

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号
特許第4767954号
(P4767954)

(45) 発行日 平成23年9月7日 (2011.9.7)

(24) 登録日 平成23年6月24日 (2011.6.24)

(51) Int.Cl.
F 1 6 C 32/04 (2006.01)

F 1 6 C 32/04 A

請求項の数 12 (全 35 頁)

(21) 出願番号	特願2007-526156 (P2007-526156)	(73) 特許権者	505187895
(86) (22) 出願日	平成17年5月3日 (2005.5.3)		メコス トラックスラー アクチェンゲゼ
(65) 公表番号	特表2008-501909 (P2008-501909A)		ルシャフト
(43) 公表日	平成20年1月24日 (2008.1.24)		スイス国、8404 ヴィンタートゥール
(86) 国際出願番号	PCT/CH2005/000248		、インドゥストリーシュトラーセ 26
(87) 国際公開番号	W02005/121580	(74) 代理人	100064012
(87) 国際公開日	平成17年12月22日 (2005.12.22)		弁理士 浜田 治雄
審査請求日	平成19年12月14日 (2007.12.14)	(72) 発明者	ビューラー, フィリップ
(31) 優先権主張番号	04405354.4		スイス国、ツェーハー 8005 チュー
(32) 優先日	平成16年6月8日 (2004.6.8)		リッヒ、アルベルトシュトラーセ 2
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (EP)		
		審査官	瀬川 裕

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 簡易配線を有する磁気軸受装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

増幅ユニット（601、701、1001、1201、1601、1701、1801）と、物体（101、1101）の多自由度を制御する電磁アクチュエータから構成される少なくとも1つのアクチュエータグループ（410、810、1110）とからなり、前記アクチュエータグループ（410、810、1110）におけるアクチュエータの数は少なくとも3つであり、前記アクチュエータグループにおける各アクチュエータは電流を前記各アクチュエータに供給するための第1と第2のポートとを有し、前記アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第1のポートは前記増幅ユニットに接続される、物体を磁氣的に支持する磁気軸受装置（100、1100）において、

ー 前記アクチュエータグループは第1の下位アクチュエータグループと第2の下位アクチュエータグループに分けられ、該第1の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第1の共通ノード（608）に接続され、そして該第2の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第2の共通ノード（609）に接続され、

ー 前記第1の共通ノード（608）と前記第2の共通ノード（609）とはノード接続手段により電氣的に接続され、

ー 前記共通ノードのいずれかと前記増幅ユニット間には追加電気接続がないか、または1つ以上の追加電気接続（606）が前記第1および／または前記第2の共通ノードと前記増幅ユニット（601、701、1001、1201、1601、1701）との間

に存在する場合には、前記増幅ユニット（601、701、1001、1201、1601、1701）は、前記追加電気接続（606）を流れる全電流の絶対値の合計が必ず前記アクチュエータグループにおける全アクチュエータを流れる全電流の絶対値の合計より低くなるように前記アクチュエータを流れる前記電流を制御する手段からなることを特徴とする、磁気軸受装置。

【請求項2】

前記第1と第2の共通ノードが互いに直接接続されるか、または前記ノード接続手段がコイルまたはそれ以上の電磁アクチュエータからなることを特徴とする、請求項1に記載の磁気軸受装置。

【請求項3】

前記アクチュエータグループの各アクチュエータは磁気抵抗型アクチュエータ（201、202、203）であることを特徴とする、請求項1または2に記載の磁気軸受装置。

【請求項4】

前記第1の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの前記第1のポートは第1の極性で前記増幅ユニットに接続され、前記第2の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの前記第1のポートは該第1の極性とは反対の第2の極性で前記増幅ユニットに接続されることを特徴とする、請求項1乃至3のいずれか1項に記載の磁気軸受装置。

【請求項5】

前記増幅ユニット（601、701、1001、1201）は、前記第1の下位アクチュエータグループの前記各アクチュエータの各第1のポートを第1の電位レベル（ V_0 ）に選択的に接続し、前記第2の下位アクチュエータグループの前記各アクチュエータの各第1のポートを前記第1の電位レベル（ V_0 ）より低い第2の電位レベル（GND）に選択的に接続するように操作可能な能動スイッチ手段（303）からなることを特徴とする、請求項1乃至4のいずれか1項に記載の磁気軸受装置。

【請求項6】

前記増幅ユニット（601、701、1001、1201）は、一方向電流が前記第2の電位レベル（GND）から前記第1の下位アクチュエータグループにおける前記各アクチュエータの各第1のポートに流れることができるようにする複数の第1のダイオードと、電流が前記第2の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの各第1のポートから前記第1の電位レベル（ V_0 ）に流れることができるようにする複数の第2のダイオードとからなることを特徴とする、請求項5に記載の磁気軸受装置。

【請求項7】

前記アクチュエータグループ（410）は、第1の方向（+x）に力を生成する第1のアクチュエータ（411）と、該第1の方向とは反対の第2の方向（-x）に力を生成する第2のアクチュエータ（412）と、該第1と第2の方向とは異なる第3の方向（+y）に力を生成する第3のアクチュエータ（413）と、該第3の方向とは反対の第4の方向（-y）に力を生成する第4のアクチュエータ（414）とからなり、前記第1の下位アクチュエータグループは、前記第1と前記第2のアクチュエータ（411、412）とからなり、そして前記第2の下位アクチュエータグループは、前記第3と前記第4のアクチュエータ（413、414）とからなることを特徴とする、請求項1乃至6のいずれか1項に記載の磁気軸受装置。

【請求項8】

物体（101、1101）を磁氣的に支持する磁気軸受装置（100、1100）の操作方法において、前記磁気軸受装置は増幅ユニット（601、701、1001、1201、1601、1701）と、該物体（101、1101）の多自由度を制御する電磁アクチュエータから構成される少なくとも1つのアクチュエータグループ（410、810、1110）とからなり、前記アクチュエータグループ（410、810、1110）におけるアクチュエータの数は少なくとも3つであり、前記アクチュエータグループにおける各アクチュエータは電流を前記各アクチュエータに供給するための第1と第2のポート

10

20

30

40

50

とを有し、前記アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第1のポートは前記増幅ユニットに接続され、前記アクチュエータグループは第1の下位アクチュエータグループと第2の下位アクチュエータグループに分けられ、該第1の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第1の共通ノードに接続され、該第2の下位アクチュエータグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第2の共通ノードに接続され、前記第1の共通ノードと前記第2の共通ノードとはノード接続手段により電氣的に接続され、前記共通ノードと前記増幅ユニット間には追加電気接続（606）が設けられておらず、そして各下位アクチュエータグループを流れる電流の合計が必ず同じ方向に流れるように電流が前記アクチュエータに供給される、操作方法。

【請求項9】

前記磁気軸受装置は、 $p \geq 1$ であり、 m 多自由度を制御する合計 n 個のアクチュエータを有する p 個のアクチュエータグループからなり、各アクチュエータグループのアクチュエータは共通ノードに接続される方法において、前記方法は、

- ・ 複数のセンサ信号を供給するステップと、
- ・ 前記センサ信号に基づいて一連の m 制御信号を導出するステップと、
- ・ 前記制御信号から一連の n 一般化力値を導き出して前記アクチュエータを駆動するステップとからなり、

一連の n 一般化力値を導き出す前記ステップは、

- ・ その行列要素がアクチュエータの幾何学的配置および物理的特性を記述する幾何行列

【数1】

$$\underline{\underline{D}}$$

を求めるステップと、

- ・ その行列要素がアクチュエータと前記各共通ノードとの接続を記述するノード行列

【数2】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

を求めるステップと、

- ・ その行列要素が追加境界条件を記述するバイアス行列

【数3】

$$\underline{\underline{D}}_b$$

を求めるステップと、

- ・ 幾何行列

【数4】

$$\underline{\underline{D}}$$

、バイアス行列

【数5】

$$\underline{\underline{D}}_b$$

、およびノード行列

【数6】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

から二次可逆システム行列

【数7】

$$\underline{\underline{D}}_t$$

10

20

30

40

50

を形成するステップと、

- ・ 前記システム行列

【数 8】

$$\underline{\underline{D_t}}$$

を反転させて逆システム行列

【数 9】

$$\underline{\underline{D_t^{-1}}}$$

を求めるステップと、

- ・ 前記逆システム行列

【数 10】

$$\underline{\underline{D_t^{-1}}}$$

に、前記 m 制御信号、前記共通ノードからの電流を記述する p 追加番号、および前記追加境界条件に属する (n-m-p) 多追加番号の値を含む列ベクトルを乗算して、前記一般化力値を含む n 行を有する列ベクトルを求めるステップとからなることを特徴とする、請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

増幅ユニット (1901) とペアの電磁アクチュエータ (1911、1912) とからなり、前記各アクチュエータは電流を前記アクチュエータに供給するための第 1 と第 2 のポートを有する、物体 (101、1101) を支持する磁気軸受装置 (100、1100) において、前記第 1 のアクチュエータの前記第 2 のポートと前記第 2 のアクチュエータの前記第 1 のポートとは共通ノード (1910) に接続され、前記第 1 のアクチュエータ (1911) の前記第 1 のポート、前記第 2 のアクチュエータ (1912) の前記第 2 のポート、および前記共通ノード (1910) のそれぞれは前記増幅ユニット (1901) に接続され、そして前記増幅ユニットは電流を第 1 の方向の前記第 1 のアクチュエータ (1911) の前記第 1 のポート、前記第 1 の方向とは反対の第 2 の方向の前記第 2 のアクチュエータ (1912) の前記第 2 のポート、および前記第 1 の方向または前記第 2 の方向のいずれかの前記共通ノード (1910) に供給するようになっていることを特徴とする、磁気軸受装置。

【請求項 11】

前記増幅ユニットは第 1 と第 2 の電位レベル間に供給される H-ブリッジ回路からなり、前記第 1 のアクチュエータの前記第 1 のポートは前記 H-ブリッジ回路の第 1 の分岐に接続され、前記第 2 のアクチュエータの前記第 2 のポートは前記 H-ブリッジ回路の第 2 の分岐に接続され、そして前記共通ノードは前記共通ノードと前記第 1 または前記第 2 の電位レベルとを交互に接続する働きをするスイッチ手段に接続されることを特徴とする、請求項 10 に記載の磁気軸受装置。

【請求項 12】

・ 前記第 1 のアクチュエータの前記第 1 のポートから流れる所定のバイアス電流を前記第 2 のアクチュエータの前記第 2 のポートに供給するステップと、
 ・ 所望の位置から前記物体の一部の変位を求めるステップと、
 ・ 前記増幅ユニットと前記共通ノード間を流れる電流を変更して、前記所望の位置を復元する働きをする力を生成するステップとからなることを特徴とする、請求項 10 または 11 に記載の磁気軸受装置の操作方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気軸受装置および係る装置の操作方法に関する。特に、本発明は、請求項 1 または請求項 12 のプリアンブルの特徴を有する磁気軸受装置および請求項 9 または請

10

20

30

40

50

求項14のプリアンブルの特徴を有する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

磁気軸受装置において、物体は電磁的、非接触的に支持される。1自由度以上の物体は、位置または変位センサーを供給し、センサ信号をコントローラに送り込み、該センサ信号を基に制御電流または制御電圧を導出し、これらの電流または電圧を電力増幅器の助けを得て電磁アクチュエータに印加することにより、能動制御される。このようにして、支持対象物体の安定浮揚を実現する。

【0003】

重要な例として、回転子は磁気軸受装置内で吊るされ、回転子軸を中心に回転する。シャフトの長軸は z で表され、シャフト軸に垂直に互いに直交する2方向は x および y で表される。通常、5自由度（自由度が3の並進運動および2の回転運動）が制御される。原理上は、この目的には5つのセンサと同じ数のアクチュエータがあれば十分である。しかしながら、数多くのアクチュエータが用いられることが多く、通常は10個のアクチュエータを5つのペアにまとめたものが用いられる。

【0004】

視線運動を制御するには（ x および y 方向に向かう並進運動および傾斜運動）、通常 z 軸沿いに上部および下部位置に2つのラジアル軸受ユニットが設けられる。各ラジアル軸受ユニットには、2つのペアのアクチュエータが存在し、 $\pm x$ 方向および $\pm y$ 方向におけるシャフトセクションの変位をそれぞれ制御する。同様に、1つのペアのアクチュエータを有する片軸受またはスラスト軸受ユニットが通常存在し、 $\pm z$ 方向の変位を制御する。各アクチュエータにバイアス電流を供給して動作基点を設定することができる。

【0005】

通常、各アクチュエータは2本のワイヤーによって個々の電力増幅器に接続される。この電力増幅器は通常、アクチュエータから除去しやすい別個の増幅ユニットに収容される。上記の例の10個のアクチュエータの場合、これによって増幅ユニットからかなりの距離を超えたアクチュエータまで合計20本のワイヤーが必要となる。このように多数のワイヤーを要するため、ケーブルとコネクタに費用がかかり、信頼性にも影響を及ぼしかねない。

【0006】

従来技術では、配線数を減らすためにさまざまな対策が提案されてきた。

【0007】

1つの方法として、バイアス電流を供給するのではなく、永久磁石で磁気抵抗型アクチュエータにバイアスをかけることである。永久磁石により、バイアス磁界が得られる。（Ulbrich, H. ; Wang, Y. -X. ; 機械工学用途向け磁気アクチュエータの設計。第4回磁気軸受国際シンポジウム会報、チューリッヒ 1994、377～382頁。）そうすると、各軸受ユニット内の各ペアのアクチュエータを直列で逆極性で接続することが可能となる。アクチュエータを流れる電流により、該ペアの第1のアクチュエータの磁界が増加し、第2のアクチュエータの磁界が減少する。その結果、アクチュエータと増幅ユニット間の所要のワイヤー数を削減することが可能となる。

【0008】

ワイヤー数を削減する他の方法は、いくつかのアクチュエータ、通常は接地接続に1本の共通帰線を使用することである。10個のアクチュエータを用いるシステムでは、ワイヤー数をこのように12本から11本に削減することができる。しかし、この方法では、共通帰線の負荷要求が他のワイヤーの場合よりずっと高く、従来の配線に比べて配線全体の電力処理能力が高くなることさえある。

【発明の概要】

【0009】

本発明の目的は、簡易な配線を有する磁気軸受装置を提供することである。特に、本発明の目的は、所定の数のアクチュエータに対するアクチュエータと電力増幅器間の配線を

10

20

30

40

50

より安価に行うことができる磁気軸受装置を提供することである。

【0010】

この目的を実現するには、請求項1または請求項12の特徴を有する磁気軸受装置によって行う。

【0011】

本発明の更なる目的は、係る磁気軸受装置の改良された操作方法を提供することである。

【0012】

この目的を実現するには、請求項8または請求項14の特徴を有する磁気軸受装置の操作方法によって行う。

【0013】

本発明の第1の側面によれば、物体を磁氣的に支持する磁気軸受装置を提供する。該装置は増幅ユニットと物体のm多自由度を制御する電磁アクチュエータの少なくとも1つのグループからなる。前記グループにおけるアクチュエータ数は少なくとも3つであり、好ましくは少なくとも4つである。各アクチュエータには電流をアクチュエータに流すための第1と第2のポートがある。各アクチュエータの第1のポートは増幅ユニットに電氣的に接続される。アクチュエータのグループは、アクチュエータの第1のサブグループと第2のサブグループに分けられる。該第1のサブグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第1の共通ノードに接続され、該第2のサブグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第2の共通ノード（共通接合、共通接続）に接続される。各共通ノードは各サブグループ内のすべてのアクチュエータに共通のものである。該第1の共通ノードと該第2の共通ノードとはノード接続手段により電氣的に接続される。これらの共通ノードには増幅ユニットとの追加電気接続はない（すなわち、アクチュエータを除き、共通ノードと増幅ユニット間を電流が流れることができない）。もう1つの方法として、共通ノードと前記増幅ユニット間には1つまたはそれ以上の追加電気接続（共通帰線と呼ばれる）が存在する。さらにまた、増幅ユニットは追加電気接続を流れるすべての電流の絶対値の合計がアクチュエータのグループ内のすべてのアクチュエータを流れる電流の絶対値の合計よりも必ず低くなるように、好ましくは後者の合計の半分よりも低くなるように、より好ましくはアクチュエータのいずれか1つを流れる電流の最大値（時系列）よりも低くなるように、アクチュエータに電流を供給する手段からなる。

【0014】

これにより、すべてのアクチュエータを流れる電流の絶対値の合計より常に低い電流を運ぶために追加電気接続を有利に必要な大きさにすることが可能となる。従来技術の配線方式ではこうした設計や操作モードを行うことはできない。

【0015】

本発明が基盤とすることは、ワイヤーの数を削減し、過度の負荷を運ぶことが可能な帰線を設ける必要のない磁気軸受装置を操作可能とすることを実現することである。係る追加電気接続（共通帰線）が存在する場合は、この接続を好ましくは、アクチュエータのグループ内のアクチュエータのいずれかを流れる最大電流に対応する最大電流を運ぶのに必要な大きさにすることである。このように、共通帰線の仕様は増幅ユニットとアクチュエータ間を結ぶ他のすべてのワイヤーと全く変わらない。その結果、配線がより簡単に、そしてより安価になる。最も好ましくは、共通ノードと増幅ユニット間に追加電気接続がまったく存在しないことである。

【0016】

一般に、増幅ユニットは、第1のサブグループ内のアクチュエータを流れる（符号付き）電流値の合計の符号が必ず、第2のサブグループ内のアクチュエータを流れる（符号付き）電流値の合計の符号と逆になるようにする手段からなる。したがって、共通帰線における合計電流は少なくとも部分的にキャンセルされる。

【0017】

「共通ノード」という用語をサブグループ内のすべてのアクチュエータが接続される物

10

20

30

40

50

理的ポイントとしてではなく、概念として理解することである。アクチュエータのサブグループの第2のポートは、プリント回路基板上の共通ワイヤーや共通導体または何か他の導体のような低オームおよび低インダクタンス接続による接続時には必ず、共通ノードに接続されると理解することである。

【0018】

第1と第2の共通ノードは互いに直接接続される、すなわち、適正な導電体で接続されるのが好ましい。この場合、概念的には第1と第2の共通ノードからなる1つの単一共通ノードがあるのみである。もう1つの方法として、ノード接続手段をバイアス磁界、またはそれ以上の電磁アクチュエータを生成するコイル、特に、バイアスコイルのような追加負荷で構成してもよい。

10

【0019】

増幅ユニットは、ノード接続手段を流れる電流がいずれも所定の方向、すなわち、アクチュエータの各サブグループを流れる電流合計が所定の方向（これらの方向は第1と第2のサブグループとは逆方向である）にのみ流れるように、アクチュエータを流れる電流を制御する手段からなるのが有利である。これにより、例えば、バイアスを効率的にかけることが可能となる。言い換えれば、増幅ユニットは、前記磁気軸受装置の操作中に増幅ユニットからアクチュエータの第1のサブグループを経て第1の共通ノードに流れる電流の合計がその符号を変えないような方法でアクチュエータの前記グループに複数の電流を供給するように操作可能であるのが好ましい。

【0020】

20

有利な実施形態では、アクチュエータの前記グループの各アクチュエータは磁気抵抗型アクチュエータである。これらは磁気軸受装置に最も一般的に用いられる型のアクチュエータである。

【0021】

特定の1実施形態では、前記第1のサブグループにおける各アクチュエータの該第1のポートは第1の極性で増幅ユニットに接続され、該第2のサブグループにおける各アクチュエータの該第1のポートは、該第1の極性とは反対の第2の極性で増幅ユニットに接続される。このような場合、各アクチュエータを流れる電流の方向は固定している。これにより、特に単極性、すなわち、各アクチュエータを流れる電流の方向を変えることができない増幅ユニットを簡単に設計することが可能となる。言い換えれば、増幅ユニットは、増幅ユニットから該第1のサブグループにおける各アクチュエータの該第1のポートまでの各電流が必ず第1の所定方向に流れ、増幅ユニットから該第2のサブグループにおける各アクチュエータの該第1のポートまでの各電流が必ず該第1の所定方向とは反対の第2の所定の方向に、可能であれば小さな残留電流とは別に流れるような方法でアクチュエータの前記グループに複数の電流を供給するように操作可能であるのが好ましい。

30

【0022】

本発明の文脈の中で、極性については次のように定義している。接続によって増幅ユニットとアクチュエータ間の接続を流れる電流が特定の所定の方向にだけ生じた場合には、アクチュエータは特定の極性で増幅ユニットに接続されると解釈する。アクチュエータの第1のポートが増幅ユニットに正の極性で接続されるということは、電流が増幅器からアクチュエータを経て共通ノードにこのように特定した方向に流れるということの意味する。それに対応して、負の極性とは、電流が共通ノードからアクチュエータを経て増幅ユニットにこのように特定した方向に流れるということの意味する。

40

【0023】

アクチュエータと増幅器および共通ノードとの接続についてこのように定義した極性は、アクチュエータによって生成された磁界の極性（すなわち、方向）とは無関係である。磁界方向は第1または第2のポートのどちらを増幅ユニットに接続するかを選択するか、またはアクチュエータのコイルの巻き方向によって決まる。

【0024】

増幅ユニットは、該第1のサブグループの各アクチュエータを第1の電位レベルに選択

50

的に接続し、該第2のサブグループの各アクチュエータを該第1の電位レベルより低い第2の電位レベルに選択的に接続するように操作可能な能動スイッチ手段で有利に構成することができる。他の能動スイッチ手段が不要になる。これは、単極性増幅ユニットの具体的な1実施例である。

【0025】

そうすると、増幅ユニットは、一方向電流が該第2の電位レベルから該第1のサブグループにおける前記各アクチュエータの各第1のポートに流れ、一方向電流が該第2のサブグループにおける各アクチュエータの各第1のポートから該第1の電位レベルに流れることを可能とする複数の第2のダイオードで更に有利に構成される。上記の能動スイッチ手段（例えば、トランジスタ）とは別のスイッチ手段が不要になるが、ダイオードは必要である。

10

【0026】

具体的な例は、2つの異なる正と負の方向に力を生成する2つのペアのアクチュエータを有する軸受ユニットからなる磁気軸受装置である。このようなアクチュエータのグループは、第1の方向に力を生成する第1のアクチュエータ、該第1の方向とは反対の第2の方向に力を生成する第2のアクチュエータ、該第1と該第2の方向とは異なる第3の方向に力を生成する第3のアクチュエータ、そして第3の方向とは反対の第4の方向に力を生成する第4のアクチュエータで構成される。さらにまた、該第1のサブグループが該第1と該第2のアクチュエータで有利に構成され、該第2のサブグループが該第3と該第4のアクチュエータで有利に構成される。特に、この接続方式により両方のサブグループに対して簡単にバイアスをかけることが可能となる。

20

【0027】

他の有利な配置は、3つのアクチュエータの第1のサブグループと3つのアクチュエータの第2のサブグループ、6つのアクチュエータからなる完全なアクチュエータのグループで構成されるものである。更なる有利な配置は、4つのアクチュエータの第1のサブグループ、4つのアクチュエータの第2のサブグループ、8つのアクチュエータからなる完全なアクチュエータのグループで構成されるものである。

【0028】

アクチュエータのグループに、反対方向に力を生成するように操作可能な少なくとも1つのペアのアクチュエータが含まれている場合に、このようなペアのそれぞれが同じサブグループに属しているのなら有利である。該ペアを所定のバイアス電流で操作すると、各ペアを流れる電流の合計をもっと簡単に所定の値に保つことができる。

30

【0029】

本発明の磁気軸受装置は、更にコントローラと物体の変位を検出する複数のセンサで構成されることが多い。センサはセンサ信号を供給するコントローラに操作可能に接続され、コントローラはセンサ信号に基づいて生成された力信号を増幅ユニットに供給する増幅ユニットに操作可能に接続される。

【0030】

発明の方法は、物体を磁氣的に支持する磁気軸受装置の操作方法である。磁気軸受装置は増幅ユニットと、物体の多自由度を制御する電磁アクチュエータの少なくとも1つのグループとからなり、前記グループにおけるアクチュエータの数は少なくとも3つ、好ましくは少なくとも4つであり、アクチュエータの前記グループにおける各アクチュエータは前記アクチュエータに電流を供給する第1と第2のポートを有し、アクチュエータの前記グループにおける各アクチュエータの該第1のポートは前記増幅ユニットに接続され、アクチュエータの前記グループはアクチュエータの第1のサブグループと第2のサブグループに分けられ、該第1のサブグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第1の共通ノードに接続され、該第2のサブグループにおける各アクチュエータの該第2のポートは第2の共通ノードに接続され、前記第1の共通ノードと前記第2の共通ノードとはノード接続手段により電氣的に接続される。この方法では、前記共通ノードと前記増幅ユニット間の追加電気接続を流れる全電流の絶対値の合計がゼロになるように、またはアク

40

50

チュエータのグループ内の全アクチュエータを流れる全電流の絶対値の合計より必ず低くなるように、電流がアクチュエータに供給される。

【0031】

アクチュエータへの電流は、ノード接続手段を流れる電流がいずれも所定の方角にのみ流れるように供給されるのが有利である。言い換えれば、増幅ユニットからアクチュエータの該第1のサブグループを経て第1の共通ノードに流れる電流の合計はその符号を変えないのが好ましい。

【0032】

有利な1実施形態では、該第1のサブグループにおける全アクチュエータを流れる全電流の絶対値の合計は、所定のバイアス値に等しい。このバイアス値は時間固定することも時間変動することもできるが、個々のアクチュエータの電流よりゆっくりと変動するのが有利である。

【0033】

本発明の文脈の中で、磁気軸受装置は全体としてm多自由度を制御する合計n多アクチュエータを有するアクチュエータのp多グループからなる。アクチュエータの1グループにおける各サブグループのアクチュエータは共通ノードに接続される。こうしたことから、本発明の方法は以下のようにすっきりしたやり方で実現することができる。

該方法は、

- ・ 複数のセンサ信号を供給するステップと、
- ・ 前記センサ信号に基づいて一連のm制御信号を導出するステップと、
- ・ 前記制御信号から、一連のn一般化力値を導出してアクチュエータを駆動するステップと、からなる。

最も簡単な場合は、一般化力値をアクチュエータに供給する電流値としてもよい。一連のn一般化力値を導き出すステップは多数の数学ステップからなり、

- ・ その行列要素がアクチュエータの幾何学配置および物理的特性を記述する幾何行列

【数1】

D

を求めるステップと、

- ・ その行列要素がアクチュエータと前記共通ノードとの接続を記述するノード行列

【数2】

D_N

を求めるステップと、

- ・ その行列要素が追加境界条件を記述するバイアス行列

【数3】

D_b

を求めるステップと、

- ・ 幾何行列

【数4】

D

、バイアス行列

【数5】

D_b

、およびノード行列

10

20

30

40

【数 6】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

から、二次可逆システム行列

【数 7】

$$\underline{\underline{D}}_t$$

を形成するステップと、

- ・ 前記システム行列

【数 8】

$$\underline{\underline{D}}_t$$

を反転させて逆システム行列

【数 9】

$$\underline{\underline{D}}_t^{-1}$$

を求めるステップと、そして

- ・ 前記逆システム行列

【数 10】

$$\underline{\underline{D}}_t^{-1}$$

に、前記m制御信号、共通ノードからの電流を記述するp多追加番号、および前記追加境界条件に属する(n-m-p)多追加番号の値を含む列ベクトルを乗算して、前記一般化力値を含むn行を有する列ベクトルを求めるステップとからなるものである。

【0034】

本発明の第2の側面によれば、物体を磁氣的に支持する磁気軸受装置において、増幅ユニットと第1と第2のアクチュエータとからなり、各アクチュエータは第1と第2のポートを有する磁気軸受装置を提供する。該第1のアクチュエータの該第2のポートは該第2のアクチュエータの該第1のポートに接続される。このように、これらのアクチュエータは直列で接続され、共通ノードを共有している。該第1のアクチュエータの該第1のポートと該第2のアクチュエータの該第2のポートと該共通ノードとは増幅ユニットに接続される。該増幅ユニットは電流を第1の所定方向の該第1のアクチュエータの該第1のポートと、該第1の所定方向とは反対の第2の所定方向の該第2のアクチュエータの該第2のポートに供給するようになっている。該共通ノードには双方向電流を供給することができる。つまるところ、これはアクチュエータの各サブグループが1つのアクチュエータのみからなるシステムに相当するものである。

【0035】

好適な実施形態では、アクチュエータはHブリッジ回路の2つの出力間を直列構成で接続され、次には、第1と第2の電位レベル(電圧)間を接続され、そして共通ノードは共通ノードを二者択一的に第1の電位レベルまたは第2の電位レベルに接続する働きをするスイッチ手段に接続される。言い換えれば、磁気軸受装置は該第1のアクチュエータの該第1のポートを第1の電位レベルに選択的に接続する第1のスイッチ手段と、該第2のアクチュエータの該第2のポートを該第1の電位レベルより低い第2の電位レベルに選択的に接続する第2のスイッチ手段と、該第1のアクチュエータの該第1のポートを該第2の電位レベルに選択的に接続する第3のスイッチ手段と、該第2のアクチュエータの該第2のポートを該第1の電位レベルに選択的に接続する第4のスイッチ手段と、該共通ノードを該第1の電位レベルに選択的に接続する第5のスイッチ手段と、そして該共通ノードを該第2の電位レベルに選択的に接続する第6のスイッチ手段とからなるということである。

【0036】

10

20

30

40

50

該第1と第2と第5と第6のスイッチ手段は有利には能動電流スイッチからなり、好ましくはトランジスタからなる。

【0037】

該第3と第4のスイッチ手段は有利には電流を所定の方向にのみ、好ましくはダイオードにのみ電流を流す受動電流スイッチからなる。ダイオードは陽極と陰極間の電圧が負の場合には、非伝導状態を切り換える働きをし、この電圧が正であり、装置依存閾値を超える場合には伝導状態を切り換える働きをする。したがって、該第3のスイッチ手段は好ましくはその陽極が該第2の電位レベルに接続され、その陰極が該第1のアクチュエータの該第1のポートに接続されるダイオードからなる。同様に、該第4のスイッチ手段は好ましくはその陽極が該第2のアクチュエータの該第2のポートに接続され、その陰極が該第1の電位レベルに接続されるダイオードからなる。この構成により、電流は必ず所望の方向にのみ自動的に流れることが可能となる。

10

【0038】

もう1つの方法として、該第1と該第2のスイッチ手段のそれぞれをトランジスタで構成してもよい。トランジスタのスイッチ状態は制御電圧（例えば、MOSFETの場合は、ゲート電圧）または制御電流（例えば、バイポーラトランジスタの場合は、バイアス電流）に依存するので、増幅ユニットは、電流が必ず所望の方向に流れるようにスイッチ手段を能動的に制御する手段で構成される。

【0039】

係る磁気軸受装置の方法は、

20

- ー 該第1のアクチュエータの該第1のポートから流れる所定のバイアス電流を該第2のアクチュエータの該第2のポートに供給するステップと、
- ー 所望の位置から前記物体の一部の変位を求めるステップと、
- ー 該増幅ユニットと該共通ノード間に制御電流を供給して該物体の一部の所望の位置を復元する働きをする力を生成するステップとからなる。

【0040】

該第1のアクチュエータの該第1のポートと該第2のアクチュエータの該第1のポート間に所定のバイアス電流を供給するステップは、好ましくは、

- ー 所定のバイアス電流に達するまで、該第1のアクチュエータの該第1のポートを第1の電位レベルに、該第2のアクチュエータの該第2のポートを該第1の電位レベルより低い第2の電位レベルに選択的に接続するステップと、
- ー 該第1と該第2のアクチュエータを流れる電流を閉電流路を設けて再循環させるステップとからなる。

30

【0041】

該増幅ユニットと該共通ノード間に制御電流を供給するステップは、好ましくは交番順序による以下のステップからなり、

- ー 該共通ノードを第1の電位レベルに選択的に接続するステップと、
- ー 該共通ノードを該第1の電位レベルより低い第2の電位レベルに選択的に接続するステップとからなるものである。

【0042】

40

本発明は磁気軸受装置のどのような応用にも適用可能である。特に、ターボ分子ポンプに本発明に係る磁気軸受装置を備えることが得策である。

【0043】

以下に、図面に示す実施例に関連して本発明について詳細に説明する。

【発明の詳細な説明】

【0044】

図1に、z方向を中心に回転する磁気軸受装置100に吊るされ回転子シャフト101を非常に模式化した形で示す。該軸受装置は、シャフト101に取り付けられたディスク102と協働する第1（上部）のラジアル軸受ユニット110と第2（下部）のラジアル軸受ユニット120と片（スラスト）軸受ユニット130とからなる。該上部ラジアル軸

50

受ユニット 110 は、シャフト 101 の上部領域に対して +x、+y、-x、および -y の各方向に力を出す 4 つのアクチュエータ 111 と 112 と 113 と 114 とからなり、x と y 方向は互いに直交し、z 方向に垂直である。同様に、該下部ラジアル軸受ユニット 120 は、シャフト 101 の下部領域に対して +x、+y、-x、および -y の各方向に力を出す 4 つのアクチュエータ 121 と 122 と 123 と 124 とからなる。ラジアル軸受ユニットの各アクチュエータは磁極片または磁極ヨーク上の巻線からなる電磁石で構成される。また、該片軸受ユニットは、図 1 の巻線により簡素化した形で表した 2 つの電磁アクチュエータ 131 と 132 とからなる。

【0045】

磁気軸受装置 100 に吊るされたシャフト 101 の付いた回転子は、第 1 の近似値に対して 6 自由度 (DOF) の頑丈な回転子として扱われる。1 DOF は z 軸を中心に回転するものである。一般に、この DOF は簡単にするために図 1 に示していない電気モーターで動く。他の 5 DOF は x、y、および z 方向には並進運動として、そして x と y 方向には傾斜運動として分類することができる (x-z および y-z 平面)。これらは以下のように制御される。センサ 131、132 はそれぞれ、±x と ±y 方向におけるシャフト 101 の上部領域の変位を測定する。同様に、センサ 141、142 はそれぞれ、±x と ±y 方向におけるシャフト 101 の下部領域の変位を測定する。センサ 151 は、±z 方向における変位を測定する。これらセンサからの信号はコントローラに送られ、このコントローラが周知の手段によりこのセンサ信号からアクチュエータの駆動信号を導出する。センサが 5 つを超える場合の状況にこれと同じ方式を当て嵌めることができる。このような制御方式は従来技術においては周知のものである。各駆動信号は電力増幅器に送られ、ここで一般化力値に対応する特定の分力を起こすのに必要な電流を供給して個々のアクチュエータを動かすのである。

【0046】

磁気軸受装置では、磁気抵抗型電磁アクチュエータを用いることが多い。このようなアクチュエータの原理を図 2 に示す。コイル 202 には電流 j が供給される。この電流により、ヨーク 201 と強磁性体装置 203、例えば、ヨークと装置の間に幅 d の空隙がある回転子シャフトまたはこのシャフト上のパッドを介して磁束が発生する。この磁束により装置 203 に磁化が誘導される。その結果、ヨークと装置の間に、第 1 の近似およびヒステリシスの無視に対して電流 j の 2 乗に比例し、空隙の幅 d の 2 乗に反比例する力 F が生じる：

【数 11】

$$F \propto j^2 / d^2$$

このギャップは空気に限定されるものではなく、ウォーターギャップ、真空ギャップ、 CO_2 ギャップ、または他の元素で充填されたギャップもまた使用可能である。この力は常に引力であるが故に、磁気抵抗型軸受では斥力を生成することができない。

【0047】

そのため、通常、所定の方向 (x、y、または z) に磁気抵抗型アクチュエータを使用する場合、正と負の両方向における変位を完全制御するのに 2 つ以上のアクチュエータが必要になる。更に磁気抵抗型アクチュエータの特徴は、これらのアクチュエータにより生成された力のほぼ二次電流依存であることである。この性質は好ましくないことがある。バイアス電流がない場合に所定の力を変更するには、大電流の変更を必要とするからである。このため、磁気抵抗型アクチュエータにはバイアス電流を印加することが多い。電流への力の二次依存に関する更なる結果として、この力は、アクチュエータを流れる電流の方向とは無関係であり、一般に単極電流源しか必要としない。

【0048】

バイアス電流を使用する代わりとなるのは、バイアスをかける分離手段を使用することである。このようなバイアス磁場は永久磁石または超コイルを用いて生成することができる。

【数 1 2】

$$F \propto B^2$$

上式では：

【数 1 3】

$$B = B_{bias} + B_j \quad \text{と} \quad B_j \propto j / d$$

である。

その場合、すべての力は依然として引力である。しかし、ゼロ力に達するためには、電流を負に設定しなければならないが、このためには二極電流源が必要となる。

10

【0049】

磁気抵抗型アクチュエータの駆動方法に関する例として、図3に再び非常に模式化した形で軸受ユニット310内の磁気抵抗型アクチュエータ311に接続された電力増幅器301を示す。該電力増幅器はいわゆるHブリッジ設計である。第1の電流スイッチ303と第1のダイオード304は（正）電圧 V_0 と接地との間に直列で接続されている。該ダイオードはその伝導方向とは逆に挿入されている。第2の分岐では、第2のダイオード304'と第2の電流スイッチ303が同じように、しかし逆の順序で直列に接続されている。アクチュエータ310は、各ダイオードと各電流間の接続ポイントにつながる2本のワイヤーでHブリッジ増幅器に接続されている。電気用語では、アクチュエータを実質的な意味で大インダクタンスとして表すことがある。操作時に、初めに両方のスイッチを閉じると、アクチュエータ310のインダクタンスに電流 j が蓄積する。所要の電流に達するとすぐに、これらのスイッチの1つが開く。次に、閉じたままのスイッチと1つのダイオードを介して閉ループ内に電流が流れる。電流は、両方のスイッチを再度閉じるか（増やす場合）、または両方のスイッチを開いて（減らす場合）変更すると、電流センサ305により検出することができる。切り替え動作および／または伝導ロス最適化するためには、各ダイオードを能動電流スイッチに置き換えるとよい。通常、各能動電流スイッチ303は、各スイッチを通じて時間平均電流を制御するために、パルス幅変調方式（PWM）のような変調技術によって駆動されるMOSFET（金属酸化膜／半導体電界効果形トランジスタ）、IGBT（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）、サイリスタなどの半導体材料から製造された固体スイッチング素子からなる。

20

30

【0050】

当然、他のタイプの増幅器設計を行うことも可能であるから、本発明は上記のHブリッジ型増幅器設計に限定されない。本発明に対して適用可能な他の設計については、例えば、（Wassermann, J. ; Springer, H: 磁気軸受用電流注入付線形電力増幅器（A Linear Power Amplifier with Current Injection for Magnetic Bearings）第4回磁気軸受国際シンポジウム会報、チューリッヒ 1994、371～376頁）（Schroder, U: 磁気軸受用電力増幅器、'96MAG会報、磁気軸受、磁気駆動および乾性ガスシール、バージニア 1995、285～301頁）、または（Zhang, J. ; Schulze, J. O. ; Barletta, N: アクティブ磁気軸受用三準位PWM電力増幅器、第5回磁気軸受国際シンポジウム会報、金沢 1996、277～282頁）に記載されている。

40

【0051】

従来技術では、他にも数多くの誘導負荷を駆動するパワーエレクトロニクスの設計が知られている。これらには、電流型変換器、マトリックスコンバータ、C-ダンブコンバータ、共振コンバータ、または線形増幅器などが挙げられる。これらは通常、ステッピングモーター、誘導電動機、反作用電動機、変圧器またはソレノイドを駆動するときに用いられる。

【0052】

50

図3の配線計画では、各アクチュエータをその電力増幅器のそれぞれに接続するには2本のワイヤーが必要である。これについては図4に図示するが、非常に模式化した形で4つのアクチュエータ411、412、413および414からなるラジアル軸受ユニット410の配線を示している。該アクチュエータは、図3と同じ型の4つの個別増幅器からなる増幅ユニット401に接続されている。簡単にするため、アクチュエータ411はシャフト部に対して+x方向に、アクチュエータ412は-x方向に、アクチュエータ413は+y方向に、そしてアクチュエータ414は-y方向に力を生成するものとする。4つのアクチュエータを駆動するには8本のワイヤーが必要である。比較するためには、増幅ユニット401と軸受ユニット410間のワイヤー毎および増幅ユニットの電源スイッチ毎に所要の電圧と定格電流を計算することが有用である。アクチュエータはそれぞれ、電流 j_1 、 j_2 、 j_3 および j_4 をそれぞれ最大 j_{max} で運ぶ。電圧 V_0 の場合、各ワイヤー並びに各スイッチの定格電圧は V_0 および j_{max} である。示した構成では、ワイヤーの合計電力処理能力は $8V_0j_{max}$ である。4つのアクチュエータのそれぞれの最大出力電力は V_0j_{max} であるため、ケーブルの電力処理要求と合計出力電力との比率は2.0である。

【0053】

増幅ユニット401と軸受ユニット410間の距離がかなりあり、しかも各ワイヤー端部では一般にコネクタを必要とするので、配線には比較的費用がかかることから少ないワイヤーで配線を安くする方法が望ましい。

【0054】

したがって、従来技術ではすべてのアクチュエータに1本の単一共通帰線を設けることが示唆された。図5に、各種配線の個別ニーズに適合する各種増幅ユニット501に接続されたラジアル軸受ユニット410の配線を非常に模式化した形で示す。アクチュエータはすべて単一共通帰線506によりスイッチ503とダイオード504を有する増幅分岐に接続されるようになる。一見すると、軸受ユニット410を増幅ユニット501に接続するには5本のワイヤーしか必要としないので、この設計は図4の設計よりも著しく簡単のように思われる。しかしながら、この設計はワイヤーとスイッチの合計電力処理能力が図4の設計と比較して、むしろ向上していることが分かる。これは以下のように理論的に説明することが可能である。4つのすべてのアクチュエータを単独操作できるようにするには、ポイント507（ワイヤー506と増幅ユニットとの接続ポイント）における電位レベルを平均で最大電圧 V_0 の50%に保持するように増幅器を駆動する必要がある。このため、各アクチュエータの両端の最大平均電位差異（電圧）は、図4の最大電圧の50%に過ぎない。個々のアクチュエータを流れる個々の電流 j_1 、 j_2 、 j_3 および j_4 と同じ最大電圧 j_{max} について、各アクチュエータの平均出力電力は図4と比較して半分であり、 $1/2V_0j_{max}$ となるにすぎない。しかしながら、個々のアクチュエータに導く各ワイヤーの定格は依然として最大（ピーク）電圧 V_0 と電流 j_{max} であるのに対して、共通帰線は V_0 の最大（ピーク）電圧が最大 $4j_{max}$ のときに合計反流 $j_N = j_1 + j_2 + j_3 + j_4$ を運ぶ。同じことがスイッチにも当てはまる。また、ケーブルとスイッチの電力処理能力と出力電力との比率は4.0となる。この数は、各時点においてアクチュエータを流れる電流の瞬間合計を制限するのに好適な制御方式を実装することで減らすことができる。しかしながら、いずれの場合も、共通帰線を必要な大きさにして他の接続よりも強くする必要があるが、これは配線と増幅器の双方の設計を複雑にする。

【0055】

要約すれば、例え費用のかかるワイヤーのコストであっても、図5の設計は概念的な配線の簡素化を示すものである。

【0056】

対照的に、本発明ではワイヤーの電力処理能力の向上を必要とせずに、簡素な配線が可能である。図6に、適合増幅ユニット601に接続された本発明の第1の実施形態によるラジアル軸受ユニット410の配線を非常に模式化した形で示す。2つのアクチュエータ411および412は第1のサブグループを形成しており、ここでは各アクチュエータは

第1の共通ノード608への1つのポートと接続されている。同様に他の2つのアクチュエータが第2のサブグループを形成し、ここでは各アクチュエータは第2の共通ノード609への1つのポートと接続されている。共通ノード608と609の双方は直接接続されており、すなわち、概念的にはこれら2つの共通ノードが1つの単一共通ノード610を形成しているとみなすこともできる。このノード610は単一共通帰線606により増幅ユニット601に接続されているが、図5とは異なり、該第2のサブグループを形成する2つのアクチュエータ413と414は、該第1のサブグループを形成する他のアクチュエータ411と412とは反対の極性で増幅器に接続されている。これがアクチュエータの機能性に影響を及ぼさないのは、各アクチュエータに増幅ユニットに接続されているポートと共通ノードに接続されているポートを自由に選択して、アクチュエータコイルを通る電流方向が図5と同一のものとなるようにすることができるからである。この配線により、共通帰線606を通る電流 j_N を最小化する形でアクチュエータを駆動することができるようになる。いずれの場合にも、電流 j_N はユニット410の全アクチュエータを流れる電流の絶対値の合計よりも必ず低くなる。したがって、共通帰線606の負荷要求が図5の共通帰線506に比べ削減される。実際に、反流 j_N が必ず、アクチュエータのグループ内のいずれかを流れる最大電流よりも高くないようにすることは可能なので、それに応じて帰線をアクチュエータと増幅ユニット401間を結ぶ他のワイヤーと同じ要求を満たす大きさにすることも可能である。反流 j_N を永久にゼロにしておくことも可能である。図6の構成ではこれを以下のように合理化することができる。制御電流がない場合、バイアス電流 j_B が各アクチュエータを流れる。制御を得るためには、(異なる) 20
制御電流 Δj_i を各アクチュエータ i のバイアス電流に加える。よって： $j_i = j_B + \Delta j_i$ ($i = 1, \dots, 4$)となる。 x -軸沿いの変位を制御するためには、アクチュエータ411の電流 j_1 をアクチュエータ412の電流 j_2 を減らしたのと同じ量だけ増やすか、その逆を行えばよい： $\Delta j_2 = -\Delta j_1$ 。よって、電流 j_1 と j_2 の合計を各アクチュエータのバイアス電流 j_B の2倍である所定の値に保持することが可能となる： $j_1 + j_2 = (j_B + \Delta j_1) + (j_B + \Delta j_2) = 2j_B$ 。アクチュエータ413および414を流れる電流 j_3 および j_4 についても同じことが言える： $j_3 + j_4 = (j_B + \Delta j_3) + (j_B + \Delta j_4) = 2j_B$ 。第2のサブグループにおけるこれら2つのアクチュエータの極性は、第1のサブグループにおけるアクチュエータ411と412の極性とは正反対なので、ノード608に流入する電流の絶対値の合計はノード609から流出する電流の絶対値の合計と等しく、またバイアス電流の2倍に等しい： $j_1 + j_2 = j_3 + j_4 = 2j_B$ 。 30

【0057】

制御の質または自由を何ら損失することなく、この結果を得ることができる。この理由は4つの電流が2自由度を制御するために供給されることである。したがって、制御を得るには電流の値に関する2つの条件しか必要としないが、更に2つの条件を自由に選択することができる。第1の条件は、バイアス電流を供給することである。このバイアス電流は一定でなくてもよく、実際のシステム状況に動的に適合可能である。一例として、バイアス電流は、最小電流が常にゼロ（もしくは他のいくつかの固定値）となるように選択することができる。別の例としては、バイアス電流は、電力損失が最小限となるように動的に適合可能である。 40

【0058】

第2の条件は、ノード608に流入する電流の合計をノード609から流出する電流と同一にすることである、すなわち、電流が共通帰線を流れないということである ($j_N = 0$)。この例では、2つのアクチュエータの極性が他のアクチュエータの極性とは正反対であり、また極性を上記のように定義しているため、第2の条件を満足させることができる。すべてのアクチュエータが同じ極性を有し、すべての電流が同じようにゼロの場合、共通ノードポイントにおける合計電流はゼロしかあり得ない。これは全く図5の状況と同様であり、ワイヤー506を通る電流をゼロに保持すると、操作ができなくなる。

【0059】

10

20

30

40

50

図6において、軸受ユニット410は、電流が共通帰線606を流れないように駆動可能なので、このワイヤーを完全に除外しても差し支えない。これについては図7に図示する。図7では図6と同じ軸受ユニットを示しているが、共通ノード610と増幅ユニット601との間に追加接続を必要としない、すなわち、共通帰線を必要としない。共通ノード610の共通電位を設定するための制御回路が不要となるため、増幅ユニット701を簡素化することが可能となる。更に、発明の設計には電流センサ305は3つしか必要としない。3つの電流について知識があれば、4つ目についてもすぐに計算できるからである。

【0060】

再び、図7の配置におけるワイヤーの所要の電力処理能力を計算することは有益である。ノード608と609の電位は平均 $V_0/2$ であることが分かる。電流 $j_1 \sim j_4$ のいずれかが最大 j_{max} であろう。各アクチュエータの最大電力は $1/2 V_0 j_{max}$ であるのに対し、各ワイヤーとスイッチの定格は V_0 と j_{max} である。したがって、ワイヤーとスイッチの合計電力処理能力とアクチュエータの出力電力との比率は2.0となり、図4の従来技術における配線方式と同じである。

【0061】

このように、本発明に係る磁気軸受装置は数多くの有用な特性を有するが、これらの特性は図7の特定の実施形態とは無関係である。すなわち、

- ・ 従来技術に比べ、増幅ユニットと軸受ユニット間のワイヤー数が少なく、簡素な配線を可能としている。
- ・ 従来技術に比べ、所定の数のアクチュエータを駆動するためのスイッチ数が少なく、簡素な増幅器の設計を可能としている。
- ・ 従来技術に比べ、ワイヤーとスイッチの電流と電圧の合計要求が増加していない。

総合すれば、高価なワイヤーおよび／または駆動回路のコストを必要とせずに、簡素な配線および簡素な増幅器設計を実現することができるのである。

【0062】

本発明は、所定の数のアクチュエータに必要なワイヤーや増幅器スイッチの数を削減するのではなく、所定の数のワイヤーや増幅器スイッチに必要なアクチュエータの数を増やすのに使用することも当然可能である。このように、例えば、アクチュエータまたは増幅器コンポーネントの誤作動や誤較正を修正するための制御の冗長性を達成することができる。

【0063】

本発明は、上記に述べたものとは別のアクチュエータの配置にも適用可能である。別の例として、図8に6つのアクチュエータ811、812、813、814、815および816を有するラジアル軸受ユニット810を非常に模式化した形で示す。従来技術による配線方式では、これらのアクチュエータは、例えば、図9に示すように、共通帰線を介して増幅ユニット901に接続される。また、この方式では帰線は他のワイヤーと比べ、定格電流が多量に増加する。対照的に、図10は本発明に係る増幅ユニット1001に接続された軸受ユニット810の概略配線図を示している。第1のサブグループを形成する3つのアクチュエータ811、813、815が第1の極性で第1の共通ノードに接続されているのに対し、第2のサブグループを形成するアクチュエータ812、814、816は第1の極性とは反対の第2の極性で第2の共通ノードに接続されている。再び、これらのノードは直接接続されているので、単一の共通ノードとしてみなすことができる。アクチュエータを流れる電流はノード条件 $J_1 + J_3 + j_5 = J_2 + J_4 + j_6$ を満足させる。アクチュエータまたは電流の数が制御する自由度数を超えるため、この条件を満足させることは容易である。

【0064】

アクチュエータ811、813、および815の第1のサブグループが3つのアクチュエータを有する第1（例えば、上部）のラジアル軸受ユニットを形成し、アクチュエータ812、814、および816の第2のサブグループが3つのアクチュエータを有する第

2（例えば、下部）のラジアル軸受ユニットを形成する場合には、図10と同じ制御方式を適用することもできる。それでも尚、4自由度（2の並進運動、2の回転／傾斜運動）のラジアル完全制御を達成することが可能である。すなわち、6つの制御変数（電流）、4自由度、そして所定のバイアス電流（言い換えると、各グループにおける所定の3つの電流の合計）およびノード条件 $j_1 + j_2 + j_3 = j_4 + j_5 + j_6$ という2つの境界条件がある。これらの条件は同時に満足させることができる。

【0065】

更なる例として、図11に線形軸受装置1100を非常に模式化した形で示す。物体1101は、矢印1102が示すz方向沿いに線形移動するように、上部軸受ユニット1110および下部軸受ユニット1120に支持される。上部軸受ユニット1110は4つのアクチュエータ1111、1112、1113および1114からなり、下部軸受ユニット1120は他の4つのアクチュエータ1121、1122、1123および1124からなる。簡単にするため、図11には電磁アクチュエータの巻線は描かれていない。5自由度は制御可能なものである。すなわち、z方向とは垂直方向に並進運動（xとy）および3つの方向に回転運動（傾斜運動）するように制御する。図12、13および14に、このような線形軸受装置について本発明による3種類の配線方式を示す。図12では、4つのアクチュエータの2つのグループがそれぞれ形成されている。第1のグループは2つのサブグループからなる。すなわち、正の極性で増幅ユニット1201に接続された第1の軸受ユニットの±x方向における変位を制御するためのアクチュエータ1111と1113の第1のサブグループと、負の極性で増幅ユニット1201に接続された第2の軸受ユニットの±x方向における変位を制御するためのアクチュエータ1121と1123の第2のサブグループとからなる。この2つのサブグループは共通ノードで接続されている。サブグループ内の電流は、共通ノードが存在するため $j_1 + j_3 = j_5 + j_7$ の関係を満足させる。同様に、第2のグループは、第1のグループと同じやり方で共通ノードを介して接続されたアクチュエータ1112と1114の第1のサブグループと、アクチュエータ1122と1124の第2のサブグループからなる。これにより、電流に2つの制約条件（境界条件）が置かれるようになる。制御すべき5自由度および8つのアクチュエータが存在するので、例えば、（一定または動的に適合可能な）バイアス電流の設定に追加境界条件を1つ適宜選択することができる。

【0066】

図13では、両方の軸受ユニットにおけるすべてのアクチュエータで1つのグループを形成している。上部軸受ユニットのアクチュエータ1111、1112、1113および1114が正の極性で増幅ユニット1201に接続された第1のサブグループを形成し、下部軸受ユニットのアクチュエータ1121、1122、1123および1124が負の極性で増幅ユニット1201に接続された第2のサブグループを形成している。この2つのサブグループは共通ノードで接続され、その結果、 $j_1 + j_2 + j_3 + j_4 = j_5 + j_6 + j_7 + j_8$ という条件になる。（一定または動的に適合可能な）バイアス電流の設定に更に2つの制約条件を適宜選択することができる。

【0067】

また、図14では、すべてのアクチュエータが1つのグループを形成している。アクチュエータ1111、1113、1122および1124が第1のサブグループ（正の極性）を形成し、アクチュエータ1112、1114、1121および1123が第2のサブグループ（負の極性）を形成している。サブグループ間に共通ノードが存在することから、 $j_1 + j_3 + j_6 + j_8 = j_2 + j_4 + j_5 + j_7$ となる。また、更に2つの制約条件を自由に選択することができる。

【0068】

図15は、第1と第2の共通ノードは直接接続する必要がないことを図示している。言い換えれば、これらのノードは1つの共通ノードを形成する必要がないということである。この例では、図7と同じ配置が選択されている。しかしながら、図7とは対照的に、追加アクチュエータ1501が第1と第2の共通ノード間に接続されている。この追加アク

10

20

30

40

50

チュエータを流れる電流はアクチュエータ 4 1 1 と 4 1 2 のペアを流れる電流の合計である。言い換えると、アクチュエータ 4 1 3 と 4 1 4 のペアを流れる電流でもある。したがって、アクチュエータ 1 5 0 1 はこの合計を変えることで、すなわち、バイアス電流 j_B を変えることで制御可能となる。

【0069】

上記の例では、各アクチュエータは固定極性で増幅ユニットに接続されている、すなわち、特定の方向に向かう電流のみが各アクチュエータを流れることができるとされている。これは、適切な増幅ユニットの設計により、すなわち、ダイオード 3 0 4 により確実なものとなった。しかしながら、個々のアクチュエータの電流が、少なくともある時点でアクチュエータの各サブグループ内において異なる方向に流れることが可能なことは本発明の範囲内である。これについては、図 1 6 に示す。ここで、抵抗器 1 6 0 1 が各ダイオード 3 0 4 に並列で設けられている。各抵抗器により、小さな電流が各ダイオードの阻止方向に流れることが可能となる。

10

【0070】

図 1 7 に示すように、ダイオードを設ける代わりに、追加の能動スイッチを設けてもよい。これらのスイッチを適切に制御すれば、ノード条件を自動的に満たしつつ、各アクチュエータにおける所望の方向で所望の電流を得ることが可能となる。適切にプログラムされたコントローラにより制御が可能となる。

【0071】

図 1 6 と図 1 7 の実施形態では共に、特定の追加境界条件を満たすような方法で、例えば、2つの共通ノード 6 0 8 と 6 0 9 間の電流は必ず所定の方向に流れるように増幅ユニットを駆動することができる。

20

【0072】

ノード 6 0 8 または 6 0 9 のどちらかと増幅ユニット間に共通帰線が存在する場合（この帰線を流れる電流を制御する適切な増幅器コンポーネントと共に）、適切な制御プログラムを用いたコントローラにより、共通帰線を流れる電流は所定の最大値を超えなくなる。また、制御プログラムにより、他の境界条件を満足させることも可能となる。

【0073】

図 1 9 に本発明の第 2 の側面による配線方式を示す。2つのアクチュエータ 1 9 1 1、1 9 1 2 および増幅ユニット 1 2 0 1 が設けられている。通常、該アクチュエータは磁気軸受装置に吊るされる物体の反対側に配置された磁気軸受装置内においてペアとなるアクチュエータである。一例として、該アクチュエータは、図 1 における装置のユニット 1 3 0 内にあるアクチュエータ 1 3 1、1 3 2 のような片軸受ユニットのペアのアクチュエータの場合もあれば、ラジアル軸受ユニット内の対向するペアのアクチュエータの場合もある。これら 2つのアクチュエータは単極性 H-ブリッジ型の 2つの増幅回路の間を直列構成で接続されている。これら 2つのアクチュエータ間の接続ポイント（共通ノード 1 9 1 0）は共通ノードと電源電圧 V_0 または接地 GND とを交互に接続する働きをする増幅ユニット内の回路に接続されている。

30

【0074】

該 H-ブリッジ回路は 2つの分岐からなる。第 1 の分岐は第 1 の電流スイッチ 1 9 0 3 と第 1 のダイオード 1 9 0 4 とからなり、電圧 V_0 と接地 GND 間を直列で接続されている。ダイオードはその導通方向に逆挿入されている。第 2 の分岐においては、第 2 のダイオード 1 9 0 4' と第 2 の電流スイッチ 1 9 0 3' が同じように、但し逆の順序で直列に接続されている。ダイオードと電流スイッチ間の各接続ポイントはアクチュエータ 1 9 1 1 または 1 9 1 2 のポートにそれぞれ接続されている。

40

【0075】

アクチュエータ 1 9 1 1 と 1 9 1 2 の双方を流れる所定のバイアス電流 j_B を確立するには、スイッチ 1 9 0 3 と 1 9 0 3' の双方を閉じる。これらのアクチュエータは大きなインダクタンスとなる。すなわち、アクチュエータ内に電流が次第に蓄積される。所望のバイアス電流 $j_1 = j_2 = j_B$ に達すると、スイッチ 1 9 0 3 または 1 9 0 3' のうちの

50

1つが開く。すると、アクチュエータ、1つの分岐内の閉スイッチ、そしてその他の分岐ダイオードを介して電流が閉ループ内を再循環する。回避不能な損失（例えば、アクチュエータの抵抗損）およびダイオードの順電圧により、アクチュエータを流れる電流がゆっくりと減少していく。このため、バイアス電流を保持するには、時々、開スイッチを閉じる必要がある。バイアス電流が減少すると、スイッチが両方とも開き、電流がアクチュエータと、アクチュエータ内の電流を減少させる働きをする電圧 V_0 の動作に逆らうダイオードを循環するようになる。しかし、図19において矢印で示すように、電流は必ず同じ方向に流れるので、回路設計の故にその方向を逆にするとは絶対でない（小さな漏れ電流は別として）。

【0076】

10

スイッチの開閉順序を制御するための周知の方式はいずれも適用可能であり、記載された方式の一般的な精神から離脱するものではないことは当然である。特に、バイアス電流の制御には標準のPWM方式を用いるのがよい（Zhang, J.; Schulze, J. O.; Barletta, N: アクティブ磁気軸受用同期3レベルPWM電力増幅器。第5回磁気軸受国際シンポジウム会報、金沢1996、277～282頁）。

【0077】

他の実施例では、ダイオードを能動スイッチに置き換えることもできる。電圧 V_0 とGND間の望ましくない短絡を回避するため、また上述と同じ精神でバイアス電流を制御するためには、すべてのスイッチを能動制御する必要がある。この能動制御を行うために制御ユニットが設けられている。制御はハードウェア、ソフトウェアのいずれでも実現する

20

【0078】

磁気軸受装置により磁氣的に吊るされている物体の位置を制御するには、アクチュエータ1911を流れる電流 j_1 をアクチュエータ1912を流れる電流 j_2 とは別のものにすることができる。このため、制御電流（ノード電流） j_N が接続1906を介して共通ノード1910に設けられている。制御電流を増やすには、スイッチ1923を閉じるのに対し、制御電流を減らすには、スイッチ1924を閉じる。電源電圧 V_0 と接地との短絡を回避するためには、両方のスイッチが同時に閉じることは当然ない。もう一度繰り返すが、これを確実にを行うために好適な制御ユニットが設けられる。また、制御はハードウェア、ソフトウェアのいずれでも実現可能である。当然、制御電流を変えながら、バイアス電流を変えることもできる。

30

【0079】

このような磁気軸受装置の顕著な利点は、高速制御能力である。バイアス電流の変化は比較的緩慢ではあるが、バイアス電流を変えると、最大電圧 V_0 がアクチュエータ双方の合計インダクタンスにかかるので、制御電流をもっと高速に変えるとよい。これは、制御電流を変えると、最大電圧 V_0 が1つのインダクタンスのみにかかるからである。

【0080】

各アクチュエータを単極性Hブリッジ独立回路に接続する従来の配線方式に関するその他の利点として、以下のものが挙げられる。

- ・ 完全回路にはダイオードは4つではなく、2つ必要とするだけである。
- ・ アクチュエータと増幅ユニット間の接続は、4つではなく3つ必要とするだけである。
- ・ 各アクチュエータは負電圧 $-V_0$ ～正電圧 V_0 の全帯域において駆動可能である。
- ・ 所要能動スイッチの最大出力電力と数と電力定格との比率が好ましい。
- ・ 接続ケーブルの最大出力電力と定格電流との比率が好ましい。

40

【0081】

この配線方式は共通ノードとの接続を必要とするが、いくつかの用途では最も有利な構成とすることができる。

【0082】

図3の回路について述べたように、いろいろ異なる能動電流スイッチ手段、例えば、ト

50

ランジスタ（例えば、MOSFET、IGBTなど）やサイリスタその他を使用することができる。

【0083】

上述した回路は所望のペアのアクチュエータに用いると、磁気軸受装置に吊るされている1自由度の物体を制御することができる。特に、回転子を吊るす磁気軸受装置では、こうした回路は片軸受（+z、-zアクチュエータ）にも、どのようなラジアル軸受（例えば、上部もしくは下部+x、-xアクチュエータまたは上部もしくは下部+y、-yアクチュエータのそれぞれ）にも使用可能である。このような装置のすべての軸受に回路を使用する場合、増幅ユニットと軸受間において5自由度を完全能動制御するには5つの回路が必要になり、合計で20個の能動スイッチと10個のダイオードと15本の接続線が必要となる。これにより、従来の配線方式より大幅に節約することが可能となる。

10

【0084】

前述の例から、本発明に係るアクチュエータのグループを配線する可能性が複数存在することは明らかである。以下では、配線方式を一般的な数学的枠組みで説明するものとする。この枠組みは、アクチュエータを固定極性で増幅ユニットに接続するすべての場合に適用可能である。

【0085】

nアクチュエータのグループはm自由度の制御に用いるものとする。並進運動の自由度は、アクチュエータで生成されたトルクによる力、回転自由度で制御され、 $n > m$ とする。更に、電流とアクチュエータにより生成された力および／またはトルクとの間には、一般性を失うことなく線形関係があるものとする。

20

【数14】

$$\vec{F} = \underline{D} \cdot \vec{J},$$

上式では、

【数15】

$$\vec{F} = (f_1, \dots, f_m)^T$$

は、m力および／またはトルク値のm-コンポーネント列ベクトルであり、各力および／またはトルクは所定の1自由度を制御するように働き、

30

【数16】

$$\vec{J} = (j_1, \dots, j_n)^T$$

は、n個のアクチュエータに対し、n電流値のn-コンポーネント列ベクトルであり、

【数17】

$$\underline{D}$$

はm行とn列を有する($m \times n$)行列であり、そのコンポーネントはアクチュエータの幾何学的配置および物理的特性に依存する。この行列は「幾何行列」と呼ばれる。シンボルTは行列転置を示す。前提としているように、線形関係が存在しない場合には、例えば、テイラー展開により、所定の動作基点付近で真（非線形）の関係を必ず線形近似させることができる。したがって、電流値は、（小さな）電流変化の値として理解すべきである。

40

【0086】

すべての力および／またはトルクを別々に制御可能とするためには、ランク

【数18】

$$(\underline{D})$$

とmを等価にする必要がある（すなわち、

【数 1 9】

 D

のすべての m 行を線形独立にする必要がある)。

【0 0 8 7】

該動作基点は通常、バイアス電流とされる。バイアス電流は、アクチュエータを流れる電流から誘導され、定義値に保持されるある種の電流値とされる。さまざまな一連のアクチュエータに応じてさまざまなバイアス電流を持つことが望ましく、またバイアス電流は時間変動することができる。各バイアス電流要求には一連の電流値に対する制約が加えられている(境界条件)。 k バイアス電流要求の場合 ($k \leq n - m$)、これらの境界条件は

10

【数 2 0】

$$\bar{I}_{bias} = \underline{\underline{D}}_b \cdot \bar{J}.$$

ここで、

【数 2 1】

 $\bar{I}_{bias}$

とは k - コンポーネント列ベクトルのことであり、

【数 2 2】

20

 D _{b}

とはバイアス電流と個々の電流値との関係を記述する k 行と n 列を有する ($k \times n$) 行列のことである。この行列は「バイアス行列」と呼ばれる。1 例として、バイアス電流が全アクチュエータを流れる全電流の合計である場合は、

【数 2 3】

$$\underline{\underline{D}}_b = (1, \dots, 1),$$

であり、すなわち、 n - コンポーネント列ベクトルである。

【0 0 8 8】

30

線形近似を適用し、電流を実際に(小さな)電流変化と解する場合、

【数 2 4】

 $\bar{I}_{bias}$

はバイアス電流変化のベクトルであると理解すべきである。バイアス電流が時間一定の場合は、ベクトル

【数 2 5】

 $\bar{I}_{bias}$

にはゼロしか含まれず、所定の一連のアクチュエータを流れる電流変化の合計がゼロとなることを意味する。

40

【0 0 8 9】

力の方程式およびバイアス電流要求は単一方程式で書くことができる。

【数 2 6】

$$\begin{pmatrix} \bar{F} \\ \bar{I}_{bias} \end{pmatrix} = \underline{\underline{D}}_x \cdot \bar{J}.$$

ここで、

【数 2 7】

$$\underline{\underline{D}}_x = (\underline{\underline{D}}^T, \underline{\underline{D}}_b^T)^T$$

は、 $m+k$ 行と n 列を有する行列である。

【数 2 8】

$$\underline{\underline{D}}_x$$

のランクは $m+k$ となる。そうでないと、所定のバイアス電流でシステムを操作することができなくなる。 10

【0 0 9 0】

1 例として、 $n=4$ のアクチュエータと $m=2$ の自由度を有する図 4～7 のラジアル軸受ユニット 4 1 0 (x と y の置き換え) が考えられる。この方程式は以下のように解釈できる。

【数 2 9】

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix},$$

20

【数 3 0】

$$\bar{J} = (j_{+x} \quad j_{+y} \quad j_{-x} \quad j_{-y})^T,$$

【数 3 1】

$$\underline{\underline{D}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

及び

30

【数 3 2】

$$\underline{\underline{D}}_b = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1).$$

【数 3 3】

$$\underline{\underline{D}}$$

の定義は、 $+x$ 方向への力は $+x$ アクチュエータの電流と $-x$ アクチュエータの負の電流に比例し、したがって $+y$ 方向への力場合も同じように比例することを意味する。

【数 3 4】

40

$$\underline{\underline{D}}_b$$

の定義は、すべての電流の合計が得られるので 1 つのバイアス電流要求を定義するということを意味する。所定の 1 つのバイアス電流による 2 自由度の独立制御の必要に応じて、行列

【数 3 5】

$$\underline{\underline{D}}$$

および

【数 3 6】

$$\underline{\underline{D}}_b$$

により形成される

【数 3 7】

$$\underline{\underline{D}}_x$$

のランクは 3 であるということが容易に検証できる。

【0 0 9 1】

この例では、

【数 3 8】

$$\underline{\underline{D}}_x$$

は二次方程式 ($n > m + k$) ではない。この場合、

【数 3 9】

$$\bar{F}$$

と

【数 4 0】

$$\bar{J}$$

における一意の関係を定義するため、すなわち、

【数 4 1】

$$\underline{\underline{D}}_x$$

を二次および可逆にするため、さらに条件を追加することができる。その後、所望の一連の力および／またはトルクを得るため、行列

【数 4 2】

$$\underline{\underline{D}}_x$$

を反転させれば一意の一連の電流を誘導することができる。従来の方法 (図 4、5) では、この目的を達成するため、更に多くのバイアス電流要求を定義して境界条件を追加することができる。上記の例では、バイアス電流要求は、例えば、

【数 4 3】

$$\underline{\underline{D}}_b = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

【数 4 4】

$$\bar{I}_{bias} = \begin{pmatrix} I_{bias,x} \\ I_{bias,y} \end{pmatrix}.$$

+x および -x アクチュエータを流れる電流の合計は、+y および -y アクチュエータを流れる電流の合計とは別個に与えられることを意味する。したがって、

10

20

30

40

【数 4 5】

$$\underline{\underline{D}}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

この行列のランクは 4 なので可逆であることが容易に検証できる。

【0 0 9 2】

本発明の方法では、アクチュエータのグループは一緒に共通ノードに接続される。こうした接続が存在する場合には、各グループのアクチュエータ間を流れる電流の符号付きの値と関連する共通ノードとの合計から、共通ノードと増幅ユニット間の接続を流れる電流が分かる。接続が存在しない場合は、この合計はゼロとなる。このようにして他の境界条件を加える。共通ノードを流れる電流の要件は方程式で表すことができる。

【数 4 6】

$$\bar{I}_N = \underline{\underline{D}}_N \cdot \bar{J}.$$

ここで、

【数 4 7】

$$\bar{I}_N$$

とは、対応する接続を介して各共通ノードから増幅ユニットへと流れる電流の p 値の列ベクトルのことであり、そして p は共通ノードを有するグループの数である。接続が存在しない場合、この列ベクトルに含まれるのはゼロだけである。

【数 4 8】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

とは、p 行（共通ノードを示す）および 0、+1、および -1 の数のみが含まれる n 列（アクチュエータを示す）とを有する行列のことであり、アクチュエータと共通ノードとの接続方法について記述するものである。この行列は「ノード行列」と呼ばれる。所定の行および列における +1 という行列要素は、正の極性で所定の行の共通ノードに接続されている所定の列のアクチュエータに対応し、-1 の値は負の極性で共通ノードに接続されているアクチュエータに対応し、そしてゼロの値はアクチュエータと共通ノードとの接続が存在しないことを意味する。アクチュエータの p 個別グループと 1 共通ノードとの電氣的に可能な配線方式を持つためには、行列

【数 4 9】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

の各列にはせいぜい 1 つの要素 = 1 および 1 つの要素 = -1 程度を含めるとよい。同一列内に要素 1 と要素 -1 が両方とも存在する場合、アクチュエータは、増幅ユニットに直接接続されるのではなく、2 つの共通ノード間において接続されることを意味する。この文書の文脈では、このようなアクチュエータはどちらのグループにも属しないとみなされる。

【0 0 9 3】

このような状況の例を図 18 に示す。第 1 のグループ 1 8 1 0 は 4 つのアクチュエータ、1 8 1 1 と 1 8 1 2 と 1 8 1 3 と 1 8 1 4 とからなる。これらは、例えば、図 1 の上部軸受ユニット 1 1 0 の +x、+y、-x、-y アクチュエータとすることができる。アクチュエータ 1 8 1 1 と 1 8 1 3 は正の極性で接続された第 1 のサブグループを形成し、アクチュエータ 1 8 1 2 と 1 8 1 4 は負の極性で接続された第 2 のサブグループを形成し、そして双方のグループは同じ共通ノードに接続されている。アクチュエータのこのグルー

10

20

30

40

50

プの共通ノードは、行列

【数 5 0】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

の第 1 の行に対応し、第 1 のサブグループの各アクチュエータは 1 つの要素に値 + 1 を付与し、第 2 のサブグループの各アクチュエータは 1 つの要素に値 - 1 を付与する。同様に、第 2 のグループ 1 8 2 0 は、反対の極性を有する 2 つのサブグループの 4 つのアクチュエータ、1 8 2 1 と 1 8 2 2 と 1 8 2 3 と 1 8 2 4 とからなる。これらは、下部軸受ユニット 1 1 0 の + x、+ y、- x、および - y アクチュエータとすることができる。このグループの共通ノードは

【数 5 1】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

の第 2 の行に対応している。これらのグループの共通ノード間に接続されるのは追加のアクチュエータ 1 8 3 0 である。これは、例えば、z 方向への力を生成するアクチュエータとすることができる。このアクチュエータによって第 1 の行の要素 + 1 および第 2 の行の要素 - 1 が生成される。したがって、全体としてノード行列は 2 つの行と 9 つの列を有する行列である。

【0 0 9 4】

線形近似を適用し、電流を実際に（小さな）電流変化とみなす場合、

【数 5 2】

$$\bar{I}_N$$

は共通ノードから増幅ユニットに流れる電流の変化のベクトルであると解すべきである。

【0 0 9 5】

この方程式は力と電流との関係の方程式およびバイアス要求に算入することができる。

【数 5 3】

$$\begin{pmatrix} \bar{F} \\ \bar{I}_{bias} \\ \bar{I}_N \end{pmatrix} = \underline{\underline{D}}_t \cdot \bar{J},$$

上式では、

【数 5 4】

$$\underline{\underline{D}}_t = \begin{pmatrix} \underline{\underline{D}} \\ \underline{\underline{D}}_b \\ \underline{\underline{D}}_N \end{pmatrix}$$

は、(m + k + p) 行および n 列を有する行列である。この行列は「システム行列」と呼ばれる。

【0 0 9 6】

【数 5 5】

$$\underline{\underline{D}}_t$$

を可逆にするためには、行列は二次式でなければならない。すなわち、制御すべき多自由度、バイアス電流要求の数、そしてノードポイントの数の合計がアクチュエータの合計と等しくなければならない。更に、行列のランクは n と等しくなければならない。すなわち、すべての行と列が線形に独立していなければならない。そうすれば、行列を反転させて

10

20

30

40

50

逆システム行列

【数 5 6】

$$\underline{\underline{D}}_t^{-1}$$

を生成し、任意の所望の一連の力および／またはトルクごとに一意の一連の電流値を計算することが可能となる。

【数 5 7】

$$\bar{J} = \underline{\underline{D}}_t^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \bar{F} \\ \bar{I}_{bias} \\ \bar{I}_N \end{pmatrix}. \quad 10$$

図 6 の例では、数は $n = 4$ 、 $m = 2$ 、 $k = 1$ 、および $p = 1$ である。方程式は以下のよう
に読む。

【数 5 8】

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \end{pmatrix},$$

【数 5 9】

20

$$\bar{I}_{bias} = j_B = I_{bias,x} + I_{bias,y},$$

【数 6 0】

$$\bar{I}_N = j_N = I_{bias,x} - I_{bias,y},$$

【数 6 1】

$$\bar{J} = (j_{+x} \quad j_{+y} \quad j_{-x} \quad j_{-y})^T, \quad 30$$

【数 6 2】

$$\underline{\underline{D}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

【数 6 3】

$$\underline{\underline{D}}_b = (1 \quad 1 \quad 1 \quad 1),$$

40

及び

【数 6 4】

$$\underline{\underline{D}}_N = (1 \quad -1 \quad 1 \quad -1).$$

【0 0 9 7】

電流 j_N は共通ノード 6 1 0 から増幅ユニットへと流れる共通帰線 6 0 6 を経る電流である。この電流は任意の固定値を持つことできる。図 7 に示すように、 $j_N = 0$ の場合、この共通帰線は除外しても差し支えない。したがって、図 7 は $j_N = 0$ の上記方程式で正しく記述されていることになる。行列（実際には、行ベクトル）

【数 6 5】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

は、ラジアル軸受ユニットの 4 つのアクチュエータのすべてが 1 つのグループとなり、1 つの共通ノードに接続されることを意味する。+ x および - x アクチュエータは正の極性で接続され、+ y および - y アクチュエータは負の極性で接続されている。これにより、行列

【数 6 6】

$$\underline{\underline{D}}_t$$

を反転させると、任意の所要の力に対するアクチュエータの電流値を計算することが可能となる。

【0 0 9 8】

バイアス条件を除外すると、共通ノードを介してアクチュエータを接続する自由が多くなる。すなわち、1 つの選択肢が、

【数 6 7】

$$\underline{\underline{D}}_N = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

図 5 の従来技術の解決法に相当し、かつ 1 つの追加境界条件のために自由を残しておくことになる。もう 1 つの選択肢は、

【数 6 8】

$$\underline{\underline{D}}_N = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

+ x および - x アクチュエータ並びに + y および - y アクチュエータを反対の極性で直列にペアのように接続する、バイアス電流を供給する可能性のない従来技術の解決法に相当する。このことから本数値処理が多種多様なアクチュエータトポロジーに適用できることが極めて一般的であることが分かる。

【0 0 9 9】

所定の数のアクチュエータ (n) および自由度 (m) について可能なすべての行列

【数 6 9】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

を少ない計算量で評価することができる。何故なら、

【数 7 0】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

には 0、1、または -1 の数しか含まれず、いずれの列にも 1 つの数 1 および / または -1 しか含まれないからである。この結果、非常に限られた数の可能な行列となる。

【0 1 0 0】

一例として、少なくとも 1 つのバイアス電流要求を満たす追加条件 ($k \geq 1$) で、図 1 1 ~ 1 4 の $n = 8$ 、 $m = 5$ の線形軸受システムに系統的な検索を適用した。この検索から得られた 3 つの妥当で技術的に理非分別のある接続方式が図 1 2 ~ 1 4 の方式であり、図 1 2 の

【数 7 1】

$$\underline{\underline{D}}_N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

10

20

30

40

50

図 13 の
【数 7 2】

$$\underline{\underline{D}}_N = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

そして図 14 の
【数 7 3】

$$\underline{\underline{D}}_N = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

10

に対応している。

最後の 2 つの方式では、 $p = 1$ であり、追加条件をまだ 1 つ自由に選ぶことができるということである。

【0 1 0 1】

別の例として、図 19 の実施形態に対応する方程式、すなわち、直列で接続され、制御電流を供給する共通ノードを有する単一ペアの磁石が導出される。第 1 の磁石の力方向は第 2 の磁石の力方向の逆である。

【数 7 4】

$$\underline{\underline{D}} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix}$$

20

バイアス条件を追加することができる。

【数 7 5】

$$\underline{\underline{D}}_b = \begin{pmatrix} 1 & 1 \end{pmatrix}$$

ところで、

【数 7 6】

$$\underline{\underline{D}}_x = \left(\underline{\underline{D}}^T, \underline{\underline{D}}_b^T \right)^T$$

は二次式である。共通ノード j_N 上の電流は、追加境界条件

30

【数 7 7】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

を必要とせずに所望の力に基づいて計算することができる。このことから、図 19 のように、共通ノードは j_N を制御する必要がある増幅器との接続を必要とする。

【0 1 0 2】

上記の一般数理モデルは、電流

【数 7 8】

$$\underline{\underline{J}}$$

40

と所望の力／トルク

【数 7 9】

$$\underline{\underline{F}}$$

との線形関係、あるいは少なくともこのような線形関係の線形近似を前提としている。既に述べたように、このような線形近似を常に所定の動作基点を中心とした小さな領域に確立するには、周知のテイラー展開のように、「真」の電流－力関係を線形近似に置き換えることである。そして、電流値を（小さな）電流変化として理解すべきである。もっと一般的な方法では、電流値を一般化力値として理解することもできる。一般化力値はそれぞれ、個々のアクチュエータにより生成される所望の力を表す。アクチュエータの物理的特性

50

が分かっている場合は、一般化力値をこの力を生成するのに必要なアクチュエータの実電流に変換することができる。この目的には追加システム状態情報を用いるとよい。一般化力値から電流を計算するには、例えば、各アクチュエータの物理的特性を反映するアクチュエータ別のルックアップテーブルを使用することである。これはアクチュエータごとに独立して行うことができる。一般化力値と電流との関係は線形でなくともよい。制御の過程で上記の数値モデルの（線形）方程式を満たす一般化力値が計算される。特に、共通ノードを流れる電流に関する条件は、行列

【数 8 0】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

10

およびベクトル

【数 8 1】

$$\bar{T}_N$$

で記述されるように、一般化力値の条件となる。一般化力値は一般的に非線形関係を介したアクチュエータの駆動電流に変換される。計算した電流が共通ノードの条件をまだ満たしているかどうかを確認するには、元の

【数 8 2】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

20

ではなく、変換された行列

【数 8 3】

$$\tilde{\underline{\underline{D}}}_N$$

を使用することができる。これは一般化力値が満たさなければならない条件として、共通ノードにおける電流条件を示すものである。電流－力関係が作用点を中心に線形に近似している場合には、行列

【数 8 4】

$$\tilde{\underline{\underline{D}}}_N$$

30

を簡単に計算することができる。必要に応じて、

【数 8 5】

$$\tilde{\underline{\underline{D}}}_N$$

はアクチュエータの実作用点までサンプリング時間ごとに再計算することができる。実用化する上でこの方法を簡素化すると、通常満足な結果が得られるものである。

【数 8 6】

40

$$\tilde{\underline{\underline{D}}}_N$$

を一定に保持したり、元の行列

【数 8 7】

$$\underline{\underline{D}}_N$$

を用いたりすると、計算された電流が共通ノードの条件を満たさなくなる恐れがあるが、Kirchhoff の第 1 法則により、これらの条件は演繹的に満たされる。これにより、ノード条件（Kirchhoff の第 1 法則）が再び満たされるように計算電流とは異

50

なる実電流を増幅器が生成させる。

【0103】

もう1つの方法として、逆システム行列

【数88】

$$\underline{D}_r^{-1}$$

による変換前に追加された追加手段により、非線形性を補正することができる。アクチュエータの物理的特性が分かっている場合は、修正した力／トルク値を元の所望の力／トルク

【数89】

10

$$\bar{F}$$

値を基に計算して変換すれば、非線形性を相殺したアクチュエータの電流を得ることができる。

【0104】

このような計算を行うには、例えば、各アクチュエータの物理的特性を反映し、システム状態情報（例えば、バイアス電流、回転子位置、センサ情報）を使用するルックアップテーブルを用いて、アクチュエータの非線形性を相殺することである。

【0105】

好適な電流を計算するための別の自由は、バイアス電流を動的に変更して、伝導損失または線形性のようなシステムパフォーマンスを最適化することである。

20

【0106】

本発明に関連して使用する制御方式はいずれもソフトウェアでもハードウェアでも実現可能である。特に、制御を行うために必要な計算にデジタル信号プロセッサ（DSP）を用いる場合に有利である。このようなDSPは増幅ユニットの一部であると解釈することができる。さらにまた、適切にプログラムされたDSPはアクチュエータの電流を制御する手段とみなされる。計算にはA／D変換器（ADC）で適切にデジタル化された後のセンサ信号の評価や制御ステップにおけるこれら信号の所要の力／トルク（または、一般に制御信号）の計算、適切な一般化力値の計算、そして一般化力値の電流値への変換などが挙げられるが、これらは例えば、D／A変換器（DAC）またはパルス幅モジュレータ（PWM）を介して電力増幅器やアクチュエータに設けられる。より一般的な用語では、この計算にはセンサ信号から一般化力値を導き出すプロセスにおける計算ステップなどが挙げられる（変位センサまたは等価のセンサ情報から）。

30

【0107】

特に、制御ステップは、当該技術において周知の比例（P）、比例積分（PI）、比例積分微分（PID）、比例微分（PD）制御方式、または非線形制御、適応制御もしくは

【数90】

$$H_\infty$$

制御のようなより高度な制御方法により、センサ信号から制御信号が有利に導出するものである。また、制御ステップは変換、周波数フィルタリング、またはその他安定制御を行うための有利な手段を含むものである。

40

【0108】

好適な実施形態を参照して本発明について述べてきたが、本発明がこれらの実施形態に限定されるべきものではなく、また本発明の範囲から逸脱することなく多くの変更が可能であることは明らかである。

【0109】

多くの例のうちの1つとして、本発明は回転子を支持するいわゆる円錐ころ軸受にも適用可能であり、少なくとも1つのアクチュエータが軸方向だけでなく半径方向にも力を出す。

50

【図面の簡単な説明】

【0110】

【図1】磁気軸受に吊るされた回転子の非常に模式化された斜視図を示す。

【図2】磁気抵抗型電磁アクチュエータの原理の図を示す。

【図3】従来技術による増幅ユニットと単一アクチュエータとを接続するためのケーブル方式の略図を示す。

【図4】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための第1のケーブル方式の略図を示す。

【図5】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための従来技術による第2のケーブル方式の略図を示す。

10

【図6】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第1の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図7】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第2の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図8】6つのアクチュエータを備えた磁気軸受装置の非常に模式化された平面図を示す。

【図9】増幅ユニットと6つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための従来技術によるケーブル方式の略図を示す。

【図10】増幅ユニットと6つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第3の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

20

【図11】8つのアクチュエータを備えた線形磁気軸受装置の非常に模式化された斜視図を示す。

【図12】増幅ユニットと図11のアクチュエータとを接続するための本発明の第4の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図13】増幅ユニットと図11のアクチュエータとを接続するための本発明の第5の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図14】増幅ユニットと図11のアクチュエータとを接続するための本発明の第6の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図15】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第7の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

30

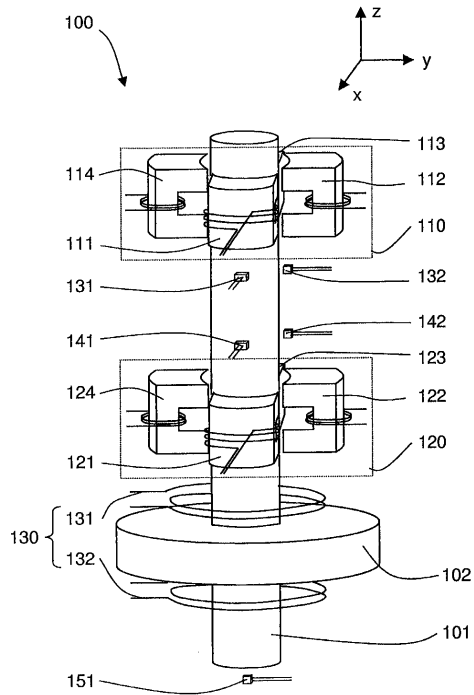
【図16】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第8の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図17】増幅ユニットと4つのアクチュエータを備えた軸受ユニットとを接続するための本発明の第9の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

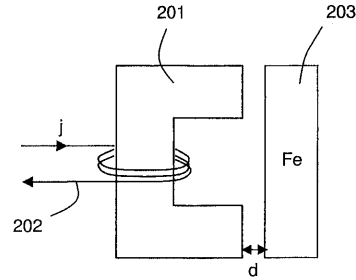
【図18】本発明の第10の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

【図19】本発明の第11の実施形態に係るケーブル方式の略図を示す。

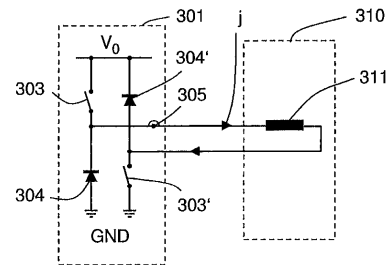
【図 1】



【図 2】

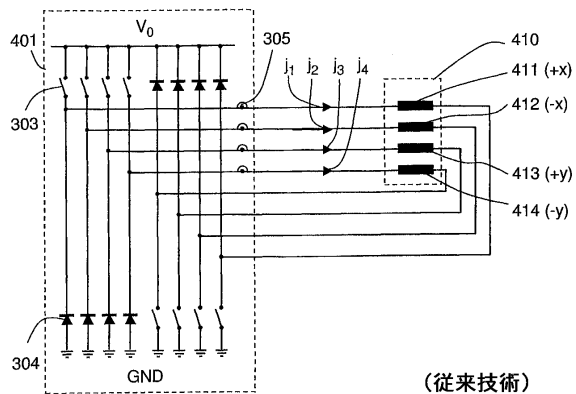


【図 3】



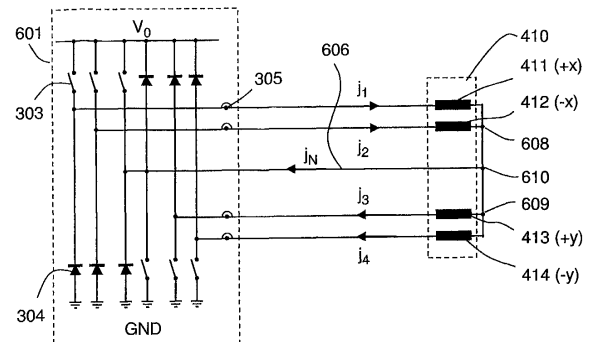
(従来技術)

【図 4】

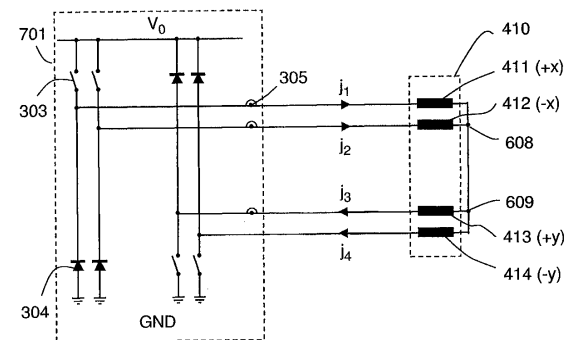


(従来技術)

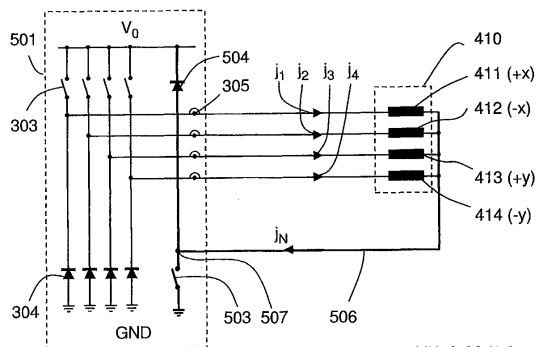
【図 6】



【図 7】

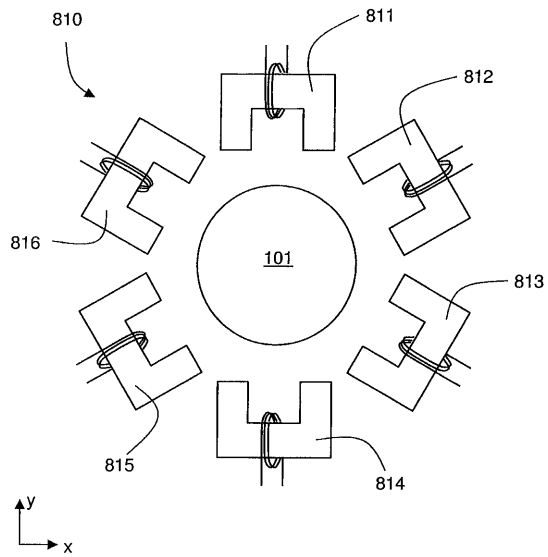


【図 5】

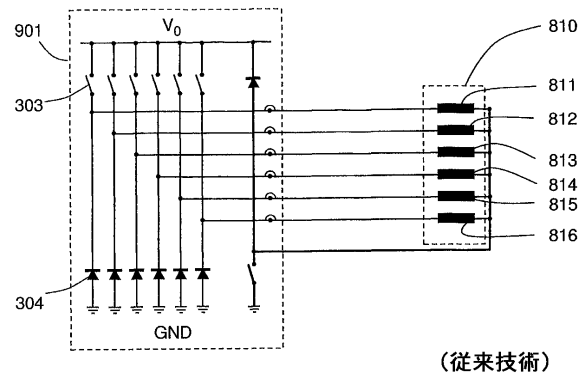


(従来技術)

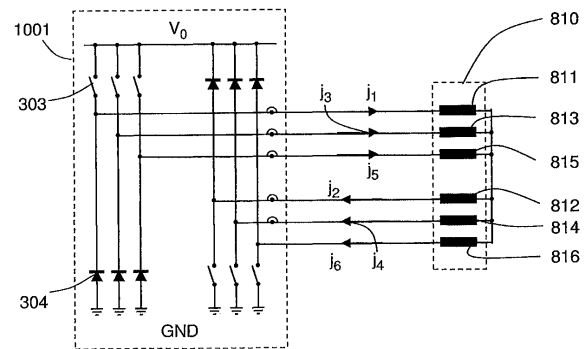
【図 8】



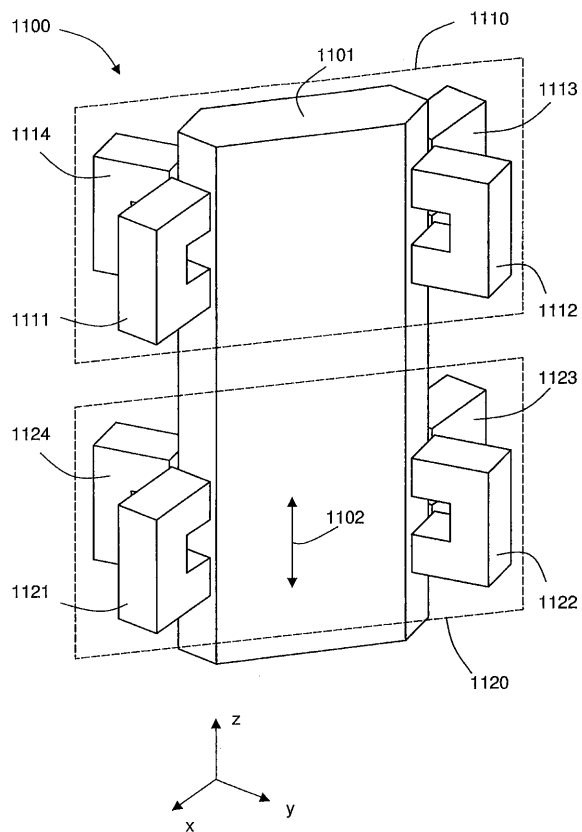
【図 9】



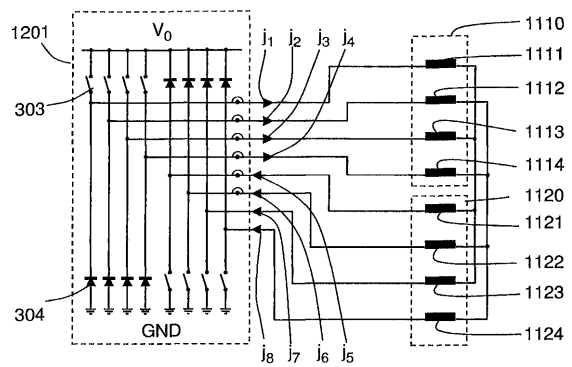
【図 10】



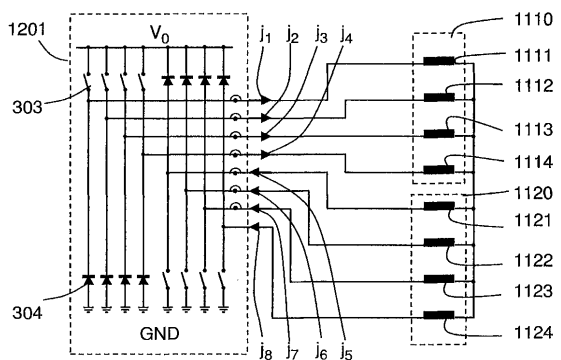
【図 11】



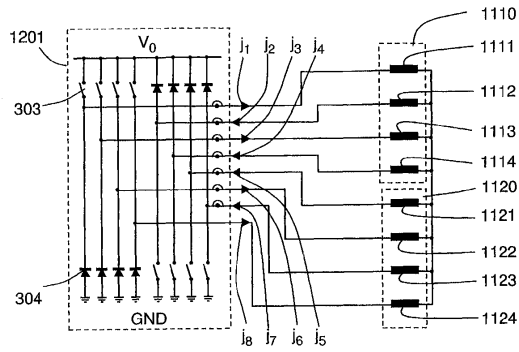
【図 12】



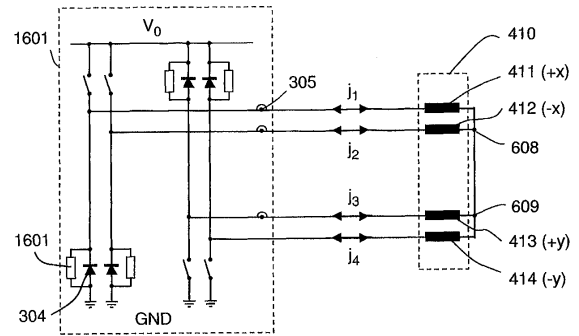
【図 13】



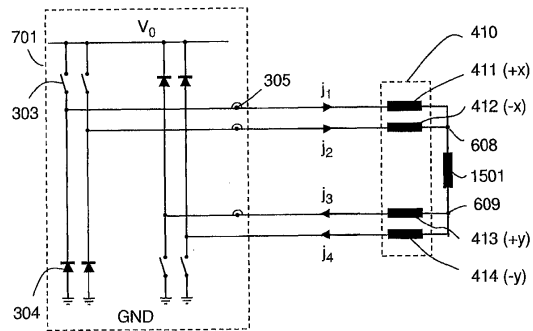
【図 14】



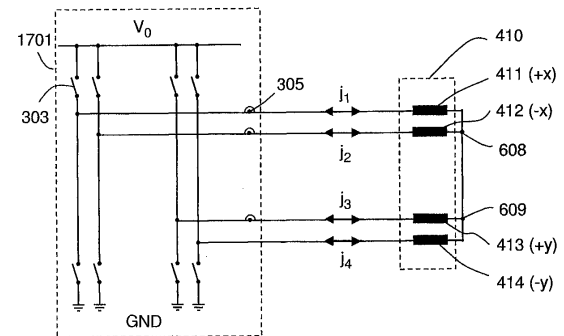
【図 16】



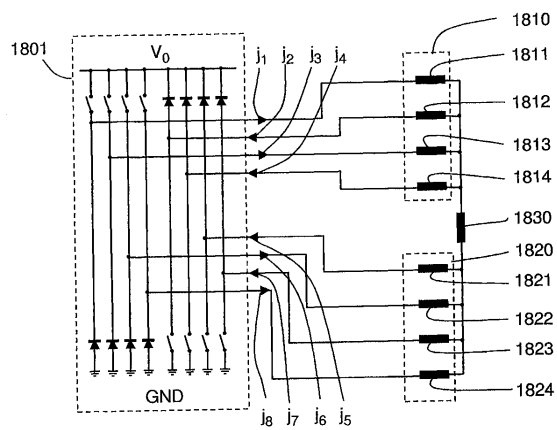
【図 15】



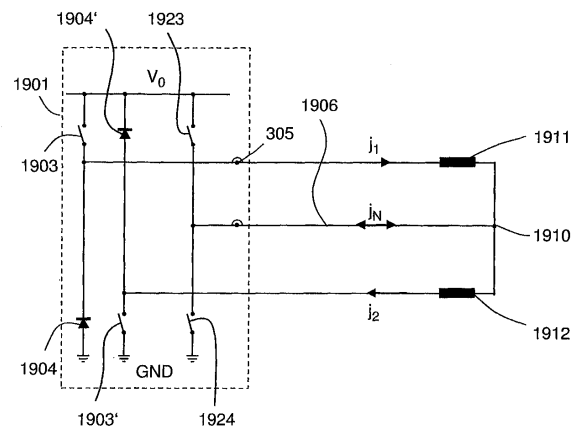
【図 17】



【図 18】



【図 19】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2001-012467 (JP, A)
米国特許第3823990 (US, A)
欧州特許出願公開第1460294 (EP, A2)
米国特許第5627421 (US, A)
特開昭52-037648 (JP, A)
特開昭62-056618 (JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
F16C 32/04