

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

Strumenti software basati su un'architettura IoT per la valutazione ergonomica del posto di lavoro

Progettazione e realizzazione del software, scelta dei sensori,
sperimentazione e risultati



Relatore:

prof. Maurizio Morisio

Co-relatore:

Luca Monterzino

Candidato:

Silvia Baruzzo

Ottobre 2018

Ringraziamenti

Innanzitutto vorrei ringraziare il prof. Maurizio Morisio per avermi indirizzato al meglio durante la stesura della tesi, con suggerimenti sempre chiari e precisi. Inoltre ringrazio tutte le persone di ProLogic coinvolte nel progetto, in particolare: Luca Monterzino per avermi seguito durante lo sviluppo della tesi e per avermi permesso di utilizzare i sensori da loro acquistati ogni qual volta ne avessi bisogno; Agostino Moronese per avermi aiutato a risolvere qualsiasi problema si presentasse durante lo sviluppo del software; Alessandro Marchina per avermi spiegato il significato dei quaternioni e degli angoli di Eulero, nonché come utilizzarli ai fini del progetto; Marco Malano, che insieme ad Alessandro si è prestato ad indossare la maglietta sensorizzata durante la sperimentazione. Ringrazio anche la prof. Margherita Micheletti e Ambra Giustetto dell'Università di Torino (Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi), il loro contributo è stato fondamentale per definire gli aspetti ergonomici utili al progetto. Vorrei ringraziare Valerio Cietto dell'Università di Torino (Dipartimento di Informatica) per avermi permesso di prendere spunto dalla sua tesi di laurea, e la prof. Cristina Gena sua relatrice. Infine desidero ringraziare la mia famiglia che mi ha supportato durante il percorso accademico, permettendomi di svolgere, in contemporanea agli studi, sia l'attività di maestra di sci che quella lavorativa.

Sommario

La tesi si colloca nel contesto del progetto Humans.

Il progetto Humans, iniziato nel 2017, coordinato da COMAU e finanziato su fondi POR-FESR, ha l'obiettivo di realizzare soluzioni tecniche altamente innovative che consentano di eseguire operazioni di elevata complessità attraverso l'interazione sicura tra l'uomo e il robot.

Sarà creato un nuovo paradigma di fabbrica in cui l'operatore umano sarà al centro del sistema di produzione.

Il nuovo paradigma produttivo sarà realizzato attraverso le seguenti linee di sviluppo e relative tecnologie abilitanti:

- robot collaborativi
- robot indossabili
- postazioni di lavoro auto-adattative
- logistica di stabilimento e robot mobili
- internet delle cose nell'industria
- architetture di controllo modulari
- sistemi di controllo virtualizzati
- sistemi ad apprendimento automatico.

All'interno del progetto Humans, questa tesi ha avuto l'obiettivo di integrare, nel contesto più ampio di un'architettura logica IoT, sensoristica e moduli software a supporto dell'ergonomia del posto di lavoro. La tesi è svolta in collaborazione con la società ProLogic che si è occupata della sensoristica indossabile applicata su una maglietta e successivamente ad un esoscheletro. L'obiettivo è stato quello di individuare posture scorrette e relativa frequenza, tramite i rilevamenti di una maglietta sensorizzata. Si è realizzata una sperimentazione sul campo e la validazione dei risultati ottenuti applicando regole ergonomiche fornite ed elaborate dall'Università di Torino.

Successivamente e in base ai risultati precedenti, si è impostato il lavoro di pilotaggio del controllo attivo di un esoscheletro per supportare carichi dorsali a fronte di piegamenti del busto, attività che si concluderà con la fine del progetto a giugno 2019.

Questa tesi è strutturata nel seguente modo:

Il primo capitolo colloca la tesi nello scenario evolutivo tecnologico di Industry 4.0, fornisce una sintesi del progetto Humans e inserisce in tale contesto i propri obiettivi.

Il secondo capitolo descrive gli aspetti tecnologici che hanno consentito di realizzare gli obiettivi. Si parte dalle problematiche dell'ergonomia di fabbrica e si descrivono tutti gli aspetti hardware e software per la realizzazione della maglietta.

Si descrive lo stato dell'arte sulle architetture IoT e si motivano le scelte effettuate per quella di Humans.

Un paragrafo è dedicato agli aspetti e regole ergonomiche necessarie sia per il corretto posizionamento dei sensori sia per l'interpretazione dei dati, un paragrafo descrive anche gli algoritmi matematici alla base del calcolo del posizionamento dei sensori nello spazio per la derivazione delle posture.

Si riportano inoltre le modalità ed i risultati della sperimentazione effettuata in laboratorio.

Infine si descrive una prima analisi di applicazione su esoscheletro, questa attività rappresenta un proseguimento della tesi che porterà alla conclusione del progetto Humans a metà 2019.

Indice

Ringraziamenti	I
Sommario	III
1 Lo scenario	1
1.1 La quarta rivoluzione industriale “Industry 4.0”	1
1.1.1 Le tecnologie	4
1.2 Il progetto Humans	11
1.3 Gli obiettivi della tesi	12
2 Tecnologie a supporto dell’ergonomia del posto di lavoro	15
2.1 Il problema	15
2.1.1 Misurazione posture attraverso sensori indossabili: lo stato dell’arte	16
2.1.2 Maglietta sensorizzata e modalità di utilizzo.....	20
2.2 L’architettura IoT	21
2.2.1 Stato dell’arte delle piattaforme IoT.....	21
2.2.2 Le architetture esistenti.....	24
2.2.3 L’architettura IoT per il progetto Humans.....	26
2.2.4 L’architettura IoT nel contesto dell’ergonomia di fabbrica e di questa tesi	28
2.3 Hardware	30
2.3.1 Sensori	31
2.3.2 Dispositivo <i>bridge</i>	34
2.3.3 Server.....	35
2.4 Aspetti ergonomici	36
2.4.1 Individuazione di range di movimento in relazione a posture statiche o dinamiche e assunzione di angoli articolari degli arti superiori e del tronco considerabili come ottimali, tollerabili o critici	39
2.4.2 Indossabilità dei sensori.....	43
2.5 Software e metodologie	44

2.5.1 Applicazione di configurazione e acquisizione/gestione dei dati per il caso dei sensori indossabili.....	44
2.5.2 Algoritmi matematici per il calcolo del posizionamento dei sensori.....	47
2.5.3 Base di dati	53
2.5.4 Software di visualizzazione delle posture.....	56
2.5.5 Sistema di valutazione ergonomica	56
2.6 Sperimentazione	60
3 Considerazioni preliminari per l'integrazione nel progetto di esoscheletri attivi	65
4 Conclusioni.....	69
Bibliografia.....	71

Capitolo 1

Lo scenario

1.1 La quarta rivoluzione industriale “Industry 4.0”

Il termine “rivoluzione industriale” è stato introdotto dall’economista Arnold Toynbee per caratterizzare i cambiamenti rivoluzionari nella produzione del periodo tra il 1760 e il 1840.

Da allora, è stato usato dagli storici e dai tecnici per definire periodi di forte cambiamento tecnologico con impatto rilevante sulla società. In più di duecento anni, possiamo catalogare quattro rivoluzioni, anche se le date di inizio e di fine di ciascun periodo non possono essere definite con precisione [1]. Una catalogazione di questi periodi è stata fatta in modo sistematico da Kagermann del centro tedesco per l’intelligenza artificiale DFKI nel 2013 (figura 1.1).

Quello che si può notare, ripercorrendo la storia delle evoluzioni tecnologiche nell’industria è l’incredibile accelerazione degli ultimi anni. Un secolo ciascuna, la durata delle prime due rivoluzioni, 40 anni la terza e la quarta è appena cominciata.

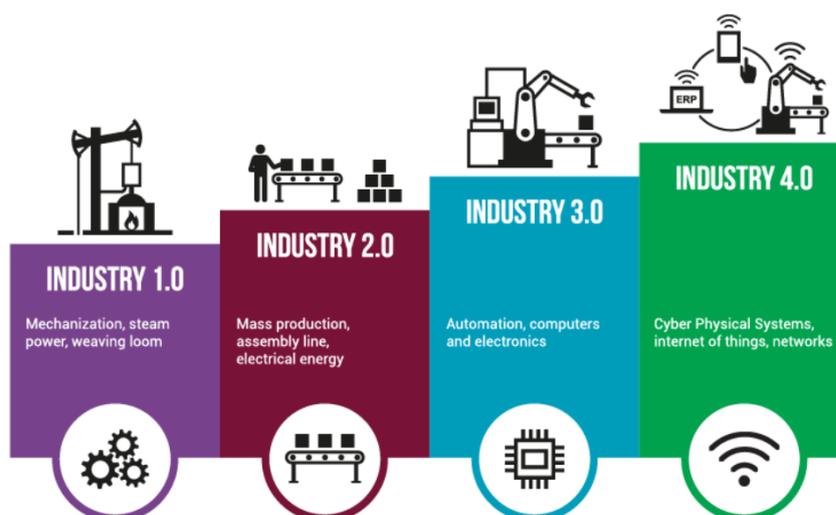


Figura 1.1: la quarta rivoluzione industriale

La prima rivoluzione inizia a fine diciottesimo secolo con la meccanizzazione della produzione utilizzando la forza del vapore e dell'acqua, la seconda, durata un altro secolo fino alla fine degli anni settanta, è stata pilotata dall'introduzione dell'elettricità e ha consentito la produzione di massa; successivamente con l'avvento dell'elettronica e delle tecnologie informatiche si è potuto automatizzare ulteriormente la produzione, e infine l'incalzare delle tecnologie digitali innovative ha avviato, dopo solo quarant'anni, la nuova rivoluzione, denominata Industry 4.0 [2].

Industry 4.0, anche chiamata industria intelligente, industria digitale o industria del futuro, fornisce diverse risposte tecnologiche alle sfide di un mercato sempre più competitivo. Il termine è stato coniato in Germania nel 2011 e indica la nuova trasformazione digitale nell'industria manifatturiera. Essa è un settore chiave per l'economia e per l'occupazione europee: riceve l'80% degli investimenti in ricerca e sviluppo in Europa e fornisce lavoro a più di 20 milioni di cittadini europei, 30 milioni se si include anche l'indotto dei servizi [3].

I nuovi paradigmi alla base di Industry 4.0 hanno come principali effetti la trasformazione da produzione di massa a produzione individualizzata, pur mantenendo alti i volumi, l'integrazione orizzontale dei processi in reti collaborative (ciclo di vita del prodotto, catena di fornitura), la reintegrazione delle risorse umane nel loop produttivo [4].

Secondo altri autori [5], il cambiamento radicale non è di per sé nel progresso tecnologico, ma nel suo impatto sul concetto di prodotto/servizio, produzione/distribuzione e specialmente sul modo in cui le aziende creano, distribuiscono e incrementano valore. I cambiamenti sono anche rilevanti nei processi, nell'organizzazione del lavoro e nella società stessa.

Esaminiamo le principali differenze rispetto alla precedente rivoluzione industriale che è stata centrata sull'avvento dell'elettronica, dell'informatica e conseguentemente dell'automazione; il termine "tecnologie manifatturiere

avanzate” (*Advanced Manufacturing Technologies-AMT*) è nato negli anni '80 e fa riferimento a un set di tecnologie ormai consolidate quali *Computer Integrated Manufacturing (CIM)*, *Computer-Aided Design (CAD)*, *Computer-Aided Manufacturing (CAM)*, *Flexible Manufacturing Systems (FMS)*, tra molte altre [6]. L'obiettivo era ottenere una maggiore flessibilità, cicli produttivi più brevi, prodotti più rispondenti alle esigenze dei clienti, risposte più rapide alle variazioni del mercato, maggior controllo e accuratezza dei processi [7]. L'automazione ha tolto spazio all'uomo e quindi si è assistito all'instaurarsi di una vera e propria dicotomia uomo-macchina.

Si è verificato lo svuotamento delle fabbriche, esistono tuttora linee completamente automatiche in cui la presenza umana quasi non si percepisce. Anche l'ambiente di fabbrica presenta delle vere e proprie linee di demarcazione. Dove operano le macchine, per motivi di sicurezza l'uomo non può andare o deve varcare cancelli che fermano l'operatività.

Nonostante tutto ciò, per politiche di riduzione costi, molti impianti sono stati spostati in stati o continenti poco industrializzati (est Europa o Asia) [8] alla fine del ventesimo secolo. Da un lato, la globalizzazione ha intensificato l'applicazione dei sistemi informatici, dall'altro gli incentivi all'automazione erano frenati dai costi ridotti della produzione all'estero. Per anni si sono trasferite competenze e organizzazione, formando così dei nuovi concorrenti nei paesi emergenti.

E qui comincia la nuova rivoluzione di Industry 4.0, che sicuramente ha avuto un supporto tecnologico, come vedremo nel seguito, ma che ha avuto una forte spinta sociale.

Pur richiedendo macchine sempre più autonome e intelligenti si è visto che il vero vantaggio competitivo è nella collaborazione tra uomo e macchina e non nella contrapposizione. La macchina diventa un aiuto e non una sostituzione.

L'uomo rientra a far parte integrante della rete produttiva diventando uno dei nodi della rete collaborativa, il nodo più dinamico e più intelligente.

Già dalla fine del ventesimo secolo si è osservato che la corsa all'innovazione ha prodotto un mercato dinamico e iper-competitivo [9]; questo vuol dire che il vantaggio competitivo è effimero e le aziende devono perseguire un adattamento e miglioramento continuo [10]. Allo stesso tempo la collaborazione, spinta a tutti i livelli, e la rete sono diventati prioritarie sia per l'innovazione che per l'operatività quotidiana [11]. Infatti il progetto, lo sviluppo, la produzione, il rilascio di nuovi prodotti o servizi coinvolgono sempre di più numerose organizzazioni interattivamente.

La catena del valore sta subendo un processo di cambiamento intenso di cui l'orientamento ai servizi (*servitisation of manufacturing*) [12], la deverticalizzazione e la collaborazione, sono solo alcuni esempi di tendenze nell'industria, che richiedono un ripensamento dei processi e nuovi modelli operativi. Con la digitalizzazione dell'industria viene abilitata l'interazione tra un numero sempre maggiore di attori fisici e virtuali che cooperano per la realizzazione di prodotti e servizi sempre più orientati al cliente, con un forte orientamento all'efficienza e alla scalabilità della produzione [13].

In questo scenario si innestano le tecnologie abilitanti. Proprio con il loro maturare è resa possibile la trasformazione Industry 4.0 appena descritta.

1.1.1 Le tecnologie

Le tecnologie principali alla base di Industry 4.0, che a loro volta ne sottendono molte altre, sono quindi le seguenti (le lasciamo indicate in inglese perché sono molto più note in lingua originale):

- *Cyber-Physical Systems (CPS)*
- *Internet of Things (IoT)*
- *Big Data*
- *Ubiquitous Computing.*

Le suddette tecnologie impattano pesantemente sui processi manifatturieri fornendo contenuti digitali ai due concetti che inquadrano e caratterizzano completamente la quarta rivoluzione industriale:

- la fabbrica intelligente
- la società e l’economia iper-connessa.

Cyber-Physical Systems (CPS)

Rappresentano la tecnologia principale alla base di Industry 4.0 e possono essere definiti come la combinazione di sistemi fisici e cibernetici [14]. I due sistemi operano come un’unica entità: tutto ciò che avviene nel fisico impatta sul virtuale e viceversa [15].

Nel settore manifatturiero i CPS abilitano lo sviluppo di processi produttivi autonomi che diventano intelligenti attraverso algoritmi e processi decisionali che sfruttano le informazioni derivate dalla doppia dimensione, quella fisica e quella virtuale.

La principale caratteristica dei CPS è che la loro intelligenza non è centralizzata, ma distribuita su vari nodi e in diversi momenti del processo e questa dà al sistema maggior stabilità, flessibilità e sicurezza.

I CPS modificano il concetto di “*plug and play*”, comunemente usato nel software per indicare una facile configurabilità, nel concetto di “*plug and work*” che sottende alla autoconfigurabilità di un sistema produttivo quando vengono introdotti nuovi nodi cyberfisici. L’aspetto chiave è che un nuovo CPS può venire introdotto su una linea di produzione ed essere operativo senza cambiare l’applicazione di controllo [16].

I CPS consentono di connettere i processi fisici con la parte virtuale attraverso internet e di integrarli mediante intelligenza distribuita; la linea produttiva acquisisce così flessibilità e autonomia consentendo una maggiore adattabilità verso la produzione individualizzata [4].

I CPS costruiscono la loro base sulla tecnologia internet, sui sistemi integrati e sull'intelligenza artificiale. La combinazione di queste tecnologie è sicuramente dirompente [17].

Internet of Things (IoT)

Internet ha rivoluzionato il modo in cui le imprese realizzano i propri business attraverso la fornitura di piattaforme aperte, servizi web, strumenti e applicazioni che consentono attività collaborative indipendenti dalla geolocalizzazione di chi le effettua.

A oltrepassare il concetto di internet puramente software, negli ultimi anni, in conseguenza della sempre maggior diffusione dei CPS, si è arrivati a parlare di internet delle cose (noto come IoT, *Internet of Things*) che ha generato una nuova rivoluzione in tutti i settori aggiungendo al concetto di nodo di una rete software, la dimensione hardware rendendo parte della rete internet anche sensori o attuatori in grado di comunicare in modo cablato o wireless col resto della rete. E non è finita qui, la rete si allarga ulteriormente parlando di internet globale o *Internet of Everything* (IoE), che ha fatto ulteriormente evolvere e generalizzare il concetto di *Internet of Things* (IoT), portando a una nuova era computazionale [18].

IoE congiunge in una rete virtuale persone, processi, dati, hardware e oggetti, passivi o attivi, intelligenti o meno, rendendo le connessioni di rete più rilevanti e indispensabili che mai, trasformando informazioni in azioni e creando nuove capacità, nuove esperienze, nuove potenzialità di business e opportunità economiche, dando un'ulteriore inarrestabile accelerazione a tutti i processi individuali, sociali, aziendali e globali [19]. Il risultato di tutto ciò è un significativo miglioramento di prodotti, servizi e processi, miglioramento globale in termini di tempi, qualità, soddisfazione del cliente e quant'altro [20].

Il vero valore di IoE sarà realizzato quando gli oggetti intelligenti, i software, i processi e le persone potranno realmente comunicare e condividere dati tra loro

attraverso il cloud per trasformare questi in informazioni e conoscenze ricavate a loro volta, mediante la convergenza di M2M (*Machine 2 Machine*), *Big Data*, cloud e HPC (*High Performance Computing*), tecnologie chiave per costruire la prossima generazione di sistemi. Nonostante questo stratosferico scenario, per ora la maggioranza delle aziende non è andata molto oltre lo sviluppo della loro intranet aziendale focalizzata su locali e isolati scenari chiusi su loro stessi.

L’internet delle cose (IoT), collegata ai sistemi *Cyber-Physical* (CPS), ma anche alla sicurezza digitale, al *Cloud Computing*, ai *Big Data*, alla realtà virtuale, e a molte altre tecnologie emergenti nell’ambito dell’intelligenza artificiale, migliorerà l’efficienza e la flessibilità della produzione e dei consumi, rispondendo al meglio le necessità del cliente, e aiutando a salvaguardare le risorse naturali in ambito manifatturiero e logistico.

La convergenza di queste tecnologie digitali disegna un nuovo scenario manifatturiero in cui gli impianti produttivi comprenderanno innumerevoli dispositivi, fisici o virtuali, intelligenti e interconnessi che consentiranno una riconfigurazione dinamica, un monitoraggio automatico dell’impianto o della rete, un controllo della qualità ed un miglioramento dell’efficienza. Inoltre il ciclo di vita del prodotto, tradizionalmente frammentato in progettazione, produzione, vendita e post-vendita sarà rimpiazzato da un anello chiuso che consentirà di connettere le varie fasi ed i relativi dati per ottenere una maggiore rispondenza dei prodotti alle esigenze del cliente e per arrivare alla produzione individualizzata.

Big Data

In un contesto di fabbrica intelligente ed estesa, includendo sia i concetti di ciclo di vita del prodotto che la catena della fornitura, i dati che vengono generati rappresentano un’enorme fonte di informazione e portano con loro una serie di problematiche da gestire [21].

Inoltre in un mondo iper-connesso ogni CPS diventa un generatore di dati e di informazioni.

Nel seguito elenchiamo le tipologie di dati e le relative potenzialità di utilizzo nei tre contesti collegati al settore manifatturiero e cioè la fabbrica, la catena di fornitura e il ciclo di vita del prodotto.

- Contesto di fabbrica: i dati sono generati nelle linee di produzione e sono necessarie delle potenzialità analitiche per la gestione della sicurezza, l'ottimizzazione, la diagnosi e il monitoraggio dell'impianto, l'interazione con il personale di fabbrica, la pianificazione della produzione.
- Contesto catena della fornitura: i dati sono generati dall'ecosistema che non si chiude solo sulla fabbrica ma si estende ai fornitori, distributori e venditori. In questo caso i dati vengono acquisiti ed analizzati con molteplici finalità, da analisi dei trend, alla gestione dei laboratori, all'ottimizzazione della catena di fornitura e distribuzione, all'ottimizzazione della logistica (interna ed esterna), al monitoraggio dei clienti e quant'altro.
- Contesto ciclo di vita del prodotto: i dati vengono generati in tutte le fasi della creazione di nuovi prodotti dalla loro concezione al fine vita, e i dati raccolti in tutte le fasi servono a ottimizzare e migliorare le fasi precedenti in una prospettiva di economia circolare.

Le priorità tecnologiche in ambito *Big Data* sono:

- visualizzazione dati e interazione con l'utente: approcci e tecniche di visualizzazione che migliorano l'interazione con l'utente, capaci di gestire l'incremento continuo e la complessità dei dati al fine di trarne informazioni utili;
- analisi dei dati: tecniche di analisi che consentano di migliorare la comprensione del significato dei dati, tecniche di *learning*, di sintesi;

- architetture per la gestione dei dati: architetture ottimizzate e scalabili per processare fonti enormi di dati provenienti dai sensori, tecnologie *High Performance Computing and Exascale* con architetture hardware e software di supporto consentiranno tali analisi;
- protezione dei dati: gestione della privacy e meccanismi di anonimizzazione, ma anche architetture per facilitare la protezione dei dati.

Ubiquitous Computing

L'obiettivo dell'*Ubiquitous Computing* è quello di rendere i dispositivi intelligenti, creando una rete di sensori capaci di raccogliere, processare e inviare dati, che sia in grado di comprendere gli avvenimenti che la circondano per migliorare la qualità della vita dell'utilizzatore. Per fare ciò, viene aggiunta una capacità computazionale (di solito nella forma di microprocessori), all'interno dei dispositivi utilizzati quotidianamente, in modo che possano svolgere determinate funzioni senza che l'utente debba interagire con essi come farebbe con un normale computer.

I dispositivi che utilizzano questo paradigma sono completamente connessi e sempre disponibili, essi includono non solo laptop o smartphone, ma anche tablet, dispositivi indossabili, sistemi di illuminazione, sensori e molto altro.

Esempi di *Ubiquitous Computing* sono l'Apple Watch, che notifica all'utente la ricezione di una telefonata e gli permette di continuarla dall'orologio, oppure Amazon Echo che riproduce una canzone grazie semplicemente alla richiesta vocale dell'utente. [22]

Mark Weiser, considerato il padre del termine *Ubiquitous Computing*, definisce una serie di principi per descriverli al meglio:

- lo scopo di un computer è quello di aiutare l'utente a fare qualcos'altro;
- il miglior computer è un servitore tranquillo e invisibile;

- più cose l'utente riesce a fare grazie all'intuito, più egli è intelligente, il computer deve essere in grado di estendere il suo inconscio;
- la tecnologia deve generare tranquillità.

In sostanza con l'*Ubiquitous Computing* si passa da un'era in cui utente e computer comunicano a fatica attraverso il desktop, a un'era in cui la tecnologia si nasconde sullo sfondo della nostra vita. [23]

In ambito europeo i due filoni Industry 4.0 e IoT sono stati parte integrante del programma quadro H2020 che ha finanziato numerosi progetti sul tema.

Sono anche attivi numerosi gruppi di lavoro come EFFRA (*European Factory of the Future Research Association*) [24] responsabile dei lanci dei bandi FoF (*Factory of the Future*) che hanno finanziato numerosi progetti in ambito Industry 4.0, EPoSS (*European Platform on Smart System Integration*) [25] gruppo di lavoro supportato dall'industria per la definizione di scenari di ricerca per l'integrazione di sistemi intelligenti, AIOTI (*Alliance for Internet of Things Innovation*) [26], IoT-EPI (*IoT-European Platform Initiative*) [27] che ha l'obiettivo di fornire una visione organica delle piattaforme software che stanno emergendo nel settore IoT.

All'interno di questi gruppi di lavoro sono stati redatti dei documenti riassuntivi che sono stati presi in considerazione in questa tesi soprattutto per quanto riguarda l'architettura delle piattaforme software, come spiegato nel paragrafo 2.2.

IoT e tutte le tecnologie digitali correlate costituiscono una nuova opportunità che sta uscendo dal settore della ricerca per approdare nel mondo industriale, sono la nuova sfida per gestire i dati che le aziende producono attraverso i loro sistemi e controllarne gli output, sono il primo e principale ingrediente tecnologico di Industry 4.0.

1.2 Il progetto Humans

Il progetto Humans, iniziato nel 2017 e finanziato su fondi POR-FESR, ha l'obiettivo di realizzare soluzioni tecniche altamente innovative che consentano di eseguire operazioni di elevata complessità attraverso l'interazione sicura tra l'uomo e il robot.

Si vuole quindi creare un nuovo paradigma di fabbrica in cui l'operatore umano sia al centro del sistema di produzione.

Questo nuovo paradigma produttivo è realizzato attraverso le seguenti linee di sviluppo e relative tecnologie abilitanti:

- robot collaborativi: studio di sistemi per la cooperazione sicura uomo-robot con utilizzo di algoritmi di controllo avanzati e sviluppo di strategie per garantire la sicurezza dell'operatore nelle diverse configurazioni operative di interazione uomo-robot;
- robot indossabili: sviluppo di soluzioni di robotica avanzata di supporto agli operatori umani nello svolgimento delle loro attività rispettando i più avanzati requisiti di ergonomia;
- postazioni di lavoro auto-adattative: studio di strumenti progettuali per la realizzazione di ambienti di fabbrica mirati all'interazione ottimale uomo-macchina;
- logistica di stabilimento e robot mobili: introduzione di robot mobili che permettano di ampliare la flessibilità operativa dei sistemi di produzione;
- internet delle cose nell'industria: applicazione di sensoristica avanzata per operazioni di raccolta dati e controllo dei processi produttivi;
- architetture di controllo modulari: sviluppo di architetture di controllo innovative che permettano di aumentare la flessibilità e l'adattatività dei sistemi, riducendone la complessità;

- sistemi di controllo virtualizzati;
- sistemi ad apprendimento automatico: implementazione di metodologie avanzate di apprendimento a livello di macchine e sistemi con l'obiettivo di incrementare l'adattabilità delle macchine all'uomo.

1.3 Gli obiettivi della tesi

All'interno del progetto Humans, questa tesi ha avuto l'obiettivo di integrare, nel contesto più ampio di un'architettura logica IoT, sensoristica e moduli software a supporto dell'ergonomia del posto di lavoro. La tesi è svolta in collaborazione con la società ProLogic che si è occupata della sensoristica indossabile applicata su una maglietta e successivamente ad un esoscheletro. L'obiettivo è quello di individuare posture scorrette e relativa frequenza, tramite i rilevamenti di una maglietta sensorizzata e di pilotare il controllo attivo dell'esoscheletro per supportare carichi dorsali a fronte di certi piegamenti del busto.

In sintesi per lo sviluppo della tesi si è collaborato con ProLogic nello svolgimento di Humans realizzando le seguenti attività:

- la personalizzazione, nel contesto della problematica ergonomica, di una generica architettura IoT a tre livelli: *edge*, *fog* e *cloud*
 - o a livello *edge* sono stati scelti dei dispositivi-sensori dotati di capacità di calcolo (paragrafo 2.3.1)
 - o a livello *fog* (smartphone) si è realizzata un'applicazione di preelaborazione dati per quanto raccolto dai sensori adottati da ProLogic e per riversarli nel database (server, livello *cloud*)
 - o a livello *cloud* si è effettuata la realizzazione del database, delle interfacce di visualizzazione dati e dei sistemi di *reasoning* sugli algoritmi di interpretazione delle misure;

| 1.3 –GLI OBIETTIVI DELLA TESI

- il supporto alla sperimentazione e sviluppo incrementale delle soluzioni elaborate in base ai risultati verificati sul campo;
- l'analisi delle posture del tronco per l'attivazione di un esoscheletro.

Capitolo 2

Tecnologie a supporto dell'ergonomia del posto di lavoro

2.1 Il problema

Dopo alcune sessioni di lavoro con gli altri partner di progetto si è giunti ad una elaborazione dei requisiti preliminari. In funzione dei riscontri raccolti dopo le visite effettuate presso gli stabilimenti produttivi FPT e FCA e per quanto emerso nelle successive discussioni con alcuni tra i partner di progetto, si è deciso di supportare il monitoraggio continuo del livello di “comfort posturale” dei lavoratori nell’ambito delle diverse mansioni svolte.

È infatti opinione condivisa che l’aumento dell’efficienza e della produttività non possa prescindere da condizioni di lavoro ottimali, che in parte sono soggettive e specifiche per ogni lavoratore e che possono essere influenzate dal livello di affaticamento nel tempo, sia fisico che mentale (es: distrazioni ripetute).

Il livello di affaticamento può, almeno in parte, essere misurato automaticamente e indirettamente tramite il rilievo di posture e movimenti ripetuti nel tempo e non coerenti con la mansione del lavoratore (ad esempio lo “sgranchirsi” le gambe o le braccia, inarcare la schiena, inchinarsi ripetutamente per raccogliere attrezzatura sfuggita di mano, ecc.).

La postazione di lavoro, intesa come luogo, attrezzature e dotazioni individuali, in un contesto ideale dovrebbe potersi adattare ai “cambiamenti” di postura dell’operatore nel corso della giornata lavorativa, evitando o limitando, ad esempio, le posture non congrue assunte dal lavoratore affaticato a fine turno.

Ciò premesso, si è avviato lo studio e l'implementazione di un sistema hardware-software composto da apparati indossabili poco invasivi e da soluzioni informatiche, in grado di rilevare e memorizzare le posture e i movimenti degli operatori nell'arco della giornata lavorativa, sia ad intervalli di tempo predefiniti che al verificarsi di condizioni particolari (es: posture non congrue). Si intende quindi non solo individuare i movimenti fuori soglia ma anche la frequenza con cui questi avvengono.

Il sistema di rilevamento, oltre a fornire dati indispensabili alla progettazione di ausili quali esoscheletri o robot indossabili, vuole diventare un vero e proprio strumento di monitoraggio e controllo della salubrità delle mansioni assegnate e della salute del lavoratore. Questo è possibile identificando schemi di postura e movimento ricorrenti ed evidenziando, tramite analisi dei dati in tempo reale o su base statistica, le azioni e le posture critiche assunte dall'operatore. Così facendo si ottiene un miglioramento del comfort lavorativo, si riduce o elimina l'affaticamento eccessivo e si previene l'insorgere di disturbi muscolo-scheletrici o malattie professionali.

Volendo evitare l'utilizzo di telecamere, che sono altamente invasive e non ammesse in ambiente di fabbrica, si è deciso di analizzare la possibilità di ricostruzione dei movimenti degli arti superiori attraverso dispositivi-sensori opportunamente posizionati sulle braccia e sul tronco.

2.1.1 Misurazione posture attraverso sensori indossabili: lo stato dell'arte

Negli ultimi anni, l'applicazione della realtà virtuale, della sensorizzazione e delle tecnologie per l'acquisizione dei movimenti e dei parametri fisici sono in forte espansione. Gli scopi fino ad ora sono stati ludici, sportivi, cinematografici o di monitoraggio della salute o degli anziani. Questa forte evoluzione è principalmente dovuta alla sempre maggior disponibilità di processori a basso costo con potenze computazionali in costante crescita ed un elevato grado di miniaturizzazione. Inoltre la disponibilità di potenti processori grafici e l'avvento

di strumenti quali Wii, Microsoft Kinect e Optitrack hanno portato alla forte semplificazione dell'interfaccia uomo-macchina e alla possibilità di un tracciamento preciso dei movimenti.

L'utilizzo iniziale è nato dalla necessità di produrre giochi coinvolgenti cercando un buon compromesso tra prestazione, usabilità e costo dell'hardware. In questo caso il monitoraggio della posizione dell'utente e il tracciamento dei movimenti sono funzionali agli scopi del gioco e possono essere in molti casi approssimati, deve essere solo garantito un sufficiente coinvolgimento nel gioco. Successivamente, applicazioni per lo sport e per il fitness hanno dimostrato un potenziale inaspettato coniugando divertimento e forma fisica. Tracciare aspetti come movimenti degli arti, rapidità, angoli si è rivelato estremamente utile anche in ottica riabilitativa. In tale ottica si sono realizzate piattaforme a basso costo basate su console Nintendo Wii o Microsoft Kinect [28], tuttavia volendo mettere in pratica una buona riabilitazione la precisione di questi sistemi e la relativa accuratezza sono migliorabili.

In ambito cinematografico, invece, la grande disponibilità di fondi ha stimolato la creazione di piattaforme di *Motion Capture* di notevole precisione, ma con costi notevoli, inoltre richiedono un ambiente di ripresa particolare come uno sfondo di colore omogeneo, il piazzamento di marker e l'uso di telecamere multiple ad alta risoluzione [29].

Inoltre simili sistemi si dimostrano inadatti ad ambienti quali quello di fabbrica, in quanto la cattura del movimento avviene attraverso sistemi di puntamento basati su telecamere, affidabili solo in condizioni di luminosità controllata, che dovrebbero inquadrare continuamente il lavoratore.

I sistemi ottici sono anche disturbati in caso di polvere, scarsa illuminazione, umidità e vibrazioni.

Sta allora emergendo la possibilità di utilizzare tecnologie inerziali per la cattura del movimento basate su sensori inerziali miniaturizzati, modelli biomeccanici ed algoritmi di *sensor fusion*.

Sul fronte commerciale segnaliamo la diffusione di Myo, il Gesture Control Armband di Thalmic Labs che si indossa come un normale braccialetto, ma va tenuto poco più sotto del gomito, sulla parte più grande dell'avambraccio. Può essere indossato sotto i vestiti ma non sopra, perché il funzionamento è basato sul rilevamento dell'attività muscolare attraverso i sensori miografici (da cui prende il nome Myo), che appoggiano sulla pelle. Utilizza una serie di sensori elettromiografici per percepire l'attività elettrica degli arti superiori, combinati con un giroscopio, un accelerometro e un magnetometro per riconoscere i gesti dell'utente. Myo può essere utilizzato come mouse per controllare attraverso i gesti l'interazione con i videogiochi, la musica, le presentazioni.



Figura 2.1: esempi di sensori di movimento e relativi supporti

I dati di movimento dei sensori inerziali vengono trasmessi a un computer dove vengono memorizzati e visualizzati. La maggioranza di questi sensori utilizzano accelerometri per misurare il vettore della gravità e accelerazioni lineari, giroscopi per misurare angoli e rotazioni.

Tali accelerazioni e rotazioni sono poi ricondotte al movimento dell'arto o della parte del corpo in questione riproducendone una rappresentazione grafica 2D o

3D. I sistemi inerziali per la cattura del movimento possono catturare i 6 gradi di libertà necessari alla rilevazione del movimento in tempo reale. Possono anche fornire indicazioni sulla direzione del movimento se si include un magnetometro, anche se questi hanno una bassa risoluzione e sono molto suscettibili a onde elettromagnetiche, quindi inadatti all'utilizzo in fabbrica ove sono presenti motori di vario genere. I benefici dell'utilizzo dei sistemi inerziali sono una elevata portabilità e un'area di acquisizione non limitata dal puntamento della telecamera.

Come si mostra in figura 2.1 stanno nascendo diverse tipologie di dispositivi indossabili come supporti. Nel caso di Humans si partirà da una maglietta sensorizzata per valutare successivamente la possibilità di sensorizzare tute da lavoro o scarpe. Si è partiti da due tesi del Dipartimento di Informatica e di Scienze Motorie dell'Università di Torino [30] che hanno analizzato l'analisi posturale di lavoratori al computer, seduti alla scrivania e che sono servite da spunto per l'analisi. In questo caso sono utilizzati dei sensori posizionati sul dorso e viene rilevata e visualizzata una postura non corretta in tempo reale. Tuttavia nel caso di Humans la rilevazione è più complessa in quanto coinvolge un movimento nello spazio molto più articolato. Come detto precedentemente, la ripresa dei lavoratori mediante telecamera nell'ambiente di fabbrica, anche a scopi benefici quali quelli di migliorarne il comfort, non è possibile, per vari motivi tra cui l'impossibilità di avere condizioni di luminosità adeguate e l'elevato costo di installazione dovuto alla grande ampiezza del campo di rilevazione.

Attualmente gli individui vengono catalogati in base ai percentili e a valori medi e per la progettazione iniziale della linea ci si basa essenzialmente sulla simulazione a partire da dati rilevati dalla letteratura scientifica.

In Humans, rispetto a come si opera attualmente:

- si vogliono considerare le specificità degli individui che non vengono uniformati ad una media ma considerati singolarmente mediante i dati rilevati inizialmente da uno scanner e successivamente dalla maglietta;
- si utilizzano magliette sensorizzate anziché la telecamera per rendere più precisa e realistica la simulazione per la configurazione della linea;
- si utilizzano le magliette anche per fornire allarmi durante l'attività lavorativa in caso di adozione continuativa di movimenti sbagliati e fuori range e per evidenziare i fattori di rischio;
- si utilizzano sensori posturali per pilotare l'esoscheletro attivo.

Il metodo in sviluppo ha l'obiettivo iniziale di configurare le linee in modo ergonomico, ma in prospettiva potrebbe essere utilizzato per segnalare anomalie di postura.

I fattori di rischio collegati a posture errate vengono esaminati su 3 prospettive:

- regole e standard internazionali
- regole FCA (Fiat Chrysler Automobiles)
- letteratura scientifica.

Da questi parametri si ricavano i valori da misurare per l'analisi delle posture e i tipi di postura anche in funzione dei valori antropometrici delle singole persone. Si può anche valutare l'errore che si ha considerando i valori medi anziché le specificità.

2.1.2 Maglietta sensorizzata e modalità di utilizzo

Inizialmente si è scelto come supporto per i sensori di rilievo del movimento una maglietta sufficientemente aderente da mantenere il sensore nella corretta posizione, come indicato nel paragrafo 2.4.

Si è pensato di realizzare una applicazione su smartphone che consenta di ricevere i dati dai sensori, interfacciarsi con la base dati e con l'utente.

Nell'ambito dello studio e predisposizione del sistema di rilevamento, sono stati individuati dispositivi-sensore indossabili e semilavorati, integrati successivamente con dispositivi di raccolta mobile, per procedere poi alla preelaborazione e storicizzazione dei dati su apposito database e alla realizzazione di un'applicazione per la visualizzazione dei dati e delle statistiche. Il tutto verrà integrato nella piattaforma IoT adottata all'interno del progetto.

Nell'attività di analisi requisiti è stato fatto un lavoro in stretta integrazione con l'Università di Torino (UniTo). Il ruolo di UniTo, in particolare della componente del DBIOS (Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi), è fondamentale per la definizione dei parametri di comportamento del sistema: dalle misure antropometriche degli operatori coinvolti nella sperimentazione alla definizione delle regole e dei vincoli posturali (posture congrue e non congrue) nel rispetto delle normative vigenti.

2.2 L'architettura IoT

2.2.1 Stato dell'arte delle piattaforme IoT

La priorità di questi ultimi 5 anni di ricerca europea è stata quella di identificare architetture software distribuite che supportino al meglio le problematiche dell'internet delle cose.

Tra queste problematiche c'è la necessità di raccogliere e rappresentare moli elevate di dati, analizzarle, gestirle in tempo reale, curarne la sicurezza ove necessario, integrare applicazioni o piattaforme diverse.

Alla tematica IoT si affiancano pertanto altri argomenti di ricerca quali i *Big Data*, il cloud e i nuovi paradigmi *fog* e *edge*, l'*High Performance Computing*, l'intelligenza artificiale e il *machine learning*.

Acquisendo dati che provengono da sensori e fonti diverse, diventa quindi essenziale gestirli, molto spesso diventa inefficiente e poco sicuro trasferirli sul

cloud per elaborarli e pertanto si deve fare riferimento a nodi della rete più intelligenti. Quindi i sensori vengono spesso dotati di capacità elaborative e molti calcoli vengono effettuati a livello del singolo sensore (*edge*) o di gateway quali ad esempio tablet o smartphone (*fog*). Queste necessità sono emerse anche nel corso di questa tesi come spiegato nei paragrafi successivi.

Una piattaforma IoT può essere definita come uno strato intelligente che connette gli oggetti ad una rete ed estrae dati da questi al fine di sviluppare nuovi servizi.

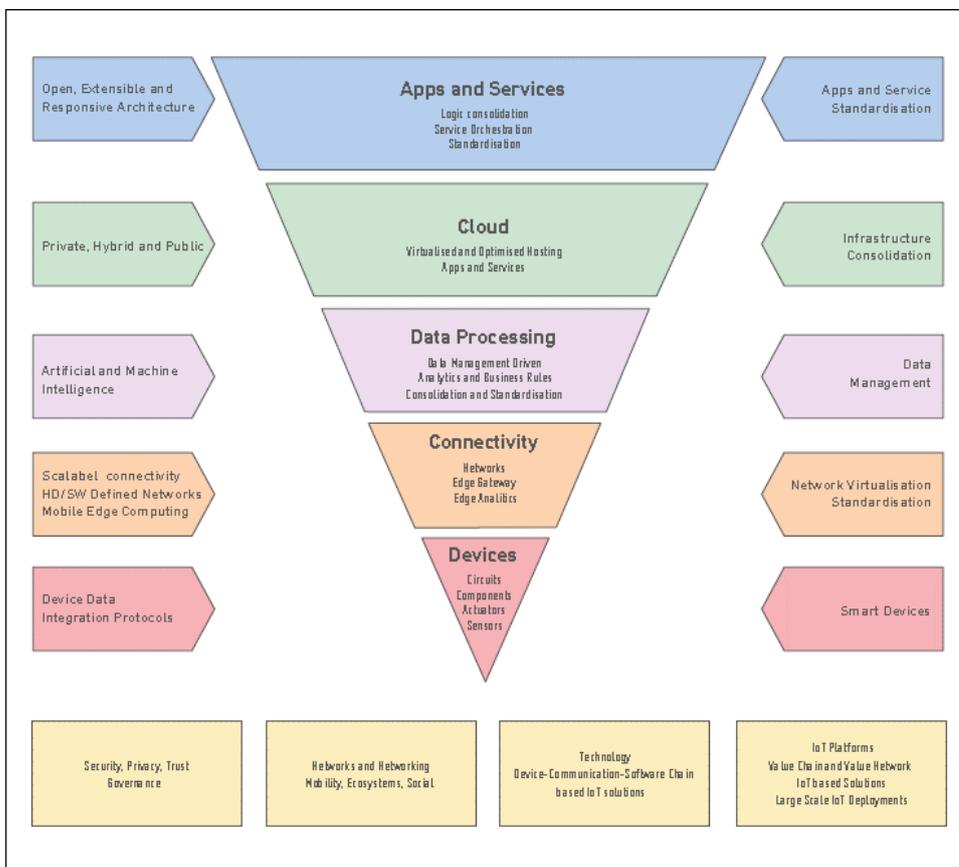


Figura 2.2: la catena del valore del dato in una piattaforma IoT [27]

Le piattaforme IoT realizzano numerosi obiettivi, in primis la flessibilità in quanto devono essere facilmente adattabili a contesti diversi, l'usabilità in quanto devono essere facili da utilizzare, la produttività in quanto devono essere scalabili e migliorare l'efficienza del contesto in cui si inseriscono. In pratica la realizzazione di nuove applicazioni deve essere facilitata operando in un contesto

di una piattaforma IoT e le necessità di integrazione devono risultare semplificate.

Quindi funzionalità quali comunicazione, flusso di dati, gestione di dispositivi diversi devono essere disponibili ed integrate con le necessità delle nuove applicazioni/servizi che si vogliono fornire.

In altre parole una piattaforma IoT consente di sviluppare applicazioni in un contesto che fornisce i servizi necessari a connettere macchine, dispositivi, persone, dati e centri di controllo [31].

Come mostrato in figura 2.2, le piattaforme IoT coprono funzionalità corrispondenti alla catena del valore digitale che parte da sensori/attuatori e li connette in una rete in cui i dati e le relative elaborazioni divengono disponibili per molteplici scopi.

Le piattaforme facilitano la comunicazione, il flusso dei dati, la gestione dei dispositivi e la realizzazione di nuove funzionalità. Una piattaforma non va confusa con l'applicazione in sé ma ne costituisce l'insieme e l'integrazione in un'unica struttura (framework) [32].

Attraverso cruscotti, API, elaborazioni dati e algoritmi, una piattaforma permette a diversi settori industriali e non di connettersi in rete e comunicare attraverso i dati con una semplicità e rapidità senza precedenti.

Si costituisce un vero e proprio ecosistema dinamico e facilmente espandibile.

In pratica una piattaforma IoT permette una concentrazione delle proprie risorse su attività a maggior valore aggiunto. Invece di richiedere alle aziende di focalizzarsi sui livelli più bassi della tecnologia digitale, si può spostare il fuoco sullo sviluppo di applicazioni vicine alle funzionalità necessarie senza doversi preoccupare di protocolli, connettività sicurezza e gestione del dato.

Esistono molte definizioni e molte catalogazioni delle piattaforme IoT: da ThingWorx [33] a Link Labs [34], ma forse la più essenziale è quella proposta da Gartner [35].

Questo definisce la piattaforma come un insieme di prodotti software che consentono di connettere una rete di nodi fisici e virtuali con le seguenti funzionalità:

- gestione dei singoli dispositivi e dei loro software applicativi
- aggregazione, interazione, trasformazione, immagazzinamento e gestione dei dati
- processamento di eventi
- personalizzazione di applicazioni
- visualizzazione dati e interfaccia utente
- sicurezza digitale
- standard e protocolli di comunicazione
- adattatori (API, gateway, dispositivi *edge*)
- interfacce per gli sviluppatori.

2.2.2 Le architetture esistenti

Nell'attuale contesto di "fabbrica intelligente", così come ci viene presentato in Industry 4.0, si assiste quindi all'emergere di nuove architetture che consentano di gestire dati altamente distribuiti, in cui i paradigmi *fog* e *edge* si inseriscono a complementare ed integrare l'attuale dicotomia tra sistemi embedded e sistemi remoti basati su cloud-HPC [36].

Da quando è nato, il concetto di IoT ha via via incrementato la propria importanza e le piattaforme IoT stanno nascendo esponenzialmente nei progetti di ricerca (H2020) ma iniziano a gestire reti di sensori a livello manifatturiero anche in diversi domini applicativi.

Si citano allora alcune piattaforme *general-purpose* che incorporano risorse cloud per supportare l'analisi di grandi moli di dati. Esse sono piattaforme open derivate da progetti a finanziamento Europeo, FIWARE [37], OpenMTC e SmartThings, per citare le più famose, o piattaforme commerciali.

Alcuni esempi commerciali sono AWS IoT la piattaforma IoT fornita da Amazon, IBM Bluemix, che offre come servizio una piattaforma open source basata su cloud. Il suo scopo è quello di realizzare funzioni e servizi e fornirli alle aziende in modo facilmente integrabile all'interno dei propri software. Un altro esempio è IBM IoT Service che consente la facile interoperabilità tra applicazioni nello scambio di dati collezionati da sensori, strumenti e gateway. Microsoft Azure IoT è invece una soluzione *cloud-based* preconfigurata e generalizzata per essere applicata su svariati scenari IoT.

Recentemente e per superare le limitazioni del cloud stanno nascendo soluzioni *edge* quali Microsoft Edge, EdgeX Foundry, and Mobility Edge Platform, in modo da fornire aggregazione dati in modo sicuro e una maggiore reattività alla dinamicità dei dati.

Parallelamente alle soluzioni *edge computing*, le iniziative *fog computing* quali Cisco Fog Data Services e OpenFog sono finalizzate ad aggiungere uno strato intermedio in cui l'intelligenza è spostata dal cloud ad un livello più basso per fornire elaborazioni e filtraggi di dati su un nodo *fog* o gateway IoT migliorando i tempi di risposta.

Grandi organizzazioni come IBM (attraverso la sua iniziativa Smart Planet), Qualcomm e Cisco vedono la connettività degli *smart object* come una via per vendere più prodotti e/o servizi. Anche la Cina la pensa così e, il governo cinese, sta iniettando centinaia di milioni di dollari ogni anno per l'"*Internet of Things-based manufacturing*". Gli analisti hanno ipotizzato che nel 2025 ci saranno un trilione di dispositivi connessi che si scambieranno un elevato numero di dati al secondo per un valore economico globale di circa 6,2 trilioni di dollari all'anno. Entro tale data una percentuale compresa tra l'80 e il 100% di tutti i prodotti utilizzerà applicazioni IoT, con un potenziale impatto economico globale di 2,3 trilioni di dollari per il solo settore manifatturiero globale. All'interno di questa cornice economica si struttura Industry 4.0 che, sull'onda dell'IoT potrà generare

ricadute e impatti dal punto di vista tecnologico, di know-how ed economico dei soggetti coinvolti.

Attualmente stiamo assistendo ad una esplosione di piattaforme per l'*Internet of Things* in tutto il mondo. Le piattaforme IoT stanno emergendo come la spina dorsale dell'IoT. Entro il 2019, il mercato di tali piattaforme raggiungerà 1 miliardo di dollari [38]. Queste piattaforme sono la chiave per lo sviluppo di applicazioni scalabili e di servizi che collegano il mondo reale e fisico con quello virtuale dei dati e delle informazioni. Tuttavia, poiché il mercato delle piattaforme per l'IoT rappresenta un vero e proprio nuovo segmento che era quasi inesistente fino a pochi anni fa, lo scenario del mercato è complesso e rapidamente mutevole.

2.2.3 L'architettura IoT per il progetto Humans

Sulla base di quanto descritto il progetto Humans adotterà pertanto i seguenti concetti generali che sono alla base di una piattaforma IoT:

- connettività e normalizzazione: porta diversi protocolli e formati dati in un unico software mediante *adapter* che consentono l'interazione con i dispositivi;
- gestione dei dispositivi: consente un rapido aggiornamento dei dispositivi garantendo la funzionalità del sistema nel suo insieme;
- database: occorre strutturare un database flessibile che contenga tutti i dati e le informazioni rilevate dai sensori, dalle persone, dalla linea e dagli altri software;
- processamento e attuazioni: consente di attivare dei trigger in base ai dati rilevati;
- *analytics*: effettua analisi specifiche a partire dai dati rilevati applicando algoritmi che vanno dal *machine learning* all'analisi predittiva. Diverse statistiche collegate alla ricostruzione dei movimenti dell'operaio potranno essere realizzate in Humans;

2.2 – L'ARCHITETTURA IOT

- visualizzazione: cruscotti che consentono di visualizzare trend e grafici;
- strumenti aggiuntivi: la piattaforma consentirà di integrare strumenti specifici man mano che ne sorge l'esigenza, deve pertanto essere aperta;
- interfacce esterne: possibilità di integrare sistemi di terze parti tramite specifiche API (*Application Programmable Interface*), SDK (*Software Development Kit*) o gateway realizzati ad hoc.

In Humans si stanno quindi realizzando gli applicativi necessari ad avere funzionalità di ergonomia, monitoraggio e interfacce uomo-robot inseriti in un contesto IoT. Trattandosi di un progetto di ricerca non si effettuerà la scelta della piattaforma commerciale che verrà adottata a monte degli sviluppi realizzati.

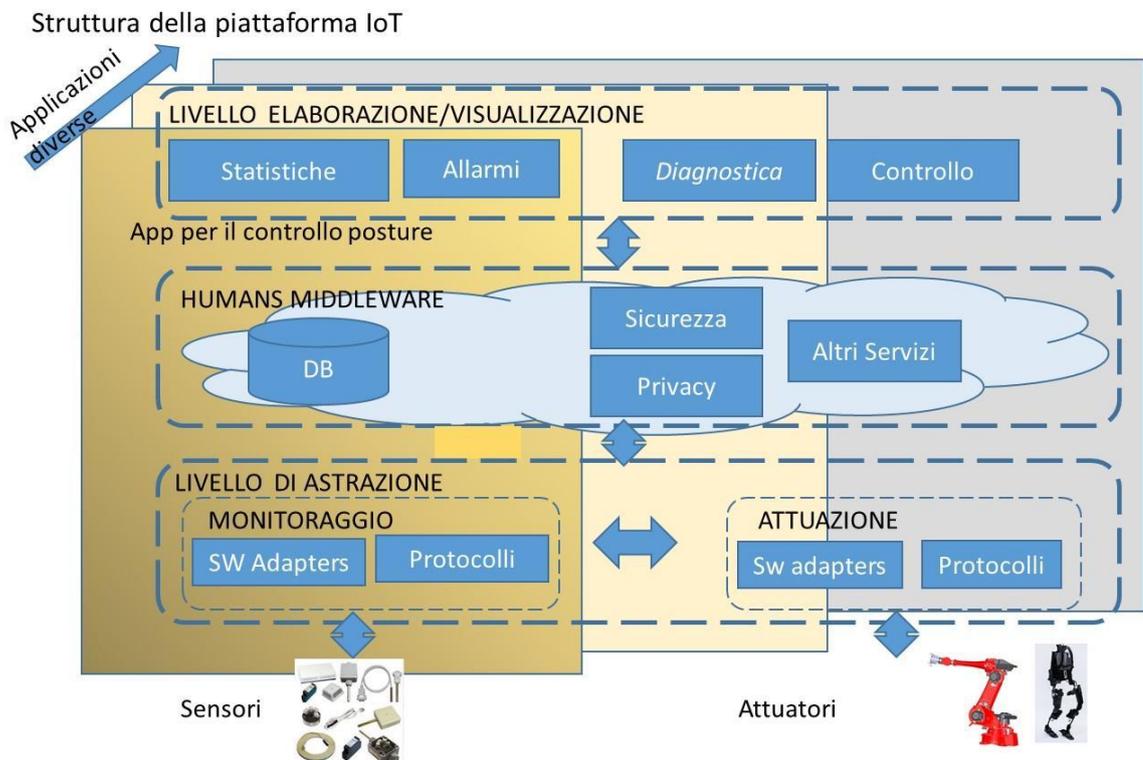


Figura 2.3: architettura IoT

Le funzionalità che verranno realizzate saranno incluse in tre livelli di software (rappresentate nei rettangoli orizzontali tratteggiati), un livello di astrazione che comprende tutti i moduli che si interfacciano con i nodi esterni, sensori, oggetti,

attuatori, un middleware che comprende la base di dati (le funzioni di privacy e sicurezza si intendono incluse nella piattaforma che si sceglierà) e un livello di elaborazione/visualizzazione che consentirà di elaborare i dati, visualizzarli, applicare algoritmi, presentare statistiche, interagire con l'utente.

Nello schema 2.3 sono poi rappresentati gli applicativi trasversali che possono essere creati su questo tipo di piattaforma.

I 3 rettangoli, grigio, giallo chiaro o giallo scuro rappresentano rispettivamente 3 possibili applicativi trasversali che sfruttano l'architettura di tale piattaforma: sicuramente il controllo di processo, la diagnostica e le applicazioni ergonomiche, ma ve ne possono essere molti altri nel contesto di Humans.

2.2.4 L'architettura IoT nel contesto dell'ergonomia di fabbrica e di questa tesi

L'attività di questa tesi, relativamente al rilevamento posture per fini ergonomici e controllo attivo di esoscheletri, si colloca interamente nel rettangolo giallo scuro.

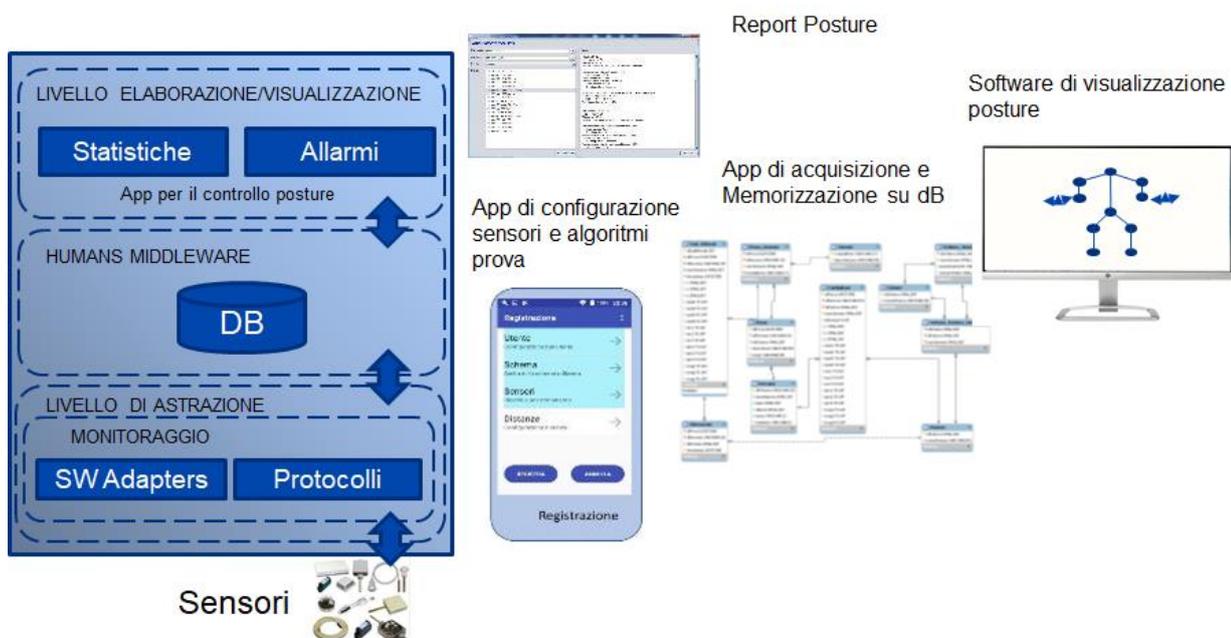


Figura 2.4: architettura IoT applicata al calcolo delle posture

Sulla base dello schema illustrato nel paragrafo precedente, nel contesto di un'architettura IoT più generale, si sono quindi definite le specificità dell'applicazione all'ergonomia.

Come si vede dallo schema, si sono realizzate applicazioni specifiche nei tre livelli dell'architettura: astrazione, middleware ed elaborazione. Il software include una base di dati per la raccolta delle informazioni collegate ai sensori, una applicazione per la configurazione e l'acquisizione dei dati da dispositivi mobili, un sistema di visualizzazione, una gestione degli utenti, una serie di interfacce verso i sensori e una serie di interfacce verso il software di elaborazione dei dati presenti. L'hardware include invece sensori, un dispositivo *bridge* e un server, come spiegato nel seguito.

Per collegarsi ai concetti introdotti precedentemente, si è analizzata la possibilità di adottare sensori con capacità elaborative (nodi *edge*), effettuare alcune valutazioni su dispositivo *bridge* (nodi *fog*) e le elaborazioni finali su server (*cloud*).

Quanto illustrato in figura 2.4 rappresenta l'adattamento dello schema più generale IoT al nostro caso di monitoraggio della postura.

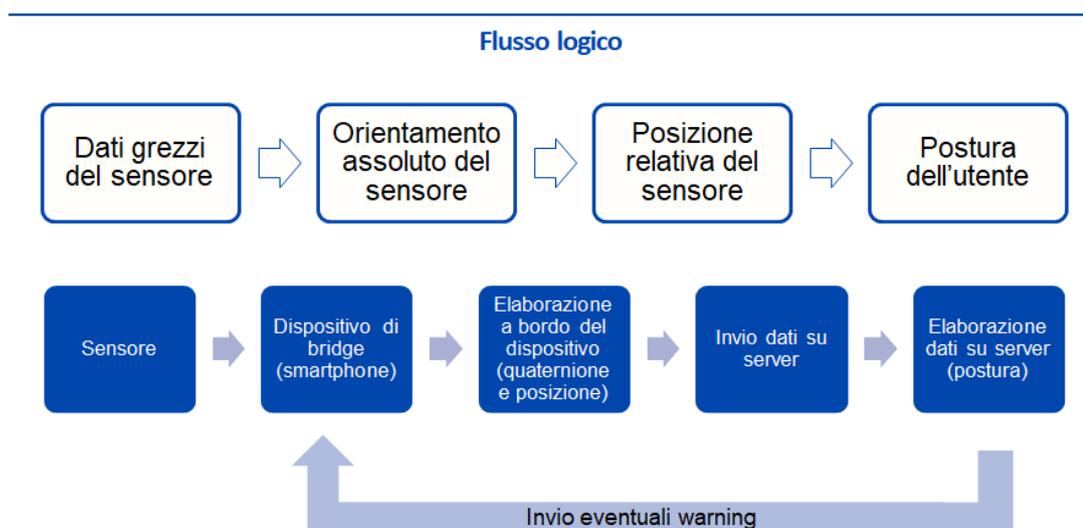


Figura 2.5: flusso logico

L'architettura deve rispettare caratteristiche di scalabilità e generalità necessarie all'integrazione di tipologie diverse di sensori in contesti e su dimostratori diversi.

Coerentemente con lo schema si è implementato il flusso logico per il calcolo della postura illustrato in figura 2.5.

I dati grezzi vengono raccolti dai sensori (vedere paragrafo 2.3.1 per la descrizione della parte hardware) attraverso un'applicazione su smartphone che consente anche la configurazione iniziale (paragrafo 2.5.1), successivamente si procede all'elaborazione a bordo dello smartphone per poi inviare i dati al server e al DB che effettuerà l'analisi della postura in base a regole ergonomiche.

Nel seguito si analizzeranno le parti software dell'architettura IoT costituite da:

- applicazione di configurazione e acquisizione/gestione dei dati per il caso dei sensori indossabili
- algoritmi matematici per il calcolo della postura
- database e applicazione per la memorizzazione dati
- software di visualizzazione delle posture
- regole ergonomiche
- sistema di allarme e statistiche sulle posture.

Nel paragrafo successivo si analizzeranno invece le parti hardware dell'architettura costituite dai sensori, dal dispositivo *bridge* (smartphone) e dal server centrale.

2.3 Hardware

Si è effettuato lo studio e la sperimentazione di un sistema composto di dispositivi-sensore wireless (BT) di dimensione contenuta alimentati a batteria, e relativi apparati di controllo, raccolta dati ed elaborazione, per il rilevamento della posizione di braccia o parti articolate di robot o esoscheletri (attivi e passivi).

Come rappresentato in figura 2.4, la raccolta, l'elaborazione e l'analisi delle informazioni per l'analisi posturale dell'operatore si avvale di una piattaforma IoT multi-level che si può suddividere in tre macro-componenti: una rete di sensori, un dispositivo *bridge* di raccolta dati e un server centrale di immagazzinamento ed elaborazione del dato.

Esaminiamo in dettaglio ciascun livello della piattaforma, per delinearne le macro- e micro-specifiche e per analizzare le scelte architettoniche che hanno influenzato le implementazioni.

2.3.1 Sensori

La rete di sensori si occupa di sensorizzare l'operatore in modo da poter ricavare dati che permettano di determinarne il posizionamento spaziale, l'orientamento e la configurazione degli arti al fine di ricavare la postura.

A questo proposito si è analizzato e messo a punto un algoritmo matematico per la determinazione della posizione nello spazio di sensori disposti sui nodi di un modello: “*body frame*” (posizionamento sul corpo umano come spiegato nel paragrafo 2.4.1). A tal fine sono stati utilizzati i seguenti tipi di sensori: accelerometri, giroscopi, magnetometri.

Sono stati individuati dei dispositivi in grado di alimentare e gestire simultaneamente i suddetti sensori e di inviare i dati al sistema di raccolta e preelaborazione (dispositivo *bridge*).

Per rilevare l'orientamento nello spazio di ogni singolo dispositivo in funzione delle grandezze misurate è necessaria l'implementazione di un algoritmo di *sensor fusion*. Come spiegato successivamente sono stati analizzati due diversi dispositivi: uno che implementa al suo interno detto algoritmo, l'altro che invia i dati al dispositivo *bridge* che a sua volta implementa l'algoritmo.

I vincoli e i parametri definiti nel modello “*body-frame*” dovrebbero consentire a un algoritmo matematico di rilevare la configurazione assunta dal modello in un certo momento e quindi le posizioni nello spazio delle braccia o del tronco.

Per effettuare queste misurazioni, è necessario poter ricavare dai sensori l'orientamento spaziale assoluto, tramite quaternioni di Hamilton (d'ora in avanti, quaternione) ovvero tramite angoli di Eulero che verranno illustrati successivamente. È pertanto necessario che i sensori possano calcolare e inviare i dati necessari per tale calcolo. Per poter effettuare il calcolo dell'orientamento spaziale assoluto, è necessario che i dispositivi restituiscano rilevazioni su velocità angolare, accelerazione lineare e campo magnetico.

Per l'invio del dato dal dispositivo contenente i sensori al dispositivo di *bridge* è stato scelto il protocollo *Bluetooth Low Energy* (di seguito BLE). Questo protocollo implementa le specifiche della comunicazione via protocollo bluetooth, ma con un consumo energetico ridotto sia per il trasmittente che per il ricevente. Questa scelta è stata effettuata per permettere una durata sufficientemente alta delle batterie a bordo dei dispositivi, e per permettere il funzionamento il più prolungato possibile del dispositivo *bridge*.

I dispositivi che sono stati analizzati per l'implementazione della rete appartengono a due famiglie e produttori differenti, di cui forniamo alcune specifiche tecniche:

- i sensori SimpleLink SensorTag CC2650 prodotti da Texas Instruments
- i sensori MetaMotionC prodotti da MbleintLab.



Figura 2.6: SimpleLink SensorTag CC2650

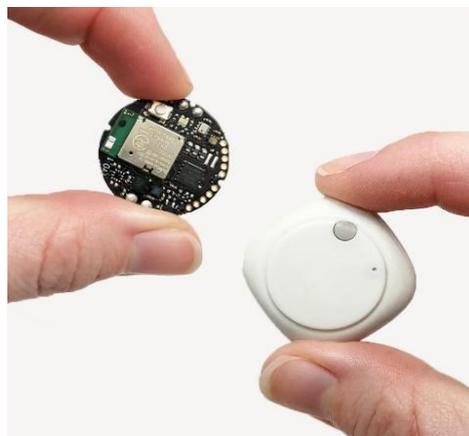


Figura 2.7: MetaMotionC

I sensori CC2650 della Texas Instruments integrano un microcontrollore ARM Cortex-M3, un ricetrasmittitore 2.4 GHz RF compatibile con le specifiche BLE. Questa MCU integra al suo interno la MPU-9250 prodotta da Invensense. La MPU integra a sua volta giroscopio, accelerometro e magnetometro a tre assi di sviluppo proprietario in tecnologia MEMS. L’invio dei dati di ciascun sensore è asincrono e indipendente. Sono inoltre presenti ulteriori sensori nonché apparati hardware che esulano dall’interesse del progetto.

I sensori MetaMotionC della MblentLab integrano un microcontrollore ARM Cortex-M0 e un ricetrasmittitore 2.4 GHz compatibile con le specifiche BLE. Questa MCU integra al suo interno una IMU BMI-160 prodotta da Bosch, che include un giroscopio e un accelerometro a tre assi in tecnologia MEMS. La MCU comprende inoltre un magnetometro BMM-150 a tre assi in tecnologia MEMS prodotta sempre da Bosch. A differenza dei sensori CC2650, questa MCU implementa *on board* un algoritmo di *sensor fusion* proprietario di Bosch per la generazione di un sensore virtuale che risponde il quaternioni ricavato dalle tre misurazioni. L’invio dei dati di ciascun sensore, fisico o virtuale, è asincrono e indipendente. Sono inoltre presenti ulteriori sensori nonché apparati hardware che esulano dall’interesse del progetto.

Dai dati elencati dai dispositivi e dalle richieste applicative, si evince che entrambi questi dispositivi sono atti alle elaborazioni richieste dal progetto; inoltre il sensore MetaMotionC ha il vantaggio di implementare *on board* il calcolo del quaternioni, riducendo pertanto le letture di dati necessarie da tre (una per il giroscopio, una per l’accelerometro e una per il magnetometro) a una (per il sensore virtuale). Questo semplifica le sincronizzazioni necessarie, a discapito di un ovvio aumento di costo del singolo sensore.

2.3.2 Dispositivo *bridge*

Il dispositivo *bridge* si occupa di fare da ponte tra i singoli nodi della rete e il server di elaborazione dati. Questo dispositivo deve raccogliere i dati da ciascun nodo, preelaborarli se necessario e inviarli al server.

La scelta implementativa per la comunicazione con i nodi è, come precedentemente detto, l'utilizzo del BLE, mentre per la comunicazione con il server sono stati scelti i protocolli HTTP/HTTPS per interrogare i servizi REST esposti. La preelaborazione dei dati a bordo del dispositivo *bridge* varia tra la semplice sincronizzazione delle letture dei sensori nel caso del MetaMotionC, l'implementazione del *sensor fusion* per i CC2650, alla derivazione del posizionamento spaziale relativo del singolo sensore. Per quanto riguarda il posizionamento spaziale si è scelto di calcolarlo lato server per quanto riguarda l'analisi dei dati posturali, in quanto non ci sono necessità di gestione in tempo reale. Nell'applicazione su esoscheletro in cui è necessario pilotare in tempo reale degli attuatori, questo calcolo dovrà essere effettuato sul dispositivo *bridge*. La scelta del dispositivo *bridge* deve pertanto coniugare la disponibilità dei protocolli di comunicazione nelle due direzioni (da e verso la rete di sensori, da e verso il server di elaborazione dati), la potenza di calcolo per la preelaborazione del dato e la durata della batteria per permetterne un utilizzo prolungato.

Alla luce di quanto sopra, come dispositivo *bridge* è stato eletto uno smartphone con sistema operativo Android (versione minima: 5.1, Lollipop_MR1, API level 22). Sul dispositivo trova posto un'applicazione che gestisce le elaborazioni richieste dal progetto: rilevazione, connessione e configurazione della rete di sensori; raccolta, sincronizzazione e preelaborazione del dato; invio del dato al server.

Il dispositivo *bridge* effettua elaborazioni dati sufficienti ad assicurare che si possano inviare sul server dati atti all'analisi posturale. I dati che sono stati individuati come necessari sono i seguenti:

| 2.3 –L’HARDWARE

- l’istante di tempo di rilevazione dei dati
- i dati grezzi di accelerometro, giroscopio e magnetometro (nel caso del sensore CC2650)
- il quaternione (calcolato a bordo del *bridge* nel caso del sensore CC2650 o ottenuto dal sensore virtuale di *sensor fusion* nel caso del sensore MetaMotionC)
- il posizionamento relativo dei sensori.

2.3.3 Server

Il server di immagazzinamento ed elaborazione dei dati si occupa di fornire una base dati per immagazzinare i dati elaborati da ciascun dispositivo *bridge* e di un’area di elaborazione dei dati ottenuti.

Il server si basa su un sistema operativo Linux CentOS, sul quale è presente una base dati per l’immagazzinamento dei dati, un server web per l’accesso via protocollo HTTP/HTTPS e la *runtime* di un linguaggio di programmazione o di scripting per l’esecuzione delle elaborazioni necessarie.

Per la base dati si è scelto di utilizzare un DBMS MySQL-like. Questo permette di ottenere garanzie di stabilità e coerenza del dato, insieme a un’occupazione ridotta di memoria, portabilità dei dati e gratuità dell’applicativo; la scelta del DBMS MySQL-like permette altresì di poter replicare la base dati con il minor numero di problemi su un sistema operativo Microsoft, in caso di necessità lato sviluppo, replicazione o *fallback*.

Lato web server si è scelto di utilizzare il server Apache HTTP Server. Questa scelta è dettata dal fatto che su piattaforme *NIX questo server web è alla base delle pile tecnologiche *AMP (primariamente LAMP, nonché di tutte le pile tecnologiche derivate sui differenti sistemi operativi, quali WAMP per Windows, MAMP per macOS, SAMP per Solaris, FAMP per FreeBSD...) che sono più diffuse rispetto a pile tecnologiche LEMP o LLMP-like. Questo permette una più

semplice replicazione su altri sistemi operativi, in caso di necessità lato sviluppo, replicazione o *fallback*.

Lato *runtime* si è optato per l'utilizzo del linguaggio di scripting PHP. Questa scelta si basa come le precedenti sulla possibilità di avere implementazioni multisistema operativo, nonché sulla maggior semplicità di sviluppo in tempi ridotti per via della sua natura interpretata e non compilata; la *runtime* di PHP è sufficientemente evoluta da garantire tempi di esecuzione pari o migliori di altri concorrenti (PERL, Python); inoltre l'integrazione con il server web Apache è uno dei cardini portanti dell'architettura *AMP che è stata sopra descritta.

Si è scelto di implementare la comunicazione con il server tramite l'esposizione di servizi REST, che risulta lo standard attualmente in uso insieme al SOAP per la comunicazione di dati o la fruizione di servizi tramite protocollo HTTP/HTTPS. La scelta del protocollo REST in vece del protocollo SOAP è dettata da considerazioni di snellezza e pulizia del codice.

Come illustrato nel paragrafo precedente, il server si occupa dell'elaborazione posturale del dato dell'operatore fintanto che non c'è la necessità di gestione in tempo reale.

È ancora in corso di studio l'hosting del server. Nella fase di sviluppo e test il server è ospitato in house ovvero in cloud, mentre a regime sarà ospitato su un'architettura ad hoc.

2.4 Aspetti ergonomici

In collaborazione con l'Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, sono stati identificati e definiti i punti anatomici in corrispondenza dei quali posizionare i sensori. Tali punti sono stati scelti tra quelli utilizzabili ai fini di valutazioni biomeccaniche per le attività di lavoro svolte a carico degli arti superiori e del rachide. I criteri sono focalizzati sulla

facilità di identificazione anatomica degli stessi, sulla coerenza rispetto a quelli maggiormente utilizzati nella ricerca del settore antropometrico e di ergonomia applicata, e sulla buona replicabilità. A questo scopo ci si è riferiti il più possibile a punti derivati da standard antropometrici internazionali [39] apportando eventuali modifiche e adattamenti alla specificità della ricerca in corso, giustificati da esigenze tecniche della componente sensoristica, identificate in letteratura o dalla valutazione di dispositivi indossabili sensorizzati attualmente in commercio.

A seguito della verifica nella letteratura scientifica della localizzazione della sensoristica indossabile si sono identificati sette punti anatomici, relativi agli arti superiori e al tronco, utili ai fini di identificazione e rilievo di angoli articolari di interesse:

- 3 punti utili al rilevamento del movimento delle tre principali articolazioni (spalla, gomito e polso) per ogni lato del corpo
- 1 punto utile al rilevamento del movimento del tronco (collocato sulla colonna vertebrale come riferimento sul piano sagittale del corpo come di seguito descritto).

La localizzazione dei sensori è influenzata dalla necessità tecnica di posizionare gli stessi su parti piane del corpo. Tale limite esclude la localizzazione su punti anatomici ossei e standardizzati quali i punti articolari degli arti superiori, portando invece alla scelta di zone intermedie poste tra le articolazioni rispetto al punto superficiale prossimo all'articolazione di interesse. Per quanto concerne il busto la localizzazione del sensore sul punto cervicale, può essere utile come riferimento per le analisi del movimento degli arti superiori, ma risulta meno efficace per il monitoraggio del movimento e degli angoli di flessione, o rotazione del tronco se non viene associato alla valutazione di un ulteriore punto di riferimento. Tali considerazioni hanno dunque condizionato la scelta dei punti

anatomici da utilizzare per il posizionamento dei sensori come mostrato nelle figure successive.

Per ognuno dei punti di collocazione scelto per i sette sensori si riporta la definizione del punto di riferimento anatomico e la collocazione del sensore relativo:

- in riferimento all'articolazione della spalla, il nodo è posizionato sulla porzione piana della scapola in corrispondenza del centro del corpo scapolare, sia a destra che a sinistra;
- in riferimento all'articolazione del gomito, il nodo è posizionato sulla superficie laterale del braccio appena sopra il gomito, sia a destra che a sinistra;
- in riferimento all'articolazione del polso, il nodo è posizionato a metà della superficie superiore del polso, sia a destra che a sinistra;
- in riferimento alla colonna vertebrale, il nodo è posizionato sulla dodicesima vertebra (T12).

Si riporta in forma grafica un corpo stilizzato con rappresentazione della struttura scheletrica per evidenziare i 7 punti scelti e sopra descritti (figura 2.8).

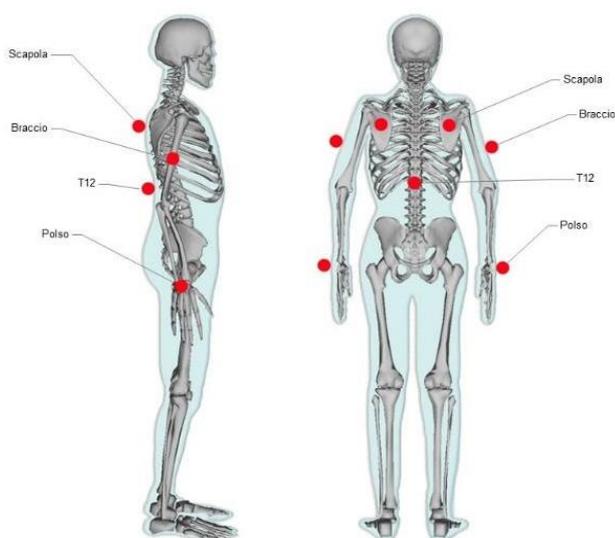


Figura 2.8: posizionamento dei 7 sensori sul corpo in corrispondenza dei punti scheletrici sopra descritti (visione laterale di destra e posteriore)



Figura 2.9: esempio di applicazione di sensori alla maglietta indossata in fase sperimentale, sono posizionati 4 sensori in punti identificativi per i rilevamenti dei movimenti dell'arto destro (vista posteriore)

Si è successivamente scelto di applicare i sensori ad una maglietta aderente elasticizzata (figura 2.9), disponendo ogni sensore in corrispondenza del punto anatomico specifico.

2.4.1 Individuazione di range di movimento in relazione a posture statiche o dinamiche e assunzione di angoli articolari degli arti superiori e del tronco considerabili come ottimali, tollerabili o critici

Nell’ottica di rilevare e valutare le posture assunte da operatori in ambito lavorativo, nell’esecuzione di attività specifiche, e identificarne eventuali criticità, si è scelto di fare riferimento alla normativa vigente [40]. Questa fornisce indicazioni sui limiti di riferimento per la valutazione delle posture di lavoro considerate accettabili o meno e definisce limiti ed entità degli angoli articolari considerabili ottimali, tollerabili e critici. Lo standard internazionale ISO 11226 è di riferimento per la definizione delle posture di lavoro, con una principale componente statica, considerabili confortevoli o scomode o inopportune e che coinvolgono i diversi segmenti corporei nella relazione testa/collo, tronco e/o arti superiori e inferiori.

Tutte le variazioni di postura sono da valutare e misurare in riferimento alla posizione descritta nella ISO 11226:2000 come “posizione eretta con tronco diritto non ruotato, braccia che pendono liberamente, palmi delle mani rivolti verso il corpo, capo diritto con lo sguardo rivolto verso l'orizzontale” (ISO 11226:2000). Nell’applicazione software realizzata, la configurazione iniziale viene acquisita dai sensori assumendo la suddetta posizione.

Di seguito vengono descritte le posture considerate “accettabili” e “non raccomandate” per il tronco (figura 2.10) e i distretti degli arti superiori (figura 2.11 e 2.12) in accordo con la norma ISO 11226 del 2000.

Le tre tabelle sotto illustrate sono state utilizzate come riferimento per la realizzazione del software di analisi delle posture.

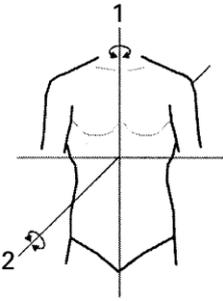
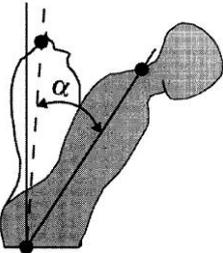
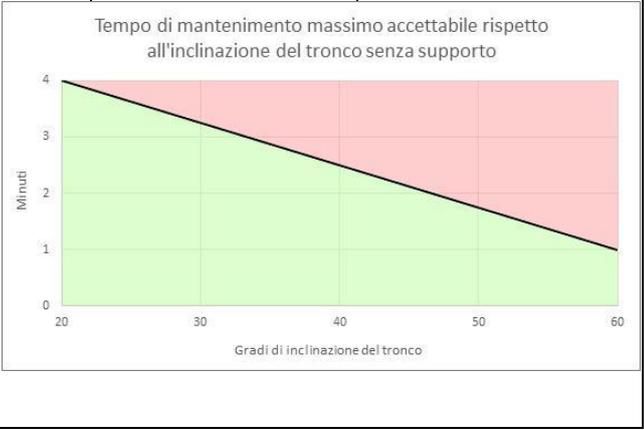
<u>Tronco</u>	Accettabile	Non raccomandata												
<p>Postura simmetrica</p> <p>Non vi è né rotazione assiale (1) né flessione laterale della parte superiore del tronco (torace) rispetto alla parte inferiore del tronco (bacino) (2)</p> 	SI	NO												
<p>Inclinazione (α)</p> <p>Postura durante l'esecuzione dell'attività rispetto alla postura di riferimento (vista dal lato del tronco)</p>  <p>Da 20° a 60° con tronco non completamente supportato</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Da 0° a 20° - Da 20° a 60° con tronco completamente supportato - <0° con tronco completamente supportato 	<ul style="list-style-type: none"> - >60° - <0° senza supporto 												
<p>Tempo di mantenimento massimo accettabile rispetto all'inclinazione del tronco senza supporto</p>  <table border="1" style="display: none;"> <caption>Data for Figure 2.10 Graph</caption> <thead> <tr> <th>Gradi di inclinazione del tronco</th> <th>Tempo di mantenimento massimo accettabile (Minuti)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>			Gradi di inclinazione del tronco	Tempo di mantenimento massimo accettabile (Minuti)	20	4	30	3	40	2	50	1.5	60	1
Gradi di inclinazione del tronco	Tempo di mantenimento massimo accettabile (Minuti)													
20	4													
30	3													
40	2													
50	1.5													
60	1													

Figura 2.10: Posture accettabili e non raccomandate per il tronco in accordo con ISO 11226:2000, Evaluation of static working postures

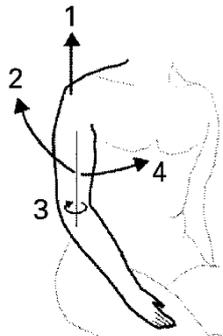
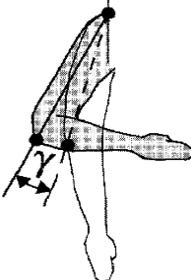
<u>Spalla e Braccio</u>	Accettabile	Non raccomandata												
<p>Posizione scomoda</p> <p>Spalla sollevata (1)</p> <p>Retroflessione del braccio (2)</p> <p>Rotazione esterna del braccio (3) (Se >90° rispetto alla posizione di riferimento*)</p> <p>Adduzione del braccio. (4)</p> 	NO	SI												
<p>Elevazione del braccio (γ)</p> <p>Postura durante l'esecuzione dell'attività rispetto alla postura di riferimento</p>  <p>Da 20° a 60° con arto non completamente supportato</p>	<p>- Da 0° a 20°</p> <p>- Da 0° a 60° con arto completamente supportato</p>	>60°												
<p>Tempo di mantenimento massimo accettabile rispetto all'elevazione del braccio senza supporto</p>  <table border="1" style="display: none;"> <caption>Data for Figure 2.11: Maximum acceptable maintenance time vs. arm elevation</caption> <thead> <tr> <th>Gradi di elevazione del braccio</th> <th>Tempo accettabile (Minuti)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>50</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>60</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>			Gradi di elevazione del braccio	Tempo accettabile (Minuti)	20	4	30	3	40	2	50	1	60	0
Gradi di elevazione del braccio	Tempo accettabile (Minuti)													
20	4													
30	3													
40	2													
50	1													
60	0													
<p>*Postura di riferimento: posizione eretta con un tronco dritto non ruotato, le braccia che pendono liberamente, i palmi delle mani rivolti verso il corpo, il capo dritto con lo sguardo rivolto verso l'orizzontale (ISO 11226:2000)</p>														

Figura 2.11: Posture accettabili e non raccomandate per la spalla e il braccio in accordo con ISO 11226:2000, Evaluation of static working postures

<u>Avambraccio e mano</u>	Accettabile	Non raccomandata
<p>Flessione/estensione estrema del gomito (2 e 3)</p> <p>È da considerare “estrema” una flessione $>150^\circ$ rispetto alla postura di riferimento*</p> <p>È da considerare “estrema” una estensione $>10^\circ$ rispetto alla pdr*</p>	NO	SI
<p>Pronazione/supinazione estrema dell'avambraccio (1 e 4)</p> <p>È da considerare “estrema” una pronazione $>90^\circ$ rispetto alla pdr*</p> <p>È da considerare “estrema” una supinazione $>60^\circ$ rispetto alla pdr*</p>	NO	SI
<p>Postura estrema del polso</p> <p>Abduzione radiale (5) da considerare estrema se $>20^\circ$ rispetto alla pdr*</p> <p>Abduzione ulnare (8) da considerare estrema se $>30^\circ$ rispetto alla pdr*</p> <p>Flessione (6) da considerare estrema se $>90^\circ$ rispetto alla pdr*</p> <p>Estensione (7) da considerare estrema se $>90^\circ$ rispetto alla pdr*</p>	NO	SI
<p>*pdr = Postura di riferimento: posizione eretta con un tronco dritto non ruotato, le braccia che pendono liberamente, i palmi delle mani rivolti verso il corpo, il capo dritto con lo sguardo rivolto verso l'orizzontale (ISO 11226:2000)</p>		

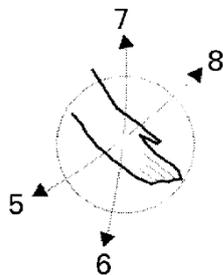
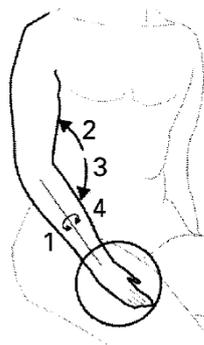


Figura 2.12: Posture accettabili e non raccomandate con relativi limiti per l'avambraccio e la mano in accordo con ISO 11226:2000, Evaluation of static working postures

2.4.2 Indossabilità dei sensori

L'indossabilità dei sensori comporta due requisiti: la necessità che il sensore sia visibile e facilmente asportabile dalla maglietta e che utilizzi batterie a norma.

Per connettere il dispositivo *bridge* a ciascun nodo è necessario che quest'ultimo sia identificato da un indirizzo MAC. Ogni sensore è quindi dotato di un adesivo con sopra impresso un codice QR. Tale codice QR contiene l'indirizzo MAC del ricetrasmittitore BLE del sensore, e permette pertanto di identificarlo e utilizzarlo senza doverlo sganciare dalla maglietta. Il codice QR deve essere facilmente accessibile così da non bloccare i sensori in una data posizione per ogni maglietta, e così da poter permettere la sostituzione dei sensori in caso di necessità (sensore rotto, sensore scarico, necessità di sostituzione della maglietta).

Riguardo la batteria, è opportuno ricordare che una batteria che sia posta su un oggetto a contatto con il corpo deve rispettare le normative di sicurezza individuale, specialmente riguardo al rischio di surriscaldamento e di esplosione. Alla luce di queste considerazioni, risulta che un sensore non possa essere alimentato da una batteria al litio, fortemente a rischio riscaldamento. La scelta verte pertanto sull'uso di batterie a tampone, di durata certamente limitata nel tempo ma più sicure nell'utilizzo a contatto con un operatore. Facciamo notare che sia il sensore CC2650 della Texas Instruments che il sensore MetaMotionC della MblentLab utilizzano batterie a tampone, e quindi sono entrambi indicati come dispositivi indossabili.

Vogliamo esplicitare che la scelta di utilizzare dei sensori con tecnologia wireless non risulta al momento la scelta migliore per la comunicazione: ad oggi l'utilizzo di una rete di sensori è ottimale se connessi da cavi, che permettono un invio più rapido dei dati e semplificano la progettazione del sensore stesso non richiedendo l'implementazione dello strato wireless. Tuttavia, viste le potenzialità di sostituibilità dei sensori, la veloce evoluzione nell'ambito delle tecnologie

wireless e la possibilità di integrare in futuro i sensori tramite reti *mesh*, si è scelto di optare per tale soluzione tecnologica in ottica futura.

Sono inoltre ancora in fase di studio eventuali semplificazioni nei modelli posturali per ridurre il numero di variabili interessate nelle elaborazioni, sfruttando ad esempio i ridotti gradi di libertà che le articolazioni umane posseggono.

2.5 Software e metodologie

2.5.1 Applicazione di configurazione e acquisizione/gestione dei dati per il caso dei sensori indossabili

Si è realizzata una applicazione su smartphone (dispositivo *bridge*) che consenta di ricevere i dati dai sensori, interfacciarsi con il server e con l'utente.

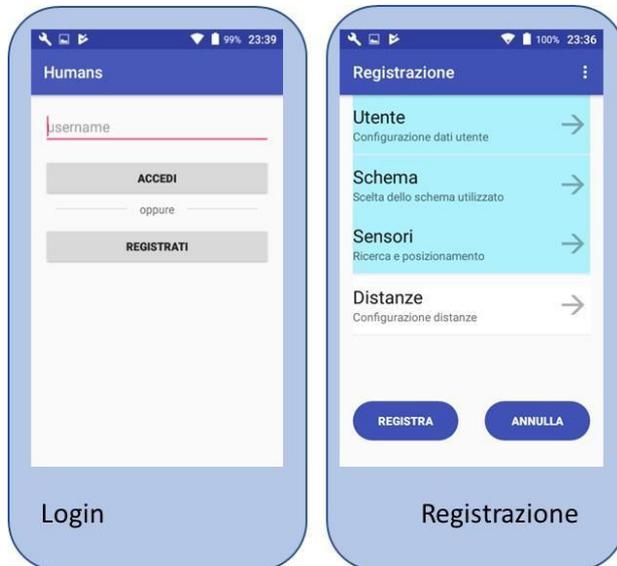
Nel seguito si presentano le funzionalità dell'applicazione su smartphone attraverso le sue videate.

Si prevedono due modalità di utilizzo in diverse fasi del processo produttivo:

- 1) In fase di configurazione della linea di produzione. Attualmente la linea viene configurata esclusivamente in maniera virtuale. Per convalidare e supportare le simulazioni virtuali si può affiancare una sperimentazione reale che permette di configurare la linea in maniera più ergonomica e valutare ove sia necessaria l'adozione di esoscheletri.
- 2) In fase di normali sessioni lavorative. In questa ipotesi occorre procedere ad una ingegnerizzazione della maglietta, descritta nel paragrafo 2.1.2, in modo da renderla confortevole per un uso quotidiano. La configurazione iniziale sarà ridotta in quanto ciascun operaio avrà già la sua maglietta e il suo dispositivo, al mattino sarà necessario inizializzare la posizione dei sensori.

Sono realizzate le seguenti funzionalità:

- LOGIN



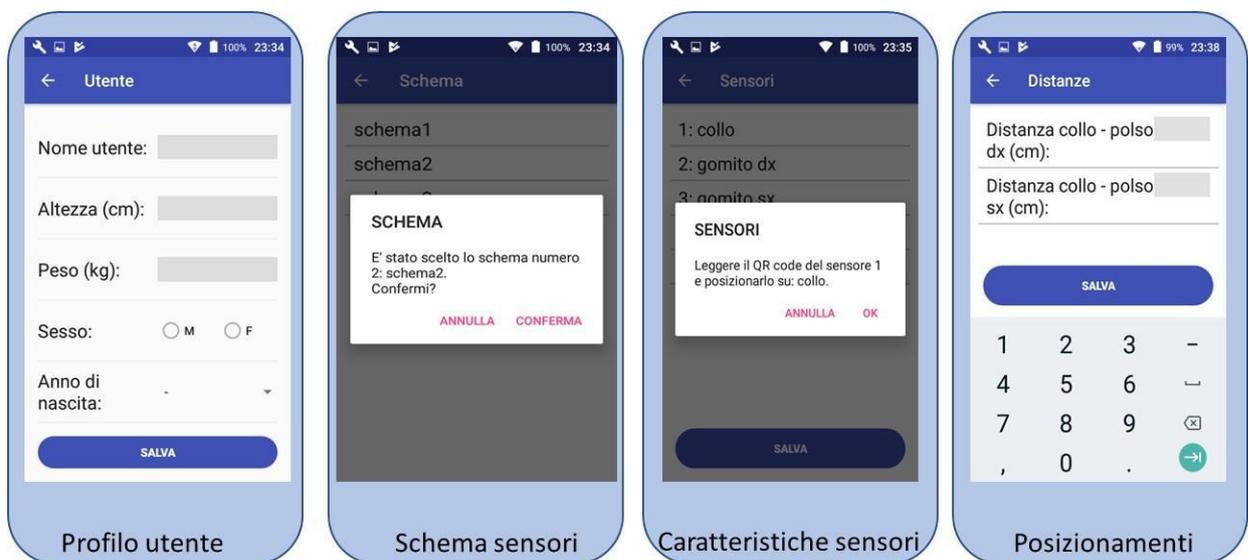
Attraverso lo username viene riconosciuto l'utente e vengono presentati i suoi dati già memorizzati. Altrimenti occorre registrare il nuovo utente. Questa videata viene visualizzata solo se si è effettuato il logout altrimenti l'utente viene riconosciuto

dallo smartphone e rimane collegato.

- SCHERMATA DI REGISTRAZIONE

In tale videata vengono richieste in sequenza le seguenti informazioni:

- o dati utente (altezza, peso, sesso, età)
- o schema dei sensori utilizzato: al momento si pensa di lasciare libero il numero di sensori da utilizzarsi e il relativo posizionamento (per motivi di flessibilità di sperimentazione)



- rilevamento dei sensori: occorre leggere il codice QR del sensore per caratterizzarlo tramite indirizzo MAC
- distanze tra i sensori, in base allo schema scelto (serve per effettuare i calcoli algoritmici che ricavano il movimento dalle posizioni relative).

Quando una schermata viene completata appare colorata in azzurro nella videata di registrazione. Quando tutte sono azzurre si può procedere attraverso il bottone “REGISTRA” alla inizializzazione della prova.

- INIZIALIZZAZIONE DELLA PROVA



Selezionando “Prova” si possono inserire le informazioni sulla prova quali descrizione e luogo mentre la data viene presa in automatico e consente di identificare la prova in modo univoco.

Selezionando “Posture” si procede invece alla definizione della posizione di partenza. Questa si può ottenere richiedendo all’utente di effettuare una serie di posizionamenti e mantenerli per qualche secondo in modo da consentire la memorizzazione

dei parametri dei sensori.

Una volta completata questa procedura di inizializzazione, attraverso il pulsante “INIZIA” lo smartphone stabilisce la connessione BLE con ciascun sensore, per poi procedere con il calcolo e la memorizzazione in tempo reale dei movimenti, come spiegato nel prossimo paragrafo.

- MEMORIZZAZIONE PROVE

Si possono pianificare più sperimentazioni nel corso della giornata anche con lo stesso utente (ad esempio mattino e pomeriggio). I dati vengono memorizzati in locale e scaricati solo attraverso il pulsante “Invia dati” con connessione Wi-Fi.

Se si effettua “Logout”, i dati vengono comunque memorizzati nel telefono e non vengono persi.

- VISUALIZZAZIONE

In tale fase si pensa di dare all’utente informazioni relative alle prove effettuate, quali:

- elenco delle prove effettuate
- date e durate
- ricostruzione grafica schematica dei movimenti nel tempo.

2.5.2 Algoritmi matematici per il calcolo del posizionamento dei sensori

Nelle elaborazioni dell’analisi posturale e nella determinazione delle coordinate relative della rete di sensori, svolgono un ruolo chiave gli angoli di Eulero e i quaternioni di Hamilton. Queste due quantità sono intimamente connesse e possono essere derivate dai sensori, via un sensore virtuale come nel caso dei MetaMotionC della MblentLab oppure tramite algoritmi di *sensor fusion* implementati nel dispositivo *bridge*, per i sensori CC2650.

Il quaternione di Hamilton è una rappresentazione di un orientamento spaziale in tre dimensioni. In quanto tale vi devono essere ovviamente delle trasformazioni che permettono di ricavare l’angolo di Eulero in funzione del quaternione. Indicando l’angolo di Eulero nella forma canonica (ϕ, θ, ψ) , ove ϕ indica l’angolo di rotazione propria (*roll*), θ indica l’angolo di nutazione (*pitch*) e ψ indica l’angolo di precessione (*yaw*) e il quaternione nella formula canonica $q_{|B} = (q_0, q_1, q_2, q_3)$, queste trasformazioni si possono esprimere nella forma seguente:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \\ \arcsin(2(q_0 q_2 - q_3 q_1)) \\ \arctan \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \end{bmatrix}$$

Tramite gli angoli di Eulero è possibile rilevare le rotazioni di ciascun nodo intorno agli assi x, y, z. Questo è uno degli elementi che ci permettono di effettuare l'analisi posturale lato server.

Lo studio di posizionamento spaziale della rete di sensori è, nell'architettura descritta, interamente gestita sul dispositivo *bridge* come step di preelaborazione del dato, prima dell'invio al server per l'analisi posturale. Questa scelta implementativa è stata effettuata in quanto alcuni dati di posizionamento relativo dei sensori possono servire nell'individuazione delle posture corrette o scorrette dell'operatore: basti come esempio la rilevazione del sollevamento della spalla, operazione che non comporta la rotazione del sensore e che quindi non può essere rilevata dal cambio degli angoli di Eulero, ma necessita di un confronto fra la posizione iniziale e quella finale.

EsPLICITIAMO pertanto in dettaglio i dati in elaborazione per ottenere i risultati; questi conterranno giocoforza al loro interno anche alcuni dettagli delle implementazioni per la rilevazione posturale viste le interconnessioni tra le rilevazioni.

Calcolo del quaternione di Hamilton

Nel caso di utilizzo dei sensori CC2650, è necessario effettuare il calcolo del quaternione sul dispositivo *bridge*. Si spiegano nel seguito gli algoritmi necessari a tale calcolo, nonostante essi non siano stati implementati. È stato infatti scelto di utilizzare i sensori MetaMotionC che, implementando on board l'algoritmo di *sensor fusion*, riducono la quantità di calcoli svolti dal dispositivo *bridge*. In questo modo il tempo necessario all'elaborazione dei dati è ridotto e maggiormente adatto all'analisi in tempo reale.

Da letteratura, l'unico dato strettamente necessario per ottenere il quaternione è la velocità angolare ottenuta da un giroscopio. Questo risultato è dovuto a calcoli matematici sul quaternione, in particolare al "Teorema di evoluzione temporale

del quaternione unitario”, che asserisce che, indicando con q il quaternione e con ω la velocità angolare, vale la seguente equazione differenziale:

$$dq(t) = \frac{1}{2} q(t) \times \omega(t) dt$$

Da questo è semplice ottenere il risultato del quaternione tramite integrazione numerica a un qualsiasi tempo t dato il suo valore in un istante iniziale.

Questo risultato è puramente teorico; il giroscopio fisico tuttavia non è un sensore perfetto, ragion per cui si registrano vibrazioni casuali di tipo rumore bianco sulla misura dello strumento, cosa che trasforma l’equazione differenziale di partenza in un’equazione differenziale stocastica. Un’integrazione diretta di questa quantità comporta una deriva del risultato che in breve tempo porta a gravi errori finali. Per ovviare a questi errori di misurazione è possibile aggiungere una correzione tramite l’accelerazione lineare ottenuta da un accelerometro.

Il quaternione corretto tramite l’uso di giroscopio e accelerometro forma la base per il calcolo dell’orientamento spaziale relativo rispetto a uno zero fissato in precedenza.

Per ottenere l’orientamento spaziale assoluto richiesto in partenza, è necessario riferire l’orientamento spaziale relativo a un riferimento assoluto. Questo riferimento può essere ottenuto aggiungendo la rilevazione del campo magnetico terrestre tramite un magnetometro.

Per la derivazione del quaternione sono stati creati in letteratura molteplici algoritmi di correzione, generalmente basati su un filtro di Kalman, che permettono di ottenere precisioni più o meno accurate in funzione della potenza di calcolo necessarie per l’esecuzione. Citiamo come esempi di tali implementazioni l’algoritmo q di Davenport, gli algoritmi QUEST, ESOQ e FOMA, o i filtri complementari di Mahony e Madgwick. Sono in fase di studio le implementazioni di questi algoritmi all’interno del dispositivo di *bridge* e la misura di accuratezza e costo computazionale degli stessi.

Derivazione della posizione spaziale dei sensori

La derivazione della posizione spaziale dei sensori permette di determinare un posizionamento spaziale relativo della rete di sensori rispetto alla configurazione iniziale. Il posizionamento è gioco forza relativo: data una configurazione iniziale arbitraria, i soli sensori dell'accelerometro, giroscopio e magnetometro forniscono un orientamento assoluto di ogni sensore all'interno della configurazione al tempo iniziale. Ricalcolando i quaternioni con l'algoritmo precedentemente descritto, è possibile ottenere per ogni tempo l'orientamento assoluto dei sensori, e quindi come il nuovo riferimento sia orientato in relazione all'originale. Tuttavia, senza aggiungere altri sensori, come potrebbe essere un *beacon* bluetooth, non è possibile determinare un posizionamento assoluto, o almeno relativo a un sistema di riferimento esterno che possa essere considerato statico e stabile.

Prima di descrivere in dettaglio l'algoritmo, vediamo quali sono i dati a disposizione e come l'applicativo possa fornirli ed elaborarli.

Il fondamento di base nella derivazione della posizione è l'assunto che ogni segmento virtuale di congiunzione tra i sensori possa essere rappresentato come un segmento fisico rigido di lunghezza data. Essendo il segmento rigido, per determinare la posizione di uno dei due estremi è sufficiente conoscere il punto iniziale del segmento e il suo orientamento. L'orientamento è fornito dal quaternioni, mentre il punto iniziale del segmento può essere visto come il punto finale del segmento precedente. In questa maniera, è possibile rappresentare la rete di sensori come un albero: una volta considerato un sensore iniziale che funga da zero della configurazione, tutti gli altri sensori sono ricavabili tramite le relazioni padre-figlio dell'albero.

L'applicativo deve quindi permettere una fase di riconoscimento dei sensori e di configurazione degli stessi in un albero virtuale rappresentante le interconnessioni (come spiegato nel paragrafo 2.5.1). Seguirà quindi una fase di

rilevazione e connessione ai sensori per l'inizializzazione dei dati dell'albero, una fase di lettura e sincronizzazione dei dati, una fase di elaborazione a bordo del dispositivo *bridge*. Segue infine una fase di trasmissione del dato a un server esterno, per ulteriori elaborazioni.

Per il riconoscimento e la configurazione dei sensori, si è scelto di effettuare l'identificazione via indirizzo MAC, dato univoco per ogni ricetrasmittitore BLE. Una volta inseriti gli indirizzi MAC dei sensori che si ha intenzione di utilizzare per la rilevazione, viene costruito un albero virtuale assegnando ogni sensore a un posizionamento sull'operatore. A seguito di questo step, l'albero virtuale è inizializzato e si è pronti per la raccolta dei dati.

Una volta configurato l'applicativo, si procede con la rilevazione dei sensori e la connessione con gli stessi via protocollo BLE. In questa fase si possono riconoscere problematiche quali un sensore non funzionante o scarico, e si può intervenire fisicamente sulla rete di sensori per ripristinare la funzionalità ottimale.

Una volta che i sensori sono stati connessi è possibile effettuare le rilevazioni a partire da essi. Per tutte le famiglie di sensori individuate, la lettura dei dati di ogni singola rilevazione (intesa come sensore fisico o virtuale: accelerometro, giroscopio, magnetometro, *sensor fusion*) è asincrona rispetto alle altre, pertanto risulta necessario sincronizzare le letture per poter operare su dati normalizzati e coerenti. La sincronizzazione delle rilevazioni avviene tramite il ritaglio di finestre temporali entro le quali vengono rilevati i dati, per poi ottenere una media della rilevazione all'interno della finestra. Tali finestre sono di ampiezza minima possibile per evitare problematiche dovute ai potenziali dati stantii.

Una volta che i dati sono stati rilevati e sincronizzati è possibile iniziare la preelaborazione degli stessi. In primo luogo, nel caso in cui non sia presente il sensore virtuale del *sensor fusion* è necessario implementare tale algoritmo a bordo del dispositivo *bridge*, secondo quanto descritto in precedenza.

A questo punto è possibile calcolare il posizionamento relativo della rete dei sensori. Il posizionamento è gestito applicativamente solo come relativo in quanto manca un riferimento assoluto rispetto cui effettuare il calcolo (per ottenere questo risultato sono necessarie condizioni aggiuntive sui sensori richiesti che non sono rispettate dalle scelte ad oggi effettuate). A seguito del calcolo dell'albero virtuale dei sensori ottenuto in fase di configurazione e del quaternioni ottenuto nello step di preelaborazione, è possibile determinare in maniera iterativa il posizionamento relativo di un sensore dato il padre dello stesso come illustrato in figura 2.13.

Tramite questo algoritmo è possibile, a partire da un antenato fisso, percorrere tutto l'albero e recuperare ogni posizione a partire dalla posizione del sensore padre.

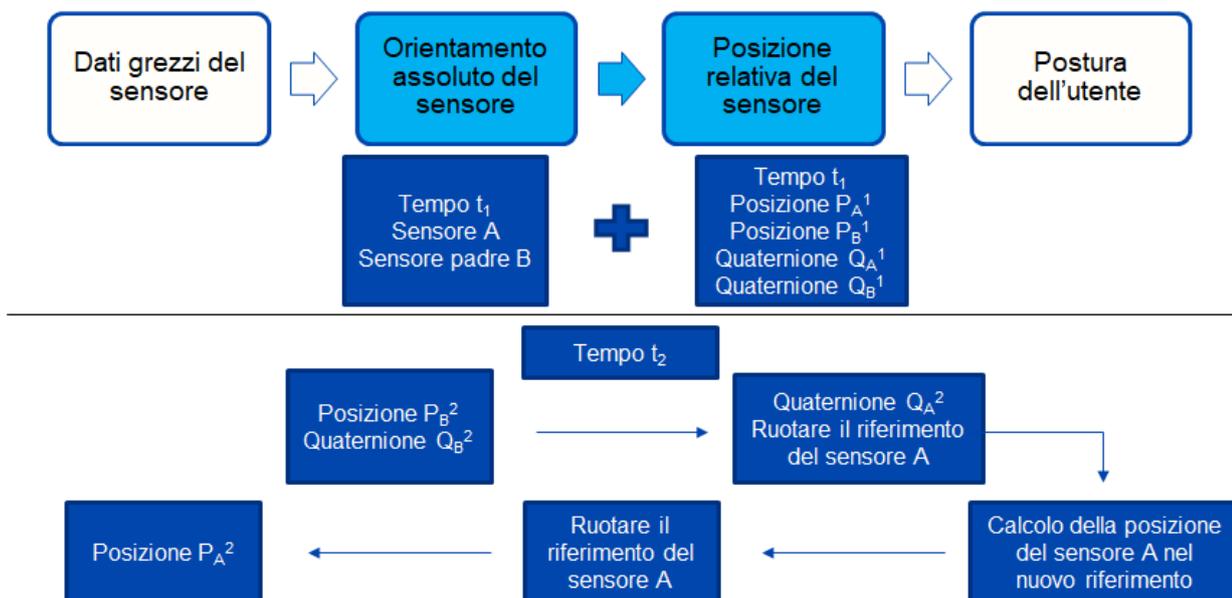


Figura 2.13: algoritmi per la posizione relativa del sensore

Sono in corso di valutazione ulteriori evoluzioni di questi procedimenti di raccolta, aggregazione e gestione del dato; esplicitiamo alcune di queste evoluzioni.

Si valuta l'utilizzo di algoritmi di *learning* che consentano ad un'applicazione adeguatamente addestrata di poter sostituire un sensore mancante sulla base dei dati degli altri sensori e dei limiti posturali e anatomici del corpo umano. Questo

potrebbe servire per ovviare alle problematiche dovute a un malfunzionamento di uno dei sensori; l'applicazione potrebbe essere altresì addestrata per individuare le posture corrette o scorrette dell'operatore. Il vantaggio di questa proposta è di poter rafforzare uno dei possibili punti deboli del sistema, ovvero la rottura del singolo sensore nonché la complessità dell'elaborazione algoritmica.

Si valuta la possibilità di ricalibrazione dei sensori e delle misurazioni sulla base di movimenti noti dell'operatore. Come caso di esempio si può portare la richiesta che l'operatore effettui, prima di andare in pausa, un movimento standard (ad esempio: posi un badge all'interno di un contenitore). Il sistema può recepire questo evento tramite l'uso delle posizioni dei rilevatori o dell'analisi posturale per definire una configurazione standard che possa andare a ricalibrare i sensori. Questa ricalibrazione può ovviare a problemi dovuti all'utilizzo prolungato del sensore che comporta una perdita graduale di significatività del dato.

2.5.3 Base di dati

Il database è presente sia sul dispositivo *bridge* che sul server. Il primo è realizzato in SQLite e contiene i dati necessari alla configurazione e i dati raccolti durante le singole prove; questi ultimi, una volta trasferiti sul server vengono eliminati dal dispositivo. Il database su server, realizzato in MySQL contiene i dati storici di tutte le prove e viene utilizzato per le analisi ergonomiche.

La struttura è rappresentata in figura 2.14.

Nel seguito vengono spiegate le relazioni tra le varie tabelle e i contenuti.

- GENERAZIONE TABELLE INIZIALI

Le tabelle “Schemi”, “Posture”, “Sensori”, “Schema_Postura_Sensore” e “Schema_Sensore” devono essere già popolate al momento dell'installazione dell'applicazione sul dispositivo *bridge*.

Per le prime due è sufficiente definire dei nomi/descrizioni per ciascuno schema e ciascuna postura, l'identificativo viene assegnato automaticamente in modo incrementale.

A partire dalla tabella “Schemi” si definisce la tabella “Schema_Sensore” in cui a ciascuno schema vengono associati i sensori utilizzati con il loro posizionamento e il loro padre (per il sensore di partenza ha valore 1 e il campo padre è 0).

Dopo aver generato queste tre tabelle può essere creata la tabella “Schema_Postura_Sensore”, la quale indica quali sensori di quale schema possono determinare una certa postura.

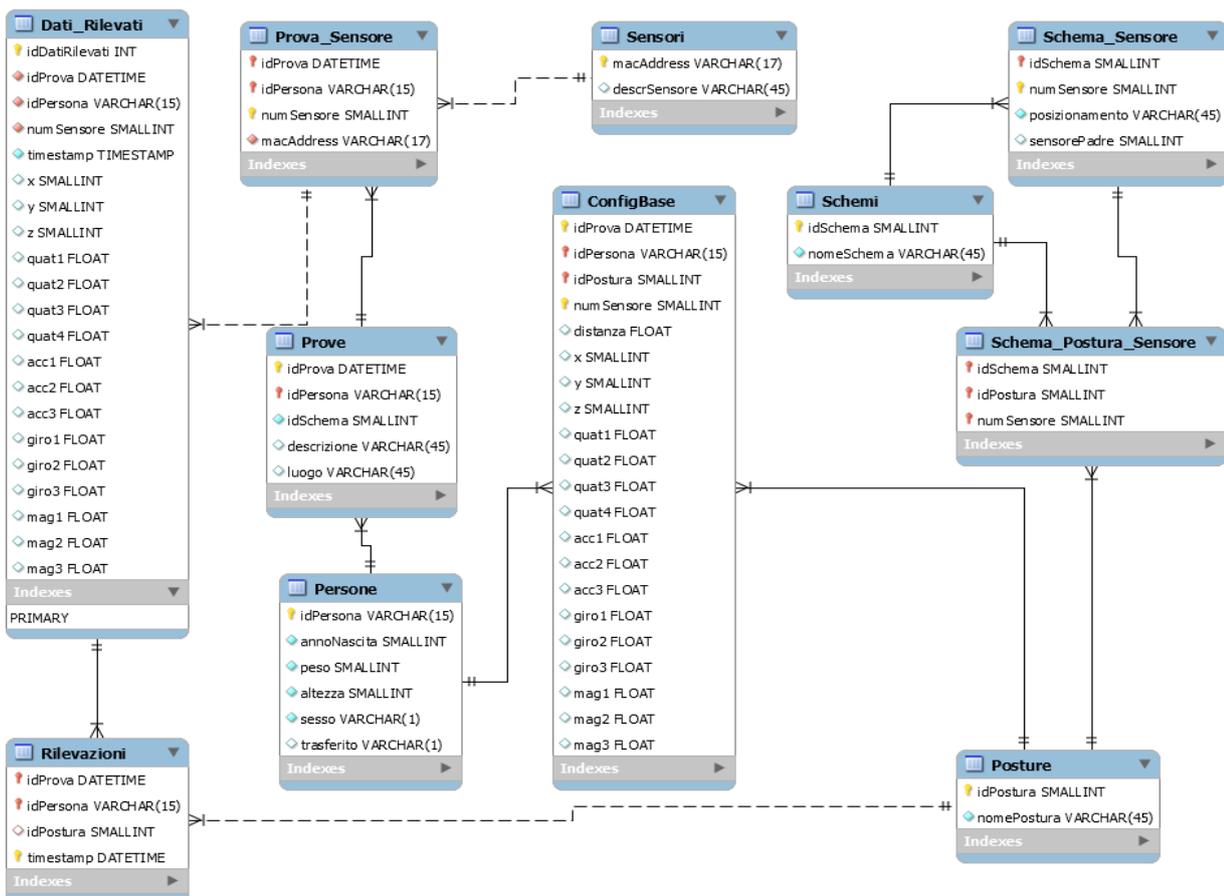


Figura 2.14: schema database

- CREAZIONE DI UN NUOVO UTENTE

Quando si effettua la registrazione di un nuovo utente, i dati inseriti (altezza, peso, sesso, età) vengono memorizzati nella tabella “Persone”.

Ogni utente è identificato da uno username. Inoltre è presente un campo che indica se i dati del nuovo utente sono già stati trasferiti al server oppure no, in modo tale da evitare una trasmissione massiccia di dati già salvati.

- CREAZIONE DI UNA NUOVA PROVA

Ogni prova è identificata da un identificativo (data e ora di memorizzazione) e dallo username dell'utente che effettua la prova. È inoltre necessario memorizzare lo schema utilizzato. Si procede poi con la definizione di una configurazione di base in cui viene memorizzato il posizionamento di ogni sensore per ogni postura presente nello schema scelto. Oltre al posizionamento nello spazio (x, y, z) si memorizzano i quaternioni, i dati ricevuti da accelerometro, giroscopio e magnetometro e la distanza di ciascun sensore dal padre.

- MEMORIZZAZIONE DEI SENSORI

Quando viene acquistato un nuovo sensore questo deve essere inserito nella tabella “Sensori” specificando il suo indirizzo MAC (usato come identificativo) e una descrizione.

Nel momento in cui viene effettuata una nuova prova si indicherà quali sono i sensori utilizzati tramite la tabella “Prova_Sensore”.

- RILEVAZIONI

Si memorizza ogni rilevazione effettuata dai singoli sensori (quaternioni, accelerometro, magnetometro, giroscopio, posizionamento nello spazio), per cui nella tabella “Dati_Rilevati” viene creato un record per ogni sensore utilizzato in una determinata prova in un certo istante di tempo. La tabella “Rilevazioni” sarà invece utilizzata per memorizzare eventuali posture riconosciute.

2.5.4 Software di visualizzazione delle posture

È stato generato un software che dalla posizione istantanea dei sensori ricostruisce la posizione relativa e li visualizza con dei pallini collegati da archi. In tal modo si riesce in modo semplice a rendere graficamente il concetto del movimento delle braccia e del tronco.

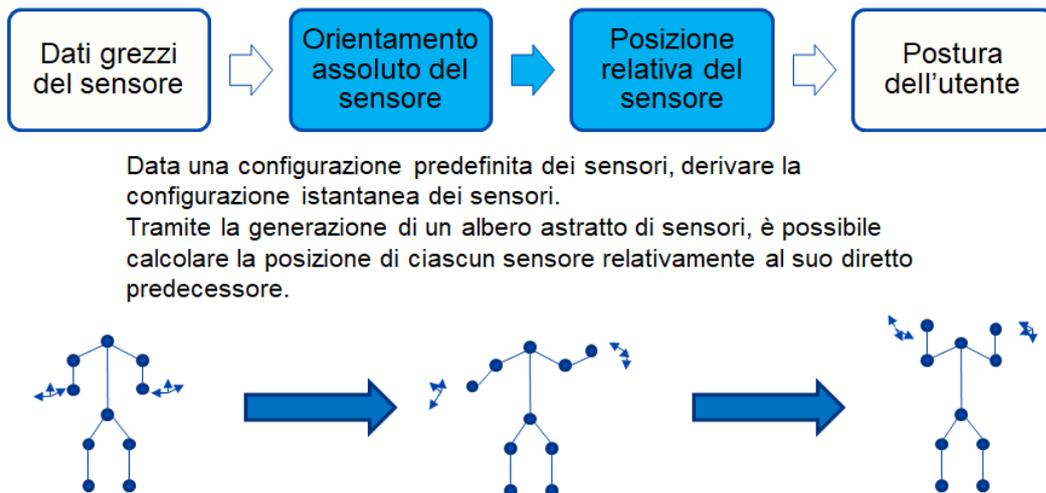


Figura 2.15: visualizzazione posture

2.5.5 Sistema di valutazione ergonomica

Infine si è realizzato su server un sistema di reportistica che legge i dati da database e applica le regole ergonomiche descritte nel paragrafo 2.4.1.

Tali regole portano a generare allarmi collegati a errate posture sia su inclinazione del busto, sia sull'elevazione delle braccia. Vengono indicate sia la durata del movimento sia le frequenze con cui si verificano posizioni errate.

L'utilizzo del sistema avviene nel seguente modo: dopo aver scelto la prova di cui si vuole effettuare l'analisi (tramite selezione dell'utente ed eventualmente della data), il sistema legge dal database i dati relativi alla prova, nello specifico: i quaternioni, l'istante di tempo a cui fanno riferimento e il sensore da cui sono stati rilevati. Inoltre vengono estratti gli stessi dati relativamente alla configurazione di base della prova scelta. In seguito vengono calcolati gli angoli di Eulero (a partire dai quaternioni) dei dati rilevati durante tutta la durata della prova e dei dati relativi alla configurazione di base, applicando la formula

indicata nel paragrafo 2.5.2. Grazie al confronto degli angoli “finali” con quelli di base viene stilato un report in cui, per ogni posizione scorretta (inclinazione del tronco, elevazione del braccio...) vengono elencati tutti i momenti in cui tale posizione è stata assunta (con ora di inizio e durata della postura), oltre a un riepilogo in cui viene indicato il numero di volte in cui è stata rilevata una data postura e la durata delle posizioni scorrette (in percentuale rispetto al tempo totale della prova).

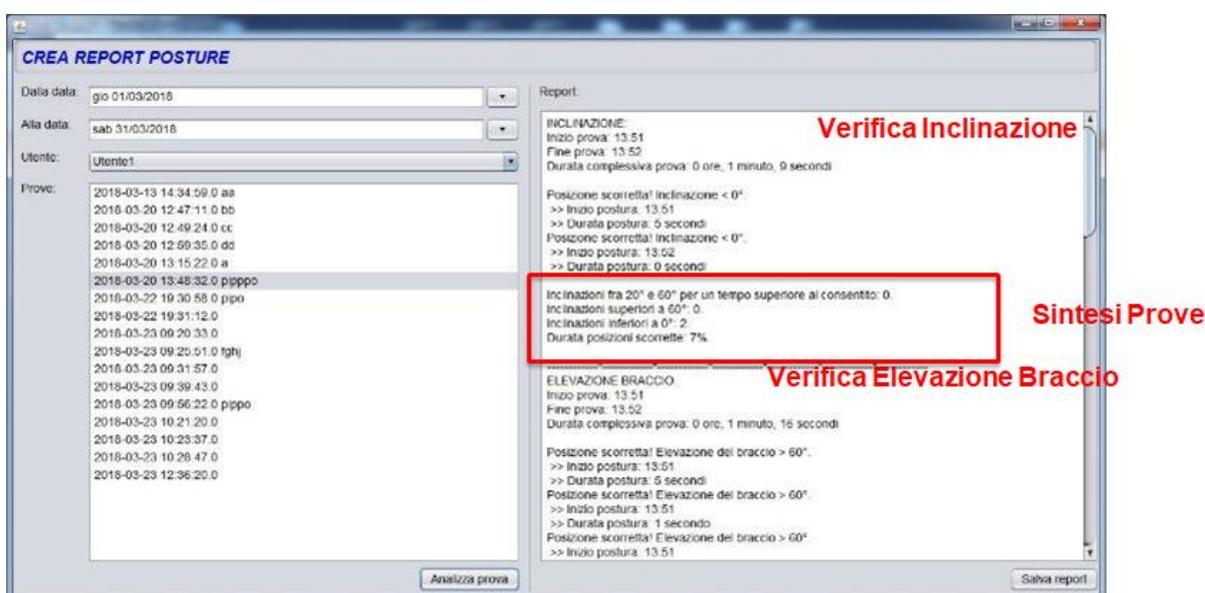


Figura 2.16: applicazione regole e allarmi

Di seguito i calcoli effettuati per la rilevazione di ciascuna postura:

- INCLINAZIONE DEL TRONCO

Il sensore considerato è quello posto sulla vertebra T12. Per rilevare l’angolo di inclinazione (in avanti o indietro) viene fatta la differenza fra l’angolo di *roll* della postura attuale e quello della configurazione di base. Ogni volta che questo valore è maggiore di 60° o minore di 0° viene segnalato. Per rilevare il mantenimento di un’inclinazione fra 20° e 60° per tempo superiore al consentito è stato assegnato un valore da 1 a 4 a ciascun grado di inclinazione (da 20 a 60), per ogni rilevazione consecutiva entro questo intervallo si sommano i valori relativi

all'angolazione (per più rilevazioni nello stesso secondo si prende il valore relativo alla loro media), se nel momento in cui si torna fuori dal range 20-60 la somma ottenuta è maggiore di 240 (4 minuti), significa che la postura è stata assunta per troppo tempo e perciò viene segnalata.

- RETROFLESSIONE DEL BRACCIO

Il sensore considerato è quello posto sul braccio. Per rilevare una retroflessione viene fatta la differenza fra l'angolo di *yaw* della postura attuale con quello della configurazione di base (se il sensore è posto sul braccio destro viene cambiato il segno). Ogni volta che questo valore è minore di 0° viene segnalata la postura scorretta.

- ADDUZIONE DEL BRACCIO

Il sensore considerato è quello posto sul braccio. Per rilevare un'adduzione viene fatta la differenza fra l'angolo di *roll* della postura attuale con quello della configurazione di base. Ogni volta che questo valore è maggiore di 0° viene segnalata la postura scorretta.

- ROTAZIONE ESTERNA DEL BRACCIO

Il sensore considerato è quello posto sul braccio. Per rilevare una rotazione viene fatta la differenza fra l'angolo di *pitch* della postura attuale con quello della configurazione di base (se il sensore è posto sul braccio destro viene cambiato il segno). Ogni volta che questo valore è maggiore di 0° viene segnalata la postura scorretta.

- ELEVAZIONE DEL BRACCIO

Il sensore considerato è quello posto sul braccio. Per rilevare un'elevazione viene fatta la differenza fra l'angolo di *roll* della postura attuale con quello della configurazione di base (cambiato di segno). Ogni volta che questo valore è maggiore di 60° viene segnalata la postura scorretta. Per rilevare il mantenimento di un'elevazione fra 20° e 60° per

tempo superiore al consentito si eseguono gli stessi calcoli effettuati per l'inclinazione del tronco.

- FLESSIONE/ESTENSIONE DEL GOMITO

I sensori considerati sono quelli posti sul braccio e sul polso. Per rilevare una flessione o un'estensione viene fatta la differenza fra l'angolo di *yaw* della postura attuale con quello della configurazione di base, sia per il braccio che per il polso, dopo di che viene fatta una differenza tra i due in modo tale da togliere la componente del movimento del braccio da quello dell'avambraccio (se i sensori sono posti sul braccio destro viene cambiato il segno). Ogni volta che questo valore è maggiore di 150° (flessione) o minore di -10° (estensione) viene segnalata la postura scorretta.

- PRONAZIONE/SUPINAZIONE DELL'AVANBRACCIO

I sensori considerati sono quelli posti sul braccio e sul polso. Per rilevare una pronazione o una supinazione viene fatta la differenza fra l'angolo di *pitch* della postura attuale con quello della configurazione di base, sia per il braccio che per il polso, dopo di che viene fatta una differenza tra i due in modo tale da togliere la componente del movimento del braccio da quello dell'avambraccio (se i sensori sono posti sul braccio destro viene cambiato il segno). Ogni volta che questo valore è maggiore di 60° (supinazione) o minore di -90° (pronazione) viene segnalata la postura scorretta.

Al termine della generazione del report è possibile salvarlo in un documento di testo. In futuro sarà valutato se mantenere tale formato o sceglierne uno diverso in base all'utilizzo che ne verrà fatto. Il risultato attuale è mostrato in figura 2.17.

```
INCLINAZIONE:
Inizio prova: 09:38:33
Fine prova: 09:40:09
Durata complessiva prova: 0 ore, 1 minuto, 36 secondi

Posizione scorretta! Inclinazione > 60°.
>> Inizio postura: 09:38:40
>> Durata postura: 8 secondi
Posizione scorretta! Inclinazione < 0°.
>> Inizio postura: 09:39:26
>> Durata postura: 12 secondi

Inclinazioni fra 20° e 60° per un tempo superiore al consentito: 0.
Inclinazioni superiori a 60°: 1.
Inclinazioni inferiori a 0°: 1.
Durata posizioni scorrette: 21%.

-----*-----*-----*-----*-----*-----*-----*
ELEVAZIONE BRACCIO:
Inizio prova: 09:38:33
Fine prova: 09:40:09
Durata complessiva prova: 0 ore, 1 minuto, 36 secondi

Posizione scorretta! Elevazione del braccio > 60°.
>> Inizio postura: 09:39:06
>> Durata postura: 1 secondo
Posizione scorretta! Elevazione del braccio > 60°.
>> Inizio postura: 09:39:11
>> Durata postura: 10 secondo
Posizione scorretta! Elevazione del braccio > 60°.
>> Inizio postura: 09:39:27
>> Durata postura: 5 secondi

Elevazioni del braccio fra 20° e 60° per un tempo superiore al consentito: 0.
Elevazioni del braccio superiori a 60°: 3.
Durata posizioni scorrette: 17%.
```

Figura 2.17: report posture

2.6 Sperimentazione

La prima parte della sperimentazione ha riguardato la messa a punto del database, dell'applicazione Android a bordo del dispositivo *bridge* e del trasferimento dei dati sul server.

Dopo aver sviluppato una prima versione dell'applicazione, sono state effettuate alcune prove di configurazione della prova e rilevamento dei dati dai dispositivi-sensore. Da queste prove si è notato che la procedura di inizializzazione della prova, ossia scegliere lo schema di sensori utilizzato, leggere il codice QR di ciascun sensore e indicare le distanze fra di essi, richiedeva un tempo elevato.

Per questo motivo si è deciso di memorizzare sul dispositivo *bridge* l'ultima configurazione utilizzata, eccetto che in caso di disconnessione dell'utente. Così facendo, nel momento in cui un utente già connesso decide di effettuare una nuova prova, può scegliere se continuare con la configurazione precedentemente impostata o se definirne una nuova.

Un'altra criticità che si è riscontrata in fase di sperimentazione è stato il fatto che l'indirizzo IP del server fosse dichiarato all'interno del codice dell'applicazione, e quindi non fosse modificabile dall'utente. Durante le varie prove infatti, sono stati utilizzati come server dispositivi diversi, collegati alla rete locale della postazione di prova. Di conseguenza è stata aggiunta all'applicazione una voce del menu a tendina che permetta l'inserimento dell'indirizzo IP del server utilizzato. Questo ovviamente non sarà un problema nel momento in cui la sperimentazione sarà conclusa e si avrà un server fisso e sempre attivo.

In una prima fase, inoltre, non si era pensato di dover sincronizzare i dati in arrivo dai sensori. Solo dopo i primi trasferimenti su server ci si è accorti che non si sarebbero potute ricavare le posture assunte dall'operatore se a ciascun dispositivo-sensore era associato un *timestamp* differente. Per questo motivo si è modificata l'applicazione in modo da associare i dati ricevuti nella stessa finestra temporale allo stesso istante di tempo. Così facendo a ogni istante sono associati i dati in arrivo da ciascun nodo dello schema scelto.

Dopo aver concluso le prove riguardo al funzionamento dell'applicazione e al trasferimento dei dati su server, si è passati alla realizzazione dell'applicativo di analisi delle posture lato server.

Per prima cosa si è dovuto comprendere il movimento dei sensori. Per fare ciò è stato necessario capire come sono orientati nello spazio. Nella figura 2.18 è mostrata la disposizione degli assi nel caso del sensore da noi utilizzato.

Inizialmente è stata sfruttata l'applicazione Android fornita da MbientLab [41],

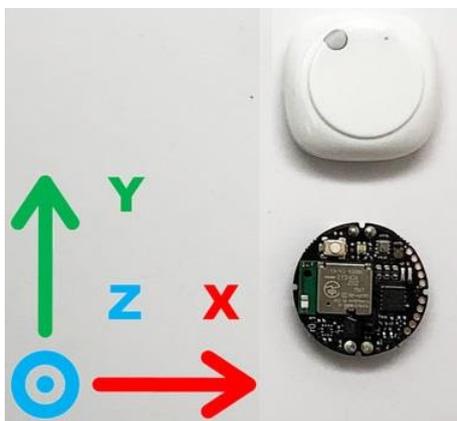


Figura 2.18: orientamento assi

che permette di creare dei grafici in funzione del tempo che mostrano la variazione degli angoli di Eulero di un singolo dispositivo-sensore.

La fase di sperimentazione è quindi cominciata dall'analisi delle posture del tronco: sono stati rilevati i dati inviati da un sensore posizionato sulla scapola (figura 2.19), prima in posizione normale, poi effettuando movimenti di

inclinazione antero-posteriore, di rotazione e di inclinazione laterale. Da questa prima analisi è emerso che effettuando una rotazione del sensore intorno all'asse x (movimento antero-posteriore), viene rilevata una variazione dell'angolo di *roll*. Quando si effettua una rotazione intorno a y, la variazione è invece rilevata per l'angolo di *pitch*. Di conseguenza una rotazione intorno all'asse z porta a una variazione dell'angolo di *yaw*. Continuando l'analisi del solo sensore posto sulla scapola, si è dovuto verificare quale fosse il verso di rotazione positivo per ciascun asse. Ne è emerso che per quanto riguarda l'asse x, si ha una variazione positiva quando si è effettuata un'inclinazione all'indietro, mentre per gli assi y e z la variazione positiva si ottiene rispettivamente con una rotazione del tronco verso sinistra e un'inclinazione verso destra.

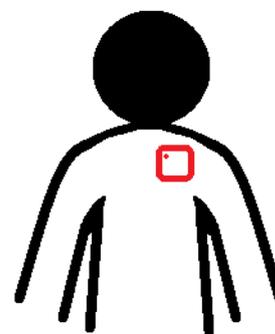


Figura 2.19

A questo punto si è potuto procedere con lo sviluppo dell'applicativo lato server: inizialmente vengono calcolati gli angoli di Eulero di ogni sensore in ogni istante di tempo e nella configurazione di base, poi si passa all'analisi dei movimenti di ciascun sensore. Nello specifico si è voluto iniziare con lo studio dei movimenti del tronco. In prima battuta si è deciso di considerare i movimenti del sensore posto sulla scapola ed in particolare la differenza dell'angolo di *roll* fra la

posizione considerata e quella della configurazione di base. In questo modo si possono monitorare le inclinazioni in avanti e indietro e segnalare le relative posture scorrette secondo quanto indicato nel paragrafo 2.4.1.

A seguito delle analisi effettuate sul tronco si è potuto passare allo studio dei sensori posizionati sul gomito e sul braccio. I sensori sono ruotati di 90° intorno all'asse y rispetto a quelli posizionati sulla schiena, ma le rotazioni intorno agli assi sono le stesse individuate precedentemente. Per valutare i movimenti del braccio è necessario considerare non solo il sensore interessato, ma anche il rispettivo padre. Infatti quando si verifica un'inclinazione in avanti del tronco con il braccio allineato ad esso, il sensore del braccio rileverà una rotazione intorno all'asse z, ma questa è dovuta allo spostamento del tronco, non a un diretto movimento del braccio. Per questo motivo quando vengono analizzati i movimenti del braccio e dell'avanbraccio si deve come prima cosa verificare che i sensori a monte non abbiano effettuato un movimento, e in caso contrario effettuare gli opportuni calcoli per “annullare” la componente relativa ad esso. Tutte le analisi precedentemente descritte sono state implementate nel software di valutazione ergonomica illustrato nel paragrafo 2.5.5.



Figura 2.20

A seguito di questa prima analisi è stata fatta indossare una maglietta sensorizzata con quattro nodi (posizionati su T12, scapola, gomito e polso) a quattro soggetti diversi, due uomini e due donne. Tutti hanno dovuto effettuare la stessa sequenza di movimenti: prima inclinazione del busto, poi elevazione e abduzione del braccio e infine flessione e rotazione dell'avanbraccio. Le prove sono state tutte videoregistrate. Al termine delle rilevazioni i dati sono stati trasferiti sul server per essere valutati dal software.

Confrontando le posture rilevate con le immagini video si è notato che quando viene portato il braccio verso l'alto, il sensore posto sulla scapola si inclina all'indietro di circa 20°, questo porta alla rilevazione di un'inclinazione del tronco che in realtà non è mai avvenuta. Per questo motivo si è pensato di valutare l'inclinazione del busto in base ai movimenti del sensore posto sulla vertebra T12 invece che sulla scapola, così facendo i risultati si sono rivelati corretti per i soggetti a cui la maglietta aderiva bene al corpo. Nei soggetti a cui la maglietta stava un po' più larga, si è notato che i sensori posti sul tronco tendevano a muoversi nonostante si stesse effettuando un movimento con un'altra parte del corpo, portando alla rilevazione di inclinazioni non esistenti. Allo stesso modo i sensori posti sulle braccia tendevano ad appesantire il punto della maglietta a cui erano ancorati, facendola muovere e portando a rilevazioni errate. Per questo motivo è fondamentale che la maglietta aderisca al corpo e i sensori siano ben ancorati ad essa.

Capitolo 3

Considerazioni preliminari per l'integrazione nel progetto di esoscheletri attivi

L'attività condotta sulla maglietta, oltre ad avere un diretto utilizzo per fini ergonomici, ha avuto anche lo scopo di gettare le basi per la progettazione di un controllo di esoscheletro attivo, inizialmente a supporto dello sforzo sulla schiena.

L'esoscheletro è una struttura elettromeccanica indossata dall'operatore che aderisce al corpo e costituisce un ausilio nei movimenti. Esso è capace di aumentare le abilità degli arti e/o di trattare muscoli, articolazioni o parti scheletriche, infortunate o indebolite a causa di malattie o problemi neurologici. Inoltre combina la potenza della macchina con l'intelligenza umana, in modo da aumentare la potenza dell'operatore e l'intelligenza del robot. Gli esoscheletri lavorano in parallelo con il corpo umano e possono essere azionati passivamente o attivamente.

La maggioranza degli esoscheletri in commercio sono di tipo passivo, cioè forniscono un ausilio all'operaio che lo indossa o attraverso un sistema di molle o comunque scaricando le forze in gioco sui muscoli delle gambe per alleggerire la schiena.

La storia degli esoscheletri attivi nasce intorno agli anni '60, quando l'esercito degli Stati Uniti sviluppò diversi esoscheletri per amplificare le abilità dei soldati. In seguito General Electric sviluppò un sistema master-slave a due bracci per

maneggiare apparecchiature radioattive. Il master era costituito da un esoscheletro indossato dall'operatore, i movimenti di quest'ultimo venivano quindi trasmessi allo slave (unità a due bracci) che li riproduceva. Gli sviluppi successivi hanno portato alla realizzazione di esoscheletri per gli arti superiori e inferiori, per aiutare le persone paralizzate ad effettuare determinati movimenti. L'implementazione dell'esoscheletro può essere classificata in tre grandi gruppi: aumento della potenza dell'essere umano, interazioni tattili e riabilitazione. Ai fini di questo progetto si considerano gli esoscheletri del primo gruppo, in quanto si vuole aiutare l'utente a svolgere determinati movimenti in un ambiente di fabbrica. [42]

A seguito di una riunione in CRF (Centro Ricerche Fiat) si è deciso di usare come caso di studio un esoscheletro che supporti l'operaio nel mantenere una posizione di busto inclinato tra i 45 e 60 gradi per un tempo superiore a 5 secondi.

Gli esoscheletri passivi esistenti, sono dotati di un sistema di molle ma hanno lo svantaggio di non supportare torsioni o flessioni laterali del busto ma solo la flessione in avanti.

Per contro gli esoscheletri attivi devono includere un motore, una batteria e dei sensori, aumentando sostanzialmente il peso da portare da parte di chi lo indossa. Tuttavia si cercano soluzioni per far sì che il peso non vada direttamente a caricare l'individuo.

Per quanto riguarda ProLogic l'attività di sensorizzazione dell'individuo e monitoraggio dei suoi movimenti si è concentrata sugli arti superiori, che rispetto alla schiena presentano dei gradi di libertà in più.

Da una prima analisi si è visto che monitorare solo l'inclinazione e la torsione del busto è più semplice, in particolare l'esoscheletro attivo consentirebbe di monitorare la torsione del busto che non è possibile con quello passivo.

Mediante la ricostruzione dei movimenti sarà quindi possibile dedurre torsioni o flessioni laterali del busto e comunicare con l'esoscheletro per controllarne la

parte attiva che avrà l’obiettivo di supportare e fornire un appoggio per bilanciare tali movimenti.

La maggior semplicità algoritmica per l’elaborazione dei dati dei sensori è tuttavia compensata dalla maggior complessità derivata dalla necessità di operare in tempo reale e dalle problematiche collegate all’alimentazione del sistema.

Ci si concentrerà quindi essenzialmente sulle elaborazioni a livello *bridge*.

Il progetto Humans si conclude nel 2019, pertanto questa attività farà parte del lavoro dei prossimi sei mesi ma per completezza se ne sono anticipati i contenuti a livello di questa tesi.

Capitolo 4

Conclusioni

Il lavoro descritto ha avuto i seguenti risultati:

- realizzazione e sperimentazione di una maglietta sensorizzata per il rilievo delle posture in fabbrica (arti superiori e tronco)
- analisi, in un contesto ergonomico, delle posture scorrette
- adozione di una architettura IoT nel contesto Industry 4.0 per supportare la scalabilità di quanto realizzato
- impostazione preliminare del controllo attivo di un esoscheletro a supporto di piegamenti e torsioni del busto.

Le principali criticità che si sono individuate nel corso della ricerca hanno riguardato il calcolo della posizione relativa dei sensori. In prima battuta erano stati adottati sensori non dotati di intelligenza a bordo, questi hanno un chiaro vantaggio economico, ma l'implementazione degli algoritmi di *sensor fusion* su *bridge* non soddisfacevano le esigenze di tempo reale dell'elaborazione. Pertanto si sono dovuti adottare dei sensori più costosi. Una seconda criticità emersa riguarda la maglietta che deve essere molto attillata in modo da non consentire lo spostamento dei sensori non solidale con il corpo. Occorre quindi, per un utilizzo reale pensare a diverse taglie e curare il set up del sistema con molta attenzione. Quindi diversi passi sono ancora necessari per l'ingegnerizzazione e l'adozione reale di quanto realizzato.

Tuttavia la ricerca effettuata ha portato risultati interessanti che costituiscono un nuovo passo avanti verso la fabbrica del futuro. Questa sfrutta pesantemente la tecnologia ma al contrario del passato, la utilizza per posizionare l'uomo e il

| 4 – *CONCLUSIONI*

lavoratore al centro degli obiettivi dell'efficienza di fabbrica anziché sostituirlo interamente. Il concetto manifatturiero tradizionale, che poneva le operazioni di fabbrica al centro e relegava l'uomo ad un ruolo passivo, viene così ribaltato e riposizionano il lavoratore al centro, come attore importante della ricerca dell'efficienza produttiva.

Bibliografia

- [1] Cristina Klingenberg, in “Industry 4.0, what makes it a revolution”, 2017
- [2] Elenabsl, “Industrial revolution stages from steam power to cyber physical systems, automation and internet of things,” Illustration, Shutterstock, <https://www.shutterstock.com/image-vector/industrial-revolution-stages-steam-power-cyber-physical-systems>
- [3] AIOTI Position Paper su Smart Manufacturing <https://aioti.eu/resources-new/>
- [4] M. Brettel, N. Friederichsen, M. Keller, M. Rosenberg, in “How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective”, World Academy of Science Engineering and Technology, International Journal of Information and Communication Engineering, 2014, Vol. 8, No. 1
- [5] R. Drath, A. Horch, in “Industrie 4.0: Hit or Hype?”, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014
- [6] D. Gerwin, J. C. Tarondeau, in “Case studies of computer integrated manufacturing systems: A view of uncertainty and innovation processes”, Journal of Operations Management, 1982, Vol. 2
- [7] J. D. Goldhar, M. Jelinek, in “Plan for Economies of Scope”, Harvard Business Review, 1983
- [8] M. E. Porter, in “The Role of Location in Competition”, International Journal of the Economics of Business, 1994, Vol. 1
J. Stentoft, J. Olhager, J. Heikkilä, L. Thoms, in “Manufacturing backshoring: a systematic literature review”, Operations Management Research, 2016, Vol. 9

- [9] R. A. D’Aveni, in “Hypercompetition: Managing the Dynamics of Strategic Maneuvering”, New York: The Free Press, 1994
- [10] R. A. D’Aveni, G. B. Dagnino, K. G. Smith, in “The age of temporary advantage”, Strategic Management Journal, 2010
- [11] H. W. Chesbrough, in “Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology”, Harvard Business School Press, 2006
- [12] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig, in “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group”, 2013
- [13] C. Anderson, in “The Long Tail: Why the Future of Business Is Selling Less of More”, 2006
C. Anderson, in “Makers: a nova revolução industrial”, 2012
- [14] E. A. Lee, in “CPS foundation”, Proceedings of the 47th Design Automation Conference, 2010
- [15] J. Lee, B. Bagheri, H. A. Kao, in “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems”, Manufacturing Letters, 2015
- [16] M. Schleipen, A. Lüder, O. Sauer, H. Flatt, J. Jasperneite, in “Requirements and concept for Plug-and-Work: Adaptivity in the context of Industry 4.0”, at-Automatisierungstechnik, 2015
- [17] A. Hellinger, H. Seeger, in “Cyber-Physical Systems: Driving force for innovation in mobility, health, energy and production”, Acatech, 2011
- [18] T. Steenman, in “Intel vision for the Internet of Things”, 2013
- [19] Cisco, “Annual report”, 2013
- [20] R. Van der Meulen, “How to Deliver a Successful IoT Initiative”, Gartner, 2016
- [21] BDVA (Big Data Value Association), SMI Smart Manufacturing Integration position paper

- [22] <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/pervasive-computing-ubiquitous-computing>
- [23] M. Weiser, in "Computer Science Challenges for the Next 10 Years", 1996
- [24] EFFRA roadmap, <https://www.effra.eu/factories-future-roadmap>
- [25] EPOSS research agenda,
<https://www.smart-systems-integration.org/publication/ecs-sra-2018>
- [26] AIOTI strategy 2017-2021, <https://aioti.eu/aioti-strategy-2017-2021/>
- [27] IoT-EPI, Advancing IoT Platforms Interoperability Book, <https://iot-epi.eu/2018/07/21/advancing-iot-platforms-interoperability-book/>
- [28] M. Plow, M. Finlayson, in "A qualitative study exploring the usability of Nintendo Wii Fit among persons with multiple sclerosis", Occupational Therapy International 21, 2014, No. 1: 21-32.
- K. Laver, in "Gaming consoles are widely used in clinical rehabilitation settings however evidence to support their use is lacking", Physical Therapy Reviews 19, 2014, No. 1: 41-42.
- [29] A. Shafaei, J. J. Little, in "Real-Time Human Motion Capture with Multiple Depth Cameras", Computer Science Department, The University of British Columbia, 2016
- [30] Valerio Cietto, in "Sistema di monitoraggio della postura basato su sensori wireless", Tesi di Laurea Triennale in Informatica, 2017
- Luca Bruni, in "Studio pilota con maglietta sensorizzata per valutazione e correzione dell'angolo di cifosi dorsale nei lavoratori al vdt", Tesi di Laurea Magistrale in Scienze dell'Educazione Motoria e delle Attività Adattate, 2017
- [31] A. Gluhak, O. Vermessan, R. Bahr, F. Clari, T. Macchia, M. T. Delgado, A. Hoer, F. Bösenberg, M. Senigalliesi, V. Barchetti, in "Report on IoT platform activities", 2016, online at: http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/D03_01_WP03_H2020_UNIFY-IoT_Final.pdf

- [32] M. J. Perry, in “Evaluating and Choosing an IoT Platform”, 2016, https://www.thingworx.com/wp-content/uploads/WP_oreilly-media_evaluating-and-choosing-an-iot-platform_978-1-491-95203-0_EN.pdf
- [33] ThingWorx, IoT Technology Platform, <https://www.thingworx.com/platforms>
- [34] L. Labs, <https://www.link-labs.com/blog/what-is-an-iot-platform>
- [35] A. Velosa, Y. V. Natis, M. Pezzini, B. Lheureux, E. Goodness, “Gartner’s Market Guide for IoT Platforms”, 2015, <https://www.gartner.com/doc/3086918/market-guide-iot-platforms>
- [36] BDVA (Big Data Value Association), Big Data Challenges in Smart Manufacturing position paper <http://www.bdva.eu/downloads>
- [37] <https://www.fiware.org/>
- [38] Gartner, IoT Trends report
https://www.gartner.com/en/conferences/content/iot-technology-disruptions?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=&gclid=Cj0KCQjwof3cBRD9ARIsAP8x70NucCUoog_B2syof7ter4wVxuROhU6tjDff5XxbWiply1B6BOT2mzYaArrKEALw_wcB
- [39] ISO 7250-1:2017 Basic human body measurements for technological design - Part 1: Body measurement definitions and landmarks; ISO 8559-1:2017 Size designation of clothes - Part 1: Anthropometric definitions for body measurement
- [40] ISO 11226:2000, Ergonomics - Evaluation of static working postures
- [41] <https://github.com/mbientlab/MetaWear-SampleApp-Android>

| *BIBLIOGRAFIA*

- [42] K. Anam, A. A. Al-Jumailyb, in “Active Exoskeleton Control Systems: State of the Art”, International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors 2012 (IRIS 2012), Procedia Engineering, 2012, N. 41: 988-994
https://www.researchgate.net/publication/271604259_Active_Exoskeleton_Control_Systems_State_of_the_Art