

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第3729888号
(P3729888)

(45) 発行日 平成17年12月21日(2005.12.21)

(24) 登録日 平成17年10月14日(2005.10.14)

(51) Int. Cl.⁷

F I

F 1 6 F 15/02

F 1 6 F 15/02

A

G 0 5 D 19/02

G 0 5 D 19/02

D

請求項の数 30 (全 36 頁)

(21) 出願番号	特願平7-51627	(73) 特許権者	501403209
(22) 出願日	平成7年3月10日(1995.3.10)		テクニカル マニュファクチャリング
(65) 公開番号	特開平8-54039		コーポレーション
(43) 公開日	平成8年2月27日(1996.2.27)		アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
審査請求日	平成7年3月15日(1995.3.15)		1960 ピーボディール センテナルド
審査番号	不服2001-15032(P2001-15032/J1)		ライヴ 15
審査請求日	平成13年8月24日(2001.8.24)	(74) 代理人	100079119
(31) 優先権主張番号	08/223 256		弁理士 藤村 元彦
(32) 優先日	平成6年4月4日(1994.4.4)	(72) 発明者	デール ダブリュ. シューベルト
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
			1776 サドバリー ホースポンドロ
			ド 91

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 剛性アクチュエータ能動振動絶縁装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

第1の質量を有する換価荷重(M_p)を振動源から絶縁するための前記換価荷重(M_p)と前記振動源との間に配設された能動振動絶縁装置であって、

前記第1の質量の10分の1以下である第2の質量を有する小質量(M_s)と、

ある軸に沿って間隔が変化する第1及び第2の対向する表面(14, 9)を有する少なくとも一つの圧電アクチュエータ(12)と、

前記小質量(M_s)及び前記換価荷重(M_p)の間に配置された受動アイソレータ(20)と、

前記小質量(M_s)に接続され、前記小質量(M_s)の動きの関数であるセンサ信号を発生するセンサと、

前記センサ信号を前記圧電アクチュエータ(12)に中継する中継回路(22, 24)とから成り、

前記中継回路(22, 24)は前記センサ信号を変更して前記センサの特性を補償する補償回路(24)を含み、前記中継回路(22, 24)は更に、前記圧電アクチュエータ(12)に接続され前記圧電アクチュエータ(12)の前記間隔を該変更されたセンサ信号の関数として変化させる制御回路(22)を含み、

前記第1の表面(14)が前記小質量(M_s)に接続されかつ前記第2の表面(9)が前記振動源と接続されていることを特徴とする能動振動絶縁装置。

【請求項2】

20

前記小質量 (M s) の前記換価荷重 (M p) 質量に対する質量の比は 1 / 5 0 から 1 / 2 0 0 の範囲であることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 3】

前記受動アイソレータ (2 0) はエラストマーからなることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 4】

前記圧電アクチュエータ (1 2) はそれぞれが第 1 及び第 2 の対向する表面を有し前記対向する表面の間の各々の軸に沿った各々の可変の間隔を有する第 1、第 2 及び第 3 の圧電アクチュエータ (6 1 4 , 6 1 6 , 6 1 8) の少なくとも一つであり、

前記第 1、第 2 及び第 3 の圧電アクチュエータ (6 1 4 , 6 1 6 , 6 1 8) の各々は前記第 1、第 2 及び第 3 の圧電アクチュエータ (6 1 4 , 6 1 6 , 6 1 8) の残りの圧電アクチュエータに関する軸に対して非平行であり、

前記圧電アクチュエータの各々の第 1 の表面は前記小質量 (M s) に接続され、前記圧電アクチュエータの各々の第 2 の表面は前記震動源に接続されて、

前記圧電アクチュエータは前記換価荷重質量 (M p) を前記 3 つの各軸に沿って前記振動源から絶縁するように動作し得ることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 5】

前記軸は互いに直交していることを特徴とする請求項 4 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 6】

前記第 1 の圧電アクチュエータ (1 2) の前記第 1 の表面 (1 4) は、前記第 1 の表面 (1 4) と前記小質量 (M s) との間に配置された剪断応力減衰結合器 (6 4 0) によって前記小質量 (M s) に接続されていることを特徴とする請求項 4 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 7】

前記センサは、各々が前記小質量 (M s) に接続され前記軸の夫々に平行な方向での前記小質量 (M s) の動きを検知する第 1、第 2 及び第 3 のセンサの内の一つであり、前記センサのセンサ信号の一つを前記第 1、第 2 及び第 3 の圧電アクチュエータの各一つに中継する第 1、第 2 及び第 3 の補償回路を有することを特徴とする請求項 4 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 8】

前記センサ信号は前記小質量 (M s) の速度を表す速度信号であり、

前記中継回路 (2 2 , 2 4) は前記速度信号を積分して変位信号を生成し、前記変位信号のための出力を有する速度積分器を含み、

前記補償回路 (2 4) は前記速度積分器の前記出力に接続されていることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 9】

前記補償回路 (2 4) は前記センサからの直流電圧を阻止する直流阻止回路 (1 4 0) を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 0】

前記直流阻止回路は伝達関数

【数 1】

$$\frac{S}{S + W_1}$$

を有し、S はラプラス変換演算子であり W₁ は共振周波数であることを特徴とする請求項 9 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 1】

前記直流阻止回路 (1 4 0) はアナログ段であることを特徴とする請求項 1 0 に記載の

能動振動絶縁装置。

【請求項 1 2】

前記補償回路 (2 4) は伝達関数

【数 2】

$$\frac{1 + T_{c2}S}{1 + T_{c1}S}$$

を有する低周波数補償回路 (2 4) を含み、 S はラプラス変換演算子、 T_{c1} は所定の第 1 の時定数、 T_{c2} は前記第 1 の時定数より小さい第 2 の時定数であることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

10

【請求項 1 3】

前記センサはサスペンション周波数を有し、 T_{c1} は前記サスペンション周波数に一致していることを特徴とする請求項 1 2 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 4】

前記第 1 の質量は 2 2 7 キログラム (5 0 0 ポンド) から 9 0 7 キログラム (2 , 0 0 0 ポンド) であることを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 5】

前記補償回路 (2 4) は前記受動アイソレータ (2 0) の共振周波数領域において、進み位相を加える進み位相増加回路 (1 6 0) を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

20

【請求項 1 6】

前記進み位相増加回路 (1 6 0) は前記共振周波数領域において前記センサ信号の少なくとも 40° の位相シフトを起こすことを特徴とする請求項 1 5 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 7】

前記進み位相増加回路 (1 6 0) は 2 つの極と 2 つのゼロを有する周波数特性をもつ 2 つの直列接続されたアナログ進み遅れステージから成ることを特徴とする請求項 1 5 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 1 8】

前記補償回路は前記センサ信号に作用して前記圧電アクチュエータ (1 2) のばね定数及び前記小質量 (M_s) により生ずる共振周波数より低い周波数領域内の利得が 1 となる周波数において利得を 1 に減少させる高周波利得減衰回路を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の能動振動絶縁装置。

30

【請求項 1 9】

前記高周波利得減衰回路 (2 3 0 , 2 5 0) は伝達関数

【数 3】

$$\left(\frac{1}{1 + T_{c3}S} \right)^2$$

40

を有し、 S はラプラス変換演算子であり $1 / T_{c3}$ は周波数領域における前記利得が 1 となる周波数であることを特徴とする請求項 1 8 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 2 0】

前記高周波利得減衰回路 (2 3 0 , 2 5 0) はアナログ回路であることを特徴とする請求項 1 8 に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項 2 1】

前記高周波利得減衰回路 (2 3 0 , 2 5 0) は、各々が前記利得が 1 となる周波数より低い第 1 の周波数において極を有し、前記利得が 1 となる周波数より高い第 2 の周波数に

50

においてゼロを有する周波数特性をもつ2つの直列接続された遅れ及び進み回路から成ることを特徴とする請求項20に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項22】

前記共振周波数は約1500ヘルツであり、周波数領域内において前記利得が1となる周波数は約350ヘルツに選択されていることを特徴とする請求項18に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項23】

前記補償回路(24)は前記小質量(M_s)、前記換価荷重質量(M_p)及び前記受動アイソレータ(20)の相互作用により生じる共振周波数において低利得となるノッチを有するノッチフィルタ回路(400)を含むことを特徴とする請求項1に記載の能動振動絶縁装置。 10

【請求項24】

前記ノッチフィルタ回路(400)は約300ヘルツのノッチを有することを特徴とする請求項23に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項25】

前記ノッチフィルタは1の直流利得を有することを特徴とする請求項23に記載の能動振動絶縁装置。

【請求項26】

換価荷重質量(M_p)を振動から能動的に絶縁する方法であって、
受動アイソレータ(20)上に前記換価荷重質量(M_p)を置き、
前記受動アイソレータ(20)を前記換価荷重質量(M_p)の質量がその10倍である
小質量(M_s)に対して接続し、 20

ベースからの振動を受ける前記小質量(M_s)を少なくとも一つの圧電アクチュエータ(12)により支持し、

前記小質量(M_s)の動きを検知し、
前記小質量(M_s)の動き関数である小質量(M_s)センサ信号を生成し、

前記小質量(M_s)センサ信号の関数である制御信号を生成し、

前記制御信号を前記圧電アクチュエータ(12)に印加し、

前記印加するステップに応じて前記圧電アクチュエータ(12)の長さを変化させ、
これによって前記換価荷重質量(M_p)に伝わる振動を減少させる各ステップからなる
ことを特徴とする能動振動絶縁方法。 30

【請求項27】

前記小質量(M_s)センサ信号は小質量(M_s)の速度の関数であることを特徴とする
請求項26に記載の能動振動絶縁方法。

【請求項28】

前記小質量(M_s)センサ信号を積分して小質量(M_s)変位信号を得るステップと、
前記小質量(M_s)変位信号の関数として制御信号を導出するステップとを更に有する
ことを特徴とする請求項27に記載の能動振動絶縁方法。

【請求項29】

能動振動絶縁装置の少なくとも一つの共振周波数を補償するために前記小質量(M_s)
センサ信号を小質量(M_s)修正センサ信号に修正するステップと、
制御信号を前記小質量(M_s)修正センサ信号の関数として生成するステップとを更に
含むことを特徴とする請求項28に記載の能動振動絶縁方法。 40

【請求項30】

換価荷重質量(M_p)の動きを検知するステップと、
換価荷重(M_p)センサ信号を換価荷重(M_p)の動きの関数として生成するステップ
と、

制御信号を前記センサ信号及び前記換価荷重センサ信号の関数として生成するステップ
とを更に含むことを特徴とする請求項28に記載の能動振動絶縁方法。

【発明の詳細な説明】

【 0 0 0 1 】

【 産業上の利用分野 】

本発明は支持された換価荷重から振動を除去するための方法及び装置に関し、特にセンサ及び剛性アクチュエータを用いた能動振動絶縁装置に関する。

【 0 0 0 2 】

【 従来技術 】

産業界においては振動絶縁（アイソレーション）の必要性が増大している。例えば、半導体の製造において用いる紫外線ステッパーの場合には周囲の振動に対する許容性が益々小さくなっている。半導体及び他の製品の製造は益々高精度になっており、周囲の振動を抑制する必要が益々大きくなっている。

10

【 0 0 0 3 】

この分野の従事者は慣性空間に対する換価荷重の絶対的な運動を測定するために、ボイスコイルモータエレメント等の力モータ、絶縁された換価荷重上のセンサを用いる理論的なアクティブ振動絶縁装置を考え出している。

【 0 0 0 4 】

【 発明が解決しようとする課題 】

これまで、換価荷重の共振が検知出力に結合する問題と安定性マージンをとることとの妥協を図る必要から、これらの従来技術の概念及び装置は完全には実用的ではなかった。

【 0 0 0 5 】

可能な範囲で最も単純な圧電アクティブ振動絶縁装置においては、装置の共振周波数は圧電モータエレメントのスプリング剛性と支持された換価荷重の質量との組み合わせにより決まる。典型的な支持換価荷重の重量は圧電モータ当たり 4 5 4 キログラム (1 0 0 0 ポンド) の範囲である。典型的な圧電モータエレメントは、ほぼ 2.68×10^7 キログラム / メートル (1 5 0 万ポンド / インチ) のスプリング剛性係数を有する。この値は約 1 3 0 ヘルツ (毎秒 1 3 0 サイクル) のやっかいな装置共振周波数を生じさせる。この装置共振周波数の値（絶縁が必要な周波数範囲に対する）は実用的なアクティブ絶縁のデザインを得るために解決しなければならない2つの問題に行き当たる。第1の問題は約1ヘルツの低い周波数迄のアクティブ振動絶縁を得るためには装置のフィードバック・ループ利得が極めて高くなければならないことである。更に、安定性を確保するためには利得が換価荷重 / モータ共振周波数においては1以下の低い利得までフィルタリングされねばならない。従来技術の設計では、この様な所望の利得を得ることは不可能であった。第2に、換価荷重 / モータの共振周波数において装置が周囲の振動を大きく増幅し、また周波数におけるフィードバック利得が低いため、かかる設計においてはアクティブ絶縁装置の利点の殆ど全てが失われる。従って、圧電モータまたは他の剛性アクチュエータに基づいた実用可能なアクティブ振動絶縁装置の必要が依然として存在する。

20

30

【 0 0 0 6 】

【 発明の概要 】

本発明の目的は従来の能動振動拒絶装置の上述の問題点を解決することである。

【 0 0 0 7 】

【 課題を解決するための手段 】

本発明による能動振動絶縁装置は、第1の質量を有する換価荷重を振動源から絶縁するための前記換価荷重と前記振動源との間に配設された能動振動絶縁装置であって、前記第1の質量の10分の1以下である第2の質量を有する小質量と、ある軸に沿って間隔が変化
する第1及び第2の対向する表面を有する少なくとも一つの圧電アクチュエータと、前記小質量及び前記換価荷重の間に配置された受動アイソレータと、前記小質量に接続され、前記小質量の動きの関数であるセンサ信号を発生するセンサと、前記センサ信号を前記圧電アクチュエータに中継する中継回路とから成り、前記中継回路は前記センサ信号を変更して前記センサの特性を補償する補償回路を含み、前記中継回路は更に、前記圧電アクチュエータに接続され前記圧電アクチュエータの前記間隔を該変更されたセンサ信号の関数として変化させる制御回路を含み、前記第1の表面が前記小質量に接続されかつ前記第2

40

50

の表面が前記振動源と接続されていることを特徴とする。

【0008】

装置の回路が動きセンサ信号を受け、振動周波数及び換価荷重の質量の所定の範囲にわたって装置が安定であるための補償回路を含む。回路は更に、変更されたセンサ信号の関数として剛性アクチュエータの長さを変化させる剛性アクチュエータに接続された駆動回路を含む。

好ましくは、小質量は「X」、「Y」及び「Z」軸の各々における振動から絶縁されている。好ましい実施例において、小質量はケース内に納められており、「X」「Y」及び「Z」軸の各々において、各方向における少なくとも一つの剛性アクチュエータによりケースから浮動している。剛性アクチュエータが圧電モータエレメントである場合には、水平に設けられた剛性アクチュエータは引っ張り応力からモータエレメントが損傷するのを防ぐために予め圧縮されている。選ばれたデザインにおいて、各々水平または半径方向の圧電モータエレメントが小質量とケースの一方の側の側壁の間に配置されており、圧縮アッセンブリが小質量の他の面上に設けられ、ケースからの圧縮力を小質量を介して圧電モータエレメントに加えるようになっている。

10

【0009】

発明の他の局面によれば、剛性アクチュエータの各々は剪断応力の圧電モータに対する加圧を制限する剪断デカップラもしくは減衰結合器を用いて小質量またはケースに接続されている。好ましい実施例において、剪断デカップラアセンブリの各々は圧電モータエレメントの端部に隣接した第1の剛性プレートもしくはエレメントと、小質量またはケースに隣接する第2の剛性プレートもしくはエレメントと、剛性プレートの間の弾力性材料の薄いディスクもしくはウエハを含む。

20

【0010】

発明の更に他の局面によれば、換価荷重質量上に設置されたセンサから導出される信号を用いる追加の補償回路を使用することも可能である。換価荷重慣性速度を表すこれらの信号は小質量自身の上のセンサからのフィルタリングされた速度信号と合成されて換価荷重の振動応答が更に制御される。

好ましい実施例において、本発明において用いられた小質量運動センサはそのデザインの簡潔さと機械動力的利点から選ばれたジオホンである。

【0011】

本発明はまた、好ましくは、補償回路の一部として受動アイソレータと小質量及びモータのスプリング剛性との間の特定の共振周波数を補償回路の利得を増加させることなしに抑制する新規なノッチフィルタを用いている。回路内の他の補償回路は他の共振モードを補償するために用いられている。

30

【0012】

【作用】

本発明は、剛性アクチュエータ及び邪魔にならずに動く絶縁機構に基づいた実用的なアクティブ振動絶縁装置を初めて提供するものである。共振周波数の値を上昇させるための小質量が設けられたこと、小質量からの換価荷重の共振の減衰と能動的に絶縁する周波数の範囲外の受動的な絶縁を提供する受動アイソレータが設けられたこと、小質量からの絶対速度の信号及び選択に応じて換価荷重からの動き信号に基づいて剛性アクチュエータを制御するための補償回路が設けられたことによって、本発明は、フィードバック不安定性が生じる恐れ無しに周囲の振動源から換価荷重質量に伝達される振動を低減させることができるのである。

40

【0013】

【実施例の詳細な説明】

図1は符号10で一般的に示された受動/能動アイソレーション装置の構成モデルである。図1は3つの次元の内の一つでのアクティブ振動のみを考慮したモデルを示している。この簡略化は説明のために行っている。装置10は「邪魔せずに動く」アクティブ振動絶縁装置と命名しても良い。この装置において、床もしくはベースFは符号12で概括的に

50

示された剛性アクチュエータもしくはモータエレメントの底部 9 と共に振動する。剛性アクチュエータ 1 2 の頂部 1 4 は殆ど動かないまま、或いは対象物の動きが床 F の移動のほぼ 0.01 倍となる程度である。図 1 のモデルはベースもしくは床の振動を剛性アクチュエータ 1 2 の変位の軸に平行である絶対変位センサ 1 7 (例えばジオホンなどの、センサ信号出力が変位を得るために積分される絶対速度センサである) の感度の高い軸の方向に沿ってのみ絶縁する。このモデルにおいて、例えば圧電スタックである剛性アクチュエータもしくはモータエレメント 1 2 は 2 つの個別の要素を含んでいる。第 1 の要素はその軸に平行な長さが印加された制御信号の関数として変化するスタック 1 3 と称する全体が堅固な要素である。アクチュエータモータ 1 2 の他のモデル化された要素は剛性 K_s を有するモータスプリング 1 6 である。これはアクチュエータ 1 2 のスプリング剛性 (ばね定数) を表している。圧電モータを用いた好ましい実施例において、スプリング剛性はほぼ 3.39×10^7 キログラム/メートル (190 万ポンド/インチ) であり、変位対電圧関係はほぼ 3.93×10^7 ボルト/メートル (100 万ボルト/インチ) のピークである。

10

【0014】

選ばれた圧電スタック 1 3 は 2.54×10^{-5} メートル (0.001 インチ) のピークの最大相対スタック変位を有し、従ってモータ 1 2 をプラス又はマイナス 1.27×10^{-4} メートル (0.005 インチ) 動かすのに約 500 ボルトの電圧を必要とする。この電圧は、移動が生じないために、500 ボルトの DC 電圧が圧電モータ 1 2 に印加されるような電圧である。このバイアス電圧は電流を必要とせず、モータ 1 2 をその最大相対変位の半分だけ予め伸長させる。電圧を上昇または下降させることにより、圧電モータ 1 2 はそれに応じた分だけ拡張または収縮する。圧電モータ 1 2 はゼロボルトでその完全に収縮した状態に達し、1000 ボルトでその完全に伸長した状態に達する。印加された電圧に対する拡張及び収縮はほぼ直線的である。

20

【0015】

装置 10 は換価荷重質量の重量 M_p を支持するように設計されている。このモデルにおいて、換価荷重質量 M_p は 4.6×10 キログラム/メートル/秒² (2.6 ポンド/インチ/秒²) に選ばれており、これは 454 キログラム (1000 ポンド) の重量を有している。図示された実施例において、構造的な実施例を参照しつつ後述する圧電モータ 1 2 の各々について、 M_p はほぼこの量である。従って、この装置の共振周波数は、換価荷重 M_p が剛性アクチュエータ 1 2 によって直接的に支持されていれば、装置共振周波数はほぼ 130 ヘルツ (毎秒 130 サイクル) であると導出される。これは、次に 2 つの問題を生じさせる。第 1 には所望の振動絶縁を得るためには装置利得が極めて高くなければならず、他方、利得は換価荷重/モータ共振周波数 F_n (130 ヘルツ (毎秒 130 サイクル)) において利得が 1 より充分低くなるように、フィルタリングされねばならない。剛性アクチュエータ 1 2 の入力からの補償された速度信号出力 20 迄の全体的ループゲインは例えば 99 程度に高くなければならない。 F_n より低い周波数においてこの所望の利得を得ることは不可能である。第 2 に、補正無しでは装置が換価荷重/モータ共振周波数において振動を大きく増幅し、その結果アクティブ絶縁の利益の殆どが失われる。

30

【0016】

本発明は値 M_s を有する小質量 18 を介在させることによってこの問題を除去している。質量 M_s は装置 10 が支持もしくは絶縁するように設計されている質量 M_p の範囲に比較して質量が少なくとも一桁小でなければならず、 M_s 対 M_p の関係は好ましくは $1/50$ から $1/200$ の範囲である。図示された実施例において、 M_p が約 454 キログラム (1000 ポンド) に対応するとき M_s は 4.54 キログラム (10 ポンド) に対応するように選ばれている。

40

【0017】

小質量 18 は剛性アクチュエータ 1 2 上に直接配置されている。これにより圧電モータスプリング係数 K_s に付随する共振が 1000 ヘルツ (毎秒 1000 サイクル) 近くまで非常に高まる。ほぼ 4.54 キログラム (10 ポンド) の重量の小質量 18 により、小質量

50

及び圧電モータ 1 2 の共振周波数は約 1 0 0 0 ヘルツ (毎秒 1 0 0 0 サイクル) になる。ここで、2 0 で示された弾力性受動振動アイソレータが小質量 1 8 及び換価荷重質量 M_p の間に挿入されている。アイソレータ 2 0 は参照番号 3 0 で概括的に示された減衰エレメント係数 C_i 及び参照番号 3 2 で概括的に示されたスプリング定数 K_i を有している。このような構成により、受動アイソレータ 2 0 がそれらの非常に高い周波数で受動的な振動絶縁を与えるために非常に高い周波数でフィードバック利得を得ることができる。受動アイソレータ 2 0 は換価荷重質量 M_p が負荷となる時に約 2 0 ヘルツ (毎秒 2 0 サイクル) の共振周波数となるように選ばれている。

【 0 0 1 8 】

装置は加算電力増幅器 2 2 を介して剛性アクチュエータ 1 2 の拡張及び収縮を制御する。加算電力増幅器 2 2 は定常状態で 5 0 0 ボルト DC 電圧がモータ 1 2 に印加されている状態において、可変電圧を圧電モータ 1 2 に印加する。小質量速度センサ 1 7 が信号を生成し、その信号が小質量 1 8 の絶対変位を得るために積分される。センサ信号はセンサ 1 7 から、変位を得るために信号を積分して利得を増大させるための利得モジュール 2 4 に伝達される。増幅された変位センサ信号は多くの補償回路を含む後述の電力増幅器 2 2 に伝達される。

10

【 0 0 1 9 】

アクティブ振動絶縁装置 1 0 により絶縁された支持された換価荷重 M_p は、換価荷重 M_p に作用して、それに応答して振動させる運動機械成分を含んでいる。従って絶縁装置 1 0 が支持された換価荷重の換価荷重により生成される力による移動に抵抗するように成されていることが好ましい。装置 1 0 の受動的特徴を高めるために、第 2 の運動センサ 2 6 がアクティブ振動絶縁装置 1 0 に付加されている。換価荷重質量絶対運動センサ 2 6 は絶対速度センサもしくは相対移動センサのどちらでも良く、信号を発生し、その信号は利得ステージ 2 8 において増幅される。増幅信号は次にセンサ 1 7 からの状態信号に加算され、それによりステージ 2 2 の入力センサ 1 7 及びセンサ 2 6 に依存するように成されている。絶対換価荷重質量速度ループ及び絶対小質量変位ループの両方を考慮すると絶縁されて支持された換価荷重質量 M_p の回りの力の合計は以下の式ようになる：

20

$$M_p S^2 X(S) = (K_i + C_i S)(V(S) - X(S)) + F_p \quad (1)$$

上式はラプラス表記にて示されている。X は絶縁されて支持された換価荷重の M_p での運動である。F_p は換価荷重 M_p 上に作用する力であり、典型的には重力の力である。V は小質量 1 8 の運動である。

30

【 0 0 2 0 】

小質量 M_s はアイソレータスプリング K_s 及びアイソレータダンパー 3 0 並びに圧電モータスプリングエレメント 1 6 (K_s) に基づいて動作する。小質量 1 8 の回りの力の加算式は以下の如くである。

$$M_s S^2 V(S) = K_s (Z(S) - V(S)) + (K_i + C_i)(X(S) - V(S)) \quad (2)$$

U をモータスプリング K_s の軸方向での床 F の運動とし、運動 Z が圧電スタック 1 4 の頂部の運動とすると、絶対速度フィードバック式は以下のように書き直される：

$$Z - U = -C_d V(S) - C_v S X(S) \quad (3)$$

40

上述の式において、C_d は絶対変位センサフィードバック・ループからの利得であり、C_v は絶対速度センサフィードバック・ループからの利得である。

【 0 0 2 1 】

全体的な装置の動作は完全な伝達関数としては示されていないが、これはいかなる値についても複雑過ぎる微分式であるためである。その代わりに、システムブロック図が図 2 に示されている。図 2 は完全なアクティブ振動絶縁装置の異なる部分がどのようにして相互に関係しているかを示すラプラス変換ブロック図である。

【 0 0 2 2 】

一時的に図 1 に戻ると、ボックス 2 4 は絶対速度センサ 1 7 及び電力増幅器 2 2 の間に挿入された補償及び利得回路を表している。センサ 1 7 はサーボ加速度計、或いは好ましく

50

は、ジオホンである。ジオホンは非常に低い剛性の機械スプリングに支持された、コイルを通過する磁界を有する電線コイルから成るものである。

【 0 0 2 3 】

磁界はコイル内に、磁石を保持したジオホンケースに対するコイルの相対速度、コイルを通過する磁界の強度、コイル内の電線の巻数に比例した電圧を発生させる。ジオホンはまた低コストであり低雑音、かつ高感度である。補償回路 2 4 (及び加算電力増幅器の部分 2 2) はセンサ 1 7 がジオホンである場合について示されており、種々の補償ステージの電氣的構成図である図 3 及び図 4 において詳細に図示されている。図 3 及び図 4 は補償回路 2 4 のアナログ形式の実施例を図示している。図示されたアナログ回路と同一機能を達成するためにデジタル回路及びデジタル信号処理を用いることも可能である。

10

【 0 0 2 4 】

ジオホンの出力は入力 7 0 に示されでいる。入力 7 0 に現れる信号は小質量の変位に以下の如く関係する電圧信号である。

【 0 0 2 5 】

【 数 4 】

$$E_{out} = C_g * \frac{S^3}{(S + W_g)^2} * (\text{CASE DISPLACEMENT})$$

この式において、 C_g は ボルト / メートル / 秒 × 0 . 0 2 5 4 (ボルト / インチ / 秒) の単位で測定したジオホンのモータ定数である。 W_g はジオホンコイルのその懸架スプリング上の共振周波数である。ケースの変位は小質量 1 8 に固定されたジオホンケースの変位である。このように分解されたジオホンの特性式はジオホンコイルの質量及びスプリング装置に作用する制動が臨界であることを表している。入力 7 0 上に現れる補償回路の出力は上記伝達関数により重み付けされたジオホンケースの絶対速度の測定出力である。しかしながら、ジオホンコイル - 小質量 - スプリング系に加えられる制動が正確に臨界値にあることが必須でなはなく、ジオホン応答の臨界制動力の約 0 . 7 から約 2 . 0 の範囲の値が本発明のアクティブ振動絶縁装置センサの要求を満たすことができるのである。

20

【 0 0 2 6 】

積分されない速度信号は平均 (R M S) 信号レベルより何デシベルも低い小さな、非常に低周波振動振幅を生成する大きな高周波数の振幅を含んでいるため、積分器ステージ 8 0 (或いは積分遅延ネットワークとして知られているステージ) をアナログデジタル変換器 (デジタル回路の前に設けられている) の前に設けることが必要である。積分器ステージ 8 0 の入力信号 7 0 における作用は以下の如く示すことができる。

30

【 0 0 2 7 】

【 数 5 】

$$\frac{\text{Gain}}{1 + T_i S}$$

上述の式において、 R_i がステージ 8 0 の等価直列抵抗であり、 C_i が接地に対する抵抗の後であり、出力の前の等価容量であるときに表現 T_i は $R_i C_i$ に等しくなる。

40

アクティブ振動絶縁装置を安定化するために、その 4 . 5 ヘルツの共振周波数を有する伝達関数 (上式 4) によって、ジオホンは固有の低周波数利得ロールオフを有している。ジオホンに固有のこの低周波数ロールオフが無ければ、少なくとも 2 つの追加の補償ステージを補償回路 2 4 に設ける必要が生じる。

例えば 0 . 0 1 μ F の小さなコンデンサ 7 2 が入力 7 0 及び接地の間に接続されている。ダイオード 7 4 及び 7 6 が前置増幅器の過電圧保護のために入力 7 0 及び接地の間に接続されている。

【 0 0 2 8 】

補償回路 2 4 は波線の囲みで示される幾つかの連続したステージに構成されている。第 1

50

のステージ 80 は入力 70 上に現れる速度信号を積分して小質量 18 の変位信号 (図 1) を得、またここでは 15、000 に選ばれている非常に大きな利得を得るように設計されている。この利得はジオホン入力 70 をその正入力端において受け取る非反転演算増幅器 82 を用いることより達成される。フィードバック抵抗 84 が出力ノード 86 及び増幅器 82 の負入力端 88 との間に接続されている。

非反転増幅器がジオホンセンサ 17 に負荷を与えないように用いられている。抵抗 90 がノード 88 及び接地の間に接続されている。15、000 倍の DC 利得を得るためには、抵抗 84 は 15 k に選ばれ、抵抗 90 は 1 に選ばれている。好ましくは 1 k の抵抗 92 及び 220 μ F のコンデンサ 94 がノード 86 及び 88 の間に直列に接続されている。例えば 100 pF の低い値のコンデンサ 96 がノード 86 を接地に接続している。

10

【0029】

追加の抵抗 98 がノード 86 をステージ 80 の出力として使用されるノード 100 に接続する。コンデンサ 102 がノード 100 及び接地の間に接続されており、図示された実施例においては 220 μ F に選ばれている。

積分の半分はオペアンプ 82 により行われる。ステージ 80 により実行される積分動作の残りは抵抗 98 及びコンデンサ 102 の組み合わせにより行われる。このステージ 80 において信号の増幅をできる限り行い、DC オフセット電圧及び信号のちらつきが後のステージで増幅されないようにされることが好ましい。

【0030】

他の、殆んどデジタル化されたデザインにおいても尚、最初のアナログ段 80 を設けることが好ましい。これにより信号をマイクロボルトからボルトの単位に上昇させ、アナログデジタル変換器が読み取る信号において十分に高い電圧が得られる。図 3 及び図 4 に示された補償回路の残りのステージはデジタル形式であっても良く、例えばデジタル信号プロセッサにおいて一連のプログラムされたステップとして行われる。

20

【0031】

ノード 100 は第 2 のステージ 110 への入力として用いられる。

ステージ 110 は絶対変位センサ 17 としてジオホンを選択的に用いたことを考慮した低周波補償投である。

0.2 ヘルツ (0.2 サイクル毎秒) の目標周波数において、おおよそ利得 1 の交差を得るためには、開ループゲインの変化率は 0.2 ヘルツの周波数領域において 6 dB / オクターブでなければならない。これを行うために、遅れ一進みネットワークを用いることができる。遅れ一進みネットワーク 110 は低い周波数において利得が 1 であり、次に回路の遅延部分によってマイナス 6 dB / オクターブの減衰に入り、最後に回路の進み部分により、高い周波数において 1 以下の一定利得までレベル低下する。ステージ 110 の低周波補償機能は以下のように表すことができる：

30

【0032】

【数 6】

$$E_{out} = \frac{1 + T_{c2}S}{1 + T_{c1}S} * E_{in} \quad (6)$$

40

ステージ 110 (図 3) において、コンデンサ 116 によってノード 114 が抵抗 118 に接続される。抵抗 118 はコンデンサ 116 及び接地の間に接続されている。抵抗 112、コンデンサ 116 及び抵抗 118 が遅れ一進み回路の要素を構成する。式 (6) において、 $T_{c2} = R_{118} C_{116}$ であり、 $T_{c1} = (R_{112} + R_{118}) C_{116}$ である。図示された実施例において、抵抗 112 は 14 k に選ばれ、コンデンサ 116 は 220 μ F に選ばれ、抵抗 118 は 720 Ω に選ばれている。

【0033】

114 が演算増幅器 120 の正入力端に接続されている。ノード 114 はまた 2200 pF のコンデンサ 122 を介して接地に接続されている。このコンデンサがノイズを除去する。オペアンプ 120 の出力ノード 124 は図示された実施例においては 15 k に選ば

50

れた抵抗 128 を介して負入力 126 に戻り接続されている。抵抗 130 がノード 126 を接地に接続する。

【0034】

DC (直流) ステージ 110 の利得は抵抗 130 の値で割った抵抗 128 の値 + 1 に等しい。ここで、図示された実施例におけるように、抵抗 130 は 681 に選ばれた場合、DC 利得は 23 である。ステージ 110 は コンデンサ 102 及び コンデンサ 116 の間の相互作用により式 (6) で与えられる理想的な低周波補償からは外れるけれども、近似値としては正確である。

【0035】

小さな容量の コンデンサ 132 が好ましくはノード 124 及び接地の間に配置されている 10

。ステージ 140 利得が 6 である DC 電圧阻止ステージである。ノード 124 におけるその入力から、好ましくは 220 μ F の コンデンサ 142 が抵抗 146 を介して接地に接続されているノード 144 に接続されている。ノード 144 は演算増幅器 148 への正入力端として用いられる。出力ノード 150 が比較的小さな容量 (100 pF) の コンデンサ 152 を介して接地に接続されている。フィードバック抵抗 154 が出力ノード 150 をオペアンプ 148 の負入力 (ノード 156) に接続している。抵抗 158 がノード 156 を接地に接続している。

【0036】

コンデンサ 142 (好ましくは 220 μ F) 及び抵抗 146 (好ましくは 15 k) の組 20
み合わせが DC 阻止動作を提供する。ステージ 110、160、180、210、230 及び 250 がデジタル形式である一つの実施例 (図示せず) においては、好ましくは DC 電圧阻止 進みネットワーク 140 がアナログ/デジタル変換器 (図示せず) の前に設けられ、コンピュータ入力のために完全なダイナミックレンジを補償するように成される。図示された全体が アナログである実施例 においては、DC 電圧阻止ステージ 140 を速度積分及び増幅段 80 の後に設けることにより補償回路における利得半値点の後に DC 電圧阻止が行われることが保証される。

【0037】

ステージ 160 及び 180 は受動アイソレータもしくはカップマウント (図 1) の共振の 30
周波数領域に位相進みを加えるように設計されている。ノード 150 が増幅器 162 の正入力端に接続されている。増幅器 162 の出力ノード 164 は好ましくは 100 k の抵抗 166 を通してノード 168 に接続されている。ノード 168 がオペアンプ 162 の負入力端に接続されている。コンデンサ 170 (好ましくは 0.39 μ F) 及び第 2 の抵抗 172 (好ましくは 100 k) がノード 168 を接地に接続している。小さな容量 (100 pF) の コンデンサ 174 がノード 164 を接地に接続している。

【0038】

ステージ 160 は $C_{170} R_{166}$ 、もしくはほぼ 0.039 秒の時定数でゼロを生ずる。ステージ 160 はまた

【0039】

【数 7】

$$C_{170} * \frac{(R_{166} R_{172})}{(R_{166} + R_{172})},$$

もしくは約 0.0195 秒において ポール を生ずる。ステージ 160 により生成される真の ポール 及び真のゼロの代わりに、他の回路を用いることができその場合複雑な ポール および複雑なゼロが生成される。

以降のステージ 180 において、ノード 164 が、0.001 μ F の コンデンサ 186 を介して接地に接続され、かつオペアンプ 188 の正の入力に接続されたノード 184 に抵抗 182 を介して接続されている。オペアンプ 188 の出力ノード 190 は抵抗 192 を通して負入力ノード 194 に接続されている。ノード 194 は コンデンサ 196 及び抵抗 50

198を通して接地に直列に接続されている。比較的小さな容量(100 pF)のコンデンサ200がノード190を接地に接続する。抵抗192及び198は好ましくは100 k に選ばれ、コンデンサ196は0.39 μ Fに選ばれている。抵抗182は33.2 k に選び、コンデンサ186は0.001 μ Fに選んでも良い。抵抗182及びコンデンサ186が共働して高周波数でのノイズ低減フィルタを提供している。ステージ180はステージ160と同様に、同一の個々の時定数において他のポール及び他のゼロを生成する。

【0040】

ステージ160及び180の両方はDC利得が1であるけれども、高周波数利得はコンデンサ170及び196のために約2となっている。ステージ160及び180の両方が総計で45から50度の量の位相シフトを更に与えるために一緒に用いられる。

10

ステージ210は1から10の利得調整ステージである。抵抗212がステージ180の出力をオペアンプ216の負入力として用いられるノード214に接続する。オペアンプ216の出力ノードは比較的小さな容量(例えば100 pF)のコンデンサ220を介して接地に接続されている。ノード218が抵抗222を介して0及び50 k の間で調整することが可能な可変抵抗224に接続されている。抵抗222は5 k の選ばれた値を有する。抵抗226がオペアンプの正入力端216を接地に接続し、この抵抗は好ましくは1 k の値を有する。入力オフセット電流の影響を最小にするために抵抗226のインピーダンスがオペアンプ216のフィードバックインピーダンスに大体等しくなるように選ばれている。

20

【0041】

以降のステージ230及び250が高周波数領域での利得を低下させるために補償回路に挿入されている。この理由は以下の通りである。 T_{c2} (ほぼ0.5ヘルツ(0.5サイクル毎秒))が作用する周波数以上の周波数では、開ループ回路24の伝達関数の利得が12 dB / オクターブの割合で約4.5ヘルツ(4.5サイクル毎秒)のジオホンの共振周波数に達するまで増大する。この周波数以上では、開ループ伝達関数利得は、ほぼ100の一定ループゲインの水準に達するまで上昇する。もし可能で有り、本発明のアクティブ振動絶縁装置の機械的要素が完全に理想的でありまた剛体であるとすると、開ループゲインは非常に高い周波数まで100のままである。

【0042】

30

しかしながら、高周波数においてはおよそ2000ヘルツでの小質量18(図1参照)の共振があり、圧電モータスプリングエレメント16及び小質量の共振が約700ヘルツで存在する。ジオホン17及び装置プラットフォームベース(後述する)においても他の高周波数の共振が存在する。もし開ループゲインがこれらの共振の周波数領域において一定の大きさ100に維持され得るならば、不安定な状態が存在し、上記の共振の内の一つ或いはその近傍で装置が振動することになる。

【0043】

従って補償回路24の高周波ループゲインは上記の、この例では小質量18及びスプリングエレメント16の共振であり約700ヘルツ(毎秒700サイクル)の共振の最低周波数の手前で十分に1以下になって居なければならない。高周波数共振での増幅がいくらか行われるためには、ループゲインが1に交差し、700ヘルツより充分手前で周波数の上昇に対して高速に低下することが必要である。

40

【0044】

好ましくは、利得がほぼ350ヘルツ(350サイクル毎秒)で1になり、それ以後急速に低下することが必要である。

高周波数での利得減少の式は以下の通りである。

【0045】

【数8】

$$\frac{1}{(1 + T_{c3}S)} \quad (7)$$

選択された T_{c3} は、 0.0314 秒である。ステージ 230 及び 250 全体の効果は 50 ヘルツ（毎秒 50 サイクル）から開ループゲインを低下させはじめ、 -12 dB / オクターブの割合で低下させることである。

図示されたアナログ段 230 において、抵抗 232 がステージ 210 の出力ノード 218 を演算増幅器 236 の入力ノード 234 に接続している。オペアンプ 236 の第 2 の入力は抵抗 238 を介して接地に接続されており、抵抗 238 好ましくは 100 k である。オペアンプ 236 の出力ノード 240 は抵抗 242 を介して入力ノード 234 に戻り接続されている。ノード 240 はまたコンデンサ 246 に直列な抵抗 244 を介してノード 234 に接続されている。比較的小さな容量（ 100 pF）のコンデンサ 248 が出力ノード 240 を接地に接続している。好ましくは、コンデンサ 246 は 0.22 μ F に選ばれており、抵抗 244 は 1700 、抵抗 242 は 100 k に選ばれている。この組み合わせは、 0.22 秒でポールを、 3.74×10^{-4} 秒でゼロをそれぞれ生成する。

【0046】

ステージ 250 の構成要素はステージ 230 の構成要素と概ね同様である。抵抗 252 がステージ 230 の出力ノード 240 を演算増幅器 256 の入力ノード 254 に接続する。オペアンプ 256 の第 2 の入力は抵抗 258 を介して接地に接続されている。オペアンプ 256 の出力ノード 260 は抵抗 262 を介して入力ノード 254 に接続されている。ノード 260 及び 254 はコンデンサ 264 及び抵抗 266 を介して直列に相互接続されている。抵抗 252、258、262 及び 266、及びコンデンサ 264 の選ばれた値はステージ 230 の対応する抵抗及び容量の値と同じである。容量の小さなコンデンサ 268（ 100 pF）が出力ノード 260 を接地に接続する。所望の補償機能を得るために、第 2 のステージが以下の項を二乗する。

【0047】

【数9】

$$\left(\frac{1}{1 + T_{c3}S} \right)^2$$

図示された実施例において、カップマウントもしくは受動アイソレータ 20 の剛性及び圧電モータの剛性のために、小質量 18 及び換価荷重質量 M の間で、半径方向においてほぼ 300 ヘルツ、 Z 方向において 700 Hz の周波数の共振モードが存在することが明らかになった。この振動モードは参照番号 400 で概括的示されるノッチフィルタにより抑制される。

【0048】

好ましくは 10 k の抵抗 402 がノード 260 を演算増幅器 406 への負入力端として用いられるノード 404 に接続する。好ましくは 10 k の抵抗 408 がオペアンプの正入力端 406 を接地に接続する。オペアンプ 406 の出力 410 は好ましくは 10 k の抵抗 412 を介して入力ノード 404 に戻り接続されている。抵抗 402 及び 412 の値のために、「マザー」増幅器ステージ 406 の利得は 1 に近い。ノード 410 が全体ステージ 400 の出力ノードとして用いられ、図 1 において 22 で示されている圧電モータ電力増幅器に接続されている。

【0049】

ステージ 400 の残りの回路は入力ノード 404 及び出力ノード 410 の間にブリッジ接続されている。ポテンシオメータ 414 はノード 410 に接続された第 1 の端部と、ノード 416 に接続された第 2 の端部と、オペアンプの負入力端 418 に接続されたワイパを有している。好ましくは 10 k の抵抗 420 がオペアンプの正入力端 418 を接地に接続している。オペアンプ 418 及び素子 414 及び 420 の目的は抵抗 412 に平行なル

10

20

30

40

50

ープの回りに供給される信号の利得を設定することである。

【0050】

同じく、好ましくは10k の抵抗422がノード416を入力ノード424に接続している。入力ノード424は演算増幅器426の負入力端に接続されている。好ましくは1k の抵抗428によりオペアンプの正入力端426が接地に接続される。ここでは0.047μFに選ばれたコンデンサ430がオペアンプ426の出力ノード432をその入力424に接続している。ノード432及び424はまた好ましくは5k のポテンシオメータ434及び好ましくは1k の値を有する抵抗436を介して接続されている。ポテンシオメータ434のワイパーが抵抗436を介してノード424に接続されており、その一端は接地に接続されており、その他端はノード432に接続されている。演算増幅器426及び付随する素子428、430、436及び434が第1の積分器ステージを形成する。ポテンシオメータ434はノード410に現れる出力スペクトルの「ノッチ」の深さを設定する。

10

【0051】

ノード432が好ましくは10k の抵抗437を介して演算増幅器440への負入力端として用いられるノード438に接続されている。オペアンプ440は好ましくは1k の抵抗442を介して接地に接続された正入力端を有する。オペアンプ440の出力ノード444は図示された実施例においては0.047μFに選ばれたコンデンサ446を介して入力ノード438に接続されている。オペアンプ440及び付随する素子442、437及び446がオペアンプ426を含む第1の積分器ステージとともに共振状態を生成する第2の積分器ステージを形成している。出力ノード432における電圧が所定の周波数範囲で共振し、マザー増幅器406により得られる利得の全体的な減衰を生成する。ノード432が図示された実施例では4.99k に選ばれた抵抗448を介してオペアンプ406の信号入力404に再び接続される。

20

【0052】

ノード444がポテンシオメータ450の一端に接続されている。ポテンシオメータ450のワイパーは演算増幅器の負入力端452に接続されている。このオペアンプ452の正入力端が抵抗454を介して接地に接続されている。

図示された実施例において、ポテンシオメータ450は5k に選ばれており、抵抗454は1k に選ばれている。

30

【0053】

ポテンシオメータ450の他端はオペアンプ452の出力ノード456に接続されている。オペアンプ452及び付随する素子450及び454が利得を有する反転増幅器として動作する。ポテンシオメータ450を調整することにより出力410に現れる「ノッチ」の周波数が変化する。ノード404及び410の間の二次のループにおける利得が高くなるほど「ノッチ」の幅が広がる。ノード456が好ましくは10k の抵抗458を介してノード424に接続されている。

【0054】

ノッチフィルタステージ400は利得が1以上にならないという有益な特徴を有している。DC利得は1であり、無限周波数での利得も1である。「ノッチ」の周波数はポテンシオメータ450により調整される。「ノッチ」の深さはポテンシオメータ434により調整される。「ノッチ」の幅はポテンシオメータ414において調整される。

40

【0055】

図7～13に図示された実施例において、ジオホン26(図1)等の換価荷重絶対速度センサにより圧電スタック12に追加のフィードバック・ループが提供される。もしこの追加のセンサが用いられた場合、それからの補償された信号がノード270に加えられる。換価荷重速度信号増幅器ステージが460の点線で示されている。

【0056】

この追加の絶対速度ループの動きの閉ループ式は以下の通りである。

【0057】

50

【数 10】

$$\frac{X}{U} = \frac{W_i^2}{S^2 + G_v C_v W_i^2 S + W_i^2} \quad (8)$$

Xは換価荷重 M_p の運動、Uはベースの運動、 W_i は受動アイソレータ及び換価荷重の共振周波数、 G_v は補償関数、 C_v は閉ループ利得でありSはラプラス変換演算子である。上式はジオホンの伝達関数を1に設定した単純化した形式で示されている。これはジオホンの共振周波数 W_q はアクティブ絶対速度制御が行われる周波数領域より殆ど $1/10$ 程度低いから、行うことができるのである。

【0058】

伝達関数特性式の虚数部分は $2 W_i S$ に等しくしなければならず、 W_i は臨界制動の受動アイソレータに相当する部分である。補償関数 G_v は臨界値制動の受動アイソレータ相当部分である。補償関数 G_v は1に設定される。次に C_v は以下の通りである。

$$C_v = 0.5 W_i \quad (9)$$

受動アイソレータは好ましくは弾力性の構造である。 C_v の所望の値は1であり、換価荷重 M_p (この実施例では907キログラム(2000ポンド)の最大値を有する)による応力が印加されているエラストマーの W_i は約毎秒 2×10^{-1} ラジアンであるから、 C_v 約 1.79×10^{-1} キログラム/メートル/秒(0.01ポンド/インチ/秒)である。

【0059】

圧電モータを 2.54×10^{-6} メートル(0.0001インチ)動かすのに必要な電圧は100ボルトであり、ジオホンの較正は 5.9×10 ボルト/メートル/秒(1.5ボルト/インチ/秒)である。所望のループゲインを達成するための実利得は $100/1.5$ 又は 67 である。この小さな大きさの利得によって、DCブロックステージを設ける必要が無い。

【0060】

実際の増幅器利得を 67 にするには適当な抵抗値を選ぶことによってステージ 460 において達成される。

ジオホン共振周波数は 4.5 ヘルツ(毎秒 4.5 サイクル)であり、換価荷重の絶対速度制御の開ループゲインは 0.0015 /秒であり、また 100 ヘルツ(100 サイクル)の周波数において換価荷重速度制御ループの開ループゲインは 0.0033 である。これらの利得の両方は低く、また周波数が受動アイソレータ共振周波数から増加もしくは減少するのに応じてさらに低くなる。 4.5 ヘルツ及び 100 ヘルツでの低利得ステージは換価荷重絶対速度センサ 26 から電力増幅器 22 までの回路に複雑な補償回路を設ける必要が無いことを示している。こうして、必要となるすべては単一の増幅器ステージ 460 である。複雑で激しい内部共振を伴う換価荷重については、このフィードバック・ループにおいて、より複雑なフィルタリング、例えば少なくとも2つのポールの追加が必要になる。

【0061】

図3及び図4の回路は完全にアナログ形式である。幾つかのアルゴリズムのうちのいずれかを用いることによって同一の信号処理をデジタルで行うことができ、これらの機能をデジタルで実施することは十分に当業者の能力の内であるからこれらのデジタルの方法は図示されたアナログ回路の完全に等価である。補償回路 24 は「絶対変位」センサ(好ましくは、その出力が一度積分された絶対速度センサであり、図示された回路 24 がこの積分を行う)及び(選択的には)一方向の動きのための絶対速度センサからの信号を調整するのに用いられる。以下に述べるように、発明の装置は3つの方向の各々における振動を補償する。補償回路 24 は単にこれらの振動補償の追加の方向の各々に対して同じ動作を行う。他の実施例(図示せず)の場合にはマルチ・アクセス接続された補償回路が個々の補償回路の代わりに用いられる。

【0062】

図5は3次元装置の為のジオホン、補償回路及び剛性アクチュエータの間の電氣的相互

10

20

30

40

50

接続を示す高水準の電氣的構成図である。符号 470 で全体的に表される電子コントローラが図 3 及び図 4 において詳しく説明した補償回路 24 を含んでいる。回路 472 及び 474 は回路 24 と同一である。

補償 / 制御回路 24 は「Z」もしくは垂直の換価荷重ジオホン 26 及び「Z」小質量ジオホン 17 からのセンサ入力を受け取るように設けられている。この回路は複数の垂直の圧電もしくは剛性アクチュエータモータ 12a、12b 及び 12c の各々に並列的に制御信号を出力する。補償 / 制御回路 472 は「X」軸に沿った換価荷重の動きを検知する「X」ジオホン 323 からのセンサ信号を受け取る。この回路はさらに小質量の「X」方向の動きを検知する「X」ジオホン 502 からのセンサ信号を受け取る。制御信号がこれらのセンサ信号から導出され、「X」半径方向の剛性アクチュエータもしくは圧電モータ 284 に伝達される。

10

【0063】

補償 / 制御回路 474 は「Y」換価荷重ジオホン 325 及び「Y」小質量ジオホン 506 からの入力を受け取る。これらのジオホンから受けた信号に基づいて、「Y」補償 / 制御回路 474 は制御信号を「Y」半径方向の剛性アクチュエータもしくは圧電モータ 350 に供給する。図から分かるように、センサ / モータ装置は電子的クロストークが無く、以下に記述した種々の剪断デカップラーにより実際のクロストークを扱う必要がなくなる。

【0064】

先に述べたように、本発明の補償回路はアナログ形式の代わりにデジタル形式で構成しても良い。図 18 は図 3 及び図 4 に図示されたアナログ回路の代わりに使用することができるデジタル補償回路の高水準電気ブロック構成図である。信号調節器 800 が入力 803 に現れる 6 つのセンサ信号 (X、Y 及び Z 方向の各々について 2 つ) の各々をバッファリングし、増幅する。センサ信号のうち 3 つは小質量に付いた運動センサから供給され、さらに外側制御ループが用いられている場合には他の 3 つのセンサ信号は換価荷重質量に付随するセンサから導出される。信号調節器 800 は信号をバッファリングして増幅し、次いでこれらの信号をサンプルホールド回路 803 に伝送する。適当な周期でサンプルホールド信号がアナログ / デジタル変換器 804 に信号送出される。アナログ / デジタル変換器 804 は 6 つの信号のうちの一つを選択してデジタル信号プロセッサ 808 に送出するマルチプレクサ 806 にデジタル信号を送出する。図示された実施例において、デジタル信号プロセッサは一度に一つの信号を処理するものであるが並列処理を用いても良いことは勿論である。デジタル信号プロセッサ 808 は圧電モータのために適当な制御信号を生成するために入力 803 上に現れる信号をフィルタリングするために必要な信号補償を行う。3 つの方向のうち選ばれた一つのためのデジタル制御信号はデジタル信号プロセッサ 808 からデマルチプレクサ 810 に出力され、後者は次に、デマルチプレクス (多重化分解) 信号を 3 つのライン 812 のうち選ばれたひとつからデジタル・アナログ変換器 814 に送出する。デジタル・アナログ変換器 814 は制御信号のアナログ信号を生成し、後者は次にローパス平滑フィルタ 816 に伝達される。フィルタリングされた制御信号は次いで高電圧増幅器 818 に伝達され、後者は出力 820 を介して、増幅信号を圧電スタックに伝達する。

20

30

【0065】

図 19 は発明の構成により実現されねばならない内側及び外側制御ループ及び能動 (アクティブ) / 受動振動補償装置の補償回路のブロック図での表示であり、3 つの方向のうちの一つのみが示されている。図 19 は特に換価荷重質量の絶対速度を用いる外側ループが使用された場合を示している。入力関数 i_n は振動する床により発生するベース外乱変位を表している。慣性変位 u_c は圧電モータスタックにより発生し、これはノード 830 において「邪魔せずに動く」方法で i_n から減算されて中間の質量慣性変位 i が生成される。本発明の目的は i を最小にすることである。

40

【0066】

ブロック 832 は変位から速度への微分を表しており、装置の構造に内在されるものである。ブロック 832 は中間もしくは小質量の絶対速度である v_i を生成する。速度 v_i は

50

ジオホンにより検知される。ジオホンセンサの動的特性は関数 $S(s)$ で表される。関数 $G_v(s)$ は中間慣性速度 v_i と換価荷重の速度出力 v_o との間の動的関係を表している。これは次に外側ループ補償関数である $C_v(s)$ に入力される。内側ループ補償関数 $C(s)$ はブロック 834 で示されており、例えば、図 3 及び図 4 に示された回路により実現される。関数 $C_v(s)$ はカップマウントもしくは受動アイソレータにより生じ、ほぼ 20 ヘルツにおいて出現する共振を補償するためにのみ用いられる。図示された実施例において補償回路 $C_v(s)$ からの出力は $C(s)$ からの補償信号にノード 836 において加算され、これが次に圧電モータの慣性変位 c を生成する。

【0067】

図 20 (A) 及び (B) は補償関数 $C(s)$ についての振幅対周波数の及び位相対周波数のボード線図である。図 20 (A) において、縦座標は周波数をデシベル単位で -20 及び 140 デシベルの間で示している。周波数は横座標において 100 mHz 及び 1 kHz の間で対数的に示されている。図 20 (B) において、縦座標は位相を -180 及び +180 度の間で示し、周波数は再び 100 mHz 及び 1 kHz の間で対数的に示されている。

10

【0068】

図 21 (A) 及び (B) は選ばれた外側ループ補償関数 $C_v(s)$ についてのボード曲線である。図 21 (A) 及び (B) に示されたグラフの横座標は受動アイソレータ共振周波数 ω_c が $1(10^0)$ に等しくなるように正規化された周波数である。図 21 (A) における利得も利得曲線の「位置」はセンサ感度及び他の要因に依存するため同様に正規化されている。利得はデシベル単位で示されている。外側ループはカップマウントにより生成される共振にのみ関係しているため、共振周波数 ω_c から離れるに従って意図的な減衰が行われている。

20

一般的に、補償関数は以下の式で示される。

【0069】

【数 11】

$$C_v(s) = \frac{S(\text{Gain})}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (9.1)$$

通過帯域はカップマウント周波数のほぼ 1 オクターブ上と下に選ばれている。第 1 のポール $1/\tau_1$ は $\omega_c/2$ より低く選ぶことすら可能である。例えば、 ω_c が 20 ヘルツであるときには、 $1/\tau_1$ は 5 ヘルツに選んでも良い。他方のポール $1/\tau_2$ は、この時 40 ヘルツに選ぶことができる。第 1 のポールの前のロールオフは一定の変位に対しては反作用が起こらないようにする DC ブロック機能である。

30

【0070】

図 20 (A)、(B)、図 21 (A) 及び (B) に示されたボード線図が有り、図 19 のブロック図が与えられたとすると、デジタル信号プロセッサ 808 (図 18) を生のセンサ信号の共振を補償するのに必要な適当な伝達関数によりプログラムすることは当業者にとっては可能な範囲内のことである。

図 6 はアクティブ振動絶縁装置の 2 次元表示の単純化した概略的な実体図である。図 1 により分かるように、支持された換価荷重 M は受動アイソレータ (好ましくは弾力性タイプのマウント) 20 上に静止しており、後者は小質量 18 により支持されている。剪断デカップラー 282 が小質量 18 及び垂直の圧電モータスタック 12 の間に挿入されている。図 6 はまた換価荷重により働く力 (典型的には重力) に垂直な方向での能動的な振動の絶縁も示している。この絶縁は半径方向の剛性アクチュエータ (好ましくは圧電モータ) 284 及び半径方向の剪断デカップラー 286 を使用することにより行われる。半径方向のモータ 284 は振動する床もしくはベース F に何等かの方法で固定されている。剪断デカップラー 286 は半径方向のモータ 284 及び小質量 18 のあいだに挿入されている。

40

【0071】

半径方向の剛性アクチュエータモータ 284 が圧電スタックである場合には、半径方向の

50

モータ 284 には実際の動作においてモータエレメント 284 が張力を受けるようにならないように与圧しておくことが必要である。参照番号 288 で概括的に示される圧縮スプリングエレメントが半径方向のモータ 284 を与圧しておくために用いられる。好ましい実施例において、スプリングエレメントはゴムもしくはエラストマー同軸プシュ 292 によって案内された円錐形の鋼スプリング等のスプリング 290 を含む。スプリングエレメント 288 は床もしくは振動するベース F の延長部分及び剪断デカップラーユニット 294 との間に配置されており、後者はスプリングエレメント 288 及び小質量 18 の間に挿入されている。半径方向のモータ 284、デカップラー 286、デカップラー 294 及びスプリングエレメント 288 の直線的な配置は図 6 における紙に垂直な方向についても繰り返されており、これにより 3 次元の全てにおいて振動の絶縁が行われる。

10

【0072】

剛性アクチュエータモータ 284 が圧電型である場合、最大の半径方向の振動の大きさは励振周波数域全体に対してほぼ 2.54×10^{-5} メートル (0.001 インチ) である。圧電モータエレメントの予圧圧縮は例えば 3.81×10^{-5} メートル (0.0015 インチ) 等の 2.54×10^{-5} メートル (0.001 インチ) よりわずかに大な値でなければならない。圧電モータ 284 をこの量だけ圧縮するのに必要な力は約 454 キログラム (1000 ポンド) である。好ましくは圧縮設定ネジもしくは他の手段 (図 6 に図示せず) により円錐形の鋼スプリング 290 が予圧されて半径方向の圧電モータエレメント 284 の圧縮方向において所望の大きさのスラスト力を提供する。

【0073】

同軸スプリングエレメント 288 半径方向のモータ 284 の軸に平行なその軸に沿って低い剛性を有し、それから半径方向には非常に高い剛性を有する。こうして、同軸スプリングエレメント 288 は半径方向のモータエレメント 284 が印加された指令信号に応じて半径方向に収縮もしくは拡張することを許す。同軸スプリングエレメント 288 は軸方向において小さなスプリング剛性値を有しているけれども、その軸に垂直な全ての方向における力学剛性は非常に高い。この構成により半径方向の圧電モータエレメント 284 が半径方向のアイソレータの方向に自由に動き、垂直モータのデカップラーの小さな剛性及び同軸円錐形スプリングエレメントの負荷を受けるのみである。デカップラー 286 が半径方向のモータ 284 及び小質量 18 の間に挿入されていることにより、例えば換価荷重支持圧電モータ 12 の移動により生じる剪断偏移が半径方向のモータ 12 の移動の 0.7% 程度に減少する。

20

30

【0074】

小質量 18 は垂直方向にのみ動き、垂直モータ 12 が拡張もしくは収縮するときに回転しないことが望まれる。従って、デカップラー 286 は小質量 18 の他の面においてデカップラー 294 及び同軸プシュ 292 によってバランスが取られている。

図 7 ~ 10 は本発明の第 1 の実際の実施例の詳細な機械的図面であり、図 7 は等角投影図、図 8 は構成要素のある部分が影像で示された平面図、図 9 は図 8 の線 10 - 9 にほぼ沿った立断面図、図 10 は図 8 の線 10 - 10 にほぼ沿った立断面図である。始めに図 7 を参照して、参照番号 10 で概括的に表されたアクティブ振動絶縁装置は、図示された実施例では長方形の外部筐体もしくはケース 300 内に納められた機械的要素を有する。実施時には、3 つのアクティブ振動絶縁装置 10 が用いられており、単一の換価荷重質量 M (図示せず) を三脚の状態で作持するように構成されていることが注目される。ケース 300 は側壁 308 及び 310 及び更に 2 つの側壁 (図示せず、図 7 ~ 9 参照) を有し、その各々はそれぞれ側壁 308 及び 310 に平行である。ケース 300 の頂部 302 は取付可能な別のユニットである。外部ケース 300 は良好な高周波数の能動的振動絶縁を得るために、高いモード共振周波数を持つように十分に堅固でなければならない。外部筐体 300 の振動の第 1 のモードは 1500 ヘルツ (毎秒 1500 サイクル) より上でなければならない。これを満たすために、外部筐体 300 は例えばアルミニウム等の軽い重量の金属から製造され、比較的厚い壁を有している必要が有る。外部筐体 300 は鋳造または機械仕上げされたプレートをボルトで組み立てることで作成される。好ましくは、外部筐体 3

40

50

00はダイキャスト処理により製造される。

頂部プレート302は外部ケース300にボルト304を用いて取り付けられる。外部筐体300と同様、頂部302例えばアルミニウムもしくは他の軽い金属等の軽い堅固な材料から作られ、実用的な範囲でできるだけ厚い必要がある。図示された実施例において、頂部302及び外部筐体300の壁の厚さはほぼ 3.8×10^{-2} メートル(1.5インチ)である。

【0075】

3つの足306が外部筐体300の底部に、好ましくは自在継手によって取り付けられる。この構成は足が非平坦であり得る床の表面に対応することができるために用いられている。しかしながら足306は高さが調整可能であってはならない。もし底部足306が振動アイソレータ10が取付られ、支持された換価荷重 M_p (図示せず)がカバー板320上に配置された状態でその垂直の高さが変更されたとすると、底部足306のどの一つの高さが変化してもアイソレータ外部ケース300が受動アイソレータ20に大きな剪断負荷を与えるような方法で回転することになる。この剪断負荷は次に大きなトルクを小質量(ここでは図示せず、図8~10参照)に与え、これによって潜在的に大きな剪断負荷が圧電モータエレメント(ここでは図示せず、図8~10参照)に与えられることになる。もしその結果生じる小質量上のねじれがかなり大きければ圧電モータ剪断応力を過度に受け割れてしまい、モータエレメントが動作しなくなる。

【0076】

図示された実施例において、受動振動アイソレータ20はマサチューセッツ州、ブライトンのバリーコントロール社により品番UC-4300として製造されている弾力性のカップマウントである。同様のアイソレータはオハイオ州、デイトンのテックプロダクツ社から入手可能である。受動アイソレータ20は好ましくは図7に示されるX、Y及びZの全ての方向において等しい動的スプリング剛性を有している。受動アイソレータは支持された重い換価荷重質量 M_p (図1参照)を小質量18 (図8~10に示す)から動的に絶縁し、剛性アクチュエータ及び補償回路により良好なアクティブ振動絶縁が提供される周波数より高い周波数において、支持された換価荷重のすべての振動方向における振動絶縁が行われる。

受動振動アイソレータ20の共振周波数の選択は、一方で高周波数での振動絶縁のトレードオフを考慮し、他方では支持された換価荷重自身に作用する力による支持された換価荷重の動的な偏位を考慮して行われる。受動アイソレータ20のために特に選ばれた共振周波数はほぼ20ヘルツである。

【0077】

図示された実施例において、受動アイソレータ20は広いベース312 (図8及び9)を含む。アイソレータもしくはカップマウント20の直径は垂直に上昇するに従って減少し、カップマウント20の半径が最小となる狭搾部314に至る。この点からは、カップマウント20の輪郭がリップ部316まで半径方向外側に所定の距離だけ拡大する。カップマウント20の輪郭は次いで凸形にその頂部318に向けて湾曲している。

【0078】

頂部プレート320が受動アイソレータ20の頂部318に付着している。頂部プレート320により支持された換価荷重質量の重量が確実にカップマウントアイソレータ20の頂部318全体に分配される。頂部プレート320はまたその各々がZ、X及びY方向における換価荷重の移動を個々に検知するために配置された3つの速度制御ループジオホンセンサ26、323及び325 (図8参照)を含むケース322を含む。それらの感度の軸は剛性アクチュエータ12a-c、284及び350の各々の伸長/収縮の軸に一致させられている。

【0079】

外部エンクロージャ300の頂部302はスペーサ板326を受ける大きな中心開口324を有する。

支持された換価荷重センサのエンクロージャ322はプレート320、アイソレータ20

10

20

30

40

50

の頂部及びセンサ 26、323 及び 325 の重量の共振周波数が高いようにカップマウントカバープレート 320 によって支持されねばならない。これらの共振周波数が高くなる程、絶対速度制御ループを良好に機能させることができる。

【0080】

図 7 には X 方向の半径方向圧電モータのための半径方向のデカップラー保持板 332 と、Y 方向の半径方向圧電モータのための円錐形スプリング保持板 334 が示されている。装置 10 の実施例の内部構成は図 8 ~ 10 に最も良く図示されている。図 8 はその内部構成の選ばれたエレメントを点線で示したアクティブ振動絶縁装置 10 の平面図である。図 9 は図 8 の線 9 - 9 にほぼ沿った立断面図である。図 10 は図 8 の線 10 - 10 にほぼ沿った横方向の立断面図である。特に図 10 を参照すると、スペーサ板 326 がボルト 36

10

によって小質量 18 に取り付けられている。小質量 18 は垂直の圧電モータエレメント 12a、12b 及び 12c、及び付随した垂直のデカップラー 282a、282b 及び 282c によって全体的に支持されている。小質量 18 は内部の空洞 338 内に位置し、全ての面が外部ケース 300 から離れており、垂直の圧電モータエレメント 12a - 12c 及び半径方向の圧電モータエレメント 284 及び 350 (後述する) を介した接触点のみが外部ケース 300 との実際の接触点である。

【0081】

図示された実施例において、垂直の圧電モータエレメント 12a - 12c は直径が 2.5×10^{-2} メートル (1.0 インチ) であり、垂直の高さが 3.20×10^{-2} メートル (1.26 インチ) である。これらのモータ 12a - 12c はプラス又はマイナス 2.5

4×10^{-5} メートル (0.001 インチ) の最大動作範囲を有している。3つの垂直モータ 12a - 12c は 3 脚状の支持を形成し、垂直モータ 12a - 12c が支持することが可能な換価荷重を増加させるために使用されている。各垂直の剪断デカップラーアセンブリ 282a - 282c は垂直方向において非常に高いスプリング剛性を有する一方、X 及び Y 方向においては非常に低い力学剛性を有する。好ましくは、軸方向 (垂直) の剛性と半径方向 (X 及び Y) の剪断デカップラーの剛性の比は少なくとも 10 倍好ましくは 100 倍の大きさである。図示された実施例において、剪断デカップラー 282a - 282c の直径は 5.1×10^{-2} メートル (2 インチ) であり、2つのデカップラーディスク 342 及び 344 の各々の間の弾力性円板もしくはウエハ 340 の直径も 5.1×10^{-2} メートル (2 インチ) である。

20

30

【0082】

デカップラー 282a - 282c 及び対応する半径方向のデカップラー (後述) が発明の重要な局面を成している。アクティブ振動絶縁装置 10 内において用いられる圧電モータエレメントは常に圧縮されていることが必要である。全ての引っ張り負荷はそれらのウエハ層に依存し、そうでなければモータを分極させる。引っ張り応力の発生を避けるためには、モータエレメントは軸方向の負荷もしくは曲げ方向の負荷において引っ張り負荷が生じないように構成されていなければならない。圧電モータエレメントの剪断負荷は剪断負荷がモータの部分に引っ張り負荷を発生する曲げモーメントを発生させない限り許容される。圧電モータエレメント 12a - c 内の剪断負荷を制限するために、各剪断デカップラー 282a - c が使用されており、その各々はエラストマーの薄いディスク、ウエハもしくは層 340 がその間に挟まれた硬い非弾性材料例えば金属等から成る 2つのディスク 342 及び 344 から成るものである。

40

【0083】

負荷が作用する面積と負荷が作用しない面積との比が大きくなるときには各剪断デカップラー 282a - c の軸方向の剛性は高く保たれる一方、半径方向の剛性は非常に低く保たれる。装置 10 により担持される換価荷重はエラストマーディスク 340 及び好ましくは鋼ディスク 342 及び 344 の面に垂直であり、他のモータエレメントの動きにより生成される剪断負荷は常にほぼエラストマーディスク 340 の面内にある。剪断デカップラー 282a - c の品質の一つの測定基準は形状係数であり、これは圧縮負荷を受けるゴムもしくは他のエラストマーの領域のディスクの周囲の回りの装荷されない

50

ゴムの領域に対する比に相当する。

【 0 0 8 4 】

これは以下の式で表される。

【 0 0 8 5 】

【 数 1 2 】

$$\frac{0.25\pi D^2}{\pi Dt} = \frac{0.25D}{t} \quad (10)$$

Dはゴムディスクの直径でありtはディスクの厚さである。エラストマーの剪断実効係数が変化しない限り形状係数が増加するとともにエラストマーの圧縮実効係数が増加する。図示された実施例において、剪断デカップラー282a-cの各々は直径が5.1 × 10⁻²メートル(2インチ)であり、エラストマーウエハ340は厚さが約1.52 × 10⁻³メートル(0.06インチ)であり、大きな直径対エラストマーの厚さの比が生じ、形状係数は約8である。

10

【 0 0 8 6 】

図示された圧電モータ12a-cの場合のモータ圧縮係数は2.11 × 10⁹ キログラム/メートル² (3,000,000 psi)であり、モータ剪断係数はほぼ7.03 × 10⁸ キログラム/メートル² (1,000,000 psi)である。圧縮剛性は3.36 × 10⁷ キログラム/メートル (1,880,000ポンド/インチ)であり、剪断に対する垂直モータスプリング剛性は約1.12 × 10⁶ キログラム/メートル (62,830ポンド/インチ)である。

20

【 0 0 8 7 】

垂直モータ12a-cについては、軸方向でのデカップラー剛性とモータ剛性の比は0.7である。半径方向での同一の比は0.07である。同一サイズではないけれども、半径方向のモータ及びそれらの剪断デカップラー(後述)についても同様の数値が得られる。大きな電圧が圧電モータエレメント12a-cに印加されていることを考慮すると、剪断デカップラーエラストマー340はオゾンに対する耐性がなければならない。他のオゾン耐性エラストマーを使用することも可能であるが、かかるエラストマーとしてはクロロプレンゴムがある。エラストマーウエハ340を構成するために用いられるクロロプレンゴムは好ましくは剪断剛性をできるだけ低く維持し、かつ高い機械強度を得るために、例えばカーボンブラック等の強化充填材を使用せずに形成される。図示された如く、各デカップラー282a-cは垂直の圧電モータエレメント12a-cの各々の端部と小質量18の間に間挿され、小質量18にこの目的で形成された受け部346の中に位置する。適当な穴及びチャンネル(明確のために省略した)がケース300及び小質量18に形成され、圧電モータ12a-cに連絡する。

30

【 0 0 8 8 】

圧電モータエレメント12a-cの各々は絶縁ディスクにより互いに分離された複数の圧電ディスクから成る。圧電ディスクは一对の平行バスにより並列に配線され、後者は一对の高電圧リードに接続する。これらの詳細は明確のために省略したが、この技術分野では良く知られた内容である。

40

本発明の図7~10に示された実施例には2つの半径方向の圧電モータエレメントが設けられている。即ち「Y」方向(図10参照)にその軸が向いた圧電モータ350と、その軸が「X」方向(図9参照)に向いた圧電モータエレメント284である。図示された実施例において、半径方向のモータエレメント284及び350は直径が1.6 × 10⁻²メートル(0.63インチ)であり長さが3.2 × 10⁻²メートル(1.26インチ)である。この直径は円錐形スプリングが実用的な大きさだけ突出する(円錐形スプリングについては後述する)為に必要な長さに対してできる限り小さく選ばれている。モータ284及び350は垂直の圧電モータエレメント12a-12cと同一のダイナミック変位特性を有する。

50

【 0 0 8 9 】

半径方向モータエレメント 2 8 4 には参照番号 2 8 6 で概略的に表された半径方向のデカップラーが設けられており、半径方向のモータエレメント 3 5 0 には参照番号 3 5 2 で概略的に表された半径方向のデカップラーが設けられている。各デカップラーアセンブリー 2 8 6、3 5 0 はフロントプレート 3 5 4、弾力性ウエハ 3 5 6 及びリア取付部品もしくは板 3 5 8 を含む。ディスク 3 5 4、フィッティング 3 5 8 及び弾力性ウエハ 3 5 6 は垂直のデカップラーアセンブリー 2 8 2 a - c のそれと同じ直径を有し、ディスク 3 5 4 は金属ディスク 3 4 4 及び 3 4 2 と厚さが同じであり、弾力性ウエハ 3 5 6 はウエハ 3 4 0 と同様の弾力性を有する。各フロントディスク 3 5 4 は半径方向のモータ 3 5 0 又は 2 8 6 の一端を所定位置に保持するために端ぐりされている。モータエレメント 3 5 0 及び 2 8 6 の端部をそれぞれのディスク 3 5 4 に取り付けるためには高係数エポキシ樹脂接着剤を用いる方法が選ばれている。フィッティング 3 5 8 は外部エンクロージャ 3 0 0 の各々の側壁 3 5 9、3 0 8 にネジ込まれたネジ付きシリンダである。

10

【 0 0 9 0 】

図 1 0 を参照すれば、小質量 1 8 の他の面には半径方向のモータ 3 5 0 と正反対の位置に、これに軸方向に位置合わせされた、参照番号 3 6 0 で概括的に表された半径方向のデカップラーが設けられている。半径方向のデカップラー 3 6 0 は、半径方向のデカップラーアセンブリー 3 5 2 と同様に、金属フロントディスク 3 6 2、弾力性ウエハ 3 6 4 及び後部の円筒形成分 3 6 6 を含む。部品 3 6 2、2 6 4 及び 3 6 6 の直径は垂直のデカップラーアセンブリー 2 8 2 a - c の直径と同一である。ディスク 3 6 2 の厚さはディスク 3 4 4 の厚さと同一であり、弾力性層 3 6 4 の厚さは層 3 4 0 の厚さと同様である。図示された実施例における半径方向のデカップラーは半径方向の大きさが垂直のデカップラー 2 8 2 a - c と同一であるが、これはコストの理由からであり他のサイズとしても良い。ディスク 3 6 2 は小質量 1 8 のボア穴 3 6 8 にはめ込まれている。

20

【 0 0 9 1 】

半径方向の同軸ブシュ 3 7 0 がチューブ 3 7 4 及びシリンダ 3 6 6 によって形成される。これらの構成要素好ましくは機械加工可能な金属例えば鋼、真ちゅうもしくはアルミニウムから作られる。シリンダ 3 6 6 は例えば 1.6×10^{-3} メートル (0.063 インチ) の小さな隙間を残してチューブ 3 7 4 の中に差し込まれている。弾力性のガスケット 3 7 8 がシリンダ 3 6 6 及びチューブ 3 7 4 の間の位置にはめ込まれている。

30

【 0 0 9 2 】

同軸ブシュ 3 7 0 はブシュ半径方向の軸の方向において大きな形状係数を有しデカップラー 2 8 2 a - c 及びデカップラー 3 5 2 と同様の作用を成す。これによりブシュがブシュ半径方向において非常に大きな力学剛性をもつ一方、ブシュの軸方向においては非常に低い力学剛性をもつことになる。この様にして、半径方向の圧電モータ 3 5 0 は小質量 1 8 を同軸ブシュのスプリング剛性から殆ど抵抗を受けずに「Y」方向に動かすことが可能である。しかしながらブシュはブシュ軸の方向に対する半径方向において大きな力学剛性を有し、垂直の圧電モータ 1 2 a - 1 2 c が動く結果となるブシュ 3 7 0 の半径方向の移動が防止される。

【 0 0 9 3 】

ジオホン 1 7 が小質量 1 8 に形成された受容キャビティ (空洞) 3 7 9 内に配置されている。ジオホンは装置 1 0 の「Z」軸或いは換言すればモータ 1 2 a - c の軸に軸合わせされており、小質量の 1 8 の垂直の振動を検知する。

40

一時的に図 9 に戻ると、「X」半径方向の圧電モータ 2 8 4 には剪断デカップラー 2 8 6 が設けられており、後者はフロントプレート 3 5 4、弾力性ウエハ 3 5 6 及びリア取付部品 3 5 8 から成り、それらの全ては剪断デカップラー 3 5 2 の構成要素と同一である。質量 1 8 の他の側には半径方向の圧電モータ 2 8 4 の長さ方向の軸に同軸となるように半径方向のスプリングデカップラーアセンブリー 2 9 4 が設けられている。スプリングデカップラーアセンブリー 2 9 4 はフロントディスク 3 6 2、弾力性円板、ウエハもしくは層 3 6 4 及び後部円筒形成分 3 6 6 を含みこれらの全ては半径方向のスプリングデカップラー

50

アセンブリー 360 の同様の番号で示された構成要素と同一であり得る。「X」半径方向の圧電モータ 284 にはまた半径方向の同軸ブシュ 500 が設けられている。図 9 に示された断面においてまた明かなように、「X」小質量ジオホン 502 (部分的に示す) が小質量 18 内のその受容部 504 に納められて示されており、「Y」ジオホン 506 が小質量 18 内のその受容部 508 に納められて示されている。ジオホン 17、502 及び 506 の内部構成要素は示されていないが、これらの部品は販売会社から入手可能である。ジオホン 502 はそのセンサ軸が半径方向の圧電モータ 284 の軸に平行に軸合わせされており、図 3 及び図 4 に示されたものと同様の回路を用いてモータに電子的に接続されている。ジオホン 506 は「Y」軸もしくは半径方向の圧電モータ 350 の軸に軸合わせされており、回路 472 (図 5) を用いて電子的にこのモータに接続されている (図 9)。

10

【0094】

図 7 ~ 10 を同時に参照すると、同軸ブシュ 370 の半径方向の高い力学剛性 (図 10) は小質量 18 の垂直もしくは「Z」軸に沿った力学剛性に釣りあっている。従って、小質量 18 の垂直の動きが小質量 18 の各面上のデカップラー 360、352、294 及び 286 をして同じ量だけ偏位せしめ、小質量がロール、縦揺れもしくは偏揺れ角度の方向に回転することが防止される。半径方向の同軸ブシュ 370 及び 500 の半径方向の剛性は半径方向の圧電モータ 350 及び 284 の半径方向の剛性にほぼ等しい。小質量 18 のすべての側面に作用する垂直剛性は等しく、小質量 18 が垂直の圧電モータ 12a - 12c の頂部の面内で変位することが許される。これにより、垂直モータ 12a - 12c が動作したときに小質量 18 はほぼ純粹に垂直に移動する。

20

【0095】

図 10 に戻って、外側同軸ブッシュチューブの直径 374 はネジ付けされており、ケース 300 内のネジ付穴 380 に受け取られる。これにより同軸ブッシュチューブ 374 がケース 300 の外側の側壁 310 の位置にネジこまれて円錐形スプリング筐体 (後述) を用いることにより所定の軸方向の予圧が半径方向のモータ 350 に与えられる時点まで一時的に半径方向の圧電モータ 350 及び同軸ブシュ 370 を弱い圧縮下で正しい位置に保持する。

【0096】

円錐形スプリング (もしくはワッシャー) 382a 及び 382b は半径方向の圧電モータ 350 に同軸的に、また後者からは小質量 18 の反対側に設けられている。各円錐形スプリングもしくはベルビルワッシャー 382 の形状は明確化の為に大きく誇張されており、実際はもっと平坦である。円錐形スプリング 382a - b は適当な量だけ圧縮されたときに一定の圧縮力を与える。円錐形ワッシャー - 382a - b は寸法が小さく非常にコストが低いことが理由で選ばれているが、例えばゴム、エラストマーもしくは鋼ダイススプリング、あるいは普通の圧縮コイルスプリング等の他の圧縮手段が所定の圧縮力を圧電モータ 350 に加えるために用いることができる。

30

【0097】

図示された実施例において、2つの円錐形ワッシャー 382a 及び 382b は、さらに直線的な特性を得るためにフロント (前部) 対フロントの形で配置されてスプリング内の摩擦を低減させている。この種の円錐形ワッシャーは、例えばニューヨーク、ウッドサイドのシュノーコーポレーションにより製造されている。同軸ブシュ内側シリンダ 366 (剪断デカップラー 360 の部分としても同様に作用する同一構成要素) は内側円錐形ワッシャー 382b を正しい位置に保持するために形成或いは機械加工されている。例えば、カウンタボア穴 384 はシリンダ 366 内へのボア穴及びその中に配置された埋め金 386 である。この中にはセットネジもしくはそれによりワッシャー 382b が正しい位置に保持されるピン 388 が配置される。

40

【0098】

外側の円錐形スプリング保持板 334 は中心ボア穴 390 を有し、その中には円錐形ワッシャー 382a を正しい位置に保持するように動作するネジ 392 がネジ込まれている。円錐形ワッシャー 382a 及び 382b を正しい位置に固定するための他の手段を用いて

50

も良い。円錐形スプリング保持板 334 はソケットヘッドキャップネジ 394 等を用いてブッシュチューブ 374 に（或いは、外部側壁 310 に）固定されている。

【0099】

同軸ブッシュチューブ 374 及びシリンダ 366 の間のオフセットは円錐形スプリング保持板が正しい位置に置かれるときにほぼ 136 キログラム (300 ポンド) の圧縮力が圧電半径方向のモータエレメント 350 に加えられるように予め決められる。保持板 334 は「Y」方向半径方向のすべての部品が接触するまで同軸ブッシュ 370 内にネジ込み、ついで堅く接触するまで 1/4 から 1/2 回回転させることで固定される。この方法で、半径方向の部品及び小質量 18 は円錐形ワッシャー 382 a、382 b が正しく位置し、予圧されるまで同軸ブッシュが軸方向に装荷されることによる小さな力で正しい位置に保持される。予圧圧縮力はアイソレータ 10 が支持された換価荷重の下に設置されるまでそれを一緒に保持する。

10

【0100】

図 9 に戻り、半径方向のスプリングデカップラーアセンブリー 294 及び半径方向の同軸ブッシュ 500 は同様の方法で、デカップラーアセンブリー 360 及び同軸ブッシュ 370（図 10）と同一の部品で構成される。同軸ブッシュ 500 は側壁 514 内の適当なボア穴 512 にネジ込まれたネジ付きチューブ 510 を含み、外部キャップ 516 がキャップネジ 518 によってチューブ 510 に取り付けられている。ベルビルワッシャーが設けられており、それは対向する二つの部分 520 a 及び 520 b を有している。これらの部分はそれぞれのピン 522 及び 524 によって正しい位置に保持されている。ピン 522 は円筒形部品 366 に同軸的な埋め金 526 内に納められている。ピン 524 はエンドキャップ 516 の同軸ボア穴に挿入されている。弾力性の円筒形層 530 がブッシュ円筒 366 及びチューブ 510 の間に形成されている。

20

【0101】

適当な柔軟性導線ジャケット 532 及び付随する部品が換価荷重ジオホンケース 322 及びケース 300 の側壁 514 の穴（図示せず）との間に取り付けられている。導線ジャケット 532 はジオホン 26、323 及び 325（図 8）に接続された電線のための空間を提供する。ジオホン及び種々の圧電モータへの電氣的接続は明確化のために省略されている。図示された実施例において、図 3 及び図 4 及び図 5 の補償回路はユニット 10 から離れて位置し、適当な通信ケーブル（図示せず）を通してユニット 10 に接続されている。

30

【0102】

図 11 (A)、(B)、(C)、12 及び 13 はほぼ円筒形の形状の発明の第 2 の実施例を示している。図 11 (A) は参照番号 600 で概略的に表されたアクティブ振動絶縁装置の分解等角投影図である。図 11 (C) は (A) 及び (B) のための座標装置を図示している。図 11 (B) は装置 600 を組み立てた状態で示す等角投影図である。図 12 は図 11 の線 12 - 12 にほぼ沿った構成断面図である。図 13 はいくつかの内部構成要素を点線で示した装置 600 の平面図である。

【0103】

図 11 (A) ~ 13 を参照すると、装置 600 はキャビティ 604 を確定する円筒形ケース 602 に納められている。ケース 602 はその外部側壁 606 において凹型であり、同時にその内側側壁表面 608 において凸型である。小質量 610 は側壁 608 及びケース 602 の底部 612 から離れるようにキャビティ 604 内に納められている。小質量 610 は 3 つの剛性アクチュエータもしくは圧電モータ 614 ~ 618 により支持されている。垂直の圧電モータ 614 ~ 618 の各々は垂直の剪断デカップラーアセンブリーを有し、その一つは、例えば圧電モータ 616 とともに符号 620 で示されている（図 11 (B)）。垂直のデカップラーアセンブリー 620 は前の実施例における場合と同様に、下部金属板 622、弾力性ウエハもしくはディスク 624 及び上部金属板 626 から構成されている。部品 622 - 626 は図 7 ~ 10 に示された実施例における部品と同様に同じ大きさと特性を有している。

40

【0104】

50

モータエレメント 6 1 6 を一例とすると、その頂部は下部デカップラーアセンブリ板 6 2 2 の凹部 6 2 8 内に受容されている。モータエレメント 6 1 6 の底部は内部ケース 6 0 2 の底部表面 6 1 2 上に静止している。デカップラーアセンブリ 6 2 0 及びモータエレメント 6 1 4 は小質量 6 1 0 内のボア穴 6 3 0 内に受容されている。小質量 6 1 0 はキャビティ 6 0 4 内に納まり、また小質量 6 1 0 の重量を減少させるために曲面の表面 6 3 2 (図 1 1 (A) 参照) をもつように形成されている。

【 0 1 0 5 】

小質量 6 1 0 内のボア穴 6 3 0 はその最も深い部分において、上部デカップラーアセンブリ板 6 2 6 を精密に受容するために比較的小さな半径となっている。ボア穴 6 3 0 の残り全体にわたってやや大きな半径となって、弾力性円板もしくはウエハ 6 2 4、下部板 6 2 2 及び圧電モータ 6 1 4 をより緩く受容し、ディスク 6 2 4 及び板 6 2 2 が小質量 6 1 0 に対して横方向に動くことを許している。

10

【 0 1 0 6 】

前の例と同様に小質量 6 1 0 は「 X 」及び「 Y 」方向において剛性アクチュエータもしくは圧電モータエレメント 6 3 4 及び 6 3 6 によって個々にケース 6 0 2 から絶縁されている。

剪断デカップラーアセンブリ 6 4 0 は図 1 2 に示されており、「 Y 」圧電モータエレメント 6 3 6 と連結している。同様にデカップラーアセンブリ 6 4 2 は「 X 」圧電モータエレメント 6 3 4 (図 1 1 (A)) と連結している。デカップラーアセンブリ 6 4 0 及び 6 4 2 は夫々近接金属板、弾力性円板もしくはウエハ、遠隔金属板を含み、好ましくは製造が容易であるために垂直のデカップラーアセンブリ 2 0 と同一である。

20

【 0 1 0 7 】

圧電モータエレメント 6 3 6 及びデカップラーアセンブリ 6 4 0 は図 1 2 に示された如く「 Y 」軸に同軸的に配置されている。また参照番号 6 4 4 で概略的に表されたブッシュデカップラーアセンブリ及び水平パワーキャップ 6 4 6 が「 Y 」軸に同軸的に設けられている。デカップラーアセンブリ 6 4 4 は、組み立てられたときに小質量の平坦な垂直の側壁 6 1 0 に係合するように成された近接板 6 4 8 を含んでいる。弾力性ウエハもしくはディスク 6 5 0 が金属板 6 4 8 に隣接するように設けられている。円筒形金属デカップラーアセンブリエレメント 6 5 2 が弾力性円板 6 5 0 の近傍に近接板 6 4 8 に位置を合わせて配置されている。

30

【 0 1 0 8 】

筒型スリーブ 6 5 4 がケース 6 0 2 のボア穴 6 5 6 にネジ込まれている。スリーブもしくはチューブ 6 5 4 の内側の半径はそれと円筒形ブッシュ部品 6 5 2 との間に十分な隙間が残るように決められている。

パワーキャップ 6 4 6 には複数のボア穴が設けられ、それらはスリーブ 6 5 4 の対応するボア穴と直線上に位置するように成されている。キャップネジ (図示せず) がネジ付きボア穴 6 5 8 及び 6 6 0 内に受容されてパワーキャップ 6 4 6 がスリーブ 6 5 4 に取り付けられる。

【 0 1 0 9 】

中心ネジ 6 6 2 が水平パワーキャップ 6 4 6 の軸方向のボア穴 6 6 4 内に受容されている。ボア穴 6 6 4 はネジ付きである。ネジ 6 6 2 は長いソケットヘッドネジであり、ネジ無しのクリアランスシリンダ 6 5 2 のボア穴 6 6 6 に受容されるのに十分な長さである。セットネジ 6 6 2 はパワーキャップ 6 4 6 にネジ込まれており 2 つのロックジャムナット 6 6 5 a 及び 6 6 5 b がソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 に取付られている。ロックジャムナット 6 6 5 a 及び 6 6 5 b はソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 上でまず位置決めされ、ついで互いに締め付け固定される。ジャムナット 6 6 5 a 及び 6 6 5 b のロック (固定) 位置は 2 つの円錐形ワッシャー 6 6 7 及び 6 6 8 を位置決めするように設定されている。ロックされたジャムナット 6 6 5 a 及び 6 6 5 b の位置は 2 つの円錐形ワッシャーが予圧された時にソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 がシリンダ 6 5 2 に接触しないように決められている。ボア穴 6 6 6 はその直径がソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 がそれに

40

50

接触しないような大きさである。円錐形ワッシャー 6 6 7 及び 6 6 8 がソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 上の正しい位置に保持され、内側のワッシャーもしくは円錐形スプリング 6 6 7 の直径部分がジャムナット 6 6 8 に接触する。円錐形スプリング 6 6 7 の外側の直径部分が円錐形スプリング 6 6 8 の外側の直径部分に接触する。円錐形スプリング 6 6 8 の内側の直径部分はソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 の外側の直径部分によって円錐形スプリング 6 6 7 に同軸的に保持されている。円錐形スプリング 6 6 8 の内側の直径部分がボア穴 6 6 6 の回りのシリンダ 6 5 2 に接触している。

【 0 1 1 0 】

別な方法としては、ジャムナット 6 6 5 a 及び 6 6 5 b は、ネジ 6 6 2 の半径がそのステップ（段差）部の後に減少するようなネジ 6 6 2 の機械加工されたステップ部（図示せず）に変えてもよい。次ぎに円錐形ワッシャー 6 6 7 及び 6 6 8 はネジ 6 6 2 の細くなったシャフトにステップ部に届くまで滑り込まされ、該ステップ部はワッシャー 6 6 7 の内側直径部分に接触する機械的ストップ部として作用する。

10

【 0 1 1 1 】

圧電モータ 6 3 6 はソケットヘッドキャップネジ 6 6 2 を円錐形ワッシャー 6 6 7 及び 6 6 8 の荷重対変位の特性に依存した所定の変位だけ締め付けることにより予圧され、圧電モータエレメントの 6 3 6 予圧に必要な 1 3 6 キログラム（3 0 0 ポンド） の大きさの軸方向の推力を発生する。

他の別な実施例（図示せず）においては、図示されたワッシャー 6 6 7 及び 6 6 8 は例えば 6 個もしくは 8 個のワッシャーがネジ 6 6 2 上に並び、ジャムナット 6 6 5 及びボア穴 6 6 6 の間に配置されるように複数個用いても良い。次いで、「X」方向についてもこのようにベルビルワッシャーの数を増加させる。

20

【 0 1 1 2 】

この例と第 1 の実施例（図 7 ~ 1 0）の一つの重要な特徴は「Y」軸（及び「X」軸、図 1 3 参照）を垂直のデカップラーアセンブリー 6 2 0（一つが図 1 2 に示されている）に対して位置決めされることである。垂直のデカップラーアセンブリー 6 2 0 はモータ 6 3 6 の「Y」軸が垂直の剪断デカップラーエラストマー 6 2 4 a、b 及び c の水平な面内にほぼ存在するように位置決めされている。この方法により、「Y」軸に沿って伝達された力が垂直モータエレメント 6 1 4 - 6 1 8 上の曲げモーメントもしくは力あるいは小質量 6 1 0 の回転を生じさせることが無いのである。

30

【 0 1 1 3 】

小質量 6 1 0 の他の面上には水平圧電スタック保持板 6 7 0 がケース 6 0 2 の側壁 6 0 6 内の受容部もしくはボア穴 6 7 2 内にはめ込まれている。適当なネジ付きボア穴 6 7 4 及び 6 7 6（図 1 0 及び 1 1）が側壁 6 0 6 及び保持板 6 7 0 内に形成され、保持板 6 7 0 が適当なネジ（図示せず）により側壁 6 0 6 に取り付けられている。ネジ（図示せず）がネジ付きボア穴 6 7 8（図 1 2）内に受容されて、水平剪断デカップラーアセンブリー 6 4 0 の末端の金属板 6 8 0 を保持板 6 7 0 に取り付ける。図 1 2 に図示された「Y」方向の構造は「X」方向についても繰り返される。

【 0 1 1 4 】

特に図 1 1（A）を参照すると、スタック保持板 6 8 2 が側壁 6 0 6 内の対応する受容部 6 8 4 に固定され、「X」デカップラーアセンブリー 6 4 2 を圧電モータ 6 3 4 に対して保持するように成されている。スリーブもしくはチューブ 6 8 6 が「X」軸で小質量 6 1 0 の反対側にあるボア穴 6 8 8 にねじ込まれている。水平パワーキャップ 6 9 0 は中心セットネジ 6 9 2 を有し、後者は中心ボア穴 6 9 0 内にねじ込まれシリンダ 6 8 7 内に軸方向に形成されたネジ無しクリアランスボア穴 6 9 4 内に伸びている。前の例と同様にジャムナット 6 9 6 及び 6 9 8 はセットネジ 6 9 2 にネジ込まれており（或いはまた、これらのネジ 6 9 2 の残りのシャフト部分の半径が小さくなるようなネジ 6 9 2 の機械加工されたステップ部に置き換えても良い）。一對の円錐形スプリングもしくはベルビルワッシャー 7 0 1 及び 7 0 3 はジャムナット 7 0 0 及び [中心ボア穴 6 9 4 のリップ部の間で圧縮され、セットネジ 6 9 2 のシャフトによって正しい位置に保持される。図 1 0 において、

40

50

ジャムナット 665a 及び 665b 及び円錐形スプリング 667 及び 668 は明確化のために省略されている。

【0115】

「X」、「Y」及び「Z」軸の各々に対して各ジオホン 694、695 及び 697 (図 13 に最も良く示されている) が設けられており、小質量 610 内の適当な空洞部分内に配置されている。3つの足 700 の夫々はケース 602 の底部の適当なネジ付きボア穴 704 にねじ込まれたシャフト 702 を含む。

図示された実施例では弾力性カップマウント 706 である受動アイソレータはフランジ部 708 及び適当なボア穴 710 (図 11(A)) にネジ込まれたネジ (図示せず) を介して直接的に小質量 610 の頂部に固定されている。この実施例において、換価荷重質量は 10 中間の構造を介さずに直接的にカップマウント 706 の頂部上に静止している。図示された実施例においてはまた、換価荷重運動センサフィードバック・ループが設けられておらず、図 7 ~ 10 に示された実施例においてはこの目的のために設けられていたセンサ及びケースはここでは用いられていない。勿論、換価荷重質量の速度を測定する速度フィードバック・ループを設けることが望ましい場合には図 11(A) ~ 13 に示された構成に追加することができる。

【0116】

更に能動/受動絶縁装置 721 の実施例が図 14 に示された等角投影図及び図 15 の関連する分解図に図示されている。図 14 及び 15 に示された実施例は図 10 ~ 13 に図示された実施例と大体同様であり、主な相違点についてのみ説明する。外部ケース 720 には 20 図 5 に図示された補償回路を納めた回路ボックス 722 が取付られている。カップマウントもしくは受動アイソレータ 724 は前の例と同様に小質量 726 の頂部に取り付けられている。カップマウント 724 は中心ネジ 730 によってキャップ 728 に取り付けられている。キャップ 728 の下に見えるのは変位センサ 732、734 及び 736 であり、これらは 3つの方向の各々における換価荷重 (図示せず) の動きを検知する為に配置されている。下方くさび 738 (図 15 においてシート金属カバー 740 の頂部上に示されているけれども、実際はカバー 740 の下に配置されている) が中心ネジ 730 (実際にカバー 740 上にある) によって正しい位置に保持されている。下方くさび 744 はシート金属カバー 740 の下に by an L - L 型ブラケット 746 によって保持されている。セットネジ (図示せず) が L 型ブラケット 746 を通して及びネジ付きボア穴 748 にねじ 30 込まれており、下方くさび 744 を内側もしくは外側に付勢しており、これによりカバー 740 を上昇もしくは下降せしめる。図 14 に示された如く、セットネジはカバー 740 の側面内の外部ボア穴 750 から挿入される。弾力性円板 752 がカバー 740 の頂部に取り付けられ、換価荷重を受けるように成されている。

【0117】

図 14 ~ 15 に示された実施例において、下方及び上方くさび 744 及び 738 を適当に調節することにより換価荷重の水準の調整が可能である。

図 16 は 3つの能動/受動絶縁装置 721 がすぐに換価荷重質量 (図示せず) を受けることが可能なように 3角形に配置されている状態を示す等角投影図である。3つの装置 721 は、使用者が装置 721 の適当な電子診断及び組み上げができるように使用者インターフェイス/コントローラ 754 に接続されている。電力ケーブル 756 及び通信ケーブル 758 がこれらのユニット間を接続する。 40

【0118】

図 17 は速度及び相対変位フィードバック・ループの両方を用いた発明の更に他の実施例の等角投影図である。図 15 及び 17の間では同様の文字が同様の部品を表している。上方くさび 738 及び中心ネジ 730 が正しい位置にあることが注目される。図 7 ~ 9 及び 14 ~ 16 の場合の如く、速度もしくは初期変位センサを換価荷重に接続して配置する代わりに発明のこの実施例は小質量 726 の頂部に配置されたマウントブラケット 776 上に配置された X、Y 及び Z 相対移動センサ 770、772 及び 774 を用いている。変位センサ 770、772 及び 774 は渦電流センサ、磁気抵抗素子もしくはホール効果セン 50

サ等を含む種々の種類の非接触センサの何れでも良い。センサ 770 ~ 774 及びマウントブラケット 776 は参照番号 778 で概略的に表された 3 軸ターゲットと共働する。ターゲット 778 は鉄を含む材料から成り、カバー 728 の下面に固定されている。ターゲット 778 の面 780 は Z センサ 774 に沿い、面 782 は Y センサ 772 に沿い、面 784 (隠れ線で示す) は X センサ 770 に沿っている。組み立てた状態において、面 782 及び 784 はブラケット 776 及び Z センサ 784 の直立した壁との間に配置されている。ブラケット 776 は小質量 726 の上面の上に受動アイソレータ 724 からは半径方向に位置をずらして配置されているけれども、小質量 726 の半径方向の余裕部分の中に位置している。センサ 770 ~ 774 が渦電流センサもしくは磁気抵抗素子である場合にはターゲット 778 は強磁性体のものが選ばれる。センサ 770 ~ 774 の各々からのリード線は補償回路に接続され、これらのセンサからの信号は小質量 726 上及び内に配置されたジオホンとともにアクチュエータ 790、792、794、796 及び 798 を制御するために用いられる。

10

【0119】

換価荷重の振動特性が能動/受動振動絶縁装置の制動性能に顕著に影響することが明らかになった。剛性アクチュエータを制御するために速度フィードバックを用いた結果、換価荷重の振動モードと検知された出力との間に強い結合が生じる。ループゲインを高く保つ「進み-遅れ」ネットワーク(例えば図3及び図4参照)を用いたことによりループが閉じるためには、少なくとも有る程度は特定の換価荷重に対して調整することが必要な補償回路が要求される。以上に示した動的装置においてポールの位置は固定されていたが、ゼロの位置及びそれに応じて結合強度は測定されたセンサ出力に依存している。その結果がゼロに現れるセンサ出力をポールの非常に近くに選ぶことによって、フィードバック・ループ対換価荷重の動的特性の感度を低下させることができる。これは、受動マウントの負荷もしくは偏位を測定することによって達成される。

20

【0120】

換価荷重からの速度フィードバックを使用することによって2つ以上のポールが外側もしくは速度ループを構成する補償回路に挿入されることが必要になるが、相対移動センサを使用することで補償回路を比較的単純化されることが明らかになった。

図22は装置の内側及び外側ループの組み合わせを示すブロック図であり、ここでは相対移動センサは外側ループの補償に用いられている。床の動きは \underline{u}_n で表されている。中間質量慣性変位 \underline{u}_i (垂直方向における変位) は圧電モータの頂部において測定されることができ、(図19における場合と同様に、自由度の一つのみが表されており、これらの補償回路は他の自由度についても複製して用いられる。)
「プラント」ブロック 840 は関数 $P(s)$ を含み、これは補償装置の構造に固有の変位から速度への微分である。この関数が中間質量の絶対速度である \underline{v}_i を生成する。ジオホンセンサの動的特性はブロック 842 に $S(s)$ として表されている。小質量絶対速度もまたブロック 844 に入力されている。この固有もしくは「プラント」関数ブロックは入力 \underline{v}_i と、速度を変位に微分するために逆ラプラス変換演算子 $1/S$ が作用する検知された変位 q との間の動的関係を示している。検知された変位 q は 846 で示される外側ループ補償器 $C(s)$ に入力される。 $C_q(s)$ は好ましくは $C(s)$ (式9.1参照) と同一であり、以下の式で表されることが確認されている。

30

40

【0121】

【数13】

$$C_q(s) = \frac{S(\text{Gain})}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (10)$$

この補償関数の通過帯域は $C(s)$ に対するものと同じく選択され、図21(A)及び21(B)に示されたボード線図が $C(s)$ 及び $C_q(s)$ を画定するために使用される。

50

フィルタリングされた信号 S がジオホン速度信号 S_v とノード 848 において加算され、合成信号 S_c が得られる。この信号はステップ 850 において内側ループ補償関数 $C(s)$ により補償される。内側ループ補償関数 $C(s)$ は図 3 及び図 4 に示されたアナログ回路を使用し、あるいはデジタル的に実現される。 $C(s)$ のポード曲線は図 20a 及び 20b に示されている。内側ループ補償関数 $C(s)$ が圧電スタック変位 u_c を生成し、それはノード 852 において環境の変位 u_n と加算される。 $1/\omega_1$ の選択は目的とする換価荷重に依存している。換価荷重はまた少ない程度であるが、 $1/\omega_2$ の選択にも影響する。

【0122】

以上の如く、アクティブ振動絶縁装置について示し説明してきた。本発明による絶縁装置においては共振周波数及び必要な利得を低下させるため小質量が換価荷重質量及びこれを支持する剛性アクチュエータエレメントの間に配置されている。剛性アクチュエータを小質量内のセンサによって生成された変位信号の関数として 3 つの方向の各々で駆動する回路が設けられている。この回路はその中に構造に特有の共振モードをフィルタリングする補償回路を有している。受動的振動絶縁を能動的振動絶縁周波数の範囲外において行うために、受動アイソレータが小質量と換価荷重質量の間に挿入されている。好ましくは、小質量はケースに受容され、「X」、「Y」及び「Z」剛性アクチュエータエレメントによって、ケースの底部及び壁部から支持されている。ケースはまた水平圧電モータに対して圧縮力を印加する方法を提供している。本発明は回路の全体的利得を変更すること無しに「ノッチ」フィルタ特性を提供する新規な信号フィルタ技術を用いている。

【0123】

以上の詳細な説明においては説明的な実施例について記述してきたけれども、本発明はこれに限るものではなく、添付の請求項の範囲及び精神にのみ限定されるのである。

【図面の簡単な説明】

以下の詳細な説明を参照することによって、発明の他の局面及びその利点について理解することができる。図において同様の部分は同じ参照記号で示されている。

【図 1】 単一の軸に沿った振動の絶縁を示す装置モデルの構成図である。

【図 2】 アクティブ振動絶縁装置の異なる区間が数学的に互いにどの様に関係しているかについて示す数学的システムブロック図である。

【図 3】 本発明のセンサを制御される剛性アクチュエータエレメントに連結する補償回路の電子回路詳細図である。

【図 4】 本発明のセンサを制御される剛性アクチュエータエレメントに連結する補償回路の電子回路詳細図である。

【図 5】 3次元の制御におけるセンサ及び剛性アクチュエータエレメント間の電気的相互接続を示す高度に簡略化した電気的構成図である。

【図 6】 2つの軸に沿った絶縁を示すアクティブ振動絶縁装置の実施例の簡略化した実ブロック構成図である。

【図 7】 アクティブ振動絶縁装置の第 1 の実際の実施例の等角投影図である。

【図 8】 図 7 に図示された実施例の、選ばれた部分を点線で示し、頂部プレートを明確化のために除いて示したの平面図である。

【図 9】 図 8 の線 9 - 9 にほぼ沿った断面構成図である。

【図 10】 図 8 の線 10 - 10 にほぼ沿った構成立断面図である。

【図 11】 (A) は本発明の第 2 の実際の実施例の分解等角投影図である。(B) は発明の第 2 の実施例の組み立てた状態での等角投影図である。(C) は図 (A) 及び (B) を描くために用いたデカルト座標系である。

【図 12】 図 11 の線 12 - 12 にほぼ沿った立断面図である。

【図 13】 図 11 に示された実際の実施例を、選ばれた内部要素を点線で示した平面図である。

【図 14】 発明の第 3 の実施例の組み立てた状態での等角投影図である。

【図 15】 図 14 に示された実施例の構成要素の分解図である。

10

20

30

40

50

【図16】 図14及び15に図示された如く配置され、換価荷重を受け入れユーザーインターフェイス/制御装置に接続された3つの能動/受動絶縁装置の等角投影図である。

【図17】 相対移動センサを用いた発明の第4の実施例の等角投影分解図である。

【図18】 ここに記述された補償関数を実行するのに適当なデジタル回路を示す高レベルの電気ブロック構成図である。

【図19】 外部制御ループにおいて絶対速度センサを用いた補償装置の説明ブロック図である。

【図20】 (A)及び(B)は選ばれた内側ループ補償関数のポード曲線である。

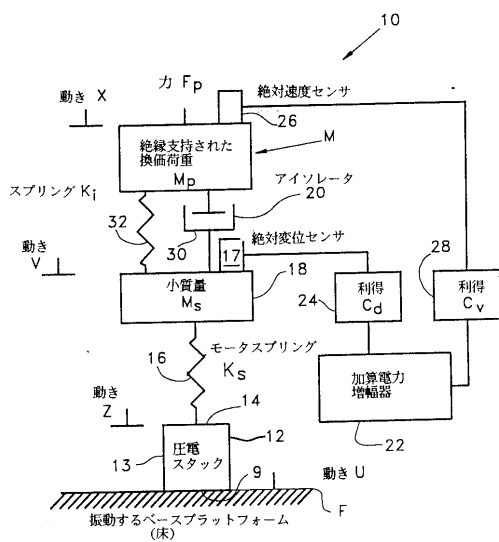
【図21】 (A)及び(B)は選ばれた外側ループ補償関数のポード曲線である。

【図22】 外側制御ループにおいて相対移動センサを用いた装置の説明ブロック図である。 10

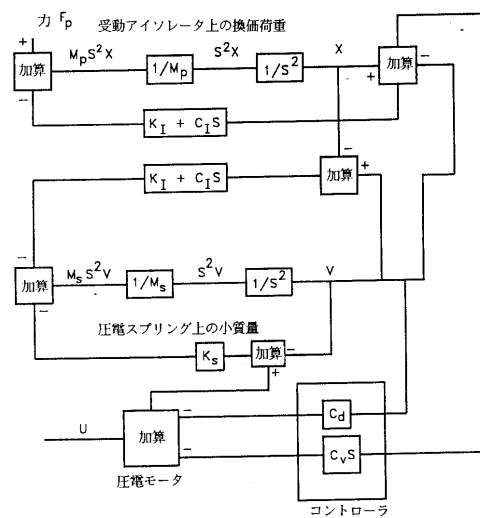
【主要部分の符号の説明】

- 10 能動振動絶縁装置
- 12 剛性アクチュエータ
- 17 ジオホン
- 18 小質量
- 20 受動振動アイソレータ
- 300 外部筐体
- M 換価荷重

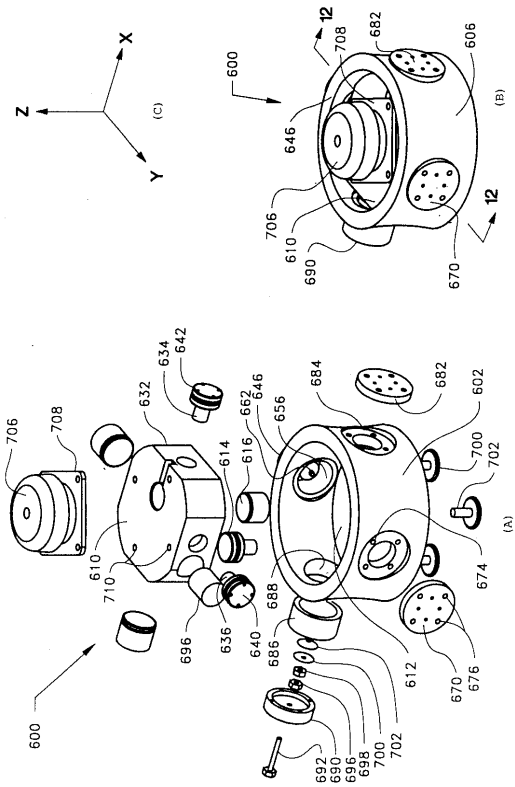
【図1】



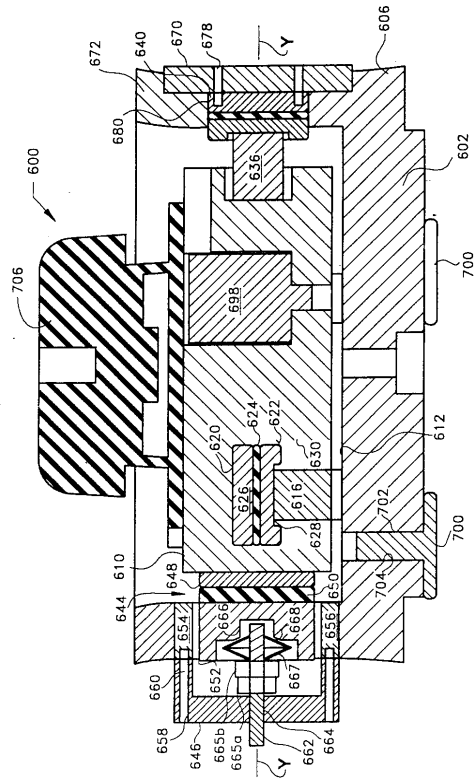
【図2】



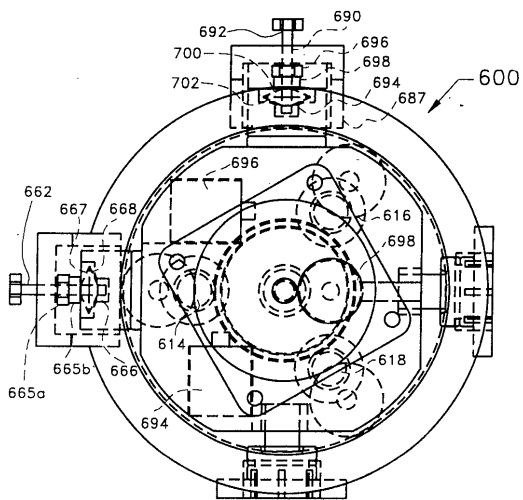
【 図 1 1 】



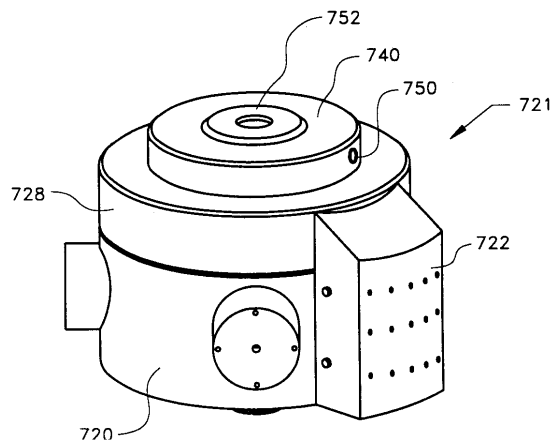
【 図 1 2 】



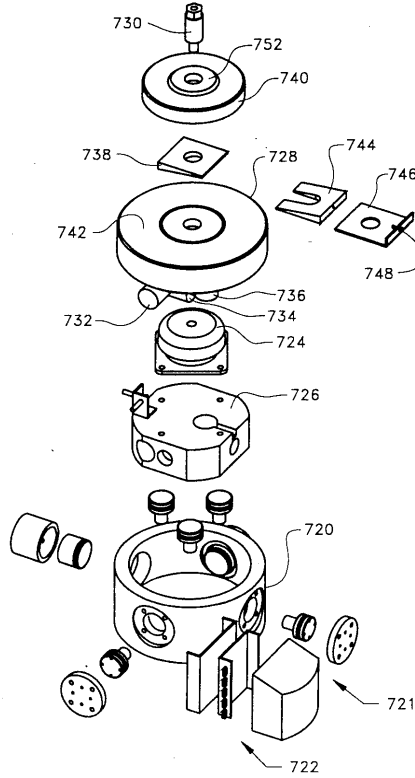
【 図 1 3 】



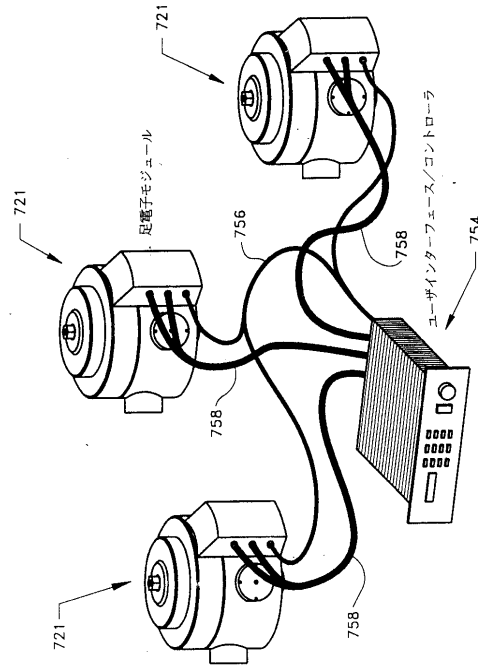
【 図 1 4 】



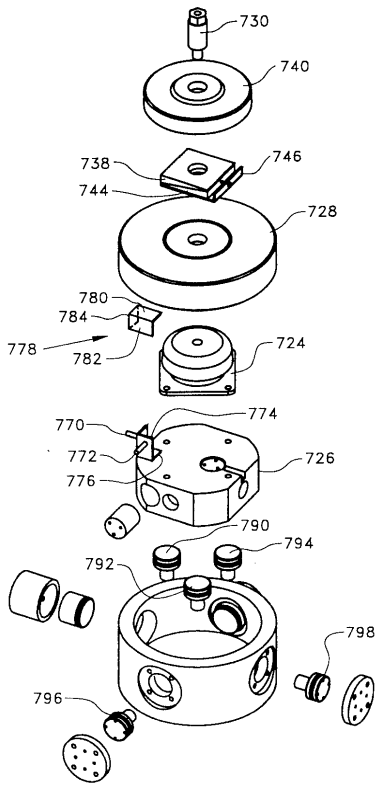
【図15】



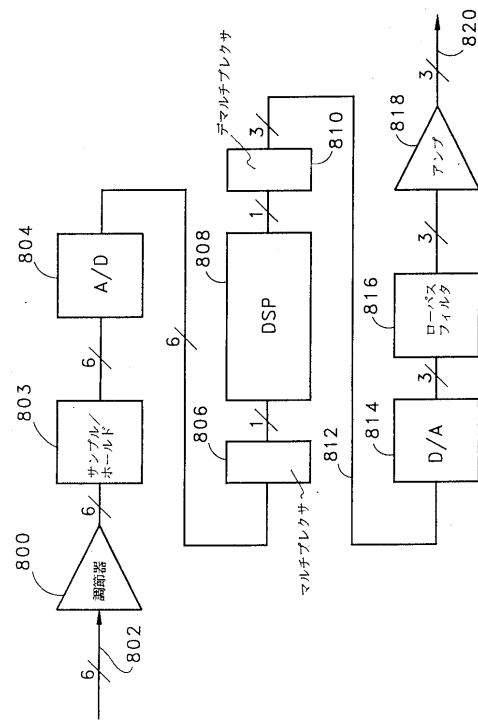
【図16】



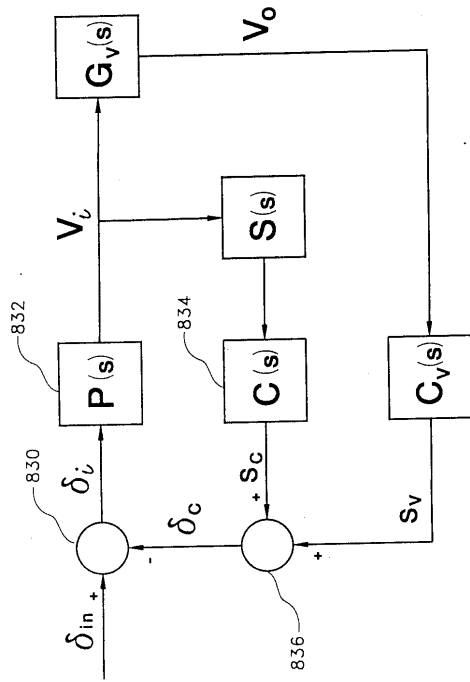
【図17】



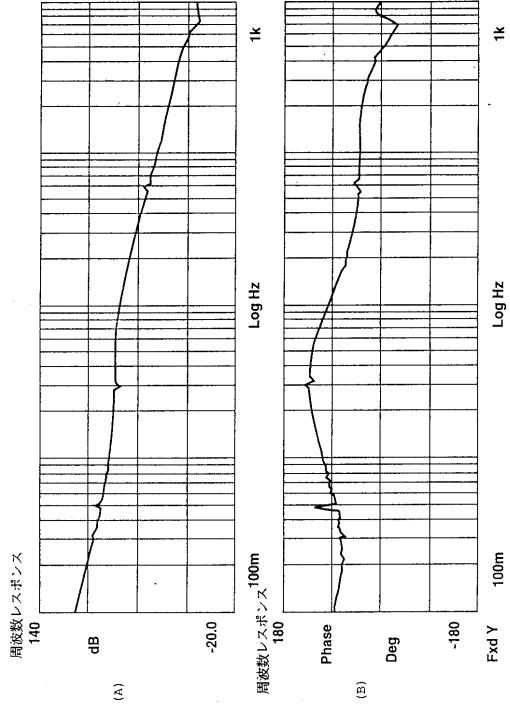
【図18】



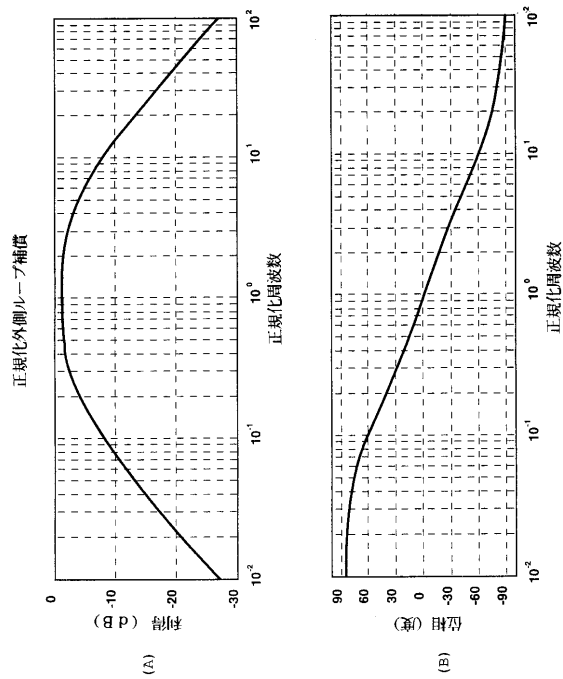
【 図 19 】



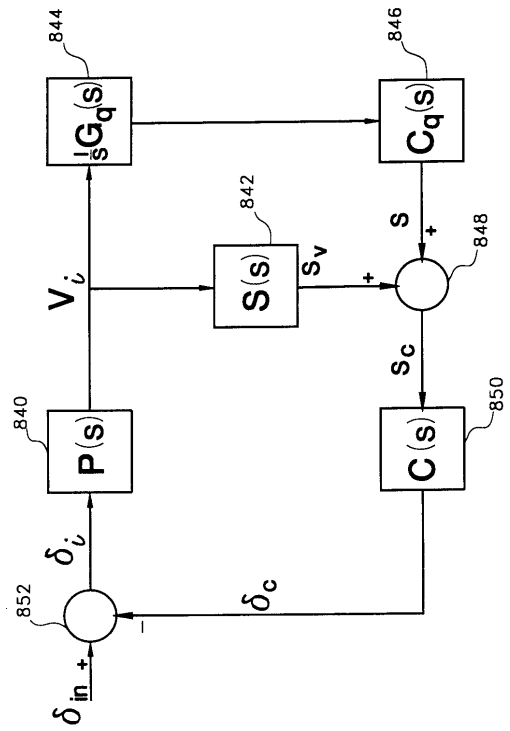
【 図 20 】



【 図 21 】



【 図 22 】



フロントページの続き

- (72)発明者 アンドリュー マイケル ピアード
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01890 ウィンチェスター ハイランドアベニュー 4
28
- (72)発明者 スティーブン フランク シェド
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 02367 プリンプトン ディボラサンプソンウェイ
9
- (72)発明者 マリオン リチャード アールズ ジュニア
アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 01752 マルボロ ウィリアムズロード 540
- (72)発明者 アンドレアス エイチ. ヴァン フロタウ
アメリカ合衆国 オレゴン州 97031 フッドリバー カントリークラブロード 1750

合議体

審判長 村本 佳史

審判官 平田 信勝

審判官 亀丸 広司

- (56)参考文献 特開平2 - 246382 (JP, A)
特開平5 - 346136 (JP, A)
特開平3 - 292433 (JP, A)
実開平4 - 34538 (JP, U)
特開昭64 - 83742 (JP, A)
特開平5 - 149379 (JP, A)
特開平3 - 219141 (JP, A)
計測自動制御学会編「自動制御ハンドブック基礎編」(昭和58年10月30日、オーム社発行、124頁~126頁)
日本機械学会論文集(別刷)59巻559号C編(平成5年3月、社団法人日本機械学会発行)
「ピエゾアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御装置の研究」藤田隆史他著、105頁~111頁

- (58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)

F16F15/02

G05D19/02