

Scheda tecnica

Maggiore accuratezza per centri di lavoro nella produzione automatizzata di grandi serie

Gli acquirenti di autovetture richiedono tipologie e motorizzazioni differenti secondo i gusti e le necessità più disparate. A seconda dei costi del carburante, delle norme sulle emissioni e delle misure fiscali, ad esempio, la domanda varia nei singoli mercati per dimensioni del veicolo, tipologie e potenze del motore. Per le case automobilistiche questo rende difficoltosa la valutazione relativa ai quantitativi da produrre, alla pianificazione delle capacità come pure alla progettazione di una linea di produzione.

Per rispondere alle esigenze dei clienti, i costruttori di autoveicoli offrono tra l'altro motori con lo stesso numero di cilindri in classi di potenza differenti, con conseguente aumento del numero di versioni. I cicli di vita dei veicoli divenuti sempre più brevi e i mercati mutevoli comportano nuove sfide per la produzione delle case automobilistiche [1]. Per affrontare queste sfide, è stato aggiunto l'aspetto della flessibilità alle caratteristiche classiche della produttività quali qualità, tempo e costi.

Per le linee produttive dedicate alla lavorazione meccanica dei componenti della catena cinematica dei veicoli (ossia motore, trasmissione e assi), questo implica l'eliminazione delle classiche linee transfer con cicli rigidi ed elevata produttività per passare a linee con centri di lavoro concatenati che consentono maggiore flessibilità. Accanto alla sfida per poter reagire con flessibilità alle oscillazioni della domanda dei mercati di vendita per autoveicoli, continueranno ad aumentare in futuro i requisiti relativi alla riduzione delle emissioni di scarico e ai consumi di carburante dei veicoli imposte dai legislatori e dai clienti finali. Un modo per far fronte a tali esigenze consiste nel ridurre le perdite per attrito nei componenti della catena cinematica, da cui risulteranno requisiti di qualità ancora più severi per i componenti da realizzare.

I centri di lavoro concatenati, impiegati nelle linee di produzione, hanno il compito di rispondere alle richieste dei produttori anche per elevati quantitativi garantendo la sicurezza di processo (cfr. figura 1). L'impiego di sistemi di misura lineari con regolazione in Closed Loop negli assi di avanzamento dei centri di lavoro contribuisce a soddisfare queste molteplici esigenze.



Dalla linea transfer a centri di lavoro concatenati

Maggiore flessibilità per varianti, macchine e capacità

La scarsa capacità di adattamento delle linee transfer

Le singole stazioni di una linea transfer sono concepite in modo specifico per la lavorazione di un determinato pezzo e quindi la linea con concatenazione fissa non può essere semplicemente ampliata aggiungendo altre stazioni. Per poter predisporre le capacità massime pianificate, è pertanto necessario eseguire già all'inizio della produzione (SOP) gran parte degli investimenti della linea produttiva. Poiché il numero di pezzi aumenta lentamente all'inizio della produzione (avvio della linea) e diminuisce alla fine del ciclo di vita del prodotto (eliminazione della linea), l'offerta di capacità produttive risulta eccessiva (figura 2). Questo comporta il non totale sfruttamento della capacità installata.

Le sfide ulteriori si presentano qualora durante la messa a regime della linea transfer il fabbisogno di capacità dovesse aumentare in misura maggiore rispetto a quanto pianificato, senza riuscire più a produrre i pezzi richiesti dal mercato con la capacità della linea. La duplicazione di una linea transfer per la gestione di questi picchi di quantità comporterebbe tuttavia una netta sovracapacità.

Massima flessibilità grazie a centri di lavoro concatenati

L'impiego di centri di lavoro (MC) concatenati consente di installare linee di produzione con minore capacità produttiva ma permette una maggiore gamma di funzioni produttive e quindi una maggiore flessibilità di produzione. Sono in grado di adattarsi alle necessità reali in termini di numero di pezzi all'avvio della produzione integrando centri di lavoro supplementari nelle postazioni libere della linea produttiva o duplicando l'intera linea.

Questo avvicinamento dell'offerta di capacità al fabbisogno effettivo consente di conseguire un ampliamento il più possibile proficuo del sistema di produzione [2]. Pertanto il trend nella produzione di grandi serie di componenti per la catena cinematica di veicoli si allontana dalle linee di produzione per passare ai centri di lavoro [3].

L'aumento di flessibilità dei centri di lavoro concatenati si riferisce alla reazione il più possibile rapida ed economica alle oscillazioni nella domanda. Si aspira ad esempio a poter lavorare diverse varianti di un pezzo senza tempi di riattrezzaggio sulla stessa linea di produzione (**flessibilità delle versioni**).

Un ulteriore approccio riguarda l'ampliamento semplificato della linea di produzione aggiungendo altre macchine. Si può parlare in tal caso di **flessibilità di riuso**, in quanto l'impiego di macchine standard e il relativo concatenamento omogeneo consentono l'integrazione semplificata e il riutilizzo delle macchine in altre linee di produzione.

Se la considerazione della capacità della linea va al di là della durata utile del pezzo da produrre, le oscillazioni descritte della domanda comportano alla fine differenze tra il fabbisogno di capacità e l'offerta di capacità della linea di produzione. Mentre con le linee transfer è possibile realizzare soltanto salti relativamente grandi nella capacità produttiva, le linee di produzione con centri di lavoro concatenati sono idonei per l'incremento a piccoli passi della capacità all'avvio della produzione. Grazie alla loro maggiore flessibilità possono essere riconfigurate anche in fase di dismissione del prodotto [4]. La figura 2 rappresenta l'investimento graduale nell'ambito della fase iniziale di un pezzo da produrre e la riduzione nella fase di dismissione (**flessibilità della quantità**).

La figura 3 illustra a titolo di esempio il layout di una linea di produzione per la lavorazione meccanica di un componente della trasmissione. Si evidenziano i centri di lavoro concatenati con caricatore a portale, raggruppati a loro volta in singole operazioni di lavorazione. Una operazione di lavorazione si compone quindi di diversi centri di lavoro azionati in parallelo con le stesse funzionalità.

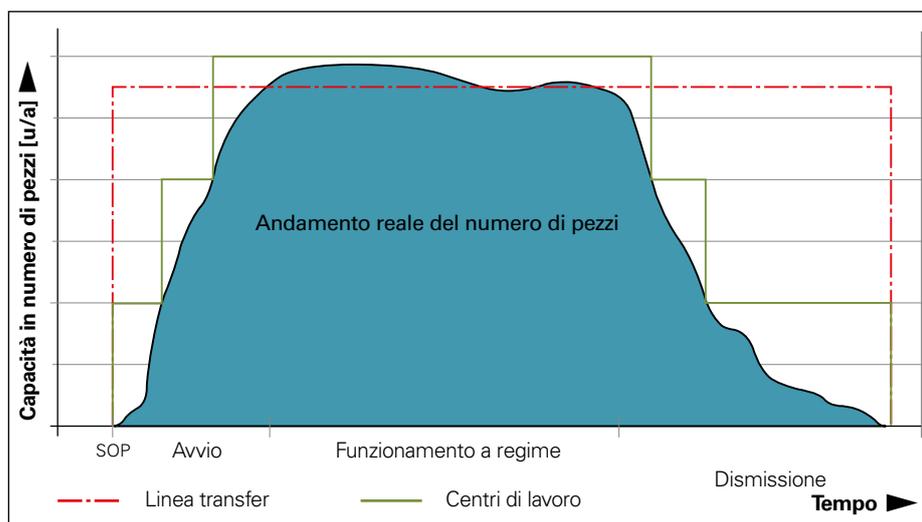


Figura 2: flessibilità in termini di numero di pezzi – capacità offerta vs. capacità richiesta (secondo [4])

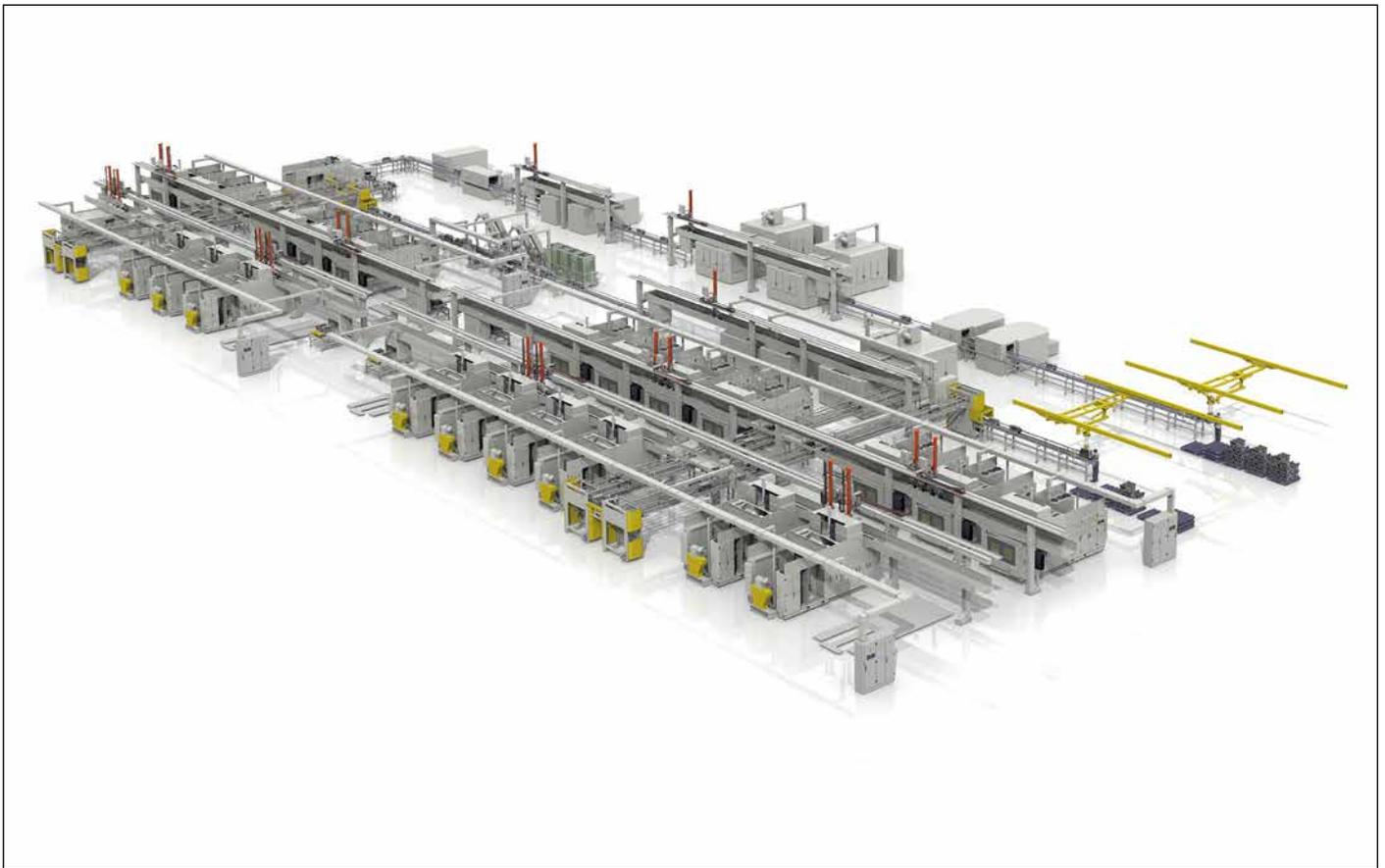


Figura 3: esempio di una linea di produzione per grandi serie (grafico: MAG IAS GmbH)

I vantaggi offerti dai centri di lavoro orizzontali

Di norma per la produzione vengono impiegati i centri di lavoro orizzontali, in quanto presentano la pratica caduta dei trucioli permettendo così di lavorare ad esempio con ridotta quantità di lubrorefrigerante per il lavaggio o anche con lubrificazione minima. Queste macchine sono inoltre automatizzabili in modo variabile con carica frontale o dall'alto per l'alimentazione dei pezzi. Questo consente di impiegare lo stesso tipo di macchina per differenti linee di produzione, anche quando si dispone di sistemi di carico differenti. A causa dell'elevata produttività su una superficie pressoché identica si impiegano in alcuni casi anche macchine a doppio mandrino (vedere figura 1 a pagina 1).

Le caratteristiche della produzione automobilistica di grandi serie

Per riassumere possono essere definite le seguenti caratteristiche per la lavorazione ad asportazione del truciolo di pezzi cubici nella produzione automobilistica di grandi serie:

- produzione automatizzata con centri di lavoro orizzontali concatenati,
- un operatore è in grado di gestire da otto fino a quindici macchine,
- una operazione di lavorazione si compone principalmente di diversi centri di lavoro identici, azionati in parallelo con le stesse funzionalità,
- la lavorazione di un pezzo è di tipo sequenziale con numerose operazioni di lavorazione,
- un singolo pezzo viene realizzato con diversi centri di lavoro, pertanto diversi centri di lavoro sono responsabili per il rispetto delle tolleranze del pezzo.

In particolare l'ultimo punto della lista sottolinea che le tolleranze realizzate in un pezzo dipendono dalle singole macchine ovvero dai sottoprocessi dell'intero impianto di produzione. Rispetto alla costruzione di utensili e stampi, dove un pezzo viene lavorato su una macchina, assistita da un meccanico addetto, nella produzione di grandi serie sussistono correlazioni tra le singole fasi di produzione della catena di processo, da tenere presente in fase di concezione del processo e della linea di produzione.

Componenti cubici della trasmissione

Procedura di lavorazione e tolleranze

La catena cinematica di un veicolo si ripartisce nei moduli di motore, trasmissione e assi [1]. Questi moduli si compongono a loro volta di ulteriori gruppi di componenti, ad esempio il comando valvole e i relativi particolari. Componenti cubici classici della produzione della trasmissione sono da intendersi tra gli altri testata, basamento e scatola del cambio.

A causa dell'elevato numero di pezzi e della redditività ad esso correlata, i pezzi vengono prodotti come di consueto con profilo pressoché finale prima della lavorazione meccanica. Questo implica che la geometria primaria del pezzo sia già predefinita dal processo di fusione o anche dal processo di forgiatura, ad esempio per bielle o albero motore. Ciò si ripercuote sulla ripartizione del processo nelle lavorazioni ad asportazione del truciolo di pezzi cubici [5, 6].

L'importanza della lavorazione di foratura

La figura 4 mostra la ripartizione del processo sull'esempio di una testata. La percentuale di lavorazione di fresatura è ridotta rispetto alle lavorazioni di foratura o similari. Fatto evidente in quanto la geometria principale del pezzo è già stata realizzata in fase di colata eccetto poche superfici.

I fori desiderati non possono essere realizzati in un pezzo di questo tipo mediante colata o comunque solo con grande difficoltà e devono infatti essere integrati con operazioni di foratura nell'ambito della linea di produzione meccanica in cui prevale nettamente la relativa percentuale della procedura di produzione impiegata con asportazione del truciolo.

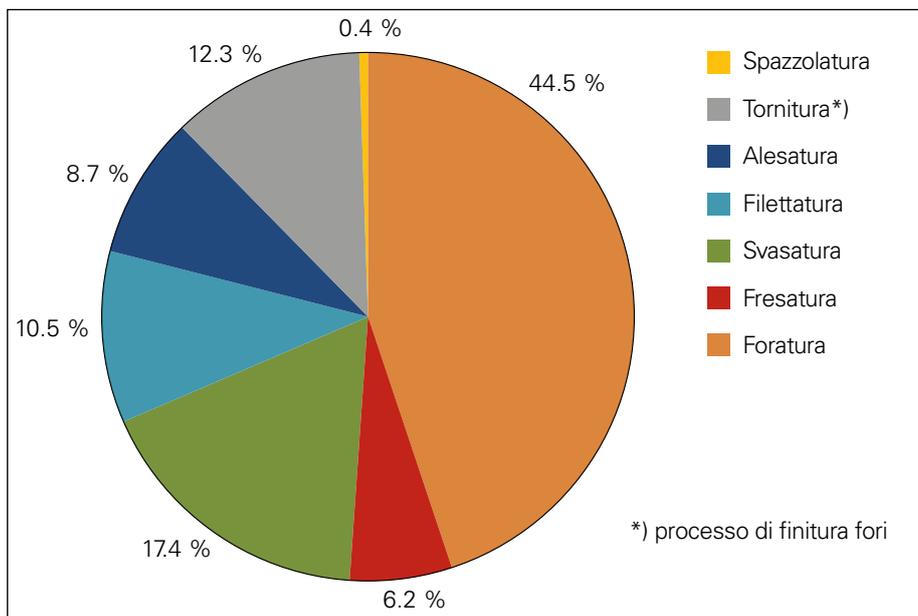


Figura 4: il processo di produzione impiegato e la relativa percentuale di produzione di una testata (secondo [5])

La ripartizione rappresentata consente anche di dedurre i movimenti degli assi necessari per la lavorazione. Sulla base delle operazioni di foratura la parte preponderante consiste nei movimenti dal posizionamento dell'utensile verso il pezzo e nel movimento di avanzamento e ritorno a un asse. Siccome i pezzi non presentano di solito alcuna superficie a forma libera, per le lavorazioni di fresatura oltre a un posizionamento è sufficiente il movimento nel piano tramite la traslazione di due assi lineari.

Il numero predominante di tolleranze di forma e posizione del pezzo da produrre è determinato dalle numerose lavorazioni di foratura. Oltre alle tolleranze del diametro, che sono influenzate in primo luogo dalla quota dell'utensile, ad esempio di un alesatore, è necessario ricercare nei disegni dei componenti anche indicazioni di tolleranza relative a posizione, distanza e profondità di foratura.



Figura 5: sistema di misura lineare HEIDENHAIN in un centro di lavoro orizzontale (foto: GROB-WERKE GmbH & Co. KG)

La stabilità dimensionale determinata dagli assi lineari

Il rispetto delle tolleranze definite è determinato tra l'altro dalla capacità degli assi lineari di una macchina di lavorazione di eseguire un posizionamento preciso (figura 5). In funzione del pezzo o del set di disegni considerato, è possibile trovare differenti valori di tolleranza e configurazioni di tolleranza per le caratteristiche di produzione.

La figura 6 mostra a titolo di esempio la configurazione delle tolleranze (tolleranze di posizione, di distanza e di profondità) per un basamento. Per l'esempio scelto è evidente che oltre il 30% circa delle tolleranze osservate è $\leq \pm 0,1$ mm. E anche per testate o scatole del cambio, sono previste caratteristiche di produzione per le quali i progettisti richiedono tolleranze $\leq \pm 0,1$ mm. A titolo di esempio sono qui indicate le tolleranze di posizione e profondità di fori nell'area del comando valvole di una testata o anche di distanze dei fori degli assi principali e di supporto collare sulla scatola del differenziale.

Sicurezza di processo nel rispetto di ridotti valori di tolleranza

Per realizzare l'esigenza descritta sopra incrementando la flessibilità, i produttori puntano tra l'altro a impiegare le macchine standard per la produzione. In questo modo non devono ricorrere per le singole dimensioni di produzione a macchine speciali supplementari. Questo implica a sua volta che, sebbene i valori di tolleranza siano $\leq \pm 0,1$ mm, questi sono tuttavia da rispettare con sicurezza di processo mediante centri di lavoro installati nelle linee di produzione.

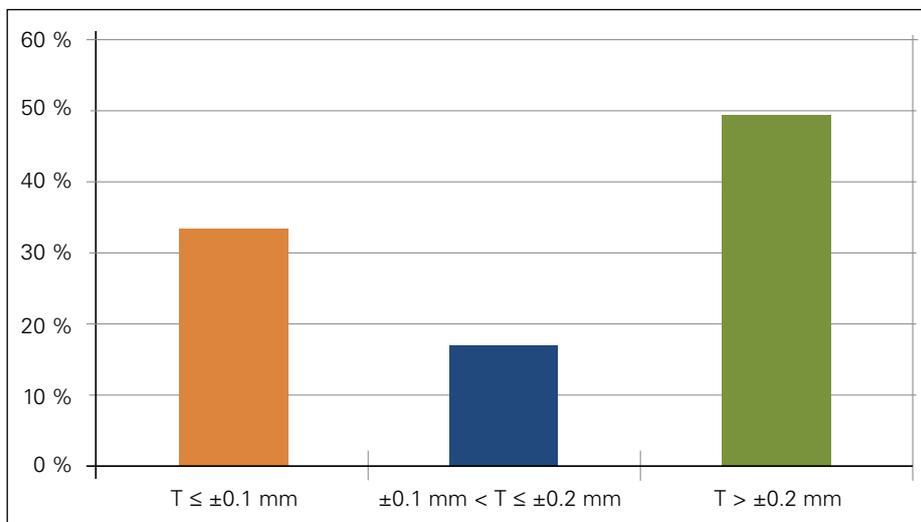


Figura 6: configurazione delle aree per tolleranze di posizione, distanza e profondità sull'esempio di un basamento

Componenti cubici della trasmissione

Le analisi di capacità forniscono caratteristiche in merito alla capacità della macchina e del processo

Rispetto ai requisiti dell'industria di costruzione di utensili e stampi i valori di tolleranza descritti sembrano effettivamente eccessivi. Occorre tuttavia assicurarsi che in primo luogo i valori dei pezzi degli autoveicoli siano conformi alle quote dei disegni del progettista. Le case costruttrici eseguono degli studi statistici di capacità per garantire che le macchine, ovvero il processo di produzione realizzato, siano in grado di rispettare entro i limiti previsti le tolleranze richieste dei disegni per un periodo di tempo prolungato e con la sicurezza definita [7].

Analisi di capacità per macchina e processo

Per il collaudo delle macchine utensili vengono ad esempio prodotti 50 pezzi sull'impianto o sulle singole macchine. Di seguito viene analizzata la ripartizione delle quote di tolleranza ottenute utilizzando metodi statistici. Per le analisi di capacità vengono definiti i cosiddetti parametri ovvero indici di capacità effettiva.

Per la determinazione della **capacità della macchina** vengono definiti gli indici C_m o C_{mk} , per il rilevamento della **capacità di processo** gli indici C_p o C_{pk} . Gli indici C_{mk} e C_{pk} considerano una ripartizione non centrata dei valori di tolleranza misurati, rilevati su componenti diversi.

Determinando la capacità della macchina si acquisiscono le conoscenze sul comportamento di dispersione a breve termine di una quota di tolleranza ottenuta con una macchina utensile in condizioni generali il più possibile costanti (\equiv analisi a breve termine). La capacità di processo ha l'obiettivo di determinare il comportamento di dispersione a lungo termine di una macchina alle condizioni del processo (\equiv analisi a lungo termine). In [7] sono disponibili le equazioni per calcolare gli

indici partendo dai valori di tolleranza misurati sui pezzi finiti e ulteriori informazioni.

L'equazione 1 descrive per il successivo impiego le grandezze C_m e C_p :

$$C_m, C_p = T / (6 \cdot s) \quad (\text{equazione 1})$$

T = campo di tolleranza secondo disegno
 s = errore standard

Il produttore predefinisce i parametri di capacità effettiva per le tolleranze rilevanti in termini di qualità. Le macchine di produzione fornite dal relativo costruttore devono perlomeno raggiungere tali indici in fase di collaudo. In riferimento al processo di collaudo viene definita con la determinazione degli indici una ulteriore limitazione dei valori di tolleranza indicati nel disegno del pezzo. La figura 7 illustra tale procedura sull'esempio della tolleranza $T = \pm 0,1$ mm tenendo conto del parametro di capacità della macchina C_m . Le case costruttrici di automobili indicano inoltre classi caratteristiche per le tolleranze: critica ($C_m = 2,00$), importante ($C_m = 1,67$) o poco importante ($C_m = 1,33$) in riferimento alla funzionalità del componente.

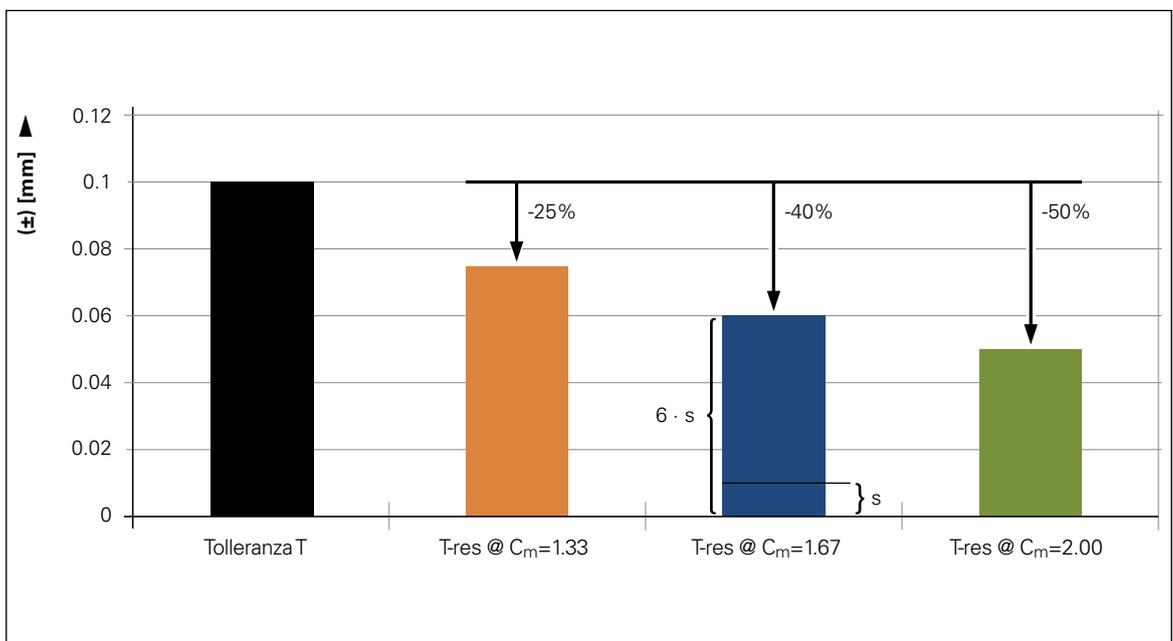


Figura 7: correlazione tra indicazione di tolleranza del disegno e indice di capacità C_m

Obiettivo: minima dispersione

Per una qualità del pezzo costantemente elevata o una quantità minima di scarti si punta a raggiungere la minima dispersione possibile delle quote di tolleranza ottenute e quindi un errore standard minimo.

L'equazione 1 può quindi essere interpretata anche nel seguente modo:

$$C_{m,misurato} = T / (6 \cdot s) \geq C_m \quad (\text{equazione 2})$$

oppure

$$6 \cdot s \leq T / C_m \quad (\text{equazione 3})$$

$C_{m,misurato}$ corrisponde all'indice che risulta dalla misurazione di una quota di tolleranza ad es. 50 durante il collaudo della macchina dei pezzi prodotti e dell'errore standard calcolato su tale base.

Analisi di capacità per verificare il rispetto della dispersione massima accettata

Dall'equazione 2 è evidente che l'indice di capacità risultante dalle misurazioni aumenta al diminuire dell'errore standard. Questo valore ($C_{m,misurato}$) risultante dalle misurazioni sui pezzi reali deve essere a sua volta maggiore o uguale al valore C_m prescritto dal produttore. Considerato ciò, l'indice di capacità predefinito corrisponde all'errore standard massimo accettato predefinito da parte del produttore per una quota tollerata (equazione 3 e figura 7).

Per l'esempio rappresentato in figura 7, con $C_m = 1,67$ questo significa che per la tolleranza originaria di $\pm 0,1$ mm il 99,73% di tutti i valori misurati sui diversi pezzi di una quota di tolleranza deve rientrare nel campo di $\pm 0,06$ mm. L'errore standard accettato deve pertanto presentare soltanto un valore di $\max \pm 10 \mu\text{m}$. Raggiungere tali valori rappresenta una grande sfida per i centri di lavoro concatenati della produzione in grande serie che vale la pena di affrontare.



Limiti di errore della lavorazione

Variabili di errore nel processo e relativi effetti

Nelle pagine precedenti sono stati descritti gli ordini di grandezza delle tolleranze sui pezzi della catena cinematica delle autovetture. Ci si domanda a questo punto quale sia la percentuale della tolleranza disponibile di una caratteristica di produzione sprecata dalle diverse tipologie di errore presenti.

Se il totale degli errori è maggiore della tolleranza a disposizione, la macchina ovvero il processo non è in grado di soddisfare la funzione di lavorazione desiderata. Di seguito saranno quindi valutati i limiti di errore che possono verificarsi su una macchina di lavorazione, ad esempio a causa del serraggio del pezzo o della deriva termica assiale dell'asse. L'obiettivo è quello di stimare il margine di tolleranza residuo mettendo a confronto la tolleranza disponibile con i limiti di errore esistenti. Tale margine consente alle macchine e al processo di intercettare gli influssi di produzione imprevedibili o difficilmente controllabili.

Indice di tolleranza del serraggio del pezzo

Le macchine di lavorazione vengono di norma caricate in modo automatizzato con unità di carico speciali, ad esempio caricatori a portale. Per poter lavorare un pezzo è necessario posizionarlo e fissarlo in un'attrezzatura di bloccaggio della macchina. Poiché tutto questo deve essere eseguito senza

alcun intervento manuale, il posizionamento viene di norma eseguito mediante appositi perni integrati nelle attrezzature di bloccaggio. Questo significa che tra i fori di posizionamento di ciascun pezzo e i perni di posizionamento delle singole attrezzature di bloccaggio della linea di produzione si crea una interfaccia meccanica con tolleranza di accoppiamento.

Secondo l'indicazione del disegno è disponibile per ciascun pezzo lavorato sulla linea di produzione la stessa tolleranza dei fori di posizionamento. La quota realmente prodotta varia tuttavia da pezzo a pezzo. Lo stesso vale anche per i singoli perni di posizionamento dell'attrezzatura di bloccaggio. Non è quindi possibile prevedere un errore di posizionamento sempre costante. I campi di tolleranza massimi predefiniti per il foro di posizionamento e il perno di posizionamento dovrebbero tuttavia essere rispettati al fine di non produrre scarti. Questo consente di stimare un limite di errore.

Per i componenti cubici descritti della catena cinematica per autovetture (testata, albero motore o scatola del cambio) vengono spesso eseguiti fori di posizionamento di $\varnothing 12$ mm. Il serraggio del pezzo nell'attrezzatura di bloccaggio non è desiderato in quanto questo può

essere causa di sovraccarico del sistema di caricamento o di errori di serraggio del pezzo e quindi di un eventuale fermo della linea di produzione. Per evitare tutto questo si adotta quindi un accoppiamento $\varnothing 12$ H7/js6. Con tali dati risulta il seguente limite di errore massimo per il posizionamento del pezzo nei dispositivi di serraggio:

$$\text{Foro di posizionamento} \\ \varnothing 12 \text{ H7} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0,018 \\ 0 \end{matrix} \text{ mm} \quad (\text{equazione 4})$$

$$\text{Perno di posizionamento} \\ \varnothing 12 \text{ js6} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0,0055 \\ -0,0055 \end{matrix} \text{ mm} \quad (\text{equazione 5})$$

$$\varnothing (12,018 - 11,9945) \text{ mm} \\ \equiv \pm 11,75 \text{ } \mu\text{m} \quad (\text{radiale}) \quad (\text{equazione 6})$$

Per la realizzazione di caratteristiche dalle tolleranze esigue, prima del serraggio i pezzi vengono spostati in parte sopra i corrispondenti cilindri nel dispositivo di serraggio in una direzione definita. Ciò significa che il pezzo viene compresso in posizione radiale nei perni di posizionamento affinché partendo dall'asse centrale del foro si presenti al massimo la metà del limite di errore ($\equiv \pm 5,88 \text{ } \mu\text{m}$). Siccome le unità di spostamento rendono tuttavia il dispositivo di serraggio spesso più complesso e quindi più costoso, non vengono predisposte in tutte le stazioni di lavorazione.

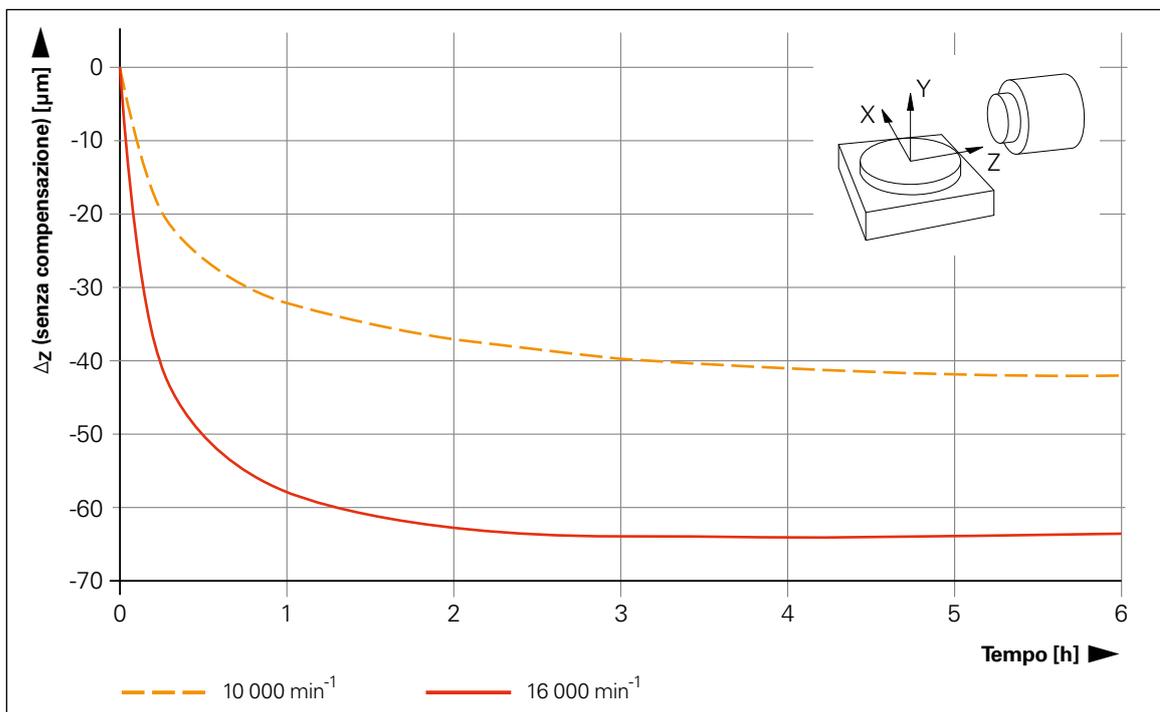


Figura 8: deriva dell'asse Z misurata, non compensata dovuta al calore del mandrino di lavoro

Tolleranze per il cambio utensile

Per quanto riguarda l'utensile, anche durante il suo cambio emergono imprecisioni in funzione dell'interfaccia utensile impiegata. Nei centri di lavoro attuali delle linee di produzione descritte in precedenza trovano di norma impiego mandrini di lavoro e utensili con attacco HSK. In [8] sono indicate le principali accuratèzze di ripetibilità del collegamento HSK con $< 1 \mu\text{m}$ (assiale) e $< 3 \mu\text{m}$ (radiale) ($\cong \pm 0,5 \mu\text{m}$ assiale; $\pm 1,5 \mu\text{m}$ radiale).

Deriva indotta termicamente del naso del mandrino

La deriva assiale sul naso del mandrino che si presenta durante la lavorazione riveste un ruolo determinante per i fori con quote di profondit  definita come pure nella fresatura frontale quando due superfici parallele al piano devono essere realizzate a una distanza definita, ad esempio per la superficie della camera di combustione e della copertura nella testata. Durante la lavorazione soprattutto lo sviluppo di calore del mandrino influisce fortemente sulla dilatazione dell'albero del mandrino e della struttura dell'asse del mandrino. Di norma sulle macchine di produzione descritte sopra vengono impiegati elettromandrini. Le diverse condizioni di lavorazione comportano potenze variabili e quindi carichi termici differenti generati dal sistema mandrino integrato e dai cuscinetti. Siccome l'elettromandrino   altamente integrato nella struttura degli assi della macchina, il calore viene disperso tra l'altro anche tramite l'alloggiamento dell'elettromandrino e la superficie di montaggio della struttura degli assi della macchina. Pertanto l'elettromandrino   di norma collegato a un gruppo di raffreddamento.

La figura 8 mostra la deriva dell'asse Z nella fase di riscaldamento come risultato delle misurazioni eseguite per la deriva su un centro di lavoro dotato di elettromandrino.   raffigurata la deriva del Tool Center Point relativamente alla tavola della macchina che risulta dal numero di giri del mandrino a vuoto di 10000 min^{-1} o 16000 min^{-1} . Le misurazioni non includono tuttavia i carichi termici supplementari e la risultante deriva a causa delle sollecitazioni del mandrino durante il processo di taglio. A seconda del carico e del numero di giri del mandrino di lavoro si devono tuttavia prevedere valori di deriva nettamente crescenti rispetto al numero di giri a vuoto.

Partendo dalla curva di misura illustrata in figura 8 con un carico di numero di giri a vuoto di 16000 min^{-1} risulta una deriva termica del naso del mandrino relativamente alla tavola della macchina di ca. $64 \mu\text{m}$ in direzione Z. Di frequente la deriva termica viene ulteriormente ridotta anche dall'uso di modelli di compensazione memorizzati nel controllo numerico, ottenendo cos  una riduzione della deriva rappresentata pari all'80% circa. Se applicato alla curva di misura raffigurata, questo implica un valore residuo di $12 \mu\text{m}$ ($\cong \pm 6 \mu\text{m}$).

Limiti di errore della lavorazione

Variabili di errore derivanti dalla determinazione della posizione

Le ulteriori considerazioni richiedono una differenziazione relativamente alla determinazione del valore reale di posizione su un asse di avanzamento impiegando una vite a ricircolo di sfere. La differenza principale deriva in tal caso dalla posizione di montaggio del sistema di misura degli assi e dalla sua integrazione nell'anello di regolazione dell'asse di avanzamento. La figura 9 mostra la configurazione di un asse di avanzamento in Semi-Closed Loop rispetto a un asse con regolazione in Closed Loop.

Semi-Closed Loop e Closed Loop

Semi-Closed Loop significa che l'anello di regolazione della posizione dell'asse di avanzamento è collegato tramite il trasduttore rotativo del motore di avanzamento. Il trasduttore rotativo rileva in tal caso la posizione angolare dell'albero motore di avanzamento e non la posizione della slitta assiale da posizionare. La posizione della slitta è determinata dal calcolo della posizione angolare con il passo della vite a ricircolo di sfere. Si presuppone pertanto che la correlazione tra posizione angolare, passo della vite e posizione della slitta sia costante durante il funzionamento dell'asse di avanzamento ovvero della macchina di lavorazione. Se questa correlazione cambia, ad esempio a causa della dilatazione indotta

termicamente o dell'usura della vite a ricircolo di sfere, la posizione calcolata è errata. La regolazione e il trasduttore rotativo sono per così dire "ciechi" rispetto alle variazioni della catena cinematica dell'asse di avanzamento.

Durante il funzionamento dell'asse di avanzamento in Closed Loop, la posizione della slitta dell'asse di avanzamento viene misurata mediante un sistema di misura lineare e restituita come valore reale di posizione nell'anello di regolazione di posizione dell'asse. Gli errori che si verificano durante il funzionamento come la deriva termica della vite a ricircolo di sfere vengono rilevati sulla slitta e corretti mediante la regolazione degli assi.

Errori di posizione sistematici e casuali

Nel corso del posizionamento di assi di avanzamento si verificano imprecisioni ([9], [10]). Possono presentarsi errori sistematici riproducibili con le stesse condizioni generali e quindi compensabili. Tuttavia si verificano anche errori casuali (ampiezza della zona di lavoro) che non sono riproducibili ma rispecchiano un comportamento prettamente statistico. L'effetto degli errori casuali sul posizionamento di un asse della macchina è descritto dalla variabilità di posizione.

Se la macchina deve ad esempio eseguire un foro con una tolleranza di posizione nel pezzo, deve essere considerata anche la variabilità di posizione come influenza di errore non riproducibile. Le misurazioni eseguite dimostrano che gli ordini di grandezza tipici per la variabilità di posizione con assi di avanzamento di lunghezza compresa tra 500 mm e 800 mm presentano un valore di ca. $2 \mu\text{m}$ ($\cong \pm 1 \mu\text{m}$) se gli assi vengono azionati in Semi-Closed Loop.

Il collegamento di un sistema di misura lineare alla slitta assiale e l'utilizzo di misure dirette di posizione nell'anello di regolazione eliminano gli effetti dell'attrito nella catena cinematica e nelle guide lineari per il posizionamento. Le misurazioni evidenziano che la variabilità di posizione impiegando una regolazione in Closed Loop può essere tipicamente ridotta del 40% - 50% rispetto al Semi-Closed Loop ($\cong \pm 0,5 \mu\text{m}$).

Riduzione della deriva termica

Le misurazioni descritte nelle schede tecniche "Accuratezza del posizionamento" e "Accuratezza delle lavorazioni delle macchine utensili" mettono in evidenza che un asse di avanzamento azionato in Semi-Closed Loop con vite a ricircolo di sfere e campo di traslazione di 800 mm

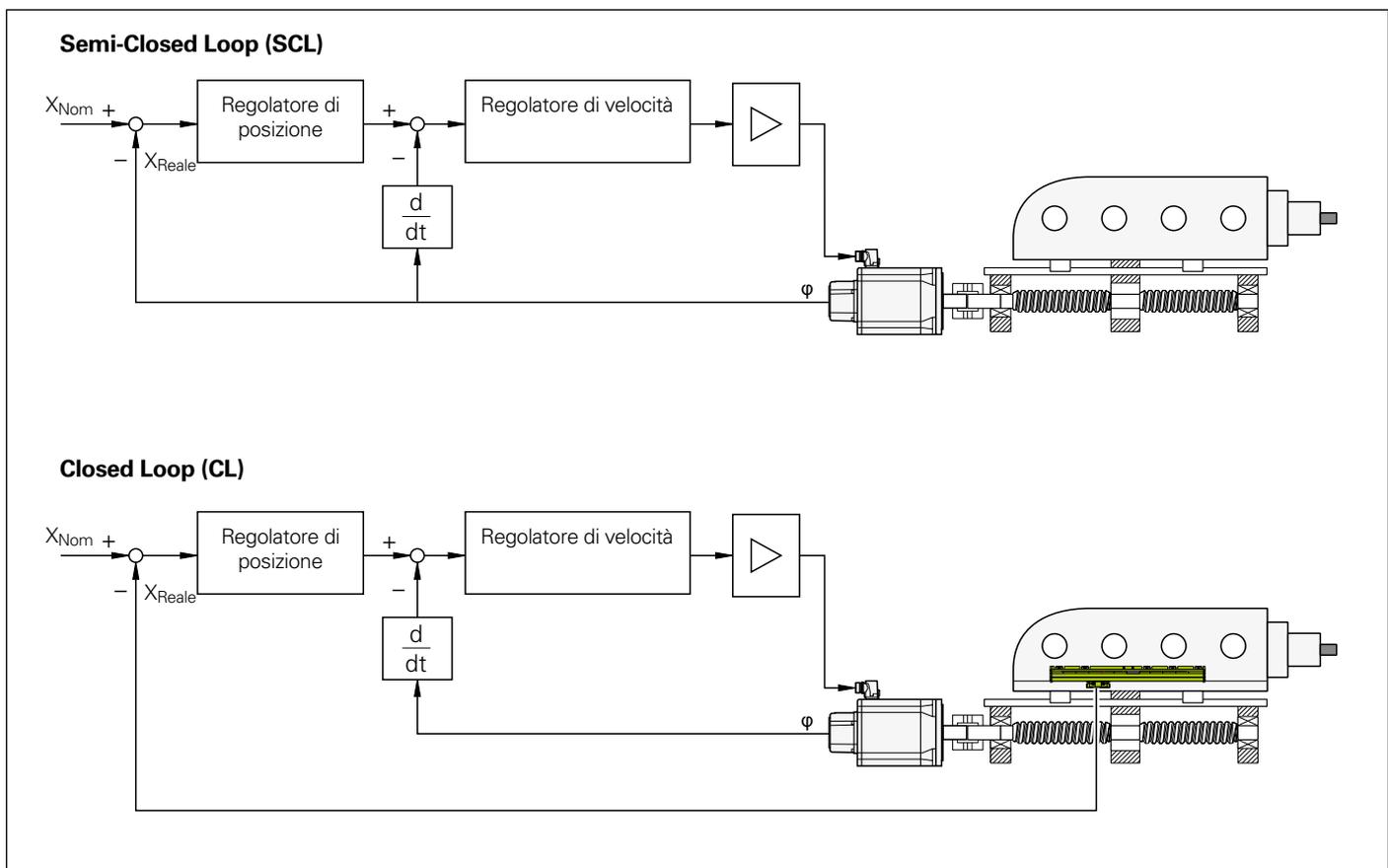


Figura 9: principio di Semi-Closed Loop e Closed Loop

	Limiti di errore stimati [μm]	
	Semi-Closed Loop	Closed Loop
Posizionamento serraggio pezzo	$\pm 11,75$ $\pm 5,88$ (con unità di spostamento)	
Accuratezza cambio utensile (HSK)	$\pm 0,5$ (assiale) $\pm 1,5$ (radiale)	
Deriva termica asse mandrino di lavoro (compensata)	± 6	
Variabilità di posizione (500 mm < X \leq 800 mm)	± 1	$\pm 0,5$
Deriva termica per riscaldamento della vite a ricircolo di sfere	± 20 ± 10 (vite a ricircolo di sfere raffreddata)	± 1
Errore di misura lineare del sistema di misura a coordinate	$\pm 1,5$	

Tabella 1: limiti di errore stimati per Semi-Closed Loop e Closed Loop

può presentare una deriva termica di oltre $40 \mu\text{m}$ ($\cong \pm 20 \mu\text{m}$) ([11], [12]). Se si cerca la soluzione di questo problema nel raffreddamento della vite a ricircolo di sfere, è possibile ottenere una riduzione della deriva del 50% impiegando un gruppo di raffreddamento di qualità (stabilità della temperatura $\leq 1 \text{ K}$). Oltre all'integrazione del gruppo di raffreddamento devono essere previsti anche condotti supplementari per l'alimentazione e lo scarico del refrigerante dei singoli assi di avanzamento e giunti rotanti per il trasferimento del liquido refrigerante nei sistemi con viti a ricircolo di sfere.

Una riduzione nettamente maggiore della deriva termica di un asse con vite a ricircolo di sfere può essere ottenuta impiegando la regolazione in Closed Loop. La deriva del mandrino con vite a ricircolo di sfere è rilevata dal sistema di misura lineare e corretta dalla regolazione degli assi. La deriva termica residua è quindi pari a $\leq 2 \mu\text{m}$ ($\cong \pm 1 \mu\text{m}$) [11].

La tabella 1 riepiloga i limiti di errore precedentemente analizzati e li mette a confronto per un asse di avanzamento con Semi-Closed Loop e Closed Loop. Per stimare la parte di una tolleranza da

realizzare che viene sottratta dai limiti di errore elencati, è necessario considerare la posizione del pezzo e le caratteristiche di produzione tollerate nell'area di lavoro. Infatti, soltanto gli errori si prendono una parte del budget di tolleranza disponibile della quota da realizzare.

Influenze della prova del pezzo

La valutazione dell'accuratezza dimensionale dei pezzi viene di norma eseguita in idonee sale metrologiche mediante sistemi di misura a coordinate. Un sistema di misura a coordinate assomiglia per la sua configurazione geometrica a una macchina di lavorazione ed è soggetto anch'esso agli errori, determinando scostamenti di misura nelle quote del pezzo da valutare. La dimensione degli scostamenti di misura è essenzialmente influenzata da:

- oscillazioni termiche nella sala metrologica,
- errori geometrici del sistema di misura a coordinate,
- errori di tastatura,
- strategia di misura scelta,
- errori di serraggio del pezzo ed errori dell'operatore,
- ...

Siccome lo scostamento di misura residuo deve essere nettamente inferiore alla tolleranza di misura da valutare, i sistemi di misura a coordinate vengono di norma utilizzati in sale climatizzate. Inoltre, per la produzione e il montaggio dei sistemi di misura a coordinate si punta specificatamente sull'elevata precisione e vengono impiegati sistemi di misura lineari per la regolazione in Closed Loop.

Adottando compensazioni computerizzate si ottiene una ulteriore riduzione degli scostamenti residui (ad esempio flessione del tastatore in fase di tastatura). Per la misurazione attendibile di una quota lineare tollerata, un sistema di misura a coordinate dovrebbe presentare uno scostamento lineare di ca. 10 volte inferiore alla tolleranza da valutare. Per la tolleranza descritta nel disegno del pezzo di $\pm 0,1 \text{ mm}$ questo implica $\pm 10 \mu\text{m}$ o oltre. Per poter controllare con sicurezza anche tolleranze inferiori e predisporre macchine di misura di impiego universale, ad esempio in una sala metrologica centralizzata, vengono impiegati nella pratica sistemi di misura a coordinate che presentano errori di misura lineari dell'ordine di $\pm 1,5 \mu\text{m}$.

Tolleranza del pezzo vs. limiti di errore

Maggiore margine di tolleranza grazie al Closed Loop

Il confronto tra la tolleranza del pezzo richiesta nelle pagine introduttive e i limiti di errore stimati è illustrata sulla base di una geometria esemplificativa. La figura 10 rappresenta schematicamente i fori per il supporto di un albero in una scatola del cambio.

Per ridurre i tempi passivi e quindi anche il tempo ciclo, entrambi i diametri dei fori possono essere realizzati con un utensile combinato. I taglienti per realizzare le quote del diametro e Z vengono applicati su un utensile. È rappresentato anche uno dei necessari fori di posizionamento per l'allineamento del pezzo. La direzione di tolleranza del foro di posizionamento è rivolta nella stessa direzione delle quote di produzione tollerate Z_1 e Z_2 . Questo non è pertinente per la quota Y .

Errori da considerare

L'errore che può risultare sulla base del posizionamento del pezzo nel dispositivo di serraggio va pertanto considerato per la realizzazione di Z_1 e Z_2 . Siccome durante questa operazione di lavorazione vengono impiegati sulla macchina anche altri utensili in diversi punti del pezzo, le imprecisioni del cambio utensile vanno incluse nel calcolo del budget di errore. Sono inoltre da considerare gli errori presenti in direzione delle quote Z_1 e Z_2 a causa della deriva termica dell'asse del mandrino di lavoro, della variabilità di posizione durante il posizionamento dell'asse Z in direzione di lavorazione e la deriva termica in direzione dell'asse Z per effetto del riscaldamento della vite a ricircolo di sfere. Gli errori di misura lineari del sistema di misura a coordinate confluiscono nella considerazione del budget di errore indipendentemente dalla direzione di serraggio del pezzo sulla macchina di lavorazione.

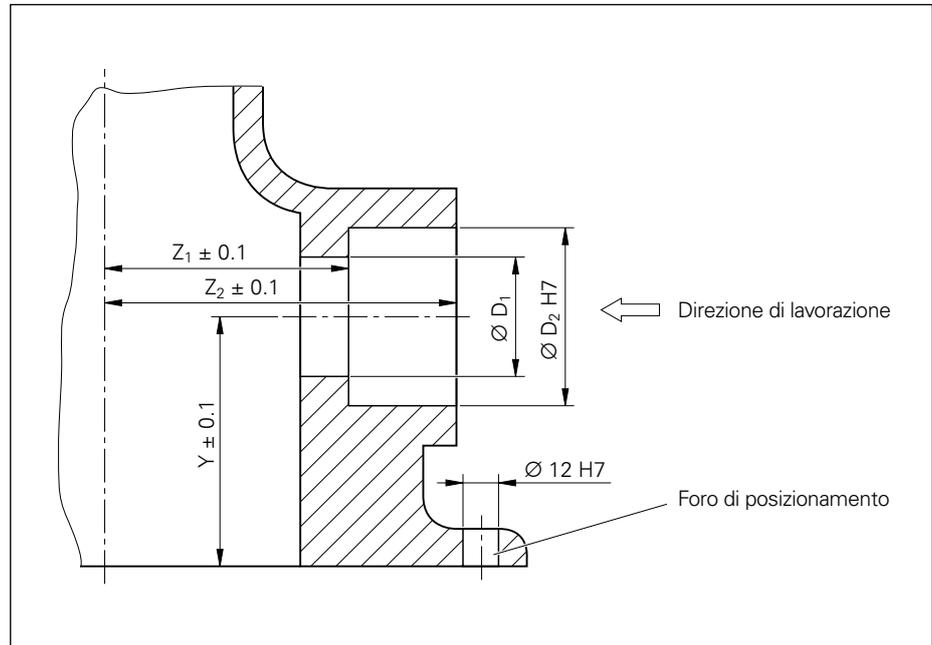


Figura 10: fori di supporto nella scatola del cambio (geometria esemplificativa)

Supponendo che le quote di produzione tollerate siano associate a un indice medio di capacità della macchina di $C_m = 1,67$, è possibile paragonare il valore del consumo della tolleranza da parte degli errori stimati nel peggiore dei casi. La figura 11 mostra ciò per le tolleranze delle quote Z_1 e Z_2 dapprima sull'esempio della regolazione in Semi-Closed Loop.

Si deduce che il maggiore uso della tolleranza disponibile è da ricondurre alla deriva termica incontrollata del mandrino con vite a ricircolo di sfere. La quantità rimanente al termine della codifica della tolleranza disponibile (margine di tolleranza) è di soli $\pm 19 \mu\text{m}$.

Meno errori, maggiore margine di tolleranza

Ne risulta che la riduzione delle grandezze di errore comporta direttamente un incremento del margine di tolleranza. L'impiego di sistemi di misura lineari sugli assi lineari, ad esempio il funzionamento in Closed Loop, è in grado di ridurre in particolare la deriva indotta termicamente della vite a ricircolo di sfere (figura 12). Ne consegue un netto aumento del margine di tolleranza pari a $\pm 39 \mu\text{m}$.

Come descritto in precedenza nella produzione di grande serie scaturiscono correlazioni tra le singole fasi produttive della catena di processo. I limiti di errore riportati nella tabella 1 indicano soltanto una parte delle variabili potenziali di errore che possono verificarsi sull'intera catena di produzione di un componente. L'obiettivo consiste pertanto nel raggiungere all'interno di una singola macchina di lavorazione variabili di errore minime al fine di creare un margine di tolleranza massimo per errori difficilmente influenzabili all'interno del processo.

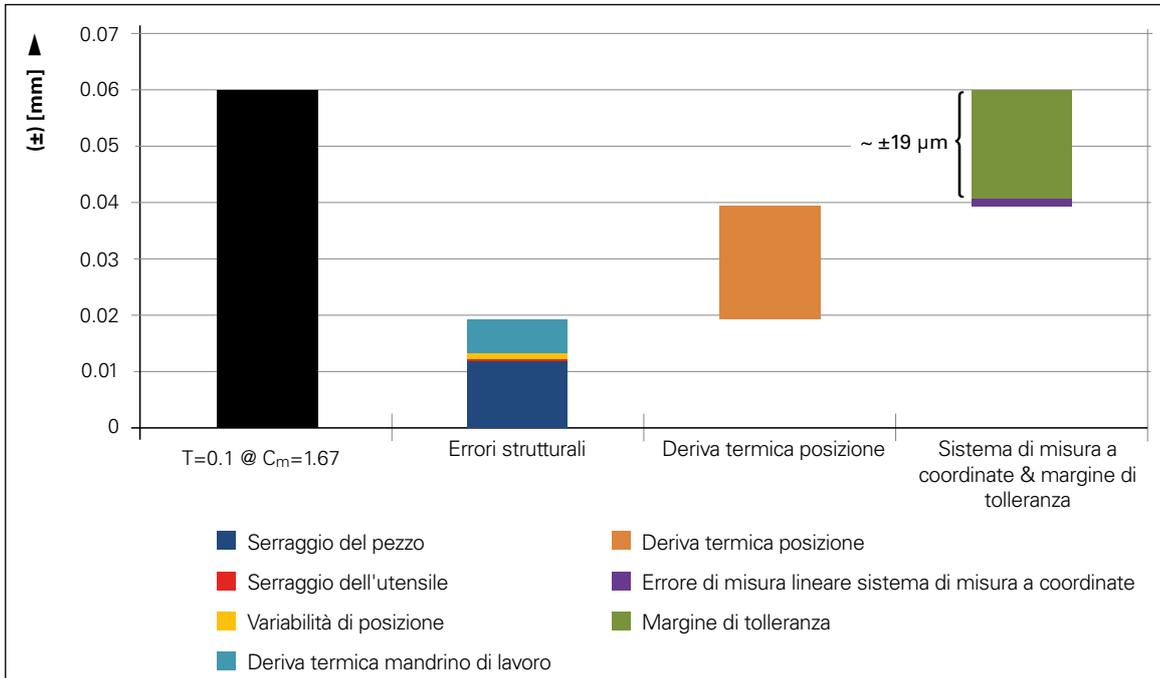


Figura 11: tolleranza disponibile ($\pm 0,1$ mm) con $C_m = 1,67$ vs. limiti di errore in Semi-Closed Loop

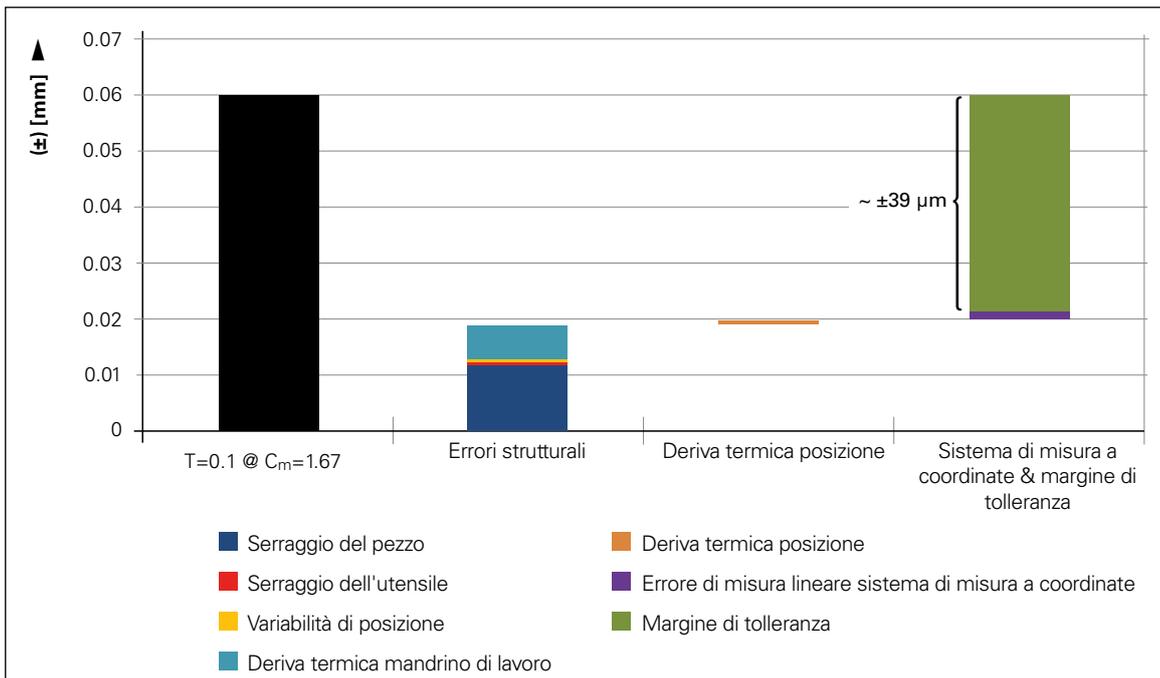


Figura 12: tolleranza disponibile ($\pm 0,1$ mm) con $C_m = 1,67$ vs. limiti di errore in Closed Loop

Influssi difficilmente controllabili all'interno della catena di produzione possono essere:

- oscillazioni della temperatura del capannone,
- oscillazione della temperatura del lubrorefrigerante,
- oscillazioni della temperatura del pezzo e quindi la dilatazione indotta termicamente del pezzo durante il trasporto tra le macchine,
- deformazioni statiche sul pezzo a causa delle forze di serraggio e delle tolleranze di serraggio variabili dei singoli dispositivi di serraggio della linea di produzione,
- ritardo termico di quote di tolleranza di temperature differenti del pezzo sulle

singole macchine (produzione delle quote di tolleranza) e nella sala metrologica (valutazione delle quote di tolleranza),

- allontanamento dell'utensile a causa della lavorazione preliminare imprecisa (ad es. allontanamento di un alesatore a causa delle oscillazioni di tolleranza della preforatura),
- trucioli (ad es. blocco di trucioli, trucioli nel preforo ecc.),
- usura dell'utensile (ad es. forze di taglio variabili, allontanamento dell'utensile ecc.)
- ...

Senza alcuna pretesa di esaustività, questo elenco mostra tuttavia chiaramente che la concezione di un processo di produzione per la lavorazione meccanica automatizzata di componenti della catena cinematica per le autovetture non è banale. Esistono molte fonti di errore possibili che influiscono sulla qualità di produzione, sul tempo di produzione e sui costi di produzione.

Tolleranza del pezzo vs. limiti di errore

Incremento della produttività grazie al margine di tolleranza

Per avere un'idea di ciò che significa un margine di tolleranza di $\pm 19 \mu\text{m}$ in Semi-Closed Loop ovvero di $\pm 39 \mu\text{m}$ in Closed Loop, si considera di seguito l'ordine di grandezza dell'usura dell'utensile. Mentre per pezzi in alluminio, nonostante il bordo tagliente apparentemente affilato, la formazione di bava sul pezzo comporta spesso il cambio dell'utensile, subentra in particolare per la lavorazione di pezzi in ghisa grigia (ad es. basamento) o getto in acciaio resistente alle alte temperature (ad es. turbocompressore dei gas di scarico) una usura elevata dell'utensile. Questa si evidenzia di norma nella larghezza della rigatura d'usura (VB) che aumenta nel tempo (figura 13).

L'usura dell'utensile deve essere consentita

A causa della geometria del tagliente (angolo di spoglia α e angolo di taglio γ) all'aumentare della larghezza della rigatura d'usura risulta un corrispondente offset del bordo del tagliente (SV), che riduce direttamente il margine di tolleranza. L'offset del bordo del tagliente può essere calcolato secondo [13] in funzione della larghezza della rigatura d'usura VB e di α e γ come segue:

$$SV = \frac{VB \cdot \tan \alpha}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \gamma} \quad (\text{equazione 7})$$

Supponendo l'attuale stato della configurazione della linea con centri di lavorazione concatenati, i costi degli utensili per la lavorazione meccanica di testate, basamenti o scatole del cambio

variano dall'8% al 12% rappresentando una quota considerevole dell'investimento dell'impianto complessivo. Questo comprende sia i componenti dell'utensile non soggetti ad usura (portautensili, alesatori ecc.) che soggetti a usura (placchette, punte ecc.). La quota dipende tra l'altro dal numero degli utensili sostitutivi impiegati (in parte fino a tre set) e dai materiali taglienti impiegati (ad es. taglienti PCD per la lavorazione dell'alluminio).

Per risparmiare i costi correnti degli utensili, questi dovrebbero presentare una durata possibilmente elevata. Una determinata quota di usura utensile deve essere pertanto ammessa prima di eseguire un cambio utensile o un'affilatura.

Per utensili in metallo duro e la lavorazione di finitura rilevante per il raggiungimento della tolleranza, come grandezza indicativa per la larghezza della rigatura d'usura è previsto in [14] il valore VB = da $200 \mu\text{m}$ fino a $400 \mu\text{m}$. Per ottenere un ordine di grandezza per l'offset del bordo tagliente, vengono applicati i seguenti angoli tagliente tipici: $\alpha = 5^\circ$ e $\gamma = 4^\circ$. Impiegando l'equazione 7 risulta un campo per l'offset del bordo tagliente da $18 \mu\text{m}$ a $35 \mu\text{m}$.

Partendo da un bordo affilato al centro della zona di tolleranza, in Semi-Closed Loop i valori di usura minimi dell'utensile richiedono la maggiore parte del margine di tolleranza residua. Tenendo presente gran parte dei margini di tolleranza con l'impiego

dei sistemi di misura lineari è possibile lavorare più pezzi prima di dover eseguire una correzione dell'usura utensile. Questo a sua volta implica meno interventi di prova sui pezzi per rilevare il momento giusto della correzione o del cambio utensile.

I cambi utensile interrompono la produzione

Il cambio di un utensile con cui deve essere realizzata una quota di tolleranza critica, richiede spesso un pezzo da controllare direttamente e da refertare come idoneo (pezzo OK). Per prevenire gli scarti, la macchina di lavorazione si ferma durante la misurazione di questo primo pezzo realizzato con il nuovo utensile. La macchina viene quindi abilitata soltanto se il pezzo realizzato e misurato è un componente OK. Il tempo di attesa fino all'abilitazione deve essere equiparato alla perdita di pezzi, in quanto va perso tempo produttivo sulla macchina.

Potendo ridurre la complessità di prova e correzione e incrementare i tempi di lavorazione della macchina, nella produzione di grandi serie un ingente margine di tolleranza contribuisce ad aumentare la produttività. Per analogia, quando si è alla guida di un autoveicolo, un percorso con una carreggiata larga richiede minime correzioni da parte del conducente per rimanere in strada. Se le carreggiate sono strette sono invece necessari maggiori interventi di correzione.

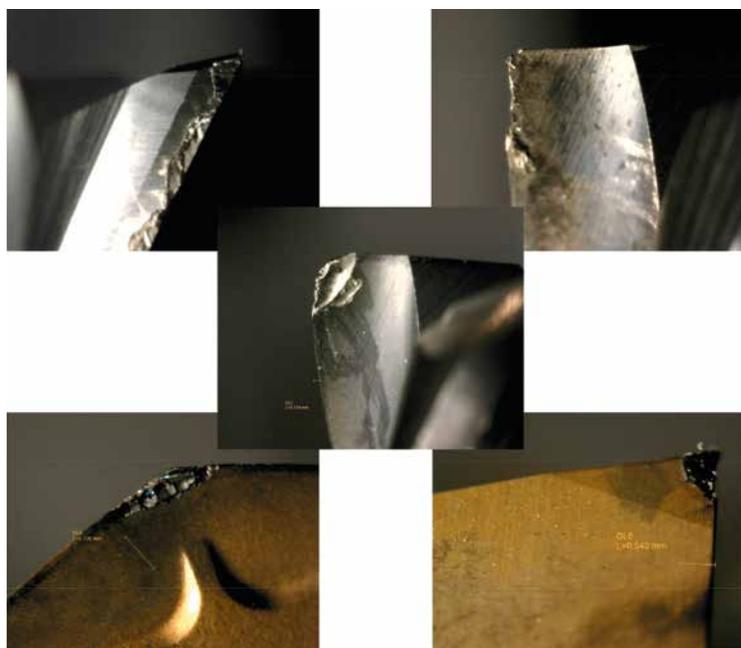
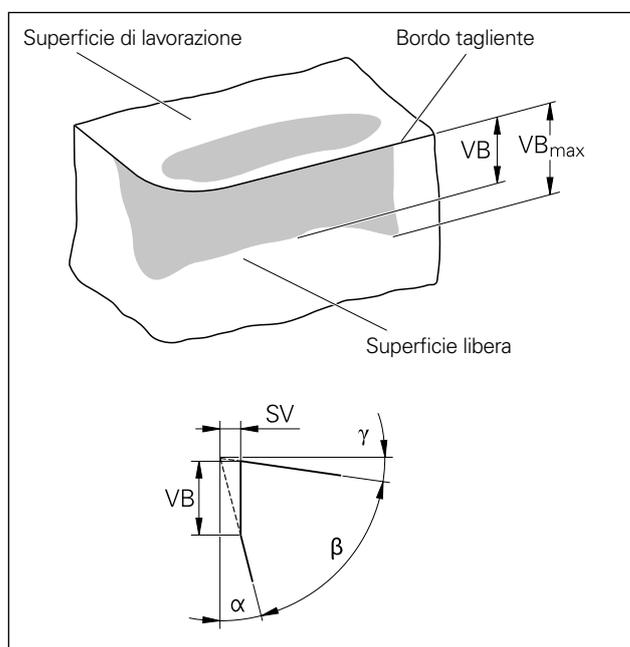


Figura 13: larghezza delle rigature di usura (VB) e offset del bordo tagliente (SV) – disegni secondo [13] e [14]

Riepilogo

Accanto alla sfida per poter reagire con flessibilità alle oscillazioni di domanda dei mercati di vendita per autoveicoli, continueranno ad aumentare in futuro i requisiti relativi alla riduzione delle emissioni di scarico e ai consumi di carburante dei veicoli imposte dai legislatori e dai clienti finali. Un modo per far fronte a tali esigenze consiste nel ridurre le perdite per attrito nei componenti della catena cinematica. Questo a sua volta richiede tolleranze del pezzo e valori caratteristici delle superfici di maggiore qualità.

Con la lavorazione del pezzo sequenziale presente nella produzione automatizzata di grandi serie esistono correlazioni tra le singole fasi di produzione della catena di processo. Per rispettare con sicurezza le tolleranze del pezzo nel processo globale, l'obiettivo è quello di consumare una quota il più possibile ridotta delle tolleranze disponibili con le singole macchine di lavorazione. Il margine di tolleranza residuo è disponibile per influssi di processo difficilmente controllabili e dovrebbe pertanto essere il maggiore possibile.

L'impiego di sistemi di misura lineari negli assi di avanzamenti dei centri di lavoro contribuisce a incrementare l'accuratezza della macchina e di conseguenza il margine di tolleranza. Le complesse operazioni di prova e le perdite di pezzi possono essere ridotte incrementando così la produttività.

Bibliografia

- [1] Kasper, G.: *Challenges for Future Powertrain Production – Insights to Global Manufacturing*. 12th Powertrain Manufacturing Conference, Darmstadt, September 26th – 27th, 2013.
- [2] Abele, E.; Hueske, B. und Kuhn, S.: *Overall Equipment Flexibility – Entwicklung einer Methodik zur Messung der Gesamtanlagenflexibilität für die spanende Fertigung*. ZWF 103 Nr. 5, 2008.
- [3] Dörr, J.: *Powertrain Machine Tool Concepts: Comparison from an Economic Point of View*. 10th Powertrain Machining Conference, Fellbach, November 11th – 12th, 2009.
- [4] Abele, E.; Wiegel, F.; Kuske, P. und Hueske, B.: *Kleine Schritte für große Flexibilität – Eine Methodik zur monetären Beurteilung der Expansionsflexibilität von Fertigungssystemen*. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100, 2010.
- [5] Stürenburg, B.: *Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen*. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, Band 02/2009.
- [6] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J. und Tschannerl, M.: *Untersuchungen an langen VHM-Spiralbohrern – Einfluss der Werkzeuglänge auf das dynamische Verhalten von Vollhartmetallschneidbohrern*. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97, 2007.
- [7] VDMA 8669 : 1999-01: *Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme spanender Werkzeugmaschinen*. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), 1999.
- [8] MAPAL: *MAPAL Kompetenz – Spanntechnik*. Firmenschrift MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG, Bestell-Nr. 10138532 | V2.1.0, 2015.
- [9] DIN ISO 230-2 : 2000-05: *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 2: Bestimmung der Positionierungsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2000.
- [10] VDI/DGQ 3441: *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure / Deutsche Gesellschaft für Qualität, März 1977.
- [11] HEIDENHAIN: *Technische Information – Genauigkeit von Vorschubachsen*. März 2006.
- [12] HEIDENHAIN: *Technische Information – Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. September 2011.
- [13] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M. und Tikal, F.: *Zerspantechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Vieweg + Teubner Verlag, 12. Auflage, 2008.
- [14] GARANT: *GARANT ToolScout – Zerspandhandbuch*. ISBN 3-00-016882-6, veränderter ND 04/2013.

Sistemi di misura lineari per macchine utensili

Per l'elevata accuratezza di posizionamento delle macchine utensili sono indispensabili sistemi di misura lineari per il feedback di posizione. Sono in grado di rilevare direttamente e immediatamente il percorso di traslazione dell'asse di avanzamento. Le imprecisioni introdotte dagli elementi di trasmissione meccanici non hanno quindi alcuna influenza sul rilevamento della posizione: gli errori cinematici e termici o gli effetti delle forze esterne vengono rilevati dal sistema di misura lineare e considerati nel loop di regolazione della posizione, escludendo così una serie di possibili cause di errore:

- errori di posizionamento dovuti al riscaldamento della vite a ricircolo di sfere,
- errori di inversione,
- errori dovuti alla deformazione del sistema meccanico di azionamento per effetto delle forze di lavorazione,
- errori cinematici dovuti a imprecisioni nel passo della vite a ricircolo di sfere.

Su macchine dai requisiti elevati in termini di **precisione di posizionamento** e **velocità di lavorazione** è pertanto indispensabile impiegare sistemi di misura lineari.

I sistemi di misura lineari HEIDENHAIN per macchine utensili a controllo numerico sono di impiego universale: sono idonei per macchine e impianti sui quali la traslazione degli assi di avanzamento è regolata, ad esempio per fresatrici, centri di lavoro, foratrici, alesatrici, torni e rettificatrici. Il favorevole comportamento dinamico dei sistemi di misura lineari, le loro elevate velocità di traslazione e accelerazione ammesse nella direzione di misura ne consentono l'impiego sia per assi realizzati con cinematiche tradizionali altamente dinamiche che per configurazioni con motori diretti.



LC 485 fino a 2040 mm



LC 185 fino a 4240 mm



LB 201 fino a 28040 mm

HEIDENHAIN

HEIDENHAIN ITALIANA S.r.l.

Via Asiago, 14
20128 Milano, Italy
☎ +39 02 27075-1
FAX +39 02 27075-210
E-Mail: info@heidenhain.it

www.heidenhain.it

Per ulteriori informazioni:

- Catalogo *Sistemi di misura lineari per macchine utensili a controllo numerico*
- Scheda tecnica *Accuratezza del posizionamento*
- Catalogo *Sistemi di misura per il collaudo e la verifica di macchine utensili*