

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΟΠΤΙΚΗ ΕΠΟΠΤΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΧΩΡΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΕ ΜΝΗΜΕΙΑ



ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΛΥΡΩΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΜΙΧΑΛΗΣ ΖΕΡΒΑΚΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

XANIA 2011

Στην οικογένειά μου

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

Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Μιχάλη Ζερβάκη, για την πολύτιμη βοήθειά του και αρωγή στην εκπλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Τον Αν. Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Αριστομένη Αντωνιάδη, για τη διαρκή του υποστήριξη, καθόλη την περίοδο της εργασίας μέχρι και την εκπλήρωσή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ				
2.	ΧΘΕΣ Κ 2.1	ΑΙ ΣΗΜΕΡΑ Εμπειρικές - Τοπομετρικές μέθοδοι αποτύπωσης 2.1.1 Εξοπλισμός 2.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	7 8 8 10		
	2.2	 Τοπογραφικές μέθοδοι αποτύπωσης 2.2.1 Ο θεοδόλιχος 2.2.2 Γεωδαιτικός σταθμός 2.2.3 Μέθοδοι μέτρησης οριζόντιων γωνιών 2.2.4 Μέθοδοι μέτρησης κατακόρυφων γωνιών 2.2.5 Βασική επεξεργασία – Θεμελιώδη προβλήματα Τοπογραφίας 2.2.6 Μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων 2.2.7 Γενικά Χαρακτηριστικά- Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα 	11 12 16 17 20 21 25 26		
	2.3	 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι αποτύπωσης 2.3.1 Συστήματα Συντεταγμένων 2.3.2 Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία 2.3.3 Μονοσκοπική Φωτογραμμετρία 2.3.4 Επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία 2.3.5 Ορθοφωτογραφία 2.3.6 Φωτογραμμετρικός Εξοπλισμός 2.3.7 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα 	26 29 30 31 32 33 34 36		
	2.4	Τεχνικές σάρωσης laser ή τριγωνισμού 2.4.1 Τεχνικές ανίχνευσης 2.4.2 Βασική επεξεργασία 2.4.3 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα	36 37 41 42		
	2.5	Εναλλακτικές μέθοδοι αποτύπωσης	43		
3.	ΑΛΓΟΡΙ 3.1 3.2 3.3	ΘΜΟΙ Παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας Από RGB σε grayscale Δυαδική μετατροπή grayscale εικόνας, μέσω της κατωφλίωσης	44 44 48		
	3.4 3.5 3.6	του Otsu Ο μετασχηματισμός Hough Ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny Διασύνδεση ακμών	51 59 64 71		
4.	ΑΝΑΛΥ	EH SOFTWARE	74		
	4.1 4.2 4.3	Μετατροπή RGB εικόνας σε grayscale Δυαδικοποίηση grayscale εικόνας Εφαρμογή μαθηματικών μορφολογικών τελεστών	75 77		
	4.4	στη ουαοικη εικονα Εντοπισμός ευθυνράμμων τμημάτων	84 90		
	4.5 4.6	Ανίχνευση ακμών Διασύνδεση ακμών	96 98		

5.	ΠΑΡΟΥ	ΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	100
6.	ΣΥΝΟΨ	Η-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	119
	6.1	Σύνοψη-Συμπεράσματα	119
	6.2	Μελλοντικές επεκτάσεις	121
BIE	122		

κεφαλαίο 1. εισαγωγή

αρχαιολογία βρίσκεται μονίμως αντιμέτωπη με το πρόβλημα της καταγραφής και μελέτης αντικειμένων ανυπολόγιστης αξίας. Τα αρχαία μνημεία-κειμήλια εκτίθενται σε μια προοδευτική και συχνά ανίατη διαδικασία παραμόρφωσης που μπορεί να καταλήξει ακόμα και σε ολική καταστροφή. Τα δεδομένα που καταγράφονται για μία αρχαιολογική έρευνα έχουν διττό σκοπό: τη δημιουργία ενός μέσου που θα επιτρέπει την υψηλής πιστότητας δημοσίευση του αντικειμένου αλλά και την εικονική διατήρηση του ακόμα και στο απλούστερο επίπεδο της διάσωσης της ιδίας της αρχαιολογικής πληροφορίας που εμπεριέχει.

Η προστασία και διατήρηση αρχαιολογικών – πολιτιστικών αντικειμένων δεν είναι ένα απλό θεωρητικό πρόβλημα. Η αρχαιολογία είναι, εξ ορισμού, καταστροφική κατά την διάρκεια της αποκάλυψης του παρελθόντος. Η απαραίτητη καταστροφή του ανασκαφικού συνόλου αποβλέπει στην αποκάλυψη του εκάστοτε αντικειμένου. Μετά την ανασκαφή, το αντικείμενο εκτίθεται σε ένα πλήθος νέων περιβαλλοντικών φυσικοχημικών επιθέσεων. Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναπόφευκτη η φθορά του και πραγματοποιείται σε πολύ σύντομο σε σχέση με την ηλικία του χρονικό διάστημα . Για την αντιμετώπιση αυτής της προοδευτικής και ανίατης φθοράς, οι αρχαιολόγοι χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές καταγραφής και αρχειοθέτησης. Σε αντίθεση με μια γενικότερη άποψη που επικρατεί, η φωτογραφία δεν πληρεί τις ανάγκες καταγραφής της Αρχαιολογίας και της Ιστορίας Τέχνης. Προβάλει πάντα το αντικείμενο από μία οπτική γωνία, μειώνοντας τον όγκο του αντικειμένου σε δύο διαστάσεις. Από την άλλη οι ερμηνευτικές παραστάσεις, οι οποίες βοηθούν στην μελέτη του αντικειμένου, είναι πολλές φορές αδύνατο να πραγματοποιηθούν πάνω στη φωτογραφία. Τα αποτελέσματα της παραδοσιακής φωτογράφησης ξεθωριάζουν με τον καιρό. Για όλους τους προηγούμενους λόγους οι αρχαιολόγοι και οι ιστορικοί τέχνης βασίζονται συνήθως και σε άλλες μεθόδους αρχειοθέτησης όπως είναι η σχεδίαση. Τις περισσότερες φορές τα σχέδια αυτά γίνονται με αργούς ρυθμούς, ώστε να έχουν μεγάλη ακρίβεια, παρουσιάζοντας το μειονέκτημα να προσαρμόζονται δύσκολα σε τεχνικές διαχείρισης και οργάνωσης. Η αρχειοθέτηση στην Αρχαιολογία και στην Ιστορία Τέχνης έχει να αντιμετωπίσει δύο ουσιώδη προβλήματα τα όποια σχετίζονται απόλυτα μεταξύ τους. Την αντικειμενικότητα της περιγραφής του αντικειμένου (πιστότητα) και την ταχύτητα – προσαρμοστικότητα της πραγματοποίησης της καταγραφής.

Στην πραγματικότητα το πρόβλημα της χαρτογράφησης της πολιτισμικής κληρονομιάς, δεν είναι τίποτα διαφορετικό από ένα ακόμα πρόβλημα «μετάφρασης». Μια δύσκολη μετάφραση της αρχιτεκτονικής πραγματικού κόσμου σε εικονικό ψηφιακό. Η λέξη «μετάφραση» στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη μεταφορά κάποιου αντικειμένου από ένα χώρο σε κάποιον άλλο, χωρίς να δεχθεί την παραμικρή μεταβολή. Κάτι τέτοιο βέβαια δεν είναι απόλυτο, ακόμα και σε γλωσσικό επίπεδο, αφού ίδιες λέξεις διαφέρουν σημασιολογικά από γλώσσα σε γλώσσα. Τα πολιτιστικά αντικείμενα ποικίλουν σε διαστάσεις. Τα ακανόνιστα σχήματα και η μορφολογική πολυπλοκότητα των επιφανειών τους είναι ένα σύνηθες φαινόμενο. Ο διαθέσιμος χρόνος για μετρήσεις είναι τις περισσότερες φορές ελάχιστος και στο παρελθόν η φωτογραμμετρία ήταν η μόνη μέθοδος που μπορούσε να εφαρμοστεί σε τόσο στενά χρονικά περιθώρια. Νέες τεχνολογίες έρχονται να δώσουν απαντήσεις στο πρόβλημα της καταγραφής και προβολής του πολιτιστικού μας θησαυρού. Η οπτική αναπαράσταση και η μετάδοση της ψηφιακής πληροφορίας είναι από τα πλέον σημαντικά ερευνητικά πεδία που επιτρέπουν σε όλους τους φορείς που ασχολούνται με τον πολιτισμό να προβάλουν τα αποτελέσματα της δουλειά τους με πολλαπλούς νέους και δυναμικούς τρόπους. Η ψηφιοποίηση αποτελεί στις μέρες μας ένα αναπόσπαστο πλέον κομμάτι της προσπάθειας αρχειοθέτησης της πολιτιστικής και πολιτισμικής μας κληρονομιάς, καθώς προσφέρει δυνατότητες καταγραφής αρχιτεκτονικών δημιουργιών, αρχαιολογικών ευρημάτων, ιστορικών μνημείων και μνημείων τέχνης. Η αναπαλαίωση μνημείων σε περιπτώσεις που έχουν υποστεί καταστροφές, η ανάλυση επανορθωτικών τεχνικών, η αλληλεπίδραση με τα πολιτιστικά αντικείμενα σε εικονικό περιβάλλον, χωρίς τον φόβο οιασδήποτε φθοράς, η κατασκευή ρεαλιστικών μοντέλων που μπορούν να βοηθήσουν ουσιαστικά στη μελέτη αντικειμένων από απόσταση, η διεύρυνση του πλήθους ατόμων που μπορούν να μελετήσουν ταυτόχρονα κάθε αντικείμενο, ŋ δημιουργία εκπαιδευτικού υλικού για ερευνητές, επιστήμονες φοιτητές/μαθητές της αρχαιολογίας, της ιστορίας και του πολιτισμού, αποτελούν σημαντικά γενεσιουργά κίνητρα για την εν λόγω καταγραφή.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας και η υλοποίηση λογισμικού για την ταχύτατη και αποτελεσματική δισδιάστατη αποτύπωση αρχαιολογικών μνημείων, με χρήση σύγχρονων τεχνικών, που βασίζονται στην αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνας και στη μηχανική όραση. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε ένα ψηφιακό σύστημα, το οποίο δέχεται στην είσοδό του ορθοφωτογραφίες που απεικονίζουν αρχαιολογικά τείχη, εντοπίζει τους πλίνθους που απαρτίζουν τα τείχη και εξαγάγει μια δισδιάστατη αποτύπωση των τειχών, με τη μορφή δυαδικής ψηφιακής εικόνας. Στον τομέα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, προηγούμενες συναφείς προσπάθειες, έγιναν με απευθείας χρήση βελτιστοποιημένων αλγορίθμων ανίχνευσης ακμών, οι οποίες έδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα [33,34,35,36]. Η ανίχνευση των ακμών είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, διότι με τις ακμές μπορούν να περιγραφούν, να προσδιοριστούν, να αναπαρασταθούν και να αναγνωριστούν αντικείμενα ενδιαφέροντος που περιέχονται σε ψηφιακές εικόνες. Κάθε εφαρμογή όμως, μπορεί να απαιτεί τη χρήση διαφορετικής ειδικευμένης τεχνικής ανίχνευσης ακμών, ανάλογα με τα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος. Στο παρόν πρόβλημα, δεν ενδείκνυται η απευθείας χρήση αλγορίθμων ανίχνευσης ακμών, διότι οι εικόνες εισόδου εμφανίζουν μεγάλη πυκνότητα, όσον αφορά τα αντικείμενα ενδιαφέροντος και πολλές αλλαγές στην ένταση και στην κατανομή των επιπέδων του γκρι, μέσα στα όρια των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Άρα, θα εντοπιζόταν πληθώρα ακμών, πολλές από τις οποίες θα αποτελούσαν «θόρυβο», με συνέπεια να μη διαχωρίζονται τα όρια των περιοχών ενδιαφέροντος. Έτσι, καταφεύγουμε στον εντοπισμό των ευθυγράμμων τμημάτων, των «χοντρικών» ορίων δηλαδή, των περιοχών ενδιαφέροντος και υλοποιούμε την αναζήτηση ακμών σε μια μικρή γειτονιά γύρω από το κάθε ευθύγραμμο τμήμα. Αφού λάβει χώρα η στοχευμένη αναζήτηση ακμών, οι μη-συνεχείς ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο, ακμές που εξήχθησαν δομούνται με έναν καλύτερο τρόπο, με συνέπεια οι γειτνιάζουσες ακμές να αποτελούν συνεχείς λεπτές γραμμές και να δημιουργούνται με ακρίβεια τα περιγράμματα των αντικειμένων ενδιαφέροντος.

Το κεφάλαιο 2 της εργασίας, περιέχει τη στάθμη γνώσεων του αντικειμένου της αποτύπωσης, καθώς σε αυτό αναφέρονται και αναλύονται οι πλέον ενδεδειγμένες και αξιόπιστες μέθοδοι για την αποτύπωση των αρχαιολογικών-αρχιτεκτονικών μνημείων. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται εις βάθος, οι αλγόριθμοι του τομέα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσης εργασίας. Στο κεφάλαιο 4, αναλύεται κάθε βαθμίδα του λογισμικού, εξηγείται περαιτέρω η φιλοσοφία της μεθόδου και οι λόγοι για τους οποίους επελέγησαν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται ένας ικανοποιητικός αριθμός, όχι μόνο των τελικών αποτελεσμάτων που εξήγαγε η μέθοδος, αλλά και κάποιων από τα ενδιάμεσα, όπως αυτά παρήχθησαν μέσα στις εσωτερικές βαθμίδες του συστήματος. Στην ίδια ενότητα, γίνεται μια εξήγηση-κριτική των αποτελεσμάτων και μια παρουσίαση της επιτυχίας της μεθόδου με συγκεντρωτικά αποτελέσματα, τα οποία αφορούν τον αριθμό των στοιχείων ενδιαφέροντος, που εντοπίστηκαν σε κάθε εικόνα εισόδου. Τέλος, στο κεφάλαιο 6, γίνεται μια σύνοψη της μεθόδου και μια αναφορά στις πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της.

κεφαλαίο 2. Χθες και σημερα

έχρι πριν από μερικά χρόνια, όταν η τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των μετρητικών διατάξεων δεν ήταν τόσο εξελιγμένη όσο σήμερα, η δημιουργία μοντέλων μνημείων και μικροαντικειμένων (αρχαιολογικών ευρημάτων και αντικειμένων τέχνης και πολιτισμού) ήταν μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία. Η δυσκολία αυτή οφειλόταν τόσο στη διαδικασία της αποτύπωσης με ικανοποιητική ακρίβεια του υπό μελέτη αντικειμένου όσο και στην οπτικοποίηση του μοντέλου του.

Η κοινή πρακτική για την αποτύπωση των μνημείων και αντικειμένων γινόταν με τη χρήση μη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για τη μέτρηση χαρακτηριστικών σημείων του αντικειμένου χρησιμοποιώντας απλές μετρητικές διατάξεις όπως μιας μετροταινίας ή ενός γεωδαιτικού σταθμού όσον αφορά την αποτύπωση μεγάλων ακίνητων αντικειμένων ή ενός υποδεκάμετρου σε συνδυασμό με ένα παχύμετρο για τη μέτρηση μικροαντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Τα παραγόμενα προϊόντα σε αυτή την περίπτωση συνήθως παρουσίαζαν την αποτύπωση σε ένα χάρτινο φορέα υπό κλίμακα των χαρακτηριστικών όψεων, κατόψεων και τομών του αντικειμένου.

Η δημιουργία του ψηφιακού μοντέλου ενός μνημείου έγινε πραγματικότητα με την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών για την αναπαράσταση των αντικειμένων στις επιστήμες που ασχολούνταν με τη μελέτη τους, όπως για παράδειγμα η τοπογραφία, η αρχιτεκτονική και η αρχαιολογία. Ειδικότερα, η ανάπτυξη εφαρμογών παρουσίασης και οπτικοποίησης στην οθόνη ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή, ενός μοντέλου, ώθησε τη χρήση ψηφιακών τεχνικών τρισδιάστατης αποτύπωσης και μετρήσεων με χρήση νέων εξελιγμένων μετρητικών διατάξεων που είναι σε θέση να παρέχουν με αυτοματοποιημένες διαδικασίες τη θέση στο χώρο ενός μεγάλου αριθμού χαρακτηριστικών σημείων που απαρτίζουν την εξωτερική επιφάνεια και οριοθετούν το αντικείμενο είτε αυτό είναι ένα μικροαντικείμενο ή ένα αρχιτεκτονικό μνημείο ή κτίριο με ιδιαίτερα σημαντική πολιτιστική αξία.

Τα οφέλη που προκύπτουν από τη δημιουργία των μοντέλων των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς ωθούν ολοένα και περισσότερο στη χρήση νέων ψηφιακών τεχνικών αποτύπωσης από τα ιδρύματα, τα ινστιτούτα και τους οργανισμούς που ασχολούνται με τη μελέτη και συντήρηση τους.

Καθώς πολλά από τα αντικείμενα της πολιτιστικής κληρονομιάς είναι παλαιά και εν μέρη ή στο σύνολό τους υπό κατάρρευση, η δημιουργία του μοντέλου οδηγεί στη μελέτη για πιθανή αποκατάσταση τους εάν πρόκειται για κτίρια και μεγάλα ακίνητα μνημεία και στη μελέτη του μοντέλου αντί του ίδιου αντικειμένου με σκοπό την αποφυγή ενεργειών που θα επιφέρουν σημαντικές φθορές στο ίδιο, εφόσον πρόκειται για μικροαντικείμενα.

Τα μοντέλα που δημιουργούνται μπορούν να αποτελέσουν ένα επιπλέον στοιχείο καταγραφής τους που είναι δυνατόν να ενσωματώνεται σε μια συλλογή (Βάση Δεδομένων) όλων των παρόμοιων αντικειμένων, παραδείγματος χάριν αγαλματιδίων, που παρουσιάζουν μια συγκεκριμένη μορφή ή ανήκουν σε συγκεκριμένη ανασκαφή ενός αρχαιολογικού χώρου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για ένα αρχαιολόγο ή γενικά μελετητή να έχει συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία που αφορούν το αντικείμενο της μελέτης του. Η απλή φωτογραφική απεικόνιση των αντικειμένων δεν είναι σε θέση να προβάλει σε ικανοποιητική ακρίβεια τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων καθώς δεν παρουσιάζουν συνολικά τη μορφή τους και δεν παρέχουν την πληροφορία της κλίμακας συνεπώς και των διαστάσεων τους.

Στη συνέχεια του συγγράμματος αναφέρονται οι πλέον ενδεδειγμένες και αξιόπιστες μέθοδοι για την αποτύπωση των αρχαιολογικών και αρχιτεκτονικών μνημείων, οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Εμπειρικές
- Τοπογραφικές
- Φωτογραμμετρικές
- Ανίχνευσης (σάρωσης) με χρήση τεχνικών laser-τριγωνισμού
- Υβριδικές (αποτελούν συνδυασμό ή παραλλαγή των παραπάνω κλασικών μεθόδων)

2.1 Εμπειρικές - Τοπομετρικές μέθοδοι αποτύπωσης

Η πρώτη κατηγορία αποτύπωσης συνίσταται από εμπειρικές ή τοπομετρικές μεθόδους συνήθως των αρχιτεκτόνων μηχανικών που πραγματοποιούνται με μηκομετρήσεις τριγώνων (τριπλευρισμούς), διαγωνίων, πλευρών, αποκλίσεων και υψομετρικών διαφορών χρησιμοποιώντας νήμα στάθμης, αλφαδολάστιχο και μετροταινία, προσδιορίζοντας διαδοχικά τις συντεταγμένες των σημείων που απαιτούνται για την πλήρη αναπαραγωγή της γεωμετρίας και της μορφής του προς μελέτη αντικειμένου. Για να προσδιοριστεί η θέση ενός σημείου, χρησιμοποιείται ένα ζεύγος τιμών. Η απόσταση από την αρχή των αξόνων και η γωνία που μετριέται από το θετικό ημιάξονα, αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η αρχική καταγραφή των μετρήσεων γίνεται σε σκαρίφημα και η μελλοντική μεταφορά των χαρακτηριστικών του μνημείου σε ψηφιακή μορφή (ψηφιοποίηση) γίνεται σε ένα δεύτερο στάδιο με χειροκίνητη εισαγωγή των στοιχείων συνήθως σε ένα αρχείο σχεδίασης σε περιβάλλον CADD (Computer Aided Design and Drafting). Οι μετρήσεις στηρίζονται σε μια αυθαίρετα ορισμένη αρχή και διεύθυνση ενός άξονα του συστήματος συντεταγμένων. Όλες οι μετρήσεις των σημείων αναφέρονται σε αυτές τις παραδοχές ενώ είναι εξαιρετικά δύσκολη η τρισδιάστατη καταγραφή, καθώς η τρίτη διάσταση δεν είναι δυνατόν να προέλθει με απλά μέσα γνωρίζοντας μόνο την αρχή και έναν από τους δύο άξονες του συστήματος συντεταγμένων.

2.1.1 Εξοπλισμός

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της εμπειρικής μεθόδου για τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός χώρου είναι το χαμηλό κόστος του εξοπλισμού. Συνήθως μια μετροταινία αποτελεί το κύριο εργαλείο για την εφαρμογή της. Ωστόσο, η καταγραφή σωστών μετρήσεων απαιτεί η μέτρηση των χαρακτηριστικών σημείων να γίνεται στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο που παρουσιάζει την κάτοψη ενός μνημείου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται νήματα της στάθμης, αλφαδολάστιχα ή ακόμα και απλά στη χρήση τοπογραφικά όργανα ,όπως χωροβάτες με αυτόματη οριζοντίωση ιδιαίτερα σε εφαρμογές αποτύπωσης αρχαιολογικών σκαμμάτων.

Το νήμα στάθμης (λιναίη) αποτελείται από ένα νήμα, στο ένα άκρο του οποίου υπάρχει ένα βάρος. Αν κρατηθεί σταθερά από το άλλο άκρο του τότε, λόγω του νόμου της βαρύτητας, το νήμα παίρνει τη διεύθυνση της κατακορύφου ενός τόπου. Η εξαιρετική ευπάθειά του, όμως, στην παραμικρή πνοή του ανέμου και η λεπτότητα του νήματος, το κάνουν αρκετά δύσχρηστο. Χρησιμοποιείται, πλέον μόνο σε περιπτώσεις ελέγχου της κατακορύφωσης άλλων οργάνων.

Λόγω του ότι, ορισμένες φορές οφείλει να αλφαδιαστεί κάποια μεγάλη μνημειακή επιφάνεια, το κοινό αλφάδι με το περιορισμένο μέγεθος του δεν ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη διαδικασία. Οι εναλλακτικοί τρόποι για τη διεκπεραίωση της διαδικασίας αυτής, είναι η χρήση ενός αλφαδίου laser ή του παραδοσιακού αλφαδολάστιχου, το οποίο σίγουρα είναι μια φθηνή αλλά συνάμα μια αξιόπιστη λύση. Το αλφαδολάστιχο είναι ουσιαστικά ένα κοινό διαφανές λάστιχο, του οποίου η λειτουργία βασίζεται στην αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων. Είναι ιδιαίτερα εύκαμπτο, με

μήκος μεγαλύτερο από το μήκος της επιφάνειας που στοχεύεται για αλφάδιασμα. Το λάστιχο απλώνεται κατά το μήκος της επιφάνειας και στην συνέχεια με την βοήθεια σύρματος ή κολλητικής ταινίας στηρίζεται σε δύο πασσάλους, οι οποίοι προηγουμένως έχουν τοποθετηθεί στις γωνίες του χώρου που αλφαδιάζεται. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια χωνιού που προσαρμόζεται στο στόμιο του, το αφλαδολάστιχο, γεμίζεται αργά και σταδιακά με νερό, χωρίς κενά και φυσαλίδες, μέχρις ότου η στάθμη του μέσα στον σωλήνα φτάσει στο κατακόρυφο σημείο του, στο οποίο έχει στηριχθεί ο πάσσαλος. Κατόπιν, τα σημεία όπου βρίσκεται η στάθμη του νερού, σημαδεύονται και στους δυο πασσάλους και ενώνονται μεταξύ τους με ένα ράμμα. Η ευθεία που δημιουργείται μεταξύ των δυο σημείων είναι η υψομετρική ευθεία, το αλφάδιασμα δηλαδή, της μεταξύ τους απόστασης.

Τα τελευταία χρόνια, κυκλοφορούν στο εμπόριο ηλεκτρονικές διατάξεις μέτρησης αποστάσεων και γωνιών – κλίσεων με δυνατότητα οριζοντίωσης, κάνοντας χρήση ενσωματωμένης αεροστάθμης, για την μέτρηση της οριζόντιας απόστασης ή γωνίας ανάμεσα σε χαρακτηριστικά σημεία της κάτοψης ενός χώρου. Το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο εφαρμόζεται στο σημείο που θα αποτελέσει την αρχή της μετρημένης απόστασης και μια δέσμη laser ή υπερήχων εκπέμπεται από το πομπό του και ανακλάται από το χαρακτηριστικό σημείο του οποίου η απόσταση από το σημείο εφαρμογής του επιθυμείται να μετρηθεί. Η δέσμη laser είναι ορατή και παρατηρείται το ίχνος της στο σημείο που αποτελεί το τέλος της μετρημένης απόστασης με αρχή το σημείο εφαρμογής του αποστασιόμετρου. Επίσης και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η τεχνική υπερήχων μια ορατή δέσμη laser (χωρίς τη δυνατότητα μέτρησης) συνοδεύει τη δέσμη υπερήχων ώστε να συμπίπτουν στο σημείο ανάκλασής-μέτρησης τέλους της απόστασης. Το μέγεθος του αποστασιομέτρου, όπως επίσης και το βάρος του, είναι εξαιρετικό μικρό και η λειτουργία του ιδιαίτερα εύκολη καθώς η χρήση του μπορεί να γίνει από έναν μόνο αποτυπωτή και δεν είναι απαραίτητη η συνεργασία τουλάχιστον δυο ατόμων, όπως είναι φυσικό να γίνεται κατά την εφαρμογή της συμβατικής μεθόδου μέτρησης με χρήση μετροταινίας ή και αλφαδολάστιχου. Η κατασκευή του είναι ιδιαίτερα ανθεκτική, αδιάβροχη και αδιαπέραστη από τη σκόνη ώστε να αντέχει στις δυσκολότερες εργοταξιακές συνθήκες. Το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο μπορεί, επίσης, να διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη για την καταγραφή των μετρήσεων οι οποίες είναι εύκολο να μεταφερθούν αργότερα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ή κατευθείαν σε υπολογιστικές συσκευές χειρός (palmtop). Συνεπώς, με τις δυνατότητες αυτές του ηλεκτρονικού αποστασιομέτρου, αυξάνεται η ασφάλεια, η ταχύτητα και η αξιοπιστία των μετρήσεων κατά την τοπομετρική αποτύπωση μνημείων.





(β)





2.1.2 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κατηγορίας μεθόδων είναι:

- η υποκειμενική σχέση του αποτυπωτή με το αντικείμενο
- η απαιτούμενη άμεση προσπελασιμότητα προς το αντικείμενο
- τα απλά και φτηνά όργανα μετρήσεων (μετροταινία, αλφαδολάστιχο, laser αποστασιόμετρο)

 η αδυναμία ελέγχου με κάποια επιστημονική μεθοδολογία άρα αδυναμία αντικειμενικής αξιολόγησης της αποτύπωσης

Παρόλο που η μέθοδος υστερεί σε ακρίβεια και επιστημονικότητα από τις άλλες τεχνικές, ενδείκνυται πολλές φορές χάριν της ταχύτητας και του χαμηλού κόστους, όταν βέβαια οι απαιτήσεις ακρίβειας του τελικού προϊόντος δεν είναι μεγάλες.

2.2 Τοπογραφικές μέθοδοι αποτύπωσης

Η επιστήμη που ασχολείται με την απεικόνιση των τμημάτων της γήινης επιφάνειας συμπεριλαμβανομένων και των ανθρώπινων κατασκευών είναι η επιστήμη της τοπογραφίας. Η τεχνολογική ανάπτυξη και εξέλιξη των τοπογραφικών οργάνων καθώς και των προγραμμάτων επεξεργασίας των μετρήσεων του πεδίου αύξησε σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία και ακρίβεια τόσο των μετρήσεων όσο και των αποτελεσμάτων [21,23].

Η χρήση τοπογραφικών οργάνων και συγκεκριμένα θεοδόλιχων και αποστασιομέτρων για αποτύπωση σημείων του τρισδιάστατου χώρου έχει ξεκινήσει από πολύ παλιά και μπορούμε να πούμε ότι η σημερινή τεχνολογία των οργάνων μέτρησης είναι αρκετά ικανοποιητική ώστε να είναι σε θέση να αποτυπώνει με σημαντική ακρίβεια μετρήσεων αρχαιολογικά και αρχιτεκτονικά μνημεία.

Τα όργανα μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στις συγκεκριμένες μεθόδους είναι σε θέση να ορίσουν ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο αναφέρονται όλες οι μετρήσεις των σημείων και η χρήση τους γίνεται από έμπειρους μηχανικούς, συνήθως αγρονόμουςτοπογράφους μηχανικούς, πολιτικούς μηχανικούς ή αρχιτέκτονες μηχανικούς. Το όργανο που κατά κόρον χρησιμοποιείται σήμερα στην τοπογραφική αποτύπωση είναι ο ολοκληρωμένος γεωδαιτικός σταθμός (total station), ο οποίος αποτελεί την μετεξέλιξη του θεοδόλιχου, που είναι το παραδοσιακό όργανο για τη μέτρηση γωνιών και του ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου.

Πολλές φορές η πολυπλοκότητα του αντικειμένου και η μεγάλη λεπτομέρεια που εμφανίζουν τα αρχιτεκτονικά και αρχαιολογικά μνημεία καθιστούν ασύμφορη οικονομικά αλλά και χρονικά την τοπογραφική μέθοδο αποτύπωσης. Για το λόγο αυτό μπορεί η τοπογραφική αποτύπωση να συνδυαστεί με την φωτογραμμετρική μεθοδολογία ώστε να ληφθούν μόνο οι ελάχιστες τοπογραφικές μετρήσεις που είναι απαραίτητες για τον καθορισμό του επίγειου τρισορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων στο οποίο θα αναφερθούν οι φωτογραφίες των στερεομοντέλων που θα επεξεργαστούν φωτογραμμετρικά και θα αποδώσουν το τελικό προϊόν. Άλλωστε η μέθοδος αποτύπωσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται τόσο από το τελικό παραδοτέο προϊόν, που θα προδιαγράψει και την ακρίβεια του σχεδιαγράμματος αποτύπωσης όσο και από το κόστος της εφαρμοσμένης τεχνικής [25].

2.2.1 Ο θεοδόλιχος





Για να γίνει εφικτή η μέτρηση των σημείων στο χώρο είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ακριβή όργανα μετρήσεων. Ο θεοδόλιχος είναι σε θέση να μετρά με μεγάλη ακρίβεια την οριζόντια και κατακόρυφη γωνία που σχηματίζεται από τη νοητή οπτική γραμμή που συνδέει ένα χαρακτηριστικό σημείο του οργάνου (κέντρο σκόπευσης) και το σημείο λεπτομέρειας (σημείο σκόπευσης) επί του αντικειμένου που μέσω του οπτικού συστήματος του.

Οριζόντια γωνία μεταξύ δύο σημείων P1 και P2, ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται στο σημείο Ο, από τις διευθύνσεις των προβολών των σημείων αυτών, πάνω στο οριζόντιο

επίπεδο, το οποίο διέρχεται από το Ο. Κατακόρυφη γωνία ενός σημείου ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται στο σημείο Ο, από τη διεύθυνση του σκοπευομένου σημείου και την προβολή της πάνω στο οριζόντιο επίπεδο, το οποίο διέρχεται από το Ο. Η γωνία δύναται να είναι θετική ή αρνητική αν τα σημεία βρίσκονται πάνω ή κάτω αντίστοιχα από το επίπεδο αυτό. Στη πράξη αντί της κατακόρυφης γωνίας, μετράται η ζενιθία, η γωνία δηλαδή, που σχηματίζεται μεταξύ της κατακορύφου που διέρχεται από το σημείο Ο και της διεύθυνσης του σκοπευομένου σημείου. Οι οριζόντιες γωνίες σε συνδυασμό με τη μέτρηση μηκών είναι απαραίτητο στοιχείο για τη σύνταξη οριζοντίων αποτυπώσεων, αλλά χρησιμεύουν και για τη χάραξη τεχνικών έργων. Οι κατακόρυφες γωνίες αντίστοιχα χρησιμεύουν για τις υψομετρικές αποτυπώσεις και για τον υπολογισμό της οριζόντιας απόστασης [26].

Ο θεοδόλιχος διακρίνεται στο κάτω και στο πάνω μέρος. Το κάτω μέρος είναι σταθερό και στηρίζεται σε βάση, ενώ το πάνω είναι κινητό, επί του οποίου υπάρχει το τηλεσκόπιο. Η βάση στηρίζεται σε τρεις κοχλίες (τρικόχλιο), με τη βοήθεια των οποίων το όργανο οριζοντιώνεται. Το άνω κινητό μέρος περιστρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα που ονομάζεται άξων περιστροφής ή πρωτεύων άξων. Το όργανο φέρει και οριζόντιο άξονα που λέγεται άξων αντιστροφής ή δευτερεύων άξων, στον οποίο είναι στερεωμένο το τηλεσκόπιο και ο κατακόρυφος κύκλος.

Για τη χονδρική οριζοντίωση υπάρχει σφαιρική αεροστάθμη στη βάση του οργάνου. Για ακριβή οριζοντίωση το όργανο είναι εφοδιασμένο με ευαίσθητη σωληνωτή αεροστάθμη, η οποία είναι προσαρμοσμένη στο επάνω μέρος του οργάνου. Οι κοχλίες του τρικοχλίου πατάνε σε μεταλλική πλάκα, η οποία έχει στο κέντρο της οπή, στην οποία βιδώνεται ο κοχλίας που συνδέει το όργανο με τον τρίποδα και το στερεώνει πάνω σε αυτόν. Ο τρίποδας είναι σχεδιασμένος με τέτοια μορφή, ώστε να επιτρέπει στον κάθε παρατηρητή, να φέρει το όργανο σε κατάλληλο ύψος, με ταχύτητα, αυξομειώνοντας το μήκος των ποδιών, ώστε να χειρίζεται το όργανο με ευχέρεια. Ο θεοδόλιχος τοποθετείται πάνω από κάποιο συγκεκριμένο σημείο εκ του οποίου γίνονται οι παρατηρήσεις γωνιών και λοιπές τοπογραφικές εργασίες.

Κέντρωση του θεοδόλιχου είναι η διαδικασία που γίνεται, ώστε ο πρωτεύων άξων του οργάνου να διέρχεται από το υλοποιημένο στο έδαφος σημείο, το οποίο και αποτελεί τη κορυφή των προς μέτρηση γωνιών. Η κέντρωση επιτυγχάνεται με τη βοήθεια νήματος στάθμης, ράβδου ή οπτικής διάταξης με την οποία είναι εφοδιασμένο το όργανο (οπτική κέντρωση). Χάρη στις κινήσεις που επιτρέπουν να πραγματοποιούνται ο πρωτεύων και δευτερεύων άξων του οργάνου, το τηλεσκόπιο μπορεί να κατευθυνθεί σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Το θεοδόλιχο είναι εφοδιασμένο με ανασταλτικούς και μικροβατικούς κοχλίες που δίνουν τη δυνατότητα κατεύθυνσης του οπτικού άξονος με ακρίβεια προς τον επιλεγμένο στόχο. Οι ανασταλτικοί επιτρέπουν ή αναστέλλουν την κίνηση. Οι μικροβατικοί ενεργοποιούνται όταν οι ανασταλτικοί είναι σφιγμένοι και παρέχουν δυνατότητα μικρομετακίνησης.

Μέρος του θεοδόλιχου αποτελεί το σκοπευτικό τηλεσκόπιο, ένα οπτικό σύστημα που δίνει τη δυνατότητα να παρατηρούνται σε μεγέθυνση και ευκρίνεια τα απομακρυσμένα αντικείμενα. Ένας φακός Α μεγάλης εστιακής απόστασης, που λέγεται αντικειμενικός, δίνει για κάθε απομακρυσμένο αντικείμενο αβ ένα αντεστραμμένο είδωλο α'β', κοντά στο εστιακό επίπεδο. Το είδωλο αυτό παρατηρείται μέσα από δεύτερο φακό (S12), τον λεγόμενο προσοφθάλμιο, μικρής εστιακής απόστασης, ο οποίος για την εικόνα α'β' δίνει ένα είδωλο α''β'' σε μεγέθυνση. Οι δύο φακοί τοποθετούνται σε σωλήνα, ώστε οι οπτικοί άξονες να συμπίπτουν.

Πρακτικά ο σωλήνας είναι διπλός ώστε να αυξομειώνεται η απόσταση των δύο φακών με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται σχηματισμός του τελικού ειδώλου στην ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως του κάθε παρατηρητή. Αν κοντά στο εστιακό επίπεδο του αντικειμενικού φακού, υλοποιηθεί σημείο, που να βρίσκεται στον κοινό οπτικό άξονα των δύο φακών, τότε το τηλεσκόπιο λέγεται σκοπευτικό. Το σημείο υλοποιείται ως η τομή δύο καθέτων ευθειών, το λεγόμενο σταυρόνημα. Είναι χαραγμένο πάνω σε γυάλινη πλάκα, με μηχανική ή φωτογραφική μέθοδο. Διατάξεις των νημάτων του σταυρονήματος φαίνονται στη σχηματική παράσταση.

Η απλούστερη μορφή σταυρονήματος είναι μια απλή κατακόρυφη ευθεία, η οποία τέμνεται κάθετα από μία οριζόντια στο μέσον (περίπτωση α). Με τη προσθήκη στο σταυρόνημα δύο επιπλέον οριζόντιων νημάτων (περιπτώσεις δ, ε), δόθηκε η δυνατότητα με τη βοήθεια της σταδίας η οπτική μέτρηση αποστάσεων με ταχύτητα. Το θεοδόλιχο αυτό ονομάστηκε ταχύμετρο. Παρ όλου που σχεδόν όλοι οι θεοδόλιχοι, είναι εφοδιασμένοι με σταδιομετρικά νήματα, έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζονται σαν ταχύμετρα οι θεοδόλιχοι εκείνοι των οποίων η απόδοση στις γωνιομετρήσεις είναι μικρή (1c).



Σχήμα 2.3: Μορφές σταυρονημάτων.

Με τη βοήθεια του κοχλία του τρίποδα το όργανο σταθεροποιείται στην κεφαλή του τρίποδα. Κρατώντας τον τρίποδα με το όργανο στον αέρα (δεν εφάπτεται με το έδαφος ο τρίποδας) και παρατηρώντας από την οπτική διάταξη με την οποία είναι εφοδιασμένο το όργανο και η οποία ουσιαστικά υλοποιεί τον πρωτεύοντα άξονα του οργάνου, γίνεται προσπάθεια ταύτισης του σταυρού ή κουκίδας με το σημείο που είναι υλοποιημένο στο έδαφος. Για ταχύτητα της εργασίας δεν είναι απαραίτητη η πλήρης ταύτιση, αλλά προσεγγιστικά να φαίνεται το υλοποιημένο στο έδαφος σημείο, όσο το δυνατόν πιο κοντά στο κέντρο της οπτικής διάταξης. Σταθεροποιούνται τα πόδια του τρίποδα, πατώντας τα δυνατά στο έδαφος. Κατά κανόνα τα πόδια βυθίζονται άνισα στο έδαφος, και γενικά το όργανο δεν είναι σε οριζόντια θέση, ούτε έχει επιτευχθεί ή κέντρωση, απλώς έχει γίνει προσέγγιση της διαδικασίας κέντρωσης. Όπως έχει σταθεροποιηθεί ο τρίποδας με το όργανο, παρατηρώντας μέσα από την οπτική διάταξη και περιστρέφοντας τους κοχλίες του τρικοχλίου, φέρεται σε απόλυτη ταύτιση, ο σταυρός ή η κουκίδα που βρίσκεται στο κέντρο της οπτικής διάταξης και υλοποιεί τον πρωτεύοντα άξονα, με το υλοποιημένο στο έδαφος σημείο. Κατά τη φάση αυτή έχει επιτευχθεί η κέντρωση του οργάνου, δηλαδή ο πρωτεύων άξων διέρχεται από το υλοποιημένο στο έδαφος σημείο με τη διαφορά ότι ο πρωτεύων άξων δεν ταυτίζεται με τη κατακόρυφο που διέρχεται από το σημείο αυτό.

Για την οριζοντίωση αξόνων ή επιπέδων κατά κανόνα χρησιμοποιείται η αεροστάθμη. Όπως προαναφέρθηκε για χονδρική οριζοντίωση υπάρχει η σφαιρική αεροστάθμη και για ακριβή οριζοντίωση η σωληνωτή. Η ρύθμιση της σφαιρικής αεροστάθμης, ώστε η φυσαλίδα να βρεθεί στο μέσον του κύκλου, γίνεται, ανεβοκατεβάζοντας τα πόδια του τρίποδα. Η επιλογή για το πιο πόδι θα ανέβει ή θα κατέβει αντίστοιχα, το δηλώνει η νοητή ευθεία, που συνδέει το κέντρο της φυσαλίδας και το κέντρο αεροστάθμης, με το πλησιέστερο πόδι του τρίποδα. Μετά από κάθε κίνηση ποδιού, ελέγχεται από την οπτική διάταξη κατακορύφωσης, αν παρατηρηθεί απόκλιση

του πρωτεύοντος άξονος από το υλοποιημένο σημείο στο έδαφος. Η ρύθμιση τυχούσας απόκλισης γίνεται με τους κοχλίες του τρικοχλίου. Παρά το έντονο ανεβοκατέβασμα των ποδιών σημειώνεται μικρή απόκλιση της κέντρωσης σε σχέση με τη χρήση των κοχλιών του τρικοχλίου. Μετά από λίγα προσεγγιστικά βήματα έχει επιτευχθεί χονδρική οριζοντίωση και ταυτόχρονα κέντρωση του οργάνου. Η τελική και ακριβής οριζοντίωση του οργάνου γίνεται με τη σωληνωτή αεροστάθμη.

Το όργανο στρέφεται γύρω από τον πρωτεύοντα άξονα μέχρι η σωληνωτή αεροστάθμη γίνει παράλληλη προς την ευθεία που ορίζουν δύο από τους κοχλίες του τρικοχλίου, έστω τους Α και Β. Περιστρέφοντας αργά τους κοχλίες αυτούς αντίρροπα και ταυτόχρονα, φέρεται η φυσαλίδα στο κανονικό σημείο (μέσον). Το όργανο στρέφεται κατά 100g και με την περιστροφή μόνο του τρίτο κοχλία Γ, φέρεται η φυσαλίδα στο κανονικό σημείο και γίνεται παράλληλη με την ευθεία ΑΒ. Η ίδια διαδικασία εκτελείται και για την κάθετη προς την ευθεία ΑΒ θέση. Τέλος ελέγχεται η κέντρωση του οργάνου από το οπτικό σύστημα. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί απόκλιση, ξεβιδώνεται ελαφρά ο κοχλίας του τρίποδα και μεταφέρεται μαλακά το όργανο πάνω στη κεφαλή του τρίποδα, μέχρι να επιτευχθεί η κέντρωση και επαναλαμβάνεται η διαδικασία οριζοντίωσης με τη σωληνωτή αεροστάθμη. Το όργανο θεωρείται ότι είναι οριζοντιωμένο όταν η φυσαλίδα παραμένει στο ίδιο σημείο για όλες τις διευθύνσεις. Η δε κέντρωση θεωρείται σωστή όταν για μία πλήρη περιστροφή του οργάνου το σημείο του εδάφους. Τυχόν αποκλίσεις απαιτούν έλεγχο, ρύθμιση ή επισκευή του οργάνου.



Σχήμα 2.4: Οριζοντίωση θεοδόλιχου με τη βοήθεια σωληνωτής αεροστάθμης.

Έμμεσα με χρήση των εξισώσεων τριγωνομετρίας και της μέτρησης των κατακόρυφων γωνιών είναι εφικτό να μετρηθούν και οι κατακόρυφες αποστάσεις μεταξύ σημείων στον τρισδιάστατο χώρο. Με την επίλυση των θεμελιωδών θεωρημάτων της τοπογραφίας όλες οι μετρήσεις των γωνιών που γίνονται μέσω του θεοδόλιχου μπορούν να οδηγήσουν σε υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων των παρατηρούμενων σημείων στο επίγειο καρτεσιανό τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

2.2.2 Γεωδαιτικός σταθμός

Γεωδαιτικός σταθμός ή total station ονομάζεται το τοπογραφικό όργανο που έχει δυνατότητα μέτρησης γωνιών και αποστάσεων. Αποτελεί συνδυασμό σε ενιαία συσκευή, ψηφιακού θεοδόλιχου και EDM (Electronic Distance Measurement), που επιτρέπει στο χρήστη του να συλλέγει όλες τις μετρήσεις που είναι απαραίτητες για μία τοπογραφική αποτύπωση με χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας. Αν και οι θεοδόλιχοι αρχικά κατασκευάστηκαν μόνο για κάνουν μετρήσεις γωνιών, οι Γεωδαιτικοί Σταθμοί επιτρέπουν με μία μόνο σκόπευση, δηλαδή μέτρηση της οριζόντιας και κατακόρυφης γωνίας και την ταυτόχρονη μέτρηση της απόστασης του σημείου λεπτομέρειας από το θεοδόλιχο, να παράγουν τις απ' ευθείας τρισδιάστατες συντεταγμένες σημείων στο χώρο, εφόσον είναι απόλυτα προσδιορισμένη η στάση του τοπογραφικού οργάνου σε ένα τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.





Οι πλέον σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί είναι εξοπλισμένοι και με ενσωματωμένα μέσα αποθήκευσης των δεδομένων (καταγραφικά) που απαλλάσσουν τον τοπογράφο από την καταγραφή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων με το χέρι. Έτσι, τα δεδομένα αποθηκεύονται στο εσωτερικό του οργάνου και, στη συνέχεια, είναι προσβάσιμα μέσω ενός υπολογιστή όπου μπορούν, πλέον, να επεξεργαστούν και να παράγουν το τελικό αποτέλεσμα.

Η μέθοδος λειτουργίας ενός γεωδαιτικού σταθμού βασίζεται στις αντίστοιχες μεθόδους που χρησιμοποιούν τους ψηφιακούς θεοδόλιχους και τα EDM, χωρίς καμία ιδιαίτερη διαφοροποίηση επί αυτών.

Οι σύγχρονοι γεωδαιτικοί σταθμοί έχουν πολύ μεγάλες δυνατότητες ακρίβειας τόσο στη μέτρηση γωνιών όσο και αποστάσεων. Οι αποστάσεις μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια της τάξης

μερικών mm ή και δεκάτων του mm, ενώ οι γωνίες μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια 0.5" έως 20". Κάθε γεωδαιτικός σταθμός, όπως και γενικά κάθε μετρητικό όργανο ακριβείας, συνοδεύεται από την αντίστοιχη διακρίβωση (βαθμονόμηση).

Πρόσφατα, οι δυνατότητες και ευκολίες που προστέθηκαν στα όργανα αυτά είναι σημαντικές. Ορισμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν δυνατότητα αυτόματης στόχευση στο κάτοπτρο και ασύρματο τηλεχειρισμό, αποκαλούνται δε συνήθως "ρομποτικοί". Επίσης ορισμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί διαθέτουν ενσωματωμένους δέκτες GPS γεωδαιτικής ακριβείας που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της θέσης του οργάνου με ακρίβεια cm.

Κατά την χρήση ένας γεωδαιτικός σταθμός πρέπει να τοποθετηθεί σε έναν ειδικό τρίποδα που τον συγκρατεί στο ύψος άνετης σκόπευσης. Ο τρίποδας μπορεί να παραληφθεί αν το όργανο τοποθετηθεί σε υφιστάμενο τριγωνομετρικό βάθρο. Πριν από την έναρξη των μετρήσεων πρέπει να γίνει οριζοντίωση και κέντρωση του οργάνου ως προς την κατακόρυφο της γης και το τοπογραφικό σημείο όπου τοποθετείται, αντίστοιχα. Για να διευκολυνθούν αυτές οι προκαταρκτικές εργασίες, το όργανο είναι εξοπλισμένο με φυσαλίδες οριζοντίωσης και με laser ή κάτοπτρο.

Οι μετρήσεις αποστάσεων απαιτούν τη χρήση ενός τοπογραφικού κατόπτρου που επιτρέπει στο όργανο να υπολογίσει την απόσταση μεταξύ των δύο σημείων. Το κάτοπτρο μπορεί να παραληφθεί σε περιπτώσεις όπου ο στόχος είναι ανοιχτόχρωμος και σε σχετικά μικρή απόσταση, παραδείγματος χάριν 100m.

2.2.3 Μέθοδοι μέτρησης οριζόντιων γωνιών

Για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα κατά τη μέτρηση οριζόντιων γωνιών, εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι παρατήρησης, ανάλογα με την επιδιωκόμενη ακρίβεια [2,26].

 Στην περίπτωση που πρέπει να μετρηθεί μία γωνία, από ένα σημείο εφαρμόζονται οι εξής μέθοδοι :

Απλή μέθοδος

Αν σκοπευθούν διαδοχικά τα δύο αυτά σημεία και από τη δεύτερη ανάγνωση αφαιρεθεί η πρώτη θα προκύψει η επιθυμητή δεξιόστροφη γωνία. Για καλύτερα αποτελέσματα το τηλεσκόπιο τοποθετείται σε δεύτερη θέση τηλεσκοπίου και στρέφοντας αριστερόστροφα σκοπεύονται με αντίθετη σειρά οι στόχοι και καταγράφονται οι αναγνώσεις. Η μέση τιμή των αναγνώσεων κατά τη σκόπευση κάθε στόχου σε πρώτη και δεύτερη θέση τηλεσκοπίου αντιπροσωπεύει την τιμή της σκόπευσης του κάθε στόχου και εκ της διαφοράς των δύο τιμών προκύπτει η ζητούμενη γωνία. Στη συγκεκριμένη μέθοδο υπεισέρχονται αρκετά σφάλματα, λόγω πιθανής εσφαλμένης κατακορύφωσης του πρωτεύοντα άξονα, εσφαλμένης διαίρεσης του κύκλου και σφαλμάτων παρατήρησης, τα οποία οφείλονται στον χειριστή. Για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται η μέτρηση κατά περιόδους.

Μέτρηση κατά περιόδους

Έστω ότι αποφασίστηκε να μετρηθεί μία γωνία ν φορές. Αφού κεντρώνεται και οριζοντιώνεται το όργανο, τοποθετείται ένδειξη κοντά στο 0 στον οριζόντιο κύκλο, σκοπεύεται ο πρώτος και ο δεύτερος στόχος και καταγράφονται οι ενδείξεις. Στη συνέχεια, το τηλεσκόπιο τοποθετείται σε δεύτερη θέση και επαναλαμβάνονται οι σκοπεύσεις με τον τρόπο που προαναφέρθηκε. Έτσι ολοκληρώνεται η πρώτη περίοδος. Κατόπιν, το τηλεσκόπιο τοποθετείται σε πρώτη θέση, μετακινείται ο οριζόντιος κύκλος στην ένδειξη 200/ν περίπου, σκοπεύεται ο πρώτος στόχος και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία ν φορές. Η τελική τιμή θα είναι α = [α_i] / ν.

Επαναληπτική μέθοδος

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο, η τιμή της γωνίας προστίθεται κατά μηχανικό τρόπο ν φορές χωρίς να ληφθούν οι ενδιάμεσες αναγνώσεις. Σκοπεύεται σε πρώτη θέση τηλεσκοπίου ο αριστερός στόχος και λαμβάνεται η αρχική ανάγνωση και κατόπιν ο δεύτερος στόχος. Ο οριζόντιος κύκλος στερεώνεται, ώστε να περιστρέφεται μαζί με το όργανο και η ανάγνωση να μη μεταβάλλεται και σκοπεύεται το πρώτο σημείο. Κατόπιν ελευθερώνεται ο κύκλος, περιστρέφεται το όργανο και σκοπεύεται ο δεύτερος στόχος. Η εργασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί το επιθυμητό πλήθος επαναλήψεων, οπότε λαμβάνεται και η τελική ανάγνωση προς το δεύτερο σημείο.

Τέλος γίνεται αναστροφή-περιστροφή του τηλεσκοπίου (δεύτερη θέση τηλεσκοπίου) και επαναλαμβάνεται η ίδια εργασία αρχίζοντας από το δεύτερο σημείο και κινούμενοι αριστερόστροφα, μέχρις ότου να πραγματοποιηθεί ο ίδιος αριθμός επαναλήψεων. Από τις αναγνώσεις αυτές αφαιρούνται 200g και λαμβάνονται οι αντίστοιχες μέσες τιμές. Η τιμή θα είναι α = [(L_1 - L_2) + k·400] / v. όπου L_1 , L_2 οι αντίστοιχες μέσες τιμές. Βέβαια θα πρέπει να προσεχθεί αν πρέπει να προστεθεί πολλαπλάσιο των 400 g πριν τη διαίρεση.

 Στην περίπτωση που πρέπει να μετρηθούν περισσότερες από μία γωνίες, από ένα σημείο εφαρμόζονται οι εξής μέθοδοι :

Μέθοδος διευθύνσεων

Μεταξύ των διευθύνσεων που αρχίζουν από το σημείο στάσης προς τους στόχους, εκλέγεται εκείνη η διεύθυνση που προσφέρεται για την καλύτερη σκόπευση σαν διεύθυνση αναφοράς ή αρχική διεύθυνση. Αρχίζοντας από τη διεύθυνση αυτή, κινούμενοι δεξιόστροφα και σε πρώτη θέση τηλεσκοπίου, παρατηρούνται οι στόχοι και καταγράφονται οι αναγνώσεις του οριζόντιου κύκλου.

Κατόπιν, γίνεται αναστροφή-περιστροφή του τηλεσκοπίου και παρατηρούνται οι στόχοι κινούμενοι κατ' αντίθετη πορεία, μέχρι σκοπεύσεως της αρχικής διεύθυνσης. Οι ενδείξεις που καταγράφηκαν αποτελούν τις μετρήσεις μίας περιόδου.

Αν έχει οριστεί να μετρηθούν ν περίοδοι, τότε πριν από την έναρξη κάθε περιόδου ο κύκλος θα πρέπει να μετατίθεται κατά 200/ν βαθμούς.

Ο μέσος όρος των αναγνώσεων σε πρώτη και δεύτερη θέση τηλεσκοπίου δίνει τη μέση τιμή της κάθε σκόπευσης. Η διαφορά της ένδειξης αναφοράς από κάθε μία από τις ενδείξεις των σκοπεύσεων που έχουν καταγραφεί σε μία περίοδο δίνει τη μέση ανηγμένη τιμή .Η μέση τιμή των αντιστοίχων ανηγμένων τιμών στο σύνολο των περιόδων δίνει τη γενική μέση τιμή.

> Μέθοδος όλων των συνδυασμών ή του Schreiber

Άλλη περισσότερο πολύπλοκη μέθοδος που μπορεί να εφαρμοστεί για πολλές διευθύνσεις είναι η μέθοδος Schreiber. Μετρούνται οι μεμονωμένες γωνίες που σχηματίζονται από τις διάφορες διευθύνσεις με όλους τους δυνατούς ανά δύο

συνδυασμούς. Με αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται ίδιο πλήθος παρατηρήσεων και επομένως ενιαία ακρίβεια σε όλες τις γωνίες του σημείου στάσης.

Έκκεντρη στάση

Όταν το τοπογραφικό όργανο δεν είναι δυνατόν να τοποθετηθεί στο σημείο Α και τοποθετείται σε σημείο Σ σε απόσταση d, η ζητούμενη γωνία Χ υπολογίζεται σε σχέση με τις γωνίες φ και ω: X = φ + ω και sinω= (d·sinφ)/ S

Εκ των σχέσεων, προκύπτει η τιμή της γωνίας ω, με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστά τα μήκη d και S (δύνανται να μετρηθούν άμεσα ή έμμεσα).



Σχήμα 2.6: Υπολογισμός γωνίας ω, στην περίπτωση έκκεντρης στάσης.

• Έκκεντρο σημείο

Όταν από τη κορυφή Α δεν είναι δυνατόν να σκοπευθεί το σημείο Γ, ώστε να μετρηθεί η γωνία Χ τότε σκοπεύεται σημείο Σ και μετρούνται οι γωνίες φ και α και οι αποστάσεις S και d (άμεσα ή έμμεσα) : X = φ + ω και sinω= (d·sinα)/ S.



Σχήμα 2.7: Υπολογισμός γωνίας ω, στην περίπτωση έκκεντρου σημείου.

Εκ των σχέσεων, προκύπτει η τιμή της γωνίας ω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η γωνία ω και στις δύο περιπτώσεις μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με τη θέση του βοηθητικού σημείου Σ.

2.2.4 Μέθοδοι μέτρησης κατακόρυφων γωνιών

Η κατακόρυφη γωνία, καθορίζει τη θέση του σκοπευτικού άξονα του τηλεσκοπίου σε σχέση με τη κατακόρυφο. Στη περίπτωση αυτή ονομάζεται ζενιθία απόσταση z. Αν η θέση του σκοπευτικού άξονα ορίζεται σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο τότε ονομάζεται γωνία ύψους β.

Σφάλμα λόγω εκκεντρότητας των κύκλων είναι το προερχόμενο εκ της μη ταύτισης του άξονος περιστροφής του διηρημένου κύκλου από το σημείο που ορίζεται από τις συγκλίνουσες χαραγές των υποδιαιρέσεων.

Έλεγχος και ρύθμιση των δεικτών του κατακόρυφου κύκλου είναι η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε η ένδειξη 0° ή 100g του κατακόρυφου κύκλου, να είναι στην κατάλληλη θέση, όταν ο σκοπευτικός άξονας του τηλεσκοπίου είναι σε οριζόντια θέση.

Σε αντίθεση με ότι συμβαίνει στο οριζόντιο κύκλο όπου η ανάγνωση που αντιστοιχεί σε μία διεύθυνση απαλλάσσεται από το σφάλμα εκκεντρότητας, όταν γίνονται αντιδιαμετρικές αναγνώσεις, στον κατακόρυφο κύκλο για να απαλειφθεί αυτό το σφάλμα όχι μόνο πρέπει να υπάρξουν αντιδιαμετρικές αναγνώσεις αλλά επί πλέον οι σκοπεύσεις πρέπει να γίνονται σε δύο θέσεις τηλεσκοπίου και να λαμβάνεται η μέση τιμή των δύο αποτελεσμάτων.

Στους σύγχρονους θεοδόλιχους η τιμή του σφάλματος εκκεντρότητας έχει μειωθεί σημαντικά. Όταν σκοπεύεται σημείο Α σε πρώτη θέση τηλεσκοπίου, εξ αιτίας του σφάλματος δείκτη Κ, η ανάγνωση Ζ₁ που καταγράφεται είναι εσφαλμένη κατά το σφάλμα αυτό.

$$Z_1 = Z - K$$
 (2.1)

Αν ο σκοπευτικός άξων του τηλεσκοπίου έλθει στη δεύτερη θέση σχηματίζεται γωνία Z με τη κατακόρυφο. Η ανάγνωση Z₂ στη θέση αυτή είναι εσφαλμένη κατά το αυτό σφάλμα δείκτη K εφόσον η θέση των δεικτών παραμένει αμετάβλητη, αλλά με αντίθετο πρόσημο.

$$Z_2 = Z + K \qquad (2.2)$$

Από τις Σχέσεις (2.1) και (2.2) προκύπτει:

$$\begin{cases} Z = \left(Z_1 + Z_2 \right) / 2 \\ K = \left(Z_2 - Z_1 \right) / 2 \end{cases}$$
 (2.3)

Η αληθής τιμή της γωνίας Ζ του σκοπευτικού άξονα με την κατακόρυφο προκύπτει ως η μέση τιμή των αναγνώσεων του κατακόρυφου κύκλου στις δύο θέσεις του τηλεσκοπίου. Η τιμή σφάλματος δείκτη προσδιορίζεται ως η ημιδιαφορά των αναγνώσεων. Στα σύγχρονα όργανα η αποκατάσταση του σφάλματος της κατεύθυνσης των δεικτών του κατακόρυφου κύκλου μπορεί να γίνει αυτόματα με τη βοήθεια ισοσταθμιστή. Αποτελεί σοβαρό πλεονέκτημα ο εφοδιασμός των οργάνων με ισοσταθμιστή διότι εκτός των προαναφερομένων ελαττώνει τον χρόνο που απαιτείται για τη μέτρηση των κατακόρυφων γωνιών. Η τελική τιμή, με τη προαναφερθείσα διαδικασία, απαλλάσσεται από όλα τα σφάλματα, εκτός από το σφάλμα καθετότητας του δευτερεύοντος άξονος προς τον κατακόρυφο κύκλο, το σφάλμα διαιρέσεως του κατακόρυφου κύκλου και το σφάλμα εκτιμήσεων των αναγνώσεων. Τα δύο πρώτα είναι μικρά για τα σύγχρονα όργανα, ενώ το τελευταίο περιορίζεται με επανάληψη των μετρήσεων.



2.2.5 Βασική επεξεργασία – Θεμελιώδη προβλήματα τοπογραφίας

Σχήμα 2.8: Πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα.

Το **πρώτο θεμελιώδες πρόβλημα** της τοπογραφίας οδηγεί σε υπολογισμό των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων ενός σημείου όταν είναι γνωστές οι οριζοντιογραφικές ή επίπεδες συντεταγμένες (x₁, y₁) ενός σημείου, η γωνία διεύθυνσης G12 από το σημείο 1 προς το σημείο 2 και η οριζόντια απόσταση (S12) ανάμεσα στα δύο σημεία.

Η εφαρμογή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος γίνεται όταν μετά από την επίλυση της όδευσης είναι γνωστές οι συντεταγμένες των κορυφών της όδευσης.

Αν ο θεοδόλιχος έχει τοποθετηθεί στη θέση με οριζοντιογραφικές συντεταγμένες (x₁,y₁) ο υπολογισμός των συντεταγμένων (x₂, y₂) του σημείου που παρατηρείται από το οπτικό σύστημα του οργάνου μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

J	$x_{2} = x_{1} + D_{x} = x_{1} + S_{12} \cdot sin(G_{12})$	(24)
	$y_{2} = y_{1} + D_{y} = y_{1} + S_{12} \cdot sin(G_{12})$	(2.7)

όπου G12 είναι η γωνία που θα διαγράψει ο άξονας των Υ (βορράς) αν κινηθεί σύμφωνα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού ώστε να συμπέσει με τη νοητή γραμμή που συνδέει τα δυο

σημεία και (S12) η οριζόντια απόσταση ανάμεσα στο σημείο στάσης του οργάνου και το σημείο σκόπευσης (x₂, y₂).

Το **αντίστροφο ή δεύτερο θεμελιώδες πρόβλημα** της τοπογραφίας μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της απόστασης (S12) δύο σημείων και της γωνίας διεύθυνσης G12 που σχηματίζει η νοητή ευθεία που τα ενώνει με το θετικό ημιάξονα των τεταγμένων, εφόσον είναι γνωστές οι συντεταγμένες του σημείου.



Σχήμα 2.9: Τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα

Το **τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα** της τοπογραφίας (μεταφορά γωνίας διεύθυνσης) οδηγεί στον προσδιορισμό της γωνίας διεύθυνσης μιας οποιασδήποτε πλευράς της τεθλασμένης γραμμής (ή πολυγωνικής όδευσης) G_n(n+1) όταν είναι γνωστές οι προηγούμενες γωνίες θλάσεις και η γωνία διεύθυνσης της πρώτης πλευράς.

Η σχέση που δίνει τη γωνία διεύθυνσης είναι:

$$G_n(n+1) = G_n(n-1) + \theta_1 + 200^g$$
 (2.5)

Εφαρμόζοντας τη σχέση για όλες τις μετρήσεις των γωνιών μιας όδευσης προκύπτει τελικά η σχέση που αποδίδει τη γωνία διεύθυνσης μιας πλευράς, όταν είναι γνωστές οι γωνίες θλάσεις των προηγούμενων πλευρών και η γωνία διεύθυνσης της πρώτης πλευράς.

$$G_{n}(n+1) = G_{01} + \sum_{i=1}^{n} \theta_{i} + (n \times 200^{g}) - (k \times 400^{g})$$
(2.6)

Οπισθοτομία: Η διαδικασία υπολογισμού των συντεταγμένων του σημείου στάσης του οργάνου μετά από μέτρηση των διευθύνσεων προς τρία τουλάχιστον γνωστά σημεία Α, Β, Γ. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντεταγμένων της στάσης του οργάνου με οπισθοτομία οι Βαρυκεντρική, Collins και Τομής δύο κύκλων, ωστόσο για λόγους συντομίας περιγράφεται η πιο κοινή (Βαρυκεντρική).

Βαρυκεντρική (Tienstra) μέθοδος οπισθοτομίας: Η στάση που τοποθετείται το τοπογραφικό όργανο (οπισθοτομικό σημείο) πρέπει να εντοπίζεται κατά προτίμηση στο κέντρο βάρους των γνωστών σημείων και σε κάθε περίπτωση εντός του τριγώνου. Μετρούνται οι διευθύνσεις προς τρία γνωστά σημεία από τις οποίες προκύπτουν οι γωνίες γ1, γ2, γ3 και οι σχέσεις που δίνουν τις οριζόντιες συντεταγμένες του σημείου Ρ είναι:



Σχήμα 2.10: Βαρυκεντρική μέθοδος οπισθοτομίας

$$\begin{cases} x_{p} = \frac{(k_{1} \cdot x_{A}) + (k_{2} \cdot x_{B}) + (k_{3} \cdot x_{\Gamma})}{k_{1} + k_{2} + k_{3}} \\ y_{p} = \frac{(k_{1} \cdot y_{A}) + (k_{2} \cdot y_{B}) + (k_{3} \cdot y_{\Gamma})}{k_{1} + k_{2} + k_{3}} \end{cases}$$

$$(2.7)$$

Όπου

$$\frac{1}{k_{1}} = \cot(\gamma_{A}) - \cot(\gamma_{1}),$$
$$\frac{1}{k_{2}} = \cot(\gamma_{B}) - \cot(\gamma_{2}),$$
$$\frac{1}{k_{3}} = \cot(\gamma_{\Gamma}) - \cot(\gamma_{3})$$

Οι γωνίες γΑ, γΒ, γΓ προκύπτουν από το δεύτερο και τρίτο θεμελιώδες πρόβλημα με γνωστές τις συντεταγμένες των σημείων. Το αλγεβρικό άθροισμα των γωνιών γ1, γ2, γ3 είναι 400g.

Εμπροσθοτομία: Είναι η μέθοδος προσδιορισμού των συντεταγμένων ενός σημείου με μετρήσεις μόνο των γωνιών από άλλα δύο σημεία (τις στάσεις του οργάνου). Υπάρχουν τρεις μέθοδοι επίλυσης της εμπροσθοτομίας (επίλυση τριγώνου και θεμελιώδη προβλήματα, με μετρημένες γωνίες και με γωνίες διεύθυνσης). Ωστόσο για λόγους συντομίας περιγράφονται η πρώτη και δεύτερη μέθοδοι που είναι οι πιο κοινές.



Σχήμα 2.11: Εφαρμογή εμπροσθοτομίας

Μέθοδος εμπροσθοτομίας με επίλυση τριγώνου και θεμελιώδη προβλήματα: Τα σημεία A,B έχουν γνωστές συντεταγμένες (x_A, y_A) και (x_B, y_B) και με εφαρμογή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος υπολογίζονται η απόσταση S_{AB} και η γωνία διεύθυνσης G_{AB}. Σύμφωνα με το νόμο των ημίτονων οι αποστάσεις S_{AM} και S_{BM} προκύπτουν από τις σχέσεις

$$S_{AM} = S_{AB} \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$
 (2.8)

$$S_{BM} = S_{AB} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)}$$
 (2.9)

Με εφαρμογή του 3ου θεμελιώδους προβλήματος της τοπογραφίας υπολογίζονται οι γωνίες διευθύνσεις G_{AM} και G_{BM}

$$G_{AM} = G_{BA} + \alpha + 200^{g}$$
 (2.10)
 $G_{BM} = G_{AB} + (400^{g} - \beta) + 200^{g}$ (2.11)

Με γνωστά τα (x_A, y_A), G_{AM} και S_{AM} υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου M (x_M, y_M) από το 1ο θεμελιώδες πρόβλημα:

$$x_{M} = x_{A} + [S_{AM} \cdot \sin(G_{AM})] \quad (2.12)$$
$$y_{M} = y_{A} + [S_{AM} \cdot \cos(G_{AM})] \quad (2.13)$$

Για έλεγχο και μόνο υπολογίζονται οι συντεταγμένες του σημείου M (x_M, y_M) και από το σημείο B:

$$x_{M} = x_{B} + [S_{BM} \cdot sin(G_{BM})] \qquad (2.14)$$
$$y_{M} = y_{B} + [S_{BM} \cdot cos(G_{BM})] \qquad (2.15)$$

Μέθοδος εμπροσθοτομίας με μετρημένες γωνίες: Απ΄ ευθείας από τις σχέσεις (χωρίς επίλυση του τριγώνου) έχουμε:

$$x_{M} = \frac{y_{B} \cdot y_{A} + [x_{A} \cdot \cot(\beta)] + [x_{B} \cdot \cot(\alpha)]}{\cot(\alpha) + \cot(\beta)}$$
(2.16)
$$y_{M} = \frac{x_{A} \cdot x_{B} + [y_{A} \cdot \cot(\beta)] + [y_{B} \cdot \cot(\alpha)]}{\cot(\alpha) + \cot(\beta)}$$
(2.17)

Με χρήση των προηγούμενων προβλημάτων ή της μεθόδου οπισθοτομίας μπορεί να δημιουργηθεί ένα δίκτυο μετρημένων σημείων γύρω από το χώρο ή το κτίριο μελέτης και στη συνέχεια με χρήση μεθόδων εμπροσθοτομίας ή του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος να υπολογιστούν οι συντεταγμένες όλων των σημείων που παρατηρούνται από το σύστημα σκόπευσης του οργάνου (γεωδαιτικού σταθμού).

2.2.6 Μέθοδοι μέτρησης αποστάσεων

Για τη μέτρηση αποστάσεων χρησιμοποιούνται, κατά κόρον, οι τρεις παρακάτω μέθοδοι:

- I. Μηχανική μέθοδος. Γίνεται με τη χρήση μεταλλικών μετροταινιών και συρμάτων invar.
- **ΙΙ. Οπτική μέθοδος**. Γίνεται με την παρατήρηση μέσω του οπτικού συστήματος ενός οργάνου μιας ειδικής μετρητικής διάταξης.
- III. Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος. Για την μέτρηση της απόστασης με χρήση του τοπογραφικού οργάνου απαιτείται συνήθως η εφαρμογή ενός ανακλαστήρα που εφάπτεται του σημείου που απαιτείται να μετρηθεί. Υπάρχουν οι εξής τρόποι για τον υπολογισμό της απόστασης:
 - Παλμού. Βασίζεται στο χρόνο που απαιτείται για την μετάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος μεταξύ του οργάνου που φέρει και την πηγή του Η/Μ κύματος και του σημείου που επιθυμείται η μέτρηση της απόστασής του από αυτό.

Σύγκρισης φάσεων. Ο πομπός του οργάνου παράγει ένα ημιτονοειδές μετρικό σήμα το οποίο αντανακλάται και επιστρέφει με διαφορετική φάση. Η διαφορά φάσης καταγράφεται και μετατρέπεται σε απόσταση.

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη και εξέλιξη των αποστασιόμετρων laser και των οργάνων μέτρησης απόστασης με χρήση της τεχνολογίας των υπέρυθρων ακτίνων έδωσε τη δυνατότητα να γίνονται οι μετρήσεις χωρίς να είναι απαραίτητη η χρήση ανακλαστήρα (πρίσμα ή κάτοπτρο).

2.2.7 Γενικά Χαρακτηριστικά- Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Κύρια χαρακτηριστικά της τοπογραφικής μεθόδου είναι:

- Η τοπογραφική αποτύπωση είναι αντικειμενική.
- Ορίζει ένα σύστημα αναφοράς βάσει του οποίου γίνεται ο προσδιορισμός των μετρήσεων στο χώρο.
- Η ανακατασκευή γεωμετριών στην αναπαράσταση γίνεται μέσω συγκεκριμένων σημείων, που προσδιορίζονται αυστηρά.
- Υπάρχει δυνατότητα επιστημονικού ελέγχου του αποτελέσματος και ικανοποίηση των απαιτήσεων ακρίβειας και αξιοπιστίας.
- Υπάρχει δυνατότητα και έμμεσων μετρήσεων, ως παράγωγων των πρωτογενών άμεσων μετρήσεων.
- Υπάρχει ανάγκη για στοιχειώδη σχεδιαστική ικανότητα στο πεδίο, για τη σύνταξη σκαριφημάτων.
- Αντιμετωπίζονται δύσκολα και μόνο μετά από κατάλληλη μαθηματική στατιστική επεξεργασία (στο γραφείο), περιπτώσεις μη-επιπεδότητας.
- Υπάρχει σημαντικό πρόβλημα χρόνου και κόστους εργασιών πεδίου, που εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του αντικειμένου.
- Ο εξοπλισμός πεδίου είναι, μέτριου κόστους.
- Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τις επεξεργασίες γραφείου είναι ο συνηθισμένος των τοπογραφικών εφαρμογών.
- Η αλγοριθμική επεξεργασία των δεδομένων είναι εύκολη.
- Δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν λεπτομέρειες και πολύπλοκα αρχιτεκτονικά (κυρίως μη-γραμμικά) ή δύσκολα προσπελάσιμα στοιχεία του προς αποτύπωση αντικειμένου.
- Υπάρχει ανάγκη για πρόσθετες εργασίες, που χρησιμοποιούνται στην εμπειρική μέθοδο, όπως είναι για παράδειγμα οι μετρήσεις με μετροταινία και οι ερασιτεχνικές φωτογραφίες.

2.3 Φωτογραμμετρικές μέθοδοι

Η φωτογραμμετρία είναι η τέχνη, η επιστήμη και η τεχνική που σκοπό έχει την εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας φυσικών αντικειμένων και του περιβάλλοντος μέσω των διαδικασιών της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων και άλλων πρότυπων Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και φαινομένων [22,27,28,29,30].

Εμπνευστής της χρήσης της φωτογραφίας για την τεκμηρίωση των αρχιτεκτονικών κατασκευών σημαντικής πολιτιστικής αξίας, ήταν ο Albrecht Meydenbauer, γερμανός αρχιτέκτων που στα 1858 μετά από ένα ατύχημα κατά τη διάρκεια των μετρήσεων που έκανε στον καθεδρικό ναό της πόλης Wetzlar και μπορούσε να στοιχίσει τη ζωή του, σκέφτηκε ότι θα μπορούσαν οι μετρήσεις στην όψη ενός κτηρίου να πραγματοποιηθούν με έμμεσο τρόπο και όχι απ' ευθείας. Ο καλύτερος τρόπος για την εξαγωγή των μετρήσεων έμμεσα ήταν με χρήση φωτογραφικής εικόνας. Οι κοινές φωτογραφικές μηχανές της εποχής δεν ήταν σε θέση να αποδώσουν ορθά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αντικειμένων και για το λόγο αυτό αποφάσισε να κατασκευάσει μια φωτογραφική μηχανή που θα ενσωμάτωνε και μια μετρητική συσκευή ικανή να δώσει εκτός

από την εικόνα του αντικειμένου και κάποια γεωμετρική πληροφορία του. Η συσκευή αυτή κατασκευάστηκε το 1867 και αποτελούνταν από ένα ευρυγώνιο φακό (εστιακής απόστασης 25 cm) με μέγεθος αρνητικού 30x30 cm. Ο Meydenbauer έδωσε το όνομα στην επιστήμη που ονομάστηκε φωτογραμμετρία και προέρχεται από τρεις ελληνικές λέξεις: «Φως – γραμμή – μέτρηση» που περιγράφουν πολύ λιτά την ιδιότητα που έχει το φως να πορεύεται πάντα σε ευθεία γραμμή και να μπορεί να δίνει μετρήσεις κάνοντας χρήση αυτής της ιδιότητας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο Meydenbauer ήταν ο πρώτος που διαπίστωσε ότι τα μνημεία – αντικείμενα πολιτιστικής κληρονομιάς είναι σε κίνδυνο από τις βλάβες που υφίστανται με το πέρασμα του χρόνου και πρότεινε τη δημιουργία του "Denkmälerarchiv" δηλαδή του αρχείου της πολιτιστικής κληρονομιάς που θα χρησιμοποιούνταν σε περίπτωση καταστροφής του αρχικού μνημείου. Η δραστηριότητα του οδήγησε στην καταγραφή περίπου 2600 μνημείων και 20000 φωτογραφιών. Μερικά μάλιστα από τα μνημεία που αποτύπωσε ανήκουν και στη χώρα μας.

Από τότε η Φωτογραμμετρία έχει εξελιχθεί παράλληλα με την τεχνική της φωτογραφίας και σε συνεργασία με τις επιστήμες των μετρήσεων όπως της τοπογραφίας και της αρχιτεκτονικής, για τη δημιουργία των σχεδιαγραμμάτων των όψεων των κτιρίων και των αρχαιολογικών ανασκαφών. Τα σημαντικότερα στάδια εξέλιξής της φωτογραμμετρίας ήταν:

- Ι. Αναλογική φωτογραμμετρία, όπου με χρήση των οπτικομηχανικών μέσων κατέστη δυνατή η εξαγωγή της θέσης στις τρεις διαστάσεις λεπτομερειών ενός εικονιζόμενου αντικειμένου που εικονίζεται σε ένα στερεοζεύγος φωτογραφιών που έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις με σημαντική επικάλυψη.
- II. Αναλυτική φωτογραμμετρία, όπου οι φωτογραμμετρικές διαδικασίες γίνονται με υπολογιστικά μέσα και για πρώτη φορά χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί υπολογιστές για τον υπολογισμό των παραμέτρων των φωτογραφικών εικόνων και των προσανατολισμών τους καθώς και ο προσδιορισμός στον τρισδιάστατο χώρο της θέσης των λεπτομερειών των αντικειμένων.
- III. Ψηφιακή φωτογραμμετρία, όπου σταματά η επεξεργασία των αναλογικών φωτογραφιών και η επεξεργασία γίνεται με υπολογιστικά μέσα σε ψηφιακές απεικονίσεις (σκαναρισμένες εικόνες ή πρωτογενείς ψηφιακές εικόνες) όχι μόνο του ορατού φάσματος της Η/Μ ακτινοβολίας αλλά και άλλων προτύπων της όπως για παράδειγμα στο μήκος κύματος των μικροκυμάτων και των υπέρυθρων ακτίνων.

Η μέθοδος της φωτογραμμετρίας έχει ως βάση λειτουργίας των υπολογισμό συντεταγμένων στο χώρο, χρησιμοποιώντας την εμπροσθοτομία και την οπισθοτομία. Για την εφαρμογή της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας που οδηγεί σε υπολογισμό των συντεταγμένων πρέπει να προηγηθεί η φωτογραμμετρική οπισθοτομία. Η γνώση της θέσης τριών τουλάχιστον σημείων στο χώρο και η παρατήρησή τους σε μία εικόνα δημιουργεί ένα σύστημα με έξι εξισώσεις και έξι αγνώστους που είναι οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού της εικόνας, δηλαδή της θέσης της μηχανής και συγκεκριμένα του κέντρου του φακού της και στροφής των αξόνων της ως προς τους άξονες του επίγειου συστήματος. Τα σημεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης και των στροφών της φωτομηχανής και μετρώνται με μεγάλη ακρίβεια σε ένα αυθαίρετο τρισορθογώνιο επίγειο σύστημα συντεταγμένων, λέγονται φωτοσταθερά. Τα φωτοσταθερά μπορεί να είναι είτε ευδιάκριτες λεπτομέρειες (χαρακτηριστικά σημεία του κτιρίου, παραδείγματος χάριν η γωνία ενός παραθύρου στην όψη ενός κτιρίου) στην επιφάνεια του αντικειμένου ή προσημασμένοι στόχοι υλοποιημένοι σε χαρτί ή άλλο φορέα (παραδείγματος χάριν αλουμίνιο) και τοποθετημένοι πάνω στο αντικείμενο ώστε να καλύπτουν το σύνολο της περιοχής του αντικειμένου που εμφανίζεται στις εικόνες. Το επίγειο σύστημα συντεταγμένων μπορεί να είναι αυθαίρετο και υλοποιείται από τη θέση των φωτοσταθερών που είναι δυνατόν να μετρηθούν με χρήση ενός τοπογραφικού οργάνου (γεωδαιτικού σταθμού) όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η ίδια απαίτηση για την ύπαρξη φωτοσταθερών αφορά και τον προσδιορισμό των οκτώ άγνωστων παραμέτρων των εξισώσεων της μορφής (21) που εφαρμόζονται στην μονοσκοπική φωτογραμμετρία.

Είναι απαραίτητο λοιπόν για τη χρήση οιασδήποτε φωτογραμμετρικής διαδικασίας να υπάρχει ένας ελάχιστος αριθμός μετρημένων σημείων στο χώρο που παρατηρούνται στις εικόνες. Γιατί, λοιπόν εφόσον γίνονται κάποιες μετρήσεις να μην αποτυπώνεται ολοκληρωτικά ένα αντικείμενο με χρήση κοινών τοπογραφικών οργάνων ή άλλων μετρήσεων;

Το σύνολο των μετρήσεων που γίνονται με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή στις εικόνες είναι πολύ μεγαλύτερο από τις ελάχιστες μετρήσεις και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες γίνονται οι μετρήσεις είναι πολύ καλύτερες. Οι συνθήκες είναι πολύ πιο ευνοϊκές όταν γίνονται στο γραφείο μπροστά στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή με όλες τις ανέσεις που αυτό παρέχει παρά όταν γίνονται κάτω από τον καλοκαιρινό ήλιο του Αυγούστου ή κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων σε μια αρχαιολογική ανασκαφή με χρήση μετροταινίας και αλφαδολάστιχου. Οι μετρήσεις που απαιτούνται για την φωτογραμμετρική επίλυση των εικόνων γίνονται συνήθως με τη χρήση τοπογραφικών οργάνων (γεωδαιτικών σταθμών) έτσι ώστε η ακρίβεια μέτρησης να είναι αρκετά υψηλή και της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάσταση της εικονοψηφίδας (pixel) στο έδαφος ώστε να μην υποβαθμίζεται η τελική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προϊόντων.

Εάν το μέγεθος της εικονοψηφίδας (pixel) στο έδαφος που καθορίζεται από τη μέση κλίμακα των εικόνων (δηλαδή από το λόγο της εστιακής απόστασης προς την απόσταση της φωτογράφησης) και την ανάλυση του αισθητήρα (ή της ανάλυσης σάρωσης της φωτογραφίας ή του αρνητικού) είναι 1 cm, τότε η μεταβλητότητα που εκφράζει την ακρίβεια των μετρήσεων δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή αυτή. Σε πολλές περιπτώσεις μεταβλητότητες πάνω από 1 cm, μπορεί να οδηγήσουν σε αποδεκτά φωτογραμμετρικά προϊόντα αν η τελική εκτύπωση των σχεδίων γίνεται σε τέτοια κλίμακα που το σφάλμα των μετρήσεων να μην είναι ορατό. Το μέγιστο ανεκτό σχεδιαστικό σφάλμα ενός υπό κλίμακα σχεδίου είναι της τάξης των 0.2-0.3 mm οπότε, για κλίμακα απόδοσης 1:50 το σφάλμα του 1 cm οδηγεί σε σχεδιαστικό σφάλμα 0.2 mm που είναι μικρότερο του κάτω ορίου του σχεδιαστικού σφάλματος και επομένως είναι αποδεκτό. Τα σημεία που μετρώνται πρέπει να καλύπτουν όσο το δυνατόν καλύτερα το σύνολο του αντικειμένου που είναι ορατό στην επικαλυπτόμενη περιοχή του στερεοζεύγους, αν πρόκειται για στερεοσκοπική εφαρμογή ή το κτίριο συνολικά σε μια μονοσκοπική εφαρμογή. Λόγω της χρήσης τοπογραφικών μεθόδων για τη μέτρηση των φωτοσταθερών η επιστήμη της τοπογραφίας έχει παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της επιστήμης της Φωτογραμμετρίας. Τα τελευταία χρόνια όμως λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της χρήσης τους για την επίλυση φωτογραμμετρικών προβλημάτων η Φωτογραμμετρία αποτελεί ένα κοινό τόπο μελέτης και εφαρμογών για πολλές επιστήμες. Σε πολλές περιπτώσεις βέβαια που αναφέρθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, δεν είναι απαραίτητη η χρήση ενός ακριβούς τοπογραφικού οργάνου για την συλλογή μετρήσεων για την φωτογραμμετρική επίλυση αλλά αρκούν ελάχιστες μετρήσεις αποστάσεων στην όψη ενός μνημείου που γίνονται με χρήση μετροταινίας ενώ ταυτόχρονα γίνονται μερικές παραδοχές συνθηκών (καθετότητα και παραλληλία γραμμών και επιπέδων) που ικανοποιούν χαρακτηριστικά σημεία του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή η ακρίβεια είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται με χρήση τοπογραφικών οργάνων αλλά και πάλι αν οι απαιτήσεις της ακρίβειας του τελικού προϊόντος είναι σχετικά μικρές είναι δυνατόν οι συγκεκριμένες μετρήσεις να αποδώσουν ικανοποιητικά το τελικό φωτογραμμετρικό προϊόν.

2.3.1 Συστήματα Συντεταγμένων

Προτού αναλυθεί το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη βασική επεξεργασία της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας θα γίνει μια μικρή αναφορά στα διάφορα συστήματα συντεταγμένων που συμμετέχουν στην φωτογραμμετρική επεξεργασία και της σχέσης που τα συνδέει.

• Σύστημα συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου.

Η μέτρηση των σύντεταγμένων των εικονιζόμενων σημείων σε μια φωτογραμμετρική εικόνα γίνεται στο σύστημα της φωτογραφίας ή αλλιώς του φωτογραφικού επιπέδου. Πρόκειται για ένα 2Δ (x, y) σύστημα συντεταγμένων που σαν αρχή έχει το κέντρο της εικόνας ή μάλλον την προβολή του κέντρου (x₀, y₀) των φακών της φωτομηχανής στο επίπεδο του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα. Το κέντρο των φακών αποτελεί και το κέντρο προβολής από το οποίο διέρχονται όλες οι οπτικές γραμμές που αποτυπώνουν τα αντικείμενα του 3Δ χώρου στον 2Δ χώρο του φωτογραφικού επιπέδου. Οι μετρήσεις στο φωτογραφικό επίπεδο ανάγονται μετά από κατάλληλη επεξεργασία στον υπολογισμό των 3Δ συντεταγμένων των τρισδιάστατων αντικειμένων της φωτογραφίας.

• Σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής.

Πρόκειται για ένα 3Δ σύστημα συντεταγμένων που έχει σαν αρχή το κέντρο των φακών με τον άξονα του βάθους W κάθετο προς το φωτογραφικό επίπεδο και τους άξονες U,V παράλληλους προς τους άξονες x, y του συστήματος συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου.

• Σύστημα συντεταγμένων του 3Δ χώρου.

Πρόκειται για ένα σύστημα συντεταγμένων (X,Y,Z) που υλοποιείται από το τοπογραφικό όργανο μετρήσεων των φωτοσταθερών που εικονίζονται στις φωτογραμμετρικές εικόνες. Η σύνδεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων και του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής προκύπτει αν υποθέσουμε ότι για τη μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο αρκεί να γίνουν τρεις μεταθέσεις (παράλληλα προς τους τρεις άξονες (X₀,Y₀,Z₀) που ορίζουν στο επίγειο σύστημα τις συντεταγμένες του κέντρου των φακών και αρχή του 3Δ συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής) τρεις στροφές (ω,φ,κ γύρω από κάθε άξονα) και μία μεταβολή της κλίμακας των μετρήσεων. Σε μορφή πινάκων η σχέση ορίζεται από τη μορφή

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} X \cdot X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}$$
(2.18)

Όπου R(ω,φ,κ) είναι ένα μητρώο 3x3 που αποτελείται από αθροίσματα τριγωνομετρικών συναρτήσεων των γωνιών στροφής ω, φ, κ και των αξόνων X,Y,Z, ώστε να συμπέσουν με τους άξονες U,V,W και λ είναι ο συντελεστής κλίμακας της σμίκρυνσης των ειδώλων στη φωτογραφία. Κάθε σημείο που μετράται στην εικόνα στο σύστημα συντεταγμένων της φωτογραφικής μηχανής (U,V,W) έχει σταθερή συντεταγμένη βάθους W = -c, όπου c είναι η εστιακή απόσταση της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή η απόσταση του κέντρου των φακών της από το φωτογραφικό επίπεδο και (x₀,y₀) η προβολή του κέντρου των φακών στο φωτογραφικό επίπεδο. Οι παράμετροι (c,x₀,y₀) μαζί με τις διαστάσεις του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα ορίζουν τις παραμέτρους της εσωτερικής

γεωμετρίας της φωτομηχανής. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής ονομάζεται εσωτερικός προσανατολισμός. Αντίθετα η θέση (X₀,Y₀,Z₀) του κέντρου των φακών και οι στροφές (ω,φ,κ) των αξόνων του επίγειου συστήματος ώστε να συμπέσουν με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής, αποτελούν στοιχεία της θέσης και προσανατολισμού της φωτογραφικής λήψης στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και ο προσδιορισμός των 6 αυτών παραμέτρων ονομάζεται εξωτερικός προσανατολισμός. Η Σχέση (2.18) μετατρέπεται στη μορφή:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x} - \mathbf{x}_{0} \\ \mathbf{y} - \mathbf{y}_{0} \\ -\mathbf{c} \end{bmatrix} = \lambda \cdot \mathbf{R} (\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} \mathbf{X} - \mathbf{X}_{0} \\ \mathbf{Y} - \mathbf{Y}_{0} \\ \mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{0} \end{bmatrix}$$
(2.19)

λόγω της παραλληλίας με των αξόνων U,V του συστήματος της φωτογραφικής μηχανής με τους x,y του φωτογραφικού επιπέδου.

Από τις τρεις εξισώσεις που προκύπτουν μπορούμε να οδηγηθούμε με διαίρεση των δύο πρώτων από την τρίτη σε ένα σύστημα δύο εξισώσεων απαλείφοντας με τον τρόπο αυτό το συντελεστή κλίμακας λ, που χαρακτηρίζονται ως εξισώσεις συγγραμικότητας και είναι η βάση της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρικής επεξεργασίας:

$$\begin{cases} x = x_{0} - c \cdot \frac{(X - X_{0}) \cdot R_{11} + (Y - Y_{0}) \cdot R_{12} + (Z - Z_{0}) \cdot R_{13}}{(X - X_{0}) \cdot R_{31} + (Y - Y_{0}) \cdot R_{32} + (Z - Z_{0}) \cdot R_{33}} \\ y = y_{0} - c \cdot \frac{(X - X_{0}) \cdot R_{21} + (Y - Y_{0}) \cdot R_{22} + (Z - Z_{0}) \cdot R_{23}}{(X - X_{0}) \cdot R_{31} + (Y - Y_{0}) \cdot R_{32} + (Z - Z_{0}) \cdot R_{33}} \end{cases}$$
(2.20)

Οι σχέσεις αυτές συνδέουν τις φωτογραφικές συντεταγμένες (x,y) της εικόνας ενός σημείου στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίγειες συντεταγμένες του (X,Y,Z) μέσω των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής (c,x₀,y₀) και των συντεταγμένων στάσης (X₀,Y₀,Z₀) της φωτογραφικής μηχανής στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού).

2.3.2 Στερεοσκοπική Φωτογραμμετρία

Με χρήση δυο εικόνων δηλαδή μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων (x,y) του ίδιου σημείου σε δύο εικόνες (που ονομάζονται ομόλογα σημεία), προκύπτουν δύο ζεύγη εξισώσεων της παραπάνω μορφής (2.20) που μπορούν να λυθούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και να εξάγουν τη θέση του σημείου στο χώρο δηλαδή τις συντεταγμένες (X,Y,Z). Η τεχνική αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία κατά αντιστοιχία της τοπογραφικής εμπροσθοτομίας που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βασική προϋπόθεση για την επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας είναι να έχει προσδιοριστεί προηγουμένως η θέση και στροφή της φωτομηχανής, δηλαδή η σχέση των αξόνων της φωτομηχανής με τους άξονες του επίγειου συστήματος συντεταγμένων. Ο προσδιορισμός της θέσης των φωτογραφικών στάσεων και των γωνιών στροφής των αξόνων ονομάζεται φωτογραμμετρική οπισθοτομία και είναι δυνατόν να γίνει και πάλι με επίλυση εξισώσεων της μορφής (19) εφόσον είναι γνωστή η θέση τριών τουλάχιστον σημείων που εικονίζονται σε κάθε εικόνα στο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του εδάφους. Η επάρκεια των τριών σημείων για την επίλυση της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας οφείλεται στο γεγονός ότι οι έξι άγνωστοι παράμετροι του προσανατολισμού των εικόνων Χ,Υ,Ζ,ω,φ,κ μπορούν να υπολογιστούν καθώς κάθε ένα από τα τρία σημεία συνεισφέρει στο προς επίλυση σύστημα εξισώσεων με 2 εξισώσεις άρα συνολικά έχουμε 6 εξισώσεις για 6 αγνώστους.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας οφείλεται στην τρισδιάστατη όραση και παρατήρηση των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής του τρισδιάστατου χώρου στις δύο εικόνες σε εξειδικευμένους ηλεκτρονικούς υπολογιστές που ονομάζονται Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί (ΨΦΣ). Η παρουσίαση γίνεται μέσω ενός συστήματος στερεοσκοπικής όρασης του στερεοζεύγους και μετρήσεων, όπου μετά από κατάλληλη επεξεργασία που ονομάζεται σχετικός προσανατολισμός και κατόπιν της δημιουργίας κατάλληλων εικόνων (επιπολικές εικόνες) είναι δυνατή η τρισδιάστατη όραση του συνόλου των λεπτομερειών της επικαλυπτόμενης περιοχής του του συνόλου των σημείων μέσω του τρισδιάστατου συστήματος εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων, συντομότερη επεξεργασία με τη μέτρηση δύο ομόλογων σημείων ταυτόχρονα σε δύο διαφορετικές εικόνες και αποφυγή χονδροειδών σφαλμάτων από λανθασμένη επιλογή παρόμοιων αλλά διαφορετικών σημείων στις δύο εικόνες.

2.3.3 Μονοσκοπική Φωτογραμμετρία

Σε μερικές περιπτώσεις η απλότητα της γεωμετρίας ενός αντικειμένου μπορεί να οδηγήσει σε χρήση μίας μόνο φωτογραμμετρικής εικόνας για τον προσδιορισμό της θέσης των εικονιζόμενων λεπτομερειών. Σε ένα κτίριο, για παράδειγμα, όλα τα χαρακτηριστικά σημεία μιας όψης βρίσκονται σε ένα κατακόρυφο επίπεδο οπότε, αν θεωρήσουμε ότι η μια από τις τρεις συντεταγμένες του επίγειου συστήματος είναι το βάθος κάθετα στο κατακόρυφο αυτό επίπεδο, προκύπτει ότι για κάθε σημείο λεπτομερειών υπάρχουν μόνο δύο άγνωστες τιμές συντεταγμένων δηλ. η απόσταση οριζόντια και κάθετα επάνω στην όψη του. Μαθηματικά η σχέση που συνδέει το κατακόρυφο επίπεδο της όψης ενός κτιρίου και της φωτογραμμετρικής εικόνας του ορίζεται από τις σχέσεις:

$$\begin{cases} x = \frac{(a_1 \cdot X) + (a_2 \cdot Y) + a_3}{(c_1 \cdot X) + (c_2 \cdot Y) + 1} \\ y = \frac{(b_1 \cdot X) + (b_2 \cdot Y) + b_3}{(c_1 \cdot X) + (c_2 \cdot Y) + 1} \end{cases}$$
(2.21)

όπου x,y οι εικονοσυντεταγμένες των λεπτομερειών και X,Y οι αντίστοιχες συντεταγμένες στο επίγειο σύστημα και a₁,a₂,a₃,b₁,b₂,b₃,c₁,c₂ άγνωστοι παράμετροι. Αν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι οκτώ άγνωστες παράμετροι που συνδέουν τα δύο επίπεδα, το επίπεδο της όψης και το φωτογραφικό επίπεδο στο όποιο γίνεται η καταγραφή, μπορεί να δημιουργηθεί μια

εικόνα που αποτελεί την ορθή προβολή της όψης του κτιρίου, δηλαδή ένα χάρτη της όψης που κάθε σημείο του αντιστοιχεί βάσει των παραπάνω παραμέτρων σε γνωστά σημεία στο χώρο που υλοποιεί το κατακόρυφο επίπεδο.

Ο προσδιορισμός των αγνώστων παραμέτρων πραγματοποιείται με την επίλυση ενός συστήματος τουλάχιστον 8 εξισώσεων άρα αν υπάρχουν 4 τουλάχιστον γνωστά σημεία στον πραγματικό χώρο και μετρηθούν οι εικονοσυντεταγμένες τους, μπορεί να δημιουργηθεί ένα σύστημα εξισώσεων που θα οδηγεί στην εύρεση των παραπάνω τιμών. Η εικόνα που δημιουργείται ονομάζεται ανηγμένη και η διαδικασία ονομάζεται φωτογραμμετρική αναγωγή εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα καθώς μπορεί με ελάχιστο κόστος (μέτρηση ορισμένων μόνο σημείων που βρίσκονται στο οριζόντιο ή κατακόρυφο επίπεδο και μπορεί να προσδιοριστούν ακόμα και με χρήση των εμπειρικών τεχνικών αποτύπωσης) και χρόνο να δώσουν ένα προστιθέμενης αξίας προϊόν με τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει ένα συνεχές προϊόν.
- Ενσωματώνεται με μεγάλη ευκολία σε ένα σύστημα ψηφιοποίησης CADD και οδηγεί πολύ εύκολα στο γραμμικό σχέδιο του μνημείου.
- Με αναγωγή πολλών συνεχώς επικαλυπτόμενων εικόνων μπορεί να δημιουργηθεί ένα μωσαϊκό ανηγμένων εικόνων (φωτομωσαϊκό).
- Δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις σε υλικό του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθώς δεν είναι απαραίτητη η χρήση στερεοσκοπικού συστήματος παρατήρησης.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθούν φωτογραφικές εικόνες που έχουν ληφθεί από κοινές φωτογραφικές μηχανές, ακόμα και αναλογικές compact φωτογραφικές μηχανές.
- Μπορεί και μια μετροταινία να οδηγήσει στην υλοποίηση και μέτρηση των απαιτούμενων φωτοσταθερών για την τελική αναγωγή των εικόνων.

Επίσης, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί η ανηγμένη εικόνα μιας φωτογραφικής λήψης έχοντας στη διάθεσή μας μία ή δύο το πολύ μετρήσεις με την προϋπόθεση ότι στην αρχική εικόνα παρουσιάζεται ένα αντικείμενο στο όποιο είναι υλοποιημένα δύο ζεύγη παράλληλων γραμμών στους άξονες του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων του χώρου. Στην περίπτωση αυτή γίνεται η χρήση των σημείων φυγής και της γεωμετρίας της κεντρικής προβολής για τον προσδιορισμό της θέσης της φωτογραφικής μηχανής σε σχέση με το αντικείμενο που εμφανίζει τα δύο ζεύγη των παράλληλων γραμμών των αξόνων. Επίσης, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν και οι γωνίες στροφής (ω,φ,κ) που σχηματίζουν οι άξονες της φωτογραφικής μηχανής σε σχέση με το επίπεδο αναγωγής και εφόσον είναι γνωστό ένα ευθύγραμμο τμήμα που εμφανίζεται παράλληλο σε ένα από τα δύο ζεύγη των αξόνων μπορεί να προσδιοριστούν οι 8 παράμετροι της εξίσωσης (24) που οδηγούν στη δημιουργία της ανηγμένης εικόνας. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ανάγκη για μέτρηση φωτοσταθερών και υλοποίηση τους σε ένα 2D σύστημα συντεταγμένων. Έτσι η χρήση μιας φωτογραφικής μηχανής και μιας μετροταινίας μπορεί να οδηγήσει άμεσα και σε ελάχιστο χρόνο σε ένα προστιθέμενης αξίας φωτογραμμετρικό προϊόν που έχει τα ίδια πλεονεκτήματα με αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Ακόμα και σε περιπτώσεις που το αντικείμενο δεν είναι επίπεδο και υπάρχει ένα μικρό ανάγλυφο, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί η ψηφιακή αναγωγή των μεμονωμένων εικόνων ακόμα και με μικρή απώλεια μέρους της ακρίβειας του τελικού προϊόντος, προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση της στερεοσκοπικής επεξεργασίας εικόνων σε ψηφιακούς φωτογραμμετρικούς σταθμούς (ή σε προγράμματα πολυεικονικών συγκλινουσών λήψεων) αλλά και η μέτρηση φωτοσταθερών σημείων και την υλοποίηση ενός τρισδιάστατου συστήματος αναφοράς που αναπόφευκτα θα οδηγήσει στη χρήση των ακριβών μετρητικών οργάνων.

Οι τεχνικές που περιγράφηκαν παραπάνω αποτελούν τη βάση όλων των φωτογραμμετρικών εφαρμογών που μπορούν με χρήση μιας ή περισσότερων εικόνων να οδηγήσουν στην εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας του δισδιάστατου και τρισδιάστατου χώρου.

2.3.4 Επίγεια και εναέρια φωτογραμμετρία

Η φωτογραμμετρική επιστήμη μπορεί να διαχωριστεί σε επίγεια και από αέρα φωτογραμμετρία. Η από αέρα φωτογραμμετρία ασχολείται με θέματα που αφορούν τη χαρτογράφηση σε μικρές συνήθως κλίμακες της γήινης επιφάνειας με χρήση φωτογραφιών που προέρχονται από φωτομηχανές που ίπτανται σε μεγάλο σχετικό ύψος πάνω από τη επιφάνεια της Γης. Η επίγεια φωτογραμμετρία ασχολείται με ψηφιοποίηση αντικειμένων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση (κάτω από 100 m) από το φωτογραφικό φακό και οι κλίμακες αποτύπωσης είναι μεγαλύτερη ή ίση του 1:100. Οι τρισδιάστατες ψηφιοποιήσεις των ακίνητων μνημείων αφορούν μεγάλες κλίμακες και αντικείμενα που η φωτογράφηση τους γίνεται, συνήθως, όχι από αέρα αλλά επίγεια. Ωστόσο, οι τεχνικές της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας που χρησιμοποιούνται συνήθως δεν διαφέρουν αν τα αντικείμενα και η φωτογράφηση είναι επίγεια. Η αποτύπωση μνημείων - χώρων γίνεται συνήθως με χρήση επίγειων φωτογραμμετρικών τεχνικών. Ωστόσο, και στη καταγραφή μνημείων-χώρων είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές αεροφωτογραμμετρίας ιδιαίτερα όταν απαιτείται δημιουργία τοπογραφικών η διαγραμμάτων/χαρτών για μεγάλους αρχαιολογικούς χώρους - κάστρα οπότε και η κλίμακα αποτύπωσης είναι σχετικά μικρή (1:500) [31].

2.3.5 Ορθοφωτογραφία

Η ορθοφωτογραφία είναι ένα προϊόν της φωτογραμμετρίας, που ευνοήθηκε ιδιαίτερα από την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Έχει εφαρμοστεί και συνεχίζει να εφαρμόζεται σε έργα εθνικής κλίμακας, όπως το Εθνικό Κτηματολόγιο, το Ελαιοκομικό και Αμπελουργικό κτηματολόγιο και έχει χρησιμοποιηθεί για την πλήρη κάλυψη του Ελληνικού χώρου από το Υπουργείο Γεωργίας με ορθοφωτοχάρτες.

Οι ιδιαιτερότητες της εφαρμογής στους αρχαιολογικούς χώρους είναι η αναμενόμενη ακρίβεια, και ο χρόνος και τρόπος λήψεως των μετρήσεων καθώς και το μικρό κόστος, αφού πρόκειται εν γένει για περιοχές μικρών διαστάσεων.

Η ορθοφωτογραφία είναι μια φωτογραφική εικόνα που έχει αναχθεί διαφορικά ώστε να εξαλειφθούν οι παραμορφώσεις της αρχικής εικόνας, που οφείλονταν στην επίδραση των κλίσεων, στις εκτροπές λόγω αναγλύφου κ.λπ. Οι κυριότερες ιδιότητές είναι ότι έχει ενιαία κλίμακα, περιέχει ποιοτική πληροφορία, έχει μετρητική αξιοπιστία και αποτελεί ευέλικτο ψηφιακό προϊόν. Η παραγωγή της διαφορικά ανηγμένης φωτογραφίας ή ορθοφωτογραφίας είναι σήμερα μια αυτοματοποιημένη ψηφιακή μονοεικονική φωτογραμμετρική διαδικασία, που έχει ως αποτέλεσμα την απεικόνιση του χώρου σε ορθή προβολή. Ακτινική μετατόπιση στην παραγόμενη εικόνα εμφανίζεται μόνον στις οριζοντιογραφικές θέσεις των σημείων των υπερκείμενων της επιφάνειας του εδάφους, π.χ. κτιρίων ή άλλων τεχνικών έργων.

Ο εμπλουτισμός της ορθοφωτογραφίας με πρόσθετες πληροφορίες όπως σύμβολα για οριζοντιογραφικές λεπτομέρειες, αλφαριθμητικούς χαρακτήρες (ονόματα περιοχών, δρόμων κλπ), υψομετρική πληροφορία (καμπύλες και μεμονωμένα υψόμετρα) κ.ά., οδηγεί στην παραγωγή του ορθοφωτοχάρτη.

Τα πλεονεκτήματα που παρέχει η ορθοφωτογραφία έναντι των άλλων φωτογραμμετρικών μεθόδων (σε ακρίβεια ως προς την αναγωγή, σε ταχύτητα και οικονομία ως προς τη στερεοαπόδοση) συνέβαλαν στην ευρύτατη διεθνή εφαρμογή της για τη σύνταξη υποβάθρων για θέματα διαχείρισης γης, ιδίως με την ανάπτυξη των ψηφιακών μεθόδων σύνταξης της

ορθοφωτογραφίας. Η σύνταξη μέσης και μεγάλης (1:5000) κλίμακας χαρτών αγροτικών εκτάσεων είναι το ιδεώδες, αλλά όχι το μόνο, πεδίο εφαρμογής της ορθοφωτογραφίας. Άλλες βασικές χρήσεις της περιλαμβάνουν την ενημέρωση χαρτών, τη σύνταξη κτηματολογικών χαρτών, τις περιβαλλοντικές, χωροταξικές και πολεοδομικές μελέτες, ακόμη και επίγειες εφαρμογές στη γεωμετρική τεκμηρίωση μνημείων ή άλλων αντικειμένων.

Οι ορθοφωτογραφίες είναι κατάλληλες για:

- ιδιοκτησιακής φύσεως υποθέσεις.
- υποθέσεις δασαρχείου.
- ύπαρξη ή μη κατασκευών προσθηκών ή αυθαιρέτων κατοικιών.
- σύνταξη διαγραμμάτων για κατασκευές μεγάλης κλίμακας (οδοποιία, σιδηροδρομική, ιδιωτικές πολεοδομικές μελέτες, διαγράμματα καθορισμών Αιγιαλού και Παραλίας).
- ορισμούς ρεμάτων, έλεγχος μετατόπισης ρεμάτων.
- ύπαρξη ή μη δρόμων, μονοπατιών, κτιρίων ή άλλων κατασκευών.
- γεωμορφολογία και άλλα φυσικά ή τεχνητά χαρακτηριστικά του εδάφους.
- γεωλογικό χαρακτήρα της περιοχής.
- κάθε ποιοτική ή ποσοτική πληροφορία που μπορεί να είναι διακριτή σε αεροφωτογραφία και συνεπώς μπορεί να τεκμηριωθεί χρονικά και χωρικά.

2.3.6 Φωτογραμμετρικός Εξοπλισμός

Ο απαραίτητος υλικοτεχνικός εξοπλισμός για την εφαρμογή φωτογραμμετρικών τεχνικών για την ψηφιοποίηση μνημείων περιλαμβάνει τόσο φωτογραφικές μηχανές όσο και μετρητικές διατάξεις και εξειδικευμένα υπολογιστικά συστήματα που ονομάζονται Ψηφιακοί Φωτογραμμετρικοί Σταθμοί, αλλά και εφαρμογές λογισμικού με δυνατότητα επεξεργασίας εικόνας και δημιουργίας τρισδιάστατων μοντέλων από συγκλίνουσες φωτογραμμετρικές λήψεις εικόνων (convergent photogrammetry systems) ή δημιουργίας ανηγμένων εικόνων από προγράμματα ψηφιακής αναγωγής. Ο συνδυασμός των απαιτούμενων συσκευών και προγραμμάτων που θα οδηγήσει σε βέλτιστη και οικονομικότερη ψηφιοποίηση των μνημείων εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του μνημείου, την τελική κλίμακα και τα απαιτούμενα φωτογραμμετρικά προϊόντα απόδοσης του.

Μετρικές φωτογραφικές μηχανές είναι ο τεχνικός όρος που χρησιμοποιείται για να δηλώσει τις εξειδικευμένες αναλογικές (με χρήση φιλμ) φωτογραφικές μηχανές που χρησιμοποιήθηκαν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές πριν την εμφάνιση της ψηφιακής τεχνολογίας και των ψηφιακών αισθητήρων σε φωτογραφικές μηχανές. Η χρήση τους μάλιστα γινόταν σε ειδικά συστήματα αναλογικής επεξεργασίας, στους μονοσυγκριτές και στερεοσυγκριτές ή σε αναλυτικά συστήματα (στερεοαναγωγείς). Η χρήση των συστημάτων αυτών διατηρήθηκε μέχρι τις αρχές της προηγούμενης εικοσαετίας οπότε σταδιακά αντικαταστάθηκαν από τους Ψηφιακούς Φωτογραμμετρικούς Σταθμούς και τα λογισμικά συγκλίνουσας μη στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας ή μονοσκοπικής επεξεργασίας φωτογραμμετρικών εικόνων. Η χρήση όμως των εικόνων από μετρικές μηχανές διατηρείται ακόμη και σήμερα καθώς με την ψηφιοποίηση των φωτογραφιών τους από μεγάλης ακρίβειας σαρωτές φωτογραφιών μπορεί να επεξεργαστούν σε σύγχρονα φωτογραμμετρικά συστήματα.

Οι μετρικές φωτογραφικές μηχανές διαφέρουν από τις κοινές φωτογραφικές μηχανές λόγω των υψηλών προδιαγραφών στην ποιότητα των φακών και στη σταθερότητα της εσωτερικής γεωμετρίας που αποτελεί προϋπόθεση για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας φωτογραμμετρικών προϊόντων. Σε εφαρμογές επίγειας φωτογραμμετρίας οι φωτογραφικές μηχανές χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη διάσταση του αρνητικού και από την καλή ποιότητα των φακών που στερούνται σχεδόν κάθε παραμόρφωσης σε αντιδιαστολή με τις κοινές φωτογραφικές μηχανές που παρουσιάζουν μεγάλη παραμόρφωση ιδιαίτερα στην άκρη του format. Μια από τις πλέον συνηθισμένες φωτομηχανές που χρησιμοποιήθηκαν είναι η WILD P31 με μέγεθος αρνητικού

10x12.5 cm και η WILD P32 με μικρότερη διάσταση αρνητικού (6x12 cm). Χαρακτηριστικό στοιχείο κάθε μετρικής φωτογραφικής μηχανής είναι σταθερή εστιακή απόσταση των φακών και η ύπαρξη ειδικών σημαδιών που ονομάζονται εικονοσήματα και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του συστήματος μέτρησης των συντεταγμένων επάνω στο φωτογραφικό επίπεδο. Τα εικονοσήματα είναι υλοποιημένα χαρακτηριστικά σημάδια (σταυρονήματα) σε μία γυάλινη πλάκα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο σύστημα των φακών και το αρνητικό. Σε κάθε έκθεση του φιλμ στο φως μαζί με το αντικείμενο αποτυπώνεται στην ίδια πάντα θέση και το σταυρόνημα κάθε ενός από τα 4-5 εικονοσήματα που θα καθορίσουν την εσωτερική γεωμετρία της φωτομηχανής. Οι μετρικές μηχανές βαθμονομούνται πριν παραδοθούν στον τελικό τους χρήστη. Η διαδικασία βαθμονόμησης οδηγεί στον ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων της εσωτερικής γεωμετρίας της και πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα στα εργαστήρια της εταιρείας.

Η χρήση των φωτογραφικών εικόνων που προέρχονται από μια μετρική φωτογραφική μηχανή πρέπει να ψηφιοποιηθούν προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε ένα σύγχρονο ψηφιακό φωτογραμμετρικό σύστημα. Η ψηφιοποίηση γίνεται από σαρωτές με ανάλυση της τάξης μέχρι και 4000 dpi. Η ψηφιοποίηση είναι προτιμότερο να γίνεται απευθείας από το αρνητικό ή διαθετικό (slide) της φωτογράφησης, επειδή τυχόν εκτύπωση σε χαρτί της φωτογραφικής εικόνας μπορεί να οδηγήσει σε παραμορφώσεις των ειδώλων και ενδεχόμενα σφάλματα μετρήσεων.

Εκτός από τις μετρικές κάμερες μπορεί να χρησιμοποιηθούν και οι ημίμετρικές μηχανές που μοιάζουν με τις κοινές φωτογραφικές μηχανές (μεσαίου format, με διάσταση φιλμ 6x6 cm), στις οποίες όμως έχει προστεθεί μια γυάλινη πλάκα με ιδικά σταυρονήματα παρόμοια με αυτά των εικονοσημάτων που παίζουν τον ίδιο ρόλο, προσδιορίζουν την εσωτερική γεωμετρία της φωτομηχανής. Τα σημάδια αυτά ονομάζονται σημεία resau και απέχουν απόσταση 1 ή 2 cm στο αρνητικό. Η θέση τους έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια επάνω στη γυάλινη πλάκα (περίπου 1 μm) και επομένως εμφανίζονται σε απόλυτα προσδιορισμένες θέσεις στην εκτυπωμένη φωτογραφία, το αρνητικό ή το διαθετικό (slide). Ο φακός των ημιμετρικών φωτομηχανών έχει σταθερές προσδιορισμένες θέσεις εστίασης για τις οποίες έχει προσδιοριστεί σχεδόν απόλυτα η εστιακή τους απόσταση. Επίσης έχει εκ των προτέρων προσδιοριστεί και η παραμόρφωση που επιφέρουν σε κάθε φωτογραφία. Οι ημιμετρικές φωτομηχανές έχουν βαθμονομηθεί πριν την πώληση τους σε ειδικά εργαστήρια της κατασκευάστριας εταιρείας ώστε να προσδιοριστούν όλες οι παράμετροι παραμορφώσεις των φωτογραφικών ειδώλων κατά τη στιγμή της αποτύπωσης της φωτογραφικής εικόνας. Τελευταία, η γερμανική εταιρεία Rollei έχει κατασκευάσει και ψηφιακές ημιμετρικές φωτογραφικές μηχανές με υψηλή ποιότητα φακών και σταθερή εσωτερική γεωμετρία. Ωστόσο, ακόμα και κοινές φωτογραφικές μηχανές και μάλιστα οι ψηφιακές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτογραμμετρικές εφαρμογές. Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, λόγω της απουσίας του μηχανισμού κίνησης του αρνητικού και της σταθερής θέσης του ψηφιακού αισθητήρα, μπορούν μετά από μια διαδικασία βαθμονόμησης να οδηγήσουν σε ακριβή φωτογραμμετρικά προϊόντα. Η εστιακή απόσταση που χρησιμοποιείται στις φωτογραφικές λήψεις μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια εφόσον είναι αμετάβλητη από λήψη σε λήψη (επεξεργασία στερεοζεύγους εικόνων) και υπάρχουν αρκετά σημεία ελέγχου (φωτοσταθερά) ώστε να οδηγηθούμε μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται αυτοβαθμονόμηση στον προσδιορισμό όχι μόνο της εσωτερικής γεωμετρίας της μηχανής και των παραμέτρων ακτινικής παραμόρφωσης των φακών (παράμετροι βαθμονόμησης) αλλά και της θέσης στο χώρο που είναι απαραίτητη για την εξαγωγή μετρήσεων από στερεοσκοπικές φωτογραφικές εικόνες ενός στερεομοντέλου.

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές που προτιμώνται είναι οι dSLR (digital Single Lens Reflex) μηχανές. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η ανταγωνιστικότητα μεταξύ των κατασκευαστριών
εταιρειών έχει ωθήσει στην κατασκευή αισθητήρων υψηλής ανάλυσης και ποιότητας. Η επιλογή της φωτομηχανής που θα χρησιμοποιηθεί (μετρική, ημιμετρική, ψηφιακή, αναλογική) εξαρτάται από τη χρήση της σε στερεοσκοπική ή μονοσκοπική εφαρμογή και την απαιτούμενη τελική ακρίβεια των φωτογραμμετρικών προϊόντων. Σημαντικό ρόλο παίζει η ανάλυση της ψηφιακού αισθητήρα εφόσον είναι ψηφιακή ή το μέγεθος του format αν πρόκειται για αναλογική (μετρική, ημιμετρική ή απλή αναλογική). Η μέση κλίμακα της φωτογράφησης που συνδέεται άμεσα με την ανάλυση της φωτογραφικής εικόνας σε μονάδες εδάφους, θα καθορίσει και την απόσταση φωτογράφησης, δηλαδή τη μέση απόσταση του αντικειμένου από το φωτογραφικό φακό. Συνήθως η κλίμακα φωτογράφησης είναι της τάξης του 1:200 ή μεγαλύτερης [31]. Μια προσεγγιστική σχέση που δίνει την κλίμακα της φωτογράφησης προκύπτει από το λόγο της εστιακής απόστασης προς την απόσταση του φακού από το προς μελέτη αντικείμενο (1/H = c/H). Για μια φωτογραφική μηχανή με εστιακή απόσταση 28 mm, η κλίμακα φωτογράφησης 1:200 ορίζει απόσταση από το αντικείμενο περίπου 0.028 x 200 = 5.6m.

2.3.7 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Τα κύρια χαρακτηριστικά της Φωτογραμμετρικής Μεθοδολογίας αποτύπωσης είναι:

- Η αποτύπωση είναι αντικειμενική.
- Ορίζεται σύστημα αναφοράς.
- Η ανακατασκευή των γεωμετριών του αντικειμένου, στο χώρο, γίνεται μέσω συνεχούς απόδοσης ή/και σημειακής.
- Υπάρχει δυνατότητα επιστημονικού ελέγχου του αποτελέσματος ως προς την ακρίβεια και αξιοπιστία.
- Δεν υπάρχει ανάγκη σχεδίων πεδίου (σκαριφήματα).
- Υπάρχει δυνατότητα έμμεσων μετρήσεων.
- Μπορεί να αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες της νέας σχεδιαστικής τεχνολογίας (CADD), αλλά και της ψηφιακής τεχνολογίας επεξεργασίας εικόνας (image processing).
 Επιπλέον είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν εύκολα οι νέες ολοκληρωμένες τεχνικές ψηφιακής τεκμηρίωσης (αλφαριθμητικά, γραφικά και εικόνες). Αντιμετωπίζονται άμεσα λεπτομέρειες και πολύπλοκα αρχιτεκτονικά ή δύσκολα προσπελάσιμα στοιχεία.
- Στη διαδικασία των φωτογραμμετρικών αποτυπώσεων, ενσωματώνεται εύκολα η λογική της διαχρονικής παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς του αντικειμένου, εφόσον είναι εύκολη, φθηνή και "πληθωρική" η συλλογή δεδομένων.
- Γίνεται άμεση ανακατασκευή της στερεομετρίας του αντικειμένου.
- Αξιοποιούνται γεωμετρικές ιδιότητες (σημεία φυγής, προοπτικότητας, κ.λπ.) οι οποίες διευκολύνουν και πλουτίζουν τις επεξεργασίες.
- Η αλγοριθμική επεξεργασία των δεδομένων είναι δύσκολη.
- Υπάρχει ανάγκη για πρόσθετες εργασίες της τοπογραφικής μεθόδου, στις περιπτώσεις χρήσης φωτοσταθερών, ή τοποθέτησης του αντικειμένου σε αμοιβαία σχέση με άλλα αντικείμενα.
- Ο εξοπλισμός πεδίου είναι από χαμηλού κόστους μέχρι μέτριου.
- Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τις επεξεργασίες γραφείου είναι εξειδικευμένος είτε μέτριου είτε υψηλού κόστους. Η φωτογραμμετρία ανάλογα με τον τρόπο του υπολογισμού και τον αριθμό των συντεταγμένων των σημείων των λεπτομερειών διακρίνεται σε μονοσκοπική και σε στερεοσκοπική φωτογραμμετρία και ανάλογα με τη θέση της φωτομηχανής, σχετικά με το αντικείμενο, σε επίγεια και από αέρα.

2.4 Τεχνικές σάρωσης laser ή τριγωνισμού

Τα τελευταία χρόνια νέα όργανα μετρήσεων έχουν εισαχθεί στις επιστήμες των αποτυπώσεων χώρων τα οποία είναι σε θέση να μετρήσουν και να ανακατασκευάσουν τον τρισδιάστατο χώρο και τα αντικείμενα των διάφορων μορφών και μεγεθών με έναν γρήγορο και οικονομικό τρόπο. Αυτά τα όργανα, βασισμένα στην τεχνολογία laser, είναι συνήθως γνωστά ως επίγειοι Τρισδιάστατοι Ανιχνευτές Laser (3D laser scanner). Εκτός από τους τρισδιάστατους ανιχνευτές laser υπάρχουν και συσκευές που σαρώνουν μόνο οριζόντια ή κατακόρυφα ένα μνημείο – χώρο και μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς. Οι συσκευές ονομάζεται laser profilers και χρησιμοποιούνται με σημαντική επιτυχία για τη δημιουργία σχεδιαγραμμάτων κατόψεων και τομών των εσωτερικών χώρων των μνημείων.

2.4.1 Τεχνικές ανίχνευσης

Οι γωνίες διεύθυνσης της ακτίνας laser μαζί με την μετρημένη απόσταση ανάμεσα στον πομπό της ακτίνας και του σημείου που την ανακλά πίσω στο δέκτη του ανιχνευτή μπορεί να οδηγήσει με χρήση του πρώτου θεμελιώδους προβλήματος της Τοπογραφίας και των σχέσεων της Τριγωνομετρικής Υψομετρίας σε υπολογισμό των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων στα οποία προσπίπτει η ακτίνα laser, εφόσον είναι γνωστή η στάση (θέση του οργάνου) στο καρτεσιανό τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων.

Οι τεχνικές ανίχνευσης διαχωρίζονται ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα στην πηγή της ακτίνας laser και τα σαρωμένα σημεία του χώρου. Ο τρόπος προσδιορισμού της απόστασης μπορεί να είναι ένας από τους τρεις παρακάτω:

 Τριγωνισμού. Ο ανιχνευτής κάνοντας χρήση της μεγάλης οπτικής ευκρίνειας μιας δέσμης laser που προβάλλεται επί του αντικειμένου και με χρήση εξισώσεων φωτογραμμετρίας υπολογίζει τη θέση του κάθε σημείου που φωτίζεται από την ακτίνα laser στον τρισδιάστατο χώρο. Σημαντικό ρόλο στην επιτυχημένη λειτουργία του ανιχνευτή laser είναι η ύπαρξη των κατάλληλων συνθηκών φωτισμού του αντικειμένου καθώς η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στον εντοπισμό του στίγματος της ακτίνας laser στην εικόνα του αντικειμένου που συλλαμβάνεται από τον ενσωματωμένο οπτικό αισθητήρα.



Σχήμα 2.12: Μέθοδος τριγωνισμού για τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων.

Σε μερικές μάλιστα περιπτώσεις υπάρχουν δύο οπτικοί αισθητήρες CCD που με παρόμοιο τρόπο με αυτόν της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας μπορεί να εντοπίσει στο χώρο ένα σημείο εφόσον ανιχνευτούν οι εικονοσυντεταγμένες του σε δύο εικόνες των οποίων η σχετική θέση είναι γνωστή [32].



Σχήμα 2.13: Μέθοδος τριγωνισμού στο 3Δ χώρο με χρήση δύο οπτικών αισθητήρων.

Χρόνος της πτήσης ενός παλμού laser. Ένας παλμός laser εκπέμπεται προς το αντικείμενο και η απόσταση μεταξύ της συσκευής αποστολής σημάτων και της επιφάνειας του αντικειμένου υπολογίζεται από το χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της μετάδοσης και της υποδοχής του παλμού. Αυτή η αρχή είναι ευρέως γνωστή από τα ηλεκτρονικά ταχύμετρα (Γεωδαιτικός Σταθμός). Στην πραγματικότητα, ένα ταχύμετρο θα μπορούσε να προγραμματιστεί ώστε να λειτουργεί όπως η συσκευή σάρωσης. Η ταχύτητα μέτρησης όμως θα ήταν πολύ χαμηλή, λόγω της χαμηλής απόκρισης του οργάνου. Οι σαρωτές χρησιμοποιούν μικρά περιστρεφόμενα κάτοπτρα για τη γωνιακή εκτροπή της ακτίνας laser και απλούστερους αλγορίθμους χρήσης για τον υπολογισμό της απόστασης που μπορεί να οδηγήσει σε υπολογισμό της μετρημένης απόστασης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι χαρακτηριστικές τιμές της απόκλισης των μετρήσεων απόστασης από τους ανιχνευτές που χρησιμοποιούν την τεχνική Time of Flight είναι της τάξεως μερικών χιλιοστόμετρων. Δεδομένου ότι οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές, αυτή η ακρίβεια είναι σχεδόν η ίδια για ολόκληρο τον τρισδιάστατο χώρο. Η τρισδιάστατη ακρίβεια επηρεάζεται επίσης από την ακρίβεια της γωνιακής μέτρησης της ακτίνας που είναι της τάξης των εκατοστών του βαθμού (g) [32].



Σχήμα 2.14: Αρχή λειτουργίας της τεχνικής Time of flight.

Σύγκρισης φάσης. Αυτή η μέθοδος είναι επίσης ευρέως γνωστή από ταταχυμετρικά όργανα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εκπεμπόμενη ακτίνα διαμορφώνεται από ένα αρμονικό κύμα και η απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά φάσης μεταξύ του κύματος αποστολής και λήψης. Από άποψη λειτουργικότητας, η μέθοδος δεν είναι πολύ διαφορετική από τη μέθοδο χρόνου πτήσης (Time of Flight). Λόγω της πολυπλοκότερης ανάλυσης των σημάτων, τα αποτελέσματα μπορεί να είναι ακριβέστερα ,σε βάρος όμως του συνολικού αριθμού των μετρούμενων σημείων αλλά και της μέγιστης μετρούμενης απόστασης. Δεδομένου ότι απαιτείται ένα καλά καθορισμένο σήμα επιστροφής για τον υπολογισμό των αποστάσεων, οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο σύγκρισης φάσης μπορεί να έχουν μειωμένη εμβέλεια και να τείνουν να παράγουν περισσότερα λανθασμένα ή αποκλεισμένα από τις ανοχές σε σφάλματα μετρήσεων.

Ενώ τα όργανα ανιχνευτών laser βασισμένα στη αρχή του τριγωνισμού (triangulation) και τους υψηλούς βαθμούς ακρίβειας (λιγότερο από 1 χιλιοστόμετρο σφάλμα απόδοσης) έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από τη δεκαετία του '80, τα όργανα που στηρίζονται στην τεχνική του υπολογισμού του χρόνου πτήσης (Time of Flight) και σύγκρισης φάσης (Phase Comparison) έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί ευρέως για μετρικές εφαρμογές σάρωσης μόνο τα τελευταία 10 χρόνια [32].

Στην ουσία ο ανιχνευτής laser αποτελεί τη φυσική μετεξέλιξη των γεωδαιτικών σταθμών (Total station) με δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων χωρίς ανακλαστήρα. Η χρήση ενός μηχανισμού περιστροφής της μετρητικής διάταξης γύρω από των οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα περιστροφής του οργάνου έδωσε τη δυνατότητα της αυτόματης μέτρησης εκατομμυρίων σημείων χωρίς να είναι απαραίτητη η σκόπευση τους από το χειριστή του οργάνου.

Για όλα τα σαρωμένα σημεία του τρισδιάστατου χώρου στα οποία προσπίπτει η ακτίνα laser επιτυγχάνεται μια μέτρηση της απόσταση σε σχέση με μια γνωστή διεύθυνση: Οι συντεταγμένες (X,Y,Z) ενός σημείου μπορούν να υπολογιστούν για κάθε καταγραμμένη απόσταση-διεύθυνση.

Οι ανιχνευτές laser επιτρέπουν την καταγραφή εκατομμυρίων σημείων του χώρου σε λίγα μόνο λεπτά. Λόγω της πρακτικότητας και της ευκολίας χρήσης τους, αυτά τα είδη των οργάνων χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στον τομέα της αρχιτεκτονικής, αρχαιολογικής και περιβαλλοντικής έρευνας.

2.4.2 Βασική επεξεργασία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι επίγειοι ανιχνευτές laser μπορεί να θεωρηθούν ως εξειδικευμένοι αυτόματοι γεωδαιτικοί σταθμοί. Αντίθετα όμως από τους κοινούς Γεωδαιτικούς Σταθμούς, όπου ο χειριστής επιλέγει άμεσα τα σημεία που μετρώνται, οι ανιχνευτές laser ανακτούν τυχαία ένα πυκνό σύνολο μετρημένων σημείων. Ο χειριστής επιλέγει μόνο το τμήμα του αντικειμένου που επιθυμεί να σαρωθεί και την πυκνότητα των σημείων που επιθυμεί στην σάρωση αυτή (συνήθως το γωνιακό βήμα της ανίχνευσης στα κάθετα και οριζόντια επίπεδα μπορεί να επιλεγεί από το χειριστή).

Μόλις δοθούν αυτές οι τιμές, η σάρωση ξεκινά αυτόματα. Από τα αποτελέσματα και μετά από κατάλληλη μαθηματική επεξεργασία των μετρήσεων των γωνιών οριζόντιας και κατακόρυφης διεύθυνσης και της απόστασης που διήνυσε η ακτίνα laser, προκύπτουν οι καρτεσιανές συντεταγμένες των σημείων της σάρωσης που αποτελείται από ένα πολύ πυκνό σύννεφο μετρημένων σημείων, που καλείται και DDSM (Dense Digital Surface Model). Για κάθε σημείο του μοντέλου του αντικειμένου παράγονται οι συντεταγμένες (X,Y,Z) και η τιμή της ανακλαστικότητάς του. Δεδομένου ότι το σύνολο σημείων του μοντέλου σαρώνεται με έναν απολύτως αυθαίρετο τρόπο, με εξαίρεση τις παραμέτρους της ανάλυσης σάρωσης που δίνονται από το χειριστή, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν με όσο το δυνατό πιο λογικό τρόπο οι αρχικές παράμετροι αυτής της σάρωσης. Ιδιαίτερη προσοχή λοιπόν πρέπει να δοθεί στην τιμή των αρχικών στοιχείων σάρωσης που δίνονται από το χρήστη του οργάνου.

Η επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τους ανιχνευτές laser αποτελείται από ένα σύνολο ενεργειών που είναι απαραίτητες για να προκύψει το σωστό ψηφιακό μοντέλο του μνημείου ξεκινώντας από το νέφος των μετρημένων σημείων. Αυτό το σύνολο ενεργειών μπορεί να διαιρεθεί σε 2 διαφορετικά στάδια:

- την προεπεξεργασία (ή προκαταρκτική επεξεργασία) των δεδομένων laser
- τη διαμόρφωση της επιφάνειας από το νέφος σημείων.

Με τον όρο "προκαταρκτική επεξεργασία" ορίζουμε όλες τις απαραίτητες διαδικασίες που εφαρμόζονται άμεσα στο νέφος σημείων, όπως, παραδείγματος χάριν, το φιλτράρισμα των σημείων, την καταγραφή των σημείων και τις διαδικασίες γεωαναφοράς (georeferencing). Το αποτέλεσμα αυτών των διαδικασιών είναι ένα σύνθετο "χωρίς θόρυβο" νέφος σημείων, χωρίς outliers, δηλαδή, χονδροειδή και συστηματικά σφάλματα και αυτό αποτελεί τη βάση για το επόμενο στάδιο που είναι η διαμόρφωση του μοντέλου της επιφάνειας που απαρτίζουν αυτά τα μετρημένα σημεία του χώρου.

Το δεύτερο μέρος της διαχείρισης των δεδομένων που προέρχονται από τον ανιχνευτή laser, η διαμόρφωση της τρισδιάστατης επιφάνειας, είναι ένα σύνολο διαδικασιών, που αρχίζουν από οποιοδήποτε νέφος σημείων, και οδηγεί στη διαμόρφωση του τρισδιάστατου μοντέλου επιφάνειας του αντικειμένου που ανιχνεύεται. Αν και υπάρχει μια μεγάλη συλλογή διαφορετικών προϊόντων λογισμικού στην αγορά για την πραγματοποίηση της στερεάς διαμόρφωσης των σαρωμένων αντικειμένων (μοντελοποίηση), υπάρχουν πολύ λίγες εφαρμογές λογισμικού που να ορίζουν μια σωστή προκαταρκτική επεξεργασία των επίγειων στοιχείων των ανιχνευτών laser. Συνήθως, η κατασκευάστρια εταιρεία του ανιχνευτή laser προμηθεύει μαζί με το υλικό και κατάλληλο λογισμικό που αναλαμβάνει:

- Να "κατεβάζει" σαρωμένο νέφος σημείων
- Να προεπισκοπεί την περιοχή σάρωσης και να δίνει τη δυνατότητα της σάρωσης μέρους του μνημείου – χώρου
- Να παράγει τα αρχεία με τα μετρημένα σημεία που στη συνέχεια θα επεξεργαστούν και θα αποδώσουν τις επιφάνειες που περιγράφουν το σχήμα, μέγεθος και μορφή του μνημείου – χώρου.

Επίσης δίνεται η δυνατότητα ενσωμάτωσης του λογισμικού επεξεργασίας των νεφών των σημείων σε περιβάλλον CADD, όπου με χρήση των κοινών σχεδιαστικών εντολών μπορεί να δημιουργηθεί το γραμμικό σχέδιο απόδοσης των όψεων, τομών και κατόψεων του μνημείου – χώρου ή το τρισδιάστατο (φωτορεαλιστικό) μοντέλο του κτιρίου.



Σχήμα 2.15: Νέφος σημείων και τρισδιάστατη απόδοση ναού στην Ιαπωνία με χρήση του laser scanner.





2.4.3 Γενικά χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Κύρια χαρακτηριστικά της μεθόδου ανίχνευσης laser είναι:

- Είναι ταχύτατη και αξιόπιστη μέθοδος αποτύπωσης.
- Παρέχει ακριβέστερα προϊόντα από οποιαδήποτε άλλη μεθοδολογία.
- Απαιτεί λιγότερη προεπεξεργασία αλλά και μικρότερο χρόνο εργασίας στο γραφείο.
- Συνδυάζει την ακρίβεια της τοπογραφικής αποτύπωσης και την πληρότητα και συνέχεια αποτύπωσης της φωτογραμμετρικής.
- Παρέχουν μεταβλητή ανάλυση στο έδαφος ανάλογα με την απαιτούμενη ακρίβεια του τελικού προϊόντος.
- Παρέχει συνολική αποτύπωση των αντικειμένων χωρίς επιπλέον κόπο ή χρόνο εργασίας.
- Το κόστος αγοράς εξοπλισμού είναι μεγάλο ενώ το κόστος της αποτύπωσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα χαμηλό λόγω του μειωμένου χρόνου παραμονής των ειδικευμένων επιστημόνων στο τόπο καταγραφής και του περιορισμένου αριθμού εργατοωρών που απαιτούνται για τη δημιουργία του συνολικού μοντέλου.
- Τα σημεία που θα μετρηθούν δεν προσδιορίζονται από το χειριστή του οργάνου αλλά προκύπτουν τυχαία και το μόνο που καθορίζεται είναι το βήμα της ανάλυσης μετρήσεων.

2.5 Εναλλακτικές μέθοδοι

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, αρκετοί επιστήμονες, οι οποίοι που ασχολούνται με την καταγραφή και τεκμηρίωση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς προσπάθησαν να αναπτύξουν καινοτόμες μεθοδολογίες που έχουν σαν σκοπό την αυτοματοποίηση των μετρήσεων για την καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους ή την ολική αποτύπωσή τους. Συνήθως οι προσπάθειες αυτές υλοποιούνταν με χρήση τεχνικών τοπογραφικών μετρήσεων και σύλληψης της εικονικής πληροφορίας, μέσω υβριδικών συστημάτων.

Η εναλλακτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία, για την ταχύτατη και αποτελεσματική αποτύπωση αρχαιολογικών μνημείων, εφαρμόζει μια σειρά σύγχρονων τεχνικών και αλγορίθμων, του τομέα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας και της μηχανικής οράσεως, πάνω σε ψηφιακές ορθοφωτογραφίες. Συνδυάζεται, λοιπόν, η φωτογραμμετρία και πιο συγκεκριμένα η ορθοφωτογραφία, με αλγορίθμους και τεχνικές, όπως η κατάτμηση με τη μέθοδο Otsu, ο μετασχηματισμός Hough και η ανίχνευση ακμών με τη μέθοδο του Canny. Αφού υλοποιήθηκαν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι, εφαρμόστηκαν σε μια σειρά ορθοφωτογραφιών, οι οποίες απεικονίζουν τα Ενετικά τείχη της παλαιάς πόλης των Χανίων, με κύριο στόχο τον εντοπισμό των πλίνθων, ώστε μέσω αυτών να επιτευχθεί η αποτύπωση. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το υλοποιηθέν σύστημα ψηφιακής αποτύπωσης, θεωρήθηκαν αρκετά ικανοποιητικά.



Σχήμα 2.17: Διάγραμμα ροής του συστήματος για την ψηφιακή αποτύπωση αρχαιολογικών μνημείων, της παρούσας εργασίας.

κεφαλαίο 3. Αλγοριωμοι

τη συγκεκριμένη ενότητα περιγράφονται αναλυτικά και με τη σειρά εφαρμογής τους, οι βασικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν για την περαίωση της εργασίας. Η παραγωγή των ψηφιακών ορθοφωτογραφίων, πραγματοποιήθηκε από τις Αρχαιολογικές Υπηρεσίες του Νομού Χανίων.

3.1 Παραγωγή ψηφιακής ορθοφωτογραφίας

Η γενική αρχή στην οποία στηρίχθηκε η παραγωγή της ορθοφωτογραφίας όπως αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε στα πρώτα όργανα κατά τη δεκαετία του 1950 (π.χ. ορθοφωτοσκόπιο), υπέστη με την πάροδο των χρόνων πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις. Η εξέλιξη των φωτογραμμετρικών οργάνων και κυρίως των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των μονάδων τους αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων, οδήγησε στη δημιουργία ποικίλων συστημάτων διαφορικής αναγωγής και παραγωγής ορθοφωτογραφίας. Την τελευταία δεκαετία για λόγους αυτοματοποίησης της διαδικασίας, ταχύτητας και ακρίβειας του παραγόμενου προϊόντος, επικράτησε πλήρως η ψηφιακή παραγωγή της ορθοφωτογραφίας, μέσω διαχείρισης ψηφιακών αρχικών φωτογραφιών.



Σχήμα 3.1: Ένταξη της Ψηφιακής Ορθοφωτογραφίας στην Φωτογραμμετρική διαδικασία.

Τα δεδομένα για τη σύνταξη της ορθοφωτογραφίας είναι:

- η ψηφιακή εικόνα. Σε grayscale φωτογραφία αποθηκεύεται η τιμή της κλίμακας του γκρι σε κάθε pixel, ενώ σε έγχρωμη απαιτείται η καταγραφή τριών τιμών για το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε χρώμα. Το μέγεθος του pixel ποικίλει από 7.5-50 μm, ανάλογα με την εφαρμογή και την επιδιωκόμενη τελική ακρίβεια
- ο εσωτερικός προσανατολισμός της φωτομηχανής
- ο εξωτερικός προσανατολισμός της εικόνας ή οι συντεταγμένες εδάφους φωτοσταθερών σημείων, που μπορούν να προκύψουν από την επίλυση αεροτριγωνισμού
- το ψηφιακό μοντέλο του εδάφους (D.Ε.Μ.), σε μορφή καννάβου ή σε ακανόνιστο δίκτυο σημείων. Πηγές αυτής της πληροφορίας μπορεί να είναι:
 - > η ψηφιοποίηση υπαρχόντων χαρτών ή διαγραμμάτων κατάλληλων κλιμάκων
 - τοπογραφικές μετρήσεις ή μετρήσεις με GPS
 - συλλογή υψομετρικής πληροφορίας με φωτογραμμετρικές διαδικασίες στερεοαπόδοσης, που αποτελεί την συνηθέστερη μέθοδο
 - εναέρια συστήματα Laser (LIDAR)
 - > απεικονίσεις SAR (Radar).

Για την παραγωγή της ορθοφωτογραφίας δεν χρειάζεται ιδιαίτερος φωτογραμμετρικός εξοπλισμός. Αρκεί η ύπαρξη μετατροπέων πληροφορίας από αναλογική σε ψηφιακή μορφή και αντίστροφα (για την εκτύπωση της ορθοφωτογραφίας) και σταθμού εργασίας Η/Υ με γραφική οθόνη και μεγάλης χωρητικότητας μονάδα αποθήκευσης, εξοπλισμένου με κατάλληλο λογισμικό.

Οι βασικές λειτουργίες ενός τέτοιου Συστήματος Ψηφιακής Ορθοφωτογραφίας μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω βήματα:

- είσοδος των ψηφιακών δεδομένων, από σαρωτές ή ψηφιακές φωτομηχανές, και αποκατάσταση εσωτερικού προσανατολισμού.
- διαχείριση της εικόνας, που περιλαμβάνει μετακινήσεις στη φωτογραφία, μεγεθύνσεις, γεωμετρικούς μετασχηματισμούς και μονοσκοπική ή στερεοσκοπική απεικόνιση στην οθόνη.
- επεξεργασία της εικόνας, για περιορισμό του θορύβου, ενίσχυση ακμών και διαβάθμισης, συμπίεση των δεδομένων, αλγεβρικές και λογικές λειτουργίες.
- πραγματοποίηση μετρήσεων στην εικόνα, όπως μέτρηση εικονοσυντεταγμένων ή συντεταγμένων των pixels.
- αποκατάσταση σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού ή οπισθοτομίας (εξωτερικού προσανατολισμού).
- δημιουργία και επεξεργασία του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (D.E.M.), που περιλαμβάνει αλγόριθμους παρεμβολής, παραγωγή υψομετρικών καμπυλών και διατομών του εδάφους.
- παραγωγή της ορθοφωτογραφίας με διαφορική αναγωγή.
- επεξεργασία των ορθοφωτογραφιών, με σύνταξη φωτομωσαϊκού, επεξεργασία μεμονομένων pixel και περιοχών της εικόνας.
- έλεγχος της ποιότητας των ορθοφωτογραφιών.
- προσθήκη διανυσματικών πληροφοριών, όπως συμβόλων, υψομετρικών καμπυλών, καννάβου, γραμμών και πολυγώνων, διαγραμμίσεων κ.λπ.
- έξοδος των τελικών προϊόντων, που είναι οθροφωτογραφίες, χάρτες ή ψηφιακά δεδομένα.

Σε ένα πλήρως ψηφιακό σύστημα δημιουργίας ορθοφωτογραφιών υπάρχουν πέντε επιμέρους στάδια παραγωγής.

- Ι. Σχεδιασμός της όλης εργασίας, όπου με βάση τις υπάρχουσες προδιαγραφές ακρίβειας, ορίζονται η κλίμακα σύνταξης της ορθοφωτογραφίας και η διάσταση στο έδαφος της στοιχειώδους ψηφίδας της ορθοφωτογραφίας. Με διαδικασίες προσομοίωσης γίνεται ο βέλτιστος σχεδιασμό του προγράμματος και οι εκτιμήσεις για τα προβλεπόμενα σφάλματα των τελικών προϊόντων.
- **ΙΙ. Επιλογή των τμημάτων των φωτογραφιών που θα αναχθούν** για την καλύτερη κάλυψη ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος.
- **ΙΙΙ. Ψηφιακή διαφορική αναγωγή των εικόνων**, που περιλαμβάνει (βλέπε Σχήμα 3.2):
 - την εισαγωγή των ψηφιακών δεδομένων.
 - τον υπολογισμό των παραμέτρων αφινικού μετασχηματισμού των εικονοψηφίδων της εικόνας στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων (από τα εικονοσήματα) και αντίστροφα.
 - την επίλυση οπισθοτομίας για υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού (από τα φωτοσταθερά).
 - την έναρξη της διαδικασίας διαφορικής αναγωγής από το πάνω αριστερό pixel της ανηγμένης εικόνας (ορθοφωτογραφίας) συντεταγμένων (r_{op},c_{op}).
 - τον εντοπισμό των οριζοντιογραφικών συντεταγμένων εδάφους (X,Y) του κέντρου του συγκεκριμένου pixel.
 - την διενέργεια παρεμβολής στο Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (D.Ε.Μ.) για υπολογισμό του αντίστοιχου υψομέτρου, Z = f(X, Y).
 - την αντίστροφη εφαρμογή της συνθήκης συγγραμμικότητας για τον υπολογισμό των συντεταγμένων εικόνας (x,y).
 - την επιβολή αντίστροφων διορθώσεων συρρίκνωσης, ακτινικής διαστροφής, καμπυλότητας της γης, ατμοσφαιρικής διάθλασης κ.ο.κ., για τον υπολογισμό των πραγματικών εικονοσυντεταγμένων: x' = x dx και y' = y dy, τον αφινικό μετασχηματισμό των εικονοσυντεταγμένων σε συντεταγμένες (γραμμή, στήλη) της raster εικόνας: rd_i = a₀ + a₁·x' + a₂·y·cd_i = b₀ + b₁·x' + b₂·y'.
 - την διενέργεια ραδιομετρικής παρεμβολής, για τον καθορισμό της τιμής του τόνου του γκρι (ή των τιμών τριών βασικών χρωμάτων για έγχρωμες εικόνες), στη θέση (rd_i,cd_i). Οι βασικές τεχνικές παρεμβολής είναι:

α. της πλησιέστερης γειτνίασης, με τη συμμετοχή 1 εικονοστοιχείου (pixel) της αρχικής εικόνας: Η τιμή του γκρί στο pixel (r_{op},c_{op}) ισούται με την τιμή του γκρί στο pixel της αρχικής εικόνας όπου περιλαμβάνεται η θέση (rd_i,cd_i).

β. η διγραμμική, με συμμετοχή παραθύρου 2 x 2 = 4 εικονοστοιχείων (pixels) της αρχικής εικόνας: Η συμβολή κάθε pixel στον υπολογισμό της τιμής του γκρί στη θέση (rd_i,cd_i), είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης του κέντρου του από την θέση αυτή.

γ. **η δικυβική**, με συμμετοχή παραθύρου 4 x 4 =16 εικονοστοιχείων (pixels) της αρχικής εικόνας.

- την καταγραφή για το pixel (r_{op},c_{op}),στο αρχείο αποθήκευσης της ανηγμένης εικόνας, της υπολογισθείσας τιμής του γκρι στη θέση (rd_i,cd_i).
- την επανάληψη των παραπάνω βημάτων για το επόμενο pixel της αναγμένης εικόνας, μέχρι το κάτω - δεξιό pixel αυτής της εικόνας.



Σχήμα 3.2: Ψηφιακή διαφορική αναγωγή των εικόνων από σαρωτές ή ψηφιακές φωτομηχανές.

ΙV. Δημιουργία του τελικού φωτομωσαϊκού, που περιλαμβάνει:

- ακριβή προσδιορισμό των τμημάτων των αναχθέντων εικόνων από τα οποία θα απαρτίζονται τα φύλλα των ορθοφωτογραφιών. Ο καθορισμός των θέσεων των συναρμογών γίνεται είτε από τον χειριστή στην γραφική οθόνη όπου απεικονίζονται οι ορθοφωτογραφίες είτε αυτόματα από ειδικό λογισμικό.
- καθορισμό των περιοχών εφαρμογής ενός προγράμματος αυτόματης συσχέτισης για την παραγωγή σημείων ελέγχου των συναρμογών.
- χρήση μοντέλων γεωμετρικής και ραδιομετρικής διόρθωσης των αναχθέντων εικόνων και των ενώσεών τους.
- εφαρμογή τεχνικών ενίσχυσης της εικόνας, με χωρικά φίλτρα, ενίσχυση της διαβάθμισης κ.α.
- προσθήκη της απαραίτητης διανυσματικής πληροφορίας, όπως σύμβολα, ονοματολογία, υψομετρικές καμπύλες κ.α.

V. Ποιοτικός έλεγχο των ορθοφωτογραφιών, που αφορά:

- την ποιότητα σύνθεσης του φωτομωσαϊκού, όπου ο έλεγχος γίνεται με απλή παρατήρηση (με τη βοήθεια τοπικών μεγεθύνσεων) της απεικόνισής του σε γραφική οθόνη.
- τον εντοπισμό προβλημάτων που οφείλονται σε χονδροειδή σφάλματα του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Ο έλεγχος γίνεται με διάφορους τρόπους, όπως επίθεση των υψομετρικών καμπυλών στην ορθοφωτογραφία, παραγωγή της ίδιας ορθοφωτογραφίας και από τις δύο εικόνες ενός στερεομοντέλου (αριστερής και δεξιάς), ψηφιακός έλεγχος των διαφορών τους ανά pixel κ.ο.κ.
- την ορίζοντιογραφική ακρίβεια της ορθοφωτογραφίας, όπου ο έλεγχος απαιτεί την ύπαρξη δικτύου σημείων γνωστών συντεταγμένων.

3.2 Aπó RGB σε grayscale

Στο RGB μοντέλο, τα χρώματα εμφανίζονται με βάση τις πρωταρχικές φασματικές συνιστώσες του κόκκινου (Red), πράσινου (Green) και μπλε (Blue). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε ένα καρτεσιανό τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων. Ο χρωματικός υποχώρος που μας ενδιαφέρει είναι ο κύβος που εικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.3), του οποίου οι τρεις γωνίες πάνω στους άξονες είναι τα RGB χρώματα και οι άλλες τρεις γωνίες είναι τα μαύρο, ενώ το άσπρο είναι τοποθετημένο αντιδιαμετρικά, στην πιο απομακρυσμένη γωνία, από το μαύρο.





Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα το κάθε χρώμα αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα. Έτσι τα χρώματα Κόκκινο, Πράσινο και Μπλε αντιστοιχούν στα σημεία (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), το Μαύρο στο (0,0,0) και το Λευκό στο σημείο (1,1,1). Τα σημεία που ανήκουν στην ευθεία που ενώνει το Μαύρο με το Λευκό αποτελούν την κλίμακα του Γκρι (Grayscale). Οι RGB εικόνες ουσιαστικά αποτελούν το συνδυασμό τριών συστατικών εικόνων, μία για κάθε πρωταρχικό χρώμα.





Σχήμα 3.4: (α) Αρχική RGB εικόνα. Οι συνιστώσες: Red (β), Green (γ), Blue (δ).

Ο αριθμός των bits που χρησιμοποιείται για να αναπαρασταθεί κάθε pixel στον RGB χώρο ονομάζεται βάθος εικονοστοιχείου (pixel depth). Αν η κάθε συστατική εικόνα (δηλαδή οι εικόνες που αντιστοιχούν στα τρία βασικά χρώματα) της RGB εικόνας είναι μια εικόνα των 8 bits ή των 256 σταθμών κβάντισης, τότε τα pixels της RGB εικόνας θα έχουν βάθος ίσο με 24 bits. Ο συνολικός αριθμός των χρωμάτων που μπορούν να αναπαρασταθούν σε μια RGB εικόνα είναι (2⁸)³=16.777.216 χρώματα.

Το χρωματικό μοντέλο RGB δεν προσφέρει άμεσα τη δυνατότητα να γνωρίζουμε την ένταση της φωτεινότητας ενός εικονοστοιχείου. Η χρωματική πληροφορία της εικόνας, σε αντίθεση με την ένταση φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία εισόδου για τις τεχνικές αναγνώρισης των ευθειών γραμμών και των ακμών, που θα ακολουθήσουν. Μια διαδικασία, λοιπόν, που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η μετατροπή της έγχρωμης RGB εικόνας σε ασπρόμαυρη εικόνα έντασης (Grayscale - Αποχρώσεων του γκρι). Η κλίμακας του Γκρι εικόνα αποτελείται από ένα μόνο κανάλι, αυτό της έντασης (Intensity). Ο προφανής τρόπος για να την μετατρέψουμε μια RGB εικόνα, σε κλίμακας του γκρι είναι χρησιμοποιώντας τον τύπο Grayscale=(R+G+B)/3. Όμως, η χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου τύπου, δε δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, συνεπώς, για τον λόγο αυτό, εφαρμόζουμε διαφορετικούς συντελεστές βαρύτητας στα τρία κανάλια της RGB εικόνας. Με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου, η grayscale εικόνα που προκύπτει είναι αρκετά καθαρότερη και περισσότερο φωτεινή. Grayscale = (0.2989×R + 0.5870×G + 0.1140×B).





Μια grayscale εικόνα, είναι ένας δισδιάστατος πίνακας δεδομένος Ι, του οποίου οι τιμές των στοιχείων αναπαριστούν την ένταση της φωτεινότητας κάθε pixel. Οι τιμές των pixels αντιστοιχούν σε διάφορες εντάσεις φωτεινότητας (επίπεδα του γκρι), όπου η τιμή 0 αναπαριστά το μαύρο και η τιμή 255 αναπαριστά το λευκό. Το διάστημα [0,255] μέσα στο οποίο μπορεί να πάρει τιμή φωτεινότητας ένα pixel, ορισμένες φορές κανονικοποιείται στο διάστημα [0,1].

3.3 Δυαδική μετατροπή grayscale εικόνας, μέσω της κατωφλίωσης του Otsu Το ιστόγραμμα μιας ψηφιακής εικόνας είναι μια ακολουθία:

$$p_i = \frac{n_i}{n}, \quad 0 < i < L - 1$$
 (3.1)

όπου n_i είναι το πλήθος των εικονοστοιχείων της εικόνας, με επίπεδο φωτεινότητας i, n είναι το συνολικό πλήθος των εικονοστοιχείων και L το συνολικό πλήθος των επιπέδων φωτεινότητας. Η ποσότητα p_i δηλώνει τη συχνότητα εμφάνισης του επιπέδου φωτεινότητας i στην εικόνα, ενώ το συνολικό ιστόγραμμα της εικόνας μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εκτίμηση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της φωτεινότητας, p(z). Στην ουσία, το ιστόγραμμα είναι ένα γράφημα, ο οριζόντιος άξονας του οποίου, αναπαριστά τα επίπεδα φωτεινότητας και ο κατακόρυφος το πλήθος των pixels που «ζουν» σε κάθε επίπεδο. Το ιστόγραμμα παρέχει γενικές πληροφορίες για τη μορφή της εικόνας και το περιεχόμενό της, όπως το δυναμικό εύρος και την αντίθεση της εικόνας (φωτεινή, σκοτεινή, υψηλής ή χαμηλής αντίθεσης).



Σχήμα 3.6: (α) Μια grayscale εικόνα και (β) το ιστόγραμμά της.

Συχνά τα εικονοστοιχεία ενός αντικειμένου μιας εικόνας παίρνουν τιμές σε ένα μικρό διάστημα αποχρώσεων. Αυτό οδηγεί συνήθως στη δημιουργία ενός τοπικού μέγιστου στην περιοχή του ιστογράμματος της εικόνας. Η εύρεση τέτοιων τοπικών μεγίστων διευκολύνει τον εντοπισμό των αντικειμένων της εικόνας και την απόδοσή της με λιγότερες κύριες αποχρώσεις. Έχει προταθεί μια πληθώρα τεχνικών για τον καθορισμό τιμών του πεδίου των αποχρώσεων, μεταξύ των οποίων εμφανίζονται τοπικά μέγιστα του ιστογράμματος, καμία όμως δεν εξασφαλίζει γενική αποτελεσματικότητα. Οι συγκεκριμένες τιμές ονομάζονται κατώφλια. Η διαδικασία της κατωφλίωσης μπορεί να βασίζεται στη χρήση σταθερού κατωφλίου Τ για όλη την εικόνα (ολική κατωφλίωση) ή προσαρμοστικού κατωφλίου, του οποίου η τιμή εξαρτάται από τις τοπικές ιδιότητες της εικόνας (προσαρμοστική κατωφλίωση). Η δυαδική μετατροπή (binarization) μιας εικόνας, η οποία αναφέρεται στην μετατροπή μίας grayscale εικόνας σε δυαδική, είναι το αρχικό βήμα στα συστήματα επεξεργασίας εικόνων. Συνήθως, διαχωρίζει περιοχές ενδιαφέροντος από περιοχές υποβάθρου. Η δυαδική μετατροπή παίζει ζωτικό ρόλο στον τομέα της επεξεργασία εικόνας, διότι το αποτέλεσμά που γεννιέται από τη συγκεκριμένη διαδικασία, επηρεάζει τα μετέπειτα στάδια της αναγνώρισης των αντικειμένων ενδιαφέροντος [12].

Για την μετατροπή μιας εικόνας αποχρώσεων του γκρι σε δυαδική είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός των 2 κύριων αποχρώσεών της. Με τον τρόπο αυτό οι αποχρώσεις της εικόνας χωρίζονται σε 2 κλάσεις C₀,C₁ που κάθε μια αποτελείται από τις αποχρώσεις που βρίσκονται πιο κοντά σε μια από τις 2 κύριες αποχρώσεις. Ο διαχωρισμός αυτός ισοδυναμεί με την εύρεση μιας τιμής σταθερού κατωφλιού Τ, ο οποίος εκφράζεται από τη σχέση:

$$grayscale(i,j) \in \begin{cases} C_0 & \alpha v \ grayscale(i,j) < T \\ C_1 & \alpha v \ grayscale(i,j) \ge T \end{cases}$$
(3.2)

Ακολούθως από την αρχική grayscale εικόνα Ι προκύπτει η δυαδική εικόνα Bwl, κάθε εικονοστοιχείο της οποίας, δίνεται από τη σχέση :

$$\mathsf{Bwl}(i,j) = \begin{cases} 0 & \alpha v & \mathsf{I}(i,j) < \mathsf{T} \\ 1 & \alpha v & \mathsf{I}(i,j) \ge \mathsf{T} \end{cases}$$
(3.3)

ή εναλλακτικά

$$\mathsf{Bwl}(i,j) = \begin{cases} 0 & \alpha v & \mathsf{I}(i,j) \in \mathsf{C}_1 \\ 1 & \alpha v & \mathsf{I}(i,j) \in \mathsf{C}_2 \end{cases}$$
(3.4)

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τον αυτόματο προσδιορισμό του κατωφλίου, στο συγκεκριμένο σύστημα, είναι η μέθοδος κατάτμησης του Otsu.

Η ιδέα είναι σχετικά απλή: καλά διαχωρισμένες ομάδες θα διαφέρουν στα επίπεδα γκρι. Σε στατιστικούς όρους αυτό μεταφράζεται σε ελαχιστοποίηση της διακύμανσης μεταξύ των επιπέδων γκρι της ίδιας ομάδας (ενδοδιακύμανση – within class variance), ένα μέτρο το οποίο προσδιορίζει κατά πόσο μια ομάδα είναι "συμπαγής" και την μεγιστοποίηση της διακύμανσης των επιπέδων γκρι διαφορετικών ομάδων. Το τελευταίο μέτρο, «μαρτυράει» κατά πόσο δύο ή και περισσότερες ομάδες είναι καλά διαχωρισμένες [6].

Έστω L οι στάθμες κβάντισης μιας grayscale εικόνας και ο αριθμός των εικονοστοιχείων του επιπέδου i, n_i. Ο συνολικός αριθμός εικονοστοιχείων της εικόνας είναι n= n₁ + n₂ + n₃ +...+ n_L. Το ιστόγραμμα της εικόνας κανονικοποιείται και θεωρείται ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας p_i, με τις ακόλουθες ιδιότητες:

$$p_{j} = \frac{n_{j}}{n}, \quad p_{j} \ge 0 \qquad \sum_{i=1}^{L} p_{i} = 1$$
 (3.5)

Η αναμενόμενη τιμή των επιπέδων γκρι της εικόνας είναι:

$$\mu_{\mathrm{T}} = \mu(\mathrm{L}) = \sum_{i=1}^{\mathrm{L}} \mathbf{i} \cdot \mathbf{p}_{i}$$
(3.6)

Αν χωρίσουμε την εικόνα σε δύο κλάσεις C_0, C_1 , χρησιμοποιώντας ένα σταθερό κατώφλι στην τιμή k, τότε τα επίπεδα γκρι των εικονοστοιχείων που ανήκουν στην κλάση C_0 αποτελούν το σύνολο [1,2,...,k] και τα επίπεδα γκρι των εικονοστοιχείων, τα οποία ανήκουν στην κλάση C1 το σύνολο [k+1,k+2,...,L]. Οι πιθανότητες $ω_0, ω_1$ ένα εικονοστοιχείο να ανήκει σε μια από τις δύο κλάσεις C_0, C_1 είναι αντίστοιχα:

$$\begin{cases} \omega_0 = P(C_0) = \sum_{i=1}^{k} p_i = \omega(k), \\ \omega_1 = P(C_1) = \sum_{i=k+1}^{L} p_i = 1 - \omega(k) \end{cases}$$

$$(3.7)$$

όπου.

Για κάθε μία κλάση η αναμενόμενη τιμή δίδεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{cases} \mu_0 = \sum_{i=1}^{k} i \cdot \frac{p_i}{\omega_0} = \frac{\mu(k)}{\omega(k)}, \\ \mu_1 = \sum_{i=k+1}^{L} i \cdot \frac{p_i}{\omega_1} = \frac{\mu_T \cdot \mu(k)}{1 \cdot \omega(k)} \end{cases}$$
(3.8)

όπου $\omega(k) = \sum_{i=1}^{k} p_{i}, \quad \mu(k) = \sum_{i=1}^{k} i \cdot p_{i},$

οι μηδενικού και πρώτου αντίστοιχα βαθμού αθροιστικές ροπές του ιστογράμματος έως το k επίπεδο αντίστοιχα.

Για κάθε k, μπορούμε εύκολα να αποδείξουμε ότι ισχύουν οι σχέσεις

$$\begin{cases} \omega_{0} \cdot \mu_{0} + \omega_{1} \cdot \mu_{1} = \mu_{T} \\ \omega_{0} + \omega_{1} = 1 \end{cases}$$

$$(3.9)$$

Επίσης οι μεταβλητότητες προκύπτουν από τις δευτέρου βαθμού αθροιστικές ροπές:

$$\begin{cases} \sigma_{0}^{2} = \sum_{i=1}^{k} (i - \mu_{0})^{2} \frac{p_{i}}{\omega_{0}}, \\ \sigma_{1}^{2} = \sum_{i=k+1}^{L} (i - \mu_{1})^{2} \frac{p_{i}}{\omega_{1}} \end{cases}$$
(3.10)

.

Για να αποτιμήσουμε το κατώφλι που επιλέγει η μέθοδος του Otsu, ορίζουμε την ενδοδιακύμανση σ_w^2 και την διακύμανση των επιπέδων γκρι μεταξύ των δύο κλάσεων σ_B^2 ως εξής:

$$\begin{cases} \sigma_{w}^{2}(k) = \omega_{0}\sigma_{0}^{2} + \omega_{1}\sigma_{1}^{2}, \\ \sigma_{B}^{2}(k) = \omega_{0}(\mu_{0} - \mu_{T})^{2} + \omega_{1}(\mu_{1} - \mu_{T})^{2} \\ = \omega_{0}\omega_{1}(\mu_{1} - \mu_{0})^{2} \end{cases}$$
(3.11)

Η συνολική διακύμανση μεταξύ των επιπέδων του γκρι είναι:

$$\sigma_{\mathrm{T}}^{2} = \sum_{i=1}^{\mathrm{L}} \left(\mathbf{i} \cdot \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{T}} \right)^{2} \cdot \mathbf{p}_{i}^{*}, \qquad (3.12)$$

Ο Otsu καθόρισε τα παρακάτω μέτρα διαχωρισιμότητας των δύο κλάσεων, τα οποία πρέπει να μεγιστοποιηθούν από το βέλτιστο κατώφλι k:

$$\left\{\lambda(\mathbf{k}) = \frac{\sigma_{\mathrm{B}}^{2}}{\sigma_{\mathrm{w}}^{2}}, \qquad \delta(\mathbf{k}) = \frac{\sigma_{\mathrm{T}}^{2}}{\sigma_{\mathrm{w}}^{2}}, \qquad \eta(\mathbf{k}) = \frac{\sigma_{\mathrm{B}}^{2}}{\sigma_{\mathrm{T}}^{2}}\right\} \quad (3.13)$$

Σημειώνουμε ότι οι συναρτήσεις λ(k), δ(k) και η(k), δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Για παράδειγμα ισχύει ότι δ(k)= λ(k)+1 και η(k)= λ(k)/(λ(k)+1), διότι πάντοτε ισχύει η ακόλουθη βασική σχέση:

$$\sigma_{W}^{2} + \sigma_{B}^{2} = \sigma_{T}^{2}$$
(3.14)

Παρατηρούμε επίσης ότι τα σ_B^2 και σ_w^2 είναι συναρτήσεις του k, ενώ το σ_L^2 όχι. Ακόμα, παρατηρούμε ότι, σε αντίθεση με το σ_L^2 , για τον υπολογισμό του σ_w^2 απαιτείται ο υπολογισμός δευτέρου βαθμού στατιστικών ποσοτήτων (σ_0 , σ_1). Για τους λόγους αυτούς, επιλέγεται η συνάρτηση η(k) ως η συνάρτηση κριτηρίου που πρέπει να μεγιστοποιήσουμε. Η βέλτιστη τιμή κατωφλίου k *, η οποία μεγιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ επιπέδων γκρι των δύο κλάσεων

(σ_B²) και ελαχιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης επιλέγεται από την ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία:

$$k^{*} = \max_{2 \le k \le L} \left(\sigma_{B}^{2}(k) \right)$$
(3.15)

,όπου το σ_{B}^{2} υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη από τη σχέση:

$$\sigma_{\rm B}^{2}(k) = \frac{\left[\mu_{\rm T} \cdot \omega(k) - \mu(k)\right]^{2}}{\omega(k) \cdot \left[1 - \omega(k)\right]}$$
(3.16)

Έτσι, ξεκινώντας από το αρχικό επίπεδο γκρι της εικόνας k=1 και καταλήγοντας στο επίπεδο L, υπολογίζεται η σ_B² συναρτήσει του κατωφλίου. Τέλος, επιλέγεται το κατώφλι k *, για το οποίο η σ_B² είναι η μέγιστη.

Παρακάτω, γίνεται μια σύντομη, αλλά συνάμα αναλυτική εφαρμογή του αλγορίθμου, στο ιστόγραμμα μιας εικόνας 6 αποχρώσεων του γκρι. Η επιλογή της συγκεκριμένης εικόνας έγινε για λόγους απλότητας και συντομίας.



Σχήμα 3.7: Η εικόνα 6 αποχρώσεων του γκρι και το ιστόγραμμά της.

Η διαδικασία ξεκινάει με τον υπολογισμό των τιμών της πιθανότητας, της αναμενόμενης τιμής και της διασποράς, για τα στοιχεία της κλάσης C_0 (φόντο) και της κλάσης C_1 (στοιχεία ενδιαφέροντος) και μέσω αυτών, υπολογίζεται η τιμή της ενδοδιακύμανσης και της διακύμανσης μεταξύ των δύο κλάσεων. Ο αλγόριθμος αρχικοποιείται με κατώφλι T=0 και επαναλαμβάνεται για όλες τις πιθανές τιμές κατωφλίου, μέχρι την τιμή T=L-1. Ενδεικτικά, παρουσιάζονται οι υπολογισμοί των σταθερών, για την περίπτωση του κατωφλίου T=3.



Σχήμα 3.8: Οι δύο κλάσεις του ιστογράμματος της εικόνας με επιλογή κατωφλίου T=3.

• Για την κλάση C_0 (Background):

Weight
$$\omega_0 = \frac{8+7+2}{36} = 0.4722$$

Mean $\mu_0 = \frac{(0 \times 8) + (1 \times 7) + (2 \times 2)}{17} = 0.6471$
Var $\sigma_0^2 = \frac{((0 - 0.6471)^2 \times 8) + ((1 - 0.6471)^2 \times 7) + ((2 - 0.6471)^2 \times 2)}{17} = 0.4637$

Για την κλάση C₁ (Foreground):

Weight
$$\omega_1 = \frac{6+9+4}{36} = 0.5278$$

Mean $\mu_1 = \frac{(3\times6)+(4\times9)+(5\times4)}{19} = 3.8974$
Var $\sigma_1^2 = \frac{((3-3.8947)^2\times6)+((4-3.8947)^2\times9)+((5-3.8947)^2\times4)}{19} = 0.5152$

• Αναμενόμενη τιμή των επιπέδων γκρι:

$$\mu_{T} = (\omega_{0}\mu_{0}) + (\omega_{1}\mu_{1})$$

= 2.3626

- Evδoδiaκúµavση (Within Class Variance): $\sigma_W^2 = (\omega_0 \times \sigma_0^2) + (\omega_1 \times \sigma_1^2)$ $= (0.4722 \times 0.4637) + (0.5278 \times 0.5152)$ = 0.4909
- Διακύμανση μεταξύ των κλάσεων (Between Class Variance):

$$\sigma_{B}^{2} = \sigma_{T}^{2} - \sigma_{W}^{2}$$

= $\omega_{0}(\mu_{0} - \mu)^{2} + \omega_{1}(\mu_{1} - \mu)^{2}$
= $\omega_{0}\omega_{1}(\mu_{0} - \mu_{1})^{2}$
= 0.4722 × 0.5278 × (0.6471 - 3.8974)^{2}
= 2.6287

Οι ίδιοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για όλα τα πιθανά κατώφλια και τα παραχθέντα αποτελέσματα, παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 3.9: Υπολογισθέντες τιμές των παραμέτρων ω₀,ω₁,μ₀,μ₁,σ₀²,σ₁²,σ_w²,σ_B² για κάθε πιθανή τιμή του κατωφλίου Τ.

Όπως εξάγεται από τον παραπάνω πίνακα, το βέλτιστο κατώφλι k *, το οποίο μεγιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ επιπέδων γκρι των δύο κλάσεων και ελαχιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης, είναι το T=3. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθόδου κατωφλίωσης του Otsu, στην αρχική εικόνα 6 αποχρώσεων του γκρι, είναι ικανοποιητικότατο, αφού οι αρχικές κλάσεις, δηλαδή οι περιοχές των αντικειμένων ενδιαφέροντος και του φόντου, διαχωρίστηκαν αρκετά «σφικτά».



Σχήμα 3.10: Αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου κατωφλίωσης του Otsu στην αρχική grayscale εικόνα 6 επιπέδων του γκρι.



Σχήμα 3.11: Παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου κατωφλίωσης του Otsu, στην πράξη. Αριστερά παρουσιάζονται οι αρχικές grayscale εικόνες, δεξιά τα ιστογράμματα των εικόνων, πάνω στα οποία διακρίνονται τα κατώφλια που ευρέθησαν με τη μέθοδο του Otsu και στο κέντρο οι δυαδικές εικόνες που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου.

3.4 Ο μετασχηματισμός Hough

Για την ανεύρεση ευθύγραμμων τμημάτων χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός Hough, ο οποίος αποτελεί μια τεχνική εξαγωγής χαρακτηριστικών με ευρεία χρήση στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας για τον προσδιορισμό γραμμών και γενικά παραμετρικά εκφραζόμενων καμπυλών. Ο μετασχηματισμός Hough, προτάθηκε από τον Paul Hough το 1962 [10]. Αναπτύχθηκε στα πλαίσια της κατασκευής μιας ηλεκτρονικής συσκευής για την ανίχνευση της κίνησης σωματιδίων υψηλής ενέργειας. Ήταν μια από τις πρώτες προσπάθειες για την αυτοματοποίηση της οπτικής διαδικασίας που μέχρι τότε, απαιτούσε πολλές ανθρωποώρες εργαστηριακών μετρήσεων.

Το βασικό χαρακτηριστικό του προσδιορισμού της θέσης ευθειών με το μετασχηματισμό Hough είναι η σχέση σημείου-ευθείας. Ένα σημείο P μπορεί να οριστεί είτε από ένα ζεύγος συντεταγμένων, είτε ως το σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών που διέρχονται από αυτό. Η βασική ιδέα του μετασχηματισμού γίνεται φανερή εάν ορίσουμε ένα σύνολο συνευθειακών σημείων P_i και εξετάσουμε από καθένα από αυτά τα σημεία. Θα παρατηρήσουμε τότε ότι από όλες τις ευθείες υπάρχει μόνο μία που θα διέρχεται από όλα τα σημεία. Η δυαδικότητα σημείουευθείας ισχύει όμως και αντιστρόφως. Όπως ένα σημείο μπορεί να προσδιοριστεί ως σημείο τομής ενός συνόλου ευθειών, έτσι και μία ευθεία μπορεί να προσδιοριστεί από ένα σύνολο σημείων.

Αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σημείο P(x_i, y_i), στο καρτεσιανό επίπεδο, τότε η παραμετρική εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y_{i} = a \cdot x_{i} + b$$
 (3.17)

Όλες οι ευθείες που διέρχονται από το σημείο P(x_i, y_i) για διαφορετικά a και b ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση. Εάν στη συνέχεια γράψουμε την εξίσωση ως ακολούθως:

$$b = -x_i \cdot a + y_i \qquad (3.18)$$

και θεωρήσουμε το επίπεδο [α - b] (γνωστό και ως παραμετρικός χώρος), τότε το σημείο αντιστοιχίζεται σε ευθεία. Επιπλέον, εάν πάρουμε ένα δεύτερο σημείο (x_j, y_j), τότε και αυτό αντιστοιχίζεται σε ευθεία η οποία τέμνει την προηγούμενη στο σημείο (α',b'). Στην πραγματικότητα όλα τα σημεία της ευθείας στο [x - y] επίπεδο αντιστοιχίζονται σε ευθείες στον παραμετρικό χώρο, οι οποίες τέμνονται στο σημείο (α',b').



Σχήμα 3.12: (α) Το [x - y] επίπεδο και (β) το [α - b] επίπεδο.

Ο αλγόριθμος υλοποίησης του μετασχηματισμού περιλαμβάνει την διαίρεση του παραμετρικού χώρου σε κελιά μήτρας, όπως φαίνεται στο <u>Σχήμα 3.13</u>, όπου ($\alpha_{max}, \alpha_{min}$) και (b_{max}, b_{min}) είναι οι αναμενόμενες τιμές κλίσης της ευθείας και του σημείου τομής των ευθειών. Το κελί με συντεταγμένες (i,j) και τιμή A(i,j) αντιστοιχεί στο παράθυρο μήτρας του παραμετρικού χώρου (α_i, b_j). Αρχικά όλα τα κελιά της μήτρας έχουν τιμή 0. Στη συνέχεια, για κάθε σημείο (x_k, y_k) της αρχικής εικόνας, θέτουμε την παράμετρο α ίση με τις επιτρεπόμενες τιμές του άξονα α και βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές b λύνοντας την εξίσωση: b = - x_k·α+ y_k.



Σχήμα 3.13: Διαίρεση του παραμετρικού χώρου για χρήση στο μετασχηματισμό Hough.

Οι τιμές b που βρίσκονται στρογγυλοποιούνται προς την κοντινότερη επιτρεπόμενη τιμή στον bάξονα. Στη συνέχεια, για κάθε τιμή α_p, η οποία οδηγεί σε λύση b_p θέτουμε: A(p,q) = A(p,q) + 1. Τελικά, η τιμή Q αντιστοιχίζεται σε Q σημεία του επιπέδου [x - y], τα οποία βρίσκονται πάνω στην ευθεία: y = α_ix + b_j.

Ο αριθμός των διαιρέσεων στο [α - b] επίπεδο καθορίζει τον αριθμό των συνευθειακών σημείων. Στη Σχέση (3.14) τα όρια των τιμών (α,b) είναι μη πεπερασμένα έτσι οι ευθείες του καρτεσιανού επιπέδου που είναι παράλληλες στον άξονα y απαιτούν άπειρα ζεύγη τιμών (α,b) ώστε να προσδιοριστούν στο επίπεδο [α - b]. Ένας τρόπος για να υπερβούμε το πρόβλημα είναι να κάνουμε χρήση της προσέγγισης των Duda και Hart, οι οποίοι αντικατέστησαν το επίπεδο [α b], με το επίπεδο [ρ - θ]. Στην περίπτωση αυτή η Σχέση (3.14), γίνεται:

 $\rho = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta$ (3.19)



Σχήμα 3.14: (α) [x - y] επίπεδο και (β) [ρ - θ] επίπεδο.

Στην ουσία το επίπεδο [α - b], αντικαθίσταται με το επίπεδο [ρ - θ] των πολικών παραμέτρων μιας ευθείας. Το <u>Σχήμα 3.14</u> απεικονίζει τη γεωμετρική ερμηνεία των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στην Σχέση (3.19). Η κατασκευή της μήτρας με την βοήθεια της Σχέσης (3.19) γίνεται όπως ήδη περιγράψαμε για τη Σχέση (3.17). Σε αντίθεση όμως με την κατασκευή ευθειών γραμμών στον αb παραμετρικό χώρο στην προηγούμενη περίπτωση, εδώ έχουμε ημιτονοειδείς καμπύλες στον χώρο [ρ - θ]. Όμως, όπως και πριν, έτσι και τώρα τα Q συνευθειακά σημεία που βρίσκονται στην ευθεία x-cosθ_i + y-cosθ_i = ρ_i παράγουν Q ημιτονοειδής καμπύλες οι οποίες τέμνονται στο σημείο (ρ_i-θ_i). του παραμετρικού χώρου. Αυξάνοντας τη γωνία θ και επιλύοντας για το αντίστοιχο ρ παίρνουμε Q σημεία της μήτρας A(i,j), τα οποία συσχετίζονται με τα κελιά (ρ_i.θ_i).

Το εύρος της γωνίας θ είναι ±90° σε σχέση με τον άξονα - x. Κατά συνέπεια με αναφορά στο <u>Σχήμα 3.14 (α)</u>, μια οριζόντια γραμμή έχει γωνία θ=0°, και το ρ ταυτίζεται με τον θετικό ημιάξονα x. Παρόμοια, μια κάθετη γραμμή έχει γωνία θ=90° και το ρ ταυτίζεται με τον θετικό ημιάξονα y. Οι Duda και Hart προσάρμοσαν το μετασχηματισμό Hough και έδωσαν μια μέθοδο υλοποίησης του για δυαδικές εικόνες. Σύμφωνα με τη μέθοδό τους, κάθε μαύρο εικονοστοιχείο της εικόνας μετασχηματίζεται σε μια ημιτονοειδή καμπύλη στο επίπεδο [ρ - θ]. Το επίπεδο αυτό υλοποιείται με έναν πίνακα διαστάσεων m x n, που μπορούμε να τον ονομάσουμε πίνακα Hough. Έτσι κάθε σημείο της ημιτονοειδούς καμπύλης «γεμίζει» την κοντινότερη προς αυτό θέση του πίνακα Hough. Στο τέλος αυτής της διαδικασίας, ο πίνακας θα αντιπροσωπεύει το μετασχηματισμό Hough της δυαδικής εικόνας. Δηλαδή μια ευθεία, θα αντιστοιχεί σε εκείνο το σημείο του πίνακα με τη μεγαλύτερη τιμή.

Το παρακάτω παράδειγμα καθιστά σαφή όσα περιγράφτηκαν παραπάνω για τον μετασχηματισμό Hough. Θεωρούμε τρία σημεία όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Σημεία, περιγραφέντα ως τομή ευθειών στο [x - y] επίπεδο.

Για κάθε σημείο σχεδιάζεται ένα αριθμός γραμμών, που διέρχονται από αυτό σε διαφορετικές γωνίες. Αυτές φαίνονται στο σχήμα ως συμπαγείς χρωματιστές γραμμές. Ακολούθως για κάθε ευθεία σχεδιάζεται η κατακόρυφη σε αυτή ευθεία η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Οι ευθείες αυτές είναι στο σχήμα οι διακεκομμένες γραμμές. Στη συνέχεια, μετρώνται το μήκος και η γωνία κάθε διακεκομμένης γραμμής, τα οποία φαίνονται στους πίνακες του <u>Σχήματος 3.15</u>. Τέλος, δημιουργείται ένα γράφημα του μήκους σε συνάρτηση με τη γωνία, όπως διακρίνεται στο <u>Σχήμα 3.16</u>.



Σχήμα 3.16: Μεταφορά ευθειών στο [ρ - θ] επίπεδο.

Το σημείο όπου τέμνονται οι καμπύλες δίνει ένα ζεύγος απόστασης-γωνίας. Η απόσταση και η γωνία αυτή υποδηλώνουν την ευθεία, η οποία διέρχεται από τα τρία αρχικά σημεία. Στο γράφημα του παραδείγματός μας, οι καμπύλες τέμνονται στο μωβ σημείο, το οποίο αντιστοιχεί στη μωβ ευθεία η οποία διαπερνά τα τρία σημεία.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα παράδειγμα μετάβασης από το πεδίο [x - y] στο [ρ - θ] σε επίπεδο πινάκων. Στην αρχική εικόνα αντιστοιχίζεται στη συνέχεια μια νέα, με θ στήλες και r γραμμές, κάθε στοιχείο (r,θ) της οποίας είναι ένας ακέραιος αριθμός που δείχνει πόσα pixels της αρχικής βρέθηκαν να ανήκουν στη συγκεκριμένη ευθεία. Στο <u>Σχήμα 3.17</u> φαίνεται ένα τμήμα εικόνας στην οποία έχουν ανιχνευθεί ακμές. Με την βοήθεια του μετασχηματισμού Hough ανιχνεύονται οι ευθείες που μπορεί να αναγνωρίσει αμέσως η ανθρώπινη όραση, παρά το γεγονός της απώλειας κομματιών τους, πιθανόν λόγω θορύβου : Στην ομάδα των έξι pixels που σχηματίζουν την πλησιέστερη προς την αρχή των αξόνων ευθεία αντιστοιχεί απόσταση από την αρχή r=57 pixels και γωνία θ=45°. Η γωνία έχει προκύψει από την γωνία της ακμής, που με την σειρά της έχει προκύψει από την διαδικασία εύρεσης της ακμών. Στην άλλη ευθεία που σχηματίζεται από την ομάδα των οκτώ pixels, αντιστοιχεί το ζεύγος (r,θ)=(60,45°). Μιά σάρωση της εικόνας (r,θ) μπορεί να αποκαλύψει τα εικονοστοιχεία με την μεγαλύτερη τιμή, τις πιο μεγάλες (πιθανές) δηλαδή ευθείες της αρχικής εικόνας.



Σχήμα 3.17: Διαδικασία ανίχνευσης ευθυγράμμων τμημάτων, σε τμήμα δυαδικής εικόνας.

Η ιδέα του μετασχηματισμού Hough είναι εύκολα γενικεύσιμη για την ανίχνευση και άλλων αναλυτικών καμπυλών. Με κατάλληλη δε τροποποίηση, είναι δυνατή η αναγνώριση και μη αναλυτικών καμπυλών.

3.5 Ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny

Ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny προτάθηκε το 1986 από τον John F.Canny [9] και θεωρείται από τους πιο ισχυρούς. Ο αλγόριθμος του Canny, δεν είναι μια απλή τεχνική για τη βέλτιστη εξαγωγή ακμών. Στην πραγματικότητα είναι μια βέλτιστη τεχνική ανίχνευσης και δημιουργίας ακμών. Τα κριτήρια στα οποία βασίζεται η ανάπτυξή της είναι τα ακόλουθα:

- I. Σωστή ανίχνευση. Να ανιχνεύονται με μεγάλη πιθανότητα ακμές όταν αυτές πραγματικά υπάρχουν, αλλά και να μην αναγνωρίζονται ως σημεία ακμών, σημεία που δεν ανήκουν σε ακμές.
- **ΙΙ. Εντοπισμός θέσης**. Οι ακμές που ανιχνεύονται να είναι στη σωστή χωρικά θέση, πολύ κοντά προς τις πραγματικές ακμές.
- III. Μοναδική απόκριση σε κάθε ακμή. Το κριτήριο αυτό απαιτεί τον αποκλεισμό της πιθανότητας μία πραγματική ακμή να δώσει περισσότερες από μία ακμές ως απόκριση. Αν και το κριτήριο αυτό ουσιαστικά υπερκαλύπτεται από το πρώτο, περιλαμβάνεται χωριστά καθώς η μαθηματική περιγραφή του πρώτου κριτηρίου δεν αποκλείει αυτή την περίπτωση.

Ο αλγόριθμος εξαγωγής ακμών του Canny, αποτελείται από την ακόλουθη σειρά διαδικασιών, οι οποίες εκτελούνται σειριακά:

Βήμα 1°. Φιλτράρισμα της εικόνας με ένα φίλτρο Gaussian μηδενικής μέσης τιμής και καθορισμένης τυπικής απόκλισης σ. Η δισδιάστατη μορφή του φίλτρου Gaussian περιγράφεται από τη σχέση:

$$G(x,y) = e^{\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}}$$
(3.20)

Η συνάρτηση *G*(*x*, *y*) ικανοποιεί την ιδιότητα της διαχωριστικότητας, δηλαδή:

$$G(x,y) = e^{\frac{x^2}{2\sigma^2}} \cdot e^{\frac{y^2}{2\sigma^2}} = G(x) \cdot G(y)$$
(3.21)

Συνεπώς, το φιλτράρισμα της εικόνας μπορεί να γίνει σε δύο βήματα πρώτα ως προς τον άξονα *x* και κατόπιν ως προς τον άξονα *y*. Ισχύει δηλαδή, η σχέση:

$$I(x,y)^*G(x,y) = [I(x,y)^*G(x)]^*G(y)$$
 (3.22)

Οπότε :

$$I_{G}(x,y) = [I(x,y)^{*}G(x)]^{*}G(y)$$
(3.23)

Μπορούμε, δηλαδή, να βρούμε πρώτα τη συνέλιξη της εικόνας με το μονοδιάστατο οριζόντιο φίλτρο G(x) και στη συνέχεια, το αποτέλεσμα να το συνελίξουμε με το κατακόρυφο φίλτρο G(y). Σημειώνεται ότι για ένα φίλτρο Gaussian διαστάσεων k x k, η δισδιάστατη συνέλιξη απαιτεί k² πολλαπλασιασμούς και k²-1 προσθέσεις ανά εικονοστοιχείο, ενώ η εφαρμογή της μεθόδου της διαχωριστικότητας μειώνει τον αριθμό των πράξεων σε 2k πολλαπλασιασμούς και 2k-1 προσθέσεις ανά εικονοστοιχείο.



Σχήμα 3.18: Gaussian κατανομές, μηδενικής μέσης τιμής και διαφορετικών τιμών σ.

Βήμα 2°. Προσδιορισμός της κλίσης (Gradient) της εικόνας I_G(x,y)

Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρησιμοποίηση μασκών, όπως αυτή του Sobel. Για τη συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκαν 3x3 μάσκες Sobel. Ο κατακόρυφος πυρήνας Sobel, προκύπτει από τον οριζόντιο, αν αυτός περιστραφεί αριστερόστροφα κατά 90°.

Οριζόντια 3x3 μάσκα Sobel : S
x =
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Κατακόρυφη 3x3 μάσκα Sobel: S
y = $\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$

Αν λοιπόν, IG_x και IG_y οι εικόνες που προκύπτουν από την εφαρμογή της οριζόντιας και κατακόρυφης μάσκας Sobel, τότε προσδιορίζουμε τα πλάτη και τις γωνίες σε κάθε εικονοστοιχείο από τις σχέσεις:

$$E_{s} = \sqrt{I_{Gx}^{2} + I_{Gy}^{2}}$$
(3.24)
$$E_{o} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{Gy}}{I_{Gx}} \right)$$
(3.25)

Βήμα 3ο. Καταστολή Μη-μεγίστων τιμών (Non-Maxima Suppression)

Στο στάδιο αυτό, διενεργείται αναζήτηση με σκοπό την εύρεση τοπικού μεγίστου της βαθμίδας κλίσης, στην κατεύθυνση της κλίσης, αν αυτό υπάρχει. Τοπικό μέγιστο της βαθμίδας κλίσης σε κάποιο σημείο, σημαίνει ότι το εικονοστοιχείο στο σημείο αυτό, αποτελεί σημείο ακμής. Ουσιαστικά, στο βήμα αυτό απαλείφουμε από την E_s ως θέσεις ακμών εκείνες που τοπικά έχουν μικρότερη τιμή. Οι τιμές της κατεύθυνσης των gradient, στρογγυλοποιούνται ώστε να αποδοθούν σε μία εκ των γωνιών των τεσσάρων κυρίων κατευθύνσεων (0°,45°,90°,135°) και η αναζήτηση των τοπικών μεγίστων, επιτυγχάνεται μέσω των παρακάτω υποθέσεων:

- Εάν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 0 μοίρες, τότε το σημείο θα θεωρηθεί ακμή, αν η τιμή της έντασης του είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στις δυτικές και ανατολικές κατευθύνσεις.
- Εάν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 90 μοίρες, τότε το σημείο θα θεωρηθεί ακμή, αν η τιμή της έντασης του είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στις βόρειες και νότιες κατευθύνσεις.
- Εάν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 45 μοίρες, τότε το σημείο θα θεωρηθεί ακμή, αν η τιμή της έντασης του είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στις βορειοανατολικές και νοτιοδυτικές κατευθύνσεις.
- Εάν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 135 μοίρες, τότε το σημείο θα θεωρηθεί ακμή, αν η τιμή της έντασης του είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες τιμές

των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στις βορειοδυτικές και νοτιοανατολικές κατευθύνσεις.

Από το στάδιο αυτό, προκύπτει ένα σύνολο ακμών σε μορφή δυαδικής εικόνας. Τα σύνολα αυτά καλούνται συχνά και λεπτές ακμές (thin edges).



Σχήμα 3.19: Απόδοση των γωνιών των gradient, στην κοντινότερη εκ των γωνιών των τεσσάρων κυρίων κατευθύνσεων (0°, 45°, 90°, 135°).

Βήμα 4ο. Κατωφλίωση Υστέρησης (Hysteresis thresholding)

Η τελευταία διεργασία είναι η κατωφλίωση της εικόνας με υστέρηση. Η τεχνική αυτή στοχεύει στην παραπέρα μείωση των εικονοστοιχείων των ακμών της εικόνας, που προέκυψαν μέχρι αυτό το βήμα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο τιμές κατωφλίου Τ₁ και Τ₂, με Τ₁ < Τ₂. Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την εύρεση ενός εικονοστοιχείου με κλίση μεγαλύτερη του Τ2. Στη συνέχεια προχωρούμε διαδοχικά, στα γειτονικά διασυνδεδεμένα εικονοστοιχεία, έως ότου βρούμε κάποιο με κλίση μικρότερη από Τ1. Η κατωφλίωση αυτή γίνεται με βάση το κριτήριο της ελάχιστης και της μέγιστης φωτεινότητας στην εικόνα. Με άλλα λόγια, για ένα δεδομένο εικονοστοιχείο, αν το μέγεθος της κλίσης του είναι κάτω από το Τ1, τότε αυτή τίθεται ίση με μηδέν. Εάν η κλίση είναι τουλάχιστον Τ₂, το εικονοστοιχείο παραμένει ως έχει. Εάν η κλίση βρίσκεται μεταξύ Τ1 και Τ2, τότε η τιμή κλίσης τίθεται ίση με μηδέν, εκτός αν υπάρχει μια διαδρομή από αυτό το εικονοστοιχείο σε ένα άλλο, με κλίση μεγαλύτερη από Τ₂. Η διαδρομή πρέπει να αποτελείται εξ ολοκλήρου από εικονοστοιχεία που να έχουν κλίση τουλάχιστον ίση με την Τ₁. Η διαδρομή μπορεί να περιλάβει και τις διαγώνιες κινήσεις όπως καθορίζεται από την 8συνδετικότητα. Η διαδικασία της κατωφλίωσης συνεχίζεται έως ότου εξαντληθούν όλα τα εικονοστοιχεία της εικόνας. Εν τέλει, μετά την κατωφλίωση προκύπτει η τελική εικόνα με συνεχείς ακμές, η οποία είναι και σε δυαδική μορφή.

Σημαντικό πλεονέκτημα του ανιχνευτή ακμών που προτάθηκε από τον Canny, αποτελεί η συμπεριφορά του παρουσίας Λευκού Γκαουσιανού θορύβου. Στο Σχήμα που ακολουθεί

εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο του Canny σε μια εικόνα με αρκετή ποσότητα Λευκού θορύβου και παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα είναι σχεδόν ταυτόσημο με την «καθαρή» αρχική εικόνα.





Σχήμα 3.20: Συμπεριφορά του Canny Edge Detector με τυπική απόκλιση σ, του Γκαουσιανού φίλτρου ίση με 2, παρουσία Λευκού Γκαουσιανού θορύβου.

Η μέθοδος του Canny αποτελεί ίσως, τον πλέον ισχυρό και ευρύτατα χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο εξαγωγής ακμών. Όμως, έχει ορισμένες μεταβλητές που πρέπει να ορισθούν ανάλογα με την εκάστοτε περίσταση : το μέγεθος του παραθύρου για το Gaussian φίλτρο, η τυπική απόκλιση σ και τα κατώφλια T_1 και T_2 για την κατωφλίωση υστέρησης.

Τέλος, στο Σχήμα 3.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στα διάφορα στάδια της εφαρμογής του αλγορίθμου του Canny, ενώ στο Σχήμα 3.22 δίδονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου, για διάφορες τιμές των παραμέτρων του.

Η διαφορά στο αποτέλεσμα του αλγόριθμου, για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης του Γκαουσιανού φίλτρου, οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται η τιμή της τυπικής απόκλισης, τόσο περισσότερο η εικόνα ομαλοποιείται και ακμές με πλάτος μικρότερο από αυτό του πυρήνα της συνέλιξης, ουσιαστικά εξαλείφονται από το φίλτρο.



(٤)

Σχήμα 3.21: (α) Αρχική εικόνα. (β) Φιλτράρισμα της αρχικής εικόνας με Gaussian φίλτρο με σ=1. (γ) Το πλάτος της κλίσης. (δ) Καταστολή Μη-μεγίστων τιμών. (ε) Κατωφλίωση υστέρησης με T1=5 και T2=10.



Σχήμα 3.22: Ανίχνευση ακμών με τη μέθοδο του Canny, για διαφορετικά σετ παραμέτρων τυπικής απόκλισης-κατωφλίων.

3.6 Διασύνδεση ακμών

Οι ακμές που ανιχνεύονται με τεχνικές προσδιορισμού ακμών, σπάνια χαρακτηρίζουν πλήρως το περίγραμμα κάποιου φυσικού αντικειμένου της επεξεργαζόμενης εικόνας. Εξ αιτίας θορύβου που μπορεί τόσο να ενυπάρχει στην εικόνα από την πρόσληψή της (μη ομοιόμορφος φωτισμός, ατέλειες οπτικών) αλλά και να υπεισέρχεται κατά την μετάδοση του σήματος, οι ακμές που αντιστοιχούν σε φυσικά όρια εμφανίζονται πολλές φορές «σπασμένες». Η σύνδεση των ακμών αποτελεί μια προσπάθεια για να δομηθούν με καλύτερο τρόπο οι γειτνιάζουσες ακμές, έτσι που να αποτελούν συνεχείς γραμμές.

Αρχικά, οι τιμές της κατεύθυνσης των gradient των ακμών, στρογγυλοποιούνται ώστε να αποδοθούν σε μία εκ των γωνιών των τεσσάρων κυρίων κατευθύνσεων (0°, 45°, 90°, 135°). Αν η τιμή της γωνίας είναι μεγαλύτερη από -22.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση με 22.5° ή μεγαλύτερη από 157.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση από -157.5°, τότε αποδίδουμε στη γωνία την τιμή 0°. Αν η τιμή της γωνίας είναι μεγαλύτερη από 22.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση από -12,5°, τότε αποδίδουμε στη γωνία την τιμή 0°. Αν η τιμή της γωνίας είναι μεγαλύτερη από 22.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση από -112,5°, τότε αποδίδουμε στη γωνία την τιμή 45°. Στην περίπτωση που η τιμή της γωνίας είναι μεγαλύτερη από 67.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση με 112.5° ή μεγαλύτερη από -112,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η ίση από -112,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η από 67.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση με 112.5° ή μεγαλύτερη από -112,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η ίση από -112,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η ίση από -67.5° και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση με 112.5° ή μεγαλύτερη από -112,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η ίση από -67.5° η τότε αποδίδουμε στη γωνία την τιμή της γωνίας είναι μεγαλύτερη από -12,5° και ταυτόχρονα μικρότερη η ίση από -67.5° η τότε αποδίδουμε στη γωνία την τιμή 135°.



Σχήμα 3.23: Στρογγυλοποίηση των γωνιών των gradient, ώστε να αποδοθούν στις γωνίες των τεσσάρων κυρίων κατευθύνσεων (οριζόντια, κατακόρυφη και δύο διαγώνιες), για ευκολότερη αναζήτηση των γειτνιαζουσών ακμών.

Αρχικά, ορίζεται ένα κατώφλι απόστασης T pixels, με βάση το οποίο θα γίνει η αναζήτηση των γειτνιαζουσών ακμών. Ορίζουμε, δηλαδή, το μέγεθος της γειτονιάς αναζήτησης. Κατόπιν,
ξεκινώντας από ένα εικονοστοιχείο (x,y), ελέγχεται η τιμή της στρογγυλοποιημένης γωνίας του gradient του. Εάν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 0 μοίρες, η αναζήτηση των ακμών γίνεται για T pixels δυτικά και T pixels ανατολικά του (x,y). Αν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 90 μοίρες, η αναζήτηση των ακμών γίνεται για T pixels νότια του (x,y). Αν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 90 μοίρες, η αναζήτηση των ακμών γίνεται για T pixels βόρεια και T pixels νότια του (x,y). Αν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 45 μοίρες, η αναζήτηση των ακμών γίνεται για T pixels βορειοανατολικά και T pixels νοτιοδυτικά του (x,y). Τέλος, αν η στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient είναι 135 μοίρες, η αναζήτηση των ακμών γίνεται για T pixels βορειοδυτικά και T pixels νοτιοανατολικά του (x,y). Στο επόμενο βήμα, καθορίζονται τα κριτήρια για τη διασύνδεση των ακμών. Συγκεκριμένα, καθορίζεται ότι το εικονοστοιχείο (x',y'), που βρίσκεται σε απόσταση T τουλάχιστον pixels από το εικονοστοιχείο (x,y), στην κατεύθυνση που ορίζει το gradient του (x,y), μπορεί να θεωρηθεί ως συνέχεια του (x,y), εάν έχει την ίδια τιμή της στρογγυλοποιημένης γωνίας του gradient του (x,y), και εάν ισχύει :

$$\left\|\nabla f(\mathbf{x},\mathbf{y})\right| - \left|\nabla f(\mathbf{x}',\mathbf{y}')\right\| \le T_{a}$$
(3.26)

,αν διαφέρουν δηλαδή, οι τιμές του μέτρου των gradient των δύο εικονοστοιχείων το πολύ μέχρι Τ_a. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία της εικόνας, έως ότου χαρακτηριστούν πλήρως τα περιγράμματα των φυσικών αντικειμένων της επεξεργαζόμενης εικόνας. Στο <u>Σχήμα 3.24</u>, γίνεται μια γραφική αναπαράσταση της παραπάνω διαδικασίας, σε τμήμα δυαδικής εικόνας.



Σχήμα 3.24: Αναζήτηση μη συνδεδεμένων γειτνιαζουσών ακμών σε τμήμα δυαδικής εικόνας.

H στρογγυλοποιημένη τιμή της γωνίας του gradient, του εικονοστοιχείου A είναι ίση με 135°. Το κατώφλι αναζήτησης ορίστηκε ως T=3 pixels και το κατώφλι T_a=20. Συνεπώς, για τη διασύνδεση του εικονοστοιχείου A με τις πιθανές γειτονικές του ακμές, ελέγχονται 3 pixels βορειοδυτικά και 3 pixels νοτιοανατολικά του A. Οι ακμές που βρίσκονται μέσα στη γειτονιά αναζήτησης, πληρούν τα κριτήρια διασύνδεσης, καθώς οι στρογγυλοποιημένες τιμές της γωνίας του gradient των δύο ακμών, είναι ίσες με 135° και η διαφορά των πλατών των ακμών με το πλάτος της ακμής A, δεν ξεπερνά το κατώφλι T_a (157-172) ≤ T_a και 157-172| ≤ T_a).



Σχήμα 3.25: (α) Grayscale εικόνα. (β) Οριζόντια συνιστώσα του gradient των ακμών. (γ) Κατακόρυφη συνιστώσα του gradient των ακμών. (δ) Διασυνδεδεμένες ακμές. Η τιμή του κατωφλίου αναζήτησης Τ ορίστηκε ίση με 3, ενώ αυτή του κατωφλίου Τ_a ίση με 25.

κεφαλαίο 4. ΑΝΑλύΣΗ SOFTWARE

Πως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την ταχύτατη και αποτελεσματική δισδιάστατη αποτύπωση αρχαιολογικών μνημείων, αποτελεί τον κύριο στόχο της παρούσης εργασίας. Ο συγκεκριμένος σκοπός επετεύχθη με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών και αλγορίθμων, που βασίζονται στην αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνας και στη μηχανική όραση, οι οποίοι υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Matlab R2010b της εταιρείας MathWorks. Το Matlab,αποτελεί ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προγραμματισμού και ταυτόχρονα μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού. Το συγκεκριμένο περιβάλλον επιλέχτηκε μεταξύ άλλων, λόγω των τεραστίων γραφικών δυνατοτήτων που διαθέτει, της ευκολίας καθώς και της ταχύτητας υλοποίησης αλγορίθμων και της διαθεσιμότητας μιας πληθώρας έτοιμων διαδικασιών, μέσω των toolboxes που έχει στην κατοχή του. Στη συγκεκριμένη ενότητα, γίνεται μια εκτενής ανάλυση του τεχνικού κομματιού της εργασίας, του software, το οποίο συντάχθηκε για την εφαρμογή των αλγορίθμων, πάνω σε μια σειρά ορθοφωτογραφιών.

Η γενική φιλοσοφία της μεθοδολογίας που υλοποιήθηκε είναι η εξής: Στην είσοδο του συστήματος, εισάγεται μια RGB ορθοφωτογραφία και μετατρέπεται σε μια κλίμακας του γκρι εικόνα, 256 σταθμών κβάντισης. Η μετατροπή αυτή λαμβάνει χώρα, λόγω του γεγονότος ότι η χρωματική πληροφορία της εικόνας, σε αντίθεση με την ένταση φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία εισόδου για τις τεχνικές κατάτμησης και αναγνώρισης των ευθυγράμμων τμημάτων και των ακμών, που θα ακολουθήσουν. Στη συνέχεια η grayscale εικόνα, μετατρέπεται σε δυαδική. Η δυαδική μετατροπή αποτελεί βασικό στοιχείο των συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, διότι μία βέλτιστη δυαδική μετατροπή αποτελεί τη βάση για την επίτευξη της σωστής αναγνώρισης αντικειμένων και της περαιτέρω εξαγωγής των χαρακτηριστικών τους. Για το λόγο αυτό, επιλέχτηκε η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu, η οποία υπολογίζει το βέλτιστο κατώφλι, το οποίο μεγιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ επιπέδων γκρι των δύο κλάσεων (κλάση των αντικειμένων ενδιαφέροντος και κλάση του φόντου) και ελαχιστοποιεί την διακύμανση μεταξύ των επιπέδων της ίδιας κλάσης, με συνέπεια τον «σφικτό» διαχωρισμό των κλάσεων. Επιπροσθέτως, η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαφορετικά δεδομένα κατανομών του ιστογράμματος, κάτι που την καθιστά μια αρκετά καθολική λύση στο πρόβλημα της τμηματοποίησης της εικόνας. Το επόμενο κατά σειρά βήμα έγκειται στην επεξεργασία της δυαδικής εικόνας, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών, ώστε να αφαιρεθούν οι μικρές οπές της εικόνας και να ενωθούν τα μικρά γειτονικά αντικείμενα. Έτσι, υλοποιούνται 10 διαδοχικά opening και στη συνέχεια 10 διαδοχικά closing, για να απομακρυνθεί ο ανεπιθύμητος «θόρυβος» από την εικόνα, πράξη η οποία βελτιώνει την ακρίβεια εντοπισμού των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Στη συνέχεια, με χρήση του μετασχηματισμού Hough, γίνεται ο εντοπισμός των ευθυγράμμων τμημάτων, των ορίων δηλαδή, των περιοχών ενδιαφέροντος. Κύρια πλεονεκτήματα του μετασχηματισμού Hough αποτελούν η ταχύτητα και η ακρίβεια εντοπισμού των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Κατόπιν, ενώνονται όλα τα οριζόντια ευθύγραμμα τμήματα, που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο i και προκύπτει μια ενιαία ευθεία σε κάθε επίπεδο και επεκτείνονται και κάποια από τα κατακόρυφα, με σκοπό να προκύψει ένα είδος grid. Τέλος, τα διαμορφωμένα ευθύγραμμα τμήματα, σχεδιάζονται πάνω στη grayscale εικόνα, ώστε να επαληθευτεί ότι τα συγκεκριμένα τμήμα, αντιστοιχούν στα πραγματικά περιγράμματα των περιοχών ενδιαφέροντος. Κατόπιν, γίνεται μια στοχευμένη αναζήτηση ακμών, γύρω από τα ευθύγραμμα τμήματα που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Ανοίγεται ένα παράθυρό γύρω από το κάθε ευθύγραμμο τμήμα, με συνολικό μήκος όσο το μήκος του τμήματος και πλάτος 10 pixels (5 pixels πάνω από το ευθύγραμμο τμήμα και 5 pixels κάτω) και μέσα σε αυτό πραγματοποιείται η αναζήτηση ακμών στη grayscale εικόνας, με τον αλγόριθμο του Canny. Η

επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου, έγκειται στο ότι ο αλγόριθμος του Canny, αποτελεί μια βέλτιστη τεχνική ανίχνευσης και δημιουργίας ακμών. Ανιχνεύονται με μεγάλη πιθανότητα ακμές όταν αυτές πραγματικά υπάρχουν, δεν αναγνωρίζονται ως σημεία ακμών, σημεία που δεν ανήκουν σε ακμές και οι ακμές που ανιχνεύονται είναι στη σωστή χωρικά θέση, πολύ κοντά προς τις πραγματικές ακμές. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιτυγχάνει επίσης, μια λέπτυνση των ακμών. Οι ακμές που εξήχθησαν με τη μέθοδο του Canny, εμφανίστηκαν μη-συνεχείς ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο. Για το λόγο αυτό, λαμβάνει χώρα η διαδικασία διασύνδεσης των ακμών, για να δομηθούν με καλύτερο τρόπο οι γειτνιάζουσες ακμές, έτσι ώστε να αποτελούν συνεχείς γραμμές. Το αποτέλεσμα του edge linking, αποτελεί συνάμα, το εξαγόμενο αποτέλεσμα του συστήματος.

4.1 Μετατροπή RGB εικόνας σε grayscale

Στην είσοδο του συστήματος, εισάγεται μια RGB ορθοφωτογραφία και αφού διαβαστεί μέσω της συνάρτησης **imread**, μετατρέπεται σε μια κλίμακας του γκρι (grayscale) εικόνα, 256 σταθμών κβάντισης. Η μετατροπή αυτή λαμβάνει χώρα, λόγω του γεγονότος ότι η χρωματική πληροφορία της εικόνας, σε αντίθεση με την ένταση φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία εισόδου για τις τεχνικές κατάτμησης και αναγνώρισης των ευθυγράμμων τμημάτων και των ακμών, που θα ακολουθήσουν. Δημιουργείται συνεπώς, ένας δισδιάστατος πίνακας δεδομένων, μέσω της συνάρτησης **rgb2gray**, του οποίου οι τιμές των στοιχείων αναπαριστούν την ένταση της φωτεινότητας του κάθε pixel της ορθοφωτογραφίας. Οι τιμές των pixels αντιστοιχούν σε διάφορες εντάσεις φωτεινότητας (επίπεδα του γκρι), όπου η τιμή 0 αναπαριστά το μαύρο και η τιμή 255 το λευκό.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής των δύο αρχικών σταδίων του συστήματος.

RGB Orthophotograph



Σχήμα 4.2: Μετατροπή της RGB ορθοφωτογραφίας σε κλίμακας - του - γκρι εικόνα των 8 bits (256 σταθμών κβάντισης).

4.2 Δυαδικοποίηση grayscale εικόνας

Η δυαδική μετατροπή (binarization) αποτελεί το επόμενο βήμα στη ροή του συστήματος και αναφέρεται στην μετατροπή των grayscale εικόνων σε ασπρόμαυρες. Η δυαδική μετατροπή αποτελεί βασικό στοιχείο των συστημάτων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, διότι μία βέλτιστη δυαδική μετατροπή αποτελεί τη βάση για την επίτευξη της σωστής αναγνώρισης αντικειμένων και της περαιτέρω εξαγωγής των χαρακτηριστικών τους. Στο παρόν βήμα, δημιουργείται το ιστόγραμμα της grayscale εικόνας, πάνω στο οποίο ορίζεται ένα απόλυτο κατώφλι Τ. Ακολούθως, μπορούμε να διαχωρίσουμε την αρχική grayscale εικόνα και να τη μετατρέψουμε σε δυαδική, σύμφωνα με τη Σχέση (3.3). Στην τελική δυαδική εικόνα που θα προκύψει, τα αντικείμενα ενδιαφέροντος, έχουν εικονοστοιχεία με μηδενικές τιμές, οι οποίες αντιστοιχούν στο λευκό.



Σχήμα 4.3: Ιστόγραμμα της εικόνας του Σχήματος 4.2.

Ως περιγραφέντα στοιχεία του ιστογράμματος συχνότητας τιμών, χρησιμοποιούνται οι μονοδιάστατες κεντρικές ροπές (moments). Η k τάξεως κεντρική ροπή, ορίζεται ως:

$$\mu_{k} = \sum_{i=1}^{L} (i - m)^{k} \times p(i) \qquad (4.1)$$

, όπου m η αναμενόμενη τιμή των επιπέδων γκρι της εικόνας και p(i) η συχνότητα εμφάνισης του επιπέδου φωτεινότητας i στην εικόνα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, παρουσιάζουν οι κεντρικές ροπές τρίτης και τέταρτης τάξεως. Η μονοδιάστατη κεντρική ροπή τρίτης τάξεως (μ3) είναι γενικότερα γνωστή ως ασυμμετρία (skewness) και αποτελεί ένα μέτρο της συμμετρίας του ιστογράμματος. Με άλλα λόγια, προσδιορίζει πόσο και προς ποιά κατεύθυνση αποκλίνει η κατανομή από την πλήρως συμμετρική κατανομή. Σημειώνεται επίσης, ότι η ασυμμετρία μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Θετικά ασύμμετρη ονομάζεται η κατανομή, η οποία παρουσιάζει εξόγκωση προς τα αριστερά και επιμήκυνση του άκρου της, που αντιστοιχεί στις μεγαλύτερες τιμές του χαρακτηριστικού. Στη συγκεκριμένη κατανομή, η μεγάλη συγκέντρωση των παρατηρήσεων βρίσκεται στις μικρές τιμές της μεταβλητής. Αντίθετα, αρνητικά ασύμμετρη ονομάζεται η κατανομή, η οποία παρουσιάζει εξόγκωση προς τα δεξιά και επιμήκυνση του άκρου της που αντιστοιχεί στις μικρότερες τιμές του χαρακτηριστικού. Στην περίπτωση αυτή, η μεγάλη συγκέντρωση των παρατηρήσεων βρίσκεται στις μεγάλες τιμές της μεταβλητής. Η μονοδιάστατη κεντρική ροπή τέταρτης τάξεως (μ₄) είναι γνωστή ως κύρτωση (kurtosis) και αποτελεί μέτρο της οξύτητας της κορυφής της κατανομής. Ιστόγραμμα περισσότερο πεπλατυσμένο από αυτό της Γκαουσιανής κατανομής (kurtosis' coefficient = 3), καλείται πλατύκυρτο (kurtosis' coefficient > 3). Αντίθετα, όταν το ιστόγραμμα είναι πιο λεπτό από το αντίστοιχο της Γκαουσιανής, καλείται λεπτόκυρτο (kurtosis' coefficient < 3). Ο συντελεστής ασυμμετρίας ισούται με την τιμή της τρίτης ροπής, διαιρεμένη με τον κύβο της τυπικής απόκλισης της κατανομής. Αντίστοιχα, ο συντελεστής κύρτωσης ισούται με την τιμή της τέταρτης ροπής, διαιρεμένη με την τέταρτη δύναμη της τυπικής απόκλισης της κατανομής.



Σχήμα 4.4: Επίδραση των συντελεστών ασυμμετρίας και κύρτωσης.

Παρατηρούμε πώς το ιστόγραμμα της εικόνας του Σχήματος 4.2, παρουσιάζει μια αρνητική ασυμμετρία και μια κύρτωση, καθώς εμφανίζεται μια εξόγκωση του ιστογράμματος προς τα δεξιά ταυτόχρονα με μια «ουρά» προς τα αριστερά και μια αυξημένη οξύτητα της κορυφής της κατανομής. Ο υπολογισμός των συντελεστών της τρίτης και τέταρτης μονοδιάστατης κεντρικής ροπής του ιστογράμματος επιβεβαιώνει την οπτική αυτή παρατήρηση.

Για την κατωφλίωση των ιστογραμμάτων του συγκεκριμένου τύπου, συνήθως εργαζόμαστε ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία: Αρχικά, εντοπίζεται η κορυφή (peak) της κατανομής και παρατηρούμε σε ποιο επίπεδο φωτεινότητας αντιστοιχεί (i_{peak}). Στη συνέχεια αναζητείται το επίπεδο φωτεινότητας με τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης (i_{min}) στο τμήμα εκείνο του

ιστογράμματος, στο οποίο η κατανομή παρουσιάζει μια εξόγκωση. Αφού εντοπιστεί, υπολογίζεται η απόλυτη απόστασή του (d), από το επίπεδο φωτεινότητας στο οποίο αντιστοιχεί η κορυφή του ιστογράμματος.

$$d = \begin{vmatrix} i_{min} - i_{peak} \end{vmatrix}$$
 (4.2)

Ως κατώφλι Τ ορίζουμε την τιμή του επιπέδου εκείνου που βρίσκεται σε απόσταση d από την κορυφή της κατανομής, αντιδιαμετρικά του σημείου στο οποίο εντοπίστηκε το επίπεδο φωτεινότητας με τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης, στο προηγούμενο βήμα. Η συγκεκριμένη μέθοδος συντάχθηκε και υλοποιήθηκε στη συνάρτηση **kurtosis.m**, η οποία δέχεται σαν όρισμα το ιστόγραμμα μιας grayscale εικόνας και επιστρέφει το κατώφλι Τ.



Σχήμα 4.5: Εύρεση απολύτου κατωφλίου ιστογράμματος με τη συνάρτηση kurtosis.m.

Μετά την εφαρμογή της μεθόδου στο ιστόγραμμα του Σχήματος 4.3, το κατώφλι που υπολογίστηκε είναι το T=142. Μπορούμε λοιπόν, να διαχωρίσουμε την αρχική grayscale εικόνα και να τη μετατρέψουμε σε δυαδική, σύμφωνα με τη Σχέση (3.3). Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.



Grayscale Image







- (γ)
- Σχήμα 4.6: Δυαδικοποίηση grayscale εικόνας. (α) Grayscale εικόνα. (β) Κατωφλίωση ιστογράμματος μέσω της συνάρτησης kurtosis.m. (γ) Προκύπτουσα δυαδική εικόνα.

Παρατηρούμε, ότι η εφαρμογή της μεθόδου στη συγκεκριμένη εικόνα, παρουσιάζει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, όμως δε λειτούργησε το ίδιο καλά για τις αρκετές εικόνες που εισήχθηκαν στην είσοδο του συστήματος, λόγω διαφορετικότητας της μορφής των ιστογραμμάτων. Το κατώφλι υπολογιζόταν σε τέτοιο σημείο, ώστε πολλά από τα εικονοστοιχεία ενδιαφέροντος να θεωρούνται εικονοστοιχεία του φόντου. Συνεπώς, έπρεπε να ευρεθεί μια περισσότερο καθολική λύση στο πρόβλημα της τμηματοποίησης της εικόνας. Χρησιμοποιήθηκε τελικά, η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu, η οποία δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαφορετικά δεδομένα εισόδου του συστήματος.

Η εύρεση του κατωφλίου με τη μέθοδο του Otsu, υλοποιήθηκε μέσω της συνάρτησης graythresh της Matlab, η οποία δέχεται σαν όρισμα τη grayscale εικόνα και επιστρέφει το κατώφλι του ιστογράμματος.

TOtsu = graythresh(rgbImage);

Η δυαδικοποίηση της εικόνας, υλοποιήθηκε μέσω της συνάρτησης **im2bw** της Matlab, η οποία δέχεται σαν όρισμα τη grayscale εικόνα και την τιμή του κατωφλίου και επιστρέφει τη δυαδική εικόνα.

binaryImage = im2bw(rgbImage,TOtsu);

Μετά την εφαρμογή της κατωφλίωσης του Otsu στο ιστόγραμμα του Σχήματος 4.3, το κατώφλι που υπολογίστηκε είναι το T=173. Το αποτέλεσμα της δυαδικοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.







Otsu Thresholded Image



Σχήμα 4.7: (α) Grayscale εικόνα. (β) Κατωφλίωση ιστογράμματος μέσω της μεθόδου του Otsu. (γ) Προκύπτουσα δυαδική εικόνα.



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροής του σταδίου δυαδικοποίησης της grayscale εικόνας.

4.3 Εφαρμογή μαθηματικών μορφολογικών τελεστών στη δυαδική εικόνα

Το επόμενο κατά σειρά βήμα έγκειται στην επεξεργασία της δυαδικής εικόνας, μέσω μαθηματικών μορφολογικών τελεστών, ώστε να αφαιρεθούν οι μικρές οπές της εικόνας και να ενωθούν τα μικρά γειτονικά αντικείμενα.

Η μαθηματική μορφολογία αναφέρεται στην μελέτη της γεωμετρίας, της τοπολογίας και της μορφής των αντικειμένων. Αφορά συγκεκριμένες πράξεις, όπου μια εικόνα αλληλεπιδρά με ένα δομικό στοιχείο και μετατρέπεται σε μια απλοποιημένη και λειτουργική μορφή, διατηρώντας τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής της. Στοχεύει, κυρίως, στην βελτίωση της δομής των αντικειμένων (φιλτράρισμα θορύβου, βελτίωση της ποιότητας και απλοποίηση των αντικειμένων, σκελετός, λέπτυνση, πάχυνση της εικόνας, λείανση των περιγραμμάτων) και στην ποσοτική περιγραφή των αντικειμένων (χαρακτηριστικά εμβαδού, περιμέτρου, προβολών). Τα μονοδιάστατα μορφολογικά φίλτρα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο είδος μορφολογίας, είναι ίδια με τα φίλτρα μέγιστης ή ελάχιστης τιμής. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιούν επιπλέον ένα σήμα-συνάρτηση, μήκους όσο και το μήκος του παραθύρου που παρατηρούμε. Το σήμα αυτό καλείται δομικό στοιχείο (structuring element). Το δομικό στοιχείο μπορεί να είναι ένας οποιοσδήποτε πίνακας (διαστάσεων μικρότερων από την αρχική εικόνα) ο οποίος περιλαμβάνει για στοιχεία του μηδέν και μονάδες με τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματίζουν ένα γεωμετρικό σχήμα. Οι περισσότερες μορφολογικές πράξεις μπορούν να οριστούν χρησιμοποιώντας τις δύο βασικές πράξεις οι οποίες είναι η διάβρωση (erosion) και η διαστολή (dilation).

Έστω το αντικείμενο A και το δομικό στοιχείο B. Τότε Bx είναι η μετατροπή του B, ώστε η αρχή του είναι το x. Η διάβρωση της εικόνας A με δομικό στοιχείο B ορίζεται σαν το σύνολο των σημείων x τέτοια ώστε το Bx να περιλαμβάνεται στην εικόνα A:

$$A \odot B = \{ x \colon B x \subseteq A \}$$
 (4.3)

Με βάση το δομικό στοιχείο, κατά την δυαδική διαστολή, υπολογίζεται μια νέα τιμή σε κάθε θέση της αρχικής εικόνας. Η νέα τιμή είναι η μέγιστη τιμή όλων των εικονοστοιχείων στη γειτονιά του αρχικού εικονοστοιχείου. Επομένως, αν έστω ένα από τα γειτονικά εικονοστοιχεία έχει τιμή 1, η νέα τιμή του κεντρικού εικονοστοιχείου θα είναι 1. Η βασική επίδραση του τελεστή erosion, είναι να διαβρώνει τα σύνορα της περιοχής των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στο προσκήνιο της δυαδικής εικόνας (για παράδειγμα τα μαύρα pixels). Αφαιρεί, επίσης, τις πολύ μικρού μεγέθους οπές των αντικειμένων ενδιαφέροντος.

Αντίστοιχα, η διαστολή της εικόνας Α με δομικό στοιχείο Β ορίζεται σαν το σύνολο των σημείων x τέτοια ώστε το Bx και η εικόνα Α έχουν μη κενή τομή:

$$\mathsf{A} \oplus \mathsf{B} = \{ \mathsf{x} : \mathsf{B} \mathsf{x} \cap \mathsf{A} \neq \emptyset \} \qquad (4.4)$$

Κατά την δυαδική συστολή, υπολογίζεται μια νέα τιμή σε κάθε θέση της αρχικής εικόνας, η οποία ισούται με την ελάχιστη τιμή όλων των εικονοστοιχείων στη γειτονιά του αρχικού εικονοστοιχείου. Επομένως, αν έστω ένα από τα γειτονικά εικονοστοιχεία έχει τιμή 0, η νέα τιμή του κεντρικού εικονοστοιχείου θα είναι 0. Η βασική επίδραση του τελεστή dilation, είναι η διεύρυνση των συνόρων της περιοχής των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στο προσκήνιο της δυαδικής εικόνας. Αφαιρεί αντικείμενα, πολύ μικρού μεγέθους και διαγράφει μικρά-στενά εξογκώματα αντικειμένων.

Το <u>Σχήμα 4.9</u> παρουσιάζει μία αναπαράσταση της διαδικασίας του erosion και του dilation μιας δυαδικής εικόνας Α με δομικό στοιχείο Β.



Σχήμα 4.9: Erosion – Dilation. (α) Αρχική δυαδική εικόνα και δομικό στοιχείο. (β) Εφαρμογή δομικού στοιχείου στη διαδική εικόνα. (γ) Αποτέλεσμα της διαδικασίας διάβρωσης (erosion). (δ) Αποτέλεσμα της διαδικασίας διαστολής (dilation).

Δύο άλλες σημαντικές πράξεις της μαθηματικής μορφολογίας είναι το άνοιγμα (opening) και το κλείσιμο (closing). Λείανση του σήματος της εικόνας Α, με τη βοήθεια του δομικού στοιχείου Β και ταυτόχρονη αύξηση του όγκου του, αποτελεί η διαδικασία κλεισίματος (closing) που είναι ένα dilation ακολουθούμενο από ένα erosion.

$$\mathsf{A} \circ \mathsf{B} = (\mathsf{A} \odot \mathsf{B}) \oplus \mathsf{B} \tag{4.5}$$

Επίσης, λείανση του σήματος της εικόνας Α, με τη βοήθεια του δομικού στοιχείου Β και ταυτόχρονη μείωση του όγκου του, αποτελεί η διαδικασία ανοίγματος (opening) που είναι ένα erosion ακολουθούμενο από ένα dilation.

$$A \cdot B = (A \oplus B) \odot B \tag{4.6}$$

Στην πράξη, η διαδικασία closing εξαλείφει όλες τις εσοχές του σήματος στις οποίες δεν μπορεί να εισέλθει το δομικό στοιχείο. Αντίστοιχα το opening εξαλείφει όλες τις εξογκώσεις του σήματος όπου δεν μπορεί να εισέλθει το δομικό στοιχείο.



Σχήμα 4.10: Αποτελέσματα εφαρμογής των μορφολογικών τελεστών Opening και Closing στη δυαδική εικόνα του <u>Σχήματος 4.9.(α)</u>.

Πολύ αποτελεσματικοί μηχανισμοί που απαλύνουν εικόνες μπορούν να δημιουργηθούν με την διαδοχική και επαναλαμβανόμενη χρησιμοποίηση των λειτουργιών του ανοίγματος και του κλεισίματος.

Για μια εικόνα Α και ένα δομικό στοιχείο Β, ορίζουμε τις διαδικασίες Ανοίγματος-Κλεισίματος (Open-Close) και Κλεισίματος- Ανοίγματος (Close-Open) ως εξής:

Open - Close
$$(A,B) = Open \left[Close (A,B), B \right]$$

Close - Open $(A,B) = Close \left[Open (A,B), B \right]$

Αυτές οι λειτουργίες είναι σχετικά όμοιες, όχι όμως μαθηματικά ταυτόσημες. Ο μορφολογικός τελεστής Open-Close τείνει να ενώσει γειτονικά αντικείμενα μεταξύ τους, ενώ ο Close-Open τείνει να ενώσει γειτονικές οπές μεταξύ τους.



Σχήμα 4.11: Αποτέλεσμα εφαρμογής μορφολογικών τελεστών Close-Open και Open-Close.

Οι δυαδικές εικόνες που προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα παρουσιάζουν ασυνέχειες, μικρές οπές, καθώς επίσης και μη συνδεδεμένα γειτονικά αντικείμενα ενδιαφέροντος. Για την ομαλοποίησή τους, εφαρμόστηκε ο τελεστής Open-Close, ο οποίος υλοποιήθηκε στη συνάρτηση openclose.m. Η συνάρτηση δέχεται σαν όρισμα τη δυαδική εικόνα, το δομικό στοιχείο και των αριθμό *i* των διαδοχικών opening και closing που θα λάβουν χώρα. Σαν δομικό στοιχείο χρησιμοποιήθηκε ένα τετράγωνο 3x3, με βάση το οποίο πραγματοποιήθηκαν πρώτα 10 διαδοχικά opening και κατόπιν 10 διαδοχικά closing. Τα closing υλοποιήθηκαν μέσω της συνάρτησης imclose της Matlab, η οποία δέχεται σαν όρισμα μία δυαδική ή μία grayscale εικόνα και το δομικό στοιχείο. Η συγκεκριμένη συνάρτηση εφαρμόζει τους τελεστές erosion και dilation, με το δοθέν δομικό στοιχείο στην εικόνα που διαβάζει, καλώντας αρχικά τη συνάρτηση imerode και κατόπιν τη συνάρτηση imdilate της Matlab. Τέλος, επιστρέφει την closed εικόνα. Αντίστοιχα, τα opening υλοποιήθηκαν μέσω της συνάρτησης imopen της Matlab, η οποία δέχεται ορίσματα ίδια με αυτά της imclose. Η συνάρτηση αυτή εφαρμόζει τους τελεστές dilation και erosion, με το δοθέν δομικό στοιχείο στην εικόνα που διαβάζει, καλώντας πρώτα τη συνάρτηση imdilate και κατόπιν τη συνάρτηση imerode της Matlab. Τέλος, επιστρέφει την opened εικόνα. Συνεπώς, με τη βοήθεια της συνάρτησης openclose.m, απομακρύνεται ο ανεπιθύμητος «θόρυβος» από την εικόνα, πράξη η οποία βελτιώνει την ακρίβεια εντοπισμού των αντικειμένων ενδιαφέροντος.

 $se = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

binaryImage = openclose(binaryImage, se, iterations);



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης openclose.m

Στο <u>Σχήμα 4.13</u> παρουσιάζεται η εφαρμογή του συντελεστή Open-Close, στη δυαδική εικόνα του <u>Σχήματος 4.7</u>, μέσω της συνάρτησης openclose.m. Γίνεται εμφανές ότι, μετά την εφαρμογή των αριθμητικών μορφολογικών τελεστών στη δυαδική εικόνα, ενοποιήθηκαν μικρά γειτονικά αντικείμενα ενδιαφέροντος, αφαιρέθηκαν οι μικρές οπές και γενικότερα απομακρύνθηκε ένα σημαντικό ποσοστό του ανεπιθύμητου θορύβου.



Σχήμα 4.13: Αποτέλεσμα εφαρμογής της συνάρτησης openclose.m στη δυαδική εικόνα του <u>Σχήματος 4.7 (γ)</u>.



Σχήμα 4.14: Διάγραμμα ροής του σταδίου εφαρμογής των μορφολογικών τελεστών στη δυαδική εικόνα.

4.4 Εντοπισμός ευθυγράμμων τμημάτων

Η χρήση του μετασχηματισμού Hough στο σύστημά μας, έγκειται στον εντοπισμό ευθυγράμμων τμημάτων. Ο μετασχηματισμός επεκτείνεται εύκολα και για άλλα γεωμετρικά σχήματα, που μπορούν να περιγραφούν πλήρως από μία παραμετρική εξίσωση. Παρόλο που οι περισσότερες μέθοδοι εντοπισμού σχημάτων σε ψηφιακές εικόνες, μελετούν τις σχέσεις των οπτικών στοιχείων σε γειτονιές της εικόνας, στην περίπτωση του μετασχηματισμού Hough δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη γειτονικών χαρακτηριστικών σημείων στην προς επεξεργασία εικόνα. Συνεπώς, μπορούν να εντοπιστούν και διακεκομμένες γραμμές, γεγονός που θα ήταν αδύνατο να υλοποιηθεί με τη μέθοδο αντιστοίχισης προτύπου. Το κυριότερο πλεονέκτημα του μετασχηματισμού Hough είναι η ταχύτητα εντοπισμού των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, για μια εικόνα μεγέθους n x n και ένα πρότυπο m x m, η πολυπλοκότητα της αντιστοίχισης προτύπου είναι O(n²m²), την ίδια στιγμή που η αντίστοιχη του μετασχηματισμού Hough είναι Ο(nm).

Μέσω της συνάρτησης **houghtrans.m**, αναζητούνται ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία περιγράφονται πλήρως από τις πολικές συντεταγμένες τους, με βάση την Εξίσωση. Αρχικά, κατασκευάζεται, ένας πίνακας συνάθροισης (accumulator array) ίσων διαστάσεων με τον αριθμό των παραμέτρων της εξίσωσης, ο οποίος αποτελεί το βασικό αντικείμενο επεξεργασίας για τον αλγόριθμο εντοπισμού ευθειών. Οι στήλες του accumulator array, αναφέρονται στις τιμές της παραμέτρου ρ, οι οποίες φράσσονται από -δ έως δ, όπου δ=ceil[sqrt(n²+m²)]. Παραδείγματος χάριν, για μια εικόνα διαστάσεων [n,m]=[200,200] κατασκευάζεται ένας πίνακας διαστάσεων [ρ,θ]=[283,360], όπου το βήμα και για τις δύο διαμερίσεις έχει ληφθεί ίσο με τη μονάδα. Τα στοιχεία του accumulator array αρχικοποιούνται με μηδενικές τιμές και το περιεχόμενό τους διαθέτει την έννοια των συσσωρευτικών ψήφων. Στη συνέχεια για κάθε τιμή του θ υπολογίζεται η αντίστοιχη τιμή του ρ, μέσω της εξίσωσης :

 $\rho(\theta) = x \cdot \cos(\theta) + y \cdot \sin(\theta)$ (4.7)

Κάθε εικονοστοιχείο της δυαδικής εικόνας, του οποίου η τιμή ισούται με 1, συγκρίνεται με όλες τις δυνατές ευθείες, εκπεφρασμένες στο παραμετρικό σύστημα συντεταγμένων [ρ-θ] και ελέγχεται σε ποιές από αυτές θα μπορούσε να ανήκει. Κατόπιν, αυξάνεται κατά ένα το περιεχόμενο των αντίστοιχων θέσεων στον συσσωρευτή, των κελιών δηλαδή του πίνακα συνάθροισης, τα οποία περιγράφουν τις ευθείες που θα μπορούσαν να εμπεριέχουν το εν λόγω σημείο. Ουσιαστικά, λαμβάνει χώρα ένα σύστημα ψηφοφορίας, κατά το οποίο κάθε εικονοστοιχείο ενδιαφέροντος συμμετέχει στη διαδικασία επιλογής του μετασχηματισμού που επικρατεί (μέγιστη τιμή) στον πίνακα συνάθροισης.

Ο εντοπισμός των τοπικών μεγίστων στα στοιχεία του συσσωρευτή, αποτελεί το επόμενο βήμα του αλγορίθμου. Με άλλα λόγια, λαμβάνει χώρα ένα είδος στατιστικής επεξεργασίας του περιεχομένου του accumulator, ώστε να προκύψουν οι θέσεις (ευθείες) που ψηφίστηκαν από τα περισσότερα σημεία του επιπέδου της εικόνας και αντιστοιχούν με μεγάλη πιθανότητα, σε πραγματικά ευθύγραμμα τμήματα στην εικόνα εισόδου. Μετά το πέρας του συγκεκριμένου βήματος, υπολογίζονται και επιστρέφονται οι αντίστοιχες καρτεσιανές συντεταγμένες του συνόλου των τοπικών μεγίστων (ρ,θ) του πίνακα συνάθροισης, που αντιστοιχούν στις επικρατέστερες ευθείες της εικόνας.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα ροής της συνάρτησης houghtrans.m.

Η συνάρτηση houghtrans.m δέχεται σαν όρισμα τη δυαδική εικόνα, στην οποία αναζητούνται τα ευθύγραμμα τμήματα και ένα κατώφλι, το οποίο αναφέρεται στο magnitude του gradient των σημείων ενδιαφέροντος, ώστε να κρατηθούν μόνο οι ισχυρές ακμές κατά τη διαδικασία της αναζήτησης. Η συνάρτηση επιστρέφει δύο vectors, ο ένας εκ των οποίων περιέχει τις τιμές της

παραμέτρου ρ, ορισμένες στο διάστημα [-δ,δ] και ο δεύτερος, τις τιμές της παραμέτρου θ, οι οποίες φράσσονται από 0 έως π. Επιστέφεται επίσης, ο τελικός πίνακας συνάθροισης (Accumulator Array), ένας πίνακας n x 2, του οποίου κάθε γραμμή αναπαριστά το ζεύγος των (ρ,θ) τιμών κάθε εντοπισμένου ευθύγραμμου τμήματος και ένας πίνακας n x 4, κάθε γραμμή του οποίου, αναπαριστά τις καρτεσιανές συντεταγμένες του σημείου αρχής (x₁, y₁) και του σημείου πέρατος (x₂, y₂), κάθε εντοπισμένου ευθύγραμμου τμήματος.

[accumulator, rhoAxis, thetaAxis, linesRhoTheta, linesXy] =

houghtrans(binaryImage, magnitudeThreshold);





Σχήμα 4.16: Ο πίνακας συνάθροισης (accumulator array) της εικόνας του Σχήματος 4.13.

Στη συνέχεια, μέσω της void συνάρτησης **drawlines.m**, σχεδιάζονται πάνω στην αρχική δυαδική εικόνα, όλα τα ευθύγραμμα τμήματα που εντοπίστηκαν από την houghtrans.m. H drawlines, δέχεται ως όρισμα τον πίνακα linesXy, των καρτεσιανών συντεταγμένων των σημείων αρχής και πέρατος κάθε εντοπισμένου ευθύγραμμου τμήματος, ο οποίος επιστρέφεται από την houghtrans (x₁, x₂, y₁, y₂)



Image with Line Segments Detected

Σχήμα 4.17: Εντοπισμένα ευθύγραμμα τμήματα στην εικόνα του Σχήματος 4.13.

Κατόπιν, διαχωρίζουμε τα οριζόντια από τα κατακόρυφα ευθύγραμμα τμήματα. Τα οριζόντια ευθύγραμμα τμήματα που βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο i συνδέονται μεταξύ τους. Ενώνονται δηλαδή τα τμήματα, τα οποία έχουν τις ίδιες y καρτεσιανές συντεταγμένες και προκύπτει μια ενιαία ευθεία, την αρχή της οποίας αποτελεί το σημείο αρχής του πρώτου ευθυγράμμου τμήματος του επιπέδου i και το τέλος της οριοθετείται από το σημείο πέρατος του τελευταίου ευθυγράμμου τμήματος, του εν λόγω επιπέδου.

Στο επόμενο βήμα, υπολογίζεται το ολικό μήκος κάθε νέας προκύπτουσας ευθείας γραμμής και διαχωρίζεται ο χώρος των μηκών τους σε τρεις κατηγορίες μεγέθους, με βάση δύο απόλυτα κατώφλια, T₁ και T₂. Εάν το μήκος της ευθείας είναι μεγαλύτερο ή ίσο του κατωφλίου T₂, το οποίο ορίστηκε ίσο με 100 pixels, η γραμμή θεωρείται μεγάλου μήκους και παρουσιάζεται με μπλε χρώμα. Εάν το μήκος της ευθείας είναι μικρότερο της τιμής του κατωφλίου T₁, το οποίο ορίστηκε ίσο με 10 pixels, η γραμμή θεωρείται μικρότερο της τιμής του κατωφλίου T₁, το οποίο ορίστηκε ίσο με 10 pixels, η γραμμή θεωρείται μικρότερο της τιμής του κατωφλίου T₁, το οποίο ορίστηκε ίσο με 10 pixels, η γραμμή θεωρείται μικρού μήκους και παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα. Εάν το μήκος της ευθείας βρίσκεται εντός του διαστήματος, το οποίο ορίζεται εκ των δύο κατωφλίων, τότε η γραμμή θεωρείται μεσαίου μεγέθους και παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα. Τέλος, οι νέες ευθείες επεκτείνονται ώστε να καταλαμβάνουν ολόκληρο το μήκος του χαριμουργεί ένα είδος οριζόντιου grid.

Όσον αφορά τα κατακόρυφα ευθύγραμμα τμήματα, υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των οριζοντίων επιπέδων, μέσα στα οποία εμπεριέχονται. Αν το μήκος του κατακόρυφου ευθύγραμμου τμήματος είναι μεγαλύτερο ή ίσο του 30% της απόστασης που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, τότε το συγκεκριμένο τμήμα επεκτείνεται ώστε να καταλαμβάνει ολόκληρο το μήκος του επιπέδου στο οποίο αυτό περιλαμβάνεται. Τα πολύ μικρά κατακόρυφα τμήματα απομακρύνονται από τον συγκεντρωτικό πίνακα των κατακόρυφων τμημάτων.

Τέλος, τα διαμορφωμένα ευθύγραμμα τμήματα, σχεδιάζονται πάνω στη grayscale εικόνα, ώστε να επαληθευτεί ότι τα συγκεκριμένα τμήμα, αντιστοιχούν στα πραγματικά περιγράμματα των περιοχών ενδιαφέροντος.

A DESCRIPTION OF THE OWNER OF THE	and the second	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	Salar Alexand		1 la .
		•	and the second		
and a		1010 S		and the second	
1 mile		-		- 1	
C. C. Salar	1. 15 11		A DEMAN		tion Para 1
File Real	Ner Xal		CH 2	18 sector in	ARK CAR
	to the	State 24	· Cont	-	
(F)	(b) inter	1833 have	- Kalant	a por	30
	-		THE SEA		
NAMES AND ADDRESS	and the second statement of the se	Number of Street of Street, or other Str	CONTRACTOR AND A CONTRACTOR OF A DESCRIPTION OF A DESCRIPANTA DESCRIPTION OF A DESCRIPTION OF A DESCRIPTION	A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PRO	A DAMAGE AND A DAM
North Control of States	all the second	N ST NOTING	And and Mark and and	THE REAL PROPERTY IN	- WERE AREA
Cilling 1657			A CONTRACTOR		10
alina ista Constantia					
And States					

Grayscale Image with Line Segments Detected

Σχήμα 4.18: Σχεδίαση των διαμορφωμένων ευθύγραμμων τμημάτων πάνω στη grayscale εικόνα του Σχήματος 4.2.



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ροής του σταδίου εντοπισμού των ευθυγράμμων τμημάτων.

4.5 Ανίχνευση ακμών

Στο συγκεκριμένο στάδιο ροής, γίνεται μια στοχευμένη αναζήτηση των ακμών, γύρω από τα ευθύγραμμα τμήματα που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο βήμα. Ανοίγεται ένα παράθυρό γύρω από το κάθε ευθύγραμμο τμήμα, με συνολικό μήκος όσο το μήκος του τμήματος και πλάτος 10 pixels (5 pixels πάνω από το ευθύγραμμο τμήμα και 5 pixels κάτω). Μέσα σε αυτό πραγματοποιείται η αναζήτηση ακμών στη grayscale εικόνας, με τον αλγόριθμο του Canny, μέσω της συνάρτησης **edge**, που διαθέτει η Matlab.



Σχήμα 4.20: Απεικόνιση παραθύρων στοχευόμενης αναζήτησης των ακμών (κόκκινο), σε τμήμα της grayscale εικόνας με εντοπισμένα ευθύγραμμα τμήματα (μπλε).

edges = edge (grayscaleImage, 'canny', thresh, sigma);

Σαν πρώτο όρισμα εισάγεται η grayscale εικόνα, στην οποία θα διεξαχθεί η ανίχνευση ακμών.

Το δεύτερο όρισμα, αναφέρεται στη μέθοδο ανίχνευσης, η οποία θα εφαρμοστεί και λαμβάνει μία εκ των τιμών του διαστήματος m = { 'sobel', 'prewitt', 'roberts', 'log', 'zerocross', 'canny' }.

Το όρισμα thresh, είναι ένας vector δύο θέσεων, στον οποίο αποθηκεύονται οι τιμές των κατωφλίων T₁ και T₂. Στην περίπτωση που το όρισμα αφεθεί κενό ([]), η συνάρτηση edge υπολογίζει αυτόματα τις τιμές των κατωφλίων. Εάν το όρισμα είναι μια απόλυτη τιμή αντί για vector, η τιμή αυτή εναποτίθεται στο υψηλό κατώφλι T₂ και το χαμηλό κατώφλι λαμβάνει την τιμή T₁=0.4* T₂. Στην περίπτωση του συστήματός μας, το όρισμα thresh αφέθηκε κενό.

Το όρισμα sigma, αναφέρεται στην τυπική απόκλιση του Γκαουσιανού φίλτρου. Στην περίπτωση του συστήματός μας, το sigma ορίζεται ίσο με τη μονάδα. Η αναμενόμενη τιμή του φίλτρου είναι ίση με το μηδέν.



Σχήμα 4.21: Canny Edge Detector.



Σχήμα 4.22: Αποτέλεσμα ανίχνευσης ακμών, με τη μέθοδο του Canny, στην εικόνα του <u>Σχήματος 4.2</u>.



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα ροής του σταδίου ανίχνευσης ακμών.

4.6 Διασύνδεση ακμών

Οι ακμές που εξήχθησαν με τη μέθοδο του Canny, εμφανίστηκαν μη-συνεχείς ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο. Για το λόγο αυτό, έγινε μια προσπάθεια για να δομηθούν με καλύτερο τρόπο οι γειτνιάζουσες ακμές, έτσι ώστε να αποτελούν συνεχείς γραμμές. Αρχικά, διαγράφονται οι οριζόντιες γραμμές, μεταξύ των οποίων δεν περιέχεται κάποια κατακόρυφη, διότι δεν εντοπίζεται κάποιος πλίνθος, εντός των ορίων που αυτές δημιουργούν. Κατόπιν υλοποιείται η διασύνδεση των υπολοίπων ακμών με τη μέθοδο που περιγράφθηκε στην παράγραφο 3.6, μέσω της συνάρτησης **edgelink.m**. Η συνάρτηση δέχεται σαν όρισμα το σύνολο των ακμών και ένα κατώφλι Τ, με βάση το οποίο γίνεται η σύγκριση της σχέσης 3.26 και επιστρέφει τις συνδεδεμένες ακμές. Η τιμή του κατωφλίου αναζήτησης Τ ορίστηκε ίση με 5 και η τιμή του κατωφλίου Τ_a ίση με 20. Σημειώνεται ότι το αποτέλεσμα του edge linking, αποτελεί συνάμα, το εξαγόμενο αποτέλεσμα του συστήματος.

linkedEdges = **edgelink** (edges, thresh);





Σχήμα 4.24: Αποτέλεσμα διασύνδεσης ακμών της εικόνας του Σχήματος 4.22.



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα ροής του τελικού σταδίου του συστήματος.

Τέλος, με βάση την παραθύρωση που δημιουργήθηκε στα προηγούμενα βήματα (βλέπε Σχήμα 4.18), υπολογίζονται το μήκος, το πλάτος καθώς και η χωρητικότητα του κάθε εντοπιζόμενου πλίνθου σε pixels, μέσω της συνάρτησης **metrics.m**, η οποία εφαρμόζεται πάνω σε κάθε δεδομένο παράθυρο της τελικής δυαδικής εικόνας.

[x, y, area] = metrics (window);

κεφαλαίο 5. Παρουσίαση αποτελεσματών

φού το σύστημα διαβάσει μεμονωμένες ψηφιακές εικόνες ή κάποιον φάκελο εικόνων από συγκεκριμένο path (στο οποίο συν τοις άλλοις, ευρίσκονται όλα τα .m αρχεία), εξαγάγει τις τελικές δυαδικές εικόνες με τις διασυνδεμένες ακμές. Στη συγκεκριμένη ενότητα, πέραν του τελικού αποτελέσματος, παρουσιάζονται και κάποια από τα ενδιάμεσα, όπως αυτά παράγονται μέσα στις εσωτερικές βαθμίδες του συστήματος. Κατά συνέπεια, σε κάθε σειρά αποτελεσμάτων i, παρουσιάζεται :

- (α) η RGB εικόνα που εισάγεται στο σύστημα.
- (β) η αντίστοιχη grayscale εικόνα.
- (γ) το ιστόγραμμα της grayscale εικόνας, με σημειωμένο το κατώφλι δυαδικοποίησης.
- (δ) η κατωφλιωμένη, δυαδική εικόνα.
- (ε) τα εντοπισμένα ευθύγραμμα τμήματα, πάνω στην κατωφλιωμένη εικόνα.
- (στ) οι επεκταμένες ευθείες γραμμές, πάνω στην grayscale εικόνα.
- (ζ) η τελική edge linked δυαδική εικόνα.

Το πρώτο βήμα παρουσίασης, έλαβε τόπο στην προηγούμενη ενότητα, με την παράθεση μίας συγκεκριμένης ορθοφωτογραφίας και των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων επεξεργασίας της, μέχρι την παραγωγή της τελικής δυαδικής εικόνας, με κύριο στόχο τη βαθύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος. Ο κώδικας εκτελέστηκε για δεκάδες εικόνες, συνεπώς το επιχείρημα να παρατεθούν όλα τα εξαγόμενα αποτελέσματα θα παρουσίαζε αυξημένη δυσκολία. Για το λόγο αυτό, παρουσιάζεται ένας ικανοποιητικός αριθμός αποτελεσμάτων-μαρτύρων, τα οποία αποτελούν διαπιστευτήρια της αξιοπιστίας της υλοποιηθήσας μεθόδου.

Κάτω από κάθε σειρά εικόνων i, παρατίθεται μια μικρή εξήγηση και κριτική των αποτελεσμάτων, ο αριθμός των συνολικών πετρών που απεικονίζονται στην εικόνα εισόδου καθώς επίσης και ο αριθμός των εντοπισμένων από το σύστημα πετρών, ώστε να υπάρχει ένα μέτρο επιτυχίας της μεθόδου για την εκάστοτε εικόνα εισόδου.

Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν, για 40 τυχαίες εικόνες που εισήχθησαν στο σύστημα, ώστε να υπάρχει μια σαφής εικόνα για το πόσο καλά δούλεψε η μέθοδος που υλοποιήθηκε ένα γενικό μέτρο επιτυχίας της μεθόδου.

Σειρά αποτελεσμάτων 1



(α)

(β)





(δ)



(٤)

(от)





Στη συγκεκριμένη σειρά αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι στην RGB ορθοφωτογραφία εισόδου, τα αντικείμενα ενδιαφέροντος διακρίνονται καθαρά σε δύο περιοχές Area1 και Area2 όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.α. Μετά την καταφλίωση, οι πλίνθοι που διακρίνονταν ξεκάθαρα στην εικόνα εισόδου, συνεχίζουν να φαίνονται καθαρά και να ξεχωρίζουν μεταξύ τους. Συνεπώς η κατωφλίωση με την μέθοδο του Otsu λειτούργησε ικανοποιητικά, βρίσκοντας ένα κατώφλι το οποίο διαχωρίζει αρκετά «σφικτά» τις περιοχές των αντικειμένων ενδιαφέροντος και του φόντου. Ο μετασχηματισμός Hough, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να ελαττώσει την υπολογιστική πολυπλοκότητα του εντοπισμού ευθυγράμμων τμημάτων, μεγάλου εύρους μηκών, σε μια δυαδική εικόνα, αλλά και για να αυξήσει την ακρίβεια εντοπισμού των τμημάτων αυτών, πέτυχε το στόχο του. Μετά τη διαδικασία επέκτασης των ευθυγράμμων τμημάτων, παρατηρούμε ότι εντοπίστηκαν με μεγάλη ακρίβεια τα όρια των πλίνθων, που διακρίνονταν ξεκάθαρα στην εικόνα εισόδου. Για τον εντοπισμό των ακμών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Canny, η οποία εντοπίζει με μεγάλη πιθανότητα ακμές όταν αυτές πραγματικά υπάρχουν και στη σωστή χωρικά θέση, πολύ κοντά προς τις πραγματικές ακμές, αν όχι πάνω σε αυτές. Η διασύνδεση των ακμών, θεωρείται επιτυχημένη. Οι μη-συνεχείς ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο, ακμές που εξήχθησαν με τη μέθοδο του Canny, δομήθηκαν με έναν καλύτερο τρόπο, με συνέπεια οι γειτνιάζουσες ακμές να αποτελούν συνεχείς λεπτές γραμμές και να δημιουργούνται με ακρίβεια τα περιγράμματα των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Τέλος ένας εξωτερικός παρατηρητής, ο οποίος θα σύγκρινε την εικόνα εισόδου με την τελική edge linked δυαδική εικόνα, εύκολα θα εξήγαγε το συμπέρασμα ότι οι πλίνθοι, οι οποίοι διακρίνονται καθαρά στην εικόνα εισόδου, εντοπίζονται με μεγάλη ακρίβεια από τη μέθοδο που υλοποιήθηκε. Μέτρο επιτυχίας της μεθόδου για τη συγκεκριμένη εικόνα εισόδου, αποτελούν τα παρακάτω στοιχεία.

Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : 59 Αριθμός εντοπισμένων πετρών : 57 Ποσοστό επιτυχίας: 96.6%



Σχήμα 5.1: Περιοχές στις οποίες διακρίνονται ξεκάθαρα τα αντικείμενα ενδιαφέροντος (α) στην RGB ορθοφωτογραφία εισόδου και (β) στην grayscale εικόνα με σημειωμένες πάνω τις επεκταμένες ευθείες γραμμές.

Σειρά αποτελεσμάτων 2







(β)

(δ)

104



(ɛ)

(от)









105

Στη συγκεκριμένη σειρά αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι στην RGB ορθοφωτογραφία εισόδου τα αντικείμενα ενδιαφέροντος διακρίνονται καθαρά ξανά σε περιοχές-λωρίδες. Μετά την καταφλίωση, οι πλίνθοι που διακρίνονταν ξεκάθαρα στην εικόνα εισόδου, συνεχίζουν να φαίνονται καθαρά και να ξεχωρίζουν μεταξύ τους, όπως γίνεται αντιληπτό από την εικόνα (δ). Άρα, η κατωφλίωση με την μέθοδο του Otsu λειτούργησε ικανοποιητικά και για τη συγκεκριμένη κατανομή του ιστογράμματος. Ο μετασχηματισμός Hough, εντόπισε ευθύγραμμα τμήματα, μεγάλου εύρους μηκών, εκεί που πραγματικά υπήρχαν και μετά τη διαδικασία επέκτασης των ευθυγράμμων τμημάτων, παρατηρούμε ότι δημιουργήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια τα όρια των πλίνθων, που διακρίνονταν ξεκάθαρα στην εικόνα εισόδου. Όπως φαίνεται, όμως, στο Σχήμα 5.2, υπεισέρχεται ένα μικρό σφάλμα, γιατί ενώ ο μετασχηματισμός Hough είχε εντοπίσει ένα ευθύγραμμο τμήμα μικρού μήκους, αυτό απομακρύνθηκε από τον συγκεντρωτικό πίνακα των κατακόρυφων τμημάτων, διότι το μήκος του ήταν μικρότερο από το 30% της απόστασης μεταξύ των οριζοντίων επιπέδων, μέσα στα οποία αυτό ευρισκόταν. Έτσι οι δύο πέτρες, δε διαχωρίζονται και αναγνωρίζονται σαν μία. Η διασύνδεση των ακμών, θεωρείται επιτυχημένη διότι οι γειτνιάζουσες ακμές ενοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελούν συνεχείς λεπτές γραμμές. Τέλος, παρατίθεται ο αριθμός των πετρών στην εικόνα εισόδου, καθώς και ο αριθμός των εντοπισμένων από το σύστημα πετρών, ώστε να υπάρχει ένα μέτρο επιτυχίας της μεθόδου για τη συγκεκριμένη εικόνα εισόδου.

Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : 45 Αριθμός εντοπισμένων πετρών : 42 Ποσοστό επιτυχίας: 93.3%



(β)

Σχήμα 5.2: (α) Εντοπισμένο, από τον μετασχηματισμό Hough, ευθύγραμμο τμήμα μικρού μήκους. (β) Μη ύπαρξη του εντοπισμένου τμήματος πάνω στην grayscale εικόνα με τις επεκταμένες ευθείες γραμμές.

Σειρά αποτελεσμάτων 3





(α)

(β)





(δ)


(٤)

(от)



Στη συγκεκριμένη σειρά αποτελεσμάτων, παρατηρούμε ότι η RGB ορθοφωτογραφία εισόδου δεν είναι καθόλου καθαρή, συνεπώς διακρίνονται ξεκάθαρα ελάχιστα αντικείμενα ενδιαφέροντος και δεν υπάρχουν σαφή όρια για το που, μερικά από αυτά, περατώνονται. Παρόλα αυτά, μετά την καταφλίωση, οι λίγες πέτρες που διακρίνονταν ξεκάθαρα στην εικόνα εισόδου, συνεχίζουν να ξεχωρίζουν. Άρα, η κατωφλίωση με την μέθοδο του Otsu λειτούργησε ικανοποιητικά και πάλι για τη συγκεκριμένη διαφορετική κατανομή του ιστογράμματος. Η διαδικασία επέκτασης των ευθυγράμμων τμημάτων, δεν θεωρείται επιτυχημένη επιλογή στη συγκεκριμένη εικόνα, διότι δεν υπάρχουν αρκετές ομάδες πετρών που να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο i. Δημιουργούμε, δηλαδή στη συνέχεια, μια στοχευόμενη αναζήτηση ακμών γύρω από ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία δεν αποτελούν, πραγματικά όρια των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Έτσι, πολλές από τις ακμές που ευρίσκονται, δεν αποτελούν χρήσιμες ακμές, αλλά θόρυβο. Παρατηρούμε επίσης, ότι στην τελική εικόνα εξόδου, πολλές ακμές εμφανίζονται μη-συνεχείς ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο. Αφού, δεν υπάρχουν κοντινά αντικείμενα ενδιαφέροντος, δεν υπάρχουν και κοντινές εντοπισμένες ακμές, συνεπώς θα έπρεπε να επιλεγεί μια μεγαλύτερη γειτονιά αναζήτησης και ένα διαφορετικό κατώφλι σύγκρισης, για να ενοποιηθούν οι συγκεκριμένες ακμές. Ολικά, το εξαγόμενο αποτέλεσμα, δεν θεωρείται πολύ επιτυχημένο, συγκριτικά και με τις δύο προηγούμενες σειρές αποτελεσμάτων. Τέλος, παρατίθεται ο αριθμός των πετρών στην εικόνα εισόδου, καθώς και ο αριθμός των εντοπισμένων από το σύστημα πετρών, ώστε να υπάρχει ένα μέτρο επιτυχίας της μεθόδου για τη συγκεκριμένη εικόνα εισόδου.

Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : 26 Αριθμός εντοπισμένων πετρών : 17 Ποσοστό επιτυχίας: 65.4%

Σειρά αποτελεσμάτων 4





(α)

(β)





(δ)



(٤)

(от)



Σειρά αποτελεσμάτων 5



(β)





(δ)



(ɛ)



(от)



(ζ)

Στις σειρές αποτελεσμάτων 4 και 5, παρατηρούμε ότι στις RGB ορθοφωτογραφίες εισόδου τα αντικείμενα ενδιαφέροντος διακρίνονται ξεκάθαρα. Η κατωφλίωση που επετεύχθη και στις δύο με την μέθοδο του Otsu ήταν εξαιρετικά ικανοποιητική. Συνεπώς, η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu αποτελεί μια καθολική λύση στο πρόβλημα της τμηματοποίησης της εικόνας, καθώς δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαφορετικά δεδομένα εισόδου του συστήματος. Ο μετασχηματισμός Hough, εντόπισε ευθύγραμμα τμήματα, μεγάλου εύρους μηκών, στα σημεία που πραγματικά υπήρχαν και μετά τη διαδικασία επέκτασης των ευθυγράμμων τμημάτων, δημιουργήθηκαν με μεγάλη ακρίβεια τα όρια των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Η διαδικασία του edge linking, θεωρείται επιτυχημένη και στις δύο σειρές αποτελεσμάτων, καθώς επέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Οι μη-συνεχείς, ως προς τη διάταξή τους πάνω στο χώρο, ακμές που εξήχθησαν με τη μέθοδο του Canny, δομήθηκαν με έναν καλύτερο τρόπο, με συνέπεια οι γειτνιάζουσες ακμές να αποτελούν συνεχείς λεπτές γραμμές και να δημιουργούνται με ακρίβεια τα περιγράμματα των πλίνθων. Τα τελικά αποτελέσματα είναι επιτυχή και στις δύο σειρές αποτελεσμάτων, γεγονός το οποίο μαρτυρείται και από τους παρακάτω αριθμούς.

Σειρά αποτελεσμάτων 4 Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : 16 Αριθμός εντοπισμένων πετρών : 15 Ποσοστό επιτυχίας: 93.7%

Σειρά αποτελεσμάτων 5 Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : 28 Αριθμός εντοπισμένων πετρών : 27 Ποσοστό επιτυχίας: 96.4%

Σειρά αποτελεσμάτων 6



(α)







(δ)



(٤)



(от)





Στη συγκεκριμένη σειρά αποτελεσμάτων, η κατωφλίωση με την μέθοδο του Otsu λειτούργησε ικανοποιητικά και για τη συγκεκριμένη «περίεργη» κατανομή του ιστογράμματος. Ο μετασχηματισμός Hough, εντόπισε ευθύγραμμα τμήματα, μεγάλου εύρους μηκών, εκεί που πραγματικά υπήρχαν, όμως μετά τη διαδικασία επέκτασης των ευθυγράμμων τμημάτων, παρατηρούμε ότι δημιουργήθηκαν κάποια πλασματικά όρια, γύρω από τα οποία πραγματοποιήθηκε η αναζήτηση ακμών. Έτσι, το τελικό αποτέλεσμα, εμφανίζονται ακμές και γραμμές που δεν αντιστοιχούν σε πραγματικά όρια των αντικειμένων ενδιαφέροντος. Όπως φαίνεται στο <u>Σχήμα 5.3</u> υπεισέρχεται ένα σφάλμα στον εντοπισμό των πετρών της συγκεκριμένης περιοχής, διότι δεν υπάρχουν ευθύγραμμα τμήματα μεταξύ των αντικειμένων, αλλά κάποιες καμπύλες. Ο μετασχηματισμός Hough για ευθεία γραμμή δε λειτουργεί στη συγκεκριμένη περίπτωση και οι δύο πέτρες αναγνωρίζονται σαν μία. Σε περίπτωση που είναι επίθυμητός ο εντοπισμός καμπυλών και γεωμετρικών σχημάτων, θα πρέπει να υλοποιηθεί κάποια επέκταση του μετασχηματισμού Hough, με την εισαγωγή της μορφής των καμπυλών που αναζητούνται στο αρχικό στάδιο του μετασχηματισμού. Γενικότερα, όμως, η μέθοδος εξήγαγε αρκετά καλά αποτελέσματα και στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου : **33** Αριθμός εντοπισμένων πετρών : **29** Ποσοστό επιτυχίας: **87.8%**



Σχήμα 5.3: Σφάλμα στον εντοπισμό αντικειμένων ενδιαφέροντος, λόγω μη ύπαρξης ευθυγράμμων τμημάτων σε περιοχή της εικόνας εισόδου.

Τέλος, στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν, για 40 τυχαίες εικόνες που διαβάστηκαν στην είσοδο του συστήματος, ώστε να υπάρχει ένα μέτρο επιτυχίας της μεθόδου. Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα, η μέθοδος που υλοποιήθηκε είναι αρκετά αποτελεσματική.

Αριθμός εικόνας	Αριθμός πετρών στην εικόνα εισόδου	Αριθμός εντοπισμένων πετρών
1	59	57
2	45	42
3	26	17
4	16	15

5	28	27
6	33	29
7	54	51
8	72	67
9	36	35
10	47	42
11	43	42
12	19	18
13	30	24
14	65	58
15	38	36
16	22	22
17	15	12
18	34	27
19	30	28
20	64	60
21	51	47
22	15	13
23	27	21
24	24	22
25	49	45
26	43	40
27	55	51
28	36	30
29	28	27
30	58	52
31	17	15
32	15	15
33	35	33
34	23	15
35	55	45
36	43	41
37	58	57
38	31	28
39	34	33
40	54	50

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα, όσον αφορά τον αριθμό των στοιχείων που εντοπίστηκαν, για 40 τυχαίες εικόνες που διαβάστηκαν στην είσοδο του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΝΟΨΗ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

6.1 Σύνοψη-Συμπεράσματα

ε το πέρας της εργασίας αυτής, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, του οποίου η αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στο <u>Σχήμα 6.1</u>, για την ταχύτατη και αποτελεσματική δισδιάστατη αποτύπωση αρχαιολογικών μνημείων. Το ψηφιακό σύστημα, συνδυάζει σύγχρονες τεχνικές, οι οποίες βασίζονται στην αυτοματοποιημένη επεξεργασία εικόνας και στη μηχανική όραση προσφέρει τη δυνατότητα άμεσης καταγραφής και εποπτείας αρχαιολογικών- ιστορικών μνημείων.



Σχήμα 6.1: Αρχιτεκτονική του ολοκληρωμένου συστήματος ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για την αποτύπωση και εποπτεία αρχαιολογικών- ιστορικών μνημείων.

Το πρώτο βήμα είναι η απόκτηση της εικόνας (Image acquisition). Αυτό απαιτεί την ύπαρξη Ψηφιακής Φωτογραμμετρικής Μηχανής ή οποιουδήποτε αισθητηρίου εικόνας (imaging sensor) και τη δυνατότητα της ψηφιοποίησης του σήματος που παίρνουμε από τα αισθητήρια. Το ακόλουθο κατά σειρά βήμα αφορά την προεπεξεργασία της εικόνας. Η βασική λειτουργία της προεπεξεργασίας στο σύστημα, έγκειται στη μετατροπή της RGB ορθοφωτογραφίας/ ψηφιακής εικόνας σε μια κλίμακας του γκρι (grayscale) εικόνα, 256 σταθμών κβάντισης ώστε να αφαιρεθεί ο ανεπιθύμητος «θόρυβος» . Η μετατροπή αυτή λαμβάνει χώρα, λόγω του γεγονότος ότι η χρωματική πληροφορία της εικόνας, σε αντίθεση με την ένταση της φωτεινότητας των εικονοστοιχείων, δεν αποτελεί χρήσιμη πληροφορία εισόδου για τις τεχνικές κατάτμησης και αναγνώρισης των ευθυγράμμων τμημάτων και των ακμών, που θα ακολουθήσουν. Τα δύο πρώτα βήματα, όπως φαίνεται και από το <u>Σχήμα 6.1</u>, ανήκουν στο χαμηλό επίπεδο επεξεργασίας (Low-level processing).

Το επόμενο βήμα, ασχολείται με την τμηματοποίηση της εικόνας (Image segmentation). Η τμηματοποίηση διαιρεί την εικόνα στα αντικείμενα τα οποία την αποτελούν. Ο βαθμός στον οποίο αυτή η υποδιαίρεση προχωρά, εξαρτάται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος. Γενικά, η διαδικασία του segmentation πρέπει να σταματά όταν τα αντικείμενα ενδιαφέροντος έχουν απομονωθεί (ανιχνευθεί). Η τμηματοποίηση αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Μία καλή διαδικασία τμηματοποίησης συμβάλλει αποφασιστικά στην επίλυση ενός προβλήματος εικόνας. Από την άλλη όμως, ένας προβληματικός αλγόριθμος κατάτμησης είναι σχεδόν πάντα ικανός να εγγυηθεί αποτυχία στο τελικό αποτέλεσμα. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας του segmentation είναι συνήθως ακατέργαστα δεδομένα υπό τη μορφή pixels, τα οποία αποτελούν είτε τα σύνορα των περιοχών της εικόνας είτε ολόκληρο το εσωτερικό των περιοχών της εικόνας. Στη συνέχεια, επεξεργάζεται η κατωφλιωμένη εικόνα με την εφαρμογή αριθμητικών-μορφολογικών τελεστών. Γίνεται εμφανές ότι, μετά την εφαρμογή των αριθμητικών μορφολογικών τελεστών, ενοποιήθηκαν μικρά γειτονικά αντικείμενα ενδιαφέροντος, αφαιρέθηκαν οι μικρές οπές και γενικότερα απομακρύνθηκε ένα σημαντικό ποσοστό του ανεπιθύμητου θορύβου. Η μέθοδος κατάτμησης που υλοποιήθηκε στη συνάρτηση kyrtosis.m, έδωσε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα, σε εικόνες με ιστογράμματα παρόμοια με αυτά του Σχήματος 4.3. Δε λειτούργησε, όμως, το ίδιο καλά για τις αρκετές εικόνες που εισήχθηκαν στην είσοδο του συστήματος, λόγω διαφορετικότητας της μορφής των ιστογραμμάτων. Το κατώφλι υπολογιζόταν σε τέτοιο σημείο, ώστε πολλά από τα εικονοστοιχεία ενδιαφέροντος να θεωρούνται εικονοστοιχεία του φόντου ή το αντίστροφο. Συνεπώς, έπρεπε να ευρεθεί μια περισσότερο καθολική λύση στο πρόβλημα της τμηματοποίησης της εικόνας. Χρησιμοποιήθηκε τελικά, η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu, η οποία δίδει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για διαφορετικά δεδομένα εισόδου του συστήματος. Τα στάδια της τμηματοποίησης, της επεξεργασίας της κατωφλιωμένης εικόνας ανήκουν, στο ενδιάμεσο επίπεδο επεξεργασίας (Intermediate-level processing).

Το τελευταίο βήμα του σχήματος περιλαμβάνει την αναγνώριση ευθυγράμμων τμημάτων μέσω του μετασχηματισμού Hough, τον εντοπισμό ακμών γύρω από τα ευθύγραμμα τμήματα και τη διασύνδεση των μη-συνεχών γειτονικών ακμών, έτσι ώστε να αποτελούν συνεχείς γραμμές, οι οποίες αναπαριστούν τα περιγράμματα των στοιχείων ενδιαφέροντος. Τα τελευταία αυτά στάδια ανήκουν στο υψηλό επίπεδο της επεξεργασίας (High-level processing).

Το εξαγόμενο αποτέλεσμα του συστήματος, εξαρτάται από την ποιότητα της φωτογραφίας που λήφθηκε από την ψηφιακή φωτογραμμετρική μηχανή ή γενικότερα, το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο αισθητήριο εικόνας. Όπως παρατηρούμε από τα αποτελέσματα της Ενότητας 5, μια καθαρή εικόνα εισόδου, οδηγεί σε αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα εξόδου. Αντιθέτως, όπως γίνεται αντιληπτό και από την σειρά αποτελεσμάτων 3, μια μη καθαρή -«κακή» εικόνα εισόδου, οδηγεί σε σαφώς λιγότερο ικανοποιητικό τελικό αποτέλεσμα. Σημαντικό παράγοντα για την επιτυχία ή μη της όλης διαδικασίας, διαδραματίζει το αποτέλεσμα της κατάτμησης της εικόνας. Τη διαδικασία αυτή, δυσχεραίνει ακόμα περισσότερο η ύπαρξη θορύβου στην εικόνα. Ο κύριος στόχος της κατάτμησης είναι ο διαχωρισμός της εικόνας σε τμήματα, τα οποία έχουν ισχυρό βαθμό συσχέτισης με αντικείμενα του πραγματικού κόσμου τα οποία περιέχονται στην εικόνα. Στο σύστημά μας, το πρόβλημα κατάτμησης υπεισήρθε στην απομόνωση-διαχωρισμό των αντικειμένων ενδιαφέροντος, δηλαδή των πλίνθων, που έχουν αντίθεση με το φόντο της εικόνας. Η λύση δόθηκε με χρήση ενός απόλυτου ορίου με βάση τη διαβάθμιση του γκρι. Πολλά αντικείμενα ή περιοχές της εικόνας χαρακτηρίζονται από σταθερή απορρόφηση φωτός ή σταθερή αντανάκλαση. Έτσι, ένα κατώφλι στη φωτεινότητα της εικόνας μπορεί να διαχωρίσει τα αντικείμενα από το φόντο που τα περιβάλλει. Το απόλυτο κατώφλι υπολογίστηκε με τη μέθοδο του Otsu, η οποία βασίζεται σε μια απλή ιδέα: Αν θεωρήσουμε τα αντικείμενα και το φόντο ανεξάρτητα πρότυπα (κλάσεις), τότε αρκεί η μεγιστοποίηση της διακριτότητας μεταξύ των κλάσεων. Θέτοντας ένα όριο μεταξύ αντικειμένων και φόντου, στόχος

μας είναι να διαχωρίσουμε όσο γίνεται πιο «σφιχτά» τις δυο κλάσεις. Η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu, λειτούργησε ολιστικά και αποτελεσματικά για διαφορετικά δεδομένα εισόδου.

Το ολοκληρωμένο ψηφιακό σύστημα λειτούργησε για κάθε εικόνα τείχους, που διαβάστηκε στην είσοδό του. Κύρια πλεονεκτήματα του, αποτελούν η ταχύτητα και η αποτελεσματικότητα της δισδιάστατης αποτύπωσης των μνημείων, σε αντίθεση με τεχνικές αποτύπωσης του παρελθόντος.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Στις μελλοντικές εργασίες του συστήματος, μπορεί να προστεθεί η επέκταση του μετασχηματισμού Hough για εντοπισμό περισσοτέρων καμπυλών και γεωμετρικών σχημάτων. Στο αρχικό στάδιο του μετασχηματισμού εισάγεται η μορφή των καμπυλών που αναζητούνται και στη συνέχεια, η μέθοδος παράγει την ομάδα των καμπυλών της συγκεκριμένης μορφής, που εμφανίζονται στην υπό επεξεργασία εικόνα. Επομένως, κάθε σχήμα που μπορεί να περιγραφεί με συγκεκριμένη παραμετρική εξίσωση, μπορεί να εντοπιστεί από τον μετασχηματισμό Hough. Παραδείγματος χάριν, οι παραμετρικές εξισώσεις του κύκλου είναι :

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cdot \cos(\theta) \\ y = y_0 + r \cdot \sin(\theta) \end{cases}$$
(6.1)

Οι παράμετροι του Hough είναι η ακτίνα r και οι συντεταγμένες του κέντρου (x₀, y₀). Για το λόγο αυτό, θα απαιτούνταν η κατασκευή μιας τρισδιάστατης παραμετρικής μήτρας P(r,x,y) για τον εντοπισμό, εντός αυτής, περιοχών υψηλής συγκέντρωσης εικονοστοιχείων.

Μελλοντική επέκταση του συστήματος θα μπορούσε να αποτελέσει και η εξής ιδέα: Επιλογή της «βέλτιστης» μεθόδου κατάτμησης με βάση τη μορφή του ιστογράμματος της εικόνας εισόδου, η οποία θα αναγνωρίζεται αυτόματα από μια μέθοδο, αντί για μια μέθοδο απόλυτης κατωφλίωσης. Η μέθοδος κατωφλίωσης του Otsu, δίνει αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα για τις εικόνες εισόδου, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να μην εντοπίζει κάποια αντικείμενα ενδιαφέροντος (πλίνθους), που θα μπορούσαν να εντοπιστούν αν είχε χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος κατάτμησης, η οποία ενδείκνυται περισσότερο για τη μορφή του ιστογράμματος της εικόνας εισόδου.

Τέλος, η δημιουργία ενός εικονικού μουσείου μέσω του διαδικτύου, που θα περιέχει μια βάση δεδομένων με την ψηφιακή αποτύπωση των αρχαιολογικών τειχών αλλά και την αποτύπωση μοντέλων αντικειμένων μεγάλης αρχαιολογικής και αρχιτεκτονικής αξίας θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό προϊόν για την ανάδειξη της πολιτιστικής κληρονομιάς του τόπου μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] http://www.ipet.gr/digitech2
- [2] Παπαμάρκος, Ν., Ψηφιακή Επεξεργασία & Ανάλυση Εικόνας, Β. Γκιούρδας Εκδοτική, 2005.
- [3] Sonka, M., Hlavac, V., Boyle R., Image Processing Analysis and Machine Vision, 2nd Edition, Brooks/Cole Publishing Company, 1999.
- [4] Ritter, G.X., Wilson J.N., Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra, CRC Press, 1996.
- [5] Bernsen, J., "Dynamic Thresholding of grey-level images", Proc. Eighth Int'l Conf, Pattern Recognition, Paris, 1986.
- [6] Otsu, N., "A threshold selection method from gray-level histograms", IEEE Trans. on System Man and Cybernetics, 1979.
- [7] Trier, Q.D. and Jain, A.K., "Goal-Directed Evaluation of Binarization Methods". IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence,1995.
- [8] Sezgin, M., Sankur, B., "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation", Journal of Electronic Imaging, 2004.
- [9] Canny, J., "A Computational approach to edge-detection", IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.8, 1986.
- [10] Duda, R.O., Hart, P.E., "Use of the Hough transform to detect lines and curves in pictures", Commun. ACM, vol. 15, 1972.
- [11] Gonzalez, R.G., Woods, R.E., Digital Image Processing Second Edition, Addison-Wesley, 2002.
- [12] Kittler, J., Illingworth, J., "Minimum error thresholding", Pattern Recognition, vol.19, 1986.
- [13] Jahne, B., Haubecker and H., Computer Vision and Applications A Guide for Students and Practitioners, Academic Press, 2000.
- [14] Seul, M., O' Gorman, L. and Sammon, M., Practical Algorithms for Image Analysis, Cambridge University Press, 2001.
- [15] Forstner, W., "Quality Assessment of Object Location and Point Transfer using Digital Image Correlation Techniques. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing", Rio de Janeiro, 1984.
- [16] Artese, G., Gencarelli, M.,"Real Time Monitoring of Cultural Heritage through camera phone digital images", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B5, Beijing, 2008.

- [17] Scherer, M., "Advantages of the Integration of Image Processing and Direct Coordinate Measurement for Architectural Surveying – Development of the System", FIG XXII International Congress Washington, D.C. USA, 2002.
- [18] Musílek, L., "The Laboratory of Quantitative Methods in Research of Ancient Monuments", Workshop CTU Prague, Prague, Workshop Proceedings, 1998.
- [19] Pavelka, K., "Using of Close Range Photogrammetry for Historical Buildings Documentation", Proceedings of Workshop CVUT Prague, 1999.
- [20] Charvillat, V., Anna, Tonazzini A., Van Goo,I L. and Nikolaidis, N., "Image and Video Processing for Cultural Heritage", EURASIP Journal on Image and Video Processing, Hindawi Publishing Corporation, 2009.
- [21] Cingoni, P., Montani, C. and Scopigno, R., "A comparison of mesh simplification algorithms", Computers & Graphics, 22 (1), p.37-54.
- [22] Garland, M., Heckbert, P.S., Surface Simplication Using Quadric Error Metrics, SIGGRAPH 1997.
- [23] Guidi, G., Senior Member, IEEE, J.-Beraldin, A. and Atzeni, C., "High-Accuracy 3D modeling of Cultural Heritage: The Digitizing of Donatello's 'Maddalena", IEEE Transactions on Image processing, Vol.13,2004.
- [24] Ioannides, M., Wehr, A., '3D Reconstruction & Re-production in Archaeology', Scanning for Cultural Heritage Recording, 2002.
- [25] Bernardini, F., Mittleman, J., Rushmeier, H., Silva, C. and G. Taubin, "The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5(4):349-359, 1999.
- [26] Λάμπρου, Ε., Εφαρμοσμένη Γεωδαισία, Εκδόσεις Ζήτη, 2010.
- [27] Britton, B.J., "The Boundaries of Scientific Culture in Virtual Heritage", Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'01).
- [28] Somers, J., A simplification algorithm based on shortest edge first, 2002, http://users.rcn.com/liusomers
- [29] Godin, G., Rioux, M., Beraldin, J.A., Levoy, M., Cournoyer, L. and Blais, F. "An assessment of laser range measurement on marble surfaces",5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, 2001, Vienna, Austria
- [30] Abhinav Dayal, "3D Scanning: From Physical Objects to Computer Models", Advanced Computer Graphics (Winter 2002).
- [31] Forest, J., Salvi, J., Cabruja, E. and Pous, C. "Laser stripe peak detector for 3D Scanners. A FIR filter approach", 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004, Cambridge, UK, 2004.

- [32] Noborio et al.:Construction of the octree approximating three-dimensional objects by using multiple views, IEEE Trans. on PAMI, Vol.10, 1988.
- [33] Jing, L., Peikang, H., Xiaohu, W. and & Xudong P. "Image edge detection based on beamlet transform", China Aerospace Science & Industry Corporation, Beijing 100854, P. R. China, 2008.
- [34] Alshawabkeh, Y., Haala, B. and Fritsch, D. "Range Image Segmentation Using the Numerical Description of Mean Curvature Values", 2004.
- [35] Katsoulas, D., Werber, A., "Edge Detection in Range Images of Piled Box-like Objects.",
 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004), 4-Volume Set,
 Cambridge, UK. IEEE Computer Society, ISBN 0-7695-2128, 2004.
- [36] Sappa, A., Devy, M., "Fast Range Image Segmentation by an Edge Detection Strategy.", Proc. IEEE Conf. 3D DigitalImaging and Modeling, 2001.