

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica
Curriculum Meccatronico

**INTERAZIONE UOMO MACCHINA E ROBOT COLLABORATIVI:
SVILUPPI RECENTI E PROBLEMATICHE**

RELATORE: Prof. Richiedei Dario

LAUREANDO: Zonato Nicola

ANNO ACCADEMICO: 2015 – 2016

*Dedicato alla mia famiglia,
agli amici più intimi,
ai miei compagni di studio
e a tutte le persone che mi sono
state vicine e mi hanno supportato.*

INDICE:

SOMMARIO	7
1.ROBOT INDUSTRIALI.....	9
1.1.Andamento del Mercato.....	9
2.ROBOT COLLABORATIVI.....	15
2.1.Stato dell'arte	15
2.2.Tecniche di approccio alla sicurezza	16
2.2.1.Sicurezza Passiva.....	16
2.2.2.Sicurezza Attiva.....	18
2.3.Ulteriori Problematiche ed Esigenze	23
3.NORMATIVE.....	25
4.ESEMPI DI CO-ROBOTS.....	29
4.1.Robot collaborativo LBR iiwa 14 R820	29
4.2.Robot collaborativo APAS assistant.....	33
4.3.Robot collaborativo YUMI IRB 14000-5/0.5.....	35
5.CONCLUSIONI.....	41
6.BIBLIOGRAFIA.....	43

SOMMARIO

L'utilizzo dei robot in ambito industriale è diventato sempre più diffuso e capillare, e sempre maggiore è l'interazione che essi hanno con l'uomo. Ciò ha portato alla necessità di un'attenta analisi delle problematiche relative alla sicurezza degli ambienti di lavoro, che vedono un sempre più stretto contatto tra operatori umani e robot.

Questa tesi ha come obiettivo l'approfondimento delle problematiche e delle caratteristiche dei robot collaborativi, cioè robot atti a lavorare a stretto contatto con l'uomo.

Si andrà ad analizzare lo stato dell'arte, le esigenze, le normative e a capire come il mercato risponde a questi termini andando ad esaminare più in specifico dei robot collaborativi presenti nel commercio.

1. Robot industriali

1.1. Andamento del mercato

Il numero di robot utilizzati in ambito industriale è in costante crescita negli ultimi anni. I dati raccolti dall'IFR, International Federation of Robotics, che coprono un arco temporale che va dal 2005 al 2014, identificano proprio l'ultimo anno quello in cui si sono venduti più robot, come mostrato in figura 1.1.1 [1].

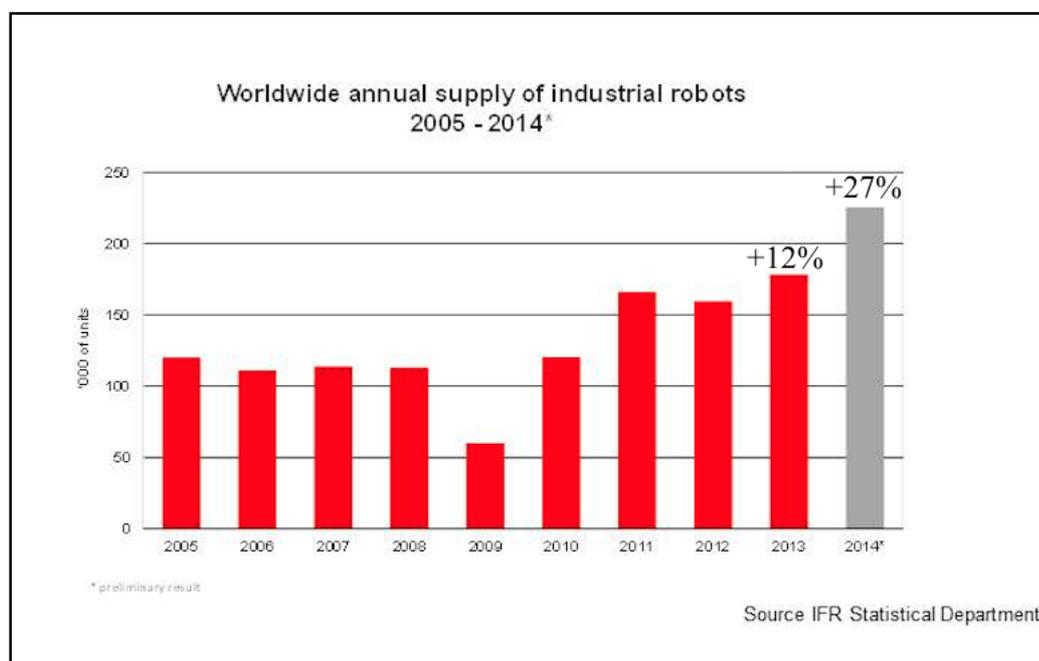


Figura 1.1.1 Stima delle vendite di robot industriali nel mondo

Infatti nel solo 2014 la vendita di robot ha subito un incremento del 27% rispetto l'anno precedente, arrivando a quasi 225.000 unità. L'aumento della produzione è dovuto principalmente dalla maggiore domanda da parte dei paesi asiatici, nei quali sono stati installati quasi 140.000 robot, il 40% in più rispetto il 2013. Si riporta in figura 1.1.2 le vendite annuali dal 2010 al 2014 dei paesi maggiormente interessati che coprono il 75% del mercato globale. Si può osservare, infatti, che nell'ultimo anno la maggior richiesta di robot si è verificata in Cina e in Corea del Sud. In Cina sono state

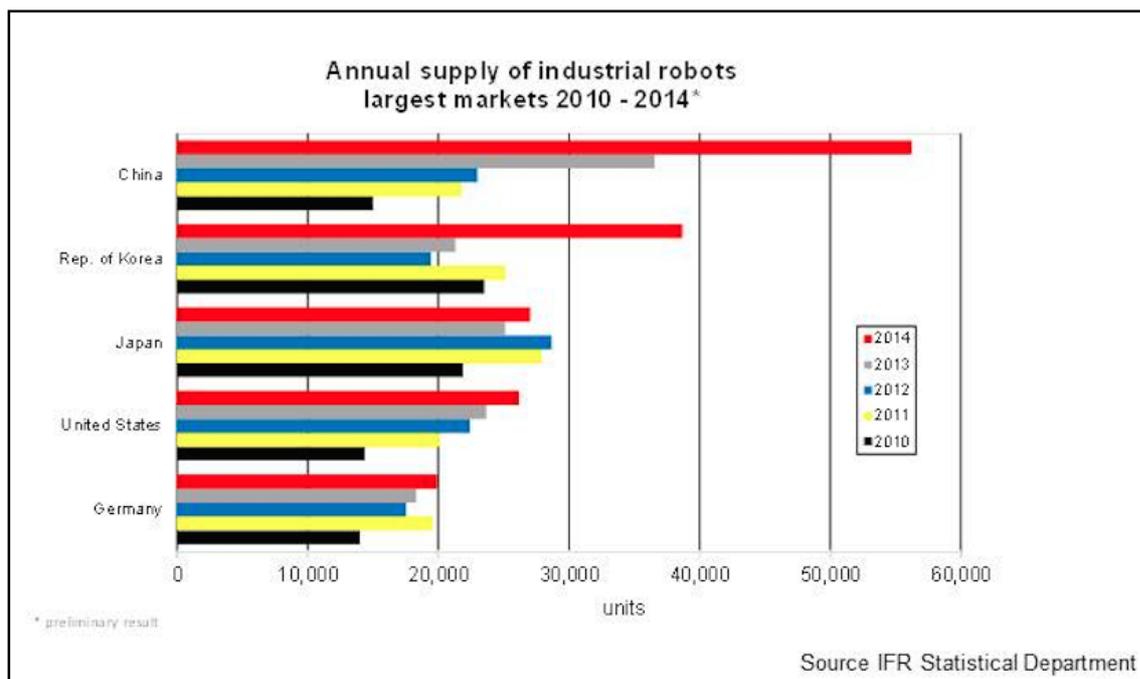


Figura 1.1.2: Stima delle vendite annuali di robot nei principali paesi

vendute circa 56.000 unità, il 54% in più rispetto al 2013, di cui 16.000 derivanti da aziende cinesi e la parte restante da aziende internazionali. In Corea del Sud le vendite del 2014 ammontano a circa 39.000 unità, quasi l'85% in più rispetto l'anno precedente. Per quanto riguarda l'Europa, le vendite del 2014 hanno raggiunto il picco di circa 45.600 unità, il 5% in più rispetto al 2013. Si stima che questo dato sia aumentato anche nel 2015, dovuto ad una grande richiesta del settore automobilistico di impianti robotici. Le vendite totali accumulate, misurate dopo l'introduzione di robot industriali a fine 1960 fino alla fine del 2013, sono pari a circa 2,65 milioni di unità. La vita utile media di un robot industriale è di circa 15 anni e il numero stimato di robot industriali in tutto il mondo è 1,5 milioni di unità. La Corea del Sud ha raggiunto la più alta densità di robot al mondo con circa 437 robot ogni 10.000 dipendenti. Per quanto riguarda i settori di maggiore incidenza riguardo la richiesta dei robot industriali si fa riferimento alla figura 1.1.3.

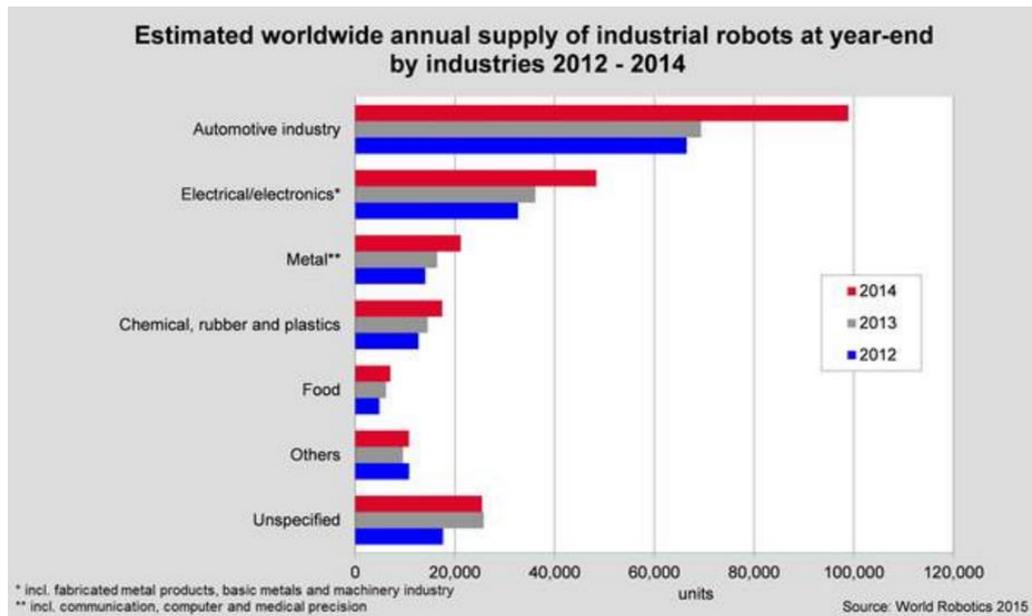


Figura 1.1.3: Stima delle vendite nei settori principali dal 2012 al 2014

Dal 2010, l'industria automobilistica è il cliente più importante per quel che riguarda il mercato dei robot. Essa, infatti, ha notevolmente aumentato gli investimenti in tutto il mondo. Nel 2014 sono stati venduti circa 98.900 nuovi robot, il 44% rispetto al mercato globale e il 43% in più rispetto al 2013. Tra il 2009, in cui il numero di impianti robotizzati toccarono il valore minimo, e il 2014 le vendite annuali di robot nel settore automobilistico è salito da 19.300 unità a 98.900 unità. Per quanto riguarda l'Australia, Cina, India, Thailandia, Taiwan e altri paesi asiatici, la Federazione Internazionale della Robotica crede che i dati relativi alla distribuzione dei robot in base alle varie industrie non siano completi; quindi considerando che la maggior parte di questi paesi sono mercati emergenti, la quota reale delle forniture di robot per l'industria automobilistica è probabilmente ancora più alta. L'industria elettrica / elettronica (inclusi computer, radio, TV, dispositivi di comunicazione, attrezzature mediche, strumenti ottici), dopo una decrescita registrata tra il 2011 e 2012, ha aumentato progressivamente gli ordini di robot arrivando nel 2014 a 48.400 unità, circa il 34% in più rispetto al 2013, portando la quota di fornitura totale corrispondente al 21%. Le industrie metallurgiche

hanno raggiunto un nuovo livello di picco nel 2014 di circa 21.000 unità, che rappresentano una quota del 9% della fornitura totale. Le industrie di gomma e plastica hanno continuamente aumentato il numero di installazioni di robot dal 2009 da circa 5.800 unità a 17.400 unità nel 2014 coprendo così il 7% della fornitura totale.

Le vendite di robot per l'industria farmaceutica e cosmetica sono aumentate del 69% a quasi 2.000 unità e l'industria alimentare e delle bevande ha aumentato gli ordini di robot del 17% a quasi 7.200 unità, che rappresentano una quota del 3% del totale.

Si stima che il valore del mercato mondiale riguardante i sistemi robotizzati si aggira intorno ai 32 miliardi di dollari.

Il mercato dei Robot industriali prevede un continuo aumento negli anni 2015-2018. Le installazioni di robot sono stimate aumentare del 15% in media all'anno: circa il 6% in America così come in Europa, e circa il 16% in Asia / Australia, come mostrato in figura 1.1.4.

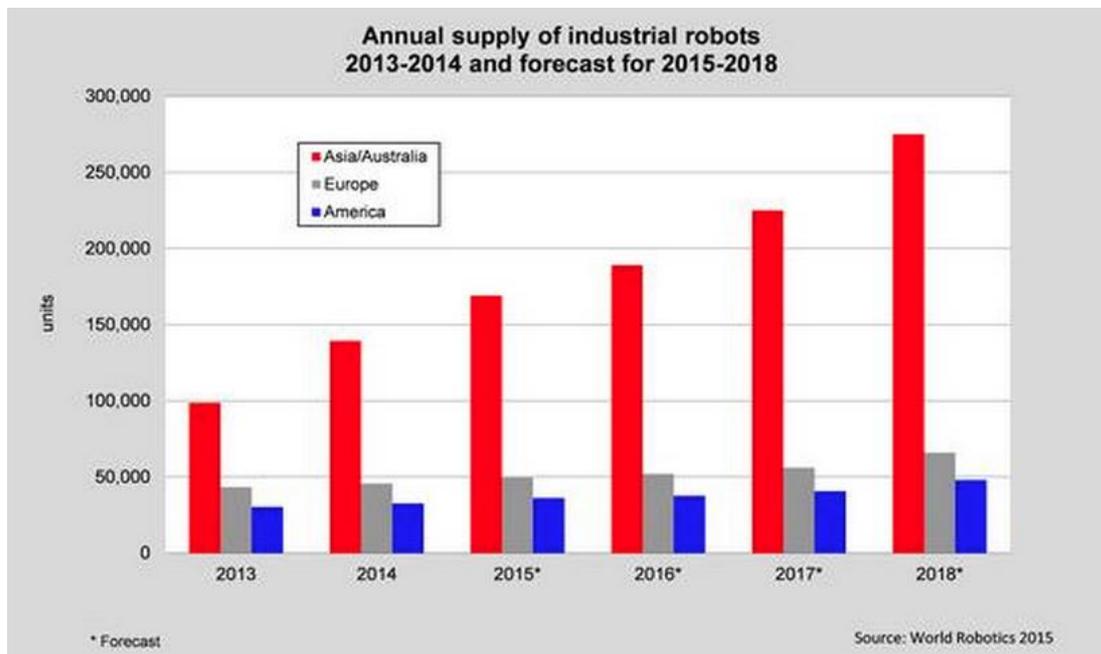


Figura 1.1.4: Previsione della fornitura di robot industriali

La domanda può variare tra le varie regioni e le varie industrie. Secondo l'IFR, l'industria elettrica / elettronica aumenterà gli investimenti di robot sia nell'automazione della produzione che nel riattrezzamento di nuovi processi produttivi. È anche previsto un ulteriore aumento degli ordini di robot da altri settori, in particolare da parte dell'industria farmaceutica, alimentare e metallurgiche. Di contro, in alcuni mercati, quali l'industria automobilistica, si prevede che la domanda rallenti dopo tre anni di continue crescenti installazioni. La continua crescita delle vendite di robot è prevista in Nord America, Brasile, Corea del Sud, Cina e nei mercati dell'Europa dell'Est, tra cui la Turchia. Le vendite di robot in Giappone e in Germania probabilmente diminuiranno a causa della saturazione del mercato automobilistico, causata da grandi investimenti negli ultimi tre anni.

Da quanto visto, l'utilizzo massiccio dei robot nella produzione industriale genera un netto aumento della produttività, facendo da traino agli investimenti in questo campo. Visto il trend di crescita, si può pensare che l'utilizzo dei robot in ambito industriale divenga sempre più diffuso e capillare. Ciò porta con sé la necessità di un'attenta analisi delle problematiche relative alla sicurezza degli ambienti di lavoro, che vedranno un sempre più stretto contatto di operatori umani e robot. Com'è noto, fino poco tempo fa, la tecnologia non consentiva una sicura collaborazione uomo-robot. Per cui, per ovviare a questo problema, le normative vigenti prevedevano una netta separazione degli ambienti in cui operano i manipolatori robotici da quelli in cui lavorano gli operatori umani, come mostrato in figura 1.1.5 [2]. Queste norme sono strutturate di modo da garantire al massimo la sicurezza agli operatori umani nello svolgimento delle loro mansioni. A tale scopo, vengono montate barriere metalliche oppure ottiche di separazione tra gli spazi accessibili agli umani e quelli in cui operano i robot. Inoltre, vengono installate varie tipologie di sensori



Figura 1.1.5: Cella di lavoro robotizzata

che monitorano eventuali intrusioni nell'ambiente assegnato ai robot, in modo da bloccare l'esecuzione del lavoro se necessario. Tutte queste restrizioni causano un considerevole rallentamento e una mancata flessibilità delle operazioni industriali rispetto al livello di efficienza che sarebbe ottenibile attraverso una cooperazione sicura tra uomo e robot.

Al giorno d'oggi, attraverso l'evoluzione tecnologica, è possibile disporre di robot capaci di lavorare a stretto contatto con l'uomo garantendo una cooperazione in tutta sicurezza. Queste macchine vengono definite Robot Collaborativi.

2. Robot Collaborativi

Per robot collaborativi si intendono macchine complesse che operano fianco a fianco con l'uomo coadiuvando quest'ultimo nel corso di un processo lavorativo che coinvolge entrambi e riducendo la mole di lavoro a suo carico

2.1. Stato dell'arte

La chiave per sfruttare a pieno il contributo della robotica nei processi produttivi, e quindi incrementare il più possibile l'efficienza di questi ultimi, è rendere il più naturale e sicuro possibile l'interazione fra operatori umani e robot. In questa maniera si potrebbero affidare agli operatori umani tutti quei processi che richiedono un'automazione troppo complessa, mentre ai robot resterebbero destinati tutti quei compiti che necessitano maggiore rapidità di esecuzione e standard di qualità elevati, un esempio è presentato in figura 2.1.1.

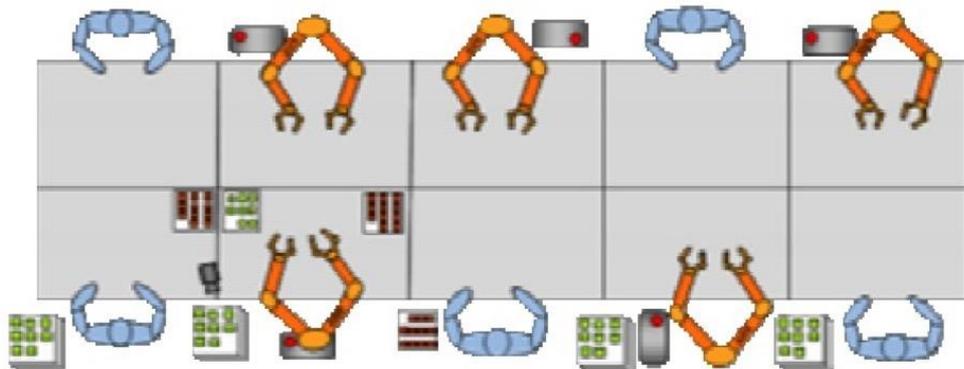


Figura 2.1.1 : Possibile formazione di cooperazione uomo-robot

Per rendere possibile questa strategia produttiva, bisogna individuare e progettare metodologie di controllo e supervisione tali da rendere naturale e innocua l'interazione umana con i robot.

Purtroppo, a causa delle normative attuali, nell'ambito industriale non è

possibile superare queste problematiche. La ricerca in questo ambito si sta quindi muovendo nella robotica di servizio. Sono stati promossi anche importanti progetti in ambito europeo per poter dare un importante contributo alla soluzione dei problemi di cooperazione uomo-robot nelle industrie. In tal senso è significativo il progetto ROSETTA, primo fra tutti conclusosi nel 2013 [3].

2.2.Tecniche di approccio alla sicurezza

Gli approcci utilizzati per tentare di risolvere i problemi di cooperazione uomo-robot sono essenzialmente due:

- sicurezza passiva
- sicurezza attiva

2.2.1.SICUREZZA PASSIVA

Tutte le metodologie volte ad aumentare la sicurezza passiva nell'interazione degli esseri umani con i robot sono essenzialmente volte a modificare la struttura e il funzionamento di questi ultimi, in modo da diminuire la probabilità di incidenti e la loro gravità. I robot progettati seguendo questo criterio sono caratterizzati da strutture leggere e flessibili, in modo da minimizzare i danni causati da un eventuale impatto su di un essere umano e per questo sono ricoperti da materiali leggeri. In più, molti robot per evitare di lesionare l'operatore sono rivestiti esternamente di materiali morbidi e sono privi di spigoli.

Un esempio di robot realizzato secondo questi criteri è quello rappresentato in figura 2.2.1.

Un'ulteriore metodologia di progetto mira a ridurre l'inerzia e la massa delle parti mobili di un manipolatore. Questa tecnica, spesso utilizzata in ambito industriale, viene definita Distributed Macro-Mini actuation DM



Figura 2.2.1: Esempio di robot collaborativo della KUKA

[4]. Consiste in una diversa distribuzione degli attuatori del robot. Vicino alla base del robot vengono poste tutte le parti più pesanti, come i motori, per cui per trasmettere il moto ai giunti vengono poi utilizzati appositi cavi e pulegge. Nello specifico, questa tecnica consiste nella suddivisione dell'attuazione del robot fra due attuatori connessi in parallelo e disposti in zone differenti del manipolatore.

Le componenti ad alta frequenza dell'attuazione vengono fornite da piccoli motori dotati di poca inerzia direttamente connessi ai giunti del manipolatore. Le componenti a bassa frequenza, invece, sono generate da una serie di attuatori più pesanti posti alla base del robot. Questo approccio è schematizzato in figura 2.2.2.

Un'altra tecnica volta al miglioramento della sicurezza intrinseca ai manipolatori robotici consiste nell'utilizzo di attuatori cosiddetti ad impedenza variabile o VIA (Variable Impedance Actuator) [5] [6]. Questi dispositivi sono in grado di variare l'impedenza meccanica, ossia la relazione tra le coppie applicate ad un punto e il relativo moto, a seconda

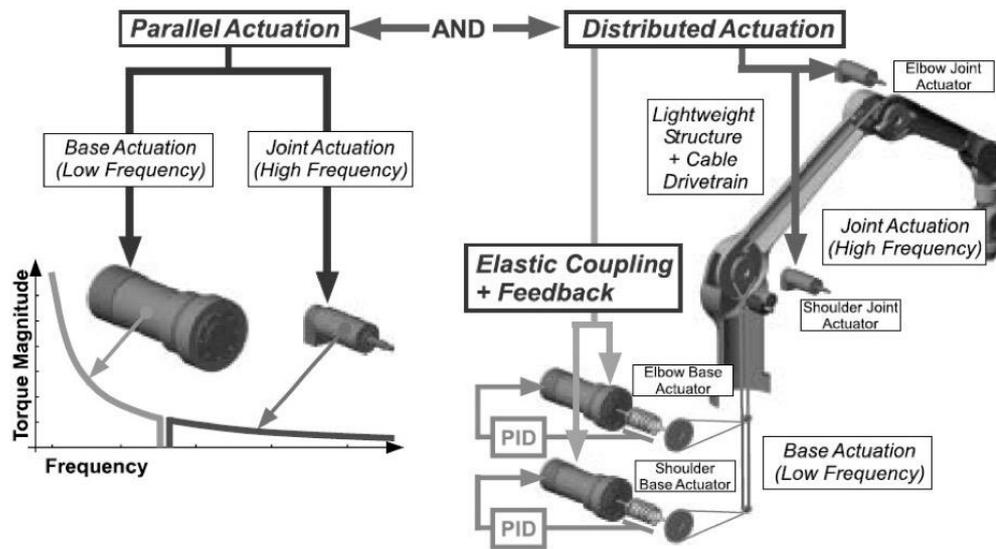


Figura 2.2.2: Schema dell'approccio DM

della fase di lavoro.

L'effetto pratico sarà quello di avere, nelle fasi di lavorazione ad alta velocità, un'impedenza modificata tale da ridurre la rigidità e lo smorzamento del manipolatore, così da minimizzare i danni causati da un eventuale impatto. A basse velocità invece, la modifica dell'impedenza causerà un aumento di rigidità e smorzamento, così da avere una migliore risposta in accelerazione dei link e una minore oscillazione in fase di frenata [7].

2.2.2.SICUREZZA ATTIVA

La sicurezza attiva non è altro che lo sviluppo di particolari strategie di controllo del manipolatore che, integrando una sensoristica dedicata, permettono di sfruttare il costante monitoraggio dell'ambiente circostante il robot per modificare dinamicamente il comportamento del manipolatore in caso di situazioni potenzialmente rischiose: l'avvicinarsi di un operatore durante l'esecuzione di un task o la preparazione di un cambio pezzo.

La ricerca nell'ambito della sicurezza attiva è di particolare interesse per l'industria poiché, con il progressivo sviluppo di sensori sempre più

sofisticati e a basso costo, e di algoritmi di controllo evoluti, questa permetterà di sfruttare con maggiore efficienza e affidabilità la presenza dei robot nelle industrie.

Le tipologie di sensori esterocezionali, cioè atti a misurare quantità esterne, utilizzati normalmente negli algoritmi di controllo per la sicurezza sono due. Si riporta in figura 2.2.3 delle immagini esemplificative:

- Sensori che hanno la funzione di ricostruire la geometria dell'ambiente circostante il robot (telecamere a tempo di volo, scanner laser, sensori di prossimità etc.).
- Sensori che permettono il riconoscimento di una collisione con un corpo estraneo al robot (sensori di forza).



Fig. 2.2.3: -a sinistra: sensore di coppia solitamente presente nei giunti; -a destra: sensore laser di posizione

Le modalità d'impiego di tale sensoristica sono molteplici e variano a seconda della strategia di controllo prescelta. Ad esempio, in riferimento al progetto Rosetta [8], delle tecniche utilizzate e in fase di sviluppo si cita: “supervisione della cella robotica”, “utilizzo di manipolatori cinematicamente ridondanti”, “programmazione del moto del braccio robotico ispirati al moto del braccio umano” e “utilizzo di sensoristica addizionale per lo sviluppo di strategie di controllo attivo in tempo reale”.

La supervisione della cella robotica consiste nel monitorare continuamente l'ambiente occupato dal robot da telecamere (comuni telecamere di sorveglianza) disposte in modo tale da inquadrare il robot stesso e un'area di opportune dimensioni intorno al robot. Successivamente, grazie a sofisticati algoritmi di elaborazione delle immagini e di visione cognitiva, il sistema di supervisione sarà in grado di individuare eventuali persone che entrano nella scena inquadrata e di seguirne il cammino. Ulteriori algoritmi basati sia sulla classificazione statistica delle traiettorie comunemente seguite dall'uomo nel corso della propria camminata, sia su modelli della camminata ispirati a concetti propri delle neuro scienze, saranno in grado di predire il moto della persona negli istanti successivi. Questa predizione contribuirà a formare una stima dell'intenzione della persona, classificata nella volontà, da parte della persona inquadrata, di interagire in modalità differenti con il robot.

Una stima affidabile e sufficientemente pronta dell'intenzione della persona può contribuire ad attivare con un opportuno anticipo la strategia di sicurezza attiva più consona con l'interpretazione della situazione. Tuttavia, queste tecniche di predizione sono tecniche non del tutto consolidate e affidabili in quanto l'essere umano è una persona dinamica e imprevedibile ed è quindi approssimativo prevedere le sue intenzioni [9].

Per quanto riguarda l'utilizzo di robot cinematicamente ridondanti consiste nell'utilizzare robot muniti di gradi di libertà aggiuntivi rispetto a quelli strettamente necessari per compiere un determinato lavoro nello spazio. La presenza di un grado di libertà aggiuntivo, rispetto ai tradizionali robot a 6 assi, garantisce la possibilità di eseguire lo stesso compito in diversi modi, e quindi conferisce destrezza al braccio manipolatore. In tal modo, il moto programmato del robot si potrebbe adattare durante il ciclo produttivo per permettere la cooperazione con operatori umani, senza peraltro alterare il compito assegnato. La pianificazione del moto del braccio robotico

consiste nello studiare strategie di risoluzione della ridondanza in modo da rendere il più naturale possibile la coesistenza tra uomo e robot.

In tal caso però, le strategie di pianificazione e controllo del moto, consolidate per robot tradizionali, si complicano considerevolmente. Il problema di inversione cinematica risulta decisamente più complicato, sia dal punto di vista concettuale che algoritmico. Inoltre, l'adozione di robot cinematicamente ridondanti può porre significativi problemi dal punto di vista della prevedibilità del movimento. Infatti a seconda della strategia di pianificazione del moto, ossia della scelta dell'algoritmo per tradurre un dato compito pianificato a livello cartesiano in opportune traiettorie dei singoli giunti, il comportamento del robot può risultare imprevedibile [10].

Infine, le strategie di controllo attivo basate sull'utilizzo di sensori esterocezionali consistono nell'utilizzo di sensoristica innovativa di corto raggio in grado di rilevare la presenza di eventuali oggetti non previsti nello spazio di lavoro del braccio robotico, compresi parti del corpo di un eventuale operatore umano presente nello stesso ambiente di lavoro. Attraverso questi sensori, un apposito controllore alla sicurezza otterrà in tempo reale e con adeguata frequenza di campionamento misure di distanza dagli ostacoli che potranno essere utilizzate in leggi di controllo ad anello chiuso intese a ridurre il rischio di collisioni. In particolare nel progetto Rosetta si è approfondito il concetto sopra citato definendolo come "Kinetostatic Danger Field" (KDF) [11]. Si tratta di una misura del rischio di impatto del robot con un ostacolo collocato in un punto arbitrario dello spazio di lavoro del robot. La misura è espressa da un campo vettoriale che dipende sia dalla posizione corrente del robot, sia dalla sua velocità. Una volta che l'oggetto nell'ambiente è stato individuato, il campo è valutato sulla base della distanza tra l'oggetto e il robot, la velocità del robot e l'angolo tra i vettori rappresentativi della distanza e della velocità.

Un'ulteriore metodo, presentato in [12], basa il concetto di sicurezza attiva

sul riconoscimento 3D di eventuali ostacoli o persone ed una loro approssimazione attraverso figure geometriche elementari. In particolare, come mostrato in figura 2.2.4, l'uomo e il robot vengono approssimati come una somma di sfere.

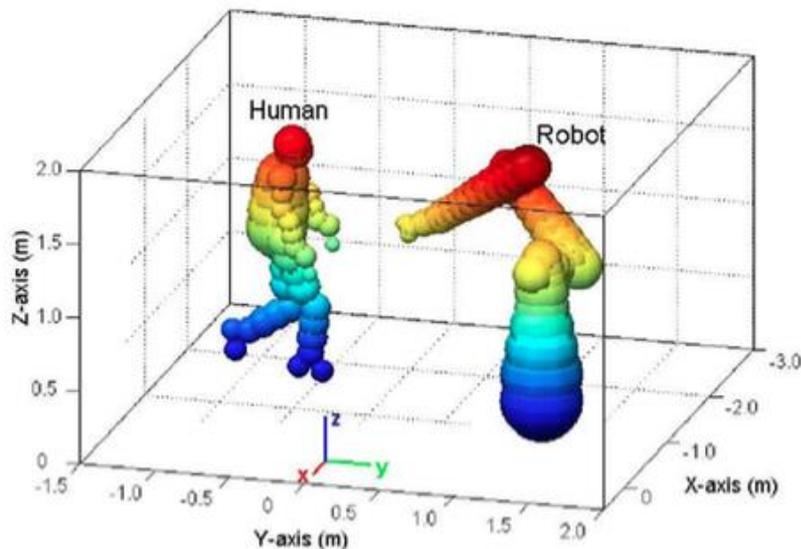


Figura 2.2.4: Modello geometrico di una cella di lavoro contenente un braccio robotico e un uomo

Questo avviene per agevolare la velocità di calcolo della distanza tra i due. Successivamente, basandosi su una previsione del movimento umano, un apposito algoritmo mira a calcolare la traiettoria ideale che il manipolatore dovrà adottare in modo da raggiungere la posizione finale mantenendo una determinata distanza di sicurezza dall'operatore umano.

Esistono molte altre tecniche che mirano a salvaguardare la sicurezza tra l'interazione uomo-robot.

Si può citare l'approccio di Heinzmann e Zelinsky che progettarono un sistema di controllo per manipolatori robotici che limitasse i valori delle coppie in un intervallo di valori di sicurezza, il tutto all'interno di un algoritmo di controllo della posizione [13]. Ancora si può ricordare lo schema di Zurada, il quale fa uso di una serie di sensori per riconoscere la presenza di un operatore umano all'interno dello spazio del robot. Questo

controllo impone al robot di attuare delle strategie di moto decise in precedenza (move as intended, slow down, emergency stop) a seconda della posizione dell'operatore [14].

Un'ulteriore metodologia di controllo che vale la pena ricordare si basa sul concetto di impedenza virtuale [15] [16]. Attorno all'ostacolo individuato viene costruita una superficie virtuale. Al robot viene poi applicata una forza che si oppone al suo moto, proporzionale alla profondità di attraversamento della superficie. La forza virtuale viene poi tradotta in coppie antagoniste applicate ai giunti del manipolatore, di modo da costringere il robot ad allontanarsi da tale superficie.

2.3.Ulteriori Problematiche ed Esigenze

Nella progettazione dei robot collaborativi oltre a tener conto di aspetti critici derivanti dalla sicurezza tra uomo e robot, ci sono aspetti di tipo funzionali e psicologici.

Un aspetto funzionale da tenere in considerazione è dato dalla forte contrapposizione tra requisiti produttivi richiesti e requisiti di sicurezza.

L'industria richiederebbe, per massimizzare i profitti, massimizzazione della velocità per minimizzare il tempo di lavoro, robustezza dei manipolatori per evitare rotture da fatica, traiettorie che ottimizzano lo spazio percorso per eseguire le manipolazioni etc. D'altra parte, la sicurezza dei lavoratori richiederebbe robot leggeri ed elastici, velocità ridotte, movimentazioni prevedibili dall'operatore umano etc. Perciò un aspetto delle ultime ricerche nel campo della robotica collaborativa è dunque mirato a trovare una mediazione fra questi due punti di vista opposti [17].

Da tenere poi in considerazione abbiamo le non idealità dei sistemi robotici, la difficoltà di ottenere un elevato grado di precisione, ambienti di

lavoro non completamente noti, devono montare capacità di calcolo potenti e veloci in modo da eseguire le varie funzioni in real time.

Per quanto riguarda l'utilizzo, i robot devono poter essere "human friendly", cioè devono poter essere controllati da operatori "non esperti". Necessitano perciò di interfacce semplici e intuitive in grado di prevedere il filtraggio dei comandi degli utenti, eliminando comandi "pericolosi" e ricevendo comandi "intermittenti".

Infine, riguardo gli aspetti psicologici, i robot non devono mettere a disagio l'operatore durante una cooperazione di un certo task e non devono farlo sentire in pericolo. Talvolta, per cercare di rendere la cooperazione il più possibile simile all'interazione tra due umani, e quindi a far sentire l'operatore a proprio agio, i robot vengono costruiti con somiglianze umane e i loro movimenti vengono studiati in modo da renderli il più naturali possibile.

3. Normative

Fin dall'inizio dello sviluppo del settore della robotica, la sicurezza è stata un'importantissima preoccupazione per l'industria. Con l'avvento dei primi robot industriali a comando idraulico, caratterizzati da grandi dimensioni ed elevate potenze meccaniche, si è instaurata un'accesa preoccupazione per la sicurezza. Per tale motivo fu stata avviata negli Stati Uniti e in Europa una ricerca per codificare i requisiti di sicurezza per gli esseri umani che lavorano intorno a robot industriali. Negli Stati Uniti, la Robotic Industries Association (RIA) sviluppò, in collaborazione con l'American National Standards Institute (ANSI), la norma di sicurezza per i robot ANSI RIA R15.06. In Europa, al contempo, la International Organization for Standardization (ISO) portò avanti la prima edizione della norma ISO 10218: 1992, che è stata successivamente adottata dal Comitato europeo di normazione (CEN) come EN 775. Esse prevedevano, tra le tante clausole, di racchiudere i robot all'interno di gabbie nelle quali l'operatore non poteva entrarvi fin che questo era in funzione. Nel 1999, con l'evolversi della tecnologia e la disponibilità di servocomandi elettrici, si è ampliato l'utilizzo di robot nei diversi ambiti portando con sé un necessario aggiornamento delle norme in termini di sicurezza. In particolare all'importanza di comprendere sia l'attività ma anche la valutazione del rischio associato. Nel frattempo le tecnologie dei robot continuarono ad evolversi, nascono sensori e unità di controllo molto efficienti e di conseguenza la necessità da parte degli enti di standardizzazione di fornire una nuova guida riguardante l'interazione tra l'uomo e i robot industriali. Nel 2006, in riferimento alla ISO TC184/SC2 WG3 [18], per i robot industriali nacque il primo lavoro veramente globale con la ISO 10218-1 dedicata solo ai robot. Questo documento prevedeva una linea guida completa per i produttori di robot, in particolare su un'adeguata costruzione

di essi. Un ulteriore aggiornamento avvenne nel luglio del 2011, ridefinendo i requisiti di sicurezza e integrazione dei sistemi robotici, dividendo la ISO 10218: 2011 in due parti:

- ISO 10218-1:2011 Robot e attrezzature per robot - Requisiti di sicurezza per robot industriali - Parte 1: Robot
- ISO 10218-2: 2011 Robot e attrezzature per robot Requisiti di sicurezza per robot industriali Parte 2: Sistemi ed integrazione di robot

La prima parte specifica i requisiti e le linee guida per la sicurezza integrata nella progettazione, le misure protettive e l'informazione per l'uso dei robot industriali. Essa descrive i pericoli di base associati a tali robot e fornisce i requisiti per eliminare, o ridurre adeguatamente, i rischi associati a tali pericoli.

Mentre la seconda specifica i pericoli che derivano dall'integrazione di robot industriali nelle linee produttive e identifica una serie di requisiti minimi di sicurezza che devono essere intrapresi da qualsiasi parte coinvolta (produttore, fornitore, integratore ed utilizzatore) al fine di garantire un ambiente di lavoro sicuro.

Questa norma fa riferimento alla più generale categoria di robot industriali; all'interno di essa sono contenute altre norme a cui fare riferimento nei casi specifici. Si riporta sotto le norme riguardanti nello specifico i robot collaborativi e l'interazione uomo macchina.

La ISO/TS 15066 "Robot e dispositivi robotici-Requisiti di sicurezza dei robot industriali – operazione collaborativa". Essa fornisce indicazioni tecniche sui requisiti che i robot devono avere, in particolare fa riferimento alle specifiche riguardante le distanze minime di separazione, l'arresto sicuro, il controllo di velocità, la limitazione di coppia e forza in riferimento ai tipi di operazioni collaborative stabilite in accordo con la EN ISO 10218-1. I tipi di operazioni collaborative sono essenzialmente 4:

- Safety-rated monitored stop: il robot non si muove quando l'operatore si trova nello spazio di lavoro collaborativo.
- Hand guiding: il robot si muove solo sotto l'input diretto dell'operatore.
- Speed and separation monitoring: il robot si muove quando l'operatore si trova a una distanza minima di sicurezza.
- Power and Force limiting: l'eventuale contatto tra uomo e robot non deve creare lesioni per l'umano quindi potenza e forza vengono limitate da un opportuno sistema di controllo.

Inoltre, di nota importanza, si cita la EN ISO 13849-1 "Sicurezza delle macchine – Parti del sistema di controllo correlate alla sicurezza – Principi generali di progettazione" la quale fornisce ai costruttori istruzioni per la realizzazione di macchine sicure. Queste istruzioni comprendono indicazioni per la progettazione, l'integrazione e la convalida dei sistemi di controllo riguardanti la sicurezza. Di particolare interesse questa norma definisce come determinare il Livello di prestazione, PL Performance Level, che è richiesto per il sistema di sicurezza e il modo in cui il PL ottenuto viene verificato. Il Livello di Prestazione indica l'efficienza e l'affidabilità con cui un sistema di sicurezza è in grado di eseguire una funzione di sicurezza in condizioni prevedibili. Sono disponibili cinque livelli di prestazioni: a, b, c, d, e. Il valore PL "e" indica il livello più alto di affidabilità del sistema di sicurezza, mentre il valore PL "a" indica quello più basso.

Si riporta in Fig. 3.1 il grafico ad albero atto a determinare il livello di prestazione di sicurezza richiesto.

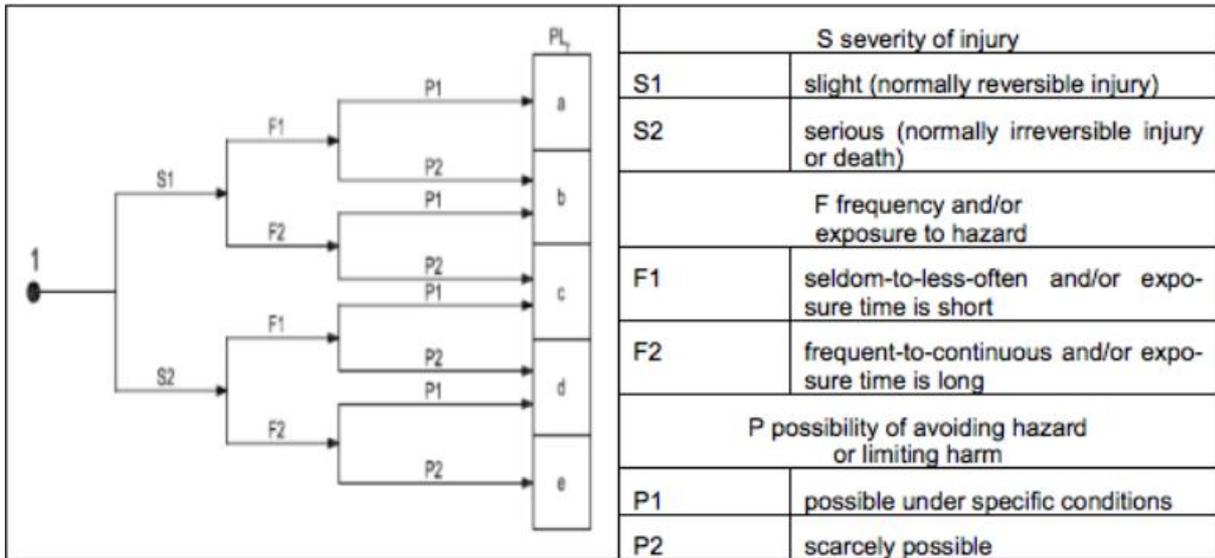


Fig. 3.1: Grafico ad albero fornito dalla ISO 13849 per determinare il livello di prestazione (PL) necessario al sistema di controllo

4. Esempi di co-Robots

L'obiettivo di questo Capitolo è analizzare come gli attuali robot collaborativi soddisfino problematiche, esigenze e normative. Nel comparare questi robot abbiamo scelto il top di gamma di tre aziende fortemente presenti nel mercato:

- Robot collaborativo LBR iiwa 14 R820 dell'azienda KUKA
- Robot collaborativo APAS assistant dell'azienda BOSCH
- Robot collaborativo YUMI IRB 14000-5/0.5 dell'azienda ABB

4.1. Robot collaborativo LBR iiwa 14 R820

KUKA, acronimo di Keller und Knappich Augsburg, è un produttore tedesco a livello mondiale di robot industriali e soluzioni per l'automazione industriale. La società è stata fondata nel 1898 ad Augusta, Germania, da Johann Josef Keller e Jacob Knappich. Inizialmente si focalizzava su luci stradali e domestiche ma ben presto cominciò a concentrarsi su altri prodotti, come macchinari e soluzioni di saldatura e grandi container. Costruisce il suo primo robot industriale nel 1973, FAMULUS, munito di



sei assi azionati tramite motore elettrico e dopo numerosi successi e studi innovativi portò nel 2013 a costruire il primo robot sensitivo atto alla collaborazione uomo-robot, LBR iiwa (Fig. 4.1.1), ove "LBR" sta per "robot leggero e "iiwa" per "intelligent industrial work assistant" [19].

Fig. 4.1.1: robot collaborativo KUKA LBR iiwa

Esamineremo in particolare LBR iiwa 14 R820.

Il sistema robotico è formato da 5 parti, figura 4.1.2,:

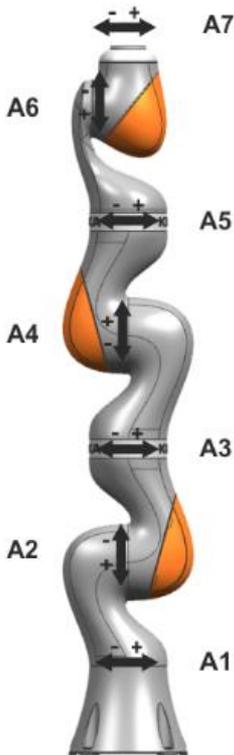


Fig 4.1.2: sistema robotico

- 1_ Cavo connettore per lo smartPAD
- 2_ Pannello di controllo KUKA smartPAD
- 3_ Manipolatore
- 4_ Cavo connettore tra manipolatore e unità di controllo
- 5_ Unità di controllo KUKA Sunrise

Viene classificato come “robot leggero” in quanto il manipolatore pesa solo 29,9 kg. Infatti esso è costituito da un telaio in alluminio e altri materiali leggeri. In termini di carico la portata massima dichiarata è di 14 kg.

Per migliorare la sicurezza negli eventuali urti con l’operatore umano ha un design esterno progettato senza spigoli, in modo da non avere bordi appuntiti e taglienti.



*Fig. 4.1.3:
Schematizzazione
dei 7 assi*

È un robot ridondante, infatti presenta 7 assi, figura 4.1.3, ciò permette di compiere lo stesso compito in diversi modi tenendo conto delle problematiche sopra citate.

Per quanto riguarda la precisione ha una ripetibilità di $\pm 0,15$ mm, ha un raggio di azione massimo di 820 mm ed è possibile fissarlo sia a pavimento sia a soffitto sia nei muri. Si riporta in figura 4.1.4 le specifiche dello spazio di lavoro.

Presenta un servo motore in ogni asse insieme ad un sensore di coppia e vari sensori di posizione.

L'unità di controllo Kuka Sunrise, con una frequenza di campionamento di 1000Hz, è ottimizzata per gestire al meglio il funzionamento del robot e garantire la sicurezza.

Prevede un sistema di programmazione semplice e veloce, definito "teaching by demonstration", infatti è possibile determinare i movimenti che il robot deve compiere muovendo manualmente e direttamente il manipolatore.

Il sistema è definito con un grado di protezione IP 54, che garantisce la protezione totale alla penetrazione di corpi solidi e da gocce o spruzzi di liquido in qualsiasi direzione. Eventualmente la penetrazione di polveri e liquidi non deve danneggiare l'apparecchiatura. Secondo la ISO 13849 il sistema di controllo ha un livello di prestazione PL "d", indica cioè che la probabilità che avvenga un guasto pericoloso all'ora è mediamente da 10^{-7} a 10^{-6} . La casa costruttrice garantisce una vita utile di più di 30000 ore [20].

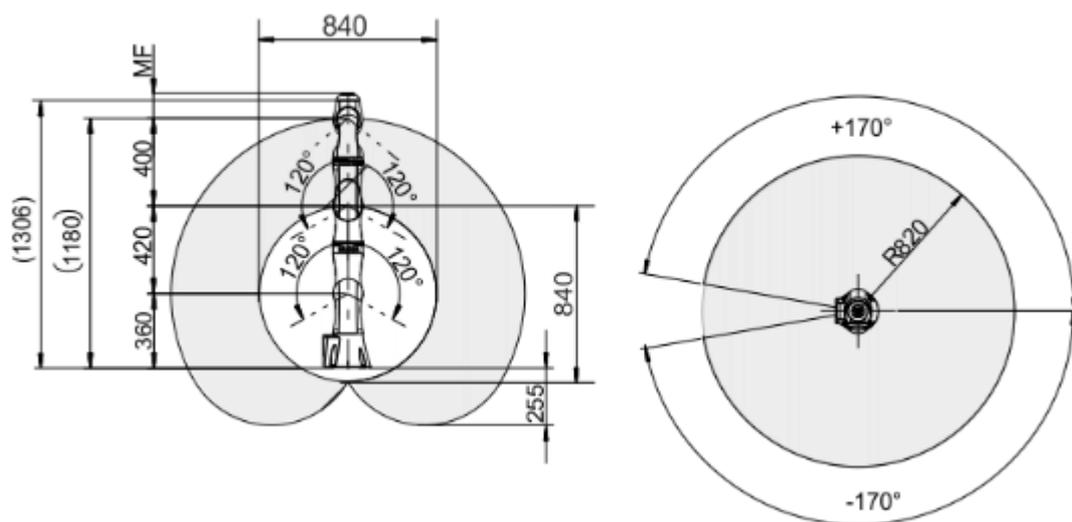


Fig. 4.1.4: spazio di lavoro (dimensioni in mm)

4.2. Robot collaborativo APAS assistant

BOSCH è una azienda multinazionale tedesca fondata a Stoccarda nel 1886 da Robert Bosch come officina di meccanica di precisione ed ingegneria elettrotecnica. Inizialmente produce dispositivi di accensione a magnete a bassa tensione, successivamente comincia a produrre di fari, tergicristallo per auto, apparecchi termo sanitari, autoradio specializzandosi in diversi settori, tra cui l'automazione e la progettazione di robot industriali.

In questo elaborato verrà trattato il robot collaborativo APAS assistant [21], figura 4.2.1.



Fig. 4.2.1: Robot collaborativo APAS assistant della BOSCH

E' composto da un braccio manipolatore il quale viene fissato su un basamento di supporto all'interno del quale è presente una unità di controllo. Il tutto comunica con un operatore tramite un display touch mobile che fa da interfaccia. Il basamento è supportato da delle ruote (figura 4.2.2), in tal modo è possibile spostare il robot da un luogo all'altro senza problemi per poi bloccarle una volta trovata la posizione desiderata. Il display touch mobile, in Fig. 4.2.3, permette di comunicare con il robot e di programmarlo mediante funzioni semplici ed intuitive senza dover



Fig. 4.2.2: Ruota del basamento



Fig. 4.2.3: APAS assistant touchpad

conoscere linguaggi di programmazione. Per garantire la sicurezza l'APAS assistant è munito di una varietà di sensori: il più visibile è la copertura esteriore definita come "sensor skin".

E' una copertura in pelle imbottita la quale reagisce immediatamente quando qualcuno si avvicina. Prima di qualsiasi contatto tra l'uomo e la macchina il sistema di controllo riceve il segnale e ferma il manipolatore fino a che l'uomo non si è allontanato dalla zona di pericolo che approssimativamente è di 50 mm dal braccio robotico. APAS assistant monta una pinza a tre denti, figura 4.2.4,



Fig. 4.2.4: Pinza e telecamera

con la quale è possibile regolare la forza di serraggio da 40 a 120 N. In prossimità della pinza vi è un sistema di elaborazione immagini 3D e di illuminazione integrati in una telecamera (Fig. 4.2.4). Attraverso ciò, il sistema di controllo è in grado di rilevare lo spazio attorno alla pinza e gli oggetti presenti garantendo così una elevata precisione nella presa e nella deposizione. La ripetibilità dichiarata è di 0,03 mm e la capacità di carico di 2 kg. Il peso complessivo del sistema robotico è circa 230kg e il raggio di azione del manipolatore è di 911 mm. Si riporta per una maggiore comprensione lo spazio di lavoro e le dimensioni generali in figura 4.2.5.

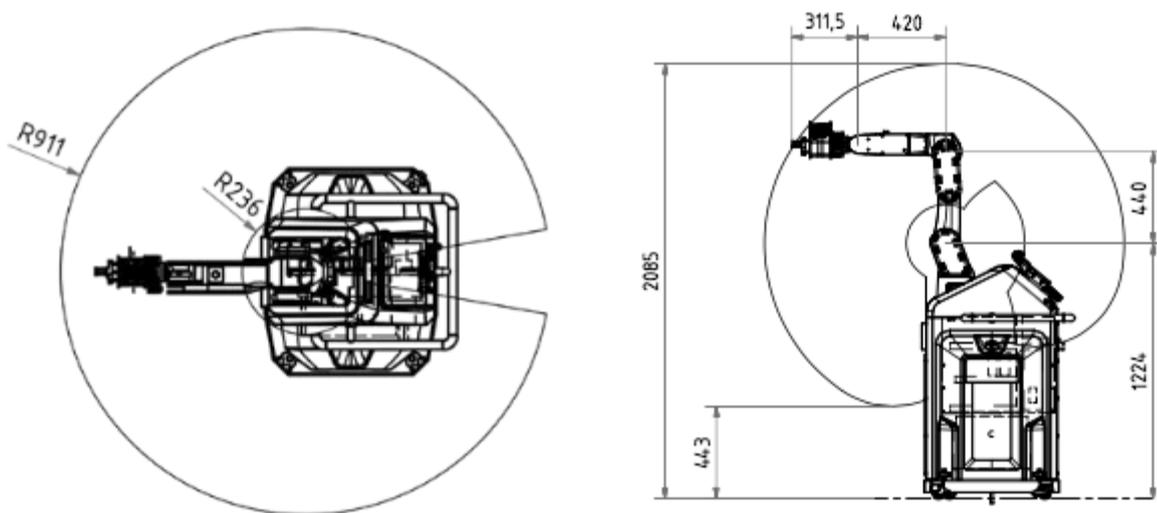


Fig. 4.2.5: Spazio di lavoro (dimensioni in mm)

4.3. Robot collaborativo YUMI IRB 14000-5/0.5

ABB, acronimo di Asea Brown Boveri, è un'azienda multinazionale con sede a Zurigo (Svizzera). È Operante in circa 100 Paesi del mondo, impiega 140 000 dipendenti e opera in massima parte nelle tecnologie per l'energia e l'automazione. ABB nasce nel 1988 dalla fusione di due importanti realtà industriali europee: la svedese ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget), fondata nel 1883 e la svizzera Brown Boveri, fondata nel 1891, la quale già nel 1903 acquisisce il Tecnomasio Italiano, la più antica società elettromeccanica italiana creata nel 1863. Al giorno

d'oggi ABB è una delle aziende leader nella fornitura di robot industriali. Esamineremo qui in seguito l'ultimo sviluppo nel campo della robotica presentato il 13 Aprile 2015, si tratta del primo robot a due bracci realmente collaborativo denominato come YUMI, il quale significato sta per "You and Me" cioè "Tu e Io". Questo robot è stato progettato specificamente per le esigenze di flessibilità e agilità in produzione dell'industria elettronica di largo consumo, ma può essere impiegato in qualsiasi processo di assemblaggio di piccoli componenti.

Si riporta in figura 4.3.1 il suddetto robot.



Fig. 4.3.1: robot collaborativo YUMI di ABB

Yumi, come precedentemente detto, è formato da due bracci i quali sono fissati su una base simile a un busto. Questo design è stato scelto proprio per ricordare il più possibile la figura umana e quindi per avere un aspetto più amichevole [22]. La base è possibile fissarla su qualsiasi piattaforma con un apposito sistema di fissaggio integrato su di essa. Anch'esso rientra nella categoria dei robot leggeri infatti pesa solo 38kg. I bracci robotici sono formati da uno scheletro in magnesio leggero, avvolti da una

copertura in plastica imbottita che consente di ammortizzare eventuali impatti accidentali. Si riporta in figura 4.3.2 un esploso del braccio robotico.

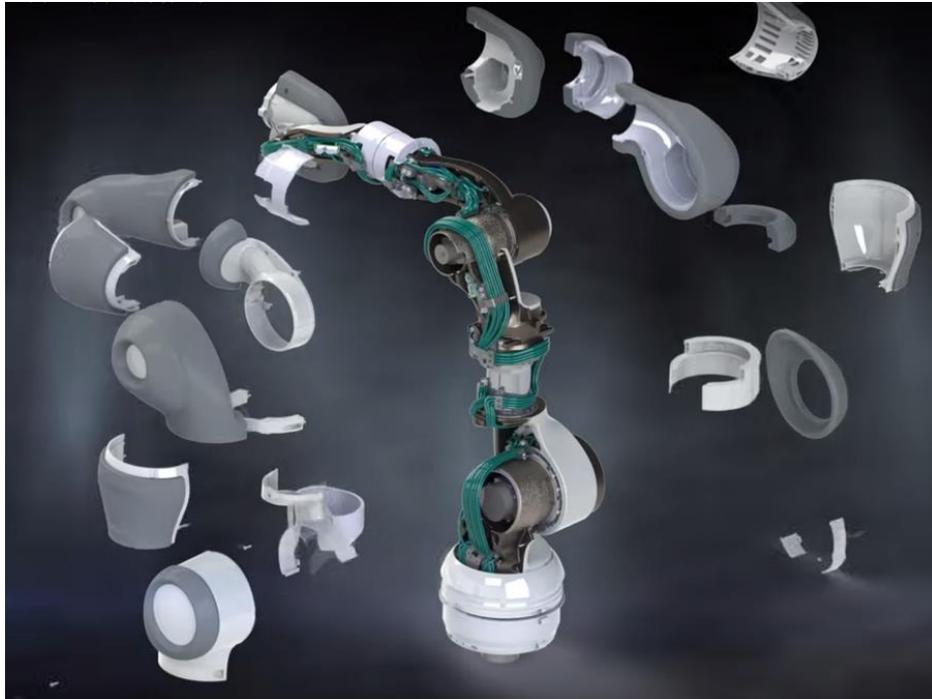


Fig. 4.3.2: Esploso di un braccio del robot Yumi

Sono dotati di 7 assi di movimento, riuscendo così a conferire destrezza in uno spazio di lavoro ristretto commisurato a un essere umano. All'estremità del braccio è possibile fissare una delle servopinze progettate da ABB in base alle diverse necessità. Posso essere dotate di videocamere integrate in grado di riconoscere i vari oggetti e di una o due ventose in grado di fornire una modalità diversa di afferraggio. Se ne riporta i diversi tipi in figura 4.3.3.



Fig.4.3.3: Tipologie di pinze

La capacità di carico è di 0,5 kg, la ripetibilità dichiarata è di 0,02 mm e la velocità massima di 1,5 mm/s². Può essere alimentato a una comune rete domestica e richiede un'alimentazione pneumatica per il serraggio delle pinze. Inoltre dispone di svariate porte digitali di entrata e uscita come porte Ethernet, Usb in modo da interfacciare diversi dispositivi e farli comunicare tra loro. Il sistema è classificato con un grado di protezione IP30, garantendo protezione contro l'ingresso di oggetti solidi di diametro più grande di 2,5 mm (es. fili, attrezzi) ma non garantisce la protezione da ingresso di liquidi. È munito di un controller IRC5 di quinta generazione che consente un controllo del movimento avanzato, della velocità, della precisione e la sincronizzazione con dispositivi esterni. Se il robot si imbatte in un ostacolo imprevisto, come il contatto con un operatore, il sistema di controllo, subito dopo l'urto, arresta il robot nel giro di qualche millisecondo. Successivamente è possibile ripristinare il normale funzionamento del robot attraverso un telecomando premendo il tasto denominato con "play". In termini di sicurezza al sistema di controllo è stato assegnato un livello di prestazione PL "b". Significa che la probabilità che avvenga un guasto pericoloso all'ora è mediamente da $3 \cdot 10^{-6}$ a 10^{-5} volte.

Per quanto riguarda la programmazione è dotato di una funzione detta "Lead-Through" la quale permette di registrare i movimenti che il braccio deve compiere muovendo manualmente il braccio e registrando alcuni punti di riferimento. In maniera automatica il software convertirà i movimenti in codici. Tuttavia se l'attività di Lead-Through diventa troppo complessa per determinate movimentazioni è possibile programmare in modo tradizionale il robot con un linguaggio di programmazione chiamato "Rapid" sviluppato da ABB.

Si riporta in figura 4.3.4 le dimensioni e lo spazio di lavoro.

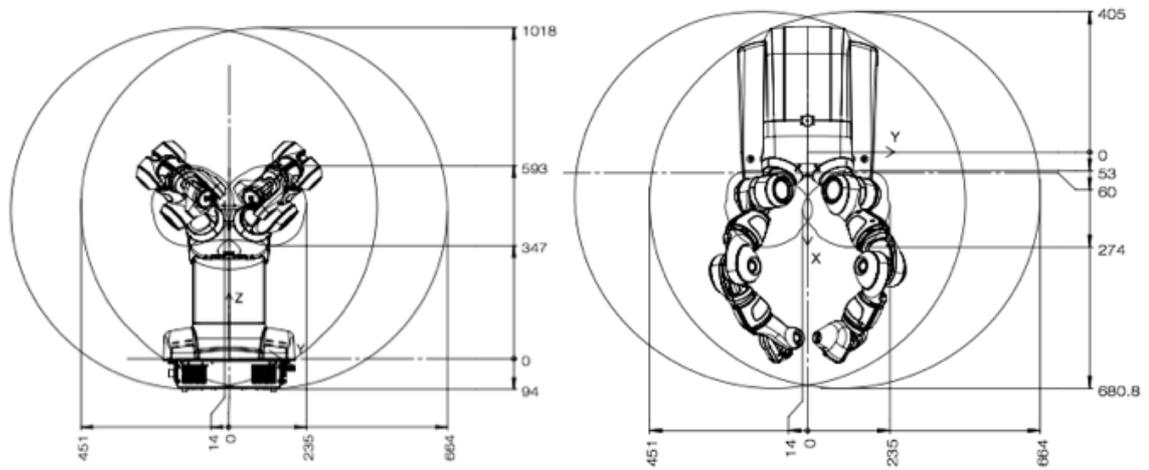


Fig. 4.3.4: Spazio di lavoro (dimensioni in mm)

5. Conclusioni

Il tema dell'interazione uomo-robot è sicuramente un tema ancora giovane, riservato, per ora, alla produzione e assemblaggio nell'industria. Come mostrano i dati, il mercato dei robot collaborativi è in continua espansione e da quanto trattato in questa tesi si può dire che l'apice della loro evoluzione non sia ancora stato raggiunto. Infatti, gli sviluppi futuri mirano a migliorare le loro prestazioni, in particolare ad aumentare le capacità di carico, ottenere tempi di ciclo più rapidi e a migliorare la protezione in ambienti ostili come fonderie in modo da aumentare le loro applicazioni. Inoltre, la concentrazione sarà legata con molto interesse all'evoluzione delle tecniche di sicurezza tramite metodi di controllo e di predizione dell'interazione, in modo da rendere quest'ultima il più efficace ed affidabile possibile.

Dagli esempi di robot sopra citati si può osservare che nonostante siano tutti co-Robot, essi si differenziano molto nelle loro caratteristiche, robot leggeri, robot con due bracci, robot con particolari sensori in base alle tecniche di sicurezza scelte. Tuttavia il loro punto di forza comune è la loro flessibilità, caratteristica sempre più richiesta nelle aziende, infatti, rispetto ai Robot tradizionali, comportano un impiego di risorse nettamente inferiori in termini di progettazione di sistemi, installazione, messa in funzionalità e operatività.

Questa è la chiave del loro successo che spinge centri di ricerca ad un continuo impiego di risorse per sviluppare questi sistemi.

Fino a che punto i Robot collaborativi riusciranno a spingersi non è cosa saputa ma si può dire che è stata una grande evoluzione nel mondo della robotica.

6. Bibliografia

- [1] International Federation of Robotics. World robotics 2014 industrial robots. <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>
- [2] RIA/ANSI R15.06. American national standard for industrial robots and robot systems - safety requirements. American National Standards Institute.
- [3] L. Bascetta P. Bolzern G. Ferretti B. Lacevic A. Locatelli G. Magnani P. Rocco N. Schiavoni A.M. Zanchettin. Robotica industriale umano-centrica: il progetto rosetta. pages 75–79, 6 2011.
- [4] O. Khatib B. Roth, M. Zinn and J.K. Salisbury. A new actuation approach for human-friendly robot design. In International Symposium on Experimental Robotics, 7 2002.
- [5] G. Tonietti M. Bavaro A. Bicchi and M. Piccigallo. Variable stiness actuators for fast and safe motion control. In International Symposium on Robotics Research, 2003.
- [6] S. L. Rizzini A. Bicchi and G. Tonietti. Compliant design for intrinsic safety: general issues and preliminary design. In IEEE Int. Symp. Intelligent Robots and Systems, pages 1864–1869, 10 2001.
- [7] A. Albu Schaeer A. Bicchi R. Bischo R. Chatila A. D. Luca A. D. Santis G. Giralt J. Guiochet G. Hirzinger F. Ingrand V. Lippiello R. Mattone D. Powell S. Sen B. Siciliano G. Tonietti R. Alami and L. Villani. Safe and dependable physical human-robot interaction in anthropic domains: State of the art and challenges. In IROS Workshop on pHRI - Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains, 10 2006.
- [8] L. Bascetta, P. Bolzern, G. Ferretti, B. Lacevic, A. Locatelli, G. Magnani, P. Rocco, N. Schiavoni, A. M. Zanchettin - Politecnico di Milano, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano, Italia

- [9] Balan, L. ; Dept. of Mech. Eng., McMaster Univ., Hamilton, Ont.; Bone, G.M., "Real-time 3D Collision Avoidance Method for Safe Human and Robot Coexistence". Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 9 - 15, 2006, Beijing, China
- [10] C. Klein, C. Huang, "Review of pseudoinverse control for use with kinematically redundant manipulators", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. 13, n. 3, pp. 245-250, 1983.
- [11] B. Lacevic, P. Rocco, "Kinetostatic danger field - a novel safety assessment for human-robot interaction", RSJ/IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Iros 2010, pp. 2169-2174, 2010.
- [12] Balan, L. ; Dept. of Mech. Eng., McMaster Univ., Hamilton, Ont.; Bone, G.M., "Real-time 3D Collision Avoidance Method for Safe Human and Robot Coexistence". Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 9 - 15, 2006, Beijing, China
- [13] J. Heinzmann and A. Zelinsky. Quantitative safety guarantees for physical human-robot interaction. pages 22(7–8):479 504, 2003.
- [14] A.L. Wright J. Zurada and J.H. Graham. A neuro-fuzzy approach for robot system safety. 2 2001.
- [15] Y. Nakabo and M. Ishikawa. Visual impedance using 1 ms visual feedback system. 1998.
- [16] T. Tsuji and M. Kaneko. Noncontact impedance control for redundant manipulators. In IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, volume 29, chapter part A. 1999.
- [17] S. Haddadin, A. Albu-Schaeffer, and G. Hirzinger. Requirements for safe robots: measurements, analysis and new insights. International

Journal of Robotics Research, 28:1507–1527, 2008.

- [18] ISO/TC 184/SC 2 “Robots and robotic devices”; working group WG3 “Industrial safety” is one of five active working groups in this subcommittee. See committee web site: http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee.html?commid=54138
- [19] sito della KUKA <http://www.kuka-robotics.com/italy/it/>
- [20] sito KUKA http://www.kuka-robotics.com/italy/it/products/industrial_robots/sensitiv/lbr_iiwa_14_r820/start.htm
- [21] Documentazione trovata nel sito della bosch da file scaricabili dal sito http://www.bosch-apas.com/en/apas/produkte/assistant/assistant_product_detail/produkt_details_1.html
- [22] Presentazioni cataloghi e datasheet reperibili nel sito della ABB <http://new.abb.com/products/robotics/yumi>