

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02015/178052

発行日 平成29年4月20日 (2017. 4. 20)

(43) 国際公開日 平成27年11月26日 (2015. 11. 26)

(51) Int.Cl.  
H02N 15/00 (2006.01)

F I  
H02N 15/00

テーマコード (参考)

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 21 頁)

出願番号 特願2016-520954 (P2016-520954)  
 (21) 国際出願番号 PCT/JP2015/055039  
 (22) 国際出願日 平成27年2月23日 (2015. 2. 23)  
 (31) 優先権主張番号 特願2014-103797 (P2014-103797)  
 (32) 優先日 平成26年5月19日 (2014. 5. 19)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

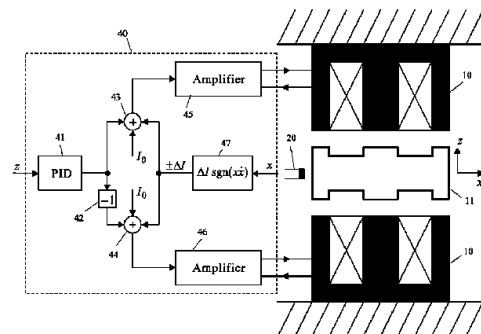
(71) 出願人 504190548  
 国立大学法人埼玉大学  
 埼玉県さいたま市桜区下大久保255  
 (74) 代理人 100100918  
 弁理士 大橋 公治  
 (72) 発明者 水野 毅  
 埼玉県さいたま市桜区下大久保255 国立大学法人埼玉大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気浮上装置とその制御方法

(57) 【要約】

強磁性体(11)の非接触支持のための磁力を発生する一対の磁石(10)と、強磁性体(11)の横ずれ方向への変位を検出する変位検出手段(20)と、強磁性体(11)の横ずれ方向の振動を抑制する制御手段(40)とを備え、制御手段(40)が、振動の中心から離れる方向に変位する強磁性体(11)に対し、振動の中心に戻る方向に変位するときよりも強い磁力が作用するように一対の磁石(10)を制御する。強磁性体(11)が振動の中心から離れる際の磁気力の剛性を強め、強磁性体(11)が振動の中心に戻る際の磁気力の剛性を弱めることにより、強磁性体(11)の振動は急速に減衰する。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

磁気力を利用して浮上対象物を非接触支持する磁気浮上装置であって、  
浮上対象物の非接触支持のための磁力を発生する一对の磁石と、  
前記一对の磁石の配列方向と直交する横ずれ方向への前記浮上対象物の変位を検出する  
変位検出手段と、

前記浮上対象物の前記横ずれ方向の振動を抑制する制御手段と、  
を備え、

前記制御手段は、前記振動の中心から離れる方向に変位する前記浮上対象物に対し、前  
記振動の中心に戻る方向に変位するときよりも強い磁力が作用するように前記一对の磁石  
を制御する、  
ことを特徴とする磁気浮上装置。

10

## 【請求項 2】

請求項 1 に記載の磁気浮上装置であって、前記一对の磁石が上下方向に配列された電磁  
石であり、前記浮上対象物が前記電磁石の各々に吸引されて前記一对の電磁石の間に非接  
触支持される強磁性体を含み、前記制御手段は、前記浮上対象物が前記振動の中心から離  
れる方向に変位するとき、前記一对の電磁石に印加する電流を強め、前記浮上対象物が前  
記振動の中心に戻る方向に変位するとき、前記一对の電磁石に印加する電流を弱める、こ  
とを特徴とする磁気浮上装置。

20

## 【請求項 3】

請求項 2 に記載の磁気浮上装置であって、前記横ずれ方向に振動する前記浮上対象物の  
変位を  $x$ 、前記浮上対象物の移動速度を  $x'$  とするとき、前記制御手段は、前記一对の電  
磁石に印加するバイアス電流を、 $x \cdot x' \geq 0$  の状態と、 $x \cdot x' < 0$  の状態とで切り替  
え、 $x \cdot x' \geq 0$  のときの前記バイアス電流が、 $x \cdot x' < 0$  のときの前記バイアス電流  
より大きくなるように設定する、ことを特徴とする磁気浮上装置。

## 【請求項 4】

請求項 3 に記載の磁気浮上装置であって、前記制御手段は、 $x \cdot x'$  の値が所定値より  
小さいとき、前記一对の電磁石に印加する前記バイアス電流を  $x \cdot x'$  の値に応じて減少  
させる、ことを特徴とする磁気浮上装置。

## 【請求項 5】

請求項 1 から 4 のいずれかに記載の磁気浮上装置であって、前記変位検出手段が、前記  
浮上対象物の横ずれ方向に配置された、前記浮上対象物までの距離を測定する測定手段で  
ある、ことを特徴とする磁気浮上装置。

30

## 【請求項 6】

請求項 2 から 4 のいずれかに記載の磁気浮上装置であって、前記変位検出手段が、前記  
電磁石の前記浮上対象物に対向する側に配置された、通過磁束の変化を検出するセンシ  
ングコイルである、ことを特徴とする磁気浮上装置。

## 【請求項 7】

請求項 2 から 4 のいずれかに記載の磁気浮上装置であって、前記変位検出手段が、前記  
電磁石を支持し、該電磁石に作用する力を検出する力センサである、ことを特徴とする磁  
気浮上装置。

40

## 【請求項 8】

請求項 1 に記載の磁気浮上装置であって、前記浮上対象物が、前記一对の磁石に対して  
相反する方向に反発する磁石を含み、前記一对の磁石と前記浮上対象物の磁石との反発力  
により前記浮上対象物が非接触支持され、前記制御手段は、前記浮上対象物が前記振動の  
中心から離れる方向に変位するとき、前記反発力が強まる位置に前記一对の磁石を移動し  
、前記浮上対象物が前記振動の中心に戻る方向に変位するとき、前記反発力が弱まる位置  
に前記一对の磁石を移動する、ことを特徴とする磁気浮上装置。

## 【請求項 9】

磁気力を利用して浮上対象物を非接触支持する磁気浮上装置の制御方法であって、

50

上下方向に配列する一対の電磁石の間に、強磁性体を含む浮上対象物を非接触支持し、前記一対の電磁石に対して、前記電磁石の配列方向への前記浮上対象物の変位を抑える電流  $i$  と、前記配列方向と直交する横ずれ方向への前記浮上対象物の振動を抑制するバイアス電流  $i$  とを重畳して印加し、

前記横ずれ方向に振動する前記浮上対象物の変位を  $x$ 、前記浮上対象物の移動速度を  $x'$  とするとき、前記一対の電磁石に印加する前記バイアス電流  $i$  を、 $x \cdot x' = 0$  の状態と、 $x \cdot x' < 0$  の状態とで切り替え、 $x \cdot x' = 0$  のときの前記バイアス電流を、 $x \cdot x' < 0$  のときの前記バイアス電流より大きくする、ことを特徴とする磁気浮上装置の制御方法。

【請求項 10】

請求項 9 に記載の磁気浮上装置の制御方法であって、 $x \cdot x'$  の値が所定値より小さいとき、前記バイアス電流  $i$  を、 $x \cdot x'$  の値に応じて減少させる、ことを特徴とする磁気浮上装置の制御方法。

【請求項 11】

請求項 10 に記載の磁気浮上装置の制御方法であって、前記バイアス電流  $i$  を、次の条件 1 ~ 条件 5 を満たす関数  $f(x \cdot x')$  に従って変化させる、ことを特徴とする磁気浮上装置の制御方法。

前記バイアス電流  $i$  が連続的に変化する範囲を調整するパラメータを  $X_0$  として、

条件 1 :  $x \cdot x' < -X_0$  のとき  $f(x \cdot x') = -I$

条件 2 :  $-X_0 < x \cdot x' < 0$  のとき  $-I$  から 0 へ単調に増加する

条件 3 :  $f(0) = 0$ 、

条件 4 :  $0 < x \cdot x' < X_0$  のとき 0 から  $I$  へ単調に増加する

条件 5 :  $X_0 < x \cdot x'$  のとき  $f(x \cdot x') = +I$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気力を利用して浮上対象物を非接触支持する磁気浮上装置とその制御方法に関し、浮上対象物の安定的な非接触支持を低コストで実現するものである。

【背景技術】

【0002】

磁気浮上系は、非接触で物体を支持することが可能であり、機械的摩擦がないため振動や騒音が少なく、また、潤滑を必要としないため、潤滑油の蒸発を嫌う真空中やクリーンルームなどの特殊環境下でも使用できる。

磁気浮上の方式には、磁石同士の反発力を利用する反発型や、磁石と強磁性体の吸引力を利用する吸引型などがある。

図 17 (a) は、一対の電磁石 10 の間に在る強磁性体 11 が、上下の電磁石 10 の磁力により吸引され、電磁石間に非接触支持されている様子を示している。この強磁性体 11 の上下方向の位置は、上下の電磁石 10 に印加する電流を制御し、それらの電磁石 10 から発生する磁力を調整することにより安定的に保つことができる。

【0003】

この強磁性体 11 に対し、図 17 (b) に示すように、一対の電磁石 10 の配列方向と直交する方向の外力が加わると、非接触支持されている強磁性体 11 は、押された方向に移動（横ずれ）する。このとき、電磁石 10 から外れた強磁性体 11 の端部には、図 18 に示すように、吸引力  $B$  の成分とともに、横ずれを元に戻そうとする復元力  $A$  の成分を含む力が働く。これは“端効果”として知られている。

復元力  $A$  を受けた強磁性体 11 は横ずれ方向の反対側に横ずれし、再び端効果による復元力を受ける。その結果、強磁性体 11 は横ずれ方向への振動を繰り返す。

この横ずれ方向の振動は、下記特許文献 1 に記載されているように、非接触支持された強磁性体 11 に減衰作用が働かないため、収束し難い。

【先行技術文献】

10

20

30

40

50

## 【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2001-268981号公報

## 【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

こうした横ずれ方向の振動は、図19に示すように、強磁性体11の上下方向だけでなく、前後・左右方向にも電磁石12の対を配置して、上下の電磁石10と同様に、対を成す電磁石12への印加電流を制御し、電磁石12から発生する磁力を調整すれば、抑えることができる。

10

しかし、このように構成した場合、電磁石やそれに電流を供給する増幅器等の台数が増加し、装置の大型化や高コスト化が避けられない。

【0006】

本発明は、こうした事情を考慮して創案したものであり、横ずれ方向の振動の制振機能を有し、小型、且つ、低コストで構成できる磁気浮上装置と、その制御方法を提供することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明は、磁気力を利用して浮上対象物を非接触支持する磁気浮上装置であって、浮上対象物の非接触支持のための磁力を発生する一对の磁石と、一对の磁石の配列方向と直交する横ずれ方向への浮上対象物の変位を検出する変位検出手段と、浮上対象物の横ずれ方向の振動を抑制する制御手段と、を備え、制御手段が、振動の中心から離れる方向に変位する浮上対象物に対し、振動の中心に戻る方向に変位するときよりも強い磁力が作用するように一对の磁石を制御する、ことを特徴とする。

20

このように、浮上対象物が振動の中心から離れる際の磁気力の剛性を強め、浮上対象物が振動の中心に戻る際の磁気力の剛性を弱めることにより、浮上対象物の振動は急速に減衰する。

【0008】

また、本発明の磁気浮上装置では、一对の磁石が、上下方向に配列された電磁石から成り、浮上対象物が、電磁石の各々に吸引されて一对の電磁石の間に非接触支持される強磁性体を含んでいる。制御手段は、浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位するとき、一对の電磁石に印加する電流を強め、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位するとき、一对の電磁石に印加する電流を弱める。

30

こうした構成により、吸引型磁気浮上装置の横ずれ方向の振動を効果的に減衰させることができる。

【0009】

また、本発明の磁気浮上装置では、横ずれ方向に振動する浮上対象物の変位を $x$ 、浮上対象物の移動速度を $x'$ とすると、制御手段は、一对の電磁石に印加するバイアス電流を、 $x \cdot x' > 0$  (以下、 $x \cdot x'$ と表記する。)  $> 0$ の状態と、 $x \cdot x' < 0$ の状態とで切り替え、 $x \cdot x' > 0$ のときのバイアス電流が、 $x \cdot x' < 0$ のときのバイアス電流より大きくなるように設定する。

40

横ずれ方向の振動の中心を原点とする $x$ 座標において、 $x \cdot x' > 0$ は、 $x$ 及び $x'$ が共に正の場合、または、共に負の場合であり、浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位している状態である。また、 $x \cdot x' < 0$ は、 $x$ が正で $x'$ が負の場合、または、 $x$ が負で $x'$ が正の場合であり、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位している状態である。そのため、 $x \cdot x' > 0$ のときに一对の電磁石に印加するバイアス電流を増やして磁気力の剛性を高め、 $x \cdot x' < 0$ のときのバイアス電流を減らして磁気力の剛性を弱めることにより、浮上対象物の横ずれ方向の振動を効果的に減衰させることができる。

【0010】

また、本発明の磁気浮上装置では、 $x \cdot x'$ の値が所定値より小さいとき、制御手段が

50

、一对の電磁石に印加するバイアス電流を  $x \cdot x'$  の値に応じて減少させるようにしてもよい。

$x \cdot x'$  の値が小さいときのバイアス電流値が大きいと、浮上対象物の行き過ぎ量が大きくなり、振動の収束までの時間が長くなる恐れがある。 $x \cdot x'$  の値に応じてバイアス電流を減らすことで、そうした恐れが解消できる。

【0011】

また、本発明の磁気浮上装置では、変位検出手段は、浮上対象物の横ずれ方向に配置した、浮上対象物までの距離を測定する測定手段で構成することができる。

測定手段が検出した浮上対象物までの距離の変化から  $x \cdot x'$  の正負や  $x \cdot x'$  の値を求めることができる。

【0012】

また、本発明の磁気浮上装置では、変位検出手段を、電磁石の浮上対象物に対向する側に配置した、通過磁束の変化を検出するセンシングコイルで構成することもできる。

センシングコイルの通過磁束が減少傾向にあるときは、浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位しているときであり、センシングコイルの通過磁束が増加傾向にあるときは、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位しているときである。その変位の状態は、センシングコイルの誘導起電力や誘導電流の変化から検出できる。

【0013】

また、本発明の磁気浮上装置では、変位検出手段を、電磁石を支持して、電磁石に作用する力を検出する力センサで構成しても良い。

力センサの検出値が減少傾向にあるときは、浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位しているときであり、力センサの検出値が増加傾向にあるときは、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位しているときである。

【0014】

また、本発明の磁気浮上装置では、浮上対象物が、一对の磁石に対して相反する方向に反発する磁石を含み、一对の磁石と浮上対象物の磁石との反発力により浮上対象物が非接触支持される。制御手段は、浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位するとき、反発力が強まる位置に一对の磁石を移動し、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位するとき、反発力が弱まる位置に一对の磁石を移動する。

こうした構成により、反発型磁気浮上装置の横ずれ方向の振動を効果的に減衰させることができる。

【0015】

本発明は、磁気力を利用して浮上対象物を非接触支持する磁気浮上装置の制御方法であって、上下方向に配列する一对の電磁石の間に、強磁性体を含む浮上対象物を非接触支持し、一对の電磁石に対して、電磁石の配列方向への浮上対象物の変位を抑える電流  $i$  と、配列方向と直交する横ずれ方向への浮上対象物の振動を抑制するバイアス電流  $i$  とを重畳して印加する。そして、横ずれ方向に振動する浮上対象物の変位を  $x$ 、浮上対象物の移動速度を  $x'$  とするとき、一对の電磁石に印加するバイアス電流  $i$  を、 $x \cdot x' = 0$  の状態と、 $x \cdot x' < 0$  の状態とで切り替え、 $x \cdot x' = 0$  のときのバイアス電流を、 $x \cdot x' < 0$  のときのバイアス電流より大きくする。

こうした制御方法により、一对の電磁石を用いて、浮上対象物を安定的に非接触支持することができる。

【0016】

また、本発明の磁気浮上装置の制御方法では、 $x \cdot x'$  の値が所定値より小さいとき、印加するバイアス電流  $i$  を、 $x \cdot x'$  の値に応じて減少させるようにしても良い。

こうすることで、浮上対象物の行き過ぎ量が大きくなるのを防ぐことができ、振動の収束までの時間を短縮できる。

【0017】

また、本発明の磁気浮上装置の制御方法では、バイアス電流  $i$  を、次の条件 1 ~ 条件 5 を満たす関数  $f(x \cdot x')$  に従って変化させるようにしても良い。

10

20

30

40

50

バイアス電流  $i$  が連続的に変化する範囲を調整するパラメータを  $X_0$  として、

条件 1 :  $x \cdot x' < -X_0$  のとき  $f(x \cdot x') = -I$

条件 2 :  $-X_0 < x \cdot x' < 0$  のとき  $-I$  から  $0$  へ単調に増加する

条件 3 :  $f(0) = 0$ 、

条件 4 :  $0 < x \cdot x' < X_0$  のとき  $0$  から  $I$  へ単調に増加する

条件 5 :  $X_0 < x \cdot x'$  のとき  $f(x \cdot x') = +I$

この条件 1 ~ 条件 5 を満たす関数  $f$  に従ってバイアス電流  $i$  を変化させれば、 $x \cdot x'$  の値が小さいとき、バイアス電流  $i$  も小さいため、浮上対象物の行き過ぎ量が大きくなるのを防止できる。

【発明の効果】

10

【0018】

本発明により、浮上対象物の安定的な非接触支持が可能な磁気浮上装置を、小型に、且つ、低コストで構成することができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態に係る吸引型磁気浮上装置を示す図

【図 2】図 1 の浮上対象物の  $x \cdot x'$  が正または負になる状態を示す図

【図 3】図 1 の浮上対象物が横ずれ方向に振動する時の  $x$  及び  $x'$  の軌跡を示す図

【図 4】実験装置を示す図

【図 5】外乱波形を示す図

20

【図 6】バイアス電流  $0$  (a) 及び  $1$  A (b) のときの横ずれ振動波形を示す図

【図 7】バイアス電流を切替制御したときの横ずれ振動波形を示す図

【図 8】 $x \cdot x'$  の変化 (a) と切替制御したバイアス電流 (b) を示す図

【図 9】収束する横ずれ振動の  $x$  及び  $x'$  の軌跡を示す図

【図 10】バイアス電流の値を変えて切替制御したときの横ずれ振動波形を示す図

【図 11】 $x \cdot x'$  の小さい範囲でバイアス電流を減少させる関数を示す図

【図 12】図 11 の関数でバイアス電流を制御したときの横ずれ振動波形を示す図

【図 13】浮上対象物の変位をセンシングコイルで検出するときの構成を示す図

【図 14】浮上対象物の変位を力センサで検出するときの構成を示す図

【図 15】本発明の第 2 の実施形態に係る反発型磁気浮上装置を示す図

30

【図 16】図 15 の装置において横ずれ振動の剛性を切り替えるときの形態を示す図

【図 17】吸引型磁気浮上装置での浮上対象物の変位を説明する図

【図 18】磁気浮上装置の端効果を説明する図

【図 19】従来横ずれ振動の抑止構造を示す図

【発明を実施するための形態】

【0020】

(第 1 の実施形態)

図 1 は、本発明の第 1 の実施形態に係る吸引型の磁気浮上装置を示している。

この装置は、上下方向 ( $z$  方向) に配置された一对の電磁石 10 と、一对の電磁石 10 の間に非接触支持された浮上対象物である強磁性体 11 と、強磁性体 11 の横ずれ方向 ( $x$  方向) の変位量を検出する変位センサ 20 と、電磁石 10 に印加する電流を制御する制御機構 40 とを備えている。

40

【0021】

制御機構 40 は、強磁性体 11 の  $z$  方向の変位を検出する変位センサ (不図示) から変位信号 ( $z$ ) が入力すると、PID 制御により  $z$  方向の変位を解消するための  $z$  方向バイアス電流を生成する PID 制御部 41 と、強磁性体 11 の  $x$  方向の変位を検出する変位センサ 20 から変位信号 ( $x$ ) が入力すると、 $x$  と ( $dx/dt$ ) との積に応じて  $x$  方向バイアス電流を切り替えるバイアス電流切替部 47 と、PID 制御部 41 から出力された  $z$  方向バイアス電流の符号を反転する反転部 42 と、PID 制御部 41 から出力された  $z$  方向バイアス電流とバイアス電流切替部 47 から出力された  $x$  方向バイアス電流とを基準電

50

流  $I_0$  に加算する加算部 4 3 と、反転部 4 2 から出力された反転された  $z$  方向バイアス電流とバイアス電流切替部 4 7 から出力された  $x$  方向バイアス電流とを基準電流  $I_0$  に加算する加算部 4 4 と、加算部 4 3 から出力された電流を増幅して上側の電磁石 1 0 に印加する増幅器 4 5 と、加算部 4 4 から出力された電流を増幅して下側の電磁石 1 0 に印加する増幅器 4 6 と、を有している。

#### 【0022】

なお、 $z$  方向の変位を解消する制御は、従来から良く知られている。この制御機構 4 0 では、浮上対象物を  $z$  方向に安定的に保持するために電磁石 1 0 に印加される電流  $I$  に対して、さらに  $x$  方向バイアス電流が重畳される点に特色がある。 $x$  方向バイアス電流は、上下の電磁石 1 0 に同じ量だけ追加される。そのため、 $x$  方向バイアス電流が加わっても、強磁性体 1 1 の  $z$  方向のバランスが乱れることは無い。

10

#### 【0023】

この明細書では、 $(dx/dt)$  を  $x'$  と表記することにする。

バイアス電流切替部 4 7 の符号関数  $sgn(n)$  は、 $n > 0$  のとき 1、 $n = 0$  のとき 0、 $n < 0$  のとき -1 を出力する。そのため、バイアス電流切替部 4 7 は、 $x \cdot x' > 0$  のとき、 $x$  方向バイアス電流として  $I$  を出力し、 $x \cdot x' < 0$  のとき、 $x$  方向バイアス電流として  $-I$  を出力する。 $x \cdot x' = 0$  のときは 0 を出力する。

図 2 は、 $x$  及び  $x'$  を軸とする直交座標系において、 $x \cdot x' > 0$  となる範囲、及び、 $x \cdot x' < 0$  となる範囲を示している。 $x \cdot x' > 0$  となるのは座標系の第 1 象限及び第 3 象限であり、図 2 (a) (c) に示すように、浮上対象物が電磁石 1 0 の中心位置 (振動の中心) から横ずれ方向に離れるときの状態である。また、 $x \cdot x' < 0$  となるのは第 2 象限及び第 4 象限であり、図 2 (b) (d) に示すように、横ずれした浮上対象物が電磁石 1 0 の中心位置 (振動の中心) に戻るときの状態である。

20

#### 【0024】

強磁性体 1 1 の  $z$  方向のバランスを保つために電磁石 1 0 に供給される電流を  $I_0$  とすると、 $x \cdot x' > 0$  のときには、電磁石 1 0 に電流 ( $I_0 + I$ ) が印加され、 $x \cdot x' < 0$  のときには、電磁石 1 0 に電流 ( $I_0 - I$ ) が印加される。

電磁石 1 0 に印加される電流が増加すれば、電磁石 1 0 から発生する磁力が増強され、強磁性体 1 1 に対する横ずれ方向の復元力が強まり、浮上対象物の横ずれに対する剛性が高まる。

30

電磁石 1 0 に電流 ( $I_0 + I$ ) が印加されたときの横ずれに対する剛性を  $k + k$  とすると、電磁石 1 0 に電流 ( $I_0 - I$ ) が印加されたときの剛性は  $k - k$  に低下する。

#### 【0025】

図 3 は、横ずれ方向に振動するときの変位及び速度の軌跡を  $x - x'$  直交座標系上で示している。この軌跡は、横ずれに対する剛性が異なると変わってくる。図 3 (a) は、横ずれに対する剛性が高い場合の軌跡であり、速度 ( $x'$ ) 方向に長い軌跡を描く。図 3 (b) は、剛性が低い場合の軌跡であり、変位 ( $x$ ) 方向に長い軌跡を描く。

図 3 (c) は、図 1 の制御機構により、 $x \cdot x'$  の正負に応じて横ずれに対する剛性を切り替えたときの軌跡を示している。この場合、第 2、4 象限では、剛性が低いときの軌跡を辿り、第 1、3 象限では、剛性が高いときの軌跡を辿って振動が減衰する。

40

このように、 $x \cdot x' > 0$  のときに横ずれに対する剛性を高め、 $x \cdot x' < 0$  のときにその剛性を低めた場合には、浮上対象物の横ずれ方向の振動が、急速に収束する。

#### 【0026】

この磁気浮上装置の特性を実験により確認した。

図 4 は、その実験装置の平面図を示している。この装置は、浮上対象物 5 0 の上下に配置された電磁石 5 1、5 2 と、浮上対象物 5 0 の横ずれ方向の変位を検出するレーザ変位計 5 4 と、浮上対象物 5 0 の変位方向を横ずれ方向のみに拘束する板バネ 5 5 と、浮上対象物 5 0 に横ずれ方向の外乱を与えるボイスコイルモータ 5 3 とを備えている。

この装置では、板バネ 5 5 を用いて、浮上対象物 5 0 の運動を横ずれ方向の並進 1 自由

50

度に拘束しているため、電磁石 5 1、5 2 には、横ずれ方向の振動を抑制するバイアス電流だけを印加している。

【0027】

図 5 は、ボイスコイルモータ 5 3 で発生させた外乱を示している。

図 6 ( a ) は、比較のため、電磁石 5 1、5 2 へのバイアス電流  $I$  を  $I = 0$  に設定して浮上対象物 5 0 に外乱を与えたときの浮上対象物 5 0 の横ずれ方向の振動を示している。この振動の周波数は  $3.5 \text{ Hz}$  であり、振幅が初期の  $5\%$  となるまでの整定時間を測定したところ、 $64.0$  秒であった。

また、図 6 ( b ) は、比較のため、バイアス電流  $I$  を  $I = 1 \text{ A}$  に設定して浮上対象物 5 0 に外乱を与えたときの浮上対象物 5 0 の横ずれ方向の振動を示している。この振動の周波数は  $4.3 \text{ Hz}$  であり、振幅が初期の  $5\%$  となるまでの整定時間は  $59.5$  秒であった。

10

図 6 ( a ) ( b ) の振動数の比較から、電磁石 5 1、5 2 にバイアス電流を流すことで横ずれに対する剛性が  $44\%$  増加したことが分かる。しかし、剛性を高めるだけでは、横ずれ方向の振動を短時間で収束させることはできない。

【0028】

図 7 は、電磁石 5 1、5 2 へのバイアス電流  $I$  を、 $x \cdot x'$  の値が正のときは  $1 \text{ A}$ 、 $x \cdot x'$  の値が負のときは  $0 \text{ A}$  に切り替えた場合の浮上対象物 5 0 の横ずれ方向の振動を示している。また、図 8 は、このとき、レーザ変位計 5 4 の測定値から求めた  $x \cdot x'$  の変化 ( a ) と、 $x \cdot x'$  の正負に応じて切り替えた電磁石 5 1、5 2 へのバイアス電流 ( b ) とを示している。

20

この振動の振幅が初期の  $5\%$  となるまでの整定時間は  $2.5$  秒であった。これは、図 6 ( a ) に示す振動の整定時間の  $1/25$  である。

図 9 は、図 8 の  $x \cdot x'$  算出の基礎となった  $x$  及び  $x'$  の軌跡を  $x - x'$  直交座標上に表している。図 9 から、電磁石 5 1、5 2 へのバイアス電流を切り替えて、横ずれに対する剛性を制御することにより、変位と速度が座標上で螺旋を描くように 0 に収束していることが分かる。

【0029】

図 10 は、 $x \cdot x'$  の値が正のときに電磁石 5 1、5 2 に印加するバイアス電流  $I$  の大きさを変えて剛性制御を行ったときの横ずれ方向の振動を示している。

30

図 10 ( a ) は、 $I_0 = I = 0.25 \text{ A}$  とした場合であり、整定時間は  $4.9$  秒であった。

図 10 ( b ) は、 $I_0 = I = 0.5 \text{ A}$  とした場合であり、整定時間は  $2.4$  秒であった。

図 10 ( c ) は、 $I_0 = I = 0.75 \text{ A}$  とした場合であり、整定時間は  $0.9$  秒であった。

図 10 ( d ) は、 $I_0 = I = 1.0 \text{ A}$  とした場合であり、整定時間は  $1.0$  秒であった。

このように、バイアス電流を大きくすることで、ある程度まで整定時間を短縮できる。しかし、注目すべきは、 $I_0 = I = 1.0 \text{ A}$  の場合、 $I_0 = I = 0.75 \text{ A}$  のときより整定時間が長くなっている点である。

40

これは、 $I_0 = I = 1.0 \text{ A}$  の場合、剛性の変化が大きく、そのため、変位が小さい状態で行き過ぎ量が大きくなり、それが振動の収束を遅らせていると考えられる。

この点は、 $x \cdot x'$  の値が所定値より小さいとき、 $x \cdot x' > 0$  の状態で印加するバイアス電流を、 $x \cdot x'$  の値に応じて減少させれば回避できる。

【0030】

図 11 には、バイアス電流切替部 4 7 ( 図 1 ) が符号関数  $\text{sgn}$  を用いて生成したバイアス電流 ( a ) と、符号関数  $\text{sgn}$  に代えて、アークタンジェント (  $2 / \quad$  )  $\text{tan}^{-1}$  (  $x \cdot x'$  ) 関数を用いて生成したバイアス電流 ( b ) とを示している。アークタンジェント関数を用いた場合、バイアス電流は、 $x \cdot x'$  の小さい範囲において、 $x \cdot x'$  の値

50



に応じて減少している。これによって、 $x \cdot x'$  の小さい範囲においてチャタリングが起きることを防止している。また、バイアス電流が連続的に変化する範囲は、パラメータによって調整できる。 $\alpha$  が小さい場合には、バイアス電流が連続的に変化する範囲が広く、 $\alpha$  が大きい場合には、バイアス電流が連続的に変化する範囲を狭くすることができる。特に  $\alpha$  が無限大の極限では、符号関数  $\text{sgn}$  と一致ようになる。

図 12 は、電磁石 51、52 に印加するバイアス電流  $I$  を、 $\alpha = 80$ 、 $I_0 = I = 1.0$  A として、アークタンジェント  $(2/\alpha) \tan^{-1}(\alpha x \cdot x')$  関数を用いて生成した場合の横ずれ方向の振動を示している。

この振動の整定時間は 0.95 秒であり、図 10 (d) に示す振動の整定時間より短縮している。

#### 【0031】

また、符号関数  $\text{sgn}$  に代える関数は、アークタンジェントに限定されるものではなく、つぎの条件を満たす関数  $f$  であれば、用いることができる。

- (1)  $x \cdot x' < -X_0$  のとき  $f(x \cdot x') = -I$
- (2)  $-X_0 < x \cdot x' < 0$  のとき  $-I$  から 0 へ単調に増加する
- (3)  $f(0) = 0$
- (4)  $0 < x \cdot x' < X_0$  のとき 0 から  $I$  へ単調に増加する
- (5)  $X_0 < x \cdot x'$  のとき  $f(x \cdot x') = +I$

ここで、 $X_0$  は、バイアス電流が連続的に変化する範囲を調整するパラメータである。

#### 【0032】

次に、浮上対象物の横ずれ方向の変位量を検出する変位センサの変形例について説明する。

図 1 に示すように、浮上対象物 11 の横方向に配置された変位センサ 20 が邪魔になる場合がある。

図 13 には、電磁石の浮上対象物に対向する側にセンシングコイル 201 を配置して浮上対象物の横ずれ方向の振動を検出する構成を示している。

センシングコイル 201 は、コイルを通過する磁束が変化すると、誘導起電力が発生して誘導電流が流れる。浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位する場合は、コイルの通過磁束が減少し、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位する場合は、コイルの通過磁束が増加する。そのため、 $x \cdot x' > 0$  の状態と  $x \cdot x' < 0$  の状態とで誘導起電力の向きが逆になり、誘導電流の方向から  $x \cdot x' > 0$  か  $x \cdot x' < 0$  かを識別することができる。

#### 【0033】

また、図 14 には、電磁石を力センサ 202 で支持し、力センサ 202 の検出信号から浮上対象物の横ずれ方向の振動を検出する構成を示している。

浮上対象物が振動の中心から離れる方向に変位する場合は、力センサ 202 の検出信号が減少傾向を示し、浮上対象物が振動の中心に戻る方向に変位する場合は、力センサ 202 の検出信号が増加傾向を示す。そのため、力センサ 202 の検出信号から  $x \cdot x' > 0$  の状態か  $x \cdot x' < 0$  の状態かを識別することができる。

このように、図 13 や図 14 の構成を採用することにより、磁気浮上装置の側方の変位センサを取り除くことができる。

#### 【0034】

(第 2 の実施形態)

図 15 は、本発明の第 2 の実施形態に係る反発型の磁気浮上装置を示している。

この装置は、横方向 ( $z$  方向) に対向して配置された一対の永久磁石 150、160 と、永久磁石 150 を保持した状態で  $z$  方向に移動可能な磁石保持部 151 と、永久磁石 160 を保持した状態で  $z$  方向に移動可能な磁石保持部 161 と、永久磁石 150 に反発する永久磁石 711、712 と、永久磁石 160 に反発する永久磁石 721、722 と、内壁に永久磁石 711、712 及び永久磁石 721、722 が固定された浮上対象物 170 と、磁石保持部 151 及び磁石保持部 161 の  $z$  方向の移動位置を制御する制御機構

10

20

30

40

50

80とを備えている。

永久磁石150は、磁石保持部151の軸512に固定された円筒状の1つの永久磁石として示しているが、軸512を中心に上下に対称に配置された複数の永久磁石で構成しても良い。永久磁石160も同様である。

永久磁石711、712は、浮上対象物170の円筒状の内壁に固定された円筒状の1つの永久磁石であっても良いし、浮上対象物170の内壁に、上下に対称に配置された複数の永久磁石であっても良い。永久磁石721、722も同様である。

いずれにしろ、浮上対象物170の永久磁石の711の部分と712の部分が永久磁石150に対して相反する方向に反発し、また、浮上対象物170の永久磁石の721の部分と722の部分が永久磁石160に対して相反する方向に反発し、それにより、浮上対象物170が永久磁石150、160に非接触支持されれば良い。

10

#### 【0035】

制御機構80は、浮上対象物170のz方向の変位を検出する変位センサ（不図示）から変位信号（z）が入力すると、PID制御によりz方向の変位を解消するための磁石保持部151及び磁石保持部152のz方向移動量を算出するPID制御部81と、浮上対象物170のx方向の振動に伴うx方向変位を検出する変位センサ（不図示）から変位信号（x）が入力すると、 $x \cdot x' > 0$ の場合にz方向移動量としてzを出力し、 $x \cdot x' < 0$ の場合にz方向移動量として $-z$ を出力する振動抑制移動量切替部87と、振動抑制移動量切替部87から出力されたz方向移動量の符号を反転する反転部82と、PID制御部81及び振動抑制移動量切替部87から出力されたz方向移動量を加算する加算部83と、PID制御部81及び反転部82から出力されたz方向移動量を加算する加算部84と、加算部83から出力されたz方向移動量だけ磁石保持部151をz方向に移動する駆動部85と、加算部84から出力されたz方向移動量だけ磁石保持部161をz方向に移動する駆動部86と、を備えている。

20

#### 【0036】

この装置では、浮上対象物170がz方向に変位すると、その変位を打ち消すように、磁石保持部151及び永久磁石150と、磁石保持部152及び永久磁石160とがz方向を同じ向きに同一距離だけ移動する。浮上対象物170は、このフィードバック制御により、z方向には安定的に非接触支持される。

しかし、一对の永久磁石150、160の配列方向に直交するx方向には、能動的な制御が働かないため、x方向の振動（横ずれ方向の振動）は減衰し難い。

30

#### 【0037】

この横ずれ方向の振動を減衰するため、 $x \cdot x'$ の正負に応じたz方向移動量が振動抑制移動量切替部87及び反転部82から出力される。振動抑制移動量切替部87及び反転部82から出力されるz方向移動量は、磁石保持部151と磁石保持部152との対称的な移動を規定するものであるから、一对の永久磁石150、160は、z方向を反対向きに同一距離だけ移動する。この永久磁石150、160の対称的な動きは、浮上対象物170のz方向のバランスを乱さない。

#### 【0038】

図16(a)は、 $x \cdot x' > 0$ の場合の永久磁石150、160と浮上対象物170との位置関係を示し、図16(b)は、 $x \cdot x' < 0$ の場合の永久磁石150、160と浮上対象物170との位置関係を示している。

40

図16(a)の状態では、永久磁石150、160と、浮上対象物170の永久磁石とが正対しており、それらの間に強い反発力が働いている。そのため、x方向の変位（横ずれ）に対する剛性が高い。一方、図16(b)の状態では、永久磁石150、160と、浮上対象物170の永久磁石とが正対しておらず、それらの間の反発力は弱い。そのため、横ずれに対する剛性が低い。

このように、 $x \cdot x' > 0$ の状態のとき、剛性を強く設定し、 $x \cdot x' < 0$ の状態のとき、剛性を弱く設定することにより、第1の実施形態と同様に、横ずれ方向の振動は、急速に収束する。

50

## 【産業上の利用可能性】

## 【0039】

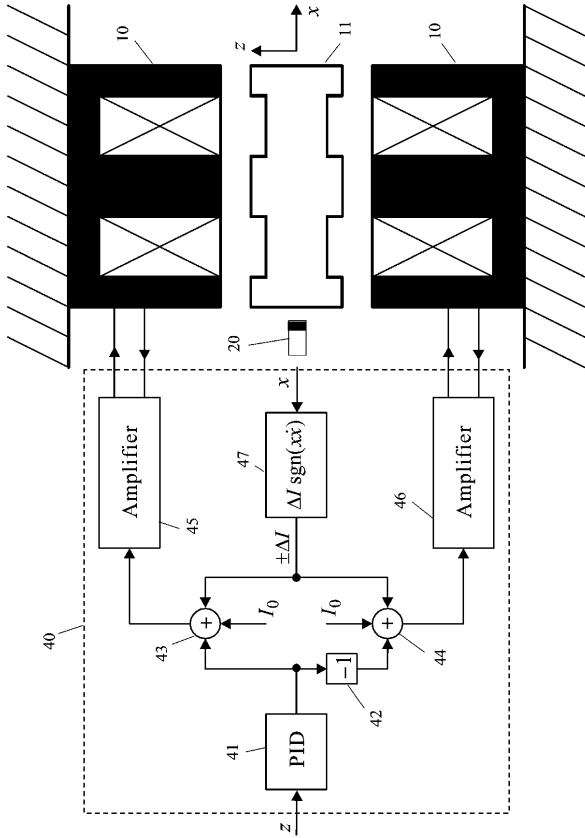
本発明の磁気浮上装置は、浮上対象物の安定的な非接触支持が可能であって、小型に、且つ、低コストで構成できる、と言う利点を有しており、ターボ分子ポンプやクリーンルームでの搬送装置、ジャイロセンサなど、吸引型や反発型の磁気浮上系を備える装置に広く利用することができる。

## 【符号の説明】

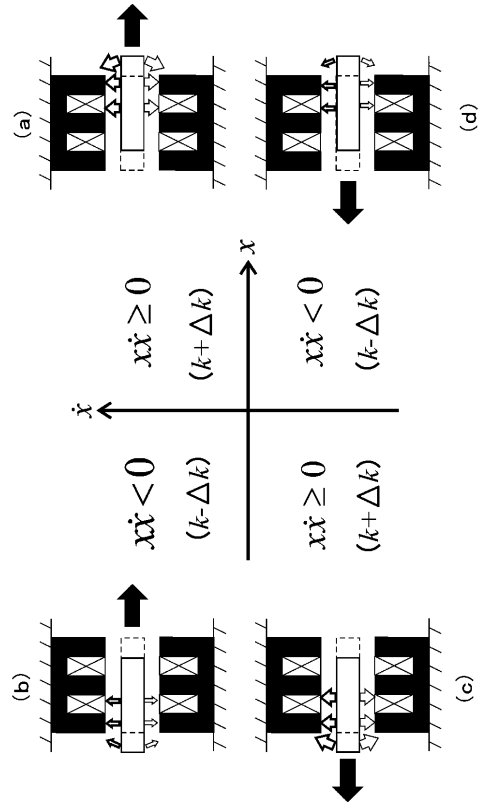
## 【0040】

10	電磁石	
11	強磁性体	10
12	電磁石	
20	変位センサ	
40	制御機構	
41	PID制御部	
42	反転部	
43	加算部	
44	加算部	
45	増幅器	
46	増幅器	
47	バイアス電流切替部	20
50	浮上対象物	
51	電磁石	
52	電磁石	
53	ボイスコイルモータ	
54	レーザ変位計	
55	板バネ	
80	制御機構	
81	PID制御部	
82	反転部	
83	加算部	30
84	加算部	
85	駆動部	
86	駆動部	
87	振動抑制移動量切替部	
150	永久磁石	
151	磁石保持部	
160	永久磁石	
161	磁石保持部	
170	浮上対象物	
201	センシングコイル	40
202	力センサ	
711	永久磁石	
712	永久磁石	

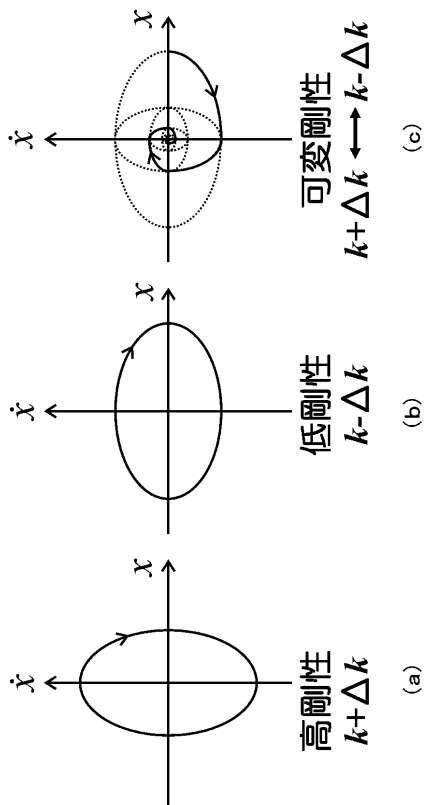
【 図 1 】



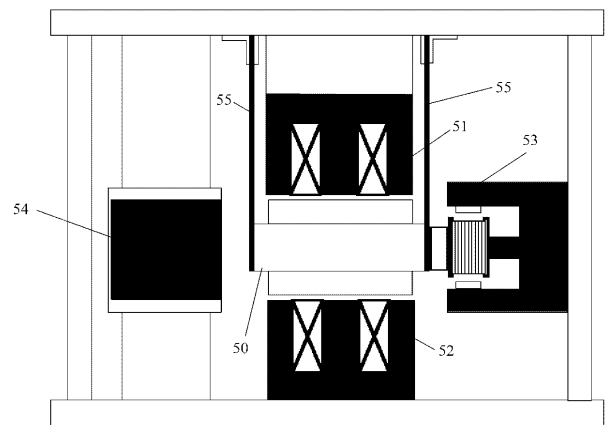
【 図 2 】



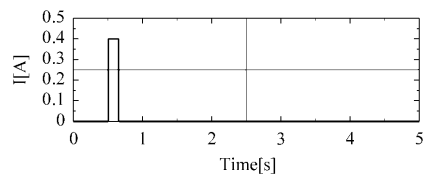
【 図 3 】



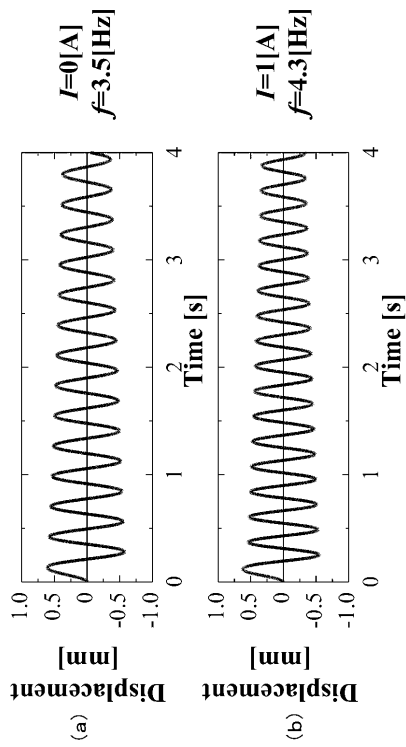
【 図 4 】



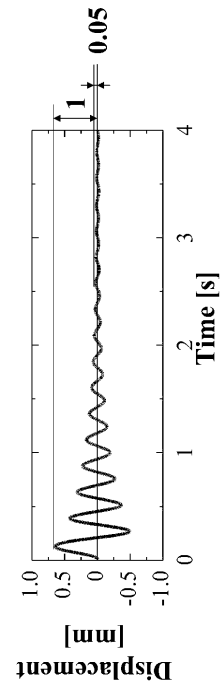
【 図 5 】



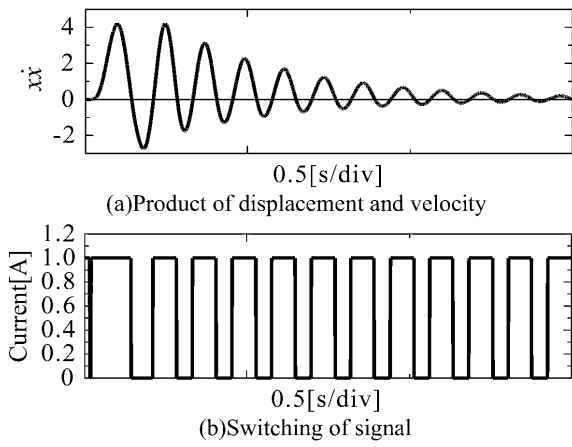
【 図 6 】



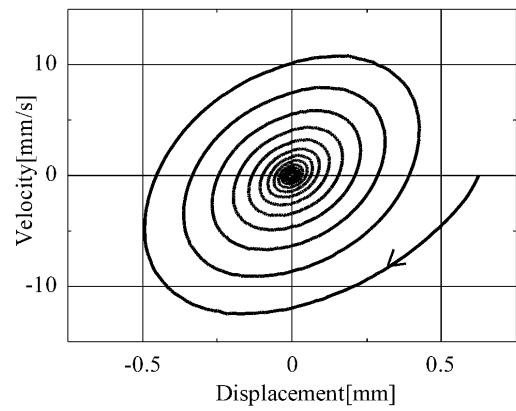
【 図 7 】



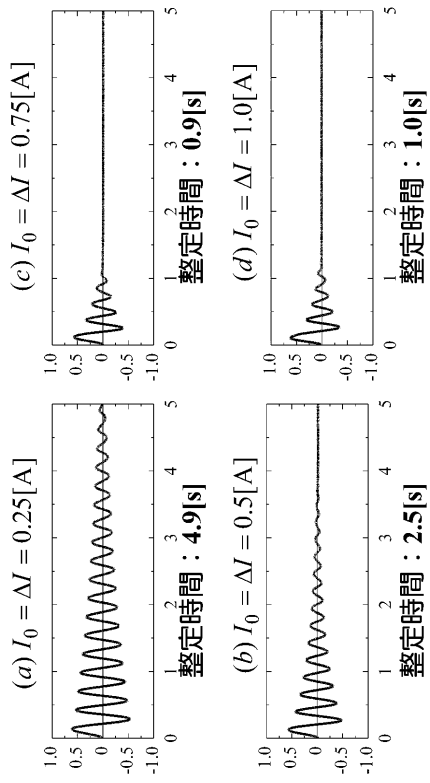
【 図 8 】



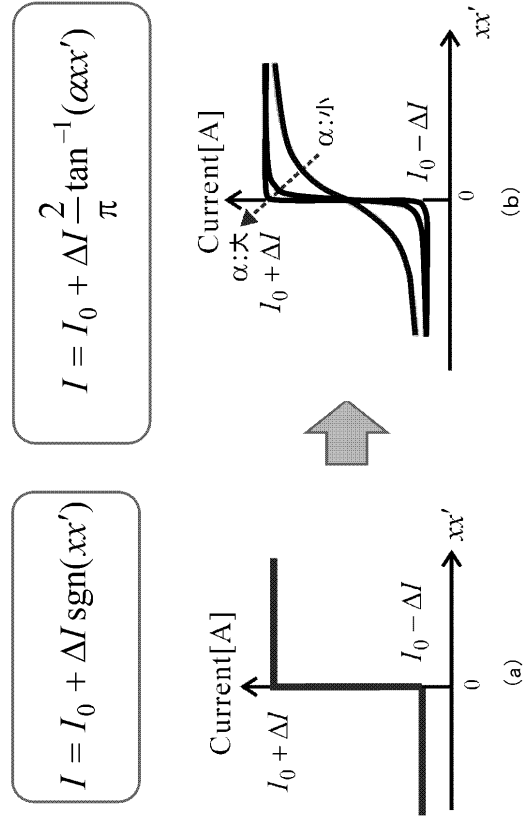
【 図 9 】



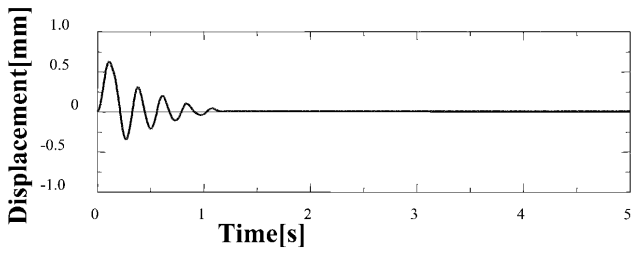
【 図 1 0 】



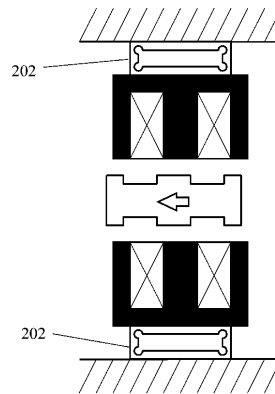
【 図 1 1 】



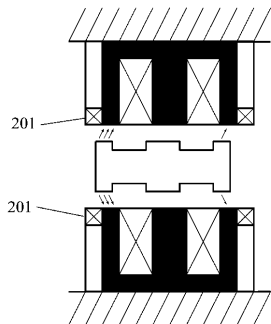
【 図 1 2 】



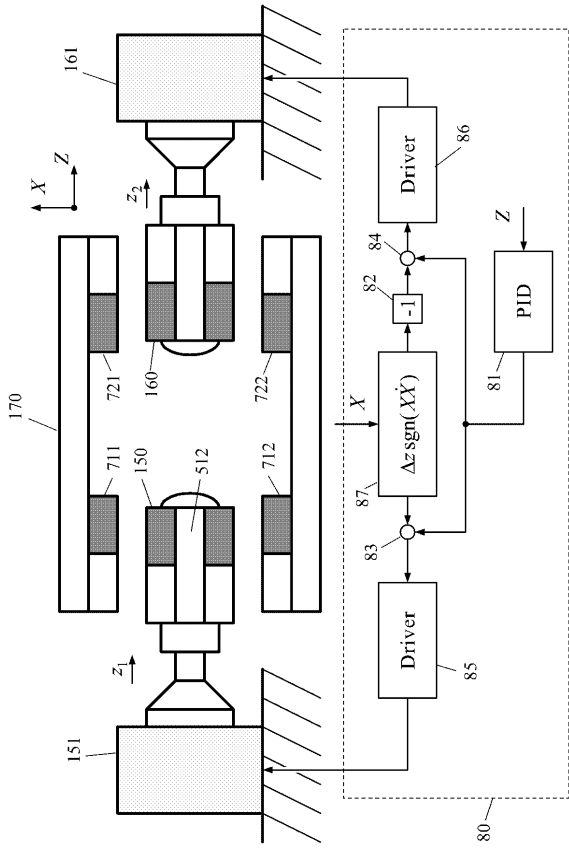
【 図 1 4 】



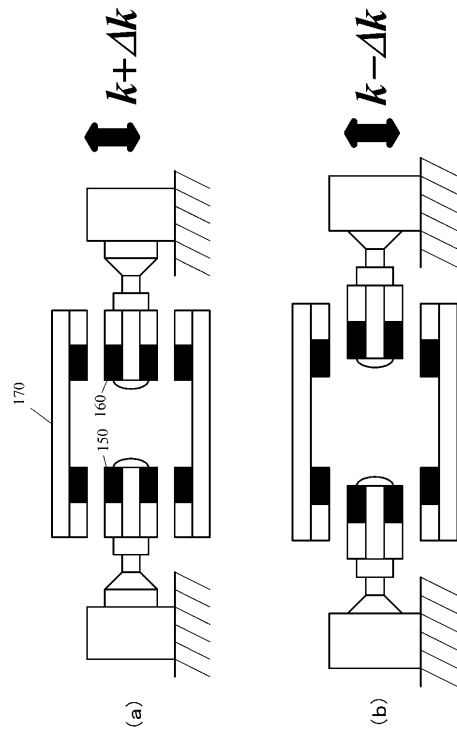
【 図 1 3 】



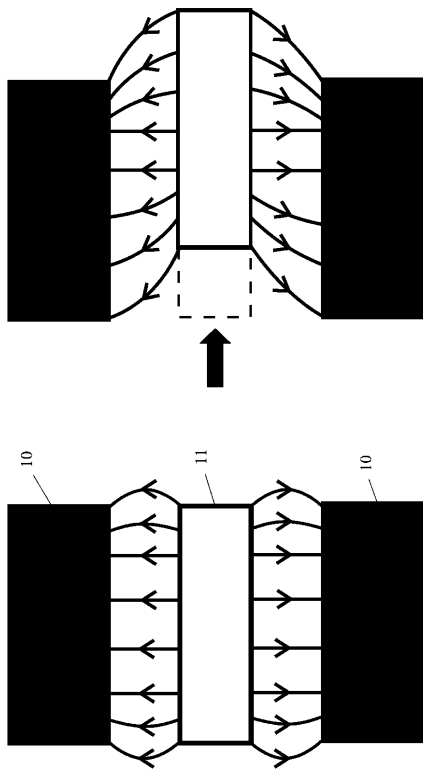
【 図 1 5 】



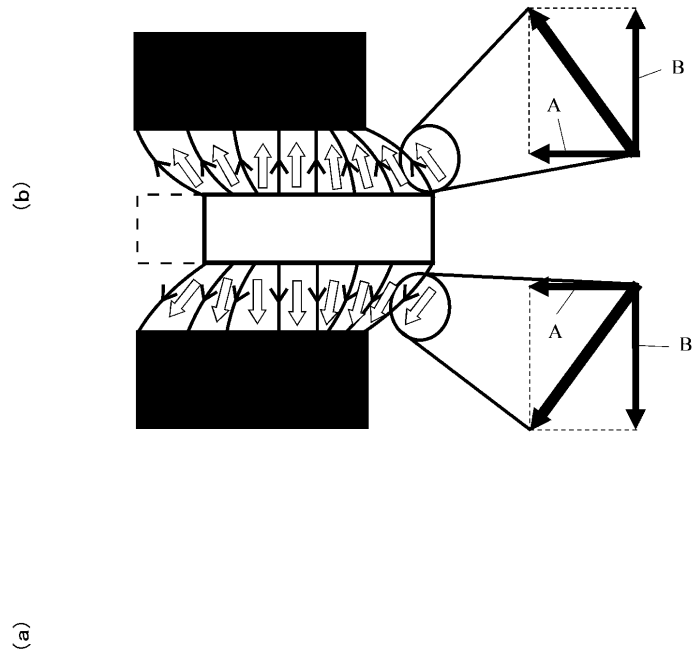
【 図 1 6 】



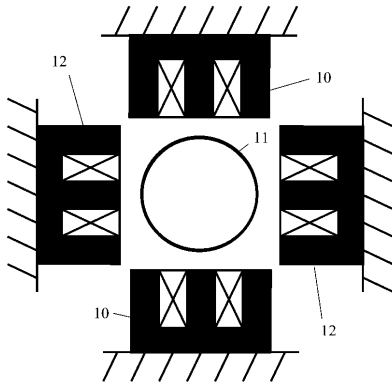
【 図 1 7 】



【 図 1 8 】



【 図 19 】





## 【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International application No. PCT/JP2015/055039
<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> H02N15/00(2006.01)i  According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H02N15/00  Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2015 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2015 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2015  Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2011-190837 A (Kochi University of Technology), 29 September 2011 (29.09.2011), paragraphs [0022] to [0035]; fig. 1 to 10 (Family: none)	1-11
A	JP 11-218130 A (Tadashi FUKAO), 10 August 1999 (10.08.1999), claims; paragraphs [0014] to [0041]; fig. 1 to 7 (Family: none)	1-11
A	JP 61-202406 A (Levitron International Ltd.), 08 September 1986 (08.09.1986), entire text; all drawings (Family: none)	1-11
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 14 May 2015 (14.05.15)		Date of mailing of the international search report 26 May 2015 (26.05.15)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2015/055039

**C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Microfilm of the specification and drawings annexed to the request of Japanese Utility Model Application No. 53468/1990 (Laid-open No. 12006/1992) (Toshiba Corp.), 31 January 1992 (31.01.1992), entire text; all drawings (Family: none)	1-11
A	JP 62-201713 A (Shinko Electric Co., Ltd.), 05 September 1987 (05.09.1987), entire text; all drawings & EP 0239231 A2 & DE 3786817 T2	1-11

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 1 5 / 0 5 5 0 3 9	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02N15/00(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H02N15/00			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2015年 日本国実用新案登録公報 1996-2015年 日本国登録実用新案公報 1994-2015年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
A	JP 2011-190837 A (公立大学法人高知工科大学) 2011.09.29, 段落 [0022]-[0035], 第 1-10 図 (ファミリーなし)	1-11	
A	JP 11-218130 A (深尾 正) 1999.08.10, 特許請求の範囲, 段落 [0014]-[0041], 第 1-7 図 (ファミリーなし)	1-11	
A	JP 61-202406 A (レピトロン・インターナショナル・リミテッド) 1986.09.08, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-11	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。		<input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。	
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願		の日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 14.05.2015		国際調査報告の発送日 26.05.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		特許庁審査官 (権限のある職員) 田村 耕作 電話番号 03-3581-1101 内線 3357	3V 9618

国際調査報告

国際出願番号 PCT/J P 2015/055039

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	日本国実用新案登録出願 2-53468 号(日本国実用新案登録出願公開 4-12006 号)の願書に添付した明細書及び図面の内容を撮影したマイクロフィルム (株式会社東芝) 1992.01.31, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-11
A	JP 62-201713 A (神鋼電機株式会社) 1987.09.05, 全文, 全図 & EP 0239231 A2 & DE 3786817 T2	1-11

## フロントページの続き

(81)指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), EP(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。