

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
CAMPUS DI CESENA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

**Analisi comparativa di strumenti per la stima
dei parametri del salto verticale**

ELABORATO IN
LABORATORIO DI BIOMECCANICA

RELATORE:

Prof.ssa Silvia Fantozzi

PRESENTATA DA:

Alessandro Vandi

CORRELATORE:

Dot.ssa Anna Lisa Mangia

SESSIONE II
ANNO ACCADEMICO 2016/2017

Indice	1
Indice	1
Introduzione	3
Capitolo 1	4
Il salto nello sport	4
1.1 Salto sinonimo di Sport	4
1.2 Descrizione e tipologie di salto	5
1.3 Test di Sargent	6
1.4 Strumentazione Foot-contact	7
1.4.1 Pedana di Bosco	7
1.4.2 Pedana dinamometrica	9
1.4.3 Optojump	13
1.5 Sistemi Foot-Contactless	14
1.6 Stereofotogrammetria	16
Capitolo 2	20
Metodologie	20
2.1 Stereofotogrammetria	20
2.2 Strumentazione foot-contact	20
2.2.1 Pedana dinamometria	20
2.2.3 Optojump	21
2.2 Strumentazione foot-conctacless: sensori inerziali	22
2.2.1 Gyko	22
2.2.2 Sensorize Free Power	24
2.2.3 Opal	26
2.3 Setup sperimentale	27
2.3.1 Soggetti e protocolli	27
2.3.2 Disposizione strumentazione	28
2.3.3 Acquisizione dei dati	29
2.4 Elaborazione dei dati	31
2.4.1 Pedana dinamometrica	32
2.4.2 Stereofotogrammetria	33
2.4.3 Opal	35
Capitolo 3	39
	1

Analisi dei risultati e discussione	39
3.1 Riepilogo dei dati	39
3.1.1 Analisi di significatività	39
3.1.2 Grafici Bland-Altman	40
3.2 Risultati	40
3.2.1 Squat Jump	40
3.2.2 Salto con contro-movimento (CMJ)	42
3.2.3 Risultati test di Kolmogorov-Smirnov	43
3.2.2 Risultati test di Kruskal-Wallis	44
3.2.3 Grafici Bland-Altman	47
3.3 Discussioni	54
Conclusioni	57
Bibliografia	58
Ringraziamenti	60

Introduzione

La misura delle prestazioni sportive è legata a strumentazioni ingombranti, non trasportabili e limitanti il movimento per cui per analizzare le prestazioni di un atleta è necessario recarsi all'interno di un laboratorio o di una struttura appositamente dedicata. Un'altra problematica è dovuta alla limitata zona di lavoro ed è quindi difficile, se non impossibile, ricreare l'esatto ambiente in cui l'atleta è solito allenarsi. Avendo quindi meno punti di riferimento, la prestazione del soggetto può risultare peggiore rispetto al suo standard.

Da alcuni anni sono stati presentati e introdotti sul mercato dei sensori inerziali che replicano le analisi fatte dalle strumentazioni da laboratorio con il vantaggio di essere piccoli, leggeri e quindi indossabili dall'atleta senza arrecargli alcun fastidio durante il movimento. Un altro vantaggio di questi sensori è il costo: assai inferiore se rapportato a quello delle strumentazioni presenti nei laboratori. Questi sensori sono quindi adatti a sessioni di analisi sul campo senza la necessità di ricreare l'ambiente in laboratorio.

Questo lavoro di Tesi ha lo scopo di indagare l'affidabilità dei sensori inerziali in sessioni di salto verticale confrontando i risultati con quelli forniti da strumentazioni da laboratorio la cui affidabilità è già ampiamente dimostrata (Stereofortogrammetria, Pedana di Forza). Indagando quale sia la differenza tra le altezze registrate e se l'errore commesso (scostamento delle altezze registrate) è accettabile, verrà valutata la possibilità di utilizzare tali sensori al pari delle strumentazioni presenti in laboratorio.

Capitolo 1

Il salto nello sport

1.1 Salto sinonimo di Sport

Il salto è uno dei gesti principali dell'attività sportiva. La maggior parte degli sport include tale movimento, tuttavia esistono alcuni sport che si basano su di esso ed altri che ne fanno uso solo in determinate circostanze.

Tra gli sport che si basano sul salto, ad esempio, ci sono:

- l'atletica leggera (salto in alto, salto in lungo, salto triplo, salto con l'asta...);
- la pallavolo, dove tutta la fase di attacco sarebbe poco efficace se non si ricorresse al salto per colpire la palla nel punto più alto possibile ed imprimere una forza maggiore e più efficace allo scopo finale (superare la rete ed evitare le mani avversarie, schiacciando la palla nel campo avversario);
- il basket dove il salto è utilizzato come elevazione per raggiungere un obiettivo: il canestro posto in posizione sopraelevata rispetto alla testa del giocatore;
- la ginnastica artistica dove più l'elevazione è maggiore più elementi (capriole, salti mortali etc.) l'atleta riuscirà a compiere prima di riacquistare contatto con il terreno.

Tra gli sport che utilizzano il salto solo in particolari circostanze ci sono ad esempio:

- il calcio, dove il salto non è la caratteristica principale ma al quale si può ricorrere per intercettare cross o tiri che sono al di sopra della testa del calciatore, oppure del salto si serve spesso il portiere per intercettare un tiro all'interno dello specchio della porta [1];
- il tennis in cui il giocatore fa ricorso ad un'elevazione dal terreno durante il servizio o quando esegue uno smash;

- il nuoto quando il nuotatore si tuffa in vasca fa ricorso ad un salto per prendere una spinta maggiore e quindi avere una buona velocità già dai primi istanti di gara.

1.2 Descrizione e tipologie di salto

Una grande varietà e tipologie differenti caratterizzano il salto, come già detto in precedenza l'atletica leggera è composta da discipline che ne fanno il proprio fulcro. Nonostante una così grande variabilità è possibile tuttavia suddividere il gesto in alcune fasi comuni a tutte le tipologie:

- Fase di partenza: il soggetto è fermo e si prepara ad eseguire il salto;
- Fase di caricamento: l'atleta immagazzina più energia cinetica possibile
- Fase di spinta: il soggetto spinge il più possibile sul terreno per ottenere una propulsione ottimale.
- Fase di stacco: il momento in cui non vi è più contatto tra piede e suolo
- Fase di volo: durata in cui non vi è contatto tra superficie corporea e terreno.

Qui si trova anche la massima quota raggiunta

- Fase di atterraggio: nuovo contatto tra corpo (solitamente piede) e suolo.

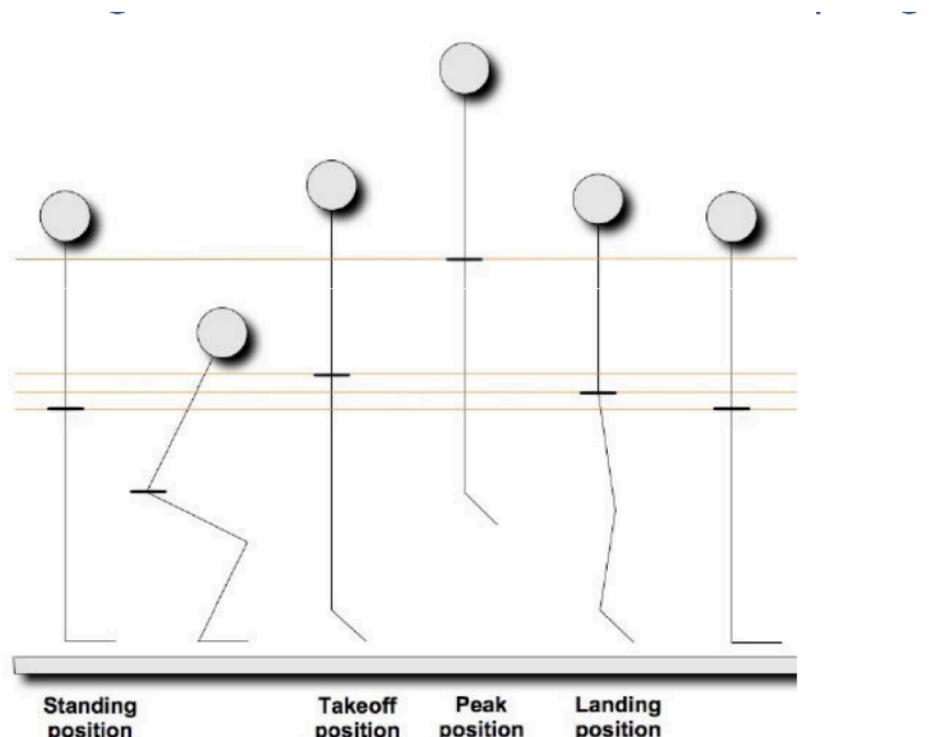


Fig.1

In aggiunta alle suddivisioni precedenti vi possono essere delle ulteriori situazioni non comuni a tutti i salti come la fase di rincorsa dove l'atleta raggiunge la massima velocità possibile per raggiungere un'altezza o una gittata maggiore oppure la fase di ammortizzamento flettendo le gambe a conclusione del salto.

Soffermandosi al solo salto verticale è possibile riscontrare diverse tipologie:

- Squat jump dove il soggetto parte dalla posizione di squat (accovacciato)
- Squat jump con contromovimento: si sfrutta l'energia cinetica del caricamento per raggiungere un'altezza maggiore
- Drop jump: partenza da posizione rialzata, si compie un pre-salto e senza fermarsi si compie il salto
- Salti multipli e ripetuti in successione per valutare la resistenza dell'atleta alla fatica.

1.3 Test di Sergeant

Il test principalmente utilizzato per la stima dell'altezza del salto verticale è il *Sergeant test* ideato dal dottor Dudley Allen Sargent nel 1921. La procedura per misurare l'altezza del salto, quindi analizzare lo sviluppo della forza elastica delle gambe, è la seguente: il soggetto con i piedi uniti e il braccio teso, appoggia la mano ad una parete sulla quale è presente una scala graduata che riporta l'altezza da terra, un operatore registra l'altezza raggiunta in questa situazione statica. Ora il soggetto partendo da accovacciato salta cercando di toccare con la mano il punto più alto possibile sulla scala graduata e l'operatore segna l'altezza massima raggiunta dalla mano del soggetto. Infine operando una semplice differenza si risale all'altezza del salto. Tramite apposite tabelle divise per sesso ed età si valuta se l'altezza del salto corrisponde ad un'eccellente, modesta o pessima prestazione.

Il test non è preciso poiché il tecnico ha a disposizione una frazione di secondo per osservare l'altezza del salto raggiunta con la mano; inoltre osservando dall'alto verso il basso per una questione di prospettiva c'è il rischio che il salto venga sovrastimato; infine un altro limite è rappresentato dal fatto che il soggetto con la mano copre la scala graduata durante il contatto e quindi rende imprecisa la lettura da parte dell'operatore.

1.4 Strumentazione *Foot-contact*

Tale strumentazione basa il suo funzionamento sulla misura dell'istante di contatto tra il piede e il suolo, ottenendo così il tempo di volo, ossia l'intervallo di tempo da quando il soggetto si eleva dal terreno, non avendo più contatto con quest'ultimo, a quando ritorna a toccare il suolo.

Esempi di strumentazione *foot-contact* sono la pedana di bosco che è composta da un tappetino, funzionante da interruttore al fine di calcolare il tempo di volo (in cui non vi è pressione sul tappetino) di un salto ed è quindi facilmente trasportabile. Strumento più ingombrante ma anche più preciso e che fornisce un'analisi più completa è la pedana dinamometrica la quale necessita di essere ancorata al terreno per calcolare la forza di reazione piede suolo (le forze scambiate tra piede e terreno) e data la caratteristica appena citata è impossibile da trasportare. Un buon compromesso tra affidabilità, precisione e portabilità è l'Optojump che è un sistema optoelettrico composto da barre che comunicano tra di loro tramite segnale wireless e in grado di rilevare l'interruzione del segnale da parte di un fattore esterno, quindi in grado di calcolare sia il tempo in cui il segnale è interrotto che, funzionando in maniera inversa, il tempo in cui il segnale non è interrotto (tempo di volo di un salto).

1.4.1 Pedana di Bosco

Ideata da Carmelo Bosco negli anni, '70 consiste in un "tappetino" al cui interno sono inseriti dei sensori baropodometrici di tipo resistivo, la cui disposizione matriciale funge da interruttore: quando il soggetto è in contatto con la pedana i sensori rilevano una pressione che viene successivamente trasdotta in segnale elettrico. Nel momento in cui il soggetto stacca dal terreno i sensori non rilevano più tale la pressione. In questo istante, il computer, a cui è collegata la pedana, attiva un cronometro per calcolare il tempo di volo che viene arrestato quando sulla pedana è rilevata nuovamente una pressione che corrisponde all'istante in cui l'atleta ritorna in contatto con il suolo.

Il tempo di volo è fondamentale per calcolare l'altezza del salto infatti è possibile considerare il moto come un moto uniformemente accelerato (decelerato nel caso in esame) e quindi calcolare lo spazio secondo la legge oraria[2]:

$$S = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g \left(\frac{t_v}{2} \right)^2 \quad (1)$$

considerando il suolo come quota zero e, poiché il soggetto è partente da fermo, la sua velocità risulta essere pari a zero per cui la (1) si semplifica:

$$S = \frac{1}{2} g \left(\frac{t_v}{2} \right)^2 \quad (2)$$

con g accelerazione di gravità e t_v tempo di volo (dal momento dello stacco al momento del nuovo contatto con il terreno).

La Pedana di Bosco ha il vantaggio di essere facilmente trasportata e quindi non è necessario che, per valutare le prestazioni degli atleti, essi si rechino all'interno di un laboratorio o di una struttura dedicata a queste tipologie di studi.

Al contrario si è dimostrato che la superficie morbida (o meglio non rigida) cambi la propriocettività del soggetto e che quindi la registrazione baropodometrica si discosti dalla realtà alterando (seppur di poco) la registrazione del tempo di volo.

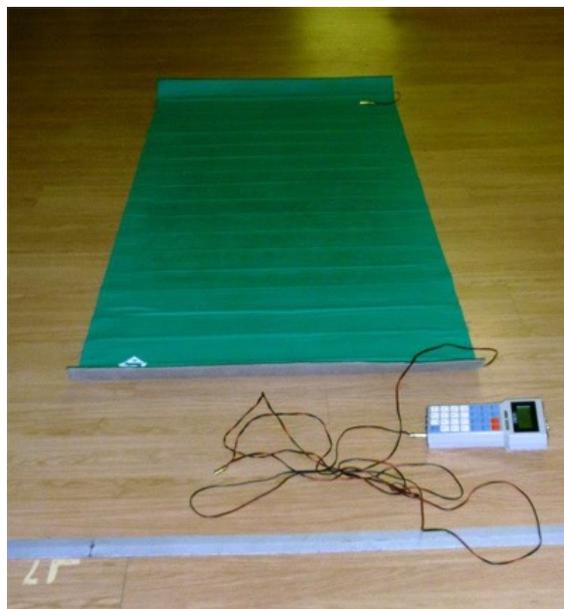


Fig.2: Pedana di Bosco

1.4.2 Pedana dinamometrica

La pedana dinamometrica, o pedana di forza, rappresenta l'evoluzione della pedana di Bosco; viene utilizzata in analisi del movimento e permette la misura delle forze scambiate tra il corpo e la pedana stessa e quindi il suolo durante lo svolgimento di attività motorie quali la postura, il cammino, la corsa e il salto.

Le grandezze misurabili dalla piattaforma sono indicative delle forze esterne scambiate tra il corpo e il suolo: l'interazione può essere riassunta da una forza risultante con il suo punto di applicazione e da una coppia della quale viene ricavato il momento.

In particolare è possibile acquisire:

- GRF¹ forza di reazione al suolo nelle tre componenti
- COP² centro di pressione (bidimensionale), considerato come punto di applicazione della GRF
- Momento libero verticale della forza GRF rispetto al COP.

In una pedana dinamometrica a sei componenti è possibile acquisire due combinazioni di dati:

1. Le componenti della forza e del momento
2. Componenti della forza, coordinate del centro di pressione, momento libero.

In una pedana a tre componenti, più economica ma non adatta a registrare movimenti ad alta frequenza o nei quali siano presenti effetti dovuti a forze di taglio, è possibile acquisire:

1. componente verticale della forza e momenti attorno agli assi x ed y
2. componente verticale della forza e posizione del centro di pressione.

La misura della forza si basa sulla risposta di sensori posti sulla piattaforma; questi sono dispositivi in grado di trasformare grandezze fisiche in elettriche in base alla variazione di proprietà degli elementi sensibili. Un sensore è composto da un elemento sensibile primario, posizionato sulla sorgente del segnale e un elemento di conversione che effet-

¹ Ground Reaction Force

² Center Of Pressure

tua la reale trasduzione della grandezza fisica in segnale di tensione o corrente elaborabile dalla strumentazione collegata a valle. Le caratteristiche del sensore permettono di determinare la risposta della piattaforma: per la pedana di forza ci si riferisce al modello dell'oscillatore armonico, nel quale i sensori sono assimilabili a molle e la piattaforma alla massa, collegata ad una delle estremità delle molle stesse. I sensori comunemente utilizzati sono di tipo estensimetrico (resistivo) o piezoelettrico (capacitivo).

I Primi (Fig.3) sono sensori di tipo resistivo poiché variano la propria resistenza in base alla deformazione alla quale vengono sottoposti, con un fattore di guadagno dipendente dalla deformabilità del materiale e dal coefficiente di Poisson (es. per gli estensimetri metallici è circa 2). Il loro funzionamento si basa sulla seconda legge di Ohm³:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

dove ρ indica la resistività tipica del materiale; l la lunghezza del filo; A l'area della sezione.

Il posizionamento degli estensimetri deve garantire che la direzione sensibile coincida con quella di misurazione della forza; poiché il segnale di tensione riesce a mantenersi a lungo (in condizioni statiche) tale tipo di sensori è adatto nel caso di movimenti a bassa frequenza, come il cammino e la postura. il principale aspetto negativo di questa tipologia di sensori, nonostante il basso costo, è l'elevata sensibilità alla temperatura.

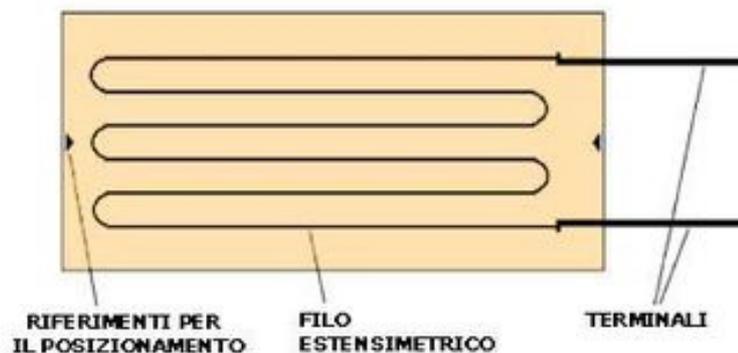


Fig.3: sensore resistivo

³ George Simon Ohm fisico e matematico tedesco (1789-1854)

I sensori piezoelettrici (Fig.4) basano il loro funzionamento sull'effetto omonimo: un cristallo piezoelettrico (ad esempio il quarzo) è in grado di generare sulla propria superficie delle cariche elettriche in seguito ad una sollecitazione meccanica, ad esempio una pressione applicata secondo la legge:

$$d = \frac{\text{carica}}{\text{forza}} \left[\frac{\text{Coulomb}}{N} \right] \quad (4)$$

Nella piattaforma sono inseriti tre cristalli, lavorati in modo da risultare prevalentemente sensibili alla deformazione in una delle tre direzioni; la tensione misurata ai capi del cristallo diminuisce dopo un transitorio, per questo motivo tali sensori trovano applicazione ottimale nel caso di atti motori ad alte frequenze o che prevedano l'entrata in gioco di forze impulsive (come la corsa e il salto).

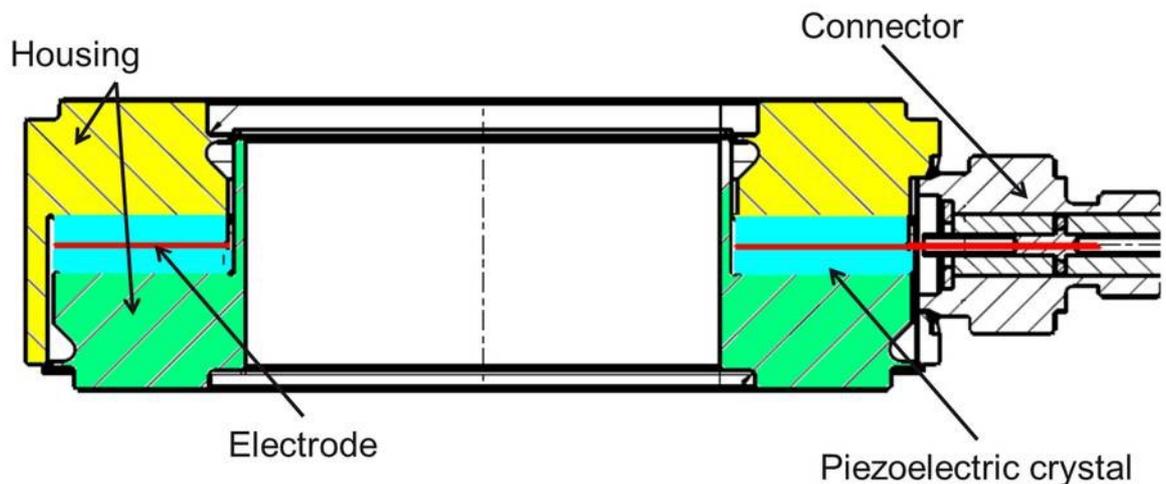


Fig.4: sensore piezoelettrico

Per la conversione del segnale si fa uso del ponte di Wheatstone⁴, un dispositivo in grado di fornire, se alimentato, una tensione in uscita dipendente sia dall'alimentazione che dal valore delle resistenze utilizzate. Si ha massimo guadagno se, nel ponte, i sensori utilizzati sono tutti uguali e se i componenti elettrici su rami opposti del ponte sono sottoposti alla stessa deformazione.

L'intero blocco del sensore è contenuto in una cella di carico: una pedana di forza ha tre/quattro celle di carico montate su piloni, che rappresentano dei vincoli al movimento del top rigido (la piattaforma stessa). Ogni cella di carico misura forze e momenti

⁴Charles Wheatstone fisico ed inventore britannico (1802-1875)

applicati rispetto al proprio baricentro, che vengono poi sommati e riferiti al baricentro della pedana.

La bontà dei dati acquisiti dipende dalle prestazioni dei sensori, in particolare vanno garantiti:

- Un'elevata sensibilità nel campo di misura considerato
- Errore di linearità minimo ed una buona accuratezza
- Isteresi minima
- Minima influenza dell'applicazione della forza lungo la componente sulla misura delle altre componenti (crosstalk)
- Risposta dinamica adeguata all'analisi effettuata, di compromesso tra la velocità di risposta e tempo di assestamento della stessa
- Stabilità dei componenti elettrici per garantire la riproducibilità degli esperimenti.

La trasformazione degli ingressi acquisiti in dati viene effettuata tramite parametri presenti all'interno della matrice di calibrazione: questa è una matrice quadrata di dimensione pari al numero di canali acquisiti contenente, sulla diagonale principale, il guadagno per ogni misura effettuata e sugli elementi al di fuori di essa i parametri che permettono di ridurre al minimo il fenomeno di crosstalk. I parametri della matrice di calibrazione vanno periodicamente aggiornati per avere misure affidabili.

La pedana di forza, è sicuramente uno strumento preciso nella valutazione della GRF istante per istante o anche per essere utilizzata come gold standard per valutare l'altezza massima di un salto tramite tempo di volo grazie all'elevata frequenza di campionamento (solitamente intorno ai 1000Hz): prendendo come starter il momento in cui non viene rilevata alcuna GRF a quando la pedana rileva nuovamente una forza di reazione. I limiti che la pedana di forza sono la non portabilità in quanto essa è ancorata al suolo; le dimensioni ridotte (circa 25 dm^2) quindi se viene utilizzata per sessioni di salti o di corsa l'atleta deve essere destralmente preciso nell'atterrare perfettamente sulla pedana altrimenti vengono falsati i risultati; infine il costo non è accessibile a qualsiasi persona.



Fig.5: Coppia pedane dinamometriche

1.4.3 Optojump

Optojump è un sistema di rilevamento ottico della *microgate* composto da due barre una trasmittente il segnale infrarosso ed una ricevente ciascuna di esse è lunga un metro e contiene 96 slot. Sulla barra trasmittente sono posizionati 96 Led che inviano continuamente il segnale il quale viene recepito dalla cellula diametralmente opposta e qualora ci sia un'interruzione del segnale dovuta alla presenza di un corpo frapposto fra i due dispositivi calcola la durata di tale interruzione. Nelle sessioni di salto il funzionamento è quello opposto: il sistema calcola la durata in cui non vi è alcun corpo frapposto tra le due barre stimando così il tempo di volo al millesimo di secondo (data la frequenza di acquisizione a1000 Hz) da cui viene stimata l'altezza del salto (2).

Optojump offre la possibilità di collegare più barre in serie tramite un apposito cavo rendendo così possibile incrementare l'area di lavoro o persino collegarle in maniera tale da avere a disposizione un'area bidimensionale per migliorare la bontà dei dati acquisiti tramite acquisizioni incrociate.

Le barre sono collegate tramite cavo usb o wireless al pc, sul quale è installato l'apposito software fornito dalla casa produttrice che mostra i parametri acquisiti duran-

te le sessioni di salto tra cui il tempo di volo, i tempi di contatto, la frequenza di acquisizione (fino a 1000 Hz), energia dissipata e la potenza.

1.5 Sistemi *Foot-Contactless*

Tra i sistemi foot-contactless ci sono i sensori inerziali indossabili (accelerometri e giroscopi), recentemente utilizzati in questo tipo di applicazioni.

L'accelerometro è un dispositivo elettromeccanico ossia composto da una parte meccanica, che rileva la variazione di velocità a cui è sottoposto il sensore e quindi l'accelerazione, e un trasduttore che tramuta la sollecitazione meccanica in segnale elettrico che viene infine inviato al software caratteristico di ogni sensore per tracciare il profilo dell'accelerazione in un determinato periodo temporale. La variazione di velocità può essere registrata tramite le proprietà fisiche di un cristallo piezoelettrico o tramite circuiti capacitivi: nel primo caso un'improvvisa accelerazione provoca uno shock e una compressione del cristallo che reagisce generando un segnale elettrico ben preciso; rilevando tale segnale ed elaborandolo in maniera opportuna l'accelerometro è in grado di determinare da quale direzione giunga la spinta acceleratrice. Nel caso si abbia di fronte un circuito capacitivo questo sfrutta la variazione di distanza fra le armature di un condensatore (quindi la variazione di capacità elettrica) al fine di determinare la variazione delle forze di accelerazione cui è sottoposto il sensore. Un apposito circuito è deputato a registrare le variazioni che si creano all'interno del condensatore (le cui armature sono solitamente costituite da una massa mobile e dalla struttura fissa del dispositivo) al fine di generare un segnale elettrico proporzionale allo spostamento della massa.

L'accelerometro può essere composto da elementi che misurano gli spostamenti su due oppure tre assi: nel primo caso si parlerà di un accelerometro biassiale; nel secondo di uno triassiale ovviamente più preciso ma anche più costoso rispetto al primo.

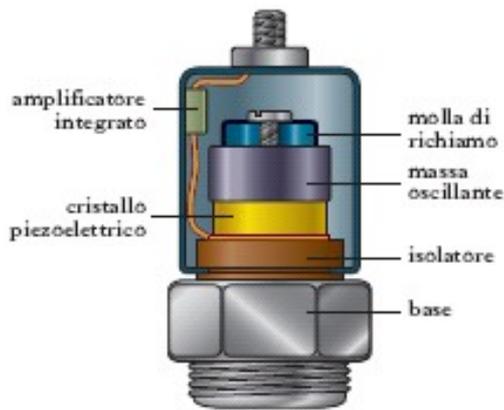


Fig.7A: accelerometro piezoelettrico

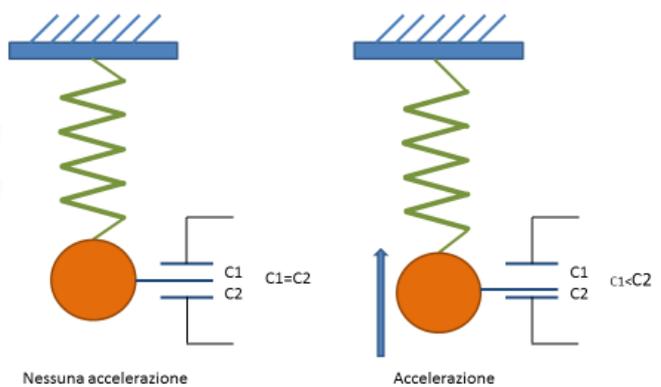


Fig.7B: accelerometro capacitivo

L'accelerometro è il cuore dei sensori inerziali i quali possono svolgere il lavoro compiuto dalla pedana dinamometrica e dalla stereofotogrammetria, sono di piccole dimensioni ed indossabili e non limitano il movimento dell'atleta. L'accelerometro al loro interno può essere bi- o tri-assiale, esso registra il profilo dell'accelerazione lungo le due o tre coordinate e successivamente trasmette i dati ad un pc, al quale è collegato tramite bluetooth, onde radio o wireless dove, tramite un proprio software, ogni sensore mostra il profilo dell'accelerazione lungo i due o tre assi, senza la necessità che ci sia un contatto tra suolo e piede dell'atleta. A seconda del tipo di sensore il software sul pc mostra alcuni parametri calcolati tramite il profilo di accelerazione quali, ad esempio, l'altezza del salto, la potenza compiuta nell'eseguirlo (nel caso di sensore atto ad acquisire sessioni di salti); velocità massima (qualora il sensore tratti la corsa di un atleta e non solo); la posizione di un atleta in ogni istante (integrando due volte il profilo dell'accelerazione istante per istante). I dati forniti dall'accelerometro possono essere visualizzati sia come numero oppure in funzione dell'accelerazione gravitazionale (2g, 3g, 4g...); inoltre più è ampio il fondo scala più valore assume l'accelerometro poiché potrà essere utilizzato in più campi. Alcuni sensori sono anche dotati di giroscopio e magnetometro in modo da arricchire i dati forniti in uscita.

I sensori inerziali hanno il grande pregio di essere piccoli e leggeri e quindi facilmente indossabili dall'atleta che sta compiendo l'attività sportiva in esame, spesso sono dotati di un'apposita fascia o cintura che consente il corretto posizionamento sul corpo del (per le sessioni di salto verticale solitamente va collocato all'altezza del baricentro

sopra la colonna vertebrale), così facendo non limitano i movimenti dell'atleta ed è possibile l'acquisizione dei dati "sul campo" senza l'uso di laboratori dove vengono ospitate le apparecchiature più ingombranti e di difficile, se non impossibile, trasporto (stereofotogrammetria e pedana di forza). Un altro punto di forza dei sensori inerziali è sicuramente il prezzo: nemmeno paragonabile al costo di una pedana di dinamometrica o di un sistema di acquisizione stereofotogrammetrico, tale che, qualora una società sportiva voglia monitorare il grado di allenamento e le prestazioni dei propri atleti, possa acquistarne uno o più senza dover affrontare un gravoso esborso economico. Infine questa tipologia di sensori non richiede una grossa manutenzione e il processo di calibrazione avviene in maniera automatica all'avvio dello strumento stesso.

Al contrario la principale incognita dei sensori inerziale è l'affidabilità: ci si chiede se i risultati ottenuti siano gli stessi che si otterrebbero utilizzando una pedana di forza e/o un sistema di misura stereofotogrammetrico. Ad oggi sono stati effettuati studi che mostrano come alcuni sensori siano realmente affidabili [3] [4] [5], altri invece lo siano meno [6] poiché sovrastimano o sottostimano i valori ottenuti dallo strumento utilizzato come gold standard. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è proprio quello di indagare l'affidabilità dei risultati ottenuti da diversi sensori inerziale paragonati a strumenti utilizzati come gold standard (stereofotogrammetria e pedana di forza, principalmente).

1.6 Stereofotogrammetria

La stereofotogrammetria ha come scopo quello di ricostruire istante per istante la posizione di un punto che si muove all'interno di un volume fornendo le coordinate di quest'ultimo (x,y,z) rispetto ad un sistema di riferimento del laboratorio dove si sta svolgendo la prova. Questo è reso possibile grazie all'applicazione di marker in plastica con rivestimento catarifrangente che riflette la radiazione infrarossa proveniente da speciali telecamere poste sul perimetro dell'area di acquisizione; tali telecamere emettono e ricevono la radiazione infrarossa ricostruendo la posizione del marker all'interno del volume di acquisizione.

In Fig.6 è rappresentato il principio di funzionamento per la ricostruzione della posizione del marker (con il numero minimo di telecamere: due): si tracciano i raggi di

proiezione attraverso i punti nodali (N), caratteristici delle telecamere, del marcatore considerato per poterne identificare la posizione. Sul chip della telecamera risulta un punto (una zona bianca) sulle due coordinate che corrispondono alla proiezione del punto acquisito. Dalla conoscenza di P_1, P_2, N_1, N_2 e dalla posizione delle telecamere, rispetto al sistema di riferimento, è possibile quindi determinare le coordinate spaziali di P. Effettuando il procedimento inverso (nel caso ideale) il punto P sarà dato dall'incrocio dei due o più raggi di proiezione. Gli errori di acquisizione però potrebbero far sì che le due o più rette non si incrocino in un punto, rendendo necessario minimizzare la distanza tra tali rette ottenendo così la miglior approssimazione possibile.

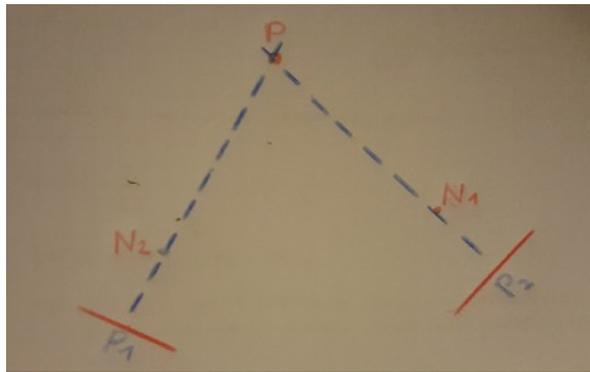


Fig.6

La procedura di calibrazione dei parametri del sistema viene effettuata attraverso un oggetto del quale sono note le coordinate, che includa tutto il volume nel quale vengono effettuate le misurazioni. Considero una terna di assi sui quali applico un numero differente di marker in modo tale da poter distinguere uno da un altro: il movimento di un'asta nel volume di misura consente di ricavare i dati sull'allineamento e la posizione dei marker. Tali misurazioni sono però affette da due tipologie di errori: sistematici dovuti all'utilizzo di modelli con validità limitato oppure causati da una calibrazione insufficiente dei dispositivi; casuali le cui cause possono essere attribuite alla digitalizzazione delle immagini, all'elaborazione dei dati oppure al Flickering ("sfarfallio" dei pixel che individuano un marker).

Prima di ogni sessione sperimentale l'operatore dovrà stimare gli errori sistematici tramite *spot-check*:

- *Pendulum test*: consiste nell'acquisizione 3D di due oscillazioni complete, su piani ortogonali, compiute da un pendolo a due marcatori
- *Full volume Test*: un'asta rigida a due marcatori viene mossa a velocità costante,

lungo le tre direzioni, attraverso tutto il volume di misura

- *Walking test*: un operatore in posizioni note del volume di misura, posiziona un'asta

rigida a due marcatori a varie inclinazioni

- *Mal test*: un'asta rigida a due marcatori è posizionata in un punto T di posizione nota rispetto ai marcatori e al sistema di riferimento (solitamente T coincide con l'origine del sistema di riferimento). L'asta viene acquisita sia da ferma che mentre viene fatta ruotare.

I marker si suddividono in attivi e passivi; i primi qualora fossero dotati di un Led alimentato dall'esterno che permette di avere maggior contrasto sul fondo e dà la possibilità di poter attivare un marker alla volta; i secondi se riflettono la radiazione incidente.

I vantaggi nell'utilizzare un sistema fotogrammetrico sono i seguenti: fornisce la traiettoria completa istante per istante all'interno del volume di acquisizione; in una sessione per valutare l'altezza del salto è sicuramente lo strumento più preciso poiché non si calcola la quota massima indirettamente (tramite tempo di volo come si deve ricorrere nel caso si abbia a disposizione una pedana di forza); volume di acquisizione ampio che comporta una buona libertà dell'atleta nello spostarsi al suo interno.

Al contrario i difetti principali della stereofotogrammetria sono: gli artefatti da tessuto molle: i marker essendo attaccati alla pelle e quest'ultima essendo in parte elastica si sposta spostando di conseguenza il marker soprastante causando un errore di misura; la non portabilità del sistema: è un sistema prettamente da laboratorio, per spostarlo occorre parecchio tempo; talvolta i marker vengono coperti durante il movimento e può capitare che il marker in un dato istante non viene acquisito, costringendo così l'operatore a compiere una ricostruzione manuale del marker.

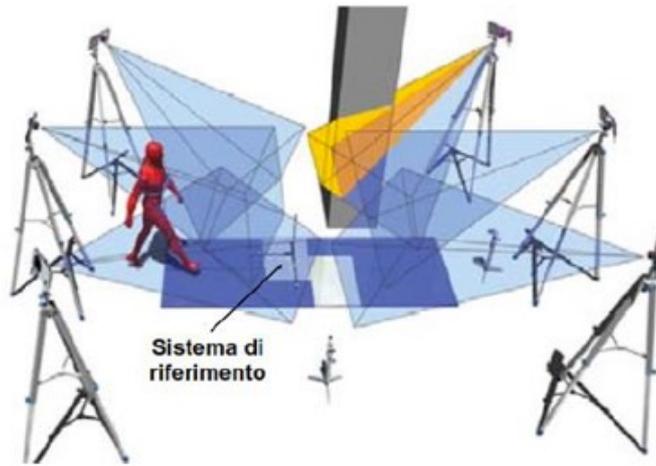


Fig.7: Sistema stereofotogrammetrico

Capitolo 2

Metodologie

In questo studio di tesi la strumentazione utilizzata per stimare l'altezza del salto verticale viene suddivisa in sistemi *foot-contact* o *foot-conctactless*: il fattore discriminante affinché la strumentazione utilizzata rientri o meno nella prima categoria è la seguente: il salto viene stimato tramite il contatto del piede col suolo prima dello stacco e si ritiene concluso con il successivo appoggio sul terreno e quindi il soggetto è vincolato ad una determinata area in cui si trova nei perimetri; oppure se il soggetto è libero di muoversi poiché la registrazione non è vincolante ad una determinata area si parla di sistemi *foot-conctactless*.

2.1 Stereofotogrammetria

Il sistema fotogrammetrico utilizzato durante le acquisizioni è fornito dalla *BTS* e il modello è *SMART-D* composto da un sistema optoelettronico costituito da dieci telecamere ad infrarossi capaci di individuare all'interno dell'area di lavoro le posizioni dei marker catarifrangenti applicati sul soggetto; dotato di *workstation* a cui sono collegate le telecamere ad infrarossi e a cui convergono tutti i dati campionati ad una frequenza di 250 Hz.

2.2 Strumentazione *foot-contact*

2.2.1 Pedana dinamometria

La pedana dinamometrica utilizzata in questo studio di tesi è una doppia pedana *Kistler(9286AA)* di tipo capacitivo a sei componenti quindi atta ad acquisire due combinazioni di dati:

1. Le componenti della forza e del momento
2. Componenti della forza, coordinate del centro di pressione, momento libero.

In questo studio la pedana utilizzata sarà una sola, quindi il soggetto dovrà prestare attenzione nello staccare ed atterrare sulla pedana senza fuoriuscire al fine di non compromettere la validità della prova e la combinazione di dati acquisiti sarà la seconda. La frequenza di acquisizione della pedana di forza è di 1000 Hz.

2.2.3 Optojump

Prima di ogni sessione di acquisizione il sistema chiede di inserire o selezionare un atleta (a seconda che abbia già utilizzato lo strumento o meno) chiedendo nome, cognome, data di nascita, il sesso, il peso e l'altezza come campi obbligatori. Una volta terminata la prova il software manda a video le prestazioni della sessione fornendo tempo di volo, l'altezza del salto; la posizione del centroide e l'area occupata durante la prova in rapporto a quella totale disponibile fra le due barre. In Fig6A è inserito un esempio di report di fine prova. In questo studio di Tesi sono state utilizzate solamente una barra trasmittitrice ed una ricevitrice data l'area limitata in qui si sono svolte le prove

Dati Test									
#	TCont.	TVolo	Altezza	Potenza	Ritmo	Centroide	Dist. Centroide	Area Occupata	RSI
	[s]	[s]	[cm]	[W/kg]	[Hz]	[cm]	[cm]	[cm²]	[m/s]
✓ 1		0,524	33,7					28,1	
✓ 2						9,4	9,4	32,3	
🔄 Minimo		(#1) 0,524	(#1) 33,7			(#1) 9,4	(#1) 9,4	(#1) 28,1	
🔄 Massimo		(#1) 0,524	(#1) 33,7			(#1) 9,4	(#1) 9,4	(#1) 32,3	
🔄 Media		0,524	33,7			9,4	9,4	30,2	
🔄 Dev Std									3,0
🔄 CV									9,9%



Figg. 6A, 6B: Optojump

2.2 Strumentazione foot-conctacless: sensori inerziali

2.2.1 Gyko

Il sensore inerziale Gyko (acronimo dall'inglese *Gravity, Gyroscope, Kinematic, Control*) è prodotto dalla *microgate* dotato di un accelerometro triassiale avente fondo scala pari a 16 volte l'accelerazione di gravità (16g); giroscopio per misurare le velocità angolari attorno agli assi di riferimento fino a 2000 °/s; magnetometro tridimensionale per misurare il campo magnetico a cui il dispositivo è sottoposto fino ad un massimo in valore assoluto di $4800\mu T$. Il dispositivo è connesso al pc tramite segnale *bluetooth* attraverso il quale comunica in tempo reale con il software fornito dalla casa produttrice o in alternativa possiede una micro-SD di 4GB tale per cui è possibile compiere sessioni di lavoro senza avere un riscontro *real time*. La frequenza di campionamento spazia da 10 Hz a 1000 Hz (in questo studio la frequenza utilizzata durante le acquisizioni è pari a 500 Hz). Gyko è dotato di batteria ricaricabile collegando il dispositivo tramite cavo USB al pc, la durata della batteria è di circa 5 ore; il peso di 46g è assai contenuto e quindi è facilmente indossabile senza recare alcun fastidio al soggetto.

Gyko può essere utilizzato in situazioni differenti:

1. Analisi della camminata e della corsa per stabilire eventuali patologie del sistema nervoso e di quello muscolo scheletrico, stimando i parametri spazio temporali del cammino, isolando le singole fasi del passo, quindi descrivere accuratamente il comportamento della parte inferiore del corpo. In questo tipo di analisi il sensore va posizionato, tramite apposita fascia (in dotazione), nella zona sub-scapolare.
2. Analisi dei salti verticali al fine di valutare l'altezza del salto e per valutare la forza muscolare espressa dagli arti inferiori fornendo il tempo di volo, il tempo di contatto, dati relativi alla fase eccentrica di caricamento del salto (quando è previsto) e alla fase concentrica di spinta, forza potenza e velocità massime raggiunte. Il sensore va posizionato in prossimità del centro di massa (tramite cintura).
3. Analisi della postura per valutare la stabilità e la capacità di controllo di un soggetto immobile in posizione eretta ricavando gli indici più noti riguardanti il gomito postulare (*Body Sway*) quali lunghezza e area del gomito, velocità di percorrenza del gomito, frequenza delle oscillazioni.

Gyko fornisce l'altezza del salto tramite il tempo di volo calcolato a partire dal profilo dell'accelerazione registrato.



Fig8A: Gyko

Report di Andrea Ceciliani

Test CMJ1

Tipo Squat

Data martedì 06 giugno 2017 @ 15.48

	Risultati salti
Tempo di volo [s]	0,5
Elevazione [cm]	30,66
Velocità massima [m/s]	2,46
Forza massima [N/kg]	25,55
Lavoro concentrico [J/kg]	7,11
Potenza massima [W/kg]	48,26
Tempo alla forza massima [s]	0,2
Rateo di sviluppo della forza [N/kg/s]	8,68
Lavoro eccentrico [J/kg]	-3,21
Rapporto durata eccentrico-concentrico	1,8
Forza massima all'atterraggio [BW]	0
Rateo di esposizione all'impatto [BW/s]	0
Tempo alla forza massima di atterraggio [s]	0

Fig.8B

Prima di compiere ogni sessione di salto il software chiede di inserire l'anagrafica del soggetto qualora utilizzi il sensore per la prima volta, altrimenti chiede di selezionarlo tra le anagrafiche già presenti, successivamente va inserito il protocollo del salto

che si vuole eseguire. Una volta terminato il salto il sensore tramite il software manda il report del salto eseguito (Fig. 8B).

2.2.2 Sensorize Free Power

Sensorize free power è l'accelerometro appositamente prodotto dalla *Sensorize* per sessioni di salti in cui viene stimata l'altezza, il tempo di volo fornendo inoltre un'analisi accurata della forza esplosiva del soggetto durante una sessione di salto. Il dispositivo comunica al pc sul quale è installato il software abbinato al sensore tramite connessione bluetooth senza quindi limitare i movimenti dell'atleta che grazie al peso contenuto è facilmente indossabile senza recare alcun problema al soggetto; il sensore va posizionato all'altezza del centro di massa sopra la colonna vertebrale tramite apposita cintura in neoprene in dotazione con il sensore. Il sensore acquisisce i dati ad una frequenza di 200 Hz, il sensore fornisce in uscita l'altezza del salto calcolata tramite tempo di volo estrapolato dal profilo dell'accelerazione registrato dall'accelerometro posto al suo interno.



Fig.9A

Prima di compiere ogni sessione di salto il software chiede di inserire l'anagrafica del soggetto qualora utilizzi il sensore per la prima volta, altrimenti chiede di selezionarlo tra le anagrafiche già presenti, successivamente va inserito il protocollo del salto

che si vuole eseguire. Una volta terminato il salto il sensore tramite il software manda il report del salto eseguito (Fig. 9B,9C).

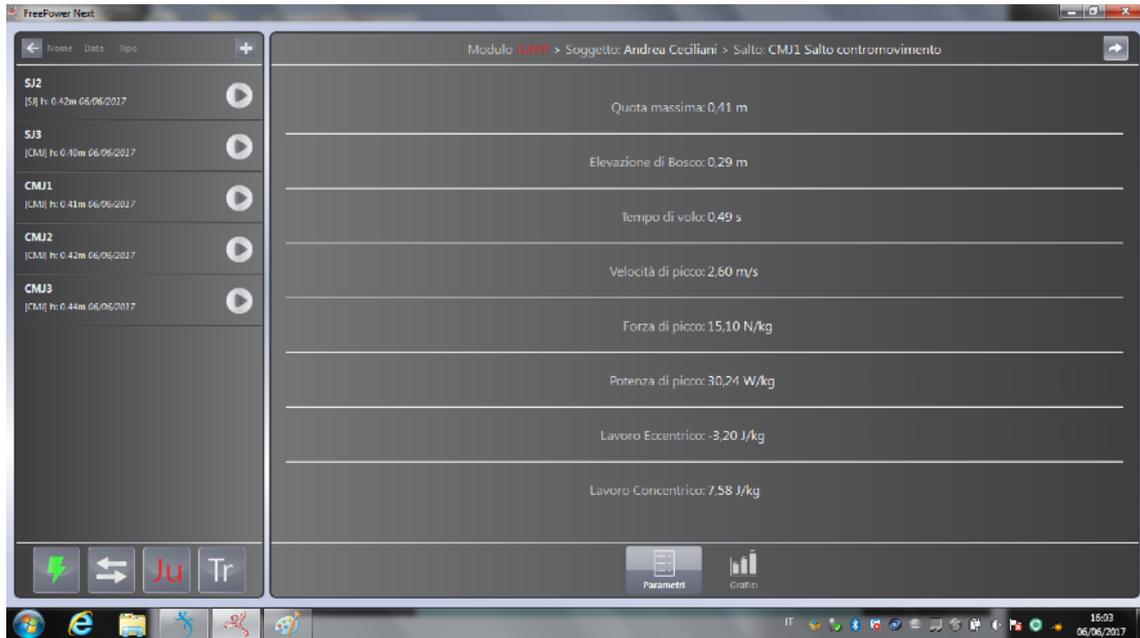


Fig.9B

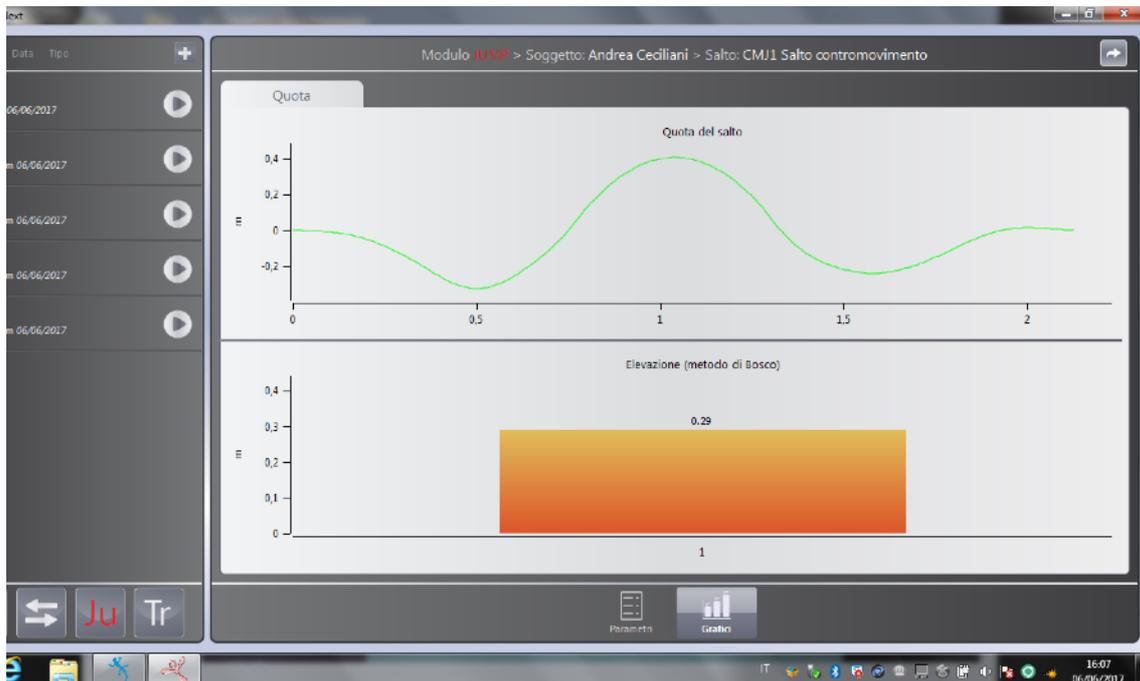


Fig.9C

2.2.3 Opal

L'Opal è un sistema microelettronico ad alte performance, triassiche composto da una serie di unità inerziali. Il sistema si compone di un *access point* il quale comunica in *real time* con i sensori Opal tramite segnale *wireless* ai quali trasmette anche il segnale di sincronia, è possibile constatare tale sincronia in maniera visiva: sia l'*access point* che i sensori sono dotati di Led che lampeggiano in maniera simultanea quando sono sincronizzati (l'*access point* in blu mentre i sensori in verde). La Docking Station viene utilizzata per configurare i sensori collegandoli al pc, li ricarica, li accende e/o li spegne qualora non servissero più; ogni sensore ha un'apposita slot dove viene inserito. I Sensori Opal una volta accesi e configurati comunicano tramite l'*access point* al pc rendendo possibile la consultazione in *real time*. Ciascun sensore è dotato di un accelerometro, giroscopio e un magnetometro tutti triassiali il cui sistema di riferimento è raffigurato su tutti i sensori, centrato sul Led:

- Asse z uscente dal lato nero del sensore
- Asse y positivo verso la porta dati del sensore
- Asse x in maniera da formare una terna cartesiana secondo la regola della mano destra.

L'accelerometro ha un fondo scala impostabile a due o sei volte l'accelerazione di gravità; il magnetometro ha un range che raggiunge i 2000 °/s mentre il magnetometro ha un fondo scala fissato a 6 Gauss. La frequenza massima di acquisizione è di 128 Hz.

Gli Opal possiedono anche una memoria interna di 8GB poiché è possibile registrare gli eventi durante una sessione e poi osservare i grafici in un secondo momento, senza quindi utilizzare la funzione *real time*. Questo secondo procedimento allunga anche la durata della batteria portandola da circa 8 ore a 12. Il peso di ogni Opal si aggira sui 22 g quindi inferiore a tutti i sensori precedentemente trattati. Ogni sensore fornisce solamente i dati grezzi: non viene compiuta in automatico alcuna analisi post sessione.



Fig10: Opal

2.3 Setup sperimentale

Le sessioni di salto si sono svolte all'interno del laboratorio dell'università di Bologna collocato nella struttura Record sita in via del Pilastro 8 a Bologna dove 9 soggetti si sono prestati per verificare l'affidabilità dei sensori inerziali rispetto ai sistemi *foot contact* la cui affidabilità è già stata ampiamente dimostrata.

2.3.1 Soggetti e protocolli

Undici soggetti età comprese tra i 21 e i 60 anni di cui 7 di sesso maschile e 4 femminile si sono prestati volontariamente ad eseguire due differenti tipologie di salto con tre ripetizioni ciascuno per un totale di sei salti per soggetto:

- Squat Jump (SJ): il soggetto parte in posizione eretta con le gambe divaricate e i piedi posizionati lungo la proiezione delle spalle; successivamente il soggetto viene

invitato a scendere controllando il movimento fino a che l'angolo al ginocchio sia il più prossimo possibile ai 90 gradi. Qui il soggetto rimane fermo per un paio di secondi per poi saltare in modo esplosivo verso l'alto cercando di raggiungere la massima quota possibile; infine ammortizzare con le gambe la fase di arrivo. Per tutta la durata del salto le mani devono rimanere appoggiate sui fianchi subito sopra le anche; il busto deve rimanere in posizione verticale evitando di fletterlo in avanti poiché tale movimento potrebbe modificare il responso dei sensori inerziali.

- Salto con contro-movimento (CMJ): il soggetto parte in posizione eretta con le gambe divaricate e i piedi posizionati lungo la proiezione delle spalle; successivamente viene invitato a scendere velocemente fino a raggiungere un angolo al ginocchio di circa 90 gradi; quindi, senza effettuare alcuna pausa, il soggetto salta il più in alto possibile sfruttando così l'energia immagazzinata nella fase di caricamento. Per tutta la durata del salto le mani devono rimanere appoggiate sui fianchi subito sopra le anche; il busto deve rimanere in posizione verticale per le stesse motivazioni spiegate in precedenza.

2.3.2 Disposizione strumentazione

Ai soggetti è stato chiesto di compiere le prove sopra una delle due pedane dinamometriche di cui è dotato il laboratorio, collocate al centro dell'area di lavoro del sistema stereofotogrammetrico; le due barre del sistema Optojump sono state posizionate a trenta centimetri circa dal limite della pedana dinamometrica utilizzata: la barra trasmittente è stata collocata a destra della piattaforma, mentre quella ricevente a sinistra.

I sensori inerziali: il Gyko, il Sensorize e un Opal sono stati collocati su una placca di legno rettangolare(Fig.11); successivamente la placca è stata fissata attorno alla vita di ciascun soggetto all'altezza della terza vertebra sacrale (altezza a cui si trova il centro di massa corporeo di una persona in posizione eretta) con dello scotch di carta. La placca è stata dotata di 4 marker catarifrangenti affinché fosse visibile al sistema stereofotogrammetrico il cui centroide è stato approssimato come centro di massa per ricostruire la posizione in ogni istante. Altri due Opal sono stati applicati: uno alla caviglia destra all'altezza del malleolo nella parte esterna, l'altro è stato legato tramite le stringhe della scarpa sul collo del piede del destro a metà piede.



Fig.11: Placca

2.3.3 Acquisizione dei dati

Il soggetto si prepara ad affrontare la prova indossando la cintura a cui è applicata la placca in legno (Fig12) viene poi controllata la corretta posizione e che sia ben aderente alla schiena sopra la colonna vertebrale; successivamente si applica il secondo Opal alla caviglia destra del soggetto sul lato esterno del malleolo tramite apposito cinturino fornito insieme ai sensori dotato di tasca per non far uscire il sensore durante la fase di acquisizione. Infine viene applicato il terzo Opal sulla scarpa destra del soggetto avendo cura di legare il sensore tramite i lacci delle scarpe al fine di evitare che il sensore scivoli via durante il salto. Successivamente il soggetto viene istruito sulle tipologie di salto che dovrà compiere (squat jump e salto con contro-movimento), sulle ripetizioni (tre per ciascuna tipologia di salto verticale) e sulle pause che dovrà compiere tra un salto e il successivo (un minuto).



Fig.12

Il soggetto viene invitato ad entrare all'interno dell'area di lavoro del sistema stereofotogrammetrico, di fronte alla pedana dinamometrica utilizzata, senza salirci sopra, fuori dall'area di lavoro delle barre Optojump in maniera che né la pedana dinamometrica né l'Optojump rilevino una presenza. Successivamente l'operatore avvia in maniera sincrona sia la registrazione tramite stereofotogrammetria sia tramite la pedana dinamometrica in modo da avere un segnale sincronizzato nel tempo dei due sistemi. Ora il soggetto viene invitato a salire sulla pedana e ad attendere in posizione eretta cercando di muoversi il meno possibile; nel frattempo l'operatore attiva in sequenza prima gli Opal e l'Optojump, poi il Gyko ed infine il Sensorize inserendo negli ultimi tre sensori il protocollo del salto che il soggetto sta per eseguire poiché se viene inserito una tipologia di salto differente da quella che si sta realmente eseguendo il sensore rileva questa difformità e non registra il profilo del salto segnalando l'errore commesso. Una volta avviati tutti i sensori il soggetto viene invitato a compiere il primo salto ossia il primo dei tre squat jump (SJ) quindi scende con le mani appoggiate sui fianchi fino a formare

un angolo al ginocchio di 90 gradi e da questa posizione salta il più in alto possibile in verticale cercando di atterrare nello stesso punto in cui ha staccato o quanto meno all'interno della pedana dinamometria per evitare che il risultato registrato dalla pedana venga alterato a causa di una fuoriuscita anche se minima. Una volta concluso il salto al soggetto è chiesto di rimanere sulla pedana fino a quando l'operatore non ha interrotto la registrazione del profilo di accelerazione degli Opal e non ha disattivato la registrazione sincronizzata della stereofotogrammetria e della pedana dinamometrica; il Gyko, il Sensorize e l'Optojump si disattivano automaticamente una volta rilevato il salto (se è stato acquisito ed eseguito correttamente) oppure mandano tramite apposito software sul pc una schermata di errore con la motivazione del fallimento. Una volta terminati i tre SJ il soggetto compie i tre salti con contro-movimento (CMJ) la procedura di attivazione sia dei sistemi *foot-contact* che di quelli inerziali non cambia, cambia solo il protocollo del salto: il soggetto non deve compiere alcuna pausa una volta che ha raggiunto l'angolo al ginocchio di 90 gradi, ma deve immediatamente risalire e staccare cercando di raggiungere la massima quota possibile, prestando sempre attenzione ad atterrare sulla pedana senza fuoriuscire.

2.4 Elaborazione dei dati

Conclusa la fase di acquisizione delle prove i dati di tutti i salti divisi per soggetti sono stati esportati dal software dei sensori Optojump, Gyko e Sensorize registrando tali dati in una tabella riepilogativa divisa per soggetti e tipologie di salto (SJ e CMJ). Procedura diversa è stata eseguita per quei sistemi che fornivano come output dei dati grezzi cioè forniscono dei profili di forza di reazione (Pedana dinamometrica), profili di posizione (sistema stereofotogrammetrico) e profili di accelerazione (Opal). Questi dati sono stati elaborati tramite MATLAB con algoritmi studiati per ciascun tipo di sistema affinché caricando il solo profilo fornito dallo strumento venisse fornito come risultato, tramite apposita *function*, l'altezza del salto in questione e il tempo di volo con cui si è ottenuto il risultato.

2.4.1 Pedana dinamometrica

I dati forniti in uscita dalla pedana di forza sono stati elaborati in MATLAB: come primo passo i dati racchiusi in una matrice tridimensionale sono stati convertiti in altra matrice questa volta bidimensionale (tramite *squeeze function*) in maniera tale che possano essere elaborati tramite programma MATLAB. Ora la matrice ha come colonne il centro di pressione lungo le coordinate x ed y (COP_x , COP_y), la Ground Reaction Force lungo le tre coordinate (F_x , F_y , F_z) e il momento torcente lungo l'asse z (M_z); per il calcolo dell'altezza del salto si è presa in considerazione solo la GRF lungo l'asse z estrapolandola dalla matrice e plottandola. Successivamente si è studiata apposita *function* in grado di contare quanti campioni della forza di reazione siano uguali a zero (a meno del disturbo presente sul segnale), poiché nella fase di volo non vi è alcun contatto tra soggetto e pedana, di conseguenza la reazione piede suolo è, nel caso ideale, pari a zero, mentre nel caso reale, prossima allo zero. In seguito, un controllo in retroazione, analizza che, nel vettore composto dai soli campioni il cui valore della GRF è prossima allo zero, non vi siano discontinuità troppo elevate (maggiori 10 campioni), poiché una tale distanza tra i campioni indica che non si è più all'interno del range riconducibile alla fase di volo ma a qualche tipo di errore (ad esempio il soggetto è uscito dalla pedana prima che l'operatore abbia interrotto la registrazione della pedana oppure ad una mancanza di registrazione di alcuni campioni da parte del sistema). Qualora il ciclo for della retroazione scorra tutto il vettore senza fermarsi allora significa che i campioni precedentemente individuati erano corretti.

Infine, conoscendo i numeri di campioni contenuti nel vettore, conoscendo la frequenza di campionamento (1000Hz), si risale alla durata nel tempo della fase di volo (in secondi) e di conseguenza si calcola l'altezza del salto (per comodità l'altezza del salto viene espressa in centimetri).

```

1  function [ H ] = Pedana(platData)
2  %fuori dalla function vanno caricati i dati della
3  %pedana
4
5  platz=squeeze(platData(1,:,5));
6
7  fc=1000; %frequenza di campionamento
8  % taglio i primi 6 secondi per eliminare la prima fase
9  %dove il soggetto non è sulla pedana e gli ultimi 2 secondi
10 %per eliminare la fase in cui il soggetto scende dalla pedana
11 %prima della fine del comando dell'operatore
12  ilim=6*fc;
13  end1=(length(platz)-2*fc);
14  platz1=platz(ilim:end1);
15  buoni=find(platz1<10);% isolo i campioni della fase di volo
16  for i=length(buoni):-1:2 %controllo in retroazione
17      if (buoni(i)-buoni(i-1))>10
18          i;
19          break
20      end
21
22  end
23  if i==2
24      i=length(buoni);
25  end
26
27  tvolo=(buoni(i-1)-buoni(1))/fc;
28  H=tvolo^2*9.82/8*100;
29  end

```

Fig.13: Function Pedana

2.4.2 Stereofotogrammetria

La Stereofotogrammetria è utilizzata, in questo studio di Tesi, come *gold standard* per le analisi finali dei dati e per la discussione dei risultati ed è quindi considerato come lo strumento più affidabile e più veritiero, anche perché è l'unico sistema che fornisce la posizione istante per istante dei marker e quindi del soggetto nel tempo, così facendo si ottiene una misurazione diretta dell'altezza massima del salto verticale.

Il sistema stereofotogrammetrico acquisisce la posizione dei quattro marker applicati alla placca(Fig.11) e la fornisce durante tutta l'acquisizione; una volta conclusa la prova e dopo aver caricato i dati in MATLAB tramite apposita funzione, si ottiene una

matrice contenente la posizione di ciascun marker per ogni campione rispetto al sistema di riferimento della stereofotogrammetria.

In un secondo momento si è assunto come punto di massa del soggetto il centroide del quadrilatero formato dai quattro marker applicati alla placca di legno, quindi si è creato un nuovo vettore formato dalla posizione del centroide campione per campione.

In seguito sfruttando la sincronizzazione nel tempo di stereo e pedana si è preso come posizione di stacco del soggetto il primo campione in cui la pedana registrava una GRF prossima a zero newton e non la posizione nel momento in cui il soggetto è fermo in posizione eretta, poiché così facendo si commetterebbe un errore di valutazione perché il salto inizia quando il soggetto stacca la punta del piede e non quando inizia a sollevare il tallone. Per fare ciò tuttavia si è dovuto ri-campionare il vettore del centroide poiché la frequenza di acquisizione della stereo è di 250 Hz mentre quella della pedana è di 1000 Hz per compiere questo passo si è usata la funzione *resample* in MATLAB. Successivamente si è preso il massimo valore della posizione acquisito e, operando una semplice differenza, si ottiene la misura del salto verticale del soggetto. Tutto questo procedimento è stato compiuto da una function in MATLAB appositamente studiata (Fig.14)

```
1  function [ Hstereo ] = Stereopedanaf(mk, platData )
2  %fuori dalla function vanno caricati i dati sia della stereo
3  %che della pedana
4
5  -   mk0y=mk(:,2);
6  -   mk1y=mk(:,5);
7  -   mk2y=mk(:,8);
8  -   mk3y=mk(:,11);
9
10 -   mkmy=mean([mk0y mk1y mk2y mk3y],2);
11 -   X=resample(mkmy,1000,250);%ricampiono il vettore
12
13 -   platz=squeeze(platData(1,:,5));
14
15 -   fc=1000; %frequenza di campionamento
16   % taglio i primi 6 secondi e gli ultimi due
17 -   ilim=6*fc;
18 -   end1=(length(platz)-2*fc);
19 -   platz1=platz(ilim:end1);
20 -   buoni=find(platz1<10);
21
22 -   Hstereo=(max(X)-X(ilim+buoni(1)))*100;
23
24 -   end
```

Fig.14: Function Stereo

2.4.3 Opal

I dati uscenti dai sensori Opal hanno un'estensione .h5 e per essere caricati e letti in MATLAB per poi quindi essere analizzati è necessaria una funzione che inserisca i dati relativi ai tre sensori all'interno di una matrice.

In seguito è stato plottato il grafico dell'accelerazione del sensore ubicato sulla placca in legno poiché dei tre applicati era quello più vicino agli altri sensori e più vicino al centro di massa di conseguenza si è ipotizzato che fosse quello che fornisse risultati più simili a quelli degli altri sensori inerziali. Un profilo di accelerazione è visibile in Fig.15

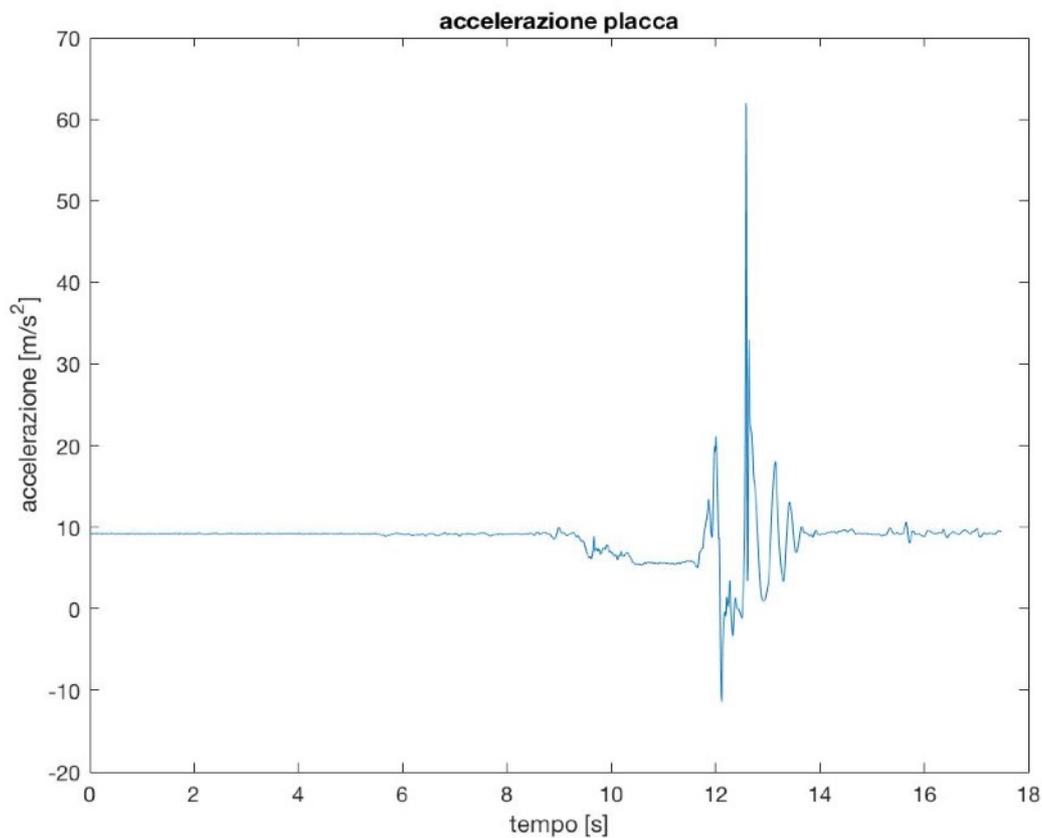


Fig.15

Nel profilo di accelerazione soprastante si possono facilmente distinguere le varie fasi del salto:

1. Dopo una prima fase costante l'accelerazione diminuisce il suo valore nella fase in cui il soggetto piega le ginocchia per raggiungere la posizione di squat.

2. Il primo picco segnala la fase di spinta contro il terreno del soggetto.

3. Rapida decrescita dell'accelerazione indica la fine della fase di spinta e l'inizio della fase del salto; precisamente il salto inizia quando l'accelerazione verticale, dovuta alla spinta del soggetto, eguaglia quella gravitazionale (avente verso opposto).

4. Il secondo picco positivo, avente grande ampiezza, segnala il contraccolpo subito dal centro di massa del soggetto nel momento del contatto con il terreno. Per convenzione il salto viene considerato terminato quando, prima del picco, il profilo di accelerazione raggiunge il valore zero poiché nuovamente le due accelerazioni che governano il moto si eguagliano in modulo (verso opposto).

5. Dato che il sensore è riconducibile ad un sistema del secondo ordine il secondo picco è riconducibile al picco di risonanza, e la successiva alternanza di picchi positivi e negativi avente ampiezza sempre minore alla fase di assestamento del sistema.

6. Il profilo "non fluido" (contenete dei piccoli picchi) durante la fase di volo è dovuto a movimenti del bacino da parte del soggetto che vengono registrati dal sensore.

In seguito, sapendo per le motivazioni precedenti, quando il soggetto stacca da terra e quando vi atterra, è stato possibile creare una function in MATLAB che scorra tutto il profilo e registri quando esso raggiunge il valore zero, o meglio un intorno di zero poiché il profilo non è tempo continuo bensì tempo discreto, quindi difficilmente ci sarà un campione avente il valore zero assoluto. Successivamente più controlli in retroazione analizzano che non vi siano più "attraversamenti" sullo zero poiché falserebbero il calcolo del tempo di volo e quindi l'altezza del salto. Un primo controllo parte dal fondo del vettore e qualora riscontrasse più valori intorno allo zero non consecutivi (poiché due campioni consecutivi prossimi a zero costituiscono un errore trascurabile), dovuti ad esempio ai picchi di assestamento, interrompe il ciclo for e restituisce il valore dell'indice al momento dell'interruzione. Contemporaneamente un altro controllo compie lo stesso lavoro scorrendo però il vettore partendo dall'inizio e interrompe il ciclo for qualora vi fossero due zero non consecutivi fornendo il valore dell'indice al momento dell'interruzione. Se i due controlli giungono rispettivamente all'inizio ed alla fine del vettore contenente i campioni aventi valore zero significa che non vi sono stati ulteriori "attraversamenti" e quindi i valori trovati sono quelli di inizio e di fine del salto; da

essi, conoscendo la frequenza di campionamento (128 Hz), si risale al tempo di volo, quindi all'altezza del salto.

```

1 function [ Hopal ] = opalf( acc_placca )
2 % la funzione richiede in ingresso la matrice del sensore estrapolato
3 % dal file .h5
4 t_placca = (1:size(acc_placca,1))/fs;
5 figure;
6 plot(t_placca,acc_placca), title('accelerazione placca'), xlabel('tempo [s]'), ylabel('accelerazione [m/s^2]')
7
8 n=1;
9 t=resample(t_placca,1000,128);
10 opal1000=resample(acc_placca,1000,128);%ricampio il segnale per aver una
11 %maggior accuratezza nell'intorno di zero
12 figure
13 plot(t(1:end-10),opal1000(1:end-10,1)), title ('accelerazione 1000Hz'), xlabel('tempo [s]'), ylabel('accelerazione [m/s^2]')
14 for i=1:size(opal1000);
15     if (opal1000(i)<0.8)&(opal1000(i)>-0.8);
16         zeroplacca(n)=t(i);
17         n=n+1;
18     end
19 end
20 for i=size(zeroplacca):-1:2
21     if (abs(zeroplacca(i)-zeroplacca(i-1))>0.3000);
22         i;
23         break
24     end
25 end
26 for j=length(zeroplacca)-1:-1:2
27     if (abs(zeroplacca(j)-zeroplacca(j-1))>0.3000);
28         j;
29         break
30     end
31 end
32 for k=1:length(zeroplacca)-1
33     if(abs(zeroplacca(k)-zeroplacca(k+1))>0.3)
34         k;
35         break
36     end
37 end
38 end
39 if (j==2)
40     j=length(zeroplacca);
41 end
42 if(k==length(zeroplacca)-1)
43     k=1;
44 end
45 if j==k+1
46     j=length(zeroplacca)-1;
47 end
48 tvolo=zeroplacca(j-1)-zeroplacca(k+1);
49 H=tvolo^2*9.81/8*100;
50 end

```

Fig. 16: Opal function

Il sensore applicato alla caviglia registra un profilo di accelerazione confrontabile con l'Opal aderente alla placca: le fasi di stacco e atterraggio coincidono le uniche piccole differenze tra i due profili sono riscontrabili durante la fase di volo poiché la caviglia rimane molto più rigida rispetto al bacino e i movimenti risultano essere diversi per cui variazioni di profilo durante la fase di volo del salto sono giustificate. Il discorso appena affrontato è riscontrabile nella figura sottostante che mostra la sovrapposizione temporale dei dati raccolti dall'Opal posizionato sulla placca e di quello applicato alla caviglia (tutte accelerazioni verticali).

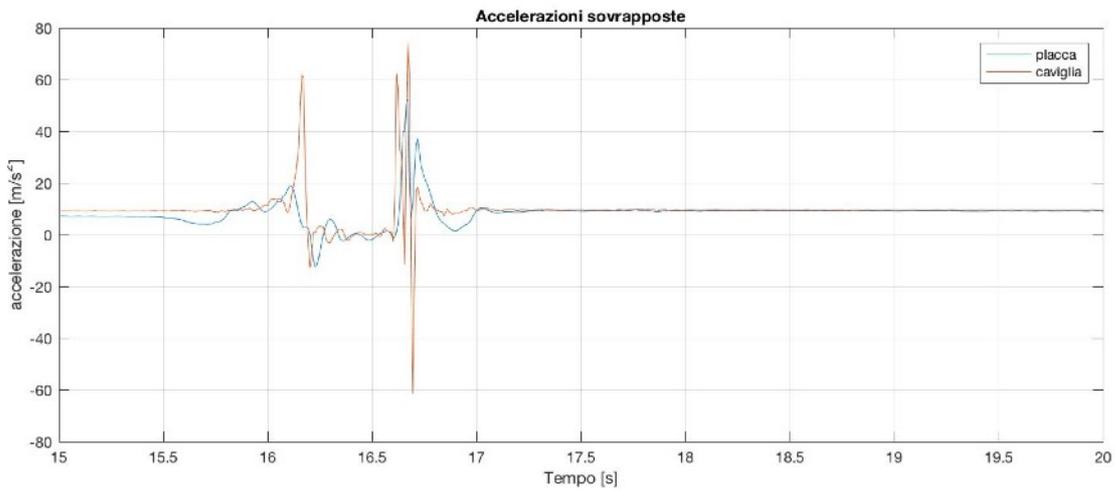


Fig.17

Discorso diverso va fatto per l’Opal applicato sulle stringhe delle scarpe poiché il primo problema che è stato riscontrato è che il sensore non può essere posizionato in posizione verticale a causa della conformazione anatomica del corpo umano, inoltre vi è una grande variabilità fra i diversi soggetti a livello della conformazione del piede, ma anche della tipologia di scarpa utilizzata per la prova. Quindi si è scelto di non utilizzare il sensore al piede durante la fase di analisi dei risultati e della successiva discussione. In Fig.18 è possibile osservare quanto il profilo dell’Opal al piede sia diverso e discostante rispetto ai primi due.

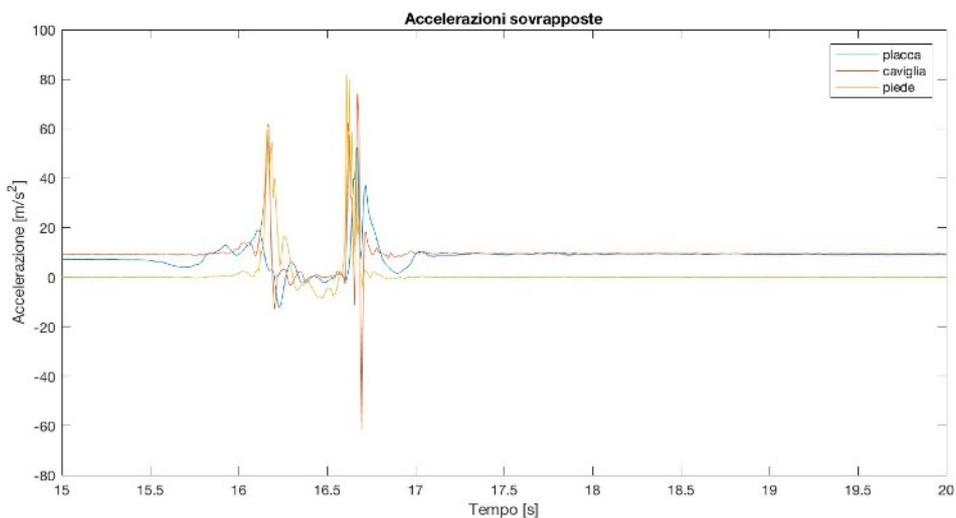


Fig18

Capitolo 3

Analisi dei risultati e discussione

Terminate le fasi di acquisizione e di elaborazione dei dati si è passati alla fase di analisi dei dati, decidendo quale strumento utilizzare come *gold standard* al quale poi riportare tutti gli altri strumenti. In questo studio di Tesi si è deciso di utilizzare come *gold standard* la stereofotogrammetria poiché fornisce la misurazione diretta della posizione del soggetto e quindi la misura diretta dell'altezza del salto da parte del soggetto, mentre alcuni strumenti sfruttano il profilo dell'accelerazione registrata per calcolare il tempo di volo e successivamente ricavare l'altezza del salto (quindi una misurazione indiretta).

3.1 Riepilogo dei dati

I dati raccolti sono stati suddivisi in base alle due sessioni effettuate (SJ e CMJ): si è preferito studiare l'affidabilità degli strumenti in casi di salti differenti e quindi si è svolta l'analisi dei risultati per le due differenti tipologie al fine di rendere lo studio il più accurato possibile e di fornire una più accurata valutazione del sensore. Ciascuno strumento è stato rapportato con la stereofotogrammetria analizzando la significatività dei dati raccolti e la loro distribuzione all'interno di un determinato intervallo di confidenza

3.1.1 Analisi di significatività

Avendo a disposizione un numero limitato di dati sono stati utilizzati dei test non parametrici disponibili nel software MATLAB per indagare la significatività dei dati raccolti:

- Il test di Kolmogorov-Smirnov (*kstest*) verifica se i dati acquisiti appartengano ad una distribuzione gaussiana normale o meno: se il test fornisce come risultato zero i dati provengono da una distribuzione normale; uno se viene rigettata l'ipotesi nulla e quindi l'appartenenza alla distribuzione normale.

- Il test di Kruskal-Wallis (*kruskalwallis*) il quale viene utilizzato qualora i dati non provengano da una distribuzione normale verifica che i dati, appartenenti a gruppi differenti siano riconducibili ad una stessa distribuzione o distribuzioni diverse aventi però la stessa mediana (confrontabile).

3.1.2 Grafici Bland-Altman

I Grafici di Bland-Altman paragonano ciascuno strumento con il gold standard utilizzato e riportano in ascissa la media delle due misure mentre in ordinata la differenza. Inoltre evidenzia la media delle differenze e l'intervallo di confidenza al 95% verificando quindi la distribuzione delle differenze all'interno di tale intervallo.

3.2 Risultati

Sono stati presi in considerazione solamente quei salti che sono stati registrati correttamente dai sei strumenti (Stereofotogrammetria, pedana dinamometrica, Optojump, Gyko, Sensorize e Opal) in maniera completa al fine di avere un confronto ottimale dei dati raccolti da ciascuno strumento. I Risultati ottenuti sono stati raccolti in due tabelle una riguardante la sessione di SJ; l'altra quella di CMJ.

3.2.1 Squat Jump

Come si evince dalla tabella sottostante, considerando i tre SJ effettuati da ciascun soggetto, mancano alcuni salti effettuati poiché non sono stati registrati da alcuni sensori quindi, come detto in precedenza, si è scelto di utilizzare i salti completi ossia registrati da tutti gli strumenti. In totale le mancanze sono state quattordici: cinque a causa del Sensorize; quattro computabili al Gyko; tre agli Opal; due all'Optojump.

Il maggior numero di *missing* appartiene al Sensorize poiché lo strumento ha un protocollo di esecuzione molto rigido per quanto riguarda lo Squat Jump: il soggetto una volta raggiunta la posizione di *squat* la deve mantenere per almeno due secondi, stando immobile, qualora non stia in tal posizione per il tempo minimo richiesto o non

stia fermo durante l’attesa il sensore non riconosce il salto eseguito correttamente e non fornisce alcuna analisi post salto archiviandolo come “non eseguito correttamente”.

Gli errori registrati dal Gyko sono dovuti ad eccessivi movimenti del bacino durante la fase di volo che alterano il profili di accelerazione nella fase di volo a tal punto che il sensore li registra come più salti contemporanei e quindi fornisce messaggio di errore senza fornire alcuna uscita.

Gli errori dovuti agli Opal, poiché forniscono solamente il profilo di accelerazione, sono dovuti alla trasmissione di tale profilo e quindi ad un disturbo nella fase di trasmissione del segnale tra sensore e pc. I Profili di questi salti presentano dei picchi elevati ed ingiustificati durante la fase di volo di ampiezza sempre minore che rendevano illeggibile tutto il salto.

L’Optojump non fornisce una motivazione precisa quando non registra il salto fornisce semplicemente un errore dovuto al calcolo del tempo di volo tramite cui calcola l’altezza del salto, quindi l’unica ipotesi che si può fare è che l’errore sia dovuto ad una interferenza sulle fotocellule.

Soggetto	Salto	Stereo	Pedana di forza	Optojump	Gyko	Sensorize	Opal
Soggetto 1	Sj2	22,60	25,80	25,2	26,63	25	25,94
	Sj3	29,85	30,90	29,9	29,68	27	29,44
Soggetto 2	Sj1	28,02	30,32	29,2	30,17	28	28,00
	Sj2	28,25	31,42	30,5	30,90	29	30,45
Soggetto 3	Sj2	31,84	31,80	30,8	30,41	31	32,29
Soggetto 5	Sj2	20,13	21,65	20,1	21,63	18	20,05
	Sj3	21,36	21,34	20,1	20,61	17	16,14
Soggetto 6	Sj1	11,13	12,17	0,0	14,18	13	6,12
	Sj2	11,09	12,18	11,2	16,43	15	20,53
	Sj3	14,24	14,44	13,4	18,46	18	11,03
Soggetto 7	Sj1	16,62	17,81	17,1	19,42	18	12,55
	Sj3	16,11	16,23	15,8	19,23	15	14,57
Soggetto 8	Sj1	20,46	22,48	21,8	23,31	22	21,08
	Sj3	20,72	22,91	22,2	23,74	23	19,62
Soggetto 9	Sj1	26,60	23,33	22,7	22,67	23	24,84
Soggetto 10	Sj2	21,18	19,05	18,5	18,65	18	17,70
	Sj3	22,47	20,33	19,8	20,61	20	18,65
Soggetto 11	Sj2	28,56	30,81	30,4	33,65	30	22,87
	Sj3	32,51	34,35	33,3	30,90	32	34,65

Tabella 1

3.2.2 Salto con contro-movimento (CMJ)

Analizzando la tabella sottostante si nota immediatamente che i salti con contro-movimento sono molti di più (a parità di tentativi) rispetto agli Squat jump, questo è riconducibile al fatto che, non dovendo compiere alcuna pausa tra la fase di squat e quella di spinta, il Sensorize dovrebbe registrare molti meno errori dovuti al protocollo del salto, ipotesi che risulterà verificata quando si riporteranno i *missing* suddivisi per strumento.

Soggetto	Salto	Stereo	Pedana di forza	Optojump	Gyko	Sensorize	Opal
Soggetto 1	Cmj1	29,22	29,47	28,5	29,68	27	28,85
	Cmj2	29,00	30,81	30,0	31,40	28	30,65
	Cmj3	26,99	27,23	26,5	29,92	27	25,94
Soggetto 2	Cmj1	32,20	34,48	33,7	35,76	33	29,62
	Cmj2	30,79	33,44	32,5	34,19	33	34,27
	Cmj3	28,10	31,92	31,4	34,71	32	35,60
Soggetto 3	Cmj1	31,70	31,80	30,0	30,66	29	32,29
	Cmj2	32,18	32,43	31,5	32,15	4	33,46
Soggetto 4	Cmj1	21,25	23,01	22,2	23,96	19	22,95
	Cmj2	21,58	22,48	22,0	21,84	20	21,63
	Cmj3	21,18	22,06	21,4	21,63	21	26,61
Soggetto 5	Cmj1	22,91	25,30	22,8	22,88	21	27,44
	Cmj2	21,68	23,66	22,6	23,31	22	27,17
	Cmj3	20,79	24,31	22,1	22,88	20	27,68
Soggetto 6	Cmj1	15,87	17,35	16,4	21,84	20	8,29
	Cmj2	20,59	22,48	21,6	24,61	23	20,61
Soggetto 7	Cmj1	16,51	16,26	16,8	20,21	18	15,89
	Cmj2	18,35	18,67	18,2	20,01	13	15,02
	Cmj3	19,90	17,26	16,8	18,65	14	17,33
Soggetto 8	Cmj1	21,89	24,52	23,8	27,09	24	20,61
	Cmj2	21,64	23,44	22,9	27,09	23	21,63
	Cmj3	22,95	24,97	24,5	28,98	24	28,51
Soggetto 9	Cmj1	27,11	27,76	25,7	23,96	33	28,75
	Cmj2	25,66	24,97	24,1	22,88	22	25,36
	Cmj3	26,70	25,74	24,8	28,49	24	19,35
Soggetto 10	Cmj1	26,66	25,63	25,2	26,17	24	26,76
	Cmj2	27,20	25,97	24,6	24,17	23	24,83
Soggetto 11	Cmj2	33,86	34,61	34,3	34,71	34	34,41

Tabella 2

Le prestazioni mancanti in questa seconda situazione sono cinque e così distribuite: tre computabili agli Opal e due alla pedana dinamometrica. I *missing* dovuti agli Opal, come detto in precedenza, sono a carico di un problema di trasmissione del segnale tra sensori e pc che alterano il profilo di accelerazione registrato. Nei due casi compu-

tabili alla pedana di forza il *missing* è dovuto ad un errore del soggetto che sta compiendo la prova poiché non ricade sulla pedana invalidando quindi la registrazione.

Osservando la tabella ci si accorge di un valore alterato: il Cm_{j2} del Soggetto 3 uscente dal sensorize che riporta un salto di 4 centimetri dovuto probabilmente ad un errore di trasmissione tra sensore e software.

3.2.3 Risultati test di Kolmogorov-Smirnov

I dati raccolti sono stati divisi in due categoria a seconda della provenienza (SJ o CMJ), successivamente sono stati compilati due file MATLAB uno per ogni categoria. Ciascun file contiene i risultati divisi per strumento ottenendo così cinque gruppi dei quali si vuole studiare la distribuzione (se è normale o meno). Come si evince dalle figure sottostanti il *kstest* ha fornito come risultato per tutti i gruppi, appartenenti sia alla sessione di SJ sia a quella di CMJ, valore pari a 1 rigettando quindi la distribuzione gaussiana dei dati.

```

1 - clc, clear all, close all
2
3 - load 'squat.mat';
4 - stereo=squat(:,1);
5 - pedana=squat(:,2);
6 - optojump=squat(:,3);
7 - gyko=squat(:,4);
8 - Sensorize=squat(:,5);
9 - opal=squat(:,6);
10
11 - hstereo=kstest(stereo);
12 - hpedana=kstest(pedana);
13 - hoptojump=kstest(optojump);
14 - hgyko=kstest(gyko);
15 - hsensorize=kstest(Sensorize);
16 - hopal=kstest(opal);

```

```

1 - clc, clear all, close all
2 - /Users/prova/Documents/Documenti - Macsabry/M
3 - load 'cmj.mat';
4 - stereo=Cmj(:,1);
5 - pedana=Cmj(:,2);
6 - optojump=Cmj(:,3);
7 - gyko=Cmj(:,4);
8 - Sensorize=Cmj(:,5);
9 - opal=Cmj(:,6);
10
11 - hstereo=kstest(stereo);
12 - hpedana=kstest(pedana);
13 - hoptojump=kstest(optojump);
14 - hgyko=kstest(gyko);
15 - hsensorize=kstest(Sensorize);
16 - hopal=kstest(opal);

```

Fig.19: kstests

Workspace		Workspace	
Name ▲	Value	Name ▲	Value
<input checked="" type="checkbox"/> hgyko	1	<input checked="" type="checkbox"/> hgyko	1
<input checked="" type="checkbox"/> hopal	1	<input checked="" type="checkbox"/> hopal	1
<input checked="" type="checkbox"/> hoptojump	1	<input checked="" type="checkbox"/> hoptojump	1
<input checked="" type="checkbox"/> hpedana	1	<input checked="" type="checkbox"/> hpedana	1
<input checked="" type="checkbox"/> hsensorize	1	<input checked="" type="checkbox"/> hsensorize	1
<input checked="" type="checkbox"/> hstereo	1	<input checked="" type="checkbox"/> hstereo	1

Fig.20: risultati kstests

3.2.2 Risultati test di Kruskal-Wallis

Avendo constatato nel paragrafo precedente che i dati non provengono da distribuzioni gaussiane si è deciso di utilizzare il test di Kruskal-Wallis per determinare se esse, provenienti da ogni strumento per ogni tipologie di salto, siano confrontabili e per fare ciò si sfruttano le mediane di ciascun gruppo. Il test chiede in ingresso un vettore colonna contenente tutti i dati provenienti da tutti gli strumenti in ordine per strumento (Stereofotogrammetria, Pedana di Forza, Optojump, Gyko, Sensorize, Opal); come secondo ingresso chiede un vettore colonna lungo quanto il primo, composto da tante serie di elementi quanti sono gli strumenti e ciascuna serie è composta da tanti elementi uguali fra loro pari al numero salti registrati. In uscita avremo il valore del *p-value* e un grafico dove vengono riportati tutti i gruppi in ascissa ed evidenziando in ordinata con il colore rosso la mediana, mentre con il colore blu, partendo dall'alto, il valore del 75-esimo e 25-esimo percentile rispettivamente. Il valore di *p-value* ottenuto è risultato >0.05 , per cui la differenza tra le misure dei diversi strumenti non risulta essere significativa per entrambe le tipologie di salto. Fig.21 è riportato il grafico del test di Kruskal-Wallis per gli squat jump.

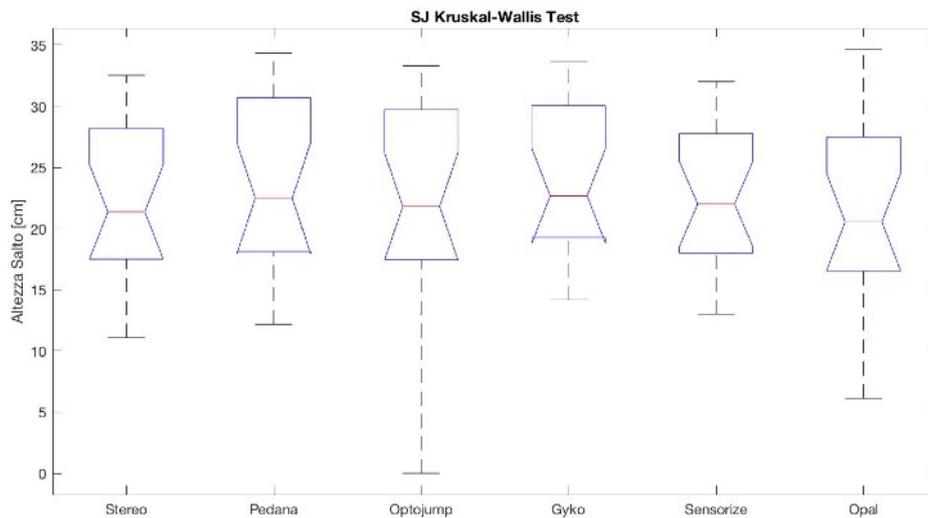


Fig.21

Strumento	Stereo	Pedana	Optojump	Gyko	Sensorize	Opal
Mediana	21,36 cm	22,48 cm	21,8 cm	22,67 cm	22 cm	20,53 cm
Differenza		+1,12 cm	+0,44 cm	+1,31 cm	+0,64 cm	-0,87 cm
Percentuale		5,24%	2,06%	6,13%	2,99%	4,07%

Tabella 3

Nella tabella soprastante sono riportati i valori delle mediane di ciascuno strumento; la differenza rispetto al gold standard (Stereofotogrammetria) e la differenza rapportata alla misura del gold standard percentuale che si potrebbe definire come un'accuratezza rispetto al sistema stereofotogrammetrico. Analizzando la tabella si può affermare che:

- il Gyko presenta lo scostamento maggiore
- Il Sensorize risulta essere lo strumento che più si avvicina ai valori del gold standard
- Tutti gli strumenti presentano uno scostamento minimo (inferiore al centimetro e mezzo).
- L'errore percentuale è contenuto il 6% massimo è un valore più che accettabile.
- L'errore medio considerando tutti gli strumenti risulta essere contenuto (4,10%).
- Tutti gli strumenti ad eccezione degli Opal sovrastimano gli SJ.

Nella figura sottostante invece sono riportati i risultati del *Kruskal-Wallis test* riguardo ai salti con contromovimento correttamente registrati dagli strumenti.

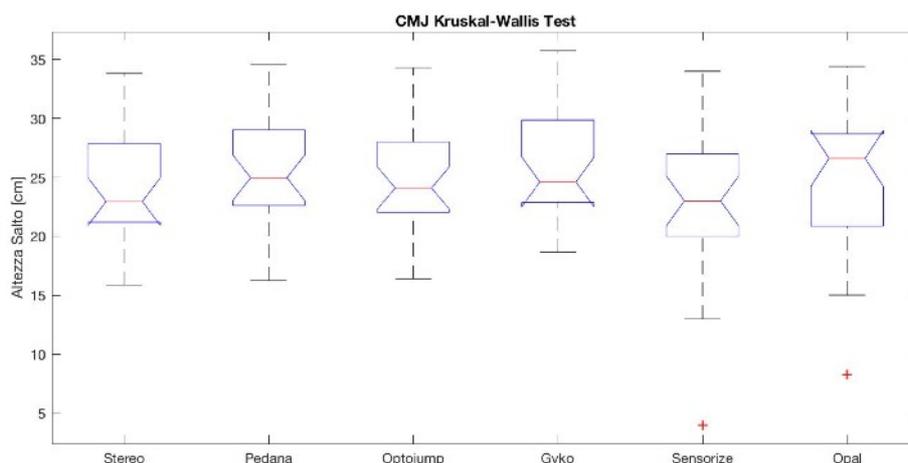


Fig.22: CMJ Kruskalwallis

Strumento	Stereo	Pedana	Optojump	Gyko	Sensorize	Opal
Mediana	22,95 cm	24,97 cm	24,1 cm	24,61 cm	23 cm	26,61 cm
Differenza		+2,02 cm	+1,15 cm	+1,66 cm	+0,05 cm	+3,66 cm
Percentuale		8,80%	5,01%	7,23%	0,22%	15,95 %

Tabella 4

Analizzando questa seconda tabella si può affermare:

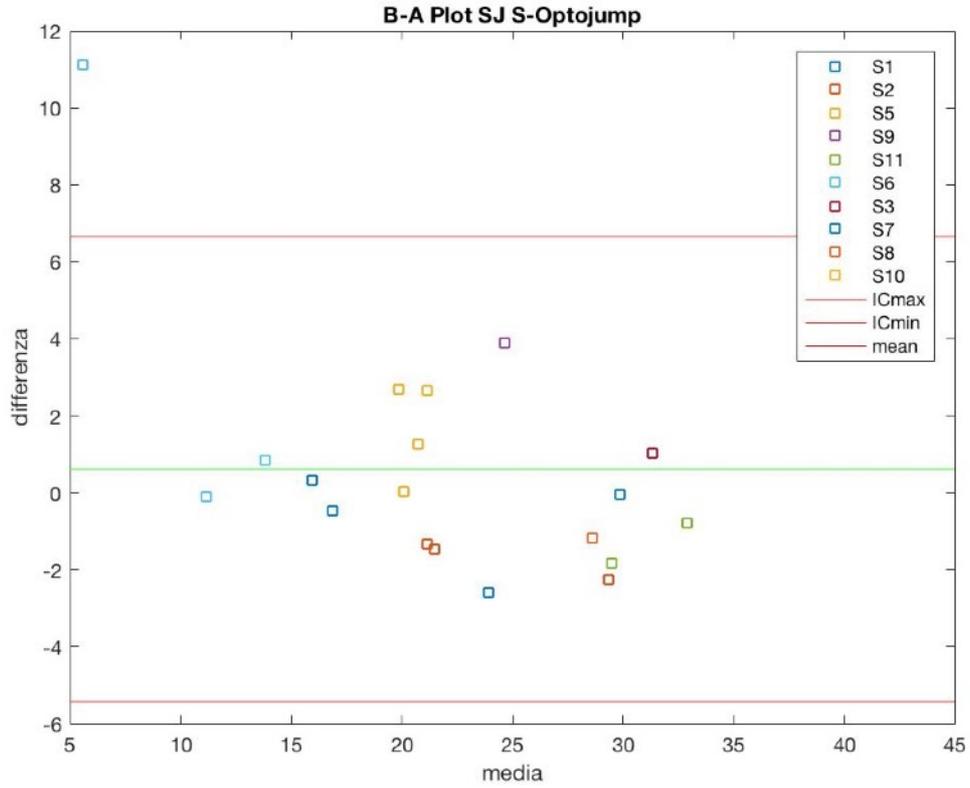
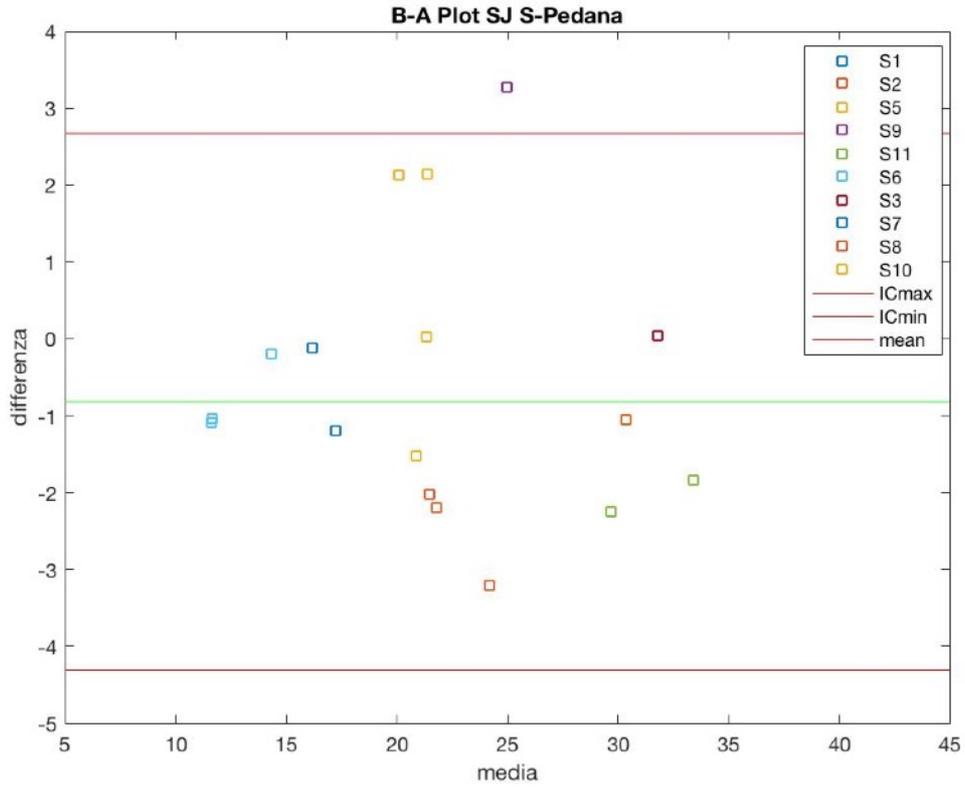
- Gli Opal presentano lo scostamento maggiore e anche molto elevato (superiore al 15% ed oltre i 3,5 cm di differenza)
- Il Sensorize risulta essere lo strumento che più si avvicina al gold standard (quasi coincide errore inferiore al millimetro)
- Lo scostamento risulta essere inferiore o prossimo ai 2 centimetri per tutti gli strumenti ad esclusione degli Opal
- L'errore medio di tutti gli strumenti risulta essere superiore al 5% (7,44%)
- Tutti gli strumenti sovrastimano il salto rispetto al gold standard

3.2.3 Grafici Bland-Altman

Con l'utilizzo del test di Kruskal-Wallis si è compiuta un'analisi dei dati raccolti inter-strumentale lavorando tramite il confronto delle mediane, ora tramite i grafici di Bland-Altman si analizzano i dati in maniera intra-strumentale lavorando sulle medie dei dati raccolti paragonati al *gold standard* e sulle differenze di registrazione, sempre tra strumento e sistema stereofotogrammetrico, analizzando tutte le misure registrate da un determinato strumento e osservando la loro distribuzione all'interno dell'intervallo di confidenza al 95% e quindi la dispersione all'interno di tale intervallo. I dati oltre ad essere divisi per strumento e tipologia di salto (SJ o CMJ) sono rappresentati per soggetto tramite colori diversi dei punti sul grafico. Nello specifico i grafici sottostanti riportano una linea verde che rappresenta la media delle differenze tra strumento e *gold standard*; la linea rossa superiore il margine superiore dell'intervallo di confidenza al 95% delle misurazioni; la linea rossa inferiore raffigura il margine inferiore dell'intervallo di confidenza al 95% delle misurazioni sulle differenze.

Il grafico in Fig.23 mette a confronto le misurazioni degli squat tra stereo e pedana dinamometrica, la media delle differenze è di -0.81 centimetri quindi una sovrastima del salto ($X_s - X_p$); un solo salto cade fuori dall'intervallo di confidenza (SJ 1 del soggetto 9) ciò è confermato osservando la tabella degli Squat Jump: la differenza fra i due strumenti è superiore ai 3 centimetri.

Il grafico successivo (Fig.24) riporta il confronto tra gold standard e Optojump riferito agli Squat Jump: il diagramma mette in evidenza una media delle differenze pari a 0.61 centimetri si è quindi di fronte ad una sottostima del salto (sottostima che ci si aspetta poiché le fotocellule sono posizionate in maniera leggermente rialzata rispetto alla linea del terreno). Un solo salto è fuori dall'intervallo di confidenza poiché SJ1 del Soggetto 6 è stato registrato pari a zero (un errore dovuto allo strumento oppure ad interferenza).



Figg.23; 24

Il grafico (Fig.25) sottostante riporta l'analisi dello strumento Gyko: la media delle differenze è pari a -1.44 centimetri (lo strumento quindi in media sovrastima il salto), tutte le prestazioni ricadono all'interno dell'intervallo di confidenza al 95%.

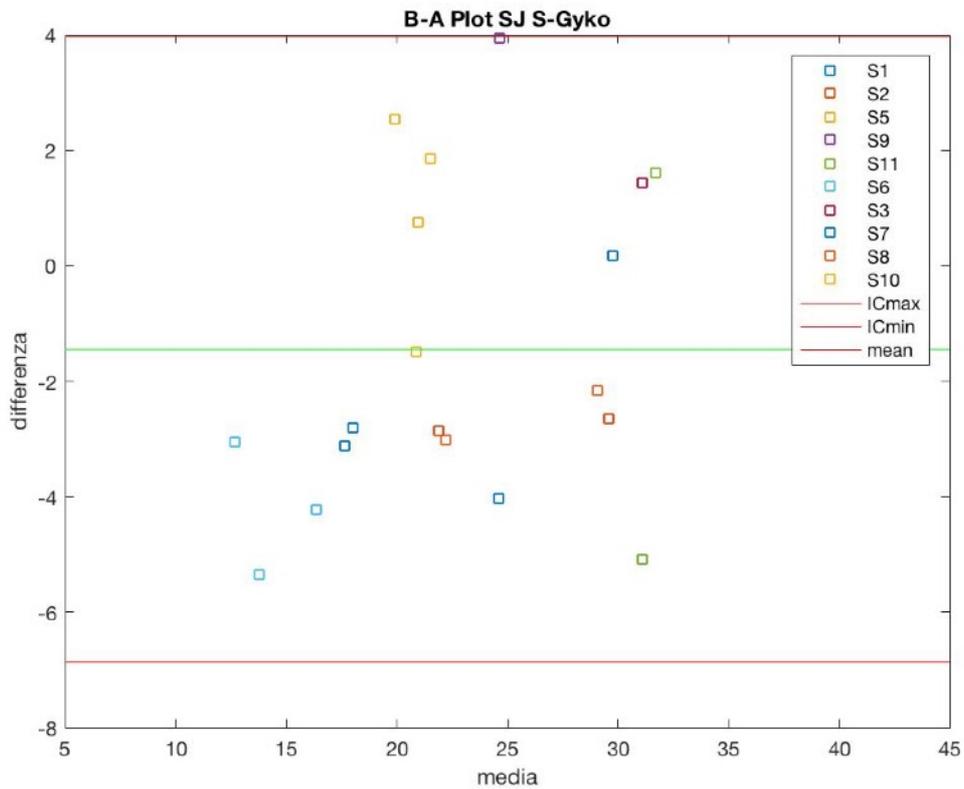
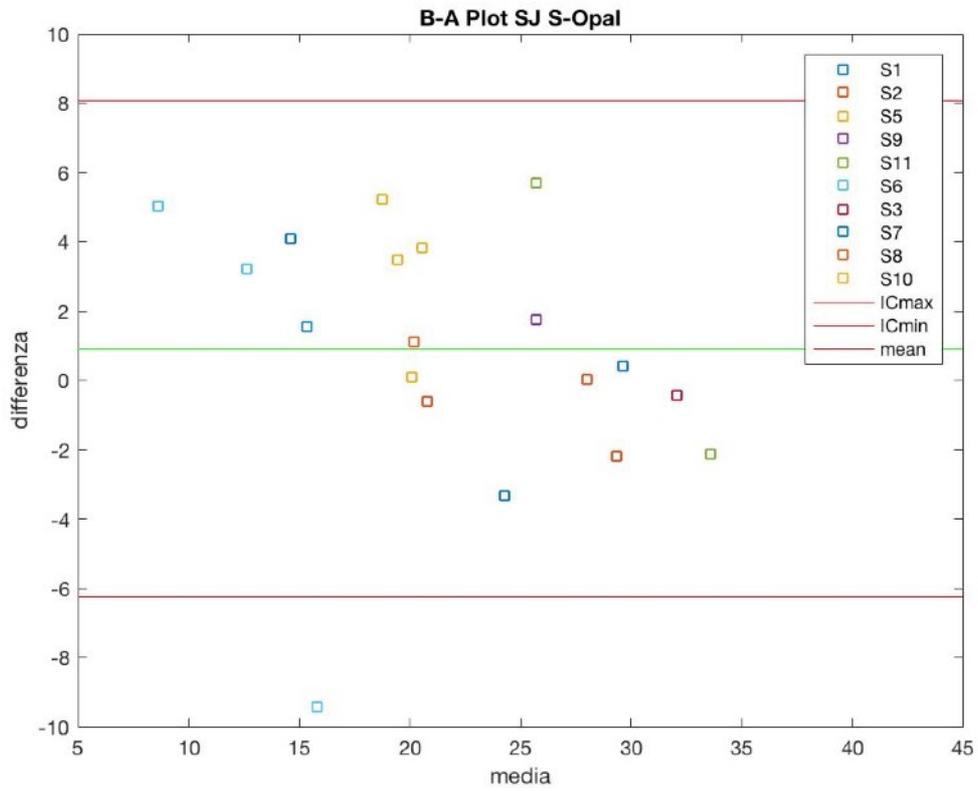
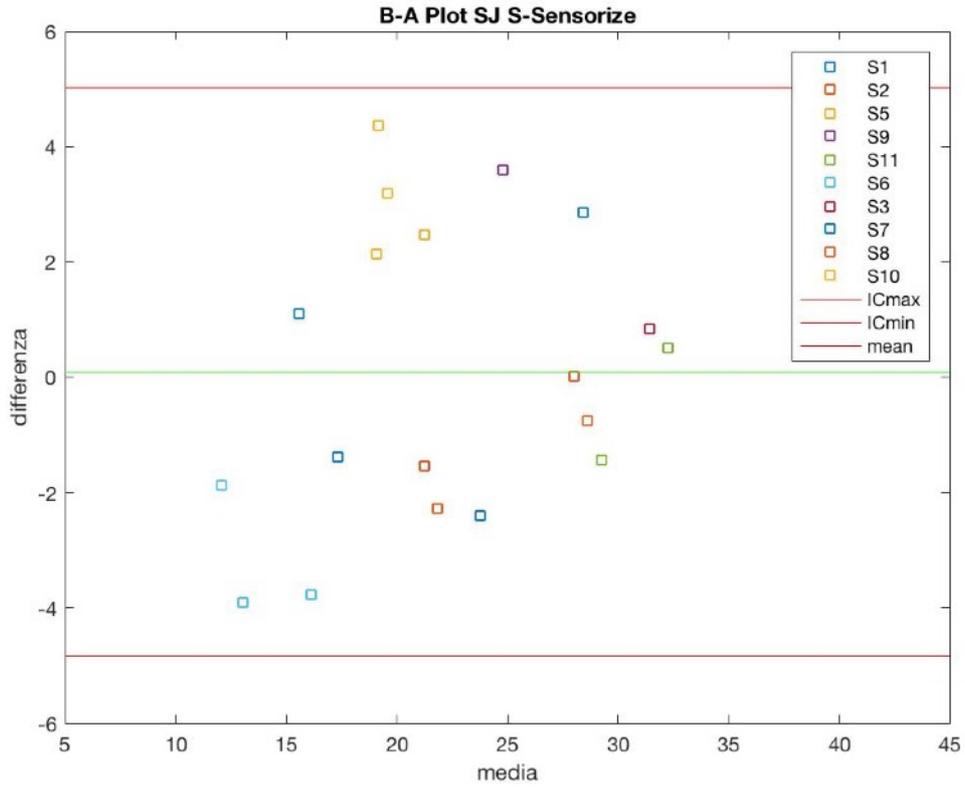


Fig.25

Nel diagramma in Fig.26 si riporta il confronto tra sistema stereofotogrammetrico e Sensorize si nota subito che la media tra le due strumentazioni è irrilevante (pari a 0,09 centimetri) e tutti confronti ricadono all'interno dell'intervallo scelto.

In Fig. 27 è riportato l'ultimo grafico degli squat jump riportante il confronto tra *gold standard* e sensori Opal la media delle differenze risulta essere contenuta pari a 0.91 centimetri; anche in questo caso le differenze e dei tra i due strumenti ricadono all'interno dell'intervallo di confidenza al 95%.



Figg.26; 27

Passando ora ai salti con contro-movimento in Fig.28 si analizza il primo grafico dove si riporta il confronto tra Stereofotogrammetria e Pedana dinamometrica la differenza media è pari a -1,14 centimetri (sovrastimando quindi il salto rispetto al gold Standard) un solo CMJ del Soggetto2 si trova al di fuori dell'intervallo di confidenza del 95% data da un'elevata sottostima della prestazione da parte dello strumento.

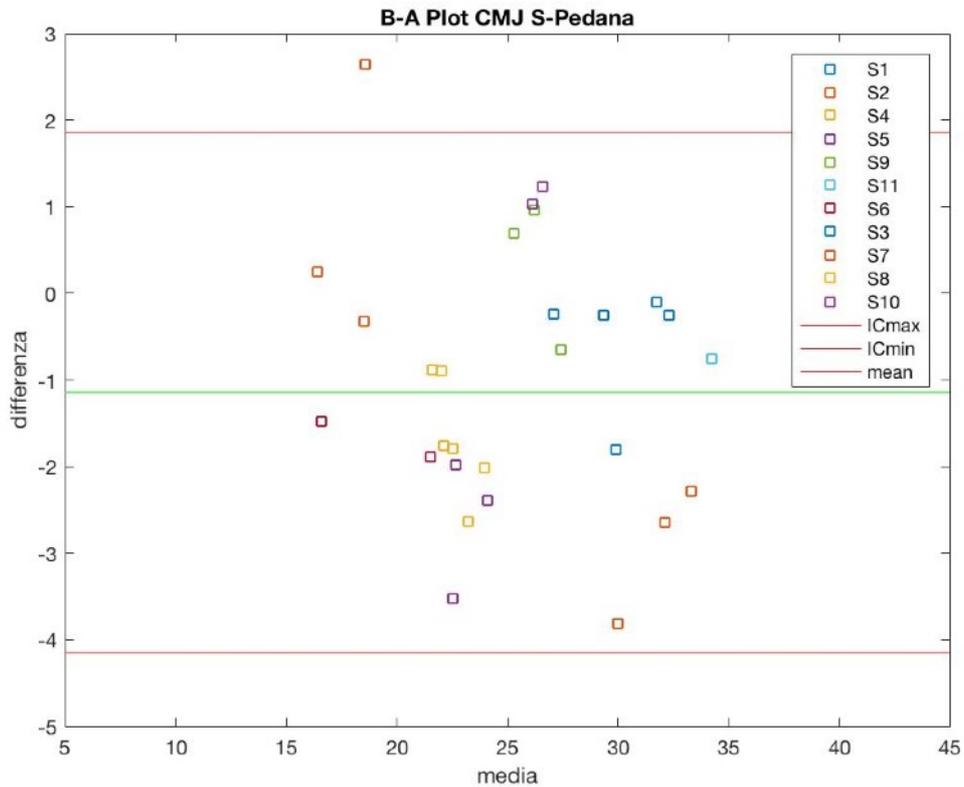
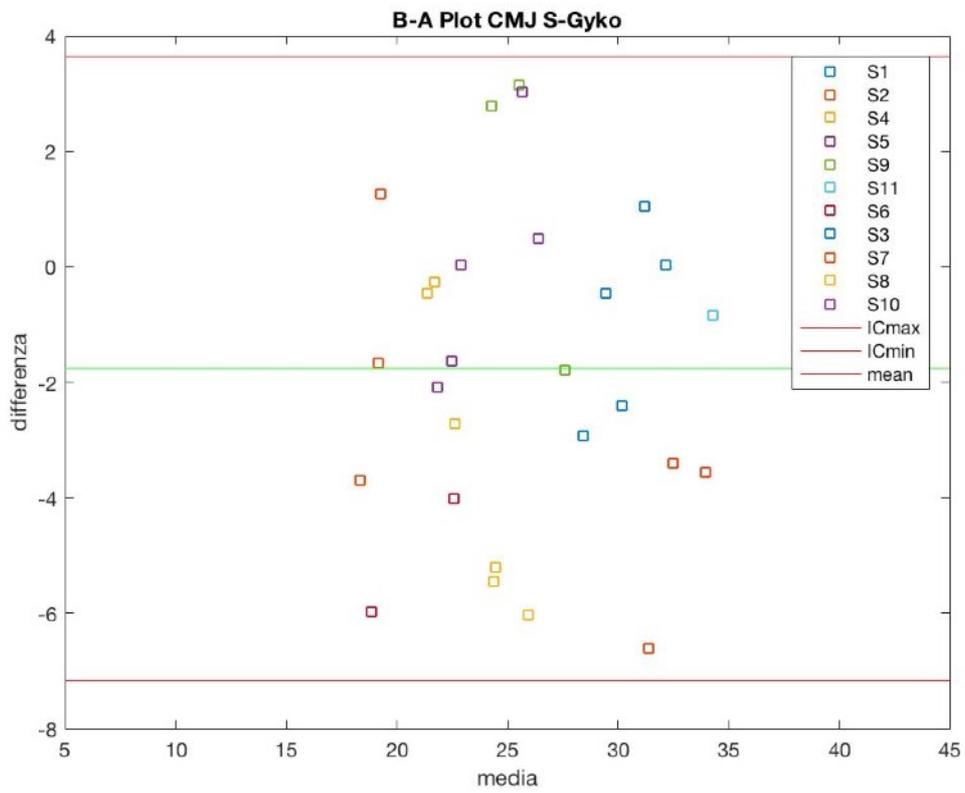
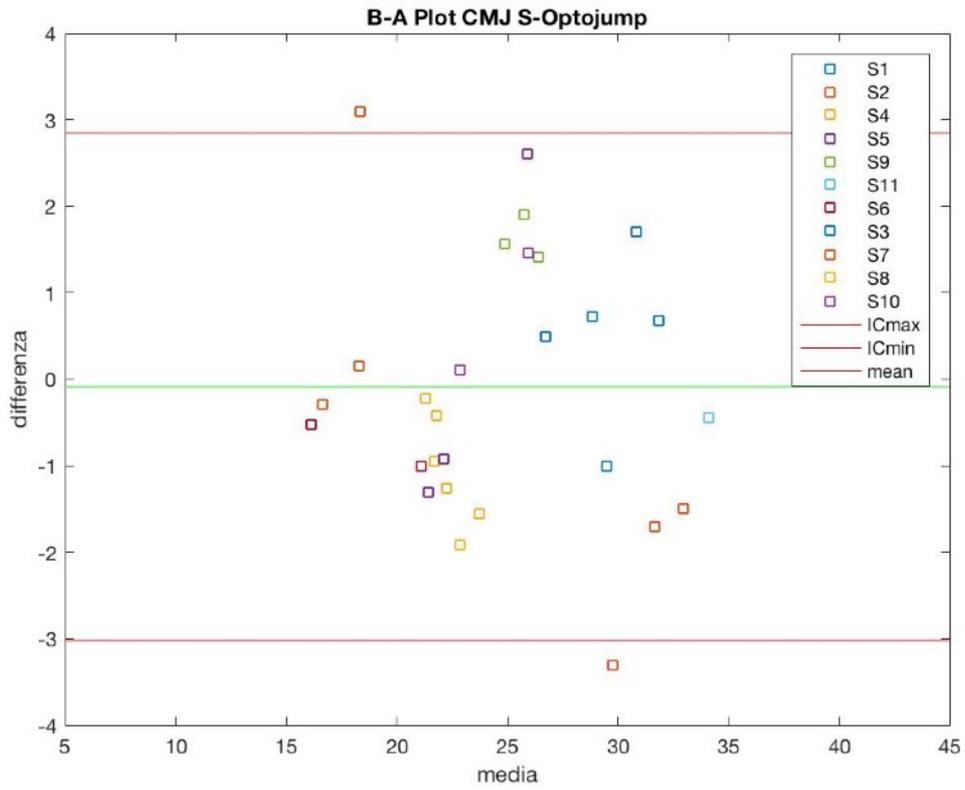


Fig.28

Nella figura successiva (Fig.29) viene riportato il diagramma fra gold standard e Optojump: la differenza medi è pari una sovrastima davvero contenuta pari 0.09 centimetri; un salto é troppo sovrastimato eccedendo i limiti dell'intervallo di confidenza (Soggetto7) mentre un'altra prestazione è eccessivamente sottostimata (Soggetto2).

Nel grafico di Fig.30 vengono analizzate le prestazioni del Gyko dove la media in termini di differenza rapportata alla Stereofotogrammetria risulta essere sovrastimata di 1.76 centimetri e tutti le prestazione sono racchiuse all'intervallo di confidenza al 95%.



Figg.29; 30

Nella figura sottostante si trova il diagramma che paragona il sensorize con il sistema stereofotogrammetrico la differenza media è contenuta: inferiore a mezzo centimetro (precisamente: 0,45 centimetri) e nessun salto risulta essere fuori dall'intervallo di confidenza al 95% anche se i limiti risultano essere molto ampi suggerendo una dispersione elevata della distribuzione dei dati.

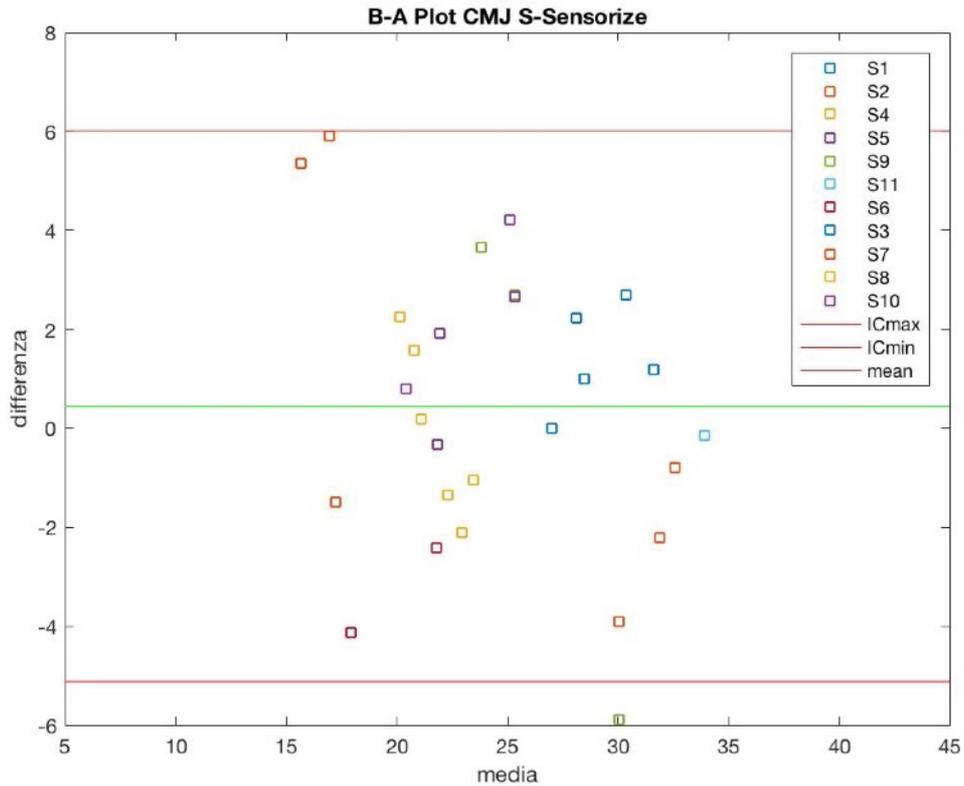


Fig.31

Infine il grafico di comparazione tra Gold Standard e Opal (Fig.32) evidenzia una differenza media di -0,87 centimetri ma un intervallo di confidenza molto ampio che disperde la distribuzione dei dati. Inoltre due salti risultano essere sottostimati a tal punto da non rientrare nell'intervallo di confidenza (Soggetto6 e Soggetto 9).

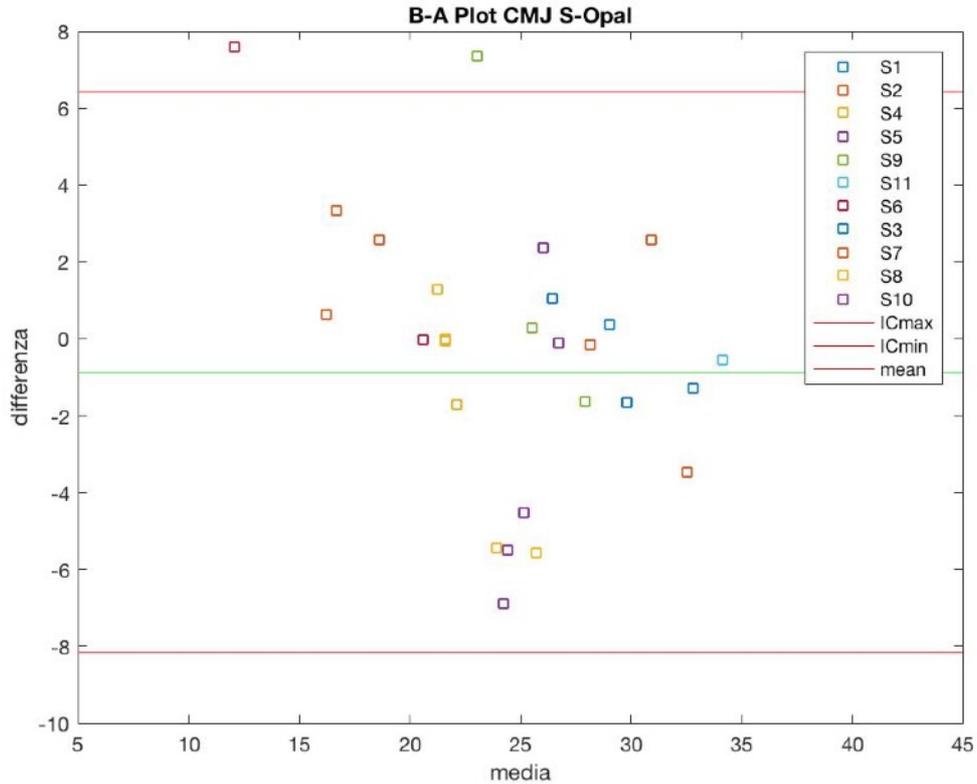


Fig32

3.3 Discussioni

Il confronto tra le altezze del salto misurate dai vari strumenti ha evidenziato che nessuno strumento differisce in modo significativo ($p > 0.05$), dal *gold standard*, ossia la stereofotogrammetria.

Osservando i grafici di Bland-Altman è possibile riscontrare la distribuzione non normale osservando i dati: qualora la distribuzione fosse gaussiana e normale si avrebbe una concentrazione dei dati attorno al valore medio, ma dai grafici non si evince ciò. Tuttavia il *kruskalwallis test* tramite analisi delle mediane suggerisce la provenienza dei dati da distribuzioni confrontabili presentando differenze contenute tra la mediana del gold standard e quella di ciascuno strumento (il massimo errore è del 6%) per quanto riguarda gli SJ. Discorso diverso per i CMJ dove si osserva una crescita delle differenze delle mediane per quasi tutti gli strumenti (eccezion fatta per il Sensorize), fino ad una differenza elevata degli Opal (superiore al 15%).

Il sensore inerziale che risulta essere più affidabile avente quindi una differenza contenuta sia a livello di mediana che di media delle differenze risulta essere il Sensorize: nella sessione di SJ la differenza tra le mediane (rispetto al gold standard) risulta essere di +0,64 centimetri, mentre la media delle differenze (sempre rispetto alla Stereofotogrammetria) è di +0.09. Nella sessione di CMJ la differenza tra le mediane scende a soli +0.05 centimetri e la media delle differenze sale leggermente a +0,45 centimetri. Analizzando le mediane si osserva che il salto è sovrastimato mentre osservando la media delle differenze il sensore risulta sottostimare il salto.

Gli Opal presentano una differenza contenuta tra le mediane nella sessione di SJ mentre cresce eccessivamente nella sessione di CMJ portando la differenza sopra i 3,5 centimetri (15,95%) passando inoltre da una sottostima del salto ad una sovrastima. Tale passaggio è riscontrato anche nell'analisi della media delle differenze (si passa da 0,91 centimetri di sottostima a 0.87 di sovrastima). Il sensore inoltre presenta un Intervallo di confidenza al 95% elevato (il più alto di tutti gli strumenti): 0.91 ± 7.15 per SJ; -0.87 ± 7.10 per CMJ.

Il Gyko è lo strumento che ha una crescita minore nella differenza delle mediane passando dalla sessione di SJ a quella di CMJ (escludendo il Sensorize che è l'unico strumento a migliorare la propria accuratezza) presentando un incremento di solo 1,10%: l'Optojump sale dal 2.06% al 5.01%, come studi precedenti avevano dimostrato [7].

L'Optojump presenta una differenza tra le mediane di +0.44 cm nella sessione di squat mentre tale differenza aumenta a +1.15 cm mentre la media delle differenze rimane contenuta: si ottiene un valore sottostimato di 0.61 cm negli SJ mentre una sovrastima di 0.09 cm nel corso dei CMJ (confermando l'affidabilità dello strumento già indagata in altri studi precedenti [8]).

In conclusione si può affermare che questo studio di Tesi ha messo in luce degli errori ampiamente inferiore ai due centimetri per quanto riguarda i sensori inerziali (eccezione fatta per gli Opal nella sessione di CMJ) rispetto alle misurazioni effettuate con il sistema stereofotogrammetrico (Gold Standard). Detto ciò si può affermare che i sensori inerziali analizzati in questo studio possono essere considerati affidabili al pari del-

la strumentazione *foot-contact* poiché differenze così limitate (inferiori ai due centimetri) consentono ad un allenatore, che voglia monitorare il grado di allenamento della sua squadra, di avere una misura affidabile a un costo non elevato e con la possibilità di compiere le misurazioni sul campo senza dover recarsi in laboratorio ed utilizzare strumentazione ingombrante limitante nei confronti dei movimenti degli atleti.

L'errore elevato nella registrazione dell'Opal nella sessione di CMJ è da ricercare nell'algoritmo utilizzato per decodificare il tempo di volo, andrebbe quindi ottimizzato per ottenere un risultato più accurato in quanto gli Opal non nascono per questo tipo di applicazioni e non compiono alcun tipo di analisi in automatico post registrazione.

Conclusioni

I risultati ottenuti sono confortanti poiché lo studio ha messo in evidenza che i sistemi *foot-contactless* possono essere affidabili tanto quanto i sistemi presenti nei laboratori (Stereofotogrammetria e Pedane dinamometriche). Questo risultato porta innumerevoli vantaggi: in ambito economico, poiché i sensori inerziali hanno un costo irrisorio se confrontato alle apparecchiature da laboratorio; non presentano fili che limitano i movimenti dell'atleta; sono indossabili senza arrecare alcun fastidio al soggetto poiché pesano pochi grammi. Quindi un allenatore può facilmente tener monitorato il grado di allenamento della proprio squadra.

Questo studio di Tesi fornisce degli spunti per alcuni sviluppi futuri al fine di indagare con ancora più precisione l'affidabilità dei sensori inerziale: applicando dei marker al piede del soggetto si ricava l'altezza del salto in maniera diretta facendo una differenza fra l'altezza massima raggiunta e l'altezza del centro di massa nel momento in cui il piede stacca dal terreno senza utilizzare la sincronizzazione tra Stereofotogrammetria e pedana di forza per ricavare l'altezza del centro di massa al momento dello stacco (forza zero sulla pedana).

L'utilizzo di atleti che hanno dimestichezza con i salti da eseguire limitando così errori di esecuzione e di registrazione degli strumenti, avendo così una rosa più completa dei salti tra cui compiere lo studio in maniera più completa.

Bibliografia

- [1] B. Requena, I. Garcia, F. Requena, E. Bressel, E. Saez-Saez de Villareal, J. Cronin, **Association between traditional standing vertical jumps and a soccer-specific vertical jump**, *European Journal of sport science* (2014);sup1 S398-S405.
- [2] T. Monnet, A. Decatoire, P. Lacouture, **Comparaison of algorithms to determine jump height and flight time from body mounted accelerometers**, *International Sports Engineering Association*(2014).
- [3] J. L. Nuzzo, J. H. Anning, J.M. Scharfenberg, **The reliability of three devices used for measuring vertical jump height**, in *Journal of Strength and Conditioning Research* (2011); 25(9)/2580-2590.
- [4] J. F. Glatthorn, S Gouge, S. Nussbaumer, S. Stauffacher, F.M. Impellizeri, N.A. Maffiuletti, **Validity and reliability of Optojump photoelectric cells for estimating vertical jump height**, *Journal of Strength and Conditioning Research*(2011);25(2):556-560.
- [5] N. Casertelli, R. Mueller, N. A. Maffiuletti, **Validity and reliability of the Myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height**, in *Journal of Strength and Conditioning Research* (2010); 24(11)/3186-3193.
- [6] A. Magnusdottir, B. Porgilsson, B. Karlsson, **Comparing three devices for jump height measurement in a heterogeneous group of subject**, *Journal of Strength and Conditioning Research* (2014); 28(10)/2837-2844.
- [7] M. Lesinski, T. Muehlbauer, U. Granacher, **Concurrent validity of the Gyko inertial sensor system for the assessment of vertical jump height in female sub-elite youth soccer players**, *BMC Sports Science Medicine Rheability* (2016); 8:35.

[8] C. Castagna, M. Ganzetti, M. Ditroilo, M. Giovannelli, A Rocchetti, V. Manzi, **Concurrent validity of vertical jump performance assessment system**, *Journal of Strength and Conditioning Research* (2013);27(3)/761-768.

Ringraziamenti

Ringrazio come prima persona la mia relatrice Silvia Fantozzi per avermi seguito in questi mesi e per avermi permesso di completare questo percorso.

Ringrazio Anna Lisa Mangia per aver concesso la sua più completa disponibilità per chiarire ogni mio dubbio, mettendo a disposizione il suo tempo e i suoi preziosi consigli.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno fornitomi durante questi anni e per avermi dato la possibilità di compiere questo percorso.

Ringrazio i miei compagni di avventura: Arianna, Eleonora, Francesca, Giovanni, Elisa e Benedetta per aver reso questi anni qualcosa di speciale.

Un ringraziamento speciale va a Lucia per i consigli e il supporto fornitomi in questo periodo.