ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

Γεωργία Μαντζώρου

Επιβλέπων: Ανδρέας Γεωργόπουλος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Γεωργία Μαντζώρου

Copyright © *Γεωργία Μαντζώρου, 2016*

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΑΛΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαντζώρου Γεωργία

Επιβλέπων Καθηγητής: Ανδρέας Γεωργόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την ..... του 2016

.....	.....	.....
.....	.....	.....
Α. Γεωργόπουλος	Χ. Ιωαννίδης	Α. Δουλάμης

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο ***"Ανάπτυξη αυτοματοποιημένης μεθόδου για την μέτρηση επιδόσεων αλμάτων μέσω ψηφιακών εικόνων"*** ανατέθηκε από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας και εκπονήθηκε στο πλαίσιο των Προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με κύριο στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας μεθόδου υπολογισμού της απόστασης κάθε έγκυρης προσπάθειας των αθλητών των οριζόντιων αλμάτων, μέσω της επεξεργασίας των εικόνων και με χρήση θεμελιωδών αρχών της Φωτογραμμετρίας.

Με την πρόοδο της επιστήμης των υπολογιστών, ο συνδυασμός της ανάπτυξης μεθόδων που επιτρέπουν την ανάλυση και επεξεργασία της εικόνας, με την δυνατότητα της σύνδεσης του τρισδιάστατου χώρου με τις εικόνες μέσω της Φωτογραμμετρίας, αποτελεί ένα θεμελιώδες εργαλείο στην έρευνα των αθλημάτων και ειδικότερα στην επίλυση προβλημάτων και την βελτίωση τεχνικών σχετικά με αυτά. Για τον λόγο αυτό, η εισαγωγή της ψηφιακής εικόνας στην ανάλυση των αθλημάτων έχει αυξηθεί σημαντικά με αποτέλεσμα να μειώνεται τόσο η πιθανότητα ανθρώπινου λάθους, όσο και ο χρόνος εκτίμησης του αποτελέσματος.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της Διπλωματικής μου εργασίας, Ανδρέα Γεωργόπουλο, ο οποίος πρώτα μου εμπιστεύθηκε το συγκεκριμένο επιστημονικό θέμα και στην συνέχεια με την απαραίτητη καθοδήγηση, την συνεργασία, τις γνώσεις και τα πολύτιμα σχόλια σχετικά με την βελτίωση του αποτελέσματος, με βοήθησε να ολοκληρώσω την έρευνά μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Μαστοράκη και την Γεωργία Κοντογιάννη, Διπλωματούχοι Αγρονόμοι Τοπογράφοι Μηχανικοί, για την βοήθεια κατά την διάρκεια της συλλογής των δεδομένων.

Ευχαριστίες απευθύνω στον κ. Γεώργιο Μακρή, επιστημονικό συνεργάτη της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου προσέφερε από την εμπειρία του στις μετρήσεις των οριζόντιων αλμάτων.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν, καθ’ όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ 5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ 13
Abstract 14
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή 16
1.1. Αντικείμενο και στόχος της εργασίας 16
1.2. Δομή της εργασίας 16
Κεφάλαιο 2. Οριζόντια άλματα και ανασκόπιση βιβλιογραφίας 18
2.1. Άλμα εις μήκος 18
2.1.1. Προδιαγραφές των εγκαταστάσεων του αγωνίσματος 18
2.1.2. Προδιαγραφές μέτρησης και ακρίβειας των επιδόσεων 20
2.1.3. Εξέλιξη τρόπου μέτρησης επιδόσεων 21
2.2. Παραδείγματα χρήσης οπτικών μεθόδων στα αθλήματα 24
2.2.1. Εισαγωγή της εικόνας στην ανάλυση των αθλημάτων 25
2.2.2. Εισαγωγή της όρασης μέσω υπολογιστή στα αθλήματα 28
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογική Προσέγγιση 37
Κεφάλαιο 4. Πειραματική Εφαρμογή και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων 45
4.1. Αναγνώριση Περιοχής και Επιλογή Κατάλληλου Φακού 45
4.2. Κεντρική Προβολή και Συστήματα Συντεταγμένων 46
4.2.1 Κεντρική Προβολή 46
4.2.2. Συστήματα συντεταγμένων 47
4.2.2.1. Σύστημα εικόνοσυντεταγμένων 47
4.2.2.2. Σύστημα εικόνας 48
4.2.2.3. Γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων για επίγειες λήψεις 49
4.3 Προσδιορισμός κατάλληλου Γεωδαιτικού Συστήματος Συντεταγμένων 50
4.4. Αποκατάσταση Προσανατολισμών 55
4.4.1. Εσωτερικός Προσανατολισμός 55
4.4.1. Εξωτερικός Προσανατολισμός – Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία 62
4.5. Προσδιορισμός οριζοντίου επιπέδου 70

4.6. Αυτοματοποιημένη μέθοδος προσδιοριμού του ίχνους 71
4.7. Προσδιορισμός επιδόσεων 77
4.8. Σύγκριση μεθόδων και έλεγχος αποτελεσμάτων 80
4.8.1. Έλεγχος επίδρασης προσδιορισμού του οριζοντίου επιπέδου 85
Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα 90
Κεφάλαιο 6. Εναλλακτικές Βελτίωσης 93
Βιβλιογραφία 96

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Διάταξη εγκατάστασεων του αθλήματος 18
Εικόνα 2.2: Βαλβίδα εκτίναξης.....20
Εικόνα 2.3: Διάδρομος φόρας και περιχοή προσγείωσης.....20
Εικόνα 2.4: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση 21
Εικόνα 2.5: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση κινούμενης ηλεκτρονικής συσκευής με σημειακό laser.....23
Εικόνα 2.7: Απαιτούμενος Εξοπλισμός.....24
Εικόνα 2.6: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση γεωδαιτικού σταθμού.....24
Εικόνα 2.8: Παράδειγμα γραφικών σχετικά με την απόσταση.....25
Εικόνα 2.9: Παράδειγμα τεχνολογίας FoxTrax.....26
Εικόνα 2.10: Παράδειγμα πραγματικής στιγμής (αριστερά) και εικονικής αναπαράστασης (δεξιά) με την18 χρήση ανάλυσης εικόνας.....27
Εικόνα 2.11: Παραδείγματα των εικόνων της τεχνικής Photo finish σε διαφορετικά αθλήματα.....28
Εικόνα 2.12: Παράδειγμα ανάλυσης και πρόβλεψης στο αγώνισμα του κρίκετ.....29
Εικόνα 2.13: Παράδειγμα προσδιορισμού της θέσης της εικόνας από γραμμές του γηπέδου.....30
Εικόνα 2.14: Παράδειγμα του συνδυασμού της παραπάνω τεχνικής στο τριπλούν.....31
Εικόνα 2.15: Τεχνολογία Goal Control.....33
Εικόνα 2.16: Τεχνολογία Goalminder.....33
Εικόνα 2.18: Παράδειγμα καταγραφής και κατάτμησης της κίνησης.....35
Εικόνα 2.19: Μεθοδολογία υπολογισμού βαθμολογίας σε αγώνα αντισφάιρισης ξυλορακέτας....36
Εικόνα 3.1: Γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων.....39
Εικόνα 3.2.: Πεδίο συλλογής δεδομένων για την παρούσα εργασία.....42
Εικόνα 3.2 : Περιβάλλον Matlab για την επίλυση της διαδικασίας.....43
Εικόνα 4.1 : Τοποθέτησης φωτοσταθερών σημείων στην περιοχή μελέτης.....45
Εικόνα 4.2:Τοποθέτηση φωτογραφικής μηχανής και γεωδατικού σταθμού.....46
Εικόνα 4.3: Εικόνα τεκμηρίωσης της τοποθέτησης του εξοπλισμού.....46
Εικόνα 4.4: Απεικόνιση κεντρικής προβολής.....47
Εικόνα 4.5: Σύστημα εικονοσυντεταγμένων ψηφιακής εικόνας.....48
Εικόνα 4.6: Συστήματα που αφορούν την εικόνα.....49
Εικόνα 4.7: Γεωδαιτικό σύστημα επίγειας λήψης.....49
Εικόνα 4.8: Αυθαίρετο Γεωδαιτικό Σύστημα-Γωνία στροφής.....53
Εικόνα 4.9: Μετασχηματισμός Στροφής και μετάθεσης για τον άξονα Χ.....53
Εικόνα 4.10: Τελικό Γεωδαιτικό Σύστημα.....55
Εικόνα 4.11: Επίδραση ακτινικής διαστροφής.....56
Εικόνα 4.12: Πιστοποιητικό Βαθμονόμησης στο πεδίο ελέγχου.....57

Εικόνα 4.13: Διάγραμμα κανονικοποιημένης ακτινικής διαστροφής Δr από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης.....58
Εικόνα 4.14: Φωτοσταθερό σημείο.....59
Εικόνα 4.15: Ανίχνευση κύκλου μέσω του αλγόριθμου.....59
Εικόνα 4.16: Χαρακτηριστικά σημεία γνωστων γεωδαιτικών συντεταγμένων.....60
Εικόνα 4.17: Γωνίες στροφής περί τους άξονες.....63
Εικόνα 4.18: Σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων.....65
Εικόνα 4.19: Απεικόνιση συστημάτων για την επίλυση της Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας.....66
Εικόνα 4.20: Υψομετρικά σημεία για τον υπολογισμό της εξίσωσης του οριζοντίου επιπέδου.....71
Εικόνα 4.21: Εικόνα πριν (επάνω) και μετά (κάτω) το άλμα.....72
Εικόνα 4.22: Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου και χειροκίνητου ελέγχου από το περιβάλλον Matlab.....76
Εικόνα 4.23: Εικόνα πριν (επάνω) και μετά (κάτω) το άλμα για τα νέα δεδομένα.....77
Εικόνα 4.24: Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου και χειροκίνητου ελέγχου από το περιβάλλον Matlab για τα νέα δεδομένα.....77
Εικόνα 6.1:Φωτοσταθερό σημείο με κύκλο στο κέντρο.....93
Εικόνα 6.2:Φωτοσταθερό σημείο με ακμές.....93

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 3.1: Μεθοδολογική Προσέγγιση σε Διαγραμματική Μορφή.....44

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Προσδιορισμός συντεταγμένων των μετρημένων σημείων στο αυθαίρετο γεωδαιτικό σύστημα.....51
Πίνακας 4.2: Προσδιορισμός γεωδαιτικών συντεταγμένων ύστερα από τους μετασχηματισμούς.....55
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα εικονοσυντεταγμένων εκφρασμένα σε pixel (αριστερά) και σε χιλιοστά δεξιά.....62
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας.....68
Πίνακας 4.5: Σφάλματα προσδιορισμού παραμέτρων Εξωτερικού προσανατολισμού.....68
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα των δυο μεθόδων.....81

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα της διαφοράς των δυο μεθόδων για την εκτίμηση του σφάλματος.....82
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ελέγχου για διαφορετικά οριζόντια επίπεδα.....85

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1.: Επίδραση σφάλματος γωνιακών μεγεθών στην οριζοντιογραφική θέση.....70
Σχήμα 4.2.: Απεικόνιση της διαφοράς των δυο μεθόδων ανάλογα με την κάθε επίδοση.....82
Σχήμα 4.3: Οριζόντιο επίπεδο απομακρυσμένο από την φωτογραφική μηχανή.....86
Σχήμα 4.4: Οριζόντιο επίπεδο πλησιέστερα στην φωτογραφική μηχανή.....87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί ο προσδιορισμός της απόστασης των αλμάτων κάθε έγκυρης προσπάθειας των αθλητών μέσω ψηφιακών εικόνων. Η ανάλυση γίνεται από πακέτο δεδομένων εικόνων που έχουν ληφθεί από φωτογραφική μηχανή τοποθετημένη σε σταθερή θέση, κλίμακας περίπου 1:250 και οι οποίες απεικονίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος. Το αποτέλεσμα της κάθε επίδοσης προσδιορίζεται με μια μονοεικονική διαδικασία και αντιστοιχίζεται με την οριζοντιογραφική συντεταγμένη Χ του κάθε ίχνους.

Για το λόγο αυτό αρχικά προσδιορίζεται το κατάλληλο σύστημα XYZ, όπου ο άξονας Χ ταυτίζεται με την γραμμή αφετηρίας των μετρήσεων, ο Z είναι οριζόντιος και παράλληλος προς την διεύθυνση λήψης της φωτογραφικής μηχανής και ο Y, ο άξονας των υψομέτρων. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η βαθμονομημένη θέση της φωτογραφικής μηχανής, προσδιορίζοντας τόσο τον εσωτερικό όσο και τον εξωτερικό προσανατολισμό των λήψεων και η εξίσωση του κατάλληλου οριζοντίου επιπέδου που προσαρμόζεται καλύτερα στην επιφάνεια προσγείωσης. Ο προσδιορισμός του κάθε ίχνους στο σύστημα XYZ προϋποθέτει την γνώση των εικονοσυντεταγμένων του σημείου αυτού, η οποία υλοποιείται μέσω της επεξεργασίας ζεύγους εικόνων πριν και μετά την κάθε επίδοση. Έτσι τελικά χρησιμοποιώντας τις δυο εξισώσεις της Συγγραμμικότητας ως προς τις εικονοσυντεταγμένες στο σύστημα της εικόνας και την εξίσωση του επιπέδου, προσδιορίζεται τελικά η τρισδιάστατη θέση του σημείου XYZ και άρα η απόσταση της επίδοσης Χ.

Βασικό αποτέλεσμα της παρούσας εργασίας αποτελεί αλγόριθμος που υλοποιεί την παραπάνω μεθοδολογία χρησιμοποιώντας τις απαραίτητες ψηφιακές εικόνες και τα απαραίτητα στοιχεία για τις επιμέρους διαδικασίες. Τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου συγκρίνονται με αυτά από την μεθοδολογία μέτρησης των αποστάσεων με την χρήση μετροταινίας και αξιολογείται το αποτέλεσμα του.

Παρόλο που το αναπτυγμένο λογισμικό παρουσιάζει επιθυμητά αποτελέσματα απαιτείται περαιτέρω έλεγχος και αξιολόγηση του, καθώς και περαιτέρω ανάπτυξη ώστε να εκτιμάται το αποτέλεσμα σε πραγματικό χρόνο για βοηθητικό εργαλείο των κριτών ή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτούς με την δυνατότητα επέμβασής τους στον προσδιορισμό του κατάλληλου ίχνους.

National Technical University of Athens, Greece

School of Rural and Surveying Engineer

Development of an automated method for measuring the performance of jumps through digital images.

Georgia Mantzorou

Diploma thesis

July 2016

Abstract

The objective of this thesis is the determination of the jumping distance of any valid attempt of the athletes through digital imaging. The analysis is made by a data package of images that have been acquired with a camera mounted in a fixed position of a scale approximately 1:250, which depict the area of interest. The outcome of every performance is determined with a single-image process and gets assigned to the horizontal graphic coordinate X of every single track.

Therefore, initially the appropriate system XYZ is determined, where the X axis is identical with a baseline measurement, the Z is horizontal and parallel to the camera shooting direction and Y is the axis of altitude. Afterwards, the calibrated position of the camera is calculated, by identifying both the interior and the exterior orientation of the shots and also the equation of an

appropriate horizontal plane that best adapts to the landing surface. The determination of each track to the XYZ system requires knowledge of the image coordinates of this point, which is implemented through the pair of images processed before and after each performance. Thus, by using the two equations of co-linearity to the image coordinates in the image system and the equation of the plane, ultimately we can determine the three-dimensional position of the XYZ point and therefore the distance X of the performance.

The core result of this study is the algorithm that implements the above method using the necessary digital images and necessary data for the individual procedures. The results of this algorithm are compared with those by the methodology of distance measurement with a tape measure and assess the effect of it.

Although the developed software shows the desired results, further testing and evaluation are required, as well as further development, in order the results to be assessed in real time as a utility tool for the judges or to be possible to be used by them with the ability to surge to determine the right track.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Στην έρευνα των αθλημάτων υπάρχουν πλέον αυτοματοποιημένες μέθοδοι επεξεργασίας ψηφιακών εικόνων και λογισμικά που βοηθούν στην όραση μέσω υπολογιστών, που έχουν ως αποτέλεσμα διάφορα πλεονεκτήματα κυρίως σχετικά με την αυτόματη ανάλυση και ερμηνεία των αθλημάτων και την βοήθεια και βελτίωση της τελικής απόφασης των διαιτητών.

1.1. Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Προς την κατεύθυνση αυτή, στην παρούσα εργασία βασική επιδίωξη αποτελεί η ανάλυση ψηφιακών εικόνων με σκοπό τον εντοπισμό κάθε ίχνους των οριζόντιων αλμάτων και ο προσδιορισμός της απόστασης της επίδοσης σύμφωνα με τον εντοπισμό αυτό.

Ο προσδιορισμός ουσιαστικά αναφέρεται στην ανάπτυξη και αξιολόγηση μεθόδων επεξεργασίας εικόνας σε συνδυασμό με Φωτογραμμετρικές διαδικασίες για την αυτοματοποιημένη μεθοδολογία υπολογισμού της απόστασης των οριζοντίων αλμάτων.

Στόχος της εργασίας είναι να απαντηθούν τα ερωτήματα κατά πόσο είναι δυνατόν να εντοπιστεί με αυτοματοποιημένη μέθοδο το κατάλληλο ίχνος στα οριζόντια άλματα (απλού ή τριπλούν) και να υπολογιστεί η απόσταση του από την γραμμή αφετηρίας των μετρήσεων, με κατάλληλη ακρίβεια που ορίζεται από τις προδιαγραφές του αθλήματος, με βάση επίγεια δεδομένα κλίμακας 1:250 από ερασιτεχνική μη μετρητική μηχανή. Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται αφορά τα οριζόντια άλματα όμως η εφαρμογή πραγματοποιείται σε δεδομένα για το άλμα εις μήκος.

1.2. Δομή της εργασίας

Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο αναπτύσσεται παρακάτω.

Στο ***πρώτο κεφάλαιο*** παρουσιάζεται το αντικείμενο ο στόχος και η δομή των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας.

Στο ***δεύτερο κεφάλαιο*** περιγράφονται γενικές πληροφορίες για το άλμα εις μήκος που αποτέλεσαν βασικό κριτήριο για την ανάπτυξη της μεθοδολογίας και οι οποίες αναφέρονται στις προδιαγραφές των εγκαταστάσεων του αθλήματος και στις προδιαγραφές της μέτρησης του με την αντίστοιχη ακρίβεια. Ακόμη γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε αναφορές σχετικά με

την χρήση της εικόνας μέσω αυτοματοποιημένων διαδικασιών, σε διαφορετικά αθλήματα, για την εξαγωγή σημαντικών αποτελεσμάτων στην ανάλυση και βελτίωση των αθλημάτων.

Στο ***τρίτο κεφάλαιο*** αναπτύσσεται η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται για την επίτευξη του στόχου καθώς και ο απαραίτητος εξοπλισμός.

Στο ***τέταρτο κεφάλαιο*** περιγράφονται οι επιλογές πριν την διαδικασία της υλοποίησης και παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα καθώς και τα προϊόντα ύστερα από την επεξεργασία τους. Παρουσιάζονται επίσης αναλυτικά στοιχεία από την υλοποίηση του αλγορίθμου στο προγραμματιστικό περιβάλλον και τα αποτελέσματα κάθε επίδοσης σύμφωνα με αυτόν. Τέλος, πραγματοποιούνται κάποιοι έλεγχοι και γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στο ***πέμπτο κεφάλαιο*** αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα στάδια υλοποίησης της εργασίας και από τους ελέγχους σχετικά με την αξιολόγηση.

Στο ***έκτο κεφάλαιο*** περιγράφονται συνοπτικά εναλλακτικές βελτίωσης που θα συμβάλλουν στην περαιτέρω ανάπτυξη και αυτοματοποίηση του κώδικα με βάση την παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 2. Οριζόντια άλματα και ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Στο κεφάλαιο αυτό δίνονται πληροφορίες σχετικά με το αγώνισμα του άλματος σε μήκος, τις προδιαγραφές των εγκαταστάσεων και τον τρόπο προσδιορισμού των επιδόσεων καθώς και παραδείγματα σχετικά με την χρήση των εικόνων στην ανάλυση των αθλημάτων.

2.1. Άλμα εις μήκος

Το άλμα εις μήκος είναι ένα αγώνισμα στίβου που ανήκει στην κατηγορία των οριζόντιων αλμάτων και βρίσκεται στο πρόγραμμα των Ολυμπιακών αγώνων για τους άντρες από το 1896 και για τις γυναίκες από το 1948. Η μεγαλύτερη παγκόσμια επίδοση που έχει πραγματοποιηθεί είναι 8.95 m από τον Αμερικάνο Mike Powel, ενώ για τις γυναίκες 7.52 m από την Galina Christyakova από την Σοβιετική Ένωση. Οι αθλητές συνδυάζουν ταχύτητα, δύναμη και ευκινησία στην προσπάθειά τους να επιτύχουν άλμα όσο το δυνατόν πιο μακριά από την γραμμή εκτίναξης, που ευρίσκεται εμπρός από την βαλβίδα.

Το άθλημα αποτελείται από τέσσερις φάσεις, την φόρα, την εκτίναξη, την φάση μετεωρισμού και την προσγείωση, όπου ο συνδυασμός τους επηρεάζει την επίδοση. Στην πρώτη φάση ο άλτης αναπτύσσει ταχύτητα σε έναν διάδρομο φόρας μέχρι την στιγμή της εκτίναξης. Ο διάδρομος αυτός έχει κατάλληλο μήκος ώστε να δίνεται η δυνατότητα στον αθλητή να φτάσει την μέγιστη ταχύτητα. Σε 4 έως 5 βήματα πριν από την βαλβίδα αρχίζει η προετοιμασία για την εκτίναξη. Η εκτίναξη πρέπει να γίνεται μπροστά από την βαλβίδα και να μην ξεπερνά τη γραμμή εκτίναξης ώστε να θεωρείται έγκυρο το άλμα. Κατά την διάρκεια του μετεωρισμού ο άλτης κρατάει την ισορροπία του, φτάνει στο ψηλότερο σημείο της τροχιάς του και ολοκληρώνει το άλμα του με την προσγείωση στην επιφάνεια του σκάμματος.

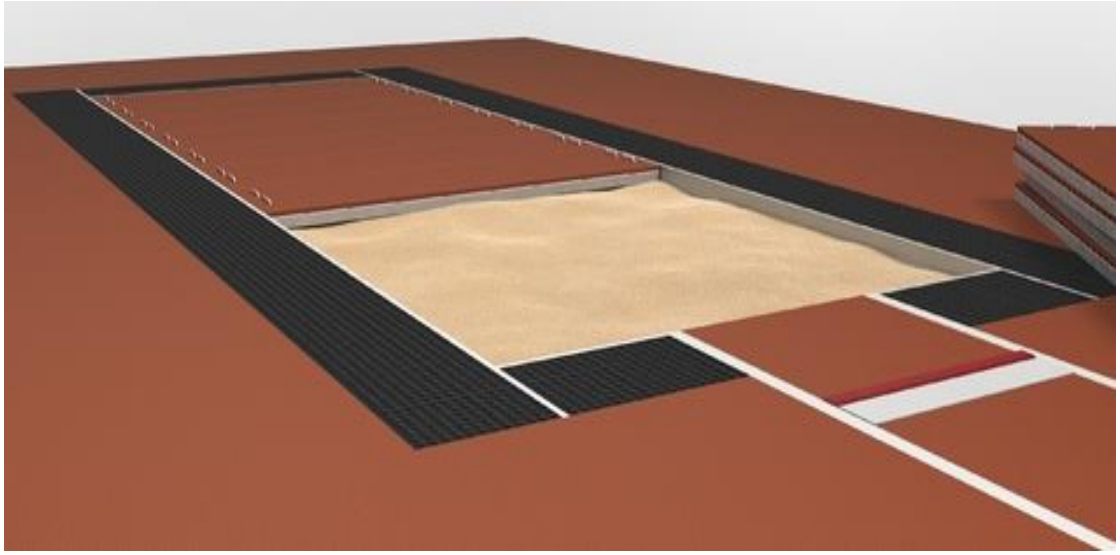
2.1.1. Προδιαγραφές των εγκαταστάσεων του αγωνίσματος

Σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Ομοσπονδιών Κλασικού Αθλητισμού (IAAF), σε κάθε άθλημα πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένοι κανονισμοί σχετικά με τις εγκαταστάσεις. Για το συγκεκριμένο αγώνισμα, οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις που περιλαμβάνονται είναι ο διάδρομος φόρας, η γραμμή εκτίναξης και η περιοχή προσγείωσης (σκάμμα).

Ο διάδρομος φόρας, μετρημένος από την αρχή του διαδρόμου μέχρι την γραμμή εκτίναξης, πρέπει να έχει ελάχιστο μήκος 40 m και όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν να φτάνει τα 45 m. Το πλάτος του πρέπει να είναι 1.22 m με απόκλιση ±0.01 m και να σημειώνονται λευκές γραμμές 50

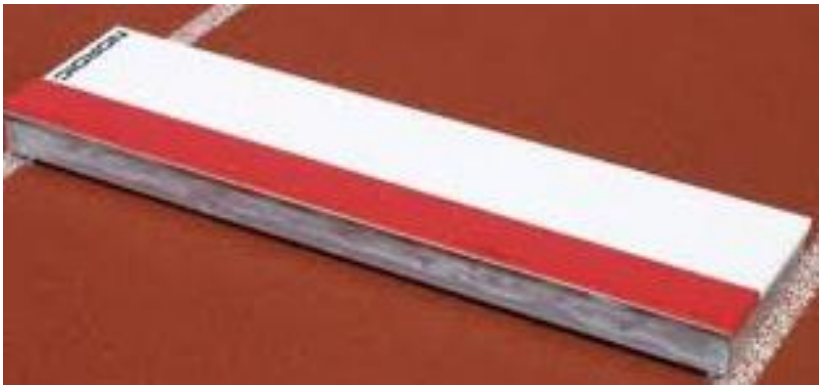
χιλιοστών σε πλάτος. Οι διάδρομοι που κατασκευάστηκαν πριν την 1 Ιανουαρίου 2004 μπορεί να έχουν μέγιστο πλάτος 1.25 m. Η επιτρεπόμενη μέγιστη πλευρική κλίση πρέπει να είναι 1%, ενώ στα τελευταία 40 m του διαδρόμου, η συνολική καθοδική κλίση στην διεύθυνση της επιτάχυνσης δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.1%.

Το σημείο εκτίναξης πρέπει να σημειώνεται με μια ορθογώνια βαλβίδα, βυθισμένη στο έδαφος, που βρίσκεται στο επίπεδο του διαδρόμου και της επιφάνειας που γίνεται η προσγείωση. Η γραμμή εκτίναξης πρέπει να τοποθετείται στην άκρη της βαλβίδας που βρίσκεται πιο κοντά στο σκάμμα. Ως βοήθημα των κριτών πρέπει να τοποθετείται ένας δείκτης από πλαστελίνη ακριβώς μετά την γραμμή εκτίναξης. Η βαλβίδα πρέπει να έχει λευκό χρώμα και διαστάσεις 1.22 m ± 0.01 m μήκος, 0.20 m ± 0.002 m πλάτος και μέγιστο βάθος 0.10 m. Από άκαμπτο υλικό πρέπει να αποτελείται και ο δείκτης πλαστελίνης και να έχει ίδιο μήκος με την βαλβίδα και πλάτος 0.10 m ± 0.002 m ενώ το χρώμα του πρέπει να είναι σε αντίθεση με το λευκό της βαλβίδας. Συγκεκριμένα για το αγώνισμα του άλματος σε μήκος, η απόσταση από την αφετηρία εκτίναξης μέχρι το τέλος του σκάμματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 10m, ενώ πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεταξύ 1m έως 3m από την αφετηρία του σκάμματος.



Εικόνα 2.1: Διάταξη εγκατάστασεων του αθλήματος

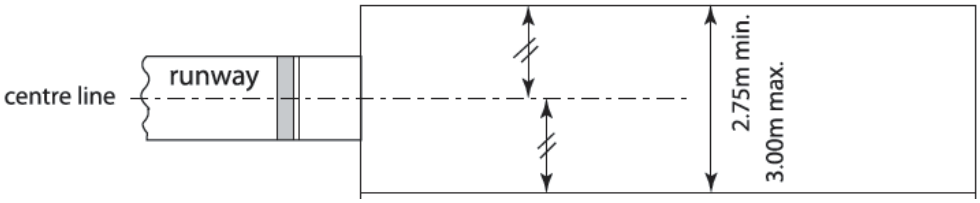
[Πηγή:http://www.nordicsport.com/product/48218/Cover_for_Sand_pit]



Εικόνα 2.2: Βαλβίδα εκτίναξης

[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=long+jump&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjL-bPQ6vrNAhUIGhQKHQ-NBLQQ_AUIBigB#tbm=isch&q=long+jump+plasticine+indicator&imgrc=zj5tDsOeVS

Το ελάχιστο πλάτος που πρέπει να έχει το σκάμμα, όπου γίνεται η προσγείωση του άλτη, είναι 2.75 m ενώ το μέγιστο 3 m. Είναι επιθυμητό να τοποθετείται σε τέτοια θέση, ώστε η μέση του διαδρόμου, προεκτεινόμενη να συμπίπτει με την μέση του σκάμματος. Σε περίπτωση που αυτό δεν επιτυγχάνεται, πρέπει να τοποθετείται μία ταινία στην περιοχή του σκάμματος ώστε ο κεντρικός άξονας του διαδρόμου με την μέση της καινούργιας περιοχής του σκάμματος να συμπίπτουν. Η περιοχή προσγείωσης πρέπει να γεμίζεται με μαλακή νωπή άμμο, όπου η επιφάνεια της πρέπει να είναι στο ίδιο επίπεδο με την βαλβίδα εκτίναξης.



Εικόνα 2.3: Διάδρομος φόρας και περιχοή προσγείωσης

[Πηγή: IAAF, «Competition Rules 2016-2017» 2016]

2.1.2. Προδιαγραφές μέτρησης και ακρίβειας των επιδόσεων

Ύστερα από την ολοκλήρωση της κάθε προσπάθειας των αθλητών πραγματοποιείται η μέτρηση της επίδοσης, εφόσον αυτή θεωρείται έγκυρη. Στην φάση της εκτίναξης, σε περίπτωση που ο διαγωνιζόμενος αρχίσει το άλμα με μέρος του ποδιού του να έχει ξεπεράσει την γραμμή εκτίναξης της βαλβίδας, η προσπάθεια θεωρείται άκυρη και το άλμα δεν μετριέται.

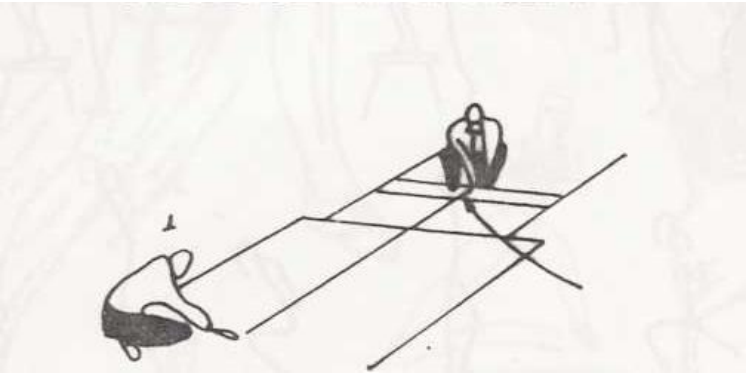
Όλα τα άλματα πρέπει να μετρούνται από το κοντινότερο σημείο του ίχνους που δημιουργείται στην άμμο του σκάμματος, από οποιοδήποτε μέρος του σώματος ή από οτιδήποτε ακουμπάει το σώμα την στιγμή της προσγείωσης, έως την γραμμή εκτίναξης. Σύμφωνα με τους κανονισμούς η μέτρηση της κάθε επίδοσης πρέπει να γίνεται κάθετα στην γραμμή εκτίναξης και οι αποστάσεις πρέπει να καταγράφονται στο κοντινότερο 0.01 m της μικρότερης μέτρησης, αν αυτή δεν συμπληρώνει ολόκληρο εκατοστό.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, μόλις ο άλτης πατήσει την περιοχή της πλαστελίνης το άλμα θεωρείται άκυρο. Άλλες περιπτώσεις που η προσπάθεια ακυρώνεται είναι

- όταν ο αθλητής κατά την διάρκεια του άλματος, πέρα από την γραμμή εκτίναξης, ακουμπήσει το διάδρομο ή το έδαφος έξω από αυτόν ή την περιοχή έξω από το σκάμμα, με οποιοδήποτε μέρος του σώματός του, ή δεν πραγματοποιήσει την φάση της αιώρησης
- όταν έχει μια ατυχή πτώση στην φάση της φόρας ή της αιώρησης
- όταν αποχωρεί από την περιοχή προσγείωσης και ακουμπήσει το έδαφος σε περιοχή κοντινότερη προς την γραμμή εκτίναξης.

2.1.3. Εξέλιξη τρόπου μέτρησης επιδόσεων

Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε για την μέτρηση του μήκους είναι η χρήση μετροταινίας, όπου για την μέτρηση της επίδοσης που σημειώθηκε χρειάζονται δύο κριτές. Ο ένας είναι υπεύθυνος να ορίσει, αμέσως μετά την προσγείωση του αθλητή, το σημείο που έχει την μικρότερη απόσταση από την βαλβίδα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιεί μια μεταλλική ράβδο η οποία τοποθετείται κάθετα στο σημείο αυτό σε σχέση με την επιφάνεια προσγείωσης και στην συνέχεια τοποθετεί εκεί την αρχή της μετροταινίας. Ο δεύτερος κριτής τεντώνει την μετροταινία πάνω στην βαλβίδα, ώστε να δημιουργείται ορθή γωνία με την γραμμή εκτίναξης και ανακοινώνει την επίδοση που αναγράφεται στην μετροταινία. Ο τρόπος αυτός χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα σε ερασιτεχνικό επίπεδο αγώνων.

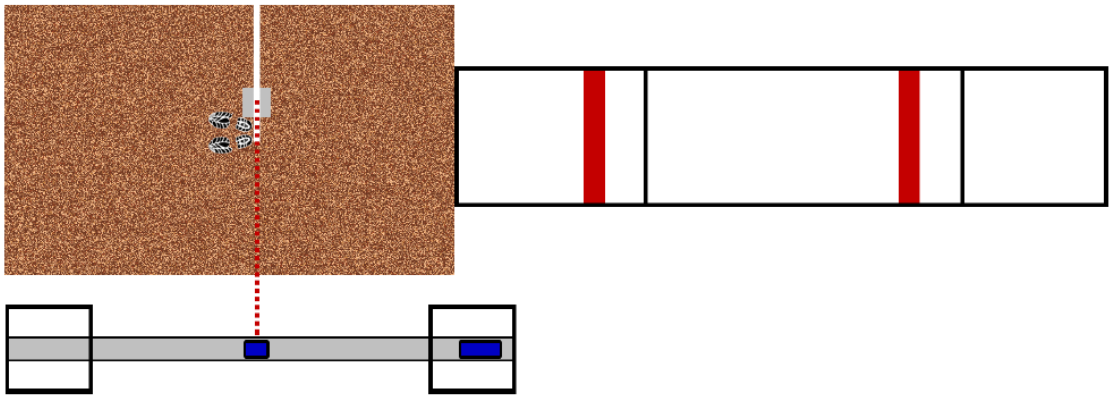


Εικόνα 2.4: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση
[Πηγή:https://www.google.gr/search?hl=el&tbm=isch&q=atletismo+salto+em+distancia&oq=&gs_l=#imgrc=isYxS0UBW-KkbM%3A]

Ο επόμενος τρόπος μέτρησης των επιδόσεων εφαρμόστηκε με την βοήθεια μιας συσκευής. Πιο συγκεκριμένα, τοποθετείται σε διεύθυνση κάθετη στην επέκταση της γραμμής εκτίναξης, μια μεταλλική ράβδος μήκους 4m πάνω στην οποία μετακινείται μια βαθμονομημένη συσκευή με τηλεσκόπιο. Όπως και στην προηγούμενη διαδικασία, ένας κριτής είναι υπεύθυνος για την υπόδειξη του κατάλληλου σημείου του ίχνους που δημιουργείται από τον αθλητή τοποθετώντας κατακόρυφα μια μεταλλική βελόνα. Στην συνέχεια ο δεύτερος κριτής είναι υπεύθυνος να μετακινήσει την βαθμονομημένη συσκευή πάνω στην ράβδο, ώστε ο άξονας της συσκευής να ταυτίζεται με την μεταλλική βελόνα. Μόλις αυτό επιτευχθεί, ο κριτής ανακοινώνει την αναγραφόμενη τιμή που φαίνεται ακριβώς κάτω από την συσκευή στο συγκεκριμένο σημείο. Για την σωστή μέτρηση των επιδόσεων οι τιμές που αναγράφονται στην τετράμετρη ράβδο είναι τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε η αφετηρία της ράβδου να αναγράφει την αντίστοιχη τιμή της απόστασης από την γραμμή εκτίναξης, όπου θεωρείται η αφετηρία των μετρήσεων. Αυτό προϋποθέτει η τετράμετρη ράβδος να είναι τοποθετημένη σε μόνιμη θέση ώστε να μπορεί να γίνει η μέτρηση όλων των επιδόσεων που αναμένονται μέσα στα τέσσερα αυτά μέτρα.

Μια παρόμοια προσέγγιση αυτής της διαδικασίας έγινε με την αντικατάσταση της βαθμονομημένης αυτής συσκευής με μια ηλεκτρονική που διαθέτει και σημειακό laser το οποίο μετακινείται πάνω στην ράβδο και καλύπτει την περιοχή που πραγματοποιούνται οι επιδόσεις. Πριν την διαδικασία του αγωνίσματος πραγματοποιούνται δύο μετρήσεις για να βαθμονομηθεί η συσκευή. Συνήθως προτείνεται να είναι η πιθανή ελάχιστη και μέγιστη επίδοση που αναμένεται

να πραγματοποιηθεί. Η διαδικασία αυτή γίνεται με την βοήθεια τοποθετημένης μετροταινίας στο σκάμμα για να αναγράφεται η σωστή θέση σε σχέση με την γραμμή εκτίναξης. Κάθε φορά που γίνεται ένα άλμα το σημειακό laser μετακινείται στην ράβδο ώστε να ευθυγραμμιστεί με το σωστό σημείο που υποδεικνύει ο κριτής στο σκάμμα και στην συνέχεια πραγματοποιείται η μέτρηση από την ηλεκτρονική συσκευή, δίνοντας έτσι την απόσταση του άλματος. Σημειώνεται πως και σε αυτήν την περίπτωση η μεταλλική ράβδος είναι κάθετη στην διεύθυνση της γραμμής εκτίναξης ώστε να υπολογίζεται η κάθετη απόσταση του σημείου από την γραμμή όπως ορίζουν οι κανονισμοί. (Heckel,2010).

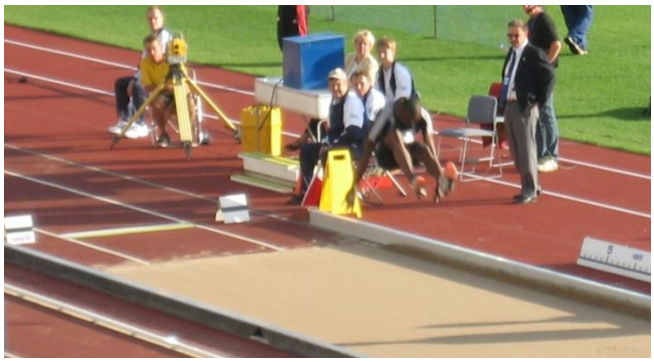


Εικόνα 2.5: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση κινούμενης ηλεκτρονικής συσκευής με σημειακό laser

[Πηγή: Heckel, «Electronic Measurement in the Horizontal Jumps» 2010]

Σε όλους τους επίσημους αγώνες πλέον, γίνεται χρήση γεωδαιτικού σταθμού για τον προσδιορισμό της απόστασης της κάθε επίδοσης. Η συσκευή τοποθετείται σε ένα σταθερό τρίποδο σε τέτοια θέση ώστε να μην εμποδίζει την διαδικασία του αθλήματος αλλά και να μην εμποδίζεται από εξωτερικούς παράγοντες ώστε να παραμένει στην ίδια θέση. Πριν από την έναρξη του αγωνίσματος πραγματοποιείται ένας αριθμός μετρήσεων ώστε να βαθμονομηθεί η συσκευή. Σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς μετρούνται οι 2 άκρες του ευθύγραμμου τμήματος της βαλβίδας στο σημείο που έχει οριστεί η γραμμή εκτίναξης. Υπολογίζονται οι συντεταγμένες των σημείων αυτών στο αυθαίρετο σύστημα και προσδιορίζεται η εξίσωση της ευθείας που ορίζουν. Οι μετρήσεις αυτές επαναλαμβάνονται για να γίνει έλεγχος της εξίσωσης. Αφού προσδιοριστεί σωστά αυτή η ευθεία το όργανο είναι έτοιμο να μετρήσει τις επιδόσεις. Ύστερα από κάθε άλμα, ο κριτής που είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό του κατάλληλου σημείου του ίχνους τοποθετεί

κατακόρυφα ένα ανακλαστικό κάτοπτρο στο σημείο αυτό. Το κάτοπτρο είναι τοποθετημένο στην βάση ενός μικρού στύλου που στο τελείωμα έχει μια βελόνα η οποία τοποθετείται μέσα στην άμμο. Αφού ολοκληρωθεί η μέτρηση, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του σημείου του ίχνους και υπολογίζεται η απόσταση του σημείου αυτού από την ευθεία με αναλυτική γεωμετρία. Το αποτέλεσμα είναι η ζητούμενη επίδοση, μετρημένη κάθετα από την γραμμή εκτίναξης. Η διαδικασία υπολογισμού γίνεται αυτόματα αμέσως μετά την μέτρηση του σημείου του άλματος, καθώς ο γεωδαιτικός σταθμός είναι συνδεδεμένος με έναν υπολογιστή που διαθέτει το λογισμικό υπολογισμού. Σε ορισμένους γεωδαιτικούς σταθμούς, ο υπολογισμός αυτός γίνεται εσωτερικά με το λογισμικό COGO. Σε σημαντικές διοργανώσεις (όπως οι Ολυμπιακοί Αγώνες) χρησιμοποιούνται δύο γεωδαιτικοί σταθμοί που πραγματοποιούν την ίδια διαδικασία και όπου ο δεύτερος χρησιμοποιείται για έλεγχο των αποτελεσμάτων του πρώτου.



Εικόνα 2.6: Μέτρηση επίδοσης με την χρήση γεωδαιτικού σταθμού
[Πηγή:https://en.wikipedia.org/wiki/Long_jump#/media/File:Sdiri_vole.jpg]

Εικόνα 2.7: Απαιτούμενος Εξοπλισμός
[Πηγή: «Laser Distance and Height Measurement»]

2.2. Παραδείγματα χρήσης οπτικών μεθόδων στα αθλήματα

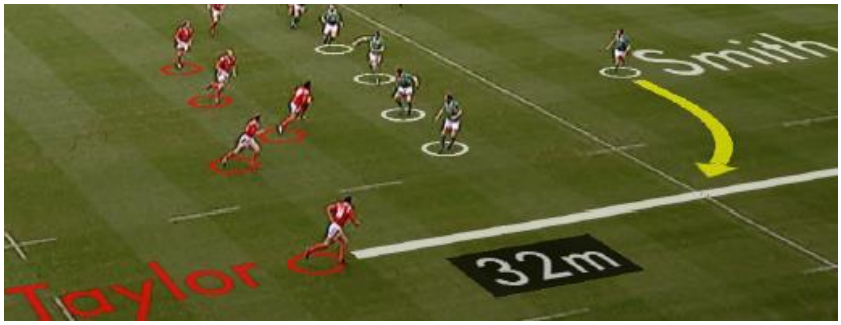
Η επιστήμη των υπολογιστών αποτελεί ένα θεμελιώδες εργαλείο στην έρευνα των αθλημάτων και ειδικότερα στην επίλυση προβλημάτων και την βελτίωση τεχνικών σχετικά με αυτά. Η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων σε συνδυασμό με τα λογισμικά που βοηθούν στην όραση μέσω υπολογιστών, έχει ως αποτέλεσμα διάφορα πλεονεκτήματα σχετικά με την βελτίωση της

μετάδοσης και της παρακολούθησης από το κοινό, την βελτίωση της μεθόδου και της τεχνικής των αθλητών, την αυτόματη ανάλυση και ερμηνεία των αθλημάτων, την βοήθεια και βελτίωση της τελικής απόφασης των διαιτητών και την διαφήμιση.

2.2.1. Εισαγωγή της εικόνας στην ανάλυση των αθλημάτων

Οι πρώτες προσεγγίσεις σχετικά με την ανάλυση των αθλημάτων δεν απαιτούσαν επεξεργασία εικόνας αλλά αισθητήρες laser που τοποθετούνταν στις γραμμές του γηπέδου της αντισφαίρισης και αναγνώριζαν αν η μπάλα ακουμπούσε την γραμμή. Αργότερα, χωρίς κάποια γνώση της γεωμετρίας της εικόνας χρησιμοποιήθηκαν στιγμιότυπα από βίντεο για απλή σχεδίαση ώστε να επισημαίνονται οι πιθανές πορείες του κάθε αθλητή ξεχωριστά .

Με την χρήση οπτικών αισθητήρων στις φωτογραφικές μηχανές, την σχετική γνώση για την βαθμονόμηση της θέσης τους και την γνώση της γεωμετρίας του γηπέδου, εισάγεται η δυνατότητα παραγωγής γραφικών σχετικά με τις αποστάσεις και την θέση εκτός πεδίου (offside) στο ποδόσφαιρο, τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα αθλήματα όπως το κολύμπι, το τρέξιμο και το άλμα εις μήκος, προσθέτοντας γραμμές που θα υποδεικνύουν τα παγκόσμια ρεκόρ. Στην περίπτωση που είναι γνωστή και η θέση των αθλητών στον χώρο του γηπέδου μπορεί να σχεδιαστεί και η σχετική απόσταση μεταξύ τους ή για παράδειγμα από την γραμμή του τέρματος στο ποδόσφαιρο.(Thomas,2012)



Εικόνα 2.8: Παράδειγμα γραφικών σχετικά με την απόσταση
[Πηγή: Thomas, «Sports TV Applications of Computer Vision» 2012]

Μια ενδιαφέρουσα εξέλιξη που συνδυάζει αυτές τις φωτογραφικές μηχανές με την παρακολούθηση των αντικειμένων είναι το σύστημα FoxTrax όπου αποδίδει μια γραφική επίστρωση στην επιφάνεια του δίσκου στο αγώνισμα του χόκεϊ επί πάγου ώστε να βελτιώσει την

ορατότητά του. Στο εσωτερικό του δίσκου είναι τοποθετημένη μια ομάδα από ημιαγωγούς που εκπέμπουν κόκκινο φως που αντιλαμβάνονται οι 8 κάμερες που είναι τοποθετημένες στην οροφή του γηπέδου. Με την αρχή του τριγωνισμού υπολογίζεται η θέση του δίσκου στον τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας τις εικόνες από αυτές τις κάμερες και έτσι αντιστοιχίζεται το αποτέλεσμα της γραφικής επίστρωσης με μια κάμερα μετάδοσης προσαρμοσμένη με αισθητήρες που πραγματοποιούν εστίαση, κίνηση και κλίση ώστε το κοινό να μπορεί να παρακολουθεί την κίνηση του δίσκου. Πέρα από την σχεδίαση πάνω στον δίσκο είναι δυνατό να απεικονιστεί και η κίνηση του μεταξύ των περιόδων ξαφνικής επιτάχυνσης. (Cavallaro, 1997)

Εικόνα 2.9: Παράδειγμα τεχνολογίας FoxTrax
[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=fox+trax&biw=1242&bih=566&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=0ahUKEwiVwMzC8frNAhXB1xQKHQPPADQQ_AUIBygC]

Σε αθλήματα, όπως οι καταδύσεις και η παγοδρομία, χρησιμοποιούνται τεχνικές ανάλυσης της εικόνας, όπου οι κινούμενοι αθλητές χωρίζονται σε ξεχωριστά τμήματα από το φόντο με μια διαδοχική λήψη φωτογραφιών ώστε να δημιουργηθεί μια νέας εικόνας που θα συνδυάζει τα τμήματα απεικονίζοντας την συνολική προσπάθεια του κάθε αθλητή.

Ο συνδυασμός της κατάτμησης των αντικειμένων και της βαθμονόμησης της φωτογραφικής μηχανής επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης στον τρισδιάστατο χώρο με την προϋπόθεση ότι το χαμηλότερο σημείο του αντικειμένου έχει επαφή με το έδαφος και ως αποτέλεσμα επιτρέπεται η δημιουργία μιας εικονικής αναπαράστασης του αγώνα σε θέση διαφορετική από αυτή που ήταν η εικόνα την στιγμή της λήψης. Ένα παράδειγμα αυτής της εφαρμογής είναι στο ποδόσφαιρο, όπου μπορεί να γίνει αναπαράσταση της υπέρβασης της γραμμής που θεωρείται offside από το

σημείο που βρίσκεται ο επόπτης την στιγμή της υπόδειξης ή για να παρουσιαστεί καλύτερα η ανάλυση μιας τακτικής του αγωνίσματος. (Thomas,2012)

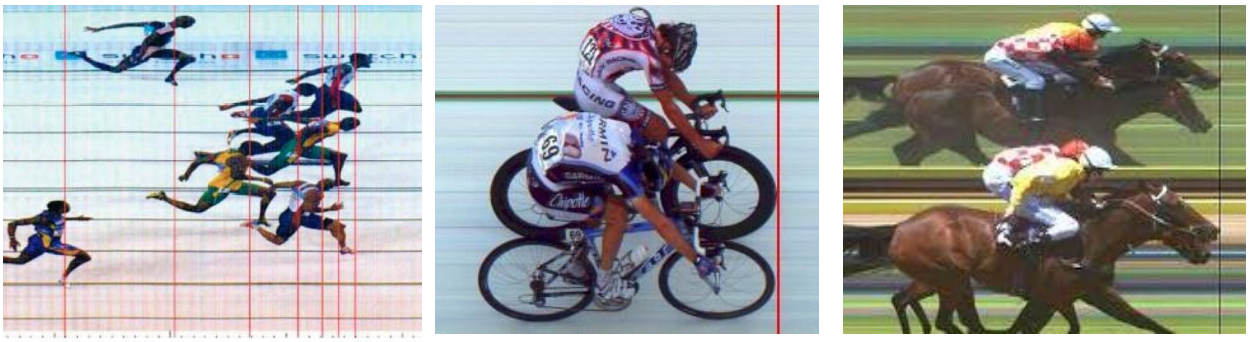
Εικόνα 2.10: Παράδειγμα πραγματικής στιγμής (αριστερά) και εικονικής αναπαράστασης (δεξιά) με την χρήση ανάλυσης εικόνας

[Πηγή: Thomas, «Sports TV Applications of Computer Vision» 2012]

Σε αγωνίσματα όπου πολλοί διαγωνιζόμενοι διασχίζουν την γραμμή τερματισμού σχεδόν ταυτόχρονα χρησιμοποιείται μια άλλη τεχνική που κάνει χρήση εικόνων και ονομάζεται Photo finish. Εφόσον ένα γυμνό μάτι δεν έχει την δυνατότητα να διακρίνει ποιος διαγωνιζόμενος τερμάτισε πρώτος, χρησιμοποιείται μια φωτογραφία ή ένα βίντεο που καταγράφεται στην γραμμή τερματισμού, για να δώσει έναν ακριβή έλεγχο του αποτελέσματος και να αποτρέψει λάθη σχετικά με τα αποτελέσματα. Παρόλο που είναι πιο συνηθισμένο να χρησιμοποιείται ηλεκτρονικός εξοπλισμός για παρακολούθηση των αθλητών, η φωτογραφία θεωρείται ως η πιο σημαντική απόδειξη στην επιλογή του νικητή σε τέτοιου είδους αγώνες.

Οι κάμερες που χρησιμοποιούνται έχουν την τεχνική της καταγραφής σε λωρίδες, όπου η μηχανή στοχεύει στην γραμμή τερματισμού τοποθετημένη σε μια υπερυψωμένη θέση. Καταγράφει μόνο την ακολουθία των γεγονότων που συμβαίνουν στην γραμμή στην κατακόρυφη υψομετρική διάσταση. Κάθε μέρος του κάθε αθλητή απεικονίζεται όπως εμφανίζεται την στιγμή που διασχίζει τον τερματισμό ενώ οτιδήποτε στάσιμο απεικονίζεται σαν οριζόντια γραμμή. Η οριζόντια θέση αντιπροσωπεύει τον χρόνο και σύμφωνα με τις χρονικές επισημάνσεις που υπάρχουν κατά μήκος της εικόνας στο κάτω μέρος της, μπορεί να βρεθεί η ακριβής στιγμή που ο κάθε ένας αθλητής διέσχισε την γραμμή του τερματισμού. Η διαφορά αυτής της μεθόδου σε σχέση με την συμβατική φωτογραφία, είναι ότι η πρώτη δείχνει ποικίλες χρονικές στιγμές σε μια θέση ενώ η τελευταία δείχνει πολλές θέσεις σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Οι ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές χρησιμοποιούν μονοδιάστατη γραμμή αισθητήρα που καταγράφει κατά ένα εικονοστοιχείο σε αλληλοδιαδοχικές εικόνες στην γραμμή τερματισμού με πολύ μεγάλη ταχύτητα, έως 10000 λήψεις το δευτερόλεπτο, και το αποτέλεσμα είναι άμεσα διαθέσιμο. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί και με καταγραφή συνεχόμενων λήψεων από στάσιμη ή κινούμενη βιντεοκάμερα. Μερικά από τα αγωνίσματα που η τεχνική αυτή είναι χρήσιμη είναι οι αγώνες ταχύτητας (όπως τα 100m), το τρίαθλο, ο ιππόδρομος και η ποδηλασία πίστας όπου το αποτέλεσμα κρίνεται σε μερικά εκατοστά ή και χιλιοστά δευτερολέπτου. (https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, 2016)



Εικόνα 2.11: Παραδείγματα των εικόνων της τεχνικής Photo finish σε διαφορετικά αθλήματα
[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=photo+finish&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwiEmtuj8vrNAhUMbxQKHQ2ICC4Q_AUIBigB]

2.2.2. Εισαγωγή της όρασης μέσω υπολογιστή στα αθλήματα

Ένα από τα πρώτα συστήματα πολλαπλών φωτογραφικών μηχανών που κάνει χρήση της όρασης υπολογιστή, αναπτύχθηκε για την τρισδιάστατη παρακολούθηση της μπάλας στην αντισφαίριση. Αρχικά έκανε χρήση μηχανών για μετάδοση όμως πλέον χρησιμοποιεί 10 κάμερες με υψηλή συχνότητα λήψεων τοποθετημένες σε σταθερή θέση στην οροφή του γηπέδου. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως Hawk Eye. Εφόσον οι μηχανές είναι σταθερές η βαθμονόμησή τους είναι ευκολότερη και μπορεί να γίνει πριν την έναρξη του αγώνα ενώ ταυτόχρονα μπορεί να είναι γνωστή και η γεωμετρία του γηπέδου. Γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά της μπάλας, το σύστημα αναγνωρίζει σε κάθε εικόνα πιθανές μπάλες ανιχνεύοντας ελλειπτικές περιοχές στο προσδοκώμενο μέγεθος και τελικά αντιστοιχίζει το επιθυμητό ίχνος μεταξύ των εικόνων και δημιουργεί την τρισδιάστατη πορεία. Το σύστημα είναι ακριβές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί

από τον διαιτητή για να αναγνωρίσει αν η μπάλα προσγειώθηκε εντός ή εκτός γηπέδου. Έχει χρησιμοποιηθεί και στο αγώνισμα του κρίκετ όπου προβλέπει την πορεία που θα είχε η μπάλα αν δεν την είχε χτυπήσει ο αθλητής ή αν δεν είχε στρίψει όταν αναπήδησε. (https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, 2016)

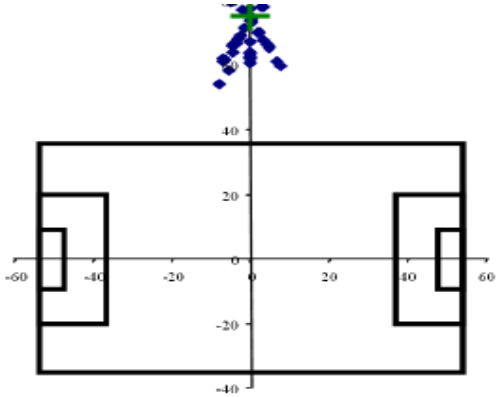
Εικόνα 2.12: Παράδειγμα ανάλυσης και πρόβλεψης στο αγώνισμα του κρίκετ
[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=hawk+eye+cricket&espv=2&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiCyNbY8_rNAhUBsBQKHa6xB8UQ_AUIBigB#imgrc=wO6zxeDuHSuP7M%3A]

Η ανίχνευση όμως της θέσης των αθλητών, αποτελεί δυσκολότερο πρόβλημα από αυτό της μπάλας τόσο γιατί υπάρχουν πολλοί αθλητές στο γήπεδο όσο και γιατί δεν ακολουθούν συγκεκριμένη τροχιά όπως μια μπάλα. Η ανάλυση της κίνησης του ανθρώπου είναι η ικανότητα του ποσοτικού προσδιορισμού της ίδιας της κίνησης χρησιμοποιώντας την κινηματική ανάλυση. Τα συστήματα που πραγματοποιούν την ανίχνευση της κίνησης αποτελούν την πιο σημαντική καινοτόμα τεχνική για την ανάλυση των επιδόσεων στα αθλήματα τα τελευταία χρόνια, χρησιμοποιώντας την όραση μέσω υπολογιστή. Μια από τις χρήσεις αυτής της τεχνικής είναι η εξαγωγή στατιστικών σχετικά με τις αποστάσεις που έχουν διανύσει οι αθλητές και την ταχύτητα τους, τα οποία μπορούν να μελετήσουν σε βάθος οι προπονητές και να βελτιώσουν την τεχνική των αθλητών.

Ένας από τους τρόπους επίτευξης αυτού του σκοπού είναι η χρήση εικόνων από βαθμονομημένη βιντεοκάμερα. Παρόλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί κινούμενη κάμερα, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται σε σταθερή θέση ώστε να μειώνεται ο αριθμός των πολλαπλών βαθμονομήσεων και των προβλημάτων που μπορούν αυτές να προκαλέσουν. Ανάλογα με το

μέγεθος του κάθε γηπέδου, 1 έως 16 κάμερες τοποθετούνται σε μεγάλο ύψος στο κέντρο του γηπέδου ή περιμετρικά του όπως ήδη αναφέρθηκε. Κάθε κάμερα καλύπτει συγκεκριμένο τμήμα του γηπέδου και είναι βαθμονομημένη στις 2 διαστάσεις μέσω των υπαρχουσών σημάνσεων του γηπέδου. Μόλις τα αντικείμενα που ανιχνεύονται (ο αθλητής ή η μπάλα) εισέρχονται στην περιοχή των εικόνων από τις αντίστοιχες κάμερες, αναγνωρίζονται και ορίζονται στο αντίστοιχο εικονοστοιχείο και μέσω των εξισώσεων μετατρέπονται οι εικονοσυντεταγμένες του στις αντίστοιχες συντεταγμένες του χώρου. (Baca,2015).

Οι περισσότερες από τις προηγούμενες διαδικασίες απαιτούν ακριβή βαθμονόμηση της κάμερας σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια μιας αθλητικής διοργάνωσης. Με την έννοια της βαθμονόμησης περιγράφεται τόσο ο προσδιορισμός του εσωτερικού όσο και κυρίως του εξωτερικού προσανατολισμού των λήψεων. Μια διαδικασία στην οποία μπορεί να προσδιοριστεί η θέση της κάμερας είναι χρησιμοποιώντας τις γραμμές του γηπέδου οι οποίες βρίσκονται συνήθως σε γνωστή θέση. Για παράδειγμα οι γραμμές στην περιοχή του τέρματος στο ποδόσφαιρο είναι αυστηρά συγκεκριμένες σε αντίθεση με τις συνολικές διαστάσεις. Πρέπει να είναι ορατός ένας ελάχιστος αριθμός 4 γραμμών που δεν είναι μεταξύ τους παράλληλες ώστε να υπολογιστεί η θέση της κάμερας. (Thomas,2012)

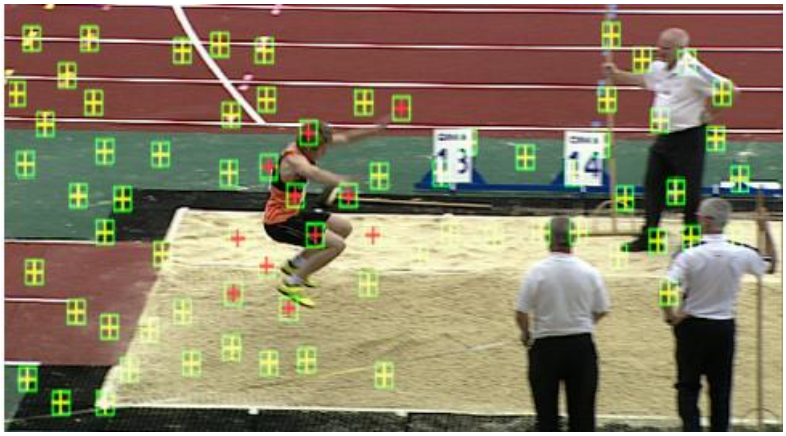


Εικόνα 2.13: Παράδειγμα προσδιορισμού της θέσης της εικόνας από γραμμές του γηπέδου

[Πηγή: Thomas, «Sports TV Applications of Computer Vision» 2012]

Η τεχνική αυτή δεν μπορεί να εφαρμοστεί για αγωνίσματα στίβου όπως τα οριζόντια άλματα και οι αγώνες ταχύτητας, η τεχνική αυτή γιατί στα άλματα δεν υπάρχουν σχεδιασμένες γραμμές και στον στίβο είναι μεταξύ τους παράλληλες. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνει διαφορετική

προσέγγιση στην οποία αρχικά αποθηκεύονται σημεία της εικόνας τα οποία είναι σταθερά και εμφανίζονται σε διαφορετικές λήψεις. Ο προσδιορισμός του σημείου της κάμερας και της θέσης του σημείου που ανιχνεύεται ενώ η κάμερα κινείται γίνεται με την διαδικασία που ονομάζεται ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM) και επιτυγχάνεται με την χρήση του φίλτρου Kalman. Το πρόβλημα χρήσης αυτού του φίλτρου στην διαδικασία SLAM είναι ότι πρέπει η κάμερα να βρίσκεται σε σταθερό σημείο και να μπορεί να αλλάζει η εστιακή απόσταση του φακού σε αντίθεση με την διαδικασία που επιτρέπει κινούμενη κάμερα με σταθερή εσωτερική γεωμετρία. Ως αποτέλεσμα είναι ο συνδυασμός των παραπάνω σταθερών στοιχείων αναφοράς της εικόνας που έχουν αποθηκευτεί (συνήθως της πρώτης λήψης) και μερικών προσωρινών μη στατικών σημείων που θα βοηθήσει στην διαδικασία της ανίχνευσης. Ωστόσο εφόσον η κάμερα είναι σε σταθερή θέση καθιστά αόριστο το βάθος και για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι η εικόνα έχει ομοιόμορφη υφή με αποτέλεσμα τα κινούμενα χαρακτηριστικά να ανιχνεύονται ως ακραία και να εξάγονται με την τεχνική RANSAC, όπου αναγνωρίζει τέτοιου είδους σημεία με μια επαναληπτική διαδικασία και τέλος να ανιχνεύονται ξεχωριστά με διαφορετική απεικόνιση. Γίνεται κατανοητό ότι το αποτέλεσμα δεν αναφέρεται στο τρισδιάστατο επίγειο σύστημα, όμως με ορισμό των συντεταγμένων κάποιον σημείων αναφοράς από έναν χειριστή υπάρχει η δυνατότητα να γίνει η αντιστοιχία τους πριν την αποθήκευση και την χρήση τους στην παραπάνω διαδικασία. (Thomas,2012)



Εικόνα 2.14: Παράδειγμα του συνδυασμού της παραπάνω τεχνικής στο τριπλούν
[Πηγή: Thomas, «Sports TV Applications of Computer Vision» 2012]

Μια άλλη τεχνική λογισμικών που εφαρμόζουν όραση μέσω υπολογιστή και χρησιμοποιείται στο ποδόσφαιρο ονομάζεται τεχνολογία Goal line. Σύμφωνα με τους κανονισμούς του ποδοσφαίρου, τέρμα (goal) επιτυγχάνεται όταν ολόκληρη η μπάλα διασχίσει την γραμμή της

εστίας που είναι σχεδιασμένη κάτω από το οριζόντιο δοκάρι. Έτσι με την τεχνολογία αυτή παρακολουθείται η πορεία της μπάλας και αναγνωρίζεται αν διέσχισε την γραμμή ολόκληρη, ενώ ταυτόχρονα ενημερώνει τους διαιτητές για την σχετική απόφαση. Ο σκοπός αυτής της τεχνολογίας δεν είναι να αντικαταστήσει των ρόλο των διαιτητών, αλλά να τους βοηθήσει στην τελική τους απόφαση. Υπάρχουν τρία συστήματα που έχουν γίνει πρόσφατα αποδεκτά για χρήση, από την Διεθνή Ποδοσφαιρική Ομοσπονδία (FIFA) και το Διεθνή Ποδοσφαιρικό Συμβούλιο (IFAB), που χρησιμοποιούν συστήματα παρακολούθησης μέσω ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών και εφαρμόζουν αυτή την τεχνολογία. Αυτά είναι οι Goal Control, Hawk-eye και Goalminder. (https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page, 2016)

- Goal Control

Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από την Γερμανία και εφαρμόστηκε στο Παγκόσμιο Πρωτάθλημα της Βραζιλίας το 2014. Είναι εξειδικευμένη για ανάλυση των εικόνων σε πραγματικό χρόνο σε αθλητικές οργανώσεις. Χρησιμοποιεί 14 κάμερες με καταγραφή έως 500 λήψεις το δευτερόλεπτο, όπου είναι βασισμένες σε συστήματα όρασης για να εντοπίζει, αναγνωρίζει και παρακολουθεί κινούμενα αντικείμενα σε περίπλοκα σκηνικά, όπως είναι η διοργάνωση του ποδοσφαίρου, στις 3 διαστάσεις. Είναι τοποθετημένες περιμετρικά του γηπέδου, όπου οι 7 παρακολουθούν την περιοχή του ενός τέρματος και οι άλλες 7 του άλλου. Είναι συνδεδεμένες με ένα σύστημα υπολογιστή που πραγματοποιεί επεξεργασία εικόνας σε πραγματικό χρόνο και παρακολουθεί όλα τα κινούμενα αντικείμενα μέσα στο γήπεδο και μέσω φίλτρων αφαιρεί τον θόρυβο (αθλητές, διαιτητές και αντικείμενα που εμποδίζουν) ώστε να παραμείνει μόνο η μπάλα. Ο προσδιορισμός της θέσης της στο χώρο των 3 διαστάσεων γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, έως 5 χιλιοστών, στο σύστημα συντεταγμένων του γηπέδου, τόσο στον αέρα όσο και στο έδαφος. Μόλις η μπάλα περάσει την γραμμή του τέρματος κάτω από το οριζόντιο δοκάρι, όλοι οι διαιτητές δέχονται σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο μια δόνηση και μια οπτική σήμανση στα ρολόγια τους.

Εικόνα 2.15: Τεχνολογία Goal Control

[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=goal+control&espv=2&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiWn5qf9vrNAhXF6RQKHZ1oC3IQ_AUIBigB#imgrc=sS9hdkQUN-mipM%3A]

- Goalminder

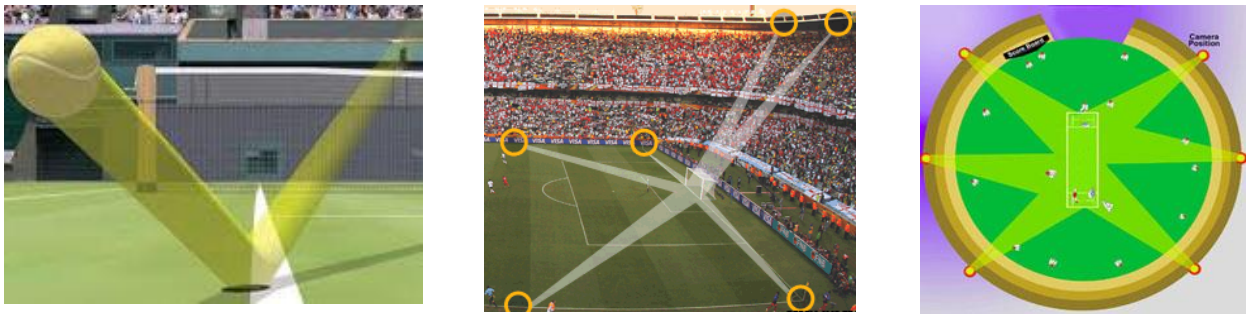
Μια άλλη τεχνική βασισμένη σε εικόνες είναι το σύστημα Goalminder που χρησιμοποιεί κάμερες υψηλής ταχύτητας που καταγράφουν 2000 λήψεις το δευτερόλεπτο τοποθετημένες στα τέρματα και στο οριζόντιο δοκάρι ώστε να καταγράφουν και να μεταδίδουν οπτικές αποδείξεις στους διαιτητές, σε λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα, και να μπορούν να διευθετήσουν διαφωνίες σχετικά με πιθανό γκολ. Αυτή η τεχνική δεν απαιτεί κάποια βαθμονόμηση των μηχανών καθώς χρησιμοποιείται μόνο για οπτικό αποτέλεσμα. Για τον λόγο αυτό δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν πολύ ακριβές κάμερες και έτσι θεωρείται αρκετά οικονομική τεχνική.

Εικόνα 2.16: Τεχνολογία Goalminder

[Πηγή:https://www.google.gr/search?q=goal+minder&espv=2&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiuyMrG9vrNAhWBUhQKHf8SABwQ_AUIBigB#tbm=isch&q=goalminder&imgrc=WNlY3Lq8B8K8eM%3A]

- Hawk-Eye

Όπως ήδη αναφέρθηκε η τεχνολογία Hawk-Eye είναι ένα σύνθετο υπολογιστικό σύστημα που έχει ήδη εφαρμοστεί σε πολλά αθλήματα όπως το κρίκετ, την αντισφαίριση (tennis), το αμερικάνικο μπιλιάρδο (snooker) και την αντιπτέριση (badminton). Σχετικά με το ποδόσφαιρο στην Goal line τεχνολογία, πραγματοποιεί οπτική παρακολούθηση της πορείας της μπάλας ελέγχοντας αν η μπάλα διέσχισε ή όχι την γραμμή του τέρματος. Το σύστημα χρησιμοποιεί συνήθως 6 υψηλής τεχνολογίας μηχανές (σε κάποιες περιπτώσεις 7), τοποθετημένες κάτω από την κορυφή του γηπέδου όπου παρακολουθεί την μπάλα από διαφορετικές γωνίες. Χρησιμοποιώντας την αρχή του τριγωνισμού, ο συνδυασμός των καταγραφών από όλες τις κάμερες με παράλληλη χρήση χρονικών δεδομένων, δημιουργεί μια τρισδιάστατη απεικόνιση της πορείας της μπάλας. Με την χρήση ενός λογισμικού υπολογίζει την θέσης της στον χώρο αναγνωρίζοντας τα εικονοστοιχεία που αυτή απεικονίζεται. Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να παρακολουθεί την μπάλα και να προβλέπει την πορεία της αποθηκεύοντας τα δεδομένα σε μια βάση, για την δημιουργία εικόνων που αναπαριστούν γραφικά την πορεία της μπάλας, ώστε οι διαιτητές, οι σχολιαστές των αγώνων, οι προπονητές και οι θεατές να έχουν την δυνατότητα να ενημερωθούν σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά μπορούν επιπλέον να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των στατιστικών των αθλητών και γενικά την ανάλυση του αγώνα. Το σύστημα αυτό θεωρείται έμπιστο σαν δεύτερη γνώμη σχετικά με αυτά τα αθλήματα και η ακρίβεια του είναι εντός 5 χιλιοστών.



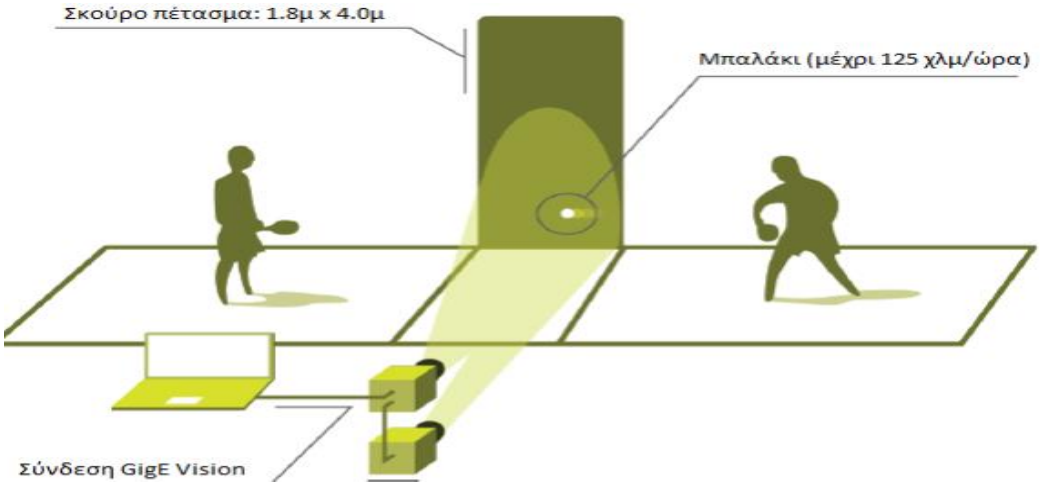
Εικόνα 2.17: Παραδείγματα του συστήματος Hawk-Eye σε διαφορετικά αθλήματα
*[Πηγή:*https://www.google.gr/search?q=google+hawk+eye&espv=2&biw=1242&bih=566&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi8087l9vrNAhUHbhQKHY0iCBoQ_AUIBigB#tbm=isch&q=hawkeye+technology*]*

Ο συνδυασμός των λογισμικών που πραγματοποιούν όραση υπολογιστή, με την θεωρία της ιδανικής τεχνικής σε κάθε φάση των οριζόντιων αλμάτων, δημιουργεί ένα πλαίσιο βελτίωσης της επίδοσης των αθλητών και μετάδοσης της ιδανικής τεχνικής στις επόμενες γενιές. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με την ανάλυση της ανθρώπινης κίνησης και συντελείται από το στάδιο της εξαγωγής των χαρακτηριστικών, την εκμάθηση της τεχνικής, την κατάτμηση της τεχνικής και την κατηγοριοποίησή της. Η ανάλυση αυτή βελτιώνει την διαύγεια και τον αυτόματο εντοπισμό των άκρων του αθλητή κατά την κατάτμηση επικεντρώνοντας στην ανάλυση της δομής και της λειτουργίας των αθλητών. Κατά το πρώτο στάδιο εξάγονται οι στάσεις και οι κινήσεις που διακρίνονται, μέσω βίντεο, μεταξύ των κινήσεων του ανθρώπου και στην συνέχεια λαμβάνονται οι γνώσεις σχετικά με το στατιστικό μοντέλο που κατατάσσεται ως νέα παρατήρηση των χαρακτηριστικών. Στο στάδιο της κατάτμησης, χωρίζεται η συνολική κίνηση σε μεμονωμένες κινήσεις και τελικά κατηγοριοποιείται σε μια βάση δεδομένων με βάση κάποια χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος, το σχήμα, την ταχύτητα και τον τρόπο. Ένα παράδειγμα αυτής της τεχνικής είναι ο προσδιορισμός του κέντρου βάρους του σώματος του άλτη, που προσδιορίζεται με βάση έναν σκελετό που προσαρμόζεται με βάση την ανάλυση της επίδοσης και σύμφωνα με την κίνηση του παρέχονται πληροφορίες σχετικά με το άλμα όπως για παράδειγμα αν μεγιστοποίησε την θέση του κέντρου του σώματος πριν την επίδοση. (Kamnardsiri, Janchai, Khuwuthyakorn, Suwansrikham, Klaphajone, 2015)

Εικόνα 2.18: Παράδειγμα καταγραφής και κατάτμησης της κίνησης

[Πηγή: Kamnardsiri, Janchai, Khuwuthyakorn, Suwansrikham, Klaphajone, «Knowledge-Based System Framework for Training Long Jump Athletes Using Action Recognition» 2015]

Πέρα από τις παραπάνω εφαρμογές, έχει αναπτυχθεί και μια ελληνική, η οποία χρησιμοποιείται για την μέτρηση των ρίψεων και τον υπολογισμό της βαθμολογίας στους αγώνες του Πανελλήνιου Συλλόγου Αντισφαίρισης Ξυλορακέτας. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από το υποσύστημα μετρήσεων με οπτικό αισθητήρα και το υποσύστημα διαχείρισης αγώνων που είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό, την καταγραφή και την οπτικοποίηση της βαθμολογίας. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η λήψη συνεχών πλαισίων μεταξύ φωτογραφικών μηχανών και ενός σκουρόχρωμου πετάσματος τοποθετημένου απέναντι τους. Η λήψη είναι κάθετη στην κίνηση των παικτών και με αλγορίθμους στερεοσκοπικής μηχανικής όρασης, προσδιορίζεται με μεγάλη ακρίβεια η τρισδιάστατη θέση της μπάλας. Γνωρίζοντας δυο διαδοχικές θέσεις προσδιορίζεται η απόσταση που διένυσε η μπάλα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και έτσι τελικά υπολογίζεται η ταχύτητα της. Η κίνησης της θεωρείται ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη και εφόσον η απόσταση που διανύει μέσα στην περιοχή του πετάσματος είναι πολύ μικρή της τάξης του ενός μέτρου, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα της μέσα σε αυτή. Η βαθμολογία που αντιστοιχεί σε μια ρίψη είναι ανάλογη της ταχύτητας της μπάλας. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σαν ένα εργαλείο για την εξαγωγή βαθμολογίας σε πραγματικό χρόνο, είτε σαν εργαλείο που υπολογίζει στατιστικά για τις επιδόσεις των αθλητών και των ομάδων. Ακόμη, μπορεί να επεκταθεί για να υποστηρίξει και άλλα αθλήματα όπως η σφαιροβολία, σφυροβολία και ο ακοντισμός. (Sekkas, Tsetsos, Biboudis, Zervas, Silvestros, Hadjiefthymiades, Batistakis, 2015)



Εικόνα 2.19: Μεθοδολογία υπολογισμού βαθμολογίας σε αγώνα αντισφάιρισης ξυλορακέτας
[Πηγή: http://www.mobics.gr/el/projects/mobiXeyes]

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογική Προσέγγιση

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου για την μέτρηση επιδόσεων αλμάτων (απλού ή τριπλούν) μέσω ψηφιακών εικόνων. Η επεξεργασία της εικόνας αποτελεί σημαντικό παράγοντα εξαγωγής χρήσιμων δεδομένων, τόσο στο αποτέλεσμα όσο και στον βοηθητικό χαρακτήρα των αποτελεσμάτων σε διάφορα αθλήματα. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος που επιλέγεται η χρήση της στο συγκεκριμένο άθλημα σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η μέχρι τώρα προσέγγιση της μέτρησης των αλμάτων γίνεται με καθαρά τοπογραφική διαδικασία. Η επιλογή αυτή καθορίζει την μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται για την επίτευξη του στόχου και παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό, όπου διατυπώνονται τα επιμέρους στάδια της που αφορούν πέρα από τον καθορισμό του στόχου, τις επιλογές πριν την εφαρμογή της μεθόδου, την συλλογή των δεδομένων και την επεξεργασία τους με στόχο το προσδιορισμό του επιθυμητού αποτελέσματος.

Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται αφορά στον καθορισμό του γεωδαιτικού συστήματος αναφοράς, στην αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού, στον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού των λήψεων από την φωτογραφική μηχανή, στον ορισμό του κατάλληλου οριζόντιου επιπέδου στο χώρο που προσομοιάζει την επιφάνεια του σκάμματος, στην μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων κάθε ίχνους στην αντίστοιχη φωτογραφία, και τέλος στον προσδιορισμό του επιθυμητού ίχνους κάθε επίδοσης, συλλέγοντας και επεξεργαζόμενη τα κατάλληλα δεδομένα.

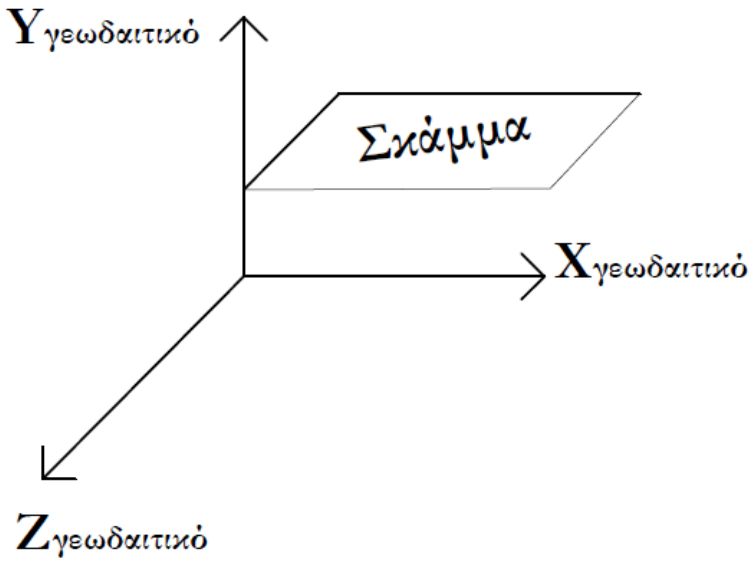
Πριν την υλοποίηση της διαδικασίας και την συλλογή των δεδομένων, αποφασίστηκε πως το αποτέλεσμα της επίδοσης κάθε άλματος θα προσδιορίζεται με μια μονοεικονική διαδικασία και θα αντιστοιχίζεται με την οριζοντιογραφική συντεταγμένη X του κάθε ίχνους. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτής της μεθοδολογίας είναι η απλότητα και η ταχύτερη εκτίμηση του αποτελέσματος γιατί υπολογίζοντας με τα κατάλληλα εργαλεία την θέση του σημείου, έχει ταυτόχρονα υπολογιστεί η απόσταση του άλματος χωρίς να είναι απαραίτητη η περαιτέρω επεξεργασία όπως με την χρήση της αναλυτικής γεωμετρίας.

Έτσι, είναι επιθυμητό όλα τα σημεία να εκφραστούν σε ένα γεωδαιτικό σύστημα, που η αφετηρία του άξονα X να βρίσκεται στην γραμμή εκτίναξης και ταυτόχρονα ο άξονας αυτός να είναι κάθετος στην διεύθυνση της γραμμής, ενώ ο άξονας Z να είναι οριζόντιος και παράλληλος στην διεύθυνση προς την φωτογραφική μηχανή ενώ παράλληλα ο άξονας Y να ορίζει την

διάσταση των υψομέτρων. Γίνεται κατανοητό, πως με τον τρόπο αυτό το αποτέλεσμα κάθε επίδοσης είναι η κάθετη απόσταση του ίχνους από την γραμμή εκτίναξης, όπως ορίζεται από τους κανονισμούς που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1.1.2.

Προτού τα σημεία εκφραστούν σε αυτό το γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, προσδιορίζονται στο αρχικό αυθαίρετο σύστημα αναφοράς που μετρούνται. Οι οριζοντιογραφικές συντεταγμένες $(X,Y)_{\text{αρχικό}}$ των σημείων υπολογίζονται με το 1ο θεμελιώδες πρόβλημα της Γεωδαισίας, γνωρίζοντας τις συντεταγμένες της στάσης ($X_{\text{στάσης}}$, $Y_{\text{στάσης}}$) που βρίσκεται το όργανο, τις οριζόντιες αποστάσεις (D) από την στάση προς τα σημεία και τις γωνίες διεύθυνσης της κάθε πλευράς (a) που σχηματίζεται από την στάση και τα σημεία. Κάθε υψόμετρο προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την κατακόρυφη γωνία που μετριέται από την στάση προς τα σημεία (z), το κεκλιμένο μήκος που μετριέται απευθείας από την στάση προς τα σημεία (S), το ύψος οργάνου ($Y_{\text{οργάνου}}$) και το ύψος κάθε σκόπευσης ($Y_{\text{στόχου}}$).

Για τον προσδιορισμό του επιθυμητού γεωδαιτικού συστήματος που περιγράφεται παραπάνω, προσδιορίζεται αρχικά ο κατάλληλος άξονας X. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, θεωρείται ως γραμμή αφετηρίας των μετρήσεων η πλευρά του σκάμματος που βρίσκεται κάθετα στην διεύθυνση του διαδρόμου, γιατί στο συγκεκριμένο διάδρομο που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή δεν είναι τοποθετημένη η βαλβίδα εκτίναξης. Έτσι μετρούνται σημεία που υλοποιούν την διεύθυνση της συγκεκριμένης γραμμής αφετηρίας, με στόχο τον προσδιορισμό της γωνίας διεύθυνσης σύμφωνα με το 2ο θεμελιώδες πρόβλημα της γεωδαισίας. Εφόσον η γραμμή αυτή πρέπει να είναι κάθετη με τον άξονα X του επιθυμητού συστήματος, η γωνία διεύθυνσής της πρέπει να γίνει μηδέν. Για το λόγο αυτό τα σημεία στρέφονται κατά γωνία ίση με την γωνία διεύθυνσης. Στην συνέχεια, εφαρμόζεται μια μετάθεση όλου του συστήματος κατά τον μέσο όρο των συντεταγμένων X των σημείων που βρίσκονται πάνω στην γραμμή αφετηρίας και τελικά υλοποιείται ο επιθυμητός άξονας X. Για τον ορισμό του άξονα Z με διεύθυνση προς την φωτογραφική μηχανή πραγματοποιείται ένας επιπλέον μετασχηματισμός στροφής περί τον άξονα X κατά 100^g με τον άξονα Y να εκφράζει τελικά τα υψόμετρα των σημείων. Έτσι το κατάλληλο γεωδαιτικό σύστημα και η θέση του σκάμματος ποιοτικά, ύστερα από τους μετασχηματισμούς, έχει την παρακάτω μορφή.



Εικόνα 3.1: Γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων

Μετά τον ορισμό του κατάλληλου γεωδαιτικού συστήματος συντεταγμένων, πραγματοποιείται η αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού για το συγκεκριμένο μοντέλο κεντρικής προβολής, χρησιμοποιώντας τα στοιχεία του πιστοποιητικού βαθμονόμησης για τον συνδυασμό της φωτογραφικής μηχανής και του φακού που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εφαρμογή και έπειτα προσδιορίζεται ο εξωτερικός προσανατολισμός με την διαδικασία της φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας.

Τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού που είναι απαραίτητα για την αποκατάσταση του, δηλαδή η σταθερά της μηχανής c, οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου (xo, yo), και οι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής του φακού, χρησιμοποιούνται από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης που διατίθεται από την βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στο πεδίο ελέγχου του Κέντρου Μετρολογίας τον Δεκέμβριου του 2012. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων που μετρώνται, ανάγονται στις σωστές γεωμετρικά

θέσεις σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα την δέσμη, όπως αυτή ήταν την στιγμή της λήψης.

Η αποκατάσταση του εξωτερικού προσανατολισμού μιας λήψης πραγματοποιεί την ένταξη της δέσμης αυτής στο χώρο. Η αποκατεστημένη δέσμη συνιστά στην ουσία ένα στερεό σώμα και υπόκειται στους ίδιους βαθμούς ελευθερίας που αφορούν στις τρεις μεταθέσεις κατά το τρισδιάστατο σύστημα XYZ και στις τρεις στροφές γύρω από τον κάθε άξονα του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι τρεις μεταθέσεις αφορούν στις τρεις γεωδαιτικές συντεταγμένες Xo, Yo, Zo του σημείου λήψης στο χώρο και οι τρεις στροφές αφορούν, στην γωνία ω περί τον άξονα X, στην γωνία φ περί τον άξονα Y και στην γωνία κ περί τον άξονα Z, ορίζοντας έτσι την διεύθυνση του άξονα λήψης και την στροφή της εικόνας περί αυτόν. (Πέτσα, 2000)

Η διαδικασία με την οποία προσδιορίζονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μιας λήψης, ονομάζεται Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία και γίνεται με την βοήθεια των εξισώσεων της Συνθήκης Συγγραμμικότητας. Η συνθήκη αυτή είναι η σχέση που συνδέει σημεία που απεικονίζονται στην φωτογραφία με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος και εκφράζει με μαθηματικό τρόπο ότι ένα σημείο A στο αντικείμενο, το προβολικό κέντρο O και η εικόνα α του σημείου A πάνω στην φωτογραφία, βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία. (Πατιάς, 1991)

Για τον προσδιορισμό των 6 παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία εφόσον, κάθε μετρημένο σημείο στην εικόνα δίνει δύο εξισώσεις παρατήρησης κατά τις εικονοσυντεταγμένες x και y γνωρίζοντας παράλληλα τις γεωδαιτικές συντεταγμένες κάθε εικονοσημείου. Χρησιμοποιούνται όμως περισσότερα σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, με στόχο την συνόρθωση του αποτελέσματος και την εκτίμηση του σφάλματος προσδιορισμού του. Έτσι εφαρμόζεται η μέθοδος των έμμεσων παρατηρήσεων με τις παρατηρήσεις να θεωρούνται ισοβαρείς και προσδιορίζονται οι έξι άγνωστοι. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται φαίνονται παρακάτω.

$$x = -c\frac{r_{11}(X-X_O)+r_{12}(Y-Y_O)+r_{13}(Z-Z_O)}{r_{31}(X-X_O)+r_{32}(Y-Y_O)+r_{33}(Z-Z_O)} = -c\frac{A_1}{\Pi}$$

$$y = -c\frac{r_{21}(X-X_O)+r_{22}(Y-Y_O)+r_{23}(Z-Z_O)}{r_{31}(X-X_O)+r_{32}(Y-Y_O)+r_{33}(Z-Z_O)} = -c\frac{A_2}{\Pi}$$

Στο επόμενο βήμα, προσδιορίζεται η εξίσωση ενός οριζόντιου επιπέδου που θα προσαρμόζεται καλύτερα στην επιφάνεια προσγείωσης, δηλαδή στο σκάμμα και που είναι παράλληλη στον διάδρομο φόρας, η οποία θεωρείται σχεδόν επίπεδη. Το υψόμετρο του επιπέδου αυτού προσδιορίζεται σύμφωνα με το μέσο όρο των υψομέτρων των σημείων που μετρούνται πάνω στην επιφάνεια αυτή. Η επιλογή αυτή γίνεται γιατί τα σημεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του σκάμματος θα προβάλλονται στο οριζόντιο επίπεδο. Στην περίπτωση που υπάρχει μια υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου της πραγματικότητας και του επιπέδου, η υψομετρική αυτή διαφορά οδηγεί σε μια οριζοντιογραφική μετατόπιση του πραγματικού σημείου με την προβολής του στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτή η μετατόπιση πρέπει να μην ξεπερνά την ακρίβεια που ορίζεται και είναι ίση με 0.01m. Για τον λόγο αυτό είναι επιθυμητό το επίπεδο να ορίζεται στο υψόμετρο της επιφάνειας του σκάμματος. Ωστόσο σύμφωνα με ελέγχους που πραγματοποιούνται στην συνέχεια παρατηρείται πως υπάρχει μια ανοχή στην επιλογή του επιπέδου, χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα.

Ακολουθεί η μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων του ίχνους κάθε έγκυρης προσπάθειας των αθλητών με μια αυτοματοποιημένη μέθοδο η οποία πραγματοποιεί επεξεργασία εικόνων. Πριν από κάθε άλμα η άμμος του σκάμματος απλώνεται ώστε να δημιουργεί ένα σχεδόν οριζόντιο επίπεδο. Ύστερα από αυτή την διαδικασία πραγματοποιείται μια λήψη, ώστε να καταγράφεται στην εικόνα η επιφάνεια του σκάμματος πριν από κάθε προσπάθεια και στην συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία του άλματος. Εφόσον η προσπάθεια είναι έγκυρη, πραγματοποιείται μια νέα λήψη που απεικονίζει την επιφάνεια του σκάμματος που περιλαμβάνει το ίχνος που άφησε ο αθλητής. Η αυτοματοποιημένη μέθοδος χρησιμοποιεί κάθε ζεύγος (πριν και μετά την επίδοση) και με την κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων, προσδιορίζονται οι εικονοσυντεταγμένες του επιθυμητού σημείου του ίχνους σε pixel. Αυτές στην συνέχεια, ανάγονται στην σωστή γεωμετρικά θέση, σύμφωνα με το μοντέλο της κεντρικής προβολής, μέσω της διαδικασίας της αποκατάστασης του εσωτερικού προσανατολισμού.

Τέλος επιλύεται η τομή της ευθείας που δημιουργείται στο χώρο, μεταξύ του σημείου λήψης της φωτογραφικής μηχανής και του ίχνους, με το οριζόντιο επίπεδο. Η επίλυση αυτή οδηγεί στον προσδιορισμό της θέσης του σημείου στο χώρο, με την οριζοντιογραφική συντεταγμένη X να ισούται με την επίδοση του αθλητή.

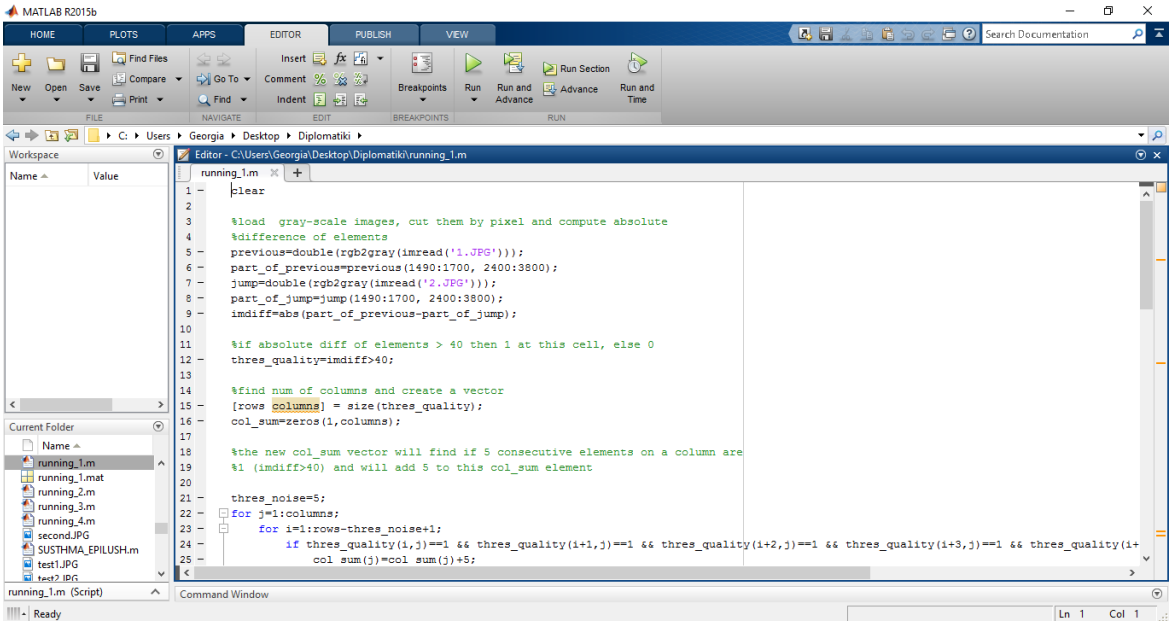
Για την πραγματοποίηση της συνολικής διαδικασίας που περιγράφεται παραπάνω, πραγματοποιείται η επίσκεψη στο γήπεδο όπου πρόκειται να πραγματοποιηθεί το αγώνισμα για την συγκεκριμένη εφαρμογή, ώστε να καταγραφούν οι ανάγκες και οι απαραίτητες επιλογές για την βέλτιστη προσέγγιση της διαδικασίας. Με βάση αυτές τις ανάγκες καθορίζεται η θέση και ο απαραίτητος εξοπλισμός για την συγκεκριμένη υλοποίηση. Το γήπεδο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η συλλογή των δεδομένων είναι το Δημοτικό Στάδιο Ζωγράφου το οποίο διαθέτει έναν διάδρομο φόρας και δύο σκάμματα στις δύο άκρες του διαδρόμου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Το σκάμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων είναι αυτό που βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του γηπέδου και σημειώνεται με μαύρη ένδειξη.

Εικόνα 3.2.: Πεδίο συλλογής δεδομένων για την παρούσα εργασία
[Πηγή:https://www.google.gr/maps/@37.9798411,23.772707,187m/data=!3m1!1e3]

Ο διαθέσιμος εξοπλισμός στην συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει:

- έναν γεωδαιτικό σταθμό Topcon 3003, με δυνατότητα μέτρησης απόστασης χωρίς ανακλαστήρα
- μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή Canon Mark III, 21MP με μέγεθος αισθητήρα 36x24 mm (full frame), μέγεθος στοιχείου του αισθητήρα (sel) 6.4 μm, διαθέσιμους φακούς εστιακής απόστασης 24mm και 50mm
- παρελκόμενα γεωδαιτικού και φωτογραφικού εξοπλισμού (μπαταρίες, φορτιστές, τρίποδα)
- στόχους και κατάλληλη κόλλα πλαστελίνης για την τοποθέτησή τους πάνω σε τρίποδα
- μετροταινία
- ανακλαστήρα για μετρήσεις χαρακτηριστικών σημείων

Η επεξεργασία των δεδομένων και η ανάπτυξη της αυτοματοποιημένης μεθόδου προσδιορισμού του ίχνους πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Matlab που είναι περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής και μια προγραμματιστική γλώσσα τέταρτης γενιάς.



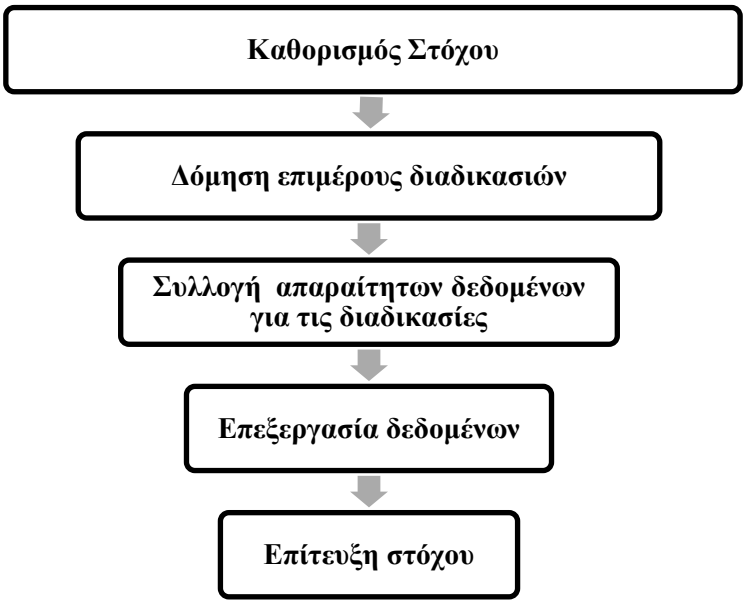
Εικόνα 3.2 : Περιβάλλον Matlab για την επίλυση της διαδικασίας

Η υλοποίηση των παραπάνω διαδικασιών για την επίτευξη του στόχου, περιλαμβάνει την τοποθέτηση της φωτογραφικής μηχανής σε σταθερή θέση με τον κατάλληλο φακό, την συλλογή των απαραίτητων μετρήσεων στο πεδίο εφαρμογής, που αφορά στον προσδιορισμό και την μέτρηση φωτοσταθερών και χαρακτηριστικών σημείων για την διαδικασία της φωτογραμμετρικής

οπισθοτομίας, στην μέτρηση σημείων που ορίζουν την διεύθυνση της γραμμής αφετηρίας των μετρήσεων και στην μέτρηση υψομετρικών σημείων για τον προσδιορισμό του κατάλληλου οριζόντιου επιπέδου και στην συλλογή των απαραίτητων εικόνων για τον προσδιορισμό του ίχνους κάθε επίδοσης.

Επιπλέον, πραγματοποιούνται αμέσως μετά τις προσπάθειες των αθλητών, μετρήσεις των επιδόσεών τους με την χρήση μετροταινίας σύμφωνα με τις προδιαγραφές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1.1.3 που θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο ελέγχου του αποτελέσματος της αυτοματοποιημένης μεθόδου. Όπως αναφέρθηκε, στην συγκεκριμένη εφαρμογή η αφετηρία των μετρήσεων θεωρείται η διεύθυνση της πλευράς του σκάμματος που είναι κάθετη στον άξονα του διαδρόμου φόρας καθώς η βαλβίδα εκτίναξης δεν είναι τοποθετημένη στο συγκεκριμένο γήπεδο. Για την ορθή επίλυση σύμφωνα με τους κανονισμούς, απαιτείται ο προσδιορισμός της γραμμής εκτίναξης.

Τέλος, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες επεξεργασίες των συλλεχθέντων δεδομένων σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν και με βάση την απαιτούμενη επιθυμητή ακρίβεια, που ορίζεται από τις προδιαγραφές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 1.1.2, πραγματοποιούνται κατάλληλοι έλεγχοι για την αξιοπιστία του αποτελέσματος.



Διάγραμμα 3.1: Μεθοδολογική Προσέγγιση σε Διαγραμματική Μορφή

Κεφάλαιο 4. Πειραματική Εφαρμογή και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα επιμέρους στάδια της υλοποίησης της συγκεκριμένης εφαρμογής, χρησιμοποιώντας Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας και στην συνέχεια αξιολογούνται και ελέγχονται τα αποτελέσματα με βάση τις προδιαγραφές που έχουν οριστεί για το αγώνισμα του άλματος σε μήκος.

4.1. Αναγνώριση Περιοχής και Επιλογή Κατάλληλου Φακού

Αρχικά πραγματοποιείται επίσκεψη στο χώρο του γηπέδου, όπου πρόκειται να γίνει η συλλογή των δεδομένων και επιλέγεται η σταθερή θέση που πρέπει να τοποθετηθεί η φωτογραφική μηχανή ώστε να απεικονίζεται η επιφάνεια του σκάμματος και ταυτόχρονα να μην εμποδίζει την διαδικασία, τόσο του συγκεκριμένου αγωνίσματος όσο των αθλημάτων που πραγματοποιούνται παράλληλα με αυτό και επιπλέον να μην εμποδίζεται από εξωτερικούς παράγοντες ώστε να μην υπάρχει η πιθανότητα μετακίνησης της.

Στον διαθέσιμο εξοπλισμό περιλαμβάνεται η φωτογραφική μηχανή Canon 1Ds Mark III, με διαστάσεις αισθητήρα 36mm επί 24mm και μέγεθος sel 6.4μm και οι δύο φακοί 24mm και 50mm. Σύμφωνα με τις διαστάσεις του σκάμματος και με βάση την θέση της φωτογραφικής μηχανής επιλέγεται ο κατάλληλος φακός. Παρόλο που και στις δύο περιπτώσεις απεικονίζεται ολόκληρη η επιφάνεια προσγείωσης, η προτίμηση για μεγαλύτερο βαθμό λεπτομέρειας οδηγεί στην επιλογή του φακού με εστιακή απόσταση 50mm και άρα κλίμακα φωτογράφισης 1:250. Με βάση τις διαστάσεις του αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής και την κλίμακα φωτογράφισης, η περιοχή που απεικονίζεται έχει διαστάσεις 9m επί 6m και σύμφωνα με το μέγεθος του στοιχείου του αισθητήρα και την κλίμακα φωτογράφισης, το μέγεθος της εδαφοψηφίδας είναι 1.6mm.

Εικόνα 4.1 : Τοποθέτησης φωτοσταθερών σημείων στην περιοχή μελέτης

Εικόνα 4.2:Τοποθέτηση φωτογραφικής μηχανής και γεωδατικού σταθμού

Εικόνα 4.3: Εικόνα τεκμηρίωσης της τοποθέτησης του εξοπλισμού

4.2. Κεντρική Προβολή και Συστήματα Συντεταγμένων

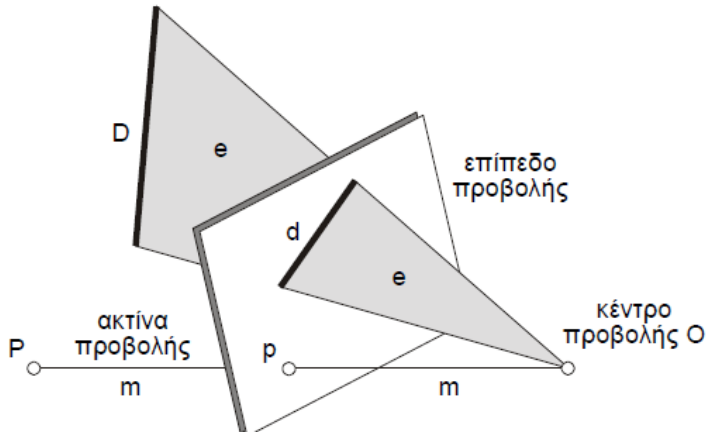
Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι αξίζει να περιγράφουν μερικές έννοιες, όπως η κεντρική προβολή και τα απαραίτητα συστήματα συντεταγμένων, που αποτελούν βασικούς παράγοντες για την εφαρμογή όλων των διαδικασιών.

4.2.1 Κεντρική Προβολή

Μια φωτογραφία θεωρείται γενικά ότι είναι προϊόν μιας κεντρικής προβολής και άρα προσεγγίζεται γεωμετρικά με το μοντέλο της κατάλληλης κεντρικής προβολής για τον συγκεκριμένο συνδυασμό φωτογραφικής μηχανής και φακού. Όλα τα σημεία του χώρου προβάλλονται σε ένα επίπεδο προβολής μέσω μιας δέσμης ακτίνων οι οποίες διέρχονται από το κέντρο προβολής (ή προβολικό κέντρο ή και σημείο λήψης). Αποτέλεσμα αυτής της προβολής και άρα της ίδιας της φωτογραφίας, είναι το σύνολο των εικονοσημείων της εικόνας τα οποία συγκροτούν μια προοπτική απεικόνιση του αντικειμένου που φωτογραφίζεται. Η κεντρική προβολή παρουσιάζει βασικά χαρακτηριστικά με ιδιαίτερη σημασία κυρίως για την επιστήμη της Φωτογραμμετρίας, τα οποία αφορούν στην μεταβλητή κλίμακα πάνω στην φωτογραφία, στην εκτροπή λόγω αναγλύφου και στην επιρροή αυτών σε συνδυασμό με φακούς διαφορετικής εστιακής απόστασης. (Πέτσα,2000)

Μια κεντρική προβολή ορίζεται εσωτερικά με την ανάπλαση των ακτίνων, όπου προσδιορίζεται η θέση του σημείου λήψης ως προς την προβολή του στο επίπεδο του αισθητήρα, δηλαδή το πρωτεύον σημείο (xo,yo) και την απόσταση του από αυτό, δηλαδή την βαθμονομημένη σταθερά της μηχανής c. Έτσι η σύνδεση του κέντρου προβολής O με τα εικονοσημεία αναπαράγει

την σωστή δέσμη ακτινών. Ύστερα από την αποκατεστημένη γεωμετρία της πρέπει να αποκατασταθεί η δέσμη στον χώρο, όπου αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του επιπέδου προβολής στον χώρο. Εφόσον το επίπεδο προβολής είναι ήδη προσανατολισμένο εσωτερικά και άρα η δέσμη είναι γνωστή με την διαδικασία αυτή προσανατολίζεται η δέσμη αυτή στο χώρο.



Εικόνα 4.4: Απεικόνιση κεντρικής προβολής

[Πηγή: Πέτσα, «Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα Φωτογραμμετρίας», 2000]

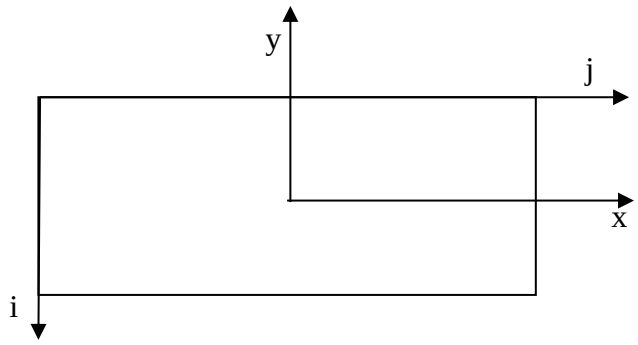
4.2.2. Συστήματα συντεταγμένων

Τα απαραίτητα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται στις φωτογραμμετρικές διαδικασίες, τόσο για μετρήσεις στην εικόνα όσο και για μετρήσεις στο χώρο είναι το σύστημα εικονοσυντεταγμένων, το σύστημα εικόνας, που αφορά την συγκεκριμένη κεντρική προβολή και το σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων που αφορά τις μετρήσεις που υλοποιούνται στο πεδίο. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εφαρμογή και για τον λόγο αυτό περιγράφονται παρακάτω.

4.2.2.1. Σύστημα εικονοσυντεταγμένων

Στο σύστημα της εικόνας ορίζεται ένα δισδιάστατο δεξιόστροφο σύστημα xy που ονομάζεται σύστημα εικονοσυντεταγμένων. Το σύστημα αυτό έχει αρχή το κέντρο της εικόνας και οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων εκφράζονται σε mm. Αρχικά όμως οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε διάφορα συστήματα μέτρησης όπως απευθείας από την οθόνη ενός υπολογιστή σε pixel και στην συνέχεια να μετασχηματιστούν στο επιθυμητό σύστημα εικονοσυντεταγμένων. (Πέτσα, 2000)

Στις ψηφιακές εικόνες οι μετρήσεις εκφράζονται σε pixel και γίνονται σε ένα σύστημα ij που η αφετηρία του είναι συνήθως η πάνω αριστερή γωνία της εικόνας και οι άξονες είναι παράλληλοι στις διαστάσεις της.

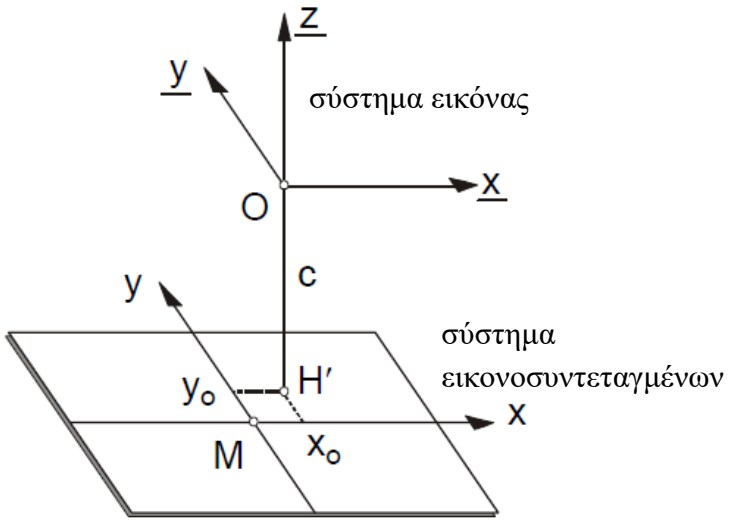


Εικόνα 4.5: Σύστημα εικονοσυντεταγμένων ψηφιακής εικόνας

4.2.2.2. Σύστημα εικόνας

Το σύστημα της εικόνας, όπου οι εικονοσυντεταγμένες που μετρούνται εκφράζονται ως προς το κέντρο προβολής Ο για την συγκεκριμένη κεντρική προβολή, είναι ένα τρισδιάστατο δεξιόστροφο σύστημα xyz με αρχή το κέντρο προβολής Ο. Ο άξονας z είναι κάθετος στο επίπεδο της εικόνας, ενώ οι άξονες xy είναι παράλληλοι στους αντίστοιχους του συστήματος εικονοσυντεταγμένων. Κάθε εικονοσημείο έχει εικονοσυντεταγμένη z ίση με -c και x και y μετατιθεμένη κατά xo και yo από τις αντίστοιχες μετρημένες. Οι εικονοσυντεταγμένες xo και yo είναι του πρωτεύοντος σημείου της εικόνας, δηλαδή η εικόνα του σημείου λήψης στο επίπεδο της εικόνας, το οποίο δεν συμπίπτει απαραίτητα με το κέντρο της. (Ε. Πέτσα, 2000). Έτσι οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων στο σύστημα της εικόνας προσδιορίζονται από την σχέση:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{σύστημα εικόνας}} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}_{\text{σύστημα εικονοσυντεταγμένων}} - \begin{pmatrix} xo \\ yo \\ c \end{pmatrix}$$

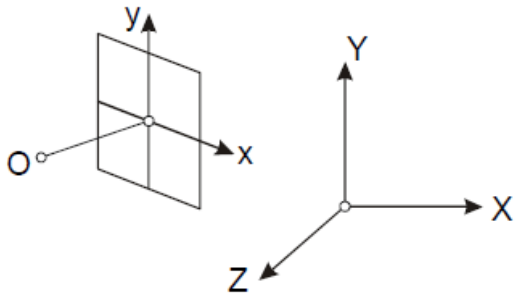


Εικόνα 4.6: Συστήματα που αφορούν την εικόνα

[Πηγή: Πέτσα, «Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα Φωτογραμμετρίας», 2000]

4.2.2.3. Γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων για επίγειες λήψεις

Με στόχο τον προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων του χώρου είναι απαραίτητος ο ορισμός του γεωδαιτικού συστήματος XYZ, το οποίο αποτελεί ένα δεξιόστροφο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με τον άξονα Z να στρέφεται ώστε να είναι παράλληλος προς τον οριζόντιο άξονα λήψης. Η στροφή αυτή επιτυγχάνεται και στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου οι λήψεις είναι επίγειες και είναι επιθυμητό ο άξονας Z να είναι οριζόντιος και παράλληλος στην διεύθυνση προς την φωτογραφική μηχανή. (Πέτσα, 2000).



Εικόνα 4.7: Γεωδαιτικό σύστημα επίγειας λήψης

[Πηγή:Πέτσα, «Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα Φωτογραμμετρίας», 2000]

4.3 Προσδιορισμός κατάλληλου Γεωδαιτικού Συστήματος Συντεταγμένων

Σύμφωνα με τα συστήματα συντεταγμένων που περιγράφονται παραπάνω και την ανάγκη προσδιορισμού του κατάλληλου γεωδαιτικού συστήματος που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιούνται κάποιοι μετασχηματισμοί που φαίνονται παρακάτω.

Αρχικά οι γεωδαιτικές μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, με την αφετηρία του συστήματος ($X_{στάσης}=0$, $Y_{στάσης}=0$, $Z_{στάσης}=0$) να βρίσκεται στο σημείο που είναι τοποθετημένος ο γεωδαιτικός σταθμός και την διεύθυνση του μηδενισμού να δίνεται τυχαία ως προς ένα προσημασμένο φωτοσταθερό με αποτέλεσμα όλες οι συντεταγμένες των μετρημένων σημείων να υπολογίζονται στο αυθαίρετο αυτό σύστημα αναφοράς.

Για τον υπολογισμό τους αρχικά προσδιορίζονται όλα τα οριζόντια μήκη από την στάση έως τα σημεία που μετρούνται σύμφωνα με την σχέση:

$$D_{στάσης\text{-}σημείου}=S_{στάσης\text{-}σημείου} * \sin(z_{στάσης\text{-}σημείου}) \qquad (4.1)$$

Εφαρμόζοντας το 1ο Θεμελιώδες πρόβλημα της Γεωδαισίας, υπολογίζονται οι συντεταγμένες κάθε μετρημένου σημείου στο αυθαίρετο γεωδαιτικό σύστημα $(XYZ)_{αρχικό}$ με τους εξής τύπους:

$$X_{σημείου} = X_{στάσης} + D_{στάσης\text{-}σημείου} * \sin(a_{στάσης\text{-}σημείου}) \qquad (4.2)$$

$$Y_{σημείου} = Y_{στάσης} + D_{στάσης\text{-}σημείου} * \cos(a_{στάσης\text{-}σημείου}) \qquad (4.3)$$

Για τον προσδιορισμό των υψομέτρων κάθε σημείου στο σύστημα αυτό χρησιμοποιείται το κεκλιμένο μήκος S κάθε απόστασης που μετρήθηκε και η αντίστοιχη κατακόρυφη γωνία z και υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$Z_{σημείου}= Z_{στάσης} + S_{στάσης\text{-}σημείου} * \cos(z_{στάσης\text{-}σημείου}) + Y_{οργάνου} - Y_{στόχου} \qquad (4.4)$$

Τα αποτελέσματα των γεωδαιτικών συντεταγμένων στο αρχικό αυθαίρετο σύστημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Σημεία	***X***	***Y***	***Z***
100	0	0	0
1	0.001	15.854	0.087
2	3.644	14.451	-0.085
3	6.796	12.545	0.098
4	-0.087	10.008	-1.204

5	1.736	9.323	-1.403
6	3.265	7.923	-1.455
7	-0.267	6.025	-1.63
8	-0.734	5.071	-1.614
9	0.864	11.64	-1.672
10	1.045	12.016	-1.667
11	1.323	12.642	-1.683
12	1.723	13.507	-1.686
13	1.591	11.62	-1.728
14	2.382	12.658	-1.749
15	2.707	12.023	-1.759
16	2.557	11.185	-1.713
17	1.978	11.063	-1.693
18	3.335	11.395	-1.758
19	2.462	11.53	-1.73
20	1.098	11.685	-1.718
21	1.447	12.337	-1.726
22	1.844	13.232	-1.741
23	-2.568	1.13	0.366

Πίνακας 4.1: Προσδιορισμός συντεταγμένων των μετρημένων σημείων στο αυθαίρετο γεωδαιτικό σύστημα

Για τον ορισμό του επιθυμητού γεωδαιτικού συστήματος συντεταγμένων XYZ, όπου η αφετηρία του άξονα X πρέπει να βρίσκεται στην γραμμή εκτίναξης και ταυτόχρονα να είναι κάθετος στην διεύθυνσή της, ο άξονας Z να ορίζεται με διεύθυνση προς την φωτογραφική μηχανή και παράλληλα ο άξονας Y να ορίζει την διάσταση των υψομέτρων, πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι μετασχηματισμοί στροφής. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η βαλβίδα εκτίναξης δεν είναι τοποθετημένη στον διάδρομο φόρας και έτσι επιλέγεται ως αφετηρία μέτρησης των αλμάτων η διεύθυνση της πλευράς της επιφάνειας του σκάμματος που είναι παράλληλη στην βαλβίδα εκτίναξης.

Εφόσον η μέτρηση της απόστασης κάθε επίδοσης υπολογίζεται από την γραμμή εκτίναξης, μετρώνται κάποια σημεία πάνω σε αυτήν ώστε να προσδιοριστεί η εξίσωση της ευθείας αυτής. Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της γραμμής χρησιμοποιώντας τον γεωδαιτικό σταθμό,

πραγματοποιούνται και στην διαδικασία που χρησιμοποιείται στους επίσημους αγώνες και αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.1.3.

Αρχικά, για την επίτευξη της καθετότητας του άξονα Χ με την αφετηρία μέτρησης των αλμάτων απαιτείται ο ορισμός της εξίσωσης της διεύθυνσής της. Η εξίσωση μιας ευθείας περιγράφεται από την σχέση Y=αX+β και τα απαραίτητα σημεία για τον προσδιορισμό των αγνώστων συντελεστών α,β κάθε ευθείας είναι δύο, όμως τελικά μετρούνται τέσσερα σημεία με στόχο τον προσδιορισμό της καλύτερης ευθείας που προσαρμόζεται σε αυτά τα σημεία και την εκτίμηση του σφάλματος της επίλυσης. Για την μέτρησή τους χρησιμοποιείται ο διαθέσιμος γεωδαιτικός σταθμός και ο ανακλαστήρας και προσδιορίζονται οι συντεταγμένες τους στο αυθαίρετο γεωδαιτικό σύστημα $(XYZ)_{\text{αρχικό}}$.

Στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες (XY) των τεσσάρων αυτών σημείων, και εφόσον αυτές είναι περισσότερες από τις απαιτούμενες για τον προσδιορισμό των αγνώστων παραμέτρων (α,β), πραγματοποιείται η διαδικασία της συνόρθωσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων που υπάγεται στην αρχή της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων. Στην συνόρθωση με έμμεσες παρατηρήσεις κάθε μέτρηση σχηματίζει μια εξίσωση παρατήρησης που συνδέεται με τους αγνώστους και είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες μετρήσεις. Για το λόγο αυτό, οι τετμημένες Χ των τεσσάρων σημείων θεωρούνται σταθερές χωρίς σφάλμα και έτσι κάθε εξίσωση παρατήρησης της τεταγμένης Y του κάθε σημείου περιέχει την ίδια την μέτρηση ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες και τις άγνωστες καθοριστικές παραμέτρους. Οι εξισώσεις παρατήρησης είναι γραμμικές και της μορφής Y_i=αχ+β και προσδιορίζονται τόσο οι άγνωστες παράμετροι α,β όσο και οι καλύτερες τιμές των τεταγμένων Y των 4 σημείων.

Οι μετρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς και άρα η λύση δίνεται από την σχέση $x=(A^TA)^{-1}A^Tl$ όπου x είναι το διάνυσμα των αγνώστων, ο A είναι ο πίνακας των συντελεστών των αγνώστων των γραμμικών εξισώσεων και το l το διάνυσμα των παρατηρήσεων. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η εξίσωση της ευθείας που προσαρμόζεται καλύτερα σε αυτά τα σημεία καθώς και οι νέες καλύτερες τιμές των Y. Στην συνέχεια υπολογίζεται η γωνία διεύθυνσης της ευθείας αυτής σύμφωνα με το 2ο θεμελιώδες πρόβλημα όπου $a=\arctan\frac{\Delta X}{\Delta Y}$ χρησιμοποιώντας τις νέες συντεταγμένες των σημείων.

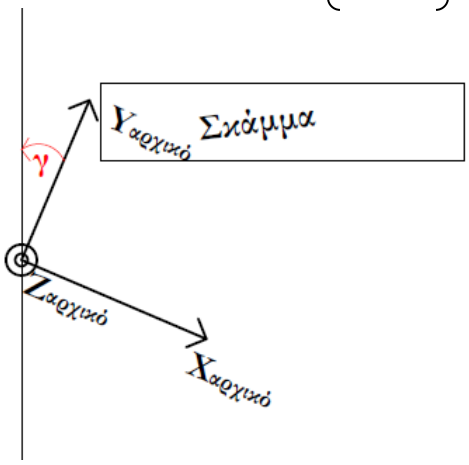
Η γωνία διεύθυνσης a υπολογίζεται σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία ίση με a=27.7778g.

Για την υλοποίηση του επιθυμητού συστήματος αναφοράς απαιτείται πρώτα ο μετασχηματισμός στροφής όλων των σημείων γύρω από τον άξονα Z κατά γωνία στροφής (γ) ίση με την γωνία διεύθυνσης που υπολογίστηκε, ώστε μετά τον μετασχηματισμό τα σημεία αυτά να έχουν μηδενική γωνία διεύθυνσης και κατά συνέπεια να επιτυγχάνεται η καθετότητα του άξονα X με την γραμμή που θεωρείται αφετηρία των μετρήσεων. Οι νέες συντεταγμένες των σημείων υπολογίζονται με την σχέση:

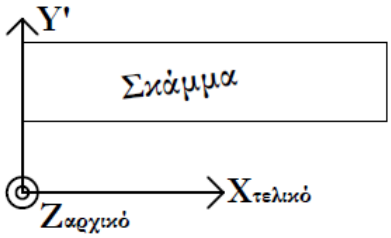
$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} X_{\text{αρχικό}} \\ Y_{\text{αρχικό}} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Στην συνέχεια πραγματοποιείται μια μετάθεση όλων των σημείων κατά απόσταση ίση με τον μέσο όρο των τετμημένων X των σημείων που ανήκουν στην καλύτερη ευθεία που προσδιορίστηκε, ώστε να μεταφερθεί η αφετηρία των μετρήσεων των επιδόσεων στην διεύθυνση της ευθείας αυτής. Έτσι οι τελικές συντεταγμένες κατά X υπολογίζονται από παρακάτω σχέση και το αποτέλεσμα του συστήματος ύστερα από αυτούς τους μετασχηματισμούς φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{pmatrix} X_{\text{σημείων}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X'_{\text{σημείων}} \end{pmatrix} - X_{\mu}. \quad (4.6)$$



Εικόνα 4.8: Αυθαίρετο Γεωδαιτικό Σύστημα-Γωνία στροφής



Εικόνα 4.9: Μετασχηματισμός Στροφής και μετάθεσης για τον άξονα X

Για τον ορισμό του άξονα Z με διεύθυνση προς την φωτογραφική μηχανή πραγματοποιείται ένας μετασχηματισμός στροφής περί τον άξονα X κατά 100^g με αποτέλεσμα οι νέες συντεταγμένες κατά Z των σημείων να είναι αντίθετες με τις συντεταγμένες κατά Y' που υπολογίζονται ύστερα από τον πρώτο μετασχηματισμό στροφής. Σύμφωνα με αυτόν τον μετασχηματισμό ο άξονας Y στο επιθυμητό τελικό σύστημα συντεταγμένων εκφράζει τα υψόμετρα των σημείων και οι νέες συντεταγμένες κατά Y των σημείων είναι ίσες με τις αρχικές συντεταγμένες κατά Z που υπολογίζονται στο αυθαίρετο γεωδαιτικό σύστημα. Άρα οι τελικές συντεταγμένες κατά Z και Y υπολογίζονται από τις αντίστοιχες σχέσεις:

$$Z_{\text{σημείων}} = -Y'_{\text{σημείων}}$$

$$Y_{\text{σημείων}} = Z_{\text{αρχικό}}$$

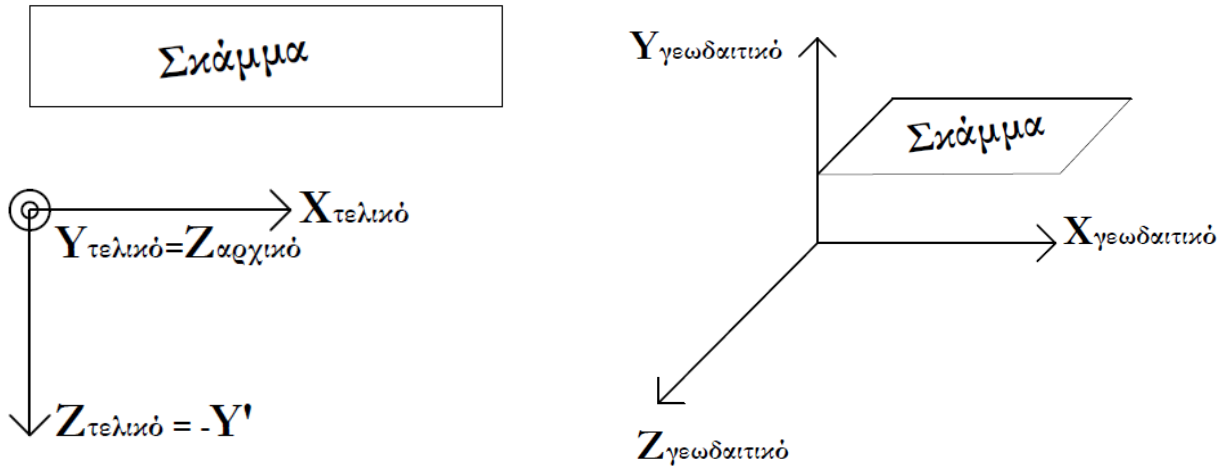
Οι τελικές γεωδαιτικές συντεταγμένες των σημείων σύμφωνα με τους παραπάνω μετασχηματισμούς φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Σημεία	***X***	***Y***	***Z***
1	-2.573	0.087	-15.190
2	1.321	-0.085	-15.458
3	4.984	0.098	-15.063
4	-0.182	-1.204	-9.855
5	1.759	-1.403	-10.005
6	3.737	-1.455	-9.382
7	1.338	-1.630	-6.169
8	1.318	1.614	-5.107
9	-0.010	-1.672	-11.736
10	-0.005	-1.667	-12.153
11	-0.018	-1.683	-12.838
12	-0.021	-1.686	-13.791
13	0.657	-1.728	-12.025
14	0.935	-1.749	-13.300
15	1.498	-1.759	-12.862
16	1.717	-1.713	-12.039
17	1.243	-1.693	-11.684

18	2.333	-1.758	-12.558
19	1.485	-1.730	-12.312
20	0.183	-1.718	-11.876
21	0.224	-1.726	-12.614
22	0.205	-1.741	-13.593
23	1.321	0.366	-0.760

Πίνακας 4.2: Προσδιορισμός γεωδαιτικών συντεταγμένων ύστερα από τους μετασχηματισμούς

Το τελικό σύστημα γεωδαιτικών συντεταγμένων ύστερα από τους μετασχηματισμούς φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 4.10: Τελικό Γεωδαιτικό Σύστημα

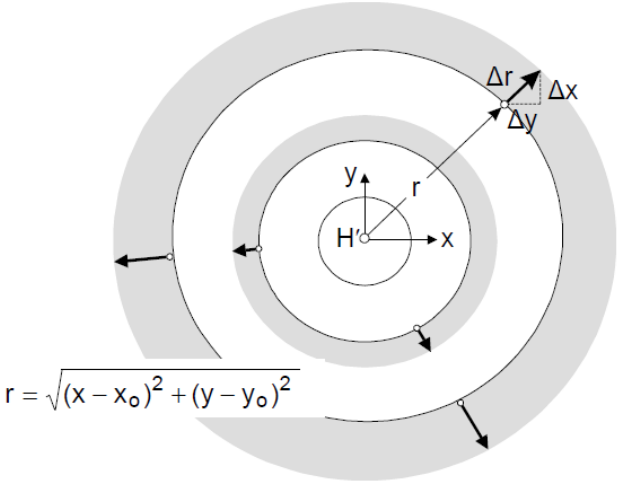
4.4. Αποκατάσταση Προσανατολισμών

Οι διαδικασίες που πραγματοποιούν την ανάπλαση της δέσμης των ακτίνων όπως ήταν την στιγμή της λήψης και τον προσδιορισμό της θέσης της στον χώρο ονομάζονται εσωτερικός και εξωτερικός προσανατολισμός αντίστοιχα.

4.4.1. Εσωτερικός Προσανατολισμός

Εσωτερικός προσανατολισμός της εικόνας ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία αποκαθίσταται η πορεία της φωτεινής ακτίνας μέσα στην φωτογραφική μηχανή, όπως αυτή υπήρχε κατά την στιγμή της λήψης. Τα στοιχεία που είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν για την αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού είναι οι συντεταγμένες του πρωτεύοντος σημείου xo yo, η βαθμονομημένη εστιακή απόσταση ή αλλιώς σταθερά της μηχανής c και η

ακτινική παραμόρφωση του φακού δr. Η ακτινική διαστροφή των φακών δr έχει ως αποτέλεσμα να παραμορφώνει τις ευθείες του χώρου σε καμπυλωμένες, εισάγοντας στην ουσία μια διαφορική μεταβολή κλίμακας που είναι ενιαία για κάθε ακτινική απόσταση r στην εικόνα από το πρωτεύον σημείο.



Εικόνα 4.11: Επίδραση ακτινικής διαστροφής

[Πηγή:Πέτσα, «Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα Φωτογραμμετρίας», 2000]

Για το λόγο αυτό πρέπει να εφαρμόζεται και μια διόρθωση της δr μέσω ενός πολυωνύμου και ζητούμενο του εσωτερικού προσανατολισμού είναι να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός σταθεράς της μηχανής c και πολυωνύμου ακτινικής διαστροφής που θα περιγράφει καλύτερα το συγκεκριμένο μοντέλο κεντρικής προβολής. (Πέτσα,2000) Οι διορθώσεις που γίνονται κατά τις συνιστώσες x και y περιγράφονται από τις σχέσεις:

$$x - \Delta x = x - \frac{x}{r}\Delta r \qquad \text{όπου} \qquad \Delta r = k_3 r^3 + k_5 r^5 + \ldots$$

$$y - \Delta y = y - \frac{y}{r}\Delta r$$

Οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού προσδιορίζονται μέσω της διαδικασίας της βαθμονόμησης της μηχανής. Οι μέθοδοι βαθμονόμησης διακρίνονται σε εργαστηριακές, σε μεθόδους που εφαρμόζονται σε πεδίο ελέγχου και στην αυτοβαθμονόμηση. Η εργαστηριακή βαθμονόμηση αφορά μετρητικές μηχανές και εφαρμόζεται από τον κατασκευαστή ή σε άλλα ειδικά εργαστήρια. (Πατιάς,1991) ενώ η βαθμονόμηση σε πεδίο ελέγχου αποτελεί μια φωτογραμμετρική διαδικασία όπου φωτογραφίζεται ένα πεδίο ελέγχου με σημεία με γνωστές

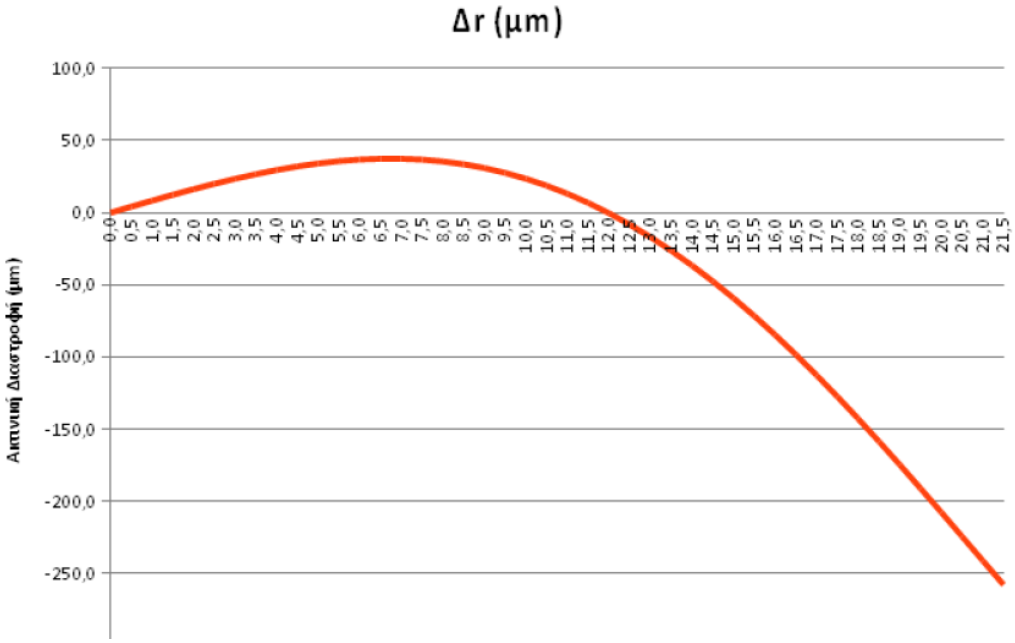
γεωδαιτικές συντεταγμένες και οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού προκύπτουν από σχετική συνόρθωση. (Πατιάς,1991).

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, όπου οι λήψεις είναι επίγειες με μη μετρητική μηχανή χρησιμοποιείται το πιστοποιητικό βαθμονόμησης που περιλαμβάνει τα απαραίτητα στοιχεία, από την βαθμονόμηση στο πεδίο ελέγχου στο Κέντρο Μετρολογίας του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας στην Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Τα στοιχεία του πεδίου ελέγχου αφορούν στον αριθμό των σημείων που είναι 81, στο εύρος βάθους που είναι 4m και στις διαστάσεις που είναι 8 επί 4 m, ενώ η εστίαση εφαρμόστηκε στα 6 m. Οι λήψεις πραγματοποιήθηκαν με οριζόντιο format και η επίλυση υλοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού Calibration_CCD σε περιβάλλον Matlab. (Σαμαρά,2004).

Α. Βαθμονόμηση για εστίαση στα 6 μέτρα
Ονομαστική Εστιακή Απόσταση 50mm

			pixel	mm
1	**Βαθμονομημένη σταθερά**		8094,2868 ± 0,781	51,803 ± 0,005
2	**Συντεταγμένες πρωτεύοντος σημείου** (από UL)			
		x_0	2764,1974 ± 2,146	17,691 ± 0,014
		y_0	1851,1582 ± 1,877	11,847 ± 0,012
3	**Ακτινική Διαστροφή**	$\Delta r = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5$		
			k_0	8,42975E-03
			k_1	-2,67409E-09
			k_2	7,66488E-17
4	**Ασύμμετρη Παραμόρφωση**			
		$\Delta x = p_1(r^2+2(x-x_0)^2)+2p_2(x-x_0)(y-y_0)$		
		$\Delta y = 2p_1(x-x_0)(y-y_0)+p_2(r^2+2(y-y_0)^2)$		
			p_1	-1,686521E-008
			p_2	-4,711298E-008
5	**Αφινικές Παραμορφώσεις**			
		Απόκλιση από την καθετότητα των αξόνων		-0,00091
		Λόγος κλιμάκων k_y / k_x		1,00001

Εικόνα 4.12: Πιστοποιητικό Βαθμονόμησης στο πεδίο ελέγχου
[Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, 2012]



Εικόνα 4.13: Διάγραμμα κανονικοποιημένης ακτινικής διαστροφής Δr από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης

[Πηγή: Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας, 2012]

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή και την επίλυση των προσδιορισμών των λήψεων τοποθετούνται στο τρισδιάστατο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων, οκτώ φωτοσταθερά σημεία ομοιόμορφα κατανεμημένα και μετρούνται τόσο στο σύστημα της εικόνας όσο και στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων. Για την μέτρησή τους στην εικόνα πραγματοποιούνται λήψεις πριν την έναρξη της διαδικασίας των αλμάτων, ώστε να απεικονίζονται όλα τα σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων (φωτοσταθερά και χαρακτηριστικά σημεία) που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του εξωτερικού προσανατολισμού της.

Τα προσημασμένα φωτοσταθερά που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι τοποθετημένα σε μικρό στυλεό, προσαρμοσμένο σε βάση και τρικόχλιο και είναι στόχοι για σαρώσεις laser (Leica Scan Station 2, Εικόνα 4.14). Έτσι αρχικά υλοποιείται ένας αλγόριθμος, που διατίθεται από το περιβάλλον Matlab, αυτόματου προσδιορισμού των προσημασμένων φωτοσταθερών όπου αναγνωρίζει τους κύκλους που εμφανίζονται στην εικόνα με εύρος ακτίνας 10<R<20, προσδιορίζει τα κέντρα και την ακτίνα των κύκλων και κρατάει τους επτά πιο δυνατούς με βάση αυτά τα αποτελέσματα. Τα κέντρα των στόχων εκφράζονται σε pixel στο σύστημα ij που

περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.2.2 και αποθηκεύονται αυτόματα για όλα τα προσημασμένα φωτοσταθερά.

Εικόνα 4.14: Φωτοσταθερό σημείο

Εικόνα 4.15: Ανίχνευση κύκλου μέσω του αλγόριθμου

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τον μετασχηματισμό Hough που εξάγει χαρακτηριστικά της εικόνας μέσω της ανάλυσης της. (Αναλυτικότερα βλ. https://scholar.google.gr/scholar?hl=el&as_sdt=0,5&q=hough+transform)

Παρακάτω φαίνεται ο αλγόριθμος που ανιχνεύει τα φωτοσταθερά της εικόνας και εξάγει τα χαρακτηριστικά τους.

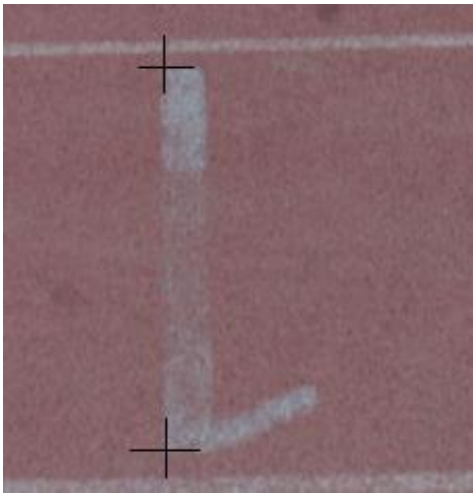
```
I = imread('points.jpg'); %Φόρτωση εικόνας με τα φωτοσταθερά

%Ανίχνευση κύκλων με βάση την ακτίνα
[centers, radii, metric] = imfindcircles(I,[10 20]);

%Διατήρηση 7 μεγαλύτερων με βάση τα στοιχεία
centersStrong7 = centers(1:7,:);
radiiStrong7 = radii(1:7);
metricStrong7 = metric(1:7);
viscircles(centersStrong7, radiiStrong7,'EdgeColor','b');

%Αποθήκευση των επιθυμητών στοιχείων
out_xy=fopen('imagecoord.txt','wt');
 for i=1:size(centersStrong7,1)
   fprintf(out_xy, '%d ', centersStrong7(i,:));
   fprintf(out_xy, '\n');
end
fclose(out_xy);
```

Χρησιμοποιούνται ακόμα και δυο επιπλέον χαρακτηριστικά σημεία από τις σχεδιασμένες γραμμές του γηπέδου, που έχουν γνωστές γεωδαιτικές συντεταγμένες, μετρούνται χειροκίνητα απευθείας από την οθόνη του υπολογιστή και εκφράζονται και αυτά σε pixel στο ίδιο σύστημα ij.



Εικόνα 4.16: Χαρακτηριστικά σημεία γνωστων γεωδαιτικών συντεταγμένων

Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.2.2 οι εκφρασμένες σε pixel θέσεις των φωτοσταθερών σημείων εκφράζονται ως προς ένα δεξιόστροφο σύστημα εικονοσυντεταγμένων xy με την χρήση των στοιχείων του πιστοποιητικού βαθμονόμησης. Αυτό επιτυγχάνεται αφαιρώντας από όλα τις εικονοσυντεταγμένες j των σημείων, την αντίστοιχη εικονοσυντεταγμένη xo του πρωτεύοντος σημείου και από την εικονοσυντεταγμένη του πρωτεύοντος σημείου yo όλες τις εικονοσυντεταγμένες i των σημείων. Το πρωτεύον σημείο είναι εκφρασμένο σε pixel στο ίδιο σύστημα ij και έτσι με τον τρόπο αυτό ορίζεται απευθείας το σύστημα της εικόνας και μετατίθεται η αρχή των αξόνων στο πρωτεύον σημείο, το σύστημα είναι δεξιόστροφο και όλα τα εικονοσημεία είναι εκφρασμένα ως προς αυτό. Για την διόρθωση της ακτινικής διαστροφής για κάθε εικονοσημείο χρησιμοποιούνται οι συντελεστές του πολυωνύμου που δίνονται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης και προσδιορίζοντας την αντίστοιχη ακτινική απόσταση r για κάθε εικονοσημείο, υπολογίζεται τελικά η διόρθωση κατά τις δυο συνιστώσες x,y.

Σύμφωνα με τα παραπάνω πραγματοποιείται η αναγωγή των μετρούμενων σημείων στις γεωμετρικές θέσεις που απαιτεί το γεωμετρικό μοντέλο της κεντρικής προβολής που περιγράφει

την δέσμη και κατά συνέπεια αποκαθίσταται ο εσωτερικός προσανατολισμός και άρα αναπλάθεται η δέσμη των οπτικών ακτίνων. Σημειώνεται ότι τελικά οι εικονοσυντεταγμένες εκφράζονται σε mm χρησιμοποιώντας την αντιστοιχία ότι το στοιχείο του αισθητήρα (sel) είναι ίσο με 6.4 μm.

Η συνάρτηση που δημιουργείται για την αναγωγή των εικονοσυντεταγμένων με βάση τα στοιχεία του πιστοποιητικού βαθμονόμησης φαίνεται παρακάτω.

```
function [x,y]= imagecoord_correct(Im,a,b) %Δημιουργία συνάρτησης

[m,n]=size(Im); %Διαβάζει το μέγεθος της εικόνας
xm=a;
ym=b;

%Ορισμός στοιχείων από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης
xo=2764.1974; yo=1851.1582;
    ko=8.42975e-3;
    k1=-2.67409e-9;
    k2=7.66488e-17;

%Μετατροπή σε δεξιόστροφο σύστημα σύμφωνα με το πρωτεύον σημείο
       x1=(-xo-0.5+xm);
       y1=(yo+0.5-ym);

%Διόρθωση από την ακτινική διαστροφή του φακού ανάλογα με την ακτινική
απόσταση
r=sqrt(x1^2+y1^2);
Dr=ko*r+k1*r^3+k2*r^5;

%Μετατροπή σε mm με βάση το μέγεθος sel
x=(x1-((x1/r)*Dr))*0.0064;
y=(y1-((y1/r)*Dr))*0.0064;
```

Τα αποτελέσματα των εικονοσυντεταγμένων των φωτοσταθερών στο σύστημα εικονοσυντεταγμένων εκφρασμένα σε pixel και στο σύστημα της εικόνας ύστερα από την αναγωγή της σύμφωνα με το πιστοποιητικό παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Σημεία	***j*** *(pixel)*	***i*** *(pixel)*	***x*** *(mm)*	***y*** *(mm)*
1	5.66E+02	3.66E+02	-14.167	9.5713
2	2.76E+03	3.87E+02	-0.0301	9.3421
3	4.84E+03	2.47E+02	13.3501	10.3325
4	1.49E+03	1.57E+03	-8.1279	1.7963
5	3.18E+03	1.67E+03	2.6492	1.1483
6	5.00E+03	1.78E+03	14.3749	0.4789

7	2880	3014	0.7343	-7.4024
8	2880	3630	0.7343	-11.373

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα εικονοσυντεταγμένων εκφρασμένα σε pixel (αριστερά) και σε χιλιοστά δεξιά

Παρατηρείται πως τα έξι πρώτα σημεία που είναι εκφρασμένα σε pixel αποτελούνται και από δεκαδικό μέρος. Αυτό συμβαίνει γιατί προσδιορίζονται από τον αλγόριθμο εντοπισμού των κέντρων των κύκλων όπου πραγματοποιούνται πράξεις μεταξύ των pixel.

4.4.1. Εξωτερικός Προσανατολισμός – Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία

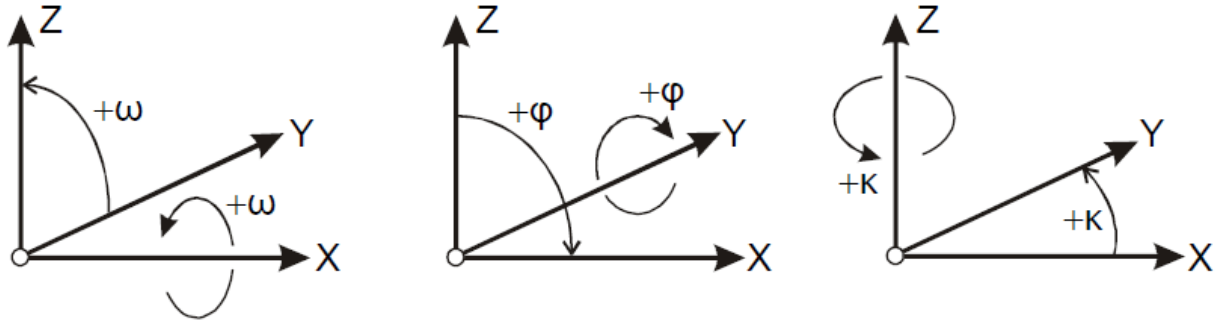
Η γνώση του εσωτερικού προσανατολισμού, επιτρέπει την γεωμετρική ανακατασκευή της δέσμης των προβολικών ακτίνων η οποία στην συνέχεια πρέπει να ενταχθεί στο γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την διαδικασία αποκατάστασης του εξωτερικού προσανατολισμού.

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3 ο εξωτερικός προσανατολισμός μιας φωτογραφίας κατά την διάρκεια μιας λήψης ορίζεται από την θέση του σημείου λήψης στο τρισδιάστατο χώρο και τον προσανατολισμό του οπτικού άξονα. Η θέση του σημείου λήψης ορίζεται από τις τρεις συντεταγμένες του στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (X_o Y_o Z_o) και ο προσανατολισμός του οπτικού άξονα από τις τρεις γωνίες ω,φ,κ περί τους άξονες X Y Z αντίστοιχα. Για τον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού μιας λήψης, μέσω της μαθηματικής σχέσης της κεντρικής προβολής που στην Φωτογραμμετρία είναι γνωστή ως συνθήκη Συγγραμμικότητας, μπορούν να προσδιοριστούν οι έξι άγνωστοι παράμετροι χρησιμοποιώντας σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων που απεικονίζονται στην λήψη, τα φωτοσταθερά. (Πατιάς, 1991)

Η συνθήκη Συγγραμμικότητας είναι η σχέση που συνδέει τα σημεία του εδάφους με τα αντίστοιχα σημεία που απεικονίζονται στην φωτογραφία μέσω των στοιχείων του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού. Τα συστήματα συντεταγμένων που χρησιμοποιούνται είναι

- το τοπικό δεξιόστροφο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων XYZ με αυθαίρετη αρχή και άξονα Z προς την διεύθυνση της φωτογραφικής μηχανής και
- το σύστημα της φωτογραφίας που είναι δεξιόστροφο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων με αρχή το προβολικό κέντρο O και άξονες x και y

Στην περίπτωση που το σύστημα της εικόνας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.2.2 είναι στραμμένο κατά γωνίες ω,φ,κ ως προς το γεωδαιτικό σύστημα συντεταγμένων XYZ, πρέπει να εκφραστεί το διάνυσμα του χώρου σε σύστημα παράλληλο με εκείνο της εικόνας με βάση έναν πίνακα στροφής που περιλαμβάνει τις στροφές αυτές. Οι θετικές στροφές στο δεξιόστροφο σύστημα ορίζονται αντίθετα από την κίνηση των δεικτών του ρολογιού καθώς κοιτάμε από τα θετικά του κάθε άξονα προς την αρχή του συστήματος. (Πέτσα, 2000).



Εικόνα 4.17: Γωνίες στροφής περί τους άξονες

[Πηγή: Πέτσα, «Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα Φωτογραμμετρίας», 2000]

Η συνολική στροφή του συστήματος περιγράφεται από τον παρακάτω πίνακα στροφής Rωφκ που περιλαμβάνει τις τρεις γωνίες και υπολογίζεται από την σχέση

$$\Re\omega\varphi\kappa = \begin{pmatrix} \cos\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa + \cos\omega\sin\kappa & -\cos\omega\sin\varphi\cos\kappa + \sin\omega\sin\kappa \\ -\cos\varphi\sin\kappa & -\sin\omega\sin\varphi\sin\kappa + \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa + \sin\omega\cos\kappa \\ \sin\varphi & -\sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{pmatrix}$$

Η εξίσωση που περιγράφει ότι κάθε σημείο Α στο χώρο, με την εικόνα του α στην φωτογραφία και το σημείο λήψης Ο είναι συνευθειακά, συνδέει τις μετρημένες εικονοσυντεταγμένες x y του κάθε σημείου, με τις γεωδαιτικές συντεταγμένες του αντίστοιχου σημείου στο χώρο, τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού xo, yo, c που έχουν προσδιοριστεί και τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού Xo, Yo, Zo, ω, φ, κ που είναι οι άγνωστοι. Υπό μορφή πίνακα αυτή περιγράφεται μέσω της σχέσης

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} = \lambda \cdot \Re_{\omega\varphi\kappa} \cdot \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix}$$

όπου ο συντελεστής λ αφορά στην κλίμακα σε κάθε σημείο και η οποία διαφοροποιείται από σημείο σε σημείο της λήψης και για το λόγο αυτό εξαλείφεται με την διαίρεση της πρώτης και της δεύτερης εξίσωσης με την τρίτη. Έτσι τελικά οι δύο εξισώσεις της Συνθήκης Συγγραμμικότητας που προκύπτουν και συνδυάζουν τα γνωστά στοιχεία με τους αγνώστους του εξωτερικού προσανατολισμού είναι

$$x = -c\frac{r_{11}(X - X_O) + r_{12}(Y - Y_O) + r_{13}(Z - Z_O)}{r_{31}(X - X_O) + r_{32}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} = -c\frac{A_1}{\Pi}$$
$$y = -c\frac{r_{21}(X - X_O) + r_{22}(Y - Y_O) + r_{23}(Z - Z_O)}{r_{31}(X - X_O) + r_{32}(Y - Y_O) + r_{33}(Z - Z_O)} = -c\frac{A_2}{\Pi}$$

όπου r_{ij} τα στοιχεία του πίνακα στροφής που περιγράφεται. Για τον προσδιορισμό των έξι αγνώστων απαιτούνται τουλάχιστον 6 εξισώσεις παρατήρησης. Κάθε μετρημένο σημείο στην εικόνα δίνει δύο εξισώσεις παρατήρησης κατά τις εικονοσυντεταγμένες x και y και άρα απαιτούνται τουλάχιστον 3 σημεία, των οποίων επιπλέον θα είναι γνωστές και οι γεωδαιτικές τους συντεταγμένες. Χρησιμοποιούνται όμως περισσότερα σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων, με στόχο την συνόρθωση του αποτελέσματος και την εκτίμηση του σφάλματος προσδιορισμού του. Έτσι, για τον προσδιορισμό του αποτελέσματος εφαρμόζεται η μέθοδος των έμμεσων παρατηρήσεων και για τον λόγο αυτό απαιτείται γραμμικοποίηση κατά Taylor των παραπάνω εξισώσεων, εφόσον αυτές δεν είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες παραμέτρους. Κατά την γραμμικοποίηση χρησιμοποιούνται κάποιες προσωρινές τιμές (Xo, Yo, Zo, ω, φ, κ)$^{(o)}$ για τους αγνώστους. Για την γραμμικοποίηση θεωρούνται οι παραπάνω εξισώσεις ως προς τις εικονοσυντεταγμένες x και y ως Fx και Fy αντίστοιχα και γραμμικοποιούνται ως προς τους έξι αγνώστους της Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας με ταυτόχρονη παράλειψη των διαφορικών ανώτερης τάξης και το αποτέλεσμα είναι

$$x = F_x = F_x^{(0)} + \frac{\partial F_x}{\partial X_o}\delta X_o + \frac{\partial F_x}{\partial Y_o}\delta Y_o + \frac{\partial F_x}{\partial Z_o}\delta Z_o + \frac{\partial F_x}{\partial \omega}\delta\omega + \frac{\partial F_x}{\partial \varphi}\delta\varphi + \frac{\partial F_x}{\partial \kappa}\delta\kappa$$

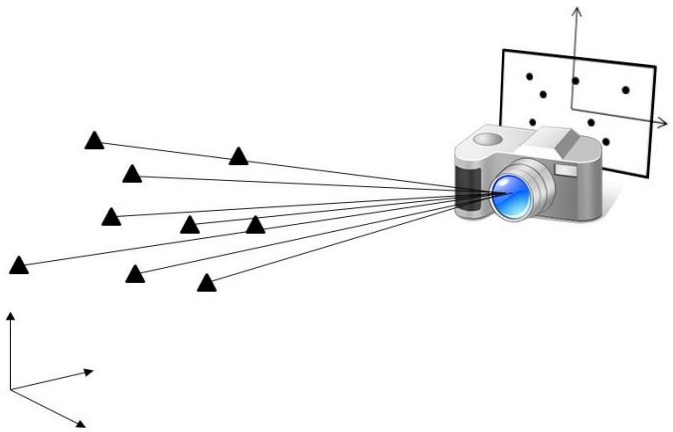
$$y = F_y = F_y^{(0)} + \frac{\partial F_y}{\partial X_o}\delta X_o + \frac{\partial F_y}{\partial Y_o}\delta Y_o + \frac{\partial F_y}{\partial Z_o}\delta Z_o + \frac{\partial F_y}{\partial \omega}\delta\omega + \frac{\partial F_y}{\partial \varphi}\delta\varphi + \frac{\partial F_y}{\partial \kappa}\delta\kappa$$

όπου, $F_x^{(o)}$ και $F_y^{(o)}$ οι τιμές που υπολογίζονται με βάση τις προσωρινές τιμές των αγνώστων και τις τιμές των γνωστών γεωδαιτικών σημείων καθώς και τις αντίστοιχες εικονοσυντεταγμένες τους στο σύστημα της εικόνας και δX_o, δY_o, δZ_o, $\delta\omega$, $\delta\varphi$, $\delta\kappa$ οι μεταβολές των προσωρινών τιμών και ουσιαστικώς οι νέοι άγνωστοι της συνόρθωσης που θα προσδιοριστούν. Οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους ,που αποτελούν τους συντελεστές των μεταβολών των προσωρινών τιμών αγνώστων, υπολογίζονται με βάση τις προσωρινές τιμές που ορίστηκαν για τους αγνώστους.

Για την επίλυση της διαδικασίας της Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας με την μέθοδο των έμμεσων παρατηρήσεων πραγματοποιείται η μέτρηση οκτώ φωτοσταθερών σημείων που βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένα στην φωτογραφία.

Εικόνα 4.18: Σημεία γνωστών γεωδαιτικών συντεταγμένων

Η διαδικασία της Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.19: Απεικόνιση συστημάτων για την επίλυση της Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας

[Πηγή: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40467-space-photo-resection]

Οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό των συντεταγμένων στο γεωδαιτικό σύστημα πραγματοποιούνται με την χρήση του γεωδαιτικού σταθμού TOPCON 3003 και με την επεξεργασία τους σύμφωνα με τις σχέσεις που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.3, προσδιορίζονται οι συντεταγμένες τους στο τελικό σύστημα XYZ με άξονα Z παράλληλο στον άξονα λήψης και στην συνέχεια χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της συνθήκης Συγγραμμικότητας αναπτύσσεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος προσδιορισμού των μεταβολών των προσωρινών αγνώστων του εξωτερικού προσανατολισμού (Xo, Yo, Zo, ω, φ, κ) όπου ολοκληρώνεται όταν προκύπτει διαφορά μεταξύ δυο διαδοχικών επαναλήψεων μικρότερη από το μισό της επιθυμητής ακρίβειας.

Αντικαθιστώντας λοιπόν όλες τις τιμές επιλύεται το σύστημα σύμφωνα με την αρχή της Μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων. Το σύστημα των εξισώσεων παρατήρησης διαμορφώνεται ως εξής :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial X_o} & \frac{\partial F_x}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_x}{\partial Z_o} & \frac{\partial F_x}{\partial \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_x}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_o} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_o} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ \frac{\partial F_y}{\partial X_o} & \frac{\partial F_y}{\partial Y_o} & \frac{\partial F_y}{\partial Z_o} & \frac{\partial F_y}{\partial \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \kappa} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta X_o \\ \delta Y_o \\ \delta Z_o \\ \delta \omega \\ \delta \varphi \\ \delta \kappa \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - F_x^{(o)} + \upsilon_{x1} \\ y_1 - F_y^{(o)} + \upsilon_{y1} \\ . \\ . \\ y_5 - F_y^{(o)} + \upsilon_{y5} \end{pmatrix}$$

και σε μορφή πινάκων ισοδυναμεί με την σχέση $A \cdot \delta x = \delta l + \upsilon$. Σημειώνεται ότι οι εικονοσυντεταγμένες για κάθε σημείο μετρώνται με την ίδια ακρίβεια και άρα οι παρατηρήσεις θεωρούνται ισοβαρείς γι' αυτό δεν απαιτείται στην σχέση ο πίνακας βαρών P.

Η επίλυση ακολουθεί τη διαδικασία των διαδοχικών προσεγγίσεων, δεδομένου ότι από κάθε επίλυση του συστήματος προκύπτουν τιμές για τις διαφορικές μεταβολές των προσωρινών τιμών, ώστε αυτές προστιθέμενες να πλησιάσουν την καλύτερη τιμή.

$$(Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa)^{(1)} = (Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa)^{(0)} + (\delta Xo, \delta Yo, \delta Zo, \delta\omega, \delta\varphi, \delta\kappa)$$

Μόλις δυο διαδοχικές λύσεις συγκλίνουν με την επιθυμητή ακρίβεια τότε η επαναληπτική διαδικασία διακόπτεται και η καλύτερη τιμή είναι αυτή της τελευταίας επανάληψης. Τα αποτελέσματα για τις τρεις μεταθέσεις Xo Yo Zo προσδιορίζονται σε m και τα τρία γωνιακά μεγέθη ω φ κ σε βαθμούς. Για τον λόγο αυτό οι εικονοσυντεταγμένες και η σταθερά της μηχανής c μετρώνται σε χιλιοστά mm ενώ οι γεωδαιτικές συντεταγμένες σε μέτρα m.

Τελικά για την προσέγγιση των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού χρησιμοποιούνται τα έξι από τα οκτώ σημεία, καθώς η ακρίβεια του αποτελέσματος της λύσης είναι καλύτερη από αυτήν με τα οκτώ σημεία. Πιο συγκεκριμένα, εφόσον το τελικό προϊόν της συνολικής διαδικασίας δεν πρέπει να έχει αβεβαιότητα μεγαλύτερη του ενός εκατοστού, είναι επιθυμητό στο συγκεκριμένο στάδιο το αποτέλεσμα να μην ξεπερνά περίπου το μισό χιλιοστό. Ωστόσο, για την επίλυση με τα οκτώ σημεία το σφάλμα προσδιορισμού των παραμέτρων ήταν μεγαλύτερο του 0.006 και για τον λόγο αυτό επιλέγεται να γίνει η επίλυση με λιγότερα σημεία που θα προσδιορίζονται με την επιθυμητή ακρίβεια.

Οι διαδοχικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της καλύτερης τιμής των αγνώστων είναι έξι και το αποτέλεσμα των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετροι Εξωτερικού Προσανατολισμού	
Xo	1.2926
Yo	0.3898
Zo	-0.6835
ω	-13.4135
φ	0.1604
κ	-1.705

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα Φωτογραμμετρικής Οπισθοτομίας

Ο βαθμός ελευθερίας r υπολογίζεται ως η διαφορά του αριθμού των εξισώσεων παρατήρησης με τον αριθμό των αγνώστων. Δηλαδή στην συγκεκριμένη εφαρμογή ο βαθμός ελευθερίας είναι 6.

Τα σφάλματα προσδιορισμού του αποτελέσματος προσδιορίζονται από τον πίνακα Μεταβλητότητας-Συμμεταβλητότητας Vx, ο οποίος υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο

$$Vx= \sigma_o^2 (A^T A)^{-1}$$

όπου σ_o^2 υπολογίζεται από την σχέση $\sigma_o^2=\frac{uTPu}{r}$. Η διαγώνιος του πίνακα αυτού περιλαμβάνει τις μεταβλητότητες των στοιχείων του εξωτερικού προσανατολισμού. Η τετραγωνική ρίζα των μεταβλητοτήτων ισούται με τα σφάλματα των αντίστοιχων στοιχείων τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Σφάλματα Παραμέτρων Εξωτερικού Προσανατολισμού	
σXo	± 0.0025
σYo	± 0.0036
σZo	± 0.0044
σω	± 0.0206
σφ	± 0.0179
σκ	± 0.0292

Πίνακας 4.5: Σφάλματα προσδιορισμού παραμέτρων Εξωτερικού προσανατολισμού

Τα σφάλματα αυτά ελέγχονται σε σχέση με τις προδιαγραφές της ακρίβειας της μέτρησης των επιδόσεων που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.1.2 και με βάση την αβεβαιότητα που ορίστηκε για το στάδιο αυτό και παρατηρείται πως πράγματι, οι συντεταγμένες της θέσης του σημείου λήψης προσδιορίζονται με καλύτερη ακρίβεια του ενός εκατοστού.

Τα σφάλματα προσδιορισμού των γωνιών στροφής αντιστοιχίζονται στην επίδραση σχετικά με τον προσδιορισμό των εικονοσυντεταγμένων πάνω στην εικόνα. Για τον υπολογισμό των εικονοσυντεταγμένων με βάση τα σφάλματα αυτά, χρησιμοποιείται η λογική του μετασχηματισμού των εικονοσυντεταγμένων σε μια φανταστική εικόνα που θα έχει ληφθεί από το ίδιο σημείο με την ίδια μηχανή χωρίς όμως στροφές.(Πέτσα, 2000).

Τα νέα εικονοσημεία έχουν την ίδια τρίτη διάσταση ίση με -c και οι νέες εικονοσυντεταγμένες τους προκύπτουν από τους τύπους:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c \end{bmatrix} = \frac{k}{k'}\mathbf{R}^{T}\begin{bmatrix} x \\ y \\ -c \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x' = -c\dfrac{r_{11}x + r_{21}y - r_{31}c}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}c} \\ y' = -c\dfrac{r_{12}x + r_{22}y - r_{32}c}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}c} \end{cases}$$

Για τον υπολογισμό του σφάλματος προσδιορισμού των νέων εικονοσυντεταγμένων x’ και y’ μέσω της επίδρασης των σφαλμάτων των στροφών πραγματοποιείται νόμος μετάδοσης σφαλμάτων στις σχέσεις που εκφράζουν τις εικονοσυντεταγμένες x’ και y’ με παραγώγιση ως προς κάθε γωνία στροφής. Το μέσο σφάλμα προσδιορισμού των εικονοσυντεταγμένων υπολογίζονται σε mm από τις σχέσεις

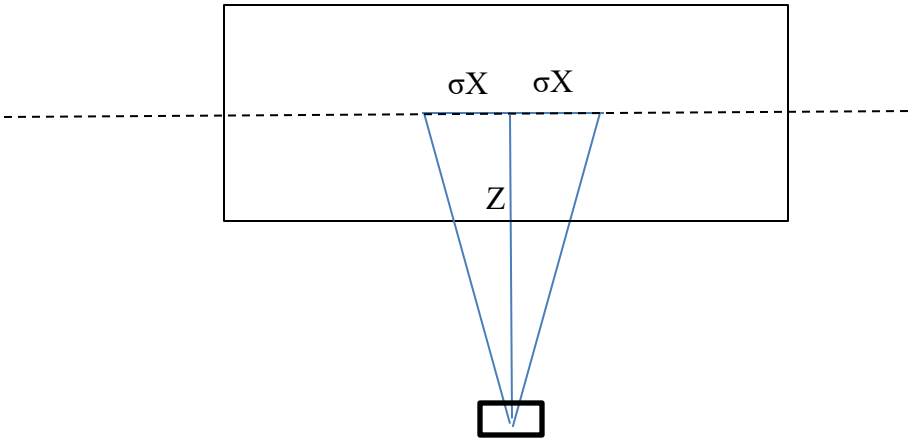
$$\sigma x'^2 = \left(\frac{\partial x'}{\partial \omega}\right)^2\sigma\omega^2+\left(\frac{\partial x'}{\partial \varphi}\right)^2\sigma\varphi^2+\left(\frac{\partial x'}{\partial \kappa}\right)^2\sigma\kappa^2$$

$$\sigma y'^2 = \left(\frac{\partial y'}{\partial \omega}\right)^2\sigma\omega^2+\left(\frac{\partial y'}{\partial \varphi}\right)^2\sigma\varphi^2+\left(\frac{\partial y'}{\partial \kappa}\right)^2\sigma\kappa^2$$

Για τον έλεγχο της επίδρασης των σφαλμάτων αυτών κατά την οριζοντιογραφική συντεταγμένη X που αφορά το αποτέλεσμα των επιδόσεων γίνεται η μετατροπή του σφάλματος σx’ στην πραγματικότητα με βάση την μέση απόλυτη απόσταση Z= 12.5m της μηχανής από το μέσο του σκάμματος και την σταθερά της μηχανής c. (Πέτσα, 2000). Έτσι τελικά το μέσο σφάλμα κατά X εκφρασμένο σε m προσδιορίζεται σύμφωνα με την σχέση

$$\sigma X = \pm \frac{Z}{c}\,\sigma x'$$

και ισούται με ±0.0035m. Άρα διαπιστώνεται πως η επίδραση των γωνιών στην συντεταγμένη κατά X είναι μικρότερη του ενός εκατοστού και έτσι τα σφάλματα προσδιορισμού των γωνιών στροφής από την Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία είναι αποδεκτά.



Σχήμα 4.1.: Επίδραση σφάλματος γωνιακών μεγεθών στην οριζοντιογραφική θέση

4.5. Προσδιορισμός οριζοντίου επιπέδου

Σύμφωνα με την μεθοδολογική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του κατάλληλου ίχνους πρέπει να προσδιοριστεί ένα επίπεδο που θα προσαρμόζεται καλύτερα στην επιφάνεια του σκάμματος. Εφόσον η επιφάνεια αυτή θεωρείται επίπεδη, πρέπει να προσδιοριστεί η εξίσωση ενός οριζόντιου επιπέδου που είναι κατάλληλο για τον σκοπό αυτό. Έτσι με την χρήση του γεωδαιτικού σταθμού και του ανακλαστήρα, ο οποίος τοποθετείται κατακόρυφα με την βάση του να ακουμπάει στην επιφάνεια της άμμου, μετρούνται αρκετά σημεία ομοιόμορφα κατανεμημένα στην επιφάνεια της προσγείωσης και προσδιορίζεται με την κατάλληλη επεξεργασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.3, το υψόμετρο των σημείων αυτών στο τρισορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων του χώρου XYZ που ορίστηκε. Το μέσο υψόμετρο της επιφάνειας αυτής, προσδιορίζεται στην συνέχεια ως ο μέσος όρος των υψομέτρων των σημείων και έτσι προσδιορίζεται τελικά η εξίσωση του οριζόντιου επιπέδου που προσεγγίζει καλύτερα την επιφάνεια του σκάμματος.

Η επιλογή αυτή γίνεται γιατί τα σημεία που βρίσκονται στην επιφάνεια του σκάμματος θα προβάλλονται στο οριζόντιο επίπεδο. Στην περίπτωση που υπάρχει μια υψομετρική διαφορά μεταξύ του σημείου της πραγματικότητας και του επιπέδου, η υψομετρική αυτή διαφορά οδηγεί σε μια οριζοντιογραφική μετατόπιση του πραγματικού σημείου με την προβολής του στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτή η μετατόπιση πρέπει να είναι μικρότερη από την αβεβαιότητα της τελικής μέτρησης και για τον λόγο αυτό είναι επιθυμητό το επίπεδο να ορίζεται στο υψόμετρο της επιφάνειας του σκάμματος.

Η εξίσωση ενός επιπέδου στον τρισδιάστατο χώρο περιγράφεται από την σχέση ΑΧ+ΒΥ+ΓΖ=Δ. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, για τον προσδιορισμό ενός οριζόντιου επιπέδου παράλληλου στο σύστημα XZ του γεωδαιτικού συστήματος συντεταγμένων XYZ, οι συντελεστές Α και Γ είναι μηδενικοί ενώ ο συντελεστής Β που αφορά στον άξονα Υ που περιγράφει την διάσταση των υψομέτρων, είναι μοναδιαίος. Το υψόμετρο του οριζόντιου επιπέδου ορίζεται από τον συντελεστή Δ ο οποίος υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των υψομέτρων των σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια προσγείωσης. Έτσι τελικά προσδιορίζεται η εξίσωση Υ= -1.7315 και αποτελεί εκείνο το οριζόντιο επίπεδο που προσεγγίζει καλύτερα την επιφάνεια του σκάμματος.

Εικόνα 4.20: Υψομετρικά σημεία για τον υπολογισμό της εξίσωσης του οριζοντίου επιπέδου

4.6. Αυτοματοποιημένη μέθοδος προσδιορισμού του ίχνους

Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου ίχνους κάθε επίδοσης πρέπει να προσδιοριστεί το αντίστοιχο εικονοστοιχείο της φωτογραφίας που θα απεικονίζει εκείνο το σημείου του ίχνους που απέχει την μικρότερη απόσταση από την αφετηρία των μετρήσεων. Τα απαραίτητα δεδομένα για τον σκοπό αυτό είναι δυο διαδοχικές λήψεις από την σταθερή φωτογραφική μηχανή, όπου η πρώτη απεικονίζει την επίπεδη επιφάνεια πριν την κάθε επίδοση και η δεύτερη το ίχνος του αθλητή που δημιουργείται στην άμμο ύστερα από την προσπάθεια. Για την ανάπτυξη της αυτοματοποιημένης μεθόδου του προσδιορισμού του επιθυμητού σημείου του ίχνους, δημιουργείται ένας αλγόριθμος όπου πραγματοποιεί επεξεργασία των δυο εικόνων για κάθε διαφορετική έγκυρη επίδοση.

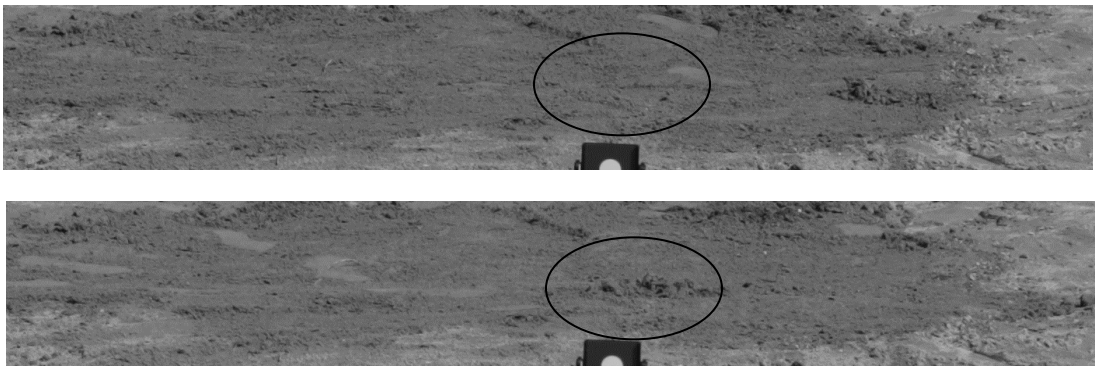
Πριν την αυτοματοποιημένη διαδικασία οι εικόνες που χρησιμοποιούνται μετατρέπονται σε 8-bit grayscale εικόνες όπου οι τιμές τους καταγράφονται σε έναν δισδιάστατο πίνακα και κάθε εικονοστοιχείο της φωτογραφίας αντιστοιχίζεται σε ένα στοιχείο του πίνακα λαμβάνοντας τιμές από 0-255 απεικονίζοντας έτσι τον πιο σκούρο έως τον πιο ανοιχτό τόνο αντίστοιχα. Στην συνέχεια, δίνεται η επιλογή στον χρήστη να ορίζει χειροκίνητα την περιοχή ενδιαφέροντος που αφορά μόνο το σκάμμα, απορρίπτοντας έτσι πιθανό κινούμενο θόρυβο, όπως άλλοι αθλητές που

μπορεί να απεικονιστούν και να διαφοροποιήσουν τις διαδοχικές λήψεις. Για το συγκεκριμένο τμήμα κάθε ζεύγους διαδοχικών λήψεων, εφαρμόζεται μια πράξη απόλυτης αφαίρεσης των τιμών κάθε εικονοστοιχείου και δημιουργείται ένα καινούργιο μητρώο που απεικονίζει μια φωτογραφία με την απόλυτη διαφοράς του ζεύγους.

```
previous=double(rgb2gray(imread('1.JPG'))); %Πρώτη εικόνα grayscale
part_of_previous=previous(1490:1700, 2400:3800); %Κατάτμηση εικόνας

jump=double(rgb2gray(imread('2.JPG'))); %Δεύτερη εικόνα grayscale
part_of_jump=jump(1490:1700, 2400:3800); %Κατάτμηση εικόνας

imdiff=abs(part of previous-part of jump); %Υπολογισμός Διαφοράς
```



Εικόνα 4.21: Εικόνα πριν (επάνω) και μετά (κάτω) το άλμα

Στην συνέχεια ο χρήστης επιλέγει μια κατάλληλη τιμή για τα εικονοστοιχεία η οποία θεωρείται ως κριτήριο για το οποίο οι διαφορές που υπολογίζονται είναι σημαντικές. Αυτή η τιμή ονομάζεται κατώφλι και επιλέγεται για να απορρίπτει ασήμαντες αλλαγές μεταξύ των δυο εικόνων, όπως σκιές ή κόκκους άμμου που εκτινάχθηκαν κατά την προσγείωση του αθλητή και δεν αποτελούν μέρος του υπό μελέτη ίχνους. Η τιμή του κατωφλίου χρησιμοποιείται μέσω μιας λογικής πράξης, δημιουργώντας έναν πίνακα με ίδιες διαστάσεις με αυτόν της διαφοράς της εικόνας, ο οποίος έχει τιμές 0 και 1 που αφορούν την απάντηση της λογικής πράξης όταν αυτή δεν ισχύει ή ισχύει αντίστοιχα, δηλαδή όταν η διαφορά δεν θεωρείται σημαντική ή όταν θεωρείται. Έτσι για τα στοιχεία του πίνακα της διαφοράς που εμφανίζουν τιμές μικρότερες από αυτήν που ορίζεται για το κατώφλι η απάντηση είναι μηδέν ενώ για τις μεγαλύτερες ένα.

```
thres_quality=imdiff>40; %Ορισμός τιμής κατωφλίου και δημιουργία
                          πίνακα από την λογική πράξη
```

0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Στο επόμενο στάδιο, το μητρώο που δημιουργείται από την λογική πράξη διαβάζεται από ένα διάνυσμα το οποίο αναζητά κατά στήλες τουλάχιστον πέντε διαδοχικές σημαντικές αλλαγές, δηλαδή τουλάχιστον πέντε διαδοχικές τιμές 1 στην ίδια στήλη. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν τέτοιες τιμές, στην αντίστοιχη θέση του καινούργιου διανύσματος τοποθετείται η τιμή 0, ενώ για 5 διαδοχικές σημαντικές αλλαγές στην ίδια στήλη θα λαμβάνει την τιμή 5 και για περισσότερες διαδοχικές τιμές θα προστίθεται στην ήδη καταγεγραμμένη, η τιμή πέντε. Την απάντηση αυτή την δίνει σε ένα μονοδιάστατο διάνυσμα που δημιουργείται, το οποίο έχει ίδιο αριθμό στηλών με τον πίνακα του κατωφλίου. Η επιλογή των τουλάχιστον 5 διαδοχικών σημαντικών αλλαγών γίνεται γιατί αρχικά έτσι απορρίπτονται διασκορπισμένες αλλαγές στην ίδια στήλη και κυρίως γιατί το ίχνος του αθλητή δεν δημιουργεί σημειακή αλλαγή αλλά περιγράφεται από ένα πλήθος διαδοχικών εικονοστοιχείων.

```
%Δημιουργία μονοδιάστατου διανύσματος με στήλες όσες το μητρώο κατωφλίου

[rows columns] = size(thres_quality);
col_sum=zeros(1,columns);

%Δημιουργία διανύσματος όπου για 5 διαδοχικές σημαντικές αλλαγές στην ίδια
στήλη θα λαμβάνει την τιμή 5 και για περισσότερες διαδοχικές τιμές θα
προστίθεται στην ήδη καταγεγραμμένη, η τιμή 5. Δηλάδη για 5 συνεχείς
σημαντικές αλλαγές θα έχει την τιμή 1, για 6 την τιμή 10 εφόσον για τα πρωτα
5 θα έχει ήδη λάβει την τιμή κοκ.
thres_noise=5;

for j=1:columns;
    for i=1:rows-thres_noise+1;
        if thres_quality(i,j)==1 && thres_quality(i+1,j)==1
           &&thres_quality(i+2,j)==1 && thres_quality(i+3,j)==1
           &&thres_quality(i+4,j)==1;

            col_sum(j)=col_sum(j)+5;
        end
    end
end
```

0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	10	0	5	5	10	10

Έπειτα, δημιουργείται ένα καινούργιο μονοδιάστατο διάνυσμα όπου κάθε στήλη του περιέχει το άθροισμα των τιμών δέκα διαδοχικών εικονοστοιχείων του διανύσματος που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Αυτό εφαρμόζεται γιατί όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το ίχνος που δημιουργεί ο αθλητής απεικονίζεται από συνεχή εικονοστοιχεία, τόσο σε διαδοχικές γραμμές της ίδιας στήλης όπως προηγουμένως, όσο και σε συνεχείς στήλες.

Γίνεται κατανοητό, ότι τελικά το ίχνος κάθε επίδοσης αναμένεται να καταλαμβάνει ένα πλήθος εικονοστοιχείων που διαδοχικές γραμμές της ίδιας στήλης θα εμφανίζουν τουλάχιστον πέντε συνεχείς σημαντικές αλλαγές και ταυτόχρονα αυτό θα συμβαίνει για τουλάχιστον δέκα διαδοχικές στήλες. Έτσι η τιμή του αθροιστικού διανύσματος στο στοιχείο που ανήκει στην περιοχή ενδιαφέροντος και το οποίο αναζητείται, θα έχει τουλάχιστον την τιμή πενήντα. Με βάση αυτή την τιμή προσδιορίζεται η συγκεκριμένη στήλη του μονοδιάστατου διανύσματος και αναζητείται σε μια περιοχή, από αυτήν την στήλη μέχρι τις επόμενες δέκα, εκείνη που εμφανίζει για πρώτη φορά τιμή τουλάχιστον ίση με πέντε, δηλαδή τουλάχιστον πέντε διαδοχικών σημαντικών αλλαγών της στήλης αυτής.

```
gap=10;
pixel_test=0;
for i=1:columns-gap;
    gap_sum(i)=sum(col_sum(i:i+gap)); %Υπολογισμός αθροίσματος ανά
                                        δέκα στοιχεία
end

for i=1:columns-gap;
    if gap_sum(i)>=gap*5; %Αναζήτηση του πρώτου στοιχείου με τιμή
                           μεγαλύτερη του 50 για τον προσδιορισμό της
                           περιοχής ενδιαφέροντος
        pixel_test=i;
        break;
    end
end

result_col=0;
result_row=0;
for i=pixel_test:pixel_test+gap;
    if col_sum(i)>=thres_noise; %Αναζήτηση του πρώτου στοιχείου που
                                 αντιστοιχίζεται στην στήλη που
                                 εμφανίζει τουλάχιστον 5 διαδοχικές
                                 σημαντικές αλλαγές για πρώτη φορά,
                                 το οποίο αποτελεί την στήλη του
                                 σημείου που βρίσκεται το επιθυμητό
                                 ίχνος
        result_col=i;
        break;
    end
end
```

Γνωρίζοντας την σωστή στήλη στην οποία απεικονίζεται το ίχνος της επίδοσης αναζητούνται σε αυτήν οι θέσεις πέντε διαδοχικών σημαντικών αλλαγών και προσδιορίζεται ο μέσος όρος τους σε ακέραιο αριθμό, ο οποίος αποτελεί την γραμμή στην οποία απεικονίζεται το εικονοστοιχείου που απεικονίζει το επιθυμητό ίχνος.

```
for i=1:rows-thres_noise+1;
    if thres_quality(i,result_col)==1 && thres_quality(i+1,result_col)==1
       && thres_quality(i+2,result_col)==1
       &&thres_quality(i+3,result_col)==1
       &&thres_quality(i+4,result_col)==1;
        result_row=i+fix(thres_noise/2); %Προσδιορισμός κατάλληλης
                                          γραμμής σύμφωνα με την
                                          στήλη που προσδιορίστηκε
        break;
    end
end
```

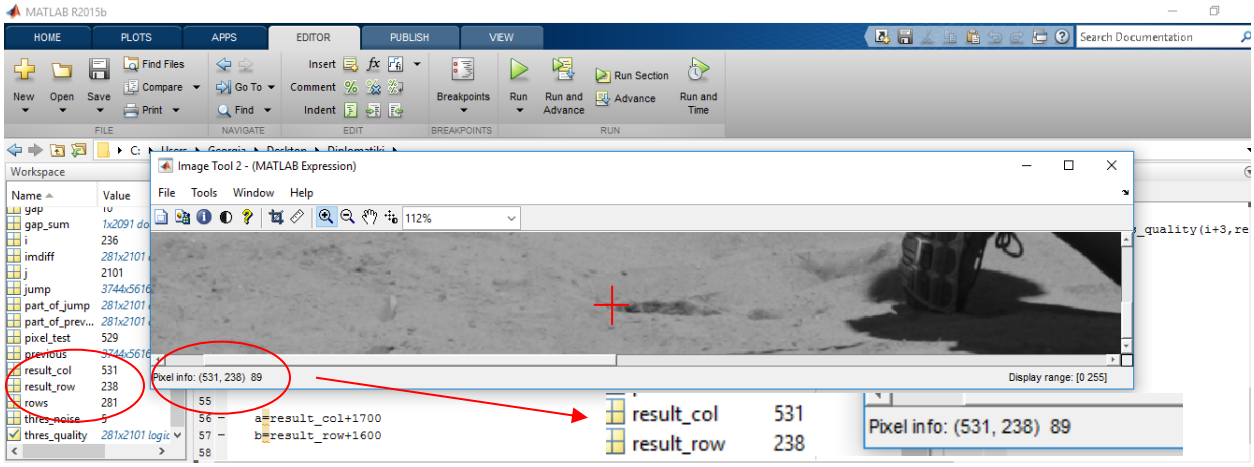
Το αποτέλεσμα του εικονοστοιχείου προσδιορίζεται σε pixel και ανάγεται με βάση τις διαστάσεις της αρχικής εικόνας στο αντίστοιχο εικονοστοιχείο. Στην συνέχεια με βάση τα στοιχεία από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης και την διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.4.1, ανάγονται οι εικονοσυντεταγμένες του σημείου στην σωστή γεωμετρικά θέση τους με βάση το μοντέλο της κεντρικής προβολής και τέλος μετατρέπονται σε χιλιοστά mm.

Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται για κάθε ζεύγος λήψεων κάθε έγκυρης επίδοσης. Για τον έλεγχο της αυτοματοποιημένης διαδικασίας, εφαρμόστηκε χειροκίνητη μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων απευθείας από την οθόνη του υπολογιστή και τα αποτελέσματα ταυτίζονταν. Σημειώνεται πως σε μερικά δεδομένα όπου οι λήψεις δεν ήταν κατάλληλες και δεν υπήρχε ζεύγος φωτογραφιών που απεικονίζουν πριν και μετά την επίδοση, το κατάλληλο ίχνος προσδιορίστηκε μόνο χειροκίνητα.

Εικόνα 4.22: Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου και χειροκίνητου ελέγχου από το περιβάλλον Matlab

Ο αλγόριθμος αυτός ελέγχθηκε και σε ένα δεύτερο σετ δεδομένων από την ίδια φωτογραφική μηχανή σε διαφορετικές συνθήκες (διαφορετική ημέρα, διαφορετικό σκάμμα και διαφορετικές συνθήκες φωτισμού). Ορίζοντας την καινούργια περιοχή ενδιαφέροντος του σκάμματος από τον χρήστη με την διαδικασία της κατάτμησης που περιγράφηκε, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ίδια με αυτά που μετρώνται χειροκίνητα από την οθόνη του υπολογιστεί μέσω του περιβάλλοντος Matlab και έτσι επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αξιοπιστίας του αλγορίθμου και σε διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα του φαίνονται παρακάτω.

Εικόνα 4.23: Εικόνα πριν (επάνω) και μετά (κάτω) το άλμα για τα νέα δεδομένα



Εικόνα 4.24: Παράδειγμα αποτελέσματος αλγορίθμου και χειροκίνητου ελέγχου από το περιβάλλον Matlab για τα νέα δεδομένα

4.7. Προσδιορισμός επιδόσεων

Η απόσταση κάθε έγκυρης επίδοσης αντιστοιχεί στην κάθετη απόσταση του σημείου του ίχνους που επιλέγεται ότι έχει την μικρότερη απόσταση με την γραμμή αφετηρίας των μετρήσεων, από αυτήν την ευθεία. Σύμφωνα με το γεωδαιτικό σύστημα XYZ που ορίζεται η απόσταση αυτή ισοδυναμεί με την οριζοντιογραφική συντεταγμένη X του σημείου εφόσον η αφετηρία των X βρίσκεται στην διεύθυνση αυτής της ευθείας και παράλληλα είναι κάθετη με τον άξονα X. Ο υπολογισμός της τρισδιάστατης θέσης κάθε ίχνους, προσδιορίζεται με βάση την επίλυση της τομής της ευθείας που δημιουργείται στο χώρο μεταξύ της φωτογραφικής μηχανής και κάθε ίχνους, με το οριζόντιο επίπεδο που έχει οριστεί.

Για την επίλυση αυτή δημιουργούνται τρεις εξισώσεις με τρεις αγνώστους οι οποίες είναι οι συντεταγμένες του σημείου στο χώρο. Οι δύο εξισώσεις είναι αυτές της Συνθήκης Συγγραμμικότητας κατά τις δύο εικονοσυντεταγμένες του υπό μελέτη σημείου x και y, ενώ η τρίτη είναι η εξίσωση του οριζοντίου επιπέδου. Στο στάδιο αυτό θεωρούνται γνωστές οι παράμετροι του εξωτερικού προσανατολισμού που υπολογίστηκαν και οι παράμετροι του εσωτερικού προσανατολισμού που δίνονται στο πιστοποιητικό βαθμονόμησης και χρησιμοποιούνται για την αναγωγή κάθε σημείου του ίχνους στην γεωμετρική θέση με βάση την συγκεκριμένη κεντρική προβολή. Οι τρεις εξισώσεις με την κατάλληλη επεξεργασία, αποκτούν την μορφή $A_i X+B_i Y+\Gamma_i Z=\Delta_i$, όπου οι συντελεστές των αγνώστων παραμέτρων υπολογίζονται με βάση τα γνωστά στοιχεία. Οι τρεις εξισώσεις είναι

$$A_1X+ B_1Y+ \Gamma_1Z= \Delta_1$$

$$A_2X+ B_2Y+ \Gamma_2Z= \Delta_2$$

$$A_3X+ B_3Y+ \Gamma_3Z= \Delta_3$$

και η επίλυση του συστήματος γίνεται με την βοήθεια πινάκων της γραμμικής άλγεβρας A*X=B όπου

$$A= \begin{pmatrix} A1 & B1 & \Gamma1 \\ A2 & B2 & \Gamma2 \\ A3 & B3 & \Gamma3 \end{pmatrix} \qquad X= \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \qquad B= \begin{pmatrix} \Delta1 \\ \Delta2 \\ \Delta3 \end{pmatrix}$$

Οι συντελεστές για την πρώτη εξίσωση που έχει διαμορφωθεί από την εξίσωση κατά την εικονοσυντεταγμένη x, υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} A_1=x*r(3,1)+c*r(1,1) \\ B_1=x*r(3,2)+c*r(1,2) \\ \Gamma_1=x*r(3,3)+c*r(1,3) \\ \Delta_1=(c*r(1,1)+x*r(3,1))*Xo+(c*r(1,2)+x*r(3,2))*Yo+(x*r(3,3)+c*r(1,3))*Zo \end{pmatrix}$$

Αντίστοιχα οι συντελεστές για την δεύτερη εξίσωση που έχει διαμορφωθεί από την εξίσωση κατά την εικονοσυντεταγμένη y, υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{pmatrix} A_2=y*r(3,1)+c*r(2,1) \\ B_2=y*r(3,2)+c*r(2,2) \\ \Gamma_2=y*r(3,3)+c*r(2,3) \\ \Delta_2=(c*r(2,1)+y*r(3,1))*Xo+(c*r(2,2)+y*r(3,2))*Yo+(y*r(3,3)+c*r(2,3))*Zo \end{pmatrix}$$

Ενώ οι συντελεστές για την εξίσωση του επιπέδου είναι:

$$\begin{pmatrix} A_3=0 \\ B_3=1 \\ \Gamma_3=0 \\ \Delta_3=-1.7315 \end{pmatrix}$$

Έτσι για κάθε σημείο με εικονοσυντεταγμένες x y που προσδιορίζεται από την αυτοματοποιημένη μέθοδο προσδιορισμού του ίχνους και την αναγωγή του στο κατάλληλο μοντέλο κεντρικής προβολής υπολογίζεται μέσω της επίλυσης του συστήματος η θέση του στο χώρο. Για να ακολουθεί το αποτέλεσμα τις προδιαγραφές που ορίζει η Διεθνή Ένωση Ομοσπονδιών Κλασικού Αθλητισμού (IAAF), το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται στο κοντινότερο 0.01 m του μικρότερου αποτελέσματος, αν αυτό δεν συμπληρώνει ολόκληρο εκατοστό.

```
%Αποτελέσματα αλγόριθμου οπισθοτομίας
Xo = resection(1); Yo = resection(2); Zo = resection(3);
omega=resection(4); phi=resection(5); kappa= resection(6);
Im=imread('2.jpg'); [m,n]=size(Im); a=input('input x_pixel:');
b=input('input y_pixel:');[x,y]=imagecoord_correct(Im,a,b);
r=funr(resection(4)*pi/200,resection(5)*pi/200,resection(6)*pi/200);
%Συντελεστές εξίσωσης κατά x
A1=x*r(3,1)+c*r(1,1); A2=x*r(3,2)+c*r(1,2); A3=x*r(3,3)+c*r(1,3);

%Συντελεστές εξίσωσης κατά y
B1=y*r(3,1)+c*r(2,1); B2=y*r(3,2)+c*r(2,2);B3=y*r(3,3)+c*r(2,3);

%Συντελεστές εξίσωσης οριζοντίου επιπέδου
G1=0; G2=1; G3=0;

%Σταθερά μέρη των τριών εξισώσεων
D1=(c*r(1,1)+x*r(3,1))*Xo+(c*r(1,2)+x*r(3,2))*Yo+(x*r(3,3)
   +c*r(1,3))*Zo;
D2=(c*r(2,1)+y*r(3,1))*Xo+(c*r(2,2)+y*r(3,2))*Yo+(y*r(3,3)
   +c*r(2,3))*Zo;
```

```
D3=-1.7315;
A=[A1 A2 A3;B1 B2 B3;G1 G2 G3;]; B=[D1;D2;D3];

%Λύση
X=linsolve(A,B)

X_jump=floor(X(1,1)*100)/100 %Προσδιορισμός του αποτελέσματος με
                              στογγυλοποιήση στο κατώτερο εκατοστό
```

4.8. Σύγκριση μεθόδων και έλεγχος αποτελεσμάτων

Κατά την συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για κάθε έγκυρη επίδοση, χρησιμοποιώντας την τεχνική της μετροταινίας σύμφωνα με τις κατάλληλες προδιαγραφές που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 2.1.3. Θεωρώντας τις μετρήσεις αυτές αξιόπιστες, πραγματοποιείται ένας έλεγχος των αποτελεσμάτων που υπολογίζονται με τον αλγόριθμο με αυτά που προσδιορίζονται με την μετροταινία. Ελέγχεται η απόλυτη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση ενός σφάλματος, μεταξύ της αναμενόμενης τιμής που θεωρείται η μέτρηση με την μετροταινία και της τιμής που προσδιορίζεται από την συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων και η εκτίμηση του σφάλματος της διαφοράς τους απεικονίζονται στους παρακάτω πίνακες.

	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ						***ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΤΡΟΤΑΙΝΙΑΣ***
Σημεία	Μέτρηση εικονοσυντεταγμένων (pixel)		Αποτελέσματα				
	j	i	**X (m)**	Y(m)	Z(m)	**Επίδοση από αλγόριθμο (m) με ακρίβεια εκατοστού**	**Επίδοση από μετροταινία (m)**
1	2370	1619	**0.702**	-1.732	-12.281	**0.70**	**0.70**
2	2619	1617	**1.062**	-1.732	-12.243	**1.06**	**1.06**
3	2750	1599	**1.251**	-1.732	-12.370	**1.25**	**1.25**
4	3067	1574	**1.725**	-1.732	-12.495	**1.72**	**1.72**
5	2852	1587	**1.401**	-1.732	-12.435	**1.40**	**1.40**
6	2969	1613	**1.565**	-1.732	-12.200	**1.56**	**1.56**
7	2678	1597	**1.146**	-1.732	-12.392	**1.14**	**1.14**
8	2991	1624	**1.594**	-1.732	-12.109	**1.59**	**1.59**
9	2688	1626	**1.162**	-1.732	-12.157	**1.16**	**1.16**

10	2598	1587	**1.028**	-1.732	-12.492	**1.02**	**1.02**
11	2360	1578	**0.672**	-1.732	-12.622	**0.67**	**0.67**
12	3460	1604	**2.268**	-1.732	-12.170	**2.26**	**2.26**
13	3212	1599	**1.918**	-1.732	-12.261	**1.91**	**1.91**
14	2948	1593	**1.539**	-1.732	-12.365	**1.53**	**1.53**
15	2661	1601	**1.122**	-1.732	-12.363	**1.12**	**1.12**
16	3221	1582	**1.939**	-1.732	-12.405	**1.93**	**1.93**
17	3373	1594	**2.151**	-1.732	-12.267	**2.15**	**2.15**
18	3526	1591	**2.371**	-1.732	-12.259	**2.37**	**2.37**
19	2846	1596	**1.391**	-1.732	-12.363	**1.39**	**1.39**

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα των δυο μεθόδων

Σύμφωνα με την διαφορά των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων προκύπτει ο παρακάτω πίνακας της διαφοράς τους, εκτιμώντας την αξιοπιστία του αλγορίθμου.

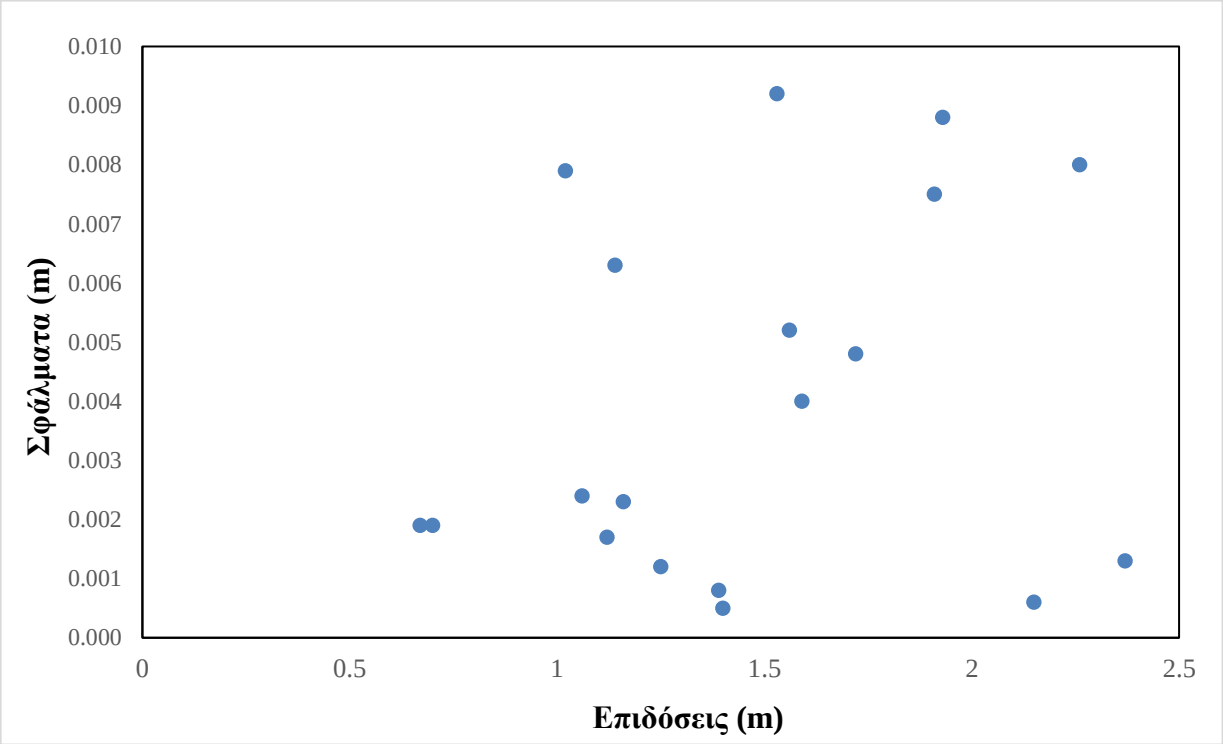
Σημεία	***ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ***
	Σφάλμα (m)
1	0.002
2	0.002
3	0.001
4	0.005
5	0.001
6	0.005
7	0.006
8	0.004
9	0.002
10	0.008

11	0.002
12	0.008
13	0.008
14	0.009
15	0.002
16	0.009
17	0.001
18	0.001
19	0.001

Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα της διαφοράς των δυο μεθόδων για την εκτίμηση του σφάλματος

Ο μέσος όρος της διαφοράς των δύο μεθόδων σύμφωνα με τον Πίνακα 4.7, υπολογίζεται 0.004m.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της διαφοράς των δυο μεθόδων, σχεδιάζεται μια γραφική παράσταση στην οποία συσχετίζονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων με το αντίστοιχο σφάλμα της διαφοράς από τις δυο μεθόδους.



Σχήμα 4.2.: Απεικόνιση της διαφοράς των δυο μεθόδων ανάλογα με την κάθε επίδοση

Παρατηρώντας την γραφική παράσταση δεν παρουσιάζεται κάποια συσχέτιση της μεταβολής του σφάλματος ανάλογα με την απόσταση της επίδοσης. Ωστόσο οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων δεν ξεπερνούν το ένα εκατοστό που ορίζεται ως η ακρίβεια προσδιορισμού του αποτελέσματος σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Ομοσπονδιών Κλασικού Αθλητισμού και άρα τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστα. Σημειώνεται πως η μέθοδος μέτρησης των επιδόσεων με την χρήση της μετροταινίας αποτελεί ακόμη και σήμερα έναν αποδεκτό τρόπο μέτρησης των αλμάτων σε επίσημους αγώνες και γι'αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως αξιόπιστη μέθοδος για την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το σφάλμα προσδιορισμού του αποτελέσματος υπολογίζεται με την χρήση του Νόμου Μετάδοσης Μεταβλητοτήτων. Στόχος είναι ο προσδιορισμός ενός πίνακα Μεταβλητότητας-Συμμεταβλητότητας V_y του διανύσματος y των αγνώστων XYZ που συνδέονται με τις συνιστώσες ενός διανύσματος x, το οποίο περιλαμβάνει τους συντελεστές των 3 εξισώσεων $A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,$ $A_2,B_2,\Gamma_2,\Delta_2,A_3,B_3,\Gamma_3,\Delta_3$ και του οποίου έχει εκτιμηθεί ο πίνακας Μεταβλητότητας-Συμμεταβλητότητας V_x. Οι συνιστώσες του διανύσματος y πρέπει να συνδέονται με τις συνιστώσες του x μέσω των συναρτήσεων της μορφής:

$$X=f_1\,(A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,\dots\ \Delta_3)$$

$$Y=f_2\,(A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,\dots\ \Delta_3)$$

$$Z=f_3\,(A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,\dots\ \Delta_3)$$

$$X=\frac{(A2*B3*D3-A3*B2*D3-A2*D2*G3+A3*D2*G2+B2*D1*G3-B3*D1*G2)}{(A1*B2*G3-A1*B3*G2-A2*B1*G3+A2*B3*G1+A3*B1*G2-A3*B2*G1)}$$

$$Y=\frac{-(A1*B3*D3-A3*B1*D3-A1*D2*G3+A3*D2*G1+B1*D1*G3-B3*D1*G1)}{(A1*B2*G3-A1*B3*G2-A2*B1*G3+A2*B3*G1+A3*B1*G2-A3*B2*G1)}$$

$$Z=\frac{(A1*B2*D3-A2*B1*D3-A1*D2*G2+A2*D2*G1+B1*D1*G2-B2*D1*G1)}{(A1*B2*G3-A1*B3*G2-A2*B1*G3+A2*B3*G1+A3*B1*G2-A3*B2*G1)}$$

Για τον υπολογισμό του πίνακα V_y πρέπει οι συναρτήσεις $f_i\,(A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,\dots\ \Delta_3)$ να είναι γραμμικές ως προς τους συντελεστές $A_1,B_1,\Gamma_1,\Delta_1,\dots\ \Delta_3$ και για τον λόγο αυτό απαιτείται πρώτα η γραμμικοποίησή τους κατά Taylor. Ο υπολογισμός του πίνακα V_y προσδιορίζεται από την σχέση

$$V_y= J_{yx}\ V_x\ \ J_{yx}^T$$

όπου ο πίνακας J ονομάζεται Ιακωβιανός και οι συνιστώσες του υπολογίζονται ως οι μερικές παράγωγοι $\frac{\partial yi}{\partial xj}$ της κάθε εξίσωσης ως προς το κάθε στοιχείο του διανύσματος των συντελετών. Πιο συγκεκριμένα ο πίνακας J έχει διαστάσεις 3x12 και υπολογίζεται ως εξής:

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial A1} & \frac{\partial X}{\partial B1} & \frac{\partial X}{\partial \Gamma 1} & \frac{\partial X}{\partial \Delta 1} & \frac{\partial X}{\partial A2} & \frac{\partial X}{\partial B2} & \frac{\partial X}{\partial \Gamma 2} & \frac{\partial X}{\partial \Delta 2} & \frac{\partial X}{\partial A3} & \frac{\partial X}{\partial B3} & \frac{\partial X}{\partial \Gamma 3} & \frac{\partial X}{\partial \Delta 3} \\ \frac{\partial Y}{\partial A1} & \frac{\partial Y}{\partial B1} & \frac{\partial Y}{\partial \Gamma 1} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta 1} & \frac{\partial Y}{\partial A2} & \frac{\partial Y}{\partial B2} & \frac{\partial Y}{\partial \Gamma 2} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta 2} & \frac{\partial Y}{\partial A3} & \frac{\partial Y}{\partial B3} & \frac{\partial Y}{\partial \Gamma 3} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta 3} \\ \frac{\partial Z}{\partial A1} & \frac{\partial Z}{\partial B1} & \frac{\partial Z}{\partial \Gamma 1} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta 1} & \frac{\partial Z}{\partial A2} & \frac{\partial Z}{\partial B2} & \frac{\partial Z}{\partial \Gamma 2} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta 2} & \frac{\partial Z}{\partial A3} & \frac{\partial Z}{\partial B3} & \frac{\partial Z}{\partial \Gamma 3} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta 3} \end{bmatrix}$$

Για τον προσδιορισμό του πίνακα Vx που περιλαμβάνει τις μεταβλητότητες και τις συμμεταβλητότητες των συντελεστών A_1,B_1,Γ_1,Δ_1,… Δ_3 και άρα είναι 12x12 εφαρμόζεται πρώτα ένας Νόμος Μετάδοσης Μεταβλητοτήτων, όπου οι συντελεστές αποτελούν το διάνυσμα των αγνώστων και συσχετίζονται με το διάνυσμα των αποτελεσμάτων της οπισθοτομίας (Xo,Yo,Zo,ω,φ,κ). Για να είναι γραμμικές οι σχέσεις εφαρμόζεται η γραμμικοποίηση κατά Taylor και για τον προσδιορισμό του πίνακα V_x των συντελεστών χρησιμοποιείται η σχέση

$$V_x= J_{xx'} V_{x'} J_{xx'}^T$$

όπου $V_{x'}$ είναι ο πίνακας μεταβλητότητας Συμμεταβλητότητας των 6 παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού και έχει προσδιοριστεί στο στάδιο της Φωτογραμμετρικής οπισθοτομίας. Σημειώνεται πως οι μεταβλητότητες και οι συμμεταβλητότητες που περιλαμβάνουν τα γωνιακά μεγέθη εκφράζονται σε rad γιατί το επιθυμητό αποτέλεσμα πρέπει να εκφραστεί σε m. Ο πίνακας J στην συγκεκριμένη περίπτωση προσδιορίζεται ως εξής:

$$J=\begin{bmatrix} \frac{\partial XA1}{\partial Xo} & \frac{\partial XA1}{\partial Yo} & \frac{\partial A1}{\partial Zo} & \frac{\partial A1}{\partial \omega} & \frac{\partial A1}{\partial \varphi} & \frac{\partial A1}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial XB1}{\partial Xo} & \frac{\partial XB1}{\partial Yo} & \frac{\partial B1}{\partial Zo} & \frac{\partial B1}{\partial \omega} & \frac{\partial B1}{\partial \varphi} & \frac{\partial B1}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial XГ1}{\partial Xo} & \frac{\partial XГ1}{\partial Yo} & \frac{\partial Г1}{\partial Zo} & \frac{\partial Г1}{\partial \omega} & \frac{\partial Г1}{\partial \varphi} & \frac{\partial Г1}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial XΔ1}{\partial Xo} & \frac{\partial XΔ1}{\partial Yo} & \frac{\partial Δ1}{\partial Zo} & \frac{\partial Δ1}{\partial \omega} & \frac{\partial Δ1}{\partial \varphi} & \frac{\partial Δ1}{\partial \kappa} \\ & & \vdots & & & \\ \frac{\partial XB3}{\partial Xo} & \frac{\partial XB3}{\partial Yo} & \frac{\partial B3}{\partial Zo} & \frac{\partial B3}{\partial \omega} & \frac{\partial B3}{\partial \varphi} & \frac{\partial B3}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial XГ3}{\partial Xo} & \frac{\partial XГ3}{\partial Yo} & \frac{\partial Г3}{\partial Zo} & \frac{\partial Г3}{\partial \omega} & \frac{\partial Г3}{\partial \varphi} & \frac{\partial Г3}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial XΔ3}{\partial Xo} & \frac{\partial XΔ3}{\partial Yo} & \frac{\partial Δ3}{\partial Zo} & \frac{\partial Δ3}{\partial \omega} & \frac{\partial Δ3}{\partial \varphi} & \frac{\partial Δ3}{\partial \kappa} \end{bmatrix}$$

Έτσι υπολογίζεται ο πίνακας V_x και στην συνέχεια προσδιορίζεται ο πίνακας V_y για κάθε σύστημα που επιλύεται σύμφωνα με την κάθε έγκυρη επίδοση. Οι συντελεστές A_1,B_1,$Γ_1$,$Δ_1$,… $Δ_3$ υπολογίζονται με βάση τις εικονοσυντεταγμένες x y στο σύστημα της εικόνας για το κάθε ίχνος. Έτσι για κάθε έγκυρη επίδοση προσδιορίζεται το σφάλμα προσδιορισμού των γεωδαιτικών συντεταγμένων του αντίστοιχου ίχνους με ενδιαφέρον στην συντεταγμένη X εφόσον αυτή ισοδυναμεί με την απόσταση κάθε άλματος. Το μέσο σφάλμα προσδιορισμού όλων των επιδόσεων υπολογίζεται ±0.001m, που σημαίνει ότι τα αποτελέσματα των επιδόσεων είναι αξιόπιστα εφόσον ο προσδιορισμός τους γίνεται με ακρίβεια 0.01m.

4.8.1. Έλεγχος επίδρασης προσδιορισμού του οριζοντίου επιπέδου

Η εξίσωση του οριζοντίου επιπέδου προσδιορίζεται με βάση το μέσο όρο των υψομέτρων ενός πλήθους σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του σκάμματος. Για τον έλεγχο της εξίσωσης αυτής εφαρμόζεται μια επίλυση που προσδιορίζει το αποτέλεσμα συγκεκριμένων επιδόσεων με βάση διαφορετικά οριζόντια επίπεδα. Πιο συγκεκριμένα, για άλματα ανά ένα μέτρο από την αφετηρία των μετρήσεων, προσδιορίζεται η θεωρητική απόσταση των αλμάτων στην περίπτωση που το οριζόντιο επίπεδο είχε διαφορετικό υψόμετρο από αυτό που υπολογίστηκε στην συγκεκριμένη εφαρμογή μέσω των υψομετρικών σημείων της επιφάνειας του σκάμματος. Ο

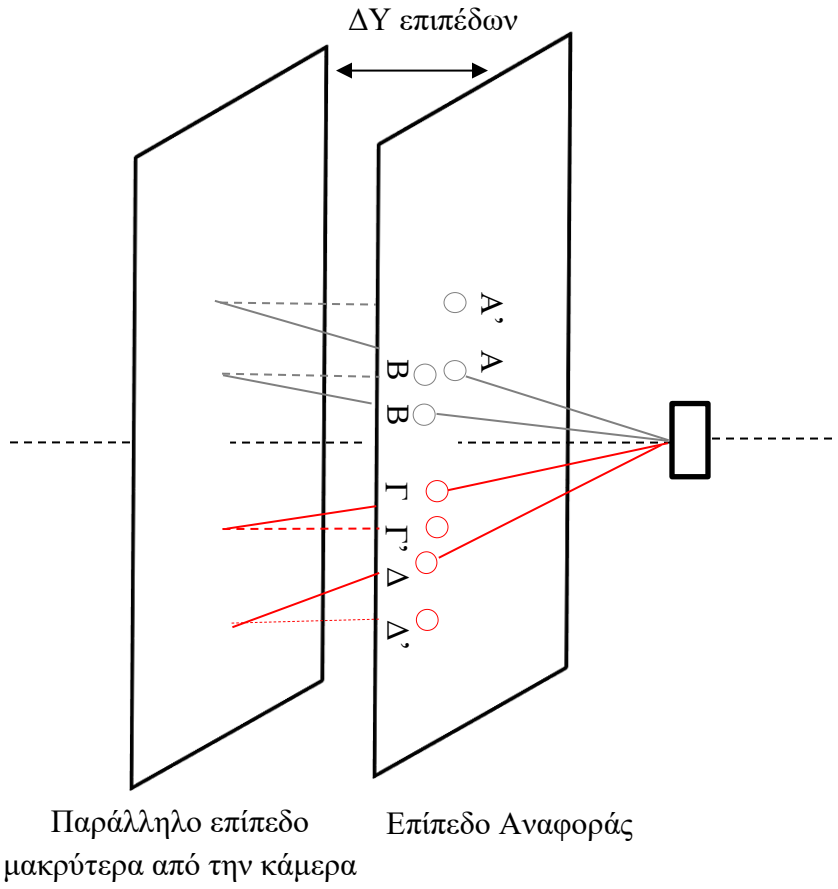
έλεγχος αυτός παρουσιάζει την επίδραση της υψομετρικής διαφοράς των επιπέδων στην οριζοντιογραφική θέση του κάθε ίχνους των επιδόσεων. Στόχος είναι το επίπεδο που επιλέγεται πως προσαρμόζεται καλύτερα στην επιφάνεια της άμμου του σκάμματος, να μην δημιουργεί σφάλμα στην οριζοντιογραφική θέση μεγαλύτερο από ένα εκατοστό. Τα αποτελέσματα από αυτό τον έλεγχο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

	Για x=0	***Για x=1***	***Για x=2***	***Για x=3***
Οριζόντια Επίπεδα	***X***	***X***	***X***	***X***
y=-1.6915		1.01		
y=-1.7015	0.02	**1.00**	1.99	
y=-1.7115	0.01	**1.00**	1.99	2.98
y=-1.7215	**0.00**	**1.00**	**2.00**	2.99
y=-1.7315	**0.00**	**1.00**	**2.00**	**3.00**
y=-1.7415	**0.00**	**1.00**	**2.00**	3.01
y=-1.7515	-0.01	**1.00**	2.01	3.02
y=-1.7615	-0.02	**1.00**		
y=-1.7715		0.99		
y=-1.7815		0.99		
y=-1.7915				

Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα ελέγχου για διαφορετικά οριζόντια επίπεδα

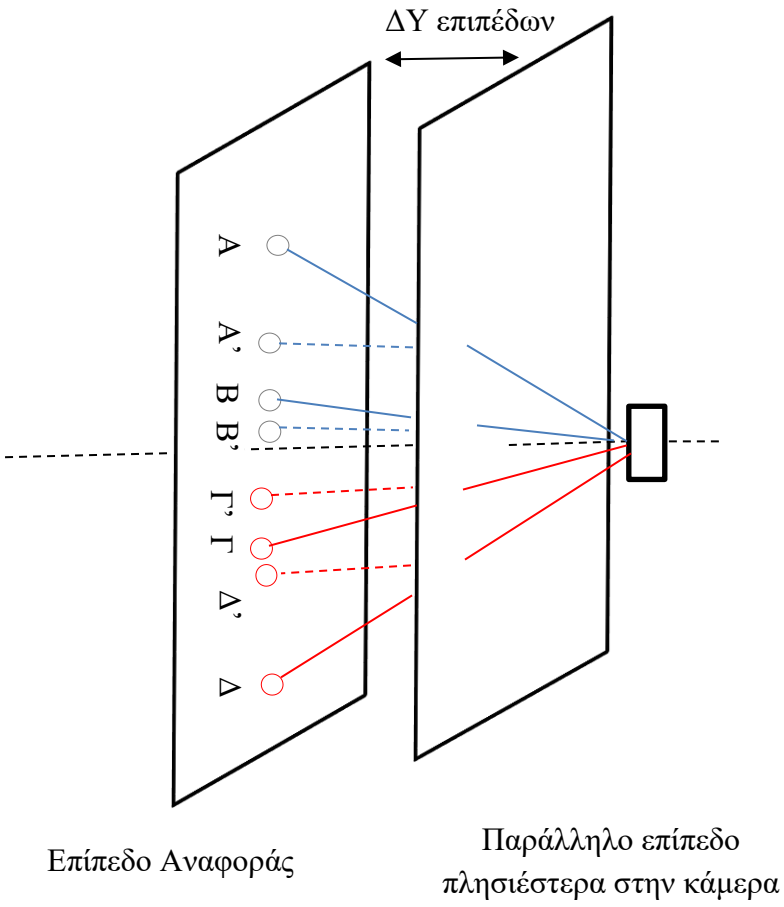
Με έντονα γράμματα σημειώνονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων που δεν διαφοροποιούνται από τα αναμενόμενα περισσότερο από 0.01m. Γνωρίζοντας πως η θέση της φωτογραφικής μηχανής είναι στα 1.29m και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, διαπιστώνεται πως υπάρχει μια ανοχή στην επιλογή του επιπέδου, χωρίς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα και η οποία εξαρτάται τόσο από την θέση που είναι τοποθετημένη η φωτογραφική μηχανή σε σχέση με το σκάμμα όσο και από την απόσταση του οριζοντίου επιπέδου από την κάμερα. Σημειώνεται πως αυτό η επιλογή αυτή ισχύει για οποιαδήποτε θέση της μηχανής με εύρος ανοχής των επιπέδων, όπως αυτό που φαίνεται στον Πίνακα 4.8 για την συγκεκριμένη θέση. Η οριζοντιογραφική μετατόπιση που δημιουργεί η υψομετρική διαφορά επιπέδων, ανάλογα με την απόσταση τους από την κάμερα παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα.

Για επίπεδα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την κάμερα παρουσιάζουν την παρακάτω οριζοντιογραφική μετατόπιση.



Σχήμα 4.3: Οριζόντιο επίπεδο απομακρυσμένο από την φωτογραφική μηχανή

Αντίστοιχα για επίπεδα που βρίσκονται σε μικρότερη απόσταση από την κάμερα παρουσιάζουν την παρακάτω οριζοντιογραφική μετατόπιση.



Σχήμα 4.4: Οριζόντιο επίπεδο πλησιέστερα στην φωτογραφική μηχανή

Τα σημεία Α', Β', Γ', Δ' προσδιορίζουν την προβολή της οριζοντιογραφικής θέσης των σημείων στην περίπτωση που επιλεγεί διαφορετικό οριζόντιο επίπεδο από το κατάλληλο που υπολογίζεται στο Κεφάλαιο 3.5 και χαρακτηρίζεται στο σχήμα ως επίπεδο αναφοράς.

Σύμφωνα με την θέση της κάμερας, γίνεται κατανοητό πως για τα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στην διεύθυνση του άξονα λήψης της, υπάρχει μεγαλύτερη ευελιξία στην επιλογή του οριζοντίου επιπέδου καθώς η προβολή των σημείων από κάθε επίπεδο στο επίπεδο αναφοράς πλησιάζει στην πραγματική τιμή της απόστασης και δεν ξεπερνά το ένα εκατοστό. Ακόμη, συμπεραίνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 4.8 και το Σχήμα 4.3 ότι για επίπεδα πλησιέστερα στην φωτογραφική μηχανή, τα σημεία που βρίσκονται πιο κοντά στην γραμμή αφετηρίας των

μετρήσεων, προσδιορίζονται με μεγαλύτερη τιμή από την πραγματική, ενώ εκείνα που βρίσκονται μακρύτερα προσδιορίζονται με μικρότερη τιμή από την πραγματική. Αντίστοιχα από τον Πίνακα 4.8 και το Σχήμα 4.3 για τα επίπεδα που απομακρύνονται από την φωτογραφική μηχανή, τα σημεία πλησιέστερα στην γραμμή αφετηρίας προσδιορίζονται με μικρότερη τιμή από την πραγματική ενώ αυτά που είναι μακρύτερα με μεγαλύτερη τιμή από την αναμενόμενη.

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Με βάση τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4, καθώς και τα διάφορα στάδια υλοποίησης της Διπλωματικής Εργασίας έχουν προκύψει σημαντικά συμπεράσματα. Αυτά συνοψίζονται σε συμπεράσματα σχετικά με τις δυνατότητες και την ακρίβεια του αλγορίθμου καθώς και συμπεράσματα που θα συμβάλλουν καθοριστικά στην μελλοντική επέκτασή του. Στόχος είναι η ανάδειξη των ιδιαιτεροτήτων του αλγορίθμου ώστε να υπογραμμιστούν κάποια σημαντικά σημεία και να διατυπωθούν οι προϋποθέσεις για βέλτιστα αποτελέσματα.

Επίτευξη στόχου

Είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση των επιδόσεων στα άλματα ως η συντεταγμένη X του κατάλληλου σημείου στο χώρο μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας του προσδιορισμού του ίχνους. Αυτό αποτελεί ένα βασικό συμπέρασμα καθώς ο στόχος της Διπλωματικής Εργασίας επιτυγχάνεται μέσω της συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης.

Ακρίβεια αποτελέσματος

Σύμφωνα με τους επιμέρους ελέγχους της διαδικασίας παρατηρείται πως τα αποτελέσματα από όλα τα στάδια, προσδιορίζονται με ικανοποιητική ακρίβεια που δεν ξεπερνά την ακρίβεια προσδιορισμού που ορίζεται από τις προδιαγραφές του αθλήματος, δηλαδή το 0.01m. Ακόμη με την σύγκριση των αποτελεσμάτων του αλγόριθμο με αυτά από την μέθοδο μέτρησης με μετροταινία συμπεραίνεται πως το αποτέλεσμα είναι αξιόπιστο εφόσον θεωρηθεί πως η μέτρηση με την μετροταινία έγινε σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές και χωρίς χονδροειδή σφάλματα.

Κατάλληλη τοποθέτηση φωτογραφικής μηχανής

Σύμφωνα με τον έλεγχο των διαφορετικών οριζοντίων επιπέδων συμπεραίνεται πως η κατάλληλη τοποθέτηση της φωτογραφικής μηχανής είναι στην κάθετη απόσταση από την περιοχή

που πραγματοποιούνται τα περισσότερα άλματα, δηλαδή εκεί που αναμένεται να προσγειωθεί η πλειονότητα των αλτών.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.7 και γνωρίζοντας πως η φωτογραφική μηχανή είναι τοποθετημένη σε απόσταση 1.29m από την αρχή του άξονα, παρατηρείται πως στην διεύθυνση αυτή η επίλυση της τομής της ευθείας με το οριζόντιο επίπεδο, οδηγεί σε αποτέλεσμα ίσο με την αληθή τιμή και μάλιστα με καθ' ύψος ανοχή επιλογής του οριζοντίου επιπέδου ±0.03m από αυτό που έχει οριστεί. Ακόμη για σημεία που απέχουν απόσταση ±1.5m από την διεύθυνση του άξονα λήψης, το αποτέλεσμα είναι ίσο με την αληθή τιμή με καθ' ύψος ανοχή επιλογής του οριζοντίου επιπέδου ίση με ±0.01m.

Σχέση σφάλματος με επίδοση

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.2 η διαφορά των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της απόστασης των επιδόσεων δεν επηρεάζονται από την αύξηση ή εν γένει την διαφοροποίηση της επίδοσης.

Έλεγχος αποτελέσματος με την μέθοδο που εφαρμόζεται στους επίσημους αγώνες

Η μέθοδος προσδιορισμού της απόστασης των επιδόσεων σύμφωνα με την την Διεθνή Ένωση Ομοσπονδιών Κλασικού Αθλητισμού (IAAF) προϋποθέτει την χρήση Γεωδαιτικού Σταθμού όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.1.3 με καλύτερη ακρίβεια από αυτή με την μέθοδο της μετροταινίας, γι' αυτό απαιτείται ο έλεγχος των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου με αυτά που υπολογίζονται με την χρήση ενός γεωδαιτικού σταθμού. Με τον τρόπο αυτό θα διασφαλιστεί η αξιοπιστία του αλγορίθμου.

Ανίχνευση κατάλληλου ίχνους

Για την ανίχνευση του ίχνους συμπεραίνεται πως απαιτείται ένα ζεύγος φωτογραφιών πριν και μετά την κάθε προσπάθεια που η διαφορά τους θα αφορά μόνο στην περιοχή του ίχνους. Αυτό θα οδηγήσει επιπλέον, σε αποφυγή θορύβου ή και σκίασης που αποτέλεσαν πρόβλημα στην

υλοποίηση του αλγορίθμου μεταξύ εικόνων που δεν ήταν χρονικά διαδοχικές γιατί δεν είχε γίνει η απαραίτητη λήψη πριν από την διαδικασία του άλματος.

Προσδιορισμός διεύθυνσης γραμμής εκτίναξης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο υπολογισμός των αποστάσεων γίνεται από την πλευρά του σκάμματος που είναι κάθετη στον άξονα του διαδρόμου ενώ οι προδιαγραφές ορίζουν ως αφετηρία των μετρήσεων την γραμμή εκτίναξης της βαλβίδας. Για το λόγο αυτό συμπεραίνεται πως για την ορθότερη λειτουργία του αλγορίθμου πρέπει να προσδιορίζεται η γραμμή εκτίναξης πάνω στην βαλβίδα, όπως συμβαίνει στην μέθοδο προσδιορισμού των αποστάσεων με την χρήση γεωδαιτικού σταθμού, γιατί υπάρχει ενδεχόμενο η πλευρά του σκάμματος να μην ορίζεται ξεκάθαρα και να μην είναι παράλληλη με την βαλβίδα.

Κεφάλαιο 6. Εναλλακτικές Βελτίωσης

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται ορισμένες εναλλακτικές λύσεις και μέθοδοι βελτίωσης ως επακόλουθο των συμπερασμάτων και των προδιαγραφών που ορίζονται για το άλμα εις μήκος. Στόχος των προτάσεων αυτών είναι να αναδειχθεί η εξελιξιμότητα και η δυναμική του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε.

Μεθοδολογία για ορισμό από κριτή

Σύμφωνα με την Διεθνή Ένωση Ομοσπονδιών Κλασικού Αθλητισμού, ο κριτής πρέπει να υποδεικνύει το κατάλληλο σημείου του ίχνους που έχει την μικρότερη απόσταση από την γραμμή εκτίναξης. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει να γίνει μια τροποποίηση του αλγορίθμου ώστε να δίνεται στον κριτή αυτή η δυνατότητα. Για παράδειγμα θα μπορεί να τοποθετεί κατακόρυφα στο σημείο που θεωρεί κατάλληλο ένας στόχος όπως αυτοί που φαίνονται παρακάτω. Άλλωστε αυτό γίνεται και στην μέτρηση της επίδοσης με τους γεωδαιτικούς σταθμούς σε επίσημους αγώνες.

Εικόνα 6.1:Φωτοσταθερό σημείο με κύκλο στο κέντρο

Εικόνα 6.2:Φωτοσταθερό σημείο με ακμές

Έτσι μόλις τοποθετήσει τον στόχο στο κατάλληλο σημείο θα γίνεται μια λήψη που το περιλαμβάνει. Ο προσδιορισμός του αντίστοιχου εικονοσημείου θα είναι ευκολότερος από την συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς η διαφορά μεταξύ των δυο φωτογραφιών θα είναι πιο αισθητή. Μάλιστα στην περίπτωση των φωτοσταθερών που χρησιμοποιούνται στην Φωτογραμμετρική Οπισθοτομία η ανίχνευση του κύκλου μπορεί να γίνει χωρίς να απαιτείται η λήψη μιας

φωτογραφίας πριν την προσπάθεια. Το ίδιο εύκολα μπορεί να ανιχνευτεί και ο στόχος της εικόνας 6.2 αν υλοποιηθεί ένα φίλτρο ακμών σε μια δυαδική εικόνα.

Μείωση χρόνου εκτίμησης του αποτελέσματος

Παρόλο που απαιτείται μια μεθοδολογία όπου ο κριτής θα ορίζει το κατάλληλο σημείο, ο αλγόριθμος που αναπτύσσεται σε αυτή την Διπλωματική Εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο της επιλογής του κριτή και να έχει βοηθητικό χαρακτήρα. Για τον λόγο αυτό είναι επιθυμητό ο προσδιορισμός του αποτελέσματος να γίνεται όσο το δυνατόν πιο άμεσα. Αυτό μπορεί να συμβεί με την άμεση φόρτωση των εικόνων στον αλγόριθμο χωρίς την επέμβαση του χρήστη καθώς και την αυτοματοποιημένη κατάτμηση της περιοχής του σκάμματος για όλες τις φωτογραφίες που πρόκειται να ληφθούν, όπως εξηγείται παρακάτω.

Άμεση σύνδεση με υπολογιστή

Αρχικά πρέπει να πραγματοποιηθεί άμεση σύνδεση της φωτογραφικής μηχανής με έναν υπολογιστή, όπου θα υλοποιείται ο αλγόριθμος με την προσθήκη ενός κώδικα που θα αναγνωρίζει τις διαδοχικές φωτογραφίες και θα τις διαθέτει αυτόματα στον συγκεκριμένο αλγόριθμο αντικαθιστώντας την φόρτωσή τους από τον χρήστη.

Δυνατότητα αυτοματοποιημένης κατάτμησης για κάθε φωτογραφική μηχανή

Παράλληλα για την μείωση του χρόνου εκτίμησης του αποτελέσματος απαιτείται η δυνατότητα αυτοματοποιημένης κατάτμησης της περιοχής του σκάμματος για κάθε πακέτο δεδομένων από διαφορετικές φωτογραφικές μηχανές. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί σε περιβάλλον Matlab με την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων που περιλαμβάνουν τεχνικές κατωφλίωσης της εικόνας, μεθόδους ανάλογα με την υφή και το χρώμα κ.ά. (Αναλυτικότερα βλ. http://www.mathworks.com/discovery/image-segmentation.html)

Βίντεο που θα αναγνωρίζει τα κατάλληλα στιγμιότυπα

Ένα εναλλακτικό σενάριο είναι η χρήση βιντεοκάμερας σε σταθερή θέση, ώστε να μην αλλάζει η διαδικασία αποκατάστασης των προσανατολισμών, όπου θα καταγράφεται η προσπάθεια πριν και μετά την επίδοση του κάθε αθλητή και θα εξάγονται μέσω του απαραίτητου κώδικα, τα κατάλληλα καρέ από το βίντεο που θα περιλαμβάνουν το απαραίτητο ζεύγος για τον προσδιορισμό κάθε επίδοσης. Με την χρήση του βίντεο αποτρέπεται η πιθανότητα έλλειψης της κατάλληλης φωτογραφίας πριν από κάθε άλμα που αποτέλεσε πρόβλημα στην παρούσα Διπλωματική Εργασία, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.

Προσδιορισμός διεύθυνσης της γραμμής εκτίναξης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για το ορθότερο αποτέλεσμα του αλγορίθμου απαιτείται ο προσδιορισμός της διεύθυνσης της γραμμής εκτίναξης ως αφετηρία των μετρήσεων κάθε επίδοσης. Η γραμμή αυτή σύμφωνα με το Κεφάλαιο 2.1.1, έχει μήκος 1.22m. Έτσι για τον προσδιορισμό της αρκεί η μέτρηση των δύο άκρων του ευθύγραμμου τμήματός της και ο υπολογισμός των γεωδαιτικών συντεταγμένων των άκρων. Γνωρίζοντας τις συντεταγμένες των δυο αυτών σημείων προσδιορίζεται η ευθεία αυτή και για τον έλεγχο του αποτελέσματος μπορεί να επαναληφθεί η διαδικασία με καινούργιες μετρήσεις των σημείων και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Η διαδικασία που προτείνεται είναι ίδια με αυτή που εφαρμόζεται ήδη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές, στους επίσημους αγώνες.

Δυνατότητα αεροφωτογράφισης από σταθερή θέση

Με την αεροφωτογράφιση δίνεται η δυνατότητα καταγραφής του σκάμματος από ένα κατάλληλο ύψος. Με τον τρόπο αυτό το ίχνος που αφήνει κάθε αθλητής θα απεικονίζεται καλύτερα με αποτέλεσμα να μην επηρεάζεται από πιθανή σκίαση όπως συμβαίνει στην επίγεια λήψη και θα είναι πιο εύκολη η ανίχνευση του. Για να βρίσκεται η κάμερα σε σταθερή θέση είναι απαραίτητο να τοποθετηθεί σε μια κατασκευή με παρόμοιο τρόπο όπως συμβαίνει στο άθλημα του ποδοσφαίρου.

Βιβλιογραφία

[1] Baca A., 2015, ***"Computer Science in Sport. Research and practice"***

[2] Cavallaro R., 1997, ***"The FoxTrax hockey puck tracking system"***, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.17, Issue 2

[3] Germann M., Popa T., Keiser R., Ziegler R., Gross M., 2012, ***"Novel-View Synthesis of Outdoor Sport Events Using an Adaptive View- Dependent Geometry"***, Eurographics, Vol 31., No. 2

[4] Golts. A, ***"Computer Vision in Sports"***

[5] Heckel M., 2010 ***"Electronic Measurement in the Horizontal Jumps"***

[6] IAAF, 2016, ***"Competition Rules 2016-2017"***

[7] IAAF, 2008, ***"Track and Field Facilities"***

[8] Kamnardsiri T., Janchai W., Khuwuthyakorn P., Suwansrikham P., Klaphajone J., November 2015 ***"Knowledge-Based System Framework for Training Long Jump Athletes Using Action Recognition"***, Journal of Advances in Information Technology Vol. 6, No. 4

[9] McGlone J.C., Mikhail E., Mullen R., 2004, ***"Manual of Photogrammetry"***, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing

[10] Pers J., Kovacic S. 2000, ***"Computer Vision System Tracking Players in Sports Games"***

[11] Sekkas O., Tsetsos V., Biboudis A., Zervas E., Silvestros N., Hadjiefthymiades S., Batistakis A., 2015, ***"Real-time stereo vision technology for racket sports"***, ScienceDirect

[12] Thomas G., 2012, ***"Sports TV Applications of Computer Vision"***, Visual Analysis of Humans: Looking at People

[13] Zhou M., 2013, ***"Advances in Sport Science and Computer Science"*** WITPress

[14] Πατιάς Π., 1991, ***"Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία"*** ,Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη

[15] Πέτσα Ε., Δεκέμβριος 2000, ***"Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας"***

Ιστότοποι

http://www.mathworks.com/

https://mycourses.ntua.gr/

https://en.wikipedia.org/wiki/Long_jump

http://www.cv-foundation.org/openaccess/CVPR2013_workshops/CVPR2013_W19.py

http://www.computervisiononline.com/blog/revolutionizing-face-sports-using-computer-vision

http://www.imveurope.com/features/feature.php?feature_id=35

http://www.usatfne.org/officials/electronic/

http://www.goalcontrol.de/en/products/goalcontrol-4d.html

http://goalcontrol.de/en/

https://www.theguardian.com/technology/2014/jun/16/world-cup-goalline-technology-football-brazil-2014

https://en.wikipedia.org/wiki/Goal-line_technology

http://www.physics.org/article-questions.asp?id=125

https://en.wikipedia.org/wiki/Hawk-Eye

http://www.mobics.gr/el/projects/mobiXeyes

https://www.alliedvision.com/en/news/detail/news/avt-cameras-measure-ball-speed-in-beach-racket-tournaments-in-greece.html

Φωτογραφίες εξωφύλλου:

https://www.google.gr/search?tbm=isch&tbs=rimg%3ACebaNfuyXOVzIjgxcbokBGqfxu_1JOpnFQkF25EWqeCwYfFjeVlbcPTmqn7pKxSvLJZ7RTOPHUXbfgY9j8WdiWUksmSoSCTFxuiQEap_1GEXXJXa4PDCFeKhIJ78k6mcVCQXYRtNnlIjgxPEwqEgnkRap4LBh8WBEV5L-9_1s_1SrioSCd5WVtw9OaqfEeIynGhbnXKDKhIJukrFK8slntER0fGvR68hgLsqEglM48dRdt-BjxFXZUKWDke_1mioSCWPxZ2JZSSyZEWiCMDnUpSUp&q=sandpit%20long%20jump&bih=566&biw=1242&ved=0ahUKEwj34vnvo_vNAhWK1hQKHao3AK0Q9C8ICQ#imgrc=jB1eAux7sSeOQM%3A

https://www.google.gr/search?hl=el&tbm=isch&q=team+building&oq=&gs_l=#tbm=isch&tbs=rimg%3ACchhiC7VRE67Ijj_1DAF7SblBzq4ruRwLb8s1yAmXUgYHFn9gQEYBexLOtXe9Yh_1qhBra39FackodNt0_1-NX09v9bnioSCf8MAXtJuUHOEbhTYnfCEwXTKhIJriu5HAtvyzUR6al6uMmGGiIqEgnICZdSBgcWfxH21HpjhHLOGioSCWBARgF7Es61EWX2Ub2YeD_1QKhIJd71iH-qEGtoR18_1y0DL_105IqEgnf0VpySh023RGATdJVCUBDZCoSCT_141fT2_11ueEcWeri1oZcY2&q=%CF%86%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%B9%CE%BA%CE%B7%20%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B7%20%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%A0%CE%9F%CE%94%CE%9F&hl=el&imgrc=cZxaA7gauF8q2M%3A