

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Corso di Laurea in Ingegneria Biomedica

***Analisi del movimento dell'Axel nel pattinaggio
di figura***

RELATORE: Prof.ssa Sawacha Zimi

LAUREANDA: Zanella Irene

CORRELATORE: Ing. Cibin Federica

Data: 25/09/2023

A. A. 2022/2023

Firma laureando

Firma relatore

ABSTRACT

Il pattinaggio artistico è uno sport che richiede una combinazione di grazia, forza e precisione tecnica. Uno dei salti più iconici e complessi in questa disciplina è l'Axel, noto per essere l'unico salto in cui il pattinatore compie una rotazione e mezza prima di atterrare sul piede opposto. Questa tesi si concentra sull'analisi biomeccanica dell'Axel nel pattinaggio artistico, con l'obiettivo di comprendere in dettaglio il movimento coinvolto e identificare i fattori chiave che contribuiscono al successo di questo salto.

L'analisi del movimento è stata condotta utilizzando metodologie come i marker, il tracking dei marker e la triangolazione per rilevare con precisione la posizione e la cinematica del corpo del pattinatore durante l'esecuzione dell'Axel. Sono stati utilizzati anche sistemi di rilevamento della pressione, cioè le solette, per misurare la distribuzione del peso durante il salto. I dati raccolti sono stati analizzati attraverso l'uso di software specializzati, come TrackOnField e Matlab, per identificare le fasi chiave del movimento e le variabili biomeccaniche rilevanti.

I risultati di questa analisi hanno rivelato aspetti fondamentali riguardanti la tecnica dell'Axel, tra cui l'importanza della giusta accelerazione angolare, l'equilibrio dinamico nel salto e la distribuzione del peso corretta, che garantiscono una rotazione completa e un atterraggio stabile. Inoltre, sono state individuate le prestazioni medie di pattinatori di livello agonistico, offrendo spunti preziosi per il miglioramento della loro formazione e preparazione tecnica.

Questo studio contribuisce all'approfondimento della conoscenza sulla biomeccanica dell'Axel nel pattinaggio artistico e fornisce una base solida per sviluppare programmi di allenamento mirati a migliorare le prestazioni dei pattinatori. Inoltre, offre un quadro più ampio sull'analisi del movimento nello sport, dimostrando come l'applicazione di tecnologie non obbligatoriamente dispendiose possa portare a una comprensione più approfondita e a miglioramenti tangibili nell'esecuzione di complesse abilità motorie.

INDICE

INTRODUZIONE

1. ANALISI DEL MOVIMENTO

- 1.1. Stereofotogrammetria
- 1.2. Analisi video markerless
- 1.3. Piattaforme di forza
- 1.4. Piattaforme e solette di pressione

2. BIOMECCANICA DEL PATTINAGGIO SUL GHIACCIO

- 2.1. Epidemiologia del pattinaggio
- 2.2. Performance
- 2.3. Prevenzione degli infortuni

3. MATERIALI E METODI

- 3.1. BBSof
- 3.2. Soggetti
- 3.3. Task motorio
- 3.4. Set-up dell'esperimento
 - 3.4.1. *Telecamere*
 - 3.4.2. *Markerset*
 - 3.4.3. *Solette di pressione*
- 3.5. Elaborazione e analisi dei dati
 - 3.5.1. *Trackonfield*
 - 3.5.1.1. *Sincronizzazione e tracking*
 - 3.5.1.2. *Calibrazione e triangolazione*
 - 3.5.2. *Matlab*

4. RISULTATI E CONSIDERAZIONI

- 4.1. Grafici a istogrammi e immediati di spinta e atterraggio
- 4.2. Grafici a fasce dell'intero task

5. CONCLUSIONI

INTRODUZIONE

Il pattinaggio artistico di figura è uno sport invernale in cui gli atleti, dotati di pattini, eseguono sul ghiaccio degli esercizi composti da passi e salti eseguiti su una base musicale. È una disciplina molto impegnativa che richiede una combinazione di resistenza, forza e flessibilità che mette a dura prova i muscoli e lo scheletro. Nonostante sia incluso nelle Olimpiadi dal 1908 [1], si hanno ancora pochi dati e analisi che ne studiano la meccanica.

Nel pattinaggio artistico, le lesioni più comuni coinvolgono gli arti inferiori, in particolare caviglie, piedi e ginocchia, e possono essere sia acute, causate da eventi traumatici come cadute, colpi o contusioni, che da sovraccarico, derivanti da un'attività ripetitiva o prolungata. I pattinatori singoli tendono a subire lesioni da sovraccarico, mentre i pattinatori a coppie, i ballerini su ghiaccio e i pattinatori sincronizzati hanno più probabilità di subire infortuni acuti, spesso concentrati nelle parti superiori del corpo a causa dei sollevamenti del partner. La distorsione alla caviglia è l'infortunio più comune, specialmente durante i salti con rotazioni [2].

La start-up BBSof, uno spin-off dell'università di Padova, utilizza analisi biomeccaniche avanzate per fornire una descrizione obiettiva di qualsiasi gesto sportivo. Il suo obiettivo è supportare i professionisti dello sport nella creazione di allenamenti personalizzati basati sulle specifiche motorie degli atleti. Durante il tirocinio presso questa start-up, l'obiettivo era compilare un fascicolo completo per ogni pattinatore, elencando i punti deboli da rinforzare e i movimenti da migliorare, al fine di fornire queste informazioni all'allenatore.

Il progetto descritto in questo elaborato è l'analisi di uno dei salti del pattinaggio più conosciuti e praticati, l'Axel, eseguito da un gruppo di dieci pattinatori, che fanno parte della squadra *Ice Skate Academy 2001 Team*, del Centro Sportivo Plebiscito di Via Guglielmo Geremia, 2/2 a Padova (PD). Lo scopo è stato quello di analizzare il movimento del salto dalla prospettiva cinematica e dinamica in modo da poter successivamente creare un programma d'allenamento adeguato ed efficace per ogni singolo atleta, potenziandone la tecnica e prevenendo eventuali infortuni.

Lo studio è avvenuto grazie a due modalità di acquisizione del movimento: la video analisi, un sistema che impiega un certo numero di fotocamere, GoPro in questo studio, disposte in un preciso set-up per permettere la visione completa degli atleti mentre eseguono il task, e un sistema di pressione plantare che fornisce un'indicazione delle funzioni del piede e della caviglia durante il movimento. I dati così acquisiti sono stati analizzati con l'utilizzo di specifici software che hanno permesso lo studio dei vari momenti del salto: fase di spinta, di volo e atterraggio.

Il pattinaggio artistico è uno sport che combina grazia e abilità tecnica, richiedendo ai pattinatori di eseguire movimenti complessi sul ghiaccio. Il salto Axel è uno degli elementi più riconoscibili e impegnativi del pattinaggio artistico, che richiede almeno una rotazione e mezza in aria prima dell'atterraggio. Come ingegneri biomedici, abbiamo l'opportunità unica di analizzare il movimento coinvolto nel salto Axel e di comprendere i principi biomeccanici in gioco. Questo saggio approfondirà le richieste fisiche poste al corpo del pattinatore e le forze meccaniche coinvolte nell'esecuzione dell'Axel. Esaminando la scienza che sta alla base di questa impresa atletica, possiamo apprezzare maggiormente l'arte e la bellezza del pattinaggio artistico [3].

1. ANALISI DEL MOVIMENTO

La biomeccanica rappresenta uno strumento fondamentale per la valutazione, l'osservazione e la correzione del movimento, al fine di migliorare le prestazioni degli atleti, ridurre il rischio di infortuni e il tempo di recupero da lesioni. L'analisi del movimento è la valutazione dell'interazione meccanica coordinata tra muscoli, legamenti, articolazioni e ossa durante i compiti specifici che si vuole valutare. L'individuo deve regolare le forze interne tramite i momenti muscolari e articolari per resistere agli effetti delle forze gravitazionali e di altre forze esterne che agiscono sul corpo, al fine di mantenere un controllo preciso degli arti e del tronco durante tutti i movimenti statici e dinamici.

L'analisi del movimento umano è applicabile a diversi campi, come la scienza delle prestazioni sportive, la medicina dello sport, l'ergonomia, la tecnologia assistiva e la riabilitazione. Grazie all'analisi del movimento, è possibile esaminare compiti specifici e adattare il programma di allenamento degli atleti, creare programmi di prevenzione degli infortuni, prendere decisioni sul trattamento di recupero e valutarne gli effetti sul breve e lungo termine [4].

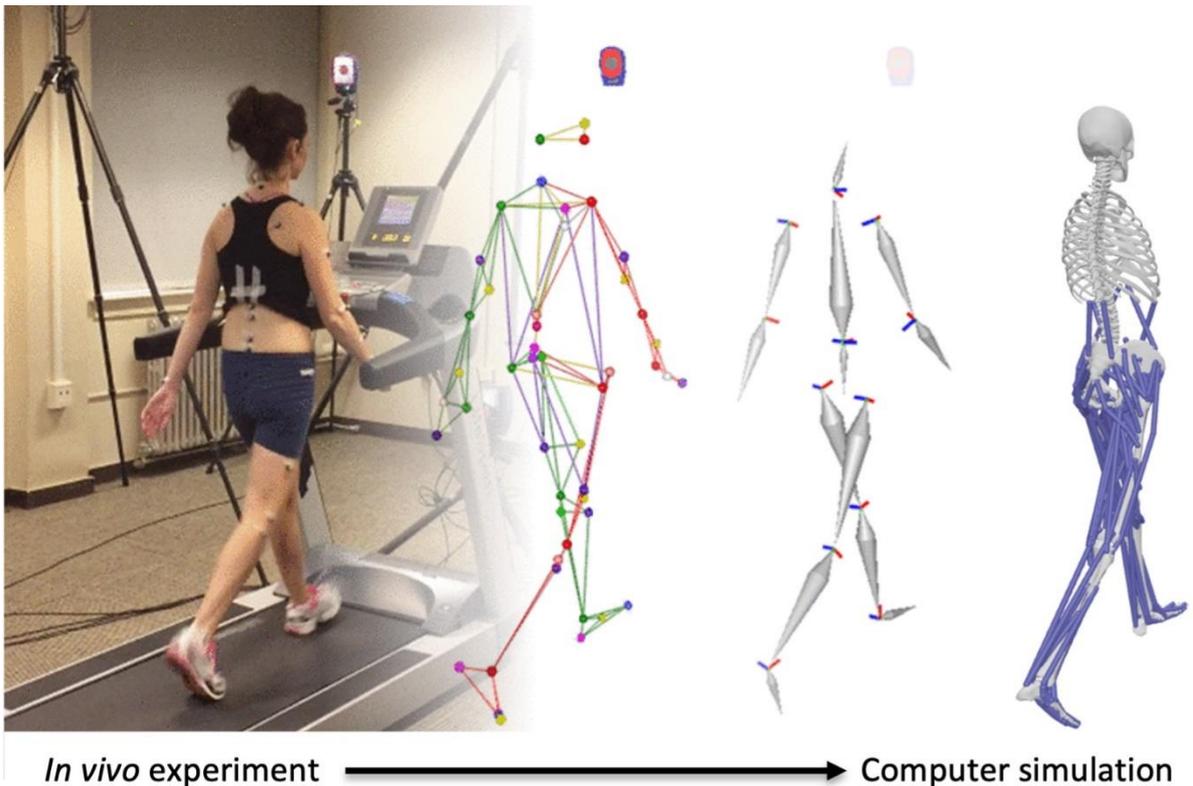


Figura 1: Analisi del movimento di una persona in gravidanza, per aiutarla a limitare le cadute, <http://labs.wsu.edu/biomechanics>

Negli ultimi anni, l'analisi del movimento umano è diventata uno strumento importante in molti settori clinici e della ricerca, al fine di migliorare l'accuratezza e l'affidabilità dei metodi teorici e sperimentali. L'obiettivo principale della ricerca sulla biomeccanica sportiva è quello di garantire la sicurezza dell'atleta durante l'esercizio fisico e la corretta esecuzione dei task per migliorare le prestazioni. Inoltre, aiuta anche gli allenatori a stimare i carichi di lavoro in base all'età, all'abilità e alla forma fisica dell'atleta, garantendo così un allenamento di qualità [5].

Esistono numerose tecnologie di analisi del movimento disponibili per acquisire e analizzare i dati sul movimento umano. Tra le tecnologie più comuni si includono la stereofotogrammetria, l'analisi video markerless, le piattaforme di forza e le piattaforme e solette di pressione.

La stereofotogrammetria è un sistema di misurazione optoelettronica che utilizza almeno due telecamere sincronizzate per catturare l'immagine di una scena tridimensionale. I marcatori posizionati sui soggetti vengono rilevati dalle telecamere, permettendo di calcolare la posizione e l'orientamento degli arti e dei segmenti corporei [6][7][8].

L'analisi video markerless, invece, analizza direttamente le immagini video e rileva i punti chiave del corpo, senza l'utilizzo di marcatori [9][10][11].

Le piattaforme di forza sono invece dispositivi che consentono di misurare le forze di reazione al suolo durante la fase di appoggio del piede. Questi strumenti possono fornire informazioni sulle forze e sui momenti che agiscono sui piedi e sulle gambe durante il cammino, la corsa o il salto [12][13][14].

Infine, le piattaforme e le solette di pressione sono strumenti utilizzati per misurare le distribuzioni delle pressioni plantari sotto i piedi. Questi dispositivi possono fornire informazioni sulla distribuzione del peso corporeo sulle diverse parti dei piedi, utili per la valutazione della postura, della stabilità e dell'equilibrio [12][13][15].

Ciascuna di queste tecnologie ha vantaggi e limitazioni, ed è importante scegliere quella più adatta alle specifiche esigenze di ricerca o di applicazione clinica.

1.1. Stereofotogrammetria

La stereofotogrammetria è un metodo di misurazione ottico che utilizza due o più telecamere, che operano nella banda degli infrarossi, per registrare immagini del soggetto considerato da diverse angolazioni. Queste immagini vengono poi elaborate per ricostruire

la forma tridimensionale del soggetto e calcolarne la dimensione e posizione nello spazio. La stereofotogrammetria è un metodo comune utilizzato nei sistemi di misurazione optoelettronica per registrare i movimenti tridimensionali del corpo umano o degli oggetti in movimento. Nel caso specifico dell'esecuzione di un esercizio, viene utilizzata per misurare i parametri cinematici del corpo che sta eseguendo il task e dei suoi segmenti [6].

I sistemi di misurazione optoelettronici si basano su telecamere fisse e possono quindi acquisire dati solo in un'area ristretta. Il volume di acquisizione dipende dal numero massimo di telecamere e dal campo visivo di ciascuna telecamera. Il numero di telecamere da utilizzare per avere una registrazione più precisa del movimento può essere elevato e questo comporta notevoli difficoltà pratiche in termini di costi, portabilità, calibrazione, sincronizzazione, manodopera e allestimento. Ulteriori limitazioni del sistema sono la necessità di una linea visiva, il che significa che la produzione di dati si interrompe quando le telecamere perdono di vista i marker. Inoltre, i sistemi sono molto sensibili alle alterazioni del setup, ad esempio a causa dello spostamento accidentale di una telecamera. I sistemi sono utilizzati soprattutto in aree buie, perché la luce solare intensa interferisce con le misurazioni. Nonostante queste limitazioni tecniche, il vantaggio della stereofotogrammetria è la sua elevata precisione, che la rende uno dei metodi di misurazione più affidabili per l'analisi del movimento [7].

Nell'ambito dei sistemi optoelettronici esistono due categorie di sistemi di marcatura, quella attiva e quella passiva [8]:

- I marcatori passivi sono piccole sfere o punti di riferimento che vengono posizionati sul corpo del soggetto e riflettono la luce emessa dalle telecamere del sistema di motion capture. Questi marcatori non richiedono alcun tipo di alimentazione e sono meno costosi e più facili da usare rispetto ai marcatori attivi. Tuttavia, i marcatori passivi possono risultare meno precisi perché possono essere soggetti a interferenze ambientali come le ombre o le luci riflesse;
- I marcatori attivi, d'altra parte, emettono luce invece di rifletterla, e vengono alimentati da una batteria interna. Questi marcatori sono più precisi rispetto ai marcatori passivi e sono meno soggetti ad interferenze ambientali. Tuttavia, i marcatori attivi sono generalmente più costosi dei marcatori passivi e richiedono più tempo per essere posizionati. Inoltre, la frequenza massima di campionamento si

riduce quando si utilizzano più marcatori, poiché il segnale di ogni singolo marcatore deve avere una frequenza distinguibile che ne permetta l'identificazione.



Figura 2: Tecnico che posiziona dei marker passivi su un'atleta, <https://www.sciencephoto.com/>



Figura 3: Soggetto con marcatori attivi installati (a sinistra), telecamera industriale veloce Basler 602fc (in alto) e marcatore attivo ingrandito (in basso), <https://www.researchgate.net/>

In generale, la scelta tra marcatori attivi e passivi dipende dalle esigenze specifiche della ricerca o dell'applicazione. Se si ha bisogno di massima precisione e riduzione di interferenze ambientali, i marcatori attivi sono la scelta migliore, ma se si ha bisogno di una soluzione più economica e facile da usare, i marcatori passivi rappresentano la scelta ottimale.

Come ultima specifica, la stereofotogrammetria è una tecnica utilizzata nei laboratori dotati di fotocamere ad alto costo, ma la start-up BBSof ha l'obiettivo di allontanarsi dall'utilizzo esclusivo di questa tecnologia indoor e di adottare soluzioni più economiche come le fotocamere GoPro.

1.2. Analisi video markerless

L'analisi video markerless è un metodo di analisi del movimento che non richiede l'utilizzo di marcatori o sensori. Il sistema si basa sull'elaborazione di immagini video per ricostruire la posizione e l'orientamento del corpo e dei suoi segmenti. Utilizza algoritmi di visione artificiale per rilevare e tracciare automaticamente le parti del corpo senza il bisogno di

applicare marker. Questi sistemi sono meno costosi rispetto alla stereofotogrammetria, ma possono essere meno precisi, specialmente quando ci sono ostacoli nella vista della telecamera o quando il soggetto è parzialmente o completamente coperto. [9]

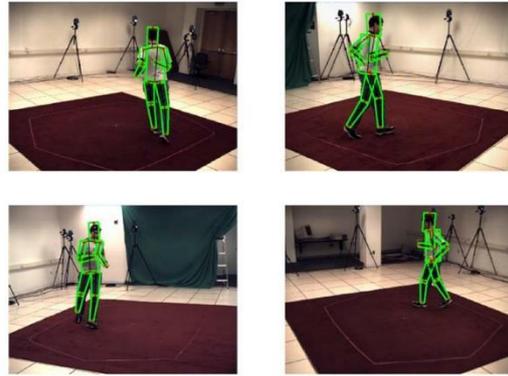
Ci sono diversi tipi di analisi video markerless, ognuno con i suoi vantaggi e limitazioni. Di seguito ne vengono elencati alcuni [10]:

- **Analisi del pattern:** questo metodo utilizza i pattern sulle superfici del soggetto, come ad esempio le righe della maglia, per rilevare i movimenti del corpo. I pattern possono essere rilevati attraverso algoritmi di elaborazione delle immagini. Questo metodo può essere meno accurato rispetto alla stereofotogrammetria e può richiedere un'illuminazione più studiata e adeguata.
- **Analisi basata sui contorni:** questo metodo utilizza i contorni del soggetto per rilevare i movimenti del corpo. Gli algoritmi di elaborazione delle immagini rilevano i contorni delle parti del corpo, come ad esempio le braccia e le gambe, e analizzano il loro movimento durante un'attività. Tuttavia, anche questo metodo può essere meno preciso rispetto ad altri e può essere influenzato dall'illuminazione e dall'occlusione.
- **Analisi basata sulla texture:** questo metodo utilizza le texture della pelle del soggetto per rilevare i movimenti del corpo. Gli algoritmi rilevano i dettagli della pelle e analizzano il suo movimento durante il task. Questo metodo è meno influenzato dall'illuminazione rispetto agli altri metodi, ma è limitato dall'occlusione e dalla deformazione dei tessuti molli durante il movimento.
- **Analisi basata sulla forma:** questo metodo utilizza la forma generale del soggetto per rilevare i movimenti del corpo. Gli algoritmi di elaborazione delle immagini possono rilevare la forma del corpo e analizzarne il movimento durante il task. Anche questo metodo può essere limitato dalla deformazione dei tessuti molli durante il movimento.

2D Pose Estimation from Monocular Motion Capture



3D Pose Estimation from Multi-camera Motion Capture



3D Pose Estimation from Monocular Motion Capture

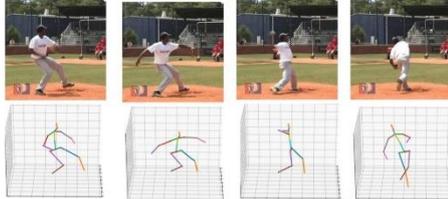


Figura 4: Esempi di cattura del movimento markerless, <https://peerj.com/articles/12995/>

In generale l'analisi video markerless può essere utile per acquisire dati di movimento senza l'utilizzo di marcatori e sistemi di calibrazione, rendendo il processo più facile e veloce. In particolare, l'analisi basata sulla texture può essere utilizzata in ambienti sia esterni che interni, poiché non richiede condizioni di illuminazione specifiche. Tuttavia, questo metodo può essere influenzato dalla presenza di ombre, cambiamenti di illuminazione o altre variazioni nell'ambiente che possono influire sulla texture dell'immagine. Inoltre, la precisione della misurazione viene meno, rispetto alla stereofotogrammetria, e richiede una grande quantità di elaborazione delle immagini, il che può rendere l'analisi computazionalmente intensiva e richiedere un hardware adeguato.[11]

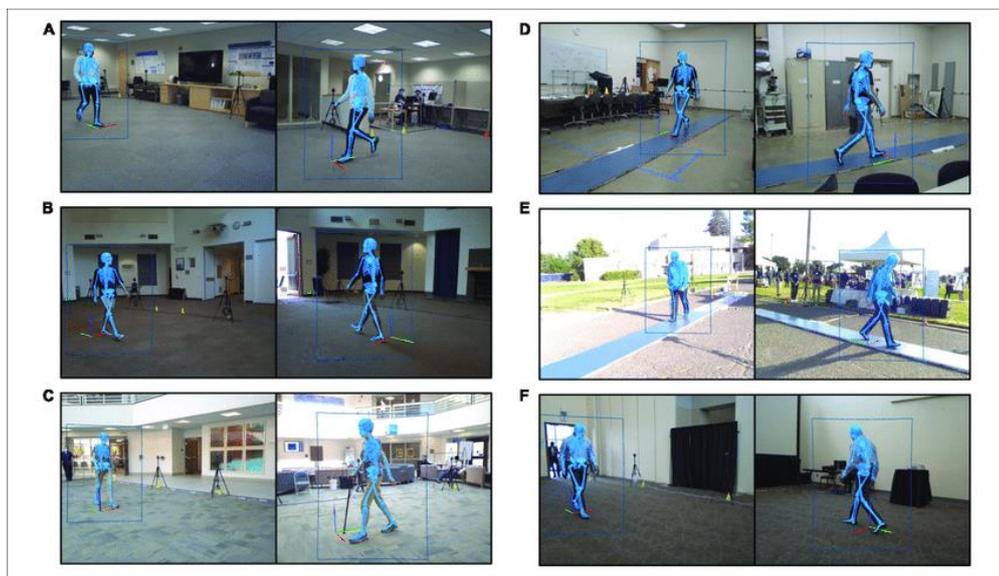


Figura 5: Immagini fisse registrate dalle videocamere per la cattura del movimento senza marcatori durante gli esperimenti di deambulazione eseguiti in ciascuna delle sei sedi sperimentali, <https://www.researchgate.net/>

1.3. Piattaforme di forza

Le piattaforme di forza sono dispositivi che misurano le forze che agiscono su un'area del corpo, nel nostro caso sul piede, in contatto con la superficie della piattaforma. Questi strumenti sono composti da celle di carico che convertono la forza applicata in un segnale elettrico, che viene poi registrato e analizzato. Le piattaforme di forza sono ampiamente utilizzate nell'analisi del movimento, soprattutto per valutare la distribuzione delle forze che agiscono sul piede durante la deambulazione o per misurare le forze esercitate durante un salto o un lancio o qualsiasi altro task da analizzare [12][13].

Le celle di carico da cui sono formate sono dei trasduttori che convertono la deformazione meccanica causata dalle forze applicate su di esse in un segnale elettrico proporzionale alla forza. Esistono diversi tipi di celle di carico, ma le più comuni sono [14]:

- Celle di carico a filo teso: sono costituite da un filo sottile teso tra due supporti, su cui è fissata la piattaforma di carico. Quando viene applicata una forza sulla piattaforma, il filo si deforma e il cambiamento di resistenza elettrica viene convertito in un segnale elettrico proporzionale alla forza applicata.
- Celle di carico a piatto di misura: sono costituite da un piatto di misura con un sensore di deformazione incorporato, che produce un segnale elettrico proporzionale alla deformazione del piatto.
- Celle di carico a flessione: sono costituite da una struttura a flessione in cui il carico applicato sulla piattaforma di carico piega la struttura, provocando una deformazione che viene convertita in un segnale elettrico proporzionale alla forza applicata.
- Celle di carico a compressione: sono costituite da una cella cilindrica che viene compressa quando viene applicata una forza sulla piattaforma di carico. La deformazione della cella viene convertita in un segnale elettrico proporzionale alla forza.

La scelta della cella di carico dipende dalle esigenze specifiche di ogni applicazione. [12]



Figura 6: Il lanciatore del Central Connecticut Michael DeLease lancia da una pedana intelligente presso il Center for Motion Analysis di Farmington, nel Connecticut, martedì 28 gennaio 2020, <https://www.ocregister.com/>

1.4. Piattaforme e solette di pressione

Le piattaforme e le solette di pressione sono strumenti che misurano la pressione esercitata su una superficie specifica del piede. Questi strumenti sono utilizzati per analizzare la distribuzione della pressione plantare e per rilevare eventuali aree di sovraccarico o di distribuzione anomala delle pressioni. Sono generalmente costituiti da una superficie piatta e sottile, spesso realizzata in materiale plastico o gomma, su cui viene esercitata la pressione del piede [12].

Le piattaforme di pressione sono composte da una matrice di sensori che registrano la pressione esercitata sui piedi in posizione statica o dinamica e la convertono in segnali elettrici che possono essere registrati e analizzati. Esistono diversi tipi di sensori utilizzati nelle piattaforme di pressione, tra cui [13]:

- **Sensori a resistenza:** questi sensori utilizzano un materiale che cambia resistenza in base alla pressione esercitata. Un esempio di sensore a resistenza utilizzato nelle piattaforme di pressione è il sensore piezoresistivo.
- **Sensori piezoelettrici:** questi sensori utilizzano cristalli piezoelettrici che generano una carica elettrica quando vengono sottoposti a pressione. Questi sensori sono

molto sensibili e sono in grado di registrare anche le variazioni di pressione più piccole.

- Sensori capacitivi: questi sensori sfruttano la variazione della capacità di un condensatore a seconda della distanza tra le sue armature. Quando il sensore viene sottoposto a pressione, la distanza tra le armature cambia e la capacità del condensatore varia di conseguenza.

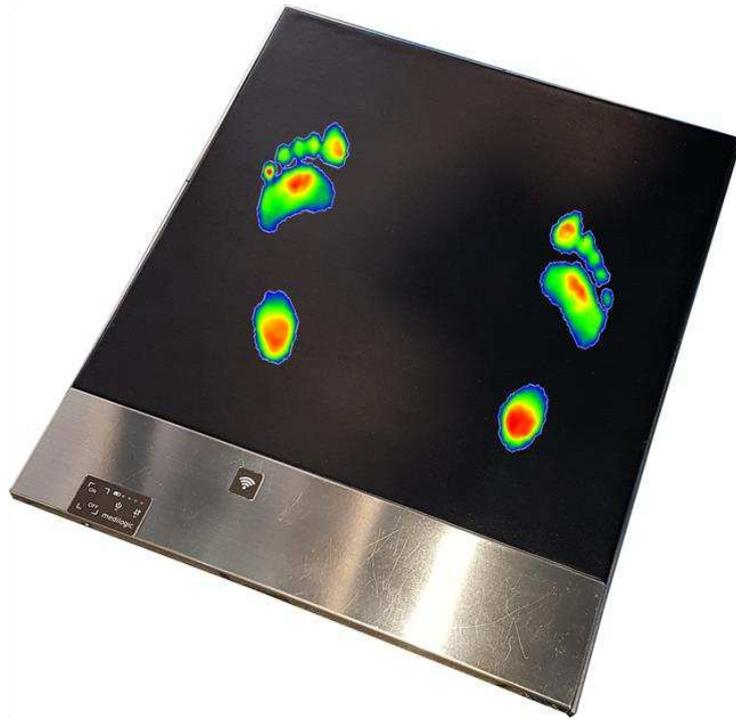


Figura 7: Piattaforma di misura della pressione NX come piattaforma singola con ingombro dinamico, <https://medilogic.com/>

I sensori utilizzati nelle piattaforme di pressione sono in grado di registrare la distribuzione delle pressioni su una superficie piatta e di generare mappe di pressione che mostrano le aree di maggiore e minore intensità. Queste informazioni possono essere utilizzate per valutare la distribuzione delle pressioni durante la deambulazione o l'esecuzione di un movimento, per individuare eventuali aree di sovraccarico o di sottocarico, e per monitorare la progressione di patologie o lesioni [15].

2. BIOMECCANICA DEL PATTINAGGIO SUL GHIACCIO

Il pattinaggio artistico è un'attività sportiva che richiede un considerevole sforzo fisico, soprattutto per quanto riguarda l'aspetto tecnico, in cui la forza muscolare e un rigoroso allenamento sono fondamentali, sia dal punto di vista artistico, che richiede eleganza e capacità interpretativa.

La performance nel pattinaggio artistico dipende da una serie di fattori chiave, tra cui la forza, la potenza, la flessibilità, l'equilibrio e la resistenza muscolare. Questi fattori sono essenziali per eseguire correttamente i programmi di gara e gli elementi singoli e richiedono un'adeguata preparazione fisica e mentale da parte degli atleti. Per questo motivo le intense sessioni di allenamento necessarie per raggiungere il massimo delle prestazioni devono essere le più indicate per il pattinatore stesso e le sue esigenze specifiche.

I salti sono considerati gli elementi più difficili da apprendere nel pattinaggio artistico, poiché richiedono una grande precisione tecnica, un controllo accurato di tutti i segmenti corporei e un elevato livello di forza e coordinazione. Proprio per questa ragione, rappresentano anche una delle principali cause di infortuni nel pattinaggio di figura. Per far fronte a queste difficoltà, gli atleti sono sottoposti a sessioni di allenamento sempre più dense, sia sul ghiaccio che fuori da esso [16].

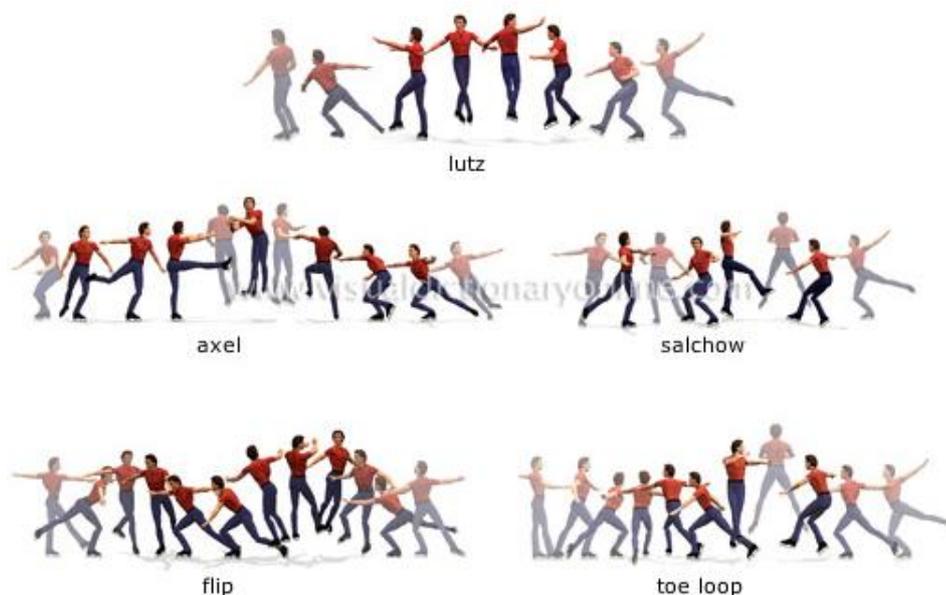


Figura 8: Esempi di salto nel pattinaggio di figura,
<http://www.visualdictionaryonline.com/>

Per comprendere al meglio come si muove l'atleta da un punto di vista più analitico, è importante studiarne i movimenti attraverso la cinematica, che permette di rispondere a diverse domande riguardanti la prestazione del pattinatore come ad esempio dove sta andando, a quale velocità, raggiungendo quale distanza e per quanto tempo dura la figura che sta eseguendo.

Per spiegare il movimento nel contesto della relazione tra le forze agenti e il corpo del pattinatore, si utilizza un'altra sotto area della biomeccanica, la dinamica, che può aiutare a comprendere le forze che agiscono sul corpo del pattinatore durante l'esecuzione di questo elemento. In primo luogo, si analizzano le forze coinvolte nell'esecuzione dell'axel, come la forza centrifuga, la forza di gravità e la forza di reazione del ghiaccio. Inoltre, si studiano le forze generate dal pattinatore durante la fase di salto e di atterraggio, come la forza di spinta e la forza di impatto. Un'altra proprietà importante è l'analisi delle angolazioni e delle velocità angolari del corpo del pattinatore durante l'esecuzione della figura, in particolare per quanto riguarda l'angolo di inclinazione del corpo rispetto al ghiaccio, l'angolo di apertura del salto e l'angolo di piegamento delle articolazioni delle gambe. Infine, lo studio dinamico include anche l'analisi della cinetica del pattinatore, ovvero l'analisi dei movimenti del corpo e delle variazioni di energia durante l'esecuzione dell'acrobazia. Questo tipo di analisi può aiutare a comprendere le diverse fasi dell'axel, dalla spinta iniziale alla rotazione del corpo, fino all'atterraggio e alla fase di uscita [17].

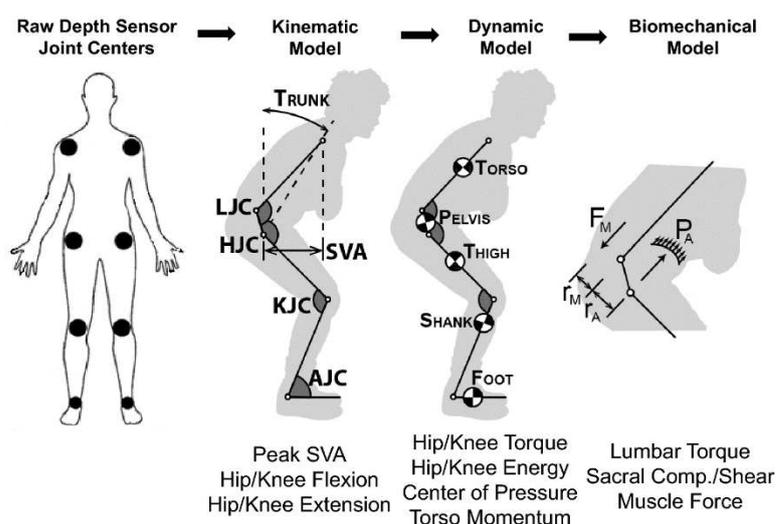


Figura 9: Processing pipeline del sistema di telecamere di profondità proposto per il recupero dei dati STS. Le stime grezze della posizione del centro articolare vengono elaborate in sequenza per ottenere misure cinematiche, dinamiche e biomeccaniche, <https://sogacot.org/>

La prevenzione degli infortuni costituisce un aspetto imprescindibile per gli atleti di qualsiasi disciplina, poiché eventuali lesioni possono rappresentare un ostacolo significativo alla loro carriera sportiva. L'incolumità fisica degli atleti riveste un'importanza primaria, in quanto solo attraverso la capacità di svolgere in modo sicuro e corretto le attività sportive essi possono mantenere una buona forma fisica e raggiungere i loro obiettivi. Le conseguenze degli infortuni sono potenzialmente pericolose, determinando dolori, stress emotivo, disabilità, nonché costi e tempi elevati per la riabilitazione. Per questo motivo, la prevenzione degli infortuni rappresenta un elemento chiave nell'allenamento degli atleti, e va integrata in modo sistematico e costante nella loro routine di preparazione fisica [16]

2.1. Epidemiologia del pattinaggio

L'epidemiologia si occupa dello studio degli infortuni e delle malattie che possono colpire gli atleti che praticano, nel nostro caso, il pattinaggio artistico. Questa disciplina sportiva richiede una combinazione di forza, flessibilità, agilità e grazia, ma comporta anche un elevato rischio di lesioni, soprattutto a causa delle acrobazie e dei salti che gli atleti devono eseguire. È fondamentale considerare molteplici fattori che possono influenzare le prestazioni dell'atleta, come la scelta del tipo e della dimensione del pattino, l'età e lo stato psicologico e nutrizionale del pattinatore, insieme alla sua condizione fisica generale e alla corretta esecuzione degli elementi tecnici [18].

Gli studi di analisi del movimento nel pattinaggio artistico hanno identificato alcune parti del corpo che sono maggiormente colpite da infortuni: gli arti inferiori sono particolarmente esposti a traumi, in particolare le caviglie, i piedi e le ginocchia [19].

Quando si parla di infortuni nello sport, si possono distinguere quelli acuti e quelli da overuse o sovraccarico. Gli infortuni acuti sono lesioni che si verificano improvvisamente, spesso a causa di un evento traumatico come una caduta, un colpo o una contusione. Questi infortuni possono includere fratture ossee, distorsioni o lacerazioni muscolari, tendiniti e lesioni legamentose. D'altra parte, gli infortuni da overuse o sovraccarico sono il risultato di un'attività ripetitiva o prolungata, che causa uno stress eccessivo sulle strutture del corpo coinvolte. Questi infortuni si sviluppano gradualmente nel tempo e possono includere tendinite, borsite, sindrome del tunnel carpale e fascite plantare. La principale differenza tra gli infortuni acuti e quelli da overuse è la modalità di insorgenza. Gli infortuni acuti si verificano improvvisamente e sono spesso causati da eventi traumatici, mentre gli infortuni

da overuse si sviluppano gradualmente e sono il risultato di un uso eccessivo o ripetitivo di una determinata parte del corpo. I pattinatori meno esperti tendono a subire più infortuni acuti, mentre i pattinatori più esperti tendono a subire lesioni da overuse [18].

Possiamo inoltre catalogare i vari infortuni in base al tipo di specializzazione scelta dai pattinatori. I pattinatori singoli eseguono salti, rotazioni e altri elementi che richiedono una grande preparazione; infatti, i loro infortuni tendono ad essere lesioni da overuse. I pattinatori a coppie, i ballerini su ghiaccio e i pattinatori sincronizzati invece tendono ad avere più infortuni acuti; ciò è dato dal fatto che sono affiancati sempre da un partner. Inoltre, tra questi pattinatori sono più esposte a traumi le parti superiori del corpo, anche perché è spesso previsto il sollevamento del partner.

I tipi di lesioni più comuni nel pattinaggio di figura sono le lesioni muscoloscheletriche e le lesioni da sovraccarico cronico, che negli atleti colpiscono soprattutto il piede, la caviglia, la gamba, l'anca e la zona lombare della schiena. La distorsione della caviglia è l'infortunio più comune in questo sport. Nei salti con più rotazioni, ad esempio, il pattinatore rischia la distorsione della caviglia se l'atterraggio avviene prima di aver completato la rotazione in aria [19].

La distribuzione delle lesioni degli arti inferiori e superiori in base alla posizione della lesione è mostrata nella tabella 1. È da tenere presente che le lesioni degli arti inferiori sono più comuni delle lesioni degli arti superiori in tutte le discipline [19].

Luogo dell'infortunio	n (%)
Lesioni riportate sui moduli di anamnesi:	
Caviglia	79 (27.7)
Ginocchio	53 (18.6)
Gamba	33 (11.6)
Indietro	44 (15.4)
Testa	28 (9.8)
Anca	19 (6.7)
Spalla	19 (6.7)
Collo	6 (2.1)
Piede	4 (1.4)

Infortuni sul posto in gara:

Ginocchio	10 (18.2)
Gamba	9 (16.3)
Indietro	8 (14.6)
Anca	8 (14.6)
Spalla	7 (12.7)
Polso	3 (5.5)
Piede	3 (5.5)
Mano	2 (3.6)
Gomito	2 (3.6)
Collo	2 (3.6)
Caviglia	1 (1.8)

Tabella 1: Lesioni agli arti inferiori e superiori riportate per sede di lesione, <https://journals.sagepub.com/>

Di seguito approfondiamo le lesioni più comuni riportate dai pattinatori di figura, grazie a uno studio condotto da Campanelli et al.[19]:

Lesioni al piede:

- La borsite retrocalcaneare è stata identificata come la lesione più comune degli arti inferiori. Questa condizione è stata riscontrata nel 34% dei pattinatori analizzati e tutti i casi erano bilaterali, ma più sintomatici nella gamba di atterraggio. Il rischio di sviluppare la borsite retrocalcaneare aumenta del 30% per ogni chilogrammo aggiuntivo di peso corporeo. Inoltre, una maggiore dorsiflessione della caviglia nello scarpone da pattinaggio è un altro fattore di rischio significativo per la borsite retrocalcaneare, soprattutto nei pattinatori meno esperti. Si ritiene quindi che l'aumento della dorsiflessione della caviglia e la compressione della borsa retrocalcaneare nella gamba di atterraggio possano contribuire allo sviluppo di questa lesione.
- La borsite calcaneare superficiale è la seconda condizione di uso eccessivo degli arti inferiori più comune tra i pattinatori. Il rischio di sviluppare la borsite calcaneare superficiale è stato associato alla maggiore differenza di lunghezza tra stivali e piedi,

alla minore dorsiflessione della caviglia e all'altezza di salto inferiore nei pattinatori d'élite. In particolare, per ogni millimetro di differenza di lunghezza tra stivale e piede, il rischio di sviluppare la borsite calcaneare superficiale è aumentato del 37%. Questo suggerisce che un maggiore slittamento del tallone negli scarponi da pattinaggio contribuisca allo sviluppo di questa condizione.

- Il "morso di pizzo" è una lesione causata dall'attrito dei tendini degli estensori delle dita dei piedi e del tibiale anteriore contro la lingua dello stivale durante la dorsiflessione della caviglia e la flessione del ginocchio. Questo è spesso causato da legature inadeguate del pizzo. Una soluzione a questo problema può essere l'utilizzo di imbottiture più dense o in silicone sulla lingua e l'utilizzo di un gancio centrale per centralizzare la lingua, impedendone il movimento durante il pattinaggio.
- La deformità delle dita a martello o la formazione di calli alle dita dei piedi sono molto comuni tra i pattinatori, con una prevalenza fino al 25%. Questo è causato dalla pressione dorsale sulla punta della scarpa da pattinaggio. La condizione è solitamente bilaterale e si verifica sull'aspetto dorsolaterale del quinto dito del piede o sul dorso delle articolazioni interfalangee prossimali delle dita dei piedi. Queste deformità di solito non causano sintomi significativi e tendono a risolversi da sole dopo il ritiro dal pattinaggio.

Lesioni alla caviglia:

- Un'indagine del 1989 su pattinatori di coppia d'élite e ballerini su ghiaccio ha riportato la presenza di borsite malleolare in due pattinatori su 48. La borsite può anche verificarsi sul perone nella parte superiore dello stivale. Comunque, queste condizioni possono essere trattate con l'uso di imbottiture protettive o con il cambio dello scarpone da pattinaggio.
- Un gruppo di ricerca ha condotto uno studio su 33 pattinatori d'élite, riscontrando che il 12% (4 pattinatori su 33) ha avuto tendinopatia di Achille. La mancanza di dorsiflessione negli scarponi da pattinaggio rende importante lavorare sulla flessibilità della parte inferiore della gamba e della caviglia, insieme alla forza intrinseca del piede e della caviglia. Allo stesso modo, la riabilitazione dei pattinatori con questa lesione richiede una prescrizione di terapia fisica specifica.

- Le distorsioni alla caviglia le lesioni più frequenti nei pattinatori di figura, con una prevalenza superiore al 50%. In generale, i pattinatori maschi e femmine singoli e di coppia sono ugualmente suscettibili alle distorsioni alla caviglia. Tuttavia, il pattinaggio sincronizzato ha un tasso di distorsioni alla caviglia significativamente inferiore rispetto al pattinaggio singolo, probabilmente a causa del minor numero di salti di rotazione multipla, che sono noti per essere associati a un maggior rischio di lesioni alla caviglia. Le distorsioni alla caviglia sono spesso il risultato di un atterraggio incompleto dopo un salto multirotazione, che può causare una rotazione del solo corpo superiore e una conseguente distorsione della caviglia.

Secondo uno studio, le lesioni acute al ginocchio sono risultate essere le più comuni tra i pattinatori sincronizzati, con una percentuale del 41,5% tra le pattinatrici e del 37,5% tra i pattinatori maschi, seguite dalle lesioni alla caviglia. Inoltre, i pattinatori adulti hanno riportato il maggior numero di lesioni al ginocchio:

- La costante attivazione del meccanismo estensore del ginocchio durante l'attività sul ghiaccio, come lo scivolamento e l'accelerazione, insieme all'elevata forza assorbita durante gli atterraggi di salto, possono causare dolore anteriore al ginocchio, che può comprendere diverse condizioni come la sindrome femoro-rotulea, la malattia di Osgood-Schlatter e la tendinopatia rotulea. Circa il 30% dei pattinatori d'élite junior singoli e a coppie riportano dolore in questa zona; ciò è dato dalla strettezza dei muscoli quadricipiti e la scarsa flessibilità dei muscoli posteriori della coscia. L'allungamento dei muscoli quadricipiti, posteriori della coscia e della banda ileotibiale può aiutare a ridurre lo sviluppo di dolore al ginocchio del meccanismo estensore.
- Nel pattinaggio artistico, le lesioni ai legamenti e ai menischi del ginocchio sono poco comuni, poiché la lama dei pattini non è fortemente fissata al ghiaccio. Tuttavia, ci sono stati alcuni casi aneddotici di lesioni al legamento crociato anteriore e posteriore; ciò si verifica quando si atterra un salto con un bordo fisso mentre il corpo continua a ruotare.

Lesioni all'anca:

I pattinatori che eseguono salti tripli sono suscettibili a lesioni all'inguine, al flessore dell'anca, al complesso adduttore e alle tensioni oblique. Queste lesioni sono spesso causate da squilibri muscolari nella forza e nella flessibilità, nonché da una forza di base insufficiente. Inoltre, i pattinatori possono soffrire di lesioni al tendine del ginocchio a causa dell'estensione ripetitiva dell'anca durante il pattinaggio. La forza e la flessibilità dei muscoli posteriori della coscia sono importanti per eseguire elementi a spirale in cui la gamba libera viene estesa al massimo dall'anca in una posizione arabesca. Inoltre, il pattinaggio avanzato, come quello eseguito dai ballerini, può causare conflitto all'anca e lacrime labrali a causa della maggiore gamma di movimento necessaria.

Lesioni alla schiena:

Secondo i dati riportati, la lombalgia è una condizione abbastanza comune tra i pattinatori singoli e in coppia, con una percentuale del 13%. Questa patologia potrebbe essere causata dalla scarpa rigida da pattinaggio, che limita il movimento del ginocchio e della caviglia, provocando un'iperestensione dell'anca durante l'atterraggio dei salti con conseguente estensione lombare compensatoria. Alcuni elementi del pattinaggio artistico, come la rotazione di riposo e la posizione di Biellmann, richiedono un'estrema iperestensione della colonna lombare e dell'anca, aumentando ulteriormente il rischio di spondilolisi. Inoltre, i pattinatori con flessori dell'anca stretti e muscoli addominali deboli potrebbero avere un'eccessiva lordosi, aumentando così lo stress sugli elementi posteriori della colonna vertebrale. Infine, la disfunzione dell'articolazione sacroiliaca deriva da cadute ripetitive su un lato dell'anca e dall'assorbimento unilaterale ripetitivo della forza degli atterraggi dei salti su una singola gamba.

2.2. Performance

Per comprendere l'utilizzo dell'analisi del movimento nel pattinaggio artistico, è necessario considerare un approccio biomeccanico. La cinematica, che descrive il movimento di punti, corpi o sistemi di corpi, è utilizzata per migliorare l'efficienza del movimento e la performance tecnica. La dinamica, invece, valuta la forza e la potenza dei movimenti del pattinatore, identificando i muscoli coinvolti e sviluppando programmi di allenamento mirati.

La cinematica e la dinamica sono fondamentali per la performance del pattinatore, poiché consentono di controllare il movimento del proprio corpo per eseguire movimenti fluidi, precisi e potenti. La cinematica studia i movimenti del pattinatore, dalla posizione dei piedi alla postura del corpo, al fine di migliorare l'efficienza del movimento e la performance tecnica. Ad esempio, l'analisi video viene utilizzata dagli allenatori per valutare la posizione del corpo del pattinatore durante l'esecuzione dei salti e dei passi, individuando eventuali problemi di tecnica e fornendo un riscontro costruttivo.

La dinamica, invece, valuta la forza e la potenza dei movimenti del pattinatore. L'analisi della dinamica aiuta ad identificare i muscoli coinvolti nei movimenti specifici del pattinaggio e a sviluppare programmi di allenamento mirati per migliorare la forza muscolare e la potenza nei movimenti del pattinatore.

Quindi, l'utilizzo della cinematica e della dinamica nel pattinaggio è essenziale per comprendere e migliorare la performance del pattinatore, nonché per prevenire gli infortuni attraverso l'analisi dei movimenti e delle forze che agiscono sul corpo del pattinatore.

2.3. Prevenzione degli infortuni

In ogni disciplina sportiva, in particolare a livello agonistico, gli atleti si addestrano quotidianamente al fine di migliorare le loro prestazioni e raggiungere i loro obiettivi. Essi sono altresì consapevoli del fatto che un infortunio potrebbe compromettere il loro futuro sportivo e la loro capacità di partecipare alle competizioni. Pertanto, la preparazione agli allenamenti e la prevenzione degli infortuni sono aspetti fondamentali da tenere in considerazione [20].

Innanzitutto, una buona preparazione fisica è essenziale per prevenire gli infortuni. I pattinatori dovrebbero svolgere un programma di allenamento mirato per migliorare la forza, la flessibilità, l'equilibrio e la coordinazione. Questo aiuta a proteggere le articolazioni dallo sforzo fisico e ridurre lo stress sulle parti del corpo vulnerabili. Ciò può essere compiuto attraverso l'allenamento off-ice, perché sviluppa la forza e la resistenza muscolare necessarie per eseguire le tecniche di pattinaggio, migliora la flessibilità e la mobilità articolare, consentendo movimenti più ampi e fluidi, favorisce l'equilibrio e la coordinazione per movimenti più precisi e efficienti sul ghiaccio e aumenta la resistenza cardiovascolare per affrontare le performance prolungate e ad alta intensità [20].



Figura 10: Miglioramento dei giocatori di hockey attraverso l'allenamento off-ice,
<https://www.hockeycanada.ca/>

Inoltre, i pattinatori dovrebbero fare attenzione all'equipaggiamento che utilizzano. Le scarpe da pattinaggio dovrebbero essere scelte in base alla loro flessibilità, ammortizzazione e stabilità. Le scarpe troppo rigide possono limitare il movimento del ginocchio e della caviglia, causando una maggiore tensione sulla colonna vertebrale durante l'atterraggio dei salti [20].

Il riscaldamento e il raffreddamento adeguati possono anche contribuire a prevenire gli infortuni. I pattinatori dovrebbero dedicare del tempo al riscaldamento prima dell'allenamento o della gara per aumentare la temperatura del corpo e migliorare la flessibilità muscolare. Al termine dell'attività, invece, un adeguato raffreddamento aiuta a ridurre la tensione muscolare e prevenire eventuali dolori.

Infine, una corretta tecnica di pattinaggio è fondamentale in ogni sport. I pattinatori si dovrebbero concentrare sulla corretta posizione del corpo e sull'esecuzione dei movimenti in modo preciso ed equilibrato. Gli allenatori, come anche l'analisi biomeccanica, possono aiutare i pattinatori a correggere eventuali errori di tecnica e fornire un riscontro costante per migliorare la performance e prevenire eventuali infortuni [20].

3. MATERIALI E METODI

3.1. BBSof

La BBSof, *Beyond Biomechanics Sport on Field*, è una start-up con sede in Via della Croce Rossa, 112 a Padova (PD). Propone aiuto ad atleti di molteplici sport nel migliorare le loro prestazioni atletiche e tecniche. Gli atleti che negli anni sono stati analizzati provengono dai mondi sportivi più svariati, dall'atletica al rugby, dal calcio allo sci, dal basket al pattinaggio, trattato in questa tesi.

Il tirocinio di questa tesi è stato svolto in questa sede, per quanto riguarda la parte di lavoro inerente all'analisi dei dati e i successivi report finali consegnati all'allenatore dei pattinatori analizzati.



Figura 11: Logo della BBSof srl, <https://www.bb-sof.com/>

3.2. Soggetti

In questo studio sono stati analizzati nove pattinatrici e un pattinatore della squadra sportiva dilettantistica *Ice Skate Academy 2001Team* di Padova, mentre eseguivano l'Axel presso il *Palaghiaccio Plebiscito* di Padova. Lo scopo della ricerca è stato quello di esaminare e descrivere le variabili biomeccaniche specifiche relative alla cinematica, alla dinamica e alla funzione neuromuscolare, utilizzando una serie di strumentazioni e metodi che abbiamo già in parte descritto.

Per motivi di privacy, l'allenatore di questi pattinatori ha firmato un accordo di riservatezza che esclude la divulgazione dei loro nomi, età e peso specifici, ma qui di seguito si possono riportare l'età media dei soggetti di $14,1 \pm 3,07$ anni e la BMI (Body Mass Index o Indice di Massa Corporea) media dei soggetti di $18,92 \pm 3,13 \frac{kg}{m^2}$.

Di seguito viene riportata la tabella con i dati biometrici degli atleti:

	Età	Peso (Kg)	Altezza (m)	BMI ($\frac{kg}{m^2}$)	N piede
Media	14,10	48,90	1,60	18,92	37,70
Dev. Std.	3,07	12,41	0,10	3,13	1,95

Tabella 2: Dati dei soggetti dello studio

3.3. Task motorio

L'Axel è un salto del pattinaggio artistico eseguito sia in singolo sia in coppia. In questo salto l'atleta o gli atleti devono completare una rotazione e mezza in aria, prima di atterrare sul bordo posteriore esterno. Dato che l'Axel è l'unico salto, rispetto a tutti gli altri, che parte dal bordo esterno in avanti è considerato uno dei salti più difficili da eseguire. Si compone di tre istanti principali [21]:

- La spinta iniziale o take-off: viene impressa dalla distensione della gamba portante, aiutata dallo slancio della gamba libera. Questa fase si conclude con il decollo, ovvero l'istante in cui il pattino perde contatto con il ghiaccio.
- La rotazione: una e mezza per il singolo Axel, due e mezza e tre e mezza per doppio e triplo Axel rispettivamente. Durante questa fase è importante che braccia e gambe rimangano il più vicino possibile all'asse di rotazione del corpo durante tutta la fase di volo. Questo permette al pattinatore di avere la massa più concentrata vicino all'asse e quindi girare più velocemente, come richiede e insegna la dinamica rotazionale.
- L'atterraggio: inizia quando la punta della lama tocca il ghiaccio e il pattinatore scivola verso il retro all'esterno del bordo della lama.

Di seguito una schematizzazione dell'Axel, in cui il punto 0 rappresenta il pre-take-off, ossia il momento subito precedente all'inizio del task; il punto 1 rappresenta il take-off; il punto 2 la rotazione in aria; il punto 3 l'atterraggio:

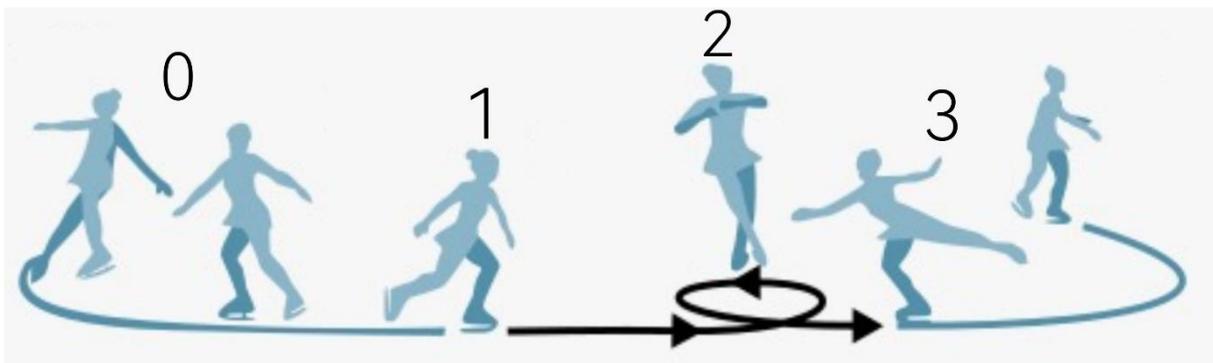


Figura 12: Stadi del salto Axel, <https://theconversation.com/>

Come si può notare dall'immagine, all'inizio del task (0), l'atleta pattina all'indietro sul bordo esterno destro, mentre alla fine di questa fase trasferisce il peso sul piede opposto, pattinando sul bordo esterno sinistro. A (1) comincia il take-off: quando è già stato spostato sul piede sinistro, il peso del pattinatore deve essere collocato sulla parte anteriore del pattino e della lama, così da consentire potenza e altezza al salto e permettere all'atleta uno stacco corretto dal ghiaccio. A (2) avvengono le rotazioni in aria, che possono essere una, due, tre o anche quattro e mezza per gli atleti più esperti. La fine del task è rappresentata dal punto (3), in cui il pattinatore atterra sul piede sinistro, lo stesso del pre-take-off, e può continuare con il resto della performance.

Di seguito l'esempio di salto Axel di Mao Asada delle Olimpiadi Sochi 2014, ritenuta una tra le/i migliori pattinatrici/pattinatori della storia:



Figura 13: Una foto composta del salto con triplo axel di Mao Asada alle Olimpiadi di Sochi, il 20 febbraio 2014, <https://mainichi.jp/>

Questo Axel in particolare è eseguito al contrario rispetto a quello nell'immagine precedente: Mao Asada parte all'indietro con il peso sul piede sinistro (momento non incluso nell'immagine), poi sposta il peso sul destro girandosi in avanti, compie tre rotazioni in aria e atterra sul sinistro all'indietro. L'Axel può essere performato sia con la spinta data dal piede destro come dal sinistro, anche se di solito il pattinatore ha una preferenza tra i due.

3.4. Set-up dell'esperimento

L'analisi del movimento umano è un campo di ricerca che richiede l'utilizzo di strumenti e metodologie avanzate per comprendere le complesse interazioni biomeccaniche coinvolte nelle diverse attività motorie. Nel presente progetto, ci focalizzeremo su tre tecnologie che hanno dimostrato di essere preziose strumentazioni nello studio del movimento: l'analisi biomeccanica basata su algoritmi di interpretazione video, il sistema di segnalazione markerset IORgait e l'utilizzo delle solette di pressione.

3.4.1. Telecamere

L'analisi biomeccanica di un salto veloce come l'Axel richiederebbe l'uso di telecamere a frequenze molto maggiori e molto più costose, ma grazie ad algoritmi che sfruttano modelli biomeccanici e che interpretano l'immagine video bidimensionale rendendola tridimensionale, BBSof riesce ad utilizzare telecamere più economiche ottenendo un risultato analogo.

Le telecamere utilizzate in queste analisi sono state in totale otto ed erano:

- quattro GoPro Hero3+, con una risoluzione video fino a 1080 a 30 fps (fotogrammi per secondo), di peso 74 grammi;
- quattro GoPro Hero7 Black, con una risoluzione video fino a 1080 a 30 fps, di peso 126 grammi;



Figura 14: GoPro Hero3+,
<https://gopro.com/>



Figura 15: GoPro Hero7 Black,
<https://gopro.com/>

Le ultime sono leggermente più pesanti, ma sono anche più recenti e quindi hanno una risoluzione maggiore di video. Le riprese sono state eseguite tutte a 30 fps, frequenza minima richiesta per avere un numero sufficiente di frame e ottenere un movimento fluido della figura anche se registrato.

Le telecamere sono state posizionate su dei cavalletti che permettevano una certa altezza di registrazione, per ottenere video da prospettive chiare, e stabilità di registrazione, perché treppiedi.

Le telecamere sono state collocate attorno ad un'area scelta di calibrazione, nel nostro caso il semi-rettangolo azzurro disegnato sul ghiaccio del Palaghiaccio. Considerando il davanti come il punto di vista dal quale si vede la gamba di partenza coprire quella di atterraggio, le telecamere erano disposte:

- una GoPro Hero3+ davanti, un'altra dietro;
- una GoPro Hero3+ a sinistra, l'ultima a destra;
- le quattro GoPro Hero7 Black sugli angoli delle immaginarie diagonali originate dal rettangolo di calibrazione.



Figura 16: Disposizione delle fotocamere dalla prospettiva della camera 5; da sinistra: camera 6, camera 2, camera 8, camera 4 in fondo a destra e si intravede la camera 1 sulla destra



Figura 17: Disposizione delle fotocamere dalla prospettiva della camera 6; da sinistra: si intravede la camera 7, camera 1, camera 5, camera 3 e si intravede la camera 8 sulla destra

Il telecomando che è stato utilizzato per far partire in maniera sincronizzata le telecamere è lo Smart Remote, un accessorio di telecomando progettato per le fotocamere GoPro, che permette di controllare la fotocamera GoPro da una certa distanza, rendendo più facile scattare foto e registrare video senza dover toccare fisicamente la fotocamera.

3.3.2. Markerset

Il markerset IORgait [22] è un sistema di segnalazione utilizzato nell'analisi del movimento umano. Si compone di markers o marcatori, ovvero piccole protuberanze o placche, che vengono applicate a specifici punti anatomici sul corpo.

Il markerset IORgait include marcatori posizionati su punti anatomici che sono considerati rilevanti per la valutazione del movimento umano. Questi punti possono includere articolazioni come ginocchia, caviglie, anche e spalle, oltre a regioni specifiche del torace e del cranio. Nello specifico, i punti anatomici considerati nel markerset IORgait sono:

- Il centro delle cervicali (C7) e la sommità delle spalle (RA e LA)
- Bacino: spina iliaca posteriore superiore destra e sinistra (RPSIS e LPSIS), punto medio tra le spina iliache posteriori (L5) e spina iliaca anteriore superiore destra e sinistra (RASIS e LASIS)
- Coscia: Testa del femore destra e sinistra (RGT e LGT), epicondilo mediale destro e sinistro (RME LME) ed epicondilo laterale destro e sinistro (RLE e LLE),
- Gamba: testa della fibula destra e sinistra (RHF e LHF), testa della tibia destra e sinistra (RTT e LTT), malleolo mediale destro e sinistro (RMM e LMM) e malleolo laterale destro e sinistro (RLM e LLM)
- Piede: il centro del calcagno destro e sinistro (RCA e LCA), quinto dito del piede destro e sinistro (RVMH e LVMH), primo dito del piede destro e sinistro (RIMH e LIMH) e secondo dito del piede destro e sinistro (RIIT e LIIT)

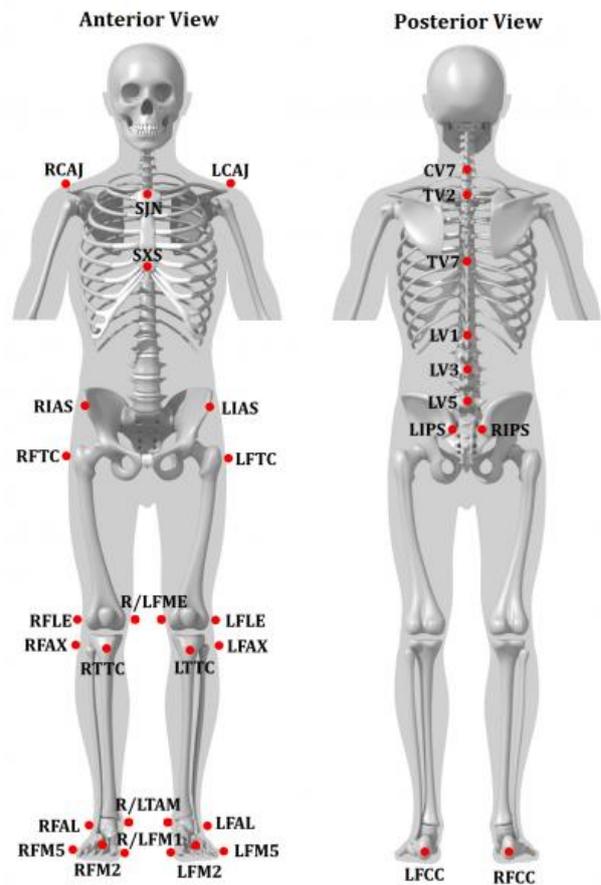
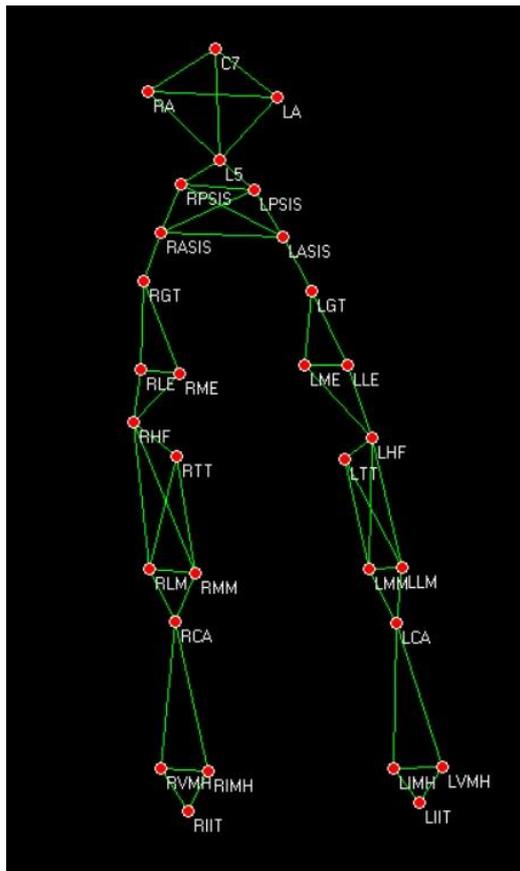


Figura 18: protocollo IORgait, <https://www.c-motion.com/>

Questi punti sono stati scelti perché rappresentano punti anatomici importanti del corpo che sono coinvolti nel movimento. La registrazione della posizione e del movimento di questi punti aiuta a creare un'immagine tridimensionale del movimento del corpo e a valutare l'efficacia e la sicurezza delle azioni.

Inoltre, l'uso di questi specifici punti anatomici garantisce una maggiore accuratezza nella raccolta dei dati sul movimento rispetto ad altri sistemi di marcatura che potrebbero includere punti irrilevanti o che potrebbero essere influenzati da variazioni individuali.

3.3.3. Solette di pressione

Le solette di pressione, anche chiamate solette di sensori di pressione o solette plantari, sono dispositivi che contengono una matrice di sensori di pressione che rilevano la distribuzione delle forze del piede durante la camminata o l'esercizio fisico. Nell'analisi del movimento nel pattinaggio artistico, le solette di pressione possono essere utilizzate per

valutare la distribuzione del peso del pattinatore sui pattini durante l'esecuzione dei movimenti. Le solette di pressione possono anche aiutare gli allenatori a sviluppare programmi di allenamento mirati per migliorare la distribuzione del peso e la stabilità del pattinatore sui pattini.

In questo studio sono state utilizzate le solette *Blu Insole* della FGP, un marchio italiano di presidi ortopedici di alta gamma. *Blu Insole* è un dispositivo che rileva da ogni passo l'eventuale scostamento dal carico indicato dallo specialista segnalandolo in tempo reale al paziente attraverso un feedback sonoro o di vibrazione.



Figura 19: dispositivo *Blu Insole* e soletta, <https://www.fgpsrl.it/>

Questo è il funzionamento e gli strumenti utilizzabili di queste solette:

- Una volta indossata la soletta nel pattino, i sensori sono totalmente al di sotto del peso del piede. Da questa fuoriesce un collegamento che può collegarsi ad un dispositivo che si applica sopra la caviglia e che restituisce il segnale in tempo reale al paziente ogni volta che si presenta uno scostamento dal parametro di soglia.
- Un software di interfaccia di facile usabilità dedicato allo specialista medico e tecnico ortopedico imposta il corretto parametro di soglia, in modo tale da conoscere e rendere noto anche al paziente le possibili mancanze a livello di equilibrio, di forza e muscolare.

- La matrice della soletta è formata da 214 sensori resistivi che rilevano con estrema precisione il carico parziale sostenuto dal piede del paziente.
- La frequenza massima sostenuta dal software Motux è di 200 hertz; quindi, questa è anche stata quella utilizzata per questa ricerca.

3.4. Elaborazione e analisi dei dati

In questo capitolo esploreremo i due metodi utilizzati per l'elaborazione e l'analisi ottenuti dai test. Nel primo paragrafo, esploreremo il software TrackOnField, sviluppato da BBSof, per la ricostruzione 3D del movimento dei soggetti a partire dai video, osservandone nel dettaglio le varie fasi. Nel secondo paragrafo presenteremo invece i codici sviluppati in Matlab in collaborazione con il laboratorio Biomov-Lab dell'Università degli Studi di Padova, e le sue applicazioni per il calcolo degli angoli 3D e i momenti biomeccanici studiati nell'arto inferiore e nel tronco.

3.4.1. Trackonfield

TrackOnField è un software, creato appositamente dall'azienda BBSof, che semplifica e velocizza il lavoro dell'ingegnere biomedico nel momento in cui ha bisogno di ottenere, sviluppare e studiare un movimento specifico di uno sport, come per l'appunto l'Axel nel pattinaggio di figura.

Di seguito sono espone le fasi iniziali del lavoro e le fasi successive sintetizzate.

Innanzitutto, è necessario aprire il software, una volta inserito il supporto di memoria rimovibile: senza di esso il software non può funzionare; infatti, permette al programma di girare nel computer dal quale si sta lavorando.

Per salvare le modifiche effettuate nel programma dall'apertura alla chiusura e conservare tutte le informazioni aggiunte, è indispensabile avviare una nuova sessione. Questa operazione creerà automaticamente una cartella in cui verranno memorizzati i dati sviluppati nelle fasi successive.



Figura 20: Barra inferiore del software, elenco delle varie schermate utilizzabili

Di seguito sono elencate le schermate del software trattate nello specifico nei capitoli seguenti:

- Sincronizzazione/ Sync
- Tracking/ Sequences
- Calibrazione/ Calibrate
- Triangolazione/ Triangulate

La sessione si apre con la schermata iniziale del software, in cui sono visibili gli spazi in cui inserire le generali dell'atleta (a conoscenza dello sviluppatore, sostituite da un nome in codice nelle conclusioni successive). In questa schermata possono essere inseriti: nome, cognome, età, altezza, peso e numero di scarpe dell'atleta, oltre al nome dell'operatore e della sessione. Inoltre, viene anche specificato e inserito il Marker Set che verrà utilizzato, in formato JSON, che in questo studio è lo IORgait, citato in precedenza.

Subject	
Name	<input type="text"/>
Surname	<input type="text"/>
Age	<input type="text" value="0"/>
Height	<input type="text" value="0"/>
Weight	<input type="text" value="0"/>
Shoe Size	<input type="text" value="0"/>

Operator	
Name	<input type="text"/>
Surname	<input type="text"/>

Session	
Name	<input type="text" value="0 - prova"/> <input type="button" value="Rename"/>
Marker Set	<input type="text" value="IORGate"/> <input type="button" value="Edit"/>

Figura 21: Schermata iniziale del software

3.4.1.1. Sincronizzazione e tracking

Una volta aperto il programma che mostra direttamente la schermata "Session", è il momento di caricare nel software i video delle otto GoPro nella schermata "Sync". I video registrati dalle GoPro sono sempre ordinati allo stesso modo per ogni atleta: ad esempio, la prospettiva del task da davanti (con la spinta iniziale a sinistra e l'atterraggio a destra) è sempre il video numero 1 e la prospettiva del task da sinistra (da cui è più visibile la spinta iniziale, mentre l'atterraggio è più lontano) è sempre il video numero 3.

Durante questa fase, l'obiettivo principale è garantire la sincronizzazione tra i vari video registrati. È possibile che, a causa di problemi tecnici, il telecomando non abbia attivato contemporaneamente tutte le telecamere disposte a diverse distanze, rendendo necessario avviare manualmente alcuni dei video. Inoltre, nel caso in cui non fosse disponibile un telecomando appropriato per l'attivazione simultanea delle telecamere, si dovrebbe procedere ad accenderle una alla volta. Questo causa degli ovvi problemi di ritardo e di asincronia tra le diverse registrazioni, in quanto il tempo impiegato per attivare manualmente le telecamere varia tra una ripresa e l'altra. È quindi di fondamentale importanza prestare particolare attenzione durante questa fase di post-produzione per garantire che eventuali problemi di delay siano corretti.

In questa fase del progetto, è fondamentale porre particolare attenzione a due momenti chiave: quello immediatamente precedente e immediatamente successivo al momento in cui il pattino si stacca dal ghiaccio, e quello immediatamente precedente e immediatamente successivo al momento in cui il pattino torna a scivolare sul ghiaccio. Questi momenti sono in effetti i più riconoscibili ed evidenti da qualsiasi angolazione; pertanto, una volta applicata questa metodologia per ogni telecamera, è possibile avere la certezza che la sincronizzazione sia stata effettuata con successo.



Figura 22: Istante subito precedente e subito successivo allo stacco del pattino dal ghiaccio

La fase successiva è quella di tracking (“Sequences” nel software) dei punti anatomici: è un processo in cui vengono identificate le diverse ripetizioni del task eseguite dall’atleta e tracciati i punti di interesse sul corpo dell’atleta nell'ambiente bidimensionale. In questa tesi si riferisce al sistema di punti IORgait, già citato in precedenza, applicato agli atleti attraverso dei tape: in questo studio, i marcatori utilizzati erano costituiti da adesivi quadrati di colore bianco con un cerchio nero posizionato al centro. Questa combinazione di colori è stata scelta in modo specifico per garantire una marcatura precisa dei punti anatomici. Il contrasto tra il bianco dei quadrati e il cerchio nero consente una rilevazione accurata e affidabile dei punti di interesse durante l'acquisizione del movimento.

Una volta identificati i punti anatomici di interesse, il tracking consiste nel seguire il loro movimento nel tempo. Ciò è ottenuto mediante l’algoritmo di Kanade-Lucas-Tommasi [23] per il tracciamento semi-automatico delle features posizionate in sequenze di immagini. A fronte di task semplici (come uno step) l’algoritmo del software riesce a seguire in modo accurato e automatico i molteplici tape; nel caso dell’Axel, che comprende un salto acrobatico in cui il pattinatore compie una rotazione in aria, i marcatori sfuggono facilmente alla vista delle telecamere, rendendone impossibile il riconoscimento automatico da parte del software. Di conseguenza, è necessario procedere al posizionamento manuale dei marcatori.



Figura 23: Esempio di collocamento dei punti anatomici durante la fase di tracking, grazie alla presenza dei marker

L'obiettivo del tracking è garantire la corretta acquisizione delle coordinate spaziali dei punti anatomici utilizzando un numero adeguato di telecamere. Questo è essenziale per l'ottenimento di immagini 3D accurate e realistiche. Ci sono due scenari da considerare:

- Se le coordinate sono troppo poche, si corre il rischio di non avere il numero minimo di punti necessario per l'imaging 3D. Di conseguenza, durante la successiva fase di triangolazione, il punto anatomico potrebbe non essere presente affatto, compromettendo la qualità e la completezza delle informazioni tridimensionali.
- Se le coordinate sono troppe, si rischia di introdurre imprecisioni nel processo di triangolazione. In tal caso, il punto anatomico potrebbe apparire come spostato in modo innaturale e improvviso. Ciò può portare ad una rappresentazione non realistica dei movimenti nel sistema di coordinate 3D, compromettendo l'accuratezza complessiva dell'acquisizione del movimento.

È quindi cruciale trovare un giusto equilibrio nella quantità di coordinate acquisite, in modo da garantire una registrazione precisa e coerente dei punti anatomici durante il tracking. Questo permette di ottenere risultati affidabili e realistici nell'imaging 3D e nelle successive analisi e applicazioni.

3.4.1.2. Calibrazione e triangolazione

La fase successiva a quella di tracking è la calibrazione ("Calibrate" nel software). È il processo che determina e corregge i parametri intrinseci ed estrinseci di un sistema di acquisizione di immagini (le otto telecamere in questo studio) al fine di ottenere misure accurate e coordinate tridimensionali precise degli oggetti nel mondo reale. La calibrazione è essenziale per garantire la corretta riproduzione spaziale degli oggetti nell'ambiente tridimensionale.

I parametri intrinseci si riferiscono alle caratteristiche specifiche delle telecamere e vengono calcolati secondo l'algoritmo di Bouguet [24]. Questi parametri sono appunto "intrinseci" al dispositivo stesso e non dipendono dall'ambiente circostante. I principali parametri intrinseci includono:

- Lunghezza focale: rappresenta la distanza tra il centro ottico della fotocamera (punto in cui i raggi di luce convergono) e il piano immagine. Misurata in millimetri, influenza l'angolo di campo e la prospettiva dell'immagine catturata.
- Centro ottico: indica il punto in cui i raggi di luce convergono all'interno della fotocamera. È importante conoscere la posizione esatta del centro ottico per calcolare la proiezione tridimensionale corretta dei punti nell'immagine.
- Distorsione: le lenti della fotocamera possono introdurre distorsioni ottiche che alterano la forma degli oggetti nelle immagini. I parametri di distorsione correggono queste distorsioni e consentono una rappresentazione più accurata degli oggetti.

I parametri estrinseci, d'altra parte, descrivono la posizione e l'orientamento relativo della telecamera rispetto all'oggetto o all'ambiente nel mondo reale. Questi parametri sono specifici per ogni punto di vista della telecamera:

- Posizione: rappresenta le coordinate spaziali tridimensionali della telecamera rispetto a un sistema di coordinate di riferimento nel mondo reale. Questo parametro definisce la posizione della telecamera nello spazio.
- Orientamento: indica l'orientamento della telecamera rispetto ai tre assi dello spazio tridimensionale. Questo parametro descrive l'inclinazione, la rotazione e l'orientamento della telecamera rispetto all'oggetto o all'ambiente.

Nel contesto della calibrazione, come in questo studio, viene spesso utilizzato un piano cartesiano di tre assi, noto come sistema di coordinate XYZ. Questo sistema di coordinate viene utilizzato per rappresentare lo spazio tridimensionale, consentendo di descrivere la posizione e l'orientamento degli oggetti nello spazio. I tre assi principali sono:

- Asse X: rappresenta la direzione frontale, in profondità, da lontano a vicino.
- Asse Y: rappresenta la direzione orizzontale da sinistra a destra.
- Asse Z: rappresenta la direzione verticale dal basso verso l'alto

Utilizzando un sistema di coordinate tridimensionale, è possibile determinare con precisione le posizioni degli oggetti nello spazio e misurare le distanze, le dimensioni e gli angoli tra di essi. La calibrazione del sistema di imaging 3D assicura che i punti nel mondo reale vengano

correttamente mappati nei punti nello spazio tridimensionale del sistema di coordinate XYZ, fornendo una rappresentazione accurata degli oggetti nell'immagine 3D acquisita.

Per questo specifico studio, l'area di calibrazione considerata è stata una forma quasi rettangolare colorata d'azzurro che era già presente nel ghiaccio del palazzetto, e l'origine del sistema è segnato nell'immagine seguente:

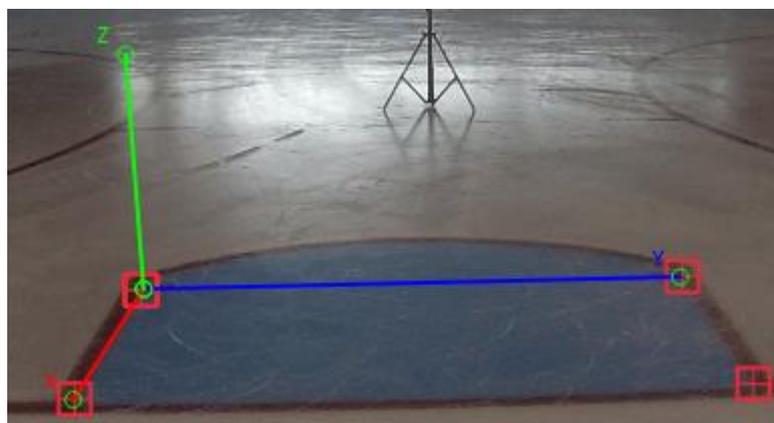


Figura 24: Sistema di coordinate tridimensionale applicato all'area di studio

La triangolazione è un metodo utilizzato per determinare la posizione tridimensionale di un punto nello spazio utilizzando le informazioni raccolte da più telecamere. Questa tecnica si basa sul principio geometrico della triangolazione, che coinvolge la misurazione degli angoli e delle distanze per calcolare la posizione di un punto nel sistema di coordinate tridimensionali.

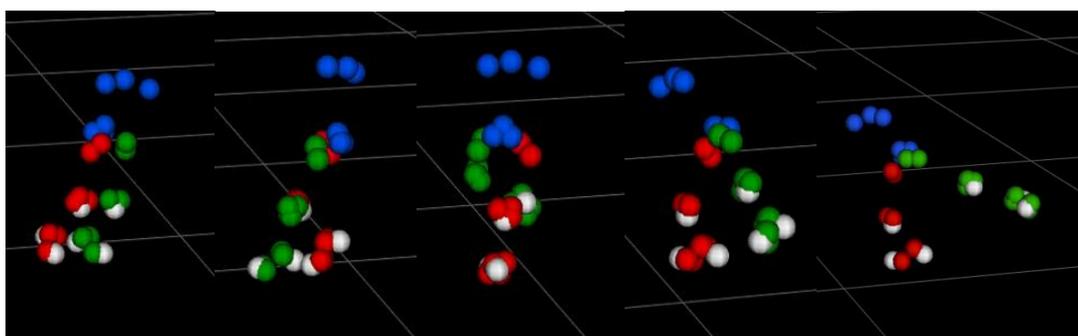


Figura 25: Triangolazione di momenti in sequenza dell'Axel visualizzati con Mokka, <https://biomechanical-toolkit.github.io/mokka/>

Nel processo di triangolazione, la corretta posizione delle telecamere riveste un ruolo fondamentale. Grazie alla loro disposizione da diverse angolazioni, le telecamere permettono di ottenere una copertura ottimale dell'area di interesse. La disposizione strategica delle telecamere assicura che i punti di interesse siano visibili da almeno due o più

telecamere contemporaneamente, consentendo una rilevazione accurata e una ricostruzione tridimensionale affidabile. Una volta ottenute le informazioni di proiezione dei punti anatomici dalle diverse telecamere, l'algoritmo di triangolazione calcola la posizione tridimensionale del punto nel sistema di coordinate. Questo viene fatto utilizzando la geometria dei triangoli formati dai punti di vista delle telecamere e dalle corrispondenze del punto di interesse.

3.4.2. Matlab

Gli algoritmi per lo studio delle variabili biomeccaniche, in particolare gli angoli 3D e i momenti dell'arto inferiore e del tronco, sono stati sviluppati con il linguaggio di programmazione Matlab in collaborazione con il gruppo di ricerca del laboratorio di Bioingegneria del movimento Biomov-Lab dell'Università degli Studi di Padova.

I codici sviluppati consentono di calcolare gli angoli 3D del tronco, del bacino, dell'anca, del ginocchio e della caviglia nei piani frontale, sagittale e mediale. Un'eccezione è rappresentata dall'articolazione del ginocchio, per la quale gli angoli vengono elaborati solo nel piano sagittale.

Per quanto riguarda i momenti articolari, il software calcola i momenti dell'anca, del ginocchio e della caviglia nei piani frontale e sagittale. I momenti articolari vengono anche normalizzati come percentuale del peso e dell'altezza dell'atleta.

Nell'analisi sono stati presi in considerazione diversi parametri articolari. Per la caviglia, sono state analizzate la dorsiflessione, la plantarflexione, l'eversione, l'inversione e la rotazione interna-esterna. Per il ginocchio, è stata valutata la flessione ed estensione nel piano sagittale, mentre per l'anca sono state prese in considerazione l'adduzione-abduzione, la flessione-estensione e la rotazione interna-esterna. Per quanto riguarda il bacino, è stata analizzata l'obliquità verso il basso e verso l'alto, insieme alla rotazione esterna-interna. Infine, per il tronco, sono stati esaminati la flessione-estensione, l'obliquità e la rotazione. I momenti articolari sono stati valutati nei piani frontale e sagittale per l'anca, il ginocchio e la caviglia, concentrandosi sulla flessione-estensione, l'inversione-eversione della caviglia, l'adduzione-abduzione e la flessione-estensione dell'anca, nonché la flessione-estensione e il valgo-varo del ginocchio, oltre alla forza esercitata.

Nella figura 26 sono riportati i principali movimenti permessi dalla caviglia e piede:

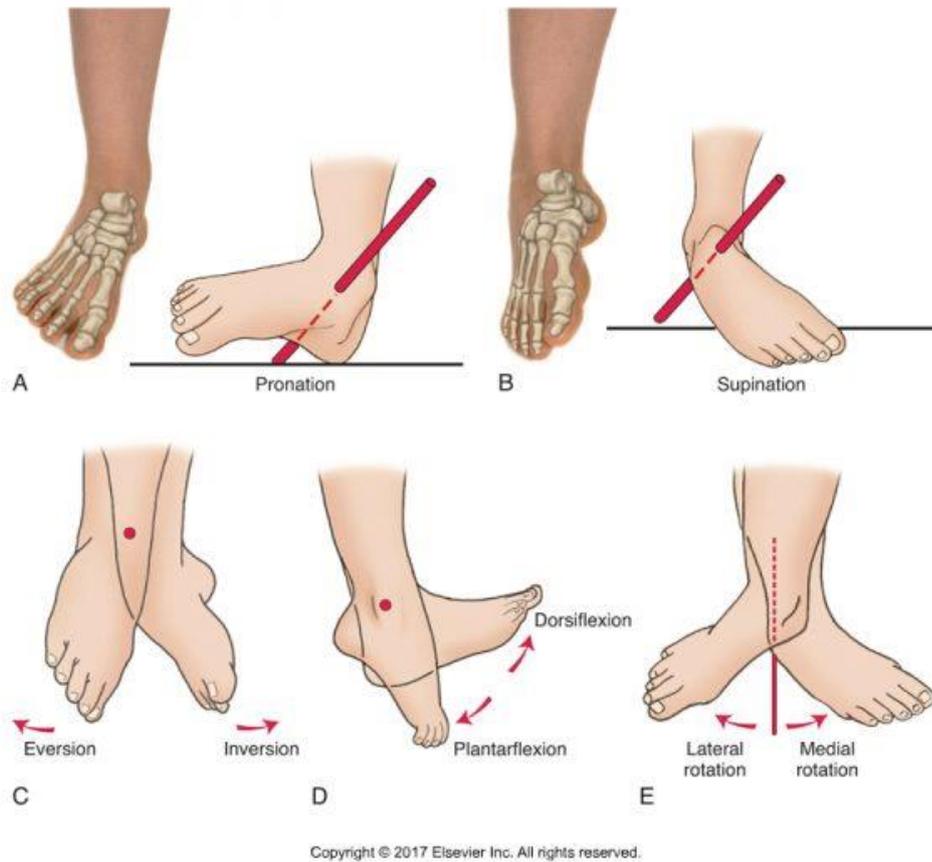


Figura 26: Movimenti di caviglia e piede, <https://www.lascienzainpalestra.it/>

I risultati sono stati presentati in bande di normalità, rappresentando la media \pm la deviazione standard. Per l'analisi statistica è stato utilizzato un test non parametrico, visto la scarsa numerosità del campione, il Wilcoxon Signed rank test, con un livello di significatività di 0,05.

4. Risultati e considerazioni

In questo capitolo vengono riportati e analizzati i risultati delle acquisizioni biomeccaniche relative all'esecuzione dell'Axel da parte dei pattinatori, includendo gli angoli articolari, i momenti e l'attivazione muscolare nel contesto del salto completo. Per garantirne la privacy, il nome dei pattinatori è stato omissso.

Nel contesto di questo studio, abbiamo prodotto due tipi principali di grafico per analizzare i dati raccolti durante l'esperimento.

Il primo tipo di grafico che abbiamo creato sono gli istogrammi, che ci permettono di visualizzare in modo chiaro e dettagliato gli angoli acquisiti e le forze torcenti che agiscono sull'articolazione durante le fasi di spinta e atterraggio del salto. Questi istogrammi ci forniscono una rappresentazione grafica delle variazioni di angolo e forza nel corso di queste fasi cruciali del movimento.

Legato a questo tipo di grafico, sono stati stilati i report immediati da consegnare all'allenatore, più diretti e interpretabili da chi è interessato principalmente alle articolazioni e i muscoli precisi messi sotto sforzo. Ciò dà la possibilità all'allenatore di valutare se allenare diversamente il pattinatore, in base a quanto riporta il report.

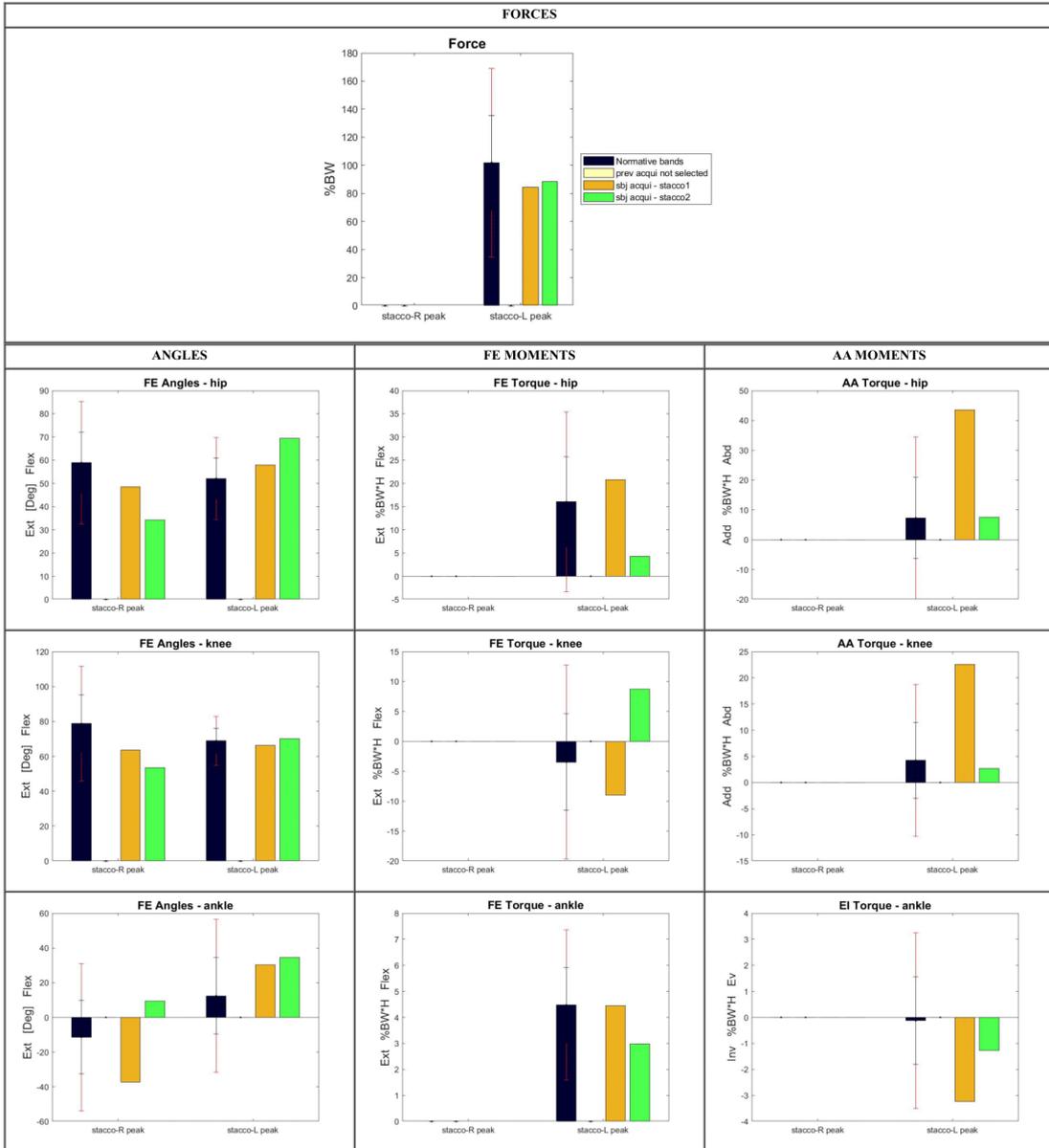
Il secondo tipo di grafico utilizzato è quello a fasce. Questi grafici ci permettono di esaminare in modo più ampio e continuo il movimento dell'articolazione durante l'intero salto, consentendoci di confrontare dettagliatamente le differenze tra la fase di decollo e quella di atterraggio. Questi dati, rappresentati tramite fasce normative, ci aiutano a identificare pattern o variazioni nel movimento dell'articolazione, fornendo informazioni precise sulla variazione del suo angolo durante il movimento.

4.1. Grafici a istogrammi e immediati di spinta e atterraggio

Nelle pagine seguenti sono riportati i report a istogrammi e i report immediati di un pattinatore, a titolo di esempio, che illustrano i momenti specifici della spinta e dell'atterraggio.

SURNAME & NAME:		AGE:	
WEIGHT:	kg	HEIGHT:	m
CODE:		ACQUISITION DATE:	

TAKEOFF Biomechanics Data report (ACL Quick Check®)



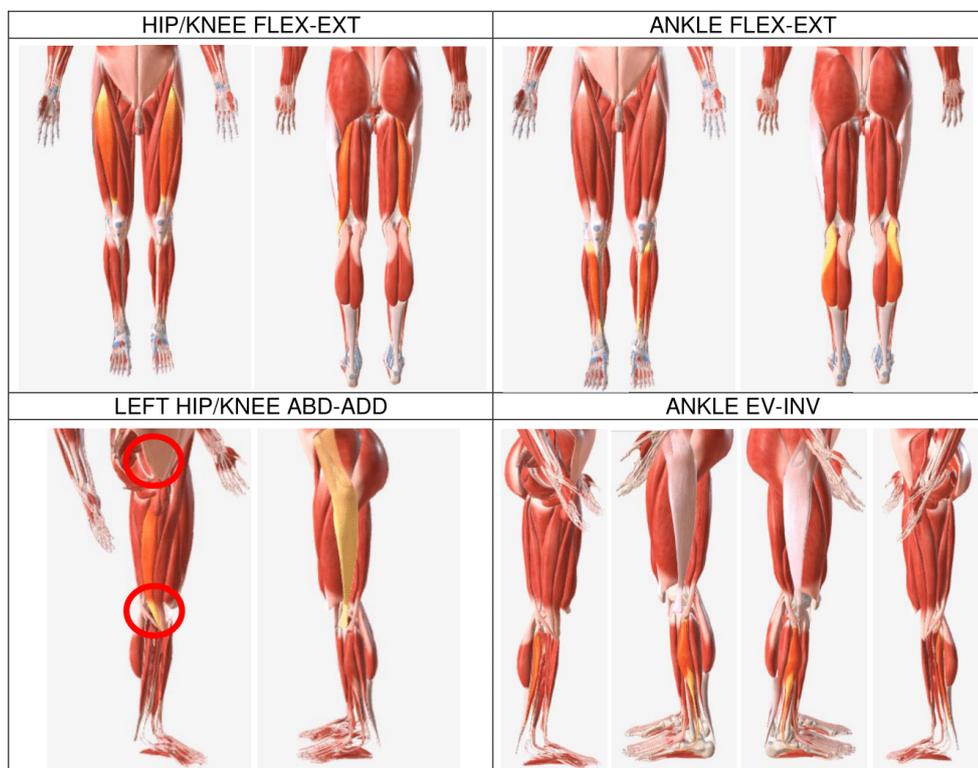
BBSof S.r.l.
via della Croce Rossa, 112 - 35129 - Padova, Italy
info@bb-sof.com - www.bb-sof.com - P.IVA 05077460284

Figura 27: Report di spinta iniziale (grafici a istogrammi)

BIOMECHANICAL VARIABLES

		Peak value – Left leg takeoff	
FORCE [%BW]		86.3	
HIP	Angle FE [Deg]	63.7 *	
	Torque FE [%BW*H]	12.5	
	Torque AA [%BW*H]	25.5 *	
KNEE	Angle FE [Deg]	68.2	
	Torque FE [%BW*H]	8.7	-9.0
	Torque AA [%BW*H]	12.6 *	
ANKLE	Angle FE [Deg]	32.4	
	Torque FE [%BW*H]	3.7	
	Torque EI [%BW*H]	-2.3 *	

*1 out of 2 trials



Legend

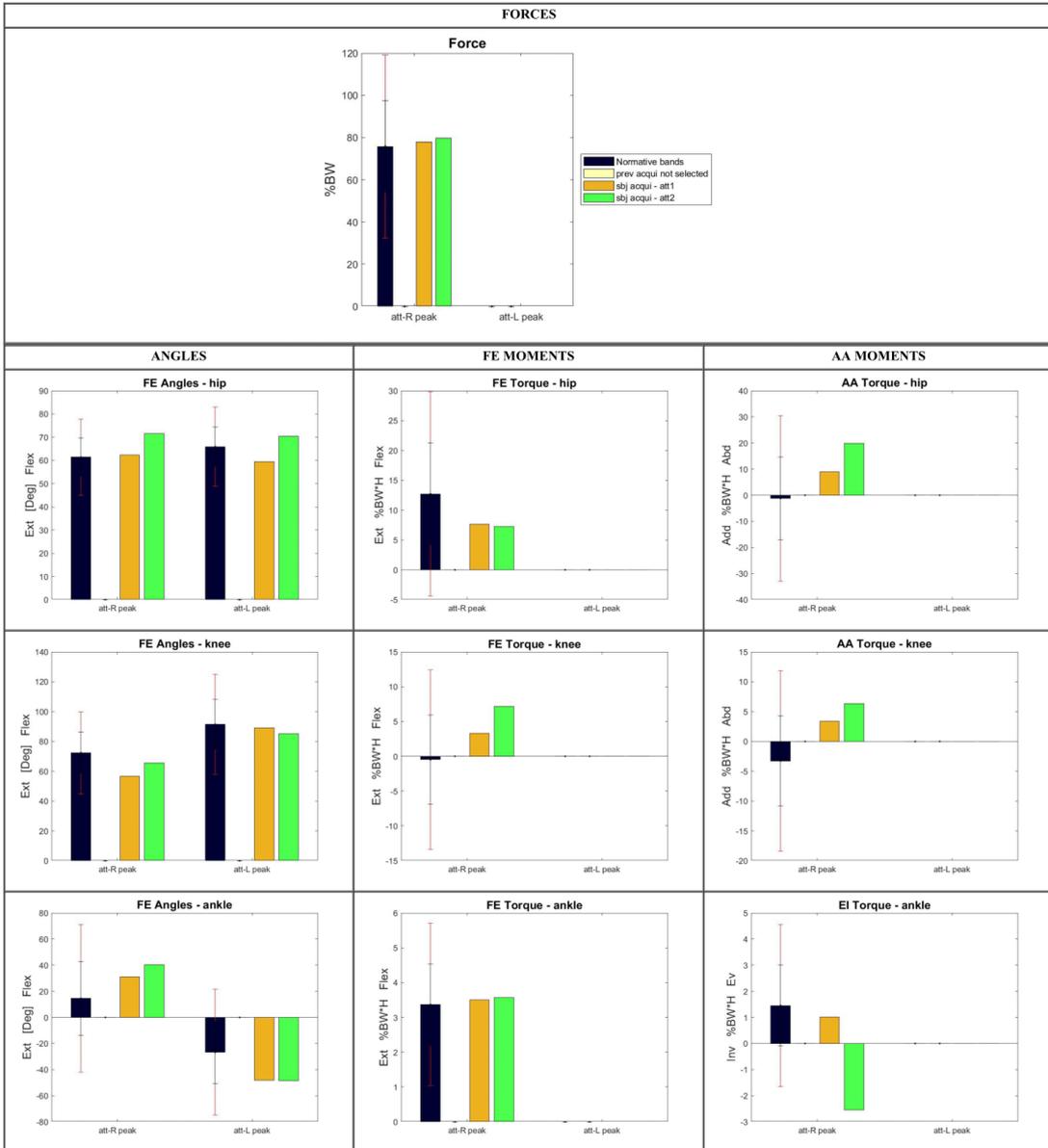
Safety
Medium risk (>1sd of normative bands)
High risk (>2sd of normative bands)



Figura 28: Report di spinta iniziale (immediato)

SURNAME & NAME:		AGE:	
WEIGHT: kg	HEIGHT: m	CODE:	ACQUISITION DATE:

LANDING Biomechanics Data report (ACL Quick Check®)



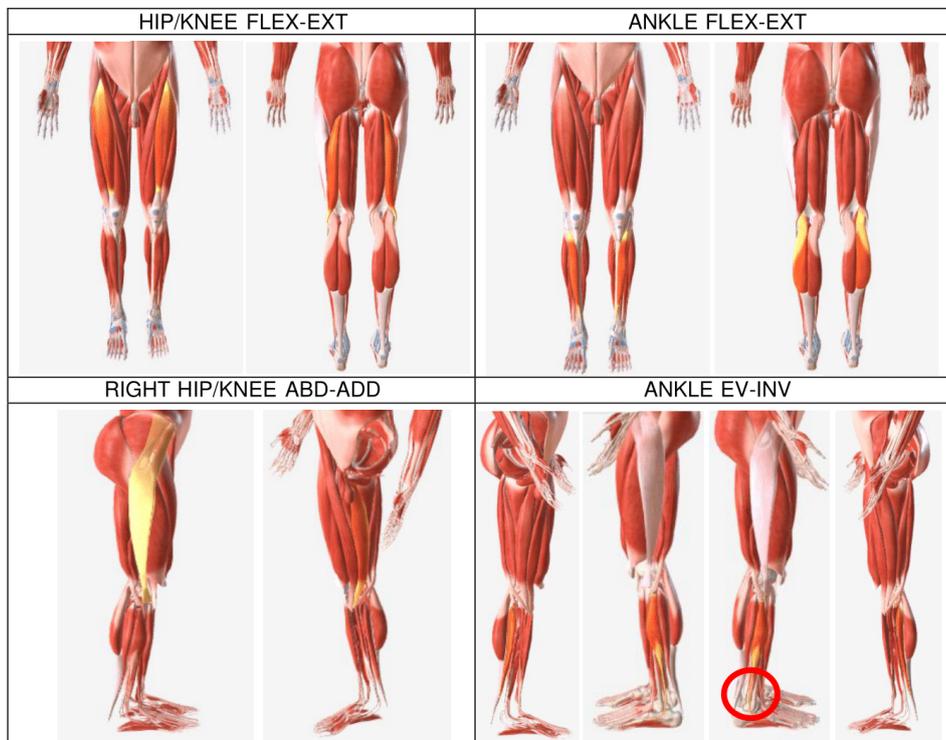
BBSof S.r.l
 via della Croce Rossa, 112 - 35129 - Padova, Italy
 info@bb-sof.com - www.bb-sof.com - P.IVA 05077460284

Figura 29: Report di atterraggio (grafici a istogrammi)

BIOMECHANICAL VARIABLES

		Peak value – Right leg landing	
FORCE [%BW]		78.8	
HIP	Angle FE [Deg]	67.0 *	
	Torque FE [%BW*H]	7.5	
	Torque AA [%BW*H]	14.5 *	
KNEE	Angle FE [Deg]	61.0	
	Torque FE [%BW*H]	7.4 *	
	Torque AA [%BW*H]	4.9 *	
ANKLE	Angle FE [Deg]	35.7	
	Torque FE [%BW*H]	3.5	
	Torque EI [%BW*H]	1	-2.5 *

*1 out of 2 trials



Legend

Safety
Medium risk (>1sd of normative bands)
High risk (>2sd of normative bands)



Figura 30: Report di atterraggio (immediato)

Nei grafici ad istogrammi, la barra blu scuro rappresenta la fascia normativa, quindi i valori medi che si dovrebbero rispettare per avere una buona esecuzione dell'Axel; la barra arancione rappresenta la prima ripetizione ritenuta valida per l'esecuzione del task, la barra verde la seconda. Come si può notare da questo esempio, questo pattinatore ha in particolare un valore fuori dalla media per quanto riguarda:

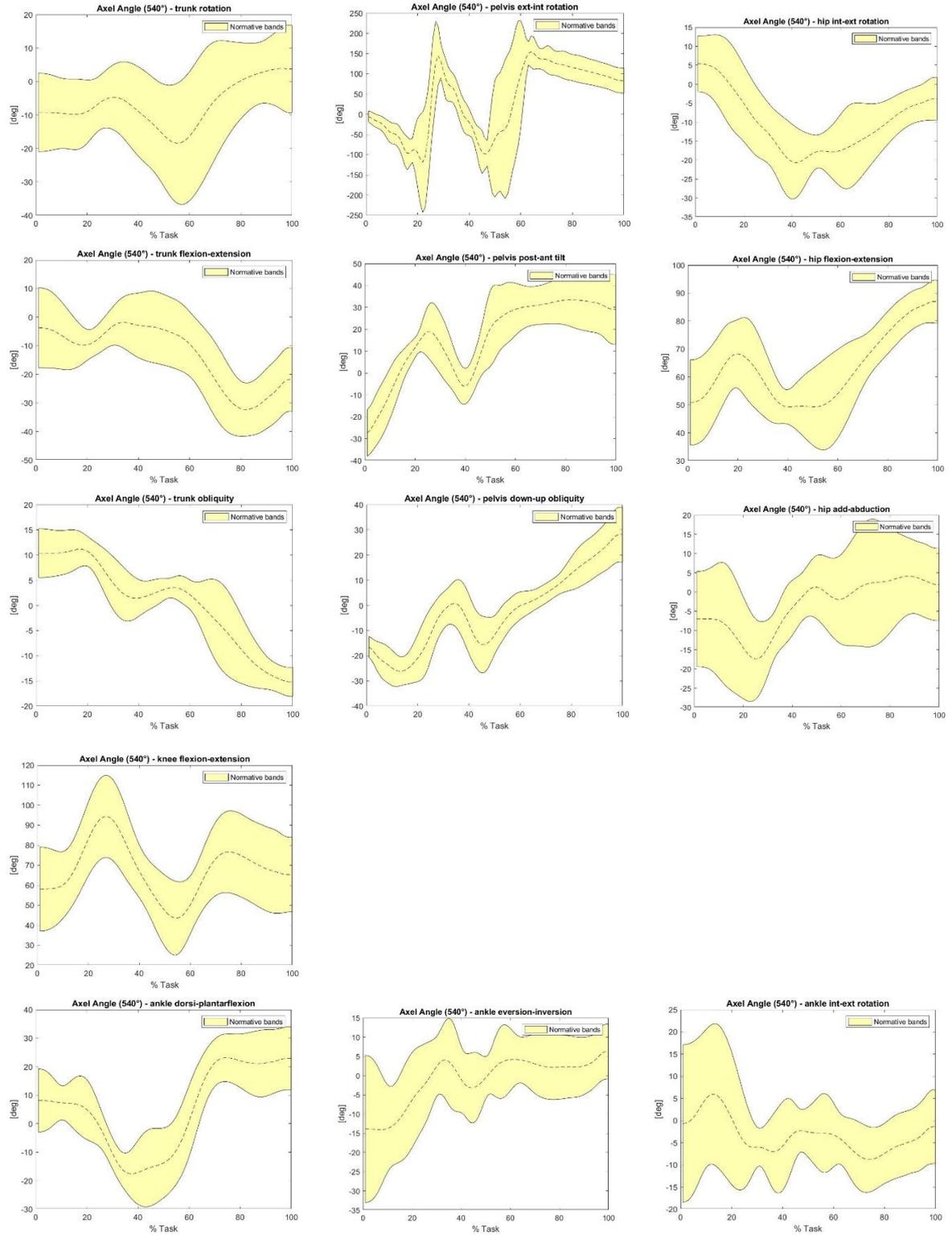
- le forze torcenti di adduzione-abduzione dell'anca e del ginocchio nella spinta
- le forze torcenti di flessione-estensione dell'anca e del ginocchio nella spinta
- le forze torcenti di eversione-inversione della caviglia nella spinta
- l'angolo di flessione-estensione dell'anca nell'atterraggio
- le forze torcenti di adduzione-abduzione dell'anca e del ginocchio nell'atterraggio
- le forze torcenti di flessione-estensione del ginocchio nell'atterraggio
- le forze torcenti di eversione-inversione della caviglia nell'atterraggio

I valori più distaccati dalla media e gravi si notano nelle forze torcenti di adduzione-abduzione dell'anca e del ginocchio nella spinta e nelle forze torcenti di eversione-inversione della caviglia; infatti, nel report finale da consegnare all'allenatore sono cerchiati per la spinta l'anca e il ginocchio destro e per l'atterraggio la caviglia destra. Ciò significa che per migliorare le prestazioni dell'atleta, l'allenatore si concentrerà sul potenziare i muscoli della gamba destra, per compensare l'errore di angoli e forze torcenti.

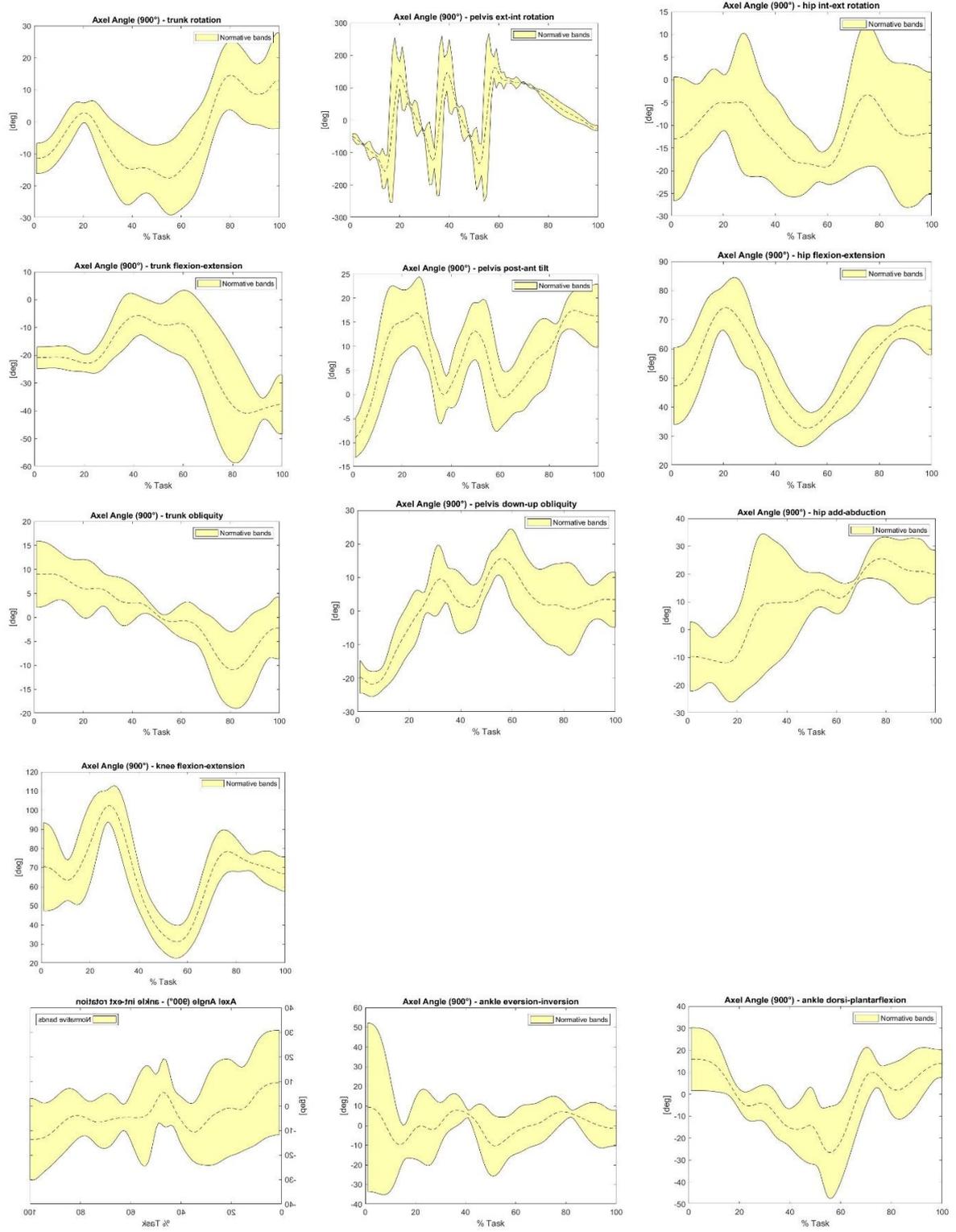
4.2. Grafici a fasce dell'intero task

Nei grafici presentati di seguito sono mostrati i risultati ottenuti con un grafico esplicativo a fasce. In ogni grafico sull'asse delle ascisse è riportata la percentuale di completamento della figura in analisi (dal momento di stacco dal suolo fino all'atterraggio nel caso dell'Axel), mentre sull'asse delle ordinate viene riportato l'angolo effettivo assunto dall'articolazione. Inizialmente sono riportati i dati raccolti dai pattinatori che hanno eseguito l'Axel da una rotazione e mezza, successivamente coloro che hanno eseguito quello da due rotazioni e mezza.

Dati degli Axel di una rotazione e mezza:



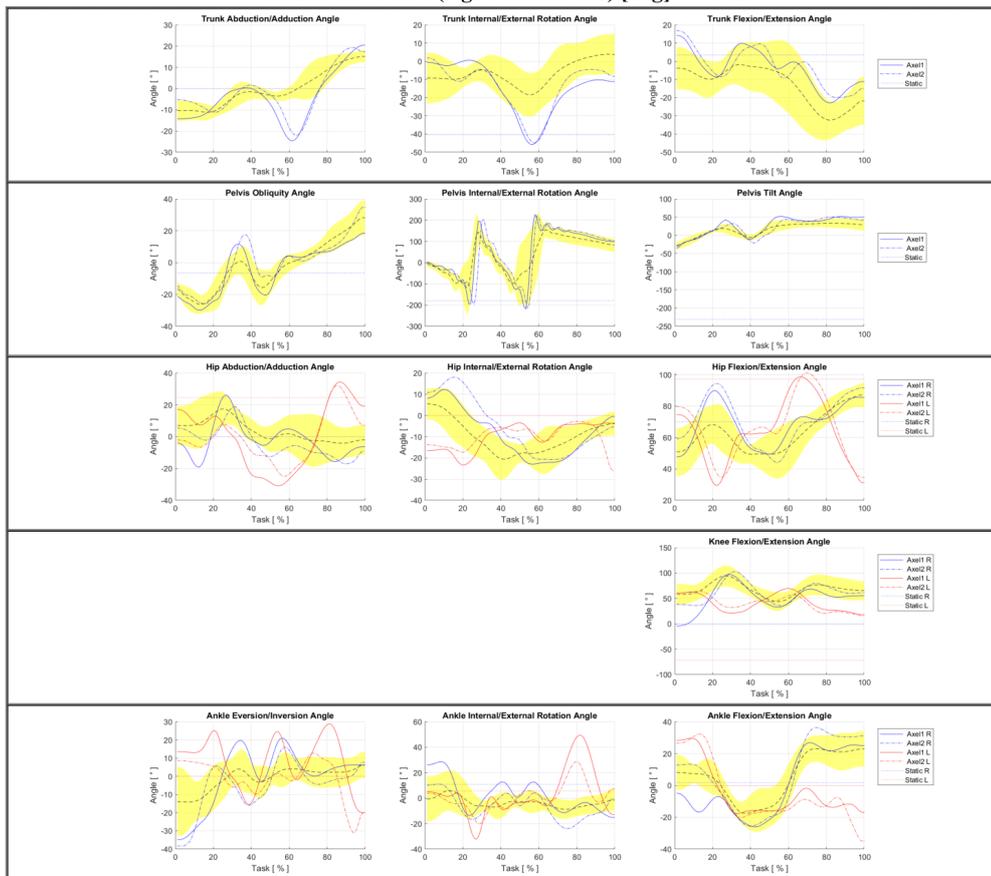
Dati degli Axel di due rotazioni e mezza:



Di seguito è invece riportato un report di esempio dei diagrammi a fasce di un pattinatore, a titolo di esempio:

PERFORMANCE

AXEL ANGLES (right blu/left red) [deg] - %task



BBSof S.r.l
via della Croce Rossa, 112 - 35129 - Padova, Italy
info@bb-sof.com - www.bb-sof.com - P.IVA 05077460284

Figura 31: Report dell'intero task (diagrammi a fasce)

Infine, analizziamo degli esempi specifici derivati dai grafici appena riportati, per spiegarne la lettura.

Nella figura 31 sono mostrati gli angoli di eversione-inversione delle caviglie destra (in blu) e sinistra (in rosso) dell'intero salto, quindi dal momento subito precedente allo stacco della lama dal ghiaccio al momento subito successivo dell'atterraggio della lama del pattino dell'altro piede. La caviglia sinistra è coinvolta principalmente nel decollo e quella destra durante l'atterraggio.

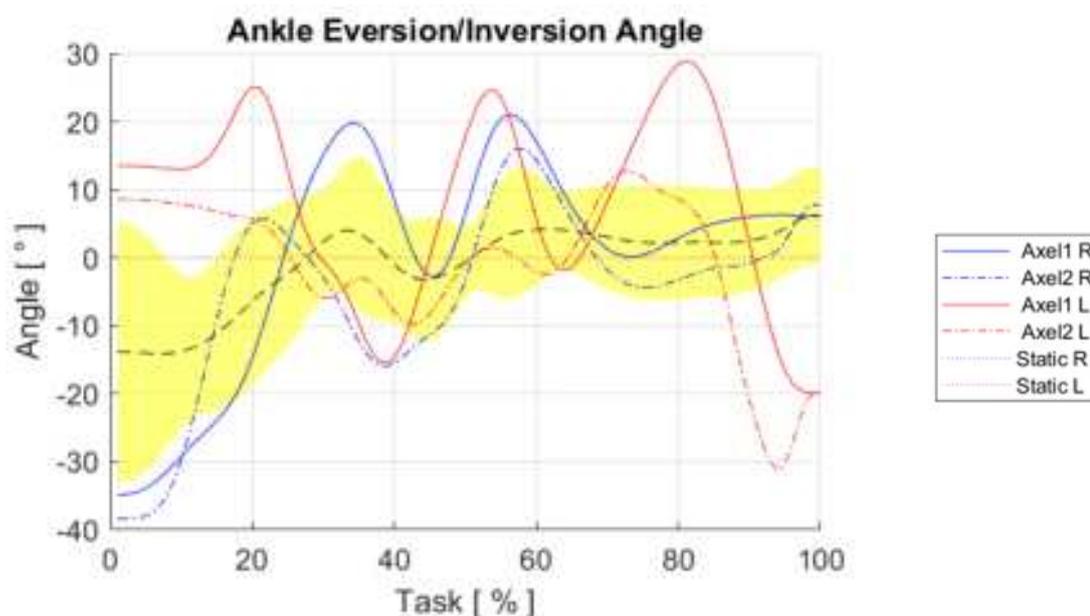


Figura 32: Sviluppo degli angoli di eversione e inversione della caviglia

In questa tabella si può notare che l'articolazione della caviglia esegue due movimenti opposti nella fase di decollo e in quella di atterraggio, mentre un movimento simile nella fase di volo.

Osservando la caviglia sinistra notiamo che durante la fase di decollo presenta un angolo positivo (di eversione) di circa 12°, questo per permettere al corpo di decollare con un momento vantaggioso al giro. Nel corso del task, mentre il pattinatore si trova in volo, questo angolo varia alternando inversione e eversione della caviglia. Infine, durante la fase di atterraggio, l'angolo di eversione è inizialmente molto ampio (raggiunge quasi i 30°) e

diminuisce verso la fine fino a raggiungere l'inversione (di 20° circa), questo perché la gamba sinistra alla fine deve essere diritta e allineata, elevata dal suolo.

La caviglia destra presenta invece un comportamento opposto, in quanto nel decollo l'angolo è ampio nell'inversione (negativo di quasi 40°), mentre durante l'atterraggio si mantiene costante poco al di sopra degli 0° per avere un migliore supporto del carico, in quanto caviglia portante.

Nella figura ** sono mostrati gli angoli di flesso-estensione della caviglia destra (in blu) e sinistra (in rosso) dell'intero salto.

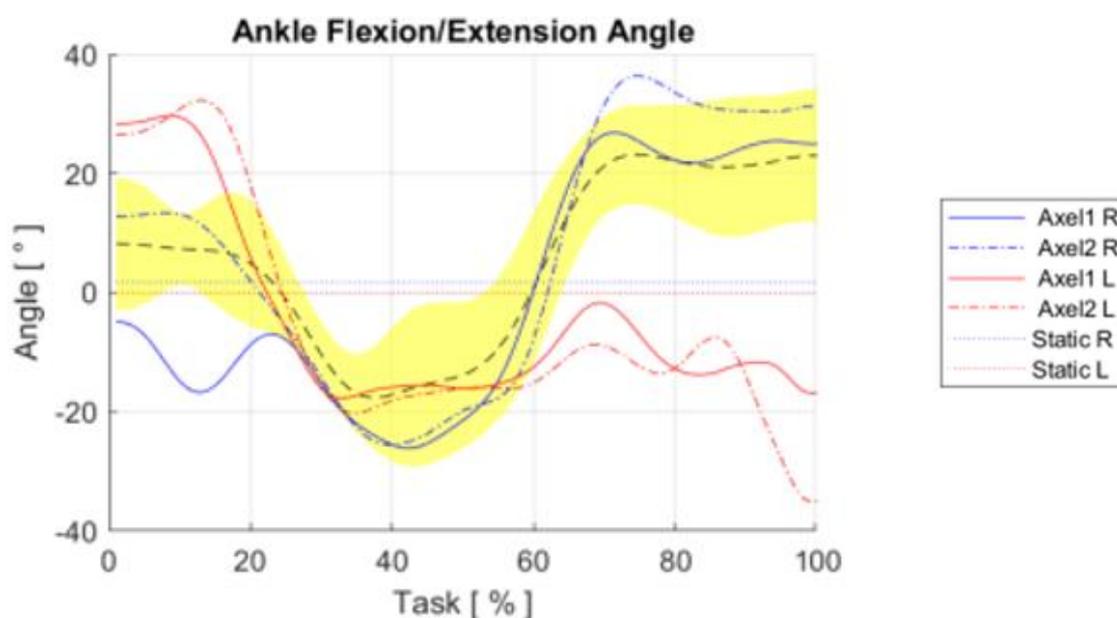


Figura 33: Sviluppo degli angoli di flessione e estensione della caviglia

Possiamo osservare che, diversamente da prima, l'articolazione delle due caviglie eseguono due movimenti opposti durante tutto l'esercizio.

Il piede principale d'appoggio durante le fasi di contatto con il suolo (decollo e atterraggio) è in posizione di flessione per permettere un miglior sostenimento del carico, mentre l'altro piede è in leggera estensione. In questa analisi il piede sinistro nella fase di decollo è il piede d'appoggio in flessione, mentre il destro è in estensione e possiamo osservare che durante la fase di atterraggio i ruoli dei piedi sono scambiati.

Durante l'esecuzione della figura (fase di volo) entrambi i piedi sono in fase di estensione, poiché la vicinanza all'asse di rotazione è necessaria per dare stabilità al pattinatore.

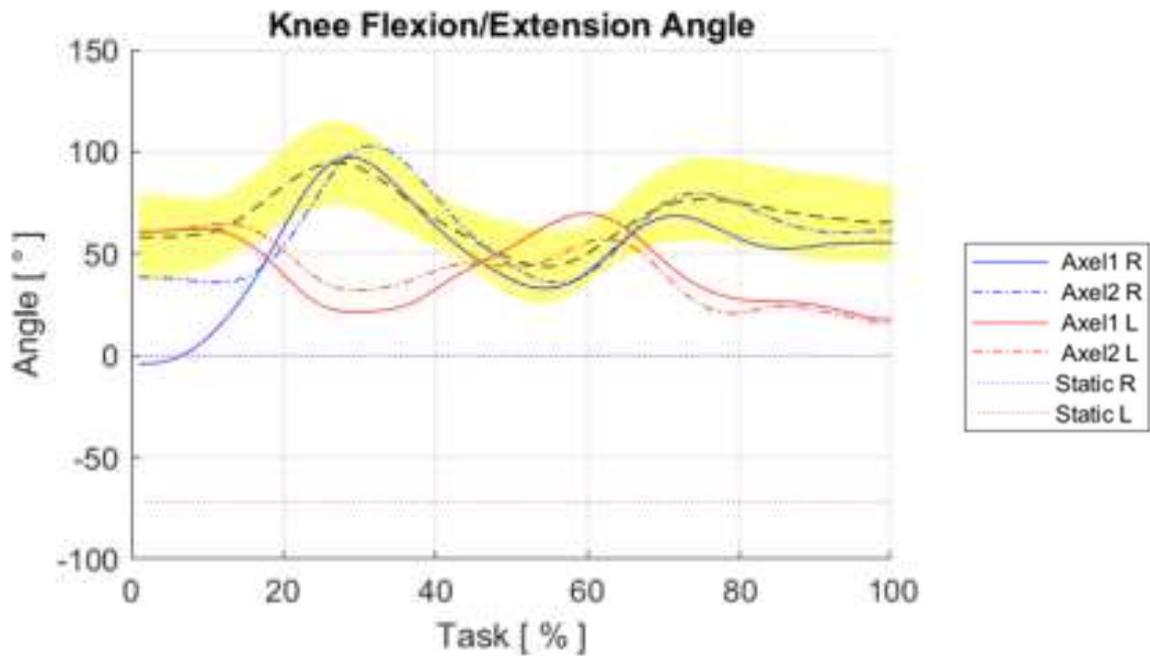


Figura 34: Sviluppo degli angoli di flessione e estensione del ginocchio

In figura 34 possiamo osservare il comportamento delle articolazioni delle ginocchia durante la figura. Inizialmente, durante la fase di preparazione al salto, le ginocchia sono flesse per permettere una migliore spinta verso l'alto, con il ginocchio portante maggiormente flesso. Successivamente, durante il momento di massima elevazione nel salto, le ginocchia si estendono gradualmente per massimizzare l'altezza raggiunta. Infine, durante la fase di atterraggio, le ginocchia tornano a flettersi per assorbire l'energia dell'impatto e stabilizzare la posizione del pattinatore, con una flessione totale maggiore di quella esercitata durante la fase di decollo.

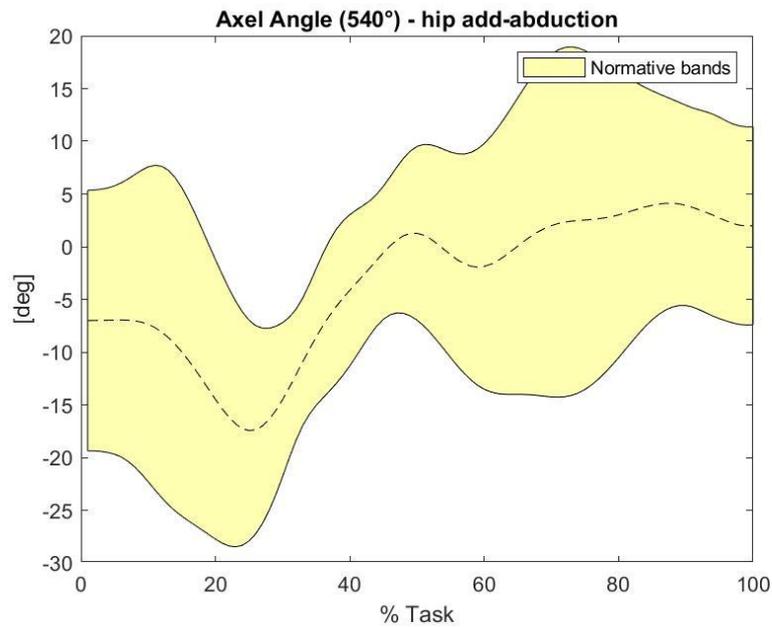


Figura 35: Sviluppo dell'angolo di adduzione e abduzione dell'anca

Nel grafico sopra (figura 35) possiamo infine osservare il movimento di adduzione/abduzione dell'anca. Durante la fase di preparazione e avvicinamento all'Axel, si osserva una leggera adduzione dell'anca, necessaria per preparare il corpo per l'imminente spinta e rotazione. Durante l'effettiva fase di salto, l'anca aumenta rapidamente l'adduzione per stabilizzare il salto durante la rotazione. Una volta che il pattinatore raggiunge l'apice del salto e inizia a discendere, l'anca torna gradualmente verso una posizione di abduzione per prepararsi alla successiva fase di atterraggio e allontanare la gamba elevata.

5. Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era analizzare le variabili biomeccaniche del salto Axel in condizioni di normale allenamento sul ghiaccio e valutarne il rischio di infortuni.

Le strategie e gli strumenti impiegati per generare i rapporti sull'analisi dell'Axel, nonostante le sfide intrinseche nel tracciamento di questo movimento specifico, hanno dimostrato di essere sia efficaci che economici.

Nel corso di questa ricerca, è emerso che l'utilizzo di determinate metodologie potrebbe essere ulteriormente ottimizzato in futuri studi. In particolare, per migliorare la fase di tracciamento, si potrebbe considerare l'uso esclusivo delle telecamere più recenti, poiché queste tendono ad offrire una maggiore precisione nei parametri intrinseci. Questo contribuirebbe a garantire una rilevazione più accurata dei movimenti durante l'esecuzione dell'Axel, facilitandone l'analisi biomeccanica e la successiva triangolazione del movimento.

Nella fase di acquisizione dei dati, potrebbe essere vantaggioso far indossare agli atleti indumenti appositamente progettati per migliorare l'adesione dei marcatori o dei tape utilizzati per il tracciamento. Questi tessuti mirati consentirebbero una migliore aderenza dei marker sulla superficie del corpo, riducendone potenzialmente il distacco dai vestiti e migliorando la precisione complessiva del tracking.

Queste ottimizzazioni proposte potrebbero contribuire a rendere ancora più efficace il processo di analisi del movimento nel pattinaggio artistico, consentendo una comprensione più dettagliata e accurata delle dinamiche coinvolte nell'esecuzione dell'Axel e facilitando ulteriori progressi nell'immediato del processo analitico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Yashynin Ilya, *Uno sguardo al passato: il curioso debutto del pattinaggio di figura ai Giochi Olimpici Estivi*, 10 agosto 2021.
- [2] Pirola Arianna, *Quali sono i rischi fisici del pattinaggio artistico?*, 28 febbraio 2017.
- [3] Dagmara Iwańska, Anna Mazurkiewicz, Czesław Urbanik, *Biomechanics of the Axel Paulsen Figure Skating Jump*, luglio 2018.
- [4] Lunghi Gianfabio, *Biomeccanica applicata allo sport*, 15 giugno 2023.
- [5] Physiopedia, *La biomeccanica clinica nello sport*.
- [6] H. T. E. Hertzberg, C. W. Dupertuis, And I. Emanuel, *Stereophotogrammetry as an Anthropometric Tool*, 1947.
- [7] A. Cappozzo, A. Leardini, U. Della Croce, L. Chiari, *Human movement analysis using stereophotogrammetry*, 2005.
- [8] ATS, *Sistemi stereofotogrammetrici 3D optoelettronici*.
- [9] Logan Wade, Laurie Needham, Polly McGuigan, James Bilzon, *Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics*, 25 febbraio 2022.
- [10] L. Mündermann, S. Corazza, and Thomas P Andriacchi, *The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications*, 2006.
- [11] Robert Kanko, Elise Laende, Gerda Strutzenberger, *Assessment of spatiotemporal gait parameters using a deep learning algorithm-based markerless motion capture system*, 2018.
- [12] Orlin, N., T.G. McPoil, *Plantar Pressure Assessment, Journal of the American Physical Therapy Association*, 2000.
- [13] Claudia Tonelo, *What is the difference between force platforms and pressure platforms?*, 2021.
- [14] Kathleen A. Lamkin-Kennard, Marko B. Popovic, *Sensors: Natural and Synthetic Sensors*, 2019
- [15] Hanatsu Nagano, Rezaul K Begg, *Shoe-Insole Technology for Injury Prevention in Walking*, 2018.
- [16] Downes L., MSPT, *The figure skater's guide to injuries and biomechanics*, Sk8Strong 2015

- [17] Mazurkiewicz A., Iwanska D., Urbanik C., *Biomechanics of the Axel Paulsen figure skating jump*, Polish Journal of Sport Tourism, 2018.
- [18] Julie S. Han, MD, Ellen T. Geminiani, MD, Lyle J. Micheli, MD, *Epidemiology of figure skating injuries: A review of the literature*, November/December 2018.
- [19] Campanelli V., Piscitelli F., Verardi L., Maillard P., Sbarbati A., *Lower extremity overuse conditions affecting figure skaters during daily training*, The Orthopedic Journal of Sports Medicine, 2015.
- [20] Laak Trevor, *Jump Manual, Skating jump secrets*, and the TAL Group, LLC; 2008 29. Aleshinsky S.Y.,
- [21] Deborah King, *Lutz or flutz? The tricky physics of figure skating*, February 18, 2014.
- [22] Leardini, Sawacha, Paolini, Ingrosso, Natio, Benedetti, *A new anatomically based protocol for gait analysis in children*, Gait & Posture. 2007.
- [23] C. Tomasi, T. Kanade, *Detection and Tracking of Point Features. Shape and Motion from Image Streams: a Factorization Method*. Part III, Technical Report, 1991
- [24] Jean-Yves Bouguet, *Camera Calibration Toolbox for Matlab®* 2010