



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

*Lucidatura di componenti meccanici tramite l'impiego di
robot antropomorfi*

Tutor Universitario: Prof. Andrea Ghiotti

Benetazzo Alessandro 1167569

Anno Accademico 2021/2022

Dedicato ai miei genitori

Abstract

L'obiettivo di questa ricerca è quello di approfondire l'impiego di robot antropomorfi nella lavorazione finalizzata alla lucidatura di pezzi meccanici.

L'idea parte dalla necessità di ottenere la minima rugosità superficiale su alcuni stampi usati per la formatura di particolari tipi di lamiera, ma subito si è passati ad una visione più ampia che potesse garantire lo stesso processo come lavorazione finale anche ai pezzi in uscita da altre lavorazioni.

L'elaborato è strutturato come segue: i primi due capitoli sono necessari per introdurre il lettore all'argomento, spiegando i processi di finitura superficiale prima e successivamente le caratteristiche e il funzionamento dei robot. Nel terzo capitolo viene trattato il vero e proprio impiego dei robot nella lavorazione di lucidatura dei pezzi, in particolare le tecnologie adottate per ottenere la qualità desiderata, per poi arrivare al capitolo finale dedicato al confronto tra questa tecnologia e le altre lavorazioni usate tradizionalmente.

Sommario

Introduzione	9
1 Processi di finitura	11
Finitura per asportazione tradizionale	12
Finitura per abrasione e altri processi di lucidatura	14
2 Robot.....	19
Tipologie	19
3 Impiego dei robot nella lucidatura	23
Cooperazione tra operaio e robot	23
Tecnologie per una migliore prestazione	25
Approccio al tipo di superficie	33
4. Confronto tra le tecnologie	39
Conclusioni	43
Riferimenti	47

Introduzione

Il processo di stampaggio consiste nella deformazione di un foglio di lamiera con eventuale asportazione di parti superflue o indesiderate mediante uno stampo che preme la lamiera contro una cavità appositamente formata, il controstampo, adagiando tutto il materiale per farle ottenere il profilo desiderato. Grazie alla sua incredibile versatilità, che permette di ottenere prodotti di qualsiasi genere, da ogni ambito della vita quotidiana alla fabbricazione di grandi mezzi, questo è uno dei processi di produzione maggiormente utilizzato in ambito delle lavorazioni dei metalli.

Tuttavia, un parametro fondamentale per la valutazione della qualità del pezzo prodotto è la finitura superficiale dello stesso: una superficie con una rugosità minore non solo è esteticamente più piacevole, ma migliora anche le proprietà sia fisiche che chimiche dell'elemento interessato. I processi di finitura sono estremamente precisi e i suoi costi aumentano esponenzialmente con il diminuire della tolleranza sulla rugosità superficiale. Dunque, riuscire a produrre un pezzo di qualità superiore in uscita da una lavorazione di stampaggio si traduce in una significativa diminuzione dei costi e dei tempi di produzione.

In generale non è possibile intervenire oltre un certo limite sulla finitura di un pezzo in uscita da un processo di deformazione di questo tipo, perché la rugosità superficiale è influenzata da numerosi parametri e alcuni dei quali non possono essere modificati. Tuttavia, esiste un settore, quello delle *white technologies* ovvero il settore applicato alla gamma degli elettrodomestici (e di cui non è nell'interesse della ricerca approfondire i metodi), in cui le lamiere subiscono alcuni trattamenti speciali, i quali fanno sì che anche una finitura dello stampo estremamente precisa come la lucidatura abbia un'influenza e sia in grado di migliorare la qualità del prodotto senza bisogno di ulteriori lavorazioni.

Le tecnologie tradizionalmente impiegate per la lucidatura non permettono di avere un controllo adeguato durante la lavorazione di superfici curve; perciò, il prossimo passo nello sviluppo tecnologico di quest'arte sarà la lucidatura tramite robot antropomorfi. Questi, infatti, hanno il vantaggio di combinare la precisione e l'accuratezza tipica delle macchine insieme a una flessibilità nei movimenti che altrimenti sarebbe tipica solo delle azioni svolte da braccia umane.

È possibile utilizzare la stessa tecnologia non solo finalizzata al miglioramento di un processo di stampaggio, ma anche per la lucidatura di pezzi finiti.

1 Processi di finitura

Ogni superficie di qualsiasi oggetto che ci circonda è caratterizzata da determinate proprietà geometriche. Allo stesso modo, ogni pezzo uscito da un qualsiasi processo di lavorazione ha una superficie le cui caratteristiche geometriche devono essere monitorate e misurabili per soddisfare dei requisiti imposti da esigenze che possono avere natura estetica o funzionale.

Alcuni dei parametri usati per valutare lo stato di una superficie rispetto al modello geometrico ideale sono:

- **Difetti (o imperfezioni).** Sono irregolarità casuali sparse e possono essere di diversa natura
- **Errori di forma.** Consistono in una significativa deformazione che va a modificare su scala macroscopica proprio la forma del pezzo. Le cause di tali deformazioni possono essere di diversa natura.
- **Ondulazioni.** Sono piccole deformazioni su scala microscopica che possono essere causate da sbalzi termici eccessivi, vibrazioni, precedenti deformazioni del pezzo o altre cause.
- **Rugosità.** Consiste in errori micro-geometrici di dimensioni ancora inferiori rispetto alle ondulazioni. Viene misurata come lo scostamento dei picchi o delle valli rispetto al valore della media sulla superficie.

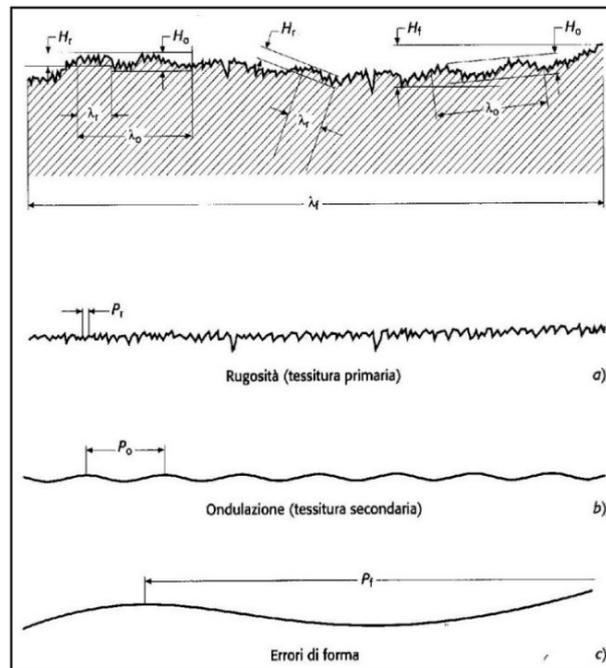


Figura 1 - Somma delle varie irregolarità che si accumulano su di una superficie

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{1}^n |y_i|$$

Finitura per asportazione tradizionale

Il primo processo utilizzato per eliminare le irregolarità sulla superficie del pezzo può essere la fresatura. Questo processo è estremamente versatile: infatti con lo stesso tipo di lavorazione si può andare a operare su una grossa porzione di volume per ottenere il pezzo desiderato asportando il materiale in eccesso da un blocco massiccio; oppure è possibile rimuovere un sottile strato per eliminare le principali irregolarità sulla superficie che possono essere state causate da una precedente lavorazione di formatura o un trattamento termico.

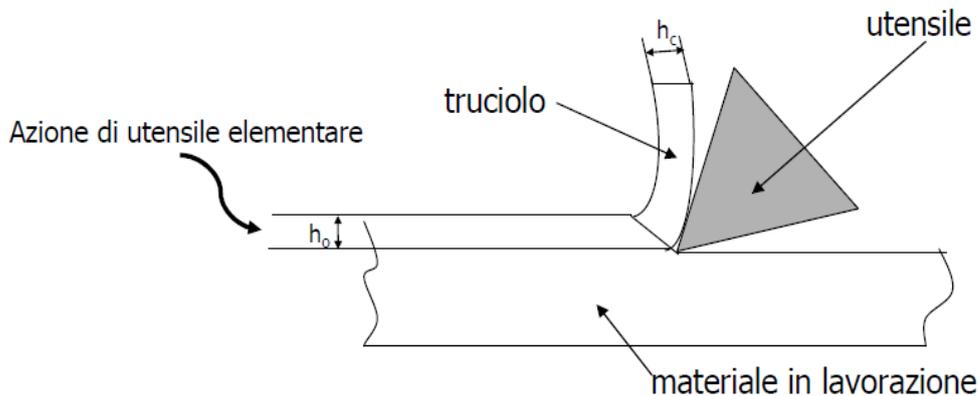


Figura 2 - Schema di processo in una lavorazione per asportazione di truciolo

La lavorazione funziona grazie a un utensile dotato di denti duri e affilati detti taglienti, il quale viene messo in rotazione ad alta velocità. L'interazione tra tagliente e metallo avviene come illustrato in figura: il tagliente va a deformare una minima parte del volume sulla superficie del pezzo; questo forma un truciolo sottile che viene facilmente rimosso dal moto continuo dell'utensile.

Tipologie di fresatura

Le principali operazioni di questa lavorazione si possono distinguere in tre categorie in base alla geometria dell'utensile e dal suo posizionamento rispetto alla superficie di lavorazione:

- **Fresatura periferica.** L'asse di rotazione è parallelo alla superficie del pezzo e l'utensile è solitamente di forma cilindrica. L'interfaccia superficie-tagliente avviene su parte della superficie laterale di tale cilindro.
- **Fresatura frontale.** Nella fresatura frontale l'asse di rotazione è perpendicolare alla superficie lavorata e il tagliente è posto all'estremità

inferiore dell'utensile. La porzione di materiale rimossa è quella immediatamente sotto di esso.

- **Fresatura a codolo.** Unisce le geometrie dell'interfaccia tra superficie e tagliente di fresatura periferica e fresatura frontale. L'asse di rotazione può avere un'inclinazione variabile rispetto al piano di lavoro anche se questi sono generalmente perpendicolari. Viene rimosso materiale sia al di sotto che ai lati dell'utensile, che può avere geometrie diverse in base alla forma della superficie da lavorare.

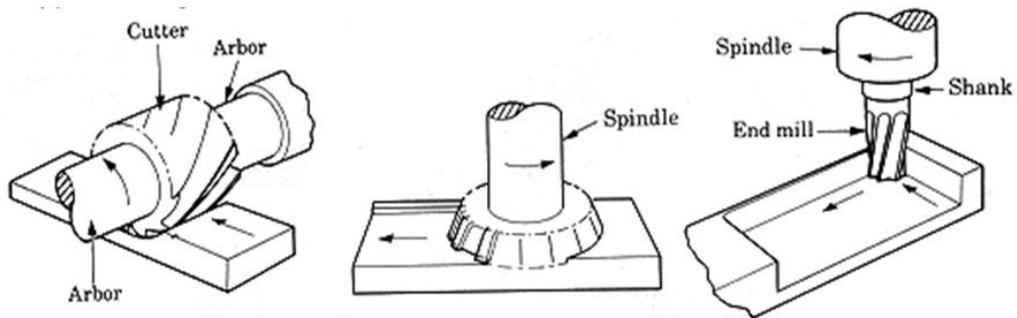


Figura 3 - Schema di processo per le principali modalità di fresatura. Da sinistra rispettivamente: fresatura periferica, fresatura frontale e fresatura a codolo.

Usura dell'utensile e finitura del pezzo

La fresatura è un processo che presenta numerosi vantaggi quando si tratta di rimuovere quantità di materiale relativamente elevate. Tuttavia, se l'esigenza è quella di asportare il più sottile strato possibile al fine di ottenere la migliore finitura superficiale, questa lavorazione presenta alcune incompatibilità dovute alla differenza di dimensioni tra la scala microscopica delle rugosità e quella macroscopica della forma del tagliente. Infatti, ci sono più parametri che influenzano lo stato finale della superficie del pezzo, dovuti alla geometria dell'utensile, del suo stato di usura e dalla profondità di passata.

Il tagliente deve continuamente, per sua natura, far fronte all'interazione con il truciolo di materiale rimosso. Questo scorre sul petto del tagliente sottoponendolo a forze di attrito e di conseguenza anche calore, andando ad alterarne le proprietà meccaniche. Ciò comporta un deterioramento del tagliente, che si manifesta in:

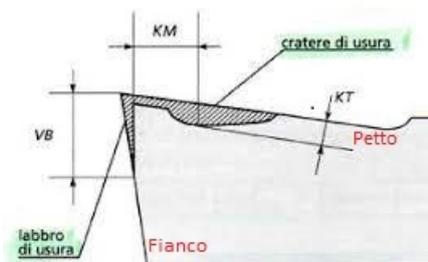


Figura 4- Usura del tagliente

- **Labbro di usura.** Sul Fianco;
- **Cratere di usura.** Sul petto
- **Scheggiatura e Frattura.** Sulla punta del tagliente.

La somma di questi tre fenomeni causa anche uno smussamento dell'utensile.

Il tagliente usurato garantisce un peggiore risultato finale della lavorazione, sia perché si ha un minore controllo della profondità di passata e dell'angolo di spoglia frontale (l'angolo tra il petto del tagliente e la perpendicolare al piano di lavorazione), sia perché vengono a generarsi più attriti che causano tensioni residue e micro-cricche. In particolare, se la profondità di passata è molto piccola, il rischio è quello che il tagliente smussato presenti un angolo di spoglia frontale negativo e l'utensile potrebbe scivolare sulla superficie senza rimuovere materiale, ma solo causando ulteriori attriti e irregolarità.

Finitura per abrasione e altri processi di lucidatura

Quando i processi per asportazione di truciolo tradizionali non bastano per ottenere la rugosità desiderata, diventa necessario ricorrere alle lavorazioni con abrasivi e ad altri processi identificati come “non convenzionali”.

finitura mediante mole abrasive

La finitura mediante abrasivi prende il nome di rettifica e fa impiego di grani composti da materiali estremamente duri, come gli ossidi di alluminio, i carburi o il diamante, che hanno una funzione analoga a quella del tagliente nel processo di fresatura mostrato precedentemente. La dimensione di questi grani abrasivi diminuisce all'aumentare della precisione richiesta, fino a raggiungere un diametro dell'ordine di 1 μm . Esistono tuttavia alcune importanti differenze tra l'asportazione di truciolo tramite un tagliente comune e quella che avviene grazie a una mola abrasiva. Le principali sono:

- Irregolarità dei grani sia per forma che per distribuzione. Questo comporta anche una non uniformità della distanza della punta del grano dal centro della mola.
- Angolo di spoglia frontale $\alpha < 0$. Quindi l'angolo di scorrimento ϕ sarà molto piccolo e le forze in gioco più elevate.

- Bassa profondità di passata, che produce trucioli piccoli e discontinui. È necessario progettare delle apposite scanalature per facilitare la rimozione di questi trucioli perché anche questi sono molto duri e rischiano di compromettere la lavorazione.
- Temperatura e velocità di passata molto più elevate rispetto a quelle della fresatura.

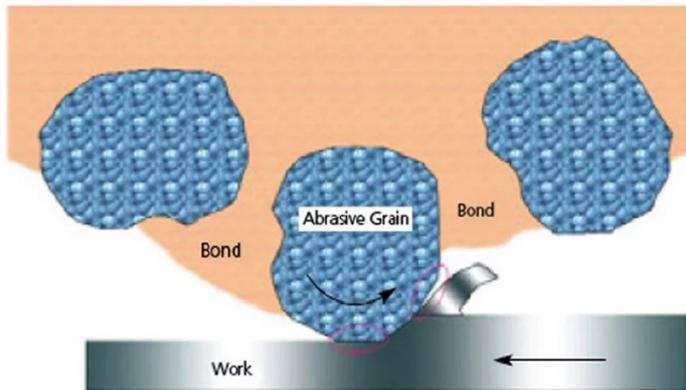


Figura 5 - Schema di lavorazione per asportazione con una mola abrasiva

quello nuovo immediatamente sotto.

Tuttavia, in questo caso la temperatura è un parametro molto delicato a cui fare attenzione perché gli alti valori del coefficiente d'attrito e della velocità dell'utensile possono farle raggiungere valori critici e finire per rovinare lo stato della superficie causando tensioni residue, cricche e compromettendo le proprietà chimiche e fisiche del metallo.

finitura con sospensione abrasiva

È possibile effettuare la lucidatura mediante una pasta abrasiva, ovvero un fluido che mantiene in sospensione un gran numero di grani abrasivi. Un utensile venne strofinato sul pezzo da lucidare, senza però toccarlo perché il fluido e i grani formano un sottile strato fondamentale per la lavorazione. La sospensione abrasiva dà origine a due modalità di abrasione:

- **Abrasione a due corpi.** I grani abrasivi aderiscono all'utensile e strisciano sulla superficie lavorata lasciando solchi paralleli in direzione del moto dell'utensile proprio come farebbero in una mola. Questo tipo

I vantaggi di questo tipo di lavorazione, oltre alla maggiore precisione raggiungibile, risiedono nella meccanica di usura. In particolare, nella proprietà dei grani di rompersi fragilemente, scoprendo nuovi spigoli affilati e in quella del legante di rompersi staccando un grano usurato per scoprire

di abrasione si verifica per elevati valori di pressione o velocità di passata e viene asportato materiale durante il processo.

- **Abrasione a tre corpi.** Si verifica quando sia la pressione che la velocità dell'utensile sono sufficientemente ridotte. In questo caso il grano rotola tra le due superfici senza rimuovere materiale da nessuna di queste, ma limitandosi a svolgere un lavoro puramente di deformazione che piega e abbassa i picchi di rugosità. Vista al microscopio una superficie che abbia subito questo trattamento presenta punte e valli disposte secondo nessuna direzione preferenziale.

In questo tipo di lavorazioni il ruolo svolto dalla sospensione non è soltanto quello di trasportare le particelle abrasive, bensì anche il fluido preso singolarmente è una sostanza chimicamente attiva e svolge la funzione di agente ossidante per il metallo. In questo modo si forma un sottile strato di ossido, più facile da rimuovere. È fondamentale, quindi, conoscere e controllare le proprietà chimiche del fluido in base al risultato finale da ottenere e dal materiale processato. Con questo metodo di lavorazione si avranno tre interfacce: tra metallo e ossido, tra ossido e grano, tra grano e fluido. La forza di adesione tra metallo e ossido deve essere minore di quella di quella del fluido per riuscire a sottrarre la lamina dal metallo; a sua volta però anche la forza di adesione tra grano e ossido deve essere maggiore o uguale a quella col fluido, altrimenti il grano non potrebbe aderire alla superficie.

Un processo di questo tipo ha però diversi svantaggi significativi. Anzitutto la pressione sui grani è difficile da controllare, perché questa è nulla se il diametro del grano è minore dello spessore dell'intercapedine, oppure inaccettabilmente troppo alta in caso contrario. Mediante delle spazzole morbide è possibile regolare la pressione sui grani, ma al prezzo di un minore controllo sulla forma.

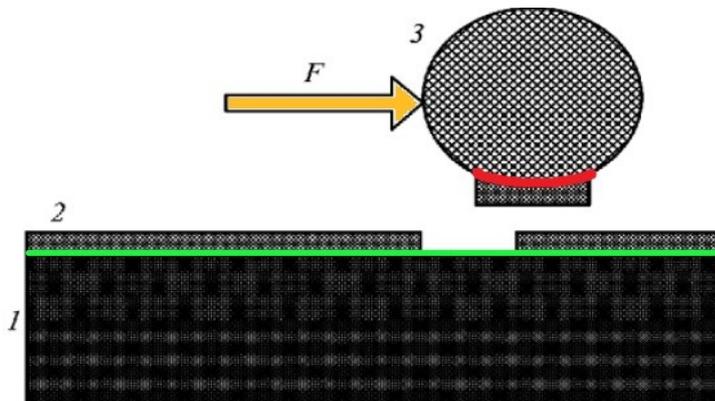


Figura 6 - Meccanica di abrasione per un grano in una sospensione abrasiva. Le forze sono in ordine crescente: verde, poi arancione e infine rosso

Questo è il sistema che viene adottato per la lucidatura manuale, ancora la più diffusa per il trattamento su pezzi con geometrie curve. Le macchine, infatti, incontrano non pochi problemi quando si tratta di lucidare con tale precisione questo tipo di forme e dunque l'unica soluzione possibile è quella di affidare il lavoro ad un operaio specializzato. Tuttavia, a dispetto della sua abilità ed esperienza individuale, un artigiano non può avere il controllo della pressione e del materiale rimosso con la stessa precisione che potrebbe raggiungere una macchina. Inoltre, un operaio umano è limitato in termini di velocità di lavorazione e causa inevitabilmente un rallentamento della catena produttiva. infine, la lucidatura di questo tipo non è in grado di lavorare su spigoli vivi, sia sporgenti che rientranti.

Altre lavorazioni

Anche altre lavorazioni sono possibili per la lucidatura delle superfici metalliche, che fanno impiego di diversi processi fisici, ma anche di reazioni chimiche:

- **Lucidatura.** Si tratta di una minima asportazione di materiale e di un addolcimento delle asperità grazie al riscaldamento dovuto all'attrito. Vengono usati utensili morbidi di tessuto rivestiti con polveri abrasive.
- **Lucidatura laser.** È prevista una rapida fusione e ri-solidificazione di un sottile strato di metallo di spessore inferiore al micrometro. È più rapida delle altre lavorazioni e può essere usata anche su superfici irregolari. La rugosità raggiungibile è di $0,05 \mu\text{m}$.
- **Lucidatura elettrolitica.** Il pezzo lavorato funge da anodo, il quale immerso in una soluzione elettrolitica libera ioni, consumandosi. La velocità alla quale avviene questo fenomeno è maggiore sui picchi delle rugosità piuttosto che nelle altre zone.
- **Lucidatura con campi magnetici.** Fa impiego di campi magnetici per regolare la pressione e l'orientazione dei grani in un liquido abrasivo durante altre lavorazioni.

Con questi processi viene ottenuta una rugosità inferiore a $0,1 \mu\text{m}$. è tuttavia desiderabile riuscire ad ottenere la stessa accuratezza di lavorazione anche con i più comuni processi abrasivi grazie all'utilizzo di una grana sufficientemente fine. Al momento questo risultato è ottenibile con un processo automatizzato solo per superfici piane, a causa della

difficoltà nel seguire con precisione un profilo curvo tramite un robot. Si sta cercando di sviluppare una macchina dotata di utensile abrasivo in grado non solo di regolare la propria forza durante la passata in modo da non indurre tensioni indesiderate, ma anche di replicare la flessibilità nei movimenti (o addirittura eseguirne di più complessi) tipica delle braccia umane. L'importanza di utilizzare un processo abrasivo risiede nella semplicità con cui può essere realizzato un macchinario di questo tipo, a differenza delle altre lavorazioni citate. In questo modo esisterà un robot efficiente, compatto, economico e ad alto potenziale produttivo alla portata di ogni azienda.

2 Robot

Il robot è una qualunque macchina in grado di operare autonomamente, controllata da un'intelligenza artificiale ed il cui scopo è quello di sostituire le operazioni umane. Il loro impiego è di fondamentale importanza nel settore dell'industria al punto che ormai è impossibile farne a meno. Questo perché un robot, a differenza degli umani, è in grado di lavorare più velocemente e può compiere in totale sicurezza operazioni altrimenti troppo pericolose per l'essere umano, come ad esempio il trattamento di metalli incandescenti. Inoltre, con l'avanzamento tecnologico, le qualità a favore dell'automazione migliorano e continueranno a migliorare rapidamente grazie ad innovazioni sia dei software, sia di materiali e strutture più prestanti.

Tipologie

I robot vengono suddivisi in base ai movimenti che essi sono in grado di fare: esistono dunque robot cartesiani, robot cilindrici, robot sferici e robot articolati. Generalmente si compongono di almeno tre articolazioni e assi su cui possono muoversi e sono queste prime tre a determinarne la tipologia. Tuttavia è possibile aumentare il loro numero al fine di ottenere un maggiore mobilità.

Robot cartesiani

I robot cartesiani utilizzano le coordinate X, Y e Z e si muovono linearmente lungo questi assi, generando un volume di lavoro rettangolare. Il loro set-up elementare ne rende possibile la costruzione anche per dimensioni estremamente elevate. Queste macchine trovano impiego per le operazioni di *Pick and place* e per lo spostamento di grandi carichi. Il loro vantaggio risiede nella semplicità con cui è possibile controllarli nei movimenti.

Robot cilindrici

I robot cilindrici possono muoversi linearmente lungo due direzioni e ruotare attorno ad una terza. Vengono usati anche questi per operazioni di *Pick and place*, ma anche per

l'asservimento ad altre macchine. Presentano il vantaggio, a parità di volume di lavoro, di essere più veloci e meno ingombranti rispetto ai robot cartesiani.

Robot sferici

I robot sferici si muovono linearmente lungo una asse e ruotano intorno ad altri due. Sono in grado di fornire una vasta gamma di operazioni, per citarne alcune la saldatura, assemblaggio o verniciatura. Nonostante un ampio volume di lavoro, e un'ottima flessibilità il loro impiego è difficilmente giustificato quando sono messi a confronto con i robot articolati.

Robot articolati

La tipologia dei robot articolati è di gran lunga la più popolare; infatti, quando si parla di robot industriali quasi sempre è per riferirsi a questa tipologia. Queste macchine hanno almeno tre assi di rotazione attorno a cui muoversi, il che li rende simili a un braccio



Figura 7 - Esempari delle quattro tipologie di robot: A) robot cartesiano; B) robot cilindrico; C) robot sferico; D) robot articolato.

umano sia nell'aspetto che nei movimenti (da qui il loro altro nome "robot antropomorfi"). Dal braccio umano prendono il nome anche le sue parti: dal telaio avremo prima di tutto la rotazione intorno alla base, poi intorno alla spalla e infine al gomito. L'estremità libera alla quale viene annesso l'utensile o un effettore prende invece il nome di polso. Sono dotati di una versatilità tale da permettergli di compiere qualsiasi operazione rapidamente, con una portata molto ampia e un minimo ingombro.

La complessità di questi robot li rende difficili da controllare, specialmente quando le articolazioni del braccio aumentano, e serve dunque un abile programmatore per poter esprimere tutto il potenziale della macchina. Lo sforzo richiesto è tuttavia ampiamente ripagato perché, se adeguatamente programmato, un robot antropomorfo è in grado di replicare movimenti complessi, con precisione e avendo il controllo dell'inclinazione del polso e della forza applicata qualora ne fosse necessario.

3 Impiego dei robot nella lucidatura

Per fare il primo passo verso lo sviluppo di un metodo automatizzato per la lucidatura è necessario partire dallo stato attuale dell'arte e progressivamente aggiungere migliorie fino al raggiungimento del risultato desiderato. Allo stesso modo, in questo capitolo sono presentate anzitutto lo studio su una possibile cooperazione tra operaio e robot e successivamente verranno illustrate le tecnologie utilizzate per la migliore automazione del processo.

Cooperazione tra operaio e robot

Come già anticipato precedentemente, spesso la lucidatura deve ancora essere svolta completamente manualmente. Con una ricerca condotta in Danimarca si è cercato di trovare un punto di incontro in cui fosse possibile suddividere il lavoro di finitura in modo che una parte del lavoro continuasse a venire svolta dall'operaio, ma un'altra parte significativa potesse essere affidata al robot in grado di velocizzare il processo.

Descrizione dell'esperimento

Per condurre l'esperimento si è fatto utilizzo di un robot industriale, il quale ha eseguito più volte la stessa operazione su campioni diversi e con utensili diversi. A questi si aggiungono per il confronto alcune lavorazioni svolte manualmente ed un provino non lavorato come riferimento. In totale si hanno sedici campioni divisi in quattro gruppi per tipo o scopo della lavorazione:

1. Analisi dell'influenza dell'angolo e dei movimenti relativi tra pezzo e utensile;
2. Lavorazioni EDM combinate alla lucidatura;
3. Lavorazione con un utensile rotante;
4. Lavorazioni manuali e di riferimento.

Risultati osservati

Al termine dell'esperimento è stata misurata la rugosità ottenuta su ciascun provino, sia tramite misurazione 2D tradizionale, sia attraverso una mappatura 3D di una area di dimensione 1×0.2 mm. In questo modo si è reso possibile notare non solo il profilo di rugosità, ma anche i solchi lasciati dalla lavorazione. Questi sono stati classificati in base alla loro profondità rispetto al piano medio della superficie come Nri (se $>0,5\mu\text{m}$) o Nr2 (se $>1\mu\text{m}$). Si sono osservati comportamenti simili tra i campioni dello stesso gruppo. In particolare, dei tre gruppi di maggiore interesse si è osservato che le lavorazioni del secondo presentavano un ottimo rispetto della geometria del pezzo, ma con un'elevata densità di pori ed una maggiore rugosità. Le lavorazioni con utensile rotante invece erano caratterizzate da picchi e valli molto irregolari, ma vantavano la miglior prestazione in termini di graffi e solchi residui. Infine, il provino lucidato a specchio era dotato della migliore rugosità ottenuta, ma vi era anche possibile notare un'indesiderata ondulazione dovuta alla mancata costanza della velocità e della pressione applicate. Nella seguente tabella sono riportate le due prestazioni migliori ottenute da ciascuna di queste categorie in base al numero osservato di graffi.

tipo e descrizione della lavorazione	Nri	Nr2	Ra (mm)	Rz (mm)
3 - Lucidatura Automatizzata con utensile rotativo inclinato di 5° rispetto al piano di lavorazione	21	3	0,07	0,52
3 - lucidatura automatizzata con utensile rotativo non inclinato rispetto al piano di lavorazione	22	4	0,04	0,24
4 - Lucidatura manuale da parte di un artigiano	26	4	0,01	0,1
2 - Lucidatura automatizzata con EDM, maggiore numero di passaggi	30	4	0,02	0,25
4 - Lucidatura manuale da parte di un artigiano, un primo passaggio di rettifica è stato svolto a macchina	29	5	0,02	0,13
2 - Lucidatura automatizzata con EDM	42	20	0,09	0,65

Conclusioni

I risultati ottenuti dall'osservazione di tutti i campioni dimostrano che ad una minore rugosità ottenuta corrisponde un minor numero di graffi residuo, ad eccezione dei due provini del terzo tipo, che hanno dimostrato la migliore prestazione nonostante la rugosità relativamente elevata. Questo fenomeno, che è stato spiegato grazie alla migliore finitura

anche dell'utensile, suggerisce l'esistenza di una combinazione ottimale di pre-lavorazione automatica e lucidatura tradizionale. Il rapporto esatto tra di esse può variare in base a vari fattori, tra i quali il materiale e la geometria del pezzo, come anche dell'utensile.

Tecnologie per una migliore prestazione

Nonostante la validità della procedura appena proposta l'obiettivo finale è quello di poter affidare alla macchina la totalità del lavoro. Per fare questo è necessario affinare le tecnologie e lo studio dei processi per consentire ai robot di ottenere una precisione conforme alle esigenze.

Geometria e proprietà dell'utensile

I primi studi svolti alla ricerca del metodo migliore per la lucidatura prevedevano l'impiego di un utensile cilindrico composto interamente di materiale abrasivo. Questo veniva messo in rotazione strofinando interamente la faccia abrasiva sulla superficie trattata mantenendosi in posizione parallela. La lavorazione inoltre veniva svolta mantenendo costante la forza di passata.

Tutti questi metodi sono stati successivamente rielaborati e migliorati. Il primo cambiamento è stato dato alla forza di passata: le superfici curve non hanno una geometria che si sposa bene con quella piana della base di un cilindro, per cui l'area di contatto tra l'utensile e il pezzo è soggetta a variazioni in forma e dimensione. Ciò significa che anche se la forza sull'utensile è costante, non lo è invece la pressione sul pezzo, ovvero la sua forza per unità di superficie. Se questo valore varia eccessivamente si rischia di ottenere una lavorazione non omogenea in cui alcuni punti sono eccessivamente trattati, a causa di una pressione troppo alta e al contrario altri potrebbero non essere sufficientemente lucidati.

Angolo di passata

Un'ulteriore modifica al processo di lavorazione è stata apportata per quanto riguarda la posizione relativa tra utensile e pezzo, in particolare per l'angolo tra essi compreso. La superficie abrasiva completamente appoggiata sul pezzo causa una lavorazione non omogenea data dalle diverse velocità relative a quest'ultimo sui diversi punti dell'utensile, e insieme a questo altre instabilità possono insorgere per angoli inferiori a 10° . Un

esperimento è stato svolto con l'obiettivo di determinare l'influenza di più parametri sul risultato finale. Per una più accurata analisi dei dati, oltre alla rugosità Ra si è voluto misurare il "Signal to Noise Ratio" SNR definito come:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{Ra^2}{\sigma^2} \right)$$

Con σ^2 varianza di Ra. Questo parametro è indicativo della regolarità di picchi e valli sulla superficie, in quanto valori maggiori di altezze e profondità hanno una maggiore rilevanza sul risultato.

Sebbene l'angolo dell'utensile non abbia avuto una particolare influenza su Ra, è stato il parametro più determinante sul valore di SNR. Si è reso dunque necessario uno studio ulteriore per approfondirne la rilevanza e l'interazione che questa ha con la velocità di passata. Nella seconda parte di esperimento, quindi, sono stati raccolti i dati ottenuti dai test con tre diversi angoli a tre diverse velocità. I risultati hanno mostrato la velocità di passata come principale parametro a determinare SNR, ma per ragioni strutturali non è possibile utilizzare valori troppo bassi di questa. Come si legge dal grafico i punti sono disposti non linearmente e quindi è possibile trovare un punto stazionario in cui anche il variare della velocità di passata entro certi limiti avrà un'influenza limitata. I dati mettono anche in evidenza un valore ottimale dell'inclinazione dell'utensile tra i 10° e i 25°, più tendente verso valori bassi. In considerazione anche della degradazione dell'utensile durante il processo, l'angolo di 10° ha dimostrato la miglior prestazione generale tendo conto sia del risultato finale della superficie, sia lo stato di usura dell'utensile.

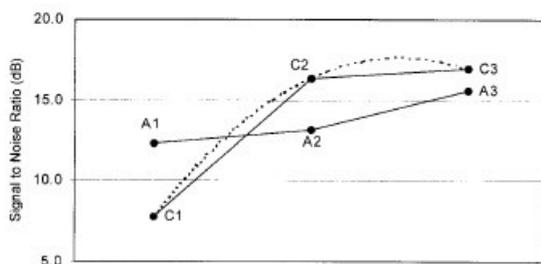


Figura 8 - influenza dei parametri esaminati su SNR. I valori C1, C2 e C3 indicano la velocità di passata rispettivamente 100, 150 e 200 mm/min, mentre i punti A1, A2 e A3 rappresentano gli angoli di 15°, 20° e 25°. Da ulteriori esperimenti sono stati estrapolati altri dati riguardanti l'angolo di 10° e lo stato di usura dell'utensile.

Un nuovo tipo di utensile

Un importante passo avanti si è avuto con l'implementazione di un metodo adattivo passo al processo, ovvero la capacità della macchina di conformare i parametri di processo in tempo reale e in modo indipendente.

Ciò è dovuto ad un nuovo tipo di utensile composto dal mandrino, solido e fissato al robot che lo mette in rotazione, da un foglio di carta abrasiva, parte attiva del processo di asportazione ed infine uno strato di spugna elastica in etilene vinil acetato interposto tra le altre due parti. L'innovazione che ha cambiato lo stato dell'arte risiede proprio nel cuscinetto elastico, in grado di deformarsi comprimendosi ed espandendosi al variare della pressione. L'utensile viene utilizzato mantenendo un'inclinazione costante con la superficie lavorata, strofinando solo una parte della zona abrasiva sul pezzo e formando un'area di contatto ellittica. La pressione è maggiore al centro dell'ellisse e nulla sul contorno, ma grazie allo spostamento della zona lavorata è possibile considerare una distribuzione uniforme sull'area. In prossimità di una variazione della geometria la forza dell'utensile sul pezzo può aumentare o diminuire in modo difficile da prevedere, allora il cuscinetto svolge il suo ruolo adattivo rispondendo a queste variazioni rispettivamente comprimendosi ed allargando l'ellisse di contatto od espandendosi e riducendola. In questo modo varia analogamente alla forza anche l'area su cui essa è distribuita cosicché la pressione rimanga pressoché costante.

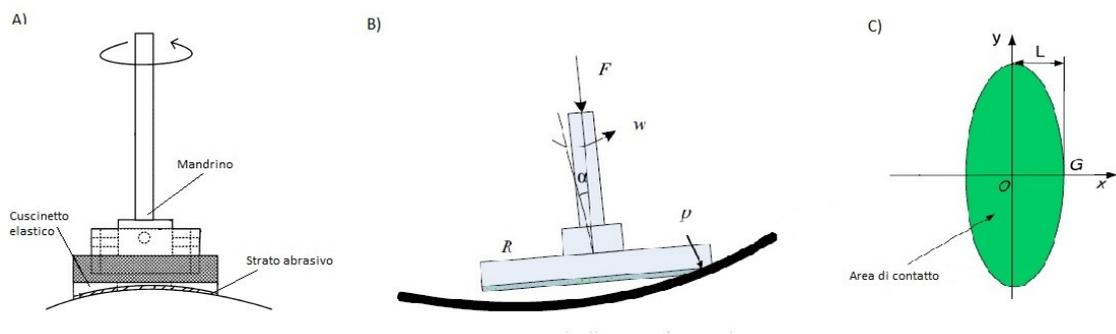


Figura 9 – Viene illustrato l'utensile descritto. A) è mostrata la capacità di adattarsi a diverse superfici; B) e C) vengono rappresentate la posizione dell'utensile durante la lavorazione e l'area di contatto.

Il controllo attivo

Oltre al controllo passivo ottenuto grazie al metodo appena illustrato è possibile migliorare ulteriormente le prestazioni adottando un metodo di controllo attivo grazie ad un effettore finale. Si tratta di un ulteriore robot di dimensione paragonabile a quella dello strumento, il quale viene installato sul polso del robot principale. È programmato per correggere errori di forza e di posizione dell'utensile relativamente piccoli grazie ad un software che gli comunica le operazioni da svolgere. Per una maggiore efficienza spesso viene dotato di uno o più sensori che comunicano al computer dati di varia natura (come potrebbero essere: posizione, forza, forma della superficie, temperatura o altro ancora), questi vengono rielaborati dal sistema e restituiti all'effettore sotto forma di comandi di movimento. Un controllo attivo sarebbe possibile anche svolto interamente dal robot industriale con un minore impegno progettuale, ma a causa delle sue dimensioni e di una maggiore inerzia la risposta sarebbe più lenta di quella dell'effettore. Per questo tipo di intervento, anche con effettore finale, la risposta non è immediata come quella che si ha grazie al controllo passivo, perché deve intercorrere un intervallo di tempo nel quale vengono inviate, rielaborate e restituite le informazioni. Nondimeno le possibilità offerte sono incredibilmente più versatili. Per questo i metodi adattivi attivo e passivo possono lavorare in concomitanza per ottenere il meglio da entrambi.

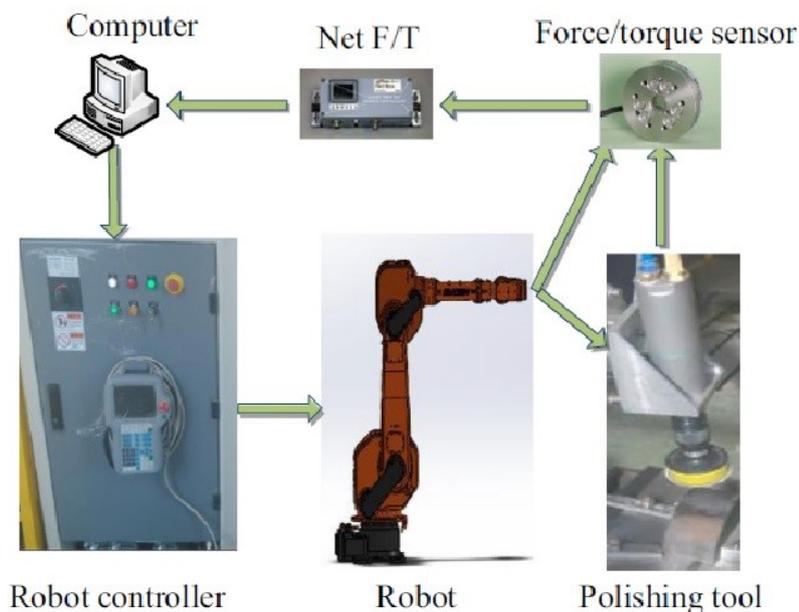


Figura 10 - Schema di composizione di una piattaforma per la lucidatura automatizzata: sono mostrate le varie parti che compongono la cella e le interazioni tra di esse. È a causa di questi numerosi passaggi che purtroppo deve intercorrere un breve lasso di tempo prima che la risposta all'impulso ricevuto dal sensore torni all'utensile.

Correzione del peso dello strumento

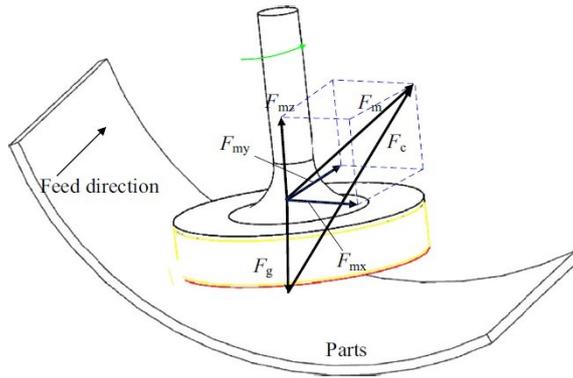


Figura 11 - Scomposizione delle diverse forze agenti su utensile e pezzo durante un processo di finitura.

Le superfici di pezzi a geometria libera sono caratterizzate da continue variazioni di inclinazione rispetto al piano orizzontale. Di conseguenza è altrettanto variabile la ripartizione della forza peso dell'utensile secondo le componenti parallela e perpendicolari alla superficie. Per una maggiore uniformità della lavorazione è necessario prevedere e correggere la forza totale

perpendicolare in modo tale che la somma della componente dovuta al peso con quella impressa dal robot rimanga conforme al valore desiderato. Di seguito verrà riassunto in poche righe il procedimento svolto all'università di Ligong in Cina.

Da uno studio analitico delle proprietà dell'utensile e del pezzo si è determinata una relazione tra pressione e forza normale di passata: $p_n \propto \sqrt[3]{F_n}$. È possibile quindi studiare esclusivamente la forza ed estrapolare i dati per ottenere anche i valori di pressione.

In ogni istante la forza totale F_c risultante sul punto generico "i" è quella dell'iterazione tra utensile e pezzo ed è data da:

$$F_c(i) = F_m(i) - F_g$$

Con F_m forza impressa dal robot (nonché quella misurata dal sensore) e F_g forza di gravità. A questi valori andrebbe aggiunta la forza di inerzia data dal movimento dell'utensile, ma il suo valore è trascurabile e perciò è stata omessa.

È possibile individuare due sistemi di riferimento: O_B solidale alla base del robot e fisso, ed O_S solidale al sensore di forza che cambia continuamente posizione e inclinazione. Le componenti di F_g rispetto ai due sistemi sono:

$$F_g^B = [0; 0; -G]$$

$$F_g^S = [F_{gx}; F_{gy}; F_{gz}]$$

È possibile esprimere F_g^B costante nel tempo come F_g^S variabile, grazie alla matrice di conversione ${}^B_S R$ in ogni istante dipendente dalla struttura del robot e dalla possibile differenza di posizionamento tra utensile e sensore. Un software svolge continuamente i calcoli necessari e ricava la forza e la pressione di passata restituendo al robot la risposta da dare per correggere la forza e la posizione. Durante l'esperimento si è messo a confronto il metodo appena spiegato con la correzione del peso dell'utensile contro una lavorazione priva di questo accorgimento. Dai risultati è emerso un valore della pressione di passata più ridotto e regolare per il nuovo metodo rispetto a quanto ottenuto dalla lavorazione "standard". Come previsto ad una minore pressione corrispondono una minore e più uniforme asportazione di materiale ed una rugosità migliore; in generale una lavorazione di più alta qualità.

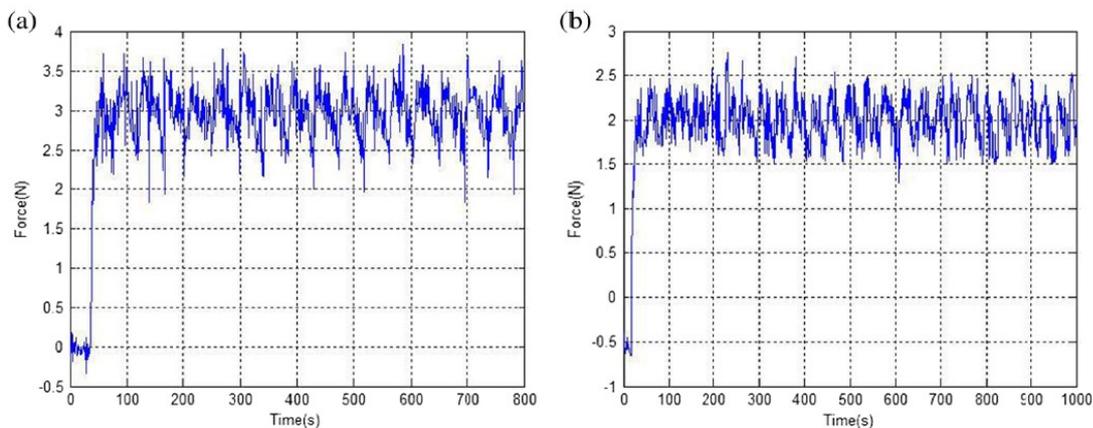


Figura 12 - Valori della forza di lavorazione rilevati durante l'esperimento: (a) senza nuovo metodo di controllo, il valore medio è di 3 N con un'oscillazione di 1,9 N; (b) con controllo adattivo della forza di gravità, il valore ottenuto risulta 2 N con un'oscillazione di 1 N.

Controllo dei movimenti e della traiettoria

In una versione successiva dello studio dell'esperimento appena citato, gli stessi ricercatori hanno anche analizzato un metodo per il controllo dei movimenti del robot sempre in cerca della soluzione che garantisca la migliore prestazione. La ricerca parte dall'analisi

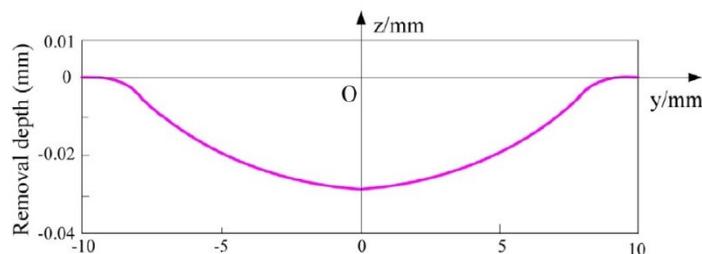


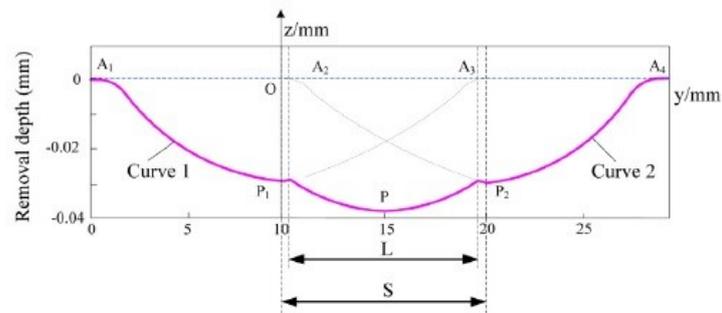
Figura 13 - profilo della superficie per una passata

del materiale asportato durante la lavorazione e dal profilo che lascia sulla sezione trasversale della superficie. Date le coordinate (X; Y; Z) con X direzione

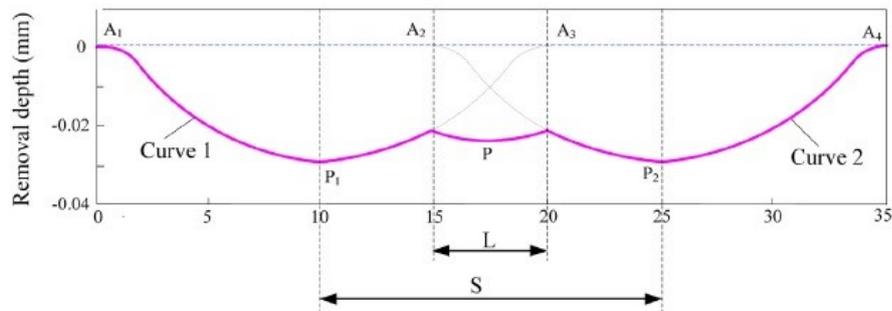
del moto di avanzamento, Y la trasversale e Z direzione normale alla superficie, la funzione che descrive tale curva è:

$$z(y) = ay^2 + b \quad | \quad y^2 \leq -\frac{b}{a}$$

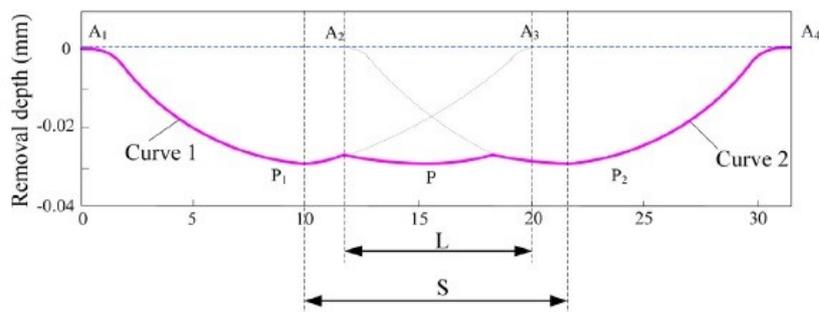
Poiché lo strato di materiale rimosso è estremamente sottile (pochi μm), a differenza del processo di fresatura nelle lavorazioni abrasive l'asportazione avviene ad ogni passata ed è cumulativa con le precedenti. Per cui è necessario determinare la giusta distanza S che deve occorrere tra una passata e l'altra: siano P_1 e P_2 i vertici di due parabole consecutive descriventi il profilo dove è appena passato l'utensile e P il punto di minimo relativo della zona in cui le due curve si sovrappongono. Il valore ottimale di S è quello che risulta nella



(a) Trajectory with small path spacing



(b) Trajectory with big path spacing



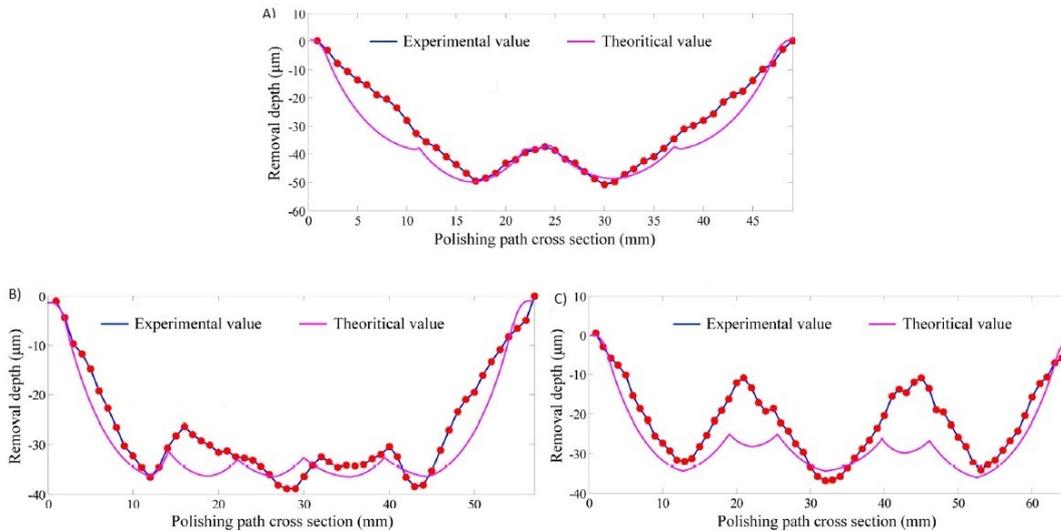
(c) Trajectory with ideal path spacing

Figura 14 - Profili della superficie lavorata per due passate adiacenti e consecutive.

curva in cui P_1 , P_2 e P si trovano allo stesso livello. Se S è troppo piccolo o troppo grande, infatti, P si troverebbe a un livello più basso o più alto rispetto agli altri due punti e genererebbe una superficie più irregolare. L'intervallo tra due passate consecutive è stato calcolato essere $S = \sqrt{-\frac{2b}{a}}$.

$$S = \sqrt{-\frac{2b}{a}}$$

Figura 16 - Confronto tra la superficie attesa dal modello teorico con quella effettivamente ottenuta empiricamente.



Per verificare la validità del modello sono state confrontate le superfici ottenute contro i risultati attesi per valori di S rispettivamente di 12, 16 e 20 mm. Il procedimento è stato svolto sia su superfici piane, sia su superfici curve producendo lo stesso esito. Come si può osservare la pratica dell'esperimento è in buon accordo con quanto previsto in via teorica; quindi, è possibile minimizzare le fluttuazioni sulla superficie selezionando un'adeguata spaziatura tra le passate.

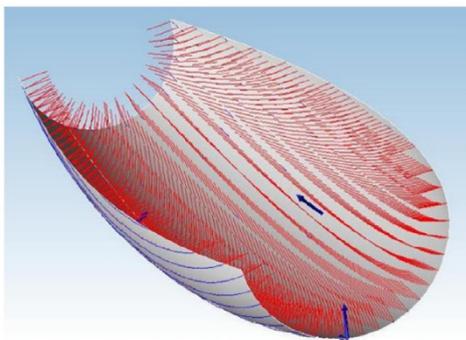


Figura 15 - Generazione automatica della traiettoria dell'utensile.

Per garantire la corretta posizione dell'utensile in ogni istante durante il suo movimento è necessario conoscerne chiaramente sia la posizione effettiva, sia quella ottimale. Per compiere questa operazione un software parte dal modello 3D del pezzo da lucidare e, discretizzando la superficie in un numero sufficiente di punti, calcola la posizione ideale del robot in ognuno di essi. Si genera così uno spazio vettoriale in cui ogni elemento rappresenta forza, posizione e

direzione che il robot deve avere in quel determinato punto. Collegando ogni vettore a quello adiacente e seguendo direzioni parallele si ottiene la traiettoria ottimale da seguire. Mentre la lavorazione è in corso il robot comunica continuamente al computer la sua posizione e contemporaneamente un sensore fornisce i dati relativi alla forza. Il software, quindi, processa tutte le informazioni istantaneamente ed elabora la risposta correttiva da inviare alla macchina per conformare i parametri di processo ai valori desiderati.

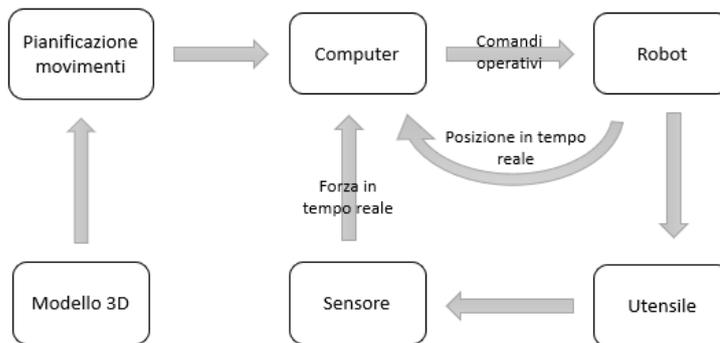


Figura 17 - Interazioni tra le parti della macchina durante la lavorazione.

Approccio al tipo di superficie

Finora è stata presentata la ricerca svolta all'insegna della migliore rugosità possibile sul singolo punto della superficie. Tuttavia, il progresso non si limita soltanto a questo aspetto: il lavoro necessario per mettere in lavorazione un singolo pezzo è ancora molto dispendioso in termini di tempo e di sforzo progettuale. È necessario ottimizzare il processo in ogni suo aspetto, non solo nel risultato finale.

Lucidatura di superfici tridimensionali ignote

Uno tra i migliori vantaggi attribuibili all'operaio umano risiede nell'estrema adattabilità delle sue operazioni. Un operaio, infatti, non ha bisogno di conoscere la geometria su cui deve lavorare, ma è in grado di agire immediatamente su di essa non appena gli dovesse essere richiesto. Con quest'idea in mente si è cercato di sviluppare un metodo che permettesse alla macchina di lucidare una qualsiasi superficie tridimensionale senza avere bisogno di conoscere i movimenti e la traiettoria da seguire a priori.

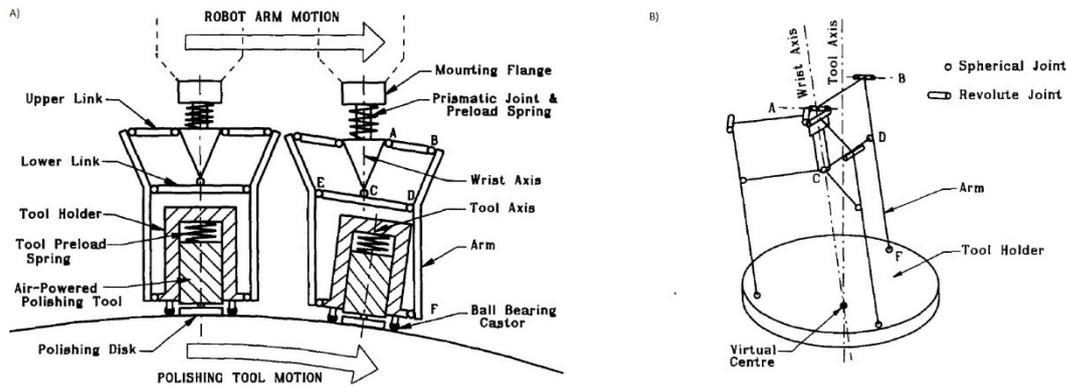


Figura 18 - A) rappresentazione bidimensionale del funzionamento passivo dell'effettore. B) Schema costruttivo tridimensionale.

L'elemento chiave di questa tecnologia consiste in un nuovo tipo di effettore finale adattivo passivo in grado di mantenere l'inclinazione dell'utensile tale che il suo asse di rotazione sia sempre perpendicolare alla superficie nel punto lucidato, a prescindere dalla posizione del polso. La sua struttura si compone di tre catene di parallelogrammi disposte radialmente rispetto all'asse del polso del robot e che collegano quest'ultimo al porta utensile. Le tre catene cinematiche sono libere di muoversi assialmente e radialmente, ma devono mantenere una certa rigidità tangenziale per evitare di spostare l'utensile fuori centro. Il porta utensile contiene il motore che mette in rotazione l'attrezzo e viene mosso dall'effettore sia per traslazione che per rotazione. Alla sua base ed in corrispondenza delle tre braccia sono collocate tre sonde munite di rotelle il cui scopo è quello di

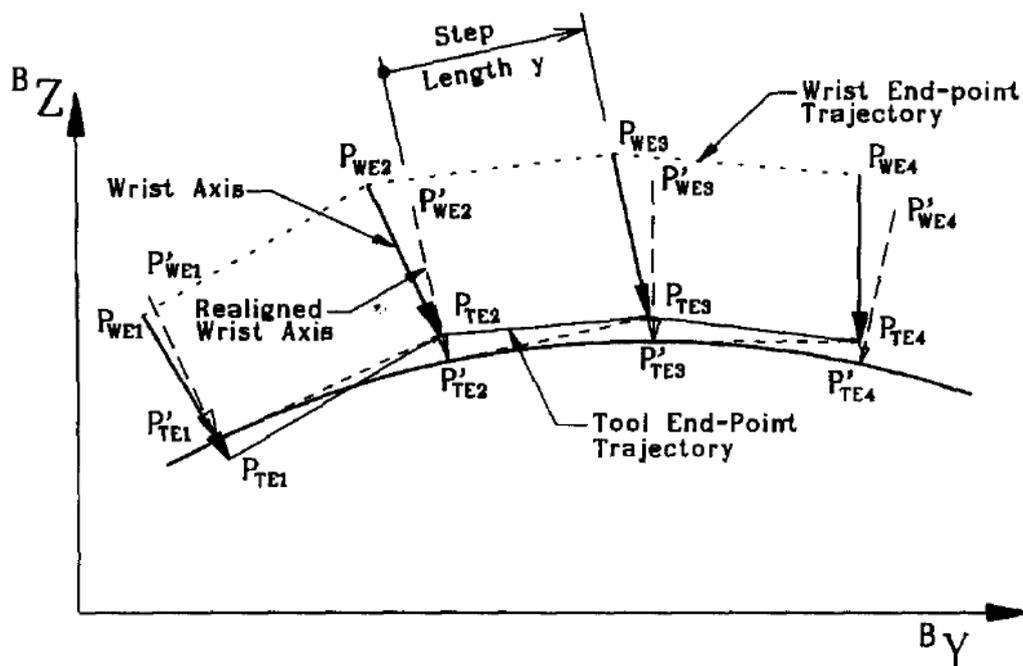


Figura 19 - Movimento e direzione del polso e dell'utensile durante la lavorazione.

comunicare ad un computer il valore della forza su ciascuno di essi. In aggiunta a questi dispositivi vengono inserite altre due molle, una sul polso del robot e una sul porta utensile, allo scopo di garantire sempre il contatto pezzo-utensile e ottenere una maggiore uniformità della forza di passata. Durante il moto del robot, il computer reagisce alle informazioni fornite dai sensori e le converte in dati sulla forma della superficie. Successivamente, a intervalli di tempo regolari, ricolloca il robot in modo tale che le nuove posizione e inclinazione si adeguino bene alla forma rilevata. Grazie al sistema adattivo è possibile semplificare i movimenti al metodo più elementare da punto a punto mentre l'effettore mantiene la regolarità della passata.

Il moto del robot procede in direzione rettilinea ed ogni passata è parallela a quelle precedenti. Quando la traiettoria raggiunge e supera il margine della superficie i sensori comunicano al computer una forza nulla. A quel punto il robot si ripositiona nell'ultimo punto in cui ha ricevuto un input non nullo da ogni sensore, si sposta perpendicolarmente del valore impostato e riprende il suo moto nella direzione di passata.

L'effettore utilizzato dell'esperimento aveva una finestra di azione di $\pm 8^\circ$ per la rotazione angolare e di ± 10 mm di traslazione ed era in grado di fornire il controllo desiderato, con una rugosità di $0,2 \mu\text{m}$, fintantoché la posizione del polso del robot fosse stata corretta ad intervalli entro l'area di azione del dispositivo. Una limitazione a questo metodo è data dalla distanza tra le sonde: quando il raggio di curvatura in un punto della superficie risulta troppo piccolo la forza di passata può variare, con conseguente disuniformità della lavorazione. Per le soluzioni future è stato proposto un motore adattivo attivo che controlli indipendentemente la forza di passata.

Lucidatura di superfici strutturate

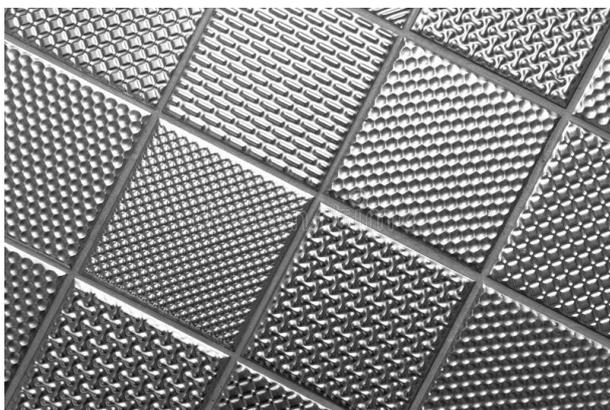


Figura 20 - Alcune superfici strutturate.

Con il termine superficie strutturata si intende una superficie, di qualsiasi forma, caratterizzata da motivi geometrici ricorrenti in rilievo. L'accesso al trattamento di questo tipo di superfici è sempre stato precluso a causa della continua presenza di spigoli vivi sporgenti e rientranti e perché, con un qualsiasi processo per asportazione, anche una minima mancanza di controllo del

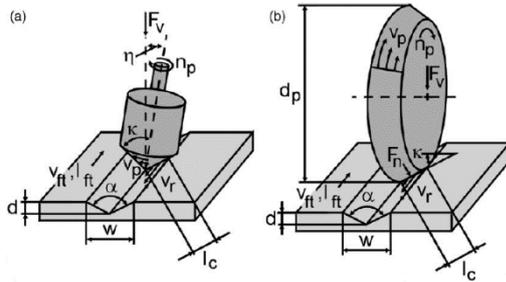


Figura 22 - I due tipi di utensili durante la lavorazione.

materiale rimosso rischia di andare a danneggiare l'intero motivo. Se ne deduce che questa operazione è impensabile da richiedere ad un artigiano, che per quanto possa essere abile gli strumenti a sua disposizione non avranno mai le caratteristiche adatte a sostenere un compito di una tale precisione ed accuratezza. Tuttavia, si può pensare, partendo da geometrie più semplici,

di affidare il soddisfacimento di questa richiesta ad un robot.

Un primo passo verso la lucidatura di questo tipo di superfici è stato fatto in Germania lavorando una tra le geometrie più semplici: Scanalature a V parallele tra di loro. Due diverse geometrie di utensile sono state provate per l'esperimento:

- **A cono:** l'asse di rotazione è inclinato di un certo angolo α rispetto alla superficie dipendente dall'apertura del cono e dall'inclinazione delle pareti delle scanalature. È più versatile e può essere usato anche per traiettorie non rettilinee.
- **A ruota:** l'asse di rotazione è parallela alla superficie ed è possibile realizzare questo utensile sia con la forma di un tronco di cono per lucidare una parete alla volta, sia come unione di due tronchi di cono in grado di lucidare entrambe le pareti in una sola passata. Questa geometria offre una distribuzione più regolare delle velocità dei grani sulla superficie, ma non è in grado di operare con forme curve.

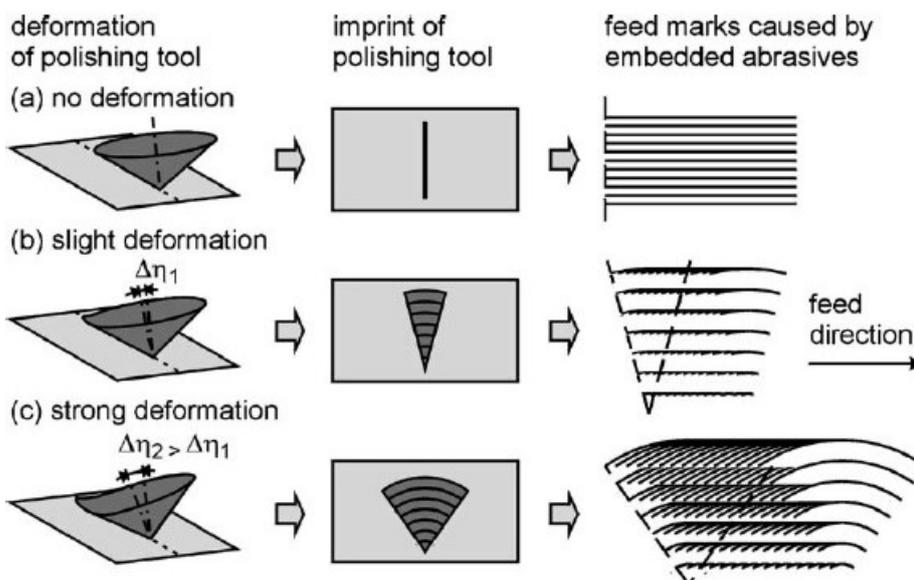


Figura 21 - Influenza dell'inclinazione e deformazione dell'utensile sulla lavorazione.

Il ruolo di abrasivo è stato svolto non dall'utensile direttamente, ma da un liquido con particelle abrasive di diametro $0,1 \mu\text{m}$. In questo modo si è assicurata una dimensione costante dei grani abrasivi durante la lavorazione scongiurando gli effetti di usura.

Sebbene l'utensile a ruota non abbia richiesto particolari analisi prima della lavorazione grazie alla sua semplicità, quello a forma conica necessitava di alcune attenzioni e di uno studio più dettagliato dell'angolo di inclinazione dell'utensile rispetto alla superficie.

Durante la lucidatura tramite utensile conico è importante che l'inclinazione di quest'ultimo mantenga sempre un valore adeguato altrimenti si corre il rischio di avere una lavorazione non uniforme tra la cima e il fondo delle pareti dei solchi. Grazie a bassi valori di pressione e velocità il fluido utilizzato permette il meccanismo di abrasione a tre corpi più delicato, che presenta il vantaggio di attenuare l'influenza della differenza di velocità tra i diversi punti della superficie. Per assicurarsi questa possibilità, è tuttavia necessario che la pressione sia uniforme e ciò è possibile solo grazie ad una corretta inclinazione dell'asse di rotazione. Infatti, denominato η come l'angolo ideale, per qualsiasi variazione da questa inclinazione l'utensile tenderà a premere con più forza verso un estremo della parete causando quindi una diversa deformazione tra i punti di contatto ed una diversa quantità di materiale asportato.

I risultati della lavorazione hanno mostrato valori di rugosità $R_a = 5 \text{ nm}$ ottenuti grazie ai bassi valori di velocità e pressione ed alla modalità di abrasione a tre corpi. I futuri obiettivi di questo lavoro sono la ricerca di nuovi metodi implementabili per la lavorazione di superfici a geometrie sempre più complesse.

Inoltre, da questa ricerca è possibile dedurre che con adeguati utensili le macchine potranno finalmente lucidare geometrie di superfici finora inaccessibili se non solo gli spigoli vivi, ma anche piccole geometrie che richiedono tale precisione di lavorazione diventeranno compiti commissionabili ad esse.

4. Confronto tra le tecnologie

La lucidatura di pezzi in metallo è un processo che viene svolto come trattamento finale della catena di produzione di un articolo. Negli ultimi quarant'anni, a partire dagli anni '80, numerosi progressi sono stati fatti in quasi tutte le fasi della realizzazione di un prodotto: In fase di progetto e disegno si è passati dal disegno tecnico a mano ad avanzati software di disegno in 2D e 3D; le macchine con cui vengono svolti i diversi processi hanno acquisito migliori prestazioni con una più alta efficienza; tuttavia il processo di lucidatura non ha subito alcun miglioramento significativo e continua ancora a venire svolto manualmente da un abile artigiano talvolta con nient'altro che l'aiuto di una pezza



Figura 23 - Lavoratore durante un processo di lucidatura

o di appositi bastoncini di legno o plastica. Inoltre, sebbene a partire già dalla fase di progettazione i passaggi necessari per arrivare al pezzo finale siano numerosi, il processo di lucidatura da solo richiede un tempo che occupa non meno del 20% del totale. Questo valore può ancora crescere ed arrivare fino al 40% per pezzi laminati o addirittura al 50% con metalli particolarmente duri per utensili e stampi.

La lavorazione manuale inoltre espone l'operaio a numerosi rischi per il suo benessere. Anzitutto la lucidatura è un lavoro lungo e monotono e per questo potrebbe diventare causa di disturbi alla salute mentale del soggetto. Ma è la salute fisica quella messa più a rischio: nell'ambiente in cui si trova, spesso il lavoratore è posto vicino a grossi macchinari industriali, esposto a movimenti pericolosi e rumori dannosi per l'orecchio. Anche la lavorazione in sé comporta l'insorgere di malattie professionali che si manifestano sia sull'apparato muscolo-scheletrico causate dai continui sforzi e movimenti ripetitivi, sia su altri organi interni, come fegato e polmoni, poiché le leghe metalliche utilizzate per la

realizzazione dei pezzi contengono elementi cancerogeni come cromo, nickel, piombo e altri.

Per queste ragioni e anche a causa della crescente domanda del mercato le compagnie faticano sempre di più a trovare ed assumere lavoratori adatti al ruolo e con le competenze necessarie.

Al contrario i robot, grazie al continuo sviluppo tecnologico, stanno diventando la risposta migliore alle varie esigenze e sempre più alla portata di ogni azienda. Grazie al loro design compatto essi sono in grado di coprire un'ampia area mantenendo minimo l'ingombro, cosicché nello stesso spazio richiesto da un operatore umano è possibile installare più robot, ciascuno dei quali con una portata maggiore.

L'impiego dei robot permetterebbe alle lavorazioni di finitura di conformarsi alle velocità delle altre lavorazioni, e questo andrebbe a ridurre o addirittura eliminare l'effetto "collo di bottiglia" causato dalle inefficienze umane.

Anche per quanto riguarda i costi l'automatizzazione rimane la scelta più conveniente: come avviene per i tempi di produzione, allo stato attuale i processi di finitura richiedono una percentuale consistente dell'intero processo anche nei costi, in particolare si stima un valore tra il 12-15%. Questo valore non è migliorabile restando fedeli al processo artigianale poiché lo stipendio del lavoratore deve essere garantito. Lo stesso non vale per i robot che, sebbene rappresentino una maggiore spesa iniziale, sono aperti a continui aggiornamenti in grado di accrescere il rendimento e ridurre i costi e spesso è più conveniente investire per rendere più prestante un robot già esistente rispetto ai costi e allo spazio necessari ad acquistarne uno nuovo

Le migliorie proposte posso intervenire su diversi aspetti. Per prima cosa, per assicurarsi un processo efficiente è necessario che la macchina sia correttamente dimensionata rispetto alle esigenze delle lavorazioni a cui dovrà far fronte, dopodiché sarà possibile intervenire sugli altri aspetti.

È possibile ridurre l'energia richiesta alla macchina programmando degli orari di accensione e spegnimento secondo i turni di lavoro e i giorni festivi in modo da evitare gli sprechi quando il robot non è in funzione. Anche il miglioramento di qualsiasi apparecchio di asservimento all'interno della cella velocizza il processo e l'utilizzo di componenti

di alta qualità riduce il rischio di usura e permette di risparmiare sui costi di manutenzione.

Spesso l'acqua e gli altri fluidi consumati durante la lavorazione vengono subito scartati come rifiuti; tuttavia, un saggio utilizzo delle risorse permetterebbe di risparmiare ulteriormente oltre ad essere più salutare per l'ambiente. Per raggiungere un tale obiettivo è necessario calcolare la dose esatta necessaria di lubrificante per unità di superficie e attenersi a quel valore, inoltre, quando possibile, il riciclo delle acque riduce gli sprechi e minimizza le risorse necessarie al trattamento delle scorie.

Anche il software può venire incontro alle esigenze della ditta grazie ad adeguati accorgimenti. La migliore comunicazione tra uomo e macchina è possibile tramite un'interfaccia più semplice e intuitiva, che non richiede particolari abilità di programmazione e grazie al collegamento ad Internet, lo scambio di informazioni e comandi avverrebbe anche a grandi distanze su più dispositivi in contemporanea. Inoltre, qualsiasi miglioria al computer, programma di elaborazione dati o sensori sul robot aiutano sicuramente ad abbreviare i tempi di risposta.

Infine, anche il controllo dell'aria a contatto con il pezzo ha una certa influenza. Sebbene nella maggior parte dei casi questa sia marginale, un adeguato sistema di ventilazione sulla zona lavorata o la possibilità di realizzare le celle di lavorazione sotto delle cappe



Figura 24 - Lucidatura tramite robot in un ambiente di lavoro confinato

costantemente controllate, può ridurre l'insorgenza di reazioni chimiche e assicura un ambiente di lavoro più sicuro.

Conclusioni

In questa ricerca sono stati analizzati diversi metodi adottabili nel settore industriale per ottenere una finitura superficiale del pezzo paragonabile a quella realizzata manualmente. L'obiettivo era quello di determinare se e come fosse possibile implementare l'automatizzazione del processo di lucidatura.

Gli elementi riportati dimostrano che automatizzando la lavorazione si possono vantare numerose migliorie quali: la stessa qualità di finitura in minor tempo, maggiore efficienza nell'utilizzo degli spazi, costi di mantenimento ridotti ed un ambiente di lavoro più sicuro.

Queste tecnologie già esistono, sebbene non siano ancora diffuse nel settore analizzato. Il traguardo per i prossimi anni sarà quindi, quello di implementare i robot anche nella lucidatura, ultimo processo rimasto ancora indietro rispetto al progresso tecnologico.

Ringraziamenti:

Desidero ringraziare per questo traguardo tutte i miei cari, amici e parenti che mi sono stati vicino durante il mio percorso, specialmente in questo ultimo periodo.

Il grazie più grande va alla mia famiglia ed in particolare ai miei genitori che hanno sempre creduto in me e si sono dimostrati orgogliosi anche nei momenti più difficili.

Riferimenti

- Abd El Khalick Mohammad, J. H. (2018). Design of a force-controlled end-effector with low-inertia effect for robotic polishing using macro-mini robot approach. *Robotics and Computer–Integrated Manufacturing*, 54-65.
- Avery Roswell, F. (. (2006). Modelling and analysis of contact stress for automated polishing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 424-435.
- Bibik, E. E. (2010). Mechanochemistry of Metal Polishing with an Abrasive Suspension. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 811-815.
- Blair, A. (1980). Mortality Among Workers in the Metal Polishing and Plating Industry, 1951-1969. *Journal of Occupational Medicine*, 158-162.
- Dautsberg J. H., K. J. (1985). Surface roughness caused by metal forming. *CIRP Annals*, 477-479.
- Ekkard Brinksmier, O. R. (2006). Finishing of structured surfaces by abrasive polishing. *Precision Engineering*, 325-336.
- Fengjie Tian, C. L. (2016). Modeling and control of robotic automatic polishing for curved surfaces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 55-64.
- Fengjie Tian, Z. L. (2016). Polishing pressure investigations of robot automatic polishing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 639-646.
- J. P. Huissoon, F. I. (2002). Automated Polishing of Die Steel Surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 285-290.
- J.A. Dieste, A. F. (2013). Automatic grinding and polishing using Spherical Robot. *Procedia Engineering*, 938-946.

- M. J. Tsai, J. F. (2006). Efficient automatic polishing process with a new.
International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 817-827.
- R.S. Eriksen, M. A. (2012). Manufacture of functional surfaces through
combined application of tool manufacturing processes and Robot
Assisted Polishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 563-566.
- Serpe kalpakjian, S. R. (2021). *Tecnologia Meccanica*. (S. Bruschi, S.
Carmignato, A. Ghiotti, G. Lucchetta, & E. Savio, Trad.) Milano - Torino:
Pearson Italia.
- T. Furukuwa, D. C. (2006). Automated Polishing of an Unknown Three-
Dimensional Surface. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*,
261-270.
- Timothy J. Kurcz, D. o. (2013). Energy and Resource Reduction for Automated
Finishing Systems. *Metal Finishing*, 30-33.