

LORENZO NICOLÈ

LA REALTÀ AUMENTATA PER LA MANUTENZIONE
INDUSTRIALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Ingegneria Meccatronica [IN2376]



LA REALTÀ AUMENTATA PER LA MANUTENZIONE
INDUSTRIALE

Applicazioni della realtà aumentata per la facilitazione della manutenzione

Relatrice: Prof.ssa Ilenia Zennaro

Laureando: Lorenzo Nicolè
Matricola: 1163028

Tesi Laurea Triennale
Anno Accademico: 2021 - 2022

Lorenzo Nicolè: *La realtà aumentata per la manutenzione industriale*, Applicazioni della realtà aumentata per la facilitazione della manutenzione, © Novembre - Dicembre 2022

RINGRAZIAMENTI

Dedico questo elaborato ai miei genitori che hanno reso possibile la mia carriera studentesca. A loro il mio più grande ringraziamento per tutti gli sforzi che hanno fatto nei miei confronti, per avermi sopportato in quei pomeriggi in cui continuavo a ripetere "in aramaico" le lezioni.

Cara Nonna Vilma

Alla fine ce l'ho fatta a realizzare il sogno di laurearmi! Non vedo l'ora di tornare a casa dopo questo traguardo ottenuto con tanto sforzo, tempo e sudore e mangiare un'altra pasta senza il pensiero di dover tornare a studiare per tutto il pomeriggio.

— Lorenzo

"Vivere vuol dire rischiare tutto. Altrimenti saresti solo un mucchio di molecole messe insieme a caso che vagano ovunque le spinga l'universo."

— Rick de "Rick & Morty"

How hard can it be?

— Jeremy Clarkson

That's what she said

— Michael Scott de "The Office"

ABSTRACT

La realtà aumentata è una tecnologia che vede i suoi primi studi a partire dagli anni '60. Sebbene un vero e proprio prototipo vedrà la luce nei primi anni '90, lo sviluppo ha avuto una forte accelerazione, nel nuovo millennio, in seguito al forte interesse suscitato da importanti aziende.

Oltre allo sviluppo civile, a fini ludici; la tecnologia AR vede un'espansione in ambito industriale, nello specifico quello manutentivo. Grazie alla spinta dell'industria 4.0, delle reti neurali e del *Deep Learning*, le applicazioni di tecnologie come l'AR trovano casa nel modo industriale.

L'estratto vuole approfondire le principali applicazioni del connubio tra industria 4.0 e realtà aumentata; seguendo i due principali metodi che impiegano tale tecnica. Inoltre, considerando ciò che le reti neurali sono in grado di elaborare, si vuole dare una breve seppur esaustiva visione di come la manutenzione può essere guidata tramite il *Deep Learning*.

INDICE

I	INTRODUZIONE E DEFINIZIONI	1
1	INTRODUZIONE	3
2	MANUTENZIONE: DI COSA SI TRATTA?	5
2.1	Strategie manutentive	6
2.1.1	Strategie basate sulla rottura	6
2.1.2	Strategie basate sul tempo	8
2.1.3	Strategie basate sulla condizione	9
2.2	Comparazione tra le tecniche	10
2.3	Possibili applicazioni	12
3	LA REALTÀ AUMENTATA	13
3.1	Principali dispositivi AR	13
3.2	Occhiali AR	15
3.2.1	La tecnica See-Through	15
3.2.2	Modelli disponibili sul mercato	16
3.2.3	Confronto tra i modelli	18
3.2.4	Utilizzo prolungato	24
3.3	Applicazioni	24
3.3.1	Ambito educativo	24
3.3.2	Ambito medico	25
3.3.3	Ambito produttivo	26
3.3.4	Ambito training e formazione	28
II	APPLICAZIONI DELLA REALTÀ AUMENTATA NELLA MANUTENZIONE	29
4	ASSISTENZA TRAMITE TELE-MANUTENZIONE	31
4.1	Architettura	31
4.2	Applicazione	35
4.3	Vantaggi e Svantaggi	36
4.4	Considerazioni	37
5	MANUTENZIONE PREDITTIVA ATTRAVERSO DEEP LEARNING E AR	39
5.1	Architettura	40
5.2	Applicazione	41
5.2.1	Risultati ottenuti	42
5.3	Vantaggi e Svantaggi	44
III	CONCLUSIONI	47
6	CONCLUSIONI	49
6.1	Considerazioni sui dispositivi AR	49
6.2	Vantaggi e limitazioni dell'utilizzo della AR	51
6.3	Aspettative future	52

IV RIFERIMENTI	53
BIBLIOGRAFIA	55

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Principali strategie manutentive secondo (da sinistra a destra): Bashiri, Badri e Hejazi [4]; Mostafa, Dumrak e Soltan [24]; Lee e Scott [19].	7
Figura 2	Diagramma di Milgram circa la realtà-virtualità [8]	13
Figura 3	Dispositivi per la realtà aumentata.	15
Figura 4	Principali dispositivi utili alla realizzazione del <i>see-through</i> [38]	16
Figura 5	Principali occhiali AR presenti sul mercato . . .	19
Figura 6	Esempio di programmazione di un cobot tramite AR [15]	27
Figura 7	Architettura tele-manutenzione [25]	32
Figura 8	Procedura per la diagnosi e generazione nuove scene AR	34
Figura 9	Architettura della proposta di PdM [35]	40
Figura 10	Analisi dei benefici della proposta del capitolo	45
Figura 11	Previsione risparmio in termini percentuali . .	50

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Vantaggi, Svantaggi e applicazioni per le strategie manutentive	11
Tabella 2	Comparativa modello Google Glass 2	20
Tabella 3	Comparativa modello Epson Moverio BT-40 . .	21
Tabella 4	Comparativa modelli di occhiali AR con OS Microsoft Holographic	22
Tabella 5	Comparativa modelli di occhiali AR con OS proprietario	23
Tabella 6	Riassunto vantaggi e svantaggi tele-manutenzione	37
Tabella 7	Risparmio monetario e temporale della proposta	38
Tabella 8	Casi manutentivi	43
Tabella 9	Risparmio temporale percentuale della proposta	43
Tabella 10	Risparmio monetario percentuale della proposta	44
Tabella 11	Vantaggi e svantaggi dell'applicazione proposta nel capitolo	46
Tabella 12	Confronto utilizzo dei diversi dispositivi AR .	51

ACRONYMS

AR	<i>Augmented Reality</i>
CBM	<i>Condition Based Monitoring / Maintenance</i>
CM	<i>Corrective Maintenance</i>
DL	<i>Deep Learning</i>
DT	<i>DownTime</i>
HHD	<i>Hand-Handle Display</i>
HMD	<i>Head-Mounted Display</i>
HUD	<i>Head-Up Display</i>
IA	<i>Intelligenza Artificiale</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ML	<i>Machine Learning</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i>
ORB	<i>Oriented FAST and Rotated BRIEF</i>
OS	<i>Operating System</i>
PM	<i>Preventive Maintenance</i>
PdM	<i>Predictive Maintenance</i>
RM	<i>Reactive Maintenance</i>
RUL	<i>Residual Useful Life</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>

Parte I

INTRODUZIONE E DEFINIZIONI

INTRODUZIONE

La manutenzione è un'attività fondamentale nella nostra cultura. Le prime attività manutentive risalgono già dal momento in cui l'essere umano ha usato i primi strumenti. Molto semplicemente si usavano prima o poi, quindi c'era la necessità di doverli sostituire o riparare [10]. Per quanto riguarda i giorni nostri, la manutenzione ormai riguarda ogni cosa: come detto in precedenza "*fa parte della nostra cultura*".

Grazie all'avvento dell'industria 4.0, l'inclusione di nuove tecnologie non è prerogativa della produzione. Pure la manutenzione vede una forte spinta tecnica grazie alla messa in rete delle macchine, ovvero la rete IoT. È proprio grazie ad IoT (*Internet of Things*) che è stato possibile l'accumulo massivo di informazioni provenienti dai macchinari, per poi essere processati, in modo da poter trovare dei legami più profondi, spesso nascosti ai nostri occhi. Ciò è dovuto al fatto che sistemi più complessi non sono rappresentabili tramite funzioni lineari, impedendoci una corretta sintetizzazione di un modello equivalente. Inoltre l'influenza di diverse variabili rende la questione ancora più complicata. I dati prelevati dalle macchine vengono elaborati attraverso *analytics*: processi che dalla raccolta dei dati ottengono informazioni. Poi, i macchinari vengono resi "intelligenti" da una IA (Intelligenza Artificiale), che processa enormi quantità di dati (*Big Data*), da cui ne ricava "insegnamento" (*machine learning*) per gestire al meglio l'impianto produttivo [22].

"Oggi assistiamo a un ritorno di fiamma verso l'IA, tanto che negli ultimi anni questa disciplina è chiamata in causa praticamente in ogni campo: dall'elettronica domestica ai complessi esperimenti di simulazione della struttura delle proteine, dal miglioramento della qualità del calcolo al creare possibilità per nuove applicazioni quali, per esempio, lo sblocco facciale di telefoni cellulari" Ligorio [20].

Dunque l'IA può fungere da trampolino all'ottimizzazione delle strategie manutentive grazie alla "*lettura profonda*" che può sfruttare per via dei *big data* provenienti dai macchinari. Nello specifico la "*lettura profonda*" la possiamo tradurre in *Deep Learning* (DL) ovvero una specifica IA che impara a conoscere, in autonomia, i sistemi al quale viene applicato a partire dai dati provenienti da questo. Tutto ciò, applicato alla manutenzione, permette di conoscere a fondo il sistema e, grazie ad opportuni algoritmi, prevedere quando fallirà. In più, la realtà aumentata (*Augmented Reality* AR) che, grazie ai suoi dispositivi, può rendere le attività manutentive più efficienti. Migliorando l'operato degli addetti alla manutenzione: supportati da scene immersive

e assistenza fornita tramite gli opportuni dispositivi.

Dunque in questo elaborato si vuole rispondere a due domande:

1. Si può realizzare una strategia per rendere più efficienti le attività manutentive tramite la realtà aumentata?
2. È possibile la collaborazione tra [IA](#) e [AR](#) in una strategia manutentiva?

MANUTENZIONE: DI COSA SI TRATTA?

Dal punto di vista industriale, qualsiasi *Down Time* (DT), ovvero periodi di tempo (imprevisti o meno) in cui una componente non lavora; può rovinare la produttività di una azienda: portando così a perdite di capitale ¹.

I DT sono fisiologici per un sistema, però si deve distinguere tra pianificati e non pianificati:

PIANIFICATI si verificano nel momento in cui è previsto che la componente venga fermata, portando ad un DT controllato (ad esempio: per manutenzione ordinaria, momenti di *setup* per un cambio prodotto, ecc. . .).

NON PIANIFICATI si verifica una rottura in un momento in cui la componente dovrebbe lavorare (ad esempio: rotture per usura delle componenti).

La manutenzione non vuole eliminare l'insorgere dei DT. Piuttosto si mira ad ottimizzarli: sfruttandone al massimo il periodo di inattività dell'impianto. Oppure, si vuole prevederli, per quanto possibile, in modo da poter "perdere" meno tempo, rendendo il DT più corto possibile.

In letteratura si riporta che la manutenzione è: "*technical skills, techniques, methods to properly utilize the assets like factories, power plants, vehicles, equipment and machines*" [34]. Infatti, non è volta solamente a mantenere sano un macchinario o impianto produttivo, bensì sfruttare al massimo le risorse che sono a disposizione per la produzione [14].

Storicamente si sono sviluppate e diverse strategie manutentive: si è partiti da una manutenzione che interveniva quando si è verificata una rottura, detta manutenzione al guasto. Passando per la previsione degli interventi manutentivi, appunto manutenzione preventiva o manutenzione basata sui tempi discreti. Fino ad arrivare alla più recente manutenzione predittiva che invece di aspettare la rottura di una componente o fissare gli interventi manutentivi ne prevede la vita utile [23].

¹ Un sistema è composto da più componenti: a partire da questa definizione possiamo considerare come componente sia il più piccolo bullone che fissa una parte di un macchinario, sia un macchinario che insieme ad altri compone un sistema produttivo [23]

2.1 STRATEGIE MANUTENTIVE

Non essendo la manutenzione un concetto standardizzato, dunque adattato per ogni esigenza: esistono diverse classificazioni delle strategie manutentive. Secondo il lavoro di Gackowiec [14] che mira a una visione generica sulla classificazione delle strategie manutentive; gli aspetti più comuni che vengono presi in considerazione per una corretta strategia manutentiva possono essere:

ROTTURE (2.1.1) monitorando le rotture della componente si possono ottenere informazioni circa quanto affidabile e disponibile sia la stessa (Analisi RAM²). Da ciò si può studiare un miglioramento della componente per renderla meno fallibile, di fatto correggendo le sue problematiche.

TEMPO (2.1.2) la strategia si basa sul fatto che prima o poi le componenti avranno una rottura, però si vuole intervenire prima che la componente effettivamente si rompa. Da qui nasce la necessità di *prevedere* o *predire* il momento della rottura, agendo prima che ciò si verifichi. Dunque prevedendo in anticipo i **DT**

CONDIZIONE (2.1.3) monitorando lo stato delle componenti, è possibile rilevarne la salute e conseguente prognosi. Fornendo una visione generale sulla vita del sistema.

I precedenti fattori sono i *fondamentali* su cui le strategie manutentive si sono sviluppate.

In figura 1 è riportata una possibile classificazione delle strategie manutentive. In letteratura se ne trovano molte altre a seconda dell'autore, della realtà industriale ecc...

Ancora una volta, si dimostra come la manutenzione dipenda dalla "cultura industriale".

Ora si vuole riportare cosa implicano, come vengano realizzate e quali siano i vantaggi e svantaggi delle principali strategie manutentive.

2.1.1 Strategie basate sulla rottura

Reactive Maintenance (RM)

La manutenzione reattiva (**RM**) prevede la riparazione e/o sostituzione di un componente solo a guasto avvenuto. Il grande vantaggio di questa tecnica è l'utilizzo totale di un componente: si sfrutta tutta la sua vita, dunque l'investimento per riparare/sostituire la componente viene totalmente ripagato. In aggiunta, il costo per la gestione di tale strategia risulta essere decisamente basso: non eseguendo alcun tipo di analisi pre-rottura, non ci sono costi aggiuntivi dedicati alla

² 23.

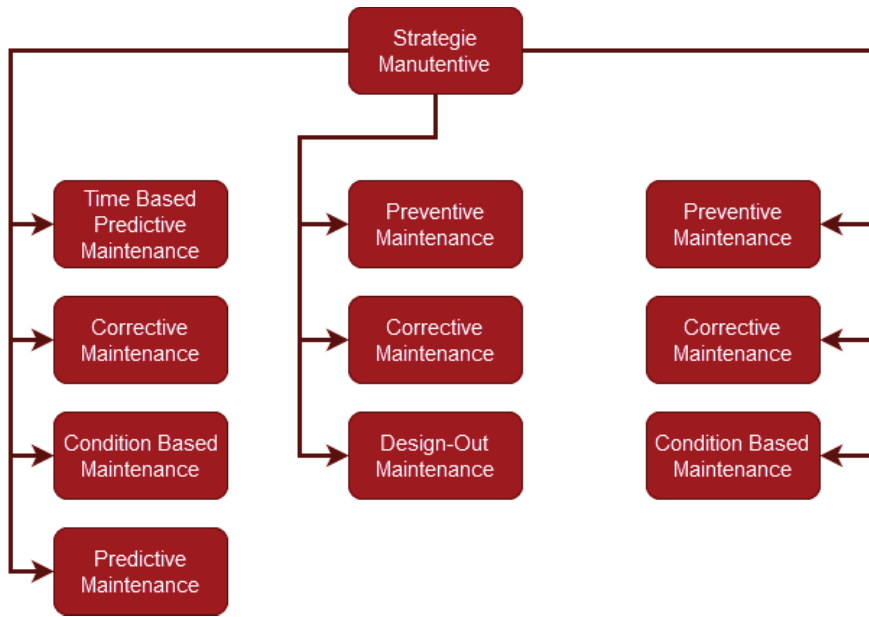


Figura 1: Principali strategie manutentive secondo (da sinistra a destra): Bashiri, Badri e Hejazi [4]; Mostafa, Dumrak e Soltan [24]; Lee e Scott [19].

strategia o dovuti all'aggiunta di sensori abbordo macchina. Parimente, il capitale perso per la mancata produzione nel periodo di fermo può superare l'utile generato dalla produzione mentre il componente era funzionante. Inoltre, questa strategia necessita di avere un magazzino sufficientemente fornito di componenti di ricambio e personale formato per la manutenzione del impianto; allungando il periodo di DT per la rimessa in funzione, legato allo svolgimento dell'attività manutentiva e al recupero dei pezzi necessari. Comunque comportando dei costi di gestione aggiuntivi. Risulta non essere una buona strategia portare i componenti a rottura: si dimostra che durante le fasi finali della vita del componente questo tende a vibrare e surriscaldarsi danneggiando così anche i componenti vicini, accelerando la loro usura [31, p. 3].

Corrective maintenance (CM)

Spesso viene associata alla **RM** con l'aggiunta di un piccolo particolare. Resta il fatto che, come prima, si portano le componenti a rottura. Però analizzando le componenti sostituite per capirne il motivo della rottura, stipulandone una diagnosi. Con un'eventuale aggiornamento della componente, è possibile correggere il motivo della rottura allungando la sua vita utile, di fatto aumentando il periodo di *Mean Time To Failure (MTTF)* [23], [39].

Non per forza la correzione dei motivi di fallimento sono associati alla manutenzione reattiva: si può combinare anche alle altre strategie [39].

2.1.2 Strategie basate sul tempo

Preventive Maintenance (PM)

Il principio di base della **PM** è quello di predeterminare le attività manutentive. Dunque si eseguono queste attività in base: alle caratteristiche operative del componente e alla durata di vita. Grazie a questa pianificazione si sostituisce/ripara la componente prima che questa vada a rottura. Al fine di prevenire le attività manutentive esistono due approcci, entrambi necessari.

L'APPROCCIO MANAGERIALE dove si schedulano le varie attività in base a interventi di manutenzione precedenti, durata del componente e performance del sistema.

L'APPROCCIO OPERAZIONALE permette di intervenire sui sistemi al fine di eseguire la manutenzione. Non è fine a se stesso: dai vari interventi si possono ricavare informazioni fondamentali per una corretta preventivazione della manutenzione come durata del componente, tipo di rottura o danno. Aspetti che dati come input all'approccio manageriale possono risultare fondamentali per la buona riuscita della tecnica [5].

Il vantaggio della tecnica è che i componenti vengono sostituiti/riparati prima che questi arrivino al fine vita e poi alla rottura. Inoltre, grazie alla schedulazione delle attività manutentive, si eseguono tali attività in situazioni in cui l'impianto non sta lavorando o, comunque, in tempi più brevi della riparazione dopo rottura. Dato che si preventivano le attività di manutenzione, si possono preparare i componenti da sostituire: ordinandoli prima di eseguire l'attività. Ciò permette di abbassare i costi di magazzino e tempi di attesa nel caso un componente non fosse già disponibile in magazzino. Lo svantaggio deriva dal fatto che un componente viene sostituito/riparato nella sua vita utile. Sprecando così istanti di vita del componente.

Time-Fixed Maintenance (TFM)

La manutenzione a tempo fissato è una strategia manutentiva che assomiglia alla precedente, con la differenza che il tempo è sempre fissato (a meno di eventi avversi all'esecuzione delle attività manutentive). Piuttosto di eseguire le attività ad ogni momento prefissato, spesso vengono eseguite delle ispezioni per sondare lo stato di salute delle componenti. Fornendo maggiori informazioni alla **PM** [11]. Comunque, come già accennato nella **PM**, spesso le due strategie vengono attuate in contemporanea.

Predictive Maintenance (PdM)

Mira a prevedere quando l'equipaggiamento si romperà, valutando il *Residual Useful Life (RUL)*. Dunque prevede quando sarà necessario eseguire operazioni di manutenzione e che tipo di operazione (sostituzione, riparazione, correzione ecc...). La predizione è basata sulla valutazione dei dati ottenuti dai vari macchinari come: vibrazioni, immagini termiche, misurazioni ultrasoniche, disponibilità/indisponibilità del sistema ecc... Invece di rimpiazzare un componente quando questo è rotto oppure ha ancora della vita utile si ottimizza il suo utilizzo [31, p. 5]. In pratica si assimilano i vantaggi delle principali strategie basate su rotture e sul tempo.

La vita delle componenti è ottimizzata e non è necessario organizzare un magazzino eccessivamente capiente. Inoltre avendo delle predizioni per le rotture si possono eventualmente ordinare i ricambi. Il principale limite è rappresentato dalla predizione: per tale scopo vengono istruite opportune reti neurali, che leggendo i dati provenienti dalla macchina possono sintetizzarne una rappresentazione matematica molto accurata. Se però il sistema è particolarmente imprevedibile per diversi fattori, la predizione risulta poco accurata e non significativa, in fatti spesso alle reti neurali viene chiesto di valutare un fattore di affidabilità della previsione [3].

Spesso, in letteratura, si sovrappone la manutenzione predittiva alla *condition based maintenance*. La loro differenza è sottile, ma entrambe collaborano per rendere il più efficiente possibile la strategia manutentiva. La predizione di possibili rotture si basa sulla previsione del *RUL*, mentre il monitoraggio della condizione permette di stabilire la diagnosi, istante per istante, del sistema.

2.1.3 *Strategie basate sulla condizione*

Condition Based Maintenance (CBM)

È una delle strategie più recenti, sviluppatasi in particolare grazie alla quarta rivoluzione industriale. La manutenzione basata sulla condizione include il monitoraggio di componenti essenziali alla produzione e parti importanti per la sicurezza. Per la realizzazione di tale strategia bisogna considerare le tecnologie che l'hanno resa possibile: diagnosi, prognosi, modello basato sull'uso, *data mining*, intelligenza artificiale, *open system architecture*³ [3].

DIAGNOSTICA è un processo che permette di trovare il motivo del fallimento del sistema. In letteratura si trovano diversi sistemi di *sensing* che permettono la diagnostica del sistema.

³ Si tratta della possibilità di eseguire gli algoritmi su qualsiasi sistema di computazione, indipendentemente da architettura, OS, ecc...

- Diagnostica per componenti elettronici;
- analisi delle vibrazioni;
- analisi della lubrificazione e degli oli;
- termografie a infrarossi;
- analisi degli ultrasuoni;
- video ad alta velocità e fibre ottiche;
- eventuali sistemi ad hoc.

PROGNOSI è il processo che prevede futuri fallimenti del sistema, analizzando la storia precedente e monitorando la deviazione dei dati. Le principali sfide della prognosi sono: predizione del *Time To Failure* o predizione del **RUL** (applicabile alla **PdM**); stima del *Trust Value*.

USAGE-BASED MODELING la modellizzazione del sistema permette la previsione del **RUL**. Il quale risulta più accurato nel momento in cui il modello permette grandi margini d'errore [3].

DATA MINING permette di estrarre dati rilevanti per la costruzione del modello. Di fatto non tutta la mole di dati, provenienti dai sensori del macchinario, è essenziale per lo sviluppo della strategia. Dunque poter trovare delle solide correlazioni tra i dati è essenziale per il modello.

INTELLIGENZA ARTIFICIALE permette uno sviluppo di algoritmi "ragionanti" che risultano fondamentali per la riuscita della **CBM**. La funzione chiave delle **IA** è quella della ricerca, per poter sviluppare ulteriori previsioni, basandosi sugli attributi dei dati [3]. Inoltre l'**IA** può realizzare il *Machine Learning* e *Deep Learning* (**ML** e **DL**), tecnica che permette di comprendere in maniera più profonda il sistema rispetto a quanto possa fare un esperto umano. Ciò permette di stabilire quali sono le condizioni di funzionamento standard di un macchinario e quali invece sono quelle limite: che possono indicare l'avvicinamento della rottura.

2.2 COMPARAZIONE TRA LE TECNICHE

Qui vengono messe in evidenza le caratteristiche, vantaggi e svantaggi delle tre tecniche più comuni in ambito industriale: in tabella 1 a pag. 11.

Tabella 1: Vantaggi, Svantaggi e applicazioni per le strategie manutentive

	Vantaggi	Svantaggi	Applicazioni	Non Applicabile
RM	Massimo utilizzo e produttività di un componente, Bassi costi di prevenzione	DT non previsti, Costi di magazzino elevati, Potenziali danni a equipaggiamento, Alti costi di riparazione	Sistemi ridondanti ed equipaggiamento non critico, Equipaggiamento riparabile a basso costo	Equipaggiamento che se rotto rappresenta un rischio per la sicurezza, Equipaggiamento disponibile 24/7
PM	Bassi costi di riparazione, Minori malfunzionamenti all'equipaggiamento e DT non pianificati	Necessità di inventario, Aumento dei DT pianificati, Attività manutentive su componenti in salute	Equipaggiamento in cui il fallimento aumenta con il tempo di utilizzo	Sistemi che hanno fallimenti non legati alla manutenzione e randomici
PdM	Visione generale dell'equipaggiamento, Maggiori possibilità di analisi, Evita le rotture, Evita rimpiazzi di componenti ancora sani	Aumento dei costi per infrastruttura e tecnologia, Sistemi più complessi	Sistemi che possono essere correlazionati tramite dati con monitoraggio regolare	Sistemi che non possono essere correlazionati tramite dati, Sistemi a basso costo

2.3 POSSIBILI APPLICAZIONI

In questo estratto si vedrà l'applicazione della manutenzione predittiva sostenuta dalla **CBM**. Sebbene l'ambito industriale sia quello di maggiore interesse per tale strategia non è il solo. In particolare l'applicazione della **CBM** viene studiata in campo *automotive* e infrastrutture IT.

AUTOMOTIVE attualmente la pratica seguita per questo ambito è quello di effettuare ispezioni regolari ogni circa 10 000km ÷ 15 000km. Si sta studiando una generazione di automobili, più in generale di veicoli, con una sensoristica a bordo del motore in grado di analizzare l'olio per la lubrificazione. Diagnosticando la qualità del lubrificante, si può predire quando sarà necessario eseguirne la sostituzione ed eventualmente lo stato di usura delle varie componenti mobili [3].

INFRASTRUTTURE IT la manutenzione per le infrastrutture IT risulta sempre più importante dato il loro ingrandimento. In particolare i parametri da monitorare, in letteratura, sono definiti *Self-Monitoring, Analysis, Reporting Technology* (S.M.A.R.T.): conteggio delle riallocazioni della memoria, cicli di potenza, errori di scansione e altri [30]. È evidente il parallelismo con l'ambito industriale dove: le informazioni derivanti dall'auto-diagnostica dei circuiti elettronici può essere fonte di dati per la previsione delle rotture.

LA REALTÀ AUMENTATA

La tecnologia a realtà aumentata permette di percepire il mondo che ci circonda con l'aggiunta di ulteriori informazioni. Fa parte delle così dette *realtà miste*. Seguendo il diagramma di Millgram alla figura 2, in cui viene esposto lo spettro delle realtà-virtualità. Lo spettro parte dalla realtà, alla sinistra, per poi aggiungere di passo in passo maggiore immersività nella virtualità arrivando alla completa immersione della persona nella realtà virtuale, alla destra. In particolare, l'AR si trova a poco meno della metà perché la persona, che sfrutta tale tecnica, percepisce ancora la realtà. L'aggiunta delle informazioni deriva dalla virtualità. A poco più della metà si trova, invece, la *virtualità aumentata* ovvero una situazione per cui la tecnologia "prende spunto" dalla realtà per poi applicarci sopra un ambiente virtuale.

In ambito industriale si potrebbero sfruttare tutte le tecniche esposte poco fa: la realtà aumentata è adatta per gli operatori che sul campo devono eseguire le operazioni manutentive. La virtualità aumentata è spesso usata per l'addestramento del personale: date le sue capacità di creare un ambiente virtuale a partire dalle informazioni dell'ambiente reale, è particolarmente adatta per l'istruzione degli apprendisti. Mentre la realtà virtuale può essere utile ad un tecnico che da remoto guida l'operatore sul campo.

3.1 PRINCIPALI DISPOSITIVI AR

I dispositivi per la tecnologia AR devono predisporre una tecnica per poter aggiungere le informazioni alla realtà: in genere si parla di proiettarle su delle apposite lenti, nel caso degli occhiali AR; oppure visualizzarle su uno schermo, nel caso di dispositivi mobili AR.

Per la tecnologia AR è fondamentale avere un dispositivo di calcolo per eseguire il *rendering* degli oggetti da visualizzare. In genere si parla di una visuale:

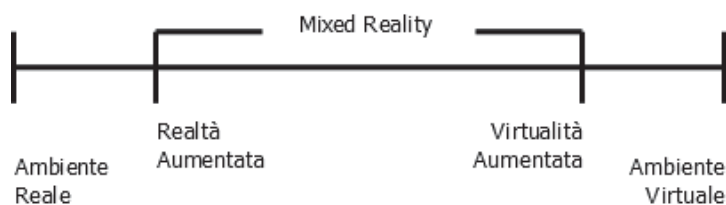


Figura 2: Diagramma di Milgram circa la realtà-virtualità [8]

RENDERING 3D dove l'oggetto viene proiettato in base al movimento del dispositivo. Si può vedere come funziona la proiezione 3D alla risorsa [8].

RENDERING 2D dove le informazioni vengono fissate sull'area di proiezione, lente o schermo che sia. In questo caso gli oggetti vengono fissati una ben stabilita area e non si muovono con il movimento del dispositivo. Anche in questo caso la tecnica di proiezione è presentata alla risorsa [8].

I principali dispositivi per realizzare la tecnologia a realtà aumentata sono tre [29]:

head-up display (**HUD**) presentano degli schermi (trasparenti) sui quali viene proiettato l'aumento della realtà. Tecnica che in gergo viene chiamata *see-through*. Un valido esempio sono i display accessori delle moderne automobili, in cui vengono visualizzate le informazioni che l'automobile percepisce dalla strada, anche le indicazioni per la navigazione e simili come si può vedere alla figura 3a. Oppure per i più recenti velivoli, gli **HUD** forniscono una visione generale degli strumenti di navigazione senza che il pilota distolga lo sguardo dell'esterno della cabina.

head-mounted display (**HMD**) prevedono che lo schermo per fornire le informazioni sia attaccato alla testa dell'utilizzatore: questo è il caso per gli occhiali AR. Il funzionamento è pressoché identico agli **HUD**. In questo caso c'è la necessità di fornire l'**HMD** di appositi sensori per digitalizzare il movimento della testa dell'utilizzatore, in modo che l'oggetto possa mutare proiezione in funzione dello sguardo. Per esempio la figura 3b mostra un vistore a realtà aumentata.

hand-handle display (**HHD**) sono dispositivi mobili che acquisiscono la realtà tramite una fotocamera e, tramite il processamento dell'immagine, aggiungono le relative informazioni. Un esempio è il software *Live View* di Google. Presente sull'applicazione *Google Maps*, permette di visualizzare le indicazioni per la navigazione tramite il proprio cellulare. Lo si può vedere in azione alla figura 3c.

Per l'argomento di questa tesi trovano una maggiore applicazione i dispositivi **HMD** per diversi vantaggi:

- Il fatto di avere un dispositivo montato sulla testa risulta ergonomico per l'operatore: dover tenere in mano un dispositivo (caso degli **HHD**), oppure dover muoversi per leggere da uno schermo fisso (caso degli **HUD**) può comportare della fatica per la persona.



Figura 3: Dispositivi per la realtà aumentata.

- In aggiunta al punto precedente, i dispositivi HMD risultano di più immediata consultazione nel caso di operatori mobili: nel caso di manutenzione, in cui è probabile che davanti a una macchina di grandi dimensioni ci si debba spostare, doversi portare dispositivi accessori è scomodo. Averli fissati sulla testa lo è meno perché l'ingombro sulla persona è limitato.

Le principali applicazioni di AR in ambito manutentivo vengono attuate tramite dispositivi HMD. In particolare si parla di occhiali a realtà aumentata. Nel prossimo capitolo un approfondimento circa il funzionamento di questi dispositivi.

3.2 OCCHIALI AR

Come accennato in precedenza: gli occhiali AR sono dispositivi *head-mounted display*. Il loro funzionamento avviene tramite la tecnica *See-Through*.

3.2.1 La tecnica See-Through

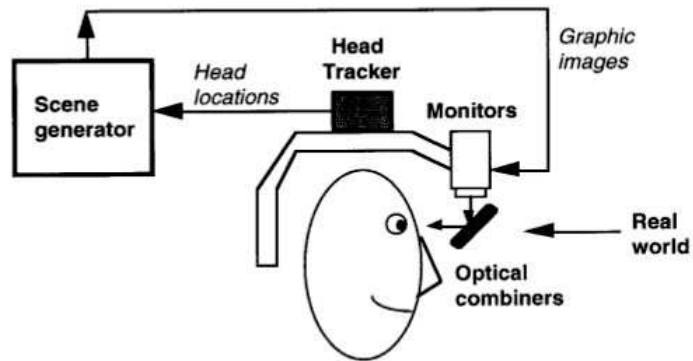
La base della realtà aumentata prevede di poter percepire la realtà attraverso il dispositivo, il quale aggiunge informazioni, opportunamente elaborate. Come accennato prima si utilizza la tecnica del *See-Through*. L'architettura necessaria raggiungere lo scopo è mostrata in figura 4 [2].

COMBINATORE OTTICO sono delle lenti che rendono possibile la combinazione della luce proveniente dal mondo reale e la proiezione del monitor del dispositivo. Il tutto possibile anche grazie alla parziale proprietà riflettente delle stesse.

MONITOR si tratta di schermi, in tecnologia *OLED* o *LCD*, che proiettano della luce sui combinatori ottici in modo da realizzare delle figure olografiche.

HEAD TRACKER è un dispositivo che include più sensori, in base a quale siano gli accessori disponibili (sensori di movimento, giroscopi, videocamere, ecc...) che tiene traccia dei movimenti della testa dell'utilizzatore. I dati ottenuti vengono inviati al

Optical see-through HMD



15

Figura 4: Principali dispositivi utili alla realizzazione del *see-through* [38]

Scene Generator che li sfrutta per renderizzare correttamente le figure da visualizzare tramite monitor.

SCENE GENERATOR ha il compito di assemblare le informazioni elaborate dal processore del dispositivo, dal *Head Tracker*; al fine di poter renderizzare le immagini da inviare al monitor.

3.2.2 Modelli disponibili sul mercato

Attualmente sul mercato esistono diversi produttori di dispositivi AR, ciò per sopperire alle esigenze richieste: basti pensare che alcuni di questi sono progettati anche in funzione delle normative in materia di sicurezza sul luogo di lavoro. Avendo, quindi, delle necessità progettuali che spesso i produttori più noti non possono garantire. Sebbene i più famosi restino quelli prodotti da Microsoft e Google, il mercato di oggi offre diversi produttori, più o meno noti.

Conviene suddividere la gamma di prodotti in base ai sistemi operativi disponibili. Sono principalmente tre:

1. Android;
2. Windows;
3. OS proprietari¹.

¹ Un esempio di questi è Lumin OS che è basato su Android ma fortemente personalizzato dall'azienda produttrice Magic Leap

Per semplicità terremo in considerazione un paio di modelli per ogni sistema operativo. Per una consultazione più approfondita circa i modelli disponibili per l'industria si consiglia la visione del sito <https://alegerglobal.com/>.

3.2.2.1 OS Android

L' OS (*Operating System*) Android è decisamente famoso per la sua applicazione nel mondo *mobile*. Il vantaggio è dovuto al *kernel* del OS disponibile su licenza gratuita. Da qui svariati sviluppatori hanno potuto personalizzare il proprio OS attraverso la modifica del *kernel* e l'aggiunta di applicazioni sviluppate ad hoc. Il primo HMD, basato su Android, è proprio quello di Google.

GOOGLE GLASS 2 (fig: 5a) il secondo modello della casa di *Mountain View* è tra i progetti più "anziani" tra quelli proposti ma anche tra quelli più avanzati. Il dispositivo viene prodotto in più varianti: il principale è quello che prevede solo il computer col proiettore però, come previsto da Google stessa, è possibile realizzare dei modelli con delle specifiche particolari per le montature in base alle necessità. Inoltre è fornito di fotocamera esterna per poter mostrare, in riunioni virtuali, ciò che l'operatore vede in real time. Altro plus non indifferente per il mercato, è la presenza di un campo tattile sulla montatura che permette un utilizzo facilitato, oltre al controllo vocale avanzato fornito da Google. Su richiesta, è possibile ottenere l'*SDK* (*Software Development Kit*) per poter progettare opportune applicazioni.

EPSON MOVERIO (fig: 5b) presenti sul mercato già dal 2011. Sfruttano un approccio leggermente differente rispetto ai precedenti, infatti tutti i modelli Moverio sono già dotati di lenti *see-through*. Disponibili in diverse varianti in base all'applicazione: da l'utilizzo personale, passando per l'utilizzo industriale (tra l'altro indossabili anche con elmetto protettivo), fino ad applicazioni *rescue*. Il controllo di tali dispositivi è basato su un *controller* esterno che presenta tutti i comandi necessari.

3.2.2.2 Microsoft Holographic OS

Sistema operativo sviluppato da Microsoft appositamente per la realtà mista. Di fatto è una derivazione del OS Windows 10 rivista a fondo per garantire alte performance per la creazione di immagini olografiche. Prevede diversi tool di sviluppo in cloud, tra cui lezioni per lo sviluppo e di realizzazione di ambienti a realtà mista, IDE (*Integrated Development Environment*) e diversi *plug-in* specifici.

MICROSOFT HOLOLENS 2 (fig: 5c) modello di punta per la casa di *Redmond*, è un prodotto che a differenza dei precedenti è in grado di

realizzare la realtà mista: ovvero sia realtà aumentata, che virtualità aumentata. Ciò rende il prodotto versatile a svariate applicazioni: dall'apprendimento degli operatori fino all'utilizzo in linea di assemblaggio o per la manutenzione con un unico dispositivo. Grazie ai diversi tool di sviluppo messi a disposizione da Microsoft è facilmente programmabile. La sensoristica abbordo del dispositivo è molto ampia e prevede diverse videocamere nello spettro luminoso con l'aggiunta di due telecamere ad infrarossi per il tracciamento degli occhi in real time. Ciò rende il controllo del dispositivo facile attraverso il riconoscimento della gestualità delle mani oppure tramite riconoscimento vocale.

TRIMBLE XR10 HOLOLENS 2 Prodotto realizzato specificatamente per l'ambito industriale, di fatto è lo stesso dispositivo del precedente disegnato per rispettare alcune specifiche dettate dalle normative per la protezione da introduzione da polveri e acqua (Normativa IP [16]). Inoltre viene fornito già comprensivo dell'elmetto protettivo.

3.2.2.3 OS proprietari

In genere gli OS proprietari sono delle personalizzazione del kernel Android. Modificato e aggiunto di varie funzionalità dagli sviluppatori delle aziende produttrici.

MAGIC LEAP 2 (fig: 5d) attualmente sul mercato è presente il primo modello della casa (Magic Leap 1), è prevista l'uscita a settembre della nuova versione. Gli aggiornamenti portati sono, sostanzialmente, centrati sul miglioramento della definizione degli schermi e sulla definizione delle videocamere incorporate. La filosofia resta la stessa: un dispositivo in grado di realizzare la realtà mista, specificatamente studiato per l'apprendimento. Molto funzionale in ambito manutentivo in quanto è in grado di realizzare una realtà virtuale per l'operatore da remoto, al contempo la realtà aumentata per l'utilizzatore lo istruisce sulle operazioni da seguire. Particolare focus è stato posto sulla frequenza di aggiornamento delle proiezioni, rendendo le immagini più fluide e affaticando meno gli occhi.

3.2.3 Confronto tra i modelli

alle tabelle 2, 3, 4 e 5 è riportata una comparativa tra le capacità dei dispositivi visti in precedenza.



(a) *Google Glass 2* [17]



(b) *Epson Moverio BT-40* [32]



(c) *Microsoft HoloLens 2* [12]



(d) *Magic Leap 2* [18]

Figura 5: Principali occhiali AR presenti sul mercato

Tabella 2: Comparativa modello Google Glass 2

Modello	Sviluppo	Costo [€]	Caratteristiche
Google Glass 2 [17]	Licenze SDK di Android	999.0	<p>OS: Android</p> <p>SoC: Qualcomm Snapdragon XR1</p> <p>Memorie: 3GB LPDDR4 / 32GB eMMC Flash</p> <p>Conessioni: Wi-Fi IEEE 802.11a/g/b/n/ac dual-band, Bluetooth 5.0, USB Type-C</p> <p>Fotocamere: 8MPx a colori, 83° di visione, 1080p30 video</p> <p>Display: 640 × 360 pixels RGB</p> <p>Angolo di visione: Non Specificato</p> <p>Peso: 46g senza montatura</p> <p>Durata batterie: 800mA h (Circa 2 ore continuative)</p> <p>Modalità di controllo: touchpad integrato, controllo vocale avanzato (<i>Google Assistant</i>)</p>

Tabella 3: Comparativa modello Epson Moverio BT-40

Modello	Sviluppo	Costo [€]	Caratteristiche
Epson Moverio BT-40 [32]	Licenze SDK di Android	646.60	<p>OS: Android</p> <p>SoC: Non specificato</p> <p>Memorie: Non specificate</p> <p>Connessioni: USB Type-C, Jack audio 3.5m m</p> <p>Fotocamere: Presente ma non meglio specificata</p> <p>Display: 1920 × 1080 pixels RGB</p> <p>Angolo di Visione: 34° circa</p> <p>Peso: 0.17kg con accessori</p> <p>Durata batterie: Non specificato, dipende dagli accessori</p> <p>Modalità di controllo: controllore cablato tramite smartphone o PC, controllo vocale avanzato</p>

Tabella 4: Comparativa modelli di occhiali AR con OS Microsoft Holographic

Modello	Sviluppo	Costo [€]	Caratteristiche
Microsoft HoloLens 2 [12]	Cloud platform Azure (IDE, SDK, ecc...)	3500 standard	<p>OS: Micosoft Holographic OS</p> <p>SoC: Qualcomm Snapdragon 850 + Holographic Processing Unit (HPU)</p> <p>Memorie: 4GB LPDDR4x DRAM / 64GB UFS 2.1 Flash</p> <p>Connessioni: Wi-Fi 5 (802.11ac 2x2), Bluetooth 5, USB Type-C</p> <p>Fotocamere: 4 fotocamere spettro visibile, 2 fotocamere infrarossi, 1MPx ToF sensore profondità, 8MPx fissa 1080p30 video</p> <p>Display: risoluzione 2k 3:2, <i>Eye-based rendering</i></p> <p>Angolo di Visione: 34° circa</p> <p>Peso: 566g</p> <p>Durata batterie: 2 - 3 ore continuative</p> <p>Modalità di controllo: Riconoscimento mani e gestualità, controllo vocale</p>

INDUSTRIAL EDITION 4950€;

TRIMBLE XR10 5199€;

DEVELOPMENT EDITION 3500€

Tabella 5: Comparativa modelli di occhiali AR con OS proprietario

Modello	Sviluppo	Costo [€]	Caratteristiche
Magic Leap 2 [18]	Lumin SDK (proprietario)	3299 base	<p>OS: Lumin OS</p> <p>SoC: AMD Zen 2 custom</p> <p>Memorie: 16GB / 256GB Flash</p> <p>Conessioni: USB Type-C, (altre non dichiarate)</p> <p>Fotocamere: 12.6MPx a colori con autofocus, 4k 30fps, 1080 60fps video</p> <p>Display: 1440 × 1760 pixels RGB</p> <p>Angolo di visione: 70°</p> <p>Peso: 260g</p> <p>Durata batterie: 3.5h continuative, 7h stand-by</p> <p>Modalità di controllo: Riconoscimento delle mani e gestualità, controllo vocale, pad di controllo cablato esterno</p>

DEVELOPER PRO 4099€

ENTERPRISE 4999€

3.2.4 *Utilizzo prolungato*

Sebbene i dispositivi AR esistano da almeno una decina d'anni, non si evidenziano particolari testi in merito a danni gravi alla salute o sintomi caratteristici dovuti all'utilizzo prolungato di tali prodotti. In genere si riferisce di sintomi lievi tipo: cinetosi, nausea e mal di testa [28].

Non essendoci precisazioni circa l'utilizzo prolungato di taluni dispositivi; conviene considerare le normative circa la regolazione del utilizzo dei videotermini sul luogo di lavoro. La normativa vigente ([33]) prevede che un "lavoratore al videoterminale" è considerato tale nel momento in cui effettua attività essenziale al videoterminale per almeno venti ore settimanali, escluse le pause obbligatorie di quindici minuti ogni due ore di attività.

Dunque, per norma, si dovrebbe avere una pausa di quindici minuti ogni due ore se i dispositivi AR fossero considerati come videotermini. Secondo la norma descritta in precedenza il videoterminale è: "Uno schermo alfanumerico o grafico a prescindere dal tipo di visualizzazione utilizzato" (Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro [33]). Includendo di fatto i dispositivi AR in quanto schermi grafici e alfanumerici con un metodo di visualizzazione "particolare" non discriminante rispetto alla norma. Per cui anche un operatore che svolge un lavoro guidato da dispositivi AR deve rispettare tale testo.

Dunque è probabile che non si evidenzino sintomi particolari circa l'utilizzo continuativo di tecnologia AR per via delle normative che già regolano l'utilizzo dei videotermini sul luogo di lavoro.

3.3 APPLICAZIONI

Oltre all'ambito industriale, i dispositivi AR hanno diverse applicazioni. Se considerati in generale, quindi tenendo conto anche degli HUD e HHD; si trovano applicazioni in ambito *automotive* e aeronautico come già visto in precedenza. Ad esempio si riporta che: l'utilizzo, nel lungo periodo, di un HUD durante la guida di un'automobile riduce lo stress durante la guida. Limitando la necessità di attenzione richiesta, per via dell'assistenza fornita dal dispositivo HUD [21]. In letteratura si trovano molteplici esempi di applicazione in campo educativo, medico e produttivo.

3.3.1 *Ambito educativo*

L'educazione sta ottenendo ottimi risultati circa l'impiego di tali dispositivi. Si riporta l'esempio di una applicazione studiata per l'apprendimento primario del linguaggio [13]. A tal fine, sono state utilizzate diverse applicazioni (in particolari su dispositivi HHD) per insegnare tramite cinque strategie di apprendimento:

- contenuti multimediali tridimensionali,
- interazione con materiale fisico per l'apprendimento,
- *gamification*²,
- mappatura spaziale,
- caratteristiche basate sulla locazione.

Si sono ottenuti dei buoni risultati, migliorando l'apprendimento dei soggetti sottoposti all'indagine. In particolare si riporta che le migliori metodologie sono quelle attraverso la visualizzazione di oggetti multimediali 3D; interazione con carte 2D; *gamification*. Inoltre si migliora anche il livello di motivazione negli studenti e di effetto dell'apprendimento.

3.3.2 Ambito medico

Gli occhiali AR stanno riscuotendo un discreto successo in ambito medico: li si vedono impiegati in visite mediche di ambulatorio, visite specialistiche, nelle sale operatorie. In particolare: per quanto riportato da Munzer et al. [26], è evidente di come la tecnologia AR non sia solo molto efficace per quanto riguarda la diagnosi del paziente: anche per l'aspetto educativo e di allenamento alla pratica medica.

Ad esempio, si riportano applicazioni di tele-medicina per addestrare i nuovi medici circa le pratiche: come eseguire correttamente un elettrocardiogramma. Sfruttano gli aiuti forniti dagli occhiali: dunque tramite riconoscimento delle immagini tramite la fotocamera, scene AR e appunti vari. Eventualmente un dottore esperto può assistere gli studenti da remoto [26].

Altra applicazione, sempre di addestramento, viene realizzata tramite HoloLens. In questo caso si tratta di vere e proprie operazioni virtuali. Grazie alla capacità della realtà mista degli HoloLens, al riconoscimento delle mani e eventuali strumenti, gli studenti possono impraticarsi per le operazioni chirurgiche. L'assistenza da remoto viene particolarmente facilitata grazie ai molteplici sensori che gli HoloLens hanno abbordo permettono all'esperto di istruire efficacemente gli studenti oltre a valutarne il lavoro [26].

Carenzo et al. [7] riportano una possibile applicazione dei Google Glass in situazioni di emergenza. In particolare hanno realizzato un'applicazione ad hoc, per un rapido *debriefing* dopo le operazioni di salvataggio, che realizza una guida visuale per lo smistamento più efficace tra pazienti non in gravi condizioni e quelli che necessitavano di cure più immediate. Ciò è stato possibile grazie alle capacità di *georeference*, foto e video incorporate al *debriefing* post intervento.

² Rendere un'attività una sottospecie di gioco per favorire la partecipazione.

3.3.3 *Ambito produttivo*

Nella produzione si riscontrano diverse possibilità per la realtà aumentata. Ad esempio si possono utilizzare i dispositivi AR per l'assemblaggio o nel utilizzo e programmazione dei robot.

A proposito dell'utilizzo dei robot, Gallala, Hichri e Plapper [15] riportano tre possibili applicazioni della realtà aumentata in collaborazione ai robot.

Human-Robot Interaction

Considerando la veloce espansione dei "cobot", ovvero robot che collaborano insieme ad un operatore umano, sorge la necessità di sviluppare delle tecniche di interfaccia umano-robot. Allora la realtà aumentata può rendersi utile per poter riconoscere la gestualità del operatore e inviare dei comandi al cobot. Al contempo l'AR può fornire al operatore una rapida visualizzazione dei movimenti del cobot, quali sono le sue zone sicure, aiutando l'operatore in loco.

Robot manipulation

Tramite il riconoscimento dei gesti del operatore, è possibile realizzare una nuova metodologia di programmazione dei robot. Come illustrato alla figura 6, è possibile che i gesti vengano interpretati tramite un'opportuna interazione tra un "vocabolario" e interprete. Da cui poi viene effettuata una vera e propria traduzione in codice di basso livello. Il codice generato viene caricato sul robot ed eseguito.

Path planning

Dato che la pianificazione del percorso per un robot è una questione di alta accuratezza si possono sfruttare i sensori abbordo dei dispositivi AR per pianificare il percorso che il robot deve seguire. Ne viene riportato un possibile esempio in [15, pp. 8 – 9].

Assembly assistance

Come detto in precedenza, un'altra possibile applicazione della realtà aumentata è quella dell'assemblaggio. Per esempio: Wang et al. [36] riportano di una possibile assistenza da parte di dispositivi AR per l'assemblaggio di componentistica meccanica.

Vien riportato che la soluzione prevede due fasi:

OFFLINE PREPARATION si estraggono automaticamente i risultati della pianificazione: come la sequenza di assemblaggio, posizioni delle componenti, ecc...; vengono generate le immagini necessarie per le scene AR. Tutto ciò proveniente dal processo di pianificazione dell'assemblaggio.

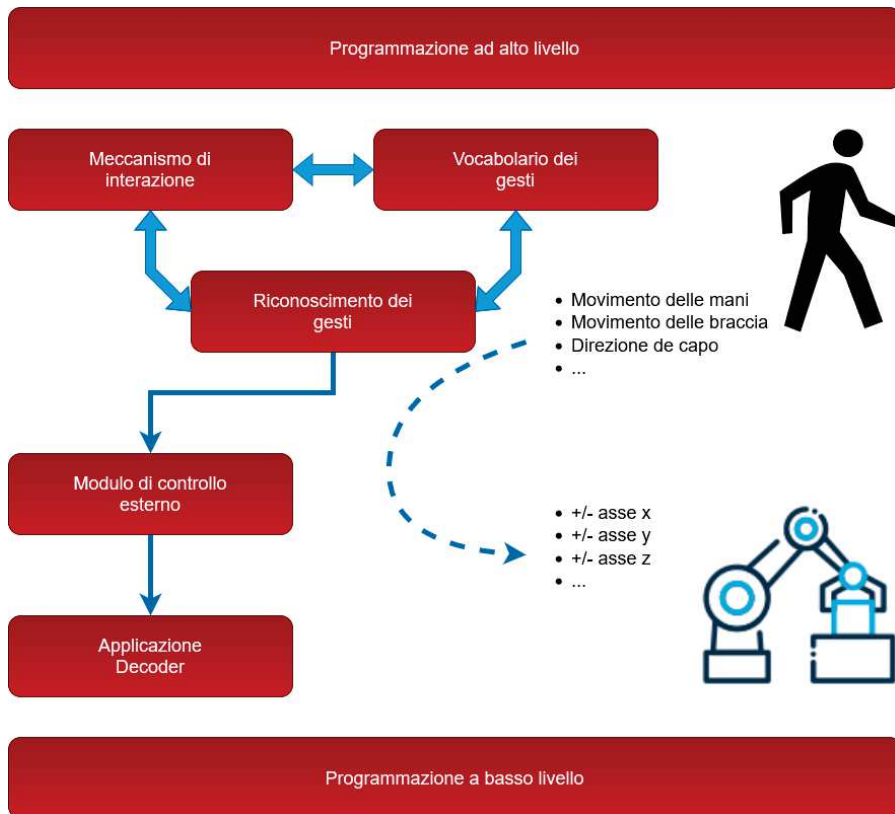


Figura 6: Esempio di programmazione di un cobot tramite AR [15]

ONLINE EXECUTION in questa fase vengono prelevati gli oggetti generati offline per poi essere elaborati online, in modo da favorire l'interazione con l'operatore.

L'algoritmo proposto è chiamato *LINE-MOD* [37], permette di riconoscere gli oggetti senza dover apporvi un *marker* di riconoscimento. In combinazione con ORB³ che permette di registrare la posizione della fotocamera continuamente; si riesce a sviluppare una strategia di riconoscimento dell'assemblaggio automatica che si adatta ogniqualvolta si passa uno step di assemblaggio.

La proposta è risultata molto efficace: sia da un punto di vista tecnico, in cui l'algoritmo riusciva a gestire un quantitativo di informazioni tali da generare una visualizzazione a 30fps. Sia da un punto di vista di facilitazione per l'operatore, in cui l'algoritmo era in grado di adattarsi automaticamente alla situazione di assemblaggio, semplicemente riconoscendo le componenti da assemblare. Inoltre, risulta che la visuale del operatore risulta molto limitata per via del dispositivo AR e per il sensore di profondità montato come accessorio. Dunque sia l'esperienza utente che il focus per il lavoro risultano limitati.

³ gradient and oriented FAST and rotated BRIEF

3.3.4 *Ambito training e formazione*

Un'ulteriore applicazione degli occhiali AR è quello dell'addestramento e formazione del personale. Affinché l'addestramento in un ambiente "sicuro" sia possibile, c'è la necessità di poter immergere il personale nella realtà mista: ciò impone di sfruttare solamente quegli occhiali in grado di realizzarla. Già al paragrafo precedente, dedicato alle applicazioni della realtà aumentata in ambito medico (3.3.2), si è parlato di addestramento degli studenti tramite l'impiego degli HoloLens [26]. Ciò è permesso da due fattori principali:

- Essendo il dispositivo in grado di realizzare la realtà mista: può immergere lo studente in una sala operatoria virtuale, dove l'errore non comporta la possibile perdita del paziente.
- Grazie ai molteplici sensori, gli HoloLens possono percepire con grande accuratezza il movimento delle mani e, grazie al riconoscimento degli oggetti, il dispositivo può capire quale strumento lo studente sta utilizzando.

Ciò lo si può trasporre anche in ambito industriale. L'azienda può sfruttare la tecnologia resa disponibile da tale dispositivo per addestrare il personale. Infatti, creando una scena virtuale in cui si impone allo studente di assemblare un prodotto oppure gli si impone di operare una macchina; l'apprendimento risulta più efficace e sicuro. Ciò è dovuto al fatto che: essendo in un ambiente sicuro, lo studente non ha la pressione psicologica di essere totalmente sicuro di quello che fa, sbagliare è contemplato, e non gli si reca ulteriore stress al pensiero di non dover mettere in pericolo altri operatori. La mente dello studente è più libera e sicuramente è facilitata all'apprendimento. Oltre al fatto che, come già anticipato nella sezione per le applicazioni dei dispositivi AR in ambito educativo (3.3.1), se la formazione viene aiutata con la gamification dei compiti: lo studente sarà più attento e coinvolto durante la sua sessione di addestramento.

Parte II

APPLICAZIONI DELLA REALTÀ AUMENTATA
NELLA MANUTENZIONE

Attualmente le pratiche manutentive si basano su supporti cartacei, spesso di difficile consultazione. Per un operatore può essere parecchio snervante dover cercare le istruzioni per operare un'attività manutentiva su faldoni di manualistica che fanno parte di un macchinario. Oppure, se il macchinario è abbastanza recente: la manualistica viene condivisa in formato elettronico. Anche in questo caso la consultazione risulta molto lunga e potrebbe non essere risolutiva. Più lunga è la consultazione, più lungo sarà il *DT*, più alti saranno i costi legati allo stesso.

Per risolvere tale problematica, si vuole applicare la realtà aumentata al fine di accelerare i tempi di risposta alla necessità di attività manutentive. Per garantirne il corretto funzionamento si vuole sfruttare la proposta di Mourtzis, Zogopoulos e Vlachou [25]. Lo scopo è quello di costituire il manuale in formato digitale che possa essere, facilmente, consultabile tramite dispositivi *AR*. In più, si vuole rendere disponibile la possibilità della *tele-manutenzione* ovvero permettere ad un esperto di seguire le attività manutentive da remoto.

Ciò impone diversi passaggi: da prima sarà necessaria la digitalizzazione delle componenti dei macchinari; poi la composizione dei modelli digitali in una scena *AR* che faciliti la consultazione all'operatore; infine, grazie alla capacità di riconoscimento degli oggetti degli occhiali *AR*, saranno le istruzioni a collaborare con l'operatore: mostrando passo passo la sequenza delle operazioni. Oppure, considerando una struttura più semplice, sarà l'operatore comandare gli occhiali *AR* senza che questi abbiano la necessità di tecniche di riconoscimento degli oggetti. Inoltre, con la stessa architettura, è possibile interrogare un esperto da remoto per un consulto andando ad abbracciare la tecnica della *tele-manutenzione*.

4.1 ARCHITETTURA

Un'architettura come riportato in figura 7 permette il compimento della strategia come richiesto in precedenza. Infatti lo sfruttamento della *Cloud-Platform* garantisce i seguenti:

- Essendoci uno spazio disponibile in cloud, le scene *AR*, in risposta, sono sempre disponibili per gli operatori. Se tutta la documentazione viene totalmente digitalizzata, seguendo il modello proposto in questo capitolo, la *Cloud-Platform* diventa un manuale vero e proprio. Essendo sotto forma di scene *AR*, la consultazione risulterà immediata e facilitata grazie al riconoscimento

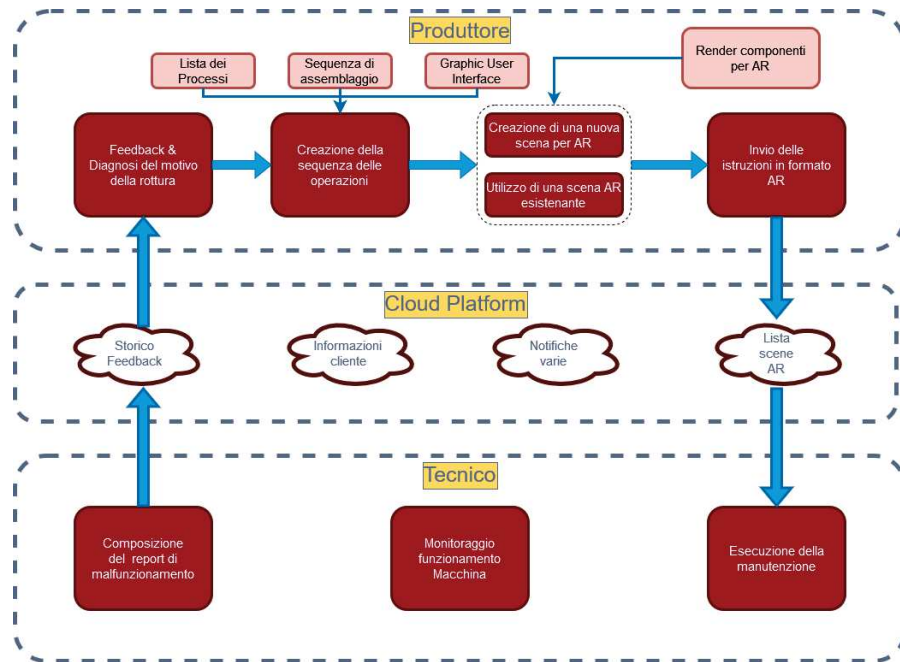


Figura 7: Architettura tele-manutenzione [25]

degli oggetti presente negli occhiali AR, per cui inquadrando un macchinario verrà aperta la manualistica digitale dedicata.

- Quando c'è la necessità di mantenere un macchinario, l'operatore in loco redige un report comprensivo di una descrizione del motivo di rottura del macchinario o la motivazione per cui è necessaria della manutenzione, foto, video ed eventualmente dati provenienti dai sensori della macchina. Quel report viene caricato sulla *Cloud-Platform* per poi essere visionato dall'esperto da remoto. Il quale può diagnosticare la rottura del macchinario e preparare la risposta al quesito sotto forma di scena AR.
- Per macchinari simili può essere che le rotture siano comuni. Dunque la risorsa generata per un quesito può rispondere a più clienti contemporaneamente. Accelerando la risposta per gli operatori in loco riducendo il DT del macchinario.
- Non si esclude un intervento dell'esperto da remoto in diretta: tramite le videocamere abbozzo degli occhiali AR è possibile sfruttare la banda larga, tipica dell'industria 4.0, per avviare una tele-conferenza in cui l'esperto, da remoto, assiste l'operatore in loco.
- Redigendo i report, si costruisce uno storico delle attività manutentive del macchinario. Ciò è fondamentale nel caso si vogliono applicare strategie manutentive di tipo preventivo (PM) e correttivo (CM).

Prendendo il caso in cui sia necessaria la composizione del report e non sia disponibile una risposta immediata, caso del processo più lungo, per questa proposta si segue la seguente procedura:

REPORT COMPOSITION Il tecnico in loco redige un report contenente:

- Descrizione del motivo della richiesta: manutenzione programmata, rottura di un componente particolare o pericoloso, richiesta di assistenza, ecc. . .
- Materiale audiovisivo, permettendo all'esperto di recuperare maggiori informazioni.
- Seguendo la filosofia dell'industria 4.0 e IoT (se disponibile), in cui i macchinari sono forniti di sensori, i dati provenienti da questi potrebbero essere allegati al report.

Come già accennato in precedenza, gli occhiali AR sono in grado di riconoscere un oggetto sfruttando algoritmi di tipo ORB. Per cui sarebbe possibile che: identificato il macchinario rotto, gli occhiali recuperino autonomamente i dati del macchinario dal server. Automaticamente potrebbero aprire un report in cui, attraverso il riconoscimento vocale, l'operatore inizi a descriverne la rottura o il motivo per cui si richiede assistenza. Alternativamente, la compilazione del report non è in formato scritto ma come audiovisivo. Una volta completato il report, viene caricato sulla *Cloud-Platform* così che l'esperto possa visionarlo.

DIAGNOSIS & AR GENERATION L'esperto da remoto può iniziare a diagnosticare il malfunzionamento del macchinario o trovare una soluzione al quesito inoltrato, prendendo visione del materiale trasmesso attraverso il report ne può comprendere i motivi della rottura. In caso i dati a disposizione non siano sufficienti, può chiedere ulteriori feed all'operatore in loco.

Una volta completata la diagnosi, il tecnico ha il compito di realizzare le scene AR, se queste non sono già disponibili. A partire dai modelli digitali delle componenti del macchinario, ad esempio disegnate in formato CAD e poi convertite in un modello tridimensionale digitale, si può comporre una scena AR. In caso, l'operatore compila una tabella dove indica: componente, asse di movimento, direzione e ordine di disassemblaggio/assemblaggio. Sfruttando una IA che, leggendo la tabella, sia in grado di assemblare autonomamente la scena. Nel caso non si voglia sfruttare una IA, sarà l'esperto a comporre la scena manualmente.

Nel caso in cui la risposta preveda una scena che è già stata realizzata, l'esperto ha il semplice compito di inoltrarla al cliente.

Diagnosi e generazione delle scene sono schematizzate alla figura 8.

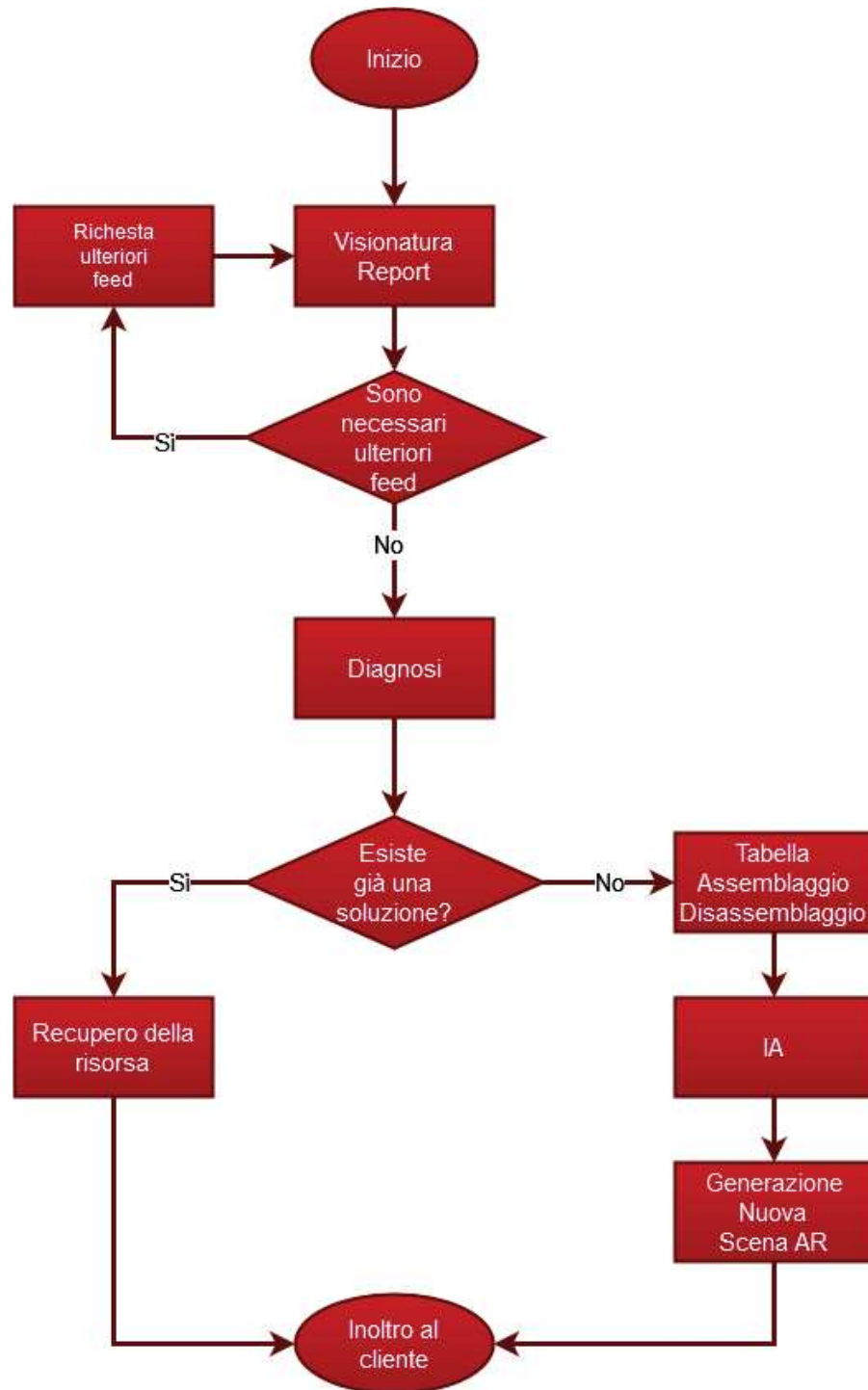


Figura 8: Procedura per la diagnosi e generazione nuove scene AR

MAINTENANCE & EVALUATION a questo punto sarà l'operatore in loco a dover seguire le sequenze AR per operare secondo le direttive date dell'esperto. Gli occhiali AR forniranno assistenza, seguendo l'operatore e indicando, passo per passo, quale sia la sequenza corretta di assemblaggio/disassemblaggio. Oltretutto rimane la possibilità che tale intervento venga seguito in diretta dall'esperto: come anticipato si può realizzare una teleconferenza.

4.2 APPLICAZIONE

La proposta presentata in precedenza garantisce semplicità in quanto:

- la realizzazione delle scene AR è indipendente dal supporto tecnologico utilizzato¹.
- Dato che la proposta risponde solamente tramite sequenze di istruzioni in formato AR, sono sufficienti occhiali AR non a realtà mista. Ciò permette di abbassare il costo di entrata a tale tecnica: dato che la differenza di prezzo tra occhiali a realtà aumentata, come i Google Glass 2 (3.2.2.1), e occhiali a realtà mista, come gli HoloLens (3.2.2.2), non è da sottovalutare. Si parla di almeno 2000€ di differenza tra le versioni base come riportato nel confronto tra i modelli al capitolo 3.
- La *Cloud-Platform* è messa a disposizione del cliente: ciò abbassa ulteriormente il costo di ingresso in quanto non c'è la necessità di acquistare workstation dedicate allo stoccaggio di report e scene AR.

Tale proposta può essere particolarmente adatta per piccole-medie imprese produttive in cui spesso si trovano configurazioni d'impianto a reparti. Infatti, la configurazione a reparti propone macchinari: in numero minore rispetto a una configurazione in linea; meno complessità; coefficiente di utilizzo dell'impianto non elevato tanto quanto una linea produttiva. Implicando una più bassa necessità manutentiva data dal basso utilizzo dei macchinari. Inoltre, un coefficiente di utilizzo basso permette che: la risoluzione di un DT non sia tempestiva tanto quanto per un impianto ad alto coefficiente, in cui si potrebbe bloccare tutta la produzione.

Considerando il fattore economico, per cui piccole imprese non hanno a disposizione diverso capitale da investire per strategie manutentive: questa proposta potrebbe risultare vincente grazie ai bassi costi d'ingresso.

¹ Per assurdo, si potrebbero utilizzare anche gli altri supporti a realtà aumentata come HUD e HHD

4.3 VANTAGGI E SVANTAGGI

La strategia presentata è un possibile impiego della tecnologia AR in una applicazione molto semplice, flessibile e a basso costo. Nonostante ciò è opportuno valutarne i vantaggi e svantaggi. Verranno riassunti alla tabella 6.

Vantaggi

Come anticipato in precedenza la semplicità è la chiave di questa proposta: il cliente, di fatto, non deve installare componenti aggiuntivi tipo sensori sui macchinari, workstation di raccolta dati. Sebbene resti indispensabile la presenza di un server che permetta agli occhiali AR di accedere alle sequenze di istruzioni e poter riconoscere i macchinari², comunque il costo per tale server è comunque inferiore rispetto ad uno che deve continuamente memorizzare dati. Tra l'altro, l'addestramento per l'utilizzo degli occhiali AR non è complicato. Pensando agli occhiali con abbozzo l'OS Android: risulta molto familiare ad utenti che già utilizzano dispositivi con lo stesso OS. Inoltre sia Google che Epson, produttori presentati al capitolo 3 che montano Android sui loro prodotti, forniscono i dispositivi sia di controllo vocale molto accurato, sia di controllo tramite campo tattile (*touchpad*) favorendone l'utilizzo del dispositivo senza dover imparare opportuni gesti.

Anche il costo d'entrata alla tecnologia non è eccessivamente alto. Come anticipato, i supporti necessari non sono costosi tanto quanto quelli che permettono la realizzazione della realtà mista.

A differenza di strategie che implicano l'utilizzo di intelligenze artificiali per stabilire la strategia manutentiva, non è necessario tempo di addestramento della IA. Di fatto rende la proposta immediatamente sfruttabile.

Considerando il caso in cui sia necessario un sopralluogo dell'esperto per diagnosticare la rottura di un macchinario o per eseguire le attività di manutenzione, questo non ha l'obbligo di dover raggiungere l'impianto produttivo. Dunque si abbassano i costi di intervento. Infatti il report comprensivo di tutto il materiale fornito dall'operatore in loco già dovrebbe essere sufficiente per raggiungere una diagnosi. In caso si può sempre ricorrere a una teleconferenza per chiarire eventuali mancanze. In più bisogna tenere a mente che, sebbene tutto il sistema dipenda dalla disponibilità dell'esperto, esiste l'eventualità che la risposta al problema sia immediatamente disponibile al cliente perché già richiesta da altri clienti.

² In precedenza si era accennato al fatto che il report potesse essere comprensivo dei dati provenienti dal macchinario. Per quanto possa essere utile all'esperto per diagnosticare la rottura, questa pratica risulta accessoria rispetto alla strategia.

Tabella 6: Riassunto vantaggi e svantaggi tele-manutenzione

Vantaggi	Svantaggi
Semplicità di applicazione	Basso sfruttamento tecnologia messa a disposizione dall'industria 4.0 e IoT
Rapidità d'impiego	Non è prevista alcuna strategia manutentiva
Basso costo di implementazione e d'intervento del tecnico	DT che può prolungarsi in caso l'esperto non sia immediatamente disponibile oppure la risoluzione sia parecchio macchinosa

Svantaggi

In questo caso la filosofia dell'industria 4.0 vien sfruttata molto poco: in caso di moderni macchinari, i dati prelevati da questi verrebbero usati solamente nel momento di redazione del report, di fatto spreandoli. In più, anche se le macchine venissero collegate in rete, approcciando all'IoT, non è prevista alcuna strategia per impiegare tale interconnessione.

A proposito di strategie, nessuna è prevista in considerazione di un piano manutentivo. Infatti la raccolta dei report può essere sfruttata per istituire una pianificazione manutentiva di tipo preventivo: basandosi sulle rotture è possibile prevedere ogni quanto, una componente, fallisce. Eventualmente intervenendo prima della rottura. Il punto è che per la pianificazione di ciò servirebbe un ufficio, o comunque del personale, dedicato. Il che aumenterebbe i costi di gestione della strategia. Infatti si è consigliato, come campo di applicazione, il caso di piccole-medie imprese in quanto aventi, genericamente, un coefficiente di utilizzo d'impianto basso, per cui anche una strategia di tipo reattivo (RM) può essere sufficiente a garantire DT abbastanza corti.

Resta l'eventualità in cui l'esperto non sia immediatamente disponibile a rispondere al quesito. Oppure la soluzione a tale problema non sia così semplice da risolvere. In questo caso i tempi di DT, inevitabilmente, si allungano.

4.4 CONSIDERAZIONI

Basandosi sui dati raccolti da Mourtzis, Zogopoulos e Vlachou [25] si può osservare che, restando nel campo di applicazione ipotizzato in precedenza, si ha un'effettiva riduzione del tempo di DT.

Ipotizzando che la manutenzione debba essere fatta ad un braccio robotico, prodotto dalla stessa azienda che è in carico della manu-

Tabella 7: Risparmio monetario e temporale della proposta

Risparmio	Percentuale risparmiata [%]
DT	78
monetario	89

tenzione: nello specifico deve essere sostituita una delle batterie di alimentazione del braccio. Considerando come DT il momento in cui il robot smette di funzionare; termina nel momento in cui si completa la sostituzione e il braccio torna a funzionare. In più, l'azienda produttrice, era solita mandare l'esperto sul luogo. Si riporta che genericamente questo lavoro chiedesse almeno 9h di DT. Con la proposta il DT si abbassa fino a 2h. Portando ad un risparmio di tempo del 78%.

Dal punto di vista economico, considerando lo stesso esempio; si riporta che: nel caso l'esperto dovesse recarsi sul luogo ci sarebbe una spesa di circa 1370€. Tenendo in considerazione la movimentazione dell'esperto di circa 1100km. Con la tele-manutenzione, l'intervento ha un costo di circa 150€ tenendo presente l'intera procedura. Quindi nel caso in cui il report avesse la necessità della generazione di una propria scena AR. Dunque il risparmio risulta essere del 89%

Nella pratica, è dimostrato che più la task è complicata, più è il risparmio dato dalla guida degli occhiali AR è alto. Ciò è dovuto dal fatto che: per semplici operazioni o attività ripetute, le skill dell'operatore sono sufficienti a portare a termine la task in poco tempo. Se però si complica il lavoro oppure non è di comune svolgimento, c'è la necessità di seguire le istruzioni, dunque il risparmio di tempo dovuto all'assistenza degli occhiali AR diventa più evidente. Se ne darà più evidente dimostrazione al capitolo successivo.

MANUTENZIONE PREDITTIVA ATTRAVERSO DEEP LEARNING E AR

Rispetto alla proposta precedente, in questo capitolo, si vuole mirare a sfruttare maggiormente le capacità date dall'industria 4.0. Nello specifico, sfruttando a pieno l'*Internet of Things* (IoT) già accennato precedentemente. Ci si pone l'obiettivo di realizzare una strategia manutentiva basata sulla predizione dei DT, garantendo comunque l'assistenza di dispositivi AR per facilitare il lavoro degli addetti.

La *Predictive Maintenance* (PdM, 2.1.2) è una strategia manutentiva che si basa sulla predizione del *Residual Usefull Life* (RUL) di un componente: ovvero il parametro che predice quanta vita utile manca al componente, prima che questo inizi il suo processo di degrado, dannoso per il sistema, arrivando alla rottura. Tale compito non è semplice: infatti esistono molteplici fattori da considerare quando si tratta di stimare il degrado di un sistema. Ad esempio, per un sistema produttivo, il degrado può essere dato da:

- ore di attività;
- tipo di produzione;
- condizioni ambientali;
- rotture;
- rotture imprevedibili;
- ecc...

Inoltre c'è da considerare che tali parametri non sempre hanno legami espliciti e traducibili attraverso un modello. Dunque sorge la necessità di un metodo per legare tra loro questi parametri, da cui poi stipulare il modello che regola la rottura del componente. Perciò vengono sfruttati algoritmi intelligenti resi disponibili dall'intelligenza artificiale (IA). Nello specifico si sfrutta un tipo di IA chiamato *Deep Learning* (DL) che permette di comprendere a fondo il sistema su cui viene applicato. Sarà proprio il DL responsabile della predizione del RUL su cui poi basare l'intera strategia manutentiva.

A tutto questo va aggiunta la collaborazione dell'AR. Si vuole rendere più efficace la collaborazione tra occhiale AR e operatore di quanto proposto al capitolo precedente. Infatti per questa proposta si sfrutteranno dei dispositivi a realtà mista: in grado di riconoscere la gestualità dell'addetto garantendo maggiore assistenza e accuratezza nella guida. Infatti grazie ai molteplici sensori, tipici di tali dispositivi, si

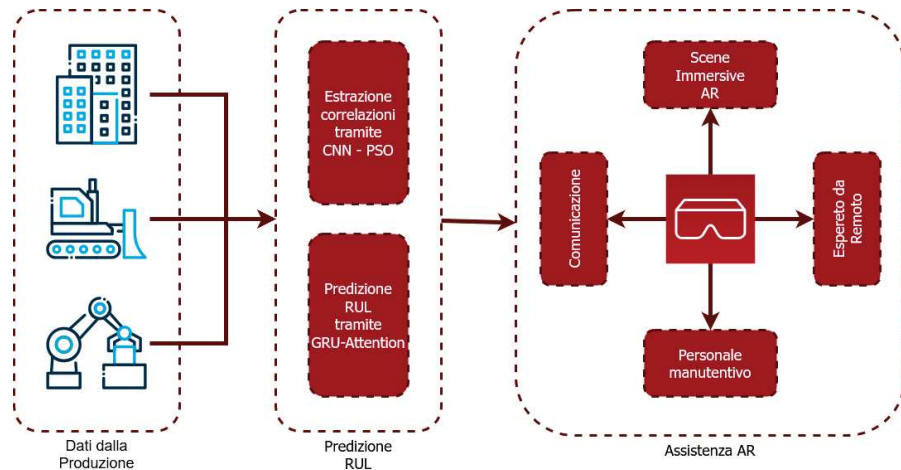


Figura 9: Architettura della proposta di PdM [35]

raggiunge un migliore riconoscimento degli oggetti e delle operazioni svolte dall'addetto. Il che permette, ad esempio, di evidenziare l'oggetto su cui è necessario operare piuttosto di mostrare una semplice sequenza di immagini tridimensionali.

5.1 ARCHITETTURA

Per garantire la migliore riuscita della strategia PdM, è necessario che la previsione del RUL sia più accurata possibile, evitando errori nella predizione ed eventualmente arrivare, erroneamente, alla rottura. A tal scopo si è sviluppata una strategia di *Condition-Base Monitoring* (CBM, 2.1.3) per cui lo stato di salute dell'impianto viene continuamente monitorato, garantendo un flusso di dati costante al DL tale da garantire una maggiore accuratezza. In pratica l'architettura la si può rappresentare alla figura 9.

Come si evince dalla figura 9, si possono identificare tre moduli fondamentali per tale architettura.

DATI DELLA PRODUZIONE l'acquisizione dei dati è necessaria per alimentare l'intelligenza artificiale. I dati devono essere pre-elaborati prima di poter effettivamente essere utilizzati: in particolare è necessario pulirli da eventuali componenti di disturbo del segnale (rumore, letture erranee, ecc. . .) e successivamente vanno normalizzati. La normalizzazione è necessaria per rendere adimensionali i dati. Ciò facilita il lavoro dell'intelligenza artificiale nel minare i dati e trovare le correlazioni che descrivono il modello che porta alla rottura, necessario per stipulare la previsione del RUL. Infatti la dimensione¹ di un dato può risultare controproducente per la rete neurale, la quale può essere ingannata

¹ Con dimensione si intende l'appartenenza, del dato, ad un ben determinato spazio di grandezze, descritto dalla grandezza fisica di riferimento.

da tale descrizione ed evitare il legame tra dati di dimensione diversa.

PREDIZIONE DEL RUL seguendo la proposta di Wang et al. [35] la predizione del RUL viene affidata a due reti neurali:

PSO-CNN questa rete di tipo convoluzionale viene sfruttata per la sua abilità di adattamento di parametri a funzioni non lineari. Ciò permette di descrivere il modello che porta alle rotture (descritto tramite funzione di molteplici parametri) in maniera estremamente accurata. Di fatto è la componente del DL che realizza il *Machine Learning* (ML) ovvero permette la "comprensione" e la modellizzazione del sistema sui cui viene applicato.

GRU-ATTENTION questa rete neurale è responsabile della vera e propria previsione del RUL. Infatti, sulla base del modello ottenuto in precedenza, tenendo presente i dati entranti e delle serie storiche che la rete ha affrontato in precedenza, elabora il tutto permettendo la stipulazione della previsione.

La combinazione di tali reti garantisce un'altissima accuratezza, circa il 98%, di predizione permettendo una migliore pianificazione delle attività manutentive.

MANUTENZIONE AR-ASSISTED La scena immersiva ottenuta tramite occhiali a realtà mista, come anticipato in precedenza, garantisce alta efficienza per le attività manutentive. Inoltre, grazie alle capacità di riconoscimento degli oggetti di tali dispositivi, quando viene inquadrato un macchinario si ha una rapida visione sullo stato di salute generale dello stesso. Per cui l'operatore ha una migliore collaborazione col dispositivo che indossa, infatti questo, riconoscendo l'oggetto, riconoscendo l'operazione eseguita dall'addetto; riesce, in autonomia, ad avanzare nella sequenza delle istruzioni.

5.2 APPLICAZIONE

Dunque il campo di applicazione risulta adatto in caso di:

- Macchinari forniti di sensoristica abbordo. In particolare per la produzione industriale vengono, spesso, sfruttati: sensori di emissioni acustiche, sensori di vibrazione, sensori di forza. Altre applicazioni riportano anche lo sfruttamento di termo-camere, videocamere ad alta frequenza e alta definizione.
- Impianto piuttosto recente e in grado di essere collegato ad internet e capace di fornire i dati alla IA.

- Necessità di previsione del RUL, dunque nel caso in cui si voglia implementare una strategia manutentiva predittiva.

Perciò, la proposta, è adatta per produzioni ad alta automatizzazione in cui il coefficiente d'utilizzo è decisamente alto. Infatti essendoci la previsione dei DT, si possono programmare le attività manutentive, evitando fermi macchina imprevisti. Ciò garantisce di intervenire prima che questo si verifichi, migliorando il tempo di riparazione considerando che in questo il tempo di reazione al problema arriva prima della vera e propria rottura.

È opportuno ricordare che tale strategia ha dei costi d'ingrasso alti rispetto a quella del capitolo precedente per via del fatto che:

- Se i macchinari sono sprovvisti di sensori, l'ammodernamento di questi potrebbe risultare molto costoso se non addirittura impossibile. Dunque per applicare tale strategia occorrerebbe comprare un nuovo macchinario, altrimenti non è applicabile.
- I server di raccolta dati, possono essere molto costosi. Del resto sono elaboratori ad alte prestazioni e molto robusti dato il loro funzionamento continuativo. Inoltre il salvataggio dei dati occupa spazio, seppur digitale, comportando dei costi.
- Come anticipato, gli occhiali a realtà mista sono più costosi di quelli a semplice realtà aumentata.

Un'azienda che vuole valutare tale applicazione deve considerare diverso capitale da investire. Sebbene il recupero monetario dovuto alla riduzione dei DT è molto marcata.

Infatti, seguendo i dati raccolti da Wang et al. [35], che propongono l'applicazione di tale strategia su: un generico macchinario per la produzione, un braccio robotico e un AGV (*Automated Guided Vehicle*). Si può osservare quanto segue.

5.2.1 Risultati ottenuti

Ipotizzando di eseguire le tre attività manutentive di difficoltà crescente proposte alla tabella 8.

Indubbiamente l'assistenza della realtà aumentata riduce il tempo necessario per le riparazioni, come si vede al grafico 10a. Più interessante è notare come all'aumentare della difficoltà della task, aumenta anche il risparmio in termini di tempo per il completamento delle riparazioni.

Tabella 8: Casi manutentivi

Caso	Attività	Difficoltà
1	Rimpiazzo della batteria del AGV	Facile
2	Cambio attrezzo di un macchinario	Medio
3	Rimpiazzo della scheda di controllo del robot e dimostrazione	Difficile

Tabella 9: Risparmio temporale percentuale della proposta

Caso	Percentuale risparmio [%]
1	$\left(1 - \frac{25.80\text{min}}{30.60\text{min}}\right) 100 = 15.69$
2	$\left(1 - \frac{43.20\text{min}}{51.70\text{min}}\right) 100 = 16.44$
3	$\left(1 - \frac{61.30\text{min}}{89.20\text{min}}\right) 100 = 31.28$

Infatti si ha un risparmio di tempo, in termini percentuali come alla tabella 9.

Considerando il lato economico. Si vuole ottenere un prospetto costi, nello specifico un dettaglio sul risparmio monetario dovuto da tale applicazione. Siccome la proposta di Wang et al. [35] non ha previsto un'analisi costi, si farà riferimento dal prezario orario del capitolo precedente, così da proporre un quadro finanziario sulla stessa base. Dunque i prezzi al minuto nel caso di intervento manutentivo senza AR con il coinvolgimento di un esperto esterno:

$$C_{\min, \text{expert}} = \frac{1370\text{€}}{9 \cdot 60\text{min}} = 2.54\text{€/min} \quad (1)$$

Mentre, il costo orario per le attività assistite da AR:

$$C_{\min, \text{remote}} = \frac{150\text{€}}{2 \cdot 60\text{min}} = 1.25\text{€/min} \quad (2)$$

Dunque, considerando i tre casi manutentivi della tabella 8, si ottengono i seguenti costi senza la proposta di questo capitolo:

$$30.60\text{min} \cdot C_{\min, \text{expert}} = 77.72\text{€} \quad (3a)$$

$$51.70\text{min} \cdot C_{\min, \text{expert}} = 131.32\text{€} \quad (3b)$$

$$89.20\text{min} \cdot C_{\min, \text{expert}} = 226.57\text{€} \quad (3c)$$

Ora, applicando l'assistenza della realtà aumentata:

$$25.80\text{min} \cdot C_{\min, \text{remote}} = 32.25\text{€} \quad (4a)$$

$$43.20\text{min} \cdot C_{\min, \text{remote}} = 54.00\text{€} \quad (4b)$$

$$61.30\text{min} \cdot C_{\min, \text{remote}} = 76.63\text{€} \quad (4c)$$

Tabella 10: Risparmio monetario percentuale della proposta

Caso	Percentuale risparmio [%]
1	$\left(1 - \frac{32.25\text{€}}{77.72\text{€}}\right) 100 = 58.50$
2	$\left(1 - \frac{54.00\text{€}}{131.32\text{€}}\right) 100 = 58.88$
3	$\left(1 - \frac{76.63\text{€}}{226.57\text{€}}\right) 100 = 66.18$

Il prospetto dei costi, per i tre casi manutentivi, è rappresentato al grafico 10b. Considerando i risultati appena ottenuti, la percentuale di risparmio in termini di costi è visibile alla tabella 10

Come anticipato al capitolo precedente, la complessità maggiore impone che l'operatore debba per forza seguire le istruzioni. Se le istruzioni sono più coinvolgenti questo seguirà il lavoro più facilmente, riducendo il tempo di riparazione. Siccome le istruzioni sono: visibili direttamente sul dispositivo, immersive per via della sovrapposizione data dalla realtà mista; l'addetto verrà assecondato direttamente dagli occhiali AR facilitandone il lavoro.

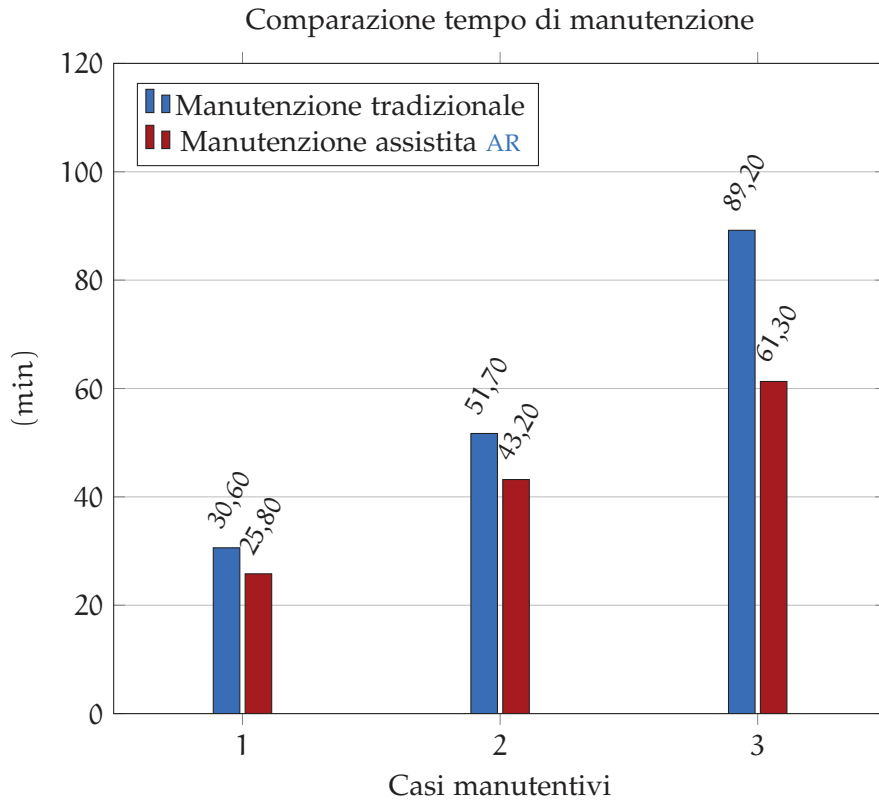
5.3 VANTAGGI E SVANTAGGI

Come fatto per il capitolo precedente è il caso di considerare i vantaggi e gli svantaggi per tale applicazione. Alla tabella 11 vi è un riassunto dei punti salienti.

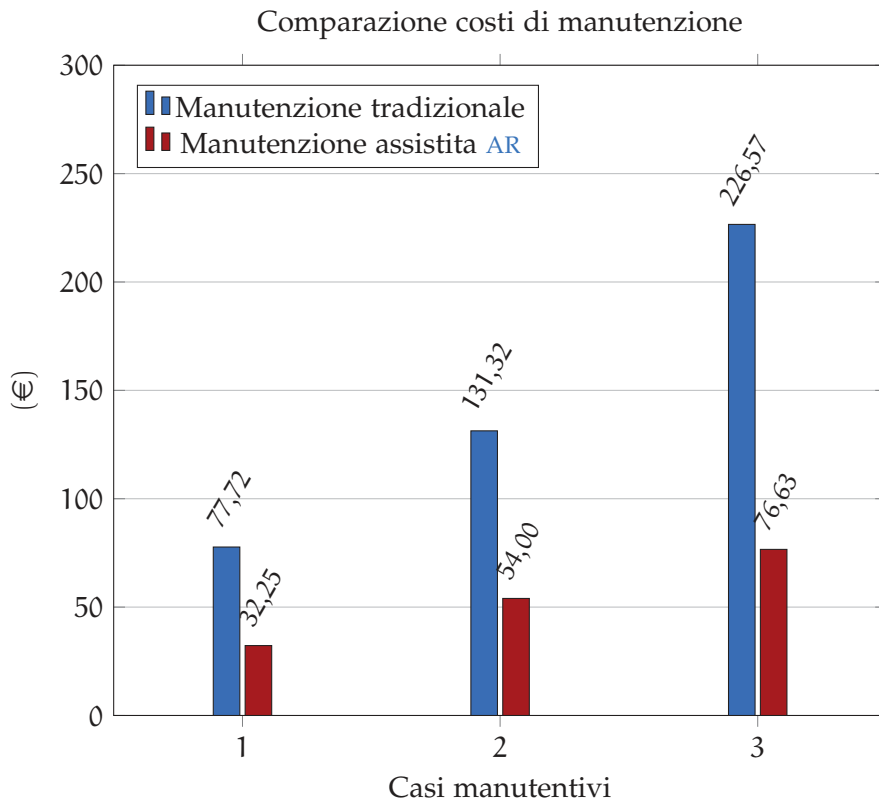
Vantaggi

La strategia proposta appoggia a pieno gli ideali che stanno dietro all'industria 4.0, dunque se l'impianto è abbastanza recente, permette di sfruttare a pieno le potenzialità fornite. L'assistenza da parte degli occhiali AR è molto più marcata rispetto quanto visto in precedenza: per la task più complessa si ha un risparmio di quasi un terzo del DT richiesto senza assistenza del dispositivo. Considerando che, nell'ambito industriale, possono sorgere necessità a più alta complessità, il tutto è notevole.

Si sta applicando una vera e propria strategia manutentiva, che a differenza del capitolo precedente, permette di prevedere gli interventi manutentivi: dunque la reazione al problema è meno marcata dal punto di vista del DT, in quanto il personale è già avvisato dalle IA di ciò. Dunque, se l'impianto produttivo è abbastanza recente e fornito di sensori abbordo, questa può essere la strategia più indicata per sfruttare a pieno l'investimento effettuato per tale macchinario. In precedenza si sarebbe sfruttato solo parzialmente.



(a) Vantaggio dell'assistenza AR in termini di tempo [35]



(b) Prospetto costi per i casi manutentivi

Figura 10: Analisi dei benefici della proposta del capitolo

Tabella 11: Vantaggi e svantaggi dell'applicazione proposta nel capitolo

Vantaggi	Svantaggi
Completezza del piano manutentivo	Costo di applicazione più alto
Sfruttamento di macchinari moderni	Necessità di sensori abbordo del macchinario
Alta accuratezza nella previsione	Richiesta di tempi di set-up per il DL
Istruzioni AR più immersive e più coinvolgenti	Costo del dispositivo AR e necessità della costruzione dei modelli 3D per il riconoscimento

Svantaggi

Sicuramente il costo di ingresso è più alto: ciò è dovuto in particolare alla strategia manutentiva che ha necessità di architettura più avanzate. Sono necessari server più capienti e potenti che indubbiamente hanno costi di gestione maggiori. Gli occhiali a realtà mista hanno costi più alti rispetto alla controparte a semplice realtà aumentata.

In più, è presente un punto debole in tale proposta: infatti se fallisse l'acquisizione dei dati perché i sensori non funzionano, la previsione può risultare erronea. Si potrebbe realizzare un circuito di diagnostica dei sensori, con lo scopo di verificare l'effettivo funzionamento. Però tale proposta comporta della complessità aggiuntiva e nuovi sistemi di controllo e da controllare.

L'applicabilità non è immediata per via dell'addestramento necessario all'intelligenza artificiale per raggiungere tale livello di accuratezza sulla previsione delle rotture del macchinario. È comunque necessario un set-up dell'architettura, come anche per la precedente, devono essere composti i modelli tridimensionali dei macchinari per essere riconosciuti dagli occhiali AR e poi per poter evidenziare le componenti quando vengono generate le istruzioni olografiche.

Parte III

CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

Entrambe le applicazioni si è osservata una riduzione della durata delle riparazioni, necessarie a terminare il DT. Inoltre come accennato per entrambi i capitoli, si osserva che: aumentando la difficoltà delle attività manutentive o la rarità, anche il risparmio sia temporale che monetario aumenta. Considerando i dati dei capitoli 4 e 5, è possibile osservare il grado di miglioramento portato dalla tecnologia AR.

È probabile che sperimentando su attività di più lunga durata si osservi che il miglioramento è possibile fino ad un certo valore, dopodiché resti più o meno costante. Ciò perché non è possibile "accelerare" l'essere umano: un operatore può lavorare con ritmo ma oltre quello non arriva. Inoltre risulterebbe non conforme alle normative di sicurezza forzare, il lavoro umano, a seguire quello di una macchina [33]. Dunque, per quanto possa essere d'aiuto l'assistenza degli occhiali AR alle attività, oltre un certo limite non si può migliorare ulteriormente.

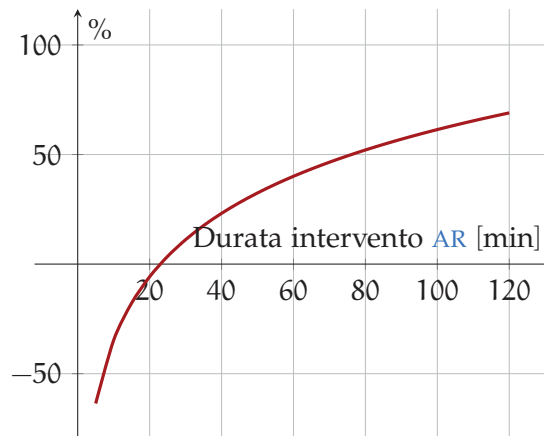
In più è possibile che sotto un certo minutaggio sia controproducente utilizzare dispositivi AR: per necessità molto rapide come microfermate d'impianto, carico/scarico di una macchina, set-up rapidi; si potrebbe perdere più tempo ad indossare l'occhiale e aspettare che questo carichi le informazioni piuttosto di imparare la sequenza di operazioni e basarsi sulle skill dell'operatore. Si potrebbe ipotizzare una previsione della percentuale di risparmio simile al grafico 11.

6.1 CONSIDERAZIONI SUI DISPOSITIVI AR

Come si è visto nei capitoli precedenti, le due proposte riferiscono di utilizzare differenti modelli di occhiali AR. Riassumendo:

TELE-MANUTENZIONE per questa proposta è sufficiente l'utilizzo di occhiali a realtà aumentata "semplice". Infatti per renderizzare i modelli tridimensionali, che vengono utilizzati nella proposta, non sono necessarie caratteristiche tecniche di ultima generazione. Al più, è necessaria della sensoristica per tracciare il movimento della testa dell'utilizzatore, proprio per rendere meglio la tridimensionalità della scena. Non che gli occhiali a realtà mista non siano capaci di tale realizzazione. Però le caratteristiche sono molto più avanzate, dunque sarebbe uno spreco tecnologico. Considerando poi il mantenimento più basso del costo di applicazione della strategia, si sono scelti gli occhiali AR semplici. Infatti al capitolo 4 vengono richiesti come occhiali i Google Glass2 (3.2.2.1). Ci sono diversi motivi per la scelta:

Figura 11: Previsione risparmio in termini percentuali
Previsione percentuale di risparmio



- Sono semplici da programmare grazie all'[SDK](#) (*Software Development Kit*) messo a disposizione da Google.
- Nonostante il prezzo più alto rispetto agli Epson, il rapporto qualità prezzo sembra favorire i Glass 2. Il punto precedente permette uno sviluppo più rapido che sembra sopperire la differenza.
- Si possono certificare per il lavoro in ambienti pericolosi.

STRATEGIA CON DL E AR In questo caso sono necessari dispositivi a realtà mista. Ciò garantisce la massima immersività applicabile all'ambiente manutentivo. Per permettere l'evidenziazione delle componenti su cui operare, è necessaria grande accuratezza nel tracciamento degli oggetti. Il tutto è reso possibile dalle molteplici e diverse fotocamere presenti sui dispositivi tipo Microsoft HoloLens 2 (3.2.2.2) o Magic Leap 2. Infatti grazie all'incrocio delle immagini prelevate dalle fotocamere si calcola la profondità e distanza dell'oggetto: calcolo che risulta di estrema difficoltà con immagini bidimensionali (caso di una sola fotocamera). Bisogna considerare il costo che è decisamente più alto, ovviamente giustificato dalla tecnologia più avanzata rispetto ai precedenti. In più:

- Per entrambi i dispositivi a realtà mista, viene reso disponibile l'[SDK](#) e diversi corsi on-line gratuiti per imparare a realizzare applicazioni per l'ambiente olografico.
- Entrambi i dispositivi sono certificati per l'utilizzo in ambienti pericolosi, eventualmente esiste una versione degli HoloLens 2 già integrata ad un elmetto di sicurezza.
- Essendo controllabili tramite gesti, possono essere sfruttati per la valutazione delle attività del personale. Ai-

Tabella 12: Confronto utilizzo dei diversi dispositivi AR

Tele-manutenzione	DL + AR
Renderizzazione di semplici modelli tridimensionali	Realizzazione di ambienti e oggetti olografici
Semplicità d'utilizzo con controllo vocale o touchpad integrato	Controllo vocale e, soprattutto, controllo gestuale che però deve essere appreso
Facili da programmare grazie alla diffusione del sistema operativo Android, che oltre alle applicazioni specifiche per AR, permette di utilizzare anche applicazioni studiate per altri dispositivi	Maggiore complessità nella programmazione ma migliore resa all'operatore, permettendo maggiore immersività

tando anche la riduzione dell'errore umano nelle operazioni manutentive. Però è necessario imparare i gesti di controllo.

Alla tabella 12 sono riassunti i punti salienti.

6.2 VANTAGGI E LIMITAZIONI DELL'UTILIZZO DELLA AR

la tecnologia AR ha un alto grado di assistenza per le operazioni in cui viene applicata: come visto sia ai capitoli 4 e 5, anche nelle applicazioni proposte al capitolo 3 si denota grande versatilità d'impiego. Rendere più efficienti i campi su cui viene applicata: uscendo dall'ambito prettamente industriale, si nota che le applicazioni coinvolgenti dispositivi AR ne giovino. Tornando all'ambito industriale, gli occhiali AR, specie quelli a realtà mista, possono essere sfruttati sia per la manutenzione (come visto in questo estratto) che per la produzione, ad esempio istruendo circa la sequenza di assemblaggio del prodotto; che in ambito di addestramento del personale. Perciò la loro versatilità è estremamente alta.

Sebbene si stia applicando alla realtà una visione "diversa", non si sono riscontrati effetti collaterali come già visto al capitolo 3. Per cui l'utilizzo, nei limiti di legge, non costituisce alcun pericolo.

Bisogna considerare, però, alcuni aspetti:

- non sempre è necessario l'utilizzo tali dispositivi, per impieghi di breve durata sono controindicati perché possono divenire una perdita di tempo.
- È necessario realizzare dei modelli digitali per poi poterli sfruttare sui dispositivi AR. Ciò implica che debbono essere scanne-

rizzati, modellizzati e digitalizzati gli oggetti utili agli occhiali. Per cui non è possibile utilizzare direttamente i dispositivi senza un'opportuna preparazione precedente. È pur vero che si sta studiando una tecnica per cui sia l'occhiale direttamente ad effettuare le scannerizzazioni, dunque realizzando un modello tridimensionale digitale in diretta.

- La loro flessibilità dipende dalle applicazioni che vengono realizzate per adempire ad un determinato scopo. Per ciò vanno programmate e installate le opportune applicazioni se necessario. Dunque c'è la necessità di opportuna configurazione.

Tutto sommato, l'impiego dei dispositivi a realtà aumentata è di generale beneficio alle applicazioni. Con le opportune considerazioni risulta che l'investimento in tale tecnologia, nelle più adatte applicazioni.

6.3 ASPETTATIVE FUTURE

Le strategie proposte mostrano che l'utilizzo della realtà aumentata non solo possibile, anche utile per rendere le attività manutentive più efficienti riducendone il DT e il costo legato alle attività.

In futuro si vorrebbe poter applicare tali strategie anche a macchinari che non sono stati digitalizzati precedentemente. Ad esempio indicando la sostituzione di una componente e, partendo dalla descrizione, riconoscendo il componente senza previa modellizzazione.

Si vorrebbe, inoltre, realizzare uno studio sulla fattibilità economica delle applicazioni proposte ai capitoli precedenti. Infatti i dati sono puramente sperimentali, per cui un'analisi più approfondita permetterebbe di valutare l'effettiva applicabilità.

Inoltre, per la proposta del capitolo 5, si può applicare anche a situazioni industriali in cui i macchinari non sono di ultima generazione? Si possono evitare i sensori in tale applicazione, rendendo così il sistema più robusto?

Parte IV

RIFERIMENTI

BIBLIOGRAFIA

- [1] URL: <https://alegerglobal.com/>.
- [2] Fabio Ariotti. “Applicazione di realtà aumentata a supporto di operazioni di manutenzione e riparazione in ambito industriale”. 2017. URL: <https://webthesis.biblio.polito.it/6597/1/tesi.pdf>.
- [3] *Real-Time Diagnostics, Prognostics and Health Management for Large-Scale Manufacturing Maintenance Systems*. Vol. ASME 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 2. International Manufacturing Science and Engineering Conference. Ott. 2008, pp. 85–94. DOI: [10.1115/MSEC_ICMP2008-72511](https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72511). eprint: https://asmedigitalcollection.asme.org/MSEC/proceedings-pdf/MSEC2008/48524/85/2783464/85_1.pdf. URL: https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72511.
- [4] Mahdi Bashiri, Hossein Badri e Taha Hossein Hejazi. “Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method”. In: *Applied Mathematical Modelling* 35.1 (2011), pp. 152–164. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.05.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X10002209>.
- [5] Ernnie Illyani Basri, Izatul Hamimi Abdul Razak, Hasnida Ab-Samat e Shahrul Kamaruddin. “Preventive Maintenance (PM) planning: a review”. In: *Journal of Quality in Maintenance Engineering* (2017).
- [6] Becca Caddy. *AR smartglasses in 2021 the devices, apps and new tech coming*. 2021. URL: <https://www.wearable.com/ar/ar-glasses-state-of-the-union-8461>.
- [7] L Carenzo, F. L. Barra, P. L. Ingrassia, D. Colombo, A. Costa e F. Della Corte. “Disaster medicine through Google Glass”. In: *European journal of emergency medicine official journal of the European Society for Emergency Medicine* (2015), 222–225. DOI: [10.1097/MEJ.000000000000229](https://doi.org/10.1097/MEJ.000000000000229). URL: <https://doi.org/10.1097/MEJ.000000000000229>.
- [8] Julie Carmigniani, Borko Furht, Marco Anisetti, Paolo Ceravolo, Ernesto Damiani e Misa Ivkovic. “Augmented reality technologies, systems and applications”. In: *Multimedia Tools and Applications* 51 (2011), pp. 341–377. ISSN: 1573-7721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-010-0660-6#>.

- [9] Raffaele Casola. *Google Maps si arricchisce di una nuova funzionalità attesa da tempo*. 2021. URL: <https://www.tomshw.it/smartphone/google-maps-si-arricchisce-di-una-nuova-funzionalita-attesa-da-tempo/>.
- [10] Maurizio Cattaneo. *Cultura di manutenzione*. Vol. 6. Alinea Editrice, 2007.
- [11] Cristiano A.V. Cavalcante, Rodrigo S. Lopes e Philip A. Scarf. "Inspection and replacement policy with a fixed periodic schedule". In: *Reliability Engineering & System Safety* 208 (2021), p. 107402. ISSN: 0951-8320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107402>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832020308887>.
- [12] Microsoft Corporation. *HoloLens 2 technical specs*. 2022. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware>.
- [13] Min Fan, Alissa N. Antle e Jillian L. Warren. "Augmented Reality for Early Language Learning: A Systematic Review of Augmented Reality Application Design, Instructional Strategies, and Evaluation Outcomes". In: *Journal of Educational Computing Research* 58.6 (2020), pp. 1059–1100. DOI: [10.1177/0735633120927489](https://doi.org/10.1177/0735633120927489). eprint: <https://doi.org/10.1177/0735633120927489>. URL: <https://doi.org/10.1177/0735633120927489>.
- [14] Paulina Gackowiec. "General overview of maintenance strategies – concepts and approaches". In: *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering* Vol. 2, Iss. 1 (2019), 126–139. ISSN: 2545-2827. URL: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-666e1b24-17c3-474a-8b65-01d03c29610d>.
- [15] Abir Gallala, Bassem Hichri e Peter Plapper. "Survey: The Evolution of the Usage of Augmented Reality in Industry 4.0". In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 521.1 (2019), p. 012017. DOI: [10.1088/1757-899x/521/1/012017](https://doi.org/10.1088/1757-899x/521/1/012017). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/521/1/012017>.
- [16] IEC 60529, EN 60529, CEI 70-1. *Grado di protezione IP marcatura internazionale di protezione*. IEC, EN, CEI. 2013.
- [17] Google Inc. *Google Glass 2 tech-specs*. 2022. URL: <https://www.google.com/glass/tech-specs/>.
- [18] Magic Leap Inc. *Magic Leap 2*. 2022. URL: <https://www.magicleap.com/device>.
- [19] Hackman Hon Yin Lee e David Scott. "Overview of maintenance strategy, acceptable maintenance standard and resources from a building maintenance operation perspective". In: *Journal of building appraisal* 4.4 (2009), pp. 269–278.
- [20] Maria Beatrice Ligorio. *Intelligenza Artificiale e apprendimento*. Il Mulino, 2022, pp. 21,26. URL: <https://www.rivisteweb.it/doi/10.1422/103844>.

- [21] Yung-Ching Liu. "Effects of using head-up display in automobile context on attention demand and driving performance". In: *Displays* 24.4 (2003), pp. 157–165. ISSN: 0141-9382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2004.01.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938204000022>.
- [22] Luciana Maci. "Che cos'è l'Industria 4.0 e perché è importante saperla affrontare". In: *Economy Up* (2021). URL: <https://www.economyup.it/innovazione/cos-e-l-industria-40-e-perche-e-importante-saperla-affrontare/>.
- [23] Riccardo Manzini e Alberto Regattieri. *Manutenzione dei Sistemi di Produzione*. Via Terracini 30, 40131 Bologna, Italia: Società Editrice Esculapio, 2007.
- [24] Sherif Mostafa, Jantanee Dumrak e Hassan Soltan. "Lean Maintenance Roadmap". In: *Procedia Manufacturing* 2 (2015). 2nd International Materials, Industrial, and Manufacturing Engineering Conference, MIMEC2015, 4-6 February 2015, Bali, Indonesia, pp. 434–444. ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.076>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978915000773>.
- [25] D. Mourtzis, V. Zogopoulos e E. Vlachou. "Augmented Reality Application to Support Remote Maintenance as a Service in the Robotics Industry". In: *Procedia CIRP* 63 (2017). Manufacturing Systems 4.0 – Proceedings of the 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, pp. 46–51. ISSN: 2212-8271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.154>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117303360>.
- [26] Brendan William Munzer, Mohammad Mairaj Khan, Barbara Shipman e Prashant Mahajan. "Augmented Reality in Emergency Medicine: A Scoping Review". In: *J Med Internet Res* 21.4 (2019), e12368. ISSN: 1438-8871. DOI: [10.2196/12368](https://doi.org/10.2196/12368). URL: <http://www.jmir.org/2019/4/e12368/>.
- [27] Volkswagen Newsroom. *Tra reale e virtuale ecco l'head-up display a realtà aumentata*. 2021. URL: <https://modo.volkswagengroup.it/it/mobotica/tra-reale-e-virtuale-ecco-lhead-up-display-a-realta-aumentata>.
- [28] Pietro Pettenà e Enrico Casarotto. "Sviluppo di un'applicazione industriale in Realtà Mista con HoloLens". Tesi di Laurea. Università degli Studi di Padova, 2022. URL: https://thesis.unipd.it/bitstream/20.500.12608/10879/1/Tesi_Pettena.pdf.
- [29] Sergio Piastra. "Interfacce di realtà aumentata per applicazioni efficienti e sicure nell'industria e nei servizi". Tesi di dott. alma, 2021. URL: <http://amsdottorato.unibo.it/9767/>.

- [30] Eduardo Pinheiro, Wolf-Dietrich Weber e Luiz André Barroso. "Failure trends in a large disk drive population". In: (2007).
- [31] Yongyi Ran, Xin Zhou, Pengfeng Lin et al. "A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches". In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* (2019).
- [32] Epson Italia S.p.a. *Moverio BT-40 Specifiche Tecniche*. 2022. URL: <https://www.epson.it/prodotti/smartglass/smartglass/moverio-bt-40/p/31095>.
- [33] *Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro*. DLgs:81/08. 9 Apr. 2008.
- [34] R S Velmurugan e Tarun Dhingra. "Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function". In: *International journal of operations & production management* 35.12 (2015-12-7). ISSN: 0144-3577.
- [35] Liping Wang, Dunbing Tang, Changchun Liu, Qingwei Nie, Zhen Wang e Linqi Zhang. "An Augmented Reality-Assisted Prognostics and Health Management System Based on Deep Learning for IoT-Enabled Manufacturing". In: *Sensors* 22.17 (2022). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s22176472](https://doi.org/10.3390/s22176472). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6472>.
- [36] Yue Wang, Shusheng Zhang, Sen Yang, Weiping He e Xiaoliang Bai. "Mechanical assembly assistance using marker-less augmented reality system". In: *Assembly automation* 38.1 (2018-01-23). ISSN: 0144-5154.
- [37] Yue Wang, Shusheng Zhang, Sen Yang, Weiping He, Xiaoliang Bai e Yifan Zeng. "A LINE-MOD-based markerless tracking approach for AR applications". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89 (mar. 2017-1), pp. 1699 – 1707. DOI: [10.1007/s00170-016-9180-5](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9180-5). URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9180-5>.
- [38] Mario Winterer. "Einsatz von Augmented Reality in der Schweißtechnik". Tesi di dott. Nov. 2016. URL: https://www.researchgate.net/figure/Abbildung-27-Funktionsweise-eines-optischen-See-Through-AR-Systems-Bildquelle-22_fig4_312034370.
- [39] Pedro Yopez, Basel Alsayyed e Rafiq Ahmad. "Intelligent assisted maintenance plan generation for corrective maintenance". In: *Manufacturing Letters* 21 (2019), pp. 7–11. ISSN: 2213-8463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.06.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631830155X>.

COLOPHON

Immagine finale: Bojack Horseman in "Escape from L.A."
Final Version as of 18 novembre 2022 (classicthesis Versione 6.1).

