



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI GENOVA



Università degli Studi di Genova

Scuola di Scienze Mediche e Farmaceutiche

Dipartimento di Neuroscienze, Riabilitazione, Oftalmologia, Genetica e Scienze Materno-Infantili

Master in Riabilitazione dei Disordini Muscoloscheletrici

A.A. 2022/2023

Campus Universitario di Savona

QUALI SONO I MIGLIORI SISTEMI, SEMPLICI ED AFFIDABILI PER LA GAIT ANALYSIS NELLA CLINICA QUOTIDIANA?

Candidato:

Dott. FT Trivarelli Giacomo

Relatore:

Dott.ssa FT, OMPT Salvioli Soleika

INDICE

1) Introduzione	6
1.1 Introduzione generale.....	6
1.2 Il ciclo del passo.....	6
1.3 Gait analysis.....	8
1.4 Parametri del cammino.....	9
1.5 Gait analysis nel contesto clinico.....	9
1.6 Scopo della revisione.....	10
2) Materiali e metodi	11
3) Risultati	13
3.1 Selezione degli studi.....	13
3.2 Estrazione dei risultati.....	14
4) Discussione	20
5) Conclusioni	27
6) Bibliografia	28

ABSTRACT

Background: il cammino rappresenta una delle attività motorie principali nella nostra vita ed una sua compromissione può influire in maniera importante sull'autonomia della persona oltre che sul suo stato di salute sia fisico che mentale. Il cammino è costituito da un susseguirsi di movimenti ripetuti, la cui singola unità è definita come ciclo del passo, che possono essere analizzati qualitativamente e quantitativamente. L'analisi quantitativa del cammino trova i suoi Gold Standard in ambito di laboratorio con sistemi di videoanalisi di movimento multicamera e pedane pressorie, metodiche che tuttavia mal si adattano ad un contesto clinico sia per quanto riguarda il costo delle apparecchiature che per quanto riguarda la praticità di utilizzo delle stesse.

Obiettivo: lo scopo di questa revisione narrativa è quello di individuare i migliori sistemi proposti ad oggi dalla letteratura che permettano di svolgere un'analisi del cammino valida ed affidabile in un contesto clinico rispetto ai sistemi di riferimento di laboratorio.

Materiali e metodi: questa revisione narrativa è stata condotta in accordo, dove possibile, con le linee guida PRISMA (dedicate a revisioni sistematiche). È stata effettuata una ricerca bibliografica sul database MEDLINE tra settembre ed ottobre 2022 ricercando articoli che trattassero di metodiche di Gait Analysis utilizzabili in clinica utilizzando parole chiave quali "musculoskeletal system", "gait analysis", "tool", "methods" e "reliability" combinate tra loro per formare la stringa di ricerca. Sono stati considerati gli studi pubblicati dal 2012 in poi, condotti su popolazione umana di età superiore ai 18 anni, sana o con sole problematiche muscoloscheletriche.

Risultati: la ricerca bibliografica ha fornito un totale di 815 risultati: tramite il processo di selezione, 18 articoli sono stati considerati per la revisione seguendo i criteri di inclusione ed esclusione. Di questi 18, 17 erano studi osservazionali mentre 1 era una revisione sistematica. Gli studi hanno riportato diverse metodiche utilizzabili in ambito clinico per l'analisi del cammino e dei suoi parametri sia cinematici che spaziotemporali. Solo 2 studi valutano il cammino di soggetti con problematiche muscoloscheletriche, mentre gli altri considerano un gruppo di popolazione sana. Gli studi analizzano il cammino in maniera differente tra loro, a differenti velocità, pendenze, superfici; alcuni analizzano anche il cammino con compito secondario o con sovraccarichi. I sistemi di riferimento per quanto riguarda la validità sono principalmente i sistemi di videoanalisi e le pedane pressorie.

Conclusioni: i risultati riportano diverse metodiche utilizzabili in ambito clinico, valide ed affidabili. Sulla popolazione sana gli strumenti a nostra disposizione sono diversi tipi di IMU (Inertial Measurement Units) come, ad esempio, Opal – Mobility Lab, Physilog5 e RehaGait, device Kinect per XBoX, plantari con sensori integrati (OpenGo) e app per smartphone (OneStep). La stessa app si è visto possa essere utilizzata anche in soggetti con problematiche muscoloscheletriche e in pazienti sottoposti ad intervento di artroplastica di anca o ginocchio. L'eterogeneità degli studi inclusi (parametri considerati, condizioni di cammino valutate, Gold Standard utilizzato) non permette però un confronto diretto tra tutti gli strumenti individuati: non è possibile quindi raccomandare una specifica metodica piuttosto che un'altra; la scelta del clinico sembra poter quindi ricadere sullo strumento con cui ha maggior dimestichezza o che meglio si adatta al contesto clinico specifico, considerato che tutte le soluzioni riportate sono state in grado di fornire dati validi rispetto ai Gold Standard.

INTRODUZIONE

1.1 Introduzione generale

Il cammino rappresenta una delle attività motorie principali della vita di tutti i giorni. Esso può essere definito semplicisticamente come una serie di movimenti ritmici ripetuti degli arti inferiori che portano all'avanzamento del corpo nello spazio attraverso il minimo dispendio di energia possibile; se consideriamo invece il cammino più nello specifico, possiamo definirlo come il risultato di un'attività coordinata di sistema nervoso centrale, periferico e muscolare.

Il cammino è un'attività fondamentale per quanto riguarda l'indipendenza della persona e una sua compromissione sembra essere legata ad un maggior rischio di declino fisico^{1,2} e di diminuzione della partecipazione alla vita sociale³.

Il monitoraggio e l'analisi del cammino sono degli aspetti che negli anni hanno acquisito una notevole importanza da un punto di vista sia diagnostico che riabilitativo in diversi campi della medicina, tra cui quello ortopedico e neurologico. Individuare schemi alterati di deambulazione può infatti essere d'aiuto nella diagnosi di uno specifico quadro patologico, nel riconoscimento degli impairment sui quali focalizzare il percorso riabilitativo e nel monitoraggio dell'efficacia dello stesso.

1.2 Il ciclo del passo

Il cammino è composto da un'attività motoria ripetuta, denominata *gait cycle*, che può essere definita come l'unità funzionale della deambulazione. Convenzionalmente, il *gait cycle* è costituito da tutti gli eventi che avvengono tra il contatto del tallone di un piede al suolo e il contatto successivo del tallone dello stesso lato⁴.

Il ciclo del passo può essere suddiviso inizialmente in due fasi principali, ovvero:

- Fase di *stance*, o fase di appoggio, nella quale il piede rimane a contatto con il terreno ed i muscoli dell'anca acquisiscono energia potenziale che sarà poi trasformata in energia cinetica in fase di *swing*;
- Fase di *swing*, o fase di volo, che inizia con il sollevamento dell'alluce (*toe off*) e finisce con l'appoggio del tallone (*heel strike*). In questa fase, il piede, staccandosi dal suolo, avanza rispetto all'arto controlaterale permettendo quindi l'avanzamento del corpo.

La fase di *stance* ha una durata superiore rispetto a quella di *swing*: in percentuale, infatti, la prima occupa circa il 60-65% del *gait cycle*.

Più nello specifico, possiamo suddividere ulteriormente le due fasi⁴:

- La fase di *stance* è composta da 5 sottofasi: *heel strike o initial contact*, *foot flat o loading response*, *midstance*, *heel-off o terminal stance* e *toe-off o pre-swing*
- La fase di *swing* è composta da 3 sottofasi: *acceleration o initial swing*, *midswing* e *deceleration o terminal swing*.

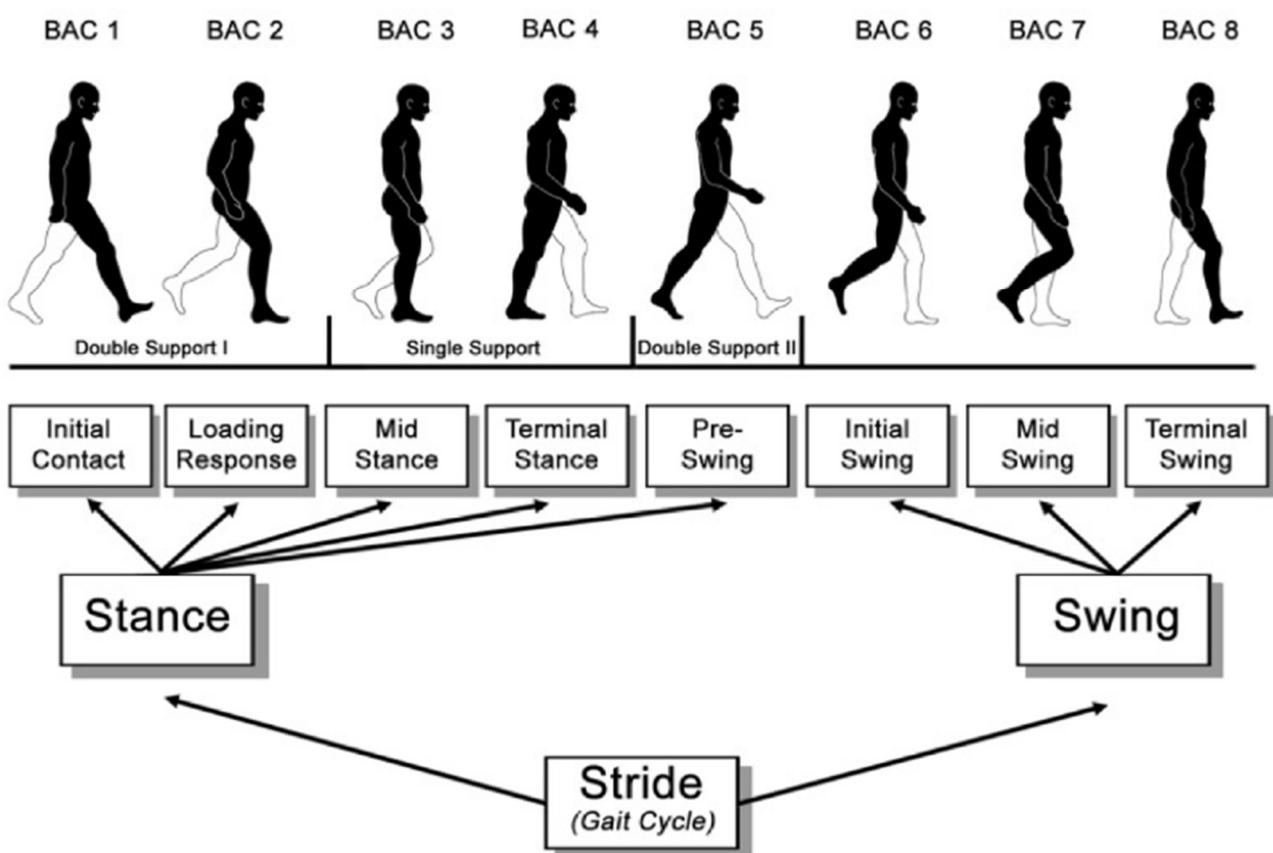


Fig.1: rappresentazione grafica del ciclo del passo

1.3 Gait Analysis

La Gait Analysis nasce con l'intento di valutare il ciclo del passo e misurare i parametri ad esso relativi con il fine di fornire risposte a domande cliniche specifiche riguardo processi diagnostici, decisioni terapeutiche e monitoraggio dell'evoluzione del paziente⁵.

Va specificato come i dati ottenuti da queste valutazioni e misurazioni assumano maggior valore nel momento in cui vengono contestualizzati in situazioni cliniche specifiche, così da poter supportare decisioni terapeutiche individualizzate⁵.

Ad oggi, il Gold Standard per quanto riguarda l'analisi del cammino risulta essere l'analisi in laboratorio, che si avvale generalmente di sistemi sofisticati di *motion tracking* abbinati o meno a pedane di forza. Questa analisi permette di estrapolare dati cinematici (come angoli articolari), spaziotemporali e cinetici (inerzia, attriti, Ground Reaction Force) che non possono essere calcolati tramite l'analisi osservazionale del cammino. Quest'ultima, infatti, non sfruttando nessun tipo di sistema di valutazione fatta eccezione per l'osservazione, non permette un'analisi quantitativa del cammino ma solo qualitativa⁶.

L'analisi di laboratorio, però, mal si adatta al contesto clinico: infatti, per eseguirla, sono necessarie apparecchiature specifiche e generalmente costose, un adeguato spazio dedicato e personale istruito all'utilizzo degli apparecchi stessi.

Le apparecchiature utilizzate in laboratorio comprendono generalmente sistemi di videocamere multiple (che consentono di riprendere il passo ed effettuare ulteriori analisi in seguito), sistemi optoelettrici (che trasformano segnali luminosi rilevati da sistemi ad infrarossi in segnali elettrici), piattaforme di forza (che rilevano le forze scambiate tra piede e terreno così da poter calcolare i momenti e le potenze della varie articolazioni, oltre che i parametri temporali), sistemi di baropodometria elettronica (che permettono la rilevazione della distribuzione delle pressioni durante l'appoggio) ed in ultimo elettromiografi (che acquisiscono il segnale elettrico generato da una contrazione muscolare). È quindi facilmente comprensibile come un'analisi di questo tipo possa essere condotta prevalentemente, se non esclusivamente, in un contesto di laboratorio.

L'analisi del cammino in ambito clinico, tuttavia, risulta utile per più motivi: permette di valutare il grado di autonomia di un paziente, il grado di limitazione cui è sottoposto in seguito ad un dato problema e consente di pianificare interventi specifici e monitorarne l'efficacia⁷.

Se, quindi, sappiamo che l'analisi di laboratorio rappresenti il Gold Standard, l'analisi clinica del cammino è lo strumento utilizzabile dai clinici con le finalità sopra riportate

1.4 Parametri del cammino

L'analisi quantitativa del cammino permette, come già detto di rilevare diversi parametri, tra cui:

- Parametri spaziotemporali: lunghezza, larghezza e durata del passo, velocità, cadenza, tempo di carico mono- e bipodalico, durata delle varie fasi;
- Parametri cinematici: traiettoria, velocità, accelerazione;
- Parametri cinetici: Ground Reaction Force;
- Parametri biomeccanici: momento articolare

1.5 Gait Analysis nel contesto clinico

Se, come detto, da un lato abbiamo una valutazione del cammino quantitativa che ci fornisce dei dati precisi ma che mal si adatta ad un contesto di clinica quotidiana, dall'altro abbiamo degli strumenti che hanno un maggior utilizzo clinico ma che non forniscono dati quantitativi precisi. Da questo nasce la necessità di sviluppare metodiche di *gait analysis* più accessibili in un contesto clinico che siano però in grado di riportare dei dati quantitativi affidabili.

In questi anni, in letteratura, sono stati proposti diversi strumenti che permettono un'analisi clinica quantitativa del cammino, come ad esempio diversi tipi di IMU (Inertial Measurement Unit) e sensori indossabili, fino ad arrivare ad applicazioni specifiche per lo smartphone.

Gli IMU, ed in generale i sensori indossabili, sono degli strumenti che, una volta applicati al corpo del paziente, permettono di rilevare parametri quantitativi senza dover ricorrere ad ulteriori strumentazioni: sono costituiti da giroscopi, sensori di forza, accelerometri, goniometri, inclinometri ecc.

Negli ultimi anni, gli IMU sono stati integrati in cellulari, tablet e device per il *gaming* (come ad esempio la Nintendo Wii), ampliando di fatto la gamma di strumentazione potenzialmente utilizzabile per quanto riguarda l'analisi del cammino.

1.6 Scopo della revisione

Considerato quanto fin qui detto, lo scopo di questo lavoro di revisione è quello di ricercare in letteratura quali siano gli strumenti ad oggi disponibili per un'analisi del cammino quantitativa in ambito clinico.

Saranno quindi ricercati articoli inerenti a validità e/o affidabilità di diverse metodiche per la *gait analysis* clinica, con lo scopo finale di fornire uno stato dell'arte attuale riguardo questo argomento.

MATERIALI E METODI

La revisione è stata effettuata seguendo, dove possibile, le indicazioni fornite dalle linee guida PRISMA: si specifica dove possibile in quanto queste linee guida fanno riferimento alla stesura di revisioni sistematiche e non di narrative come nel caso di questo lavoro, di conseguenza non tutti gli items potranno essere rispettati.

La ricerca bibliografica è stata condotta sul database MEDLINE tra settembre e ottobre 2022, ricercando articoli che ci potessero fornire uno stato dell'arte attuale riguardo metodiche proposte per l'analisi clinica del cammino, indipendentemente dal fatto che tali metodiche siano state validate o meno. Sono state individuate le parole chiave quali "musculoskeletal system", "gait analysis", "tool", "methods" e "reliability" e tramite l'utilizzo degli operatori booleani sono state unite per formare la stringa di ricerca riportata di seguito:

```
((("Musculoskeletal System"[MeSH Terms] OR "Musculoskeletal System"[All Fields] OR "musculoskeletal"[All Fields] OR "Musculoskeletal Diseases"[MeSH Terms]) AND ("gait analysis"[MeSH Terms] OR "gait analysis"[All Fields]) AND "tool"[All Fields])) OR (("gait analysis"[MeSH Terms] OR "gait analysis"[All Fields]) AND "assessment"[All Fields]) OR (("gait analysis"[MeSH Terms] OR "gait analysis"[All Fields]) AND ("methods"[MeSH Terms] OR "methods"[All Fields] OR "methods"[MeSH Subheading]))) AND ("reliabilities"[All Fields] OR "reliability"[All Fields] OR "reliable"[All Fields] OR "reliability"[All Fields] OR "reliably"[All Fields] OR "Reproducibility of Results"[MeSH Terms] OR "Validation Study"[Publication Type])
```

Gli articoli risultanti sono stati selezionati sulla base di alcuni criteri di inclusione ed esclusione.

I criteri di inclusione comprendevano:

- Studi condotti su popolazione adulta con o senza patologie muscoloscheletriche;
- Studi che avessero come oggetto di studio l'analisi del cammino in ambito clinico;
- Studi che utilizzassero come outcome principale metodi validi e/o affidabili per l'analisi clinica del cammino che possono comprendere l'utilizzo di smartphone, videocamere, applicazioni, smartwatch e tutti gli altri strumenti accessibili in un contesto clinico;
- Studi pubblicati dopo il 2012.

Sono stati invece esclusi articoli:

- Condotti su animali;
- Condotti su popolazione di età inferiore a 18 anni;
- Condotti su popolazione con problematiche neurologiche o cardiovascolari;
- Che prendessero in considerazione strumenti di gait analysis in ambito di laboratorio;
- Condotti su popolazione anziana residente in strutture assistenziali;
- Che valutassero solo determinate fasi del cammino o solo determinate regioni anatomiche

Alcuni di questi criteri sono stati decisi precedentemente la ricerca, mentre altri sono stati integrati in itinere per restringere il campo di analisi dello studio visto l'elevato numero di risultati.

Il processo di inclusione o esclusione degli articoli in base ai criteri sopra elencati è stato eseguito in diverse fasi da un unico revisore, data l'impossibilità di includerne un secondo: una prima selezione è stata effettuata leggendo i titoli degli articoli risultati dalla ricerca; in secondo luogo sono stati letti gli abstract degli articoli inclusi tramite titolo ed infine sono stati reperiti e esaminati i full-text degli articoli selezionati nella seconda fase per l'inclusione finale.

L'outcome di interesse ricercato è stato la proposta da parte degli articoli considerati di una strategia di gait analysis clinica valida e/o affidabile che si potesse avvalere di strumenti e device quali videocamere, smartphone, smartwatch, applicazioni ed altri mezzi facilmente accessibili nella pratica clinica quotidiana.

Oltre all'outcome, sono stati estratti dagli studi i dati relativi a popolazione studiata in termini di età e presenza o assenza di patologie muscoloscheletriche.

In base agli articoli reperiti, i risultati sono stati discussi in sottogruppi per popolazione studiata e per strumento o device utilizzato per l'analisi.

RISULTATI

3.1 Selezione degli studi

La ricerca effettuata su MEDLINE ha generato un totale di 815 risultati. Sulla base dei criteri di inclusione ed esclusione indicati precedentemente è stato eseguito il processo di selezione degli articoli pertinenti analizzando in primo luogo il titolo, in secondo l'abstract ed infine analizzando i full-text.

Lo screening effettuato tramite la lettura del titolo ha portato all'esclusione di 730 articoli (studi condotti su animali, su popolazione con esiti di patologie neurologiche o incidenti cardiovascolari, su bambini o adolescenti).

La lettura degli Abstract ha consentito di escludere altri 64 articoli (popolazione studiata, strumenti di gait analysis proposti).

Infine, la lettura dei 21 full-text degli articoli inclusi ha portato all'esclusione di altri 3 studi, arrivando quindi all'inclusione finale di 18 articoli in questa revisione narrativa. I dati relativi agli studi inclusi sono riportati nella tabella in fondo al capitolo (Tab.1).

Di seguito viene riportata la flow chart di inclusione degli studi.

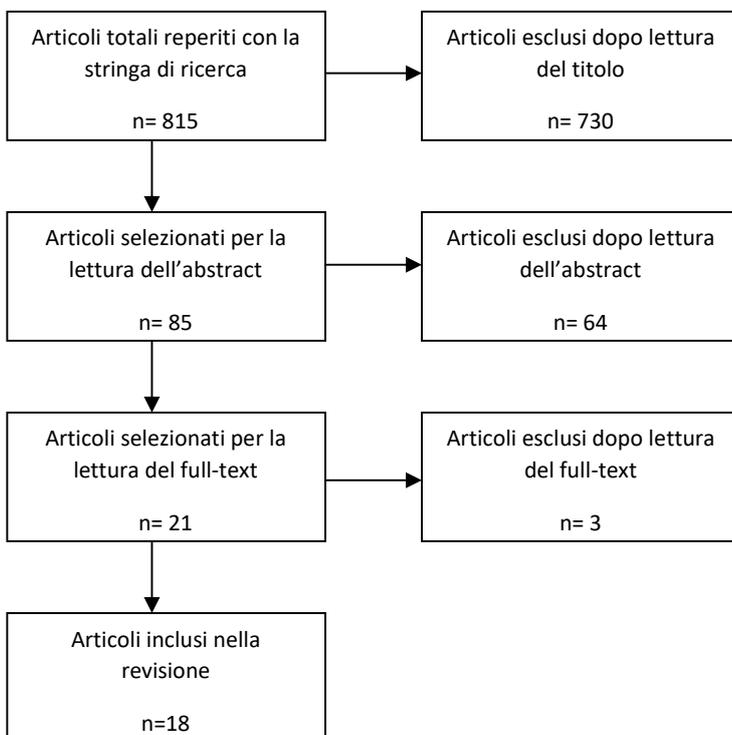


Fig.2: flow chart del processo di selezione degli articoli

3.2 Estrazione dei risultati

I 18 articoli inclusi nella revisione, 17 studi osservazionali e 1 revisione sistematica, sono stati letti ed analizzati al fine di estrapolare i dati di interesse: questi sono riportati nella tabella sottostante (Tab.1).

Tutti gli articoli ad eccezione di due prendono in esame un sottogruppo di popolazione sana, senza problematiche muscoloscheletriche. L'età media dei sottogruppi inclusi varia molto a seconda degli studi (da un minimo di 21,6 anni di media ad un massimo di 72,1 anni); tuttavia la maggior parte degli studi considera fasce di popolazione sotto i 40 anni di età media.

Tutti gli studi osservazionali hanno valutato le performance di diversi sistemi di analisi del cammino utilizzabili in ambito clinico: 8 studi hanno considerato come outcomes sia affidabilità che validità, 7 studi hanno considerato solo la validità, 1 solo l'affidabilità mentre uno ha messo a paragone i dati derivati da più sistemi di analisi differenti.

Degli studi osservazionali, 3 analizzano le performance della stessa applicazione per smartphone (*OneStep*), 4 studiano l'utilizzo di un device per X-Box (*Microsoft Kinect* nelle sue diverse versioni), 5 considerano l'utilizzo di diversi tipi di IMU, 3 studiano l'utilizzo di plantari con sensori di pressione e 1 prende in considerazione un sistema di analisi video 2D.

La revisione sistematica inclusa fornisce invece uno stato dell'arte riguardo le metodiche di analisi del cammino clinica.

Tab.1: riassunti dei dati principali degli studi inclusi

Pubblicazione	Disegno di studio	Obiettivo	Popolazione	Risultati
Christensen et al (2022) ⁸	Studio osservazionale	1) Valutare validità e affidabilità dell'app per smartphone OneStep nella rilevazione di parametri spaziotemporali del cammino 2) Valutare la capacità dell'app nel rilevare cambiamenti longitudinali nel cammino in pazienti con esiti di protesi di ginocchio o anca.	1) 20 soggetti sani dell'età media di 42,3 anni, 60% di sesso maschile. 2) 12 soggetti dell'età media di 58,7 anni, 58% maschi che hanno subito un intervento unilaterale di protesi di ginocchio o anca senza complicazioni successive.	1) L'app OneStep risulta essere uno strumento valido (rispetto ad un sistema di videoanalisi del movimento, VICON) ed affidabile per quanto riguarda la rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino; i risultati mostrano anche che, all'aumentare della velocità del cammino, diminuiscono i due outcome di interesse. 2) I risultati dimostrano come l'app sia in grado di rilevare i cambiamenti nel tempo (a 2 e a 10 settimane) dei parametri spaziotemporali del cammino
Usami et al. (2022) ⁹	Studio osservazionale	Valutare la validità di Microsoft Kinect2 nella rilevazione dei parametri cinematici (angolo di massima e minima escursione articolare) e spaziotemporali (velocità e lunghezza del passo, durata del ciclo del passo, tempo di contatto piede-terreno) del cammino.	Inclusi 10 soggetti sani e giovani (non specificata l'età), di cui 9 di sesso femminile.	I risultati mostrano come Kinect2 sia un metodo valido (rispetto a sistema di analisi ad infrarossi con markers e rispetto a pedana pressoria) per valutare il cammino, soprattutto per quanto riguarda i parametri spaziotemporali (velocità e lunghezza del passo, durata del ciclo del passo). Risultati meno validi per quanto riguarda i parametri cinematici e per il tempo di contatto piede-terreno.
Shema-Shiratzky et al (2022) ¹⁰	Studio osservazionale	Valutare la validità dell'app per smartphone OneStep nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino.	Inclusi 72 pazienti dell'età media di 52,7 anni, 37 di sesso femminile e 35 maschile. Tutti riportavano almeno una condizione tra artrosi sintomatica di anca, ginocchio o caviglia e Low Back Pain.	I risultati mostrano come l'app OneStep rappresenti uno strumento valido (rispetto a pedana pressoria) per la rilevazione di cadenza e velocità del passo; inoltre, permette di rilevare stime accettabili per quanto riguarda la percentuale di appoggio mono- e bipodalico e di fase di stance.

Pinedo-Jauregi et al. (2022) ¹¹	Studio osservazionale	Valutare validità e affidabilità dell'IMU Stryd Power Meter nella rilevazione di cadenza e tempo di contatto piede-terreno durante il cammino a differenti pendenze e con diversi sovraccarichi esterni.	Inclusi 17 soggetti sani dell'età media di 44 anni (sesso non specificato), appartenenti al corpo di polizia.	I risultati mostrano come l'analisi con Stryd Power Meter rappresenti una metodica affidabile per la rilevazione di entrambi i parametri in tutte le condizioni testate. La validità (rispetto a sistema OptoJump), tuttavia risulta buona solo per quanto riguarda la cadenza, non per il tempo di contatto piede-terreno, parametro che l'IMU tende a sovrastimare.
Shahar et al. (2021) ¹²	Studio osservazionale	Valutare la validità dell'app per smartphone OneStep nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino (cadenza, velocità, lunghezza del passo, percentuale di doppio appoggio, di swing e di stance).	Inclusi 60 adulti sani dell'età media di 37,2 anni, 52% di sesso femminile.	Accordo tra buono ed eccellente tra l'app e l'IMU Opal-Mobility Lab (considerato come Gold Standard per la gait analysis con IMU) per quanto riguarda velocità, cadenza e lunghezza del passo. Accordo moderato per percentuale di doppio appoggio, di stance e di swing dx (lato dove era posizionato lo smartphone), scarso per quanto riguarda percentuale di stance e swing sx. In generale, l'app rappresenta uno strumento valido ed utilizzabile in tutte le condizioni di cammino considerate.
Soulard et al. (2021) ¹³	Studio osservazionale	Valutare affidabilità dell'IMU Physilog5 per l'analisi dei parametri spaziotemporali (velocità, cadenza, lunghezza del passo, % di stance, swing e doppio appoggio) e di simmetria del passo.	Inclusi soggetti sani adulti dell'età media di 44,7 anni (sesso non specificato), in grado di camminare autonomamente per 180m, senza artroprotesi di anca o ginocchio.	Valutato il cammino in single e in dual task (sorreggendo un bicchiere d'acqua). I risultati dimostrano un'affidabilità eccellente intra-sessione per quanto riguarda la rilevazione dei parametri spaziotemporali. L'affidabilità scende invece quando consideriamo la rilevazione dei parametri di simmetria del cammino.
Prasanth et al. (2021) ¹⁴	Revisione sistematica	Presentare i sistemi di analisi del cammino in tempo reale con sensori indossabili.	/	I risultati mostrano come "Heel Strike" e "Toe Off" siano i due eventi maggiormente utilizzati nel calcolare i parametri spaziotemporali. I sensori maggiormente utilizzati comprendono IMU (utilizzati nel 77% degli studi inclusi, per lo più posizionati sulla tibia), plantari pressori (spesso utilizzati anche come Gold Standard in assenza di pedane pressorie), sensori elettromiografici, goniometri, inclinometri, tracker elettromagnetici e sensori di allungamento. Gli algoritmi maggiormente utilizzati per processare i dati derivati dai sensori sono quelli "rule-based", seguiti dai "Machine Learning".
Rudisch et al. (2021) ¹⁵	Studio osservazionale	Valutare accordo assoluto e consistenza per quanto riguarda la rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino	Inclusi 12 soggetti anziani sani dell'età media di 72,1 anni (6 di	Sono stati valutati 5 sistemi di analisi clinica del cammino in simultanea: sistemi di superficie (OptoGait, GAITRite, Zebris) e sensori indossabili (Physilog5 - GaitUp, Opal - Mobility Lab).

		tra 5 sistemi differenti di analisi clinica del cammino.	sesto maschile e 6 di sesso femminile).	I risultati mostrano un grado di accordo eccellente tra tutti i 5 sistemi per quanto riguarda durata del ciclo del passo e cadenza. Eccellente accordo anche per lunghezza del passo e velocità, in questi due parametri, tuttavia, Opal mostra un accordo moderato. Riguardo le percentuali di fase di stance e swing, solo Physilog5 e GAITRite hanno mostrato un buon accordo. In conclusione, per i parametri assoluti i 5 sistemi considerati forniscono risultati comparabili, a differenza dei parametri relativi.
Albert et al. (2020) ¹⁶	Studio osservazionale	Valutare la validità nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino e nel tracking dei segmenti corporei del nuovo sistema Kinect Azure in confronto al Gold Standard Vicon e paragonarne la performance con quella del suo predecessore, Kinect2.	Inclusi 5 soggetti sani dell'età media di 28,4 anni (sesso non specificato).	I risultati dimostrano come Kinect Azure fornisca risultati più validi rispetto a Kinect2 per quanto riguarda il tracking delle estremità inferiori come piede e caviglia, mentre al contrario Kinect2 garantisce performance migliori nel tracking delle estremità superiori. Riguardo i parametri del cammino invece, per quelli spaziali (lunghezza e larghezza del passo) Kinect Azure ha fornito risultati più validi, mentre per i parametri temporali (durata di passo e semipasso) non sono emerse differenze significative nelle rilevazioni fornite da Kinect Azure e Kinect2.
Fernandez-Gonzalez et al. (2020) ¹⁷	Studio osservazionale	Valutare affidabilità inter- e intraoperatore del software di analisi video 2D KINOVEA nella rilevazione degli angoli articolari di caviglia, ginocchio e anca e valutare il grado di accordo con sistema di analisi video 3D (Gold Standard).	Inclusi 50 soggetti sani (26 di sesso femminile), dell'età media di 21,6 anni.	Per quanto riguarda l'affidabilità, i risultati dimostrano come sia eccellente quella interoperatore, buona invece quella intraoperatore per tutte e tre le articolazioni. Per quanto riguarda l'accordo con il sistema VICON, invece, i risultati dimostrano differenze significative tra i dati derivati dai due sistemi, fattore che mette in dubbio l'utilità clinica del software KINOVEA.
Cho et al. (2018) ¹⁸	Studio osservazionale	Valutare affidabilità e validità di un sistema di analisi del cammino con IMU nella rilevazione di parametri cinematici e spaziotemporali del cammino.	Inclusi 3 soggetti sani di sesso maschile, dell'età media di 38,3 anni.	I risultati mostrano come l'analisi condotta con IMU porti a risultati validi (rispetto a sistema di videoanalisi VICON) ed affidabili per quanto riguarda parametri spaziotemporali (% di fase di stance e swing, velocità, lunghezza del passo) e cinematici (relativi ad anca, ginocchio e caviglia).
Washabaugh et al. (2017) ¹⁹	Studio osservazionale	Valutare validità e affidabilità di un sistema di analisi del cammino con IMU (Opal - Mobility Lab) nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino	Inclusi 39 soggetti sani di cui 25 di sesso maschile, dell'età media di 23,8 anni senza storia	Cammino valutato in 3 condizioni: treadmill (14 soggetti), doppio treadmill asincrono (11 soggetti) e su terreno (14 soggetti). Nel cammino su terreno è stata considerata solo la velocità.

		(velocità, cadenza, lunghezza del passo, durata del ciclo del passo, percentuale di stance e swing).	recente di infortunio agli arti inferiori.	I risultati dimostrano come in tutte e 3 le condizioni, l'analisi con IMU fornisca risultati validi (rispetto a pedane pressorie) e ripetibili (validità minore per quanto riguarda le % di stance e swing). Inoltre, la collocazione degli IMU sul dorso del piede sembra garantire i risultati migliori.
Eltoukhy et al. (2016) ²⁰	Studio osservazionale	Valutare la validità di Kinect2 nella rilevazione di parametri spaziotemporali (lunghezza e larghezza del passo, dislocamento pelvico, durata di passo e semipasso e velocità di swing del piede) e cinematici (angoli di flessione/estensione di anca, ginocchio e caviglia) del cammino.	Inclusi 10 soggetti sani (5 di sesso maschile e 5 femminile) dell'età media di 26,7 anni, senza storia passata di chirurgia agli arti inferiori e senza infortuni recenti.	I risultati mostrano come Kinect2 permetta di rilevare parametri cinematici validi per anca e ginocchio ma non per la caviglia; per quanto riguarda i parametri spaziotemporali, buona validità complessiva (rispetto a sistema di videoanalisi VICON), soprattutto per lunghezza e larghezza del passo.
Oerbekke et al. (2016) ²¹	Studio osservazionale	Valutare validità e affidabilità dei plantari OpenGo nella rilevazione dei parametri temporali del cammino (tempo di stance, durata del ciclo del passo, cadenza) e del centro di pressione.	Inclusi 20 soggetti sani (10 di sesso maschile e 10 femminile), dell'età media di 27,25 anni, senza storia passata di artroprotesi ad anca o ginocchio nell'ultimo anno, senza LBP acuto e non utilizzanti ortesi o plantari nella vita quotidiana.	I risultati dimostrano scarsa validità (rispetto a pedana pressoria) per quanto riguarda il centro di pressione, buona validità (rispetto a dati forniti dal treadmill) ed eccellente affidabilità per quanto riguarda invece i parametri temporali.
Donath et al. (2016) ²²	Studio osservazionale	Valutare affidabilità e validità del sistema RehaGait (IMU) nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino (velocità, cadenza, lunghezza e durata del passo).	Inclusi 22 soggetti sani (14 di sesso maschile) dell'età media di 31,0 anni.	I risultati mostrano validità tra buona ed eccellente (rispetto a pedane pressorie) per quanto riguarda tutti i parametri considerati. Anche l'affidabilità è risultata essere buona. Quest'ultima però, tende a diminuire con il cammino in salita
Braun et al. (2015) ²³	Studio osservazionale	Valutare validità ed affidabilità dei plantari OpenGo nella rilevazione di parametri spaziotemporali del cammino (non meglio specificati).	Inclusi 12 soggetti sani (6 di sesso maschile e 6 femminile), dell'età media di 25,3 anni.	I risultati dimostrano come OpenGo fornisca risultati validi (rispetto a pedana pressoria) riguardo tempo di stance e passo pressorio. Inoltre, la rilevazione degli altri parametri spaziotemporali del cammino ha dimostrato di essere affidabile.

Xu Xu et al. (2015) ²⁴	Studio osservazionale	Valutare la validità di Microsoft Kinect nella rilevazione dei parametri spaziotemporali (durata di passo e semipasso, durata di stance e swing, durata dell'appoggio bipodalico, larghezza del passo) e cinematici (angoli articolari di ginocchio ed anca) del cammino.	Inclusi 20 soggetti sani (10 di sesso maschile) dell'età media di 28,5 anni.	I risultati mostrano una diversa validità (rispetto a sistema di videoanalisi OptoTrak) a seconda dei parametri considerati: risulta infatti maggiore per tempo di passo e semipasso (non influenzata dalla velocità), minore invece per tempo di stance, swing, doppio appoggio e larghezza del passo (maggiore validità con velocità maggiore). Per i parametri cinematici, Kinect sembra poter fornire dei dati in accordo con quelli derivati dal Gold Standard, seppur con errori di misurazione (soprattutto per l'anca).
Macleod et al. (2013) ²⁵	Studio osservazionale	Valutare la validità di wi-GAT (plantari con sensori di pressione) nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino (lunghezza e durata del passo, cadenza, durata e % di fase di stance e swing, durata del doppio appoggio e velocità)	Inclusi 10 soggetti sani (4 di sesso maschile) dell'età media di 26,5 anni.	Accordo eccellente con sistema di videoanalisi VICON per velocità, lunghezza e durata del passo, durata della fase di stance e cadenza. Minor accordo per durata di fase di swing e del doppio appoggio. Buon accordo generale, quindi, con il Gold Standard.

DISCUSSIONE

Lo scopo di questa revisione narrativa è quello di indagare lo stato dell'arte attuale riguardo le metodiche in nostro possesso per effettuare un'analisi del cammino valida ed affidabile in un contesto clinico quotidiano.

Dato che la ricerca bibliografica ha fornito un numero considerevole di risultati, il campo di indagine è stato ristretto ai soli studi riguardanti soggetti adulti sani o, in alternativa, con la presenza di disturbi muscoloscheletrici.

Solo due studi hanno incluso soggetti con problematiche muscoloscheletriche, mentre tutti gli altri hanno analizzato solo soggetti sani di diverse fasce d'età.

I due studi su pazienti con problematiche hanno entrambi preso in considerazione l'utilizzo dell'applicazione per smartphone OneStep che si è dimostrata applicabile sia per monitorare i cambiamenti nel tempo dello schema del passo in pazienti post-chirurgia di artroprotesi totale di anca o ginocchio⁸ sia per rilevare in maniera valida ed affidabile i parametri spaziotemporali del cammino in soggetti con Low Back Pain o artrosi sintomatica di anca, ginocchio o caviglia¹⁰. In entrambi gli studi, l'età media dei partecipanti era compresa tra i 50 e i 60 anni. La capacità di rilevare cambiamenti longitudinali del cammino nella fase postoperatoria può essere di notevole aiuto, considerato l'impatto e le alterazioni che interventi come artroprotesi di anca e ginocchio possono avere sul cammino stesso. L'app inoltre può fornire dati spaziotemporali validi anche in presenza di problematiche muscoloscheletriche unilaterali indipendentemente dalla locazione dello smartphone (può essere posizionato quindi sia nella tasca dell'arto sintomatico che di quello asintomatico senza alterare significativamente i dati estrapolati)¹⁰. Seppure non siano stati rilevati altri studi tramite la stringa di ricerca, gli articoli analizzati riportano come altre applicazioni e software (come ad esempio Apple con I-Phone²⁶) costituiscano strumenti validi per la valutazione del cammino in diverse patologie non solo muscoloscheletriche (Parkinson, post-stroke), rafforzando quindi l'utilizzo della tecnologia degli smartphone. Nel nostro caso non è possibile raccomandare l'utilizzo di un'applicazione piuttosto che un'altra, avendo riscontrato una sola opzione, ma possiamo affermare come l'app OneStep sia uno strumento utilizzabile nella valutazione del cammino patologico e postoperatorio.

Come detto, i restanti articoli inclusi, discussi in seguito, sono stati condotti su popolazione sana e perlopiù di giovane età: infatti, ad eccezione di un solo studio¹⁵, tutti sono stati condotti su un

gruppo di popolazione dell'età media inferiore ai 45 anni (ben 8 studi hanno analizzato soggetti tra i 20 e i 30 anni).

Gli strumenti che gli articoli propongono per la valutazione del cammino in soggetti sani sono di diverso tipo e vanno dall'app OneStep^{8,12}, nominata precedentemente, al device Kinect per Xbox^{9,16,20,24}, a diversi tipi di Inertial Measurement Units (IMU)^{11,13,18,19,22} fino ad arrivare a plantari con sensori^{21,23,25}.

Iniziando dalla validità degli strumenti proposti, notiamo come gli autori dei diversi studi abbiano utilizzato differenti Gold Standard di riferimento: quelli maggiormente utilizzati sono sistemi di videoanalisi di movimento multicamera (in particolar modo il sistema VICON) e le pedane pressorie integrate o meno a treadmill. Dei 14 studi che hanno valutato la validità, 7 hanno utilizzato come Gold Standard un sistema di videoanalisi (VICON in 6 casi^{8,16,17,18,20,25}, Optotrak in uno²⁴), 5 delle pedane pressorie^{10,19,21,22,23}, 1 degli IMU¹², 1 un sistema di rilevamento ottico (OptoJump)¹¹ e 1 sia un sistema di analisi ad infrarossi che delle pedane pressorie⁹. Gli autori non giustificano la scelta del Gold Standard utilizzato, tuttavia analizzando gli studi possiamo notare come per i parametri spaziotemporali vengano utilizzati entrambi i sistemi principali (videoanalisi e pedane) per validare strumenti anche simili tra loro (ad esempio, nella validazione di plantari con sensori vengono utilizzati sia il sistema VICON²⁵ che delle pedane pressorie^{21,23}), mentre nel caso in cui vengano considerati i parametri cinematici (angoli articolari durante il cammino), il Gold Standard utilizzato è sempre il sistema di videoanalisi.

Riguardo questi ultimi parametri, quelli cinematici, vi è una buona uniformità tra gli studi rispetto ai parametri considerati: tutti e 5 gli studi che li considerano^{9,17,18,20,24}, infatti, analizzano i gradi di escursione articolare sul piano sagittale delle 3 principali articolazioni dell'arto inferiore, ovvero anca, ginocchio e caviglia.

3 studi analizzano il device per XBox Kinect^{9,20,24}; la prima versione del device ha dimostrato di poter quantificare in maniera realistica il ROM di anca e ginocchio durante il cammino²⁴, con la presenza tuttavia di errori di misurazione (fornendo, per esempio, un irrealistico angolo di iperestensione del ginocchio, come già rilevato da studi precedenti); la versione successiva, Kinect2, ha mostrato di poter fornire performance migliori, con un grado di accordo con il Gold Standard tra buono e eccellente per quanto riguarda il ROM totale di anca e ginocchio²⁰. Anche Usami e coll.⁹ confermano il possibile utilizzo di Kinect2 nella valutazione del ROM articolare durante il cammino, specificando però che la validità sia tra scarsa e buona e indicando come questi parametri siano rilevati con meno

accordo rispetto a quelli spaziotemporali. Lo studio di Albert e coll.¹⁶, pur non parlando chiaramente dei parametri cinematici, analizza la capacità di tracking dei segmenti corporei delle varie versioni del device e conclude come l'ultima versione, Kinect Azure, sia migliore nel tracciare gli arti inferiori rispetto a Kinect2. I risultati ci suggeriscono quindi come questo device, particolarmente comodo ed utilizzabile in clinica (nessuna strumentazione richiesta, se non il device stesso), possa fornirci dei dati cinematici con validità accettabile utili per rilevare impairment articolari durante il cammino stesso, validità e precisione dei dati che sembra aumentare con le versioni più recenti¹⁶.

Il sistema di videoanalisi 2D KINOVEA, invece, ha dimostrato di non essere in grado di fornire dati cinematici in accordo con quelli derivati dal Gold Standard, con errori di misurazione che non possono giustificare l'utilizzo in clinica¹⁷.

Cho e coll.¹⁸ hanno concluso che anche utilizzando degli IMU (non meglio specificati) si possono ottenere dei dati cinematici in accordo con quelli derivati dal Gold Standard, con dei risultati che non differiscono significativamente tra di loro.

In conclusione, per l'analisi dei parametri cinematici in soggetti sani i risultati sembrano suggerire l'utilizzo di Kinect nelle sue versioni più recenti (Kinect Azure), dato il maggior numero di articoli presenti.

I parametri spaziotemporali sono studiati in un numero maggiore di articoli ma, a differenza di quelli cinematici appena nominati, vi è meno uniformità per quanto riguarda i singoli parametri considerati nei diversi studi così come per i Gold Standard di riferimento utilizzati, fattori che rendono più difficile un confronto riguardo quale strumento sia più valido. Tra i parametri maggiormente considerati troviamo ad esempio cadenza, velocità, durata del ciclo del passo, lunghezza del passo, durata e percentuale delle fasi di stance, di swing e di appoggio bipodalico.

Il device Kinect, nominato poco fa, si è dimostrato uno strumento valido anche per la rilevazione di questi parametri rispetto a sistemi di videoanalisi (VICON^{16,20}, OptoTrak²⁴) e a marker con infrarossi⁹ sia in condizioni di cammino su treadmill^{16,20,24} che su terreno⁹. Kinect e Kinect2 forniscono dati validi per quanto riguarda sia parametri spaziali (lunghezza^{9,16,20} e larghezza^{16,20,24} del passo) che temporali (velocità⁹, durata del ciclo del passo^{9,16,24}); lo studio di Albert e coll.¹⁶ ci indica poi come la versione Kinect Azure, più recente, ci fornisca dei parametri spaziali maggiormente validi rispetto alle versioni precedenti.

Per quanto riguarda l'utilizzo degli IMU, 4 studi hanno proposto l'utilizzo di 4 sensori differenti^{11,18,19,22}. Solo uno studio ha valutato il cammino su terreno¹⁸, utilizzando 7 IMU non meglio specificati validati rispetto a videoanalisi del cammino (VICON). I dati relativi a lunghezza del passo, velocità e percentuale di fase di swing e di stance si sono dimostrati in accordo con quelli ricavati dal Gold Standard. I restanti 3 studi hanno analizzato il cammino su treadmill utilizzando come IMU Stryd Meter Power¹¹, Opal (APDM)¹⁹ e RehaGait²². Nel primo caso il solo parametro considerato è stata la cadenza, ricavata in maniera valida rispetto ad un sistema di rilevamento ottico (OptoJump). I restanti due IMU hanno dimostrato di fornire dati in accordo con quelli ricavati da pedane pressorie per quanto riguarda cadenza, velocità e lunghezza del passo, oltre che durata del ciclo del passo^{19,22}. I differenti sistemi riportati, quindi sembrano fornire tutti dati in accordo con quelli ricavati da diversi Gold Standard ma, data la difficoltà nel confrontare in maniera oggettiva i risultati degli studi data la loro eterogeneità, non è possibile indicarne l'utilizzo di uno piuttosto che di un altro nella rilevazione dei parametri spaziotemporali del cammino. La scelta potrebbe basarsi quindi principalmente sulle preferenze del clinico e sulla praticità nell'utilizzo dei diversi sistemi. Se lo studio di Cho e coll.¹⁸ utilizza un sistema di 7 IMU non meglio specificati, gli altri 3 richiedono solo uno o due IMU e del relativo software per l'estrazione e l'elaborazione dei dati raccolti dai sensori; tuttavia, lo studio condotto sull'IMU Stryd Meter Power¹¹ prende in considerazione solo il parametro della cadenza; quindi, per un'analisi più completa del cammino in soggetti sani i due IMU Opal (APDM) e RehaGait sembrano essere quelli più indicati^{19,22}.

L'app OneStep, discussa precedentemente per quanto riguarda l'analisi del cammino in soggetti con problematiche muscoloscheletriche, è stata validata anche per quanto riguarda la valutazione del cammino in soggetti sani ed anche in questo caso, sia per quanto riguarda il cammino su treadmill⁸ che su terreno¹². Nel primo caso⁸, rispetto a videoanalisi del cammino (VICON), l'app ha dimostrato di fornire parametri quali velocità, cadenza, lunghezza di passo e semipasso, tempo di stance swing e appoggio bipodalico validi a diverse velocità, validità che tuttavia diminuisce per tutti i parametri all'aumentare della velocità del cammino. Per quanto riguarda il cammino su terreno, l'app ha dimostrato di fornire dati quali velocità, cadenza e lunghezza del passo in forte accordo con quelli ricavati dagli IMU Opal¹², appena discussi e dimostrati essere una metodica di analisi del cammino valida rispetto a delle pedane pressorie. Dai risultati ottenuti da questa ricerca quindi, l'app OneStep è l'unico strumento raccomandabile per quanto riguarda la sua validità sia per il cammino sano che patologico.

Riguardo il posizionamento degli IMU, la revisione di Prasanth e coll.¹⁴ suggerisce il posizionamento

degli IMU a livello dell'aspetto anteriore della tibia, tuttavia Washabaugh e coll.¹⁹ nel loro studio dimostrano come i dati con maggior validità siano quelli ricavati dagli IMU posizionati a livello del piede, seppur il confronto sia con il posizionamento sulla caviglia. I risultati di quest'ultimo studio sembrano però essere d'accordo con quelli di altri lavori che dimostrano come la validità dei dati ricavati dagli IMU aumenti all'aumentare della vicinanza dei sensori al terreno²⁷.

L'ultima metodica utilizzabile è quella basata sull'utilizzo di plantari con sensori pressori integrati; due studi valutano l'utilizzo dei plantari OpenGo^{21,23}, validandone l'utilizzo rispetto ai dati temporali ricavati da pedane pressorie nel cammino su treadmill (per parametri quali cadenza, durata del ciclo del passo, durata della fase di stance²¹). Anche i plantari Wi-GAT sono in grado di fornire dati in accordo con un sistema di videoanalisi (VICON) per quanto riguarda velocità, cadenza, lunghezza del passo e durata del ciclo del passo²⁵. Tuttavia, questo tipo di plantare appare maggiormente complicato da utilizzare rispetto ai plantari OpenGo, che tramite l'apposita app e/o il software per PC forniscono i dati in tempo reale. Anche qui quindi, la raccomandazione sull'utilizzo di uno piuttosto che dell'altro strumento si basa prevalentemente sulla praticabilità in ambito clinico, dati i risultati simili degli studi.

La validità simile degli strumenti proposti è confermata anche dallo studio di Rudisch e coll.¹⁵ che confronta il grado di accordo dei dati spaziotemporali ricavati da cinque sistemi di analisi clinica del cammino: OptoGait (sistema simile a quello OptoJump, nominato precedentemente), GAITRite, Zebris (pedane pressorie), Physilog5 e Opal (IMU). I risultati mostrano un accordo tra moderato ed eccellente per quanto riguarda i parametri 'assoluti' ricavati (velocità, cadenza, durata e lunghezza del passo), accordo che si abbassa significativamente per quanto riguarda i parametri 'relativi' (percentuale di fase di stance e swing). Degli strumenti analizzati da Rudisch, gli studi inclusi nella nostra revisione analizzano specificamente solo i sensori Opal¹⁹; tuttavia, il grado di accordo con gli altri sistemi per quanto riguarda i parametri sopra riportati (che corrispondono anche a quelli validati nello studio di validazione dei sensori Opal¹⁹) ci può far pensare come anche gli altri 4 sistemi nominati possano costituire un'alternativa valida per quanto riguarda l'analisi clinica del cammino sano, seppure siano necessari studi di validazione dedicati.

Relativamente all'affidabilità dei sistemi proposti, i 9 studi che esaminano le performance dei sistemi dal punto di vista della ripetibilità dei risultati sono piuttosto concordi, seppure vengano valutate diversi tipi di affidabilità. IMU di diverso tipo (Physilog5¹³, Opal¹⁹, Rehgait²²) così come i

plantari OpenGo^{21,23} hanno dimostrato di avere un'affidabilità inter-sessione e/o intra-operatore tra buona ed eccellente per quanto riguarda i parametri spaziotemporali. Il sistema di analisi 2D KINOVEA fornisce dati cinematici con buona affidabilità sia intra che interoperatore, seppure come detto precedentemente la sua scarsa validità rispetto al Gold Standard non ne giustifica l'utilizzo¹⁷. In ultimo, l'app OneStep⁸ e gli IMU Stryd Meter Power¹¹, se utilizzati contemporaneamente sui due arti inferiori, forniscono dati in accordo tra loro, seppure vada specificato come questo risultato sia derivato dal cammino sano, tendenzialmente simmetrico.

Va specificato come gli studi siano stati condotti con procedure e metodiche diverse riguardo a velocità del cammino, pendenza, presenza o meno di sovraccarichi esterni o di compito secondario; tuttavia, nessuno studio ha rilevato differenze significative riguardo le performance di analisi degli strumenti studiati al variare delle condizioni del cammino; solo Christensen e coll.⁸ hanno rilevato, come scritto in precedenza, una diminuzione della validità dei parametri spaziotemporali raccolti con l'app OneStep nel caso di cammino veloce (2.0 m/s).

In ultimo, possiamo presupporre che i sensori Opal possano essere utilizzati anche nel cammino patologico: infatti, lo studio di Washabaugh¹⁹ dimostra come questi sensori forniscano dati validi anche in condizioni di cammino asimmetrico, facendo pensare ad un loro possibile utilizzo nella valutazione del cammino in soggetti con problematiche che alterano la simmetria dello stesso. Questo però dovrà essere confermato con uno studio futuro apposito.

Gli studi inclusi presentano alcuni limiti: primo su tutti è il basso numero di soggetti inclusi nella pressoché totalità degli studi, fattore che naturalmente diminuisce il peso dei risultati. Inoltre, la validità dei sistemi proposti viene valutata in relazione a diversi sistemi a seconda dello studio considerato, seppur la maggior parte consideri come Gold Standard il sistema di videoanalisi VICON. Altro fattore è il basso numero di studi reperiti che hanno analizzato soggetti con problematiche muscoloscheletriche: questo può influire sulla trasferibilità dei risultati di questa revisione al contesto clinico, considerato il fatto che la stragrande maggioranza dei soggetti che vediamo presentano condizioni varie di problematiche muscoloscheletriche che possono alterare il cammino.

D'altro canto, il fatto che diversi studi valutino lo stesso strumento in setting e con modalità differenti può contribuire a dare forza ai risultati ottenuti; anche la varietà per quanto riguarda l'età della popolazione inclusa (anche tra studi che valutano lo stesso strumento) può rafforzare i risultati.

CONCLUSIONI

In conclusione, possiamo notare come in letteratura siano riportati diversi metodi applicabili in ambito clinico per effettuare una valutazione valida ed affidabile del cammino.

Per quanto riguarda i pazienti con problematiche muscoloscheletriche e/o post-operatorie (artroprotesi di anca o ginocchio), la letteratura suggerisce l'utilizzo dell'applicazione per smartphone OneStep per la valutazione dei parametri spaziotemporali e per il monitoraggio dei cambiamenti degli stessi nel percorso riabilitativo.

Considerando invece i pazienti sani, gli articoli inclusi ed analizzati riportano diverse metodiche di analisi del cammino come l'appena citata app OneStep, diversi tipi di IMU, il device Kinect nelle sue diverse versioni e plantari con sensori integrati per quanto riguarda la valutazione sia dei parametri spaziotemporali che cinematici del cammino. Non è possibile, tuttavia, sulla base dei risultati, indicare la superiorità di una metodica rispetto ad un'altra, né di suggerire l'utilizzo di una in particolare.

Tutti gli strumenti proposti hanno infatti dimostrato di essere affidabili e validi rispetto a diversi sistemi di riferimento come sistemi di videoanalisi multicamera e come pedane pressorie.

La scelta dell'utilizzo di uno strumento piuttosto che di un altro sembra poter essere quindi basata sulle preferenze del clinico piuttosto che su precise indicazioni: infatti, le performance dei vari strumenti sono paragonabili tra loro ed inoltre non sembrano esserci differenze di performance al variare di caratteristiche del cammino stesso quali velocità, pendenza, presenza di eventuali sovraccarichi o compiti secondari, cammino su treadmill o su terreno.

Considerato il fatto che la maggior parte degli studi inclusi propone metodiche per l'analisi del cammino in soggetti sani, potrebbero essere utili studi futuri incentrati sulla validazione delle stesse metodiche su pazienti con problematiche muscoloscheletriche, tenendo conto che nella pratica clinica questi strumenti possano venire utilizzati dai fisioterapisti nella valutazione di un paziente con qualsiasi tipo di condizione muscoloscheletrica e molto meno raramente su persone sane.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Christiansen CL, Bade MJ, Davidson BS, Dayton MR, Stevens-Lapsley JE. Effects of weight-bearing biofeedback training on functional movement patterns following total knee arthroplasty: a randomized controlled trial. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2015;45(9):647–55. <https://doi.org/10.2519/jospt.2015.5593>.
- 2) Zeni J Jr, Abujaber S, Flowers P, Pozzi F, Snyder-Mackler L. Biofeedback to promote movement symmetry after total knee arthroplasty: a feasibility study. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2013;43(10):715–26. <https://doi.org/10.2519/jospt.2013.4657>.
- 3) Ambrose AF, Paul G, Hausdorff JM. Risk factors for falls among older adults: a review of the literature. *Maturitas.* 2013;75(1):51–61. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2013.02.009>.
- 4) Broström EW, Esbjörnsson AC, von Heideken J, Iversen MD. Gait deviations in individuals with inflammatory joint diseases and osteoarthritis and the usage of three-dimensional gait analysis. *Best Pract Res Clin Rheumatol.* 2012 Jun;26(3):409–22. doi: 10.1016/j.berh.2012.05.007.
- 5) Baker R. Gait analysis methods in rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil.* 2006 Mar 2;3:4. doi: 10.1186/1743-0003-3-4.
- 6) Wren TAL, Gorton GE 3rd, Ounpuu S, Tucker CA. Efficacy of clinical gait analysis: A systematic review. *Gait Posture.* 2011 Jun;34(2):149–3. doi: 10.1016/j.gaitpost.2011.03.027.
- 7) Baker R, Esquenazi A, Benedetti MG, Desloovere K. Gait analysis: clinical facts. *Eur J Phys Rehabil Med.* 2016 Aug;52(4):560–74.
- 8) Christensen JC, Stanley EC, Oro EG, Carlson HB, Naveh YY, Shalita R, Teitz LS. The validity and reliability of the OneStep smartphone application under various gait conditions in healthy adults with feasibility in clinical practice. *J Orthop Surg Res.* 2022 Sep 14;17(1):417. doi: 10.1186/s13018-022-03300-4
- 9) Usami T, Nishida K, Iguchi H et al. Evaluation of lower extremity gait analysis using Kinect V2® tracking system. *SICOT J.* 2022;8:27. doi: 10.1051/sicotj/2022027. Epub 2022 Jun 24.
- 10) Shema-Shiratzky S, Beer Y, Mor A, Elbaz A. Smartphone-based inertial sensors technology - Validation of a new application to measure spatiotemporal gait metrics. *Gait Posture.* 2022 Mar;93:102–106. doi: 10.1016/j.gaitpost.2022.01.024. Epub 2022 Jan 29.

- 11) Pinedo-Jauregi A, Garcia-Tabar I, Carrier B, Navalta JW, Cámara J. Reliability and validity of the Stryd Power Meter during different walking conditions. *Gait Posture*. 2022 Feb;92:277-283. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.11.041. Epub 2021 Dec 3.
- 12) Shahar RT, Agmon M. Gait Analysis Using Accelerometry Data from a Single Smartphone: Agreement and Consistency between a Smartphone Application and Gold-Standard Gait Analysis System. *Sensors (Basel)*. 2021 Nov 11;21(22):7497. doi: 10.3390/s21227497.
- 13) Soulard J, Vaillant J, Balaguier R, Vuillerme N. Gait Analysis Using Accelerometry Data from a Single Smartphone: Agreement and Consistency between a Smartphone Application and Gold-Standard Gait Analysis System. *Sensors (Basel)*. 2021 Nov 11;21(22):7497. doi: 10.3390/s21227497.
- 14) Prasanth H, Caban M, Keller U, Courtine G, Ijspeert A, Vallery A, von Zitzewitz J. Wearable Sensor-Based Real-Time Gait Detection: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2021 Apr 13;21(8):2727. doi: 10.3390/s21082727.
- 15) Rudisch J, Joellenbeck T, Vogt L, Cordes T, Klotzbier TJ, Vogel O, Wollesen B. Agreement and consistency of five different clinical gait analysis systems in the assessment of spatiotemporal gait parameters. *Gait Posture*. 2021 Mar;85:55-64. doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.01.013. Epub 2021 Jan 20.
- 16) Albert JA, Owolabi V, Gebel A, Brahms CM, Granacher U, Arnrich B. Evaluation of the Pose Tracking Performance of the Azure Kinect and Kinect v2 for Gait Analysis in Comparison with a Gold Standard: A Pilot Study. *Sensors (Basel)*. 2020 Sep 8;20(18):5104. doi: 10.3390/s20185104.
- 17) Fernández-González P, Koutsou A, Cuesta-Gómez A, Carratalá-Tejada M, Miangolarra-Page JC, Molina-Rueda F. Reliability of Kinovea® Software and Agreement with a Three-Dimensional Motion System for Gait Analysis in Healthy Subjects. *Sensors (Basel)*. 2020 Jun; 20(11): 3154. doi: 10.3390/s20113154
- 18) Cho YS, Jang SH, Cho JS, Kim MY, Lee HD, Lee SY, Moon SB. Evaluation of Validity and Reliability of Inertial Measurement Unit-Based Gait Analysis Systems. *Ann Rehabil Med*. 2018 Dec;42(6):872-883. doi: 10.5535/arm.2018.42.6.872. Epub 2018 Dec 28.
- 19) Washabaugh EP, Kalyanaraman T, Adamczyk PG, Clafflin ES, Krishnan C. Validity and repeatability of inertial measurement units for measuring gait parameters. *Gait Posture*. 2017 Jun;55:87-93. doi: 10.1016/j.gaitpost.2017.04.013. Epub 2017 Apr 12.

- 20) Eltoukhy M, Oh J, Kuenze C, Signorile J. Improved kinect-based spatiotemporal and kinematic treadmill gait assessment. *Gait Posture*. 2017 Jan;51:77-83. doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.10.001. Epub 2016 Oct 4.
- 21) Oerbekke MS, Stukstette MJ, Schütte K, de Bie RA, Pisters MF, Vanwanseele B. Improved kinect-based spatiotemporal and kinematic treadmill gait assessment. *Gait Posture*. 2017 Jan;51:77-83. doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.10.001. Epub 2016 Oct 4.
- 22) Donath L, Faude O, Lichtenstein E, Nüesch C, Mündermann A. Validity and reliability of a portable gait analysis system for measuring spatiotemporal gait characteristics: comparison to an instrumented treadmill. *J Neuroeng Rehabil*. 2016 Jan 20;13:6. doi: 10.1186/s12984-016-0115-z.
- 23) Braun BJ, Veith NT, Hell R, Döbele S, Roland M, Rollmann M, Holstein J, Pohlemann T. Validation and reliability testing of a new, fully integrated gait analysis insole. *J Foot Ankle Res*. 2015 Sep 22;8:54. doi: 10.1186/s13047-015-0111-8.
- 24) Xu X, McGorry RW, Chou LS, Lin JH, Chang CC. Accuracy of the Microsoft Kinect for measuring gait parameters during treadmill walking. *Gait Posture*. 2015 Jul;42(2):145-51. doi: 10.1016/j.gaitpost.2015.05.002. Epub 2015 May 14.
- 25) Macleod CA, Conway BA, Allan DB, Galen SS. Accuracy of the Microsoft Kinect for measuring gait parameters during treadmill walking. *Gait Posture*. 2015 Jul;42(2):145-51. doi:10.1016/j.gaitpost.2015.05.002. Epub 2015 May 14.
- 26) Measuring Walking Quality Through iPhone Mobility Metrics. Available online: https://www.apple.com/sg/healthcare/docs/site/Measuring_Walking_Quality_Through_iPhone_Mobility_Metrics.pdf, (accessed on May 30, 2021).
- 27) Iosa M., Picerno P., Paolucci S., Morone G. Wearable inertial sensors for human movement analysis. *Expert Rev. Med. Devices* 4440 (2016) 1–19, <http://dx.doi.org/10.1080/17434440.2016.1198694>.