



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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102009901747959
Data Deposito	07/07/2009
Data Pubblicazione	07/01/2011

Classifiche IPC

Titolo

SISTEMA E PROCEDIMENTO PER LA MISURA DI DEFORMAZIONI, E RELATIVO PRODOTTO INFORMATICO
--

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Sistema e procedimento per la misura di deformazioni, e relativo prodotto informatico"

di: Sintesi SCpA, Via delle Magnolie 4, 70026 Modugno BA

Inventori designati: Enrico CATTANI, Francesco MODICA, Alessandro BRONDI, Antonino SIDDIOLO.

Depositata il: 7 luglio 2009

TESTO DELLA DESCRIZIONE

Campo dell'invenzione

La presente invenzione riguarda i sistemi ed i procedimenti per la misura delle deformazioni di una struttura.

L'invenzione è stata in particolare sviluppata al fine di determinare e conseguentemente compensare le deformazioni della struttura di una macchine utensile.

Descrizione della tecnica relativa

Le strutture delle macchine utensili a controllo numerico (CN) sono soggette a deformazioni dovute, ad esempio, alle forze di lavoro, alle forze di inerzia, e/o alle variazioni di temperatura. Tali deformazioni limitano la precisione di lavorazione e/o di posizionamento delle macchine. La possibilità di poter conoscere in tempo reale come le strutture si deformano permette un'azione di compensazione delle deformazioni e quindi un miglioramento della precisione di lavorazione.

Ad esempio, nelle macchine a controllo numerico la posizione del "Tool Center Point" (TCP) è nota in base alla conoscenza delle corse delle parti mobili della macchina lungo i rispettivi assi. Tale posizione è però nota a meno di due gruppi di errori:

- errori che non dipendono dal tempo, perlomeno nell'ambito della durata di un ciclo di lavoro della macchina utensile, ad esempio errori geometrici di costruzione e/o montaggio, e

- errori che dipendono dal tempo e/o dal ciclo di lavorazione, ad esempio errori dovuti alle deformazioni della struttura sottoposta a carichi di lavoro, forze di inerzia e/o variazione di temperatura.

Per compensare gli errori geometrici si possono apportare correzioni alla posizione degli assi del CN mediante tabelle costruite in fase di collaudo. Ad esempio, si può effettuare, prima di una lavorazione di precisione, l'operazione cosiddetta di "zero pezzo". Ciò consiste nel prendere dei riferimenti, ad esempio il valore della corsa del pezzo da lavorare lungo i tre o più assi della macchina, azionando il movimento lungo gli assi della macchina e rilevando la posizione del pezzo mediante un sensore tastatore. Tale operazione consente di conoscere con precisione la posizione relativa tra il pezzo da lavorare e il TCP, e di azzerare gli errori di posizionamento del TCP dovuti alle deformazioni pregresse della macchina, ad esempio non linearità geometriche dovute a precarichi, giochi e deformazioni termiche. L'operazione di zero pezzo viene eseguita di solito a discrezione dell'utente della macchina per ridurre gli errori di lavorazione e quindi può essere ripetuta in base alla precisione richiesta della lavorazione da eseguire.

La riduzione dell'effetto delle deformazioni delle strutture sulla precisione delle macchine, viene invece ottenuta con sistemi diversi, ad esempio mediante misure di vario tipo e/o mediante metodi analitici, numerici o empirici. Ad esempio, gli errori della macchina dovuti alle

deformazioni delle strutture possono essere determinati in riferimento alla condizione iniziale costituita dall'istante in cui si è finito di eseguire l'operazione di zero pezzo.

Il documento EP 1 839 808 A1 descrive in questo contesto un sistema di sensori ottici basato su una rete di fibre ottiche FBG (Fiber Bragg Grating) per rilevare le deformazioni di strutture complesse. In particolare, a partire dalle variazioni della lunghezza d'onda della luce trasmessa dalla fibra ottica FBG, viene determinato lo spostamento relativo tra due nodi della rete.

Scopo e sintesi dell'invenzione

Gli inventori hanno osservato che la soluzione nota da EP 1 839 808 A1 ha significativi svantaggi, ad esempio:

- la soluzione necessita di un processo di calibrazione,
- la presenza di una struttura composta di aste e giunti su cui apporre i sensori estensimetrici FBG costringe ad avere una continuità della struttura reticolare che ne rende molto difficile l'integrazione con la macchina,
- è richiesto un collegamento tra l'interrogatore (o gli interrogatori) ed ogni fibra FBG con una diversa fibra ottica, il che rende il sistema sia costoso sia ingombrante, e
- le fibre ottiche sono fragili, il che impedisce di seguire curvature troppo strette.

Lo scopo dell'invenzione è quello di realizzare un sistema di misura che sia meno costoso rispetto ai sistemi noti e che raggiunga nello stesso tempo ottimi risultati per quanto riguarda la precisione di misura.

In vista di raggiungere il suddetto scopo, l'invenzione ha per oggetto un sistema di misura delle deformazioni di una struttura dotato delle caratteristiche specificate nell'annessa rivendicazione 1. L'invenzione riguarda anche il relativo procedimento di misura, nonché un prodotto informatico, caricabile nella memoria di almeno un elaboratore e comprendente parti di codice software suscettibili di realizzare le fasi del metodo quando il prodotto è eseguito su almeno un elaboratore. Così come qui utilizzato, il riferimento ad un tale prodotto informatico è inteso essere equivalente al riferimento ad un mezzo leggibile da elaboratore contenente istruzioni per il controllo del sistema di elaborazione per coordinare l'attuazione del procedimento secondo l'invenzione. Il riferimento ad "almeno un elaboratore" è evidentemente inteso a mettere in luce la possibilità che la presente invenzione sia attuata in forma modulare e/o distribuita.

Ulteriori caratteristiche vantaggiose dell'invenzione formano oggetto delle annesse rivendicazioni dipendenti.

Tutte le rivendicazioni annesse vanno intese come parte integrante dell'insegnamento tecnico qui fornito in relazione all'invenzione.

L'invenzione in oggetto ha lo scopo di misurare le deformazioni di strutture quali ad esempio la struttura di una macchina utensile a controllo numerico sottoposta all'azione di forze e/o gradienti termici.

In una forma di attuazione, la ricostruzione della deformazione si basa sulla misura dello spostamento relativo che avviene tra diversi punti, ovvero nodi, tramite Laser interferometrici di alta precisione e accuratezza di misura ed a basso costo.

In una forma di attuazione, si utilizzano sensori Laser interferometrici che

- misurano lo spostamento relativo di due punti, almeno lungo la direzione della retta che li congiunge,

- hanno una risoluzione adeguata alla stima dello spostamento che si vuole osservare e compensare; ad esempio per le macchine utensili che effettuano lavorazioni di precisione una risoluzione adeguata è preferibilmente inferiore al micrometro, e

- hanno una precisione ed accuratezza adeguata e paragonabile alla risoluzione.

Ad esempio, la Richiedente ha sviluppato per questa specifica applicazione un sensore Laser interferometrico che

- effettua la misura in continuo e fornisce istante per istante lo spostamento relativo di due punti rispetto ad un istante iniziale scelto dall'utente,

- effettua la compensazione dei parametri ambientali (ad esempio temperatura dell'aria, pressione atmosferica, ecc) sulla misura dello spostamento,

- ha dimensioni di ingombro, sia della sorgente sia del target riflettente, ridotte per permettere un montaggio direttamente sulla struttura della macchina, e

- ha un costo ridotto.

Dettagli di questo sensore Laser interferometrico sono descritti ad esempio nel documento PCT/EP2008/005422.

In una forma di attuazione, i sensori Laser vengono montati rigidamente sulla struttura di cui si vuole conoscere la deformata in modo da misurare uno spostamento dovuto esclusivamente alla deformazione della struttura stessa.

In una forma di attuazione, i sensori Laser sono disposti in modo da formare dei reticoli modulari triangolari in modo da misurarne la variazione di lunghezza dei lati.

In una forma di attuazione, le misure di spostamento relativo vengono elaborate attraverso operazioni di triangolazione, per il caso piano, o trilaterazione, per il caso tridimensionale, in modo tale da ricostruire la posizione relativa tra i nodi e da questa la deformata della struttura su cui vengono effettuate le misure.

In questo modo, il sistema è in grado di rilevare la deformata della struttura nel suo evolversi nel tempo misurando sia gli spostamenti dovuti a deformazioni lente, come quelle dovute alle variazioni di temperatura, sia gli spostamenti vibratorii dovute ad esempio all'azione di forze di lavorazione e/o di inerzia. Si può così rilevare la deformata della struttura ed elaborarla nel dominio del tempo e/o delle frequenze.

In una forma di attuazione, si utilizzano le misure per compensare, nel prosieguo della lavorazione ed in tempo reale, gli spostamenti del TCP dovuti alle deformazioni della struttura sensorizzata aumentando la precisione di lavorazione e riducendo la necessità di effettuare un'ulteriore azione di "zero pezzo" con conseguente risparmio di tempo e aumento di produttività.

La soluzione qui descritta ha quindi numerosi vantaggi, ad esempio:

- la continuità della struttura reticolare non è fondamentale in quanto il reticolo si chiude solo idealmente; è necessario solo che ogni laser "veda" il proprio target,

- la soluzione è poco ingombrante, perché non richiede né aste né giunti,

- la soluzione può essere integrata e montata sulla struttura in modo semplice, ad esempio i sensori laser e i target possono essere anche incassati nella struttura,

- ogni sensore laser ha un ingombro minimo e permette una comunicazione tramite classici cavi elettrici, e

- la soluzione consente una facile manutenzione e l'eventuale sostituzione dei sensori.

Breve descrizione delle viste annesse

L'invenzione verrà ora decritta con riferimento ai disegni annessi, forniti a puro titolo di esempio non limitativo, in cui:

- la Figura 1 mostra una forma di attuazione di un reticolo piano minimo;

- la Figura 2 mostra una forma di attuazione di un reticolo piano;

- la Figura 3 mostra una forma di attuazione di un reticolo tridimensionale minimo;

- la Figura 4 mostra una forma di attuazione di un reticolo di misura composto; e

- le Figure 5a e 5b mostrano una deformazione esemplare di una struttura.

Descrizione particolareggiata di forme di attuazione

Nella seguente descrizione sono illustrati vari dettagli specifici finalizzati ad un'approfondita comprensione delle forme di attuazione. Le forme di attuazione possono essere realizzate senza uno o più dei dettagli specifici, o con altri metodi, componenti, materiali ecc. In altri casi, strutture, materiali o operazioni noti non sono mostrati o descritti in dettaglio

per evitare di rendere oscuri vari aspetti delle forme di attuazione.

Il riferimento ad "una forma di attuazione" nell'ambito di questa descrizione sta ad indicare che una particolare configurazione, struttura o caratteristica descritte in relazione alla forma di attuazione è compresa in almeno una forma di attuazione. Quindi, frasi come "in una forma di attuazione", eventualmente presenti in diversi luoghi di questa descrizione, non sono necessariamente riferite alla stessa forma di attuazione. Inoltre, particolari conformazioni, strutture o caratteristiche possono essere combinati in un modo adeguato in una o più forme di attuazione.

I riferimenti qui utilizzati sono soltanto per comodità e non definiscono dunque l'ambito di tutela o la portata delle forme di attuazione.

Nelle seguenti forme di attuazione è previsto che si dispongano sensori in modo da formare un poligono, denominato nel seguito "reticolo di misura" RM. In particolare, i lati S del reticolo di misura RM costituiscono le direzioni in cui viene effettuata una misura di spostamento relativo attraverso un laser interferometrico e i punti d'incontro delle direzioni di misura che costituiscono i vertici del poligono sono i nodi N in cui vengono ricostruiti gli spostamenti.

Ad esempio, la Richiedente ha sviluppato per questa specifica applicazione un sensore Laser interferometrico basato sulla tecnologia "Laser self-mixing". In particolare, la tecnologia di self-mixing consente di misurare lo spostamento di un target utilizzando un effetto di interferenza per auto-miscelazione. Quando una determinata quantità di intensità del fascio rientra nella

cavità della sorgente Laser, un effetto di interferenza genera una fluttuazione della potenza di emissione del diodo. Tale variazione risulta periodica (con periodo uguale a metà della lunghezza d'onda del Laser) e asimmetrica. Utilizzando un fotodiodo nella parte posteriore del diodo, è possibile misurare tale fluttuazione (osservando ad esempio la derivata del segnale proveniente dal fotodiodo) e discriminare entità e direzione dello spostamento del target, con una risoluzione pari alla metà della lunghezza d'onda.

Uno dei vantaggi principali rispetto ad un classico laser interferometrico è la mancanza di un ramo ottico di riferimento. Questa assenza nella tecnologia di self-mixing implica un'estrema semplificazione dell'intero sistema ottico di misura che si traduce in maggiore compattezza, minore ingombro, minor costo, maggiore facilità di allineamento.

Queste caratteristiche sono ulteriormente accentuate se si utilizza un diodo laser invece di una sorgente di tipo HeNe. Questa "sostituzione" implica una diminuzione delle prestazioni metrologiche che è contenuta grazie a soluzioni di stabilizzazione termica della sorgente e/o a metodi di stima della lunghezza d'onda durante la misura di spostamento. Nonostante tale sistema Laser sia meno prestante in termini relativi rispetto a quelli interferometrici, l'entità dell'errore (di alcuni ppm) è sufficiente per la misura delle deformazioni nelle macchine utensili.

In una forma di attuazione, il reticolo di misura RM è modulare, il suo modulo elementare essendo costituito da un triangolo.

La Figura 1 mostra una forma di attuazione di un tale reticolo piano minimo che è formato da tre sensori Laser interferometrici L in cui ciascun sensore Laser L comprende un emettitore A e un target riflettente B.

Nella forma di attuazione considerata, il reticolo di misura RM ha una forma triangolare, in cui ogni laser L misura lo spostamento relativo di due punti che appartengono alla stessa retta che congiunge due vertici o nodi N del triangolo, ma che, in generale, non sono necessariamente i vertici del triangolo.

In una forma di attuazione, per pervenire alla misura dello spostamento di due vertici o nodi N, viene eseguita una proporzione tra la distanza dei due punti di cui si conosce lo spostamento relativo (ovvero la distanza tra l'emettitore A e il target riflettente B) e la distanza dei due vertici o nodi N del triangolo (ovvero la lunghezza del rispettivo lato).

Nella forma di attuazione considerata, le misure che vengono effettuate dai sensori Laser sono di tipo incrementale, cioè si misura lo spostamento dei nodi N rispetto ad una condizione iniziale che è, ad esempio, quella in cui la struttura si trova subito dopo un'operazione di "zero pezzo".

In generale, i reticoli di misura possono essere sia piani sia tridimensionali, oppure essere formati da una composizione di essi.

La Figura 2 mostra un esempio per un reticolo piano. In questo caso, tutti i nodi N appartengono ad una o più superfici quasi complanari della struttura e dalle loro misure si ricostruisce il campo degli spostamenti piani della superficie.

Nella forma di attuazione considerata, il reticolo di misura RM è formato da più moduli triangolari adiacenti, in cui due moduli sono adiacenti quando condividono due nodi N ed un lato S. Preferibilmente tale reticolo di misura RM prende la forma che meglio interpreta la deformata della struttura che si vuole osservare e misurare. Infatti, il reticolo costruito su una superficie piana permette di ricostruire il campo di spostamento piano di tutti i punti della superficie su cui esso è montato.

Un reticolo tridimensionale è composto da un minimo di quattro nodi N non complanari. In particolare, i nodi di un reticolo tridimensionale formano un tetraedro o un poliedro composto da più tetraedri adiacenti (ovvero tetraedri che condividono una superficie laterale e tre nodi). Dalle loro misure si può ricostruire lo spostamento nello spazio di ogni nodo.

Ad esempio, la Figura 3 mostra una forma di attuazione della versione minima di un reticolo di misura RM tridimensionale comprendete 4 nodi N non complanari. In particolare, tale reticolo di misura RM può essere considerato come 4 reticoli di misura triangolari.

Il reticolo composto comprende due o più reticoli piani che giacciono su superfici differenti ed incidenti, preferibilmente prossime all'ortogonalità. Combinando i due sistemi di misura piani, ma quasi ortogonali fra loro, si può ricostruire il campo di spostamenti nello spazio di ogni punto.

Ad esempio, la Figure 4 mostra una forma di attuazione di un tale reticolo composto che comprende due reticoli di misura RM_1 e RM_2 piani ciascuno composto da 6 nodi N e 9 lati S (ovvero 9 sensori laser L).

L'esperto del ramo apprezzerà che le precedenti forme dei reticoli di misura base possano anche essere combinati per creare reticoli misti che comprendono due o più reticoli piani e/o tridimensionali.

Le Figure 5a e 5b mostrano una possibile applicazione del sistema di misura.

In particolare la Figura 5a mostra una parte della struttura di una macchina utensile MU che comprende ad esempio un punto di aggancio per un utensile T. La Figura 5b mostra la stessa struttura, ma in condizione deformata.

Nella forma di attuazione considerata, è montato su almeno un lato di un carro della macchina utensile un reticolo di misura. Ad esempio, nella Figura 5 è previsto un reticolo di misura RM piano con 6 nodi N che comprende 9 lati (ovvero 9 sensori Laser).

Nella forma di attuazione considerata, si calcola lo spostamento dei nodi N attraverso la triangolazione delle misure, ovvero ogni lato del triangolo ha una lunghezza pari a quella iniziale più la variazione misurata dal sensore. Noto lo spostamento dei nodi del reticolo ogni altro spostamento dei punti della struttura su cui esso è montato può essere ricavato per interpolazione degli spostamenti dei nodi.

In una forma di attuazione si utilizza un Laser che è in grado di misurare più gradi di libertà di spostamento relativo tra i due nodi (ad esempio spostamenti trasversali e/o rotazioni). In questo caso si può adottare una funzione di interpolazione non lineare per risalire con più precisione al campo di spostamenti dei punti della struttura.

In una forma di attuazione, si utilizzano le informazioni sugli spostamenti dei nodi del reticolo di

misura per compensare gli errori di posizionamento del TCP dovuti al deformarsi delle strutture sensorizzate.

In una forma di attuazione è prevista un'unità di controllo, ad esempio un PC, che effettua le seguenti operazioni:

- acquisizione in continuo delle misure dei sensori laser disposti in reticoli e montati sulla struttura;
- elaborazione delle misure in tempo reale e ricostruzione della deformata della struttura;
- ricostruzione in tempo reale del contributo allo spostamento del TCP dovuto al deformarsi della struttura sensorizzata; e
- compensazione in tempo reale dello spostamento del TCP dovuto al deformarsi della struttura sensorizzata.

In una forma di attuazione, il contributo allo spostamento del TCP dovuto al deformarsi della struttura sensorizzata viene ricostruito effettuando una proiezione degli spostamenti dei nodi del reticolo di misura. Ad esempio, se la struttura su cui sono disposti i reticoli è sensorizzata su una sola superficie, si ricostruiscono solo le componenti di spostamento (ad esempio due traslazioni e una rotazione) del TCP su di un piano parallelo a quello del reticolo. Se la struttura è invece sensorizzata su due superfici incidenti sufficientemente ortogonali fra loro oppure con reticoli tetraedrici, si possono ricostruire tutte le componenti di spostamento del TCP dovute al deformarsi della struttura sensorizzata.

In una forma di attuazione, si effettua la compensazione dello spostamento del TCP attraverso il controllo numerico della macchina. Ad esempio, in una forma di attuazione, si forniscono agli assi in tempo reale le

compensazioni da effettuare sulla posizione del TCP per compensare le deformate misurate dai reticoli.

In una forma di attuazione si monitorano le deformate della struttura nel tempo e nelle frequenze. In particolare, le deformazioni termiche provocano di solito spostamenti lenti, mentre le forze di lavorazione provocano spostamenti veloci.

In una forma di attuazione si elaborano gli spostamenti dei nodi N del reticolo di misura RM in una scala temporale adatta per l'elaborazione in frequenza dei dati per permettere il monitoraggio e la compensazione degli spostamenti nelle macchine CN a diverse frequenze.

Ad esempio, in una forma di attuazione, si monitorano i contributi degli spostamenti a bassa frequenza permettendo in questo modo di misurare gli spostamenti dovuti alle fonti di calore presenti nella macchina e nell'ambiente.

In una forma di attuazione, si utilizzano questi spostamenti a bassa frequenza per compensare gli spostamenti del TCP dovuti alle variazioni di temperatura in modo indipendente dagli spostamenti dovuti alle forze di lavorazione.

In una forma di attuazione, si effettua un'integrazione dei segnali generati dalle misure del reticolo con il filtraggio dei segnali per compensare gli spostamenti senza incorrere in instabilità degli anelli di controllo della macchina. Infatti, gli inventori hanno osservato che possono esistere condizioni che possono provocare instabilità dinamiche negli anelli di controllo del CN. Per poter effettuare la compensazione in tempo reale dello spostamento del TCP causato dalle deformate delle strutture sensorizzate può essere quindi necessario

tarare opportunamente il sistema, ad esempio, attraverso dei filtri e/o dei guadagni appropriati.

In una forma di attuazione, si ricostruisce una misura istantanea dello spostamento di qualsiasi punto della struttura su cui è montato il reticolo, attraverso un'interpolazione degli spostamenti dei nodi del reticolo.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, i particolari di costruzione e le forme di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto descritto ed illustrato a puro titolo di esempio, senza per questo uscire dall'ambito della presente invenzione, così come definito dalle rivendicazioni che seguono.

RIVENDICAZIONI

1. Sistema di misura delle deformazioni di una struttura, caratterizzato dal fatto che detto sistema di misura include una pluralità di sensori Laser interferometrici (L) montati rigidamente su detta struttura in modo da formare un reticolo di misura (RM) composto da almeno un reticolo triangolare, in cui su ciascun lato di detto almeno un reticolo triangolare sono disposti un emettitore (A) e un target riflettente (B) di un rispettivo sensore Laser (L) per rilevare un valore rappresentativo per lo spostamento di due punti per ogni lato di detto almeno un reticolo triangolare.

2. Il sistema di misura secondo la rivendicazione 1, in cui ciascun sensore Laser (L) è configurato per rilevare un valore rappresentativo per lo spostamento relativo tra il rispettivo emettitore (A) e target riflettente (B) rispetto ad una condizione iniziale.

3. Il sistema di misura secondo la rivendicazione 1 o la rivendicazione 2, in cui detti sensori Laser (L) sono configurati per compensare l'influenza dei parametri ambientali sulla misura dello spostamento.

4. Il sistema di misura secondo la rivendicazione 4, in cui detto reticolo di misura (RM) è:

- un reticolo di misura (RM) piano, in cui tutti i nodi (N) del reticolo di misura (RM) appartengono ad una o più superfici quasi complanari della struttura, ed in cui il reticolo di misura (RM) è formato da più moduli triangolari adiacenti,

- un reticolo di misura (RM) tridimensionali, in cui i nodi (N) del reticolo tridimensionale (RM) formano un

tetraedro o un poliedro composto da più tetraedri adiacenti,

- un reticolo di misura (RM) composto che comprende due o più reticoli di misura (RM) piani che giacciono su superfici differenti ed incidenti, o

- un reticolo di misura (RM) che comprende una pluralità di detti reticoli di misura (RM) piani e/o tridimensionali.

5. Procedimento per misurare le deformazioni di una struttura, in cui detto procedimento include le fasi di:

- acquisire in continuo i valori rilevati da un sistema di misura secondo una delle rivendicazioni 1 a 4,

- elaborare detti valori rilevati in tempo reale per ricostruire le posizioni relative dei nodi (N) del reticolo di misura (RM) di detto sistema di misura attraverso operazioni di triangolazione, per il caso piano, o di trilaterazione, per il caso tridimensionale, e

- ricostruire dalle posizioni relative dei nodi (N) del reticolo di misura (RM) di detto sistema di misura la deformata di detta struttura.

6. Il procedimento secondo la rivendicazione 5, in cui detto elaborare detti valori rilevati include calcolare le proporzioni tra le lunghezze dei lati (S) di detto almeno un reticolo triangolare e la distanza fra i rispettivi emettitori (A) e target riflettenti (B).

7. Il procedimento secondo la rivendicazione 5 o la rivendicazione 6, includendo monitorare le deformate di detta struttura nel tempo e nelle frequenze.

8. Il procedimento secondo una delle rivendicazioni 5 a 7, includendo ricostruire lo spostamento di un punto della struttura attraverso un'interpolazione degli spostamenti dei nodi (N) di detto reticolo di misura (RM).

9. Il procedimento secondo una delle rivendicazioni 5 a 8, in cui detta struttura è una struttura di una macchina utensile, ed in cui detto procedimento include:

- ricostruire in tempo reale il contributo allo spostamento del TCP di detta macchina utensile dovuto al deformarsi della struttura, e

- compensare in tempo reale lo spostamento del TCP di detta macchina utensile dovuto al deformarsi della struttura.

10. Prodotto informatico caricabile nella memoria di almeno un elaboratore e comprendente porzioni di codice software per attuare il procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 5 a 9.

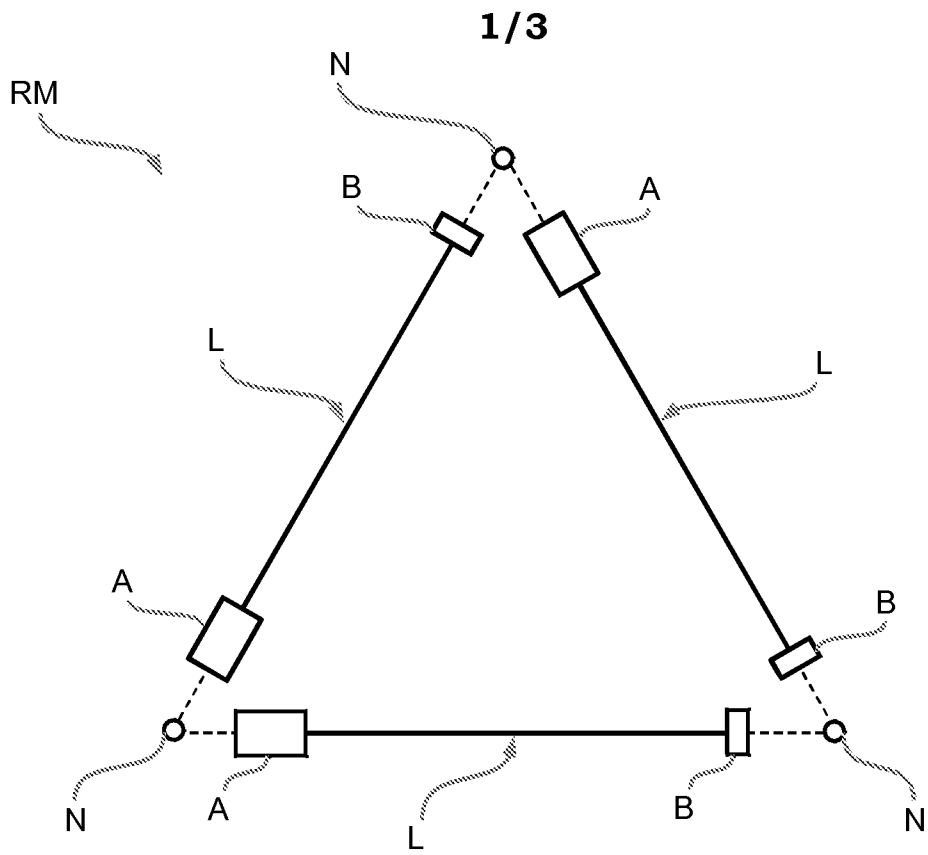


Fig. 1

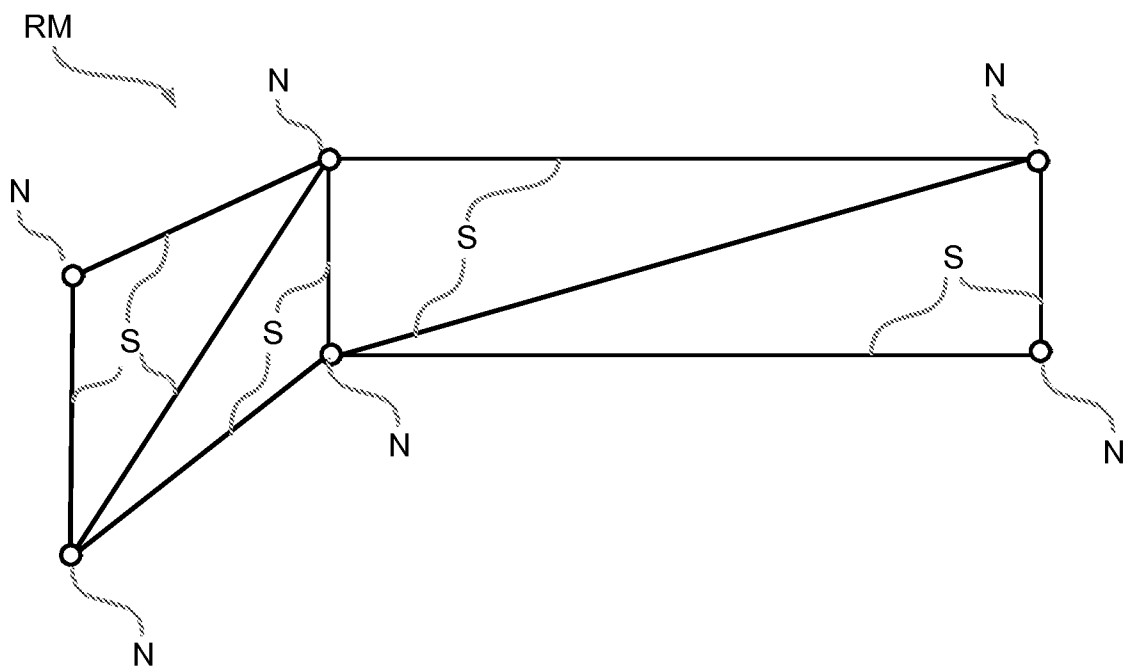


Fig. 2

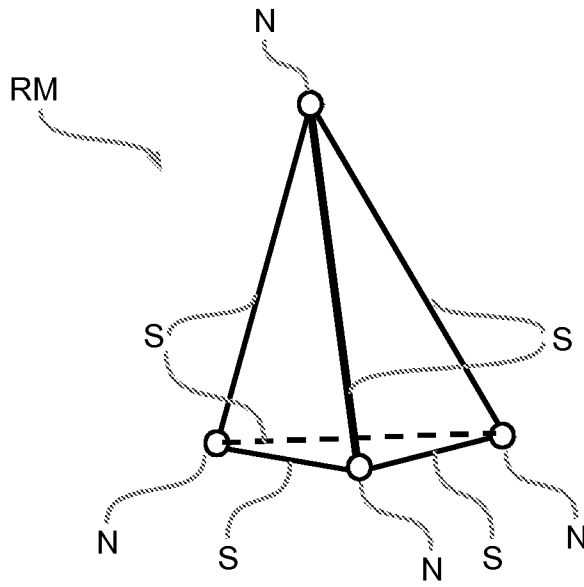


Fig. 3

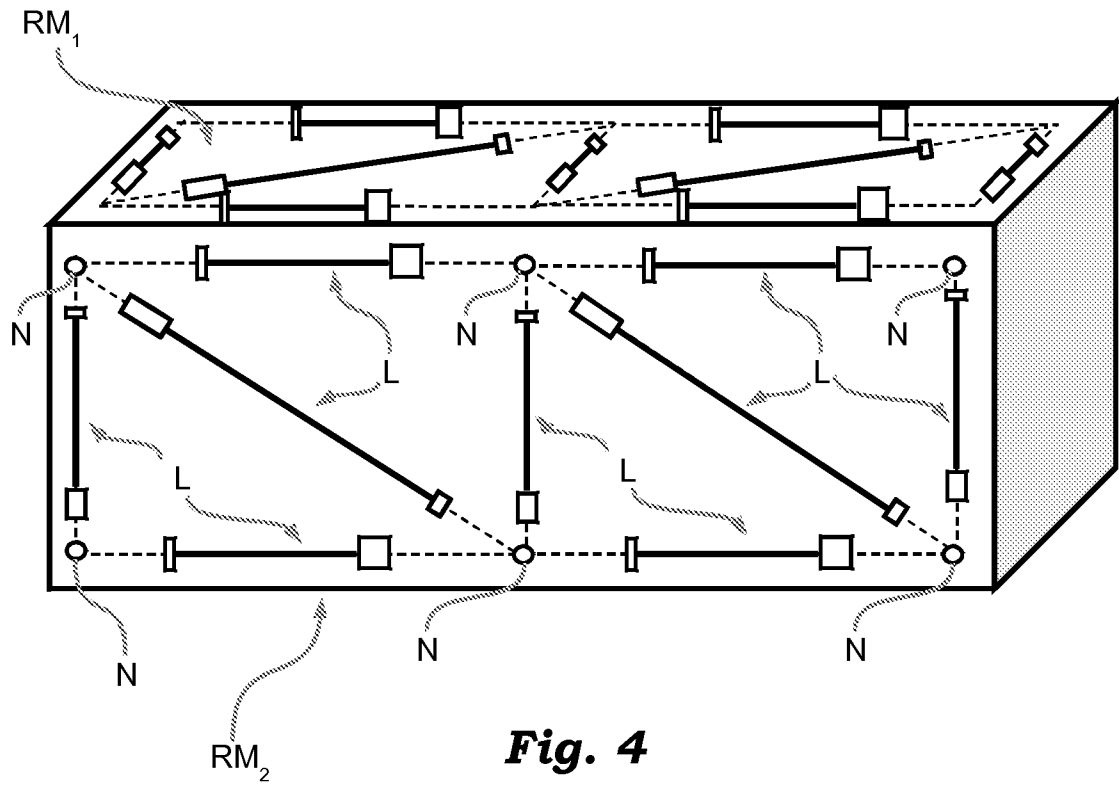


Fig. 4

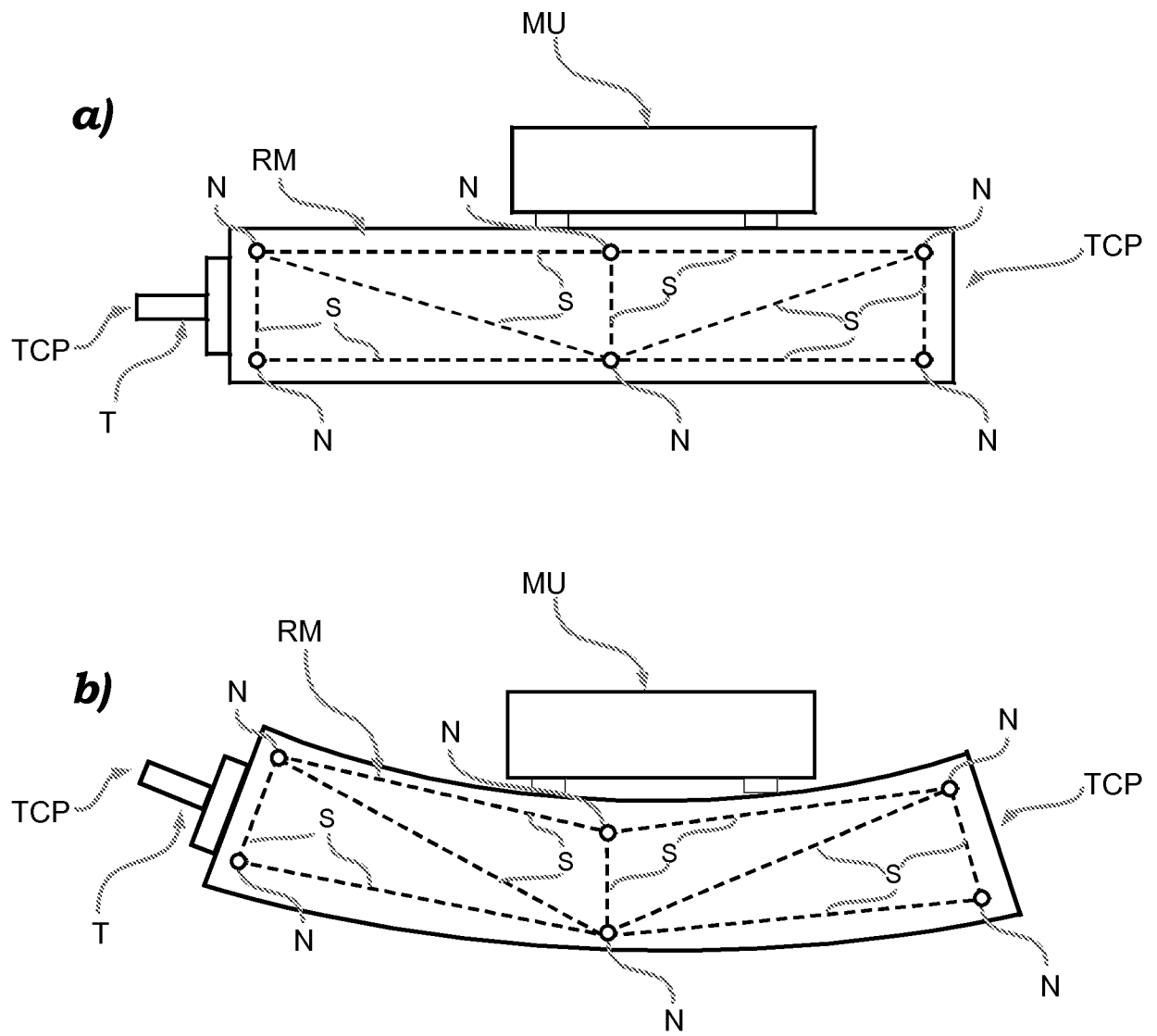


Fig. 5