

La Bioingegneria e le nuove sfide per il futuro

Andrea Corvi, Federico Carpi, Filippo Cavallo

La bioingegneria unisce principi di ingegneria, biologia e medicina per sviluppare soluzioni innovative a problemi legati alla salute e al benessere umano. Grazie a essa, si progettano dispositivi come protesi avanzate, organi artificiali, e sistemi di diagnosi e terapia all'avanguardia. Contribuisce alla creazione di tecnologie che migliorano la qualità della vita, come robot chirurgici e sensori per il monitoraggio medico. Inoltre, la bioingegneria gioca un ruolo chiave nella ricerca su nuove terapie, biotecnologie e nella comprensione del corpo umano. Il seguente capitolo presenta le attività di ricerca svolte all'interno del dipartimento di ingegneria industriale congiuntamente ai laboratori di ricerca attivi.

Il Laboratorio di Termografia Oculare (LaTO)

Responsabile: Prof. Corvi

Il gruppo di ricerca coordinato dal Prof. Corvi è stato promotore dell'istituzione di un laboratorio di termografia oculare in collaborazione con la Clinica Oculistica dell'Ateneo. In particolare, sono state fatte numerose ricerche relative sia alla perfusione sanguigna oculare sia ad alcune patologie come l'occhio secco. Il sangue è il principale termoregolatore del corpo umano e

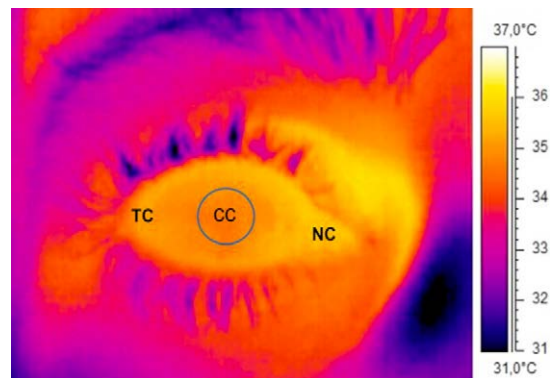


Figura 75 – Distribuzione delle temperature in un occhio. Le temperature massime si hanno sui cantanti nasale e temporale.

Andrea Corvi, University of Florence, Italy, andrea.corvi@unifi.it, 0000-0002-6714-1110
Federico Carpi, University of Florence, Italy, federico.carpi@unifi.it, 0000-0001-8496-5085
Filippo Cavallo, University of Florence, Italy, filippo.cavallo@unifi.it, 0000-0001-7432-5033
Referee List (DOI 10.36253/fup_referee_list)
FUP Best Practice in Scholarly Publishing (DOI 10.36253/fup_best_practice)

Andrea Corvi, Federico Carpi, Filippo Cavallo, *La Bioingegneria e le nuove sfide per il futuro*, © Author(s), CC BY 4.0, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4.18, in Bruno Facchini, Giovanni Ferrara, Rocco Furferi (edited by), *Ingegneria Industriale & Ingegneria dell'Informazione per il territorio fiorentino – 1. Ingegneria Industriale*, pp. 123-134, 2026, published by Firenze University Press, ISBN 979-12-215-0972-4, DOI 10.36253/979-12-215-0972-4

pertanto l'analisi della temperatura superficiale dell'occhio ha permesso di indagare alcune patologie come il diabete, i tumori, il glaucoma e le retinopatie che possono avere effetti sull'afflusso del sangue nell'occhio. Un tipico termogramma dell'occhio è riportato in Figura 75.

Il Laboratorio di Analisi del Movimento

Responsabile: Prof. Corvi

Nel 2014 è stato realizzato un laboratorio di analisi del movimento presso il CESAT di Fucecchio. Il laboratorio gestito dal DIEF in collaborazione con la Fondazione in Cammino, ONLUS e con la ASL di Empoli ha fornito supporto scientifico al CESAT (centro di eccellenza di chirurgia dell'anca e del ginocchio). Basate su un sistema di analisi della cinematica del movimento SMART, su due piattaforme di forza, su un sistema di analisi elettromiografica wireless e su un sensore inerziale, le ricerche svolte nel laboratorio hanno permesso di valutare differenze nella riabilitazione di pazienti operati con diverse tipologie di protesi evidenziando differenti velocità di recupero di una corretta deambulazione (Figura 76).



Figura 67 – Laboratorio di gait analysis di Fucecchio. Si notano quattro delle otto telecamere SMART e le due piattaforme di forza annegate nella pedana.

Ablazione di masse tumorali con microonde

Responsabile: Prof. Corvi

Il BioLab ha inoltre sviluppato un sistema di ablazione di masse tumorali attraverso irraggiamento con microonde.

La termoablazione a microonde (MWA) rappresenta una delle tecnologie più promettenti nell'ambito della chirurgia minimamente invasiva, con applicazioni che vanno dal trattamento dei tumori alla gestione delle resezioni epatiche complesse. Questa tecnica sfrutta l'energia delle microonde per generare calore localizzato, distruggendo selettivamente il tessuto patologico e riducendo al minimo i danni ai tessuti sani circostanti. Gli studi recenti hanno messo in evidenza risultati rilevanti e innovazioni che rendono la MWA una soluzione efficace e sicura. Una delle principali conquiste riguar-

da la precisione e il controllo offerti dai dispositivi di ablazione avanzati. Un esempio significativo è l'applicatore a microonde sterilizzabile non raffreddato, progettato specificamente per resezioni laparoscopiche e robotiche dal BioLab che ha acquisito negli anni le competenze per sviluppare modelli, procedure e set up sperimentali per il testing dei dispositivi biomedicali ad energia come mostrato nella Figura 68.

I test eseguiti ex vivo hanno confermato la capacità di creare zone di ablazione altamente localizzate, con un significativo controllo delle perdite di sangue. Inoltre, l'integrazione della MWA con piattaforme robotiche, come il sistema da Vinci Research Kit, ha migliorato ulteriormente la precisione e l'efficienza, permettendo una coagulazione prechirurgica del parenchima epatico che minimizza i rischi di emorragia intraoperatoria.

La versatilità di questa tecnologia è stata dimostrata anche in situazioni chirurgiche complesse, come la termoablazione vicino a strutture metalliche, ad esempio protesi bronchiali. Gli studi hanno evidenziato un controllo efficace del riscaldamento anche in presenza di possibili interferenze elettromagnetiche, ampliando così le potenziali applicazioni della tecnica. Un altro aspetto rilevante è la possibilità di creare linee di resezione coagulativa senza la necessità di sistemi di raffreddamento complessi. Ciò rappresenta un passo avanti significativo verso procedure chirurgiche più semplici, rapide e sicure.

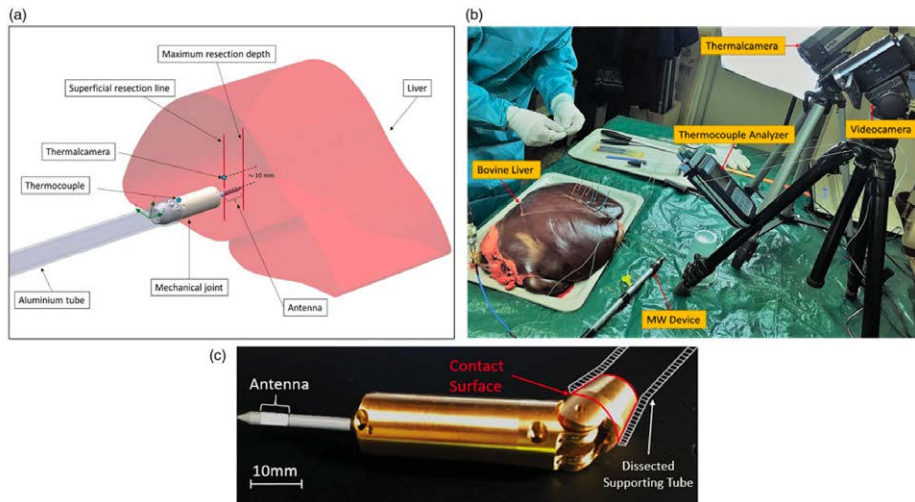


Figura 77 – a) Modellazione CAD 3D e simulazione di un protocollo resettivo in presenza di Epatocarcinoma (HCC); b) Setup sperimentale con tessuto ex vivo per il monitoraggio dell'efficacia termoablattiva del dispositivo sviluppato; c) integrazione del dispositivo a Microonde in uno strumento per uso laparoscopico.

Il perfusore di organi

Responsabile: Prof. Corvi

Quando un organo viene prelevato dal donatore viene messo nella maggior parte dei casi in una borsa termica con del ghiaccio e poi trasportato da autoblunze, auto della polizia o elicotteri per raggiungere l'ospedale dove è in attesa il paziente in cui l'organo deve essere trapiantato. Il trasferimento deve essere molto veloce perché nonostante che il freddo rallenti il metabolismo cellulare, le cellule dell'organo si danneggiano e muoiono e dopo poche ore l'organo non è più utilizzabile. Nel BioLab si è quindi iniziato lo sviluppo di un perfusore di organi che possa perfondere l'organo appena prelevato con san-

gue, o un surrogato del sangue, ossigenato e alla temperatura corporea. In questo modo, l'organo non dovrebbe «accorgersi» di non essere più nel corpo e potrebbe continuare a vivere anche per tempi più lunghi delle 24 ore. Il prototipo sviluppato è quindi costituito da sistemi di pompaggio del liquido di perfusione, da sistemi di riscaldamento ed eventuale raffreddamento, da un ossigenatore, filtri e sensori di pressione, temperatura e portata. In Figura 78 è riportato lo schema di funzionamento del perfusore.

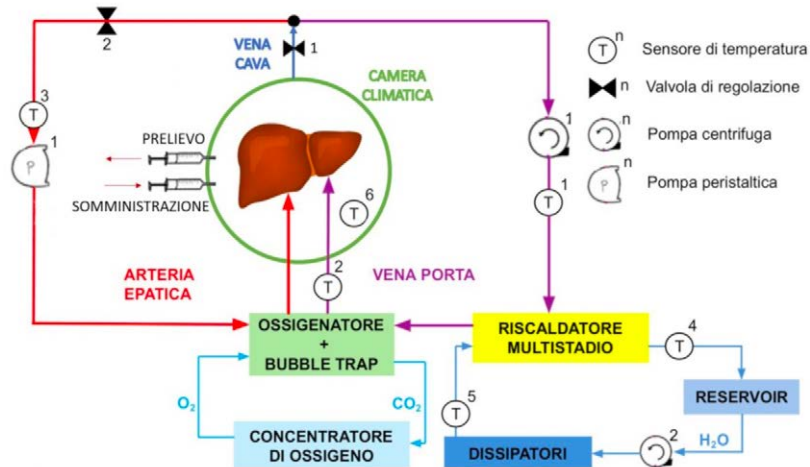


Figura 78 – Schema di funzionamento del perfusore.

Il prototipo, pensato per mantenere in vita fegati e reni, è attualmente in sperimentazione con la collaborazione dei chirurghi del Dipartimento di Medicina Sperimentale e Clinica dell'Ateneo fiorentino (Figura 79). È anche in corso di fondazione uno *spin-off* dell'Università di Firenze che dovrà gestire l'ingegnerizzazione del perfusore e la sua futura commercializzazione.



Figura 79 – Perfusore allestito per i test su fegati di maiale.

Un nuovo approccio alla ricerca sui tumori

Responsabile: Prof. Corvi

Un nuovo filone di ricerca prende spunto dalla considerazione che le cellule tumorali hanno morfologia e proprietà meccaniche diverse dalle cellule sane. In conseguenza hanno frequenze di risonanza diverse (Figura 80).

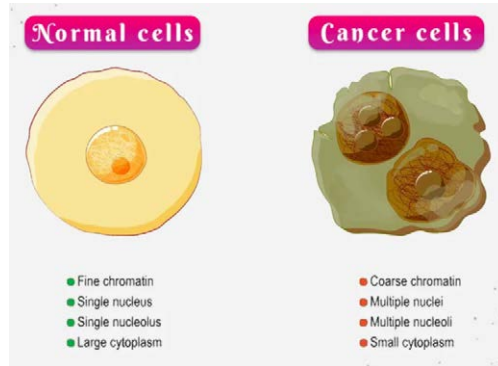


Figura 80 – Morfologia di una cellula sana e di una cellula tumorale.

Si è quindi pensato che, eccitando il tessuto di un organo in cui siano presenti masse tumorali con ultrasuoni alla frequenza di risonanza delle cellule malate, queste comincino a vibrare e si danneggino, si rompano e comunque vadano in necrosi mentre le cellule sane, la cui frequenza di risonanza è diversa, non si accorgano di nulla. In base a questa idea, è iniziata una campagna di prove, in collaborazione con colleghi del Dipartimento di Medicina Sperimentale e Clinica, su colture cellulari tridimensionali (sferoidi) di un tumore del pancreas, uno dei più aggressivi, andando a sollecitare con ultrasuoni a bassa intensità, a frequenze diverse degli sferoidi fino ad individuare la frequenza che porta alla maggiore mortalità cellulare (Figura 81).

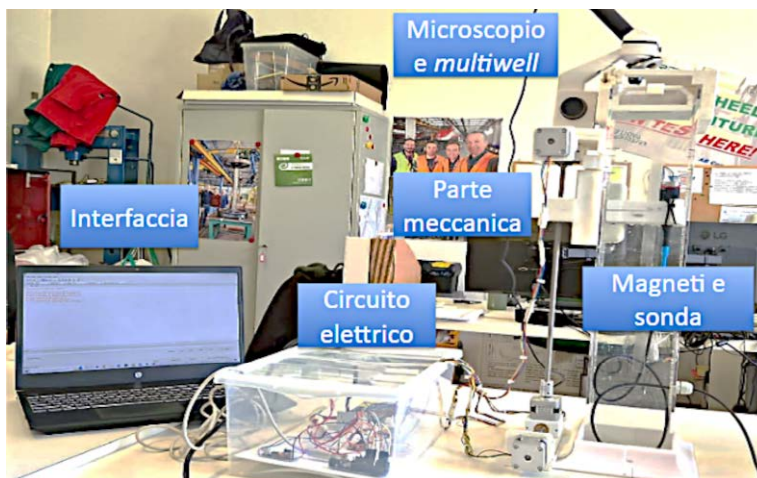


Figura 81 – Lay out sperimentale per l'eccitazione delle colture cellulari.

Attualmente sono in corso prove per individuare la frequenza di risonanza delle cellule sane per verificare che non corrisponda a quella delle cellule tumorali. Il passo

successivo sarà quello di provare a trattare con gli ultrasuoni dei topi nei quali sia stato indotto il tumore del pancreas e valutare se la tecnica possa portare a dei successi anche in vivo (Figura 82).

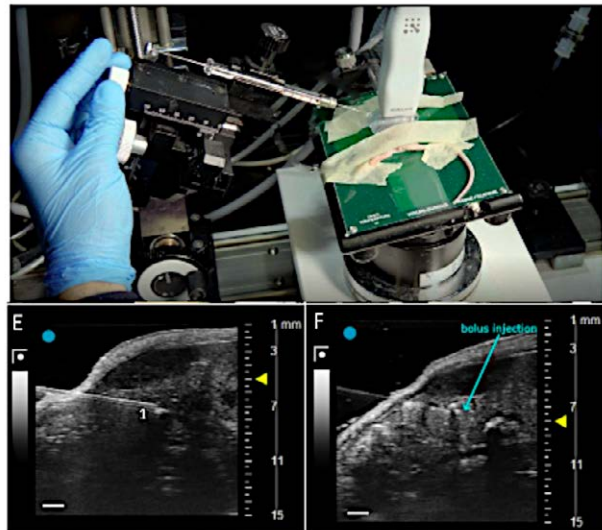


Figura 82 – Attrezzatura per la stimolazione con ultrasuoni guidata da ecografo sui topi.

Nuovi dispositivi ottici e aptici basati su materiali intelligenti

Responsabile: Prof. Carpi

Molteplici applicazioni nell'ambito delle interfacce essere umano-macchina, degli agenti robotici, dei sistemi indossabili e degli ambienti di realtà virtuale necessitano oggi di nuovi dispositivi che superino le limitazioni di tecnologie convenzionali di attuazione e sensorizzazione. Consideriamo, ad esempio, gli sviluppi recenti nei sistemi di visione impiegati nelle telecamere che popolano il nostro mondo (dallo smartphone che abbiamo in tasca ai droni che volano sopra di noi); essi sono dominati da aspetti computazionali, sotto la spinta di un'intensa ricerca sull'intelligenza artificiale. Al contrario, sino ad oggi è stata dedicata assai meno attenzione all'innovazione dell'hardware ottico. Infatti, anche le telecamere più avanzate utilizzano oggi ancora la stessa strategia dei primi pionieri della fotografia, spostando lenti in vetro (a lunghezza focale costante) avanti e indietro lungo un asse. Anche negli smartphone, le innovazioni ottiche sono principalmente limitate a insiemi di telecamere, utilizzando più lenti (ad esempio tradizionali, grandangolari e teleobiettivo). Il teleobiettivo/zoom, in particolare, crea problemi, a causa del piccolo spessore del telefono: poiché spesso non è possibile adattare più di un obiettivo zoom 2x o 3x, vengono combinate più telecamere con diverse lunghezze focali. Ciò solleva sfide per l'abbinamento delle immagini dalle telecamere, poiché necessitano di simili livelli di esposizione, bilanciamento del bianco e riallineamento, per ridurre al minimo gli artefatti, a causa dell'offset di posizione delle telecamere. Tali sfide aumentano man mano che vengono aggiunte più telecamere per estendere la gamma di zoom. Questi problemi hanno origine dall'uso di un hardware ottico affidabile e consolidato, che sposta le nuove sfide sulla parte computazionale (software). Di conseguenza, i sistemi convenzionali si basano su software specializzati in continuo sviluppo, che richiedono una potenza di calcolo in costante crescita. Un

approccio simile, che dà per scontato il “corpo visivo” (hardware ottico) ed è sbilanciato verso il “cervello visivo” (software), intrinsecamente compromette le dimensioni, il peso, il tempo di risposta e i requisiti di calcolo dei sistemi.

Ciò differisce dall’evoluzione dei sistemi di visione naturale, in cui il corpo visivo e il cervello visivo si evolvono insieme per adattarsi ad ambienti e compiti specifici. Ad esempio, alcuni organismi si basano in gran parte sulla “pre-elaborazione” delle informazioni a livello oculare, per svolgere compiti con un’elaborazione minima ad alto livello (cervello). Nonostante alcuni tentativi tecnologici condotti sino ad oggi di creare hardware ottico che imiti alcune caratteristiche oculari naturali, un passaggio chiave mancante è imitare la controllabilità dinamica della morfologia dell’ottica oculare, tipica degli animali e dell’uomo. Quest’ultima è utilizzata in natura per modulare la convessità delle lenti oculari, in modo da adattare continuamente la lunghezza focale della lente alla distanza del bersaglio (accomodazione). Da molti anni alcune attività di ricerca del gruppo del Prof. Carpi mirano a imitare la semplicità e l’efficienza di tale strategia naturale, mediante lenti soft polimeriche controllabili elettricamente, che combinino più funzioni ottiche nello stesso corpo ottico (messa a fuoco e astigmatismo). L’obiettivo è di aumentare le informazioni che possono essere raccolte dinamicamente con una lente singola, senza la necessità di muoverla, e con minor ingombro, minor peso e minore impegno computazionale.

A tale scopo, le attività si concentrano sullo sviluppo di nuove lenti soft elettricamente deformabili, realizzate in «materiali intelligenti», funzionanti come «muscoli artificiali», chiamati polimeri elettroattivi. Tali muscoli artificiali sono in grado di modificare elettricamente la curvatura della lente, imitando ciò che accade nel cristallino umano, come mostrato in Figura 83 (Carpi et al. 2011; Ghilardi et al. 2019). La realizzazione di tali dispositivi interamente in silicone ha portato alla lente controllabile più veloce al mondo realizzata con materiali intelligenti, avente un tempo di risposta di 175 microsecondi (Maffli et al. 2015).

Un altro ambito di ricerca in cui sono concentrate le attività del gruppo del Prof. Carpi è quello delle interfacce indossabili essere umano-macchina, e, in particolare, quelle progettate per sistemi di realtà virtuale o aumentata. Esse oggi non sono in grado di fornire all’utente un feedback aptico (in particolare tattile) sulle caratteristiche meccaniche di morbidezza/rigidezza degli oggetti virtuali che si stanno esplorando.

Questa limitazione è cruciale, poiché la capacità di restituire la sensazione fisica di morbidezza è fondamentale per un’ampia gamma di applicazioni, come ad esempio simulatori per la formazione medica, sistemi di tele-operazione e sistemi di tele-presenza per interazioni sociali.

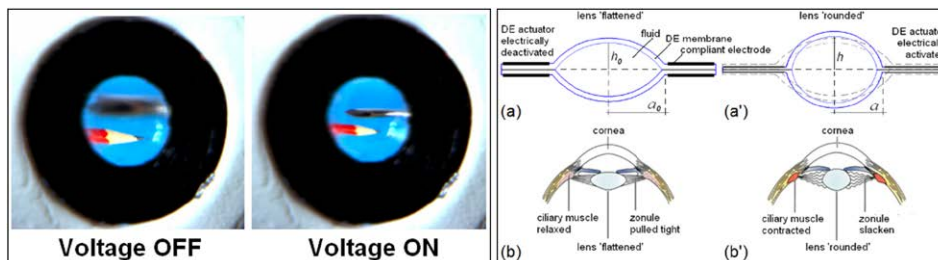


Figura 83 – Esempio di lente biomimetica soft controllabile elettricamente mediante «muscoli artificiali», sviluppata dal gruppo del Prof. Carpi, e sua analogia con il processo di accomodazione, attraverso il quale nell’occhio umano la lente (cristallino) e i muscoli ciliari regolano la messa a fuoco di oggetti a diverse distanze.

La sfida consiste nel creare interfacce aptiche mediante dispositivi compatti, leggeri, comodi ed economici, in grado di fornire un feedback tattile, chiamati display tattili indossabili. Tali dispositivi devono controllare sia l'area di contatto con la pelle, sia la sua profondità di indentazione, che sono fattori cruciali nella percezione della morbidezza. Raggiungere questo obiettivo utilizzando tecnologie di attuazione (motori) convenzionali, senza compromettere la compattezza, il peso e il comfort del dispositivo indossabile, non è banale. In effetti, finora, la maggior parte dei display tattili è costituita da motori elettrici vibranti, inadeguati a rendere informazioni sulla morbidezza di un oggetto.

In tale ambito il gruppo del Prof. Carpi da diversi anni sviluppa sistemi di attuazione innovativi, basati su «materiali intelligenti», che utilizzano sia polimeri elettroativi (Frediani et al. 2021), sia membrane attivate pneumaticamente (Frediani, Carpi 2020). Un esempio è mostrato in Figura 84. Sempre nell'ambito delle interfacce aptiche, il gruppo sta sviluppando anche un altro tipo di dispositivi, concepiti come una sorta di pelle robotica con capacità di riconoscimento tattile di oggetti. Tale capacità è importante, perché la rilevazione tattile sta cambiando la robotica, consentendo alle macchine di riconoscere e interagire con corpi a contatto, con una precisione simile a quella umana.

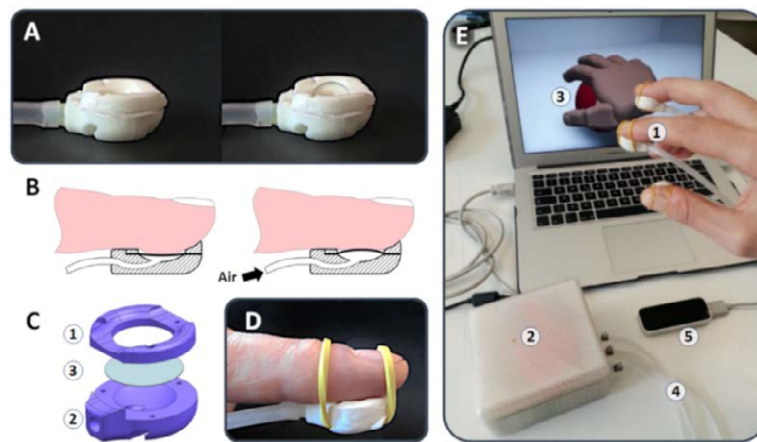


Figura 84 – Esempio di display tattile indossabile per sistemi di realtà virtuale, sviluppato dal gruppo del Prof. Carpi.

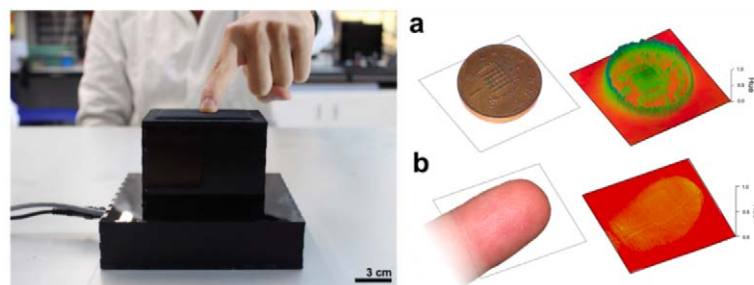


Figura 85 – Prototipo di dispositivo che utilizza una pelle robotica sensorizzata sviluppata dal gruppo del Prof. Carpi e esempi di impronta di una moneta (a) e impronta digitale (b), rilevate dalla pelle robotica.

Tecnologie anche molto recenti, come Digit 3602 di META, sono in grado di mappare pattern di contatto con alta risoluzione, ma non rilevano la pressione di contatto, che è fondamentale per comprendere la morfologia di oggetti 3D. Il gruppo del Prof. Carpi sta sviluppando di sistemi di pelle robotica innovativi, in grado di rilevare pattern di contatto, pressioni e morfologia 3D ad alta risoluzione, come mostrato in Figura 85. Grazie alle elevate prestazioni di riconoscimento tattile, questa pelle robotica è allo studio per migliorare l'interazione essere umano-macchina e il riconoscimento automatico di oggetti a contatto.

Robot, sensori e AI: tecnologie abilitanti al servizio della persona

Responsabile: Prof. Cavallo

Gruppo di Ricerca: Laura Fiorini, Erika Rovini, Alessandra Sorrentino

Il laboratorio di ricerca Biomedical e Robotics guidato dal Prof. Filippo Cavallo si pone l'obiettivo di progettare e sviluppare soluzioni di Internet of Robotics Things solutions per supportare i cittadini fragili in vari contesti (casa, clinica, residenza assistita). Il laboratorio ha la sua sede principale presso il Centro Didattico Morgagni. Ha inoltre attive due sedi congiunte: presso l'istituto di BioRobotica della Scuola Superiore Sant'Anna – laboratorio di Assistive Biorobotics –, e presso il Centro di Riabilitazione IRCCS Fondazione Don Carlo Gnocchi di Firenze. Queste collaborazioni consentono di poter progettare e testare le soluzioni di bioingegneria con i pazienti per poterne valutare effettivo impatto clinico.

Le attività di ricerca si snodano attraverso tre grandi linee: lo sviluppo delle capacità sociali del robot per il miglioramento dell'interazione uomo-robot, il design e la realizzazione di schede elettroniche per lo sviluppo di sistemi wearable custom e smart objects di concerto con lo sviluppo di algoritmi proprietari per il supporto clinico e i test e la valutazione delle soluzioni proposte in ambiente reale.

Sensori indossabili e intelligenza artificiale: come le tecnologie possono supportare pazienti e medici nel percorso di cura

I rapidi progressi nella tecnologia dei sensori, dalla realizzazione delle schede elettroniche, all'evoluzione delle reti di trasmissione dati, fino alla fabbricazione di packaging customizzabili e con materiali biocompatibili, stanno consentendo lo sviluppo di sensori indossabili ad alte prestazioni, sempre più miniaturizzati e adatti ad applicazioni in campo biomedico. I sensori indossabili, corredati di algoritmi di analisi sempre più sofisticati basati su intelligenza artificiale, garantiscono la misurazione di una vasta gamma di informazioni relativamente alla persona, permettendone una caratterizzazione dello stato di salute attraverso la valutazione dell'attività motoria e dei parametri fisiologici. Ad esempio, l'identificazione di schemi motori umani anomali svolge un ruolo cruciale nella rilevazione di numerose malattie (Rovini et al. 2021) (Figura 86). Il deterioramento delle abilità motorie fini, infatti, è un segno distintivo riconosciuto nei disturbi del movimento di tipo neurodegenerativo, tra cui il tremore essenziale e la malattia di Parkinson (PD). È inoltre correlato al declino cognitivo (Mancioppi et al. 2023), che va dal Mild Cognitive Impairment (MCI) fino alla malattia di Alzheimer, e comporta difficoltà per i pazienti nello svolgimento delle attività quotidiane, con un peggioramento significativo della loro qualità della vita (QoL). L'utilizzo di queste tecnologie mira ad avere un impatto notevole sull'identificazione e gestione delle malattie neurodegenerative e croniche permettendone: i) l'identificazione in fase prodromica (Mancioppi et al. 2021), ovvero quando i sintomi caratteristici non sono ancora manifesti in modo evidente, ma rilevabili con i sensori, così da poter intervenire con terapie neuroprotettive; ii) la valutazione oggettiva della sintomatologia tramite la misurazione

ne dei parametri caratteristici durante l'esecuzione di protocolli motori o motorio/cognitivi ad hoc per la valutazione clinica del paziente supportando così il medico in fase di diagnosi (Rovini, Maremmani, Cavallo 2020); iii) il monitoraggio delle condizioni di salute del paziente nel tempo, durante il decorso della malattia, con valutazioni periodiche quantitative ed oggettive che permettano di supportare il clinico anche nelle variazioni della terapia. Se i sensori indossabili permettono il rilevamento di segnali caratteristici dello stato di salute, gli algoritmi di intelligenza artificiale ne permettono l'analisi, identificando parametri e sintomi tipici della patologia investigata e consentendo anche di valutare allo stesso tempo la co-presenza di più sintomi, fornendo al clinico un report dettagliato, oggettivo e immediato dello stato di salute del paziente.



Figura 86 – Sensori indossabili sviluppati all'interno del nostro laboratorio che vengono utilizzati per la misurazione del movimento.

Social Assistive Robotics: come i robot possono aiutarci nella nostra vita quotidiana

Il campo della robotica di assistenza si è significativamente evoluto negli ultimi trent'anni, passando da robot progettati esclusivamente per assistere persone con disabilità fisiche a sistemi multi-robot connessi, in grado di fornire servizi complessi attraverso la cooperazione fisica e cognitiva in diversi ambienti. Negli ultimi anni, i robot di assistenza hanno iniziato a essere concepiti come macchine progettate non solo per lavorare per gli esseri umani, ma anche con gli esseri umani, introducendo il concetto di «robot personali». Al fine di favorire questo cambiamento, la progettazione dei robot ha iniziato a prevedere anche l'integrazione di capacità sociali nei robot, che favoriscano l'interazione uomo-robot in maniera efficace ed intuitiva, in ambienti non strutturati e non protetti (come, ad esempio, gli ambienti domestici), integrando aspetti psicologici e sociali per garantire un'interazione intima. Diversi studi hanno dimostrato che non solo le capacità sociali dei robot favoriscono la relazione con l'utente finale, ma anche l'aspetto dei robot ha un ruolo decisivo. Nel dettaglio, capacità sociali mostrate da un robot antropomorfo sembrano favorire l'interazione tra il robot e il suo utente finale. Basandosi sull'importanza dell'interazione sociale, sono stati successivamente definiti Social Assistive Robots (SARs) tutte quelle piattaforme robotiche che hanno l'obiettivo di creare interazioni strette ed efficaci con gli esseri umani per fornire assistenza e monitorare lo stato di salute (fisico e/o cognitivo) degli utenti tramite parametri misurabili in ambiti come la convalescenza, la riabilitazione e l'apprendimento (Fiorini et al. 2025). L'inte-

razione uomo-robot (HRI) si basa sia su aspetti fisici che cognitivi, promuovendo così un cambiamento di paradigma nella robotica verso la coesistenza uomo-robot. La sfida principale nell'ambito nel SAR risiede nella natura complessa e imprevedibile dell'essere umano, inteso come un sistema complesso, dotato della propria capacità di ragionare e interagire con l'ambiente secondo convenzioni sociali, dettate non solo dal contesto puntuale dell'interazione, ma anche dal contesto culturale ed educativo in cui è cresciuto. La complessità di questa sfida aumenta, se consideriamo che il comportamento dell'essere umano può essere influenzato da ulteriori fattori legati alla condizione clinica della persona. Al fine di diventare cooperativi, i robot devono essere in grado di riconoscere tutti questi aspetti del partner umano e comportarsi nella maniera più appropriata. Più nel dettaglio, le principali caratteristiche di questi robot cooperativi sono, innanzitutto, la capacità di tenere conto delle intenzioni e delle preferenze umane e di adattarsi ad esse; in secondo luogo, devono garantire un'interazione ravvicinata, sicura e affidabile con gli esseri umani in uno spazio di lavoro condiviso; infine, devono possedere la capacità di percepire, ragionare, apprendere e agire in modo sicuro in un mondo parzialmente sconosciuto e abitato da esseri umani. In questo contesto, emerge la crescente necessità di sviluppare modelli comportamentali per i robot sociali al fine di garantire un'interazione di alta qualità e un elevato livello di accettabilità, fornendo servizi utili ed efficienti (Nocentini et al. 2019). Un primo passo per affrontare questa sfida riguarda lo sviluppo di sistemi intelligenti in grado di rilevare lo stato di interesse e il coinvolgimento degli utenti, modulando il proprio comportamento in base a fattori sociali, come la distanza interpersonale, lo stato mentale, la risposta degli utenti e il loro profilo (Sorrentino, Fiorini, Cavallo 2024). Quando i robot sono dotati di capacità cognitive ed emotive, possono stabilire relazioni empatiche con gli utenti e acquisire meccanismi cognitivi sociali, che ne favoriscono l'utilizzo sia in ambito domestico sia clinico. In questo contesto, è cruciale lo sviluppo di architetture cognitive in grado di avvicinarsi a uno stato cognitivo completo, integrando meccanismi di percezione, adattamento e motivazione. In questo contesto si collocano le attività di ricerca del laboratorio inerenti alla human-robot interaction (Figura 87). Applicando principi di user-centered design, sono stati sviluppati dei paradigmi di stimolazione fisica cognitiva per diverse tipologie di persone fragili (bambini con disturbi del neurosviluppo, pazienti affetti da stroke, persone anziane) con diverse piattaforme di robot sociali presenti nel laboratorio di ricerca. L'idea è quella di sfruttare le informazioni percepite dal robot relative all'interazione verbale e non verbale, aggregarle con metodiche di intelligenza artificiale e di utilizzarle in maniera duale: 1) per adattare il comportamento del robot e per 2) fornire un supporto decisionale al terapeuta (Fiorini et al. 2023). Il fine ultimo della ricerca è quello di ottenere dei sistemi bio-cooperativi avanzati per il supporto alla riabilitazione fisico-cognitiva.



Figura 87 – Attività sperimentali con i robot sociali fatte nel laboratorio del Prof. Cavallo nell'anno 2024: (a) Scenario «un, due, tre... stella» con il robot Pepper (b) «Raccontami una storia», attività sperimentale fatta con i bambini (c) Scenario cooperativo con braccio robotico (d) Follow-me con robot ASTRO.

Testare le soluzioni «into the wild»

Al fine di capire l'impatto che le soluzioni integrate di robot, sensori e piattaforme di analisi dati possono portare nella vita dei cittadini, è importante testare le tecnologie in ambienti reali per capirne l'impatto sulla vita e quali fattori ne favoriscono o ne prevengono l'uso. Il progetto Pharaon, coordinato dal Prof. Cavallo, ha coinvolto 40 partner provenienti da 12 stati membri dell'UE, ed è finalizzato a promuovere un invecchiamento sano ed attivo della popolazione europea mediante utilizzo di piattaforme avanzate integrate e altamente personalizzabili. Nel corso dei 60 mesi di progetto, sono state reclutate 3600 persone in tutto il territorio europeo suddivise in 6 diversi siti pilota. In particolare, il DIEF come coordinatore del sito pilota italiano (Dr.ssa Laura Fiorini) ha coordinato le attività di reclutamento di 770 persone di cui 300 anziani sul territorio toscano e su quello pugliese (Lorusso et al. 2023). A livello globale sono stati registrati un aumento della qualità di vita (EQ-5D-3L, VAS) e riduzione della loneliness percepita (UCLA score). A livello italiano, i risultati hanno confermato questo trend. Inoltre, in Italia è stato osservato un aumento della resilienza (RS-14) e una diminuzione significativa dello stress percepito nell'utilizzo della tecnologia misurato con la scala PSS (Pani et al. 2024). I dati qualitativi raccolti hanno evidenziato che il 42% degli anziani intervistati ha espresso la volontà di acquistare le tecnologie dopo la fine del progetto, e che l'esperienza è stata valutata positivamente sia da parte degli utenti anziani che dai loro caregiver primari.

Riferimenti bibliografici

- Carpi, F. et al. 2011. "Bioinspired Tunable Lens with Muscle-Like Electroactive Elastomers." *Advanced Functional Materials* 21(21): 4152-58.
- Fiorini, L. et al. 2023. "User Profiling to Enhance Clinical Assessment and Human-Robot Interaction: A Feasibility Study." *International Journal of Social Robotics* 15(3): 501-16.
- Fiorini, L. et al. 2025. "Robots for Assistive Services." In *Robotics Goes MOOC*. Springer Nature Switzerland.
- Frediani, G. e F. Carpi. 2020. "Tactile Display of Softness on Fingertip." *Scientific Reports* 10(1): 20491.
- Frediani, G. et al. 2021. "A Soft Touch: Wearable Tactile Display of Softness Made of Electroactive Elastomers." *Advanced Materials Technologies* 6(6): 2100016.
- Lorusso, L. et al. 2023. "Design And Evaluation of Personalized Services to Foster Active Aging: The Experience of Technology Pre-Validation in Italian Pilots." *Sensors* 23(2): 797.
- Mancioppi, G. et al. 2021. "Innovative Motor Cognitive Dual-Task Approaches Combining Upper and Lower Limbs May Improve Dementia Early Detection." *Scientific Reports* 11: 7449.
- Mancioppi, G. et al. 2023. "Mild Cognitive Impairment Identification Based on Motor and Cognitive Dual-Task Pooled Indices". *PLoS ONE* 18(8): e0287380.
- Nocentini, O. et al. 2019. "A Survey of Behavioral Models for Social Robots." *Robotics* 8(3): 54.
- Pani, J. et al. 2024. "How Time, Living Situation, and Stress Related to Technology Influence User Acceptance and Usability of a Socialization Service for Older Adults and Their Formal and Informal Caregivers: Six-Month Pilot Study." *JMIR aging* 7: e54736.
- Rovini, E., Maremmani, C. e F. Cavallo. 2020. "A Wearable System to Objectify Assessment of Motor Tasks For Supporting Parkinson's Disease Diagnosis." *Sensors* 20(9): 2630.
- Rovini, E. et al. 2021. "A Wearable Ring-Shaped Inertial System to Identify Action Planning Impairments During Reach-To-Grasp Sequences: A Pilot Study." *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation* 18: 118.
- Sorrentino, A., Fiorini, L. e F. Cavallo. 2024. "From the Definition to the Automatic Assessment of Engagement in Human-Robot Interaction: A Systematic Review." *International Journal of Social Robotics*, 1-23.