



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

“IL FEEDBACK SENSORIALE NELLE PROTESI AGLI ARTI”

Relatore: Prof. Augusto Ferrante

Laureando: Daniel Beretta

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea: 14 marzo 2022

Sommario

1 Introduzione	2
1.1 Outline: obiettivi e struttura	2
1.2 Panoramica generale della situazione odierna	3
1.3 Dispositivo ottimale per il ripristino del feedback sensoriale	4
2 Feedback sensoriale	6
2.1 Nervi periferici somatosensoriali	6
2.2 Metodi di approccio	8
2.2.1 Metodi di approccio invasivi	8
2.2.2 Metodi di approccio non invasivi	11
2.3 Applicazioni di arti bionici	13
2.3.1 Ripristino del feedback sensoriale per le estremità degli arti superiori	13
2.3.2 Ripristino del feedback sensoriale per le estremità degli arti inferiori	14
3 Case study: B:Ionic Glove	16
3.1 Funzionamento	16
3.2 Design	16
3.3 Conclusioni	17
4 Prospettive future	18
Bibliografia	19

1 Introduzione

1.1 Outline: obiettivi e struttura

La seguente indagine si pone come obiettivo quello di portare alla luce gli studi più recenti sull'implementazione di feedback sensoriali alle protesi bioniche.

Dopo aver effettuato un'attenta ricerca bibliografica e aver selezionato gli articoli di maggior pertinenza, questi verranno esposti per trattare l'argomento il più chiaramente possibile.

Verrà inoltre presentato un case-study molto recente sullo sviluppo di un dispositivo che permette il feedback sensoriale nelle protesi agli arti superiori.

1.2 Panoramica generale della situazione odierna

La perdita di un arto a seguito di un'amputazione modifica drasticamente lo stile di vita di una persona. Sia le funzioni motorie che quelle sensoriali vengono perse, provocando difficoltà nel compiere anche le attività quotidiane più basilari.

Il senso del tatto è essenziale per l'esperienza umana e l'assenza di sensibilità è una conseguenza inevitabile della perdita di un arto.

Le protesi agli arti superiori ed inferiori attualmente disponibili non forniscono informazioni sensoriali tattili sull'interazione con oggetti o movimenti, obbligando gli utilizzatori a basarsi sulla vista e sull'udito per svolgere qualsiasi tipo di attività.

I mutilati agli arti inferiori, poiché non sono in grado di percepire quando la protesi si imbatte in un ostacolo, possono essere soggetti a pericolose cadute o a difficoltà nel mantenere la simmetria mentre si trovano in posizione eretta o mentre camminano [1]. Inoltre possono percepire un aumento del costo metabolico conseguente alla normale attività fisica, il quale può portare a una ridotta mobilità e a un maggior rischio di infarto.

Il feedback sensoriale viene citato dai mutilati agli arti superiori come una delle caratteristiche principali mancanti nelle protesi commerciali, in quanto, se fosse presente, permetterebbe di migliorare il controllo della forza nell'afferrare gli oggetti e porterebbe alla concreta percezione della protesi come parte integrante del proprio corpo da parte dell'individuo [2]. Inoltre, la mancanza del feedback fisiologico tra l'estremità rimanente dell'arto amputato e il cervello, genera la sindrome dell'arto fantasma (*phantom limb pain*).

Tutte queste limitazioni sono responsabili di un alto tasso di rigetto e di abbandono dei dispositivi protesici da parte dei mutilati, rendendo più complessa la reintegrazione completa nella società agli utilizzatori di protesi [3].

Proprio per i motivi sopra citati sono in corso numerosi studi e ricerche riguardanti l'implementazione di protesi agli arti dotate di feedback sensoriali in grado di favorire e migliorare lo stile di vita dei mutilati. Molteplici studi basati sull'utilizzo di approcci sia invasivi che non invasivi mostrano risultati promettenti riguardo il ripristino del feedback sensoriale. Tuttavia, attualmente, tali stimoli sono per lo più limitati a case report o a esperimenti di laboratorio.

1.3 Dispositivo ottimale per il ripristino del feedback sensoriale

Il ripristino del feedback sensoriale consente ai mutilati di riabilitare la sensibilità nelle interazioni corpo-ambiente o il movimento effettivo del dispositivo. Il meccanismo di funzionamento del feedback sensoriale artificiale è ispirato al sistema somatosensoriale dei mammiferi, in cui i recettori della pelle o dei muscoli trasducono gli stimoli interni o esterni in segnali elettrici che viaggiano verso il cervello.

Per realizzare un sistema di feedback sensoriale artificiale, un set di sensori viene aggiunto alla protesi utilizzando un guanto, un calzino o una soletta. Questi sensori misurano la pressione applicata alla protesi (tocco) e il movimento delle sue articolazioni (propriocezione). Le letture dei sensori sono ottenute da un controller, che le trasduce in parametri di stimolazione elettrica attraverso una mappatura dedicata tra segnali sensoriali artificiali e naturali (algoritmi di codifica sensoriale). I parametri di stimolazione vengono inviati a uno stimolatore che suscita le sensazioni percepite dall'utilizzatore della protesi.

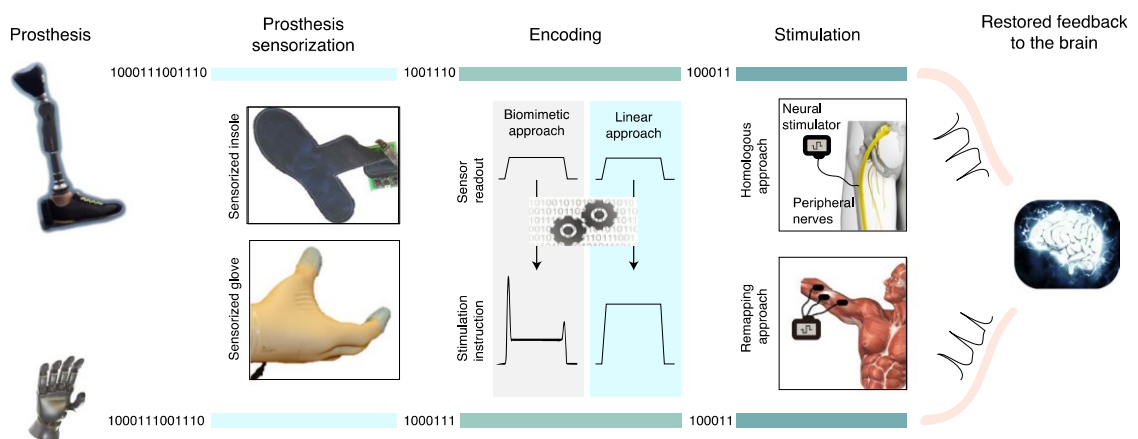


Fig. 1: Principio di funzionamento di un dispositivo per il ripristino del feedback sensoriale.

Un dispositivo di ripristino del feedback sensoriale ottimale dovrebbe evocare sensazioni simili a quelle percepite dall'arto intatto, in termini di qualità e posizione. La capacità della neuroprotesi sensoriale di evocare sensazioni che corrispondono alla qualità dello stimolo esterno è descritta come omologia, mentre la capacità di evocare sensazioni che corrispondono alla posizione è indicata come somatotopia. L'omologia e la somatotopia massimizzano la facilità d'uso e l'accettazione del dispositivo [4]. Di conseguenza, il mutilato non deve dedicare lunghi periodi di addestramento per interpretare gli input del dispositivo.

Infine, in un dispositivo di ripristino del feedback sensoriale ottimale, tutta la comunicazione tra controller, stimolatore e sensori della protesi deve avvenire con un ritardo impercettibile (come nel sistema somatosensoriale dei mammiferi).

2 Feedback sensoriale

2.1 Nervi periferici somatosensoriali

I nervi periferici umani sono strutture simili a cavi in cui gli assoni sono raggruppati attraverso sottili strati protettivi di tessuto connettivo (chiamato endonervio). Gruppi di assoni sono organizzati in fascicoli, che a loro volta sono disposti in fasci. Il nervo stesso è avvolto in una guaina di tessuto connettivo (chiamata epinervio), che è collegato in modo lasco ai fasci interni, consentendo ai fascicoli di muoversi. Il nervo può quindi deformarsi sotto una pressione esterna.

Le fibre afferenti trasmettono le informazioni dalla periferia al cervello e le fibre efferenti dal cervello alla periferia. Le afferenze sono collegate alla periferia attraverso diversi *sensori* corporei: meccanocettori cutanei, propriocettori e nocicettori. I meccanocettori cutanei trasducono gli stimoli tattili applicati sulla pelle in segnali per il cervello che viaggiano lungo le fibre afferenti (chiamate anche fibre tattili).

Esistono quattro tipi di fibre tattili e sono collegate a quattro diversi meccanocettori nella pelle glabra. Le fibre di tipo I (FAI) e di tipo II (FAII) ad adattamento rapido, rispondono solo durante le fasi dinamiche della deformazione tissutale (ad esempio, quando c'è contatto con una superficie). Di conseguenza, la stimolazione elettrica intraneurale di queste afferenze di solito suscita la percezione di picchietti intermittenti [5].

Le fibre di tipo I (SAI) e di tipo II (SAII) ad adattamento lento, rispondono a deformazioni prolungate della pelle. Le fibre SAI codificano cambiamenti statici a bassa frequenza nella deformazione tissutale (ad esempio, mantenendo il contatto con una superficie) ed evocano sensazioni di pressione sostenuta con stimolazione elettrica. Le fibre SAII codificano per stiramenti cutanei e generalmente, quando stimulate, non suscitano sensazioni.

Le fibre FAI sono le più numerose. Le fibre di tipo I hanno campi recettivi più piccoli rispetto alle afferenze di tipo II. Le afferenze innervano la pelle progressivamente, maggiormente verso la parte distale delle estremità.

Le afferenze tattili inviano messaggi al sistema nervoso centrale in due modi: il codice di frequenza (l'intensità di uno stimolo è proporzionale all'attività di una fibra) e il codice di popolazione (l'intensità di uno stimolo è proporzionale al numero di fibre attivate). Queste strategie vengono utilizzate, ad esempio, per trasmettere le informazioni sull'intensità di uno stimolo. Combinazioni o variazioni di queste strategie vengono adottate per fornire al cervello caratteristiche tattili più sofisticate. Ad esempio, le lettere in rilievo sono codificate attraverso un codice spaziale: sottogruppi di fibre si attivano quando entrano in contatto con una

protuberanza su un oggetto, mentre altri no. Strutture molto piccole vengono comunicate al cervello attraverso un codice temporale (cioè una sequenza esatta di picchi). La forza o la forma del contatto diretto sono codificate dal codice di latenza dei picchi: due gruppi di fibre si attivano con una latenza specifica [6].

I propriocettori sono responsabili della sensibilità della postura e del movimento del tronco e degli arti, nonché della percezione della forza. Esistono tre tipi principali di fibra propriocettiva nei muscoli che sono collegati a due principali propriocettori [7]. Le fibre di tipo Ia sono collegate ai fusi muscolari (che sono incorporati nelle fibre muscolari e costituiscono la maggior parte del muscolo) e forniscono informazioni sulla lunghezza del muscolo e sulla velocità della sua variazione. Le fibre di tipo II sono simili alle fibre di tipo Ia ma codificano solo per la lunghezza del muscolo. Le fibre di tipo Ib sono collegate agli organi tendinei del Golgi (incorporati nei tendini) e danno informazioni sulla forza esercitata dai muscoli. La stimolazione di queste fibre spesso non suscita sensazioni. Questi propriocettori possono essere attivati o inibiti attraverso vibrazioni sui tendini muscolari. I recettori articolari sono collegati ad afferenze che si adattano lentamente ed evocano una sensazione di spostamento o una sensazione profonda dall'articolazione quando presi di mira con la stimolazione elettrica [8].

2.2 Metodi di approccio

Esistono due tipi di approccio principali per il ripristino del feedback sensoriale: quello invasivo, che comprende obbligatoriamente un intervento chirurgico, e quello non invasivo, che non necessita di interventi complessi.

2.2.1 Metodi di approccio invasivi

Ci sono tre principali approcci di feedback sensoriale invasivo: reinnervazione sensoriale mirata, stimolazione diretta del sistema nervoso periferico e stimolazione del sistema nervoso centrale. La stimolazione diretta del nervo periferico è meglio compresa e tradotta nella corteccia somatosensoriale, fornendo una sensazione più naturale. Tuttavia, è anche possibile evocare sensazioni e proprietà simili a quelle naturali della protesi mediante stimolazione diretta del sistema nervoso centrale.

Reinnervazione sensoriale mirata

La reinnervazione mirata è una tecnica chirurgica in cui i nervi di una mano amputata vengono trasferiti ai nervi più prossimali che innervano i muscoli. I segnali mioelettrici di questi muscoli vengono quindi utilizzati per alimentare il movimento volontario di un braccio robotico. I nervi trasposti innervano anche la pelle sovrastante i muscoli interessati, conferendo varie proprietà sensoriali di una mano mancante, consentendo così di utilizzare questa area cutanea come interfaccia [9]. Questo approccio ha inoltre il vantaggio di un intervento chirurgico più preciso. I nervi sensoriali reindirizzati innervano la pelle del braccio rimanente fornendo una sensazione più dettagliata e diffusa delle aree perse della mano. Case report hanno mostrato la possibilità di un flusso bidirezionale di informazioni del nervo periferico e di un miglioramento del controllo delle protesi mioelettriche.

I vantaggi dimostrati sono: assenza di corpi estranei, sensazione più naturale rispetto a quella evocata dalla stimolazione elettrica artificiale e stabilità a lungo termine. Tuttavia, gli svantaggi di questo approccio sono: la disorganizzazione della rappresentazione somatotopica della mappa della mano, imprevedibilità del pattern di reinnervazione cutanea e nessun feedback propriocettivo [10].

Stimolazione diretta del sistema nervoso periferico

Sono stati sviluppati vari elettrodi per interfacciarsi direttamente con i nervi periferici. Gli elettrodi vengono impiantati mediante intervento chirurgico attorno o all'interno del nervo e la corrente, che trasporta le informazioni, viene applicata al nervo. Questo approccio consente agli impulsi sensoriali diretti prodotti dalla macchina di essere trasmessi attraverso i nervi che evocano il feedback sensoriale. A seconda dell'invasività, sono noti tre tipi principali di elettrodi: extra-neurale, intra-neurale e rigenerativo. Con l'aumento dell'invasività, è necessaria una minore intensità del segnale e una maggiore selettività delle fibre nervose stimulate. Tuttavia, con una maggiore selettività, la stabilità dell'elettrodo che interagisce con una popolazione di fibre identica diminuisce.

Elettrodi extra-neurali

Gli elettrodi extra neurali, come la cuffia e gli elettrodi epineurali, circondano il nervo e forniscono una notevole area di contatto intorno alla cuffia, permettendo di stimolare un numero considerevole di assoni largamente mielinizzati vicino alla superficie del nervo. Un'altra versione di un elettrodo esterno è un elettrodo nervoso a interfaccia piatta (FINE: *fine interface nerve electrode*), che fornisce un numero maggiore di superfici attive in tutta la cuffia, garantendo così un contatto migliore e un'attivazione più selettiva delle fibre [11]. Sebbene questo tipo di elettrodo causi meno danni al nervo, è necessaria una maggiore stimolazione della corrente per suscitare la sensazione. Inoltre, una corrente più elevata attiva un numero maggiore di fasci diminuendo la selettività e limitando l'accuratezza e la precisione della sensazione evocata. Infatti, un numero maggiore di fascicoli attivati in modo sincrono può portare a sensazioni innaturali e parestesie.

Elettrodi intra-neurali

Esistono vari elettrodi intra-neurali, i quali si differenziano principalmente nella densità e nella disposizione degli elettrodi. Alcune delle interfacce più note sono l'elettrodo intra-fascicolare longitudinale (LIFE: *longitudinal intra-fascicular electrode*), dove i contatti sono posti parallelamente al nervo, l'elettrodo multicanale intra-fascicolare trasversale (TIME: *transversal intra-fascicular multichannel electrode*), dove i contatti sono posti perpendicolari al nervo e la rete di elettrodi inclinati dello Utah (USEA: *Utah slanted electrode array*), dove più reti di contatti parallele penetrano perpendicolarmente nei nervi a diverse profondità [12]. Le interfacce intra-fascicolari vengono inserite direttamente nel nervo, consentendo l'accesso a

diversi gruppi di fascicoli attraverso il nervo. L'elettrodo ha un contatto più stretto con le fibre nervose e la soglia per evocare il potenziale è ridotta ed è necessaria una corrente di stimolazione più bassa, consentendo di attivare diversi fasci in modo più selettivo. Una maggiore selettività si traduce in un feedback più naturale e più preciso. Uno svantaggio, tuttavia, è l'invasività della procedura che può portare a un grado più elevato di danno nervoso. Un altro problema è la stabilità a lungo termine che è compromessa a causa dell'interruzione dei contatti tra l'elettrodo e le fibre nervose.

Elettrodi rigenerativi

Gli elettrodi rigenerativi vengono impiantati tra due estremità nervose, in modo simile a un innesto nervoso. Tuttavia, invece di utilizzare un innesto biologico, viene utilizzato un setaccio di materiale artificiale per chiudere lo spazio tra le estremità nervose. Il setaccio ha un gran numero di fori attraverso i quali le fibre nervose trattate si rigenerano, creando piccoli fasci e massimizzando così l'area di contatto con gruppi di fascicoli separati. Il meccanismo permette quindi di stimolare gli assoni in modo altamente selettivo. L'approccio appena descritto aumenta la percezione di una sensazione naturale. Inoltre, diminuendo le dimensioni e aumentando il numero di fori si può ottenere una risoluzione ancora più elevata. Questa procedura è molto invasiva e conduce a danni ai nervi e possibile degrado a lungo termine. Inoltre, a causa della ricrescita dei nervi attraverso il setaccio, per osservare i primi risultati positivi sono richiesti diversi mesi.

Stimolazione del sistema nervoso centrale

Le interfacce cervello-macchina vengono utilizzate per trasmettere l'attività dei neuroni corticali a dispositivi esterni, come le braccia protesiche. La stimolazione diretta della corteccia somatosensoriale tramite elettrodi impiantati può anche fornire il senso di proprietà dell'arto artificiale. I microelettrodi vengono impiantati nella corteccia somatosensoriale e, successivamente alla stimolazione, trasmettono informazioni sul tocco e sulla pressione nelle rispettive aree della mano.

Sebbene l'elevata invasività di queste procedure comporti grandi rischi chirurgici, la stimolazione diretta della corteccia somatosensoriale mostra che il sistema nervoso periferico può essere bypassato. Questi studi suggeriscono che le schiere di microelettrodi intra-corticali potrebbero essere utilizzate per il feedback delle neuroprotesi per aumentare il controllo motorio e la manipolazione degli oggetti [13]. Tuttavia, gli impianti possono avere vita breve e possono non funzionare correttamente se staccati o spostati dalla corteccia.

2.2.2 Metodi di approccio non invasivi

Esistono diversi metodi per il ripristino del feedback sensoriale tramite approcci non invasivi: feedback meccanotattile, vibrotattile e elettrotattile. Un altro metodo che può essere classificato come non invasivo è la simulazione della realtà aumentata. Questi metodi producono un feedback sensoriale in misura limitata. Tuttavia, sono ancora in fase di sviluppo, in quanto, nello stato attuale, non garantiscono risultati soddisfacenti.

Stimolazione meccanotattile

La stimolazione meccanotattile è un meccanismo di feedback che utilizza la pressione o l'allungamento della pelle per trasmettere informazioni tattili. A seconda della tipologia e delle caratteristiche della pressione applicata su qualsiasi area della pelle, viene stimolato il senso del tatto e la percezione delle caratteristiche degli oggetti, come durezza o morbidezza.

Stimolazione vibrotattile

La tecnica vibrotattile è uno dei sistemi di feedback sensoriale più utilizzati. Le informazioni tattili, riguardanti la forza di pressione o la posizione, vengono trasmesse dai sensori posizionati nella protesi a un dispositivo vibrante posizionato sulla pelle degli utilizzatori.

Il feedback vibrotattile può essere utilizzato per fornire informazioni su: forza di presa, punto di contatto, velocità della mano, propriocezione e consistenza di un oggetto [14].

Stimolazione elettrotattile

La stimolazione elettrotattile fornisce un feedback sensoriale erogando corrente elettrica attraverso la pelle. La stimolazione elettrica viene utilizzata per suscitare: pressione, forza di presa e sensazione di scivolamento. Il feedback elettrotattile consente all'utente di analizzare la forza di presa, migliorando così il controllo della protesi mioelettrica. Inoltre, il feedback elettrotattile permette di moderare più accuratamente la forza di presa necessaria al sollevamento di oggetti leggeri e pesanti.

Simulazione della realtà virtuale

La simulazione della realtà virtuale viene utilizzata principalmente per trattare il dolore dell'arto fantasma per gli amputati. In questa simulazione, vengono utilizzati degli occhiali tridimensionali per ritrarre un'immagine dell'arto perso a un paziente. Il software di realtà virtuale consente a un mutilato di vedere i movimenti della parte del corpo mancante. La corteccia visiva viene stimolata e il cervello viene indotto con l'inganno a credere a una realtà alternativa. Questo metodo fornisce lo stimolo necessario affinché i processi di neuroplasticità abbiano luogo [15].

2.3 Applicazioni di arti bionici

L'amputazione degli arti provoca la perdita dei recettori delle estremità e quindi degli organi sensoriali che interagiscono con l'ambiente. Tuttavia, i nervi somatosensoriali e le vie che convogliano le informazioni sensoriali al sistema nervoso centrale rimangono funzionanti.

Per il ripristino di queste funzioni vengono utilizzati i metodi di approccio visti nel paragrafo precedente.

2.3.1 Ripristino del feedback sensoriale per le estremità degli arti superiori

Le interfacce neurali per il ripristino del feedback sensoriale sono state sfruttate per la prima volta nel 2004, utilizzando cavi LIFE impiantati nei nervi mediano e ulnare di otto amputati transmerali. Questi studi hanno dimostrato che le sensazioni somatotopiche possono essere suscitate dalla mano mancante. L'intensità della sensazione suscitata può essere modulata aumentando la frequenza o l'ampiezza della neurostimolazione [16].

Nel 2010, a un amputato transradiale è stato impiantato un LIFE a film sottile, il quale ha suscitato sensazioni percepite sulla mano fantasma [17].

Il successivo sfruttamento del feedback artificiale, fornito da cavi LIFE, è stato implementato in una mano protesica, consentendo agli amputati di identificare le dimensioni e la rigidità di diversi oggetti con una protesi mioelettrica, in assenza di segnali visivi o uditivi.

Più recentemente, i LIFE a base di polimeri sono stati testati con successo sull'uomo.

TIME, FINE ed elettrodi a cuffia hanno dimostrato di essere interfacce neurali efficaci e funzionali, fornendo feedback sensoriale negli amputati degli arti superiori. Utilizzando la stimolazione neurale fornita attraverso TIME, un amputato è stato in grado di identificare la posizione, la forma e la conformità dell'oggetto. Inoltre, con FINE e TIME, è stato dimostrato un miglioramento nel controllo della forza [18].

Nel 2016 è stato mostrato il primo utilizzo di un'USEA per il sistema nervoso periferico nell'uomo attraverso la registrazione di segnali neurali periferici e la fornitura di feedback sensoriale [19].

I ricercatori hanno iniziato a dimostrare i benefici delle strategie sensomotorie legate al controllo protesico. Anche gli aspetti cognitivi del ripristino del feedback sensoriale sono stati studiati considerando la realizzazione della protesi e l'integrazione. I benefici per la salute sono stati correlati alla riduzione delle rappresentazioni anormali dell'arto fantasma e del dolore dell'arto fantasma. È stato anche dimostrato che il ripristino del feedback sensoriale ha un impatto sulla durata dell'utilizzo di una protesi nella vita di tutti i giorni [20].



Fig. 2: Caratterizzazione delle sensazioni per amputati degli arti superiori secondo diversi approcci neurali

2.3.2 Ripristino del feedback sensoriale per le estremità degli arti inferiori

Il ripristino sensoriale è possibile anche negli amputati degli arti inferiori. Stimolando il nervo sciatico, è possibile evocare le sensazioni riferite alla gamba e al piede fantasma: FINE e TIME sono stati testati con successo nell'uomo [21]. I FINE vengono adottati con amputati transtibiali e i TIME con amputati transfemorali. Le persone impiantate con FINE percepiscono sensazioni in poche aree, ma estese, sotto il piede fantasma e sulla gamba fantasma, importanti per l'equilibrio e la locomozione. Il feedback sensoriale neurale fornito dai TIME impiantati nel nervo tibiale viene sfruttato con successo dagli amputati transfemorali. Sensazioni distinte e spazialmente selettive di tocco, pressione e vibrazione vengono suscitate da più di 20 posizioni del piede fantasma, insieme alla contrazione dei muscoli della gamba mancante. In particolare, questo feedback neurale viene sfruttato nelle attività motorie, dimostrando che questo approccio migliora il riconoscimento da parte degli utenti del movimento e del tocco della protesi, della mobilità sulle scale e nell'evitare gli ostacoli [22]. Nella quotidianità, la velocità di deambulazione e la fiducia nella protesi aumentano, mentre l'affaticamento mentale e fisico

diminuiscono per gli utilizzatori di protesi con feedback sensoriale neurale rispetto che con protesi che ne sono sprovviste. Inoltre, i mutilati hanno riportato un dolore all'arto fantasma radicalmente ridotto quando è fornito un feedback sensoriale neurale.

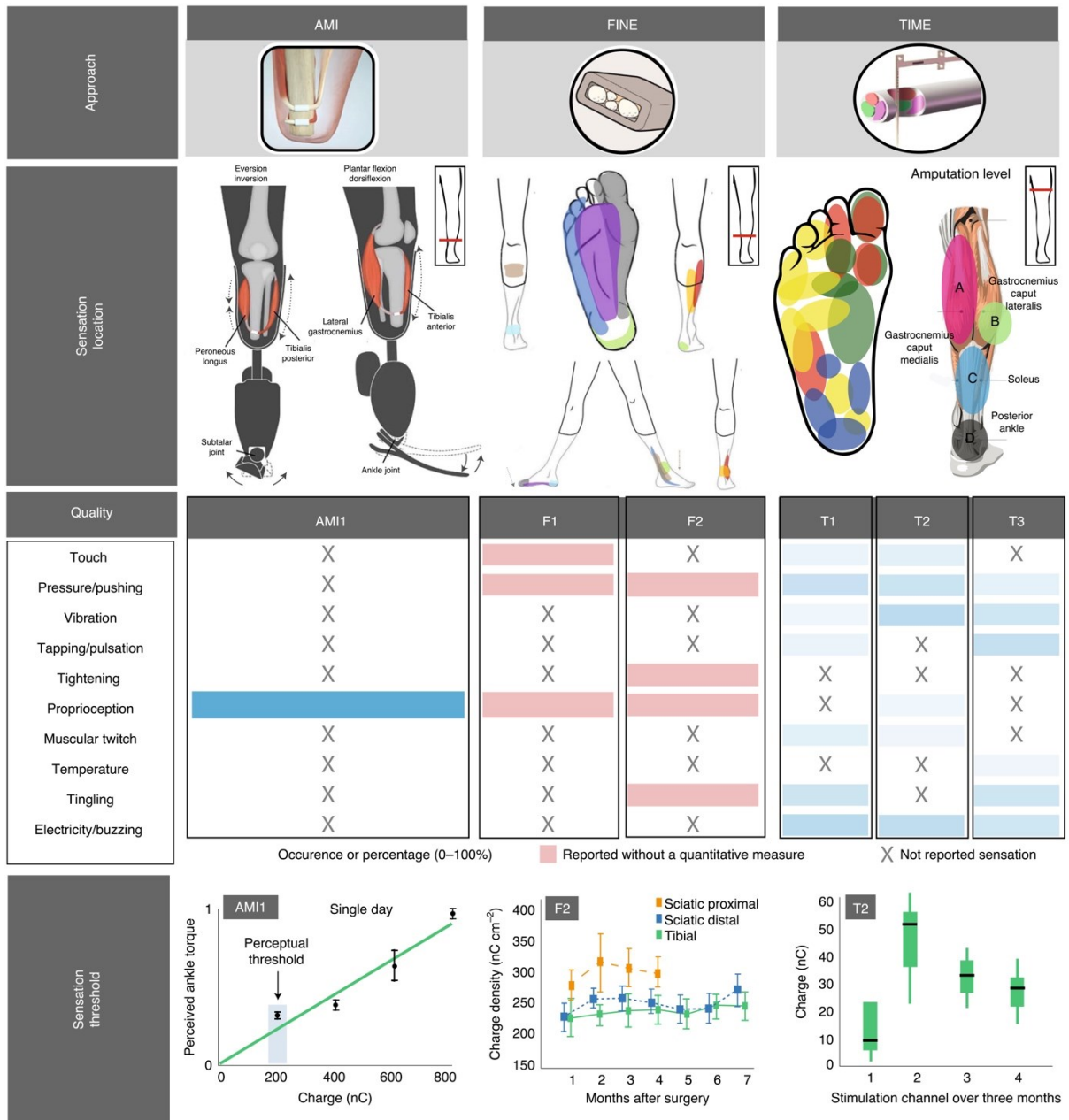


Fig. 3: Caratterizzazione delle sensazioni per amputati degli arti inferiori secondo diversi approcci neurali

3 Case study: B:Ionic Glove

Il guanto indossabile B:Ionic consiste in un sistema di sensori protesici in grado di fornire una stimolazione meccanotattile sul braccio dell'utente rispetto alla pressione subita sulla punta delle dita del dispositivo protesico dell'arto superiore.

3.1 Funzionamento

Il guanto B:Ionic è costituito da cuscinetti a pressione contenenti fluido conduttore situati sulla punta delle dita del guanto. Essi possono essere facilmente fissati a un dispositivo protesico. Quando viene applicata la pressione, questo fluido viaggia attraverso una rete di canali di silicone, collegando coppie di elettrodi e chiudendo i circuiti elettrici. Questi circuiti elettrici avviano la contrazione dei corrispondenti attuatori costituiti da lega a memoria di forma (SMA: *shape memory alloy*) situati su un bracciale posizionato sull'arto residuo dell'utente che stringe delicatamente il braccio.

3.2 Design

Il guanto B:Ionic è costituito da tre componenti:

- un guanto indossato sulla mano protesica con un cuscinetto morbido sotto ogni polpastrello, in cui ogni cuscinetto è collegato a canali di silicone e contenente un liquido conduttivo;
- un controller elettrofluidico (Soft Matter Computer);
- un bracciale tattile.

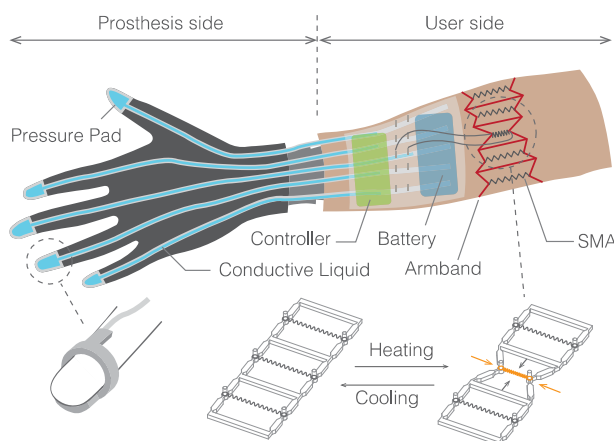


Fig. 4: Illustrazione del B:Ionic Glove

Quando il cuscinetto viene premuto, la variazione di volume forza il liquido conduttivo attraverso una rete di canali in silicone. Questo fluido colma quindi lo spazio tra le coppie di elettrodi lungo il canale, chiudendo il circuito elettrico. Nella sua forma più semplice, ogni cuscinetto è collegato a un attuttore SMA a spirale sul bracciale. Una volta chiuso il circuito, il corrispondente SMA sul bracciale si contrae mentre la corrente

assorbita dalla batteria riscalda l'attuatore SMA, generando sensazioni di stiramento e compressione della pelle.

3.3 Conclusioni

Il guanto B:Ionic ha il potenziale per essere utilizzato come dispositivo di feedback sensoriale con protesi robotiche dell'arto superiore. Il dispositivo è completamente morbido e indossabile e può essere utilizzato per trasmettere l'intensità della forza e le posizioni di pressione dai polpastrelli protesici alla pelle dell'utente. Una prospettiva futura è quella di testare il dispositivo su mutilati agli arti superiori per valutarne l'efficacia in applicazioni reali. Con questo dispositivo, gli utilizzatori di protesi potrebbero essere in grado di afferrare gli oggetti in modo più naturale e intuitivo senza fare affidamento esclusivamente sul feedback visivo. Questo potrebbe ridurre il dolore dell'arto fantasma e aumentare l'accettazione del dispositivo protesico, riducendo il tasso di rigetto, che attualmente è elevato [23].

4 Prospettive future

L'obiettivo principale di queste tecnologie è il passaggio dagli studi di laboratorio alla realtà clinica. Per raggiungere questo obiettivo sono necessari diversi passaggi tecnologici e normativi. Gli elettrodi dovrebbero essere facili da impiantare attraverso la chirurgia poco invasiva. A causa di tutti i problemi con i fili percutanei (comprese le possibili infezioni), lo sviluppo di sistemi completamente impiantabili che comunicano con sensori esterni è una prerogativa indispensabile [24]. Negli arti bionici, un elevato carico di informazioni deve essere trasmesso attraverso la pelle per consentire la comunicazione bidirezionale. Ciò comporta un importante vincolo alla capacità della batteria e alle dimensioni dell'impianto, che rappresentano notevoli sfide tecnologiche.

I benefici per la salute e la qualità della vita devono essere valutati e documentati, con l'obiettivo di aiutare i sistemi sanitari a risparmiare nelle spese che sarebbero altrimenti necessarie per il trattamento dei pazienti. Questo aumenterebbe le probabilità che queste neurotecnologie possano essere rimborsate dalle assicurazioni e dai sistemi sanitari, garantendone quindi la diffusione a tutti i pazienti bisognosi.

Le neurotecnologie presentate hanno un enorme potenziale in termini di impatto sociale e sanitario e, dopo le recenti scoperte, siamo un passo bionico più vicini al loro raggiungimento.

Bibliografia

- [1] Unwin, N. Epidemiology of lower extremity amputation in centres in Europe, North America and East Asia. *Br. J. Surg.* **87**, 328-337 (2000)
- [2] Petrini, F. M et al. Six-month assessment of a hand prosthesis with intraneural tactile feedback. *Ann. Neurol.* **85**, 137-154 (2019)
- [3] Raspopovic, S. et al. Sensory feedback for limb prostheses in amputees. *Nat. Mater.* **20**, 925–939 (2021)
- [4] Makin, T. R., de Vignemont, F. & Faisal, A. A. Neurocognitive barriers to the embodiment of technology. *Nat. Biomed. Eng.* **1**, 0014 (2017)
- [5] Schiefer, M. et al., Sensory feedback by peripheral nerve stimulation improves task performance in individuals with upper limb loss using a myoelectric prosthesis. *J. neural eng.* **13**, 016001-016001 (2015)
- [6] Johansson, R. S. & Birznieks, I. First spikes in ensembles of human tactile afferents code complex spatial fingertip events. *Nat. Neurosci.* **7**, 170-177 (2004)
- [7] Proske, U. & Gandevia, S. C. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol. Rev.* **92**, 1651-1697 (2012)
- [8] Macefield, G., Gandevia, S. C. & Burke D. Perceptual responses to microstimulation of single afferents innervating joints, muscles and skin of the human hand. *J. Physiol.* **429**, 113-129 (1990)
- [9] Herbert, J. S., Olson, J. L., Morhart, M. J., Dawson, M.R., Marasco, P. D., Kuiken, T. A. & Chan, K. M. Novel targeted sensory reinnervation technique to restore functional hand sensation after transhumeral amputation. *IEEE Transact. Neur. Syst. Rehab. Eng.* **22**, 765-773 (2014)
- [10] Saal, H. P. & Bensmaia, S. J. Biomimetic approaches to bionic touch through a peripheral nerve interface. *Neuropsychologia* **79**, 344-353 (2015)
- [11] Tyler, D. J. & Durand, D. M. Functionally selected peripheral nerve stimulation with a flat interface nerve electrode. *IEEE Transact. Neur. Syst. Rehab. Eng.* **10**, 294-303 (2002)
- [12] Ledbetter, N. M., Ethier, C., Oby, E. R., Hiatt, S. D., Wilder, A. M., Ko, J. H., Miller, L. E., Wilder, A. M., Agnew, S. P. & Clark, G. A. Intrafascicular stimulation of monkey arm nerves evokes coordinated grasp and sensory responses. *J. Neurophysiol.* **109**, 580-590 (2012)

- [13] O'Doherty, J. E., Lebedev, M. A., Ifft, P. J., Zhuang, K. Z., Shokur, S., Bleuler, H. & Nicolelis, M. A. L. Active tactile exploration using a brain-machine-brain interface. *Nature* **479**, 228-231 (2011)
- [14] Hasson, C. J. & Manczurowsky, J. Effects of kinematic vibrotactile feedback on learning to control a virtual prosthetic arm. *J. NeuroEng. Rehab.* **12**, 31 (2015)
- [15] Dimante, D., Logina, I., Sinisi, M. & Krūmina, A. Sensory Feedback in upper limb prosthesis. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B, Natural Sciences* **74**, 308-317 (2020)
- [16] Tan, D. W. et al. A neural interface provides long-term stable natural touch perception. *Sci. Transl. Med.* **6**, 257ra138 (2014)
- [17] Rossini, P. M. et al. Double nerve intraneural interface implant on a human amputee for robotic hand control. *Clin. Neurophysiol.* **121**, 777-783 (2010)
- [18] Raspopovic, S. et al. Restoring natural sensory feedback in real-time bidirectional hand prostheses. *Sci. Transl. Med.* **6**, 222ra19 (2014)
- [19] Devis, T. S. et al. Restoring motor control and sensory feedback in people with upper extremity amputations using arrays of 96 microelectrodes implanted in the median and ulnar nerves. *J. Neural. Eng.* **13**, 036001 (2016)
- [20] Graczyk, E. L., Resnik, L., Schiefer, M. A., Shmitt, M. S. & Tyler, D. J. Home use of a neural-connected sensory prosthesis provides the functional and psychological experience of having a hand again. *Sci. Rep.* **10**, 6576 (2020)
- [21] Petrini, F. M. et al. Sensory feedback restoration in leg amputees improves walking speed, metabolic cost and phantom pain. *Nat. Med.* **25**, 1356-1363 (2019)
- [22] Petrini, F. M. et al. Enhancing functional abilities and cognitive integration of the lower limb prosthesis. *Sci. Transl. Med.* **10**, eaap8373 (2018)
- [23] Simons, M. F. et al. B:Ionic Glove: A Soft Wearable Sensory Feedback Device for Upper Limb Robotic Prostheses. *IEEE robotics and automation letters* **6**, 3311-3316 (2021)
- [24] Raspopovic, S. Advancing limb neural prostheses. *Science* **370**, 290-291 (2020)