

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA**

“Approccio biomeccanico alla ginnastica artistica”

Relatore: Prof. Piero Pavan

Laureanda: Cristina Impoco

**ANNO ACCADEMICO 2023-2024
Data di laurea 17/07/2024**

Indice

ABSTRACT

- 1 INTRODUZIONE
 - 1.1 La ginnastica artistica
 - 1.1.1 Gli attrezzi
 - 1.1.2 Penalità di esecuzione
 - 1.1.3 Salti acrobatici
 - 1.1.4 Salti artistici
 - 1.2 Evoluzione
 - 1.2.1 Rischi di infortunio
 - 1.2.2 Scopo
 - 1.2.3 Biomeccanica dello sport
 - 1.3 Strumentazione per l'analisi del movimento
 - 1.3.1 Stereofotogrammetria
 - 1.3.2 Modelli di simulazione computerizzata
 - 1.3.3 Pedane di forza
- 2 APPLICAZIONI DELLA BIOMECCANICA NELLA GINNASTICA ARTISTICA
 - 2.1 Cenni alle caratteristiche biomeccaniche
 - 2.1.1 Il salto pennello
 - 2.1.2 La verticale
 - 2.2 Revisione della letteratura
 - 2.2.1 La biomeccanica della ginnastica artistica nella letteratura scientifica
 - 2.2.2 Elementi della ginnastica artistica nella letteratura scientifica
- 3 VOLTEGGIO
 - 3.1 Fasi del volteggio
 - 3.1.1 Rincorsa
 - 3.1.2 Pre-salto e prima fase di volo
 - 3.1.3 Gruppi del volteggio
 - 3.2 Ribaltata
 - 3.2.1 Tenuta del corpo
 - 3.3 Tsukahara
 - 3.3.1 Variabili cinematiche
 - 3.3.2 Seconda fase di volo
 - 3.4 Yurchenko
 - 3.4.1 Caratteristiche biomeccaniche
 - 3.4.2 Analisi del movimento in relazione ai punteggi
 - 3.4.3 Analisi cinematica del centro di massa
 - 3.4.4 Il Biles 2
- 4 CORPO LIBERO
 - 4.1 Composizione dell'esercizio
 - 4.1.1 Artisticità e coreografia
 - 4.2 Salto indietro teso con avvitamento
 - 4.2.1 Assi di rotazione
 - 4.2.2 Momento angolare
 - 4.3 Tecniche di esecuzione

4.3.1 Cat Twist e Hula Hoop Twist

4.3.2 Tilt Twist

4.3.3 Analisi biomeccanica tramite modelli computerizzati

5 CONCLUSIONI

ABSTRACT

La ginnastica artistica è uno sport che include azioni rapide e coordinate, caratterizzate da forza e dinamicità, per questo si presta ad essere valutata tramite un approccio biomeccanico. Spesso non basta osservare ad occhio nudo l'esecuzione di un elemento, ma sono necessari dati oggettivi per comprendere al meglio il movimento e i relativi errori. Questo elaborato vuole mostrare il vantaggio che può apportare l'analisi biomeccanica alle prestazioni di una ginnasta, attraverso evidenze sperimentali sul volteggio e il corpo libero. Tramite una revisione della letteratura scientifica a riguardo, sono state analizzate le variabili biomeccaniche della *ribaltata*, dello *Tsukahara*, dello *Yurchenko* e le tecniche di esecuzione degli avvitamenti, quali *Cat Twist*, *Hula Hoop Twist* e *Tilt Twist*. Sono stati identificati i metodi più efficaci mediante *motion capture* e modelli di simulazione computerizzata. L'allenatore, associando la tecnica ideale alle corrispondenti componenti cinematiche e dinamiche, può sviluppare programmi di allenamento specifici per ogni fase di un elemento, al fine di perfezionare la performance dell'atleta.

Un'approfondita conoscenza delle forze applicate e degli angoli articolari, da parte degli allenatori e degli atleti, comporta inoltre una riduzione dei fattori di rischio di infortunio del sistema muscoloscheletrico.

1 INTRODUZIONE

1.1 La Ginnastica Artistica

La ginnastica artistica è una disciplina olimpica che si differenzia dagli altri sport poiché prevede l'esecuzione di esercizi su diversi attrezzi nella stessa competizione, unisce la forza necessaria per eseguire gli elementi acrobatici all'eleganza e alla precisione della parte artistica e coreografica [1]. Ogni esercizio viene giudicato infatti sommando il punteggio delle difficoltà, detto nota D, a quello dell'esecuzione, detto nota E, ottenendo così il punteggio finale.

Nel corso degli anni i criteri di valutazione si sono evoluti: prima del 2006 [2] era possibile raggiungere un punteggio massimo di 10,00 per ogni esercizio eseguito, il quale fu ottenuto per la prima volta ai Giochi Olimpici di Montreal da Nadia Comaneci nel 1976 [3].



Figura 1.1: Nadia Comaneci, Olimpiadi di Montreal 1976

1.1.1 Gli attrezzi

Nella ginnastica artistica femminile vengono eseguiti il volteggio, il corpo libero, la trave e le parallele asimmetriche.

Per quanto riguarda la ginnastica artistica maschile gli attrezzi sono: il volteggio e il corpo libero (analoghi a quelli della femminile), cavallo con maniglie, sbarra, parallele simmetriche, anelli. Nel seguito di forniscono alcuni elementi per la ginnastica artistica femminile.

Il volteggio consiste in una rincorsa lunga al massimo 25 m con successiva battuta a piedi pari sulla pedana elastica ed esecuzione del salto con appoggio delle mani sulla tavola alta 125 cm, che esordì ai mondiali del 2001 sostituendo il cavallo, a seguito di numerosi infortuni [4].

Il corpo libero è l'unico attrezzo che si esegue con la musica, che risalta gli aspetti artistici e coreografici. L'esercizio viene eseguito su un "quadrato" di area 12m x 12m che facilita le spinte e attutisce gli arrivi.



Figura 1.2: Volteggio



Figura 1.3: Corpo libero

Per eseguire gli elementi sulla trave, la ginnasta necessita di un eccellente equilibrio per portare a termine l'esercizio su un'asse di legno, appositamente rivestita, larga 10 cm, lunga 5 m e alta 120 cm. Infine, le parallele asimmetriche sono composte da due staggi con altezze diverse, mentre la distanza tra essi con gli anni è cambiata. Nel periodo di attività di Nadia Comaneci, la quale ottenne il massimo punteggio previsto (10) proprio in questo attrezzo, gli staggi erano molto più vicini.

Oggi, con l'aumentare delle difficoltà degli elementi, la distanza è stata aumentata per favorire l'esecuzione di nuove evoluzioni e passaggi da uno staggio all'altro [1].



Figura 1.4: Trave



Figura 1.5: Parallele

Ogni attrezzo esalta particolari caratteristiche dell'atleta. Infatti, nelle competizioni è solitamente prevista una classifica "per attrezzo" e una "generale" dove vengono sommati i punteggi dei quattro esercizi eseguiti; il volteggio richiede forza e reattività, il corpo libero musicalità e resistenza, per la trave equilibrio e precisione, infine, dinamismo e velocità alle parallele.

Rispetto al suo livello tecnico, ogni ginnasta sosterrà allenamenti più o meno intensi per sviluppare diversi requisiti necessari per tutti gli attrezzi: coordinazione, mobilità articolare, forza, velocità, ritmo, agilità e dinamismo [2].

1.1.2 Penalità di esecuzione

Il Codice dei Punteggi impone delle penalità, applicate dai giudici durante le competizioni, per ogni elemento eseguito dalla ginnasta. In particolare, i falli di esecuzione sono legati al punteggio “*nota E*”, sono riportati nell’apposita sezione del Codice dei Punteggi, dove ad ognuno è assegnato un valore in base alla gravità dell’errore.

Ad esempio braccia o gambe flesse o aperte, insufficiente elevazione, non allineare gambe busto e braccia, sono considerati “falli piccoli e medi” con valori da -0.1 a -0.3; oscillazioni, passi all’arrivo, perdita di equilibrio e cadute sono “falli grandi” da -0.5 a -1.0 detratti dal punteggio. Nella sezione “Direttive Tecniche” vengono descritte le tecniche di esecuzione specifiche affinché l’elemento venga riconosciuto dai giudici.

1.1.3 Salti acrobatici

Nei salti indietro raccolti, carpiati o tesi vengono specificati gli angoli delle anche e delle ginocchia. Nello specifico nel salto raccolto l’angolo tra anche e ginocchia deve essere minore di 90°, nel carpiato tra anche e busto, deve anch’esso essere minore di 90°, mentre nel salto indietro teso tutte le parti del corpo devono essere allineate.



Figura 1.6: Posizioni del corpo nei salti indietro raccolto, carpiato e teso

Se queste caratteristiche non vengono rispettate, si applicano delle penalità oppure viene assegnato un altro elemento, per esempio se nel salto carpiato l’angolo delle ginocchia è inferiore a 135° viene assegnato il salto raccolto.

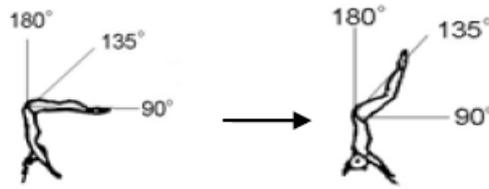


Figura 1.7: Angolo corretto e angolo insufficiente per il salto carpiato

1.1.4 Salti artistici

Anche nei salti artistici sono richiesti precisi angoli di apertura degli arti inferiori, ne è un esempio l'*enjambè*, dove è richiesta una divaricata sagittale di 180°. Un'ampiezza insufficiente porterà ad una penalità di fallo piccolo se l'apertura è inferiore di 0°-20°, fallo medio tra 20° e 45° mentre se maggiore di 45° non verrà riconosciuto l'elemento [5].

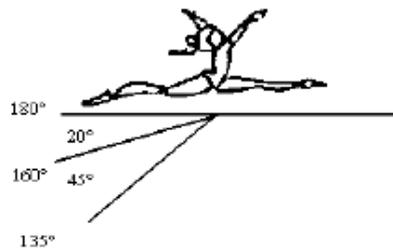


Figura 1.8: Gradi di apertura degli arti inferiori durante l'esecuzione di un *enjambè*

1.2 Evoluzione

Nei decenni, gli elementi della ginnastica artistica sono diventati sempre più complessi, sia da imparare che da insegnare. Ogni 4 anni il *Codice dei Punteggi* viene aggiornato: è un manuale internazionale che contiene tutti gli elementi esistenti nella ginnastica femminile (ne esiste uno analogo per la ginnastica maschile) riconosciuti dalla FIG, *Federazione Internazionale di Ginnastica*. Viene utilizzato dai giudici per giudicare gli esercizi in gara, assegnando ad ogni elemento il valore ivi riportato e dagli allenatori per comporre correttamente gli esercizi delle ginnaste seguendone le esigenze.

1.2.1 Rischi di infortunio

A causa della difficoltà richiesta da questo sport, gli atleti sono sottoposti ad un elevato stress fisico che spesso causa infortuni sin da bambini, infatti solitamente la carriera di un ginnasta termina intorno ai 25 anni per le donne e ai 30 per gli uomini.

La fase più rischiosa degli esercizi è l'atterraggio poiché spesso, eseguendo evoluzioni in aria, non si riesce a vedere dov'è il suolo prima dell'atterraggio. L'atleta, conoscendo le tempistiche del movimento, deve capire il momento giusto per "stoppare" il salto. Ad esempio nel caso dell'esecuzione di un avvitamento e mezzo al volteggio, ossia una rotazione sull'asse trasversale e una e mezza su quello longitudinale, la partenza avviene di spalle dal primo salto chiamato *rondata* mentre l'arrivo è nel verso opposto.

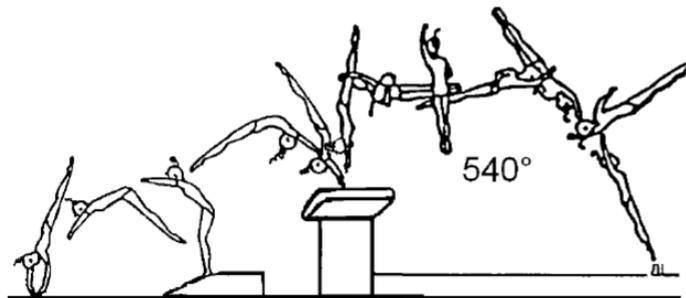


Figura 1.9: Esecuzione al volteggio dell'elemento *rondata-flic-salto teso con 1 avvitamento e 1/2*

I salti con avvitamenti sono gli elementi più rischiosi sia per le caviglie che per le ginocchia, essendo comune la rottura dei legamenti crociati durante l'esecuzione al volteggio e al corpo libero.

I distretti articolari più soggetti ad infortuni, oltre i precedentemente citati, sono:

schiena, gomito, polso e spalla. È solito assistere a fratture, lussazioni e distorsioni [6].

1.2.2 Scopo

Essendo la ginnastica artistica in continua evoluzione, questa tesi vuole mostrare come, applicando i principi della biomeccanica, si può giungere ad una migliore conoscenza dei gesti tecnici al fine di facilitarne la comprensione per le ginnaste e l'insegnamento da parte degli allenatori, avendo come scopo il miglioramento delle prestazioni.

Attraverso la specifica branca della biomeccanica chiamata *biomeccanica dello sport* si mostrerà come quest'ultima può essere utile nella prevenzione dagli infortuni tramite l'identificazione dei fattori di rischio e l'analisi del movimento.

1.2.3 Biomeccanica dello sport

La biomeccanica dello sport e dell'esercizio comprende l'area della scienza che si occupa dell'analisi della meccanica del movimento umano. Si riferisce alla descrizione, all'analisi dettagliata e alla valutazione del movimento umano durante le attività sportive [7].

Lo studio e l'analisi dell'attività sportiva hanno come obiettivo quello di individuare movimenti scorretti per prevenire lesioni, al contempo correggere gli esercizi e studiare la tecnica ottimale per massimizzare le prestazioni. Ogni atleta ha le proprie caratteristiche e condizioni fisiche perciò le valutazioni sportive saranno specifiche ed individuali per assicurarne il benessere.

Gli ingegneri biomeccanici, tramite l'analisi del movimento, valutano eventuali insufficienze motorie che potrebbero predisporre gli atleti ad infortuni, in seguito ai dati ottenuti poi comunicati agli allenatori, si può migliorare la tecnica di esecuzione apportando le giuste correzioni ed è possibile preparare programmi di allenamento specifici per rafforzare i distretti interessati. Infatti con l'aiuto della biomeccanica è possibile perfezionare le strategie di allenamento attraverso il monitoraggio dei progressi in un periodo di tempo [8].

Gli allenatori stessi possono migliorare le loro competenze, comprendendo a fondo gli esercizi che l'atleta dovrà eseguire, l'assistenza sarà più facile e gli garantirà condizioni di sicurezza.

1.3 Strumentazione per l'analisi del movimento

Nella pratica, gli ingegneri biomeccanici effettuano l'analisi del movimento tramite specifiche strumentazioni, sistemi di simulazione, sistemi cosiddetti di *motion capture*, pedane di forza e sensori inerziali [9].

1.3.1 Stereofotogrammetria

I sistemi di *motion capture* sono una tecnologia avanzata che utilizza sistemi optoelettronici come telecamere ad infrarossi, telecamere in chiaro e *marker* passivi (catarifrangenti) per catturare i movimenti del corpo in 3D per poi valutare numericamente il movimento di un'azione specifica [10]. Uno di questi sistemi è la stereofotogrammetria 3D optoelettronica, un sistema dotato di telecamere che proiettano un fascio di infrarossi nel loro campo visivo per acquisire dati dai *marker* passivi, applicati sul soggetto, che rifrangono gli infrarossi; in questo modo le telecamere ne seguono il movimento, che verrà descritto attraverso specifici *software* di analisi, ottenendo così le caratteristiche cinematiche del moto [11].

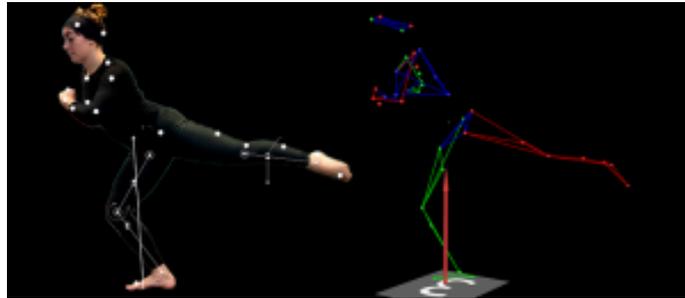


Figura 1.10: a sinistra: posizione dei *marker* su una ginnasta.
A destra, sistema stereofotogrammetrico 3D optoelettronico.

1.3.2 Modelli di simulazione computerizzata

Tra le nuove tecnologie nell'ambito dell'analisi del movimento, sono stati sviluppati diversi software per modellizzare il corpo umano e semplificarne i movimenti. I segmenti corporei vengono assunti come corpi rigidi collegati tra loro tramite articolazioni; vengono integrate la meccanica, la cinematica e la dinamica. Si possono simulare movimenti semplici, come il cammino, o più complessi, come le evoluzioni aeree.

1.3.3 Pedane di forza

Le pedane di forza forniscono una visione completa sulla distribuzione del carico su ciascun piede e sulla simmetria del corpo durante la camminata o l'esecuzione di salti [12]. I sensori inerziali sono per esempio accelerometri e giroscopi, che vengono utilizzati per registrare i cambiamenti della velocità e dell'orientamento nello spazio del corpo in movimento.

2 APPLICAZIONI DELLA BIOMECCANICA NELLA GINNASTICA ARTISTICA

2.1 Cenni alle caratteristiche biomeccaniche

L'analisi biomeccanica può essere applicata a qualunque tipo di movimento, a partire da quelli base fino ad arrivare ad elementi più complessi, ed ognuno di essi può essere scomposto in diverse fasi. La ginnastica artistica è uno sport che richiede elevata precisione nell'applicazione delle tecniche di esecuzione, essendo una disciplina individuale dove viene valutato l'esercizio del singolo e non la tecnica di squadra. Ogni elemento della ginnastica artistica è descritto da particolari parametri, alcune dei quali sono comuni a più attrezzi, come ad esempio le ampiezze dei salti, le rotazioni in attitudine di volo o attorno ad un punto fisso, l'elevazione, l'equilibrio per il mantenimento di posizioni statiche, le azioni propulsive, tenuta del corpo e gli arrivi [13].

2.1.1 Il salto pennello

Un salto "pennello" con rincorsa può essere diviso in:

1. Corsa
2. Pre-salto: unione dei piedi in volo per prepararsi alla battuta
3. Battuta a piedi uniti
4. Fase aerea: si divide in fase ascendente decelerante e fase discendente accelerante
5. Arrivo del salto

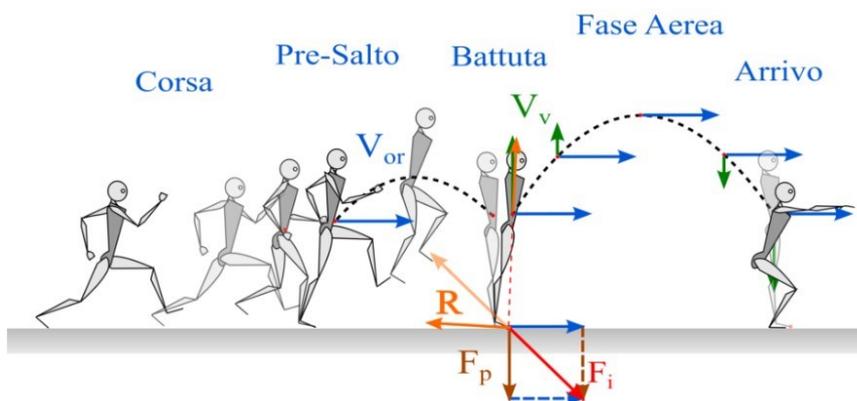


Figura 2.1: Schematizzazione di un salto "pennello" con rincorsa:

V componenti orizzontale e verticale della velocità, R reazione vincolare, F_p forza peso, F_i forza di inerzia.

Questo è uno degli elementi propedeutici allo studio dei salti al volteggio, dove la battuta verrà effettuata sulla pedana e l'arrivo su opportuni tappeti.

I parametri biomeccanici individuabili in questo semplice esercizio sono numerosi:

la velocità della corsa influenza direttamente l'esecuzione del salto in termini di altezza e di atterraggio, quest'ultimo infatti, richiede particolare attenzione poiché, se gli angoli del ginocchio o della caviglia non sono sufficientemente ampi, possono essere causa di infortunio.

La lunghezza dei passi durante la fase di rincorsa influisce sulla potenza con cui verrà effettuata la battuta; si parte con passi più lunghi per poi accorciarli e velocizzarli in prossimità del punto di stacco del pre-salto. Dopo la battuta, l'atleta deve ricercare l'elevazione del salto sfruttando la reazione vincolare del suolo (o della pedana). L'angolo di inclinazione del tronco è un altro parametro fondamentale perché determina la lunghezza del salto: se si vuole ottenere un salto in altezza, al momento della battuta, bisognerà che l'atleta si allunghi verso l'alto, allineando il più possibile tutti i segmenti corporei.

2.1.2 La verticale

La verticale è un elemento fondamentale per tutti gli attrezzi della ginnastica artistica.

È una posizione che viene eseguita sia in statica che in dinamica, alle parallele e al volteggio viene eseguita come posizione di passaggio, mentre alla trave e al corpo libero come posizione di equilibrio.



Figura 2.2: Slancio in verticale a gambe divaricate alle parallele

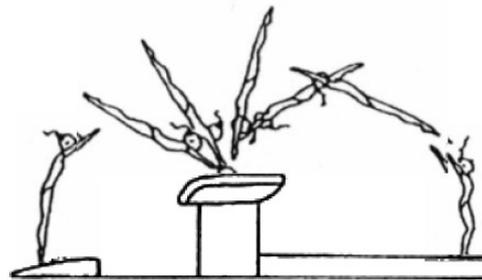


Figura 2.3: Esecuzione della ribaltata al volteggio con passaggio in verticale

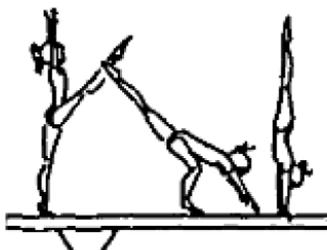


Figura 2.4: Verticale eseguita sulla trave



Figura 2.5: Verticale eseguita al corpo libero

Moltissimi elementi più complessi ne richiedono il passaggio, infatti è uno dei movimenti base che viene insegnato sin da bambini, premesso un intenso lavoro di potenziamento muscolare, essendo necessaria un'ottima tenuta del corpo da parte dell'atleta.

La tecnica corretta di esecuzione prevede che dalla posizione eretta con braccia tese in alto, si esegua un affondo in avanti per posizionare le mani lontane dal piede in appoggio, mantenendo allineati braccia, busto e gamba libera.

Effettuata la posa delle mani, si slancia la seconda gamba libera verso l'alto con contemporanea spinta del piede di appoggio fino a raggiungere la posizione di verticale, tecnicamente chiamata posizione di *appoggio ritto rovesciato*.



Figura 2.6: Esecuzione della verticale al corpo libero

La fase più importante è riuscire a mantenere il corpo proteso verso l'alto, grazie alla costante spinta delle spalle. Caviglie, ginocchia, anche, spalle e polsi devono essere allineati, altrimenti la chiusura dell'angolo tra arti superiori e busto causerà uno sbilanciamento in avanti delle spalle che porterà la ginnasta ad inarcare la schiena [14].

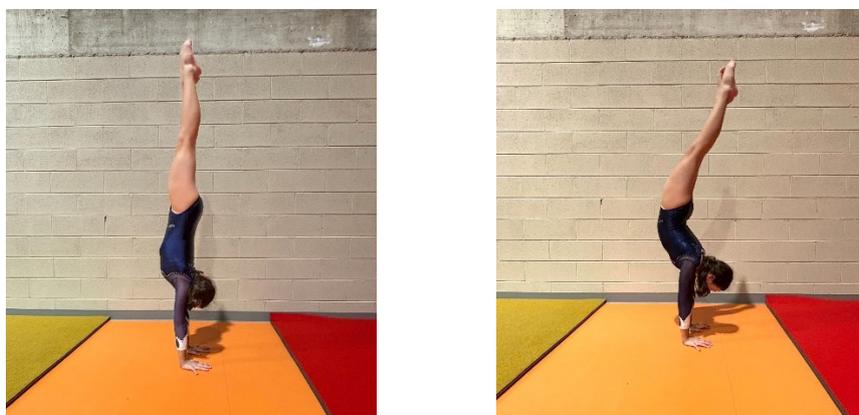


Figura 2.7: Esecuzione corretta ed esecuzione sbagliata.

2.2 Revisione della letteratura

La letteratura scientifica riguardante la biomeccanica applicata alla ginnastica artistica è abbastanza ampia, nello specifico sono presenti articoli che trattano l'importanza di quest'ultima al fine di sviluppare nuove strategie di allenamento per migliorare le performance.

2.2.1 La biomeccanica della ginnastica artistica nella letteratura scientifica

Già intorno agli anni 70, iniziano i primi studi sull'utilizzo della biomeccanica nello studio della ginnastica con alcuni articoli sulle riviste americane *Modern Gymnast Magazine* e *Technique Magazine*. Successivamente negli anni 90, anche in Italia viene pubblicato mensilmente "Il Ginnasta", ancora oggi redatto dalla Federazione Ginnastica d'Italia.

Kinematics of Roundoff Entry Vaults By Female Olympic Gymnasts

Mohamed A. Ragheb and Virginia L. Fortney

Kinematics of Roundoff Entry Vaults

Of the last few years, side horse vaulting in women's gymnastics has improved tremendously. A recent modification in vaulting technique is the change of the final part of the approach phase from a hurdle step to a roundoff entry onto the board. The advantages of this entry are: 1) it enables the gymnast to face the side horse with her back from which she can easily initiate a backward salto, 2) it provides the gymnast an opportunity to perform a twist during the preflight onto the side horse, and 3) it may contribute to raising the degree of difficulty in terms of the judging code. A review of available gymnastic literature revealed a lack of biomechanical analysis of vaults with the roundoff entry. The aim of the present study was to investigate the kinematics of vaults with the roundoff entry performed by international gymnasts during the 1984 Olympic Games in Los Angeles. It was also a point of interest to examine the intra- and inter-individual differences among and between these elite gymnasts in performing this movement on the vault.

METHODS

Twelve (12) roundoff entry vaults performed during the 1984 Olympic Games in the women's optional vaults and the individual finals competition, included in the original 16 mm scientific films, were analyzed. The gymnastic vault competitions were filmed under the authorization of the Medical Commission of the International Olympic Committee. Descriptive data

Table 1 Descriptive Data of Gymnasts

| Gymnast | Age (yr) | Height (m) | Mass (kg) |
|----------|----------|------------|-----------|
| Talavera | 17 | 1.62 | 51.8 |
| Zhou, P. | 15 | 1.55 | 41.4 |
| Munoz | 14 | 1.40 | 29.1 |
| Tudos | 15 | 1.47 | 35.5 |
| Mean | 15.3 | 1.51 | 39.5 |

Table 2 Roundoff Entry Vault Scores and Descriptions

| Gymnast | Country | Score (pts) | Description |
|----------|---------|-------------|---|
| Talavera | USA | 9.80 | ROE, 1½ back Salto in layout |
| | | 9.90 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |
| | | 9.90 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |
| | | 9.80 | ROE, 1½ back Salto in layout |
| Zhou, P. | CHN | 9.65 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |
| | | 9.70 | ROE, 1½ back Salto in layout |
| | | 9.70 | ROE, 1½ back Salto in layout with 1 twist |
| | | 9.70 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |
| Tudos | CAN | 9.45 | ROE, with 1 twist on, 1 twist off |
| | | 9.50 | ROE, with 1 twist on, 1 twist off |
| Munoz | ESP | 9.35 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |
| | | 9.65 | ROE, 1½ back Salto with 1 twist |

of the gymnasts included in this research and their vault performances are shown in Tables 1 and 2. The cameras were operated at speeds of 100 frames per second for the purpose of biomechanical analysis (Nelson, Cross, and Street 1985). Alternate frames were digitized for the 12 vaults. The center of mass (CM) for the total body was calculated from the digitized data using the predictive regression equations of segmental mass proportions and segmental center of mass locations from Clauser, McConville, and Young's study (1969).

RESULTS and DISCUSSION

Temporal Measurements

The data showing the temporal structure of the roundoff entry are presented in Table 3 while a stick figure sequence of an exemplar roundoff entry, based on the mean values of the phases of the roundoff entry, is shown in Figure 1. The five sequential phases include the following: the turn off the run to a handstand at the beginning of the roundoff, the handstand, the preflight onto the board, the support on the board, and preflight onto the side horse. The time consumed in assuming the handstand reflects the effect of moment of inertia in slowing down the movement. We compared Talavera with the other gymnasts since she was the tallest and heaviest gymnast to perform a round-

off entry vault. She required the longest amount of time to assume the handstand and the reverse was the case for Munoz, the shortest and fastest in this phase of the vault. Inter- and intra-individual differences were too small to be considered in the second phase of the vault which ended when the gymnast was free of the floor. The thrust of that takeoff was developed by the upper extremities. Bearing in mind the differences in the body mass, it was expected that differences would be found in the flight time onto the board. Although differences existed in flight times there were no discernable relationships to the differences and the body mass measures. Time on the board was a considerable percentage (23%) of the duration of the total time in the five phases included in this research. All of the gymnasts had longer times in the flight phase onto the side horse (26%) than onto the board (17%). Tudos apparently spent a longer time in that second flight phase because of the task demand of a twist onto the side horse which she included.

Spatial Measurements

The location of the CM of the gymnasts throughout the roundoff entry vaults was of interest to the investigators. The path of the center of mass for each trial was plotted in order to study the geometrical aspects of the path during the approach phase of the

vault. A representative plot is shown in Figure 2.

The 12 vaults analyzed have similar patterns which were characterized by an inconsistent increase in the vertical displacement with respect to the horizontal displacement of the CM throughout the five phases. The vertical displacement increased while the gymnast was in contact with the board as the gymnast initiated an extension of the joints of the lower extremities, spinal column, and shoulders in order to generate the required impulse to raise the center of mass for the proper height at takeoff.

The geometric parameters derived from the path of the center of mass were: the height (h) of the CM at the moment of takeoff from the board, the moment arm (m) at the same instant.

The following instantaneous positions of the CM of the gymnasts were of particular interest: the contact angle and takeoff angles with respect to the board, and the projection angle tangent to the path of the CM at the instant of takeoff. These three angles are graphically displayed in Figure 2. For practical purposes, the horizontal distance from the toes of the thrusting leg to the landing point on the board was also measured. The measurements of spatial parameters (distances and angles) are summarized in Tables 4 and 5 (see page 13) in terms of means and standard deviations of the whole sample and for each gymnast in her analyzed number of trials which reflect some inter-individual differences between the gymnasts. The differences in the height of the CM at takeoff can be attributed to individual anthropom-

etry. The anthropometric differences have a direct effect on the path of the CM since many parts of this event are executed with contact to supporting surfaces.

This research was also concerned with the velocity of the gymnast's CM during the duration of the board contact. The two components of the average velocity: horizontal (V_x) and vertical (V_y) were calculated. The average horizontal velocity was considerably higher than the average vertical velocity as shown in Table 6.

The average horizontal velocity appears to be the highest predictor from all of the measurements for the quality of performance in terms of the judges' mean scores. It was easy to notice the increase in score accompanying the increase in horizontal velocity. A correlation coefficient of 0.96 was found between the two variables. Tudos demonstrated the lowest horizontal and vertical velocities, but as previously mentioned, she was preparing for a different task during the flight onto the side horse.

It was a point of interest to compare the parameters of the roundoff entry with the hurdle entry. Nelson et al (1985) analyzed the performance of the eight individual finalists, including data on the hurdle entry. It can be seen that the time spent on the board was longer in the roundoff entry (0.16 s)

Table 3 Means and Standard Deviations of the Temporal Parameters for the Phases of Roundoff Entry Vaults

| Gymnast | T1 ^{a,b} | T2 | T3 | T4 | T5 | T |
|----------|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Talavera | .15 ± .001 | .11 ± .000 | .12 ± .000 | .17 ± .040 | .13 ± .010 | .68 ± .020 |
| Zhou, P. | .14 ± .001 | .11 ± .004 | .13 ± .001 | .16 ± .090 | .14 ± .010 | .66 ± .030 |
| Munoz | .12 ± .000 | .11 ± .001 | .10 ± .001 | .15 ± .000 | .18 ± .030 | .66 ± .030 |
| Tudos | .13 ± .000 | .11 ± .001 | .13 ± .020 | .15 ± .001 | .25 ± .040 | .77 ± .040 |
| Mean | .14 ± .040 | .11 ± .020 | .12 ± .020 | .16 ± .040 | .18 ± .050 | .70 ± .080 |

^aMean units for the phases and total time are in seconds(s).

^bThe temporal phases of the roundoff entry vault were defined as time consumed in:

T1: assuming handstand position; T2: handstand; T3: preflight on Reuther board; T4: support on board; T5: preflight onto side horse; T: total time phases T1-5.

Kinematics of Roundoff Entry Vaults

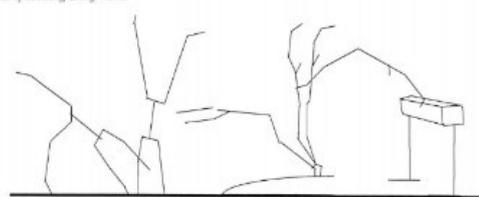


Figure 1 Stick figure sequence of an exemplar roundoff entry vault

Figura 2.8: Articolo che tratta la cinematica della rondana al volteggio, *Technique Magazine* – Dicembre 1988

Con l'evoluzione delle tecniche di analisi, gli studi procedono già con uno sguardo al futuro. Ad esempio:

Yeadon e Challis [15] presentano una panoramica sulla ricerca biomeccanica correlata alle prestazioni, descrivendo le tecniche di analisi ed elaborazione dei dati affiancate alla teoria della biomeccanica sportiva, con esempi tratti da diversi sport. Si conclude che i progressi, negli sport in

cui la tecnica è un requisito primario, derivano dall'applicazione di un'adeguata combinazione di approcci teorici e sperimentali.

Negli ultimi decenni, diverse pubblicazioni passano in rassegna le variabili per una performance di successo rimarcando l'utilità della biomeccanica sportiva:

Prassas et al. [16] identificano come abilità necessarie la capacità di guadagnare elevazione, di ruotare su diversi assi modificando la posizione dei segmenti corporei, di mantenere posizioni di equilibrio statiche e dinamiche, e infine, la capacità di atterrare correttamente. Concludono asserendo che, l'analisi del movimento, condotta tramite modelli computerizzati e analisi video 2D/3D, può essere uno strumento utile ad allenatori e atleti per comprendere i movimenti da insegnare e da eseguire.

In base ad un'analisi quantitativa, Tanasă e Moraru [17] riportano che l'allenamento può basarsi su dati oggettivi e scientifici, in modo da permettere agli allenatori di convertire i parametri biomeccanici in esercizi pratici per attenersi alle tecniche di esecuzione richieste.

Bruggemann [18] analizza il potenziale sovraccarico legato alla costante evoluzione della ginnastica, che può portare alla lesione di diversi tessuti, dal momento che vengono ideati elementi sempre più difficili e di conseguenza, più rischiosi.

Grazie alle recenti tecniche di analisi del movimento, sono stati condotti studi sperimentali che dimostrano come le azioni specifiche di alcuni sport possano essere studiate tramite modelli di simulazione computerizzata: Yeadon e Pain [19] prevedono che in futuro ci saranno, probabilmente, un maggiore sviluppo e utilizzo di metodi *motion capture markerless*, parametri di modello specifici per individuo e una maggiore considerazione degli aspetti di controllo motorio nell'analisi della tecnica sportiva.

Altre due evidenze sperimentali sono state trattate da Semenov et al. [20] e da Potop e Manolachi [21]. I primi hanno utilizzato l'analisi cinematica per osservare gli angoli articolari, la velocità e l'accelerazione angolare durante l'esecuzione di alcuni elementi di base da parte di 10 ginnasti tra i 9 e i 12 anni. Durante i 9 mesi in cui si è svolto l'esperimento si è visto come i parametri dei ginnasti si siano avvicinati all'esecuzione ideale, a seguito di opportune correzioni da parte degli allenatori. Poptop e Manolachi [21] hanno invece approfondito l'impatto della ricerca biomeccanica applicata ginnastica artistica, mostrando come siano stati applicati metodi di *motion capture* per analizzare diversi elementi eseguiti ai 4 attrezzi da ginnaste dai 12 ai 17 anni, componenti della squadra nazionale rumena tra il 2012 e il 2014. I risultati dello studio hanno evidenziato un miglioramento dei parametri cinematici e dinamici, perfezionando la tecnica grazie all'analisi del movimento mediante metodi video-computerizzati e metodi di orientazione della postura.

2.2.2 Elementi della ginnastica artistica nella letteratura scientifica

Più lavori in letteratura esaminano particolari elementi della ginnastica come, i salti Tsukahara e Yurchenko per il volteggio. Crețu et al. [22] definiscono una metodologia per ottimizzare il salto Tsukahara. Secondo gli autori, per ambire ad un'esecuzione ideale, bisogna ottenere una traiettoria di volo parabolica, aumentare l'altezza e la lunghezza della seconda fase di volo ed estenderne la durata, che permetterà di aumentare la difficoltà del salto aggiungendo rotazioni sull'asse longitudinale. Inoltre, gli autori affermano che l'analisi video è un importante metodo per l'osservazione diretta, consente il miglioramento tecnico e la conoscenza delle caratteristiche cinematiche e dinamiche dei parametri di movimento con la possibilità di confrontare e valutare le differenze tra atleti o le prestazioni dello stesso atleta a distanza di tempo. Koh e Jennings [23] hanno condotto uno studio per determinare una strategia efficace per insegnare il salto Yurchenko;. Analizzando separatamente il momento angolare, l'angolo del corpo all'impatto con la tavola e le componenti della velocità, stabiliscono che la velocità del centro di massa è essenziale per guadagnare altezza nella seconda fase di volo e che è conveniente mantenere ampio l'angolo del corpo al momento della posa delle mani sulla tavola.

Per il corpo libero, gli studi iniziano già alla fine degli anni '70 riguardo la disciplina dei tuffi [24]; oggi nella letteratura sono presenti numerose ricerche riguardo le varie tecniche per eseguire i salti con avvitamento sull'asse longitudinale. Un'analisi approfondita è stata svolta da Yeadon [25], il quale ha effettuato un'indagine teorica sull'esecuzione dei salti con avvitamento tramite modelli matematici, vengono poi valutate le tecniche e i contributi che esse apportano alla rotazione, mentre Fink [26] esamina le diverse tecniche per eseguire gli avvitementi, come il Cat Twist, Hula Hoop Twist e Tilt Twist.

Riguardo le parallele, sono state trattate maggiormente le *granvolte* e le uscite. Il movimento di *granvolta* si esegue sullo staggio superiore delle parallele e consiste in una rotazione di 360° intorno ad esso con il corpo in posizione verticale e i segmenti corporei perfettamente allineati; Witten et al. [27] hanno identificato gli elementi biomeccanici critici per aiutare gli allenatori a comprendere e spiegare le *granvolte*, mentre Arampatzis e Brüggemann [28] ne hanno analizzato gli aspetti energetici, in particolare lo scambio di energia tra il corpo e lo staggio e l'energia meccanica assorbita dai muscoli. Tra le uscite, è stato esaminato il doppio salto indietro che prevede lo stacco delle mani dallo staggio con una successiva doppia rotazione del corpo lungo l'asse trasversale e infine l'atterraggio. Potop et al. [29], tramite uno studio sperimentale che ha evidenziato gli elementi chiave della tecnica, hanno mostrato i fattori antropometrici necessari per l'analisi biomeccanica e hanno evidenziato l'influenza delle caratteristiche cinematiche e dinamiche sull'esecuzione, in accordo con le prestazioni di gara.

Anche per la trave, sono state analizzate le uscite e alcuni elementi acrobatici, entrambi trattati da Potop [30] [31]. È stato condotto un esperimento su atlete di 12-14 anni tramite stereofotogrammetria e metodi di video analisi computerizzata per definire le componenti biomeccaniche delle uscite in rondata, con il fine di comprendere la tecnica e sviluppare esercizi per migliorare le posizioni in ogni fase del movimento. Con gli stessi metodi sono stati analizzati il *flic flac* indietro e la *rovesciata avanti senza mani* per dimostrare che l'analisi biomeccanica computerizzata può contribuire alla valutazione della tecnica e prevedere le penalità che potrebbero essere assegnate durante le competizioni.

In questo elaborato, si vogliono presentare esempi su particolari elementi della ginnastica artistica, per mostrare l'efficienza della biomeccanica nel comprendere i gesti tecnici e avere dati oggettivi su cui basarsi per correggere gli errori e perfezionare l'esecuzione.

3 VOLTEGGIO

3.1 Fasi del volteggio

Il volteggio è una successione di azioni sequenziali e coordinate tra loro in un breve periodo di tempo. Per tale ragione richiede grande dinamismo e velocità di reazione. Effettuata la rincorsa di 25 m, il salto inizia con la battuta a piedi pari sulla pedana elastica; queste due azioni sono comuni a tutti i tipi di salti.

A seguire, vengono valutate le “fasi del volteggio”:

- 1) Prima fase di volo
- 2) Repulsione
- 3) Seconda fase di volo
- 4) Arrivo

3.1.1 La rincorsa

Dalla rincorsa dipende in gran misura la riuscita del salto: il ritmo e la velocità degli appoggi aumenta gradualmente, il busto è inclinato in avanti fino al raggiungimento di un'adeguata velocità, poi torna gradatamente in posizione retta. Gli arti inferiori sono flessi all'anca e al ginocchio a 90°, come anche il gomito. Arti inferiori e superiori devono essere coordinati per ottenere una rincorsa efficace.

In questa fase la ginnasta accumula energia cinetica che, dopo la battuta, avrà una componente lineare per continuare a procedere nella direzione della corsa e una angolare per eseguire la rotazione durante il salto. Le fasi principali della corsa sono la fase di appoggio e la fase di volo.

La spinta al suolo viene realizzata dall'avampiede, la fase di appoggio è a sua volta divisa in 3 momenti: ammortizzamento (a), caricamento (b) e propulsione (c).

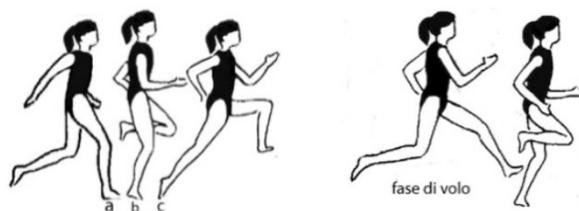


Figura 3.1: Tecnica di esecuzione della rincorsa

Il contatto con il suolo inizia con il tallone. Nel momento in cui avviene l'ammortizzamento, il piede sostiene un carico pari a circa tre volte il peso corporeo dell'atleta, il quale viene ammortizzato dal tricipite surale, dal quadricipite femorale e dalla colonna vertebrale. Durante le fasi di caricamento e

propulsione, il piede effettua un'estensione per produrre l'energia necessaria per lo stacco da terra. L'arto inferiore si distende per favorire l'avanzamento. Nella fase di volo il baricentro segue una traiettoria parabolica. Si distingue un primo momento in cui l'articolazione coxo-femorale è estesa, il ginocchio è flesso e il tallone si trova in prossimità del gluteo, successivamente l'articolazione coxo-femorale si flette ed il ginocchio effettua un'estensione per giungere in fase di appoggio.

3.1.2 Pre-salto e prima fase di volo

L'entrata in pedana o pre-salto, è l'ultimo passo che porta all'appoggio a piedi uniti e determina l'angolo tra busto e arti inferiori con cui la ginnasta lascerà la pedana. Condiziona l'esecuzione del salto poiché in questo istante è essenziale assumere la corretta posizione del corpo da mantenere durante tutto il salto. Bisogna allineare braccia, gambe e busto, con il dorso in atteggiamento di chiusura, in modo che, grazie alla spinta della pedana, la ginnasta riesca ad appoggiare le mani sulla parte centrale della tavola. In mancanza di questi accorgimenti tecnici l'angolo tra spalle e busto sarà insufficiente e il corpo non risulterà allineato. Il centro di massa dell'atleta seguirà una traiettoria parabolica dipendente dalla tenuta del corpo e dalla velocità di rotazione. Infine, la fase di arrivo avverrà inizialmente sul metatarso e successivamente sul tallone, gli arti inferiori dovranno piegarsi per ammortizzare l'impatto e le braccia verranno aperte per distribuire meglio il peso del corpo sulla base d'appoggio [32].

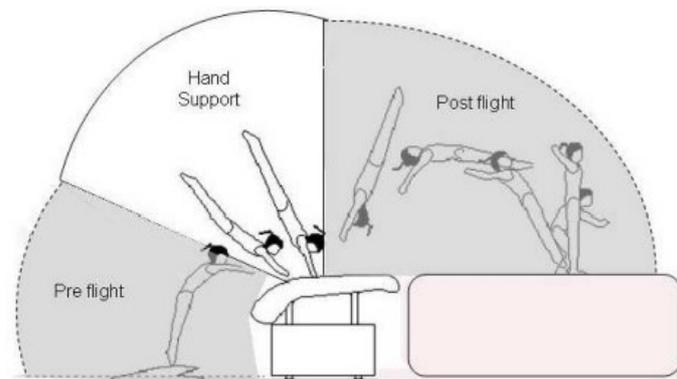


Figura 3.2: Schematizzazioni fasi del volteggio nell'esecuzione della ribaltata

3.1.3 Gruppi del volteggio

Nel Codice dei Punteggi, i salti al volteggio sono classificati nei seguenti gruppi:

- Gruppo 1: Volteggi senza salti (ribaltate, rondate)
- Gruppo 2: Ribaltata avanti con o senza avvitamento nel 1° volo – salto avanti o dietro con o senza avvitamento nel 2° volo
- Gruppo 3: Tsukahara
- Gruppo 4: Yurchenko
- Gruppo 5: Rondata con $\frac{1}{2}$ avvitamento nel 1° volo – salto avanti o dietro con o senza avvitamento nel 2° volo

In questo capitolo verranno analizzati gli elementi più diffusi: Ribaltata, Tsukahara, Yurchenko.

3.2 Ribaltata

La ribaltata è uno degli elementi più semplici eseguiti al volteggio.

Consiste in un ribaltamento sull'asse trasversale con appoggio degli arti inferiori sulla tavola e nessuna evoluzione durante la seconda fase di volo; infatti dopo la fase di repulsione delle spalle, l'atleta si prepara direttamente per l'arrivo.

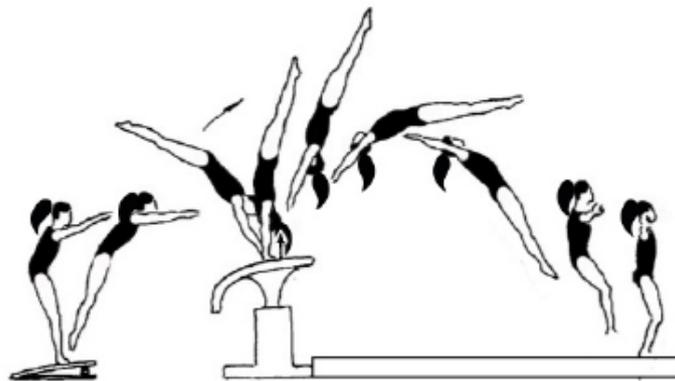


Figura 3.3: Ribaltata al volteggio

3.2.1 Tenuta del corpo

La variabile principale per una buona esecuzione del salto è l'allineamento dei segmenti corporei, la cui mancanza può provocare un'asimmetria di tutto il corpo. Jancosek et al. [33] hanno condotto un'analisi biomeccanica tramite il sistema optoelettronico SMART a 6 telecamere. Hanno dimostrato che, valutando la ribaltata con strumenti che analizzano e registrano i movimenti dei singoli segmenti corporei, è possibile creare allenamenti mirati per migliorare le posizioni dei singoli segmenti, al fine di avere un miglioramento della postura di tutto il corpo. L'esperimento si basa sulla scomposizione sperimentale in segmenti tramite parametrizzazione biomeccanica. Il campione di studio è costituito da 5 ginnasti e 5 ginnaste tra gli 11 e i 12 anni. Sono stati utilizzati *marker* passivi, posizionati su 19 punti di reperi anatomico, per individuare asimmetrie indesiderate durante l'esecuzione. Sono stati raccolti i dati di 10 salti, mentre si è tenuto in considerazione il migliore ai fini della valutazione. L'angolo tra anca e bacino nella seconda fase di volo e il momento in cui avviene la posa delle mani si sono rivelati i parametri più importanti per ottenere una corretta esecuzione. Osservando le registrazioni, è emerso che gli atleti avevano problemi a mantenere la simmetria del corpo durante la ribaltata nei piani frontale e trasversale. Una maggiore asimmetria era visibile nelle articolazioni dell'anca sul piano frontale. Dopo 6 settimane, in seguito ad un confronto con gli allenatori che hanno apportato opportune modifiche agli allenamenti degli atleti, l'esperimento è stato ripetuto. Sono stati valutati i salti ritenuti migliori dall'allenatore e, sulla base dei dati ottenuti, è risultato evidente che un allenamento mirato, incentrato su specifiche carenze individuali nell'esecuzione dei salti, può migliorare la tecnica di esecuzione.

L'occhio umano non è in grado di catturare il movimento dei singoli segmenti, soprattutto nei casi in cui le posizioni dei segmenti cambiano rapidamente, ad esempio nella fase di volo. L'analisi 3D del movimento fornisce le traiettorie dei singoli segmenti corporei, che consentono un'analisi biomeccanica approfondita applicabile alla metodologia d'insegnamento dei movimenti.

3.3 Tsukahara

I salti appartenenti al gruppo Tsukahara consistono nell'esecuzione di una rotonda con una rotazione di 180° sull'asse longitudinale nella prima fase di volo e una successiva rotazione di 360° lungo l'asse trasversale. Può essere eseguito in posizione raccolta, carpiata o tesa, e si possono effettuare rotazioni anche lungo l'asse longitudinale nella seconda fase di volo per incrementare la difficoltà e il punteggio del salto.



Figura 3.4: Tsukahara raccolto al volteggio

3.3.1 Variabili cinematiche

Dopo la battuta, la componente orizzontale della velocità del centro di massa decresce fino all'atterraggio, mentre aumenta la componente verticale, con picco massimo dopo la fase di repulsione e successiva diminuzione. Il momento angolare, che permette la rotazione, viene prodotto nella fase di contatto con la tavola, in cui diminuisce la velocità del salto, inoltre più l'atleta riuscirà ad avvicinare i segmenti corporei all'asse su cui sta ruotando, maggiore sarà la sua velocità di rotazione. Infatti il principio della conservazione del momento angolare implica che più la ginnasta riesce a prendere una conformazione compatta del corpo più rapidamente ruota; perciò risulta essenziale la reattività degli arti inferiori al fine di effettuare la rotazione trasversale.

La componente verticale della velocità è necessaria per permettere all'atleta di acquisire un'elevazione sufficiente per completare le rotazioni in volo e di visualizzare il suolo per cercare un arrivo più preciso possibile. Nel punto più alto della traiettoria, l'energia potenziale è massima e si esaurirà al momento dell'atterraggio. Anche l'energia cinetica diminuirà fino a raggiungere lo zero all'arrivo del salto [34].

3.3.2 Seconda fase di volo

Nel 2012 in Romania è stato condotto uno studio sull'analisi biomeccanica del salto Tsukahara carpiato, eseguito da una ginnasta della nazionale junior. In questo studio Marian et al. [35] hanno dimostrato come, applicando la video-analisi quantitativa alla ginnastica artistica, gli allenamenti si possano basare su dati biomeccanici oggettivi per migliorare l'esecuzione del salto. L'obiettivo principale per ottimizzare lo Tsukahara al volteggio è ottenere una traiettoria di volo parabolica ideale aumentando l'altezza, la lunghezza del 2° volo e prolungarne la durata. Ciò contribuisce ad incrementare la difficoltà degli elementi, permettendo all'atleta di aggiungere rotazioni sull'asse longitudinale.

La video-analisi è un importante metodo di registrazione dell'osservazione diretta e aiuta ad analizzare le fasi del salto, consentendo il miglioramento tecnico tramite la conoscenza delle caratteristiche cinematiche e dinamiche. Applicando l'analisi quantitativa, l'allenatore può basare l'allenamento su dati scientifici e può valutare le prestazioni dell'atleta nel tempo o confrontarle con altri.

L'esperimento è stato svolto registrando i dati di 3 salti Tsukahara ma è stata selezionata solo l'esecuzione migliore. Si è tenuto conto della traiettoria del centro di massa del corpo della ginnasta considerato sull'articolazione coxo-femorale. La registrazione è stata eseguita in 2D con telecamera *Panasonic 50 Hz* e una scheda di acquisizione video con *software Pinnacle*, mentre è stato utilizzato il *software off-line markerless WIM 3.0* per l'analisi delle immagini, in termini di variabili cinematiche e dinamiche.

La conoscenza dettagliata di queste variabili ha consentito l'intervento dell'allenatore che ha convertito le informazioni quantitative dei parametri del movimento in precise istruzioni per migliorare il salto. Dati oggettivi forniti dall'analisi biomeccanica possono quindi contribuire all'immediata evoluzione della tecnica.

3.4 Yurchenko

Natalie Yurchenko eseguì per la prima volta in una competizione internazionale il salto Yurchenko, in occasione della Coppa del Mondo di Zagabria nel 1982. L'elemento consiste in una rondata con arrivo in pedana di spalle alla tavola, seguita da un *flik* con successivo salto giro indietro, che può essere eseguito in posizione raccolta, carpiata o tesa.



Figura 3.5: Yurchenko raccolto al volteggio

Il salto raffigurato è la versione più semplice del gruppo dei salti Yurchenko. Negli anni le difficoltà sono aumentate eseguendo il salto in posizione tesa e aggiungendo avvitamenti sul piano longitudinale nella seconda fase di volo. Questo tipo di salto si è rapidamente diffuso tra le ginnaste, soprattutto in competizioni ad alti livelli come Mondiali e Olimpiadi, ma viene eseguito anche dagli uomini.

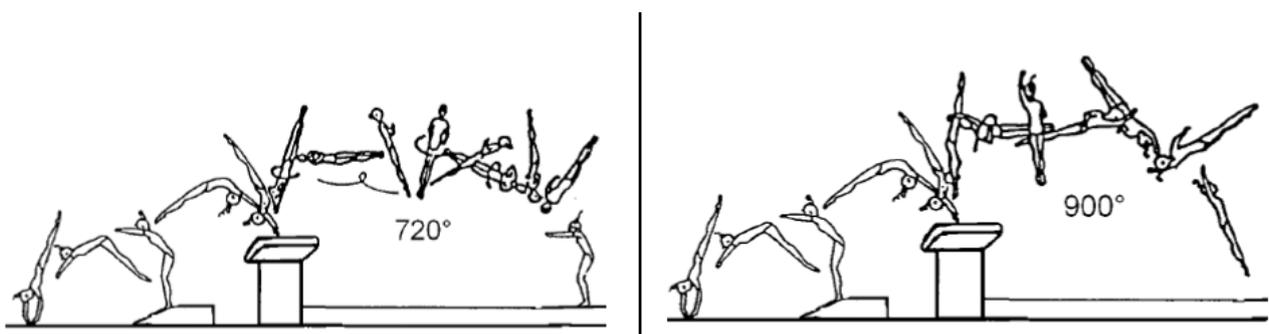


Figura 3.6: Yurchenko teso con 2 avvitamenti e con 2 1/2 avvitamenti

3.4.1 Caratteristiche biomeccaniche

Nonostante sia uno dei salti più eseguiti nella ginnastica artistica, vi sono pochi studi a riguardo, uno di questi è stato svolto tra il 2010 e il 2011 da Valentin Uzunov [36] negli Stati Uniti.

L'autore ha voluto fornire una descrizione delle caratteristiche biomeccaniche chiave per ottenere un punteggio alto nell'esecuzione dello Yurchenko teso, proponendo di utilizzare i parametri precedentemente analizzati per fornire delle indicazioni pratiche agli allenatori, con il fine di impostare modelli metodologici specifici per migliorare la tecnica dello Yurchenko [37].

Uzunov identifica 3 caratteristiche biomeccaniche principali: dopo la rondata, è necessario uno stacco dalla pedana rapido, quando gli arti inferiori devono velocemente raggiungere la posizione verticale; la rotazione all'indietro sulla tavola deve essere molto veloce e deve avere un angolo di attacco tra arti superiori e tavola, tra i 30° e i 40°; la fase di appoggio delle mani sulla tavola deve essere breve con una velocità crescente in fase di stacco, per procedere con il 2° volo che deve seguire una traiettoria ascendente per permettere l'evoluzione aerea. Infatti, è questa la fase che produce il momento angolare per la rotazione, perciò gli allenatori dovrebbero focalizzarsi sullo sviluppo della capacità della ginnasta di generare e mantenere il momento angolare già dalle fasi di rondata, battuta e impatto sulla tavola, poiché un errore in uno di questi stadi comprometterà l'esecuzione del salto.

Essendo un movimento molto complesso, è necessario che gli allenatori comprendano la specifica relazione causa-effetto tra gli errori per correggerli correttamente, e per farlo possono servirsi delle variabili cinematiche e dinamiche di ogni fase.

Il salto Yurchenko si può scomporre in 6 fasi:

1. Rincorsa
2. Pre-salto e battuta
3. Prima fase di volo e attacco sulla tavola
4. Repulsione
5. Seconda fase di volo
6. Arrivo.

Come per i precedenti elementi, l'obiettivo della rincorsa è accumulare più energia cinetica possibile che verrà poi tradotta in velocità orizzontale, verticale e rotazionale [38]. Sands [39] riporta invece, una differenza con i salti che non presentano la rondata in fase di attacco: la rincorsa degli atleti ha una velocità minore durante l'esecuzione dei salti Yurchenko.



Figura 3.7: Visione cinematografica delle fasi di rincorsa, pre-salto e rondata in pedana

Penitente et al. [38] hanno stimato che l'angolo di impatto ottimale degli arti inferiori sulla pedana è di circa 60° con i piedi pari ad una distanza di 30 cm dal bordo. Inoltre suggeriscono che impattando la tavola con un angolo maggiore, la ginnasta è in grado di ridurre le perdite di velocità orizzontale del centro di massa, massimizzandone la velocità verticale e il momento angolare al momento dello stacco.

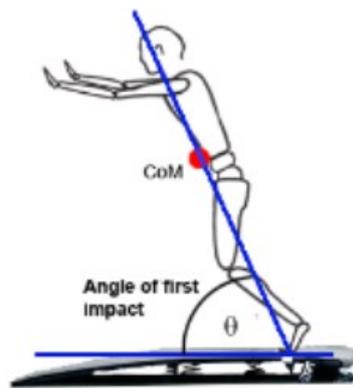


Figura 3.8: Angolo di impatto con la pedana di circa 60°

Gli autori riportano, inoltre, che il fattore più importante per la prima fase di volo è una grande velocità orizzontale al momento dello stacco dei piedi dalla pedana. L'apertura rapida dell'angolo delle spalle e il protendersi all'indietro consentono alla ginnasta di toccare rapidamente la tavola, senza appoggiarsi. Un breve tempo di contatto, un corretto allineamento e una posizione del corpo perpendicolare alla pedana massimizzano la velocità verticale del centro di massa, il quale avrà un percorso parabolico e continuerà a salire mentre la ginnasta ruota all'indietro.

Il successo dell'esecuzione della fase di repulsione è caratterizzato da un'elevata velocità verticale al momento dello stacco dalla tavola, un breve tempo di contatto, un adeguato angolo di attacco degli arti superiori, un corretto allineamento del corpo, la coordinazione delle articolazioni durante il contatto e la repulsione che le spalle effettuano sulla tavola. Al fine di enfatizzare il momento in cui la traiettoria inizia la fase ascendente, la ginnasta deve impattare sulla tavola con un angolo tra busto

e braccia molto ampio (180°) e deve generare un impulso verticale effettuando la propulsione con l'azione coordinata di spalle, braccia e polsi.

Koh et al. [40] riportano che in media l'angolo di attacco risulta essere tra i 160° e i 170° . In questa fase è importante considerare le condizioni ottimali per evitare infortuni agli arti superiori.

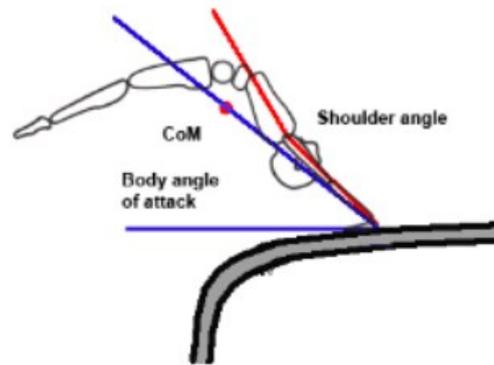


Figura 3.9: Angolo di attacco sulla tavola (blu) e angolo di attacco tra braccia e busto (rosso)

Si identifica la velocità verticale nel momento dello stacco delle mani dalla tavola come la variabile più significativa per raggiungere un'altezza elevata nella seconda fase di volo. Una volta lasciato la tavola, la ginnasta non può più modificare la sua traiettoria di volo o cambiare il suo momento angolare, la sua capacità di mantenere un corpo teso è già stata determinata. Può solo accelerare la rotazione riducendo la propria inerzia attraverso un'alterazione della posizione del corpo.

Il centro di massa dovrebbe iniziare ad elevarsi dalla rondata e poi avere un secondo aumento di elevazione durante la seconda fase di volo [37].



Figura 3.10: Elevazione del centro di massa nel salto Yurchenko con $2 \frac{1}{2}$ avvitamenti

Queste informazioni sono state applicate successivamente nel secondo articolo di Uzunov [37], dove vengono illustrati esercizi specifici per ogni fase del salto Yurchenko con lo scopo di mostrare agli allenatori come comprendere le variabili biomeccaniche di un movimento può aiutarli a preparare metodi di allenamento specifici per ottenere performance migliori.



Figura 3.11: Esercizio propedeutico per la fase di repulsione: i tappeti sopraelevati portano la ginnasta a dare un maggiore impulso con le spalle per ottenere sufficiente elevazione

3.4.2 Analisi del movimento in relazione ai punteggi

Nella letteratura scientifica sono presenti alcuni studi sperimentali sulla biomeccanica del salto Yurchenko. Eden [41] conduce un'analisi per identificare le variabili biomeccaniche temporali e spaziali in relazione al punteggio assegnato dai giudici. Lo studio è stato svolto considerando i salti di 20 ginnaste, ripresi con una telecamera da 300 Hz e successivamente filtrati con un filtro Butterworth passa-basso con frequenza di taglio da 6 Hz. Le variabili rilevanti registrate sono state la velocità orizzontale e verticale del centro di massa, la durata del salto e angolo delle spalle al momento dell'impatto sulla tavola. Dai dati è emerso che i punteggi più alti sono stati assegnati alle ginnaste che hanno eseguito salti Yurchenko con una lunga durata della seconda fase di volo e un ottimo allineamento dei segmenti corporei, mentre l'angolo delle spalle non è stato correlato al punteggio ma solo alla capacità di elevazione dopo la fase di repulsione, cioè nel trasformare la velocità orizzontale in verticale al momento della spinta delle spalle sulla tavola, come riportato anche da Uzunov [36]. Una ricerca simile è stata svolta da G. Penitente et al. [42] all'Università di Bologna. In quest'ultimo lavoro gli autori vogliono evidenziare la spiegazione biomeccanica dell'assegnazione dei punteggi da parte dei giudici relativi alle fasi di primo volo e attacco sulla tavola nell'esecuzione di un salto Yurchenko teso con un avvitarmento. Lo scopo è quello di identificare le debolezze della tecnica e quindi di diagnosticare le probabili cause di una scarsa prestazione tramite un modello biomeccanico.

Sono state filmate 4 ginnaste durante i Campionati Italiani del 2006 con telecamere per l'analisi del movimento 3D da 100 Hz. Il coefficiente di correlazione di Spearman è stato utilizzato per stabilire

la relazione tra le variabili meccaniche del modello e il rilevamento dei punteggi da parte dei giudici. La correlazione principale trovata ha indicato che le penalità dipendevano maggiormente dalle variabili angolari: una bassa velocità angolare del centro di massa al momento dell'impatto con la tavola, il suo lento spostamento e l'alta velocità angolare delle spalle prodotta sulla tavola, una minore estensione dell'anca e una maggiore della spalla nella fase di repulsione, che portano ad un disallineamento di tutto il corpo. Inoltre, influiscono anche le variabili verticali, quali la mancanza di altezza del centro di massa durante lo stacco delle mani e la perdita di velocità verticale sulla tavola.

3.4.3 Analisi cinematica del centro di massa

Gli stessi autori [42] hanno svolto uno studio specifico sull'analisi cinematica del centro di massa di 14 salti Yurchenko [38], sempre durante i Campionati Italiani del 2006, per ampliare le conoscenze biomeccaniche su questa fase. Sono stati considerati i parametri relativi alla velocità, orizzontale e verticale, e agli angoli corporei. La strategia biomeccanica utilizzata dalle ginnaste consiste nell'evitare la diminuzione della velocità orizzontale del centro di massa e aumentarne quella verticale. Ciò può essere realizzato mantenendo ampio l'angolo delle spalle nella fase di attacco per ridurre la caduta verso il basso e massimizzare il sollevamento del centro di massa in direzione verticale durante la seconda fase di volo.

3.4.4 Il Biles 2

Ai Campionati Mondiali di Anversa 2023, Simone Biles, esponente della ginnastica artistica femminile americana e mondiale, ha nuovamente dato il suo nome ad un elemento del volteggio (il *Biles 2*), che verrà inserito nella prossima versione del Codice dei Punteggi. Il salto appartiene al gruppo Yurchenko e consiste in un salto indietro carpiato con due rotazioni sull'asse trasversale, in gergo "doppio carpio". L'estrema difficoltà dipende proprio dalla doppia rotazione sull'asse trasversale, finora mai eseguita da una donna.



Figura 3.12: Yurchenko doppio carpio

Dalla analisi video del salto si può stimare che Simone Biles impiega circa un secondo per eseguire l'evoluzione e che la variazione dell'altezza del centro di massa è di circa un metro. Dalla legge del moto parabolico, si ricava la velocità verticale nella fase di repulsione che risulta essere 3,9 m/s. La ginnasta avendo solo un secondo in aria prima dell'arrivo, deve aumentare la sua velocità angolare per potere completare due rotazioni. Per farlo, secondo il principio della conservazione del momento angolare, la ginnasta deve compiere un'adduzione degli arti inferiori verso il busto in modo da mantenere l'angolo tra essi acuto, in modo da ruotare più velocemente [43].



Figura 3.13: Simone Biles esegue lo Yurchenko doppio carpio ai Mondiali di Anversa 2023

4 CORPO LIBERO

4.1 Composizione dell'esercizio

Secondo le norme del Codice dei Punteggi, l'esercizio al corpo libero è composto da 8 elementi, di cui 3 acrobatici, 3 artistici e 2 a scelta. Nella parte artistica troviamo elementi come giri, salti con spinte a 2 piedi e ad 1 piede, mentre quella acrobatica comprende le evoluzioni come salti in avanti o indietro con rotazioni su entrambi gli assi, trasversale e longitudinale.

Devono essere inoltre rispettate le *esigenze di composizione*, in assenza delle quali verrà assegnata una penalità di 0,5 decimi per ognuna: deve essere eseguito un *passaggio di danza* composto da due salti artistici con spinta ad 1 piede collegati, uno dei quali con divaricata di 180°; bisogna eseguire salti acrobatici in avanti e indietro, un elemento con doppia rotazione sull'asse trasversale e uno con avvitamento sull'asse longitudinale.

Oltre gli elementi selezionati da diversi gruppi strutturali, l'esercizio deve comprendere cambi di livello, ovvero parti coreografiche a terra e in piedi; cambi di direzione, che permettono alla ginnasta di occupare tutti i lati della pedana; collegamenti e passaggi di introduzione all'esecuzione delle linee acrobatiche.

4.1.1 Artisticità e coreografia

Negli ultimi anni, la FIG ha iniziato a dare importanza, non solo alla parte tecnica dell'esercizio, ma soprattutto a quella artistica e coreografica, essendo comunque il corpo libero l'unico attrezzo che viene eseguito con una base musicale; infatti sul Codice dei Punteggi vi è una specifica sezione che tratta l'artisticità al corpo libero, in cui viene detto che *“Un'esecuzione artistica è quella in cui la ginnasta dimostra la capacità di trasformare il suo esercizio da composizione ben strutturata in esibizione artistica.”*

Per far ciò, viene spiegato che, la composizione dell'esercizio si basa sia sul bagaglio tecnico, sia sui movimenti coreografici in relazione a spazio e tempo e in armonia con la musica scelta [5].

4.2 Salto indietro teso con avvitamento

Tra gli elementi acrobatici più avanzati, gli *avvitamenti* indietro sono una base per le evoluzioni di maggiore difficoltà: partendo dalla rondata, viene eseguito un salto indietro teso con uno o più avvitamenti sull'asse longitudinale. Per eseguirlo, è necessario mantenere il bacino allineato agli arti inferiori al momento dello stacco, i quali devono compiere un'azione rapida verso l'alto per guadagnare elevazione; gli arti superiori si allineano con il corpo tramite un'abduzione dal tronco durante lo stacco dal suolo, viene poi eseguita un'adduzione per condurli in posizione parallela

all'asse trasversale in preparazione della fase di arrivo, ovvero le braccia si aprono per rallentare la rotazione ed effettuare un atterraggio sicuro. Lo sguardo deve essere rivolto ai piedi, altrimenti si può incorrere nell'errore di rovesciare il capo all'indietro, perdendo l'allineamento del corpo [44].

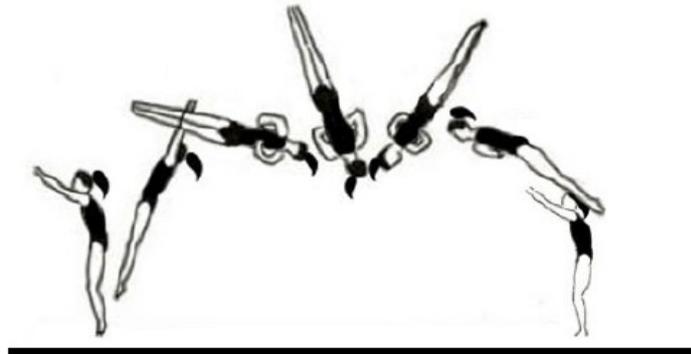


Figura 4.1: Salto indietro teso con 1 avvitamento

4.2.1 Assi di rotazione

L'atleta, dopo lo stacco da terra, mantiene una configurazione del corpo fissa, è ragionevole quindi approssimarlo ad un corpo rigido. Si considerano 3 assi di rotazione, f_1 laterale, f_2 frontale, f_3 longitudinale, e i rispettivi angoli di rotazione, ϕ corrispondente alla rotazione sull'asse trasversale, ossia dove avviene il salto teso, θ è detto angolo di *tilt*, letteralmente "inclinazione", spazzato dagli arti superiori che si muoveranno nel piano frontale per eseguire l'avvitamento; infine, ψ è l'angolo chiamato *twist*, sull'asse longitudinale dove avviene l'avvitamento [45].

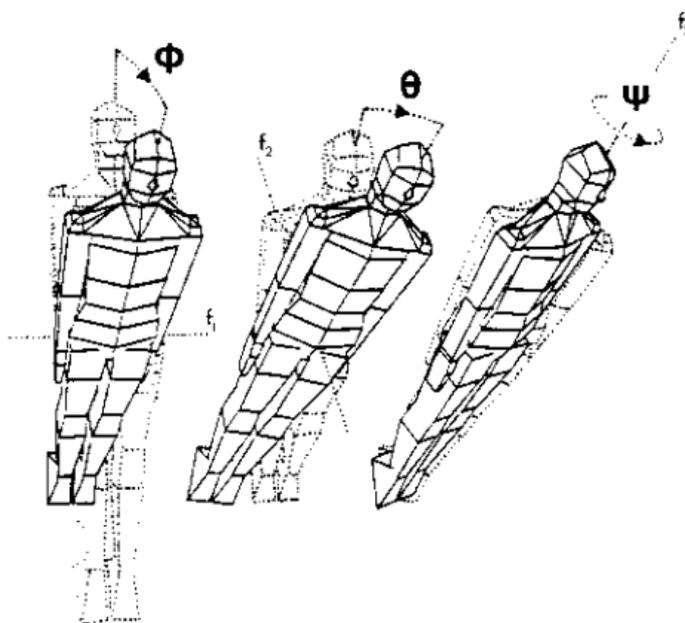


Figura 4.2: Assi f_1, f_2, f_3 e angoli ϕ, θ, ψ di rotazione

4.2.2 Momento angolare

Il momento angolare è stato identificato come elemento principe per gli avvitamamenti, infatti le tecniche di esecuzione sono state divise in *Torque Twist* e *Non Torque Twist*, ovvero con e senza momento angolare. Nella prima categoria troviamo il *Cat Twist* e l'*Hula Hoop Twist*, con momento angolare pari a zero; mentre, la tecnica principale avente momento angolare non nullo è il *Tilt Twist*. Il principio di conservazione del momento angolare L stabilisce che questo è pari al prodotto di momento di inerzia I e velocità angolare ω , ovvero, $L = I \omega$. Il momento angolare può essere considerato come la quantità di rotazione che un corpo possiede attorno ad un dato asse, come risultato della sua velocità di rotazione e della distribuzione della sua massa attorno all'asse. Il momento di inerzia esprime la tendenza di un corpo ad opporsi alle rotazioni: quanto più la massa è lontana dall'asse, tanto più aumenterà la sua inerzia. La velocità angolare rappresenta la velocità di rotazione intorno all'asse di rotazione. Essendo I e ω inversamente proporzionali, il corpo dell'atleta in volo ha la possibilità di cambiare il momento di inerzia I in base alla posizione assunta, di conseguenza verrà a modificarsi anche la velocità angolare ω [49]. Da ciò si deduce che la posizione del corpo in volo è una delle variabili principali per acquisire o diminuire la velocità dell'avvitamento.

4.3 Tecniche di esecuzione

Gli avvitamamenti sono movimenti comuni a più discipline acrobatiche, come trampolino elastico, sci freestyle e tuffi, infatti gli studi svolti riguardo le tecniche per l'esecuzione degli avvitamamenti sono applicabili a tutti gli sport, inclusa la ginnastica artistica [48].

I riferimenti tecnici riportati dalla FGI (Federazione Ginnastica d'Italia) affermano che bisogna iniziare l'avvitamento dopo aver iniziato la rotazione all'indietro del salto teso, ma esistono diverse tecniche per eseguire questo elemento. A partire dagli anni '80, fisici e matematici hanno provato a spiegare quantitativamente quale fosse la metodologia migliore, la questione rimane aperta poiché, l'esecuzione dipenderà dalle caratteristiche dell'atleta e da quale tecnica si adatterà meglio alle sue esigenze.

4.3.1 Cat Twist e Hula Hoop Twist

Il nome della tecnica *Cat Twist* deriva da come un gatto, cadendo supino, riesca a compiere una rotazione di 180° in volo e atterrare in piedi. Il gatto, in caduta, inarca la schiena dividendo così il suo corpo in due "segmenti rigidi", anteriore e posteriore, ognuno dei quali ruoterà attorno ad un asse con un proprio momento di inerzia. I due segmenti ruoteranno in direzioni opposte per mantenere nullo il momento angolare totale [49].

L'*Hula Hoop Twist* consiste nello spostare il bacino in modo circolare attorno all'asse longitudinale, mentre il resto del corpo dovrà ruotare della direzione opposta per mantenere il momento angolare pari a zero. Variando i momenti di inerzia di alcune parti del corpo, è possibile eseguire un numero limitato di rotazioni, solitamente $\frac{1}{2}$ per il *Cat Twist* e $1\frac{1}{2}$ per l'*Hula Hoop Twist*, poiché la parte con maggiore momento di inerzia ruoterà meno di quella avente inerzia minore [50].



Figura 4.3: Schematizzazione del corpo del gatto in caduta

4.3.2 Tilt Twist

La tecnica *Tilt Twist* si basa sull'asimmetria del corpo dopo lo stacco da terra e implica una rotazione delle braccia sul piano frontale, mentre il corpo ruoterà in direzione opposta generando l'avvitamento. Durante i movimenti laterali degli arti superiori durante il salto, il corpo si inclinerà in direzione opposta per mantenere il momento angolare costante. Per l'esecuzione dell'avvitamento indietro, è necessaria l'adduzione del braccio sinistro e la contemporanea abduzione del destro, rispetto al busto [51].

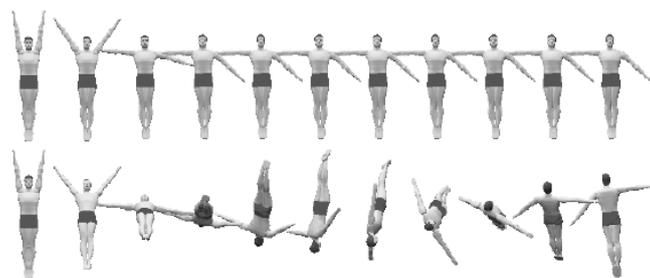


Figura 4.4: Asimmetria delle braccia nel $\frac{1}{2}$ avvitamento indietro

4.3.3 Analisi biomeccanica tramite modelli computerizzati

Nella letteratura scientifica sono presenti numerosi studi in cui sono state effettuate analisi biomeccaniche tramite modelli di simulazione computerizzata per analizzare i segmenti corporei durante la fase di volo. La tecnica migliore, tra le precedenti, per eseguire uno o più avvitamenti si è rivelata essere il *Tilt Twist*. La maggior parte delle analisi sono state svolte da Yeadon, il quale implementò un modello di simulazione a 11 segmenti [52]. Tale modello venne successivamente utilizzato per diverse ricerche, ad esempio, per simulare un salto teso indietro con un avvitamento

[53] per definire una tecnica di *tilt* vantaggiosa anche per rallentare la rotazione nella fase finale e controllare l'arrivo. Ciò risulta molto importante anche ai fini della salvaguardia fisica delle atlete, dato che l'arrivo è spesso causa di infortuni. L'autore ha condotto diverse analisi per comprendere come un'atleta può gestire gli avvitiamenti tramite la comprensione della biomeccanica con l'ausilio di modelli di simulazione computerizzati. Inizialmente, Yeadon esegue una trattazione quantitativa [45], dove vengono applicate le leggi della fisica al corpo umano, semplificato come corpo rigido, per descriverne le rotazioni e ottenere le relazioni tra gli angoli φ , θ , ψ . Successivamente, l'autore distingue il *Contact Twist* dall'*Aerial Twist*: il primo metodo consiste nell'iniziare l'avvitamento quando i piedi sono ancora in contatto con il suolo, mentre il secondo suggerisce di iniziare prima la rotazione sull'asse trasversale e poi l'avvitamento. In un successivo lavoro [46], viene analizzata matematicamente la capacità dei segmenti corporei di trasferire il momento angolare. In particolare si afferma che le braccia sono in grado di produrre rotazione nel *Contact Twist*, ma potrebbero essere utilizzati anche il busto o l'intero corpo. Viene poi valutato [47] l'inizio dell'avvitamento mediante movimenti asimmetrici di braccia, anche e torace nell'*Aerial Twist*; inoltre, si determina l'effetto sulla velocità di rotazione e si valutano i metodi per interrompere l'avvitamento. Yeadon conferma che le azioni di adduzione e abduzione asimmetrica delle braccia possono iniziare la rotazione e che i loro movimenti dipenderanno dalla direzione del salto; mentre il movimento del busto, ovvero l'apertura o chiusura dell'angolo tra tronco e arti inferiori, e la rotazione delle anche sono più efficaci se impiegati nell'esecuzione di salti in posizione carpiata. Inoltre, asserisce che, è preferibile partire con gli arti superiori lontani dall'asse longitudinale per poi eseguire un'adduzione dopo lo stacco da terra ed entro un quarto dell'avvitamento, in modo da ridurre il momento d'inerzia e aumentare la velocità di rotazione. Per rallentare la rotazione e prepararsi all'arrivo, sarà sufficiente eseguire al contrario l'azione che ha generato l'avvitamento, in base anche alla direzione del salto, risulta quindi più facile effettuare un atterraggio sicuro rispetto alla tecnica di *Contact Twist*, riguardo la quale non si era giunti ad una soluzione concreta. Nell'ultima fase dello studio [48], è stato condotto un esperimento filmando 4 salti tesi con 1 avvitiamento, eseguiti da un atleta professionista al trampolino elastico. Le riprese sono state poi modellizzate mediante il modello a 11 segmenti di Yeadon e, tramite il calcolo del momento angolare e delle variabili cinematiche dei segmenti corporei, si è stabilito che l'*Aerial Twist*, eseguita insieme al *Tilt Twist*, è la tecnica che permette di compiere più avvitiamenti e che il contributo maggiore è dato dall'asimmetria delle braccia.

In molti dei suoi studi [48][49][51], Yeadon sottolinea l'importanza dell'uso dei modelli di simulazione per comprendere l'esecuzione di ogni fase dei movimenti e facilitarne l'insegnamento, affermando che “*I progressi delle prestazioni sportive derivano da una migliore comprensione della tecnica e dall'allenamento*”.

5 CONCLUSIONI

In seguito alla ricerca bibliografica svolta, si è appreso che l'analisi biomeccanica applicata alla ginnastica artistica può contribuire a migliorare la tecnica e ad aumentare la difficoltà degli esercizi in maniera sicura, poiché permette una profonda comprensione dei gesti tecnici.

La conoscenza dettagliata delle variabili cinematiche e dinamiche degli elementi permette agli allenatori di sviluppare allenamenti mirati, basati su dati scientifici oggettivi, al fine di perfezionare le performance. Inoltre, l'analisi del movimento consente di prevenire gli infortuni tramite l'identificazione di potenziali fattori di rischio ai fini di una maggiore salvaguardia degli atleti.

L'efficacia dell'approccio biomeccanico in ambito sportivo ha portato ad un notevole sviluppo dei sistemi di analisi del movimento e dei modelli di simulazione computerizzata.

Rispetto ai primi studi, oggi l'attrezzatura per l'acquisizione dei dati risulta essere un fattore meno limitante. Le prime ricerche in questo campo si basano perlopiù su approcci puramente teorici, mentre i lavori più recenti sono improntati su studi sperimentali, grazie all'evoluzione dei sistemi di analisi. In futuro si prevede un maggiore sviluppo dei sistemi di *motion capture markerless* automatici e non invasivi, i quali permettono di ridurre gli artefatti da movimento. I modelli di simulazione computerizzata potranno essere personalizzati e specifici per ogni individuo, perfezionando la simulazione in 3 dimensioni.

È ipotizzabile che le nuove frontiere dell'analisi biomeccanica potranno includere *software* basati sull'intelligenza artificiale e su algoritmi di *machine learning*. Questi strumenti permetteranno non solo rilevazioni degli aspetti biomeccanici, ma anche di quelli neurali connessi al controllo motorio e alla coordinazione del movimento. L'integrazione della realtà virtuale e aumentata faciliterà le valutazioni tecniche e biomeccaniche.

Tra i nuovi sistemi di analisi sono presenti dispositivi indossabili leggeri dotati di sensori, che consentono di monitorare le prestazioni e analizzare il movimento sia nei laboratori che nelle azioni quotidiane.

In conclusione, la figura di un bioingegnere con competenze in ambito biomeccanico può risultare vantaggiosa negli ambienti sportivi, potendo contribuire all'incremento delle prestazioni degli atleti e alla riduzione del rischio di infortunio.

Bibliografia

- 1 <https://www.federginnastica.it/la-ginnastica/femminile.html>
- 2 [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ginnastica_artistica&oldid=138285813](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ginnastica_artistica&oldid=138285813)
- 3 [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Nadia_Com%C4%83neci&oldid=136426474](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Nadia_Com%C4%83neci&oldid=136426474)
- 4 [//it.wikipedia.org/w/index.php?title=Volteggio&oldid=131557219](https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Volteggio&oldid=131557219)
- 5 Codice dei punteggi GAF 2022-2024
- 6 <https://www.fisiopoint.net/2023/10/30/la-ginnastica-artistica-lo-sport-dei-traumi-imprevedibili/>
- 7 <https://langs.physio-pedia.com/it/clinical-biomechanics-in-sport-it/>
- 8 <https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-use-biomechanics-stand-out-functional>
- 9 <https://www.noraxon.com/biomechanics-and-the-rehabilitation-process/>
- 10 <https://biomech.stanford.edu/rehabilitation/>
- 11 <https://it.linkedin.com/pulse/misurare-il-movimento-umano-unanalisi-profonda-luca-mercogliano>
- 12 <https://www.technogym.com/it/newsroom/pedana-di-forza-benefici-sport-riabilitazione>
- 13 <http://www.fgicampania.it/sez.tecnica/Biomeccanica-applicata-alla-ginnastica-artistica>
- 14 <https://www.ginnasticakinesroma.it/studiare-da-allenatore/la-verticale/>
- 15 *The future of performance-related sports biomechanics research* - M.R. Yeadon & J.H. Challis, 1994
- 16 *Biomechanical research in artistic gymnastics: a review* - Spiros Prassas, Young-Hoo Kwon, William A. Sands, 2007
- 17 *The importance of using biomechanical analysis in the process of learning technical elements in artistic gymnastics among juniors* - Tanasă Anca Raluca, Moraru Cristina, 2022
- 18 *Biomechanical and biological limits in artistic gymnastics* - Gert-Peter Brüggemann, Institute for Biomechanics and Orthopaedics, German Sport University Cologne, 2005
- 19 *Fifty years of performance-related sports biomechanics research* - M.R. Yeadon e M.T.G. Pain, 2023
- 20 *Kinematic analysis as the basis for training strategy in gymnastics* - D. Semenov, V. Shlyakhtov, A. Romyantsev, 2021
- 21 *The Scientific Impact of Applied Biomechanics Research in Artistic Gymnastics* - V. Potop e V. Manolachi, 2020
- 22 *Study of Biomechanics Characteristics of Tsukahara Vault in Women's Artistic Gymnastics* - Crețu Marian, Mihăilă Ion, Potop Vladimir, 2012
- 23 *Strategies in preflight for an optimal Yurchenko layout vault* - Michael Koh, Les Jennings, 2007
- 24 *Do springboard divers violate angular momentum conservation?* - Frohlich, 1979

- 25 *The biomechanics of twisting somersaults* - M.R. Yeadon 1993
- 26 *An insight into the Biomechanics of Twisting* – H. Fink, 1997
- 27 *Kinematic and Kinetic Analysis of the Overgrip Giant Swing on the Uneven Parallel Bars* - Winifred A. Witten, Eugene W. Brown, Charles X. Witten, Robert Wells, 1996
- 28 *Mechanical energetic processes during the giant swing exercise before dismounts and flight elements on the high bar and the uneven parallel bars* - Adamantios Arampatzis, Gert-Peter Brüggemann, 1999
- 29 *Biomechanical characteristics of back double salto dismount off the uneven bars* - V. Potop, Timnea Olivia Carmen, C. Mihaiu, C. Manole, 2014
- 30 *Biomechanical characterization dismount from balance beam on the basis of the analysis of key elements of sports equipment* - V. Potop, Rafal G, Boloban V.N., Otsupok A.P., 2013
- 31 *Analysis of Biomechanical Characteristics of Acrobatic Elements on Balance Beam* - V. Potop, Timnea Olivia Carmen, 2017
- 32 *La ginnastica in schede – Volteggio, a cura di Fulvio Vailati* – Federazione Ginnastica d’Italia
- 33 *Biomechanical Parameterization of Front Handspring Vaults* - M. Jancosek, M. Danko, J. Ivankova, 2020
- 34 *Kinematic variables of table vault on artistic gymnastics* – S.M.B. Fernandes, P. Carrara, J.C. Amadio, L. Mochizuki, 2016
- 35 *Study of biomechanics characteristics of Tsukahara vault in women’s artistic gymnastics* – C. Marian, M. Ion, V. Potop, 2012
- 36 *Qualitative Description of the Ideal Yurchenko Layout Vault Technique* - Valentin Uzunov, 2010
- 37 *Teaching a Great Yurchenko Layout Vault* - Valentin Uzunov, 2011
- 38 *Kinematics of the springboard phase in Yurchenko-style* - Penitente, Merni, Fantozzi, Perretta, 2007
- 39 *Vault Run-up Speeds* - Sands WA., 2000
- 40 *A predicted optimal performance of the Yurchenko layout* - Koh M., Jenning L., Elliot B., Liyod D., 2003
- 41 *Biomechanical variables of the Yurchenko vault* - L. Eden, 2015
- 42 *On-Board and Pre-flight mechanical model of Yurchenko one twist on vault: implications for performance* - G. Penitente, F. Merni, S. Fantozzi, 2009
- 43 <https://www.focus.it/scienza/scienze/il-salto-impossibile-di-simone-biles>
- 44 *La ginnastica in schede – Corpo Libero, a cura di Fulvio Vailati* – Federazione Ginnastica d’Italia
- 45 *The biomechanics of twisting somersaults. Part I: Rigid body motions* - M.R. Yeadon, 1993
- 46 *The biomechanics of twisting somersaults. Part II: Contact twist* - M.R. Yeadon, 1993

- 47 *The biomechanics of twisting somersaults. Part III: Aerial twist* - M.R. Yeadon, 1993
- 48 *The biomechanics of twisting somersaults. Part IV: Partitioning performances using the tilt angle* - M. R. Yeadon, 1993
- 49 *The Physics of twisting somersaults* – M.R. Yeadon, 2000
- 50 *An insight into the Biomechanics of Twisting* – H. Fink, 1997
- 51 *Learning how to twist fast* – M.R. Yeadon, 1999
- 52 *The simulation of aerial movement – II. A mathematical inertia model of the human body* – M.R. Yeadon, 1990
- 53 *The control of twisting somersaults using asymmetrical arm movements* - M.R. Yeadon

Indice delle figure

Figura 1.1 <https://www.mondiali.it/curiosita-sportive/nadia-comaneci-primi-10-alle-olimpiadi/>

Figura 1.2: <https://www.oasport.it>

Figura 1.3: <https://bravewords.com/news/stahlmann-s-military-lapdance-used-in-russian-gymnast-s-official-floor-music-video>

Figura 1.4: <https://www.mymi.it/tag.asp?tag=Allianz+Cloud+Arena>

Figura 1.5: <https://www.oasport.it/2022/01/ginnastica-nuovo-codice-dei-punteggi-le-parallele-esigenze-abbuoni-di-collegamento-difficolta-e-valori-elementi/>

Figura 1.6-1.9: Codice dei punteggi GAF 2022-2024

Figura 1.10: *G. Penitente*, Analisi cinematica e dinamica dei ribaltamenti al volteggio, 2008 - Motion and physiological measurements for health, rehabilitation and performance analysis, University of Eastern Finland

Figura 2.1: <https://www.newwaves.info/biomeccanica-della-ginnastica-artistica/>

Figura 2.2-2.5: Codice dei punteggi GAF 2022-2024

Figura 2.8: Technique Magazine – Dicembre 1988

Figura 3.1: La ginnastica in schede – Volteggio, a cura di Fulvio Vailati – FGI

Figura 3.2: *Investigation of hand contact forces of female gymnasts performing a handspring vault*, G. Penitente, W. Sands, J. McNeal, Sarah L. Smith, Wendy Kimmel, 2010

Figura 3.3-3.5: La ginnastica in schede – Volteggio, a cura di Fulvio Vailati – FGI

Figura 3.6: Codice dei punteggi GAF 2022-2024

Figura 3.7: *Qualitative Description of the Ideal Yurchenko Layout Vault Technique* - Valentin Uzunov (2010)

Figura 3.8-3.9: *Kinematics of the springboard phase in Yurchenko-style*, Penitente, Merni, Fantozzi, Perretta (2007)

Figura 3.10: McKayla Maroney, Olimpiadi Londra 2012, NBC Sports

Figura 3.11: *Teaching a Great Yurchenko Layout Vault* - Valentin Uzunov

Figura 3.12: Federazione Internazionale di Ginnastica – New Vault Element

Figura 3.13: Tim Clayton/Corbis via Getty Images

Figura 4.1: La ginnastica in schede – Corpo Libero, a cura di Fulvio Vailati – Federazione Ginnastica d'Italia

Figura 4.2: *The biomechanics of twisting somersaults. Part I: Rigid body motions* - M.R. Yeadon, 1993

Figura 4.3: *An insight into the Biomechanics of Twisting* – H. Fink, 1997

Figura 4.4: *Learning how to twist fast* – M.R. Yeadon, 1999