



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

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102009901780121
Data Deposito	03/11/2009
Data Pubblicazione	03/05/2011

Classifiche IPC

Titolo

PROCEDIMENTO PER STIMARE I PARAMETRI DI CONTROLLO DI UN SISTEMA PER LO SMORZAMENTO ATTIVO, E RELATIVO SISTEMA E PRODOTTO INFORMATICO

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Procedimento per stimare i parametri di controllo di un sistema per lo smorzamento attivo, e relativo sistema e prodotto informatico"

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

Inventori designati: NEGRI Gianpiero, GUADAGNO Gianluca, PALLADINO Marco, ANZALONE Giuseppe

Depositata il: 3 novembre 2009

TESTO DELLA DESCRIZIONE

Campo dell'invenzione

La presente invenzione riguarda i sistemi ed i procedimenti per lo smorzamento attivo delle vibrazioni.

L'invenzione è stata in particolare sviluppata al fine di stimare i parametri di controllo di un sistema per lo smorzamento attivo applicato ad una struttura meccanica, ad esempio di una macchina utensile.

Descrizione della tecnica relativa

Nel mondo delle macchine utensili è particolarmente sentita l'esigenza di ridurre le vibrazioni della punta utensile che possono compromettere la qualità delle lavorazioni e ridurre il tempo medio di utilizzo dell'utensile stesso.

Un possibile indice di valutazione delle vibrazioni è il diagramma a lobi che riporta, in ascissa, la velocità di rotazione del mandrino (in rpm) e in ordinata la profondità di passata (in mm).

L'analisi condotta su tale grafico permette di evidenziare le regioni stabili (e non) per le lavorazioni sulla macchina (ad esempio tornio o fresa), distinte dal confine del lobo.

La Figura 1 mostra un esempio di diagramma a lobi che mostra un possibile comportamento senza controllo NC, e due possibili comportamenti con controllo delle vibrazioni attivo AC1 e AC2.

In particolare, nella parte superiore della curva, si ritengono instabili le lavorazioni poiché la combinazione dei parametri profondità di passata e velocità di rotazione al mandrino può innescare fenomeni rigenerativi come il chatter, ossia una vibrazione instabile che inficia la qualità della lavorazione e può, al limite, causare danni all'utensile e/o alla macchina stessa. Questo significa che l'intercetta sull'ordinata corrispondente al minimo dei lobi rappresenta il valore massimo di profondità di passata prima che si inneschi il chatter.

L'adozione di una soluzione efficace per lo smorzamento delle vibrazioni consente di elevare il limite minimo di profondità di passata oltre il quale la lavorazione rischia di diventare instabile.

Ciò comporta la possibilità di incrementare la profondità di passata, e, quindi, la capacità di asportazione della macchina, con un corrispondente incremento di produttività.

Sono noti sistemi di smorzamento attivo delle vibrazioni per macchine industriali o, in generale, per strutture vibranti basati su attuatori di tipo inerziale. Di solito tali attuatori inerziali sono basati sul principio fisico della generazione di una forza di reazione su una struttura di supporto, ottenuta accelerando una massa sospesa.

Ad esempio il documento US-A-2006/0157310 descrive un attuttore inerziale basato su una massa movimentata tramite un circuito elettromagnetico.

Una possibile implementazione di un dispositivo di smorzamento delle vibrazioni è basata su un attuatore inerziale, su un sensore accoppiato all'attuatore, e su un semplice controllore che implementa un algoritmo di Direct Velocità Feedback (DVF).

Un tale schema di controllo è denominato LAC (Low Authority Control). L'unico parametro per il sistema di controllo, oltre alla posizione della coppia sensore/attuatore, è il guadagno di feedback.

Scopo e sintesi dell'invenzione

Gli inventori hanno osservato che gli attuatori inerziali presentano una serie di vantaggi rispetto ad altre tecnologie di attuazione (ad esempio, del tipo piezoelettrico):

1) Non invasività: utilizzando tale tipo di attuatore non è necessaria alcuna modifica strutturale del sistema di cui si vuole smorzare le vibrazioni. Se il controllo viene disattivato, la struttura esibisce semplicemente il suo comportamento originale. Non appena il controllo viene riattivato, il comportamento strutturale resta sostanzialmente lo stesso, ma i picchi di risonanza vengono di solito smorzati.

2) Robustezza e stabilità del controllo: grazie alla configurazione a sensore/attuatore, si può ottenere un sistema di controllo più stabile e robusto.

3) Lo smorzamento inerziale è un processo "additivo", nel senso che quanti più attuatori inerziali sincronizzati si utilizzano, tanto maggiore è lo smorzamento ottenuto.

4) Non sono richieste connessioni meccaniche: a differenza degli attuatori classici che necessitano di un punto di ancoraggio, gli attuatori inerziali sono "hooked

to the sky", cioè non richiedono di essere vincolati a una struttura di supporto esterna.

5) E' richiesta una conoscenza non approfondita sulle caratteristiche modali della struttura di cui smorzare i modi; pertanto, non è necessaria un'analisi modale preliminare della struttura stessa.

6) Banda operativa ampia: l'attuatore può smorzare tutti i modi visti dai sensori accoppiati, e, a differenza degli attuatori passivi "tuned", che coprono una sola banda di frequenze, hanno una banda di attuazione compresa tipicamente tra 25 e 2000 Hz.

7) Compattezza: le dimensioni dell'attuatore dipendono solo dall'ampiezza della forza che si intende generare, e sono piuttosto contenute.

Gli inventori hanno tuttavia osservato che gli attuatori basati su tecnologia inerziale disponibili in commercio hanno significativi svantaggi. Ad esempio, tali attuatori possono generare forze soltanto lungo un'unica direzione e hanno di solito un elevato rapporto peso proprio/forza generata.

Lo scopo dell'invenzione è quello di realizzare un sistema per lo smorzamento attivo delle vibrazioni che supera questi inconvenienti.

In vista di raggiungere il suddetto scopo, l'invenzione ha per oggetto un procedimento per stimare i parametri di controllo di un sistema per lo smorzamento attivo delle vibrazioni dotato delle caratteristiche specificate nell'annessa rivendicazione 1. L'invenzione riguarda anche il relativo sistema per lo smorzamento, 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.

Secondo l'invenzione, il sistema per lo smorzamento delle vibrazioni utilizza un sistema di attuazione costituito da più coppie di rotori eccentrici tramite i quali è possibile ottenere una forza di inerzia legata all'eccentricità delle masse rotanti.

In una forma di attuazione, l'azione delle coppie di rotori viene generata a partire da un segnale di misura proveniente da un sensore posto a contatto con una parte della struttura meccanica della quale si intendono smorzare le vibrazioni, mediante un'opportuna strategia di controllo.

In una forma di attuazione, a seconda della tipologia di vibrazione misurata dalla struttura, il sistema sviluppa adattativamente una forza in grado di opporvisi, smorzandola.

Gli inventori hanno osservato che un sistema di attuazione costituito da più coppie di rotori eccentrici ha

vari punti critici. In generale, un tale sistema è in grado di generare:

- modulo della forza,
- frequenza della forza
- fase istantanea della forza, e
- direzione della forza

Il controllo di un tale sistema è piuttosto semplice se la tipologia di forza da smorzare (ad esempio vibrazioni indotte da motori) include soltanto piccole variazioni dei parametri (in particolar la frequenza) intorno a valori ben definiti.

Tuttavia, nel settore delle macchine utensili, i disturbi sono caratterizzati da un'ampia variabilità, sia in termini temporali (disturbi transitori) sia in termini di composizione in frequenza (disturbi multimodali), ovvero il sistema per lo smorzamento delle vibrazioni deve generare forze con un contenuto spettrale composito, ossia multimodali, o fortemente non stazionarie.

In una forma di attuazione, per risolvere questo problema, si utilizza un procedimento di controllo in grado di compensare disturbi vibratori non stazionari e/o multimodali.

Breve descrizione delle viste annesse

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

- la Figura 1 è stata già descritta;
- le Figure 2 a 5 mostrano possibili forme di attuazione del sistema di attuazione;
- le Figure 6° e 6b mostrano un montaggio esemplare del sistema di attuazione su una macchina utensile;

- la Figura 7 mostra il sistema di riferimento utilizzato per ogni singolo rotore; e

- le Figure 8 e 9 sono schemi a blocchi che illustrano una possibile forma di attuazione del procedimento di controllo utilizzato all'interno del sistema per lo smorzamento delle vibrazioni.

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.

L'idea alla base della soluzione qui descritta è l'utilizzo di un sistema di attuazione costituito da almeno

tre rotori eccentrici tramite i quali sia possibile ottenere una forza di inerzia legata all'eccentricità delle masse rotanti.

In una forma di attuazione, l'azione delle coppie di rotori viene generata a partire da un segnale di misura proveniente da un sensore posto a contatto con la parte della struttura meccanica della quale si intendono smorzare le vibrazioni, ad esempio una macchina utensile.

In tal modo, a seconda della tipologia di vibrazione misurata dalla struttura, il sistema sviluppa una forza in grado di opporvisi,

In una forma di attuazione, la forza generata è caratterizzata dall'avere modulo, fase istantanea (e quindi frequenza) e direzione controllabili indipendentemente e in modo "continuo", in modo da inseguire opportunamente ed opporsi alle accelerazioni o forze che possono insorgere durante la lavorazione meccanica.

In una forma di attuazione, l'attuatore utilizzato per lo smorzamento è costituito da due coppie di rotori controrotanti coassiali eccentrici, la cui velocità angolare è controllabile indipendentemente.

In una forma di attuazione, lo schema complessivo del sistema di smorzamento prevede l'utilizzo dei seguenti componenti moduli:

- un sensore o più sensori (preferibilmente accelerometri o celle di carico) posto opportunamente a contatto con la struttura meccanica di cui si vogliono smorzare le vibrazioni;

- il sistema di attuazione, accoppiato col sensore sulla struttura meccanica, costituito ad esempio da quattro motori indipendenti utilizzati per mettere in rotazione le masse eccentriche;

- un regolatore tarato opportunamente per l'implementazione della strategia di controllo del sistema di smorzamento; e

- un modulo che implementa un procedimento di stima per la decomposizione del segnale di accelerazione misurato e il calcolo dei riferimenti da assegnare ai singoli rotori per ottenere una forza che bilanci quella sentita dall'accelerometro, in modo da opporsi alle vibrazioni presenti nella struttura della macchina durante la lavorazione.

La Figura 2 mostra una prima forma di attuazione del sistema di attuazione 10.

Nella forma di attuazione considerata, il sistema 10 comprende quattro rotori eccentrici 100 che sono fissati agli alberi di rispettivi motori 102.

Nella forma di attuazione considerata, i motori 102 sono fissati ad una piastra di supporto 104 permettendo in questo modo soltanto una rotazione dei rotori eccentrici intorno le assi dei rispettivi motori. Ad esempio, nella forma di attuazione considerata, la piastra di supporto 104 comprende 4 aperture cilindriche 104a, ovvero un'apertura per ciascun motore 102. Gli alberi dei motori 102 vengono inseriti nelle aperture 104a durante il montaggio dei motori 102 sulla piastra 104 e successivamente vengono fissati i rotori eccentrici 100 dal lato opposto della piastra 104 agli alberi dei motori 102.

Nella forma di attuazione considerata, è anche prevista una piastra di base 106 che include quattro porzioni concave, ovvero una per ciascun rotore eccentrico 100. Tale piastra di base 106 viene fissata alla piastra di supporto in modo tale da chiudere i rotori eccentrici 100 all'interno delle piastre 104 e 106.

Preferibilmente sono anche previsti cuscinetti 108, che vengono inseriti nelle porzioni concave della piastra di base 106 per sostenere le porzioni terminali degli alberi dei motori 100.

Nella configurazione mostrata nella Figura 3, la forza viene generata nel piano della piastra inferiore del dispositivo, ossia nel piano ortogonale agli assi dei rotori, che è preferibilmente anche il piano d'appoggio del dispositivo stesso.

La Figura 3 mostra una seconda configurazione per i motori 102.

Nella forma di attuazione considerata, sono montate due coppie di motori su lati opposti della piastra di base 106.

Nella forma di attuazione considerata, sono anche previste due piastre di supporto 104 che supportano due motori 102 ciascuna.

In questo caso, la forza viene generata sempre nel piano perpendicolare all'asse dei rotori, ma la loro disposizione consente la collocazione dell'attuatore tale da generare una componente di forza normale al piano d'appoggio.

Il sistema di attuazione esercita quindi forze mediante l'utilizzo di rotori sbilanciati da masse eccentriche potendo lavorare in due direzioni.

Per poter controllare indipendentemente modulo, direzione e fase della forza generata è necessario controllare precisamente il moto di almeno tre rotori, preferibilmente quattro rotori.

In una forma di attuazione è prevista una struttura modulare dell'attuatore. Tale struttura modulare può consentire la disposizione delle coppie di rotori in almeno

due configurazioni alternative, che possono essere utilizzate per generare forze in piani con differente giacitura.

La Figura 4 mostra una possibile forma di attuazione di un singolo dispositivo di attuazione.

Nella forma di attuazione considerata, il dispositivo di attuazione comprende un rotore eccentrico 100 portato dall'albero di un motore 102. Anche in questo caso, il motore 102 è fissato tramite opportuni mezzi di fissaggio ad una piastra di supporto 104. Ad esempio, nella forma di attuazione considerata, l'albero del motore 102 viene inserito in un'apertura della piastra di supporto 104 (non visibile nella Figura 4) e il motore 102 viene fissato tramite vite e/o bulloni 120 alla piastra 104. Successivamente viene fissato il rotore eccentrico 100 dal lato opposto della piastra 104 all'albero del motore 102.

Nella forma di attuazione considerata, è anche prevista una piastra di base 106 che viene fissata alla piastra di supporto 104 tramite opportuni mezzi di fissaggio in modo tale da chiudere il rotore 100 all'interno delle piastre 104 e 106. Ad esempio, nella forma di attuazione considerata, la piastra di base 106 viene fissata alla piastra di supporto 104 tramite vite e/o bulloni 122.

Anche in questo caso possono essere previsti ulteriori cuscinetti, ad esempio, un cuscinetto 108 per sostenere la porzione terminale dell'albero del motore 102 (ovvero un cuscinetto tra il rotore 100 e la piastra di base 106) e/o un cuscinetto 110 per sostenere l'albero del motore 102 nell'apertura della piastra di supporto 104 (ovvero un cuscinetto tra il motore 102 e il rotore 100).

Nella forma di attuazione considerata, è prevista una spina di azzeramento 112. Tale spina può essere utile durante una procedura di "zero meccanico" per tutti i moduli, per garantire con precisione elevata il valore della fase (o angolo) iniziale di ogni rotore.

In una forma di attuazione, è previsto almeno un sensore (basato, ad esempio, su tecnologia ottica) utilizzato durante una procedura di azzeramento.

Il dispositivo di attuazione comprende anche una pluralità di mezzi di accoppiamento 130 (ad esempio fori di centraggio e/o di fissaggio) per accoppiare fra loro i dispositivi di attuazione in modo tale da formare sistemi di attuazione più complessi.

Le Figure 5a e 5b mostrano due viste di una possibile forma di attuazione di un sistema di attuazione 10 comprendente quattro dispositivi di attuazione modulari 10a, 10b, 10c e 10d.

Nella forma di attuazione considerata, i dispositivi di attuazione delle Figura 4 vengono accoppiati in modo tale da creare un sistema di attuazione che funzioni sostanzialmente come il sistema di attuazione mostrato nella Figura 3.

Nella forma di attuazione considerata, ogni dispositivo di attuazione, ovvero l'involucro del dispositivo, comprende almeno un foro 130a perpendicolare all'asse del motore (ad esempio, un foro passante che attraversa esclusivamente la piastra di supporto 104 o la piastra di base 106) ed almeno un foro 130b perpendicolare sia all'asse del motore sia all'asse del foro 130a.

Nella forma di attuazione considerata, i fori 130a e 130b vengono utilizzati per accoppiare due dispositivi di attuazione, secondo una disposizione reciproca affiancata

in un comune piano perpendicolare alle asse dei motori. Ad esempio nella forma di attuazione considerata, il foro 130b è un foro cieco con filettature che permette di fissare due dispositivi di attuazione tramite una vite 130c.

Nella forma di attuazione considerata, i fori 130a e 130b insieme con le viti 130c permettono l'accoppiamento dei dispositivi 10a e 10b, e dei dispositivi 10c e 10d.

Nella forma di attuazione considerata, ogni dispositivo di attuazione 10a-10d, ovvero l'involucro del dispositivo, comprende anche almeno un foro di centraggio 130g parallelo all'asse del foro 130a ed almeno un foro di centraggio 130h parallelo all'asse del foro 130b. Nella forma di attuazione considerata, tali fori di centraggio 130g e 130h sono fori ciechi in cui possono essere inseriti perni 130i per ottimizzare l'accoppiamento tra due dispositivi.

Nella forma di attuazione considerata, ogni dispositivo di attuazione, ovvero l'involucro del dispositivo, comprende anche almeno due fori 130d e 130e ad assi paralleli all'asse del motore.

Nella forma di attuazione considerata, i fori 130d e 130e vengono utilizzati per accoppiare due dispositivi di attuazione secondo una disposizione reciproca sovrapposta in cui gli assi dei motori coincidono. Ad esempio nella forma di attuazione considerata, il foro 130d è un foro passante e il foro 130e è un foro cieco con filettature che permette di accoppiare due dispositivi di attuazione tramite viti 130f.

Nella forma di attuazione considerata, i fori 130d e 130e insieme con le viti 130f permettono l'accoppiamento dei dispositivi 10a e 10c, e dei dispositivi 10b e 10d.

Un tale dispositivo di attuazione modulare permette quindi di creare diversi sistemi di attuazione complessi che possano sviluppare forze in piani diversi. Ad esempio, i dispositivi di attuazione modulari possono anche essere accoppiati per creare un sistema che funzioni sostanzialmente come il sistema di attuazione mostrato nella Figure 2.

Tuttavia, i singoli dispositivi di attuazione modulari possono anche essere montati in diversi punti sulla struttura meccanica di cui si vuole smorzare le vibrazioni.

Ad esempio, le Figure 5a e 5b mostrano due viste di un montaggio esemplare di quattro dispositivi di attuazione modulari 10a-10d su una macchina utensile.

Nella forma di attuazione considerata, i dispositivi di attuazione sono montati direttamente sull'elemento operativo 34 della macchina utensile 30 (ovvero sull'elemento che porta l'utensile, ad esempio il mandrino).

Nella forma di attuazione considerata, i dispositivi di attuazione sono fissati in modo tale che i rotori eccentrici dei rispettivi dispositivi di attuazione 10a-10d ruotano in un comune piano perpendicolare all'asse di rotazione 32 dell'utensile, in cui i dispositivi hanno una distanza sostanzialmente eguale dall'asse di rotazione 32 dell'utensile.

La Figura 7 riportata il sistema di riferimento utilizzato per ogni singolo rotore, in cui il punto P rappresenta il baricentro della rispettiva massa eccentrica 100, posta ad una distanza r dal centro (ovvero l'albero del rispettivo motore 102) ed avente una massa m .

La posizione $\mathbf{p}$ della massa può essere descritto come:

$$\mathbf{p} = r \cos(\vartheta(t)) \hat{\mathbf{x}} + r \sin(\vartheta(t)) \hat{\mathbf{y}} \quad (1)$$

in cui $\hat{\mathbf{x}} = (1,0)^T$ e $\hat{\mathbf{y}} = (0,1)^T$ sono i versori associati agli assi cartesiani nel piano, e $\vartheta(t)$ è l'angolo in senso antiorario da percorrere partendo da 0° .

La velocità $\mathbf{v}$ della massa può essere descritto come:

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{p}} = -r \sin(\vartheta(t)) \omega(t) \hat{\mathbf{x}} + r \cos(\vartheta(t)) \omega(t) \hat{\mathbf{y}} \quad (2)$$

in cui $\omega(t) = \dot{\vartheta}(t)$ è la velocità angolare.

Infine, l'accelerazione $\mathbf{a}$ della massa può essere descritto come:

$$\mathbf{a} = \dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} -r \cos(\vartheta(t)) \omega^2(t) - r \sin(\vartheta(t)) \dot{\omega}(t) \\ -r \sin(\vartheta(t)) \omega^2(t) + r \cos(\vartheta(t)) \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{y}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La dinamica delle accelerazioni generate nel piano è quindi estremamente non-lineare nei variabili angolari, e l'accelerazione complessiva è la somma di quelle prodotte dai quattro rotori.

In una forma di attuazione, il sistema per lo smorzamento delle vibrazioni è composto, da un sensore accelerometrico (preferibilmente passabanda), da un'unità di elaborazione che implementa sia un metodo di stima sia un controllo numerico, e dagli azionamenti e dai rotori.

In una forma di attuazione, l'accelerometro misura la vibrazione che si vuole smorzare e il metodo di stima, in base a questa misura, genera le traiettorie per i motori da passare al controllo numerico il quale provvederà a chiudere gli anelli di regolazione.

In una forma di attuazione, per semplificare la trattazione, viene generato soltanto una forza arbitraria nel piano con caratteristica passabanda.

La Figura 8 riporta uno schema a blocchi che descrive una forma di attuazione del sistema per lo smorzamento 20 applicato ad una macchina utensile 30.

Nella forma di attuazione considerata, viene generata nel corso della lavorazione una vibrazione indesiderata che produce un'accelerazione ACC misurabile sulla struttura della macchina.

Tale accelerazione ACC viene misurata da un sensore accelerometrico 202 (ad esempio un accelerometro bi-assiale) e viene passata ad un modulo di controllo 204.

Nella forma di attuazione considerata, il modulo di controllo 204 implementa un controllo DVF, in cui l'accelerazione misurata (ovvero il valore ACC_{mis}) viene confrontata con un valore di riferimento (che è preferibilmente zero, dovendo il sistema, ad anello chiuso, abbattere le vibrazioni della struttura su cui è posto).

Nella forma di attuazione considerata, il modulo di controllo 204, a partire dal confronto tra l'accelerazione misurata ACC_{mis} e il riferimento, fornisce in uscita un'accelerazione ACC_{reg} che il sistema di attuazione posto a valle deve generare per opporsi al disturbo.

In una forma di attuazione, il valore di riferimento utilizzato per la chiusura del loop esterno di controllo viene considerato nullo. In tal caso, il sistema viene utilizzato per opporsi alle vibrazioni della struttura meccanica su cui è posto, in modo da minimizzare lo scarto tra ACC_{mis} e il riferimento nullo, in modo, cioè, da rendere nulla l'accelerazione complessivamente misurata dal sensore accelerometrico.

Tuttavia, il dispositivo può eseguire un'azione arbitraria, nel senso che il riferimento utilizzato può anche esser diverso da zero e/o variabile nel tempo. In tal modo, il dispositivo di attuazione può generare traiettorie arbitrarie (in frequenza e ampiezza), utili, ad esempio, se il dispositivo stesso è posto su una macchina utensile e il

contributo che esso deve generare deve esser tale da ridurre lo scarto tra la traiettoria pianificata e quella effettivamente eseguita dalla macchina.

Nella forma di attuazione considerata, tale accelerazione ACC_{reg} viene processata da uno stimatore 206 tramite il quale, istante per istante, vengono determinate le leggi di moto dei singoli rotori eccentrici tali da generare, complessivamente, l'azione richiesta.

I rispettivi "set point" ricavati tramite lo stimatore vengono forniti in ingresso ai regolatori dei motori del sistema di attuazione 10 mostrato ad esempio nelle figure 3 e 4, e i motori, ruotando opportunamente, generano una forza F per l'abbattimento del disturbo.

Nella forma di attuazione considerata, grazie alla presenza di (almeno) 4 motori indipendenti, è possibile generare, variando sia la loro velocità $VelVibr$ che la posizione reciproca delle masse eccentriche $PosVibr$, una forza con modulo, frequenza istantanea e direzione istantanea variabili in un piano.

Infatti, considerando che ognuno dei rotori è collegato ad una massa eccentrica, e che la posizione e la velocità della massa eccentrica equivalente sono controllabili indipendentemente, ogni rotore può generare una forza con componente sia centrifuga che tangenziale legata alla rotazione della massa.

Ad esempio, l'azione complessiva del sistema costituito da quattro rotori è, in ognuna delle due direzioni ortogonali in cui viene esplicitata, il risultante delle proiezioni delle forze generate da ogni singolo rotore. Il sistema per lo smorzamento 20 è quindi in grado:

a) controllando la velocità angolare di rotazione, imporre una frequenza istantanea dell'azione generata;

b) controllando l'angolo di fase tra i rotori di una coppia, imporre il valore del modulo della forza generata (compreso tra 0 e il valore massimo di forza legato al valore di velocità angolare e di eccentricità);

c) controllando l'angolo di fase tra due coppie di rotori, imporre la direzione dell'azione nel piano.

Le caratteristiche della forza generata possono variare adattivamente, compensando quindi un'ampia classe di disturbi con caratteristiche di tempovarianza e caratterizzati da un contenuto modale non necessariamente monocromatico.

Il sistema qui proposto si presta quindi per compensare vibrazioni con caratteristiche non stazionarie nel tempo, con frequenze, ampiezza, contenuto in frequenza variabili entro la banda attuabile del sistema.

La soluzione è anche generalizzabile al caso di $2N$ rotori (con N preferibilmente pari) sia per la generazione di forze piane, sia per la generazione di forze nello spazio.

In una forma di attuazione, il modulo di controllo 204 e/o lo stimatore 206 sono implementati all'interno di un'unità di elaborazione, ad esempio tramite porzioni di codice software suscettibili di essere eseguiti su almeno un micro-processore o computer.

In una forma di attuazione, lo stimatore 206 è composta da due sottomoduli:

- il primo sottomodulo 206a esegue una doppia pseudo-integrazione del segnale di accelerazione misurato *ACCmis*, ed

- il secondo sottomodulo 206b stima fasi *PosVibr* e velocità angolari *VelVibr* da assegnare ai rotori.

In una forma di attuazione, entrambi i passi vengono eseguiti da appositi filtri di Kalman.

In una forma di attuazione, la pseudo-integrazione sfrutta il fatto che l'accelerazione misurata ACC_{mis} è un segnale passa-banda per evitare una deriva incontrollabile nel tempo dei segnali integrati.

In una forma di attuazione, la stima delle fasi $PosVibr$ e delle velocità angolari $VelVibr$ viene effettuata riformulando il problema nel dominio complesso sfruttando le proprietà dei fasori.

In una forma di attuazione, per formulare il doppio pseudo-integratore, si utilizza un filtro di Kalman stazionario a riferimento nullo. Infatti, essendo il segnale dell'accelerometro di tipo passa-banda, il suo valore medio stazionario è nullo e così pure per i suoi integrali.

In una forma di attuazione, il segnale proveniente dall'accelerometro 202 viene normalizzato rispetto ad r ottenendo, per ogni rotore:

$$\bar{\mathbf{p}} = \mathbf{p} / r = \cos(\vartheta(t)) \hat{\mathbf{x}} + \sin(\vartheta(t)) \hat{\mathbf{y}} \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{v} / r = -\sin(\vartheta(t)) \omega(t) \hat{\mathbf{x}} + \cos(\vartheta(t)) \omega(t) \hat{\mathbf{y}} \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{a}} = \mathbf{a} / r = \begin{bmatrix} -\cos(\vartheta(t)) \omega^2(t) - \sin(\vartheta(t)) \dot{\omega}(t) \\ -\sin(\vartheta(t)) \omega^2(t) + \cos(\vartheta(t)) \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{y}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

in cui le grandezze normalizzate complessive sono la somma di quelle relative ad ogni rotore.

In una forma di attuazione, il fattore di normalizzazione indicato con r include anche eventuali guadagni relativi agli schemi di regolazione a monte.

In una forma di attuazione, soffermandosi su un solo canale (ovvero una sola asse) dell'accelerometro, si

utilizza il seguente sistema nello spazio dello stato nel sottomodulo 206a:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (8)$$

dove:

- $\mathbf{x}_k \in \mathfrak{R}^n$ (con $n = 2$) è lo stato composto dalla concatenazione di posizione $\bar{p}$ e velocità $\bar{v}$ normalizzate:

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} \bar{p}_k \\ \bar{v}_k \end{pmatrix} \quad (9)$$

- $\mathbf{u}_k \in \mathfrak{R}^l$ (con $l = 1$) è l'ingresso dell'accelerazione normalizzata:

$$\mathbf{u}_k = \bar{a}_k \quad (10)$$

- $\mathbf{y}_k \in \mathfrak{R}^m$ (con $m = 1$) è la misura (nulla), e
- i vettori $\mathbf{w}_k \in \mathfrak{R}^n$ e $\mathbf{v}_k \in \mathfrak{R}^m$ sono i disturbi sullo stato e il rumore sulle misure rispettivamente.

In una forma di attuazione, le matrici $\mathbf{F} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $\mathbf{G} \in \mathfrak{R}^{n \times l}$, $\mathbf{H} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$ del sistema sono:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \Delta t^2 / 2 \\ \Delta t \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{H} = (1 \ 0) \quad (13)$$

In una forma di attuazione, si assume che $\mathbf{w}_k \approx N(0, \mathbf{Q})$ è un rumore gaussiano con covarianza $\mathbf{Q} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, e $\mathbf{v}_k \approx N(0, \mathbf{R})$ è un rumore gaussiano con covarianza $\mathbf{R} \in \mathfrak{R}^{m \times m}$.

Nella forma di attuazione considerata, il doppio pseudo-integratore realizzato mediante un filtro di Kalman con riferimento nullo forza la posizione normalizzata e la velocità normalizzata ad avere un valor medio stazionario

nullo, a meno di una variabilità legata all'incertezza di misura avente covarianza $\mathbf{R} \in \Re^{m \times m}$.

In una forma di attuazione, tali matrici di covarianza sono:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{G}(\sigma_a^2 / r^2) \mathbf{G}^T \quad (14)$$

$$\mathbf{R} = (N / 2)^2 / 12 \quad (15)$$

dove N è il numero di rotori e Δt è il passo di campionamento.

Nella forma di attuazione considerata, la matrice $\mathbf{Q}$, dipende dall'incertezza di misura dell'accelerometro σ_a^2 .

Nella forma di attuazione considerata, il valore determinato per $\mathbf{R}$ discende dalla considerazione che la somma delle N posizioni normalizzate può essere conservativamente assunta come una variabile aleatoria uniformemente distribuita nell'intervallo $[-N/2, N/2]$.

In una forma di attuazione, si utilizza un filtro di Kalman discreto che sfrutta il fatto che $\mathbf{y}$ è 0.

In una forma di attuazione, si calcola quindi il vettore di stato tramite l'equazione:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{G} \bar{a}_k \quad (16)$$

in cui la matrice $\mathbf{A}$ è definito come:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}(\mathbf{I} - \mathbf{K} \cdot \mathbf{H}) \quad (17)$$

in cui $\mathbf{I}$ è una matrice identica di opportune dimensioni e $\mathbf{K} \in \Re^{m \times n}$ è il guadagno di Kalman:

$$\mathbf{K} = \mathbf{P} \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (18)$$

e $\mathbf{P} \in \Re^{n \times n}$ è la matrice di covarianza dell'errore di stima dello stato.

In una forma di attuazione si opererà il filtro di Kalman nella sua formulazione completa. Essendo il filtro

di Kalman esposto rapidamente convergente, in una forma di attuazione, le matrici **A** e **G** vengono pre-calcolate per risparmiare tempo computazionale accettando un lieve peggioramento nella qualità della stima,

Ad esempio, in una forma di attuazione, si utilizza per la matrice **P** la soluzione stabile dell'equazione discreta di Riccati associata al filtro di Kalman:

$$\mathbf{P} = \text{dare}(\mathbf{F}^T, \mathbf{H}^T, \mathbf{Q}, \mathbf{R}) \quad (19)$$

in cui la funzione $\mathbf{X} = \text{dare}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R})$ di Matlab® calcola la soluzione dell'equazione discreta di Riccati:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{X} \mathbf{A} - \mathbf{X} - \mathbf{A}^T \mathbf{X} \mathbf{B} (\mathbf{B}^T \mathbf{X} \mathbf{B} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{X} \mathbf{A} + \mathbf{Q}) = \mathbf{0} \quad (20)$$

In una forma di attuazione, si utilizza sostanzialmente la stessa struttura su entrambi i canali dell'accelerometro.

La Figura 9 mostra lo schema di una possibile forma di attuazione dell'equazione (16) per uno dei (almeno) due canali dell'accelerometro.

Nella forma di attuazione considerata, il vettore di stato precedente $\mathbf{x}_{k-1}$ viene moltiplicato con la matrice **A** ad un blocco 2060, e l'accelerazione normalizzata $\bar{a}$ viene moltiplicato con la matrice **G** ad un blocco 2062.

I risultati delle moltiplicazioni 2060 e 2062 vengono sommati ad un blocco 2064 per fornire il nuovo vettore di stato $\mathbf{x}_k$, ovvero l'attuale posizione $\bar{p}_k$ e velocità $\bar{v}_k$.

Infine, il vettore di stato $\mathbf{x}_k$ viene salvato per un istante temporale ad un blocco 2066 per fornire il vettore di stato precedente $\mathbf{x}_{k-1}$ per il prossimo istante temporale.

I risultati per ciascuna asse dell'accelerometro vengono forniti ad un stimatore complesso il cui scopo è quello di ricavare fasi e velocità angolari dei rotori a

partire dalla stima della somma delle N posizioni normalizzate ottenuta al passo precedente.

Infatti, gli inventori hanno osservato, che grazie alla normalizzazione, è possibile trattare la somma delle N posizioni normalizzate lungo gli assi x ed y come se fosse la somma di N fasori.

In una forma di attuazione, tale stimatore viene formulato nel campo complesso per rendere più agevole la decomposizione del segnale di accelerazione "desiderata" nei riferimenti da assegnare ai quattro rotori affinché l'azione complessiva esplicita corrisponda effettivamente all'accelerazione desiderata.

In una forma di attuazione, si assume, per ogni rotore, il seguente modello lineare autoregressivo (Autoregressive model o AR) di primo ordine per l'evoluzione dell'angolo di fase:

$$\vartheta_{i,k+1} = \vartheta_{i,k} + \omega_{i,k} \Delta t \quad (20)$$

$$\omega_{i,k+1} = \omega_{i,k} \quad (21)$$

in cui i è l'indice del rotore e k è l'indice temporale.

Nella forma di attuazione considerata, si definisci i seguenti parametri:

$$\alpha_{i,k} = e^{j\omega_{i,k}\Delta t} \quad (22)$$

$$\beta_{i,k} = e^{j\vartheta_{i,k}} \quad (23)$$

$$\beta_{i,k}^* = e^{-j\vartheta_{i,k}} \quad (24)$$

Nella forma di attuazione considerata, la presenza del fasore complesso coniugato $\beta_{i,k}^*$ è necessaria ai fini della scrittura dell'equazione di osservazione, come sarà chiarito in seguito.

In una forma di attuazione, le equazioni che descrivono l'evoluzione temporale dello stato per ogni rotore sono le seguenti:

$$\alpha_{i,k+1} = \alpha_{i,k} \quad (25)$$

$$\beta_{i,k+1} = \alpha_{i,k} \beta_{i,k} \quad (26)$$

$$\beta_{i,k+1}^* = \frac{1}{\alpha_{i,k}} \beta_{i,k+1}^* \quad (27)$$

Nella forma di attuazione considerata, si assume quindi, per semplicità, un'evoluzione a velocità angolare costante.

Date le definizioni, è possibile scrivere:

$$c_{i,k} = \cos \vartheta_{i,k} = (\beta_{i,k} + \beta_{i,k}^*) / 2 \quad (28)$$

$$s_{i,k} = \sin \vartheta_{i,k} = (\beta_{i,k} - \beta_{i,k}^*) / 2j \quad (29)$$

$$\omega_{i,k} = \frac{\vartheta_{i,k+1} - \vartheta_{i,k}}{\Delta t} = \log(\alpha_{i,k}) / j\Delta t \quad (30)$$

in cui la funzione $\log$ indica la funzione logaritmo naturale.

In una forma di attuazione, lo stato dello stimatore è composto dalla concatenazione dei parametri fasoriali per ognuno dei rotor, mentre le misure, provenienti dalla stima del doppio pseudo-integratore, sono la posizione e la velocità normalizzata stimate, rispettivamente lungo le direzioni x ed y :

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \overline{p}_{x,k} \\ \overline{p}_{y,k} \\ \overline{v}_{x,k} \\ \overline{v}_{y,k} \end{bmatrix} = \sum_i \begin{bmatrix} c_{i,k} \\ s_{i,k} \\ -\omega_{i,k} s_{i,k} \\ \omega_{i,k} c_{i,k} \end{bmatrix} \quad (31)$$

In una forma di attuazione, vista le non-linearità delle equazioni, si calcolano le matrici $\mathbf{F}_k$ ed $\mathbf{H}_k$ come gli Jacobiani delle trasformazioni. Visto che ogni rotore è

indipendente, la matrice $\mathbf{F}_k$ è diagonale a blocchi, mentre la matrice $\mathbf{H}_k$ è la concatenazione orizzontale di blocchi indipendenti:

$$\mathbf{F}_k = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_{1,k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{F}_{2,k} & \ddots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{F}_{N,k} \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$\mathbf{H}_k = (\mathbf{H}_{1,k} \quad \mathbf{H}_{2,k} \quad \dots \quad \mathbf{H}_{N,k}) \quad (33)$$

in cui $\mathbf{F}_{i,k}$ e $\mathbf{H}_{i,k}$ sono gli i -esimi blocchi delle matrici:

$$\mathbf{F}_{i,k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \beta_{i,k} & \alpha_{i,k} & 0 \\ -\beta_{i,k}^* / \alpha_{i,k}^2 & 0 & 1 / \alpha_{i,k} \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\mathbf{H}_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & -j & j \\ -2s_{i,k} / (j\alpha_{i,k}\Delta t) & j\omega_{i,k} & -j\omega_{i,k} \\ 2c_{i,k} / (j\alpha_{i,k}\Delta t) & \omega_{i,k} & \omega_{i,k} \end{pmatrix} \quad (35)$$

In una forma di attuazione, si utilizza come incertezza sulla misura $\mathbf{y}$ la covarianza di stato $\mathbf{P}$ dello stimatore precedente.

In una forma di attuazione, si imposta l'incertezza dello stato complesso a $(\dot{\omega}_{\max} \Delta t^2)^2$ per i soli stati rappresentati la velocità angolare, in cui $\dot{\omega}_{\max}$ è la massima accelerazione angolare permessa dal rotore.

Tuttavia, entrambe le incertezze possano essere ottimizzate per la specifica applicazione.

In una forma di attuazione si utilizza un filtro di Kalman esteso (Extended Kalman Filter o EKF).

Un EKF è un classico filtro di Kalman nel quale le equazioni rappresentanti l'evoluzione dello stato e le equazioni rappresentanti la misura sono, generalmente, non-lineari. Poiché l'evoluzione temporale della matrice di

covarianza di stato $\mathbf{P}$ dipende dalla matrice $\mathbf{F}$ ed il guadagno di Kalman $\mathbf{K}$ dipende dalla matrice di covarianza di stato $\mathbf{P}$ e dalla matrice di osservazione $\mathbf{H}$ (fare riferimento alle equazioni del doppio pseudo-integratore), è necessario ottenere una forma linearizzata delle matrici suddette ad ogni istante temporale k . In generale, se:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k \quad (36)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k \quad (37)$$

$$\mathbf{w}_k \approx N(0, \mathbf{Q}_k) \quad (38)$$

$$\mathbf{n}_k \approx N(0, \mathbf{R}_k) \quad (39)$$

rappresenta un generico sistema non-lineare, le equazioni di un EKF per ogni istante k sono le seguenti:

$$\mathbf{F}_k = \left. \frac{d \mathbf{f}}{d \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} \quad (40)$$

$$\mathbf{x}_{k+1}^- = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) \quad (41)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_k \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (42)$$

$$\mathbf{H}_k = \left. \frac{d \mathbf{h}}{d \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{k+1}^-} \quad (43)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (44)$$

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_{k+1}^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{y}_k - \mathbf{h}(\mathbf{x}_{k+1}^-)) \quad (45)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (46)$$

In una forma di attuazione, a valle delle operazioni di aggiornamento dello stato, si effettua una normalizzazione dello stesso.

In una forma di attuazione, si considerano anche gli effetti di saturazione sulla velocità angolare prima della rinormalizzazione.

In una forma di attuazione, per ottenere la stima delle fasi e delle velocità angolari dei rotori, si esegue il seguente calcolo sul vettore di stato:

$$\omega_{i,k} = \arg(\alpha_{i,k} / \Delta t) \quad (47)$$

$$\vartheta_{i,k} = \text{atan2}[\Re(-j(\beta_{i,k} - \beta_{i,k}^*)), \Re(\beta_{i,k} + \beta_{i,k}^*)] \quad (48)$$

in cui il simbolo $\Re$ indica l'estrazione della parte reale per evitare che piccole incertezze numeriche possano falsare il calcolo dell'arcotangente.

Gli stimatori qui presentati sono capace di stimare le fasi e le velocità angolari da assegnare ad un numero $N \geq 3$ di rotori sbilanciati per fare in modo che essi sprigionino una forza desiderata con modulo, fase e direzione (sul piano) variabili indipendentemente.

Gli inventori hanno osservato che gli stati iniziali dei due stimatori sono molto importanti. Preferibilmente, l'accelerometro dovrà leggere inizialmente un'accelerazione nulla e la fase e la velocità angolare iniziale dei rotori dovrà essere nota con buona precisione.

Gli inventori hanno anche osservato che tutti i parametri possano richiedere tarature di piccola entità per la specifica applicazione.

Tuttavia, il metodo di stima risulta particolarmente stabile, anche partendo o passando attraverso condizioni di singolarità di rappresentazione cinematica ed anche in condizioni di saturazione.

Gli inventori hanno anche osservato che il sistema si presenta per l'implementazione di un metodo di autotuning o auto-taratura.

Infatti, con il sistema installato su una macchina utensile target, a partire dai segnali misurati dall'accelerometro incluso nel sistema in risposta ad

opportuni ingressi di forza generati dalla soluzione stessa, il sistema è in grado di stimare i parametri interni ai metodi di stima discussi (principalmente, varianze o co-varianze della matrice di stato) in modo da ottimizzare le proprie prestazioni sulla macchina per la quale il sistema è utilizzato.

In una forma di attuazione, il sistema implementa anche una procedura di autodiagnostica. Ad esempio, il sistema può rilevare autonomamente propri malfunzionamenti, ad esempio a partire da opportune misure delle grandezze come l'accelerazione o corrente dei motori.

In generale, il sistema qui descritto è in grado di generare, in modo controllato, forze e momenti. Nel disegno finora discusso, tuttavia, il braccio della forza risultante rispetto al piano d'azione su cui viene sviluppata la forza è stato ridotto al minimo per consentire la generazione soprattutto di forze. Tuttavia, il sistema di attuazione stesso, con un disegno leggermente differente (in cui ad esempio sia aumentata la distanza tra la forza risultante e il piano d'azione) può essere utilizzato anche come generatore di coppie.

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. Procedimento per stimare i parametri di controllo di un sistema per lo smorzamento attivo delle vibrazioni (20) di una struttura meccanica (30), in cui detto sistema per lo smorzamento (20) è in grado di generare una forza tramite la rotazione di almeno tre rotori eccentrici (100), in cui detto procedimento include le fasi di:

- ricevere un valore ($\bar{a}$) indicativo per la forza complessiva che detti almeno tre rotori eccentrici (100) devono generare, e

- stimare (206) le fasi ($PosVibr, \vartheta$) e le velocità angolari ($VelVibr, \omega$) da applicare a detti almeno tre rotori (100) in funzione di detto valore ($\bar{a}$) indicativo per la forza complessiva.

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui detto valore ($\bar{a}$) indicativo per la forza complessiva è un'accelerazione che detti almeno tre rotori eccentrici (100) devono generare.

3. Procedimento secondo la rivendicazione 2, in cui detta accelerazione ($\bar{a}$) che detti almeno tre rotori eccentrici (100) devono generare viene determinata (204) in funzione di un valore di accelerazione misurata (ACCMis).

4. Procedimento secondo la rivendicazione 2 o la rivendicazione 3, in cui detto stimare (206) le fasi ($PosVibr, \vartheta$) e le velocità angolari ($VelVibr, \omega$) da applicare a detti almeno tre rotori (100) include:

- stimare (206a) un valore indicativo per una posizione complessiva ($\bar{p}$) e un valore indicativo per una velocità complessiva ($\bar{v}$) in funzione di detta accelerazione ($\bar{a}$), e

- stimare (206b) dette fasi ($PosVibr, \vartheta$) e dette velocità angolari ($VelVibr, \omega$) in funzione di detto valore indicativo per una posizione complessiva ($\bar{p}$) e detto valore indicativo per una velocità complessiva ($\bar{v}$).

5. Procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui detto valore indicativo per una posizione complessiva ($\bar{p}$) e detto valore indicativo per una velocità complessiva ($\bar{v}$) vengono stimati (206a) tramite una doppia pseudo-integrazione di detta accelerazione ($\bar{a}$).

6. Procedimento secondo la rivendicazione 5, in cui detta doppia pseudo-integrazione di detta accelerazione ($\bar{a}$) viene effettuata tramite un filtro di Kalman.

7. Procedimento secondo una delle rivendicazioni 4 a 6, in cui vengono stimati per ogni asse di accelerazione un valore indicativo per una posizione complessiva ($\bar{p}$) e un valore indicativo per una velocità complessiva ($\bar{v}$).

8. Procedimento secondo una delle rivendicazioni 4 a 7, in cui dette fasi ($PosVibr, \vartheta$) e dette velocità angolari ($VelVibr, \omega$) vengono stimate (206b) tramite un modello lineare autoregressivo di primo ordine complesso.

9. Procedimento secondo una delle rivendicazioni 4 a 8, in cui dette fasi ($PosVibr, \vartheta$) e dette velocità angolari ($VelVibr, \omega$) vengono stimate (206b) tramite un filtro di Kalman esteso.

10. Sistema per lo smorzamento attivo delle vibrazioni (20) di una struttura meccanica (30), comprendente:

- un sistema di attuazione (10) inerziale per generare una forza tramite la rotazione di almeno tre rotori eccentrici (100),

- un sensore (202) per rilevare un valore ($\bar{a}$) indicativo per la forza complessiva che detti almeno tre rotori eccentrici (100) devono generare, e

- un modulo di controllo configurato per implementare il procedimento di stima secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 9.

11. Sistema secondo la rivendicazione 10, in cui detto modulo di controllo è configurato per effettuare una procedura di auto-taratura che comprende le fasi di:

- generare almeno una forza tramite detti almeno tre rotori eccentrici (100), e

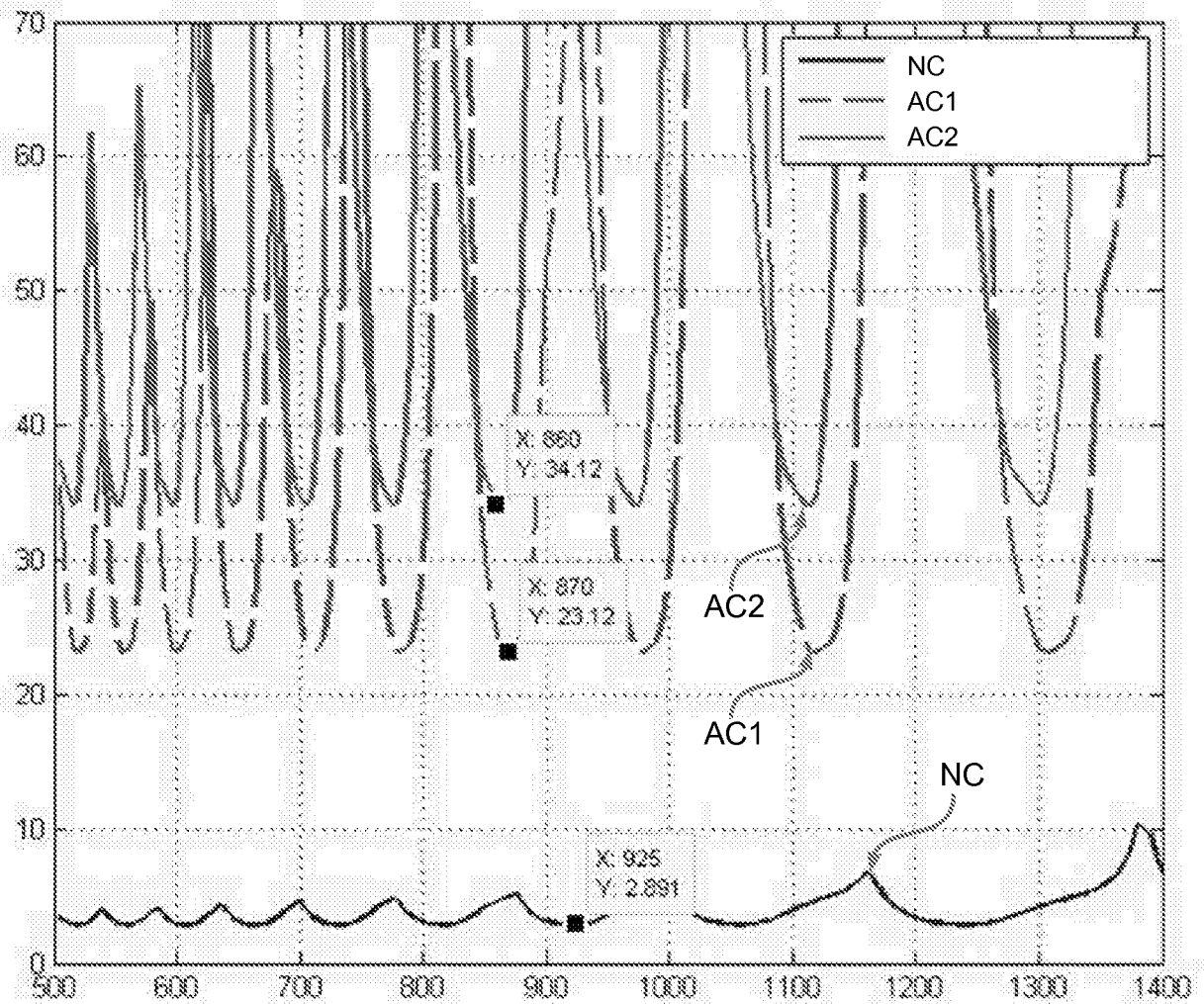
- stimare almeno una varianza e/o co-varianza utilizzata all'interno di detto modulo di controllo in funzione del valore ($\bar{a}$) rilevato tramite detto sensore (202).

12. Sistema secondo la rivendicazione 10 o la rivendicazione 11, in cui detto sensore (202) è un sensore di accelerazione.

13. Sistema secondo una delle rivendicazioni 10 a 12, in cui detta struttura meccanica (30) è una macchina utensile.

14. Dispositivo di attuazione (10a-10d) suscettibile di essere utilizzato in un sistema per lo smorzamento delle vibrazioni (20) secondo una delle rivendicazioni 10 a 13, in cui detto dispositivo di attuazione (10a-10d) comprende un motore (102), un rotore eccentrico (100) accoppiato ad detto motore (102), ed un involucro (104, 106), in cui detto involucro (104, 106) comprende almeno un primo foro (130a) con asse perpendicolare all'asse di detto motore (102), almeno un secondo foro con asse perpendicolare sia all'asse di detto motore (102) sia all'asse di detto primo foro (130a), ed almeno due fori (130d, 130e) ad assi paralleli all'asse di detto motore (102) per accoppiare una pluralità di detti dispositivi di attuazione (10a-10d).

15. 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 1 a 9.

**Fig. 1**

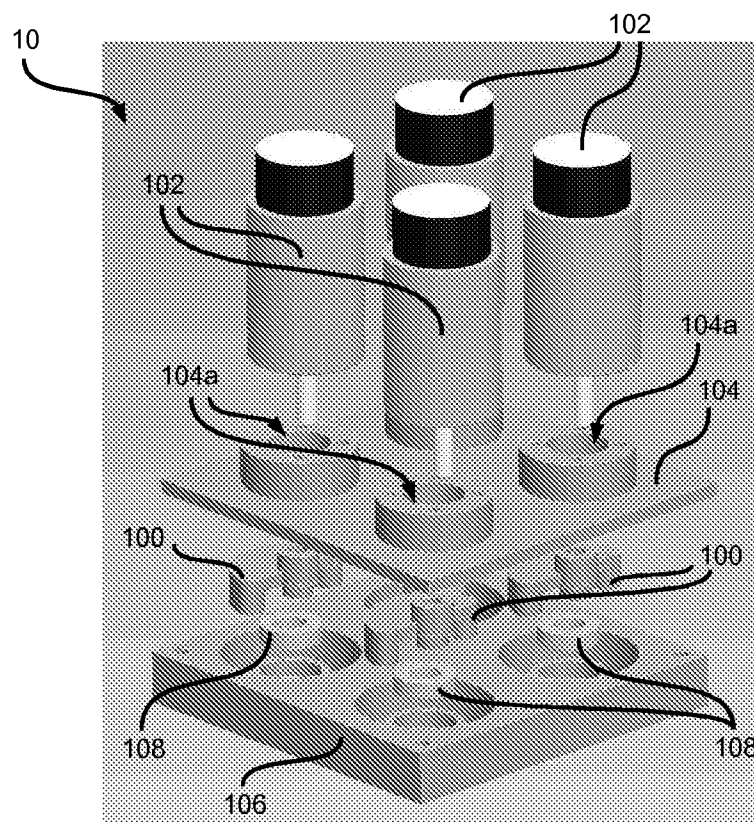


Fig. 2

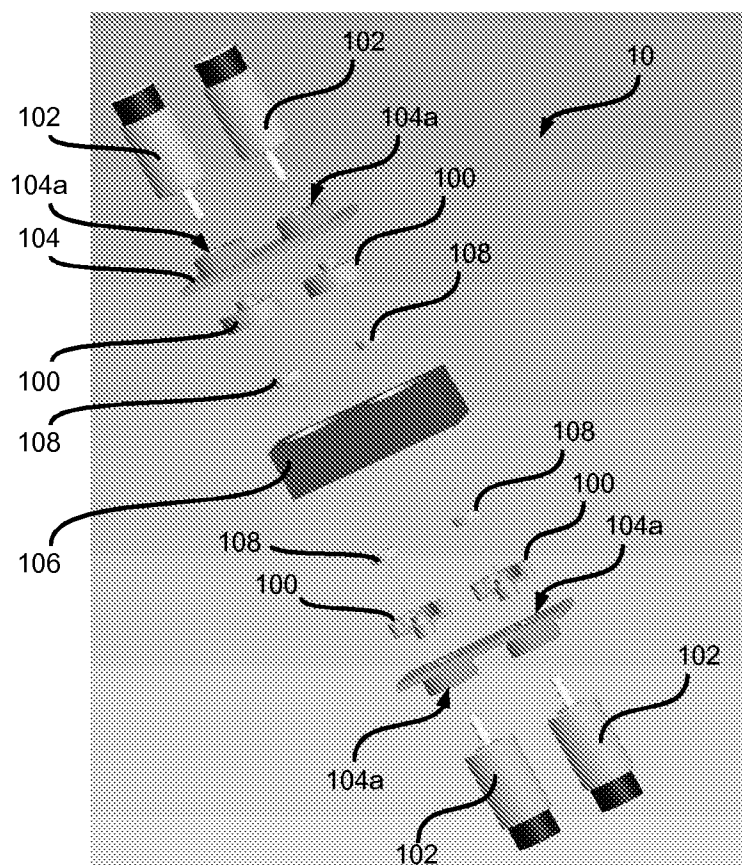


Fig. 3

3/7

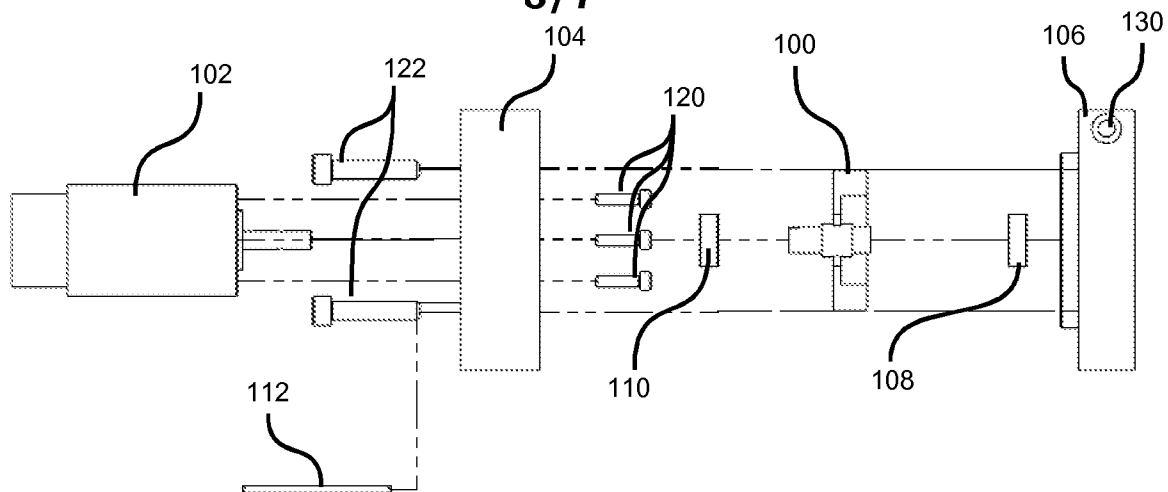


Fig. 4

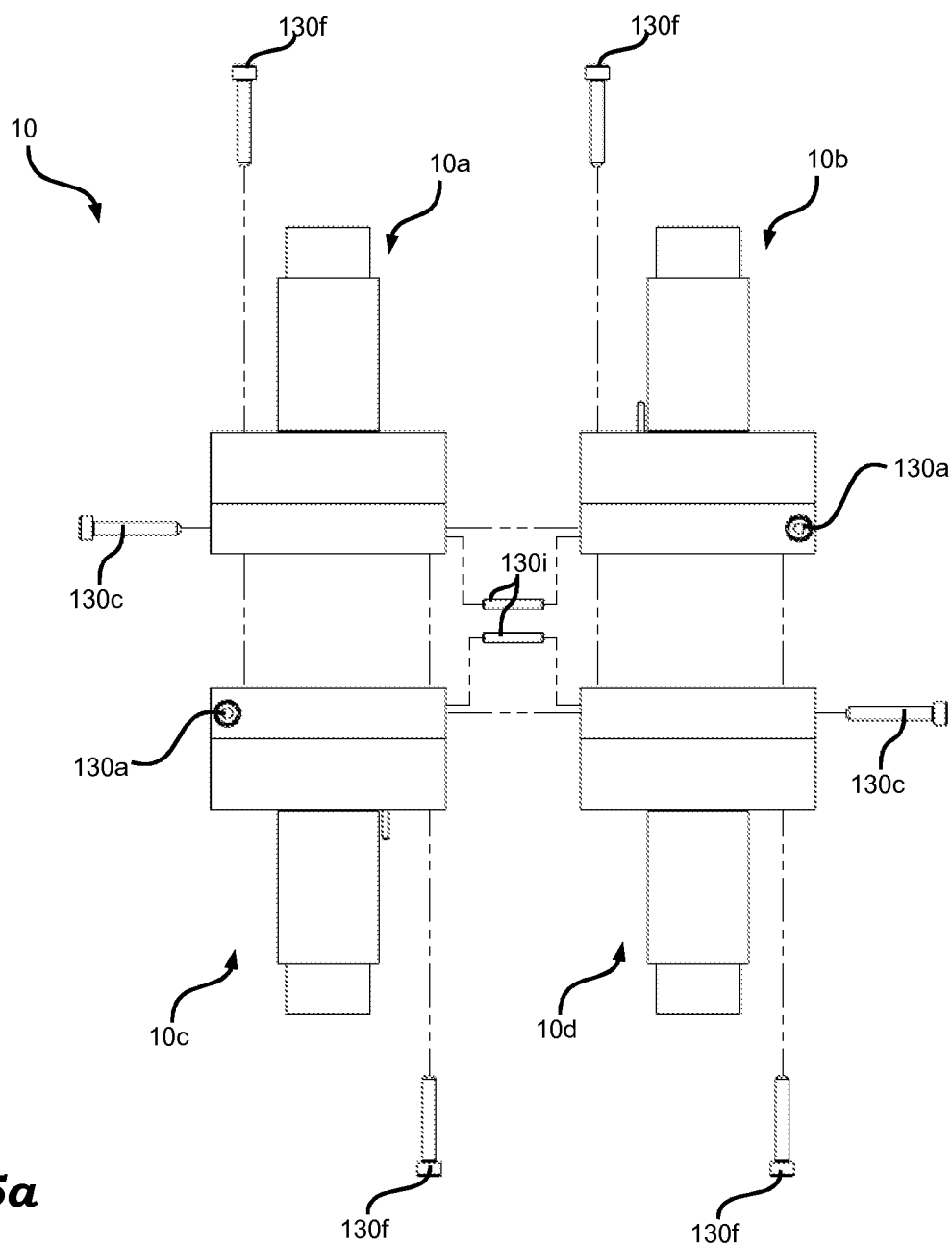


Fig. 5a

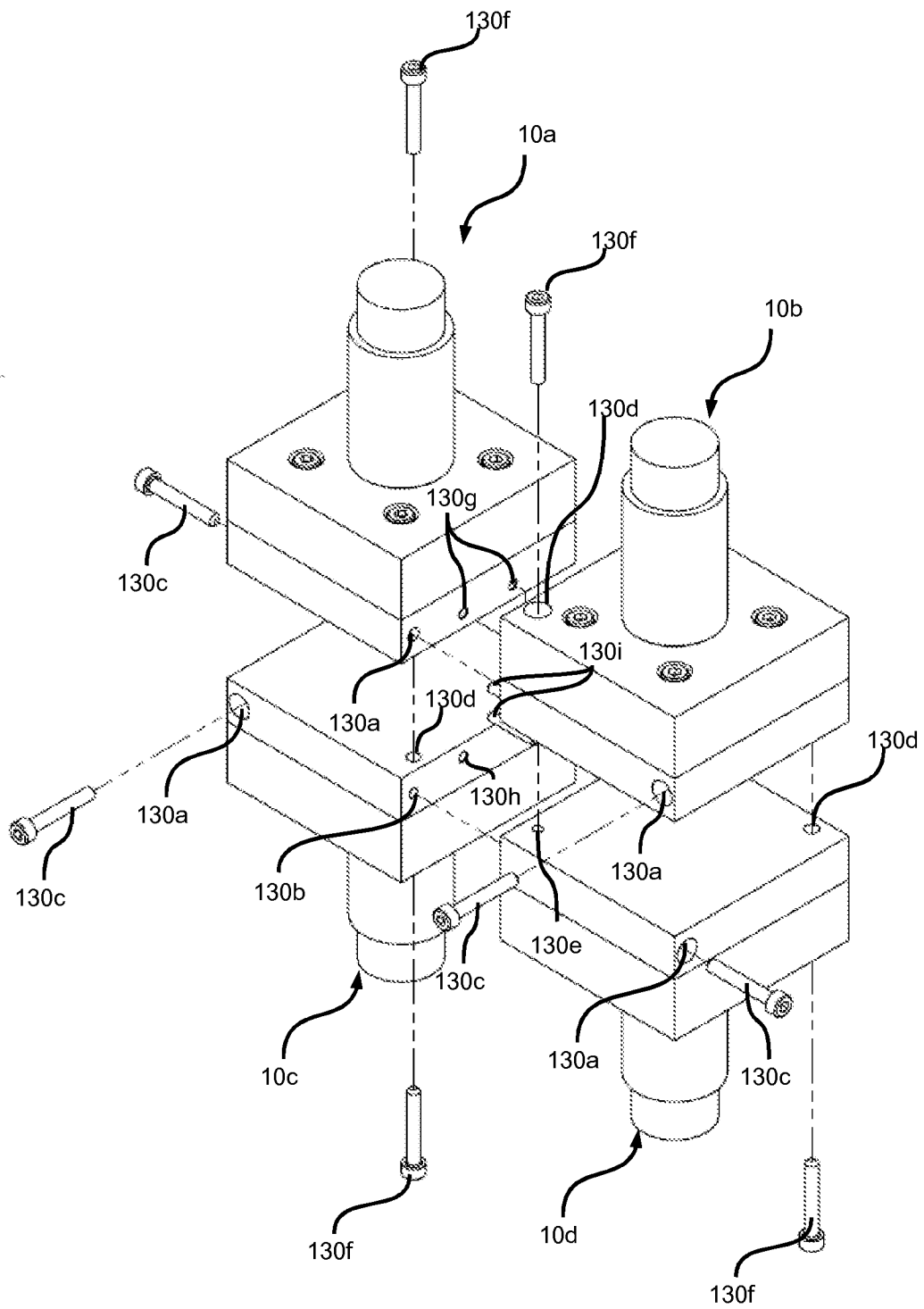


Fig. 5b

5/7

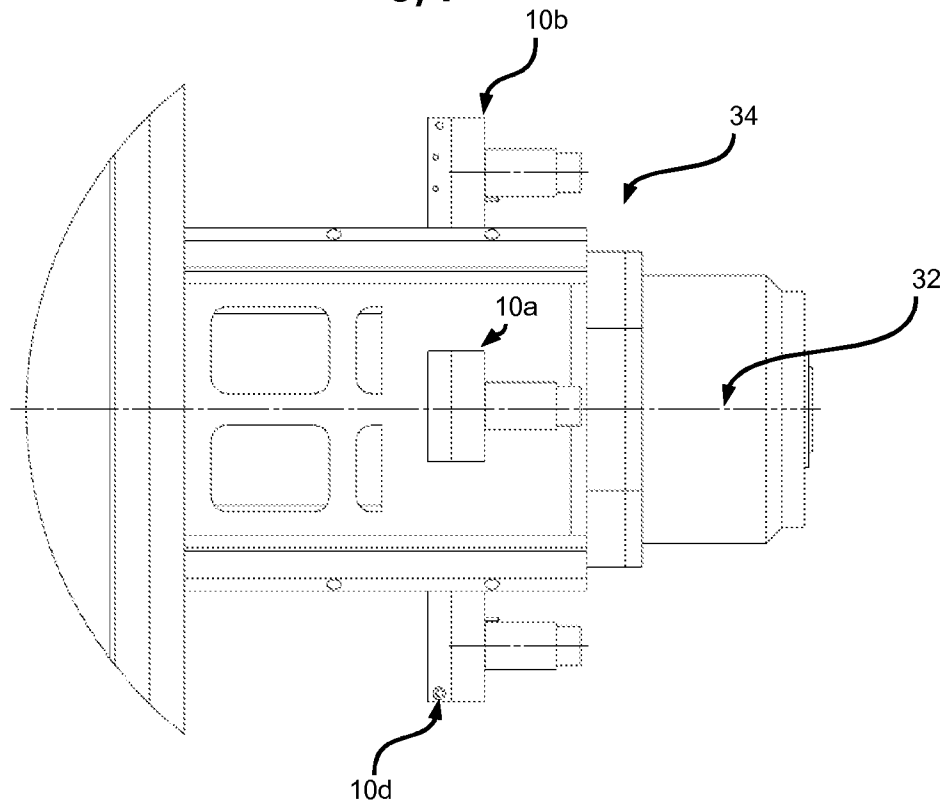


Fig. 6a

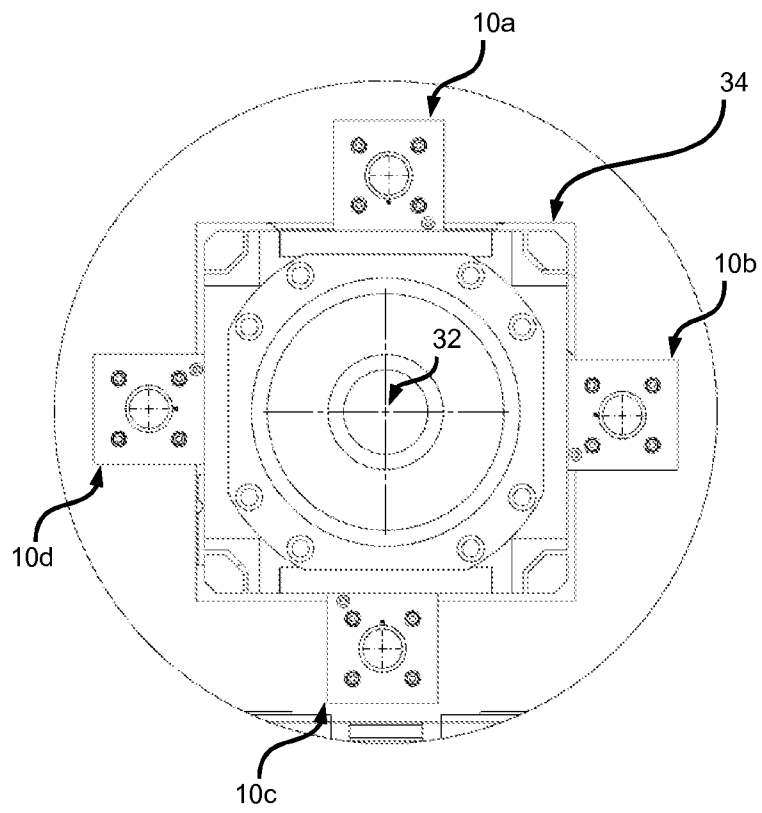


Fig. 6b

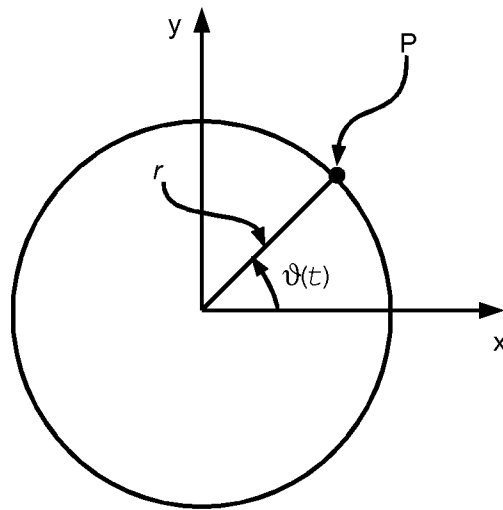


Fig. 7

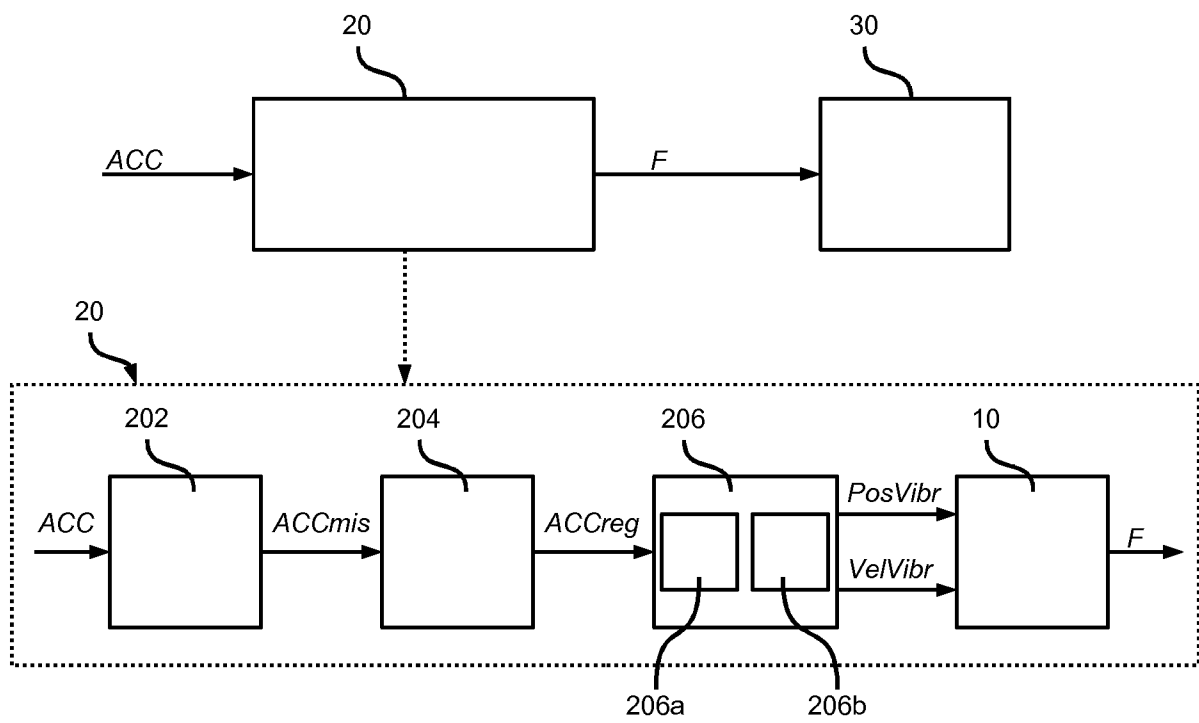
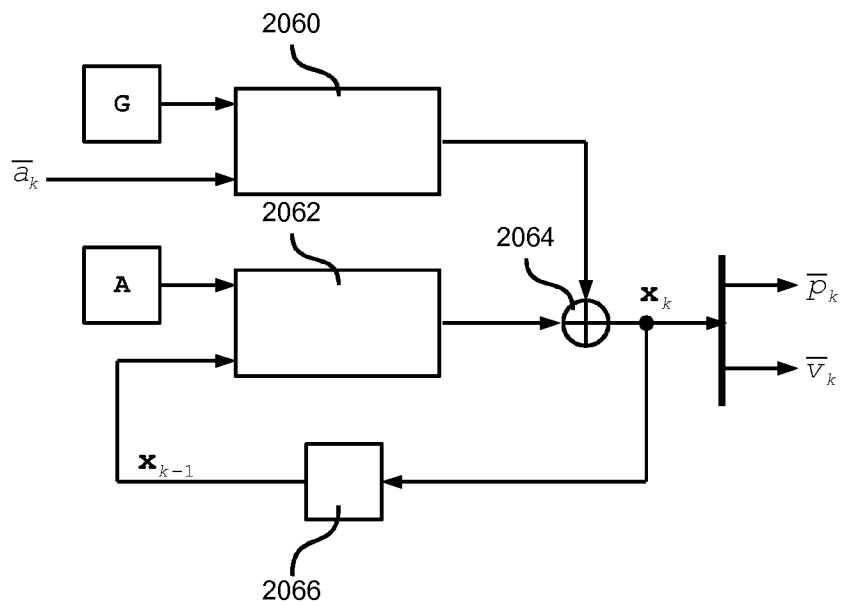


Fig. 8

**Fig. 9**