UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

“Robot mobili e AGV per l’automazione e la logistica delle imprese”

“Mobile robots and AGV, for automation and companies’ logistics”

Relatore:

Prof.
Massimo Callegari

Tesi di Laurea di:

Daniela
Mastrogiuseppe

A.A. 2020/2021

Prefazione

La mia tesi è incentrata sulla robotica mobile e tutte le innovazioni legate ad essa, confrontando il panorama italiano e quello mondiale da qui ai prossimi dieci anni. Le motivazioni che mi hanno spinto a scegliere questo argomento nascono sicuramente dal mio corso di studi, che mi ha dato modo di confrontarmi con la robotica, in particolare nel corso di "Meccanica delle macchine"; ma sono stata spinta soprattutto dalla curiosità e dalla volontà di voler approfondire un argomento tanto attuale, quanto interessante. L'obiettivo di questa tesi è quello di fornire un'analisi accurata della sensoristica che sta alla base degli Autonomous Mobile Robots (AMR), mettendone in evidenza le peculiarità, il grado di autonomia e la flessibilità, caratteristiche che li differenziano dai loro predecessori, i più conosciuti AGV (Automated guided vehicoles). Sono stati riportati inoltre molti dati, relativi a ricerche effettuate ad esempio dall'Interact Analysis, piuttosto che da Ab Research, che evidenziano il notevole successo degli AMR e quanto saranno rilevanti nell'industria dei prossimi dieci anni.

La mia tesi si articola in cinque capitoli:

Il primo capitolo è prettamente introduttivo e fornisce una panoramica generale sull'argomento, dalla prima definizione di Autonomous mobile robot (AMR) fino all'integrazione della robotica nel decreto rilancio, con un'analisi dettagliata della sezione robotica nel PNR (Piano Nazionale di Ricerca).

Nel secondo capitolo si descrive dettagliatamente il robot mobile, e viene posta maggiore attenzione sulle differenze sostanziali tra AGV ed AMR. Ad ogni modo il fulcro del capitolo è stato la sensoristica che sta alla base dei robot mobili, dalla navigazione laser fino alla guida SLAM (Simultaneous Localization and mapping).

Il terzo capitolo verte sulla programmazione dei robot mobili, descrivendo passo dopo passo come un AMR, tramite la sensoristica spiegata nel capitolo precedente, ed essendo opportunamente guidato, riesca a costruire una mappa che rileva l'area in cui esso può muoversi. Inoltre, il capitolo si incentra sulle differenze che intercorrono tra i robot mobili dei principali produttori mondiali di robot.

Il quarto capitolo si incentra invece sulla logistica, principale ambito in cui vengono impiegati sia robot mobili che AGV. Il tutto viene arricchito da un esempio relativo al dimensionamento di un reparto di logistica, sottolineando anche quanto sia fondamentale l'aspetto relativo alla sicurezza, che i robot devono garantire agli operatori.

Nel quinto capitolo, infine, si riportano i dati che vedono un futuro prosperoso per gli AMR, da qui ai prossimi 30 anni, le innovazioni legate ad essi, le future applicazioni e i miglioramenti che dovranno ancora essere applicati, per renderli sempre più performanti e flessibili. Il quinto capitolo si conclude con un riferimento ad i-Labs, il Laboratorio del quale è responsabile il mio relatore, il professore Massimo Callegari. Questa esperienza è stata particolarmente edificante, nonché fondamentale per strutturare la mia tesi. L'importanza di questa esperienza verrà riportata nelle conclusioni della mia tesi.

Sommario

CAPITOLO 1- INTRODUZIONE 1

1.1. L'EVOLUZIONE DELLA ROBOTICA: DAGLI AGV AGLI AMR 1
1.1.1. ALGORITMI SLAM E SENSORISTICA 1
1.1.2. SETTORI DI APPLICAZIONE AMR 2
1.1.3. UN MERCATO IN EVOLUZIONE, GLI AMR RAPPRESENTANO IL FUTURO 3
1.2. L'INTELLIGENZA ARTIFICIALE 3
1.2.1. PNR (PIANO NAZIONALE DELLA RICERCA) 5
1.2.2. OBIETTIVI ENTRO IL 2027 7
1.2.3. ROBOTICA PER INDUSTRIA 4.0 8
1.3. GLI AMR E LE APPLICAZIONI 4.0 10

CAPITOLO 2- AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS (AMR) 13

2.1. COSA SONO I ROBOT MOBILI 13
2.1.1. PRINCIPALI DIFFERENZE TRA AGV E AMR 14
2.1.2. CAMPI DI APPLICAZIONE ROBOT MOBILI 16
2.2. SISTEMI DI GUIDA 18
2.2.1. GUIDA INDUTTIVA 19
2.2.2. GUIDA CON NASTRO OTTICO O MAGNETICO 19
2.2.3. NAVIGAZIONE LASER 20
2.2.4. GUIDA INERZIALE 21
2.2.5. GUIDA SLAM 22
2.2.6. GUIDA GPS 23
2.3. I ROBOT MOBILI, UNA NUOVA FRONTIERA 24

CAPITOLO 3- APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELLA ROBOTICA MOBILE 27

3.1. COME SI PROGRAMMANO I ROBOT MOBILI 27
3.2. KUKA MOBILE ROBOTS: KUKA OMNIWHEELS 29
3.2.1. CARATTERISTICHE COMUNI 32
3.2.2. KMR IIWA 33
3.2.3. KMP 1500 35
3.2.4. KUKA OMNIMOVE 37
3.3. OMRON 37
3.3.1. LD250 38
3.3.2. HD1500 39
3.3.3. FLOTTE DI ROBOT MOBILI IN OMRON 40
3.4. COMAU AGILE1500 41
3.5. MOBILE INDUSTRIAL ROBOTS (MIR) 43
3.5.1. MIR 250 44
3.5.2. MIR 1350 45

CAPITOLO 4- ROBOT MOBILI A SUPPORTO DELLA LOGISTICA 47

4.1. DEFINIZIONE DELLA FUNZIONE LOGISTICA 47
4.1.1. INTEGRAZIONE ED AUTOMAZIONE LOGISTICA 47

4.1.2. IL CONCETTO DI FLESSIBILITÀ 48
4.2. SISTEMA FLESSIBILE DI ASSEMBLAGGIO 49
4.3. CRITERI DI PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI TRASPORTO FLESSIBILE CON CARRELLI AGV 49
4.3.1. ESEMPIO DI PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI CARRELLI AGV 50
4.4. CONSIDERAZIONI ECONOMICHE SULL'ACQUISTO DI UN SISTEMA AGV 57
4.4.1. L' IMPORTANZA DELLA SICUREZZA 58
4.4.2. GLI AMR PER ASSICURARE SICUREZZA SUL POSTO DI LAVORO 59

CAPITOLO 5- CONCLUSIONI 60

5.1. IL FUTURO DELLA ROBOTICA MOBILE 60
5.1.1. FLESSIBILITÀ E SICUREZZA DEGLI AMR 61
5.1.2. LA NUOVA GENERAZIONE DI AMR 62
5.2. I-LABS JESI 62

6- BIBLIOGRAFIA 67

7- SITOGRAFIA 68

8- APPENDICE 71

Indice delle figure

FIGURA 1. AUTOMATED GUIDED VEHICLES 15
FIGURA 2. AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS 16
FIGURA 3. DISPOSITIVO NAV3XX DELLA SICK, NAVIGAZIONE LASER 21
FIGURA 4. MAPPA ELABORATA MEDIANTE LA GUIDA SLAM 23
FIGURA 5. RICERCA EFFETTUATA DA INTERACT ANALYSIS 25
FIGURA 6. LA FABBRICA DEL FUTURO 26
FIGURA 7. MAPPA COSTRUITA DAL ROBOT MOBILE 28
FIGURA 8. I MOVIMENTI CONSENTITI ALLE RUOTE OMNIDIREZIONALI 30
FIGURA 9. MOVIMENTI CONSENTITI ALLE RUOTE DIFFERENZIALI 31
FIGURA 10. KUKA MOBILE PLATFORMS 31
FIGURA 11. KUKA MOBILE ROBOTS 32
FIGURA 12. ALCUNE APPLICAZIONI DEI ROBOT MOBILI 33
FIGURA 13. DATI DEL KUKA SUNRISE CABINET 34
FIGURA 14. LA PIATTAFORMA ROBOTIZZATA SI MUOVE AUTONOMAMENTE IN AMBIENTE DI LAVORO 35
FIGURA 15. KMR IIWA 35
FIGURA 16. KMP 1500 36
FIGURA 17. LA FAMIGLIA OMRON 37
FIGURA 18. LD250 38
FIGURA 19. LD60/90 VERSIONE ESD 39
FIGURA 20. LD250 VERSIONE ESD 39
FIGURA 21. LE ZONE DI SICUREZZA IN FUNZIONE DELLA VELOCITÀ 40
FIGURA 22. FLEETMANAGER OMRON 41
FIGURA 23. VISTA FRONTALE AGILE 1500 42
FIGURA 24. VISTA POSTERIORE AGILE 1500 42
FIGURA 25. MIR 250 45
FIGURA 26. MIR 1350 46
FIGURA 27. SISTEMA PRODUTTIVO 47
FIGURA 28. LAYOUT RELATIVO AL PROBLEMA ESAMINATO CON STAZIONI DI CARICO E SCARICO 51
FIGURA 29. NUMERO DI CARRELLI CARICHI PER ANDARE DA UNA STAZIONE “I” A UNA STAZIONE “J” 51
FIGURA 30. GRAFO ORIENTATO 55
FIGURA 31. FLUSSO DI CARRELLI VUOTI 55
FIGURA 32. DISPENDIO ECONOMICO LEGATO ALL’ACQUISTO DI UN SISTEMA AGV 57
FIGURA 33. YUMI ABB 63
FIGURA 34. UR10E 63
FIGURA 35. TM 5-700 64
FIGURA 36. KMR JIWA 64
FIGURA 37. MIR 200 65

Capitolo 1- INTRODUZIONE

1.1. L'evoluzione della robotica: Dagli AGV agli AMR

Negli anni 50 del ventesimo secolo la Barrett Electronics of Northbrook, Illinois, (USA), introdusse i primi AGV (Automated Guided Vehicles), come versione commerciale del prototipo costruito da A.M. Barret Jr. Nel 1953, denominato 'Guide-O-Matic'.

Il prototipo era un carrello elevatore modificato in modo da seguire il campo magnetico generato da una linea elettrica disposta sul soffitto o sul pavimento. Trasportava alla velocità di 4,5 km/h un numero di cinque carrelli, fermandosi in 11 stazioni predisposte lungo il percorso di generi alimentari, muovendosi all'interno di uno spazio accuratamente delimitato per evitare pericoli legati al passaggio di operatori umani. L'idea venne apprezzata parecchio, tanto che nel 1973, Volvo realizzò presso l'impianto Kalmar la prima linea di assemblaggio completamente asincrona, sostituendo ai nastri trasportatori una flotta di 186 AGV.

Tuttavia, a distanza di più di mezzo secolo, le prospettive sono cambiate e sul mercato hanno preso sempre più piede i cosiddetti AMR (Autonomous Mobile Robot), i quali sono essenzialmente una versione "smart" degli originali AGV. La differenza sostanziale la si ritrova nel grado di autonomia, che porta con sé differenze fondamentali in termini di flessibilità, impiego e valore aggiunto.
A differenza dei più conosciuti Autonomous Guided Vehicles (AGV), gli AMR si muovono nell'ambiente di lavoro in modo autonomo grazie ad un sistema di navigazione intelligente e funzionano in modo completamente autonomo, servendosi di algoritmi SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), e di una combinazione di sensori complessi.

1.1.1. Algoritmi SLAM e sensoristica

Uno strumento fondamentale su cui l'AMR può fare affidamento è l'utilizzo di algoritmi di localizzazione e mappatura. Lo SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) è stato studiato per parecchi anni e ha avuto una notevole evoluzione. In particolare, il problema consiste nel porre un robot in un ambiente sconosciuto, con il compito di usare i propri sensori per ricavare una mappa dell'ambiente stesso e capire quale sia la propria posizione al suo interno. Il tutto è complicato dalla presenza di inevitabili incertezze ed errori di misura. In pratica, il robot dovrà esplorare il proprio ambiente, anche sfruttando le informazioni già raccolte, per capire da che parte procedere con l'esplorazione e, allo stesso tempo, organizzare i dati raccolti in una mappa coerente, che consenta l'autolocalizzazione. L'uso di algoritmi di Slam a bordo degli AMR elimina la necessità di elaborare e caricare una mappa dell'ambiente di lavoro nella memoria del robot, al contrario di quanto succede, per esempio, negli AGV che usano la triangolazione laser, e rende l'AMR più facilmente adattabile all'utilizzo in ambienti dinamici.

È, comunque, possibile 'guidare' la fase di apprendimento, sia fornendo direttamente la mappa, sia utilizzando una speciale modalità operativa nella quale si porta 'a spasso' il robot mediante un joystick.

Un altro aspetto fondamentale è quello legato alla sensoristica, ovvero un uso combinato di sensori complessi per la visione artificiale e algoritmi di intelligenza artificiale, nonché della connessione in rete di flotte di AMR. La simbiosi fra tali sistemi porta a prestazioni sempre più elevate nei compiti da svolgere, soprattutto in ambienti altamente dinamici. Lo scambio di informazioni fra diversi AMR, con il supporto di dati visivi, per esempio, rende estremamente più efficiente l'esecuzione degli algoritmi di Slam, o la realizzazione di compiti collaborativi che richiedono l'intervento simultaneo di più AMR.

1.1.2. Settori di applicazione AMR

La piattaforma di base di un AMR è rimasta sostanzialmente la stessa del primo prototipo di AGV, ovvero un carrello motorizzato, oggi però è possibile arricchire tale piattaforma con una grande varietà di elementi, da semplici ganci per la trazione di carrelli a sofisticati bracci robotici sensorizzati. Pertanto, se l'utilizzo classico, e ancora prevalente, degli AMR è nel settore della movimentazione all'interno dei magazzini è sempre più frequente vedere applicazioni di natura diversa. È il caso della movimentazione in ambiti non legati a logistica e produzione, per esempio in ambito ospedaliero, per il trasporto di medicinali, fino al caso estremo delle pantofole e dei cuscini a guida autonoma progettati da Nissan utilizzando gli stessi algoritmi impiegati per il parcheggio automatico degli autoveicoli. Questi accessori tornano da soli al proprio posto una volta utilizzati. Anche al di fuori della movimentazione, la ricca gamma di accessori disponibili rende gli AMR in grado di partecipare ai processi produttivi in molti modi, come nell'alimentazione di altre macchine o nella sostituzione di utensili su bracci robotici.

Un trend interessante si riscontra anche nella varietà dei modelli di business utilizzati per proporre l'uso di AMR in nuovi settori e impianti. La versatilità degli AMR consente infatti bassi investimenti iniziali, in quanto non è necessario introdurre modifiche strutturali all'impianto o predisporre guide apposite, con conseguente veloce recupero dell'investimento, in quanto l'uso del robot consente di liberare risorse umane che possono essere dedicate a compiti a maggiore valore aggiunto. D'altro canto, l'uso di nuove formule di accesso ai servizi forniti dagli AMR si è rivelata una chiave vincente alla diffusione degli stessi. Le modalità 'Pay-per-pick' (PPP) o 'Robot as a Service' (RaaS), per esempio, mirano a ridurre il costo iniziale dell'investimento fornendo al contempo una soluzione scalabile e dando la possibilità al cliente di sperimentare i vantaggi offerti dagli AMR senza impegni onerosi. In entrambi i modelli l'azienda produttrice resta proprietaria dei robot e provvede alla loro configurazione presso il cliente; quest'ultimo paga un canone proporzionale al numero di esecuzioni dei task previsti: prelievo di un oggetto da uno scaffale nel PPP, oppure impacchettamento di un articolo nel RaaS. Tali soluzioni sono facilmente scalabili in caso di periodi di picco della produzione e permettono al cliente di dimensionare la flotta di AMR sulle sue esigenze effettive. Di solito, il passo successivo consiste nell'acquisto dei robot da parte del cliente stesso.

1.1.3. Un mercato in evoluzione, gli AMR rappresentano il futuro

La presenza crescente della robotica nella logistica industriale è chiaramente evidenziata dall'ultimo report IFR che offre una visione cristallina dei trend futuri. Il numero di robot dedicati alle diverse applicazioni in ambito logistico cresce in modo significativo, tanto che l'IFR stima un aumento di oltre il 30% nel biennio 2021-23. Tanto per dare un'idea della presenza numerica di robot nel settore industria, si è partiti da quasi 80 k unità nel 2019, salite a 120k lo scorso anno per arrivare a circa 160k quest'anno. Tuttavia, per gli AMR il campo d'azione non è limitato al solo utilizzo industriale; basti pensare che negli ambienti pubblici la percentuale di crescita sarà ancora maggiore, attestandosi al 40% e ciò è dovuto alla proliferazione di servizi vari assolti dagli AMR (primo fra tutti quello della sanificazione).

È necessario inoltre prendere in considerazione anche un altro aspetto fondamentale: la crisi pandemica ha accelerato in maniera esponenziale la domanda di servizi di e-commerce per qualsiasi tipo di bene (ad esempio GDO ed FMGC). Lo scenario futuro vedrà senz'altro un ulteriore crescita della richiesta e pertanto allo scopo di consolidare una filiera di questo tipo, in grado di sostenere tutte le future richieste, sarà necessario disporre di nuovi hub logistici.

Secondo una ricerca condotta da Interact Analisys, entro il 2025 si prevede la realizzazione di almeno 30000 fra nuovi hub e magazzini logistici che saranno predisposti secondo il modello di logistica automatizzata. La proliferazione di robot mobili autonomi all'interno dei settori produttivi, così come nell'e-commerce è ancora agli inizi e senz'altro si possono auspicare ampi margini di crescita nei prossimi anni. Nonostante i robot autonomi siano già entrati a far parte del nostro vivere quotidiano, nel prossimo futuro potremo apprezzare AMR sempre più multitasking con livelli di affidabilità, flessibilità e performance fino ad oggi difficili da immaginare.

1.2. L'intelligenza artificiale

Oggi i robot mobili utilizzano sensori e software per il controllo e la percezione dell'ambiente circostante. I dati provengono da laser scanner integrati, fotocamere 3D, accelerometri, giroscopi, motor encoder e altro ancora. I robot sono in grado di navigare dinamicamente utilizzando i percorsi più efficienti, hanno consapevolezza ambientale in modo da poter evitare ostacoli o persone sul loro percorso e possono recarsi nella stazione di ricarica automaticamente quando necessario. Senza Intelligenza Artificiale, tuttavia, i robot reagiscono allo stesso modo a tutti gli ostacoli, rallentando e tentando di navigare intorno alla persona o all'oggetto, se possibile.

L'intelligenza artificiale comprende diversi rami: per i robot collaborativi si concentra principalmente sull'apprendimento automatico (ML) e sui sistemi di visione. Ad esempio, le telecamere statiche posizionate strategicamente consentono ai robot di prevedere gli ostacoli sui loro percorsi, in modo che siano in grado di riprogrammare in anticipo la missione per una navigazione ottimizzata.

Le capacità innovative di intelligenza artificiale mantengono i protocolli di sicurezza dei robot e promuovono una maggiore efficienza nella pianificazione del percorso e nell'interazione ambientale.

L'intelligenza artificiale è implementata in algoritmi di apprendimento avanzati nel software del robot e in telecamere remote collegate che possono essere montate in aree ad alto traffico o nei percorsi di carrelli elevatori o altri veicoli automatizzati. Le telecamere sono dotate di computer integrati in grado di elaborare dati resi anonimi ed eseguire sofisticati software di analisi per identificare se gli oggetti nell'area sono esseri umani, ostacoli fissi o altri tipi di dispositivi mobili, come gli AGV. Le telecamere, quindi, trasmettono queste informazioni al robot, estendendo la comprensione dell'ambiente circostante in modo che possa adattare il suo comportamento in modo appropriato, anche prima che entri in un'area.

Con l'IA, i robot possono reagire in modo efficiente e appropriato a diversi tipi di ostacoli per migliorare la navigazione e l'efficienza. Un sistema robotico dotato di IA è in grado di rilevare le aree ad alto traffico prima che arrivi e può identificare altri veicoli e comportarsi in modo appropriato per ridurre il rischio di collisione. In questo modo, non solo gli AMR migliorano il proprio comportamento con l'IA, ma si adattano anche ai limiti di altri veicoli.

"L'IA è una priorità assoluta per tutti i Paesi e per l'Europa in primis", si legge nel documento che fa da testo base per il PNR 2021-2027. "La capacità di contribuire con posizione dominante nella ricerca sia di base sia applicata è essenziale per il posizionamento strategico dell'Europa a breve, medio e lungo termine, come già ampiamente confermato dai rapporti e dagli investimenti internazionali nel settore".

In particolare, nel 2030 l'adozione dell'IA potrà contribuire al previsto incremento del 14% del Pil mondiale. Si prevede infatti un incremento negli investimenti nella ricerca sull'IA per il periodo 2021-2027, con almeno 7 miliardi di euro dedicati nei programmi Horizon Europe e Digital Europe. Il concetto di intelligenza artificiale è strettamente legato a quello di robotica ed entrambi sono punti cardine del PNR: L'Articolazione dedicata alla "**Robotica per Industria 4.0**", in particolare, ricorda che "i robot sono gli strumenti preferiti nei sistemi di **automazione flessibile**, dove la produzione deve potersi modificare sulla base delle mutevoli esigenze del mercato".

Da cosa deriva il successo della robotica industriale lo si vede nel PNR, che ricorda diversi motivi, come la personalizzazione sempre più spinta dei prodotti, che richiede piccoli lotti con elevati mix produttivi (a cui i robot industriali si prestano particolarmente bene); oppure l'aumento della competitività nel mercato globale, che richiede incrementi di produttività, eliminazione e riduzione dei difetti, soluzioni produttive sostenibili. Ma non solo: si ricorda anche che "i robot oggi non sono più appannaggio della sola grande industria ma sono utilizzati sempre più anche da aziende medio-piccole (PMI), in particolare nella versione dei robot collaborativi, in grado di operare a stretto contatto con l'uomo".

1.2.1. PNR (Piano Nazionale della Ricerca)

A differenza di altri settori, nella Robotica, l'Italia parte tra i migliori rispetto ai partner europei. Al contempo, nel contesto mondiale l'Europa parte almeno alla pari con i concorrenti americani e asiatici. L'Europa ha circa un terzo del mercato mondiale della robotica industriale, mentre nel mercato dei robot di servizio i produttori europei producono il 63% dei robot non militari. Investire in questo settore significa per l'Italia e l'Europa creare le basi per un primato tecnologico in un campo che ha enorme potenziale non solo economico, ma più generalmente sociale.

La tecnologia robotica è, infatti, destinata a influenzare ogni aspetto del lavoro e della vita delle persone, offrendo la possibilità di trasformarli positivamente, aumentando i livelli di efficienza e di sicurezza e fornendo nuovi servizi e risposte alle esigenze di una popolazione che cresce in età media. La robotica è destinata a diventare la tecnologia di guida alla base di un'intera nuova generazione di dispositivi autonomi che, attraverso le loro capacità di apprendimento, possano interagire con il mondo che li circonda e, quindi, forniscano l'anello mancante tra il mondo digitale e quello fisico in cui viviamo.

In questo senso si spiega il neologismo Tecnologie dell'Interazione (InterAction Technologies, IAT) introdotto per spiegare come robotica e macchine intelligenti rappresentino il futuro di quelle Tecnologie dell'Informazione (ICT) che oggi si fermano sul piano della raccolta ed elaborazione di dati, ma che dispiegheranno tutte le loro potenzialità solo quando potranno essere usate per intervenire fisicamente sull'ambiente e sulle persone, per modificare il primo e assistere le seconde con la capacità di percepire e agire nel mondo fisico in tempo reale.

La robotica è già oggi il motore della competitività e della flessibilità nelle industrie manifatturiere su larga scala. Senza la robotica, molte delle industrie manifatturiere di successo non sarebbero in grado di competere dalle loro basi operative in Italia e in Europa, né tantomeno saranno in grado di attrarre nuovamente quelle produzioni che sono state delocalizzate. Mentre nel settore manifatturiero di larga scala la robotica è già strumento fondamentale di produttività, è proprio grazie allo sviluppo delle nuove tecnologie della robotica collaborativa (ossia della robotica che consente l'interazione fisica con l'uomo) che l'innovazione sta diventando sempre più rilevante anche per le industrie più piccole, che sono fondamentali per la capacità produttiva e occupazionale dell'Italia.

La robotica di servizio mostrerà effetti ancora più dirompenti sulla competitività delle industrie non manifatturiere come l'agricoltura, i trasporti, l'assistenza sanitaria, la sicurezza e i pubblici servizi o *utility*. La crescita in queste aree nel prossimo decennio sarà esplosiva. Da quella che è attualmente una base relativamente limitata di partenza, le previsioni indicano che i robot di servizio utilizzati nelle aree non manifatturiere potranno presto diventare il settore della robotica a maggior valore aggiunto.

Al di là dell'impatto sempre crescente nella nostra società, la robotica ha caratteristiche spiccate di ricerca scientifica fondamentale, ponendosi naturalmente come fulcro multidisciplinare delle Tecnologie dell'Interazione. Le questioni fondamentali della robotica moderna coinvolgono le scienze della mente e la fisiologia, le scienze della salute e della riabilitazione, le scienze dei materiali e dell'energia, la matematica e la scienza dell'apprendimento artificiale. Si è già detto della forte posizione internazionale dell'Italia e dell'Europa nella ricerca scientifica sulla robotica. Al di là dei dati bibliometrici sopra riportati, sono europee e italiane alcune delle innovazioni che hanno trasformato la robotica mondiale.

Tra queste, la robotica collaborativa che ha affiancato e integrato il paradigma della robotica industriale e ha permesso di far lavorare persone e robot in prossimità, aumentando la produttività e l'ergonomia del lavoro mantenendo al contempo un'elevata sicurezza. In altri campi, ricercatori italiani sono stati pionieri della nascita di nuove aree, cui oggi sono dedicati intere conferenze e riviste internazionali, come la biorobotica, le interfacce aptiche, la roboetica e la robotica *soft*. Sono stati italiani due presidenti e quattro vicepresidenti della società mondiale IEEE Robotics and Automation, ad esempio Bruno Siciliano è stato Presidente della RAS (IEE Robotics & Automation Society), nel biennio 2008-2009, e nel 2010 ha già ricevuto l'IEEE RAS Distinguished Service Award. Oppure Alessandro De Luca, Professore ordinario presso La Sapienza, che è stato Editor-in-Chief (2003-04) delle IEEE Transactions on Robotics and Automation e delle IEEE Transactions on Robotics (2004-08).

Al di là delle problematiche scientifiche e tecniche, lo sviluppo e l'uso sempre più diffuso della robotica solleva importanti questioni etiche, sociali e legali. L'Europa è riuscita a guidare il dibattito mondiale in questo settore, ed è importante che le indagini etiche, legali, sociali ed economiche (ELSE) siano in prima linea nelle considerazioni relative allo spiegamento e all'uso della robotica nella società italiana ed europea. La robotica italiana è stata la culla delle discussioni su queste implicazioni partendo dai primi incontri sulla Roboetica del 2004. Sin da allora esiste una profonda consapevolezza che le capacità dei robot autonomi avranno un forte impatto sulla società e che il loro sviluppo debba essere guidato da chiari principi etici per essere inclusivo e non creare nuove divisioni sociali. La partecipazione di filosofi, giuristi, sociologi ed economisti alla comunità robotica è stata determinante per creare questa consapevolezza, e sarà molto importante mantenerla e rafforzarla per affrontare i nuovi problemi che la robotica crea o potrebbe creare.

Le osservazioni fatte evidenziano un aspetto particolarmente degno di nota della robotica, ovvero la sua intrinseca natura multidisciplinare, che vede collaborare e incontrarsi ricercatori provenienti dall'ingegneria dell'informazione, industriale e civile con informatici, matematici e fisici, medici, fisiologi, biologi e psicologi, filosofi, economisti e giuristi, in un vero e proprio *melting pot* scientifico e culturale che ne fa l'habitat ideale per lo sviluppo sistemico della prossima rivoluzione tecnologica. La comunità robotica nazionale, costituita da ricercatori e professionisti di accademie, centri di ricerca, aziende, start-up, che provengono da tutte queste diverse culture ma concorrono in una unica visione di sistema delle Tecnologie dell'Interazione, è

riunita e organizzata nell'Istituto di Robotica e Macchine Intelligenti. L'innata vocazione della comunità robotica a superare settori e steccati disciplinari, che sovente hanno ostacolato lo sviluppo della ricerca nell'accademia italiana, deve essere ulteriormente incoraggiata e favorita nel futuro quadro della ricerca nazionale.

1.2.2. Obiettivi entro il 2027

L'uso combinato di tecnologie che spaziano dalla robotica collaborativa all'intelligenza artificiale, dalla robotica mobile alla realtà virtuale, dal 5G agli avatar, può permettere di mantenere lo stretto rapporto del nostro tessuto sociale produttivo con gli strumenti e gli ambienti della produzione, ma anche con le infrastrutture per la mobilità e le comunicazioni, mantenere l'operatività delle strutture sanitarie e assistenziali, garantire la sicurezza e ridurre i rischi naturali connessi con le infrastrutture critiche, migliorare l'inclusività delle postazioni lavorative e la qualità della vita dei lavoratori, e ridurre le emissioni inquinanti tramite la riduzione del pendolarismo grazie all'estensione dello *smart working* alle professioni che coinvolgono lavoro fisico.

Le **tecnologie abilitanti** cui la ricerca in robotica deve focalizzarsi includono:

- Intuitività ed usabilità delle interfacce uomo robot;
- Integrazione di percezione e intelligenza naturale e artificiale;
- Capacità di interazione fisica e sociale dei robot con l'ambiente e con le persone circostanti;
- Realizzazione di strumenti meccatronici fisici per la manipolazione destra e la locomozione in ambienti aerei, acquatici, e su suoli di natura diversa e accidentata, e in generale per il miglioramento delle prestazioni dei robot;
- Autonomia energetica e resilienza alle imperfette comunicazioni.

Lo sviluppo di queste tecnologie andrà a **rafforzare/semplificare il lavoro delle persone** (ambienti ostili, ambiti industriali e civili, medicina, agro-alimentare) e/o **salvare/aumentare dei posti di lavoro** che andrebbero persi (artigiani, nuove aziende produttive, con robot e macchine intelligenti in Italia invece che all'estero). L'impatto sul mondo del lavoro sarà immediato e positivo, non solo perché le grandi innovazioni tecnologiche hanno sempre aumentato i posti di lavoro, ma in virtù del fatto che la Robotica permette di aumentare la produttività e rendere economiche sul suolo nazionale attività che rimarrebbero altrimenti delocalizzate.

L'analisi critica del contesto di riferimento per tutta la filiera, dalla ricerca fondamentale all'applicazione, porta all'individuazione di cinque aree prioritarie o **Articolazioni (ART)**:

- ART1. Robotica in ambiente ostile
- ART2. Robotica per Industria 4.0

- ART3. Robotica per l'ispezione e la manutenzione di infrastrutture
- ART4. Robotica per il settore agro-alimentare
- ART5. Robotica per la salute

1.2.3. Robotica per Industria 4.0

La robotica industriale è una tecnologia collaudata e presente nel settore manifatturiero da decine di anni. L'interesse per questa tecnologia non accenna però a diminuire, prova ne siano i dati di vendita a livello globale, in continua crescita (anche a doppia cifra) negli ultimi anni. In particolare, i dati di vendita di robot industriali in Italia sono ottimi, almeno fino al 2018, quando si sono registrate circa 9.800 unità vendute, con una crescita del 27% rispetto all'anno precedente (fonte SIRI). Il mercato italiano della robotica è il settimo a livello mondiale e il secondo in Europa, dietro alla Germania. La densità di robot in Italia, calcolata come il numero di robot installati ogni 10.000 addetti, ha raggiunto il valore di 200, contro una media mondiale di 99.

I *driver* per l'adozione sempre più pervasiva della tecnologia robotica in industria sono molteplici e sono riconducibili alla personalizzazione sempre più spinta dei prodotti, caratterizzata da piccoli lotti con elevati mix produttivi; all'aumento della competitività nel mercato globale, che richiede incrementi di produttività, eliminazione e riduzione dei difetti e soluzioni produttive sostenibili; alla progressiva penetrazione della robotica tra le piccole e medie imprese, in particolare nella versione collaborativa.

L'impulso alla digitalizzazione delle fabbriche dovuto alla introduzione e diffusione dei paradigmi produttivi dell'Industria 4.0 ha poi dato rinnovata importanza all'utilizzo dei robot, quali strumenti interconnessi, altamente digitalizzati, dotati di gemello digitale, in grado di migliorare le proprie prestazioni e auto-apprendere sulla base dell'analisi dei dati raccolti nei sistemi di produzione. Da questo punto di vista, l'intelligenza artificiale dovrà sempre più coniugarsi alla robotica industriale, per rendere i robot degli agenti consapevoli e in grado di apprendere dal proprio operato.

La robotica collaborativa, in cui uomo e robot condividono lo stesso spazio di lavoro in sicurezza, compartecipando al processo produttivo, oggi costituisce ancora solo una nicchia, pari a qualche punto percentuale del mercato globale della robotica industriale. A detta di tutti gli analisti, la robotica collaborativa è, tuttavia, destinata a una forte crescita nei prossimi anni, con nuovi soggetti che si affacciano sul mercato e i grandi player che si organizzano per competere anche su questo fronte. L'industria deve essere guidata dalla ricerca nel processo di ristrutturazione delle linee di produzione da puramente manuali o puramente automatizzate a linee di produzione miste. Nel lavoro preparatorio per le future iniziative europee, lo European Economic and Social Committee (EESC) ha già iniziato a prospettare la prossima transizione a Industry 5.0 come caratterizzata dal passaggio dalla coesistenza alla piena cooperazione, fisica e sociale, tra macchine e persone.

L’utilizzo della robotica collaborativa darà anche nuova linfa all'artigianato, contrastando il fenomeno dell’invecchiamento di professionalità specializzate, e favorirà il *reshoring* di produzioni delocalizzate all'estero negli anni passati, in particolare nei settori di punta della nostra economia, quali la moda, dove la parziale robotizzazione delle operazioni potrà rendere conveniente riportare all’interno dei confini nazionali le linee di produzione.

Come già evidenziato nell’articolazione sulla Robotica in ambienti ostili, una delle emergenze sociali in industria è costituita dalle malattie associate alla sollecitazione dell’apparato muscolo scheletrico. La robotica collaborativa fornisce una naturale risposta a questa emergenza, dal momento che il cobot può interagire direttamente con l’uomo, per esempio sgravandolo dal compito di sollevare o reggere carichi rilevanti, migliorando l’ergonomia della stazione di lavoro. Accanto ai tradizionali manipolatori industriali, i robot mobili (AGV) rivestono importanza crescente nella logistica industriale. Nel 2018 sono stati installati a livello globale 111.000 unità (con una crescita del 60% rispetto all’anno precedente), la maggior parte dei quali nella logistica, nei magazzini o negli ospedali, ma con circa 8.000 unità direttamente impiegate nel settore manifatturiero. Le previsioni di crescita del mercato sono molto buone anche su questo fronte.

Obiettivi:

1. La progressiva penetrazione della robotica in comparti industriali diversi da quelli tradizionalmente interessati alla robotizzazione comporterà un’intensa attività di ricerca e trasferimento tecnologico nello studio di soluzioni per l’esecuzione robotizzata di processi altrimenti eseguiti manualmente o con macchinari dedicati. Di particolare rilievo sono le applicazioni della robotica nell’industria dei metalli, nell’industria della plastica, nell’industria farmaceutica e in quella aerospaziale.

2. Nel paradigma della smart factory, la robotica potrà anche ibridarsi con altre tecnologie produttive, in particolare l’additive manufacturing, dando luogo a scenari di crescente interesse dove il robot manipolatore è equipaggiato con uno strumento di deposizione di materiale oppure è integrato a stampanti 3D per migliorarne la produttività.

3. In quanto elemento centrale nella nuova fabbrica intelligente, il robot diventerà a tutti gli effetti un sistema cyber-fisico indissolubilmente legato alla sua rappresentazione digitale. Questa sarà utilizzata per manutenzione predittiva, monitoraggio della produzione e ottimizzazione delle prestazioni: la ricerca si potrà indirizzare verso gli algoritmi più efficaci per lo sviluppo di queste nuove funzionalità.

4. La capacità del robot industriale di interagire con ambienti destrutturati ha ancora ampi margini di miglioramento, così come la capacità di apprendere la corretta esecuzione di un compito. Le tecniche di machine learning e intelligenza artificiale dovranno sempre più permearsi con la robotica, per consentire l’evoluzione dal robot agente autonomo pre-programmato al robot agente intelligente.

5. La crescita della robotica collaborativa deve essere accompagnata da attività di ricerca e trasferimento tecnologico intese a dare compimento alle esigenze di operare in sicurezza negli ambienti misti uomo– robot, con lo sviluppo di nuovi sensori per la percezione affidabile della presenza umana e di metodologie per la valutazione del rischio.

6. La ricerca dovrà anche fornire un quadro di sviluppo coerente alle applicazioni di robotica collaborativa, oggi ancora episodiche. Da questo punto di vista, gli aspetti di ergonomia e di ausilio all'operatore nella limitazione dell'esposizione al rischio sull'apparato muscolo-scheletrico sono ancora solo parzialmente esplorati dalla ricerca.

7. L'intelligenza artificiale ha anche applicazione rilevante nella robotica collaborativa, laddove il robot accoppiato a dispositivi di visione cognitiva potrà essere in grado di comprendere il comportamento del compagno di lavoro umano, adattandovisi al fine di migliorare la qualità della collaborazione.

8. Per quanto riguarda la robotica mobile, la ricerca si indirizzerà verosimilmente verso la gestione di flotte di AGV, l'integrazione spinta e intelligente con i MES aziendali e lo sviluppo di AGV leggeri per la logistica dell'ultimo miglio.

9. La robotica manipolativa e la robotica mobile si possono poi combinare nella tecnologia della manipolazione mobile, che consente di ampliare arbitrariamente gli spazi di lavoro del robot manipolatore, situazione di particolare interesse in contesti applicativi quali l'aerospazio in cui le superfici su cui il robot opera assumono dimensioni considerevoli.

10. Tanto per la robotica manipolativa, quanto per la robotica mobile, gli aspetti di natura meccatronica costituiranno temi di ricerca di rilievo, in particolare per quanto riguarda lo sviluppo di strumenti per la manipolazione con destrezza.

11. La robotica può inoltre fornire tecniche avanzate di manipolazione per la sintesi, l'accoppiamento, la trasformazione e la caratterizzazione di materiali. Lo sviluppo rapido di nuovi polimeri a basso impatto ambientale o provenienti da fonti rinnovabili e nell'ottica dell'economia circolare è di grande interesse per ridurre l'impatto sull'ambiente sempre più compromesso dall'uso di plastiche di origini fossili e/o non biodegradabili. L'introduzione di tecniche di caratterizzazione automatiche può favorire questa accelerazione nel quadro della cosiddetta high-throughput experimentation, ovvero la sintesi e la caratterizzazione di microcampioni di nuovi materiali in parallelo in sistemi interamente automatizzati.

1.3. Gli AMR e le applicazioni 4.0

La ripresa delle attività produttive industriali sta accelerando grazie alla crescente automazione dei processi. Questo è un trend prevedibile, logica conseguenza dei processi di digitalizzazione spinti dall'introduzione del concetto e dei fondi per l'Industria 4.0. Sono numerosi gli ambiti che stanno vivendo questa grande

trasformazione: il più significativo è senz'altro quello della logistica e intralogistica dell'industria. Ciò è dovuto ai numerosi sforzi che le aziende hanno fatto e dovranno ancora compiere per far convergere i due universi IT e OT allo scopo di generare valore attraverso la riqualificazione del personale, l'ottimizzazione dei tempi operativi, la sostenibilità e, non meno importante, la razionalizzazione degli spazi all'interno dei magazzini e dei siti produttivi.

La convergenza IT e OT rappresenta per il settore della robotica un fondamentale passo avanti poiché, attraverso il tracking accurato delle operazioni automatizzate, è possibile ricavare dati che possono facilitare notevolmente le decisioni strategiche, grazie alla disponibilità di un numero molto più ampio di informazioni e nuovi parametri. Va anche considerato che lo scenario industriale degli ultimi anni ha già iniziato ad adoperare approcci molto più dinamici rispetto al passato e l'adozione di sistemi robotizzati ha accelerato ulteriormente questa tendenza.

Ciò che oggigiorno le aziende ricercano è un livello sempre crescente di autonomia e affidabilità a cui potersi appoggiare completamente. I robot mobili autonomi hanno già dato piena dimostrazione di poter assolvere tutti i compiti ripetitivi e noiosi, riuscendo allo stesso tempo a innalzare il livello di sicurezza operativa all'interno delle aree. Tuttavia, è ancora lunga la strada da percorrere per migliorare la tecnologia applicata agli AMR (Autonomous Mobile Robots) in modo da poter loro conferire la massima funzionalità in termini di poteri decisionali riguardo agli itinerari da percorrere, la possibilità di riuscire a comandare dispositivi a distanza e molto altro. Tutto questo rappresenta una sfida per tutti i produttori di robot mobili, noi di Mobile Industrial Robots compresi, poiché occorrerà lavorare molto sia sull'hardware che sul software. Senz'altro nei prossimi anni vedremo AMR in grado di operare indifferentemente all'interno e all'esterno nelle aree logistiche, e per questo continuerà la ricerca e sperimentazione di nuove tipologie di sensori, radar e scanner nonché interventi sulla meccanica vera e propria degli AMR.

Le ragioni della crescente adozione di AMR non sono imputabili unicamente al successo dell'applicazione combinata alle più recenti tecnologie. Bisogna considerare che per molti anni il concetto di robotica è sempre stato interpretato come l'affidamento di numerose mansioni nell'ambito produttivo, prima assolte dall'uomo, con un approccio "isolato". Le profonde trasformazioni in campo produttivo e l'esigenza di avere processi sempre più lean e flessibili ha ridisegnato i requisiti della robotica moderna. Infatti, negli ultimi anni il concetto base della robotica industriale è stato reinterpretato attraverso un preciso pensiero di aggregazione: uomo e robot insieme e non più separati; non a caso il termine (cobot) "collaborativo" è oramai entrato nel nostro vocabolario. Collaborativo significa l'esigenza di consolidare il rapporto di coesione uomo-macchina, fattore che ha assunto in breve tempo peculiarità fondamentali. Con questa nuova visione, il concetto di robot mobili è stato profondamente trasformato dalle tecnologie di ultima generazione: sistemi di navigazione e di visione talmente innovativi che hanno permesso di evolvere il robot facendolo diventare

completamente autonomi e, conseguentemente, di inserirsi agevolmente nel lavoro quotidiano dei colleghi umani, svolgendo compiti noiosi, ripetitivi ma anche pericolosi.

Ad oggi gli AMR assicurano livelli di sicurezza, affidabilità, precisione e flessibilità difficili da immaginare solamente dieci anni fa. Come detto i concetti di coesione, sicurezza e flessibilità hanno trovato nella tecnologia lo strumento ideale per rendere concreto il nuovo concetto di robotica industriale, in tutte le sue sfaccettature. Ciò che è logico aspettarsi per il futuro sarà di avere robot sempre più perfezionati dal punto di vista delle prestazioni e capacità.

La continua evoluzione dei sistemi di visione, di sensoristica e di rilevamento ha ancora un ampio margine di sviluppo e non bisogna dimenticare i sempre più sofisticati algoritmi dell'AI. Questi aspetti possono essere tradotti in un AMR di nuova generazione che non solo sarà in grado di assolvere i compiti assegnati ma, ad esempio, potrebbe essere di aiuto ai colleghi umani migliorando il benessere sul posto di lavoro attraverso il monitoraggio del loro stato di salute così come il controllo degli ambienti circostanti per la prevenzione dei rischi.

Entriamo dunque nel vivo, partendo dalla spiegazione della sensoristica e di tutti i sistemi di guida, nel capitolo successivo.

CAPITOLO 2- AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS (AMR)

2.1. Cosa sono i robot mobili

Come già introdotto nel capitolo uno, fondamentale è l'evoluzione che ha portato allo sviluppo del robot mobile. Aggiungendo un braccio robotico ad un AGV, il sistema diventa un vero e proprio robot mobile, in grado di aggiungere al trasporto operazioni di carico/scarico ed effettuare vere e proprie operazioni. I robot mobili sono in grado di muoversi in sicurezza attorno a persone o ostacoli e la navigazione è autonoma, senza la necessità di guide. Un robot mobile è un sistema che opera in un ambiente parzialmente sconosciuto; ciò significa che deve essere in grado di navigare senza interruzioni e deve essere capace di evitare qualsiasi ostacolo posto entro il confine del movimento. I robot autonomi presentano caratteristiche ben precise, quali:

- capacità di apprendimento, attraverso l'esperienza e l'interazione (AI);
- la possibilità di acquisire autonomia tramite le capacità sensoriali;
- lo scambio di dati con l'ambiente in cui si trovano a operare (interconnettività);
- La capacità di saper analizzare i dati raccolti.

I robot autonomi sono realizzati attorno a un nucleo centrale costituito da una serie di processori, che eseguono degli algoritmi di intelligenza artificiale e operano effettuando delle scelte, servendosi delle reti neurali. Vi è poi un largo utilizzo di sensori, per acquisire le più svariate informazioni dall'esterno. Autonomous Mobile Robot (AMR), sta ad indicare un robot in grado di muoversi senza l'intervento umano ed è progettato in modo da seguire un percorso predefinito, sia interno, che esterno; inoltre, affinché un robot mobile autonomo possa svolgere il suo compito, deve disporre di una gamma di sensori ambientali. Questi sensori possono essere collocati direttamente sul robot e il numero di sensori posizionati su di esso, consente di eseguire compiti complessi come la stima e la localizzazione. In particolare, sono tre i fattori alla base degli Autonomous Mobile Robots, ovvero: Locomozione, percezione e navigazione.

- Locomozione: Il sistema di locomozione è un aspetto importante della progettazione del robot mobile, che non si basa solo sul mezzo in cui il robot si muove, ma anche su altri fattori, come, manovrabilità, controllabilità, condizioni del terreno, efficienza, etc. La progettazione del robot mobile dipende dal servizio a cui esso deve adempiere; pertanto, un AMR può essere progettato per camminare, correre, saltare, volare, ecc. I robot mobili particolarmente autonomi sono molto richiesti, in quanto riescono a svolgere compiti che possono sembrare difficili per l'uomo. I robot mobili che vengono progettati possono presentare ruote, gambe, piedi o ibridi. La ruota sicuramente rappresenta il meccanismo di locomozione più famoso nella robotica mobile e nei veicoli in genere. I vantaggi della ruota sono l'efficienza e la semplicità. L'uso delle ruote è più facile ed economico da costruire, progettare e programmare rispetto alle altre controparti. Il controllo è meno complesso e

provocano un'usura minima sulla superficie su cui si muovono. Un altro vantaggio è che non hanno problemi con il bilanciamento a causa del costante contatto con le loro aree di mobilità. Il difetto delle ruote è che non sono adatte a superare ostacoli, come terreni sassosi o superfici irregolari; pertanto, per progettare e sviluppare il sistema di locomozione, è necessario identificare il tipo di terreno adatto per il robot mobile;

- Percezione: è molto importante per un robot mobile autonomo acquisire informazioni dal suo ambiente, percepire oggetti intorno a sé o la sua posizione relativa. La percezione è un aspetto fondamentale nello studio dei robot mobili. Se un robot mobile non è in grado di osservare il suo ambiente in modo corretto ed efficiente, per eseguire attività come la stima accurata della posizione di un oggetto, potrebbe essere un problema. Per raggiungere questo obiettivo, le informazioni vengono percepite mediante l'uso di sensori e altri dispositivi correlati. I sensori consentono di eseguire autonomamente la localizzazione dei robot e sono utilizzati anche per la raccolta di dati, l'identificazione di oggetti, la mappatura e la rappresentazione;
- Navigazione: La navigazione è un aspetto fondamentale nella robotica e in altre importanti tecnologie. Affinché il robot mobile possa navigare autonomamente, esso deve sapere dove si trova attualmente, dove si trova la destinazione e come può raggiungerla. L'obiettivo è che il robot navighi da una destinazione all'altra in un ambiente riconosciuto o non controllato. Il più delle volte, il robot mobile non può eseguire il percorso diretto, dal punto di partenza al punto finale, il che significa che le tecniche di pianificazione del movimento devono essere incorporate. Ciò vuol dire che il robot deve dipendere da altri aspetti, come la percezione (dati preziosi acquisiti dal robot mobile attraverso l'uso di sensori), la localizzazione (posizione e configurazione da determinare dal robot), la cognizione (decisione presa dal robot mobile su come raggiungere i suoi obiettivi) e il controllo del movimento (il robot deve stimare le sue forze in ingresso sugli attuatori per realizzare la traiettoria prevista).

2.1.1. Principali differenze tra AGV e AMR

I moderni AMR (Autonomous Mobile Robot - Robot Mobili Autonomi) sono essenzialmente la versione ‘smart’ degli originali AGV, un po’ come i moderni smartphone sono i nipoti ‘intelligenti’ dei primi telefoni cellulari. La differenza sostanziale è nel grado di autonomia, che porta con sé differenze fondamentali in termini di flessibilità.

Gli AGV sono legati a forme di guida esterna, che si realizzano in termini di percorsi pianificati a priori dall’operatore umano e codificati all’interno dell’impianto di produzione mediante la predisposizione, per esempio, di apposite guide a filo o bande magnetiche posizionate sul pavimento, il cui campo magnetico indotto dal passaggio di corrente è letto da solenoidi a bordo dell’AGV, oppure da bande colorate rilevate mediante sensori ottici. Nei modelli più avanzati viene caricata sull’AGV la mappa dell’impianto, poi si usa la triangolazione, collocando in posizioni note nell’impianto dei catarifrangenti in grado di riflettere la luce

lungo la stessa direzione da cui arriva, e montando sull'AGV una testa rotante con sensori/emettitori laser mediante la quale l'AGV scandisce lo spazio che lo circonda. Queste tre misure simultanee consentono all'AGV di stabilire esattamente qual è la sua posizione sulla mappa. In tutti i casi, il percorso e le fermate effettuate dall'AGV sono predeterminate dalle guide magnetiche/ottiche, o dal percorso sulla mappa scelto dall'operatore, e ogni cambiamento di percorso richiede un lavoro non banale in termini di tempo e operazioni da svolgere. Le uniche variazioni sul percorso assegnato possono essere motivate dal rilevamento di un ostacolo: in tal caso si attiva un meccanismo di sicurezza e l'AGV si blocca fintantoché l'ostacolo non viene rimosso.

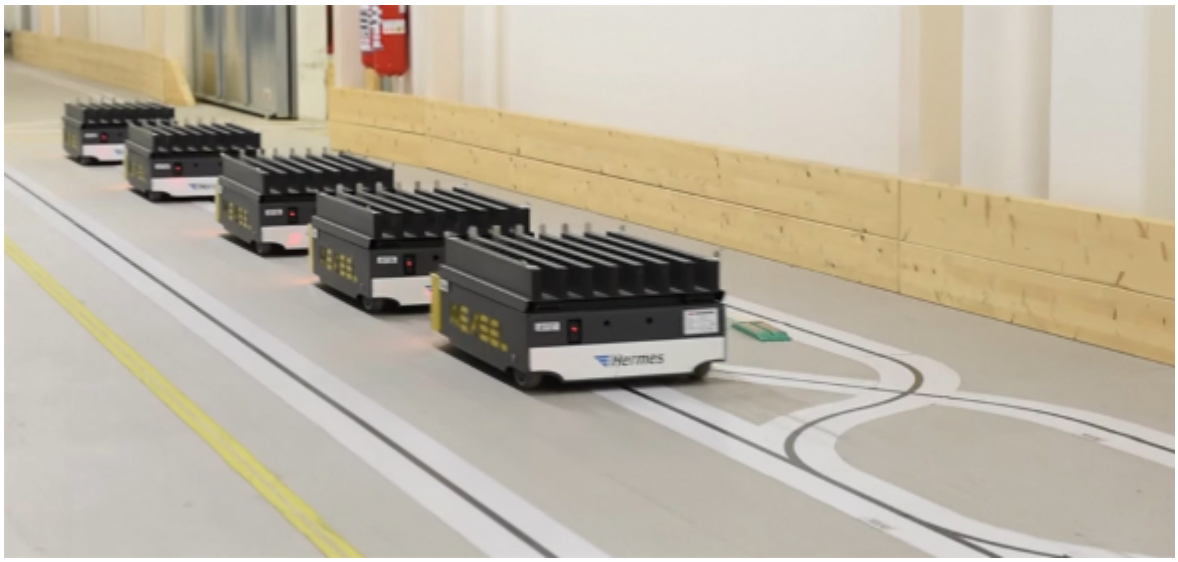

Figura 1. Automated guided vehicles

Al contrario, il punto di forza degli AMR consiste nell'utilizzare una forma di guida interna che li rende più facilmente adattabili ad ambienti dinamici e a un utilizzo flessibile. Il primo strumento adottato per ottenere tali caratteristiche è l'uso di algoritmi intelligenti di elaborazione del percorso (path-planning), simili a quelli utilizzati nei navigatori satellitari delle automobili. Se nel caso degli AGV, dunque, l'operatore deve specificare l'intero percorso fisicamente sull'impianto, oppure sulla mappa caricata in memoria, nel caso dell'AMR basta indicare i punti che dovranno essere fisicamente visitati con una fermata dall'AMR. Sarà poi l'AMR stesso a pianificare il proprio percorso in maniera ottimale sulla base della mappa memorizzata che potrebbe essere stata ricavata da lui direttamente. Un enorme vantaggio che deriva da tale approccio consiste nel modo in cui l'AMR gestisce la presenza di ostacoli sul proprio cammino: mentre l'AGV è costretto a fermarsi aspettando la rimozione dell'ostacolo da parte di un agente esterno, l'AMR può procedere autonomamente a un ricalcolo del percorso, in modo da evitare l'ostacolo e portare avanti il proprio compito senza ulteriori indugi. L'ostacolo in questione può essere un'altra macchina (a guida autonoma o no), oppure un operatore umano, impegnato nello svolgimento di mansioni che implicano l'occupazione del percorso pianificato dal robot. La capacità di gestire tali situazioni qualifica l'AMR come robot collaborativo ed elimina la necessità di

separare rigidamente gli spazi operativi dell'uomo e della macchina, come invece avveniva per il Guide-O-Matic, con un conseguente migliore utilizzo degli spazi aziendali.

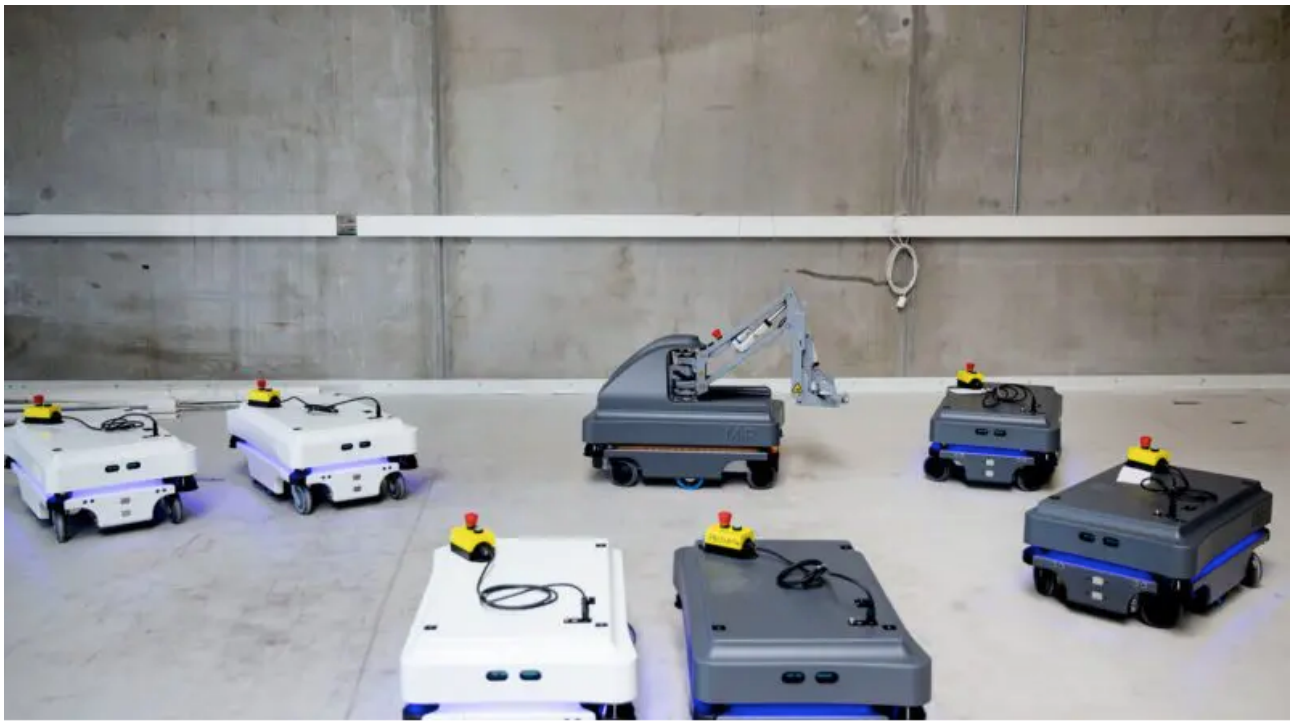

Figura 2. Autonomous mobile robots

A tal proposito, possiamo quindi assodare che la principale differenza tra gli AGV e gli AMR, sta nel sistema di navigazione, gli AMR erano usati soprattutto per il trasporto di carichi leggeri (come, ad esempio, scatole) contrariamente agli AGV, destinati al trasporto automatico di pallet. Con il passare del tempo, gli AMR si sono adeguati e modernizzati e, attualmente, i grandi fabbricanti offrono veicoli AMR preparati per trasportare pallet di peso elevato. Tuttavia, gli AMR non rappresentano una innovazione solo dal punto di vista logistico, ma possono essere inseriti in diversi contesti, vediamo alcuni campi di applicazione.

2.1.2. Campi di applicazione robot mobili

- Una categoria in forte sviluppo è relativa alla logistica. I magazzini completamente automatizzati e la movimentazione automatica di pezzi sono una realtà da diverso tempo, ma tipicamente richiedono un attrezzaggio più o meno impegnativo in termini di costo e di realizzazione. Robot autonomi possono svolgere gli stessi compiti affrontando anche situazioni impreviste, quali la presenza di persone nel raggio d'azione del robot, e permettendo anche una allocazione dei materiali dinamica, che segua logiche di ottimizzazione e opportunità non legate ad una strutturazione prefissata del magazzino. Inoltre, per le operazioni di scarico e carico del materiale è necessario interagire con ambienti non strutturati, ed un robot autonomo può farsi carico di queste operazioni, ad esempio scaricando un container, o caricandolo in modo ottimizzato. In maniera analoga, si possono avere robot che si occupano autonomamente di caricare a bordo parti (ad esempio parti di oggetti da

montare) li trasportano alla stazione di montaggio e alimentano una linea di produzione. In questo caso, può esser richiesta una gestione più avanzata di dati sensoriali (tipicamente immagini) per il riconoscimento e la presa delle parti, e per il rilascio in opportune zone di carico.

- Un altro settore in forte espansione riguarda la sorveglianza. Impianti fissi con telecamere e sistemi di rilevazione possono essere in parte sostituiti o comunque affiancati da robot mobili in grado di effettuare autonomamente delle ronde e riportare situazioni sospette, identificate tramite analisi automatica dei dati sensoriali, a operatori che possono intervenire direttamente o prendere il controllo del robot per verificare la reale pericolosità della situazione o addirittura effettuare l'intervento. La sorveglianza può essere orientata ad intrusioni, o anche al monitoraggio di incendi o perdite di gas o liquidi o emissioni elettromagnetiche e radioattive, e la presenza di un robot al posto di un operatore umano permette di salvaguardare lo stato di salute di quest'ultimo che può operare remotamente. In modo del tutto analogo, abbiamo robot di ispezione, che possono effettuare ispezioni accurate di zone pericolose o disagevoli, ad esempio condotti di scarico e strutture fatiscenti, e fornire dati utili a operatori remoti. In questo caso, l'autonomia del robot e la sua possibilità di auto-localizzarsi può permettere una scansione completa e accurata di tutta la parte di impianto o di territorio da ispezionare.
- Un altro settore che si va rapidamente popolando di robot mobili autonomi è quello agricolo, in cui viene lasciato al robot, eventualmente monitorato, il compito di svolgere un lavoro ripetitivo sul campo. In questo caso, spesso si ha a disposizione un segnale GPS che, con opportuni accorgimenti ed elaborazioni, può permettere di giungere a una risoluzione utile per la localizzazione del robot con la necessaria precisione. Sono comunque necessari sensori di distanza a bordo del robot per gestire l'interazione con il mondo circostante. Anche in agricoltura ci si può avvalere di robot per il monitoraggio e l'ispezione, in quest'ultimo caso orientata principalmente allo stato della coltura e all'individuazione di eventuali infestanti.
- Un altro campo di applicazione, fortemente innovativo, ma che sta crescendo sempre di più, è quello sanitario; i robot mobili agiscono all'interno di ospedali e cliniche e si muovono lungo percorsi ben definiti. Vengono utilizzati per una vasta gamma di scopi, quali: disinfezione delle stanze, assistenza nel trasporto dei pazienti o spostamento di macchinari pesanti. Si va verso uno sviluppo sempre maggiore, affinché l'utilizzo di questi robot possa essere sempre più vasto e il loro utilizzo sempre più performante.
- Tra le numerose operazioni che essi possono svolgere, una di recente sviluppo è quella relativa al settore delle pulizie. Migliaia sono oggi i cosiddetti "intelligent cleaners" impiegati a livello globale in negozi al dettaglio e alimentari, centri commerciali, aeroporti, scuole, ospedali e altri luoghi pubblici. Una crescita dovuta ai progressi tecnologici che hanno reso le soluzioni robotiche più efficienti e più facili da usare ed integrare nell'operatività di tutti i giorni. Sulla base di uno studio del 2019 di ABI

Research, infatti, si prevede che i robot mobili autonomi utilizzati per il settore del cleaning saranno la categoria più in rapida crescita nel mercato dei robot mobili tra il 2020 e il 2030.

2.2. Sistemi di guida

Come si è potuto notare dal paragrafo precedente, di notevole importanza sono i sistemi di guida, attraverso i quali i robot possono muoversi. Notevole è l'evoluzione di essi, a partire dagli AGV fino agli AMR. I primi AGV seguivano un filo guida induttivo o una linea ottica visibile, dipinta o realizzata con nastro adesivo sul pavimento. Il filo guida induttivo è ancora il sistema di guida più utilizzato per i veicoli a guida automatica che operano su pavimenti in calcestruzzo, anche per le nuove installazioni. Molte aziende hanno provato ad inventare metodologie alternative al filo guida induttivo. Negli anni sono stati progettati sistemi di guida e navigazione con scanner laser (sicuramente il tipo di navigazione più performante), transponder, giroscopi ad inerzia, ultrasuoni, magneti interrati, sistemi di visione con telecamere, etc. Alcuni dei nuovi tipi di sistemi di guida per carrelli automatici sono chiamati sistemi di navigazione a riconoscimento dei contorni. Mentre i sistemi di guida AGV risultano essere basati prevalentemente sulla navigazione filoguidata, nei moderni AMR si fa affidamento su algoritmi di localizzazione e mappatura. In parole povere, il problema consiste nel porre un robot in un ambiente sconosciuto, con il compito di usare i propri sensori per ricavare una mappa dell'ambiente stesso e capire quale sia la propria posizione al suo interno. Il tutto è complicato dalla presenza di inevitabili incertezze ed errori di misura. In pratica, il robot dovrà esplorare il proprio ambiente, anche sfruttando le informazioni già raccolte, per capire da che parte procedere con l'esplorazione e, allo stesso tempo, organizzare i dati raccolti in una mappa coerente, che consenta l'auto- localizzazione. L'uso di algoritmi di Slam a bordo degli AMR elimina la necessità di elaborare e caricare una mappa dell'ambiente di lavoro nella memoria del robot, al contrario di quanto succede, per esempio, negli AGV che usano la triangolazione laser. Un altro strumento che si va sempre più diffondendo è l'uso combinato di sensori complessi per la visione artificiale e algoritmi di intelligenza artificiale, nonché della connessione in rete di flotte di AMR.

È importante tuttavia effettuare alcune premesse, prima di entrare nel dettaglio.

Nei sistemi di guida ci sono due componenti fondamentali che determinano il corretto funzionamento e queste componenti sono: **odometria** e **sicurezza**.

- ★ L'**odometria** è la tecnica che permette al veicolo di stimare la sua posizione, utilizzando le informazioni provenienti dalle sue ruote e dal suo sterzo. Nei primi sistemi di guida non ha avuto eccessiva rilevanza, diverso è il discorso per i sistemi di guida più moderni; essa, infatti, è sempre più importante con l'aumento della sofisticazione dei sistemi di guida.
- ★ La **sicurezza** diventa un aspetto fondamentale dal momento che l'AGV si muove in ambiente aperto e a tal proposito effettuiamo una distinzione:

- ★ **Bumper**: I primi AGV hanno fatto uso di bumper e/o coste sensibili come strumento di sicurezza; i bumper devono essere abbastanza profondi per permettere l'arresto del veicolo nella loro dimensione
- ★ **Sensori di sicurezza laser**: I cosiddetti "PLS", ad oggi preferiti in quanto è possibile configurare l'area di intervento. Si possono individuare due zone, una di rallentamento e una di arresto di emergenza. Questi permettono una migliore copertura dell'area protetta, anche in presenza di carichi paganti sporgenti dalla sagoma degli AGV.

2.2.1. Guida induttiva

Utilizzata nei primi impianti, oggi quasi scomparsa. L'AGV naviga seguendo l'itinerario definito da un filo interrato percorso da corrente e questo speciale tipo di guida si avvale di un'antenna, montata sotto l'AGV, generalmente davanti alla moto-ruota, che rileva specifiche frequenze generate da un cavo annegato nel pavimento e non visibile. Le frequenze vengono generate da uno o più generatori di frequenza dove ogni frequenza identifica uno specifico percorso e ogni tot metri (di solito ogni due o tre metri) è presente una piastra metallica contenente un TAG RFID, che identifica un punto notevole dell'impianto, atto ad aiutare l'AGV a capire se si trova nel posto corretto al momento giusto.

L'AGV quindi segue la traccia grazie all'antenna e si avvale delle piastre metalliche per capire se sta andando nel verso corretto, non avendo altri sistemi di riferimento.

L'AGV comunica al sistema tre variabili che ne identificano la posizione nel piano cartesiano X Y e un angolo rispetto alla X che indica il senso di marcia. In questo specifico caso le coordinate intermedie tra un punto notevole e l'altro sono calcolate grazie a un algoritmo e non sono rilevate con sensori.

Questo tipo di guida consente un'elettronica di guida molto elementare e una grande sicurezza di navigazione, dal momento che se l'antenna non rileva più il filo si ferma. Ottima la precisione trasversale, ma più carente quella longitudinale. La guida induttiva non necessita di una odometria precisa, ma necessita di interrare il filo e rivela una scarsa flessibilità nella definizione dei percorsi, il che costituisce uno svantaggio.

2.2.2. Guida con nastro ottico o magnetico

Il sistema di guida a magneti, detto anche a guida a spot, viene utilizzato di rado e permette all'AGV di navigare in un layout grazie alla presenza di piccoli magneti cilindrici, generalmente lunghi un paio di centimetri al massimo, annegati nel pavimento e coperti da una speciale resina. L'AGV è dotato di sensori, montati sotto di esso, che rilevano la presenza di questi magneti, disposti secondo una determinata sequenza, in modo tale che l'AGV possa verificare se la direzione che sta seguendo è quella corretta. Possono essere necessari centinaia di magneti per completare un impianto, ma questo sistema di guida è molto utile in ambienti sporchi, molto grandi o molto "simmetrici" in cui non è possibile usare metodi di guida ottica. Tra i suoi vantaggi si ha sicuramente la facilità nell'installare i percorsi e i costi che sia che riguardino

l'installazione, sia che riguardino il materiale, risultano essere contenuti. È la migliore alternativa ai sistemi di guida ottici anche se presenta problematiche relative all'affidabilità dei tempi del nastro e inoltre la manutenzione dell'impianto risulta essere particolarmente impegnativa.

2.2.3. Navigazione Laser

Il raggio di un laser rotante, riflesso da opportuni specchi tipicamente passivi, permette di individuare la posizione e l'orientamento del veicolo per **triangolazione,** generalmente i veicoli che utilizzano questo tipo di navigazione, sono noti come **LGV** (Laser guided Vehicles). La navigazione laser consente di definire e variare i percorsi con grande facilità, anche se essa è impossibilitata ad effettuare percorsi all'aperto e presenta una difficoltà di navigazione nei corridoi dei magazzini. Questo elaborato sistema di guida automatica rappresenta la soluzione ideale per l'ottimizzazione dei trasporti interni in ambiente industriale. Tra le varie versioni di LGV sono presenti veicoli per la movimentazione del pallet e veicoli per la movimentazione di carichi più ingombranti, ad esempio container. Questi veicoli risolvono il problema di opere fisse (binari), e strutture meccaniche accessorie. La massima flessibilità è garantita dal fatto che lo studio ed il dimensionamento dell'impianto, avvengono attraverso un sistema di simulazione attraverso il quale si verificano lay-out, traiettorie, numero di missioni eseguibili e numero di veicoli necessari. L'impianto è completamente monitorato da un sistema di supervisione che riconosce automaticamente i dati inerenti alle statistiche di produzione. In questo modo è possibile ridurre l'intervento umano a minime funzioni di controllo e ottimizzare i processi di produzione. L'utilizzo di LGV comporta quindi una riduzione di costi di installazione e la creazione di un ambiente lavorativo sicuro, strutturato in modo semplice e lineare, con un basso grado di inquinamento acustico. Un esempio di AGV a guida laser è il **NAV3xx** della **SICK**.

Questo dispositivo è dotato di un emettitore rotante di raggi infrarossi che "rimbalzano" su degli speciali riflettori, ritornando alla sorgente che li ha emessi. I riflettori sono generalmente dei cilindri metallici ricoperti di un materiale catarifrangente. Possono anche essere piatti. Vengono montati sulle pareti e sulle strutture del layout in cui l'AGV dovrà muoversi e l'AGV dovrà essere sempre in grado di vederne come minimo tre, per poter effettuare un calcolo di triangolazione della sua posizione nello stabilimento. La sua posizione è composta da tre variabili X, Y e un angolo rispetto alla X che identifica la direzione dell'AGV.

Figura 3. Dispositivo NAV3xx della sick, navigazione laser

2.2.4. Guida inerziale

Ad una odometria particolarmente curata, si è aggiunto un giroscopio in grado di misurare la rotazione del veicolo su un piano; è quindi possibile la navigazione. Per quanto accurata possa essere l'odometria e preciso il giroscopio, il sistema è soggetto a derive e pertanto lungo la traiettoria devono essere installati opportuni magneti per dare riferimenti assoluti in posizione. I sistemi di navigazione inerziale incorporano degli accelerometri lineari ed angolari (per misurare le variazioni di posizione); alcuni includono degli elementi giroscopici (per mantenere un riferimento assoluto angolare). Gli accelerometri angolari misurano la rotazione del velivolo nello spazio. Generalmente, c'è almeno un sensore per ciascuno dei tre assi: asse di beccheggio (alzare/abbassare la prua), asse di imbardata (prua a destra o a sinistra), ed asse di rollio (oscillazione intorno al proprio asse orizzontale). Gli accelerometri lineari misurano il modo in cui il velivolo si muove nello spazio. Poiché esso si può muovere lungo tre assi (su e giù, sinistra e destra, ed avanti e indietro) esiste un accelerometro lineare per ciascuno dei due o tre assi.

I sistemi di guida automatica per carrelli si basano in parte su un sistema di guida inerziale generalmente più semplice che agisce principalmente sui vari organi che trasmettono valori come spazio, angolo di sterzata, velocità ecc. Tali valori sono la base per calcolare la traiettoria/e che il veicolo deve compiere in base alla programmazione. In questa navigazione intervengono poi una serie di fattori che introducono degli errori nella guida; pertanto, il carrello o il veicolo si deve ricalibrare al fine di rimanere allineato rispetto al percorso teorico stabilito. I sistemi di guida come quelli a filo o magnetici o banda colorata sono concettualmente più semplici in quanto il sistema ha come riferimento una pista da seguire, ma sono viceversa molto rigidi nelle loro funzioni. Difatti una volta stabilito il percorso questo viene tracciato sul terreno, o affogato (nel caso dei fili o dei magneti), questo preclude sia una navigazione dinamica come richiede un buon lavoro di

approntamento sul campo per essere istallato. Il sistema Laser tramite triangolazione richiede una serie di marcatori o riscontri catarifrangenti disposti lungo il percorso al fine che il veicolo tramite il laser di bordo che ruota intercettandoli tramite una serie di calcoli possa dedurre la sua posizione rispetto a tali riferimenti.

2.2.5. Guida Slam

Oggigiorno i robot usano sempre più rilevatori a laser per il rilevamento degli ostacoli. Nasce spontanea l'idea di impiegarli anche per la navigazione, utilizzando la loro "visione" dell'ambiente. Tra i vantaggi troviamo la grande flessibilità nella definizione dei percorsi e la possibilità di navigazione senza la necessità di un dispositivo ausiliario (fili interrati, magneti, specchi, etc); tra gli svantaggi bisogna considerare la dispendiosità dell'operazione di programmazione, la problematica relativa agli ambienti che non sempre sono ideali, necessità di grosse potenze di calcolo e di memoria, odometria sufficientemente accurata. In fase di programmazione, il veicolo deve essere portato mediante i comandi manuali, lungo i percorsi che dovrà percorrere e il sistema di visione costruisce una mappa dell'ambiente. È molto importante indicare che la rappresentazione delle mappe sta influenzando la complessità computazionale relativa al ragionamento riguardo il mappaggio, la navigazione e la localizzazione. Il robot mobile deve rappresentare due concetti specifici: una rappresentazione (modello) di un ambiente o una mappa, insieme ad aspetti riguardanti l'ambiente, contenuti nella mappa. L'accuratezza dell'esposizione della posizione è di solito limitata; in ogni caso, quando si sceglie una rappresentazione specifica di una mappa, è necessario che siano presenti tre aspetti:

- L'accuratezza della mappa dovrebbe corrispondere con l'accuratezza con cui i robot dovrebbero realizzare i loro compiti;
- L'accuratezza della mappa e il tipo di oggetti che vengono mostrati dovrebbero corrispondere al tipo e all'accuratezza dei dati forniti dai sensori dei robot;
- La complessità della rappresentazione della mappa ha un effetto diretto sulla complessità computazionale che riguarda considerazioni sulla navigazione, localizzazione e il mappaggio.

In ogni caso, le mappe potrebbero rappresentare in modo intelligente la posizione fisica dell'oggetto senza alcun riferimento alla sua elasticità, colore, consistenza, o qualsiasi altra simile proprietà secondaria che non è direttamente associata allo spazio e alla posizione. I metodi di rappresentazione delle mappe sono diversi e tra i più utilizzati rileviamo: il filtro di localizzazione kalman, la localizzazione markov, la localizzazione Monte Carlo, localizzazione basata sui percorsi, sistemi segnalatori di posizione, localizzazione unica globale, navigazione basata su punti di riferimento, la tecnica di mappe stocastiche, costruzione di mappe autonoma, ambienti dinamici e ambienti ciclici. Analizzeremo più nel dettaglio il "Filtro di localizzazione di Kalman".

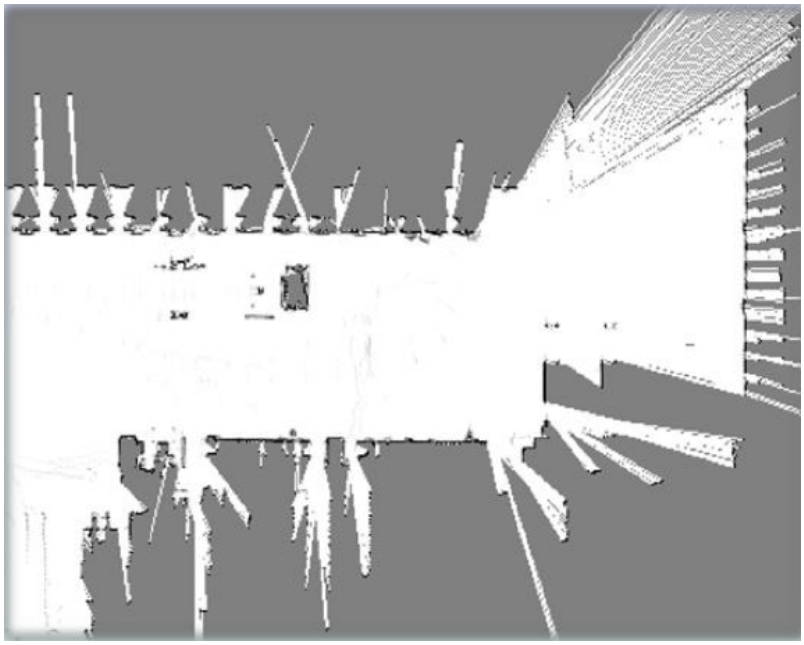

Figura 4. Mappa elaborata mediante la guida SLAM

- ★ Il filtro di Kalman fonde la previsione della posizione (dal comando), l'odometria ed ogni altra misura (beacon, contorno, gps...) e tramite le loro proprietà statistiche stima la nuova posizione. È molto complesso, ma viene ritenuto "indispensabile" e richiede la conoscenza statistica dei sensori e del sistema. La guida SLAM richiede il filtro di Kalman. Per controllare un robot mobile, è spesso necessario combinare informazioni provenienti da diverse sorgenti. Tuttavia, diversi tipi di sensori hanno diverse risoluzioni e gradi di errore, di conseguenza, l'informazione che proviene da sorgenti affidabili dovrebbe essere più importante o dovrebbe avere più peso rispetto ad informazioni meno affidabili. Un modo generale per calcolare l'informazione relativa a sorgenti che sono più o meno affidabili, e quali valori devono essere assegnati ai dati relativi ad ogni sorgente, è effettuare un'addizione ponderata delle misure. Questo procedimento è meglio noto come filtro di Kalman ed è uno dei metodi più utilizzati per la fusione sensoriale nelle applicazioni ai robot mobili. Per i sistemi non lineari viene utilizzato il filtro di Kalman esteso (EFK).

2.2.6. Guida GPS

Il sistema GPS è stato adottato per la guida dei veicoli operanti all'esterno, in particolare l'agricoltura. Per poter essere impiegato, occorre lavorare con il principio del GPS differenziale. Un ricevitore GPS è installato sul veicolo; un secondo ricevitore GPS, è installato a terra, in un punto noto ed invia i suoi segnali al veicolo. Confrontando i due rilevamenti, la precisione arriva al decimetro. Precisioni più spinte possono anche essere ottenute ma a scapito dei tempi di rilevamento. Il sistema di posizionamento globale (GPS) è il più noto sistema di localizzazione. Laddove accurati sistemi di GPS possano essere installati sui robot, il problema di localizzazione potrebbe essere risolto. Tuttavia, ci sono alcune limitazioni come gli elevati costi, il consumo di elettricità e le grandi dimensioni che rendono difficile l'impiego regolare di questo metodo. Inoltre, il GPS

non può essere utilizzato al chiuso o in aree ostruite e, pertanto, i robot potrebbero essere limitati nello spazio di lavoro, e in più, tali sistemi né sono al momento disponibili né sono abbastanza precisi da poterci lavorare. La localizzazione globale, insieme alla percezione, è al momento il principale prerequisito per navigare e controllare i robot mobili. Laddove vengano utilizzati solo i dati provenienti da sensori a corrente basati su mappe acquisite precedentemente, la localizzazione dei robot mobili potrebbe estimare la posizione in modo accurato; quindi, i sensori (sistema di percezione) sono di vitale importanza nella localizzazione.

2.3. I robot mobili, una nuova frontiera

Solo negli ultimi anni, infatti, veri robot mobili si sono affiancati agli Agv che erano una presenza nelle fabbriche già da decenni. A differenza di un Agv, un robot mobile può gestire i percorsi in maniera molto più flessibile, anche se necessita di un sistema sensoristico e di controllo molto più avanzato, per poter gestire le problematiche di una navigazione realmente autonoma.

Oltre alle classiche applicazioni di logistica di magazzino, i robot mobili possono avere un ruolo anche nelle aree di produzione e supply chain, con la possibilità di avere una flotta di robot mobili che collega la linea produttiva al magazzino, permettendo così di realizzare una produzione pienamente in logica “pull”. Inoltre, possono contribuire al superamento del vincolo della linea di produzione, o quantomeno al conferimento di maggiore flessibilità alla linea stessa: essi possono infatti essere utilizzati per il trasporto di pezzi, utensili o anche robot fra aree di lavoro diverse, consentendo di gestire la produzione in maniera modulare e rapidamente riconfigurabile. A proposito di nuove frontiere una ricerca dell’Interact Analysis ha dimostrato che nonostante i ritardi causati dalla pandemia, nel 2020 sono stati consegnati quasi 60.000 robot mobili, con una crescita di oltre il 25% rispetto al 2019. La crescita dei robot mobili autonomi (AMR) è stata significativamente più alta di quella dei veicoli a guida automatica (AGV), perché il segmento AGV ha affrontato ritardi e problemi superiori: il motivo – spiegano gli analisti – sarebbe da individuare nella tendenza degli AGV ad essere relativamente più costosi e meno scalabili, e a richiedere tempi di installazione più lunghi, rispetto agli AMR. Ash Sharma, amministratore delegato di Interact Analysis, ha commentato: “Alla fine del 2020, i robot mobili erano stati distribuiti in poco più di 9.000 siti, principalmente magazzini e fabbriche. Entro la fine del 2025, la previsione è che si supereranno le 53.000 implementazioni, e saremo comunque sarà ancora lontani dal punto di saturazione del mercato. I robot per le applicazioni di logistica goods-to-person rappresenteranno il 37% del volume delle consegne nei prossimi cinque anni, ma solo il 18% dei ricavi. Tuttavia, i robot person-to-goods stanno crescendo a un ritmo impressionante, e prevediamo un enorme spazio di crescita in tutte le aree del mercato dei robot mobili”.

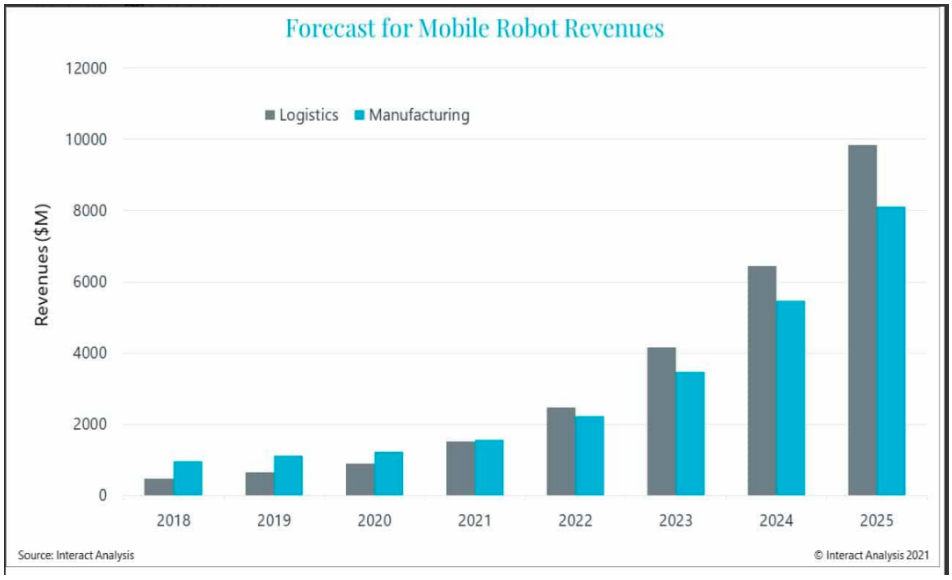

Figura 5. Ricerca effettuata da Interact Analysis

Il futuro dovrebbe tornare a far registrare il segno "+". La società di ricerca Robo Global prevede che il mercato mondiale della robotica industriale aumenterà da 45 miliardi di dollari nel 2020 a 73 miliardi di dollari nel 2025. L'Italia è messa piuttosto bene: si conferma la seconda manifattura in Europa come utilizzatore, dietro alla Germania, con 74.400 unità. Ed è al decimo posto a livello globale, dietro a giganti inarrivabili come Giappone e Stati Uniti ma anche a Paesi ultra-innovativi come Singapore e Corea del Sud. La tendenza che si osserva, poi, è una crescita (seppur ancora su volumi poco rilevanti) della robotica collaborativa, che vale poco meno del 5% del totale delle installazioni.

Così, ai nomi noti Abb, Fanuc, Kuka, Omron, Yaskawa, Kawasaki e l'italianissima Comau; parte della galassia Fca, si stanno affiancando nuovi player come la danese Universal Robots, specializzata unicamente in cobot. Proprio la Danimarca è al terzo posto a livello continentale per robot per 100mila dipendenti, davanti alla stessa Italia. Il Covid ha dato una spinta alla robotica, perché ha reso automazione e digital transformation necessità, non più tendenze: la pandemia sta mostrando che senza la digitalizzazione industriale il rischio di chiudere i battenti è altissimo.

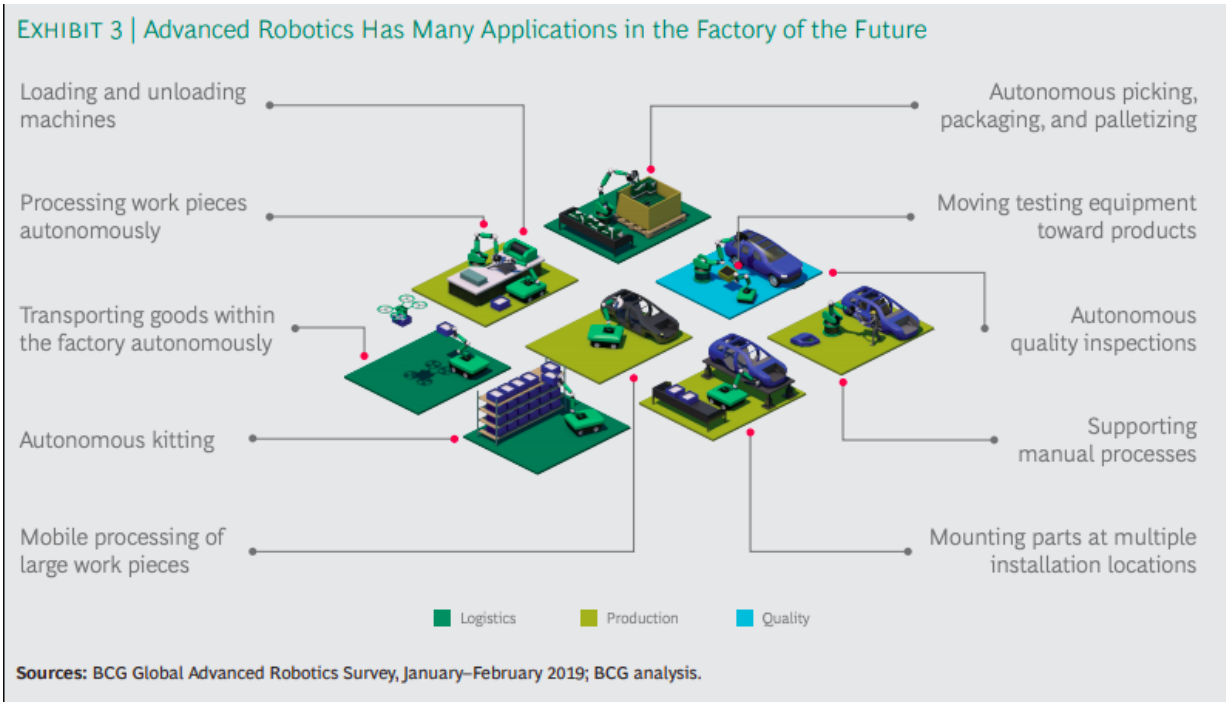

Figura 6. La fabbrica del futuro

Avendo nominato Abb, Kuka, Omron, Comau, avremo modo nel capitolo successivo, (Cap III), di analizzarne alcuni AMR, fornendo una panoramica di struttura, sensoristica e ottimizzazione dei processi di ciascuno di questi produttori che stanno segnando le scene della robotica mondiale.

CAPITOLO 3- APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELLA ROBOTICA MOBILE

3.1. Come si programmano i robot mobili

Prima di spiegare come avviene la programmazione vera e propria dei robot mobili riprendiamo alcuni concetti importanti, in parte analizzati nei capitoli precedenti. Il concetto fondamentale di cui dobbiamo tenere conto, è quello di **FLESSIBILITA';** i robot non sono più statici, i robot ora sono in movimento, in movimento autonomo grazie ai sistemi di guida analizzati nel CAPITOLO II; ma soprattutto sono in grado di adattarsi all'ambiente che li circonda. Il prodotto cambia, cambia velocemente e quindi c'è la necessità di modificare l'impianto per adeguarsi a quello che è il compito da svolgere, per questo diviene fondamentale il concetto di flessibilità e si può introdurre un concetto nuovo che è quello della **MATRIX PRODUCTION**., una formazione matriciale dove è implementata un'altissima flessibilità degli impianti industriali. Parliamo adesso nello specifico di cosa si intende con il programmare un robot mobile. Innanzitutto, bisogna rispondersi a tre domande; a queste domande possono rispondere i sistemi di navigazione del software che comunica con un hardware ben strutturato, le cui componenti sono state analizzate nel capitolo II; le quali permettono al robot effettivamente di localizzarsi, di capire dove si trova e di capire cosa lo circonda, inoltre gli consentono di ripianificare il suo percorso qualora sia necessario e da qui entriamo nel vivo della programmazione. Torna l'importanza del concetto di mappa e di slam, per la costruzione di una mappa in tempo reale, in modo tale che il robot riesca a capire in tempo reale dove si trova, in un contesto che cambia.

Il sistema di navigazione deve permettere al robot di muoversi da una parte all'altra, ovvero gestire un insieme di percorsi che consentono al robot di essere guidato in un ambiente strutturato, destrutturato o caotico; laddove il caos non viene generato solo dall'eventuale presenza di persone in movimento, ma anche dalla presenza di macchine, oggetti a terra, operatori di linea; qui la tecnologia slam fa da padrona.

Programmare un robot mobile significa avvalersi di tre strumenti fondamentali, che sono: Slam, odometria e laser scanner. I filtri di Kalman sono tuttavia coloro che rappresentano la base assoluta, garantendo al robot la possibilità di creare un percorso corretto per raggiungere una postazione.

Per cui la prima cosa da chiedersi è la MAPPA, bisogna capire dove ci si trova. L'utilizzo dello slam e dell'odometria consentono in questo caso di non cambiare il contesto ambientale nel quale il robot si sta muovendo. Ci si avvale in tal senso delle triangolazioni laser, già analizzate e in tantissimi casi le problematiche relative all'ambiente vengono risolte dallo slam. Ovvero essa applica degli aggiustamenti strutturali dell'ambiente, in modo tale che mappando in tempo reale ciò che io vedo, si riesce ad adattare il robot mobile nel contesto in cui si trova.

Arrivati a questo punto, si guida il robot mobile, si attiva il recording della mappa e si vanno a leggere i dati che i laser scanner hanno collezionato. Il robot ricostruisce la sua mappa, un esempio viene riportato nella figura seguente:

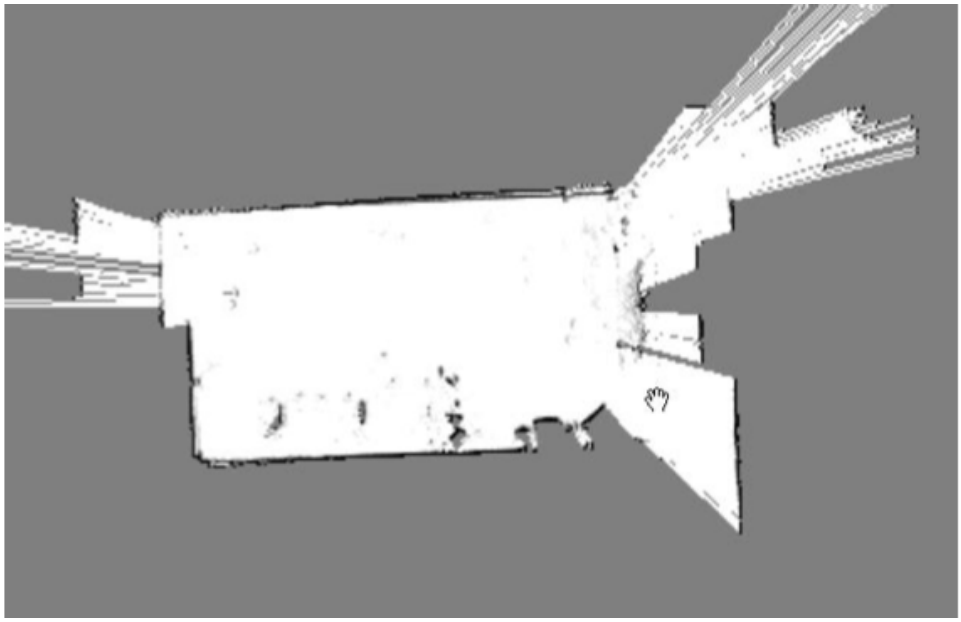

Figura 7. Mappa costruita dal robot mobile

Dove il nero rappresenta gli ostacoli profondi, il grigio le aree sconosciute, mentre il bianco rappresenta lo spazio libero. L'area arancione rappresenta l'area in cui avviene il movimento del robot.

L'unione tra slam e odometria consente al robot, di capire dove si trova, di localizzarsi in quell'ambiente e di muoversi da un punto A ad un punto B. Quando si muove, il robot utilizza l'odometria, una odometria estremamente imprecisa, basata sulla meccanica delle ruote e sui difetti meccanici delle ruote.

Dopo la creazione della mappa che ovviamente rappresenta l'aspetto fondamentale per la programmazione, dobbiamo vedere in che modo avviene il movimento, la teoria che c'è alla base. Tutti i sistemi di navigazione che abbiamo visto, consentono di disporre accanto al plc, che è un hardware dove viene ubicato un programma specializzato per interpretare le informazioni ricevute da un software di livello superiore; un wi-fi che permette di comunicare con chi lo chiama. Questi oggetti si trovano di solito in una posizione di riposo, prima di ricevere una missione dal Mes (I sistemi **MES**, Manufactoring Execution System, sono i software che svolgono la fondamentale funzione di acquisire, gestire e inoltrare tutte quelle informazioni, che possono essere utilizzate per ottimizzare le attività produttive nel complesso: dal lancio ed esecuzione dell'ordine al prodotto finito) ; ricevono questo comando tramite il wi-fi, il wi-fi comunica con il sistema di gestione delle missioni, la procedura parte.

Questo sistema vale sia se abbiamo un solo robot mobile, sia se abbiamo a che fare con una flotta. Esiste infatti un fleet manager, per la gestione della flotta che può essere istallato a bordo o esternamente sul mes. Le richieste vengono quindi acquisite e smistate tra i vari robot mobili, a seconda delle competenze necessarie. A seconda della stazione che chiama il robot o i robot, il fleetmanager smista la chiamata e direziona il robot su un grafo orientato.

Ogni robot deve quindi muoversi da un punto iniziale ad un punto finale percorrendo un percorso definito da una sequenza di segmenti.

Considerando il grafo associato a corridoi e intersezioni, il robot passerà di nodo in nodo.

Tipicamente esistono più percorsi possibili per spostarsi tra due nodi quindi ci si pone il problema di trovare un percorso ottimale.

Si noti che gli algoritmi di pianificazione dei percorsi si basano su informazioni note a priori, quali la geometria dell'ambiente e i tempi di percorrenza stimati. In realtà potremmo non disporre della conoscenza perfetta del problema. Ad esempio, si possono verificare situazioni di congestione che rendono inattendibili i tempi di percorrenza stimati, oppure alcuni spazi potrebbero diventare inaccessibili e quindi inutilizzabili per gli spostamenti. Per la pianificazione vengono utilizzati degli algoritmi sub-ottimali che consentano di ottenere una soluzione ragionevolmente buona con un costo computazionale accettabile. Inoltre, i robot dovranno affrontare situazioni di possibile collisione. È necessario che abbiano la possibilità di scambiarsi informazioni tra loro per consentire una ripianificazione dei percorsi. In tal caso i robot che non possono proseguire per il rischio di collisione dovranno negoziare il diritto di passaggio su un segmento. Ad esempio, si può stabilire una priorità tra i vari robot in cui il perdente dovrà mettersi in attesa o scegliere un percorso alternativo. Particolarmente delicate sono le intersezioni perché soggette alla maggiore probabilità di passaggio dei robot e quindi di collisione. Si può ricorrere a tecniche di allocazione delle risorse con accesso mutuamente esclusivo.

Dopo questa introduzione generale alla programmazione dei robot mobili, è interessante vedere come operano alcuni tra gli AMR dei principali produttori mondiali di robot, quali: Kuka, Omron, Comau, MiR.

3.2. Kuka Mobile Robots: Kuka Omniwheels

Nel paragrafo 3.1 abbiamo analizzato come avviene la programmazione di un robot mobile, sottolineando il concetto di movimento, di spazio, di odometria, tutti questi concetti sono direttamente collegati al discorso di trazione, ovvero delle ruote. È interessante vedere come i diversi produttori, sfruttino concetti fisici e matematici in maniera diversa e un caso è questo delle omniwheels. Le omniwheels sono delle ruote omnidirezionali costituite da cilindretti di Vulkollan, un materiale plastico, che sono posti a 45° l'uno dall'altro.

Queste ruote seguono un principio fisico che è il seguente, ovvero consentono di: andare avanti, indietro, ruotare attorno al baricentro e muoversi in direzione diagonale.

Ciò che conta rispetto ad una ruota classica sterzante, è che quando ci si deve spostare da un corridoio ad un altro, ovvero bisogna invertire la direzione, senza tornare indietro, ma compiendo un giro, in questo caso non si sterza, ma si trasla.

Tutto ciò consente ovviamente un grandissimo risparmio dello spazio, dal momento che sterzare, necessita di raggi di curvatura e quindi bisogna considerare uno spazio notevolmente più ampio; con le ruote omniwheels da questo punto di vista si riesce ad avere un notevole risparmio di spazio e anche di tempo.

La ruota omnidirezionale consente quindi un movimento traslatorio, consentendo di cambiare direzione più volte e in maniera molto più pratica.

Altrimenti vengono utilizzate le ruote differenziali, le differential drives, che consentono di andare avanti, indietro, ruotare attorno a sé stessi, oppure girare a destra o a sinistra prevedendo però un raggio di curvatura.

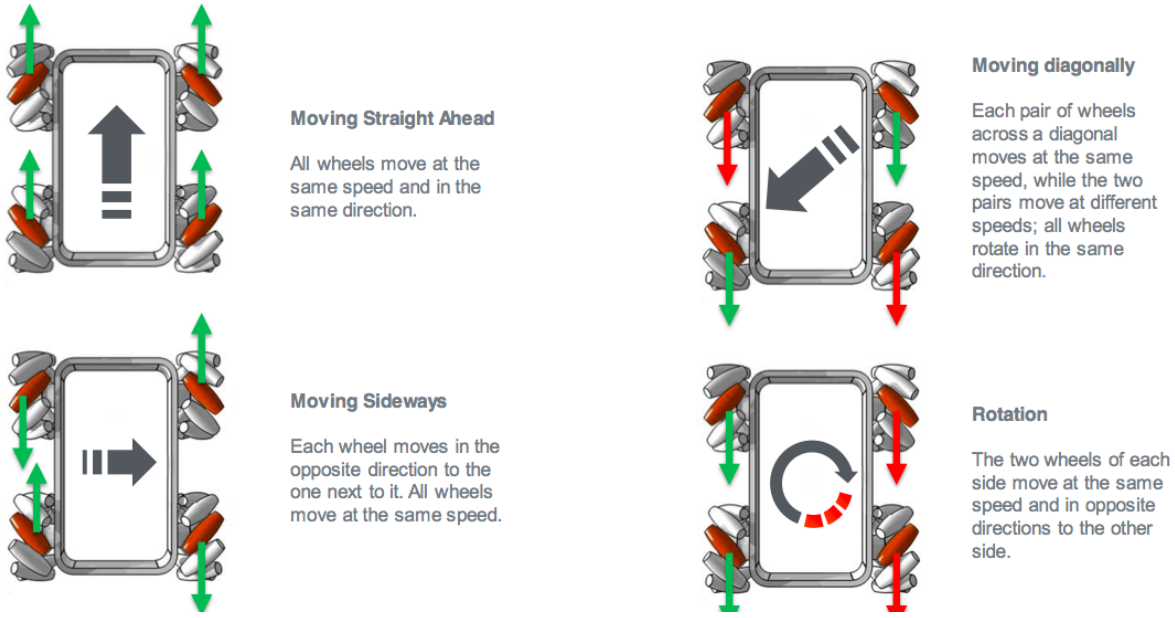

Figura 8. I movimenti consentiti alle ruote omnidirezionali

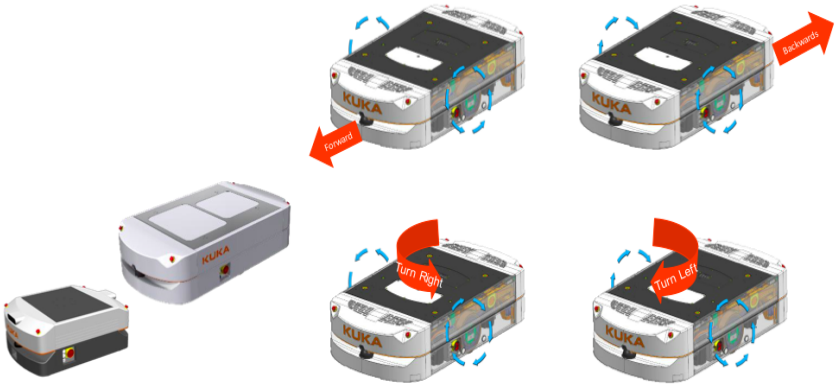

Figura 9. Movimenti consentiti alle ruote differenziali

Le famiglie di robot della Kuka si basano interamente su queste due tipologie di ruote e variano da robot mobili senza robot a bordo, a robot mobili con robot a bordo. Variano da robot che possono trasportare dei carichi intorno ai 200 kg, fino alle 100/200 tonnellate. Analizzeremo prima le caratteristiche comuni a tutti questi robot e poi analizzeremo nel dettaglio il KMR iiwa e il KMP 1500.

Figura 10. Kuka Mobile Platforms

Figura 11. Kuka Mobile Robots

3.2.1. Caratteristiche comuni

Caratteristiche comuni a questi tipi di robot sono le seguenti:

- ★ Tutti possono essere guidati da un joystick;
- ★ Tutti hanno lo stesso sistema di navigazione basato su slam;
- ★ Tutti hanno sistemi di lifting, pantografo o sistemi con pistoni;
- ★ Hanno tutti una batteria interna che dura 4/8 ore;
- ★ Possono tutti essere caricati attraverso sistemi di biberonaggio;
- ★ Sono costituiti da una base, che presenta almeno un laser scanner, solitamente ne sono presenti due posti in diagonale, dove grazie al plc safe o alla centralina safe, si riesce a gestire la situazione, tenendo conto della velocità e degli ingombri che vengono rilevati;
- ★ In particolare, vengono scelte 14 configurazioni di sicurezza direttamente dal plc.

Tutto ciò che posso fare con questi robot mobili sostanzialmente è:

- Il trasporto, ad esempio, trasportare dei pezzi che vengono condotti allo stock in magazzino;
- Qualora ci sia un altro mezzo meccanico che disponga su di essi i pezzi da trasportare, si potrebbero introdurre dei conveyor, in modo da avere continuità con le linee;
- In alcuni casi, ma non tutti si può fare il trascinamento. Sicuramente con le ruote omnidirezionali il trascinamento sarebbe impossibile.

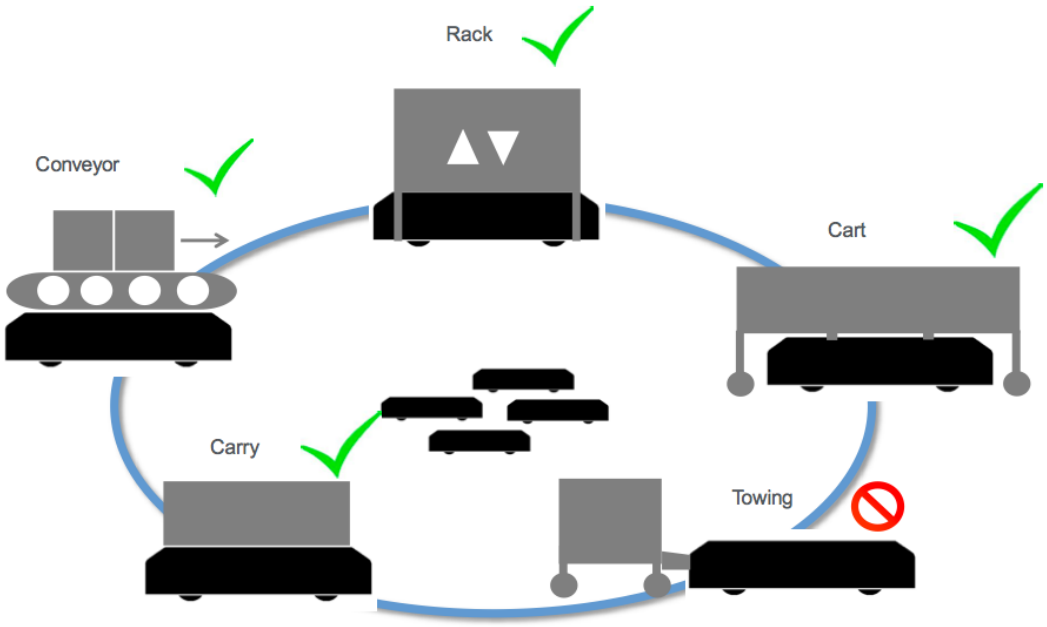

Figura 12. Alcune applicazioni dei robot mobili

3.2.2. KMR iiwa

Dopo aver fatto un excursus su quelli che sono i robot mobili Kuka nelle loro generalità, ne vediamo un paio, di categorie diverse tra loro.

KMR è un acronimo che indica KUKA Mobile Robotics. KMR iiwa è una combinazione tra il robot leggero sensibile LBR iiwa e una piattaforma mobile e flessibile. Questo robot è costituito da sette speciali sensori di coppia su ogni asse del robot leggero LBR iiwa, che lo rendono estremamente sensibile all'ambiente circostante. È in grado di navigare autonomamente, arrestandosi immediatamente quando avviene un contatto esterno. La piattaforma naviga in modo del tutto autonomo grazie agli scanner laser, che abbiamo avuto modo di citare precedentemente; inoltre, la peculiarità è l'utilizzo di ruote omnidirezionali, le quali consentono di sviluppare rotazioni a 360°. Ogni ruota, è formata da diversi rulli, ognuno dei quali presenta un'angolazione di 45° rispetto all'asse. L'utilizzo di omniwheels risulta essere efficiente dal momento che porta ad una riduzione degli spazi, nonché dei tempi.

Come spiegato nel paragrafo 3.1. è molto importante nella programmazione dei robot mobili affidarsi a un sistema che sia in grado di gestire, non un solo robot, ma addirittura una flotta. Nel caso di questo robot KuKa di questo se ne occupa il KUKA Sunrise Cabinet. Esso rappresenta un sistema di controllo, dotato di una struttura flessibile e ampliabile. I componenti hardware, i cavi e i connettori, sono stati ridotti notevolmente e sostituiti da soluzioni software.

Processore	Quadcore
Disco rigido	HDD, optional SDD
Interfacce	USB, Ethernet, DVI-I
Classe di protezione	IP 20
Dimensioni	500 x 483 x 190 millimetri (L x A x P)
Peso	23 chilogrammi
Tensione nominale	110 V - 230 V AC
Tolleranza ammissibile della tensione nominale	+/- 10%
Frequenza di rete	50 Hz ± 1Hz oppure 60 Hz ± 1Hz
Protezione da rete	2 x 16 A ad azione lenta
Temperatura ambiente (in esercizio)	da +5 °C a +45 °C

Figura 13. Dati del Kuka Sunrise Cabinet

Con l'integrazione di combinata con scanner laser di sicurezza, il KMR iiwa è in grado di individuare gli ostacoli che si frappongono sul suo percorso. Il KMR iiwa viene utilizzato a pieno come collaboratore nelle aziende, insieme all'operatore umano e i compiti legati alla logistica non sono le uniche possibilità di impiego del KMR iiwa. È ipotizzabile il rifornimento di diverse macchine industriali o la collaborazione diretta con uno o più operatori in uno spazio di lavoro condiviso. La collaborazione sicura tra uomo e robot è garantita da scanner laser sulla piattaforma mobile e da sensori di coppia dei giunti snodati presenti su ogni asse del robot. Un altro vantaggio per l'utilizzatore: per comandare la piattaforma robotizzata autonoma è sufficiente un solo sistema di controllo. Il KMR iiwa si muove in modo del tutto indipendente. Non occorre neppure apportare modifiche costruttive allo stabilimento. Per questo motivo, il robot mobile è fondamentalmente adatto a tutte le operazioni di prelievo e alimentazione, eseguite finora soprattutto dall'uomo. Può inoltre essere impiegato per l'alimentazione delle macchine, il cambio utensili su macchine utensili, l'automazione di laboratori, l'integrazione dei processi nell'industria dei semiconduttori o per l'intralogistica, quale la fornitura di componenti per la linea di montaggio.

Figura 14. La piattaforma robotizzata si muove autonomamente in ambiente di lavoro

Figura 15. KMR iiwa

3.2.3. KMP 1500

KUKA KMP 1500 è una piattaforma controllata in modo autonomo, che si integra nel processo di produzione; inoltre, questa piattaforma, che si presenta come un veicolo di trasporto senza conducente, con un preciso meccanismo di sollevamento, si muove in modo omnidirezionale e autonomo nello spazio. KMP 1500 consente di rendere flessibile la produzione, riuscendo ad assumere in modo indipendente e autonomo il trasporto dei prodotti attraverso tutte le fasi del processo. Questo concetto di produzione di KUKA consente

di ottimizzare la gestione della logistica. Grazie alla tecnologia di azionamento KukaOmnimove la KMP 1500 si muove in qualsiasi direzione partendo da ferma. Questa tecnologia di ruote consente un posizionamento con una precisione di +/- 5 mm in spazi ristretti. Questo si traduce in soluzioni di automazione a ingombro ridotto e altamente precise per la logistica.

La KMP 1500 preleva autonomamente i componenti necessari oppure, una volta lavorati, li riporta al magazzino. Con una portata che raggiunge i 1500 kg, il KMP 1500 movimenta i prodotti durante l'intero processo di lavorazione, rispetta le norme di sicurezza necessarie ed è inoltre estremamente flessibile. Gli scanner laser integrati di sicurezza consentono la navigazione autonoma attraverso l'area di produzione.

Elemento fondamentale della KMP 1500 è la piattaforma mobile. Essa presenta una serie di caratteristiche che andiamo ora ad analizzare:

- ★ Quattro arresti di emergenza, lampeggiatore per indicare la direzione di lavoro, spia luminosa LED e due scanner laser con sensori di sicurezza e avvertimento per un controllo a 360°;
- ★ Possibilità di configurazione e programmazione senza cavo, telecomando;
- ★ Un sistema di navigazione che consente alla piattaforma mobile di navigare autonomamente senza rischio di collisione e senza ricorrere a marcature artificiali;
- ★ KUKA Sunrise il controllo integrato KUKA;
- ★ Ruote omnidirezionali che consentono alla KMP 1500 di muoversi in qualsiasi direzione, garantendone spostamenti precisi alla posizione desiderata anche in spazi ristretti.

Figura 16. KMP 1500

3.2.4. Kuka Omnimove

KUKA omniMove è una piattaforma di trasporto per carichi pesanti. Essa è stata fondamentale nella costruzione dell'AIRBUS A380. Può essere controllata manualmente, ma è anche in grado di muoversi autonomamente. Nonostante dimensioni e capacità di carico enormi, naviga in sicurezza e si muove quasi in modo autonomo. Si può anche decidere di ampliarla con un'alimentazione autosufficiente di energia. Le ruote sono studiate in modo specifico, consentendo alla piattaforma mobile per carichi pesanti di muoversi in qualsiasi direzione, anche con un avvio da ferma. Il sistema di navigazione garantisce lo spostamento autonomo senza pericolo di collisione e senza marcature artificiali sul pavimento. KUKA omniMove è liberamente scalabile in dimensioni, larghezza e lunghezza all'interno di un sistema modulare. La tecnologia di azionamento è basata su una ruota sviluppata appositamente, che consente a KUKA omniMove di avere un movimento omnidirezionale. Le ruote dotate di singoli rulli a forma di barile possono muoversi in modo indipendente tra loro. Questo consente a KUKA omniMove di muoversi partendo da una posizione da ferma e di eseguire spostamenti traslatori e rotatori nello spazio più ristretto. Può così muoversi in tutte le direzioni risparmiando tempo e spazio.

3.3. Omron

La Omron rappresenta un altro tra i principali produttori mondiali nel campo della robotica. Andremo di seguito ad analizzare alcuni dei robot mobili prodotti più recentemente, quali LD250 e HD1500.

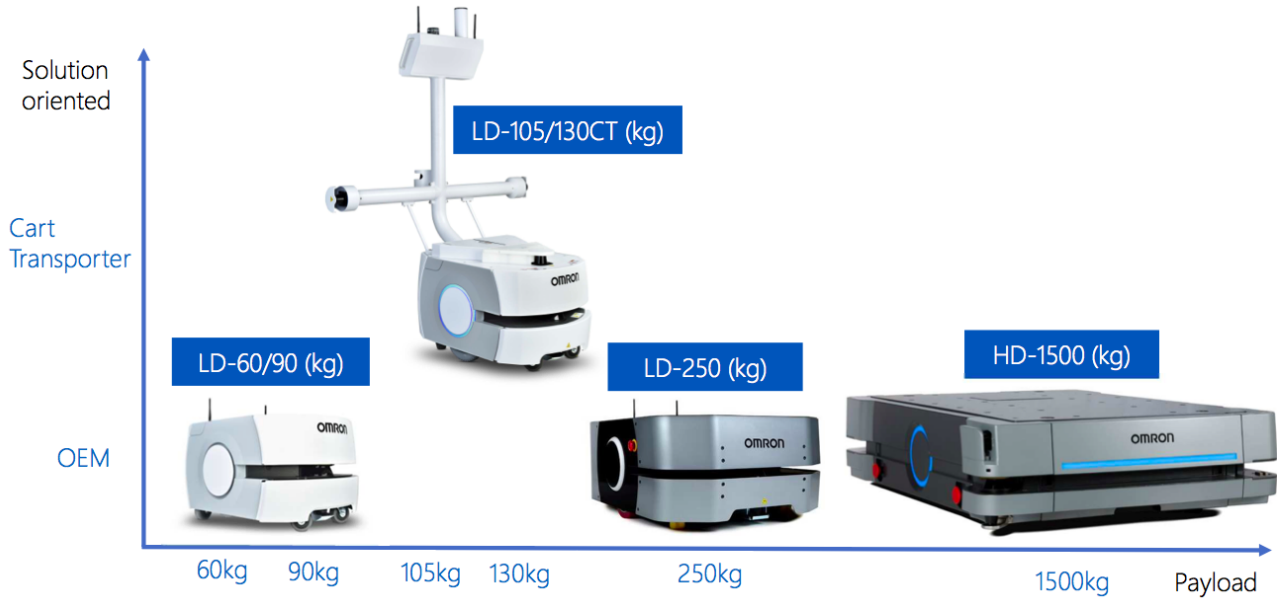

Figura 17. La famiglia Omron

3.3.1. LD250

L’ LD250 è un robot mobile che presenta una sensoristica che gli permette di riconoscere gli ostacoli, che possono essere sia ostacoli fissi, che animati, in modo da evitarli. È presente su questo robot un laser di sicurezza e di scansione per lo slam, posizionato ad un’altezza di circa 20 cm, con una profondità di scansione di 15m e un raggio di scansione di 250°.

Le sue caratteristiche principali risultano essere le seguenti:

1. Il laser di sicurezza posto a 20 cm non è il solo presente su questo robot, dal momento che ci sono alcuni oggetti, come ad esempio un pallet vuoto, che sono più bassi di 20 cm. A tal proposito gli ostacoli più bassi dei 20 cm, vengono rilevati mediante un ulteriore piccolo laser che è posizionato ad un’altezza di circa 4 cm;
2. Nel retro del robot si trovano dei sensori a tempo di volo o ultrasuoni, necessari per le piccole manovre di retromarcia o rotazioni. LD250 non è un robot bidirezionale quindi per tornare indietro deve prima girarsi e poi navigare frontalmente;
3. Il disco luminoso si colora in maniera differente e si muove in maniera differente a seconda di ciò che il robot sta facendo;
4. Durante il movimento il disco si colora in blu, in emergenza diventa rosso, in caso di smarrimento diventa giallo (lost).

Figura 18. LD250

Sia dell’LD250 che dell’LD60/90 c'è la versione ESD. Il robot è dipinto con una vernice conduttiva e scarica a terra le eventuali cariche elettrostatiche. Utilizzato per il trasporto di componenti sensibili.

Figura 19. LD60/90 versione ESD

Figura 20. LD250 versione ESD

3.3.2. HD1500

L'HD1500 è diverso dai robot visti precedentemente esso infatti presenta:

1. Un doppio laser di sicurezza con una copertura su 360°, doppio laser basso e laser laterali;
2. Il disco indicatore e i pulsanti di emergenza sono posizionati in basso, due da una parte e due da un'altra, in modo tale da essere azionati in caso di emergenza;
3. È un veicolo dal peso di 600kg e in grado di raggiungere una velocità massima di 1800 mm/s. Diviene qui importante il concetto di sicurezza. In particolare, la zona di sicurezza entro cui il veicolo si arresta varia in funzione della velocità, ma non solo, varia anche in funzione della direzione che il robot prende. Questo accade perché se la forma fosse sempre quella che vedo in figura 19 verrebbero considerate come zone di sicurezza, quindi di arresto, delle zone in cui in realtà il robot non passerebbe mai. Quindi è stato creato un sistema, in cui la zona di sicurezza si modifica a seconda della traiettoria che sta prendendo il robot.

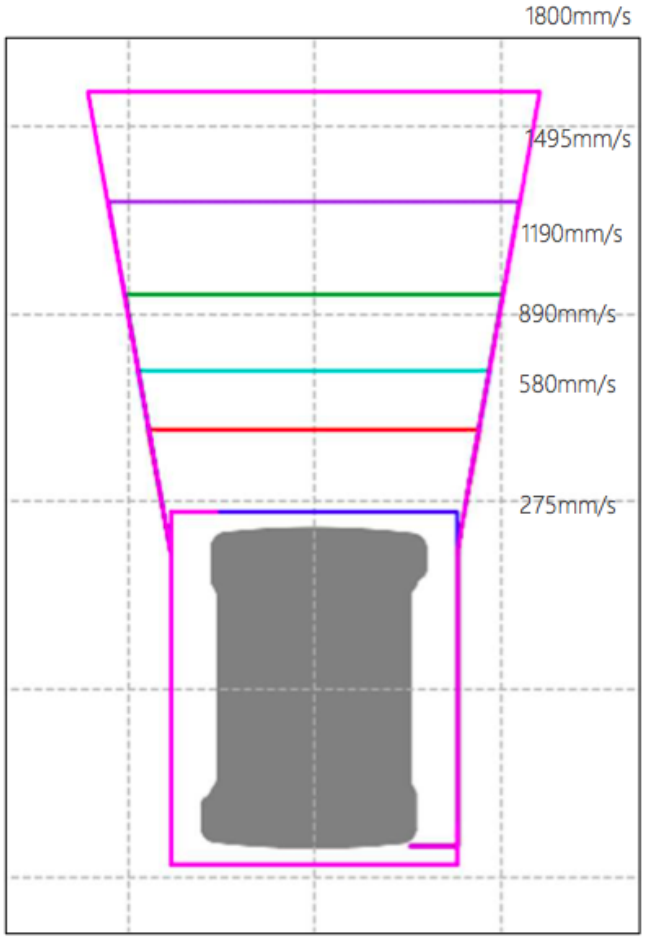

Figura 21. Le zone di sicurezza in funzione della velocità

Il robot riesce pertanto ad evitare ostacoli in movimento e quando ruota su sé stesso o si gira, le zone di sicurezza si riducono al minimo. Il tutto viene gestito da un PLC di sicurezza.

La capacità di riconoscere ostacoli in movimento è stata introdotta recentemente; infatti, precedentemente accadeva che quando il robot trovava un ostacolo in movimento finiva per produrre una serie di istantanee che lo portavano ad avere delle collisioni. Adesso invece il sistema riesce a riconoscere il movimento.

Inoltre, un ultimo appunto lo si può fare sui laser di sicurezza posti a 20 cm, ovviamente ci sono ostacoli anche più alti dei 20 cm; in questa situazione si utilizzano due laser laterali che creano una barriera verticale e il sistema è in grado di riconoscere anche gli ostacoli sospesi. Si è preferito l'utilizzo di laser e non di telecamere, in quanto non sono influenzati da eventuali variazioni di luce.

3.3.3. Flotte di robot mobili in Omron

Anche nella Omron si parla di flotte di robot mobili; in particolare si possono controllare fino a 100 robot con un fleet manager.

Il gestore di flotta si occupa principalmente di selezionare il robot più adatto ad un determinato compito. Pertanto, un sistema superiore che può essere mes, wms, genererà una missione, chi definisce quale robot adempierà a tale missione è il **fleetmanager**.

La scelta viene effettuata in base alla priorità, ma anche in base alla praticità, si sceglie infatti solitamente il robot più vicino tenendo conto anche del fattore batteria. Queste missioni, tuttavia, vengono modificate in maniera dinamica; può accadere infatti che il robot in grado di eseguire una determinata missione sia quello più lontano. Il fleetmanager è in grado di gestire l'eventuale assembramento di più robot, eventuali ingorghi, gestisce la mappa e può funzionare anche da simulatore. Si possono simulare fino a 10 robot e si può vedere fin da subito quanti robot sono necessari per svolgere un determinato compito. Si parte da una mappa eseguita col CAD e si sviluppa una vera e propria applicazione sul simulatore.

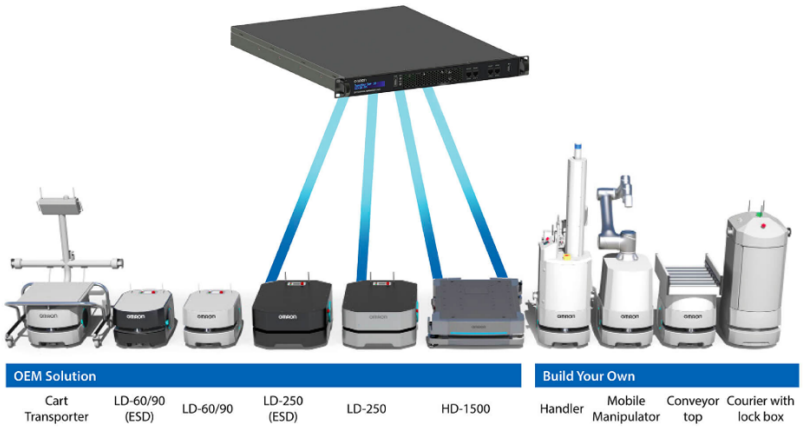

Figura 22. Fleetmanager Omron

3.4. Comau AGILE1500

Comau presenta Agile 1500, primo prodotto della **piattaforma AGV** (automated guided vehicle) sviluppata per la **logistica 4.0** nella smart factory. Agile 1500 è modulare, scalabile e completamente ri-configurabile, in grado di trasportare **carichi fino a 1.500 kg** con velocità massima di 1,7 m/sec. Il veicolo a guida automatica consente di ottimizzare i flussi logistici all'interno degli stabilimenti, migliorando la gestione del magazzino e aumentando l'efficienza produttiva, rispondendo alla domanda industriale sempre più just-in-time e just-in-sequence, oltre che alle logiche di produzione customizzata. Considerando la vista frontale, identifichiamo alcune caratteristiche di AGILE 1500. Nella parte frontale è presente un laser scanner che può fare sia navigazione che sicurezza. Esso consente al veicolo di muoversi nell'ambiente, ma nello stesso tempo è sicuro e collaborativo con l'uomo.

Nella parte frontale è presente uno stop di emergenza e un display che consente di vedere lo stato del veicolo, se ci sono eventuali errori, permette di vedere cosa sta facendo L'AGV e allo stesso tempo interagisce con esso tramite la tastiera. Nella parte laterale del veicolo sono posizionati i contatti striscianti, necessari per la ricarica del veicolo, della batteria a litio a bordo, una ricarica che può essere fatta in maniera completamente autonoma dal robot, senza l'intervento dell'operatore umano. Il veicolo è in questo caso un triciclo, ci sono pertanto due moto ruote differenziali nella parte posteriore e una ruota pivottante nella parte frontale. Questo gli consente di effettuare movimenti in avanti, retromarcia e rotazione sul punto, che non è il punto geometrico dal veicolo ma è quello che si trova nella parte posteriore.

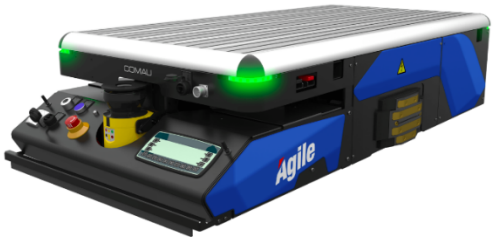

Figura 23. Vista frontale AGILE 1500

Nella vista posteriore possiamo notare invece la presenza un secondo laser scanner che consente la navigazione in sicurezza posteriormente, dal momento che quello frontale da solo non sarebbe necessario a coprire tutto il perimetro del veicolo; un connettore harting che fornisce all'utente degli I/O che permette di installare a bordo qualsiasi genere di strumento necessario per l'applicazione (un sollevatore, una rulliera, un gancio traino). Inoltre, c'è il compartimento batteria a litio, la cui ricarica è resa più semplificativa grazie a dei meccanismi (rotelline), presenti su di esse.

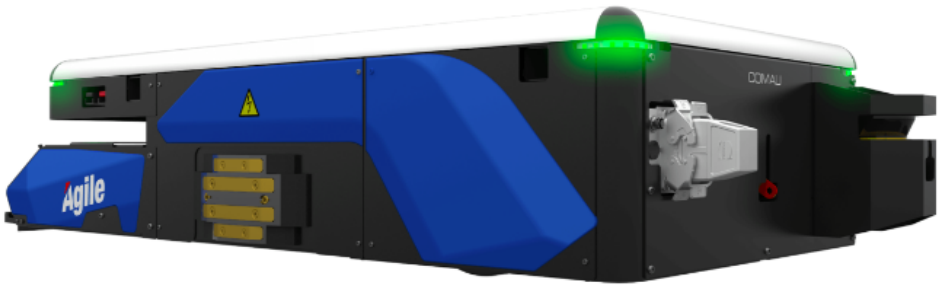

Figura 24. Vista posteriore AGILE 1500

La piastra superiore, in grado di trasportare 1500kg è dotata di LED, la presenza di LED diviene fondamentale, unitamente alla presenza di suoni, in modo tale che le persone che si trovano in prossimità di esso, riescano a riconoscerne l'arrivo. L'AGV avrà preinstallato un percorso che dovrà fare, se c'è sufficientemente spazio avrà la sua rampa di accelerazione che lo porta a raggiungere una velocità massima di 1,7 m/s. L'AGV decelera in prossimità della stazione di arrivo; nel momento in cui sono presenti degli ostacoli, il laser scanner identifica la presenza dell'ostacolo e l'AGV decelera bruscamente, qualora invece l'ostacolo non sia in prossimità, il veicolo inizia a decelerare fino a raggiungere una velocità ridotta, di circa 250 mm/s, che è una velocità collaborativa, alla quale non ci sono rischi per l'uomo. Per quanto riguarda i sistemi di navigazione, si utilizza una navigazione di tipo SLAM, sia la navigazione a riflettori che a spot magnetici. Queste tre tipologie possono coesistere, il che significa che l'AGV utilizza la tecnica migliore in base al contesto in cui si trova. Per quanto riguarda la ricarica, ci sono due approcci. O un ciclo di ricarica completo quando l'agv raggiunge una soglia ad esempio del 10%, e si procede con la carica fino al raggiungimento del 100%. Oppure si utilizza il biberonaggio, il che significa che il veicolo va a caricarsi quando ha dei tempi morti. Il tutto viene gestito dal gestore di flotta, è lui che si occupa di mandare in carica il veicolo quando ne ha necessità. Il software che consente di attivare l'agv è l'**application engineering toolkit** che consente di definire i percorsi, le velocità, la tipologia di navigazione, il mappaggio.

Dall'altra parte ci sono dei software che devono essere installati, tramite un pc che deve gestire la flotta, il traffico e comunicare con dell'hardware o del software esterno presente sulla linea.

3.5. Mobile Industrial Robots (MiR)

Come abbiamo ormai analizzato in tutti i capitoli precedenti e in questo, si può affermare con certezza che un robot mobile deve essere facile da usare, facile da programmare, e soprattutto deve funzionare in sicurezza.

Parlando di MiR (Mobile industrial robots), le prime applicazioni vennero fatte in ambito ospedaliero. Cosa consentivano di fare questi robot?

Tra i vantaggi principali troviamo sicuramente un miglioramento della sicurezza, dal momento che l'operatore ha un riscontro diretto sul presidio medico che deve fornire al malato, poiché davanti a ogni stanza, digitando un codice, l'infermiere è in grado di prelevare solo il presidio medico necessario in quel momento. Altro vantaggio nel caso di spostamenti o eliminazioni di residui è che il trasporto avviene senza l'intervento dell'operatore umano, quindi senza contatto. Inoltre, il carrello ha un PLC e collegandosi col PLC dell'ascensore può addirittura prendere l'ascensore e cambiare piano.

La sensoristica MiR si basa su:

- 2 Sick microscan 3., che consentono una visuale di 360°, fino a 30 m in piano a 200 mm di altezza;

- 2 videocamere 3D con una visuale in grado di individuare oggetti a 0-1700 mm e 114° di visuale orizzontale;
- 4 sensori di prossimità ad ogni angolo, per riconoscere oggetti vicini di piccole dimensioni, quali pallet ad esempio.

Per il discorso della programmazione, i robot MiR vengono programmati con le tecniche analizzate in precedenza (Paragrafo 3.1.), il problema fondamentale che si può verificare tuttavia è il ricalcolo della traiettoria. Il robot riesce autonomamente a ricalcolare la traiettoria per aggirare l'ostacolo, ma, qualora questo non fosse possibile, a causa di impedimenti non aggirabili, si verificano due situazioni:

- Si aziona un allarme;
- Si invia un messaggio di SOS al gestore dell'impianto.

Questi robot ad oggi vengono impiegati sostanzialmente in qualsiasi campo dell'industria dalla logistica, all'elettronica, alle aziende automobilistiche. A tal proposito analizzeremo due robot MiR.

MiR 250 e MiR 1000.

3.5.1. MiR 250

Il MiR250 è un AMR altamente flessibile in grado di funzionare 24 ore su 24 ed è semplice da configurare. Il suo ingombro ridotto e un'elevata adattabilità aiutano a ottimizzare la logistica interna senza modificarne il layout.

Con un ingombro di 580 x 800 mm e un'altezza di 30 centimetri, il MiR 250 è in grado di spostare fino a 250 kg con una velocità di 2 metri al secondo. Grazie all'ingombro ridotto, può spostarsi in spazi ristretti fino a 80 centimetri.

Per quanto riguarda la sensoristica è costituito da:

- 2 unità nanoScan3(anteriore e posteriore), con una copertura di 360°;
- 2 telecamere 3D che come anticipato, consentono un'altezza del campo visivo di 1800mm e un'estensione del campo visivo davanti al robot di 1200mm, con un angolo orizzontale del campo visivo di 114°;
- I sensori di prossimità sono costituiti da 8 unità.

Per quanto riguarda invece la sicurezza, ci sono due tipi di arresto. Un arresto di sicurezza per rilevamento di persone, oppure un arresto di emergenza che si attiva premendo il pulsante specifico di emergenza. Inoltre, il controllo della velocità impedisce al robot di superare la velocità massima di sicurezza predefinita.

Il MiR250 offre una grande flessibilità e, per la prima volta, MiR propone anche un modulo sollevatore standard denominato *MiR250 Shelf Carrier*, che può essere facilmente installato sul robot, consentendogli di

prelevare e consegnare scaffali. Sul MiR250 è anche possibile installare un trasportatore a rulli, bracci robotizzati, armadietti e altre applicazioni.

Figura 25. MiR 250

3.5.2. MiR 1350

I robot MiR600 e MiR1350, che possono sollevare rispettivamente fino a 600 kg e 1350 kg sono progettati per svolgere compiti di movimentazione dei materiali in ambienti industriali gravosi in modo sicuro ed efficiente.

I MiR600 e MiR1350, sono i primi robot mobili autonomi classificati IP52 (Ingress Protection52-rated), il che significa che tutti i loro componenti sono protetti e possono resistere alla polvere e alle gocce d'acqua. Grazie a queste caratteristiche il MiR600 e il MiR1350 sono in grado di funzionare senza alcun problema in ambienti che hanno condizioni particolari e gravose, diventando un nuovo punto di riferimento per una logistica industriale sempre più fluida, sicura e veloce.

I MiR600 e MiR1350 sono ideali per il trasporto autonomo di carichi pesanti di materiali e merci in:

- aree di carico
- aree di produzione e assemblaggio
- magazzini
- aree di consegna del materiale

Come gli altri AMR di MiR, viaggiano in modo fluido e sicuro tra le persone e altri mezzi di trasporto in quelli che sono gli ambienti dinamici di produzione e logistica. Sensori, telecamere 3D e laser scanner, assicurano una visione a 360 gradi per garantire precisione nella navigazione e nelle operazioni. I nuovi AMR sono progettati per essere conformi ai più recenti standard di sicurezza del settore, come la specifica ISO 3691-4.

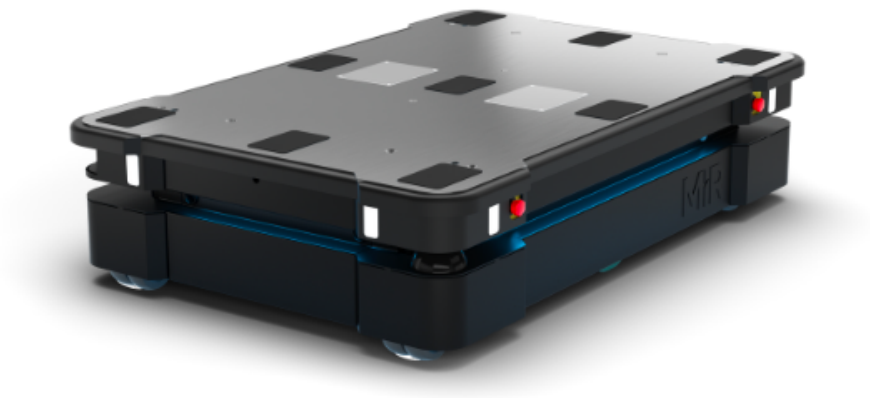

Figura 26. MiR 1350

Con le sue forche per pallet il MiR1350 può prelevare, trasportare e consegnare i pallet automaticamente. Questo robot collaborativo costituisce quindi un'alternativa sicura ai transpallet e ai carrelli elevatori tradizionali, che molte aziende vorrebbero eliminare perché comportano spesso dei rischi per la sicurezza. A differenza dei carrelli elevatori tradizionali il MiR1350 non ha bisogno di personale operativo, così ottimizza il trasporto dei pallet e lascia i dipendenti liberi di svolgere attività più produttive. Il robot collaborativo autonomo MiR1350 compie manovre sicure intorno a ogni ostacolo e se una persona incrocia la sua traiettoria, il robot si ferma. La tecnologia avanzata e il sofisticato software consentono al robot di spostarsi in autonomia e di scegliere il percorso più efficiente per raggiungere la destinazione. Quando incontra un ostacolo corregge automaticamente la direzione e può ricalcolare il percorso per evitare di interrompere o ritardare la consegna dei materiali. Il MiR1350 lo si controlla tramite smartphone, tablet o computer e si può programmare anche senza esperienza di programmazione. Il robot si può integrare nel sistema ERP aziendale per creare soluzioni completamente automatizzate ed anche è possibile aggiungerlo alla flotta MiR esistente, insieme al resto dei robot MiR, che si possono quindi controllare nella stessa flotta. È possibile cambiare rapidamente e facilmente i moduli superiori del MiR1350 in base alle esigenze, applicando ad esempio forche per pallet, nastri trasportatori, bracci robotizzati o altri moduli. Nonostante siano numerosi gli ambiti in cui la robotica mobile può essere applicata, resta importante in particolare il settore della Logistica. Vediamo come viene gestito il flusso dei veicoli all'interno di un reparto e come si punta all'ottimizzazione dei processi.

CAPITOLO 4- ROBOT MOBILI A SUPPORTO DELLA LOGISTICA

4.1. Definizione della funzione logistica

La logistica è la disciplina che tratta in maniera organica e sistematica la gestione integrata dell'intero ciclo operativo dell'azienda, attraverso le sue principali funzioni di gestione di materiali, gestione della produzione e di gestione della distribuzione fisica dei prodotti finiti, avendo come fine ultimo quello di garantire ai clienti un servizio di elevato livello, fornendo prodotti di alta qualità con rapidi tempi di risposta e a costi contenuti. Strumenti fondamentali per ottenere tutto ciò sono, integrazione e flessibilità; che andremo ad analizzare con maggior dettaglio.

4.1.1. Integrazione ed automazione logistica

All'interno della catena logistica, che si può analizzare nella figura 25, si individuano due flussi principali: quello fisico, che procede dal fornitore al cliente e quello informativo, che procede in senso inverso.

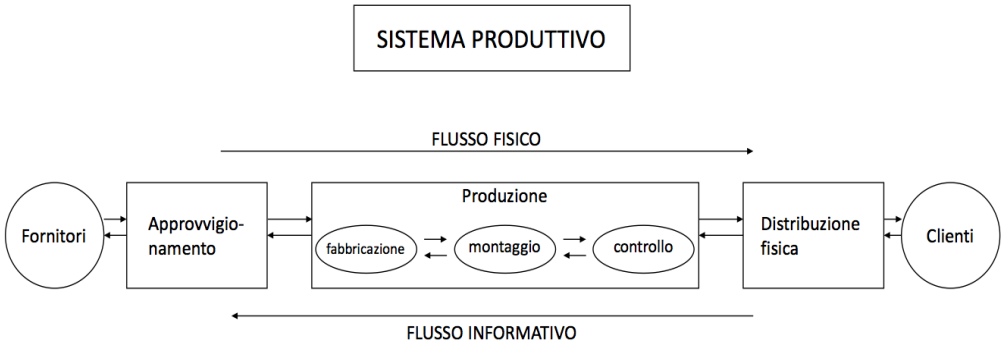

Figura 27. Sistema produttivo

Nella realtà aziendale le tre funzioni principali della logistica, quali; gestione dei materiali e approvvigionamento delle materie prime e dei componenti, gestione della produzione, gestione della distribuzione fisica dei prodotti finiti, hanno un peso relativo diverso passando da settore a settore.

Fondamentale, tuttavia, in qualsiasi azienda si vada a considerare, è garantire un elevato livello di servizio al cliente, ciò significa essere in grado di:

- Eseguire la fornitura dei prodotti o servizi, richiesti dal cliente, nella quantità, nella condizione, nel luogo e nel tempo richiesti;
- Garantire una qualità che risponda alle aspettative del cliente;
- Tempi rapidi di risposta.

L'integrazione risulta essere il principale strumento per realizzare gli obiettivi, riducendo inefficienze e tempi di inattività. Il concetto di logistica integrata è stato sintetizzato in modo preciso nella definizione proposta

dal Council of Logistics Management nel 1986, secondo cui essa rappresenta il processo per mezzo del quale pianificare, attuare e controllare il flusso delle materie prime, dei semilavorati e dei prodotti finiti, e dei relativi flussi di informazioni, dal luogo di origine al luogo di consumo, in modo da renderlo il più possibile efficiente e conforme alle esigenze dei clienti. L'evoluzione del concetto di logistica integrata è l'idea del Supply chain management caratterizzata dalla presa di coscienza da parte delle aziende che il miglioramento nella gestione dei flussi all'interno della catena logistica non può prescindere dal fattivo coinvolgimento degli attori esterni: la logistica assume un ruolo sempre più centrale ed il suo obiettivo diventa sostanzialmente quello di governare tutte le fasi del processo produttivo, anche esterne all'azienda, secondo una visione sistemica. In quest'ottica, il concetto di Supply chain management non deve essere inteso come sinonimo di logistica integrata, ma come un nuovo approccio di management in cui la singola azienda diventa parte di una rete di entità organizzative che integrano i propri processi di business per fornire prodotti, servizi e informazioni che creano valore per il consumatore. Il passaggio della logistica da una funzione sussidiaria ad un ruolo strategico si è accompagnato in molte aziende ad una propensione a esternalizzare le attività di trasporto e di movimentazione delle merci, affidando a terzi un compito che non rientra nel core business aziendale allo scopo di minimizzare i costi ed assicurare maggiore flessibilità alla struttura produttiva.

La logistica integrata è dunque una vera e proprio rivoluzione metodologica. È il modo migliore per gestire il flusso di materiali dal fornitore al consumatore finale, garantendo due aspetti essenziali: qualità del prezzo e del servizio.

4.1.2. Il concetto di flessibilità

La variabilità del mercato odierno richiede una continua evoluzione dei prodotti offerti, nonché una loro più spinta personalizzazione. Per questo motivo diviene necessario realizzare una produzione flessibile ed elastica, il che lo si può ottenere attraverso l'automazione flessibile dei sistemi e dei processi produttivi. L'automazione flessibile è stata una tendenza indotta in gran parte dall'economia di mercato, che significa ricerca di nuove tecnologie di fabbricazione per ridurre i prezzi dei prodotti; significa ancora produzione di una maggiore varietà di prodotti al fine di una loro sempre più spiccata personalizzazione, nonché introduzione di nuovi prodotti. Ormai nell'epoca moderna si parla di **produzione flessibile** e la fabbrica moderna si caratterizza per:

- Elasticità del sistema produttivo per rispondere a variazioni quantitative del mercato (variare la capacità produttiva);
- Flessibilità del processo produttivo per rispondere a variazioni qualitative del mercato (variare il mix produttivo).

Per flessibilità del processo produttivo si intende:

- Flessibilità nelle attrezzature di produzione;

- Flessibilità nel sistema logistico;
- Flessibilità nel sistema di gestione e controllo.

4.2. Sistema flessibile di assemblaggio

In azienda diventa fondamentale quello che è un sistema flessibile di assemblaggio (**FAS**), più stazioni automatiche di assemblaggio per una "famiglia" di prodotto determinano un FAS. Anche le attività di collaudo e verifica dei prodotti possono essere automatizzate attraverso dispositivi automatici, eventualmente assistiti da robot. Il flusso fisico dei materiali all'interno dei sistemi flessibili di fabbricazione (FMS) e di assemblaggio (FAS) viene assicurato da sistemi che utilizzano trasportatori automatici che possono essere sia di tipo rigido (convogliatori a rulli rotanti, a nastro, etc..); sia di tipo flessibile. A proposito di trasportatori automatici di tipo flessibile, molto innovativi sono quelli che utilizzano gli AGV (Automated Guided Vehicle) a guida automatica di diverso tipo (come analizzato nel Capitolo II). Il carrello AGV, sempre equipaggiato con un calcolatore, riesce a muoversi lungo dei percorsi molto complessi ed estremamente flessibili, determinati dal sistema di guida, scambiando materiali con centri di lavoro, celle di lavorazione o stazioni di assemblaggio, eventualmente con l'aiuto di robot. Più carrelli AGV costituiscono un sistema flessibile di trasporto, gestito da un calcolatore principale col quale sono interfacciati i calcolatori dei singoli carrelli AGV. Il sistema centrale provvede in tempo reale al controllo della guida; al rilievo delle posizioni della flotta; alla gestione delle richieste di trasporto, tenendo conto di opportune regole di priorità; all'elaborazione degli ordini di missione per i singoli carrelli. A tal proposito, analizzeremo nel paragrafo successivo quelli che sono i criteri di progettazione di un sistema di trasporto flessibile con carrelli AGV.

4.3. Criteri di progettazione di un sistema di trasporto flessibile con carrelli AGV

La progettazione di un sistema di trasporto flessibile di carrelli AGV richiede nella fase iniziale, di definire la posizione delle stazioni di carico e scarico e la rete di percorsi, tenendo conto delle direzioni possibili.

Successivamente si procede alla determinazione del numero di carrelli necessari per le attività di trasporto, infine si deve verificare il sistema così generato nel suo comportamento dinamico, eliminando eventuali problemi di congestione del traffico. A livello schematico, abbiamo:

1. LAY-OUT	
2. SCELTA STAZIONI	Carico, scarico, attesa
3. SCELTA PERCORSI	Il più possibile rettilinei
4. DISTANZA TOTALE	Da percorrere in un intervallo prefissato, tenendo conto dei flussi (From-to-chart)

5. TEMPO TOTALE	Per un solo carrello, assegnando una velocità media -> Vm= 0,4-0,7 [m/s]
6. MAGGIORAZIONE	Per i tempi di carico, scarico, attesa
7. TEMPO COMPLESSIVO	
8. NUMERO MINIMO CARRELLI	Rapporto tra tempo complessivo e durata di riferimento (1 turno)
9. SCELTA TIPO DI CARRELLO	Con rifermento non solo alla velocità media ma anche a: velocità di punta, accelerazione, decelerazione, portata max, etc.
10. VERIFICHE DI PROGETTO	
11. AFFINAMENTO MEDIANTE SIMULAZIONE	Evidenziare interferenze tra carrelli, errori percorsi

Tabella 1. Procedura per il progetto di un sistema AGV

4.3.1. Esempio di progettazione di un sistema di carrelli AGV

- Si suppone che la definizione del layout produttivo con la posizione delle stazioni di carico e scarico (numerate da 1 a 9) e la scelta dei percorsi preferenziali sono già state eseguite, come riportato nella figura 26. Le lettere A-B-C-D-E, individuano alcuni nodi dei percorsi. A fianco di ogni stazione viene riportato il simbolo (D-k), che sta ad indicare che k carrelli vengono scaricati (Drop off-k) nella stazione durante un turno di lavoro, o il simbolo (P-y), indicante che y carrelli vengono caricati (Pick up-y) nella stazione durante il turno di lavoro. I valori k e y sono noti dal foglio origine-destinazione, una matrice in cui sulle righe e sulle colonne sono indicati i reparti di lavorazione (o i macchinari), mentre nelle caselle viene indicato il flusso totale (**Φ),** dei prodotti che si spostano da un reparto all'altro.

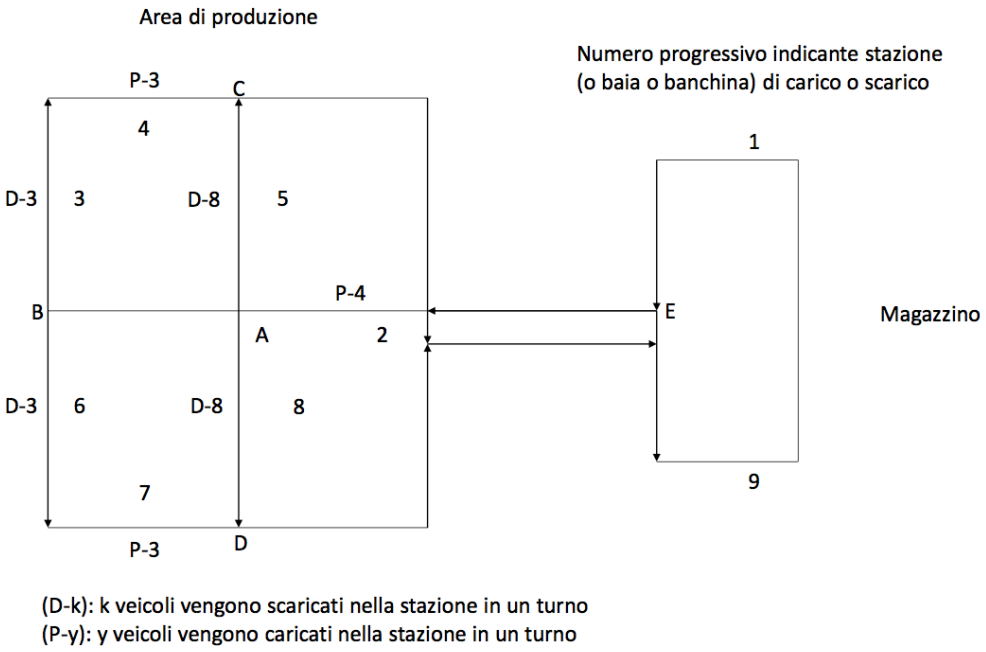

Figura 28. Layout relativo al problema esaminato con stazioni di carico e scarico

Con riferimento al seguente schema sottostante:

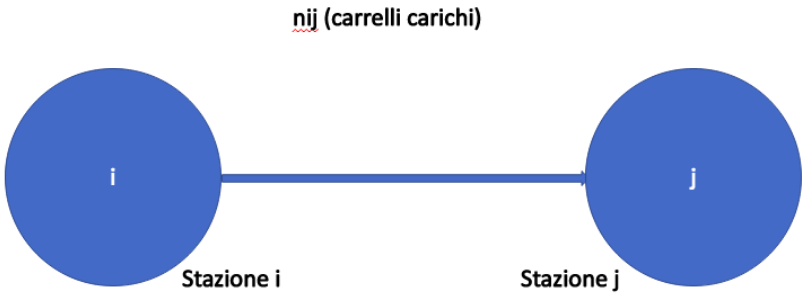

Figura 29. Numero di carrelli carichi per andare da una stazione "i" a una stazione "j"

Possiamo indicare con n_{ij} numero di carrelli carichi che durante un turno di lavoro si devono spostare dalla stazione "i" alla stazione "j"; mentre con t''_{ij} si intende il tempo necessario per caricare un carrello in "i", spostarlo in "j" e scaricarlo.

Ci sono delle caratteristiche di sistema che vanno considerate:

- ★ I veicoli si muovono in una sola direzione lungo un segmento;
- ★ I veicoli non si sorpassano lungo un segmento;
- ★ I tempi di carico e scarico sono noti per ogni lavorazione;

- ★ Importante la conoscenza della velocità media per i tempi di carico e scarico;
- ★ È noto il carico da muovere da una stazione ad un'altra.

Definiremo in tal senso le seguenti variabili:

- t_{ij}: tempo di carico in "i" (load);
- u_j: tempo di scarico in "j" (unload);
- t'_{ij}: tempo di percorrenza di un veicolo carico per andare da "i" a "j",

Si ottiene che il tempo complessivo t''_{ij} relativo al trasporto dalla stazione "i" alla stazione "j" vale:

(1) $$t''_{ij} = t_i + u_j + t'_{ij}$$

Importante è scegliere il minor tracciato di percorrenza, per cui abbiamo:

(2) $\sum n_{ij}$ Numero di veicoli necessari alla stazione i-esima per movimentare il materiale di turno

(3) $\sum n_{ij}$ Numero di veicoli in arrivo alla stazione j-esima nel turno

Bisogna inoltre considerare che per ogni inizio o fine turno, vi sarà un certo numero di viaggi a vuoto di ribilanciamento per riportare il sistema alle condizioni iniziali e predisporlo per la produzione del turno successivo. Il tempo complessivo per le attività di trasporto nel turno è rappresentato da:

(4) $$\sum_i \sum_j n_{ij} \cdot t''_{ij}$$

Al netto di eventuali viaggi a vuoto all'inizio o alla fine del turno per esigenze di bilanciamento del sistema, si stabilisce una maggiorazione in termini temporali pari a ΔH.

Indicando con h le ore di disponibilità di un carrello AGV in un turno, si ottiene il numero minimo di carrelli Y:

(5) $$\frac{H}{h} = X \rightarrow |X| = Y$$

Il flusso netto di carrelli alla stazione i-esima vale, NF(i):

(6) $$NF(i) = -\sum_i n_{ij} + \sum_j n_{ij} + f_i - g_i$$

Dove gli addendi hanno la seguente rappresentazione:

$-\sum_i n_{ij}$	Flusso uscente da i
$+\sum_J n_{ij}$	Flusso entrante in i, proveniente da j
$+f_i$	Veicoli disponibili in "i" ad inizio turno
$-g_i$	Veicoli richiesti alla stazione "i" a fine turno

Deve essere per quanto possibile:

(7) $$\sum NF(i) = 0$$

Diventa pertanto importante ragionare sul come ricollocare in modo ottimale i veicoli e assumiamo a tal proposito che:

- $\boldsymbol{t_{ij}}$ è il tempo del percorso più breve da "i" a "j" quando il veicolo è scarico;
- $\boldsymbol{x_{ij}}$ è il numero di viaggi a veicolo vuoto che dovrebbero essere fatti dalla stazione "i" alla stazione "j" per esigenze di ribilanciamento.

Il problema rappresentato dalle seguenti formule è un problema di programmazione lineare, dove tutte le variabili hanno valori interi.

I dati di input richiesti sono tempi di movimento di un veicolo scarico da un nodo alla stazione più vicina su un segmento che parte da quel nodo, oppure da un nodo iniziale a uno terminale. Sono assegnati i seguenti dati relativamente ai tempi medi di trasferimento tre le zone del lay-out in oggetto. (Vedi tabella 2). Da questi si ricava il tempo minimo di viaggio tra le stazioni, in assenza di fenomeni di interferenza tra i carrelli; nel foglio origine destinazione questi tempi vengono riportati in espressi in minuti.

From (Da)	To (A)	TEMPO (secondi)
A	B	52
A	5	80
A	8	56
B	3	52
B	6	52
5	C	48
8	D	48
3	4	144
6	7	132

C	E	210
D	E	210
4	C	48
7	D	36
E	9	126
9	1	166
1	2	180
2	A	40

Tabella 2. Tempi medi di trasferimento tra le zone del layout senza considerare i tempi di carico e/o scarico

Tutti i procedimenti che abbiamo riportato sono necessari sostanzialmente ad applicare una serie di metodi, basati sulla PLI (Programmazione Lineare), e sul metodo del simplesso, che sfruttando i dati che si ritrovano sul foglio origine destinazione, portano alla determinazione del numero minimo di carrelli necessario a svolgere il proprio lavoro. Si deve andare sostanzialmente a comprendere la relazione che intercorre tra il flusso di veicoli disponibili e quello di veicoli effettivamente necessari, richiesti per una determinata mansione.

Riporteremo infatti a tal proposito uno schema a grafo; la teoria dei grafi è stata oggetto di studio in Ricerca Operativa, oltre che ritrovata nelle varie applicazioni in Impianti Industriali; pertanto, riporto una breve definizione di grafo.

Un grafo $G = (V, A)$ è definito da un insieme di vertici/nodi *V* e da un insieme di archi/spigoli *A*. In particolare, *A* rappresenta un insieme di coppie ordinate di vertici/nodi (ad esempio, (*i,j*) con *i* e *j* in *V*). Ognuna di queste coppie sarà definita come o uno **spigolo** o un **arco**.

I grafi possono essere orientati o non orientati. Nel primo caso, l'insieme degli archi è denotato con *A* e $w(i,j) \neq w(j,i)$. Nel secondo caso, l'insieme degli spigoli è indicato con *E* ed $w(i,j) = w(j,i)$. In un grafo non orientato, il numero di spigoli che incide in un nodo è detto grado del nodo. Nel caso di nodo isolato, il suo grado è nullo. Il grado massimo di un nodo è$\frac{n(n-1)}{2}$, con *n* numero di nodi, nel caso di grafo completo, cioè quando, per ogni coppia di nodi del grafo esiste un arco che li collega.

In un grafo orientato, si definisce grado di ingresso (grado entrante) di un nodo, il numero di archi entranti nel nodo; si definisce grado di uscita (grado uscente) di un nodo, il numero di archi uscenti dal nodo. Grafi in cui tutti i nodi hanno lo stesso grado *t* sono grafi regolari di grado *t.*

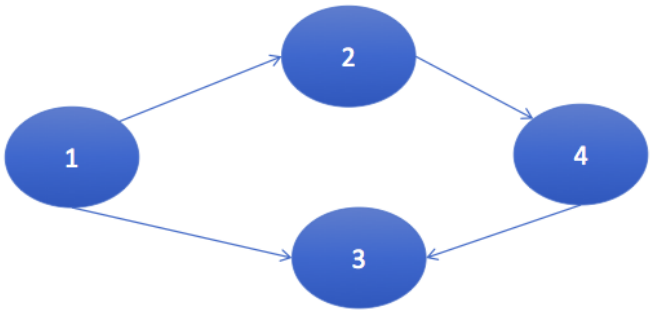

Figura 30. Grafo orientato

Dato un grafo orientato, un taglio è ottenuto partizionando i nodi in due sottoinsiemi disgiunti V' e V'' così che: $V' \cup V'' = V, V' \cap V'' = \emptyset$

Pertanto, dato un taglio $V' \subset V''$, l'insieme degli archi entranti è $cut^{+}(V')$ mentre quello degli archi uscenti è $cut\ (V')$, così come indicato di seguito:

(7) $$cut^{+}V' = \{(i,j)|i \in V', j \notin V'\}\ cut^{-}\{(i,j)|i \notin V', j \in V'$$

Esempio: V' = 1,4 → $cut^{+}(V')$ e $cut^{-}V'$.

Riportiamo dunque lo schema a grafo, riferito ad un flusso di carrelli vuoti:

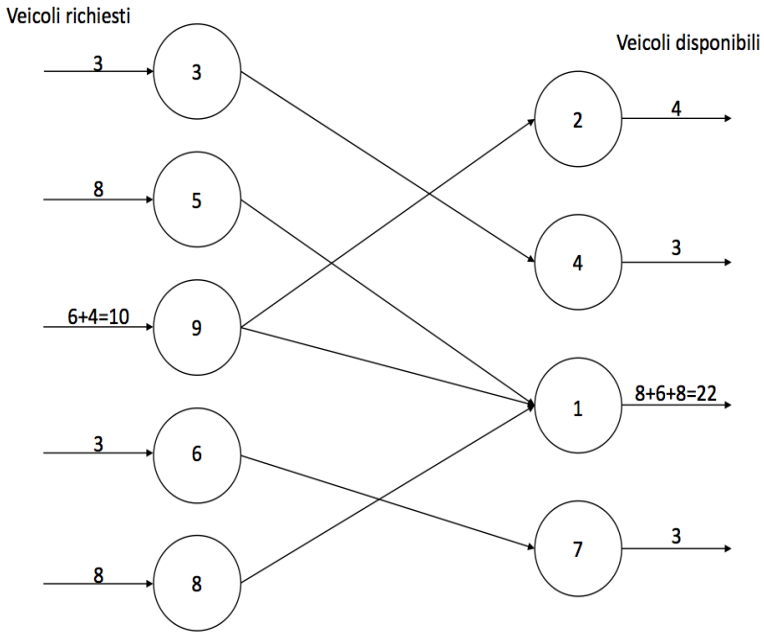

Figura 31. Flusso di carrelli vuoti

Se il problema presenta un elevato numero di incognite, si deve ricorrere alla **programmazione lineare.** In questo caso la funzione obiettivo diventa:

(8) $$S = \sum_i \sum_j x_{ij} t_{ij} = 0 \cdot x_{11} + 3 \cdot x_{12} + 5{,}4 \cdot x_{13} + \cdots + 7{,}4 \cdot x_{98} + 0 \cdot x_{99}$$

Si tratterà di 81 incognite X_{ij} di cui 9 sicuramente nulle.

Eliminando le X_{ij} sicuramente nulle ed utilizzando il metodo del simplesso, si ottiene una soluzione identica a quella riportata in precedenza cui corrisponde un valore minimo della funzione obiettivo, pari a:

(9) $$S = \Delta H$$

Pari a 199,4 minuti.

Assumiamo ora $t_1 = t_2 = u_9 = 5$ minuti e si procede con il calcolare che

(10) $$\sum_i \sum_j n_{ij} \cdot t''_{ij} = 923\ minuti$$

Tutto questo procedimento porta alla determinazione del numero minimo di carrelli necessari, ovvero Y=3, seguendo tutte le formule e i dati calcolati in precedenza.

Fino a questo punto, ad ogni modo, non si è considerato l'aspetto dinamico, ovvero il comportamento del sistema in funzione del tempo. Il problema dinamico viene affrontato con un programma di simulazione che si basa sull'emettere determinate soluzioni, tenendo conto delle regole di precedenza degli ordini. La soluzione ottimale è quella che permette di soddisfare gli ordini al tempo dovuto e senza fenomeni di bloccaggio dei flussi di carrelli.

Ci sono delle osservazioni da fare, per minimizzare il problema della congestione dei flussi. Ad esempio, i punti di scarico e carico devono essere collocati in maniera ragionata, per evitare fenomeni di blocco, dovuti ad esempio all'attesa di altre operazioni da svolgere. Un'ulteriore osservazione è relativa alle isole di lay-out; alcune dovrebbero essere dedicate al transito e non solo al lavoro.

Il buon comportamento dinamico del sistema dipende dalle regole di impiego dei carrelli e dalle regole in base alle quali si organizzano le missioni previste. Il sunto del discorso è quello di elaborare una serie di regole di gestione del traffico ("dispatching"), cioè la determinazione della sequenza di lavoro. È importante per ovviare a questo problema, partire da alcune ipotesi semplificative per affrontare il problema dinamico, creando un modello che sia concettualmente semplice. Alcune ipotesi semplificative potrebbero essere le seguenti:

- L'area produttiva costituita da una linea di assemblaggio a cadenza fissa (tempo di ciclo costante); quindi si riterrà costante il numero di unità di carico da prelevare all'uscita della linea di montaggio per ogni ora del turno;

- Il consumo dei componenti da assemblare deve essere costante, quindi deve essere costante il numero di unità di carico da consegnare all'inizio della linea di montaggio.

Non affronteremo la risoluzione del problema dinamico con le sue varie fasi, ci limitiamo ad accennarlo come fatto di sopra, affrontiamo invece ora un'ultima tematica, strettamente importante da valutare, ovvero le considerazioni economiche sull'acquisto di un sistema AGV, quando risulta conveniente o meno.

4.4. Considerazioni economiche sull'acquisto di un sistema AGV

Un impianto AGV richiede un rilevante dispendio economico; generalmente per i sistemi AGV ad alta complessità incidono anche i costi di ristrutturazione del layout e di integrazione del sistema in sé con il resto dell'azienda.

Una classificazione orientativa dei costi è quella riportata qui in basso, nella figura 30:

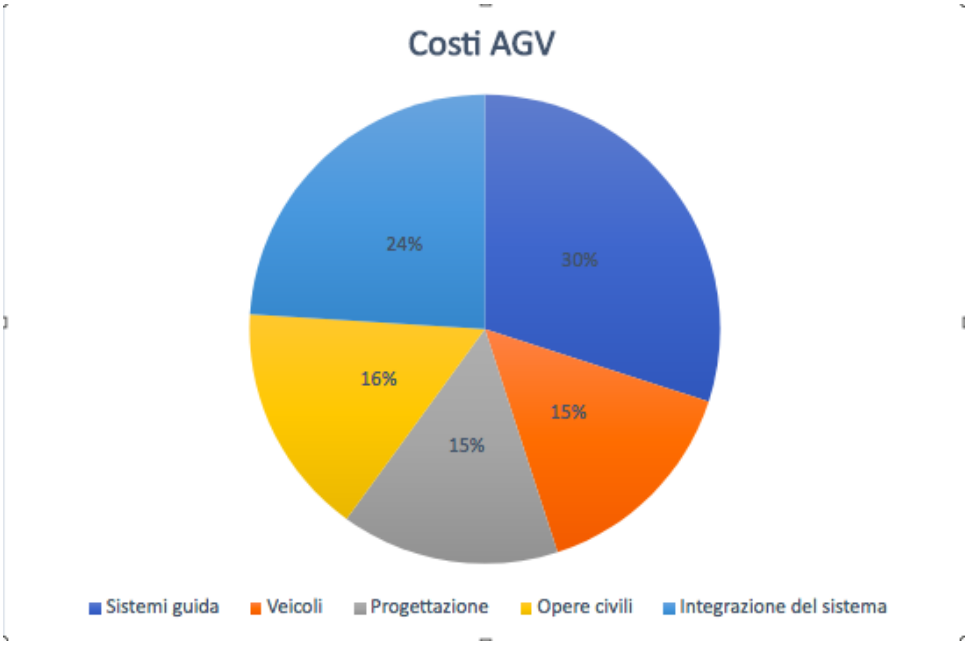

Figura 32. Dispendio economico legato all'acquisto di un sistema AGV

Il costo di manutenzione annuo è stimabile attorno 2% del costo annuale di impianto; il periodo di ammortamento è pari a 7 anni, mentre il periodo di recupero è attorno ai 3 anni. Oltre alle considerazioni economiche per capire quanto sia conveniente acquisire un sistema AGV bisogna identificare le esigenze a lungo termine, tenendo conto di:

- Previsti cambiamenti da operazioni manuali ed automatiche;
- Limiti fisici a future espansioni;
- Sviluppo sistemi CAD/CAM;
- Sviluppo o cambiamenti del sistema in ottica CIM (***Nota**);

- Modelli dei futuri prodotti o innovazioni alla gamma produttiva;
- Esigenze di sicurezza.

***Nota**: Il sistema CIM (Computer Integrated Manufacturing- fabbricazione integrata col calcolatore), rappresenta una gestione computerizzata di tutte le attività aziendali, che siano produttive (fabbricazione, assemblaggio, flusso dei materiali...), o di servizio (acquisizione degli ordini, distribuzione e spedizione, approvigionamento...).

4.4.1. L' importanza della sicurezza

Per un sistema AGV, è in primo luogo, importante che venga garantita la sicurezza del personale che opera negli stessi spazi degli AGV, per esempio operatori o personale di manutenzione, ma una volta che questo requisito è stato considerato soddisfatto, un sistema AGV, per essere ritenuto un buon investimento, deve soddisfare i seguenti requisiti:

- massima produttività;
- minimo numero di incidenti a persone e cose;
- nessun errore di tracciabilità dei carichi.

La tracciabilità dei carichi è indispensabile, per esempio, nelle industrie alimentari e nel farmaceutico, dove il veicolo deve assicurare il prelievo del corretto oggetto. I dispositivi di sicurezza, montati sui veicoli, garantiscono l'ottenimento dei suddetti requisiti, facendo così dei sistemi AGV un ottimo compromesso tra sicurezza, produttività e affidabilità.

Per quanto riguarda la sicurezza del personale, bisogna tener conto di regole ben precise che devono essere rispettate dai conducenti dei carrelli elevatori, delle vere e proprie norme; alcune riportate qui di seguito, come:

1. Non sostare sulle piste degli AGV;
2. Dare la precedenza;
3. Non mettersi mai di spalle rispetto alla direzione dell'AGV;
4. Non transitare all'interno delle aree operative di carico e scarico degli AGV;
5. In caso di operazione non completata prima dell'arrivo dell'AGV, scendere dal carrello elevatore e premere lo STOP situato sull'AGV.

I metodi di sicurezza nei sistemi AGV più utilizzati sono dispositivi che permettono alla macchina di rilevare presenze estranee sul suo percorso in modo tale da potersi fermare tempestivamente, e sistemi che permettano alla macchina di trasportare il carico da una stazione all'altra preservandone l'integrità. I dispositivi più utilizzati sono sensori fisici che tramite pressione o tramite scansione rilevano un possibile rischio che viene tempestivamente segnalato all'AGV, che provvede alla frenata. Ad esempio, se durante la

normale operatività di un AGV qualcuno dovesse passare davanti alla macchina in movimento a una distanza ritenuta pericolosa (generalmente a 1 o 2 metri se si tratta di scanner o 1 metro se si tratta di un bumper di sicurezza) l'AGV dovrà fermarsi immanente per evitare lo scontro. Inoltre, spesso sono provvisti di un profilo di sicurezza sensibile che in caso di contatto in ogni punto del contorno della macchina invia un segnale d'allarme che attiva la frenata o comunque il rallentamento. Inoltre, sono spesso provvisti di pulsanti di arresto rapido di emergenza in più di un punto sul telaio della macchina in modo che in caso di pericolo o di necessità possano essere premuti da un operatore; l'AGV anche in questo caso provvederà a una veloce frenata indipendentemente dal task che sta svolgendo. Il pulsante rimarrà premuto fino allo sblocco manuale dello stesso, e l'AGV rimarrà fermo di conseguenza. Un altro metodo per garantire la sicurezza sono segnali acustici e visivi che l'AGV produce durante le sue manovre per far sì che la sua presenza possa essere rilevata da chiunque stia operando nei dintorni.

4.4.2. Gli AMR per assicurare sicurezza sul posto di lavoro

Nella produzione moderna, la necessità di riduzione dei tempi di produzione per lotti di maggiore qualità e quantità sta aumentando la pressione sull'efficienza operativa. Questo fattore fornisce preoccupazioni operative, e può influire sui protocolli di sicurezza dei dipendenti, aumentando sempre più gli infortuni sul lavoro.

E la preoccupazione non è infondata: solo negli Stati Uniti c'è il 90% di probabilità che un carrello elevatore sia coinvolto in un incidente grave. La *Occupational Safety & Health Administration* stima anche che i carrelli elevatori causano 61.800 infortuni minori e 34.900 infortuni gravi all'anno.

Per questo motivo, diverse aziende ad oggi stanno puntando sugli AMR (autonomous mobile robot) per affrontare questa sfida e proteggere i loro lavoratori e le imprese.

I robot mobili autonomi sono un'alternativa collaborativa, sicura e flessibile ai carrelli elevatori in fabbrica. Questi modelli sono in grado automaticamente di prelevare, trasportare e consegnare pallet attraverso ambienti dinamici, rimuovendo gli esseri umani da compiti a più alto rischio.

Presentano scanner laser, telecamere 3D e sensori di prossimità che alimentano i dati in un algoritmo di pianificazione. Questo permette al robot di navigare autonomamente e di agire di conseguenza con umani o ostacoli che incontra sul percorso e navigare in modo sicuro intorno a loro, con la possibilità che il robot interrompa ogni sua attività quando gli ostacoli si fanno troppo vicini.

Mentre il ruolo del carrello elevatore rimarrà necessario per molte operazioni, l'aggiunta di robot mobili autonomi contribuirà a mantenere il personale in sicurezza assumendo quei compiti ripetitivi e rischiosi, riducendo così anche il rischio di collisioni.

CAPITOLO 5- CONCLUSIONI

5.1. Il futuro della robotica mobile

Lo scenario della robotica industriale è destinato a trasformarsi notevolmente nei prossimi dieci anni. Degli 8 milioni di robot, che si prevede saranno venduti nel 2030 in tutto il mondo, quasi 6 milioni saranno mobili. In pratica, 3 su 4 non saranno più macchinari e strumenti di automazione fissi e statici, ben piantati per terra, come si vedono oggi in molte catene di produzione; ma saranno sistemi in grado di spostarsi autonomamente tra gli ambienti e spazi dell'azienda. Alle loro capacità di costruire, realizzare, produrre, verranno quindi sempre più abbinate anche quelle di muoversi, riconoscere eventuali ostacoli e imprevisti, e il percorso da seguire per arrivare a destinazione. Attualmente, l'automazione mobile è innanzitutto concentrata nella movimentazione dei materiali all'interno della catena di fornitura e montaggio, di prodotti e materiali, ma i robot mobili sono destinati a entrare e svilupparsi in ogni settore dell'economia per una vasta gamma di casi d'uso. Ad esempio, a fine 2021 si è constatato che alcuni settori hanno avuto una notevole crescita nell'utilizzo di AMR, come ad esempio:

- Trasporto di merci o merci. Il fatturato dei robot mobili autonomi (AMR) e dei robot di consegna è cresciuto dell'11% a oltre 1 miliardo di dollari USA. La maggior parte delle unità vendute opera in ambienti interni per produzione e magazzini. La tendenza va verso soluzioni flessibili, in modo che gli AMR agiscano in ambienti misti insieme ad esempio con carrelli elevatori, altri robot mobili o esseri umani;
- Robot impiegati per la pulizia professionale. La domanda è cresciuta del 92% a 34.400 unità vendute. In risposta ai crescenti requisiti di igiene dovuti alla pandemia di Covid-19, più di 50 fornitori di servizi di robot hanno sviluppato robot per la disinfezione, spruzzando fluidi disinfettanti o utilizzando la luce ultravioletta. Spesso i robot mobili esistenti sono stati modificati per fungere da robot di disinfezione. Esiste un alto potenziale in corso per i robot di disinfezione negli ospedali e in altri luoghi pubblici. Si prevede che le vendite unitarie di robot per la pulizia dei pavimenti professionali cresceranno in media a due cifre ogni anno dal 2021 al 2024.

Infatti, a proposito della pandemia di Covid-19; secondo la ricerca condotta nel 2020 da Mckinsey Global, il Covid-19 ha indotto le aziende ad accelerare i processi di digitalizzazione delle proprie operazioni interne, anticipando di tre o quattro anni l'implementazione di alcune soluzioni. All'interno del comparto della robotica vi è un segmento che più di altri ha mostrato una crescita costante, consolidando un'interessante e ormai innegabile presenza sul mercato negli ultimi tre anni (dati IFR): la robotica collaborativa. Una soluzione di automazione che risponde efficacemente ai bisogni delle piccole e medie aziende manifatturiere per semplicità d'uso, rapidità di implementazione, flessibilità applicativa, rapido ritorno d'investimento. In particolare, la crescita in doppia cifra, (+19,6% di andamento tendenziale previsto fra il 2020 e il 2027, fonte. Grand View Research) della robotica mobile, apre a ulteriori riflessioni. Gli AMR (autonomous mobile robots)

hanno infatti garantito in questo periodo di riduzione del personale e di distanziamento sociale obbligatorio, un più elevato tasso di sicurezza all'interno dei luoghi di lavoro.

Gli esperti di automazione prevedono un'enorme crescita di questi sistemi in tutti i settori di attività, per arrivare a un valore di mercato totale pari a 230 miliardi di dollari entro il 2030, secondo le stime di Abi Research, società specializzata nella consulenza del mercato tecnologico. L'Italia è decima, per densità di robot nelle aziende, ovvero quanti dispositivi si contano ogni 10 mila addetti; con 190 robot ogni 10mila lavoratori, secondo i dati dell'Ifr, la federazione internazionale dei produttori di robotica.

5.1.1. Flessibilità e sicurezza degli AMR

Attualmente, gli Automated guided vehicle rappresentano la maggior parte delle vendite di robot mobili, ma entro il 2030 la situazione cambierà in modo netto. Mentre ci saranno 2,5 milioni di Automated guided vehicle venduti nel 2030, nello stesso anno le vendite totali di Autonomous mobile robot raggiungeranno i 2,9 milioni di unità. Quindi entro il prossimo decennio si realizzerà uno sviluppo notevole degli Autonomous mobile robots. Ciò sarà dovuto innanzitutto al calo dei costi per una navigazione di alta qualità delle macchine, e al desiderio di introdurre più flessibilità nelle flotte robotizzate. Molti settori di attività, come le consegne, le infrastrutture logistiche e di trasporto, saranno dotati di sistemi automatizzati che non richiederanno infrastrutture fisiche esterne per potersi muovere.

E così, secondo le previsioni degli addetti ai lavori, mentre gli Agv verranno impiegati prettamente nell'intralogistica, per le operazioni più ripetitive e all'interno di spazi e processi sempre uguali; gli Amr saranno la soluzione più adatta alle diverse esigenze di molti utenti finali, offrendo un'automazione più adattabile e meno limitata.

Connessa alla crescita della robotica mobile autonoma, c'è lo sviluppo e la produzione di MRE (mobile robotics equipments), ovvero gli accessori che rendono i robot mobili davvero applicabili. Si tratta di elevatori, carrelli, forche, scaffali mobili, che integrati sull'AMR fanno sì che questo possa essere utilizzato in contesti diversi e con flessibilità. Gli MRE sono l'estensione che amplia il range applicativo del robot/cobot. Se inizialmente alcune di queste soluzioni venivano prodotte internamente dalle aziende, ora il mercato si sta spostando verso soluzioni standardizzate, prodotte e concepite per un uso plug&play con i robot mobili e capaci, quindi, di incrementare il tasso di efficienza e produttività delle operazioni. La movimentazione delle merci avviene in contesti altamente congestionati, in cui l'attività umana, la presenza di prodotti e di strutture fisse, riduce lo spazio a disposizione. Utilizzare carrelli elevatori e transpallet a guida umana espone a un costante rischio di infortunio gli operatori che si muovono sul floor. La robotica mobile, opportunamente equipaggiata con i giusti MRE, offre un'alternativa flessibile e sicura in grado di azzerare il rischio, combinando sensoristica di elevata sensibilità e accessori di presa, carico e trasporto sicuri e testati.

5.1.2. La nuova generazione di AMR

C'è ancora molto da fare per migliorare la tecnologia applicata agli AMR (Autonomous Mobile Robots) in modo da renderli autonomi in termini di poteri decisionali, riguardo la possibilità di riuscire a comandare dispositivi a distanza e scegliere degli itinerari da percorrere e tanto altro. Questo costituisce una sfida per tutti i produttori di AMR, bisognerà lavorare allo sviluppo, contemporaneamente sia della parte hardware sia di quella software. L'obiettivo è quello di avere in futuro robot più performanti, sia dal punto di vista delle prestazioni, sia delle capacità, ciò sarà possibile grazie allo sviluppo di nuovi sistemi di visione, di sensoristica e di rilevamento, tutti elementi con un grande margine di sviluppo. Inoltre, si stanno sviluppando algoritmi dell'AI (Intelligenza Artificiale) sempre più sofisticati. Tutti questi aspetti contribuiscono alla creazione di AMR di nuova generazione che non solo saranno in grado eseguire i compiti assegnati ma, ad esempio, anche di aiutare i colleghi umani migliorando il benessere sul posto di lavoro. Il futuro della logistica passa anche attraverso questi strumenti, che saranno sempre più dei veri e propri collaboratori in grado di decidere autonomamente come svolgere al meglio i propri compiti.

5.2. i-Labs Jesi

A novembre è stato inaugurato a Jesi i-LABS Industry, il primo laboratorio marchigiano per la ricerca, il trasferimento tecnologico e la formazione sul tema industria 4.0.

Con il termine i-Labs si identificano le Piattaforme Tecnologiche della regione Marche: progetti di ricerca collaborativa, sviluppo e innovazione di portata strategica, per favorire la crescita economica e la competitività del Sistema Marche, attraverso la collaborazione, efficace e stabile tra il mondo accademico e imprenditoriale, favorendo contaminazione e condivisione di conoscenze soprattutto verso le piccole e microimprese. L'investimento si inserisce pienamente nella strategia nazionale delineata dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e il laboratorio, vuole essere un polo di innovazione in grado di attivare una collaborazione sinergica tra il mondo accademico e quello imprenditoriale, sulle tecnologie abilitanti per la produzione flessibile e personalizzata, secondo i paradigmi del precedente piano Industria 4.0.

Ad oggi sono presenti cinque robot collaborativi:

- Fanuc CRX 10i A/L
- Yumi
- UR5e
- UR10e
- TM 5-700

Figura 33. Yumi ABB

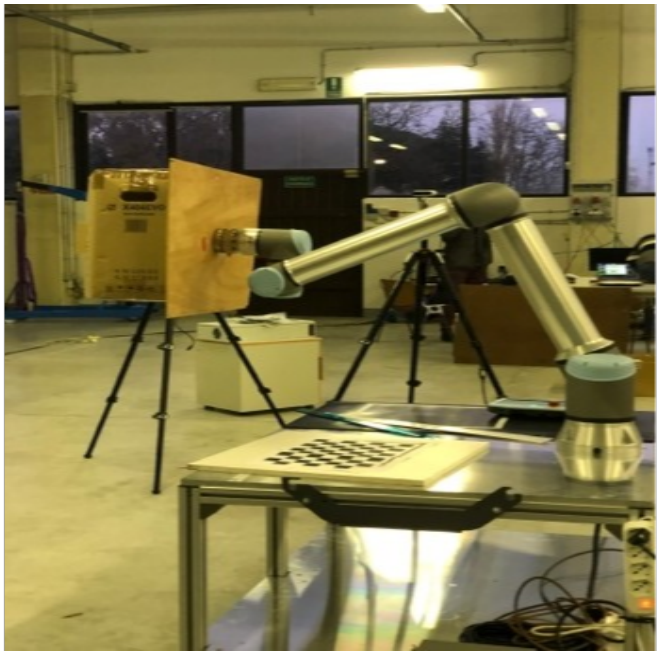

Figura 34. UR10e

Figura 35. TM 5-700

Un robot mobile collaborativo:

- KMR iiwa

Figura 36. KMR jiwa

Un robot mobile:

- MiR 200

Figura 37. Mir 200

All'interno del Laboratorio lavorano diversi ricercatori oltre che imprese, i quali cooperano al fine di garantire una rapida evoluzione verso i paradigmi dell'industria 4.0.

In particolare, ho avuto modo di interfacciarmi con l'Ingegner Daniele Costa, ricercatore di Meccanica Applicata alle Macchine.

Il quale, vertendo la mia tesi sulla robotica mobile, mi ha dato l'opportunità di toccare con mano due concetti fondamentali:

- La programmazione dei robot mobili: abbiamo analizzato insieme una mappa costruita dal MiR 200. L'Ingegner Costa mi ha mostrato il principio che c'è alla base, la teoria dei grafi, il rispetto delle priorità e la velocità con cui si muove il robot per spostarsi da un nodo ad un altro, nonché la capacità del robot di aggirare gli ostacoli, modificando semplicemente la traiettoria, senza fermarsi;
- La trazione: su questo argomento, con l'Ingegner Costa, abbiamo messo a confronto i due robot mobili presenti nel laboratorio. Ho potuto osservare da vicino le ruote omnidirezionali del KMR iiwa, che si differenziano da ogni altro tipo di ruota, avendo come peculiarità quella di essere costituite da cilindretti di Vulkollan, un materiale plastico, che sono posti a 45° l'uno dall'altro. La ruota omnidirezionale riesce a compiere un movimento traslatorio, consentendo di cambiare direzione più volte e in maniera molto più pratica.

Questi due macro-argomenti sono stati la base del mio capitolo III, dove ho approfondito e analizzato nello specifico quanto appreso dal Laboratorio di Jesi, effettuando anche dei confronti tra i diversi AMR dei principali produttori mondiali di robot.

L’ho trovata un’esperienza edificante, formativa e stimolante, dal momento che è stata un’occasione per avere un risvolto pratico e concreto dell’argomento affrontato nella mia tesi.

Ho trovato particolarmente interessante l’aspetto della programmazione, potendo osservare dal vivo l’intelligenza e l’accuratezza degli AMR (Autonomous Mobile Robots) e tutto l’aspetto legato alla sensoristica che avevo trattato nel capitolo II; in particolare l’utilizzo della SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) e dei laser scanner.

Ho avuto l’opportunità di visitarlo grazie al mio Relatore, il Prof. Massimo Callegari, docente di Meccanica applicata alle macchine, presso l’Università Politecnica delle Marche; nonché responsabile del laboratorio (i-Labs).

Lo ringrazio per la grande opportunità fornitami.

6- BIBLIOGRAFIA

Barbero, M. (2021, Giugno 4). AGILE1500. *Le soluzioni di robotica mobile autonoma per la logistica*, Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

Cazzulani, G. (2021, Giugno 4). Robotica Mobile Collaborativa. *Da robotica di servizio a robotica industriale e ritorno*, Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

Galeani, S. (2019, Novembre-DIcembre). Dagli AGV agli AMR. *Automazione Plus*, p. 134-135.

KUKA. (2021 , Giugno 4). Robotica Mobile e sue applicazioni in ambienti industriali strutturati e/o caotici, Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

Mina, M. (2021, Giugno 4). Applicazioni industriali per la robotica mobile collaborativa, Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

Montorsi, I. R. (2021, Giugno 4). La robotica mobile: applicazioni industriali. *Dall'AGV alla robotica mobile,* Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

Noor Abdul Khaleq Zghair, Ahmed S. Al-Araji (2021). *A one decade survey of autonomous mobile robot systems.* Baghdad, Iraq: International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE).

OMRON LD-250 ESD. Tratto da Omron: https://assets.omron.eu/downloads/brochure/en/v2/i860_ld-250_esd_leaflet_en.pdf

P.Hancke Gerhard, B.Alatise Mary (2020). *A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods.* IEEE Access.

Paciarotti, C. (2019/2020). Impianti industriali- Metodo di Hollier Noy, foglio origine-destinazione (from to chart) Fermo, AN, Italia: Università politecnica delle Marche.

Pareschi, A. (2011). In *Logistica integrata e flessibile*, capitolo 1, pag 1-4;11. Bologna: Società editrice esculapio.

Pareschi, A. (2011). In *Logistica integrata e flessibile*, capitolo 8, pag 191-207. Bologna: Società editrice esculapio.

Pareschi, A. (2011). Guida laser. In *Logistica integrata e flessibile. Per i sistemi produttivi dell'industria e del terziario. Con applicazioni numeriche e progettuali* (p. 185-186). Bologna: Società editrice Esculapio.

Pisacane, O. (2019/2020). Ricerca Operativa- Introduzione alla PLI, concetti generali, la teoria dei grafi. Fermo, AN, Italia: Università politecnica delle Marche.

Programma nazionale per la ricerca, Ministero dell'istruzione (2020). *Programma nazionale per la ricerca 2021-2027.*

Salvador M. Malagon-Soldara, Manuel Toledano-Ayala, Genaro Soto-Zarazua, Roberto V. Carrillo-Serrano, Edgar A. Rivas-Araiza. (2014). *Mobile Robot Localization: A Review of Probabilistic Map-Based Techniques.* Queretaro, Mexico : International Journal of Robotics and Automation (IJRA).

Zaccaria, R. (2021, Giugno 4). Metodologie avanzate per la robotica mobile, Corso Nazionale Automazione Industria e Robotica, SIRI.

7- SITOGRAFIA

A Bruno Siciliano il premio della IEEE Robotics and Automation Society. (s.d.). Tratto da Università degli studi di Napoli Federico II: https://www.unina.it/-/7397347-a-bruno-siciliano-il-premio-della-ieee-robotics-and-automation-society

Atzori, E. (2021, Giugno 15). *Tce Magazine*. Tratto da Lavasciuga pavimenti autonome: tra passato e presente, le ragioni del successo: https://blog.tuttocarrellielevatori.it/36100/lavasciuga-pavimenti-autonome-tra-passato-e-presente-le-ragioni-del-successo/

Boaglio, D. (2021 , Ottobre 29). *La metamorfosi degli AMR*. Tratto da Automazione Plus: https://automazione-plus.it/la-metamorfosi-degli-amr_130665/

Boaglio, D. (2021, Ottobre 28). *Come cambiano i robot mobili autonomi nelle applicazioni 4.0*. Tratto da Automazione industriale: https://www.automazioneindustriale.com/ultime-notizie/come-cambiano-i-robot-mobili-autonomi-nelle-applicazioni-4-0/

Bonarini, A. (2016, Novembre 21). *Robot mobili autonomi: applicazioni e tecnologie*. Tratto da News impresa: https://newsimpresa.it/tecnologie/2016/11/robot-mobili-autonomi-applicazioni-e-tecnologie/

Brecciaroli, S. (2021, Novembre 16). *A Jesi nasce I-Labs Industry, il primo laboratorio marchigiano per ricerca e formazione sull'industria 4.0*. Tratto da Centropagina: https://www.centropagina.it/jesi/i-labs-industry-primo-laboratorio-marchigiano-ricerca-formazione-industria-40/

Bruno, F. (2020, Agosto 21). *Programma Nazionale di Ricerca, aperta la consultazione pubblica: Industria 4.0 e robotica protagoniste*. Tratto da Innovation Post: https://www.innovationpost.it/2020/08/21/pnr-2021-2027-consutazione-aperta/

Canna, F. (2019, Giugno 17). *Robot e cobot: presente e futuro della robotica nell'industria*. Tratto da Industria meccanica: https://www.industriameccanica.it/c/magazine/robot-e-cobot-presente-e-futuro-della-robotica-nellindustria-9496.html

Casini, S. (2019, DIcembre 17). *La carica dei robot mobili: entro il 2030 supereranno gli AGV*. Tratto da Innovation Post: https://www.innovationpost.it/2019/12/17/la-carica-dei-robot-mobili-entro-il-2030-supereranno-gli-agv/

Con un robot mobile KMR iiwa, KUKA realizza una soluzione di trasporto autonoma tramite navigazione. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/settori/banca-dati-di-soluzioni/2016/07/solution-robotics-hall-7

Corso Nazionale Automazione Industriale e Robotica 2021 – Atti. (s.d.). Tratto da https://www.robosiri.it/2021/07/26/corso-nazionale-automazione-industriale-e-robotica-2021-atti/

Fleet Manager - Ottimizzazione della fabbrica con gestione delle flotte migliore della categoria. Tratto da Omron: https://industrial.omron.it/it/products/fleet-manager

Garbillo, D. (2021, Ottobre 20). *La pandemia non ferma la corsa della robotica mobile*. Tratto da Innovation Post: https://www.innovationpost.it/2021/10/20/la-pandemia-non-ferma-la-corsa-della-robotica-mobile/

Gotfredsen, S. (2021, Settembre). Trasportare (in) sicurezza. Tratto da *Automazione Plus*, p. 51: https://automazione-plus.it/brochure/ao/432/50/

IMPRESE ITALIANE NEL MONDO - ROBOTICA DI SERVIZIO: SETTORE PROFESSIONALE IN CRESCITA +12% NEL 2020 6,7 MILIARDI DOLLARI USA. SERVIZIO AI CONSUMATORI +16% 4,4 MILIARDI. (2021, Novembre 8). Tratto da Italian Network: http://www.italiannetwork.it/news.aspx?id=67972

Industrial Automation. Tratto da Omron: https://industrial.omron.it/it/products/ld-250

Italia, A. *I tipi di AGV*. Tratto da AGVE Italia: https://www.agve.it/2019/06/04/i-tipi-di-agv/

KMR iiwa. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/robot-mobili/kmr-iiwa

Kuka Mobile Platform 1500. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/piattaforme-mobili/kmp-1500

Kuka OmniMove. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/piattaforme-mobili/kuka-omnimove

KUKA Sunrise Cabinet. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/sistemi-robot/controlli-robot/kuka-sunrise-cabinet

La differenza fra AGV e Robot Mobile. Tratto da Logistica efficiente: https://www.logisticaefficiente.it/adept/magazzino/automazione/differenza-fra-agv-e-robot-mobile.html

La logistica integrata: cos'è e come funziona. (2021, Giugno 30). Tratto da Esse Lean Revolution: https://www.esselogistics.it/non-categorizzato/logistica-integrata/

La sicurezza nei sistemi AGV. Tratto da AGVE Italia: https://www.agve.it/2019/12/05/la-sicurezza-nei-sistemi-agv/

LD-60/90. Tratto da Industrial Automation: https://industrial.omron.eu/en/products/ld-60-90

Logistica 4.0 Comau nella smart factory. (2017, Maggio 25). Tratto da Meccanica Plus: https://meccanica-plus.it/logistica-4-0-comau-nella-smart-factory_87597/

Logistica e robotica: quale futuro per gli AMR? (2021, Dicembre 7). Tratto da Logisticamente.it: https://www.logisticamente.it/Articoli/14121/logistica-e-robotica-quale-futuro-per-gli-amr/

Logistica robotizzata. Tratto da Eleon: https://www.eleon.it/eleon.p?cid=PagStatic&pid=LogisticaRobotizzata&lid=IT

Mecalux. (2021, Luglio 23). *AMR vs. AGV: qual è la differenza e qual è il migliore?* Tratto da Mecalux: https://www.mecalux.it/blog/amr-vs-agv

MiR ancora più in alto con il nuovo robot mobile: il MiR250. (2020, Marzo 9). Tratto da Automation Tomorrow: https://www.automationtomorrow.com/mir-ancora-piu-in-alto-con-il-nuovo-robot-mobile-il-mir250/

MiR rivoluziona la logistica con due potenti robot. (2021, Agosto). Tratto da Meccanica Automazione: http://www.meccanica-automazione.com/mir-rivoluziona-la-logistica-con-due-potenti-robot/

MiR250. Tratto da Mobile Industrial Robots: https://www.mobile-industrial-robots.com/it/solutions/robots/mir250/

Piattaforme mobili di KUKA. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/piattaforme-mobili

Robot MiR1350. Tratto da Klain Robotics: https://www.klainrobotics.com/prodotti/mobile-robot-mir-2/robot-mir1350/

Robot mobili di KUKA. Tratto da Kuka: https://www.kuka.com/it-it/prodotti-servizi/mobilit%C3%A0/robot-mobili

Robotica nel settore sanitario per migliorare gli esiti dei pazienti. Tratto da Intel: https://www.intel.it/content/www/it/it/healthcare-it/robotics-in-healthcare.html

Sandonnini, P. (2021, Aprile 18). *Robot, cosa sono e quali sono le previsioni future*. Tratto da AI4Business: https://www.ai4business.it/robotica/robot-cosa-sono-e-quali-sono-le-previsioni-future/

Sick. Tratto da https://www.sick.com/it/it/soluzioni-di-misurazione-e-rilevamento/sensori-2d-lidar/nav3xx/c/g91916

Stato dell'arte di alcuni dei principali sistemi di navigazione automatica. Tratto da https://www.gobid.it/lib/lotti/lotti_0000078690/Descrizione%20del%20sistema%20NAVIGATOR.pdf

Tarletti, C. (2021, Dicembre 7). *Gli AMR (autonomous mobile robot) per assicurare la sicurezza ai dipendenti*. Tratto da Portale Impresa: https://portaleimpresa.it/gli-amr-autonomous-mobile-robot-per-assicurare-la-sicurezza-ai-dipendenti/

Tarletti, C. (2021, Dicembre 03). *L'intelligenza artificiale promuove i progressi nei robot mobili collaborativi*. Tratto da Portale Impresa: https://portaleimpresa.it/lintelligenza-artificiale-promuove-i-progressi-nei-robot-mobili-collaborativi/

Techmec.it. (2021, Marzo 01). *Robot mobili autonomi: la tecnologia MiR al servizio dei robot AMR*. Tratto da Techmec.it: https://www.techmec.it/robot-mobili-autonomi-la-tecnologia-mir-al-servizio-dei-robot-amr/

Tecnelab. (2021, Aprile 02). *La differenza tra AGV e AMR? La spiega K.L.A.IN.robotics*. Tratto da Tecnelab: https://www.tecnelab.it/news/attualita/la-differenza-tra-agv-e-amr--la-spiega-k-l-a-in-robotics

Tecnologia, L. R. *Sviluppo di un sistema robotico mobile per pallettizzazione*. Tratto da La Rete Alta Tecnologia: https://www.retealtatecnologia.it/technology-report/sviluppo-di-un-sistema-robotico-mobile-pallettizzazione

Tratto da https://www.diag.uniroma1.it/users/alessandro_de-luca

Veicoli a Guida Automatica: Automazione Logistica. Tratto da Comau: https://www.comau.com/it/competencies/robotics-automation/collaborative-robotics/veicolo-a-guida-automatica-agv/

Volontè, C. (2021, Febbraio 12). *Il 2021 sarà l'anno di svolta della robotica in fabbrica come dice l'Economist? Sì e no…*. Tratto da Industria italiana: https://www.industriaitaliana.it/robot-automazione-robotica-patrizio-bianchi-idc-agv-amr-international-federation-robotics/

8- APPENDICE

- ★ AGV: Automated guided vehicle
- ★ AI: Artificial Intelligence
- ★ AMR: Autonomous mobile robot
- ★ CAD: Computer Aided Design
- ★ CIM:Computer Integrated Manufacturing
- ★ EESC: European Economic and Social Committee
- ★ EKF: Extended Kalman Filter
- ★ FAS: Flexible automation system
- ★ FMS: Flexible manufacturing system
- ★ GPS: Global Positioning System
- ★ IAT: InterAction Technologies
- ★ ICT:Information and communications technology
- ★ IFR: International Federation of Robotics
- ★ IP52: Ingress Protection52-rated
- ★ IT: Information Technology
- ★ KF: Kalman Filter
- ★ KMP: Kuka Mobile Platforms
- ★ KMR: Kuka Mobile Robots
- ★ LGV: Laser guided Vehicle
- ★ MES: Manufacturing Execution System
- ★ MiR: Mobile Industrial Robots
- ★ ML: Machine Learning
- ★ MRE: Mobile robotics equipments

- ★ OT: Operation Technology
- ★ PLC: Programmable logic controller
- ★ PLI: Programmazione lineare intera
- ★ PLS: Plus Laser Sensors
- ★ PPP: Pay per pick
- ★ RaaS: Robot as a service
- ★ SLAM: Simultaneous localization and mapping
- ★ WMS: Warehouse Management System