



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1441A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Vitrotti

MATERIA: Vitrotti - Sistemi di produzione innovativi,  
Prof. Iuliano

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**



*Ingegneria della Produzione Industriale e  
dell'Innovazione Tecnologica*

*Appunti di*

**Sistemi di Produzione Innovativi**

(Prof. Luca Iuliano)

Luca Vitrotti

- Dove il disegno dell'elemento subisce frequenti modifiche;
- Dove la lavorazione richiede tolleranze strette e/o il pezzo deve essere controllato al 100%;
- Dove il costo dello scarto è molto elevato.

La decisione relativa all'acquisto e all'uso di macchine utensili a controllo numerico va inquadrata nel contesto dei programmi di lavorazione e di sviluppo di un'azienda. Tenendo a mente che la vita media di una MU/CN dipende dall'ambiente in cui è installata, dall'uso corretto e dall'esecuzione degli interventi di manutenzione programmata [normalmente è di almeno 10 anni], la valutazione e decisione si baserà sui seguenti fattori:

BENEFICI - VANTAGGI	COSTI dovuti a:
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Riduzione dei costi diretti di manodopera e delle attrezzature;</li> <li>➤ Aumento della produzione;</li> <li>➤ Miglioramento della qualità del prodotto;</li> <li>➤ Riduzione degli scarti;</li> <li>➤ Aumento della flessibilità di tutta la struttura produttiva;</li> <li>➤ Riduzione delle aree di officina occupate;</li> <li>➤ Possibilità di affidare ad una sola persona il controllo di più macchine;</li> <li>➤ Sicurezza di rispettare i tempi di lavorazione.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Elevato costo dei macchinari;</li> <li>○ Programmazione;</li> <li>○ Strumenti di programmazione;</li> <li>○ Manutenzione;</li> <li>○ Assistenza tecnica.</li> </ul>

### Primi concetti elementari

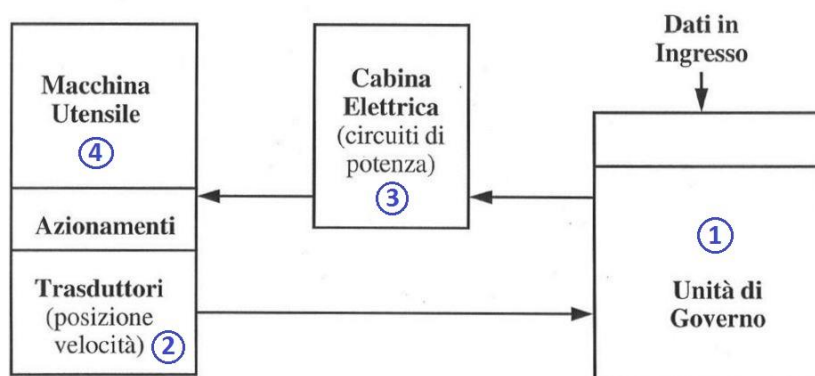
Sulle macchine utensili a C.N. si verificano spostamenti lineari ed angolari. Si hanno infatti traslazioni rettilinee delle tavole e della testa operatrice, nonché rotazioni di tavole girevoli, secondo un asse verticale od orizzontale, e della testa. Ciascuno degli spostamenti indicati è controllato da un trasduttore di posizione che rileva una quota con una determinata precisione rispetto ad un centro di coordinate prestabilite (è un misuratore di quote lineari o angolari).

Dal disegno, tramite programmazione, si fornisce all'Unità di Governo (UG) un certo numero di informazioni geometriche e tecnologiche. L'UG le interpreta e lancia opportuni segnali ai servomeccanismi della macchina che si occupano della movimentazione delle tavole e della testa operatrice. Le tavole iniziano a muoversi e devono fermarsi in una certa posizione.

I trasduttori di posizione segnalano all'unità di governo la posizione raggiunta delle tavole rispetto al punto prefissato; in prossimità del punto impostato inizia la fase di decelerazione e fermata, basandosi sulla differenza di spostamento mancante tra la posizione stabilita e la posizione raggiunta. Posizionato il pezzo nella posizione stabilita, interviene il mandrino portautensile che, con il suo avanzamento e rotazione, svolgerà la lavorazione.

Questo procedimento necessita sostanzialmente di 4 elementi:

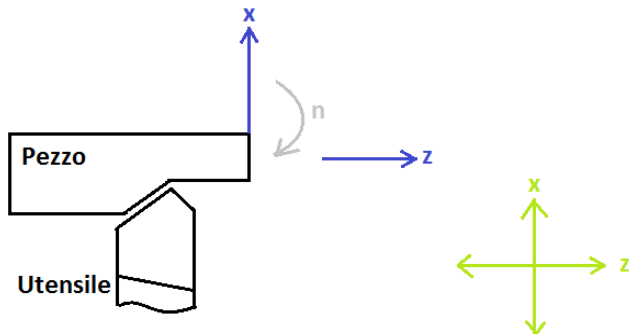
- 1) Un calcolatore, per identificare la differenza tra la quota programmata e la quota in cui si trova il pezzo/utensile, ossia la quota raggiunta;
- 2) Un sistema di lettura della quota raggiunta → trasduttori;
- 3) Un motore collegato al calcolatore per spostare i componenti sino alle quote prefissate;
- 4) La macchina utensile.



Il Controllo Numerico opera con uno schema ad anello chiuso con retroazione di posizione, di velocità e di accelerazione (molto simile a quello impiegato da un uomo nell'esecuzione della stessa funzione). Semplificando al massimo tale anello, esso può essere schematizzato nel seguente modo:

Prima di andare a distinguere le macchine utensili a seconda degli assi controllati, va sottolineato che per calcolare il numero totale di assi a disposizione e controllabili dalla macchina utensile, non deve essere **MAI** conteggiato il movimento di rotazione del mandrino (nel caso sia l'utensile a ruotare) o il movimento di rotazione del pezzo (nel caso sia il pezzo a ruotare), generalmente indicati come movimenti/assi n.

**Macchine utensili a 2 assi:** x e z → es: Tornio



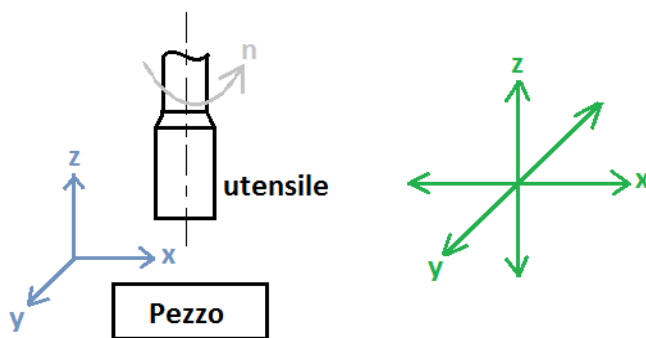
**Movimenti:**

- 1) Rotazione del pezzo (n)
- 2) Avanzamento longitudinale utensile (z)
- 3) Avanzamento trasversale utensile (x)

**Numero totale di assi = 2**, ovvero l'asse 2) e l'asse 3), mentre il movimento di rotazione del pezzo (o utensile in altri casi) non viene considerato.

[Esistono macchine utensili a due assi e mezzo (2.5), costituite da due assi indipendenti ed uno interpolato, ad esempio: fresatrici con asse x e y indipendenti e z interpolato → l'utensile viene posizionato ad una certa quota (lungo l'asse z) e rimane fisso, mentre il pezzo viene fatto spostare lungo gli assi x e y].

**Macchine utensili a 3 assi:** x, y e z → es: Fresatrice



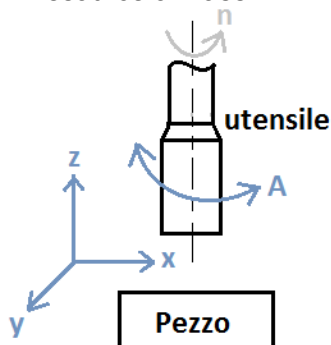
**Movimenti:**

- 1) Rotazione dell'utensile (n)
- 2) Traslazione del pezzo (z)
- 3) Traslazione del pezzo (x)
- 4) Traslazione del pezzo (y)

**Numero totale di assi = 3**, ovvero l'asse 2), l'asse 3) e l'asse 4)

**Macchine utensili a 4 assi:** x, y, z e A

→ es: Fresatrice a 4 assi



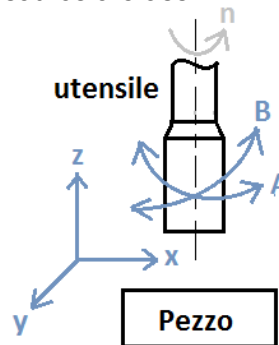
**Movimenti:**

- 1) Rotazione dell'utensile (n)
- 2) Traslazione del pezzo (z)
- 3) Traslazione del pezzo (x)
- 4) Traslazione del pezzo (y)
- 5) Rotazione dell'utensile (A)

**Numero totale di assi = 4**, ovvero l'asse 2), l'asse 3), l'asse 4) e l'asse 5)

**Macchine utensili a 5 assi:** x, y, z, A e B

→ es: Fresatrice a 5 assi



**Movimenti:**

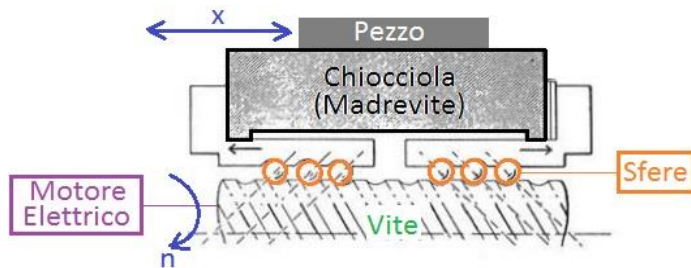
- 1) Rotazione dell'utensile (n)
- 2) Traslazione del pezzo (z)
- 3) Traslazione del pezzo (x)
- 4) Traslazione del pezzo (y)
- 5) Rotazione dell'utensile (A)
- 6) Rotazione dell'utensile (B)

**Numero totale di assi = 5**, ovvero l'asse 2), l'asse 3), l'asse 4), l'asse 5) e l'asse 6)

I particolari costruttivi delle macchine utensili a controllo numerico, che maggiormente le macchine tradizionali sono:

### 1. Viti a ricircolazione di sfere

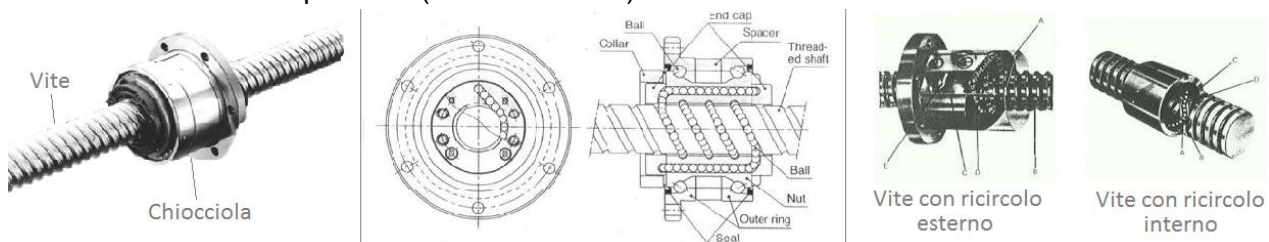
In tutte le macchine a controllo numerico la sorgente del moto viene normalmente affidata al motore elettrico, tuttavia bisogna trasformare il moto di rotazione di esso, in moto di traslazione lineare. Questo viene effettuato tramite le viti a ricircolazione di sfere, viti più costose e sofisticate delle tradizionali. Sono dotate di un elevato rendimento, in quanto permettono di minimizzare il gioco esistente con la madrevite, ma soprattutto di ridurre l'attrito: evitano il fenomeno dello "Stick-Slip" con conseguente assenza di attrito statico all'avviamento e di marcia irregolare nei movimenti rettilinei lenti.



Il motore elettrico trasmette il movimento di rotazione  $n$  alla vite. Le sfere permettono di trasformare l'attrito di trascinamento in attrito di rotolamento (il quale ha un coefficiente minore), quindi ridurlo, e di convertire il moto di rotazione  $n$  della vite in moto di traslazione lungo  $x$  del pezzo.

Affinché tutto ciò possa avvenire, nella madrevite, o chiocciola, viene inserito un meccanismo apposito che permette di avere il ricircolo delle sfere. Inoltre la chiocciola, o madrevite, può essere semplice o a doppio corpo: nel primo caso vi è presenza di gioco assiale, nel secondo caso si può eseguire un precarico allo scopo di ottenere la massima rigidezza e l'assenza di gioco. Il precarico determina una riduzione della deformazione elastica delle sfere, incrementa la produzione e migliora la dinamica dell'elemento. Usualmente, il precarico vale 1/3 del carico medio di lavoro: valori minori riducono la rigidezza, valori troppo elevati aumentano l'attrito. Infine, le viti si classificano in:

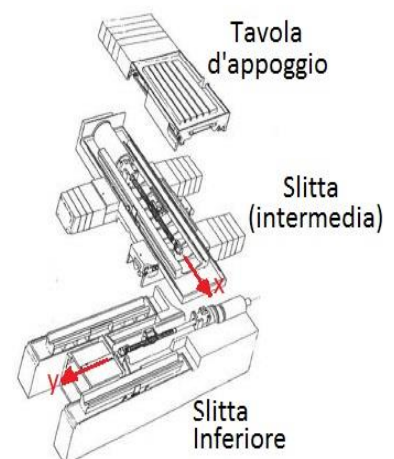
- Viti con filetti in serie (ricircolo esterno);
- Viti con filetti in parallelo (ricircolo interno).



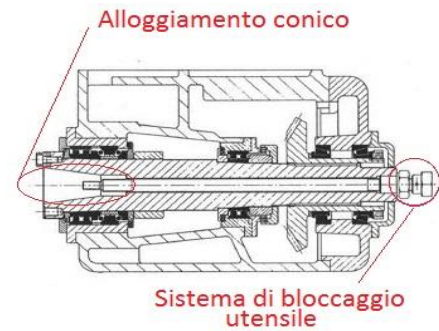
### 2. Gruppi bancale

Il gruppo bancale è un gruppo di elementi su cui viene appoggiato e bloccato il pezzo durante la lavorazione. È generalmente composto dai seguenti sottogruppi:

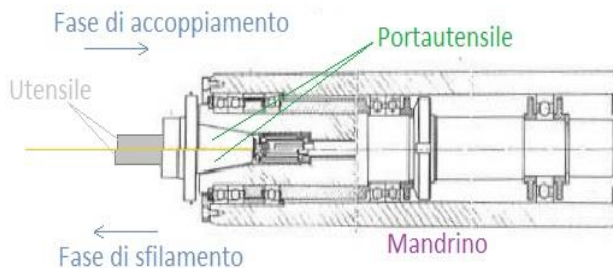
- **Tavola di appoggio o portapezzo (parte superiore):** su di essa viene collocato il pezzo e bloccato, grazie alla presenza di scanalature, inoltre essa viene generalmente posizionata su un dispositivo di traslazione longitudinale, una **slitta (intermedia)**, che garantisce la traslazione/ spostamento lungo l'asse  $x$ .
- **Slitta inferiore:** assolve la funzione di supporto alla tavola portapezzo, in quanto permette e garantisce la traslazione/ movimento trasversale lungo l'asse  $y$ , in caso di mandrino verticale, o l'asse  $z$ , in caso di mandrino orizzontale, in maniera del tutto analoga alla slitta precedente.
- **Gruppi di avanzamento:** costituiti dai motori elettrici che permettono il movimento delle slitte e quindi dell'intero gruppo bancale. Teoricamente sarebbe necessario un motore per ogni movimento, ma oggi vengono costruiti anche gruppi bancali con un solo motore per tutti i movimenti da soddisfare.



- ❖ I **mandrini per centri di lavoro a CN** (come ad esempio fresatrici), devono possedere due elementi fondamentali: l'alloggiamento conico del portautensile e il sistema di bloccaggio dello stesso sul mandrino. Il mandrino in questo caso ha il compito di sorreggere ed imprimere il moto di rotazione all'utensile, il quale viene inserito e collegato al mandrino tramite un accoppiamento conico (cono del portautensile e alloggiamento conico del mandrino) e successivamente bloccato.

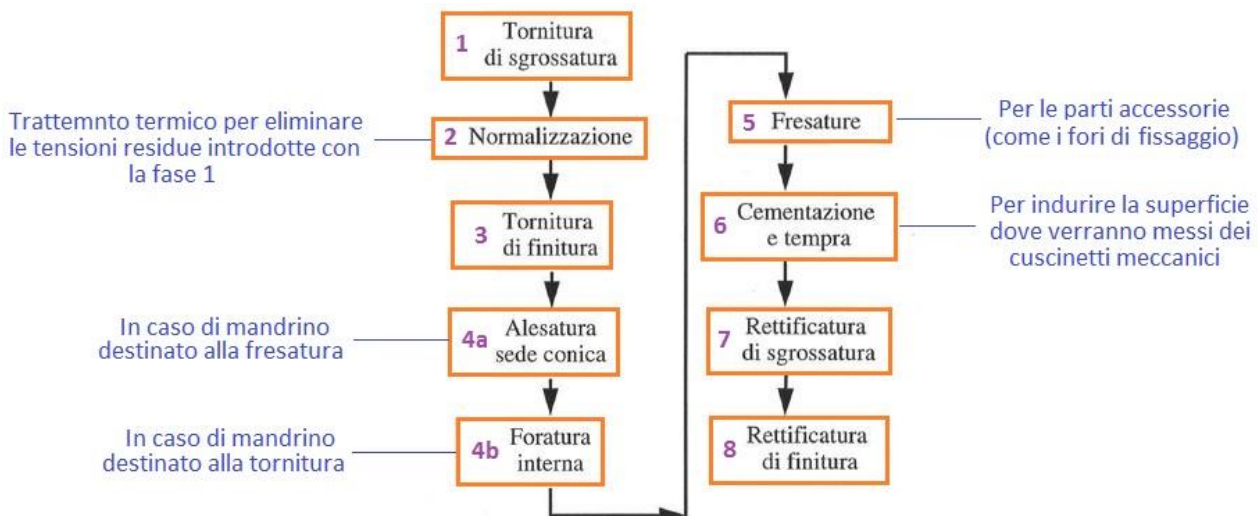


Il mandrino, come descritto, si trova all'interno della testa operatrice, e di essa proprio il gruppo canotto mandrino ne rappresenta il gruppo più impegnativo. Di seguito verrà rappresentata schematicamente la fase di accoppiamento tra mandrino e utensile, nella quale il portautensile rappresenta un elemento fondamentale. Dal momento che ogni macchina utensile possiede un unico mandrino (possono essercene anche di più, ma viene considerato il caso più semplice), ma una molteplicità di utensili, per effettuare le diverse lavorazioni, ognuno con un possibile attacco diverso, risulta necessario un elemento che permetta di velocizzare e semplificare il più possibile la procedura di cambio utensile.



La risposta giace appunto nell'portautensile: ogni utensile sarà dotato di un portautensile sul quale verrà montato. Tale portautensile avrà la forma (solitamente conica) per garantire l'accoppiamento perfetto con il mandrino (presso l'alloggiamento conico). In questo modo viene standardizzato l'attacco dell'utensile e quindi il cambio utensile risulterà più semplice e veloce.

Dato il ruolo principale nell'esecuzione della lavorazione, il mandrino dev'essere costruito e dimensionato con molta attenzione. Il dimensionamento del mandrino dev'essere condotto facendo riferimento alle sollecitazioni sia alla flessione, dovute principalmente dal peso del pezzo, sia alla torsione, a causa del movimento di rotazione con cui esso opera. Tale dimensionamento dev'essere fatto in modo che il mandrino non superi la deformazione elastica quando soggetto a sollecitazioni. Ovvero bisogna evitare che il mandrino esca al di fuori del campo elastico, in modo tale che una volta terminate le sollecitazioni esso torni alle condizioni originarie, perché se dovesse invece raggiungere la deformazione plastica diventerebbe inutilizzabile (→ deformazione permanente). Per quanto sopra descritto, verrà analizzato dunque il ciclo di lavorazione di un mandrino, il quale avviene con tolleranze estremamente strette (inferiori al centesimo di mm:  $< \pm 0.01\text{mm}$ ):



Le **caratteristiche** che un portautensile deve avere e garantire nell'assolvere la funzione di interfaccia tra l'utensile ed il mandrino della macchina, sono:

Robusto ed uniforme serraggio	Precisione e ripetibilità di posizionamento
Rigidezza statica e dinamica	Capacità di trasmettere coppie elevate alle alte velocità
Lunghezza e massa ridotte	Bilanciamento
Standardizzazione	Possibilità di sostituzione sia manuale che automatica (meglio la seconda in quanto più produttiva)
Elevati limiti di velocità	

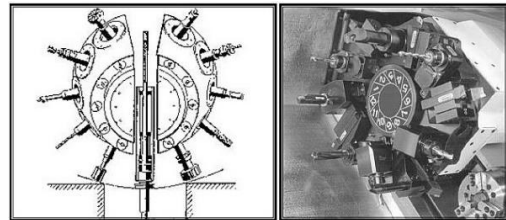
Durante il moto di rotazione, può capitare che la forza centrifuga, per un numero di giri del mandrino superiore ai 10000 g/min., possa far separare il portautensile dal mandrino, provocando così una diminuzione della superficie di appoggio/ bloccaggio.



Le macchine utensili hanno la capacità di eseguire molteplici tipologie di lavorazioni, e per ognuna di esse possono essere previsti anche diverse tipologie di utensili. Dal momento che ogni utensile ha (tendenzialmente) il proprio portautensile, risulta ovvia la necessità di disporre gli utensili non utilizzati in un posto che possa essere pratico, ordinato e raggiungibile, ossia il magazzino utensili. Esistono diverse tipologie di **magazzino utensili**:

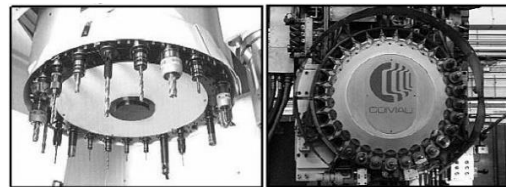
#### A Torretta:

Per macchine medio-piccole, offre un numero di posizioni da 4 ad un massimo di 12 (non oltre perché altrimenti avrebbe un ingombro troppo elevato). Lo scambio utensile (automatizzato) avviene tramite la rotazione della torretta, non con l'ausilio di un braccio di scambio.



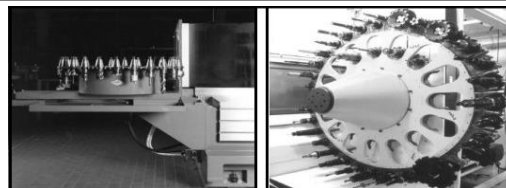
#### A Tamburo:

Magazzini di forma circolare, per macchine medie, che possono avere da 20 a 50 posizioni. Sfilamento utensile assiale.



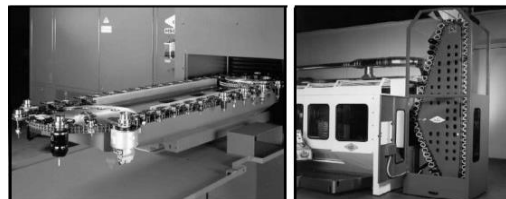
#### A Disco:

Sostanzialmente identici a quelli a tamburo, ma presentano come unica differenza lo sfilamento radiale.



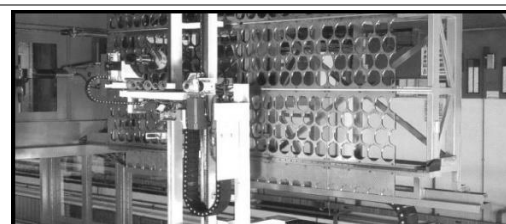
#### A Catena:

Destinato di solito a lavorazioni di medio-breve durata dove il tempo di cambio incide sul tempo di lavorazione e quindi sulla produttività. Ha un numero di posizioni generalmente maggiore di 50, e dato il basso ingombro può arrivare fino a 100 – 150 posizioni.



#### A Rastrelliera/Matrice

Destinate a macchine molto grandi, in grado di utilizzare utensili grandi ed effettuare lavorazioni su particolari di ampie dimensioni. Possono ospitare fino a 300 posizioni.



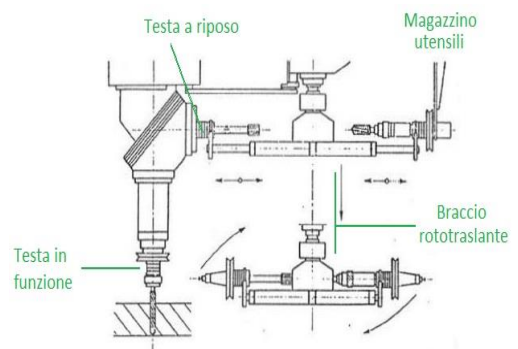


Lo scambio utensile fra mandrino e magazzino avviene per afferraggio e trasferimento del portautensile su cui è montato l'utensile da sostituire. Il portautensile è dotato di una flangia che svolge la funzione di zona di presa. Lo scambio degli utensili può avvenire con **diversi metodi**:

- ❖ Rotazione torretta;
- ❖ Braccio scambiatore e navetta;
- ❖ Braccio rototraslante;
- ❖ Con rotazione del magazzino



Esistono anche soluzioni di scambio che possono raccogliere diversi metodi insieme, come nel caso: cambio utensile con rotazione torretta e braccio di scambio rototraslante. È presente un mandrino a due teste con lavorazione alternata, ovvero quando una effettua una lavorazione, l'altra rimane bloccata in posizione di riposo. Il cambio utensile viene effettuato da un braccio rototraslante proprio sulla testa in fase di riposo: mentre una lavora, l'altra subisce il cambio utensile. In questo modo vengono ottimizzati i tempi: il tempo morto dovuto al cambio utensile viene sostituito dal tempo necessario a ruotare e quindi cambiare testa del mandrino.



Le numerose tipologie di soluzioni per effettuare il cambio utensile possono anche essere classificate e schematizzate dal punto di vista meccanico come espresso nella figura di seguito:

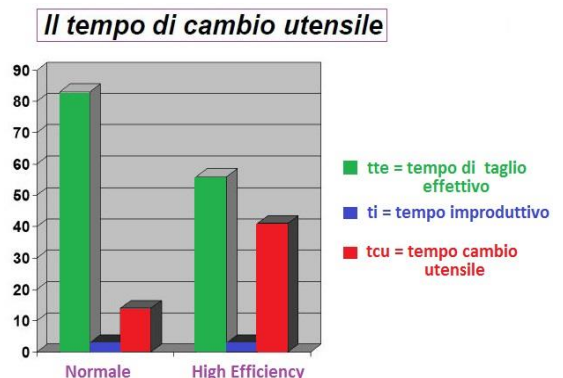
[Per immagini vedi slide documento: "CNC 3 Cambio utensile e Pezzo"]

### Tipologia del meccanismo di cambio



Nella scelta del sistema di cambio utensile, bisogna infine tener conto del fattore tempo in relazione al tempo della lavorazione, ovvero bisogna considerare quanto il tempo di cambio utensile incide sul tempo totale della lavorazione. Come mostrato nel grafico, dal punto di vista dell'incidenza, non converrebbe adottare un sistema altamente efficiente perché l'ottimizzazione del tempo di taglio effettivo porterebbe tale valore a raggiungere il 55% del tempo della realizzazione del pezzo (pari al 100% ovviamente), implicando quindi che, dato un tempo improduttivo pari al 5%, il restante 40% del tempo di venga impiegato per effettuare il cambio utensile. All'interno invece di un sistema produttivo normale, nel quale il tempo di taglio effettivo copre l'80% della tempo totale, il tempo di cambio effettivo sarebbe pari a al 15% del tempo totale (5% tempo improduttivo), avendo quindi un'incidenza ben minore.

→ Il tcu deve essere molto piccolo rispetto al tte.



Attraverso il motore si possono compiere tre tipologie diverse di movimenti, e ognuno di essi può essere svolto con differenti tipi di motore:

- 1) Movimento di rotazione del mandrino – può essere effettuato con:
  - Motori a corrente continua;
  - Motori brushless (corrente continua);
  - Motori asincroni a corrente alternata.
- 2) Movimento di traslazione del pezzo (o utensile a seconda della macchina) – effettuato con:
  - Motori brushless: motori che generano un moto di rotazione e attraverso la vite e ricircolo di sfere permettono la traslazione lineare del pezzo;
  - Motori lineari: generano direttamente un moto di traslazione;
- 3) Movimento di rotazione della tavola (pezzo) o testa operatrice (utensile)- effettuato con:
  - Motori a corrente continua;
  - Motori brushless.

## 1.3 Trasduttori

### Definizioni

Come espresso precedentemente il trasduttore rappresenta “l’occhio dell’operatore”, ovvero è il dispositivo che ha il compito di leggere e misurare istante per istante un determinato fattore, inviando il relativo valore all’unità di governo, in modo che essa possa svolgere tutte le operazioni.

- ❖ Grandezza misurata - è la variabile fisica il cui valore deve essere determinato durante la misura. Nel nostro caso, verranno prese in considerazione solo spazio e velocità come grandezze fisiche → quindi solo trasduttori di posizione e trasduttori di velocità.
- ❖ Valore misurato - è la grandezza specifica della variabile misurata: viene espressa da un numero e da un’unità di misura. Es: n° di giri (grandezza fisica) = 500 g/min (valore misurato).
- ❖ Trasduttore di misura – o semplicemente sensore, è il componente che in presenza del valore misurato fornisce in uscita il segnale di misura ( → dispositivo che rileva la grandezza fisica misurata per valutarne il valore).
- ❖ Posizione di misura – è la posizione geometrica occupata dal sensore.

### Classificazioni

I trasduttori vengono classificati secondo criteri differenti, generando quindi diverse tipologie di classificazione:

#### I. Classificazione in base al SEGNALE:

- Trasduttore analogico: caratterizzato dal fatto che, nel campo di misura, ad ogni valore misurato si associa senza discontinuità un segnale di misura distinto. Esempio: il tachimetro o il contagiri della macchina, i quali misurano in maniera continua la velocità o il numero di giri del motore.
- Trasduttore digitale: la grandezza misurata è suddivisa in parti di uguale dimensione (risoluzione) ed il valore misurato risulta essere un multiplo intero della risoluzione. Lettori ad impulsi, esempio: il contachilometri della macchina, da 0 100 metri non rileva, a 100 metri scatta (la grandezza è suddivisa in parti di 100 m e rilevata solo per suoi multipli).

L’impiego di un trasduttore analogico o numerico (digitale) determina il tipo di unità di governo da utilizzare.

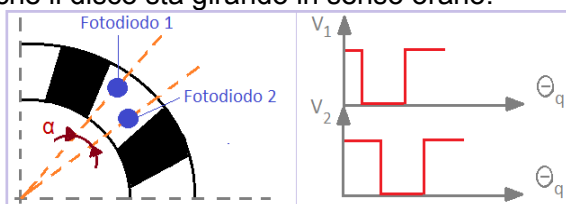
#### II. Classificazione in base all’INDICAZIONE:

- Trasduttore assoluto: dove esiste una relazione univoca tra segnale di uscita e valore misurato; un trasduttore analogico è per definizione assoluto (contagiri).
- Trasduttore incrementale: l’uscita si presenta come una successione di segnali di ampiezza costante. Si risale al valore misurato contando tali segnali; il conteggio può però iniziare in qualsiasi punto (contachilometri).

[Esistono anche trasduttori incrementali assoluti, come espresso nel grafico seguente]

Il disco viene inserito tra una fotocellula che emette luce ed un fotodiodo, un dispositivo/sistema di rilevamento che si accende e si spegne a seconda del fatto che riceva luce (settore scuro si spegne, settore chiaro si accende perché colpito dalla luce). Un giro completo del disco corrisponde dunque alla rilevazione (conteggio) di 50 impulsi:  $2\pi = 50$  impulsi. Tale dispositivo, così come descritto, non sarebbe in grado di identificare la posizione del disco qualora esso si trovi oltre 1 giro completo. Per superare tale limite, viene inserito un contagiri. Il quantizer è dunque un trasduttore di posizione digitale, incrementale e indiretto.

Così com'è in questo momento, permette di misurare la rotazione, ma non di discriminare il verso, ossia non si distingue da che parte gira. Per questo motivo viene aggiunto un fotodiodo molto vicino al primo, ma sfasato di un certo angolo  $\alpha$  rispetto a quello esistente, in modo che possano risultare all'interno di uno stesso settore. Con questa soluzione risulterà quindi possibile discriminare il verso di rotazione perché i fotodiodi si accenderanno/spegneranno in un determinato ordine a seconda della rotazione: se si accende/ spegne per primo sempre il fotodiodo 2, vorrà dire che il disco sta girando in senso orario.



Come accennato precedentemente,  $2\pi = 50$  impulsi. Da questa relazione si può dedurre l'ampiezza dell'impulso (ovvero l'ampiezza di un settore):

$$\text{in radianti: Ampiezza impulso} = \frac{2\pi}{50}, \quad \text{in gradi: Ampiezza impulso} = \frac{360}{50} = 7,2^\circ$$

Ciò significa che la rotazione minima misurabile è pari a  $7,2^\circ$  (o  $2\pi/50$ ). Ciò significa che possono essere apprezzati solo angoli maggiori di  $7,2^\circ$  (es: contachilometri della macchina, ha una risoluzione pari a 100 m, per spostamenti inferiori a 100 m non scatta). La rotazione minima misurabile è anche detta risoluzione angolare del quantizer e viene descritta come:

$$\Theta_{rq} = \frac{2\pi}{50} = \frac{360}{50}$$

Sostituendo questo parametro nella formula dello spostamento, è possibile calcolare il minimo spostamento apprezzato (S) della tavola portapezzo:

$$\Theta_{qr} = \frac{2\pi}{50} \quad X = \frac{\Theta_{TP} \cdot P}{\tau \cdot 2\pi} \rightarrow S = \frac{2\pi \cdot P}{50 \cdot \tau \cdot 2\pi} = \frac{P}{50\tau} \quad \text{es: } P = 5 \text{ mm}, \tau = 10 \rightarrow S = \frac{5}{50 \cdot 10} = 0,01 \text{ mm}$$

Tuttavia, non si tratta di un movimento minimo sufficientemente piccolo per garantire un'elevata precisione (in quanto con il quantizer non è possibile scendere sotto il centesimo di mm, e, trattandosi di risoluzioni teoriche, non vengono presi in considerazioni anche fattori come attrito e giochi tra i cinematismi). Per questo motivo vengono utilizzati strumenti più moderni, il cui sviluppo si è basato sul quantizer, ma che permettono di raggiungere precisioni maggiori (inferiori al centesimo di mm).

❖ **ENCODER:** è stato sviluppato per risolvere il maggior inconveniente del quantizer che consiste nell'avere fotocellule di diametro uguale alla dimensione dei settori chiari e scuri. Per superare tale problema, si è interposto un dispositivo (regolo) tra il disco e i fotodiodi, avente lo scopo di rendere più netto il passaggio tra il tratto opaco e quello chiaro. Si tratta di un disco di vetro con N settori chiari e scuri, dove N può variare tra 250 e 2500. Sostituendo nelle formule del quantizer il valore 50 con N, otteniamo i parametri dell'encoder:

$$- P = 5 \text{ mm}, \tau = 10, N = 250 \rightarrow S = \frac{5}{250 \cdot 10} = 0,002 \text{ mm} \quad - P = 5 \text{ mm}, \tau = 10, N = 2500 \rightarrow S = \frac{5}{2500 \cdot 10} = 0,0002 \text{ mm}$$

$$\text{Risoluzione Encoder } (\Theta_{er}) = \frac{2\pi}{N}, \quad \text{Minimo spostamento tavola } (S) = \frac{P}{N \cdot \tau}$$

Anche l'encoder è un trasduttore di posizione digitale, incrementale e indiretto. Oggi giorno è il più utilizzato, o comunque rappresenta la direzione verso la quale si stanno spostando la maggior parte degli utilizzatori [vedi "Azzeramento Encoder" su slide].

## 1.4 Unità di Governo (UG)

Le unità di governo attuali sono potenti e versatili, ciò significa che da un lato la programmazione delle lavorazioni è molto semplificata, dall'altro che possono gestire contemporaneamente un numero elevato di assi e che possono essere adatte a tipi di macchine diversi ed ai robot. Sviluppate grazie all'evoluzione dell'elettronica, sono andate a sostituire i sistemi delle macchine utensili a controllo numerico convenzionali, sistemi basati su logica cablata caratterizzati da un'elevata rigidità e prestazioni non modificabili.

L'Unità di Governo rappresenta il cervello della macchina e ne controlla completamente il funzionamento, non è altro che l'elaboratore che sovrintende a tutte le attività della macchina utensile. Dal punto di vista strutturale, la componente hardware è la tipica struttura dei comuni microcomputer. Una UG risulta generalmente composta dai seguenti circuiti elettronici:

- Logica per l'elaborazione dei dati numerici;
- Circuiti di asservimento per il comando dei servomotori;
- Matrici di memoria per i comandi ausiliari;
- Logica di collegamento con la matrice utensile.

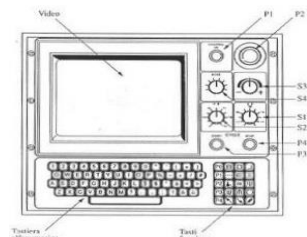
[La cabina elettrica contiene esclusivamente i circuiti di potenza per il comando dei motori e dei servizi di potenza]

L'UG, per svolgere i propri compiti, deve disporre di un software opportuno costituito da:

- ❖ **Sistema Operativo:** (Windows o Linux) controlla il funzionamento di tutto il software e l'accesso all'hardware, gestisce i file contenenti dati e programmi, etc.
- ❖ **Software di processo:** contiene la caratterizzazione della macchina e delle lavorazioni eseguibili, ovvero legge ed interpreta il CAM traducendolo in istruzioni eseguibili dalla macchina.
- ❖ **Logica di Macchina:** rappresenta il software necessario all'unità di governo per gestire il funzionamento della macchina sulla quale è installata. Ciò viene fatto con segnali digitali e serve per controllare il sistema di cambio utensile, dello shuttle, del fluido di lubrificazione, e così via. La logica di macchina è un programma che permette un facile adattamento tra macchina e unità di governo → Programmable Logic Controller (PLC): permette il controllo e gestione i meccanismi ausiliari come ad esempio il cambio del pezzo/utensile, l'apertura del mandrino, etc.
- ❖ **Software diagnostico:** consta di vari programmi residenti, attivati automaticamente, che individuano e segnalano guasti ed anomalie di funzionamento che possono avvenire. Controllano inoltre la conformità dei programmi utente al formato richiesto.
- ❖ **Software utente:** è costituito dai programmi di lavorazione che l'utente scrive mediante la tastiera o che trasmette all'unità di governo con un calcolatore. Es: FutureCAM. NB: il percorso utensile viene sviluppato su questo software e successivamente caricato nell'UG.

I primi 4 elementi sono fissi per ogni macchina, non variano una volta implementati, mentre il software utente, ossia la programmazione (scritta in linguaggio ISO) varia a seconda della lavorazione.

L'UG è composta, strutturalmente, da un monitor attraverso il quale visualizzare e verificare il programma di lavorazione, o vedere virtualmente la lavorazione che sta avvenendo; da una tastiera alfanumerica e dei tasti funzione con cui operare all'interno del software; e da una serie di comandi (manopole/levette) per consentire agli operatori di muovere manualmente la macchina utensile. Infine, normalmente il programma di lavorazione viene trasmesso all'unità di governo tramite la rete aziendale, mentre in passato veniva caricato tramite floppy-disk o chiavette.



L'UG inoltre risulta fondamentale per svolgere cosiddetta *Reverse Engineering*: si tratta di un sistema di rilevatura/copiatura che permette il trasferimento automatico delle coordinate x,y,e z del pezzo, rilevando dunque la geometria del pezzo stesso. Questo sistema avviene quando non viene fornita la descrizione matematica del componente e si cerca quindi di matematizzare il pezzo. Usata prevalentemente nel passato, avviene tramite un tastatore o sistema sonda (oggi giorno laser) che

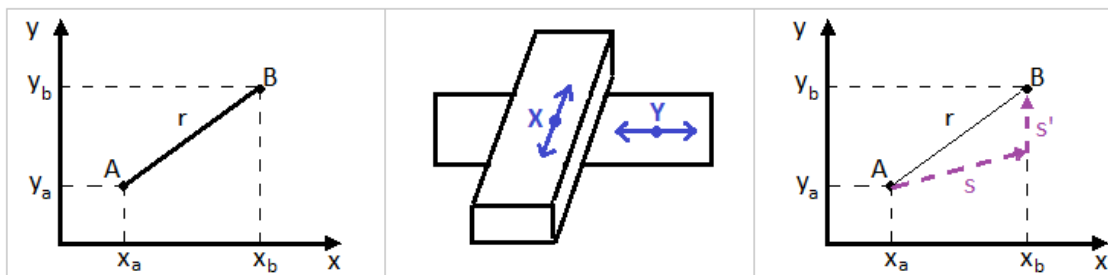
- **Strategia Proporzionale** – al servomotore giunge un segnale solo se:  $X_t - X_r < > 0$ .  
Strategia applicata alle tipologie di **CONTROLLO CONTINUO**: esiste una precisa relazione funzionale tra le coordinate individuali dei vari assi e tale relazione (es: lineare, di nostro interesse) deve essere rispettata istante per istante. Per ottenere ciò si rende necessario l'uso dell'interpolatore che opera sulle coordinate attuali e su quelle finali per valutare quelle intermedie (controllo della strategia). Tali controlli sono i più diffusi.

A seconda del numero di assi che possono essere controllati simultaneamente, ovvero a seconda del numero di assi della macchina utensile, verrà adottata un'Unità di Governo che, a livello teorico, possiede un controllo sullo stesso numero di assi (2, 2.5, 3, 4, 5 assi: a livello pratico tuttavia le UG vengono quasi sempre prodotte a 5 assi, abilitando però solo gli assi necessari alla macchina).

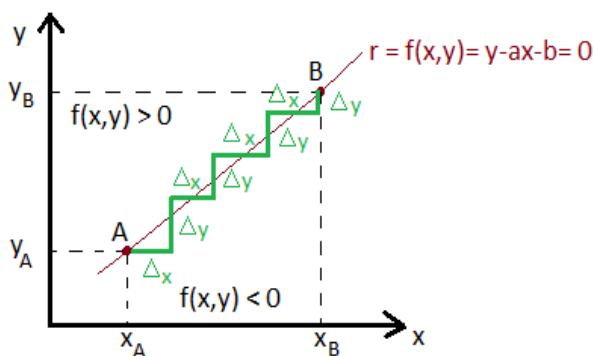
### Interpolatore

Per interpolazione si intende il calcolo delle coordinate di un gran numero di punti intermedi situati sul profilo da percorrere (percorso utensile) definito dalla programmazione. È un processo di infittimento dei punti fra gli estremi di un ben definito segmento di retta o arco di cerchio o altra curva nel piano o nello spazio. Esistono diversi tipi di interpolatori: interpolatore lineare, interpolatore circolare, interpolazione elicoidale, interpolazione parabolica e iperbolica. Il più utilizzato è l'interpolatore lineare, motivo per cui sarà l'unico di cui ci occuperemo.

Supponiamo ci si trovi nel punto **A** di coordinate  $(X_A, Y_A)$  e si voglia raggiungere il punto **B** di coordinate  $(X_B, Y_B)$  muovendosi in maniera lineare, ovvero lungo una retta **r** (fig. sx). Sulla macchina tale movimento viene realizzato dallo spostamento delle tavole lungo l'asse x e l'asse y. Sebbene siano assi indipendenti dal punto di vista teorico, a livello pratico invece ciò non è del tutto vero. Infatti, per motivi di costruzione, l'asse y trasporta l'asse x, ovvero nella propria fase di movimento l'asse y tira con sé l'asse x (fig. centro). Tale aspetto influisce sulle prestazioni dinamiche delle due tavole: la tavola lungo l'asse x sarà la più veloce nei movimenti, ovvero la più veloce nel raggiungere una determinata velocità di spostamento, poiché possiede una massa minore. Dal momento che la tavola lungo l'asse y si porta "a spalle" l'asse y avrà prestazioni dinamiche inferiori. Date tali caratteristiche, lo spostamento da A a B avverrà seguendo una traiettoria **s-s'** (fig. dx).



Per risolvere tale problema, viene introdotto l'interpolatore, il quale permette di adottare una strategia differente, ovvero approssimare la retta, e quindi il movimento lineare, ad una spezzata. Ogni punto della retta **r** soddisfa la condizione  $f(x,y) = 0$ , ovvero  $y - ax - b = 0$ , mentre per qualsiasi punto esterno alla retta varrà la relazione  $f(x,y) < > 0$ . Partendo dal punto **A**, si incrementa una delle sue coordinate di un valore piccolo a piacere,  $\Delta x$  nell'esempio. Si calcola il valore della funzione **f** (negativo in questo caso perché ci si trova al disotto della retta) e il successivo incremento verrà dato in modo da ottenere un segno opposto ( $\Delta y$ , al disopra della retta), cercando così di riportare la spezzata il più vicino possibile a 0, ossia alla retta/percorso ideale. Verrà calcolato a questo punto il nuovo valore della funzione che sarà positivo, il quale verrà successivamente compensato da un incremento lungo l'altro asse, ovvero riportandolo nella zona negativa. Nel caso di un valore della funzione **f** uguale a zero, il punto è esattamente sulla retta e sarebbe come trovarsi nella condizione di partenza, dove è indifferente la scelta della direzione del primo incremento.



il più vicino possibile a 0, ossia alla retta/percorso ideale. Verrà calcolato a questo punto il nuovo valore della funzione che sarà positivo, il quale verrà successivamente compensato da un incremento lungo l'altro asse, ovvero riportandolo nella zona negativa. Nel caso di un valore della funzione **f** uguale a zero, il punto è esattamente sulla retta e sarebbe come trovarsi nella condizione di partenza, dove è indifferente la scelta della direzione del primo incremento.

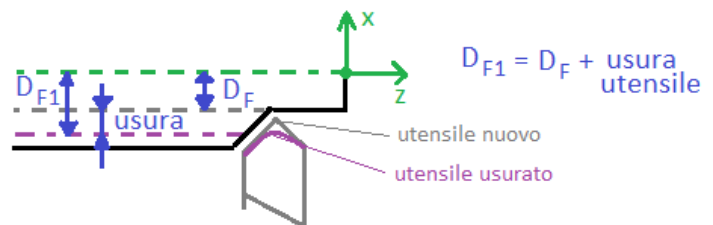
Recentemente sul mercato sono apparsi controlli numerici definiti ad 'architettura aperta' con la possibilità di inserire nel controllo:

- 1) **Schede e circuiti** per risolvere problemi specifici di interfacciamento e pilotaggio di particolari periferiche come:
  - a) Sensori specifici (visione, emissioni acustiche, etc.) in grado di fornire informazioni all'esterno - ad esempio sensori che possono permettere di riconoscere se il mandrino è fermo e il portellone aperto, in modo tale che si possa azionare un robot che svolga il cambio pezzo (nel caso di cambio pezzo robotizzato);
  - b) Tastatori per copiatura ('scansione' del pezzo);
  - c) Trasduttori di misura – ad esempio una sonda per fare delle misure dopo la lavorazione, affinché sia stata effettuata correttamente.
- 2) **Programmi** per espandere le funzionalità originali e gestire il relativo hardware esempio: sistemi di caricamento automatico o sistemi di trasporto del pezzo.

### b) *Compensazione in linea*

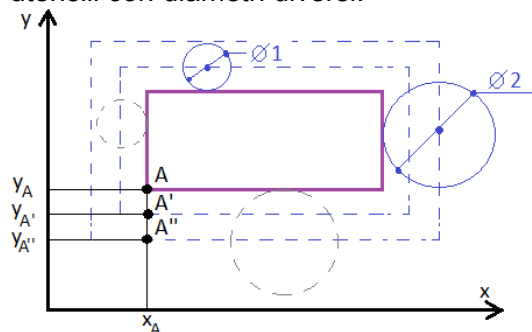
I tratta di una funzione relativa al controllo della macchina utensile e riguarda la correzione dinamica dei movimenti per cambiamenti o errori che si verificano durante la lavorazione (bisogna poter analizzare le situazioni attuali per poter rimediare in situazioni, per esempio, di usura dell'utensile).

Esempio – Tornitura longitudinale: eseguendo le lavorazioni, l'utensile si usura. Per rimediare a questo fenomeno, grazie alla compensazione in linea, gli operatori sanno di dover spostare progressivamente (verso l'alto nel nostro esempio) la posizione dell'utensile, in modo da poter sempre raggiungere la distanza  $D_F$  esatta e compensando quindi l'usura.



Le opzioni principali della compensazione in linea sono:

- **Correzione del diametro e della lunghezza dell'utensile** – si supponga di dover eseguire una lavorazione di contornatura di una piastra. Questa lavorazione potrebbe essere compiuta da utensili con diametri diversi:



Utensile  $\varnothing 1$  : posizionato in A'

$$\begin{aligned} x_{A'} &= x_A \\ y_{A'} &= y_A - \varnothing 1/2 \end{aligned}$$

Utensile  $\varnothing 2$  : posizionato in A''

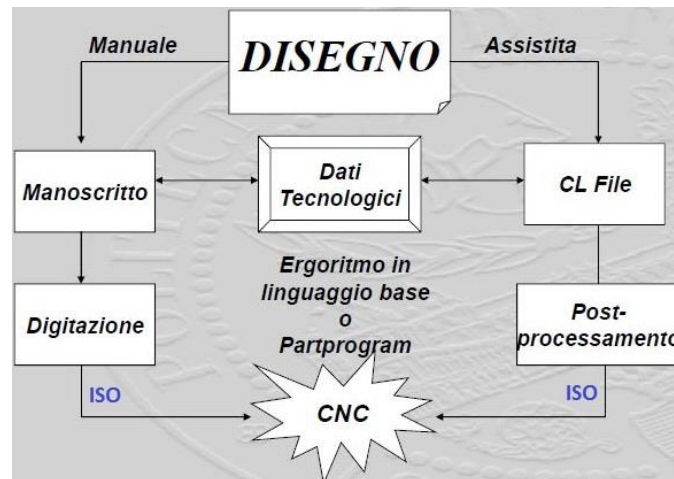
$$\begin{aligned} x_{A''} &= x_A \\ y_{A''} &= y_A - \varnothing 2/2 \end{aligned}$$

Dal momento che tutto ciò potrebbe portare ad errori, viene adottata una soluzione per ovviare a questo problema:

- Il programma di lavorazione viene definito con un utensile avente lunghezza  $L = 0$ , e diametro  $\Phi = 0$  (ovvero un utensile puntiforme). Si svolge la lavorazione come se fosse un punto;
- Si inseriscono i parametri dell'utensile ( $\Phi$  e  $L$ ) che si vogliono utilizzare nel CNC;
- Il CNC automaticamente calcola le traslazioni da applicare all'utensile.

In altre parole, la programmazione della lavorazione viene definita senza le dimensioni reali dell'utensile (ci si basa su quelle di un utensile puntiforme), le quali verranno introdotte nel CNC successivamente.

- **Correzione degli errori rilevati da sonde di misura che operano in process;**
- **Controllo adattativo di velocità e/o avanzamento;**
- **Determinazione della vita residua dell'utensile e selezione delle alternative nel magazzino utensile** (attraverso il chip di memoria nel magazzino utensili che determina anche la vita residua dell'utensile stesso).



### Ergoritmo o Part-Program:

L'ergoritmo è un blocco d'informazioni di senso compiuto formato da un numero finito di ordini elementari. Nel linguaggio corrente si chiama "programma". La sintassi dell'ergoritmo descrive la struttura degli ordini, i codici usati per la loro descrizione, la forma usata per i gruppi d'informazioni costituenti un ordine. La semantica di un ergoritmo descriverà quale significato deve essere associato a ciascun gruppo d'informazioni.

#### Il linguaggio ISO

È un linguaggio standardizzato che viene compreso dalle unità di governo. È costituito da una parte fissa ed una personalizzabile. Gli elementi del linguaggio ISO sono:

- **Parola:** formata da una lettera (indirizzo) e da un numero (#)

<b>N ####</b>	Identifica il blocco, ovvero il numero di riga
<b>G ##</b>	Funzioni preparatorie; indica come dovrà muoversi la macchina
<b>X, Y, Z #####.###</b>	Coordinate di un punto da raggiungere (mm, inch) – Traslazioni lungo gli assi
<b>U, V ###.###</b>	Angoli di rotazioni – Rotazioni attorno agli assi
<b>F ##### o ##, ##</b>	Velocità di avanzamento del pezzo (tornio) o utensile (fresatrice) [mm/min o mm/giro] – Feed velocità di avanzamento
<b>S #####</b>	Velocità di rotazione del pezzo (tornio) o utensile (fresatrice) - Speed
<b>T ##### o ##, ##</b>	Identificativo dell'utensile - Tool
<b>M ##</b>	Funzione miscelanea – Attivazione di interruttori

- **Blocco:** gruppo di parole che definiscono le informazioni necessarie per un'operazione
- **Programma:** insieme di blocchi che definiscono il ciclo di lavorazione di un particolare.

**Linguaggio ISO GE One T** (Vedi slide)

Terzo gruppo: Modalità di movimento

- G00 Movimento rapido (\*)
- G01 Movimento in interpolazione lineare a velocità di lavoro
- G02 Movimento in interpolazione circolare oraria (CW)
- G03 Movimento in interpolazione circolare antioraria (CCW)
- G04 attesa oer un numero di secondi specificato dal parametro K###.## Variabili a seconda della macchina

**M## Funzioni miscelanea**

- M00 Pausa
- M02 Fine programma e reset generale
- M03 Rotazione mandrino oraria
- M04 Rotazione mandrino antioraria
- M05 Rotazione mandrino OFF
- M06 Rotazione torretta portautensile
- M41,42,43,44 Cambio gamma

**T##.##** Numero d'utensile e relativo correttore associato

parola

blocco

Programma

```

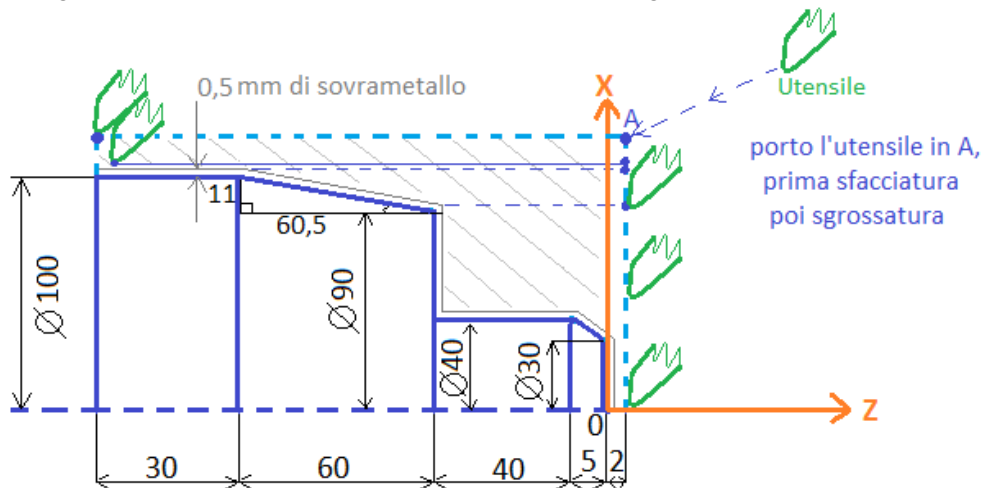
N110 G92 Z2000
N20G96M41
N30TOL01M06
N40G1F0.35120M03
N50 G68 PO-KO,P1-KO,P5=K3, P7=K0.1,
P8=K0.05,P9=K0.1,P13=K100,P14=K150
N60GOX100Z100M5
N70 M30
N11QQG1X38Z0
N110X40Z-2
N120 X40 Z-40
N130X60Z-70
N140 X60 Z-100N150 XI 16 Z-10Q
N160X120Z-102
N170X120Z-130
                    
```

Comuni/Standard per ogni macchina

Comuni/Standard per ogni macchina

Variabili a seconda della macchina

Esempio di programmazione per operazioni di sfacciatura e sgrossatura al tornio:



- Grezzo: spessore barra  $\Phi_0 = 105$  mm , Lunghezza barra  $L_0 = 137$  mm
- Profondità di passata massima  $p=3$  mm  $\rightarrow p = (105-101)/2 < 3$ , per cui va bene;
- Sovrametallo per finitura 0.5 mm sul raggio  $\rightarrow 1$  mm sul diametro  $\rightarrow 400$  ma 101

**N° di riga: Istruzioni Descrizione:**

N° di riga:	Istruzioni	Descrizione:
N10	T1 M6	T1: selezione utensile nella posizione 1 del magazzino; M6: comando di cambio utensile
N20	S1500 F0.3	Velocità di rotazione del mandrino = 1000 giri/min; Velocità di avanzamento $V_a = 0.1$ mm/giro
N30	M3 M8	M3: avvio mandrino con rotazione oraria; M8: apertura refrigerante
N40	G0 X106 Z0,5	L'utensile viene portato nel punto d'arrivo $X=106$ (non 105 altrimenti si andrebbe a sbattere) e $Z=40,5$ con velocità G0
N50	G1 X0 (Z0,5)	Per non appesantire il programma, tutto ciò che non cambia non viene ripetuto (Z0,5).
N60	Z2	Si esce dal pezzo dopo la sfacciatura
N70	G0 X101	$X=101$ per lasciare il sovrametallo (realmente 0,5 mm sul raggio)
N80	G1 Z-135	
N90	X102	Si esce dopo la prima passata di tornitura
N100	G0 Z2	Si torna alla posizione di sicurezza
N110	X95	Perché $101-96 (p_{MAX}) = \Phi 95$
N120	G1	

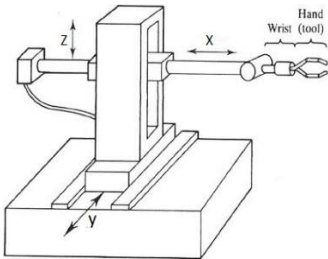


## 2.1.1 La struttura meccanica

Esistono diverse tipologie di strutture meccaniche con cui vengono costruiti i robot:

### 2.1.1.1 Struttura Cartesiana

I tre movimenti principali sono realizzati da delle coppie prismatiche, le quali permettono di raggiungere ogni punto individuato da una terna cartesiana di riferimento. Come suggerisce il nome, essa è dotata e può sfruttare 3 gradi di libertà che corrispondono, come suggerisce il nome stesso della struttura, ai tre assi cartesiani:

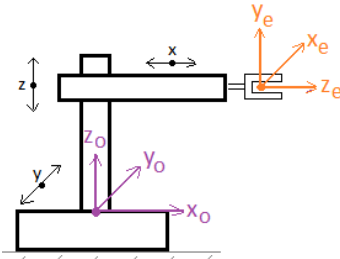


- Traslazione lungo y;
- Movimento verticale z;
- Allungamento del braccio lungo x.

Poiché i movimenti avvengono lungo i tre assi cartesiani, la modellazione e la programmazione sono semplici. Si tratta di struttura adatte a lavorare front-linea, avanti e indietro senza però eseguire rotazioni perché chiaramente non sono presenti assi di rotazioni. Inoltre, tali strutture sono tipicamente ingombranti a causa della rotaia applicata al basamento.

La struttura cartesiana è una meccanica destinata principalmente alle linee di montaggio e viene usata principalmente quando: **a)** è necessaria un'elevata precisione e ripetibilità di posizionamento; **b)** sono necessari elevati volumi di lavoro; **c)** vi è la necessità di lavorare su più stazioni dislocate su di una stessa linea.

L'identificazione del sistema di coordinate avviene nel seguente modo (lo schema da sapere):



- 1) **Xo, Yo, Zo:** sistema di coordinate generali (world coordinates), collocato sulla base del robot;
- 2) **Xe, Ye, Ze:** sistema di coordinate della mano (hand coordinates), collocato sulla mano/polso del robot [rappresentano i gradi di libertà del polso che noi affronteremo separatamente].

La direzione degli assi è definita con la regola della mano destra, inoltre:

- Zo: allineato con il vettore accelerazione di gravità (opposto al vettore della gravità)
- Ze: uscente dalla mano;
- L'origine del sistema Xo, Yo, Zo viene definita dal costruttore del robot;
- L'origine di Xe, Ye, Ze è il centro della mano.

[Queste caratteristiche dei sistemi di riferimento sono comuni a qualsiasi tipo di struttura dei robot, vengono trattati qui, ma sono validi per tutte le strutture di seguito].

Infine vi è un'ultima precisazione da fare. Dal punto di vista di un operatore (ovvero noi), un generico punto P ha coordinate  $(X_P, Y_P, Z_P)$ . I robot dotati di tale struttura, la quale si basa appunto su coordinate cartesiane, non avranno bisogno di tradurre o convertire tali coordinate per svolgere le azioni a cui sono destinati. In altre parole, le coordinate dell'operatore coincidono con quelle del robot:

$$P_{\text{operatore}} (X_P, Y_P, Z_P) \equiv P_{\text{robot}} (X_P, Y_P, Z_P)$$

### 2.1.1.2 Struttura Cartesiana a Portale

Anche queste strutture vengono solitamente impiegate per operazioni di movimentazione (quando inserita in ampi spazi) dei materiali e di montaggio dei componenti meccanici. Cinematicamente è simile alla struttura cartesiana, ha un volume di lavoro superiore dal momento che l'unità operativa è libera di muoversi sulla struttura a portale (i pezzi da movimentare vengono posti al di sotto del portale, il quale si muove sempre lungo gli assi cartesiani x, y, z). I gradi di libertà di questa struttura sono 3, definiti dai movimenti di traslazione lungo gli assi. Nonostante siano molto precise, le strutture cartesiane risultano poco flessibili a causa della mancanza di movimenti di rotazione, obbligandole quindi ad una lavorazione front-linea. [Ad esempio, se immaginiamo di porre un robot

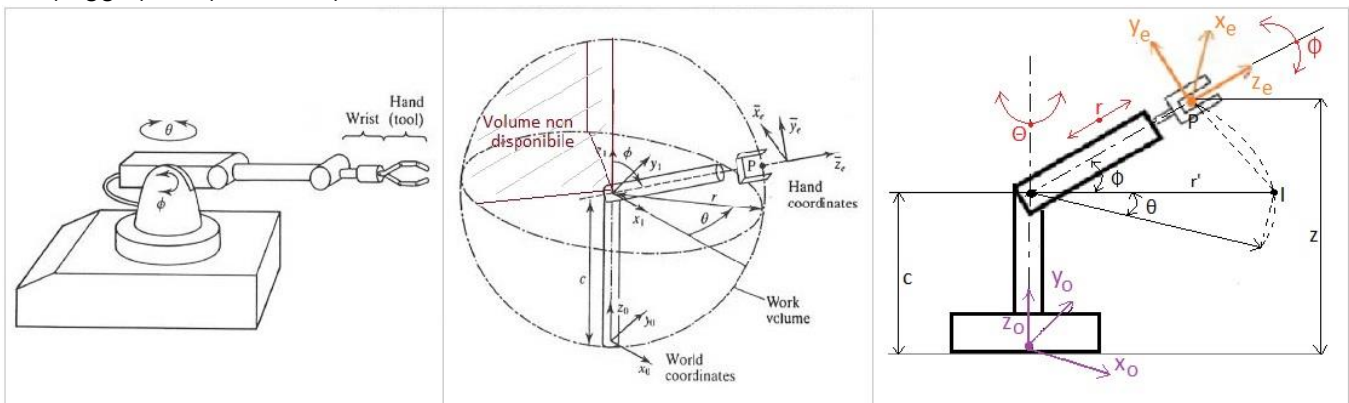
### 2.1.1.4 Struttura Sferica

È costituita da due assi di rotazione ed un'asse lineare (un altro asse di traslazione è sostituito da un asse di rotazione):

- Asse di rotazione  $\theta$  (rotazione del braccio);
- Asse di rotazione  $\Phi$  (basculamento del braccio)
- Asse lineare  $r$  (allungamento del braccio).

Si tratta di una struttura adatta all'asservimento delle macchine utensili, ma ormai è stata superata dall'avvento della struttura cartesiana e da quella articolata. È comunque una struttura più versatile di quella cilindrica ed è stata ampiamente utilizzata, negli anni '70, nel settore automotive per l'assemblaggio e la lavorazione delle scocche (tra i più utilizzati fu il robot *Puma*). Il volume di lavoro è costituito dall'insieme dei punti raggiungibili dal robot, individuati con una terna di riferimento polare.

Ogni punto generico del volume di lavoro, ossia dal punto di vista del robot, è individuato ed espresso con una terna di riferimento sferica:  $P_{robot} (\theta_P, \Phi_P, r_P)$ . Lo stesso punto P visto dall'operatore in coordinate cartesiane diventa:  $P_{operatore} (x_P, y_P, z_P)$ . Per questo motivo, l'unità di governo del robot, per prima cosa, calcolerà tali coordinate cartesiane in spostamenti lungo gli assi  $\Phi$  (rotazione),  $r$  (raggio) e  $\theta$  (rotazione):



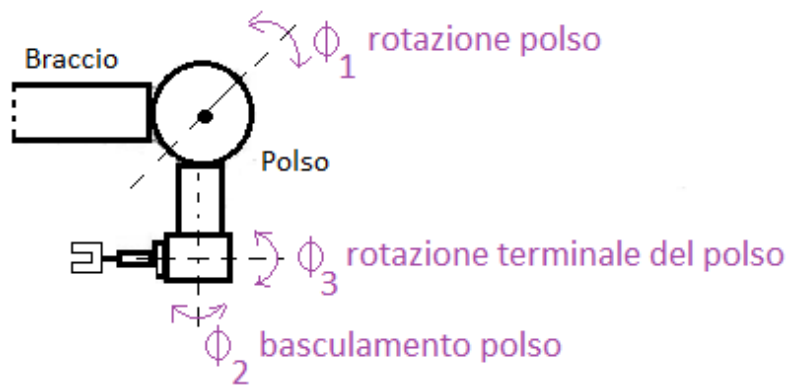
$$\Phi = \arctg \left( \frac{z-c}{r} \right); \quad r = \frac{r'}{\cos(\theta)} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos(\theta)}; \quad \theta = \arctg \left( \frac{y}{x} \right)$$

Tuttavia la funzione arctg fornisce due soluzioni, una sola delle quali è di nostro interesse. Occorre dunque verificare quale tra le due soluzioni di  $\theta$  e di  $\Phi$  cadano nel volume di lavoro del robot (il quale a sua volta è conosciuto). Anche questa struttura presenta 3 gradi di libertà, di cui quelli di rotazione le permettono di incrementare la flessibilità, riducendone però la rigidità e dunque la precisione.

Per ricavare le cartesiane	Per programmare il robot da coordinate "umane"
$z = c + r \sin(\varphi)$	$\Phi = \arctg \left( \frac{z-c}{r} \right)$
$y = r \cos(\varphi) \sin(\theta)$	$r = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\cos(\theta)}$
$x = r \cos(\varphi) \cos(\theta)$	$\theta = \arctg (y/x)$

### 2.1.1.5 Struttura Articolata o Antropomorfa

Si tratta della struttura più versatile e maggiormente utilizzata nell'industria manifatturiera (circa l'80% dei robot costruiti), specialmente in volumi di lavoro al cui interno occorre superare ostacoli. Si tratta di un'evoluzione della struttura cilindrica e sferica, motivo per cui le ha praticamente sostituite ovunque. La configurazione si avvicina molto a quella del braccio umano in quanto tutte le possibili traslazioni sono state sostituite da movimenti di rotazione della struttura. Presenta un numero di gradi di libertà superiore ma non inferiore a 5. La flessibilità permessa tuttavia limita la precisione, rendendo tale struttura la meno precisa in assoluto, con tolleranze di minori al decimo di millimetro. Il volume di lavoro non è molto esteso, però può raggiungere i punti dello spazio da qualsiasi direzione e con qualsiasi orientamento della mano, attraverso le rotazioni delle parti della struttura.



Nel caso di un robot articolato, si arriva pertanto ad un numero di gdl pari a 6:  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  (rotazioni struttura) +  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  (rotazioni polso). In alcune applicazioni è possibile aggiungere il 7° asse al robot, costituito da una traslazione dell'intera struttura su di una guida installata sul pavimento (ovvero un binario sul quale viene fatto traslare l'intera struttura, utile per la movimentazione dei pezzi in ambienti di lavorazione molto ampi). Quindi, dato un punto generico P all'interno del volume di lavoro, le sue coordinate, per l'operatore, saranno:  $P_{operatore} (X_P, Y_P, Z_P)$ ; mentre per il robot:  $P_{robot} (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3)$ . Si tratterà di calcoli difficili da gestire che appesantiranno inevitabilmente l'unità di governo. Sul polso possono essere installate in alternativa una pinza o un utensile e gli ulteriori movimenti di questi ultimi non vengono considerati nel computo dei gdl del robot in quanto considerati elementi esterni.

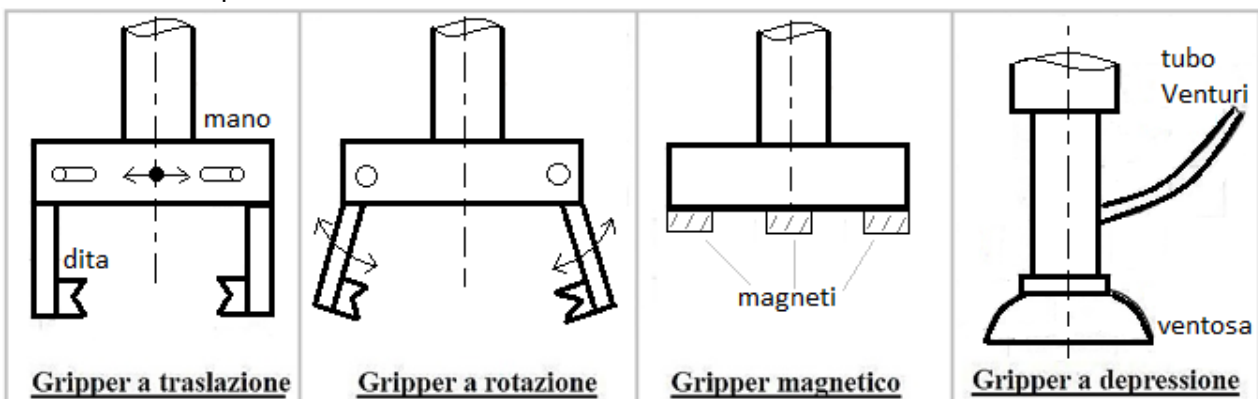
#### La Mano (End Effector)

La mano è quel dispositivo che, collegato al polso, consente al robot di eseguire i compiti a cui è stato destinato. La mano è configurata a seconda della funzione d'impiego ed è uno degli elementi più importanti della struttura del robot.

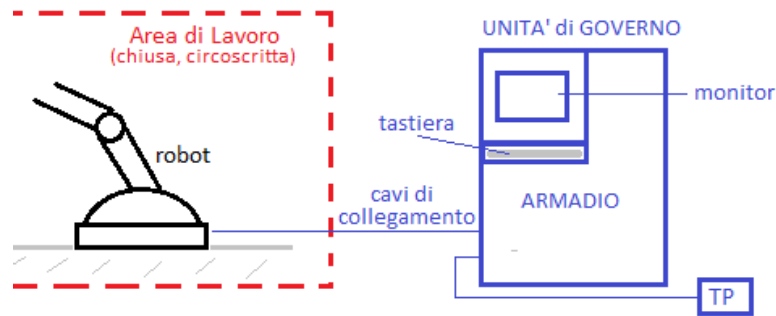
La mano può essere costituita da organi di presa (gripper) o da un utensile:

**Organi di presa:** sono dispositivi che consentono di afferrare e manipolare gli oggetti. Sono costituiti da organi prensili (dita/finger, o gripper) che permettono di afferrare saldamente l'oggetto mediante la loro apertura e chiusura. La struttura degli organi di presa differisce a seconda dell'applicazione e a seconda del tipo di comando utilizzato per la presa:

- Comando meccanico, adatto alla presa di una vasta gamma di elementi;
- Comando magnetico, adatto all'afferraggio di materiali ferromagnetici dotati di ampie superfici di presa munite di elettromagneti (es spostamento lastre di lamiera);
- Comando a depressione: il gripper a depressione sfrutta la minore pressione creata all'interno di un tubo di Venturi per aderire alla superficie di presa. È idoneo alla manipolazione di materiali non ferrosi quali lastre di vetro.



Lo stato attuale della robotica industriale è ancora lontano dal rendere disponibili gripper dotati della flessibilità e della versatilità della mano umana. Dovendo pertanto manipolare oggetti di natura diversi si ricorre al sistema di cambio automatico dei gripper (utilizzando appositi magazzini).



Le schede elettroniche che realizzano il controllo e permettono la programmazione sono basate su un sistema multiprocessore con compiti di:

- Programmazione;
- Gestione;
- Interpolazione;
- Trasformazione di coordinate;
- Controllo dei dati provenienti dai sensori.

Come nelle MU, il sistema di controllo opera con uno schema ad anello chiuso con retroazione di velocità e posizione, ed è ovviamente anche qui dotato di funzioni di autodiagnostica. I robot operano con 2 sistemi di controllo:

1. **Punto a punto**: il movimento tra due punti avviene senza il controllo della traiettoria. Viene utilizzato per applicazioni di movimentazione, saldatura a punti e montaggio;
2. **Continuo**: il movimento tra due punti avviene con il controllo della traiettoria, vi è dunque la necessità di un interpolatore. Le applicazioni tipiche sono la saldatura ad arco e la verniciatura. Usualmente il moto tra due punti segue una traiettoria rettilinea.

L'UG di un robot deve assolvere le seguenti funzioni:

- a) **Comando**: fornisce all'azionamento la posizione e la velocità impostate (dopo il confronto con quelle attuali);
- b) **Cinematica**: fornisce, data la posizione richiesta, le effettive posizioni dei vari assi;
- c) **Dinamica**: dati i carichi sul braccio, effettua la correzione sugli azionamenti per ottenere migliori prestazioni e ridurre le vibrazioni (regolando velocità e accelerazioni);
- d) **Gestione dei sensori**: a seconda dell'operazione che il robot deve compiere, l'UG abilita gli opportuni sensori (visione, contatto, ...) per determinare la sequenza dei movimenti.

### 2.1.4 I trasduttori

I trasduttori non verranno affrontati in quanto si tratta degli stessi visti per le macchine a controllo numerico. Per i trasduttori di velocità si usano le **dinamo tachimetriche**. Per i trasduttori di posizione invece bisogna distinguere a seconda delle strutture meccaniche dei robot: per le strutture che presentano movimenti di rotazione si usano gli **encoder**, mentre per quelle che presentano solo movimenti di traslazione vengono utilizzate le **righe ottiche**.

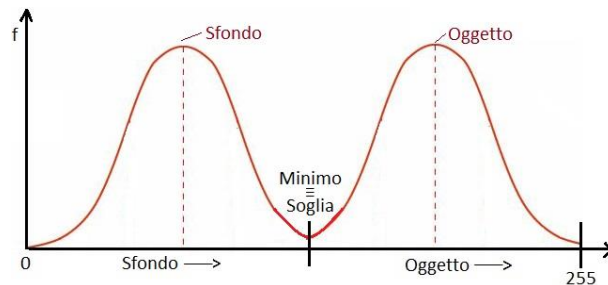
### 2.1.5 I sensori

I sensori fanno accrescere la gamma di applicazioni dei robot per la loro capacità di identificare automaticamente le posizioni e lo stato del pezzo e di comandare successivamente la sequenza del moto del robot. Permettono dunque l'interazione con l'ambiente esterno, inteso come l'insieme di macchine e attrezzature i cui componenti interagiscono con le operazioni svolte dal robot. L'UG oltre che a controllare i movimenti del braccio, deve poter dialogare con l'ambiente esterno e questo avviene tramite i sensori. Pertanto l'UG è predisposta per gestire un elevato numero di segnali analogici e digitali sia in entrata che in uscita, arrivando così a gestire l'intera cella di lavorazione. È necessaria una certa "intelligenza" (software) per realizzare l'interazione con l'ambiente esterno e questa si ottiene con l'impiego di opportuni sensori che forniscono i segnali all'UG. In altre parole il sensore rappresenta il mezzo fondamentale con cui l'UG comunica e gestisce le operazioni, attraverso il quale viene garantito il corretto funzionamento e completamento del lavoro (in quanto



Misurando le frequenze (f) con cui si manifesta ogni livello di grigio, si ottiene il seguente istogramma a livello di grigio, sul quale ci si baserà per la trasformazione in un'immagine binaria ben definita, dove tutti i pixel appartenenti allo sfondo avranno valore = 0, e quelli appartenenti all'oggetto avranno valore = 255. Se il contrasto nell'immagine a 256 livelli di grigio è buono, l'istogramma presenterà due massimi e un punto di minimo, il quale verrà posto come soglia per la conversione, a sua volta basata su una semplice elaborazione:

- Se il valore del livello di grigio è minore della soglia, verrà allora posto uguale a 0, diventando dunque sfondo;
- Se il valore di grigio è maggiore della soglia, verrà posto uguale a 255, diventando dunque oggetto.

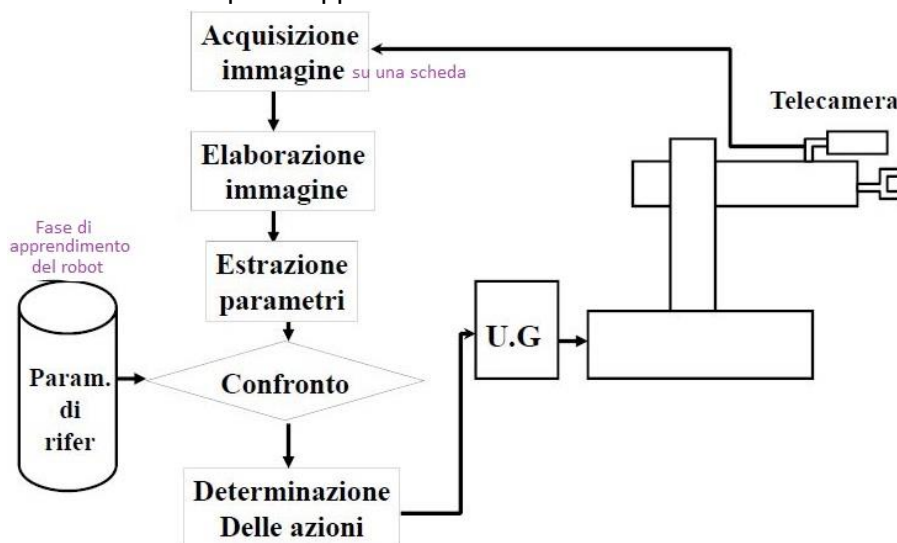


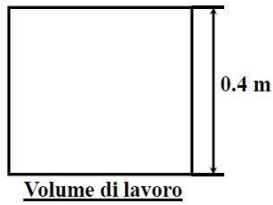
Questo procedimento semplifica notevolmente i possibili calcoli, ad esempio se fossimo interessati a calcolare l'area che ricopre l'oggetto (o un valore proporzionale all'area con un certo fattore di scala) basterà contare i pixel uguali a 255:

$$A \approx \sum_{i=1}^n (pixel = 255)$$

- Analizzata per estrarre i parametri (i più utilizzati e facili da estrarre sono: area, perimetro, il baricentro, i momenti di inerzia, l'orientamento dell'immagine, il diametro minimo del cerchio che contiene l'immagine, le dimensioni del rettangolo minimo che contiene l'immagine ...)
- I parametri, una volta estratti, vengono confrontati con quelli di riferimento preventivamente acquisiti per poter determinare le azioni da svolgere. I parametri di riferimento devono essere determinati sperimentalmente con una fase di apprendimento.
- Determinazione delle azioni da eseguire.

Esempio di applicazione del sensore di visione:

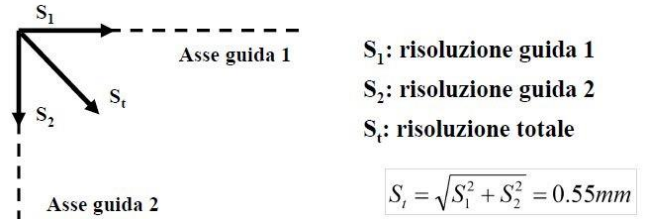




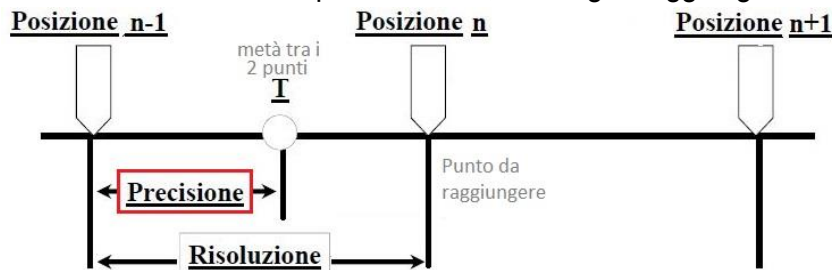
$$\frac{400}{2^{10}} = \frac{400}{1024} = 0.3906mm$$

Pertanto, 0.3906 mm è la minima distanza apprezzabile dal sistema di controllo di una guida ( $S_1, S_2$ ).

La risoluzione totale  $S_T$  sarà data dalla radice della somma dei quadrati delle risoluzioni di ogni guida:

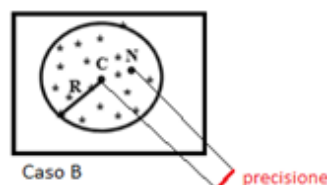
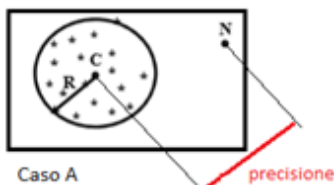


La **precisione** è la capacità di posizionare l'organo di presa in un determinato punto all'interno del volume di lavoro. Essa è strettamente legata alla risoluzione (tuttavia non sono da confondere): è tanto migliore quanto più è piccola la risoluzione; idealmente la precisione è pari alla metà della risoluzione (realmente rimane sempre comunque più piccola di essa). Supponendo che il robot si trovi nella posizione n-1, e si voglia raggiungere la posizione n:



La precisione è condizionata dalle imprecisione meccaniche dei giunti, dalle deformazioni elastiche della struttura, etc. Sarebbe auspicabile che fosse costante nell'intero volume di lavoro anche se nella realtà varia in funzione del posizionamento. La precisione migliore si ha nel baricentro della zona di lavoro; man mano che ci si sposta verso gli estremi, la precisione diminuisce.

La **ripetibilità** può essere definita come la capacità del robot di posizionarsi sempre nello stesso punto e non deve essere confusa con la precisione.



N = posizione nominale da raggiungere  
 \* = punti reali - diversi posizionamenti (un \* per ogni posizionamento)  
 C = centro della sfera contenente i vari posizionamenti del robot  
 R = raggio sfera, ripetibilità del robot

Nel Caso A si tratta di un robot ripetibile ma impreciso, poiché il punto N è al di fuori del raggio della sfera, ovvero il posizionamento reale è molto distante da quello nominale. [Più è piccolo il valore della precisione (distanza in rosso), maggiore sarà la precisione del robot; per chiarezza concettuale, può essere intesa come imprecisione: quindi più è grande, meno sarà preciso]. Nel caso B si tratta invece di un robot ripetibile e molto più preciso in quanto il punto nominale N si discosta poco dal centro della sfera, e comunque non presenta posizionamenti al di fuori della sfera. Più R è piccolo, più è ripetibile. La massima ripetibilità, come si vede in figura, si ottiene se  $C = N$ .

Usualmente la ripetibilità è inferiore alla precisione, le cause principali dell'errore di ripetibilità sono le imprecisioni meccaniche (giochi) dei giunti e dell'organo di presa. Al pari della precisione la ripetibilità dovrebbe mantenersi costante nel volume di lavoro del robot.

[I movimenti di rotazione impattano tutti e 3 i parametri di precisione dei movimenti]

- ❖ **Capacità di carico:** definita come il massimo peso che il robot può trasportare nelle condizioni di maggiore estensione della struttura;
- ❖ **Gradi di libertà;**

### 2.3.2.1 Linguaggio V.A.L.

V.A.L. è l'acronimo di Victor Assembly Language ed è stato sviluppato da Victor Scheinman per il robot PUMA, un robot di assemblaggio prodotto dalla UNIMATE. Si tratta di un linguaggio OFF-LINE per la definizione della sequenza dei movimenti mentre la memorizzazione dei punti della traiettoria avviene in autoapprendimento.

Le istruzioni del linguaggio V.A.L. sono divise in 2 gruppi: Comandi di monitoraggio e istruzioni di programmazione.

I **comandi di monitoraggio** permettono la supervisione del robot e precisamente:

- ❖ La generazione del programma;
- ❖ La definizione dei punti nello spazio;
- ❖ L'esecuzione del programma;
- ❖ L'editazione e correzione dei programmi.

Le **istruzioni di programmazione** servono a redigere il programma per definire la sequenza dei movimenti. Ogni istruzione determina un movimento della struttura o del polso del robot.

### 2.3.2.2 Linguaggio M.C.L.

M.C.L. è l'acronimo Machine Control Language. È un linguaggio di programmazione sviluppato dalla McDonnell Douglas Corporation nell'ambito del contratto ICA finanziato dall'US Air Force. È basato sull'A.P.T. (linguaggio evoluto per la programmazione delle MU a controllo numerico) ed è stato progettato specificatamente per la gestione delle celle robotizzate. Si tratta dunque di una estensione dell'APT.

A tal fine sono state introdotte una serie di istruzioni supplementari per permettere una agevole programmazione delle celle robotizzate e la gestione dei sensori presenti sulla cella stessa.

### 2.3.3 Programmazione assistita

Questa programmazione avviene con l'ausilio di un calcolatore esterno senza utilizzare il robot e la sua UG. Ciò permette di non bloccare il robot e quindi la cella asservita dallo stesso. Questo tipo di programmazione è tipicamente collegata ad un sistema CAD tridimensionale nell'ambito del quale vengono simulati, sullo schermo di un terminale grafico, l'ambiente operativo e la struttura del robot. L'operatore, tramite semplici comandi, muove virtualmente il robot secondo le traiettorie desiderate ed il sistema di programmazione provvede a tradurre tali movimenti nel linguaggio di programmazione intellegibile dall'UG.

Esistono una serie di tecniche per la generazione automatica delle traiettorie verificando l'assenza di collisioni con gli oggetti dell'ambiente circostante. Questo tipo di programmazione necessita delle seguenti informazioni:

- ❖ Descrizione geometrica di tutti gli oggetti presenti nell'ambiente di lavoro;
- ❖ Descrizione fisica di tutti gli oggetti (massa, momento di inerzia, etc.);
- ❖ Descrizione cinematica di tutti i giunti del robot;
- ❖ Descrizione delle caratteristiche dei manipolatori (limiti sui giunti, accelerazioni possibili) e delle caratteristiche dei sensori.

## 2.4 Applicazioni e criteri per l'introduzione dei robot

L'impiego dei robot nelle industrie manifatturiere permette di ottenere i vantaggi tipici dell'automazione industriale e precisamente:

- Miglioramento della qualità del prodotto vista la costanza del loro rendimento. Assicurano che tutti i movimenti avvengano allo stesso modo, ovvero assicura, che le lavorazioni siano slegate dalla variabilità tipica delle azioni umane, il robot ripete esattamente sempre la stessa operazione, senza variabilità, (a seconda della precisione);
- Aumento della produttività, i robot lavorano senza interruzioni con movimenti veloci e ottimizzati;
- Miglioramenti dell'immagine dell'azienda in termini di competitività;

Volendo garantire una traiettoria prestabilita e precisa l'azionamento più indicato è quello elettrico anche se la parte elettrica deve essere realizzata in modo opportuno per evitare esplosioni e questo determina un incremento di costo. In questi robot viene impiegato il controllo continuo della traiettoria.

### Robot di saldatura

E' del tutto analogo a quello di verniciatura con la differenza che viene richiesto un certo grado di auto adattamento dovendo lavorare particolari con ampie tolleranze.

Il controllo utilizzato è di tipo:

- ❖ Continuo, per saldatura ad arco continua;
- ❖ Punto-punto, per saldatura a punti

Recentemente nei robot di saldatura (sia essa sia a punti che continua, come quella a laser) si è passati all'inglobamento dei cavi all'interno della struttura, per praticità e sicurezza.

### Robot di manipolazione

Vengono impiegati nelle operazioni di carico-scarico di macchine utensili o per il confezionamento dei prodotti. Il robot deve essere molto versatile, le strutture più utilizzate sono quella cilindrica e articolata. L'azionamento è elettrico e il controllo in genere è punto-punto, visto che non interessa il controllo della traiettoria.

### Robot di montaggio

Sono destinati all'assemblaggio dei prodotti ed è dunque richiesta un'elevata precisione per cui le strutture più utilizzate sono quella cartesiana e S.C.A.R.A. I sistemi di guida devono essere rigidi e precisi. L'azionamento utilizzato è quello elettrico.

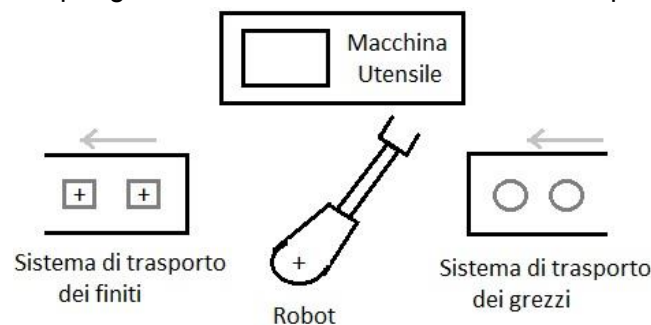
### Robot di misura e ispezione

Sono macchine ad elevata precisione, operano con movimenti in coordinate cartesiane e le strutture preferite sono quella cartesiana e cartesiana a portale. La traslazione degli assi deve avvenire con bassi attriti e pertanto vengono utilizzate le viti a ricircolazione di sfere. Sono previsti anche dispositivi per la ripresa dei giochi nei giunti. Il controllo gioca un ruolo fondamentale per garantire le precisioni richieste. L'organo di presa, in questo caso, viene sostituito con un **tastatore di misura** con o senza contatto.

### Celle robotizzate

Si tratta di sistemi produttivi più o meno complessi dove il robot viene usualmente impiegato per svolgere operazioni in sostituzione a quelle dell'uomo. L'applicazione tipica è l'asservimento alle macchine utensili, alle presse a iniezione, alle presse per pressofusione, alle presse per imbutiture, etc., specialmente assolvono la funzione di carico e scarico dei pezzi. Il robot preleva il pezzo grezzo da un sistema di trasporto, lo carica in macchina; a fine ciclo preleva il finito e lo posa in un secondo sistema di trasporto e il ciclo riprende.

Sono ovviamente necessari tutta una serie di dispositivi di segnalazione (interblocchi) per il corretto svolgimento delle operazioni che devono avvenire sotto la supervisione di un elaboratore che gestisce il flusso delle informazioni. Ogni elemento della cella è dotato di intelligenza locale e viene attivato dal calcolatore centrale sulla base delle indicazioni provenienti dagli interblocchi. Tuttavia è necessario un supervisione per garantire il corretto funzionamento complessivo.





### 3. Le Macchine di misura – Controllo della qualità assistito dal calcolatore

Il controllo classico è diverso da quello tramite macchine. Quello tradizionale (o classico) viene fatto con appositi strumenti tipo calibri, comparatori, micrometri, etc. Le macchine invece usano tendenzialmente un tastatore, azionato manualmente o previa programmazione, per rilevare allo stesso tempo sia le misure dimensionali che quelle geometriche.

Il controllo di qualità nel passato, era tradizionalmente eseguito manualmente utilizzando tecniche di campionamento statistico. Dalla produzione veniva prelevato ad intervalli di tempo regolari un elemento da controllare manualmente. Si trattava di operazioni di collaudo lunghe e costose che richiedevano una attrezzatura specifica che era complessa da utilizzare (sistemi di tracciatura, comparatori, truschini...). Il personale doveva avere un'elevata specializzazione con conseguenti incrementi dei costi aziendali. Il collaudo manuale doveva inoltre essere effettuato in un'area separata da quella produttiva e ciò determina tempi lunghi e può essere causa di colli di bottiglia nella produzione. Si correva il rischio di far passare pezzi di scarto da un campionamento a quello successivo, con la necessità di dover controllare tutti i particolari compresi tra i due campionamenti con notevoli perdite economiche.

La necessità di un controllo assistito della qualità è stata dettata dai seguenti aspetti:

- a) **Economico**: per poter ridurre i tempi e i costi relativi alla ispezione manuale che possono determinare dei ritardi di consegna;
- b) **Sociale**: il mercato è sempre più esigente e non è disposto a tollerare difetti sui prodotti. Inoltre sentenze di risarcimento dei danni emesse dai tribunali a favore dei clienti hanno fatto capire ai produttori che in determinati settori il controllo di qualità deve essere effettuato al 100%. A tali considerazioni è necessario aggiungere che l'ispezione manuale richiede una certa discrezionalità dell'operatore e a questo si desidera chiaramente ovviare;
- c) **Tecnologico**: la crescita delle prestazioni degli elaboratori elettronici ha permesso la realizzazione di sistemi automatici di ispezione che possono operare in tempo reale direttamente sulla linea produttiva.

#### *Le macchine di misura a coordinate (CMM o MMC)*

Si tratta di una macchina CNC espressamente progettata per la misurazione delle tolleranze dimensionali, geometriche e di forma dei particolari meccanici. I principali obiettivi e funzioni che queste macchine assolvono sono:

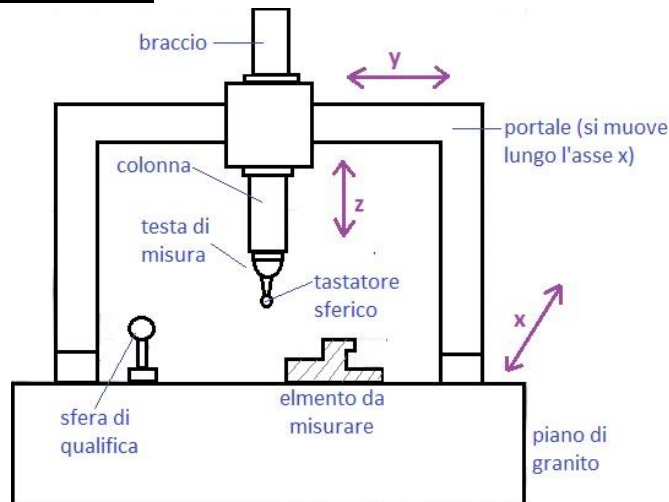
- 1) Collaudare e valutare la conformità dei pezzi prodotti durante le lavorazioni meccaniche (macchine CNC);
- 2) Sostituire gli strumenti di misura tradizionali (manuali).

Dal momento che l'obiettivo principale è garantire la massima precisione di posizionamento, ossia precise traslazioni lungo gli assi, hanno usualmente una struttura cartesiana a portale (la migliore in quanto non presenta movimenti di rotazione che potrebbero diminuirne la precisione) che scorre su di un piano in granito rettificato che funge anche da sistema di appoggio dei particolari da misurare.

L'utensile classico è sostituito da un tastatore meccanico, montato su una testa di misura orientabile, il quale permette il rilievo della postazione raggiunta.

Esempio classica macchina di misura a coordinate di medio-piccole dimensioni - è generalmente composta da due elementi: la macchina di misura ed un calcolatore, funzionante come unità di governo, tramite il quale è possibile gestire, comandare e salvare le informazioni ottenute. Basandoci sull'immagine seguente come riferimento, la scelta degli assi di riferimento è convenzionalmente, o comunque generalmente la seguente: supponendo di avere l'origine della terna degli assi cartesiani in basso a sinistra, sull'asse z avviene il movimento verticale del gruppo montante, l'asse x è quello uscente verso l'operatore e perpendicolare ad esso l'asse y. L'immagine affianco rappresenta invece la tastatura di un particolare: la testa orientabile agevola il collaudo dei componenti complessi tramite dei movimenti di rotazione riesce a seguire e tastare perfettamente le superfici del pezzo, comprese

Schema bidimensionale da sapere:

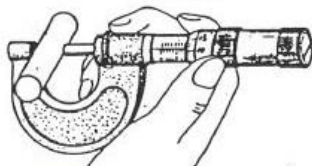


Nella maggior parte dei casi, il pezzo non richiede la necessità di essere staffato per poter essere misurato dal momento che le pressioni e le vibrazioni esercitate dalla macchina non sono sufficientemente forti da vincere il peso del componente.

Il minimo spostamento controllabile, o **risoluzione** varia da  $\pm 0.1\mu\text{m}$  a  $\pm 0.05\text{mm}$  a seconda delle applicazioni, ossia a seconda del tipo di macchina e della funzione. La risoluzione dipende dalla temperatura e dall'umidità, in quanto per le proprietà dei metalli, se esse variano, variano anche (seppur di poco) le dimensioni della struttura. La risoluzione ne risente. Per questo motivo le CMM devono essere inserite in stanze con umidità e temperatura controllate.

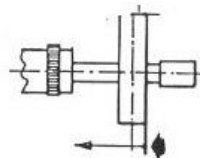
Esempio collaudo e misurazione del diametro di un perno:

Nel collaudo tradizionale è necessario uno strumento specifico e il componente va allineato sullo strumento stesso: in questo caso il micrometro. Sebbene il micrometro sia molto preciso, la complessità del pezzo può rendere difficile la misurazione manuale, aumentando così le possibilità di essere imprecisi.



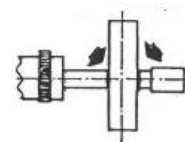
**Micrometro**

Simile al calibro, ma più preciso: misura diametri esterni



**Allineamento strumento e componente (perno)**

Rendiamo perpendicolare l'asse del perno con l'asse del micrometro

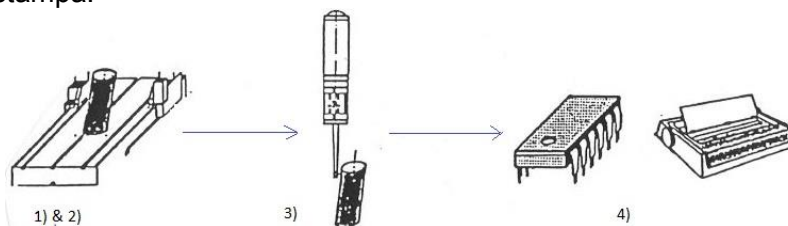


**Letture e definizione origine sul micrometro**

misurazione del diametro del perno

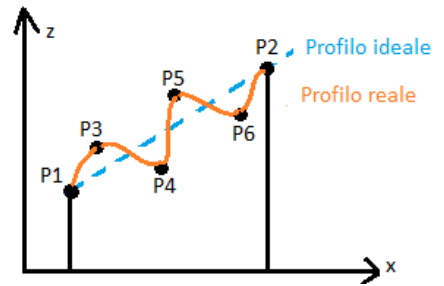
Il collaudo con CMM, può essere scomposto nelle seguenti 4 fasi:

- 1) Posizionamento del pezzo sul piano di granito senza vincoli;
- 2) Allineamento virtuale tra il sistema di riferimento del pezzo e il sistema di riferimento della macchina di misura (rotazione degli assi della CMM per farli coincidere con quelli del pezzo);
- 3) Rilevamento di una serie di punti sul pezzo;
- 4) Elaborazione tramite calcolatore per la valutazione di parametri geometrici ed errori di forma, e successiva stampa.



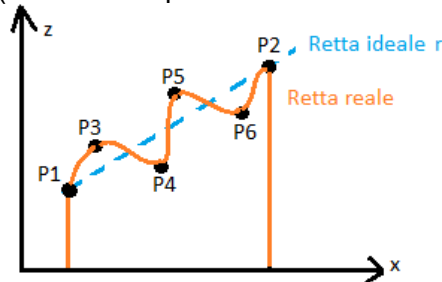
Con le CMM è possibile valutare le dimensioni (in questo caso il diametro del perno), le tolleranze geometriche e gli errori di forma. Devono essere implementate nel software di gestione della macchina, le equazioni matematiche dei vari elementi.

**Esempio: calcolo dell'errore di forma nel caso della linearità.** Verrà descritto il caso più semplice, una retta, che però può essere esteso per analogia a tutte le forme geometriche. Una retta viene descritta da 2 punti, in quanto per due punti passa una sola retta. Tuttavia, prendendo solo due punti (P<sub>1</sub> e P<sub>2</sub>) si ottiene una retta ideale. Per avere la retta reale bisogna prendere in considerazione un numero maggiore di punti (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub>, P<sub>6</sub>). Così facendo ci si allontana dal modello ideale per avvicinarsi alla realtà, in quanto vengono presi in considerazione anche i possibili errori di forma.

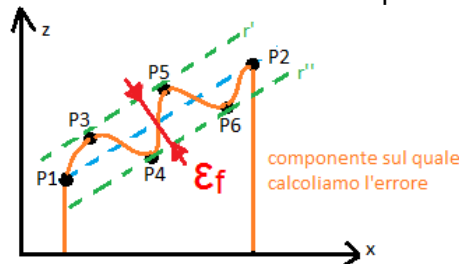


Il calcolo della retta reale e del relativo errore di forma avviene nel seguente modo:

- 1) Si calcola la retta ideale (r) che meglio interpola ed approssima i 6 punti presi attraverso il metodo dei minimi quadrati (tale metodo permette di minimizzare gli errori);



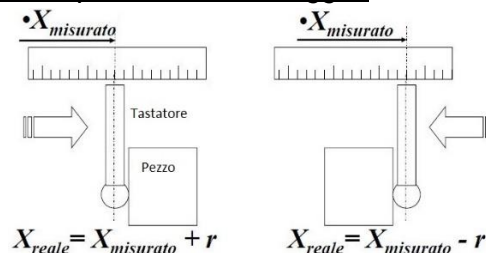
- 2) Viene introdotta la retta r', parallela alla retta ideale r e passante per il punto più lontano della parte superiore. Successivamente viene presa la retta r'', parallela alla retta r e passante per il punto più distante della parte inferiore. Infine si calcola la distanza lineare tra le due rette appena tracciate, la quale costituirà l'errore di forma  $\epsilon_f$  rispetto al profilo ideale:



**Calibrazione e qualifica del tastatore:** tramite un cubo o una sfera calibrata (di diametro noto alla quarta decimale) è possibile calibrare il primo tastatore e qualificare<sup>2</sup> gli altri rispetto al primo. Le procedure permettono di verificare il diametro del tastatore e di calcolare gli off-set rispetto all'origine del sistema di riferimento della macchina. Si consiglia di calibrare sempre all'inizio del turno, ad esempio, per essere sicuri che siano perfettamente tarate. Nello specifico: il tastatore viene portato in prossimità della sfera di calibrazione e qualifica e vengono presi 5 punti. L'algoritmo determina il diametro e la lunghezza del tastatore in base alle dimensioni della sfera.



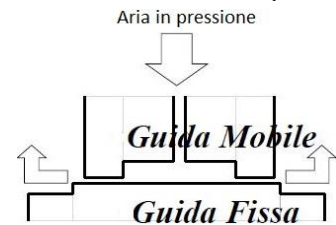
Ovviamente, visto che il tastatore ha una sua lunghezza e un suo diametro, vi è la necessità di compensare le misure ottenute, ossia bisogna togliere o aggiungere (a seconda del verso) queste quote da quanto misurato poiché le misure vengono prese in base al centro del tastatore, e non di un punto superficiale. **Esempio compensazione del raggio:**  $X_{reale} = X_{misurato} \pm r$



<sup>2</sup> Stessa identica operazione della calibrazione, solo che viene fatta sui tastatori secondari.

carro centrale, i quali definiscono rispettivamente il movimento lungo l'asse X e il movimento lungo l'asse Y, venivano costruiti in acciaio o lega leggera, ma oggi in alluminio perché i precedenti materiali presentavano problemi relativi alla deformazione nel tempo. La colonna invece è in acciaio o alluminio estruso e segue il movimento verticale lungo l'asse Z. Quest'ultima viene bilanciata da un cilindro pneumatico per evitare la caduta per peso proprio, all'estremità viene installata la testa di misura.

I movimenti tra i vari elementi mobili avvengono su pattini pneumostatici, ovvero non strisciano l'una sull'altra, ma scorrono su cuscini d'aria compressa. Il sostentamento pneumatico viene utilizzato per ridurre il coefficiente di attrito a  $10^6$  rispetto al  $10^3$  delle viti a ricircolazione di sfere. L'aria in pressione crea un meato (fisso e controllato) tra la guida mobile e parte fissa (→ pattino pneumostatico, ognuno dotato del proprio circuito pneumostatico), così non avviene strisciamento. La pressione dell'aria dev'essere costante (4-6 bar) e l'aria dev'essere filtrata e privata dell'umidità. Qualora la pressione dovesse scendere troppo, il sistema va in emergenza arrestando la macchina, non perché non garantirebbe il movimento ma perché non garantirebbe il corretto posizionamento tra parte fissa e parte mobile. Inoltre, potendo scorrere su un pattino d'aria, si possono utilizzare piccoli motori per lo spostamento della guida perché l'attrito è minimo, prevenendo anche così problemi relativi all'usura nel tempo delle guide. Tutto ciò avviene perché le sollecitazioni in gioco sono piccole, le spinte per muovere la struttura sono estremamente ridotte e le deformazioni della struttura della macchina sono trascurabili.



Come trasduttori di posizione vengono impiegate delle righe ottiche (una per ogni asse, trasduttori diretti) montate direttamente sulle guide. L'UG funziona come per robot e CNC, ma non abbiamo la gestione dei sensori perché nella macchina di misura non c'è interazione con l'ambiente esterno. L'unità di governo della macchina permette la gestione:

- In automatico e manuale della macchina;
- Dei programmi, realizzati manualmente o tramite appositi software;
- Dei tastatori;
- Della diagnostica

#### Programmazione e software per la macchina

La **programmazione** è come quella dei robot, e può avvenire tramite:

- 1) Autoapprendimento: si memorizzano le varie posizioni e movimenti che vengono fatti in modo da renderli ripetibili (è il metodo più semplice tuttavia richiede il fermo macchina per eseguire la programmazione);
- 2) Tramite linguaggio di programmazione – Esiste un linguaggio ISO delle macchine di misura, ma è troppo complesso e difficile da usare. Ogni macchina di misura presenta il proprio linguaggio di programmazione interno e non vi è alcun tipo di standardizzazione tra produttori. Dal momento che tali linguaggi presentano dei limiti, vengono usate per operazioni e misurazioni di geometrie semplici, poco complesse;
- 3) Fuori-linea. Partendo dal modello CAD del pezzo viene definito il ciclo di collaudo dal tecnologo, e di conseguenza il part-program per la CMM (→ definizione percorso di misura).

Rispetto alle CNC è necessario oltre che alla parte di gestione del controllo numerico una parte di **software** specifico per l'elaborazione dei punti misurati sulla base di equazioni matematiche implementate. Le CMM possono dunque essere equipaggiate con i seguenti tipi di software:

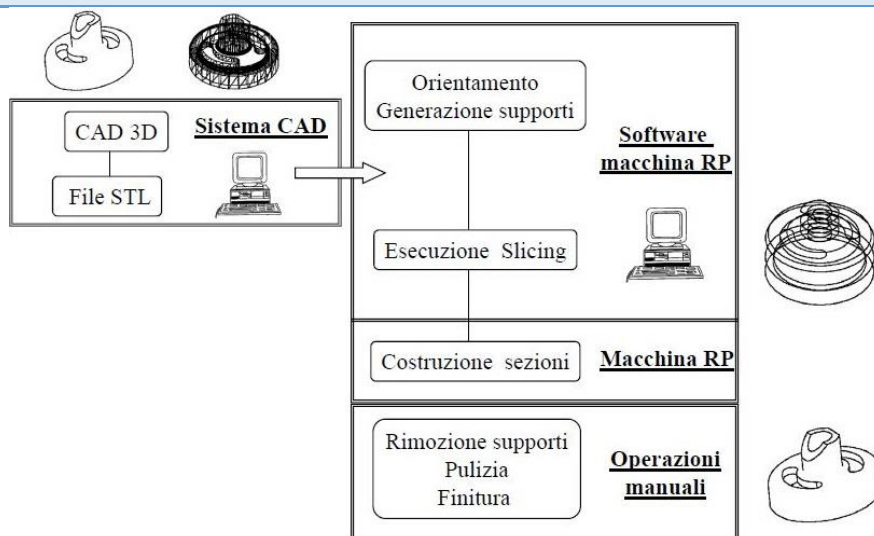
- Di misura per il collaudo in manuale o automatico per misurare elementi geometrici standard;
- Per la copiatura degli elementi fisici mediante scansione a contatto (reverse engineering) e successiva matematizzazione delle superfici in ambiente CAD 3D. Si dispone di un elemento fisico di cui non si possiede il modello CAD. L'oggetto viene tastato (sia mediante tastatori a contatto sia mediante tastatori laser o basate su scansioni 3d, es Kinect) in una serie di punti con una determinata strategia, i punti vengono successivamente suddivisi e usati nella matematizzazione e creazione del modello CAD (meno utilizzato, applicazione principale: copiatura fraudolenta);
- Collaudo sulla matematica CAD 3D. Permette di controllare superfici complesse confrontandole con il modello matematico dell'oggetto.

## 4. La fabbricazione additiva

La Fabbricazione Additiva (FA) è una tecnologia innovativa (nata a fine anni '80 negli USA, nel settore automotive il quale era in crisi perché non riusciva immettere sul mercato modelli con la frequenza dei competitor giapponesi: si scoprì essere la prototipazione il bottleneck ) che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'uso di utensili, di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su di un sistema CAD tridimensionale (si ottiene l'oggetto fisico direttamente dal modello CAD, senza operazioni intermedie). Nata inizialmente per la realizzazione di prototipi in plastica, motivo per il quale ha assunto per molti anni il nome di "Prototipazione Rapida" (Rapid Prototyping → Additive Manufacturing), viene usata oggi per la produzione vera e propria di pezzi e componenti, nonostante la realizzazione dei prototipi è ancora l'applicazione principale. Viene definita additiva in quanto, nella produzione, il materiale viene aggiunto strato per strato e rappresenta l'alternativa economicamente vantaggiosa, in termini di quantitativo di materiale utilizzato, di quella sottrattiva, dove invece il materiale viene sottratto generando scarti inutilizzati.

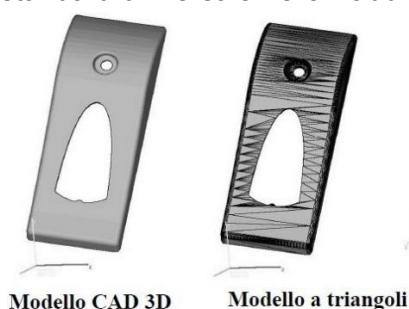
Tanto più sono complesse le geometrie, tanto più è vantaggiosa rispetto alla fabbricazione tradizionale in quanto non richiede utensili ed operazioni meccaniche, è potenzialmente senza limiti in quanto l'idea di lavorare per strati è tanto elementare quanto comoda ed efficace. Inoltre, la FA permette di convertire un problema tridimensionale in uno bidimensionale, generando sezioni piane dell'oggetto da fabbricare. Data la sua natura ed il suo funzionamento, l'unico prerequisito che richiede consiste nella disponibilità del modello matematico del componente realizzato su di un sistema CAD tridimensionale.

### Ciclo di funzionamento della Fabbricazione Additiva



Il ciclo di funzionamento o produzione della fabbricazione additiva, può essere scomposto nelle seguenti fasi:

- 1) **Realizzazione del modello CAD** dell'oggetto tramite un apposito software.
- 2) **Conversione della superficie interna ed esterna**: si converte il modello CAD di tipo solido (3D) in un modello tipo "Shell" in cui la superficie esterna ed interna sono approssimate attraverso triangoli di diverse dimensioni (a seconda della risoluzione richiesta). È stato il primo produttore a scegliere i triangoli, (non vi sono tecnologie particolari per la scelta) in modo da seguire il profilo del modello. Lo standard universale nella Fabbricazione Additiva per i modelli matematici è il **formato .STL** (Standard Triangulation Language).



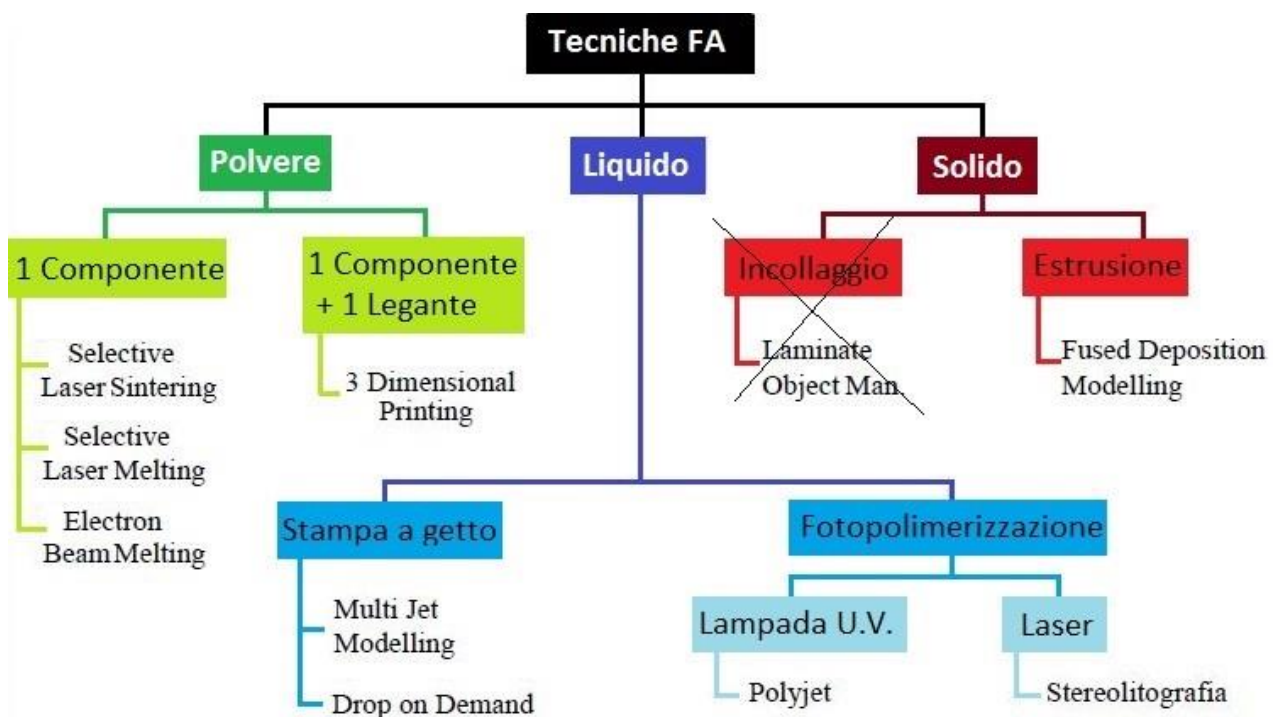
Per questo motivo, e per ragioni di precisione, non si va mai oltre 0.33 mm. Tale errore potrebbe essere ridotto adottando uno slicing adattativo, il quale non divide il modello in sezioni di dimensione ( $\Delta S$ ) costante (slicing costante vs slicing adattativo), ma permette di utilizzare sezioni con spessori variabili nelle zone più critiche. Tuttavia questa tipologia è poco utilizzata in quanto, sebbene per il software sia facile svolgere i calcoli, non tutte le macchine possono gestire spessori variabili ( $\rightarrow$  limiti fisici delle macchine).

- 4) **Costruzione delle sezioni:** la macchina a FA (hardware) realizza il componente aggiungendo il materiale strato per strato in base alle sezioni definite nello slicing, facendo in modo che aderiscano l'una all'altra. Dove è necessario vengono anche aggiunti elementi leganti tra uno stato di materiale e l'altro.
- 5) **Operazioni manuali:** vengono infine svolte manualmente delle operazioni di rimozione dei supporti, finitura e pulizia del componente finito.

Ricapitolando, durante lo svolgimento di queste operazioni, le macchine FA sono soggette a due tipi di errori concettuali, i quali non sono eliminabili ma minimizzabili:

- a. **Errore di faceting:** dovuto al formato .STL, ossia all'approssimazione di superfici curve con elementi di geometria piana, i triangoli (i quali non aderiscono perfettamente alla superficie del modello CAD).
- b. **Errore di stair-case** (errore effetto scala): imputabile allo slicing e causante eccessi di materiale, in quanto è impossibile riprodurre perfettamente superfici curve con elementi di geometria piana, ovvero le sezioni, le quali hanno uno spessore finito e non infinitesimo (maggiore è lo spessore delle sezioni, maggiore sarà la possibilità di commettere errori).

## Classificazione delle tecniche



Le principali tecniche di produzione basate sulla fabbricazione additiva possono essere riassunte in tre categorie a seconda dello stato fisico in cui si trova il materiale di partenza:

- 1) **STATO LIQUIDO** - vi sono due tipi di tecniche:
  - ❖ **Stampa a getto:** è presente una testina di stampa che deposita del materiale (plastica) in forma liquida. La stampa a getto può essere realizzata tramite:
    - Multijet modelling;
    - Drop on demand.

La stereolitografia presenta:

<b>Vantaggi</b>
Alta precisione (la più precisa, in realtà) e alte finiture superficiali poiché il materiale è depositato /creato in maniera continua.
Semi trasparenza (al più color bianco) del materiale che consente la vista interna degli oggetti realizzati (per altri colori vanno verniciati).
<b>Svantaggi</b>
Il materiale utilizzato è non definitivo, poiché termoidurente e non termoplastico. Come tale non può essere usato per la produzione (a meno che non se ne possa fare a meno) ma solo per la creazione dei prototipi poiché non è riciclabile. Non può essere riportato allo stato liquido per fusione e quindi necessita di un processo di smaltimento costoso e più lungo (viene stoccato ed eventualmente bruciato).
Problemi con i supporti (oltre al fatto che costituiscono degli scarti inutilizzabili, ossia un costo): <ol style="list-style-type: none"> <li>a) I supporti incidono sulla superficie e relativa finitura del pezzo, per cui devono essere inseriti nella parte non a vista del pezzo finito (ad esempio nella parte interna della cover del cel o della plancia di una macchina), così che gli eventuali residui e segni della rimozione dei supporti non si vedano;</li> <li>b) Impediscono di sfruttare completamente l'asse z, ossia per poter realizzare un pezzo sopra l'altro bisognerà per forza inserire dei supporti tra i due che dovranno poi essere rimossi, generando quindi imperfezioni sulla superficie (punto a).</li> </ol>

La SLA non va confusa con la fabbricazione additiva. Quest'ultima ultimamente si sta diffondendo anche con soluzioni open-source a basso costo (600-2000 €). È ovvio che tali soluzioni sono di applicazioni ridotte rispetto alle macchine SLA (ad esempio le macchine della 3D Systems costano dai 300.000 ai 900.000€, con volumi di lavoro che vanno da 650x750x550 mm<sup>3</sup> a 1500x750x550 mm<sup>3</sup>). Inoltre i macchinari SLA sono (a causa dello spot del laser) molto più precise.

## 2) **STATO SOLIDO** – tale tecnica avviene per:

- ❖ **Estrusione** (Fused Deposition Modelling): la testina estrude il materiale in forma solidafilamentare. È la tecnica tuttora più diffusa a livello internazionale e al momento destinata esclusivamente allo stampaggio di componenti in polimero (stampa 3D: solo plastica).
- ❖ **Incollaggio** (Laminare Object Manufacturing): praticamente in disuso.

## 3) **POLVERE** – si distingue a seconda della presenza di un elemento legante oltre al materiale:

- ❖ **Ad un componente**: fusione, tramite un fascio laser, delle particelle di polvere, o miscele di polveri, o sabbia Croning. È considerata la tecnica del futuro, ossia di grande interesse tecnologico in quanto è destinata alla creazione di componenti, tanto prototipi quanto prodotti finiti, con materiali sia polimerici che metallici. Sebbene sia una tecnica che presenta un livello di precisione inferiore, dovuto allo stato in cui si trovano i materiali (la polvere ha la propria granulometria e quindi presenta possibili dimensioni dei granuli differenti), presenta il vantaggio di produrre componenti con materiali definitivi (cioè materiali che si utilizzerebbero in fabbricazioni tradizionali e che siano riciclabili). I principali produttori di macchine usanti tale tecnica sono sempre la 3D Systems e la EOS (Germania, maggiore fornitore specialmente in Europa), i quali detengono in due praticamente l'interezza del mercato. La fusione delle particelle di polvere può avvenire con diverse tecniche: Selective Laser Sintering, Selective Laser Melting e Electron Beam Melting. Di nostro interesse è la **Selective Laser Sintering**, il cui ciclo di funzionamento è il seguente:

la struttura è pressoché analoga a quella della stereolitografia, tranne per la presenza di dispositivo di livellamento (rullo). L'elevatore viene posizionato in alto, rasentando l'estremità superiore della camera di lavoro e su di esso viene depositato uno strato di polvere, a sua volta livellato dal rullo. Il raggio laser uscente dalla sorgente (più potente di quello della SLA a causa dei materiali e della fusione dell'intera sezione), indirizzato tramite un sistema di specchi, porta a fusione tutta la sezione di polvere contemporaneamente. Terminata la fusione, l'elevatore si

## Prototipi

Durante la fase di sviluppo di un prodotto vengono realizzate le seguenti tipologie di prototipi:

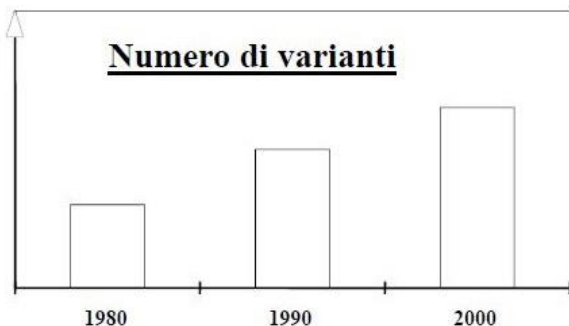
- Per ottimizzare il prodotto:
  - **Prototipi concettuali** - il cui obiettivo primario consiste nella valutazione del design (in termini di estetica e possibilità di realizzazione);
  - **Prototipi funzionali** - es: condotto di aspirazione di un motore: bisogna sottoporre il prototipo a tutte le prove che vanno a simulare il funzionamento effettivo del pezzo finale, quindi si userà anche un materiale simile a quello definitivo;
- Per ottimizzare anche il processo oltre il prodotto:
  - **Prototipi tecnici;**
  - **Prototipi preserie** (es automotive: le vetture mascherate che si vedono testare in città);

Gli obiettivi di ciascuno sono ovviamente differenti così come il materiale impiegato per la costruzione (man mano che il prototipo si specializza, il materiale con cui si realizza il prototipo stesso sarà sempre più simile a quello definitivo) e la tecnologia di fabbricazione. La fabbricazione additiva viene principalmente nelle prime due, dove è consolidata ormai, ma sta anche prendendo campo nelle seconde due.

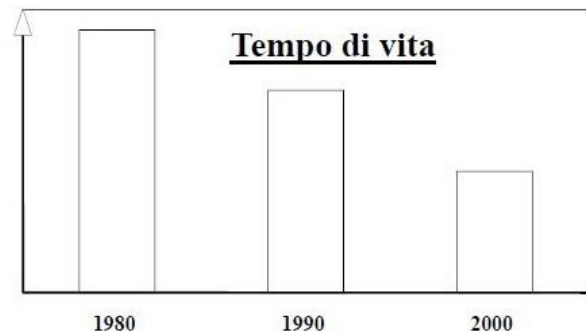
	<b>Prototipi concettuali</b>	<b>Prototipi funzionali</b>	<b>Prototipi tecnici</b>	<b>Prototipi preserie</b>
<b>Obiettivi</b>	Valutazione della forma  Verifiche di montaggio  Analisi delle difficoltà tecnologiche	Valutazione delle prestazioni con prove funzionali  Ottimizzazione del prodotto per la funzione	Valutazione delle prestazioni del prodotto e del ciclo di fabbricazione  Ottimizzazione delle tecnologie di fabbricazione	Valutazione finale del prodotto (ammesse poche modifiche marginali)
<b>Materiale</b>	Qualsiasi	Simile	Molto simile	Definitivo
<b>Tecnologia di fabbricazione</b>	Non considerata	Non considerata	Simile	Definitiva

## Motivazione economica

Prendendo il caso di un bene di largo consumo, quale un'autovettura, si possono considerare i seguenti trend registrati negli anni:



Es - la panda: nell'80 c'erano solo due motori e il cliente poteva inoltre scegliere solo il colore, mentre oggi può scegliere di tutto e di più. Risulta chiaro che all'aumentare delle varianti, aumenta in maniera esponenziale la complessità di realizzazione del prodotto.



In controtendenza è il tempo di vita, inteso non come durata di funzionamento, ma il tempo di permanenza del prodotto sul mercato (es: un modello dura 2-3 anni poi avviene un restyling). Esso è in progressivo calo, ciò significa che si ha meno tempo disponibile per recuperare gli investimenti fatti.