



ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ
ΟΡΘΟΠΑΙΔΙΚΗ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ MARKERLESS ΚΑΙ
MARKER BASED ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΕ
ΥΓΙΑ ΑΤΟΜΑ»

ΝΙΚΟΣ ΠΑΤΤΑΣ

ΑΘΗΝΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2023

Copyright © Νίκος Πάττας

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος lgasavvidou@gmail.com
ος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Σημείωμα Συγγραφέα

Το δοκίμιο αυτό αποτελεί διπλωματική εργασία που συντάχθηκε για το Μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Εφαρμοσμένη Εμβιομηχανική και Βιοϋλικά στην Ορθοπαιδική» της Ιατρικής Σχολής – Α΄ Ορθοπαιδική Κλινική – Πανεπιστημιακό Γενικό Νοσοκομείο «Αττικών» – ΕΚΠΑ και υποβλήθηκε τον Απρίλιο του 2023.

Ο συγγραφέας βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο του παρόντος έργου είναι αποτέλεσμα προσωπικής εργασίας και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων -όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο-, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Γεννήθηκα και μεγάλωσα στο Ηράκλειο Κρήτης. Σπούδασα Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών στον Πανεπιστήμιο Κρήτης (2014-2020). Πραγματοποίησα την πρακτική μου άσκηση στο Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε), στο διάστημα 15 Ιουνίου έως 15 Αυγούστου του 2017 με επιβλέποντα τον Βλασσόπουλο Δημήτριο. Η έρευνα οδήγησε στην συγγραφή της εργασίας με τίτλο «*Συμπεριφορά του ιζώδους συναρτήσει τις πυκνότητας διασταυρωτών σε μικρογέλες PS*». Η διπλωματική μου εργασία (Φεβρουάριος 2018 – Σεπτέμβριος 2019) πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Οπτικής και Όρασης (Ι.Ν.Ο) με επιβλέποντες τους Παλλήκαρη Ιωάννη και Χατζηνικολαΐδου Μαρία και έφερε τίτλο «*Μηχανικές ιδιότητες φωτοπολυμεριζόμενων υλικών για ενδοφθάλμιες εφαρμογές*». Τον Οκτώβριο του 2021 ξεκίνησα την φοίτηση μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών με τίτλο «*Εφαρμοσμένη Εμβιομηχανική και Βιοϋλικά στην Ορθοπαιδική*» κατά την διάρκεια του οποίου πραγματοποιήθηκε η παρούσα εργασία. Από το 2021 ζω στην Αθήνα και εργάζομαι ως *Real Time VFX Artist* στο animation studio Number9 Greece.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης στην «Εφαρμοσμένη Εμβιομηχανική και Βιοϋλικά στην Ορθοπαιδική» που απονέμει η Ιατρική Σχολή του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών.

Εγκρίθηκε την.....από την εξεταστική επιτροπή:

Ηλίας Τσέπης

Καθηγητής Φυσικοθεραπείας, Τμήμα Φυσικοθεραπείας, Σχολή Επιστημών
Αποκατάστασης Υγείας Πανεπιστημίου Πατρών
(Επιβλέπων)

Υπογραφή

Όλγα Σαββίδου

Καθηγήτρια Ορθοπαιδικής, ΕΚΠΑ

Υπογραφή

Βασίλειος Νικολάου

Καθηγητής Ορθοπαιδικής, ΕΚΠΑ

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τσέπη Ηλία, την κυρία Ξέργια Σοφία, την κυρία Σαββίδου Όλγα και τον κύριο Νικολάου Βασίλειο για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν σε όλη την διάρκεια ολοκλήρωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους διδάσκοντες του μεταπτυχιακού προγράμματος αλλά και τους συμφοιτητές μου που αποτέλεσαν παράδειγμα και πηγή έμπνευσης κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την οικογένεια μου που αποτελούν στήριγμα σε κάθε στιγμή της ζωής μου και στην Μάρω που, δίχως την συνεισφορά της η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία έγινε η σύγκριση δύο συστημάτων καταγραφής κίνησης (motion capture). Του συστήματος optical motion capture VICON και του προγράμματος τεχνητής νοημοσύνης Pose2Sim (Pagnon et al., 2021) χρησιμοποιώντας πέντε κινητά τηλέφωνα (smartphones).

Για τις ανάγκες της εργασίας καταγράφηκαν δύο διαφορετικές κινήσεις (βαθύ κάθισμα και βήμα σε σκαλοπάτι) από τέσσερα υγιή άτομα ταυτόχρονα με το σύστημα καμερών της VICON και με τα πέντε κινητά τηλέφωνα. Η σύγκριση των δύο συστημάτων έγινε με σύγκριση των αποτελεσμάτων κάμψης της λεκάνης (pelvic tilt), της κάμψης του ισχίου (hip flexion) και της γωνίας του γόνατος (knee angle). Τα δεδομένα αυτά ήταν τα ασφαλέστερα στην παρατήρηση δεδομένου της επιλογής των κινήσεων αλλά και της βέλτιστης προσομοίωσης των κάτω άκρων από το Pose2Sim. Ευελπιστούμε να μελετήσουμε τα αποτελέσματα κινήσεων των άνω άκρων σε μελλοντική έρευνα αφού προσαρμόσουμε περαιτέρω το Pose2Sim στις ανάγκες μας.

Το Pose2Sim παρέχει στον χρήστη την δυνατότητα εντοπισμού δυσδιάστατων συντεταγμένων από πολλαπλά βίντεο μέσω του OpenPose (Cao et al., 2019). Η αρχιτεκτονική του OpenPose δίνει την δυνατότητα εξαγωγής συντεταγμένων θέσεις των άκρων ενός ή περισσότερων ατόμων από βίντεο ή φωτογραφίες παίρνοντας, συνήθως, σαν σημείο αναφοράς το κεφάλι ή τον λαιμό του εμφανιζόμενου ατόμου. Καθιστά δυνατή την άντληση δεδομένων από αρχεία βίντεο οποιασδήποτε μορφής (webcams, smartphone, CCTV cameras κ.α.), καθώς και η ελαφριά εκδοχή επιτρέπει την χρήση του ακόμα και από υπολογιστές χαμηλής επεξεργαστικής ισχύς. Επίσης, το Pose2Sim παρέχει εργαλεία για βαθμονόμηση των καμερών, εντοπισμού του αντικειμένου ενδιαφέροντος σε όλα τα βίντεο, δημιουργία φακέλων «.trc» με συντεταγμένες τριών διαστάσεων και φιλτράρισμα των αποτελεσμάτων για εξάλειψη μέρους του θορύβου στα δεδομένα.

Η επιλογή έγινε βάση της προσβασιμότητας του, της αρχιτεκτονικής ανοιχτού λογισμικού του που το καθιστά ευέλικτο ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε ερευνητή

και της σύνδεσής του με το πρόγραμμα εμβιομηχανικών προσομοιώσεων OpenSim (Delp et al., 2007).

Το OpenSim είναι ένα εξαιρετικά δημοφιλές πρόγραμμα ανοικτού κώδικα, που επιτρέπει τον υπολογισμό γωνιών αρθρώσεων σε τρισδιάστατο χώρο (3D joint angles), λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα συντεταγμένων από markers. Στην έρευνα μας επιλέχθηκε ώστε να αποτελέσει μια πλατφόρμα μέσω της οποίας να γίνει η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του Pose2Sim και του συστήματος VICON. Η πιστότητα των προσομοιώσεων του OpenSim σε συνδυασμό με την υψηλή ποιότητα των δεδομένων που εξήχθησαν από το VICON, μας επέτρεψε να έχουμε ένα αξιόλογο μέτρο σύγκρισης των αποκλίσεων που είχαν τα αποτελέσματα του Pose2Sim από τα επιθυμητά.

Λέξεις κλειδιά: Τεχνητή νοημοσύνη, Καταγραφή κίνησης, Κάμερες κινητών τηλεφώνων, Υπολογιστική όραση, Ανοιχτός κώδικας, Προσομοίωση

ABSTRACT

In the present work, a comparison was made between two motion capture systems. The optical motion capture system by VICON and the artificial intelligence program Pose2Sim (Pagnon et al., 2021) using five smartphones were evaluated.

For the purposes of this study, two different movements (deep squat and stair ascent) were recorded from four healthy individuals with the VICON cameras and the five smartphones simultaneously. The comparison of the two systems was based on the analysis of pelvic tilt, hip flexion, and knee angle. These data were chosen for their safety in observation, considering the selected movements and the optimal simulation of lower limb motions provided by Pose2Sim. We hope to explore upper limb movement results in future research by further adapting Pose2Sim to our needs.

Pose2Sim allows users to detect two-dimensional coordinates from multiple videos using OpenPose (Cao et al., 2019). The architecture of OpenPose enables the extraction of limb coordinates from videos or photos, typically using the head or neck of the person as a reference point. This makes it possible to extract data from various video formats (webcams, smartphones, CCTV cameras, etc.), and its lightweight version allows usage even on low-processing power computers.

Additionally, Pose2Sim provides tools for camera calibration, object tracking in all videos, creation of «.trc» folders with three-dimensional coordinates, and filtering of results to eliminate noise in the data. The choice of Pose2Sim was based on its accessibility, open-source nature that provides flexibility according to researchers' needs, and its integration with the biomechanical simulation program OpenSim (Delp et al., 2007).

OpenSim is a widely used open-source program that calculates 3D joint angles using coordinate data from markers. In our research, it was chosen as a platform for comparing the results of Pose2Sim and the VICON system. The accuracy of OpenSim simulations, combined with the high-quality data obtained from VICON, allowed us to have a reliable measure for comparing the deviations between Pose2Sim results and the desired outcomes.

Keywords: Artificial intelligence, Motion capture, Smartphones cameras, Computer vision, Opensource, Simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ABSTRACT

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό υπόβαθρο

1.2 Σκοπός και οφέλη της εργασίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Καταγραφή Κίνησης (Motion Capture)

2.2 Pose estimation

2.3 Βαθμονόμηση καμερών (Camera Calibration)

2.4 Τρισδιάστατος τριγωνισμός (3D Triangulation)

2.5 Εμβιομηχανική προσομοίωση (Biomechanical simulation)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1 Πειραματική διάταξη

3.2 Βαθμονόμηση κάμερας με χρήση checkerboard

3.3 Καταγραφή κίνησης

3.4 Ανάλυση δεδομένων

3.4.1 Αποτελέσματα της βαθμονόμησης

3.4.1.1 Intrinsic parameters

3.4.1.2 Extrinsic parameters

3.4.2 Pose estimation με χρήση του OpenPose

3.4.3 Συγχρονισμός καμερών (Camera synchronization)

3.4.4 Person association

- 3.4.5 Τρισδιάστατος τριγωνισμός στο Pose2Sim
- 3.4.6 Φιλτράρισμα για μείωση του θορύβου
- 3.4.7 Προσαρμογή διαστάσεων του μοντέλου στο OpenSim
- 3.4.8 Αντίστροφη κινηματική (Inverse Kinematics)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

- 4.1 Επεξεργασία δεδομένων
 - 4.1.1 Προσαρμογή διαστάσεων του μοντέλου
 - 4.1.2 Φιλτράρισμα (Filtering)
- 4.2 Αποτελέσματα πειραμάτων
 - 4.2.1 Βαθύ κάθισμα (Squat)
 - 4.2.2 Βήμα σε σκαλοπάτι (Step)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΖΗΤΗΣΗ

- 5.1 Περιορισμοί και σφάλματα
- 5.2 Μελλοντική έρευνα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Οπτική αναπαράσταση του σκελετού που προκύπτει από το pose estimation (Cao et al., 2019).

Εικόνα 2: Camera Calibration using OpenCV, (Kaustubh Sadekar et al. 2020)

Εικόνα 3: Το checkerboard που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με διαστάσεις τετραγώνων 97 x 97 mm. Τα αριθμημένα σημεία προκύπτουν αυτόματα βάση του αλγόριθμου του OpenCV με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας. Εάν τα σημεία δεν εμφανιστούν, ο χρήστης καλείται να τα επιλέξει χειροκίνητα ακολουθώντας την ίδια αρίθμηση. Βάση των αποτελεσμάτων από αυτή την διαδικασία εξάγονται οι extrinsics παράμετροι.

Εικόνα 4: Οι συντεταγμένες των σημείων του χώρου επιλέγονται αρχικά από τον αλγόριθμο του Pose2Sim και στην συνέχεια ο χρήστης πρέπει να τις επιβεβαιώσει χειροκίνητα για βέλτιστο υπολογισμό των extrinsics παραμέτρων.

Εικόνα 5: Οπτικοποίηση των συντεταγμένων που δίνονται εξ αρχής από τον χρήστη για εύρεση των extrinsics παραμέτρων.

Εικόνα 6: Εξατομικευμένο μοντέλα που προέκυψαν στο OpenSim κατά την διαδικασία του scaling βάση των δεδομένων από το Pose2Sim.

Εικόνα 7: Προσομοίωση της κίνησης των τεσσάρων μοντέλων βάση των δεδομένων του Pose2Sim για το βαθύ κάθισμα. (α.)Subject 1, (β.)Subject 2, (γ.)Subject 3, (δ.) Subject 4. Είναι εμφανής οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα και τα σφάλματα.

Εικόνα 8: Η προσομοίωση της κίνησης των τεσσάρων μοντέλων βάση των δεδομένων του Pose2Sim για το βήμα στο σκαλοπάτι. (α.)Subject 1, (β.)Subject 2, (γ.)Subject 3, (δ.) Subject 4. Είναι εμφανής οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα και τα σφάλματα.

ΛΙΣΤΑ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Γράφημα 1: Κάμψη ισχίου για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

Γράφημα 2: Γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

Γράφημα 3: Κλίση λεκάνης, κάμψη ισχίου και γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

Γράφημα 4: Κάμψη ισχίου για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος στο σκαλοπάτι. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

Γράφημα 5: Γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος στο σκαλοπάτι. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4.

Γράφημα 6: Κλίση λεκάνης, κάμψη ισχίου και γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος στο σκαλοπάτι. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό υπόβαθρο

Η μελέτη της ανθρώπινης κίνησης ήταν ανέκαθεν άρρηκτα συνδεδεμένη με τις τεχνολογίες καταγραφής εικόνας κάθε εποχής. Η προσβασιμότητα και η ακρίβεια με την οποία μπορούσαμε να καταγράψουμε οργανισμούς εν κινήσει ήταν ο βασικός παράγοντας που όριζε το βάθος της κατανόησης μας για την ανθρώπινη εμβιομηχανική (Mündermann et al., 1874).

Οι πρώτες μελέτες πάνω στην κίνηση ανθρώπων και ζώων έγιναν με χρήση φωτογραφικών μεθόδων της εποχής, οι οποίες στάθηκαν ο πρόδρομος τόσο της εμβιομηχανικής μελέτης όσο και των τεχνολογιών καταγραφής (Marey 1873, Muybridge , 1878).

Μέχρι την δεκαετία του 1950 λίγη πρόοδος είχε γίνει τόσο τεχνολογικά, στην καταγραφή κίνησης όσο και στο κομμάτι της έρευνας πάνω στην κινηματική ανάλυση. Όμως, η ανάγκη περίθαλψης και αποκατάστασης των βετεράνων του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας. Με την κλασική πλέον μελέτη του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (Inman et al., 1947, Inman et al. 1987), τέθηκαν οι βάσεις για πολλές από τις θεμελιώδεις αρχές της κινηματικής που ακολουθούνται έως και σήμερα.

Τα τελευταία χρόνια οι μέθοδοι καταγραφής κίνησης έχουν κατακλύσει την αγορά από εξαιρετικά πολύπλοκα μοντέλα και τεχνολογίες αιχμής, έως πολύ απλά προγράμματα αυτόματης καταγραφής με χρήση συσκευών καθημερινής χρήσης όπως κινητά τηλέφωνα. Ωστόσο στην εμβιομηχανική η αναζήτηση βελτιστοποιημένων συστημάτων, βολικότερα τόσο για τον χρήστη όσο και για το άτομο που καταγράφεται, παραμένει ένα πεδίο ασταματητής έρευνας και καινοτομίας.

Η έλευση της τεχνητής νοημοσύνης ήταν αναπόφευκτο, λοιπόν, και κεντρίσει το ενδιαφέρον ερευνητών και κλινικών ιατρών, που είδαν στην υπολογιστική όραση ένα πιθανό εργαλείο χάραξης νέων δρόμων στην επιστήμη της εμβιομηχανικής.

1.2 Σκοπός και οφέλη της εργασίας

Ο στόχος της συγκεκριμένης έρευνας ήταν η μελέτη και κατανόηση ενός markerless προγράμματος τεχνητής νοημοσύνης για καταγραφή κίνησης και η σύγκρισή του με το αξιόπιστο εργαστηριακό σύστημα αναφοράς, το marker based optical motion capture, VICON.

Τα άτομα που συμμετείχαν καταγράφηκαν να πραγματοποιούν τις κινήσεις ταυτόχρονα και με τα δυο συστήματα για να είμαστε σε θέση να παρατηρήσουμε τις αποκλίσεις. Μέσω αυτής της σύγκρισης ευελπιστούμε να γίνουν κατανοητές οι δυνατότητες ενός τόσο προσβάσιμου και ευέλικτου εργαλείου όπως το Pose2Sim για την εμβιομηχανική έρευνα και τους περιορισμούς που έχει σε σχέση με τα εγκαθιδρυμένα εργαλεία. Η εργασία αποσκοπεί, επίσης στην εξοικείωση μας με προγράμματα τεχνητής νοημοσύνης για καταγραφή κίνησης που φαίνεται ότι αποτελούν το κεντρικό σημείο έρευνας της παγκόσμιας κοινότητας στην εμβιομηχανική και τις επιστήμες αποκατάστασης. Αλλά και στην προώθηση της χρήσης συστημάτων ανοιχτού λογισμικού στις πρακτικές της εμβιομηχανικής έρευνας.

Φαινομενικά η σύγκριση των δύο συστημάτων αυτή την στιγμή μπορεί να φαντάζει άνιση, όμως αποτελεί την βάση μιας μεγαλύτερης και εκτενέστερης προσπάθειας ένταξης της τεχνητής νοημοσύνης στην εμβιομηχανική. Η σύγκριση ενός ευέλικτου και φτηνού συστήματος ανάλυσης κίνησης με το σύστημα αναφοράς θα προσδιορίσει τον βαθμό εγκυρότητας του δεύτερου και θα βοηθήσει στην στοχοθεσία για την βελτίωση του ώστε, με την εκμετάλλευση μιας ραγδαίας αναπτυσσόμενης τεχνολογίας, να αναπτυχθούν φορητά, ευέλικτα και χρηστικά στην κλινική πράξη και προπονητική, συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Καταγραφή Κίνησης (Motion Capture)

Οι μέθοδοι καταγραφής κίνησης μπορεί να είναι μηχανικού τύπου, ακουστικά συστήματα, μαγνητικά, οπτικά ή να λειτουργούν με αισθητήρες τύπου IMU (Inertial Measurement Units) (R. Suweth et al. 2017).

Στις μέρες μας δύο τύποι καταγραφής κίνησης απαντώνται στην ορθοπαιδική και τις επιστήμες αποκατάστασης, η μέθοδος των IMU και τα συστήματα optical motion capture.

Οι αισθητήρες IMU λειτουργούν με χρήση γυροσκοπίου που στέλνει σήμα στον υπολογιστή για την θέση του αισθητήρα στον χώρο. Η τεχνολογία αυτή απαλλάσσει τον χρήστη από την ανάγκη ενός πλήρως εξοπλισμένου εργαστηρίου καταγραφής κίνησης, προσφέρει ταχύτερη διεξαγωγή του πειράματος και δεν απαιτεί χρήση υπέρυθρων καμερών (Iosa, 2016). Ωστόσο οι αισθητήρες συχνά εμφανίζουν σημαντικά σφάλματα σε σχέση με τις marker based μεθόδους, πράγμα που καθιστά την χρήση τους σε ιατρικές εφαρμογές συχνά επίφοβη (Xu et al., 2019).

Η τεχνολογία με τις υψηλότερες επιδόσεις στην καταγραφής κίνησης είναι, αναμφίβολα το optical motion capture, με πληθώρα μελετών να αποδεικνύει την ισχύ του τόσο σε στατικά όσο και σε δυναμικά πειραματικά μοντέλα (Medved, 2000). Η μέθοδος αυτή αν και εξαιρετικά ακριβής, απαιτεί ειδικά διαμορφωμένο χώρο διεξαγωγής των πειραμάτων, ειδικό εξοπλισμό και είναι εξαιρετικά κοστοβόρα. Τα συστήματα optical motion capture, όπως και το VICON αποτελούνται από ειδικές κάμερες που εντοπίζουν τους ανακλαστήρες που έχουν τοποθετηθεί πάνω σε συγκεκριμένα σημεία του σώματος του ατόμου που καταγράφεται.

Ένα τυπικό σύστημα optical motion capture απαρτίζεται από τουλάχιστον 3 έως και πάνω από 48 συγχρονισμένες κάμερες σε συνδυασμό με το κατάλληλο πρόγραμμα

ελέγχου της λειτουργίας τους και επεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τριγωνομετρικές σχέσεις μεταξύ των markers, ώστε να εντοπίσουν την θέση και την περιστροφή των αρθρώσεων του ατόμου στον τρισδιάστατο χώρο.

Ο αριθμός των καμερών εξαρτάται από τον αριθμό των ατόμων που πρόκειται να καταγραφούν, καθώς και τις έκτασης του χώρου που θα καλύψουν οι κινήσεις τους. Οι κάμερες φέρουν υπέρυθρες (Infra-Red) LED λάμπες γύρω από τον φακό, ο οποίο διαθέτει σχετικό φίλτρο. Με αυτό τον τρόπο η κάμερα καταγράφει αποκλειστικά την κίνηση των ανακλαστήρων που ανακλούν το φως από τις λάμπες της κατά την διάρκεια της κίνησης του ατόμου.

Η τεχνολογία που επιλέχθηκε να μελετηθεί στην συγκεκριμένη έρευνα και αποτελεί την νεότερη προσθήκη στην εργαλειοθήκη του/της σύγχρονου/ης εμβιομηχανικού είναι η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα της υπολογιστικής όρασης (Computer Vision).

Η χρήση της υπολογιστικής όρασης φαίνεται να μπορεί να απαλλάξει την διαδικασία της κινηματικής ανάλυσης από κάθε προαναφερθείσα δυσκολία αφού με την χρήση κοινότυπων καμερών, όπως εκείνες ενός κινητού smartphone μπορούμε να επιτύχουμε καταγραφή και ανάλυση κίνησης, γρήγορα και εύκολα σε οποιοδήποτε χώρο και κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες.

Δεδομένου ότι η τεχνολογία αυτή είναι ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, η χρήση της σε κλινικές εφαρμογές είναι ακόμα σε πειραματική φάση. Το κεντρικό μειονέκτημά της είναι η αδιαφάνεια της διαδικασίας διεξαγωγής των αποτελεσμάτων. Τα σφάλματα είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθούν, πόσο μάλλον να ανατρέξει κανείς στην πηγή που τα προκάλεσε. Επίσης, αν και φαινομενικά η μέθοδος καταγραφής και επεξεργασίας υπόσχονται ταχύτητα και άνεση μετρήσεων, την αρχική βαθμονόμηση που απαιτείται μπορεί να είναι εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία.

2.2 Pose estimation

Το pose estimation περιγράφει την διαδικασία μέσα από την οποία ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης (machine learning) υπολογίζει την κίνηση ενός ή περισσότερων ατόμων από εικόνες ή βίντεο μέσα από την ανίχνευση εικονικών σημείων στις αρθρώσεις του σώματος.

Ο αλγόριθμος λαμβάνει σαν εντολή εισόδου τα δεδομένα τις εκάστοτε κάμερας και εξάγει τις συντεταγμένες των αρθρώσεων στον χώρο. Κατά αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται η θέση και η κίνηση του ατόμου στον χώρο χωρίς να κρατούνται προσωπικά του στοιχεία.

Τα σημεία που ανιχνεύονται καταχωρούνται με ξεχωριστές ταυτότητες (ID) ανάλογα με την θέση τους στον χώρο. Με εύρος πιθανότητας (confidence score), δηλαδή την πιθανότητα εύρεσης του σημείου στην εκάστοτε θέση, μεταξύ 0 και 1.

Εφόσον ο αλγόριθμος λάβει τα οπτικά δεδομένα εισόδου (visual input data) δημιουργεί μια αναπαράσταση του σώματος σε μορφή σκελετού (body skeleton pose).



Εικόνα 1: Οπτική αναπαράσταση του σκελετού που προκύπτει από το pose estimation (Cao et al., 2019).

Για αυτό τον λόγο το μοντέλο του ανθρωπίνου σώματος που θα επιλεγεί από τον χρήστη είναι εξαιρετικά σημαντικό και αποτελεί ξεχωριστό τομέα έρευνας για την εμβιομηχανική κοινότητα (Uhlrich et al. 2023). Τα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιούν κινηματικά μοντέλα στερεών N-αρθρώσεων (N-joints rigid kinematic model) στα οποία το ανθρωπινό σώμα απεικονίζεται ως ένα σύνολο αρθρώσεων και άκρων, τα οποία περιέχουν τα κινηματικά δεδομένα και μεγέθη που αφορούν το καταγραφόμενο άτομο. Υπάρχουν τρεις τύποι μοντέλων του ανθρωπίνου σώματος, τα

kinematic, planar και volumetric, των οποίων η χρήση εξαρτάται από την μέθοδο του pose estimation. Στην συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο BODY_25B του OpenPose (Hidalgo G., 2019), το οποίο προτείνεται και από τους δημιουργούς του Pose2Sim (Pagnon et al., 2022b) και αποτελεί kinematic μοντέλο.

2.3 Βαθμονόμηση Καμερών (Camera Calibration)

Οι κάμερες εκ φύσεως, αποτελούν μηχανισμούς καταγραφής ενός τρισδιάστατου κόσμου και προβολής του σε δισδιάστατες εικόνες. Δημιουργούν παραστάσεις ενός περιβάλλοντος όπως αποτυπώθηκε από μια συγκεκριμένη θέση σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ο φακός λαμβάνει πληροφορία για την ένταση του φωτός που εκπέμπεται ή ανακλάται από και προς συγκεκριμένες κατευθύνσεις, ωστόσο η πληροφορία του βάθους χάνεται. Όπως είναι λογικό επίσης, πληροφορίες όπως το πραγματικό μέγεθος των αντικειμένων και το ποσοστό παραμόρφωσης του χώρου λόγω του εκάστοτε φακού είναι επίσης δύσκολο να προσδιοριστούν. Είναι, λοιπόν εμφανές πως η εξαγωγή δεδομένων σε τρεις διαστάσεις από μια κάμερα αποτελεί πρόκληση.

Με τον όρο βαθμονόμηση (camera calibration), εννοούμε την διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων μια κάμερας. Αυτό σημαίνει ότι είναι γνωστές όλες οι πληροφορίες για την εκάστοτε κάμερα, οι οποίες είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της ακριβούς συσχέτισης μεταξύ τρισδιάστατων σημείων του πραγματικού χώρου και της αντίστοιχης δισδιαστατης προβολής (pixels) στην καταγεγραμμένη εικόνα.

Πρακτικά τα παραπάνω σημαίνουν ότι ανακτώνται δύο είδη παραμέτρων κατά τη διάρκεια του βαθμονόμησης, τις internal και τις external παραμέτρους.

Internal parameters ονομάζουμε τα στοιχεία του φακού της εκάστοτε κάμερας, όπως το εστιακό μήκος, το σημείο εστίασης και τους συντελεστές παραμόρφωσης.

Από την άλλη External parameters αφορούν τον προσανατολισμό της κάμερας συναρτήσει ενός προκαθορισμένου σημείου γνωστόν διαστάσεων, στον χώρο. Για να βρεθεί η προβολή των τρισδιάστατων σημείων πάνω σε μια δισδιάστατη εικόνα, πρέπει αρχικά να μετατραπούν οι συντεταγμένες του πραγματικού κόσμου στις συντεταγμένες της κάμερας χρησιμοποιώντας τις extrinsic parameters (rotation \mathbf{R} και translation \mathbf{t}).

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας τις intrinsic parameters της κάμερας εντοπίζουμε τα σημεία.

Η εξίσωση που συσχετίζει τα σημεία του κόσμου σε τρεις διαστάσεις (X_w, Y_w, Z_w) με την δισδιάστατη προβολή τους (u, v) είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ z' \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$u = \frac{u'}{w'}$$

$$v = \frac{v'}{w'}$$

Όπου \mathbf{P} είναι ο πίνακας 3x4 όπου περιέχονται οι πίνακες των intrinsic (\mathbf{K}) και των extrinsic ($[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$) παραμέτρων, οι οποίες είναι συνδυασμός της 3x3 μήτρας \mathbf{R} και του διανύσματος \mathbf{t} , όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\mathbf{P} = \overbrace{\mathbf{K}}^{\text{Intrinsic Matrix}} \times \overbrace{[\mathbf{R} | \mathbf{t}]}^{\text{Extrinsic Matrix}}$$

Με το \mathbf{K} να εκφράζεται από τον παρακάτω πίνακα:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Οι ποσότητες f_x , f_y αφορούν το εστιακό βάθος. Οι c_x , c_y είναι οι συντεταγμένες του εστιακού βάρους και η ποσότητα γ αφορά την καμπυλότητα μεταξύ αξόνων και είναι συνήθως 0.

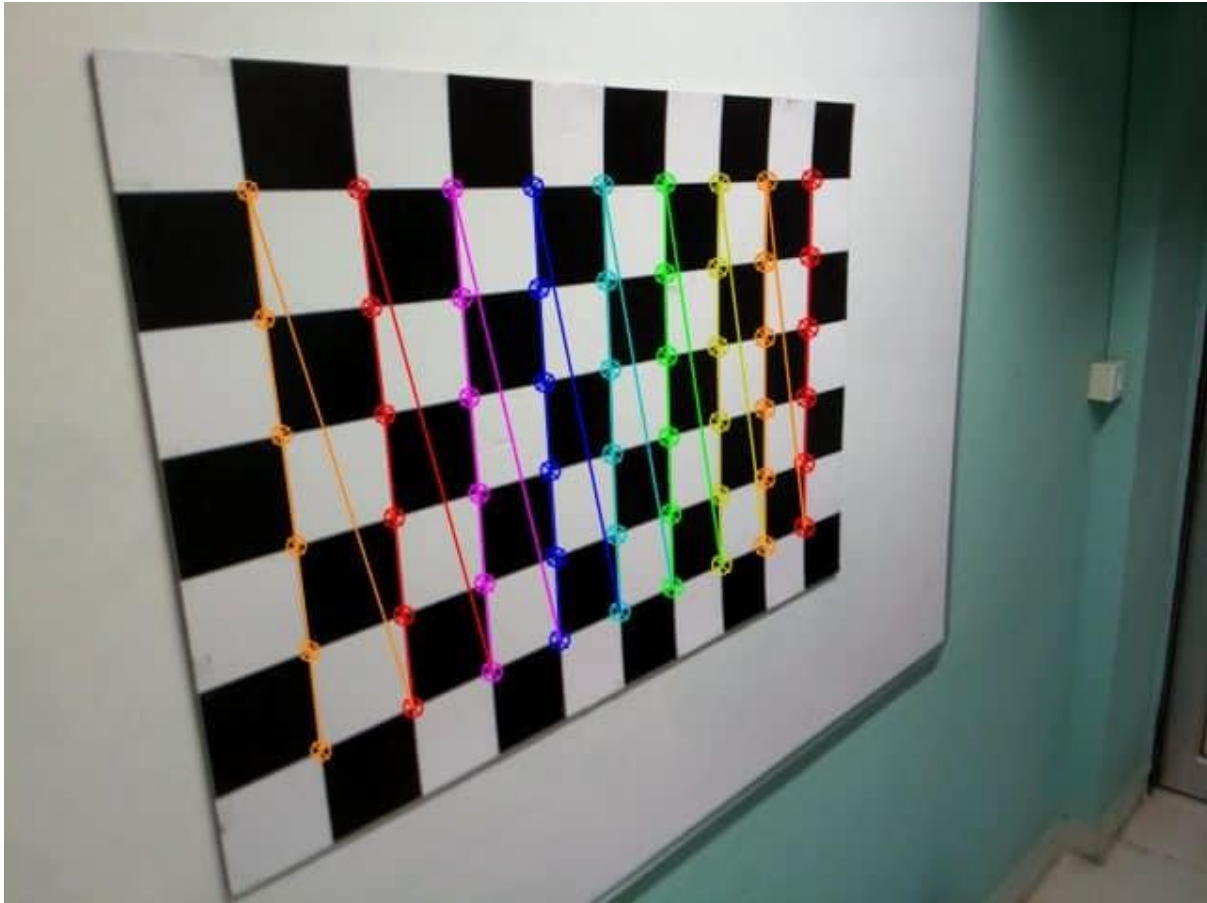
Ο στόχος του βαθμονόμησης είναι να βρεθεί ο 3x3 πίνακας \mathbf{K} , ο 3x3 πίνακας περιστροφής \mathbf{R} και το διάνυσμα \mathbf{t} , χρησιμοποιώντας ένα σύνολο γνωστών σημείων στον τρισδιάστατο χώρο (Sadekar et al. 2020).

Τα σημεία αυτά υπάρχουν πολύ τρόποι να βρεθούν ανάλογα με το είδος του calibration που πραγματοποιείται. Στην συγκεκριμένη έρευνα θεωρήθηκε αποδοτικότερη η χρήση ενός checkerboard, γνωστών διαστάσεων, για το βαθμονόμηση όλων των καμερών των smartphones. .

Το σύστημα VICON φέρει δικό του αλγόριθμο και συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιώντας markers σε ραβδί, που επιτρέπει στον χρήστη να βαθμονομήσει τις κάμερες πριν την διεξαγωγή κάθε πειράματος. Για τις ανάγκες του Pose2Sim, το βαθμονόμηση των καμερών έλαβε χώρα χρησιμοποιώντας την ανοικτή βιβλιοθήκη υπολογιστικής όρασης OpenCV (Zhang, 2000) με την βοήθεια checkerboard.

Η χρήση ενός checkerboard είναι από τους πλέον διαδεδομένους τρόπους βαθμονόμησης στις εφαρμογές υπολογιστικής όρασης. Ο λόγος είναι πως αυτά τα σχέδια είναι εύκολο να εντοπιστούν από την κάμερα και να ξεχωρίσουν από το περιβάλλον τους. Επίσης, οι γωνίες των τετραγώνων είναι ιδανικές για τον εντοπισμό τους επειδή έχουν έντονες κλίσεις σε δύο κατευθύνσεις.

Στο βαθμονόμηση με χρήση checkerboard οι κάμερες αναζητούν τις γωνίες αυτές στο pattern και τις λαμβάνουν ως τα σημεία (X_w, Y_w, Z_w) στο χώρο. Με αυτό τον τρόπο η περιστροφή και η απόσταση του checkerboard από την κάμερα δίνουν τα απαραίτητα δεδομένα για να πραγματοποιηθεί το βαθμονόμηση.



Εικόνα 2: *Camera Calibration using OpenCV, (Sadekar et al. 2020)*

2.4 Τρισδιάστατος τριγωνισμός (3D Triangulation)

Στην υπολογιστική όραση με τον όρο, triangulation, reconstruction ή intersection, εννοούμε την διαδικασία μέσα από την οποία ένα σημείο του τρισδιάστατου χώρου εντοπίζεται μέσα από την δισδιάστατη αναπαράστασή του σε δύο ή παραπάνω εικόνες.

Εφόσον είναι γνωστές οι παράμετροι των καμερών που χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την μέθοδο του 3D triangulation προσομοιώνεται, ουσιαστικά η θέση των σημείων στον τρισδιάστατο χώρο.

Πολύ σημαντική παράμετρος για σωστό 3D triangulation είναι η συγχρονισμός όλων των καμερών που χρησιμοποιούνται. Θα πρέπει, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή οι

κάμερες να έχουν καταγράψει την ίδια ακριβώς κίνηση από διαφορετικές γωνίες. Με αυτό τον τρόπο στην συνέχεια υπολογίζεται η θέση κάθε σημείου σε τρεις διαστάσεις βάση των δισδιάστατων βίντεο που δίνουν οι κάμερες (Pagnon et al., 2021).

2.5 Εμβιομηχανική προσομοίωση (Biomechanical simulation)

Εφόσον όλα τα παραπάνω δεδομένα θέσης είναι γνωστά, αυτά μπορούν να φορτωθούν σαν δεδομένα κίνησης σε ένα μοντέλο που αναπαριστά το ανθρώπινο σώμα, έχει τις κατάλληλες διαστάσεις και φέρει τις απαραίτητες παραμέτρους για να προσομοιώσει ρεαλιστικά την κίνηση που έχει καταγραφεί.

Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση νευρομυοσκελετικών συστημάτων (NMS) επιτρέπει σε ερευνητές και κλινικούς γιατρούς να μελετήσουν τις περίπλοκες δυνάμεις και παραμέτρους που συντελούν στην ανθρώπινη κίνηση (Hoang et al. 2018).

Η εμβιομηχανική προσομοίωση μας δίνει μια ακριβή αναπαράσταση της κίνησης του ατόμου που καταγράφηκε στον χώρο, επιτρέπει τον λεπτομερέστερο έλεγχο της κίνησης και την άντληση δεδομένων που δεν είναι δυνατά με απλή παρατήρηση. Τα μοντέλα μπορούν να αποκαλύψουν εσωτερικές μυικές τάσεις και δυνάμεις στις αρθρώσεις για μια ευρεία γκάμα κινήσεων από καθημερινές δραστηριότητες μέχρι έντονες, δυναμικές κινήσεις αθλητών (Akhras et al., 2015).

Τα μοντέλα NMS χρησιμοποιούν εξισώσεις βασισμένες στην ανθρώπινη βιολογία και τους φυσικούς νόμους ώστε να συνδράμουν με ουσιώδη δεδομένα στην δημιουργία προσθετικών (Andrea Cimolato et al., 2020), σε προεγχειρητικούς ελεγχους (Babcock et al., 2023), την κατασκευή εξοσκελετών (Zhang et al., 2023) και πολλά άλλα (Martelli et al., 2011).

Στην συγκεκριμένη μελέτη το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση των δεδομένων από το Pose2Sim δίνεται από τον κατασκευαστή του προγράμματος. Το μοντέλο αυτό, αφού του δοθούν οι παράμετροι βάρους και διαστάσεων των άκρων

του εκάστοτε ατόμου είναι έτοιμο να δεχθεί τα δεδομένα κίνησης και να τα αναπαράγει.

Για το VICON χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα ανοικτού λογισμικού AddBiomechanics (Keenon Werling et al., 2023). Το AddBiomechanics επιτρέπει σε ερευνητές και γιατρούς να επεξεργαστούν, και να μοιραστούν τα δεδομένα των μελετών τους με ολόκληρη την εμβιομηχανική κοινότητα. Ο χρήστης ανεβάζει αρχεία .c3d ή .trc στην πλατφόρμα και αυτά επεξεργάζονται σε απομακρυσμένο server. Στην συνέχεια, ο χρήστης, μέσα σε διάστημα μερικών λεπτών λαμβάνει πίσω έναν φάκελο με τα αρχεία του, συμπεριλαμβανομένων .mot αρχείων και OpenSim μοντέλων. Τα νέα αυτά αρχεία είναι έτοιμα να περάσουν στο OpenSim για να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση χωρίς περαιτέρω διαδικασίες. Το AddBiomechanics είναι φτιαγμένο ειδικά για την ταχύτερη απεικόνιση αποτελεσμάτων από ανάλυση κίνησης με VICON και προσομοίωσης στο OpenSim, παρέχοντας ένα ακόμα εργαλείο εξαιρετικής ποιότητας στην εμβιομηχανική κοινότητα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

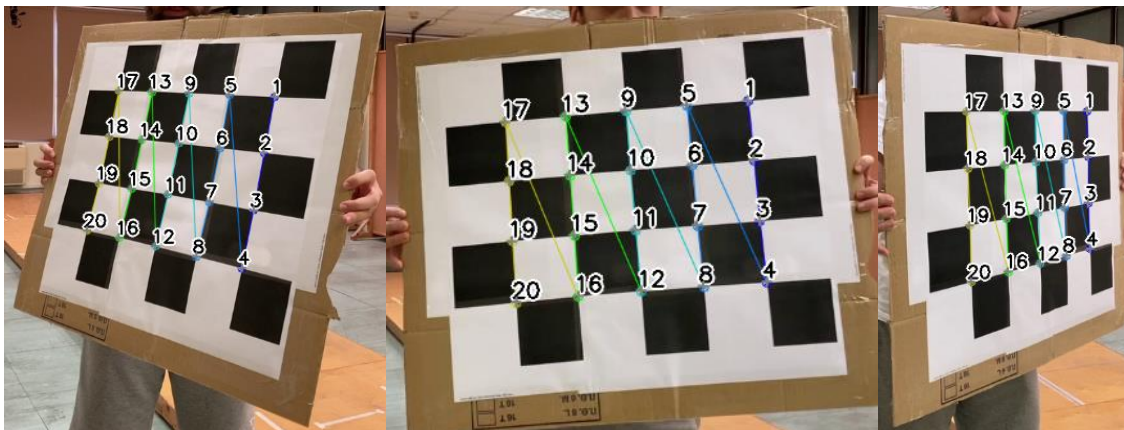
3.1 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων στήθηκαν πέντε συνολικά συσκευές smartphone, δύο iPhone και τρεις Android, περιμετρικά στον χώρο που κατέγραφαν και οι υπέρυθρες κάμερες VICON. Στο κέντρο του χώρου βρισκόταν μια ξύλινη πλατφόρμα γνωστών διαστάσεων, πάνω στην οποία πραγματοποιούνταν οι κινήσεις από τα τέσσερα άτομα.

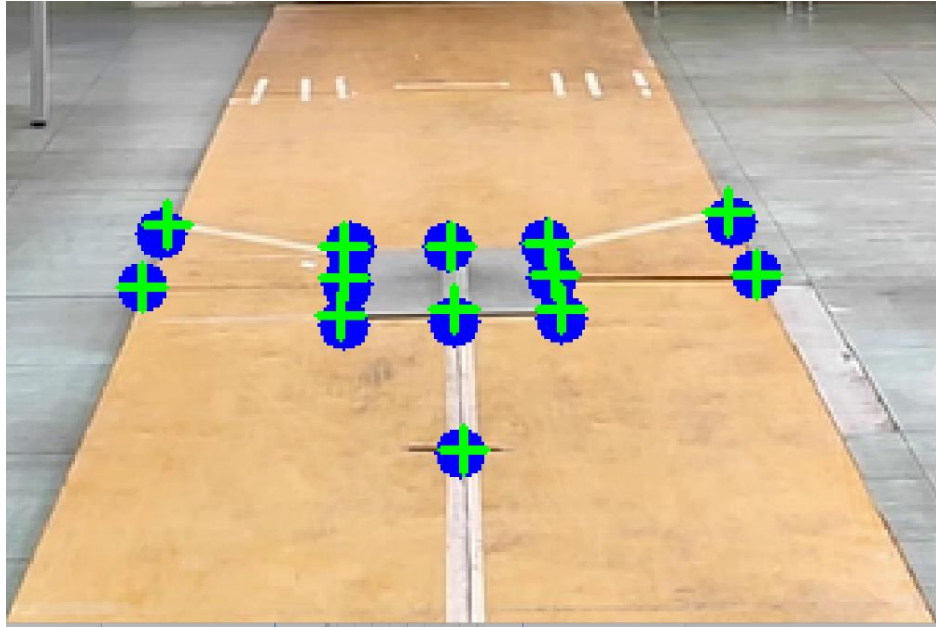
Στο Pose2Sim, δόθηκαν οδηγίες για τις προδιαγραφές του πειράματος, όπως το μέγεθος του checkerboard, οι συντεταγμένες του χώρου κ.α.

3.2 Βαθμονόμηση κάμερας με χρήση checkerboard

Για το calibration των καμερών χρειάστηκε να παρθούν βίντεο του checkerboard που είχαμε δημιουργήσει με όλες τις κάμερες, από διάφορες προοπτικές ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους σε δεύτερο χρόνο, με σκοπό να είμαστε σε θέση να βρούμε τις extrinsics και intrinsics παραμέτρους. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε πριν την διενέργεια των πειραμάτων, μονάχα με χρήση του checkerboard, για εύρεση των extrinsics παραμέτρων και την καταγραφή του άδειου χώρου που θα διεξάγεται το πείραμα σε μια στατική εικόνα για την εξαγωγή των intrinsics παραμέτρων βάση των συντεταγμένων του χώρου.

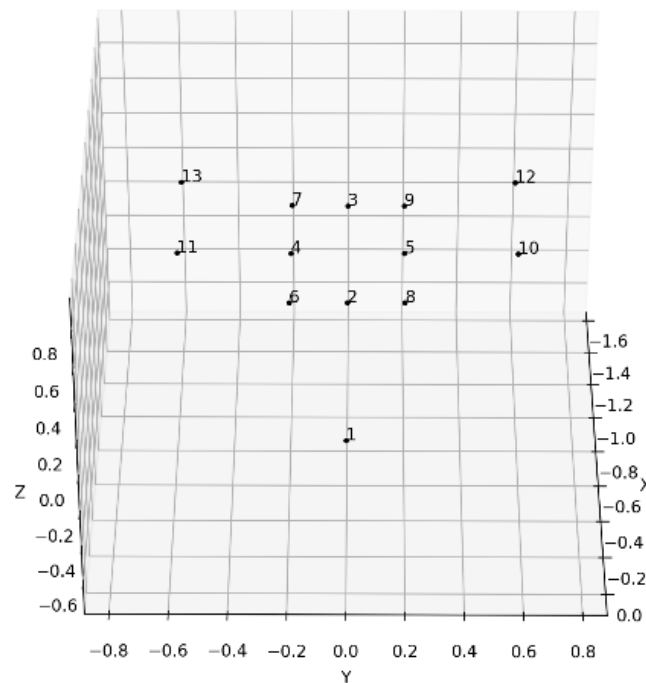


Εικόνα 3: Το checkerboard που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα με διαστάσεις τετραγώνων 97 x 97 mm. Τα αριθμημένα σημεία προκύπτουν αυτόματα βάση του αλγόριθμου του OpenCV με σκοπό τον καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας. Εάν τα σημεία δεν εμφανιστούν, ο χρήστης καλείται να τα επιλέξει χειροκίνητα ακολουθώντας την ίδια αρίθμηση. Βάση των αποτελεσμάτων από αυτή την διαδικασία εξάγονται οι extrinsics παράμετροι.



Εικόνα 4: Οι συντεταγμένες των σημείων του χώρου επιλέγονται αρχικά από τον αλγόριθμο του *Pose2Sim* και στην συνέχεια ο χρήστης πρέπει να τις επιβεβαιώσει χειροκίνητα για βέλτιστο υπολογισμό των *extrinsics* παραμέτρων.

- + Σημεία που επιλέχθηκαν χειροκίνητα
- Σημεία που επιλέχθηκαν από το πρόγραμμα βάση των συντεταγμένων (Εικόνα 5)



Εικόνα 5: Οπτικοποίηση των συντεταγμένων που δίνονται εξ αρχής από τον χρήστη για εύρεση των *extrinsics* παραμέτρων:

object_coords_3d = [[0.0,0.0,0.1], [-0.79,0.0,0.1], [-1.39,0.0,0.1], [-1.09,-0.2,0.1], [-1.09,0.2,0.1], [-0.79,-0.2,0.1], [-1.39,-0.2,0.1], [-0.79,0.2,0.1], [-1.39,0.2,0.1], [-1.09,0.6,0.1], [-1.09,-0.6,0.1], [-1.54, 0.6,0.1], [-1.54,-0.6,0.1]]

3.3 Καταγραφή κίνησης

Αρχικά το κάθε άτομο που πήρε μέρος στο πείραμα έπρεπε να σταθεί ακίνητο σε T-pose για την καταγραφή του σε σταθερή θέση για το Pose2Sim και σε A-pose για το VICON. Τα δεδομένα από την σταθερή θέση του ατόμου βοηθούν και τα δύο προγράμματα να προσομοιώσουν την θέση του ατόμου στον τρισδιάστατο χώρο. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια στο OpenSim για το scaling του μοντέλου. Δηλαδή τον υπολογισμό των διαστάσεων του ατόμου, ώστε να δημιουργηθεί ένα εξατομικευμένο μοντέλο για την κάθε περίπτωση, στο οποίο φορτώθηκαν τα δεδομένα κίνησης (inverse kinematics). Κατά την διάρκεια που το κάθε άτομο με την σειρά του πραγματοποιούσε το κάθισμα και το βήμα στο σκαλοπάτι, καταγράφονταν ταυτόχρονα από τις κάμερες των πέντε κινητών smartphone αλλά και από τις κάμερες VICON.

3.4 Ανάλυση Δεδομένων

3.4.1 Αποτελέσματα της βαθμονόμησης

3.4.1.1 Intrinsic parameters

Για το calibration των intrinsics παραμέτρων δόθηκαν οι εντολές στο πρόγραμμα να εντοπίσει τις συντεταγμένες των γωνιών στο pattern από τα βίντεο. Πολλές φορές ήταν απαραίτητη η υποβοήθεια του προγράμματος χειροκίνητα για τον εντοπισμό των γωνιών διότι σφάλματα στην διαδικασία και η χαμηλή ποιότητα εικόνας κάποιων κινητών δεν επέτρεψαν στον αλγόριθμο να εντοπίσει σωστά τα σημεία σε όλα τα frames.

Το σφάλμα των μετρήσεων των intrinsics παραμέτρων σε όλα τα δείγματα κυμαίνονταν από 1.5 έως τα 3.0 pixels, με τον δημιουργό του προγράμματος να επισημαίνει ως όριο το πολύ τα 0.5 px.

3.4.1.2 Extrinsics parameters

Για το calibration των extrinsics παραμέτρων δόθηκαν στο πρόγραμμα σαν εντολές εισόδου οι συντεταγμένες σε τρεις διαστάσεις δεκατριών σημείων πάνω στην πλατφόρμα που θα διεξαγόταν τα πειράματα.

Μέσω αυτών των παραμέτρων το πρόγραμμα επέστρεψε τις διορθωτικές τιμές για τις παραμορφώσεις των φακών στα κινητά.

Το σφάλμα κυμάνθηκε από τα 3 έως τα 5 cm από τα 2.5 που ήταν το ασφαλές όριο. Το σφάλμα αυτό δείχνει την απόκλιση των σημείων που εντόπισε το πρόγραμμα μεταξύ της κάμερας του κάθε κινητού.

Η αστοχίες αυτές δύναται να οφείλονται σε ανεπαίσθητες κινήσεις των κινητών πάνω στα τρίποδα κατά την διάρκεια της καταγραφής αλλά και την χαμηλή ποιότητα εικόνας που πρόσφεραν κάποιες από τις κάμερες.

3.4.2 Pose estimation με χρήση του OpenPose

Με χρήση του OpenPose πραγματοποιήθηκε το pose estimation για κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Τα δεδομένα, στην συνέχεια αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό φάκελο για την διαδικασία του triangulation.

Για την σωστή εξαγωγή δεδομένων είναι απαραίτητο το άτομο να μην φοράει φαρδύ ρουχισμό, καθώς και το περιβάλλον του να μην έχει έντονη πληροφορία που μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία του openpose.

Στα πειράματά μας παρουσιάστηκαν αρκετά σφάλματα κατά την διαδικασία του pose estimation, λόγω θορύβου στο περιβάλλον αλλά και της χαμηλής ποιότητας στις κάμερες από κάποιες συσκευές.

3.4.3 Συγχρονισμός καμερών (Camera synchronization)

Τα βίντεο που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία συγχρονίστηκαν χειροκίνητα βάση του καταγεγραμμένου ήχου στο πρόγραμμα Davinci Resolve και στην συνέχεια κατηγοριοποιήθηκαν στους αντίστοιχους φακέλους. Μεγάλη προσοχή δόθηκε στο να κρατηθούν οι διαστάσεις της εικόνας (1980 x 1820) καθώς θα έπρεπε να ταιριάζουν απόλυτα με τα βίντεο και τις εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν για το calibration των καμερών. Επίσης το frame rate των βίντεο έπρεπε να κρατηθεί στα 30 fps (frames per second) καθώς αυτό ήταν μέγιστο δυνατό ποσοστό που μπορούσαν να παρέχουν όλα τα κινητά.

Το τελευταίο αποτελεί και μια από τις πιθανότερες αιτίες αστοχιών και σφαλμάτων κατά την πειραματική διαδικασία, καθώς ο αριθμός των frames ανά λεπτό είναι πάρα πολύ μικρός για να πιάσει με λεπτομέρεια γρήγορες κινήσεις χωρίς να θολώσει κάποια από τα frames (motion blur). Να σημειωθεί ότι οι κάμερες VICON παρέχουν βίντεο μέχρι και 260 fps.

3.4.4 Person association

Αφού οι κάμερες έχουν βαθμονομηθεί και το pose estimation μέσω του openpose έχει δημιουργήσει τους απαραίτητους φακέλους με τις συντεταγμένες κινήσεις, δίνεται η εντολή στο πρόγραμμα να λάβει υπόψη του μόνο το άτομο που έχει καταγραφεί από όλες τις κάμερες (person association), αγνοώντας τους τριγύρω παρευρισκόμενους. Η διαδικασία αυτή γίνεται σχεδόν αυτόματα και δίνει εξαιρετικά αξιόπιστα αποτελέσματα με το σφάλμα να κυμαίνεται μεταξύ των 0.01% και 0.1% αποκλεισμένων χρόνου καμερών.

Το σφάλμα αυτό δείχνει στην ουσία το ποσοστό από τα βίντεο που το πρόγραμμα δεν ήταν σε θέση να επεξεργαστεί για να κάνει τον εντοπισμό των εμφανιζόμενων ατόμων.

Η διαδικασία αυτή δεν λαμβάνει χώρα εντός του συστήματος VICON, καθώς οι κάμερες υπερέθρων εντοπίζουν και καταγράφουν μόνο τους markers που φέρει το άτομο που εκτελεί τις κινήσεις

3.4.5 Τρισδιάστατος τριγωνισμός στο Pose2Sim

Στην συνέχεια δίνεται η εντολή να γίνει το triangulation όπου και το πρόγραμμα δημιουργεί τα δεδομένα για να φορτωθούν στο μοντέλο που θα προσομοιώσει την κίνηση στο OpenSim.

Το σφάλμα σε αυτή την διαδικασία κυμαίνονταν από το 30% έως το 60% αποκλεισμένου χρόνου καμερών το οποίο είναι πολύ κοντά στο 50% που προτείνει ο δημιουργός τους προγράμματος.

Για την μείωση του σφάλματος σε ακόμα μικρότερο ποσοστό θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν περισσότερες κάμερες.

Το 3D triangulation είναι μια εξαιρετικά απαιτητική διαδικασία και ευαίσθητη σε πλήθος παραμέτρων. Δεδομένου ότι το Pose2Sim βρίσκεται ακόμα σε πειραματική φάση τα υψηλά ποσοστά σφάλματος είναι αναμενόμενα.

Το πρόγραμμα του VICON φέρει λογισμικό που κάνει το triangulation αυτόματα χωρίς την ανάγκη περαιτέρω ενεργειών από τον χρήστη.

3.4.6 Φιλτράρισμα για μείωση του θορύβου

Για την καλύτερη αποτύπωση της ανθρώπινης κίνησης στο πρόγραμμα προσομοίωσης, δίνεται η εντολή να φιλτράρει τα αποτελέσματα του triangulation και να τα κανονικοποιήσει για την αποφυγή ανεπιθύμητου θορύβου στα τελικά δεδομένα.

3.4.7 Προσαρμογή διαστάσεων του μοντέλου στο OpenSim

Η πρώτη διαδικασία για την προσομοίωση της κίνησης στο OpenSim είναι να λάβει το μοντέλο τα δεδομένα διαστάσεων του ατόμου που καταγράφηκε. Αυτό γίνεται φορτώνοντας στην πλατφόρμα τα δεδομένα του triangulation από το T-pose. Το πρόγραμμα αυτόματα δημιουργεί το εξατομικευμένο μοντέλο που είναι έτοιμο στην συνέχεια να δεχθεί τα δεδομένα από την κάθε κίνηση.

Ήδη από την διαδικασία του scaling γίνεται αντιληπτό το εάν παρουσιάστηκε κάποιο σφάλμα κατά την διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων. Πολύ συχνά μετά το scaling η διαδικασία του calibration θα πρέπει να επαναληφθεί μέχρι να πάρουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Εάν το calibration δεν φέρει αποτέλεσμα είναι πιθανό το σφάλμα να οφείλεται στην πειραματική διάταξη.

Για τα δεδομένα από το VICON δεν ήταν ανάγκη να γίνει scaling του μοντέλου λόγω της χρήσης του AddBiomechanics. Τα μοντέλα που στάλθηκαν πίσω μετά την επεξεργασία των δεδομένων στον απομακρυσμένο server ήταν ήδη scaled και φορτωμένα με τα inverse kinematics.

3.4.8 Αντίστροφη κινηματική (Inverse Kinematics)

Αφού πραγματοποιήθηκε το scaling των μοντέλων η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται με σκοπό την εξαγωγή των δεδομένων κίνησης. Σε αυτό το σημείο τα αποτελέσματα του triangulation φορτώθηκαν στο μοντέλο και παρατηρήθηκε η κίνηση του στον χώρο.

Με τον όρο inverse kinematics περιγράφεται η μέθοδος μέσα από την οποία διαφορετικές αρθρώσεις αντιδρούν αλυσιδωτά και με φυσικό τρόπο στις μεταβολές που υπόκειται το σύστημα (Porovic et al., 2019).

Η πιστότητα της ομοιότητας στην κίνηση μεταξύ του μοντέλου και το άτομου κατά την πειραματική διαδικασία ήταν το πρώτο δείγμα ότι οι αστοχίες του Pose2Sim οφείλονται σε παραμέτρους που ήταν εξαιρετικά δύσκολο να ελεγχθούν στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη και με την παρούσα αρχιτεκτονική του προγράμματος.

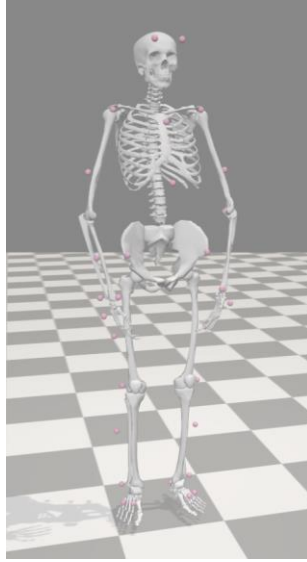
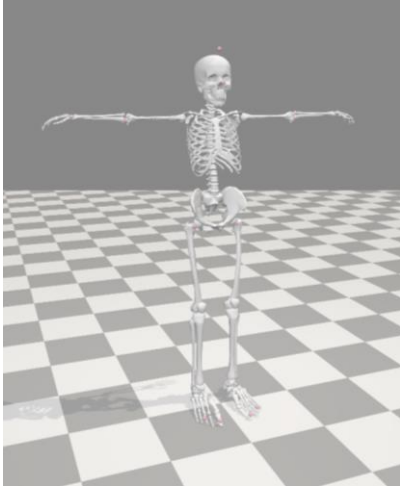
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Επεξεργασία δεδομένων

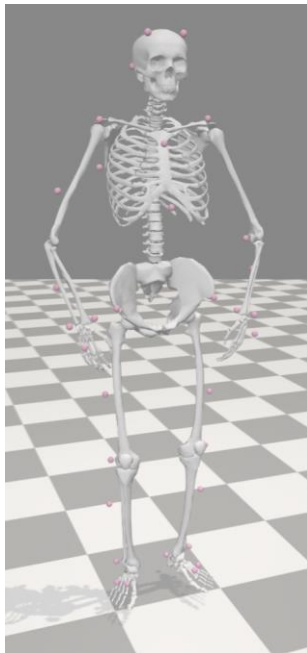
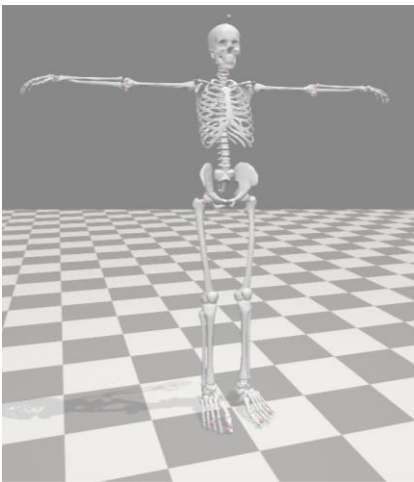
4.1.1 Προσαρμογή διαστάσεων του μοντέλου (Scale)

Παρακάτω παρουσιάζονται τα τέσσερα μοντέλα για το κάθε άτομο στο OpenSim βάση των δεδομένων του Pose2Sim (αριστερά) και του VICON (δεξιά).

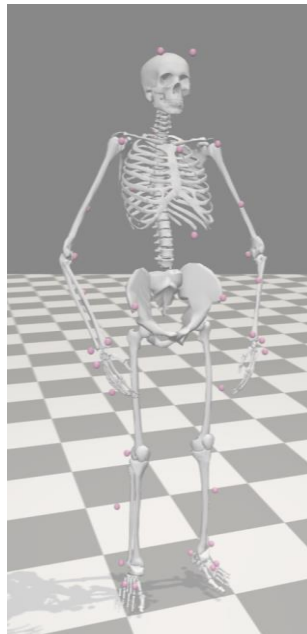
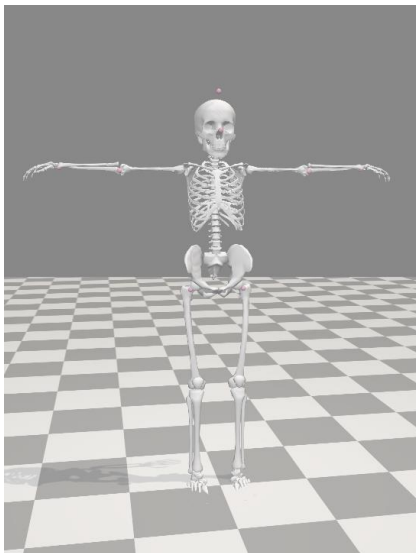
α.



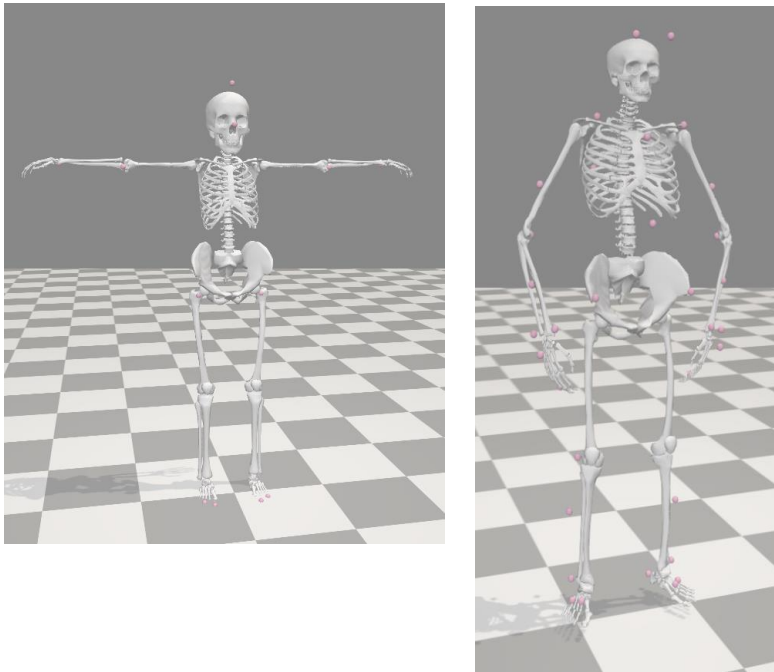
β.



γ.



δ.



Εικόνα 6: Εξατομικευμένο μοντέλα που προέκυψαν στο OpenSim βάση των δεδομένων από το Pose2Sim (αριστερά) και του VICON (δεξιά).

4.1.2 Φιλτράρισμα (Filtering)

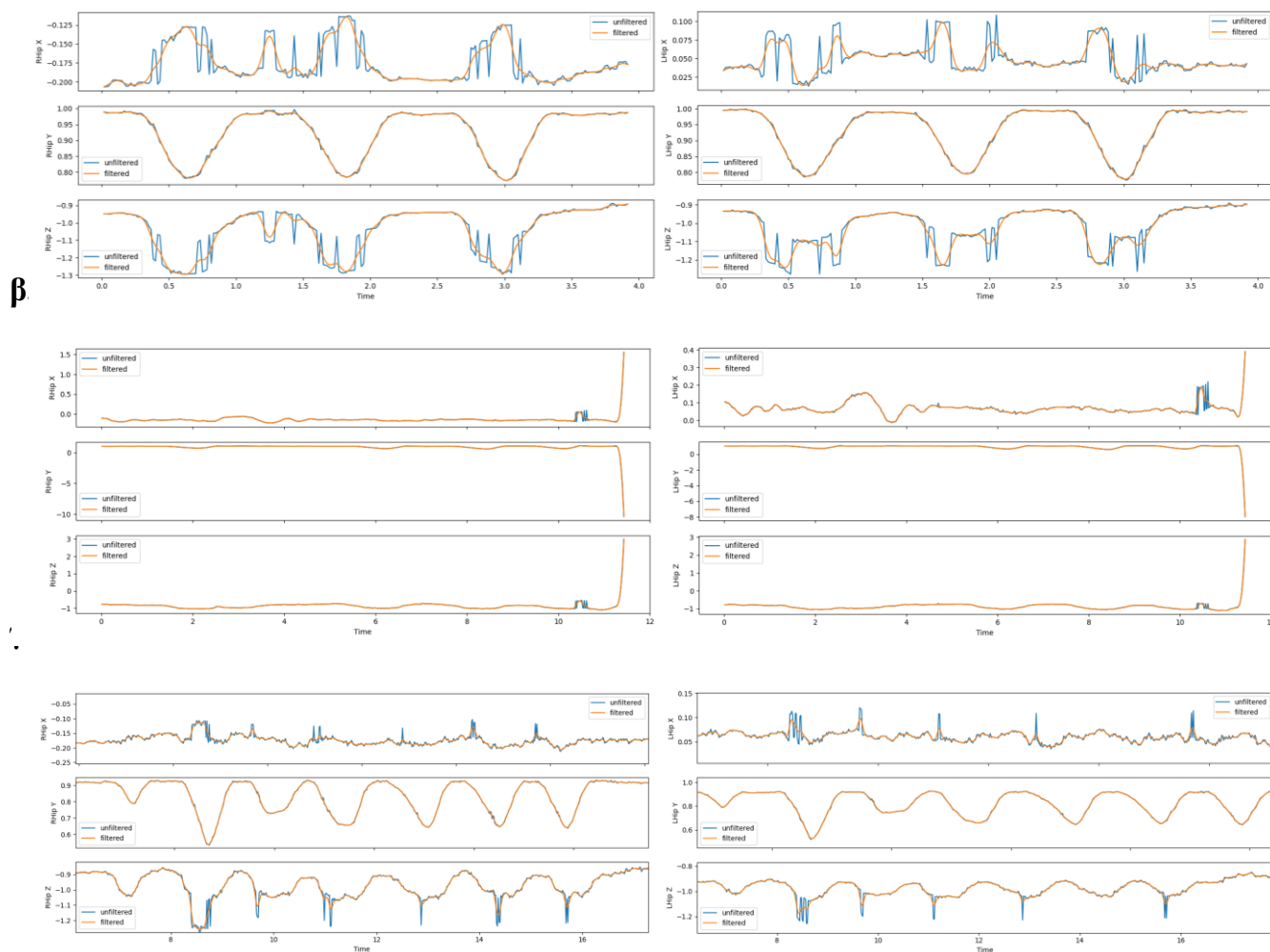
Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα σε μορφή πινάκων από την κάμψη του ισχίου και της γωνίας του γόνατος κατά την διάρκεια των δύο κατά την διάρκεια του καθίσματος και του βήματος στο σκαλοπάτι. Οι μπλε καμπύλες παρουσιάζουν τα δεδομένα μετά το triangulation και το πορτοκαλί γράφημα παρουσιάζει τα φιλτραρισμένα δεδομένα.

4.2 Αποτελέσματα πειραμάτων

Τα γραφήματα εξάγονται αυτόματα από το Pose2Sim χωρίς δυνατότητα επεξεργασίας της μορφής τους. Αποτελούν, ωστόσο ένα αξιόλογο μέσο προεπισκόπησης των αποτελεσμάτων πριν την διαδικασία της προσομοίωσης στο OpenSim. Παρακάτω παρουσιάζονται τα εν λόγω γραφήματα, με το δεξί και το αριστερό γόνατο αριστερά και τα αντίστοιχα μέρη του ισχίου δεξιά.

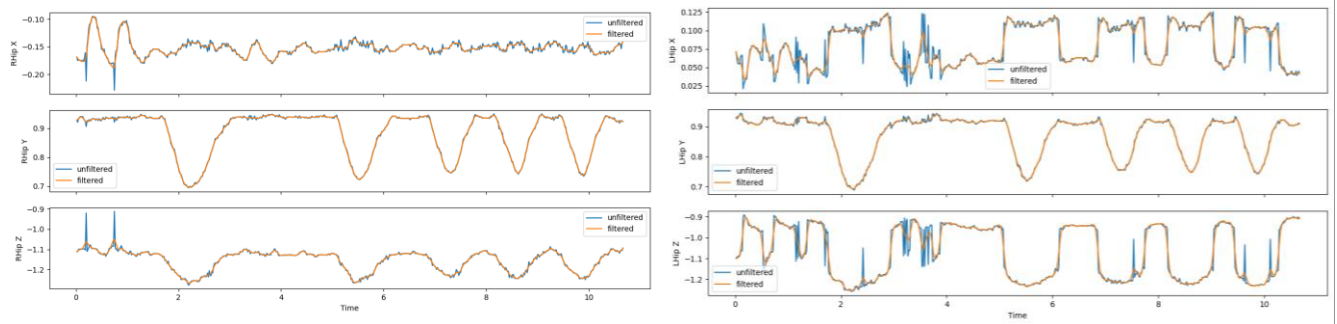
4.2.1 Βαθύ κάθισμα (Squat)

α.



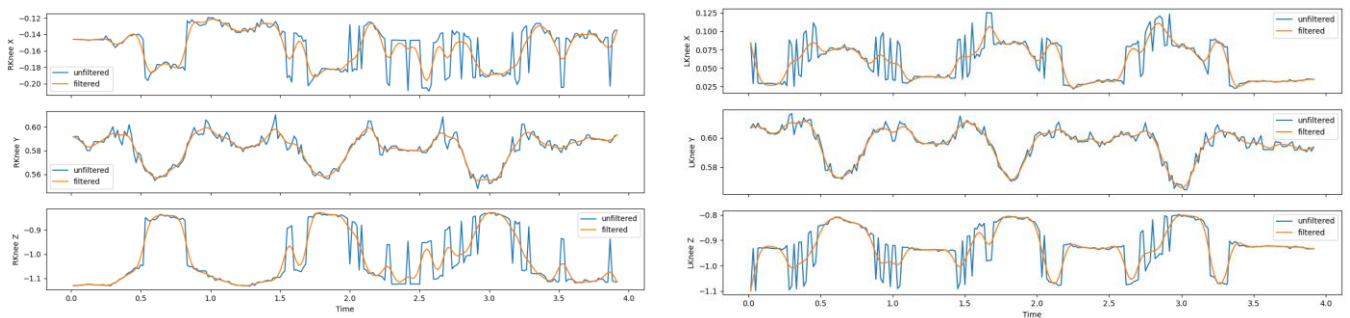
β

δ.

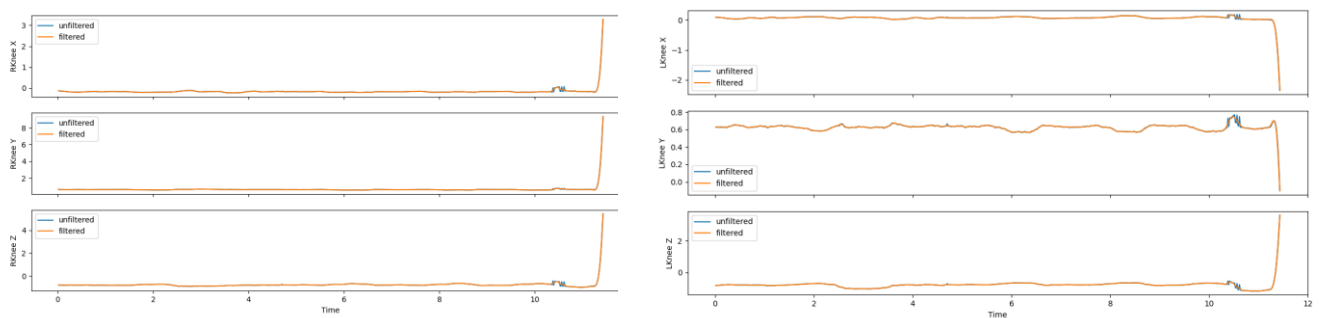


Γραφημα 1 :Κάμψη ισχίου για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος βάση των δεδομένων από το Rose2Sim. Παρουσιάζονται το δεξί και το αριστερό μέρος του ισχίου αντίστοιχα. (α) Subject 1, (β)Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

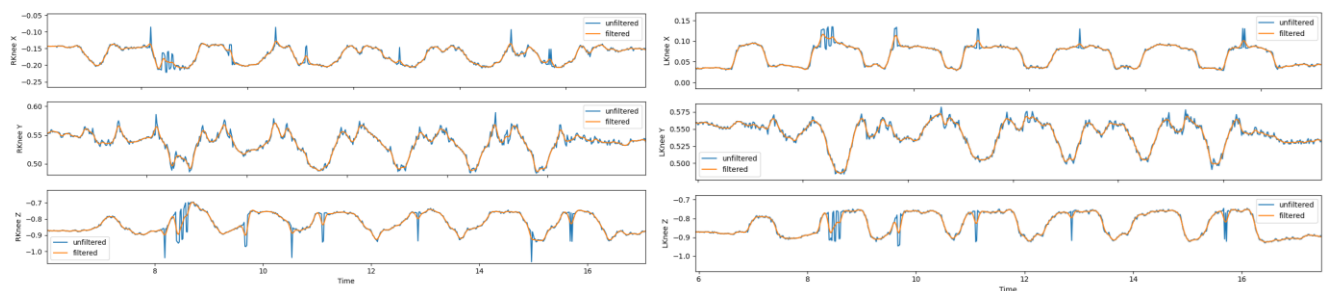
α.



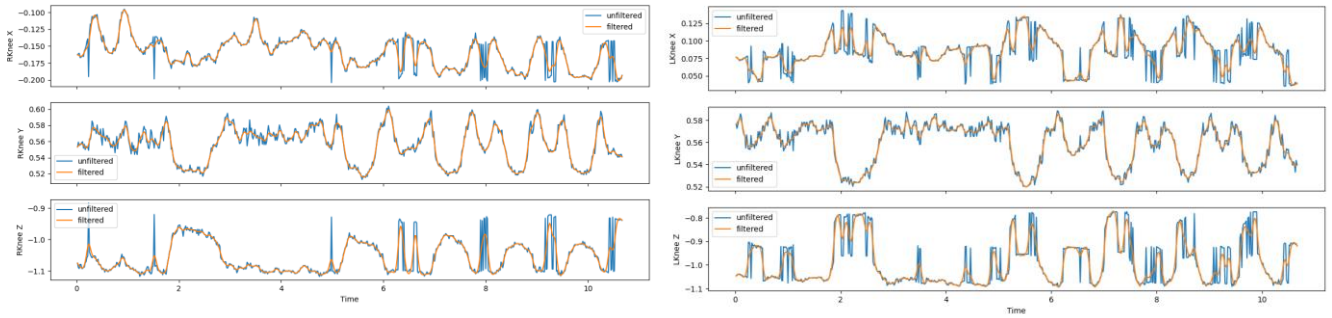
β.



γ.



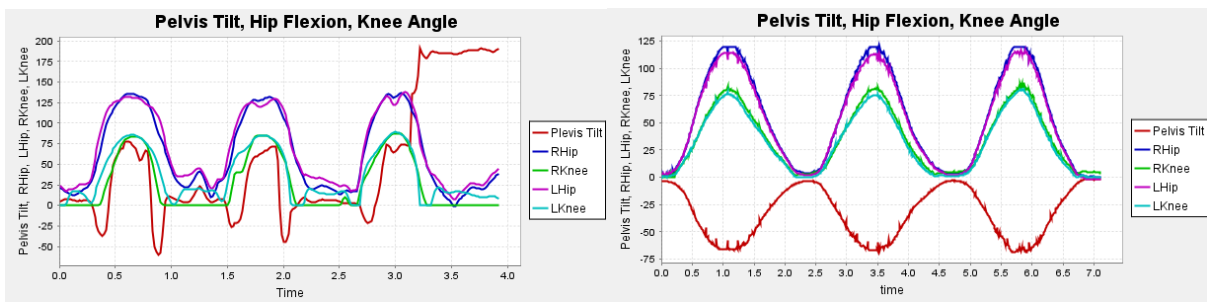
δ.



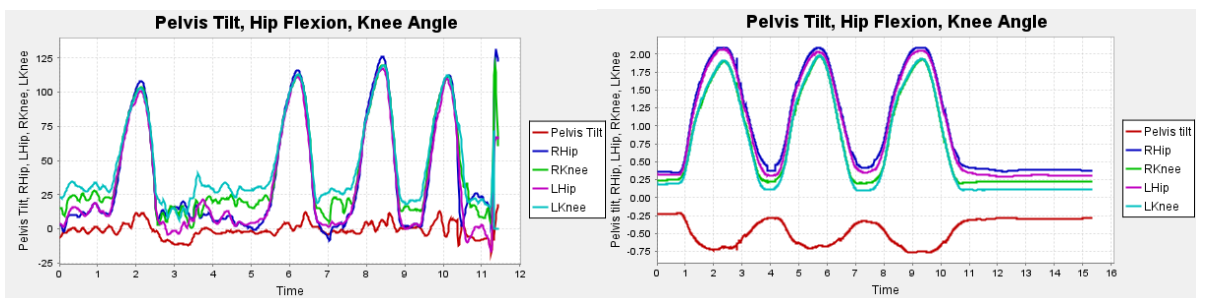
Γραφημα 2: Γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος βάση των δεδομένων από το Pose2Sim. Παρουσιάζονται το δεξί και το αριστερό γόνατο αντίστοιχα. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα κάμψης ισχίου, γωνίας του γόνατος αλλά και κλίσης της λεκάνης για το βαθύ κάθισμα. Με δεξιά να παρουσιάζονται τα δεδομένα που πήραμε από το σύστημα VICON και αριστερά τα δεδομένα του Pose2Sim. Τα γραφήματα αυτά εξήχθησαν από το OpenSim βάση των προσομοιώσεων.

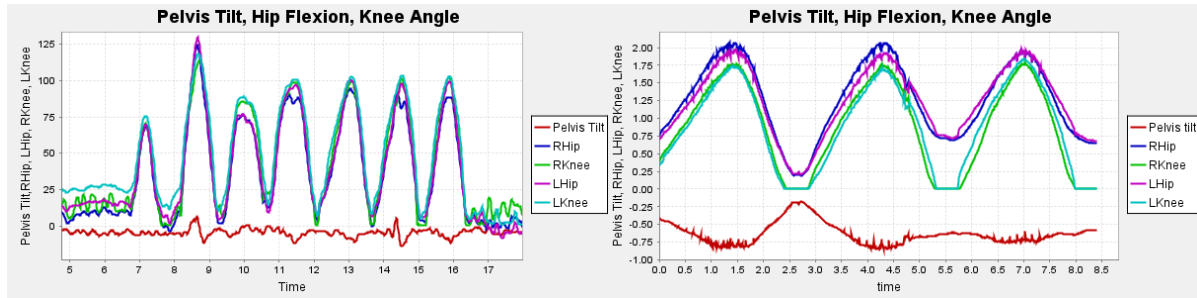
α.



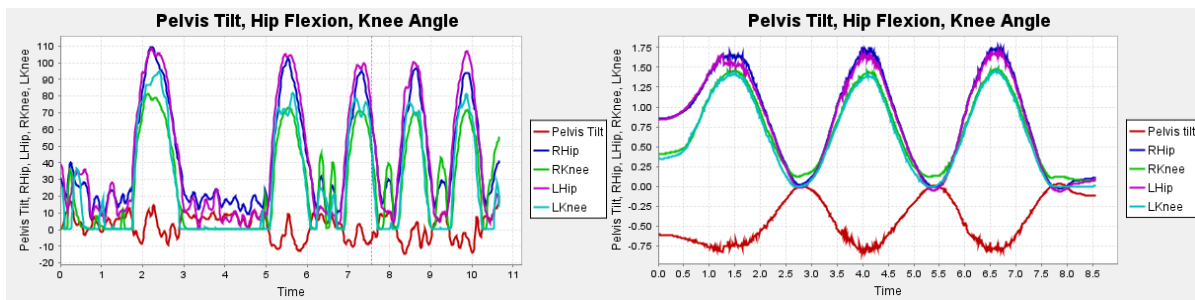
β.



γ.



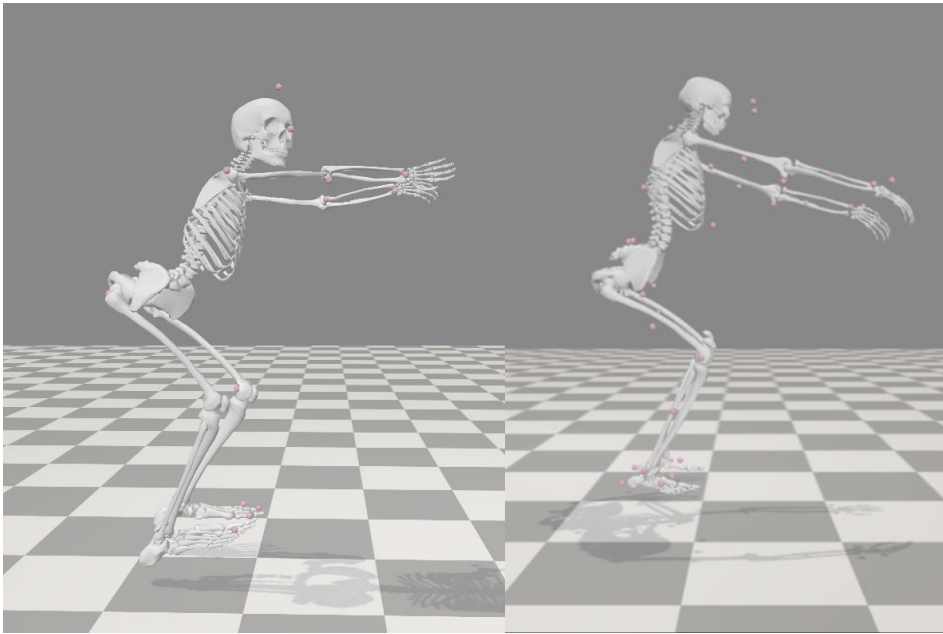
δ.



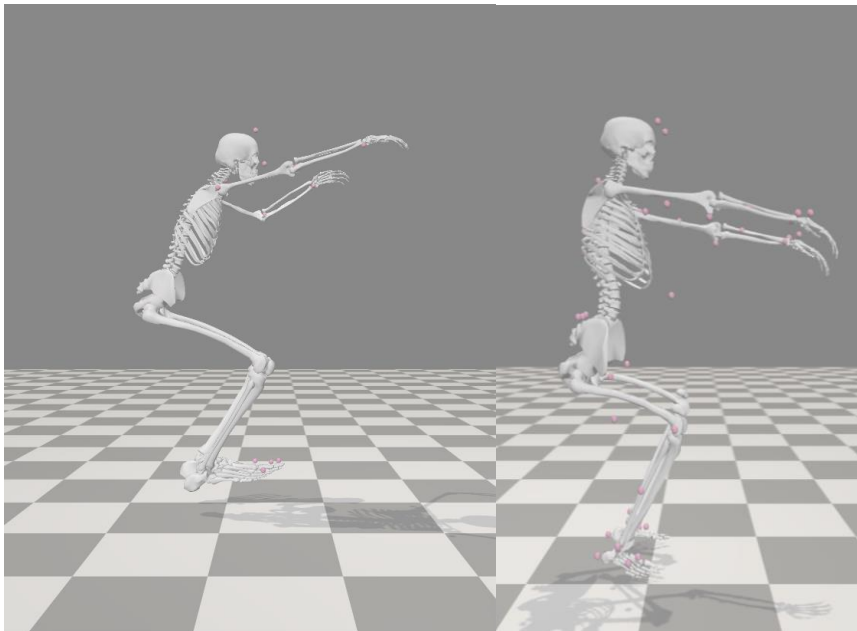
Γραφημα 3:Κλίση λεκάνης, κάμψη ισχίου και γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του καθίσματος για τα δυο συστήματα, Pose2Sim (αριστερά) και VICON (δεξιά). (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4.

Από το OpenSim δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής βίντεο και στατικών εικόνων κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων για περαιτέρω μελέτη της κίνησης του ατόμου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να παρατηρηθούν σκελετικές ανωμαλίες ή απρόβλεπτες κινήσεις που πιθανόν να οφείλονται σε αστοχία των δεδομένων ή της διαδικασίας καταγραφής. Εφόσον η πειραματική διαδικασία βεβαιωθεί πως έχει δώσει αξιόπιστα δεδομένα, οι λόγοι των παραπάνω ανωμαλιών μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν ιατρικό ενδιαφέρον.

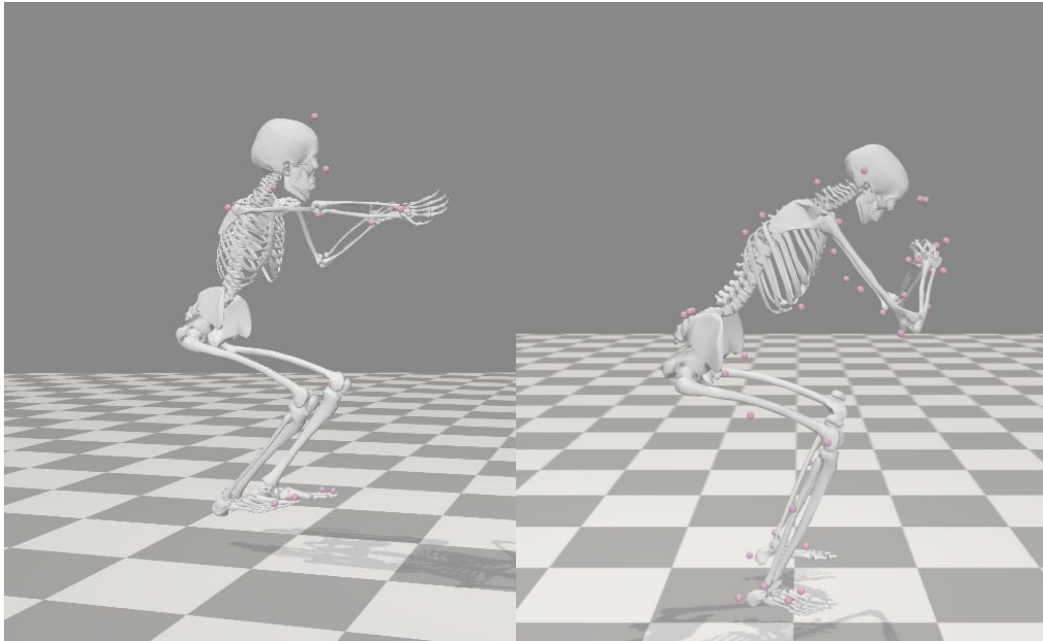
α.



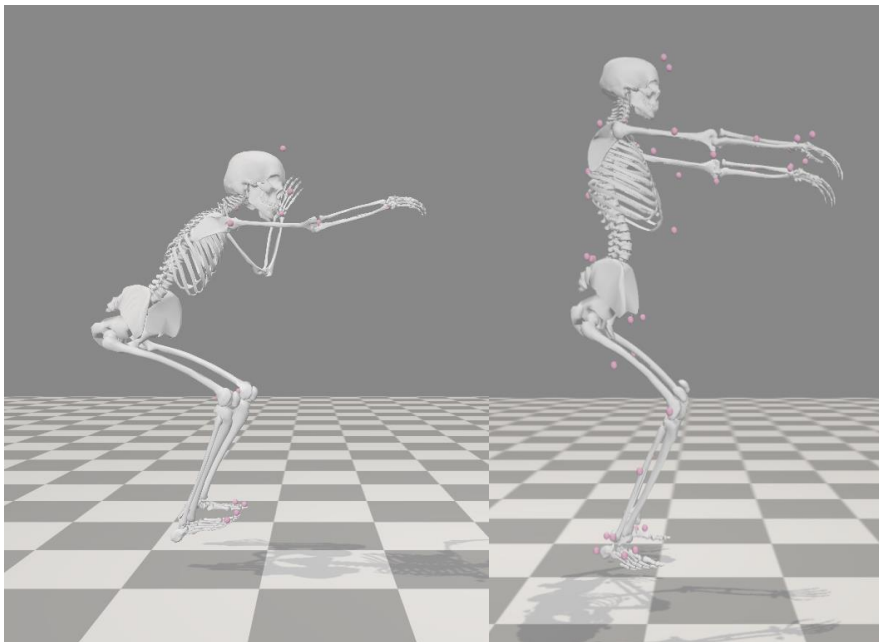
β.



γ.



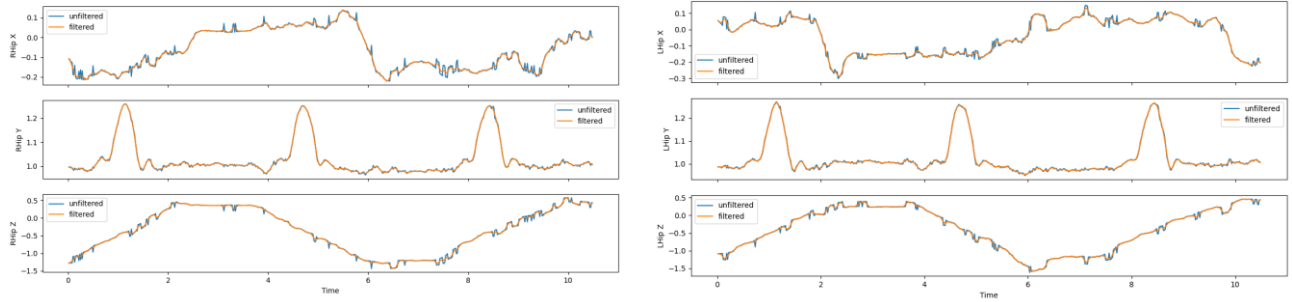
δ.



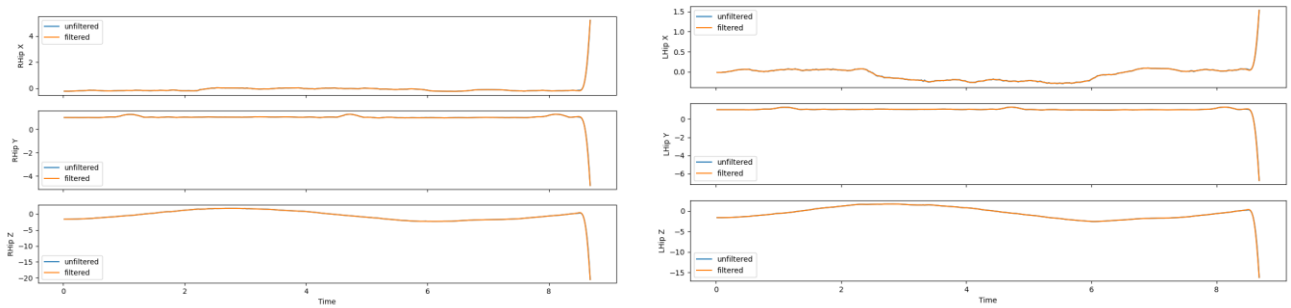
Εικόνα 7: Η προσομοίωση της κίνησης των τεσσάρων μοντέλων βάση των δεδομένων του Pose2Sim (αριστερα) και VICON (δεξιά) για το βαθύ κάθισμα στο ίδιο στιγμιότυπο της κίνησης του ατόμου. (α.)Subject 1, (β.)Subject 2, (γ.)Subject 3, (δ.) Subject 4. Είναι εμφανής οι αποκλίσεις των δύο μοντέλων και τα σφάλματα που φέρει η προσομοίωση του Pose2Sim.

4.2.2 Βήμα σε σκαλοπάτι (Step)

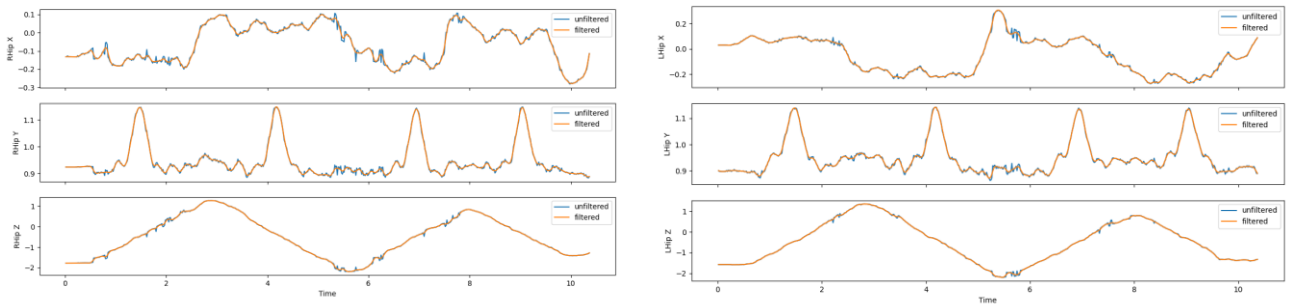
α.



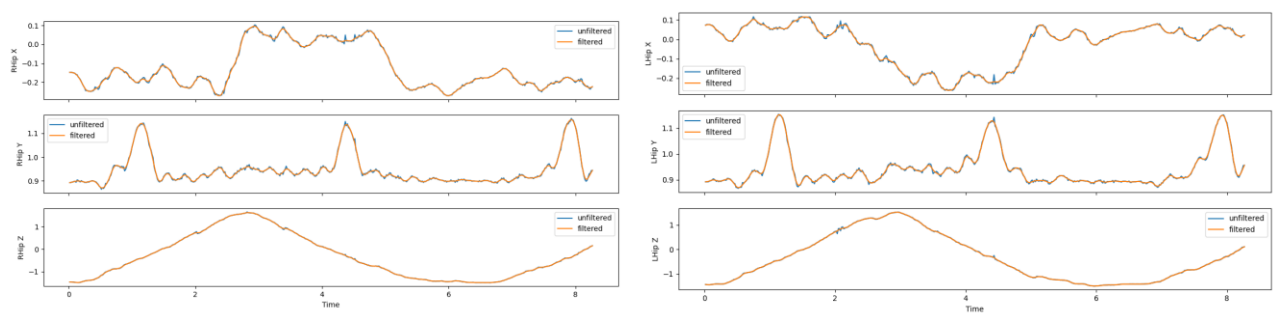
β.



γ.

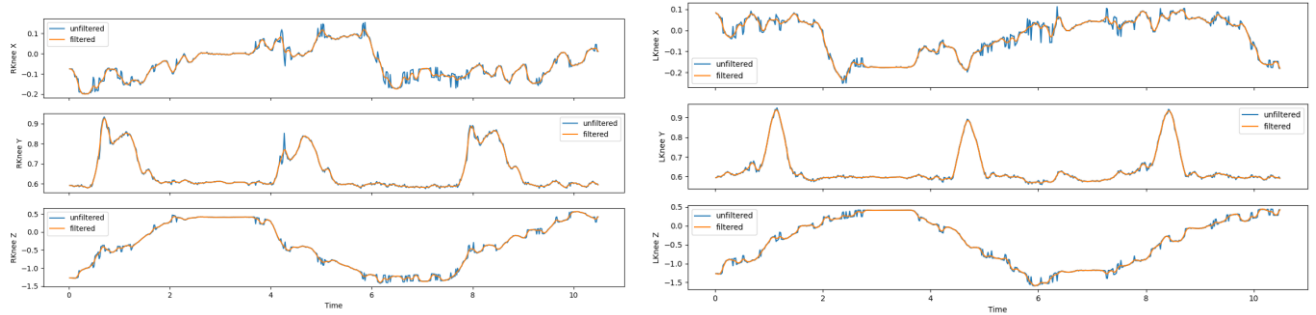


δ.

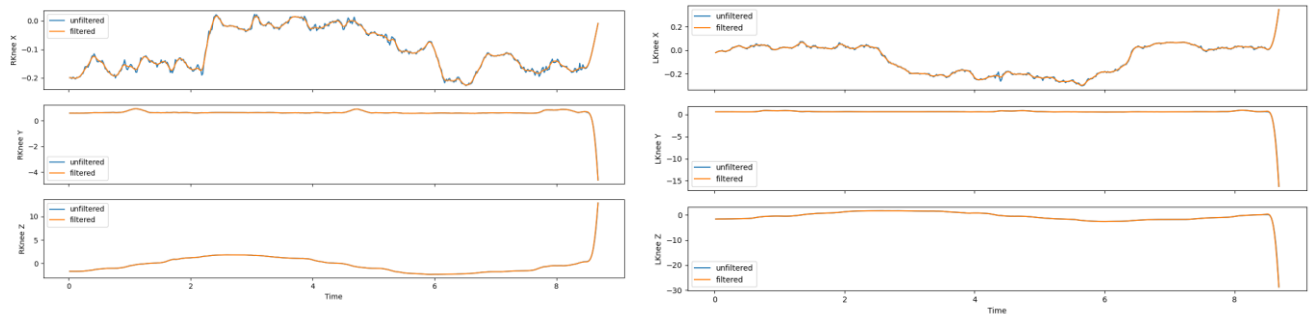


Γραφημα 4 :Κάμψη ισχύου για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος σε σκαλοπάτι βάση των δεδομένων από το Pose2Sim. Παρουσιάζονται το δεξί και το αριστερό μέρος του ισχύου αντίστοιχα. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

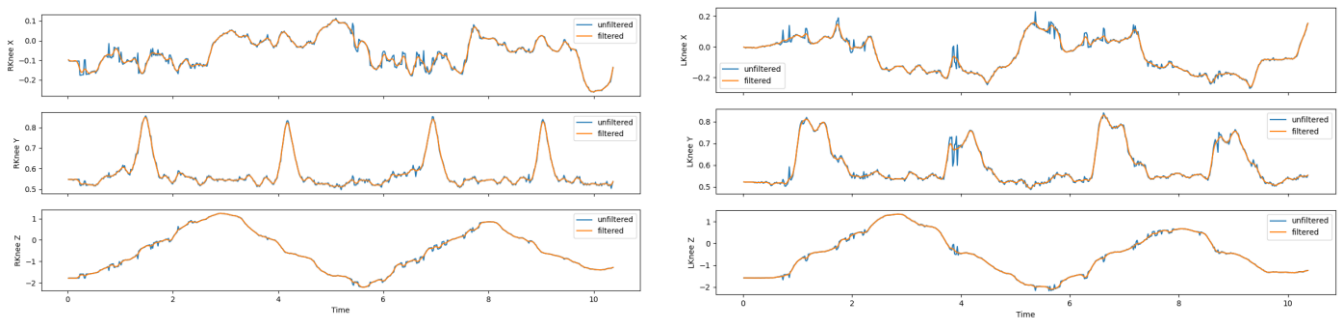
α.



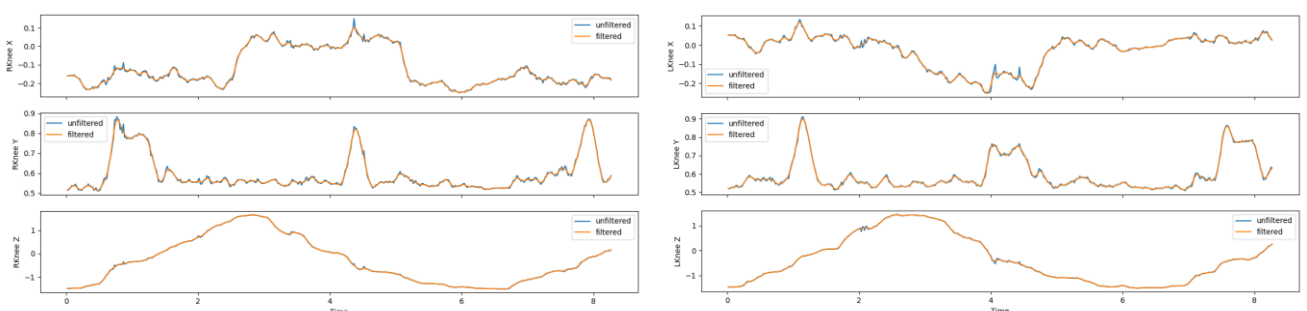
β.



γ.



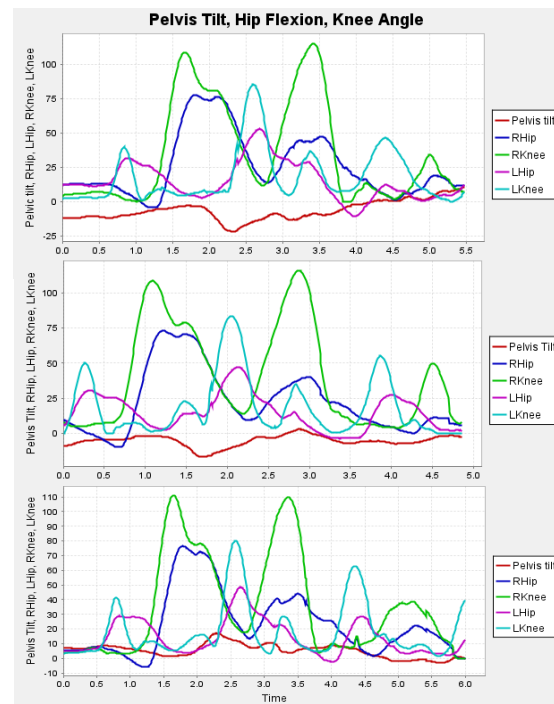
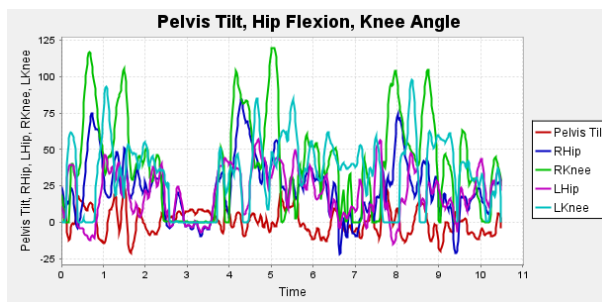
δ.



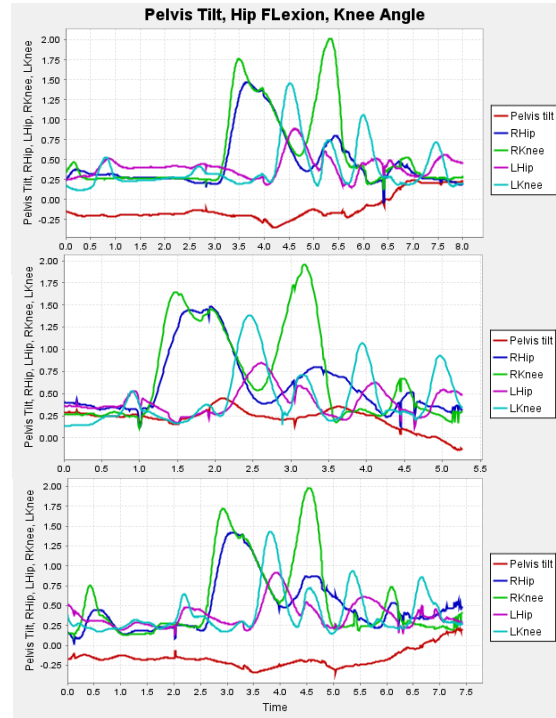
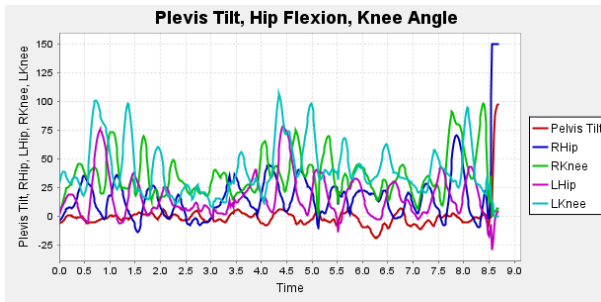
Γραφημα 5: Γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος στο σκαλοπάτι βάση των δεδομένων από το Pose2Sim. Παρουσιάζονται το δεξί και το αριστερό μέρος του ισχίου αντίστοιχα. (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα κάμψης ισχίου, γωνίας του γόνατος αλλά και κλίσης της λεκάνης για το βαθύ κάθισμα, με δεξιά να παρουσιάζονται τα δεδομένα που πήραμε από το σύστημα VICON σε τρία μέρη όπως καταγράφηκαν και αριστερά τα δεδομένα του Pose2Sim σαν ενιαίο διάγραμμα της κίνησης στον χρόνο. Τα γραφήματα αυτά εξήχθησαν από το OpenSim βάση των προσομοιώσεων.

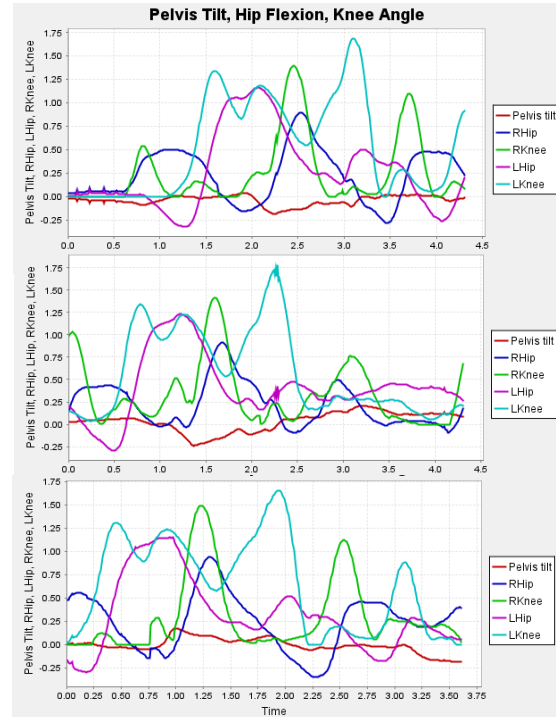
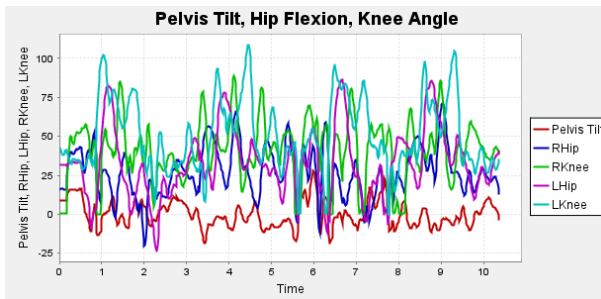
α.



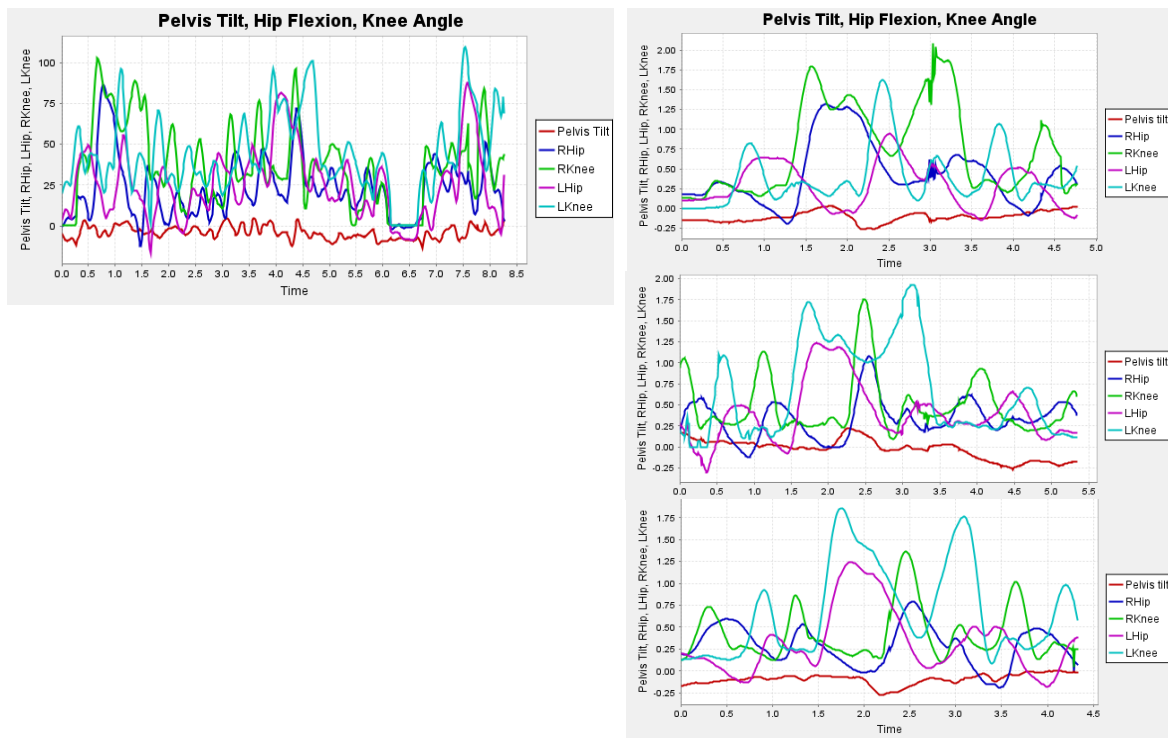
β.



γ.

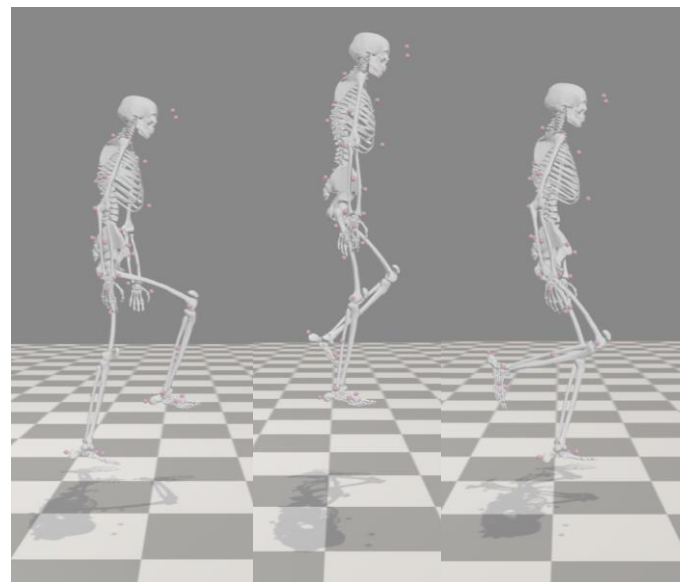
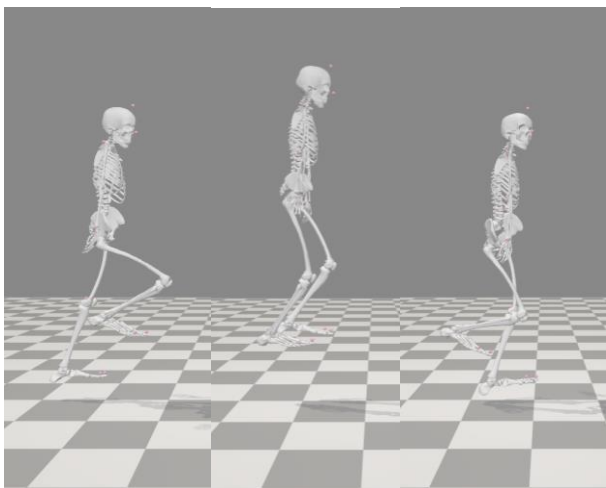


δ.

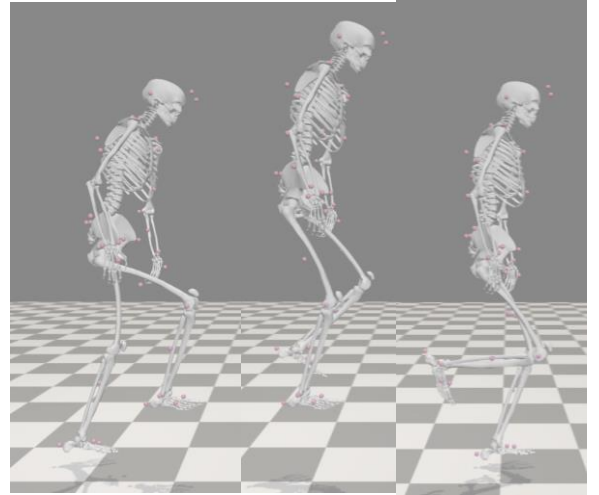
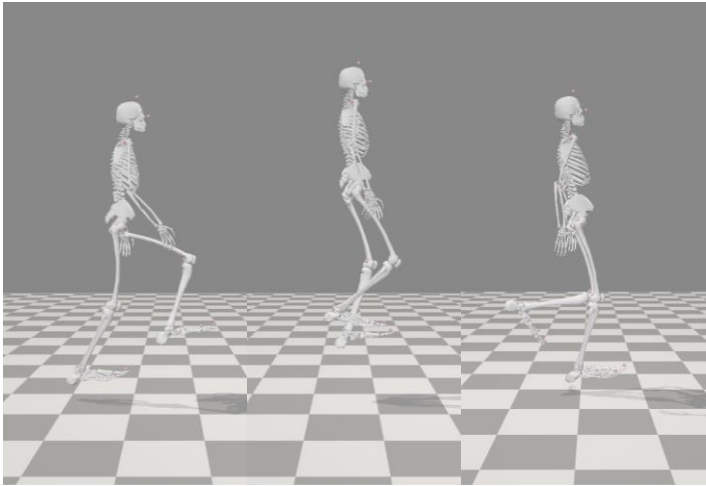


Γραφημα 6: Κλίση λεκάνης, κάμψη ισχίου και γωνία γόνατος για κάθε subject κατά την διάρκεια του βήματος στο σκαλοπάτι. Pose2Sim (αριστερά) και VICON (δεξιά). (α) Subject 1, (β) Subject 2, (γ) Subject 3, (δ) Subject 4

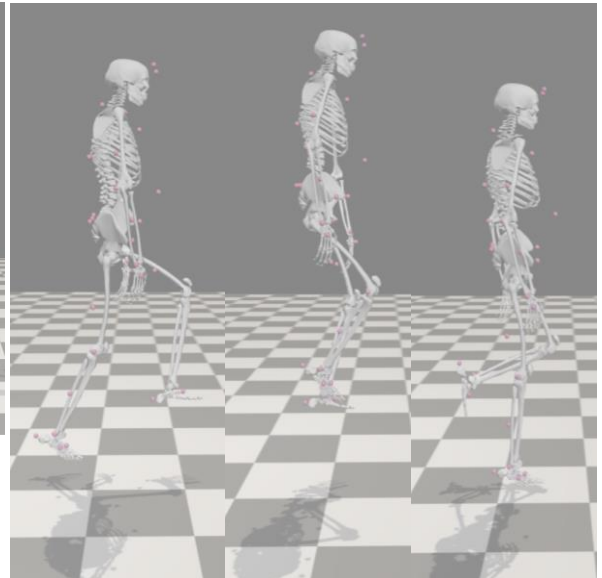
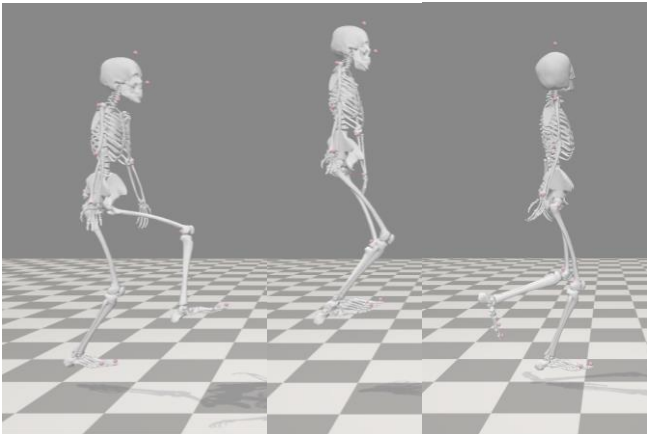
α.



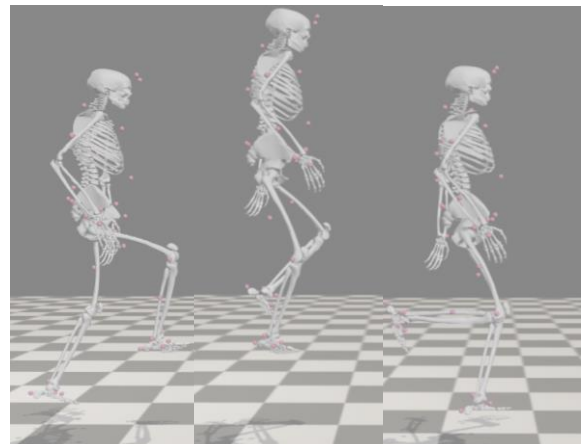
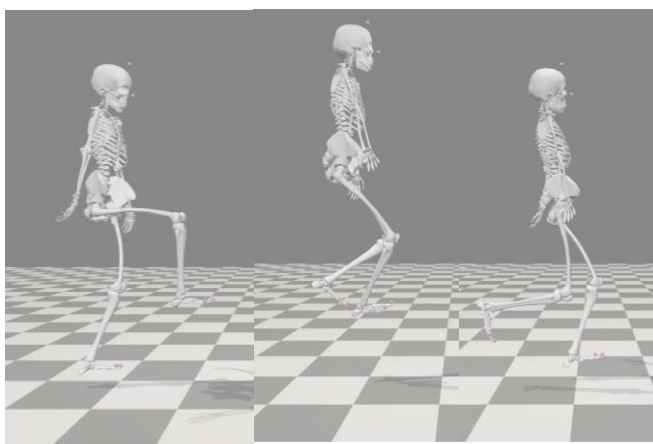
β.



γ.



δ.



Εικόνα 8: Η προσομοίωση της κίνησης των τεσσάρων μοντέλων βάση των δεδομένων του Pose2Sim για το βήμα στο σκαλοπάτι χωρισμένη στα τρία βασικά σημεία της κίνησης του ατόμου. Pose2Sim (αριστερά) και VICON (δεξιά). (α.)Subject 1, (β.)Subject 2, (γ.)Subject 3, (δ.) Subject 4. Είναι εμφανής οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα και τα σφάλματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Περιορισμοί και σφάλματα

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν ανταποκρίθηκαν στο βαθμό των προσδοκιών μας. Τα σφάλματα που παρουσιάστηκαν, ανεξάρτητα αν οφείλονταν στην ποιότητα καταγραφής, ή στην λειτουργία του ίδιου του προγράμματος, αποδείχθηκε εξαιρετικά δύσκολο να εντοπιστούν κατά την πειραματική διαδικασία.

Η χρήση συσκευών smartphone, επίσης, είναι πιθανό να οδήγησε σε σφάλματα των δεδομένων της βαθμονόμησης, καθώς κάθε κινητό έφερε διαφορετικές παραμέτρους στην κάμερα του και την ποιότητα της εικόνας του, πράγμα που δεν θα συνέβαινε στην περίπτωση ομοιομορφίας των καμερών.

Το γεγονός ότι η ανάλυση κίνησης γίνεται σε δεύτερο χρόνο εξ αιτίας της μεγάλης διαδικασίας που απαιτείται καθιστά σχεδόν ανέφικτη την προεπισκόπηση των αποτελεσμάτων. Αυτό οδήγησε στην παραγωγή υψηλού ποσοστού σφαλμάτων αλλά και απορρίψεις ολόκληρων πειραματικών διατάξεων. Παραδείγματος χάριν, είχαν γίνει καταγραφές απλής βάρδισης που λόγω της λάθος καταγραφής έδωσαν εντελώς αλλοιωμένα αποτελέσματα.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα που φέρει η χρήση του Pose2Sim είναι το φαινόμενο του “μαύρου κουτιού” (black box). Δηλαδή το γεγονός ότι ο χρήστης είναι αδύνατον να έχει εικόνα του πως το πρόγραμμα έφτασε στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα κατά την εφαρμογή του triangulation, καθώς και την πιθανή πηγή των σφαλμάτων. Δυστυχώς, μέχρι στιγμής, μόνο εικασίες είναι δυνατό να γίνουν αν και η συχνή χρήση και έντονη

τριβή με το πρόγραμμα βοηθάει τον χρήστη να κατανοήσει εμπειρικά την φύση κάποιων αποτελεσμάτων. Ωστόσο δεν προτείνεται ακόμη για κλινική εφαρμογή. Η έρευνα μας κατέδειξε τους εμφανείς περιορισμούς της ανάλυσης κίνησης μέσω τεχνητής νοημοσύνης ως ιατρικό εργαλείο. Η μέθοδος, σε παγκόσμιο επίπεδο είναι σε νεογνικό στάδιο και τα τελευταία τρία χρόνια κάνει τα πρώτα της βήματα ειδικά λόγω των βιβλιοθηκών ανοιχτού κώδικα και του μεγάλου ενδιαφέροντος από εργαστήρια και ομάδες που είναι διατεθειμένα να μοιραστούν τα ευρήματα και τις καινοτομίες τους. Η ραγδαία βελτίωση των υπολογιστικών μεθόδων και της τεχνολογίας των κινητών τηλεφώνων, υπόσχεται μια βελτιωμένη εικόνα στο μέλλον.

5.2 Μελλοντική έρευνα

Αν και η επανάληψη των πειραμάτων με την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη με σκοπό την περαιτέρω μείωση των σφαλμάτων θα ήταν μια πρόταση, είναι γεγονός πως η ανάγκες της έρευνας απαιτούν πιο εξειδικευμένα εργαλεία.

Το γεγονός ότι πρόγραμμα Pose2Sim είναι ανοικτού κώδικα επιτρέπει στον χρήστη να επέμβει και να αλλάξει, να προσθέσει αλλά και να βελτιώσει παραμέτρους μέχρις ότου να μπορεί να αποδώσει τα μέγιστα κάτω από τις συνθήκες που επιβάλλει η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.

Η χρήση συσκευών smartphone επιλέχθηκε λόγω της διαθεσιμότητας που υπάρχει αλλά και της σχετικής ποιότητας στην εικόνα που δεν θα μπορούσε να μας δώσει καμία άλλη τόσο ευρέως διαθέσιμη συσκευή καταγραφής.

Ωστόσο, σε μια μελλοντική έρευνα θα μπορούσαν να αναπτυχθούν κάμερες χαμηλού κόστους που θα έφεραν τις λειτουργίες του Pose2Sim ενσωματωμένες. Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να μειώσει εξαιρετικά τον χρόνο επεξεργασίας των δεδομένων αλλά και την πολυπλοκότητα της πειραματικής διαδικασίας. Ένα πιθανό εργαλείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή τέτοιων καμερών είναι το πακέτο εξαρτημάτων της Raspberry Pi.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη έγινε η σύγκριση μεταξύ δύο συστημάτων καταγραφής κίνησης, προκειμένου να προσδιοριστεί ο βαθμός που ένα φορητό και οικονομικό σύστημα προσεγγίζει ένα εργαστηριακό σύστημα αναφοράς. Τα δεδομένα καταδεικνύουν την υπεροχή του VICON σε επίπεδο ακρίβειας των αποτελεσμάτων, ωστόσο είναι γεγονός ότι η ευκολία, ταχύτητα και το χαμηλό κόστος που φέρει η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης δεν μπορεί παρά να λειτουργήσει ενθαρρυντικά για επόμενες μελέτες.

Συγκεκριμένα για το Pose2Sim, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν μεγάλες αστοχίες στην προσέγγιση ακόμα και της φυσιολογίας των ατόμων, κάτι που, προφανώς, αποτυπώθηκε και στα δεδομένα κίνησης. Αντίθετα η καθαρότητα των δεδομένων του VICON ήταν επίσης εμφανής και αδιαμφισβήτητη.

Δεδομένου της χαμηλής ποιότητας των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης μελέτης είναι σωστό να αναφερθεί η πρώιμη φάση στην οποία βρίσκεται ακόμα η συγκεκριμένη τεχνολογία. Η σύγκριση με ένα πρόγραμμα που εξελίσσεται εδώ και δεκαετίες είναι προφανώς άνιση αλλά επιτρέπει στην καλύτερη διαπίστωση των περιορισμών που υπάρχουν όπως και των ρεαλιστικών στόχων που πρέπει να τεθούν στο μέλλον. Το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας για την ανάλυση κίνησης με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης είναι αμείωτο και εκθετικά αναπτυσσόμενο, γεγονός που υπόσχεται συνεχείς και αλματώδεις εξελίξεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Akhraş, M.A., Bortoletto, R., Madehkhaksar, F., Tagliapietra, L. (2016).
Neural and Musculoskeletal Modeling: Its Role in
Neurorehabilitation, Emerging Therapies in Neurorehabilitation
II. Biosystems & Biorobotics, vol 10,

2016.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-24901-8_5

Andrea Cimolato, Giovanni Milandri, Leonardo S. Mattos et al., Hybrid Machine Learning-Neuromusculoskeletal Modeling for Control of Lower Limb Prosthetics, 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2020.

<https://10.1109/BioRob49111.2020.9224448>

Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S.-E., & Sheikh, Y., OpenPose: Realtime multiperson 2D pose estimation using part affinity fields. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019.

<https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2929257>

Cheng Xu, Jie He, Xiaotong Zhang, Xinghang Zhou & Shihong Duan, Towards Human Motion Tracking: Multi-Sensory IMU/TOA Fusion Method and Fundamental Limits, Electronics, 2019.

<https://doi.org/10.3390/electronics8020142>

Colton D. Babcock, Victoria L. Volk, Wei Zeng et al., Neural-driven activation of 3D muscle within a finite element framework: exploring applications in healthy and neurodegenerative simulations, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2023.

<https://doi.org/10.1080/10255842.2023.2280772>

Delp, S. L., Anderson, F. C., Arnold, A. S., Loan, P., Habib, A., John, C. T., Guendelman, E., & Thelen, D. G., 2007. OpenSim: Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 54(11), 1940–1950.

<https://doi.org/10.1109/TBME.2007.901024>

Eberhart H, Inman V, “Fundamental studies of human locomotion and

other information relating to design of artificial limbs”, 1947.

Inman V, Ralston H, Todd F, “Human Walking”, 1981.

Hidalgo, G. (2019). OpenPose experimental models. In GitHub repository.
GitHub.

https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose_train/tree/master/experimental_models#body_25b-model---option-2-recommended

Hoa X. Hoang, Claudio Pizzolato, Laura E. Diamond, David G. Lloyd,
Subject-specific calibration of neuromuscular parameters
enables neuromusculoskeletal models to estimate
physiologically plausible hip joint contact forces in healthy
adults, Journal of Biomechanics,
2018.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.08.023>

Kaustubh Sadekar, Satya Mallick, Camera Calibration using OpenCV,
LearnOpenCV,
2022.

<https://learnopencv.com/camera-calibration-using-opencv/>

Keenon Werling, Nicholas A. Bianco, Michael Raitor, Jon Stingel,
Jennifer L. Hicks, Steven H. Collins, Scott L. Delp, C. Karen
Liu, AddBiomechanics: Automating model scaling, inverse
kinematics, and inverse dynamics from human motion data
through sequential optimization, bioRxiv, 2023

<https://doi.org/10.1101/2023.06.15.545116>

Lars Mündermann, Stefano Corazza¹ and Thomas P Andriacchi
Longbin Zhang, Xiaochen Zhang, Xueyu Zhu, Ruoli Wang, Elena
M. Gutierrez-Farewik, Neuromusculoskeletal model-informed
machine learning-based control of a knee exoskeleton with
uncertainties quantification, Frontier in Neuroscience, 2023.

<https://10.3389/fnins.2023.1254088>

Marco Iosa, Pietro Picerno, Stefano Paolucci & Giovanni Morone,

Wearable inertial sensors for human movement analysis, Expert Review of Medical Devices, 2016.

<https://doi.org/10.1080/17434440.2016.1198694>

Marey E., “Animal Mechanism: A Treatise on Terrestrial and Aerial Locomotion”, 1874

Marko B. Popovic, Matthew P. Bowers, 2 - Kinematics and Dynamics, Biomechatronics, 2019.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812939-5.00002-1>

Martelli, S, Taddei, F, Testi, D, Delp, S, & Viceconti, NMSBuilder: An application to personalize NMS models, 23rd Congress of the International Society of Biomechanics, 2011.

<https://eprints.qut.edu.au/202704/1/63065157.pdf>

Muybridge Eadeward , “Animal Locomotion”, 1887

Pagnon, David and Domalain, Mathieu and Reveret, Lionel, Pose2Sim: An End-to-End Workflow for 3D Markerless Sports Kinematics—Part 1: Robustness, Sensors, 2021.

<http://doi.org/10.3390/s21196530>

Pagnon, David and Domalain, Mathieu and Reveret, Lionel, Pose2Sim: An End-to-End Workflow for 3D Markerless Sports Kinematics—Part 2: Accuracy, Sensors, 2022.

<https://10.3390/s22072712>

R. Suweth, Dr. V. Subedha, Dr. T. Kalaichelvi, Dr. S. Hemalatha, Motion Capture using 3d, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), 2017.

<http://doi.org/10.22214/ijraset.20174218>

Scott Uhlrich, Thomas K. Uchida, Marissa Rachel Lee, Ten steps to becoming a musculoskeletal simulation expert: A half-century of progress and outlook for the future, Journal of Biomechanics, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111623>

Vladimir Medved, Measurement of Human Locomotion, 2000.

Yalin Liao, Aleksandar Vakanski, Min Xian, David Paul, Russell Baker, A review of computational approaches for evaluation of rehabilitation exercises, Computers in Biology and Medicine, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2020.103687>

Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000.

<https://doi.org/10.1109/34.888718>