

# Biomeccanica

La biomeccanica si occupa dello studio delle condizioni di equilibrio delle articolazioni del corpo umano. Tali condizioni sono normalmente studiate in condizioni statiche attraverso la tecnica del cosiddetto ‘diagramma a corpo libero’, che rappresenta con opportuni vettori le forze applicate al sistema ponendo attenzione alla loro posizione in funzione della struttura dell’ articolazione stessa (fulcro di leva).

Tecniche analoghe ma più complesse vengono utilizzate nello studio delle articolazioni in movimento.

Nel seguito del capitolo verranno descritte alcune articolazioni del corpo umano, proponendone i corrispondenti diagrammi.

## LE ARTICOLAZIONI DEL CORPO UMANO

### IL GOMITO

I due muscoli più importanti responsabili del movimento del gomito sono il bicipite e il tricipite (Fig. 1). La contrazione del tricipite provoca un'estensione, o apertura, del gomito, mentre la contrazione del bicipite chiude il gomito. Nella nostra analisi del gomito, si prenderà in considerazione solamente l'azione di questi due muscoli, anche se si tratta di una semplificazione, poiché molti altri muscoli svolgono un ruolo nel movimento del gomito: alcuni di questi stabilizzano l’ articolazione a livello della spalla quando il gomito si muove, altri stabilizzano il gomito stesso.

La fig. 2a mostra un peso  $W$  tenuto in mano con il gomito piegato di un angolo pari a  $100^\circ$ . Uno schema semplificato di questa posizione del braccio è mostrato in fig. 2b. Le dimensioni indicate in fig. 2 sono ragionevoli per un braccio umano, ma, ovviamente, variano da persona a persona. Il peso tira il braccio verso il basso. Pertanto, la forza muscolare che agisce sul braccio deve essere diretta verso l'alto. Di conseguenza, il muscolo principale attivo è il bicipite. La posizione del braccio è fissata alla spalla dall'azione dei muscoli della spalla. Calcoliamo, in condizioni di equilibrio, la forza di trazione  $F_m$  esercitata dal muscolo bicipite e la direzione e la grandezza della forza di reazione nel fulcro (a livello dell'articolazione). I calcoli vengono eseguiti considerando la posizione del braccio una leva di III genere, come mostrato in fig. 3. Gli assi  $x$  e  $y$  sono mostrati in fig. 3. La direzione della forza di reazione mostrata è una supposizione. L'esatta risposta sarà fornita dai calcoli.

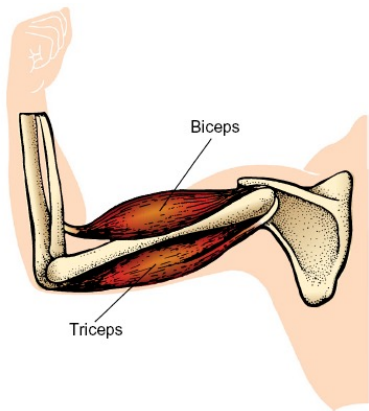


FIGURE 1.11 The elbow.

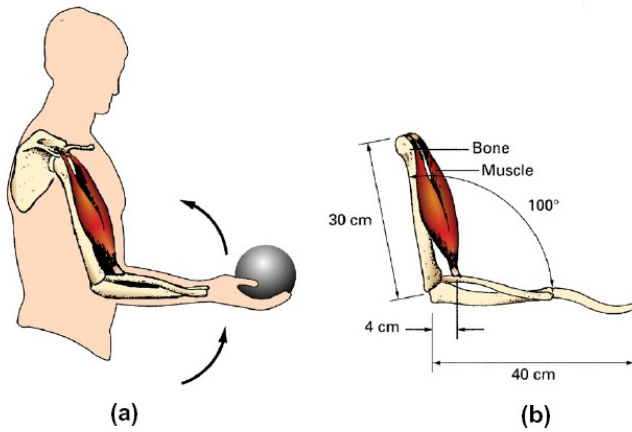


FIGURE 1.12 (a) Weight held in hand. (b) A simplified drawing of (a).

Fig. 1 Il gomito (in figura: muscolo bicipite, muscolo tricipite)

Fig. 2 (a) Un peso tenuto in mano, (b) schema semplificato di (a) (in figura (b): osso, muscolo)

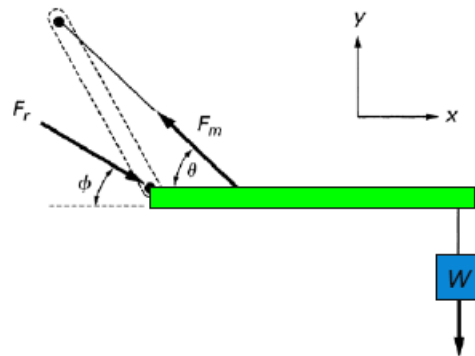


FIGURE 1.13 Lever representation of Fig. 1.12.

Fig. 3 Schema della leva di Fig. 2

In questo problema abbiamo tre incognite: la forza muscolare  $F_m$ , la forza di reazione vincolare applicata dal fulcro  $F_r$  e l'angolo, o direzione,  $\theta$  di questa forza. L'angolo  $q$  relativo alla forza muscolare può essere calcolato da considerazioni trigonometriche, senza ricorrere alle condizioni di equilibrio. Come mostrato nell'Esercizio 1, l'angolo  $q$  è di  $72,6^\circ$ . All'equilibrio, la somma delle componenti  $x$  ed  $y$  delle forze deve essere uguale a zero. Da queste condizioni otteniamo:

**Eq. 1.10**

$$F_m \cos \theta = F_r \cos \phi$$

**Eq. 1.11**

$$F_m \sin \theta = W + F_r \sin \phi$$

Queste due equazioni non sono sufficienti a determinare le tre incognite. L'equazione addizionale necessaria si ottiene considerando il momento prodotto dalle forze in condizioni di equilibrio. In equilibrio, il momento risultante delle forze in fig. 3 deve essere pari a zero.

Ci sono due momenti che agiscono su questo punto: uno in senso orario, dovuto al peso applicato, e uno antiorario, dovuto alla componente verticale  $y$  della forza muscolare. Dal momento che la forza di reazione vincolare  $F_r$  agisce nel fulcro, essa non produce alcun momento in questo punto. Utilizzando le dimensioni indicate in fig. 2, otteniamo:

$$4 \text{ cm} \times F_m \sin q = 40 \text{ cm} \times W$$

Ovvero:

**Eq. 1.12**

$$F_m \sin \theta = 10W$$

Pertanto, con  $q = 72.6^\circ$ , la forza muscolare  $F_m$  è:

**Eq. 1.13**

$$F_m = \frac{10W}{\sin 0.954} = 10.5W$$

Con un peso di 14 kg in mano, la forza esercitata dal muscolo bicipite è:

$$F_m = 10.5 \times 14 \times 9.8 = 1440 \text{ N}$$

Se assumiamo che il diametro del bicipite sia 8 cm e che il muscolo produca una forza di  $7 \times 10^6$  dyne per ogni centimetro quadrato di sezione, il braccio è in grado di supportare un massimo di 334 N nella posizione mostrata in fig. 3 (Esercizio 2). La soluzione delle eq. 1.10 e 1.11 fornisce la grandezza e la direzione della forza di reazione vincolare  $F_r$ . Assumendo come prima che il peso  $W$  supportato sia pari a 14 kg, queste equazioni diventano:

**Eq. 1.14**

$$1440 \times \cos 72.6 = F_r \cos \phi$$

$$1440 \times \sin 72.6 = 14 \times 9.8 + F_r \sin \phi$$

ovvero:

**Eq. 1.15**

$$F_r \cos \phi = 430 \text{ N}$$

$$F_r \sin \phi = 1240 \text{ N}$$

Elevando al quadrato entrambe le equazioni, utilizzando la relazione:  $\cos^2 \phi + \sin^2 \phi = 1$  e sommandole, otteniamo:

$$F_r^2 = 1.74 \times 10^6 \text{ N}^2$$

Ovvero:

**Eq. 1.16**

$$F_r = 1320 \text{ N} (8298 \text{ lb})$$

Dalle eq. 1.14 e 1.15, la cotangente dell'angolo è:

**Eq. 1.17**

$$\cot \phi = \frac{430}{1240} = 0.347$$

e:

$$\phi = 70.9^\circ$$

Gli esercizi 3, 4 e 5 presentano altri aspetti simili riguardo la biomeccanica dei bicipiti.

In questi calcoli abbiamo ommesso il peso del braccio stesso, ma questo effetto è considerato nell' Esercizio 6. Le forze prodotte dal muscolo tricipite sono analizzate nell' Esercizio 7.

I nostri calcoli mostrano che le forze esercitate sull' articolazione e dal muscolo sono grandi. Infatti, la forza esercitata dal muscolo è molto maggiore del peso che si tiene in mano. Questa considerazione è valida per quasi tutti i muscoli scheletrici del corpo che applicano forze di leva che hanno un vantaggio meccanico minore di uno. Come accennato in precedenza, questa disposizione fornisce una maggiore velocità a livello degli arti. Una piccola variazione di lunghezza del muscolo produce un maggiore spostamento delle estremità degli arti (Esercizio 8). Sembra che la natura preferisca la velocità alla forza. Infatti, le velocità consentite per le estremità degli arti sono notevoli. Un lanciatore esperto può scagliare una palla da baseball ad una velocità di oltre 160 km/h. Naturalmente, questa è anche la velocità della mano nel punto in cui si lascia la palla.

## L'ANCA

La Fig. 4 mostra l' articolazione dell'anca (o coxo-femorale) e la sua rappresentazione semplificata come leva, con dimensioni tipiche per un corpo maschile. L'anca è stabilizzata da un gruppo di muscoli, rappresentato in fig. 1.14b come un'unica forza risultante  $F_m$ .

Quando una persona si alza, l'angolo di questa forza è di circa  $71^\circ$  rispetto al piano di appoggio orizzontale. WL rappresenta il peso combinato di gamba, piede e coscia. Tipicamente, questo peso è una frazione (0,185) della forza peso corporeo W (cioè,  $WL = 0,185 W$ ). Il peso WL si presume agisca verticalmente verso il basso nel punto centrale dell'arto.

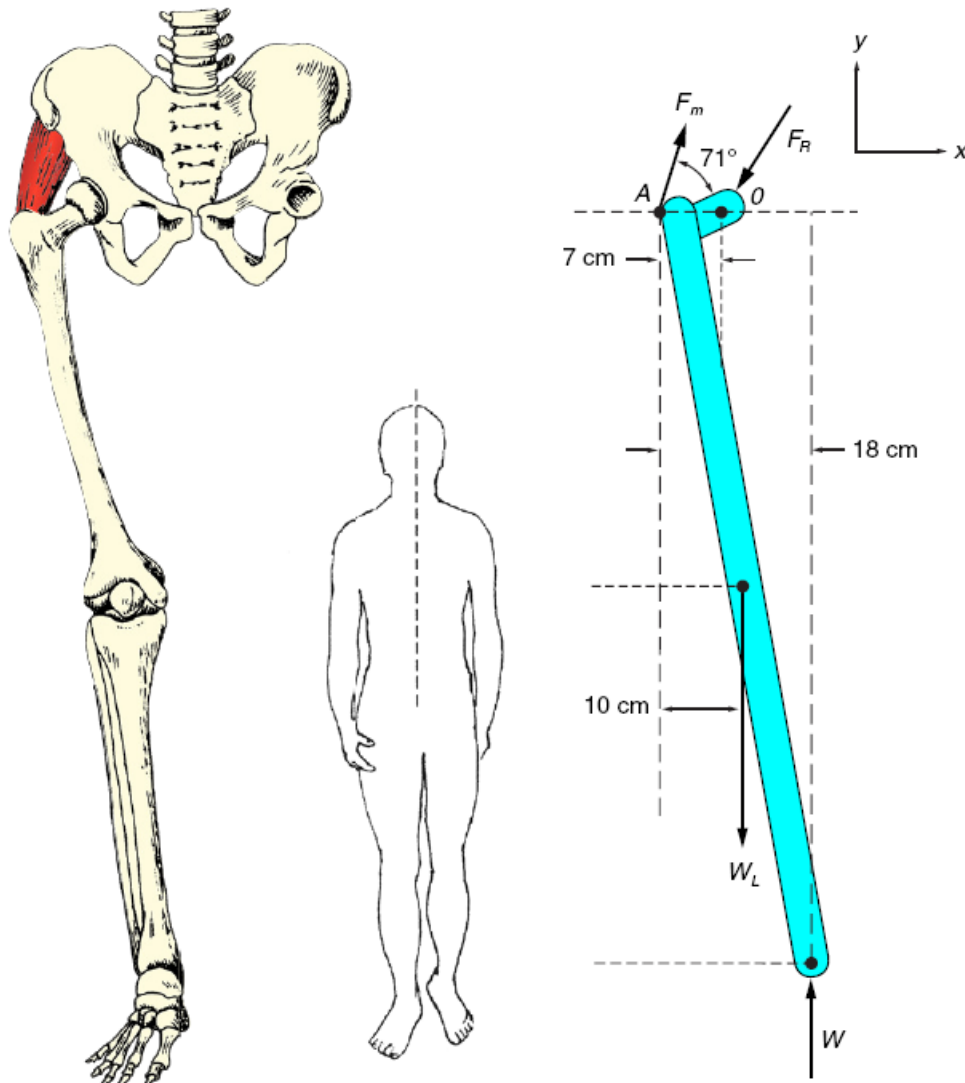


FIGURE 1.14 (a) The hip. (b) Its lever representation.

fig. 4 (a) l'anca. (b) rappresentazione come leva

Calcoliamo ora la grandezza della forza muscolare  $F_m$  e della forza vincolare  $F_r$  che agiscono a livello dell'articolazione dell'anca quando la persona è in posizione eretta su un piede come durante una passeggiata lenta e come mostrato in fig. 4. La forza  $W$  che agisce sul fondo della leva è la forza di reazione del terreno sul piede della persona. Questa è la forza che sostiene il peso del corpo. Dalle condizioni di equilibrio otteniamo:

Eq. 1.18

$$F_m \cos 71^\circ - F_R \cos \theta = 0$$

$x = \text{componenti della forza} = 0$

Eq. 1.19

$$F_m \sin 71^\circ + W - W_L - F_R \sin \theta = 0$$

$x = \text{componenti della forza} = 0$

**Eq. 1.20**

$$(F_R \sin \theta) \times 7 \text{ cm} + W_L \times 10 \text{ cm} - W \times 18 \text{ cm} = 0 \text{ (coopia su punto A = 0)}$$

Poichè  $W_L = 0,185 W$ , dall' Eq. 1.20 abbiamo:

$$F_R \sin q = 2.31 W$$

Utilizzando il risultato nell' Eq. 1.19, otteniamo:

**Eq. 1.21**

Dall'eq. 1.18, otteniamo:

$$F_R \cos q = 1.59 W \cos 71^\circ = 0.52 W$$

Pertanto:

$$q = \tan^{-1} 4.44 = 77.3^\circ$$

e:

**Eq. 1.22**

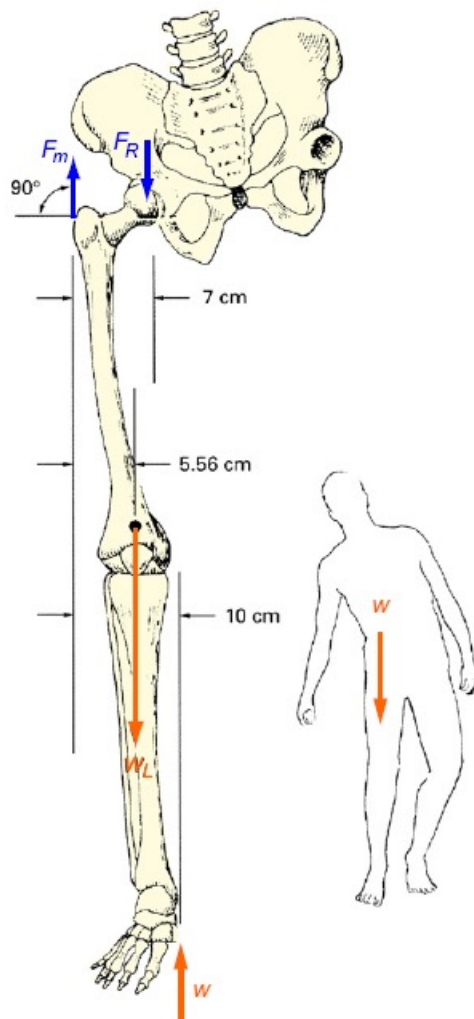
$$F_R = 2.37 W$$

Questo calcolo mostra che la forza che agisce sull' articolazione dell'anca è pari a quasi due volte e mezzo il peso della persona. Si consideri, ad esempio, una persona la cui massa è di 70 kg e il cui peso è  $9,8 \times 70 = 686 \text{ N}$ . La forza sull'articolazione dell'anca è pari a 1625 N.

## **LA ZOPPIA**

Le persone per le quali l'articolazione dell' anca non funziona correttamente zoppicano appoggiandosi verso la parte lesa (Fig. 5). Come risultato, il centro di gravità del corpo si sposta in una posizione più asimmetrica al di sopra dell'anca, diminuendo la forza peso dal lato della zona lesa. I calcoli per il caso di Fig. 5 mostrano che la forza muscolare  $F_m$  è  $0.47 W$  e che la forza vincolare esercitata dall'anca è  $1,28 W$  (Esercizio 10). Questo rappresenta una riduzione significativa delle

forze applicate a livello dell'articolazione rispetto a una normale posizione della gamba.



**FIGURE 1.15** Walking on an injured hip.

Fig. 5 schema corporeo di deambulazione con zoppia

## LA COLONNA VERTEBRALE

La colonna vertebrale è costituita da un insieme pressoché continuo di vertebre, che si comportano come articolazioni distinte.

Quando il tronco è piegato in avanti, la colonna vertebrale ruota principalmente sulla quinta vertebra lombare (Fig. 6a). Analizzeremo le forze in gioco quando il tronco è piegato a  $60^\circ$  rispetto alla verticale con le braccia lungo il corpo. Il modello semplificato di leva che rappresenta la situazione è mostrato in fig. 6. Il punto di perno A è la quinta vertebra lombare. Il braccio di leva AB rappresenta la schiena. Il peso del tronco  $W_1$  è distribuito uniformemente lungo la schiena; il suo effetto può essere rappresentato da un peso sospeso nel mezzo. Il peso di testa e braccia è rappresentato da  $W_2$  ed è sospeso alla fine del braccio di leva.

Il muscolo elevatore spinale, indicato come il collegamento DC inserito in un punto ai due terzi superiori della colonna, mantiene la posizione della schiena. L'angolo tra



la colonna vertebrale e questo muscolo è di circa  $12^\circ$ . Per un uomo di 70 kg,  $W_1$  e  $W_2$  sono tipicamente 320 N e 160 N, rispettivamente.

La soluzione del problema è lasciata come esercizio. Essa mostra che solo per sostenere il peso corporeo, il muscolo deve esercitare una forza di 2000 N e la forza compressiva sulla quinta vertebra lombare è di 2230 N. Se, inoltre, la persona tiene un peso di 20 kg in mano, la forza esercitata del muscolo è di 3220 N e la compressione sulla vertebra di 3490 N (Es 10). Questo esempio indica che le forze che vengono esercitate a livello della quinta vertebra lombare sono molto intense. Non è sorprendente quindi che la lombalgia origini più frequentemente in questo punto. È anche evidente che la posizione mostrata in figura non è il modo raccomandato per sollevare un peso.

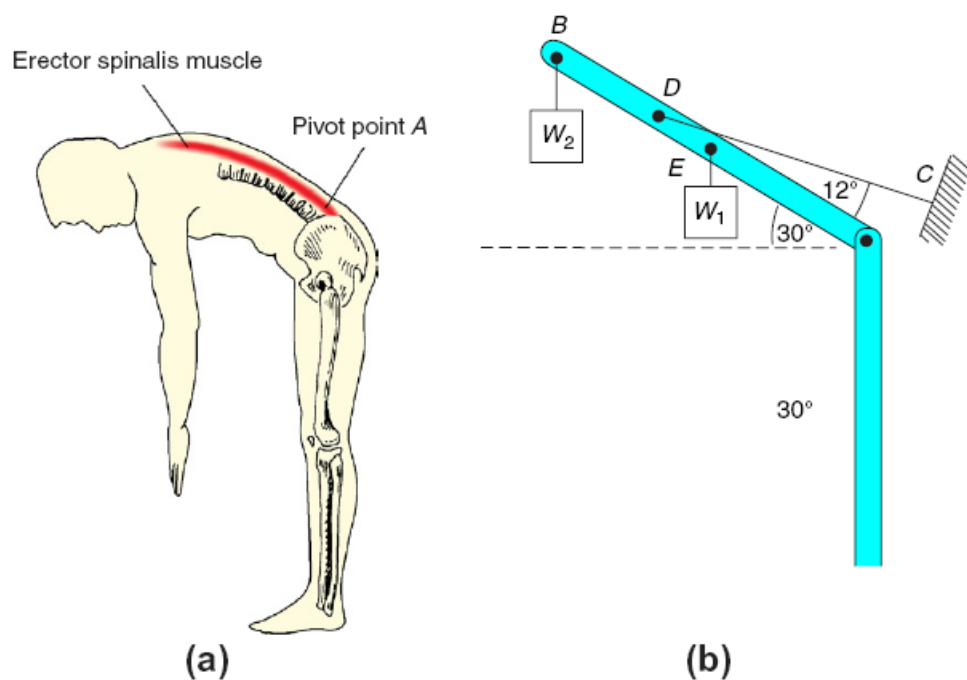
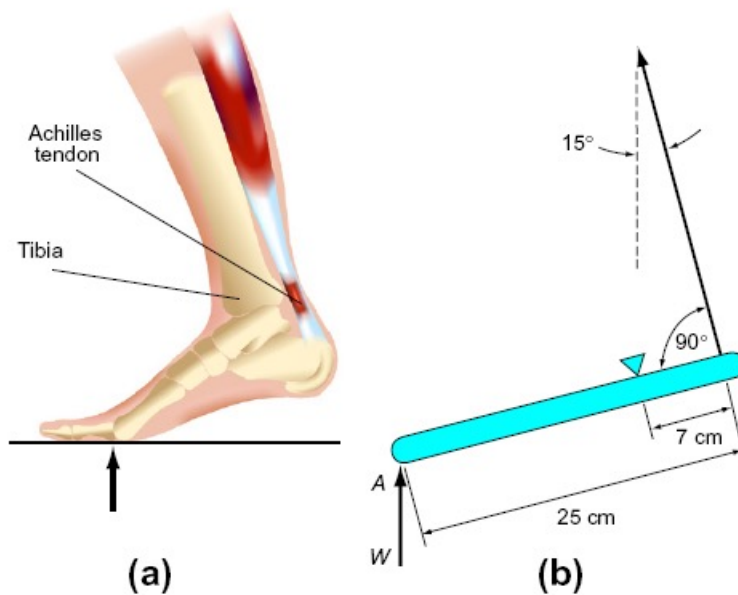


FIGURE 1.16 (a) The bent back. (b) Lever representation.

Fig. 6 (a) schiena in flessione . (b) rappresentazione come leva (in figura (a): muscolo spinale, Punto di perno A)

## STATICA DELLA POSIZIONE IN PUNTA DI PIEDI

La posizione del piede quando ci si trova in punta di piedi è mostrata in fig. 7. Il peso totale della persona è sostenuto dalla forza di reazione nel punto A. Questa è una leva di I genere con il fulcro nel punto di articolazione con la tibia. La forza di bilanciamento è fornita dal muscolo collegato al tallone dal tendine di Achille. Dimensioni ed angoli mostrati in fig. 7 sono valori ragionevoli per questa situazione. I calcoli mostrano che, stando in punta di piedi su un piede, la forza di compressione sulla tibia è di  $3,5 W$  e la forza di tensione sul tendine di Achille è  $2,5 \times W$  (Esercizio 1.11). La posizione in punta di piedi è, infatti, una posizione abbastanza faticosa.



**FIGURE 1.17** (a) Standing on tip-toe. (b) Lever model.

Fig. 7 (a) statica della posizione in punta di piedi. (b) rappresentazione come leva (in Fig. (a): tendine di Achille, tibia)

## ASPETTI DINAMICI DELLA POSTURA

Nella nostra trattazione del corpo umano, si è ipotizzato che le forze esercitate dai muscoli scheletrici siano di tipo statico, cioè, costanti nel tempo. Tuttavia, il corpo umano (e di tutti gli animali) è un sistema dinamico che risponde con continuità agli stimoli generati dal corpo stesso e dall'ambiente esterno. Poiché il centro di gravità in posizione eretta si trova circa a metà altezza dell'individuo al di sopra delle piante dei piedi, anche un leggero spostamento del tronco tende a rovesciare il corpo. Come è stato dimostrato sperimentalmente, la semplice azione di mantenere la stazione eretta richiede al corpo un continuo movimento ondulatorio di bilanciamento avanti e indietro, a sinistra e a destra, al fine di mantenere l'equilibrio, ovvero il centro di gravità al di sopra della base di supporto. In un tipico esperimento progettato per studiare questo aspetto della postura, la persona è invitata a stare in piedi, a piedi uniti, il più fermo possibile, su una piattaforma che registra le forze applicate dalle piante dei piedi (centro di pressione). Per compensare lo spostamento del centro di gravità, si osserva che la posizione di questo centro di pressione è continuamente spostata anche di parecchi centimetri sulla zona di appoggio delle piante dei piedi in una scala di tempo di circa mezzo secondo. Piccole perturbazioni anteriori e posteriori del centro di massa (spostamenti inferiori a 1,5 cm) sono compensati dai movimenti della caviglia. Movimenti dell'anca sono invece necessari per compensare spostamenti più grandi e oscillazioni verso destra e sinistra.

Il mantenimento dell' equilibrio nell'azione di camminare richiede una ancora più complessa serie di movimenti di compensazione, poichè il centro di gravità si sposta da un piede all'altro. Mantenere il corpo in posizione verticale è un compito molto complesso per il sistema nervoso. Le prestazioni richieste per mantenere questa posizione sono ancora più notevoli quando accidentalmente si scivola e il centro di gravità è momentaneamente spostato dalla base di appoggio. Senza movimenti di compensazione, un corpo umano in posizione eretta che perda il suo equilibrio cadrà sul pavimento in circa 1 sec. Durante questo breve intervallo di tempo, l'intero sistema muscolare è chiamato in causa dal "riflesso di raddrizzamento" per mobilitare le varie parti del corpo in movimento in modo da spostare il baricentro rispetto alla base di appoggio. Il corpo può eseguire incredibili contorsioni nel processo di ripristino dell'equilibrio.

Il sistema nervoso ottiene le informazioni necessarie per mantenere l'equilibrio principalmente da tre canali: la vista, il sistema vestibolare situato nell'orecchio interno che controlla il movimento e la posizione della testa, e il sistema somatosensoriale che rileva la posizione e l'orientamento delle varie parti il corpo. Con l'età, diminuisce l'efficienza delle funzioni richieste per mantenere una persona in posizione eretta, e si osserva un numero crescente di infortuni dovuti a cadute. Negli Stati Uniti, il numero di morti per cadute accidentali di persone di età superiore a 80 anni è di circa 60 volte superiore rispetto alle persone di età inferiore a 70 anni.

Un altro aspetto della dinamica del corpo umano è l'interconnessione del sistema muscolo-scheletrico. Tutti i muscoli e le ossa sono collegati tra loro in un network complesso, e un cambiamento nella tensione muscolare o nella posizione di un arto in una parte del corpo devono essere accompagnate da una modifica di compensazione altrove. Il sistema può essere visualizzato come una complessa tensostruttura. Le ossa agiscono come i pali ed i muscoli come le corde portando il corpo in equilibrio nella posizione desiderata. Il corretto funzionamento di questo tipo di struttura richiede che le forze siano opportunamente distribuite su tutte le ossa e i muscoli. Ad esempio, una tensione eccessiva dei grandi muscoli nella parte anteriore degli arti inferiori tenderà a tirare il busto in avanti. Per compensare questa trazione in avanti, i muscoli della schiena devono contrarsi, spesso esercitando una forza eccessiva sulle più delicate strutture della parte bassa della schiena. In questo modo, la tensione in eccesso in un insieme di muscoli può riflettersi in un dolore evocato in una parte completamente diversa del corpo.

## **ESERCIZI**

1. Usando la trigonometria, calcolare l'angolo  $q$  come mostrato in fig. 3. Le dimensioni sono specificate nella fig. 2b.

2. Utilizzando i dati forniti nel testo, calcolare il peso massimo che il braccio può supportare nella posizione mostrata in fig. 2.
3. Calcolare la forza applicata dal bicipite e la forza di reazione ( $F_r$ ) in prossimità dell'articolazione con un peso di 14 kg tenuto in mano quando il gomito è a (A)  $160^\circ$  e (b)  $60^\circ$ . Le dimensioni sono come in fig. 2. Si supponga che la parte superiore del braccio rimanga fissa come nella fig. 2 e si utilizzino i calcoli dell'Esercizio 1. Si noti che in queste condizioni la parte inferiore del braccio non è più orizzontale.
4. Consideriamo ancora la fig. 2. Ora il peso di 14 kg è appeso alla metà del braccio (20 cm dal fulcro). Calcolare la forza del bicipite e la forza di reazione in corrispondenza dell'articolazione.
5. Si consideri la situazione in cui il braccio di Fig. 3 supporti due pesi, uno tenuto nella mano come in fig. 3 e l'altro sostenuto al centro del braccio come nell'Esercizio 1.4. (A) Calcolare la forza del muscolo bicipite e la forza di reazione. (B) Le forze calcolate nella parte (a) sono uguali alla somma delle forze prodotte quando i pesi sono sospesi individualmente?
6. Calcolare forze aggiuntive a causa del peso del braccio stesso in Fig. 3. Si supponga che la parte inferiore del braccio abbia una massa di 2 kg e che il suo peso totale possa essere considerato agire a metà del braccio, come nell'Esercizio 4.
7. Stimare le dimensioni del proprio braccio, e disegnare un modello di leva per rappresentare l'estensione del gomito da parte del tricipite. Calcolare la forza del tricipite in un braccio sollevato in una posizione di presa con un angolo al gomito di  $100^\circ$ .
8. Supponiamo che il bicipite in fig. 3 si contragga di due centimetri. Qual è lo spostamento del peso verso l'alto? Supponiamo che la contrazione muscolare sia uniforme nel tempo e si verifichi in un intervallo di 0,5 sec. Calcolare la velocità del punto di attacco del tendine all'osso e la velocità del peso. Confrontare il rapporto delle velocità con il vantaggio meccanico.
9. Calcolare le forze nella situazione di zoppia mostrata nella fig. 5. A che valore dell'angolo agisce la forza  $F_R$ ?
- 10 (a) Calcolare la forza esercitata dal muscolo e la forza di compressione sulla quinta vertebra lombare in Fig. 6. Utilizzare le informazioni fornite nel il testo. (b) ripetere i calcoli in (a) per il caso in cui la persona illustrata in Fig. 6 tenga un peso di 20 kg in mano.
- 11 Calcolare la forza nel punto di articolazione con la tibia e sul tendine di Achille come in Fig. 7