



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Laurea in Ingegneria Biomedica

Esoscheletri per il cammino controllati da BCI : una revisione sistematica

Relatore

PROF. STEFANO TORTORA

Studente

ENRICO COLLAUTTI

MAT. 2001422

29 Settembre 2023

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Abstract

Gli esoscheletri per il cammino rappresentano una fondamentale innovazione nell'ambito della robotica indossabile consentendo a persone con disabilità motorie di riprendere a camminare. Un recente sviluppo in questo senso riguarda l'utilizzo di interfacce cervello-macchina (Brain-Computer Interface [BCI]) per il controllo degli esoscheletri. La BCI consente agli utenti, tramite la decodifica dei soli segnali cerebrali, di comandare le azioni dell'esoscheletro, sostituendo le precedenti interfacce basate su metodi non fisiologici e non naturali, come pulsanti o sensori di pressione.

Questo elaborato ha l'obiettivo di analizzare lo stato dell'arte nel campo degli esoscheletri per l'assistenza degli arti inferiori controllati da BCI. In particolare, sono stati presi in considerazione in maniera sistematica tutti quei lavori che prevedono test sperimentali in cui l'attività cerebrale è utilizzata come metodo di controllo delle azioni dell'esoscheletro.

L'obiettivo generale di questa revisione è quello di capire e riportare quali sono i paradigmi e le modalità di controllo più utilizzati nel mondo degli esoscheletri degli arti inferiori, per permettere agli esperti e ai ricercatori di visualizzare un sommario dello stato dell'arte di questo ambito, con un'analisi degli studi fino all'anno 2023.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Background	1
1.2	Esoscheletri	2
1.3	BCI: Brain-Computer Interface	3
1.3.1	Paradigmi	4
1.4	Scopo e struttura della Tesi	5
2	Metodo di Ricerca	7
2.1	Prisma Statement	7
2.2	Domande di Ricerca	7
2.3	Procedura per la Selezione	8
2.3.1	Metodi e Materiali	8
2.3.2	Query di ricerca	8
2.3.3	Criteri di eleggibilità	8
2.3.4	Screening dei Full-text	9
3	Risultati	11
3.1	Analisi dei sistemi di acquisizione utilizzati	11
3.2	Analisi dei paradigmi utilizzati	13
3.3	Analisi dei comandi degli esoscheletri	14
3.4	Analisi dei test sperimentali	16
4	Discussione	17
4.1	Risposte alle Domande di Ricerca	17
5	Conclusioni: sfide e questioni aperte per il futuro	23
A	Tabella Riassuntiva	25
	Bibliografia	29

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Background

Sia il mondo della ricerca che quello industriale stanno mostrando un crescente interesse per lo sviluppo di nuove tecnologie con l'obiettivo di migliorare la qualità e l'aspettativa di vita della popolazione. In particolare, il progressivo invecchiamento della popolazione mondiale [1] ha portato alla luce una serie di problemi legati alla mobilità corporea che richiedono soluzioni innovative e mirate.

L'incremento dell'età media, se da un lato è un trionfo dei progressi della medicina moderna, dall'altro pone sfide cruciali per la salute e il benessere delle persone anziane. Malattie neurologiche come il morbo di Parkinson e l'Ictus, così come altre condizioni legate all'invecchiamento o ad incidenti come le lesioni spinali, possono portare a una significativa perdita di autonomia e qualità della vita a causa della limitata funzionalità degli arti. Pertanto, l'identificazione di approcci innovativi e tecnologicamente avanzati per ripristinare la mobilità rappresenta un'urgente priorità.

Tra le soluzioni più promettenti destinate a ridefinire il panorama della riabilitazione e della mobilità, emergono gli esoscheletri. In particolare, il controllo di questi dispositivi tramite Interfacce Cervello-Computer (Brain-Computer Interface [BCI]) permette di superare un problema non indifferente: attualmente gli esoscheletri sono controllati soltanto da comandi non-fisiologici (es. pulsanti, sensori inerziali). Invece, utilizzando le BCI, si può bypassare il sistema muscoloscheletrico, che potrebbe essere affetto da disabilità. Questi dispositivi consentono ai pazienti di superare le barriere imposte da malattie debilitanti, riappropriandosi di movimenti che altrimenti sarebbero stati irraggiungibili.

1.2 Esoscheletri

Gli esoscheletri sono dispositivi robotici indossabili (Figura 1.1) concepiti per supportare e migliorare la funzionalità delle parti del corpo affette da disabilità [2]. Questi strumenti stanno ridefinendo il concetto stesso di riabilitazione e offrono soluzioni versatili per migliorare la qualità della vita dei pazienti, sia attraverso il potenziamento delle capacità fisiche che l'assistenza nel percorso di riabilitazione [3].

Gli esoscheletri indossabili si configurano come veri e propri robot elettromeccanici motorizzati, progettati per interagire armoniosamente con l'utente. Questi strumenti, che simulano l'andatura umana e seguono una struttura antropomorfa, agiscono in modo sincronizzato con i movimenti dell'individuo, potenziando o sostituendo le capacità degli arti coinvolti. Attivati sia in modo attivo che passivo, gli esoscheletri agiscono sinergicamente con l'utente, sommando la forza impressa dal corpo a quella necessaria per eseguire i movimenti desiderati.

Si configurano in diverse tipologie, ognuna delle quali mira a soddisfare esigenze specifiche. Sono suddivisi principalmente in tre categorie in base alla parte del corpo coinvolta: arti superiori, arti inferiori e singole articolazioni [2]. Questa classificazione si approfondisce ulteriormente in base alla funzione che gli esoscheletri andranno a svolgere. Alcuni sono progettati per migliorare le performance, consentendo a individui privi di disabilità di ampliare le loro capacità fisiche. Altri si concentrano sull'assistenza a persone con disabilità motorie, fornendo il supporto necessario per compiere movimenti altrimenti difficili. Infine, altri si dedicano alla fase di riabilitazione, agendo con scopi terapeutici.

Tuttavia, gli esoscheletri non si limitano solamente a fornire assistenza motoria. Oltre a consentire alle persone con limitazioni motorie di riconquistare la capacità di eseguire attività quotidiane, questi dispositivi stanno trovando applicazioni in diversi settori. Dall'ambito della riabilitazione, all'industria manifatturiera e perfino all'uso militare, gli esoscheletri offrono l'opportunità di amplificare la forza, migliorare la precisione e potenziare le capacità umane, creando così nuove opportunità nei settori più diversificati.

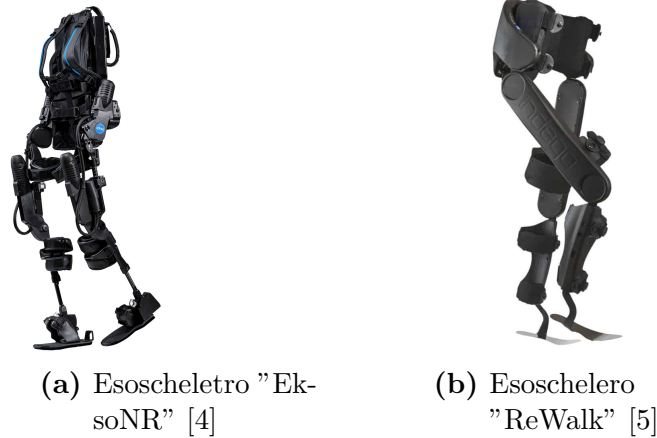


Figura 1.1: Esempi di esoscheletri commerciali

1.3 BCI: Brain-Computer Interface

La Brain-Computer Interface (BCI) si configura come un ponte tra l'intenzione del cervello e l'azione nel mondo esterno [6]. I segnali cerebrali, una volta tradotti in comandi, possono essere eseguiti da dispositivi ausiliari, come gli esoscheletri. Questa tecnologia mira a superare le limitazioni derivanti da canali neuromuscolari compromessi, che rappresentano i vettori di comunicazione tra il cervello e il sistema muscolare [7]. Le BCI creano un ciclo di interazione chiusa, un sistema in cui il feedback costante contribuisce al miglioramento complessivo delle performance [8]. Il cuore di questo ciclo è l'anello di controllo, un meccanismo attraverso il quale il segnale cerebrale viene acquisito e processato per estrarne le caratteristiche distintive, che a loro volta vengono classificate per inviare segnali di comando all'esoscheletro. Quest'ultimo risponde con un feedback in tempo reale, consentendo al soggetto di modulare le attività cerebrali, chiudendo così l'anello di controllo.

Una gamma diversificata di tecniche viene impiegata per rilevare l'attività cerebrale attraverso la BCI. Attualmente, l'**elettroencefalogramma (EEG)** è il segnale più utilizzato in BCI, soprattutto per la sua versatilità e efficacia [9]. Si acquisisce, infatti, in maniera non invasiva ponendo degli elettrodi sullo scalpo del paziente in posizioni standard. Inoltre, il sistema di acquisizione è relativamente portatile rispetto alle varie alternative di misurazione. Ciò che viene acquisito in questo caso sono i segnali elettrici del cervello, in particolare viene rilevata l'attività post-sinaptica dei neuroni piramidali presenti nella corteccia cerebrale. Tuttavia, è fondamentale considerare l'EEG come una tecnologia sensibile a interferenze. Le criticità risiedono nella scarsa risoluzione spaziale dell'acquisizione

e nella bassa intensità del segnale (microVolt), con conseguente facilità ad essere compromesso da artefatti [10].

Un'alternativa all'EEG, è l'**elettrocorticografia (ECoG)** che utilizza gli stessi principi dell'EEG, ma è un metodo di acquisizione invasivo. Infatti, vengono impiantati chirurgicamente degli elettrodi subdurali nelle zone cerebrali di interesse. L'invasività di tale metodo, però, consente di avere un segnale più pulito rispetto all'EEG e con una migliore risoluzione spaziale [11].

Oltre ai segnali cerebrali, esiste la possibilità di acquisire altri segnali biologici per completare le informazioni disponibili del paziente. In questo modo si vanno a stabilire delle interfacce ibride che possono essere utili per un controllo più integrale [12]. In questa revisione, in particolare, si parlerà di articoli che hanno usato, oltre all'EEG, i seguenti segnali:

- **Elettromiografia (EMG)**: metodo che misura l'attività elettrica muscolare durante la contrazione volontaria, tramite aghi-elettrodi inseriti nella zona di interesse, oppure tramite elettrodi posti sulla superficie della pelle (EMG di superficie) [13].
- **Elettro-oculogramma (EOG)**: registrazione del potenziale generato dai movimenti oculari [14].

1.3.1 Paradigmi

Il protocollo attraverso il quale viene generato lo specifico pattern neurale per il funzionamento dell'anello chiuso della BCI viene definito come "Paradigma". La principale classificazione è tra paradigmi endogeni ed esogeni. [15]

- **Paradigmi Endogeni**: il paziente volontariamente inizia l'attività neurale, senza il bisogno di alcun tipo di stimolo esterno. Basandosi, però, su segnali spontanei e quindi meno intensi, questo li rende più difficili da acquisire.
- **Paradigmi Esogeni**: l'attività cerebrale è derivata dalla risposta a stimoli esterni (visivi, uditivi, tattili ecc.). Un problema in questo caso può essere che il paziente si abitui allo stimolo se questo è ripetitivo e la sua risposta neurale sarà progressivamente meno significativa.

All'interno di questa revisione si trovano tre tipi diversi di paradigmi che sono stati utilizzati negli articoli analizzati:

- **Motor Imagery (MI):** è un paradigma endogeno in cui il paziente immagina di muovere in un certo modo una determinata parte del corpo, senza muoverla davvero. Si è notato che le zone cerebrali attivate con questa tecnica sono analoghe a quelle derivate da un movimento effettivo del corpo [16], rendendo la MI molto utile in casi di paralisi e disabilità. [17]
- **Movement Attempt:** è un paradigma endogeno nel quale il paziente compie un vero e proprio tentativo di movimento di una o più parti del corpo, anche se questa è soggetta a paralisi totale o parziale. Ad esempio, un individuo paraplegico potrebbe aver perso la capacità di compiere movimenti volontari, ma non quella di pianificare quei movimenti. Applicando questo paradigma, quindi, si potrebbe riparare l'anello senso-motorio del paziente, consentendogli di riappropriarsi della completezza del movimento. [18]
- **Steady state visually evoked potential (SSVEPs):** è un paradigma esogeno che si basa sui potenziali evocati derivati da stimoli visivi. In particolare, al paziente vengono presentate delle luci che lampeggiano a diversa frequenza e, in base a quale stimolo il soggetto decide di osservare, la frequenza corrispondente potrà essere osservata nell'attività neuronale della corteccia visiva. Successivamente, a ciascuno stimolo viene associato un diverso comando della BCI per il controllo del dispositivo esterno. [11]

1.4 Scopo e struttura della Tesi

Questo elaborato ha l'obiettivo di analizzare lo stato dell'arte nel campo degli esoscheletri utilizzati per l'assistenza degli arti inferiori. In particolare, si analizzano gli esoscheletri controllati da interfaccia cervello-computer (BCI, brain-computer interface), grazie all'analisi e all'elaborazione di vari segnali neurali, sia invasivi che non invasivi. Lo scopo finale è quello di fornire un'analisi sia qualitativa che quantitativa dei sistemi e delle metodologie più utilizzate fino ad oggi in questo ambito, fornendo analisi e descrizioni per comprendere a tutto tondo il contesto tecnologico.

In questa revisione sistematica vengono presi in considerazione soltanto i lavori che hanno proposto un test sperimentale con l'esoscheletro controllato da BCI, sia con soggetti sani che con pazienti, escludendo tutti quei lavori che svolgono solo analisi offline dei loro metodi o il cui controllo coinvolge solamente un avatar virtuale.

L'obiettivo generale di questa revisione è quello di capire e riportare quali sono i paradigmi, le modalità di controllo e i metodi di studio più utilizzati, per permettere agli esperti e ai ricercatori di visualizzare un sommario dello stato dell'arte di questo ambito, con un'analisi degli studi fino all'anno 2023.

La struttura della tesi è la seguente: nel secondo capitolo si analizza il metodo di ricerca alla base di questa revisione sistematica. Nel terzo e quarto capitolo si presentano e si commentano i risultati della ricerca. Nel quinto e ultimo capitolo vengono tratte delle conclusioni basate sui risultati ottenuti e si portano alla luce le possibili questioni aperte per il prossimo futuro.

Capitolo 2

Metodo di Ricerca

2.1 Prisma Statement

Al fine di analizzare lo stato dell'arte riguardante gli esoscheletri per gli arti inferiori controllati da BCI, è stata prodotta una revisione sistematica, seguendo le linee guida indicate dal PRISMA Statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [19]. Quest'ultimo fornisce uno standard per redigere revisioni sistematiche, con l'obiettivo di garantire qualità, trasparenza e completezza per la ricerca. Nel 2020 è stata rilasciata la versione più recente di questo standard ed è stata indicata la presenza di alcuni elementi consigliati all'interno della revisione, come i criteri di inclusione e di esclusione che gli studi devono rispettare o meno per venire considerati all'interno della ricerca, e una rappresentazione analitica dei risultati ottenuti.

2.2 Domande di Ricerca

L'obiettivo principale della revisione è quello di rispondere a delle domande di ricerca, che vadano a fornire un quadro complessivo dello stato dell'arte riguardante gli esoscheletri per gli arti inferiori controllati da BCI. Quindi, a monte della revisione sono state selezionate quattro domande e le corrispondenti risposte verranno presentate nel Capitolo 4.

DR N°	Domande di Ricerca
1)	Quali sono i sistemi di acquisizione maggiormente utilizzati?
2)	Quali sono i paradigmi maggiormente utilizzati?
3)	Quali e quanti sono i comandi permessi nel controllo dell'esoscheletro?
4)	Sono stati eseguiti test sperimentali e/o clinici con pazienti?

2.3 Procedura per la Selezione

2.3.1 Metodi e Materiali

Gli studi da includere nella revisione sono stati presi dal Database Scopus, una delle più grandi basi di dati bibliografiche dedicata alla letteratura scientifica, tecnica e medica.

Per eseguire, invece, lo screening degli articoli è stato usato il tool Rayyan Systems Inc ¹, che semplifica notevolmente le decisioni sull'inclusione o sull'esclusione degli studi, grazie a un'interfaccia grafica intuitiva e la possibilità di assegnare comode 'etichette' ad ogni paper.

2.3.2 Query di ricerca

Per interrogare il database Scopus è stata redatta una apposita stringa di ricerca. La stringa di ricerca è stata creata utilizzando gli operatori Booleani AND e OR, che corrispondono rispettivamente all'intersezione e all'unione algebrica dei termini:

TITLE-ABS-KEY ((eeg OR electroencephalogr OR ecog OR electrocorticogr* OR bci OR bmi OR nirs) AND ("lower limb" OR leg OR walk*) AND (exoskeleton*))*

L'ultima consultazione dei risultati di ricerca risale al giorno 29/07/2023.

2.3.3 Criteri di eleggibilità

Dopo aver rimosso eventuali duplicati dal risultato della query di ricerca, è stato effettuato uno screening basandosi sulla lettura di soli titolo e abstract di ogni lavoro, identificando se ognuno di essi rispondesse o meno ai criteri di eleggibilità di seguito riportati:

I **criteri di inclusione** considerati sono i seguenti:

1. Lo studio in questione deve riguardare gli arti inferiori;
2. Lo studio in questione deve riguardare strategie di controllo di un esoscheletro;
3. Nello studio in questione deve essere utilizzato un segnale cerebrale per il controllo;

¹<https://www.rayyan.ai/>

2.3 Procedura per la Selezione

4. Lo studio in questione deve includere test sperimentali con l'esoscheletro.

I **criteri di esclusione** considerati sono i seguenti:

1. Full-Text non accessibile;
2. Lo studio tratta esclusivamente il design dell'esoscheletro;
3. Lo studio presenta sperimentazione solo su animali;
4. Lo studio riguarda un controllo gestito da un operatore e non dal paziente stesso;
5. Lo studio presenta solo test in realtà virtuale o su avatar digitali.

Risultato del primo screening: Sono stati analizzati 198 articoli esclusivamente dal loro titolo e dal loro abstract. Ne sono stati esclusi 100, di conseguenza sono rimasti altri 98 articoli da studiare più approfonditamente.

2.3.4 Screening dei Full-text

Lo screening più approfondito consiste nella lettura del testo completo degli articoli rimasti. Tra questi, 9 non consentivano la lettura del full-text, di conseguenza sono stati esclusi dalla revisione. Al termine di questo processo, sono stati esclusi altri 45 articoli, arrivando così al numero finale di paper inclusi nella revisione sistematica pari a 44.

Lo screening completo, dall'inizio alla fine, viene riassunto nel diagramma di flusso in Figura 2.1.

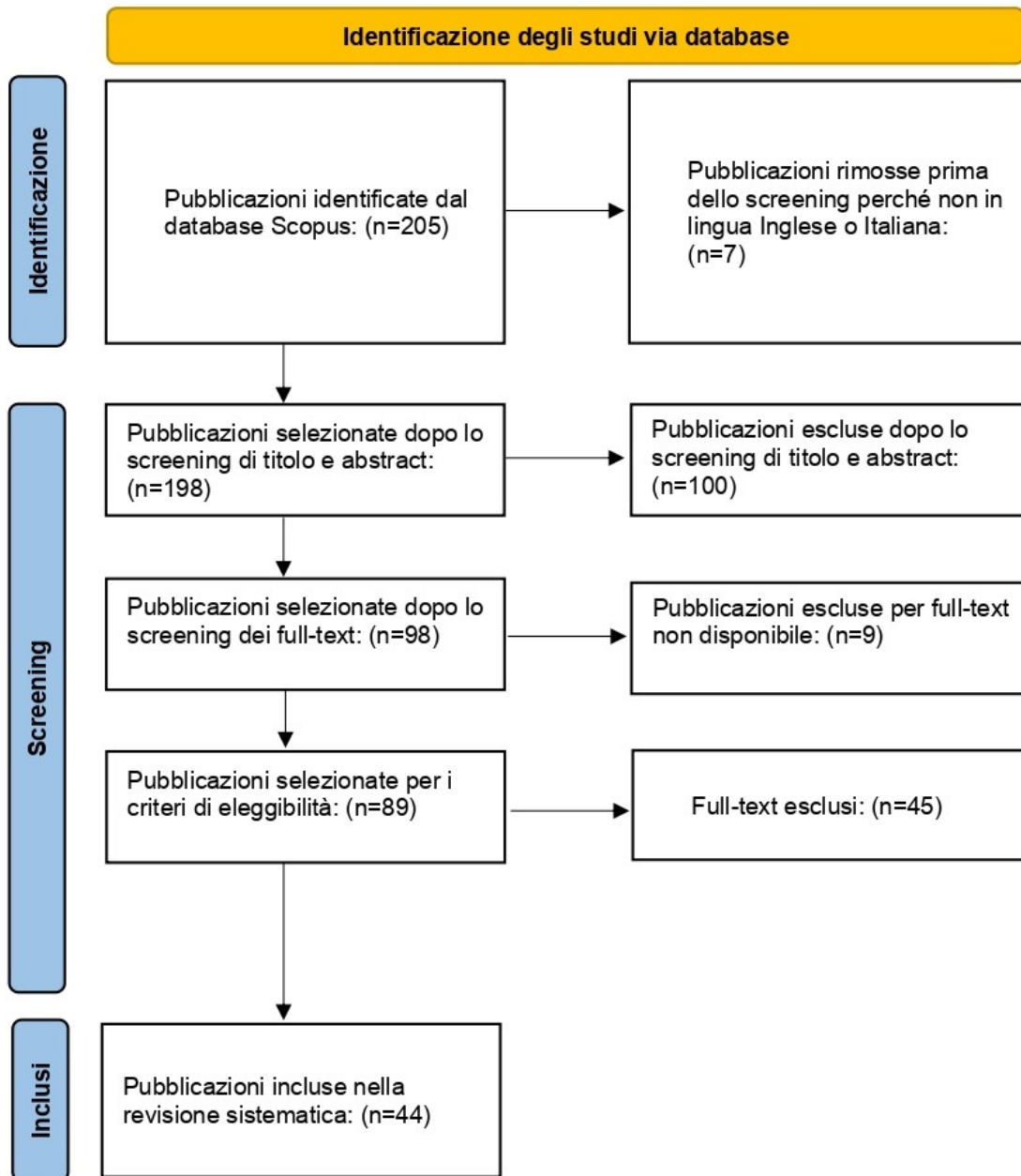


Figura 2.1: Diagramma di flusso dello screening

Capitolo 3

Risultati

In questo capitolo si riportano i risultati dell'analisi derivata dalla lettura dei full-text degli articoli presi in considerazione in questa revisione sistematica. In particolare è stata eseguita una valutazione quantitativa utile per rispondere ai quesiti di ricerca (Capitolo 4) e di seguito si riportano le evidenze ottenute.

3.1 Analisi dei sistemi di acquisizione utilizzati

Per iniziare, si analizzano i dati riguardanti il metodo di acquisizione del segnale cerebrale che ogni studio ha scelto per comandare la BCI. Come è evidente dalla Figura 3.1, quasi tutti gli studi hanno optato per un approccio non invasivo. Soltanto uno studio [20] si è affidato a un metodo invasivo, e in particolare è stata usata la tecnica dell'elettrocorticogramma (ECOG).

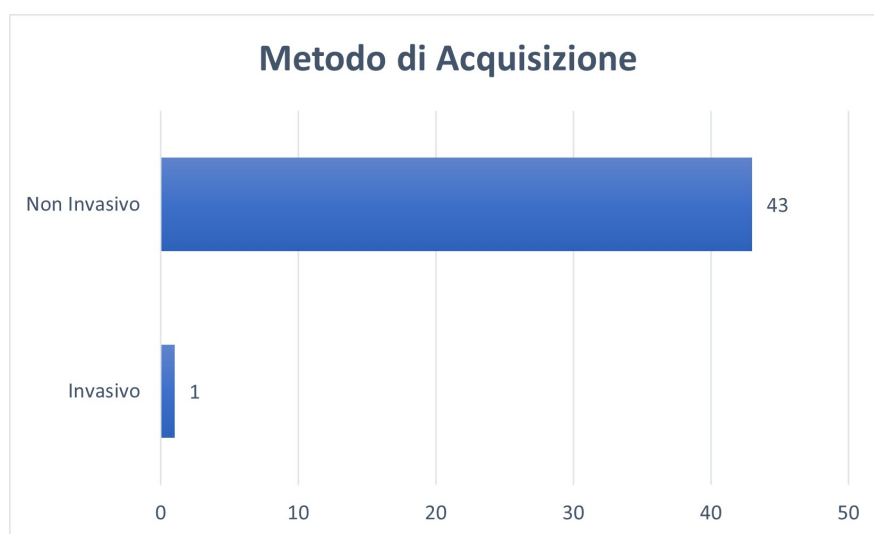


Figura 3.1: Metodo di acquisizione scelto negli articoli

Passando poi ad un'analisi riguardo quali segnali sono stati preferiti durante l'acquisizione non invasiva, si nota come tutti i lavori si siano affidati all'elettroencefalogramma (EEG).

È interessante capire quanti studi hanno deciso di affiancare o meno all'EEG anche l'acquisizione di altri segnali quali l'elettromiogramma (EMG) e l'elettrooculogramma (EOG). Come si può notare dalla Figura 3.2, il 63% degli studi ha utilizzato l'EEG da solo, mentre il restante 37% ha optato per un'interfaccia ibrida con EMG o EOG. Nessuno invece ha utilizzato tutti i tre segnali.

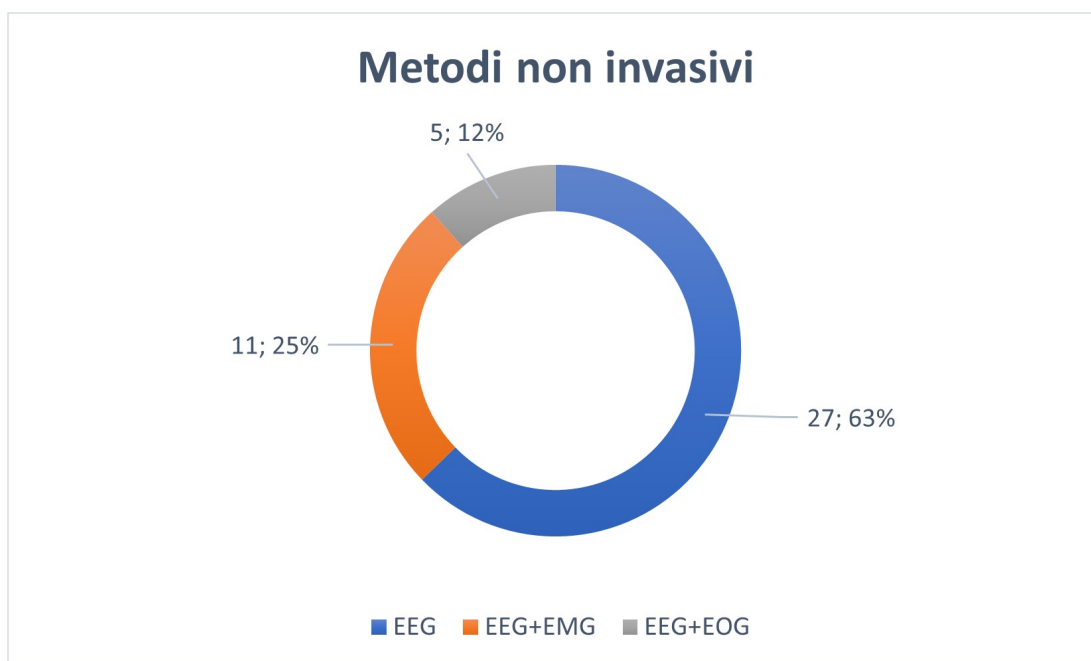


Figura 3.2: Segnali utilizzati nei metodi non invasivi

3.2 Analisi dei paradigmi utilizzati

Si analizzano le tipologie di paradigmi utilizzati, partendo dalla prima macro suddivisione tra endogeni ed esogeni (Sezione 1.3.1). Come riportato nella Figura 3.3, 33 studi hanno optato per un approccio endogeno, mentre 10 per uno esogeno. Uno soltanto [21] ha studiato entrambi gli approcci separatamente.

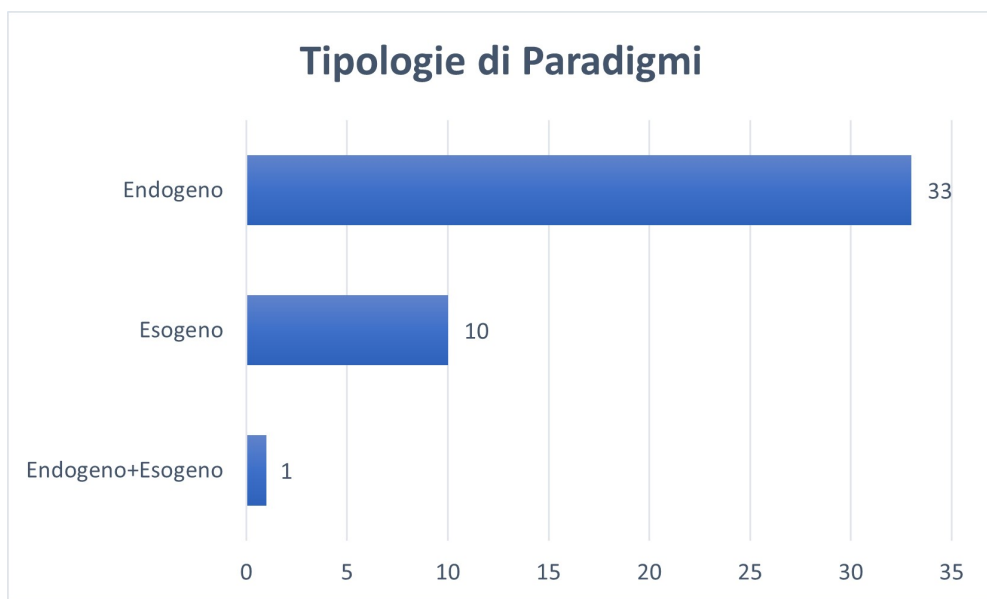


Figura 3.3: Utilizzo di paradigmi endogeni e/o esogeni negli articoli

Andando più nel dettaglio, si può notare dalla Figura 3.4 che i paradigmi più utilizzati sono quelli descritti nella Sezione 1.3.1: 23 studi hanno usato il paradigma endogeno della *Motor Imagery* [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 21, 42, 43]; 12 studi si sono affidati al paradigma endogeno del *Movement Attempt* [44, 45, 46, 20, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54]; infine 8 articoli hanno utilizzato il paradigma esogeno degli SSVEPs [55, 56, 57, 58, 21, 59, 60]. Da notare che in questo conteggio è compreso il paper [21] che ha utilizzato la MI come paradigma endogeno e gli SSVEPs come paradigma esogeno. Per concludere, 2 studi sono rientrati nella categoria *Other* perchè hanno utilizzato paradigmi non classificabili tra i tre principali. In particolare, sia [61] che [62] utilizzano un sistema che si basa sui potenziali evocati, senza specificarne però la tipologia esatta.

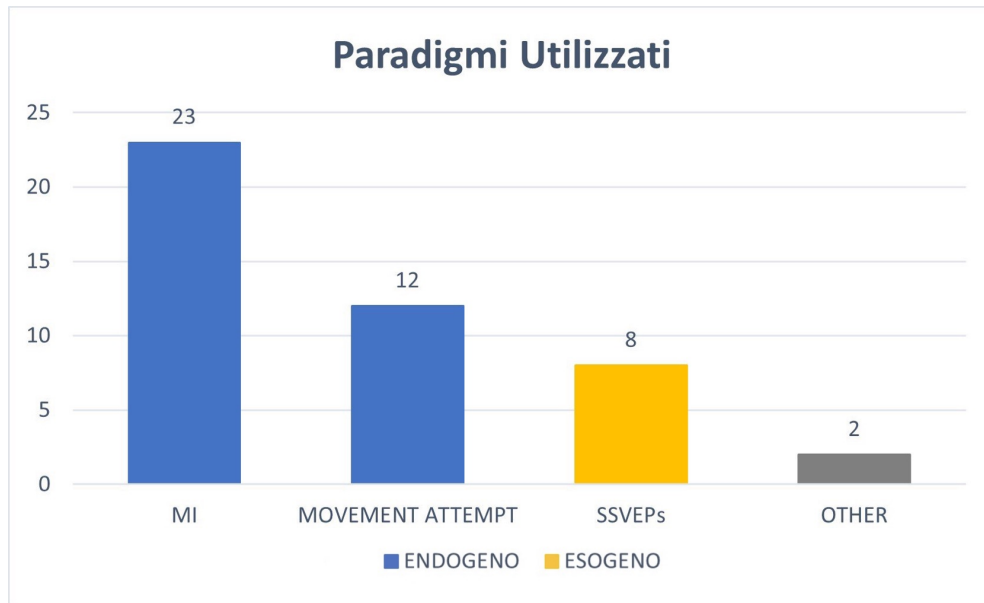


Figura 3.4: Tipologie di paradigmi utilizzati negli articoli

3.3 Analisi dei comandi degli esoscheletri

In questa sezione viene esposta un'analisi riguardante le possibilità di comandi che l'esoscheletro utilizzato in ciascuno studio permetteva al suo utilizzatore. Il numero di comandi dipende sia dai gradi di libertà concessi dall'hardware dell'esoscheletro stesso, sia dalla quantità di output di controllo previsti dalla BCI usata.

I comandi sono stati raggruppati in diverse categorie, per le quali viene disposta una breve spiegazione in Tabella 3.1.

Ciascuno studio permetteva al paziente una combinazione di uno o più dei comandi elencati. Di seguito si riporta un'analisi riguardante le combinazioni di comandi, o i singoli comandi, più frequenti negli articoli selezionati per questa revisione. I risultati sono riportati in Figura 3.5.

Comando	Spiegazione
Start/Stop	Inizio o fine di un movimento preimpostato
Dx/Sx	Effettuare una svolta a destra o sinistra
Stand/Sit	Effettuare movimenti di "sedersi" e "alzarsi in piedi"
Single Movement	Effettuare un movimento singolo, come alzare una gamba o muovere un'articolazione
Walk	Movimento completo e libero di camminata dritta
Other	Altri tipi di movimento meno specifici

Tabella 3.1: Descrizione dei comandi

3.3 Analisi dei comandi degli esoscheletri



Figura 3.5: Frequenza delle combinazioni di comandi consentiti dagli esoscheletri nei differenti studi

La Figura 3.6 riporta, invece, quante volte ciascun comando è stato utilizzato nei differenti studi. Come si può notare, la maggior parte degli studi si è cimentata nello studio del movimento della camminata dritta; un'altra buona parte nel comando di attuazione e di arresto di un movimento prestabilito, oppure in quello di sedersi e alzarsi in piedi. Diversi lavori, inoltre, hanno affiancato al movimento "Walk", altri comandi più semplici come quelli di "Stand/Sit" o "Dx/Sx".

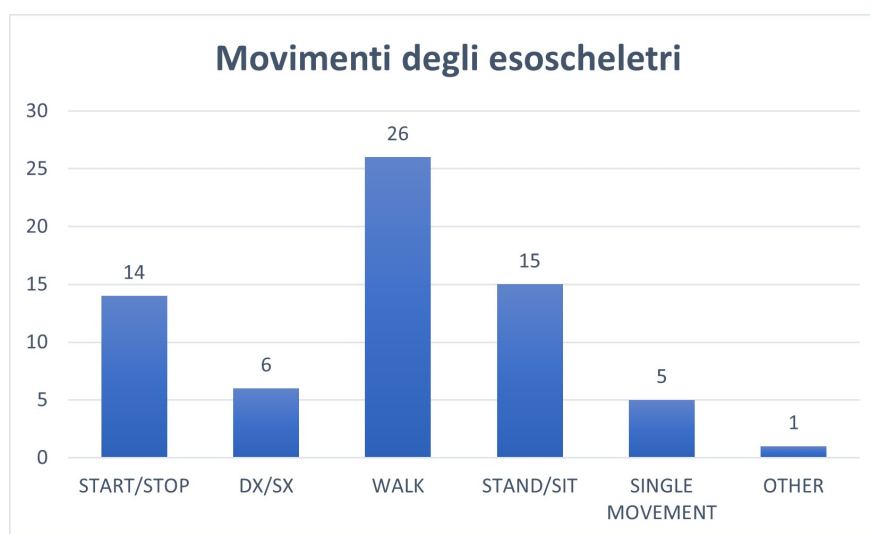


Figura 3.6: Frequenza assoluta di ciascun comando nei differenti studi

3.4 Analisi dei test sperimentali

Infine, viene analizzato lo stato di salute dei pazienti selezionati per effettuare i test pratici sugli esoscheletri dei vari studi. Si cerca di comprendere quanti di questi fossero individui sani e quanti pazienti affetti da una patologia motoria o del sistema nervoso. Come è evidente dalla Figura 3.7, la maggioranza degli studi ha effettuato test solo su individui sani. Soltanto 7 degli studi inclusi nella review hanno testato il loro sistema su pazienti [28, 20, 50, 51, 38, 41, 60]. In particolare, di questi 7 studi uno solo è stato condotto su un paziente post-ictus [60], mentre tutti gli altri hanno coinvolto individui reduci da una lesione spinale.

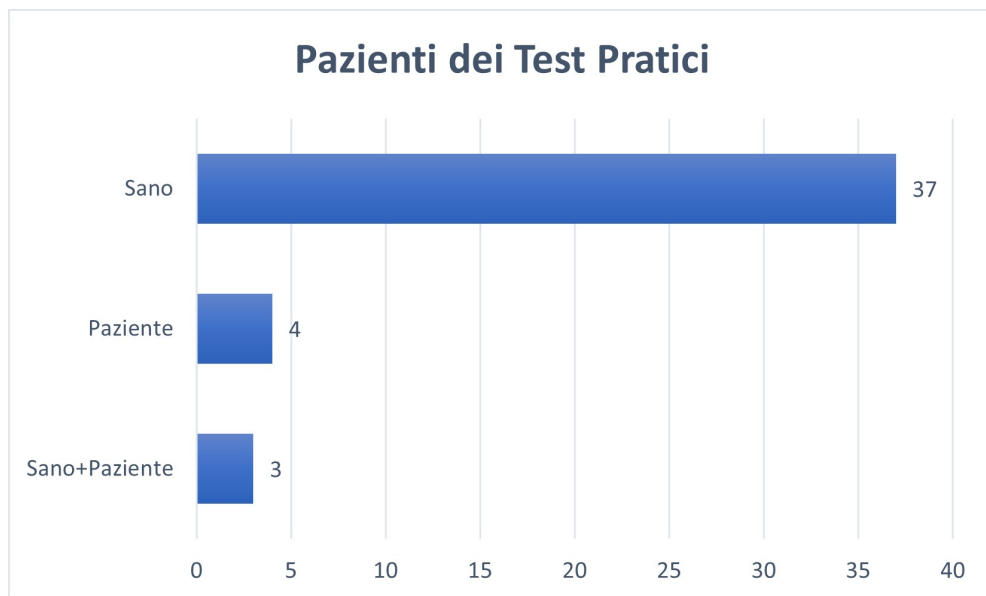


Figura 3.7: Stato di salute dei pazienti dei test pratici

Capitolo 4

Discussione

In questo capitolo verranno discussi i risultati riportati nel Capitolo 3 con l'obiettivo di rispondere alle Domande di Ricerca descritte nella Sezione 2.2.

4.1 Risposte alle Domande di Ricerca

DR N°1 - Quali sono i sistemi di acquisizione maggiormente utilizzati?
Come è evidente dalle analisi presentate nella Sezione 3.1, la scelta di quasi tutti i lavori è ricaduta su un metodo di acquisizione non invasivo del segnale biologico. Soltanto il paper [20], infatti, ha optato per un approccio invasivo, utilizzando l'ECOG.

È interessante visualizzare questo netto trend poiché l'acquisizione non invasiva dell'EEG porta con sé la grande criticità dell'inaccuratezza del segnale. Banalmente, tra la zona in cui viene generata l'attività elettrica d'interesse, cioè la corteccia cerebrale, e gli elettrodi che acquisiscono il segnale, l'interferenza del cranio, dello scalpo e dei capelli è un fattore di errore. Soprattutto nel caso dell'EEG che misura segnali di bassa intensità (ordine dei microVolt) ancora più facilmente attaccabili da interferenze esterne. Tutte problematiche parzialmente affrontabili con un approccio invasivo, ponendo gli elettrodi di acquisizione direttamente nelle zone cerebrali di interesse, incorrendo così in minori interferenze. Chiaramente l'approccio invasivo comporta svariate problematiche, come un maggiore rischio per il paziente sia durante l'operazione chirurgica di craniotomia, che dopo a causa del rischio di infezione e/o di rigetto, nonché un maggior costo a carico del sistema sanitario nazionale. [63]

Discutendo invece riguardo i metodi non invasivi, è rilevante capire l'utilità delle interfacce ibride [12], nelle quali oltre all'EEG è stato acquisito un altro segnale,

in particolare EMG o EOG. Dai risultati della review, si è visto che 27 lavori hanno acquisito solamente l'EEG e controllato l'esoscheletro solo grazie ad esso. Gli altri 16 lavori hanno adoperato un'interfaccia ibrida. Solitamente vengono usate per fornire un doppio controllo sugli output di movimento rilevati dalla BCI, in modo da gestire eventuali falsi positivi o falsi negativi [23]; oppure per perfezionare o diversificare le possibilità previste dall'interfaccia con l'esoscheletro [48, 29, 53].

Ad esempio, in [48] il segnale EEG è stato utilizzato per attivare la camminata dell'esoscheletro, mentre il segnale EMG veniva usato con lo scopo di allungare o accorciare il singolo passo per evitare eventuali ostacoli. In questo caso, quindi, l'interfaccia ibrida è stata sfruttata per apportare leggere modifiche al controllo finale per gestire situazioni di pericolo.

Un'altra alternativa è quella di "fondere" i diversi segnali acquisiti per estrarne poi le caratteristiche necessarie per il controllo, come in [49, 52, 54].

L'EOG, diversamente, in tutti i lavori in cui è stato acquisito è servito per ripulire il segnale EEG. Nell'acquisizione dell'EEG, infatti, è facile introdurre artefatti che rovinano il segnale e uno di questi è proprio quello oculare: i movimenti dell'occhio e lo sbattere delle palpebre intaccano la corretta acquisizione del segnale cerebrale e per questo motivo viene spesso usato un algoritmo di pulizia del segnale cerebrale che utilizza come segnale di riferimento per il rumore oculare proprio l'EOG, e.g. per comprendere meglio quali componenti del segnale eliminare.

DR N°2 - Quali sono i paradigmi maggiormente utilizzati?

Partendo dai risultati riportati nella Sezione 3.2, si nota come l'approccio endogeno sia il più utilizzato. Questo perché fornisce una maggiore versatilità al sistema e di conseguenza è un metodo più verosimilmente utilizzabile in applicazioni quotidiane. Il fatto di poter continuamente e in maniera spontanea inviare un segnale di controllo all'esoscheletro, senza doversi riferire a stimoli esterni, rende l'utente più autonomo e consente quindi un'interazione più naturale con il sistema robotico.

Primo fra tutti, l'approccio della *Motor Imagery* (MI) è il più utilizzato. Si basa sul pensiero del movimento, che viene riconosciuto dalla BCI per emettere un comando concreto all'esoscheletro.

Ad esempio, in [31], viene chiesto al paziente di operare successivi task mentali: in ordine, rilassarsi, pensare al movimento di camminata, contare alla rovescia da 500 a salti di 7 e infine rilassarsi nuovamente. Molto spesso si ritrova questo

procedimento, con l'obiettivo di permettere al soggetto di concentrarsi al meglio sulla camminata. Il conto alla rovescia, infatti, serve per spostare il focus del pensiero su qualcosa di completamente differente, ma pur sempre impegnativo, per distaccarsi il più possibile dall'immaginazione del movimento richiesto.

L'altro approccio predominante nei paradigmi endogeni è quello del *Movement Attempt*, nel quale è il tentativo vero e proprio di movimento che porta all'output di controllo. Ad esempio, [51] riporta di aver utilizzato questo approccio: l'esoscheletro inizialmente si oppone al movimento volontario delle gambe e soltanto quando viene registrato il segnale cerebrale corrispondente all'intenzione di muoversi del paziente, allora l'esoscheletro si sbloccherà e opererà il movimento desiderato. Questo approccio ovviamente porta con sé dei limiti per essere utilizzato con pazienti cronici, in quanto la capacità di produrre lo stimolo di intenzione del movimento a livello corticale potrebbe essere stata compromessa dal lungo inutilizzo del distretto corporeo.

Parlando invece di paradigmi esogeni, quello maggiormente utilizzato è l'approccio *Steady state visually evoked potential* (SSVEPs) nel quale sono degli stimoli visivi ad indurre l'attività cerebrale del paziente. Riportando a titolo d'esempio l'articolo [64], sono stati presentati al soggetto stimoli visivi a cinque differenti frequenze, dai 9 Hz ai 17 Hz, ad intervalli di 2 Hz, corrispondenti a cinque comandi (*walk, sx, dx, stand, sit*). A seconda poi della frequenza predominante nei potenziali evocati rilevati dall'EEG, veniva eseguito il movimento corrispondente.

DR N°3 - Quali e quanti sono i comandi permessi nel controllo dell'esoscheletro?

Dall'analisi presentata nella Sezione 3.3, è emerso che il movimento *Walk* è stato il più frequente, seguito da *Stand/Sit* e *Start/Stop*. Infatti, data la difficoltà di individuare un numero elevato di comandi dalla BCI, la maggior parte dei lavori si è concentrata su strategie di controllo semplici dell'esoscheletro, in cui la BCI funge sostanzialmente da "trigger" per l'esecuzione di azioni pre-programmate del dispositivo robotico che poi le esegue in autonomia, un approccio noto in letteratura come *shared control* [65, 66] o *shared autonomy* [67]. Ad esempio, in [36] una BCI basata su *motor imagery* è utilizzata per inviare all'esoscheletro comandi di "walk", "turn left" e "turn right". Questi vengono poi eseguiti in maniera autonoma dall'esoscheletro in base all'ambiente circostante, acquisito tramite una camera RGB-D, e.g. per evitare gli ostacoli. Volendo riportare, invece, un esempio di BCI con molteplici comandi, l'articolo [60] ha previsto un

esoscheletro con la possibilità di muoversi in avanti, girare a destra e sinistra e di sedersi e rialzarsi. Nella fase di allenamento del paziente, si è istruito un algoritmo per riconoscere i pattern EEG, evocati tramite SSVEPs, corrispondenti ai vari comandi. Durante l'esperimento vero e proprio, quando la BCI riconosceva il pattern di un determinato comando, questo veniva eseguito. Ciò accadeva dopo una gestione degli errori tramite una macchina a stati finiti, e.g. se la BCI riconosceva un comando di "gira a destra" mentre il soggetto era nello stato di "seduto", il movimento non veniva eseguito. Negli articoli in cui si parla soltanto di comando "Start/Stop", invece, il paziente può soltanto azionare o fermare un movimento prestabilito, ad esempio di camminata. Ovviamente questo tipo di BCI presenta grossi limiti e nella vita quotidiana è praticamente inutilizzabile poichè le variabili presenti naturalmente sono incalcolabili, rendendo impossibile prevedere a priori i bisogni dell'utilizzatore.

Comunque sia, è interessante vedere che per questo tipo di comandi non è necessaria un'attività mentale affine al movimento. Ad esempio nel paper [35], il comando di *Start* del movimento è azionato dalla *Motor Imagery* di un'azione per cui il paziente è confidente: un soggetto azionava il movimento pensando alla sua mano che gioca a basket, un altro invece pensando alla sua mano che tira un pugno al sacco da boxe. Effettivamente per comandi semplici, questo è un metodo efficace per mettere a proprio agio il paziente e avere un'ottima resa della BCI.

DR N°4 - Sono stati eseguiti test sperimentali e/o clinici con pazienti?

I risultati presentati nella Sezione 3.4 mostrano una netta tendenza a reclutare individui sani per i proprio studi. Infatti, solo 7 articoli su 44 hanno eseguito i loro test su pazienti [28, 20, 50, 51, 38, 41, 60].

Questo fenomeno può essere spiegato alla luce del fatto che è più semplice chiedere a individui sani di partecipare a test sperimentali su esoscheletri, sia perché sono più facili da reclutare, e.g. tra i membri del gruppo di ricerca, sia perché le responsabilità durante gli esperimenti con pazienti, e i conseguenti standard di sicurezza più stringenti e difficili da rispettare, richiedono specifici iter di approvazione dello studio da parte dei comitati etici predisposti.

É importante ricordare, però, che l'utilizzatore finale di questi apparati è proprio la persona con difficoltà fisiche e forse coinvolgere maggiormente questa classe di persone porterebbe a risultati più utili e significativi. Un esempio banale può essere quello di chiedere a una persona di controllare il movimento di una gamba

4.1 Risposte alle Domande di Ricerca

dell'esoscheletro tramite Motor Imagery: è chiaro che colui che ha l'abilità di poterla muovere anche naturalmente, penserà in maniera differente da colui che a causa di una patologia ha perso la sua mobilità.

Ad esempio, l'articolo [41] che ha effettuato test sperimentali sia su individui sani che disabili, ha rilevato che le aree del cervello impegnate durante il controllo dell'esoscheletro nelle due diverse categorie, sono proprio differenti, spiegandosi il fenomeno dicendo: *"...potrebbe essere attribuito alla perdita di cellule cerebrali e alla dinamiche relative a una corteccia cerebrale degradata o alla mancanza di input afferenti in seguito a una lesione al midollo spinale."*

Capire approfonditamente queste differenze può essere la chiave per sviluppare sistemi robotici assistivi più efficaci e maggiormente volti al paziente.

Capitolo 5

Conclusioni: sfide e questioni aperte per il futuro

Lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni ha permesso all'uomo di pensare a soluzioni mediche che prima non sarebbero state nemmeno immaginabili. In particolare, il supporto alle persone con patologie e limiti di movimento sta progredendo e fornisce diverse soluzioni. In questa revisione sistematica, scritta seguendo il protocollo PRISMA, si è analizzato lo stato dell'arte riguardante gli esoscheletri per gli arti inferiori, controllati da BCI.

Lo scopo finale è stato quello di rispondere a dei precisi quesiti di ricerca, e nel farlo è stata eseguita un'analisi dei metodi più e meno utilizzati fino ad oggi. L'EEG è il segnale più utilizzato, così come la MI è il paradigma più comune; al contrario, metodi di acquisizione invasivi come l'ECOG sono rarissimi e i paradigmi esogeni risultano molto meno comuni di quelli endogeni. Per quanto riguarda i test pratici su esoscheletri, è molto più facile trovare studi che chiedano ad individui sani di parteciparvi, piuttosto che coinvolgere i pazienti finali soggetti a patologie.

Proprio quest'ultimo argomento è uno spunto per gli studi futuri. Capire fino in fondo le differenze funzionali che distinguono un individuo sano da un paziente finale, può aiutare la ricerca a sviluppare prodotti incentrati sul destinatario ufficiale. Probabilmente, quindi, iniziare un trend di test pratici adattati al paziente finale può consentire di perfezionare queste tecnologie.

Un'altra questione da non sottovalutare è quella dell'allenamento dei pazienti: non è semplice, infatti, riuscire ad utilizzare un esoscheletro comandato da BCI. Per questo motivo ogni studio prevede una fase preliminare in cui l'individuo prende confidenza con l'apparato sperimentale. Anche le task mentali da ese-

guire non sono sempre immediate: è stato visto in questa revisione che talvolta l'azione o il pensiero che si tradurrà poi in comando, non è strettamente legato al comando stesso. Per semplificare, pensare di muovere una mano per poi comandare la gamba dell'esoscheletro può risultare controintuitivo. Tutte queste complicazioni risultano in uno stress fisico e mentale non indifferente per il paziente, ed è qui che si evidenzia l'importanza di un allenamento adeguato [68, 69]. Per fortuna, ad oggi la tecnologia ha facilitato molto questo aspetto permettendo di evitare dispendiose sessioni di allenamento con attrezzature costose. Infatti, ad esempio, le tecniche di realtà virtuale possono sostituire le sessioni reali con un'adeguata efficacia, soprattutto se queste comprendono attività interattive e videoludiche [15] [17].

Infine, un limite evidente di tutte le BCI analizzate è quello del numero di comandi. Per quanto possa essere sviluppato un apparato, comunque non può avere la versatilità di un corpo umano naturale. Questo deriva sia da limiti hardware, sia da quelli software, come la completa e corretta interpretazione dei segnali biologici. Un futuro in cui si riesce a distinguere nitidamente le intenzioni di una persona grazie alla comprensione dei segnali neuronali, potrà essere un terreno fertile per l'innovazione nel campo del sostegno alle persone con patologie motorie.

Appendice A

Tabella Riassuntiva

ARTICOLO	ACQUISIZIONE	PARADIGMA	COMANDI	TEST
Ferrero et al.[22], 2022	EEG	MI	Walk	Sano
Kwak et al.[64], 2015	EEG	SSVEPs	Walk+Stand/Sit	Sano
Choi et al.[44], 2019	EEG+EMG	MA	Walk	Sano
Gordleeva et al.[23], 2020	EEG+EMG	MI	Walk+Stand/Sit	Sano
Choi et al.[24], 2020	EEG	MI	Walk+Stand/Sit	Sano
Choi et al.[25], 2020	EEG	MI	Walk+Stand/Sit	Sano
Dong et al.[45], 2020	EEG+EMG	MA	Single Movement	Sano
Ferrero et al.[26], 2023	EEG	MI	Start/Stop	Sano
Jeong et al.[46], 2020	EEG+EMG	MA	Start/Stop	Sano
Ferrero et al.[27], 2022	EEG	MI	Walk	Sano
Ferrero et al.[28], 2022	EEG+EOG	MI	Walk	Spinal Injury
Li et al.[29], 2019	EEG+EMG	MI	Walk	Sano
Gui et al.[55], 2015	EEG	SSVEPs	Walk+Altro	Sano
Ferrero et al.[30], 2021	EEG+EOG	MI	Walk	Sano
Benabid et al.[20], 2019	ECOG	MA	Start/Stop	Spinal Injury
Kwak et al.[56], 2017	EEG	SSVEPs	Dx/Sx+Walk+Stand/Sit	Sano
Ferrero et al.[31], 2021	EEG+EOG	MI	Walk	Sano
Ferrero et al.[32], 2022	EEG	MI	Walk	Sano
Gordleeva et al.[33], 2017	EEG	MI	Dx/Sx	Sano
Formaggio et al.[34], 2017	EEG	MI	Up/Down+Single Movement	Sano
Kilicarslan et al.[47], 2013	EEG	MA	Stand/Sit	Sano
Duan et al.[35], 2019	EEG	MI	Start/Stop	Sano

Tabella A.1: Tabella riassuntiva di tutti gli articoli analizzati (parte 1)

ARTICOLO	ACQUISIZIONE PARADIGMA			COMANDI	TEST
Lee et al.[36], 2017	EEG	MI	Start/Stop+Dx/Sx	Sano	
Li et al.[48], 2020	EEG+EMG	MA	Altro	Sano	
Li et al.[49], 2022	EEG+EMG	MA	Walk+Stand/Sit	Sano	
Wang et al.[37], 2017	EEG	MI	Walk+Stand/Sit	Sano	
Rajasekaran et al.[50], 2018	EEG	MA	Start/Stop	Spinal Injury	
Lopez-Larraz et al.[51], 2016	EEG	MA	Start/Stop	Spinal Injury+Sano	
Zhang et al.[52], 2022	EEG+EMG	MA	Dx/Sx+Walk+Stand/Sit	Sano	
Zheng et al.[57], 2020	EEG	SSVEPs	Walk+Altro	Sano	
Quiles et al.[38], 2020	EEG	MI	Walk	Spinal Injury	
Song et al.[53], 2022	EEG+EMG	MA	Walk+Stand/Sit	Sano	
Quiles et al.[62], 2022	EEG+EOG	OTHER	Altro	Sano	
Zuravska et al.[39], 2022	EEG	MI	Walk	Sano	
Ortiz et al.[40], 2020	EEG	MI	Walk	Sano	
Qi et al.[58], 2021	EEG	SSVEPs	Start/Stop+Altro+Single Movement	Sano	
Zhang et al.[41], 2017	EEG	MI	Start/Stop	Spinal Injury+Sano	
Wang et al.[21], 2018	EEG	MI+SSVEPs	Walk+Stand/Sit	Sano	
Wang et al.[59], 2017	EEG+EMG	SSVEPs	Start/Stop+Stand/Sit	Sano	
Villa-Parra et al.[54], 2015	EEG+EMG	MA	Stand/Sit+Single Movement	Sano	
Vinoj et al.[60], 2019	EEG	SSVEPs	Dx/Sx+Walk+Stand/Sit	Stroke+Sano	
Ortiz et al.[42], 2020	EEG+EOG	MI	Start/Stop	Sano	
Quiles et al.[61], 2023	EEG	OTHER	Start/Stop	Sano	
Rodriguez-Ugarte et al.[43], 2018	EEG	MI	Start/Stop+Walk	Sano	

Tabella A.2: Tabella riassuntiva di tutti gli articoli analizzati (parte 2)

Bibliografia

- [1] Max Roser, Esteban Ortiz-Ospina e Hannah Ritchie. «Life Expectancy». In: *Our World in Data* (2013). <https://ourworldindata.org/life-expectancy>.
- [2] CJ Yang et al. «A review of exoskeleton-type systems and their key technologies». In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 222.8 (2008), pp. 1599–1612.
- [3] Di Shi et al. «A review on lower limb rehabilitation exoskeleton robots». In: *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 32.1 (2019), pp. 1–11.
- [4] *EksosNR - Eksobionics* — eksobionics.com/eksonr/. [Accessed 23-09-2023].
- [5] 2023. URL: [%5Curl%7Bhttps://rewalk.com/%7D](https://rewalk.com/).
- [6] Jonathan R Wolpaw et al. «Brain–computer interfaces for communication and control». In: *Clinical neurophysiology* 113.6 (2002), pp. 767–791.
- [7] José del R Millán. «The human-computer connection: An overview of brain computer interfaces». In: *Metode Science Studies Journal* 9 (2019), pp. 135–141.
- [8] Serafeim Perdikis e Jose del R Millan. «Brain-machine interfaces: a tale of two learners». In: *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine* 6.3 (2020), pp. 12–19.
- [9] Swati Vaid, Preeti Singh e Chamandeep Kaur. «EEG signal analysis for BCI interface: A review». In: *2015 fifth international conference on advanced computing & communication technologies*. IEEE. 2015, pp. 143–147.
- [10] José Del R. Millán et al. «Non-invasive brain-actuated interaction». In: *Advances in Brain, Vision, and Artificial Intelligence: Second International Symposium, BVAI 2007, Naples, Italy, October 10-12, 2007. Proceedings 2*. Springer. 2007, pp. 438–447.

-
- [11] Alexis Ortiz-Rosario e Hojjat Adeli. In: *Reviews in the Neurosciences* 24.5 (2013), pp. 537–552. DOI: doi : 10 . 1515 / revneuro - 2013 - 0032. URL: <https://doi.org/10.1515/revneuro-2013-0032>.
- [12] Inchul Choi et al. «A systematic review of hybrid brain-computer interfaces: Taxonomy and usability perspectives». In: *PloS one* 12.4 (2017), e0176674.
- [13] Mingde Zheng, Michael S Crouch e Michael S Eggleston. «Surface electromyography as a natural human-machine interface: a review». In: *IEEE Sensors Journal* 22.10 (2022), pp. 9198–9214.
- [14] Chama Belkhiria et al. «EOG-Based Human-Computer Interface: 2000–2020 Review». In: *Sensors* 22.13 (2022), p. 4914.
- [15] Maged S. AL-Quraishi et al. «EEG-Based Control for Upper and Lower Limb Exoskeletons and Prostheses: A Systematic Review». In: *Sensors* 18.10 (2018). ISSN: 1424-8220. DOI: 10 . 3390 / s18103342. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3342>.
- [16] Dennis J McFarland et al. «Mu and beta rhythm topographies during motor imagery and actual movements». In: *Brain topography* 12 (2000), pp. 177–186.
- [17] Natasha Padfield et al. «A Comprehensive Review of Endogenous EEG-Based BCIs for Dynamic Device Control». In: *Sensors* 22.15 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22155802. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5802>.
- [18] Zhongfei Bai et al. «Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: A systematic review and meta-analysis». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 17.1 (2020). DOI: 10.1186/s12984-020-00686-2.
- [19] Matthew J Page et al. «The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews». In: *BMJ* 372 (2021). DOI: 10.1136/bmj.n71. eprint: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71.full.pdf>. URL: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n71>.
- [20] A.L. Benabid et al. «An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration». In: *The Lancet Neurology* 18.12 (2019). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 150, pp. 1112–1122. DOI: 10.1016/S1474-4422(19)30321-7. URL: [5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=)

- 2-s2.0-85074232672&doi=10.1016%2fS1474-4422%2819%2930321-7&partnerID=40&md5=2fc338183344c752175d89f1c5357057%7D.
- [21] C. Wang et al. «Implementation of a Brain-Computer Interface on a Lower-Limb Exoskeleton». In: *IEEE Access* 6 (2018). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 55, pp. 38524–38534. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2853628. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049672638&doi=10.1109%2fACCESS.2018.2853628&partnerID=40&md5=76b0d9daa1b95155562be6e5beb73cdb%7D.
- [22] L. Ferrero et al. «Optimal Calibration Time for Lower-Limb Brain–Machine Interfaces». In: *Biosystems and Biorobotics* 28 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 59–64. DOI: 10.1007/978-3-030-70316-5_10. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85116866765&doi=10.1007%2f978-3-030-70316-5_10&partnerID=40&md5=33239d0f8f329b0cf5711d23de1da1e6%7D.
- [23] S.Y. Gordleeva et al. «Real-Time EEG-EMG human-machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton». In: *IEEE Access* 8 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 66, pp. 84070–84081. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991812. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084951867&doi=10.1109%2fACCESS.2020.2991812&partnerID=40&md5=7f8ab6f994fb9ec7e4b857f8bf883dd0%7D.
- [24] J. Choi et al. «Robust Semi-synchronous BCI Controller for Brain-Actuated Exoskeleton System». In: *8th International Winter Conference on Brain-Computer Interface, BCI 2020* (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 5. DOI: 10.1109/BCI48061.2020.9061658. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85084055608&doi=10.1109%2fBCI48061.2020.9061658&partnerID=40&md5=a11e4ec41f160f0767dc987302b647d4%7D.
- [25] J. Choi et al. «Developing a motor imagery-based real-time asynchronous hybrid BCI controller for a lower-limb exoskeleton». In: *Sensors (Switzerland)* 20.24 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 29, pp. 1–15. DOI: 10.3390/s20247309. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098185342&doi=10.3390%2fs20247309&partnerID=40&md5=3b973349d9fe208cdb52167876427d9b%7D.

- [26] L. Ferrero et al. «Brain-computer interface enhanced by virtual reality training for controlling a lower limb exoskeleton». In: *iScience* 26.5 (2023). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0. DOI: 10.1016/j.isci.2023.106675. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85153957001&doi=10.1016%2fj.isci.2023.106675&partnerID=40&md5=26a1dfc8f484e7a0d49d03930b1f79d7%7D.
- [27] L. Ferrero et al. «Adapting EEG based MI-BMI depending on alertness level for controlling a lower-limb exoskeleton». In: *2022 IEEE International Workshop on Metrology for Extended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering, MetroXRINE 2022 - Proceedings* (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 399–403. DOI: 10.1109/MetroXRINE54828.2022.9967639. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85144613383&doi=10.1109%2fMetroXRINE54828.2022.9967639&partnerID=40&md5=7d70a94f88afcacb28661dbd5fe79146%7D.
- [28] L. Ferrero et al. «Assessing user experience with BMI-assisted exoskeleton in patients with spinal cord injury». In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 2022* (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 4064–4067. DOI: 10.1109/EMBC48229.2022.9870982. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85138127102&doi=10.1109%2fEMBC48229.2022.9870982&partnerID=40&md5=31249d33b75d1067baa328b7f0e9a68d%7D.
- [29] Z. Li et al. «Hybrid Brain/Muscle Signals Powered Wearable Walking Exoskeleton Enhancing Motor Ability in Climbing Stairs Activity». In: *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics* 1.4 (2019). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 95, pp. 218–227. DOI: 10.1109/TMRB.2019.2949865. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078316705&doi=10.1109%2fTMRB.2019.2949865&partnerID=40&md5=2365c8e11c129a60406e528a056163e0%7D.
- [30] L. Ferrero et al. «Brain symmetry analysis during the use of a BCI based on motor imagery for the control of a lower-limb exoskeleton». In: *Symmetry* 13.9 (2021). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 6. DOI: 10.3390/sym13091746. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/

- record.uri?eid=2-s2.0-85115877801&doi=10.3390%2fsym13091746&partnerID=40&md5=a35651df80433f54e82c5b7963392826%7D.
- [31] L. Ferrero et al. «A BMI based on motor imagery and attention for commanding a lower-limb robotic exoskeleton: A case study». In: *Applied Sciences (Switzerland)* 11.9 (2021). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 10. DOI: 10.3390/app11094106. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85105674928&doi=10.3390%2fapp11094106&partnerID=40&md5=c265c761b6d516c3c4605536540e6332%7D.
- [32] L. Ferrero et al. «Inter-session Transfer Learning in MI Based BCI for Controlling a Lower-Limb Exoskeleton». In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 13259 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 2, pp. 243–252. DOI: 10.1007/978-3-031-06527-9_24. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85132119306&doi=10.1007%2f978-3-031-06527-9_24&partnerID=40&md5=147c655586a8a15a3764a3d0ad3ebc89%7D.
- [33] S.Y. Gordleeva et al. «Exoskeleton control system based on motor-imaginary brain-computer interface». In: *Sovremennye Tehnologii v Medicine* 9.3 (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 28, pp. 31–36. DOI: 10.17691/stm2017.9.3.04. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029762747&doi=10.17691%2fstm2017.9.3.04&partnerID=40&md5=36ce1d4fadf2e2d434fb59dad1553fe9%7D.
- [34] E. Formaggio et al. «Quantitative EEG Evaluation during Robot-Assisted Foot Movement». In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 25.9 (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 33, pp. 1633–1640. DOI: 10.1109/TNSRE.2016.2627058. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029593435&doi=10.1109%2fTNSRE.2016.2627058&partnerID=40&md5=1ec259c9f9888e9358ac8c8baa59bc4a%7D.
- [35] S. Duan et al. «Haptic and visual enhance-based motor imagery BCI for rehabilitation lower-limb exoskeleton». In: *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2019* (2019). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 5, pp. 2025–2030. DOI: 10.1109/ROBIO49542.2019.8961721.

- URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85079056271&doi=10.1109%2fROBI049542.2019.8961721&partnerID=40&md5=d82d15944e5e110ba3884a073507ce50%7D.
- [36] K. Lee et al. «A brain-controlled exoskeleton with cascaded event-related desynchronization classifiers». In: *Robotics and Autonomous Systems* 90 (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 91, pp. 15–23. DOI: 10.1016/j.robot.2016.10.005. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014544448&doi=10.1016%2fj.robot.2016.10.005&partnerID=40&md5=dc2b0be35a5aa5f74668618075d679d4%7D.
- [37] Z. Wang et al. «A control system of lower limb exoskeleton robots based on motor imagery». In: *2017 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2017* (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 3, pp. 311–316. DOI: 10.1109/ICInfA.2017.8078925. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85039965659&doi=10.1109%2fICInfA.2017.8078925&partnerID=40&md5=a7ec2ecd83e51cb6f073afca40948066%7D.
- [38] V. Quiles et al. «Usability and acceptance of using a lower-limb exoskeleton controlled by a BMI in incomplete spinal cord injury patients: A case study». In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS 2020* (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 3, pp. 4737–4740. DOI: 10.1109/EMBC44109.2020.9175738. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091030389&doi=10.1109%2fEMBC44109.2020.9175738&partnerID=40&md5=319fb8ce04daebaaa994687b840b7c6a%7D.
- [39] A. Zuravska e L.A. Stankevich. «Application of a Non-invasive Interface “Brain-Computer” for Classification of Imaginary Movements». In: *Lecture Notes in Networks and Systems* 442 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 1, pp. 512–521. DOI: 10.1007/978-3-030-98832-6_45. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85128888154&doi=10.1007%2f978-3-030-98832-6_45&partnerID=40&md5=0962223454e40ecac09dc9e0fa89607c%7D.
- [40] M. Ortiz et al. «Sensory Integration in Human Movement: A New Brain-Machine Interface Based on Gamma Band and Attention Level for Con-

- trolling a Lower-Limb Exoskeleton». In: *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 8 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 17. DOI: 10.3389/fbioe.2020.00735. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091023299&doi=10.3389%2ffbioe.2020.00735&partnerID=40&md5=f4fb19a0ff3031ba301ae256a51eba8d%7D.
- [41] Y. Zhang et al. «Multiple kernel based region importance learning for neural classification of gait states from EEG signals». In: *Frontiers in Neuroscience* 11 (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 39. DOI: 10.3389/fnins.2017.00170. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018374686&doi=10.3389%2ffnins.2017.00170&partnerID=40&md5=44c4abae566bc532f637a9300a2eca39%7D.
- [42] M. Ortiz et al. «Analysis of the EEG Rhythms Based on the Empirical Mode Decomposition During Motor Imagery When Using a Lower-Limb Exoskeleton. A Case Study». In: *Frontiers in Neurorobotics* 14 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 15. DOI: 10.3389/fnbot.2020.00048. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85090761092&doi=10.3389%2ffnbot.2020.00048&partnerID=40&md5=7b7939ea789427918aa632c9428d180c%7D.
- [43] M. Rodríguez-Ugarte et al. «Improving Real-Time Lower Limb Motor Imagery Detection Using tDCS and an Exoskeleton». In: *Frontiers in Neuroscience* 12 (2018). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 18. DOI: 10.3389/fnins.2018.00757. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078243299&doi=10.3389%2ffnins.2018.00757&partnerID=40&md5=f9c44882650ee557e7e34fc9bab4dbd1%7D.
- [44] J. Choi e H. Kim. «Real-Time Decoding of EEG Gait Intention for Controlling a Lower-limb Exoskeleton System». In: *7th International Winter Conference on Brain-Computer Interface, BCI 2019* (2019). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 13. DOI: 10.1109/IWW-BCI.2019.8737311. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068331582&doi=10.1109%2fIWW-BCI.2019.8737311&partnerID=40&md5=0c1af3a08e410714139c97a2da23a35a%7D.
- [45] R. Dong et al. «A Virtual Induction Approach for EEG Signal of Patient Movement Intention with Lower Limb Motion Assisted Robot». In: *10th IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Con-*

- trol and Intelligent Systems, CYBER 2020* (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 354–359. DOI: 10.1109/CYBER50695.2020.9279128. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099064118&doi=10.1109%2fCYBER50695.2020.9279128&partnerID=40&md5=5e65b0b36d5018f4005e64a019469f6b%7D.
- [46] J.-H. Jeong et al. «Decoding Movement-Related Cortical Potentials Based on Subject-Dependent and Section-Wise Spectral Filtering». In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 28.3 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 70, pp. 687–698. DOI: 10.1109/TNSRE.2020.2966826. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081934606&doi=10.1109%2fTNSRE.2020.2966826&partnerID=40&md5=d655f6e135ec6a0ec1de204944efbaa9%7D.
- [47] A. Kilicarslan et al. «High accuracy decoding of user intentions using EEG to control a lower-body exoskeleton». In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS* (2013). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 162, pp. 5606–5609. DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610821. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84886508188&doi=10.1109%2fEMBC.2013.6610821&partnerID=40&md5=38fed873057a68044367bf3ef7e5f201%7D.
- [48] M. Li et al. «A Hierarchical Fusion Strategy Based on EEG and sEMG for Human-Exoskeleton System». In: *2020 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, RCAR 2020* (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 4, pp. 458–463. DOI: 10.1109/RCAR49640.2020.9303041. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85099353520&doi=10.1109%2fRCAR49640.2020.9303041&partnerID=40&md5=40cc6bbeaaccd4bae3b27082ec35b319%7D.
- [49] W. Li et al. «Preliminary study of online real-time control system for lower extremity exoskeletons based on EEG and sEMG fusion». In: *2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2022* (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 1689–1694. DOI: 10.1109/ROBIO55434.2022.10011813. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85147334177&

- doi = 10 . 1109 % 2fROBIO55434 . 2022 . 10011813 & partnerID = 40 & md5 = 998ae5a0fa9365e4484b72fba5a24b03%7D.
- [50] V. Rajasekaran et al. «Volition-adaptive control for gait training using wearable exoskeleton: Preliminary tests with incomplete spinal cord injury individuals». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 15.1 (2018). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 15. DOI: 10 . 1186 / s12984 - 017 - 0345 - 8. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042614884&doi=10.1186%2fs12984-017-0345-8&partnerID=40&md5=9651334ed04f1500cbfb57d1e5e98e96%7D.
- [51] E. López-Larraz et al. «Control of an ambulatory exoskeleton with a brain-machine interface for spinal cord injury gait rehabilitation». In: *Frontiers in Neuroscience* 10 (2016). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 86. DOI: 10.3389/fnins.2016.00359. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988447849&doi=10.3389%2ffnins.2016.00359&partnerID=40&md5=f8f1a76e7814b456ea6ad1dc75203e9c%7D.
- [52] X. Zhang et al. «Electroencephalogram and surface electromyogram fusion-based precise detection of lower limb voluntary movement using convolution neural network-long short-term memory model». In: *Frontiers in Neuroscience* 16 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0. DOI: 10.3389/fnins.2022.954387. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85140058304&doi=10.3389%2ffnins.2022.954387&partnerID=40&md5=baa906835183bb940ae28eb7919ac2c5%7D.
- [53] G. Song et al. «An EEG-EMG-Based Motor Intention Recognition for Walking Assistive Exoskeletons». In: *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 13455 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0, pp. 769–781. DOI: 10 . 1007 / 978 - 3 - 031 - 13844 - 7 _ 71. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85135775088&doi=10.1007%2f978-3-031-13844-7_71&partnerID=40&md5=7ee9228154db4a1ab5cd497d2051d64e%7D.
- [54] A.C. Villa-Parra et al. «Towards a Robotic Knee Exoskeleton Control Based on Human Motion Intention through EEG and sEMG signals». In: *Procedia Manufacturing* 3 (2015). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 29, pp. 1379–1386. DOI: 10 . 1016 / j . promfg . 2015 . 07 . 296. URL: %5Curl%

- 7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85009961944&doi=10.1016%2fj.promfg.2015.07.296&partnerID=40&md5=b265c99cf106e5b999c89e00812a4126%7D.
- [55] K. Gui, Y. Ren e D. Zhang. «Online brain-computer interface controlling robotic exoskeleton for gait rehabilitation». In: *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics 2015* (2015). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 9, pp. 931–936. DOI: 10.1109/ICORR.2015.7281323. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946072648&doi=10.1109%2fICORR.2015.7281323&partnerID=40&md5=d8eeaac1891894cc3ccb8171f7d126da%7D.
- [56] N.-S. Kwak, K.-R. Müller e S.-W. Lee. «A convolutional neural network for steady state visual evoked potential classification under ambulatory environment». In: *PLoS ONE* 12.2 (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 189. DOI: 10.1371/journal.pone.0172578. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85013356387&doi=10.1371%2fjournal.pone.0172578&partnerID=40&md5=e0820dbbae650b2bb861ee15ea50b3f7%7D.
- [57] Y. Zheng et al. «Research on motion pattern recognition of exoskeleton robot based on multimodal machine learning model». In: *Neural Computing and Applications* 32.7 (2020). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 26, pp. 1869–1877. DOI: 10.1007/s00521-019-04567-1. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074630749&doi=10.1007%2fs00521-019-04567-1&partnerID=40&md5=e058f9dedc9904a32fa6f9439c4b7fe2%7D.
- [58] Z. Qi et al. «Lower Limb Rehabilitation Exoskeleton Control based on SSVEP-BCI». In: *Proceedings of the 16th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2021* (2021). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 3, pp. 1954–1959. DOI: 10.1109/ICIEA51954.2021.9516146. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85115448943&doi=10.1109%2fICIEA51954.2021.9516146&partnerID=40&md5=c44a7ddb6341f6a9cedce35950ee47cd%7D.
- [59] Z. Wang et al. «Implementation of brain-computer interface based on SSVEP for control of a lower-limb exoskeleton». In: *2016 IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE ICIA 2016* (2017). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 3, pp. 1882–1886. DOI:

- 10.1109/ICInfA.2016.7832126. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85015731048&doi=10.1109%2fICInfA.2016.7832126&partnerID=40&md5=ae5d6d72dc972484ec4e9a7b14845038%7D.
- [60] P.G. Vinoj et al. «Brain-controlled adaptive lower limb exoskeleton for rehabilitation of post-stroke paralyzed». In: *IEEE Access* 7 (2019). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 49, pp. 132628–132648. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921375. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85073536612&doi=10.1109%2fACCESS.2019.2921375&partnerID=40&md5=7080762a99c946e59f6ba63011f7fbed%7D.
- [61] V. Quiles et al. «Brain-machine interface based on transfer-learning for detecting the appearance of obstacles during exoskeleton-assisted walking». In: *Frontiers in Neuroscience* 17 (2023). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 0. DOI: 10.3389/fnins.2023.1154480. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150998636&doi=10.3389%2ffnins.2023.1154480&partnerID=40&md5=67094f6fbf0f95629aa7af2fea918163%7D.
- [62] V. Quiles et al. «Detecting the Speed Change Intention from EEG Signals: From the Offline and Pseudo-Online Analysis to an Online Closed-Loop Validation». In: *Applied Sciences (Switzerland)* 12.1 (2022). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 3. DOI: 10.3390/app12010415. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85122081280&doi=10.3390%2fapp12010415&partnerID=40&md5=204e5c75fba4e790ac63cf02b4c19a80%7D.
- [63] Henri Lorach et al. «Walking naturally after spinal cord injury using a brain–spine interface». In: *Nature* (2023), pp. 1–8.
- [64] N.-S. Kwak, K.-R. Müller e S.-W. Lee. «A lower limb exoskeleton control system based on steady state visual evoked potentials». In: *Journal of Neural Engineering* 12.5 (2015). Export Date: 29 July 2023; Cited By: 161. DOI: 10.1088/1741-2560/12/5/056009. URL: %5Curl%7Bhttps://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84945219076&doi=10.1088%2f1741-2560%2f12%2f5%2f056009&partnerID=40&md5=1e96f85711abd6be5f65513a1af3673d%7D.

- [65] Luca Tonin et al. «The role of shared-control in BCI-based telepresence». In: *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. IEEE. 2010, pp. 1462–1466.
- [66] Stefano Tortora et al. «Continuous Teleoperation of a Robotic Manipulator via Brain-Machine Interface with Shared Control». In: *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE. 2022, pp. 1–8.
- [67] Andrea Bonarini et al. «Introducing lurch: a shared autonomy robotic wheelchair with multimodal interfaces». In: *Proceedings of IROS 2012 workshop on progress, challenges and future perspectives in navigation and manipulation assistance for robotic wheelchairs*. 2012, pp. 1–6.
- [68] Serafeim Perdikis et al. «The Cybathlon BCI race: Successful longitudinal mutual learning with two tetraplegic users». In: *PLoS biology* 16.5 (2018), e2003787.
- [69] Stefano Tortora et al. «Neural correlates of user learning during long-term BCI training for the Cybathlon competition». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 19.1 (2022), pp. 1–19.