



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale INGEGNERIA BIOMEDICA

**METODOLOGIE E TECNICHE NELL'USO DI SENSORI INERZIALI PER LA VALUTAZIONE
DEL RISCHIO BIOMECCANICO**

**METHODOLOGIES AND TECHNIQUES IN THE USE OF INERTIAL SENSORS FOR
BIOMECHANICAL RISK ASSESSMENT**

Relatore:

Dott. Alessandro Mengarelli

Correlatori:

Dott. Federica Verdini

Dott. Andrea Tigrini

Tesi di Laurea di:

Giovanni Bisceglia

A.A. 2021 / 2022

INDICE

1. Introduzione.....	
1.1. Perché una valutazione del rischio biomeccanico?.....	
1.2. Obiettivi della ricerca.....	
2. Materiali e metodi di ricerca.....	
2.1. Strategia di ricerca.....	
2.1.1. Criteri di idoneità.....	
2.1.2. Criteri di esclusione.....	
3. Risultati.....	
3.1. Tecnologie sensori inerziali.....	
3.1.1. IMU's.....	
3.2. IMU's e campi di applicazione.....	
3.2.1. Ambiente industriale.....	
3.3. Metodologie di applicazione.....	
4. Conclusione.....	

1. Introduzione

La maggior parte dei settori lavorativi e dell'industria si interfaccia con pericoli e problematiche che possono essere causa di incidenti e conseguenti infortuni, talvolta anche fatali.

L'obiettivo primario che si propone di perseguire la disciplina ergonomica è quella di individuare le soluzioni più idonee alle esigenze psicofisiche dei lavoratori e al contempo a quelle della produzione.

Dopo un primo periodo dominato dall'utilizzo di protocolli e metodologie elementari, basate su analisi semi-soggettive e questionari di autovalutazione, si è arrivati a condizioni di oggettiva valutazione dei compiti motori in ambito lavorativo e al rischio connesso grazie allo sviluppo scientifico e tecnologico agevolato dal crescente utilizzo della sensoristica indossabile.

Lo scopo di questa revisione letteraria è esaminare la documentazione tecnico-scientifica relativa all'uso dei sensori inerziali (IMU) nella valutazione del rischio biomeccanico nell'ambito industriale.

1.1. Perché una valutazione del rischio biomeccanico?

“Malattie e disturbi muscoloscheletrici da sovraccarico biomeccanico (DMS) sono assai diffusi tra i lavoratori. In Italia nel 2020 le malattie professionali del sistema osteo-muscolare 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 “ [1]

La valutazione di tali rischi è di fondamentale importanza nell'ottica di apportare importanti variazioni nelle dinamiche lavorative che influenzino in positivo l'interfacciarsi dell'operatore con l'ambiente di lavoro.

La valutazione del rischio biomeccanico è anche importante da un punto di vista dell'economia dell'impresa e della qualità della produzione, infatti, quando un operatore va incontro ad infortunio, questo deve essere necessariamente sostituito per tutto il periodo di degenza, al quale il datore di lavoro deve provvedere con conseguente assunzione di un nuovo operatore, la sua formazione professionale, l'eventuale polizza assicurativa da stanziare in caso di infortuni e perdendo nel contempo anche qualcosa dal punto di vista della continuità della catena di produzione.

1.2. Obiettivi della ricerca

L'obiettivo principale di tale revisione della letteratura è quello di dare un chiaro quadro degli ambiti, dei limiti e dei vantaggi dell'utilizzo della sensoristica inerziale in campo ergonomico.

2. Materiali e metodi di ricerca

Un'accurata revisione della letteratura scientifica permette di valutare e analizzare le ricerche e i risultati di studi di "primo livello", ovvero delle migliori prove di evidenza disponibili riguardo ad un determinato argomento.

2.1. Strategia di ricerca

La ricerca degli articoli e del materiale utilizzato è stata condotta principalmente su tre banche dati, individuabili in Scopus, IEEEXplore e PubMed.

Per facilitare il lavoro di individuazione del materiale lo studio è stato suddiviso in due rami concettuali, uno dedicato alla ricerca di articoli che avessero come tema principale la sensoristica inerziale e l'altro dedicato alla valutazione del rischio biomeccanico, all'ergonomia e all'ambito dell'industria.

Per evidenziare il tema d'interesse e selezionare gli articoli in maniera esplicita e specifica, è stata proposta una selezione di termini e parole chiave utilizzate nella fase di ricerca, classificabili in due macro-gruppi:

- **TERMINI RELATIVI ALLA SENSORISTICA VERA E PROPRIA** (strumento di misura):

[TITLE-ABS- KEY (inertial AND measurement AND unit AND imu AND wearable AND devices)]

Tale stringa di ricerca ha portato alla luce seicento quarantacinque risultati che, attraverso l'uso di uno filtraggio per mezzo di ulteriori specifiche quali: tipologia di documenti, area di studio e aggiunta di terminologia chiave,

[TITLEABSKEY (inertial AND measurement AND unit AND imu AND wearable AND devices) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "re")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Inertial

Measurement Unit") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wearable Sensors") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Inertial Measurements Units") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Biomechanics") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Gait") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Gait Analysis") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "IMU") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wearable Devices") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Inertial Measurement Unit (IMU)") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Units Of Measurement") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Accelerometers") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Motion") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Gyroscopes") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Inertial Measurement Units") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Wearable Device"))]

ha contribuito ad una riduzione dei risultati a circa trecentonovanta articoli.

- **TERMINI RELATIVI ALL'ESPOSIZIONE AL RISCHIO BIOMECCANICO NELL'AMBITO LAVORATIVO/INDUSTRIALE:**

[TITLE-ABS-KEY (ergonomic AND work AND environment)]

Tale dicitura all'interno della barra di ricerca ha evidenziato un'ingente quantità di materiale dell'ordine di duemilacinquecento articoli, i quali sottoposti, anche loro, ad un simil filtraggio, come precedentemente proposto,

[TITLE-ABS-KEY (*ergonomic* AND *work* AND *environment*) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomics*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Work Environment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Humans*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Workplace*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Diseases*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Musculoskeletal Disease*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Risk Assessment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Disease*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Risk Factor*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Risks*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Biomechanics*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Review*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Work Environments*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Body Position*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Health*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Safety*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Accident*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Accident Prevention*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Worker*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Work-related Musculoskeletal Disorders*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Materials Handling*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Industrial Worker*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Assessment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Office Worker*")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "*ar*") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "*cp*") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "*re*")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "*ENGI*"))]

ne hanno limitato la mole di risultati a seicento ventisei articoli.

A questo punto, ottenuta questa mole di materiale per i due rami individuati, si è resa necessaria un'integrazione delle due branche terminologiche che ha portato all'individuazione di 39 articoli (utili all'argomento principale).

[TITLE-ABS-KEY (*imu* AND *ergonomic*) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomics*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Inertial Measurement Unit*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Human*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Risk Assessment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Wearable Sensors*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*IMU*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Posture*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Article*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Body Position*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Diseases*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Work-related Musculoskeletal Disorders*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Assessment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Risks*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Biomechanics*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Occupational Disease*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Wearable Devices*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Inertial Measurement Unit (IMU)*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Inertial Measurements Units*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Risk Assessments*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Inertial Measurement Units*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Reproducibility Of Results*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Risk Factor*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Work-related Musculoskeletal Disorder*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Evaluation*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Risk*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Ergonomic Risk Assessment*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Tracking (position)*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Working Postures*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Accident Prevention*")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "*ENGI*")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Manual Material Handling*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Musculoskeletal Disorders*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Industrial Environments*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Automotive Assembly Lines*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Manufacturing Industries*") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "*Biomechanical Overload Risk*"))]

2.1.1. Criteri di idoneità

L'idoneità degli articoli ai fini della stesura della revisione deve necessariamente soddisfare i seguenti termini:

- Solo articoli in lingua inglese;
- Solo articoli pubblicati su giornali scientifici e/o verbali di conferenze;

- Solo articoli che riguardano IMU's e sensori inerziali indossabili con fine esplicito di valutazione ergonomica e analisi in ambito industriale;

2.1.2. Criteri di esclusione

- Articoli che non fanno esplicito riferimento alla valutazione del rischio biomeccanico;
- Articoli che propongono metodi di valutazione dei parametri biomeccanici attraverso l'uso di strumentazione diversa (ad esempio riferimento a segnale elettromiografico, i.e. EMG o di altra natura) da quella sopra citata;
- Articoli che propongono l'uso di sensoristica inerziale per scopi differenti da quelli ergonomici (ex: riabilitazione, sport, robotica);
- Articoli che propongono solo una descrizione tecnica dei dispositivi;
- Articoli che propongono solo protocolli di validità dei dispositivi;

3. Risultati

Dopo l'esclusione di articoli di scarso interesse e di quelli con poca affinità ai criteri precedentemente stabiliti, l'analisi del lavoro è stata condotta su un pattern di circa 39 articoli.

Tali articoli evidenziano un enorme progredire dell'uso di sensoristica inerziale applicata alla valutazione del rischio biomeccanico.

Tuttavia, per comprendere meglio la medesima revisione si è pensato di provvedere alla sua stesura partendo da una spiegazione dettagliata di ciò che rappresentino tali sensori inerziali (IMU) e i loro campi di applicazione, fino ad arrivare ad una analisi dettagliata della loro applicazione in campo industriale.

3.1. Tecnologie sensori inerziali

Con i termini "sensori inerziali" si intendono quelle tecnologie e strumenti di misura basati sulle proprietà inerziali dell'oggetto da misurare.

Alcuni di questi strumenti di misura sono rappresentati da accelerometro, giroscopio, magnetometro e IMU che sono una combinazione di accelerometro, giroscopio e talvolta magnetometro.

➤ Accelerometro

L'accelerometro è un sensore in grado di rilevare e/o misurare l'accelerazione.

Abbiamo trasduttori diversi che hanno la capacità di misurare l'accelerazione, tra questi abbiamo quelli a cristalli piezoelettrici, i sensori piezoresistivi, e quelli a capacità variabile.

Come descritto in [2], sebbene ogni tipo di accelerometro utilizzi diversi meccanismi di misura dell'accelerazione e abbia differenti tipologie di implementazione, concettualmente, tutti usano, seppur in forme varianti, un sistema formato da una massa, una molla e uno smorzatore.

In questo sistema, quando viene applicata l'accelerazione, una piccola massa all'interno dell'accelerometro risponde applicando una forza ad una molla, causando un allungamento o un accorciamento di quest'ultima.

Così facendo lo spostamento della molla misurato è usato per calcolare l'accelerazione applicata al sistema. [2]

In applicazioni ergonomiche sono tipicamente utilizzati per misure di orientamento (flessione, estensione, angolo di levazione) di uno specifico segmento corporeo.

Accelerometri applicati alla caviglia e alla tibia, sono utilizzati per valutare la flessione e l'estensione della gamba nello studio del movimento [4] ma vi sono applicazioni degli accelerometri anche per la valutazione del movimento dell'intero corpo che prevede l'applicazione del sensore quanto più vicino possibile al centro di massa del corpo stesso individuabile in prossimità dello sterno o della vita. [5]

Pertanto, i risultati di un accelerometro indossabile dipendono dalla sua posizione di applicazione, dalla sua orientazione relativamente al soggetto, dalla postura del soggetto e dall'attività performata dal soggetto stesso. [2]

Accelerometri mono-assiali, acquisiscono le accelerazioni in una sola direzione [2], quelli triassiali, composti da un unico dispositivo che incorpora tre accelerometri, forniscono informazioni su movimenti tridimensionali. [3]

➤ Giroscopio

Esistono diverse tipologie di giroscopio che sfruttano principi di funzionamento diversi, distinguiamo in giroscopi magnetici, a precessione, ottici e a forza di Coriolis [6].

Quest'ultimo è quello più usato in ambito della microelettronica, in quanto può essere prodotto di dimensioni molto ridotte e a basso costo integrabile in tutti i dispositivi elettronici come gli smartphone.

In accordo con Aminian et al. [6], il giroscopio basato sulla forza di Coriolis è costituito generalmente da un elemento vibrante accoppiato ad un elemento sensibile, che funge da sensore di Coriolis.

La forza di Coriolis è una forza apparente che sorge in un sistema di riferimento rotante ed è proporzionale alla velocità angolare di rotazione.

Il giroscopio misura l'accelerazione di Coriolis generata quando una velocità angolare è applicata al sistema oscillante.

Il movimento degli arti inferiori durante la deambulazione, in Aminian et al. [6], è stato misurato proprio attraverso l'uso di giroscopio a forza di Coriolis; i dispositivi sono stati applicati con una fascia in gomma ad ogni tibia e sulla coscia destra, misurando la velocità angolare parallela all'asse medio laterale (perpendicolare all'asse sagittale).

Inoltre, i giroscopi a tre assi sono spesso implementati con un accelerometro, anch'esso a tre assi, per fornire un sistema completo di tracciamento del movimento a 6 DoF (Degree of Freedom).[8] [7]

➤ Magnetometro

È il più antico e semplice strumento per la misurazione del campo magnetico.

In applicazioni ergonomiche, in accordo con Lim and Souza [14] il magnetometro triassiale, integrato in un dispositivo IMU, è utilizzato per la misura del campo geomagnetico per stimare la direzione del sensore rispetto al polo magnetico della terra[17], è inoltre responsabile di una migliore valutazione dell'orientazione dei segmenti corporei [8][9][10][13], anche se in applicazioni on-field è spesso affetto da disturbi elettromagnetici dovuti alla presenza di un ambiente circostante altamente ferromagnetico[15][16].

Non sempre sono presenti all'interno di un dispositivo IMU.[8]

In Caputo, d'Amato et al. [12], il magnetometro è usato, per calcolare le distorsioni del giroscopio, come filtro passo basso, dandone buone stime di orientazione in condizioni stazionarie.

Alcuni metodi di correzione o algoritmi matematici (SFA) sono stati sviluppati nel corso degli anni per compensare tali disturbi. [18]

In Luinge e Veltink [19], sono stati usati entrambi accelerometro e giroscopio per stimare gli errori di orientazione e bias del giroscopio utilizzando la struttura di un filtro complementare di Kalman (CKF).

Successivamente venne incluso anche il magnetometro nel CKF per prevenire errori di distorsioni nell'angolo di imbardata, anche in ambienti affetti da disturbi magnetici [20] [21].

➤ Inertial Measurement Unit (IMU)

Inizialmente, i sensori IMU sono stati sviluppati per i sistemi di navigazione, aerei a pilotaggio remoto, robot, razzi e missili guidati [18].

La loro diffusione è stata favorita dal basso costo dei componenti e dalle ridotte dimensioni dei sensori [26], ormai miniaturizzati, che ne hanno favorito la portabilità e la non invasività, proprietà che hanno portato gli IMU all'interno degli ambienti di lavoro [22].

Un'unità di misura inerziale è un sistema elettronico che misura l'accelerazione e la velocità angolare di un corpo, talvolta anche l'orientazione del sensore rispetto al campo magnetico terrestre.

Alcune unità inerziali hanno on-board il software che stima l'orientazione fornendo in uscita i quaternioni.

Come ben noto, accelerazione, orientazione rispetto al campo magnetico e velocità angolari sono grandezze vettoriali e in quanto tali devono essere riferite a un sistema di riferimento.

L'accelerometro restituisce generalmente una misura dell'accelerazione come multiplo della accelerazione di gravità (g).

La forza misurata dall'accelerometro può essere di natura statica, e.g. forza gravitazionale, o dinamica, i.e. causata dal movimento o vibrazione dell'accelerometro. [23]

L'integrazione di un giroscopio all'interno del dispositivo permette una precisa misurazione della velocità angolare che non è influenzata dalle forze esterne rilevate tramite accelerometro. [23]

La natura del giroscopio solleva qualche problema di distorsione che può essere ridotto attraverso l'integrazione di magnetometri utilizzati come dispositivi di calibrazione che hanno come riferimento il campo magnetico della terra.[23]

Le unità di misura inerziali sono dispositivi che grazie alla loro miniaturizzazione e buona accuratezza nel raccogliere informazioni e dati in real-time e soprattutto on-field, offrono la possibilità di valutare la corretta esecuzione di movimenti dei segmenti corporei [8,9,10,14,16] ai quali tali dispositivi sono applicati.

Tuttavia, tali sensori devono necessariamente avere importanti caratteristiche affinché vengano correttamente utilizzati in campo industriale e in particolar modo a stretto contatto con l'operatore che ne è il principale destinatario.

Tra queste caratteristiche distinguiamo quelle che, comunemente, rientrano nella categoria dei vantaggi che tali dispositivi apportano nella loro applicazione e sono rappresentate da: una buona portabilità, in quanto non debbano essere di peso eccessivo e garantire la possibilità di essere facilmente trasportati e indossati; un basso costo, in modo tale da poter

permetterne una produzione in ampia scala e quindi favorire la loro diffusione; una non-intrusività, che permetta a chi utilizza il dispositivo di non essere ostacolato o distratto nel compimento delle sue azioni quotidiane.

I principali limiti applicativi che riguardano l'uso di tale tecnologia si riferiscono a una minore accuratezza laddove vengano paragonati con sistemi optoelettronici (tipica strumentazione di laboratorio, con grossi limiti di trasportabilità e costo elevato) [1]. Spesso risultano affetti da disturbi elettromagnetici nel caso in cui i sensori inerziali siano muniti di magnetometro (problema che recentemente si sta cercando di risolvere attraverso l'utilizzo di particolari materiali isolanti e attraverso l'uso di alcuni algoritmi di fusione o filtri) [1,20,21]. Un ultimo aspetto da tenere in considerazione, anche evidenziato nel lavoro di Cerqueira et al. [24], riguarda il posizionamento delle IMU sul corpo umano che non è stato stabilito in nessun protocollo di validità o standard (ad esempio: studi sulla valutazione di uno stesso movimento utilizzano una diversa disposizione dei sensori e anche in diverso numero [14], portando necessariamente a risultati diversi che difficilmente, in accuratezza, prevalgono l'uno sull'altro).

3.2. IMU's e campi di applicazione

Come precedentemente accennato, i sensori inerziali, caratterizzati da un ottimo rapporto accuratezza/costo [26] e con la possibilità di essere indossabili e applicabili per valutazioni in tempo reale [1,25] e non necessariamente in ambiente di laboratorio, negli ultimi anni hanno riscontrato un massiccio interesse all'interno dei più svariati ambiti della vita quotidiana.

Le applicazioni degli IMU sono tra le più disparate e riguardano ambiti diversi che vanno dal settore aerospaziale [18] a quello clinico/ospedaliero [25], non dimenticando l'ambito sportivo [25] e del gaming e considerando ,negli ultimi decenni, un sempre maggiore interesse nell'ambito industriale [27-32], in ottica di una maggiore interazione uomo-macchina [16] che possa apportare benefici sia dal punto di vista economico e della produzione ma anche e soprattutto dal punto di vista del benessere dell'operatore/lavoratore nell'interfacciarsi ai suoi compiti quotidiani in maniera adeguata e laddove possibile evitando la sua esposizione a rischi e pericoli di carattere biomeccanico (prevenzione) .

Tra le applicazioni in ambito industriale che vedono coinvolti i sensori inerziali ci sono le valutazioni di performance del movimento [8,9,13,], di mantenimento dell'equilibrio in circostanze al limite di caduta [16,29,38], o il monitoring di un soggetto sottoposto a operazioni ripetitive, usuranti a bassa intensità e/o compiti ad alta intensità e condizioni di sovraccarico [11,22,27,36].

3.2.1. Tipologie di settori industriali

All'interno della letteratura scientifica, frequentemente, l'adozione delle tecnologie di acquisizione del movimento (MoCap) [35] sono state adottate in larga scala dall'industria edile [27,28,29,37,38], seguita dall'applicazione per il miglioramento dell'interazione con la robotica industriale [16], della manifattura della catena di montaggio di automobili e in generale dei mezzi di trasporto [8,10,11], seguita dall'industria agricola e di falegnameria.

In poche occasioni, gli autori hanno mostrato di applicazioni nell'industria alimentare e aerospaziale [18] così come in quella legata all'energia e l'industria petrolifera e siderurgica, sviluppatasi solo di recente.

Altra buona parte della letteratura è dedicata alle applicazioni delle tecnologie per la valutazione ergonomica e il monitoraggio della fatica fisica [2,5,12]; altamente considerate in ambito di laboratorio e di recente interessate allo studio della valutazione del rischio biomeccanico in ambito industriale [13,14,24,26,31,32,33,34], col fine di valutarne in maniera relativamente accurata e in tempo reale le caratteristiche problematiche e pericolose che caratterizzano l'ambiente di lavoro stesso.

3.3. Metodologie di applicazione

Tenendo conto dell'anatomia topografica, la struttura fisica dell'uomo può essere divisa in tre regioni:

1. Testa, collo;
2. Tronco, arti superiori;
3. Pelvi e arti inferiori

In corrispondenza di queste, verranno applicati i sensori inerziali per la valutazione del rischio biomeccanico.

I principali fattori di rischio da sovraccarico biomeccanico sono l'utilizzo di forza intensa, la ripetitività, l'assunzione di posizioni incongrue e la mancanza di periodi di recupero tra una mansione e la successiva [1,8].

Successivamente verranno analizzate le applicazioni di tale sensoristica per ogni regione corporea individuata.

1) Testa e collo

Oggi, la vita moderna è ampiamente caratterizzata dall'uso massiccio di dispositivi tecnologici (telefoni, pc, smartwatches, tablet ecc...).

Questo è dovuto al fatto che il progresso tecnologico ha avuto un impatto significativo nel migliorare alcuni degli aspetti della vita quotidiana.

Inoltre, l'avvento dell'ultima pandemia di COVID-19, con l'obiettivo primario di ridurre al minimo l'espansione, ha caratterizzato l'emergente bisogno di assumere lavoratori che lavorassero da remoto e di fronte al computer per molte ore, assumendo, molto spesso, posizioni inadeguate.

Questo ha generato molti casi di disturbi fisici dovuti appunto ad un incongruo modo di approcciarsi alla postazione di lavoro.

Non per caso molti lavoratori hanno identificato nell'assunzione di posizioni improprie e nei modi impropri di stare seduti, durante i lavori di ufficio, una causa primaria di disagio e di insorgenza di problematiche quali dolori cronici della spina dorsale, spondilosi cervicale, mal di testa cronici e perdita di sensibilità nelle zone estreme degli arti.

Ionut-C [8] nel suo articolo mette in risalto l'applicazione di tre sensori inerziali, applicati in corrispondenza delle vertebre cervicali, attraverso l'utilizzo di un collare elastico, e come vengono acquisiti i dati relativi ai movimenti generati dalle posizioni che assume la nostra testa in relazione ad una serie di attività, identificate come tipiche di un ambiente di ufficio, e che poi verranno analizzate e tabulate in modo tale da rendere visibili i risultati.

Con il sistema di valutazione proposto in [8], l'orientazione della testa nel piano sagittale, trasversale e frontale è determinato attraverso i sensori inerziali IMU.

In questo esperimento [8] la normale posizione della testa è rappresentata dalla sua disposizione allineata con il resto del corpo, con un angolo di 90° rispetto al piano trasversale, in direzione verticale (seduto dritto e con lo sguardo rivolto in avanti) e con una deviazione dell'angolo cervicale variabile in un range tra 0°-20° (range estrapolato dalla letteratura medica).

L'obiettivo principale in Ionut-C [8] è quello di identificare le posizioni della testa che abbiano un'inclinazione inadeguata ovvero quelle con una deviazione dell'angolo cervicale superiore o al di fuori del range (0°-20°) precedentemente stabilito.

Questo studio basato sull'acquisizione di dati tramite sensori IMU è stato proposto come eccellente alternativa ai classici sistemi di acquisizione (valutazioni soggettive di esperti, questionari personali, etc...) in modo tale da considerarne l'alta capacità di performance, a livello di accuratezza, e un corrispondente basso costo di implementazione.

Pertanto, i risultati così ottenuti evidenziano quanto siano affidabili tali sistemi di acquisizione, sia da un punto di vista economico che da un punto di vista implementativo.

2) Tronco, arti superiori

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) ha identificato le cause principali dei disagi muscolo-scheletrici, relativi all'ambiente di lavoro, principalmente laddove vi si presenti un mismatch tra la fisica capacità del corpo umano di sostenere sforzi continuativi e la richiesta fisica di un determinato compito. [16,39]

È il caso specifico di ciò che può avvenire in ambienti di lavoro che hanno prevalentemente necessità di lavoro manuale (ad esempio: catene di assemblaggio [11] o cantieri edili [27,28,29,37]).

Anche in questo caso l'utilizzo della sensoristica inerziale ha semplificato enormemente l'acquisizione di dati in real-time[33] e con buona accuratezza, sostituendo in gran parte, ma non completamente, il ruolo che avevano le valutazioni semi-soggettive degli specialisti dell'ergonomia, i quali basavano le loro informazioni e analisi su registrazioni video alle quali affiancavano questionari, rivolti all'operatore stesso che, in base alla sua percezione di fatica e di eventuale discomfort, valutava la mansione da lui svolta

In Battini et al. [33] viene presentato un sistema che permetta di capire come e con quale attrezzatura sia possibile effettuare una valutazione ergonomica in tempo reale.

La strumentazione base, individuata da 17 sensori IMU applicati dalla zona apicale (testa) a quella caudale (piedi) del soggetto, con tecnologia applicata sul tronco, braccia, pelvi e arti inferiori è integrata con strumenti di analisi dei dati, sviluppati ad hoc dagli autori stessi, basati sui principali protocolli di valutazione ergonomica (OWAS, OCRA, RULA).

Il sistema viene completato con l'introduzione di un software utile per la collezione istantanea dei dati acquisiti, tramite collegamento wireless o Bluetooth, dai sensori e per la classificazione delle informazioni relative all'attività svolta dal soggetto, ad esempio esecuzione e durata dell'attività.[33]

Nel caso di acquisizioni dati all'interno di una catena di assemblaggio auto, in accordo con Nunes, Folgado et al. [11], è stata proposta una rete di sette sensori inerziali wireless IMU che integrati con altri sensori hanno permesso l'acquisizione di dati, on-field e in real-time.

I sensori IMU proposti nel setup descritto in [11] sono stati applicati sul soggetto: una IMU all'interno di un guanto per ogni mano, una IMU per ogni braccio e avambraccio, attraverso l'uso di bende in velcro, e una IMU per il tronco, fissato attraverso un corpetto e localizzato sul petto, ognuno dei sensori è applicato con l'asse delle ascisse del telaio del sensore stesso lungo l'asse longitudinale del rispettivo segmento corporeo, puntando dall'estremità distale a quella prossimale e con l'asse z normale al segmento corporeo.

Tuttavia, nonostante la portabilità e la non invasività del setup proposto, i risultati ottenuti, se confrontati con quelli di laboratorio, proponendo in entrambi i casi le stesse mansioni, risultano meno accurati.

Questo è dovuto al fatto che i sensori IMU, qui utilizzati, provvisti di magnetometro, all'interno di un ambiente altamente ferromagnetico, come può esserlo quello di una catena di assemblaggio di automobili, acquisiscono dati con valori affetti da distorsione e pertanto poco fedeli alla realtà.

3) Pelvi e arti inferiori

La maggior parte delle valutazioni sul rischio biomeccanico in ambiente industriale sono state condotte relativamente alla parte superiore del corpo, statisticamente più affetta da sforzi e movimenti incongrui.

Tuttavia, specialmente in ambienti di lavoro, oberati di ostacoli, come i cantieri edili, scivolate, cadute e inciampi risultano essere la maggior causa di infortuni fatali.

Questo ha reso necessario un intervento da parte di ricercatori ed esperti di ergonomia per limitare tali avvenimenti, provando a studiare gli ambienti di lavoro all'interno di laboratori, per via di simulazioni che replicassero in maniera quanto più fedele possibile le mansioni eseguite dagli operai.

Molte delle prime tecniche di identificazione dei rischi di caduta o scivolamento venivano condotti in presenza di uno specialista che attraverso un suo giudizio valutava la pericolosità dei movimenti del soggetto in esame. [28]

Questo approccio, ovviamente, non poteva essere a lungo adoperato a causa del fatto che le valutazioni e le acquisizioni di tali dati, relativi al soggetto, fossero di tipo soggettivo, dettate dal livello di conoscenza dello specialista e dalla sua esperienza nel settore.

Spesso e volentieri, infatti, non si riteneva sufficiente analizzare il movimento solo attraverso una mera visione del soggetto.

Recenti studi hanno dimostrato che non sempre il rischio di caduta è facilmente identificabile ad occhio nudo, attraverso evidenti gesti di perdita di stabilità ed equilibrio; pertanto, si è reso necessario l'identificazione di un metodo che analizzasse in maniera più critica e specifica la stabilità di un operaio usando dati cinematici acquisiti attraverso l'utilizzo della sensoristica IMU.

Uno di questi parametri che sono risultati utili a quantificare il rischio di caduta, è rappresentato dalla distanza tra il centro di massa del corpo (BCoM) e l'asse del momento minimo d'inerzia (MMA) calcolata come approssimazione delle variazioni del momento angolare di tutto il corpo [38].

In Pillet et Watier [38] vengono acquisiti i parametri cinematici, relativi al movimento del centro di massa, attraverso l'utilizzo di sensoristica inerziale IMU in modo tale da valutarne l'accuratezza e la solidità di misurazione on-field, rispetto ad una di laboratorio, comparando i risultati con quelli ricavati da un sistema optoelettronico.

I risultati prodotti in [38], riguardanti l'accuratezza di raccolta dati di una IMU rispetto ad un sistema optoelettronico e dopo aver stimato il valore soglia della distanza tra il BCoM e il MMA durante la deambulazione di un soggetto sano, mettono in risalto che l'errore medio tra lo spostamento del BCoM acquisito dalla IMU e quello acquisito dal sistema di riferimento optoelettronico è di 4mm, 3mm, 53mm sugli assi medio laterale, anteroposteriore e verticale rispettivamente.

I risultati in [38] permettono di considerare la determinazione dei rischi di cadute on-field in maniera non del tutto corretta.

In Jebelli et al. [28], ricerca nel quale viene valutata la validità e l'abilità del Max LE (maximum Lyapunov exponents), una metrica di valutazione dell'andatura utilizzata con successo in ambito clinico ospedaliero, nella valutazione del rischio di caduta in ambiente di lavoro, il sensore IMU per l'acquisizione dei dati è applicato alle caviglie dell'operatore e orientato con l'asse delle X, l'asse delle Y e l'asse Z in modo tale che rappresentino le direzioni antero-posteriore (AP), verticale (VT) e medio-laterale (ML), rispettivamente.

In [28] viene richiesto al gruppo di soggetti in esame, al fine della valutazione del rischio di caduta, di portare a termine tre tasks diverse in ordine crescente di difficoltà, a partire dalla prima che prevede una semplice deambulazione del soggetto a velocità normale (155.75cm/s), su un sito di lavoro appositamente riprodotto in ambiente di laboratorio, la seconda che prevede la deambulazione del soggetto con carico di 12Kg da trasportare da un solo lato e la terza ed ultima task che prevede la deambulazione del soggetto ad una velocità sostenuta (220.37 cm/s).

Il metodo esposto in Jebelli et al. [28] misura come il movimento di un lavoratore reagisce ai vari ostacoli causati da fattori estrinseci, ostacoli e pericoli indivisuali sul cantiere, da distinguere da quelli intrinseci, legati all'età, all'esperienza del soggetto e altre caratteristiche fisiche [28], e permette ai ricercatori di valutare il rischio di un pericolo per la sicurezza basato sulla risposta dei lavoratori al pericolo piuttosto che alle proprietà fisiche del pericolo stesso.

4. Conclusione

La presente revisione della letteratura ha l'obiettivo di evidenziare aspetti salienti dell'uso di unità inerziali in ambito industriale con particolare riferimento agli aspetti ergonomici.

Seppur non in maniera approfondita, sono stati brevemente introdotti alcuni esempi di applicazione dei sensori IMU con lo scopo di sottolineare il loro utilizzo per la raccolta dati che

risulta essere uno dei primi step necessari all'analisi di un determinato movimento o task di studio (non sono stati, infatti, trattati argomenti che riguardassero algoritmi di fusione, filtri per l'eliminazione di eventuali distorsioni, espliciti riferimenti a calcoli matematici, integrazioni tra i suddetti sensori ed altra tecnologia).

Bibliografia:

1) Stampato dalla Tipolitografia Inail di Milano • Edizione 2021 Autori: A. Papale, G. Chini, F. Draicchio, A. Fiorelli, L. Fiori, A. Ranavolo, A. Silvetti, A. Tatarelli, R. Trovato, T. Varrecchia • Progetto editoriale: Inail-Dimeila • Editing e grafica: A. Luciani

2) Mathie, Merryn J; Coster, Adelle C F; Lovell, Nigel H; Celler, Branko G (2004). *Accelerometry: providing an integrated, practical method for long-term, ambulatory monitoring of human movement. Physiological Measurement.*

3) Culhane, K.M., O'Connor, M., Lyons, D., Lyons, G.M. Accelerometers in rehabilitation medicine for older adults (2005) *Age and Ageing*, 34 (6), pp. 556-560. Cited 230 times.

4) Bussmann, J.B.J., Damen, L., Stam, H.J. Analysis and decomposition of signals obtained by thigh-fixed uni-axial accelerometry during normal walking (2000) *Medical and Biological Engineering and Computing*, 38 (6), pp. 632-638. Cited 25 times

5) Bouten CVC, Koekkoek KTM, Verduin M, Kodde R, Janssen JD. A triaxial accelerometer and portable data processing unit for the assessment of daily physical activity. *IEEE Trans Biomed Eng* 1997;44(3):136-47.

6) Aminian, K., Najafi, B., Büla, C., Leyvraz, P.-F., Robert, Ph. Spatio-temporal parameters of gait measured by an ambulatory system using miniature gyroscopes (2002) *Journal of Biomechanics*, 35 (5), pp. 689-699. Cited 612 times.

7) Threshold-based fall detection using a hybrid of tri-axial accelerometer and gyroscope Fu-Tai Wang, Hsiao-Lung Chan, Ming-Hung Hsu, Cheng-Kuan Lin, Pei-Kuang Chao and Ya-Ju Chang. Published 12 October 2018 • © 2018 Institute of Physics and Engineering in Medicine

8) Ionut-Cristian, S. A Brief Review of Using the Inertial Sensor to Determine the Driver Head Posture (2021) 2021 9th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2021.

9) Reich, O., Hubner, E., Ghita, B., Wagner, M.F., Schafer, J. A Survey Investigating the Combination and Number of IMUs on the Human Body Used for Detecting Activities and Human Tracking (2020)

2020 World Conference on Computing and Communication Technologies, WCCCT 2020, art. no. 9170009, pp. 20-27. Cited 6 times.

10) Severin, I.-C. Head posture monitor based on 3 IMU sensors: Consideration toward healthcare application (2020) 2020 8th E-Health and Bioengineering Conference, EHB 2020, art. no. 9280106, . Cited 5 times.

11) Nunes, M.L., Folgado, D., Fújao, C., Silva, L., Rodrigues, J., Matias, P., Barandas, M., Carreiro, A.V., Madeira, S., Gamboa, H. Posture Risk Assessment in an Automotive Assembly Line Using Inertial Sensors (2022) IEEE Access, 10, pp. 83221-83235. Cited 1 time

12) Caputo, F., D'Amato, E., Greco, A., Notaro, I., Spada, S. Human posture tracking system for industrial process design and assessment (2018) Advances in Intelligent Systems and Computing, 722, pp. 450-455. Cited 19 times

13) Petz, P., Eibensteiner, F., Langer, J. Sensor Shirt as Universal Platform for Real-Time Monitoring of Posture and Movements for Occupational Health and Ergonomics (2021) Procedia Computer Science, 180, pp. 200-207. Cited 4 times

14) Lim, S., D'Souza, C. A narrative review on contemporary and emerging uses of inertial sensing in occupational ergonomics (2020) International Journal of Industrial Ergonomics, 76, art. no. 102937, . Cited 41 times.

15) Bachmann, E.R., Yun, X., Brumfield, A., 2007. Investigating the Effects of Magnetic Variations on Inertial/magnetic Orientation Sensors. Technical report. NAVALPOSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA.

16) Digo, E., Pastorelli, S., Gastaldi, L. A Narrative Review on Wearable Inertial Sensors for Human Motion Tracking in Industrial Scenarios (2022) Robotics, 11 (6), art. no. 138

17) Chen, D., Cai, Y., Cui, J., Chen, J., Jiang, H., Huang, M.-C. Risk factors identification and visualization for work-related musculoskeletal disorders with wearable and connected gait analytics system and kinect skeleton models (2018) Smart Health, 7-8, pp. 60-77. Cited 11 times

18) Milad Nazarahari, Hossein Rouhani; 40 years of sensor fusion for orientation tracking via magnetic and inertial measurement units: Methods, lessons learned, and future challenges. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Donadeo Innovation Centre for Engineering, Edmonton, Alberta T6G 1H9, Canada

19) H.J. Luinge, P.H. Veltink, Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers, Med. Biol. Eng. Comput. 43 (2005) 273–282.

20) D. Roetenberg, H.J. Luinge, C.T.M. Baten, P.H. Veltink, Compensation of magnetic disturbances improves inertial and magnetic sensing of human body segment orientation, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng. 13 (2005) 395–405.

21) Bergamini, E., Ligorio, G., Summa, A., Vannozzi, G., Cappozzo, A., Sabatini, A.M. Estimating orientation using magnetic and inertial sensors and different sensor fusion approaches: Accuracy assessment in manual and locomotion tasks (2014) Sensors (Switzerland), 14 (10), pp. 18625-18649. Cited 171 times

- 22) Di Pasquale, V., De Simone, V., Radano, M., Miranda, S. Wearable devices for health and safety in production systems: a literature review (2022) IFAC-PapersOnLine, 55 (10), pp. 341-346.
- 23) Simpson, L., Maharaj, M.M., Mobbs, R.J. The role of wearables in spinal posture analysis: A systematic review (2019) BMC Musculoskeletal Disorders, 20 (1), art. no. 55, . Cited 35 times
- 24) Cerqueira, S.M.; Da Silva, A.F.; Santos, C.P. Smart Vest for Real-Time Postural Biofeedback and Ergonomic Risk Assessment. IEEE Access 2020, 8, 107583–107592
- 25) McDevitt, S., Hernandez, H., Hicks, J., Lowell, R., Bentahaikt, H., Burch, R., Ball, J., Chander, H., Freeman, C., Taylor, C., Anderson, B. Wearables for Biomechanical Performance Optimization and Risk Assessment in Industrial and Sports Applications (2022) Bioengineering, 9 (1), art. no. 33, . Cited 6 times
- 26) The Sensor-Based Biomechanical Risk Assessment at the Base of the Need for Revising of Standards for Human Ergonomics Alberto Ranavolo 1, Arash Ajoudani 2, Andrea Cherubini 3 , Matteo Bianchi 4, Lars Fritzsche 5, Sergio Iavicoli 1, Massimo Sartori 6, Alessio Silvetti 1, Bram Vanderborght 7,8 Tiwana Varrecchia 1 and Francesco Draicchio 1
- 27) J. Chen, C.R. Ahn, S. Han, Detecting the hazards of lifting and carrying in construction through a coupled 3D sensing and IMUs sensing system, 2014. International Conference Computing in Civil and Building Engineering. 1110–1117
- 28) H. Jebelli, C.R. Ahn, T.L. Stentz, Fall risk analysis of construction workers using IMU validating the usefulness of the postural stability metrics in construction, 2016. Safety Science 84 161–170
- 29) Lee, S., Koo, B., Yang, S., Kim, J., Nam, Y., Kim, Y. Fall-from-Height Detection Using Deep Learning Based on IMU Sensor Data for Accident Prevention at Construction Sites (2022) Sensors, 22 (16), art. no. 6107,
- 30) Petropoulos, A., Sikeridis, D., Antonakopoulos, T. Wearable Smart Health Advisors: An IMU-Enabled Posture Monitor (2020) IEEE Consumer Electronics Magazine, 9 (5), art. no. 9090976, pp. 20-27. Cited 12 times.
- 31) Stefana, E., Marciano, F., Rossi, D., Cocca, P., Tomasoni, G. Wearable devices for ergonomics: A systematic literature review (2021) Sensors (Switzerland), 21 (3), art. no. 777, pp. 1-24. Cited 37 times
- 32) Akhmad, S., Arendra, A., Findiastuti, W., Lumintu, I., Pramudita, Y.D., Mualim Wearable IMU wireless sensors network for smart instrument of ergonomic risk assessment (2020) Proceeding - 6th Information Technology International Seminar, ITIS 2020, art. no. 9321084, pp. 213-218. Cited 3 times.
- 33) Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F. Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management (2014) Computers and Industrial Engineering, 77, pp. 1-10. Cited 83 times.
- 34) Caputo, F., Greco, A., D'Amato, E., Notaro, I., Spada, S. Imu-based motion capture wearable system for ergonomic assessment in industrial environment (2019) Advances in Intelligent Systems and Computing, 795, pp. 215-225. Cited 16 times.

- 35) Menolotto, M., Komaris, D.-S., Tedesco, S., O'flynn, B., Walsh, M. Motion capture technology in industrial applications: A systematic review (2020) *Sensors (Switzerland)*, 20 (19), art. no. 5687, pp. 1-25. Cited 50 times.
- 36) Lamers, E.P., Yang, A.J., Zelik, K.E. Feasibility of a biomechanically-assistive garment to reduce low back loading during leaning and lifting (2018) *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65 (8), pp. 1674-1680. Cited 59 times
- 37) Yan, X., Li, H., Li, A.R., Zhang, H. Wearable IMU-based real-time motion warning system for construction workers' musculoskeletal disorders prevention (2017) *Automation in Construction*, 74, pp. 2-11. Cited 175 times.
- 38) Pillet, H., Watier, B. Development of a Wearable Framework for the Assessment of a Mechanical-Based Indicator of Falling Risk in the Field (2023) *IRBM*, 44 (2), art. no. 100742
- 39) WHO. 2021. Musculoskeletal conditions. 8 February 2021; [updated October 30; accessed 2021 Oct 30].