



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

DOMANDA NUMERO	101998900691030
Data Deposito	10/07/1998
Data Pubblicazione	10/01/2000

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	06	F		

Titolo

PROCEDIMENTO E SISTEMA PER LA REALIZZAZIONE DELLA COMPENSAZIONE DEGLI ERRORI STATICI SU MACCHINE UTENSILI A CONTROLLO NUMERICO

Descrizione dell'Invenzione Industriale avente per
titolo:

"Procedimento e sistema per la realizzazione della
compensazione degli errori statici su macchine
utensili a controllo numerico"

a nome: FIDIA S.p.A., di nazionalità italiana, con
sede in corso Lombardia 11 - 10099 SAN MAURO
TORINESE (TO).

Depositata il **17.0 LUG. 1998** al n. **TO 98A 000606**
DESCRIZIONE

La presente invenzione si riferisce ad un
procedimento e ad un sistema per la realizzazione
della compensazione degli errori statici su
macchinari in generale, ed in particolare su
macchine utensili a controllo numerico. Esempi di
altri tipi di macchinari a cui si applica la
presente invenzione sono macchine di misura,
fresatrici di qualunque morfologia, macchine ad
elettroerosione, macchine di lavorazione al plasa e
macchine di lavorazione per getto d'acqua.

Le macchine utensili a controllo numerico,
dopo essere state installate mediante opportune
operazioni di taratura, dopo un certo periodo di
funzionamento presentano posizioni di lavorazione
non più corrispondenti a quelle previste dal

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

controllo a bordo macchina. Questi errori posizionali non sono dovuti ad errato funzionamento dei trasduttori a bordo macchina, bensì a geometrie errate della macchina stessa, errori di montaggio, o altre cause quali cedimento delle fondazioni, usura, urti durante il funzionamento, ecc. A fronte di tali disallineamenti tra posizione richiesta dal controllo e posizione effettiva raggiunta dall'utensile, occorrerebbero ritarature della macchina per riportarla nelle condizioni originali "ideali" che erano presenti al momento dell'installazione.

Tuttavia, finora, queste ritarature sono state realizzate molto raramente, dato che per esse era necessario impiegare strumenti di misura costosi. Pertanto, il loro impiego è stato limitato a campi in cui il costo del prodotto finale e la precisione necessaria rendevano accettabile tale impiego, ad esempio i campi dell'aeronautica e dei grandi motori marini.

Un'alternativa teoricamente possibile nella tecnica sarebbe quella di impiegare, per le misure di taratura, un interferometro laser, che è uno strumento poco costoso. Tuttavia, dato che per tali ritarature, è necessario effettuare un numero

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

elevatissimo di misure (dell'ordine delle migliaia), per ciascuna delle quali l'interferometro impiega circa mezz'ora per centrare lo specchio con il fascio laser, sarebbero necessari parecchi mesi per ritarare una macchina.

Non sono pertanto attualmente disponibili nella tecnica dispositivi o sistemi che consentano di ritarare una macchina utensile consentendo di realizzare per essa la cosiddetta Compensazione degli Errori Statici (SEC = Static Error Compensation).

Scopo della presente invenzione è quello di risolvere i suddetti problemi della tecnica anteriore, fornendo un procedimento ed un sistema che consentano di applicare la Compensazione degli Errori Statici (SEC) a macchinari in generale ed a macchine utensili a controllo numerico in particolare, in modo semplice, veloce e poco costoso.

I suddetti ed altri scopi e vantaggi dell'invenzione, quali risulteranno dal seguito della descrizione, vengono raggiunti con un procedimento ed un sistema per realizzare la SEC come quelli descritti rispettivamente nelle rivendicazioni 1 e 5. Forme di realizzazione

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

preferite e varianti non banali della presente invenzione formano l'oggetto delle rivendicazioni dipendenti.

La presente invenzione verrà meglio descritta da alcune forme preferite di realizzazione, fornite a titolo esemplificativo e non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

- la Figura 1 è un diagramma a blocchi di una realizzazione preferita del sistema secondo la presente invenzione;
- la Figura 1A è un diagramma a blocchi più dettagliato della realizzazione di Fig. 1;
- la Figura 2 è una vista in prospettiva in spaccato del dispositivo laser di misura del sistema di Fig. 1;
- la Figura 3 è una vista in prospettiva frontale di una fresatrice a controllo numerico che costituisce una possibile parte del sistema della presente invenzione; e
- la Figura 4 illustra un esempio di applicazione della matrice degli errori impiegata nel procedimento della presente invenzione.

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

Facendo riferimento alla Fig. 1, è illustrata una realizzazione pratica del sistema per effettuare la Compensazione degli Errori Statici (SEC). In Fig. 1, il numero di riferimento 1 indica una macchina utensile a controllo numerico di tipo tradizionale, il 3 un dispositivo di controllo applicato alla macchina utensile 1 allo scopo di comandarne il funzionamento, ed il 5 un dispositivo laser di misura montato su una testa birotativa a controllo numerico. Questo schema di larga massima può essere rappresentato più in dettaglio dalla soluzione di Fig. 1A; in essa, il numero di riferimento 1 indica una macchina utensile a controllo numerico di tipo tradizionale; il 3 un dispositivo di controllo applicato alla macchina utensile 1 allo scopo di comandarne il funzionamento; il 3' un modulo di compensazione degli errori statici interno al dispositivo di controllo 3; il 4 un'interfaccia tra il dispositivo di controllo 3 ed il sistema di misura secondario 5, che è comunemente costituito da un dispositivo laser di misura montato su una testa birotativa a controllo numerico. Il dispositivo laser di misura 5 è collegato al dispositivo di controllo 3 tramite il modulo 4, con il quale scambia informazioni e

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

dati relativi al procedimento della presente invenzione.

Per quanto riguarda la terminologia utilizzata nel presente documento, con riferimento alla Fig. 1A, il modulo di compensazione SEC 3 utilizza il cosiddetto "Modello degli errori", cioè una griglia spaziale di "voxel" (termine che verrà illustrato più avanti) e dei relativi errori associati per generare l'errore nell'attuale posizione della macchina 1 (fase di compensazione).

L'interfaccia 4 invece utilizza la cosiddetta "Tabella degli errori", che è una tabella di dati necessaria per creare la cosiddetta "Matrice degli errori" per una qualunque posizione del corpo in esame rispetto al suo grado di libertà descritto dalla terna affiancata. Il termine "Matrice degli errori", invece, indica una matrice che rappresenta i gradi di libertà in termini di errori di rototraslazioni (vedere anche Fig. 4) rigide di un corpo osservato da un sistema di coordinate conformi alle convenzioni di Denavit e Hartenberg. Tale matrice descrive lo stato del corpo citato solamente nella sua attuale posizione rispetto al grado di libertà osservato dalla terna locale citata.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

Come sopra visto, pertanto, l'interfaccia 4 utilizza la Tabella degli errori per calcolare per ogni posizione degli assi (in realtà soltanto per i vertici dei futuri voxel) le Matrici degli errori per ogni sistema di riferimento di Denavit e Hartenberg. Tramite la procedura descritta nel presente documento (derivata dalla teoria cinematica di Denavit e Hartenberg) essa costruisce l'errore statico globale della macchina per quelle determinate posizioni degli assi. Così facendo, costruisce il Modello degli errori, nella fase di calibrazione o generazione del Modello degli errori che verrà illustrata più avanti.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

La Fig. 2 è una vista in prospettiva in spaccato del dispositivo laser di misura 5 del sistema dell'invenzione. Il dispositivo 5 illustrato è del tipo LTD500 fabbricato dalla ditta Leica AG, ma sono applicabili in modo ugualmente efficace altri dispositivi in commercio di tipo equivalente, non solo per quanto riguarda il principio di funzionamento (ad esempio, sistemi basati su principi di fotometria), ma anche per quanto riguarda la morfologia (sensoristica di distanza a non contatto). Il dispositivo laser di misura 5 comprende sostanzialmente un

retroriflettore 7 che in Fig. 2 è illustrato separato dal dispositivo 5, poiché esso viene collocato sull'oggetto da misurare. Nel caso in esame, il retroriflettore 7 viene collocato sulla testa porta-utensile 9 della macchina utensile 1. Il dispositivo 5 comprende inoltre una testa di misura 8 contenente un codificatore 9 azionato da un motore 11 in modo da ruotare intorno ad un primo asse A di Fig. 2, ed un codificatore 13 azionato da un motore 15 in modo da ruotare intorno ad un secondo asse B perpendicolare al primo asse A. Sono previsti inoltre un rilevatore di posizione 17, uno sdoppiatore di raggi 19, un interferometro 21 ed un misuratore 23 della distanza assoluta. I componenti appena indicati sono standard per il prodotto illustrato e il loro funzionamento verrà descritto soltanto in breve, per una migliore comprensione della presente invenzione.

Il dispositivo 3 utilizza la propria testa di misura 8 rotante intorno ai due assi A e B in abbinamento con lo specchietto inclinato 19: le coordinate si basano in generale sul metodo della determinazione del punto polare, cioè si misurano la direzione del raggio laser nello spazio e la distanza tra la testa di misura 8 ed il riflettore

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

7. Queste misure vengono prese ad una velocità che può arrivare fino a 1000 volte al secondo e sono convertite nelle più comuni coordinate cartesiane da un calcolatore interno (non illustrato). Il raggio laser viene riflesso all'indietro sulla testa laser 8 direttamente lungo il suo percorso di trasmissione nella misura in cui il riflettore 7 non si sposta. Quando il riflettore 7 si sposta, il raggio laser trasmesso non colpisce più il centro ottico del riflettore 7. Invece, il raggio riflesso segue un percorso parallelo secondo la velocità di scorrimento. Si determina questo scostamento parallelo sul rilevatore di posizione 17 (che comprende un fotodiodo sensibile alla posizione bidimensionale all'interno della testa di misura 8) tramite la misura di tensioni e lo si scompone in qualsiasi misura della distanza effettuata dall'interferometro 21. Le correzioni d'angolo calcolate per lo specchio inclinato 19 sono convertite in segnali analogici ed inviate agli amplificatori (non illustrati) dei motori 11, 15 allo scopo di ripuntare il raggio laser sul centro del riflettore 7. Questo calcolo viene effettuato 3000 volte al secondo, consentendo il puntamento continuo di qualsiasi percorso. Poiché il

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

retroriflettore 7 sposta il raggio laser in parallelo all'angolo di movimento del riflettore 7, la velocità di puntamento massima non viene molto influenzata dalla distanza. Come con tutti gli interferometri in generale, non si può determinare alcuna distanza assoluta. E' possibile determinare soltanto le variazioni della distanza - cioè quanto il riflettore 7 si è spostato verso o lontano dalla testa di misura 8. Per ottenere la misura della distanza assoluta necessaria per la determinazione dei punti polari, le misure devono cominciare sempre con il riflettore 7 posizionato in un punto da cui è nota la distanza assoluta (nella presente invenzione tale punto sarà chiamato "punto 0"). Gli impulsi di conteggio dell'interferometro 21 vengono quindi sommati o sottratti da questa distanza iniziale per l'esecuzione delle misure.

La Fig. 3 è una vista in prospettiva schematica di una macchina utensile a controllo numerico 1 a cui può essere applicata la presente invenzione, in maniera non limitativa. La macchina utensile 1 illustrata è una fresatrice del tipo sviluppato dalla Richiedente della presente invenzione e su di essa, oltre al dispositivo di controllo 3 collegato (con relativi video 25,

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

tastiera 27 e pulsantiera 29), sono illustrati componenti noti quali la testa porta-utensile di fresatura 9, il mandrino 31, nonché una coppia di portelli di protezione 33. La macchina utensile 1 illustrata in Fig. 3 è di configurazione e funzionamento noti e non verrà descritta ulteriormente in questo contesto.

Verrà ora descritto in dettaglio il procedimento attuato dal sistema secondo la presente invenzione sopra discusso, con riferimento in particolare alla Fig. 1A.

Si effettua innanzitutto la connessione del dispositivo laser di misura 5 al dispositivo di controllo 3 della macchina utensile 1 tramite il modulo 4; dopo ciò, si effettua l'invio automatico del punto 0 della macchina utensile 1 dal dispositivo di controllo 3 al dispositivo laser di misura 5 tramite il modulo 4, in modo da consentirgli il funzionamento in misura, come sopra indicato.

Si effettua quindi l'invio di un comando di presa di un punto di misura della macchina utensile 1 dal dispositivo di controllo 3 al dispositivo laser di misura 5: su questo punto di misura e sugli altri stabiliti efficaci verranno fatti i

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

controlli di corrispondenza tra valori misurati e valori memorizzati, per effettuare l'eventuale taratura futura (questo è l'errore statico).

Il dispositivo laser di misura 5 effettua quindi il rilevamento automatico del suddetto punto di misura, acquisendone il valore per un numero n di volte (dove n di default è 500) e comunicando come risultato il valore medio e la deviazione standard (ottimo indice della bontà e dispersione dei dati). Se la deviazione standard è troppo alta, questo significa che la misura non è stabile e va ripetuta eliminando le cause di instabilità (tipicamente vibrazioni) o aumentando il numero n di acquisizioni.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Paolo Garavelli

Ogni singola acquisizione in automatico viene effettuata in un tempo massimo pari a $4,5 \div 5$ secondi.

Una volta consolidato il punto misurato, il dispositivo laser di misura 5 invia i dati di tale punto al dispositivo di controllo 3 tramite il modulo 4.

Si ripetono le precedenti fasi di invio del comando di presa del punto, rilevamento automatico e invio dei dati di misura m volte, per tanti punti quanti sono ritenuti necessari per l'effettuazione

di una misura corretta ed efficace. Il parametro m dipende dalle dimensioni della macchina e dalla tortuosità degli errori da campionare.

Quando il dispositivo di controllo 3 ha a disposizione gli m dati di misura richiesti, esso procede alla produzione di un modello degli errori statici della macchina utensile 1; tramite questo modello, una volta determinato, sarà possibile eseguire la Compensazione degli Errori Statici (SEC).

Per attuare il procedimento sopra descritto, il dispositivo di controllo 3 comprende una serie di algoritmi, sviluppati attualmente tramite programmi software in linguaggio C, che consentono di effettuare:

- la calibrazione (setup) della macchina utensile; e
- la compensazione degli errori statici della macchina, cioè di quegli errori il cui valore non è influenzato da agenti esterni.

Per quanto riguarda la calibrazione, come già visto, si utilizzano in combinazione per la procedura il controllo numerico, il sistema di misura a bordo macchina ed il cosiddetto "sistema di misura secondario assoluto", cioè il dispositivo

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
pgaravelli

laser di misura 5, in cui il raggio laser, emesso dall'interferometro 21 e direzionato dalla testa birotativa 8, viene riflesso in direzione parallela all'incidenza dallo specchio 7 posizionato sulla macchina utensile 1 al posto dell'utensile. La conoscenza della distanza assoluta (per mezzo del raggio interferometrico) e degli angoli di posizionamento della testa birotativa 8 sono condizioni necessarie e sufficienti per la determinazione della posizione assoluta del riflettore 7 posizionato sul lato dell'utensile.

Con i suddetti dati, si attiva la procedura software di calibrazione che comprende le seguenti fasi:

- determinazione delle dimensioni di una serie di cubetti elementari (chiamati da qui in avanti "voxel", per analogia con il comune termine "pixel" utilizzato per le immagini): una procedura basata sulle note tecniche FFT (Fast Fourier Transformers = Trasformate Rapide di Fourier) determina la dimensione minima dei voxel con cui descrivere il comportamento geometrico della macchina; ciò può essere un valore che è funzione della posizione degli assi

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

della macchina;

- acquisizione degli errori statici;
- raccolta dei valori degli errori statici per tutti i vertici dei voxel in cui è stato suddiviso il volume di lavoro della macchina 1.

La procedura di acquisizione degli errori statici, a sua volta, si suddivide nelle seguenti fasi:

- emissione di un comando di un riferimento da parte del software di calibrazione nel modulo 4 al controllo 3 della macchina 1;
- dopo il posizionamento della macchina 1, comando dell'esecuzione di un ciclo di misura da parte del software di calibrazione al dispositivo di misura 5;
- al termine della misura, acquisizione, da parte del software di calibrazione, dei valori di misura dal sistema di misura a bordo della macchina 1 e dal dispositivo di misura 5;
- registrazione della differenza tra i valori misurati nella fase precedente come valore dell'errore statico correlato al

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Paolo Garavelli

- riferimento comandato in precedenza al controllo 3 della macchina 1;
- emissione di comandi relativi ad un nuovo riferimento.

Come si vede, il software di calibrazione riprende in questo stadio sostanzialmente le fasi del procedimento evidenziate in precedenza.

Lo scopo è quello di creare il Modello degli errori, cioè ottenere i valori degli errori statici per tutti i vertici dei voxels che compongono la griglia spaziale che descrive l'area di lavoro della macchina.

Per farlo, nella procedura di calibrazione, la raccolta dei valori degli errori statici per i vertici dei voxel si effettua, in alternativa, o rilevando tali valori per tutti i vertici dei voxel nel campo di lavoro della macchina 1, oppure applicando la seguente strategia:

- sempre mediante il suddetto ciclo di rilevamento, acquisizione dei valori degli errori statici soltanto per un numero sufficiente di punti, in modo tale da raccogliere le informazioni necessarie a comprendere il comportamento di ogni singolo asse della macchina.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

La base teorica di ciò è che il dispositivo di controllo 3 controlla la macchina 1 in base a una cinematica cartesiana ideale. In realtà ogni asse è dotato di una cinematica più complessa perché comprensiva di errori geometrici (vedere la Fig. 4). Lo scopo è quindi quello di comprendere il reale comportamento cinematico di ogni asse (grado di libertà della macchina) (e quindi le sue roto-traslazioni reali (Fig. 4)) e quindi comporli cinematicamente per ricostruire l'errore che la macchina assumerebbe in ogni posizione in cui guida "l'utensile" (o attuatore tecnologico).

Lo sviluppo di tale approccio trova i suoi fondamenti nella teoria matematica della risoluzione del problema della cinematica diretta dei robot. Tale cinematica, basata sul metodo di Denavit e Hartenberg (1955), è in grado di trasformare ogni punto, osservato dalla terna di riferimento locale ad un asse della macchina 1, tramite il prodotto matriciale fra la catena di terne locali agli assi, nel sistema di riferimento assoluto. Associando ad ogni terna locale il grado di libertà dell'asse a cui è riferita, si riesce a descrivere, tramite questa serie di prodotti fra matrici, il moto di un qualsiasi punto osservato da

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

una qualsiasi di tali terne. Verrà fornito qui di seguito un breve esempio di applicazione del metodo di Denavit e Hartenberg, ipotizzando una terna $j-1$ e una terna j , rispettivamente come sistemi di riferimento locale dell'asse $j-1$ e dell'asse j solidali al loro grado di libertà. Con queste ipotesi, la posizione della terna j è osservabile dalla terna $j-1$ tramite un vettore descrivibile tramite la seguente matrice:

Matrice di trasformazione $j \rightarrow j-1$

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta_j) & -\sin(\theta_j) \cdot \cos(\alpha_j) & \sin(\theta_j) \cdot \sin(\alpha_j) & a_j \cdot \cos(\theta_j) \\ \sin(\theta_j) & \cos(\theta_j) \cdot \cos(\alpha_j) & -\cos(\theta_j) \cdot \sin(\alpha_j) & a_j \cdot \sin(\theta_j) \\ 0 & \sin(\alpha_j) & \cos(\alpha_j) & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)
PGaravelli

dove θ è il grado di libertà di j .

Premoltiplicando il vettore che descrive la posizione di un punto osservata rispetto alla terna j , per la matrice di trasformazione $j \rightarrow j-1$ si ottiene un vettore che descrive la posizione di tale punto osservata dalla terna $j-1$. La serie di moltiplicazioni delle matrici di trasformazione permette di trasformare un riferimento locale in uno globale risalendo la catena cinematica in esame.

Si effettua quindi la descrizione del

comportamento geometrico della macchina componendo gli errori, tramite interposizione, alla suddetta serie di moltiplicazioni per trasformare un punto dall'utensile nel sistema di riferimento assoluto, prima di ogni matrice di trasformazione, di una "matrice degli errori", che descrive gli errori statici generati dal movimento dell'asse a cui è associata detta matrice per determinate posizioni del suddetto asse (o grado di libertà).

La matrice degli errori, in forma identica a quelle di trasformazione, è tale che, in base al valore di posizione dell'asse a cui è riferita, riesce a descrivere i soli errori rototraslatori dell'asse. Come indicato in precedenza, la sola misura dei punti necessari in grado di fornire le informazioni necessarie a comprendere il comportamento di ogni singolo asse della macchina, permette di calcolare, tramite tale metodologia, i valori degli errori statici in qualunque punto dell'area di lavoro della macchina e quindi nei vertici dei voxel.

Con riferimento alla Fig. 4, si descriverà in maggior dettaglio come per ogni posizione del grado di libertà è possibile creare/assemblare la matrice degli errori. Come già detto, la matrice degli

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

errori è quell'insieme di informazioni necessarie a descrivere, rispetto ad un determinato sistema di riferimento, gli errori rototraslatori di un corpo dotato di un grado di libertà in una sua determinata posizione rispetto a tale grado di libertà. Il sistema di riferimento, opportunamente posizionato secondo le convenzioni di Denavit e Hartenberg, osserva e descrive il grado di libertà del corpo in esame. In base alla posizione di tale corpo viene generata la matrice degli errori. Le informazioni necessarie a generare la matrice degli errori sono contenute in una tabella degli errori.

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)
pgaravelli

Come illustrato in Fig. 4, il corpo rappresentato è dotato di un grado di libertà descritto ed osservato dalla terna locale indicata in figura. L'asse Z della terna locale identifica tale grado di libertà. D_y e D_z rappresentano gli errori statici di tale corpo. Questi errori sono funzione della quota Z. Esiste ovviamente anche un D_z che non è stato rappresentato in figura.

La conoscenza di tali errori, in un determinato numero di punti della quota Z, permette di compilare le tabelle degli errori come in Tabella I:

Tabella I

Posizione (valore di Z)	Dx	Dy	Dz	Da	Db	Dc
" posizione a cui gli errori si riferiscono"	" come precedentemente indicato"	" come precedentemente indicato"	" come precedentemente indicato"	Errore di posizionamento angolare rispetto all'asse X	Errore di posizionament o angolare rispetto all'asse Y	Errore di posizionamento angolare rispetto all'asse Z
... .						

La conoscenza della quota Z permette di ricercare nelle tabelle degli errori le informazioni necessarie a ricostruire la posizione reale del corpo in esame rispetto alla terna locale riferita al suo grado di libertà.

Tali informazioni vengono tradotte in una matrice tramite le convenzioni di Denavit e Hartenberg. Viene così creata la matrice degli errori relativa alla posizione Z corrente del corpo in esame.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

Premoltiplicando la matrice degli errori ottenuta per le matrici di trasformazione, si possono trasformare gli errori nel sistema di riferimento assoluto. Tale trasformazione permette inoltre di considerare l'effetto leva delle posizioni degli assi rispetto agli errori angolari.

Attraverso tale procedimento, è quindi possibile descrivere gli errori di una catena cinematica aperta. La condizione necessaria a tale scopo è che le singole matrici degli errori dei

singoli assi descrivano i soli errori relativi a tale asse, esattamente come se gli ulteriori gradi di libertà della macchina fossero privi di errori. In altre parole, questa è una scomposizione degli errori geometrici di un sistema cinematico. La base di tale scomposizione è l'individuazione delle cause degli errori.

Una volta noto ciò, si è quindi in grado di valutare virtualmente (cioè senza eseguirvi ha misura diretta ma semplicemente adottando la procedura precedentemente descritta) il valore dell'errore statico in una qualunque posizione della macchina. Tale procedura viene quindi adottata per calcolare i valori degli errori in tutti i vertici del voxels costruendo in tale maniera il Modello degli errori (necessario al modulo 3 di Figura 1 per la fase di compensazione).

Per quanto riguarda la compensazione degli errori statici della macchina 1, il programma software in grado di eseguirla è strutturato in modo da comprendere il modello degli errori contenente i valori degli errori statici in determinate posizioni della macchina 1; sulla base di tale tabella, la procedura consente di calcolare e quindi compensare con sufficiente velocità gli

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

errori statici della macchina. La velocità di compensazione è sufficiente qualora il modulo di compensazione sia in grado di eseguire la compensazione di un errore statico in tempo utile tale da produrre un comportamento geometrico della macchina migliore rispetto al caso di mancata compensazione.

In base al concetto di "velocità sufficiente" definito in precedenza, il modulo di compensazione acquisisce i valori del sistema di misura a bordo macchina, ed elabora, in base ai valori contenuti nel modello degli errori, il valore di errore statico corrispondente alla posizione attuale della macchina fornita tramite l'acquisizione.

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

La procedura e la struttura dei dati sono le seguenti: il modello degli errori descrive in maniera discreta gli errori della macchina 1 nel suo volume di lavoro. Essa quindi consiste in una griglia/reticolo spaziale per i cui vertici è appunto disponibile il valore dell'errore statico della macchina 1 qualora il sistema di misura a bordo macchina indichi che l'utensile è posizionato in tale punto. L'area di lavoro della macchina viene quindi "discretizzata" in una serie di voxel, per tutti i quali negli otto vertici è disponibile

il valore dell'errore, esattamente come citato in precedenza.

Quindi, in base alla posizione reale della macchina, nota dalla fase precedente, il modulo di compensazione ricerca il voxel che contiene tale punto. Una volta noto l'indirizzo di tale voxel, esso calcola con interpolazioni lineari il valore dell'errore statico nel punto di reale interesse, partendo dagli otto valori disponibili per i vertici del voxel e conoscendo la posizione della macchina al suo interno.

Si eseguono infine operazioni di filtraggio, per evitare brusche variazioni nell'andamento delle compensazioni imposte, e quindi si esegue la compensazione, forzando la macchina a posizionarsi nello spazio di un punto dato dalla somma algebrica dei valori acquisiti e di quelli elaborati in precedenza (posizione misurata + errore).

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

RIVENDICAZIONI

1. Procedimento per la realizzazione della Compensazione Statica degli Errori su macchinari, in particolare macchine utensili a controllo numerico, caratterizzato dal fatto di comprendere le seguenti fasi:
 - a. connessione di un dispositivo laser di misura (5) ad un dispositivo di controllo (3) di una macchina utensile a controllo numerico (1);
 - b. invio automatico del punto 0 di detta macchina utensile (1) da detto dispositivo di controllo (3) a detto dispositivo laser di misura (5);
 - c. invio di un comando di presa di un punto di misura di detta macchina utensile (1) da detto dispositivo di controllo (3) a detto dispositivo laser di misura (5);
 - d. rilevamento automatico di detto punto di misura da parte di detto dispositivo laser di misura (5) dopo n volte in cui non si sono verificate variazioni di detto punto;
 - e. invio dei dati di detto punto di detta macchina utensile (1) rilevato da detto dispositivo laser di misura (5) a detto dispositivo di controllo (3);
 - f. ripetizione delle precedenti fasi da c) ad e)

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

per m punti di misura;

- g. produzione di un modello degli errori statici di detta macchina a controllo numerico (1);
 - h. esecuzione della Compensazione Statica degli Errori (SEC) in base a detto modello prodotto.
2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che n è comunemente uguale a 500.
 3. Procedimento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che m dipende dalle dimensioni della macchina e dalla tortuosità degli errori da campionare.
 4. Procedimento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detta fase d) di rilevamento automatico viene effettuata in un tempo variabile da 4,5 a 5 secondi.
 5. Sistema per la realizzazione della Compensazione Statica degli Errori su macchinari, in particolare macchine a controllo numerico, caratterizzato dal fatto di comprendere:
 - una macchina utensile a controllo numerico (1);
 - un dispositivo di controllo (3) connesso a detta macchina utensile (1) ed atto a controllarne il funzionamento;

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

- un dispositivo laser di misura (5) montato su una testa birotativa (8) a controllo numerico, detto dispositivo laser di misura (5) essendo connesso a detto dispositivo di controllo (3).

6. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detta macchina utensile a controllo numerico (1) è una fresatrice.

7. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispositivo laser di misura (5) comprende sostanzialmente:

- un retroriflettore (7) collocato sulla testa porta-utensili (9) di detta macchina utensile (1);
- una testa di misura (8) contenente un codificatore (9) azionato da un motore (11) in modo da ruotare intorno ad un primo asse (A), ed un codificatore (13) azionato da un motore (15) in modo da ruotare intorno ad un secondo asse (B) perpendicolare a detto primo asse (A);
- un rilevatore di posizione (17);
- uno sdoppiatore di raggi (19);

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli

- un interferometro (21); ed
 - un misuratore (23) della distanza assoluta.
8. Sistema secondo la rivendicazione 5, caratterizzato dal fatto che detto dispositivo di controllo (3) comprende:
- mezzi di calibrazione; e
 - mezzi di compensazione degli errori statici di detta macchina (1).
9. Sistema secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di calibrazione sono atti ad eseguire le seguenti fasi:
- determinazione delle dimensioni dei voxel, mediante una procedura basata su tecniche FFT che determina la dimensione minima dei voxel con cui descrivere il comportamento geometrico della macchina (1);
 - acquisizione degli errori statici;
 - raccolta dei valori degli errori statici per tutti i vertici dei voxel in cui è stato suddiviso il volume di lavoro della macchina (1).
10. Sistema secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detta procedura di

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

acquisizione degli errori statici comprende le seguenti fasi:

- emissione di un comando di un riferimento da parte del software di calibrazione al controllo (3) della macchina (1);
- dopo il posizionamento della macchina (1), comando dell'esecuzione di un ciclo di misura da parte del software di calibrazione al dispositivo di misura (5);
- al termine della misura, acquisizione, da parte del software di calibrazione, dei valori di misura dal sistema di misura a bordo della macchina (1) e dal dispositivo di misura (5);
- registrazione della differenza tra i valori misurati nella fase precedente come valore dell'errore statico correlato al riferimento comandato in precedenza al controllo (3) della macchina (1); e
- emissione di comandi relativi ad un nuovo riferimento.

11. Sistema secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detta fase di raccolta dei valori degli errori statici per i

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

vertici dei voxel si effettua rilevando tali valori per tutti i vertici dei voxel nel campo di lavoro della macchina (1).

12. Sistema secondo la rivendicazione 9, caratterizzato dal fatto che detta fase di raccolta dei valori degli errori statici per i vertici dei voxel si effettua tramite le seguenti fasi:

- acquisizione dei valori degli errori statici soltanto per un numero sufficiente di punti, in modo tale da raccogliere le informazioni necessarie a comprendere il comportamento di ogni singolo asse della macchina (1); e
- descrizione del comportamento geometrico della macchina (1).

13. Sistema secondo la rivendicazione 12, caratterizzato dal fatto che detta fase di acquisizione dei valori di parte dei punti si basa sulla teoria matematica della risoluzione del problema della cinematica diretta dei robot, ed è in grado di trasformare ogni punto, osservato dalla terna di riferimento locale ad un asse della macchina (1), tramite il prodotto matriciale fra la catena di terne locali agli

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

assi, nel sistema di riferimento assoluto detta teoria, associando ad ogni terna locale il grado di libertà dell'asse a cui è riferita, essendo in grado di descrivere, tramite questa serie di prodotti fra matrici, il moto di un qualsiasi punto osservato da una qualsiasi di tali terne.

14. Sistema secondo la rivendicazione 13, caratterizzato dal fatto che detta fase di descrizione del comportamento geometrico della macchina (1) è effettuata tramite interposizione, prima di ogni matrice di trasformazione, di una matrice degli errori a detta serie di moltiplicazioni per trasformare un punto dall'utensile nel sistema di riferimento assoluto, detta matrice degli errori essendo di forma identica a detta matrice di trasformazione e descrivendo gli errori statici generati dal movimento dell'asse a cui è associata detta matrice, detta matrice degli errori essendo tale da descrivere, in base al valore di posizione dell'asse a cui è riferita, i soli errori roto-traslatori dell'asse.

15. Sistema secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di compensazione degli errori statici della

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

macchina (1) comprendono una tabella degli errori contenente i valori degli errori statici in determinate posizioni della macchina (1), detti mezzi di compensazione essendo in grado di effettuare le seguenti fasi:

- sulla base di detta tabella degli errori, calcolo e quindi compensazione degli errori statici della macchina (1), con una velocità di compensazione tale per cui i mezzi compensazione siano in grado di eseguire la compensazione di un errore statico in tempo utile tale da produrre un comportamento geometrico della macchina (1) migliore rispetto al caso di mancata compensazione;
- acquisizione dei valori del sistema di misura a bordo macchina;
- elaborazione, in base ai valori contenuti in detta tabella degli errori, del valore di errore statico corrispondente alla posizione attuale della macchina fornita tramite la fase di acquisizione.

16. Sistema secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detta tabella degli errori descrive in maniera discreta gli errori

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Garavelli

della macchina (1) nel suo volume di lavoro, detta tabella degli errori comprendendo una griglia/reticolo spaziale per i cui vertici è disponibile il valore dell'errore statico della macchina (1) qualora il sistema di misura a bordo macchina indichi che l'utensile è posizionato in tale punto.

17. Sistema secondo la rivendicazione 15, caratterizzato dal fatto che detti mezzi di compensazione sono in grado di eseguire inoltre le fasi di:

- discretizzazione dell'area di lavoro della macchina (1) in una serie di voxel, negli otto vertici di tutti detti voxel essendo disponibile il valore dell'errore;
- in base alla posizione reale della macchina (1), ricerca del voxel che contiene tale punto;
- calcolo, tramite interpolazioni lineari, del valore dell'errore statico nel punto di interesse, partendo dagli otto valori disponibili per i vertici del voxel e conoscendo la posizione della macchina al suo interno;
- filtraggio, allo scopo di evitare brusche

PAOLO GARAVELLI
(iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

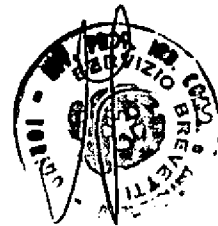
variazioni nell'andamento delle compensazioni imposte; e

- compensazione degli errori, detta compensazione essendo attuata forzando la macchina (1) a posizionarsi nello spazio di un punto dato dalla somma algebrica dei valori acquisiti e di quelli elaborati in precedenza (posizione misurata + errore).

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)
Garavelli



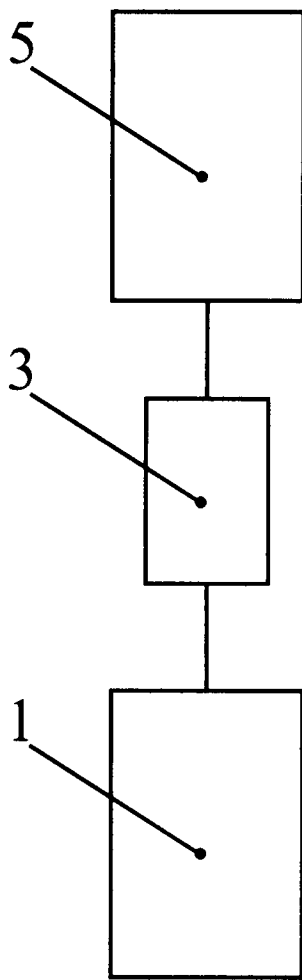


Fig. 1

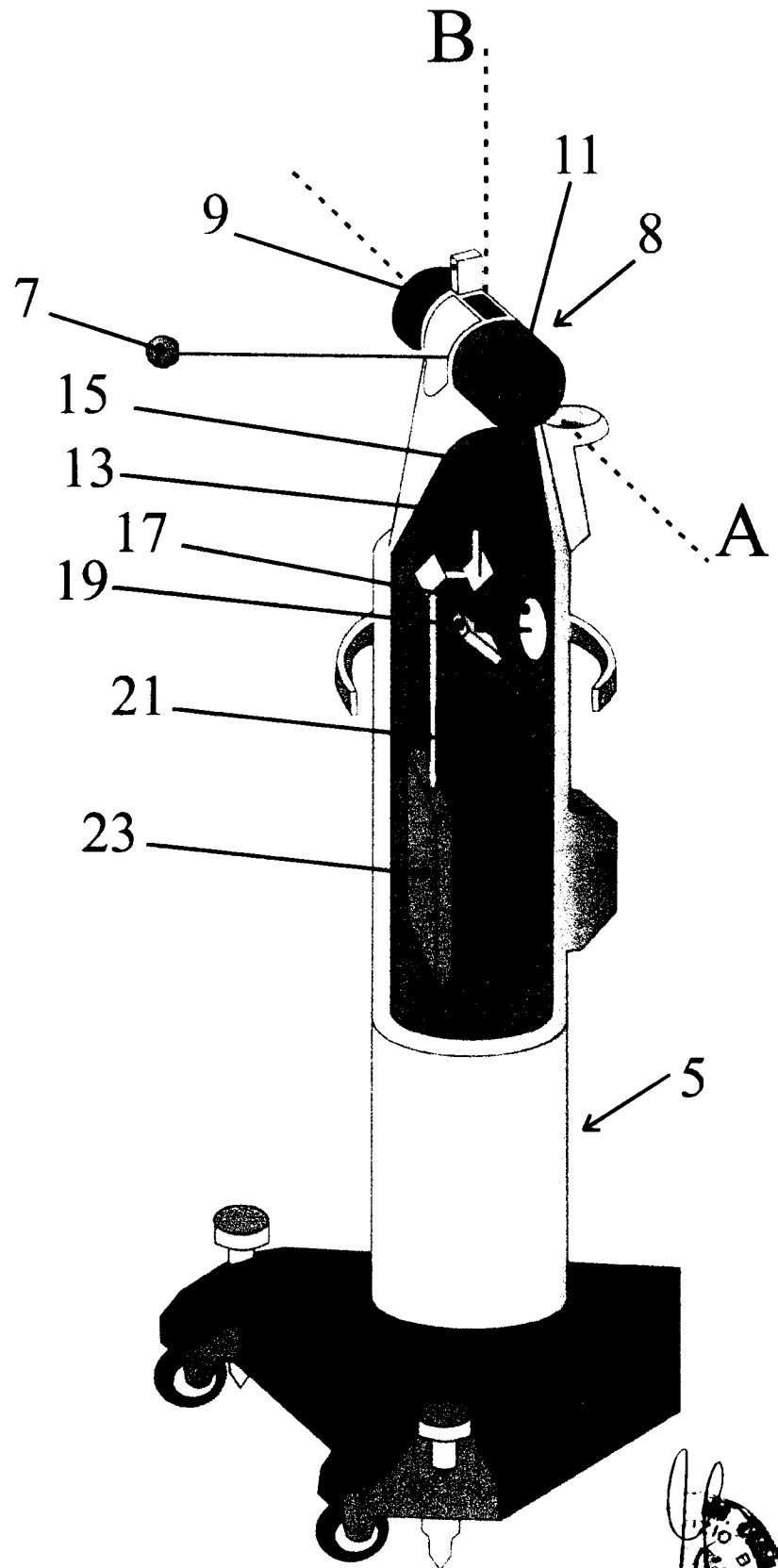


Fig. 2

PACI G. GAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Giovanni Gavelli

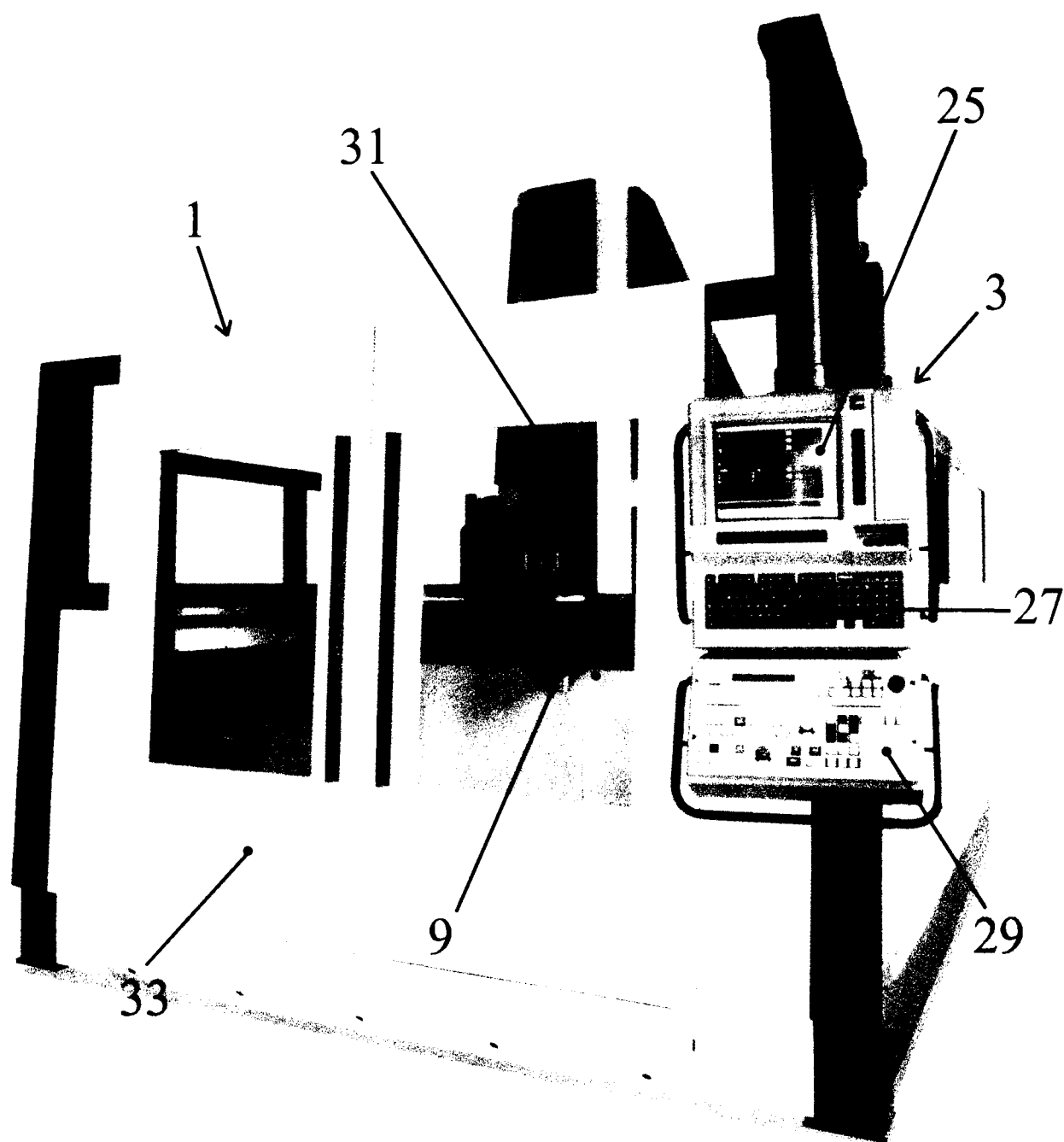


Fig. 3

PAOLO GARAVELLI
(Iscriz. Albo n. 771)

Paolo Garavelli

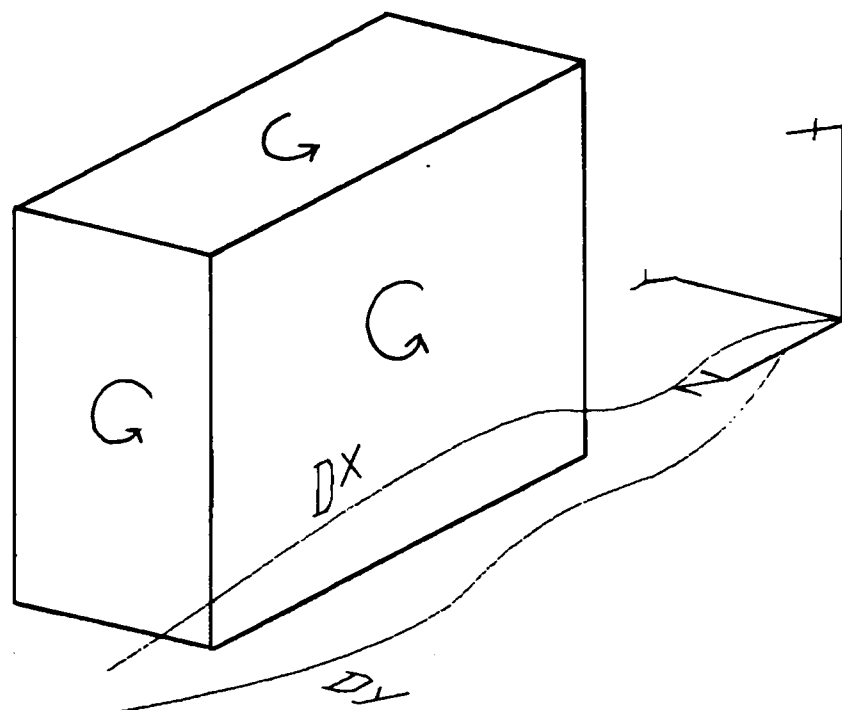


Fig. 4

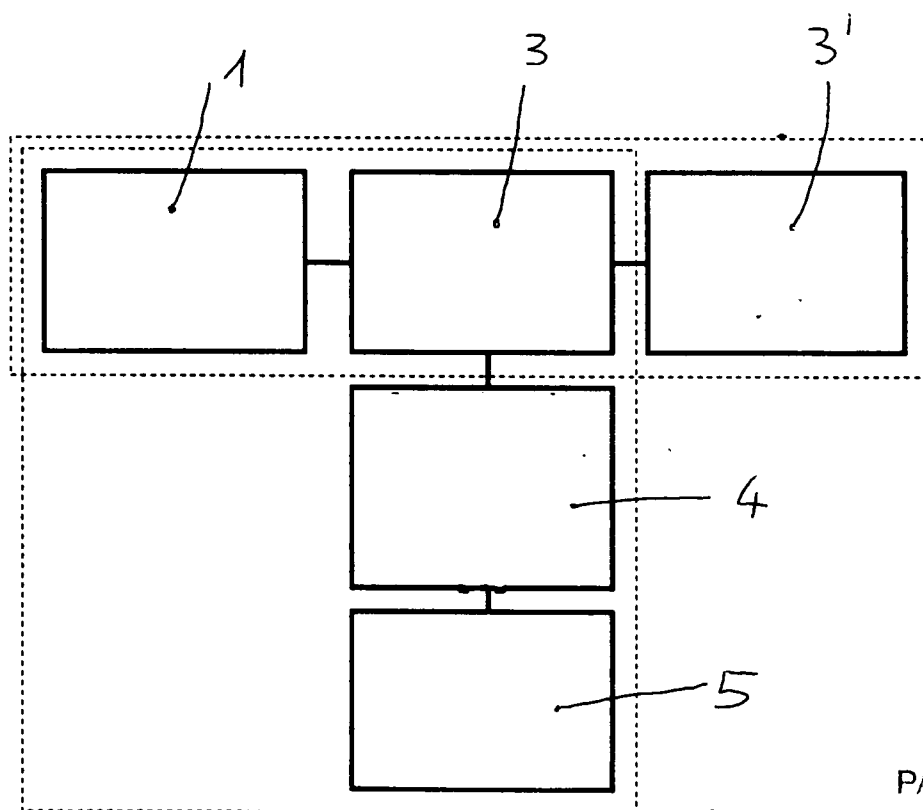


FIG. 1A

PAOLO GARAVELLI
(Inventor, Att. n. 771)

Paolo Garavelli