



## MMC e CTD

Un dispositivo robotico indossabile riduce il rischio di patologie

■ di **Andrea Cini, Matteo Russo, Maria Lemmi**, Azienda USL 5 di Pisa - Dipartimento della Prevenzione - Settore Prevenzione e Sicurezza nei luoghi di lavoro, **Giuseppe Pozzana**, Pont-Tech, e **Alessandro Filippeschi, Basilio Lenzo, Mario Priolo, Fabio Salседo**, Laboratorio PERCRO - TECIP - Scuola superiore Sant'Anna

*Nel luglio 2010 è nato il Piano Mirato biennale promosso dalla Regione Toscana. Il gruppo di lavoro nato per lo sviluppo del Piano ha focalizzato l'attenzione su dati INAIL relativi alle malattie professionali, in particolare a quelle dell'apparato muscolo-scheletrico, derivanti da movimentazione manuale dei carichi e da sovraccarico biomeccanico, in particolare nel settore dell'edilizia. È stato progettato un concept tecnologico, basato sulla conoscenza dello stato dell'arte delle tecnologie robotiche di interazione con l'uomo, adatto a fornire forze di supporto al movimento.*

L'approccio preventivo per il miglioramento della sicurezza e dell'igiene sui luoghi di lavoro è attualmente mirato prevalentemente agli aspetti organizzativi, formativi e gestionali più che sull'innovazione tecnologica, in particolare nei settori a più bassa industrializzazione e a più alta incidenza del fattore umano e per questo motivo poco standardizzabili come l'edilizia, l'impiantistica, la cantieristica navale ecc.

Attenzione minore è dedicata, infatti, alla valorizzazione degli apporti che le nuove tecnologie possono portare direttamente su questo terreno.

Tuttavia, lo sviluppo tecnologico relativo ad attrezzature, dispositivi di protezione individuale, prodotti o, in generale, a processi potrebbe generare effetti positivi ai fini del miglioramento della sicurezza sui luoghi di lavoro anche in settori attualmente poco industrializzati.

Da questa valutazione, nel luglio 2010 è nato il Piano Mirato biennale promosso dalla Regione Toscana - Direzione generale Diritto di cittadinanza e coesione sociale - Settore Prevenzione e sicurezza nei luoghi di lavoro, con affidamento dello sviluppo del progetto all'Azienda USL 5 di Pisa - Unità funzionale Prevenzione e sicurezza nei luoghi di

lavoro - Zona Pisana.

Gli obiettivi specifici previsti dal Piano consistono nella diminuzione di fattori di rischio presenti durante le attività lavorative, attraverso l'utilizzo di innovative attrezzature di lavoro e/o componenti di sicurezza progettati allo scopo all'interno del processo produttivo di imprese operanti sul territorio provinciale.

Soggetto attuatore del Piano è stata l'Unione dei Comuni della Valderra che ha usufruito del lavoro del consorzio<sup>[1]</sup>, nato per sostenere e rafforzare la competitività territoriale nella ricerca scientifica e di un laboratorio<sup>[2]</sup>.

Il consorzio e la Scuola superiore Sant'Anna da tempo, infatti, hanno collaborato per promuovere processi innovativi nel sistema produttivo. In questo contesto, grazie a

[1] Pont-Tech (Pontedera & Tecnologia), è il consorzio per la ricerca industriale e il trasferimento tecnologico costituito nel 1996 da Enti locali, Università e Imprese del distretto meccanico di Pontedera. Gestisce il Centro pubblico per l'innovazione tecnologica e l'incubatore di imprese CERFITT.

[2] Laboratorio PERCRO (Perceptual robotics laboratory) della Scuola superiore Sant'Anna di Pisa.

cofinanziamenti della Regione Toscana, avevano portato a termine il progetto ESSETRE che, muovendo dallo studio di casi concreti di applicazione delle tecnologie della simulazione, della *virtual reality* e della *augmented reality* ai processi produttivi di specifici settori quali il lapideo, la logistica portuale, l'industria meccanica aveva anche prefigurato la possibilità di poter utilizzare innovazioni tecnologiche nei processi, non solamente ai fini di una ottimizzazione dei cicli e dei processi stessi, ma anche in funzione di incrementi della sicurezza sui luoghi di lavoro.

Dall'approfondimento di questa ipotesi di lavoro è scaturita una proposta di progetto che, veicolata dall'Unione dei Comuni della Valdera (interlocutore istituzionale del consorzio), è stata fatta propria dalla Regione Toscana che ne ha affidato la realizzazione all'USL di Pisa.

L'Unione Valdera ha preso parte al progetto in qualità di istituzione deputata a facilitare e a promuovere nuovi processi di sviluppo sul territorio di riferimento, principalmente attraverso l'interconnessione di piani disciplinari e di lavoro tra loro diversi, dunque, in vista di possibili sviluppi successivi alla fase di sperimentazione del prototipo. L'Unione, infatti, può essere vista come "dominio applicativo" entro il quale superare le logiche strettamente settoriali e realizzare approcci multidisciplinari integrati, in funzione dello sviluppo di nuova conoscenza e del potenziamento del capitale sociale a livello locale.

### La scelta del progetto

Muovendo dall'assunto di carattere generale che fosse possibile speri-

mentare approcci innovativi alla sicurezza sul lavoro attraverso il ricorso mirato a nuove tecnologie, il primo passo da affrontare è consistito nella individuazione del caso concreto sul quale orientare il progetto di ricerca. All'interno di una gamma di possibili opzioni molto vasta, era possibile adottare due alternative modalità di approccio. In un primo caso, il progetto poteva essere orientato alla realizzazione di specifici dispositivi mirati a dare risposta a un bisogno già concretamente rilevato. In un secondo tipo di approccio, era possibile partire, invece, dall'analisi dei dati INAIL, relativi ai profili di rischio, agli infortuni e alle malattie professionali, in modo da individuare il settore o, addirittura, la singola operazione portatrice di un maggior costo sociale e sviluppare soluzioni allo specifico problema così individuato. L'opzione prescelta è stata proprio quest'ultima con particolare riferimento alle malattie professionali.

Latenti e lente nella loro manifestazione, pericolose e spesso sottovalutate, le malattie professionali sono patologie che i lavoratori contraggono per effetto dei lavori svolti. La definizione di malattia professionale può essere "qualsiasi stato morboso che possa essere posto in rapporto causale con lo svolgimento di una qualsiasi attività lavorativa"<sup>[3]</sup>.

Questa caratteristica di graduale progressiva azione di fattori presenti nell'ambiente di lavoro, che possono compromettere la salute dei lavoratori, da un lato diversifica le malattie professionali dagli infortuni, che hanno caratteristiche opposte di traumaticità imme-

diata, dall'altra è alla radice di una storica sottovalutazione dovuta anche alle difficoltà di individuazione e di accertamento del nesso causale e a un significativo fenomeno di sottodenuncia da parte dei medici. L'aumento delle denunce riscontrato negli ultimi anni deve essere senz'altro ricondotto, da una parte, a una più matura consapevolezza raggiunta dai lavoratori, dai datori di lavoro e dai medici, dall'altra, soprattutto, all'introduzione delle nuove tabelle delle malattie professionali indennizzabili, avvenuto nel 2008, che ha reso molto più facile l'iter di indennizzo di una lunga serie di malattie cronico-degenerative (tumori e malattie muscolo-scheletriche).

Dall'analisi dei dati INAIL è emersa un'elevata incidenza di malattie professionali dell'apparato muscolo-scheletrico, derivanti da movimentazione manuale dei carichi e da sovraccarico biomeccanico (*Cumulative Trauma Disorders, CTD*) (si veda la *tabella 1*). Queste patologie, quali, per esempio, tendiniti, affezioni dei dischi intervertebrali, sindrome del tunnel carpale ecc., sono particolarmente invalidanti per il lavoratore, riducendone significativamente lo stato di salute oltre che la produttività. In questo ambito, il settore edile italiano è particolarmente a rischio contribuendo, infatti, per circa il 15% al numero totale delle malattie professionali che ogni anno vengono denunciate all'INAIL, senza contare i costi sociali indiretti generati dalle giornate perse, per la perdita di capacità lavorativa e per le cure necessarie conseguenti<sup>[4]</sup>.

Sulla base dei dati disponibili è stato stimato che in Italia siano circa

[3] Per maggiori informazioni sul punto si veda, del Ministero del Lavoro e delle Politiche sociali, *Malattie Professionali: conoscerle e prevenirle*, in Rivista on line Sicurezza e Prevenzione n. 6/2012.

[4] Per un approfondimento della materia, si veda di Marco Bottazzi, *Le patologie derivanti dalle attività lavorative: i dati dell'indagine*, Atti Convegno FILLEA, novembre 2011.

TABELLA 1

**MALATTIE PROFESSIONALI DENUNCIATE PER SETTORI**

Malattie denunciate nell'industria e servizi				
2007	2008	2009	2010	2011
26.844	27.875	30.542	35.620	38.073
Malattie osteo-articolari e muscolo-tendinee denunciate nell'industria e servizi				
2007	2008	2009	2010	2011
10.415	11.898	15.493	20.799	23.708
Malattie denunciate dalle aziende delle costruzioni				
2007	2008	2009	2010	2011
2.405	3.641	4.150	5.045	5.665

Fonte: Rapporto statistico INAIL - 2012

1.900.000 i lavoratori del settore delle costruzioni, occupati soprattutto in piccole e piccolissime imprese.

Oltre l'80% delle imprese (escluse quelle artigiane) ha un numero di addetti inferiore alle 5 unità (solo lo 0,80% delle imprese è superiore ai 50 addetti). Le cooperative sono presenti in una quota importante pari a circa il 10% delle imprese pari al 9,8% degli occupati del settore.

La dimensione europea del problema nel settore dell'edilizia è confermata, peraltro, da un documento elaborato nel 2004 da parte dell'*European Agency for Safety and Health at Work*<sup>[5]</sup> nel quale è stato evidenziato come i lavoratori edili soffrano più dei colleghi di altri settori di disturbi muscoloscheletrici, come lombalgie, cervicalgie e problemi degli arti.

Una volta identificato il fattore di rischio e il settore produttivo sui quali intervenire, è stato definito un *concept* tecnologico di riferimento per l'attività di ricerca e di sviluppo del progetto, sulla base della conoscenza dello stato dell'arte delle tecnologie robotiche di interazione

con l'uomo (*human robot interaction, HRI*), adatte a fornire forze di supporto al movimento.

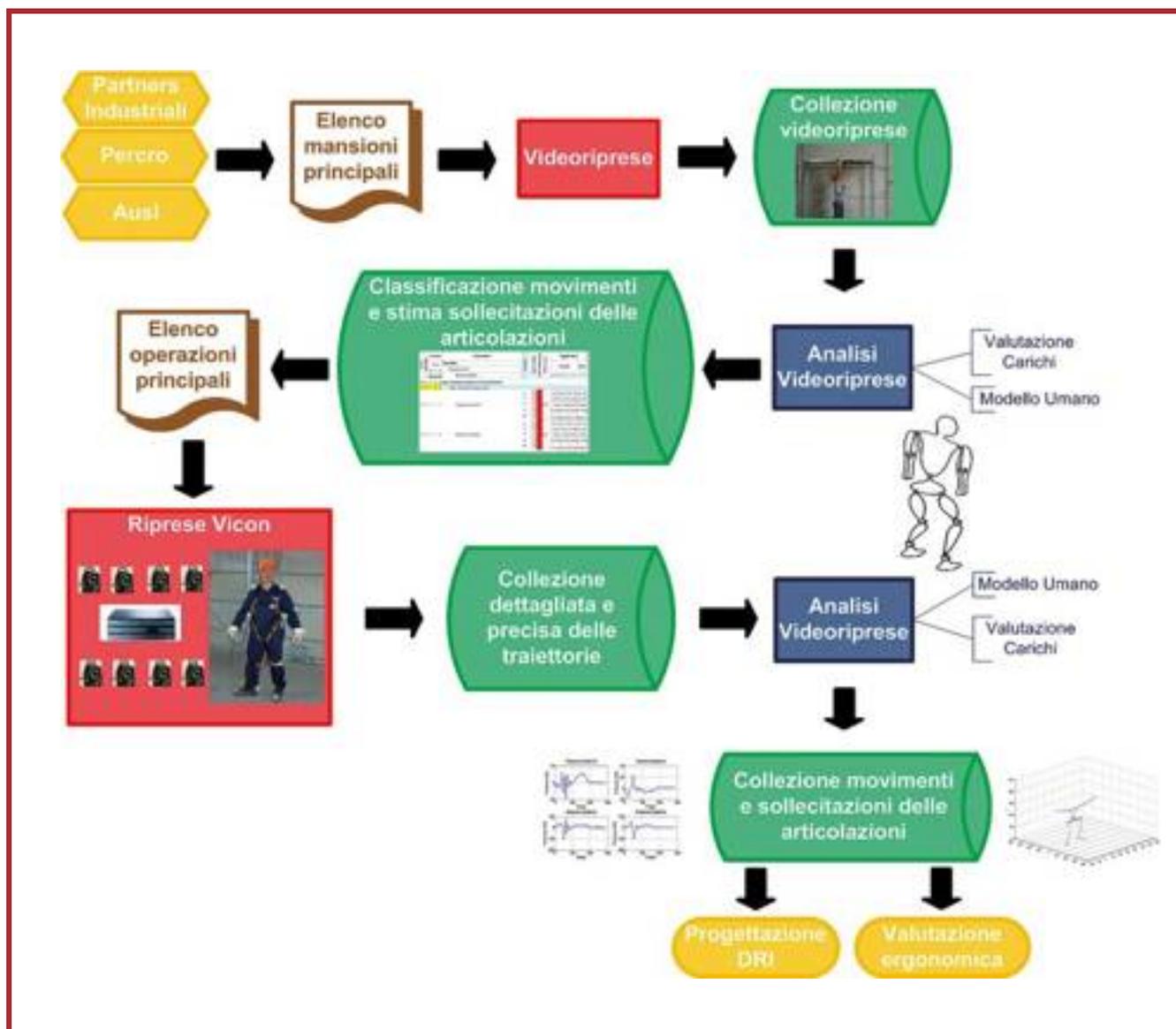
In particolare, questo *concept* tecnologico, denominato dispositivo robotico indossabile (DRI), consiste in una struttura esoscheletrica, dotata di mezzi autonomi di attuazione, di controllo e di stoccaggio dell'energia, indossabile sul corpo del

lavoratore e in grado di consentire ampiezze di movimenti degli arti superiori e inferiori paragonabili a quelle naturali dell'uomo e di fornire forze di supporto verticali alla movimentazione dei carichi, in modo da ridurre gli sforzi articolari agenti sull'apparato muscolo-scheletrico del lavoratore (si vedano le *figure 1.1 e 1.2*).



▲ Figure 1.1 e 1.2 - Concept del dispositivo robotico indossabile (DRI)

[5] Si veda, per maggiori informazioni, della *European Agency for Safety and Health at Work, Improving safety and health in construction: the need for action during procurement, construction and maintenance*, Report, 2004.



▲ Figura 2 - Task analysis

### I primi passi per la progettazione

Individuati la riduzione del rischio da movimentazione manuale dei carichi e da sovraccarico biomeccanico e il settore edile come elementi sui quali focalizzare l'attività di ricerca e di sviluppo, è stato deciso di analizzare il problema avvalendosi della collaborazione di un certo numero di aziende campione del territorio, che hanno dato la loro disponibilità a partecipare volontariamente al progetto. Alcune imprese del territorio han-

no partecipato a questa prima fase, specializzate in montaggio ponteggi, lavori generali di edilizia e realizzazione prefabbricati.

In via preliminare sono stati compiuti vari sopralluoghi direttamente nei cantieri, con osservazione diretta, con ausilio di tecniche di rilevazione dei tempi e dei metodi, e, infine, utilizzando metodologie di valutazione del rischio in coerenza con quanto previsto dal Titolo VI, D.Lgs. n. 81/2008, ovvero con metodologie NIOSH e OCRA, ISO della serie 112281, «Sollevamento

e trasporto manuale di carichi», e 3, «Compiti ripetitivi di movimentazione di piccoli carichi ad alta frequenza». Successivamente, sono state individuate le mansioni più critiche, quali quelle svolte dal montatore di ponteggi, dal cartongessista, dal carpentiere, dal pavimentatore ecc., e al loro interno i compiti più gravosi, per esempio, la movimentazione dei telai del ponteggio, il serraggio degli ancoraggi e dei giunti, la posa in opera del cartongesso ecc.

L'attività svolta e la metodologia di

indagine preliminare sono sintetizzabili secondo i seguenti punti:

- ogni impresa partecipante ha fornito indicazioni sulle cinque mansioni più gravose relative al proprio ambito, le mansioni sono state filmate sul luogo di lavoro con utilizzo di videocamere;
- sulla base delle registrazioni, ogni mansione è stata suddivisa in una serie di operazioni e, a sua volta, ogni operazione è stata suddivisa in movimenti elementari;
- per ciascun movimento sono stati valutati i carichi e le escursioni delle articolazioni, quindi, sono state stimate le sollecitazioni sulle articolazioni e l'energia spesa per l'effettuazione del movimento;
- le operazioni sono state ordinate secondo le sollecitazioni articolari e l'energia coinvolta;
- le operazioni risultate più gravose sono state selezionate per la loro riproduzione, in una sessione di cattura del movimento tramite sistema VICON<sup>[6]</sup>, in cui un set di camere a infrarossi riconosce la posizione di *markers* riflettenti (punti dell'oggetto di cui si vuole registrare il movimento, nella fattispecie l'operatore), effettuata all'interno di un laboratorio attrezzato poiché in cantiere elementi di disturbo come luce e polvere non avrebbero permesso l'utilizzo di questo sistema;
- gli operatori hanno ripetuto le operazioni selezionate indossando i *markers* e sono stati ripresi dalle camere a infrarossi;
- i dati ottenuti sono stati opportunamente elaborati per calcolare i movimenti e le sollecitazioni degli operatori con un elevato livello di dettaglio e, quindi, poter definire al meglio le specifiche tec-

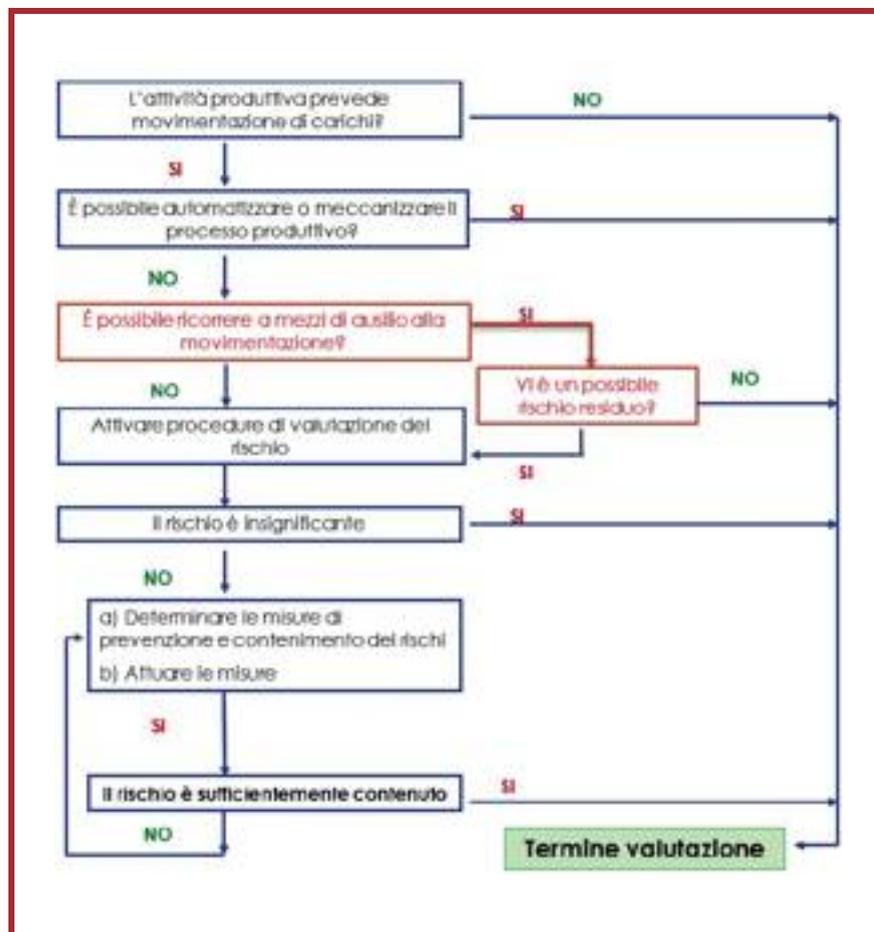
niche del DRI (si veda la figura 2).

### Progettazione del dispositivo robotico indossabile

#### Valutazione del rischio e scelta delle caratteristiche del DRI

L'analisi preliminare effettuata ha evidenziato come le mansioni e i compiti svolti in edilizia sottopongono i lavoratori a fattori di rischio da movimentazione manuale dei carichi e da sovraccarico biomeccanico per sforzi ripetuti molto gravosi e, in generale, tranne poche eccezioni, con indici di sollevamento e punteggi risultanti non ac-

cettabili a seguito dell'applicazione dei metodi di valutazione dei rischi utilizzati, quali NIOSH e OCRA, almeno per i singoli compiti analizzati (si veda lo *schema 1*). È opportuno sottolineare come, stante la difficoltà estrema di standardizzare una giornata lavorativa tipo di un lavoratore edile e l'estrema difficoltà (tranne alcune eccezioni, come per il montatore di ponteggi) anche di applicare il metodo NIOSH sequenziale, sia stata effettuata una valutazione su singoli compiti, utilizzando queste valutazioni dei rischi come indirizzo per la progettazione del DRI, al fine di renderlo il più possibile flessibile e utilizzabile secondo condizioni e



▲ Schema 1 - Flusso semplificato per la valutazione del rischio MMC

[6] Per maggiori dettagli sulla tecnica di cattura del movimento si veda, di D. Toolani, A. Goswami, N.I. Badler, *Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs*, Graphical Models, 2000, 62, pag. 353, e, di R.L. Huston, *Principles of biomechanics*, Boca Raton, FL CRC Press; 2009, pag. 369.

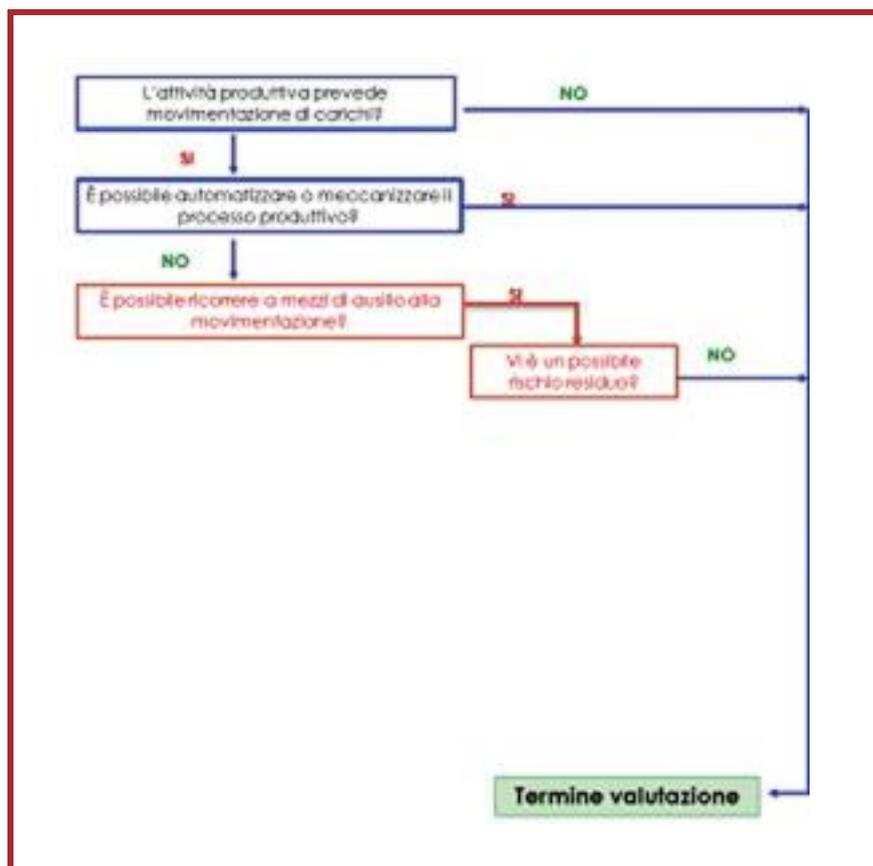


▲ **Figura 3 - Sollevamento di un telaio prefabbricato**

compiti estremamente variabili durante la giornata lavorativa.

Il *flow chart standard* prescritto nel D.Lgs. n. 81/2008 ha indicato chiaramente che, qualora sia necessario sollevare carichi manualmente, è obbligatorio valutare il rischio con i metodi NIOSH (sollevamento e trasporto), OCRA (movimenti ripetitivi degli arti superiori), Snook&Ciriello (spinta e traino). Tracciato un indice di valutazione comparato alle tabelle *standard*, deve essere valutato se attivare un processo di prevenzione primaria o secondaria.

Occorre sottolineare come per alcuni compiti sia stato rilevato il superamento obbligato di vincoli, relativamente alla fase di montaggio e di smontaggio, di alcune condizioni al contorno e vincoli che il metodo NIOSH non consentirebbe di oltrepassare, quali il limite di 175 cm per l'altezza delle mani alla destinazione, limite che è superato obbligatoriamente e ripetutamente, per esempio, durante la giornata lavorativa, da tutti i montatori di ponteggi durante il sollevamento e la posa dell'intavolato metallico (peso 15 kg circa) sul piano di calpestio superiore, problema non superabile dal montatore con particolari procedure organizzative, in quanto dovuto alle caratteristiche



▲ **Schema 2 - Valutazione del rischio MMC con interposizione della "ausiliazione meccanica"**

intrinseche di installazione di tutti i ponteggi a telai prefabbricati. Osservando il *flow chart* dello *schema 2*, è possibile riscontrare che il DRI può ridurre e minimizzare gli indici di rischio da MMC, cosa non ottenibile in edilizia con la sempli-

ce riprogettazione dei posti di lavoro a causa di vincoli spesso insuperabili dovuti alle caratteristiche del lavoro da svolgere, poco standardizzabile in quanto molto variabile e diversificato.

In conclusione, in seguito alla valu-

tazione dei rischi precedente, è stato scelto di sviluppare un dispositivo robotico indossabile (di seguito indicato con DRI), avente le seguenti caratteristiche, sintetizzabili nelle parole chiave:

- **assistenza** - il dispositivo deve consentire l'esecuzione di manovre di MMC fornendo assistenza simile a quella di una postazione di lavoro fissa;
- **ergonomia** - indossare un dispositivo (per esempio, un casco o dei guanti antinfortunistici) può comportare sempre una diminuzione del *comfort*; fuori dal contesto della sicurezza, usare o indossare un dispositivo è visto positivamente quando i benefici, in termini di produttività e di affaticamento, superano la percezione di ridotta mobilità;
- **flessibilità** - è necessario poter svolgere mansioni che coinvolgono molte attività diverse fra loro, fra cui deambulazione in spazi stretti (per esempio, salire le scale), trasporto e manipolazione di oggetti pesanti (per esempio, il trapano e il pannello di cartongesso nella realizzazione di controsoffitti);
- **portabilità** - il dispositivo deve aiutare l'operatore durante il turno lavorativo, quindi, è importante che non necessiti di alimentazione esterna e che abbia un'autonomia almeno pari a quella necessaria per completare 4 ore lavorative; l'ingombro e la massa del dispositivo devono permettere agli operatori di trasportare, di riporre e di indossare il dispositivo;
- **sostenibilità economica** - il prezzo di acquisto del DRI da parte dell'impresa deve essere tale da far sì che il suo acquisto (indipendentemente dal fatto che sia determinato da scelta autonoma dell'imprenditore o dall'ottemperanza a obblighi di legge) sia

sostenibile da parte dell'impresa, se non addirittura vantaggioso in termini di analisi costi-benefici. Ognuna di queste caratteristiche deve risultare riscontrabile dagli operatori affinché il DRI possa avere reali possibilità di essere accettato e utilizzato.

## Progettazione

### *Architettura e specifiche principali*

La configurazione architettureale presa a riferimento per lo sviluppo del DRI ha previsto la presenza di un corpo centrale, posto in corrispondenza della schiena (una sorta di zaino), che alloggia il sistema di attuazione, le batterie e la componente elettronica di controllo dei motori, acquisizione dei sensori e gestione dell'energia e di 4 arti robotici indipendenti (2 esoscheletri per gli arti superiori e 2 esoscheletri per gli arti inferiori) connessi al corpo centrale.

Il dispositivo è stato progettato per esercitare forze massime di supporto alla movimentazione del carico di 100 N per braccio e consentire movimenti degli arti superiori di ampiezza prossima a quella naturale delle braccia umane e movimenti degli arti inferiori sufficienti a permettere la deambulazione longitudinale e laterale, la salita e la discesa di scale, la rotazione del corpo intorno a un asse verticale e l'accovacciamento al suolo.

### *Tecnologia di attuazione*

L'attuazione del DRI è basata su una tecnica innovativa, elaborata nel corso del progetto VANTS, che ha previsto l'impiego di elementi attivi (motori elettrici), combinati con elementi passivi elastici (molle lineari). Questa tecnica, denominata attuazione ibrida, può consentire di generare le forze di supporto alla movimentazione del ca-

rico con minimo dispendio di energia oltre che di ridurre al minimo la complessità del controllore e garantire la massima sicurezza dell'utente del DRI.

Per capire le limitazioni delle tecniche di attuazione tradizionali e il principio sul quale è basato il sistema di attuazione del DRI, basti pensare, inizialmente, al caso di un lavoratore che muove o semplicemente sostiene un carico per un periodo più o meno prolungato. Gli sforzi in corrispondenza delle varie articolazioni che i muscoli devono esercitare per bilanciare il carico, producono l'affaticamento del lavoratore a causa della necessità di fornire continuamente ai muscoli energia chimica per produrre o mantenere la trazione delle fibre muscolari. Analogamente, in un manipolatore robotico attuato con una tecnica tradizionale è necessario fornire continuamente energia elettrica ai motori, affinché possano produrre la coppia necessaria per bilanciare il carico sostenuto dallo stesso. Questo consumo di energia è necessario, non solo in caso di movimentazione del carico, ma anche per il suo sostentamento in una postura fissa (condizioni isostatiche).

D'altra parte, considerando il sistema manipolatore più il carico nel suo complesso e ipotizzando per semplicità trascurabili eventuali perdite per attrito e gli effetti della massa propria del manipolatore, sarebbe necessario introdurre energia netta nel sistema solamente per un aumento della quota verticale del carico (ovvero per un suo sollevamento), che porterebbe, infatti, a un aumento della sua energia potenziale gravitazionale. Viceversa, nel caso di una diminuzione della quota verticale del carico, ovvero di una diminuzione della sua energia potenziale gravitazionale, il sistema potrebbe riversare

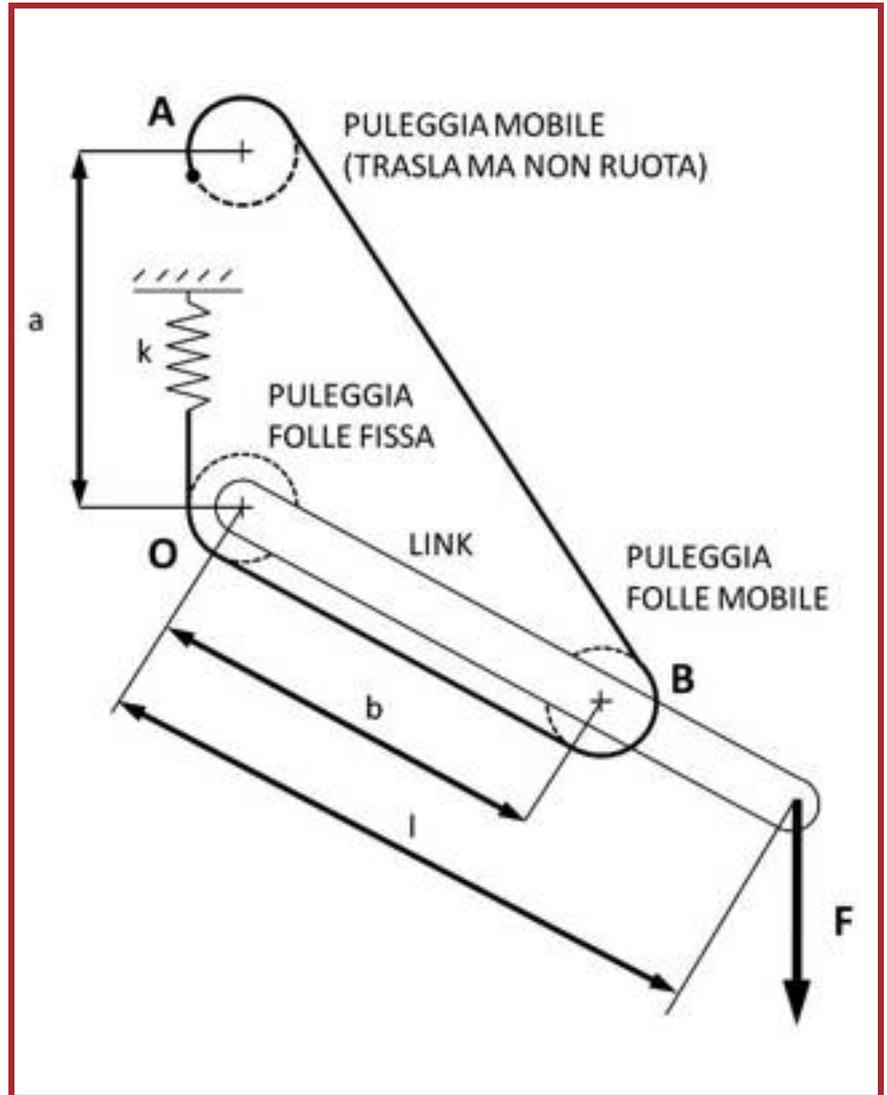
verso il mondo esterno energia netta che, quindi, potrebbe essere immagazzinata per consentire successivi sollevamenti del carico, quando richiesti dal lavoratore.

L'idea alla base della tecnica di attuazione utilizzata nel DRI è proprio quella di gestire in modo intelligente l'energia potenziale di gravitazione associata al carico movimentato, utilizzando elementi elastici, opportunamente connessi alle articolazioni del robot e in grado di immagazzinare e rilasciare energia meccanica.

Un esempio molto semplice di sistema di bilanciamento del carico, in grado di implementare questo principio, è utilizzato nella classica lampada da tavolo, che può essere posizionata ovunque rimanendo in equilibrio sotto l'azione del suo peso proprio<sup>[7]</sup>. Con riferimento al suo schema di funzionamento riportato nella figura 4, una forza costante  $F$ , applicata a un braccio articolato al telaio fisso in corrispondenza del punto  $O$ , è equilibrata da una molla  $K$ , meccanicamente connessa al braccio per il tramite di una trasmissione a cavo e pulegge.

È possibile dimostrare che un opportuno dimensionamento dei parametri del sistema possono consentire di bilanciare la forza  $F$  per qualsiasi posizione angolare del braccio rispetto al telaio fisso<sup>[8]</sup>.

Occorre notare che, però, quando la forza da bilanciare cambia di intensità (per esempio, quando l'operatore appoggia il carico a terra) o direzione, i parametri devono essere opportunamente modificati tramite l'impiego di attuatori (registrazione della forza di supporto), con conseguente dispendio



▲ Figura 4 - Sistema auto equilibrato

energetico. Nel caso in cui la variazione della forza da bilanciare avviene poco frequentemente si ha un dispendio di energia minimo rispetto alle attuazioni tradizionali; in caso contrario, come, per esempio, nella deambulazione, si ha una certa spesa energetica che però risulta essere comunque sensibilmente inferiore rispetto a quella che si

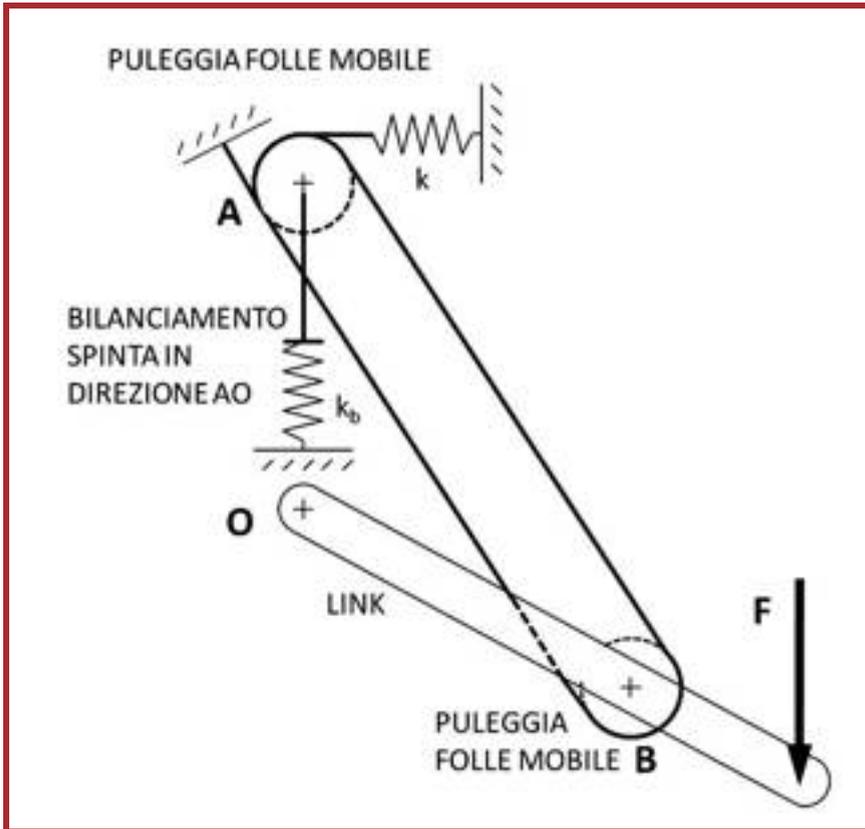
avrebbe con attuazioni tradizionali. In quest'ultimo caso, per ridurre il consumo energetico è possibile inserire un secondo serbatoio di energia che permetta di regolare i parametri del primo (gli elementi elastici) senza spesa energetica<sup>[9]</sup>. Un esempio di come realizzare questo secondo scambio di energia è mostrato nella figura 5.

L'innovativo sistema di attuazione

[7] Per ulteriori dettagli si veda, di M. French e M. Widden, *The spring-and-lever balancing mechanism, George Carwardine and the anglepoise lamp*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, volume 214, numero 3, pag. 501, 2000.

[8] Per un approfondimento si veda, di J. Herder, *Design of spring force compensation systems*, Mechanism and machine theory, volume 33, numeri 1-2, pag. 151, 1998, e, di A. Fattah and S. Agrawal, *Gravity-balancing of classes of industrial robots*, in Robotics and Automation, 2006, ICRA 2006, Proceedings 2006 IEEE International Conference on IEEE, 2006, pag. 2872.

[9] Si veda, di R. Barents, M. Schenk, W. van Dorsser, B. Wisse, and J. Herder, *Spring-to-spring balancing as energy-free adjustment method in gravity equilibrators*, ASME, 2009.



▲ Figura 5 - Sistema autoequilibrato con sistema di bilanciamento

del DRI, sviluppato nell'ambito del progetto VANTS, può consentire di implementare il principio di scambio di energia meccanica con il carico manipolato nel caso di cinematiche complesse come quella degli esoscheletri degli arti superiori e inferiori<sup>[10]</sup>.

Il sistema di attuazione ibrida sviluppato per gli esoscheletri degli arti superiori del DRI è stato strutturato in modo tale da consentire il bilanciamento di forze esterne non necessariamente verticali, esercitando minime forze resistenti al movimento dell'operatore.

Il sistema di attuazione ibrida degli esoscheletri degli arti inferiori consente di generare, in corrispondenza della schiena del lavoratore, una forza di supporto costantemente

verticale di entità tale da sostenere il peso della parte superiore del DRI e la componente verticale della forza di supporto generata dagli esoscheletri per gli arti superiori (la rimanente componente orizzontale può essere facilmente sostenuta dagli arti inferiori del lavoratore). Il sistema di attuazione è anche in grado di modificare rapidamente il carico verticale gravante su ogni gamba, per consentire velocità di deambulazione sufficientemente elevata per l'applicazione del DRI nel settore edile.

### **Esoscheletro dell'arto superiore**

L'esoscheletro dell'arto superiore del DRI è caratterizzato dall'aver una cinematica isomorfa a quella

del braccio umano, avendo gli assi delle coppie cinematiche sostanzialmente allineati con i corrispondenti assi delle articolazioni fisiologiche. Per garantire ampiezze dei movimenti consentiti paragonabili a quelle del braccio umano e contenere al contempo la complessità del dispositivo, è stato scelto di applicare le forze di supporto generate dallo stesso in corrispondenza della porzione distale dell'avambraccio del lavoratore (ovvero in prossimità dell'articolazione del polso), in modo da lasciare completamente liberi i movimenti delle dita e della mano. Questa soluzione ha consentito di limitare a 5 il numero di gradi di libertà del dispositivo, di cui 4 attuati e sensorizzati e 1 solamente sensorizzato. In maggior dettaglio, il giunto di spalla dell'esoscheletro è stato implementato tramite 3 coppie rotoidali attuate e sensorizzate, tra loro connesse in serie e con assi a due ortogonali e incidenti in un punto sostanzialmente coincidente con il centro della testa dell'omero, il giunto di gomito è stato implementato tramite una coppia rotoidale attuata e sensorizzata, avente asse sostanzialmente allineato con l'asse dell'articolazione di flessione-estensione del gomito e il giunto di pronosupinazione dell'avambraccio tramite una coppia rotoidale solamente sensorizzata, avente asse sostanzialmente allineata con la corrispondente articolazione fisiologica. Al fine di contenere al massimo la massa e l'ingombro delle parti mobili dell'esoscheletro dell'arto superiore, nella sua struttura sono stati alloggiati i soli componenti della trasmissione, mentre il suo sistema di attuazione ibrida è stato alloggiato nello zaino.

[10] Per maggiori dettagli implementativi si veda di P. Lin, W. Shieh e D. Chen, *Design of a gravity-balanced general spatial serial-type manipulator*, Journal of Mechanisms and Robotics (Transactions of the ASME), volume 2, numero 3, 2010, e di B. Lenzo, A. Frisoli, F. Salsedo e M. Bergamasco, *An Innovative Actuation Concept for a New Hybrid Robotic System*, RoMansy 19th CISM-IFToMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control 2012.

## Esoscheletro dell'arto inferiore

Anche l'esoscheletro dell'arto inferiore è caratterizzato dall'aver una cinematica isomorfa a quella dell'arto sul quale deve essere indossato. Al fine di permettere i movimenti richiesti per le gambe e contenere, al contempo, la complessità del dispositivo, è stato deciso di limitare la capacità di supporto delle gambe alla generazione di sole forze verticali. Questa semplificazione ha richiesto l'attuazione dei soli 3 gradi di libertà di flessione-estensione dell'arto, ovvero di quelli delle articolazioni dell'anca, del ginocchio e della caviglia, attuazione non necessaria, invece, per i restanti 3 gradi di libertà, che sono stati solamente sensorizzati.

Per evitare di avere masse in movimento rispetto alla schiena è stato anche scelto di posizionare il sistema di attuazione in corrispondenza dell'anca. Questa soluzione ha consentito di attuare l'esoscheletro dell'arto inferiore con 3 molle e un solo motore, tramite un sistema del tipo mostrato nella *figura 4*.

Rispetto al caso dell'esoscheletro del braccio, la progettazione dell'esoscheletro dell'arto inferiore ha presentato il requisito specifico di dover generare carichi di entità massima molto più elevata e rapidamente variabili durante la deambulazione.

Per soddisfare questo requisito sarebbe stato necessario impiegare un motore di potenza relativamente elevata e, quindi, di elevato ingombro e peso. Il problema è stato ovviato inserendo un opportuno stadio di bilanciamento ottenendo un sistema simile a quello mostrato nella *figura 5*, il motore trasferisce energia dal sistema di attuazione a quello di bilanciamento, con un dispendio energetico che si riduce, di fatto, ai soli attriti.

Nella *figura 6* è mostrato lo schema cinematico delle gambe.

## Risultati

Il progetto di ricerca VANTS ha consentito di definire le specifiche e il progetto preliminare di un dispositivo robotico indossabile in grado di ridurre significativamente gli sforzi articolari derivanti dalla movimentazione manuale dei carichi, prendendo a riferimento le mansioni lavorative tipiche del settore edile.

Al fine di fornire una dimostrazione tangibile delle potenzialità della nuova tecnologia, è stato anche avviato lo sviluppo di un prototipo di esoscheletro per l'arto superiore, equipaggiato con l'innovativo sistema di attuazione ibrida concepito nel corso del progetto VANTS, in grado di ridurre drasticamente il dispendio di energia durante la movimentazione dei carichi.

Attualmente è stata conclusa la progettazione di dettaglio del prototipo ed è stata avviata la sua costruzione.

Sulla base degli elementi quantitativi forniti dalla progettazione di dettaglio, il prototipo risulta rispondere appieno alle specifiche, consentendo, in particolare, ampiezze dei movimenti dell'arto superiore, molto prossime a quelle fisiologiche del braccio umano (copertura dello spazio di lavoro naturale del braccio intorno al 90%). Inoltre, il disegno del prototipo è risultato estremamente compatto e leggero, essendo il peso delle parti mobili (escluso il sistema di attuazione e lo zaino) minore di 3,5 kg.

## Conclusioni

Il miglioramento della sicurezza sui luoghi di lavoro è uno degli elementi chiave che devono essere perseguiti con metodologie nuove per garantire uno sviluppo socialmente sostenibile. Il piano mirato VANTS è inserito in questo contesto, ponendosi come obiettivo lo sviluppo di tecnologie innovative capaci di fornire un supporto attivo durante le



▲ *Figura 6 - Gradi di libertà attuati (evidenziati in rosso) e non attuati (evidenziati in bianco) dell'esoscheletro della gamba*

attività lavorative che prevedono l'intervento diretto dell'uomo, al fine di ridurre significativamente i fattori di rischio.

Un'analisi delle banche dati dei profili di rischio, degli infortuni e delle malattie professionali ha permesso di orientare la ricerca sullo sviluppo di tecnologie capaci di ridurre il sovraccarico biomeccanico derivante dalla movimentazione manuale dei carichi, applicabili in particolare al settore edile.

È stato definito, quindi, il progetto preliminare di un dispositivo robotico indossabile (DRI) sul corpo di un lavoratore, in grado di fornire forze di supporto verticali alla movimentazione dei carichi e consentire ampiezze di movimento degli arti superiori e inferiori paragonabili a quelle naturali dell'uomo.

Il progetto del DRI definito in VANTS ha presentato una serie di elementi innovativi che lo ha differenziato rispetto ad altri dispositivi analoghi in sviluppo nei vari laboratori di ricerca nel mondo. In particolare, per l'attuazione del DRI è stata concepita una nuova tecnica di ge-

Se utilizzi una  
di queste,



ti serve una  
di queste.



I centri di formazione autorizzati IPAF ogni anno formano più di 100.000 operatori sull'uso sicuro ed efficace di piattaforme di lavoro elevabili.

La Carta PAL IPAF è riconosciuta dalle industrie di tutto il mondo come prova che i vostri operatori sono stati formati ai massimi standard di sicurezza e soddisfano tutti i requisiti legali.

**Trova un centro di formazione  
IPAF autorizzato in**  
[www.ipaf.org/it](http://www.ipaf.org/it)

Il programma di formazione IPAF per operatori è certificato dal TÜV come rispondente alla norma UNI-ISO 18878.



nerazione delle coppie di bilanciamento articolari, che combina elementi elastici passivi con elementi attivi, potenzialmente in grado di ridurre drasticamente il dispendio di energia, oltre che di semplificare il controllo del dispositivo e garantire il massimo grado di sicurezza per l'utente.

Benché la nuova tecnica di attuazione presenti notevoli vantaggi rispetto a quella tradizionale, basata sull'impiego di soli elementi attivi, questa è anche caratterizzata da limiti intrinseci al suo stesso principio di funzionamento che confinano l'ambito della sua migliore applicabilità a quelle mansioni lavorative che non richiedono cambiamenti dell'intensità e dell'orientazione della forza di supporto alla movimentazione dei carichi relativamente frequenti e repentini.

Tuttavia, la maggior parte delle mansioni tipiche del settore dell'edilizia considerate nel progetto VANTS ricadono in questo ambito, in quanto prevedono operazioni in cui uno stesso carico è movimentato per intervalli di tempo relativamente lunghi rispetto alla durata dell'operazione.

Il progetto di dettaglio dei sistemi di attuazione degli arti inferiori e superiori basati su questa tecnica ha evidenziato una serie di criticità nell'identificazione di soluzioni implementative sufficientemente compatte da poter essere alloggiare nei volumi di ingombro disponibili del DRI.

Queste criticità potranno essere sicuramente superate in futuro tramite una più attenta scelta dei materiali e dei componenti chiave dei sistemi di attuazione (motori, molle cavi metallici, viti a ricircolo ecc.).

Al fine di dimostrare le potenzialità della nuova tecnologia, è stato avviato lo sviluppo di un prototipo di esoscheletro per l'arto superiore •