



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	102001900950205
Data Deposito	08/08/2001
Data Pubblicazione	08/02/2003

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	25	J		

Titolo

METODO PER EFFETTUARE IN MODO AUTOMATICO LA CORREZIONE DEGLI ERRORI SISTEMATICI IN MACCHINE DI MISURA ED IN MACCHINE OPERATRICI ED APPARECCHIATURA PER ATTUARE IL METODO.
--

DESCRIZIONE

dell'invenzione avente per titolo:

" Metodo per effettuare in modo automatico la correzione degli errori sistematici in macchine di misura ed in macchine operatrici ed apparecchiatura per attuare il metodo "

della FPT INDUSTRIE S.P.A. a Camposampiero (Padova) e del signor TOMELLERI Raffaele a Verona

depositata il 08/08/2001 presso la Camera di Commercio dell'Industria, dell'Artigianato e dell'Agricoltura di Venezia al numero di domanda

La presente invenzione concerne un metodo per effettuare in modo automatico la correzione degli errori sistematici in macchine di misura ed in macchine operatrici, che comprendono le macchine utensili e le macchine di movimentazione. L'invenzione concerne anche un'apparecchiatura per attuare il metodo.

In seguito si parlerà solo di macchine utensili per semplicità, ma si intende che le stesse considerazioni con i necessari adattamenti valgono anche per le altre macchine sopraindicate.

E' noto che in una macchina utensile la precisione della lavorazione è legata alla precisione di molti elementi che partono dal pezzo in lavorazione e attraverso la fondazione e la macchina stessa giungono all'utensile e costituiscono un anello, che si chiude sulla superficie tra il pezzo e l'utensile stesso.

In una macchina utensile, la posizione dell'utensile rispetto al pezzo viene descritta da un modello matematico teorico, qui di seguito definito modello teorico, il quale fornisce la posizione e l'orientamento dell'utensile in relazione al pezzo, in funzione della posizione degli assi, supposto che non esistano errori dei sistemi di guida e cedimenti delle strutture.

A seconda della macchina utensile il suo modello teorico è più o meno complesso.

Nel caso di una macchina parassiale a tre assi, il suo modello teorico è molto semplice e consiste essenzialmente in tre espressioni, legate alla lettura dei rispettivi assi.

$$X_1 = C_1 - Co_1$$

$$X_2 = C_2 - Co_2$$

$$X_3 = C_3 - Co_3$$

in cui X_i ($i = 1,2,3$) sono le coordinate reali dell'utensile nel sistema di riferimento prescelto, C_i sono le coordinate misurate lungo gli assi corrispondenti e Co_i sono le posizioni di zero.

Per quanto riguarda l'orientamento del mandrino di una macchina parassiale a tre assi, il modello teorico fornisce angoli costanti.

Ciò premesso, e focalizzando la descrizione esemplificativa su una macchina utensile, il problema che la presente invenzione affronta e risolve consiste nel determinare il modello matematico di detta macchina utensile, che sia il più fedele possibile al reale comportamento di questa e che pertanto tenga conto anche delle cause di errore, e nel correggerne gli errori conseguenti.

In una macchina utensile reale l'effettiva posizione e l'orientamento dell'utensile in relazione al pezzo risultano funzione della posizione di ciascun elemento rispetto alla posizione dell'elemento che lo precede lungo l'anello che va dal pezzo all'utensile, per cui le coordinate relative tra pezzo ed utensile e il loro orientamento relativo sono funzione della lettura degli assi della macchina ma anche di molte altre grandezze che tengono conto per quanto possibile degli errori presenti.

Nel caso di una macchina utensile reale a n assi, nella quale sono presenti molte cause di errore, con un determinato utensile applicato, il suo modello matematico particolare è del tipo

$$X'_1 = f_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

$$X'_2 = f_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

$$X'_3 = f_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

$$\alpha'_1 = g_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

$$\alpha'_2 = g_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

$$\alpha'_3 = g_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l)$$

in cui X_i sono le coordinate della base dell'utensile in relazione al pezzo, C_i sono le coordinate lungo gli assi della macchina, V_i sono variabili fisiche causa di errori come temperature e carichi, α_i sono gli angoli di orientamento dell'utensile in relazione al pezzo, e f_i e g_i sono funzioni, date dall'esperienza, del modello matematico della macchina.

Le espressioni sopra scritte descrivono la posizione e l'orientamento della base dell'organo finale, che nel caso delle fresatrici è costituito dal cono mandrino.

La posizione e l'orientamento dell'organo finale, costituito ad esempio dal centro dell'utensile per una fresa sferica, risulta poi deducibile dalle dimensioni di questo in riferimento all'organo finale, ovvero dalle sue tre coordinate U, V, W , con le espressioni:

$$X_1 = X'_1 + V * \alpha_2 - W * \alpha_3$$

$$X_2 = X'_2 + W * \alpha_3 - U * \alpha_1$$

$$X_3 = X'_3 + U * \alpha_1 - V * \alpha_2$$

$$\alpha'_1 = \alpha_1$$

$$\alpha'_2 = \alpha_2$$

$$\alpha'_3 = \alpha_3$$

ottenendo che la posizione del punto finale risulta sempre descritta dalle relazioni seguenti che rappresentano il modello matematico

$$X_1 = f_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$X_2 = f_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$X_3 = f_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_1 = g_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_2 = g_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_3 = g_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

Per una macchina utensile generica, nella quale non sono ancora state identificati tutti i parametri delle funzioni che legano posizione ed orientamento alle coordinate degli assi e alle variabili fisiche, il modello matematico è di tipo parametrico, e verrà definito modello matematico parametrico, poiché comprende anche i parametri P_i , ed assume la forma del tipo

$$X_1 = f_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

$$X_2 = f_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

$$X_3 = f_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

$$\alpha_1 = g_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

$$\alpha_2 = g_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

$$\alpha_3 = g_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m, U, V, W)$$

in cui P_i ($i = 1, 2, 3 \dots n$) sono m parametri della macchina, e U, V, W sono le dimensioni dell'utensile.

Quando i parametri P_i sono stati identificati e perciò hanno assunto valori numerici precisi, l'insieme delle sei espressioni diventa il modello matematico della macchina utensile.

Per evidenti ragioni di precisione e di lavorazione è essenziale che tale modello matematico della macchina utensile sia il più vicino possibile al sistema reale, e pertanto riduca al minimo ogni errore risultante dallo scostamento tra la posizione e l'orientamento dell'utensile rispetto al pezzo, come calcolata dal modello matematico, e la sua posizione reale.

Questo errore è il risultato degli errori del modello matematico che descrive tutte le posizioni relative di tutti gli elementi che compongono l'anello

come sopra definito. Nel caso particolare di una macchina utensile a tre assi, questi errori sono dovuti a:

- errori tra la superficie del pezzo e la superficie della tavola porta pezzo,
- errori tra la superficie del pezzo ed il sistema di riferimento fisso alla fondazione,
- errori tra il sistema di riferimento e la parte mobile del primo asse,
- errori tra la parte mobile del primo asse e la parte mobile del secondo asse,
- errori tra la struttura mobile del secondo asse e la struttura mobile del terzo asse,
- errori tra la struttura mobile del terzo asse e la struttura della testa ,
- errori tra la testa e la bussola portamandrino,
- errori tra la bussole portamandrino ed il tagliente dell'utensile.

Poiché evidentemente il modello matematico di una macchina utensile è tanto più fedele quanto più piccoli sono gli errori tra la posizione dell'utensile indicata dal modello matematico e la sua posizione reale, è importante che il modello matematico parametrico contenga, per quanto possibile, tutte le grandezze ed i parametri che descrivono la posizione dell'utensile rispetto al pezzo.

Tuttavia più il modello matematico parametrico è complesso e più è difficoltoso definirne i valori dei parametri, e più è difficoltoso raggiungere la precisione desiderata.

In particolare la identificazione del modello matematico della macchina richiede l'utilizzazione di strumenti di varia tipologia (laser interferometrici, livelle elettroniche, ecc.) che richiedono un continuo riposizionamento manuale nel campo di lavoro con notevole dispendio di tempo.

Inoltre i noti sistemi di correzione non consentono di correggere l'orientamento dell'organo finale della macchina in relazione agli errori forniti dal modello matematico.

Scopo dell'invenzione è di proporre un metodo che consenta di definire in modo automatico il valore più corretto possibile dei parametri del modello matematico parametrico di una macchina utensile in modo da ottenere un modello matematico che contenga al minimo lo scostamento tra la posizione e l'orientamento dell'utensile rispetto al pezzo, forniti dal modello matematico, e la posizione e l'orientamento reali nel campo di lavoro.

Altro scopo dell'invenzione è di attuare la correzione della posizione dell'utensile rispetto al pezzo.

Altro scopo dell'invenzione è quello di attuare la correzione dell'orientamento dell'utensile in relazione al pezzo, nel caso la macchina sia dotata degli assi idonei a eseguire questa correzione, e ciò utilizzando la differenza tra l'orientamento fornito dal modello teorico e l'orientamento fornito dal modello matematico.

Altro scopo dell'invenzione è di proporre un'apparecchiatura per attuare il metodo.

Questi scopi ed altri che risulteranno dalla descrizione che segue sono raggiunti, secondo l'invenzione, con un metodo per la correzione degli errori sistematici in macchine di misura ed in macchine operatrici, in particolare in macchine utensili, caratterizzato dal fatto di comprendere in successione le seguenti fasi operative:

- individuare il modello matematico parametrico della macchina,

- assegnare inizialmente ai parametri di detto modello matematico parametrico valori numerici ritenuti prossimi a quelli effettivi, ottenendo un modello matematico provvisorio della macchina,
- eseguire una pluralità di misure di distanza, tra loro indipendenti, nel campo di lavoro della macchina,
- determinare gli scostamenti tra i valori di distanza misurati sperimentalmente ed i corrispondenti valori di distanza desunti da detto modello matematico provvisorio, definendo il corrispondente indice provvisorio di imprecisione della macchina,
- variare detti parametri nel senso di migliorare il predefinito indice provvisorio di imprecisione, ottenendo in tal modo un nuovo modello matematico provvisorio della macchina, più vicino al modello matematico della stessa,
- proseguire iterativamente con nuove determinazioni degli scostamenti tra questo ed i corrispondenti valori desunti dal modello matematico fino a quando dette variazioni di parametri non determinano alcun ulteriore significativo miglioramento di detto indice di imprecisione, ottenendo in tal modo il modello matematico della macchina,
- ricavare da detto modello matematico gli errori di posizione ed eventualmente di orientamento dell'organo finale della macchina, e
- utilizzare i dati di errore per eseguire la correzione.

Vantaggiosamente si possono eseguire le misure di distanza tra distinte posizioni assunte dall'organo finale della macchina, utilizzando un interferometro laser a raggio orientabile automaticamente.

Sempre secondo l'invenzione si possono eseguire le misure di distanza tra un punto dell'organo finale della macchina ed un luogo geometrico prefissato, fisicamente presente sulla macchina.

Sempre secondo l'invenzione l'apparecchiatura per attuare il metodo comprende:

- mezzi di misura, associati alla macchina, per effettuare misure di distanza in differenti condizioni operative della macchina stessa,
- un'unità di elaborazione provvista di mezzi per assegnare ad un modello matematico parametrico valori numerici a detti parametri, di mezzi per determinare distanze utilizzando detto modello matematico, di mezzi per comparare i valori di distanze così determinati con i valori di distanze misurati sperimentalmente, e di mezzi per trasmettere i dati d'errore al Controllo Numerico.

La presente invenzione viene qui di seguito ulteriormente chiarita in due sue preferite forme di pratica realizzazione riportate a scopo puramente esemplificativo e non limitativo con riferimento alle allegate tavole di disegni, in cui:

- la figura 1 mostra in vista prospettica generale una macchina utensile equipaggiata con un'apparecchiatura per attuare il metodo secondo l'invenzione,
- la figura 2 mostra in vista laterale il laser di taratura dell'apparecchiatura secondo l'invenzione,
- la figura 3 lo mostra in pianta secondo la vista III – III di fig. 2,
- la figura 4 mostra il riflettore laser applicato al mandrino portautensile della macchina utensile,

- la figura 5 mostra schematicamente il sistema di inseguimento di detto riflettore,
- la figura 6 mostra in sezione longitudinale il laser triassiale dell'apparecchiatura secondo l'invenzione,
- la figura 7 lo mostra secondo la sezione trasversale VII – VII di fig. 6,
- la figura 8 mostra lo schema a blocchi dell'apparecchiatura secondo l'invenzione,
- la figura 9 mostra secondo la vista IX-IX di figura 10 l'interfaccia tra la macchina e l'accessorio di supporto del suo organo finale,
- la figura 10 lo mostra in vista laterale parzialmente sezionata,
- la figura 11 mostra schematicamente il dispositivo di fissaggio automatico dell'accessorio alla macchina,
- la figura 12 mostra secondo la sezione ingrandita XII-XII di figura 13 il particolare del centraggio dell'accessorio sulla macchina, e
- la figura 13 lo mostra secondo la sezione XIII-XIII di figura 12.

Prima di descrivere nei dettagli alcuni esempi di attuazione dell'invenzione, è opportuno fornire alcune definizioni, che verranno adottate nel corso dell'intera descrizione.

Con "macchina" si intende una macchina operatrice che può essere una macchina utensile, una macchina di misura od una macchina di movimentazione.

Con "organo finale della macchina" si intende l'organo che viene movimentato in tutte le posizioni ed in tutte le direzioni corrispondenti ai gradi di libertà della macchina. Nel caso di una macchina utensile l'organo finale è l'utensile, oppure la testa portautensile nel caso di una macchina di misura è il

tastatore e nel caso di una macchina di movimentazione (manipolatore) è la pinza di presa.

Con "variabili dipendenti" si intendono le coordinate e gli angoli di orientamento dell'organo finale della macchina in relazione al sistema di riferimento adottato.

Con "variabili indipendenti" si intendono le coordinate lungo i gradi di libertà della macchina, rilevate dai relativi trasduttori, nonché le caratteristiche dimensionali dell'organo finale ed altre grandezze indipendenti (temperatura, pressione, carichi unitari) che influiscono sulla posizione dell'organo finale e che sono rilevate da altri trasduttori specifici.

Con "modello matematico parametrico" della macchina si intende il complesso delle relazioni che legano le variabili indipendenti alle variabili dipendenti ed a valori costanti non ancora determinati, ma caratteristici della macchina.

Con "parametri" si intendono i valori costanti ma non ancora determinati, che caratterizzano le relazioni del modello matematico parametrico della macchina.

Con "modello matematico" della macchina si intende il modello matematico parametrico dopo la determinazione dei parametri, e cioè dopo che ai parametri sono stati assegnati i valori numerici caratteristici della particolare macchina.

Con "modello matematico particolare" si intende un modello matematico di una macchina, nella quale l'utensile ha dimensioni ben definite.

Con "modello matematico provvisorio" della macchina si intende il modello matematico, nel quale ai parametri sono stati assegnati dei valori provvisori.

Con "indice di imprecisione" si intende una espressione funzione di tutti gli errori rilevati (ad es. errore massimo, deviazione standard, ecc.) e significativo della imprecisione della macchina.

Il metodo secondo l'invenzione prevede di svolgere in successione le seguenti fasi operative:

Definizione del modello matematico parametrico

Una prima fase del metodo secondo l'invenzione prevede di individuare il modello matematico parametrico della macchina, che sia il più fedele possibile, e che fornisca le coordinate dell'utensile, oltre che, eventualmente, il suo orientamento, in funzione della posizione degli assi, delle dimensioni dell'utensile e dei parametri.

Successivamente è previsto di introdurre nel modello matematico parametrico ulteriori variabili indipendenti, rappresentate da grandezze fisiche, quali temperature e carichi, in grado di influenzare la posizione dell'utensile.

Identificazione del modello matematico

Una volta definito nella forma ora descritta il modello matematico parametrico, l'invenzione prevede di eseguire una pluralità di misure di distanza, tra loro indipendenti, tra posizioni assunte dall'utensile nel campo di lavoro. Tra le misure di distanza possono essere comprese delle misure di distanza da un luogo geometrico noto, quale ad esempio una sfera con diverse lunghezze dell'utensile e diversi orientamenti della testa birotativa. Le misure di distanza vengono memorizzate.

Successivamente, partendo da un modello matematico provvisorio, l'invenzione prevede di utilizzare i valori di distanza misurati sperimentalmente ed i corrispondenti valori di distanza forniti da detto modello

matematico provvisorio per ricavare i migliori valori da assegnare ai parametri al fine di identificare il modello matematico della macchina.

In particolare l'invenzione prevede di:

- assegnare inizialmente a detti parametri valori numerici ritenuti prossimi a quelli effettivi, ottenendo un modello matematico provvisorio della macchina,
- determinare gli scostamenti tra i valori di distanza rilevati sperimentalmente ed i corrispondenti valori di distanza desunti da detto modello matematico provvisorio, definendo il corrispondente indice di imprecisione della macchina,
- variare detti parametri della macchina nel senso di ridurre il valore del predefinito indice di imprecisione,
- proseguire con iterazioni successive fino a quando dette variazioni di parametri non determinano alcuna ulteriore significativa riduzione di detto indice di imprecisione.

Allo scopo di ridurre ulteriormente detto indice di imprecisione l'invenzione prevede anche di integrare dette misure di distanza con ulteriori misure di distanze reali di un punto dell'organo finale della macchina da un luogo geometrico prefissato, fisicamente presente sulla macchina, e di confrontare poi tali ulteriori misure di distanza reali con quelle desunte dal modello matematico provvisorio.

Diagnosi

I valori assegnati ai parametri durante la fase di taratura della macchina, indicano il comportamento della macchina, e pertanto forniscono utili indicazioni sulla accettabilità delle condizioni di funzionamento.

Certificazione

Le misure eseguite nel campo di lavoro della macchina per la identificazione del modello matematico, hanno anche la funzione di fornire l'effettivo grado di precisione della macchina che essa ottiene nella lavorazione del pezzo

Correzione

Durante la fase operativa della macchina, la posizione dell'utensile viene desunta dal modello matematico identificato nella fase di taratura e pertanto la precisione del posizionamento diventa quella del modello matematico. Sulla base della posizione e dell'orientamento dell'utensile forniti dal modello matematico e della posizione e dell'orientamento fornite dal modello teorico, gli assi della macchina vengono corretti in modo che la posizione e l'orientamento dell'utensile siano quelli voluti.

Per attuare il metodo secondo l'invenzione è necessario effettuare in modo automatico delle misure di distanza tra le differenti posizioni assunte dall'utensile all'interno del campo di lavoro della macchina, utilizzando anche utensili di diverse dimensioni, e memorizzarle assieme alle coordinate degli assi ed alle altre variabili indipendenti.

A tal fine l'invenzione propone di utilizzare due differenti apparecchiature, previste per effettuare misure di lunghezza o di distanza e misure di ripetibilità.

L'apparecchiatura per effettuare misure di distanza è costituita da un interferometro laser a posizionamento fisso e da un riflettore laser fissato al mandrino portautensile o ad un'altra parte mobile della macchina.

In figura 1 è illustrata globalmente una macchina utensile 2, alla quale è applicato l'interferometro laser ed il riflettore laser. Più particolarmente l'interferometro laser a raggio orientabile, illustrato nelle figure 2 e 3,

comprende una sorgente laser 4 montata sulla base 6 di una struttura 8, provvista anche di una piastra 10 che supporta il complesso di orientamento di uno specchio 12. La piastra 10 sostiene su cuscinetti un elemento a forcella 14, il cui stelo è azionato da un primo motore elettrico 16, provvisto di trasduttore di rotazione 18 (encoder).

I due bracci dell'elemento a forcella 14 sostengono, mediante cuscinetti, un alberino 20, sul quale è montato lo specchio 12, affacciato alla sorgente laser 4. All'alberino 20 è accoppiato un secondo motore elettrico 22 per le sue rotazioni ed un trasduttore 24 (encoder) per il rilevamento delle stesse.

Ad un elemento anulare 26, circostante l'uscita del raggio laser 28 dalla sorgente 4, sono applicati, in quattro posizioni a 90° tra loro, quattro fotodiodi 30 (cfr. figura 5), i quali sono collegati alla apparecchiatura elettronica 32, che invia il segnale di comando a due amplificatori 34, 36 di comando dei due motori elettrici 16, 22 rispettivamente.

Anziché quattro sensori se ne possono impiegare di più, ad esempio otto al fine di ottenere una maggiore precisione di correzione dell'orientamento del raggio laser.

Il riflettore laser dell'apparecchiatura è essenzialmente costituito da un catadiottro 38 a vertice di cubo, il quale ha la nota proprietà di effettuare la riflessione di un raggio incidente 28 secondo una direzione parallela ad esso, fino a che l'angolo incidente è contenuto all'interno di un cono con angolo di apertura di circa 35° rispetto all'asse del catadiottro 38.

Per effettuare le misure di distanza, e cioè per definire le posizioni reali dell'organo finale della macchina, nel caso di specie dell'utensile della macchina utensile 2, si dispone la struttura 8 in posizione fissa rispetto al

basamento 40 di detta macchina, si applica all'utensile od al mandrino portautensile 42 il catadiottro 38 e si fa in modo che il raggio laser 28 emesso dalla sorgente 4 e riflesso dallo specchio 12 colpisca con il catadiottro 38 e venga riflesso all'indietro sullo stesso specchio 12 e da questo all'interno dell'elemento anulare 26 sostenente i fotodiodi 30.

Una volta "agganciato" in tal modo il mandrino 42 della macchina utensile 2 al laser di taratura, esso rimane sempre agganciato ad esso, grazie al software dell'apparecchiatura, che elabora i segnali provenienti dai fotodiodi 30, sensibilizzati dal raggio laser riflesso dal catadiottro 38 e deviato dallo specchio 12, e li trasforma in segnali, che comandano i due motori 16 e 22, in modo da riportare il raggio riflesso all'interno dell'elemento anulare 26.

In questo modo, l'interferometro laser è in grado di effettuare misure di distanza tra coppie di posizioni successivamente occupate dal catadiottro 38, e quindi dall'utensile della macchina, e ciò a seguito di successivi spostamenti dell'utensile, comandati dal Controllo Numerico lungo una stessa direzione, senza alcun intervento dell'operatore.

Al termine di questa serie di misure l'apparecchiatura orienta diversamente il raggio laser in modo che esso tenga sempre agganciato a sé l'utensile, ed esegue una nuova serie di misure di distanza lungo una nuova direzione programmata nel Controllo Numerico.

Dopo una prima serie di misurazioni di distanza secondo più orientamenti, la posizione e l'orientamento del laser di taratura vengono completamente identificati, con riferimento alle posizioni assunte dagli assi, e trasmessi dal Controllo Numerico all'apparecchiatura, che è in grado di orientare lo specchio 12 con gli angoli necessari, comandando i motori a ciclo chiuso sugli encoder dei due assi.

E' da considerare che eventuali piccoli errori di orientamento corrispondenti a pochi millimetri sul catadiottro 38, non influenzano la distanza quando questa è dell'ordine di almeno un metro.

Al termine di queste misure di distanza secondo tutte le programmate direzioni, si può spostare manualmente la struttura 8 e ripetere le stesse operazioni, allo scopo di acquisire ulteriori dati di misura di distanza in una o più direzioni . Con questi dati l'apparecchiatura è in grado di effettuare le comparazioni tra le distanze reali fornite dall'interferometro laser e le corrispondenti distanze teoriche fornite dal Controllo Numerico, e di procedere poi alla identificazione del modello matematico della macchina.

La seconda apparecchiatura di misura secondo l'invenzione è particolarmente indicata per la modellazione delle teste birotative, ovvero per la determinazione dei parametri caratteristici, in modo che il punto finale possa ripetere la stessa posizione con la massima precisione quando la testa assume tutti gli orientamenti possibili.

Essa è costituita da un sensore triassiale in grado di effettuare misure di ripetibilità in differenti posizioni con un utensile di forma sferica, riportato sempre nella stessa posizione con differenti orientamenti del mandrino portautensile, segnalando le tre componenti dell'errore nelle tre direzioni degli assi coordinati.

Il sensore triassiale dell'apparecchiatura secondo l'invenzione (cfr. figure 6 e 7) comprende un supporto 44, che sostiene un albero rotante 46, azionato da un motore elettrico 48, in grado di portarlo in due distinte posizioni a 180° tra loro quando una chiavetta 50, solidale a detto albero 46, interferisce con l'uno o con l'altro di due fermi 52, 54 solidali ad un manicotto 56 fissato all'albero stesso.

La possibilità di assumere due diversi orientamenti ha la funzione di evitare situazioni di interferenza con la sfera e con l'albero che la sostiene.

Il principio di funzionamento del sensore triassiale ora descritto si basa sulla finalità di determinare la distanza tra un punto dell'utensile (ad esempio il centro di una sfera 58 rappresentativa dell'utensile) ed un punto dello spazio, definito da tre sensori di prossimità 60 disposti nelle tre direzioni dello spazio. Il senso di questa determinazione è legato alla constatazione che se un punto dell'utensile deve raggiungere il pezzo in lavorazione provenendo da differenti direzioni e con differenti orientamenti, il suo centro deve sempre riportarsi nella stessa posizione che è rappresentata dal centro della sfera 58.

Mentre nel caso ideale questo centro della sfera 58 deve coincidere con il punto dello spazio definito dai tre sensori di prossimità 60, nella realtà ciò non succede a causa degli errori introdotti dalla macchina.

Per questo è necessario creare il modello matematico, non solo della macchina ma anche della testa birotativa, che tiene conto degli errori in pratica introdotti, e questo modello viene creato a partire da un modello matematico parametrico, nel quale i valori dei parametri vengono fissati durante la fase di taratura.

Per fare ciò si avvicina la sfera 58 ai tre sensori di prossimità 60 e si cerca di far coincidere il suo centro con il punto dello spazio da questi determinato.

Si ripete poi il posizionamento della sfera nello stesso punto, ma con diverse angolazioni degli assi della testa, memorizzando ad ogni posizionamento l'errore di posizione fornito dai tre sensori 60.

La misura viene ottenuta mediando le due misure con mandrino 42 in due posizioni a 180 gradi, in modo che la misura non risulti influenzata dagli errori di forma del mandrino e del supporto della sfera.

La misura viene ripetuta con diverse combinazioni degli angoli della testa, e poi ripetuta con una diversa lunghezza dell'utensile, in modo che le misure siano influenzate dalla posizione dell'asse di rotazione del mandrino 42.

La stessa procedura potrebbe essere seguita se il luogo geometrico, rispetto al quale deve essere misurata la distanza da un punto dell'utensile, è ad esempio un piano anziché un punto ideale dello spazio. A questo fine si potrebbe usare come luogo geometrico un piano reale della macchina e si potrebbe misurare la distanza dell'utensile di questo, applicando un sensore di prossimità al portautensile ed effettuando una serie di misure di distanza con differenti posizioni ed orientamenti dell'utensile.

Come si è detto, il complesso delle misurazioni e delle elaborazioni effettuate consente di determinare in maniera automatica i corretti parametri che identificano il modello matematico della macchina, nonché un indice di imprecisione della stessa. E poiché la macchina è in grado di determinare automaticamente il suo indice di imprecisione si può affermare che il metodo e l'apparecchiatura secondo l'invenzione consentono alla macchina di autocertificare la sua qualità.

Durante la fase di taratura, l'apparecchiatura elettronica, rappresentata in fig. 8, riceve i dati dal laser di taratura, dal sensore triassiale e dal Controllo Numerico in modo da realizzare la identificazione del modello matematico.

Durante la fase operativa della macchina, l'apparecchiatura elettronica fornisce al Controllo Numerico, in funzione della posizione degli assi, che rappresentano le posizioni volute dell'utensile per mezzo del modello teorico della macchina, e in funzione delle eventuali grandezze fisiche, le correzioni da realizzare sugli assi stessi della macchina al fine di ottenere la posizione ed eventualmente anche l'orientamento voluto dell'utensile.

Dato il modello matematico della macchina

$$X_1 = f_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$X_2 = f_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$X_3 = f_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_1 = g_1 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_2 = g_2 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

$$\alpha_3 = g_3 (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_l, U, V, W)$$

ed il modello matematico teorico della macchina che viene rappresentato come segue,

$$X_{a1} = f_{a1} (C_1, C_2, C_i, \dots, C_n)$$

$$X_{a2} = f_{a2} (C_1, C_2, C_i, \dots, C_n)$$

$$X_{a3} = f_{a3} (C_1, C_2, C_i, \dots, C_n)$$

$$\alpha_{a1} = g_{a1} (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n)$$

$$\alpha_{a2} = g_{a2} (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n)$$

$$\alpha_{a3} = g_{a3} (C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n)$$

l'ampiezza delle correzioni di posizione da inviare al Controllo Numerico sono date dalle differenze

$$ex_1 = X_1 - X_{a1}$$

$$ex_2 = X_2 - X_{a2}$$

$$ex_3 = X_3 - X_{a3}$$

$$e\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha a_1$$

$$e\alpha_2 = \alpha_2 - \alpha a_2$$

$$e\alpha_3 = \alpha_3 - \alpha a_3$$

che vengono realizzate nel Controllo Numerico, movimentando gli assi secondo il modello matematico teorico, dato che gli errori sulla ampiezza della correzione risultano trascurabili.

Nel caso in cui si voglia correggere l'orientamento dell'utensile, è necessario che la macchina sia dotata di movimentazioni atte a modificare l'orientamento dell'utensile, e ciò può essere ottenuto mediante gli stessi assi della testa birotativa, della quale la macchina è già dotata, o mediante assi supplementari, aggiunti proprio per realizzare detta correzione.

La figura 9 mostra lo slittone di una macchina fresatrice a montante mobile dotata di quattro dispositivi per il fissaggio automatico della testa 62 di supporto del portamandrino 42 e di due spine coniche di posizionamento 64.

La figura 10 mostra i dispositivi di fissaggio automatico degli accessori visti di lato.

La figura 11 mostra una possibile forma di realizzazione dei dispositivi di fissaggio automatico della testa 62.

Ciascun dispositivo di fissaggio automatico comprende una pinza di bloccaggio 66, di tipo tradizionale, azionato da un pistone 68, scorrevole entro una sede cilindrica 70 ricavata nel corpo 72 mediante il quale il dispositivo di fissaggio è stabilmente applicato allo slittone 74 della macchina utensile. La pinza di bloccaggio 66 di ciascun dispositivo di fissaggio coopera con un codolo 76, pure di tipo tradizionale applicato alla testa 62 di supporto del mandrino 42.

Il corpo 72 di ciascun dispositivo di fissaggio si prolunga oltre la superficie dello slittone 74 affacciato alla testa 62 con una posizione anulare 78, deformabile per compressione a seguito della trazione esercitata su di essa da parte dei dispositivi di fissaggio, quando viene immesso a pressione il liquido operativo entro i cilindri 70.

Grazie a questa possibilità della posizione 78 di ciascun dispositivo di fissaggio di deformarsi per compressione, si può variare l'ampiezza del gioco 80 esistente tra la faccia dello slittone 68 e la testa 62 di supporto del mandrino portautensile 42 e di conseguenza si può variare la posizione del punto di appoggio 82 di detta testa 62.

Dall'orientamento richiesto all'accessorio per il mandrino 42 si possono ricavare i cedimenti necessari in corrispondenza della posizione del punto di appoggio di ciascuno dei quattro dispositivi di fissaggio della sua testa di supporto 62 e di conseguenza le pressioni necessarie nei quattro cilindri 70.

La soluzione presentata dalle figure 9, 10, e 11 permette di modificare l'orientamento dell'accessorio con rotazioni intorno agli assi x e z, con rotazioni α_1 e α_3 , e ciò senza errori apprezzabili sulla posizione dell'accessorio sul fronte slittone, purchè la conicità delle spine coniche sia abbastanza piccola.

Volendo introdurre anche la rotazione α_2 , la cosa è certamente possibile visto che la posizione di fissaggio sullo slittone ha tre gradi di libertà, ed avendo impegnato le due rotazioni della base della testa, resta la possibilità di utilizzare la traslazione della testa per realizzare la rotazione restante. Questo può essere possibile trasformando le traslazioni lungo l'asse y in una rotazione intorno allo stesso asse con una camma.

La figura 12 mostra lo slittone 74 al quale sono fissate due spine coniche 64. Ad ognuna delle spine coniche, si accoppia un bussola 86, che appoggia alla spina conica nella parte superiore, mentre nella parte inferiore è contrastata da un elemento 88 spinto da una molla 90 di forza idonea a garantire l'appoggio sull'altro lato. La figura 13 mostra l'insieme delle due spine coniche 64, nelle quali i due elementi 88 si trovano uno diretto verso il basso e l'altro diretto verso l'alto. In questo modo risulta chiaro che ad una traslazione d'insieme della testa 62 si ottiene una rotazione della stessa attorno all'asse y. La soluzione presentata permette di orientare la testa 62 durante le operazioni di finitura, mentre durante le operazioni di sgrossatura la testa 62 viene portata in appoggio alla superficie dello slittone 74 con forze adeguate dei dispositivi di fissaggio.

La pressione di alimentazione viene pilotata mediante una valvola riduttrice di pressione proporzionale 92, mentre l'effettiva posizione della testa 62 in relazione alla superficie dello slittone 74 viene controllata con sensori di prossimità 94.

Nel caso sia presente nella macchina il dispositivo di correzione dell'orientamento, la fase di correzione prevede l'esecuzione, nell'ordine, delle seguenti operazioni.

1. Sulla base dell'orientamento dell'utensile fornito dal modello matematico, e dell'orientamento teorico voluto, si calcolano le correzioni di orientamento necessarie da effettuare sul dispositivo di correzione e si effettuano queste correzioni.

$$e\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha a_1$$

$$e\alpha_2 = \alpha_2 - \alpha a_2$$

$$e\alpha_3 = \alpha_3 - \alpha a_3$$

2. Sulla base della posizione dell'utensile fornita dal modello matematico, e della posizione teorica si calcolano le correzioni di posizione degli assi.

$$ex_1 = X_1 - Xa_1$$

$$ex_2 = X_2 - Xa_2$$

$$ex_3 = X_3 - Xa_3$$

3. Si calcolano le traslazioni indotte dalle correzioni di orientamento sull'utensile in base alle distanze X, Y, Z, tra gli assi di rotazione delle correzioni ed alla posizione dell'utensile

$$\Delta X_1 = Y * e\alpha_3 - Z * e\alpha_2$$

$$\Delta X_2 = Z * e\alpha_1 - X * e\alpha_3$$

$$\Delta X_3 = X * e\alpha_2 - Y * e\alpha_1$$

4. Si correggono le posizioni degli assi tenendo conto delle traslazioni indotte dalle correzioni dell'orientamento

$$ex_1 = X_1 - Xa_1 - \Delta X_1$$

$$ex_2 = X_2 - Xa_2 - \Delta X_2$$

$$ex_3 = X_3 - Xa_3 - \Delta X_3$$

Volendo rendere ancora più automatica l'acquisizione delle misure di distanza nelle diverse posizioni assunte dal laser interferometrico a raggio orientabile, è possibile utilizzare la macchina stessa per trasportare il laser da una posizione all'altra, impiegando ad esempio il dispositivo di bloccaggio automatico dell'utensile.

E' opportuno che il numero delle misurazioni necessarie ad identificare il modello matematico, sia sufficientemente elevato, e in grado di discriminare tutte le cause di errore presenti nel modello.

Inoltre, per identificare il modello matematico, che risulta funzione delle dimensioni U, V, W dell'utensile, è necessario eseguire misurazioni di

distanza con almeno tre utensili distinti, di dimensioni diverse, che non siano una la combinazione lineare delle altre due. A meno che le rotazioni α_1 , α_2 , α_3 non siano così piccole, che le dimensioni U, V, W producono solo una traslazione del centro utensile

Nel caso della modellazione di un esapode invece, nel quale le rotazioni dell'organo finale non sono trascurabili, la misurazione con diverse dimensioni dell'organo finale risulta invece necessario.

La presente invenzione è stata illustrata e descritta in alcune sue preferite forme di realizzazione, ma si intende che varianti esecutive potranno ad esse in pratica apportarsi, senza peraltro uscire dall'ambito di protezione del presente brevetto per invenzione industriale.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per effettuare in modo automatico la correzione degli errori sistematici in macchine di misura ed in macchine operatrici, in particolare in macchine utensili, caratterizzato dal fatto di comprendere in successione le seguenti fasi operative:

- individuare il modello matematico parametrico della macchina,
- assegnare inizialmente ai parametri di detto modello matematico parametrico valori numerici ritenuti prossimi a quelli effettivi, ottenendo un modello matematico provvisorio della macchina,
- eseguire una pluralità di misure di distanza, tra loro indipendenti, nel campo di lavoro della macchina,
- determinare gli scostamenti tra i valori di distanza misurati sperimentalmente ed i corrispondenti valori di distanza desunti da detto modello matematico provvisorio, definendo il corrispondente indice provvisorio di imprecisione della macchina,
- variare detti parametri nel senso di migliorare il predefinito indice provvisorio di imprecisione, ottenendo in tal modo un nuovo modello matematico provvisorio della macchina, più vicino al modello matematico della stessa,
- proseguire iterativamente con nuove determinazioni degli scostamenti tra queste ed i corrispondenti valori desunti dal modello matematico fino a quando dette variazioni di parametri non determinano alcun ulteriore significativo miglioramento di detto indice di imprecisione, ottenendo in tal modo il modello matematico della macchina,
- ricavare da detto modello matematico gli errori di posizione ed eventualmente di orientamento dell'organo finale della macchina, e

- utilizzare i dati di errore per eseguire la correzione.
- 2. Metodo secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto di eseguire dette misure di distanza tra distinte posizioni assunte dall'organo finale della macchina, utilizzando un interferometro laser.
- 3. Metodo secondo la rivendicazione 2 caratterizzato dal fatto di eseguire le misure di distanza utilizzando un interferometro laser a raggio orientabile automaticamente.
- 4. Metodo secondo la rivendicazione 3 caratterizzato dal fatto di eseguire le misure di distanza utilizzando un interferometro laser a raggio orientabile automaticamente verso un riflettore fissato all'organo finale della macchina.
- 5. Metodo secondo la rivendicazione 1 caratterizzato dal fatto di eseguire dette misure di distanza tra un punto dell'organo finale della macchina ed un luogo geometrico prefissato.
- 6. Metodo secondo la rivendicazione 5 caratterizzato dal fatto di effettuare misure di distanza da un punto fisso rappresentativo dell'organo finale della macchina secondo tre direzioni ortogonali.
- 7. Apparecchiatura per attuare il metodo secondo una o più delle rivendicazioni da 1 a 6 caratterizzata dal fatto di comprendere:
 - mezzi di misura, associati alla macchina, per effettuare misure di distanza in differenti condizioni operative della macchina stessa,
 - un'unità di elaborazione provvista di mezzi per assegnare ad un modello matematico parametrico valori numerici a detti parametri, di mezzi per determinare distanze utilizzando detto modello matematico, di mezzi per comparare i valori di distanza così determinati con i valori di distanza misurati sperimentalmente e di mezzi per trasmettere i dati d'errore da detti mezzi di comparazione al controllo numerico ed alla macchina.

8. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 7 caratterizzata dal fatto di comprendere:

- un riflettore (38) applicato all'organo finale (42) della macchina (2),
- un interferometro laser (4), il cui raggio (28) è orientabile in modo automatico verso il riflettore (38),
- mezzi di elaborazione, che durante la fase di misura delle distanze, orientano il raggio laser (28) verso il riflettore (38), durante la fase di identificazione del modello matematico assegnano ai parametri i valori migliori e durante la fase di correzione ricavano i dati di errore e li trasmettono al controllo numerico.

9. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 8 caratterizzata dal fatto di comprendere uno specchio (12) affacciato all'interferometro (4), per riflettere il raggio (28), da questo emesso, verso il riflettore (38) e per riflettere altresì il raggio riflesso da detto riflettore (38), verso detto interferometro laser (4), a detto specchio (12) essendo associati mezzi per la sua movimentazione nel senso di assicurare che il raggio riflesso proveniente da detto riflettore (38) investa detto interferometro laser (4) indipendentemente dalla posizione di detto riflettore (38).

10. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 9 caratterizzata dal fatto che lo specchio (12) è sostenuto da un supporto (8,10) con due bracci ortogonali rotanti (14,20) vincolati a rispettivi attuatori (16,22) azionati su comando di sensori (30) associati a detto interferometro laser (4).

11. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 10 caratterizzata dal fatto che ciascuno dei due attuatori (16,22) è costituito da un motorino elettrico provvisto di trasduttore angolare (18,24) e comandato da detti sensori (30),

che sono posti su un elemento anulare (26) previsto in detto interferometro (4) in posizione circostante l'uscita di detto raggio laser (26).

12. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 7 caratterizzata dal fatto di comprendere un dispositivo triassiale di misura di distanza da un punto fisso.

13. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 12 caratterizzata dal fatto che detto dispositivo triassiale comprende una sfera (58), fissata al posto dell'organo finale (42) della macchina e tre sensori fissi (60) che rilevano la distanza da detta sfera (58) nelle tre direzioni.

14. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 12 caratterizzata dal fatto che il dispositivo triassiale comprende una sfera fissa (58) e tre sensori (60) fissati al posto dell'organo finale (42) della macchina, per rilevare la distanza da detta sfera (58) nelle tre direzioni.

15. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 13 caratterizzata dal fatto che i tre sensori (60) sono rotanti e di tipo idoneo ad assumere ciascuno almeno due distinte posizioni.

16. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 8 caratterizzata dal fatto di comprendere mezzi di correzione dell'orientamento dell'organo finale (42) della macchina, costituiti dagli stessi dispositivi di fissaggio della testa (62) di supporto di detto organo finale allo slittone (74) della macchina.

17. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 16 caratterizzata dal fatto di comprendere oltre a detti dispositivi di fissaggio, almeno una spina conica (64) di posizionamento di detta testa (62).

18. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 16 caratterizzata dal fatto che ciascun dispositivo di fissaggio è montato sullo slittone (74) della macchina e comprende una pinza di bloccaggio (66) cooperante con un codolo (76) fissato alla testa (62) di supporto dell'organo finale (42) della

macchina, detta pinza di bloccaggio (66) essendo associata ad un pistone idraulico (68) in grado di esercitare su comando una trazione assiale su detto codolo (76), in contrasto con una parte deformabile (78) presente tra detto slittone (74) e detta testa (62).

19. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 18 caratterizzata dal fatto che tra lo slittone (74) e la testa (62) di supporto dell'organo finale (42) della macchina sono interposti sensori (94) di controllo della loro posizione reciproca.

20. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 19 caratterizzata dal fatto di comprendere più dispositivi di fissaggio controllabili individualmente ed esercitanti sui corrispondenti codoli (76) trazioni differenziate tali da provocare rotazioni di detta testa (62) rispetto a detto slittone (74) secondo due direzioni ortogonali tra loro e parallele alla superficie di detto slittone affacciato a detta testa.

21. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 17 caratterizzata dal fatto che alla sede conica (86) di alloggiamento di detta spina conica (64) è associato uno spintore (88) agente sulla superficie laterale conica di detta spina (64) per assicurare la stabilità del vincolo indipendentemente dalla sua posizione assiale nella rispettiva sede (86).

22. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 21 caratterizzata dal fatto che a detto spintore (88) sono associati mezzi elastici (90) per mantenerlo aderente a detta spina conica (64).

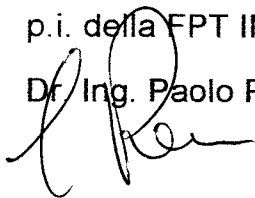
23. Apparecchiatura secondo la rivendicazione 21 caratterizzata dal fatto di comprendere due spine coniche (64) distanziate tra loro e provviste, nella rispettiva sede (86) di alloggiamento, di uno spintore (88) agente in senso contrapposto allo spintore dell'altra spina per esercitare in funzione della

posizione assiale di ciascuna spina nella rispettiva sede una rotazione di detta testat (62) rispetto a detto slittone (74) attorno ad un asse ortogonale alla superficie dello slittone stesso affacciata a questa.

24. Metodo per effettuare in modo automatico la correzione degli errori sistematici in macchine di misura ed in macchine operatrici secondo le rivendicazioni da 1 a 6, apparecchiatura per effettuare il metodo secondo le rivendicazioni da 7 a 23 e sostanzialmente come illustrati e descritti.

p.i. della FPT INDUSTRIE S.P.A e del signor TOMELLERI Raffaele

Dr. Ing. Paolo Piovesana



VE 2001 A000036

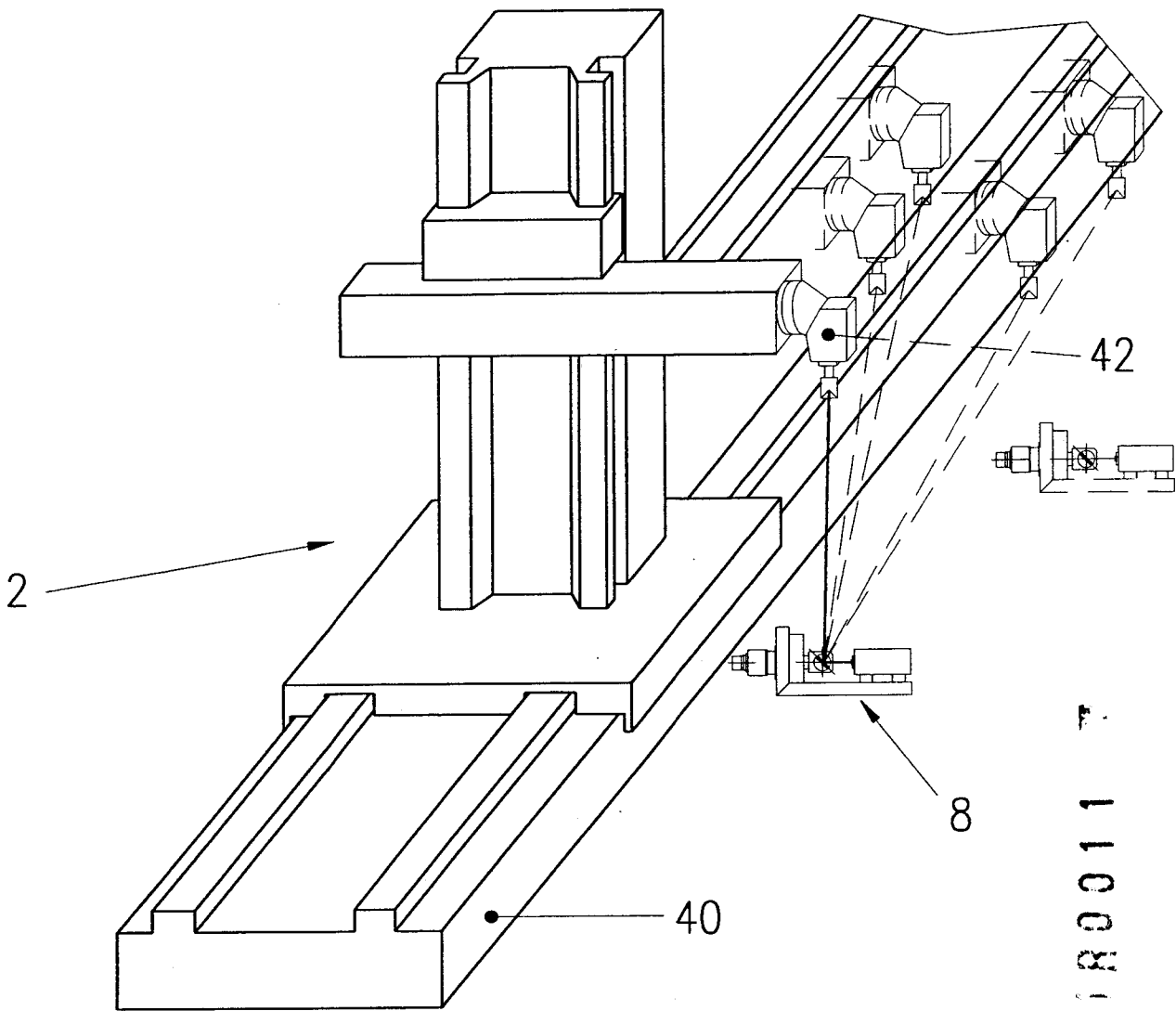


Fig. 1

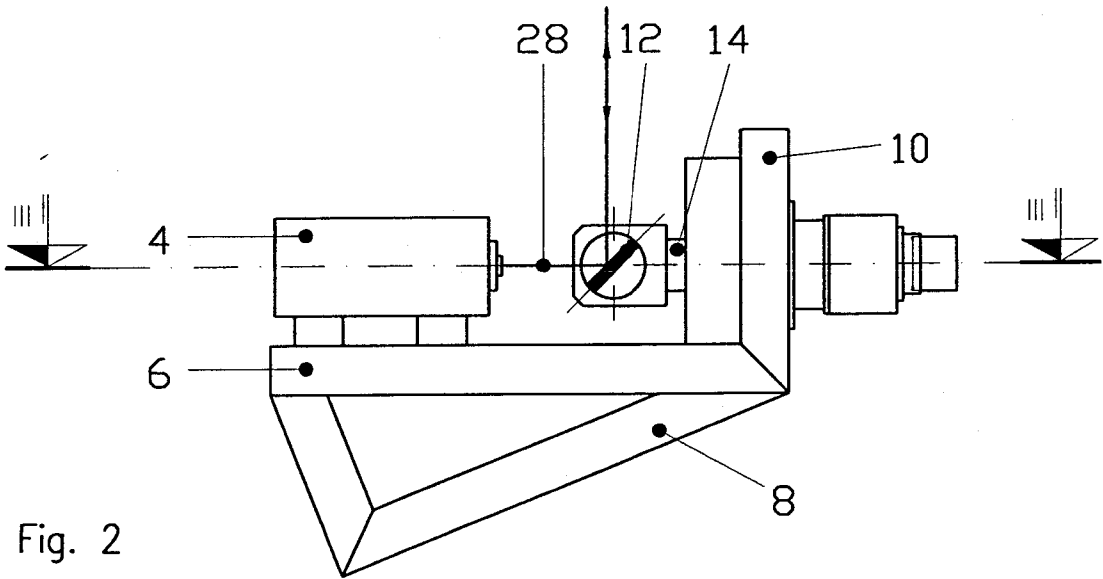


Fig. 2

VE 200180011

Fig. 3

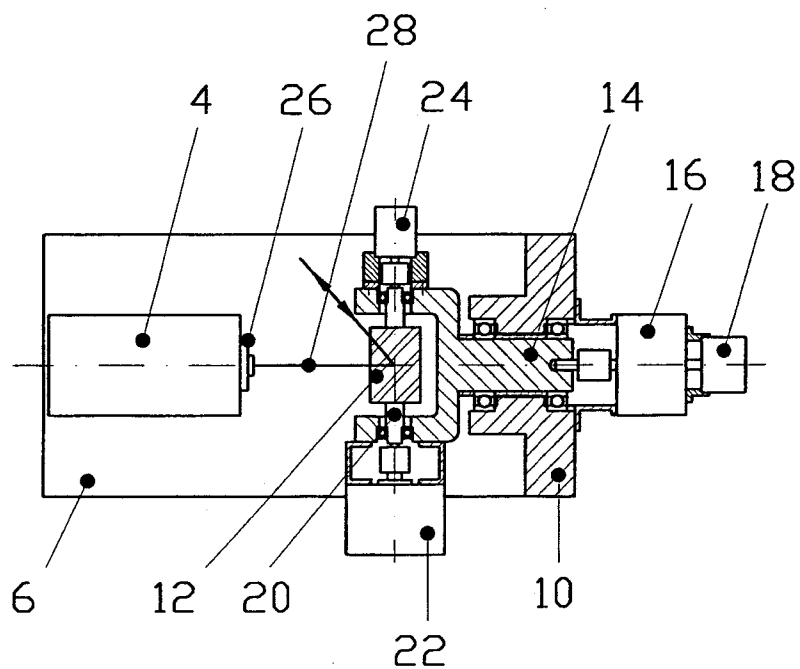


Fig. 4

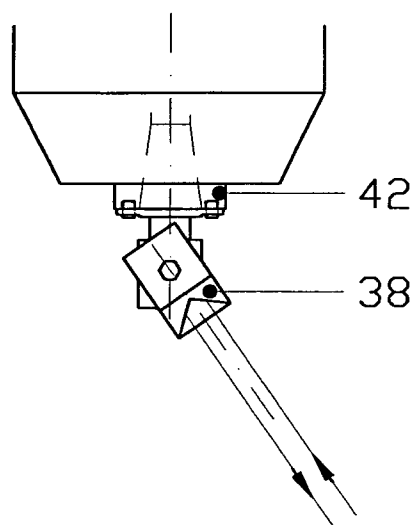
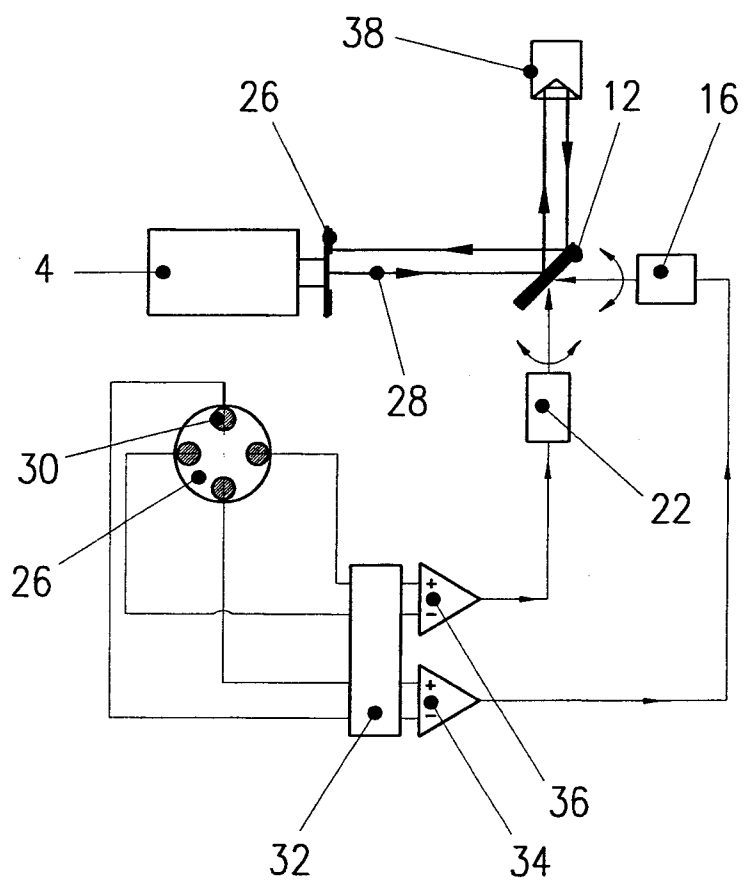


Fig. 5



VE 2001 R 0011

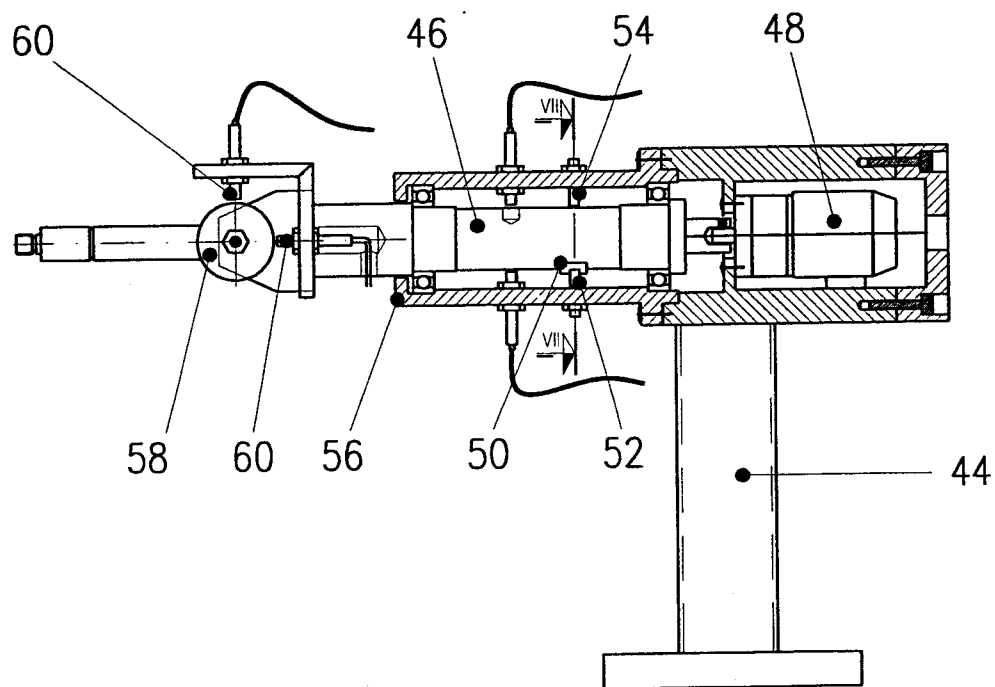


Fig. 6

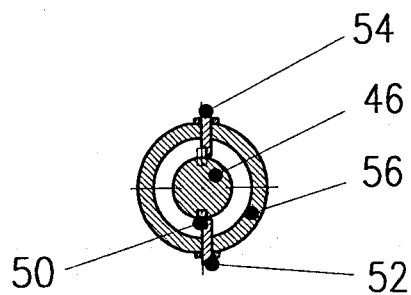


Fig. 7

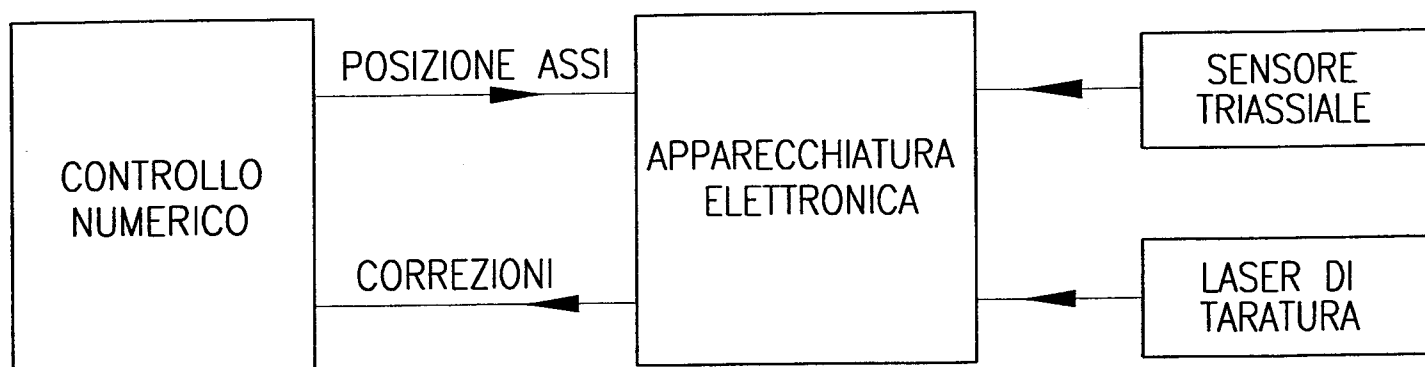


Fig. 8

Fig. 9

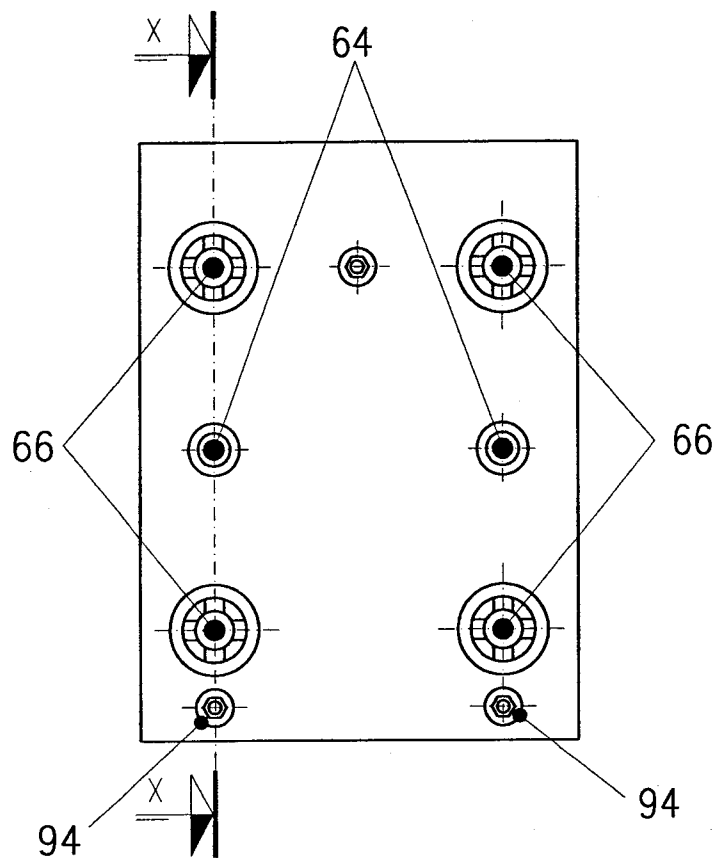
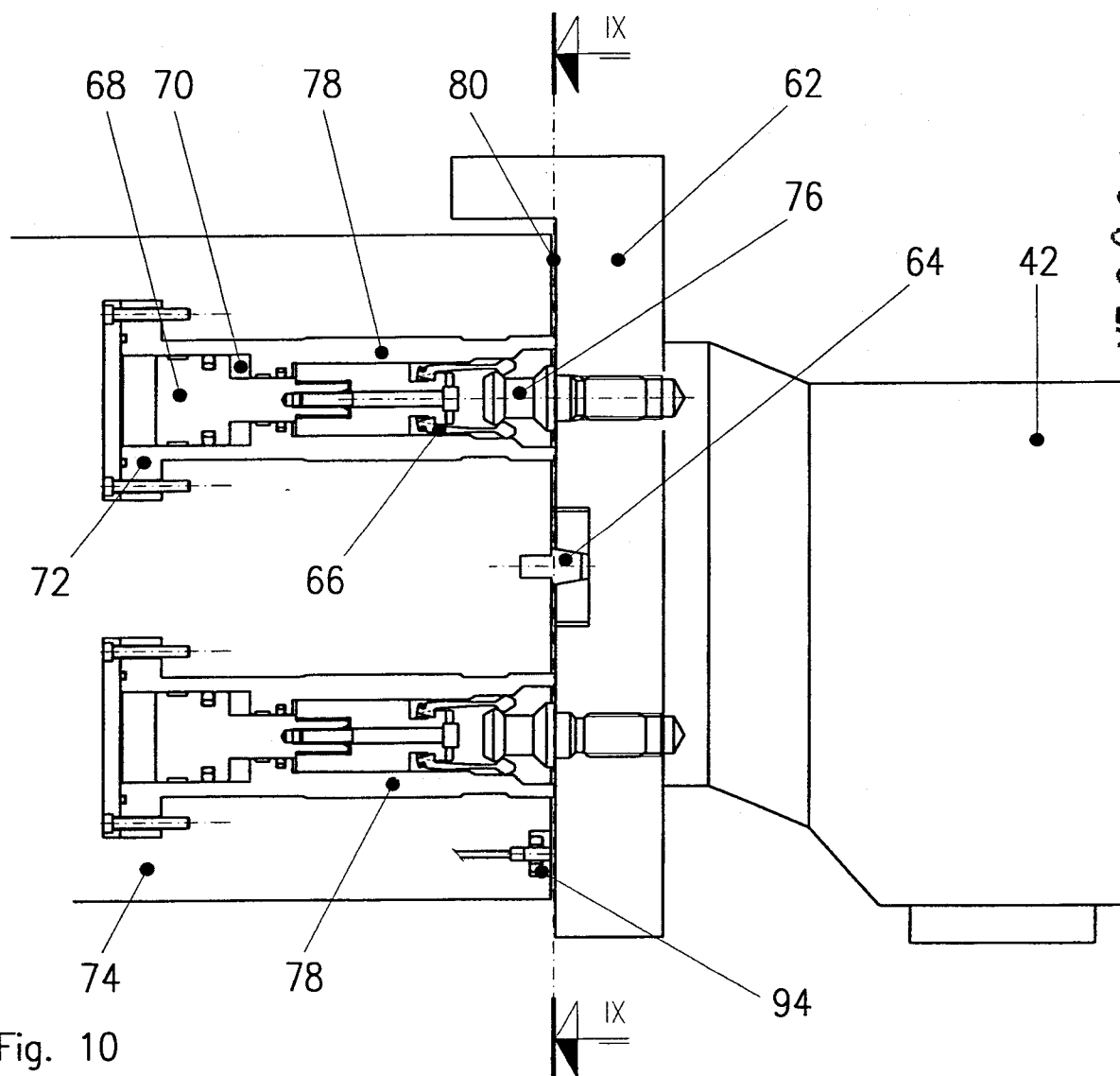
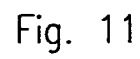


Fig. 10



VE 2001R0011

Dr. Ing. Paolo Piovesana



VE 2001R0011

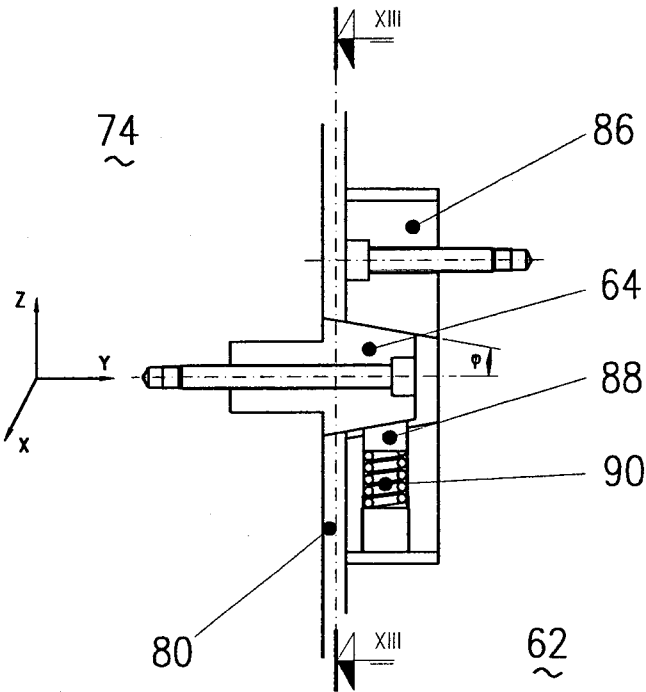


Fig. 12

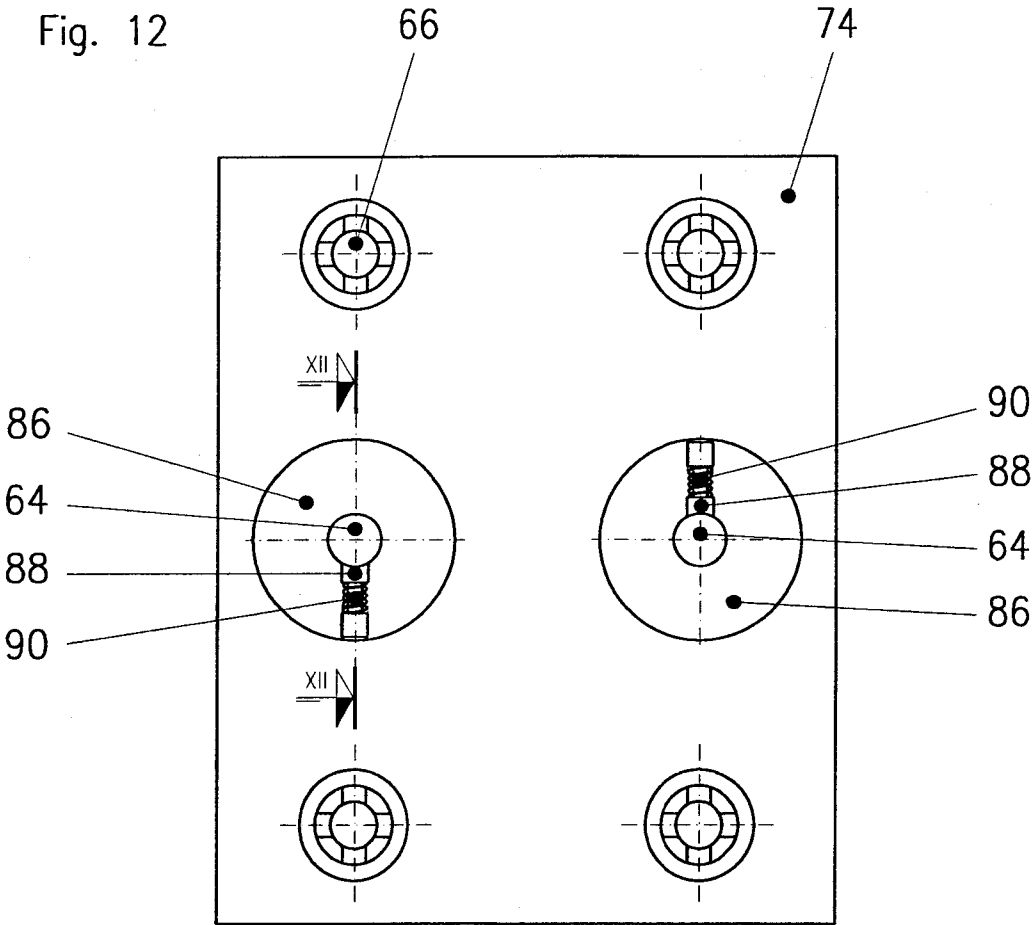


Fig. 13

WF 2001R0011