



Università degli Studi di Genova
Facoltà di medicina e Chirurgia

Master in Riabilitazione dei Disturbi Muscolo Scheletrici

A.A 2010/2011

Campus Universitario di Savona

UTILIZZO DI ACCELEROMETRI NELLA VALUTAZIONE E NELL'ALLENAMENTO ALLA FORZA DELL'ARTO SUPERIORE IN RIABILITAZIONE

Candidato:
Fagioli Gabriele

Relatore:
Migliorini Manolo

UTILIZZO DI ACCELEROMETRI NELLA VALUTAZIONE E NELL'ALLENAMENTO ALLA FORZA DELL'ARTO SUPERIORE IN RIABILITAZIONE

.Abstract

Obiettivo: scopo di questo studio è realizzare una revisione sistematica della letteratura per classificare e analizzare i metodi di valutazione e allenamento della forza dell'arto superiore mediante l'utilizzo di accelerometri.

Background: attualmente gli accelerometri sono un metodo obiettivo largamente utilizzato per valutare l'attività fisica. Questi strumenti di grande praticità (sia mono che triassiali ed utilizzabili a diverse frequenze di campionamento) vengono considerati affidabili sia nell'analisi biomeccanica che nell'allenamento della forza. Vista la praticità di utilizzo ed i costi accessibili, possono trovare ampio spazio anche in ambito riabilitativo.

Materiali e metodi: è stata eseguita una ricerca su database elettronico di Medline selezionando gli studi in base a criteri predefiniti.

Risultati: sono stati reperiti 2 studi rispondenti ai criteri di inclusione

Conclusioni: La piccola dimensione e il costo relativamente basso dell'accelerometro ne fanno uno strumento versatile e accessibile, potenzialmente capace di poter valutare prestazioni in test specifici in ogni attività.

.Introduzione

La valutazione della potenza muscolare è essenziale per capire la capacità prestazionale di un individuo. La potenza è la misura dell'abilità di produrre forza rapidamente e viene per lo più calcolata come prodotto di forza e velocità (18). La potenza muscolare, altamente dipendente dalla forza muscolare, è un importante attributo in atletica come evidenziato dalla necessità di produzione di forza rapida in molti sport (6); comunque, è ugualmente importante il fatto che forza e potenza sono anche necessarie per eseguire molte semplici attività di vita quotidiana, come portare la spesa o salire le scale. Perciò occorre un sistema di valutazione della prestazione muscolare affidabile e preciso per poter determinare le capacità e i potenziali limiti di un individuo.

La forza muscolare è normalmente misurata dinamicamente, spesso con la tecnica della singola ripetizione massimale (1RM), dove è valutato il massimo carico che un gruppo muscolare può sollevare (3). Altri metodi di valutazione della forza muscolare includono protocolli isometrici e isocinetici, entrambi con limiti metodologici. La natura della produzione di forza isometrica non contempla movimento articolare ed è stato pertanto evidenziato che esiste poca correlazione tra test muscolari isometrici e prestazioni dinamiche (4, 5). Sebbene vi sia movimento durante i test isocinetici, la velocità del movimento è controllata e perciò fallisce la simulazione della maggior parte dei pattern di movimento usati nelle attività quotidiane (4, 5).

La valutazione della potenza muscolare presenta problemi simili. Anche in questo caso la combinazione di produzione di forza e di velocità di movimento dovrebbero essere controllate completamente dal soggetto.

Per poter correlare in maniera adeguata i dati quindi, oltre la misura della resistenza occorrerà valutare anche i movimenti. Cioè bisogna rilevare altre variabili: velocità angolare, accelerazione angolare, jerk. Con gli strumenti convenzionali (goniometri, inclinometri, cronometri) è possibile misurare il ROM statico e calcolare in maniera approssimata la velocità angolare media la quale, tuttavia, è un parametro troppo grossolano per poter descrivere la qualità del movimento. È necessario, per contro, misurare i valori istantanei di velocità ed

accelerazione nonché il jerk, ossia, le derivate di primo, secondo e terzo ordine dello spazio rispetto al tempo. Tale scopo è raggiungibile utilizzando strumenti di motion tracking i quali, con diverse modalità, consentono la misurazione tridimensionale del ROM dinamico mediante il campionamento del movimento sui tre piani dello spazio in intervalli di tempo molto piccoli. Ciò permette di poter calcolare, per tutte le componenti del movimento analizzato, i parametri cinematici tendenti ai valori di velocità e accelerazione istantanei.

SISTEMI DI MOTION TRACKING

Per motion tracking si intende il processo di registrazione del movimento e la sua traduzione in un modello digitale. Nel corso degli ultimi decenni sono state sviluppate diverse tecnologie in grado di assolvere a tale funzione. I sistemi di motion tracking, altresì conosciuti come “motion capture”, hanno trovato applicazione in svariati campi della scienza e della tecnologia: inizialmente l’ambito militare (come spesso accade per quasi tutte le nuove tecnologie al loro esordio), estendendosi poi ai settori dell’intrattenimento, dello sport, della medicina e della robotica. Un notevole sviluppo di queste tecnologie, in particolar modo, si è recentemente verificato sotto la spinta dell’industria cinematografica, che le utilizza per registrare i movimenti di attori umani e utilizzare queste informazioni per l’animazione di modelli digitali bidimensionali o tridimensionali.

In ambito clinico, al fine di valutare la cinematica del corpo umano sono state adottate diverse soluzioni di monitoraggio le quali si basano su diverse tecnologie di rilevamento.

In particolare, i sistemi di motion tracking utilizzano usualmente sensori per misurazioni di tipo meccanico, acustico, ottico, elettromagnetico e inerziale. Ogni approccio presenta i propri punti di forza vantaggi e limiti.

Il rilevamento meccanico viene generalmente utilizzato per determinare angoli articolari. In generale, il sistema è costituito da due o più componenti meccaniche interconnesse con trasduttori elettromeccanici, quali potenziometri o giroscopi. Quando l’utente esegue un movimento, i trasduttori si muovono reciprocamente

permettendo così di estrapolare l'angolo articolare. Benché questi sistemi siano in grado di misurare direttamente a livello dell'articolazione, la loro applicazione ai segmenti corporei risulta essere scomoda, soprattutto se protratta nel tempo, e tende ad impedire i movimenti.

Il rilevamento meccanico presenta, quindi, alcune limitazioni specifiche: le difficoltà di campionamento per le articolazioni complesse provviste di gradi di libertà multipli (i.e. la spalla); la variabilità/imprecisione della posizione di connessione dei sensori ai segmenti corporei, dovuta alla mobilità dei tessuti molli; la necessità di ricalibrare il sistema in ragione della variabilità interindividuale delle caratteristiche antropometriche.

Il rilevamento acustico opera utilizzando impulsi ultrasonici. Esso può determinare la posizione del sensore in due modalità: misurando il tempo di trasmissione dell'impulso, oppure misurando la coerenza di fase intercorrente tra il segnale in trasmissione e il segnale captato da un microfono. I limiti fisici del suono costituiscono un limite per l'accuratezza di questi sistemi, per la frequenza di campionamento e per il loro raggio d'azione [14].

Il fenomeno della riflessione del suono può, a sua volta, alterare il campionamento del movimento disturbando la ricezione dei sensori. Per limitare le alterazioni dei segnali è indispensabile mantenere il contatto visivo diretto tra la fonte del segnale acustico e il sensore evitando di interporre ostacoli.

I sistemi di rilevazione radio o a microonde, operano prevalentemente sul principio di misurazione del tempo di trasmissione, analogamente a quanto accade per i sistemi di rilevamento acustico.

Il principale limite di questo sistema consiste nella velocità di propagazione delle onde radio che viaggiano estremamente più velocemente delle onde sonore. Tale fatto rende più complesso e meno preciso il processo di misurazione del tempo di trasmissione.

I sistemi di rilevamento ottico (optoelettronici) comprendono un'ampia gamma di tecnologie. In generale, i sistemi ottici determinano la posizione utilizzando telecamere multiple in grado di tracciare markers specifici posizionati sui segmenti corporei e allineati con precisi punti di repere ossei. L'esatta posizione spaziale dei

markers viene calcolata a partire dalle immagini registrate delle telecamere e ricorrendo metodi di triangolazione [12].

Esistono sistemi a markers passivi e sistemi a markers attivi. I primi usano luce infrarossa riflessa che viene emessa da LED posizionati attorno alla telecamera per determinare la posizione dei markers. I sistemi a markers attivi usano LED a luce infrarossa pulsata installati su ogni segmento corporeo per determinarne la posizione. Un vantaggio dei marker attivi consiste nel fatto che essi possono essere automaticamente distinti in quanto ognuno può pulsare a frequenze predefinite [7].

Il limite più significativo dei sistemi optoelettronici è dato dal fenomeno dell'occlusione ottica che si verifica ogni qualvolta una richiesta traccia luminosa venga bloccata da un oggetto interposto tra le telecamere e i trackers [12].

In questi sistemi, inoltre, possono verificarsi distorsioni del segnale a causa di altre fonti luminose o di riflessi che possono determinare l'effetto dei markers fantasma. I sistemi optoelettronici, in virtù della loro capacità di tracciare il movimento in contesti ambientali estesi, vengono utilizzati prevalentemente nei programmi rivolti allo studio delle cammino (gait analysis) [10].

I sistemi di rilevamento elettromagnetico utilizzano dei sensori posizionati sui segmenti corporei per misurare il vettore di campo magnetico generato localmente da un trasmettitore. La fonte emittente è costituita da tre bobine perpendicolari che generano un campo magnetico quando attraversate da corrente elettrica.

I sensori tridimensionali misurano la forza del campo la quale è indirettamente proporzionale alla distanza dalla sorgente [13].

I sensori e l'emettitore sono collegati ad un processore che calcola la posizione e l'orientamento di ogni singolo sensore basandosi sui valori del campo elettromagnetico da esso rilevati permettendo così le misurazioni su sei gradi di libertà (tre movimenti lineari sui tre piani dello spazio e tre movimenti angolari sui tre assi ortogonali).

I vantaggi più significativi dei sistemi di rilevamento elettromagnetico sono costituiti dalla loro elevata accuratezza e precisione nonché dal fatto che essi non sono soggetti a fenomeni di occlusione ottica. Infatti il corpo umano, e qualsiasi altra struttura non ferromagnetica, vengono liberamente e attraversati dalle linee di forza del campo magnetico.

Per contro, i punti deboli di questi sistemi di rilevazione sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche fisiche proprie del campo magnetico. I campi magnetici, infatti, diminuiscono rapidamente la loro potenza all'aumentare della distanza dalla sorgente e vengono facilmente alterati dalla presenza di materiali ferromagnetici collocati all'interno del volume di misurazione del campo [8].

La limitata portata rende i sistemi di rilevazione elettromagnetica inadeguati a specifici studi del movimento che richiedano spostamenti su ampi spazi come ad esempio accade nell'analisi del cammino. Essi sono preferibili per il campionamento di movimenti complessi in quanto non soggetti all'occlusione ottica dipendente dall'interposizione dei segmenti corporei tra la sorgente del campo e i sensori. Tali strumenti, inoltre, risultano di difficile utilizzo in settings clinici a causa delle loro complesse procedure di calibrazione e per la ridotta portabilità.

I sistemi di rilevamento inerziale (accelerometri) sfruttano la proprietà dei corpi di mantenere costanti le loro velocità lineari e angolari fin tanto che non vengono perturbati da forze o momenti di forza esterni. Sulla base di questi principi i suddetti sistemi di rilevamento inerziale permettono la misurazione dei cambi di posizione e di orientamento [9].

Un esempio biologico di sistema inerziale tridimensionale è costituito dal sistema vestibolare collocato nell'orecchio interno. Esso è in grado di rilevare sia movimenti angolari del capo sia le sue accelerazioni lineari. Questo sistema riveste un ruolo fondamentale nel controllo dell'equilibrio e nella stabilizzazione degli occhi rispetto all'ambiente circostante.

I sensori inerziali miniaturizzati vengono posizionati su ogni segmento corporeo i cui i movimenti devono essere campionati. Un giroscopio misura la velocità angolare e le variazioni d'inclinazione mentre un accelerometro misura le accelerazioni compresa l'accelerazione di gravità [9].

Il principale vantaggio dei sistemi di rilevamento iniziale consiste nel fatto che sono facilmente trasportabili e del tutto indipendenti e inoltre, non presentano problemi di occlusione visiva né di multitraccia acustica né di interferenza elettromagnetica [11].

Il loro svantaggio è imputabile alla vulnerabilità alle derive di integrazione dipendenti da disturbi e fluttuazioni di bilanciamento. I sensori inerziali, inoltre, non

possono essere utilizzati per stimare le loro posizioni e orientamenti reciproci in quanto l'integrazione può essere utilizzata solamente per valutare modifiche nel corso del tempo e la posizione iniziale di ogni sensore è sempre sconosciuta.

I sistemi di realtà virtuale, pur non essendo strumenti di rilevamento, rivestono un ruolo sempre più rilevante nei processi di valutazione del movimento. Infatti, essi vengono utilizzati in associazione a sistemi di tracking ottico o più spesso elettromagnetico per visualizzare i movimenti campionati o per costruire specifici tasks motori permettendo di realizzare degli ambienti di sintesi, interattivi e tridimensionali, che fungono da interfaccia dinamica tra uomo e computer.

Sinteticamente, la realtà virtuale può essere descritta dall'integrazione di tre fattori: immersione, interazione e immaginazione (triangolo di Burdea).

L'immersione rappresenta il grado di coinvolgimento dell'utente. Maggiormente i suoi organi di senso sono stimolati dal computer, maggiormente egli è immerso nell'ambiente virtuale e distaccato da quello reale.

L'interazione è data dal livello di scambio di informazioni realizzabile tra uomo e ambiente virtuale che viene mediato dal sistema VR.

L'immaginazione coincide con il grado di libertà concesso al progettista nel realizzare l'ambiente virtuale, permettendogli di costruire una gamma di scenari che si estende da quelli più aderenti al mondo reale fino a quelli caratterizzati da alterazioni della realtà o completamente immaginari.

In una diversa interpretazione viene introdotto il concetto di "presenza" in sostituzione di quello di immersione. Per presenza si intende il numero di stimoli scambiati con l'ambiente virtuale e di conseguenza il grado della sensazione di trovarsi all'interno di esso. Un minore grado di presenza induce nell'utente la sensazione di osservare l'ambiente virtuale dall'esterno, come attraverso una finestra, mentre un'elevata presenza evoca la sensazione di essere parte dello stesso [15].

L'interazione con l'ambiente virtuale può avvenire in modalità immersiva e non immersiva. La realtà virtuale immersiva viene simulata visivamente per mezzo di un casco (head mounted device – HMD) che permette la visione stereoscopica attraverso piccoli monitors collocati di fronte a ciascun occhio e che sincronizza il punto di vista dell'ambiente virtuale con i movimenti della testa. L'HMD è inoltre provvisto di cuffie in grado di fornire stimoli acustici atti ad esaltare l'orientamento

spaziale e la localizzazione. Questo sistema coinvolge profondamente l'utente facendolo sentire parte dell'ambiente virtuale. Presenta, per contro, due limiti rilevanti: il costo elevato dei dispositivi impiegati ed un effetto indesiderato noto come cybersickness. Quest'ultimo può emergere nel caso in cui si verificano degli errori di sincronizzazione tra la posizione reale dell'utente e l'immagine dell'ambiente riprodotta dal sistema. La conseguente incoerenza di informazioni visive e vestibolari esperite, può indurre la suddetta condizione di cybersickness caratterizzata da nausea, vomito, cefalea, sonnolenza, alterazioni dell'equilibrio e incoordinazione oculo-manuale [16].

La VR immersiva può altresì essere riprodotta con sistemi più complessi la cui massima espressione ad oggi è rappresentata dal CAVE™ system (Cave Automatic Virtual Environment) che simula ambienti virtuali tridimensionali ad alta definizione in cui possono interagire più persone. Questo sistema è rappresentato da una stanza le cui pareti sono costituite da display a retroproiezione sui quali vengono proiettate immagini stereoscopiche. L'effetto tridimensionale è realizzato attraverso la visione selettiva di tali immagini per singolo occhio indossando speciali occhiali con otturatore a LCD che diviene trasparente in sincrono con il refresh rate del monitor o il frame rate del proiettore.

Il grado di immersione è proporzionale alla quantità e qualità dei feedback multisensoriali resi disponibili dal sistema VR. I sistemi attuali sono stati sviluppati fornendo all'utente informazioni prevalentemente visive ed acustiche. Solo in seguito sono state elaborate interfacce aptiche in grado di fornire feedback somestesici e cinemati come il tatto, la vibrazione, la pressione o la forza. La simulazione di altri stimoli sensoriali quali gli odori ed il gusto, allo stato attuale, si basa su tecnologie limitate e trova ancora una minima applicazione nei sistemi VR.

La realtà virtuale non immersiva o desktop VR prevede un minore grado di presenza e sfrutta dispositivi più semplici e relativamente economici. L'utente percepisce l'ambiente virtuale tridimensionale come se lo osservasse attraverso una finestra. Allo scopo si utilizzano monitors, display LCD o videoproiettori sui quali la tridimensionalità viene simulata per mezzo di artifici ottici caratterizzanti il senso di profondità di campo nella visione monoculare: prospettiva lineare, interposizione, movimento di parallasse, distribuzione di ombre e di illuminazione e prospettiva aerea [17]. La presenza viene aumentata anche per

mezzo di sistemi acustici stereofonici, dolby surround e più recentemente con tecniche di multicanalità virtuale. Negli studi clinici viene data preferenza all'utilizzo dei sistemi VR non immersivi in quanto si sono rivelati più pratici, più economici di quelli immersivi e perché hanno dimostrato in tutti i casi di non procurare effetti collaterali di cybersickness.

Tra tutti questi sistemi di motion tracking andiamo a vedere più in dettaglio i sistemi di rilevamento inerziale, gli accelerometri appunto.

Un **accelerometro** è uno strumento di misura in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione.

Negli ultimi anni l'importanza di questi sensori è notevolmente accresciuta, questo perché, accanto alle tradizionali applicazioni in ambito scientifico e aerospaziale, si è sviluppato il loro uso in molti campi civili (automobilistico, testing, analisi meccanica, ludico, eccetera).

Con il moltiplicarsi delle applicazioni, sono accresciute anche le tipologie di questi strumenti, e oggi se ne possono contare decine di tipi, ognuno con caratteristiche funzionali e costruttive differenti.

Principio di funzionamento

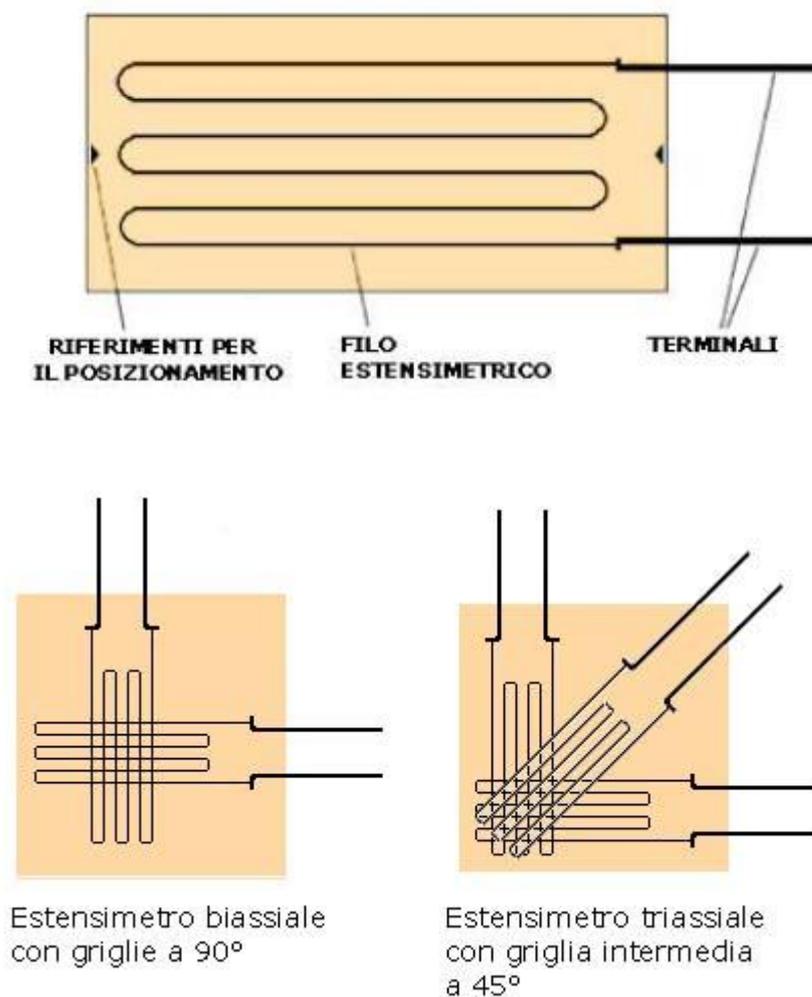
Nella maggior parte degli accelerometri, il principio di funzionamento è il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una **massa** quando viene sottoposta ad un'accelerazione.

La massa viene sospesa ad un **elemento elastico**, mentre un qualche tipo di sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico acquisibile dai moderni sistemi di misura.

Una prima classificazione si può così fare suddividendo questi strumenti a seconda del principio di funzionamento del **sensore di posizione**.

Accelerometro estensimetrico (strain gauge)

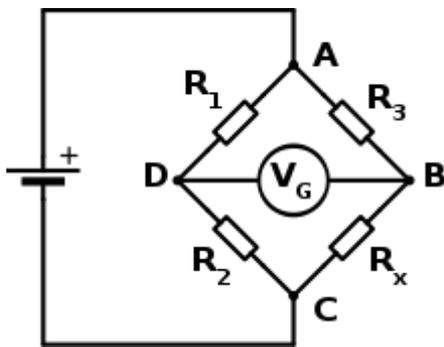
L'**accelerometro a ponte estensimetrico** sfrutta come principio di rilevazione lo stesso delle celle di carico, cioè la variazione di resistenza di un estensimetro dovuta alla variazione della sua lunghezza.



In questi dispositivi una massa viene sospesa su dei sottili lamierini, su quest'ultimi sono fissati degli estensimetri collegati a ponte di Wheatstone.

In presenza di un'accelerazione la massa si sposta, flettendo i lamierini e conseguentemente gli estensimetri subiscono un allungamento. Con un voltmetro

è possibile leggere una tensione di sbilanciamento del ponte di Wheatstone proporzionale all'accelerazione.



Schema elettrico di un ponte di Wheatstone

Accelerometro piezoresistivo

L'**accelerometro a ponte piezoresistivo** è una variante dell'accelerometro a ponte estensimetrico, dove al posto degli estensimetri sono utilizzati sensori piezoresistivi. Questi sensori si comportano in modo analogo agli estensimetri, ma permettono allungamenti e sensibilità superiori, pur avendo qualche problema di stabilità con la variazione di temperatura.

Spesso, in questi strumenti la massa viene sospesa su una membrana plastica, sulla quale sono stati attaccati gli elementi piezoresistivi.

Accelerometro LVDT

L'**accelerometro LVDT** sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, un sensore LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) integrato nella struttura dell'accelerometro stesso.

In questi dispositivi, la massa stessa costituisce il **nucleo ferromagnetico** del sensore LVDT, e scorre (sospesa su molle o altri elementi elastici) all'interno di un canale, attorno al quale sono avvolte le bobine destinate alla rilevazione della posizione della massa.

Un apposito circuito rileva la posizione del nucleo rispetto alle bobine e genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento rispetto alla posizione di riposo.

Accelerometro capacitivo

L'**accelerometro capacitivo** sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue **armature**.

In questi accelerometri, la massa (realizzata con materiale conduttivo) costituisce un'armatura, mentre l'altra è realizzata sulla struttura fissa del dispositivo, nell'immediata prossimità della massa. La massa viene sospesa su un elemento elastico relativamente rigido (tipicamente una membrana). Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore così realizzato e genera un segnale elettrico proporzionale alla posizione della massa.

Accelerometro piezoelettrico

L'**accelerometro piezoelettrico** sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, il segnale elettrico generato da un cristallo piezoelettrico quando è sottoposto ad una compressione.

In questi accelerometri la massa viene sospesa sul cristallo piezoelettrico, che, in questo caso, costituisce sia il sensore, che l'elemento elastico. In presenza di un'accelerazione la massa (che presenta una certa inerzia) comprime il cristallo, il quale genera un segnale elettrico proporzionale alla compressione.

Visto che l'elemento elastico è un cristallo, le caratteristiche di questi dispositivi sono peculiari:

- presentano una sensibilità relativamente bassa;
- possono rilevare accelerazioni elevatissime senza danneggiarsi (anche 1000 g);
- non possono rilevare accelerazioni statiche.

Una considerazione di particolare rilievo sta nel fatto che i cristalli generalmente impiegati nella costruzione dell'elemento elastico hanno un elevatissimo valore della costante elastica, il che ha una profonda influenza sull'equazione

differenziale che governa il fenomeno vibratorio che coinvolge il sistema strumento.

L'ultima caratteristica è da rimarcare: come detto, il cristallo genera un segnale elettrico proporzionale alla compressione, ma se la compressione sul cristallo permane, il segnale generato tende a dissiparsi dopo un breve periodo. In conseguenza di questo fenomeno, detto *leakage*, questi accelerometri non sono in grado di rilevare un'accelerazione quasistatica: dopo qualche secondo dall'applicazione di una tale accelerazione, il segnale prima si "congela" e poi si dissipa, e in uscita non sarà presente alcun segnale. Ciò è dovuto all'elevata resistenza dell'accelerometro o, eventualmente, anche ad una errata impostazione della frequenza limite inferiore sul preamplificatore. Questi accelerometri trovano impiego in applicazioni dove si deve rilevare accelerazioni dinamiche come quelle che si generano nelle vibrazioni e negli shock meccanici.

Accelerometro laser

L'**accelerometro laser** è un tipo particolare d'accelerometro, usato quando è necessario effettuare misure estremamente precise, non ottenibili con altri tipi di strumenti. Il principio di funzionamento è concettualmente differente rispetto a quelli sopra esposti, e si basa sul principio fisico che l'accelerazione è una derivata della velocità nel tempo.

In questo dispositivo un interferometro laser misura istante per istante lo spostamento dell'oggetto in moto, un computer ad esso collegato effettua la derivata seconda rispetto al tempo, ottenendo così direttamente il valore d'accelerazione.

I problemi di questi dispositivi è che sono costosi, piuttosto ingombranti, richiedono che l'interferometro sia montato a terra (o su un luogo da considerarsi fisso) e il laser deve essere costantemente puntato verso l'oggetto in moto.

Gravitometro

Il **gravitometro** è un tipo particolare d'accelerometro realizzato appositamente per misurare l'accelerazione di gravità. Secondo il principio d'equivalenza della

relatività generale, gli effetti della gravità e dell'accelerazione sono gli stessi, perciò un accelerometro non può fare distinzione tra le due cause.

Come gravimetri si possono usare delle versioni migliorate di accelerometri per misure statiche, in cui sono state particolarmente curate le caratteristiche di sensibilità, di precisione e di stabilità. Infatti, in questa applicazione, necessita rilevare variazioni d'accelerazione estremamente ridotte.

Dove, a fini scientifici, è necessario effettuare misure estremamente precise, si ricorre ad uno strumento che lavora con lo stesso principio dell'accelerometro laser: in questo caso, si rileva l'accelerazione della caduta di un grave in una camera sottovuoto, usando un interferometro laser per misurare lo spostamento, e un orologio atomico per misurare il tempo di caduta.

La rilevazione dell'accelerazione gravitazionale, oltre ad avere interesse in campo scientifico (specie in fisica e in geologia), è una pratica dell'industria estrattiva (specie per la ricerca di giacimenti petroliferi).

Banda passante

Gli accelerometri possono essere divisi in due grandi categorie:

- per misure di accelerazione statica;
- per misure di accelerazione dinamica.

Alla prima categoria appartengono gli strumenti che presentano una banda passante con una caratteristica passa basso, mentre alla seconda appartengono gli strumenti che presentano una caratteristica passa banda.

Gli **accelerometri per misure di accelerazione statica** sono in grado di rilevare dalle accelerazioni continue e statiche (grandezza d'ingresso con frequenza a 0 Hz) fino ad accelerazioni che variano con frequenze basse (normalmente fino a 500 Hz). Questa caratteristica è tipica degli accelerometri realizzati con il principio estensimetrico, LVDT o capacitivi. Esempi d'applicazione per questi strumenti sono misure d'accelerazione gravitazionale, d'accelerazione centrifuga, di un veicolo in movimento, nella guida inerziale.

Gli **accelerometri per misure di accelerazione dinamica** sono dei dispositivi che non sono in grado di rilevare accelerazioni statiche (ad esempio l'accelerazione gravitazionale), ma sono in grado di rilevare le accelerazioni che variano nel tempo, ad esempio quelle generate da oggetti che vibrano o quelle che si generano negli urti. La banda passante di questi strumenti può andare da qualche Hz a 50 kHz. Tipici accelerometri di questo tipo sono quelli realizzati con tecnologia piezoelettrica.

Condizionatori di segnale integrati

Il progresso della miniaturizzazione elettronica, ha permesso di integrare all'interno del contenitore di diversi accelerometri i relativi condizionatori di segnale. Questi circuiti possono servire ad alimentare correttamente i sensori, oppure ad amplificare, filtrare e linearizzare il segnale d'uscita.

L'integrazione di questi circuiti ha semplificato l'uso degli accelerometri, che possono essere efficacemente usati in una più vasta gamma di applicazioni in modo semplice ed economico.

Utilizzo degli accelerometri nella vita quotidiana

Se fino a pochi anni fa gli accelerometri erano destinati ad usi scientifici, militari o civili "speciali", oggi con l'evoluzione dell'elettronica, la riduzione dei costi e lo sviluppo delle applicazioni, gli accelerometri vengono utilizzati sempre più su oggetti d'uso comune.

Alcuni accelerometri miniaturizzati (utilizzati come inclinometri) si ritrovano in apparecchi portatili allo scopo di ruotare automaticamente l'orientamento della visualizzazione sullo schermo (da verticale a orizzontale e viceversa), a seconda se il dispositivo sia posto in orizzontale o verticale. La medesima tecnologia è a bordo dei gamepad di alcune console giochi, permettendo, con la sola inclinazione dei medesimi, di comandare lo svolgimento dei giochi. Esempio, nella piattaforma Wii della Nintendo, l'uso di accelerometri nei telecomandi, permette un'interattività molto superiore alla concorrenza.

Un'altra applicazione sempre più comune, è quella utilizzata per la rilevazione dell'accelerazione laterale nei veicoli, allo scopo di controllare le sbandate azionando opportunamente il sistema di frenatura.

.Materiali e Metodi

È stata condotta una ricerca consultando la banca dati elettronica di Medline utilizzando come parole chiave: “accelerometer”, “motion caption”, “low cost device”, “electronic device”, “motion detection”, e “assessment”, “measurement”, “analysis”, “training”, “workout”.

Non sono stati imposti limiti temporali.

La ricerca dei dati è successivamente proseguita basandosi sui riferimenti bibliografici degli articoli reperiti e permettendo così l'inclusione di fonti rilevanti ai fini del presente studio le quali non erano state estrapolate dai motori di ricerca a causa dell'assenza delle parole chiave nella loro indicizzazione.

Sono stati selezionati gli studi rispondenti ai due criteri inclusione coesistenti. Gli studi, al loro interno, dovevano prevedere sempre la valutazione o l'allenamento della forza e riguardare l'arto superiore.

Risultati

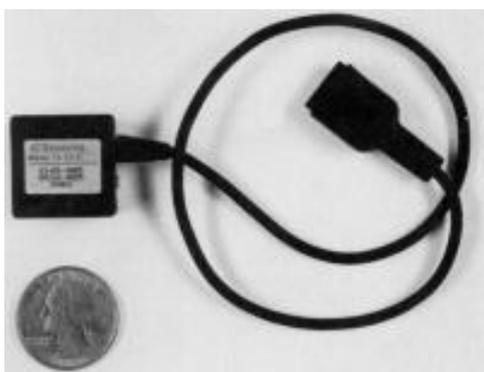
Sono stati reperiti 2 studi rispondenti ai criteri di inclusione.

Autore	Titolo	Tipo di accelerometro	Oggetto di analisi	Numerosità campione
Thompson C. J. Bemben M. G.	Reliability And Comparability Of The Accelerometer As A Measure Of Muscular Power (1)	Piezo-resistivo uniassiale	Uso dell'accelerometro per misurare potenza muscolare	30 (età 19-15)
Rontu J-P Hannula M. I. Leskinen S. Linna V. Salmi J. A.	One-Repetition Maximum Bench Press Performance Estimated With A New Accelerometer Method (2)	triassiale	Uso dell'accelerometro per la stima della singola ripetizione massimale (1RM)	22

.Discussione

Lo studio di Thompson et al. (1) intende determinare l'efficacia dell'uso di accelerometri come misura attendibile della potenza muscolare della parte superiore del corpo e la sua comparabilità con altri strumenti di misura convenzionali.

Trenta uomini, di età compresa tra i 19 e i 25 anni, in seguito a consenso informato scritto, hanno effettuato una singola ripetizione massimale (1RM) di panca piana su apposito apparato guidato. Tre prove al 60% 1RM sono state eseguite con un intervallo di 1 minuto e l'intera procedura è stata ripetuta il giorno successivo. Per ogni prova è stata analizzata potenza media (AP), velocità media



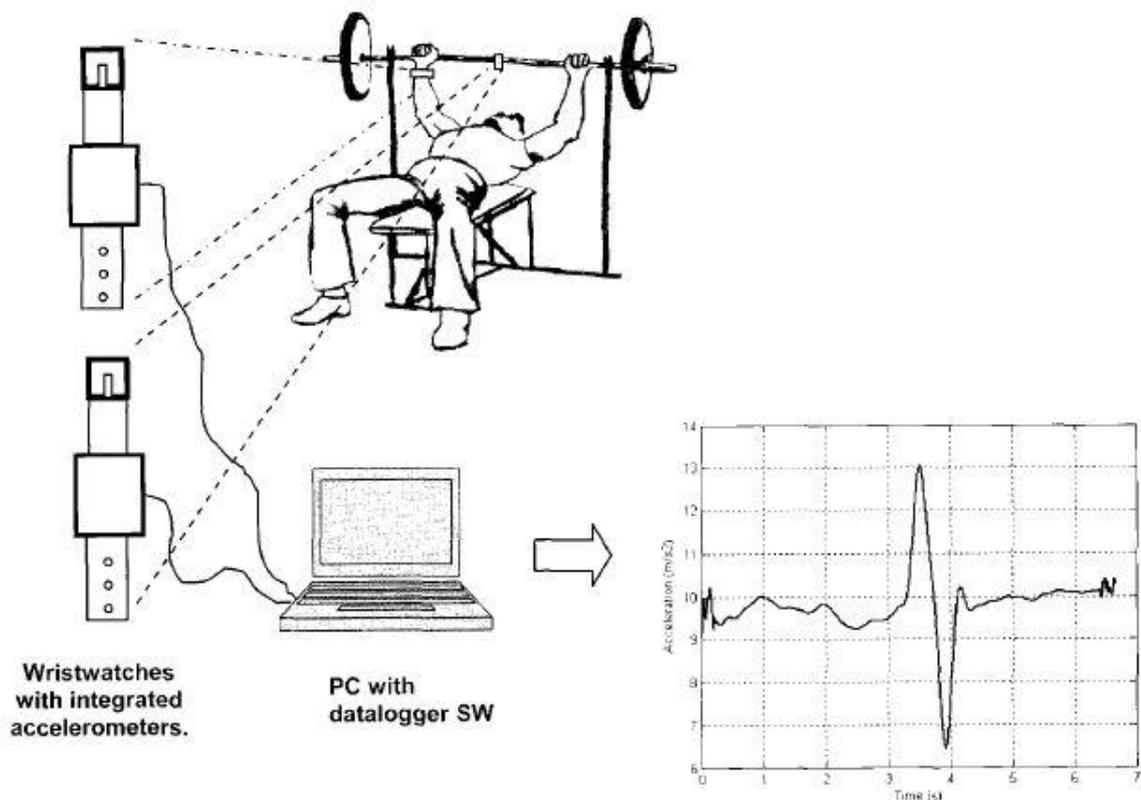
(AV) e dislocamento totale (TD) mediante l'uso di tre strumenti: un accelerometro piezoresistivo uni assiale (ICS Sensors Model 3145, Milpitas, CA) montato su apparato Cybex Smith Press (Owatonna, MN), una videocamera da 17 mm che ha registrato il sollevamento, e un sistema con fotocellula a infrarossi e timer calibrato per analizzare un

segmento di 20 cm del sollevamento. I dati di accelerazione campionati a 60 Hz hanno dato una misura diretta della forza e una misura integrata della velocità per calcolare la potenza muscolare.

I test di misurazioni ripetute ANOVA e i coefficienti di correlazione intraclassa indicano alta affidabilità tra le prove ($r = 0.99$) per tutte le variabili di misurazione. La misurazione di AP mediante filmato è stata significativamente più grande ($P \leq 0.05$) che con accelerometro e con fotocellula nel segmento di 20 cm (356.6 ± 94.8 W vs 335.5 ± 97.7 W, e 342.0 ± 97.2 W, rispettivamente). Presenti altre differenze rilevanti ($P \leq 0.05$) per la misurazione di AP tra accelerometro e filmato (246.0 ± 70.2 W vs 286.1 ± 83.6 W), e per la misurazione di AV (44.4 ± 9.2 cm·s⁻¹ vs 51.3 ± 12.3 cm·s⁻¹) e per la misurazione di TD (43.2 ± 7.9 cm vs $47.4 \pm$

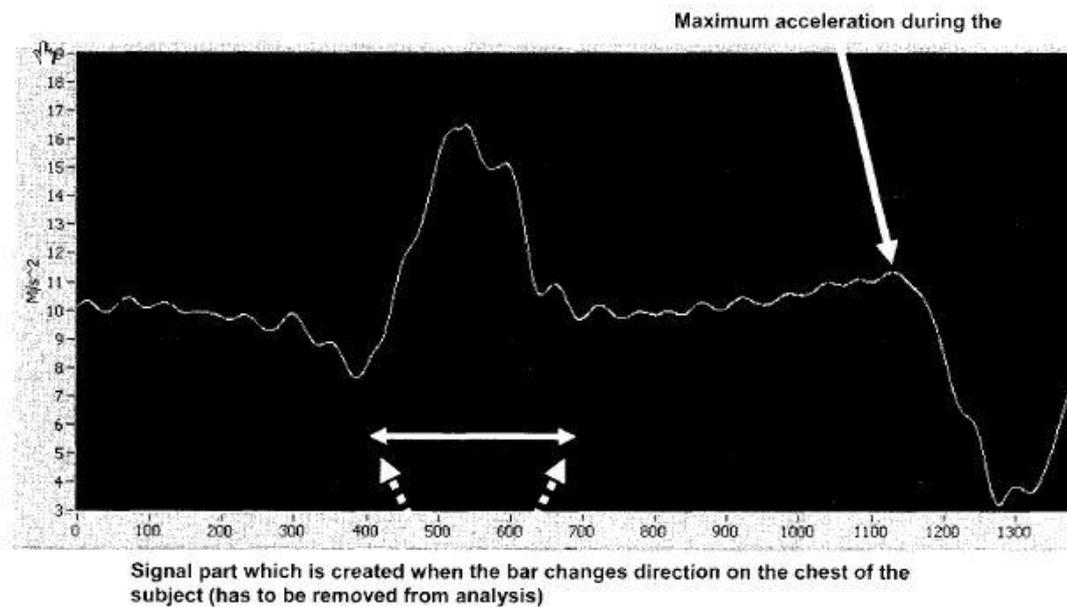
7.4 cm) quando esaminati sull'intero sollevamento, ma ci sono state correlazioni significative tra i 2 metodi (AP, $r = 0.95$; AV, $r = 0.98$; TD, $r = 0.93$). Questi risultati suggeriscono che nonostante ci siano stati lievi errori di acquisizioni dati, gli accelerometri possono essere ritenuti mezzi affidabili e versatili per valutare la potenza muscolare.

Lo studio di Rontu et al. (2) si propone di analizzare un nuovo metodo di prevedere la prestazione 1RM su panca piana attraverso un sollevamento sub-massimale. Il metodo sviluppato è stato analizzato usando livelli di carico differenti (50, 60, 70, 80 e 90% di 1RM). I soggetti erano giocatori di floorball ($n = 22$). Il nuovo metodo è basato sul presupposto che la stima di 1RM può essere calcolata dal peso sub-massimale e dalla accelerazione massima di tal peso durante il sollevamento. Il sollevamento su panca piana è stato registrato con un accelerometro triassiale integrato ad una polsiera e ad una scheda di acquisizione dati.



L'accelerazione massima è stata calcolata dai dati di misurazione del sensore e analizzati in un personal computer dotato di software basato su LabView. I risultati di 1RM stimati sono stati confrontati con i risultati di 1RM misurati tradizionalmente

sempre negli stessi soggetti. Per ogni livello di carico è stata sviluppata un'apposita equazione di calcolo, quindi sono state utilizzate 5 equazioni di calcolo differenti per i valori di 1RM misurati nei soggetti. La media (\pm SD) dei risultati misurati è stata 69.86 (\pm 15.72) kg. La media dei valori stimati è stata 69.85 - 69.97 kg. Le correlazioni tra risultati misurati e stimati sono state alte (0.89 – 0.97; $p < 0.001$). Le differenze tra i metodi sono stati molto piccole (da - 0.11 a 0.01 kg). I risultati di questo studio hanno mostrato una promettente accuratezza di previsione per la stima di prestazione su panca piana effettuando un singolo sollevamento con carico sub massimale. La precisione della stima è competitiva con altri metodi di stima conosciuti.



Entrambi gli studi hanno dimostrato l'affidabilità delle apparecchiature inerziali per valutare la forza e la potenza muscolare, di conseguenza il loro utilizzo è applicabile anche all'allenamento di queste capacità.

.Conclusioni

L'uso di un accelerometro che misura istantaneamente le accelerazioni durante un movimento restituisce un'esatta misurazione della forza e una misura integrata di velocità per misurare una potenza muscolare.

Sapendo che le grandezze di forza e accelerazione sono proporzionali e legate tra loro dall'entità della massa spostata ($\text{Forza} = \text{massa} \times \text{accelerazione}$), è possibile valutare e quindi allenare la forza muscolare senza dover aumentare il carico (es. dischi su bilanciere) ma semplicemente considerando il parametro di accelerazione. Ciò permette, tra l'altro, di sollecitare meno le strutture anatomiche del soggetto.

La sua piccola dimensione ed il costo relativamente basso fanno dell'accelerometro un strumento versatile e accessibile, potenzialmente capace di poter valutare prestazioni in test specifici in ogni attività, sia sportive che riabilitative.

Bibliografia

1. Thompson, Christian J.; Bemben, Michael G. *Reliability and comparability of the accelerometer as a measure of muscular power*. *Medicine & Science in Sports & Exercise* Issue: Volume 31(6), June 1999, pp 897-902
2. Jari-Pekka Rontu, Manne I Hannula, Sami Leskinen, Vesa Linnamo, Jukka A Salmi. *One-Repetition Maximum Bench Press Performance Estimated With A New Accelerometer Method*. *Journal of Strength and Conditioning Research*. Champaign: Aug 2010. Vol. 24, Iss. 8; pg. 2018, 8 pgs
3. American College of Sports Medicine. *Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. Philadelphia, PA: Lea and Febiger, 1991, pp. 48-49.
4. Murphy, A. J. and G. J. Wilson. *Poor correlations between isometric tests and dynamic performance: relationship to muscle activation*. *Eur. J. Appl. Physiol.* 73:353-357:1996.
5. Murphy, J. A., G. J. Wilson, and J. F. Pryor. *Use of isoinertial force mass relationship in the prediction of dynamic human performance*. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69:250-257, 1994.
6. Sale, D. G. *Testing strength and power*. In: *Physiological Testing of the High-Performance Athlete*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1991, pp. 21-106.
7. Jill Schmidt, Devin R. Berg and Heidi-Lynn Ploeg, *Precision, repeatability and accuracy of Optotrak® optical motion tracking systems*, *Int. J. Experimental and Computational Biomechanics*, Vol. 1, No. 1, 2009
8. LaScalza S, Arico J, Hughes R., *Effect of metal and sampling rate on accuracy of Flock of Birds electromagnetic tracking system.*, *J Biomech.* 2003 Jan;36(1):141-4.
9. Mayagoitia RE, Nene AV, Veltink PH., *Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems.*, *J Biomech.* 2002 Apr;35(4):537-42.
10. J P Paul, *Gait Analysis*, *Ann Rheum Dis.* 1989 March; 48(3): 179–181.

11. Bergmann JH, Mayagoitia RE, Smith IC. *A portable system for collecting anatomical joint angles during stair ascent: a comparison with an optical tracking device.* Dyn Med. 2009 Apr 23;8:3.
12. Cappozzo A, Della Croce U, Leardini A, Chiari L., *Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 1: theoretical background.*, Gait Posture. 2005 Feb;21(2):186-96.
13. Van Herp G., Rowe P., Salter P., Paul J.P., *Three dimensional lumbar spinal kinematics: a study of range of movement in 100 healthy subjects aged 20 to 60+ years.*, Rheumatology 2000; 39:1337-1340.
14. Coley B, Jolles BM, Farron A, Bourgeois A, Nussbaumer F, Pichonnaz C, Aminian K., *Outcome evaluation in shoulder surgery using 3D kinematics sensors.*, Gait Posture. 2007 Apr;25(4):523- 32. Epub 2006 Aug 28.
15. Schuemie MJ, van der Straaten P, Krijn M, van der Mast CA., *Research on presence in virtual reality: a survey.*, Cyberpsychol Behav. 2001 Apr;4(2):183-201.
16. Holden MK., *Virtual environments for motor rehabilitation: review.*, Cyberpsychol Behav. 2005 Jun;8(3):187-211; discussion 212-9.
17. Kiryu T, So RH., *Sensation of presence and cybersickness in applications of virtual reality for advanced rehabilitation.*, J Neuroeng Rehabil. 2007 Sep 25;4:34.
18. Schmidtbleicher, D. *Training for power events. In: Strength and Power in Sport.* London, England: Blackwell Scientific Publications, 1992, pp. 381-395.