



IRCCS*in***ME**

Bollettino Scientifico

dell'IRCCS Centro Neurolesi Bonino Pulejo

**APPLICAZIONI DELLA REALTÀ VIRTUALE
NELLA NEURORIABILITAZIONE**

Volume 3 Numero 3 Settembre 2026

SOMMARIO/SUMMARY

- 4 **Editoriale**
Editorial

- 13 **Realtà virtuale in neuroriabilitazione: dalla tecnologia all'esperienza cognitiva ed emotiva**
Virtual Reality in Neurorehabilitation: From Technology to Cognitive and Emotional Experience

- 19 **Seminario Scientifico**
Scientific Seminar

- 23 **Realtà virtuale e neuroriabilitazione motoria: dal gesto alla terapia personalizzata**
Virtual reality and motor neurorehabilitation: from movement to personalized therapy

LEGALE RAPPRESENTANTE

Dott. Maurizio Letterio Lanza

DIRETTORE SCIENTIFICO e RESPONSABILE ISTITUZIONALE

Prof. Angelo Quartarone

REFERENTE AREA COMUNICAZIONE SCIENTIFICA

Antonio Vadalà - Collaboratore Professionale Ricerca Sanitaria

COMITATO SCIENTIFICO

Dott. Rocco Salvatore Calabrò - Dott.ssa Silvia Marino

IRCCS Centro Neurolesi "Bonino Pulejo"

Strada Statale 113 - C.da Casazza - 98124 Messina (ME)



CHI SIAMO

IRCCSinME è il primo bollettino di informazione e divulgazione scientifica dell'IRCCS Centro Neurolesi "Bonino Pulejo" che si propone di valorizzare e accrescere la massa critica di conoscenze, stimolando l'interesse e l'attenzione dei pazienti sulla ricerca scientifica. IRCCSinME vuole essere un canale di comunicazione anche per gli operatori sanitari, orientati a promuovere e proteggere la salute in base alle evidenze scientifiche disponibili. IRCCSinME invita i ricercatori e il personale sanitario a raccontare il proprio lavoro facendo della comunicazione/divulgazione uno strumento essenziale per la conoscenza e per diffondere la consapevolezza del valore del pensiero scientifico medico e della ricerca scientifica nel miglioramento degli standard sanitari. Questi i principali obiettivi: creazione di uno spazio dedicato ai lavori di ricercatori e operatori dell'IRCCS, promozione dei nuovi approcci tecnologici e terapeutici anche in forza all'Istituto, divulgazione del pensiero scientifico ai pazienti.

ABOUT US

IRCCSinME is the first scientific information and dissemination bulletin of IRCCS Centro Neurolesi "Bonino Pulejo" that aims to enhance and increase the critical mass of knowledge, stimulating patients' interest and attention on scientific research. IRCCSinME also aims to be a channel of communication for health professionals, oriented to promote and protect health based on available scientific evidence. IRCCSinME invites researchers and healthcare personnel to tell about their work by making communication/dissemination an essential tool for knowledge and spreading awareness of the value of medical scientific thinking and scientific research in improving healthcare standards. These are the main objectives: creation of a space dedicated to the work of IRCCS researchers and practitioners, promotion of new technological and therapeutic approaches also in force at the Institute, and dissemination of scientific thinking to patients.

Legge 16 luglio 2012, n. 103 di conversione del Decreto Legge 18 maggio 2012, n. 63. "Disposizioni urgenti in materia di riordino dei contributi alle imprese editrici, nonché di vendita della stampa quotidiana e periodica e di pubblicità istituzionale"

Art. 3 bis. Semplificazioni per periodici web di piccole dimensioni

1. Le testate periodiche realizzate unicamente su supporto informatico e diffuse unicamente per via telematica ovvero on line, i cui editori non abbiano fatto domanda di provvidenze, contributi o agevolazioni pubbliche e che conseguano ricavi annui da attività editoriale non superiori a 100.000 euro, non sono soggette agli obblighi stabiliti dall'articolo 5 della legge 8 febbraio 1948, n. 47, dell'articolo 1 della legge 5 agosto 1981, n. 416, e successive modificazioni, e dall'articolo 16 della legge 7 marzo 2001, n. 62, e ad esse non si applicano le disposizioni di cui alla delibera dell'Autorità per le garanzie nelle comunicazioni n. 666/08/CONS del 26 novembre 2008, e successive modificazioni.

2. Ai fini del comma 1 per ricavi annui da attività editoriale si intendono i ricavi derivanti da abbonamenti e vendita in qualsiasi forma, ivi compresa l'offerta di singoli contenuti a pagamento, da pubblicità e sponsorizzazioni, da contratti e convenzioni con soggetti pubblici e privati.

**Prof. Angelo Quartarone***Direttore Scientifico - Scientific Director**IRCCS “Bonino Pulejo”***EDITORIALE****La Realtà Virtuale in neuroriabilitazione: non una terapia, ma un contenitore di terapie**

Nel giro dell'ultimo decennio la realtà virtuale (VR) è passata dall'essere una “chicca tecnologica” confinata a pochi laboratori a una presenza stabile e consolidata nei reparti di riabilitazione neurologica. Visori a basso costo, sistemi di motion tracking markerless, ambienti tridimensionali sviluppabili in poche settimane hanno abbassato le barriere di accesso a un punto tale che oggi la domanda non è più se sia possibile portare la VR al letto del paziente, ma in che modo la utilizziamo. Ed è proprio qui che i tool terapeutici di realtà virtuale mostrano la loro fragilità concettuale. La letteratura degli ultimi dieci anni è infatti dominata da una domanda formulata in modo troppo generale: la realtà virtuale funziona? La domanda presuppone che la VR sia una molecola, con un meccanismo d'azione unitario e un effetto atteso misurabile. Ma la VR non è un farmaco. È un mezzo di somministrazione della terapia: un contenitore dentro cui possiamo collocare principi attivi molto diversi, spesso non

EDITORIAL**Virtual Reality in neurorehabilitation: not a therapy, but a container for therapies**

Over the past decade, virtual reality (VR) has evolved from a “technological novelty” confined to a few laboratories into a stable, established treatment in neurological rehabilitation units. Low-cost headsets, markerless motion-tracking systems, and 3D environments that can be developed in just a few weeks have lowered barriers to entry to such an extent that the question today is no longer whether it is possible to bring VR to the patient's bedside, but rather how we use it. And it is precisely here that virtual reality therapeutic tools reveal their conceptual fragility. Indeed, the literature of the last ten years has been dominated by a question framed far too broadly: does virtual reality work? This question presupposes that VR is a molecule with a single mechanism of action and a measurable, expected effect. But VR is not a drug. It is a medium for delivering therapy: a vessel into which we can place widely varying and often unstated active ingredients, all of



dichiarati, che contribuiscono in modo variabile all'eventuale effetto terapeutico.

Il problema dell'eterogeneità.

Sotto l'etichetta "riabilitazione in realtà virtuale" spesso convivono interventi che hanno in comune poco più della presenza di uno schermo. Un sistema non immersivo basato su console commerciale, utilizzato per attività ricreative di gruppo, e una piattaforma immersiva con head-mounted display, feedback aptico e adattamento della difficoltà in tempo reale non sono la stessa cosa; non lo sono per dose, per specificità del compito, per qualità del feedback, né per il carico cognitivo che impongono. Eppure, entrano nelle stesse meta-analisi riportate in letteratura. Non sorprende che i risultati siano moderatamente significativi e disomogenei. Ad esempio, la revisione Cochrane sull'arto superiore dopo ictus (Laver et al. 2017-2025) aveva già indicato con chiarezza, come altri studi, che la VR non risulta superiore alla terapia convenzionale a parità di dose, ma produce benefici quando viene aggiunta al trattamento usuale.

Quali sono, allora, gli ingredienti attivi?

Se accettiamo la premessa che la VR sia una piattaforma, il compito diventa specificare cosa quella piattaforma consente di fare che altrimenti non faremmo, o faremmo peggio. Almeno quattro elementi meritano di essere isolati e studiati come tali.

which contribute in different ways to any resulting therapeutic effect.

The problem of heterogeneity.

The label "virtual reality rehabilitation" often encompasses interventions that share little more than the presence of a screen. A non-immersive system based on a commercial console, used for group recreational activities, is not the same as an immersive platform featuring a head-mounted display, haptic feedback, and real-time difficulty adjustment as they differ in terms of dosage, task specificity, feedback quality, and the cognitive load they impose. Yet, they are included in the same meta-analyses found in the literature. It is not surprising that the results are moderately significant and inconsistent. For instance, the Cochrane review on upper-limb rehabilitation following stroke (Laver et al. 2017–2025) clearly indicated, as have other studies, that VR is not superior to conventional therapy when dosages are matched, but it does yield benefits when added to standard treatment.

What, then, are the active right ingredients?

If we accept the premise that VR is a platform rather than a therapy, the key task is to specify what that platform enables us to do that we could not otherwise do or could do only less effectively. At least four elements deserve to be isolated and studied.

**Feedback aumentato e manipolabile: trasformare il segnale percettivo in leva di apprendimento.**

Nel mondo fisico ciò che il paziente vede coincide necessariamente con ciò che ha fatto: se il braccio si muove di dieci centimetri, l'occhio ne vede dieci. In un ambiente virtuale questo vincolo cade, e il rapporto tra movimento reale e movimento rappresentato diventa un parametro che il clinico può modulare. Si può amplificare l'errore, mostrando una deviazione maggiore di quella effettiva per potenziare il segnale che guida l'adattamento e la plasticità; oppure ridurlo, mostrando un movimento più ampio del reale, così che un paziente con grave deficit sperimenti comunque il successo, con effetti documentati su motivazione, senso di proprietà del movimento ed eccitabilità cortico-motoria. La stessa logica estende il principio della mirror therapy senza i vincoli fisici dello specchio. In questo caso la VR non rende soltanto più gradevole un esercizio: somministra un segnale di apprendimento che nessun altro strumento fornisce con la stessa precisione. È proprio questa funzione che molti sistemi commerciali, basati su una mappatura fedele movimento-avatar, non sfruttano pienamente.

Embodiment: usare l'avatar come strumento di riorganizzazione corporea.

La rappresentazione del corpo non è un dato anatomico fisso ma una costruzione che il cervello aggiorna in continuo integrando informazione visiva, pro-

Augmented and manipulable feedback: transforming the perceptual signal into a lever for learning and plasticity.

In the physical world, what the patient sees necessarily corresponds to what they have done: if the arm moves ten centimeters, the eye perceives ten centimeters of movement. In a virtual environment, this constraint is removed, and the relationship between actual movement and represented movement becomes a parameter that the clinician can modulate. Errors can be amplified, showing a deviation greater than the actual one, to boost the signal driving adaptation and plasticity; conversely, they can be reduced by displaying a movement larger than the actual one, allowing a patient with a severe deficit to still experience success with documented effects on motivation, the sense of movement ownership, and corticomotor excitability. This same logic extends the principle of mirror therapy, free from the physical constraints of a mirror. In this context, VR does more than simply make an exercise more enjoyable; it delivers a learning signal that no other tool provides with the same precision. It is precisely this function that many commercial systems, reliant on a faithful mapping between movement and avatar, fail to fully exploit.

Embodiment: using the avatar as a tool for bodily reorganization.

Body representation is not a fixed anatomical fact but a construct that the brain continuously updates by integrating visual, proprioceptive, and motor informa-



priocettiva e motoria. È plastica, e quindi manipolabile: l'illusione della mano di gomma lo dimostra da decenni con un pennello e un oggetto di lattice.

La VR immersiva estende quel paradigma dal singolo arto al corpo intero e lo rende somministrabile in reparto. Conta nelle condizioni in cui la rappresentazione corporea è parte della patologia, non un epifenomeno. Nel dolore da arto fantasma la corrispondenza tra intenzione motoria e feedback sensoriale è interrotta: la VR generalizza il principio della mirror therapy senza i vincoli geometrici dello specchio. Nel neglect unilaterale, manipolare la corrispondenza tra movimento reale e movimento dell'avatar consente riorientamenti dello spazio peripersonale con logica affine all'adattamento prismatico, ma con controllo parametrico e misurazione continua.

Nelle sindromi dolorose regionali complesse, modificare l'aspetto dell'arto virtuale, dimensione, colore, integrità, ha mostrato effetti sulla soglia dolorifica. Il substrato anatomico è intuibile: aree premotorie e parietali che integrano segnali multisensoriali e codificano lo spazio peripersonale.

Le prove restano però preliminari, per ragioni precise. L'embodiment è misurato per lo più con questionari soggettivi o indicatori indiretti di validità dibattuta; la maggior parte degli studi è su soggetti sani, mentre proprio i pazienti con alterazione dello schema corporeo potrebbero avere una capacità di appropriazione ridotta; e l'embodiment

It is plastic and therefore manipulable as the rubber hand illusion has demonstrated for decades using a paintbrush and a latex object. Immersive VR extends this paradigm from a single limb to the entire body and allows for its clinical application. This is significant in conditions where body representation is part of the pathology itself, rather than merely an epiphenomenon. In phantom limb pain, the link between motor intention and sensory feedback is disrupted; VR generalizes the principle of mirror therapy without the geometric constraints imposed by a mirror. In cases of unilateral neglect, manipulating the correspondence between real movement and avatar movement enables the reorientation of peripersonal space a process similar in logic to prism adaptation but offering parametric control and continuous measurement. In complex regional pain syndromes, altering the virtual limb's appearance, such as its size, color, or integrity, has been shown to affect pain thresholds. The underlying anatomical basis is clear: premotor and parietal areas that integrate multisensory signals and encode peripersonal space. However, the evidence remains preliminary for specific reasons. Embodiment is primarily measured using subjective questionnaires or indirect indicators of debated validity; most studies involve healthy subjects, whereas patients with altered body schemas might possess a reduced capacity for embodiment; and



è quasi sempre trattato come sottoprodotto dell'immersione anziché come variabile manipolata. La dissociazione di embodiment e immersione, confrontando stimolazione visuo-motoria sincrona e asincrona a parità di ambiente, compito e dose, consente di stabilire se il beneficio dipenda dall'appropriazione dell'avatar o dal semplice trovarsi in un ambiente tridimensionale.

Dose e aderenza: distinguere l'effetto della pratica dall'effetto della tecnologia.

Il tempo di pratica significativa è probabilmente la variabile con il sostegno empirico più solido in neuroriabilitazione: a parità di condizioni, chi si allena di più tende a recuperare di più. In questa prospettiva, se la VR consente al paziente di svolgere venti minuti aggiuntivi di esercizio al giorno perché l'attività risulta meno monotona, il beneficio è reale e clinicamente rilevante. Tuttavia, quel beneficio va attribuito prima di tutto all'aumento della dose di trattamento, non necessariamente alla tecnologia in sé. La distinzione non è triviale: ha conseguenze dirette sul disegno degli studi. Confrontare la VR con la terapia standard senza controllare il tempo di trattamento significa confrontare due interventi che differiscono contemporaneamente per almeno due variabili: il mezzo utilizzato e la quantità di pratica. In queste condizioni, qualunque risultato positivo resta difficile da attribuire con precisione.

embodiment is almost always treated as a byproduct of immersion rather than as a manipulated variable. By dissociating embodiment from immersion, comparing synchronous versus asynchronous visuomotor stimulation while keeping the environment, task, and dosage constant, it is possible to determine whether the benefit stems from embodying the avatar or simply from being in a three-dimensional environment.

Dose and adherence: distinguishing the effect of practice from the effect of technology.

Meaningful practice time is arguably the variable with the strongest empirical support in neurorehabilitation: all else being equal, those who train more tend to recover more. From this perspective, if VR enables a patient to perform an additional twenty minutes of exercise daily because the activity is less monotonous, the benefit is real and clinically significant. However, that benefit should be attributed primarily to the increased treatment dose, not necessarily to the technology itself. This distinction is not trivial; it has direct implications for study design. Comparing VR with standard therapy without controlling for treatment time means comparing two interventions that differ in at least two variables simultaneously: the medium used and the amount of practice. Under these conditions, it is difficult to attribute any positive result with precision.

**Misurazione continua: trasformare la riabilitazione in un processo osservabile.**

Ogni sessione in VR genera dati cinematici ad alta risoluzione: traiettorie, tempi di reazione, variabilità e curve di apprendimento. Questo è forse il contributo più sottovalutato della tecnologia. La VR può spostare la riabilitazione da un intervento valutato con scale ordinali somministrate a distanza di settimane a un processo monitorato in continuo, con biomarcatori digitali potenzialmente sensibili a cambiamenti che le scale cliniche non sono in grado di catturare. Il limite, oggi, è che questi dati vengono spesso raccolti più facilmente di quanto vengano interpretati in modo clinicamente utile.

Cosa dovremmo chiedere al prossimo decennio di ricerca?

La conseguenza operativa è che i trial "VR versus terapia convenzionale", se non precisano quale componente della VR intendono testare, hanno ormai un'utilità informativa limitata. Il risultato atteso è già noto: differenze spesso non significative, prove di qualità bassa e una raccomandazione generica a condurre ulteriori studi. Per produrre conoscenza utile servono quindi disegni diversi. Servono studi che controllino la dose per costruzione, così che l'eventuale effetto sia attribuibile alla tecnologia e non al tempo. Servono confronti tra varianti di VR immersiva vs non immersiva, con e senza adattamento della difficoltà, con e senza feedback distorto

Continuous measurement: transforming rehabilitation into an observable and measurable process.

Every VR session generates high-resolution kinematic data, trajectories, reaction times, variability, and learning curves. This is perhaps the technology's most underrated contribution. VR can shift rehabilitation from an intervention assessed via ordinal scales administered weeks apart to a continuously monitored process, utilizing digital biomarkers potentially sensitive to changes that clinical scales fail to capture. The current limitation is that this data is often collected more easily than it is interpreted in a clinically useful way.

What should we ask of the next decade of research?

The practical implication is that "VR versus conventional therapy" trials, unless they specify exactly which component of VR is being tested, now offer limited informative value. The expected outcome is often disappointing with non-significant differences, low-quality evidence, and a generic recommendation for further studies. To generate useful knowledge, different study designs are required. We need studies that control for dosage by design, ensuring that any observed effect can be attributed to the technology itself rather than simply the time spent on practice. We need comparisons between immersive and non-immersive VR variants, as well as conditions with and without adaptation or distorted feedback, since these are the variables that allow us to iso-



perché è lì che si isolano i meccanismi. Servono criteri di stratificazione: la variabilità interindividuale nella risposta, che conosciamo bene dalla stimolazione cerebrale non invasiva, esiste anche qui, e determinanti come la riserva cognitiva, l'integrità del tratto corticospinale e la tolleranza vestibolare sono candidati plausibili come moderatori. E servono descrizioni degli interventi sufficientemente dettagliate da essere replicabili: la checklist TIDieR (Template for Intervention Description and Replication) dovrebbe essere un requisito minimo, non una buona pratica occasionale. Restano poi questioni che la comunità scientifica tende a trascurare. La cybersickness (cinetosi o malessere da realtà virtuale) non è un dettaglio tecnico: in popolazioni con disfunzione vestibolare, epilessia, neglect o disturbi dell'attenzione può essere un criterio di esclusione sostanziale, e i tassi di intolleranza sono raramente riportati negli studi di riferimento. Il transfer alle attività della vita quotidiana rimane l'endpoint che conta e quello meno documentato: migliorare in un compito virtuale relativo alle attività occupazionali culinarie non significa cucinare meglio.

Verso sistemi integrati e personalizzati.

Le direzioni più promettenti sono quelle in cui la VR smette di essere presentata come trattamento autonomo e diventa un componente di sistemi terapeutici più ampi. Nell'integrazione con interfacce cervello-computer e neuro-modulazione non invasiva come TMS e tDCS, l'ambiente virtuale fornisce il

late specific mechanisms. Stratification criteria are also essential: inter-individual variability in response, a phenomenon well-known in non-invasive brain stimulation, exists here too, and factors such as cognitive reserve, corticospinal tract integrity, and vestibular tolerance are plausible candidates as moderating variables. Furthermore, intervention descriptions must be detailed enough to ensure replicability; the TIDieR (Template for Intervention Description and Replication) checklist should be a minimum requirement, not merely an occasional best practice. Finally, there are issues the scientific community tends to overlook. Cybersickness (motion sickness induced by virtual reality) is not merely a technical detail; in populations with vestibular dysfunction, epilepsy, neglect, or attention disorders, it can serve as a significant exclusion criterion, yet intolerance rates are rarely reported in key studies. Transferability to activities of daily living remains the most crucial, yet least documented, endpoint: improving at a virtual task related to cooking does not necessarily mean one cooks better in real life.

Towards integrated and personalized systems.

The most promising directions are those in which VR ceases to be presented as a standalone treatment and becomes a component of broader therapeutic systems. When integrated with brain-computer interfaces and non-invasive neuro-modulation techniques such as TMS and tDCS, the virtual environment provides the feedback that closes the sensorimotor loop: the intention to move is decoded, translated into avatar action, and visually



feedback che chiude l'anello sensomotorio: l'intenzione di movimento viene decodificata, tradotta in azione dell'avatar e restituita alla vista, ripristinando l'accoppiamento tra comando ed effetto che la lesione ha interrotto.

Nell'accoppiamento con la neuromodulazione non invasiva, il ruolo della VR è diverso ma altrettanto specifico: la stimolazione non agisce nel vuoto, ma su una rete già attivata dal compito virtuale, che ne definisce il bersaglio funzionale.

Gli algoritmi adattivi sfruttano invece i dati cinematici raccolti in continuo per regolare la difficoltà sul margine di sfida ottimale del singolo paziente, sessione per sessione. In questo modo, ciò che un terapeuta esperto fa spesso in modo implicito diventa un processo esplicito, tracciabile e potenzialmente replicabile. La teleriabilitazione domiciliare monitorata, infine, non introduce necessariamente un nuovo meccanismo biologico, ma affronta un problema organizzativo cruciale: la discontinuità assistenziale dopo la dimissione, che può vanificare parte dei risultati ottenuti in reparto.

La domanda giusta, quindi, non è se la realtà virtuale funzioni in generale. È quale ingrediente stiamo somministrando, a quale paziente, in quale dose e attraverso quale meccanismo. Finché la letteratura continuerà a privilegiare la prima domanda, continuerà verosimilmente a produrre revisioni sistematiche che si chiudono con la stessa formula: sono necessari ulteriori studi di migliore qualità. Gli strumenti per porre domande più precise, pertinenti e clinicamente utili esistono già; il passo successivo è usarli in modo esplicito e sistematico.

fed back to the user, thereby restoring the link between command and effect that was disrupted by the injury.

When paired with non-invasive neuromodulation, VR plays a different yet equally specific role: stimulation does not occur in a vacuum but acts upon a network already activated by the virtual task, which defines the functional target. Adaptive algorithms, meanwhile, leverage continuously collected kinematic data to adjust the difficulty level to the individual patient's optimal challenge threshold, session by session. In this way, a process that an expert therapist often performs implicitly becomes explicit, trackable, and potentially replicable.

Finally, monitored home-based telerehabilitation does not necessarily introduce a new biological mechanism; instead, it addresses a crucial organizational issue: the lack of continuity in care following discharge, which can undermine some of the progress achieved in the clinical setting.

The right question, therefore, is not whether virtual reality works in general. Rather, it is about which ingredient we are administering, to which patient, at what dosage, and via which mechanism. If the literature continues to prioritize the former question, it will likely keep producing systematic reviews that conclude with the same standard phrase: further, higher-quality studies are needed. The tools to ask more precise, relevant, and clinically useful questions already exist; the next step is to use them explicitly and systematically.



DONA IL TUO 5X1000 AL CENTRO NEUROLESI BONINO PULEJO

Scegli il riquadro
'FINANZIAMENTO DELLA RICERCA SANITARIA'
inserendo il codice fiscale 02733700831

Puoi farlo attraverso

CERTIFICAZIONE
UNICA 2024



PF
PERSONE FISICHE
2024



MODELLO
730

SCELTA PER LA DESTINAZIONE DEL CINQUE PER MILLE DELL'IRPEF (in caso di scelta FIRMARE in UNO degli spazi sottostanti)

SOSTEGNO DEGLI ENTI DEL TERZO SETTORE ISCRITTI NEL RUNTS DI CUI ALL'ART. 46, C. 1, DEL D.LGS. 3 LUGLIO 2017, N. 117, COMPRESSE LE COOPERATIVE SOCIALI ED ESCLUSE LE IMPRESE SOCIALI COSTITUTE IN FORMA DI SOCIETÀ, NONCHÉ SOSTEGNO DELLE ONLUS ISCRITTE ALL'ANAGRAFE

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

FINANZIAMENTO DELLA RICERCA SANITARIA

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): **02733700831**

SOSTEGNO DELLE ATTIVITÀ SOCIALI SVOLTE DAL COMUNE DI RESIDENZA

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

SOSTEGNO DEGLI ENTI GESTORI DELLE AREE PROTETTE

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

FINANZIAMENTO DELLA RICERCA SCIENTIFICA E DELLA UNIVERSITÀ

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

FINANZIAMENTO DELLE ATTIVITÀ DI TUTELA, PROMOZIONE E VALORIZZAZIONE DEI BENI CULTURALI E PAESAGGISTICI (SOGETTI DI CUI ALL'ART. 9, C. 2, DEL D.P.C.M. 28 LUGLIO 2016)

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

SOSTEGNO ALLE ASSOCIAZIONI SPORTIVE DILETTANTISTICHE ISCRITTE AL REGISTRO NAZIONALE DELLE ATTIVITÀ SPORTIVE DILETTANTISTICHE A NORMA DI LEGGE CHE SVOLGONO UNA RILEVANTE ATTIVITÀ DI INTERESSE SOCIALE

FIRMA: _____
Codice fiscale del beneficiario (eventuale): _____

AVVERTENZE Per esprimere la scelta a favore di una delle finalità destinarie della quota del cinque per mille dell'IRPEF, il contribuente deve apporre la propria firma nel riquadro corrispondente. Il contribuente ha inoltre la facoltà di indicare anche il codice fiscale di un soggetto beneficiario. La scelta deve essere fatta esclusivamente per una sola delle finalità beneficiarie.

**Rosaria De Luca***Ricercatori - Researchers**IRCCS "Bonino Pulejo"***Maria Grazia Maggio****Realtà Virtuale in neuroriabilitazione:
dalla tecnologia all'esperienza cognitiva
ed emotiva**

Negli ultimi anni, le tecnologie hanno ampliato le possibilità della neuroriabilitazione, offrendo nuovi modi di interagire con ambienti digitali. Il termine Extended Reality (XR) comprende la realtà aumentata (Augmented Reality, AR), che sovrappone elementi digitali all'ambiente fisico, la realtà mista (Mixed Reality, MR), in cui elementi reali e virtuali coesistono e interagiscono, e la realtà virtuale (Virtual Reality, VR), nella quale l'ambiente digitale costituisce il principale contesto dell'esperienza. All'interno della VR, il grado di immersione descrive quanto l'ambiente virtuale sostituisca, sul piano percettivo, quello fisico. Nei sistemi non immersivi, l'utente interagisce attraverso uno schermo mantenendo piena consapevolezza del contesto reale; nei sistemi semi-immersivi, grandi display o proiezioni ampliano il campo visivo senza escludere la percezione dello spazio fisico; nei sistemi pienamente immersivi, generalmente basati su visori e tracking, l'ambiente virtuale diventa il riferimento percettivo predominante. Questa classificazione descrive come la tecnologia costruisce l'esperienza virtuale, ma non ne determina, di per sé, il valore riabilitativo [1,2]. In neuroriabilitazione, l'utilità

**Virtual Reality in neurorehabilitation:
from technology to cognitive and
emotional experience**

In recent years, technologies have expanded the possibilities of neurorehabilitation, offering new ways of interacting with digital environments. The term Extended Reality (XR) encompasses Augmented Reality (AR), which overlays digital elements onto the physical environment; Mixed Reality (MR), in which real and virtual elements coexist and interact; and Virtual Reality (VR), in which the digital environment constitutes the primary context of the experience. Within VR, the degree of immersion describes the extent to which the virtual environment perceptually replaces the physical one. In non-immersive systems, users interact through a screen while maintaining full awareness of the real-world context; in semi-immersive systems, large displays or projections broaden the visual field without excluding perception of the physical space; and in fully immersive systems, generally based on head-mounted displays and tracking technologies, the virtual environment becomes the predominant perceptual frame of reference. This classification describes how technology shapes the virtual experience but does not, in itself, determine its rehabili-

della VR dipende soprattutto da come il paziente può agire al suo interno. Interazione, feedback in tempo reale, adattabilità del compito e stimolazione multisensoriale consentono esperienze ripetibili e personalizzate. Gli ambienti virtuali possono simulare attività della vita quotidiana in condizioni di maggiore sicurezza, consentendo al paziente di esplorare, pianificare e agire, adattando la risposta alle conseguenze delle proprie azioni (Figura 1).

tative value [1,2]. In neurorehabilitation, the clinical utility of VR depends primarily on how patients are able to act within the virtual environment. Interaction, real-time feedback, task adaptability, and multisensory stimulation enable repeatable and personalized experiences. Virtual environments can simulate activities of daily living under safer conditions, allowing patients to explore, plan, and act while adapting their responses to the consequences of their actions (Figure 1).



Figura 1. Esercizi di riabilitazione di attività della vita quotidiana, finalizzati all'esercizio integrato di abilità cognitive e motorie in un ambiente controllato mediante sistema di realtà virtuale immersiva VESPA.

Figure 1. Rehabilitation exercises involving activities of daily living, aimed at the integrated training of cognitive and motor skills in a controlled environment using the VESPA immersive virtual reality system.



La VR, da sola o combinata con metodiche di alta specialità come la neuromodulazione, diventa così un contesto nel quale percezione, cognizione e azione possono essere sollecitate congiuntamente, secondo principi di apprendimento e neuroplasticità rilevanti per il recupero neurologico [2,3]. Questa integrazione è particolarmente rilevante per la riabilitazione cognitiva. Attenzione, memoria, funzioni esecutive e abilità visuospatiali possono essere allenate attraverso compiti di complessità crescente, superando la logica dell'esercizio cognitivo isolato. Nella vita quotidiana, infatti, ricordare, orientarsi o decidere richiede di integrare informazioni sensoriali, movimento e comportamento finalizzato. La VR può riprodurre parte di questa complessità in condizioni protette e controllabili, favorendo un approccio più ecologico [4–8]. Anche interventi a prevalente componente motoria possono coinvolgere attenzione, pianificazione e controllo esecutivo; in questa prospettiva, gli exergames rappresentano un esempio di integrazione tra esercizio fisico e stimolazione cognitiva all'interno di compiti interattivi [9]. La stessa prospettiva si estende alla dimensione emotiva e motivazionale. Partecipazione attiva, controllo sulle proprie azioni e feedback possono influenzare la motivazione del paziente. Nell'ictus, programmi di training virtuale sono stati studiati in relazione a funzioni esecutive, prassie e sin-

VR, either as a stand-alone intervention or combined with highly specialized approaches such as neuromodulation, can thus provide a context in which perception, cognition, and action are jointly engaged, in accordance with principles of learning and neuroplasticity that are relevant to neurological recovery [2,3]. This integration is particularly relevant to cognitive rehabilitation. Attention, memory, executive functions, and visuospatial abilities can be trained through tasks of increasing complexity, moving beyond the traditional paradigm of isolated cognitive exercises. In everyday life, remembering, navigating, or making decisions requires the integration of sensory information, movement, and goal-directed behavior. VR can reproduce some of this complexity under safe and controlled conditions, thereby supporting a more ecologically valid approach to rehabilitation [4–8]. Interventions with a predominantly motor component may also engage attention, planning, and executive control. From this perspective, exergames provide an example of how physical exercise and cognitive stimulation can be integrated within interactive tasks [9]. The same perspective extends to emotional and motivational dimensions. Active participation, perceived control over one's actions, and feedback may influence patient motivation. In stroke rehabilitation, virtual training programs have been investigated in rela-



tommi depressivi; nella sclerosi multipla, l'attenzione si è estesa alla relazione tra cognizione, ansia, depressione e autoefficacia emotiva [6-8]. La VR permette inoltre di esplorare dimensioni più complesse, quali cognizione sociale, empatia, e rappresentazione corporea, fino al modo in cui la persona vive il proprio corpo e le proprie azioni nell'ambiente virtuale, coinvolgendo non soltanto ciò che il paziente fa, ma anche la relazione che costruisce con l'ambiente [1,2]. In questo scenario, i percorsi cognitivi innovativi personalizzati si inseriscono nella linea di ricerca sviluppata presso l'IRCCS Centro Neurolesi "Bonino-Pulejo", che ha esplorato da oltre un decennio differenti tecnologie virtuali in diverse condizioni neurologiche, dal Parkinson alle gravi cerebrolesioni acquisite, dalla sclerosi multipla ai disturbi di coscienza e alla lesione midollare, con crescente attenzione ai processi cognitivi, emotivi e comportamentali [7-9]. Le soluzioni domiciliari di Tele-VR hanno inoltre esteso il training cognitivo oltre il setting ospedaliero, favorendo continuità e personalizzazione dell'intervento. Il futuro della VR in neuroriabilitazione non coincide quindi con sistemi sempre più immersivi o complessi. La tecnologia rappresenta il mezzo, non il meccanismo terapeutico. La sfida è comprendere quali caratteristiche dell'ambiente e dell'esperienza siano più appropriate rispetto al processo da riabilitare e alla persona [1,2]. Dal trai-

tion to executive functions, praxis, and depressive symptoms; in multiple sclerosis, research has also addressed the relationships among cognition, anxiety, depression, and emotional self-efficacy [6-8]. VR also makes it possible to explore more complex dimensions, including social cognition, empathy, and body representation, as well as the way individuals experience their own body and actions within the virtual environment. Thus, VR involves not only what patients do, but also the relationship they establish with the environment itself [1,2]. Within this framework, innovative and personalized cognitive rehabilitation pathways are part of the research program developed at the IRCCS Centro Neurolesi "Bonino-Pulejo", which for more than a decade has investigated different virtual technologies across a broad range of neurological conditions, from Parkinson's disease and severe acquired brain injury to multiple sclerosis, disorders of consciousness, and spinal cord injury, with increasing attention to cognitive, emotional, and behavioral processes [7-9]. Home-based Tele-VR solutions have further extended cognitive training beyond the hospital setting, promoting continuity of care and greater personalization of rehabilitation interventions. The future of VR in neurorehabilitation, therefore, does not necessarily lie in increasingly immersive or technologically complex systems. Technology is the me-



ning cognitivo agli ambienti multisensoriali, fino alle esperienze che coinvolgono corpo, emozioni e interazione sociale, la VR offre un continuum di possibilità da trasformare in esperienze terapeutiche significative, personalizzate e trasferibili alla vita quotidiana. La vera innovazione risiede nella capacità del clinico di individuare e scegliere la risorsa innovativa più adeguata ai bisogni della persona.

dium, not the therapeutic mechanism. The key challenge is to identify which characteristics of the environment and the experience are most appropriate for the specific rehabilitation target and for the individual patient [1,2]. From cognitive training and multisensory environments to experiences involving the body, emotions, and social interaction, VR offers a continuum of possibilities that can be translated into meaningful, personalized therapeutic experiences with the potential to transfer to everyday life. The real innovation lies in the clinician's ability to identify and select the technological resource that best matches the individual's rehabilitation needs.





REFERENZE/REFERENCES

1. Slater M and Sanchez-Vives MV (2016) Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. *Front. Robot. AI* 3:74. doi: 10.3389/frobt.2016.00074.
2. Tieri G, Morone G, Paolucci S, Iosa M. Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies. *Expert Rev Med Devices*. 2018;15(2):107-117. doi:10.1080/17434440.2018.1425613.
3. Laver KE, Lange B, George S, Deutsch JE, Saposnik G, Crotty M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database Syst Rev*. 2017;11(11):CD008349. Published 2017 Nov 20. doi:10.1002/14651858.CD008349.pub4.
4. Jahn FS, Skovbye M, Obenhausen K, Jespersen AE, Miskowiak KW. Cognitive training with fully immersive virtual reality in patients with neurological and psychiatric disorders: A systematic review of randomized controlled trials. *Psychiatry Res*. 2021;300:113928. doi:10.1016/j.psychres.2021.113928.
5. Tortora C, Di Crosta A, La Malva P, et al. Virtual reality and cognitive rehabilitation for older adults with mild cognitive impairment: A systematic review. *Ageing Res Rev*. 2024;93:102146. doi:10.1016/j.arr.2023.102146.
6. Wender CLA, DeLuca J, Sandroff BM. Developing the Rationale for Including Virtual Reality in Cognitive Rehabilitation and Exercise Training Approaches for Managing Cognitive Dysfunction in MS. *NeuroSci*. 2022;3(2):200-213. Published 2022 Apr 3. doi:10.3390/neurosci3020015.
7. Maggio MG, Latella D, Bonanno L, et al. Comparing the Effect of Semi-Immersive Virtual Reality, Computerized Cognitive Training, and Traditional Rehabilitation on Cognitive Function in Multiple Sclerosis: A Randomized Clinical Trial. *Ann Clin Transl Neurol*. Published online April 10, 2026. doi:10.1002/acn3.70390.
8. De Luca R, Gangemi A, Maggio MG, et al. Effects of Virtual Rehabilitation Training on Post-Stroke Executive and Praxis Skills and Depression Symptoms: A Quasi-Randomised Clinical Trial. *Diagnostics (Basel)*. 2024;14(17):1892. Published 2024 Aug 28. doi:10.3390/diagnostics14171892.
9. Maggio MG, Baglio F, Maione R, et al. The overlooked role of exergames in cognitive-motor neurorehabilitation: a systematic review. *NPJ Digit Med*. 2025;8(1):419. Published 2025 Jul 9. doi:10.1038/s41746-025-01843-4.



**Prof. Antonino Casile**

*Dipartimento BIOMORF
Università degli Studi di Messina*



Le frontiere della riabilitazione motoria: la teleriabilitazione in Realtà Virtuale immersiva
The frontiers of motor rehabilitation: telerehabilitation in immersive Virtual Reality

SEMINARIO SCIENTIFICO

L'ictus è una delle principali cause di disabilità acquisita nell'età adulta: solo in Italia se ne contano circa 200.000 nuovi casi l'anno, uno ogni due minuti e mezzo. Nella fase acuta provoca nell'80% dei pazienti un'emiparesi dell'arto superiore, che permane in forma cronica in circa il 40% dei casi. La riabilitazione motoria inizia in ospedale e prosegue per mesi dopo la dimissione, obbligando il paziente a recarsi due o tre volte a settimana presso una struttura sanitaria. A costi umani gravissimi si sommano costi economici ingenti: nei 28 paesi dell'Unione Europea l'ictus pesa per circa 57 miliardi di euro l'anno¹, una cifra che impone di contenere la spesa senza sacrificare l'efficacia delle cure.

La neuroriabilitazione mira a stimolare la plasticità del cervello per massimizzare il recupero. Poggia su tre ingredienti: la ripetizione del gesto, l'alto dosaggio e l'esecuzione di esercizi dotati di significato funzionale. Il dosaggio è il fattore più determinante: idealmente servirebbero tre o quattro sessioni a settimana, sotto la supervisione di un terapeuta. Di qui la sfida per il nostro Sistema Sanitario: erogare terapie ad alto dosaggio e con supervisione medica, riducendo però i

SCIENTIFIC SEMINAR

Stroke is one of the leading causes of acquired disability in adulthood: in Italy alone, some 200,000 new cases are recorded each year — one every two and a half minutes. In its acute phase it causes hemiparesis of the upper limb in 80% of patients, which persists in chronic form in about 40% of cases. Motor rehabilitation begins in hospital and continues for months after discharge, obliging the patient to travel to a healthcare facility two or three times a week. To these grave human costs are added substantial economic ones: across the 28 countries of the European Union, stroke costs roughly €57 billion a year¹, a figure that makes it imperative to contain expenditure without sacrificing the effectiveness of care.

Neurorehabilitation aims to stimulate the brain's plasticity in order to maximize recovery. It rests on three ingredients: repetition of the movement, high dosage, and the performance of exercises with functional meaning. Dosage is the most decisive factor: ideally, three or four sessions a week would be needed, under a therapist's supervision. Hence the challenge for our health service: delivering therapies that



costi che ciò comporta.

Nel nostro laboratorio all'Università di Messina abbiamo progettato, proprio per rispondere a questa sfida, un sistema di riabilitazione fondato sulla realtà virtuale immersiva, che abbiamo chiamato RehabVR. Indossando un visore commerciale dal costo di poche centinaia di euro il paziente è immerso in un ambiente virtuale in cui esegue esercizi concepiti a scopo riabilitativo, mentre un'applicazione sul computer del terapeuta ne restituisce lo svolgimento in tempo reale, via internet: il medico può così seguire il paziente, dialogare con lui e modificarne gli esercizi anche a distanza. Questa possibilità di supervisione da remoto consente di dimettere prima i pazienti e di ridurre gli accessi in ospedale nel periodo successivo. Perché la realtà virtuale? Perché trasformando esercizi ripetitivi e faticosi in attività coinvolgenti se ne migliora l'aderenza, e con essa quel dosaggio effettivo che più conta per il recupero. E non si tratta di una scommessa: trial controllati e revisioni sistematiche documentano già miglioramenti clinici con la riabilitazione in VR. Su queste basi ne stiamo valutando l'efficacia nei pazienti con ictus (trial multicentrico coordinato dall'Università di Ferrara) e con morbo di Parkinson (progetto rAIdD, Università di Messina).

In aggiunta, alla possibilità di spostare a casa del paziente una parte del percorso riabilitativo, l'applicazione della moderna realtà virtuale immersiva alla riabilitazione motoria ha, secondo me, un altro aspetto molto promettente: mentre eroga la terapia, RehabVR misura. Mentre il paziente gioca in uno degli esercizi (e.g., deve allungare la

are high in dosage and medically supervised while reducing the costs this entails.

In our laboratory at the University of Messina we designed, precisely to meet this challenge, a rehabilitation system based on immersive virtual reality, which we called RehabVR. Wearing a commercial headset costing a few hundred euros, the patient is immersed in a virtual environment in which he or she performs exercises designed for rehabilitative purposes, while an application on the therapist's computer relays their execution in real time, over the internet: the physician can thus follow the patient, talk with him or her, and modify the exercises even remotely. This possibility of remote supervision makes it possible to discharge patients earlier and to reduce their hospital visits in the subsequent period. Why virtual reality? Because turning repetitive, tiring exercises into engaging activities improves adherence, and with it the effective dosage that matters most for recovery. And this is not a gamble: controlled trials and systematic reviews already document clinical improvements with VR-based rehabilitation. On these foundations we are assessing its efficacy in stroke patients (a multicenter trial coordinated by the University of Ferrara) and in patients with Parkinson's disease (the rAIdD project, University of Messina).

In addition to the possibility of moving part of the rehabilitation pathway into the patient's home, the application of modern immersive virtual reality to motor rehabilitation has, in my view, another very promising aspect: while it delivers therapy, RehabVR measures. While the patient plays one of the exercises — for example, reaching out to knock down virtual glas-



mano e far cadere dei bicchieri virtuali, un gesto vicino a quelli della vita quotidiana) il sistema registra silenziosamente tempi di esecuzione, traiettorie e velocità dei movimenti, trasformandoli in una stima quantitativa del recupero. Oggi il grado di compromissione si valuta con scale cliniche, come, per esempio, quella di Fugl-Meyer, che richiedono personale formato e tempi lunghi. Abbiamo mostrato che indici semplici, calcolati in automatico dal visore (ad esempio la differenza dei tempi di esecuzione tra arto sano e arto colpito), correlano con quei punteggi clinici, e che le misure di posizione e velocità della mano fornite dal visore concordano con quelle di un sistema professionale di motion capture, a una frazione del costo. Per esempio, abbiamo mostrato che le traiettorie registrate dal visore di realtà virtuale sono sufficienti per rivelare le differenze di ampiezza e fluidità tra i due arti. In altre parole, un dispositivo da poche centinaia di euro può offrire al medico parametri clinicamente significativi, calcolabili al termine di ogni seduta e potenzialmente da remoto.

Nulla di tutto questo sostituisce il terapeuta o i sistemi di misura ad alta precisione. Suggestisce però che le tecnologie di realtà virtuale immersiva possono spostare a casa del paziente una parte della terapia e una parte della valutazione dei progressi, senza intaccarne l'efficacia e con benefici concreti per i bilanci del nostro Servizio Sanitario Nazionale.

¹*Dato relativo al 2017 per i 28 Stati membri dell'Unione Europea. Fonte: Luengo-Fernandez R., Violato M., Candio P., Leal J. (2020). Economic burden of stroke across Europe: a population-based cost analysis. European Stroke Journal, 5(1), 17–25.*

ses, a gesture close to those of everyday life — the system silently records completion times, trajectories, and the velocity of movements, turning them into a quantitative estimate of recovery. Today the degree of impairment is assessed with clinical scales, such as the Fugl-Meyer scale, which require trained personnel and lengthy administration times. We have shown that simple indices, computed automatically by the headset (for instance the difference in completion times between the healthy and the affected limb), correlate with those clinical scores, and that the estimates of hand position and velocity provided by the headset agree with those of a professional motion-capture system, at a fraction of the cost. For example, we have shown that the trajectories recorded by the virtual-reality headset are enough to reveal the differences in amplitude and smoothness between the two limbs. In other words, a device costing a few hundred euros can offer the physician clinically meaningful parameters, computable at the end of each session and potentially from a distance.

None of this replaces the therapist or high-precision measurement systems. It does suggest, however, that immersive virtual reality technologies can move part of the therapy — and part of the assessment of progress — into the patient's home, without undermining its effectiveness and with concrete benefits for the budgets of our National Health Service.

¹*Figure for 2017 for the 28 European Union member states. Source: Luengo-Fernandez R., Violato M., Candio P., Leal J. (2020). Economic burden of stroke across Europe: a population-based cost analysis. European Stroke Journal, 5(1), 17–25.*

PER APPROFONDIRE/FURTHER READING

Fregna G., Schincaglia N., Baroni A., Straudi S., Casile A. (2022). A novel immersive virtual reality environment for the motor rehabilitation of stroke patients: a feasibility study. *Frontiers in Robotics and AI*, 9, 906424.

Casile A., Fregna G., Boarini V., Paoluzzi C., Manfredini F., Lamberti N., Baroni A., Straudi S. (2023). Quantitative comparison of hand kinematics measured with a markerless commercial head-mounted display and a marker-based motion capture system in stroke survivors. *Sensors*, 23(18), 7906.

Borzelli D., Boarini V., Casile A. (2025). A quantitative assessment of the hand kinematic features estimated by the Oculus Quest 2. *Scientific Reports*, 15, 8842.

Laver K.E., Lange B., George S., Deutsch J.E., Saposnik G., Crotty M. (2017). Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 11, CD008349.

Mekbib D.B., Debeli D.K., Zhang L. et al. (2021). A novel fully immersive virtual reality environment for upper extremity rehabilitation in patients with stroke. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1493(1), 75–89.

Kwakkel G. (2006). Impact of intensity of practice after stroke: issues for consideration. *Disability and Rehabilitation*, 28(13–14), 823–830.

Doumas I., Everard G., Dehem S., Lejeune T. (2021). Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta-analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 18(1), 100.

Kwakkel G., Van Wegen E., Burridge J.H. et al. (2019). Standardized measurement of quality of upper limb movement after stroke: consensus-based core recommendations from the Second Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable. *International Journal of Stroke*, 14(8), 783–791.

Alt Murphy M., Willén C., Sunnerhagen K.S. (2011). Kinematic variables quantifying upper-extremity performance after stroke during reaching and drinking from a glass. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 25(1), 71–80.

Maceira-Elvira P., Popa T., Schmid A.-C., Hummel F.C. (2019). Wearable technology in stroke rehabilitation: towards improved diagnosis and treatment of upper-limb motor impairment. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 16, 142.

Liz L., da Silva T.G., Michaelsen S.M. (2023). Validity, reliability, and measurement error of the remote Fugl-Meyer assessment by videoconferencing: Tele-FMA. *Physical Therapy*, 103, pzad054.

**Mirjam Bonanno***Ricercatori - Researchers**IRCCS "Bonino Pulejo"***Paolo De Pasquale**

Realtà Virtuale e neuroriabilitazione motoria: dal gesto alla terapia personalizzata

La neuroriabilitazione motoria si basa su una pratica ripetuta e specifica per il compito, la cui dose e progressione vengono adattate alle caratteristiche e agli obiettivi del paziente [1]. La realtà virtuale (VR) può trasformare questa pratica in un'esperienza interattiva, in cui il cammino o un gesto motorio permettono di raggiungere obiettivi digitali. Negli exergames il compito assume la forma di una sfida: bersagli, punteggi e livelli possono sostenere il coinvolgimento e rendere più accettabile la ripetizione [2]. La VR può fornire in tempo reale feedback multisensoriali e adattare progressivamente difficoltà e assistenza alle prestazioni della persona [2,3]. I feedback sono prevalentemente visivi e acustici, mentre quelli tattili o propriocettivi possono essere aggiunti mediante dispositivi aptici o robotici [4]. Nella riabilitazione post-ictus, recenti evidenze ne sostengono soprattutto l'impiego in aggiunta alla terapia usuale, anche per aumentarne la dose [5]. Si crea così un circuito sensomotorio nel quale il paziente agisce e il sistema misura la risposta, restituendo informazioni sul risultato, per esempio il raggiungimento

Virtual Reality and motor neurorehabilitation: from movement to personalized therapy

Motor neurorehabilitation is based on repeated, task-specific practice, with dose and progression tailored to the patient's characteristics and goals [1]. Virtual reality (VR) can transform this practice into an interactive experience in which walking or performing a motor action is used to achieve digital goals. In exergames, the task takes the form of a challenge: targets, scores, and levels can support engagement and make repetition more acceptable [2]. VR can provide augmented multisensory feedback in real time and progressively adapt task difficulty and assistance to the person's performance [2,3]. Feedback is predominantly visual and auditory, while tactile or proprioceptive feedback can be added through haptic or robotic devices [4]. In post-stroke rehabilitation, recent evidence mainly supports the use of VR as an adjunct to usual care, also to increase the treatment dose [5]. This creates a sensorimotor loop in which the patient acts and the system measures the response, providing information about the outcome, such as reaching a target, and about movement quality, including



di un bersaglio, e sulla qualità del gesto, come traiettoria, ampiezza e velocità. Il rapporto tra movimento e feedback può essere modulato per enfatizzare specifici aspetti della prestazione o guidare il paziente verso pattern motori più funzionali [3]. La VR permette quindi di intervenire sulla relazione tra intenzione, azione e percezione del risultato, rendendo il feedback parte integrante dell'esercizio terapeutico.

Questi principi possono essere applicati attraverso differenti configurazioni di VR, dai sistemi non immersivi e semi-immersivi fino ai visori immersivi [6], integrando tecnologie per rilevare e analizzare il movimento. Telecamere e sensori indossabili possono rilevare il gesto. La VR può inoltre essere integrata con sistemi robotici ed esoscheletri per gli arti inferiori e superiori, come Lokomat e ArmeoPower. Questi dispositivi assistono il movimento e, mediante sensori di posizione, rotazione e forza, permettono all'ambiente virtuale di rispondere in tempo reale alle azioni del paziente e di restituire un feedback immediato sulla prestazione. Il CAREN, in uso presso il Centro Neurolesi "Bonino-Pulejo", integra uno schermo panoramico a 180° con un tapis roulant strumentato con sensori di forza, piattaforma mobile e sistema optoelettronico per la registrazione e l'analisi del movimento [7] (Figura 1). Nei sistemi immersivi, visori dotati di display e tecnologie di tracciamento del movimento permettono all'ambiente digitale di seguire i movimenti di testa, mani o controller. Telecamere integrate e unità inerziali contribuiscono alla stima della posizione e dell'orientamento dei segmenti corporei tracciati, mentre nei si-

trajjectory, amplitude, and speed. The relationship between movement and feedback can be modulated, to emphasize specific aspects of performance or guide the patient toward more functional motor patterns [3]. VR can therefore shape the relationship among intention, action, and perception of the outcome, making feedback an integral part of therapeutic exercise.

These principles can be implemented through different VR configurations, ranging from non-immersive and semi-immersive systems to immersive headsets [6], integrating technologies to detect and analyze movement. Cameras and wearable sensors can detect movement. VR can also be integrated with lower- and upper-limb robotic systems and exoskeletons, such as Lokomat and ArmeoPower. These devices assist movement and, through position, rotation and force sensors, allow the virtual environment to respond in real time to the patient's actions and provide immediate performance feedback. The CAREN system at the Centro Neurolesi "Bonino-Pulejo" combines a 180° panoramic screen with an instrumented treadmill equipped with force sensors, a motion platform, and an optoelectronic system for motion capture and analysis [7] (Figure 1). In immersive systems, headsets equipped with displays and motion-tracking technologies allow the digital environment to respond to movements of the head, hands, or controllers. Integrated cameras and inertial units contribute to estimating the position and orientation of the tracked body segments, while computer-vision techniques in

stemi più recenti, tecniche di visione artificiale consentono il riconoscimento delle mani e del movimento, senza controller o sensori esterni [8].

newer systems enable hand and motion recognition without controllers or external sensors [8].



Figura 1. Esercizio riabilitativo in realtà virtuale tramite l'utilizzo del sistema CAREN. Il paziente esegue un compito di intercettazione di bersagli virtuali (farfalle) mentre cammina in un bosco.

Figure 1. VR-based rehabilitation exercise using the CAREN system. The patient performs a virtual-target interception task (butterflies) while walking through a forest.

Indipendentemente dalla tecnologia utilizzata, i sensori permettono di descrivere aspetti complementari della prestazione motoria. La cinematica documenta come avviene il movimento attraverso parametri quali posizione, angoli articolari, ampiezza, velocità, fluidità e meccanismi di compensazione. Queste informazioni

Regardless of the technology used, sensors can describe complementary aspects of motor performance. Kinematics characterizes movement through parameters such as position, joint angles, range of motion, velocity, smoothness, and compensatory mechanisms. These data can be acquired using optoelectronic sy-



possono essere acquisite mediante sistemi optoelettronici, telecamere per la visione artificiale, sensori inerziali (IMU) applicati ai segmenti corporei o trasduttori integrati in robot ed esoscheletri. Pedane di forza, tapis roulant strumentati e sensori di forza o coppia permettono di quantificare le forze di reazione al suolo e l'interazione con il dispositivo. Integrate con i dati cinematici e con modelli biomeccanici, queste misure consentono di stimare momenti e potenze articolari, utili per un'analisi funzionale del movimento. L'elettromiografia di superficie (sEMG) può completare la valutazione fornendo informazioni sui tempi e sull'intensità di attivazione muscolare, sulla co-attivazione e sull'affaticamento [9]; può inoltre essere utilizzata come segnale di controllo o di biofeedback [3].

Il valore aggiunto della VR non risiede quindi nello schermo più spettacolare, ma nella possibilità di integrare, all'interno di un unico percorso terapeutico, esercizi coinvolgenti, misurazione oggettiva della prestazione e progressione personalizzata. Il clinico interpreta i dati raccolti e adatta difficoltà, assistenza e obiettivi terapeutici. L'esercizio può così diventare più coinvolgente, misurabile e personalizzato. Restano essenziali la corretta calibrazione dei sistemi, la qualità dei dati, la standardizzazione delle metriche, la sicurezza e la tollerabilità, soprattutto in presenza di deficit cognitivi o sensoriali, affaticamento o disturbi legati all'esperienza virtuale, come nausea, vertigini e disorientamento (cybersickness).

In conclusione, la realtà virtuale non sostituisce il terapeuta, ma amplia le possibilità di trattamento, misurazione e osservazione del recupero motorio.

stems, computer-vision cameras, inertial measurement units (IMUs) attached to body segments, or motion transducers integrated into robots and exoskeletons. Force plates, instrumented treadmills, and force or torque sensors can instead quantify ground reaction forces and interaction with the device. When combined with kinematic data and biomechanical models, these measurements enable the estimation of joint moments and powers, which are useful for functional movement analysis. Surface electromyography (sEMG) can complement the assessment by providing information on the timing and intensity of muscle activation, co-activation, and fatigue [9]; it can also be used as a control or biofeedback signal [3].

The added value of VR therefore lies not in a more spectacular display, but in the ability to integrate, within the therapeutic pathway, engaging exercises, objective performance measurement, and personalized progression. The clinician interprets the collected data and adapts difficulty, assistance, and therapeutic goals. Exercise can thus become more engaging, measurable, and personalized. Proper system calibration, data quality, metric standardization, safety, and tolerability remain essential, particularly in the presence of cognitive or sensory deficits, fatigue, or symptoms associated with the virtual experience, such as nausea, dizziness, and disorientation (cybersickness).

In conclusion, VR does not replace the therapist; it expands the possibilities for treating, measuring, and monitoring motor recovery.

REFERENZE/REFERENCES

1. Pomeroy, V.; Aglioti, S.M.; Mark, V.W.; McFarland, D.; Stinear, C.; Wolf, S.L.; Corbetta, M.; Fitzpatrick, S.M. Neurological Principles and Rehabilitation of Action Disorders: Rehabilitation Interventions. *Neurorehabil Neural Repair* 2011, 25, 33S-43S, doi:10.1177/1545968311410942.
2. Maggio, M.G.; Baglio, F.; Maione, R.; Calapai, R.; Di Iulio, F.; dos Santos, P.C.R.; Maldonado-Díaz, M.; Pistorino, G.; Cerasa, A.; Quartarone, A.; et al. The Overlooked Role of Exergames in Cognitive-Motor Neurorehabilitation: A Systematic Review. *npj Digit. Med.* 2025, 8, 419, doi:10.1038/s41746-025-01843-4.
3. De Pasquale, P.; De Bartolo, D.; Russo, M.; Berger, D.J.; Maselli, A.; Borzelli, D.; Colamariano, E.; Mattia, D.; Nissler, C.; Nowak, M.; et al. User-Centered Development of a Personalized Adaptive Mirror Therapy for Upper-Limb Post-Stroke Rehabilitation Using Virtual Reality and Myoelectric Control. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2025, 13, doi:10.3389/fbioe.2025.1655416.
4. Proulx, C.E.; Louis Jean, M.T.; Higgins, J.; Gagnon, D.H.; Dancause, N. Somesthetic, Visual, and Auditory Feedback and Their Interactions Applied to Upper Limb Neurorehabilitation Technology: A Narrative Review to Facilitate Contextualization of Knowledge. *Front. Rehabil. Sci.* 2022, 3, doi:10.3389/fresc.2022.789479.
5. Laver, K.E.; Lange, B.; George, S.; Deutsch, J.E.; Saposnik, G.; Chapman, M.; Crotty, M. Virtual Reality for Stroke Rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2025, 2025, doi:10.1002/14651858.CD008349.pub5.
6. Tieri, G.; Morone, G.; Paolucci, S.; Iosa, M. Virtual Reality in Cognitive and Motor Rehabilitation: Facts, Fiction and Fallacies. *Expert Review of Medical Devices* 2018, 15, 107–117, doi:10.1080/17434440.2018.1425613.
7. Bonanno, M.; De Pasquale, P.; De Marchis, C.; Lombardo Facciale, A.; Paladina, G.; Fonti, B.; Quartarone, A.; Calabrò, R.S. Might Patients with Cerebellar Ataxia Benefit from the Computer Assisted Rehabilitation ENvironment (CAREN)? A Pilot Study Focusing on Gait and Balance. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2024, 12, doi:10.3389/fbioe.2024.1385280.
8. De Pasquale, P.; Bonanno, M.; Mojdehdehbaher, S.; Quartarone, A.; Calabrò, R.S. The Use of Head-Mounted Display Systems for Upper Limb Kinematic Analysis in Post-Stroke Patients: A Perspective Review on Benefits, Challenges and Other Solutions. *Bioengineering* 2024, 11, 538, doi:10.3390/bioengineering11060538.
9. Campanini, I.; Disselhorst-Klug, C.; Rymer, W.Z.; Merletti, R. Surface EMG in Clinical Assessment and Neurorehabilitation: Barriers Limiting Its Use. *Front Neurol* 2020, 11, 934, doi:10.3389/fneur.2020.00934.



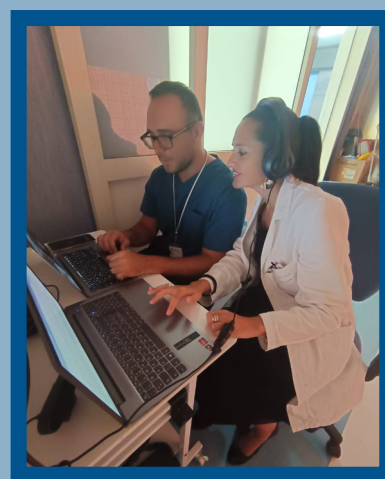
CAREN con Team



VRRS Physio



BTS con Team CAREN



Tele nutrizionale e cognitiva
con VRRS HomeKit



Team clinico con il sistema di realtà virtuale
semi-immersiva BTS Nirvana presso l'Ospedale Piemonte