



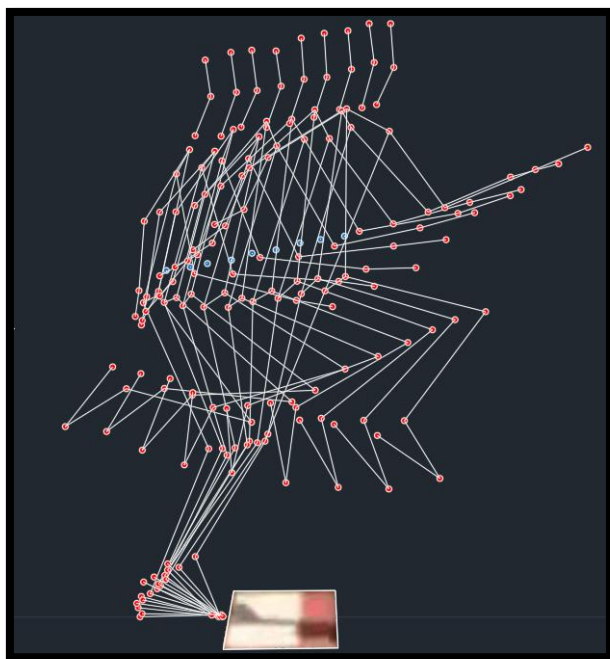
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ - ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ :

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΛΜΑΤΟΣ ΤΡΙΠΛΟΥΝ**



Παναγιώτης Βότσης

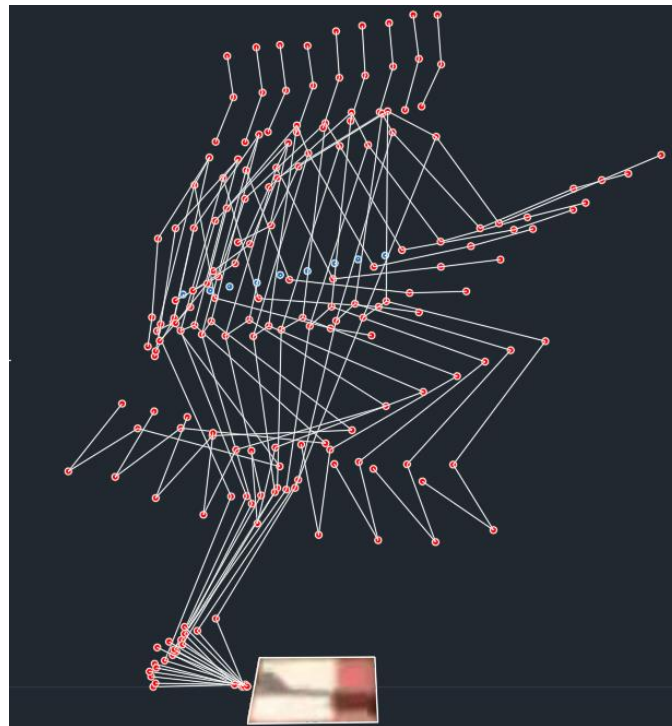
Επιβλέπων: Ανδρέας Γεωργόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF RURAL AND SURVEYING ENGINEERING
DEPARTMENT OF TOPOGRAPHY – LABORATORY OF PHOTOGRAMMETRY

DIPLOMA THESIS:
**DEVELOPMENT OF A PHOTOGRAMMETRIC METHOD FOR THE
KINEMATIC ANALYSIS OF THE TRIPLE JUMP**



Panagiotis Votsis

Supervisor: Andreas Georgopoulos, Professor at NTUA

Athens, October 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ανδρέα Γεωργόπουλο, επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, για την ενθάρρυνση να αναπτύξω ένα διεπιστημονικό θέμα της επιλογής μου, καθώς και για τη συνολική του καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της έρευνας.

Αντίστοιχα, ευχαριστώ θερμά τον κ. Απόστολο Θεοδώρου, επίκουρο καθηγητή αθλητικών αλμάτων στη ΣΕΦΑΑ του ΕΚΠΑ, για την ανιδιοτελή βοήθεια του, τις πολύτιμες συμβουλές του και την όρεξη του να συμμετάσχει σε αυτή την προσπάθεια από την αρχή έως το τέλος και τον κύριο Βασίλη Πανουτσακόπουλο για τις ουσιαστικές του παρατηρήσεις και διορθώσεις.

Στη συνέχεια, δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην συμβολή των καθηγητών Álvaro Rodriguez Miranda και José Manuel Valle Melón καθώς και της συναδέλφου Garbiñe Elorriaga Aguirre. Οι παρεμβάσεις τους και η βοήθεια τους στη δοκιμαστική λήψη δεδομένων που πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της διαμονής μου στην πόλη Vitoria της Ισπανίας υπήρξαν καθοριστικές για την ανάπτυξη της μεθόδου και τη συνέχεια της έρευνας μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Σεβαστή Ταπεινάκη, μέλος του εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας για την πολύτιμη βοήθεια της στο στάδιο της επεξεργασίας και τους φίλους μου Γρηγόρη Θεοδοσάκη και Ανδρέα Φιλιππόπουλο για τη συνολική τους βοήθεια κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στη φίλη και συνάδελφο Ιωάννα Δραμιτινού για τη βοήθεια της στη συλλογή δεδομένων αλλά κυρίως για τη στήριξη της σε όλη τη διάρκεια της ταυτόχρονης εκπόνησης των διπλωματικών μας εργασιών. Οι κοινές αναμνήσεις αυτής της περιόδου θα παραμείνουν ανεξίτηλες.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου και συγκεκριμένα τους γονείς μου για τη υποστήριξη τους σε όλη τη διαδρομή της ακαδημαϊκής μου εκπαίδευσης. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

AGRADECIMIENTOS

Es necesario mencionar la contribución de los profesores Álvaro Rodriguez Miranda y José Manuel Valle Melón y de la compañera Garbiñe Elorriaga Aguirre. Sus intervenciones, sus ideas, y su ayuda con respecto a la prueba de la toma de datos realizada durante mi estancia en Vitoria, España han sido decisivas para el desarrollo del método y la continuación de mi tesis. Os agradezco muy sinceramente el apoyo.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	10
ABSTRACT.....	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	13
A.1. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	13
A.1.1. Κατηγοριοποίηση συστημάτων	14
A.1.2. Συστήματα επεξεργασίας εικόνας (IMS)	17
A.1.3. Καταγραφή αθλητικής κίνησης.....	19
A.1.4. Ανασκόπηση μεθόδων καταγραφής αθλητικής κίνησης.....	21
A.2. ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΘΛΗΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	24
A.2.1. Αθλητική εμβιομηχανική και τεχνική	25
A.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ : ΑΛΜΑ ΤΡΙΠΛΟΥΝ	26
A.3.1. Ιστορική Αναδρομή	26
A.3.2 Τεχνική	27
A.3.3. Προδιαγραφές εγκαταστάσεων.....	28
A.3.4. Βιβλιογραφικές αναφορές.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	32
B.1. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	32
B.1.1. Τοποθέτηση και ρύθμιση καμερών	33
B.1.2. Απόδοση κλίμακας.....	33
B.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	35
B.2.1. Αρχές σχεδιασμού και διαστάσεις.....	35
B.2.2. Συλλογή Δεδομένων.....	36
B.2.3. Φωτογραμμετρική επεξεργασία.....	38
B.2.4. Μέτρηση και υπολογισμός στοιχείων κινηματικής ανάλυσης.....	41
B.2.5. Διάγραμμα ροής.....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	44
Γ.1. ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΜΕΡΑΣ.....	44
Γ.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	49

Γ.2.1. Εφαρμογή χρησιμοποιούμενης μεθόδου	51
Γ.2.2. Εφαρμογή προτεινόμενης μεθόδου.....	53
Γ.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΜΕΡΩΝ GOPRO	63
Γ.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	64
Γ.4.1. Κινηματικά στοιχεία στο τμήμα σύγκρισης.....	64
Γ.4.2. Στοιχεία κινηματικής ανάλυσης στο σύνολο του άλματος	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	73

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

- Εικόνα 1: Σελ. 26:** Side A: jumper. Photograph courtesy of the Museum of Fine Arts, Boston
- Εικόνα 2: Σελ. 27:** Φάσεις άλματος τριπλούν
- Εικόνα 3: Σελ. 28:** Διαστάσεις σκάμματος και διαδρόμου σύμφωνα με την IAAF
- Εικόνα 4: Σελ. 29:** Διάταξη καμερών κατά την καταγραφή της κίνησης
- Εικόνα 5: Σελ. 29:** Ανακλαστικοί στόχοι τεχνολογίας Vicon
- Εικόνα 6: Σελ. 30:** Θέσεις καμερών εντός του σταδίου για τον τελικό του άλματος τριπλούν ανδρών (με πράσινο)
- Εικόνα 7: Σελ. 31:** Το πλαίσιο διαβάθμισης που κατασκευάστηκε και βιντεοσκοπήθηκε πριν και μετά τη διεξαγωγή κάθε αγωνίσματος
- Εικόνα 8: Σελ. 45:** Διάταξη λήψης
- Εικόνα 9: Σελ. 45:** Κάμερες συλλογής δεδομένων
- Εικόνα 10: Σελ. 46:** Τα αυτοκόλλητα στο σώμα του αθλητή
- Εικόνα 11: Σελ. 46:** Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν
- Εικόνα 12: Σελ. 49:** Νέφος σημείων από PhotoScan
- Εικόνα 11: Σελ. 49:** Σφάλμα RMS διαδικασίας
- Εικόνα 12: Σελ. 49:** Σύνθεση από τις τελικές ορθοφωτογραφίες
- Εικόνα 15: Σελ. 50:** Το γήπεδο όπου έλαβε χώρα η συλλογή δεδομένων
- Εικόνα 16: Σελ. 51:** Διάταξη πειραματικής εφαρμογής
- Εικόνα 17: Σελ. 51:** Θέση τοποθέτησης των δύο καμερών GoPro στο ποδήλατο
- Εικόνα 18: Σελ. 53:** Οι σταθερές κάμερες της χρησιμοποιούμενης μεθόδου
- Εικόνα 19: Σελ. 53:** Οι σιδερένιοι στύλοι διαβάθμισης για τη δισδιάστατη απόδοση κλίμακας. Αριστερά, η τοποθέτηση τους κατά τη διάρκεια των αλμάτων και δεξιά, η μετακίνησή τους στο κέντρο του διαδρόμου μετά το πέρας των αλμάτων για να γίνει η καταγραφή τους.
- Εικόνα 20 : Σελ. 55:** Στόχοι 1 (επάνω) και 4 (κάτω)
- Εικόνα 21: Σελ. 56:** Τα σημεία A και B στους σιδερένιους στύλους
- Εικόνα 22: Σελ. 56:** Σχεδιάγραμμα χωρικής διάταξης στόχων
- Εικόνα 23: Σελ. 57:** Το ποδήλατο με τοποθετημένη την κάμερα
- Εικόνα 24: Σελ. 58:** Παράδειγμα εφαρμογής μάσκας

Εικόνα 25: Σελ. 60: Τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου κίνησης

Εικόνα 26: Σελ. 60: Το σφάλμα RMS της διαδικασίας και τα επιμέρους σφάλματα στους άξονες

Εικόνα 27: Σελ. 62: Παράδειγμα χειροκίνητης σκόπευσης ανατομικών σημείων στο καρτέ 75

Εικόνα 28: Σελ. 62: Το σύνολο των καρτέ που αναλύθηκαν στο τμήμα σύγκρισης

Εικόνα 29: Σελ. 65: παράδειγμα ταυτόχρονων καρτέ από GoPro

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΕΣ

Διάγραμμα 1: Σελ. 23: Δενδροδιάγραμμα αθλημάτων και αντιστοίχιση με συστήματα καταγραφής κίνησης

Διάγραμμα 2: Σελ. 43: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας στο οποίο απεικονίζονται με κόκκινο οι εργασίες πεδίου, με μπλε οι εργασίες γραφείου και με πράσινο τα αποτελέσματα της διαδικασίας

Διάγραμμα 3: Σελ. 67: Σύγκριση των οριζοντίων ταχυτήτων προτεινόμενης και χρησιμοποιούμενης μεθόδου

Διάγραμμα 4: Σελ. 68: Σύγκριση των κατακόρυφων ταχυτήτων προτεινόμενης και χρησιμοποιούμενης μεθόδου

Πίνακας 1: Σελ. 42: Θέση του ΚΒ Μέλους, από το κεντρικό σημείο, ως ποσοστό (%) του μήκους του μέλους.

Πίνακας 2: Σελ. 42: Μάζα Μελών Σώματος ως ποσοστό (%) του Συνολικής Σωματικής Μάζας

Πίνακας 3: Σελ. 47: Αναλυτικά στοιχεία για κάθε κάμερα που χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 4: Σελ. 47: Αναλυτικά στοιχεία για κάθε κάμερα που χρησιμοποιήθηκε

Πίνακας 5: Σελ. 56: Μετρημένες συντεταγμένες φωτοσταθερών στο αυθαίρετα ορισμένο σύστημα

Πίνακας 6: Σελ. 63: Σύνολο καταγεγραμμένων συντεταγμένων για τα καρτέ του τμήματος σύγκρισης

Πίνακας 7: Σελ. 64: Παράδειγμα υπολογισμού συντεταγμένων κέντρου μάζας για το καρτέ 80

Πίνακας 8: Σελ. 64: Συντεταγμένες κέντρων μάζας για τα καρτέ του τμήματος σύγκρισης

Πίνακας 9: Σελ. 66: Πίνακας σύγκρισης στοιχείων κινηματικής ανάλυσης

Πίνακας 10: Σελ. 67: Πίνακας υπολογισμού ταχυτήτων

Πίνακας 11 : Σελ. 69: Στοιχεία κινηματικής ανάλυσης από όλο το μήκος του άλματος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην ανάπτυξη μίας φωτογραμμετρικής μεθόδου για την εκπόνηση κινηματικής ανάλυσης του άλματος τριπλούν που δυνητικά θα μπορούσε να εφαρμοστεί από κάθε ενδιαφερόμενο, με χαμηλό χρηματικό και χρονικό κόστος, ανεξαρτησία του συστήματος καταγραφής από τον αθλητή.

Μεθοδολογία: Αρχικά, έγινε ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στις μεθόδους καταγραφής αθλητικής κίνησης και επιλέχθηκε να αναπτυχθεί ένα σύστημα επεξεργασίας εικόνας με τη χρήση εργαλείων φωτογραμμετρικής επεξεργασίας. Η συλλογή δεδομένων έγινε με παράλληλη βιντεοσκόπηση του άλματος με κινούμενη κάμερα πακτωμένη σε ποδήλατο. Με το φωτογραμμετρικό λογισμικό υπολογίστηκαν οι συντεταγμένες θέσης και οι στροφές των σημείων λήψης για κάθε καρέ σε αυθαίρετα ορισμένο τρισσορθώνιο σύστημα συντεταγμένων. Με τη χρήση των υπολογισμένων στοιχείων και το μέσο κατακόρυφο επίπεδο κίνησης, παράχθηκαν οι αντίστοιχες ορθοφωτογραφίες. Στη συνέχεια, οι ορθοφωτογραφίες εισήχθησαν σε λογισμικό σχεδίασης, όπου μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν τα στοιχεία κινηματικής ανάλυσης τα οποία παρουσιάστηκαν υπό μορφή διαγραμμάτων και πινάκων.

Έλεγχος και συμπεράσματα: Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα της υφιστάμενης μεθόδου καταγραφής που εκτελέστηκε παράλληλα σε τμήμα του ίδιου άλματος και εξάχθηκαν τα απαραίτητα συμπεράσματα. Τέλος, παρουσιάστηκαν προτάσεις για την αυτοματοποίηση και τη βελτίωση της μεθόδου σε επόμενο στάδιο έρευνας καθώς και προτάσεις αξιοποίησης.

ABSTRACT

The present diploma thesis pertains to the development of a non-obstructive photogrammetric method oriented to carry out the kinematic analysis of a triple jump performance that anyone could apply with low expense on cost and time.

Methodology: After the review of the recent bibliography on the sports motion capture methods, it was decided to develop an Image Processing Measurement System (IMS) using the tools of photogrammetric analysis. The data capture was realized with parallel videography of the jump, using a camera located on a bike. The photogrammetric software calculated the space coordinates and the rotation angles of the points from which the frames were taken based on a determined arbitrary coordinate system. Using the above data and the mean vertical plane of movement, the software generated an orthophoto for each frame. The orthophotos were uploaded in a drafting software, where elements of kinematic analysis were measured and calculated. Later, tables and diagrams were used to properly present the results.

Control and Conclusions: A critical comparison among the generated results with those of the established method, which was simultaneously applied on a specific part of the jump, has been attempted. This comparison led to certain deductions. Finally, suggestions towards the automation, the improvement and the alternative use of the designed method were presented.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα σημαντικό τμήμα της έρευνας γύρω από τα αθλήματα αποτελεί η ανάλυση της αθλητικής κίνησης. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα και μέθοδοι που διευκολύνουν το προσδιορισμό των στοιχείων από τα οποία απαρτίζεται και περιγράφεται η ανάλυση, προς όφελος των ερευνητών, των προπονητών αλλά και των ίδιων των αθλητών.

Η εμπειρία του συγγραφέα στο άθλημα του στίβου και πιο συγκεκριμένα στο άλμα τριπλούν σε συνδυασμό με τις σπουδές του στη φωτογραμμετρία, γέννησαν την ιδέα της αξιοποίησης των εργαλείων που παρέχει η τελευταία, προς όφελος της προπονητικής διαδικασίας.

Με αφορμή την παραπάνω ιδέα, εκπονήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, με αντικείμενο την ανάπτυξη μίας φωτογραμμετρικής μεθόδου για την κινηματική ανάλυση του άλματος τριπλούν. Βασική πολιτική του σχεδιασμού αποτέλεσε το χαμηλό κόστος, η ανεξαρτησία του αθλητή από το σύστημα καταγραφής και η δυνατότητα αυτοματοποιήσεων για τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας.

Στόχος της εργασίας είναι αρχικά η ανάπτυξη και ο σχεδιασμός της φωτογραμμετρικής μεθόδου που έχει πρακτική χρησιμότητα και στη συνέχεια η συγκριτική αξιολόγησή της με τις ήδη υπάρχουσες.

Η διπλωματική εργασία αναλύεται σε πέντε κεφάλαια :

- ❖ Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στις μεθόδους καταγραφής κίνησης και παρουσιάζονται χρήσιμα στοιχεία για το άλμα τριπλούν και την επιστήμη της αθλητικής εμβιομηχανικής, στην οποία υπάγεται η κινηματική ανάλυση.
- ❖ Στο δεύτερο κεφάλαιο, αρχικά αναλύεται η χρησιμοποιούμενη μέθοδος, όπως αυτή εφαρμόζεται από τους αρμόδιους επιστήμονες και στη συνέχεια περιγράφεται ο πλήρης σχεδιασμός της προτεινόμενης μεθόδου.
- ❖ Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της πειραματικής εφαρμογής της μεθόδου, αναλύονται τα προβλήματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.
- ❖ Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα της διαδικασίας.
- ❖ Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προτάσεις βελτίωσης και αξιοποίησης της συγκεκριμένης έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α : ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

A.1. ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η συνηθισμένη μέθοδος μελέτης της κίνησης είναι η παρατήρηση με γυμνό μάτι. Το ανθρώπινο μάτι έχει όμως περιορισμένες δυνατότητες στη σύλληψη και μέτρηση της κίνησης με λεπτομέρεια, οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη τεχνολογιών που επιτρέπουν στους ανθρώπους να καταγράψουν την κίνηση ενδεδειχώς.

Η καταγραφή της κίνησης (motion capture) ή παρακολούθηση της κίνησης (motion tracking) αντικειμένων ή ανθρώπων είναι ένα επιστημονικό εργαλείο με εφαρμογή σε πολλούς, διαφορετικούς τομείς. Ο ίδιος ο μελετητής της καταγραφής της κίνησης μπορεί επίσης να προέρχεται από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους, γεγονός που έχει δημιουργήσει διαφορετικές προσεγγίσεις και μεθόδους. Τα πρωτόκολλα συλλογής δεδομένων, ακρίβειας μετρήσεων και μοντέλων μείωσης δεδομένων έχουν αναπτυχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Με αφετηρία τα έργα Animal Locomotion [Muybridge,1887] και Movement [Marey,1895] στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και στη συνέχεια με την ανάπτυξη της φωτογραφικής μηχανής και του κινηματογράφου, η τεχνολογία καταγραφής της κίνησης είχαν ήδη εξελιχθεί ραγδαία στα μέσα του 20^{ου} αιώνα. Ένας από τους πρώτους τομείς έρευνας που ανέπτυξαν μεθόδους καταγραφής τις δεκαετίες του '70 και του '80 με απώτερο σκοπό την ανάλυση της κίνησης ήταν η εμβιομηχανική, δηλαδή η επιστήμη που ασχολείται με την περιγραφή και την ερμηνεία της κίνησης έμβιων όντων με βάση τους νόμους της Φυσικής. Μάλιστα, η βασική υποστηρικτική επιστήμη πάνω στην οποία βασίστηκαν οι επιστήμονες εμβιομηχανικής για την ανάπτυξη συστημάτων καταγραφής και ανάλυσης της κίνησης ήταν η φωτογραμμετρία.

Σήμερα, υπάρχει πληθώρα ανεπτυγμένων συστημάτων και επιστημονικών προσεγγίσεων που καλύπτουν τις ανάγκες πολλαπλών εφαρμογών.

A.1.1. Κατηγοριοποίηση συστημάτων

Ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται αλλά και το σκοπό που επιτελούν, τα συστήματα καταγραφής κίνησης διακρίνονται σε αδρανειακά, μηχανικής κίνησης, μαγνητικά, οπτικά και επεξεργασίας εικόνας.

Η τεχνολογία των **αδρανειακών αισθητήρων** κίνησης βασίζεται στην χρήση επιταχυνσιόμετρων, γυροσκοπίων και μαγνητόμετρων, τοποθετημένων στα καίρια σημεία του σώματος με τη χρήση κατάλληλων κουστουμιών ή/και με την κατάλληλη πρόσδεσή τους στα μέλη του σώματος. Η πληροφορίες που δίνουν οι αισθητήρες μεταφράζονται σε «σκελετό» σημείων και γραμμών στον υπολογιστή και η μετάδοσή τους πραγματοποιείται ασύρματα και σε πραγματικό χρόνο. Τα συστήματα αυτά καλύπτουν και τους έξι βαθμούς ελευθερίας της κίνησης ενώ σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν απαιτείται η χρήση καμερών ή η ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών φωτισμού στη σκηνή. Βασικά μειονεκτήματα είναι η μειωμένη ακρίβεια ως προς τη σχετική θέση των σημείων και ο μεγάλος όγκος δεδομένων ειδικά στα συστήματα με συνδυασμό μετρήσεων επιτάχυνσης και θέσης.

Στην **ηλεκτρομηχανική καταγραφή κίνησης** ο χρήστης φοράει εξωσκελετό ο οποίος αποτελείται από άκαμπτες ράβδους συνδεδεμένες με ποτενσιόμετρα. Τα κύρια πλεονεκτήματα του εξοπλισμού αυτού είναι η καταγραφή σε πραγματικό χρόνο, η υψηλή ακρίβεια που αποδίδει στην κίνηση του χρήστη, η αυτονομία του κάθε αισθητήρα και η ανεξαρτησία ως προς το χώρο καταγραφής. Απ' την άλλη πλευρά, το γεγονός ότι ο εξοπλισμός αυτός είναι εξωσκελετικός με άκαμπτες ράβδους τον καθιστά περιοριστικό για την ελευθερία κινήσεων του χρήστη. [Τσαμπουνάρης, 2017]

Τα **ηλεκτρομαγνητικά συστήματα καταγραφής κίνησης** αποτελούνται από πομπούς που υλοποιούν ένα μαγνητικό πεδίο στο χώρο και από ενσύρματους ή ασύρματους αισθητήρες τοποθετημένους στο σώμα. Ο κάθε αισθητήρας καθορίζει ανεξάρτητα για το σημείο στο οποίο είναι προσαρτημένος θέση και προσανατολισμό. Βασικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου θεωρούνται η ύπαρξη έξι βαθμών ελευθερίας και η ανεξαρτησία των αισθητήρων. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η περιορισμένη εμβέλεια και η πιθανή ύπαρξη θορύβου στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. [Τσαμπουνάρης, 2017]

Τα **οπτικά (ή και οπτοηλεκτρονικά) συστήματα καταγραφής κίνησης** είναι αυτά που χρησιμοποιούν οπτικούς αισθητήρες (κάμερες) και στόχους για τη συλλογή δεδομένων. Αποτελούν τα συστήματα με την εκτενέστερη χρήση σε πληθώρα εφαρμογών, τη μεγαλύτερη τεχνολογική εξέλιξη και την καλύτερη παρεχόμενη ακρίβεια. Ουσιαστικά, δύο ή παραπάνω κάμερες που έχουν μεταξύ τους επικάλυψη καταγράφουν ένα αντικείμενο με τους ειδικούς στόχους, ώστε να προσδιορίσουν την τρισδιάστατη θέση τους μέσω τριγωνισμού. [Μαγκαφώση, 2018]

Ανάλογα με το είδος αισθητήρων-στόχων που χρησιμοποιούν, τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: σε ενεργητικά και παθητικά.

Στα **ενεργητικά συστήματα** οι στόχοι-πομποί εκπέμπουν φως το οποίο καταγράφουν οι κάμερες-δέκτες. Η εκπομπή γίνεται με διόδους φωτοεκπομπής (LED) υπέρυθρης ακτινοβολίας που τοποθετούνται στους στόχους ενώ η καταγραφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μέσω ειδικού υπέρυθρου φίλτρου στο φακό των καμερών. Τα ενεργητικά οπτικά συστήματα καταγραφής έχουν μειωμένο θόρυβο στα δεδομένα, μπορούν να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερη περιοχή μελέτης και παρέχουν μεγάλη ακρίβεια. Ένα άλλο σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι κάθε LED αναγνωρίζεται ως ξεχωριστή μονάδα κατά την επεξεργασία με αποτέλεσμα να μην υπάρχει παρεμπόδιση (occlusion) ή επικάλυψη (overlapping). Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος και η ανάγκη τοποθέτησης μπαταρίας και καλωδίων για τα LED πάνω στο σώμα του αθλητή, συνήθως με τη χρήση ειδικών στολών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργητικών οπτικών συστημάτων είναι η τεχνολογία Optotrak της εταιρείας NDI. [Van der Kruk & Reijne, 2018]

Στα **παθητικά συστήματα** οι στόχοι-δέκτες ανακλούν το φως που εκπέμπουν οι κάμερες-πομποί. Η εκπομπή γίνεται με διόδους φωτοεκπομπής (LED) τοποθετημένες στις κάμερες. Στη συνέχεια οι στόχοι ανακλούν τις ακτίνες, οι οποίες καταγράφονται από το φίλτρο υπέρυθρης ακτινοβολίας που είναι τοποθετημένο στο φακό. Παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία ως προς τα σημεία τοποθέτησης των στόχων αφού δε χρειάζονται καλώδια και μπαταρία, πάρα μόνο ανακλαστική ταινία και έχουν μικρότερο κόστος. Τα προβλήματα αυτής της μεθόδου είναι η ύπαρξη θορύβου λόγω εσφαλμένων ανακλάσεων, και η πιθανή ανάγκη χειροκίνητης επεξεργασίας λόγω παρεμπόδισης ή επικάλυψης στόχων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι τεχνολογία Vicon και η τεχνολογία OptiTrack και η τεχνολογία Vicon. [Van der Kruk & Reijne, 2018]

Αν και τεχνολογικά είναι οι πιο ανεπτυγμένες, αμφότερες οι μέθοδοι των οπτικών συστημάτων παρουσιάζουν τα εξής βασικά μειονεκτήματα :

- είναι περιοριστικές ως προς το χώρο και τις συνθήκες καταγραφής (π.χ. φωτισμός)
- και περιλαμβάνουν στόχους στο ανθρώπινο σώμα που πιθανώς να επηρεάζουν την απρόσκοπτη κίνηση.

Λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν τα παραπάνω συστήματα σε πλήθος εφαρμογών, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία ανερχόμενη τάση στον τομέα της έρευνας για εύρεση προσαρμοστικών και μη παρεμβατικών (ή ελάχιστα παρεμβατικών) μεθόδων καταγραφής της ανθρώπινης κίνησης. Με τον όρο προσαρμοστικές νοούνται οι μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και συνθήκες, συνήθως σε αντιδιαστολή με τον ελεγχόμενο χώρο ενός εργαστηρίου. Ως μη παρεμβατικές νοούνται οι μέθοδοι στις οποίες το αντικείμενο που καταγράφεται κινείται με πλήρη ανεξαρτησία από το σύστημα καταγραφής.

Η τάση αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη των συστημάτων επεξεργασίας εικόνας (Image Processing Measurement systems). Επειδή στην προτεινόμενη μεθοδολογία της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιείται ένα τέτοιο σύστημα, κρίθηκε απαραίτητο να αναλυθούν εκτενώς σε ξεχωριστό κεφάλαιο.

A.1.2. Συστήματα επεξεργασίας εικόνας (IMS)

Είναι τα συστήματα στα οποία το καταγεγραμμένο βίντεο ή φωτογραφία υπόκειται σε ψηφιακή επεξεργασία με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για την κίνηση. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα συστήματα που βασίζονται σε αισθητήρες (ακόμη και τα λεγόμενα οπτικά συστήματα), αυτά τα συστήματα στηρίζονται στην όραση, χρησιμοποιώντας οπτικές κάμερες και αλγορίθμους όρασης υπολογιστών. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους είναι η ανεξαρτησία τους από στόχους-σημεία αναφοράς (markerless), πράγμα που τα καθιστά ελκυστικά για πληθώρα εφαρμογών (π.χ. αθλητική κίνηση). Επιπλέον, παρέχουν ευρεία κάλυψη και είναι εύκολα προσαρμόσιμα στα περισσότερα περιβάλλοντα. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται τα εξής: α) δεν είναι εύκολη η ανάλυση κίνησης σε πραγματικό χρόνο, β) υπάρχει η περίπτωση να απαιτείται ακριβός, υψηλής ανάλυσης και ταχύτητας βιντεογραφικός ή φωτογραφικός εξοπλισμός και γ) η ακρίβεια έχει στενή εξάρτηση με το εκάστοτε στήσιμο της καταγραφής, δηλαδή τη θέση της κάμερας σε σχέση με την τροχιά κίνησης και τον αριθμό των καμερών.

Τα συστήματα όρασης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) αυτά που εκτελούν εντοπισμό βάσει μοντέλου (model-based tracking) και β) αυτά που εκτελούν εντοπισμό βάσει στοιχείων/χαρακτηριστικών (feature-based tracking).

- ❖ Ο εντοπισμός βάσει μοντέλου προϋποθέτει την ύπαρξη του 3D μοντέλου του αντικείμενου. Η πληροφορία θέσης και προσανατολισμού του ενημερώνεται σε κάθε καρέ, αρχικά χρησιμοποιώντας δυναμικά μοντέλα μέσω φίλτρων πρόβλεψης και στη συνέχεια με μετρήσεις σε αυτό. Αυτού του είδους τα συστήματα είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε άγνωστα περιβάλλοντα και περιορίζουν την κίνηση της κάμερας ακριβώς επειδή απαιτούν πρότερη γνώση του 3D μοντέλου του αντικείμενου αλλά και του περιβάλλοντος του.
- ❖ Οι αλγόριθμοι εντοπισμού βάσει στοιχείων/χαρακτηριστικών χρησιμοποιούν σημεία ενδιαφέροντος (ή χαρακτηριστικά σημεία) εντός του frame με σκοπό να εντοπίσουν το αντικείμενο. Αυτή η διαδικασία είτε είναι τυποποιημένη, δηλαδή υπάρχουν προκαθορισμένα μοτίβα σε στόχους εντός του περιβάλλοντος τα οποία αναζητούν σε κάθε καρέ (frame) οι αλγόριθμοι (κωδικοποιημένοι στόχοι), είτε μέσω ειδικών φίλτρων αναζητούνται ομόλογα σημεία μεταξύ των frames τα οποία είναι ποικιλοτρόπως διακριτά (π.χ. γωνίες, τομές, σημεία με συγκεκριμένη υφή), χωρίς τη χρήση στόχων (markerless).

Η πρώτη εκδοχή απαιτεί μία προεργασία (τοποθέτηση στόχων) αλλά προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στο μοντέλο. Η δεύτερη εκδοχή, που προσφέρει το σημαντικό πλεονέκτημα της ανεξαρτησίας από το περιβάλλον κίνησης, αφορά σε αλγορίθμους που συνεχώς εξελίσσονται και βελτιώνονται για εφαρμογές όπως η ρομποτική όραση ή η επαυξημένη πραγματικότητα. Συγκρίνοντας τους αλγορίθμους ανοιχτού κώδικα που υπάρχουν με τις βάσεις δεδομένων μετρητικών στοιχείων ανθρώπινης κίνησης, οι ερευνητές/προγραμματιστές σε αυτούς τους κλάδους της τεχνολογίας έχουν σημειώσει ραγδαία πρόοδο. [Van der Kruk & Reijne, 2018].

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχουν ήδη πολλά φωτογραμμετρικά προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούν αντίστοιχους αλγορίθμους για τη δημιουργία μοντέλων και άλλων παραγώγων σε δύο και τρεις διαστάσεις. Ο συνδυασμός δε με στόχους όχι μόνο είναι δυνατός, αλλά χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων για την βελτίωση της ακρίβειας και την παροχή πληροφορίας απόλυτης θέσης (απόλυτος προσανατολισμός).

A.1.3. Καταγραφή αθλητικής κίνησης

Πολλοί από τους τομείς της έρευνας γύρω από τα αθλήματα απαιτούν την καταγραφή της κίνησης του αθλητή, όχι μόνο ποιοτικά αλλά και ποσοτικά. Τα συστήματα καταγραφής της ανθρώπινης κίνησης, όπως αυτά έχουν εξελιχθεί διαχρονικά από επικουρικές επιστήμες, έχουν συμβάλει δραστικά στην εξέλιξη της αθλητικής έρευνας. Η σωστή εφαρμογή τους όμως προϋποθέτει την πρότερη γνώση των ειδικών χαρακτηριστικών και των προβλημάτων της αθλητικής κίνησης. [Κέλλης, 2015]

Η συλλογή πληροφοριών σχετικά με την ακρίβεια και την πρακτική χρήση των μετρητικών συστημάτων μπορεί να γίνει μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά που αναφέρουν οι κατασκευαστές τους έχουν προκύψει σε συνθήκες και διατάξεις διαφορετικές από αυτές στις οποίες πραγματικά εκτελούνται τα αθλήματα. Αυτή η απόκλιση αποδίδεται σε τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά του τομέα της αθλητικής έρευνας:

- ❖ Η έρευνα της αθλητικής κίνησης εκτελείται *in situ*, δηλαδή στο εκάστοτε φυσικό πεδίο εκτέλεσης της κίνησης και όχι σε εργαστηριακή προσομοίωση. Σε αντίθεση με τις ελεγχόμενες συνθήκες του εργαστηρίου, το πεδίο είναι πηγή διακριτών προβλημάτων όπως η τοποθεσία (κλειστός – ανοιχτός χώρος), οι καιρικές συνθήκες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία), οι παρεμβολές στις μετρήσεις (π.χ. θόρυβος, μαγνητικές οχλήσεις, σκέδαση φωτός) και τα εμπόδια του χώρου.
- ❖ Ο όγκος των μετρούμενων στοιχείων είναι συχνά μεγάλος. Η ακρίβεια είναι αντιστρόφως ανάλογη του εύρους του συστήματος. Όσο αυξάνεται ο χώρος που απαιτεί η κίνηση, αυξάνεται η μετατόπιση που εκτελούν οι συμμετέχοντες άρα μειώνεται και η ακρίβεια μέτρησης.
- ❖ Η αθλητική κίνηση πολλές φορές είναι έντονα δυναμική και γρήγορη, πράγμα που σημαίνει ότι καταγράφεται δυσκολότερα από στατικές ή αργές κινήσεις όπως το περπάτημα. Αυτό συχνά αποτελεί τεχνικό περιορισμό, ειδικά για τα συστήματα με αισθητήρες εικόνας τα οποία χρειάζονται υψηλή συχνότητα των καρτέ (frames) για να καταγράψουν με την απαραίτητη λεπτομέρεια την αθλητική κίνηση. Συγκεκριμένα, οι συχνότητες βιντεοσκόπησης που έχουν επιλεγεί σε αθλητικές εφαρμογές έχουν εύρος από 50 μέχρι και 250 fps (καρτέ ανά δευτερόλεπτο). Με εξαίρεση ορισμένες ειδικές εφαρμογές, γενικά αποφεύγεται η βιντεοσκόπηση σε μεγαλύτερες συχνότητες λόγω αχρείαστου όγκου δεδομένων και ύπαρξης θορύβου. Επίσης, η δυναμική της κίνησης δημιουργεί προβλήματα στα αδρανειακά συστήματα, όπου οι γραμμικές επιταχύνσεις μπορεί να ενοχλήσουν την εκτίμηση προσανατολισμού των αισθητήρων.

- ❖ Το μέγεθος και το βάρος των αισθητήρων (είτε στόχων, ανακλαστήρων, αυτοκόλλητων) είναι ένα σημαντικό στοιχείο, όταν το επιλεγμένο σύστημα καταγραφής περιλαμβάνει την τοποθέτησή τους απευθείας στο σώμα του αθλητή. Ειδικά στην γρήγορη και υψηλής απόδοσης κίνηση, ο αθλητής πρέπει να παρακωλύεται ελάχιστα ως προς την ελευθερία κινήσεών του. Αν η κίνησή του δεν είναι απρόσκοπτη και δεν προκύπτει φυσικά, το καταγεγραμμένο αποτέλεσμα αποτελεί κακέκτυπο της φυσικής κίνησης μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία των συμπερασμάτων.

Πέρα από τα προαναφερθέντα γενικά προβλήματα, τα ίδια τα αθλήματα διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την κίνηση, το μέγεθος του χώρου αλλά και το περιβάλλον στο οποίο λαμβάνουν χώρα. Συνεπώς, είναι σημαντικό, από την πλευρά του μελετητή, να καταστεί σαφές ποιο σύστημα καταγραφής ταιριάζει σε κάθε άθλημα, συνυπολογίζοντας α) τις δυνατότητες του συστήματος καταγραφής και β) τις ανάγκες που παρουσιάζει και τους περιορισμούς που θέτει το ίδιο το άθλημα.

A.1.4. Ανασκόπηση μεθόδων καταγραφής αθλητικής κίνησης

Η συγκεντρωτική έρευνα των Eline van der Kruk και Marco M. Reijne [2018] περιλαμβάνει 20 διαπιστευμένες μελέτες σχετικές με τη μετρητική ακρίβεια 17 διαφορετικών συστημάτων καταγραφής διαφορετικών αθλημάτων.

Ανάμεσα στα στοιχεία που καταγράφονται στους δύο πίνακες της έρευνας περιλαμβάνονται οι διαστάσεις (2D/3D), το περιβάλλον καταγραφής, τα χαρακτηριστικά των στόχων που χρησιμοποιήθηκαν, οι λεπτομέρειες των αισθητήρων/καμερών, οι διαστάσεις του χώρου της κίνησης αλλά και τα στατιστικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της τελικής ακρίβειας κάθε μεθόδου. Επίσης, η έρευνα καταλήγει σε συμπεράσματα ως προς στην αντιστοίχιση αθλημάτων και καταλληλότερων μεθόδων καταγραφής αλλά και ως προς τα κενά που παρουσιάζει η έρευνα διεθνώς σε αυτόν το διεπιστημονικό τομέα.

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκε συγκριτικό διάγραμμα δύο αξόνων (κάθετος άξονας: ακρίβεια και οριζόντιος άξονας: χώρος κίνησης), στο οποίο έχουν τοποθετηθεί όλες οι εφαρμογές. Το διάγραμμα είναι αναρτημένο σε διαδραστική μορφή στο διαδικτυακό εργαλείο που δημιούργησαν οι ερευνητές στα πλαίσια της συγκεντρωτικής μελέτης.

Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική προτείνει μία νέα μεθοδολογία καταγραφής αθλητικής κίνησης, τα δεδομένα της συγκεκριμένης συγκεντρωτικής έρευνας θα χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο σύγκρισης κατά το στάδιο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Οι πίνακες με τα στοιχεία της εν λόγω έρευνας και το συγκριτικό διάγραμμα δύο μεταβλητών περιλαμβάνονται ως παράρτημα στο τέλος της τεχνικής έκθεσης της παρούσας διπλωματικής.

Αντιστοίχιση αθλημάτων-συστημάτων καταγραφής

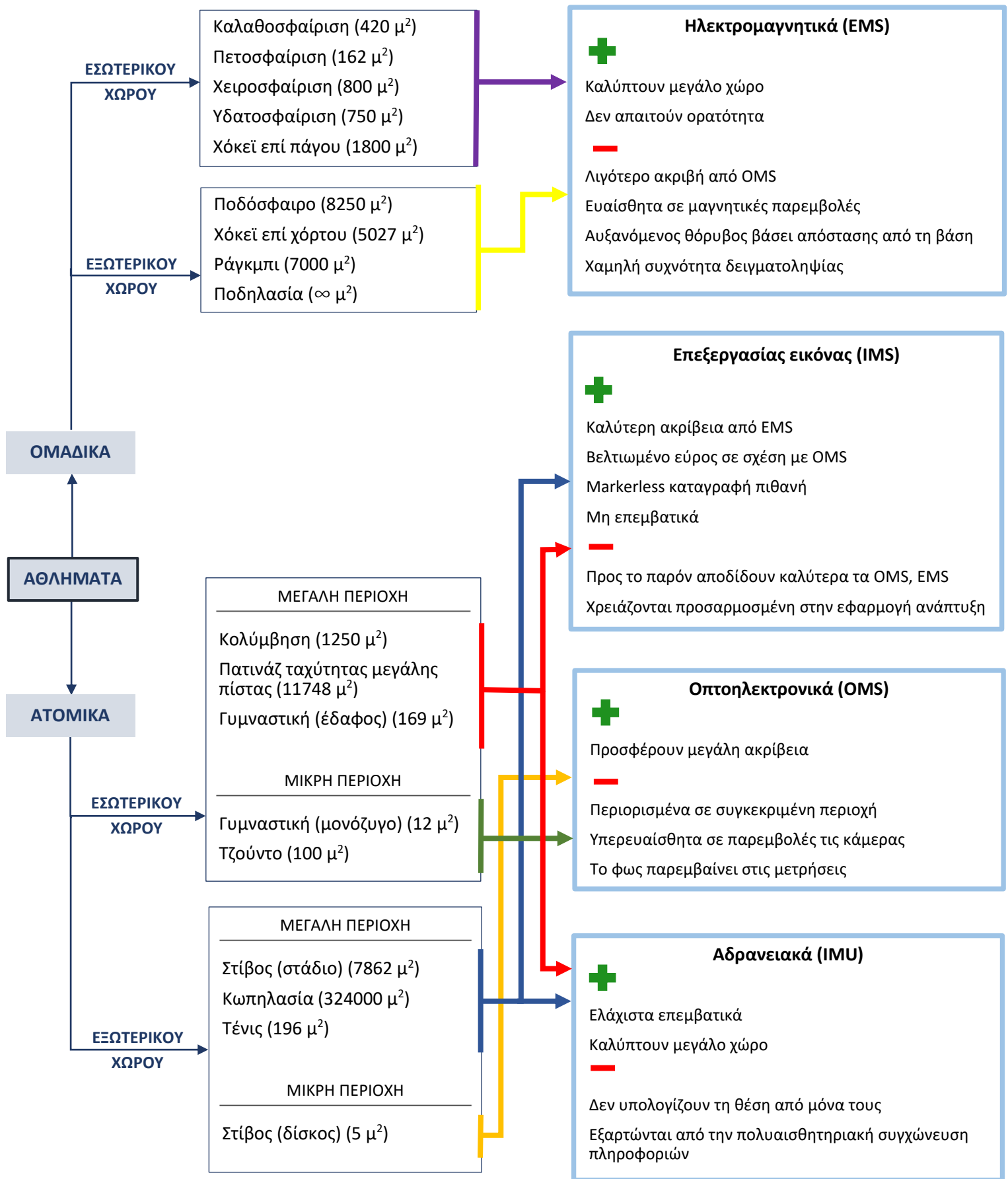
Σύμφωνα με την έρευνα, τα κύρια συστήματα που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή της αθλητικής κίνησης είναι τα αδρανειακά (IMU: Inertial Measurement Units), τα ηλεκτρομαγνητικά (EMS: Electromagnetic Measurement Systems), τα οπτοηλεκτρονικά (OMS: Optoelectronic measurement systems) και τα συστήματα επεξεργασίας εικόνας (IMS: Image Measurement Systems).

Το παρακάτω δένδροδιάγραμμα (Εικόνα 1) αντιστοιχίζει τα διαφορετικά αθλήματα των εφαρμογών της έρευνας με τις τέσσερις βασικές μεθόδους καταγραφής. Στο πρώτο επίπεδο γίνεται διάκριση των αθλημάτων σε ατομικά και ομαδικά, στο δεύτερο επίπεδο γίνεται διάκριση σε εξωτερικού και εσωτερικού χώρου και στο τρίτο επίπεδο το οποίο υπάρχει μόνο στα ατομικά αθλήματα, γίνεται διάκριση σύμφωνα με το χώρο που καταλαμβάνει η κίνηση (μικρή-μεγάλη περιοχή). Κάθε υποομάδα που

έχει δημιουργηθεί συνδέεται με το βέλτιστο για τα χαρακτηριστικά της σύστημα καταγραφής της ανθρώπινης κίνησης.

Από το δένδροδιάγραμμα και τα αναλυτικά στοιχεία της έρευνας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- ❖ Στα ομαδικά αθλήματα τα συστήματα καταγραφής συνηθίζουν να χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό θέσης, απόστασης, ταχύτητας και επιτάχυνσης των παικτών ενώ στα ατομικά απασχολεί περισσότερη η ανάλυση της τεχνικής.
- ❖ Τα ομαδικά αθλήματα έχουν μεγάλη περιοχή καταγραφής και συχνή παρεμπόδιση στα δεδομένα ενώ η ακρίβεια δεν είναι τόσο σημαντική όσο είναι για την ανάλυση της τεχνικής. Συνεπώς, θεωρούνται καταλληλότερα τα ηλεκτρομαγνητικά συστήματα καταγραφής.
- ❖ Στα ατομικά αθλήματα, στα οποία απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην καταγραφή, επιλέχθηκαν διαφορετικά συστήματα με γνώμονα την περιοχή καταγραφής. Επιβεβαιώνοντας τις αρχές της αθλητικής έρευνας, σε εφαρμογές μικρής χωρικής εμβέλειας επιτεύχθηκε υψηλή ακρίβεια με την επιλογή των οπτικών συστημάτων. Παράλληλα, για τα ατομικά αθλήματα που καταλαμβάνουν μεγάλο όγκο στην κίνηση θεωρούνται καταλληλότερα τα συνεχώς αναπτυσσόμενα συστήματα επεξεργασίας εικόνων (IMS) και ο συνδυασμός αδρανειακών συστημάτων (IMU) με μοντέλα προσομοίωσης.
- ❖ Δεν υπάρχουν μετρητικά συστήματα που εξασφαλίζουν κάλυψη μεγάλης χωρικής εμβέλειας σε συνδυασμό με υψηλή μετρητική ακρίβεια για την καταγραφή ατομικών αθλημάτων τόσο εσωτερικού χώρου (π.χ. κολύμβηση, πατινάζ ταχύτητας) όσο και εξωτερικού (π.χ. κωπηλασία, στίβος)



Διάγραμμα 1: Δενδροδιάγραμμα αθλημάτων και αντιστοίχιση με συστήματα καταγραφής κίνησης

A.2. ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΑΘΛΗΤΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η επιστήμη της εμβιομηχανικής (biomechanics) αναφέρεται στην περιγραφή και την ερμηνεία της κίνησης με τη χρήση των νόμων της φυσικής.

Η κίνηση, αναλυόμενη με όρους φυσικής, αφορά κυρίως στη χωρική μετατόπιση, στη μεταβολή της σε σχέση με το χρόνο (ταχύτητα), στη μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με το χρόνο (επιτάχυνση) και σε συνδυασμό με τη μάζα του σώματος, στη δύναμη που προκαλεί τις αλλαγές. Επίσης, αφορά στις δυνάμεις που ασκούνται για να ξεπεράσει το ανθρώπινο σώμα τους εξωτερικούς παράγοντες (όπως τις τριβές, τον αέρα, τη βαρύτητα κλπ.). Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και αντίστροφα, αναλύοντας τα υπάρχοντα δεδομένα και συνθέτοντας μοντέλα κίνησης.

Η φυσική απαιτεί τον ορισμό συμβάσεων για την ανάλυση ανάλογα με το επίπεδο λεπτομέρειας που απαιτείται. Για παράδειγμα, μακροσκοπικά ο αθλητής θεωρείται ως ένα συμπαγές στερεό σώμα, ενώ στην πραγματικότητα τα μέλη του κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες και εκτελούν διακριτές υπό-κινήσεις που επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα. Παράλληλα, για τη διευκόλυνση της ανάλυσης, η κίνηση στο χώρο μπορεί να εξεταστεί τμηματικά σε δύο διαστάσεις. Συγκεκριμένα, τα 3 βασικά επίπεδα ανάλυσης του ανθρώπινου σώματος είναι το προσθοπίσθιο, το μετωπιαίο και το εγκάρσιο, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Η πολυπλοκότητα επομένως, η οποία χαρακτηρίζει τη μελέτη της ανθρώπινη κίνησης σε όλα τα επίπεδα, από τους μύες και τους εξωτερικούς παράγοντες μέχρι και τα μοντέλα προσομοίωσης, έχει αναγκάσει τους ερευνητές να στραφούν στις τεχνολογίες καταγραφής που αναφέρθηκαν για να βελτιστοποιήσουν τις προσεγγίσεις τους. Ο όγκος των απαιτούμενων υπολογισμών τέλος, έχει καταστήσει τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και την ψηφιακή επεξεργασία αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας.

A.2.1. Αθλητική εμβιομηχανική και τεχνική

Είναι ο κλάδος της εμβιομηχανικής ο οποίος ασχολείται με τη μελέτη της κίνησης όπως αυτή εκτελείται στην αθλητική προσπάθεια. Στην αθλητική κίνηση, ο αθλητής εφαρμόζει δυνάμεις με το σώμα του μέσα στο προκαθορισμένο εξωτερικό περιβάλλον του εκάστοτε αθλήματος, για να πραγματοποιήσει μία σειρά κινήσεων των μελών του σώματος που θα του επιτρέψουν να επιτύχει τη βέλτιστη επίδοση (μέγιστη επίδοση ή μέγιστη οικονομία ή συνδυασμό αυτών). Ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζονται οι δυνάμεις σε συνδυασμό με τον τρόπο που κινούνται τα μέλη και το σώμα για ένα συγκεκριμένο σκοπό είναι αυτό που αποκαλείται αθλητική τεχνική. [Κόλλιας, 1997]

Ειδικά στα ατομικά αθλήματα, η τεχνική παίζει πρωτεύοντα ρόλο για το αποτέλεσμα, από το οποίο και κρίνεται. Η διαχρονική πορεία των επιδόσεων σε πολλά αθλήματα έχει δείξει ότι ενώ υπάρχει μία γενική φόρμα κίνησης, δεν υπάρχει καθολική ιδανική τεχνική, αφού διαφορετικοί αθλητές με διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης πετυχαίνουν ίδιου επιπέδου επιδόσεις. Συνεπώς, η τεχνική είναι καθαρά προσωπική και η ανάλυσή της σε βάθος χρόνου μπορεί να οδηγήσει σε συμπεράσματα για τη βελτίωσή της. Ένα από τα εργαλεία που έχει ο αθλητής ή ο προπονητής ή ο μελετητής για την ανάλυση και άρα τη βελτίωση της τεχνικής, είναι η καταγραφή της με τα τεχνικά μέσα που διαθέτει.

Η αθλητική εμβιομηχανική στηρίζεται στα εξής επιστημονικά πεδία:

- ❖ Στην κινηματική (kinematics) που αφορά στην ποσοτική περιγραφή της κίνησης και προκύπτει ως το αποτέλεσμα της χρήσης ειδικών συστημάτων και αναλύσεων. Παρέχει πληροφορίες σχετικές με τη μεταβολή της θέσης και της ταχύτητας.
- ❖ Στην κινητική (kinetics) ή δυναμική που έχει ως σκοπό την εύρεση των αιτιών της κίνησης, με κύριο αντικείμενο τον εντοπισμό και τη μελέτη των δυνάμεων που ασκούνται.
- ❖ Στις επικουρικές επιστήμες που παρέχουν τα εργαλεία για τα προαναφερθέντα πεδία χωρίς να εντάσσονται αποκλειστικά σε κάποιο από τους δύο. Οι βιοϊατρικές τεχνολογίες, όπως η ηλεκτρομυογραφία και οι απεικονιστικές τεχνικές, αλλά και τα υπολογιστικά συστήματα επεξεργασίας και προσομοίωσης της κίνησης αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων εργαλείων. [Κέλλης, 2015]

A.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ : ΑΛΜΑ ΤΡΙΠΛΟΥΝ

A.3.1. Ιστορική Αναδρομή

Πιθανολογείται ότι η ιδέα της μέτρησης αλληλουχίας αλμάτων υπήρξε στους αρχαίους Ολυμπιακούς αγώνες, ως ένα από τα αγωνίσματα του αρχαίου πεντάθλου. Βασιζόμενοι μόνο στις σωζόμενες καταγεγραμμένες επιδόσεις, κάποιοι ιστορικοί εικάζουν ότι ήταν πενταπλούν άλμα άνευ φοράς, με τη χρήση αλτήρων, δηλαδή λίθινων ή μολύβδινων βαρών τους οποίους οι αθλητές πετούσαν προς τα πίσω για μεγαλύτερη ώθηση. Επίσης, τα άλματα εκτελούνταν πάντα με τη συνοδεία αυλητή, υπογραμμίζοντας έτσι τη σημασία του ρυθμού στο συγχρονισμό των κινήσεων.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι δεν έχει αποσαφηνιστεί και τεκμηριωθεί ιστορικά η ακριβής μορφή του αγωνίσματος του αρχαίου πεντάθλου και ότι αυτό που αποκαλείται σήμερα άλμα τριπλούν είναι μεταγενέστερη ιδέα κεντροευρωπαϊκής προέλευσης.

Το άλμα τριπλούν ήταν ένα από τα δώδεκα αθλήματα του στίβου που διεξήχθησαν στους πρώτους σύγχρονους Ολυμπιακούς Αγώνες το 1896 στο Παναθηναϊκό Στάδιο της Αθήνας, τα οποία εξακολουθούν να υπάρχουν στο ολυμπιακό πρόγραμμα μέχρι και σήμερα. Επειδή ήταν το πρώτο αγώνισμα χρονικά, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι ο Αμερικάνος James Connolly, που στέφθηκε νικητής, ήταν ο πρώτος σύγχρονος Ολυμπιονίκης. Οι γυναίκες δεν αγωνίζονταν επίσημα στο άλμα τριπλούν έως το 1990. Το αντίστοιχο αγώνισμα των γυναικών υπάρχει στο ολυμπιακό πρόγραμμα από τους Ολυμπιακούς Αγώνες του 1992 στη Βαρκελώνη μέχρι και σήμερα. Η μεγαλύτερη επίδοση που έχει πραγματοποιηθεί παγκοσμίως στους άντρες είναι 18,29 μέτρα από το Βρετανό Jonathan Edwards και στις γυναίκες 15,50 μέτρα από την Ουκρανή Inessa Kravets. Και τα δύο ρεκόρ πραγματοποιήθηκαν τον Αύγουστο του 1995 στο παγκόσμιο πρωτάθλημα του Gothenburg της Σουηδίας.



Εικόνα 1 : Boston 01.8020, Side A: jumper. Photograph courtesy of the Museum of Fine Arts, Boston

A.3.2 Τεχνική

Το άλμα εις τριπλούν είναι άθλημα που υπάγεται στον κλασσικό αθλητισμό, στίβο και συγκεκριμένα στην κατηγορία των οριζόντιων αλμάτων μαζί με το άλμα εις μήκος. Στη σύγχρονη μορφή του, αποτελείται αρχικά από ένα σπριντ (γρήγορη ρυθμική επιτάχυνση) μέχρι τη βαλβίδα (σημείο απογείωσης), το οποίο ακολουθούν τρεις διαδοχικές φάσεις:

Το κουτσό : Απογείωση από τη βαλβίδα με το ένα πόδι και προσγείωση με το ίδιο πόδι.



Το βήμα : Απογείωση με το ίδιο πόδι και προσγείωση με το άλλο πόδι.



Και το άλμα : Απογείωση με το ένα πόδι και προσγείωση στο σκάμμα της άμμου, συνήθως και με τα δύο πόδια.



Εικόνα 2 : Φάσεις άλματος τριπλούν

Το άλμα μετρείται από την βαλβίδα έως το πλησιέστερο προς αυτήν ίχνος που δημιουργείται από τον αθλητή στην άμμο του σκάμματος.

Το άλμα εις τριπλούν θεωρείται ένα από τα πλέον δύσκολα αγωνίσματα του στίβου ως προς την τεχνική κατάρτιση που απαιτείται να έχουν οι αθλητές σε υψηλό επίπεδο. Επίσης, έρευνες έχουν μετρήσει ότι οι δυνάμεις αντίδρασης του εδάφους (Ground Reaction Forces) που δέχεται ένας αθλητής υψηλού επιπέδου κατά τη διάρκεια της προσγείωσης στο κουτσό είναι έως 22,3 φορές το σωματικό του βάρος, καθιστώντας το ένα από τα πιο επίπονα αγωνίσματα για το σώμα. [Allen, 2009] Ως συνέπεια, επιδημιολογικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι τραυματισμοί που αφορούν στον αστράγαλο, στο γόνατο, στο ισχίο και στη μέση είναι συνήθεις για τους αθλητές του τριπλούν.

Οι αθλητές καλούνται να συνδυάσουν ταχύτητα, ρυθμό, αλτικότητα, εκρηκτικότητα και ισορροπία στο ίδιο άλμα αλλά σε διαφορετικές φάσεις. Ο απόλυτος έλεγχος και συντονισμός των μελών του σώματος και ο συγχρονισμός των κινήσεων είναι απαραίτητοι για τη σωστή εκτέλεση της τεχνικής και την αποφυγή τραυματισμών.

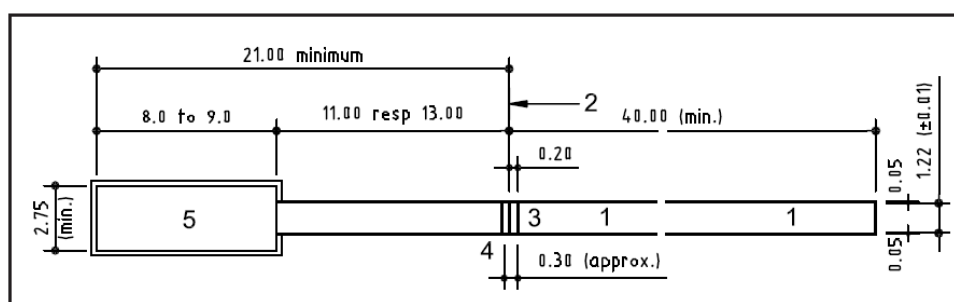
A.3.3. Προδιαγραφές εγκαταστάσεων

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 βαλβίδα ώθησης 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 σημειώνεται με λευκές γραμμές πλάτους 5 εκατοστών. 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 ώθησης υλοποιείται με μια ορθογώνια βαλβίδα διαστάσεων (μήκος, πλάτος, βάθος) = (1.22 m \pm 0.001 m, 0.20 m \pm 0.002 m, <0.10 m), τοποθετημένη μέσα στο έδαφος έτσι ώστε η επιφάνεια ώθησης να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το διάδρομο και την επιφάνεια της προσγείωσης. Το ύστατο όριο έγκυρου άλματος και η αφετηρία μέτρησής του ορίζεται ως η ακμή της βαλβίδας που βρίσκεται πιο κοντά στο σκάμμα. Ακριβώς μετά από αυτή την ακμή πρέπει να τοποθετείται μία επιφάνεια από εύπλαστο υλικό (πλαστελίνη) ίδιου μήκους και πλάτους 0.10 m \pm 0.002 m ώστε να βοηθάει τους κριτές στην απόφαση της εγκυρότητας ή μη του άλματος. Η βαλβίδα πρέπει να έχει λευκό χρώμα ενώ η επιφάνεια της πλαστελίνης πρέπει να έχει χρώμα που την καθιστά διακριτή. Για το αγώνισμα του άλματος τριπλούν, η απόσταση από την αφετηρία εκτίναξης μέχρι το τέλος του σκάμματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 21 m, ενώ πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση μεταξύ 13 m από την αφετηρία του σκάμματος για τους άνδρες και 11 m για τις γυναίκες σε επίσημους αγώνες.

Το μήκος που πρέπει να έχει το σκάμμα, όπου γίνεται η προσγείωση του άλτη, είναι 8 ή 9 m ενώ το ελάχιστο πλάτος πρέπει να είναι από 2.75 m έως 3 m. Είναι επιθυμητό να τοποθετείται σε τέτοια θέση, ώστε η μέση του διαδρόμου, προεκτεινόμενη να συμπίπτει με την μέση του σκάμματος. Η περιοχή προσγείωσης πρέπει να γεμίζεται με μαλακή νωπή άμμο και η επιφάνεια της πρέπει να είναι στο ίδιο επίπεδο με την βαλβίδα εκτίναξης. [IAAF



Εικόνα 3: Διαστάσεις σκάμματος και διαδρόμου σύμφωνα με την IAAF

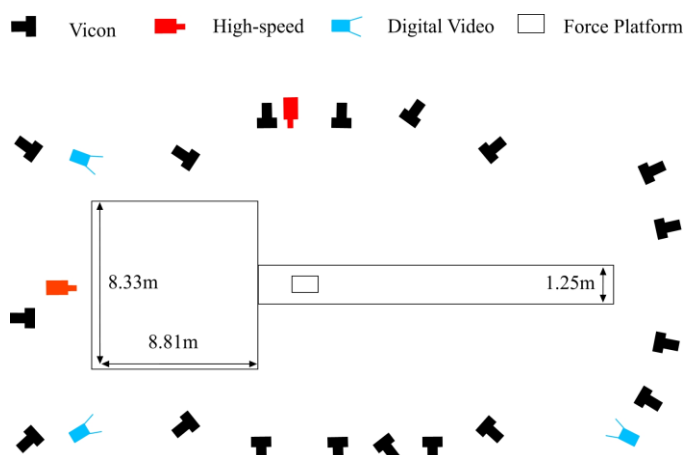
A.3.4. Βιβλιογραφικές αναφορές

Δεν υπάρχουν πολλές αναφορές σχετικές με ολοκληρωμένη καταγραφή ή βιομηχανική ανάλυση στο άλμα τριπλούν. Πολλές μελέτες στα οριζόντια άλματα επιλέγουν την πιο απλή τεχνικά κίνηση του άλματος εις μήκος για ανάλυση, ένα αγώνισμα σίγουρα πιο δημοφιλές. Παρακάτω αναλύονται οι εφαρμογές που βρέθηκαν:

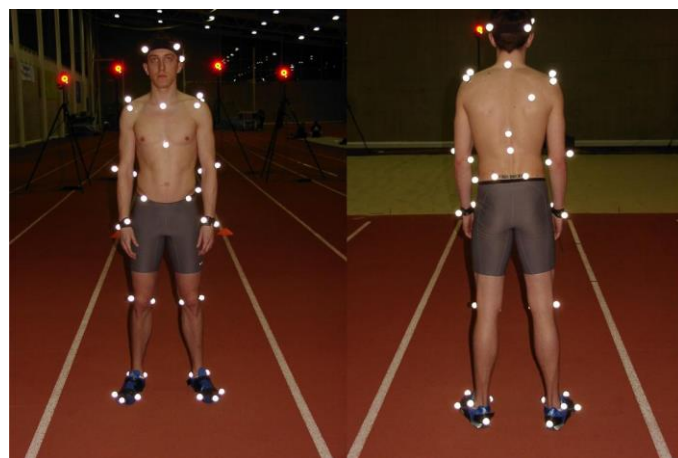
A) Η πιο ολοκληρωμένη έρευνα είναι η διδακτορική διατριβή του Samuel James Allen στο πανεπιστήμιο του Loughborough σχετικά με τη βελτιστοποίηση της επίδοσης στο άλμα τριπλούν, χρησιμοποιώντας προσομοίωση μέσω υπολογιστή. Για την καταγραφή των αλμάτων, ο ερευνητής έχει εγκαταστήσει ένα πολύπλοκο σύστημα μεγάλου κόστους που κατά κύριο λόγο αποτελείται από κάμερες τεχνολογίας Vicon, συγκεκριμένα 18 στον αριθμό. Είναι ένα οπτικοηλεκτρονικό παθητικό σύστημα, πράγμα που σημαίνει ότι ο αθλητής έχει πάνω στο σώμα του ανακλαστικούς στόχους (εικόνα 5). Συμπληρωματικά, έχει καταγράψει την κίνηση με 3 κάμερες υψηλής ταχύτητας στα 240 και 480 fps. Η περιοχή καταγραφής έχει διαστάσεις 18μ. x 2μ. x 2.5 μ. και η διάταξη της φαίνεται στην εικόνα 4.

Με τη συλλογή κινηματικών και κινητικών δεδομένων, σκοπός του μελετητή ήταν να δημιουργήσει ένα μοντέλο προσομοίωσης το οποίο στη συνέχεια θα συνέκρινε με τα άλματα των αθλητών προκειμένου να αποφανθεί σε ποια στοιχεία του άλματος χρειάζονται βελτίωση.

Ως προς την ακρίβεια των κινηματικών δεδομένων, η συγκεκριμένη τεχνολογία Vicon παρέχει ακρίβεια 2 mm (RMS) σε κινούμενους, πλήρως ορατούς από το σύστημα στόχους.



Εικόνα 4: Διάταξη καμερών κατά την καταγραφή της κίνησης

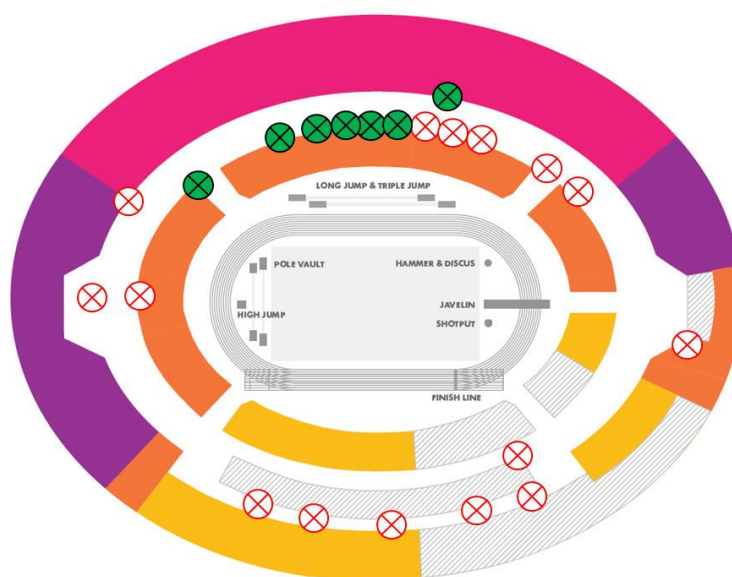


Εικόνα 5: Ανακλαστικοί στόχοι τεχνολογίας Vicon

B) Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι αναφορές βιομηχανικής ανάλυσης από τα παγκόσμια πρωταθλήματα στίβου του 2009 στο Βερολίνο και του 2017 στο Λονδίνο αντίστοιχα.

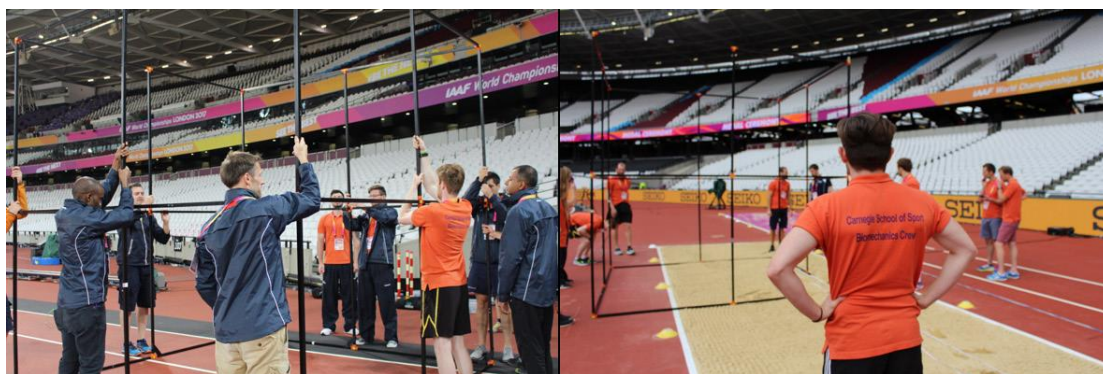
Η πρώτη, η οποία συντάχθηκε υπό την αιγίδα της γερμανικής ομοσπονδίας στίβου σε συνεργασία με γερμανικά πανεπιστήμια παρουσιάζει μόνο τα αποτελέσματα της βιομηχανικής ανάλυσης με τα αντίστοιχα διαγράμματα, χωρίς να αναλύει το τρόπο με τον οποίο συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Δίνει όμως πολύτιμες πληροφορίες ως προς το ποια είναι τα βασικά στοιχεία εμβιομηχανικής και ποια είναι η τάξη μεγέθους τους για επαγγελματίες αθλητές υψηλού επιπέδου.

Η δεύτερη αναφορά συντάχθηκε απευθείας από την παγκόσμια ομοσπονδία στίβου (IAAF) σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Leeds. Η συλλογή κινηματικών δεδομένων έγινε με βιντεοσκόπηση από σταθερές κάμερες τοποθετημένες στο διάδρομο των ανάμεσα στις κερκίδες, συνευθειακά με το διάδρομο του σκάμματος. Πιο συγκεκριμένα, 9 κάμερες τοποθετήθηκαν σε 7 θέσεις κλειδιά όπως δείχνει και η εικόνα 6.



Εικόνα 6: Θέσεις καμερών εντός του σταδίου για τον τελικό του άλματος τριπλούν ανδρών (με πράσινο)

Ένα σημαντικό στοιχείο είναι ότι πριν και μετά τη διεξαγωγή κάθε αγωνίσματος πραγματοποιήθηκε μία διαδικασία διαβάθμισης. Ένα πλαίσιο διαβάθμισης σε μορφή κύβου ($8\mu^3$) τοποθετήθηκε σε διακριτά προδιαγεγραμμένα σημεία κατά μήκος του διαδρόμου και του σκάμματος με σκοπό να καθορίσει με ακρίβεια το χώρο μέσα στον οποίο οι αθλητές εκτελούν τους δύο τελευταίους διασκελισμούς, το κουτσό, το βήμα και το άλμα. Ουσιαστικά η διαδικασία αυτή εισάγει την κλίμακα στο μοντέλο.



Εικόνα 7: Το πλαίσιο διαβάθμισης που κατασκευάστηκε και βιντεοσκοπήθηκε πριν και μετά τη διεξαγωγή κάθε αγωνίσματος

Από τις κάμερες, οι τρεις ήταν Sony PXW-FS5 ρυθμισμένες στα 200 fps (ταχύτητα κλείστρου 1/1750, ISO 2500, FHD 1920x1080) και κάλυψαν το κομμάτι του διαδρόμου μέχρι και τη βαλβίδα απογείωσης. Οι υπόλοιπες έξι ήταν Canon EOS 700D ρυθμισμένες στα 60 Hz (ταχύτητα κλείστρου 1/1000, ISO 1600, SHD 1280x720) και κάλυψαν το βήμα, το κουτσό, το άλμα και την προσγείωση. Οι τελευταίες λειτούργησαν σε ζεύγη για την καταγραφή αυτών των περιοχών κίνησης.

Η επεξεργασία των αρχείων για την εξαγωγή των κινηματικών δεδομένων έγινε με χειροκίνητη ψηφιοποίηση κάθε ενός frame από έμπειρο χειριστή μέσω του λογισμικού SIMI Motion (Version 9.2.2). Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος συγχρονισμού τεσσάρων κρίσιμων στιγμών για την ένωση των επίπεδων συντεταγμένων από κάθε κάμερα που συμμετείχε στην καταγραφή. Στη συνέχεια, μέσω του αλγορίθμου άμεσου γραμμικού μετασχηματισμού (DLT) υπολογίστηκαν οι 3D συντεταγμένες από τα x και y κάθε κάμερας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πολύ μικρά τυχαία και συστηματικά σφάλματα κατά την ψηφιοποίηση, επομένως επιβεβαιώθηκε η υψηλή αξιοπιστία της διαδικασίας.

Αμφότερες οι αναφορές είναι ενταγμένες στη βιβλιογραφία της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ενδεικτικά, οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν αφορούσαν στις συνολικές και επιμέρους αποστάσεις, σε γωνίες μεταξύ μελών του σώματος, στις γωνίες απογείωσης, στους χρόνους επαφής και αιώρησης καθώς και στις συνιστώσες της ταχύτητας μέσω του προσδιορισμού του κέντρου μάζας σώματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β : ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

B.1. ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας σχετικά με τη μέθοδο καταγραφής των αλμάτων και λόγω της διεπιστημονικότητας του θέματος της παρούσας διπλωματικής, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί η επιστημονική προσέγγιση από την πλευρά των ειδικών της Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού, στην οποία υπάγεται η εμβιομηχανική. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με το τμήμα Κλασσικού αθλητισμού της Σχολής Επιστήμης Φυσικής Αγωγής και Αθλητισμού του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, και συγκεκριμένα με τον επίκουρο καθηγητή αθλητικών αλμάτων κ. Απόστολο Θεοδώρου. Ακολουθούν οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν σχετικά με την χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία για την καταγραφή των αλμάτων.

Για ερευνητικούς σκοπούς (κινηματική ανάλυση), οι αρμόδιοι επιστήμονες επιλέγουν κατά κύριο λόγο τα συστήματα επεξεργασίας εικόνας για την καταγραφή των οριζόντιων αλμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Η επιλογή αυτή έχει να κάνει με τα εξής:

- ❖ **Με το κόστος:** Η καταγραφή πραγματοποιείται με μοναδικό εξοπλισμό ένα συγκεκριμένο αριθμό καμερών βιντεοσκόπησης σε υψηλή συχνότητα. Το συνολικό τους κόστος είναι σημαντικά μικρότερο από το αντίστοιχο άλλων συστημάτων ακριβείας, π.χ. των οπτικών συστημάτων Vicon, Optitrak.

- ❖ **Με την συνολική ανεξαρτησία του συστήματος από τον αθλητή:** Τα εν λόγω συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής επιδόσεων υψηλού επιπέδου σε εξωτερικό, μη ελεγχόμενο χώρο, από απόσταση και χωρίς την παρέμβαση, π.χ. με στόχους, στο σώμα του αθλητή. Αντιθέτως, γίνεται εκ των υστέρων στην επεξεργασία με χειροκίνητη ψηφιακή σκόπευση. Πολλοί επιστήμονες του κλάδου καλούνται να συλλέξουν κινηματικά δεδομένα σε σημαντικούς διεθνείς αγώνες (όπως στα παγκόσμια πρωταθλήματα στίβου του 2009 και 2017 που προαναφέρθηκαν) για την ανάλυση της τεχνικά άρτιας κίνησης των αθλητών. Συνεπώς, η ανεξαρτησία του συστήματος καταγραφής είναι βασικό ζητούμενο.

Η καταγραφή των οριζοντίων αλμάτων έχει το πλεονέκτημα της γραμμικότητας της κίνησης: το σώμα του αθλητή κινείται προς μία κατεύθυνση και δε στρέφεται (όπως π.χ. στη φόρα του άλματος εις ύψος), με αποτέλεσμα να καθίσταται αρκετή και αξιόπιστη η δισδιάστατη καταγραφή στο μετωπιαίο επίπεδο, δηλαδή με την κάμερα κάθετη στο επίπεδο της κίνησης. Επειδή όμως θεωρείται αρκετά μακριά σε μήκος κίνηση, συνήθως επιλέγεται η καταγραφή της με παραπάνω από μία σταθερές κάμερες.

B.1.1. Τοποθέτηση και ρύθμιση καμερών

Η βιντεοσκόπηση γίνεται από μία ή περισσότερες κάμερες υψηλής συχνότητας, κάθε μία από τις οποίες καλύπτει και καταγράφει συγκεκριμένο τμήμα της κίνησης. Οι κάμερες τοποθετούνται με τον κατάλληλο βοηθητικό εξοπλισμό (π.χ. τρίποδα) όσο πιο μακριά γίνεται σε κάθετη απόσταση από το τμήμα του άξονα κίνησης που θα βιντεοσκοπήσουν, με την προϋπόθεση ότι μέσω μεγέθυνσης δύνανται να φέρουν την εικόνα του αθλητή στο επιθυμητό μέγεθος, με ικανοποιητική ανάλυση. Για να γίνει αυτό, πολλές φορές χρησιμοποιείται τηλεφακός για καταγραφή σε μεγαλύτερη κλίμακα. Η τοποθέτηση σε απόσταση από τον άξονα κίνησης επιλέγεται για να ελαχιστοποιηθεί η παράλλαξη λόγω κεντρικής προβολής.

Η εστίαση πρέπει να είναι στο άπειρο λόγω της μεγάλης απόστασης (>10μ.) του αθλητή από την κάμερα καταγραφής. Το οπτικό πεδίο ρυθμίζεται μέσω της εστιακής απόστασης ώστε να συμπίπτει με τα όρια της περιοχής καταγραφής. Με αυτό τον τρόπο μεγιστοποιείται το μέγεθος του αθλητή στην προβεβλημένη εικόνα, αυξάνοντας παράλληλα την ακρίβεια σκόπευσης κατά τη διαδικασία της ψηφιοποίησης. Είναι σημαντικό να διατηρηθεί σταθερή η εστιακή απόσταση απενεργοποιώντας τη λειτουργία αυτόματης εστίασης, αν παρέχεται από την κάμερα αυτή η επιλογή. [Bartlett, 2007]

B.1.2. Απόδοση κλίμακας

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο A.3.4. με την καταγραφή της κίνησης στο παγκόσμιο πρωτάθλημα στίβου του Λονδίνου το 2017, η καθιερωμένη μεθοδολογία περιλαμβάνει τη διαδικασία της απόδοσης κλίμακας μέσω κατασκευών καθορισμένων διαστάσεων που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως δένδρα διαβάθμισης. [Κόλλιας, 1997] Στις εφαρμογές όπου η καταγραφή γίνεται μόνο με μία κάμερα η ανάλυση είναι δισδιάστατη και χρησιμοποιούνται διαβαθμισμένοι στύλοι, ενώ στις εφαρμογές όπου υπάρχουν περισσότερες από μία κάμερες με επικαλυπτόμενο τμήμα η ανάλυση είναι τρισδιάστατη και χρησιμοποιείται κύβος συγκεκριμένων διαστάσεων. Η απόδοση κλίμακας πραγματοποιείται με τη λήψη φωτογραφιών πριν ή μετά την καταγραφή του άλματος, χωρίς να αλλάξει η σταθερή θέση της κάμερας.

B.1.3. Επεξεργασία

Το επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία των δεδομένων σε ειδικά λογισμικά 2D και 3D ανάλυσης κίνησης μέσω βίντεο, με σκοπό την εξαγωγή αυτόματων αποτελεσμάτων βιομηχανικής ανάλυσης. Στην περίπτωση της 3D ανάλυσης χρησιμοποιούνται προφανώς περισσότερες από μία κάμερες. Παραδείγματα τέτοιων λογισμικών είναι το APAS (Ariel Performance Analysis System) της εταιρείας Ariel Dynamics καθώς και το SIMI Motion.

- ❖ Στη δισδιάστατη ανάλυση πραγματοποιείται χειροκίνητη σκόπευση-ψηφιοποίηση των αρθρώσεων σε κάθε καρτέ. Από τις καταγεγραμμένες συντεταγμένες τους υπολογίζονται αυτόματα όλα τα χρήσιμα στοιχεία ανάλυσης όπως το κέντρο μάζας, (με τη μέθοδο των μελών του σώματος), αποστάσεις, γωνίες, ταχύτητες κ.ά.

Για τη διαγραμματική παρουσίαση της δυναμικής εξέλιξης των στοιχείων εφαρμόζονται πολλές φορές φίλτρα εξομάλυνσης, τα οποία βοηθούν στη μείωση του θορύβου και στην ελαχιστοποίηση της επίδρασης των λανθασμένων σκοπεύσεων. Ειδικά στην 2D ανάλυση που η μία πλευρά του αθλητή δεν είναι ορατή, η σκόπευση των σημείων γίνεται προσεγγιστικά. Τα «τυφλά» αυτά σημεία προκαλούν απότομες ανωμαλίες στα διαγράμματα θέσεων, ταχυτήτων και γωνιών, οι οποίες διορθώνονται με την εξομάλυνση.

- ❖ Στην τρισδιάστατη ανάλυση, αφού πραγματοποιηθεί ο συγχρονισμός των βίντεο, πρώτα διαχωρίζεται η σιλουέτα του αθλητή από το φόντο της κίνησης σε όλα τα καρτέ. Στη συνέχεια, οι σιλουέτες προσαρμόζονται σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης του ανθρώπινου σώματος φτιαγμένο με τις ανθρωπομετρικές μετρήσεις του αθλητή. Η βέλτιστη προσαρμογή των σιλουετών με το τρισδιάστατο μοντέλο επιτρέπει την εξαγωγή της τρισδιάστατης θέσης και των γωνιών των αρθρώσεων. [[ιστοσελίδα Simi Motion](#)]

B.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας μεθόδου καταγραφής της κίνησης του άλματος με σκοπό την κινηματική ανάλυση του αθλητή και τη διαμόρφωση προτάσεων για τη βελτίωση της τεχνικής του, αξιοποιώντας κατά τη διαδικασία τα σύγχρονα εργαλεία ανάλυσης και που προσφέρει η επιστήμη της φωτογραμμετρίας.

Η προτεινόμενη μέθοδος υλοποιεί ένα σύστημα επεξεργασίας εικόνας (IMS) το οποίο εκτελεί εντοπισμό βάσει χαρακτηριστικών σημείων (feature based tracking) (βλ. κεφ. Α.1.2.). Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα τεθούν οι αρχές πάνω στις οποίες βασίστηκαν οι επιλογές που έγιναν στο σχεδιασμό της μεθόδου. Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα εξής επιμέρους στάδια:

- ❖ η συλλογή δεδομένων, δηλαδή η καταγραφή της κίνησης με τεχνικά μέσα
- ❖ η φωτογραμμετρική επεξεργασία και
- ❖ η μέτρηση και ο υπολογισμός των απαραίτητων στοιχείων σε λογισμικό σχεδίασης και η παρουσίασή τους.

B.2.1. Αρχές σχεδιασμού και διαστάσεις

Η μέθοδος σχεδιάστηκε με βάση συγκεκριμένες αρχές που προέκυψαν από την διερεύνηση των υπάρχοντων συστημάτων, τις κατευθύνσεις που δίνει η σύγχρονη βιβλιογραφία αλλά και την προσωπική εμπειρία του συγγραφέα.

Αυτές ήταν οι εξής :

- A. Η μείωση του κόστους ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί από τους ενδιαφερόμενους με ίδια μέσα, κυρίως ως προς τη συλλογή των δεδομένων
- B. Η ανεξαρτησία του μοντέλου καταγραφής από τον αθλητή ώστε να είναι φυσική η καταγεγραμμένη κίνηση
- Γ. Η ανεξαρτησία του μοντέλου καταγραφής από τον περιβάλλοντα χώρο ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικές συνθήκες
- Δ. Ο περιορισμός του απαραίτητου χρόνου για τη λήψη των δεδομένων και η δυνατότητα αυτοματοποίησης τμημάτων της μεθόδου για τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας

Στην αρχική φάση του σχεδιασμού έγινε η προσπάθεια για καταγραφή και ανάλυση σε τρεις διαστάσεις διότι αυτή προφανώς προσφέρει μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κίνησης και ενδεχομένως πιο αξιόπιστες μετρήσεις. Αυτή όμως δεν κατέστη δυνατή, κυρίως λόγω έλλειψης του απαραίτητου εξοπλισμού, δεδομένου ότι έπρεπε να χρησιμοποιηθούν περισσότερες από τρεις κάμερες υψηλής συχνότητας βιντεοσκόπησης και τεχνολογία συγχρονισμού. Επιπροσθέτως, θα ήταν δυσκολότερη

η εφαρμογή της μεθόδου από μη εξειδικευμένους χρήστες κατά τη λήψη των δεδομένων αλλά και κατά την επεξεργασία τους.

Όπως προέκυψε από την έρευνα, τα απαραίτητα στοιχεία κινηματικής ανάλυσης είναι μετρήσιμα και σε δύο διαστάσεις και συγκεκριμένα στο προσθοπίσθιο επίπεδο του σώματος του αθλητή, κατά μήκος του οποίου εξελίσσεται και η κίνηση. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να γίνει καταγραφή του άλματος σε αυτό το επίπεδο, με μία μόνο κάμερα.

B.2.2. Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων με τη μορφή της βιντεοσκόπησης πραγματοποιείται με μία κάμερα, πακτωμένη σε ποδήλατο, που κινείται σε ευθεία παράλληλη με τον αθλητή. Η κινούμενη κάμερα που καταγράφει όλο το μήκος της κίνησης σε μία λήψη αποτελεί μία από τις καινοτομίες της μεθόδου, μιας και η καθιερωμένη μέθοδος για τα ίδια δεδομένα, στον ίδιο χρόνο, χρειάζεται πολλές στατικές κάμερες.

Το στάδιο της συλλογής δεδομένων όμως αποτελείται τόσο από τη βιντεοσκόπηση, όσο και από την προετοιμασία της, η οποία εκτελείται στις τρεις φάσεις που ακολουθούν:

- **Η προετοιμασία του συστήματος βιντεοσκόπησης** περιλαμβάνει τον καθορισμό των κατάλληλων παραμέτρων, την τοποθέτηση της κάμερας στο ποδήλατο και τη μέτρηση της κατάλληλης απόστασης λήψης. Τα στοιχεία αυτά προσδιορίστηκαν στη δοκιμή που πραγματοποιήθηκε (βλ. κεφ. Γ.1.1.).
- **Η προετοιμασία του αθλητή** είναι προαιρετική, αφού η μέθοδος αναπτύσσεται με άξονα την απουσία παρέμβασης στον αθλητή. Όμως, για τη βελτιστοποίηση των σκοπεύσεων των αρθρώσεων του σώματος σε επόμενο στάδιο είναι δυνατή η τοποθέτηση αβαρούς χάρτινου στόχου 1-2 εκατοστών σε δύσκολα αναγνωριζόμενα σημεία, όπως το ισχίο. Μερικοί τέτοιοι στόχοι, τοποθετούμενοι στο ρουχισμό του αθλητή, δεν εμποδίζουν την κίνηση ούτε επηρεάζουν τη φυσικότητά της. Επίσης, η σκόπευση των αρθρώσεων είναι ακριβέστερη στο γυμνό δέρμα, συνεπώς, προτείνεται η εκτέλεση άλματος χωρίς αθλητική ένδυση στον κορμό τους ώμους και τα χέρια. Στο κάτω μέρος του αθλητή είναι προτιμότερο να υπάρχει ρουχισμός με ελαστικό ύφασμα που εφαρμόζει στα πόδια και το σώμα ώστε να είναι ορατό το σχήμα τους.
- **Η προετοιμασία του χώρου** είναι αρκετά σημαντική προεργασία. Αφορά αρχικά στον καθορισμό αυθαίρετου τρισσορθογώνιου συστήματος συντεταγμένων XYZ, με την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση του περιβάλλοντος χώρου: το άλμα τριπλούν διεξάγεται στην πλειονότητα των περιπτώσεων σε χώρο προκαθορισμένων διαστάσεων (βλ. Α.3.3.). Στη συνέχεια, τοποθετούνται τουλάχιστον τρεις στόχοι σε κατάλληλα σημεία, ώστε να υλοποιείται μέσω αυτών επίπεδο παράλληλο της κίνησης. Σύμφωνα με το καθορισμένο σύστημα

συντεταγμένων, μετρούνται οι ορθογώνιες συντεταγμένες των σημείων. Η χρήση ολοκληρωμένου γεωδαιτικού σταθμού (total station) θα οδηγούσε σε καλύτερη ακρίβεια της διαδικασίας. Επειδή όμως είναι ειδικευμένος και ακριβός εξοπλισμός, η μέτρηση των ορθογώνιων συντεταγμένων προτείνεται να γίνεται με μετροταινία. Τέλος, συνίσταται η τοποθέτηση αντικειμένων του περιβάλλοντος χώρου (π.χ. εμπόδια) στο φόντο της κίνησης, ειδικά αν υπάρχει μεγάλο βάθος πεδίου. Αυτό θα βοηθήσει τον αυτοματοποιημένο αλγόριθμο εύρεσης ομόλογων σημείων του φωτογραμμετρικού λογισμικού.

B.2.3. Φωτογραμμετρική επεξεργασία

Προϋπόθεση για την επιτυχή εκτέλεση του αυτοματοποιημένου αλγορίθμου των φωτογραμμετρικών λογισμικών είναι είτε η καταγραφή του αντικειμένου, από διαφορετικά σημεία στο χώρο. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν μπορεί να αξιοποιηθούν τα βίντεο από σταθερές αλλά περιστρεφόμενες κάμερες που ακολουθούν την πορεία του αθλητή (panning camera). Η επιλογή της κινούμενης, παράλληλα με τον αθλητή, κάμερας στην προτεινόμενη μέθοδο εξασφαλίζει ακριβώς αυτή την προϋπόθεση: κάθε καρέ του βίντεο αντιστοιχεί σε διακριτό σημείο λήψης στο χώρο. Η κίνηση της κάμερας αποτελεί ένα βασικό στοιχείο διαφοροποίησης από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιεί μόνο σταθερές κάμερες. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι σε μία μόνο παράλληλη λήψη δύναται να καταγραφθεί ολόκληρο το άλμα, ενώ στην χρησιμοποιούμενη μέθοδο χρειάζονται σίγουρα περισσότερες από μία συγχρονισμένες σταθερές κάμερες για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται με τη φωτογραμμετρική επεξεργασία αφορά στην αποκατάσταση του εσωτερικού προσανατολισμού, στον προσδιορισμό του εξωτερικού προσανατολισμού των καρέ του βίντεο που καταγράφεται από την κάμερα, στον ορισμό του κατακόρυφου επιπέδου στο οποίο θα προβληθεί ορθά ο αθλητής και στη δημιουργία ορθοφωτογραφιών στο κατακόρυφο επίπεδο, πάνω στις οποίες μπορούν να γίνουν μετρήσεις των αρθρώσεων του σώματος με συγκεκριμένη ακρίβεια.

Εσωτερικός προσανατολισμός

Αρχικά, στο περιβάλλον του φωτογραμμετρικού λογισμικού πραγματοποιείται η διαδικασία προσδιορισμού των στοιχείων του εσωτερικού προσανατολισμού και η αποκατάσταση του για την κάμερα και το φακό που χρησιμοποιούνται.

Τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για τη σωστή αποκατάσταση του είναι η σταθερά c της μηχανής (απόσταση του προβολικού κέντρου από το εστιακό επίπεδο), οι συντεταγμένες (x_0, y_0) του πρωτεύοντος σημείου (θέση της προβολής του προβολικού κέντρου στο σύστημα των εικονοσυντεταγμένων), και οι συντελεστές του πολυωνύμου της ακτινικής διαστροφής του φακού. Με βάση τα στοιχεία αυτά, οι εικονοσυντεταγμένες των σημείων που μετρούνται ανάγονται στις σωστές γεωμετρικά θέσεις σύμφωνα με το μοντέλο κεντρικής προβολής που περιγράφει καλύτερα την δέσμη, όπως αυτή ήταν την στιγμή της λήψης.

Πρακτικά, τα φωτογραμμετρικά λογισμικά μπορούν να εκτιμήσουν τα στοιχεία του εσωτερικού προσανατολισμού με τη βοήθεια της συνθήκης συγγραμμικότητας (διαδικασία αυτοβαθμονόμησης). Σε αυτή την περίπτωση, είτε ανιχνεύονται τα βασικά στοιχεία αυτόματα μέσω των μεταδεδομένων των καρέ (π.χ. εστιακή

απόσταση), είτε δίνονται προκαθορισμένες αρχικές τιμές σε κάποια στοιχεία τα οποία διορθώνονται στη συνέχεια.

Αυτή η δυνατότητα των λογισμικών επιτρέπει την αξιοποίηση μη επαγγελματικών, εμπορικών καμερών, που παρέχουν υψηλή συχνότητα βιντεοσκόπησης. Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να υπάρχει έλεγχος των αποτελεσμάτων, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται κάμερες των οποίων η εσωτερική γεωμετρία είναι γνωστή ή κάμερες με πιστοποιητικό βαθμονόμησης.

Εξωτερικός προσανατολισμός

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. Η διαδικασία με την οποία προσδιορίζονται τα στοιχεία του εξωτερικού προσανατολισμού μιας λήψης γίνεται με την βοήθεια των εξισώσεων της Συνθήκης Συγγραμμικότητας. [Πατιάς, 1991-Πέτσα, 2000]

Στόχος αυτού του βήματος της μεθόδου και παράλληλα προϋπόθεση για το επόμενο βήμα αποτελεί ο προσδιορισμός των παραμέτρων του εξωτερικού προσανατολισμού, δηλαδή τα X , Y , Z , ω , ϕ , κ για τα σημεία λήψης του κάθε καρέ. Είναι σημαντικό να αποσαφηνιστεί ότι σε αυτό το στάδιο της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας, προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος, το αντικείμενο σε κάθε καρέ που συμμετέχει στον αλγόριθμο είναι μόνο το περιβάλλον του αθλητή και όχι ο ίδιος και η σκιά του. Πιο αναλυτικά:

- ❖ Το περιβάλλον του αθλητή θεωρείται ακίνητο, άρα ο αυτοματοποιημένος αλγόριθμος μπορεί να εντοπίσει ορθά τα ομόλογα σημεία του μεταξύ των καρέ, κάθε ένα από τα οποία έχει ληφθεί από διαφορετικό σημείο.
- ❖ Αντίθετα, ο αθλητής αποτελεί κινούμενο αντικείμενο. Δεν μπορεί να απεικονιστεί την ίδια χρονική στιγμή από διαφορετικά σημεία του χώρου με μία μόνο κάμερα. Για την καταγραφή του κινούμενου αθλητή χρειάζονται περισσότερες από μία (έστω n) συγχρονισμένες κάμερες με επικάλυψη, ώστε στην επεξεργασία να υπάρχει ένας n αριθμός ταυτόχρονων καρέ που θα απεικονίζουν τον αθλητή από διαφορετική οπτική γωνία. Στη συνέχεια, ο αυτοματοποιημένος αλγόριθμος επεξεργάζεται αυτά τα καρέ για την εύρεση ομόλογων σημείων.

Λόγω των παραπάνω, στην περίπτωση της προτεινόμενης μεθόδου, στην οποία γίνεται καταγραφή μόνο με μία κάμερα, ο αθλητής και η σκιά του συνιστούν θόρυβο και πηγή σφαλμάτων για τον αλγόριθμο. Για αυτό το λόγο, πριν την εκτέλεση της

Συνθήκης Συγγραμμικότητας τοποθετείται χειροκίνητα μάσκα στο τμήμα του κάθε καρέ που περιέχει τον αθλητή, καθώς και τη σκιά του, ένα εργαλείο που τα εξαιρεί από τη διαδικασία.

Επίσης, ο καθορισμός του συστήματος συντεταγμένων και η απόδοση της κλίμακας στο μοντέλο δίνεται από τα σημεία γνωστών συντεταγμένων που μετρήθηκαν στο στάδιο της συλλογής δεδομένων, παρακάμπτοντας τη χρονοβόρα διαδικασία της απόδοσης κλίμακας μέσω κατασκευών καθορισμένων διαστάσεων, όπως γίνεται στην χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Η απόδοση κλίμακας εντός του σταδίου της επεξεργασίας με φωτογραμμετρικό λογισμικό αποτελεί άλλη μία σημαντική διαφοροποίηση από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

Δημιουργία ορθοφωτογραφιών

Η ορθοφωτογραφία είναι μία ψηφιακή εικόνα που διαθέτει όλα τα χαρακτηριστικά ενός χάρτη, δηλαδή είναι ορθή προβολή και έχει ενιαία κλίμακα. Ακόμα, διατηρεί όλη τη φωτογραφική (εικονιστική) πληροφορία της αρχικής εικόνας από την οποία προέκυψε. Σε αυτή έχει γίνει γεωμετρική διόρθωση για να εξαλειφθούν οι προοπτικές παραμορφώσεις της αρχικής εικόνας ή του αρχικού καρέ, που χρησιμοποιεί την κεντρική προβολή. Έχει μετρητική αξία αφού τα εικονιζόμενα αντικείμενα με την ορθή προβολή εμφανίζονται στις σωστές οριζοντιογραφικές τους θέσεις. Για τη δημιουργία της είναι απαραίτητη η αναπαράσταση του αντικειμένου από ένα ψηφιακό μοντέλο.

Η ορθή προβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί έχοντας ως ψηφιακό μοντέλο ένα επίπεδο, πάνω στο οποίο προβάλλεται ορθά το αντικείμενο. Στην προτεινόμενη μέθοδο επιλέγεται ως ψηφιακό μοντέλο το προσθοπίσθιο επίπεδο του αθλητή που ορίζεται ως το μέσο επίπεδο του διαδρόμου (που έχει καθορισμένο πλάτος), σύμφωνα πάντα με το καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Στο λογισμικό επεξεργασίας αντιστρέφονται οι μάσκες σε όλα τα καρέ και με δεδομένα τις θέσεις και της στροφές των σημείων λήψης από το προηγούμενο βήμα, δημιουργούνται οι ορθοφωτογραφίες του τμήματος που απεικονίζει τον αθλητή για κάθε καρέ.

Επειδή το ψηφιακό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι επίπεδο, δεν περιγράφει σωστά την επιφάνεια του αθλητή. Υπάρχει ένα σφάλμα περιγραφής της τάξης των 30 εκατοστών, όσο το μισό πλάτος του αθλητή. Συνεπώς, τα σημεία του σώματος που εμπίπτουν σε αυτό το εύρος απόστασης από το μέσο επίπεδο κίνησης, παρουσιάζουν οριζοντιογραφικό σφάλμα.

Σημειώνεται ότι ενώ κατά τη φωτογραμμετρική διαδικασία δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο του φόντου του αθλητή, τα φωτογραμμετρικά παράγωγα της μεθόδου, δηλαδή οι ορθοφωτογραφίες των στιγμιότυπων του αθλητή, είναι δισδιάστατα.

B.2.4. Μέτρηση και υπολογισμός στοιχείων κινηματικής ανάλυσης

Οι ορθοφωτογραφίες, επειδή είναι προσανατολισμένες, εισάγονται σε λογισμικό σχεδίασης στις κατάλληλες θέσεις. Το λογισμικό επιτρέπει την απευθείας μέτρηση πολλών στοιχείων κινηματικής ανάλυσης όπως αποστάσεις και γωνίες επάνω στο επίπεδο προβολής. Για την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου, επιλέχθηκε ως πρότυπο κινηματικής ανάλυσης η επίσημη αναφορά βιομηχανικής ανάλυσης της παγκόσμιας ομοσπονδίας στίβου (IAAF) για το άθλημα του άλματος τριπλούν στο παγκόσμιο πρωτάθλημα του Λονδίνου.

Υπάρχουν όμως άλλα στοιχεία κινηματικής ανάλυσης, των οποίων ο υπολογισμός απαιτεί μία πιο περίπλοκη διαδικασία. Το βασικότερο όλων είναι το κέντρο μάζας σώματος, διότι όλα τα διαγράμματα ταχυτήτων και επιταχύνσεων αναφέρονται στη μεταβολή αυτού.

Η διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων του κέντρου μάζας σώματος από βιντεοσκόπηση είναι τυποποιημένη και έγκειται στη μέθοδο των μελών του σώματος. Με αυτή τη μέθοδο το κέντρο μάζας σώματος προσδιορίζεται από το ποσοστό μάζας και τη θέση του κέντρου μάζας (ΚΜ) των μελών από τα οποία απαρτίζεται το σώμα.

Τα απαραίτητα στοιχεία για την εφαρμογή της είναι τα εξής:

Θεωρώντας το στέρνο ως κέντρο του σώματος, ένα μέλος προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες P_x , P_y του κοντινού προς το στερεό σημείου (proximal) και τις συντεταγμένες D_x , D_y του μακρινού σημείου (distal). [Κόλλιας, 1997]

Πέρα από αυτά τα στοιχεία, τα οποία προκύπτουν από τις σκοπεύσεις, για την εφαρμογή της μεθόδου αξιοποιούνται άλλα δύο στοιχεία που δίνονται από πίνακες:

- ❖ m_i , η αναλογία (%) της μάζας κάθε μέλους του σώματος ως προς τη συνολική μάζα του σώματος και
- ❖ Q_i , η θέση του κέντρου μάζας κάθε μέλους από το κεντρικό σημείο εκφρασμένο ως ποσοστό (%) του μήκους του μέλους

Οι πίνακες από τους οποίους γίνεται ανάκτηση αυτών των στοιχείων έχουν προκύψει από εκτεταμένες μελέτες βιομηχανικής ανάλυσης σε μεγάλο δείγμα πληθυσμού. Στην εφαρμογή της μεθόδου προτάθηκαν από το συνεργαζόμενο επιστήμονα οι πίνακες της έρευνας των Plagenhoef Evans και Abdelnour [1983] που ακολουθούν παρακάτω.

Μέλη Σώματος	Αρχικό (Pi) - Τελικό (Di) Σημείο	Άντρες Qi	Γυναίκες Qi
Κεφάλι	Ανώτερο - Κατώτερο σημείο κεφαλιού	55,0	55,0
Κορμός	Ωμος - Ισχίο	44,5	39,0
Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	43,6	45,8
Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	43,0	43,4
Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	46,8	46,8
Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	43,3	42,8
Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	43,4	41,9
Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	50,0	50,0

Πίνακας 1: Θέση του ΚΒ Μέλους, από το κεντρικό σημείο, ως ποσοστό (%) του μήκους του μέλους.

Μέλη Σώματος	Αρχικό - Τελικό Σημείο	Άντρες mi	Γυναίκες mi
Κεφάλι	Ανώτερο - Κατώτερο σημείο κεφαλιού	8,3	8,2
Κορμός	Ωμος - Ισχίο	46,8	45,2
Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	3,3	2,9
Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	1,9	1,6
Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	0,7	0,5
Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	10,5	11,8
Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	4,8	5,4
Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	1,4	1,3

Πίνακας 2: Μάζα Μελών Σώματος ως ποσοστό (%) του Συνολικής Σωματικής Μάζας

Συνεπώς, η θέση του ΚΜ κάθε μέλους του σώματος υπολογίζεται κατά Χ και Υ από τον εξής τύπο:

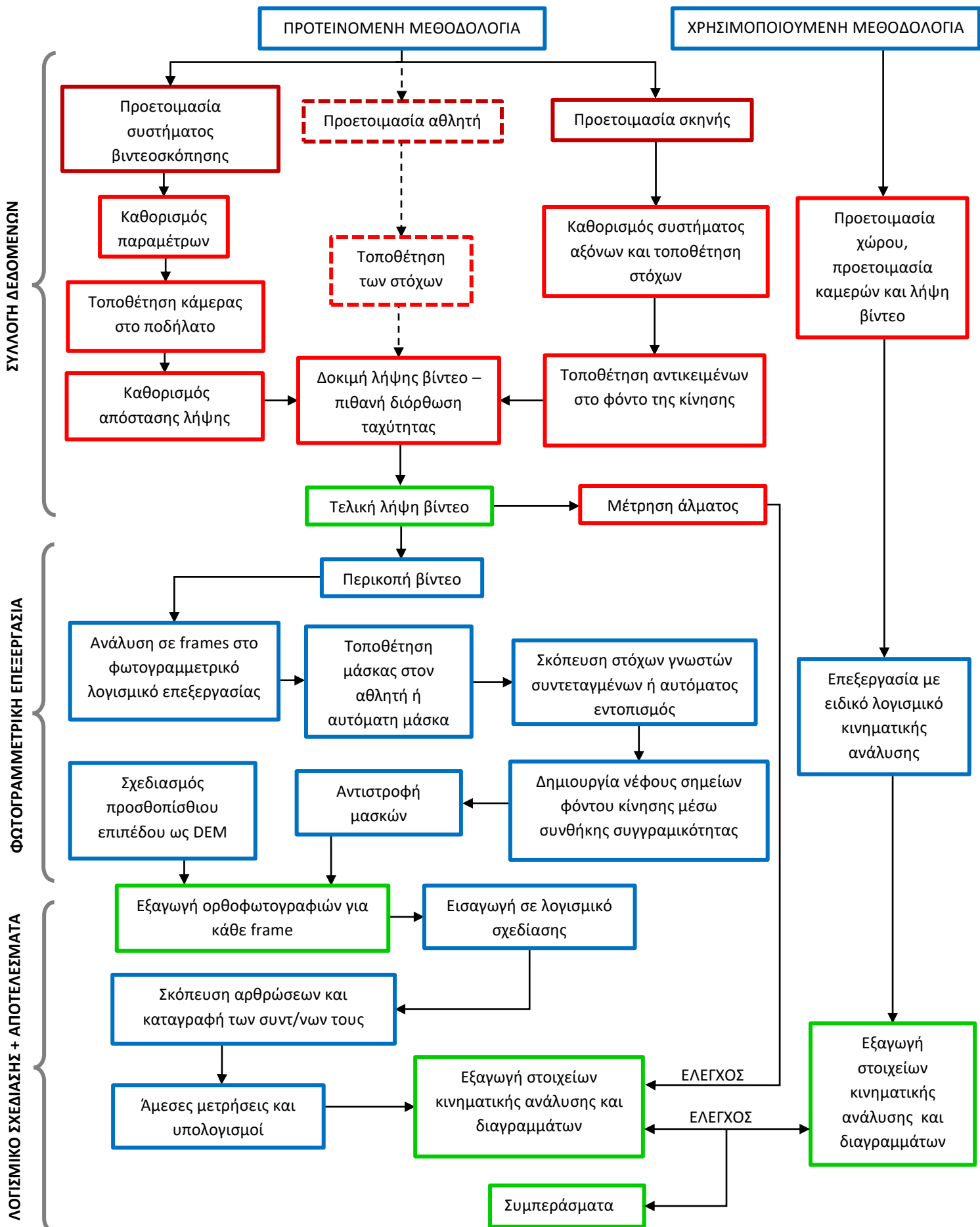
$$C_x = P_x - (P_x - D_x) * Q_i \quad C_y = P_y - (P_y - D_y) * Q_i$$

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα πολλαπλασιάζονται με την αντίστοιχη εκατοστιαία ποσότητα μάζας mi. Το άθροισμα όλων των γινομένων οδηγεί στον προσδιορισμό των συντεταγμένων του κέντρου μάζας σώματος:

$$C_{KMx} = \Sigma((P_x - (P_x - D_x) * Q_i) * mi) \quad C_{KMy} = \Sigma((P_y - (P_y - D_y) * Q_i) * mi)$$

Τέλος, τα τελικά στοιχεία της κινηματικής ανάλυσης παρουσιάζονται σε κατάλληλους πίνακες και διαγράμματα. Τα αποτελέσματα αυτά, υπό συνθήκες, μπορούν να συγκριθούν με την αντίστοιχα χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία. Ακολουθεί το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

B.2.5. Διάγραμμα ροής



Διάγραμμα 2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας στο οποίο απεικονίζονται με κόκκινο οι εργασίες πεδίου, με μπλε οι εργασίες γραφείου και με πράσινο τα αποτελέσματα της διαδικασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Γ.1. ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ – ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΜΕΡΑΣ

Στα πλαίσια δοκιμής της μεθοδολογίας που σχεδιάστηκε, πραγματοποιήθηκε λήψη δεδομένων στην πόλη Βιτόρια της Ισπανίας. Στόχος της δοκιμής ήταν κυρίως ο καθορισμός των κατάλληλων παραμέτρων της κάμερας και η εκ του αποτελέσματος επιβεβαίωση της επιτυχίας της αλληλουχίας των μεθόδων που σχεδιάστηκαν. Πριν τη λήψη δεδομένων πραγματοποιήθηκε μελέτη ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες παράμετροι για τη βιντεοσκόπηση:

Διαστάσεις καρτέ

Αρχικά, ήταν σημαντικό να καθοριστούν οι διαστάσεις του καρτέ βιντεοσκόπησης ώστε να εξασφαλίζεται ότι ο αθλητής δε θα φύγει εκτός κατά τη διαδικασία λόγω διαφορετικών ταχυτήτων κάμερας-αθλητή ή λάθους του χειριστή. Αν a και b είναι οι διαστάσεις του καρτέ στο χώρο τότε

$a = (36/\text{εστιακή απόσταση}) * \text{απόσταση λήψης}$

και $b = (24/\text{εστιακή απόσταση}) * \text{απόσταση λήψης}$.

Έγινε η εκτίμηση ότι το a , που αφορά τη διεύθυνση κίνησης, πρέπει να είναι τουλάχιστον 4-5 μέτρα για την εξασφάλιση της επιτυχίας της διαδικασίας.

Μέγεθος pixel

Στη συνέχεια, είναι σημαντικό να υπολογιστεί το μέγεθος του pixel. Π.χ. για ανάλυση 1920x1080 το μέγεθος του pixel είναι $a/1920$ ($=b/1080$). Θεωρήθηκε ότι για την εφαρμογή απαιτείται ένα μέγεθος pixel μικρότερο του ενός εκατοστού ώστε να εξασφαλίζεται στη συνέχεια της διαδικασίας η σωστή σκόπευση των σημείων του σώματος του αθλητή.

Ταχύτητα κλείστρου – Άνοιγμα διαφράγματος – ISO

Αποτελούν αλληλεξαρτώμενα μεγέθη. Το πιο σημαντικό στη συγκεκριμένη εφαρμογή βιντεοσκόπησης είναι η ταχύτητα κλείστρου. Στόχος είναι να επιλεγθεί μία μικρή ταχύτητα κλείστρου ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή αποτύπωση του αθλητή και των άκρων του που κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τον κορμό αλλά και να ελαχιστοποιηθεί η αλλοίωση λόγω της κίνησης (motion blur) των ακίνητων σημείων στο φόντο της κίνησης. Η μικρή ταχύτητα κλείστρου προϋποθέτει μεγαλύτερο άνοιγμα διαφράγματος ώστε να εισέλθει στιγμιαία περισσότερο φως και μεγαλύτερη τιμή στην ευαισθησία του αισθητήρα (ISO). Στη βιβλιογραφία

αναφέρεται ότι στη βιντεογράφιση τρεξίματος πλήρους ταχύτητας επιλέγεται συνήθως ταχύτητα κλείστρου 1/2000 έως 1/4000.

Συλλογή δεδομένων

Καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα βιντεοσκόπησης εντός γηπέδου, του φυσικού δηλαδή περιβάλλοντος της κίνησης, η λήψη δεδομένων έλαβε χώρα σε ένα χώρο στάθμευσης και η βιντεοσκόπηση έγινε από αυτοκίνητο που κινούνταν παράλληλα με τον αθλητή (εικόνα 8 και 9). Ο αθλητής εκτέλεσε την κίνηση του άλματος τριπλούν, προφανώς χωρίς προσγείωση.

Η βιντεοσκόπηση έγινε από δύο διαφορετικές φωτογραφικές μηχανές: την Canon 5D Mark II και την Canon 5D Mark III. Επίσης τοποθετήθηκε σε σταθερή βάση μία κάμερα Ricoh Theta (360°). Οι κάμερες που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στο εργαστήριο γεωμετρικής τεκμηρίωσης πολιτιστικής κληρονομιάς του πανεπιστημίου της Χώρας των Βάσκων (Laboratorio de Documentación Geométrica del Patrimonio, UPV-EHU) και αν και παρέχουν δυνατότητα βιντεοσκόπησης, δεν είναι οι πλέον κατάλληλες για τη συγκεκριμένη εφαρμογή λόγω χαμηλής συχνότητας. Πιο συγκεκριμένα, η Canon 5D Mark II μπορεί να καταγράψει με 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο και ανάλυση 1920x1080 ενώ η Canon 5D Mark III μπορεί να καταγράψει με 25 καρέ ανά δευτερόλεπτο και ανάλυση 1920x1080 ή με 50 fps και ανάλυση 1280x720.

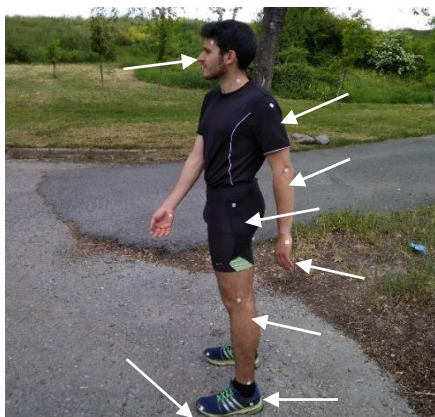
Στο σώμα του αθλητή τοποθετήθηκαν λευκά αυτοκόλλητα διαστάσεων 1,5x1,5 εκατοστών ως σημεία αναφοράς σε διάφορα μέρη του σώματος ώστε να ελεγχθεί το μέγεθος του pixel. (εικόνα 10) Τέλος, τοποθετήθηκαν στόχοι στο φόντο της κίνησης και μετρήθηκαν αποστάσεις τριών χαρακτηριστικών σημείων σε αυθαίρετο σύστημα που επιλέχθηκε. (εικόνα 11)



Εικόνα 8: Διάταξη λήψης



Εικόνα 9: Κάμερες συλλογής δεδομένων



Εικόνα 10: Τα αυτοκόλλητα στο σώμα του αθλητή



Εικόνα 11: Οι στόχοι που χρησιμοποιήθηκαν

Και για τις δύο μηχανές επιλέχθηκε η ρύθμιση της προτεραιότητας της ταχύτητας κλείστρου (shutter priority), για την οποία επιλέχθηκε η τιμή 1/2500. Πραγματοποιήθηκαν δέκα καταγραφές, σε κάθε μία από τις οποίες μετρήθηκε με μετροταινία η απόσταση λήψης. Τα υπόλοιπα στοιχεία ανακτήθηκαν από τα μεταδεδομένα των βίντεο. Ακολουθούν οι πίνακες με τα αναλυτικά στοιχεία των λήψεων:

Canon 5D Mark III	Βίντεο 1	Βίντεο 2	Βίντεο 3	Βίντεο 4
Συχνότητα	25	25	50	50
Ανάλυση	1920x1080	1920x1080	1280x720	1280x720
Απόσταση λήψης (μ.)	19	14	12	6.8
Εστιακή απόσταση (χιλ.)	90	90	21	21
Διαστάσεις καρέ (μ.)	5,07x7,60	3,73x5,60	13,71x20,57	7,77x11,66
Μέγεθος pixel (χιλ.)	4	3	16	9
Ταχύτητα κλείστρου	1/2500	1/2500	1/2500	1/2500

Canon 5D Mark II	Βίντεο 1	Βίντεο 2	Βίντεο 3	Βίντεο 4	Βίντεο 5	Βίντεο 6
Συχνότητα	30	30	30	30	30	30
Ανάλυση	1920x1080	1920x1080	1920x1080	1920x1080	1920x1080	1920x1080
Απόσταση λήψης (μ.)	8,5	9	19	14	12	6.8
Εστιακή απόσταση (χιλ.)	58	60	60	80	80	28
Διαστάσεις καρέ (μ.)	3.52x5.28	3.60x5.40	7.60x11.40	4.20x6.30	3.60x5.40	5.83x8.74
Μέγεθος pixel (χιλ.)	3	3	6	3	3	5
Ταχύτητα κλείστρου	1/2500	1/2500	1/2500	1/2500	1/2500	1/2500

Πίνακας 3 και 4: Αναλυτικά στοιχεία για κάθε κάμερα που χρησιμοποιήθηκε

Προβλήματα που παρουσιάστηκαν

Κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων παρουσιάστηκαν συγκεκριμένες δυσκολίες που αξίζει να αναφερθούν. Αρχικά, ήταν δύσκολος ο συγχρονισμός της ταχύτητας του αθλητή με την ταχύτητα του αυτοκινήτου. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να προπορεύεται με σημαντική απόσταση το αυτοκίνητο, κυρίως κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του άλματος, στο οποίο η ταχύτητα του αθλητή αναγκαστικά μειώνεται.

Στα βίντεο, αυτό το πρόβλημα επηρέασε κυρίως τις λήψεις με τις μικρότερες διαστάσεις του καρτέ, της τάξης των 3.5 επί 5 μέτρων. Η μεγαλύτερη ταχύτητα του αυτοκινήτου ανάγκασε τους χειριστές να στρέψουν την κάμερα ώστε να μην βγει ο αθλητής εκτός του πλαισίου καταγραφής, απόφαση που σε μερικές λήψεις δεν είχε επιτυχία. Παράλληλα, με τη στροφή της κάμερας χανόταν η σταθερότητα της λήψης. Για αυτό το λόγο, στις τελευταίες λήψεις επιλέχθηκε μικρότερη εστιακή απόσταση ώστε να μεγαλώσουν οι διαστάσεις του καρτέ και να εξασφαλιστεί η ύπαρξη ολόκληρου του αθλητή εντός του πλαισίου καθ'όλη τη διάρκεια της κίνησης.

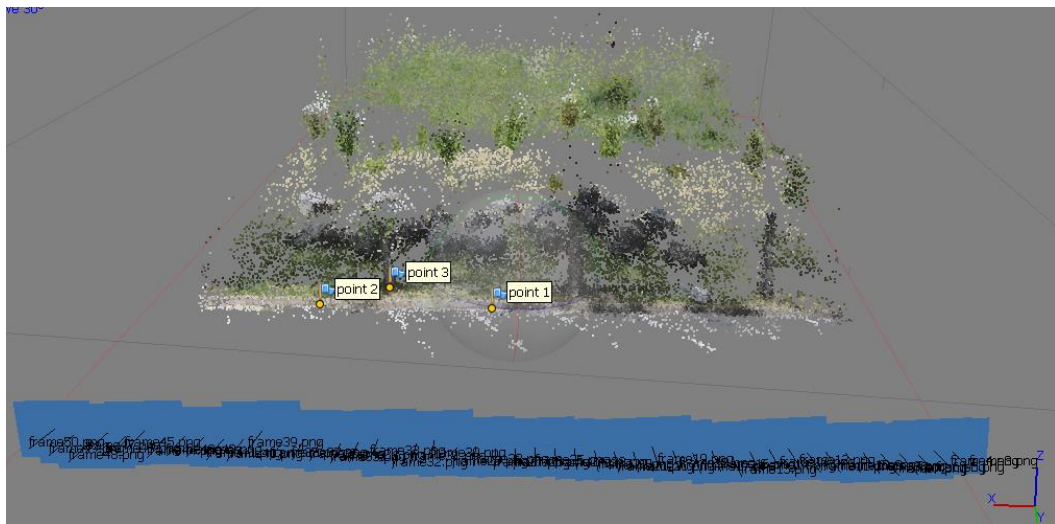
Ένα δευτερεύον πρόβλημα παρουσιάστηκε με τα αυτοκόλλητα που είχαν τοποθετηθεί στο σώμα, τα οποία συχνά ξεκολλούσαν κατά τη διάρκεια της κίνησης.

Επεξεργασία και αποτελέσματα

Τελικά, επιλέχθηκε το Βίντεο 2 από την Canon 5D Mark III λόγω της καλής ανάλυσης, του μικρού μεγέθους pixel και της σταθερότητας της λήψης. Το βίντεο υπέστη επεξεργασία αρχικά στο φωτογραμμετρικό λογισμικό PhotoScan ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στο κεφάλαιο B.2.3.

Στη συνέχεια, με την εξαγωγή των X, Y, Z, ω, φ, κ δημιουργήθηκαν οι ορθοφωτογραφίες σε ανεπτυγμένο λογισμικό του εργαστηρίου. Σε αυτή τη φάση της έρευνας το μόνο ζητούμενο ήταν να εξακριβωθεί εάν η μέθοδος μπορεί να έχει αποτέλεσμα. Για αυτό το λόγο, η πρακτική εφαρμογή των βημάτων που σχεδιάστηκαν και η ακρίβεια της διαδικασίας θα αναλυθούν εκτενώς στο κεφάλαιο της εφαρμογής που έπεται.

Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες από την επεξεργασία: Το νέφος σημείων που δημιουργήθηκε από την εφαρμογή του αυτοματοποιημένου αλγορίθμου, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) της διαδικασίας και μία σύνθεση από τις τελικές ορθοφωτογραφίες που περιγράφουν τη συνολική κίνηση του άλματος.



Εικόνα 12: Νέφος σημείων από Photoscan

Markers	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> point 1	-0.013303	0.039754	-0.005...	0.005000	0.042295	4	0.189
<input checked="" type="checkbox"/> point 2	-0.048733	0.024650	-0.004...	0.005000	0.054771	5	0.223
<input checked="" type="checkbox"/> point 3	0.063205	-0.059331	0.011051	0.005000	0.087391	7	0.189
Total Error							
Control points	0.046715	0.043620	0.007547		0.064358		0.200
Check points							

Εικόνα 13: Σφάλμα RMS διαδικασίας



Εικόνα 14: Σύνθεση από τις τελικές ορθοφωτογραφίες

Γ.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Επόμενο βήμα της έρευνας είναι η πειραματική εφαρμογή της μεθόδου και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της.

Ο χώρος στον οποίο έλαβε χώρα η συλλογή δεδομένων για την εφαρμογή είναι το γήπεδο στίβου στο προπονητικό κέντρο του Άγιου Κοσμά στην Αθήνα. Πιο συγκεκριμένα, η εκτέλεση των αλμάτων έγιναν στο νότιο σκάμμα, που έχει σημειωθεί στην εικόνα 15 με κόκκινη έλλειψη.

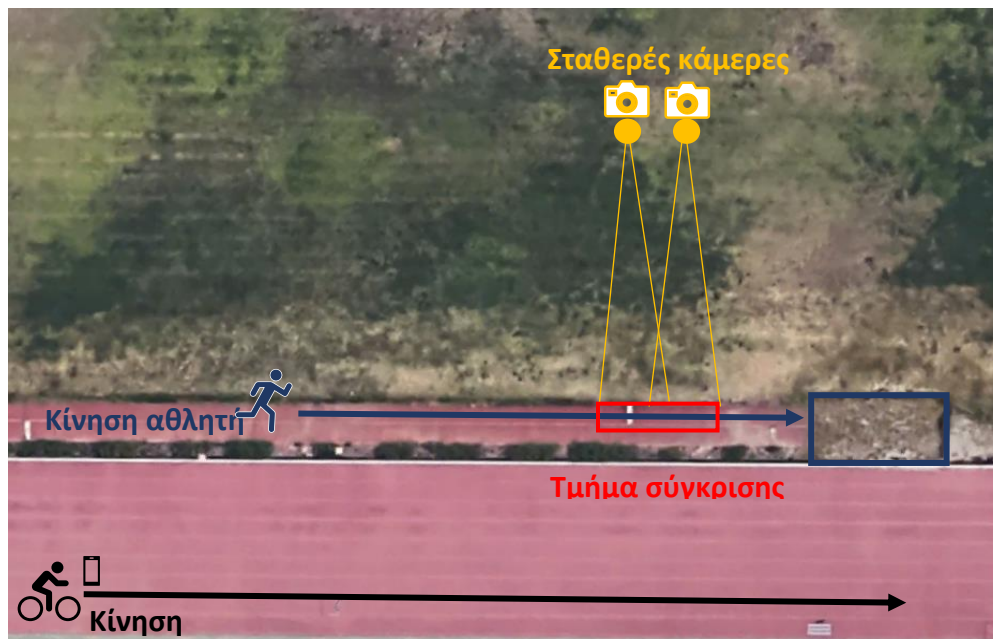


Εικόνα 15: Το γήπεδο όπου έλαβε χώρα η συλλογή δεδομένων

Προκειμένου να γίνει εκ των υστέρων σύγκριση μεθόδων, η πειραματική εφαρμογή πραγματοποιήθηκε ως εξής:

Από τη δεξιά πλευρά του αθλητή έγινε καταγραφή με την προτεινόμενη μέθοδο, δηλαδή με βιντεοσκόπηση από κάμερα πακτωμένη σε ποδήλατο που κινείται σε ευθεία παράλληλη με τον αθλητή. Από την αριστερή πλευρά πραγματοποιήθηκε καταγραφή με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο, δηλαδή με δισδιάστατη DLT ανάλυση με δύο σταθερές κάμερες εστιασμένες στο τμήμα της απογείωσης από τη βαλβίδα και στην εναλλαγή από το κουτσό στο βήμα αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η σύγκριση ορισμένων στοιχείων κινηματικής ανάλυσης σε αυτά τα τμήματα και μάλιστα μπορεί να αξιοποιηθεί ως μέσο ελέγχου της αξιοπιστίας της μεθόδου.

Σχηματικά, η διάταξη της πειραματικής εφαρμογής περιγράφεται με την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 16: Διάταξη πειραματικής εφαρμογής

Επίσης, εκτός της παραπάνω διαδικασίας σύγκρισης, καταγράφηκε βίντεο ολόκληρου άλματος έχοντας τοποθετήσει 2 κάμερες GoPro Hero 4 Black στο μπροστά και στο πίσω μέρος του ποδηλάτου, στο ίδιο ύψος. Σκοπός ήταν να διευκρινιστεί εάν οι κάμερες αυτές, που ανήκουν στην κατηγορία των καμερών καταγραφής γρήγορης δράσης (action cameras), είναι κατάλληλες για αυτή την εφαρμογή. Επίσης αρχικός στόχος ήταν και να διερευνηθεί η δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης των ταυτόχρονων ζευγών, για την οπτικοποίηση της τρίτης διάστασης.



Εικόνα 17: Θέση τοποθέτησης των δύο καμερών GoPro στο ποδήλατο

Γ.2.1. Εφαρμογή χρησιμοποιούμενης μεθόδου

Ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν για την εφαρμογή της χρησιμοποιούμενης μεθόδου από τον συνεργαζόμενο επιστήμονα κ. Απόστολο Θεοδώρου:

Το κουτσό καταγράφηκε χρησιμοποιώντας μία σταθερή κάμερα υψηλής συχνότητας (Casio Computer Co. Ltd, Exilim-Pro-EX-F1, Shibuya, Japan), ρυθμισμένη σε συχνότητα 300 καρέ ανά δευτερόλεπτο και ανάλυση 512 x 384, τοποθετημένη 15 μ. από το διάδρομο, σε ύψος 1.60 μ. και κατάλληλα προσανατολισμένη ώστε ο οπτικός άξονας να είναι κάθετος στο διάδρομο. Είχε τοποθετηθεί άλλη μία ίδια κάμερα για την καταγραφή της προσγείωσης στο κουτσό, η οποία δεν χρησιμοποιήθηκε τελικά λόγω τεχνικών προβλημάτων.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί δισδιάστατη αναφορά κλίμακας για τη σταθερή κάμερα που καταγράφει το κουτσό (το οποίο έλαβε χώρα σε απόσταση 11 μέτρων από το σκάμμα), χρησιμοποιήθηκαν δύο σιδερένιοι στύλοι βαθμονόμησης (ύψους 2 μ. , πλάτους 0.025 μ.) χρωματισμένοι εναλλάξ σε άσπρο και μαύρο χρώμα ανά 0.25 μ. . Οι δύο στύλοι τοποθετήθηκαν και καταγράφηκαν στο μέσο του διαδρόμου, σε αποστάσεις 9.25 μέτρων και 12.25 μέτρων από το σκάμμα αντίστοιχα. Η συνολική βαθμονομημένη περιοχή ήταν μήκους 3 μέτρων (στον άξονα X) και ύψους 2 μέτρων (στον άξονα Y). Ο άξονας X ταυτίστηκε με τη διεύθυνση του διαδρόμου προς το σκάμμα και ο άξονας Y ήταν κατακόρυφος και κάθετος στον άξονα X.

Τα βίντεο που συλλέχθηκαν ψηφιοποιήθηκαν σε λογισμικό κινηματικής ανάλυσης (Ariel Dynamics Inc., APAS v2013.3.3, Trabuco Canyon, CA, USA). Σκοπεύθηκαν τα είκοσι δύο εξής ανατομικά σημεία: άκρη δαχτύλου ποδιού, 5^{ος} μετατάρσιος, πτέρνα, αστράγαλος, γόνατο, ισχίο, ώμος, αγκώνας, καρπός και 5^{ος} μετακάρπιος σε αμφότερες τις πλευρές του σώματος του αθλητή, 7^{ος} αυχενικός σπόνδυλος και η κορυφή του κεφαλιού. Οι συντεταγμένες του κέντρου μάζας σώματος υπολογίστηκαν για κάθε πεδίο χρησιμοποιώντας ανατομικά δεδομένα από την μελέτη του Plagenhoef [1985]. Ένα φίλτρο Butterworth δεύτερης τάξης με χαμηλό βαθμό διέλευσης επιλέχθηκε για εξομάλυνση. Η ακρίβεια της δισδιάστατης αποκατάστασης καθορίστηκε από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, μετά από την τυχαία επαναψηφιοποίηση του 10% των καταγεγραμμένων frames. Εντοπίστηκε ένα σφάλμα RMS 0.45 cm και 0.63 cm για το X (οριζόντιο) και τον Y (κατακόρυφο) άξονα αντίστοιχα.



Εικόνα 18: Οι σταθερές κάμερες της χρησιμοποιούμενης μεθόδου



Εικόνα 19: Οι σιδερένιοι στύλοι διαβάθμισης για τη δισδιάστατη απόδοση κλίμακας. Αριστερά, η τοποθέτησή τους κατά τη διάρκεια των αλμάτων και δεξιά, η μετακίνησή τους στο κέντρο του διαδρόμου μετά το πέρας των αλμάτων για να γίνει η καταγραφή τους.

Γ.2.2. Εφαρμογή προτεινόμενης μεθόδου

Συλλογή Δεδομένων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεκπεραίωση της συλλογής δεδομένων αποτελούνταν από:

- ❖ ποδήλατο
- ❖ κάμερα (iPhone 7 plus)
- ❖ 4 κωδικοποιημένοι στόχοι (PhotoScan)
- ❖ μηχανισμός πάκτωσης στο ποδήλατο
- ❖ μετροταινία

Επιπροσθέτως, επικουρικά, για τη βελτιστοποίηση του αποτελέσματος, αξιοποιήθηκαν:

- ❖ 2 στύλοι διαβάθμισης που τοποθετήθηκαν από τον κ. Θεοδώρου
- ❖ 2 εμπόδια που τοποθετήθηκαν στο φόντο της κίνησης
- ❖ 1 μικρός στόχος 1.5x1.5 εκ. από χαρτόνι και παραμάννα

Επιλογή κάμερας

Επιλέχθηκε να γίνει η καταγραφή του άλματος με μία συσκευή κινητού τηλεφώνου που παρέχει δυνατότητα slow motion βιντεογράφησης στα 120 fps με ανάλυση 1920*1080. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με την πρώτη αρχή που τέθηκε στο κεφάλαιο Β.2.1. και αφορά στη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου από οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο, με ίδια μέσα και με μη απαγορευτικό κόστος εξοπλισμού. Το κόστος της συγκεκριμένης συσκευής, αν και θεωρείται υψηλό για τα δεδομένα της αγοράς της κινητής τηλεφωνίας, παραμένει μικρότερο από το κόστος μίας επαγγελματικής κάμερας βιντεοσκόπησης σε υψηλή συχνότητα, όπως για παράδειγμα το κόστος της κάμερας της χρησιμοποιούμενης μεθόδου. Εξάίρεση αποτελούν ορισμένες action cameras χαμηλού κόστους με κατάλληλα χαρακτηριστικά, που όμως δεν περιλαμβάνονταν στο διαθέσιμο εξοπλισμό.

Προετοιμασία χώρου

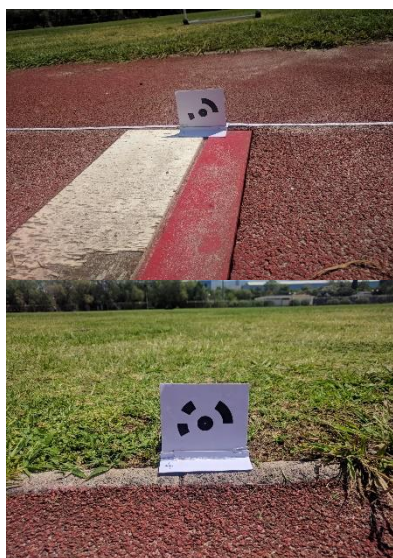
Αρχικά καθαρίστηκε ο χώρος του διαδρόμου από την άμμο ώστε να είναι ορατές οι γραμμές που τον οριοθετούν. Επίσης, στρώθηκε το σκάμμα γύρω από το σημείο αναμενόμενης προσγείωσης του αθλητή και τοποθετήθηκαν δύο εμπόδια στο φόντο της κίνησης.

Ορισμός συστήματος αξόνων

Στη συνέχεια το αυθαίρετο σύστημα αξόνων ορίστηκε ως εξής: ο άξονας X ταυτίζεται με την εξωτερική ακμή της δεξιάς ως προς τον αθλητή γραμμής οριοθέτησης του διαδρόμου. Σημείο αρχής των αξόνων θεωρείται το σημείο τομής της προαναφερθείσας ευθείας με το σκάμμα. Ως εκ τούτου, για τον άξονα X, τα σημεία εντός του σκάμματος αναγκαστικά θα έχουν αρνητικές τιμές. Ο άξονας Y είναι κάθετος στον X, ταυτίζεται με την ακμή του σκάμματος που συνορεύει με το διάδρομο, και έχει κατεύθυνση προς το επίπεδο κίνησης του ποδηλάτου. Ο άξονας Z είναι κατακόρυφος και κάθετος με τους άλλους δύο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το ταρτάν, το υλικό του διαδρόμου, στην ένωση με το σκάμμα ήταν κατεστραμμένο, με συνέπεια να μη μπορεί να σκοπευθεί το σημείο αρχής των αξόνων. Ορίστηκε γεωμετρικά, ως η τομή δύο ορατών ευθειών.

Τοποθέτηση στόχων – ορισμός φωτοσταθερών

Για την απόδοση κλίμακας στο μοντέλο τοποθετήθηκαν τέσσερις κωδικοποιημένοι στόχοι με ονόματα point 1, 2, 3 και 4 σε καθορισμένες θέσεις, για τους οποίους μετρήθηκαν με μετροταινία οι συντεταγμένες στο σύστημα που ορίστηκε. (εικόνα 20) Οι στόχοι 1, 2 και 3 τοποθετήθηκαν πάνω στη γραμμή που υλοποιεί τον άξονα X και ο στόχος 4 στην αριστερή γραμμή του διαδρόμου, πίσω από το επίπεδο της κίνησης. Παράλληλα, μετρήθηκαν οι ορθογώνιες συντεταγμένες για άλλα δύο σημεία A, B, ορισμένα πάνω στους σιδερένιους στύλους σε ύψος 1,5 μέτρου (εικόνα 21). Τέλος, ως σημείο γνωστών συντεταγμένων ορίστηκε και η άκρη της ακμής της βαλβίδας, αφού αποτελεί τη αρχή μέτρησης των αποστάσεων στα άλματα και έχει καθορισμένες συντεταγμένες στο παραπάνω σύστημα.

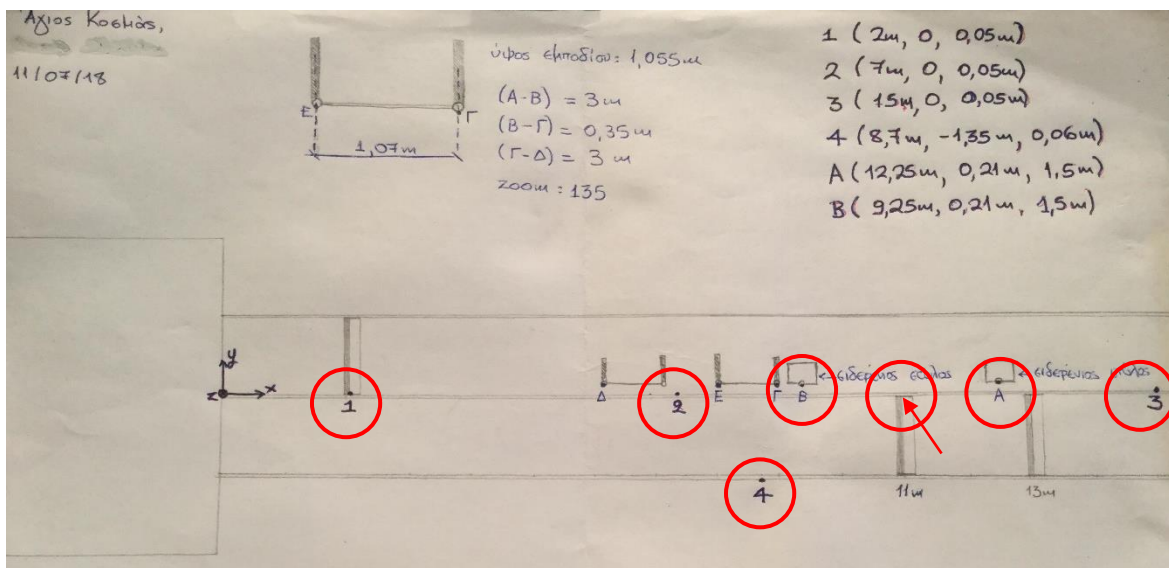


Εικόνα 20 : Στόχοι 1 (επάνω) και 4 (κάτω)



Εικόνα 21: Τα σημεία A και B στους σιδερένιους στύλους

Η διάταξη των σημείων παρουσιάζονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα:



Εικόνα 22: Σχεδιάγραμμα χωρικής διάταξης στόχων

Οι συντεταγμένες που μετρήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

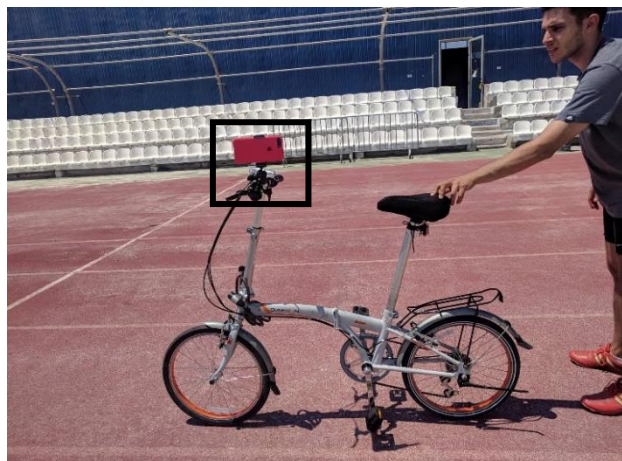
Σημεία	X (μ.)	Y (μ.)	Z (μ.)
1	2	0	0,05
2	7	0	0,05
3	15	0	0,05
4	8,7	-1,35	0,06
A	12,25	0,21	1,5
B	9,25	0,21	1,5
Βαλβίδα	11	-0,05	0

Πίνακας 5: Μετρημένες συντεταγμένες φωτοσταθερών στο αυθαίρετα ορισμένο σύστημα

Η επιλογή των κωδικοποιημένων στόχων έγινε διότι το λογισμικό φωτογραμμετρικής επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε παρέχει τη δυνατότητα αυτόματου εντοπισμού τους. Η αυτοματοποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη αφού εξοικονομεί χρόνο στη χειροκίνητη σκόπευση των σημείων. Στην περίπτωση της εφαρμογής, λόγω ανεπαρκούς μεγέθους των στόχων, η χρήση τους για τον αυτόματο εντοπισμό τους από το λογισμικό κατέστη αδύνατη, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν ως συμβατικοί στόχοι.

Προετοιμασία συστήματος κάμερας – ποδηλάτου

Αρχικά, επιλέχθηκαν οι κατάλληλες για τη βιντεοσκόπηση ρυθμίσεις στη συσκευή κινητού τηλεφώνου: Slow Motion Video, συχνότητας 120 fps, με ανάλυση 1920x1080. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε με το μηχανισμό πάκτωσης στο τιμόνι του ποδηλάτου σε ύψος 1,20 μ., όπως φαίνεται στην εικόνα 23. Τέλος, επιλέχθηκε η απόσταση λήψης στα 9,2 μ. διασφαλίζοντας παράλληλα ικανές διαστάσεις καταγραφής, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο Γ.1..



Εικόνα 23: Το ποδήλατο με τοποθετημένη την κάμερα

Τοποθέτηση μικρών στόχων στον αθλητή

Αποφασίστηκε να τοποθετηθούν δύο στόχοι από σκληρό χαρτί στα ισχία του αθλητή, διότι είναι ένα ανατομικό σημείο που εντοπίζεται δύσκολα κατά την ψηφιοποίηση. Η τοποθέτηση στο κολάν του αθλητή έγινε χρησιμοποιώντας παραμάνες.

Λήψη βίντεο

Στις πρώτες προσπάθειες καταγραφής, ο αθλητής, έχοντας μεγαλύτερη επιτάχυνση, ανέπτυσσε διαφορά από το σύστημα του ποδηλάτου με την κάμερα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην είναι κάθετη η λήψη και ο αθλητής να αποτυπώνεται στα όρια του καρέ. Για να διορθωθεί αυτό, αποφασίστηκε η εκκίνηση του ποδηλάτου από διαφορετικό σημείο, 15 μέτρα πίσω από το σημείο εκκίνησης του αθλητή, ώστε, όταν φτάνει στην ευθεία του αθλητή, να έχει αποκτήσει ήδη αρχική ταχύτητα. Στη συνέχεια, η διατήρηση της ταχύτητας στο ποδήλατο και η επιτάχυνση του αθλητή συντελούν στην εξασφάλιση της κατά το δυνατόν κάθετης λήψης στο τμήμα που συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, το οποίο είναι οι δύο τελευταίοι διασκελισμοί, το κουτσό, το βήμα και το άλμα. Στο σύνολο έγιναν τρεις καταγραφές αλμάτων και με τις δύο μεθόδους, χρησιμοποιούμενη και προτεινόμενη, και επιλέχθηκε για την ανάλυση η τρίτη καταγραφή καθώς θεωρήθηκε καλύτερη. Κριτήρια της επιλογής αυτής αποτέλεσαν η σταθερότητα της λήψης, η γωνία καταγραφής και ο συντονισμός ταχυτήτων μεταξύ αθλητή και ποδηλάτου. Η επίδοση του τρίτου άλματος μετρήθηκε με μετροταινία 12,72 μ. .

Φωτογραμμετρική επεξεργασία

Τη συλλογή των δεδομένων ακολούθησε η φωτογραμμετρική επεξεργασία του επιλεγμένου βίντεο. Αρχικά, απομονώθηκε το τμήμα του βίντεο που περιέχει τους τελευταίους δύο διασκελισμούς και όλο το άλμα έως την προσγείωση. Στη συνέχεια, εισήχθη στο φωτογραμμετρικό λογισμικό PhotoScan (Professional, Version 1.4.0) και αναλύθηκε αυτόματα σε 338 καρτέ.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προέκυψε κατά τη διαδικασία της συλλογής δεδομένων και εντοπίστηκε εκ των υστέρων ήταν ότι το iPhone 7 plus που επιλέχθηκε για την καταγραφή δεν είχε σταθερή εστίαση, με αποτέλεσμα πολλά καρτέ να έχουν κακή ανάλυση και να είναι ουσιαστικά άχρηστα. Ως συνέπεια αυτού του προβλήματος, απορρίφθηκαν 107 από τα 338 καρτέ, δηλαδή περίπου 1 στα 3. Από τα υπόλοιπα, έγινε διαλογή των καρτέ που είχαν διατηρήσει την ανάλυση όπως είχε σχεδιαστεί εξ αρχής.

Στο λογισμικό εισήχθησαν επίσης οι συντεταγμένες των σημείων που μετρήθηκαν στο στάδιο της συλλογής δεδομένων και επιλέχθηκε σφάλμα για αυτές ίσο με 5 χιλιοστά. Κάθε ένα από τα σημεία σκοπεύθηκε στα διαλεγμένα καρτέ από 3 έως 9 φορές.

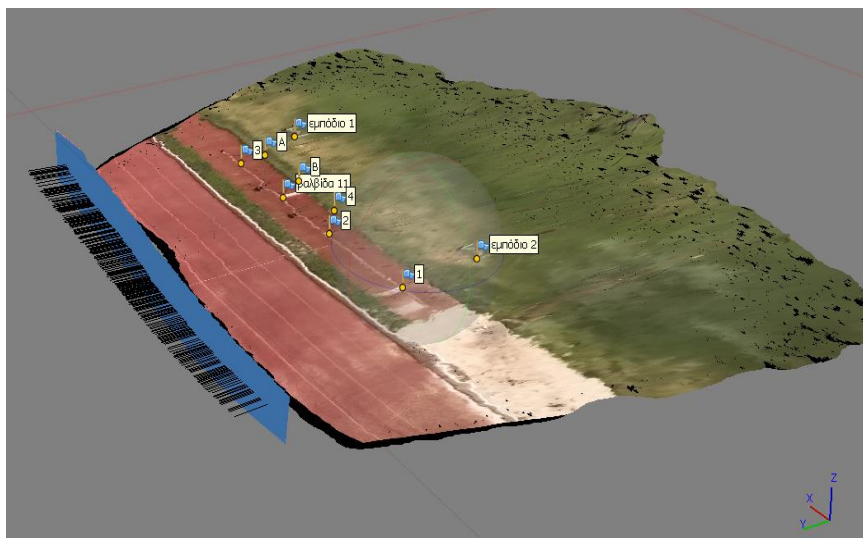
Όπως αναφέρθηκε στην ανάλυση της μεθοδολογίας, τοποθετήθηκε μάσκα στον αθλητή και στη σκιά του σε όλα τα καρτέ. (εικόνα 24)



Εικόνα 24: Παράδειγμα εφαρμογής μάσκας

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, εκτελέστηκε ο αυτοματοποιημένος αλγόριθμος και υπολογίστηκαν τα X,Y,Z,ω,φ,κ για τα σημεία λήψης. Το Y, δηλαδή η απόσταση λήψης, υπολογίστηκε από 9,46 έως 10 μέτρα, τιμή που βρίσκεται πολύ κοντά στην μετρημένη απόσταση. Το Z υπολογίστηκε 1,4 μ. ενώ το ύψος της κάμερας είχε μετρηθεί στα 1,2 μ. .

Αξίζει να αναφερθεί ότι έμμεσο αποτέλεσμα της διαδικασίας της φωτογραμμετρικής επεξεργασίας είναι το τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου της κίνησης, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 25: Τρισδιάστατο μοντέλο του χώρου κίνησης

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που προέκυψε από τη διαδικασία ήταν 0,0149 μ., το οποίο χαρακτηρίζεται ικανοποιητικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή με βάση τις δυσκολίες που προέκυψαν. Τα επιμέρους σφάλματα σε κάθε άξονα ήταν 0,008 στον X, 0,012 στον Y και 0,0005 στον Z. Είναι λογικό να είναι αυξημένο το σφάλμα στον άξονα Y διότι η παράλληλη διάταξη της λήψης ως προς τον αθλητή δεν ευνοεί την εκτίμηση του βάθους.

Markers	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> B	-0.003832	-0.003715	0.004605	0.005000	0.007049	9	0.249
<input checked="" type="checkbox"/> βαλβίδα ...	0.013466	-0.023370	0.002238	0.005000	0.027065	3	0.135
<input type="checkbox"/> εμπόδιο 1						36	0.077
<input type="checkbox"/> εμπόδιο 2						32	0.062
<input checked="" type="checkbox"/> 1	-0.003320	-0.003065	0.001485	0.005000	0.004757	9	0.051
<input checked="" type="checkbox"/> 2	-0.002992	0.009179	0.001124	0.005000	0.009720	9	0.235
<input checked="" type="checkbox"/> 3	-0.011165	-0.008523	-0.002243	0.005000	0.014224	8	0.212
<input checked="" type="checkbox"/> 4	0.007979	-0.002413	-0.011228	0.005000	0.013984	6	0.344
<input checked="" type="checkbox"/> A	-0.000856	0.015943	0.001492	0.005000	0.016036	8	0.278
Total Error							
Control points	0.007607	0.011870	0.004826		0.014901		0.233
Check points							0.071

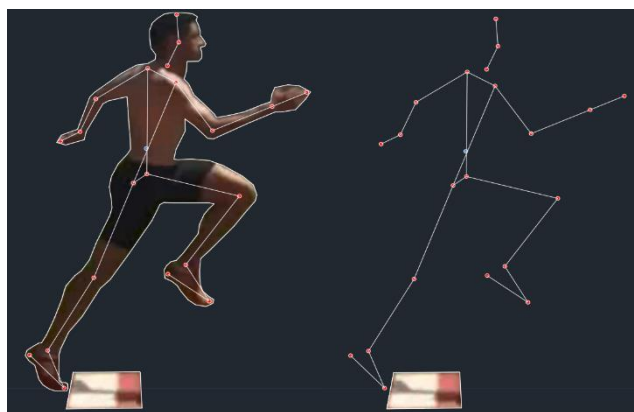
Εικόνα 26: Το σφάλμα RMS της διαδικασίας και τα επιμέρους σφάλματα στους άξονες

Στο πρόγραμμα Geomagic δημιουργήθηκε το επίπεδο που χρησιμοποιήθηκε ως ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων. Όπως αναφέρθηκε στη μεθοδολογική προσέγγιση, το επίπεδο αυτό αποφασίστηκε να είναι το προσθοπίσθιο επίπεδο του αθλητή. Μαθηματικά, στο ορισμένο σύστημα συντεταγμένων αυτό εκφράστηκε ως $Y=-0,65$, διότι ταυτίζεται με το μέσο επίπεδο του διαδρόμου, ο οποίος έχει πλάτος 1,3 μ. . Ορίστηκαν τέτοιες διαστάσεις ώστε να περιλαμβάνεται όλη η περιοχή ενδιαφέροντος. Αυτό το επίπεδο εισήχθη στο PhotoScan και δημιουργήθηκε το ορθοφωτομωσαϊκό με μέγεθος pixel 0,0054 μ. . Στη συνέχεια, αντιστράφηκαν οι μάσκες στα καρέ και έγινε εξαγωγή των επιμέρους ορθοφωτογραφιών από το λογισμικό.

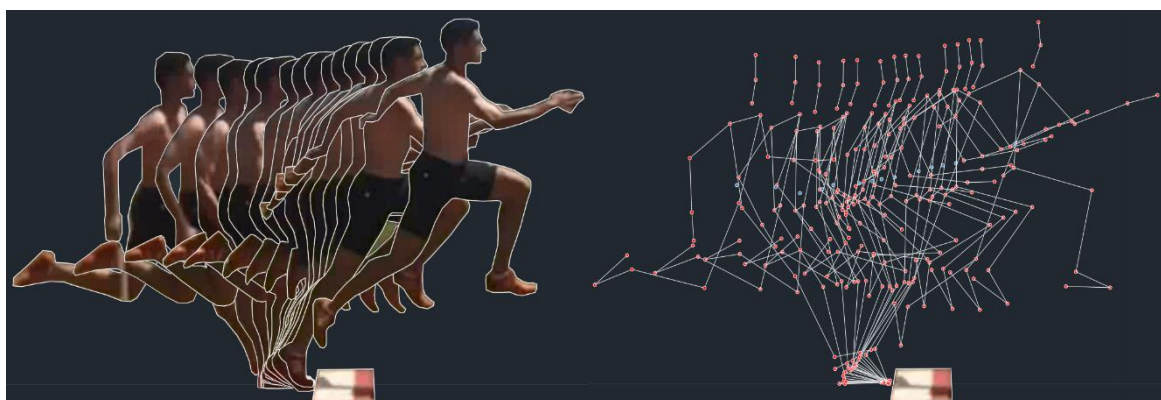
Λογισμικό Σχεδίασης

Οι ορθοφωτογραφίες που περιγράφουν το τμήμα σύγκρισης, τα καρέ 57-80, εισήχθησαν στο πρόγραμμα σχεδίασης AutoCAD (Autodesk AutoCAD 2019 Student Version) με τη βοήθεια της επέκτασης Raster Design. Με τη χρήση αυτής της επέκτασης επετεύχθη η σωστή τοποθέτηση των ορθοφωτογραφιών στο δισδιάστατο σύστημα σχεδίασης του AutoCAD. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο άξονας Z στο αυθαίρετα ορισμένο σύστημα συντεταγμένων ονομάζεται Y εντός του προγράμματος σχεδίασης.

Σε κάθε μία από αυτές τις ορθοφωτογραφίες αρχικά απομονώθηκε το σώμα του αθλητή και στη συνέχεια σκοπεύθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν χειροκίνητα τα ανατομικά σημεία του σώματος. Οι συντεταγμένες τους καταγράφηκαν στο υπολογιστικό πρόγραμμα Excel. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε ο μαθηματικός τύπος της μεθόδου των μελών του σώματος που περιγράφηκε στο κεφάλαιο Β.2.4. για τον υπολογισμό του κέντρου μάζας σώματος στην ανάλυση του βίντεο.



Εικόνα 27: Παράδειγμα χειροκίνητης σκόπευσης ανατομικών σημείων στο καρέ No 75



Εικόνα 28: Το σύνολο των καρέ που αναλύθηκαν στο τμήμα σύγκρισης

Ακολουθεί το σύνολο των καταγεγραμμένων συντεταγμένων και ένα παράδειγμα υπολογισμού των συντεταγμένων του κέντρου μάζας σώματος για ένα καρέ:

Frame	57		60		62		64		65		67		68		69	
Σημείο σώματος	Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
κεφάλι - αν. σημείο	-11,96	1,65	-11,74	1,65	-11,62	1,50	-11,49	1,63	-11,41	1,63	-11,29	1,62	-11,21	1,65	-11,15	1,65
κεφάλι - κατ. σημείο	-11,98	1,41	-11,76	1,41	-11,64	1,37	-11,52	1,39	-11,45	1,41	-11,32	1,40	-11,24	1,40	-11,18	1,43
Α-δάκτυλο ποδιού	-12,83	0,50	-12,50	0,56	-12,23	0,63	-12,02	0,60	-11,91	0,60	-11,69	0,56	-11,57	0,54	-11,47	0,49
Α-πτέρνα	-12,65	0,65	-12,30	0,70	-12,05	0,72	-11,82	0,73	-11,73	0,74	-11,56	0,73	-11,47	0,71	-11,39	0,69
Α-αστράγαλος	-12,62	0,58	-12,27	0,64	-12,04	0,65	-11,81	0,66	-11,72	0,67	-11,52	0,67	-11,41	0,67	-11,32	0,65
Α-γόνατο	-12,23	0,48	-11,93	0,48	-11,73	0,46	-11,52	0,50	-11,43	0,51	-11,15	0,57	-11,03	0,63	-10,97	0,66
Α-ισχίο	-12,05	0,91	-11,83	0,90	-11,70	0,90	-11,61	0,92	-11,54	0,94	-11,43	0,94	-11,37	0,93	-11,33	0,94
Α-ώμος	-11,93	1,35	-11,72	1,36	-11,61	1,29	-11,49	1,34	-11,47	1,36	-11,33	1,36	-11,26	1,36	-11,20	1,42
Α-αγκώνας	-11,89	1,14	-11,75	1,13	-11,61	1,07	-11,62	1,08	-11,58	1,06	-11,46	1,15	-11,42	1,18	-11,37	1,18
Α-καρπός	-11,63	1,12	-11,52	0,96	-11,49	0,90	-11,52	0,81	-11,51	0,84	-11,48	0,95	-11,46	0,93	-11,42	0,95
Α-δάκτυλο χεριού	-11,54	1,13	-11,43	0,90	-11,45	0,78	-11,46	0,74	-11,46	0,78	-11,49	0,88	-11,47	0,85	-11,47	0,86
Δ-δάκτυλο ποδιού	-11,34	0,17	-11,28	0,01	-11,23	0,02	-11,25	0,01	-11,25	0,02	-11,24	0,01	-11,24	0,01	-11,25	0,00
Δ-πτέρνα	-11,53	0,08	-11,51	0,00	-11,49	0,01	-11,48	0,01	-11,48	0,01	-11,48	0,00	-11,47	0,01	-11,48	0,03
Δ-αστράγαλος	-11,53	0,14	-11,48	0,06	-11,46	0,08	-11,44	0,08	-11,44	0,08	-11,45	0,07	-11,43	0,08	-11,42	0,09
Δ-γόνατο	-11,75	0,54	-11,59	0,49	-11,50	0,52	-11,41	0,52	-11,36	0,52	-11,28	0,49	-11,24	0,49	-11,22	0,47
Δ-ισχίο	-12,03	0,89	-11,86	0,87	-11,74	0,87	-11,63	0,89	-11,58	0,91	-11,47	0,92	-11,41	0,92	-11,35	0,91
Δ-ώμος	-12,10	1,31	-11,87	1,29	-11,74	1,27	-11,63	1,27	-11,54	1,29	-11,37	1,29	-11,30	1,31	-11,24	1,33
Δ-αγκώνας	-12,31	1,14	-12,05	1,04	-11,84	1,00	-11,61	0,98	-11,52	0,98	-11,32	1,00	-11,21	1,00	-11,13	1,05
Δ-καρπός	-12,30	0,86	-11,92	0,80	-11,66	0,78	-11,40	0,81	-11,26	0,85	-11,02	0,92	-10,90	0,98	-10,82	1,01
Δ-δάκτυλο χεριού	-12,29	0,72	-11,85	0,69	-11,57	0,66	-11,27	0,72	-11,17	0,78	-10,92	0,90	-10,79	0,96	-10,67	1,02

Frame	70		71		72		73		74		75		80	
Σημείο σώματος	Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες		Συντεταγμένες	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
κεφάλι - αν. σημείο	-11,08	1,65	-11,01	1,68	-10,94	1,70	-10,87	1,71	-10,81	1,73	-10,75	1,73	-10,44	1,82
κεφάλι - κατ. σημείο	-11,11	1,43	-11,02	1,46	-10,97	1,46	-10,89	1,48	-10,83	1,48	-10,79	1,49	-10,46	1,60
Α-δάκτυλο ποδιού	-11,35	0,44	-11,22	0,42	-11,05	0,39	-10,90	0,38	-10,75	0,37	-10,60	0,40	-10,05	0,48
Α-πτέρνα	-11,32	0,65	-11,23	0,62	-11,10	0,62	-11,01	0,57	-10,91	0,56	-10,78	0,53	-10,29	0,49
Α-αστράγαλος	-11,26	0,61	-11,17	0,63	-11,02	0,61	-10,95	0,58	-10,82	0,57	-10,71	0,57	-10,23	0,56
Α-γόνατο	-10,88	0,72	-10,79	0,76	-10,70	0,80	-10,62	0,84	-10,56	0,87	-10,47	0,89	-10,15	0,97
Α-ισχίο	-11,23	0,94	-11,17	0,96	-11,09	0,95	-11,02	0,98	-10,96	0,99	-10,88	0,99	-10,57	1,09
Α-ώμος	-11,13	1,40	-11,11	1,44	-11,03	1,45	-10,97	1,48	-10,89	1,47	-10,87	1,48	-10,53	1,58
Α-αγκώνας	-11,32	1,20	-11,28	1,23	-11,24	1,26	-11,18	1,29	-11,16	1,31	-11,10	1,34	-10,81	1,46
Α-καρπός	-11,38	0,98	-11,34	1,03	-11,31	1,06	-11,27	1,09	-11,23	1,14	-11,17	1,19	-10,88	1,35
Α-δάκτυλο χεριού	-11,46	0,89	-11,42	0,94	-11,42	0,99	-11,37	1,02	-11,32	1,07	-11,26	1,14	-10,97	1,30
Δ-δάκτυλο ποδιού	-11,26	0,01	-11,24	0,00	-11,25	0,00	-11,27	0,01	-11,24	0,00	-11,24	0,00	-11,18	0,19
Δ-πτέρνα	-11,49	0,04	-11,47	0,05	-11,47	0,06	-11,47	0,10	-11,44	0,12	-11,40	0,16	-11,21	0,40
Δ-αστράγαλος	-11,42	0,10	-11,40	0,11	-11,40	0,12	-11,40	0,14	-11,36	0,14	-11,32	0,18	-11,14	0,39
Δ-γόνατο	-11,20	0,49	-11,17	0,50	-11,16	0,51	-11,13	0,51	-11,10	0,53	-11,11	0,51	-10,77	0,63
Δ-ισχίο	-11,29	0,90	-11,22	0,91	-11,15	0,92	-11,07	0,93	-11,01	0,94	-10,94	0,95	-10,62	1,05
Δ-ώμος	-11,16	1,34	-11,08	1,38	-11,00	1,39	-10,92	1,39	-10,86	1,43	-10,75	1,42	-10,43	1,51
Δ-αγκώνας	-11,01	1,05	-10,91	1,09	-10,84	1,12	-10,74	1,15	-10,64	1,18	-10,59	1,19	-10,24	1,31
Δ-καρπός	-10,74	1,08	-10,65	1,13	-10,55	1,18	-10,51	1,21	-10,40	1,28	-10,32	1,30	-9,96	1,41
Δ-δάκτυλο χεριού	-10,58	1,10	-10,49	1,17	-10,40	1,23	-10,36	1,25	-10,26	1,32	-10,17	1,37	-9,79	1,45

Πίνακας 6: Σύνολο καταγεγραμμένων συντεταγμένων για τα καρέ του τμήματος σύγκρισης

Άξονας Χ							
Μέλος	Επεξήγηση	Pi (κοντινό)	Di(μακρινό)	Qi	Pi-(Pi-Di)*Qi	mi	(Pi-(Pi-Di)*Qi)*mi
Κεφάλι	Ανώτερο - Κατώτερο σημείο κεφαλιού	-10,46	-10,44	0,550	-10,45	0,083	-0,87
Κορμός	Ωμος - Ισχίο	-10,48	-10,60	0,445	-10,53	0,468	-4,93
A-Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	-10,53	-10,81	0,436	-10,65	0,033	-0,35
A-Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	-10,81	-10,88	0,430	-10,84	0,019	-0,21
A-Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	-10,88	-10,97	0,468	-10,92	0,007	-0,08
A-Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	-10,57	-10,15	0,433	-10,39	0,105	-1,09
A-Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	-10,15	-10,23	0,434	-10,18	0,048	-0,49
A-Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	-10,29	-10,05	0,500	-10,17	0,014	-0,14
Δ-Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	-10,43	-10,24	0,436	-10,35	0,033	-0,34
Δ-Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	-10,24	-9,96	0,430	-10,12	0,019	-0,19
Δ-Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	-9,96	-9,79	0,468	-9,88	0,007	-0,07
Δ-Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	-10,62	-10,77	0,433	-10,69	0,105	-1,12
Δ-Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	-10,77	-11,14	0,434	-10,93	0,048	-0,52
Δ-Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	-11,21	-11,18	0,500	-11,19	0,014	-0,16
Χ κέντρου μάζας							-10,56
Άξονας Υ							
Μέλος	Επεξήγηση	Pi (κοντινό)	Di(μακρινό)	Qi	Pi-(Pi-Di)*Qi	mi	i-(Pi-Di)*Qi)*mi
Κεφάλι	Ανώτερο - Κατώτερο σημείο κεφαλιού	1,60	1,82	0,550	1,72	0,083	0,14
Κορμός	Ωμος - Ισχίο	1,54	1,07	0,445	1,33	0,468	0,62
A-Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	1,58	1,46	0,436	1,53	0,033	0,05
A-Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	1,46	1,35	0,430	1,41	0,019	0,03
A-Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	1,35	1,30	0,468	1,32	0,007	0,01
A-Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	1,09	0,97	0,433	1,04	0,105	0,11
A-Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	0,97	0,56	0,434	0,80	0,048	0,04
A-Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	0,49	0,48	0,500	0,49	0,014	0,01
Δ-Βραχίονας	Ωμος - Αγκώνας	1,51	1,31	0,436	1,42	0,033	0,05
Δ-Αντιβράχιο	Αγκώνας - Καρπός	1,31	1,41	0,430	1,35	0,019	0,03
Δ-Άκρο χέρι	Καρπός - Άκρη Δαχτύλων	1,41	1,45	0,468	1,43	0,007	0,01
Δ-Μηρός	Ισχίο - Γόνατο	1,05	0,63	0,433	0,87	0,105	0,09
Δ-Κνήμη	Γόνατο - Ποδοκνημική	0,63	0,39	0,434	0,52	0,048	0,03
Δ-Άκρο πόδι	Φτέρνα - Άκρη Δαχτύλων	0,40	0,19	0,500	0,30	0,014	0,00
Υ κέντρου μάζας							1,21

Πίνακας 7: Παράδειγμα υπολογισμού συντεταγμένων κέντρου μάζας για το καρέ Νο 80

Από αυτή τη διαδικασία προέκυψε ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας με τις συντεταγμένες του κέντρου μάζας σώματος σε όλα τα καρέ του τμήματος σύγκρισης:

Καρέ	Συντεταγμένες ΚΜΣ	
	Χκμ	Υκμ
57	-12,06	1,00
60	-11,85	0,99
62	-11,72	0,96
64	-11,60	0,98
65	-11,54	1,00
67	-11,40	1,01
68	-11,33	1,02
69	-11,28	1,03
70	-11,21	1,04
71	-11,15	1,06
72	-11,08	1,07
73	-11,01	1,09
74	-10,95	1,10
75	-10,88	1,11
80	-10,56	1,21

Πίνακας 8: Συντεταγμένες κέντρων μάζας για τα καρέ του τμήματος σύγκρισης

Γ.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΝΤΕΟ ΚΑΜΕΡΩΝ GOPRO

Έγινε προσπάθεια ώστε η προτεινόμενη μέθοδος να εφαρμοστεί και με τα δύο βίντεο από τις δύο GoPro Hero 4 Black που λήφθηκαν για ξεχωριστό άλμα, εκτός της διαδικασίας σύγκρισης. Οι προσπάθεια αυτή δεν ευδοκίμησε διότι το φωτογραμμετρικό πρόγραμμα PhotoScan δεν έβγαλε σε καμία δοκιμή καλό αποτέλεσμα μετά την εντολή για εφαρμογή του αυτοματοποιημένου αλγορίθμου. Πιθανολογείται ότι για αυτό ευθύνεται η διαφορετική διάταξη των αντικειμένων στο χώρο, μιας και είχαν αφαιρεθεί οι σιδερένιοι στύλοι και τα εμπόδια που βρίσκονταν φόντο της κίνησης, ή το είδος του φακού. Ως συμπέρασμα, δε συνίσταται η χρήση τους σε μελλοντική εφαρμογή της μεθόδου. Αντ' αυτού, προτείνεται η χρήση καμερών υψηλής συχνότητας βιντεοσκόπησης, που παράλληλα παρέχουν δυνατότητα χειροκίνητης ρύθμισης βασικών παραμέτρων.

Στα στενά χρονικά πλαίσια της παρούσας διπλωματικής δεν εξετάστηκε η χρήση των ταυτόχρονων καρτέ για στερεοσκοπική παρατήρηση. Για μελλοντική έρευνα, συνίσταται η αξιοποίηση τους σε κάθε διάταξη που προσφέρει τη δυνατότητα στερεοσκοπικής παρατήρησης σε προσανατολισμένα ζεύγη και εργαλεία για τη μέτρηση της τρίτης διάστασης.



Εικόνα 29: παράδειγμα ταυτόχρονων καρτέ από GoPro

Γ.4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Γ.4.1. Κινηματικά στοιχεία στο τμήμα σύγκρισης

Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της κινηματικής ανάλυσης που αφορούν το τμήμα σύγκρισης, τόσο από την προτεινόμενη όσο και από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Αυτά είναι τα εξής:

- ❖ για το τελευταίο καρέ στήριξης στο έδαφος: η γωνία απογείωσης το ύψος του κέντρου βάρους και η συνολική ταχύτητα.
- ❖ ο χρόνος επαφής για το κουτσό
- ❖ τα διαγράμματα οριζόντιων και κάθετων ταχυτήτων

Το τελευταίο καρέ στήριξης στο έδαφος είναι το Νο 76. Ωστόσο, το συγκεκριμένο καρέ έχει απορριφθεί λόγω κακής ανάλυσης. Συνεπώς συγκρίθηκαν τα στοιχεία από το καρέ Νο 75 και το χρονικά αντίστοιχο από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Για το συγχρονισμό των συστημάτων θεωρήθηκε ότι το πρώτο καρέ του τμήματος σύγκρισης ταυτίζεται χρονικά με το αντίστοιχο πρώτο καρέ της χρησιμοποιούμενης μεθόδου.

	Frame	t sec	V _x (m/s)	V _y (m/s)	V (m/s)	Υ _{κμ} (m)	Γωνία απογείωσης (deg)	Χρόνος επαφής
Χρ. μέθοδος	46	0,15	8,541	2,592	8,926	1,101	16,88	0,137
Πρ. μέθοδος	75	0,149	7,88	0,69	7,91	1,11	5,3	0,132

Πίνακας 9: Πίνακας σύγκρισης στοιχείων κινηματικής ανάλυσης

Υπάρχει σημαντική απόκλιση στα αποτελέσματα της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα Y και της γωνίας απογείωσης, ο υπολογισμός της οποίας περιέχει τη V_y:

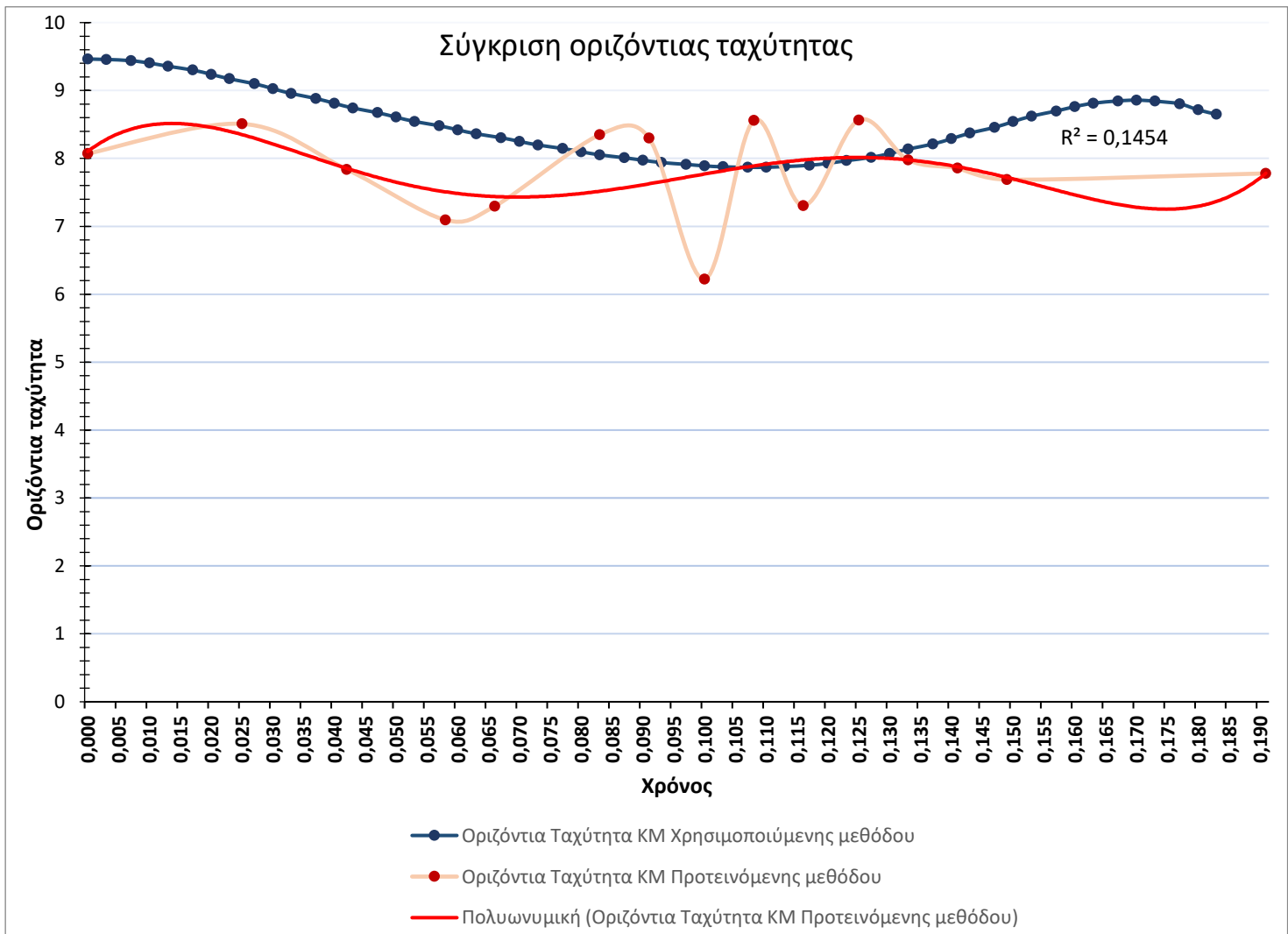
Γωνία απογείωσης = $\arctan(V_y/V_x)$, και στη συνέχεια μετατροπή σε μοίρες

Η υπολογισμένη τιμή από την προτεινόμενη μέθοδο δεν έχει ορθή φυσική σημασία.

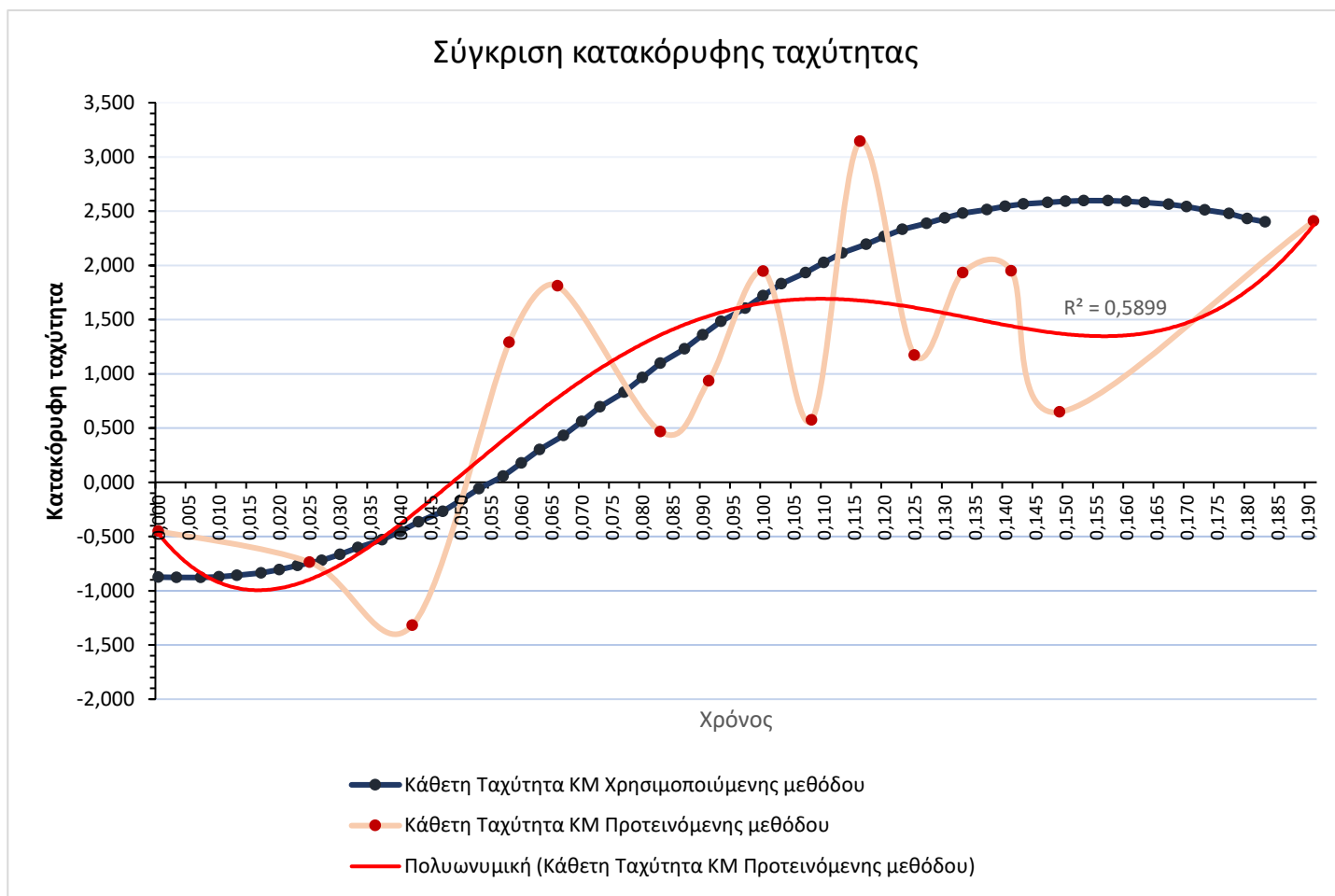
Αντίθετα, οι τιμές που προέκυψαν για τη θέση του κέντρου μάζας στον κατακόρυφο άξονα είναι πολύ κοντινές, με ποσοστιαίο σχετικό σφάλμα 1%. Το πόδι του αθλητή έχει επαφή με το έδαφος για 16 frames (60-76), άρα ο χρόνος επαφής είναι $16 \cdot 0,0083 = 0,132$ δευτ. , κοντά στην τιμή που υπολογίστηκε στη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Ακολουθούν ο πίνακας υπολογισμού των ταχυτήτων και τα διαγράμματα σύγκρισης των ταχυτήτων κατά X και Y που προέκυψαν από τις δύο μεθόδους:

Καρέ	ΔX	ΔY	t	Vx	Vy	V
57	0,067	-0,004	0,000	8,070232	-0,450857	8,082816
60	0,212	-0,018	0,025	8,508871	-0,736727	8,540706
62	0,130	-0,022	0,042	7,837824	-1,316714	7,947655
64	0,118	0,021	0,058	7,094431	1,2903597	7,210824
65	0,061	0,015	0,066	7,296825	1,8109127	7,518182
67	0,139	0,008	0,083	8,348099	0,4678803	8,3612
68	0,069	0,008	0,091	8,29872	0,9355475	8,351287
69	0,052	0,016	0,100	6,222244	1,9454219	6,519278
70	0,071	0,005	0,108	8,557434	0,5740247	8,576665
71	0,061	0,026	0,116	7,303973	3,143608	7,951748
72	0,071	0,010	0,125	8,563981	1,1723118	8,643846
73	0,066	0,016	0,133	7,977817	1,9331916	8,208703
74	0,065	0,016	0,141	7,85551	1,9504182	8,09402
75	0,064	0,005	0,149	7,688182	0,6477577	7,715422
80	0,323	0,100	0,191	7,779168	2,4087385	8,143554

Πίνακας 10: Πίνακας υπολογισμού ταχυτήτων



Διάγραμμα 3: Σύγκριση οριζοντίων ταχυτήτων προτεινόμενη και χρησιμοποιούμενης μεθόδου



Διάγραμμα 4: Σύγκριση κατακόρυφων ταχυτήτων προτεινόμενη και χρησιμοποιούμενης μεθόδου

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων επιλέχθηκε μία πολυωνυμική γραμμή τάσης 5^{ου} βαθμού, λόγω της αρκετά μεγάλης διακύμανσης που παρουσιάζουν τα δεδομένα. Η μεγάλη διακύμανση των δεδομένων είναι συχνό φαινόμενο στην κινηματική ανάλυση. Οφείλεται συνήθως στα σφάλματα που προκύπτουν κατά την ψηφιοποίηση και αντιμετωπίζεται με την εφαρμογή φίλτρων και γραμμών εξομάλυνσης. Οι τιμές R^2 δείχνουν ότι οι γραμμές τάσεις δεν έχουν καλή προσαρμογή στα δεδομένα, αφού με τιμές 0,1454 και 0,5899 απέχουν αμφότερες από τη μονάδα.

Γ.4.2. Στοιχεία κινηματικής ανάλυσης στο σύνολο του άλματος

Πέρα από το τμήμα σύγκρισης, με άμεσες μετρήσεις στο λογισμικό σχεδίασης προσδιορίστηκαν κάποια χρήσιμα στοιχεία κινηματικής ανάλυσης που αναλύονται στον παρακάτω πίνακα:

Επίσημη Μέτρηση Απόστασης	12,53	η επίσημη μέτρηση του άλματος
Πραγματική Απόσταση	12,75	η απόσταση από άκρη του παπουτσιού έως το ίχνος της προσγείωσης
Απώλεια	0,22	η διαφορά των παραπάνω δύο
Προτελευταίο Βήμα	2,23	το μήκος του προτελευταίου διασκελισμού
Τελευταίο Βήμα	2,16	το μήκος του τελευταίου διασκελισμού
Κουτσό	4,65	το μήκος στο κουτσό
Βήμα	3,63	το μήκος στο βήμα
Άλμα	4,47	το μήκος στο άλμα
% Κουτσό	36,5	το % ποσοστό του κουτσού ως προς την πραγματική απόσταση
% Βήμα	28,5	το % ποσοστό του βήματος ως προς την πραγματική απόσταση
% Άλμα	35,1	το % ποσοστό του άλματος ως προς την πραγματική απόσταση
Τεχνική	Στηριγμένη στο κουτσό (διαφορά 4%)	χαρακτηρίζεται ως στηριγμένη στο κουτσό, στηριγμένη στο άλμα ή ισορροπημένη με βάση τη διαφορά στο σχετικό ποσοστό (το όριο της ισορροπημένης είναι 2%)
χρόνος επαφής - κουτσό	0,132	ο χρόνος που διήρκησε η επαφή με το έδαφος στο κουτσό
χρόνος πτήσης - κουτσό	0,457	ο χρόνος που ο αθλητής αιωρούνταν στο κουτσό
χρόνος επαφής - βήμα	0,175	ο χρόνος που διήρκησε η επαφή με το έδαφος στο βήμα
χρόνος πτήσης - βήμα	0,365	ο χρόνος που ο αθλητής αιωρούνταν στο βήμα
χρόνος επαφής - άλμα	0,166	ο χρόνος που διήρκησε η επαφή με το έδαφος στο άλμα
χρόνος πτήσης - άλμα	0,556	ο χρόνος που ο αθλητής αιωρούνταν στο άλμα

Πίνακας 11 : Στοιχεία κινηματικής ανάλυσης από όλο το μήκος του άλματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εκτιμάται ότι ο αρχικός στόχος της διπλωματικής εργασίας, δηλαδή η αξιοποίηση των εργαλείων της φωτογραμμετρίας για την ανάπτυξη μίας μεθόδου κινηματικής ανάλυσης στο άλμα τριπλούν, επιτεύχθη.

Αντίθετα, δε συνέβη το ίδιο με το στόχος της συγκριτικής αξιολόγησης της μεθόδου. Στην πειραματική εφαρμογή παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα σχετικά με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και τις συνθήκες κάτω από τις οποίες έγινε η σύγκριση με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο.

- ❖ Η επιλογή του iPhone 7 plus ως κάμερα καταγραφής αποδείχτηκε προβληματική, λόγω της αστάθειας της εστίασης. Η μείωση των διαθέσιμων καρέ, και η μειωμένη ανάλυση της πλειονότητας από τα καρέ που έμειναν, προκάλεσε δυσχέρεια σε όλη διαδικασία της επεξεργασίας. Επίσης, αποτέλεσε πηγή σφαλμάτων αφού επηρέασε την ανάλυση της καταγραφής του αθλητή, άρα και την έκβαση της χειροκίνητης ψηφιοποίησης.
- ❖ Στη συνέχεια, το τεχνικό πρόβλημα που κατέστησε άχρηστη τη μία από τις δύο σταθερές κάμερες της χρησιμοποιούμενης μεθόδου, μείωσε το τμήμα σύγκρισης σε ένα πολύ μικρό τμήμα του άλματος, αυτό του πατήματος στη βαλβίδα, το οποίο δεν ήταν ικανό να δώσει μια συνολική εικόνα σύγκρισης των μεθόδων, παρά μόνο αποκλίσεις σε κάποιες τιμές.
- ❖ Επίσης, ο διαθέσιμος εξοπλισμός αποτέλεσε τροχοπέδη για τη σύγκριση επί ίσοις όροις. Η κάμερα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου είχε υποδιπλάσια συχνότητα από την κάμερα της χρησιμοποιούμενης μεθόδου.
- ❖ Τέλος, η διαδικασία της χειροκίνητης ψηφιοποίησης των αρθρώσεων έγκειται στην εμπειρία του χειριστή. Συνεπώς η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα είχε μεγαλύτερη αξιοπιστία εάν ο χειριστής ήταν ο ίδιος και στις δύο μεθόδους.

Όλα αυτά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν αποτελούν χρήσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση του πλαισίου μέσω του οποίου γίνεται η σύγκριση, στην επόμενη πειραματική εφαρμογή της σχεδιασμένης μεθόδου.

Κρίνεται, ότι η εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε δεν μπορεί να βγάλει ασφαλή και αξιόπιστα αποτελέσματα για ερευνητικούς σκοπούς, ειδικά ως προς τον υπολογισμό των ταχυτήτων. Ωστόσο, αποτελεί ακόμα ένα χρήσιμο εργαλείο για την εξαγωγή προπονητικών συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ε: ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η προτεινόμενη μέθοδος σχεδιάστηκε εξ αρχής με σκοπό την αξιοποίηση των εργαλείων της φωτογραμμετρίας στην κινηματική ανάλυση, λαμβάνοντας ως υπόθεση εργασίας το άλμα τριπλούν. Βασικές αρχές του σχεδιασμού της μεθόδου, μεταξύ άλλων, αποτέλεσαν τόσο το χαμηλό κόστος διεξαγωγής των μετρήσεων, όσο και η δυνατότητα γρήγορης εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων. Ωστόσο, καθώς η δοκιμή έγινε στα στενά χρονικά πλαίσια μίας διπλωματικής εργασίας και χωρίς την ασφάλεια κάποιας πρότερης δοκιμής της μεθόδου, παρουσιάζονται σίγουρα δυνατότητες βελτίωσης. Επιπλέον, παρουσιάζονται προτάσεις για εναλλακτική χρήση της μεθόδου.

Προτάσεις βελτίωσης

Μέσω της εισαγωγής αυτοματοποιημένου αλγορίθμου μπορεί να καταστεί δυνατή η αυτόματη τοποθέτηση μασκών, η οποία για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας έγινε χειροκίνητα. Η αυτόματη τοποθέτηση θα συνεισφέρει στην εξοικονόμηση χρόνου κατά τη διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων. Μία μέθοδος ευρείας χρήσης για την εισαγωγή αυτόματων μασκών αποτελεί η κατάτμηση εικόνας (image segmentation), όπως αυτή χρησιμοποιείται και στο πεδίο της μηχανικής όρασης (computer vision).

Επιπλέον, προτείνεται η χρήση κωδικοποιημένων στόχων με βάση τις προδιαγραφές του φωτογραμμετρικού λογισμικού, ώστε να αποφευχθεί η χειροκίνητη σκόπευση και να ελαττωθεί η πιθανότητα σφάλματος. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί στο μέγεθος των κωδικοποιημένων στόχων, σύμφωνα με τις οδηγίες που συνοδεύουν το εκάστοτε λογισμικό.

Καθώς η διαδικασία σκόπευσης των αρθρώσεων του σώματος αποτελεί την πλέον χρονοβόρα διαδικασία στην εφαρμογή της μεθόδου, πεδίο έρευνας θα μπορούσε να αποτελέσει η ανάπτυξη προγράμματος αυτόματου εντοπισμού υψηλής ακρίβειας των αρθρώσεων του σώματος σε κάθε καρέ.

Για την ικανοποίηση της αρχής του χαμηλού κόστους, θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί και η εφαρμογή της μεθόδου με ανοιχτά λογισμικά φωτογραμμετρικής επεξεργασίας και σχεδίασης.

Προτάσεις αξιοποίησης

Τέλος, λόγω του σχεδιασμού που ακολουθήθηκε εξ αρχής στη στοιχειοθέτηση της μεθόδου, είναι εφικτή η προσαρμογή της σε οποιοδήποτε άθλημα ακολουθεί γραμμική διεργασία, για την εξαγωγή ασφαλών και αξιοποιήσιμων προπονητικά συμπερασμάτων.

Προτείνεται η επέκταση της έρευνας σε εφαρμογές που αξιοποιούν νέα εργαλεία που παρέχει η επιστήμη της φωτογραμμετρίας για την εξαγωγή κινηματικής ανάλυσης σε αθλητική κίνηση.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Allen Samuel James, 2009, Doctoral Thesis: Optimisation of performance in the triple jump using computer simulation, Loughborough University
- [2] Bartlett, 1997-2007, Introduction to Sports Biomechanics Analysing Human Movement Patterns, Routledge
- [3] Eline van der Kruk & Marco M. Reijne, 2018, Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review, European Journal of Sport Science, 18:6, 806-819, DOI: [10.1080/17461391.2018.1463397](https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397)
- [4] German Athletics Federation, 2009, Biomechanical Analyses of selected events at the 12th IAAF World Championships in Athletics, Berlin, 15-23 August 2009
- [5] Hay James G., 1991, The biomechanics of the triple jump: A review, Journal of Sports Sciences, 10:4, 343-378, DOI: [10.1080/02640419208729933](https://doi.org/10.1080/02640419208729933)
- [6] IAAF, 2008, Track and Field Facilities Manual Edition
- [7] Marey Etienne-Jules - Pritchard Eric, 1895, Movement, New York: D. Appleton and Company
- [8] Muybridge Eadweard, 1887, Animal Locomotion, Philadelphia: Photogravure Company of New York
- [9] Plagenhoef Stanley, Gaynor Evans F. & Abdelnour Thomas, 1983, Anatomical Data for Analyzing Human Motion, Research Quarterly for Exercise and Sport, 54:2, 169-178, DOI: [10.1080/02701367.1983.10605290](https://doi.org/10.1080/02701367.1983.10605290)
- [10] Tucker A., Nicholson G., Cooke M., Bissas A., Merlino S., 2018, Biomechanical report for the IAAF World Championship London 2017: Men's triple jump, IAAF - Leeds Beckett University
- [11] Κέλλης Ελευθέριος, Αθλητική εμβιομηχανική Ι : Αρχές και μεθοδολογία εμβιομηχανικής ανάλυσης της κίνησης
- [12] Κόλλιας Α. Ηρακλής, 1997, Βιοκινητική της αθλητικής κίνησης
- [13] Μαγκαφώση Αντωνία, 2018, Διερεύνηση συστήματος αισθητήρων για την τρισδιάστατη καταγραφή κινούμενων αντικειμένων
- [14] Μαντζώρου Γεωργία, 2016, Ανάπτυξη αυτοματοποιημένης μεθόδου για τη μέτρηση επιδόσεων αλμάτων μέσω ψηφιακών εικόνων

[15] Τσαμπουνάρης Γεώργιος Κ., 2017, ChoreoMorphy: Σχεδίαση και ανάπτυξη διεπαφής για την ολόσωμη καταγραφή και οπτικοποίηση της κίνησης σε πραγματικό χρόνο

[16] Πατιάς Π., 1991, Εισαγωγή στη Φωτογραμμετρία, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη

[17] Πέτσα Ε., 2000, Θεμελιώδεις Έννοιες και Θεμελιώδη Προβλήματα της Φωτογραμμετρίας

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

[1] Simi Motion, Reality Motion Systems, <http://www.simi.com/en/>

[2] Optotrak, <https://www.ndigital.com/msci/products/optotrak-certus/>

[3] Optitrack, <https://optitrack.com/motion-capture-movement-sciences/>

[4] Vicon, <https://www.vicon.com/motion-capture/biomechanics-and-sport>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Table 1. General table: specifications of the manufacturers on the measurement systems. Given are the weight and size of the sensors and system, the type of sensor, and the maximum capture volume, number of markers, and sample frequency. The maximum capture volume and sample frequency are given for one camera or sensor; if a system is not restricted by the limitations of the number of sensors, this is indicated by '∞'. * indicates that the system was used in sport applications, but the accuracy was determined in a different context (found via reference list of paper).

System	2D/ 3D	location (l) / motion (m)	Real time	Environment		Marker						Maximum								
				Indoor	Outdoor	Dimensions	Weight	Active	Passive	Markerless	Sensor	Marker	Tag	Capture volume (1 camera)	Cameras	Markers	Sensors	Tags	Sampling frequency	
Optoelectronic (OMS)																				
Optotrak 3020	3D	m	Yes	x	–		<10 g	x	–	–	–	Infrared LED	–	3.6 × 2.6 × 3.7 m	8	512	–	–	3500 /(number of markers + 1) Hz	
Vicon 460 (datastation)	3D	m	Yes	x	x (*not broad daylight)	3–25 mm	<10 g	–	x	–	–	Reflective	–	(depending on lens)	6	∞	–	–	2000 Hz	
Vicon T-40	3D	m	No	x (*underwater)	x (*not broad daylight)	3–25 mm	<10 g	–	x	–	–	Reflective	–	(depending on lens)	10	∞	–	–	2000 Hz	
Vicon MX 13 & MX40 (cameras)	3D	m	No	x	x (*not broad daylight)	3–25 mm	<10 g	–	x	–	–	Reflective	–	(depending on lens)	>24	∞	–	–	2000 Hz	
iGPS	3D	m	Yes	x	x	Several sizes, starting at 80 × 20 × 20 mm	>30 g	x	–	–	–	Probe	–	–	55 m (circle)	∞	–	∞	–	50 Hz
Electromagnetic (EMS)																				
WASP	2D	l	Yes	x	x	90 × 50 × 25 mm	?	x	–	–	x	–	x	–	∞	–	∞	–	125 Hz	
LPM	2D	l	–	x	x	9.2 × 5.7 × 1.5 cm	60 g	x	–	–	x	–	x	–	∞	–	∞	–	1000 Hz	
RFID carpet	2D	l	–	x	–	8.5 × 5.5 cm	–	–	x	–	x	–	x	–	∞	–	∞	–	Dependent on reader	
RTK GNSS (Javad Alpha- G3 T)	3D	l	No	–	x	148 × 85 × 35 mm	430 g	x	–	–	x	–	–	–	∞	–	∞	–	50 Hz	
Ubisense, Series 700 IP	3D	l	Yes	x	x(?)	40 × 40 × 10 mm	–	x	–	–	x	–	x	–	∞	–	∞	–	10 Hz	
Image processing (IMS)																				
Panning camera, Custom tracking algorithm	3D	m	No	x	–	–	–	–	–	–	x	–	–	Camera dependent	1	–	–	–	?	
Color cameras combined with custom tracking algorithm	3D	m	No	x	–	–	–	–	–	–	x	–	–	Camera dependent	1	–	–	–	200 Hz	
Kinect	3D	m	Yes	x	–	–	–	–	–	–	x	–	–	1.8 × 2×2.8 m Camera dependent	1	–	–	–	30 Hz	
LaBacs	3D	m	–	x	–	–	–	x	–	–	–	LED	–	–	2	12	–	–	100 Hz	
Ultrasonic (UMS)																				
WSN Inertial (InMS)	3D	l	No	x	x	–	–	x	–	–	–	–	x	–	–	–	–	–	–	
Fusion (FMS)																				
GPS, single frequency (u- blox AEK4) + MEMS IMU (Xsens Mti)	3D	m	No	–	x	50 × 56 × 32 mm (IMU) + 12.2 × 16 × 2.4 mm (u- blox)	75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	∞	–	GPS: 1 Hz, MEMS-IMU (2 kHz)	
Rolling Motion Capture system: SimiMotion 7.0 (Basler A602f)	3D	m	No	X	X	3–25 mm	<10 gr	–	X	–	–	Reflective	–	System rolls along	Depending on system	–	–	–	30 Hz	

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά συστημάτων που εντάσσονται στην έρευνα των Eline van der Kruk & Marco M. Reijnen

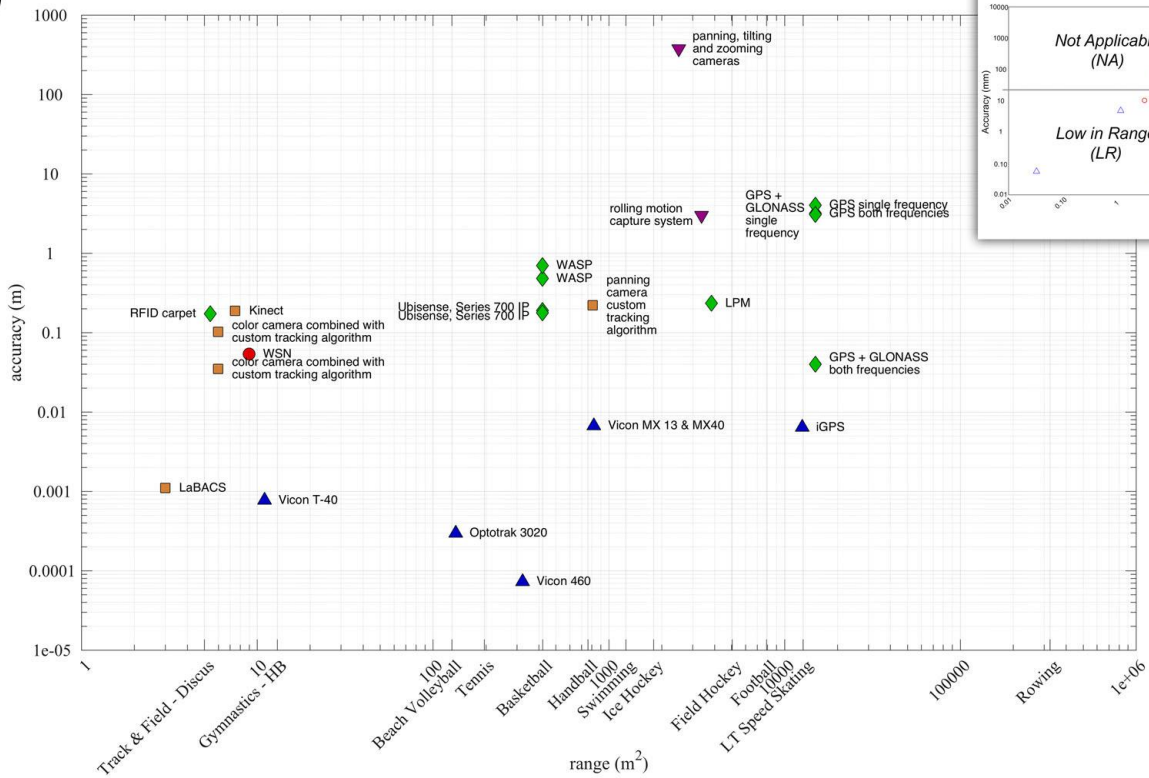
Table 2. Accuracy table: measurement systems and their accuracy in a certain range, as reported in peer-reviewed articles (column 2). The specifications of the experiment set-up are given in columns 3–7. The last two columns (12–13) report the range and accuracy that are adopted in the chart of Figure 1; chosen for this purpose was the maximum reported range (column 9), with the accuracy at 95% confidence interval (P_{95}) (column 10). If the reported statistical values (column 8) did not permit the estimation of P_{95} , this is indicated as a comment in column 11. Note that the maximum range in the peer-reviewed articles is not the maximum capture volumes of a system (for this see the general Table I).

Study	System	Experiment									Range (m ²)	Accuracy (m)
		Cameras	Markers	Sampling freq	Reference	Movement	Statistical value	Range/volume/area (m)	Reported accuracy	Comments		
Optoelectronic (OMS)												
Maletsky et al. (2007) ^{8,9}	Optotrak 3020	3 (one unit)	2 × 6 (on each RB)	30 Hz	Machinist's rotary table (resolution 0.005*) and linear slide and a sensor (reported resolution 0.006 mm)	Static relative position between two rigid bodies	Mean difference (SD)	Range: 1.75, 2.50, 3.25, 4.00, 4.75 m	Translation, in-plane 0.036 (0.109) mm, out-of-plane 0.017 (0.108) mm. Orientation, in-plane 0.119 (0.508) deg, out-of-plane 0.070 (0.591) deg	Accuracy is of all data, 24 independent trials at each distance	13.5	0.000297
Windolf et al. (2008) ¹²	Vicon 460	4	4 (diameter 25 mm)	120 Hz	Servo-motor-driven sliding carriage (reported accuracy 15 μm)	Small translational movements	RMSE (SD)	0.18 × 0.18 × 0.15 m			0.0324	0.000073
Monnet et al. (2014) ²	Vicon T-40	8	10	200 Hz	Rigid bar	Front crawl swimming (underwater)	RMSE	1.1 × 1x1 m	6.5 mm underwater, 0.77 mm in air	Only RMSE	1.1	0.00077
Spörri et al. (2016) ¹⁰	Vicon MX 13 & MX40	24	51 (Plug-in-gait marker set + skis and poles); 3 on magic wand	250 Hz	Direct caliper measurements of rigid boot and magic wand	Alpine skiing	Mean difference (SD)	41.2 × 20 m	Wand: 0.6 (0.4) mm fixed boot: 2.3 (2.2) mm (at 24.5 km/h)		824	0.0067
Van der Kruk (2013 a,b) ¹⁹	iGPS (Nikon)	8	2	30 Hz	Calibration frame	Cycling on ice rink (25 km/h)	mean(SD)	70 m x 180 m	3.0 (1.7) mm	Many gaps in the data in dynamic measurements	12,600	0.0064
Electromagnetic (EMS)												
Hedley et al. (2010) ²⁷	WASP	12	2	10 Hz	Distance between two tags attached to a piece of wood	Quickly walking around	SD	28 × 15 m	0.24 m	Indoor Basketball field, only SD	420	0.48
Sathyan et al. (2012) ²⁹	WASP	12	3	10 Hz	Relative position between two tags fixed to a ruler attached to the upper back of each participant	Run and sprint, straight and agility test course (length approx 28 m)	Cumulative density function	28 × 15 m	Indoor, linear: 0.7 m, indoor, non-linear: 0.3 m, outdoor, linear: 0.25 m, outdoor non-linear: 0.25	Accuracies are read from probability density graph at 95%	420	0.7
Ogris et al. (2012) ³	LPM	12	1	45.45 Hz	Vicon (8 cameras, 24 × 26.5 m) (reported accuracy of ...)	Small side soccer game (2 × 2, 2 × 3 or 3 × 3)	RMSE	80 × 48 m	0.234 m (at 23 km/h)	Only RMSE	3840	0.234
Shirehjini et al. (2012) ³⁰	RFID carpet	4	585	–	Unknown	Ten static positions with different orientations	mean error (SD)	3 × 1.8 m	Position: 6.5 (5.4) cm, orientation: 0.96 (4.9) deg		5.4	0.173
Rhodes et al. (2014) ³²	Ubisense, Series 700 IP	6	3	Sensors: 137 Hz, tags: 16 Hz	Position: laser total station (Leica TS-30, reported accuracy 0.004 m), velocity: wireless timing gates (Browser Timing Systems)	Position: static, velocity: maximum sprint and multidirectional (wheelchair rugby) in indoor sports hall equipped with wooden sprung flooring	mean error (SD)	28 × 15 m	Position: 0.19 m, velocity sprint: 4.00 (0.009) m/s, velocity multidirectional movements: 2.07 (0.13 m/s)	System focusses more on measuring distance and velocity instead of position.	420	0.19
Perrat et al. (2015) ³¹	Ubisense, Series 700 IP	5	9	tags: (3 x 16 Hz, 3 x 8 Hz and 3 x 4 Hz)	Leica TS-30 (reported accuracy 3 mm)	Practice wheelchair rugby match	mean error (SD)	28 × 15 m	0.37 (0.24) m		420	0.1776
Gilgien et al. (2014) ⁴	RTK GNSS (Javad Alpha-G3 T)	3	–	50 Hz	GPS + Gionass dual frequency at circular elevation angle of 10 deg (reported accuracy 0.075(0.025) m, based on photogrammetric reference system)	Alpine skiing giant slalom	(see below)	300 × 50 m (estimated from figure)	(see below)	Noted accuracy at 30 deg circular elevation angle		
–	GPS + GIONASS, both frequencies						mean error (SD)		0.02(0.01) m		15,000	0.04
–	GPS + GIONASS, single frequency						mean error (SD)		0.69(2.22) m		15,000	3.0636
–	GPS, both frequencies						mean error (SD)		0.47(1.35) m		15,000	3.17
–	GPS, single frequency						mean error (SD)		0.70(1.67) m		15,000	4.04

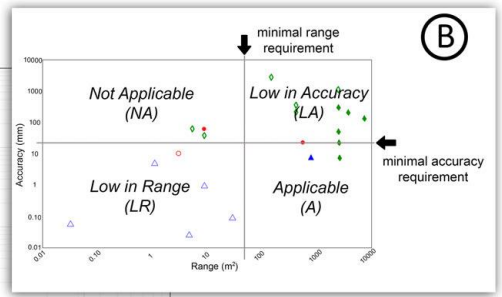
Experiment												
Study	System	Cameras	Markers	Sampling freq	Reference	Movement	Statistical value	Range/volume/area (m)	Reported accuracy	Comments	Range (m ²)	Accuracy (m)
Image processing (IMS)												
Liu et al. (2009) ⁴⁰	Panning camera, custom tracking algorithm	1	14		–	Static markers on short-track rink	RMSE (SD)	Short-track rink (45 × 18 m)	x-direction: 0.22 m, y-direction: 0.19 m	Average of 14 markers (table 4 in Rosenhahn, 2006)	810	0.22
Corazza et al. (2010) ⁸	Colour cameras combined with custom tracking algorithm	4	–	60 Hz	12 camera Vicon system (120 Hz), marker protocol proposed by manufacturer	Walking	mean absolute error (SD)		79 (11.5) mm	Data used from HumanEva database	6	0.102
Corazza et al. (2010) ⁸	Colour cameras combined with custom tracking algorithm	8	–	120 Hz	8 camera Qualysis system (120 Hz), point cluster technique protocol	Walking	mean absolute error (SD)		15 (10) mm	Range estimated based on 'backwards gymnastic flip'	6	0.035
Dutta (2012) ^{* 41}	Kinect	1	–	30 Hz	7 camera Vicon system (3 MX 3 + 4 MX 40 cameras, 100 Hz)	104 static positions of 10 cm large cubes	RMSE (SD)	range: 1–3.6 m, volume: prism from 1.02–3.06 × 2 × 0.71–2.13	x-direction: 0.0169 (0.0299) m, y-direction: 0.0348 (0.0765) m, z-direction: 0.0141 (0.0250) m (lowest–highest velocity)		7.5	0.1878
Stancic et al. (2013) ^{* 14}	LaBACS	2	2	100 Hz	Manipulator arm was rotated with precision servo motor controlled by ATMEGA 2560 microcontroller	Single degree of freedom rotation of rigid body with five increments of linear velocity from 0.5 to 2.5 m/s.	Mean difference	Not mentioned			3	0.0011
Klous et al. (2010) ³⁹	panning, tilting and zooming camera	5	25 mm squared markers (approx 100 markers)	50 Hz	fixed measured distance of markers on ski pole	5 ski-trials and 2 snowboard trials, slope inclination was uniformly 21 deg. One turn.	Average difference (SD)	35 × 15 m	31 (3.3) mm		2500	0.0376
Ultrasonic (UMS)												
Bischoff et al. (2012) ^{* 46}	WSN	2 transmitters, 5 receivers	–		–	8 static positions	RMSE (SD)	3 × 3 m	4.21 (0.57) cm	Fusion Ultrasound + radiofrequency	9	0.0535
Fusion (FMS)												
Waegli and Skaloud (2009) ⁵	GPS, single frequency (u-blox AEK4) + MEMS IMU (Xsens Mt)	GPS + 1 MEMS IMU	–	GPS: 1 Hz, MEMS-IMU (100 Hz)	GPS + GLONASS, dual frequency (Javad) and tactical grade IMU (LN200), reported accuracy 5 cm (position), 2 cm/s (velocity), 0.01 deg (roll, pitch) and 0.03 deg (heading).	Six downhill skiing runs of approximately 1 min length performed by a professional skier	RMSE	400*450	Position: 0.65 m, velocity: 0.15 m/s, orientation: 1.6 deg	Accuracy read from graph, accuracy determined by manufacturer software, reduced the number of satellites on purpose to evaluate performance with IMU fusion	180,000	0.65
Kersting et al. (2008) ¹⁶	Rolling Motion Capture system: SimiMotion 7.0 (Basler A602f) attached to moving frame	3	51	30 Hz	8-camera motion capture system Vicon MX	Rowing, nine elite level athletes in various boat categories were analysed during training and race pace	Mean joint centre	4.5*3*2.5 m	0.03 m	Exact verification process is unclear, prior work shows research set-up for gait (Begon et al., 2009)	33.75	0.03

Πίνακας 2: Πίνακας 1: Αναλυτικά στοιχεία και ακρίβεια συστημάτων που εντάσσονται στην έρευνα των Eline van der Kruk & Marco M. Reijne

(A)



(B)



- ▲ optoelectronic
- ◆ electromagnetic
- ultrasonic
- image processing
- ▼ fusion

Συγκριτικό διάγραμμα 2 μεταβλητών (ακρίβεια-περιοχή καταγραφής) με τα διαφορετικά συστήματα της έρευνας των Eline van der Kruck, Marco M. Reijne