

METODOLOGIE INNOVATIVE PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO BIOMECCANICO

PREMESSA

Malattie e disturbi muscolo-scheletrici da sovraccarico biomeccanico (DMS) sono assai diffusi tra i lavoratori. In Italia nel 2020 le malattie professionali del sistema osteomuscolare e del tessuto connettivo

hanno rappresentato il 69% del totale delle malattie denunciate all'Inail. Il lavoro caratterizzato da movimenti ripetitivi è stato responsabile del 64% dei casi di patologie di origine lavorativa degli arti superiori, mentre la movimentazione dei carichi pesanti ha determinato circa il 55% dei casi di patologie della schiena (banca dati Inail).

Molti fattori possono contribuire, singolarmente o in associazione, all'instaurarsi di una condizione di sovraccarico biomeccanico e quindi alla comparsa dei DMS. Le attività di lavoro critiche sono principalmente il sollevamento manuale di carichi pesanti, le attività di spinta e traino, le attività ripetitive e quelle che richiedono il mantenimento di posture incongrue e/o statiche.

Nel corso degli ultimi trent'anni sono stati sviluppati diversi metodi di valutazione del rischio da sovraccarico biomeccanico, ripresi all'interno degli standard internazionali ISO 11228, ISO 11226, ISO/TR 12295 e 12296 volti ad identificare le attività lavorative ad alto rischio e a valutare l'efficacia di interventi ergonomici di concezione o di correzione. Tra i più noti, la Revised Niosh lifting equation (RNLE), il Rapid upper limb assessment (RULA), il Rapid entire body assessment (REBA), l'Occupational repetitive actions (OCRA), il Revised strain index (RSI) e l'Hand activity level (ACGIH - HAL). Ognuno di questi metodi è stato pensato per specifici ambiti di applicazione, tenendo conto delle diverse caratteristiche lavorative e organizzative e, pur presentando molti vantaggi (economicità, non invasività, rapidità di applicazione, ecc.), nello stesso tempo presenta anche delle limitazioni. Il principale limite riguarda l'alta soggettività, riscontrata in vari studi di letteratura e tutt'ora oggetto di discussione scientifica, nell'assegnazione dei punteggi che determinano il livello di rischio finale. Tali metodiche sono infatti prevalentemente di natura osservazionale (osservazione diretta dell'attività sul campo o da riproduzione di video) e quindi imprecise e condizionate dalla competenza e dalla esperienza del valutatore. L'alta soggettività si evidenzia in particolar modo nell'assegnazione del punteggio al fattore di rischio 'forza' che, tutte le metodiche, indicano essere quello che più incide sul livello di rischio finale. Un altro limite è l'im-

possibilità di questi metodi di valutare tutti i compiti lavorativi. Per esempio, la RNLE, il metodo più usato per valutare i compiti lavorativi in cui si effettuano sollevamenti, non è applicabile in varie condizioni: sollevamenti in ambienti con temperatura al di fuori del range 19 - 26 °C, sollevamenti in ambienti costretti e attività in cui le caratteristiche del sollevamento non rispettino appropriati criteri di utilizzo del metodo (ad esempio un carico da sollevare tenuto troppo lontano dal corpo).

Da tali premesse risulta evidente l'utilità di poter disporre di nuove metodologie di valutazione del rischio biomeccanico che siano quantitative, oggettivabili, ripetibili e che prevedano la possibilità di identificare il rischio anche nei moderni scenari lavorativi dove si sta sempre più diffondendo l'utilizzo di esoscheletri da parte dei lavoratori e la condivisione degli spazi lavorativi con i cobot. Le metodiche attualmente usate, seppur valide, risultano incomplete e non efficaci nel valutare la complessità e il reale impatto che queste tecnologie hanno sulla salute e sicurezza dei lavoratori nell'industria 4.0.

Sistemi optoelettronici, sensori inerziali (Inertial measurement units, IMUs) ed elettromiografia di superficie (EMGs), oggi largamente disponibili, ci permettono di integrare le metodologie osservative, infatti, valutando come un soggetto muove le sue articolazioni e usa i suoi muscoli durante l'esecuzione di un compito lavorativo, consentono di effettuare in maniera oggettiva la valutazione del rischio biomeccanico anche in quei settori in cui le metodologie attualmente più diffuse non riescono a dare risposte esaustive.

I SISTEMI OPTOELETRONICI

I sistemi optoelettronici sono considerati il gold-standard per l'analisi cinematica del movimento umano. Questi sistemi utilizzano telecamere all'infrarosso in grado di riconoscere e acquisire il movimento tridimensionale di marker passivi riflettenti posti su determinati punti di repere anatomici e, successivamente, di ricostruirne il comportamento nel tempo tramite specifici software (Figura 1).

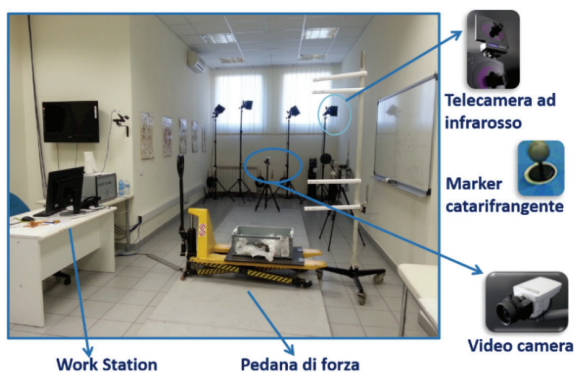
Vantaggi

Precisione e accuratezza (errore < 0,01mm) delle acquisizioni effettuate; integrazione e sincronizzazione con altre tecnologie (videocamere digitali, EMGs, piattaforme di forza, sistemi analogici ecc.).

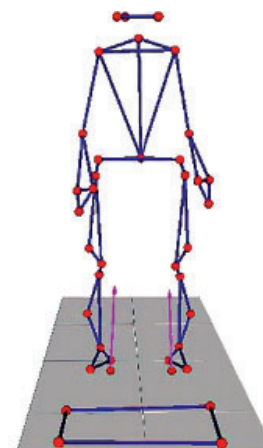
Limiti

Costo elevato; necessità di un ambiente strutturato.

Figura 1



Strumentazione del laboratorio di analisi del movimento del Centro Ricerche Inail di Monteporzio Catone (RM)



Esempio di ricostruzione 3D

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

Con l'utilizzo di IMUs ed EMGs vengono superati sia i limiti degli attuali protocolli standardizzati di valutazione del rischio, sia la complessità legata alla difficile trasportabilità attribuibile ai sistemi optoelettronici.

SENSORI INERZIALI (INERTIAL MEASUREMENT UNITS, IMUs)

I sensori inerziali sono dispositivi che, grazie alla attuale miniaturizzazione che ha permesso di includere accelerometri, giroscopi e magnetometri in sensori di dimensioni e peso ridotti, offrono la possibilità di effettuare acquisizioni del movimento direttamente nei luoghi di lavoro (Figura 2). I segnali acquisiti sono solitamente immediatamente disponibili per una valutazione in tempo reale del rischio biomeccanico.

Vantaggi

Dimensioni ridotte e portabilità; facile indossabilità; possibilità di effettuare l'analisi di qualsiasi movimento senza alterare il gesto motorio del lavoratore in esame; protocolli di comunicazione wireless; elevata durata delle batterie; presenza di memorie 'onboard' che consentono il proseguimento delle acquisizioni, evitando perdite di dati, anche in caso di temporanea interruzione della comunicazione con l'unità ricevente; costi più ridotti.

Limiti

Suscettibili alla presenza di campi elettromagnetici (problematica in via di risoluzione grazie alla schermatura dei sensori e allo studio di algoritmi che permettono la loro cancellazione in fase di elaborazione dei dati); accuratezze e precisioni inferiori a quelle fornite dai sistemi optoelettronici.

Figura 2



Sensori inerziali applicati agli arti superiori di un soggetto tramite apposite fasce elastiche per misurare il movimento delle braccia durante l'attività lavorativa (assemblaggio di automobili)

(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)

ELETTROMIOGRAFIA DI SUPERFICIE (EMGs)

L'elettromiografia di superficie è una metodica strumentale che rileva l'attività elettrica dei muscoli sulla superficie della cute (Figura 3). Le fibre muscolari, quando sono eccitate da un impulso del sistema nervoso modificano il loro stato elettrico (depolarizzazione) e si contraggono. Con l'elettromiografia di superficie bipolare è possibile rilevare l'attività muscolare complessiva per ogni istante di tempo e per ogni movimento di interesse. La EMGs è una metodica validata e molto usata anche in ergonomia. Il suo uso è previsto dai metodi standardizzati più comuni nella valutazione del rischio da movimenti ripetuti dell'arto superiore (OCRA, RSI, ACGIH-HAL) per la quantificazione della forza muscolare. Tramite analisi più dettagliate dell'ampiezza e delle componenti frequenziali del segnale EMGs è possibile, inoltre, avere utili indicazioni sullo stato di affaticamento del muscolo. I parametri di 'fatica muscolare', ampiamente validati in letteratura scientifica sin dagli anni '60, risultano ad oggi però poco utilizzati in ambito industriale. Il loro uso, infatti, non viene minimamente considerato nelle comuni tecniche di valutazione del rischio (ad eccezione dell'ACGIH che li ha inseriti in un suo recente aggiornamento dei TLV) e dagli Standard internazionali e nazionali di riferimento. Con la EMGs ad alta densità (HDsEMG) è possibile ana-

lizzare la distribuzione del potenziale elettrico su una superficie più ampia e questo permette degli interessanti approfondimenti sul fenomeno della fatica e sulla decomposizione del segnale.

Vantaggi

Non invasività; dimensioni ridotte delle sonde e portabilità in reali contesti lavorativi; possibilità di effettuare l'analisi di qualsiasi movimento senza alterare la normale strategia del soggetto in esame; presenza di memorie 'onboard' che consentono il proseguimento delle acquisizioni anche in caso di temporanea interruzione della comunicazione; possibilità di utilizzo in condizioni estreme (waterproof); possibilità di investigare fino a 20 muscoli contemporaneamente; costi in rapida diminuzione e proporzionati al numero di muscoli che si intende acquisire.

Limiti

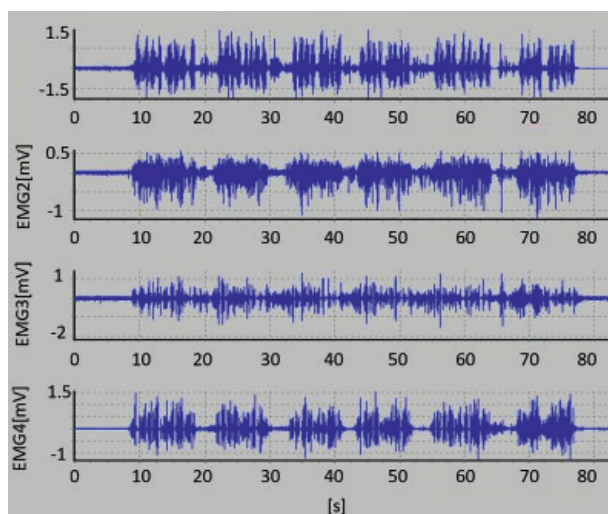
Competenze specifiche nel posizionamento delle sonde (l'esistenza di specifiche Linee guida consente l'utilizzo anche a chi possiede conoscenze base dell'anatomia umana); competenze specifiche nell'acquisizione e nell'elaborazione dei dati (i sistemi più recenti usano software user friendly che permettono l'elaborazione anche a chi non ha una formazione ingegneristica).

Figura 3

Sonde wireless



Sonde wireless miniaturizzate agganciate a elettrodi di superficie applicate all'arto superiore di un soggetto per lo studio dell'attività dei muscoli (dall'alto) Deltoide anteriore, Bicipite brachiale, Flessore dell'avambraccio e Estensore del pollice.



Esempio di segnale elettromiografico grezzo 'raw' acquisito

SENSORI MINIATURIZZATI PER EMGs E IMUs PER LA CLASSIFICAZIONE DEL RISCHIO BIOMECCANICO

La tecnologia attualmente disponibile permette, grazie all'utilizzo di sistemi di sensori (IMUs e EMGs) miniaturizzati e indossabili una valutazione strumentale quantitativa del rischio biomeccanico direttamente sul campo grazie anche alla possibilità di trasferire wireless i dati acquisiti sul lavoratore che svolge il compito

in esame. Questi aspetti facilitano la registrazione dei dati e riducono al minimo i fattori di confondimento associati allo svolgimento di attività di lavoratori che indossano apparecchiature ingombranti o attaccate a cavi, permettendo un'accurata acquisizione dei segnali anche in ambienti sfavorevoli e in situazioni lavorative in cui il lavoratore interagisce con un cobot o utilizza un esoscheletro.



(Inail - Dipartimento di medicina, epidemiologia, igiene del lavoro e ambientale)



Attraverso le attività dei due progetti MELA (Miniaturized sEMG for lifting activities) e SOPHIA (Socio-physical interaction skills for cooperative human-robot systems in agile production) si stanno sviluppando delle reti di sensori miniaturizzati ed un tool strumentale di valutazione del rischio biomeccanico in diverse attività di movimentazione manuale dei carichi. Le sonde MELA presentano forme compatibili con gli indumenti da la-

voro e tali da non interferire con la normale strategia motoria, miniaturizzazione, possibilità di utilizzo in condizioni estreme (waterproof), assenza di cavi (wireless). I sensori permetteranno di monitorare in tempo reale il rischio biomeccanico al quale è sottoposto il lavoratore, visualizzando su un monitor (PC o tablet) il livello di rischio e dare al lavoratore un feedback. Il tool SOPHIA permetterà la classificazione automatica del rischio.

PER ULTERIORI INFORMAZIONI

Contatti: laboratoriodiergonomiaefisiologia@inail.onmicrosoft.com

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA ESSENZIALE

Ranavolo A. Principi di elettromiografia di superficie. Dal potenziale d'azione alla contrazione muscolare, le tecniche di prelievo ed elaborazione, gli indici utilizzabili e le applicazioni nei diversi settori della medicina e dell'ingegneria. EUR - Edizioni Universitarie Romane, Febbraio 2021. ISBN: 978-88-6022-396-8

Ranavolo A, Ajoudani A, Cherubini A et al. The Sensors-based biomechanical risk assessment at the base of the need for revising of standards for human ergonomics. *Sensors (Switzerland)*, 2020, 20(20), pp. 1-15, 5750.

Ranavolo A, Draicchio F, Varrecchia T et al. Wearable monitoring devices for biomechanical risk assessment at work: current status and future challenges - A systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2018, 15, 2001. *Int J Environ Res Public Health*. 2018 Nov 16;15(11).

Ranavolo A, Varrecchia T, Iavicoli S et al. Surface electromyography for risk assessment in work activities designed using the "revised NIOSH lifting equation". *International Journal of Industrial Ergonomics* 68:34-45. November 2018.

Ranavolo A, Chini G, Silveti A et al. Myoelectric manifestation of muscle fatigue in repetitive work detected by means of miniaturized sEMG sensors. *Int J Occup Saf Ergon*. 2017 Sep 25:1-11.

PAROLE CHIAVE

Rischio biomeccanico, Sistemi optoelettronici, Sensori inerziali, Elettromiografia di superficie