

Vittorio Baldini

Cat twist: possibili sviluppi acrobatici

La seguente ricerca, già presentata altrove, non presuppone nel lettore una conoscenza specifica della ginnastica sportiva o di altri sport acrobatici. L'appendice B è stata aggiunta al testo originale espressamente per i lettori di Gymnica. A tale appendice si rimanda chi abbia già approfondito i temi connessi agli avvistamenti con momento angolare nullo e/o sia interessato esclusivamente alle conclusioni pratiche di carattere tecnico-didattico.

*La gloria di colui che tutto move
per l'universo penetra, e risplende
in una parte più e meno altrove.*

Dante, Par.1-3

1. Introduzione

Il moto è uno degli argomenti che più hanno attratto ed impegnato il pensiero dell'uomo in ogni tempo: il moto degli astri e della Terra, degli oggetti, degli animali, delle particelle atomiche e subatomiche. Ed è notevole che a tale impegno si debbano molte delle conquiste intellettuali e scientifiche che più hanno contribuito all'evoluzione culturale di Homo sapiens. Come è notevole, d'altronde, l'importanza che le modalità di movimento e le relative modificazioni hanno avuto nell'evoluzione biologica in generale, e dei Vertebrati e dell' Uomo in particolare. Da quando infatti, nel lontano paleozoico, iniziarono a differen-

ziarsi i primi vertebrati dotati di mascelle¹, la capacità di interpretare l'ambiente circostante e di muoversi opportunamente e rapidamente rispetto ad esso, acquistarono un significato straordinario. E molto più recentemente, solo pochi milioni di anni fa, straordinarie furono le conseguenze evolutive che il bipedismo, e la nuova motricità ad esso associata, determinarono in un' importante Famiglia dell'Ordine dei Primati; Famiglia di cui siamo oggi gli ultimi - ed unici - rappresentanti.

Ciò che verrà discusso in questa ricerca, si basa sulla fisica di un classe di movimenti - le rotazioni del corpo con momento angolare nullo - il cui interesse biomeccanico e naturalistico è da considerare di un certo rilievo.

1.1 La legge di conservazione del momento angolare

L'interpretazione fisica del moto di un corpo è teoricamente sempre possibile, anche se, talvolta, può assumere forme estremamente complesse. Fortunatamente, per quanto verrà trattato in seguito, è possibile far riferimento ad una legge di conservazione. Le leggi di conservazione, in Fisica, hanno un significato particolare, in quanto consentono di descrivere determinati fenomeni in termini relativamente semplici. Quando in un sistema una determinata grandezza fisica si mantie-

¹ "L'assenza o presenza di mascelle è ... un carattere anatomico di tale importanza, da far dividere i Vertebrati in due grandi gruppi, degli Agnati e degli Gnatostomi", cfr. Padoa 1994. 31

ne costante, infatti, risulta molto più semplice prevedere l'evoluzione del sistema.

In pratica, le leggi di conservazione richiedono alcuni accorgimenti per poter essere applicate: per quanto verrà qui esposto, tali accorgimenti riguardano la riduzione degli attriti.

La legge di conservazione che qui interessa può essere enunciata nel seguente modo: il momento angolare di un sistema isolato è costante. Essendo il momento angolare il prodotto fra momento di inerzia e velocità angolare, e la condizione di "isolato" soddisfatta dall'assenza di forze agenti sul sistema, si può enunciare lo stesso principio in questi termini: in assenza di forze esterne, per un qualsiasi corpo è costante il prodotto fra momento di inerzia e velocità angolare. Vi è una analogia fra inerzia (massa) e momento di inerzia che aiuta a comprendere il significato di quest'ultimo termine. Esso è il corrispettivo, nelle rotazioni, della proprietà manifestata da un oggetto nel "rispondere" - sotto il profilo del moto - alle sollecitazioni di una forza.

La massa di un oggetto è definita come il rapporto esistente fra la forza risultante applicata e l'accelerazione dell'oggetto stesso. Analogamente, il momento di inerzia può essere definito come il rapporto fra il momento delle forze applicate ("coppia") e l'accelerazione angolare.

Con riferimento all'esperienza sensoriale, si può dire che la facilità con cui è possibile indurre, oppure fermare, la rotazione in un oggetto, dipende da una sua proprietà, chiamata momento di inerzia.

Vi sono tuttavia alcune importanti differenze fra massa e momento di inerzia, che rendono imperfetta l'analogia proposta.

Mentre la massa di un oggetto non dipende dalla disposizione spaziale delle particelle elementari che lo compongono (cioè dalla forma geometrica), il momento di inerzia varia considerevolmente con la distanza delle particelle rispetto all'asse di rotazione (precisamente con il quadrato di tale distanza). Ne segue che il momento di inerzia di un corpo dipende dalla sua forma (che, se il corpo non è rigido, può cambiare) e anche dal particolare asse di rotazione considerato.

Nel paragrafo successivo sono riportati alcuni esempi al riguardo.

1.2 Semplici esempi biomeccanici

Si abbia un pattinatore che, dopo la fase di spinta, mantenga i pattini fra loro paralleli ed ortogonali al ghiaccio: la sua velocità lineare rimane comunque costante, qualunque posizione o successioni di posizioni del corpo vengano assunte. Similmente si abbia un pattinatore, che dopo la fase

preparatoria ad una piroetta, sia in rotazione rispetto al suo asse verticale (Fig. 1).

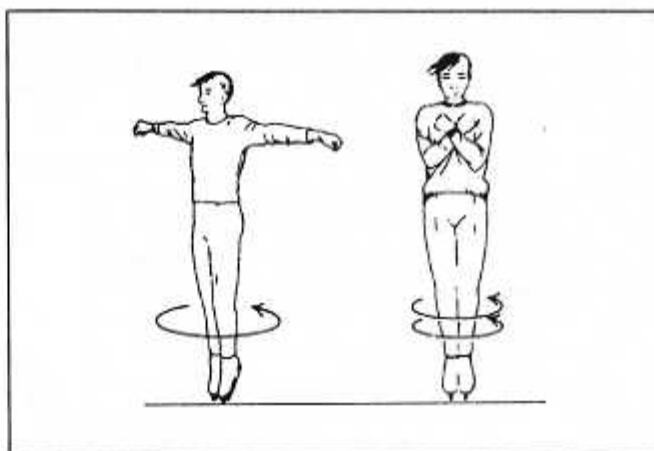


Fig. 1 (da Burns e Mac Donald 1975).

Al variare delle posizioni del corpo, il momento di inerzia cambia, e la velocità di rotazione varia conseguentemente, mantenendo così inalterato, in ogni istante, il momento angolare. In accordo con quanto previsto dalla legge di conservazione:

$$\text{momento di inerzia} \times \text{velocità angolare} = \text{costante}$$

Un altro caso riportato spesso ad esemplificazione è quello della sedia o della piattaforma girevole: lo sperimentatore può verificare facilmente come, variando la disposizione di alcuni segmenti corporei - tipicamente le braccia - si modifichi la velocità di rotazione. Per apprezzare quanto possa variare il momento di inerzia del corpo umano rispetto ad un determinato asse di rotazione, si consideri la Fig. 2:

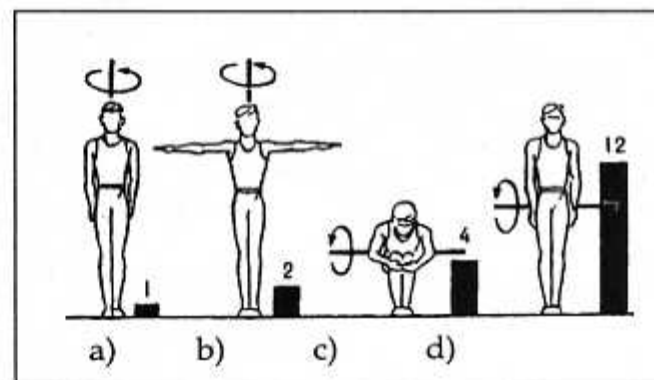


Fig 2 (da Donskoj e Zatziorskij 1979).

dalla posizione b) alla a) il momento di inerzia rispetto all'asse verticale risulta dimezzato (è il caso del pattinatore di Fig. 1), mentre il momento di inerzia rispetto all'asse orizzontale varia, dalla po-

sizione c) "raggruppata" a quella d) "tesa," addirittura di un fattore 3. Quest'ultimo caso è facilmente visibile negli sport acrobatici - soprattutto ginnastica e tuffi - in cui le rotazioni rispetto all'asse trasversale del corpo (indicato nel gergo tecnico di queste discipline come "asse di salto"), sono almeno altrettanto frequenti delle rotazioni rispetto all'asse longitudinale ("asse di avvitemento").

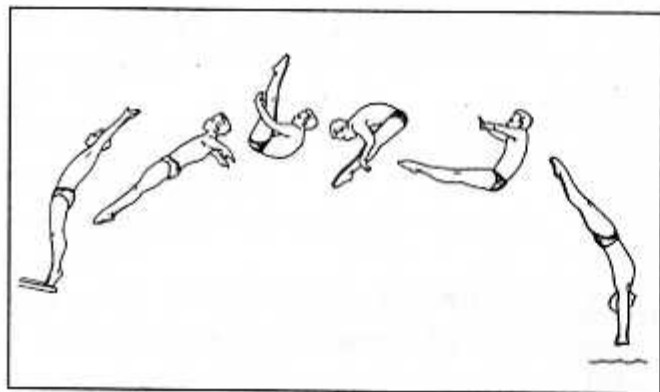


Fig. 3 - esempio di rotazione rispetto all'asse trasversale - di salto - con variazione del momento di inerzia (da O'Brien 1992).

1.3 Casi enigmatici

Non tutti i casi biomeccanici in cui è implicata la legge di conservazione del momento angolare sono tuttavia di così immediata comprensione. Le situazioni probabilmente più significative ed interessanti appaiono anzi come paradossi. Di questi ultimi, il mezzo avvitemento con cui un gatto, lasciato cadere dorsalmente, atterra sulle zampe, è quello più conosciuto. L'apparente paradosso consiste in questo: il momento angolare del gatto nell'istante in cui lo sperimentatore - che lo tiene sospeso per le zampe - lo lascia cadere, è zero. Nullo è pure il momento risultante delle forze che agiscono sull'animale durante la fase di caduta (praticamente le sole forze di gravità, dal momento che si può trascurare la resistenza dell'aria). Quindi il momento angolare che, in base alla relativa legge di conservazione, deve rimanere costante, risulta essere costantemente uguale a zero.

Ma come può il gatto compiere una rotazione se il suo momento angolare è nullo?

1.4 La fisica degli esercizi acrobatici

La risposta a questo interrogativo non è banale. Nel 1979 compare sull' *American Journal of Physics*

²Quando il momento angolare di un corpo rigido è zero, vuol dire che almeno uno dei due termini momento di inerzia e velocità angolare è nullo. Ma nel caso considerato entrambi i termini appaiono diversi da zero. Il gatto ha una massa ed una estensione, quindi il suo momento di inerzia rispetto ad un qualsiasi asse di rotazione non può essere

un contributo che costituisce una sorta di pietra miliare della materia, dal titolo significativo: "Do springboard divers violate angular momentum conservation?"³. Su *Scientific American*, l'hanno successivamente, lo stesso Autore⁴ riprende in forma divulgativa quanto già trattato nel precedente articolo; il sottotitolo è: "Divers, gymnasts, astronauts and cats can do rotational maneuvers in midair that may seem to violate the law of conservation of angular momentum but in fact do not". Le argomentazioni presentate in questi lavori possono essere suddivise in due categorie. Una relativa agli avvitementi che, come quello del gatto, vengono eseguiti in volo partendo da una condizione di momento angolare nullo rispetto ad un qualsiasi asse di rotazione. L'altra relativa ad avvitementi che vengono eseguiti in volo partendo da una condizione in cui è zero solo il momento angolare rispetto all'asse di avvitemento, ma non rispetto all'asse di salto (ed è la situazione più frequente per ginnasti e tuffatori).

Di queste argomentazioni, per rispondere al quesito con cui si è chiuso il paragrafo precedente - e per quanto sarà considerato in seguito - occorrerà riportare solo quelle inerenti alla prima categoria, rimandando senz'altro agli articoli citati per una trattazione completa.

In sintesi: il gatto gira senza violare la legge di conservazione perché si "scompone" in due parti. Le due parti vengono ruotate nello stesso senso e l'intero corpo ruota in senso opposto, conservando il momento angolare. Ciò è possibile in quanto fra le due parti viene mantenuto un certo angolo. La Fig. 4 presenta un modello schematico del processo:

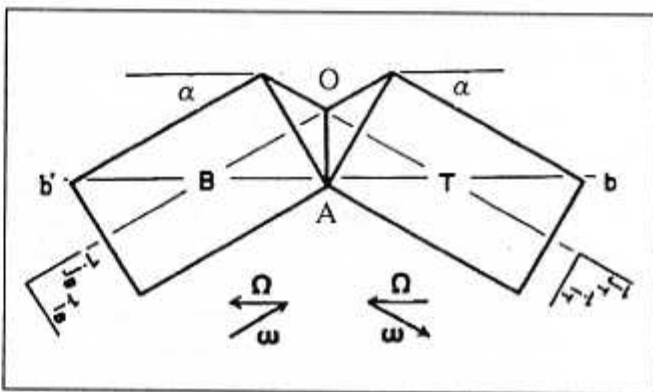


Fig. 4 - (da Frolich 1979)

I due cilindri T e B ruotano attorno ai rispettivi as-

si. Inoltre compie mezzo giro in un determinato tempo, e quindi sembra avere una velocità angolare non nulla. L'origine del paradosso sta nel fatto che il gatto non si comporta come un corpo rigido.

³Frolich 1979. 583-92.

⁴Frolich 1980. 112-20.

si di simmetria con velocità angolari ω_T e ω_B di uguale modulo ω , mantenendo un contatto reciproco tramite le rispettive superfici coniche terminali (che non scivolano l'una rispetto all'altra). Contemporaneamente, l'intero sistema ruota attorno all'asse bb' con velocità angolare Ω , in senso opposto. Fissando i versori i_T, i_B, j_T e j_B come in Fig. 4 e chiamando I il momento di inerzia di ciascun cilindro e J quello dell'intero sistema rispetto ai relativi assi di rotazione, si possono scrivere le seguenti equazioni per i momenti angolari dei due cilindri (H_T e H_B):

$$H_T = J\omega j_T - J\Omega \cos\alpha j_T + I\Omega \sin\alpha i_T$$

$$H_B = J\omega j_B - J\Omega \cos\alpha j_B - I\Omega \sin\alpha i_B$$

la cui somma vettoriale è il momento angolare dell'intero sistema:

$$H_T + H_B = J\omega(j_T + j_B) - J\Omega \cos\alpha(j_T + j_B) + I\Omega \sin\alpha(i_T - i_B)$$

quindi, se il momento angolare è zero, si ha:

$$J(\omega - \Omega \cos\alpha)(j_T + j_B) + I\Omega \sin\alpha(i_T - i_B) = 0$$

risolvendo le componenti $(j_T + j_B)$ e $(i_T - i_B)$ rispetto a bb' , si ha:

$$\omega/\Omega = ((1 + \cos^2\alpha)(J/I - 1))/((J/I)\cos\alpha)$$

e da questa equazione si constata che se, per esempio, $\alpha = 60^\circ$ e $I=J$ si ottiene:

$$\omega/\Omega = 2$$

ovvero quando i due cilindri compiono un giro attorno ai loro rispettivi assi, l'intero sistema compie esattamente mezzo giro in verso "opposto". E questo dimostra che fisicamente è possibile, per un corpo non rigido, compiere rotazioni conservando un momento angolare nullo. I gatti e gli uomini, e probabilmente anche altri animali, usano questa tecnica - anche integrata con "aggiustamenti" dei momenti di inerzia delle varie parti del corpo - per compiere rotazioni nei casi in cui è impossibile utilizzare forze esterne. Ad ogni modo è fondamentale sottolineare che le "manovre" richieste sono complesse ed interdipendenti. Comunque più complesse e soprattutto inusuali di quelle necessarie alla torsione di una parte del corpo rispetto ad un'altra, per esempio della testa rispetto al tronco. Atto motorio, questo, con cui non è possibile produrre - è bene sottolinearlo - alcuna rotazione in volo.

2. Finalità della ricerca

In Natura non esistono fenomeni dei quali si possa capire correttamente l'essenza senza porsi il problema della loro origine.

N.A. Bernstein

Il riflesso del mezzo giro osservabile nel Gatto, e gli avvistamenti eseguiti dagli acrobati, anche quando si basano sulla medesima tecnica esecutiva, si differenziano comunque da un punto di vista neurofisiologico. In un caso si tratta di sequenze motorie innate, geneticamente determinate, già complete e codificate in qualche modo e da qualche parte nel sistema nervoso centrale, e scatenate ineluttabilmente dai segnali sensoriali associati ad una caduta dorsale. Nell'altro caso, invece, tali sequenze rientrano in un repertorio motorio appreso - spesso dopo un lungo ed impegnativo addestramento - e sono eseguite volontariamente.

Tuttavia proprio durante l'iter addestrativo di questa abilità motoria, è possibile riconoscere una sorta di "predisposizione". Alcuni soggetti, in determinate condizioni didattiche⁵, risolvono il problema di girarsi in volo senza ricevere alcuna istruzione al riguardo. E' come se, improvvisamente, "ricordassero qualcosa". Ciò è reso particolarmente evidente dal concorso di due fattori. La sequenza motoria necessaria è completamente diversa da quelle, molto più "intuitive", con le quali si generano gli avvistamenti per mezzo dell'interazione con un vincolo⁶. Inoltre si manifesta una situazione del tipo "tutto o nulla": il movimento riesce o non riesce, non vi sono cioè fasi intermedie o stadi di approssimazione successiva. E' lecito ritenere che in *Homo sapiens* esista uno schema motorio innato, analogo a quello descritto in *Felis catus*?

La finalità della presente ricerca è rispondere a questo interrogativo, unitamente alla presentazione di un semplice metodo di studio individuato al riguardo. Tale metodo ha consentito di chiarire inequivocabilmente alcune incertezze interpretative riguardanti la biomeccanica di alcuni movimenti e si è rivelato essere anche un efficace strumento didattico e dimostrativo per quanto concerne la legge di conservazione del momento angolare.

colaramente stabile.

⁵Un semplice esempio - di cui tutti hanno esperienza - è il saltello sul posto a piedi uniti con mezzo giro. La tecnica esecutiva consiste nel ruotare il busto ed il capo rispetto alla parte inferiore del corpo, che non può girare in senso opposto - come farebbe in assenza del vincolo - a causa dell'attrito dei piedi col il suolo. Al momento dello stacco, il momento angolare così generato è responsabile della rotazione dell'intero corpo rispetto all'asse longitudinale. Questo tipo di avvistamenti è molto più "intuitivo" di quelli "a momento angolare zero", in quanto è una semplice derivazione del movimento fondamentale dell'orientamento: rotazione del capo.

⁶Questa affermazione si basa sulle esperienze degli allenatori della ginnastica artistica. In questa disciplina gli avvistamenti che traggono origine dalla interazione con un vincolo sono i più frequenti. Tuttavia vi è un indirizzo didattico che dà un particolare rilievo agli avvistamenti iniziati in volo; essi sono più spettacolari ed hanno il vantaggio di non sottoporre le articolazioni alla sollecitazione di momenti torcenti nella fase di stacco e di arrivo. Alcuni allenatori portano i loro atleti all'apprendimento del mezzo avvistamento curandosi esclusivamente degli aspetti inerenti il movimento al quale il mezzo avvistamento è associato, senza fornire alcuna indicazione sulla tecnica realizzativa di quest'ultimo; L'acquisizione degli avvistamenti con questa metodologia risulta parti-

3. Metodi

L'esperienza cruciale - l'esperimento della caduta come la si esegue col gatto - nel caso dell'uomo è improponibile⁷. Inoltre, la possibilità di eseguire osservazioni su cadute accidentali con fase di volo, è fortunatamente nulla. Si presentano quindi due possibilità. La prima, valutare in una popolazione più estesa ed eterogenea di quella degli "acrobati", la predisposizione ad eseguire, seppur volontariamente, un movimento meccanicamente identico al "cat twist" (senza però ricevere alcuna indicazione realizzativa). La seconda, compiere osservazioni su riflessi che posseggano una qualche analogia⁸ con quello del gatto.

L'apparato sperimentale scelto per valutare i "cat twists" deriva da uno dei sei attrezzi olimpici della ginnastica artistica maschile. Sostanzialmente si tratta di due anelli in legno sospesi con cavi di acciaio ad una struttura portante chiamata "castello". I cavi che sostengono gli anelli sono fra loro indipendenti e collegati al castello da un giunto girevole a basso attrito, che ha lo scopo di impedire torsioni ai cavi di acciaio durante le esecuzioni.

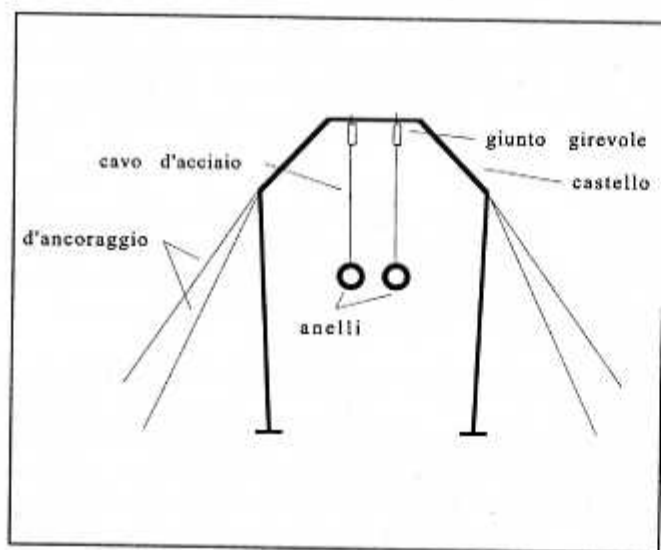


Fig. 5 - rappresentazione schematica dell'attrezzo olimpico denominato "anelli"

Per inciso, le modalità d'utilizzo che qui interessano, sono completamente diverse da quelle che caratterizzano l'impiego agonistico di questo attrezzo. Infatti, per verificare in un soggetto la capacità di compiere avvitamanti con momento angolare nullo, è richiesta la sospensione del medesimo ad un singolo anello, come rappresentato in Fig. 6. L'unico requisito necessario è quello di riuscire a mantenere la presa per pochi istanti.

⁷Non si può, per ovvie ragioni, sottoporre un individuo ad una situazione di inaspettata caduta dorsale, senza preavvisarlo. Ma il preavviso "inquina" inevitabilmente la risposta. Il problema della

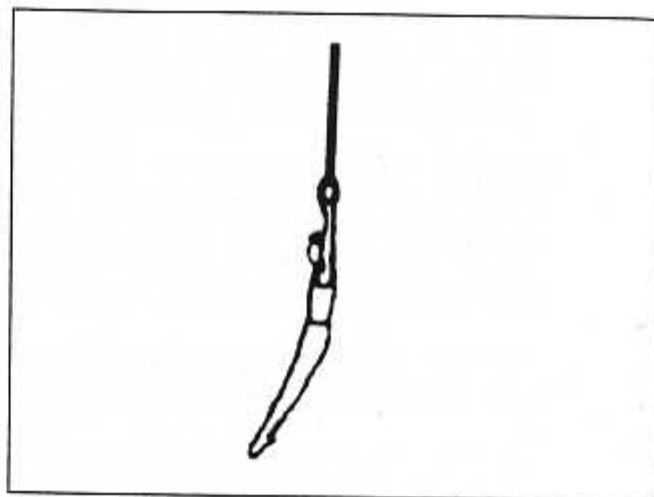


Fig. 6.

Da un punto di vista fisico - per quanto concerne le rotazioni sull'asse longitudinale - il corpo umano, sospeso in tal modo, è isolato. Per verificare l'effettiva funzionalità di questa attrezzatura sono state eseguite - e registrate su videocassetta - alcune esperienze.

- Esperienza n° 1

L'esecutore in sospensione viene posto in rotazione da un assistente: la velocità di rotazione si mantiene costante (per velocità basse e tempi non troppo lunghi).

- Esperienza n° 2

L'esecutore salta verticalmente da terra alla sospensione all'anello: nella fase di sospensione non si registra alcuna rotazione.

- Esperienza n° 3

L'esecutore salta verticalmente da terra alla sospensione, compiendo una torsione del busto sulle gambe durante la fase di stacco: nella fase di sospensione si registra una rotazione di verso opposto. La velocità di rotazione è costante.

- Esperienza n° 4

L'esecutore viene posto in sospensione fermo: l'esecutore ruota il busto rispetto alle gambe. Non si generano avvitamanti.

- Esperienza n° 5

L'esecutore in sospensione viene posto in rotazione da un assistente: viene modulata la velocità di rotazione divaricando in modo più o meno accentuato gli arti inferiori. Ritornando alla posizione iniziale, la velocità angolare torna al valore iniziale.

- Esperienza n° 6

L'esecutore viene posto in sospensione fermo: vengono eseguiti gli avvitamanti utilizzando la

incolumità fisica, invece, sarebbe del tutto risolvibile.

⁸Per le caratteristiche fisiche dei movimenti e/o per le situazioni "scatenanti".

tecnica descritta al paragrafo 1.4. La rotazione inizia e termina simultaneamente alle azioni dell'esecutore (la qual cosa può essere evidenziata richiedendo la sincronizzazione su segnali intervalati in modo casuale).

• Esperienza n° 7

L'esecutore in sospensione viene posto in rotazione da un assistente: viene aumentata la velocità di rotazione senza modificare il momento di inerzia di nessuna parte del corpo. Al cessare dei movimenti dell'esecutore, la velocità angolare riprende il valore iniziale.

• Esperienza n° 8

L'esecutore in sospensione viene posto in rotazione da un assistente: viene diminuita la velocità di rotazione senza modificare il momento di inerzia di nessuna parte del corpo. Al cessare dei movimenti dell'esecutore, la velocità angolare riprende il valore iniziale.

• Esperienza n° 9

Come precedente: il verso della rotazione viene invertito. Al cessare dei movimenti dell'esecutore, la velocità angolare riprende il valore ed il verso iniziale.

• Esperienza n° 10

Come precedente: la rotazione longitudinale del corpo viene annullata. Al cessare dei movimenti dell'esecutore, la velocità angolare riprende il valore iniziale.

• Esperienza n° 11

L'esecutore viene posto in sospensione fermo: divaricando le gambe sagittalmente e ricongiungendole dopo aver descritto due semicerchi (di verso opposto), il corpo si trova ruotato di un certo angolo.

Delle situazioni proposte nelle diverse esperienze, il significato è il seguente:

n° 1 - viene verificato che l'attrito del giunto e quello esercitato dall'aria sono trascurabili e che non vi sono altri momenti di forza in direzione verticale agenti sul sistema: il momento della quantità di moto si conserva.

n° 2 - se nell'interazione con un vincolo non vengono generate delle coppie torcenti, nell'eventuale successiva fase di volo il momento angolare è nullo.

n° 3 - se nell'interazione con un vincolo vengono generate delle coppie torcenti (per esempio con la semplice torsione del busto sulle gambe) nell'eventuale successiva fase di volo il momento angolare non è nullo.

n° 4 - in un sistema isolato la semplice torsione di una parte del corpo non produce avvitamamenti ma solo una torsione in senso opposto della rimanente parte del corpo.

n° 5 - è l'analogo, in sospensione, degli esempi della sedia o del pattinatore. Le variazioni di velocità angolare che possono essere ottenute sono molto evidenti (le gambe hanno una massa maggiore delle braccia ma soprattutto sono più lunghe).

n° 6 - è la dimostrazione pratica che è possibile compiere avvitamamenti con momento angolare nullo (cat twists).

n° 7,8,9,10 - sono tutte varianti della prova n° 6. Rispetto a quest'ultima cambia, fondamentalmente, la condizione di partenza: l'esecutore non è fermo, ma ruota con una certa velocità angolare. L'avvitamento a momento angolare nullo si "sovrappone" - restando indipendente - a quello impartito dall'assistente (o generato con l'interazione di un vincolo, come nella esperienza n° 3). Le velocità angolari delle due rotazioni si sommano o si sottraggono a seconda dei loro versi.

n° 11 - viene visualizzata un'altra possibile procedura per compiere rotazioni - in questo caso frazioni di giro - con momento angolare nullo.

La seconda possibilità di indagine - l'analisi di riflessi con particolari caratteristiche - è stata sviluppata in due ambiti: quello degli squilibri alla trave e quello dei riflessi nei neonati. La trave è un attrezzo olimpico della ginnastica artistica femminile. Si tratta di una "passerella" lunga 5 m e larga 10 cm, collocata a 1.2 m di altezza da terra. Si presta particolarmente all'osservazione che ci si è proposti per diversi motivi: è disponibile una documentazione filmata imponente e le situazioni di squilibrio sono frequenti. Ma soprattutto vi è un aspetto che rende questo attrezzo probabilmente unico per l'osservazione delle reazioni umane agli squilibri: le atlete hanno paura di cadere. Una caduta compromette infatti irrimediabilmente l'esito agonistico di una competizione, vanificando il duro lavoro di una preparazione sempre lunga e difficile. Negli esercizi alla trave si può agevolmente osservare la completa varietà delle risposte motorie umane ai vari tipi di sbilanciamento. Qui, ne sarà considerata una sola, dopo un'affermazione di carattere generale: sono tutte sequenze automatiche, involontarie, altamente predeterminate⁹. Se la perdita di equilibrio è di un certa entità, si os-

⁹È stato scritto, nelle biografie della grande campionessa romena Nadia Comaneci, che una delle sue molte doti fosse quella di saper "mascherare" i movimenti bruschi e sgraziati che inevitabilmente vengono scatenati da uno squilibrio. Ed in effetti, anche nel suo caso, il gesto

iniziava in maniera involontaria ed "incontrollata" ma prima ancora che fosse concluso il suo decorso normale, veniva "ripreso" e modificato volontariamente, per essere tradotto in una movenza graziosa e, spesso, accattivante.

