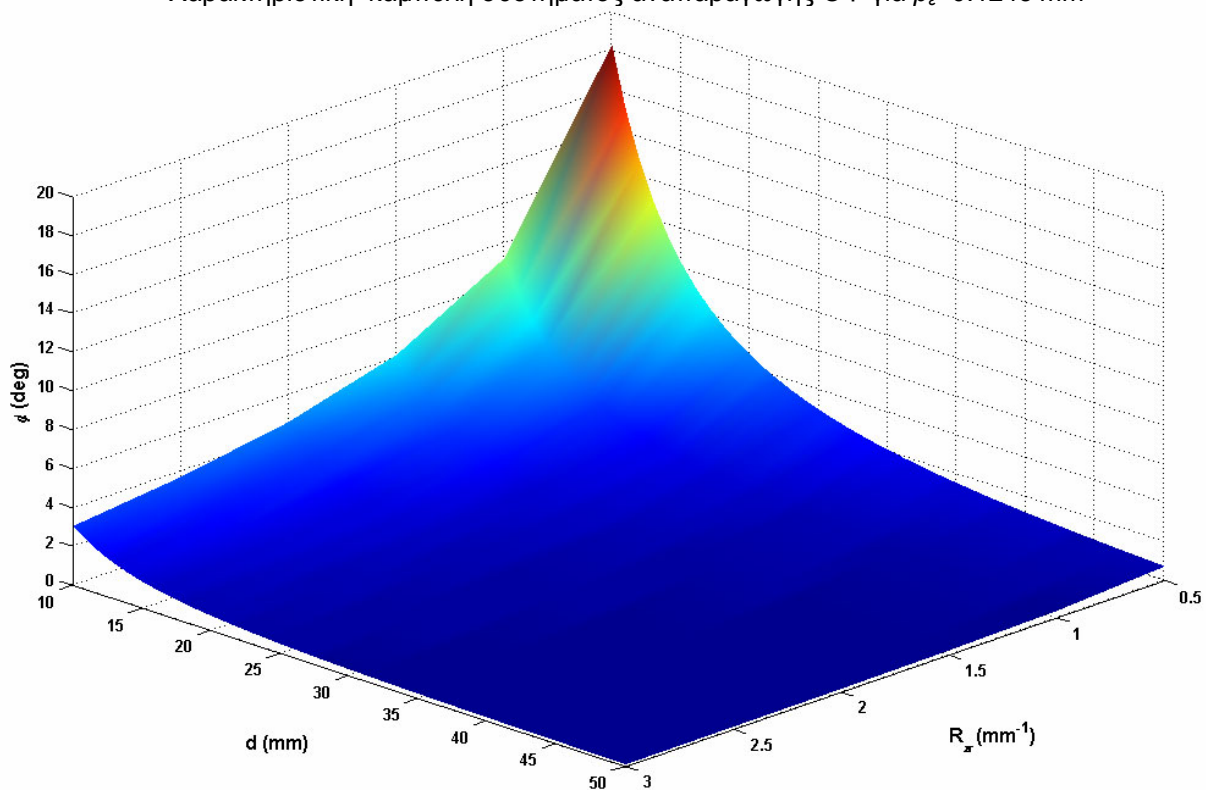
Η τελευταία εξίσωση έχει ιδιαίτερη αξία γιατί καταδεικνύει τους συμβιβασμούς μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων του συστήματος σημειώνοντας ότι είναι αδύνατο να επιτευχθεί αύξηση της ποιότητας απεικόνισης του συστήματος, δηλαδή των παραμέτρων R_{π} , d , ϕ , πέρα από ένα συγκεκριμένο όριο το οποίο θέτει η ανάλυση της οθόνης προβολής R_{ε} . Ακολουθώντας την ίδια πορεία και συμπεριλαμβάνοντας στην παραπάνω μελέτη και τους υπόλοιπους παράγοντες που συνεισφέρουν στον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών, μπορούν άμεσα να υπολογιστούν οι σχεδιαστικές παράμετροι για ένα ψηφιακό σύστημα αναπαραγωγής εικόνων ΟΦ.

Με βάση την Εξίσωση 4.23 είναι δυνατό να προσδιοριστούν τα σημεία λειτουργίας ενός ψηφιακού συστήματος αναπαραγωγής ΟΦ. Πράγματι, αν είναι γνωστό το μέγεθος του εικονοστοιχείου προβολής είναι δυνατό να δημιουργηθεί ένας χώρος των υπόλοιπων τριών παραμέτρων όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12, με βάση το οποίο μπορεί να επιλεγεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Στο Σχήμα 4.12 έχει τεθεί το μέγεθος ενός εικονοστοιχείου ίσο με $p_{\varepsilon}=0.1245\text{mm}$ και άρα, ανάλυση $R_{\varepsilon}=8.03$ εικονοστοιχεία/mm η οποία αντιστοιχεί σε μία οθόνη LCD υψηλής ανάλυσης κατάλληλης για χρήση σε συστήματα αναπαραγωγής που βασίζονται στην τεχνική της ΟΦ.

Ολοκληρώνοντας το παρόν κεφάλαιο, πρέπει να σημειωθεί ότι έχει υλοποιηθεί ένα πλήθος μελετών [82-87] που αφορά την καταγραφή και αναπαραγωγή κινούμενης 3D εικόνας με βάση την αρχή της ΟΦ. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται κατάλληλα τροποποιημένες μηχανές λήψης κινούμενης εικόνας υψηλής ανάλυσης, οι οποίες προορίζονται για τηλεοπτικές εφαρμογές υψηλής ευκρίνειας (High Definition TeleVision -HDTV) [57] και αντίστοιχες συσκευές αναπαραγωγής.

Χαρακτηριστική καμπύλη συστήματος αναπαραγωγής ΟΦ για $p_\varepsilon=0.1245 \text{ mm}$



Σχήμα 4.12: Χαρακτηριστική καμπύλη συστήματος ψηφιακής αναπαραγωγής ΟΦ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΨΗΦΙΑΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Οι διατάξεις καταγραφής 3Δ αντικειμένων που βασίζονται στην τεχνική της ΟΦ πλεονεκτούν έναντι των διατάξεων των υπολοίπων τεχνικών καταγραφής ως προς την απλότητα κατασκευής, δεδομένου ότι απαιτείται μόνο ένας φωτοευαίσθητος αισθητήρας, στον οποίο έχει υπερτεθεί μία ΣΣΦ και πολλές φορές ένας αντικειμενικός φακός για λόγους εστίασης. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιοριστούμε στη μελέτη συστημάτων ψηφιακής καταγραφής ΟΦ και ανάλυσης των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ποιότητα της απεικόνισης που αυτά προσφέρουν. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την υλοποίηση μιας διάταξης καταγραφής με βάση την τεχνική αυτή αποτελεί το περιορισμένο μέγεθος των αισθητήρων, το οποίο με τη σειρά του επιβάλλει αντίστοιχους περιορισμούς στο μέγεθος της ΣΣΦ που θα χρησιμοποιηθεί. Παράλληλα, παρουσιάζεται η υλοποίηση μιας πρωτότυπης διάταξης η οποία αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τους παραπάνω περιορισμούς παρέχοντας υψηλής ανάλυσης εικόνες ΟΦ με αυξημένο πλήθος στοιχειωδών φακών. Η έλλειψη διαθέσιμων εικόνων ΟΦ πραγματικών 3Δ αντικειμένων όπως και γενικότερα εικόνων ΟΦ από τα ερευνητικά εργαστήρια προς την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα, αποτέλεσε επιπλέον κίνητρο για την υλοποίηση της παραπάνω διάταξης ώστε να καταστεί δυνατή η μελέτη και επεξεργασία εικόνων που παράγονται από ένα σύστημα καταγραφής 3Δ αντικειμένων. Παρέχονται, επίσης, αποτελέσματα από την αξιολόγηση του αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε και περιγράφεται μία μέθοδος για τη μείωση του θορύβου που παρουσιάζεται λόγω των σημειακών ατελειών των φακών και βελτίωσης της ποιότητας της εικόνας. Το παρόν κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη συνοπτική παρουσίαση μίας μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία συστοιχιών εικόνων για την αξιολόγηση των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν για την περίπτωση της ΟΦ και σε άλλες οικογένειες αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων.

5.2 Γενικοί περιορισμοί διάταξης ψηφιακής καταγραφής εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Ο περιορισμός στο μέγεθος της ΣΣΦ, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, επιβάλλει με τη σειρά του τη μείωση του μεγέθους των στοιχειωδών φακών της συστοιχίας, το οποίο παρόλα αυτά δεν μπορεί να είναι αυθαίρετα μικρό αφού πρέπει κάθε φακός να δημιουργεί ΣΕ οι οποίες να περιέχουν ικανό αριθμό εικονοστοιχείων. Παράλληλα, η αυθαίρετη μείωση του μεγέθους των φακών μπορεί να δημιουργήσει έντονα περιθλαστικά φαινόμενα τα οποία υποβαθμίζουν αισθητά την ποιότητα του ειδώλου. Για τους παραπάνω λόγους πολλά από τα πρωτότυπα συστήματα καταγραφής ΟΦ χαρακτηρίζονται πολλές φορές από εξαιρετικά μικρό πλήθος υψηλής ανάλυσης ΣΕ ή από μεγάλο πλήθος ΣΕ χαμηλότερης ανάλυσης. Συγκεκριμένα, αν ένας φωτοευαίσθητος αισθητήρας διαθέτει συνολικά K^2 εικονοστοιχεία και η ΣΣΦ που χρησιμοποιείται περιέχει M^2 φακούς, με N^2 εικονοστοιχεία ανά φακό, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8, άμεσα προκύπτει ότι το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά στοιχειώδη φακό είναι αντιστρόφως ανάλογο με το πλήθος των φακών που θα χρησιμοποιηθεί, όπως υποδεικνύεται και από την Εξίσωση 5.1.

$$N^2 \cdot M^2 = K^2 \quad (5.1)$$

Με βάση τον παραπάνω περιορισμό, οι λύσεις που έχουν προταθεί περιορίζονται στη χρήση ψηφιακών αισθητήρων πολύ υψηλής ανάλυσης σε συνδυασμό με ΣΣΦ οι οποίες έχουν αντίστοιχο μέγεθος. Μια από τις ιδιαίτερα διαδεδομένες λύσεις [88] είναι η χρήση φωτοευαίσθητων αισθητήρων μεγάλης επιφάνειας η οποία μπορεί να περιορίσει αισθητά στο πρόβλημα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αισθητήρα με επιφάνεια (36.7mm x 36.7mm) και μέγεθος εικονοστοιχείου 9μm x 9μm, περιέχει 4080 x 4080 εικονοστοιχεία και προσφέρει με τον τρόπο αυτό ανάλυση 16 εκατομμυρίων εικονοστοιχείων. Θέτοντας ως ελάχιστη προδιαγραφή την ύπαρξη 10 x 10 εικονοστοιχείων ανά φακό της ΣΣΦ που θα χρησιμοποιηθεί, προκύπτει με χρήση της Εξίσωσης 5.1 ότι στην αντίστοιχη επιφάνεια (36.7mm x 36.7mm) αντιστοιχεί μία ΣΣΦ με 408 x 408 φακούς οι οποίοι έχουν βήμα φακού 90 μm. Με αύξηση του μεγέθους των φακών της ΣΣΦ περιορίζεται αντίστοιχα το πλήθος των φακών. Με τον τρόπο αυτό, για υψηλής ανάλυσης εικόνες ΟΦ όπου περιέχονται 50~100 εικονοστοιχεία ανά φακό το πλήθος των φακών περιορίζεται σε 80 ή 40 αντίστοιχα, ανά διάσταση της ΣΣΦ. Επιπλέον, επειδή οι ψηφιακές οθόνες προβολής ΟΦ όπως περιγράφηκαν στο

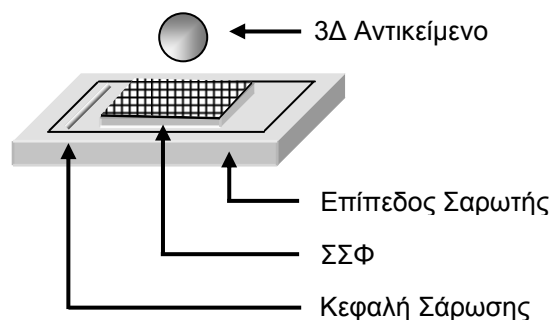
προηγούμενο κεφάλαιο διαθέτουν διαφορετικό μέγεθος εκονοστοιχείων από ότι οι ψηφιακές διατάξεις καταγραφής και χρησιμοποιούν αντίστοιχα ΣΣΦ με διαφορετικά χαρακτηριστικά, όσον αφορά το μέγεθος και την εστιακή απόσταση των φακών, απαιτείται η προσαρμογή των ληφθέντων εικόνων με κατάλληλους αλγόριθμους [89-91] ώστε να επιτευχθεί σωστή και με μικρές παραμορφώσεις απεικόνιση της 3Δ σκηνής.

5.3 Ψηφιακό Σύστημα Καταγραφής Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η περιορισμένη επιφάνεια των φωτοευαίσθητων αισθητήρων που διατίθενται περιορίζει αντίστοιχα την επιφάνεια των ΣΣΦ που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τους παραπάνω αισθητήρες και αυξάνει γεωμετρικά των κόστος κατασκευής ΣΣΦ με πολύ μικρές διαστάσεις φακών υψηλής ακρίβειας. Επιπρόσθετα, οι αλγόριθμοι μετατροπής μεταξύ των δύο διαφορετικών χαρακτηριστικών ΣΣΦ που χρησιμοποιούνται μειώνουν την ποιότητα της τελικής απεικόνισης και εισάγουν παραμορφώσεις.

Στην παρούσα διατριβή έγινε υλοποίηση ενός συστήματος που βασίζεται σε μία ΣΣΦ η οποία είναι ίδια με τις ΣΣΦ οι οποίες χρησιμοποιούνται στην αναπαραγωγή των ψηφιακών εικόνων ΟΦ. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι η απλοποίηση των διαδικασιών μετατροπής μεταξύ της ληφθείσας και αναπαραγόμενης εικόνας ΟΦ. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι το μέγεθος των δύο συστοιχιών είναι το ίδιο δεν απαιτούνται υπολογισμοί για την κατάλληλη αναδιανομή των εικονοστοιχείων μεταξύ των ΣΕ της οθόνης προβολής ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το πρόβλημα της αντιστοιχίας των εικονοστοιχείων μπορεί να λυθεί με δειγματοληψία της ληφθείσας εικόνα ΟΦ, ώστε να προσαρμοστούν κατάλληλα τα δεδομένα στο πλήθος των εικονοστοιχείων που διαθέτει ο δέκτης για μία εικόνα ΟΦ, ενώ μπορεί να επιλεγεί κατάλληλη οθόνη προβολής ή γενικότερα απεικονιστικό μέσο, το οποίο να διαθέτει ικανό αριθμό εικονοστοιχείων ώστε να υπάρχει ένα προς ένα αντιστοιχία με τα εικονοστοιχεία της διάταξης καταγραφής. Ο προβληματισμός σχετικά με τη μορφή ενός αισθητήρα μεγάλης επιφάνειας, ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ΣΣΦ με μεγάλο μέγεθος φακών και μεγάλη επιφάνεια, οδήγησε τελικά στη χρήση ενός επίπεδου σαρωτή, στον οποίο προσαρμόστηκε κατάλληλα η ΣΣΦ. Σημειώνεται ότι η χρήση ενός επίπεδου σαρωτή εισάγει γενικά ορισμένες γεωμετρικές παραμορφώσεις, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, όπως επίσης και ότι περιορίζει τη χρήση του συστήματος αποκλειστικά σε στατικά αντικείμενα. Συνακόλουθα, η μη χρήση εξωτερικών φακών περιορίζει την ικανότητα καταγραφής σε αντικείμενα που βρίσκονται

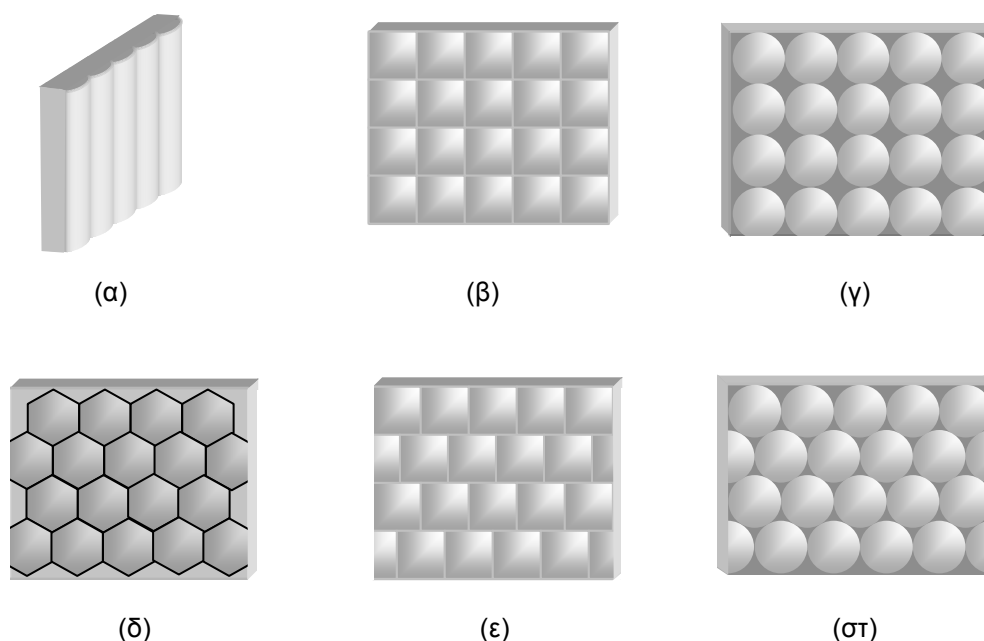
στο εγγύς πεδίο της διάταξης καταγραφής. Παρόλα αυτά, κρίθηκε ότι η συγκεκριμένη διάταξη, αποτελεί μία εξαιρετικά αξιόπιστη λύση για την παραγωγή ψηφιακών εικόνων ΟΦ πραγματικών 3D αντικειμένων οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή ανάλυση και μεγάλο χρωματικό βάθος. Τέλος, οι γεωμετρικές παραμορφώσεις που εισάγει ο αισθητήρας είναι εύκολο να υπολογιστούν και να διορθωθούν. Το τελικό σύστημα αποτελεί μία από τις απλούστερες υλοποιήσεις οι οποίες έχουν προταθεί για παραγωγή εικόνων με βάση την τεχνική της ΟΦ και επαρκεί για την μελέτη των προβλημάτων που υπεισέρχονται στις υπάρχουσες υλοποιήσεις διατάξεων καταγραφής ΟΦ, παρέχοντας παράλληλα τα δεδομένα που απαιτούνται για την εφαρμογή μίας σειράς αλγορίθμων που στοχεύουν στην ανάλυση, επεξεργασία και κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ. Μία σχηματική αναπαράσταση της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Ψηφιακή διάταξη καταγραφής ΟΦ βασισμένη σε επίπεδο σαρωτή.

5.4 Χαρακτηριστικά Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών

Για την λήψη και αναπαραγωγή μίας εικόνας ΟΦ χρησιμοποιούνται ΣΣΦ με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Υπάρχουν διάφοροι τύποι φακών που έχουν χρησιμοποιηθεί, από διάφορους ερευνητές, διατεταγμένοι σε ένα πλήθος από διαφορετικές γεωμετρίες τις οποίες θα ορίσουμε σαν γεωμετρίες πλέγματος. Οι πιο σημαντικές είναι οι συστοιχίες κυλινδρικών φακών και οι συστοιχίες σφαιρικών ή τετραγωνικών ή εξαγωνικών φακών, διατεταγμένων σε τετραγωνικές ή εξαγωνικές γεωμετρίες πλέγματος. Παραδείγματα των παραπάνω τοπολογιών απεικονίζονται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Τοπολογίες ΣΣΦ, (α) Συστοιχία κυλινδρικών φακών, (β) Συστοιχία τετραγωνικών φακών σε τετραγωνικό πλέγμα, (γ) Συστοιχία σφαιρικών φακών σε τετραγωνικό πλέγμα, (δ) Συστοιχία εξαγωνικών φακών, (ε) Συστοιχία τετραγωνικών φακών σε εξαγωνικό πλέγμα, (στ) Συστοιχία σφαιρικών φακών σε εξαγωνικό πλέγμα.

Η κατηγοριοποίηση των παραπάνω τοπολογιών ΣΣΦ πραγματοποιείται με βάση τη δυνατότητα να παρέχουν μονοδιάστατη (1Δ) ή 2Δ παράλλαξη και την πυκνότητα δομής που παρουσιάζουν, η οποία χαρακτηρίζεται πρακτικά από το συντελεστή κάλυψης της επιφάνειας μιας συστοιχίας με ενεργά στοιχεία φακών. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιηθούν σφαιρικοί φακοί είναι δυνατό να υπολογιστεί αναλυτικά η πυκνότητα της δομής [92], ενώ για τις υπόλοιπες περιπτώσεις η πυκνότητα προσεγγίζει τη μονάδα και επηρεάζεται από μικρές αποκλίσεις στην περιφέρεια των φακών. Μικρές αποκλίσεις από τις θεωρητικές τιμές για το συντελεστή κάλυψης που περιέχονται στον Πίνακα 5.1 μπορούν να οφείλονται σε κατασκευαστικές ανοχές, οι οποίες όμως είναι αμελητέες και δεν επηρεάζουν την ορθή λειτουργία της ΣΣΦ.

Η επιλογή της ΣΣΦ για τη χρήση σε μία διάταξη καταγραφής και απεικόνισης εικόνων ΟΦ μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τον παραπάνω πίνακα. Γίνεται άμεσα προφανές ότι οι ΣΣΦ που αποτελούνται από σφαιρικούς φακούς, παρουσιάζουν συντελεστές κάλυψης μικρότερους από τη μονάδα και δεν εκμεταλλεύονται όλη την επιφάνεια της ΣΣΦ. Από τις συστοιχίες που παρουσιάζουν συντελεστές κάλυψης κοντά στη μονάδα οι κυλινδρικοί φακοί προσφέρουν μονοδιάστατη παράλλαξη με αποτέλεσμα

οι καταλληλότερες ΣΣΦ να είναι αυτές που αποτελούνται από τετραγωνικούς ή εξαγωνικούς φακούς. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικοί φακοί σε τετράγωνο πλέγμα οι οποίοι παρέχουν εξαιρετική απλότητα στο χειρισμό των ΣΕ που δημιουργούν, οι οποίες είναι στοιχισμένες σε ένα αντίστοιχο τετράγωνο πλέγμα, οπότε μπορούν εύκολα να διαχωριστούν και να εφαρμοστούν αποτελεσματικά αλγόριθμοι επεξεργασίας της κάθε ΣΕ. Η ίδια προσέγγιση υιοθετείται πλέον και από όλους τους ερευνητές στο χώρο της ΟΦ.

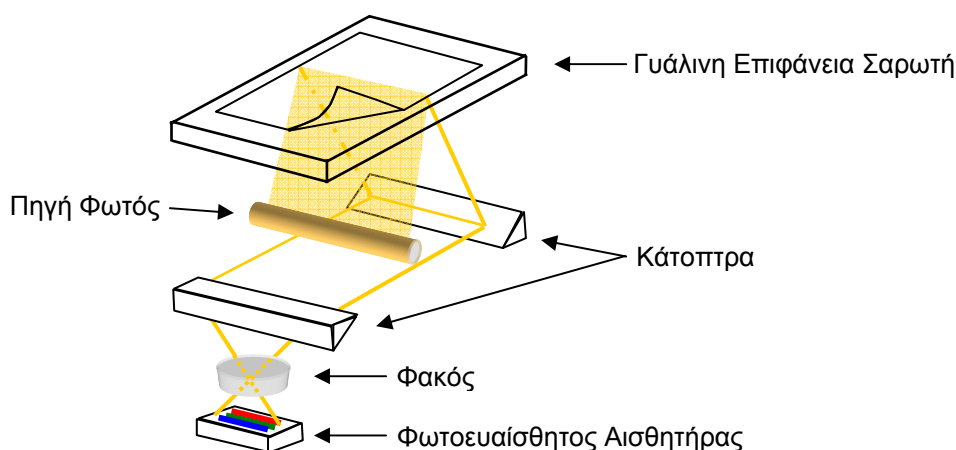
Πίνακας 5.1: Τοπολογίες Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών

Τοπολογία ΣΣΦ	Είδος Παράλλαξης	Συντελεστής Κάλυψης
Κυλινδρικοί φακοί	Οριζόντια ή κατακόρυφη	~ 1
Σφαιρικοί φακοί, τετραγωνικό πλέγμα	Οριζόντια και κατακόρυφη	$\frac{\pi}{4}$
Σφαιρικοί φακοί, εξαγωνικό πλέγμα	Οριζόντια και κατακόρυφη	$\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}}$
Τετραγωνικοί φακοί, τετραγωνικό πλέγμα	Οριζόντια και κατακόρυφη	~ 1
Τετραγωνικοί φακοί, εξαγωνικό πλέγμα	Οριζόντια και κατακόρυφη	~ 1
Εξαγωνικοί φακοί, εξαγωνικό πλέγμα	Οριζόντια και κατακόρυφη	~ 1

5.5 Χαρακτηριστικά Φωτοευαίσθητων Αισθητήρων Επίπεδου Σαρωτή

Γενικά, ένας επίπεδος σαρωτής [93] αποτελείται από μία γυάλινη επιφάνεια στην οποία τοποθετούνται τα προς σάρωση αντικείμενα, μία πηγή φωτός, η οποία φωτίζει το αντικείμενο με φως συγκεκριμένων φασματικών χαρακτηριστικών, έτσι ώστε να ισοσταθμίζει την φασματική απόκριση του φωτοευαίσθητου αισθητήρα του σαρωτή, και ένα σύστημα κατόπτρων και φακών που ανακατευθύνει της ακτίνες του ανακλώμενου φωτός από το αντικείμενο, προς την φωτοευαίσθητη επιφάνεια του αισθητήρα όπως

απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Η πηγή φωτός μαζί με τον φωτοευαίσθητο αισθητήρα ή το κάτοπτρο μετακινούνται σε διεύθυνση παράλληλη προς τη μεγάλη διάσταση του σαρωτή για να σαρώσουν ολόκληρη την επιφάνεια των αντικειμένων ή συνηθέστερα εγγράφων που τίθενται στη γυάλινη επιφάνεια του σαρωτή. Η σάρωση λαμβάνει χώρα κατά δύο διευθύνσεις, την αργή και τη γρήγορη διεύθυνση σάρωσης. Ως γρήγορη διεύθυνση χαρακτηρίζεται αυτή που είναι κάθετη στη διεύθυνση κίνησης του αισθητήρα και στην οποία η ταχύτητα σάρωσης εξαρτάται από το ελάχιστο χρόνο έκθεσης που απαιτούν οι ψηφίδες του αισθητήρα για να παράγουν το ασθενές φωτορεύμα που απαιτείται, δηλαδή να ανιχνευθεί η πρόσπτωση φωτονίων στην επιφάνεια του. Η αργή διεύθυνση σάρωσης είναι η διεύθυνση κατά την οποία κινείται η φωτοευαίσθητη επιφάνεια του σαρωτή ή το αντίστοιχο κάτοπτρο και είναι πολλαπλάσιος του χρόνου της γρήγορης σάρωσης κατά ένα παράγοντα που εξαρτάται από την ανάλυση στη διεύθυνση της αργής σάρωσης.



Σχήμα 5.3: Ηλεκτρομηχανικά μέρη επίπεδου σαρωτή.

Αναλυτικότερα, ο φωτοευαίσθητος γραμμικός αισθητήρας των σύγχρονων σαρωτών έχει τυπικό μέγεθος ψηφίδας $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ και συνολικά αποτελείται από 10000-14000 ψηφίδες. Γνωρίζοντας ότι η σάρωση μίας επιφάνειας $210\text{mm} \times 297\text{mm}$ πραγματοποιείται έτσι ώστε η γρήγορη διεύθυνση σάρωσης να αντιστοιχεί στη μικρότερη διάσταση, προκύπτει άμεσα ότι ο φακός που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 παράγει ένα είδωλο σε σμίκρυνση της διάστασης αυτής στην επιφάνεια του αισθητήρα. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι ένας αισθητήρας δειγματοληπτεί κάθε γραμμή, της προς σάρωση επιφάνειας, μήκους 210 mm και πλάτους $4\mu\text{m}$, σε 10000-

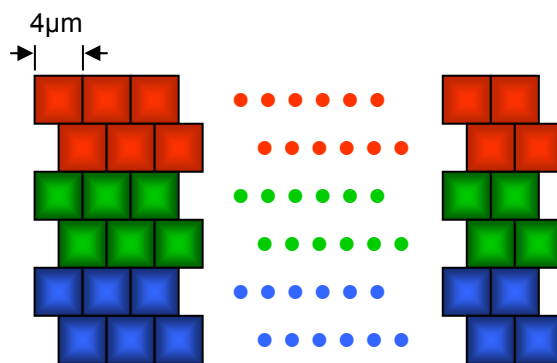
14000 σημεία. Η πραγματική ανάλυση R_γ σε κουκκίδες ανά ίντσα (Dots Per Inch - dpi) στην οποία αναφέρονται οι κατασκευαστές σαρωτών προκύπτει για τη διεύθυνση της γρήγορης σάρωσης με βάση των παραπάνω συλλογισμών από την Εξίσωση 5.2.

$$R_\gamma (dpi) = \frac{(\text{πλήθος ψηφίδων}) \cdot 25.4 \text{ mm}}{210 \text{ mm}} \quad (5.2)$$

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά προκύπτει ότι η ανάλυση ενός τυπικού αισθητήρα κυμαίνεται μεταξύ των 1200 dpi και 1600 dpi. Για την αντικειμενική εκτίμηση της ονομαστικής ανάλυσης του αισθητήρα και τη σύγκριση με αντίστοιχα απεικονιστικά συστήματα εισάγουμε το μέγεθος r_γ που δίνεται από την Εξίσωση 5.3 στο οποίο θα αναφερόμαστε ως τη διακριτική ικανότητα του αισθητήρα σε ζεύγη κουκκίδων ανά χιλιοστό ή όπως συνηθέστερα αναφέρεται για τους δισδιάστατους αισθητήρες σε ζεύγη γραμμών ανά χιλιοστό (Line Pairs Per Millimeter – lp/mm) κατά τη διεύθυνση της γρήγορης σάρωσης.

$$r_\gamma (lp/mm) = \frac{R_\gamma (dpi)}{2 \cdot 25.4} \quad (5.3)$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για την έγχρωμη σάρωση ενός αντικειμένου γίνεται χρήση ενός τριγραμμικού (Trilinear) αισθητήρα ο οποίος περιέχει τρία γραμμικά χρωματικά φίλτρα (R, G, B). Για την περαιτέρω αύξηση της ανάλυσης οι κατασκευαστές συνήθως χρησιμοποιούν δύο σειρές αισθητήρων για το κάθε χρώμα ολισθημένων κατά μισή ψηφίδα ανά χρώμα, σχηματίζοντας ένα εξαγωνικό πλέγμα για να εκμεταλλευτούν τη μειωμένη απολαβή στα άκρα της κάθε ψηφίδας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται οι πλέον σύγχρονοι αισθητήρες επίπεδων σαρωτών, οι οποίοι αποτελούνται από συστοιχίες 6 γραμμικών αισθητήρων που δυναμικά παρέχουν τη διπλάσια ανάλυση σε σχέση με τους τριγραμμικούς αισθητήρες. Για κάθε χρώμα πραγματοποιούνται δύο σαρώσεις της κάθε γραμμής και έπειτα πολυπλέκονται τα δείγματα ώστε να δημιουργηθεί μία εικόνα με διπλάσια ανάλυση, ενώ σε περίπτωση που απαιτείται ανάλυση η οποία μπορεί να επιτευχθεί με μία γραμμική συστοιχία ψηφίδων για κάθε χρώμα, η ολισθημένη παραμένει ανενεργή.



Σχήμα 5.4: Εξαγωνική διάταξη ψηφίδων αισθητήρα επίπεδου σαρωτή.

Κατά τη διεύθυνση της αργής σάρωσης ο υπολογισμός της ανάλυσης προκύπτει από το ελάχιστο βήμα του βηματικού κινητήρα (Stepper Motor) που μετακινεί τον αισθητήρα ή όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα το κάτοπτρο που χρησιμοποιείται για τη σάρωση. Κάθε βήμα του αισθητήρα αντιστοιχεί σε ένα δείγμα, δηλαδή μία κουκκίδα κατά την αργή διεύθυνση σάρωσης. Με τον τρόπο αυτό η ανάλυση του σαρωτή κατά την αργή διεύθυνση σάρωσης R_α υπολογίζεται με χρήση της Εξίσωσης 5.4 σε αντιστοιχία με το συλλογισμό με τον οποίο προέκυψε η Εξίσωση 5.2.

$$R_\alpha (dpi) = \frac{(\text{πλήθος βημάτων}) \cdot 25.4 \text{ mm}}{297 \text{ mm}} \quad (5.4)$$

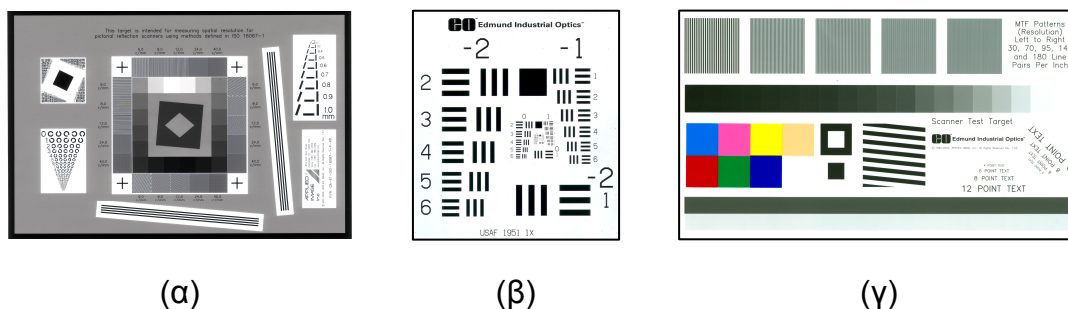
Τέλος, όσον αφορά την κατασκευή των φωτοευαίσθητων αισθητήρων αυτή πραγματοποιείται κυρίως με βάση τέσσερις τεχνικές. Η κυριότερη τεχνική κατασκευής βασίζεται στην ανάπτυξη διατάξεων συζευγμένου φορτίου (Charge Coupled Devices - CCD) και προσφέρει υψηλής ποιότητας αποτέλεσμα που έγκειται τόσο στην υψηλή ανάλυση του αισθητήρα όσο και στα μειωμένα χαρακτηριστικά θορύβου που αυτός διαθέτει. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες των επίπεδων σαρωτών είναι γραμμικοί με μικρές διαστάσεις, το κόστος κατασκευής περιορίζεται αισθητά κάνοντας εφικτή της χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στη συγκεκριμένη τεχνική, η υλοποίηση περιλαμβάνει μία γραμμική συστοιχία από φωτοευαίσθητες ψηφίδες οι οποίες λειτουργούν με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σε μία διάταξη που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3. Ως εναλλακτική λύση, στην παραπάνω μορφή αισθητήρα, πολλοί κατασκευαστές χρησιμοποιούν αισθητήρες βασισμένους σε διατάξεις συμπληρωματικού ημιαγωγού

μετάλλου οξειδίου (Complementary Metal Oxide Semiconductor - CMOS) οι οποίοι πλεονεκτούν λόγω του μαζικού τρόπου παραγωγής, όπως τα ομώνυμα ολοκληρωμένα κυκλώματα, όσο και λόγω της μικρότερης ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με τους κλασσικούς αισθητήρες τεχνολογίας CCD προκαλώντας με τον τρόπο αυτό και αντίστοιχη μείωση του κόστους κατασκευής. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη κατηγορία αισθητήρων παρουσιάζει αυξημένο θόρυβο και προορίζεται κυρίως για χαμηλού και μεσαίου κόστους εφαρμογές, όπου ανταλλάσσεται η ακρίβεια της απεικόνισης με την αυξημένη ανάλυση και την χαμηλή κατανάλωση ρεύματος. Επιπρόσθετα, σε ιδιαίτερες εφαρμογές πολύ υψηλών απαιτήσεων, όπως στους σαρωτές τυμπάνου που προορίζονται για χρήση στη σάρωση φωτογραφιών από δορυφόρους ή ιατρικών απεικονιστικών δεδομένων, όπου απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιούνται αισθητήρες που βασίζονται σε φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tube) οι οποίοι μπορούν να παράγουν ισχυρό σήμα εξόδου με πολύ μικρή διέγερση. Τέλος, πρόσφατα αλλά ιδιαίτερα δυναμικά, αναπτύσσονται γραμμικοί αισθητήρες επαφής εικόνας (Contact Image Sensors – CIS) [94] οι οποίοι απλουστεύουν τις διατάξεις σάρωσης, καθότι έχουν διάσταση όσο το πλάτος σάρωσης με αποτέλεσμα να μην απαιτείται φακός που να παρέχει σμίκρυνση του προς σάρωση αντικειμένου στο μέγεθος του αισθητήρα. Οι διατάξεις που αναπτύσσονται χαρακτηρίζονται από μηδενικές γεωμετρικές παραμορφώσεις, λόγω της έλλειψης φακού, ενώ παρουσιάζουν ιδιαίτερα μικρή κατανάλωση ισχύος λόγω της χρήσης φωτοδιόδων εκπομπής (Light Emitting Diodes – LED) ως πηγή φωτός και επιτρέπουν τη μείωση των διαστάσεων των σαρωτών. Η εστίαση του ανακλώμενου φωτός στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια του σαρωτή επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας γραμμικής συστοιχίας φακών μεταβλητού δείκτη διάθλασης, όπως οι συστοιχίες που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη διόρθωση της ψευδοσκοπίας. Αν και αρχικά οι αναλύσεις που προσέφεραν περιορίζονταν στα 600 dpi, οι εξελίξεις στην κατασκευή τους και η μείωση των διαστάσεων των ψηφίδων επιτρέπουν πλέον αναλύσεις έως 2400 dpi.

5.6 Αξιολόγηση Χαρακτηριστικών Λειτουργίας Επίπεδου Σαρωτή

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της απεικόνισης, που παράγεται από έναν επίπεδο σαρωτή, είναι οι παραμορφώσεις που εισάγονται από τη μη γραμμικότητα των οπτικών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εστίαση του αντικειμένου [96], όπως στην περίπτωση των σαρωτών τύπου CCD ή

CMOS ή της γραμμικής συστοιχίας φακών μεταβλητού δείκτη διάθλασης στην περίπτωση των αισθητήρων CIS. Αντίστοιχες παραμορφώσεις εισάγονται και από τα σφάλματα θέσης του βηματικού κινητήρα που χρησιμοποιείται στον εκάστοτε σαρωτή. Οι παραπάνω λόγοι σε συνδυασμό με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της ανάλυσης των σαρωτών, με χρήση ολισθημένων ψηφίδων, όπως αναφέρθηκε στην παραπάνω παράγραφο, μειώνουν την πραγματική ανάλυση ενός σαρωτή με αποτέλεσμα να απέχουν αρκετά τα πραγματικά από τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του. Για τον υπολογισμό των μεγεθών που απαιτήθηκαν για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών ενός επίπεδου σαρωτή, όπως η τονική απόκριση (Tonal Response), τα χαρακτηριστικά θορύβου, η δυναμική περιοχή (Dynamic Range), η χωρική συχνοτική απόκριση (Spatial Frequency Response – SFR), η οξύτητα της εικόνας (Image Sharpness) και η χρωματική απόκλιση (Chromatic Aberration), αναλύθηκαν περιοχές από τρεις διαφορετικούς στόχους οι οποίοι απεικονίζονται στην Εικόνα 5.1. Τα ειδικά χαρακτηριστικά των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης περιέχονται στο Παράρτημα Β.1.



Εικόνα 5.1: Στόχοι προσδιορισμού χαρακτηριστικών επίπεδου σαρωτή,

(α) Ανακλαστικός στόχος ISO-16067-1, (β) USAF 1951 1x,

(γ) Χρωματικός ανακλαστικός στόχος

5.7 Υλοποίηση Ψηφιακής Διάταξης Καταγραφής Αντικειμένων με τη Μέθοδο της Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Για την υλοποίηση της ψηφιακής διάταξης καταγραφής εικόνων ΟΦ χρησιμοποιήθηκε η αρχή της διάταξης που περιγράφηκε στο Σχήμα 5.1, με την οποία συνδυάστηκαν δύο συστοιχίες ΣΣΦ των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά των Συστοιχιών Στοιχειωδών Φακών

ΣΣΦ	Τύπος Φακών	Υλικό Κατασκευής	Δείκτης Διάθλασης	Βήμα φακού (mm)	Εστιακή Απόσταση (mm)
ΣΣΦ #1	Επιπεδόκυρτοι	Ακρυλικό Οπτικής Ποιότητας	1.49	1	3.3
ΣΣΦ #2 ¹	Επιπεδόκυρτοι	Γυαλί Οπτικής Ποιότητας (BaK1)	1.57	1.04	3.5

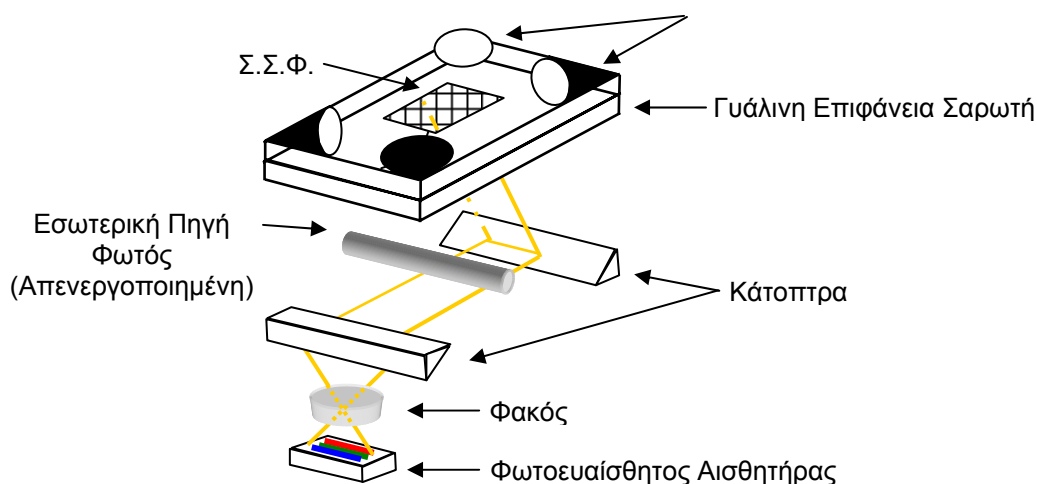
¹ Η συγκεκριμένη συστοιχία παραχωρήθηκε μαζί με το πειραματικό πρωτότυπο οθόνης προβολής το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος TDIS [95].

Κατά την υλοποίηση της διάταξης χρησιμοποιήθηκαν και οι δύο συστοιχίες, με τη ΣΣΦ #2 να παρουσιάζει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά, δεδομένου ότι υπερέχει στο υλικό κατασκευής και έχει μικρότερες ανοχές στα χαρακτηριστικά της, προκαλώντας μικρότερες παραμορφώσεις και ελάχιστες σημειακές ατέλειες που προκαλούν τελικά υποβάθμιση του ειδώλου.

Ο σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε χαρακτηρίζεται από υψηλή οπτική ανάλυση 3200 dpi αξιοποιώντας την τεχνική των ολισθημένων ψηφίδων, η οποία αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Παρόλα αυτά, στην πράξη χρησιμοποιήθηκαν χαμηλότερες αναλύσεις στο πεδίο των 600 dpi – 2400 dpi οι οποίες χαρακτηρίζονται από μειωμένα χαρακτηριστικά παραμορφώσεων και θορύβου, όπως προέκυψε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ο συγκεκριμένος σαρωτής που χρησιμοποιήθηκε διαθέτει ιδιαίτερα γραμμικά χαρακτηριστικά, ιδίως σε μία κεντρική περιοχή 100 mm x 150 mm, δεδομένου ότι προορίζεται για σάρωση αρνητικών μεγάλου μεγέθους.

Ειδικότερα, κατά τη σάρωση αρνητικών οι σαρωτές απενεργοποιούν την εσωτερική πηγή φωτός η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 και χρησιμοποιούν μία πηγή φωτισμού η οποία βρίσκεται συνήθως στο επάνω κάλυμμα της συσκευής. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι πιο δύσκολο να καταγραφεί με ακρίβεια η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε ένα διαφανές μέσο όπως τα αρνητικά, σε σχέση με τη διερχόμενη

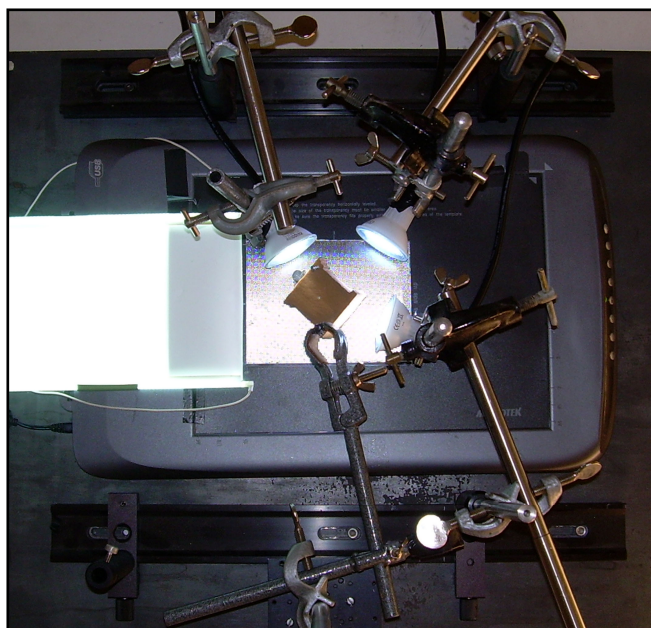
ακτινοβολία μέσα από αυτά. Επιπλέον, για την αύξηση της ομοιογένειας της φωτεινής ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από το αρνητικό χρησιμοποιείται μία επιφάνεια που προκαλεί διάχυση. Στην περίπτωση της διάταξης καταγραφής εικόνων ΟΦ ισχύουν παρόμοιες συνθήκες. Η σάρωση της επιφάνειας της ΣΣΦ με χρήση της εσωτερικής πηγής φωτός εισάγει ανεπιθύμητες παρεμβολές, που προέρχονται από τη μερική ανάκλαση του φωτός που προσπίπτει εσωτερικά στη ΣΣΦ. Για το λόγο αυτό, κατά τη χρήση ενός επίπεδου σαρωτή σε μία διάταξη ΟΦ είναι σκόπιμο να απομονώνεται η εσωτερική πηγή φωτός και να παρέχεται εξωτερικός φωτισμός στο αντικείμενο, αντίστοιχων φασματικών χαρακτηριστικών, ώστε να μην παρατηρείται το παραπάνω φαινόμενο και να διατηρείται παράλληλα η χρωματική ισοστάθμιση του αισθητήρα του σαρωτή. Το σχηματικό διάγραμμα της περιγραφείσας διάταξης απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5, ενώ η τελική μορφή της διάταξης που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.



Σχήμα 5.5: Σχηματικό διάγραμμα σαρωτή ΟΦ.

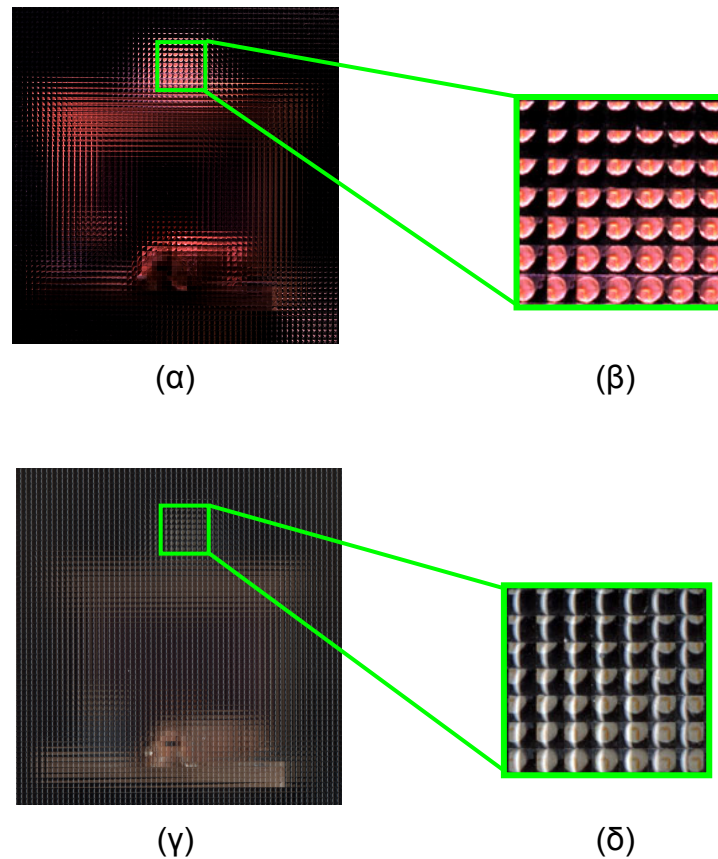
Στην τελευταία εικόνα, σημειώνεται ότι έχει χρησιμοποιηθεί μία συστοιχία από τέσσερις εξωτερικές πηγές φωτός, η οποίες παράγουν λευκό φως, με ελαφρώς διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτά του αισθητήρα. Εντούτοις, λήφθηκε μέριμνα ώστε η συνολική ισχύς της φωτεινής ακτινοβολίας να είναι αρκετά περιορισμένη ώστε να μην οδηγείται κάποια από τις χρωματικές συστοιχίες στον κόρο. Η μικρή διόρθωση που απαιτείται στην τελική εικόνα που παράγεται περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο. Η επίδραση της ανάκλασης του εσωτερικού φωτός του επίπεδου σαρωτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.3 μαζί με την αντίστοιχη εικόνα στην περίπτωση που απενεργοποιηθεί ο εσωτερικός φωτισμός του επίπεδου σαρωτή. Στη συγκεκριμένη

εικόνα, παρουσιάζονται σε μεγέθυνση δύο τμήματα της ίδιας περιοχής της εικόνας όπου παρατηρείται η έντονη παρεμβολή από της ανακλώμενες ακτίνες κατά τη διεύθυνση της αργής σάρωσης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η προβολή της εικόνας που προέρχεται από την σάρωση όπου γίνεται χρήση της εσωτερικής πηγής φωτός παράγει τελικά ποιοτικά είδωλα, γεγονός που οφείλεται στον εγγενή πλεονασμό της εικόνας ΟΦ, ο οποίος αναλύεται εκτενώς σε επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 5.2: Υλοποίηση Σαρωτή ΟΦ.

Σημειώνεται τέλος ότι οι σαρωτές που βασίζονται στην τεχνολογία CIS διαθέτουν γραμμικά χαρακτηριστικά (Παράρτημα Β.1) και εκμεταλλεύονται όλη την επιφάνεια σάρωσης, ενώ πλέον διαθέτουν τη δυνατότητα σάρωσης αρνητικών και άρα απενεργοποίησης της εσωτερικής πηγής φωτός. Παρόλα αυτά, δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος επίπεδος σαρωτής με τεχνολογία CIS κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της πειραματικής διάταξης, διότι δεν υποστηρίζονταν τη δεδομένη στιγμή η σάρωση αρνητικών και στάθηκε αδύνατη η επέμβαση για την απενεργοποίηση της εσωτερικής πηγής φωτός, λόγω κοινής τροφοδοσίας με τη γραμμική συστοιχία ψηφίδων που αποτελούν τον αισθητήρα.



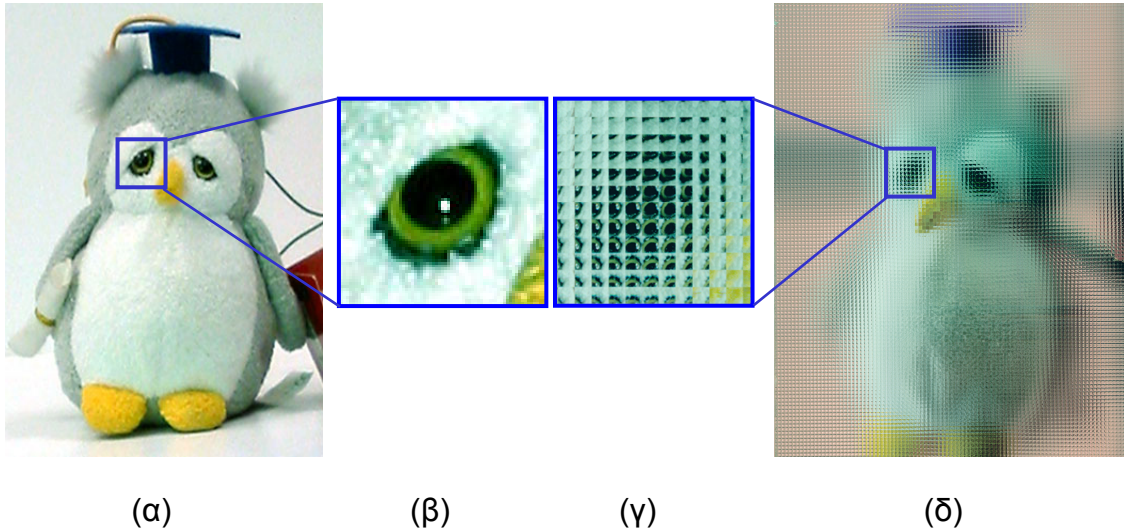
Εικόνα 5.3: Σάρωση (α),(β) με χρήση εσωτερικής πηγής φωτός και (γ),(δ) με χρήση εξωτερικής πηγής φωτός.

5.8 Γενικά Χαρακτηριστικά εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας παρήχθησαν ένα πλήθος από εικόνες ΟΦ με διαφορετικά χαρακτηριστικά θορύβου, ο οποίος εξαρτάται από τη ΣΣΦ που χρησιμοποιήθηκε αλλά και από το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά ΣΕ, το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από το βήμα της ΣΣΦ και την ανάλυση του σαρωτή που επιλέχθηκε κάθε φορά. Ένας πλήρης κατάλογος με τα 3Δ αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν και τις αντίστοιχες αναπαραστάσεις τους ως εικόνες ΟΦ περιέχεται στο Παράρτημα Β.2.

Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζεται μία εικόνα ΟΦ και το αντικείμενο που καταγράφηκε. Η συγκεκριμένη εικόνα έχει παραχθεί με χρήση της ΣΣΦ #2, με χρήση ανάλυσης 1200 dpi, η οποία μπορεί να αποδώσει κατά μέσο όρο 49 εικονοστοιχεία ανά ΣΕ. Περιλαμβάνονται 125 x 100 φακοί οι οποίοι καλύπτουν το τμήμα της επιφάνειας του σαρωτή η οποία χρησιμοποιείται για σάρωση αρνητικών μεγάλου μεγέθους. Στη συγκεκριμένη εικόνα έχει χρησιμοποιηθεί εξωτερική πηγή φωτός και δεν έχει πραγματοποιηθεί κάποια χρωματική ή άλλου είδους διόρθωση. Στις Εικόνες 5.4 (β), (γ) παριστάνεται σε

μεγέθυνση η ίδια περιοχή του 3D αντικειμένου και της αναπαράστασης ΟΦ αντίστοιχα. Οι γειτονικοί φακοί της ΣΣΦ λειτουργούν σαν ένα δισδιάστατο πλέγμα από συσκευές λήψης με παράλληλους άξονες οι οποίες καταγράφουν το αρχικό 3D αντικείμενο ή τμήμα αυτού το οποίο βρίσκεται μέσα στο οπτικό πεδίο τους.



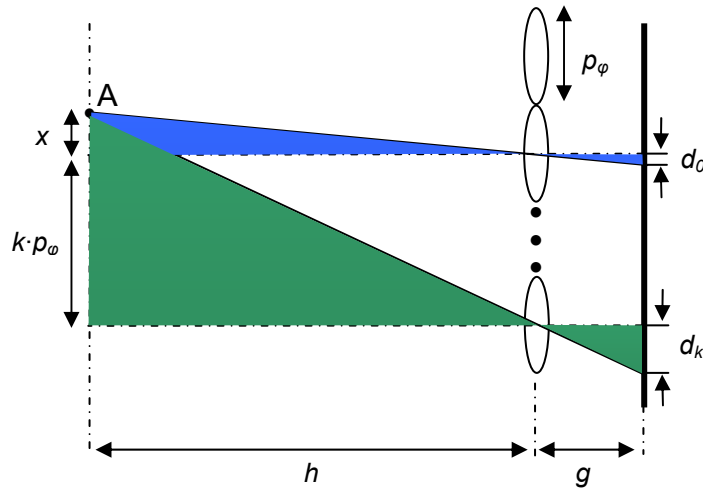
Εικόνα 5.4: (α),(β) Αρχικό 3D αντικείμενο και (γ),(δ) ΟΦ του ίδιου αντικειμένου.

Ανάλογα με την απόσταση ενός σημείου του αντικειμένου σε σχέση με τη διάταξη καταγραφής καθορίζεται και η απόσταση κατά την οποία μετατοπίζεται αυτό μεταξύ γειτονικών φακών. Για τον υπολογισμό της μετατόπισης ενός συγκεκριμένου σημείου της εικόνας μεταξύ γειτονικών φακών της ΣΣΦ χρησιμοποιείται η απόσταση κάθε φορά από τον οπτικό άξονα του φακού της ΣΣΦ που αντιστοιχεί σε μία ΣΕ όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.6.

Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι το σημείο A δίνει είδωλα σε $n \geq k+1$ διαδοχικούς φακούς προκύπτει άμεσα με βάση τα όμοια τρίγωνα του παραπάνω σχήματος ότι η μετατόπιση του σημείου μεταξύ δύο τυχαίων διαδοχικών ΣΕ $k, k+1$ δίνεται από την Εξίσωση 5.5.

$$d_{k+1} - d_k = \frac{g}{h} \cdot p_\phi \quad (5.5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με g συμβολίζεται το διάκενο μεταξύ του αισθητήρα και της ΣΣΦ και με h η απόσταση μεταξύ της ΣΣΦ και του σημείου του αντικειμένου, οι οποίες συνδέονται με την εστιακή απόσταση των φακών της ΣΣΦ f με την Εξίσωση 4.1.



Σχήμα 5.6: Μετατόπιση ενός σημείου μεταξύ φακών.

Με βάση τα προαναφερθέντα, μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η απόσταση h για γνωστά μεγέθη φακού της ΣΣΦ ρ_φ και διακένου μεταξύ φακών και αισθητήρα g , για σημεία τα οποία δημιουργούν είδωλα σε τουλάχιστον δύο διαδοχικούς φακούς. Η μετατόπιση ενός σημείου μεταξύ διαδοχικών ΣΕ $d_{k+1}-d_k$ μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση υπολογιστικών τεχνικών, σε ένα εύρος ΣΕ στις οποίες απεικονίζεται ένα δεδομένο σημείο. Ένα πλήθος μεθόδων έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της απόστασης ενός σημείου ενός αντικειμένου από τη ΣΣΦ βασισμένο σε μετρικές εκτίμησης της συσχέτισης περιοχών μεταξύ γειτονικών φακών στο 2Δ επίπεδο των ΣΕ [89,97-100].

5.9 Διόρθωση Ψευδοσκοπίας και Αφαίρεση Θορύβου

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διόρθωση της ψευδοσκοπίας μπορεί να πραγματοποιηθεί υπολογιστικά με περιστροφή κάθε ΣΕ κατά 180° γύρω από έναν άξονα που περνά από το κέντρο τους, κάθετα στο επίπεδο τους [10]. Ταυτοχρόνως, είναι δυνατή η παραγωγή πραγματικών ορθοσκοπικών ειδώλων με χρήση της τεχνικής που αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3. Σε κάθε περίπτωση η υπολογιστική διόρθωση της ψευδοσκοπίας μπορεί να ολοκληρωθεί για κάθε ΣΕ σε σταθερό χρόνο $O(N^2)$, όπου N το πλήθος των εικονοστοιχείων σε κάθε διάσταση της ΣΕ. Η παραπάνω διαδικασία πρακτικά συνίσταται σε μία ανταλλαγή των θέσεων κάθε ζεύγους εικονοστοιχείων σε κάθε ΣΕ.

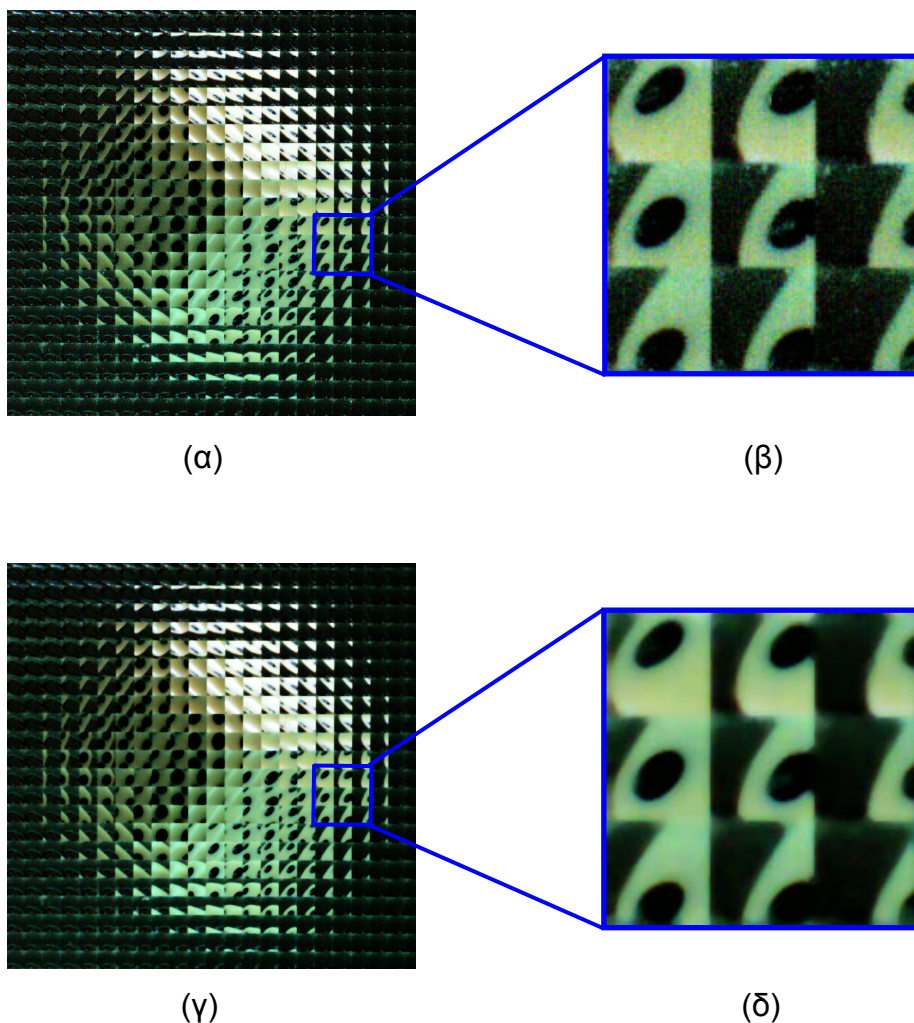
Πλέον της διόρθωσης της ψευδοσκοπίας είναι απαραίτητη και η μείωση ή εξάλειψη διαφόρων ειδών θορύβου με στόχο τη βελτιστοποίηση της τελικής απεικόνισης. Όπως

συμβαίνει με όλες τις υλοποιήσεις ιδανικών διατάξεων έτσι και οι ΣΣΦ χαρακτηρίζονται από ένα πλήθος ατελειών οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του τελικού ειδώλου. Παρότι οι ΣΣΦ που χρησιμοποιήθηκαν στην υλοποίηση του πειραματικού πρωτοτύπου παρουσιάζουν ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά, όσον αφορά τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, σε πολλές περιπτώσεις διαπιστώθηκε η ύπαρξη φυσαλίδων στο σώμα μεμονωμένων φακών της ΣΣΦ και η απόξεση τμημάτων από την επιφάνεια των φακών τα οποία χαρακτηρίζονται ως σημειακές απώλειες των φακών μιας ΣΣΦ. Ακολούθως, περιγράφουμε συνοπτικά την τεχνική που στοχεύει στην αποτελεσματική μείωση της συγκεκριμένης μορφής θορύβου, η οποία παρουσιάζει ομοιότητα με τον θόρυβο βολής (Shot Noise) ή κρουστικό-παλμικό θόρυβο, ο οποίος απαντάται σε ένα μεγάλο πλήθος συστημάτων. Για την αποτελεσματική μείωση του θορύβου βολής χρησιμοποιήθηκε ένα δισδιάστατο μη γραμμικό φίλτρο ενδιαμέσου τιμής [101-103]. Θεωρώντας μία περιοχή S_{xy} μίας εικόνας I με κέντρο το σημείο x,y , τότε η λειτουργία του φίλτρου βασίζεται στη διάταξη των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων της περιοχής S_{xy} κατά αύξουσα ή φθίνουσα σειρά και την επιλογή της ενδιάμεσης τιμής του δείγματος ως την τιμή της φωτεινότητας I_{xy} του εικονοστοιχείου με συντεταγμένες x,y . Με τον τρόπο αυτό, μεμονωμένες τιμές φωτεινότητας οι οποίες αντιστοιχούν σε κρουστικό θόρυβο με μέγεθος παλμού μικρότερο από το μισό του μεγέθους της περιοχής μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά. Το φίλτρο της ενδιαμέσου τιμής, στην περίπτωση που εφαρμοστεί σε περιοχές με περιττό πλήθος τιμών, αντικαθιστά ένα δείγμα με κάποιο άλλο το οποίο ανήκει σε αυτή την περιοχή χωρίς να εισάγει νέα δείγματα, όπως συμβαίνει με τα φίλτρα μέσης τιμής ή τα φίλτρα ενδιαμέσου τιμής τα οποία εφαρμόζονται σε περιοχές με άρτιο πλήθος τιμών. Η λειτουργία του φίλτρου περιγράφεται από την Εξίσωση 5.6.

$$I_{xy} = \underset{S_{xy} \subseteq I}{\text{median}} \{S_{xy}\} \quad (5.6)$$

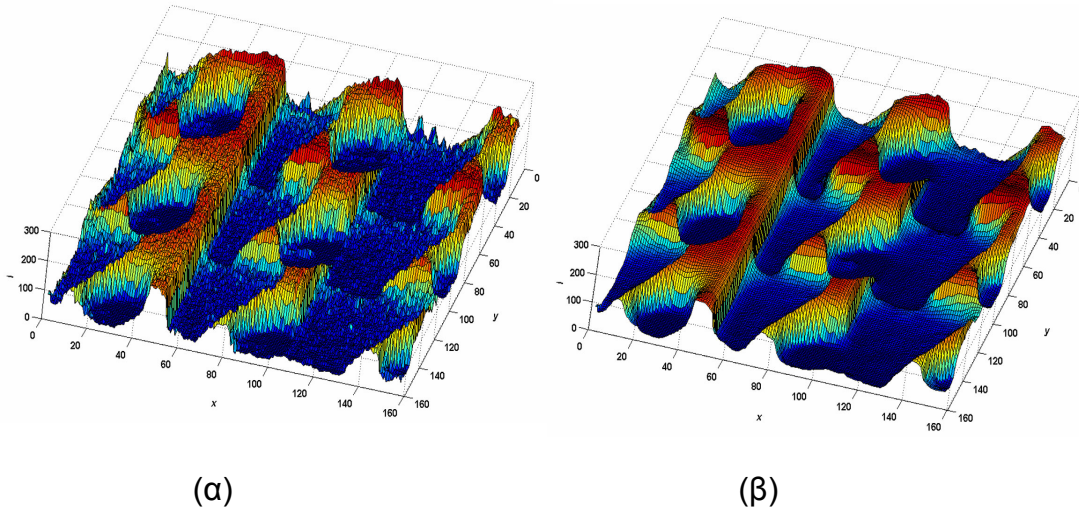
Η επίδραση του παραπάνω φίλτρου στις περιπτώσεις όπου υπάρχει κρουστικός θόρυβος παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.5.

Στο συγκεκριμένο τμήμα της εικόνας το οποίο απεικονίζεται σε μεγέθυνση στην Εικόνα 5.5 (β) υπάρχει έντονος κρουστικός θόρυβος σε σημεία τα οποία όπου βρίσκονται στα όρια μεταξύ γειτονικών φακών λόγω ατελειών κατασκευής ή απόξεσης λόγω τριβής της ΣΣΦ με επιφάνειες με τις οποίες έρχεται σε επαφή, όπως επίσης και σκόνη η οποία έχει επικαθίσει στη ΣΣΦ.



Εικόνα 5.5: (α) Εικόνα ΟΦ ενός ζαριού, (β) Περιοχή που αποτελείται από 3 x 3 ΣΕ η οποία παρουσιάζει διάφορα είδη κρουστικού θορύβου, (γ) Η αρχική εικόνα ΟΦ μετά την επίδραση του φίλτρου, (δ) Μεγέθυνση της ίδιας περιοχής της αρχικής εικόνας ΟΦ μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής.

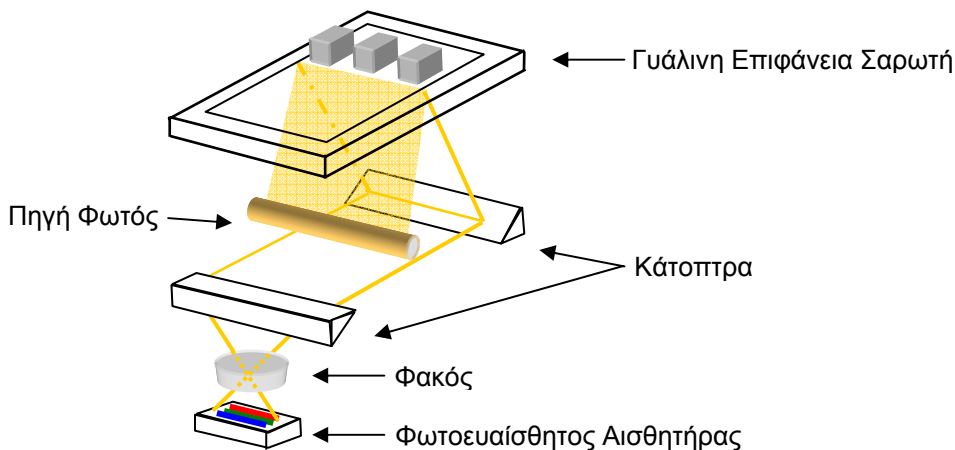
Παράλληλα στην ίδια εικόνα παρατηρείται μία σημειακή ατέλεια του κεντρικού φακού της περιοχής που παρουσιάζεται σε μεγέθυνση η οποία μεταφέρεται στην ΣΕ ως μία ομάδα από έντονα διαφοροποιημένα σε τιμές φωτεινότητας εικονοστοιχεία σε σχέση με τα γειτονικά τους. Η εικόνα μετά την εφαρμογή του φίλτρου παρουσιάζει σαφή βελτίωση ως προς τα χαρακτηριστικά του θορύβου σε σχέση με το θόλωμα που επέφερε το φίλτρο μεγέθους 3 x 3 εικονοστοιχείων το οποίο εφαρμόστηκε. Η διακύμανση της φωτεινότητας σε κάθε μία από τις Εικόνες 5.5 (β) και 5.5 (γ) παρουσιάζεται με τη μορφή 3Δ διαγράμματος στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Διακύμανση φωτεινότητας, (α) Αρχική εικόνα ΟΦ, (β) Μετά την εφαρμογή του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής.

5.10 Υλοποίηση και Αξιολόγηση Ψηφιακής Διάταξης Παραγωγής Πολυστερεοσκοπικών ζευγών

Η συγκεκριμένη τεχνική καταγραφής πολυστερεοσκοπικών ζευγών [104] παρέχει υψηλής ανάλυσης εικόνα πραγματικών αντικειμένων χρησιμοποιώντας χρονικά πολυπλεγμένες καταγραφές. Η τεχνική βασίζεται στη γεωμετρική παραμόρφωση που εισάγουν οι φακοί των χαμηλού κόστους επίπεδων σαρωτών και δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί με σαρωτές τεχνολογίας CIS. Η αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Αρχή λειτουργίας 3D σαρωτή πολυστερεοσκοπικών ζευγών.

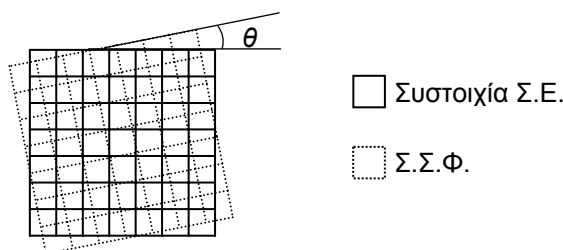
Αναλυτικότερα, το προς σάρωση 3Δ αντικείμενο τοποθετείται διαδοχικά σε διαφορετικές ισαπέχουσες θέσεις κατά τη διεύθυνση ταχείας σάρωσης του επιπέδου ψηφιακού σαρωτή. Η διαδικασία της σάρωσης επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες και οι θέσεις του αντικειμένου. Για τη δημιουργία του πολυστερεοσκοπικού ζεύγους χρησιμοποιήθηκε ένα στατικό αντικείμενο που κατασκευάστηκε από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο περίβλημα αντιστοιχών διαστάσεων. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση καταγράφηκαν οχτώ διαφορετικές θέσεις της συγκεκριμένης κατασκευής κατά τη διεύθυνση ταχείας σάρωσης του επιπέδου σαρωτή και αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για τη σύνθεση των εικόνων που παρήχθησαν σε ένα πολυστερεοσκοπικό ζεύγος για προβολή από ένα σύστημα που χρησιμοποιηθεί κυλινδρικούς φακούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι, η διαδικασία των πολλαπλών λήψεων προκαλεί προβλήματα εύρεσης αντιστοιχίας μεταξύ των λήψεων λόγω σφαλμάτων κατά την τοποθέτηση των αντικειμένων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την περαιτέρω επεξεργασία για τη χρήση των συγκεκριμένων δεδομένων. Η ομάδα λήψεων που πραγματοποιήθηκε συμπεριλαμβάνεται στο Παράρτημα Β.3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Δύο από τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λήψη μίας εικόνας ΟΦ και αλλοιώνουν τη μορφή της συστοιχίας ΣΕ που δημιουργείται στον αισθητήρα, εντοπίζονται στην ακρίβεια τοποθέτησης της ΣΣΦ στον φωτοευαίσθητο αισθητήρα, όπως επίσης και στις σχετικές διαστάσεις των εικονοστοιχείων του αισθητήρα και των φακών της ΣΣΦ στην περίπτωση των ψηφιακών αισθητήρων. Αναλυτικά, είναι προφανές ότι κατά την τοποθέτηση της ΣΣΦ στον αισθητήρα είναι ιδιαίτερα συχνό το φαινόμενο της ύπαρξης μικρών στροφών μεταξύ του πλέγματος που σχηματίζουν οι φακοί της ΣΣΦ και του πλέγματος που σχηματίζει η συστοιχία των εικονοστοιχείων της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Η ύπαρξη της παραπάνω γωνίας εκτροπής (Skew Angle) θ , αλλοιώνει την ευθυγράμμιση μεταξύ των δύο πλεγμάτων, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Στο συγκεκριμένο σχήμα απεικονίζεται η στροφή θ , την οποία ενδέχεται να παρουσιάζει η ΣΣΦ σε σχέση με το ευθυγραμμισμένο πλέγμα που θα δημιουργούσε τη συστοιχία ΣΕ. Η συγκεκριμένη στροφή δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα κατά την ανάλυση και επεξεργασία της εικόνας ΟΦ που δημιουργείται, και κυρίως στις διαδικασίες εκείνες που επενεργούν ξεχωριστά σε κάθε μία από τις ΣΕ του πλέγματος που σχηματίζεται. Με τον όρο πλέγμα ΣΕ στο υπόλοιπο τμήμα τα διατριβής θα αναφερόμαστε στη 2Δ συστοιχία των ΣΕ που σχηματίζεται στον αισθητήρα κατά την καταγραφή η προβολή μιας εικόνας ΟΦ.



Σχήμα 6.1: Στροφή πλέγματος ΣΣΦ σε σχέση με το πλέγμα των εικονοστοιχείων που σχηματίζουν τη συστοιχία των ΣΕ στον ψηφιακό φωτοευαίσθητο αισθητήρα.

Επιπρόσθετα, στη γενική περίπτωση όπου το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου του αισθητήρα είναι p_ε και το μέγεθος κάθε φακού της ΣΣΦ είναι p_ϕ , το πλήθος των εικονοστοιχείων που αντιστοιχεί σε κάθε διάσταση της ΣΕ όπως ορίζεται και στην Εξίσωση 5.1 θα δίνεται από την Εξίσωση 6.1.

$$N = \frac{p_\phi}{p_\varepsilon} \quad (6.1)$$

Στην τελευταία εξίσωση θεωρούμε ότι ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή μίας εικόνας ΟΦ. Ταυτόχρονα, παρατηρούμε ότι το πλήθος των εικονοστοιχείων ανά ΣΕ εν γένει δύναται να μην εκφράζεται ως ακέραιος αριθμός, αλλά να παίρνει τιμές στο σύνολο των πραγματικών αριθμών. Η τελευταία παρατήρηση δικαιολογεί μία μεταβολή στο μέγεθος των ΣΕ, καθώς σε εικονοστοιχεία που τοποθετούνται κατά ένα ποσοστό τους σε μία ΣΕ και κατά ένα άλλο ποσοστό στη γειτονική ΣΕ η τιμή της φωτεινότητας τους καθορίζεται κατά κύριο λόγο από το παραπάνω ποσοστό. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε τη μέθοδο η οποία αναπτύχθηκε για τον αυτόματο προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής και τον ακριβή υπολογισμό των θέσεων κάθε ΣΕ στο πλέγμα των ΣΕ [105] χωρίς να απαιτείται γνώση των χαρακτηριστικών της διάταξης καταγραφής. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να αυτοματοποιηθούν περαιτέρω υπολογιστικές διαδικασίες, όπως η υπολογιστική διόρθωση της ψευδοσκοπίας, ή να πραγματοποιηθεί αρχικοποίηση και καθορισμός παραμέτρων μίας διάταξης καταγραφής εικόνων ΟΦ. Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή για την ανίχνευση της γωνίας εκτροπής βασίζεται στον προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής ενός πλέγματος κάθετων ευθειών που διατρέχει μία εικόνα ΟΦ το οποίο δημιουργείται από την απότομη βαθμίδα που παρουσιάζεται λόγω της μεταβολής της φωτεινότητας στα όρια μεταξύ γειτονικών ΣΕ. Η συγκεκριμένη δομή στην οποία θα γίνεται αναφορά ως ορθογώνιο πλέγμα ευθειών (ΟΠΕ) είναι χαρακτηριστική για συστήματα που χρησιμοποιούν ΣΣΦ τετραγωνικών φακών σε τετραγωνικό πλέγμα, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2 β και χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή εικόνων στο πρότυπο σύστημα που αναπτύχθηκε. Εντούτοις, η τεχνική μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να πραγματοποιεί ανίχνευση και άλλου είδους πλεγμάτων. Ο ακριβής υπολογισμός της γωνίας εκτροπής του ΟΠΕ προσδιορίζει έμμεσα τη γωνιακή μετατόπιση της ΣΣΦ σε σχέση με το ορθογώνιο πλέγμα ψηφίδων του ψηφιακού αισθητήρα, το οποίο αποτελεί το πλέγμα αναφοράς. Παράλληλα, προσδιορίζεται η ακριβής απόσταση μεταξύ των πλεγματικών ευθειών του ΟΠΕ σε κάθε κατεύθυνση. Ο τελευταίος υπολογισμός είναι απαραίτητος

λόγω της μεταβολής του μεγέθους των ΣΕ όπως προκύπτει από την Εξίσωση 6.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη προσπάθεια αποτελεί την πρώτη μέθοδο αυτόματου προσδιορισμού των παραπάνω μεγεθών, τα οποία μέχρι πρότινος υπολογίζονταν με απευθείας παρατήρηση και καταμέτρηση των εικονοστοιχείων που περιέχονται σε κάθε ΣΕ.

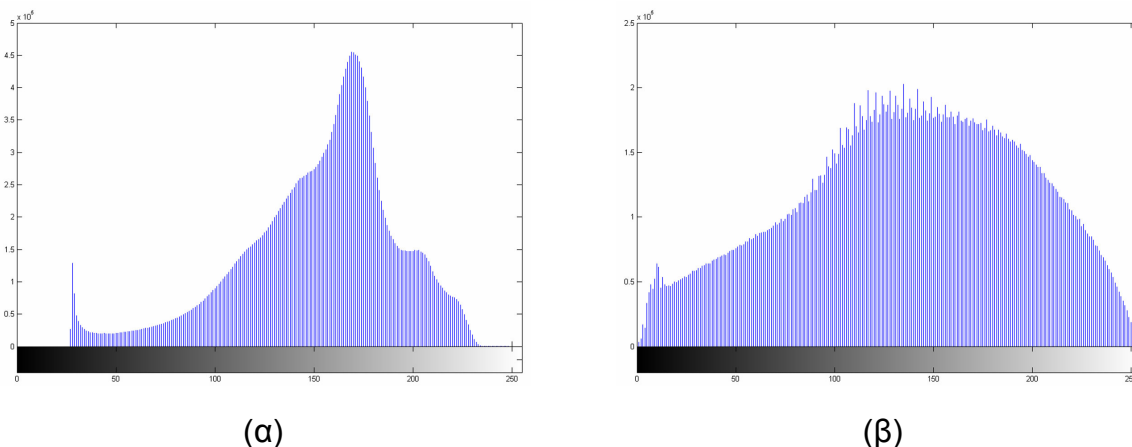
6.2 Γενική Περιγραφή της Μεθόδου

Η τεχνική που αναπτύχθηκε για τον προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής αξιοποιεί την μορφή και τη γεωμετρία μιας εικόνας ΟΦ όπως αυτές που παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.3 (δ) και 5.4 (α) και στις εικόνες ΟΦ του παραρτήματος Β.2. Η χρήση τετραγωνικών φακών για την υλοποίηση της ΣΣΦ διευκολύνει τη διαδικασία προσδιορισμού της γωνίας εκτροπής, η οποία βασίζεται στα καθολικά (Global) χαρακτηριστικά της κάθε εικόνας ΟΦ. Αρχικά, εφαρμόζονται μη γραμμικά φίλτρα για την τόνωση των ακμών που αντιστοιχούν στα όρια των ΣΕ και σχηματίζουν τις ευθείες του ΟΠΕ και χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Hough [106] για τον ακριβή προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής. Για τον ακριβή προσδιορισμό των αποστάσεων των ευθειών του ΟΠΕ πραγματοποιείται αναγωγή του ΟΠΕ με χρήση της προσδιορισθείσας γωνίας εκτροπής και εν συνεχεία ταυτοποιούνται οι συντεταγμένες των οριζόντιων και κατακόρυφων ευθειών που έχουν προσδιοριστεί με βάση ένα σύνολο από πρότυπες ακολουθίες συντεταγμένων που προκύπτει από στατιστικές εκτιμήσεις στο ΟΠΕ. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές εύρεσης του βέλτιστου ταιριάσματος μεταξύ μίας ακολουθίας και μίας βάσης προτύπων [107], ανάλογες με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μέγιστης κοινής υποακολουθίας (Longest Common Subsequence – LCS) μεταξύ ακολουθιών γραμμάτων, αριθμών ή βάσεων σε αλληλουχίες DNA.

6.3 Προεπεξεργασία Εικόνας Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Η μέθοδος υλοποιεί ένα στάδιο προεπεξεργασίας που στοχεύει στη μείωση του θορύβου, όπως περιγράφηκε στο πέμπτο κεφάλαιο, τη βελτίωση της αντίθεσης (contrast) της ληφθείσας εικόνας ΟΦ, όπως επίσης και στην αφαίρεση υπερβολικής λεπτομέρειας που οφείλεται στην υφή των αντικειμένων της 3Δ σκηνής. Αρχικά, η έγχρωμη εικόνα μετατρέπεται σε ασπρόμαυρη (grayscale) και χρησιμοποιείται η τεχνική της προσαρμοστικής ισοστάθμισης του ιστογράμματος με περιορισμό αντίθεσης (Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization - CLAHE) [103,108-109] για την

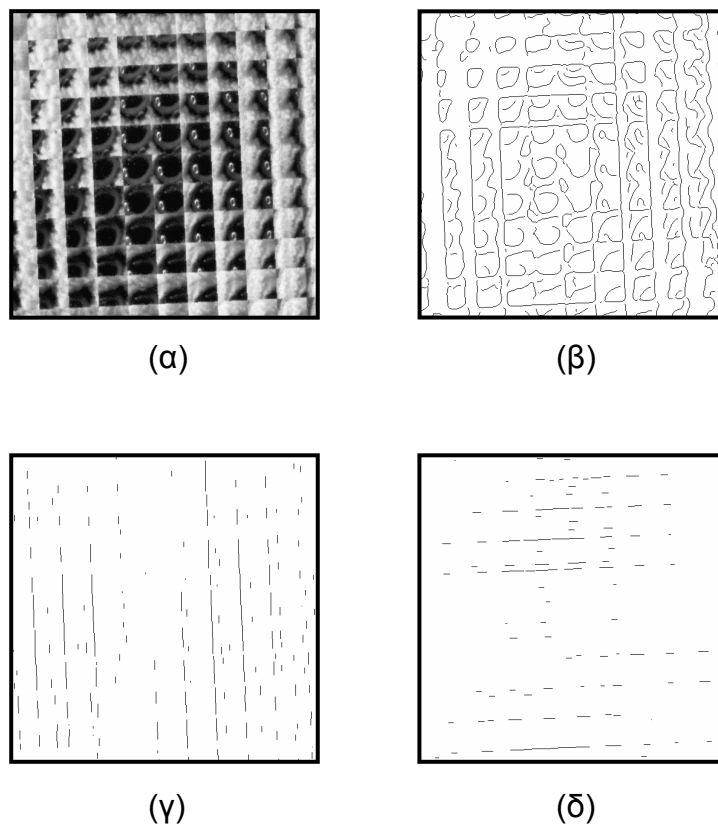
τόνωση της αντίθεσης της εικόνας ΟΦ. Η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει μικρότερη ενίσχυση του θορύβου σε σχέση με μη προσαρμοστικές μεθόδους με αποτέλεσμα να βελτιώνει την ποιότητα της εικόνας ΟΦ. Το ιστόγραμμα που προκύπτει με χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής για την ασπρόμαυρη εικόνα που αντιστοιχεί στην Εικόνα 5.3.δ απεικονίζεται στο Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: (α) Αρχικό ιστόγραμμα Εικόνας 5.3.δ, (β) Ισοστάθμιση ιστογράμματος για βελτίωση της αντίθεσης με την τεχνική CLAHE.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένα 2Δ φίλτρο ενδιάμεσης τιμής για μείωση του θορύβου, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο επόμενο στάδιο, ανιχνεύονται οι ακμές της εικόνας με χρήση του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών Canny [110] ώστε να ανιχνευθούν οι ισχυρές ακμές της εικόνας ΟΦ, οι οποίες αντιστοιχούν στο ΟΠΕ. Σημειώνεται ότι μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου ανίχνευσης ακμών προκύπτει μία μονόχρωμη (monochrome) ή αλλιώς δυαδική (binary) στην οποία οι ακμές που έχουν ανιχνευθεί έχουν τιμή ένα (1) και η υπόλοιπη εικόνα τιμή μηδέν (0) ή αντίστροφα. Για την επιπρόσθετη τόνωση των ακμών που ανήκουν στο ΟΠΕ που διατρέχουν όλη την εικόνα εφαρμόζονται 1Δ φίλτρα ενδιάμεσης τιμής κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Με κατάλληλη επιλογή του εύρους του παραθύρου των φίλτρων είναι δυνατό να εξαλειφθεί ο παραμένων θόρυβος και οι λεπτομέρειες κάθε ΣΕ, όπως επίσης και ευθείες με διευθύνσεις που απέχουν αρκετά από τις διευθύνσεις εφαρμογής του φίλτρου και έχουν μέγεθος μικρότερο από το μισό του μεγέθους του παραθύρου του φίλτρου. Αντιθέτως, η εφαρμογή του φίλτρου κατά γραμμές και στήλες στην εικόνα ΟΦ προκαλεί την τόνωση των ακμών εκείνων που αντιστοιχούν σε ευθείες με διευθύνσεις σχεδόν παράλληλες με τις προαναφερθείσες. Για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί μόνο μία εκ των παραπάνω

διευθύνσεων είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί. Αυτό συμβαίνει διότι το μεγάλο πλήθος ΣΕ παράγει ένα αντίστοιχα μεγάλο πλήθος ευθειών προς μία εκ των δύο διευθύνσεων του ΟΠΕ, οι οποίες είναι αρκετές για τον ακριβή προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής. Τα αποτελέσματα των παραπάνω σταδίων κατά την εφαρμογή τους σε μία εικόνα ΟΦ η οποία απεικονίζει το αντικείμενο της εικόνας 5.3 (δ) και παρουσιάζει γωνία εκτροπής $\theta \approx 2.5^\circ$ παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3: (α) Τμήμα μιας ασπρόμαυρης εικόνας ΟΦ, (β) Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny, (γ) Εφαρμογή κατακόρυφου και (δ) Εφαρμογή οριζόντιου 1Δ φίλτρου ενδιάμεσης τιμής.

6.4 Προσδιορισμός και Διόρθωση της Γωνίας Εκτροπής

Για τον υπολογισμό της γωνίας εκτροπής του ΟΠΕ είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα μεγάλο πλήθος τεχνικών. Πολλές από τις τεχνικές αυτές βασίζονται στην προβολή των εικονοστοιχείων μιας εικόνας σε ορισμένες διευθύνσεις, με στόχο την ανίχνευση της διεύθυνσης στην οποία η προβολή παρουσιάζει μέγιστα, ενώ άλλες βασίζονται στη μαθηματική μοντελοποίηση ορισμένων μαθηματικών καμπυλών και την εύρεση αυτών

στην εκάστοτε εικόνα [111-113]. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε μία ιδιαίτερη κατηγορία τεχνικών προσδιορισμού της γωνίας εκτροπής που βασίζεται στο μετασχηματισμό Hough [114].

Η συγκεκριμένη τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα στο παρελθόν τόσο για τον υπολογισμό της γωνίας εκτροπής [115] όσο και για τον προσδιορισμό διαφόρων δομών σε εικόνες ή κείμενα, όπου πολλές φορές είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των γραμμών ενός κειμένου για την αυτόματη οπτική αναγνώριση των χαρακτήρων του (Optical Character Recognition - OCR) [116]. Μία χαρακτηριστική ιδιότητα του συγκεκριμένου μετασχηματισμού, η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική για την εφαρμογή του στις εικόνες ΟΦ, αφορά την υψηλή ανοχή του σε διακεκομμένες ευθείες με μεγάλη συνολική έκταση οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλα κενά. Ο μετασχηματισμός διατηρεί τις ευθείες αυτές, ενώ αντίθετα αποσβένει τις μικρής έκτασης ευθείες που αφορούν τοπικά χαρακτηριστικά μιας εικόνας. Με τον τρόπο αυτό, είναι εύκολο να διατηρηθούν οι ευθείες που αντιστοιχούν στο ΟΠΕ και διατρέχουν όλη την εικόνα ΟΦ. Παράλληλα, ο μετασχηματισμός Hough διακρίνεται για την ανοχή του στο θόρυβο, την ιδιαίτερα απλή απεικόνιση των ομάδων ευθειών που αποτελούν το ΟΠΕ και την μεγάλη ακρίβεια των υπολογισμών, με κόστος την υψηλή υπολογιστική του πολυπλοκότητα. Το συγκεκριμένο μειονέκτημα αντιμετωπίζεται στην παρούσα διατριβή με την υλοποίηση μιας ιεραρχικής παραλλαγής του μετασχηματισμού και τη γνώση για τη γενική δομή που παρουσιάζει μια εικόνα ΟΦ. Στο υπόλοιπο της παρούσας παραγράφου παρουσιάζονται συνοπτικά οι θεωρητικές αρχές του μετασχηματισμού, ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιείται το πρόβλημα στο χώρο του μετασχηματισμού, καθώς και οι βασικές αρχές της ιεραρχικής υλοποίησης που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, εφαρμόζονται τα παραπάνω σε ένα σύνολο εικόνων για τον υπολογισμό της γωνίας εκτροπής και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

6.4.1 Μετασχηματισμός Hough

Όπως σε όλους τους μετασχηματισμούς, η βασική ιδέα του μετασχηματισμού Hough [117] είναι να δημιουργήσει ένα νέο χώρο όπου ορισμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά μιας εικόνας θα είναι πιο αναγνωρίσιμα σε σχέση με την αρχική εικόνα. Στην παρούσα διατριβή, η μελέτη θα περιοριστεί στην ανίχνευση ομάδων παράλληλων ευθειών οι οποίες σχηματίζουν το ΟΠΕ.

Το κλασσικό μοντέλο μιας ευθείας στο Καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων δίνεται σε ανοιγμένη μορφή από την Εξίσωση 6.2.

$$y = a \cdot x + b \quad (6.2)$$

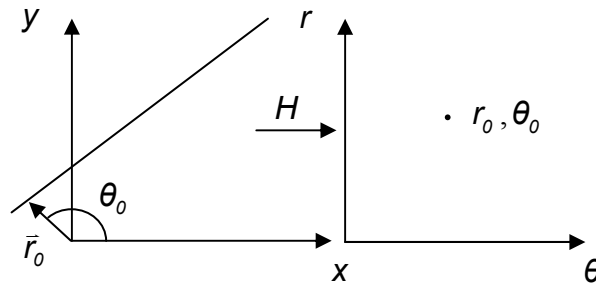
Ο μετασχηματισμός Hough απεικονίζει όλες τις παραπάνω ευθείες σε ένα χώρο με παραμέτρους το συντελεστή διευσθύνσεως της ευθείας a και την τεταγμένη επί τη αρχή b , οι οποίες αρκούν για τον καθορισμό μιας ευθείας σε ένα επίπεδο. Παρά την ελκυστικότητα της, η παραπάνω αναπαράσταση προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα σε περιπτώσεις ευθειών που είναι παράλληλες προς τον άξονα y' y του Καρτεσιανού επιπέδου λόγω απειρισμού της κλίσης a μιας δεδομένης ευθείας. Για την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος χρησιμοποιείται συνηθέστερα μία παραμετρική μορφή της εξίσωσης της ευθείας στο Καρτεσιανό επίπεδο, με βάση την απόσταση της ευθείας r από την αρχή των αξόνων του Καρτεσιανού επιπέδου και της γωνίας θ που σχηματίζει η κάθετη στην ευθεία με τον θετικό ημιάξονα Ox . Το πλεονέκτημα στην περίπτωση αυτή είναι ότι ο χώρος παραμέτρων που δημιουργείται από το μετασχηματισμό Hough και περιέχει ως παραμέτρους τα παραπάνω μεγέθη έχει πεπερασμένες διαστάσεις [118]. Η αναλυτική παραμετρική μορφή της ευθείας στο Καρτεσιανό επίπεδο θα δίνεται από την Εξίσωση 6.3.

$$r = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (6.3)$$

Χρησιμοποιώντας την τελευταία έκφραση για την ευθεία, ο μετασχηματισμός Hough μπορεί να οριστεί ως μία απεικόνιση του χώρου \mathbb{R}^2 στον παραμετρικό χώρο r - θ ως:

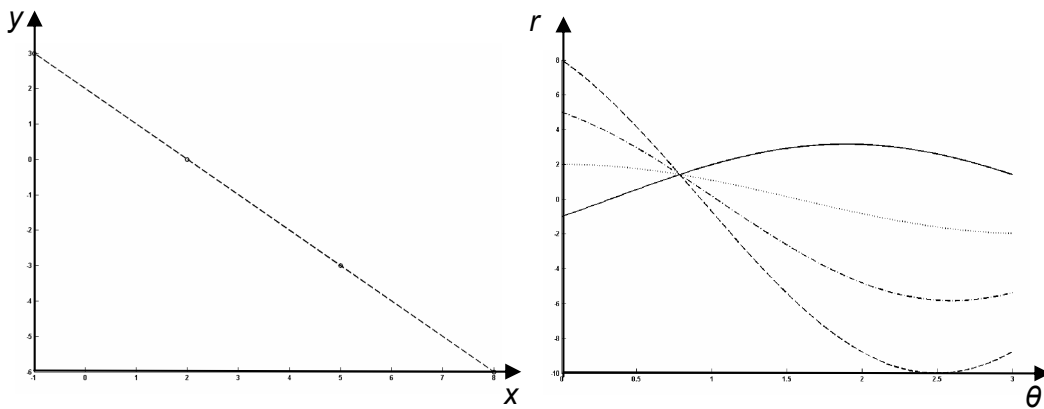
$$H : (x, y) \rightarrow (r, \theta) \quad (6.4)$$

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4, μία ευθεία στο επίπεδο x - y αντιστοιχεί σε ένα σημείο (r_0, θ_0) στο επίπεδο r - θ , όπου $\theta_0 \in [0, \pi)$ και $r_0 \in \mathbb{R}$. Στο ίδιο σχήμα σημειώνονται το κάθετο διάνυσμα στην ευθεία το οποίο διέρχεται από την αρχή των αξόνων \vec{r}_0 και η γωνία που σχηματίζει αυτό με το θετικό ημιάξονα θ_0 . Με χρήση των παραπάνω συμβολισμών η αρχή των αξόνων θα απέχει $\|\vec{r}_0\|$ από την ευθεία ενώ οι άξονες x' x και y' y θα αντιστοιχούν στα σημεία $(0,0)$ και $(0, \pi/2)$ αντίστοιχα.



Σχήμα 6.4: Μετασχηματισμός Hough.

Ο μετασχηματισμός απεικονίζει κάθε σημείο του επιπέδου x - y σε μία ημιτονοειδή καμπύλη $r(\theta)$ στο επίπεδο r - θ . Η τομή των καμπυλών των συνευθειακών σημείων είναι ένα σημείο που απεικονίζει τις παραμέτρους r, θ για την ευθεία που διέρχεται από τα σημεία αυτά. Η εικόνα αυτή για τέσσερα συνευθειακά σημεία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5: Μετασχηματισμός Hough τεσσάρων συνευθειακών σημείων.

Η αναλυτική έκφραση του μετασχηματισμού Hough των σημείων του επιπέδου x - y μιας αναλογικής εικόνας στον παραμετρικό χώρο r - θ δίνεται από τη γενική Εξίσωση 6.5.

$$H(r, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot \delta(r - x \cdot \cos \theta - y \cdot \sin \theta) \cdot dx \cdot dy \quad (6.5)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, η συνάρτηση $f(x,y)$ είναι μία συνεχής συνάρτηση που εκφράζει την τιμή της φωτεινότητας σε ένα σημείο (x,y) ενώ η συνάρτηση δέλτα, $\delta(\bullet)$ ορίζεται από την Εξίσωση 6.6.

$$\delta(r - x \cdot \cos \theta - y \cdot \sin \theta) = \begin{cases} 1, & r = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (6.6)$$

Στη διακριτή περίπτωση, θεωρούμε μία εικόνα που αποτελείται από $N \times N$ εικονοστοιχεία η οποία μετασχηματίζεται σε ένα χώρο παραμέτρων με $\theta \in [0, \pi)$ και $r \in [-N/\sqrt{2}, N/\sqrt{2}]$. Για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού θεωρούμε κάθε ένα από τα σημεία της εικόνας που ανήκουν σε ακμές με συντεταγμένες (x_i, y_i) και υπολογίζουμε την ημιτονοειδή καμπύλη για το εύρος γωνιών θ που αναφέρθηκε στα προηγούμενα χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 6.3. Προφανώς είναι αδύνατο να υπολογιστεί η παραπάνω καμπύλη όταν η τιμές της γωνίας θ παίρνουν συνεχείς τιμές. Για το λόγο αυτό, το διάστημα γωνιών θ δειγματοληπτείται με μία περίοδο δειγματοληψίας $\Delta\theta$, η οποία χαρακτηρίζει την ακρίβεια προσδιορισμού της κλίσης της αρχικής ευθείας. Επιπρόσθετα, για τον ίδιο λόγο κβαντίζεται και η τιμή της παραμέτρου r η οποία υπολογίζεται από την Εξίσωση 6.3 και χαρακτηρίζει την απόσταση των ευθειών από την αρχή των αξόνων με βήμα Δr . Με τον τρόπο ο χώρος Hough χωρίζεται σε περιοχές μεγέθους $\Delta r \times \Delta\theta$, οι οποίες συνήθως αποκαλούνται κελιά του μετασχηματισμού και τα οποία αρχικοποιούνται στην τιμή μηδέν. Θεωρούμε ένα κελί $H(r_k, \theta_l)$ του χώρου Hough και κάθε φορά αυξάνουμε την τιμή του κατά μία σταθερή ή μεταβλητή ποσότητα ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιούμε, με βάση την ανισότητα

$$|r_k - x_i \cdot \cos \theta_l - y_i \cdot \sin \theta_l| \leq \Delta r \quad (6.7)$$

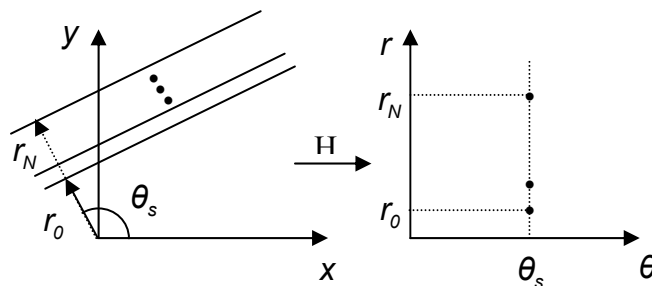
Μετά την επανάληψη της διαδικασίας για όλα τα εικονοστοιχεία που ανήκουν σε ακμές της εικόνας, η τιμή του κελιού $H(r_k, \theta_l)$ θα είναι ανάλογη του πλήθους των ημιτονοειδών καμπυλών που διέρχονται από το συγκεκριμένο σημείο στο χώρο Hough και άρα των συννευθιακών σημείων στο επίπεδο $x-y$. Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκε η κλασσική προσέγγιση για την αύξηση των τιμών των κελιών κατά μία σταθερή

ποσότητα, ακολουθώντας την παραπάνω στρατηγική για την εύρεση του κελιού που πρέπει να αυξηθεί. Ωστόσο, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν πιο σύνθετα σχήματα για την περαιτέρω μείωση του σφάλματος και τον τρόπο αύξησης των τιμών των κελιών του χώρου Hough [119-126].

6.4.2 Προσδιορισμός Γωνίας Εκτροπής Παράλληλης Δέσμης Ευθειών

Οι δύο ομάδες ευθειών που αποτελούν το ΟΠΕ συγκροτούν δέσμες από παράλληλες ευθείες των οποίων τα χαρακτηριστικά μπορούν να αξιοποιηθούν κατάλληλα για την ανίχνευση της γωνίας εκτροπής που παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα, δύο ή περισσότερες ευθείες θα σχηματίζουν την ίδια γωνία στην τομή τους με τους άξονες του Καρτεσιανού επιπέδου. Με βάση την τελευταία παρατήρηση, οι ευθείες που ανήκουν σε μία ομάδα παραλλήλων ευθειών θα καταλαμβάνουν στο χώρο Hough κελιά τα οποία έχουν την ίδια τιμή για την παράμετρο θ . Η εικόνα που θα προκύπτει στο χώρο Hough για μία δέσμη N παραλλήλων ευθειών παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.

Ο υπολογισμός της γωνίας εκτροπής που παρουσιάζουν οι παράλληλες ευθείες της δέσμης είναι ισοδύναμος με τον υπολογισμό της γωνίας που σχηματίζει το διάνυσμα r με το θετικό ημιάξονα Ox , δηλαδή της παραμέτρου θ . Με βάση τους παραπάνω συλλογισμούς, γίνεται προφανές ότι η διεύθυνση εκείνη στην οποία είναι κάθετες οι ευθείες της δέσμης θ_s , θα χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο πλήθος από κελιά με υψηλές τιμές σε αντίθεση με τις υπόλοιπες διευθύνσεις όπου οι τιμές των κελιών θα παρουσιάζουν ιδιαίτερη ομοιογένεια με μικρές διακυμάνσεις στις τιμές των κελιών σε σχέση με αυτές της διεύθυνσης θ_s .



Σχήμα 6.6: Μετασχηματισμός Hough δέσμης N παραλλήλων ευθειών.

Ένα κατάλληλο μέτρο για τον προσδιορισμό της επικρατούσας διεύθυνσης θ_s είναι η τυπική απόκλιση που παρουσιάζουν οι διάφορες διευθύνσεις σε σχέση με την τιμή της παραμέτρου r . Η συγκεκριμένη μετρική παρουσιάζει μια αξιόλογη σταθερότητα σε

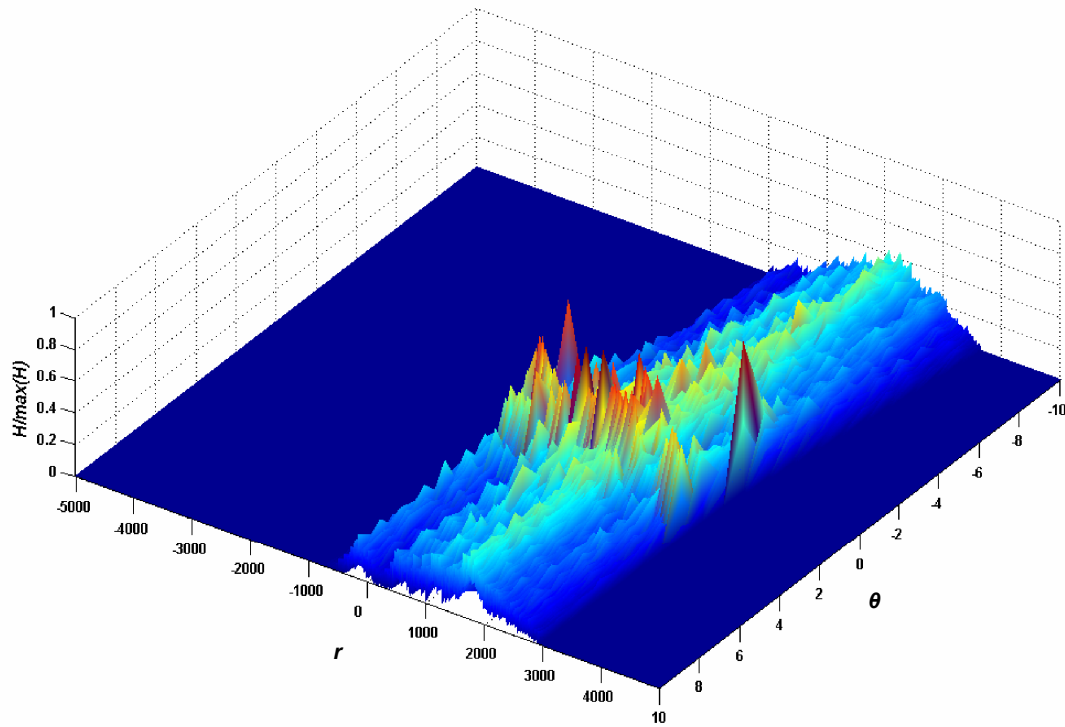
σχέση με άλλα μέτρα, όπως ο υπολογισμός του απόλυτου μεγίστου, καθότι δεν επηρεάζεται από τυχαίες μεταβολές στις τιμές των κελιών που οφείλονται σε δυνατές ακμές που έχουν παραμείνει μετά την εφαρμογή των φίλτρων. Η τιμή της μετρικής θα υπολογίζεται για κάθε διεύθυνση θ_ξ από την Εξίσωση 6.8.

$$\sigma^2(\theta_\xi) = \frac{\sum_{k=1}^M H^2(r_k, \theta_\xi)}{M} - \left(\frac{\sum_{k=1}^M H(r_k, \theta_\xi)}{M} \right)^2 \quad (6.8)$$

Στην παραπάνω εξίσωση όπου $M = N \cdot \sqrt{2}$ και η ποσότητα $H(r_k, \theta_\xi)$ αποτελεί την τιμή του κελιού στις συντεταγμένες (r_k, θ_ξ) του χώρου Hough.

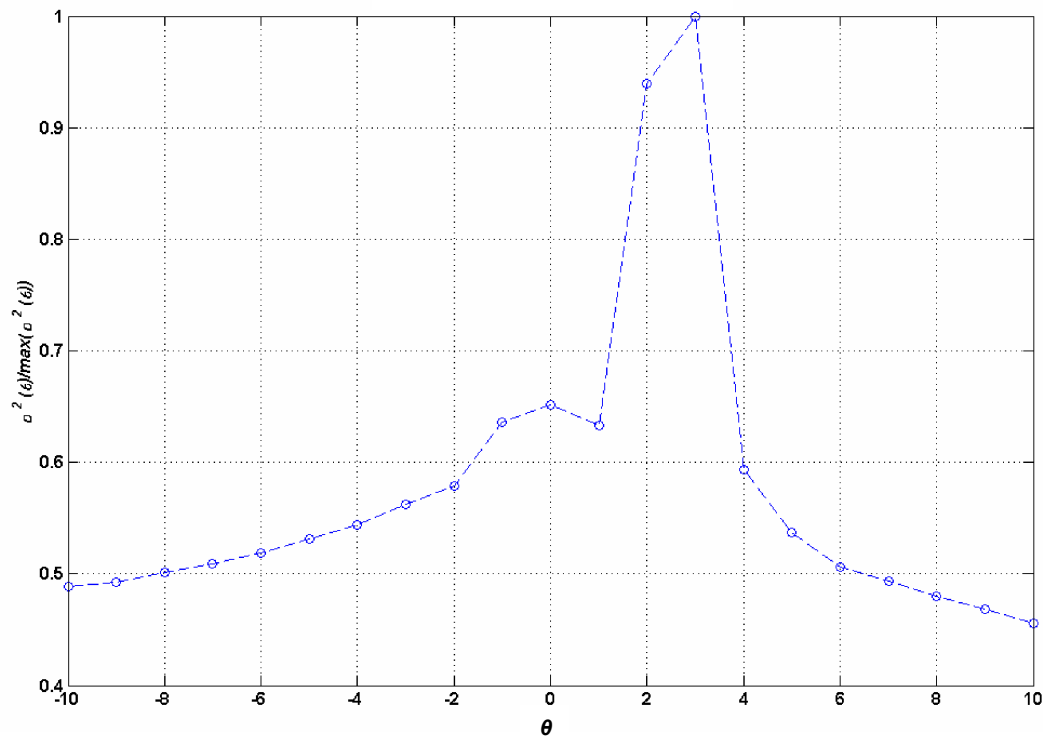
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του μετασχηματισμού είναι ένα από τα κυριότερα μειονεκτήματα του. Για την ελάττωση της μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής των ευθειών του ΟΠΕ η γωνία που σχηματίζει η μια ομάδα ευθειών δεδομένου ότι για ένα τετραγωνικό πλέγμα αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη υλοποίηση αναπτύχθηκε ένας ιεραρχικός μετασχηματισμός δύο επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο, υπολογίζεται ο μετασχηματισμός Hough χρησιμοποιώντας σαν περίοδο δειγματοληψίας της παραμέτρου θ ένα διάστημα $\Delta\theta=1^\circ$, για $\theta \in [-10^\circ, 10^\circ]$, θεωρώντας ότι οι στροφές έχουν μικρές τιμές και επιλέγεται η διεύθυνση θ_s που παρουσιάζει τη μέγιστη τυπική απόκλιση στις τιμές της με βάση την εξίσωση 6.8. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται ο υπολογισμός του μετασχηματισμού χρησιμοποιώντας ένα διάστημα δειγματοληψίας $\Delta\theta=0.05^\circ$ για $\theta \in [\theta_s - 2^\circ, \theta_s + 2^\circ]$ περιορίζοντας με τον τρόπο αυτό το χρόνο που απαιτείται για τον προσδιορισμό της γωνίας εκτροπής σε ένα κλάσμα του χρόνου που θα απαιτούνταν για τον υπολογισμό της με ακρίβεια 0.05° χωρίς να χρησιμοποιηθεί η ιεραρχική προσέγγιση, ενώ διατηρείται η απαιτούμενη ακρίβεια. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου για την εικόνα 5.4 (δ) παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.7 και 6.8. Στα διαγράμματα απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες τιμές τόσο για την τιμή κάθε κελιού του μετασχηματισμού όσο και για την τυπική απόκλιση, σε σχέση με τη μέγιστη τιμή που παρουσιάζει η κάθε ποσότητα.

Μετασχηματισμός Hough στο $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$



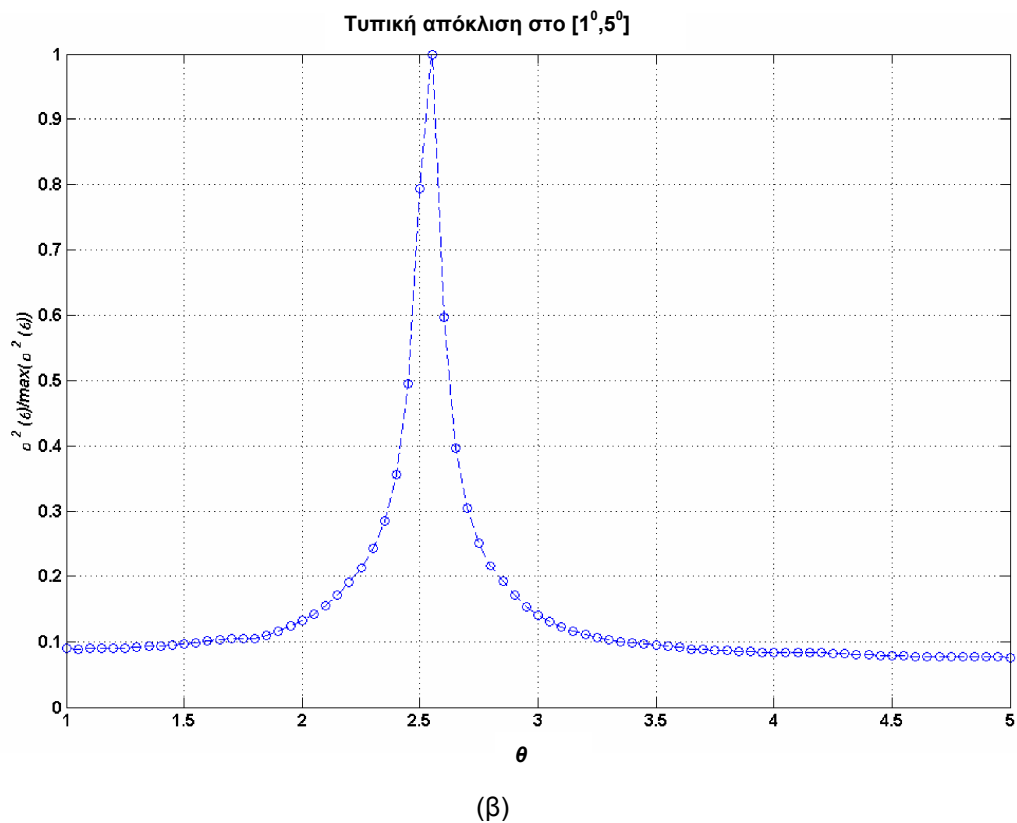
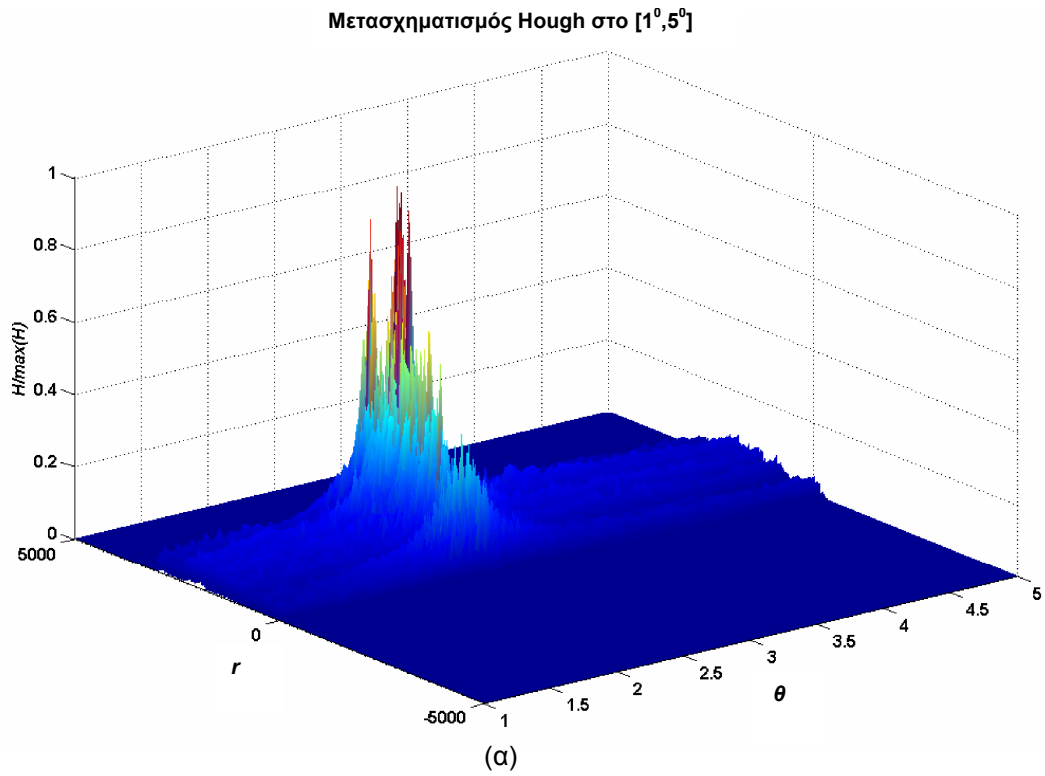
(α)

Τυπική απόκλιση στο $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$



(β)

Σχήμα 6.7: (α) Μετασχηματισμός Hough, $\theta \in [-10^{\circ}, 10^{\circ}]$, $\Delta\theta=1^{\circ}$, (β) Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης στο ίδιο διάστημα.



Σχήμα 6.8: (α) Μετασχηματισμός Hough, $\theta \in [1^{\circ}, 5^{\circ}]$, $\Delta\theta=0.05^{\circ}$, (β) Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης στο ίδιο διάστημα.

Συμπερασματικά, από τις εκτελέσεις της παραπάνω διαδικασίας στη βάση που δημιουργήθηκε από εικόνες ΟΦ οι οποίες περιέχονται στο Παράρτημα Β.2, προκύπτει ότι η μέθοδος απέδωσε τη σωστή γωνία εκτροπής σε όλες τις περιπτώσεις με σφάλμα το οποίο σε καμία περίπτωση δεν ξεπέρασε το σφάλμα δειγματοληψίας. Τέλος, η γωνία εκτροπής του ΟΠΕ, που υπολογίστηκε με βάση την περιγραφείσα μεθοδολογία, διορθώνεται με χρήση ενός κλασσικού μετασχηματισμού εκτροπής [108,127].

Σημειώνεται επίσης ότι, η μέθοδος μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια, με τη χρήση ιδιαίτερων τεχνικών κβάντισης του χώρου Hough [119-126] και διατήρηση της ιεραρχικής διαδικασίας για τη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Παρόλα αυτά, για τις συγκεκριμένες εφαρμογές η μεγαλύτερη ακρίβεια δεν συνεισφέρει στην ακριβέστερη διόρθωση της γωνίας εκτροπής καθότι για τις διαστάσεις των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν καλύπτεται από το σφάλμα δειγματοληψίας της εικόνας.

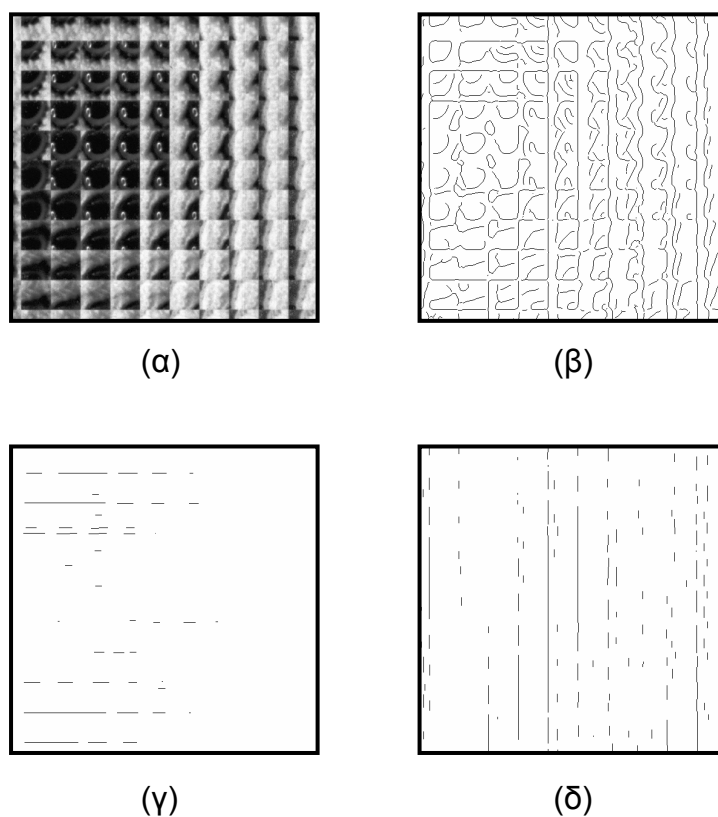
6.5 Προσδιορισμός Θέσης Ευθειών Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας θα επαναληφθεί ένα στάδιο προεπεξεργασίας που θα αφορά τη διορθωμένη ως προς τη γωνία εκτροπής εικόνα ΟΦ, την ανίχνευση των ευθειών που συνιστούν το ΟΠΕ και τη μοντελοποίηση τους. Τέλος θα πραγματοποιηθεί ταυτοποίηση του ΟΠΕ που ανιχνεύθηκε σε σχέση με το μοντέλο που προτείνεται και θα επιλεγεί η βέλτιστη λύση που θα προσεγγίζει το αρχικό ΟΠΕ με το ελάχιστο σφάλμα.

6.5.1 Προεπεξεργασία Διορθωμένης Εικόνας και Ανίχνευση Ευθειών

Για τον υπολογισμό της θέσης των ευθειών του ΟΠΕ στη διορθωμένη εικόνα, επαναλαμβάνεται το στάδιο ανίχνευσης ακμών με υψηλότερα κατώφλια, ώστε να διατηρηθούν μόνο οι ιδιαίτερα ισχυρές ακμές και εν συνεχεία εφαρμόζονται δύο φίλτρα ενδιαμέσου τιμής κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Δεδομένης της διόρθωσης της γωνίας εκτροπής που παρουσιάζει το ΟΠΕ, οι πλεγματικές ευθείες θα έχουν ευθυγραμμιστεί με την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση με την πιθανότητα ενός μικρού σφάλματος το οποίο πάντως δεν μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εικόνας. Για την τόνωση και ανάδειξη των γραμμών του πλέγματος στη διορθωμένη εικόνα εφαρμόζονται δύο 1Δ φίλτρα ενδιαμέσου τιμής με μεγαλύτερο παράθυρο, τα οποία ελαχιστοποιούν το θόρυβο και τις ευθείες που διατρέχουν την εικόνα προς άλλες κατευθύνσεις. Κάθε ένα από τα φίλτρα εφαρμόζεται στην διορθωμένη για τη γωνία

εκτροπής εικόνα παράγοντας έτσι δύο εικόνες, εκ των οποίων μία περιέχει τις οριζόντιες και μία τις κατακόρυφες ευθείες του ΟΠΕ. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 6.9 (α)-(δ). Τέλος για κάθε μία από τις παραπάνω εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή των φίλτρων υπολογίζεται αντίστοιχα η κατακόρυφη και οριζόντια προβολή των εικονοστοιχείων [128].

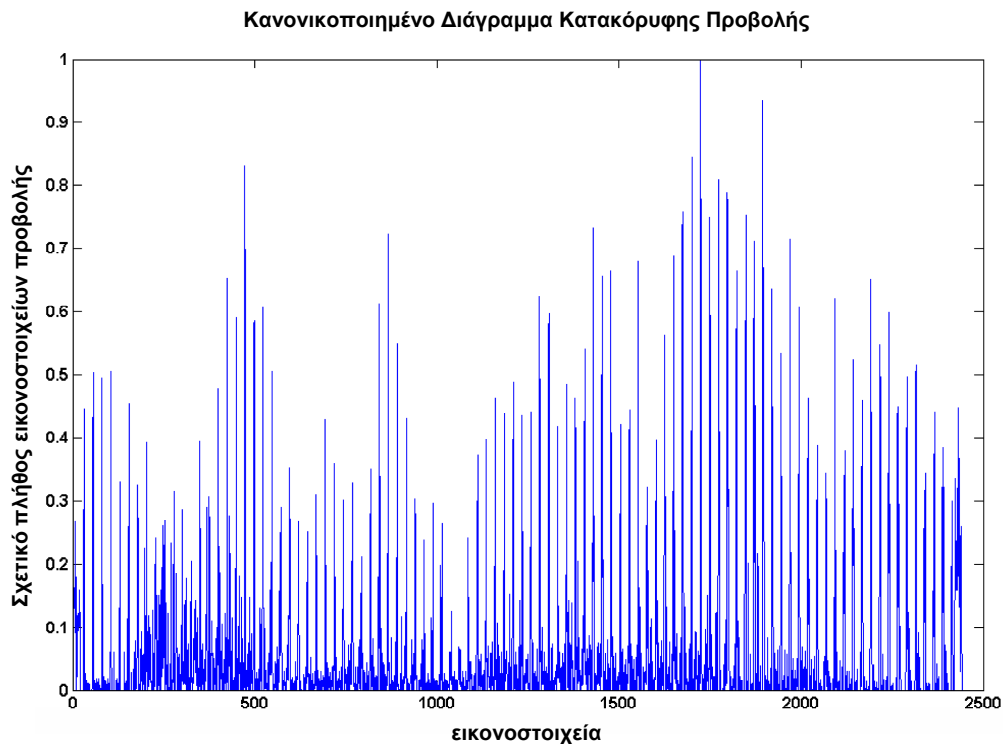


Σχήμα 6.9: (α) Διορθωμένη για τη γωνία εκτροπής εικόνα ΟΦ, (β) Ανίχνευση ακμών με τον αλγόριθμο Canny, (γ) Εφαρμογή κατακόρυφου και (δ) Εφαρμογή οριζόντιου 1Δ φίλτρου ενδιάμεσης τιμής.

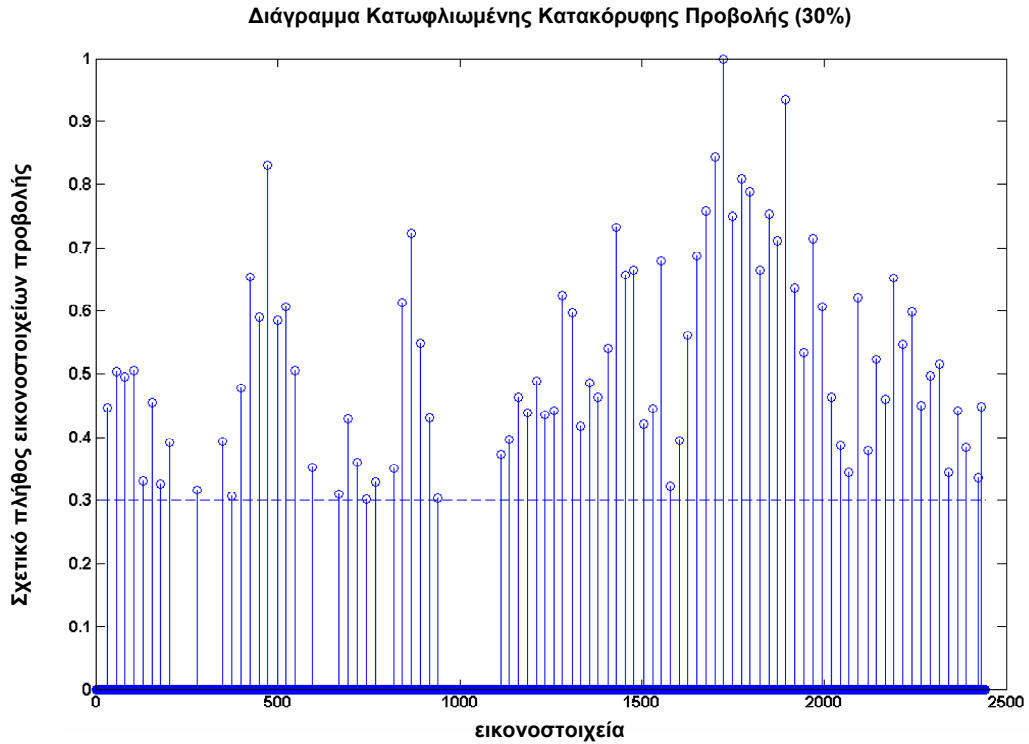
Η κατακόρυφη προβολή που αντιστοιχεί στην εικόνα 5.3 (δ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.10. Στο σχήμα απεικονίζονται ισχυρές κορυφές οι οποίες αντιστοιχούν σε ισχυρές ευθείες που διατρέχουν την εικόνα με γειτονικές μικρές κορυφές που οφείλονται σε σφάλματα κβάντισης της εικόνας και θόρυβος που κατά κύριο λόγο οφείλεται σε τμήματα ευθειών προσανατολισμένα κατά τη διεύθυνση του φίλτρου ενδιάμεσης τιμής. Για την ανίχνευση των πιο δυνατών ακμών οι οποίες αντιστοιχούν σε ευθείες του ΟΠΕ κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση προσδιορίζεται αρχικά η πιο δυνατή κορυφή και καταγράφεται η θέση της. Στη συνέχεια μηδενίζονται οι γειτονικές κορυφές σε μία

γειτονιά γύρω από την προηγούμενη κορυφή που αντιστοιχεί σε ένα διάστημα στο οποίο δεν αναμένονται άλλες κορυφές.

Η επιλογή του διαστήματος μπορεί να γίνει με βάση ένα ελάχιστο κατώφλι για το μέγεθος της κάθε διάστασης μιας ΣΕ. Δεδομένου ότι τα συστήματα ΟΦ απαιτούν ικανή ανάλυση για κάθε ΣΕ, το κατώφλι ορίστηκε ως $\delta_p=5$ εικονοστοιχεία εκατέρωθεν κάθε κορυφής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ανιχνευθούν $N/2 \cdot \delta_p$ κορυφές ή το μέγεθος των κορυφών γίνει μικρότερο από το 30% του μεγέθους της μέγιστης κορυφής. Με βάση την τελευταία συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου αποκλείονται κορυφές οι οποίες βρίσκονται στα επίπεδα θορύβου. Η παραπάνω διαδικασία επιλογής κορυφών που ανήκουν σε ευθείες του ΟΠΕ μπορεί να απομονώσει ένα μεγάλο πλήθος ορθά ανιχνευμένων ευθειών όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.10: Κανονικοποιημένο διάγραμμα κατακόρυφης προβολής των εικονοστοιχείων της εικόνας 5.3 (δ).



Σχήμα 6.11: Κατωφλιωμένο (30%) και κανονικοποιημένο διάγραμμα κατακόρυφης προβολής των εικονοστοιχείων της εικόνας 5.3 (δ).

6.5.2 Μοντελοποίηση του Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών

Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας προσδιορίστηκαν δύο ομάδες πιθανών θέσεων για τις ευθείες που αποτελούν το ΟΠΕ. Τις θέσεις αυτές θα τις συμβολίσουμε ως δύο ακολουθίες $\{\varepsilon_o\} = \langle \varepsilon_{o0}, \varepsilon_{o1}, \dots, \varepsilon_{oN-1} \rangle$ και $\{\varepsilon_k\} = \langle \varepsilon_{k0}, \varepsilon_{k1}, \dots, \varepsilon_{kM-1} \rangle$ για τις οριζόντιες και κατακόρυφες ευθείες του ΟΠΕ αντίστοιχα.

Ακολούθως, προτείνουμε ένα θεωρητικό μοντέλο για την πρόβλεψη των θέσεων των ευθειών σε ένα ΟΠΕ μια εικόνας ΟΦ. Αν θεωρήσουμε ότι το μέγεθος του κάθε φακού της ΣΣΦ είναι σε κάθε διάσταση ρ_φ και το μέγεθος του κάθε εικονοστοιχείου είναι ρ_ε , τότε οι θέσεις των ευθειών σε μία διάσταση του πλέγματος μπορούν να προσδιοριστούν από την Εξίσωση 6.9.

$$\varepsilon_j = \left\lfloor \frac{\rho_o + j \cdot \rho_\varphi}{\rho_\varepsilon} \right\rfloor \quad (6.9)$$

Στην τελευταία εξίσωση η ποσότητα ρ_o εκφράζει την απόσταση της πρώτης κατακόρυφης ευθείας του ΟΠΕ από το αριστερό όριο της διορθωμένης για τη γωνία

εκτροπής εικόνας ΟΦ και ισχύει ότι $\rho_0 < \rho_\varphi$ και $j \in \mathbb{Z}_+$. Η απόσταση αυτή οφείλεται στην αποκοπή εικονοστοιχείων από τα όρια της εικόνας ΟΦ λόγω της περιστροφής και λόγω της πιθανότητας ύπαρξης αποκομμένων στοιχειωδών φακών στα όρια της ΣΣΦ. Στη γενική περίπτωση η ποσότητα αυτή θα δίνεται από τη Εξίσωση 6.10, στην οποία $f_0 \in [0, \rho_\varepsilon)$ και $k \in \mathbb{Z}_+^*$.

$$\rho_0 = k \cdot \rho_\varepsilon + f_0 \quad (6.10)$$

Εκφράζοντας επίσης και το μέγεθος του στοιχειώδους φακού σε σχέση με το μέγεθος του εικονοστοιχείου του αισθητήρα προκύπτει τελικά ότι

$$\rho_\varphi = n \cdot \rho_\varepsilon + f_\varphi \quad (6.11)$$

όπου $f_\varphi \in [0, \rho_\varepsilon)$, $n \in \mathbb{Z}_+$ και ισχύει πάντα $k < n$. Αντικαθιστώντας τις 6.10-6.11 στην 6.9 προκύπτει τελικά ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να γραφεί στη ακόλουθη μορφή:

$$\varepsilon_j = k + j \cdot n + \left\lfloor \frac{f_0 + j \cdot f_\varphi}{\rho_\varepsilon} \right\rfloor \quad (6.12)$$

Αν επιπλέον θεωρήσουμε ότι η ποσότητα $f_\varphi / \rho_\varepsilon$ μπορεί να γραφεί ως ρητός q/r για τον οποίο προφανώς ισχύει $q/r < 1$ και ΜΚΔ(q,r)=1 και ότι η ποσότητα f_0 / ρ_ε μπορεί να γραφεί ως $\lambda/r + e_0$ με $\lambda \in [0, r-1]$ και $e_0 \in [0, 1/r)$ τότε προκύπτει ότι η Εξίσωση 6.12 μπορεί να γραφεί ως

$$\varepsilon_j = k + j \cdot n + \left\lfloor \frac{\lambda}{r} + e_0 + j \frac{q}{r} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{\lambda}{r} + j \cdot \frac{q}{r} \right\rfloor \quad (6.13)$$

Θεωρώντας το παραπάνω μοντέλο για τις θέσεις των ευθειών στην κάθε διάσταση του ΟΠΕ προκύπτει άμεσα ότι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ευθειών θα δίνεται από την Εξίσωση 6.14.

$$d_j = \varepsilon_{j+1} - \varepsilon_j = \left\lfloor \frac{\lambda}{r} + (j+1) \cdot \frac{q}{r} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{\lambda}{r} + j \cdot \frac{q}{r} \right\rfloor \quad (6.14)$$

Από την τελευταία είναι επίσης εύκολο ναδειχτεί ότι η αναμενόμενη τιμή για την απόσταση μεταξύ δύο ευθειών θα δίνεται από τη Εξίσωση 6.15.

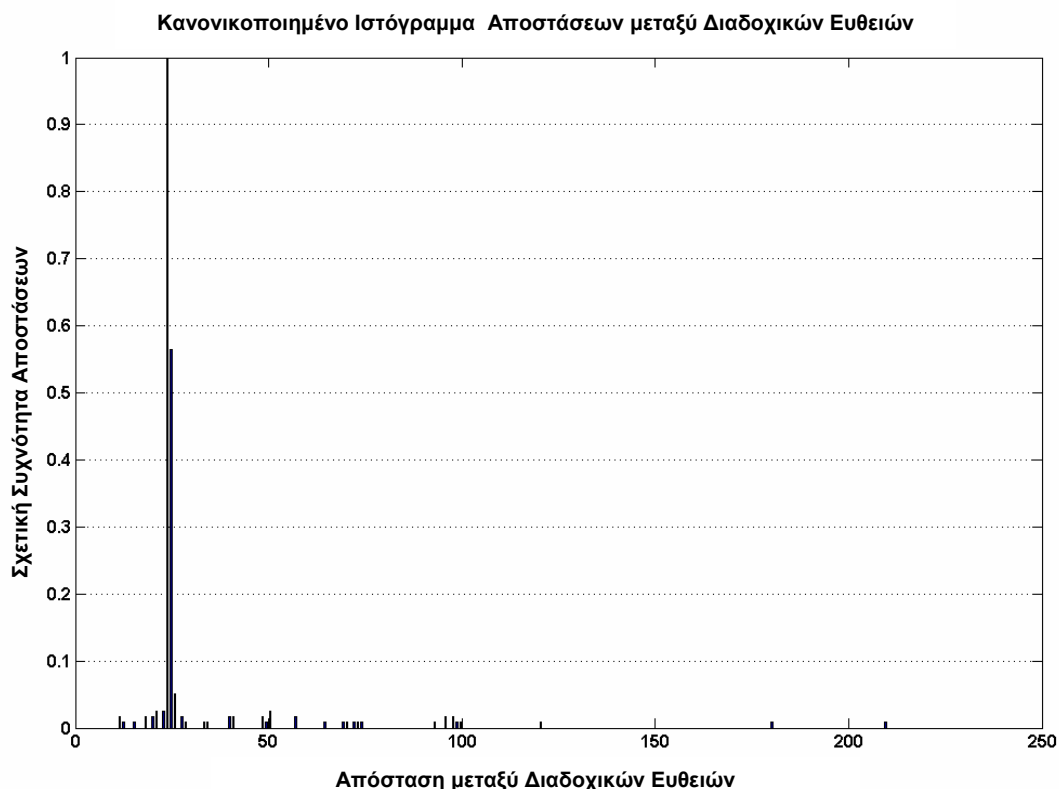
$$m = E[d] = n + \frac{q}{r} \quad (6.15)$$

6.5.3 Ταυτοποίηση του Ορθογώνιου Πλέγματος Ευθειών

Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε προβλέπει (Εξίσωση 6.14) ότι το αντίστοιχο ιστόγραμμα των αποστάσεων των ευθειών που προκύπτει από τα κατωφλιωμένα διαγράμματα προβολής θα έπρεπε να περιέχει το πολύ δύο διαδοχικές κλάσεις, στην πραγματικότητα παρατηρείται ένας αρκετά μεγαλύτερος αριθμός διεσπαρμένων κλάσεων. Η διασπορά των κλάσεων οφείλεται στα σφάλματα κατά τη διαδικασία ανίχνευσης των ευθειών. Κατά την παραπάνω διαδικασία έχουν απαλειφθεί ασθενείς ευθείες που ανήκουν στο ΟΠΕ και προέρχονται από περιοχές ιδιαίτερα χαμηλής φωτεινότητας στις οποίες δεν απέδωσε η τεχνική τόνωσης της αντίθεσης, αλλά επίσης έχουν εισαχθεί και ευθείες οι οποίες δεν ανήκουν στο ΟΠΕ και οφείλονται κυρίως σε ευθυγραμμισμένες ομάδες σημείων κατά τη διεύθυνση προβολής τα οποία παρέμειναν μετά τη διαδικασία εφαρμογής των φίλτρων. Εντούτοις, το ιστόγραμμα περιέχει πάντα μία ή δύο γειτονικές επικρατούσες κλάσεις που αντιστοιχούν στην πλειονότητα των υπολογισθέντων αποστάσεων μεταξύ δύο διαδοχικών ευθειών. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι ορθή για όλα τα ιστογράμματα που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών και ισχύει για όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός από σωστά αναγνωρισμένες ευθείες του ΟΠΕ. Για τη δημιουργία του ιστογράμματος των αποστάσεων μεταξύ των ευθειών συνδυάζονται οι παρατηρήσεις που προέρχονται για τις αποστάσεις των ευθειών του ΟΠΕ και στις δύο διευθύνσεις ώστε να αυξηθεί το στατιστικό δείγμα ακόμη και στις περιπτώσεις όπου το μέγεθος των ΣΕ είναι μεγάλο και άρα περιέχεται μικρός αριθμός ΣΕ σε μία εικόνα ΟΦ. Το ιστόγραμμα των αποστάσεων μεταξύ των ευθειών του ΟΠΕ για την Εικόνα 5.3 (δ) απεικονίζεται στο Σχήμα 6.12.

Από το συγκεκριμένο ιστόγραμμα μπορεί να υπολογιστεί άμεσα ένα διάστημα εμπιστοσύνης για την αναμενόμενη τιμή της απόστασης μεταξύ διαδοχικών ευθειών. Για την αξιολόγηση των ιστογραμμάτων που προκύπτουν θεωρούμε ότι ένα ιστόγραμμα έχει μία επικρατούσα κλάση όταν αυτή περιέχει πάνω από το 90% των τιμών, αλλιώς θεωρούμε την επικρατούσα κλάση και την αμέσως μικρότερη η οποία βρίσκεται σε γειτονία με αυτή.

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση όπου παρατηρείται μία κλάση d_π στο ιστόγραμμα τότε το διάστημα εμπιστοσύνης για την αναμενόμενη τιμή είναι της μορφής $\hat{m} \in [d_\pi - 1/2, d_\pi + 1/2]$. Εναλλακτικά, στην περίπτωση που επιλεγούν δύο κλάσεις έστω οι d_π και $d_{\pi+1}$ το αντίστοιχο διάστημα εκφράζεται ως $\hat{m} \in [d_\pi, d_{\pi+1}]$. Με βάση τους παραπάνω συλλογισμούς και περικλείοντας και τα άκρα δειγματοληπτούμε το διάστημα που προσδιορίστηκε με την παραπάνω λογική ώστε να προκύψει ένα πλήθος τιμών για την αναμενόμενη τιμή της απόστασης.



Σχήμα 6.12: Κανονικοποιημένο ιστόγραμμα αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών ευθειών.

Για κάθε ένα από τα σημεία δειγματοληψίας m_i με $i=1,2,\dots,L$, είναι δυνατό να εκτιμηθούν οι τιμές για τα $n, q/r$ με βάση τις Εξισώσεις 6.16 και 6.17.

$$n_i = \lfloor m_i \rfloor \quad (6.16)$$

$$\left(\frac{q}{r}\right)_i = m_i - \lfloor m_i \rfloor \quad (6.17)$$

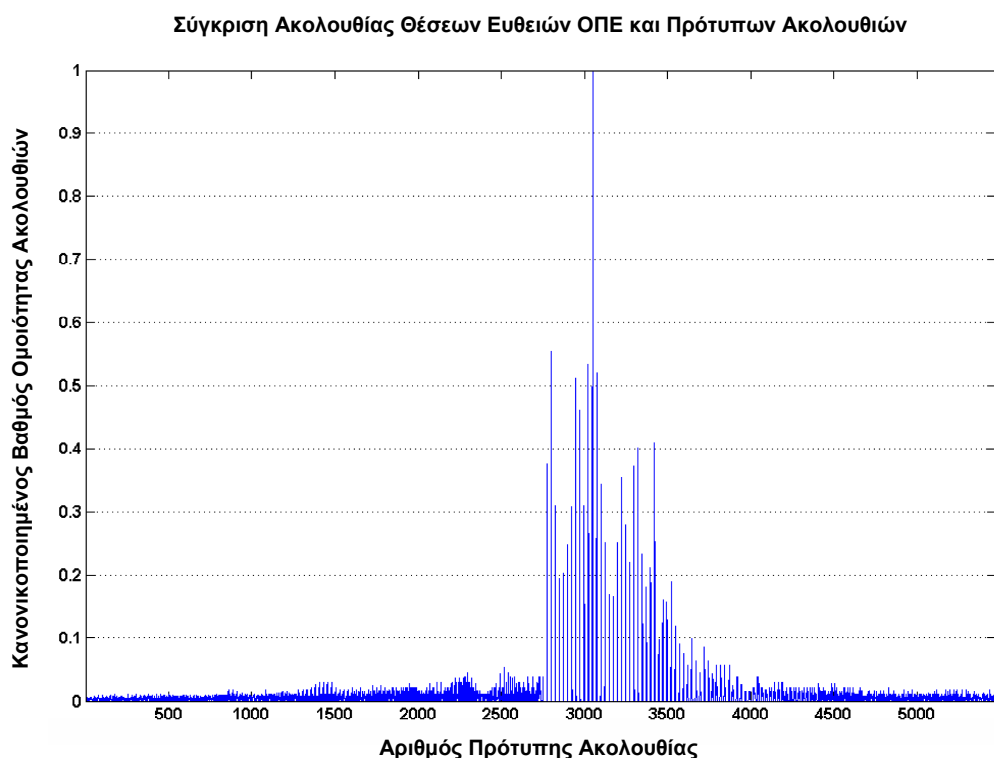
Με βάση τις τιμές που προσδιορίστηκαν, και μεταβάλλοντας τα λ, k μέσα στα πεδία τιμών που ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι δυνατό να κατασκευαστεί ένα πλήθος πρότυπων ακολουθιών $\{\epsilon\}$. Οι προσδιορισθείσες ακολουθίες θέσεων των ευθειών που προσδιορίστηκαν με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παρούσα παράγραφο, για την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση του ΟΠΕ, $\{\epsilon_o\}$ και $\{\epsilon_k\}$ αντίστοιχα, συγκρίνονται με τις πρότυπες ακολουθίες που υπολογίστηκαν. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει μία βέλτιστη ακολουθία για κάθε κατεύθυνση η οποία εξασφαλίζει το ελάχιστο σφάλμα σε σχέση με το μοντέλο. Η ταυτοποίηση των ακολουθιών $\{\epsilon_o\}$ και $\{\epsilon_k\}$, με ακολουθίες από το σύνολο $\{\epsilon\}$, τις οποίες αποκαλούμε βέλτιστες ακολουθίες ΟΠΕ και θα τις συμβολίζουμε ως $\{\epsilon_o\}_\beta$ και $\{\epsilon_k\}_\beta$ αποτελεί μία διαδικασία εκτίμησης του μεγίστου μίας συνάρτησης που χαρακτηρίζει την ομοιότητα δύο ακολουθιών. Για τη μείωση της πολυπλοκότητας στην παρούσα διατριβή θεωρήθηκαν δώδεκα δείγματα για την αναμενόμενη τιμή, δηλαδή $L=12$, τα οποία παρέχουν ακρίβεια $\Delta_m = 0.1$ εικονοστοιχεία. Η ακρίβεια της μεθόδου μπορεί να αυξηθεί μεγαλώνοντας το πλήθος των δειγμάτων με κόστος την αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, καθότι αυξάνει ραγδαία το πλήθος των πρότυπων ακολουθιών $\{\epsilon\}$ που θα δημιουργηθεί.

Για την εύρεση της βέλτιστης ακολουθίας ενός συνόλου προτύπων ακολουθιών κατά τη διαδικασία ταυτοποίησης της ανιχνευθείσας ακολουθίας θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής ο αλγόριθμος Smith-Waterman [129]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, όπως επίσης και παραλλαγές του, χρησιμοποιείται ευρέως για την ταυτοποίηση ακολουθιών Δεσοξυ-Ριβο-Νουκλεϊκού Οξέος (Desoxy-Ribose-Nucleic Acid - DNA) [130]. Κατά την ταυτοποίηση των ακολουθιών DNA πρέπει να συγκριθούν ακολουθίες που παρουσιάζουν μεγάλα κενά λόγω απουσίας πρωτεϊνικών βάσεων,

όπως επίσης και λόγω μεταλλαγών βάσεων, με ορισμένες πρότυπες και χαρακτηρισμένες ακολουθίες. Αντίστοιχα, στο πρόβλημα ταυτοποίησης των ανιχνευθείσων θέσεων των ευθειών του ΟΠΕ πρέπει να ταυτοποιηθούν ακολουθίες θέσεων οι οποίες παρουσιάζουν κενά λόγω μη ανιχνευμένων ευθειών και μεταλλαγές, δηλαδή ευθείες που έχουν εισέλθει στην ακολουθία θέσεων λόγω μη σωστής αναγνώρισης κατά τα προηγούμενα στάδια του αλγορίθμου. Η πλήρης ανάλυση του αλγορίθμου περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Α.3.

6.6 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου μετά την εφαρμογή του στην εικόνα 5.3 (δ), που αφορούν την ταυτοποίηση των ευθειών της κατακόρυφης διεύθυνσης του ΟΠΕ με το σύνολο των πρότυπων ακολουθιών απεικονίζονται στο Σχήμα 6.13.

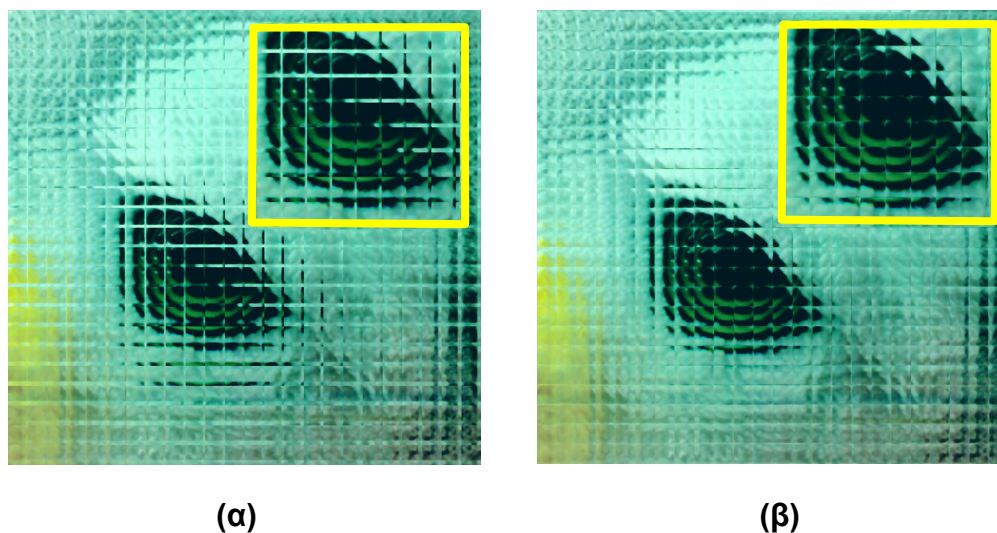


Σχήμα 6.13: Αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ ακολουθίας θέσεων ευθειών ΟΠΕ με ένα σύνολο πρότυπων ακολουθιών.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε ένα πλήθος από υπολογιστικά παραγόμενες εικόνες ΟΦ [79-80] για τις οποίες η γωνία

εκτροπής και το ακριβές μέγεθος των ΣΕ ήταν γνωστό, όπως επίσης και εικόνες πραγματικών αντικειμένων που καταγράφηκαν με την τεχνική που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 5 και περιέχονται στο Παράρτημα Β.2 και για τις οποίες τα παραπάνω χαρακτηριστικά εκτιμήθηκαν με απευθείας παρατήρηση των εικόνων και αξιοποίηση της γνώσης των χαρακτηριστικών του συστήματος .

Ο αλγόριθμος απέδωσε τα σωστά ΟΠΕ σε περισσότερες από το 80% των περιπτώσεων, ενώ ακόμα και στις περιπτώσεις που δεν ανακτήθηκε το σωστό ΟΠΕ κατάφερε να δημιουργήσει ένα σχεδόν βέλτιστο ΟΠΕ το οποίο περιόρισε τη διάδοση του σφάλματος που δημιουργείται από την ύπαρξη μη ακέραιου αριθμού εικονοστοιχείων σε κάθε ΣΕ, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πάντα μία σωστή 3Δ αναπαράσταση του αρχικού αντικειμένου. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτέλεσε τμήμα του συστήματος διόρθωσης της ψευδοσκοπίας δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο σύστημα είναι απαραίτητη η επακριβής γνώση του μεγέθους της κάθε εικόνας. Ένα παράδειγμα από την εφαρμογή του παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14. Στο συγκεκριμένο σχήμα αποτυπώνεται η επίδραση της χρήσης του ακριβούς μεγέθους των ΣΕ στη διόρθωση της ψευδοσκοπίας όπως υπολογίζονται με χρήση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε, σε σχέση με την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η κλασική προσέγγιση όπου όλες οι ΣΕ θεωρούνται ισομεγέθεις.



Σχήμα 6.14: Τμήματα εικόνας ΟΦ με διορθωμένη ψευδοσκοπία. (α) Με χρήση ΣΕ σταθερού μεγέθους και (β) με χρήση ΣΕ μεταβλητού μεγέθους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ

7.1 Εισαγωγή

Η κωδικοποίηση σημάτων αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς της επεξεργασίας σήματος. Η κωδικοποίηση ενός σήματος στοχεύει κυρίως στη μείωση του όγκου των δεδομένων του σήματος, ώστε να καταστεί δυνατή η μετάδοση του μέσω ενός καναλιού, ή η αποθήκευση του σήματος σε κάποιο αποθηκευτικό μέσο. Οι περιορισμένοι πόροι που αφορούν είτε το εύρος μετάδοσης ενός καναλιού είτε τη χωρητικότητα ενός αποθηκευτικού μέσου επιβάλλουν την αποτελεσματική κωδικοποίηση των σημάτων που θα μεταδοθούν ή θα αποθηκευθούν. Για τους λόγους αυτούς έχει αναπτυχθεί ένα πλήθος τεχνικών οι οποίες στοχεύουν στην βέλτιστη κωδικοποίηση των δεδομένων διαφόρων εφαρμογών, ενώ επιπλέον έχουν υλοποιηθεί αλγόριθμοι που πραγματοποιούν την απαιτούμενη κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Όλοι οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται εκμεταλλεύονται τον εγγενή πλεονασμό που εμπεριέχουν οι διάφορες κατηγορίες σημάτων και σε συνδυασμό με απωλεστικές τεχνικές κωδικοποίησης επιτυγχάνουν τη βέλτιστη σχέση μεταξύ ρυθμού μετάδοσης, δηλαδή συνολικού όγκου κωδικοποιημένων δεδομένων και παραμόρφωσης του κωδικοποιημένου σήματος.

Υπό την σκοπιά αυτή, οι εικόνες ΟΦ αποτελούν ένα 2Δ σήμα το οποίο χρησιμοποιείται για 3Δ απεικόνιση. Ωστόσο, δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με τις ίδιες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την περίπτωση των 2Δ εικόνων, δεδομένου ότι αυτές παρουσιάζουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά συσχέτισης μεταξύ των ΣΕ τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα της περαιτέρω μείωσης του όγκου τους, τα οποία δεν μπορούν εκμεταλλευθούν οι κλασσικές μέθοδοι κωδικοποίησης 2Δ εικόνων. Για τους λόγους αυτούς, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός κωδικοποιητών οι οποίοι θα εκμεταλλεύονται τα παραπάνω χαρακτηριστικά για να μειώσουν αποτελεσματικά τον όγκο των δεδομένων των εικόνων ΟΦ. Στο υπόλοιπο της διατριβής αναπτύσσονται οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν και βασίζονται τόσο στην πρόβλεψη της συσχέτισης διαδοχικών εικόνων όσο και στην αξιοποίηση των χαρακτηριστικών των μετασχηματισμών μεγαλύτερης τάξης για την κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ αλλά και άλλων μεθόδων 3Δ απεικόνισης.

Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μία σύνοψη των τεχνικών κωδικοποίησης εικόνας και αναλύει την πρώτη τεχνική που αναπτύχθηκε για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κωδικοποίησης εικόνων ΟΦ. Αρχικά πραγματοποιείται μία μελέτη του είδους και του βαθμού συσχέτισης που περιλαμβάνει μία εικόνα ΟΦ και ακολούθως προτείνεται μία λύση για την αποτελεσματική εκμετάλλευση του πλεονασμού που παρουσιάζουν λόγο της συσχέτισης αυτής.

7.2 Βασικές Αρχές Κωδικοποίησης Δεδομένων

Με τον όρο κωδικοποίηση δεδομένων αναφερόμαστε στη διαδικασία μείωσης του όγκου των δεδομένων που απαιτούνται για την αναπαράσταση μίας συγκεκριμένης ποσότητας πληροφορίας. Επιπρόσθετα, στον όρο κωδικοποίηση περιέχονται και όλες οι απαραίτητες διαδικασίες που απαιτούνται για την προετοιμασία μιας ομάδας δεδομένων για αποθήκευση ή μετάδοση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει ένας σαφής διαχωρισμός μεταξύ των εννοιών δεδομένα και πληροφορία. Στην πράξη η πληροφορία προέρχεται από επεξεργασία των δεδομένων, ενώ διαφορετικό πλήθος δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της ίδιας ποσότητας πληροφορίας. Μία ποσότητα που μπορεί να χαρακτηρίσει την αντιστοιχία μεταξύ του όγκου των δεδομένων και της πληροφορίας που περιέχουν αυτά είναι ο πλεονασμός (Redundancy). Ο πλεονασμός αποτελεί την πιο βασική έννοια της κωδικοποίησης δεδομένων. Επιπλέον, μπορεί εύκολα να ποσοτικοποιηθεί αν θεωρήσουμε τα μεγέθη m_1, m_2 δύο διαφορετικών ομάδων δεδομένων που αναπαριστούν την ίδια ποσότητα πληροφορίας εκ των οποίων η ομάδα m_1 αντιπροσωπεύει τα πρωτογενή δεδομένα και η ομάδα m_2 τα κωδικοποιημένα. Ο σχετικός πλεονασμός των κωδικοποιημένων προς τα πρωτογενή δεδομένα μπορεί να οριστεί ως:

$$R = 1 - \frac{m_2}{m_1} \quad (7.1)$$

όπου η ποσότητα m_2/m_1 αντιπροσωπεύει το λόγο κωδικοποίησης ή λόγο συμπίεσης των δεδομένων. Στην περίπτωση όπου $R = 0$ δεν υπάρχει πλεονασμός μεταξύ των πρωτογενών και κωδικοποιημένων δεδομένων, ενώ στην περίπτωση όπου $R \rightarrow 1$ τα πρωτογενή δεδομένα παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλο πλεονασμό, δηλαδή

παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό συσχέτισης. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να επιτευχθεί μεγάλος βαθμός συμπίεσης. Είναι, επίσης, πιθανό μία διαδικασία κωδικοποίησης να εισάγει επιπλέον δεδομένα σε μία πρωτογενή ομάδα δεδομένων. Στην περίπτωση αυτή ο πλεονασμός λαμβάνει αρνητικές τιμές. Ένας τυπικός λόγος συμπίεσης 10 σημαίνει ότι η ομάδα δεδομένων m_1 , περιέχει δεκαπλάσιο όγκο δεδομένων από την ομάδα m_2 . Τότε $R = 0.9$ το οποίο υποδηλώνει ότι το 90% των δεδομένων ομάδας m_1 είναι πλεοναστικά.

Κατά την κωδικοποίηση της κλασσικής 2D ψηφιακής εικόνας αντιμετωπίζονται τρεις βασικοί τύποι πλεονασμού. Ο πρώτος τύπος πλεονασμού οφείλεται στον υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων. Ο δεύτερος τύπος πλεονασμού ονομάζεται ψυχοοπτικός (Psychovisual) πλεονασμός και προέρχεται από το γεγονός ότι τα πρωτογενή δεδομένα πολλές φορές περιέχουν πληροφορία την οποία δεν αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής. Τρίτον, παρατηρείται και ο πλεονασμός του συστήματος κωδικοποίησης ο οποίος οφείλεται στην αποτυχία ενός συστήματος κωδικοποίησης να αντιστοιχήσει σωστά το μέγεθος των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν κατά την κωδικοποίηση τους σε σχέση με την πιθανότητα παρατήρησης του κάθε συμβόλου. Οι υψηλοί λόγοι συμπίεσης παρουσιάζονται όταν μειωθούν ή εξαλειφθούν ένας ή περισσότεροι από τους τρεις παραπάνω τύπου πλεονασμού. Στην περίπτωση της κωδικοποίησης κινούμενης εικόνας πρέπει να αντιμετωπιστεί ένας επιπλέον τύπος πλεονασμού, που προκύπτει από τον έντονο συσχετισμό μεταξύ των εικονοστοιχείων χρονικά διαδοχικών εικονοπλαισίων, δεδομένου ότι αυτά χαρακτηρίζονται από ένα στατικό τμήμα που αντιστοιχεί σε αντικείμενα του υποβάθρου της σκηνής και μία προσανατολισμένη κίνηση των αντικειμένων που βρίσκονται εγγύτερα στη συσκευή λήψης.

Τέλος, στην περίπτωση της ΟΦ παρατηρείται ένα επιπλέον είδος χωρικού πλεονασμού που προέρχεται από την ισχυρή συσχέτιση που έχουν τα εικονοστοιχεία γειτονικών ΣΕ τα οποία αντιστοιχούν στο ίδιο τμήμα μιας σκηνής. Ο συγκεκριμένος τύπος πλεονασμού παρουσιάζει ιδιαίτερες ομοιότητες με τον πλεονασμό που προκύπτει μεταξύ των χρονικά διαδοχικών εικονοπλαισίων μίας κινούμενης εικόνας. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της κωδικοποίησης χρονικά διαδοχικών εικονοπλαισίων που έχουν ληφθεί με την τεχνική της ΟΦ, δηλαδή αποτελούν μία κινούμενη εικόνα ΟΦ, πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την αποτελεσματική μείωση και των πέντε διαφορετικών τύπων πλεονασμού, ώστε να καταστεί δυνατή η μείωση του ιδιαίτερα μεγάλου όγκου δεδομένων που προκύπτουν από τη διαδικασία καταγραφής.

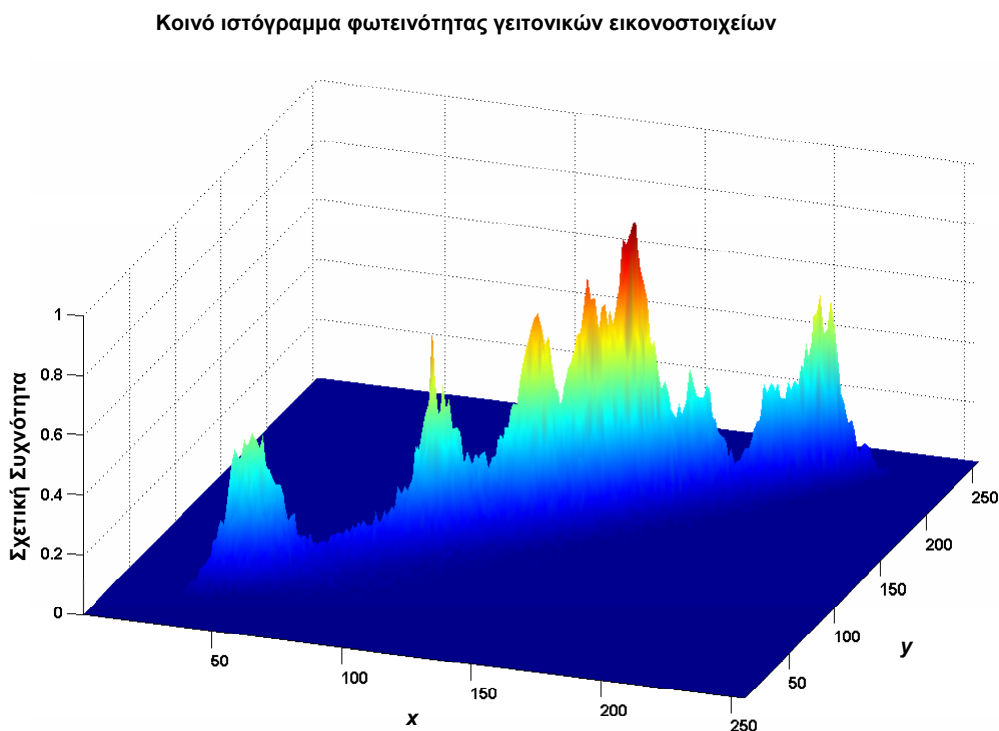
7.2.1 Πλεονασμός μεταξύ Γειτονικών Εικονοστοιχείων

Ο πλεονασμός μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων παρατηρείται σε όλα τα είδη εικόνων και είναι το κυριότερο είδος πλεονασμού που πρέπει να αντιμετωπιστεί για την αποτελεσματική κωδικοποίηση μιας οποιασδήποτε μορφής εικόνας. Ο πλεονασμός επηρεάζεται ιδιαίτερα και από την ανάλυση μιας εικόνας. Πράγματι, όσο μεγαλύτερη η χωρική ανάλυση μιας εικόνας, τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα δύο γειτονικά εικονοστοιχεία να έχουν ίδια ή παραπλήσια τιμή φωτεινότητας.

Για την αναπαράσταση του πλεονασμού μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων μιας εικόνας θεωρούμε μία τυπική ασπρόμαυρη εικόνα με 512 x 512 εικονοστοιχεία η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 7.1. Η συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζει μεγάλο βαθμό λεπτομέρειας, αλλά παρόλα αυτά οι τιμές των γειτονικών εικονοστοιχείων είναι αρκετά όμοιες μεταξύ τους. Στο Σχήμα 7.1 αποτυπώνεται το κοινό ιστόγραμμα της φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου, x σε σχέση με τη φωτεινότητα του πρώτου του γείτονα προς τα δεξιά της εικόνας, y . Στο σχήμα παρατηρείται μία ισχυρή διαγώνια συσχέτιση κατά τη διεύθυνση της ευθείας $y = x$ η οποία υποδηλώνει την ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων x, y . Η παραπάνω παρατήρηση ισχύει προφανώς για κάθε εικονοπλαίσιο μιας κινούμενης εικόνας, και κατ' αναλογία για κάθε ΣΕ μιας εικόνας ΟΦ.



Εικόνα 7.1: Πρότυπη εικόνα, 512 x 512 εικονοστοιχεία, 256 επίπεδα φωτεινότητας.



Σχήμα 7.1: Κοινό ιστόγραμμα φωτεινότητας γειτονικών εικονοστοιχείων.

Για την αφαίρεση του παραπάνω είδους πλεονασμού από μία εικόνα έχει προταθεί πλήθος μεθόδων που στοχεύουν στην αποσύζευξη των τιμών φωτεινότητας μεταξύ των γειτονικών εικονοστοιχείων και αλλαγή των στατιστικών χαρακτηριστικών τους. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η αποτελεσματικότερη αναπαράσταση τους με χρήση λιγότερων δεδομένων και άρα μείωση του πλεονασμού. Από μαθηματική σκοπιά, η παραπάνω διαδικασία αντιστοιχεί στο μετασχηματισμό της εικόνας σε ένα χώρο όπου τα δεδομένα είναι στατιστικά αποσυζευγμένα. Ανάμεσα στο πλήθος μετασχηματισμών που έχουν προταθεί, διακρίνονται ο διακριτός μετασχηματισμός συνημιτόνου (Discrete Cosine Transform – DCT), ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίου (Discrete Wavelet Transform – DWT), όπως επίσης και ο μετασχηματισμός των Walsh-Hadamard (Walsh-Hadamard Transform - WHT) [131].

7.2.2 Πλεονασμός Κινούμενης Εικόνας

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, στην περίπτωση της κινούμενης εικόνας, όσο μεγαλύτερος ο χρονικός ρυθμός εναλλαγής εικονοπλαισίων ή η ταχύτητα εναλλαγής εικονοπλαισίων (Frame Rate), τόσο υψηλότερος θα είναι ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ

Συμβολή στην Ανάλυση και Κωδικοποίηση Συστοιχίας Εικόνων Τρισδιάστατης Απεικόνισης

ΕΙΚΟΝΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ τα οποία βρίσκονται σε αντίστοιχα σημεία μεταξύ ΚΟΝΤΙΝΩΝ ΕΙΚΟΝΟΠΛΑΙΣΙΩΝ.

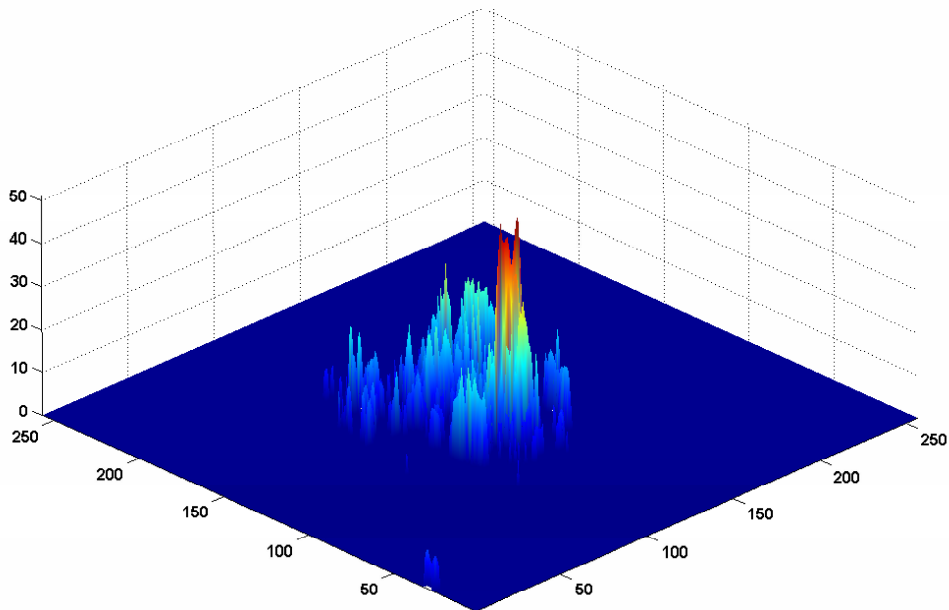


(α)



(β)

Απόλυτη Τιμή της Διαφοράς Φωτεινότητας Διαδοχικών Εικονοπλαισίων



(γ)

Σχήμα 7.2: (α),(β) Διαδοχικά εικονοπλαίσια μιας πρότυπης σειράς κινούμενης εικόνας, (γ) Η απόλυτη τιμή της διαφοράς φωτεινότητας των δύο διαδοχικών εικονοπλαισίων.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, το συγκεκριμένο είδος πλεονασμού οφείλεται στο γεγονός ότι μία σειρά διαδοχικών εικονοπλαισίων μοιράζεται στατικά χαρακτηριστικά, όπως

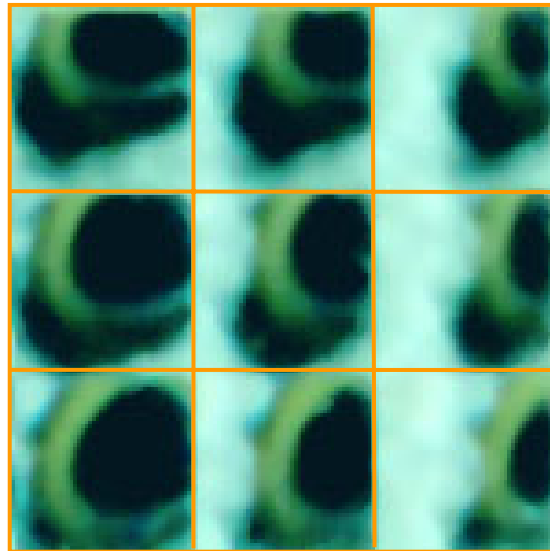
αντικείμενα που κείνται στο υπόβαθρο της σκηνής, όπως επίσης και σε αντικείμενα τα οποία βρίσκονται κοντά στη συσκευή καταγραφής και για τα οποία εκτελούν προσανατολισμένες συνήθως κινήσεις.

Το Σχήμα 7.2 παρουσιάζει μία σειρά από δύο διαδοχικά εικονοπλαίσια μίας πρότυπης σειράς κινούμενης εικόνας, όπως επίσης και τη διαφορά της απόλυτης τιμής των δύο εικονοπλαισίων. Στα εικονοπλαίσια απεικονίζεται μία παρουσιάστρια η οποία εκφωνεί ένα κείμενο μπροστά από ένα ομογενές υπόβαθρο. Η απόλυτη τιμή της διαφοράς των δύο εικονοπλαισίων δείχνει ότι η μόνη περιοχή με έντονες διαφορές είναι η περιοχή του στόματος και ορισμένα σημεία του προσώπου της παρουσιάστριας τα οποία αλλάζουν ελάχιστα θέση μεταξύ των εικονοπλαισίων λόγω κινήσεων έκφρασης. Σημειώνεται, επιπρόσθετα, ότι είναι δυνατό να προβλεφθούν οι κινήσεις αυτές με τεχνικές εκτίμησης της κίνησης μεταξύ εικονοπλαισίων που θα περιγραφούν παρακάτω με τρόπο ώστε να μειωθεί περαιτέρω το συγκεκριμένο είδος πλεονασμού.

7.2.3 Πλεονασμός μεταξύ γειτονικών Στοιχειωδών Εικόνων

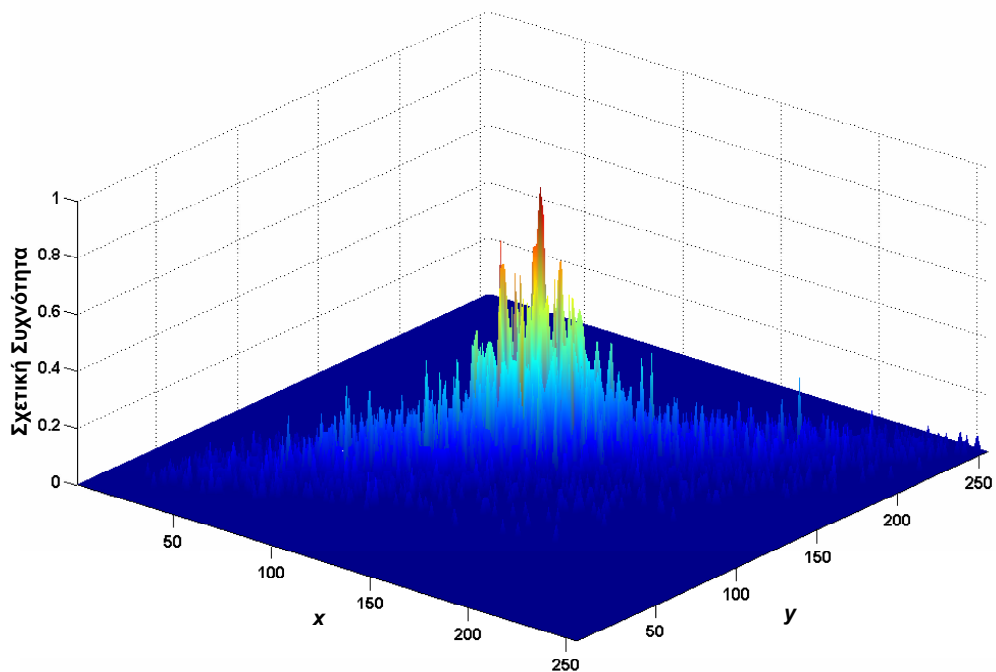
Στην περίπτωση των εικόνων ΟΦ, παρουσιάζεται τόσο πλεονασμός που οφείλεται στη συσχέτιση μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων της ίδιας ΣΕ, όπως είναι εν πολλοίς αναμενόμενο, αλλά επιπρόσθετα παρουσιάζεται και πλεονασμός που οφείλεται στη συσχέτιση μεταξύ εικονοστοιχείων σε γειτονικές ΣΕ. Για τη μελέτη των δύο αυτών ειδών πλεονασμού θεωρούμε μία ομάδα από 3 x 3 ΣΕ από την εικόνα 5.3 (δ), η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 7.3 (α). Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με τα προηγούμενα υπολογίζουμε το κοινό ιστόγραμμα για γειτονικά εικονοστοιχεία της κεντρικής ΣΕ του παραπάνω σχήματος το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 7.3 (β) και υποδεικνύει τον υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ των εικονοστοιχείων κάθε ΣΕ. Ο πλεονασμός που οφείλεται στη συσχέτιση των εικονοστοιχείων γειτονικών ΣΕ χαρακτηρίζεται σαν χωρικός πλεονασμός, σε αντίθεση με τον πλεονασμό μεταξύ διαδοχικών εικονοπλαισίων μιας κινούμενης εικόνας ο οποίος μπορεί να χαρακτηριστεί σαν χρονικός πλεονασμός.

Η κύρια διαφορά του χωρικού πλεονασμού που παρουσιάζουν οι εικόνες ΟΦ που παράχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή από τα εικονοπλαίσια μιας κινούμενης εικόνας είναι η 2Δ φύση του, δηλαδή η υψηλή συσχέτιση η οποία υπάρχει μεταξύ ενός εικονοστοιχείου της κεντρικής εικόνας του Σχήματος 7.3 (α) σε σχέση με τα αντίστοιχα προς αυτό εικονοστοιχεία στους οκτώ γείτονες του στο 2Δ χώρο των ΣΕ.



(α)

Κοινό ιστόγραμμα φωτεινότητας γειτονικών εικονοστοιχείων



(β)

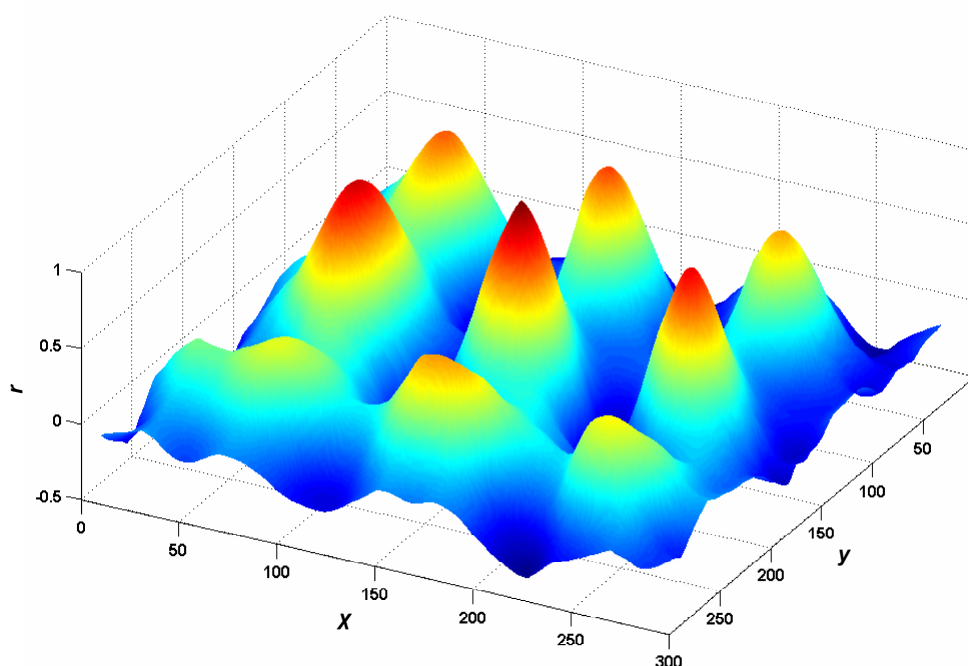
Σχήμα 7.3: (α) Τμήμα εικόνας ΟΦ μεγέθους 3 x 3 ΣΕ, (β) ιστόγραμμα φωτεινότητας γειτονικών εικονοστοιχείων για την κεντρική ΣΕ.

Ποσοτικά, η συσχέτιση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί υπολογίζοντας το συντελεστή συσχέτισης r [103] ενός κεντρικού τμήματος I' της κεντρικής ΣΕ μεγέθους $N \times N$ εικονοστοιχείων με αντίστοιχες περιοχές ίσου μεγέθους των οκτώ πρώτων γειτόνων

της. Για το λόγο αυτό, ολισθαίνουμε ένα αντίγραφο που αντιστοιχεί στην κεντρική περιοχή I' σε όλες τις δυνατές θέσεις της παραπάνω γειτονιάς 3×3 ΣΕ υπολογίζοντας για κάθε ολίσθηση το συντελεστή συσχέτισης r μέσω της Εξίσωσης 7.2

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{\square}(i,j) - \bar{I}_{\square}) \cdot (I'(i,j) - \bar{I}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I_{\square}(i,j) - \bar{I}_{\square})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (I'(i,j) - \bar{I}')^2}} \quad (7.2)$$

Συντελεστής Συσχέτισης Τμήματος Κεντρικής ΣΕ με τους Πρώτους Γείτονες



Σχήμα 7.4: Συντελεστής συσχέτισης κεντρικού τμήματος μιας ΣΕ μιας εικόνας ΟΦ σε σχέση με αντίστοιχα τμήματα των οκτώ πρώτων γειτόνων του.

Στην τελευταία εξίσωση ο συμβολισμός I_{\square} αντιστοιχεί σε μια περιοχή της γειτονιάς ίδιου μεγέθους με την I' , ενώ οι συμβολισμοί $\bar{I}_{\square}, \bar{I}'$ αντιστοιχούν στις μέσες τιμές της φωτεινότητας της κάθε περιοχής. Ο συντελεστής συσχέτισης της κεντρικής περιοχής που επιλέχθηκε στο σύνολο των 3×3 ΣΕ απεικονίζεται στο Σχήμα 7.4. Πρέπει, τέλος, να τονιστεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης παραμένει ισχυρός και στους επόμενους γείτονες της κεντρικής εικόνας. Η έκταση της συσχέτισης εξαρτάται μεταξύ άλλων και

από την απόσταση του αντικειμένου από την ΣΣΦ και μπορεί να διαφέρει έντονα εντός μιας εικόνας ΟΦ.

7.2.4 Ψυχοοπτικός Πλεονασμός

Ο ψυχοοπτικός πλεονασμός προκύπτει από την αδυναμία του ανθρώπινου οπτικού συστήματος να αντιληφθεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά μιας εικόνας. Το συγκεκριμένο είδος πλεονασμού οφείλεται στο γεγονός ότι το οπτικό σύστημα του παρατηρητή δεν ερμηνεύει αποκλειστικά τη φωτεινότητα του κάθε εικονοστοιχείου μιας αναλογικής εικόνας αλλά πραγματοποιεί μία ποιοτική, παρά ποσοτική ερμηνεία της τιμής φωτεινότητας μιας περιοχής εικονοστοιχείων. Η απομάκρυνση του συγκεκριμένου είδους πλεονασμού συνδέεται με την έννοια της κβάντισης, κατά την οποία η απώλεια ποσότητας πληροφορίας από μια εικόνα προκαλεί ελάχιστη ή μηδενική μείωση της ποιότητας της πληροφορίας την οποία αντιλαμβάνεται κάποιος παρατηρητής. Η παραπάνω παρατήρηση αποτέλεσε το έναυσμα για τη χρήση ειδικών κβαντιστών στα διάφορα πρότυπα κωδικοποίησης εικόνας, όπως το JPEG (Joint Pictures Expert Group) [132], οι οποίοι προέκυψαν με βάση ψυχοοπτικά κριτήρια με πραγματικούς παρατηρητές. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε βελτιστοποίηση του απεικονιστικού αποτελέσματος με βάση υποκειμενικά και όχι αντικειμενικά κριτήρια. Αξίζει να σημειωθεί ότι, η συγκεκριμένη τεχνική υλοποίησης κβαντιστών ήταν αυτή που επηρέασε ιδιαίτερα την επιτυχία του συγκεκριμένου προτύπου στον τομέα της κωδικοποίησης 2D εικόνων. Παράλληλα, οφείλουμε να τονίσουμε ότι ανάλογες μελέτες δεν έχουν πραγματοποιηθεί για την ανάπτυξη κβαντιστών που αναφέρονται σε σχήματα κωδικοποίησης 3D εικόνων και ότι ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί από μόνος του ανοιχτό πεδίο έρευνας.

7.2.5 Πλεονασμός Κωδικοποιητή

Η αποτελεσματικότητα ενός κωδικοποιητή εξαρτάται εκτός των άλλων και από την ικανότητα να αντιστοιχεί τα σύμβολα κωδικοποίησης στα σύμβολα της πηγής [133]. Το ιστόγραμμα μιας εικόνας μπορεί να αποκαλύψει ότι κάποια από τα επίπεδα φωτεινότητας μιας εικόνας εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα από ότι άλλα. Αν σε μία ασπρόμαυρη εικόνα η φωτεινότητα κάθε εικονοστοιχείου περιγράφεται από ένα δυαδικό αριθμό οκτώ ψηφίων, τότε άμεσα προκύπτει ότι υπάρχουν 256 επίπεδα φωτεινότητας. Αν το πλήθος των εικονοστοιχείων της εικόνας είναι N^2 τότε η πιθανότητα n_k εικονοστοιχεία να έχουν φωτεινότητα επιπέδου k θα δίνεται από την Εξίσωση 7.3.

$$p_k = \frac{n_k}{N^2}, k = 0, 1, \dots, 255 \quad (7.3)$$

Αν το πλήθος των δυαδικών ψηφίων που απαιτούνται για την περιγραφή της τιμής φωτεινότητας κάθε επιπέδου είναι l_k , τότε το μέσο πλήθος ψηφίων που απαιτούνται για την περιγραφή της φωτεινότητας κάθε εικονοστοιχείου θα δίνεται από τη Εξίσωση 7.4.

$$L = \sum_{k=0}^{255} l_k \cdot p_k \quad (7.4)$$

Η χρήση σταθερού μεγέθους συμβόλων κωδικοποίησης για κάθε σύμβολο της πηγής, αγνοεί τα στατιστικά χαρακτηριστικά της πηγής δίνοντας πάντα $L_{eq} = l_k$. Αν αντί για σταθερού μήκους σύμβολα κωδικοποίησης χρησιμοποιηθούν μεταβλητού μήκους σύμβολα για κάθε σύμβολο της πηγής ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης τους, έτσι ώστε να αντιστοιχούνται μικρότερου μήκους σύμβολα κωδικοποίησης για τα πιθανότερα σύμβολα της πηγής, είναι δυνατό να επιτευχθεί $L = L_{eq}$. Ένας από τους διασημότερους κώδικες που πραγματοποιεί την διαδικασία αντιστοίχισης μεταβλητού μήκους συμβόλων σε ίσου μήκους σύμβολα μιας πηγής βασιζόμενος στα στατιστικά χαρακτηριστικά τους είναι ο κώδικας Huffman [133]. Αναντίρρητα, ιδιαίτερα αποδοτικοί είναι και οι κώδικες που ανήκουν στη κατηγορία των καθολικών αλγορίθμων κωδικοποίησης πηγής, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι από τη στατιστική της πηγής, όπως ο αλγόριθμος κωδικοποίησης των Lempel-Ziv-Welch (LZW) [103], ο οποίος αντιστοιχεί σταθερού μήκους σύμβολα κωδικοποίησης σε μεταβλητού μεγέθους σύμβολα μιας πηγής.

7.3 Πρότυπα Κωδικοποίησης Στατικής και Κινούμενης Εικόνας

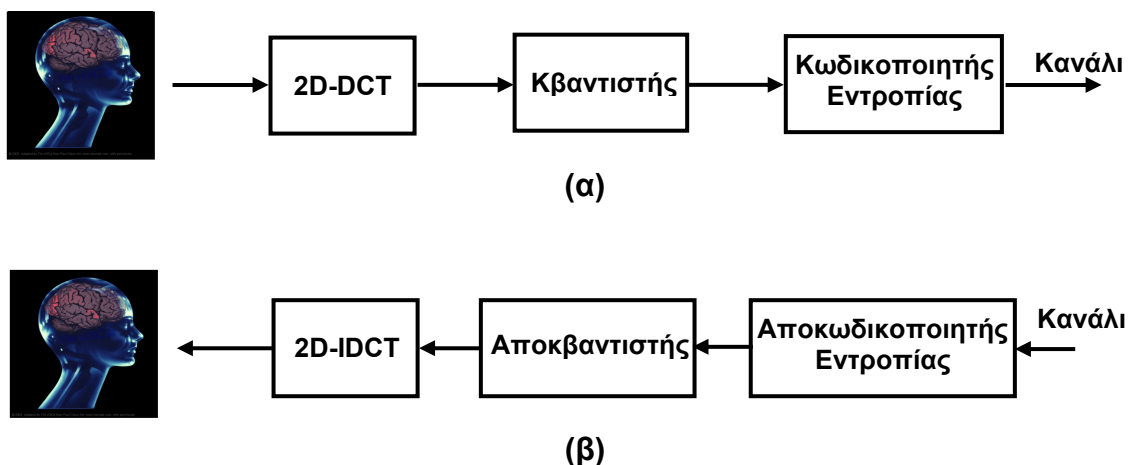
Τα πιο αποτελεσματικά πρότυπα κωδικοποίησης ενσωματώνουν μια από τις τεχνικές μετασχηματισμών που προαναφέρθηκαν, για να επιτύχουν μείωση του πλεονασμού, λόγω της συσχέτισης μεταξύ γειτονικών εικονοστοιχείων, ένα στάδιο κβάντισης των συντελεστών του μετασχηματισμού, ώστε να απομακρύνουν τον ψυχοοπτικό πλεονασμό, και τέλος ένα στάδιο αποτελεσματικής κωδικοποίησης, ώστε να περιορίσουν στο ελάχιστο τον πλεονασμό λόγω της κωδικοποίησης. Εκτός από τα παραπάνω, ένα σχήμα κωδικοποίησης κινούμενης εικόνας περιλαμβάνει και μία τεχνική

εκτίμησης της κίνησης των αντικειμένων της σκηνής που λαμβάνει χώρα μεταξύ διαδοχικών πλαισίων, ώστε να δημιουργήσει εκτιμήσεις πλαισίων από ήδη κωδικοποιημένα πλαίσια και κωδικοποιώντας της διαφορά τους να μειώσει τον πλεονασμό κινούμενης εικόνας. Παρουσιάζουμε ακολούθως, δύο από τα πιο αποτελεσματικά πρότυπα για την κωδικοποίηση 2Δ στατικών και κινούμενων εικόνων, των οποίων διάφορα τμήματα θα χρησιμοποιηθούν στη ανάπτυξη του κωδικοποιητή εικόνων ΟΦ.

7.3.1 Πρότυπο Κωδικοποίησης Στατικών Δισδιάστατων Εικόνων

Ένα από τα πρότυπα απωλεστικής κωδικοποίησης το οποίο επιτυγχάνει εξαιρετικά χαρακτηριστικά βαθμού κωδικοποίησης σε σχέση με την παραμόρφωση που εισάγει είναι το JPEG. Το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται στο 2Δ DCT (2D-DCT) για το στάδιο του μετασχηματισμού, ειδικά σχεδιασμένους πίνακες κβάντισης με βάση ψυχοοπτικά κριτήρια και ένα κωδικοποιητή εντροπίας που έχει αναπτυχθεί με βάση τον αλγόριθμο Huffman. Το αναλυτικό διάγραμμα του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή απεικονίζεται στο Σχήμα 7.5.

Ο αποκωδικοποιητής αποτελείται από μία βαθμίδα αντιστροφής της τελικής κωδικοποίησης, έναν αποκβαντιστή, ο οποίος αποκαθιστά το αρχικό πλάτος των συντελεστών και μία μονάδα που πραγματοποιεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό (2D-IDCT) ώστε να παραχθεί στην έξοδο η αρχική εικόνα.



Σχήμα 7.5: Σχηματικό διάγραμμα (α) κωδικοποιητή και (β) αποκωδικοποιητή JPEG.

Ειδικότερα, η μονάδα 2D-DCT του κωδικοποιητή υλοποιεί το μετασχηματισμό με βάση την Εξίσωση 7.5. Στην εξίσωση αυτή όπου $f(i,j)$ η τιμή φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου στη θέση i,j και $F(u,v)$ η τιμή του συντελεστή του μετασχηματισμού στη θέση u,v . Σημειώνεται επίσης ότι η συνιστώσα $F(0,0)$ του μετασχηματισμού εκφράζει τη συνεχή συνιστώσα (Direct Current - DC).

$$F(u,v) = K_{u,L} \cdot K_{v,M} \cdot \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{M-1} f(i,j) \cdot C_{i,u,L} \cdot C_{j,v,M} \quad (7.5)$$

όπου $0 \leq u \leq L-1$ και $0 \leq v \leq M-1$. Οι συναρτήσεις συνημιτόνων βάσης ορίζονται από την Εξίσωση 7.6 ενώ οι παράγοντες κανονικοποίησης από την Εξίσωση 7.7.

$$C_{\alpha,\beta,\gamma} = \cos \frac{\pi \cdot (2 \cdot \alpha + 1) \cdot \beta}{2 \cdot \gamma} \quad (7.6)$$

$$K_{\alpha,\delta} = \left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\frac{1}{\delta}} \quad \text{αν } \alpha = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{\delta}} \quad \text{αν } 1 \leq \alpha \leq \delta - 1 \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

Η παραπάνω μορφή του μετασχηματισμού αποκαλείται μορφή II [131] και διαθέτει επιπλέον την ιδιότητα της ορθογωνιότητας, δηλαδή ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι ο ίδιος ο μετασχηματισμός. Με βάση την παραπάνω ιδιότητα ο 2D αντίστροφος μετασχηματισμός DCT (2D Inverse DCT – 2D IDCT) μπορεί να γραφεί στη μορφή της Εξίσωσης 7.8.

$$f(i,j) = \sum_{u=0}^{L-1} \sum_{v=0}^{M-1} K_{u,L} \cdot K_{v,M} \cdot F(u,v) \cdot C_{i,u,L} \cdot C_{j,v,M} \quad (7.8)$$

όπου ισχύει ότι $1 \leq i \leq L-1$ και $1 \leq j \leq M-1$ και οι συναρτήσεις βάσης και κανονικοποίησης δίνονται από τις εξισώσεις 7.6 και 7.7. Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι ο συγκεκριμένος

μετασχηματισμός είναι διαχωρίσιμος, δηλαδή μπορεί να εφαρμοστεί σαν επαλληλία δύο μονοδιάστατων μετασχηματισμών.

Ο κβαντιστής που περιλαμβάνει το πρότυπο, περιγράφει μία διαδικασία κατά την οποία μία ομάδα δεδομένων του μετασχηματισμού, που ισούται με το παράθυρο του μετασχηματισμού κβαντίζεται ώστε να αφαιρεθεί ο ψυχοοπτικός πλεονασμός. Τη διαδικασία αυτή αποτυπώνει η Εξίσωση 7.9.

$$\hat{F}(u,v) = \text{round} \left[\frac{F(u,v)}{Q(u,v)} \right] \quad (7.9)$$

Στην τελευταία εξίσωση, η συνάρτηση $\text{round}(\cdot)$ δηλώνει τη στρογγυλοποίηση προς τον κοντινότερο ακέραιο, ενώ \mathbf{Q} είναι ένας πίνακας κβάντισης ο οποίος περιέχει τις τιμές κβάντισης για τον αντίστοιχο πίνακα των τιμών του μετασχηματισμού \mathbf{F} . Η συνηθέστερη διάσταση για το παράθυρο εφαρμογής του μετασχηματισμού που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ανασύστασης σε σχέση με την υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι 8×8 εικονοστοιχεία, τα οποία μετασχηματίζονται σε ένα πίνακα 8×8 συντελεστών. Αντιστοίχου μεγέθους πίνακες κβάντισης μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας συναρτήσεις ομοιόμορφης ή ανομοιόμορφης κβάντισης των συντελεστών με στόχο την επίτευξη μιας βέλτιστης ανταλλαγής ρυθμού – παραμόρφωσης [134]. Οι ειδικοί ψυχοοπτικοί κβαντιστές οι οποίοι αναπτύχθηκαν για το πρότυπο JPEG δίνουν βέλτιστα αποτελέσματα εκμεταλλευόμενοι τον ψυχοοπτικό πλεονασμό μιας εικόνας στο πεδίο του μετασχηματισμού. Για το μέγεθος του μετασχηματισμού που αναφέρθηκε στα προηγούμενα, ο πίνακας κβάντισης του προτύπου δίνεται από την Εξίσωση 7.10.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

$$D_i = DC_i - DC_{i-1}, i = 1, \dots, \left(\frac{N}{k}\right)^2 \quad (7.11)$$

Στην τελευταία εξίσωση έχει θεωρηθεί μία εικόνα μεγέθους $N \times N$ εικονοστοιχείων και ένα παράθυρο μετασχηματισμού ίσο με $k \times k$. Επιπρόσθετα, για τους υπολογισμούς ορίζεται $DC_0 = 0$ και μετά τον υπολογισμό το διάνυσμα που προκύπτει κωδικοποιείται με χρήση του αλγορίθμου Huffman μέσω ειδικών πινάκων κωδικοποίησης για τους DC συντελεστές.

7.3.2 Πρότυπο Κωδικοποίησης Κινούμενης Εικόνας

Κατά τη μελέτη του πλεονασμού μεταξύ των γειτονικών ΣΕ, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, διαπιστώνονται ορισμένες διαφορές μεταξύ των δύο αυτών τύπων πλεονασμού. Παρόλα αυτά, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στοιχεία από τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την κωδικοποίηση κινούμενης εικόνας, με κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να αντιμετωπίσουν το συγκεκριμένο είδος χωρικού πλεονασμού. Τα στοιχεία αυτά αναλύονται στην παρούσα παράγραφο με βάση το πρότυπο συμπίεσης κινούμενης εικόνας MPEG (Motion Pictures Expert Group) [135].

Κατά τη διαδικασία της κωδικοποίησης με το πρότυπο MPEG μιας σειράς κινούμενης εικόνας, τα εικονοπλαίσια που περιέχονται σε αυτή χωρίζονται σε ομάδες εικονοπλαισίων (Group Of Pictures - GOP). Κάθε ομάδα εικονοπλαισίων είναι δυνατό να περιέχει τρεις μορφές εικονοπλαισίων, τα ενδοκωδικοποιημένα εικονοπλαίσια (Intra-Coded Frames - I), τα εικονοπλαίσια με πρόγνωση απλής κατεύθυνσης (Predictively Coded Frames - P) και τα εικονοπλαίσια με πρόγνωση διπλής κατεύθυνσης (Bidirectionally Predictively Coded Frames - B). Τα εικονοπλαίσια τύπου I κωδικοποιούνται αυτόνομα με βάση την τεχνική JPEG που αναλύθηκε προηγουμένως, ενώ για τα εικονοπλαίσια τύπου P χρησιμοποιείται κάποιο εικονοπλαίσιο I ή P που προηγείται χρονικά από αυτό ώστε να δημιουργηθεί μία πρόγνωση του βασισμένη στο συσχετισμό των δεδομένων μεταξύ τους. Τέλος, στην περίπτωση των εικονοπλαισίων τύπου B γίνεται χρήση των κοντινότερων I και P εικονοπλαισίων για να πραγματοποιηθεί η πρόγνωση.

Το υπό πρόγνωση εικονοπλαίσιο χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα και για κάθε ένα από αυτά προσδιορίζεται το βέλτιστο ταίριασμα με κάποια περιοχή του εικονοπλαισίου αναφοράς με χρήση ενός αλγορίθμου αναζήτησης και μιας συνάρτησης κόστους όπως

η μέση τιμή του τετραγώνου της διαφοράς μεταξύ των εικονοστοιχείων των συγκρινόμενων τμημάτων. Υπάρχουν δεκάδες αλγόριθμοι για την αναζήτηση του βέλτιστου ταιριάσματος ενός τμήματος σε κάποια περιοχή ενός εικονοπλαισίου αναφοράς [136], εκ των οποίων ιδιαίτερα σημαντικοί είναι ο αλγόριθμος της εξαντλητικής αναζήτησης, ο αλγόριθμος τριών βημάτων και ο 2Δ λογαριθμικός αλγόριθμος αναζήτησης.

Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος της εξαντλητικής αναζήτησης ολισθαίνει το υπό πρόγνωση τμήμα ενός εικονοπλαισίου σε όλες τις πιθανές θέσεις μιας επιλεγμένης περιοχής του εικονοπλαισίου αναφοράς και υπολογίζει για κάθε θέση τη μετρική κόστους. Τελικά ως βέλτιστη θέση επιλέγεται αυτή με το ελάχιστο κόστος και το συγκεκριμένο τμήμα του εικονοπλαισίου αναφοράς χρησιμοποιείται για την πρόγνωση. Στην περίπτωση του αλγορίθμου τριών βημάτων θεωρείται ότι η συνάρτηση κόστους είναι μονότονη και υπολογίζεται σε ένα πλήθος σημείων με βάση τον κλασικό αλγόριθμο της διχοτόμησης προς την κατεύθυνση που παρουσιάζει τη μείωση του κόστους. Τέλος, ο 2Δ λογαριθμικός αλγόριθμος αναζήτησης χρησιμοποιεί παρόμοια λογική, αλλά χρησιμοποιεί βήματα τα οποία τα οποία φθίνουν λογαριθμικά προς την κατεύθυνση την μείωσης της συνάρτησης κόστους, ενώ επιπρόσθετα χρησιμοποιεί και ένα κατώφλι για τον γρηγορότερο τερματισμό της διαδικασίας αναζήτησης. Σημειώνεται ότι είναι δυνατό οι τελευταίοι αλγόριθμοι να προσεγγίσουν τη βέλτιστη λύση με κάποια υπο-βέλτιστη, αλλά σε πολύ μικρότερο κλάσμα του χρόνου από αυτό που απαιτεί ο αλγόριθμος της εξαντλητικής αναζήτησης.

Η μεγάλη διαφορά στην υπολογιστική πολυπλοκότητα των μεθόδων και οι ανάγκες για επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο καθιστούν πολλές φορές τη χρήση του αλγορίθμου της εξαντλητικής αναζήτησης ανέφικτη. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που η συνάρτηση κόστους πρέπει να εκτιμηθεί σε $p \times p$ σημεία που χαρακτηρίζουν την περιοχή αναζήτησης για το υπό πρόγνωση τμήμα ο αλγόριθμος της εξαντλητικής αναζήτησης χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα $O(p^2)$. Αντιθέτως, ο αλγόριθμος τριών βημάτων και 2Δ λογαριθμικής αναζήτησης χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα $O(\log p)$.

Μετά το πέρας της διαδικασίας της πρόγνωσης, οι θέσεις βέλτιστου ταιριάσματος των τμημάτων οι οποίες συνηθέστερα ονομάζονται διανύσματα κίνησης (Motion Vectors) κωδικοποιούνται και υπολογίζεται η διαφορά του υπό πρόγνωση τμήματος με το βέλτιστο ταιρίασμα αυτού η οποία καλείται υπολειμματικό τμήμα. Κατόπιν, το

υπολειμματικό εικονοπλαίσιο που δημιουργείται από αυτή τη διαδικασία κωδικοποιείται με βάση την τεχνική του JPEG.

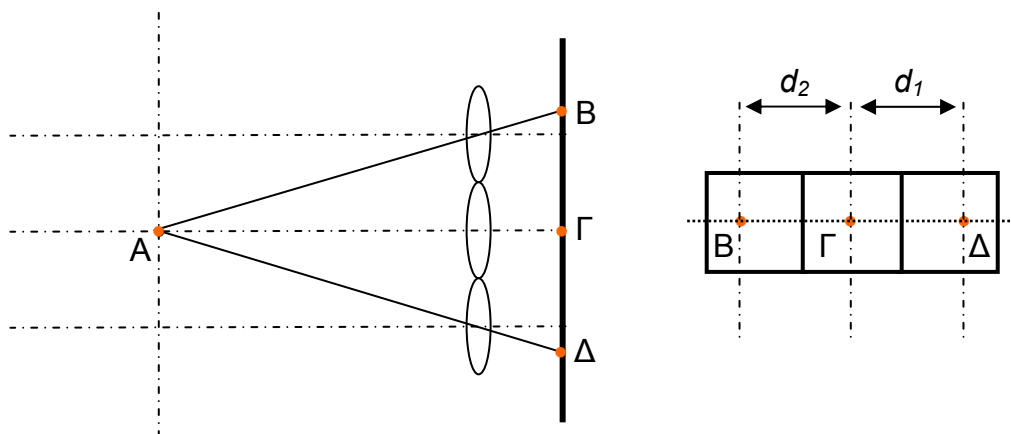
7.4 Προτεινόμενος Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης με Αντιστάθμιση της Ανομοιότητας

Η μέθοδος που προτείνουμε για την κωδικοποίηση των εικόνων ΟΦ επιτυγχάνει τη μείωση όλων των τύπων πλεονασμού που παρουσιάζονται σε μία εικόνα ΟΦ χρησιμοποιώντας μία τεχνική πρόγνωσης γειτονικών ΣΕ οι οποίες παρουσιάζουν υψηλό βαθμό συσχέτισης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η περαιτέρω μείωση του όγκου των δεδομένων σε σχέση με τις κλασσικές μεθόδους κωδικοποίησης 2Δ εικόνων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος [137] αποτελεί την πρώτη προσπάθεια κωδικοποίησης εικόνων ΟΦ που παρουσιάζουν 2Δ παράλλαξη χωρίς περιορισμούς στη μέγιστη παράλλαξη που μπορεί να παρατηρηθεί μεταξύ διαδοχικών εικόνων ΟΦ. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το 2D-DCT για την εξάλειψη του πλεονασμού μεταξύ των εικονοστοιχείων μιας ΣΕ και μία τεχνική αναζήτησης αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο αλγόριθμο κινούμενης εικόνας που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, για την μείωση του πλεονασμού μεταξύ γειτονικών ΣΕ. Για τη μείωση του πλεονασμού κωδικοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι που περιγράφηκαν για την κωδικοποίηση των 2Δ εικόνων με την τεχνική του JPEG. Η καινοτομία της μεθόδου έγκειται στην προσέγγιση ενός προβλήματος χωρικής συσχέτισης μεταξύ δεδομένων γειτονικών ΣΕ, με χρήση καλά διερευνημένων τεχνικών στο πεδίο των χρονικά συσχετισμένων εικονοπλαισίων για την πλήρη εκμετάλλευση του πλεονασμού που διαπιστώνεται σε μία εικόνα ΟΦ. Με κατάλληλες τροποποιήσεις οι οποίες περιγράφονται ακολούθως, η μέθοδος επιτυγχάνει την κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ με μεγάλη απόδοση, τόσο όσον αφορά την ποιότητα της απεικόνισης, όσο και τις ανάγκες για κωδικοποίηση σε πραγματικό χρόνο εικόνων ΟΦ.

7.4.1 Αντιστάθμιση Ανομοιότητας

Ο κωδικοποιητής που υλοποιήθηκε ενσωματώνει ένα αρχικό στάδιο εκτίμησης της ανομοιότητας (ΕΑ) μεταξύ διαδοχικών εικόνων ΟΦ. Για την εκτίμηση της ανομοιότητας, κάθε ΣΕ θεωρήθηκε ως ένα είδος χωρικού εικονοπλαισίου (ΧΕ) και τροποποιήθηκε η τεχνική του MPEG ώστε να περιοριστεί η περιοχή αναζήτησης για το βέλτιστο ταίριασμα. Συγκεκριμένα, λόγω της φυσικής κατασκευής της ΣΣΦ είναι δυνατό να

ελαττωθεί η 2D περιοχή αναζήτησης δεδομένου ότι η τυχαία κίνηση στην περίπτωση της κινούμενης εικόνας έχει πλέον μετατραπεί σε μία προσανατολισμένη κίνηση κατά τη διεύθυνση γεινίασης των φακών της ΣΣΦ. Η συγκεκριμένη αρχή απεικονίζεται στο Σχήμα 7.7.



Σχήμα 7.7: Ανομοιότητα μεταξύ διαδοχικών ΣΕ.

Στο συγκεκριμένο σχήμα, θεωρούμε τρεις γειτονικούς φακούς της ΣΣΦ που αντιστοιχούν σε τρεις διαδοχικές ΣΕ. Κατά τη διεύθυνση γεινίασης των ΣΕ θεωρούμε ότι οι ανομοιότητες μεταξύ της κεντρικής εικόνας και των γειτόνων της προσδιορίζονται από τις ποσότητες d_1 , d_2 , ενώ κατά την κάθετη προς αυτή διεύθυνση η ανομοιότητα θεωρείται μηδενική λόγω της ευθυγράμμισης των φακών της ΣΣΦ και άρα και των ΣΕ. Με τον τρόπο αυτό, στη γενική περίπτωση η εκτίμηση της ανομοιότητας, η οποία τελικά ανάγεται στον υπολογισμό μιας συνάρτησης κόστους σε p το πλήθος σημεία, εισάγει πολυπλοκότητα $O(p)$, η οποία επιτρέπει την εφαρμογή του αλγόριθμου της εξαντλητικής αναζήτησης ακόμη και για μεγάλες τιμές του p . Τα διανύσματα εκτίμησης της ανομοιότητας (ΔΕΑ) που παράγονται διαθέτουν έντονη κατευθυντικότητα κατά τη διεύθυνση εκτίμησης της ανομοιότητας, αλλά επιπρόσθετα παρουσιάζουν και σχετικά σταθερή διαφορά μεταξύ τους λόγω της σταθερής γεωμετρίας των ΣΕ. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ένας προγνώστης πρώτης τάξης και τελικά τα ΔΕΑ κωδικοποιούνται με βάση τους αλγορίθμους τρέχοντος μήκους και Huffman.

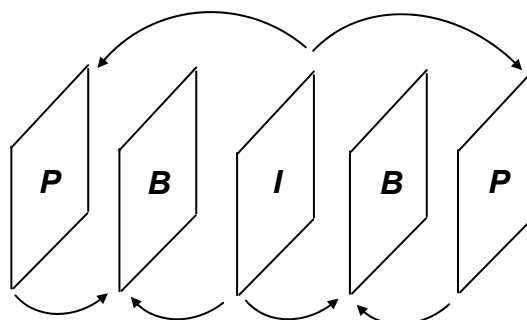
Η αντιστάθμιση της ανομοιότητας (ΑΑ) προκύπτει με υπολογισμό της διαφοράς της πρόγνωσης του ΧΕ από το υπό πρόγνωση ΧΕ, ενώ έπειτα εφαρμόζεται στο υπολειμματικό ΧΕ ο 2D-DCT. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συντελεστές του υπολειμματικού πεδίου συμβολίζουν διαφορές μεταξύ εικονοστοιχείων και όχι τις

πραγματικές τιμές εικονοστοιχείων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ομοιόμορφοι κβαντιστές, ενώ δεν χρησιμοποιείται κάποιος προγνώστης για τους διαδοχικούς συντελεστές DC ενός υπολειμματικού ΧΕ, διότι έχουν μεταβληθεί τα χαρακτηριστικά της μεταξύ τους συσχέτισης.

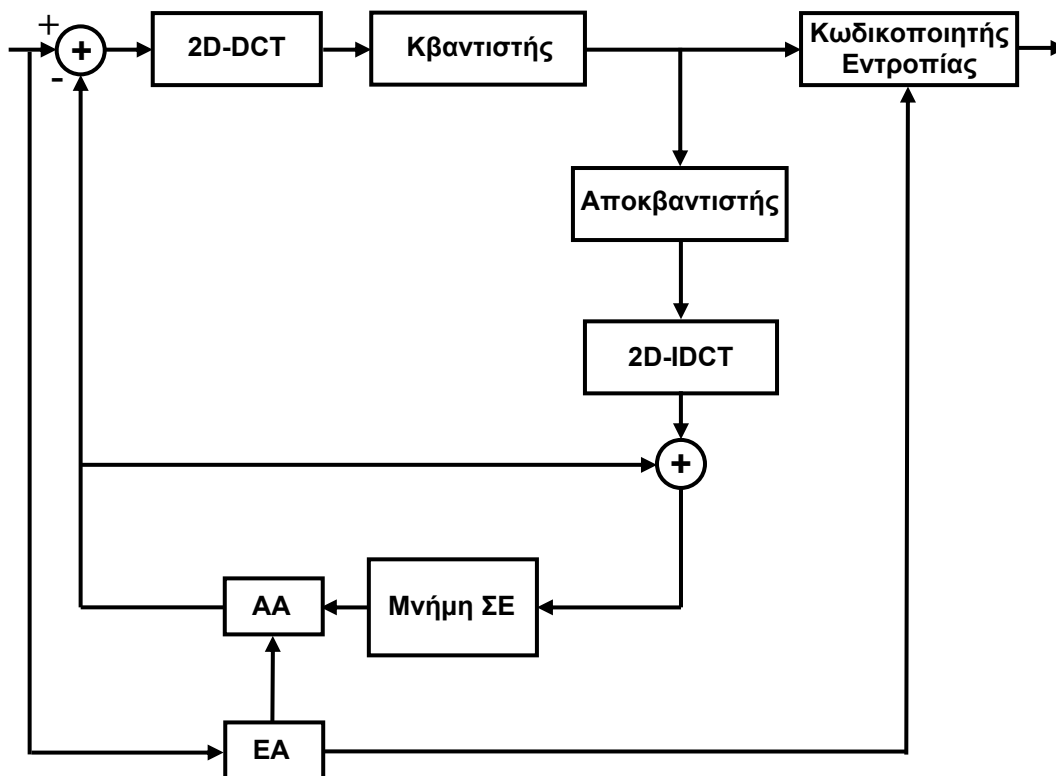
7.4.2 Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογραφίας με Αντιστάθμιση Ανομοιότητας

Για την κωδικοποίηση των ΧΕ, το μέγεθος της κάθε ΣΕ που προσδιορίστηκε στο έκτο κεφάλαιο χρησιμοποιείται για την κατάτμηση της εικόνας ΟΦ σε μία σειρά από ΧΕ μεγέθους όσο οι ΣΕ. Τα ΧΕ χωρίζονται στη συνέχεια σε ομάδες ΧΕ και κάθε ΧΕ χαρακτηρίζεται ως I, P ή B σε αντιστοιχία με την τεχνική που υλοποιείται στο πρότυπο MPEG. Για κάθε ένα από τα P, B πραγματοποιούνται οι διαδικασίες εκτίμησης και αντιστάθμισης της ανομοιότητας, και κωδικοποίησης των υπολειμματικών ΧΕ, όπως περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

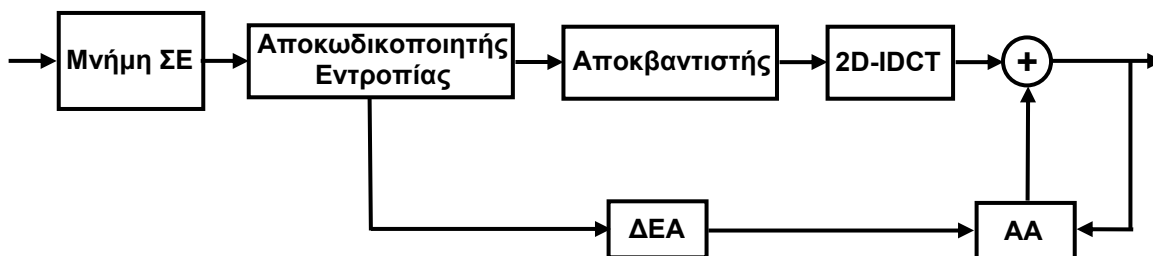
Η γενική μορφή μιας ομάδας ΧΕ ακολουθεί τη δομή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.8. Στο σχήμα απεικονίζεται η εξάρτηση των P και B ΧΕ από τα αντίστοιχα I . Ειδικότερα, για κάθε P ΧΕ πραγματοποιείται αντιστάθμιση με βάση το I ΧΕ που αντιστοιχεί στην κεντρική ΣΕ της ομάδας των ΧΕ, ενώ για κάθε B ΧΕ πραγματοποιείται αντιστάθμιση με βάση τα κοντινότερα σε αυτό P και I εικονοπλαίσια. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι δυνατό μεταβάλλοντας τους συντελεστές κβάντισης, το μέγεθος και τον τύπο των ομάδων ΧΕ να καλυφθούν τόσο εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ποιότητα με αντίστοιχο κόστος σε όγκο δεδομένων όσο και εφαρμογές που απαιτούν πολύ χαμηλούς όγκους δεδομένων με αντίστοιχους περιορισμούς στην ποιότητα της τελικής αναπαράστασης. Το σχηματικό διάγραμμα του κωδικοποιητή που υλοποιήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 7.9, ενώ ο αποκωδικοποιητής παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.10.



Σχήμα 7.8: Ομάδα κωδικοποίησης ΣΕ.



Σχήμα 7.9: Κωδικοποιητής Εικόνων ΟΦ με ΑΑ.



Σχήμα 7.10: Αποκωδικοποιητής Εικόνων ΟΦ με ΑΑ.

Τελειώνοντας, πρέπει να αναφέρουμε ότι κατά την εκπομπή των κωδικοποιημένων εικόνων ΟΦ έχει ληφθεί μέριμνα ώστε να αλλάζει η σειρά μετάδοσης για να μην παραβιάζεται η αιτιατότητα κατά την αποκωδικοποίηση των εικόνων ΟΦ. Επίσης, από τα διαγράμματα του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή που παρουσιάστηκαν είναι προφανές ότι, όπως και στην περίπτωση του MPEG, έχει διατηρηθεί η αυξημένη πολυπλοκότητα στο κωδικοποιητή, ενώ ο αποκωδικοποιητής χαρακτηρίζεται από σαφώς μειωμένη πολυπλοκότητα.

7.5 Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση του κωδικοποιητή εικόνων ΟΦ με αντιστάθμιση της ανομοιότητας χρησιμοποιήθηκε μία αντικειμενική μετρική έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τους κλασσικούς αλγορίθμους συμπίεσης εικόνας. Ειδικότερα, υπολογίστηκε ο λόγος σήματος προς θόρυβο (Peak-Signal-to-Noise-Ratio - PSNR), ο οποίος δίνεται από την Εξίσωση 7.12, για ένα πλήθος ρυθμών κωδικοποίησης.

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{255^2}{MSE} \right) \quad (7.12)$$

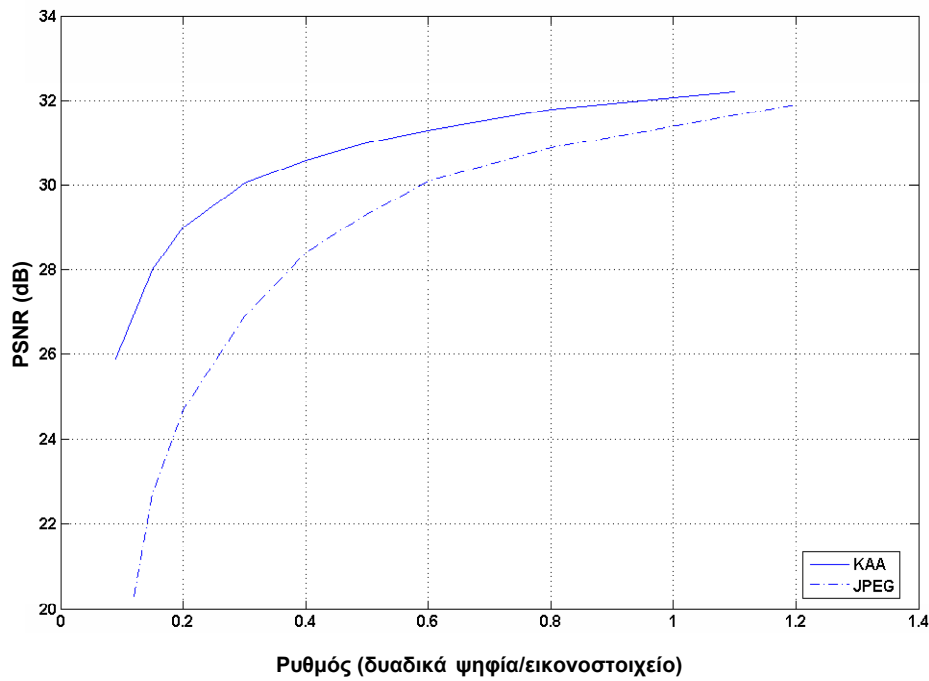
όπου το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Mean Squared Error - MSE) ορίζεται μέσω της Εξίσωσης 7.13.

$$MSE = \frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I(i, j) - \hat{I}(i, j))^2 \quad (7.13)$$

Η τελευταία εξίσωση αναφέρεται σε μία ανασυσταμένη εικόνα \hat{I} , διαστάσεων $N \times M$ η οποία έχει προέλθει από κωδικοποίηση και στη συνέχεια αποκωδικοποίηση της εικόνα I με βάση κάποια μέθοδο.

Στην παρούσα διατριβή, η ποιότητα της απεικόνισης που προσφέρει ο κωδικοποιητής εικόνων με αντιστάθμιση της ανομοιότητας (ΚΑΑ) συγκρίνεται σε σχέση με το πρότυπο JPEG το οποίο αποτελεί ένα πρότυπο σύστημα κωδικοποίησης για 2D εικόνες. Τα αποτελέσματα της κωδικοποίησης για ένα μεγάλο εύρος ρυθμών μετάδοσης για την εικόνα ΟΦ του Σχήματος 5.3 (δ) παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.11.

Από το διάγραμμα γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι ο προτεινόμενος κωδικοποιητής υπερέχει του κωδικοποιητή JPEG κατά 3-4 dB για χαμηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης, ενώ παρουσιάζει μία σταθερή βελτίωση στην ποιότητα της απεικόνισης ακόμη και για υψηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης της τάξης των 2 dB. Η παραπάνω βελτίωση οφείλεται κατά κύριο ποσοστό στην εξάλειψη του πλεονασμού μεταξύ διαδοχικών ΣΕ και κατά ένα μικρό ποσοστό στη μέθοδο της εξαντλητικής αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκε για την αναζήτηση του βέλτιστου ταιριάσματος. Συγκεκριμένα, η αντικατάσταση της μεθόδου της εξαντλητικής αναζήτησης προκαλεί μείωση της ποιότητας κατά 3% κατά μέσο όρο για την ίδια εικόνα.



Σχήμα 7.11: Σύγκριση Κωδικοποιητή Εικόνων ΟΦ με AA και JPEG.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η υπολογιστική της πολυπλοκότητα, η οποία κυμαίνεται σε μεγαλύτερα επίπεδα από το JPEG, παρά τις βελτιστοποιήσεις που αναφέρθηκαν. Ωστόσο, είναι δυνατό με κατάλληλες τεχνικές υλικού ο παραπάνω χρόνος να μειωθεί αρκετά κάνοντας τη μέθοδο ιδιαίτερα ελκυστική και για εφαρμογές πραγματικού χρόνου [138,139].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΣ ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΤΗΣ ΠΟΛΥΣΤΕΡΕΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΖΕΥΓΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΗΣ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗΣ

8.1 Εισαγωγή

Ο κωδικοποιητής που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο βασίζεται στην αντιστάθμιση της ανομοιότητας για να επιτύχει μείωση του πλεονασμού μεταξύ των ΣΕ. Ανάλογες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την κωδικοποίηση κλασικών στερεοζευγών [50,140-142], όπως επίσης και για την κωδικοποίηση των πολυστερεοσκοπικών ζευγών [143-145]. Επίσης, έχουν προταθεί μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση αλγεβρικών δεσμών μεταξύ των αντικειμένων σε κάθε εικόνα του απλού ή πολυστερεοσκοπικού ζεύγους, όπως επίσης και ένα πλήθος από μορφολογικούς αλγόριθμους [146-148] με στόχο την αποτελεσματική απομάκρυνση του πλεονασμού.

Το βασικό τμήμα των περισσότερων από τους παραπάνω κωδικοποιητές αλλά και αυτού που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ, αποτελεί ο 2D-DCT. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία τεχνική για την κωδικοποίηση ενός πολυστερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων όπως επίσης και μίας εικόνας ΟΦ που στηρίζεται στην επέκταση του παραπάνω σχήματος στις τρεις διαστάσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο 3D DCT (3D-DCT) ως τύπος μετασχηματισμού, έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν επιτυχώς για την κωδικοποίηση κινούμενης εικόνας [149] πολυστερεοσκοπικών ζευγών [147], όπως επίσης και εικόνων ΟΦ που παρουσιάζουν μονοδιάστατη παράλλαξη [150-152].

Σε αντίθεση με τις τεχνικές του εβδόμου κεφαλαίου που εισάγουν ένα σχήμα εκτίμησης της ανομοιότητας, η τεχνική που βασίζεται στον 3D-DCT που παρουσιάζεται εδώ, υλοποιεί ένα προσαρμοστικό μετασχηματισμό ανώτερης τάξης με στόχο την αποσύζευξη των δεδομένων σε ένα 3D χώρο. Η κύριες διαφορές μεταξύ των δύο τεχνικών είναι η αυξημένη ταχύτητα κωδικοποίησης, η οποία προκύπτει από την απαλοιφή του βήματος της εκτίμησης της ανομοιότητας μεταξύ γειτονικών εικόνων, και η υπεροχή σε εικόνες όπου παρατηρείται μικρή παράλλαξη. Επιπρόσθετα, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που η εικόνα ΟΦ αποτελείται από ΣΕ με μικρό πλήθος εικονοστοιχείων ανά ΣΕ όπου είναι αδύνατο να εφαρμοστούν τεχνικές που βασίζονται στην εκτίμηση της ανομοιότητας. Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αναλύουμε την υλοποίηση μιας προσαρμοστικής τεχνικής η οποία βασίζεται στον 3D-

DCT και την οποία εφαρμόζουμε για ένα σύνολο από πολυστερεοσκοπικά ζεύγη ή εικόνες ΟΦ τα οποία αρχικά έχουμε μετασχηματιστεί κατάλληλα σε μια 3Δ δομή δεδομένων ($3\Delta^3$) [153].

Η $3\Delta^3$ διαμερίζεται αρχικά σε μικρότερα τμήματα με μορφή κύβων δεδομένων και για κάθε κύβο εκτιμάται η διασπορά των τιμών της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων του. Στο επόμενο στάδιο εφαρμόζεται σε κάθε κύβο της $3\Delta^3$ ο 3D-DCT και οι συντελεστές που προκύπτουν κβαντίζονται με κατάλληλους 3Δ κύβους κβάντισης. Οι τιμές του 3Δ σχήματος κβάντισης υπολογίζονται με βάση τις στατιστικές ιδιότητες των συντελεστών του μετασχηματισμού και της πληροφορίας που προκύπτει από τη διασπορά των τιμών της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων σε κάθε κύβο. Στο τελικό στάδιο της διαδικασίας, οι κβαντισμένοι συντελεστές κάθε κύβου διευθετούνται σε διανύσματα με βάση μία τεχνική η οποία εκτιμά τη διασπορά τους, και άρα την αναμενόμενη κατεύθυνση μέσα στον κύβο που παρουσιάζει τους περισσότερους μη μηδενικούς συντελεστές, και κωδικοποιούνται με βάση τον αλγόριθμο του τρέχοντος μήκους και τον αλγόριθμο Huffman. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για ομάδες σταθερού μεγέθους που αποτελούνται από πολυστερεοσκοπικά ζεύγη οκτώ εικόνων και αντίστοιχου πλήθους ΣΕ για την περίπτωση της ΟΦ. Παρόλα αυτά, η μέθοδος μπορεί να εύκολα να γενικευθεί και για μεγαλύτερο πλήθος εικόνων στην περίπτωση που αυτό είναι συμβατό με το ποσοστό παράλλαξης που παρουσιάζουν.

8.2 Σχηματισμός της Τρισδιάστατης Δομής Δεδομένων και Εκτίμηση Διασποράς Εικονοστοιχείων

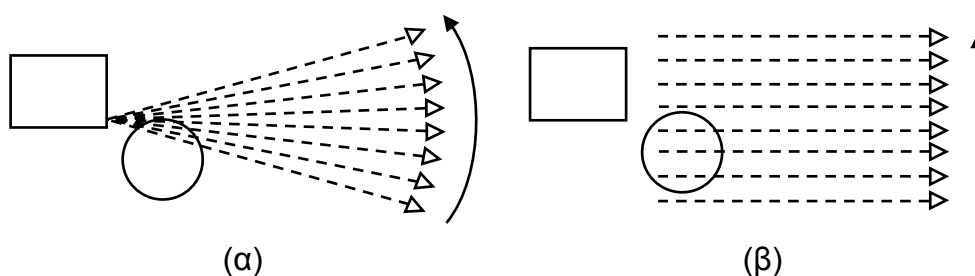
Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται ο τρόπος σχηματισμού της $3\Delta^3$ για την περίπτωση των δεδομένων πολυστερεοσκοπικών ζευγών, όπως επίσης και για τις εικόνες ΟΦ, ακολουθώντας σε κάθε περίπτωση την τεχνική που επιβάλλει η μεθοδολογία λήψης των εικόνων. Επιπρόσθετα, περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού της διασποράς, καθώς και η δημιουργία ενός χάρτη διασπορών (ΧΔ), ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στον καθορισμό των παραμέτρων του 3Δ κβαντιστή.

8.2.1 Σχηματισμός Τρισδιάστατης Δομής Δεδομένων

Όπως ήδη σημειώθηκε, στο πρώτο στάδιο, πριν την εφαρμογή του μετασχηματισμού, είναι απαραίτητο να διευθετηθούν οι εικόνες κατάλληλα με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση του σχήματος κωδικοποίησης. Γενικότερα, ένα

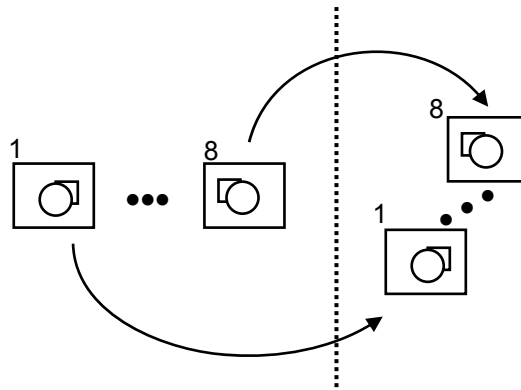
μεγάλο πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες συσκευών καταγραφής έχει προταθεί για τη σύλληψη 3D αντικειμένων και σκηνών, το οποίο είναι ανάλογο με το πλήθος των συσκευών απεικόνισης 3D αναπαραστάσεων [36,43,48,48,51]. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες τεχνικές καταγραφής μπορούν να διαχωριστούν σε αυτές που χρησιμοποιούνται συστοιχίες συσκευών καταγραφής ή κινούμενες συσκευές καταγραφής και στις τεχνικές που χρησιμοποιούν μεθόδους όπως αυτή της ΟΦ.

Η περίπτωση της καταγραφής αντικειμένων με βάση τη μέθοδο της ΟΦ έχει αναλυθεί εκτενώς στα προηγούμενα κεφάλαια. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν συστοιχίες από συσκευές καταγραφής, οι οποίες συνηθέστερα είναι απλές μηχανές φωτογραφικής ή κινηματογραφικής λήψης, μπορούν να χωριστούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μία 2D συστοιχία από μηχανές λήψης με τους άξονες τους παράλληλους και η δεύτερη περιλαμβάνει ένα αντίστοιχο πλήθος από μηχανές λήψης με συγκλίνοντες άξονες. Οι παραπάνω τεχνικές μπορούν να υλοποιηθούν, με ένα σύστημα κινούμενων μηχανών λήψης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.1.



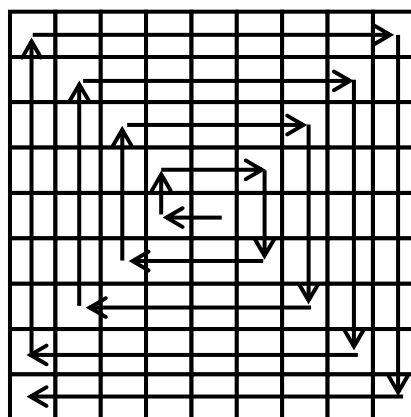
Σχήμα 8.1: Καταγραφή πολυστερεοσκοπικών ζευγών με χρήση κινούμενης μηχανής λήψης, (α) με συγκλίνοντες και (β) με παράλληλους άξονες λήψης.

Για τις παραπάνω περιπτώσεις καταγραφής, οι οκτώ εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή διευθετήθηκαν σε μια $3\Delta^3$ ως διαδοχικά παραλληλεπίπεδα τα οποία αντικατοπτρίζουν την μεταφορική ή μεταφορική και περιστροφική κίνηση της μηχανής λήψης. Αναλυτικότερα, θεωρώντας ότι κάθε εικόνα του πολυστερεοσκοπικού ζεύγους έχει μέγεθος $N \times M$, προκύπτει ότι με την παραπάνω αναδιάταξη σχηματίζεται μία $3\Delta^3$ με μέγεθος $N \times M \times 8$. Η παραπάνω διαδικασία διευθέτησης των εικόνων απεικονίζεται στο Σχήμα 8.2



Σχήμα 8.2: Διευθέτηση εικόνων που αποτελούν το πολυστερεοσκοπικό στερεοζεύγος για τη δημιουργία της $3\Delta^3$.

Στην περίπτωση που ο κωδικοποιητής χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ η τεχνική διαφέρει από την παραπάνω καθότι οι ΣΕ παρουσιάζουν μια μορφή 2Δ συσχέτισης, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 7.2.3. Για το λόγο αυτό οι ΣΕ μιας εικόνας ΟΦ σαρώνονται με ένα σπειροειδές σχέδιο [154] και διευθετούνται σε μία μονοδιάστατη σειρά εικόνων από την οποία επιλέγονται, κατά ομάδες των οκτώ, ΣΕ για να σχηματίσουν συνεχόμενες $3\Delta^3$ μεγέθους $N \times N \times 8$, όπου $N \times N$ οι διαστάσεις κάθε ΣΕ. Το σχέδιο σάρωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 8.3.



Σχήμα 8.3: Σπειροειδές σχέδιο σάρωσης των ΣΕ για τη δημιουργία της $3\Delta^3$.

8.2.2 Εκτίμηση της Διασποράς και Δημιουργία του Χάρτη Διασπορών

Για την αύξηση της απόδοσης του κωδικοποιητή υλοποιήθηκε επιπλέον μία μονάδα εκτίμησης της διασποράς (ΜΕΔ) των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων σε κάθε

κύβο στον οποίο θα εφαρμοστεί ο μετασχηματισμός. Αναλυτικότερα, υπολογίζεται η διασπορά σε κάθε κύβο και στην περίπτωση που λαμβάνει μικρές τιμές, κάτω από ένα κατώφλι θεωρείται ότι ο συγκεκριμένος κύβος ανήκει σε σχετικά ομοιογενείς περιοχές του υποβάθρου της εικόνας και άρα δεν περιέχει αξιόλογη ποσότητα πληροφορίας.

Για την εκτίμηση της διασποράς των εικονοστοιχείων του κύβου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα πλήθος τεχνικών [155] με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας. Ωστόσο, στην παρούσα διατριβή θα υπολογιστεί η διασπορά με βάση την κλασική σχέση υπολογισμού.

Για τον υπολογισμό της διασποράς $\sigma^2(s,k)$ θεωρούμε ένα τυπικό παράθυρο μετασχηματισμού διαστάσεων $8 \times 8 \times 8$ εικονοστοιχείων και υπολογίζουμε τη διασπορά με βάση την Εξίσωση 8.1.

$$\sigma^2(s,k) = \frac{1}{512} \sum_{n=1}^8 \sum_{m=1}^8 \sum_{l=1}^8 (f_{sk}(n,m,l) - \bar{f}_{sk})^2 \quad (8.1)$$

Στην παραπάνω εξίσωση με $f_{sk}(n,m,l)$ συμβολίζεται η τιμή της φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου στη θέση με συντεταγμένες n,m,l για ένα κύβο με συντεταγμένες s,l , όπου οι τιμές των s,l θα δίνονται από την Εξίσωση 8.2

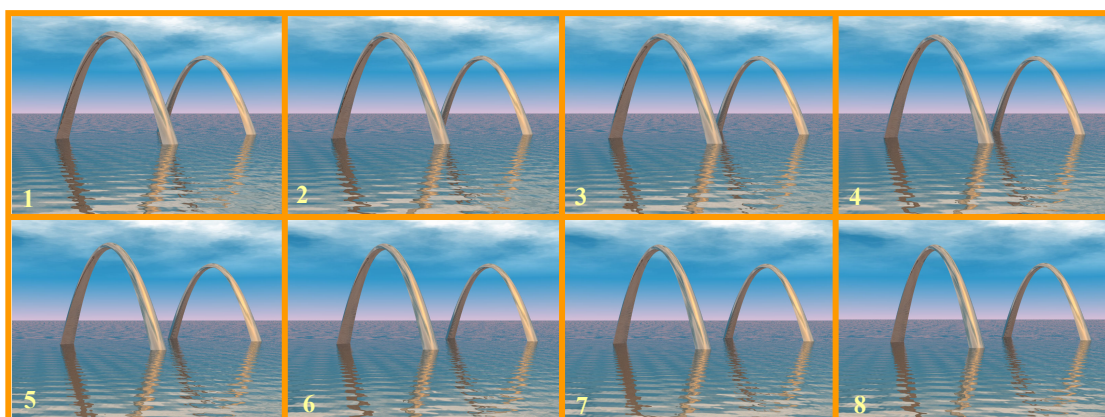
$$\begin{aligned} s &= 1, 2, \dots, \lfloor N/8 \rfloor \\ l &= 1, 2, \dots, \lfloor M/8 \rfloor \end{aligned} \quad (8.2)$$

για την περίπτωση που κάθε εικόνα του πολυστερεοσκοπικού ζεύγους ή η κάθε ΣΕ έχει μέγεθος $N \times M$ εικονοστοιχεία.

Με βάση την παραπάνω τιμή για τη διασπορά μπορεί να κατασκευαστεί ένας δυαδικός ΧΔ του οποίου κάθε σημείο αντιστοιχεί σε ένα κύβο και τον χαρακτηρίζει σαν κύβο χαμηλής ή υψηλής διασποράς, δηλαδή ένα κύβο του οποίου η πλειονότητα των δεδομένων ανήκει στο υπόβαθρο της εικόνας ή όχι. Για τη δημιουργία του ΧΔ χρησιμοποιείται η συνάρτηση που δίνεται από την Εξίσωση 8.3.

$$T = \begin{cases} 0 & \text{αν } \sigma^2(s,k) \leq t \\ 1 & \text{αν } \sigma^2(s,k) > t \end{cases} \quad (8.3)$$

Οι τιμές για το κατώφλι προσδιορίστηκαν πειραματικά στο διάστημα $t \in [5,10]$ ανάλογα με τον τύπο της εικόνας, ενώ μπορεί επίσης να οριστεί και ως ποσοστό της συνολικής διασποράς της εικόνας ΟΦ ή του πολυστερεοσκοπικού ζεύγους εικόνων. Ως παράδειγμα υπολογισμού της παραπάνω ποσότητας θεωρούμε ένα πολυστερεοσκοπικό ζεύγος το οποίο έχει ληφθεί με τη βοήθεια λογισμικού παρακολούθησης ακτίνας [156], στο οποίο υλοποιήθηκε μία μηχανή λήψης που κινείται σε μία σκηνή, λαμβάνοντας εικόνες με την τεχνική των συγκλίνοντων αξόνων. Το πολυστερεοσκοπικό ζεύγος που παράχθηκε και ο αντίστοιχος ΧΔ παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.4.



(α)



(β)

Σχήμα 8.4: (α) Πολυστερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων, (β) Χάρτης Διασπορών.

Οι μαύρες περιοχές του ΧΔ αντιστοιχούν σε περιοχές που ανήκουν κυρίως στο υπόβαθρό της εικόνας, ενώ οι άσπρες περιοχές αντιστοιχούν σε τμήματα που χαρακτηρίζονται από έντονη διασπορά στη φωτεινότητα, και αντιστοιχεί στο εγγύτερο στη μηχανή λήψης επίπεδο. Ο συγκεκριμένος δυαδικός χάρτης χρησιμοποιείται στη

συνέχεια για τη μορφοποίηση των τιμών του κβαντιστή, ώστε να κβαντίζονται αποτελεσματικότερα οι ομοιόμορφες περιοχές της εικόνας και να αυξάνεται η επίδοση του κωδικοποιητή με την ελάχιστη εισαγωγή παραμόρφωσης. Ο χάρτης που παράγεται κωδικοποιείται ως μία μονόχρωμη εικόνα με μη απωλεστικό τρόπο χωρίς να εισάγει ιδιαίτερο κόστος στην τελική κωδικοποιημένη αναπαράσταση.

8.3 Κωδικοποιητής Εικόνων Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης με χρήση του 3D-DCT

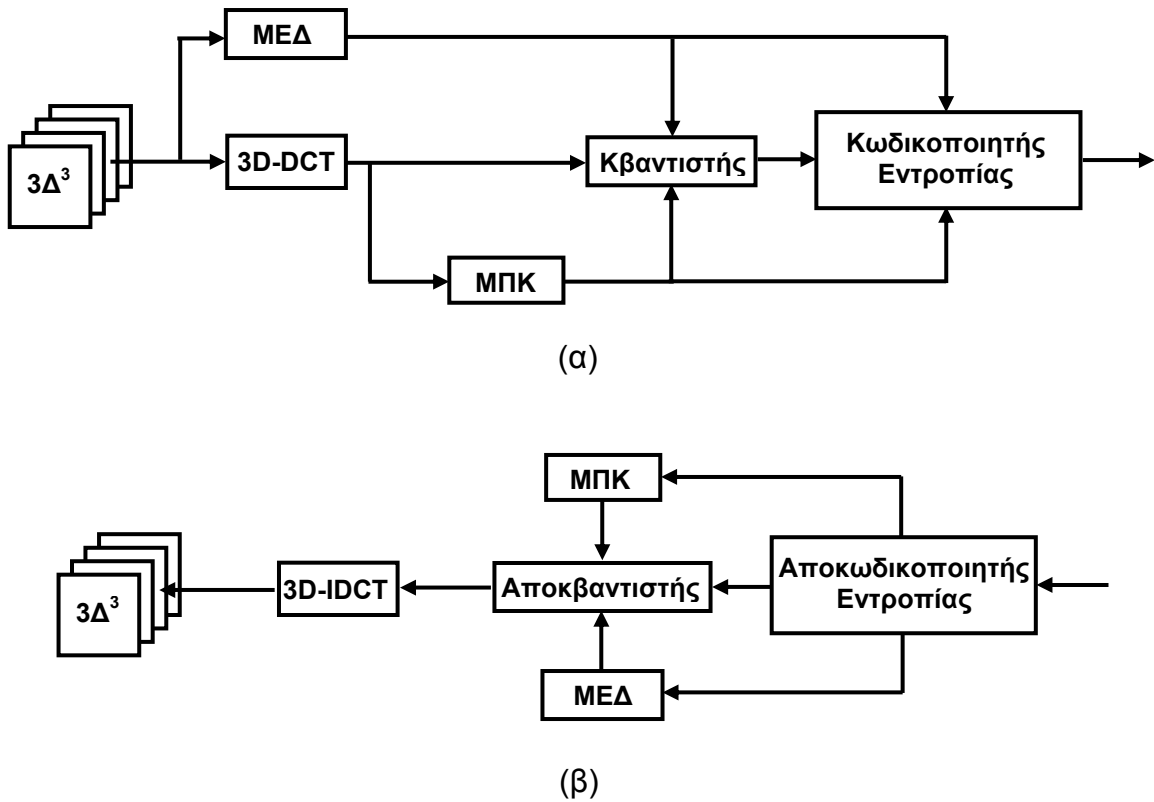
Τα βασικά μέρη του κωδικοποιητή που αναπτύχθηκε είναι η μονάδα που υλοποιεί τον 3D-DCT, ένας κβαντιστής και ένας κωδικοποιητής εντροπίας. Στην παραπάνω αρχιτεκτονική έχουν προστεθεί δύο μονάδες εκ των οποίων η μία είναι η ΜΕΔ που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διασποράς των εικονοστοιχείων, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της σειράς αναδιάταξης των συντελεστών του 3D-DCT. Η συγκεκριμένη μονάδα υπολογίζει τη συνολική διασπορά των συντελεστών που προκύπτουν από το μετασχηματισμό και ονομάζεται μονάδα πρόβλεψης κατευθυντικότητας (ΜΠΚ). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιλεγεί η κατεύθυνση εκείνη στην οποία η διασπορά των συντελεστών φθίνει με το μικρότερο ρυθμό και άρα να εφαρμοστεί το κατάλληλο σχέδιο αναδιάταξης ώστε να μειωθεί ο πλεονασμός κωδικοποίησης. Το διάγραμμα του κωδικοποιητή και του αποκωδικοποιητή απεικονίζονται στο Σχήμα 8.5.

Οι δύο συμπληρωματικές τακτικές που εφαρμόστηκαν επιτυγχάνουν την εξάλειψη του τοπικού πλεονασμού μέσω της διαδικασίας εκτίμησης της διασποράς των τιμών φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, αλλά και της κατευθυντικότητας των κύριων συντελεστών του μετασχηματισμού, η οποία είναι σταθερή τόσο στην περίπτωση των εικόνων ΟΦ όσο και στην περίπτωση των πολυστερεοσκοπικών ζευγών.

8.3.1 Μονάδα Υλοποίησης του Τρισδιάστατου Μετασχηματισμού Συνημιτόνου

Όπως διατυπώθηκε προηγουμένως, ο DCT αποτελεί ένα από τα κύρια εργαλεία στην κωδικοποίηση με μετασχηματισμό. Στην παρούσα παράγραφο παραθέτουμε τη γενική μορφή του μετασχηματισμού που υλοποιήθηκε. Η αναλυτική μορφή προέρχεται από την επέκταση της 2Δ περίπτωσης με χρήση της μορφής // του μετασχηματισμού η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με βάση τα παραπάνω ο ευθύς

μετασχηματισμός 3D-DCT για ένα κύβο με διαστάσεις $N \times L \times M$ θα δίνεται από την Εξίσωση 8.4.



Σχήμα 8.5: (α) Προσαρμοστικός κωδικοποιητής 3D-DCT, (β) Αποκωδικοποιητής 3D-DCT.

$$F(u,v,w) = K_{u,L} \cdot K_{v,M} \cdot K_{w,N} \cdot \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(i,j,k) \cdot C_{i,u,L} \cdot C_{j,v,M} \cdot C_{k,w,N} \quad (8.4)$$

Στην τελευταία εξίσωση όπου $f(i,j,k)$ η τιμή της φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου στη θέση i,j,k του κύβου και $F(u,v,w)$ η τιμή του συντελεστή στη θέση u,v,w του κύβου των συντελεστών. Σε αντιστοιχία με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο έβδομο κεφάλαιο, ο αντίστροφος μετασχηματισμός θα δίνεται από την Εξίσωση 8.5.

$$f(i,j,k) = \sum_{u=0}^{L-1} \sum_{v=0}^{M-1} \sum_{w=0}^{N-1} K_{u,L} \cdot K_{v,M} \cdot K_{w,N} \cdot F(u,v,w) \cdot C_{i,u,L} \cdot C_{j,v,M} \cdot C_{k,w,N} \quad (8.5)$$

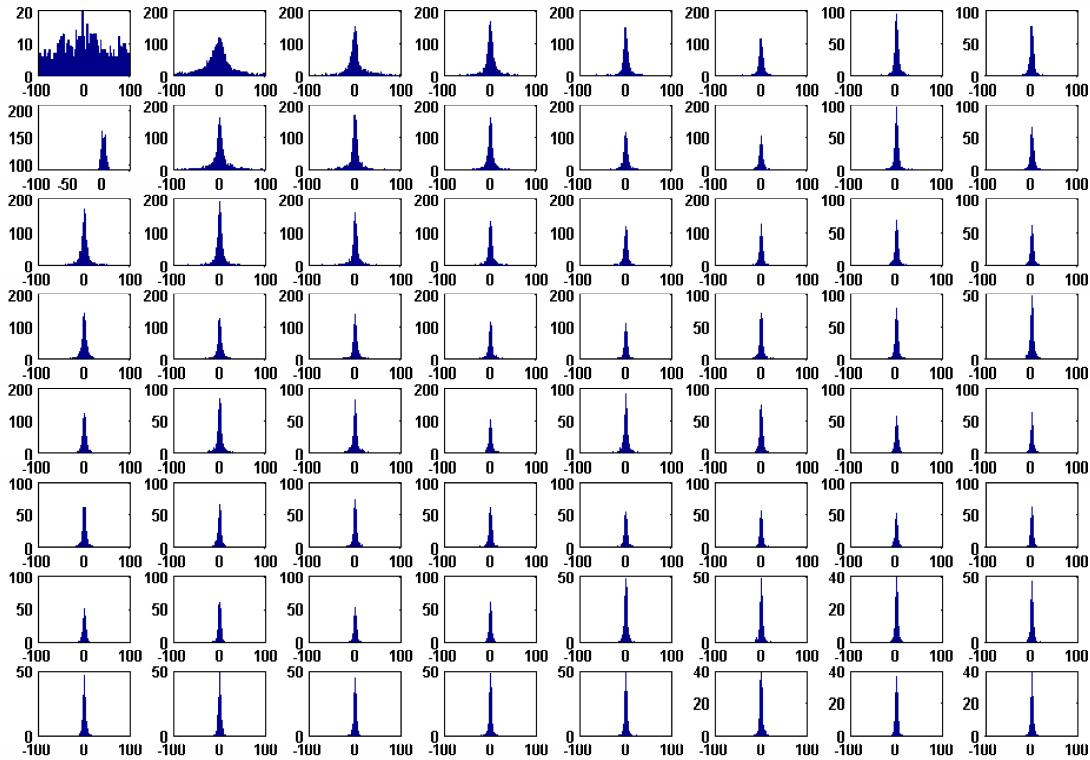
Τέλος, οι συντελεστές κανονικοποίησης και οι συναρτήσεις βάσης θα δίνονται από τις Εξισώσεις 7.6 και 7.7 σε πλήρη αναλογία με τις αντίστοιχες ποσότητες του προηγούμενου κεφαλαίου. Σημειώνεται ότι για την υλοποίηση του παραπάνω μετασχηματισμού μπορούν να χρησιμοποιηθεί η επαλληλία τριών διαδοχικών μονοδιάστατων μετασχηματισμών DCT ή να χρησιμοποιηθούν σχήματα που υλοποιούν το γρήγορο αλγόριθμο 3D-DCT μορφής // [157].

8.3.2 Μονάδα Πρόβλεψης της Κατευθυντικότητας των Συντελεστών του 3D-DCT

Είναι γνωστό ότι η διασπορά των συντελεστών του μετασχηματισμού σε μία θέση χαρακτηρίζει το ενεργειακό περιεχόμενο αυτού του συντελεστή, και κατ' επέκταση τη σημαντικότητα του συντελεστή στο σύνολο των συντελεστών [158]. Για καθαρά εποπτικούς λόγους παρουσιάζουμε στο Σχήμα 8.6 τη διασπορά των 64 συντελεστών του 2D-DCT για την Εικόνα 7.1. Από το Σχήμα 8.6 προκύπτει άμεσα ότι ο συντελεστής DC του μετασχηματισμού παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή η οποία διαφέρει από τις κατά προσέγγιση Λαπλασιανές κατανομές των υπολοίπων συντελεστών. Μία δεύτερη παρατήρηση στο ίδιο διάγραμμα αφορά το εύρος της κατανομής των διαφόρων συντελεστών. Κατά κανόνα, η αύξηση της συχνότητας προκαλεί μείωση του εύρους της κατανομής και άρα και της διασποράς των συντελεστών. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας εικόνας, στην περίπτωση του 2D-DCT ή μίας $3\Delta^3$ που κωδικοποιείται με τον 3D-DCT, μπορούν να μεταβάλλουν δυναμικά το εύρος της κατανομής ορισμένων συντελεστών με αποτέλεσμα να διαφοροποιούν τον τύπο κβάντισης και τον τύπο αναδιάταξης των συντελεστών που πρέπει να εφαρμοστεί. Επιπρόσθετα, τα χαρακτηριστικά αυτά, όπως η διεύθυνση παράλλαξης των δεδομένων που περιέχονται στην $3\Delta^3$, είναι δυνατό να αποτυπώσουν αυτή την κατευθυντικότητα στο χώρο των συντελεστών καθορίζοντας επίπεδα στα οποία οι περιεχόμενοι συντελεστές παρουσιάζουν ιδιαίτερα αυξημένες τιμές [159].

Για τον υπολογισμό των επιπέδων των ισχυρών συντελεστών μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρότερη γνώση με βάση την παράλλαξη που αναμένεται να παρουσιάζουν οι ΣΕ ή το πολυστερεοσκοπικό ζεύγος ή να υπολογιστούν τα συγκεκριμένα επίπεδα με βάση ένα πλήθος παραμέτρων.

Στην προσπάθεια γενίκευσης του κωδικοποιητή ακολουθήθηκε η δεύτερη προσέγγιση, αυτή του υπολογισμού της διεύθυνσης των επιπέδων με βάση ένα σύνολο παραμέτρων [160]. Αρχικά, θεωρούμε τις ποσότητες που δίνονται από τις Εξισώσεις 8.6 – 8.8



Σχήμα 8.6: Κατανομή πλάτους των 64 συντελεστών του 2D-DCT.

$$H = \sum_{\substack{u=1 \\ u+v+w \neq 3}}^8 \sum_{v=1}^8 \sum_{w=1}^8 v \cdot \sigma^2(u, v, w) \quad (8.6)$$

$$V = \sum_{\substack{u=1 \\ u+v+w \neq 3}}^8 \sum_{v=1}^8 \sum_{w=1}^8 u \cdot \sigma^2(u, v, w) \quad (8.7)$$

$$D = \sum_{\substack{u=1 \\ u+v+w \neq 3}}^8 \sum_{v=1}^8 \sum_{w=1}^8 w \cdot \sigma^2(u, v, w) \quad (8.8)$$

Έτσι η διεύθυνση του επιπέδου το οποίο καταλαμβάνουν οι ισχυρότεροι συντελεστές μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις Εξισώσεις 8.9-8.11.

$$R = \arctan\left(\frac{V}{H}\right) \quad (8.9)$$

$$S = \arctan\left(\frac{V}{D}\right) \quad (8.10)$$

$$W = \arctan\left(\frac{D}{H}\right) \quad (8.11)$$

8.3.3 Μονάδα Τρισδιάστατου Κβαντιστή

Η κβάντιση των συντελεστών του 3D-DCT είναι το πιο καίριο σημείο της διαδικασίας της αποτελεσματικής κωδικοποίησης, δεδομένου ότι, όπως και στην περίπτωση του 3D-DCT, είναι η διαδικασία που θα μειώσει τον ψυχοοπτικό πλεονασμό. Στην περίπτωση των συντελεστών του 3D-DCT δεν έχουν αναπτυχθεί ψυχοοπτικά μοντέλα για την δημιουργία κύβων κβάντισης. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα περιελάμβανε την εξαγωγή διαφορετικού μοντέλου ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων, δηλαδή αν επρόκειτο για δεδομένα πολυστερεοσκοπικών ζευγών ή για εικόνες ΟΦ ή άλλου είδους απεικόνισης στην οποία θα εφαρμοζόταν ο μετασχηματισμός. Αναμφισβήτητα, ο προσδιορισμός των βέλτιστων ψυχοοπτικών κβαντιστών για κάθε μορφή δεδομένων είναι ανέφικτος. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ένα πλήθος από μοντέλα [149] τα οποία προσπαθούν να προσεγγίσουν τη στατιστική των συντελεστών του μετασχηματισμού για να επιτύχουν αποτελεσματική απομάκρυνση του ψυχοοπτικού πλεονασμού.

Η διαδικασία της κβάντισης των συντελεστών του 3D-DCT μπορεί να οριστεί κατ' αναλογία με την αντίστοιχη διαδικασία στη 2D περίπτωση. Οι κβαντισμένοι συντελεστές $\hat{F}(u, v, w)$ θα δίνονται από την Εξίσωση 8.12.

$$\hat{F}(u, v, w) = \text{round}\left[\frac{F(u, v, w)}{Q(u, v, w)}\right] \quad (8.12)$$

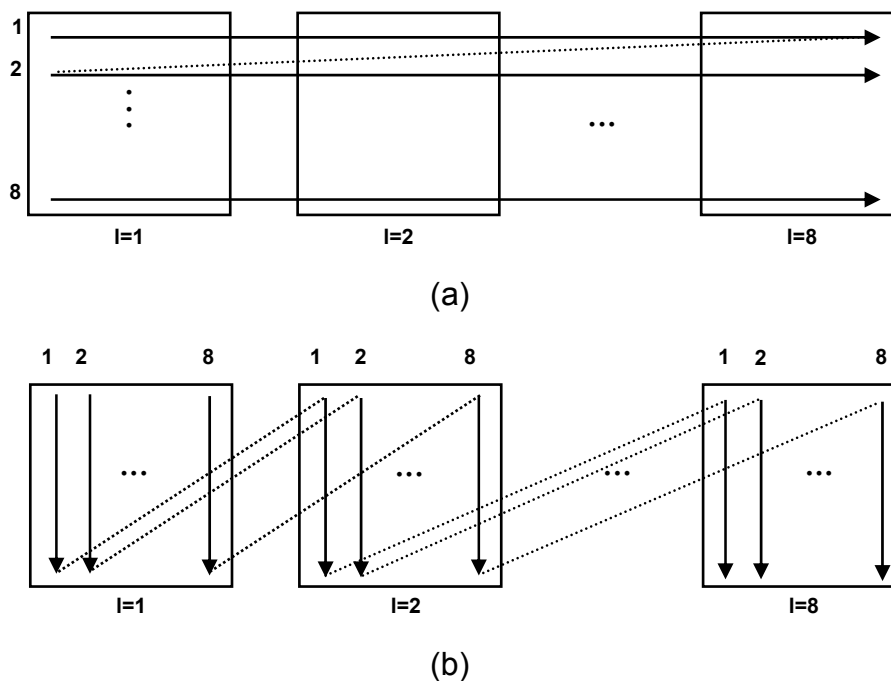
Το μοντέλο που υιοθετήθηκε για τον υπολογισμό 3D πίνακα κβάντισης ή κύβου κβάντισης [149] δίνεται από την εξίσωση 8.13, σε μία προσπάθεια να ληφθούν κατάλληλα υπόψη οι περισσότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον ψυχοοπτικό πλεονασμό, όπως η μικρή ευαισθησία στην υφή των αντικειμένων που βρίσκονται στο υπόβαθρο και η χαμηλή απόκριση στις υψηλές συχνότητες.

$$Q(u, v, w) = q_f \cdot (\alpha \cdot u^p + \beta \cdot v^p + \gamma \cdot w^p + \delta) \quad (8.13)$$

Στο παραπάνω μοντέλο, η ποσότητα q_f χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του επιθυμητού επιπέδου ποιότητας και άρα και του τελικού όγκου της κωδικοποιημένης απεικόνισης, ενώ η ποσότητα ρ δίνει το ρυθμό αύξησης των τιμών κβάντισης προς μεγαλύτερες συχνότητες. Οι τιμές των ποσοτήτων α, β, γ καθορίζουν την τελική μορφή της συνάρτησης που δίνει τις τιμές κβάντισης και προκύπτουν άμεσα από τις τιμές H, D, V οι οποίες οριοθετούν τις κύριες διευθύνσεις στο χώρο κβάντισης που καταλαμβάνονται από ισχυρούς συντελεστές, ενώ τέλος η δίτιμη ποσότητα δ λαμβάνει μία μεγάλη και μια μικρή τιμή ανάλογα με τις τιμές του $X\Delta$.

8.3.4 Μονάδα Κωδικοποιητή Εντροπίας

Ο κωδικοποιητής εντροπίας που υλοποιήθηκε περιλαμβάνει ένα σύνολο από διαδικασίες για την αποτελεσματική αφαίρεση του παραμένοντος πλεονασμού των κβαντισμένων συντελεστών του 3D-DCT, αξιοποιώντας κατάλληλα την πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί από τη μονάδα ΜΠΚ. Η σειρά με την οποία πρέπει να διευθετηθούν οι συντελεστές, ώστε να σχηματίσουν ένα μονοδιάστατο διάνυσμα το οποίο θα κωδικοποιηθεί, μπορεί σε γενικές γραμμές να προβλεφθεί με γνώση της κατευθυντικότητας των επιπέδων που περιέχουν τους ισχυρούς συντελεστές. Στην περίπτωση όπου η διασπορά των συντελεστών μειώνεται ομοιόμορφα κατά τις τρεις διευθύνσεις του κύβου των συντελεστών χρησιμοποιείται η επέκταση του σχήματος αναδιάταξης το οποίο υλοποιεί ο πρότυπος κωδικοποιητής 2D εικόνων και αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η επέκταση στις 3D του παραπάνω σχήματος έχει μελετηθεί διεξοδικά [161] και δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα στην περίπτωση όπου η διασπορά των συντελεστών φθίνει ομοιόμορφα. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν οι τιμές της παραμέτρου R κυμαίνονται στο διάστημα 0^0-30^0 οι συντελεστές παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά κατά τον οριζόντιο άξονα του κύβου, ενώ όταν οι τιμές του R κυμαίνονται στο διάστημα 60^0-90^0 οι συντελεστές παρουσιάζουν έντονη διασπορά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση του κύβου. Οι καταλληλότεροι τρόποι αναδιάταξης των συντελεστών για κάθε μία από τις δύο παραπάνω περιπτώσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 8.7.



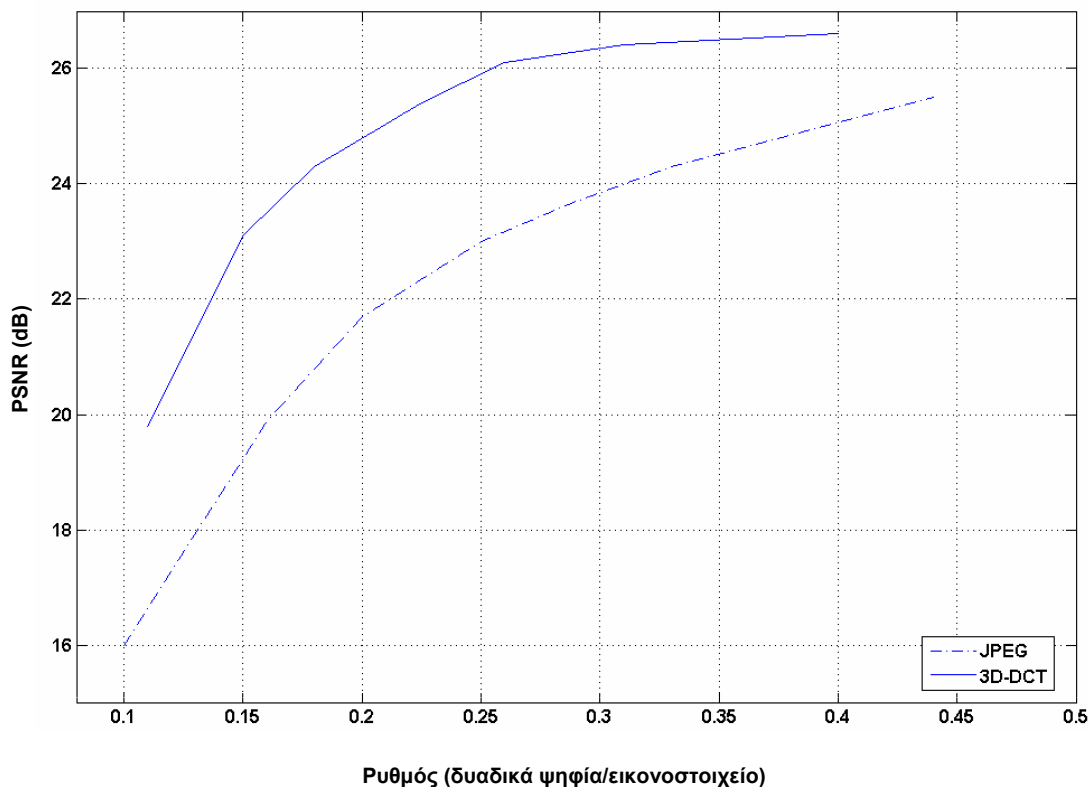
Σχήμα 8.7: Σχέδιο αναδιάταξης Συντελεστών όταν (α) $R \in [0^\circ - 30^\circ]$ και

(β) $R \in [60^\circ - 90^\circ]$

Αμέσως μετά την αναδιάταξη, εξαιρείται ο συντελεστής DC και οι υπόλοιποι κωδικοποιούνται με χρήση του αλγορίθμων τρέχοντος μήκους και Huffman. Οι συντελεστές DC κωδικοποιούνται όπως οι αντίστοιχοι συντελεστές στην 2Δ περίπτωση, ενώ κωδικοποιείται, όπως περιγράφηκε και στο αντίστοιχο εδάφιο και ο ΧΔ, ο οποίος πρέπει να είναι γνωστός κατά την αποκωδικοποίηση των εικόνων. Σημειώνεται ότι το κόστος της κωδικοποίησης του ΧΔ είναι μηδαμινό σε σχέση με κέρδος που προκύπτει από την εφαρμογή του.

8.4 Αποτελέσματα

Η αξιολόγηση της μεθόδου πραγματοποιήθηκε με βάση το αντικειμενικό κριτήριο του λόγου σήματος προς θόρυβο το οποίο εισήχθη με την εξίσωση 7.12 για ένα πλήθος από διαφορετικούς ρυθμούς κωδικοποίησης. Τα αποτελέσματα της μεθόδου συγκρίθηκαν σε σχέση με το πρότυπο JPEG, όπως και στην περίπτωση του κωδικοποιητή που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα για ένα πολυστερεοσκοπικό ζεύγος απεικονίζονται στο Σχήμα 8.8.

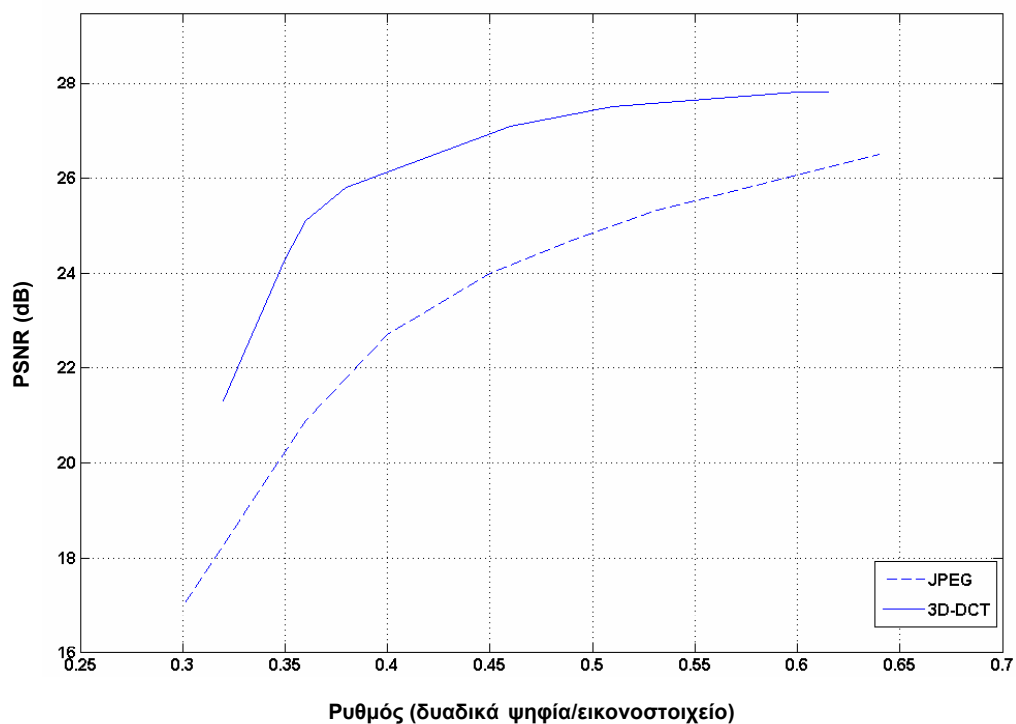


Σχήμα 8.8: Κωδικοποίηση πολυστερεοσκοπικού ζεύγους με χρήση 3D-DCT.

Ο αλγόριθμος υπερέρχει του JPEG στην περιοχή των χαμηλών ρυθμών κωδικοποίησης κατά 3dB έως 4dB, ενώ συγκλίνει με το JPEG στους υψηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης όπου η επίδραση του κβαντιστή περιορίζεται σε πολύ μικρό ποσοστό.

Στην περίπτωση των εικόνων ΟΦ, οι οποίες παρουσιάζουν μικρή παράλλαξη και ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό 2Δ συσχέτισης, ο προσαρμοστικός αλγόριθμος του 3D-DCT χαρακτηρίζεται από υψηλή αποδοτικότητα. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 8.9 η απόδοση του αλγορίθμου που προτείνεται είναι και στην περίπτωση αυτή μεγαλύτερη από 2dB - 3dB από το JPEG, ενώ ακόμη και στους υψηλούς ρυθμούς κωδικοποίησης ο αλγόριθμος υπερέρχει του JPEG κατά τουλάχιστον 2dB.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος μπορεί να επεκταθεί ώστε να καλύψει και περιπτώσεις όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερη παράλλαξη, με αύξηση του παραθύρου του μετασχηματισμού. Ωστόσο, η αύξηση του παραθύρου του μετασχηματισμού επιφέρει αντίστοιχη αύξηση στην πολυπλοκότητα του αλγορίθμου.



Σχήμα 8.9: Κωδικοποίηση Εικόνας ΟΦ με χρήση 3D-DCT.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

9.1 Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε η λειτουργία των κλασσικών και σύγχρονων αυτοστερεοσκοπικών συστημάτων, με έμφαση στη μελέτη της τεχνικής της ΟΦ, η οποία αποτελεί μια από τις καλύτερες προσεγγίσεις στο ιδεατό σύστημα 3Δ παρατήρησης.

Στο πρώτο μέρος της παρούσης μελετήθηκαν και αναλύθηκαν οι φυσικές παράμετροι των διαφόρων συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την 3Δ παρατήρηση με ιδιαίτερη έμφαση στα φυσικά χαρακτηριστικά των αναλογικών και ψηφιακών συστημάτων ΟΦ. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα πρότυπο σύστημα το οποίο δύναται να δημιουργήσει ιδιαίτερα υψηλής ποιότητας εικόνες ΟΦ από αντικείμενα που τοποθετούνται στο εγγύς πεδίο της συσκευής. Η ποιότητα των εικόνων που παρήχθησαν με τη συγκεκριμένη μέθοδο επηρεάστηκε από ένα σύνολο παραγόντων που αφορούσαν τα χαρακτηριστικά της δεδομένης συσκευής που χρησιμοποιήθηκε κατά τη σάρωση, όπως επίσης και ένα σύνολο από πηγές εξωγενούς και ενδογενούς θορύβου. Οι εικόνες ΟΦ που παρήχθησαν από την παραπάνω συσκευή χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα υψηλή ανάλυση σε σύγκριση με της υπόλοιπες προτεινόμενες στη βιβλιογραφία μεθόδους, με μεγάλη ευρύτητα του πεδίου, γεγονός που επιτρέπει την 3Δ καταγραφή μεγάλων αντικειμένων. Παράλληλα η αναπτυχθείσα συσκευή αποτελεί την απλούστερη μέχρι στιγμής προταθείσα προσέγγιση στο χώρο της 3Δ καταγραφής με την τεχνική της ΟΦ, και συνδυάζει την υψηλή ποιότητα των παραγόμενων δεδομένων με το ελάχιστο κόστος κατασκευής. Πρέπει να τονιστεί επίσης το γεγονός ότι το κόστος των αναπτυχθέντων συστημάτων ανάλογων χαρακτηριστικών είναι στην καλύτερη περίπτωση τουλάχιστον δεκαπλάσιο σε σχέση με το κόστος της προτεινόμενης συσκευής.

Στο δεύτερο μέρος της έρευνας επιχειρήθηκε η αποτελεσματική αντιμετώπιση διαφόρων ειδών προβλημάτων όπως η αρχική ευθυγράμμιση των μερών της συσκευής που απαιτείται για την ορθή λειτουργία της, η αφαίρεση ποσοστού του θορύβου όπως επίσης και η κωδικοποίηση των εικόνων ΟΦ.

Συγκεκριμένα, ακολουθώντας τις κλασσικές μεθόδους αντιμετώπισης ορισμένων ειδών θορύβου, στάθηκε δυνατή η μείωση του θορύβου βολής, ενώ κατάλληλα αντιμετωπίστηκαν και άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η μειωμένη φωτεινότητα, με τη χρήση εξελιγμένων τεχνικών ισοστάθμισης της αντίθεσης.

Κατά την ανάλυση μιας εικόνας ΟΦ αντιμετωπίστηκε αποτελεσματικά το θέμα της ευθυγράμμισης της ΣΣΦ και του αισθητήρα λήψης για την περίπτωση της ψηφιακής ΟΦ με χρήση εξελιγμένων τεχνικών που βασίστηκαν στον αλγόριθμο Hough. Επιπρόσθετα, στο ίδιο στάδιο αναπτύχθηκε μία μέθοδος για τον επακριβή προσδιορισμό των ευθειών που αποτελούν το ΟΠΕ που δεν εξαρτάται από την πρωθύστερη γνώση των χαρακτηριστικών της συσκευής και με τον τρόπο αυτό επιτρέπει την εφαρμογή αλγορίθμων για την περαιτέρω επεξεργασία της εικόνας, όπως αλγορίθμους για την εξάλειψη του φαινομένου της ψευδοσκοπίας και την κωδικοποίηση της εικόνας ΟΦ με αυτόματο τρόπο.

Στο τελευταίο τμήμα της διατριβής, αναπτύχθηκαν δύο αλγόριθμοι για την κωδικοποίηση των εικόνων ΟΦ, αλλά και πολυστερεοσκοπικών ζευγών, οι οποίοι παρέχουν λύση σε όλες τις περιπτώσεις που απαιτείται κωδικοποίηση εικόνων ΟΦ ανεξάρτητα με το μέγεθος των ΣΕ που θα κωδικοποιηθούν. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν καταδεικνύουν το γεγονός ότι υπάρχει αυξημένος εγγενής πλεονασμός στις εικόνες ΟΦ και επιτυγχάνουν την αποτελεσματική μείωση όλων των μορφών με την οποία αυτός εμφανίζεται. Τέλος η προσαρμοστική μέθοδος που αναπτύχθηκε με βάση τον 3D-DCT εφαρμόστηκε και σε ένα πλήθος πολυστερεοσκοπικών ζευγών εικόνων με υψηλή αποτελεσματικότητα και χαμηλή σε σχέση με τεχνικές εκτίμησης της ανομοιότητας πολυπλοκότητα.

9.2 Μελλοντικοί Στόχοι

Η παραπάνω έρευνα, που πραγματοποιήθηκε στο χώρο της ψηφιακής ΟΦ αποτελεί μία από τις ελάχιστες ολοκληρωμένες μελέτες που αφορούν την καταγραφή, ανάλυση και κωδικοποίηση των δεδομένων. Στους μελλοντικούς στόχους συγκαταλέγεται η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων επεξεργασίας των δεδομένων της ΟΦ, η εξαγωγή από αυτές χαρακτηριστικών της αρχικής 3Δ σκηνής, και η εφαρμογή των αποτελεσμάτων της έρευνας σε ένα ευρύ πλήθος από εφαρμογές. Οι δυνατότητες της μεθόδου και η ιδιαιτερότητα της την καθιστούν ένα δυναμικά εξελισσόμενο και ανοιχτό ερευνητικό πεδίο με εξαιρετικές προοπτικές για έρευνα και εφαρμογή των αποτελεσμάτων της.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑ

A.1 Υπολογισμός Διακριτικής Ικανότητας Βάθους

Θεωρώντας το εγγύτερο καθώς και το πιο απομακρυσμένο σημείο από τον παρατηρητή A,B αντίστοιχα με αναφορά στο Σχήμα 2.10 υπολογίζεται με βάση τη γεωμετρία του σχήματος ότι για τις παραλλακτικές γωνίες ισχύει ότι

$$\tan \frac{\gamma_B}{2} = \frac{b_{\text{off}}}{2 \cdot h} \quad (\text{A.1.1})$$

$$\tan \frac{\gamma_A}{2} = \frac{b_{\text{off}}}{2 \cdot (h-d)} \quad (\text{A.1.2})$$

Ορίζοντας τη διαφορά των παραλλακτικών γωνιών ως

$$\delta = \gamma_A - \gamma_B \quad (\text{A.1.3})$$

με χρήση της (A.1.3) μπορούμε να γράψουμε το αριστερό μέλος της στην (A.1.2) ως

$$\tan \frac{\gamma_A}{2} = \tan \frac{\delta + \gamma_B}{2} \quad (\text{A.1.4})$$

Κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \tan \beta} \quad (\text{A.1.5})$$

προκύπτει ότι

$$\tan \frac{\gamma_A}{2} = \frac{\tan \frac{\gamma_B}{2} + \tan \frac{\delta}{2}}{1 - \tan \frac{\gamma_B}{2} \tan \frac{\delta}{2}} \quad (\text{A.1.6})$$

Αντικαθιστώντας τις (A.1.1) και (A.1.2) στην (A.1.6) προκύπτει τελικά ότι

$$\frac{b_{o\phi\theta}}{2 \cdot (h-d)} = \frac{\frac{b_{o\phi\theta}}{2 \cdot h} + \tan \frac{\delta}{2}}{1 - \frac{b_{o\phi\theta}}{2 \cdot h} \tan \frac{\delta}{2}} \quad (\text{A.1.7})$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς d , το οποίο αποτελεί το ελάχιστο διακριτικό όριο βάθους προκύπτει ότι

$$d = h - \frac{\frac{b_{o\phi\theta}}{2} \cdot \left(1 - \frac{b_{o\phi\theta}}{2 \cdot h} \cdot \tan \frac{\delta}{2}\right)}{\frac{b_{o\phi\theta}}{2 \cdot h} + \tan \frac{\delta}{2}} \quad (\text{A.1.8})$$

A.2 Υπολογισμός Διαστάσεων Στερεοσκοπικού Παραθύρου

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης παρατήρησης καθώς επίσης και τον υπολογισμό του μεγέθους του οπτικού παραθύρου, θεωρούμε τη γεωμετρία που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.8. Αρχικά, υπολογίζουμε την ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορεί να πλησιάσει ο παρατηρητής την οθόνη προβολής. Θεωρούμε ότι η απόσταση μεταξύ της οθόνης και της συστοιχίας ΣΦΕΜΚ είναι g όπως σημειώνεται στο Σχήμα 3.8 και ότι το μέγεθος κάθε χρωματικής συνιστώσας του εικονοστοιχείου με μέγεθος p που απεικονίζεται στο ίδιο σχήμα, δίνεται από τη εξίσωση A.2.1.

$$s = p / 3 \quad (\text{A.2.1})$$

Για τον υπολογισμό της ελάχιστης απόστασης από τη συστοιχία ΦΕΜΚ στην οποία μπορεί να πλησιάσει ο παρατηρητής (h_{min}) θεωρούμε ακολούθως τα τρίγωνα $ΑΓΕ$ και $ΒΓΔ$ που σχηματίζονται στο Σχήμα A.2.1. Από την ομοιότητα των παραπάνω τριγώνων προκύπτει άμεσα ότι

$$\frac{ΑΕ}{ΒΔ} = \frac{ΓΕ}{ΓΔ} \quad (\text{A.2.2})$$

Όμως

$$ΑΕ = h_{min} + g \quad (\text{A.2.3})$$

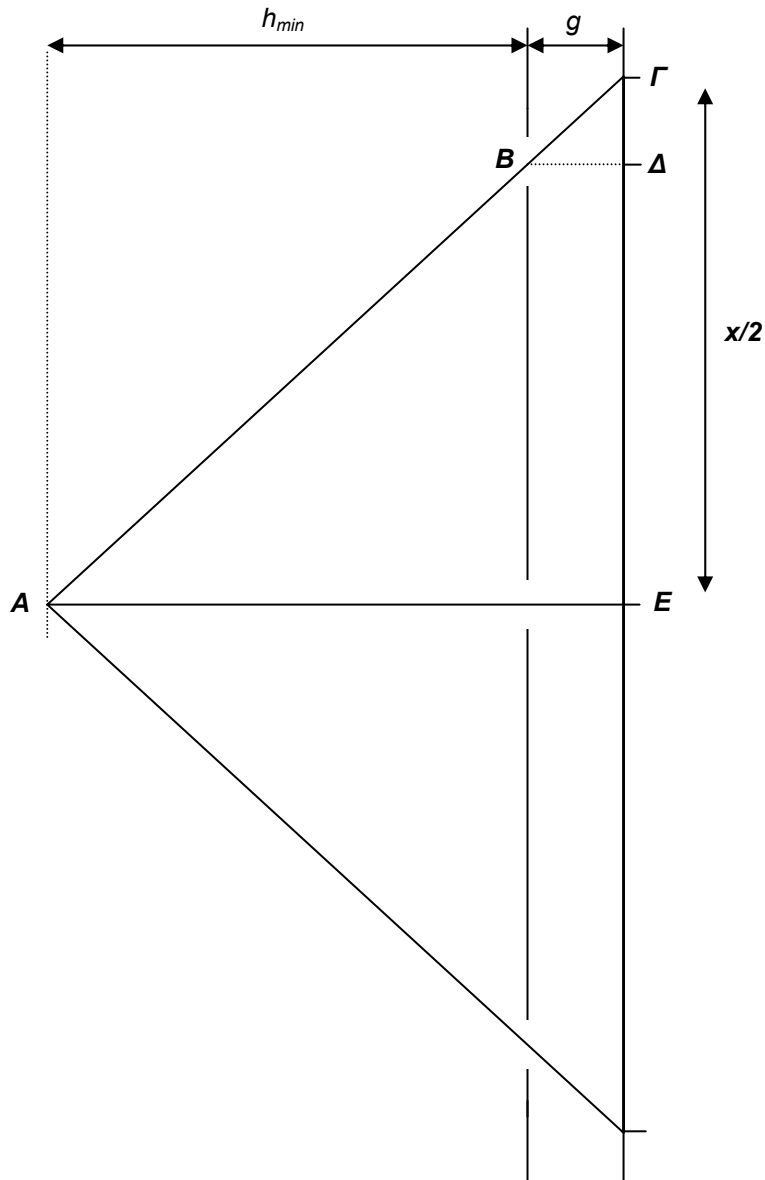
$$ΒΔ = g \quad (\text{A.2.4})$$

$$ΓΕ = \frac{x}{2} \quad (\text{A.2.5})$$

$$ΓΔ = 3.5 \cdot s \quad (\text{A.2.6})$$

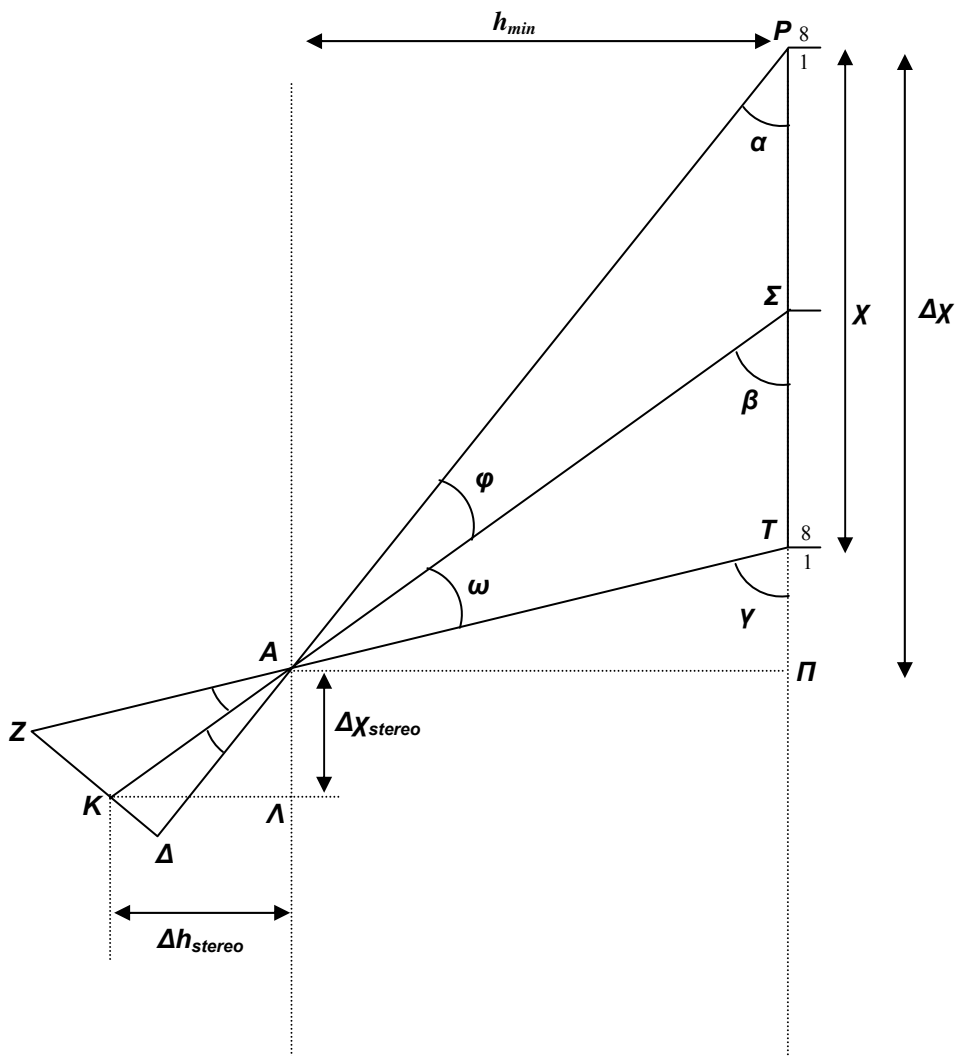
Με αντικατάσταση των (A.2.3) - (A.2.6) στην (A.2.2) προκύπτει τελικά ότι

$$h_{min} = g \cdot \left(\frac{x}{7 \cdot s} - 1 \right) \quad (\text{A.2.7})$$



Σχήμα A.2.1: Εύρεση ελάχιστης απόστασης παρατηρητή.

Για την εύρεση των διαστάσεων του οπτικού παραθύρου, δηλαδή της περιοχής μέσα στην οποία ένας παρατηρητής μπορεί να κινείται ελεύθερα χωρίς να χάνει της αίσθηση του στερεοσκοπικού φαινομένου, θεωρούμε το Σχήμα A.2.2, στο οποίο σημειώνουμε τη διαμήκη και εγκάρσια διάσταση του παραθύρου αυτού ως Δx_{stereo} και Δh_{stereo} αντίστοιχα σε απόσταση ίση με την ελάχιστη απόσταση h_{min} που μπορεί να πλησιάσει ένας παρατηρητής, η οποία δίνεται από την Εξίσωση A.2.7.



Σχήμα A.2.2: Εύρεση μεγέθους οπτικού παραθύρου.

Θεωρούμε αρχικά ένα σημείο A σε επίπεδο που απέχει απόσταση h_{min} από τη ΣΦΕΜΚ και ένα τυχαίο σημείο K εκτός του προηγούμενου επιπέδου για το οποίο θεωρούμε εντός του οπτικού παραθύρου, για το οποίο είναι δυνατή η στερεοσκοπική παρατήρηση.

Επίσης, ορίζεται η απόσταση x ως την απόσταση επάνω στην οθόνη προβολής, η οποία περιέχει οχτώ διαφορετικές εικόνες (για σύστημα με οχτώ εικόνες) και η απόσταση Δx η οποία δίνεται από την εξίσωση A.2.8.

$$\Delta x = k \cdot x \quad \mu\epsilon \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{A.2.8})$$

Για τον υπολογισμό των ζητούμενων αποστάσεων μπορεί να γίνει χρήση των ορθογωνίων τριγώνων $\Pi P A$, $\Pi \Sigma A$, και $\Pi T A$ από τα οποία άμεσα υπολογίζονται οι εφαπτόμενες των γωνιών α , β , γ . Ο υπολογισμός δίνει:

$$\tan \alpha = \frac{h_{\min}}{\Delta x} \quad (\text{A.2.9})$$

$$\tan \beta = \frac{h_{\min}}{\Delta x - x/2} \quad (\text{A.2.10})$$

$$\tan \gamma = \frac{h_{\min}}{\Delta x - x} \quad (\text{A.2.11})$$

Από το Σχήμα A.2.2 προκύπτουν άμεσα με απλούς γεωμετρικούς υπολογισμούς ότι

$$\varphi = \beta - \alpha \quad (\text{A.2.12}\alpha)$$

$$\omega = \gamma - \beta \quad (\text{A.2.12}\beta)$$

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις A.2.12α και A.2.12β τις γωνίες α , β , γ , όπως προκύπτουν από τις A.2.9-A.2.11 προκύπτουν οι γωνίες φ , ω .

$$\varphi = \arctan \frac{h_{\min}}{\Delta x - x/2} - \arctan \frac{h_{\min}}{\Delta x} \quad (\text{A.2.13})$$

$$\omega = \arctan \frac{h_{\min}}{\Delta x - x} - \arctan \frac{h_{\min}}{\Delta x - x/2} \quad (\text{A.2.14})$$

Επίσης, από τα ορθογώνια τρίγωνα $AK\Delta$ και AKZ προκύπτει ότι

$$K\Delta = AK \cdot \tan \varphi \quad (\text{A.2.15})$$

$$KZ = AK \cdot \tan \omega \quad (\text{A.2.16})$$

Από το Σχήμα Α.2.2 ισχύει εκ κατασκευής ότι $\Delta Z = K\Delta + KZ$ και με αντικατάσταση από τις Α.2.15 και Α.2.16 τελικά εξάγεται το μήκος της ΑΚ:

$$AK = \frac{\Delta Z}{\tan \varphi + \tan \omega} \quad (\text{A.2.17})$$

Εφαρμόζοντας το Πυθαγόρειο θεώρημα στο ορθογώνιο τρίγωνο ΠΣΑ προκύπτει επίσης ότι

$$A\Sigma^2 = h_{\min}^2 + (\Delta\chi - \chi/2)^2 \quad (\text{A.2.18})$$

Από τα όμοια τρίγωνα ΠΣΑ και ΑΛΚ ισχύει ότι

$$\frac{\Delta\chi_{stereo}}{\Delta\chi - \chi/2} = \frac{AK}{A\Sigma} = \frac{\Delta h_{stereo}}{h_{\min}} \quad (\text{A.2.19})$$

Με βάση την τελευταία ισότητα οι ποσότητες $\Delta\chi_{stereo}$ και Δh_{stereo} υπολογίζονται με αντικατάσταση από τις Α.2.17 και Α.2.18.

$$\Delta\chi_{stereo} = \frac{|\Delta Z|}{(\tan \varphi + \tan \omega) \cdot \sqrt{h_{\min}^2 + (\Delta\chi - \frac{\chi}{2})^2}} \cdot (\Delta\chi - \frac{\chi}{2}) \quad (\text{A.2.20})$$

$$\Delta h_{stereo} = \frac{|\Delta Z|}{(\tan \varphi + \tan \omega) \cdot \sqrt{h_{\min}^2 + (\Delta\chi - \frac{\chi}{2})^2}} \cdot h_{\min} \quad (\text{A.2.21})$$

A.3 Αλγόριθμος Smith-Waterman

Για την πληρέστερη παρουσίαση του αλγορίθμου, παραθέτουμε ένα σύνολο από ορισμούς εννοιών και θεωρήματα για τη μαθηματική θεμελίωση του αντικειμένου [162] σε σύνδεση με το πρόβλημα της ορθής ταυτοποίησης των ΟΠΕ που αντιμετωπίζεται στην παρούσα διατριβή.

Αρχικά ορίζουμε το σύνολο A των πιθανών θέσεων των ευθειών δύο ακολουθιών. Τα στοιχεία του A αποτελούν ένα αλφάβητο. Κάθε ακολουθία $\{s\}$ ορισμένη στο σύνολο A αποτελείται από μία διάταξη των στοιχείων του παραπάνω αλφαβήτου. Επιπλέον ορίζεται η κενή ακολουθία $\{e\}$. Το σύνολο των ακολουθιών A^* στο A ορίζεται ως

$$A^* = \bigcup_{i \geq 0} A^i \quad (\text{A.3.1})$$

όπου $A^0 = \{e\}$ και $A^{i+1} = \{aw \mid a \in A, w \in A^i\}$.

Ορισμός 1: Ορίζεται η πράξη αντικατάστασης ως $(a,b) \in (A^1 \cup \{e\} \times A^1 \cup \{e\}) \setminus \{(e,e)\}$.

Υπάρχουν τρία είδη αντικατάστασης

- (α). (a,e) Διαγραφή του στοιχείου a .
- (β). (e,a) Εισαγωγή του στοιχείου a .
- (γ). (a,b) Αντικατάσταση του στοιχείου a από το στοιχείο b . □

Ορισμός 2: Μια ευθυγράμμιση (Alignment) A μεταξύ των $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ είναι μία σειρά από αντικαταστάσεις $((a_1, b_1), (a_1, b_1), \dots, (a_h, b_h))$ τέτοιες ώστε $\{\varepsilon_1\} = a_1 a_2 \dots a_h$ και $\{\varepsilon_2\} = b_1 b_2 \dots b_h$. □

Παρατήρηση: Αν $A = ((a_1, b_1), (a_1, b_1), \dots, (a_h, b_h))$ μια ευθυγράμμιση των ακολουθιών $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ με μήκη m, n αντίστοιχα, τότε $m + n \geq h \geq \max\{m, n\}$.

Ορισμός 3: Ορίζεται μία συνάρτηση βαθμού ομοιότητας η οποία σε κάθε πράξη αντικατάστασης (a,b) αναθέτει την ποσότητα $\sigma(a,b) \in \mathbb{R}$. Για κάθε ευθυγράμμιση $A = ((a_1, b_1), (a_1, b_1), \dots, (a_h, b_h))$ ορίζεται ο βαθμός ομοιότητας της ευθυγράμμισης ως:

$$\sigma(A) = \sum_{i=1}^h \sigma(a_i, b_i) \quad (\text{A.3.2})$$

και ως βαθμό ομοιότητας μεταξύ των δύο ακολουθιών $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ την ποσότητα

$$\Sigma_\sigma = \max\{\sigma(A) \mid A \text{ μία ευθυγράμμιση των } \{\varepsilon_1\}, \{\varepsilon_2\}\} \quad (\text{A.3.3})$$

.□

Ορισμός 3: Αν σ μία συνάρτηση βαθμού ομοιότητας, ορίζουμε

1. $T_\sigma(\{\varepsilon_1'\}, \{\varepsilon_2'\}) = \max\{\Sigma_\sigma(\{\varepsilon_1'\}, \{\varepsilon_2'\})\}$ όπου $\{\varepsilon_1'\}$ και $\{\varepsilon_2'\}$ δύο υποακολουθίες των $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ αντίστοιχα.
2. Έστω $\{\varepsilon_1'\}$ και $\{\varepsilon_2'\}$ δύο υποακολουθίες των $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ τέτοιες ώστε $\Sigma_\sigma(\{\varepsilon_1'\}, \{\varepsilon_2'\}) = T_\sigma(\{\varepsilon_1'\}, \{\varepsilon_2'\})$. Μία ευθυγράμμιση των $\{\varepsilon_1'\}$ και $\{\varepsilon_2'\}$ για την οποία ικανοποιείται η συνθήκη $\Sigma_\sigma = \sigma(A)$ είναι μία τοπική βέλτιστη ευθυγράμμιση των $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$. □

Για τον αποτελεσματικό υπολογισμό της τοπικής ομοιότητας δύο ακολουθιών $\{\varepsilon_1\}$ και $\{\varepsilon_2\}$ με μεγέθη m, n αντίστοιχα διαστάσεων $(m+1) \times (n+1)$ κατασκευάζουμε ένα πίνακα Λ , κάθε στοιχείο του οποίου δίνεται από την Εξίσωση A.3.4.

$$\Lambda(i, j) = \max\{\Sigma_\sigma(x, y) \mid x \text{ επίθεμα της } \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \dots, \varepsilon_{1i} \text{ και } y \text{ επίθεμα της } \varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \dots, \varepsilon_{2j}\} \quad (\text{A.3.4})$$

Είναι εύκολο να δειχθεί ότι

$$T_{\sigma}(\{\varepsilon_1^i\}, \{\varepsilon_2^j\}) = \max\{\Lambda(i, j) \mid i \in [0, m], j \in [0, n]\} \quad (\text{A.3.5})$$

Θεώρημα 1: Έστω σ μία συνάρτηση βαθμού ομοιότητας που ικανοποιεί την

$$T_{\sigma}(s, e) = T_{\sigma}(e, s) = 0 \quad (\text{A.3.6})$$

για κάθε ακολουθία $\{s\} \in A^*$. Τότε ισχύουν τα ακόλουθα

(α). Αν $i = 0$ ή $j = 0$, τότε $\Lambda(i, j) = 0$

(β). Σε κάθε άλλη περίπτωση,

$$\Lambda(i, j) = \max \begin{cases} 0 \\ \Lambda(i-1, j) + \sigma(\varepsilon_i, e) \\ \Lambda(i, j-1) + \sigma(e, \varepsilon_j) \\ \Lambda(i-1, j-1) + \sigma(\varepsilon_i, \varepsilon_j) \end{cases}$$

Με βάση το παραπάνω θεώρημα κάθε προθεματική (Prefix) υποακολουθία με αρνητικό βαθμό ομοιότητας αποδίδει μηδενικές τιμές στον πίνακα Λ , με αποτέλεσμα οι θετικές υποακολουθίες να αποτελούν περιοχές με θετικές τιμές σε ένα πίνακα στον οποίο υπάρχουν κυρίως μηδενικά.

Η συνάρτηση βαθμού ομοιότητας που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής είναι η ακόλουθη:

$$\sigma(a, b) = \begin{cases} -1 & \text{αν } a = e \vee b = e \\ -2 & \text{αν } a, b \in A, a \neq b \\ 2 & \text{αν } a, b \in A, a = b \end{cases} \quad (\text{A.3.7})$$

Στην περίπτωση ταυτοποίησης των ευθειών του ΟΠΕ πραγματοποιείται η σύγκριση μιας ακολουθίας θέσεων ευθειών που έχουν ανιχνευθεί με ένα πλήθος N πρότυπων ακολουθιών θέσεων που προέκυψε από τη διαδικασία της που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.5.3 και επιλέγεται η βέλτιστη ακολουθία από το σύνολο των πρότυπων ακολουθιών για την ανασύσταση του πλέγματος του ΟΠΕ, χωρίς όμως να υλοποιηθεί το τμήμα οπισθοδρόμησης (Backtracking) που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για την εύρεση της ευθυγράμμισης των δύο ακολουθιών. Ο τροποποιημένος αλγόριθμος περιλαμβάνει και ένα απλό σχήμα δεικτησίας. Σε περίπτωση η ανιχνευθείσα ακολουθία παρουσιάζει το ίδιο μέγιστο με περισσότερες από μία πρότυπες ακολουθίες, δηλαδή έχουν συνεκτικές υποακολουθίες με το ίδιο πλήθος όρων τότε ερευνώνται τα δευτερεύοντα μέγιστα ώστε να εξασφαλισθεί ότι θα χρησιμοποιηθεί το πρότυπο με το μεγαλύτερο πλήθος συνεκτικών υποακολουθιών. Επιπλέον όταν κατά την ταυτοποίηση οι πρότυπες ακολουθίες που επιλεγούν για κάθε μία από τις δύο διευθύνσεις του ΟΠΕ έχουν προκύψει από διαφορετική εκτίμηση της αναμενόμενης τιμής, επιλέγεται η πρότυπη ακολουθία που παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό ομοιότητας με την αντίστοιχη ακολουθία θέσεων και αντίστοιχα επιλέγεται για την άλλη διεύθυνση η βέλτιστη πρότυπη ακολουθία που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη αναμενόμενη τιμή.

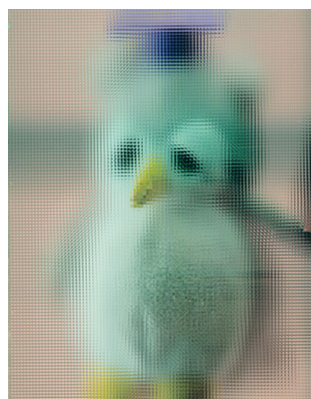
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης – Αξιολόγηση Σαρωτή

Β.1 Εικόνες Ολοκληρωτικής Φωτογράφισης

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων καταγράφηκαν ένα πλήθος από αντικείμενα με διαφορετική πολυπλοκότητα, διαφορετικά μεγέθη και τύπους φωτισμού για την εφαρμογή των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν. Ένα μικρό τμήμα από τα αρχικά αντικείμενα και οι αντίστοιχες εικόνες ΟΦ που καταγράφηκαν από το σύστημα παρουσιάζονται στην Εικόνα Β.1.1



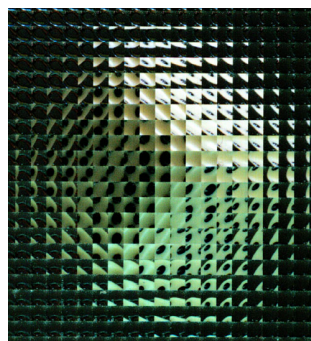
(α)



(δ)



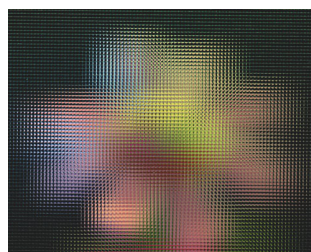
(β)



(ε)



(γ)



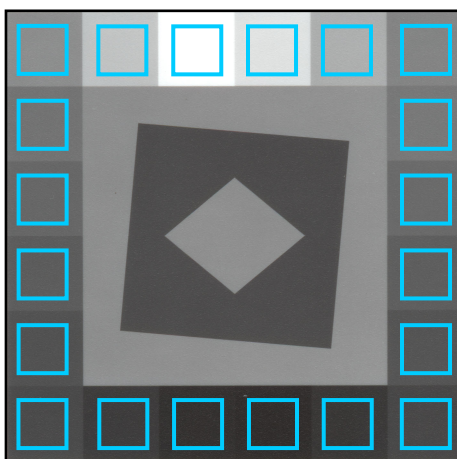
(στ)

Εικόνα Β.1.1: (α),(β),(γ) Εικόνες 3Δ αντικειμένων, (δ),(ε),(στ) Εικόνες ΟΦ των αντίστοιχων αντικειμένων.

B.2 Αξιολόγηση Σαρωτή

Στο παρόν παράρτημα η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την αντικειμενική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών του σαρωτή που χρησιμοποιήθηκε με χρήση των στόχων της Εικόνας 5.1.

Στο πρώτο στάδιο της ανάλυσης έγινε χρήση της κεντρικής περιοχής του στόχου ISO-16067-1 την εύρεση της δυναμικής περιοχής απόκρισης για τη φωτεινότητα του σαρωτή όπως επίσης και για τα χαρακτηριστικά της τονικής απόκρισης, δηλαδή της διακριτικής ικανότητας του σαρωτή μεταξύ περιοχών με μικρή απόκλιση στη φωτεινότητα. Η κεντρική περιοχή του στόχου ISO-16067-1 απεικονίζεται στην Εικόνα B.2.1.

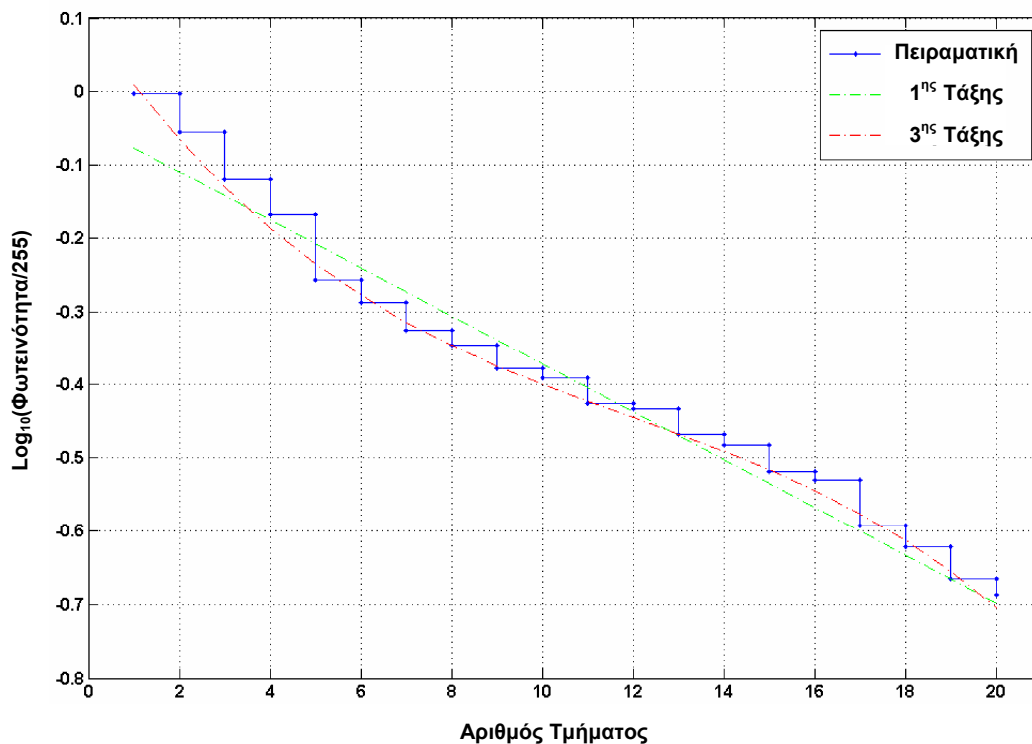


Εικόνα B.2.1: Τμήμα στόχου ISO-16067-1 για μέτρηση τονικής απόκρισης.

Στο παραπάνω τμήμα στόχου σημειώνονται 20 διαφορετικής φωτεινότητας τετράγωνα περιοχές οι οποίες χρησιμοποιούνται στη μέτρηση. Λαμβάνοντας υπόψη τη λογαριθμική μεταβολή της φωτεινότητας μεταξύ των περιοχών, υπολογίζουμε τη μέση τιμή της φωτεινότητας σε κάθε περιοχή και απεικονίζουμε τον κανονικοποιημένο λογάριθμο στο Σχήμα B.2.1.

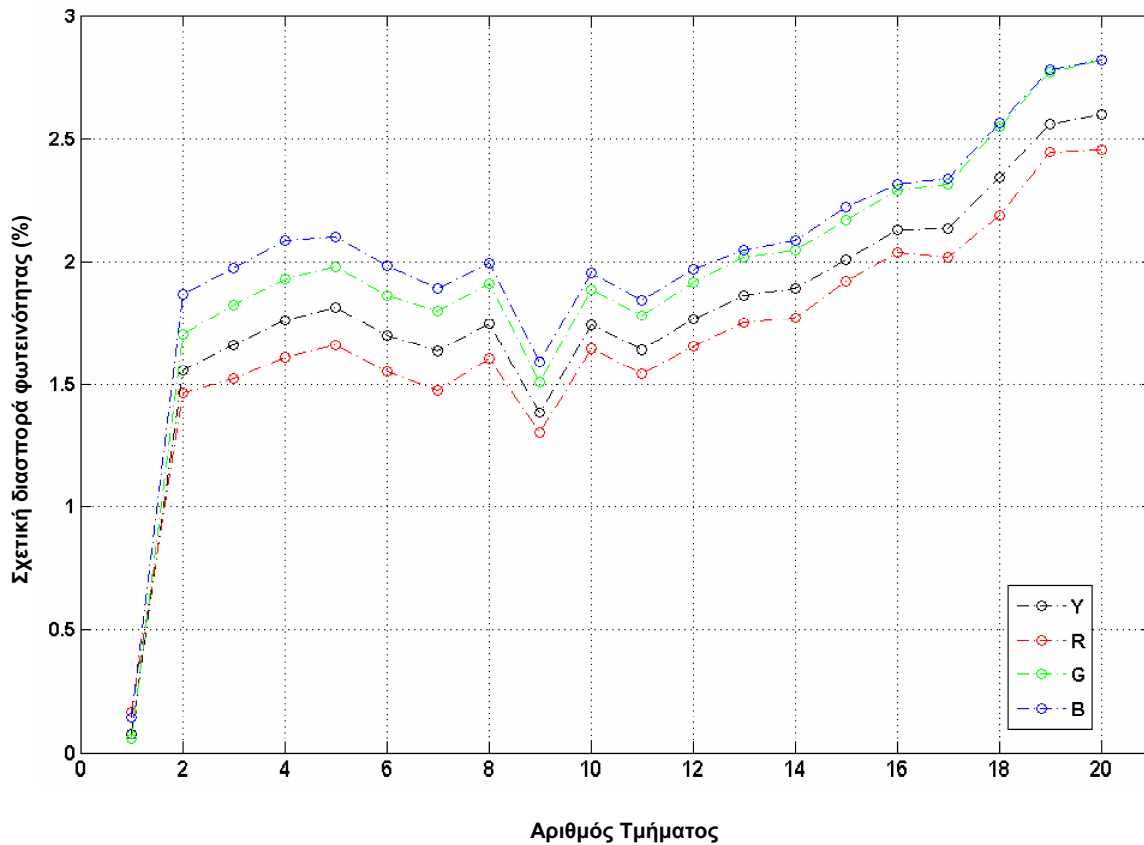
Στο διάγραμμα σημειώνονται οι διακριτές στάθμες για το λογάριθμο των τιμών της φωτεινότητας, από όπου γίνεται προφανές ότι η δυναμική περιοχή του σαρωτή καλύπτει όλη την περιοχή φωτεινοτήτων που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον παρατηρείται απόκλιση από τη γραμμική μορφή που θα έπρεπε να παρουσιάζει η τονική απόκριση του σαρωτή, η οποία προσεγγίζεται καλά από μία καμπύλη τρίτης τάξης που σημειώνεται στο ίδιο διάγραμμα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί

διόρθωση για το γάμμα [103] της ληφθείσας εικόνας ώστε να παρουσιάζει βελτιωμένη απόκριση φωτεινότητας.



Σχήμα Β.2.1: Τονική απόκριση σαρωτή.

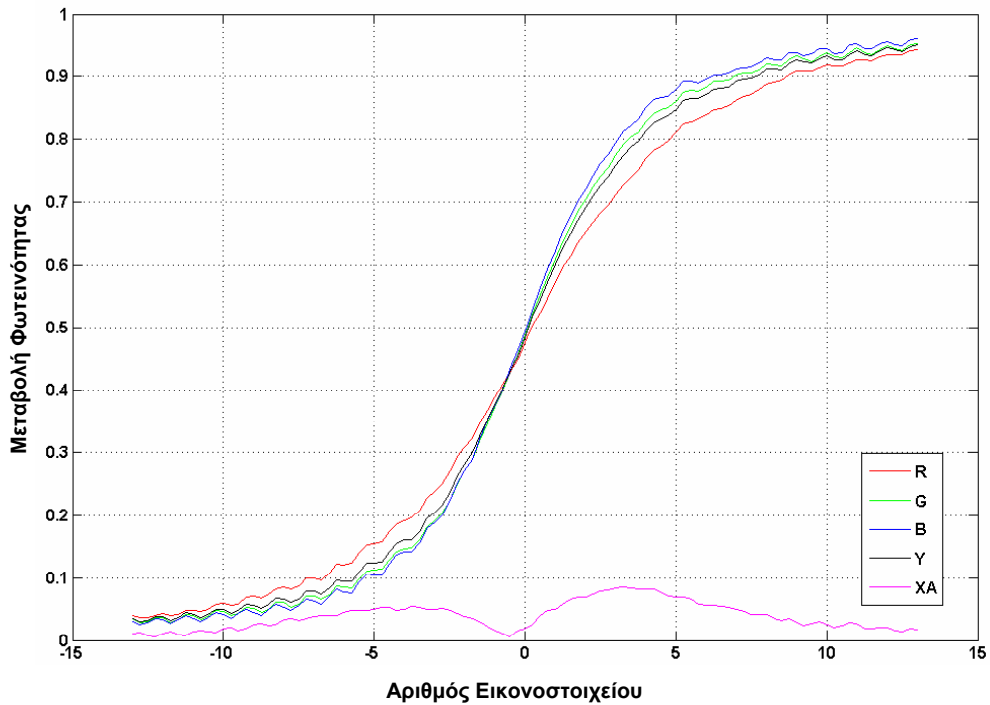
Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας αξιολόγησης των χαρακτηριστικών του σαρωτή εκτιμήθηκε το επίπεδο θορύβου με βάση την ίδια περιοχή του στόχου. Για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση της φωτεινότητας για κάθε ένα από τα είκοσι τμήματα του στόχου και για κάθε χρωματική συνιστώσα, όπως και για τη συνολική φωτεινότητα, κανονικοποιημένη ως προς τα μέσα επίπεδα φωτεινότητας. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η λευκή περιοχή του στόχου δίνει εξαιρετικά μικρή απόκλιση με μη αντιπροσωπευτικά επίπεδα θορύβου, λόγω του ότι οι τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων στη δεδομένη περιοχή έχουν οδηγηθεί στον κόρο. Στο Σχήμα Β.2.2 απεικονίζεται το κανονικοποιημένο επίπεδο του θορύβου σε ποσοστό επί τοις εκατό (σχετική διασπορά φωτεινότητας %). Πρέπει να σημειωθεί ότι σε κάθε περίπτωση η σχετική διασπορά φωτεινότητας παραμένει μικρότερη από 3% γεγονός που υποδηλώνει την ιδιαίτερα καλή απόκριση του σαρωτή στο θόρυβο.



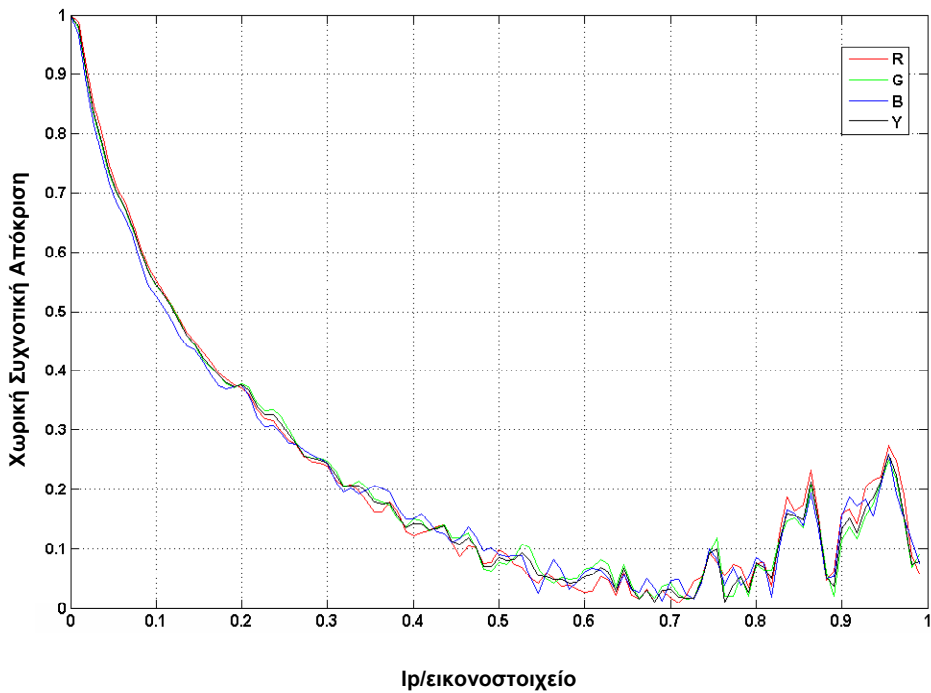
Σχήμα Β.2.2: Χαρακτηριστικά θορύβου.

Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της χωρικής συχνοτικής απόκρισης με χρήση του στόχου USAF-1951 η οποία επιτρέπει έναν άμεσο υπολογισμό της περιοχής στην οποία κυμαίνεται η ανάλυση του σαρωτή και της τεχνικής της κεκλιμένης ακμής (Slanted Edge) [163] που παρέχει ακριβή προσέγγιση της χωρικής συχνοτικής απόκρισης του σαρωτή. Ο υπολογισμός με βάση το στόχο USAF 1951 [61] έδειξε ότι η ελάχιστη διακριτή αντίθεση παρατηρείται για το πέμπτο στοιχείο της τέταρτης ομάδας, με αποτέλεσμα η μέγιστη ανάλυση του σαρωτή να έχει τιμή $r_\gamma \approx 2200$ dpi, η οποία είναι αρκετά χαμηλότερη από την ονομαστική τιμή των 3200dpi. Η συγκεκριμένη απόκλιση ενδεχόμενα οφείλεται σε μικρές αποκλίσεις των αισθητήρων λόγω χρήσης η αποκλίσεων του αρχικού υλικού. Παρόλα αυτά η πειραματικά ευρεθείσα τιμή επαρκούσε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος η παραπάνω τιμή επιβεβαιώθηκε και με την τεχνική της κεκλιμένης ακμής όπου η απόκριση της ακμής ήταν ιδιαίτερα οξεία και για τις τρεις χρωματικές συνιστώσες, με μικρό σφάλμα μεταξύ τους το οποίο έδωσε μία τιμή για τη χρωματική απόκλιση μικρότερη από 0.5 εικονοστοιχεία, ενώ η χωρική συχνοτική απόκριση ήταν μεγαλύτερη

από το 30% της μέγιστης τιμής της για χωρικές συχνότητες που αντιστοιχούσαν στα 1800 dpi. Η απόκριση της ακμής απεικονίζεται στο Σχήμα Β.2.3 ενώ το διάγραμμα της χωρικής συχνοτικής απόκρισης στο Σχήμα Β.2.4.



Σχήμα Β.2.3: Κατατομή κεκλιμένης ακμής.

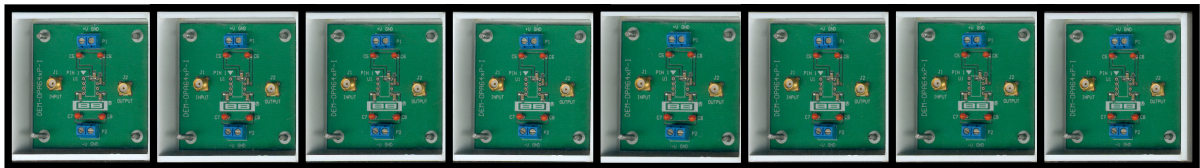


Σχήμα Β.2.4: Χωρική συχνοτική απόκριση.

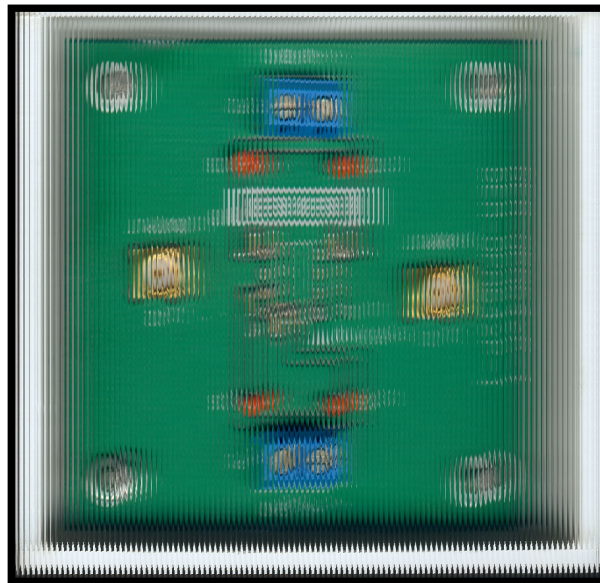
Από το τελευταίο διάγραμμα γίνεται άμεσα αντιληπτό ότι η απόκριση συχνότητας πάνω από το όριο Nyquist περιορίζεται σημαντικά με αποτέλεσμα να περιορίζεται αντίστοιχα και το φαινόμενο της αλλοίωσης στις υψηλότερες συχνότητες παραμένοντας σε όλες τις συχνότητες μικρότερο από το 30% της μέγιστης τιμής της.

B.3 Πολυστερεοσκοπικές Καταγραφές

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζεται ένα πολυστερεοσκοπικό ζεύγος εικόνων το οποίο καταγράφηκε με την τεχνική που περιγράφηκε στο πέμπτο κεφάλαιο. Στην Εικόνα B.3.1 περιέχονται οι οκτώ διαδοχικές λήψεις του αντικειμένου από τις οποίες μπορεί να προκύψει ένα σύνολο από διαφορετικές κωδικοποιήσεις ώστε να αναπαρασταθεί σε διαφορετικά πολυστερεοσκοπικά συστήματα. Στην εικόνα B.3.2 απεικονίζεται η σύνθεση των διαφορετικών λήψεων για προβολή από ένα πολυστερεοσκοπικό σύστημα με χρήση κυλινδρικών φακών.



Εικόνα B.3.1: Πολυστερεοσκοπική καταγραφή.



Εικόνα B.3.2: Σύνθεση Πολυστερεοσκοπικού Στερεοζεύγους.

ΟΡΟΛΟΓΙΕΣ

Αισθητήρας Επαφής Εικόνας	Contact Image Sensor
Αλληλεπίδραση	Crosstalk
Αλλοίωση	Aliasing
Ανομοιότητα	Disparity
Αντίθεση	Contrast
Αντίστροφος DCT	Inverse DCT
Ασπρόμαυρη	Grayscale
Αυτοστερεόγραμμα	Autostereogram
Βήμα Κουκίδας	Dot Pitch
Βηματικός Κινητήρας	Stepper Motor
Γωνία εκτροπής	Skew Angle
Δεσοξυ-ριβο-Νουκλεϊκό Οξύ	Desoxy-ribose-Nucleic Acid
Διακριτός Μετασχηματισμός Κυματιδίου	Discrete Wavelet Transform
Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου	Discrete Cosine Transform
Διάταξη Συζευγμένου Φορτίου	Charge Coupled Device
Διάταξη Συμπληρωματικού Ημιαγωγού Μετάλλου Οξειδίου	Complementary Metal Oxide Semiconductor
Διόφθαλμη Ανομοιότητα	Binocular Disparity
Δυαδική	Binary
Δυναμική Περιοχή	Dynamic Range

Ενδοκωδικοποίηση	Intra Coding
Ζεύγη Γραμμών Ανά Χιλιοστό	Line Pairs Per Millimeter
Θόρυβος Βολής	Shot Noise
Ισοστάθμιση Ιστογράμματος	Histogram Equalization
Καθολικά	Global
Κεκλιμένη Ακμή	Slanted Edge
Κινούμενη Εικόνα	Video
Κουκίδες ανά Ίντσα	Dots per Inch
Κωδικοποίηση Τρέχοντος Μήκους	Runlength Encoding
Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο	Peak-Signal-to-Noise-Ratio
Μέγιστη Κοινή Υποακολουθία	Longest Common Subsequence
Μέθοδος Ανασύστασης Όγκου	Volumetric
Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα	Mean Squared Error
Μετασχηματισμός Walsh-Hadamard	Walsh-Hadamard Transform
Μονόχρωμη	Monochrome
Οθόνη Υγρών Κρυστάλλων	Liquid Crystal Display
Ομάδα Εικονοπλαισίων	Group of Pictures
Ολόγραμμα Ανάκλασης	Reflective Hologram
Ολόγραμμα Εκπομπής	Transmission Hologram
Ολογραφική	Holographic
Ολοκληρωτική Φωτογράφιση	Integral Photography
Ολοσκοπική	Holoscopic

Οξύτητα Εικόνας	Image Sharpness
Οπτική Αναγνώριση Χαρακτήρων	Optical Character Recognition
Πλεονασμός	Redundancy
Πρόγνωση Απλής κατεύθυνσης	Predictive Coding
Πρόγνωση Διπλής Κατεύθυνσης	Bidirectionally Predictive Coding
Προσαρμοστικής Ισοστάθμισης Ιστογράμματος με Περιορισμό Αντίθεσης	Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization
Στερεόγραμμα	Stereogram
Στερεόγραμμα Τυχαίας Κουκκίδας	Random Dot Stereogram
Συνεχής Συνιστώσα	Direct Current
Συντελεστής Κάλυψης	Fill Factor
Σύντηξη	Fusion
Συστοιχία Κυλινδρικών Φακών	Lenticular Arrays
Συστοιχία Σημειακών Οπών	Pinhole Array
Συστοιχία Στοιχειωδών Φακών	Microlens Array
Συστοιχίες Φίλτρων Επιλογής Μήκους Κύματος	Wavelength Selective Filter Arrays
Ταχύτητα Εναλλαγής εικονοπλαισίων	Frame Rate
Τηλεόραση Υψηλής Ευκρίνειας	High Definition Television
Τονική Απόκριση	Tonal Response
Τριγραμμικός	Trilinear
Φράγματα Παράλλαξης	Parallax Barriers
Φωτοδίοδος εκπομπής	Light Emitting Diode

Φωτοπολλαπλασιαστής	Photomultiplier Tube
Χάρτης Ανομοιότητας	Disparity Map
Χρωματική Εκτροπή	Chromatic Aberration
Χωρική Συχνотική Απόκριση	Spatial Frequency Response
Ψηφιακός Σαρωτής	Digital Scanner
Ψυχοοπτικός	Psychovisual

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1Δ	Μονοδιάστατη – Μονοδιάστατο
2Δ	Δισδιάστατη – Δισδιάστατο
3Δ	Τρισδιάστατη – Τρισδιάστατο
3Δ ³	3Δ Δομή Δεδομένων
ΑΑ	Αντιστάθμιση Ανομοιότητας
ΔΕΑ	Διάνυσμα Εκτίμησης Ανομοιότητας
ΕΑ	Εκτίμηση Ανομοιότητας
ΚΑΑ	Κωδικοποιητής Αντιστάθμισης Ανομοιότητας
ΜΕΔ	Μονάδα Εκτίμησης Διασπορών
ΜΠΚ	Μονάδα Πρόβλεψης Κατευθυντικότητας
ΟΠΕ	Ορθογώνιο Πλέγμα Ευθειών
ΟΦ	Ολοκληρωτική Φωτογράφιση
ΣΕ	Στοιχειώδεις Εικόνες
ΣΣΟ	Συστοιχία Σημειακών οπών
ΣΣΦ	Συστοιχία Στοιχειωδών Φακών
ΣΦΕΜΚ	Συστοιχία Φίλτρων Επιλογής Μήκους Κύματος
ΧΔ	Χάρτης Διασπορών
ΧΕ	Χωρικά Εικονοπλαίσια
lp/mm	Ζεύγη Γραμμών Ανά Χιλιοστό
CCD	Διάταξη Συζευγμένου Φορτίου

CIS	Αισθητήρας Επαφής Εικόνας
CLAHE	Προσαρμοστική Ισοστάθμιση Ιστογράμματος με Περιορισμό Αντίθεσης
CMOS	Διάταξη Συμπληρωματικού Ημιαγωγού Μετάλλου Οξειδίου
DC	Συνεχής Συνιστώσα
DCT	Διακριτός Μετασχηματισμός Συνημιτόνου
DNA	Δεσοξυ-ριβο-Νουκλεϊκό Οξύ
DPI	Κουκκίδες Ανά Ίντσα
DWT	Διακριτός Μετασχηματισμός Κυματιδίου
GOP	Ομάδα Εικονοπλαισίων
IDCT	Αντίστροφος DCT
JPEG	Joint Pictures Expert Group
LCD	Οθόνη Υγρών Κρυστάλλων
LCS	Μέγιστη Κοινή Υποακολουθία
LED	Φωτοδίοδος εκπομπής
LZW	Lempel-Ziv-Welch
MPEG	Motion Pictures Expert Group
MSE	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα
OCR	Οπτική Αναγνώριση Χαρακτήρων
PSNR	Λόγος Σήματος Προς Θόρυβο
RLE	Κωδικοποίηση Τρέχοντος Μήκους
SFR	Χωρική Συχνотική Απόκριση

WHT

Μετασχηματισμός Walsh-Hadamard

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. C. Wheatstone, "Contributions to the Physiology of Vision.-Part the First. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 128, pp 371-394, 1838.
2. C. Wheatstone, "Contributions to the Physiology of Vision.-Part the Second. On some remarkable, and hitherto unobserved, Phenomena of Binocular Vision (continued)," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 142, pp 1-17, 1852.
3. D. Maupu, M. Van Horn, S. Weeks, E. Bullitt, "3D Stereo Interactive Medical Visualization," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25(5), pp. 67-71, 2005
4. T. Motoki, H. Isono, I. Yuyama, "Present status of three-dimensional television research," *Proceedings of the IEEE*, vol.83(7), pp.1009-1021, 1995
5. J. Hasting, M. McFarren, "3-D cockpit simulator displays-achieving precise depth placement of objects in graphic images," in *Proc. IEEE Nat. Aerosp. and Elec. Con. (NAECON94)*, vol.2, pp.709-714, 1994
6. H. Liao, N. Hata, S. Nakajima, M. Iwahara, I. Sakuma, T. Dohi, "Surgical navigation by autostereoscopic image overlay of integral videography," *IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine*, vol.8(2), pp. 114- 121, 2004
7. G. Lippmann, "La Photographie Integrale." *C.R Acad. Sci.*, 146, pp. 446-455, 1908
8. B.Javidi, F.Okano eds., *Three-Dimensional Television, Video, and Display Technologies*, Springer-Verlag, Berlin, 2002.
9. J. S. Jang, B. Javidi, "Two-step integral imaging for orthoscopic three-dimensional imaging with improved viewing resolution," *Opt. Eng.*, vol. 41(10), pp. 2568-2571, 2002
10. F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, I. Yuyama, "Real-time pickup method for a three-dimensional image based on integral photography," *Applied Optics*, vol. 36(7), pp. 1598-1603, 1997.

11. F. Okano, H. Hoshino, J. Arai, I. Yuyama, "Three-dimensional video system based on integral photography," *Opt. Eng.*, vol. 38(6), p. 1072-1077, 1999
12. C. Burckhardt, E. Doherty, "Beaded Plate Recording of Integral Photographs," *Appl. Opt.*, vol. 8(11), p. 2329-2331, 1976
13. J. Jang and B. Javidi, "Three-dimensional integral imaging with electronically synthesized lenslet arrays," *Opt. Lett.*, vol. 27, pp. 1767-1769, 2002
14. J. Jang and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperturesizes," *Opt. Lett.*, vol. 28, pp. 1924-1926, 2003
15. J. Jang and B. Javidi, "Two-step integral imaging for orthoscopic three-dimensional imaging with improved viewing resolution," *Opt. Eng.*, vol. 41(10), p. 2568-2571, 2002
16. N. Davies, M. McCormick, M. Brewin, "Design and analysis of an image transfer system using microlens arrays," *Optical Engineering*, vol. 33, pp. 3624-3633, 1994.
17. J. S. Jang and B. Javidi, "Formation of orthoscopic three dimensional real images in direct pickup one-step integral imaging," *Opt. Eng.* 42, 1869-1870 (2003)
18. J. R. Cameron, J. G. Skofronick, R. M. Grant, *Physics of the body*, Medical Physics Publishing Corp., 1999
19. E. Widmaier, H. Raff, K. Strang, *Vander's Human Physiology - The Mechanisms of body Function*, McGraw-Hill Education, 2005
20. R. Wilson, F. Keil, *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences (MITECS)*, MIT Press, 2001
21. L. Lipton, *Stereographics Developers' Handbook*, Stereographics Corporation, 1997
22. J. M. Wallace, P.V.Hobbs, *Atmospheric Science , An Introductory Survey*, Academic Press, 2006
23. Π. Πατιάς, *Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία*, Εκδόσεις Ζήτη, 1991
24. Y. Yeh, L. D. Silverstein, "Limits of fusion and depth judgement in stereoscopic colour displays," *Human Factors* vol. 32(1), pp. 45-60, 1990
25. D. B. Diner and D.H. Fender, *Human Engineering in Stereoscopic Display Devices*, Plenum Press, 1993

26. T. Okoshi, Three-Dimensional Imaging Techniques, Academic Press, 1976
27. L. Lipton, Foundations of the stereoscopic cinema: A study in Depth, Van Nostrand Reinhold, 1982
28. L. Lipton, J. Halnon, "Universal Electronic Stereoscopic Display," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III, vol. 2653, pp. 219-223, 1996
29. A. Lit, "The Magnitude of the Pulfrich Stereophenomenon as a function of binocular differences of intensity at various levels of illumination," The American Journal of Psychology, vol. LXII(2), pp. 159-181, 1949
30. L. T. Likova, C. W. Tyler, "Spatiotemporal relationships in a dynamic scene: stereomotion induction and suppression," Journal of Vision, vol.3, pp. 304-317, 2003
31. O. Cakmakci, J. Rolland, "Head-worn displays: a review," IEEE J. of Display Technology, vol. 2(3), pp. 199-216, 2006
32. B. Julesz, Foundations of Cyclopean perception, University of Chicago Press, 1971
33. G. Woodgate, J. Harold, M. Jacobs, R. Moseley, D. Ezra, "Flat panel autostereoscopic displays-characterization and enhancement," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VII, vol. 3957, pp. 153-164, 2000
34. K. Perlin, C. Poultney, J. Kollin, D. Kristjansson, S. Paxia, "Recent advances in the NYU autostereoscopic display," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VIII, vol. 4297, pp. 196-203, 2001
35. S. Pastoor, M. Wöpking, "3-D Displays: A review of current technologies," Elsevier Science, Displays, vol. 17(2), pp. 100-110, 1997.
36. A. Schmidt, A. Grasnick, "Multiviewpoint autostereoscopic displays from 4D-Vision GmbH," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, vol. 4660, pp. 212-221, 2002
37. C. Tyler, M. Clarke, "Autostereogram," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Applications, vol. 1256, pp. 182-197, 1990
38. P. Hariharan, Basics of Holography, Cambridge University Press, 2002
39. A Bogusz, "Holoscopy and holoscopic principles," Institute of Physics Journal of Optics, vol. 20, pp. 281-284, 1989

40. W-S. Chun, J. Napoli, O. Cossairt, R. Dorval, D. Hall, T. Purtell II, J. Schooler, Y. Banker, G. Favalora, "Spatial 3D infrastructure: display-independent software framework, high-speed rendering electronics, and several new displays," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII, vol. 5664, pp. 302-312, 2005
41. N. Dodgson, "On the number of viewing zones required for head-tracked autostereoscopic display," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII, vol. 6055, 60550Q , 2006
42. N. Dodgson, "Analysis of the viewing zone of multiview autostereoscopic displays," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, vol. 4660, pp. 254-265, 2002
43. L. Lipton, M. Feldman, "New autostereoscopic display technology: the SynthaGram," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, vol. 4660, pp. 229-235, 2002
44. V. Markov, S. Kupiec, A. Travis, "Recent advances in temporally multiplexed and point aspect autostereoscopic displays," Proc. SPIE Defense, Security, Cockpit, and Future Displays II, vol. 6225, 62250S, 2006
45. Y. Park, S. Kim, S. Lee, E. Kim, "Implementation of projection-type autostereoscopic multiview 3D display system for real-time applications," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI, vol. 5291, pp. 245-254, 2004
46. I. Relke, B. Riemann, "Special features of stereo visualization in multichannel autostereoscopic display from 4D-Vision," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X, vol. 5006, pp. 128-135, 2003
47. P. St-Hilaire, S. Benton, M. Lucente, J. Sutter, W. Plesniak, "Advances in holographic video," Proc. SPIE Practical Holography VII: Imaging and Materials, vol. 1914, pp. 188-196, 1993
48. T. Yamaguchi, H. Yoshikawa, "Real time calculation for holographic video display," Proc. SPIE Practical Holography XX: Materials and Applications, vol. 6136, 61360T, 2006
49. D. Scharstein and R. Szeliski, "A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms," Springer International Journal of Computer Vision, vol. 47(1/2/3), pp. 7-42, 2002

50. J. Ellinas, M. Sangriotis, "Stereo Image Compression Using Wavelet Coefficients Morphology", Elsevier Science Image & Vision Computing, vol. 22 (4), pp. 281-290, 2004.
51. J. Son and B. Javidi, "Three-Dimensional Imaging Methods Based on Multiview Images," IEEE/OSA Journal of Display Technology, vol. 1(1), pp. 125-140, 2005
52. J. Park, S. Min, S. Jung, and B. Lee, "Analysis of Viewing Parameters for Two Display Methods Based on Integral Photography," Applied Optics, vol. 40, pp. 5217-5232, 2001
53. H. Ives, "Optical properties of a Lippmann lenticulated sheet," Journal of Optical Society of America, vol. 21, pp. 171-176, 1931
54. N. Davies, M. McCormick, and L. Yang, "Three-dimensional imaging systems: a new development," Applied Optics, vol. 27, pp. 4520-4528, 1988
55. J. Jang and B. Javidi, "Three-dimensional projection integral imaging using micro-convex-mirror arrays," OSA Optics Express, vol. 12, pp. 1077-1083, 2004
56. J. Jang and B. Javidi, "Two-step integral imaging for orthoscopic three-dimensional imaging with improved viewing resolution," Optical Engineering, vol. 41, pp. 2568-2571, 2002
57. J. Arai, F. Okano, H. Hoshino, I. Yuyama, "Gradient-index lens-array method based on real-time integral photography for three-dimensional images," Applied Optics, vol. 37(11), pp. 2034-2045, 1998
58. J. Jang and B. Javidi, "Formation of orthoscopic three-dimensional real images in direct pickup one-step integral imaging," Optical Engineering, vol. 42(7), pp. 1869-1870, 2003.
59. C. Burkhardt, "Optimum Parameters and Resolution Limitation of Integral Photography," Journal of the Optical Society of America (JOSA), vol. 58(1), pp. 71-76, 1968.
60. J. Arai, M. Okui, M. Kobayashi, and F. Okano, "Geometrical effects of positional errors in integral photography," Journal of Optical Society of America (JOSA) A, vol. 21, pp. 951-958, 2004.
61. E. Hecht, Optics, 3rd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1997.
62. M. Corral and B. Javidi, "Formation of real, orthoscopic integral images by smart pixel mapping," OSA Optics Express, vol. 13(23), pp. 9175-9180, 2005.

63. R. Martínez-Cuenca, G. Saavedra, M. Martínez-Corral and B. Javidi, "Enhanced depth of field integral imaging with sensor resolution constraints," OSA Optics Express, vol. 12, pp. 5237-5242, 2004
64. J. Jang and B. Javidi, "Large depth-of-focus time-multiplexed three-dimensional integral imaging by use of lenslets with nonuniform focal lengths and aperture sizes," Optics Letters, vol 28, pp. 1924-1926, 2003
65. J. Jang and B. Javidi, "Improvement of Viewing Angle in Integral Imaging by Use of Moving Lenslet Arrays with Low Fill Factor ," Applied Optics, vol 42, pp. 1996-2002, 2003
66. T. Naemura, T. Yoshida, and H. Harashima, "3-D computer graphics based on integral photography," Optics Express, vol 8, pp. 255-262, 2001
67. M. Martínez-Corral, B. Javidi, R. Martínez-Cuenca and G. Saavedra, "Integral Imaging with Improved Depth of Field by Use of Amplitude-Modulated Microlens Arrays," Applied Optics, vol. 43, pp. 5806-5813, 2004
68. J. Jang and B. Javidi, "Time-Multiplexed Integral Imaging For 3D Sensing and Display," Optics & Photonics News, vol. 15, pp. 36-43, 2004
69. A. Stern and B. Javidi, "3-D computational synthetic aperture integral imaging (COMPSAII)," Optics Express, vol. 11, pp. 2446-2451, 2003
70. J. Jang and B. Javidi, "Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of nonstationary micro-optics," Optics Letters, vol. 27, pp. 324-326, 2002
71. Y. Kim, J. Park, H. Choi, S. Jung, S. Min, and B. Lee, "Viewing-angle-enhanced integral imaging system using a curved lens array," Optics Express, vol. 12, pp.421-429, 2004
72. M. Hain, W. Von Spiegel, M. Schmiedchen, T. Tschudi, and B. Javidi, "3D integral imaging using diffractive Fresnel lens arrays," Optics Express, vol. 13, pp. 315-326, 2005
73. T. Georgeiv, K. Zheng, B. Curless, D. Salesin, S. Nayar, and C. Intwala, "Spatio-Angular Resolution Tradeoff in Integral Photography," Proceedings of 17th Eurographics Symposium on Rendering (EGSR), vol. 1, pp. 263-272, 2006
74. H. Liao, M. Iwahara, Y. Katayama, N. Hata, T. Dohi, "3-D from a Distance using Integral Photography," Optics Letters, vol. 30(6), pp.613-615, 2005.

75. G. Milnthorpe, M. McCormick, N. Davies, "Computer Modeling of Lens Arrays for Integral Image Rendering," Proc. IEEE 20th Eurographics UK conference, vol. 1, pp. 136-141, 2002
76. J. Jang, F. Jin and B. Javidi, "Three-dimensional integral imaging with large depth of focus by use of real and virtual image fields ," Optics Letters, vol. 28, pp. 1421-1423, 2003
77. O. Youssef, A. Aggoun, W. Wolf, M. McCormick, "Pixels grouping and shadow cache for faster integral 3D ray tracing," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems IX, vol. 4660, pp. 123-134, 2002
78. J. Ren, A. Aggoun, M. McCormick, "Computer generation of integral 3D images with maximum effective viewing zone," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X, vol. 5006, pp. 65-73, 2003
79. S. Athineos, N. Sgouros, P. Papageorgas, D. Maroulis, M. Sangriotis, N. Theofanous, "Physical modeling of a microlens array setup for use in computer generated IP," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XII, vol. 5664, pp. 472-479, 2005
80. S. Athineos, N. Sgouros, P. Papageorgas, D. Maroulis, M. Sangriotis, N. Theofanous, "Photorealistic integral photography using a ray-traced model of capturing optics," Journal of Electronic Imaging, vol 15(04), nr. 043007, 2006 (υπό έκδοση)
81. S. Min, J. Kim, B. Lee, "New Characteristic Equation of Three-Dimensional Integral Imaging System and its Applications," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 44(2), pp. 1.71-1.74, 2005
82. S. Nakajima, K. Nakamura, K. Masamune, I. Sukuma, T. Dohi, "Three-dimensional medical imaging display with computer-generated integral photography," Computerized Medical Imaging and Graphics, vol 25(3), pp. 235-241, 2001.
83. I. Sakuma, Y. Tanaka, Y. Takai, E. Kobayashi, T. Dohi et. al, "Three-dimensional digital ultrasound imaging system for surgical navigation," Elsevier ICS Computer Assisted Radiology and Surgery, pp. 117-122, 2001.
84. H. Liao, S. Nakajima, M. Iwahara, E. Kobayashi, I. Sakuma, N. Yahagi, T. Dohi, "Intra-operative Real-Time 3-D Information Display System Based on Integral

- Videography,” Proc. 4th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2001, vol. 2208, pp. 392-400, 2001.
85. H. Liao, M. Iwahara, N. Hata, and T. Dohi, "High-quality integral videography using a multiprojector," OSA Optics Express, vol. 12, pp.1067-1076. 2004.
86. K. Matsui, K. Matsumiya, H. Liao, K. Masamune, K. Yasuda, T. Dohi, "Three dimensional real-time image overlay navigation system using Integral Videography in knee-joint surgery: evaluation of motion tracking capability," Proc of 20th International Congress and Exhibition of Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2006), pp.181-183, 2006.
87. H. Liao, M. Iwahara, T. Koike, N. Hata, I. Sakuma, T. Dohi, "Scalable high-resolution integral videography autostereoscopic display by use of seamless multi-projection," Applied Optics, vol. 44(3), pp.305-315, 2005.
88. M. Levoy, "Light Fields and Computational Imaging," IEEE Computer, vol. 39(8), pp. 46-55, 2006.
89. J. Park, Y. Kim, J. Kim, S. Min, and B. Lee, "Three-dimensional display scheme based on integral imaging with three-dimensional information processing," OSA Optics Express, vol. 12, pp. 6020-6032, 2004.
90. J. Hyun, D. Hwang, J. Park, D. Shin, E. Kim, "Display of magnified 3D images in integral imaging by use of intermediate-view reconstruction technique," Proc. SPIE Three-Dimensional TV, Video, and Display V, vol. 6392, nr. 63920Q, 2006 (υπο έκδοση).
91. B. Lee, J. Park, H. Choi, "Scaling of three-dimensional integral imaging," Proc. SPIE Optical Information Systems, vol. 5202, pp. 60-67, 2003.
92. Π. Βαρώτσος, Κ. Αλεξόπουλος, Φυσική Στερεάς Κατάστασης, Εκδόσεις Σαββάλα, 1995.
93. R. Gann, Desktop Scanners: Image Quality Evaluation, Prentice Hall PTR, 1998.
94. H. Kakinuma, M. Mohri, M. Sakamoto, H. Sawai, S. Shibata, Y. Kasuya, Y. Ohnuki, W. Chonan, "Direct-contact type image sensors using a novel amorphous-silicon photodiode array," IEEE Electron Device Letters, vol. 12(8), pp. 413-415, 1991.
95. TDIS: Three-Dimensional Imaging System Based on Integral Photography for Precise Simulation of 3D Perception and Enhancement of the Telepresence Effect,

Future and Emerging Technologies (FET) IST Programme, Commission of the European Communities, Contract Number IST-2001-38862.

96. R.Seywald, "On the automated assessment of geometric scanner accuracy", Proc. ISPRS XVIII Symposium on Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31(B1), pp. 182-186, 1996.
97. Y. Frauel and B. Javidi, "Digital three-dimensional image correlation by use of computer reconstructed integral imaging," Applied Optics, vol. 41(26), pp. 5488-5496, 2002.
98. S. Yeom and B. Javidi, "Three-dimensional distortion-tolerant object recognition using integral imaging," OSA Optics Express, vol. 12(23), pp. 5795-5809, 2004.
99. J. Park, S. Jung, H. Choi, Y. Kim, B. Lee, "Depth extraction by use of a rectangular lens array and one-dimensional image modification," Applied Optics, vol. 43(25), pp. 4882-4895, 2004.
100. S. Hong and B. Javidi, "Three-Dimensional Visualization of Partially Occluded Objects Using Integral Imaging", IEEE Journal of Display Technology, vol. 1(2), pp. 354-359, 2005.
101. N. Gallagher Jr., G. Wise, "A theoretical analysis of the properties of median filters," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 29(6), pp. 1136-1141, 1981.
102. M. Schulze, J. Pearce, "Some properties of the two-dimensional pseudomedian filter," Proc. SPIE Nonlinear Image Processing II, vol. 1451, pp. 48-57, 1991.
103. R. Gonzalez and R. Woods, Digital image processing, 2nd edition, Prentice Hall, 2002.
104. R. Schubert, "Using a flatbed scanner as a stereoscopic near-field camera," IEEE Journal of Computer Graphics and Applications, vol. 20(2), pp. 38-45, 2000.
105. N. Sgouros, S. Athineos, M. Sangriotis, P. Papageorgas, and N. Theofanous, "Accurate lattice extraction in integral images," OSA Optics Express, vol. 14(22), pp. 10403-10409, 2006.
106. R. Gonzalez, R. Woods and S. Eddins, Digital image processing, using MATLAB, Prentice Hall, 2004.
107. T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, Introduction to algorithms, McGraw-Hill, 2000.

108. W. Pratt, Digital image processing, 3rd edition, J. Wiley & Sons, 2001.
109. A. Reza, "Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement," Springer Journal of VLSI Signal Processing, vol. 38(1), pp. 35-44, 2004.
110. J. Canny, "A Computational Approach for Edge Detection," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8(6), pp. 679-698, 1986.
111. J. Hull, "Document Image Skew Detection: Survey and annotated bibliography," Proc. World Scientific Document Analysis and Systems II, pp.40-64,1998.
112. Y. Zheng, H. Li, D. Doermann, "A Model-Based Line Detection Algorithms in Documents," Proc. IEEE 7th International Conference on Document Analysis and Recognition, vol. 1, pp. 44-48, 2003.
113. L. Najman, "Using Mathematical Morphology for Document Skew Estimation," Proc. SPIE Document Recognition and Retrieval XI, vol. 5296, pp. 182-191, 2003.
114. A. Amin, S. Fischer, "A Document Skew Detection Method Using the Hough Transform," Springer Pattern Analysis & Applications, vol. 3(3), pp. 243-253, 2000.
115. J. Kwag, S. Kim, S. Jeong, G. Lee, "Efficient skew estimation and correction algorithm for document images," Image and Vision Computing, vol. 20, pp. 25-35, 2002.
116. Y. Furukawa, Y. Shinagawa, "Accurate and robust segment extraction by analyzing distribution around peaks in Hough space," Computer Vision and Image Understanding, vol. 92, pp. 1-25, 2003.
117. J. Illingworth and J. Kittler, "A survey of the Hough transform ," Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 44(1), pp. 87-116, 1988.
118. R. Duda, P. Hart, "Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures," Communications of the ACM, vol. 15(1), pp. 11-15, 1972.
119. N. Kiryati, A. Bruckstein, "Heteroscedastic Hough Transform (HtHT): An Efficient Method for Robust Line Fitting in the 'Errors in the Variables' Problem ," Computer Vision and Image Understanding, vol. 78(1), pp. 69-83, 2000.
120. V. Shapiro, "Accuracy of the straight line Hough Transform: The non-voting approach," Computer Vision and Image Understanding, vol. 103, pp. 1-21, 2006.

121. J. Basak and S. Pal, "Theoretical quantification of shape distortion in fuzzy Hough transform ," Fuzzy Sets and Systems, vol. 154(2), pp. 227-250, 2005
122. C. Chau and W. Siu, "Adaptive dual-point Hough transform for object recognition," Computer Vision and Image Understanding, vol. 96(1),pp. 1-16, 2004.
123. A. Imiya and K. Iwawaki, "Voting method for the detection of subpixel flow field," Pattern Recognition Letters, vol. 24(1-3),pp. 197-214, 2003.
124. N. Kiryati ,Y. Eldar and A. Bruckstein, "A Probabilistic Hough Transform ," Pattern Recognition vol.24, pp. 303-316,1991
125. J. Illingworth and J.Kittler , "The Adaptive Hough Transform ", Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 690-698, 1989.
126. O. Chutatape and L. Guo, "A modified Hough transform for line detection and its performance," Pattern Recognition, vol. 32(2), pp. 181-192, 1999.
127. P. Slavik and V. Govindaraju, "Equivalence of Different Methods for Slant and Skew Corrections in Word recognition Applications," Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 23(3), pp. 323-326, 2001.
128. L. Gorman, "The document spectrum for page layout analysis," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 15(11), pp. 1162 – 1173, 1993.
129. T. Smith and M. Waterman, "Identification of common molecular subsequences," Journal of Molecular Biology, vol. 147, pp. 195-197, 1981.
130. S. Altschul, T. Madden, A. Schaffer, J. Zhang et. al., "Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs," Nucleic Acids Research, vol. 25(17), pp. 3389-3402, 1997.
131. K. Rao and P. Yip, The Transform and Data Compression Handbook, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
132. W. Pennebaker, J. Mitchell, JPEG Still image data compression standard, Van Nostrand Reinhold,1993.
133. J. Proakis, M. Salehi, Communication Systems Engineering, Prentice Hall, 2002.
134. J. Max, "Quantizing form minimum distortion," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 6, pp. 7-12,1960

135. K. Rao, J. Hwang, Techniques & standards for image-video & audio coding, Prentice Hall, 1996.
136. B. Furht, J. Greenberg, R. Westwater, Motion estimation algorithms for video compression, Kluwer Academic Publishers, 1997.
137. N. Sgouros, A. Andreou, M. Sangriotis, P. Papageorgas, D. Maroulis, N. Theofanous, "Compression of IP images for autostereoscopic 3D imaging applications," IEEE Proceedings of the 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), vol. 1, pp. 223 – 227, 2003.
138. D. Chaikalis, D. Maroulis, N. Sgouros, P. Papageorgas, N. Theofanous, "An Area-Efficient FPGA Implementation of a Disparity Estimation Scheme for Real - Time Compression of IP Images", IEEE International Conference on Signals and Electronic Systems, pp. 309-312, 2004.
139. D. Maroulis, N. Sgouros, D. Chaikalis, "FPGA-based Architecture for Real-Time IP Video and Image Compression," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS 2006), pp. 5579-5583, 2006.
140. Y. Song, "Improved disparity estimation algorithm with MPEG-2's scalability for stereoscopic sequences," IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 42(3), pp. 306-311, 1996.
141. M. Moellenhoff, M. Maier, "Transform coding of stereo image residuals," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 7(6), pp. 804-812, 1998.
142. W. Woo and A. Ortega, "Optimal Blockwise Dependent Quantization for Stereo Image Coding," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 9(6), pp. 861-867, 1999.
143. J. Ohm, "Stereo/multiview video encoding using the MPEG family of standards," Proc. SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems VI, vol. 3639, pp. 242-253, 1999.
144. Y. Kima, S. Choia, S. Chob and K. Sohn, "Efficient disparity vector coding for multiview sequences," Elsevier Science Signal Processing: Image Communication, vol. 19(6), pp 539-553, 2004.
145. W. Yang, K. Ngan, J. Cai, "An MPEG-4-compatible stereoscopic/multiview video coding scheme," IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 16(2), pp. 286-290, 2006.

146. C. Kamisetty and C. V. Jawahar, "Multiview image compression using algebraic constraints," Proc. TENCON 2003 Conference on Conventional Technologies for Asia-Pacific Region, vol. 3, pp. 927-931, 2003.
147. D. Shah and N. Dodgson, "Issues in multi-view autostereoscopic image compression," Proc. IS&T/SPIE Symposium on Stereoscopic Displays and Applications XII, vol. 4297, pp. 307-316, 2001.
148. T. Palfner and E. Müller, "Coding of full-parallax multi-view images," Proc. IS&T/SPIE Symposium on Stereoscopic Displays and Applications XVI, vol. 5664, pp. 460-471, 2005.
149. N. Božinović and J. Konrad, "Motion analysis in 3D DCT domain and its application to video coding," Elsevier Science Signal Processing: Image Communication, vol. 20(6), pp. 510-528, 2005.
150. M. Forman, A. Aggoun, M. McCormick, "A novel coding scheme for full parallax 3D-TV pictures," IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 4, pp. 2945 - 2947, 1997.
151. I. Jalloh, A. Aggoun, M. McCormick, "A 3D DCT architecture for compression of integral 3D images," IEEE Workshop on Signal Processing Systems, pp.:238 – 244, 2000.
152. R. Zaharia, A. Aggoun, M. McCormick, "Adaptive 3D-DCT compression algorithm for continuous parallax 3D integral imaging," Elsevier Science Signal Processing: Image communication, vol. 17(3), pp. 231-242, 2002.
153. N. Sgouros, S. Athineos, P. Mardaki, A. Sarantidou, M. Sangriotis, P. Papageorgas, N. Theofanous, "Use of an adaptive 3D-DCT scheme for coding multiview stereo images," Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, vol. 1, pp. 180-185, 2005.
154. S. Yeom, A. Stern, and B. Javidi, "Compression of 3D color integral images," OSA Optics Express, vol. 12, pp. 1632-1642, 2004.
155. B. Furcht, K. Gustafson, H. Huang, O. Marques, "An adaptive three-dimensional DCT compression based on motion analysis," ACM Proceedings of the Symposium on Applied Computing, pp. 765-768, 2003.
156. <http://www.povray.org>

157. S. Boussakta and H. Alshibami, "Fast algorithm for the 3-D DCT II," IEEE Transactions On Signal Processing, vol. 52(4), pp. 992–1001, 2004.
158. E. Lam and J. Goodman, "A mathematical analysis of the DCT coefficient distributions for images," IEEE Transactions On Image Processing, vol. 9(10), pp. 1661–1666, 2000.
159. N. Božinović and J. Konrad, "Scan order and quantization for 3D-DCT coding," Proc. IS&T/SPIE Symposium On Image and Video Communications And Processing, vol. 5150, pp. 1204-1215, 2003
160. F. Pan, "Adaptive image compression using local pattern information," Elsevier Science Pattern Recognition Letters, vol. 23(14), pp. 1837-1845, 2002.
161. B. Yeo and B. Liu, "Volume rendering of DCT-based compressed 3D-scalar data," IEEE Transactions On Vision and Computer Graphics, vol. 1(1), pp. 29–43, 1995.
162. D. Gusfield, Algorithms on Strings, Trees and Sequences: Computer Science and Computational Biology, Cambridge University Press, 1997.
163. ISO 16067-1,2 : Photography - Electronic scanners for photographic images - Spatial resolution measurements, International Organization for Standardization.