MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETA' INDUSTRIALE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

UIBM

DOMANDA NUMERO	101997900628678
Data Deposito	09/10/1997
Data Pubblicazione	09/04/1999

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	B		

Titolo

METODO DI DETERMINAZIONE DELL'INCERTEZZA DI MISURA DI UNA MACCHINA DI MISURA A COORDINATE.

D E S C R I Z I O N E

del brevetto per invenzione industriale,

di 1) DEA - BROWN & SHARPE S.P.A.,

di nazionalità italiana,

con sede a 10024 MONCALIERI (TORINO), VIA VITTIME DI PIAZZA DELLA LOGGIA, 6

2) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE,

di nazionalità italiana,

TO 97A 000895

con sede a 00185 ROMA, PIAZZALE ALDO MORO, 7

Inventori: SOLA Domenico, RICCI Emanuele, BALSAMO Alessandro, DI CIOMMO Mauro, REBAGLIA Bruno Ippolito

*** *** ***

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

La presente invenzione è relativa ad un metodo di determinazione dell'incertezza di una misura eseguita mediante una macchina di misura a coordinate.

Le macchine di misura a coordinate, d'ora in poi denominate semplicemente CMM, sono macchine per il controllo dimensionale di pezzi di qualsiasi forma, e rappresentano un notevole supporto nelle tecniche di produzione "computer aided" (dal CAD/CAM al CIM) nei centri di lavorazione a controllo numerico.

Il principio di funzionamento delle macchine CMM è quello di campionare la superficie di un pezzo e, mediante un tastatore mobile lungo tre assi cartesiani fra loro ortogonali, rilevare un numero prestabilito di

punti sulla superficie stessa, al fine di ricostruire, mediante un algoritmo di interpolazione, la forma del pezzo stesso.

Le CMM, in virtù della loro notevole precisione di misura, sono vantaggiosamente utilizzate per la verifica delle tolleranze di lavorazione, al posto dei meno precisi strumenti di misura tradizionali. Tali CMM forniscono in uscita il risultato numerico della misura svolta senza fornire alcuna indicazione sulla incertezza della misura.

Pertanto, si pone il problema della determinazione delle incertezze dei risultati di misure dimensionali eseguite mediante esse, per poter individuare i valori del misurando che costituiscono le zone di ambiguità, vale a dire le zone in cui risulta difficile stabilire se il pezzo è conforme o meno alla specifica. Infatti, le zone di ambiguità delimitano da una parte e dall'altra la zona di tolleranza, cioè l'intervallo definito dai valori minimo e massimo che può assumere la grandezza misurata per poter considerare la grandezza conforme; se il risultato della misura si colloca in una zona di ambiguità, il pezzo viene solitamente classificato fuori tolleranza e quindi scartato. Appare ovvio il vantaggio di poter ridurre tali zone di ambiguità, riducendo l'incertezza della misura.

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

Le norme ISO 9000 sulla qualità stabiliscono che le apparecchiature per prova, misurazione e collaudo debbano avere una incertezza di misura conosciuta e compatibile con le esigenze di misurazione richieste.

Scopo della presente invenzione è la realizzazione di un metodo che consenta di determinare, in maniera veloce, ripetibile per ogni tipo di misura, e precisa, l'incertezza di una misura eseguita da una CMM.

Secondo la presente invenzione viene infatti realizzato un metodo di determinazione dell'incertezza di misura di una macchina di misura a coordinate, come definito nella rivendicazione 1.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 426/BM

Per la comprensione della presente invenzione ne viene ora descritta una forma di realizzazione preferita, a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, in cui:

- la figura 1 mostra schematicamente una CMM, alla quale viene applicato il metodo di misura oggetto dell'invenzione;

- le figure 2-4 mostrano schemi di flusso relativi a fasi di metodo secondo l'invenzione; e

- la figura 5 illustra un esempio di applicazione del metodo della presente invenzione.

Con riferimento alla figura 1, è indicata con 1 una CMM di tipo noto, atta ad eseguire misure dimensionali,

ad esempio di tolleranza di lavorazione, su un pezzo 2 prodotto ad esempio da una macchina di lavorazione a controllo numerico in una linea produttiva. Le misure dimensionali prevedono la misura di una o più grandezze del pezzo 2; nel caso di misura di più grandezze (ad esempio il diametro di due fori paralleli e l'interasse fra questi), queste ultime possono essere fra loro correlate o scorrelate.

La CMM 1 comprende, sostanzialmente, un basamento 3 sul quale viene vincolato (ad esempio con una operazione di staffatura) il pezzo 2, un supporto 4 a portale provvisto inferiormente di un primo carro 5a mobile sul basamento 3 stesso lungo una prima direzione (x) rettilinea orizzontale ed uno stelo 6 portato da un secondo carro 5b mobile rispetto alla traversa 4a del supporto a portale 4 lungo una seconda direzione orizzontale (y) perpendicolare alla prima. Lo stelo 6 è inoltre provvisto di un terzo carro 5c mobile rispetto al secondo carro 5b lungo una terza direzione (z) verticale, perpendicolare alla prima (x) ed alla seconda direzione (y); tale stelo 6 è provvisto inferiormente di un elemento tastatore 7 atto a campionare la superficie del pezzo 2 per consentire la rilevazione di punti sulla superficie stessa.

La CMM 1 comprende inoltre attuatori (non

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

rappresentati) per muovere i suddetti carri 5a, 5b e 5c lungo le rispettive direzioni (x, y, z) e sensori (non rappresentati) per rilevare la posizione dell'elemento tastatore 7 lungo le tre direzioni (x, y, z).

La CMM 1 comprende una unità elettronica programmabile (di tipo noto e non illustrata), atta a controllare i movimenti dell'elemento tastatore 7 in base al tipo di misura prescelto ed in base a informazioni sul pezzo 2 fornite dall'utente, ed è collegata ad una unità di elaborazione 9, la quale definisce una interfaccia che consente all'utente l'impostazione di parametri per la misura.

Alla CMM 1 sono accoppiati sensori 8 atti a rilevare variazioni di parametri ambientali quali temperatura ed eventualmente pressione, umidità, eccetera. La CMM 1 è inoltre provvista di scale graduate (di tipo noto e, quindi, non illustrate) che consentono di rapportare i valori misurati dal tastatore 7 a valori dimensionati. In particolare, le scale graduate sono costituite da regoli graduati realizzati in ceramica, estendentisi di fianco ai carri lungo le loro direzioni di spostamento. Ciascun carro 5a, 5b, 5c è provvisto di un lettore ottico (non mostrato) atto a leggere, sul relativo regolo graduato, la posizione del carro stesso durante il suo spostamento.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Il metodo della presente invenzione è volto alla determinazione dell'incertezza associata ad una misura eseguita mediante una CMM del tipo sopra descritto. Nel caso in cui la grandezza misurata sia una sola, determinare l'incertezza associata ad una misura corrisponde a calcolare la varianza di tale grandezza, essendo il valore della varianza pari al quadrato del valore dell'incertezza. Nel caso di più grandezze misurate, determinare l'incertezza di una misura equivale a determinare l'incertezza associata a ciascuna delle grandezze in questione, nonché a determinare il grado di correlazione esistente fra le diverse grandezze; a tal fine, occorre calcolare la matrice di varianza-covarianza dell'insieme delle grandezze misurate, la quale presenta lungo la diagonale principale i valori delle varianze delle singole grandezze, ciascuno di tali valori essendo pari al quadrato del valore dell'incertezza della relativa grandezza, e nelle restanti posizioni i valori delle covarianze che legano due a due le diverse grandezze.

Con riferimento alla figura 2, il metodo per il calcolo dell'incertezza di misura prevede inizialmente l'esecuzione di un blocco 100, in cui l'utente imposta sulla CMM 1 la strategia di campionamento della superficie del pezzo 2 nonché l'algoritmo di

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

interpolazione dei punti rilevati, da utilizzare in una fase successiva.

Sempre nel blocco 100 l'utente inserisce nell'unità di elaborazione 9 i valori di tutti i parametri ritenuti influenti per il calcolo delle grandezze di interesse. I parametri di influenza possono essere di vario tipo e sono raggruppabili in gruppi funzionali. Ad esempio, un primo gruppo di parametri comprende parametri ambientali, di cui alcuni sono rilevati dai sensori 8 e trasmessi direttamente all'unità di elaborazione 9, mentre altri sono inseriti dall'utente nell'unità di elaborazione 9 stessa. Fra i parametri rilevati dai sensori vi è la temperatura T ed eventualmente altre grandezze fisiche di interesse come la pressione, l'umidità, eccetera. Fra i parametri inseriti dall'utente vi è l'andamento e l'intervallo di variazione previsti della temperatura T sul pezzo 2, sul basamento e sulle scale di misura, gli intervalli di tempo Δt previsti fra le misurazioni successive del tastatore 7 (dipendenti dalla velocità della macchina e dalla forma del pezzo 2), i coefficienti di dilatazione termica α del pezzo 2 e delle scale di misura e le coordinate dei vincoli che bloccano il pezzo 2 sul basamento 3. I valori dei parametri introdotti dall'utente sono valori stimati, ricavati in base

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

all'esperienza, al risultato di precedenti misure, al valore dei parametri misurati dai sensori 8, a calcoli probabilistici, eccetera.

È inoltre presente un secondo gruppo di parametri cosiddetti "geometrici", comprendente parametri che descrivono rettilineità e rotazioni (rollio, beccheggio e imbardata) di ciascuno dei carri 5a, 5b, 5c della CMM 1, nonché l'offset del tastatore 7, vale a dire la distanza fra il tastatore 7 ed un punto di riferimento fisso posizionato, ad esempio, sul terzo carro 5c (la conoscenza di tale distanza essendo necessaria per correggere il valore rilevato dal tastatore 7 stesso), il tipo di tastatore 7 scelto, eccetera.

Altri gruppi di parametri possono essere relativi agli effetti di carico, agli errori del tastatore 7 (anisotropia della sua funzione di trasferimento), alla presenza di isteresi e di giochi nel moto dei carri 5a, 5b e 5c della CMM 1, agli errori dinamici dovuti alle vibrazioni o sollecitazioni della CMM 1 durante il funzionamento, eccetera.

Alcuni degli effetti sopra elencati possono essere parzialmente o totalmente compensati mediante una unità di compensazione (di tipo noto e non illustrata), utilizzante moduli di calcolo e relativi strumenti e metodi di misurazione predisposti dal costruttore ed

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 426/BM

attivabili in modo automatico o su richiesta dell'utilizzatore. In particolare l'unità di compensazione permette di eliminare gli errori sistematici della CMM 1, noti in base a valori stimati di alcuni dei parametri di influenza (parametri ambientali, geometrici, eccetera), o in base a rilevazioni ambientali effettuate da sensori posti nella macchina CMM 1 stessa,. coincidenti con i sensori 8 oppure di tipo diverso.

Fra i parametri di influenza, alcuni devono essere impostati o inseriti volta per volta prima di ogni misura, mentre altri possono essere pre-impostati e rimanere immutati per qualsiasi tipo di misura (è possibile ad esempio pre-impostare i valori di offset dei diversi tastatori utilizzabili dalla macchina, i coefficienti di dilatazione termica delle scale, i parametri di identificazione geometrica, eccetera). Essendo, comunque, ciascuno dei parametri introdotti o misurati affetto da incertezza, occorre conoscere, per l'esecuzione del metodo dell'invenzione, gli intervalli di variazione e le distribuzioni di probabilità di ciascuno di essi.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Il blocco 100 è seguito da un blocco 110, in cui la CMM 1 rileva, per mezzo del tastatore 7 le coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk}) di un numero

prestabilito di punti (P1, ..., Pk) sulla superficie del pezzo 2, dalle quali poter risalire alle grandezze di interesse G_1, ..., G_r. All'insieme di coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk}) è possibile associare un vettore di coordinate u_C = [x_{P1} y_{P1} z_{P1} ... x_{Pk} y_{Pk} z_{Pk}] avente dimensione 3k.

Il blocco 110 è seguito da un blocco 120, in cui i valori delle coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk}) vengono rapportati alle scale graduate, per trasformare i valori stessi in valori dimensionati.

Viene successivamente eseguito un blocco 130, in cui vengono disattivate tutte le eventuali compensazioni (ottenibili con l'unità di compensazione sopra citata) predisposte dal costruttore.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Viene quindi eseguito un blocco 140, in cui la CMM 1 esegue, mediante calcoli di tipo noto sulle coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk}), una interpolazione dei punti rilevati per ricavare un insieme di valori di riferimento *Rif* = (g_1, ..., g_r) delle grandezze di interesse G_1, ..., G_r.

Le fasi successivamente descritte sono quelle che caratterizzano il presente metodo e sono relative al calcolo dell'incertezza associata ai risultati della misurazione delle grandezze di interesse G_1, ..., G_r. In particolare, i successivi blocchi 150-210 sono relativi

all'esecuzione di una tecnica di simulazione detta di "Monte Carlo", nota in statistica, e all'esecuzione di un numero prestabilito N di cicli di elaborazione dei risultati di tale tecnica di simulazione fino all'ottenimento, in un blocco 220 finale, del risultato finale del presente metodo.

Brevemente, il metodo di Monte Carlo è un metodo che consente di ottenere una previsione probabilistica di una variabile y (ad esempio m-dimensionale) quando è nota la descrizione probabilistica di una variabile x (ad esempio n-dimensionale) a cui la variabile y è legata secondo una funzione y = f(x). Il metodo, in sintesi, consiste nel generare a caso, secondo la descrizione probabilistica nota, un numero p elevato di ingressi x, che vengono applicati come variabili di simulazione al modello y = f(x) per ricavare altrettante uscite y. Si ottiene così un campione di p osservazioni delle uscite y, sulla base del quale è possibile calcolare i parametri statistici richiesti. Il risultato così ottenuto tende asintoticamente al valore teorico al crescere del numero di osservazioni p, cioè di cicli di simulazione; sarà quindi necessario eseguire un numero di cicli idoneo ad ottenere i parametri statistici richiesti con approssimazione sufficiente. Il metodo di Monte Carlo ha il suo merito principale nel rendere la

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 426/BMI

complessità dell'analisi probabilistica indipendente dalla complessità del modello y = f(x).

Si supponga che, come nel caso in oggetto, la relazione y = f(x) rappresenti il modello matematico di un sistema fisico, i cui ingressi sono noti con incertezza Ψ_x; ciò che interessa è il calcolo dell'incertezza Ψ_y delle uscite. Tale problema è formalmente identico a quello descritto in precedenza, essendo l'aleatorietà degli ingressi e delle uscite dovuta ora all'incertezza; il problema può quindi essere affrontato mediante simulazione di Monte Carlo. Tuttavia va qui precisato il significato della relazione y = f(x): mentre ai fini della determinazione del valore dell'uscita y intervengono in essa solo gli ingressi misurati, ai fini della determinazione dell'incertezza Ψ_y devono intervenire nel modello y = f(x) tutti i parametri di influenza il cui contributo di incertezza non è trascurabile, compresi quelli non misurati e compensati; di questi ultimi non sono noti i valori, ma devono esserlo le descrizioni probabilistiche (incertezze). Ad esempio, in molte macchine CMM la temperatura non viene misurata, e i suoi effetti non sono compensati; dunque, in questi casi la variabile T non compare nella determinazione del risultato. Ciononostante, essa deve comparire nel modello completo

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

ai fini del calcolo dell'incertezza, perché i suoi effetti non sono trascurabili.

Con riferimento alla figura 2, nel blocco 150 viene dapprima ricavata una matrice R, la cui generica riga i-esima è costituita dagli elementi di un vettore di perturbazioni statistiche $r_i = [\varepsilon_{xP1i}\ \varepsilon_{yP1i}\ \varepsilon_{zP1i}\ \ldots\ \varepsilon_{xPki}\ \varepsilon_{yPki}\ \varepsilon_{zPki}]$ ottenuto variando, nel modo descritto in seguito, i parametri di influenza; quindi, sempre nel blocco 150, ciascun vettore r_i viene sommato al vettore u_c per ricavare un vettore di coordinate perturbate $v_{Ci} = [x_{P1i}\ y_{P1i}\ z_{P1i}\ \ldots\ x_{Pki}\ y_{Pki}\ z_{Pki}]$ che costituisce la riga i-esima di una matrice V_C di cordinate perturbate. L'insieme di coordinate (x_{P1i}, y_{P1i}, z_{P1i}; ...; x_{Pki}, y_{Pki}, z_{Pki}) associato a ciascun vettore di coordinate perturbate v_{Ci} è relativo ad un insieme di punti (P_{1i}, ... , P_{ki}) disposti in opportuni intorni dei corrispondenti punti (P_1, ..., P_k).

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Dal blocco 150 si passa ad un blocco 160, in cui viene posto uguale a 1 il valore di un contatore dei cicli di simulazione, che, per comodità di descrizione, viene indicato con lo stesso indice i già utilizzato in precedenza.

I successivi blocchi 170-210 sono relativi all'esecuzione degli N cicli di elaborazione precedentemente citati, in ciascuno dei quali viene

elaborato un rispettivo vettore di coordinate perturbate v_C. Si farà di seguito riferimento al ciclo di elaborazione i-esimo, in cui viene elaborato il vettore di coordinate perturbate v_{Ci}.

Nel blocco 170, l'unità di compensazione viene attivata per effettuare una correzione delle coordinate perturbate (x_{P1i}, y_{P1i}, z_{P1i}, ..., x_{Pki}, y_{Pki}, z_{Pki}) per eliminare gli errori sistematici della CMM 1.. In uscita dal blocco 170 si ottiene quindi un vettore di coordinate perturbate compensate $v'_{ci} = [x'_{P1i}\ y'_{P1i}\ z'_{P1i}\ \ldots\ x'_{Pki}\ y'_{Pki}\ z'_{Pki}]$.

Successivamente, si perviene ad un blocco 180 in cui viene effettuata l'interpolazione dei punti corrispondenti alle coordinate perturbate compensate (x'_{P1i}, y'_{P1i}, z'_{P1i}, ... , x'_{Pki}, y'_{Pki}, z'_{Pki}), per ottenere un insieme di risultati simulati $Ris_i = (g_{1i}, \ldots, g_{ri})$ delle grandezze di interesse.

Nel successivo blocco 190, viene calcolata la differenza fra i valori dell'insieme *Rif* ed i corrispondenti valori dell'insieme Ris_i, ottenendo un insieme di scarti $S_i = (s_{1i}, \ldots, s_{ri})$. Gli elementi dell'insieme di scarti S_i definiscono la i-esima riga di una matrice degli scarti *S*, che alla fine dei cicli di simulazione avrà dimensione N x r.

Nel blocco 200 che segue viene aumentato di una

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

unità il valore del contatore i.

Il blocco 200 è seguito da un blocco 210, in cui il valore del contatore i viene confrontato con il valore prefissato di cicli N. Se viene verificato che i<N (numero di cicli minore di quello previsto), dal blocco 210 si torna al blocco 170 per cominciare un nuovo ciclo di simulazione. Se, viceversa, nel blocco 210 si verifica che il valore di i non è più minore di N (numero previsto di cicli raggiunto), si passa ad un blocco finale 220, in cui la matrice degli scarti *S* viene elaborata statisticamente, mediante un algoritmo matriciale che prevede di moltiplicare la matrice *S* stessa per la sua trasposta e nel dividere il tutto per N, in modo da ricavare una matrice di covarianza dei risultati M_{cov}, sulla cui diagonale sono presenti i valori delle varianze delle grandezze di interesse, mentre nelle rimanenti posizioni sono presenti i valori delle covarianze che legano due a due le grandezze stesse. Dai valori delle varianze e delle covarianze è immediato risalire all'incertezza di misura.

Con riferimento alla figura 3, vengono di seguito descritte le fasi del metodo dell'invenzione che permettono di ricavare la matrice delle coordinate perturbate V_c, secondo quanto descritto in precedenza con riferimento al blocco 150 di figura 2. In

ERBARO Elena
iscrizione Albo nr 426/BM

particolare, l'esecuzione del blocco 150 corrisponde all'esecuzione contemporanea di h blocchi 250a, 250b, ..., 250h, dove h rappresenta il numero di gruppi funzionali di parametri precedentemente definiti nel blocco 100 (gruppo dei parametri ambientali, gruppo dei parametri geometrici, eccetera); ciascun j-esimo blocco 250j genera, nel modo descritto in seguito con riferimento alla figura 4, una corrispondente matrice di perturbazioni statistiche parziali $R_j = [\varepsilon_{xP1j}\ \varepsilon_{yP1j}\ \varepsilon_{zP1j}\ \ldots\ \varepsilon_{xPkj}\ \varepsilon_{yPkj}\ \varepsilon_{zPkj}]$ (in cui ciascuno degli elementi indicati è un vettore colonna di dimensione N) conseguente alla variazione statistica degli elementi del j-esimo gruppo funzionale di parametri, ed il cui significato apparirà più chiaro in seguito.

In un successivo blocco 260, le matrici R_j vengono sommate fra di loro per ottenere la matrice di perturbazioni statistiche R, (introdotta in precedenza con riferimento al blocco 150) e ciascun vettore r_i di quest'ultima viene a sua volta sommato, come già detto in precedenza, al vettore u_c delle coordinate misurate, per ricavare la matrice di coordinate perturbate V_c.

Con riferimento alla figura 4, vengono di seguito descritte le fasi relative alla generazione, all'interno di ciascun j-esimo blocco 250j, della matrice di perturbazioni statistiche parziale R_j.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Per semplicità di descrizione, viene considerato il solo caso del blocco 250a relativo ai parametri di tipo ambientale (vale a dire, viene considerato il solo caso j=1). Risulta evidente che considerazioni del tutto analoghe possono essere fatte per i blocchi 250b, ..., 250h.

In un blocco 300, viene realizzata una matrice di covarianza dei parametri ambientali M_{amb} relativa agli elementi di un vettore di parametri ambientali V_{amb} definito dall'utente in fase di impostazione della misurazione. Il vettore V_{amb} comprende quelli fra i parametri ambientali che risultano indipendenti (cioè che non dipendono da altre variabili), nonché un certo numero di sotto-parametri indipendenti da cui dipendono i restanti parametri ambientali. La matrice di covarianza dei parametri ambientali M_{amb} è una matrice quadrata avente dimensioni (numero di righe o colonne) pari al numero n delle variabili e sotto-variabili ambientali indipendenti e presentante lungo la diagonale principale i valori delle varianze dei parametri/sotto-parametri e nelle restanti posizioni i valori delle covarianze delle coppie di parametri/sotto-parametri. Ovviamente, per il calcolo delle varianze e delle covarianze occorre conoscere gli intervalli di variazione (introdotti nel blocco 110) e le

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

distribuzioni di probabilità dei parametri e dei sotto-parametri che compongono il vettore V_{amb}.

Contemporaneamente al blocco 300, viene eseguito un blocco 310, in cui un generatore di numeri casuali (di tipo noto e non rappresentato) interno all'unità di elaborazione 9 genera una matrice C di numeri casuali avente dimensione N x n, costituito da N vettori di numeri casuali c_i di dimensione n. Ciascun numero casuale ha un valore casuale compreso fra 0 e 1, scorrelato dal valore degli altri numeri.

I blocchi 300 e 310 sono seguiti da un blocco 320, in cui la matrice dei numeri casuali *C* viene combinata, mediante un opportuno algoritmo matriciale (di tipo noto), con la matrice di covarianza dei parametri ambientali M_{amb}, per ottenere una matrice di valori correlati dei parametri ambientali V_{corr} (di dimensione N x n) costituita da N vettori $v_{corr,i}$. Nella matrice V_{corr} i nuovi valori dei parametri/sotto-parametri, pur risentendo della casualità imposta dal vettore *C*, tengono conto delle distribuzioni di probabilità e degli intervalli di variazione dei parametri/sotto-parametri stessi.

Successivamente viene eseguito un blocco 330 in cui dai valori dei sotto-parametri della matrice di valori correlati dei parametri ambientali V_{corr} si risale,

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

tramite la legge che lega i sotto-parametri stessi ai corrispondenti parametri dipendenti, al valore di questi ultimi. Si ottiene quindi una matrice di parametri ambientali Q_{amb}, in cui i valori associati ai parametri ambientali sono correlati alla particolare combinazione di numeri casuali generati nel blocco 310.

Il blocco 330 è seguito da un blocco 340, in cui, a partire dai parametri ambientali calcolati nel blocco 330 ed utilizzando un modello matematico che lega i valori delle coordinate dei punti ai valori dei parametri ambientali stessi, viene calcolata una matrice di perturbazioni statistiche parziali R_1 (parziali in quanto relative ad uno solo dei gruppi di parametri di influenza). La matrice R_1 viene composta nel blocco 260 con le matrici di perturbazioni statistiche parziali R_2, ..., R_h calcolate dai blocchi 250_b, ..., 250_h al fine di generare la matrice di coordinate perturbate V_c.

Per una migliore comprensione del metodo dell'invenzione, verrà di seguito descritto un esempio applicativo semplice e non limitativo.

Si supponga, ad esempio, di voler valutare, mediante la CMM 1, l'incertezza standard di misura u(l) relativa alla determinazione della lunghezza l di un'asta fissata nel suo punto medio ed avente come estremi due punti P1 e P2 (figura 5).

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Al blocco 100, vengono introdotti tutti i parametri ritenuti influenti per la misura.

Nel successivo blocco 110, viene effettuata una misura reale per rilevare le coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}) e (x_{P2}, y_{P2}, z_{P2}) dei due punti estremi P1 e P2. Nel blocco 120, i valori misurati vengono dimensionati, dopo un confronto con le diverse scale di misura e compensati con valori nulli nel blocco 130.

Nel blocco 140 che segue, la CMM 1 calcola la lunghezza *l*, mediante l'algoritmo di interpolazione $l = \sqrt{(x_{P1} - x_{P2})^2 + (y_{P1} - y_{P2})^2 + (z_{P1} - z_{P2})^2}$; il valore di *l* così calcolato definisce il valore di riferimento *Rif*.

Nel blocco 150 viene generata la matrice di coordinate perturbate

$$Vc = \begin{bmatrix} x_{P11} & y_{P11} & z_{P11} & x_{P21} & y_{P21} & z_{P21} \\ x_{P12} & y_{P121} & z_{P12} & x_{P22} & y_{P22} & z_{P22} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{P1N} & x_{P1N} & z_{P1N} & x_{P2N} & y_{P2N} & z_{P2N} \end{bmatrix}$$

Quindi, dopo aver inizializzato il contatore 1 (blocco 160) viene iniziato il ciclo di simulazione 170-210. Nel generico ciclo i-esimo, il blocco 170 esegue l'algoritmo di compensazione per ricavare, a partire dalle coordinate perturbate (x_{P1i}, y_{P1i}, z_{P1i}, x_{P2i}, y_{P2i}, z_{P2i}), le coordinate perturbate compensate (x'_{P1i}, y'_{P1i}, z'_{P1i}, x'_{P2i}, y'_{P2i}, z'_{P2i}).

CERLARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Nel successivo blocco 180, alle coordinate perturbate e compensate (x'_{P1i}, y'_{P1i}, z'_{P1i}, x'_{P2i}, y'_{P2i}, z'_{P2i}) viene applicato l'algoritmo di interpolazione, ottenendo un valore che definisce un i-esimo risultato Ris_i. Il valore Ris_i viene sottratto dal valore Ris, blocco 190, per ottenere il valore i-esimo dello scarto S_i, dopodiché viene aggiornato di una unità il valore del contatore i, blocco 200.

Le operazioni svolte nei blocchi 170-210 vengono eseguite un numero di volte pari al numero N preimpostato, ottenendo il completamento della matrice degli scarti S, dopodiché la condizione al blocco 210 (i<N) non risulta più soddisfatta, e si passa al blocco 220 finale.

Nel blocco 220, viene calcolata la matrice di covarianza M_{COV} dei risultati che, nell'esempio in questione, consta unicamente della varianza della lunghezza l; calcolando la radice quadrata di tale varianza si ottiene l'incertezza u(l) cercata.

Per meglio comprendere le operazioni del blocco 150 si considererà, sempre con riferimento all'esempio precedente, il solo contributo dei parametri ambientali, ovverosia, con riferimento alla figura 3, il solo contributo del blocco 250a.

Si supponga, ad esempio, che per descrivere gli

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

effetti ambientali sia sufficiente conoscere gli andamenti nel tempo e nello spazio delle temperature delle tre scale (lungo i tre assi cartesiani x, y e z) e del pezzo 2, i loro coefficienti di dilatazione termica e la condizione di vincolo relativa al punto in cui il pezzo 2 stesso è staffato sul basamento 3. Si supponga inoltre che la condizione di vincolo sia espressa da una relazione analitica fra le coordinate dei due punti $\phi = (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}, x_{P2}, y_{P2}, z_{P2})$, che le temperature delle scale T_x, T_y, T_z siano fra loro uguali ($T_x = T_y = T_z = T_{scale}$), siano costanti nel volume di misura e siano variabili sinusoidalmente nel tempo, e quindi soddisfino una legge del tipo $T_{scale} = f_{scale}(t, A, \varphi, \omega)$; che la temperatura del pezzo sia variabile linearmente nel tempo secondo la legge $T_{pezzo} = f_{pezzo}(t, m, p)$ e che sia costante nel volume del pezzo stesso; che i coefficienti di dilatazione delle scale siano fra loro uguali e costanti nel tempo e nello spazio $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = \alpha_{scala} = K_{sc}$; che il coefficiente di dilatazione termica del pezzo sia costante nel tempo e nello spazio $\alpha_{pezzo} = K_p$.

In tal caso, il vettore dei parametri/sotto-parametri indipendenti che consentono di descrivere gli effetti ambientali è: $V_{amb} = [A\ \varphi\ \omega\ m\ p\ K_{sc}\ K_p]$. Di tutti questi parametri sono noti gli intervalli di variazione e le distribuzioni di probabilità dei valori, quindi le

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

loro varianze. Si supponga che tutti i parametri tranne A e m siano scorrelati, cioè che soltanto cov(A, m) sia diversa da zero.

A partire da queste informazioni, nel blocco 300 di figura 4 viene calcolata la matrice di covarianza dei parametri ambientali M_{amb}:

$$M_{amb} = \begin{bmatrix} \sigma^2(A) & 0 & 0 & \mathrm{cov}(A,m) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2(\varphi) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2(\omega) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mathrm{cov}(A,m) & 0 & 0 & \sigma^2(m) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2(p) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2(K_{sc}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2(K_p) \end{bmatrix}$$

Contemporaneamente, nel blocco 310 il generatore di numeri casuali genera la matrice *C* di numeri casuali fra loro scorrelati.

Il blocco 320 riceve in ingresso la matrice di covarianza M_{amb} e la matrice di numeri casuali *C* e fornisce in uscita, mediante una trasformazione matriciale, una matrice di valori correlati dei parametri ambientali:

$$V_{corr} = \begin{bmatrix} A_1 & \varphi_1 & \omega_1 & m_1 & p_1 & K_{sc1} & K_{p1} \\ A_2 & \varphi_2 & \omega_2 & m_2 & p_2 & K_{sc2} & K_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_N & \varphi_N & \omega_N & m_N & p_N & K_{scN} & K_{pN} \end{bmatrix}$$

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

La matrice V_{corr} viene utilizzata nel blocco 330 per ricostruire la nuova matrice di parametri ambientali: $Q_{amb} = [f_{scala}(t,A,\varphi,\omega)\ f_{pezzo}(t,m,p)\ K_{sc}\ K_p]$ (in cui ciascun elemento è un vettore colonna di dimensione N).

Nel blocco 340, la nuova matrice di parametri ambientali Q_{amb} viene impiegata per calcolare, attraverso un'opportuna funzione, la matrice di perturbazioni statistiche parziali $R_1 = g(Q_{amb}) = [\varepsilon_{xP11}\ \varepsilon_{yP11}\ \varepsilon_{zP11}\ \ldots\ \varepsilon_{xP21}\ \varepsilon_{yP21}\ \varepsilon_{zP21}]$ (in cui ciascun elemento è un vettore colonna di dimensione N); le perturbazioni statistiche parziali definiscono le perturbazioni delle coordinate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}, x_{P2}, y_{P2}, z_{P2}) generate da variazioni dei parametri ambientali, rispettando il vincolo fisico che il punto di staffaggio non subisca spostamenti.

Il metodo dell'invenzione offre i seguenti vantaggi.

Il metodo ha applicabilità generale, nel senso che può essere applicato a tipi di misure di complessità qualsiasi; non è quindi necessario sviluppare moduli software "ad hoc" per ogni tipo di misura.

I tempi di esecuzione sono estremamente veloci, e consentono di avere una stima dell'incertezza praticamente in tempo reale con la misura eseguita dalla macchina CMM, in modo da poter ridurre i tempi di realizzazione del prodotto finito.

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

Il metodo dell'invenzione consente inoltre di determinare in maniera accurata l'incertezza di misura senza la necessità di eseguire ulteriori misure sul pezzo.

L'oculata separazione dei contributi degli errori dipendenti esclusivamente dalla CMM (errori di geometria, isteresi, anisotropie del tastatore, eccetera) da quelli dipendenti dall'ambiente, (principalmente dilatazioni e deformazioni termiche) consente di distinguere i contributi di incertezza intrinseci della macchina da quelli di origine ambientale.

Risulta infine chiaro che al metodo di misura qui descritto ed illustrato possono essere apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione.

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

R I V E N D I C A Z I O N I

1.- Metodo di determinazione dell'incertezza di misura di una macchina di misura a coordinate, la detta macchina comprendendo un tastatore (7) atto a campionare la superficie di un pezzo (2) da sottoporre a misurazione per rilevare posizioni di punti della superficie del pezzo (2) stesso e per consentire la misurazione di grandezze geometriche (G_1, ..., G_r) legate alle coordinate dei detti punti (P1, ..., Pk), caratterizzato dal fatto di comprendere le fasi di:

- effettuare (110), con il detto tastatore (7), una misura di coordinate di un numero prestabilito di punti (P1, ..., Pk) sulla superficie del detto pezzo (2), ottenendo un insieme di coordinate misurate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk});
- calcolare (140), in base alle dette coordinate misurate (x_{P1}, y_{P1}, z_{P1}; ...; x_{Pk}, y_{Pk}, z_{Pk}), un insieme di valori di riferimento (Rif) per le dette grandezze geometriche (G_1, ..., G_r);
- generare (150) una matrice di coordinate perturbate (V_C) comprendente un numero prestabilito (N) di righe, ciascuna delle dette righe essendo costituita da un insieme di coordinate perturbate (v_{Ci}), le dette coordinate perturbate avendo valori statisticamente prossimi a quelli delle dette coordinate misurate;

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

e comprendente inoltre l'esecuzione di cicli simulati di misura (170-210), ciascuno dei quali comprende le fasi di:

- calcolare (180), per ciascun insieme di coordinate perturbate (v_{Ci}), un insieme di valori simulati (Ris_i) per le dette grandezze geometriche (G_1, ..., G_r);
- calcolare (190) la differenza fra i detti valori di riferimento (Rif) ed i detti valori simulati (Ris_i) per ottenere un insieme di valori degli scarti (S_i);

e comprendente la fase finale (220) di eseguire una analisi statistica dei detti insiemi di valori degli scarti (S_i) per ricavare la detta incertezza di misura.

2.- Metodo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che la detta incertezza di misura è legata alla presenza di grandezze di influenza, descrivibili mediante modelli matematici includenti parametri i cui valori, affetti da incertezza, possono essere impostati e/o misurati; la detta fase di generare (150) una matrice di coordinate perturbate (V_C) comprendendo le fasi di:

- generare (320, 300, 310) una matrice di valori correlati dei parametri (V_{corr}) comprendente un numero di righe pari al detto numero prestabilito (N), ciascuna delle dette righe essendo costituita da un insieme di valori correlati dei parametri ($v_{corr,i}$) ottenuto variando i detti parametri

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 426/BM

in maniera statistica con una distribuzione di probabilità prefissata ed in un intervallo di variabilità prefissato;

- calcolare (340), in base ad una relazione matematica che lega le dette coordinate ai detti parametri ed in base alla detta matrice di valori correlati dei parametri (V_{corr}), una matrice di perturbazioni statistiche (R) avente un numero di righe pari al detto numero prestabilito (N), ciascuna delle dette righe essendo costituita da un vettore di perturbazioni statistiche (r_i) delle dette coordinate;

- sommare (260) ciascun detto vettore di perturbazioni statistiche (r_i) di detta matrice di perturbazioni statistiche (R) a un vettore di coordinate misurate (u_C) avente come elementi le dette coordinate misurate, per ricavare la detta matrice di coordinate perturbate (V_C).

3.- Metodo secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che i detti parametri di misura impostati e/o misurati sono suddivisi in gruppi funzionali; le fasi di generare (320, 300, 310) una matrice di valori correlati dei parametri (V_{corr}) e di calcolare (340) una matrice di perturbazioni statistiche (R) delle dette coordinate essendo eseguite per ciascun detto gruppo funzionale; la detta fase di sommare (260) ciascun detto vettore di perturbazioni statistiche (r_i) di detta matrice di perturbazioni statistiche (R) ad un

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

vettore di coordinate misurate (u_c) venendo eseguita contemporaneamente per tutti i detti gruppi funzionali.

4.- Metodo secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che la detta fase di generare (320) una matrice di valori correlati dei parametri (V_{corr}) comprende, per ciascun detto gruppo funzionale di parametri, le fasi di:

- generare (310) una matrice di numeri casuali (C) avente un numero di righe pari al detto numero prestabilito (N) e delle dette righe comprendendo un numero di elementi pari al numero dei detti parametri;
- calcolare (300), in base a valori stimati e misurati dei detti parametri, una matrice delle covarianze (M_{amb}) dei detti parametri, presentante lungo la diagonale principale le varianze associate ai detti parametri e nelle restanti posizioni le covarianze che legano coppie di detti parametri; e
- combinare (320), mediante una operazione matriciale prestabilita, la detta matrice di numeri casuali (C) con la detta matrice delle covarianze (M_{amb}) per ottenere la detta matrice di valori correlati dei parametri (V_{corr}).

5.- Metodo secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che i detti insiemi di valori simulati (Ris_i) vengono generati mediante cicli di simulazione di Monte Carlo, facendo variare

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)

statisticamente i detti parametri.

6.- Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che la detta fase finale (210) di eseguire una analisi statistica dei detti insiemi di valori di scarto (S_i) per ricavare la detta incertezza di misura comprende la fase di calcolare, a partire dai detti insiemi di scarto (S_i), una matrice di covarianza (M_{cov}) delle dette grandezze, presentante lungo la diagonale principale le varianze associate alle dette grandezze, e nelle restanti posizioni le covarianze relative a coppie di grandezze.

7.- Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere la fase di eseguire (170), in ciascun detto ciclo e precedentemente alla detta fase di calcolare (180) il detto insieme di valori simulati (Ris_i), una operazione di compensazione sulle dette coordinate perturbate (v_{ci}) per eliminare errori sistematici della detta macchina di misura a coordinate.

8.- Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di poter essere eseguito alternativamente in linea durante l'esecuzione delle misurazioni oppure fuori linea in fase di programmazione e progettazione della procedura

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

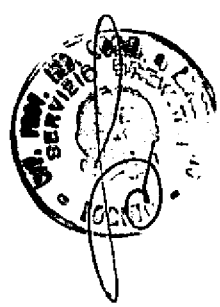
di misura.

9.- Metodo di determinazione dell'incertezza di misura di una macchina di misura a coordinate, sostanzialmente come descritto con riferimento ai disegni allegati.

p.i.: 1) DEA - BROWN & SHARPE S.P.A.

2) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM



CERBARO Elena
Iscrizione Albo nr 426/BM

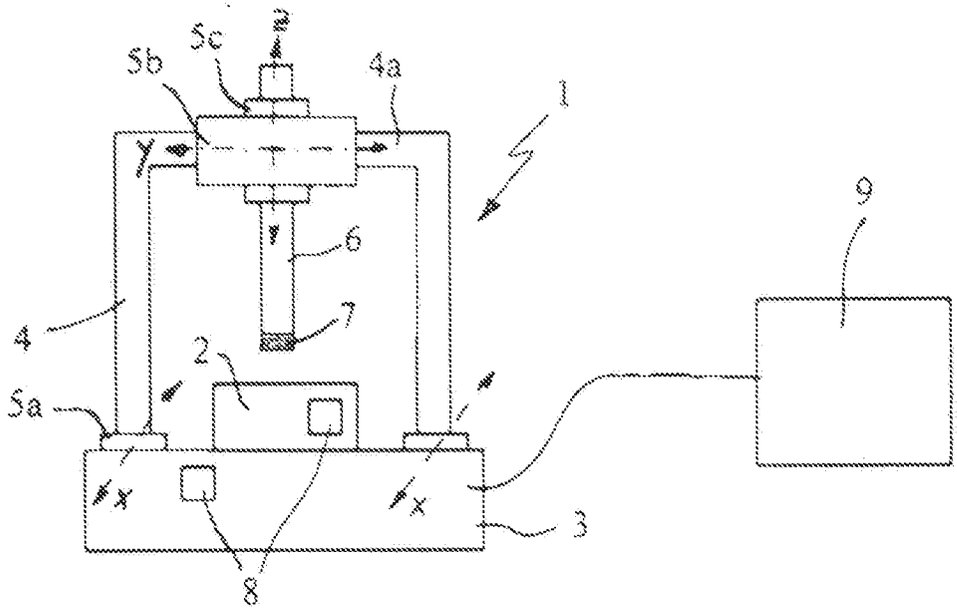


FIG. 1

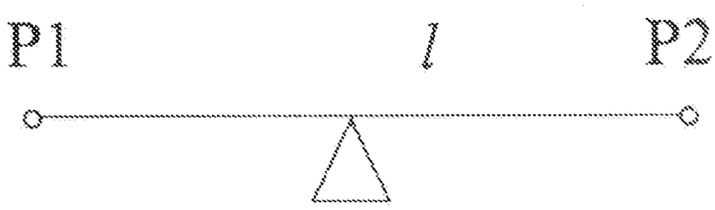


FIG. 5

p.i.: 1) DEA - BROWN & SHARPE S.P.A.
2) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 420/BM

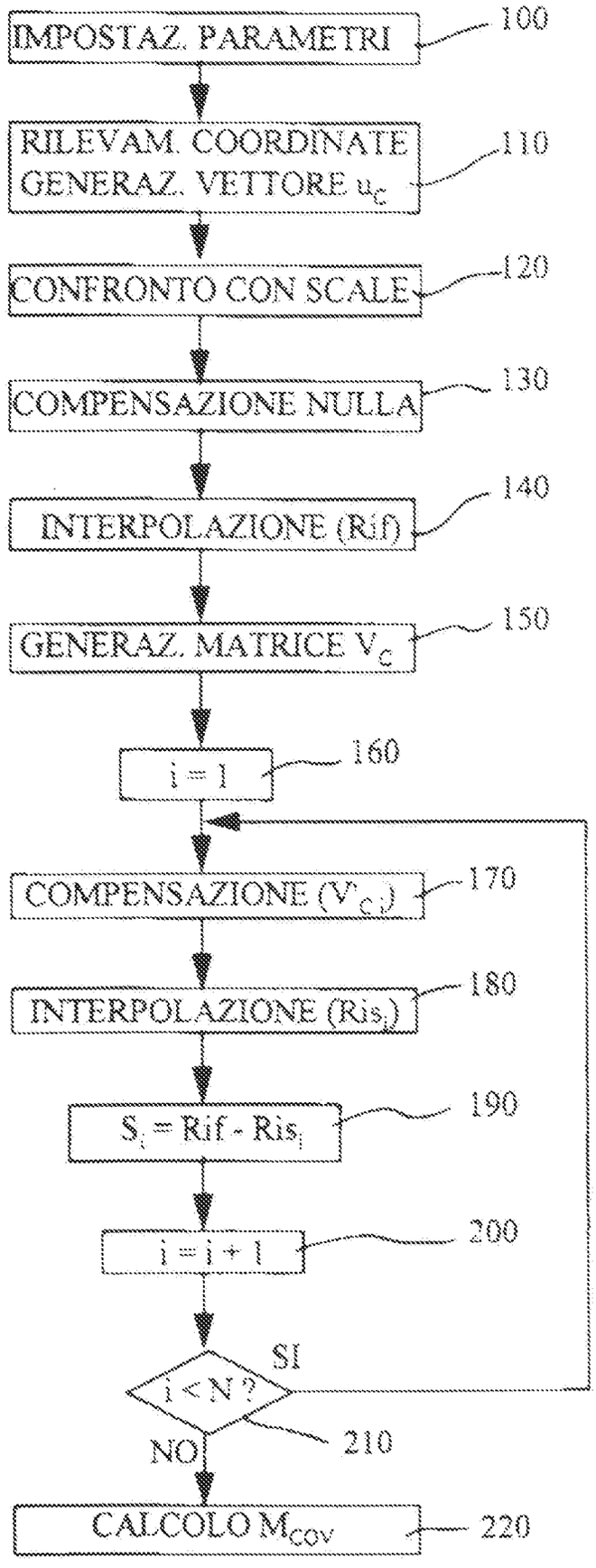


FIG. 2

p.i.: 1) DEA - BROWN & SHARPE S.P.A.
2) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

CERBARO Elena
Iscrizione Albo n° 426/BMI

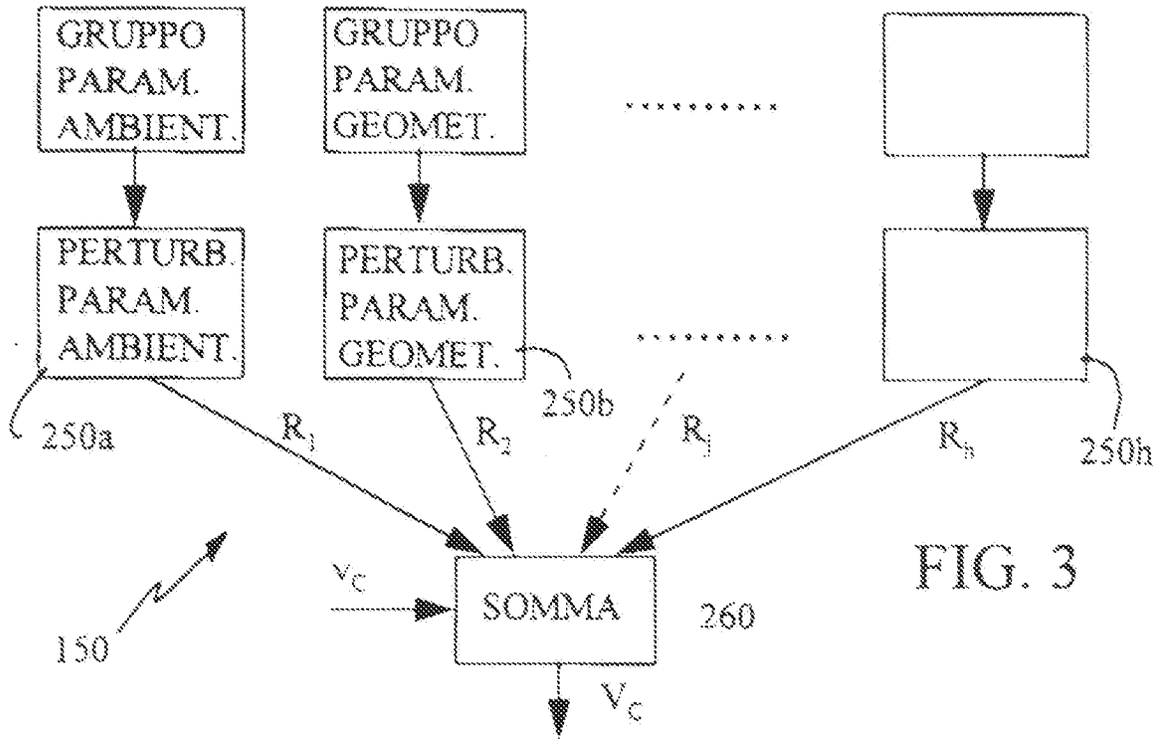


FIG. 3

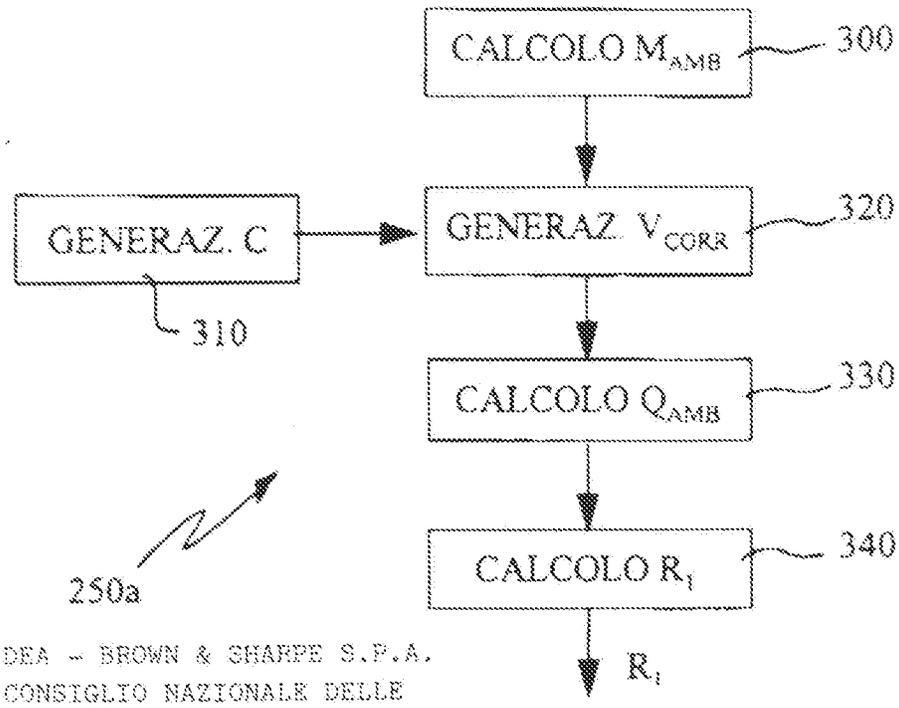


FIG. 4

p.i.: 1) DEA - BROWN & SHARPE S.P.A.
2) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

CERBARO Elena
(iscrizione Albo nr 426/BM)