



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**METODI DI VALUTAZIONE DELLA PROPRIOCEZIONE E
DELLA POSTURA IN ANALISI DEL MOVIMENTO**

Docente relatore: Alessandra Bertoldo, PhD

Correlatore: Zimi Sawacha, PhD

Laureanda: Daniela Prisciandaro

Corso di Laurea in Bioingegneria

Anno Accademico 2011/2012

Indice

Sommario	1
CAPITOLO 1 - Propriocezione	3
1.1 INTRODUZIONE.....	3
1.2 FISILOGIA DELLA PROPRIOCEZIONE [1]	4
1.3 METODI DI MISURA DELLA PROPRIOCEZIONE [6], [11], [20]	10
1.4 ANALISI DEL CAMMINO	16
1.4 ANALISI DELLA POSTURA	21
CAPITOLO 2 - Materiali e metodi	26
CAPITOLO 3 - La propriocezione nell'analisi del movimento e nella postura	31
3.1 PROPRIOCEZIONE E CAMMINO	32
3.1.1 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti con ictus [21],[10]	32
3.1.2 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti affetti da morbo di Parkinson [13], [5]	36
3.1.3 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti con osteoartrite [11], [14], [18], [2]40	
3.1.4 Variazioni dei parametri cinematici e dinamici in seguito a manipolazioni esterne [15], [3], [4]	50
3.1.5 L'uso di esercizi propriocettivi in soggetti con lesione al legamento crociato anteriore [7].....	54
3.2 PROPRIOCEZIONE E POSTURA.....	58
3.2.1 Il ruolo delle informazioni somatosensoriali nel controllo della postura [9]	58
3.2.2 Correlazione tra propriocezione ed equilibrio dinamico in pazienti con lesioni al legamento crociato anteriore [12]	61
3.2.3 Propriocezione e postura in pazienti con il morbo di Parkinson [17], [19], [16].....	63
CAPITOLO 4 - Conclusioni	69
BIBLIOGRAFIA	73
SITOLOGIA	75

Sommario

La propiocezione rappresenta la capacità del sistema nervoso centrale di percepire la posizione e il movimento nello spazio del corpo e delle sue parti, ed è importantissima sia per un meccanismo di controllo sulla corretta esecuzione del movimento, sia per un meccanismo di eventuale correzione nel caso in cui imprevedibili fenomeni esterni vengano a turbare i progetti motori strategicamente programmati. La propiocezione assume quindi un'importanza fondamentale nel complesso sistema dell'equilibrio e del movimento. Molteplici malattie e traumi possono compromettere il sistema propriocettivo e di conseguenza le risposte motorie potrebbero non essere più adeguate.

Lo scopo della tesi è ricercare nella letteratura scientifica le tecniche di valutazione della propiocezione e la relazione tra questa, il cammino e la postura dal punto di vista biomeccanico. Sono stati consultati vari database (PubMed, Science Direct, Google e Google Scholar) usando le seguenti parole chiave in diverse combinazioni: proprioception, proprioceptive, gait, posture. Gli articoli trovati sono stati valutati criticamente per selezionare quelli inerenti propriamente il lavoro di tesi. La propiocezione è stata valutata in soggetti normali, colpiti da ictus, con sindrome di Parkinson, con neuropatia diabetica, con osteoartrite e in soggetti che hanno subito una lesione del legamento crociato anteriore, in varie condizioni o a seguito di condizionamenti esterni.

L'analisi critica degli studi esaminati ha messo in evidenza che, a seconda della zona cerebrale colpita da una malattia che lede il sistema nervoso, la propiocezione può risultare o meno compromessa e non sempre i disturbi del cammino e della postura sono causati da deficit propriocettivi. Al contrario, traumi o lesioni ai propriocettori sono sempre associati casi d'instabilità e difficoltà motoria. In questi casi tuttavia la propiocezione risulta essere un fattore modificabile la cui efficacia può essere stimolata tramite esercizi mirati o stimolazioni esterne. Diversi metodi di valutazione della propiocezione sono stati utilizzati; non esiste tuttavia una tecnica di misurazione standard che descrive l'abilità funzionale generale.

La tesi è organizzata in quattro capitoli:

1. Capitolo 1: fisiologia della propriocezione, metodi di misura della propriocezione, analisi del cammino e analisi della postura;
2. Capitolo 2: materiali e metodi;
3. Capitolo 3: risultati, la propriocezione nell'analisi del cammino e nella postura;
4. Capitolo 4: conclusioni.

Capitolo 1

Propriocezione

1.1 Introduzione

Con il termine propriocezione si è soliti descrivere l'insieme delle informazioni sensoriali che permettono al corpo di riconoscere la posizione di sé e delle sue parti nello spazio in rapporto al mondo esterno, e il loro movimento. La propriocezione assume un'importanza fondamentale nel complesso meccanismo di controllo del movimento e della postura.

Il termine fu coniato da Sherrington nel 1906 da "receptus" (atto del ricevere) e "propius" (da se stesso) per definire il senso di percezione della posizione del corpo. Il concetto di propriocezione si è tuttavia sviluppato e modificato nel tempo; attraverso una lunga serie di studi atti a comprendere i meccanismi neurali sottostanti, si è individuato che la maggior parte delle informazioni propriocettive non raggiunge mai il livello di coscienza, essendo esse anche deputate al controllo dell'elaborazione del progetto motorio e alla sua esecuzione. Oggi, infatti, si tende a distinguere una componente cosciente della propriocezione e un'incosciente. Le informazioni provenienti dalla propriocezione cosciente sono trasmesse attraverso la colonna dorsale, e in parte attraverso il tratto spino-cervicale, e sono utilizzate per facilitare le attività motorie più complesse. La propriocezione incosciente invece è importante nella coordinazione delle attività motorie più semplici e nel mantenimento della postura eretta e seduta.

Nonostante il cammino e la postura possano essere normali, persone che inciampano facilmente possono manifestare una lesione al sistema della propriocezione cosciente. Le alterazioni della propriocezione incosciente determinano invece sul piano clinico i sintomi dell'ataxia o deficit posturali.

La propriocezione si basa su due tipi di sensazione: la sensazione articolare, ossia l'individuazione cosciente dell'orientamento e della posizione delle differenti parti del corpo, e il movimento articolare o cinestesia, ossia il riconoscimento cosciente dei loro movimenti.

1.2 Fisiologia della propriocezione [1]

Alla base della propriocezione vi è un complesso sistema sensoriale. I principali componenti di questo sistema sono i recettori periferici posizionati nelle articolazioni e nei tessuti circostanti, chiamati propriocettori, e le molteplici vie nervose, che trasportano i segnali propriocettivi al sistema nervoso centrale, dalla corda spinale fino alla corteccia cerebrale.

I propriocettori forniscono informazioni sui movimenti propri dell'organismo, ossia segnalano, istante per istante, i movimenti che l'organismo stesso sta compiendo. Tali informazioni specificano in tempo reale i parametri biomeccanici del movimento, quali velocità, forza, direzione, accelerazione, e i parametri fisiologici riguardanti i cambiamenti biologici dei muscoli, dei tendini e delle articolazioni in relazione al movimento effettuato. Sulla base di queste informazioni il cervello forma un'immagine della posizione del corpo e delle sue parti ed è in grado di correggere o modificare il movimento in corso.

L'unità sensoriale è composta da una fibra nervosa e dalla sua famiglia di terminazioni. Il territorio da cui un'unità sensoriale può essere eccitato è il suo campo recettivo. Le informazioni sensoriali provengono da diversi tipi di recettori, che includono sia estese terminazioni sensoriali, sia specifici recettori, sia i fusi muscolari, e il senso di posizione è percepito in seguito a disturbi meccanici delle articolazioni e dei tessuti circostanti.

Distinguiamo i propriocettori in base alla loro posizione. I recettori cutanei sono fondamentali a livello di propriocezione incosciente, e sono:

- I corpuscoli di Meissner: è un meccanorecettore che rileva e trasmette gli stimoli meccanici. Sono numerosi nei polpastrelli e rispondono ai delicati stimoli tattili. La stimolazione delle fibre provenienti dai corpuscoli di Meissner dà una

sensazione di vibrazione localizzata, strettamente aderente alla durata e alla frequenza dello stimolo.

- I corpuscoli di Pacini: questi recettori sottocutanei si trovano vicino al periostio e lungo i lati delle dita, nonché nel palmo, e sono facilmente riconoscibili dalla loro capsula, che circonda una fibra nervosa centrale. Sono meccano-recettori ad adattamento rapido, particolarmente sensibili alle vibrazioni e sono stimolati da movimenti molto precisi e rapidi. Essi rilevano la velocità del movimento.
- Terminazioni di Ruffini: queste terminazioni nervose incapsulate si trovano nella pelle, glabra e non, rispondono allo sforzo di taglio e sono recettori ad adattamento lento. Delle terminazioni di Ruffini, le più abbondanti sono quelle multi-ramificate e incapsulate e sono importanti per segnalare i limiti per il movimento dell'articolazione. I corpuscoli di Pacini e le terminazioni di Ruffini sono i principali recettori per la cinestesia.
- I dischi di Merkel: sono recettori ad adattamento lento che scaricano continuamente in risposta alla pressione sostenuta.
- Terminazioni nervose libere: si diramano in una rete sotto epidermica e si trovano in tutta la massa dei legamenti e nel rivestimento sinoviale. Alcune unità sensoriali sono termocettori ma ci sono anche due tipi di nocicettori per la trasmissione del dolore. Questi recettori trasmettono informazioni sia riguardanti la posizione articolare sia il suo movimento.
- Terminazioni nervose follicolari: si trovano appena sotto il livello della ghiandola sebacea.

I recettori dei muscoli scheletrici principali invece sono:

- I fusi neuromuscolari: si trovano nel muscolo scheletrico e sono più abbondanti verso il punto di congiunzione tra il tendine e il muscolo. Ci sono due tipi d'innervazione sensoriale dei fusi muscolari: terminazioni anulo-spirali e terminazioni a fiorame. Lo stiramento di queste fibre provoca la stimolazione di entrambe i tipi di terminazioni.
- Gli organi tendinei del Golgi: si trovano nei tendini e nei pressi delle giunzioni dei tendini con il muscolo e forniscono informazioni riguardanti la tensione.

La posizione statica degli arti è in gran parte rilevata da questi ultimi due tipi di recettori. I fusi e gli organi del Golgi sono recettori sensibili allo stato di allungamento del muscolo. Sono utili nel definire i parametri per il sistema propriocettivo incosciente o per le risposte riflesse e svolgono un ruolo importante sia nella propriocezione sia nei meccanismi di controllo motorio.

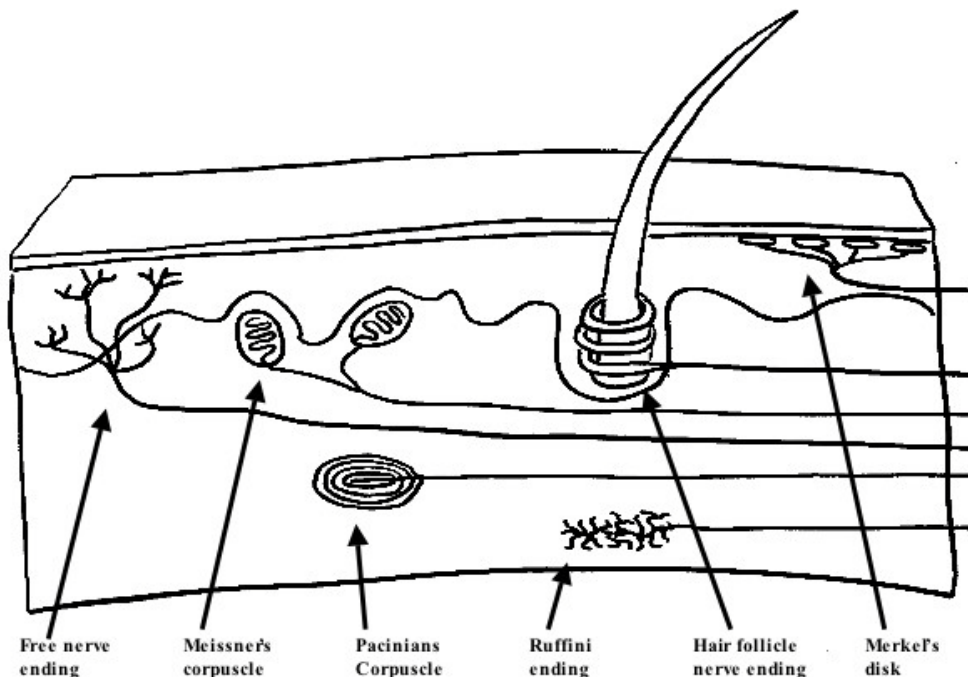


Figura 1: Principali recettori cutanei [1]

Il sistema nervoso è in grado di estrarre le diverse informazioni sensoriali e codificarle separatamente, ed è anche in grado di controllare ogni specifico aspetto del comportamento motorio utilizzando diversi gruppi di neuroni. Le informazioni ottenute dai meccanorecettori sono portate a diversi tratti della colonna spinale. La molteplicità di tratti dona al sistema nervoso con un certo grado di ridondanza e così, con la distruzione parziale del tessuto nervoso, solo alcune funzioni verranno perse.

Vi sono tre sistemi principali in cui vengono elaborati i codici provenienti dalle vie sensitive:

- Un primo sistema, incosciente, deputato al controllo e alla reazione a situazioni pericolose, e controllato in prevalenza dal midollo spinale.

- Un secondo sistema, anch'esso incosciente, deputato al controllo dell'esecuzione dei progetti motori e prevalentemente controllato dal cervelletto. Questo sistema garantisce in tutti i movimenti, la massima precisione e aderenza fra progetto motorio e movimento.
- Un terzo sistema, cosciente, attraverso cui ciascuno di noi controlla la propria immagine corporea. Questo terzo sistema è controllato dalla corteccia cerebrale, che integra in vario modo tutte le informazioni provenienti dalla periferia.

Il sistema nervoso è costruito a simmetria bilaterale. Anche se ci sono eccezioni occasionali al modello d'innervazione incrociata, la maggior parte delle informazioni somatosensoriali provenienti dal lato destro del corpo viene elaborata nella corteccia somatosensoriale nell'emisfero cerebrale sinistro. Analogamente, la corteccia motoria dell'emisfero cerebrale sinistro controlla i movimenti del corpo del lato destro del corpo. Naturalmente c'è un'eccezione alla regola del controllo motorio incrociato: ciascun emisfero cerebellare controlla coordinamento e tono muscolare sul lato ipsilaterale del corpo.

L'esame delle principali vie sensoriali o motori rivela un sistema nervoso altamente organizzato e strutturato. Per esempio, gli assoni sensoriali nel loro percorso ascendente sono disposti in modo che le fibre provenienti da specifiche sedi anatomiche (mano, avambraccio, e così via) mantengano la specifica posizione topografica nella colonna dorsale, nel talamo e nella corteccia sensoriale.

Una via sensoriale può essere descritta come una serie di neuroni. Distinguiamo quindi in neuroni di primo, secondo e terzo ordine. Il neurone di primo ordine è il neurone sensoriale primario poiché la sua estremità periferica costituisce il recettore sensoriale. Questo neurone quindi risponde agli stimoli e trasmette al sistema nervoso centrale le informazioni. Il neurone di secondo ordine si trova nel midollo spinale o nel tronco cerebrale; esso riceve le informazioni provenienti dai neuroni di primo ordine e le trasmette al talamo. Di norma, l'assone dei neuroni di secondo ordine attraversa la linea mediana, per cui l'informazione sensoriale originata in un lato del corpo raggiunge il talamo controlaterale. Il neurone di terzo ordine si trova in uno dei nuclei sensoriali del talamo. Solitamente a questo livello l'informazione può essere elaborata da circuiti

locali, prima di arrivare alla corteccia cerebrale. L'informazione sensoriale è poi ulteriormente elaborata dai neuroni di ordine superiore situati nell'appropriata area di ricezione sensoriale primaria della corteccia cerebrale. In una qualche regione non ancora ben definita della corteccia cerebrale, ha luogo la percezione, cioè il processo attraverso il quale si ha coscienza dell'esistenza dello stimolo.

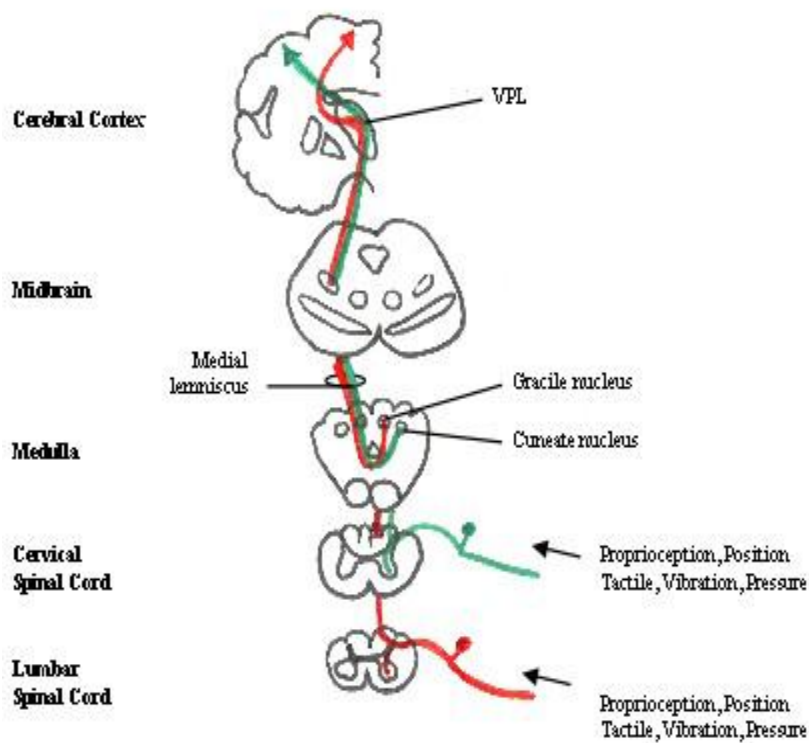


Figura 2: vie somatosensoriali [1].

Per la maggior parte, le informazioni provenienti dalla propriocezione cosciente sono trasmesse dal midollo spinale attraverso la via delle colonne dorsali lemnisco mediale fino alla corteccia cerebrale: i segnali provenienti dai recettori degli arti e del tronco sono portati dai nervi periferici fino al midollo spinale, poi attraverso il fascicolo cuneato e il fascicolo gracile fino al tronco encefalico, dove si dirigono verso la corteccia cerebrale controlaterale. La corteccia percepisce e organizza informazioni precise circa la posizione e l'orientamento degli arti. Nella propriocezione incosciente, le informazioni sensoriali sono trasmesse attraverso i nervi periferici alle vie spinocerebellari fino a

giungere al cervelletto ipsilaterale. Questa è la via del controllo rapido e automatico del movimento. Questa via è divisa inoltre in due parti: una ipsilaterale che entra nel cervelletto attraverso il peduncolo cerebellare inferiore e una controlaterale che entra nel cervelletto attraverso il peduncolo cerebellare superiore.

Il cervello umano ha fondamentalmente due mappe del corpo. Uno è lo schema corporeo, che indica gli orientamenti delle parti del corpo nello spazio e nel tempo. Il secondo è la descrizione strutturale del corpo che codifica la posizione di ogni segmento del corpo. Il senso di posizione di ogni parte del corpo è il risultato di tre ingressi nella corteccia premotoria dorsale:

- le informazioni propriocettive, che inizialmente sono trasmesse alla corteccia somatosensoriale;
- le informazioni visive, che sono dapprima trasmesse alla corteccia occipitale;
- la combinazione degli input provenienti dal sistema vestibolare e delle informazioni tattili dalla corteccia somatosensoriale.

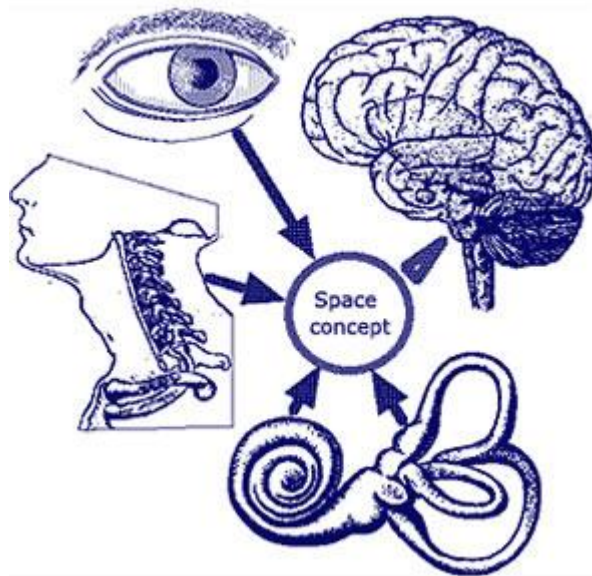


Figura 3: Integrazione delle informazioni propriocettive, visive e vestibolari. [25]

Ogni componente della propriocezione, senso di posizione e cinestesia, può essere clinicamente testato singolarmente e fornire importanti informazioni relative ai specifici

recettori cutanei sensoriali, ai nervi periferici, alle radici dorsali e alle vie somatosensoriali del sistema nervoso centrale.

1.3 Metodi di misura della propriocezione [6], [11], [20]

Negli ultimi anni sono stati pubblicati numerosi studi e articoli sulla propriocezione. Severe conseguenze funzionali per l'individuo sono associate a disturbi e traumi al sistema propriocettivo, a causa dello scarso controllo della postura e dei movimenti del corpo e dei suoi arti.

La storia completa del paziente spesso fornisce indizi clinici del tipo di disturbo sensoriale di cui è affetto il soggetto. Il dolore, il formicolio e l'intorpidimento sono spesso legati a sensazioni dolorose e termiche derivanti da fibre di piccolo diametro, e non da fibre legate al senso di posizione. D'altra parte, l'inciampare, la difficoltà a rimanere in posizione eretta quando gli occhi sono chiusi, l'uso non coordinato degli arti superiori e delle mani, la pseudoatetosi (movimenti involontari degli arti quando gli occhi sono chiusi) indicano anomalie nel senso di posizione.

La valutazione della propriocezione, come parte integrante degli esami neurologici di routine, è solitamente di natura qualitativa. Tuttavia per garantire la più appropriata e mirata terapia per il singolo paziente, è sicuramente di primaria importanza usare tecniche di misurazione standardizzate per la ricerca e l'impiego clinico. Sfortunatamente i mezzi per la valutazione somatosensoriale, con provata affidabilità e validità disponibili per la pratica clinica, sono molto limitati.

La propriocezione deriva dall'integrazione di segnali afferenti provenienti da recettori propriocettivi localizzati in differenti strutture dell'articolazione o dell'arto sotto osservazione, ma è anche influenzata da segnali forniti da altri organi come l'apparato vestibolare, il sistema visivo o i recettori cutanei presenti nelle diverse parti del corpo.

Nella letteratura sono descritti diversi metodi per la misurazione dell'accuratezza della propriocezione ma si possono in particolare distinguere due tecniche distinte di valutazione: i *position sense test*, per misurare la sensazione statica articolare, e i *motion sense test*, per la misura della sensazione di movimento passivo e lento degli arti.

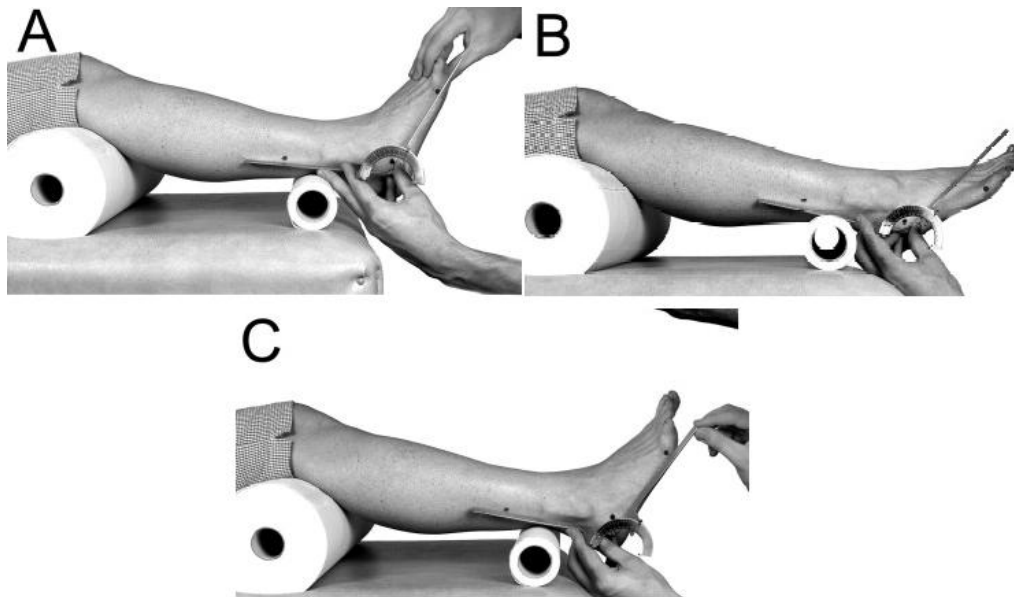


Figura 4: Position sense test, esempio [24]

Quest'ultima tipologia di esame prevalentemente rivela la soglia di percezione di movimento passivo (*Threshold To Detect Passive Motion, TTDP*); tale soglia è determinata muovendo lentamente e passivamente l'articolazione del soggetto testato a cui è chiesto di segnalare quando il movimento o la direzione desiderata viene percepiti. In entrambe le tipologie di test, ogni tipo di riferimento esterno, come ad esempio la vista la pressione, la tensione cutanea, è solitamente eliminato.

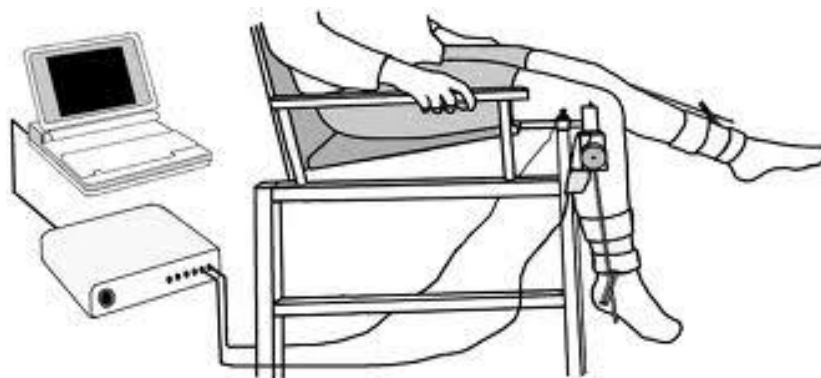


Figura 5: Motion sense test, esempio

Prendiamo a titolo di esempio i test per lo studio della propriocezione in relazione al movimento articolare del ginocchio. Nei *position sense test* il ginocchio è portato, attivamente o passivamente, in una determinata posizione definendo così uno specifico angolo tra la coscia e la gamba; dopo alcuni secondi il ginocchio viene riportato nella posizione di partenza. In seguito al soggetto viene chiesto di riprodurre l'angolo percepito con lo stesso ginocchio o quello controlaterale o di mostrare l'angolazione percepita su un modello. Nei *motion sense test*, il ginocchio viene mosso lentamente e passivamente e al soggetto viene ad esempio chiesto di individuare l'inizio e/o la fine di tale movimento il più velocemente possibile [11].

Tuttavia è risultato che tra i *motion sense test* e i *position sense test* non vi è una significativa correlazione. Prendendo sempre come riferimento i test condotti sul ginocchio, tra i diversi protocolli per la misurazione della propriocezione, la correlazione non risulta essere molto elevata e le variazioni tra i diversi test sembrano inficiare i risultati della misurazione. In particolare, questo risultato è stato evidenziato negli studi in soggetti sani. È stato quindi ipotizzato che i test di movimento vadano a stimolare principalmente i meccanorecettori articolari e minimamente i fusi neuromuscolari mentre i test di posizione attivano entrambi i tipi di recettori [11].

Non vi è un unico test che quantifica la propriocezione ma ogni tecnica valuta solo un suo aspetto senza descrivere l'abilità funzionale generale. I risultati ottenuti utilizzando una tipologia di test oppure l'altra quindi devono essere interpretati e analizzati con cura.

In letteratura sono descritte diverse tipologie di test per valutare la cinestesia e la sensazione articolare. Spesso tuttavia sono necessari specifici strumenti creati appositamente dai ricercatori a tale scopo. Un esempio è riportato nello studio "Validation of a method to measure the proprioception of the knee" [20]; in questa ricerca viene proposto e validato l'uso di un apparato posto su un letto di ospedale montato su una piattaforma con una slitta girevole che è azionata da un motore elettrico passo-passo. Sulla slitta è posta una stecca per il posizionamento e il fissaggio dell'arto inferiore, compreso il piede. La slitta può essere spostata in entrambe le direzioni lungo l'arco naturale di estensione o flessione del ginocchio.



Figura 6: Strumento per la misura della propiocezione. [20]

Il soggetto è posizionato su un fianco, con la gamba collocata sulla stecca. Il centro di rotazione dell'articolazione del ginocchio è accuratamente posizionato sopra dell'asse dell'apparecchio. Sul ginocchio è fissato un potenziometro che misura l'angolo del movimento con una precisione di $0,0238^\circ$. Il partecipante, nel momento in cui rileva il minimo movimento del ginocchio, deve premere immediatamente un tasto per arrestare il movimento del dispositivo. La propiocezione viene in questo caso quantificata digitalmente misurando la soglia di movimento passivo, ossia in l'angolo in gradi in cui è stata interrotta la macchina.

E' possibile tuttavia, sempre a partire dalla letteratura, definire altre tecniche standard per la valutazione della propiocezione. Distinguiamo ora in test qualitativi e in test quantitativi ([6] Debnath,U., Narkeesh,A & Raghumahanti,R; "Formulation of Integrated Proprioceptive Screening Scale and Testing of its Sensitivity, Reliability and Validity".)

Le tecniche e procedure per i test qualitativi sono riportate in seguito:

- Test di coordinazione dell'arto controlaterale (*Contralateral limb matching test*): l'arto del soggetto è mosso passivamente dallo sperimentatore; al paziente viene chiesto di memorizzare tali movimenti e di ripeterli successivamente con l'arto controlaterale in maniera speculare entro cinque secondi.
- Test del senso di posizione dell'articolazione distale (*Distal joint positional sense test*): al soggetto viene chiesto di identificare la posizione di un dito del piede o

della mano con gli occhi chiusi e di riferire la risposta corretta entro cinque secondi.

- Test di localizzazione percepita del pollice (*The thumb localization test*): al soggetto viene chiesto di toccare velocemente con la punta del dito indice il proprio naso, poi la punta del pollice, sollevata sopra la testa, mentre l'esaminatore pone passivamente il braccio rialzato in tre differenti posizioni nello spazio. Al soggetto viene infine chiesto di afferrare o pizzicare il pollice testato con l'altra mano entro cinque secondi.
- Test di sensazione di sinergia percepita (*Perceived Synergy Sense Test*): al soggetto viene chiesto di assumere una posizione prestabilita. Se il paziente non è in grado, lo sperimentatore posiziona passivamente l'arto del soggetto nella posizione voluta. In seguito, il soggetto deve mantenere la posizione assunta dalla spalla o dall'anca per cinque secondi mentre tenta di raggiungere la componente più distale di tale posizione.
- In una prova di riposizionamento multidirezionale, il soggetto è bendato e fatto sedere su una sedia posta il più vicino possibile a un tavolo. Molti quadrati di diversi centimetri sono disegnati sul tavolo con il gesso o altri materiali. Al soggetto è fornita quindi una moneta. Lo sperimentatore pone poi la mano testata e la moneta al centro del quadrato sul tavolo mentre l'altra mano è posta direttamente sopra tale moneta. In seguito la mano testata viene guidata gentilmente dal centro della casella in tre posizioni finché l'indice di tale mano coincide con la moneta posta dentro la casella target. Al soggetto viene chiesto di posizionare la mano che tiene la moneta all'interno della regione target. Successivamente deve muovere la mano controlaterale verso la direzione target e posizionare l'indice nella posizione percepita dell'indice della mano che tiene la moneta nella regione di riferimento. Quando il soggetto avrà completato il movimento, l'esaminatore marca la posizione indicate dagli indici e determina la distanza tra la moneta nella posizione target e la posizione dell'indice della mano controlaterale.

Le tecniche e procedure per i test quantitativi sono:

- Test di posizionamento del piede (*Foot Placement Sense Test*): al soggetto viene richiesto di camminare su una carta lunga 3,7 metri (12 feet) e di memorizzare la posizione del piede ad ogni passo. In seguito gli viene chiesto di camminare sulla stessa striscia di carta cercando di riposizionare i piedi nella stessa posizione, mantenendo però gli occhi fissi su un punto di fronte. L'errore è misurato confrontando l'impronta target con la posizione originaria del piede.
- Test di posizionamento oggettivo (*Objective Positional Sense Test*): al paziente viene chiesto di muovere l'arto sotto esame in una determinata posizione per cinque secondi. Successivamente l'arto viene riportato passivamente nella posizione di partenza e il soggetto deve provare a riportare l'arto nella posizione target a partire da quella posizione. La differenza angolare tra l'angolo target e l'angolo percepito dal paziente viene misurata.
- *Timed up and go test*: al soggetto viene chiesto di alzarsi da una sedia, camminare fino a un nastro posizionato sul pavimento a una distanza di 3 metri, girarsi, camminare indietro fino alla sedia e risedersi. Viene quindi misurato il tempo impiegato per svolgere l'esercizio.
- *Motion tracking sense test*: utilizza uno strumento ideato appositamente per misurare l'errore propriocettivo quantitativamente. Questo strumento è fatto solitamente di legno e include un cursore per facilitare la lettura delle scale e un goniometro fissato su di esso. Il soggetto è fatto sedere di fronte a un tavolo su cui è tenuto lo strumento e gli viene chiesto di muovere l'indicatore dello strumento fino a un determinato valore con gli occhi aperti e mantenere la posizione affinché il paziente possa memorizzare tale posizione. In seguito al soggetto viene chiesto di riposizionare l'arto nella posizione target a occhi chiusi. Sono misurate la distanza e l'errore angolare tra distanza/angolo target e distanza/angolo percepito dal soggetto.
- Test di Romberg modificato: al soggetto a occhi chiusi viene chiesto di stare fermo su una gamba per un minuto; viene quindi misurato il numero di volte in cui il paziente perde l'equilibrio in quel minuto.

- *Timed unilateral stance performance test*: al soggetto viene chiesto di fissare un punto lontano e di rimanere fermo sul piede destro e successivamente sul sinistro il più a lungo possibile senza perdere l'equilibrio.

1.4 Analisi del cammino

Negli ultimi decenni l'analisi del cammino ha subito un notevole impulso dal punto di vista clinico e della ricerca. Il cammino è il mezzo naturale per spostarsi da una posizione ad un'altra e il sistema ideale per colmare brevi distanze. L'adattabilità funzionale degli arti inferiori risulta di assoluta importanza per affrontare scale, ostacoli o superfici impervie con velocità ed efficacia.

La propriocezione è lo strumento principale a cui si affida il nostro corpo sia per il controllo della corretta esecuzione dei movimenti sia per avviare il meccanismo di correzione in caso di disturbi esterni che vanno a perturbare l'azione programmata.

Il controllo e l'esecuzione del progetto motorio e della postura sono regolati secondo meccanismi di feedback negativi e di feedforward. Da una parte, a seconda dell'atto motorio programmato vi è un adattamento di base rispetto ai modelli compartimentali, dall'altra l'azione eseguita dal sistema viene confrontata con il progetto motorio pianificato e qualsiasi differenza viene segnalata al sistema stesso affinché questo attivi le correzioni necessarie. La propriocezione in particolare fornisce i necessari feedback sulla posizione del corpo nello spazio e sulla percezione del moto, e il movimento stesso è forgiato sulla base di tali feedback dopo che sono stati analizzati dal sistema nervoso centrale. Il modello di attivazione dei muscoli per il cammino fa quindi affidamento proprio sulla propriocezione e sugli input dei recettori di carico e il ritmico movimento nel cammino viene proprio modellato sulla base di questi input.

Data l'importanza del cammino nella quotidianità di ogni individuo, in caso di trauma o gravi menomazioni, il normale atto motorio può risultare alterato e il cervello è costretto a mettere in atto strategie di compensazione per mantenere quest'abilità. Il pattern del cammino risultante è formato dall'insieme di movimenti normali e non di diverso significato clinico.

L'analisi del cammino costituisce uno strumento di valutazione imprescindibile delle funzioni dell'apparato locomotore. Tale analisi permette, infatti, di ricavare molteplici informazioni sulla meccanica del sistema muscolo-scheletrico durante l'atto motorio, informazioni che sono di vitale importanza per identificare le condizioni patologiche e stabilire i trattamenti necessari.

Nelle situazioni più complesse il primo preliminare esame visivo deve essere seguito da una serie di analisi di laboratorio che aumentino la precisione delle misurazioni e forniscano informazioni non ottenibili mediante l'indagine visiva. Un'accurata descrizione delle azioni che si verificano a livello di ogni articolazione permette di specificare la diagnosi funzionale del paziente. Devono quindi essere misurate le variabili che descrivono la dinamica e la cinematica dei segmenti anatomici, quali il movimento assoluto del centro di massa del corpo o di un suo arto, il movimento assoluto di segmenti ossei o corporei e il movimento relativo tra ossa adiacenti.

Tre diversi approcci analitici ci permettono di ottenere le informazioni necessarie sulla funzione locomotoria del soggetto. Il primo è l'analisi del movimento umano che definisce l'ampiezza e il tempo di ogni azione articolare durante un atto motorio. Il secondo approccio richiede la registrazione delle piattaforme di forza che misurano le richieste funzionali necessarie durante il carico mentre il terzo metodo è l'elettromiografia dinamica che determina il tempo e l'intensità dell'attività muscolare. Per ogni tipo di sistema di misura, esistono in commercio differenti strumentazioni caratterizzati da tecnologie eterogenee e differenti gradi d'invasività che quindi differiscono per costo e completezza dei dati forniti.

Il principale strumento per la stima del movimento umano è la stereofotogrammetria. Questa soluzione tecnologica permette l'acquisizione delle variabili cinematiche in maniera non invasiva tramite l'uso di telecamere operanti nella gamma del visibile o dell'infrarosso e marcatori posti sulla cute del soggetto. La ricerca attuale si sta muovendo nella direzione di sviluppare metodologie markerless anche se i marcatori cooperativi, attivi o passivi, rimangono tuttora la soluzione operativa principalmente utilizzata. I marcatori passivi sono formati da supporti plastici sferici e ricoperti da pellicola catarifrangente. Per mezzo di un dispositivo d'illuminazione dedicato, tale

pellicola riflette la luce nell'intorno delle lunghezze d'onda specifiche rilevabili dalle telecamere. I marcatori attivi sono costituiti da LED e generano autonomamente il segnale luminoso senza il bisogno di dispositivi d'illuminazione esterni. Tuttavia i marcatori attivi necessitano una costante alimentazione dei dispositivi e la sincronizzazione via cavo. Le telecamere sono dotate di opportuni dispositivi per la rilevazione del segnale luminoso e la trasduzione in segnale elettrico e presentano quindi un filtro ottico in modo tale da riconoscere opportunamente i marker dallo sfondo.

Le piattaforme di forza registrano invece le forze di reazione del terreno. Durante il cammino, in seguito al trasferimento del peso del corpo sul piede d'appoggio, si generano sul terreno forze orizzontali e rotatorie. Le forze di reazione del terreno sono equivalenti in intensità ma opposte in verso rispetto a quelle a cui viene sottoposto l'arto in carico. Le piattaforme sono collocate solitamente al centro di una passerella e sono sospese sopra trasduttori piezoelettrici o estensimetrici. Esse misurano le tre componenti della forza e della coppia risultanti, secondo il sistema di riferimento adottato. I valori ottenuti possono essere però di utilità scientifica solamente se il soggetto trasferisce spontaneamente il carico sulle piattaforme durante il cammino naturale. Inoltre è essenziale che solamente un piede prenda contatto con la piattaforma e completamente.

L'attività muscolare e le forze generate dai muscoli durante un qualsiasi movimento possono essere invece valutate attraverso lo studio dei processi elettrici associati all'attività muscolare stessa. I segnali mioelettrici sono registrati tramite elettrodi posti sulla cute o inseriti nei muscoli. Tali segnali consentono di determinare i tempi di attivazione, l'intensità della forza muscolare e le condizioni di attività della regione muscolare esaminata. L'elettromiografia di superficie (SEMG) dinamica diviene utile per valutare la fatica muscolare o per il monitoraggio dei risultati di un trattamento.

In generale, l'analisi del cammino risulta ideale per monitorare la funzione locomotrice del paziente grazie alla non invasività dei sistemi di misura, alla facile ripetibilità degli esami in un arco di tempo ridotto, alla possibilità di ottenere informazioni di tipo

quantitativo e alla possibilità di acquisire contemporaneamente i dati relativi alla cinematica, alla dinamica e all'attivazione muscolare.

Il cammino è definito da un pattern di attività motoria ciclica degli arti inferiori e del tronco al fine di far avanzare il corpo e allo stesso tempo mantenere la stabilità. Durante il movimento, l'apparato locomotore svolge diverse funzioni, quali generare forza impulsiva, mantenere la stabilità della parte superiore del corpo e assorbire gli urti durante l'impatto con il terreno.

L'unità funzionale di riferimento è il passo (*stride*), definito come l'intervallo di tempo tra due contatti iniziali successivi dello stesso piede, e tramite cui sono descritti tutti gli eventi biomeccanici e di attività muscolare. Durante il moto, una gamba serve come supporto mentre l'altra avanza in un nuovo sito di supporto; quando entrambi i piedi sono nuovamente in contatto con il terreno, le gambe invertono i ruoli e la gamba che era stabile diventa mobile, mentre la gamba mobile diventa stabile.

Una singola sequenza per un arto è chiamato ciclo del passo (*gait cycle*). Solitamente l'istante del contatto del piede con il suolo viene preso come momento d'inizio del ciclo poiché rappresenta l'evento più facile da identificare. Questo momento viene chiamato contatto del tallone con il suolo o *heel strike*.

Ogni ciclo del passo è formato da due periodi: periodo di appoggio (*stance phase*) e periodo di oscillazione (*swing phase*). La fase di appoggio equivale all'intervallo durante il quale il piede è in contatto con il terreno che inizia con l'*heel strike*, mentre la fase di oscillazione rappresenta il periodo in cui l'arto è sospeso per garantire l'avanzamento. Quest'ultima fase ha inizio al momento del distacco del piede dal suolo (*toe off*). La *stance phase* si suddivide ulteriormente in tre intervalli: fase iniziale di doppio supporto (*double support*, quando entrambi i piedi sono al suolo, il carico del peso del corpo è equamente diviso sui piedi), singolo supporto (*single support*, inizia quando il piede opposto è sollevato per oscillare), fase terminale di doppio supporto (inizia con il contatto al suolo della gamba controlaterale e continua fino a che la gamba iniziale è sollevata per oscillare).

Durante l'analisi vengono ricavati molti parametri spazio temporali di riferimento:

- lunghezza dello *stride*, pari alla lunghezza del piede più la distanza coperta in fase di oscillazione;
- *step*, ossia la distanza tra l'appoggio di un piede (tallone) e l'appoggio della stessa parte del piede controlaterale;
- larghezza del passo, ossia la distanza sul piano frontale del tallone dalla linea mediana di avanzamento;
- cadenza, cioè numero di *step* nell'unità di tempo;
- velocità del cammino.

Per ogni ciclo del passo s'individuano otto fasi funzionali; ogni fase è espressa come percentuale rispetto alla durata totale dello stride e ha uno specifico obiettivo funzionale:

1. Contatto iniziale o *Initial Contact* (0-2% del ciclo del passo): comprende il momento in cui il tallone tocca il suolo garantendo l'inizio dell'appoggio;
2. Reazione al carico o *Loading Response* (0-10%): corrisponde alla fase iniziale di doppio appoggio, comincia con il contatto iniziale del suolo e continua finché l'altro piede non viene sollevato;
3. Medio carico o *Mid Stance* (10-30%): corrisponde all'inizio della fase di singolo supporto, inizia quando il piede controlaterale viene sollevato per iniziare l'oscillazione mentre l'altro arto supporta il peso del corpo e termina quando il piede è supportato dalle teste metatarsali e dalle dita;
4. Carico terminale o *Terminal Stance* (30-50%): questa fase termina la fase di singolo supporto, inizia con il sollevamento del tallone della gamba che sostiene il peso e termina quando l'arto controlaterale tocca il terreno; il peso del corpo viene qui trasferito oltre l'avampiede e il corpo comincia a cadere in avanti;
5. Pre-oscillazione o *Pre Swing* (50-60%): durante questo periodo corrisponde alla fase terminale di doppio supporto del ciclo del passo durante il quale avviene il trasferimento del peso; incomincia con il contatto iniziale del piede controlaterale e termina con il distacco delle dita del piede in appoggio (*toe-off*);

6. Inizio dell'oscillazione o *Initial Swing* (60-73%): è il primo periodo della fase di *swing*; inizia con il piede che si alza dal suolo e termina con l'oscillazione del piede sull'altra gamba portante;
7. Oscillazione intermedia o *Mid Swing* (73-87%): comprende l'avanzamento dell'arto in avanti;
8. Oscillazione terminale o *Terminal Swing* (87-100%): l'arto decelera per permettere un corretto pre-posizionamento per la successiva fase di appoggio; questa fase termina quando il piede tocca il suolo.

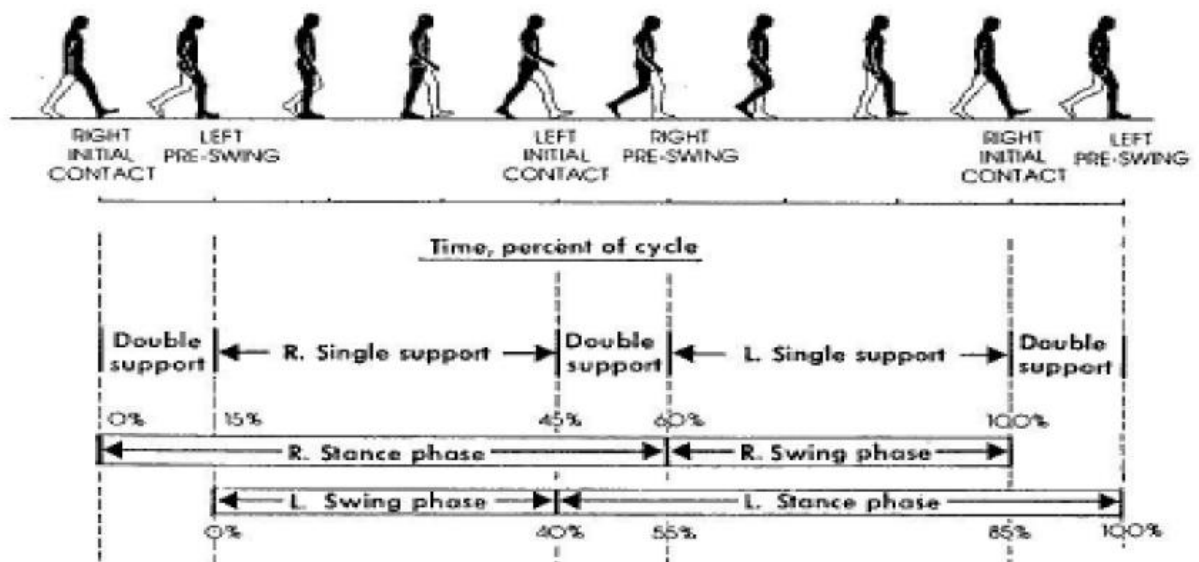


Figura 7: Ciclo del passo.

1.4 Analisi della postura

La postura deve intendersi come "posizione reattiva all'ambiente gravitazionale, ergonomica ed a controllo cibernetico, idonea allo svolgimento di attività funzionali finalizzate mediante un'azione psico-corporea integrata" (Massara 1996). Il concetto di postura non si riferisce a una condizione prettamente statica ma s'identifica più in generale con il concetto di equilibrio inteso come ottimizzazione del rapporto tra soggetto ed ambiente circostante in quel determinato momento e per i programmi motori previsti.

L'equilibrio si raggiunge quando la perpendicolare passante per il baricentro del corpo cade all'interno del piano di appoggio, delimitato dal margine esterno dei piedi. Una corretta postura è mantenuta attraverso una costante rielaborazione dei parametri dell'attività muscolare, indispensabile per mantenere il baricentro all'interno della base di appoggio. Il baricentro è in continuo movimento sia per l'azione sul corpo di forze esterne, che per gli spostamenti causati dal movimento volontario.

Al Sistema-Tonico-Posturale (S.T.P) è affidato il compito di:

- lottare contro la gravità;
- opporsi alle forze esterne;
- situarci nello spazio-tempo strutturato che ci circonda;
- permettere l'equilibrio nel movimento.

Il nostro corpo è in perenne lotta con la gravità al fine di mantenere le posture necessarie alla vita di relazione. Per fare questo, è necessario un continuo aggiustamento del tono muscolare da parte dei muscoli antigravitari. Il sistema nervoso regola il comportamento dei muscoli sulla base delle informazioni provenienti sia dall'esterno sia dall'interno del corpo. Sulla base di tali informazioni viene determinata la contrazione o il rilasciamento dei vari muscoli scheletrici al fine di ottenere la postura desiderata.

Secondo la letteratura i recettori utili per il sistema nervoso sono chiamati recettori posturali o entrate posturali. Questi recettori sono:

- **esterocettori:** sono recettori sensoriali tattili, visivi ed uditivi che ci permettono di adattare continuamente la nostra postura in funzione dell'ambiente che ci circonda. I recettori dell'orecchio interno sono degli accelerometri e forniscono informazioni sul movimento e sulla posizione della testa in rapporto alla verticale. I recettori dell'occhio permettono la stabilità posturale per i movimenti antero-posteriori, grazie alla visione periferica. I recettori plantari forniscono misure di pressione a livello della superficie cutanea plantare, ricca in recettori, e informazioni sulle oscillazioni della massa corporea. Le informazioni plantari derivano da un recettore fisso a contatto diretto col suolo

immobile. A livello del piede si raccolgono anche informazioni relative alla propriocezione muscolare e articolare.

- propriocettori: permettono al sistema di riconoscere la posizione e lo stato di ogni osso, muscolo, legamento, od organo in rapporto con l'equilibrio. In particolare sono fondamentali le informazioni riguardanti la posizione degli esocettori dell'orecchio interno e della retina in rapporto all'esocettore podalico, le informazioni sulla posizione d'ogni vertebra e l'entrata propriocettiva podalica, grazie al controllo dello stiramento dei muscoli del piede e della gamba, che situa il corpo in rapporto ai piedi. L'entrata rachidea e l'entrata propriocettiva podalica formano un'estesa catena propriocettiva che permette di situare l'orecchio interno e gli occhi in rapporto ad un recettore fisso costituito dai piedi.

L'equilibrio è regolato da diversi meccanismi fisiologici a cui contribuiscono la corteccia cerebrale, le funzioni vestibolari, il cervelletto, i recettori visivi e uditivi, gli esterocettori del tatto e della pressione e i propriocettori delle articolazioni, dei tendini e dei muscoli. Qualora uno o più fattori siano in grado di modificare l'equilibrio, il sistema posturale agirà in modo da modificare con rotazioni e/o traslazioni di compenso i vari segmenti corporei.

Negli ultimi anni si è ipotizzato che uno squilibrio del sistema posturale sia proprio il frutto di una disfunzione del sistema propriocettivo. Il sistema posturale ricevendo informazioni non corrette invierà ai vari distretti muscolo-tendinei comandi non giusti e utili all'organismo. Ciò porterà necessariamente asimmetrie di tono capaci di suscitare una sintomatologia spesso dolorosa. Errori posturali seppur modesti sono, infatti, in grado di causare disagi e patologie anche severe.

Per misurare la postura attualmente sono stati introdotti vari strumenti tecnologici che ci consentono di eseguire precisi esami posturali strumentali in grado di effettuare rilevazioni precise, ripetibili e non invasive. Esistono in letteratura specifiche procedure e protocolli per l'analisi posturale:

- “indagine morfologica”: utilizza telecamere o infrarossi per rilevare i punti di repere anatomici marcati con marker adesivi;

- “indagine baropodometrica”: utilizza pedane baropodometriche per rilevare le reazioni di terra per lo studio dei carichi statici, dinamici e stabilometrici del baricentro;
- “indagine podoscopia computerizzata”: per la misurazione della morfologia podalica;
- “indagine cinematica del movimento”: solitamente effettuata insieme all’indagine baropodometrica per valutare variazioni angolari durante il cammino;

Solitamente in seguito a queste valutazioni segue l’elaborazione digitalizzata attraverso un software per analizzare gli indicatori principali ottenuti nelle varie rilevazioni e rapportarli ai valori fisiologici.

Un’accurata analisi della postura in statica e in dinamica consente di definire il programma di rieducazione posturale. Il controllo neurofisiologico è solitamente formato da tre differenti momenti: il controllo posturale nella stazione eretta, il controllo posturale quando al corpo vengono applicate forze meccaniche esterne tali da dare luogo ad una perdita di equilibrio, e controllo posturale durante l'esecuzione di movimenti volontari.

- 1) Controllo posturale nella stazione eretta: in seguito a oscillazioni del baricentro date da forze minime, il sistema posturale è in grado di rispondere con una forza adeguata e contraria esercitata in maniera tempestiva, che consente il mantenimento della posizione eretta. Il tono muscolare conseguente alle reazioni posturali è detto tono di reazione posturale. Non esiste un unico movimento di reazione a una forza esterna, ma una serie di movimenti possibili equivalenti. Fra questi, il cervelletto sceglie il movimento di reazione ideale. Tali aggiustamenti muscolari però non sono tali da provocare attività muscolare elettromiografica.
- 2) Controllo posturale quando al corpo siano applicate forze meccaniche esterne tali da provocare una perdita di equilibrio: il tono posturale di reazione non è più in grado di mantenere la posizione di equilibrio da solo ma ha luogo un lavoro muscolare vero e proprio. Questo lavoro porta alla definizione di una nuova

posizione di equilibrio. La reazione posturale sarà di tipo motorio e i circuiti che presiedono alle reazioni posturali motorie sono gli stessi che controllano il tono di reazione posturale. In questo caso però essi si ricalibrano sulle nuove esigenze, dando luogo a reazioni motorie, anziché a variazioni del tono muscolare.

- 3) Controllo posturale durante il movimento volontario: in questo caso le reazioni posturali sono definite anticipatorie, poiché intervengono prima nel movimento volontario. Nell'esecuzione di un movimento volontario, il baricentro si sposta fuori della base di appoggio, esattamente come avviene per l'intervento di forze esterne all'organismo. A differenza delle reazioni posturali a forze esterne, prima che il movimento si compia, sono messe in atto strategie posturali per evitare lo sbilanciamento e la caduta. Le reazioni posturali anticipatorie risentono fortemente dei fenomeni di apprendimento motorio; se cambiano le condizioni di equilibrio, sono sufficienti due o tre ripetizioni del gesto volontario per adattare la reazione posturale.

Il controllo posturale è una funzione strettamente correlata al tono muscolare. Non è uguale per tutti i muscoli ed in genere è più evidente nei muscoli estensori, che permettono di mantenere una posizione eretta e l'atteggiamento normale dell'individuo.

All'interno di ogni muscolo e di ogni tendine sono presenti recettori propriocettivi in grado di valutare lo stiramento e la tensione dei muscoli e di trasmetterlo al sistema nervoso centrale.

Capitolo 2

Materiali e metodi

Per effettuare la ricerca bibliografica sono stati utilizzati diversi motori di ricerca quali Google, Google Scholar, PubMed, ScienceDirect.

Per la ricerca sono stati utilizzati come *mesh terms* i termini *proprioception* o *proprioceptive* associati alternativamente a *gait* e *posture* o ad entrambi, termini chiave per l'argomento della tesi. Lo strumento del Web è stato quindi fondamentale per trovare gli articoli contenuti nelle banche dati sopra citate.

In seguito sono riportati graficamente il numero di risultati ottenuti per ciascuna combinazione di *mesh terms*:

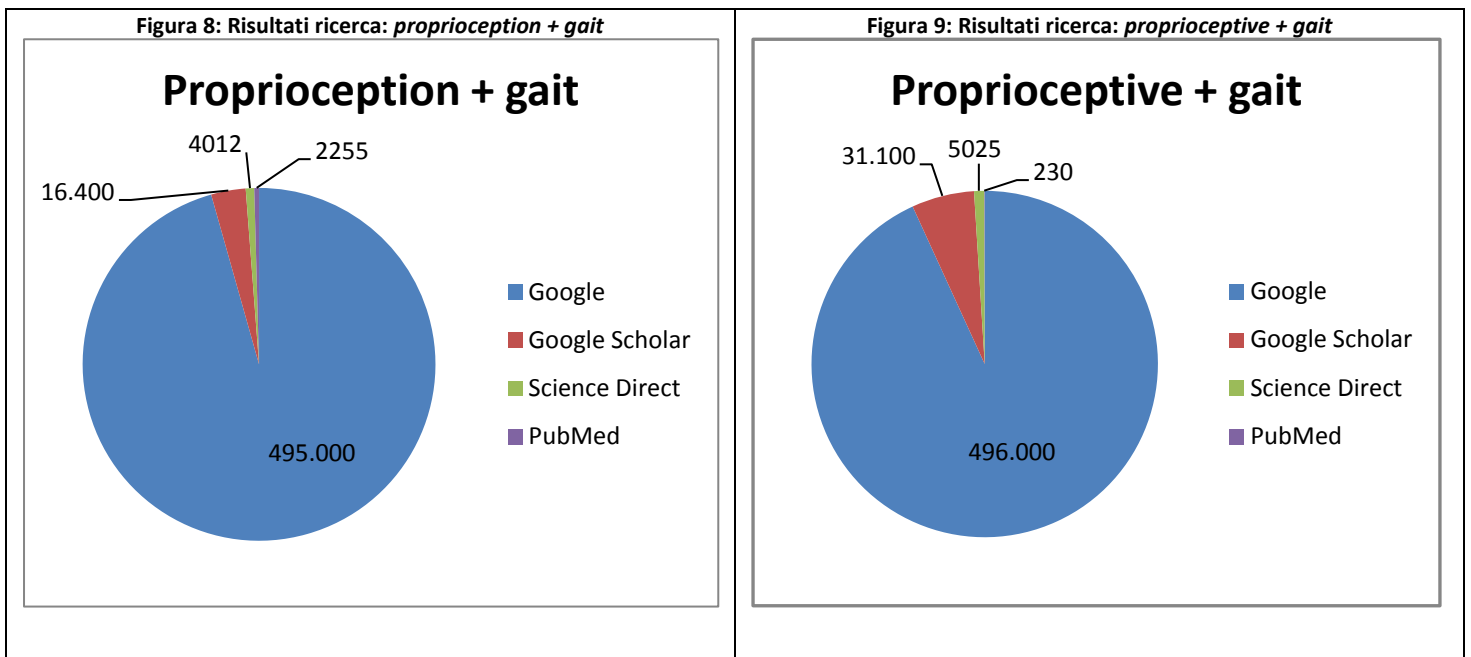


Figura 10: Risultati ricerca: *proprioception + posture*

Proprioception + posture

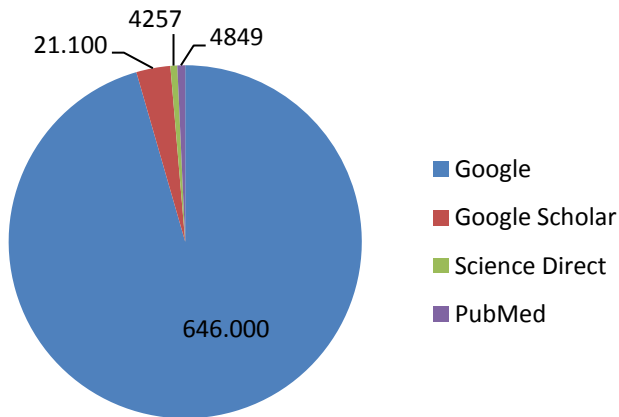


Figura 11: Risultati ricerca: *proprioceptive + posture*

Proprioceptive + posture

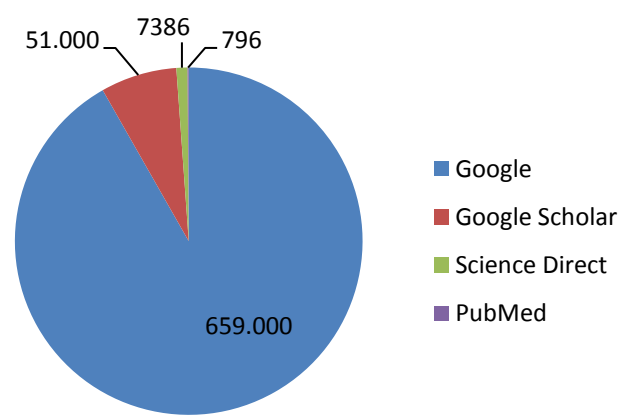


Figura 12: Risultati ricerca: *proprioception + gait + posture*

Proprioception + gait + posture

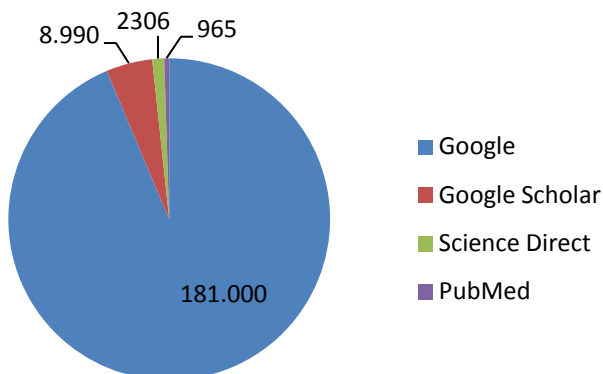
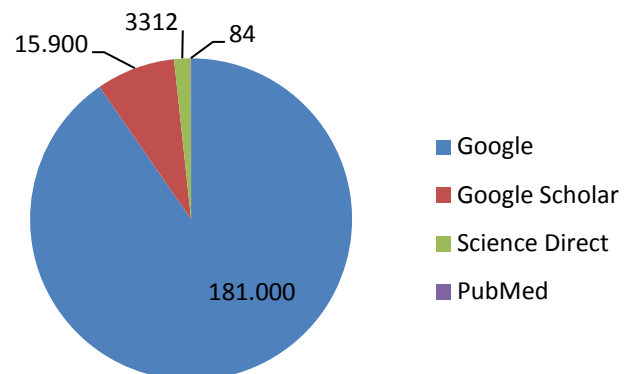


Figura 13: Risultati ricerca: *proprioceptive + gait + posture*

Proprioceptive + gait + posture



Come si evince dai grafici precedenti, la ricerca ha prodotto moltissimi risultati ma sono stati approfonditi e analizzati solo gli articoli ritenuti più adatti all'argomento della tesi. Di seguito è riportata una lista in cui sono indicati gli articoli trovati tramite ciascun motore di ricerca.

Utilizzando come motore di ricerca **Google** sono stati trovati 5 articoli riguardanti la propriocezione in relazione al cammino:

- “Proprioception, gait kinematics, and rate of loading during walking: Are they related?” [2], settimo articolo della lista dei risultati utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;
- “The merits of artificial proprioception, with applications in biofeedback gait rehabilitation concepts and movement disorder characterization”[3]; mesh terms utilizzati: *proprioception* e *gait*;
- “Variation of cinematic and dynamic parameters in posturographic and gait analysis under normal conditions and after manipulation of visual and foot proprioceptive informations” [15], utilizzando come mesh terms *proprioceptive* e *gait*;
- “Joint proprioception, muscle strength, and functional ability in patients with osteoarthritis of the knee” [18], cercando il titolo esatto dopo aver esaminato la bibliografia di un altro articolo [14];
- “Motor Function and Joint Position Sense in Relation to Gait Performance in Chronic Stroke Patients” [21], cercando il titolo esatto dopo aver esaminato la bibliografia di un altro articolo [10];

e un articolo riguardante la propriocezione in relazione alla postura:

- “Review: Proprioceptive control of posture: a review of new concepts” [8]: quarto risultato nella lista utilizzando come mesh terms *proprioceptive* e *gait*;

Utilizzando come motore di ricerca **Google Scholar** è stato trovato un articolo riguardante la propriocezione in relazione alla postura:

- “Role of somatosensory input in the control of human posture” [9]: sesto articolo della lista dei risultati utilizzando come mesh terms *proprioceptive*, *gait* e *posture*;

Utilizzando come motore di ricerca **ScienceDirect** sono stati trovati 4 articoli riguardanti la propriocezione in relazione al cammino:

- “Repeatability and variation of quantitative gait data in subgroups of patients with stroke” [10], quarto articolo della lista dei risultati utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;
- “Proprioceptive deficits in Parkinson's disease patients with freezing of gait”[5], decimo articolo della lista dei risultati utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;
- “Proprioception in knee osteoarthritis: a narrative review” [11], undicesimo articolo della lista dei risultati utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;
- “Isolating vision and proprioception during locomotor navigation toward a target in Parkinson's disease”[13], risultato numero quaranta utilizzando come mesh terms *proprioception*, *posture* e *gait*;

e 3 articoli riguardanti la propriocezione in relazione alla postura:

- “Correlation between proprioception, muscle strength, knee laxity, and dynamic standing balance in patients with chronic anterior cruciate ligament deficiency” [12], quattordicesimo articolo trovato utilizzando come mesh terms *proprioception* e *posture*;
- “Effects of Parkinson's disease on proprioceptive control of posture and reaching while standing”[16], secondo risultato trovato utilizzando come mesh terms *proprioceptive* e *posture*;
- “Proprioceptive neglect in Parkinson's disease”[19]: articolo presente nella stessa pagina di un articolo trovato precedentemente [16].

Infine utilizzando come motore di ricerca **PubMed** sono stati trovati 3 articoli riguardanti la propriocezione in relazione al cammino:

- “Neurocognitive rehabilitative approach effectiveness after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon. A randomized controlled trial”[7], secondo risultato della lista utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;
- “Virtual proprioception with real-time step detection and processing”[4], utilizzando come mesh terms *proprioception* e *gait*;

- “Knee varus–valgus motion during gait – a measure of joint stability in patients with osteoarthritis?” [14], cercando il titolo esatto dopo aver esaminato la bibliografia di un altro articolo;

e 2 articoli sulla propriocezione in relazione alla postura:

- “Impaired vertical postural control and proprioceptive integration deficits in Parkinson’s disease” [17], utilizzando i mesh terms *proprioceptive* e *posture*;
- “Validation of a method to measure the proprioception of the knee” [20], utilizzando come mesh terms *proprioception* e *posture*.

Capitolo 3

La propiocezione nell'analisi del movimento e nella postura

La propiocezione è stata definita come la consapevolezza della posizione e del movimento del corpo e delle sue parti. Disturbi al sistema somato-sensoriale, in particolare alla propiocezione, possono avere dannose implicazioni funzionali soprattutto sul controllo della postura e del movimento. Complesse funzioni motorie, come il cammino, sono modellati sulla base dei feedback propriocettivi, che sono analizzati dal sistema nervoso centrale.

E' stato dimostrato che una scarsa propiocezione incide considerevolmente sui risultati della riabilitazione e sulle attività quotidiane di una persona e può anche condurre a situazioni pericolose sia in casa che in qualsiasi contesto sociale. Risulta quindi utile una valutazione che permetta di determinare le limitazioni funzionali e definire gli obiettivi d'intervento.

Un'alterazione nel sistema propriocettivo può avvenire a più livelli: a livello del sistema nervoso, conseguentemente a danni cerebrali o alla colonna vertebrale, o a livello dei recettori propriocettivi, ad esempio in conseguenza alla rottura di tendini o legamenti.

Dall'analisi degli articoli trovati, si è potuto concludere che molteplici malattie e traumi possono causare danni al sistema propriocettivo: la propiocezione è stata valutata oltre che in soggetti sani, in soggetti affetti da malattia di Parkinson, da osteoartrite, da neuropatia diabetica, in soggetti che hanno subito ictus o la rottura del legamento crociato anteriore.

Questi studi analizzano diversi aspetti della propiocezione. La maggior parte valutano la differenza dei risultati tra soggetti malati e sani, prima e/o dopo la riabilitazione, mentre altri approfondiscono la relazione tra la propiocezione e lo stimolo visivo oppure la differenza nella sensazione articolare in soggetti giovani e in soggetti più anziani, altri

ancora analizzano l'influenza di fattori esterni come la vibrazione muscolare o l'uso di plantari.

3.1 Propriocezione e cammino

3.1.1 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti con ictus [21],[10]

Disfunzioni senso-motorie, come sensazioni alterate, debolezza muscolare, tono muscolare alterato e/o mancanza di controllo del movimento isolato, si osservano comunemente in soggetti colpiti da ictus. La capacità di eseguire normali attività funzionali è spesso compromessa e si possono quindi individuare in queste persone disturbi del cammino, come ad esempio una velocità di cammino ridotta e un'asimmetria nel ciclo del passo. Il controllo della locomozione richiede, infatti, continue informazioni sensoriali afferenti e un'alterazione nella capacità sensoriale può andare a ridurre l'abilità di reclutamento muscolare durante la deambulazione.

La relazione tra cammino e propriocezione in soggetti colpiti da ictus è stata analizzata in numerosi studi, come ad esempio in [21] e [10].

Nello studio "Motor Function and Joint Position Sense in Relation to Gait Performance in Chronic Stroke Patients" [21], si è cercato di determinare se esiste un'associazione tra il senso di posizione delle articolazioni del ginocchio e della caviglia, la funzione motoria degli arti inferiori e le prestazioni cinematiche di pazienti con ictus cronico.

A tal scopo sono stati analizzati i dati cinematici ottenuti da ventuno pazienti che hanno subito un ictus unilaterale per la prima volta da almeno un anno, aventi debolezza unilaterale e disturbi motori residui; i pazienti dovevano camminare alla loro velocità naturale, usando il loro usuale dispositivo di sostegno se necessario, su una passerella di 10 metri per tre volte. Un sistema di analisi del movimento Vicon con sei telecamere è stato utilizzato per la registrazione cinematica mentre i marker riflettenti erano stati posti sul corpo del soggetto in posizioni standard. Per ogni prova dinamica, sono state calcolate la velocità media di avanzamento sul piano sagittale, la lunghezza del passo, la lunghezza dello *stride*, il tempo di singolo supporto, il tempo di oscillazione e il tempo di supporto doppio.

Le forze isometriche dei flessori dell'anca bilaterali, degli estensori del ginocchio e dei flessori dorsali della caviglia sono state inoltre testate con un dinamometro portatile al fine di valutare la funzionalità motoria.

Il senso di posizione (*Joint Position Sense, JPS*) del ginocchio è stato valutato utilizzando un sistema computerizzato a due inclinometri fissati lungo l'asse del perone; per la misurazione del senso di posizione della caviglia gli inclinometri erano attaccati al quinto osso metatarsale. Il test prevedeva una prima fase in cui l'esaminatore portava l'arto plegico in una determinata posizione in modo da definire un angolo specifico per l'articolazione sotto esame. Successivamente il paziente doveva spostare il segmento distale dell'articolazione in modo da uguagliare l'angolo dell'articolazione in esame con quello dell'articolazione corrispondente del lato lesa mentre il segmento prossimale dell'articolazione d'arto sano era tenuto immobile. È stata utilizzata la gamba sana per la misura propriocettiva per evitare contraddittori risultati a causa dello scarso controllo motorio della gamba malata. Per il test all'articolazione della caviglia, il piede del lato plegico era portato a 10° di flessione dorsale o plantare, mentre durante il test all'articolazione del ginocchio, a partire da una posizione iniziale di 90°, la gamba veniva spostata a 100° o a 80° di flessione. I valori assoluti delle differenze tra gli angoli delle due corrispondenti articolazioni (*joint-diff*) sono stati registrati. Ogni test è stato ripetuto tre volte.

Il senso di posizione articolare è stato classificato intatto o alterato, sulla base di due criteri che valutano il range e la variazione della variabile *joint-diff*: il paziente è stato classificato come avente sensazione propriocettiva alterata se in due test posizionali su tre la variabile *joint-diff* era maggiore di 13° per l'articolazione del ginocchio o 14° per quella della caviglia, e se la variazione di valori nello stesso soggetto è maggiore di 6°.

L'analisi dei dati cinematici ha evidenziato che la funzionalità motoria, definita sulla base della forza muscolare degli arti inferiori, è correlata in modo significativo con le caratteristiche spazio-temporali di deambulazione e contribuisce alla varianza della velocità di cammino, della lunghezza del passo e del tempo di supporto doppio.

Inoltre circa un terzo dei pazienti evidenzia un'alterazione nel senso di posizione articolare, ma le prestazioni cinematiche non differiscono in modo significativo tra i

pazienti con propiocezione normale e compromessa. Nonostante la mancanza di un rapporto diretto, il senso di posizione della caviglia influisce sulla velocità di cammino e sulla lunghezza del passo. Clinicamente, i pazienti che si lamentano di sapere la posizione del piede nel cammino, ossia di avere una scarsa sensazione propriocettiva, tendono, infatti, a camminare più lentamente e a compiere piccoli passi.

Il rapporto tra le caratteristiche cinematiche e la propiocezione in soggetti colpiti da ictus è analizzato anche nello studio "Repeatability and variation of quantitative gait data in subgroups of patients with stroke" [10]. La ripetibilità e la variazione di dati quantitativi ottenuti dall'analisi del cammino in pazienti con ictus sono state valutate e confrontate tra i sottogruppi selezionati sulla base della variabilità motoria.

Le caratteristiche cinematiche del cammino sono state valutate in novanta pazienti colpiti da un primo episodio di ictus con emiparesi unilaterale da meno di 36 mesi. I dati sono stati raccolti con il sistema Vicon 370 ed elaborati dal software Vicon Clinical Manager (versione 3.2). Per ogni paziente sono state registrate tre prove di cammino a velocità naturale a piedi nudi. Per ogni prova sono state calcolate la velocità di cammino, la lunghezza del passo, il tempo di singolo supporto, l'angolazione pelvica, l'angolo al momento del contatto iniziale, l'estensione e la flessione nella *swing phase* per l'anca, il ginocchio e la caviglia.

I sottogruppi sono stati selezionati in base al sesso, al lato della paresi, al tipo di lesione, al grado di recupero motorio, al tempo dall'ictus e alla velocità del cammino e alla propiocezione.

Quest'ultima è stata classificata come normale, compromessa o assente. Il test per la valutazione della propiocezione è stato eseguito spostando l'indice del paziente, tenuto lateralmente al giunto distale interfalangeo, verso l'alto o verso il basso di pochi millimetri; il paziente doveva riferire la direzione del movimento in relazione all'ultima posizione. Se la propiocezione risultava assente a livello delle dita ma presente a livello del polso, è stata categorizzata come compromessa, mentre se risultava assente anche a livello del polso è stata categorizzata come assente.

La scala Brunnstrom's Motor Recovery Stage (BMRS) è stata invece utilizzata per valutare il grado di recupero per l'estremità inferiore. Per quanto riguarda la soglia tra pazienti con passo veloce o lento è stata fissata a 0,34 m/s.

In generale è stato dimostrato che la ripetibilità di ogni caratteristica cinematica è adeguata o eccellente in tutti i sottogruppi e la velocità di cammino risulta essere il parametro maggiormente ripetibile dopo l'ictus. Vi è una certa variabilità tra i risultati ottenuti in donne e uomini per quanto riguarda la lunghezza del passo, e in camminatori lenti e veloci in relazione alla lunghezza del passo, al tempo di *single support*, al picco raggiunto dall'anca in flessione e all'angolo di flessione del ginocchio durante la *swing phase*. La variabilità tra i dati ottenuti da soggetti femminili e maschili tuttavia può essere ricondotta a un più elevato grado di severità del danno celebrale nelle donne selezionate per il presente studio o un maggiore disagio per le donne nel camminare in biancheria intima nel laboratorio. Inoltre pazienti con buon recupero dell'attività motoria camminano più velocemente rispetto a quelli con scarso recupero motorio e la ripetibilità risulta essere maggiore per il primo gruppo. Pazienti emiparetici in fase acuta, subacuta o cronica dopo l'ictus hanno mostrato una variabilità simile e ripetibilità adeguata o eccellente.

Per quanto riguarda la propriocezione, è stato evidenziato che questa influenza i risultati ottenuti ma non significativamente: la variabilità dei dati cinematici tra pazienti con propriocezione compromessa e intatta, infatti, non risulta essere rilevante. La ripetibilità invece è eccellente per tutti i parametri valutati, tranne che per la lunghezza del passo per entrambi i sottogruppi e per l'angolo di flessione dell'anca nella fase di oscillazione nel gruppo con propriocezione compromessa.

In conclusione, per pazienti con ictus il legame tra propriocezione e cammino non è diretto e chiaro, ma sembra che la perdita propriocettiva possa influenzare solo in parte il disegno motorio. La mancanza di un rapporto tra la propriocezione e le variabili cinematiche è da attribuire in parte alla ridondanza nel controllo afferente del movimento. Il cammino necessita di supporto continuo e controllato e di spostamenti ritmici del peso che attivano il senso di pressione, che a sua volta fornisce fondamentali input sensoriali afferenti per il controllo del cammino. Così, vie somatosensoriali diverse

dalla propiocezione potrebbero essere attivate in modo da compensare l'impatto della perdita propriocettiva sulle prestazioni cinematiche.

Tuttavia, nonostante la mancanza di un rapporto diretto, il senso di posizione della caviglia sembra influire sulla velocità di cammino e sulla lunghezza del passo. Deficit propriocettivi a lungo termine potrebbero quindi portare allo sviluppo di strategie di compensazione nel cammino in pazienti con ictus cronico.

3.1.2 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti affetti da morbo di Parkinson [13], [5]

Molte ricerche hanno ipotizzato che possa esistere un deficit propriocettivo in pazienti affetti da morbo di Parkinson (PD) e hanno suggerito che problemi sensoriali, e in particolare propriocettivi, siano un importante fattore da considerare come meccanismo che contribuisce a disfunzioni nel movimento nella malattia di Parkinson.

Si è cercato di individuare l'influenza della propiocezione, o della mancanza di essa, durante il cammino in pazienti PD e le strategie di compensazione messe in atto dal corpo affinché l'individuo possa compiere le normali attività fisiche, com'è riportato in [13] e [5].

Nello studio "Isolating vision and proprioception during locomotor navigation toward a target in Parkinson's disease" [13] si è valutato, in isolamento, il contributo del sistema visivo e propriocettivo sulla capacità di un soggetto PD di camminare verso un punto fermo e di determinare se questi contributi siano influenzati dal fatto che i pazienti erano o meno sotto l'effetto di farmaci anti-Parkinson.

I partecipanti allo studio dovevano camminare verso una luce target a LED in varie condizioni:

- in condizione di completa oscurità; in questo caso il moto è guidato solo dalla propiocezione;
- con visione del bersaglio per un tratto del cammino;
- con visione di una luce posta sullo sterno del partecipante;
- con visione allo stesso tempo del bersaglio che della luce posta sullo sterno.

La precisione nella direzione del movimento è stata valutata nei partecipanti PD sotto l'effetto o meno di farmaci dopaminergici regolari.

I risultati hanno dimostrato che i pazienti che non prendono farmaci hanno una scarsa precisione direzionale quando la propriocezione è stata isolata per guidare il movimento, ossia in condizioni di completa oscurità. La luce posta sul petto ha migliorato le prestazioni del partecipante, assicurando così la medesima precisione ottenuta da pazienti trattati con farmaci dopaminergici. In tutti i partecipanti, la precisione è risultata migliorata se era permessa la visione del bersaglio.

Un soggetto affetto da morbo di Parkinson con propriocezione alterata non è quindi in grado di guidare se stesso verso un bersaglio utilizzando solamente la sensazione propriocettiva come guida. La percezione di movimento può essere migliorata con l'uso di farmaci dopaminergici o fornendo una qualche guida visiva.

Nello studio "Proprioceptive deficits in Parkinson's disease patients with freezing of gait" [5], è invece stata esaminata la risposta alle vibrazioni del tendine nei pazienti PD e che soffrono di *Freezing of gait*. Stimolare i propriocettori artificialmente tramite la vibrazione del tendine provoca l'illusione di movimento in individui sani, data dalla contrazione del muscolo antagonista a quello sottoposto a vibrazione (per esempio, quando si pone in vibrazione il tendine rotuleo, l'illusione è una flessione del ginocchio). Si è ipotizzato che il *freezing of gait* sia provocato principalmente da un deficit propriocettivo e si è quindi indagato se la propriocezione fosse o meno diversa in questi soggetti.

Freezing of gait colpisce circa un terzo dei pazienti PD e può essere definita come la più grave disfunzione del movimento. In genere è attribuito a un deficit nell'uscita motoria che compare a distanza di tempo dall'esordio della malattia. Consiste in un vero e proprio blocco della marcia: il malato, nel tentativo di avviare la marcia, percepisce una sensazione di 'attaccamento' al terreno. Il rischio di cadute risulta quindi molto elevato poiché la parte superiore del corpo, non seguita dai piedi che restano immobili, si muove in avanti determinando la perdita di equilibrio.

Lo studio ha coinvolto trentanove partecipanti, dodici dei quali erano individui con malattia di Parkinson e *freezing of gait* (gruppo PD-FOG), dodici PD che non hanno mai

subito questa disfunzione (gruppo PD-non-FOG) e quindici partecipanti sani di controllo della stessa età.

I partecipanti sono stati fatti sedere su una sedia regolabile in altezza in una posizione semi-reclinata in modo tale che i piedi non toccassero il pavimento e il ginocchio fosse circa a 90° di flessione. Le forze sono state misurate da un sensore di coppia di reazione (TQ301-400, OMEGA ®, Laval (Quebec), Canada), mostrato in figura 14.



Figura 14: TQ301-400, OMEGA ®, (<http://www.omega.com/pptst/TQ301.html>)

Durante le prove con vibrazione, una versione modificata di un'incisione Dremel veniva manualmente tenuta a contatto con il tendine patellare al fine di impedire la dispersione delle vibrazioni attraverso i gruppi muscolari adiacenti. Vicino al partecipante era posto un monitor a cui era attaccato nella parte superiore un telo oscurante allo scopo di coprire lo schermo durante le prove con visione del moto.

In primo luogo, il partecipante doveva completare tre contrazioni volontarie massime (MVC) per gamba. Feedback visivi erano forniti attraverso lo schermo del computer in cui veniva visualizzata la forza riscontrata nel tempo.

In seguito, un totale di quarantotto prove sperimentali sono state completate in una serie di quattro blocchi classificati in base al lato della gamba (sinistra / destra) e alla percentuale di MVC (10%/30%). In ogni blocco, quattro condizioni sperimentali di tre

prove ciascuno sono state definite: visione/nessuna vibrazione, visione/vibrazione, nessuna visione/nessuna vibrazione, nessuna visione/vibrazione.

Sul monitor, durante la contrazione muscolare, apparivano una linea gialla, che rappresentava il 10% o il 30% della forza massima, e una linea in movimento rosa che descriveva l'entità della forza applicata. Il soggetto doveva far combaciare la forza applicata con la forza target, o in altre parole, far sì che le due linee si sovrapponessero. Durante le prove con assenza di visione del target, il partecipante poteva osservare la forza di riferimento sullo schermo del computer per 10 secondi, mentre nei 5 secondi successivi, doveva cercare di mantenere la stessa quantità di forza. Nelle condizioni con vibrazione, il dispositivo vibrante è stato posto a contatto del tendine soltanto dopo il periodo di riferimento.

L'analisi dei dati ottenuti ha evidenziato innanzitutto che il gruppo PD-FOG non era in grado di produrre MVC con valori simili a quelli generati dagli altri gruppi di partecipanti. La debolezza muscolare tuttavia è uno dei sintomi principali del Parkinson ed è correlato con la severità clinica della malattia. La debolezza muscolare deriva da un problema senso-motorio che quindi potrebbe essere ulteriormente influenzato da deficit propriocettivi.

L'esperimento è stato impostato per consentire inoltre una valutazione tra i gruppi e nello stesso soggetto di come la produzione di forza possa essere influenzata dai feedback visivi e/o dalla vibrazione.

Sebbene l'illusione di movimento indotta dalla vibrazione non sia stata riscontrata in nessuno dei gruppi, le vibrazioni causano una maggiore deviazione nel gruppo PD-FOG. Le vibrazioni del tendine dovrebbero ottimizzare le informazioni propriocettive fornite al sistema nervoso centrale aumentando sia il numero di propriocettori coinvolti che la loro quantità totale, e così aumentare l'integrazione tra gli input visivi e quelli propriocettivi. Tuttavia sia nel gruppo PD sia nel gruppo PD-FOG vi è stato un calo in termini di prestazioni con l'aggiunta della vibrazione. È possibile che i gangli della base giochino un ruolo importante nell'integrazione visuo-propriocettiva. Di conseguenza, le scarse prestazioni negli studi di vibrazione potrebbero essere il risultato di un'incapacità dei gangli della base di integrare in modo preciso le informazioni sensoriali. Anche

possibile che esista un deficit nell'integrazione senso-motoria per cui le multiple fonti di informazioni sensoriali non sono esattamente tradotte in un moto adeguato.

Dal momento che tutte e tre le condizioni di manipolazione sensoriale erano significativamente diverse dalla condizione base (visione/nessuna vibrazione), ma non erano significativamente diverse tra loro, si deduce un soggetto PD ha severe difficoltà a svolgere il compito assegnato quando vi sia una qualsiasi modificazione agli ingressi sensoriali normali. A seguito di queste manipolazioni, il soggetto doveva completare la prova contando solo sulla propiocezione; l'incapacità a raggiungere l'obiettivo sulla base della disponibilità sensoriale dipenderà quindi da una menomazione nel sistema propriocettivo. La diminuzione della precisione sensoriale, ossia la difficoltà a far combaciare le forze, che si è verificata in seguito alla rimozione dei feedback visivi, suggerisce che i soggetti PD siano eccessivamente dipendenti dalle informazioni visive e utilizzino la visione per compensare i deficit propriocettivi. L'informazione visiva può, infatti, bypassare i gangli della base attraverso un percorso neurale separato; dal momento che i risultati sono meno accurati quando i soggetti si affidano solo alla propiocezione, si può dedurre che probabilmente non esista un percorso alternativo per le informazioni propriocettive e i deficit propriocettivi siano dovuti a un guasto centrale, probabilmente situato all'interno dei gangli della base.

In conclusione, le persone colpite da malattie di Parkinson soffrono di un deficit al sistema propriocettivo derivante probabilmente da un danno ai gangli della base che non sono in grado di elaborare correttamente le informazioni provenienti dai recettori articolari. I soggetti PD sono quindi costretti a sfruttare le informazioni visive per compensare tale deficit e riuscire a compiere le normali attività funzionali.

3.1.3 Propriocezione e analisi del cammino in pazienti con osteoartrite [11], [14], [18], [2]

L'osteoartrite (OA) è una condizione patologica ampiamente diffusa, cronica e invalidante, ed è la forma più comune di artrite. Severe limitazioni nelle attività fisiche quotidiane (ad esempio, difficoltà nel camminare e nel salire le scale) sono associate a questa malattia più che in qualsiasi altra, in particolare negli anziani. Per pazienti con OA

del ginocchio, fondamentale importanza assume pertanto lo studio del ruolo dei processi biomeccanici che hanno luogo durante le attività fisiche quotidiane.

Negli ultimi dieci anni sono stati pubblicati numerosi studi sulla propiocezione del ginocchio in pazienti con OA. La propiocezione si presume essere necessaria per la protezione del ginocchio contro movimenti eccessivi, per la stabilità durante la postura statica e per il corretto coordinamento dei movimenti. In persone con OA, tuttavia, la capacità propriocettiva risulta essere compromessa, con conseguente riduzione della protezione del ginocchio durante la deambulazione e danni degenerativi all'articolazione. [11]

La stabilità del ginocchio è stata al centro della ricerca degli ultimi anni ed è definita come la capacità dell'articolazione di mantenere una posizione o controllare il movimento in diverse situazioni di carico esterno. E' stato supposto che la debolezza muscolare, una scarsa propiocezione e inadeguati vincoli passivi (legamenti e capsule) determinino la sua instabilità.

Nello studio "Knee varus–valgus motion during gait – a measure of joint stability in patients with osteoarthritis?" [14] si è valutata la validità del movimento varo-valgo come misura della stabilità del ginocchio in pazienti con OA, stabilendo la relazione di tale movimento con la forza muscolare, la propiocezione articolare, la lassità articolare e l'allineamento scheletrico.

La lassità articolare è stata misurata come il movimento totale nella direzione vara e valga, mentre l'allineamento scheletrico è stato rilevato tramite goniometro in una situazione di assenza di carico.

La propiocezione dell'articolazione è stata definita come la sensazione di movimento articolare percepita ed è stata valutata usando un test che rileva la soglia di percezione del movimento articolare del ginocchio (*Joint Motion Detection Threshold, JMDT*). Un dispositivo è stato costruito appositamente ed è costituito da motore passo-passo destro e sinistro, un trasmettitore destro e sinistro, dislocatori angolari a sinistra e a destra, due trasduttori di forza e due pulsanti di stop. Questo dispositivo fornisce spostamenti angolari del ginocchio precisi con una risoluzione di 0,1°. Stimoli visivi e

uditivi, vibrazioni meccaniche, tensione cutanea e punti di pressione sono stati ridotti al minimo.

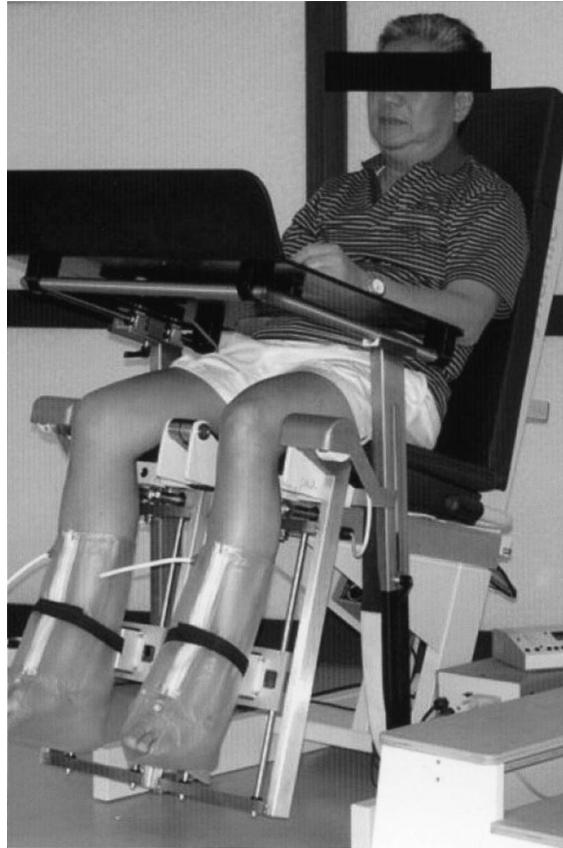


Figura 15: Configurazione sperimentale per la misura della propriocezione [31].

I soggetti sono stati fatti sedere su una sedia con schienale in posizione semi-reclinata; entrambe le gambe sono state posizionate su due bracci di leva separati in modo che le ginocchia fossero a 90° di flessione e le anche a 70° di flessione. Un bracciale è stato legato intorno alla caviglia appena sopra i malleoli per minimizzare movimenti non voluti. Per ridurre al minimo i segnali visivi, i pazienti erano seduti dietro una paratia che impediva loro di vedere il movimento. Dapprima le entrambe le gambe sono state portate in una posizione iniziale di 30° di flessione del ginocchio. In seguito, tramite un computer una sola gamba veniva mossa con una velocità di $0,3^\circ$ al secondo. Il paziente doveva premere un pulsante quando percepiva un cambiamento nella posizione del ginocchio: quello destro per il ginocchio destro e il tasto sinistro per il sinistro. L'ordine delle gambe testate è stato scelto casualmente. La JMDT del ginocchio è stata definita

come la differenza, in gradi, tra la posizione iniziale effettiva e la posizione assunta nel momento in cui il soggetto ha percepito il movimento. Un alto valore di JMDT indica un' inadeguata capacità propriocettiva mentre un basso valore denota una buona propriocezione. La media dei valori di JMDT per il ginocchio destro e sinistro individua la propriocezione totale.

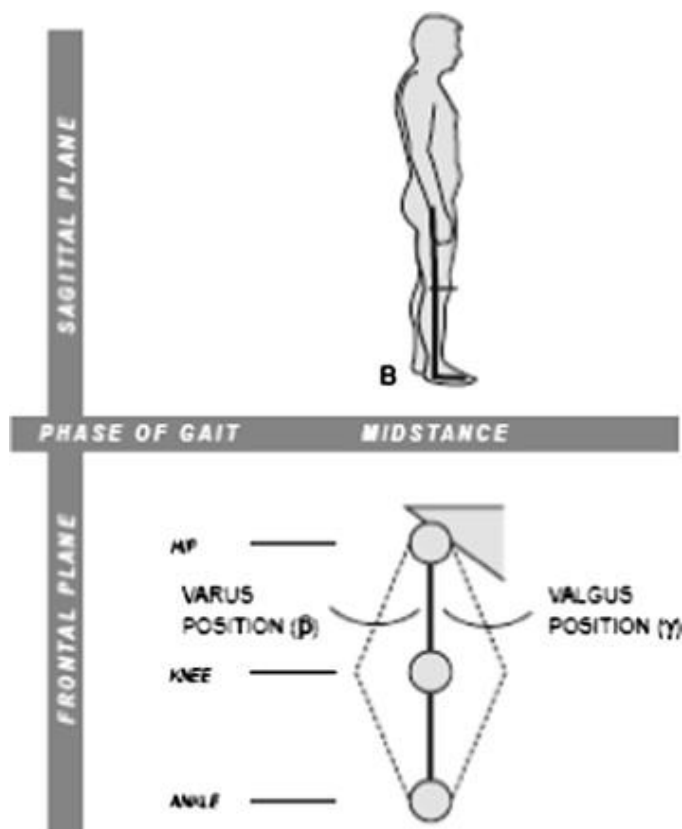


Figura 16: posizione vara e valga [21].

Per l'analisi della stabilità articolare durante il cammino, un sistema di analisi del movimento Optotrak (modello 3020, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Canada) ha registrato la posizione 3D di marker a LED posti sulla pelle del paziente in punti prefissati al fine di valutare il movimento varo e valgo. Le forze di reazione a terra sono state registrate utilizzando in sincronia una piastra di forza di 51x46,5 cm (AMTI, Watertown, MA, USA). A tutti i soggetti è stato detto di camminare a velocità normale lungo una passerella di 8 metri.

La posizione vara è definito come l'angolo β tra l'escursione vara del ginocchio in *midstance* e la posizione del ginocchio all'inizio della misurazione. La posizione valga è l'angolo γ tra l'escursione valga del ginocchio in *midstance* e la posizione del ginocchio all'inizio della misurazione. (Fig. 16)

L'analisi dei dati dinamici ha evidenziato che non vi è alcuna relazione tra il movimento varo-valgo e le variabili biomeccaniche responsabili della stabilità articolare, ossia la forza muscolare, la propriocezione articolare, la lassità articolare e l'allineamento scheletrico. Questo suggerisce che tale movimento non è una misura valida della stabilità articolare, che invece, deve essere valutata sulla base di queste variabili biomeccaniche, come la propriocezione, ma considerandole indipendentemente.

In letteratura, diversi fattori sono stati valutati come possibile causa della ridotta precisione propriocettiva in pazienti con OA del ginocchio, in particolare il deterioramento dei meccanocettori e la debolezza muscolare. Diversi studi trasversali hanno mostrato inoltre che esiste una relazione positiva significativa tra il dolore al ginocchio, le limitazioni funzionali e la ridotta precisione propriocettiva. In particolare si è osservato che un'alterata capacità propriocettiva potrebbe essere un fattore di rischio per la progressione, ma non per l'insorgenza, del dolore e delle limitazioni funzionali, ma solo quando la malattia è in fase avanzata e non in una fase iniziale della malattia. È stato ipotizzato altresì che l'input nocicettivo possa prevalere sull'input propriocettivo, in modo da comprometterne la precisione.

La propriocezione sembra essere inoltre un fattore modificabile in pazienti con OA del ginocchio. Molti studi hanno valutato gli effetti di diversi interventi sulla precisione propriocettiva, come l'impiego della stimolazione elettrica, di esercizi terapeutici o di supporti ortopedici al ginocchio. In particolare sono stati rilevati miglioramenti significativi nel senso di posizione, così come nel dolore e nelle limitazioni funzionali, a seguito di programmi terapeutici che utilizzano esercizi mirati a stimolare la propriocezione. Gli esercizi propriocettivi e gli esercizi a carico naturale di rafforzamento muscolare sembrano essere maggiormente efficaci a tal scopo. I miglioramenti ottenuti sono presumibilmente dovuti a un rafforzamento della forza muscolare e della resistenza, e di conseguenza a un aumento della sensibilità dei fusi neuromuscolari, o a

una maggiore stimolazione dei meccanorecettori dell'articolazione. E' stato ipotizzato inoltre che gli esercizi a carico naturale possano aumentare la pressione intra-articolare, stimolando in tal modo le terminazioni nervose di Ruffini, e quindi possano migliorare la precisione propriocettiva. [11]

Le cause e le conseguenze di una scarsa capacità propriocettiva in pazienti con OA sono state studiate e analizzate in numerosi studi, come in [18] e [2].

Nello studio "Joint proprioception, muscle strength, and functional ability in patients with osteoarthritis of the knee" [18] è stato indagato in particolare il legame tra la propriocezione, la debolezza muscolare e la capacità funzionale. Sessantatré pazienti con diagnosi di OA al ginocchio sono stati inclusi nello studio. La capacità funzionale è stata valutata con un questionario e due test fisici standard:

- test di locomozione per 100 metri: ai soggetti deve camminare più velocemente possibile lungo un corridoio di 20 metri per un totale di cinque volte consecutive. Un cronometro è utilizzato per misurare il tempo impiegato per completare l'intero percorso, a partire dal segnale verbale di inizio test;
- il test *Get Up and Go*: il soggetto è seduto su una sedia con braccioli, al comando "go" si deve alzare in piedi senza aiuto delle braccia e camminare lungo un corridoio il più veloce possibile. Anche in questo caso è utilizzato un cronometro per misurare il tempo impiegato dal soggetto per alzarsi dalla sedia e camminare 15 metri. I pazienti sono autorizzati ad usare un bastone, se necessario.

La forza muscolare è stata valutata per la flessione e l'estensione del ginocchio utilizzando un dinamometro isocinetico (EnKnee; Enraf-Nonius, Rotterdam, Paesi Bassi). I pazienti erano seduti su una panchina e legati al dispositivo di analisi attraverso cinghie poste sul torace, sul bacino e sulle gambe. I supporti per la caviglia del dinamometro sono stati disposti a 2 cm dal malleolo mediale per consentire la flessione dorsale della caviglia durante le prove. I pazienti hanno eseguito tre ripetizioni di contrazioni volontarie massime. La forza media delle contrazioni destre e sinistre per i quadricipiti e per i muscoli posteriori della coscia è stata utilizzata per l'analisi.

La propriocezione dell'articolazione è stata valutata usando un test che rileva la soglia di percezione del movimento articolare del ginocchio (*Joint Motion Detection Threshold*,

JMDT) utilizzando lo stesso dispositivo e la stessa metodologia descritta per il precedente articolo [18].

L'analisi dei risultati ha dimostrato che una scarsa propiocezione ha un rapporto diretto debole con i problemi relativi alla capacità funzionale. Tuttavia, l'interazione tra la forza muscolare e la propiocezione ha contribuito significativamente sul tempo di cammino di 100 metri e sul tempo della prova *Get Up and Go*. Esistono, infatti, grandi differenze nella capacità funzionale a seguito di differenze nella forza muscolare in pazienti con una scarsa propiocezione, rispetto ai pazienti con una propiocezione accurata. Questi risultati suggeriscono che, in assenza di adeguato controllo motore per mancanza di informazioni accurate provenienti dal sistema propriocettivo, la debolezza muscolare lede la capacità funzionale di un paziente con severità maggiore.

I feedback propriocettivi sensoriali, attraverso i meccanoettori dell'articolazione, modulano e regolano l'attivazione dei muscoli, fornendo così un adeguato strumento di controllo neuromuscolare della posizione e del movimento articolare, e in generale della performance delle varie attività fisiche. Sebbene il rapporto diretto tra propiocezione e la capacità funzionale sia debole, sembra che la propiocezione influisca indirettamente sulle capacità funzionali attraverso la modulazione del rapporto tra la forza muscolare e la capacità funzionale. Quando la capacità propriocettiva diminuisce, l'abilità funzionale può essere mantenuta solo se c'è forza muscolare sufficiente per compensarla. Ciò implica che la capacità funzionale è influenzata dalla presenza simultanea di problemi propriocettivi e di debolezza muscolare.

I pazienti con un'inadeguata propiocezione a livello del ginocchio potrebbero quindi beneficiare maggiormente di interventi volti ad aumentare la forza muscolare, come l'esercizio fisico, rispetto ai pazienti con propiocezione adeguata.

Nello studio "Proprioception, gait kinematics, and rate of loading during walking: Are they related?" [2] si è invece cercato di indagare se la cinematica degli arti durante il cammino, nella transizione dalla *swing phase* alla *stance phase*, influenzi la velocità di carico (*Rate Of Loading*) e di determinare se esiste una relazione tra queste azioni e la propiocezione e tra la velocità di carico e la propiocezione.

Il ciclo naturale del passo, infatti, può impartire sollecitazioni ripetute sul corpo, particolarmente durante il contatto iniziale (IC), o *heelstrike*. Nel 50 millisecondi seguenti all'IC, una "onda d'urto" attraversa il corpo con conseguente scambio di energia e di momenti tramite il piede a contatto con il suolo. Tale onda potrebbe provocare un allentamento nelle protesi articolari, fratture da stress, tendiniti, mal di testa e malattie degenerative articolari, come l'OA.

E' stato teorizzato che i movimenti degli arti prima o durante l'*heelstrike* possono condizionare le forze di reazione al suolo e la velocità di carico; mentre alcuni individui rallentano o arrestano il piede prima del contatto, altri sembrano "consentire alla terra" di fermare il piede. Inoltre, l'angolo dell'articolazione del ginocchio è un altro fattore importante da considerare nella *Rate Of Loading*. Il corretto posizionamento del ginocchio prima dell'IC e la contrazione eccentrica dei muscoli della coscia aiutano a disperdere il carico e diminuire lo stress sull'articolazione. Entrambi questi meccanismi richiedono tuttavia un sistema di controllo neuromuscolare intatto. I meccanismi neuromuscolari, che aiutano a prevenire danni all'*heel strike*, sono il riflesso miotatico a breve latenza, che abbassa la velocità di carico, e i movimenti anticipatori prima del contatto iniziale per preparare il corpo all'urto. Il riflesso miotatico a breve latenza è indotto dai fusi neuromuscolari (fibre Ia) e dagli organi tendinei di Golgi durante il caricamento a IC, meccanicocettori per il sistema propriocettivo. I movimenti anticipatori sono invece condizionati dalle informazioni propriocettive: durante la fase di oscillazione, il corpo riceve feedback dai meccanicocettori e il corpo usa queste informazioni per controllare i movimenti successivi. Se durante il cammino il corpo non è a conoscenza dei movimenti o delle posizioni dei segmenti anatomici, può non essere grado di preparare efficacemente per l'impatto e il carico a IC.

Per questo studio sono state selezionate un totale di trentotto donne sane e giovani. Per la misura della propriocezione sono stati utilizzati due tipi di test: la soglia di percezione del movimento passivo (*Threshold To Detect Passive Motion*, TTDPM) per la misura della cinestesia articolare e la riproduzione dell'angolo articolare (*Joint angle reproduction*, JAR) per la misura del senso di posizione. Nel primo tipo di test, il soggetto è seduto e la sua gamba destra è stata testata a partire da due posizioni standard di partenza, ossia

45° e 70° di estensione del ginocchio rispetto alla verticale. Venti prove TTDPM sono state eseguite alla velocità di 0.4°/s, dieci per ciascun angolo iniziale, e all'interno di ciascuna delle dieci prove, cinque movimenti erano di flessione e cinque di estensione dell'articolazione del ginocchio. Una media totale è stata trovata tra tutte le venti prove. Per il test JAR, la gamba destra del soggetto è stata testata ad angoli target di 45° e 70° di estensione dalla verticale. La differenza tra l'angolo bersaglio e quello reale è stata determinata con un flessometro Leighton (Leighton Flexometer, Inc., Spokane, WA, USA). Sono state fatte cinque prove per ogni angolo per un totale di dieci prove.

Per l'analisi del cammino, è stata usata una piastra di forza a sei componenti (Advanced Mechanical Technology Inc., Newton, MA, USA) mentre i dati cinematici sono stati registrati da una videocamera (Panasonic model AG-450, Matsushita Electric Industrial Co, Ltd, Okayama, Giappone) posta a destra del soggetto. I marker riflettenti erano attaccati in posizioni standard sul corpo del soggetto. Ai soggetti, a piedi nudi, è stato chiesto di camminare normalmente con indosso occhiali speciali per ridurre la visione periferica. Dieci prove di cammino sono state eseguite per ogni soggetto di cui le prime cinque a velocità di passo naturale mentre le ultime cinque ad una velocità tra 1,17 e 1,29 m/s, considerata come velocità normale per la maggior parte degli individui. La velocità del cammino è stata monitorata tramite due fotocellule telemetrici (Brower Infrared Timing System, Salt Lake City, UT, USA) messe a tre metri l'una dall'altra, in posizione adiacente alla passerella. Per ogni prova sono state calcolate le seguenti variabili cinematiche: angoli, velocità e accelerazioni articolari, velocità e accelerazioni radiali 50 millisecondi prima e durante l'IC del ginocchio e della caviglia.

La velocità di carico è stata calcolata a partire dalla curva delle forze di reazione al suolo come la pendenza della curva tra il punto di contatto iniziale e il picco iniziale, punto A, che rappresenta la forza massima locale generata nei 50 millisecondi dopo il contatto (Figura 17).

Questo parametro è stato poi normalizzato in base al peso corporeo (BW) per consentire il confronto dei dati. Le forze di reazione verticale sono state utilizzate anche per classificare alcuni individui come *heelstrickers*, se il rapporto A/B è maggiore di 1,2, in cui

B è il primo punto successivo ad A in cui si ha la forza minima locale. Nel nostro studio, sedici dei trentotto soggetti sono stati considerati *heelstrikers*.

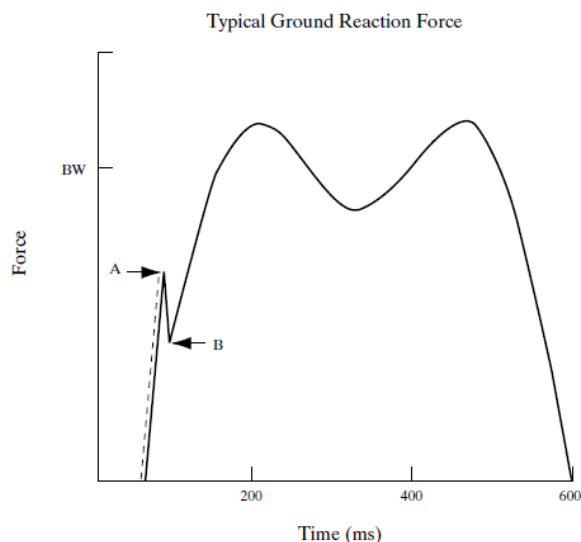


Figura 17: Curva delle reazioni verticali del terreno. [2]

L'analisi dei dati cinematici ottenuti ha evidenziato che l'accelerazione verticale della caviglia e l'angolo del ginocchio 50 millisecondi prima dell'IC sono fortemente correlati alla velocità di carico. Inoltre le misure della propriocezione ottenute con il test TTDPM a 70° di flessione e con il test JAR sono significativamente correlate con l'angolo definito dal ginocchio 50 millisecondi prima dell'IC, ma nessun test della propriocezione è relazionabile con l'accelerazione verticale della caviglia 50 millisecondi prima di IC.

L'analisi ha rivelato inoltre che persone che esprimono più alti valori della velocità di carico eseguono in modo significativamente peggiore il test 70° TDPM ($3.50 \pm 0.91^\circ$ vs $1.67 \pm 0.33^\circ$) e il test JAR ($5.51 \pm 1.80^\circ$ vs $2,13 \pm 0.81^\circ$) rispetto a quelli con una più bassa velocità di carico. I test propriocettivi possono quindi essere predittivi della velocità di carico caratteristica individuale.

In aggiunta soggetti che prima dell'IC mostrano un angolo di estensione del ginocchio più elevato, ossia con gamba maggiormente estesa o iperestesia, non solo hanno un più alto valore della *Rate of Loading* (47.7 ± 10.1 BW/s vs. 24.0 ± 5.0 BW/s), ma anche una

peggiore capacità propriocettiva (70° TDPM: $3,55 \pm 1,0^\circ$ vs $1,55 \pm 0,41^\circ$) rispetto a soggetti con gli angoli di estensione del ginocchio più piccoli.

La propriocezione di un individuo può essere quindi correlata alla posizione del ginocchio e ai movimenti delle gambe prima dell'IC, che alla fine possono influenzare la velocità di carico sperimentata. Le due misure propriocettive (70° TDPM e JAR) possono essere quindi predittive di anomalie del cammino. Tuttavia, non è chiaro se una capacità propriocettiva compromessa provochi una velocità di carico elevata o la velocità elevata provochi danni ai meccanorecettori, ma la correlazione è significativa e giustifica ulteriori indagini.

In conclusione, individui con OA al ginocchio che hanno scarsa propriocezione mostrano maggiori difficoltà nello svolgere le attività fisiche quotidiane, come salire le scale, camminare o nel compiere le comuni faccende domestiche. Queste limitazioni sono in parte causate da debolezza muscolare e sono influenzate dalla propriocezione. Il legame tra la cinematica e la propriocezione va inoltre a influenzare la velocità di carico che a sua volta può aggravare lo stato dell'osteoartrite.

3.1.4 Variazioni dei parametri cinematici e dinamici in seguito a manipolazioni esterne [15], [3], [4]

Al fine di migliorare il cammino e l'equilibrio in pazienti che presentano un pattern motorio alterato, molti sistemi tecnologici e biomeccanici sono stati studiati e valutati. Disturbi al sistema somato-sensoriale, in particolare alla propriocezione, possono, infatti, avere dannose implicazioni funzionali soprattutto sul controllo della postura e del movimento.

Un dispositivo di terapia autonoma per la neuro-riabilitazione che sfrutta la propriocezione in soggetti che hanno subito un danno cerebrale traumatico è descritto in "Virtual proprioception with real-time step detection and processing" [3] e "The merits of artificial proprioception, with applications in biofeedback gait rehabilitation concepts and movement disorder characterization" [4]. Il dispositivo quasi autonomo fornisce al soggetto biofeedback quantificati in tempo reale sullo stato cinematico delle gambe nel cammino. Sulla base di tali biofeedback, un soggetto è potenzialmente in

grado di modificare il pattern motorio verso un andamento più regolare repentinamente. Questo sistema è stato denominato *virtual proprioception*.

Complesse funzioni motorie, come ad esempio la locomozione, sono modellate sulla base dei feedback propriocettivi e organizzate a livello del sistema nervoso centrale. Un fattore di alterazione della propriocezione è legato alla modifica della funzione riflessa. Deficit nel controllo soprasspinale contribuiscono all'ipereccitabilità del riflesso a breve latenza mentre in seguito a traumi del sistema nervoso centrale la modulazione del riflesso a breve latenza può risultare alterata durante il cammino. Conseguentemente una lesione cerebrale generalmente decrementa la qualità del controllo motorio e del cammino. Alcuni sintomi generali legati a una lesione cerebrale traumatica sono la debolezza, l'ipertonicità, la coattivazione muscolare, un'attivazione muscolare diminuita e una disparità nella lunghezza delle gambe. A causa di queste lesioni e della conseguente difficoltà per il malato a flettere l'anca e la caviglia durante l'estensione della gamba, il corpo mette in atto strategie compensative, come la rotazione del piede e la circumduzione.

Gli accelerometri possono potenzialmente servire come un mezzo alternativo per quantificare la rappresentazione spaziale delle gambe. In sostanza gli accelerometri offrono la capacità di trasmettere biofeedback, una forma virtuale di propriocezione, in modo che la plasticità motoria possa essere indotta.

Il dispositivo *virtual proprioception* è costruito da due accelerometri Mednode and G-Link® Wireless 3D alimentati a batteria contenenti un'unità di elaborazione integrata, in grado di quantificare forme d'onda dell'accelerazione durante la locomozione. Ogni accelerometro è posizionato sull'epicondilo laterale del femore vicino al ginocchio. Il segnale proveniente dall'accelerometro wireless 3D è trasmesso ad un PC locale portatile per l'elaborazione e la memoria.

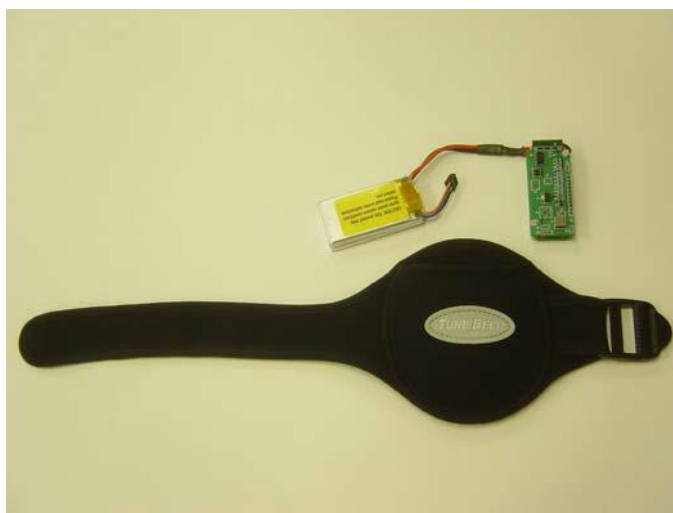


Figura 18: Accelerometri 3D wireless [3]

Il test iniziale ha coinvolto un paziente affetto da emiplegia cronica. Il soggetto doveva camminare per circa 23 metri, al termine dei quali riceveva un segnale uditivo (verbale) sul rapporto tra la gamba sinistra e quella destra da un operatore. Dato il feedback uditivo il soggetto cercava di regolare l'andatura per i successivi 23 metri e riportare in parità il rapporto. Cinque prove sono state condotte dal soggetto utilizzando questo sistema.

La forma d'onda dell'accelerazione fornisce una rappresentazione della funzione dell'articolazione dell'anca, fornendo importanti informazioni spazio-temporali pertinenti allo stato del pattern motorio. Il soggetto è riuscito a modificare l'andatura in tempo reale a seguito del feedback uditivo in maniera opportuna. La *virtual proprioception* rappresenta pertanto una valida modalità per la riabilitazione autonoma del cammino.

Nello studio "Variation of cinematic and dynamic parameters in posturographic and gait analysis under normal conditions and after manipulation of visual and foot proprioceptive informations" [16] è stato invece valutato in soggetti con dismetria agli arti inferiori gli effetti conseguenti a una variazione della percezione visiva, tramite l'uso di occhiali SGLA, e delle condizioni di contatto tra piede e suolo, tramite l'uso di plantari propriocettivi.

Il piede è un organo fondamentale del corpo umano sia per l'azione biomeccanica che svolge sia per la funzione di recettore sensoriale determinante per l'equilibrio. È anche grazie alle molteplici informazioni provenienti dai recettori muscolari, articolari e cutanei dei piedi che il nostro cervello orienta il corpo nello spazio. L'appoggio non corretto del piede incide negativamente sull'attività motoria ed induce il nostro corpo ad assumere un atteggiamento sbagliato.

Il sistema di misura utilizzato in questo studio è il sistema PEDAR, un sistema che misura la distribuzione dinamica delle pressioni per il monitoraggio dei carichi locali tra piede e calzatura.

Sia per i soggetti sani che per quelli che presentano una dismetria agli arti inferiori, due diverse condizioni di analisi sono state esaminate:

- Utilizzo di occhiali speciali (SGLA) che inducono il cosiddetto ipertono sul lato sinistro o destro del sistema muscolare;
- Utilizzo di speciali cuscinetti plantari propriocettivi (PINS) nelle scarpe durante il moto; i PINS sono costituiti da elementi di stimolo per il sistema meccanorecettore della pianta del piede.

Tutti i soggetti hanno eseguito cinque test di equilibrio su entrambi i piedi della durata di un minuto con e senza SGLA, e con diversa posizione della testa, e cinque prove di cammino in condizioni normali.

Per i soggetti con dismetria, l'uso di SGLA ha indotto una riduzione della differenza nei valori di forza di picco durante la prova equilibrio, ma solo per uno specifico lato. Nelle prove motorie, questo effetto è stato rilevato anche quando il lato opposto era sotto l'effetto della SGLA.

Il disegno definito dallo spostamento del centro di pressione, confronto con quello ottenuto in condizioni di deambulazione normale, risulta essere influenzato dai PINS. I plantari propriocettivi stimolano i recettori propriocettivi dei piedi e quindi il loro uso in pazienti con dismetria è consigliato per migliorare la risposta propriocettiva e quindi il cammino e la postura.

3.1.5 L'uso di esercizi propriocettivi in soggetti con lesione al legamento crociato anteriore [7]

Una lesione al legamento crociato anteriore (ACL) è uno dei danni più comuni in seguito a incidenti sportivi. Questo legamento è coinvolto in circa il 50% tra tutti gli infortuni che interessano l'apparato legamentoso del ginocchio. A danni di questo legamento sono associati casi d'instabilità al ginocchio, di carico alterato nell'articolazione del ginocchio e controllo neuromuscolare ridotto. Nel ginocchio, sono presenti molti meccanorecettori, come i corpuscoli di Pacini e di Ruffini, localizzati nel legamento crociato anteriore e posteriore e nel menisco; a una lesione all'ACL sono quindi associati problemi di equilibrio a seguito della perdita in capacità propriocettiva derivante dalla rottura di molteplici propriocettori.

L'80% delle operazioni chirurgiche al ginocchio coinvolge l'ACL. Oggigiorno sono molto diffusi programmi di riabilitazione accelerati post-intervento i cui obiettivi principali sono quelli di ripristinare la stabilità dinamica del ginocchio e facilitare il ritorno del paziente alla pratica di attività sportiva a livelli agonistici. Il recupero è ottenuto grazie ad esercizi attivi isometrici e isotonici che aumentano la forza muscolare, ad esercizi passivi e in seguito ad esercizi di mobilità attiva.

In letteratura, molti studi hanno valutato gli effetti di trattamenti che stimolano la propriocezione, come l'impiego della stimolazione elettrica, di esercizi terapeutici o di supporti ortopedici al ginocchio. In particolare sono stati rilevati miglioramenti significativi grazie ad esercizi propriocettivi, mirati a stimolare il senso di posizione e la cinestesia degli arti, che sembrano rafforzare la forza muscolare ed aumentare la sensibilità dei fusi neuromuscolari e la stimolazione dei meccanorecettori articolari.

Un approccio riabilitativo "neurocognitivo" che include esercizi che stimolano la propriocezione è stato presentato nello studio "Neurocognitive rehabilitative approach effectiveness after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon. A randomized controlled trial." [7]; in questo studio si sono valutati gli effetti della riabilitazione neurocognitiva e di quella tradizionale in pazienti che hanno subito la ricostruzione artroscopica dell'ACL tramite il trapianto di innesti ossei e innesti del tendine patellare.

Quattordici pazienti maschi sono stati selezionati, sette dei quali hanno sperimentato la terapia neurocognitiva e sette la terapia convenzionale. I miglioramenti conseguiti dai pazienti sono stati valutati tramite indagine baropodometrica, eseguita con una pedana sensorizzata, e indagini cliniche, attraverso questionari e specifiche misurazioni, eseguite prima dell'operazione e nei mesi successivi. L'indagine baropodometrica consisteva in una prova dinamica e una prova statica, tramite la quale si è potuto identificare il centro di pressione (CoP) del soggetto. Il test statico serviva a valutare la simmetria del carico tra l'arto operato e quello sano nelle varie fasi della riabilitazione. La simmetria è stata calcolata come la differenza tra la percentuale di carico nell'arto lesa e quello controlaterale. Durante la prova dinamica è stata invece registrata la posizione di sei passi su una pedana di circa 2.5 metri di lunghezza. Si sono così ottenuti diversi parametri quali la lunghezza del passo, la larghezza del passo, la cadenza e la velocità di cammino. Per le prove baropodometriche statiche e dinamiche sono stati usati il sistema Digital Biometric Images Scanning e il software Milletrix®.

Durante la riabilitazione neurocognitiva, è stata considerata anche l'immaginazione motoria, definita come lo stato dinamico durante il quale una persona simula una data azione.



Figura 19: Esempi di esercizi neurocognitivi: A) esercizio di riconoscimento delle differenti posizioni dell'arto inferiore per il recupero dell'arco di movimento; B) esercizio di riconoscimento dell'arto inferiore per il recupero della forza del muscolo quadricipite femorale in relazione alla direzione angolare dell'anca.[7]

Molti degli esercizi proposti richiedano il riconoscimento delle diverse posizioni del ginocchio nel tempo e nello spazio e imponevano al paziente di risolvere problemi cognitivi attraverso lo spostamento di una parte dell'arto con l'aiuto del fisioterapista. Ogni problema richiedeva un "processo cognitivo" per ricavare la metodologia di risoluzione.

Maggiori miglioramenti sono stati riscontrati in soggetti che hanno subito la riabilitazione neurocognitiva rispetto ai pazienti che hanno invece eseguito la terapia tradizionale:

- minore asimmetria del carico statico durante la prova baropodometrica statica (dal 7% al 3% vs. dal 10% al 7%);
- minore larghezza del passo (ampiezza effettiva: 1.05 vs 0.38);
- minore edema;
- miglioramento generale di salute.

Inoltre tutti i pazienti hanno acquisito una maggiore fluidità nel cammino, con passi più lunghi, minore frequenza e minore larghezza del passo. La ridotta lunghezza del passo è inoltre un indicatore del maggior bilanciamento dinamico durante il cammino.

L'uso di esercizi che stimolano in qualche modo la propriocezione, ossia una maggiore attivazione dei meccanorecettori specifici rimasti, permette a un individuo che ha subito una lesione al legamento crociato anteriore, una riabilitazione più veloce ed efficace.

	Frequenza	Trattamento neurocognitivo	Trattamento convenzionale
Dalla 1 ^a alla 3 ^a settimana	5 volte la settimana	-Massaggioterapia -Esercizi di allungamento -Esercizi di contrazione isometrica -Esercizi di flessione ed estensione agli arti inferiori	-Massaggioterapia -Esercizi di allungamento -Esercizi di contrazione isometrica -Esercizi di flessione ed estensione agli arti inferiori
1 ^a settimana Dalla 3 ^a alla 5 ^a settimana	Se necessario 3 volte la settimana	Crioterapia Esercizi neurocognitivi per: -la rigidità -la gestione del dolore -la locomozione a 30 giorni dall'operazione -la propriocezione -il coordinamento muscolare -il reclutamento muscolare	Crioterapia -Esercizi di flessione-estensione passiva -Riabilitazione all'equilibrio e al cammino -Esercizi di contrazione isometrica dei quadricipiti in completa estensione
Dalla 3 ^a alla 12 ^a settimana Dalla 4 ^a alla 24 ^a settimana	1 volta la settimana 2 volte la settimana	Terapia idrocinetica Esercizi neurocognitivi (solo esercizi di carico)	Terapia idrocinetica -Esercizi con la bici -Esercizi di flessione-estensione -Esercizi di forza sub massima negli arti inferiori -Esercizi di spinta delle gambe su un dinamometro isocinetico -Esercizi di pressione su uno e due gambe -Esercizi per i muscoli adduttori, abduzioni, estensori e flessori delle anche
Dalla 5 ^a settimana Dalla 12 ^a alla 24 ^a settimana	 2 volte la settimana	Prove di cammino senza stampelle o supporti ortopedici al ginocchio Ritorno graduale alla corsa o all'allenamento specifico su campo, tra cui: -esercizi di stretching completo, alternando la corsa veloce alla corsa lenta -salti con una o due gambe -corsa avanti e indietro, con cambi di direzione, sprint	Prove di cammino senza stampelle o supporti ortopedici al ginocchio -Esercizi isometrici di potenziamento dei muscoli -Corsa all'aperto a velocità basse -Allenamenti specifici dello sport

Tabella 1: Protocollo di trattamento neurocognitivo e trattamento convenzionale

3.2 Propriocezione e postura

Nel corso degli ultimi due decenni, le osservazioni cliniche sul ruolo della propriocezione nel controllo della postura e del cammino sono state integrate da studi sperimentali sulla posturologia statica e dinamica. Tali studi hanno cercato di valutare l'influenza sul controllo dell'equilibrio di lesioni che 'selettivamente' colpiscono la propriocezione o un altro sistema di controllo posturale.

Le indagini epidemiologiche hanno dimostrato che una riduzione della propriocezione agli arti inferiori è un fattore di rischio per le cadute nell'anziano. L'importanza di avere una propriocezione intatta per il mantenimento della posizione eretta è ulteriormente sottolineata dalle conseguenze cliniche a volte devastanti indotte da una perdita di questa, come ad esempio in pazienti con neuropatia periferica.

Recenti risultati indicano che le informazioni provenienti dal tronco o dall'anca possano essere importanti nell'attivare le correzioni necessarie per l'equilibrio umano e che gli input propriocettivi degli arti inferiori aiutino soprattutto nella definizione dello stato posturale finale e la coordinazione intermuscolare dei movimenti posturali e del cammino. I movimenti posturali e del cammino sarebbero, infatti, organizzati a livello centrale a due livelli. Il primo livello genera un pattern di risposte specifiche basate principalmente sugli input propriocettivi dell'anca e del tronco e secondariamente sugli ingressi vestibolari. Il secondo livello è coinvolto nella formazione di pattern di attivazione muscolare sulla base di input afferenti multisensoriali, compresi gli input propriocettivi di tutti i segmenti corporei e i sensori vestibolari, in modo che i movimenti siano in grado di adattarsi alle diverse condizioni. [8]

3.2.1 Il ruolo delle informazioni somatosensoriali nel controllo della postura [9]

Il sistema nervoso regola il comportamento dei muscoli sulla base delle informazioni provenienti sia dall'esterno che dall'interno del corpo. Sulla base di tali informazioni viene determinata la contrazione o il rilasciamento dei vari muscoli scheletrici al fine di ottenere la postura desiderata. In generale, la modulazione dell'attività muscolare è

determinata sia dai riflessi spinali sia dall'integrazione a più alti livelli del sistema nervoso centrale delle informazioni afferenti dal sistema visivo, vestibolare e somatosensoriale. Se quindi il sistema posturale non riceve tutte le informazioni necessarie, comandi inviati ai vari distretti muscolo-tendinei potrebbero non essere giusti e utili all'organismo che quindi potrebbe non essere più capace di raggiungere la postura voluta.

Nello studio "Role of somatosensory input in the control of human posture" [9] si è investigato come la perdita della funzionalità somatosensoriale influisca sul controllo della postura eretta, o ortostatica. Per questo sono stati selezionati pazienti con polineuropatia diabetica simmetrica distale, che sono soggetti a perdita delle sensazioni somatosensoriali nelle regioni distali della gamba, quali la propriocezione, la sensazione tattile, la percezione del movimento articolare e gli altri stimoli somatosensoriali secondari alla neuropatia diabetica. La neuropatia diabetica è tuttavia un processo che causa la perdita sensoriale gradualmente, permettendo così al corpo di sviluppare strategie posturali compensatorie.

Cinquantuno soggetti hanno partecipato allo studio: diciassette individui con diabete mellito e neuropatia sensoriale distale agli arti inferiori (gruppo DM-NP), diciassette individui con diabete mellito e neuropatia sensoriale minima (gruppo DM-nonNP), e diciassette soggetti non diabeti con normale funzionalità somatosensoriale (nonDM). La presenza o assenza di neuropatia distale è stata valutata in base all'abilità del soggetto di percepire uno stimolo vibrazionale meccanico applicato sulla superficie plantare dell'alluce. Inoltre, altri due test quantitativi della funzione sensoriale sono stati adottati su tutti i soggetti: la soglia di percezione di movimento nell'articolazione della caviglia e la sensibilità tattile cutanea mediante monofilamento di Semmes-Weinstein sulla superficie plantare di entrambi gli alluci. In aggiunta per i pazienti diabetici sono state misurate la velocità di conduzione nervosa del nervo peroneale e la latenza sensoriale per il nervo surale. Tutti i soggetti inoltre avevano funzionalità vestibolare e oculare intatta.

La stabilità posturale è stata misurata per un periodo di 30 secondi usando una piattaforma di forza Kirsler. Per quantificare la stabilità, sono state valutate l'escursione

totale del percorso del centro di pressione (CoP) nel periodo di tempo fissato, l'estensione del percorso del CoP nelle direzioni antero-posteriore e medio-laterale e l'area superficiale dentro la quale si muove il CoP. Il campo visivo dentro il quale tutti i test sono stati eseguiti consiste in una struttura che misura 1.83x4.88x3.04 metri; stimoli visivi ad altro contrasto sono stati posti sulla parete frontale al soggetto e sul soffitto.

La stabilità posturale è stata testata sotto 4 condizioni sensoriali, selezionati per manipolare i tre sistemi sensoriali: testa dritta-occhi aperti, testa dritta-occhi chiusi, testa piegata all'indietro-occhi aperti e testa piegata all'indietro-occhi chiusi. Ogni condizione è stata testata una sola volta per soggetto.

Dall'analisi posturale, non si è trovata nessuna differenza significativa nello spostamento del CoP tra i due gruppi senza neuropatia dimostrando che il diabete non inficia il controllo posturale e che le differenze riscontrate tra il gruppo DM-NP e gli altri gruppi sono attribuibili solo a differenze nella percezione somatosensoriale.

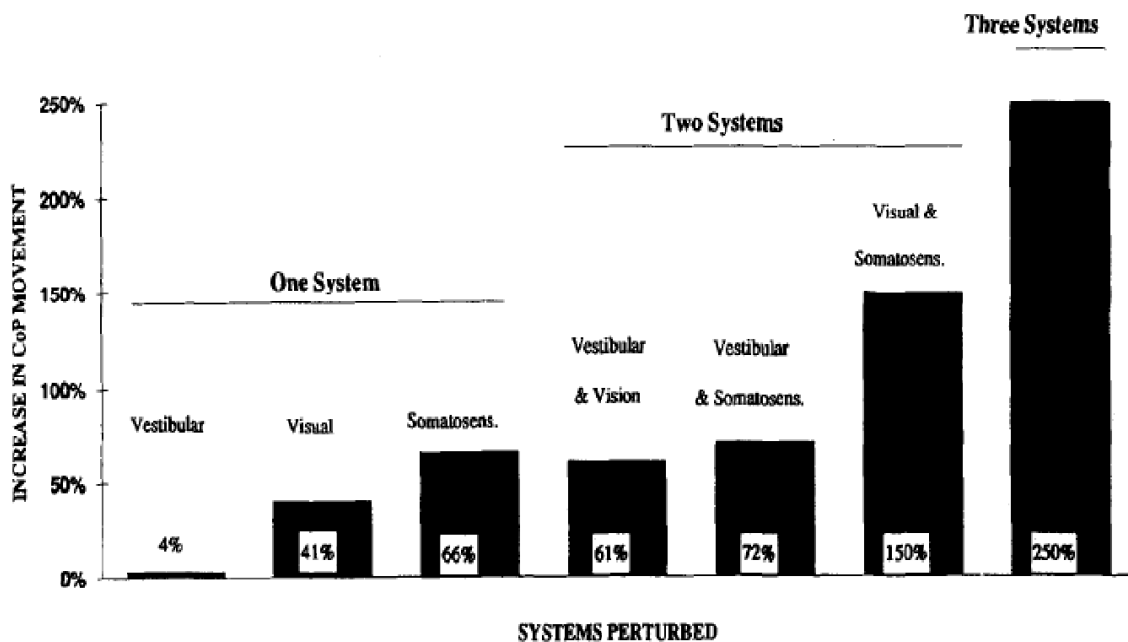


Figura 20: Spostamento del centro di pressione (CoP) [9]

Con il progredire della difficoltà delle condizioni di equilibrio, l'area superficiale addizionale coperta dal CoP dei soggetti neuropatici, sotto le stesse condizioni dei soggetti non diabetici, aumenta dal 102% al 182%, a seguito della rimozione o del

peggioramento degli altri sistemi sensoriali. In particolare, quando il sistema vestibolare viene disturbato portando la testa indietro, solo un incremento del 4% dei movimenti del centro di pressione è stato misurato indicando che la compensazione per queste lievi perturbazioni è quasi completa quando la visione e gli input somatosensoriali sono intatti. La perdita della vista o il deterioramento degli input somatosensoriali invece comporta rispettivamente un incremento del 41% e del 66% dei movimenti del CoP. Se due sistemi sensoriali sono eliminati insieme, l'incremento nell'escursione del CoP è ancora maggiore: 61% per la combinazione visiva e vestibolare (calcolata per soggetti non diabetici), 2% per la combinazione vestibolare e somatosensoriale, 150% per la combinazione visiva e somatosensoriale.

Per i pazienti diabetici con neuropatia, la neuropatia da sola determina movimenti del CoP che sono simili a quelli causati dagli effetti combinati dalle perturbazioni visive e vestibolari in pazienti non diabetici. È quindi difficile per i soggetti neuropatici mantenere la posizione stabile anche con il sistema visivo e vestibolare intatto.

La propriocezione è fondamentale per l'organismo poiché permette al sistema di riconoscere la posizione e lo stato di ogni osso, muscolo, legamento, od organo in rapporto con l'equilibrio, e di mantenere la postura desiderata; i sistemi visivi e vestibolari non possono, infatti, compensare completamente la diminuzione di input somatosensoriali nel controllo dell'equilibrio.

3.2.2 Correlazione tra propriocezione ed equilibrio dinamico in pazienti con lesioni al legamento crociato anteriore [12]

Una lesione al legamento crociato anteriore (ACL) è uno dei danni più comuni in seguito a incidenti sportivi. A seguito del trauma i meccanorecettori, come i corpuscoli di Pacini e di Ruffini, localizzati nel legamento crociato anteriore e posteriore e nel menisco, risultano danneggiati con conseguenti perdita in capacità propriocettiva e problemi di equilibrio.

Nello studio "Correlation between proprioception, muscle strength, knee laxity, and dynamic standing balance in patients with chronic anterior cruciate ligament deficiency" [12] si è valutata in particolare la correlazione della propriocezione, della forza

muscolare e della lassività del ginocchio con l'equilibrio dinamico in piedi in pazienti con lesione unilaterale all'ACL.

La propriocezione è stata misurata con uno strumento dedicato tramite un test di riposizionamento passivo (PRP) e un test per il rilevamento della soglia di percezione del movimento passivo (TTDPM). Durante il test PRP, il soggetto bendato era seduto su un letto con il ginocchio a 45° di flessione e ascoltava un rumore bianco. Lo strumento ruotava a una velocità di 5°/s il ginocchio lungo l'asse articolare verso la flessione (da 45° a 90° di flessione) o verso l'estensione (da 45° di flessione alla completa estensione) per poi riportarlo nella posizione iniziale passivamente. Quando il soggetto sentiva che il ginocchio era nuovamente nella posizione di partenza, doveva sollevare una levetta. Il test TTDPM è stato compiuto con lo stesso strumento sempre a partire dalla posizione avente il ginocchio a 45° di flessione. I partecipanti dovevano segnalare quando sentivano una qualche sensazione di movimento o un cambio di posizione del ginocchio. Tre test sono stati condotti su ogni soggetto.

Per la misura della lassività, è stato misurato lo spostamento anteriore della tibia rispetto al femore utilizzando un artrometro KT-1000 (MEDmetric Corp., San Diego, CA). L'artrometro è stato fissato all'arto con il ginocchio flesso a 30° e lo spostamento anteriore è stato registrato in millimetri. Le forze muscolari dei quadricipiti sono state invece misurate con un dinamometro Con-Tre MJ.

Il test di bilanciamento dinamico è stato realizzato anch'esso tramite strumentazione dedicata che consisteva in una piattaforma dinamica, un convertitore A/C, un software e un monitor che mostrava in tempo reale biofeedback visivi (Fig. 21). Il massimo angolo d'inclinazione della piattaforma era di 15° in ogni direzione. Durante il test dinamico, il soggetto doveva rimanere in posizione eretta prima sulla sola gamba sana con il piede posizionato al centro della piattaforma e successivamente sulla sola gamba lesa, mentre il ginocchio dell'altra gamba era in leggera flessione. Un angolo d'inclinazione elevato indicava una scarsa capacità di mantenere l'equilibrio. La lassità passiva, il test PRP e il test TTDPM, le prove di forza muscolare per i quadricipiti del ginocchio, i test di equilibrio dinamici sul singolo arto sono stati eseguiti sia per gli arti lesi sia per quelli controlaterali.



Figura 21: Strumentazione per i test d'equilibrio. [12]

Differenze significative tra il lato danneggiato e quello illeso sono state osservate per tutti i parametri. Come variabili indipendenti, la lassità del ginocchio, la propiocezione misurata tramite test PRP e la forza muscolare non sono risultati correlati con l'equilibrio dinamico in posizione eretta per l'arto infortunato. Tuttavia, una significativa correlazione positiva tra la propiocezione misurata con il test TTDPM e l'equilibrio dinamico su singolo supporto è stata osservata per l'arto lesa.

Si può quindi ipotizzare che, per il mantenimento dell'equilibrio dinamico, il corpo necessita di maggiori informazioni da parte dei meccanorecettori ad adattamento rapido e perciò presenta una sfida maggiore rispetto al mantenimento dell'equilibrio statico, soprattutto in soggetti con lesione al legamento crociato del ginocchio. Per migliorare l'equilibrio, sarebbero raccomandabili programmi di riabilitazione che migliorino la capacità propriocettiva, soprattutto la cinestesia.

3.2.3 Propriocezione e postura in pazienti con il morbo di Parkinson [17], [19], [16]

Come abbiamo visto in precedenza, nei pazienti con malattia di Parkinson (PD) sono stati spesso riscontrati deficit propriocettivi. Le difficoltà riscontrate nel compiere le normali

funzioni motorie sono state evidenziate anche nel mantenimento dell'equilibrio e nella coordinazione di movimenti complessi.

Nello studio "Impaired vertical postural control and proprioceptive integration deficits in Parkinson's disease" [17] infatti, è stato indagato come le componenti di orientamento e di stabilizzazione del controllo posturale possono essere influenzate da una ridotta integrazione propriocettiva in soggetti PD.

Per determinare il contributo propriocettivo sul controllo posturale, è stata utilizzata una piattaforma dinamica sulla quale i pazienti PD e i soggetti di controllo dovevano mantenere la posizione verticale, mentre oscillazioni sinusoidali molto lente (frequenza di 0.01Hz) venivano applicate lungo il piano laterale e antero-posteriore della piattaforma. Ogni prova durava 106 secondi e l'ampiezza e la frequenza dei loro movimenti sono state mantenute al di sotto della soglia di percezione dei canali semicircolari in modo da eliminare le informazioni vestibolari. Due condizioni sono state valutate: occhi aperti e occhi chiusi.

I dati sono stati raccolti con l'analizzatore di movimento automatico ELITE utilizzando marker passivi posti sul corpo in posizioni standard; le due componenti posturali (orientazione e stabilizzazione segmentale) sono state analizzate a livello del tronco e della testa.

L'analisi dei dati ottenuti ha evidenziato che in condizione di occhi chiusi, le prestazioni dei soggetti PD risultavano peggiori rispetto a quelle del gruppo di controllo. I soggetti PD non sono in grado di controllare propriamente e stabilizzare la postura solo sulla base delle informazioni sensoriali; alla malattia di Parkinson può essere associata un'insufficienza propriocettiva, che può essere un importante fattore che contribuisce a deficit posturali di questi pazienti.

L'uso delle informazioni visive ha migliorato le prestazioni posturali dei soggetti PD senza però ottenere risultati simili a quelli dei soggetti di controllo. La dipendenza dagli stimoli visivi può indicare che esista una strategia adattativa atta a compensare i deficit propriocettivi. Tuttavia col progredire della malattia, questa strategia potrebbe non essere più sufficiente.

È stato appurato in vari studi che i soggetti PD fanno significativamente affidamento alle informazioni visive al fine quindi di svolgere le normali attività funzionali. Anche in relazione all'analisi posturale, sono stati evidenziati questi risultati come confermato nello studio "Proprioceptive neglect in Parkinson's disease" [19]. In questo studio il controllo posturale è stato testato ponendo in vibrazione il tendine della caviglia; tali vibrazioni generano sensazioni illusorie di squilibrio e reazioni posturali. Tre diverse condizioni visive sono state testate: visione normale, assenza di informazioni visive e uso di luce stroboscopica che sopprime selettivamente i feedback visivi dinamici. Le risposte motorie di tutto il corpo del soggetto sono state analizzate tramite la registrazione cinematica a partire dagli spostamenti dinamici del centro di pressione.

In assenza di segnali visivi, le reazioni posturali dei pazienti malati sono diminuite rispetto ai soggetti di controllo, indicando che le sensazioni motorie illusorie indotte dalla vibrazione tendinea sono meno importanti nei soggetti PD che in soggetti sani.

Con la luce stroboscopica, i soggetti di controllo presentano un aumento delle oscillazioni posturali ma gli spostamenti del loro centro di pressione sono compatibili con quelli ottenuti in condizioni normali. Al contrario, nei pazienti PD, la luce stroboscopica provoca effetti simili a quelli ottenuti in assenza totale della vista.

Questi risultati hanno confermato che la propriocezione risulta compromessa in pazienti PD e che i problemi posturali, inclusi l'instabilità e il disorientamento, possono essere causati da un deficit nell'integrazione sensoriale-motoria. Inoltre una dipendenza maggiore sulla vista costituisce uno dei meccanismi principali di compensazione nell'atto motorio e nel controllo posturale.

In generale, i pazienti con questa malattia hanno problemi oltre che a mantenere l'equilibrio statico, anche a mantenere quello dinamico e a coordinare movimenti complessi. Gli aggiustamenti posturali che accompagnano i movimenti volontari sono lenti e deboli e la ridotta coordinazione della parte inferiore del corpo per i movimenti assiali durante la posizione eretta si traduce spesso in grandi spostamenti del centro di massa (CoM), sia in risposta a perturbazioni esterne che durante movimenti assiali volontari.

Nello studio "Effects of Parkinson's disease on proprioceptive control of posture and reaching while standing"[16] è stato ipotizzato che soggetti PD sottostimino il loro movimento volontario nel puntare a un punto preciso e che gli errori siano maggiori in soggetti PD quando i loro occhi sono chiusi.

Dieci soggetti con morbo di Parkinson idiopatico e dieci soggetti di uguale età di controllo sono stati selezionati. Tutti i soggetti PD hanno evidenziato bradicinesia e rigidità ma poca discinesia o tremore. I soggetti dovevano puntare ad una sfera riflettente di 2 cm di diametro sospesa davanti a loro ad un'altezza da terra e a una distanza dalle loro caviglie pari al 50% della loro altezza. Soggetti, con le mani giunte, dovevano puntare la sfera con entrambe le dita indice per cinque volte con gli occhi chiusi (Eyes Closed, EC), e successivamente altre cinque volte con gli occhi aperti (Eyes Open, OP). Per la condizione EC, ai soggetti è stato chiesto di memorizzare la posizione del target, chiudere i loro occhi per circa 3 secondi e quindi raggiungere la posizione, mantenendo gli occhi chiusi. Al fine di evitare feedback tattili, l'obiettivo è stato spostato una volta che i soggetti chiudevano gli occhi. I soggetti dovevano poi mantenere la loro posizione finale delle dita per 3 secondi prima di ritornare alla posizione di partenza sempre con gli occhi ancora chiusi. Per la condizione EO, i soggetti dovevano toccare il bersaglio con la punta delle loro dita. Ai soggetti è stato chiesto di muoversi alla loro velocità naturale.

Marcatori riflettenti sono stati posti sul corpo di ogni soggetto in posizioni standard. Le posizioni tridimensionali dei marcatori sono state registrate con un sistema di analisi del movimento con otto videocamere Falcon (Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, CA, USA). Le forze di reazione a terra e la posizione del centro di pressione dei piedi sono state registrate con una piattaforma di forza AMTI (Watertown, MA, USA).

Sono state inoltre stimate la posizione antero-posteriore del centro di massa di tutto il corpo, il centro di massa superiore (UCoM), che comprende di testa, tronco, braccia, avambraccio e mani, e il centro di massa del corpo inferiore (LCoM), che comprende bacino, cosce, stinchi e piedi.

Le prestazioni soggettive nel puntamento sono valutate tramite due tipi di errori: l'errore costante e l'errore variabile. L'errore costante (accuratezza) e l'errore variabile

(precisione) sono, rispettivamente, la media e la deviazione standard della lunghezza del vettore che collega il bersaglio con la posizione finale di puntamento. Gli errori sono stati calcolati per ogni singolo soggetto su cinque studi eseguiti nella condizione CE.

I risultati ottenuti mostrano che non c'è un peggioramento nella precisione di puntamento ad un obiettivo nelle due condizioni. Nonostante la relativa mancanza di effetti della malattia sulla componente motoria volontaria di puntamento, la strategia posturale è influenzata da questa ma solo quando feedback visivi sono eliminati. Mentre i soggetti di controllo tendono ad aumentare leggermente lo spostamento in avanti del loro CoM quando hanno gli occhi chiusi, i soggetti PD tendono a diminuirlo. Questa differenza di spostamento tra i due gruppi è dovuta al fatto che i soggetti sani, ma non i soggetti PD, hanno cambiato strategia cinematica aumentando lo spostamento all'indietro del CoM della parte inferiore del corpo (LCoM), e in concomitanza aumentando lo spostamento in avanti del centro di massa della parte superiore (UCoM). In contrasto, i soggetti PD aumentano lo spostamento indietro del LCoM ma non lo compensano aumentando lo spostamento in avanti del loro UCoM. La diminuzione dello spostamento di avanti del CoM nella condizione EC può essere dovuta al fatto che in soggetti PD non sono in grado di utilizzare con precisione la propriocezione per mappare fino a che punto il CoM del corpo si muove in avanti.

Inoltre, la perdita di feedback visivi provoca la stessa quantità di sovrastima per il movimento di puntamento e per lo spostamento del CoM in avanti nei soggetti di controllo, ma non nei soggetti PD. Allo stesso modo, i partecipanti sani, ma non i soggetti PD, mantengono la stessa sinergia temporale tra il dito e lo spostamento del centro di massa in condizione EC. Questi risultati sono coerenti con l'ipotesi che le componenti necessarie per svolgere i movimenti volontari (puntamento focale) e posturali (CoM) sono normalmente strettamente accoppiate, ma suggeriscono anche che questo accoppiamento può essere interrotto dalla malattia di Parkinson quando i soggetti devono poter contare solo sulla propriocezione.

L'interruzione dell'accoppiamento focale-posturale nei soggetti PD si è verificata solo quando nella condizione EC, suggerendo che questo dipenda, almeno in parte, sui feedback propriocettivi, che sono compromessi dalla malattia. Quando le informazioni

visive non sono disponibili, i soggetti sani utilizzano ancora il controllo propriocettivo per realizzare l'accoppiamento, mentre soggetti con malattia di Parkinson si affidano alle informazioni visive memorizzate e agli input vestibolari per compensare la loro difficoltà nell'integrare le informazioni propriocettive. È possibile che l'interruzione dell'accoppiamento sia dovuta al ruolo assunto dei gangli della base nell'uso dei feedback propriocettivi per formulare una rappresentazione interna della mappa del corpo al fine di controllare i movimenti di controllo.

In conclusione, l'effetto della deprivazione visione sulle componenti posturali, ma non volontarie del movimento, e la rottura dell'accoppiamento postura-movimento a seguito di una malattia che interessa i gangli della base, come PD, potrebbero essere spiegati con la presenza di percorsi separati per la programmazione delle componenti volontarie e di quelle posturali per la riuscita di azioni programmate, e con la definizione del ruolo dei gangli della base nel coordinare la selezione e l'accoppiamento di tali programmi. Il fatto che il disaccoppiamento è stato osservato in soggetti PD solo quando non potevano usare i feedback visivi, suggerisce che il coordinamento tra i comandi motori volontari e posturali coinvolge non solo i gangli della base, ma anche percorsi propriocettivi, critici per il controllo posturale. Al contrario, quando i soggetti hanno informazioni visive e spaziali della mano e della posizione di destinazione, la componente volontaria del movimento di puntamento non sembra richiedere l'integrazione propriocettiva.

Capitolo 4

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha permesso di investigare i meccanismi che correlano la propiocezione al controllo posturale e del cammino. Quale strumento di lavoro ci si è avvalso di una ricerca bibliografica attraverso vari database (PubMed, Science Direct, Google e Google Scholar) usando le seguenti parole chiave in diverse combinazioni: proprioception, proprioceptive, gait, posture. Gli articoli trovati sono stati valutati criticamente per selezionare quelli inerenti propriamente il lavoro di tesi. La propiocezione è stata valutata in soggetti normali, colpiti da ictus, con sindrome di Parkinson, con neuropatia diabetica, con osteoartrite e in soggetti che hanno subito una lesione del legamento crociato anteriore, in varie condizioni o a seguito di condizionamenti esterni.

Nella prima parte del lavoro di tesi ci si è concentrati sugli aspetti fisiologici della propiocezione (vedi capitolo 1), mentre poi si è approfondito il ruolo della propiocezione nel controllo posturale e del cammino (capitolo 3). Infine ci si è concentrati su alcune patologie che possono comportare delle alterazioni a livello del sistema propriocettivo e si sono analizzati i vari strumenti utilizzati in campo riabilitativo per procedere al ripristino dello stesso.

Per quanto riguarda la prima parte della tesi si è potuto evincere che la propiocezione identifica la capacità di percepire e riconoscere la posizione del proprio corpo e delle sue parti nello spazio, il loro movimento e lo stato di contrazione dei propri muscoli. Il sistema propriocettivo include i propriocettori, che specificano i parametri biomeccanici e fisiologici del movimento, e molteplici vie nervose, che trasportano tali informazioni al sistema nervoso centrale. A livello celebrale, avviene la fase d'integrazione tra gli input propriocettivi, visivi e vestibolari e la definizione della mappa corporea. Il mantenimento della corretta postura e l'esecuzione di complesse funzioni motorie, come il cammino, sono modellati sulla base di questi ingressi. Disturbi al sistema somatosensoriale

possono condurre a situazioni potenzialmente pericolose sia in casa sia in qualsiasi contesto sociale a causa di un minor controllo sulla postura e sul movimento.

La valutazione della propiocezione è solitamente di natura qualitativa e le tecniche di misurazione somatosensoriali con provata affidabilità e validità disponibili per la pratica clinica sono molto limitate. Tuttavia due tipologie di misurazione sembrano descrivere in maniera adeguata l'accuratezza propriocettiva: i *position sense test*, per misurare la sensazione statica articolare, e i *motion sense test*, per la misura della sensazione di movimento passivo e lento degli arti. Diversi protocolli e strumentazioni dedicate sono stati ideati, valutati ed approvati a tal scopo. I test più utilizzati misurano la soglia di percezione del movimento passivo; tale soglia viene determinata muovendo lentamente e passivamente l'articolazione del soggetto a cui viene chiesto di segnalare quando il movimento o la direzione desiderata vengono percepiti.

Nonostante numerosi test per la misurazione propriocettiva siano stati approvati scientificamente, l'influenza della propiocezione sul controllo motorio e posturale è spesso stata valutata semplicemente manipolando gli altri ingressi sensoriali normali, ossia quelli visivi e quelli vestibolari. Gli input vestibolari tuttavia condizionano il movimento e l'equilibrio in misura minore e l'eliminazione dei feedback visivi è di solito sufficiente ad isolare la propiocezione. Per questo molte prove sperimentali sono eseguite in condizione di completa oscurità per il soggetto.

Non esiste un unico test capace di quantificare la propiocezione nel suo complesso ma ogni tecnica valuta solo un aspetto di essa senza descrivere l'abilità funzionale generale. I risultati ottenuti utilizzando una tipologia di test oppure l'altra quindi devono essere interpretati e analizzati con cura.

Un'alterazione nel sistema propriocettivo può avvenire a più livelli: a livello del sistema nervoso, conseguentemente a danni cerebrali o alla colonna vertebrale, o a livello dei recettori propriocettivi, ad esempio in conseguenza alla rottura di tendini o legamenti.

In base alla zona celebrale danneggiata, può esistere o meno un deficit propriocettivo. In pazienti colpiti da ictus, un problema propriocettivo è stato riscontrato solamente in un terzo dei soggetti, e le caratteristiche cinematiche non differiscono in maniera significativa tra pazienti con propiocezione normale e compromessa, anche se il senso

di posizione della caviglia sembra influire sulla velocità di cammino e sulla lunghezza del passo. A seguito della lesione ischemica, il cervello riesce a sviluppare strategie di compensazione nel cammino attivando vie somatosensoriali diverse dalla propiocezione. Il morbo di Parkinson invece è una malattia degenerativa del sistema nervoso che colpisce comunemente i gangli della base. Tutti soggetti colpiti dalla malattia non sono in grado di elaborare correttamente le informazioni provenienti dai recettori articolari e quindi di mantenere l'equilibrio e a svolgere i compiti motori richiesti quando la propiocezione viene isolata. I danni subiti dai gangli della base impediscono la corretta integrazione senso-motoria per cui le molteplici informazioni sensoriali non sono tradotte in un moto adeguato. L'informazione visiva tuttavia può bypassare i gangli della base attraverso un percorso neurale separato e i soggetti colpiti da questa malattia sono quindi costretti a sfruttare le informazioni visive per compensare i deficit propriocettivi e compiere le normali attività fisiche.

Anche nel caso di un trauma o una malattia che colpisce i propriocettori non sempre il deficit propriocettivo è associabile direttamente con disfunzioni motorie. In soggetti con osteoartrite le limitazioni nella capacità funzionale sono influenzate dalla forza muscolare la cui modulazione è dipendente dagli input propriocettivi. Inoltre la propiocezione può essere correlata alla posizione del ginocchio e ai movimenti delle gambe prima del contatto iniziale, che identificano le caratteristiche cinematiche e la velocità di carico sperimentata. A seguito invece della lesione del legamento crociato anteriore, il mantenimento della postura dinamica risulta più complessa: il corpo necessita, infatti, delle informazioni provenienti dai recettori del ginocchio che rilevano il movimento articolare per mantenere l'equilibrio.

Sono stati inoltre analizzati gli effetti della vista e della vibrazione sul movimento e la postura. Soggetti che hanno subito un'alterazione propriocettiva sfruttano le informazioni visive per compensare tali deficit. Allo stesso tempo, i propriocettori possono essere stimolati artificialmente tramite la vibrazione del tendine che dovrebbe ottimizzare le informazioni propriocettive fornite al sistema nervoso centrale e così aumentare l'integrazione tra gli input visivi e quelli propriocettivi. Non è stata tuttavia ancora provata l'effettiva utilità della vibrazione in soggetti con propiocezione alterata

ma anzi si è riscontrato un calo in termini delle prestazioni con l'aggiunta della vibrazione in pazienti con malattia di Parkinson.

Infine la propriocezione sembra essere una capacità modificabile e una stimolazione adeguata, che aumenta sia il numero di propriocettori coinvolti che la quantità totale di informazioni sensoriali, potrebbe facilitare il processo riabilitativo. Molti studi hanno quindi valutato gli effetti di trattamenti e attrezzature che stimolano o cercano di sostituire la propriocezione, come l'impiego di esercizi terapeutici, di supporti ortopedici plantari o di accelerometri.

Bibliografia

- [1] EO Johnson, PN Soucacos, "Proprioception", in *International Encyclopedia of Rehabilitation*, 2012. Available online:
<http://cirrie.buffalo.edu/encyclopedia/en/article/337/>
- [2] J.L. Riskowski, A.E. Mikesky, R.E. Bahamonde, T.V. Alvey, D.B. Burr, "Proprioception, gait kinematics, and rate of loading during walking: Are they related?" in *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions*, 2005, Vol 5(4): pp 379-387.
- [3] R. LeMoyne, C. Coroian, T. Mastroianni, P. Opalinski, M. Cozza, and W. Grundfest, "The merits of artificial proprioception, with applications in biofeedback gait rehabilitation concepts and movement disorder characterization," in *Biomedical Engineering*, edited by Carlos Alexandre Barros de Mello, ISBN 978-953-307-013-1: Intech, 2009, Ch 10.
- [4] R. LeMoyne, C. Coroian, T. Mastroianni, W. Wu, W. Grundfest, W. Kaiser, "Virtual proprioception with real-time step detection and processing" in *30th Annual International Conference of the IEEE 20-25 Aug, 2008*, pp.4238-4241.
- [5] T. Tan, QJ. Almeida QJ, F. Rahimi, "Proprioceptive deficits in Parkinson's disease patients with freezing of gait." in *Neuroscience*. 2011 Sep 29;192:746-52. Epub 2011 Jul 1.
- [6] U. Debnath, A. Narkeesh, R. Raghumahanti, "Formulation of Integrated Proprioceptive Screening Scale and Testing of its Sensitivity, Reliability and Validity" in *Journal of Exercise Science and Physiotherapy*, 2010, Vol 6, No 2, pp 78-87.
- [7] F. Cappellino et al., "Neurocognitive rehabilitative approach effectiveness after anterior cruciate ligament reconstruction with patellar tendon. A randomized controlled trial." in *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine*, 2012 Mar, Vol 48(1), pp 17-30.
- [8] J.H.J. Allum, B.R. Bloem, M.G. Carpenter, M. Hulliger, M. Hadders-Algra, "Review: Proprioceptive control of posture: a review of new concepts" in *Gait and Posture*, 1998, Vol 8, pp 214-242.

- [9] G.G. Simoneau, J.S. Ulbrecht, J.A. Derr, P.R. Cavanagh, "Role of somatosensory input in the control of human posture", in *Gait and Posture*, 1995, Vol 3, Issue 3, pp 115-122.
- [10] Ö. Öken, G. Yavuzer et al., "Repeatability and variation of quantitative gait data in subgroups of patients with stroke", in *Gait and Posture*, 2008, Vol 27, Issue 3, pp 506-511.
- [11] J. Knoop, M.P.M. Steultjens, M. van der Leeden, M. van der Esch, C.A. Thorstensson, L.D. Roorda, W.F. Lems, J. Dekker, "Proprioception in knee osteoarthritis: a narrative review", in *Osteoarthritis and Cartilage*, 2011, Vol 19, Issue 4, pp 381-388.
- [12] H. Lee et al, "Correlation between Proprioception, muscle strength, knee laxity, and dynamic standing balance in patients with chronic anterior cruciate ligament deficiency", in *The Knee*, 2009, Vol 16, Issue 5, pp 387-391.
- [13] Q.J. Almeida, J.S. Frank, E.A. Roy, A.E. Patla, S. Spaulding, M.S. Jog, "Isolating vision and proprioception during locomotor navigation toward a target in Parkinson's disease", in *Gait and Posture*, 2005, Vol 21, Supplement 1, pp S91.
- [14] M. van der Esch, M. Steultjens, J. Harlaar, N. Wolterbeek, D.L. Knol, J. Dekker, "Knee varus–valgus motion during gait a measure of joint stability in patients with osteoarthritis?", in *Osteoarthritis and Cartilage*, 2008, Vol 16, Issue 4, pp 522-525.
- [15] R. Centemeri, R. Pozzo, "Variation of cinematic and dynamic parameters in posturographic and gait analysis under normal conditions and after manipulation of visual and foot proprioceptive informations", in *Gait and Posture*, 2005, Vol 21, Supplement 1, pp S24.
- [16] M. Tagliabue, G. Ferrigno, F. Horak, "Effects of Parkinson's disease on proprioceptive control of posture and reaching while standing", in *Neuroscience*, 2009, Vol 158, Issue 4, pp 1206-1214.
- [17] M. Vaugoyeau, S. Viel, C. Assaiante, B. Amblard, J.P. Azulay, "Impaired vertical postural control and proprioceptive integration deficits in Parkinson's disease", in *Neuroscience*, 2007, Vol 146, Issue 2, pp 852-863.
- [18] M. Van Der Esch, M. Steultjens, J. Harlaar, D. Knol, W. Lems, J. Dekker, "Joint proprioception, muscle strength, and functional ability in patients with osteoarthritis of the knee", in *Arthritis & Rheumatism (Arthritis Care & Research)*, 2007, Vol. 57, No. 5, pp 787–793

- [19] J.P. Azulay, H. Hakam, S. Measure, M. Vaugoyeau, "Proprioceptive neglect in Parkinson's disease", in *Gait and Posture*, 2005, Vol 21, Supplement 1, pp S91.
- [20] A.L. Boerboom, M.R. Huizinga, W.A. Kaan, R.E. Stewart, A.L. Hof, S.K. Bulstra, R.L. Diercks, "Validation of a method to measure the proprioception of the knee", in *Gait and Posture*, 2008, Vol 28, Issue 4, pp 610-614.
- [21] S. Lin, "Motor function and joint position sense in relation to gait performance in chronic stroke patients", in *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2005, Vol 86, Issue 2, pp 197-203.
- [22] G. Tacconi, "Sviluppo di un protocollo per la stima della dinamica inversa mediante il software SmartAnalyzer.", Tesi, 2010
- [23] Vaughan, Davis, O'Connor. Dynamics of Human Gait. Kiboho Publishers, Cape Town, South Africa. 1992
- [24] S. Rein, T. Fabian, H. Zwipp, S. Rammelt, S. Weindel, "Postural control and functional ankle stability in professional and amateur dancers", in *Clinical Neurophysiology*, 2011, Vol 122, Issue 8, pp 1602-1610

Sitologia

- [25] <http://www.my-personaltrainer.it/propriocezione.html>
- [26] <http://it.wikipedia.org/wiki/Propriocezione>
- [27] <http://www.omega.com/pptst/TQ301.html>
- [28] http://www.giovannichetta.it/documentaz/Postura_Benessere_Giovanni_Chetta.pdf

Desidero esprimere innanzitutto la mia sincera gratitudine alla Prof.ssa Bertoldo e alla Prof.ssa Sawacha, per aver guidato costantemente il mio lavoro, non mancando nel comprendere e rispettare le mie esigenze, e per la completa disponibilità dimostrata nei miei confronti ogni qualvolta avessi avuto bisogno.

Non posso non rivolgere un grazie, che non sarà mai abbastanza, ai miei genitori, che non mi hanno mai fatto mancare il loro amore e il loro supporto e mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Un gioioso grazie anche a tutto il resto della mia famiglia, che mi ha sempre dimostrato affettuosa fiducia e supporto.

Un grazie speciale, infine, agli amici più cari, quelli vicini e quelli lontani, quelli che conosco da quando ero piccola e quelli che conosco da pochi mesi, quelli che animano tutti i miei weekend e quelli che non riesco sfortunatamente a vedere così spesso: grazie per ogni piccolo gesto di amicizia, per ogni chiacchierata, per ogni risata, per ogni consiglio, semplicemente grazie per ogni momento passato insieme.