

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2007 年 1 月 11 日 (11.01.2007)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2007/004656 A1

- (51) 国際特許分類:
F16C 32/04 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2006/313340
- (22) 国際出願日: 2006 年 7 月 4 日 (04.07.2006)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願2005-196635 2005 年 7 月 5 日 (05.07.2005) JP
特願2005-196636 2005 年 7 月 5 日 (05.07.2005) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社荏原製作所 (EBARA CORPORATION) [JP/JP]; 〒1448510 東京都大田区羽田旭町 1 1 - 1 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 荻田 敏光 (BARADA, Toshimitsu) [JP/JP]; 〒1448510 東京都

大田区羽田旭町 1 1 - 1 株式会社荏原製作所内
Tokyo (JP). 吉田 俊哉 (YOSHIDA, Toshiya) [JP/JP]; 〒3500164 埼玉県比企郡川島町吹塚 2 0 3 Saitama (JP).

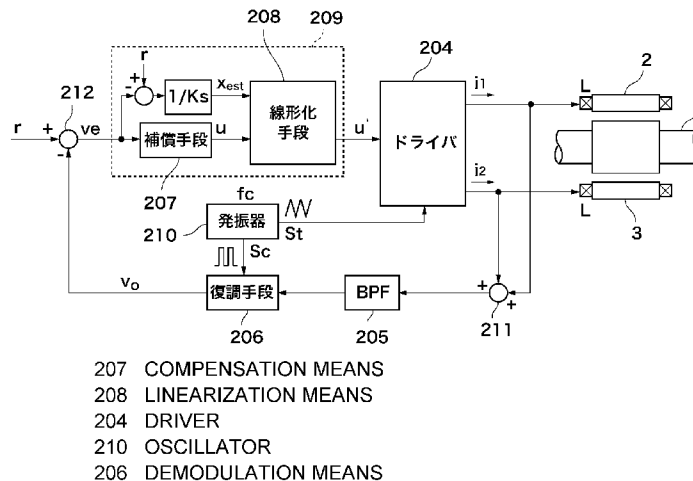
(74) 代理人: 宮川 貞二, 外 (MIYAGAWA, Teiji et al.); 〒1600005 東京都新宿区愛住町 1 9 番地 富士ビル 6 階 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: MAGNETIC BEARING DEVICE AND MAGNETIC BEARING METHOD

(54) 発明の名称: 磁気軸受装置および磁気軸受方法



(57) Abstract: There are provided a magnetic bearing device and a magnetic bearing method capable of saving energy by eliminating bias current for linearization of the relationship between the magnetic force and the excitation current of an electromagnet. The magnetic bearing device supports a floating rotor (1) as a magnetic body at a predetermined position by a magnetic force of electromagnets (2, 3) in such a manner that the rotor (1) can rotate. The electromagnets (2, 3) oppose each other to sandwich the rotor (1). A driver (204) is of the PWM (pulse width modulation) type for controlling the excitation current of the electromagnets (2, 3) by modulating the pulse width of voltage driven by a predetermined carrier frequency f_c . The driver (204) includes a resonant circuit electrically resonating with a frequency equivalent to the carrier frequency f_c . When excitation current is fed to one of the electromagnets (2, 3) arranged to oppose each other, control is performed to make the excitation current of the other electromagnet is DC zero and voltage is applied via the resonant circuit to the electromagnet whose excitation current is DC zero.

(57) 要約: 電磁石の磁気力と励磁電流の関係を線形化するためのバイアス電流を無くし省エネルギー化した磁気軸受装置を提供する。磁性体であるロータ 1 を電磁石 2、3 の磁気力により所定の位置に回転自在に浮上支持する磁気軸受装置において、電磁石 2、3 はロータ 1 を挟んで対向して配置した構成であり、ドライバ 204 は所定のキャリア周波数 f_c で駆動される電圧のパルス幅を変調するこ

[続葉有]

WO 2007/004656 A1



(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告書
- 請求の範囲の補正の期限前の公開であり、補正書受領の際には再公開される。

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

とで電磁石2、3の励磁電流を制御するPWM（パルス幅変調）方式のドライバであり、キャリア周波数 f_c と同等な周波数で電氣的に共振する共振回路を備え、対向して配置された電磁石2、3のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流が直流的にゼロになるように制御し、該励磁電流を直流的にゼロにした方の電磁石は前記共振回路を介して電圧が印加されるように構成した磁気軸受装置および磁気軸受方法。

明 細 書

磁気軸受装置および磁気軸受方法

技術分野

[0001] 本発明は、磁性体の変位を該磁性体を浮上支持する電磁石のインピーダンス変化により検出し、該磁性体が所定の位置に浮上支持されるように該電磁石の磁気力を制御する磁気軸受に関し、特に省エネルギー化に好適な磁気軸受装置および磁気軸受方法に関するものである。

[0002] また、本発明は、特に磁性体の変位を電磁石のインピーダンス変化により精度良く検出できる変位検出手段を備えた磁気軸受装置および磁気軸受方法に関するものである。

背景技術

[0003] 従来より、ターボ分子ポンプ等、回転体を高速回転させる必要のある回転機械には、回転体を磁気力により非接触支持する磁気軸受装置が広く用いられている。磁気軸受装置は、軸受が支持する回転体の回転抵抗を小さくすることができ、磨耗粉が発生せず、軸受の磨耗に伴うメンテナンスが不要であり、軸受の潤滑剤によるコンタミネーションの問題が生じない等の特徴がある。

[0004] 近年、磁気軸受装置は更なるコストダウン、省スペース化、高速回転化等が求められるようになり、変位センサを必要としないセンサレス磁気軸受の技術が採用されるようになった。センサレス磁気軸受では、変位センサの代わりに回転体の変位を検出する方法の一つとして、電磁石のインピーダンス変化が利用されている。

[0005] 電磁石のインピーダンスは、大部分が電磁石のインダクタンス要素からなり、このインダクタンス変化を回転体の変位検出に利用している。電磁石のインダクタンスは、主に、電磁石コアの材質、形状、巻き線の巻き数、回転体と電磁石間のギャップによって決まる。電磁石コアの材質、形状、巻き線の巻き数に関しては、電磁石の設計段階で決まり、電磁石のインダクタンス変化は、回転体と電磁石間のギャップ変化によって生じる。つまり、回転体の変位によって電磁石のインダクタンスが変化し、この変化を捉えることで、回転体の変位検出を実現している。そして、得られた変位信号を

フィードバックすることで、回転体を所定の位置に非接触にて浮上支持している。

[0006] また、一般的に、電磁石の励磁電流と回転体に及ぼす磁気力は非線形の関係が成り立っている。このため、従来は回転体を挟むように電磁石を対向して配置し、該対向するそれぞれの電磁石に所定の直流バイアス電流を流すことで、電磁石の励磁電流と回転体に及ぼす磁気力の関係を線形化し、簡明な線形システムとして、回転体を安定に浮上支持していた(例えば特許文献1)。

[0007] また従来の方式では次のような問題もあった。実際には電磁石電流が変化すると、電磁石コアの磁気特性が変化してしまう。このため、回転体の変位しなくても電磁石のインダクタンスが変化してしまう。このため電磁石電流によるインダクタンスの変化による変位検出には変位検出誤差を生む。一般に、電磁石によって回転体に外力を加える際、低周波数の力では回転体の変位量は大きく、高周波数の力では回転体の変位量は小さい。従って、低周波数におけるインダクタンスの変化は、電磁石電流による変化よりも回転体の変位による変化の方が大きく、電磁石電流による変位検出誤差の影響は少ない。しかし、高周波数におけるインダクタンスの変化は、その逆で、電磁石電流による変化の方が大きく、変位検出誤差の影響が大きく現れる。このため高周波数域における磁気軸受制御が不安定になり易かった。

[0008] 上記のように高周波数域における磁気軸受制御が不安定になり易い対策のため、従来は、特許文献1に示すように、電磁石電流を検出して予想される変位検出誤差分を、電磁石のインピーダンス変化によって検出した変位検出信号から、除去する方法が採用されている(例えば特許文献1)。

特許文献1:特開2004-132537号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0009] しかしながら、上記のように電磁石に所定の直流バイアス電流を流すことで、電磁石の励磁電流と回転体に及ぼす磁気力の関係を線形化することは、電磁石に前述の直流バイアス電流を流すことにより、電磁石コイルに常に銅損が発生し、磁気軸受に余分な発熱を生み、エネルギー消費増大の原因となっている。

[0010] また、従来のセンサレス磁気軸受では、電磁石のインダクタンス変化を捉えることで

回転体の変位を検出しているが、インダクタンス変化を捉えるために、電磁石に印加されるPWM電圧によって発生するリップル電流の振幅を検出している。このようにPWM電圧を発生させるドライバは、ONの時は、電磁石にPWM電源の電圧が印加され、OFFの時は、フライホイールダイオードを通して電磁石のONの時に蓄えられたエネルギーがPWM電源に返還するよう動作をする。このドライバは、フライホイールダイオードを使用しているため、電磁石には一方方向の電流しか流す能力がなく、電磁石の電流がゼロ近辺においては、リップル電流が発生しなくなり、回転体の変位検出が不可能となる。このため、従来は、常にゼロより大きい電流を対向する電磁石に流さなければならなかった。しかし通常、磁気軸受においては、磁気力と電流を線形化させるバイアス電流を流しているため、結果的には問題とならないが、発熱や消費電力を改善する電磁石にバイアス電流を流さない方式、即ちゼロバイアス磁気軸受ではセンサレス磁気軸受は実現できなかった。

[0011] 本発明は上述の点に鑑みてなされたもので、電磁石の磁気力と励磁電流の関係を線形化するためのバイアス電流を無くし省エネルギー化した、センサレスの磁気軸受装置および磁気軸受方法を提供することを目的とする。

[0012] また、上記特許文献1に記載されているような従来の方法では、変位検出誤差分を予想するために、変位検出手段の周波数特性と同等の特性のフィルタを用意する必要があった。しかしながら、変位検出手段の周波数特性は、高次数であり、変位検出手段の周波数特性と同等の特性のフィルタを実現するのが困難であった。このため、特に高周波数域における変位検出誤差を精度良く除去することが困難であった。

[0013] 本発明は上述の点に鑑みてなされたもので上記問題点を除去し、磁性体の変位を高周波数域まで精度良く検出し、高周波数域まで安定した磁気軸受制御が実現できる磁気軸受装置および磁気軸受方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 上記課題を解決するため本発明の一態様(1)は、磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と、該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段の検出信号に基いて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償手段と、該補償手段の出力信号に基づいて前記電磁石に

励磁電流を流すドライバとを備え、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置において、前記電磁石は前記磁性体を挟んで対向して配置した構成であり、前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動される電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達手段を備え、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達手段により直流的にゼロにすることを特徴とする。

[0015] 本発明の一態様(2)は、前記磁気軸受装置において、前記交流電流伝達手段は、好ましくは、コイルとコンデンサを直列に接続し、前記キャリア周波数と同等な周波数で電氣的に共振する共振手段である。

[0016] 本発明の一態様(3)は、前記磁気軸受装置において、好ましくは、前記磁性体を挟んで対向して配置された前記電磁石のそれぞれに流れる励磁電流を検出し、該検出信号の差信号が前記変位検出手段の伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段と、所定の増幅度で増幅する増幅器とを通して得られた信号を、前記変位検出手段で得られた変位検出信号に減算することで、該変位検出信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する。

[0017] 本発明の一態様(4)は、前記磁気軸受装置において、好ましくは、前記補償手段が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタと、所定の増幅度で増幅する増幅器とを通して得られた信号を、前記対向して配置した電磁石のうち、励磁電流を流す方の電磁石に前記パルス電圧を印加して発生したリップル電流の大きさと、一方の励磁電流を直流的にゼロにした電磁石に前記共振手段を介して電圧を印加することにより発生するリップル電流の大きさとを比較した信号に減算することで、前記変位検出手段によって検出された信号中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する。

[0018] 本発明の一態様(5)は、前記磁気軸受装置において、好ましくは、前記電磁石の磁性体に及ぼす磁気力と励磁電流との非線形な関係を線形化するための線形化手段を備える。

[0019] 本発明の一態様(6)は、前記磁気軸受装置において、好ましくは、前記補償手段、

又は前記線形化手段、又は前記補償手段と前記線形化手段は、デジタル演算処理によって出力を得るように構成されている。

[0020] 上記課題を解決するため、本発明の一態様(7)は、磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と、該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と、該変位検出手段の検出出力信号に基いて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償手段と、前記補償手段の出力信号に基いて、前記電磁石に励磁電流を流すドライバとを備え、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置において、前記ドライバは、所定のキャリア周波数で駆動される電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石に流す電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記変位検出手段は、前記ドライバが前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出手段を有し、前記補償手段の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段と、所定の増幅度で増幅する増幅手段とを通過して得られた信号を、前記リップル検出手段で得られた信号に減算することで、前記変位検出手段によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去するように構成したことを特徴とする。

[0021] 本発明の一態様(8)は、前記磁気軸受装置において、前記フィルタ手段は、好ましくは、ローパスフィルタである。

[0022] 本発明の一態様(9)は、前記磁気軸受装置において、前記リップル検出手段は、好ましくは、前記リップル電流の振幅を検出するためのリップル電流振幅検出巻き線を備えるトランスを有し、該トランスの電磁誘導作用によって所定の割合で前記リップルの振幅を増幅又は減衰して、電圧信号又は電流信号として出力する。

[0023] 本発明の一態様(10)は、前記磁気軸受装置において、前記トランスに、別途巻き線を設け、該巻き線に前記補償手段の出力信号が、前記フィルタ手段と、前記増幅手段とを通過して得られた信号を前記ドライバに用いる所定のキャリア周波数と同周波数でAM変調し、該AM変調された信号を入力し、該信号を電磁誘導作用により前記リップル電流振幅検出巻き線で検出した信号より減算するように構成する。

発明の効果

- [0024] 本発明の前記一態様(1)によれば、電磁石にバイアス電流を流さないで、バイアス電流を流すための回路等を必要とせず、コストダウンが可能になると共に、電磁石コイルにおける余分なエネルギーの消費がないので、省エネルギー化した磁気軸受装置を提供できる。また、磁性体に加わる磁気力を発生させる電磁石は、対向する電磁石のうちどちらか一方であるので、磁性体に加わる磁気力が推定し易くなる。また、励磁電流も、対向する電磁石のうちどちらか一方しか流さないで、省エネルギー化できる。更に、PWM方式ドライバのキャリア周波数と同等の周波数で振動する電圧が印加されることでリップル電流が発生し、電磁石の励磁電流が直流的にゼロであっても、このリップル電流から電磁石のインダクタンス変化を検出でき、このインダクタンス変化から磁性体の変位検出が可能となる。
- [0025] また本発明の前記一態様(2)によれば、交流電流伝達手段はコイルとコンデンサを直列に接続した構成であるので、市販のコイルとコンデンサで容易に実現できる。
- [0026] また本発明の前記一態様(3)によれば、電磁石の励磁電流変化による磁気特性変化、言い換えれば励磁電流による電磁石のインダクタンスの変化の影響によって生じる変位検出誤差を、電磁石の励磁電流から推定し、変位検出信号からのこの誤差分を除去することができるから、精度のよい変位検出が可能となる。
- [0027] また本発明の前記一態様(4)によれば、電磁石の励磁電流変化による磁気特性変化、言い換えれば励磁電流による電磁石のインダクタンスの変化の影響によって生じる変位検出誤差を、補償手段の出力信号から推定し、変位検出信号からのこの誤差分を除去することができるから、精度のよい変位検出が可能となる。
- [0028] また本発明の前記一態様(5)によれば、電磁石の磁性体に及ぼす磁気力と励磁電流との非線形な関係を線形化するための線形化手段を備えたので、変位検出手段で得られた変位信号に対して、磁性体に加わる磁気力が線形となるような電流指令をドライバに指示するから、磁気軸受装置を簡単な線形システムとして構成できる。
- [0029] また本発明の前記一態様(6)によれば、補償手段、又は線形化手段、又は補償手段と線形化手段は、デジタル演算処理によって出力を得るように構成されているので、DSP(Digital Signal Processor)等のデジタル演算手段によって、補償手

段、線形化手段の特性をプログラミングすることで、面倒な回路構成や半田作業を必要とせず容易に実現でき、また特性の変更も可能となる。

[0030] 本発明の前記一態様(7)によれば、補償手段の出力信号が、ドライバへ電流を流すように指示してから電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段と、所定の増幅度で増幅する増幅手段とを通過して得られた信号を、リップル検出手段で得られた信号に減算することで、変位検出手段によって検出された信号の中に含まれる回転体の変位情報以外の信号を除去するように構成したので、ドライバから電磁石間の伝達特性は、低次数の特性であり、これと同等の伝達特性をもつフィルタ手段は容易に実現するので、高周波数域までの電磁石電流による変位検出誤差を精度良く除去でき、高周波数域まで安定した磁気軸受制御が実現できる磁気軸受装置を提供できる。

[0031] また本発明の前記一態様(8)によれば、フィルタ手段を電磁石のインダクタンス特性(ドライバから電磁石間の周波数特性)が基本的にローパスフィルタ特性となることから、ローパスフィルタで構成するため、高周波域までの電磁石電流による変位検出誤差を除去することができる。言い換えれば、電磁石のインダクタンス特性(ドライバから電磁石間の周波数特性)が基本的に低次のローパスフィルタ特性となることから、フィルタ手段をこのローパスフィルタ特性と同等となるよう容易に構成できるので、高周波域までの電磁石電流による変位検出誤差を除去することができる。

[0032] また本発明の前記一態様(9)によれば、リップル検出手段にトランスを用いるので、高圧のドライバであっても、トランス絶縁することで、電磁石電流に含まれる変位情報であるリップル電流の振幅信号をそのまま低電圧回路に引き渡すことができる。また、トランスの出力側の巻き線端子間にコンデンサ又はコンデンサと抵抗器を並列に接続することで、トランスの出力側巻き線とコンデンサによる共振回路を構成することができ、変位情報が含まれる周波数以外を除去するフィルタを構成できる。

[0033] また本発明の前記一態様(10)によれば、トランスに、別途巻き線を設け、該巻き線に補償手段の出力信号が、フィルタ手段と、増幅手段とを通過して得られた信号をドライバに用いる所定のキャリア周波数と同周波数でAM変調し、該AM変調された信号を入力し、該信号を電磁誘導作用によりリップル電流振幅検出巻き線で検出した

信号より減算するように構成したので、予想された変位検出誤差を変位検出信号にトランス上で減算でき、新たな演算回路等の減算手段が必要なくなり、コストを削減できる。

[0034] この出願は、日本国で2005年7月5日に出願された特願2005-196635および日本国で2005年7月5日に出願された特願2005-196636に基づいており、その内容は本出願の内容として、その一部を形成する。

また、本発明は以下の詳細な説明によりさらに完全に理解できるであろう。本発明のさらなる応用範囲は、以下の詳細な説明により明らかとなろう。しかしながら、詳細な説明及び特定の実例は、本発明の望ましい実施の形態であり、説明の目的のためにのみ記載されているものである。この詳細な説明から、種々の変更、改変が、本発明の精神と範囲内で、当業者にとって明らかであるからである。

出願人は、記載された実施の形態のいずれをも公衆に献上する意図はなく、開示された改変、代替案のうち、特許請求の範囲内に文言上含まれないかもしれないものも、均等論下での発明の一部とする。

本明細書あるいは請求の範囲の記載において、名詞及び同様な指示語の使用は、特に指示されない限り、または文脈によって明瞭に否定されない限り、単数および複数の両方を含むものと解釈すべきである。本明細書中で提供されたいずれの例示または例示的な用語(例えば、「等」)の使用も、単に本発明を説明し易くするという意図であるに過ぎず、特に請求の範囲に記載しない限り本発明の範囲に制限を加えるものではない。

図面の簡単な説明

[0035] [図1]図1は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の構成例を示すブロック図である。

[図2]図2は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置のドライバの電流供給部の構成を示す図である。

[図3]図3は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置のドライバの制御部の構成を示す図である。

[図4]図4は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の各部の信号を示す

図である。

[図5]図5は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置のドライバの制御部の各スイッチング素子のスイッチングタイミングモードを示す図である。

[図6]図6は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の動作を説明するための図である。

[図7]図7は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の動作を説明するための図である。

[図8]図8は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の動作を説明するための図である。

[図9]図9は、本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の動作を説明するための図である。

[図10]図10は、本発明の第二の実施の形態に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。

[図11]図11は、本磁気軸受装置の各部信号波形を示す図である。

[図12]図12は、本磁気軸受装置の電磁石のインダクタンスと励磁電流の関係を示す図である。

[図13]図13は、制御電流による検出誤差を除去する第1の構成を示す図である。

[図14]図14は、制御電流による検出誤差を除去する第2の構成を示す図である。

[図15]図15は、制御電流による検出誤差を除去する第3の構成を示す図である。

[図16]図16は、制御電流による検出誤差を除去する第4の構成を示す図である。

[図17]図17は、ドライバ108の構成を示したものである。

符号の説明

[0036] 以下詳細な説明で使用した、主要要素の符号を列挙する。

- 1 ロータ
- 2 電磁石
- 3 電磁石
- 204 ドライバ
- 205 バンドパスフィルタ(BPF)

- 206 復調手段
- 207 補償手段
- 208 線形化手段
- 209 デジタル演算手段
- 210 発振器
- 211 加算器
- 212 比較器
- 225 共振手段
- 226 PWM電源
- 227 フライホイールダイオード
- 228 フライホイールダイオード
- 229 反転器
- 230 AND演算器
- 231 AND演算器
- 232 増幅器
- 233 コンパレータ
- 234 コンパレータ
- 235 減算器
- 236 比較器
- 237 比較器
- 241 増幅器
- 242 フィルタ
- 243 減算器
- 244 減算器
- 245 減算器
- 246 フィルタ
- 247 増幅器
- 248 AM変調器

- 249 加算・減算器
- 104 リップル検出手段
- 105 バンドパスフィルタ(BPF)
- 106 復調手段
- 107 補償手段
- 108 ドライバ
- 109 フィルタ手段
- 110 増幅器
- 111 AM変調器
- 112 発振器
- 113 トランス
- 114 コンデンサ
- 115 抵抗器
- 116 比較器
- 117 変位検出手段
- 121 ローパスフィルタ
- 122 ローパスフィルタ
- 123 PWMレギュレータ
- 124 バイアス電圧電源
- SW₁ スイッチング素子
- SW₂ スイッチング素子
- SW₃ スイッチング素子
- SW₄ スイッチング素子

発明を実施するための最良の形態

[0037] 以下、本発明の第一の実施の形態を図1乃至図9及び図13乃至図16に基づいて説明する。図1は本発明の第一の実施の形態に係る磁気軸受装置の構成例を示すブロック図、図2はドライバの電流供給部の構成を示す図、図3はドライバの制御部の構成を示す図、図4は磁気軸受装置の各部の信号を示す図である。即ち、図4はドラ

イバ204の制御信号 u' に対する磁気軸受装置の各部の信号を示す図であり、図の横軸左手が電磁石2へのデューティ比が大きく励磁電流が大きい場合であって、右手はその逆である。

[0038] 図示のように、本磁気軸受装置は、ロータ1、電磁石2、電磁石3、ドライバ204、バンドパスフィルタ(BPF)205、復調手段206、補償手段207、線形化手段208、デジタル演算手段209、発振器210、加算器211、及び比較器212を備えて構成されている。ロータ1、即ち磁性体からなる回転体を非接触で浮上支持するための対向する1対の電磁石2、3が、該ロータ1を挟むように対向して配置されている。電磁石2、3はロータ1の自由度を支持することができる。通常も複数対の電磁石を用いてロータの軸回り回転方向以外の5自由度を浮上支持するのが好ましいが、簡略化のため1自由度のみについて説明する。また、ロータ1を回転させるためのモータも省略し、磁気軸受部分のみ説明する。尚、前記補償手段207はフィードバック制御システムで周知である、安定な制御を保持するためのループ位相補償手段である。

[0039] ドライバ204は、図2に示すように、スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 、 SW_4 、共振手段225、PWM(パルス幅変調)電源226、フライホイールダイオード227、228から構成されている。図5はドライバ204が備えるスイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 、 SW_4 のスイッチタイミングモードを示す図である。

[0040] ドライバ204は、電磁石2、3に励磁電流を流すためのPWM方式のドライバであり、発振器210によって得られた周波数 f_c をキャリア周波数とするPWM電圧 e_1 、 e_2 を電磁石2、3に印加することによって励磁電流 i_1 、 i_2 を供給している。共振手段225は、コイル L_s とコンデンサ C_s が直列に接続される形で構成され、キャリア周波数 f_c と同等の周波数で共振するよう設定されている。つまり、共振手段225のインピーダンスは、周波数 f_c でおおよそゼロとなる。なお、本磁気軸受装置においては、使用するキャリア周波数 f_c は $f_c = 30\text{kHz}$ を使用するが、キャリア周波数 f_c としては $10\text{kHz} \sim 100\text{kHz}$ を用いてよい。

[0041] ドライバ204は、制御信号 u' に基づいてPWM電圧 e_1 、 e_2 のデューティを制御することで電磁石2、3に制御電流 i_c を流し、所望の磁気力を発生させる。電磁石2、3は、PWM電圧 e_1 、 e_2 が印加されることで、制御電流 i_c に重畳するようにリップル電流 i_r 、 i

r_2 が流れる。言い換えれば、電磁石2, 3には、磁気浮上に直接寄与する制御電流 i_c と、磁気浮上に直接寄与しないが、ロータ1の位置情報を有するリップル電流 i_{r_1} 、 i_{r_2} が含まれた電流が流れる。スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 、 SW_4 は、図5に示す通り、Model-1、Model-2、ModelI-1、ModelI-2の4パターンのスイッチタイミングでON/OFFしている。即ち、Model-1ではスイッチング素子 SW_1 がON、 SW_2 がOFF、 SW_3 がOFF、 SW_4 がONとなり、Model-2ではスイッチング素子 SW_1 がOFF、 SW_2 がOFF、 SW_3 がON、 SW_4 がOFFとなり、ModelI-1ではスイッチング素子 SW_1 がOFF、 SW_2 がON、 SW_3 がON、 SW_4 がOFFとなり、ModelI-2ではスイッチング素子 SW_1 がOFF、 SW_2 がOFF、 SW_3 がOFF、 SW_4 がONとなる。

[0042] 図6乃至図9は図4の時間 $T_1 \sim T_8$ における図1に示すブロック構成の磁気軸受装置の動作を説明するための図である。図6(a)はスイッチタイミングModel-2の時間 T_1 における動作を、図6(b)は時間 T_2 における動作をそれぞれ示す。また、図7(a)はスイッチタイミングModel-1の時間 T_3 における動作を、図7(b)は時間 T_4 における動作をそれぞれ示す。また、図8(a)はスイッチタイミングModelI-1の時間 T_5 における動作を、図8(b)は時間 T_6 における動作をそれぞれ示す。また、図9(a)はスイッチタイミングModelI-2の時間 T_7 における動作を、図9(b)は時間 T_8 における動作をそれぞれ示す。

[0043] スイッチタイミングModel-2の時間 T_1 (励磁電流 i_1 :プラス、励磁電流 i_2 :マイナス、) においては、図6(a)に示すようにスイッチング SW_3 がON、スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_4 がOFFであるから、電磁石2に励磁電流 i_1 が、電磁石3に共振手段225を通過して励磁電流 i_2 が流れる。また、時間 T_2 (励磁電流 i_1 :プラス、励磁電流 i_2 :プラス、 $i_1 > i_2$) においては、電磁石2に励磁電流 i_1 が、電磁石3に共振手段225を通過して励磁電流 i_2 が流れる。

[0044] スイッチタイミングModel-1の時間 T_3 (励磁電流 i_1 :プラス、励磁電流 i_2 :プラス、 $i_1 > i_2$) においては、図7(a)に示すようにスイッチング SW_1 、 SW_4 がON、スイッチング素子 SW_2 、 SW_3 がOFFであるから、電磁石2に励磁電流 i_1 が、電磁石3に共振手段225を通過して励磁電流 i_2 が流れる。また、時間 T_4 (励磁電流 i_1 :プラス、励磁電流 i_2 :マイナス) においては、図7(b)に示すように、電磁石2に励磁電流 i_1 が、電磁石3に共振手

段225を通して励磁電流 i_2 が流れる。

[0045] スイッチタイミングModelI-1の時間 T_5 (i_1 :プラス、 i_2 :プラス、 $i_1 > i_2$)においては、図8(a)に示すようにスイッチング SW_2 、 SW_3 がON、スイッチング素子 SW_1 、 SW_4 がOFFであるから、電磁石3に励磁電流 i_2 が、電磁石2に共振手段225を通して励磁電流 i_1 が流れる。また、時間 T_6 (励磁電流 i_1 :マイナス、励磁電流 i_2 :プラス)においては、図8(b)に示すように、電磁石3に励磁電流 i_2 が、電磁石2に共振手段225を通して励磁電流 i_1 が流れる。

[0046] スイッチタイミングModelI-2の時間 T_7 (励磁電流 i_1 :マイナス、励磁電流 i_2 :プラス)においては、図9(a)に示すようにスイッチング SW_4 がON、スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 がOFFであるから、電磁石3に励磁電流 i_2 が、電磁石2に共振手段225を通して励磁電流 i_1 が流れる。また、時間 T_8 (励磁電流 i_1 :プラス、励磁電流 i_2 :プラス、 $i_1 < i_2$)においては、図9(b)に示すように、電磁石3に励磁電流 i_2 が、電磁石2に共振手段225を通して励磁電流 i_1 が流れる。

[0047] スイッチタイミングModel-1、Model-2は、電磁石2にPWM電圧 e_1 を印加し、PWM電圧 e_1 のデューティを制御することで所望の制御電流 i_c を流す。この間、電磁石3は共振手段225を介してPWM電圧 e_2 が印加され、流れる電流は直流成分が除去される。この時、PWM電圧 e_1 、 e_2 は互いに逆電圧となるように印加され、リップル電流 i_{r1} 、 i_{r2} は、図4が示す通り、お互いに反対方向に振幅する。従って、スイッチタイミングModel-1、Model-2においては、励磁電流 i_1 、 i_2 は次式(1)となる。

$$\begin{aligned} i_1 &= i_c + i_{r1} \\ i_2 &= -i_{r2} \end{aligned} \quad (1)$$

[0048] 一方、スイッチタイミングModelI-1、ModelI-2では、スイッチタイミングModel-1、Model-2とは逆に、電磁石3に所望の制御電流 i_c が流れる。従って、スイッチタイミングModelI-1、ModelI-2においては、励磁電流 i_1 、 i_2 は式(2)となる。

$$\begin{aligned} i_1 &= i_{r1} \\ i_2 &= i_c - i_{r2} \end{aligned} \quad (2)$$

[0049] このように、ドライバ204は、図4に示すように、電磁石2、3のうち、一方の電磁石に制御電流 i_c が流れていれば、もう一方の電磁石には、時間平均電流がゼロとなるよう

なりリップル電流しか流れないようにになっている。スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 、 SW_4 は、スイッチ信号 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 によって、それぞれON/OFFされる。スイッチング素子 SW_1 、 SW_2 、 SW_3 、 SW_4 は、スイッチ信号 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 がHi(高レベル)の時にON状態となり、Lo(低レベル)の時にOFF状態となる。

- [0050] ここで、式(1)、(2)の励磁電流 i_1 、 i_2 は、ローパスフィルタ等で高周波成分を除去したものを、それぞれ i_1' 、 i_2' で表すと、 i_1' 、 i_2' は式(1')、(2')となる。 i_1' 、 i_2' は、リップル電流 ir_1 、 ir_2 が除去され、制御電流 ic の情報のみ得られる。

$$\begin{aligned} i_1' &= ic \\ i_2' &= 0 \end{aligned} \quad (1')$$

$$\begin{aligned} i_1' &= 0 \\ i_2' &= ic \end{aligned} \quad (2')$$

- [0051] ドライバ204は、図3に示す通り、 i_1' 、 i_2' を検出し、それぞれ減算器235で減算した信号をフィードバックして比較器236で制御信号 u' と比較し、比較された信号は、K倍の増幅器232にて増幅する。そして、増幅器232から出力された信号は、比較器237で発振器210から出力されるPWMキャリア周波数 fc と同等の周波数の三角波信号 St と比較することで、所望のデューティのPWM信号 Sp を得ている。PWM信号 Sp によって、スイッチ信号 S_4 と反転器229で反転されたスイッチ信号 S_3 を出力して、スイッチング素子 SW_3 とスイッチング素子 SW_4 のONとOFFのタイミングが常にお互いに反対となるよう動作する。以上より、制御信号 u' に対応した制御電流 ic が得られる。

- [0052] また、コンパレータ233は、リップル電流 ir_1 の振幅値以上に設定された微小な比較基準値 TH_1 (図4参照)を有し、電磁石2の制御電流 i_1' が比較基準値 TH_1 より大きい時は、Loを出力し、比較基準値 TH_1 以下はHiを出力する。また、コンパレータ234は、コンパレータ233と同様にリップル電流 ir_2 の振幅値以上に設定された微小な比較基準値 TH_2 (図4参照)を有し、電磁石3の制御電流 i_2' が比較基準値 TH_2 より大きい時は、Loを出力し、比較基準値 TH_2 以下はHiを出力する。これら比較基準値 TH_1 、 TH_2 は制御電流 i_1' 、 i_2' のどちらか一方に確実に電流が流れるように設けられている。これらの比較基準値 TH_1 、 TH_2 は同じ値であってもよい。そして、図4に示す通り、スイッチ信号 S_2 は、AND演算器230を備えることで(図3参照)、電磁石2の制御電流 i_1

i_1' が TH_1 より大きい時は Lo を維持し、 TH_1 以下の時はスイッチング素子 SW_3 と同期して、スイッチング素子 SW_2 をON/OFFさせる。

- [0053] また、スイッチ信号 S_1 は、AND演算器231を備えることで(図3参照)、電磁石3の制御電流 i_2' が TH_2 より大きい時は Lo を維持し、 TH_2 以下でスイッチング素子 SW_4 と同期して、スイッチング素子 SW_1 をON/OFFさせる。ここで、スイッチング素子 SW_1 がOFFしている間は、電磁石2には必ず共振手段225を介して電流を供給することになり、直流電流成分が除去され、リップル ir_1 だけが流れ、時間平均電流はゼロとなる。逆にスイッチング素子 SW_2 がOFFしている間は電磁石3の時間平均電流がゼロになり、リップル電流 ir_2 だけ流れる。

- [0054] このようにして、図4に示すように、ドライバ204は、電磁石2、3のうち、一方の電磁石に制御電流 i_c が流れていれば、もう一方の電磁石は時間平均電流がゼロとなるように制御している。且つ i_1' 、 i_2' の値の差分をフィードバックすることで、制御信号 u' に基づいた制御電流を電磁石2、及び電磁石3に励磁する。ここでは、制御信号 u' がプラスであれば、電磁石2に制御電流 i_c が流れる。制御信号 u' がマイナスであれば電磁石3に制御電流 i_c が流れる。

- [0055] ところで、電磁石2、3はPWM電圧 e_1 、 e_2 が印加されると、それぞれのインピーダンスに応じた電流が流れるが、PWM電圧 e_1 、 e_2 は高周波数であるため、電磁石2、3のインピーダンス成分は、おおよそインダクタンス成分と考えてよい。式(1)、(2)において、励磁電流 i_1 と励磁電流 i_2 を加算すると式(3)となる。

$$i_1 + i_2 = i_c + (ir_1 - ir_2) \quad (3)$$

- [0056] 式(3)の $ir_1 - ir_2$ は、電磁石2、3のインダクタンス L_1 、 L_2 によって変動し、ロータ1の変位情報を含むリップル電流成分である。 $ir_1 - ir_2$ は一般的に式(4)で表せる。

$$ir_1 - ir_2 = K \{ (1/L_1) - (1/L_2) \} \quad (4)$$

式(4)の K はPWM駆動電圧 E とキャリア周波数 fc によって決まる定数である。

- [0057] ここで、ロータ1が電磁石2と電磁石3の中心にあるときのロータ1と電磁石2及び電磁石3とのギャップを X_0 、インダクタンスを L_0 とし、ロータ1が電磁石3側に x だけ微小変位したとすると、おおよそ式(5)が成立する。

$$(1/L_1) - (1/L_2) = 2x / (L_0 \cdot X_0) \quad (5)$$

従って、式(4)、(5)から、リップル電流成分 $ir_1 - ir_2$ は、線形的に変位情報が含まれる。

[0058] 本第一の実施の形態では、図1に示す通り、励磁電流 i_1 と励磁電流 i_2 を検出し、それぞれ加算した信号をキャリア周波数 fc を中心周波数とするバンドパスフィルタ205に通すことで、式(3)における制御電流 ic を除去し、リップル電流成分、即ち変位情報成分 $ir_1 - ir_2$ を抽出する。この変位情報成分はロータ1の変位に対してキャリア周波数 fc と同等のAM変調信号で得られ、復調手段206にて復調し、変位信号 v_0 を得る。復調手段206は、発振器210からPWMキャリア周波数 fc と同等の周波数のパルス信号 Sc に従って、変位情報成分のAM変調信号を復調する。

[0059] 復調手段206にて得られた変位信号 v_0 をフィードバックし、比較器212で浮上目標位置信号 r と比較し、偏差信号 ve をデジタル演算手段209に入力してロータ1が非接触に安定浮上支持できるよう所望の制御信号 u' を得る。そして、この制御信号 u' をドライバ204に入力することで電磁石2、3に励磁電流 i_1 、 i_2 を流し励磁し、ロータ1を非接触で浮上支持するのに必要な磁気力を得る。なお、変位信号 v_0 は、変位 x に対して、 $v_0 = K_s \cdot x$ となるように調整されている。 K_s は所定の定数である。

[0060] いま、ロータ1が電磁石2と電磁石3の中心にあるときのロータ1と電磁石2及び電磁石3とのギャップを X_0 、インダクタンスを L_0 とし、ロータ1が電磁石3側に x だけ微小変位したとすると電磁石2及び電磁石3がそれぞれロータ1に及ぼす磁気力 f_1 及び磁気力 f_2 は一般的に式(6)となる。

$$\begin{aligned} f_1 &= K_0 \{ i_1 / (X_0 + x) \}^2 \\ f_2 &= K_0 \{ i_2 / (X_0 - x) \}^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)が示す通り、磁気力 f_1 、 f_2 は、励磁電流 i_1 、 i_2 、変位 x に対して非線形である。周知のとおり、非線形制御系はその振る舞いが複雑であり、単純なシステムである線形系が望ましい。なお、式(6)の K_0 は、電磁石コアの形状やコイルの巻き数で決まる定数である。

[0061] このため、本第一の実施の形態では、図1に示す通り、デジタル演算手段209内部で、偏差信号 ve を浮上目標位置信号 r から減算し、 $1/K_s$ 倍して得られた推定変

位信号 x_{est} と、補償信号 u を線形化手段208に入力し、線形化する演算を行う。線形化手段208は、式(7)の演算を行い、制御信号 u' を出力する。

$$u' = \text{sign}(u) \cdot K_m (X_0 + |x_{est}|) \cdot (u)^{1/2} \quad (7)$$

なお、 K_m は所定の定数であり、 $\text{sign}(u)$ は、補償信号 u の符号を意味する。以上の演算により、変位 x と制御信号 u' の関係は線形となる。デジタル演算手段209の演算は、DSPによるデジタル演算によって出力を得ている。

[0062] また、一般的に、電磁石2、3のインダクタンス L_1 、 L_2 は、ロータ1の変位だけでなく、制御電流 i_c が流れることでも変動する。このため、復調手段206で得られる変位信号 v_0 には、変位誤差が含まれることが少なくない。この変位誤差を除去するため、励磁電流 i_1 、 i_2 を検出し、それぞれ減算した信号をローパスフィルタ等でリップル電流成分を除去して得られた制御電流成分信号から、変位誤差を予測し、変位信号 v_0 から削除する方法をとってもよい。

[0063] 図13、図14に具体的な構成の一例を示す。

図13において、減算器243で i_1 と i_2 の差を検出し、図示しないローパスフィルタにてリップル電流成分を除去することで、制御電流 i_c を検出する。この信号をフィルタ242と増幅器241のカスケード接続回路に通す。この時、フィルタ242の伝達特性が、加算器211、BPF205、復調手段206を総合した伝達特性 G_z に一致するように設定する。また、増幅器241は、PWM電源電圧、PWMキャリア周波数、励磁電流によるインダクタンス L_1 、 L_2 の変動度合い等で決まる、所定の増幅率に設定する。これにより、増幅器241からは、予測された変位誤差信号が出力される。この出力信号を復調手段206の出力信号から減算すれば変位誤差信号が除去される。尚、増幅器241は、フィルタ242と別々に設ける必要はなく、増幅器とフィルタが一体化したフィルタ増幅器であってもよい。また、フィルタだけで必要なレベルの変位誤差信号が得られれば増幅器は必要ではない。

図14は、減算処理を比較器212の後で行ったもので、図13の構成と同じ効果が得られる。または、制御信号 u' から予測された変位誤差付分の信号をAM変調した後、励磁電流 i_1 、 i_2 を検出し、加算して得られたAM変調信号から減算してもよい。図15、図16に具体的な構成を示す。図15は、ドライバ204の伝達特性 G_d と同等の特性

を有するフィルタ246と、PWM電源電圧、PWMキャリア周波数、励磁電流によるインダクタンス L_1 、 L_2 の変動度合い等で決まる、所定の増幅率で増幅する増幅器247と、キャリア周波数 f_c でAM変調するAM変調器248を、ドライバ204の入力端子と加算・減算器249の間に設け、変位誤差信号を除去するようにしたものである。

図16は、ドライバ204の伝達特性と線形化手段208を総合した伝達特性 G_d と同等の特性を有するフィルタ246と、PWM電源電圧、PWMキャリア周波数、励磁電流によるインダクタンス L_1 、 L_2 の変動度合い等で決まる、所定の増幅率で増幅する増幅器247と、キャリア周波数 f_c でAM変調するAM変調器248を、補償手段207の出力端子と加算・減算器249の間に設け、変位誤差信号を除去するようにしたものである。

尚、図13、14と同様に、増幅器247は、フィルタ246と別々に設ける必要はなく、増幅器とフィルタが一体化したフィルタ増幅器であってもよく、また、増幅器が不要な態様も考えられる。

[0064] 上記のように本第一の実施の形態の磁気軸受装置では、対向する電磁石2、3のうち一方の電磁石にだけ電流を流すため、電磁石コイルの銅損による余分なエネルギー損失を少なくできる。

[0065] 以上、本発明の第一の実施の形態を説明したが、本発明は上記実施の形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲、及び明細書と図面に記載された技術的思想の範囲内において種々の変形が可能である。例えば、上記実施形態例では励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達手段として、コイル L_s とコンデンサ C_s が直列に接続され、キャリア周波数と同等な周波数で共振するように設定された共振手段225を用いているが、共振手段はこのようなコイルとコンデンサによるパッシブフィルタである必要はなく、アクティブフィルタで構成してもよい。また、キャリア周波数近辺でインピーダンスを下げるような電子ボリュームなどで構成してもよい。

[0066] 以下、本発明の第2の実施の形態を図10乃至図12および図17に基づいて説明する。図10は本発明の実施の形態に係る磁気軸受装置の構成例を示す図である。図10において、1はロータであり、該ロータ1、即ち磁性体からなる回転体を非接触で浮上支持するため、1対の電磁石2、3が該ロータ1を挟んで配置されている。1対の電磁石2、3はロータ1の1自由度を支持することができる。通常、複数対の電磁石を

用いてロータ1の軸回り回転方向以外の5自由度を浮上支持することが好ましいが、ここでは簡略化のため、第1の実施の形態と同様に、1自由度のみについて説明する。また、ロータ1を回転させるためのモータも省略し、磁気軸受部分のみ説明する。図11は、本磁気軸受装置の各部信号波形を示す図であり、図12は電磁石2、3のインダクタンスと励磁電流の関係を示す図である。図17は、図10のドライバ108の構成を示したものである。本第2の実施の形態では、第1の実施の形態と違って、電磁石及びケーブル等の抵抗値を考慮に入れる。

[0067] 図17において、ドライバ108は電磁石2、3に励磁電流を流すためのPWM方式のドライバであり、発振器112によって発生するパルス信号の周波数 f_c をキャリア周波数とするPWM電圧 PWM_1 、 PWM_2 を電磁石2、3に印加することにより励磁電流 i_1 、 i_2 を電磁石2、3に供給している。

[0068] ドライバ108は、図示しないPWM駆動電圧 E を発生するPWM電源と、バイアス電圧 V_b を発生するバイアス電源124を有し、バイアス電圧 V_b によって電磁石2、3に直流のバイアス電流 I_b を供給する。このバイアス電流 I_b により、電磁石2、3に供給する励磁電流 i_1 、 i_2 とロータ1に与える磁気力との関係を線形化することができる。ここで、電磁石2、3及びケーブル等の直流抵抗値を R とすると、バイアス電流 I_b は、式(8)で表される。

$$I_b = V_b / (2R) \quad (8)$$

[0069] また、ドライバ108は、PWMレギュレータ123を含み、補償手段107からの制御信号 u に基いてPWM電圧のデューティ比を制御することで、電磁石2、3に制御電流 i_c をバイアス電流 I_b に重畳する形($I_b + i_c$, $I_b - i_c$)で供給する。このとき、電磁石2、3に印加されるPWM電圧 PWM_1 、 PWM_2 はデューティ比を互いに相反するように制御することで、電磁石2が $I_b + i_c$ の制御電流ならば、電磁石3の制御電流は $I_b - i_c$ となるようになっている。

[0070] 更に、第1の実施の形態で説明したように、電磁石2、3に供給される励磁電流には、リップル電流 i_{r1} 、 i_{r2} が重畳される。このリップル電流 i_{r1} 、 i_{r2} は、PWM電圧 PWM_1 、 PWM_2 により発生し、電磁石2、3のインピーダンスに応じて変化する。このPWM電圧の基本周波数はキャリア周波数 f_c であるため十分高く、リップル電流のみを考える場

合、電磁石2、3のインピーダンスは、インダクタンス成分のみと考えてよい。従って、PWM電圧が一定であるとすれば、リップル電流 ir_1 、 ir_2 の振幅は電磁石2、3のインダクタンス L_1 、 L_2 にのみ依存する。そして、PWM電圧 PWM_1 、 PWM_2 のデューティ比がお互いに相反するように制御されているため、リップル電流 ir_1 、 ir_2 はお互いに相反する方向に上昇、下降するような振幅が生じる。従って、電磁石2、3に供給される励磁電流 i_1 、 i_2 は式(9)となる。

$$\begin{aligned} [0071] \quad i_1 &= Ib + ic + ir_1 \\ i_2 &= Ib - ic - ir_2 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)から、式(10)が成立する。

$$i_1 + i_2 = 2Ib + (ir_1 - ir_2) \quad (10)$$

式(10)において $ir_1 - ir_2$ は、リップル電流成分であり、その周波数成分はキャリア周波数 fc が主となる。このため、 $ir_1 - ir_2$ は、高周波成分であり、これをローパスフィルタ等で除去すると、式(11)となる。

$$i_1 + i_2 = 2Ib \quad (11)$$

式(11)から、バイアス電流 Ib の情報を得ることができる。

[0072] ところで、電磁石2、3及びケーブル等の直流抵抗値 R が、ケーブル長さや温度の影響によって変化すると、バイアス電流 Ib は式(8)から分かるように変化してしまう。そこで、ドライバ108は、式(11)を利用して、励磁電流 i_1 、 i_2 を検出し、それぞれの加算後、ローパスフィルタ121に通して得られた信号をPWMレギュレータ123にフィードバックすることで、バイアス電流 Ib が所定の値を維持できるようにバイアス電圧電源124を制御している。

[0073] 図11は、制御信号 u が図のように時間的に変化した場合の各部信号を示した図である。ドライバ108はPWM電圧 PWM_1 、 PWM_2 を出力して電磁石2、3にそれぞれ印加する。 PWM_1 、 PWM_2 の電圧は、それぞれ逆波形となっており、PWM駆動電圧を E 、バイアス電圧を Vb とすると、ONのときは E 、OFFのときは $-E + Vb$ となっている。つまり電磁石2、3に印加される平均電圧は、バイアス電圧 Vb によってプラス寄りとなり、 Vb を制御することで所望のバイアス電流 Ib を電磁石2、3に常時流すことができる。また、ドライバ108は、 PWM_1 、 PWM_2 の電圧が逆波形となっていることから、制

御信号uに基づいてPWM信号のデューティ比を制御することで、電磁石2に $I_b + i_c$ を流したならば、電磁石3に $I_b - i_c$ を流している。つまり、ドライバ108は、バイアス電圧 V_b を制御することでバイアス電流 I_b を、PWM電圧のデューティ比を制御することで制御電流 i_c を、それぞれ独立で制御している。更に、電磁石2、3に流れる電流には、PWM電圧に従って、それぞれ変位情報が含まれるリップル電流 i_{r1} 、 i_{r2} が重畳する。

[0074] また、式(9)から式(12)が成立する。

$$i_1 - i_2 = 2i_c + (i_{r1} + i_{r2}) \quad (12)$$

式(12)において、 $i_{r1} + i_{r2}$ はリップル電流成分であり、これをローパスフィルタ等で除去すると式(13)となる。

$$i_1 - i_2 = 2i_c \quad (13)$$

式(13)から制御電流 i_c の情報を得ることができる。そこでドライバ108は式(13)を利用して励磁電流 i_1 、 i_2 を検出し、それぞれの減算後、ローパスフィルタ122に通して得られた信号をPWMレギュレータ123にフィードバックすることで、補償手段107からの制御信号uに応じた制御電流 i_c を電磁石2、3に供給し励磁できるようにPWM電圧のデューティ比を制御している。

[0075] また、式(10)において、 $2I_b$ は直流のバイアス電流成分であり、直流成分を除去すると式(14)となる。

$$i_1 + i_2 = i_{r1} - i_{r2} \quad (14)$$

式(14)の $i_{r1} - i_{r2}$ は、電磁石2、3のインダクタンス L_1 、 L_2 によって変動し、ロータ1の変位情報を含むリップル電流成分である。該 $i_{r1} - i_{r2}$ は式(15)で表せる。

$$i_{r1} - i_{r2} = K \{ (1/L_1) - (1/L_2) \} \quad (15)$$

式(15)のKはPWM駆動電圧Eとキャリア周波数 f_c によって決まる定数である。

[0076] ここで、ロータ1が電磁石2と電磁石3の間の中心にあるときのロータ1と電磁石2及び電磁石3との間のギャップを X_0 、インダクタンスを L_0 とし、ロータ1が電磁石側3側に x だけ微小変位したとすると、電磁石2、3の励磁電流がバイアス電流 I_b 一定のときは、およそ式(16)が成立する。

$$(1/L_1) - (1/L_2) = 2x / (L_0 \cdot X_0) \quad (16)$$

[0077] しかし、電磁石2、3の励磁電流は、実際にはバイアス電流 I_b に重畳して制御電流 i

cが流れ、変動する。電磁石2、3のインダクタンスは、ロータ1の変位だけではなく、励磁電流によっても変化する。これは励磁電流によって、電磁石コアの磁気特性が変化するからである。言い換えれば、電磁石コアのインダクタンスが変化するからである。いま、電磁石2、3の励磁電流の変動幅がそれほど大きくない $I_b \pm i_c$ とし、ロータ1の変位量も微小 x とすると、この条件範囲でのインダクタンス特性は、制御電流 i_c によって、傾き $-a$ を持つ。この様子を図12に示す。

- [0078] 従って、ロータ1がギャップ X_0 に固定されていたとしても、電磁石2、3の励磁電流が $I_b + i_c$ 、 $I_b - i_c$ であれば、インダクタンス L_{01} 、 L_{02} となり、それぞれ異なる値となってしまう。このことが、リップル電流成分が変位検出誤差を生じる原因となっている。この制御電流 i_c によるインダクタンスの変化を考慮すると、式(16)は式(16')に書き直せる。

$$(1/L_1) - (1/L_2) = (2x/(L_0 \cdot X_0)) + (2a/L_0^2) \cdot i_c \quad (16')$$

- [0079] また、式(14)、(15)、(16')から、式(17)を得る

$$i_1 + i_2 = (2K/(L_0 \cdot X_0)) \cdot x + (2aK/L_0^2) \cdot i_c \quad (17)$$

なお、 a は予め計算または実測によって求められる。

- [0080] 本発明では、式(17)を利用して、電磁石2、3が励磁される励磁電流 i_1 、 i_2 から変位情報を得るために、トランス113を有するリップル検出手段104を使用している。リップル検出手段104のトランス113は、電磁誘導を利用して励磁電流 i_1 、 i_2 を加算できるように、巻き線 T_1 、 T_2 が巻かれている。なお、巻き線 T_1 、 T_2 のインダクタンスは、電磁石2、3のインダクタンスよりかなり小さく設定されている。また、このトランス113は、巻き線 T_1 、 T_2 によって得られた励磁電流 i_1 、 i_2 の加算値を所定の倍率 b で増幅して出力できる巻き線 T_4 が巻かれている。

- [0081] このとき、巻き線 T_4 では直流成分が除去され、リップル電流成分に含まれる変位情報信号を抽出する。また、巻き線 T_4 は両端子間にコンデンサ114と抵抗器115が並列に接続することで、所定の周波数帯域のみを抽出するバンドパスフィルタの作用が得られるようになっている。ここで抽出する所定周波数帯域は、リップル電流成分の主周波数であるキャリア周波数 f_c 近辺に設定されている。このようにリップル検出手段104は、励磁電流 i_1 、 i_2 から変位情報信号を得て、キャリア周波数 f_c のAM変調信

号として出力する。

- [0082] 更に、リップル検出手段104から出力された信号は、バンドパスフィルタ(BPF) 105に入力され、余分なノイズを除去し、変位変調信号 Vx' を得る。この変位変調信号 Vx' は式(18)で表せる。

$$Vx' = b(i_1 + i_2) \quad (18)$$

式(17)、(18)から式(19)を得る。

$$Vx' = Ks \cdot x + \alpha \cdot ic \quad (19)$$

ここで、 $Ks = 2bK / (L_0 \cdot X_0)$ 、 $\alpha = 2abK / L_0^2$ であり、定数である。この式(19)から、励磁電流 i_1 、 i_2 を検出し、リップル検出手段104とバンドパスフィルタ105で得られた変位変調信号 Vx' には、変位情報成分 $Ks \cdot x$ と制御電流 ic によって変動する変位誤差成分 $\alpha \cdot ic$ が含まれることが分かる。

- [0083] また、ドライバ108の入力信号である補償手段107からの制御信号 u から制御電流 i 間の伝達特性を Gdr とすると、式(19)は式(20)で表せる。

$$Vx' = Ks \cdot x + \alpha \cdot Gdr \cdot u \quad (20)$$

伝達特性 Gdr は、一般的にそれほど次数が高くなく、低次数のローパスフィルタ特性となる。式(20)の変位誤差信号 $\alpha \cdot Gdr \cdot u$ を除去するために、本発明では制御信号 u を伝達特性 Gdr と同等のローパスフィルタ特性を有するフィルタ手段109を通過させることで、推定制御電流 ic_{est} を得る。推定制御電流 ic_{est} は、定数 α と同等の倍率の増幅器110によって α 倍され、推定変位誤差信号 x_{est} を得る。

- [0084] また、推定変位誤差信号 x_{est} をAM変調器111によって、キャリア周波数 fc に基いてAM変調し、得られた信号をリップル検出手段104のトランス113の巻き線 T_3 に入力する。トランス113の巻き線 T_3 は、巻き線 T_1 、 T_2 によって得られた励磁電流 i_1 、 i_2 の加算信号から減算するように巻かれ、これにより、巻き線 T_4 は、変位誤差信号分が精度良く除去された変位情報信号を得ることができる。従って、バンドパスフィルタ105から得られる変位変調信号 Vx' は、おおよそ式(20)から(20')に書き直すことができる。

$$Vx' \doteq Ks \cdot x \quad (20')$$

- [0085] 更に、変位変調信号 Vx' をキャリア周波数 fc と同期した復調手段106にて復調し、

所定の倍率 c にて増幅することで変位信号 V_x を得る。これにより式(20')は式(21)となる。

$$V_x \doteq K_s \cdot c \cdot x \quad (21)$$

[0086] 図11の下の部分に示した2組の曲線は上記で説明した制御信号 u 、 T_3 へ入力される誤差信号波形 T_3 入力信号、誤差が除去された信号 V_x 、及びその復調波形 V_x である。

[0087] このように、変位検出手段117は、リップル検出手段104、バンドパスフィルタ105、復調手段106で構成され、変位信号 V_x を出力することができる。従って、式(21)のように、変位信号 V_x は、変位 x を $K_s \cdot c$ 倍した信号として出力され、これをフィードバックして、目標浮上位置信号 r と比較器116で比較し、補償手段107にて補償された制御信号 u を得ることで、所定の位置にロータ1を非接触にて安定して浮上支持することができる。

[0088] 以上、本発明の第2の実施形態を説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲、及び明細書と図面に記載された技術的思想の範囲内において種々の変形が可能である。

請求の範囲

- [1] 所定の位置に磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であつて；
前記磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；
該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と；
該変位検出手段の検出信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；
前記電磁石は前記磁性体を挟んで対向して配置され；
前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達手段を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達手段により直流的にゼロにする、
磁気軸受装置。
- [2] 所定の位置に磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であつて；
前記磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；
該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と；
該変位検出手段の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償手段と；
該補償手段の出力信号に基づいて前記電磁石に励磁電流を流すドライバとを備え；
前記電磁石は前記磁性体を挟んで対向して配置され；
前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達手段を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達手段により直流的にゼロにするドライバである、
磁気軸受装置。
- [3] 請求項2に記載の磁気軸受装置において、

前記補償手段は制御ループ位相を補償する手段である、
磁気軸受装置。

- [4] 磁性体を挟んで対向して配置された電磁石により、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受方法であって；

電磁石の磁気力により前記磁性体を浮上支持する工程と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出工程と；

該変位検出工程の検出信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライブ工程を備え；

前記ドライブ工程は所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)工程を有し、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達工程を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を直流的にゼロにする、

磁気軸受方法。

- [5] 磁性体を挟んで対向して配置された電磁石により、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受方法であって；

電磁石の磁気力により前記磁性体を浮上支持する工程と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出工程と；

該変位検出工程の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償工程と；

該補償工程の結果に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライブ工程を備え；

前記ドライブ工程は所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)工程を有し、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達工程を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達工程により直流的にゼロにする、

磁気軸受方法。

- [6] 請求項5に記載の磁気軸受方法において、
前記補償工程は制御ループ位相を補償する工程である、
磁気軸受方法。
- [7] 請求項1乃至請求項3のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、
前記交流電流伝達手段は、コイルとコンデンサを直列に接続し、前記キャリア周波数と同等な周波数で電氣的に共振する共振手段である、
磁気軸受装置。
- [8] 請求項1乃至請求項3のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、
前記磁性体を挟んで対向して配置された前記電磁石のそれぞれに流れる励磁電流を検出し、該検出信号の差信号を所定の周波数特性を有するフィルタ手段に通し、その出力を前記変位検出手段の出力から減ずる手段を備え；
前記の所定の周波数特性は、前記変位検出手段の周波数特性と同等の特性である、
磁気軸受装置。
- [9] 請求項1乃至請求項3のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、
前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段を通して得られた信号で、前記キャリア周波数信号をAM変調し、該AM変調波を前記対向して配置した電磁石のうち、励磁電流を流す方の電磁石に前記パルス電圧を印加して発生したリップル電流の大きさと、一方の励磁電流を直流的にゼロにした電磁石に前記交流電流伝達手段を介して電圧を印加することにより発生するリップル電流の大きさとを比較した信号に減算することで、前記変位検出手段によって検出された信号中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する、
磁気軸受装置。
- [10] 請求項1乃至請求項3及び請求項7乃至請求項9のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、
前記電磁石の磁性体に及ぼす磁気力と励磁電流との非線形な関係を線形化するための線形化手段を備えた

磁気軸受装置。

- [11] 請求項10に記載の磁気軸受装置において、
前記補償手段、又は前記線形化手段、又は前記補償手段と前記線形化手段は、
デジタル演算処理によって出力を得るように構成されている
磁気軸受装置。
- [12] 所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって；
磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；
該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と；
該変位検出手段の検出信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；
前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、
前記変位検出手段は、前記ドライバが前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出手段を有し、
前記変位検出手段の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段と、
所定の増幅度で増幅する増幅手段とを通過して得られた信号を、前記リップル検出手段で得られた信号に減算することで、前記変位検出手段によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去するように構成した、
磁気軸受装置。
- [13] 所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって；
磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；
該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出手段と；
該変位検出手段の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償手段と；
前記補償手段の出力信号に基づいて、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；

前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、

前記変位検出手段は、前記ドライバが前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出手段を有し、

前記補償手段の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ手段と、所定の増幅度で増幅する増幅手段とを通過して得られた信号を、前記リップル検出手段で得られた信号に減算することで、前記変位検出手段によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去するように構成した、

磁気軸受装置。

[14] 請求項13に記載の磁気軸受装置において、

前記補償手段は制御ループ位相を補償する手段である、

磁気軸受装置。

[15] 磁性体を挟んで対向して配置された電磁石により、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受方法であって；

電磁石の磁気力により前記磁性体を浮上支持する工程と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出工程と；

該変位検出工程の検出結果に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライブ工程を備え；

該ドライブ工程は所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)工程を有し；

前記変位検出工程は、前記ドライブ工程が前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出工程を有し、

前記変位検出工程の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ工程と、前記伝達特性と振幅が同一となるように所定の増幅度で増幅する増幅工程とを経て得られた信号を、前記リップル検出工程で得られた信号に減算する工程により、前記

変位検出工程によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する、

磁気軸受方法。

- [16] 磁性体を挟んで対向して配置された電磁石により、所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受方法であって；

電磁石の磁気力により前記磁性体を浮上支持する工程と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出工程と；

該変位検出工程の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償工程と；

該補償工程の出力信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライブ工程を備え；

該ドライブ工程は所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)工程を有し；

前記変位検出工程は、前記ドライブ工程が前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出工程を有し、

前記補償工程の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタ工程と、前記伝達特性と振幅が同一となるように所定の増幅度で増幅する増幅工程とを経て得られた信号を、前記リップル検出工程で得られた信号に減算する工程により、前記変位検出工程によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する、

磁気軸受方法。

- [17] 請求項16記載の磁気軸受方法において、

前記補償工程は制御ループ位相を補償する工程である、

磁気軸受方法。

- [18] 請求項12乃至請求項14のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記フィルタ手段は、ローパスフィルタである、

磁気軸受装置。

- [19] 請求項12乃至請求項14および請求項18のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記リップル検出手段は、前記リップル電流の振幅を検出するためのリップル電流振幅検出巻き線を備えるトランスを有し、該トランスの電磁誘導作用によって所定の割合で前記リップルの振幅を増幅又は減衰して、電圧信号又は電流信号として出力する、

磁気軸受装置。

- [20] 請求項19に記載の磁気軸受装置において、

前記トランスに、別途巻き線を設け、該巻き線に前記補償手段の出力信号が、前記フィルタ手段と、前記増幅手段とを通過して得られた信号を前記ドライバに用いる所定のキャリア周波数と同周波数でAM変調し、該AM変調された信号を入力し、該信号を電磁誘導作用により前記リップル電流振幅検出巻き線で検出した信号より減算するように構成した、

磁気軸受装置。

- [21] 所定の位置に磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって；

前記磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出回路と；

該変位検出回路の検出信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；

前記電磁石は前記磁性体を挟んで対向して配置され；

前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達回路を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達回路により直流的にゼロにする、

磁気軸受装置。

- [22] 所定の位置に磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって；

前記磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出回路と；
該変位検出回路の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償器と；

該補償器の出力信号に基づいて前記電磁石に励磁電流を流すドライバとを備え；
前記電磁石は前記磁性体を挟んで対向して配置され；

前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、前記励磁電流を直流的にゼロにする交流電流伝達回路を有し、前記対向して配置された電磁石のうち一方の電磁石に励磁電流を流すときは、他方の電磁石の励磁電流を前記交流電流伝達回路により直流的にゼロにするドライバである、

磁気軸受装置。

[23] 請求項22に記載の磁気軸受装置において、

前記補償器は制御ループ位相を補償する回路である、

磁気軸受装置。

[24] 請求項21乃至請求項23のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記交流電流伝達回路は、コイルとコンデンサを直列に接続し、前記キャリア周波数と同等な周波数で電氣的に共振する共振回路である、

磁気軸受装置。

[25] 請求項21乃至請求項23のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記磁性体を挟んで対向して配置された前記電磁石のそれぞれに流れる励磁電流を検出し、該検出信号の差信号を所定の周波数特性を有するフィルタに通し、その出力を前記変位検出回路の出力から減ずる減算器を備え；

前記の所定の周波数特性は、前記変位検出回路の周波数特性と同等の特性である、

磁気軸受装置。

[26] 請求項21乃至請求項23のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタを通して得られた信号で、前記キャリア周波数信号を

AM変調し、該AM変調波を前記対向して配置した電磁石のうち、励磁電流を流す方の電磁石に前記パルス電圧を印加して発生したリップル電流の大きさと、一方の励磁電流を直流的にゼロにした電磁石に前記交流電流伝達回路を介して電圧を印加することにより発生するリップル電流の大きさとを比較した信号に減算することで、前記変位検出回路によって検出された信号中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去する、

磁気軸受装置。

- [27] 請求項21乃至請求項26のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、前記電磁石の磁性体に及ぼす磁気力と励磁電流との非線形な関係を線形化するための線形化回路を備えた、

磁気軸受装置。

- [28] 請求項27に記載の磁気軸受装置において、前記補償器、又は前記線形化回路、又は前記補償器と前記線形化回路は、デジタル演算処理によって出力を得るように構成されている、

磁気軸受装置。

- [29] 所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって；
磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；
該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出回路と；
該変位検出回路の検出信号に基づいて、前記磁性体が所定の位置に浮上支持されるように、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；

前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、

前記変位検出回路は、前記ドライバが前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出回路を有し、

前記変位検出回路の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタと、所定の増幅度で増幅する増幅器とを通過して得られた信号を、前記リップル検出回路で

得られた信号に減算することで、前記変位検出回路によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去するように構成した、

磁気軸受装置。

[30] 所定の位置に前記磁性体を回転自在に浮上支持する磁気軸受装置であって、

磁性体を磁気力により浮上支持する電磁石と；

該電磁石のインピーダンス変化により磁性体の変位を検出する変位検出回路と；

該変位検出回路の検出信号に基づいて、前記磁性体を安定に浮上支持するように補償する補償器と；

前記補償器の出力信号に基づいて、前記電磁石に励磁電流を流すドライバを備え；

前記ドライバは所定のキャリア周波数で駆動されるパルス電圧のパルス幅を変調することで前記電磁石の励磁電流を制御するPWM(パルス幅変調)方式のドライバであり、

前記変位検出回路は、前記ドライバが前記電磁石に電圧を印加することによって発生するリップル電流の振幅を検出するリップル検出回路を有し、

前記補償器の出力信号が、前記ドライバへ電流を流すように指示してから前記電磁石に電流が流れるまでの伝達特性と同等の特性を有するフィルタと、所定の増幅度で増幅する増幅器とを通過して得られた信号を、前記リップル検出回路で得られた信号に減算することで、前記変位検出回路によって検出された信号の中に含まれる磁性体の変位情報以外の信号を除去するように構成した、

磁気軸受装置。

[31] 請求項30に記載の磁気軸受装置において、

前記補償器は制御ループ位相を補償する回路である、

磁気軸受装置。

[32] 請求項29乃至請求項31のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記フィルタは、ローパスフィルタである、

磁気軸受装置。

[33] 請求項29乃至請求項32のいずれか1項に記載の磁気軸受装置において、

前記リップル検出回路は、前記リップル電流の振幅を検出するためのリップル電流振幅検出巻き線を備えるトランスを有し、該トランスの電磁誘導作用によって所定の割合で前記リップルの振幅を増幅又は減衰して、電圧信号又は電流信号として出力する、

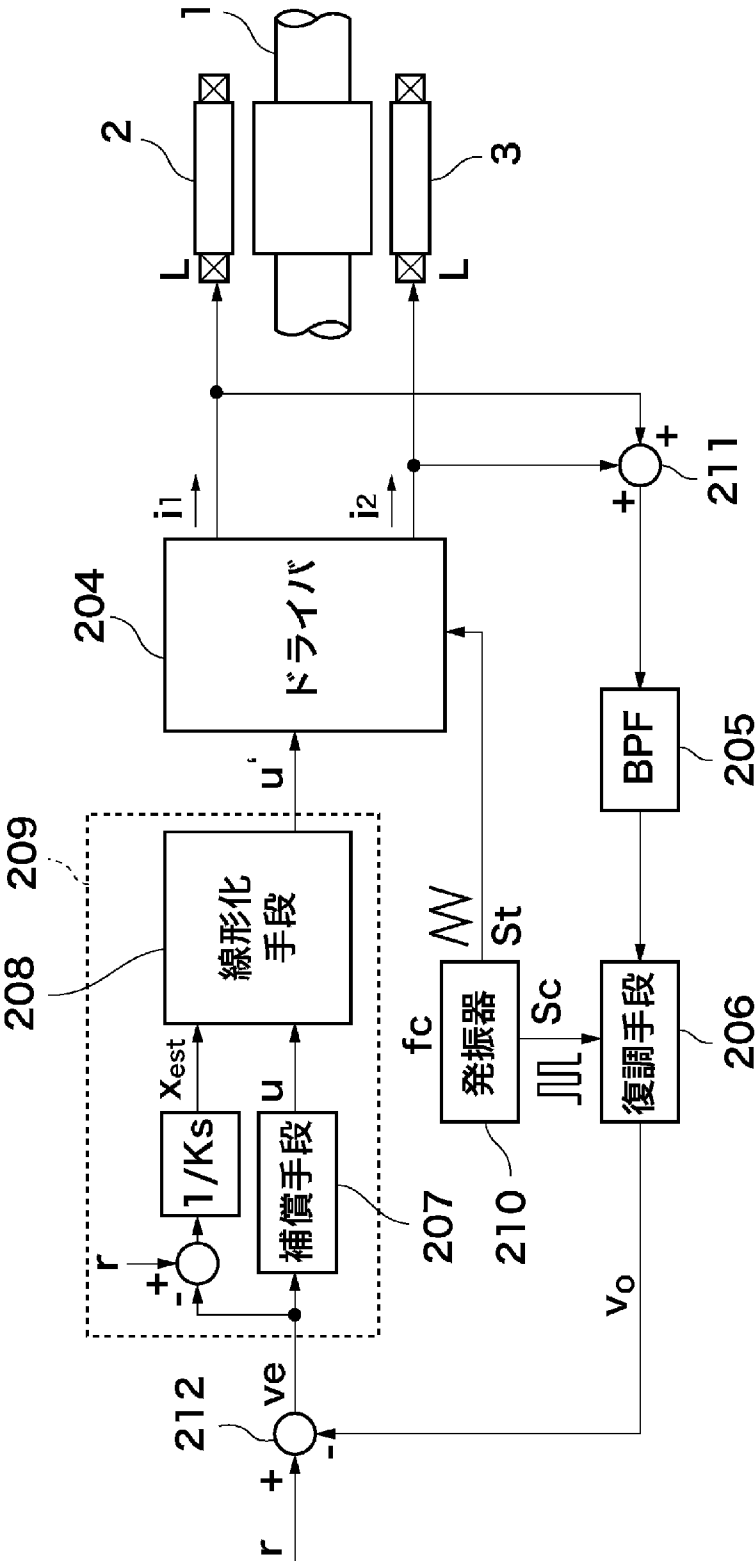
磁気軸受装置。

[34] 請求項33に記載の磁気軸受装置において、

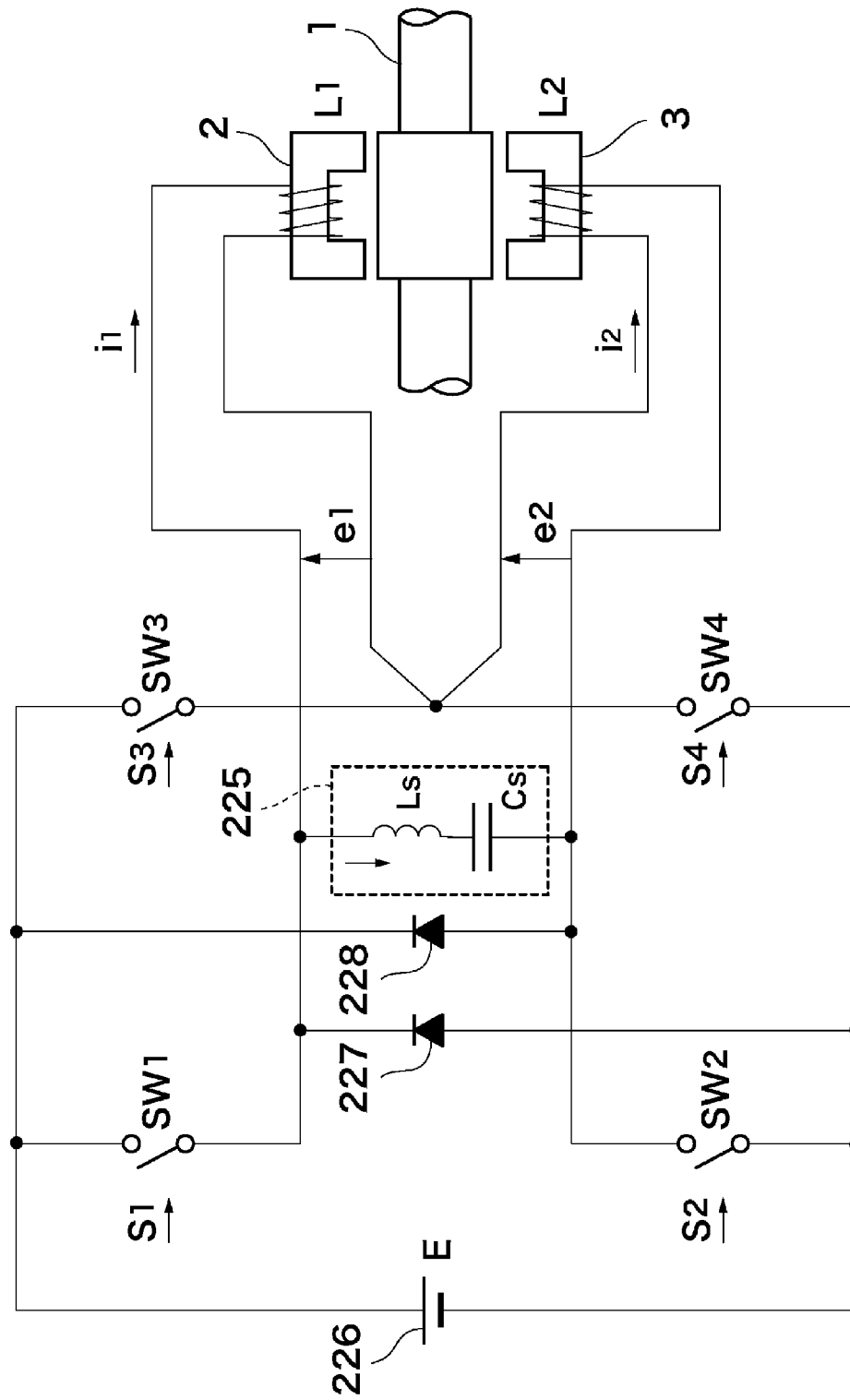
前記トランスに、別途巻き線を設け、該巻き線に前記補償器の出力信号が、前記フィルタと、前記増幅器とを通過して得られた信号を前記ドライバに用いる所定のキャリア周波数と同周波数でAM変調し、該AM変調された信号を入力し、該信号を電磁誘導作用により前記リップル電流振幅検出巻き線で検出した信号より減算するように構成した、

磁気軸受装置。

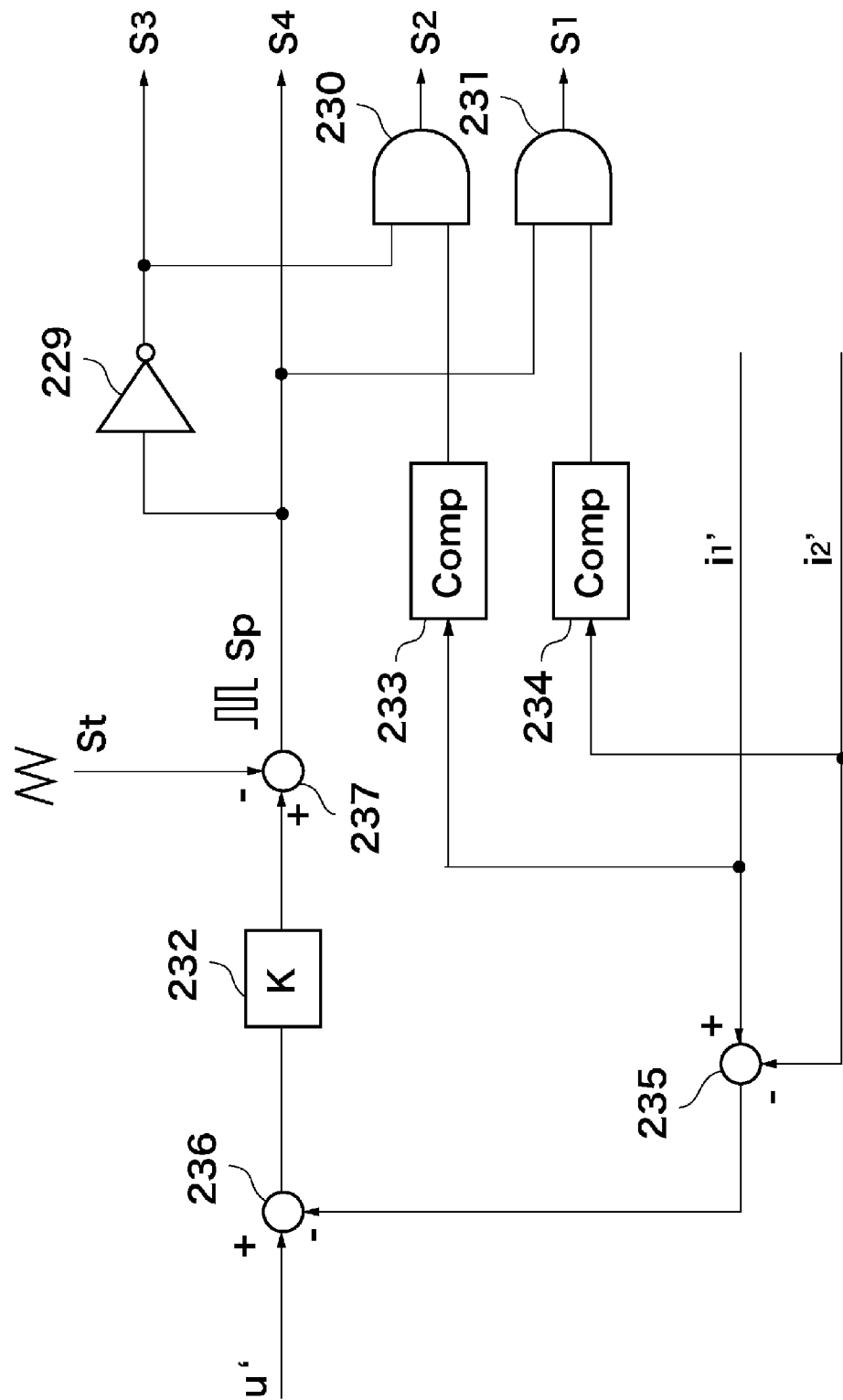
[図1]



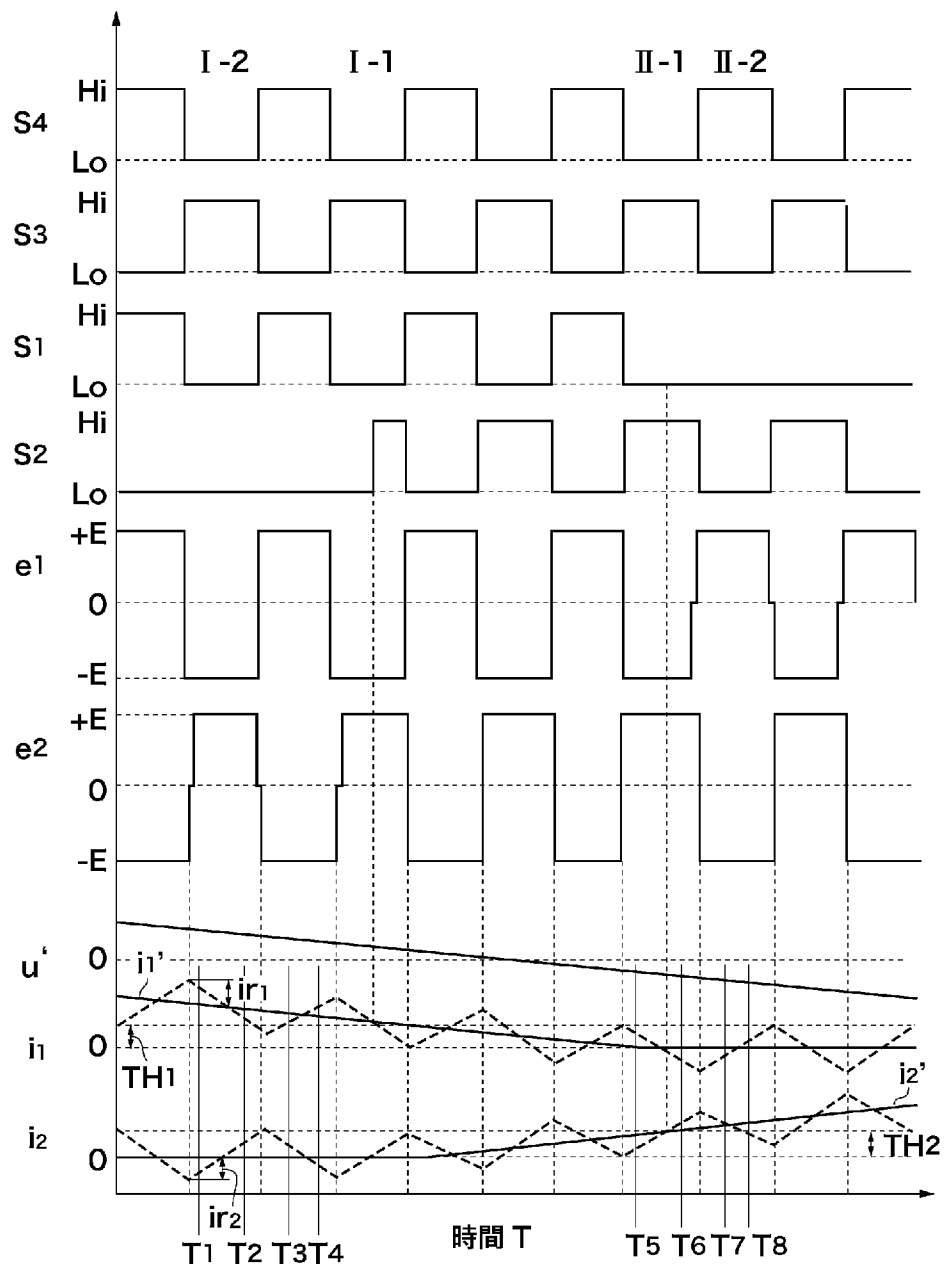
[図2]



[図3]



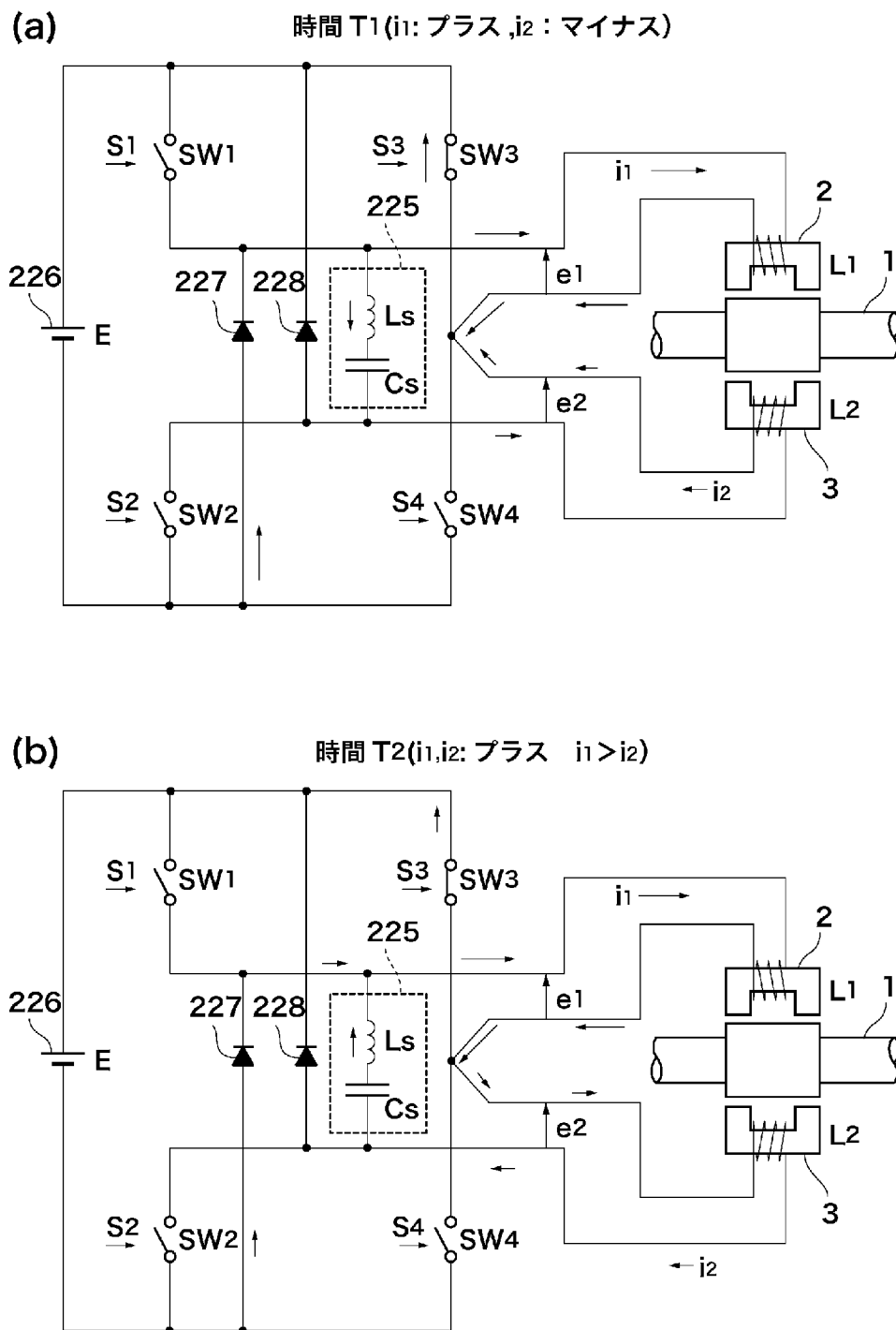
[図4]



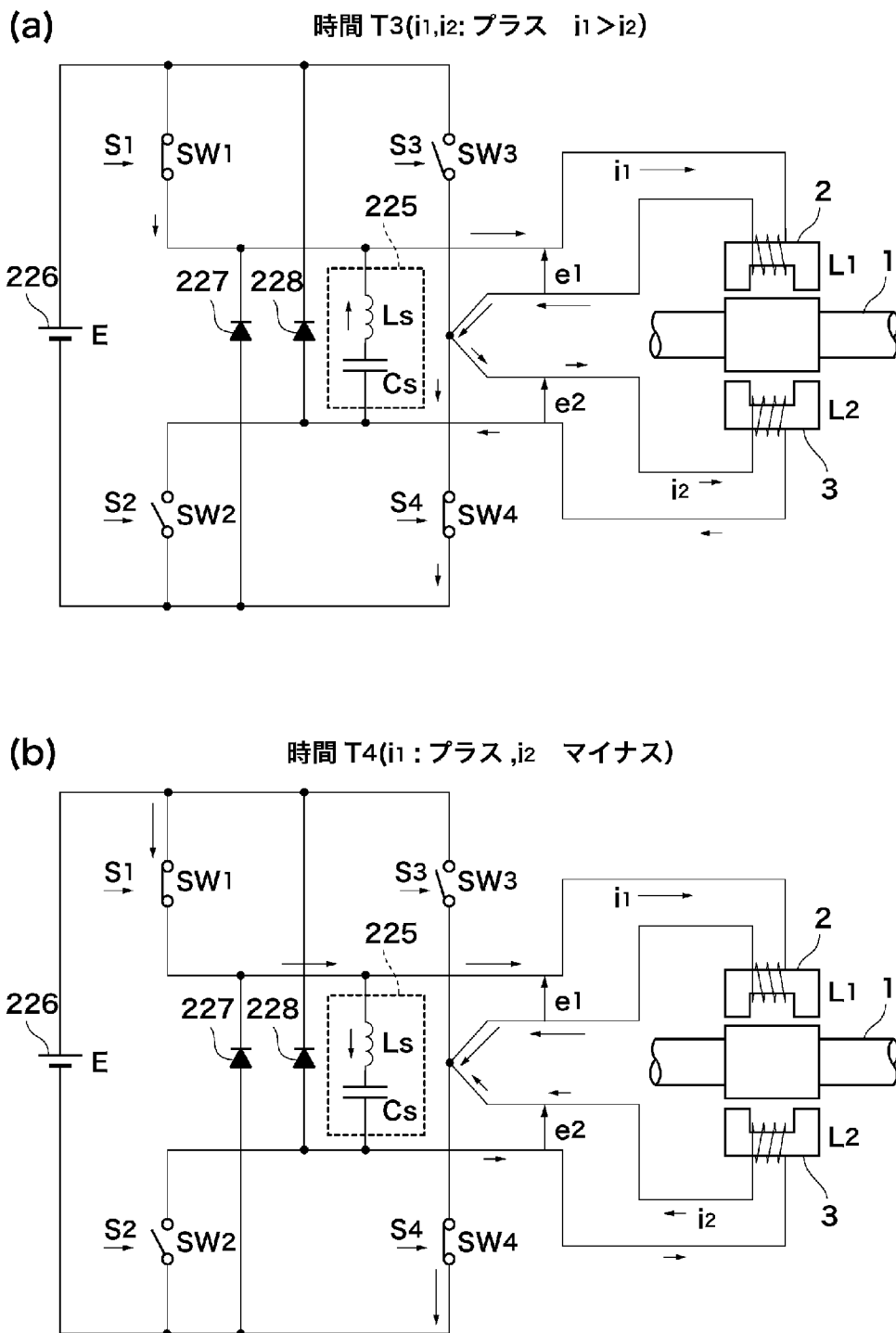
[図5]

	Mode I - 1	Mode I - 2	Mode II - 1	Mode II - 2
SW1	ON	OFF	OFF	OFF
SW2	OFF	OFF	ON	OFF
SW3	OFF	ON	ON	OFF
SW4	ON	OFF	OFF	ON

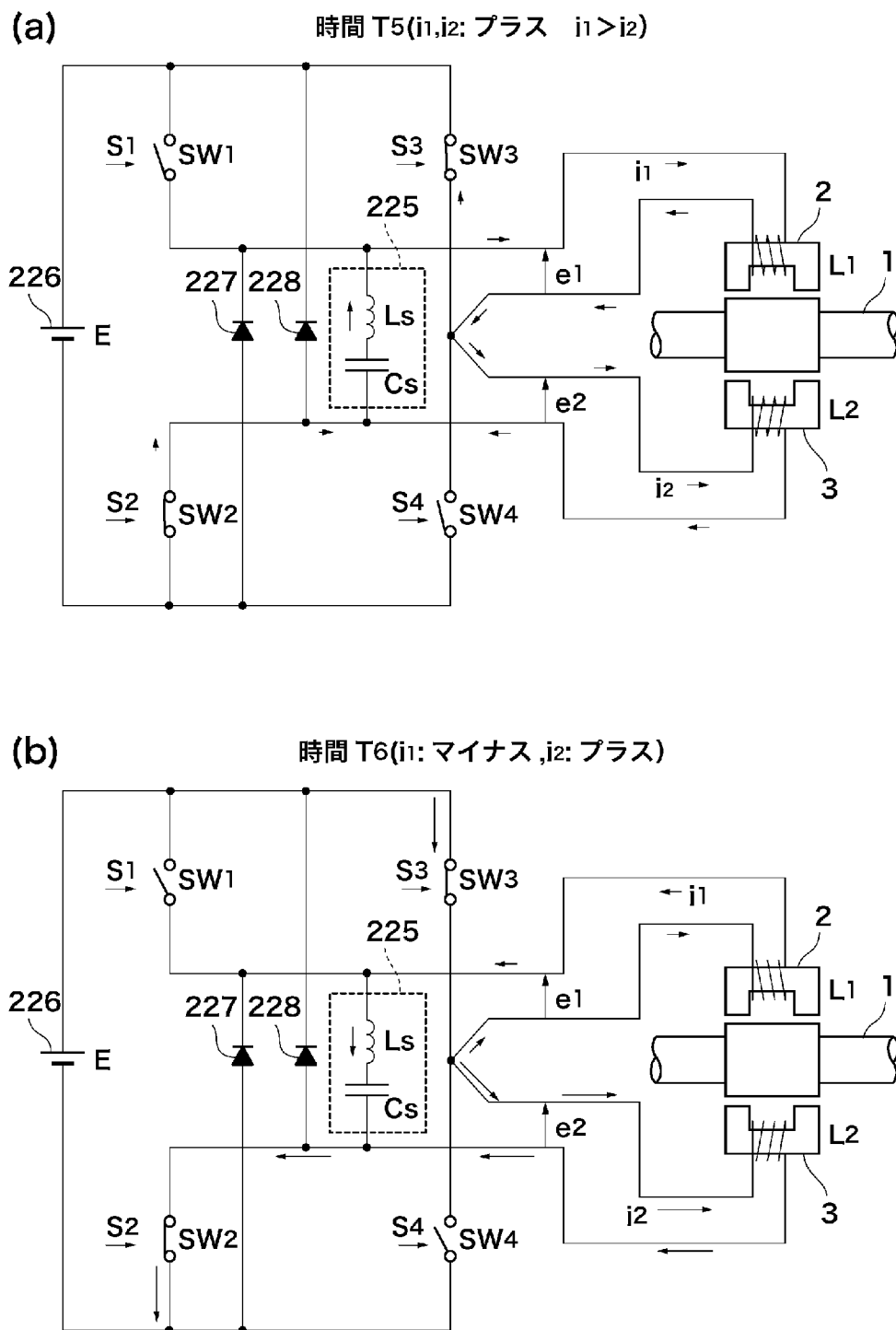
[図6]



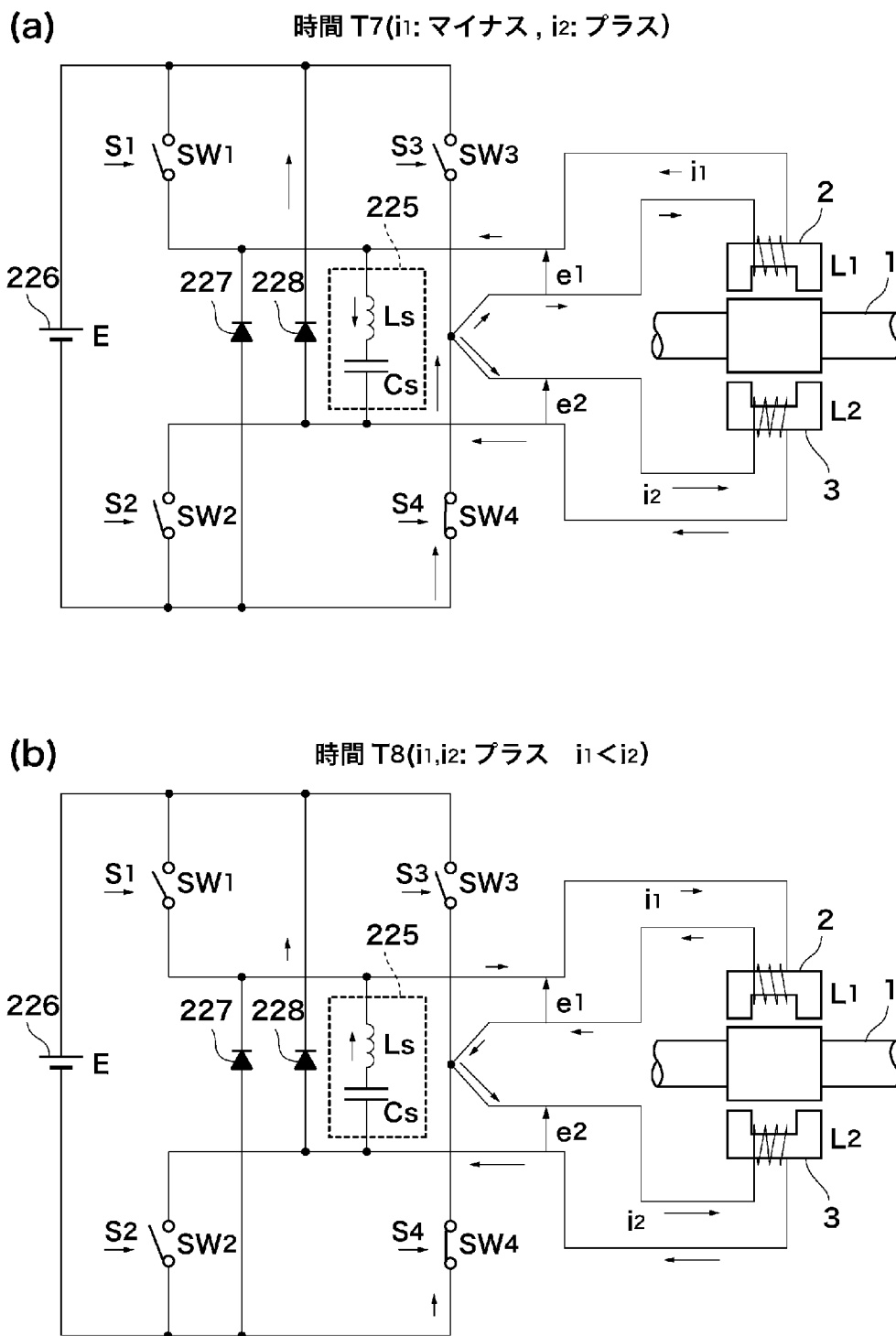
[図7]



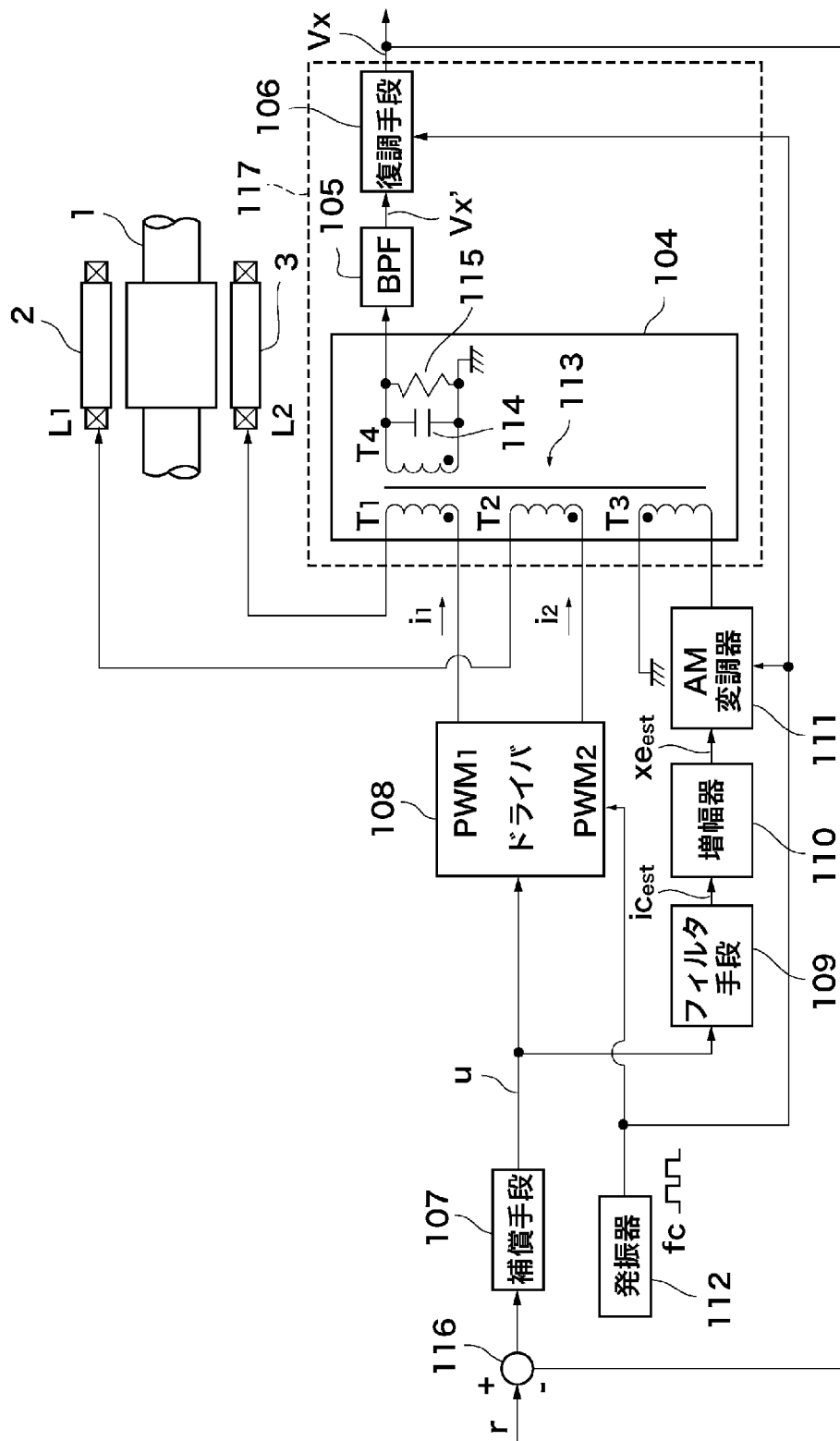
[図8]



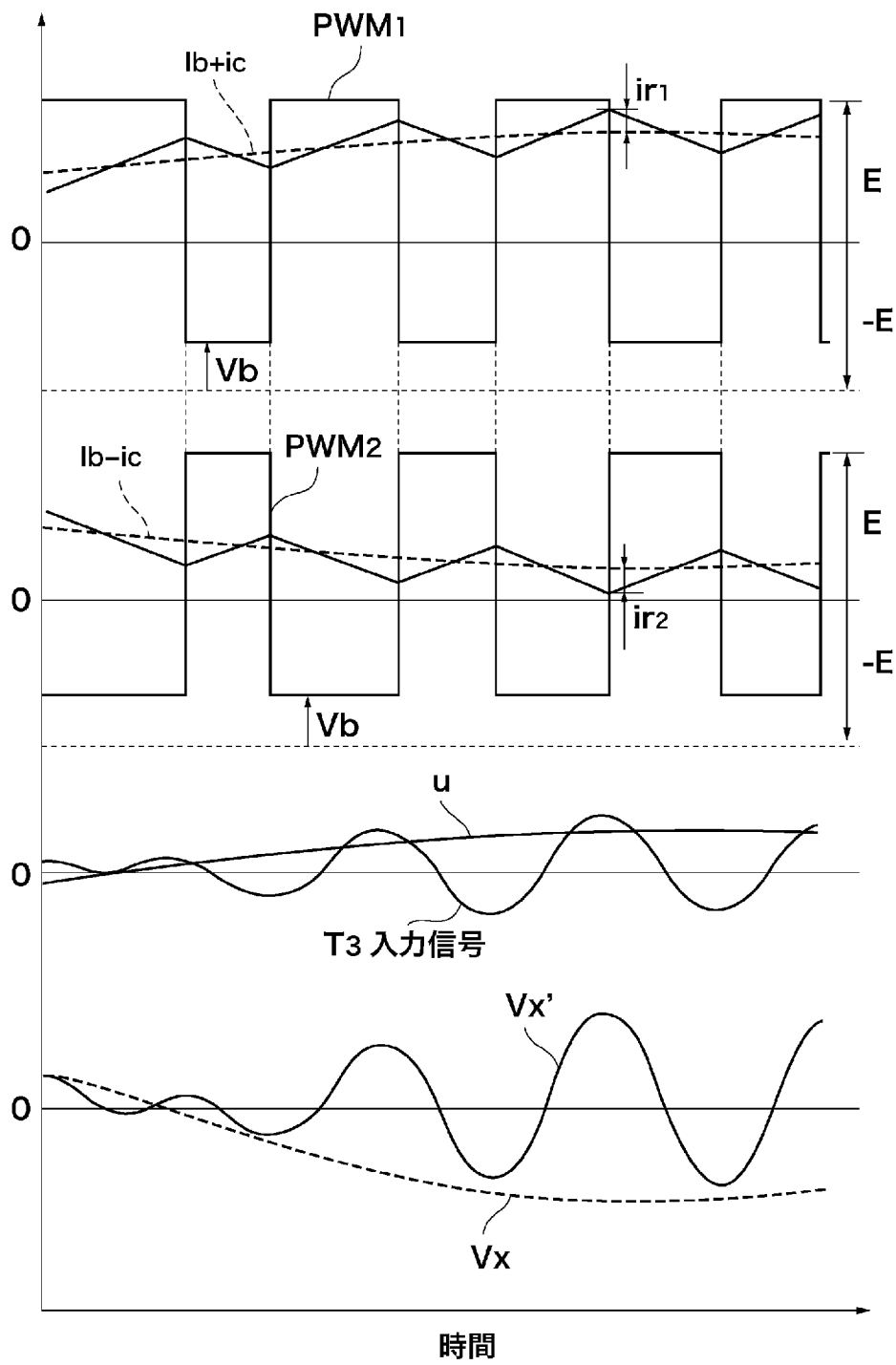
[図9]



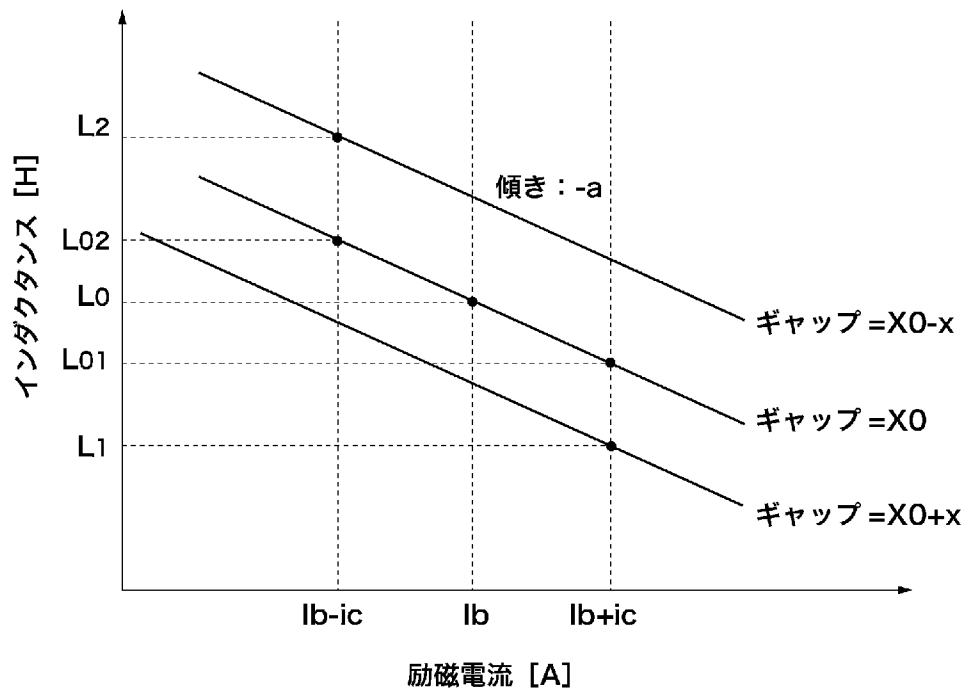
[図10]



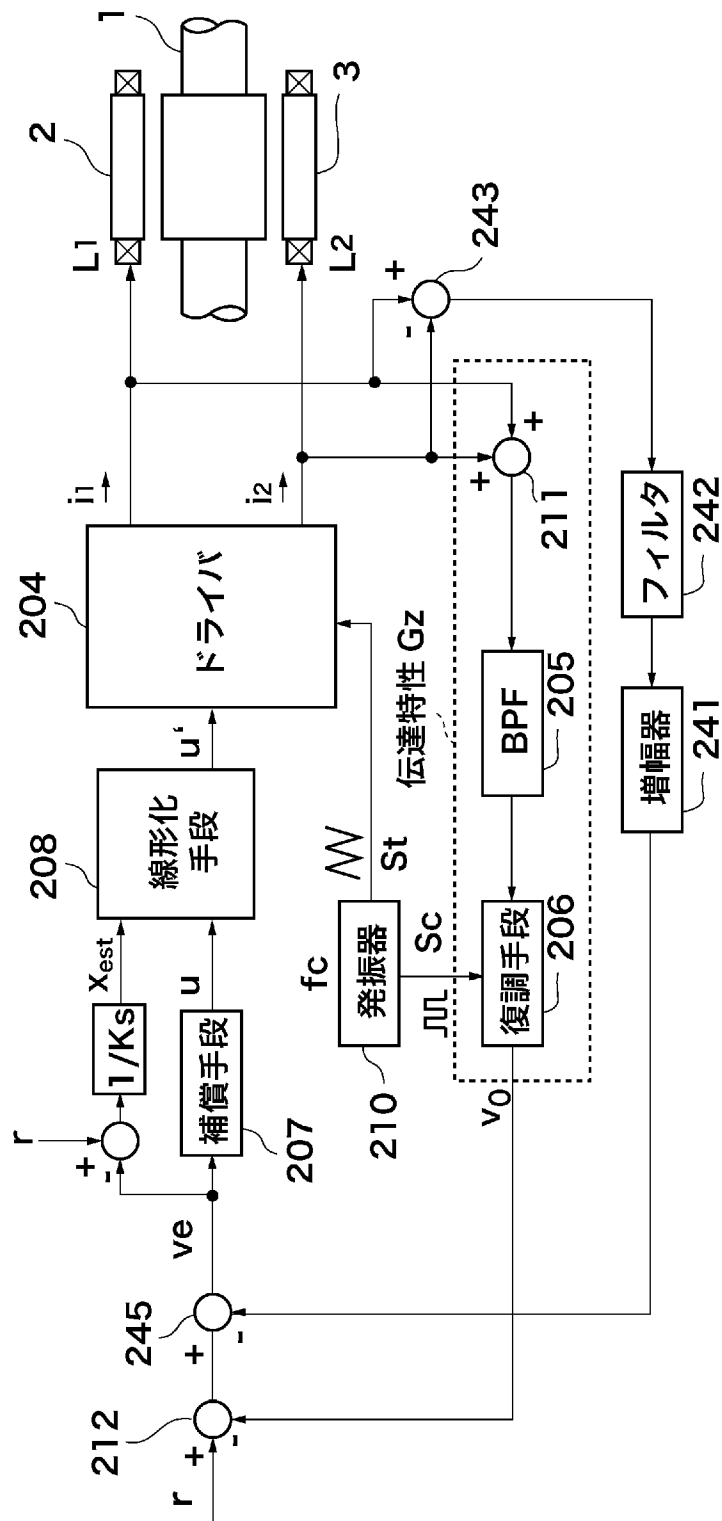
[図11]



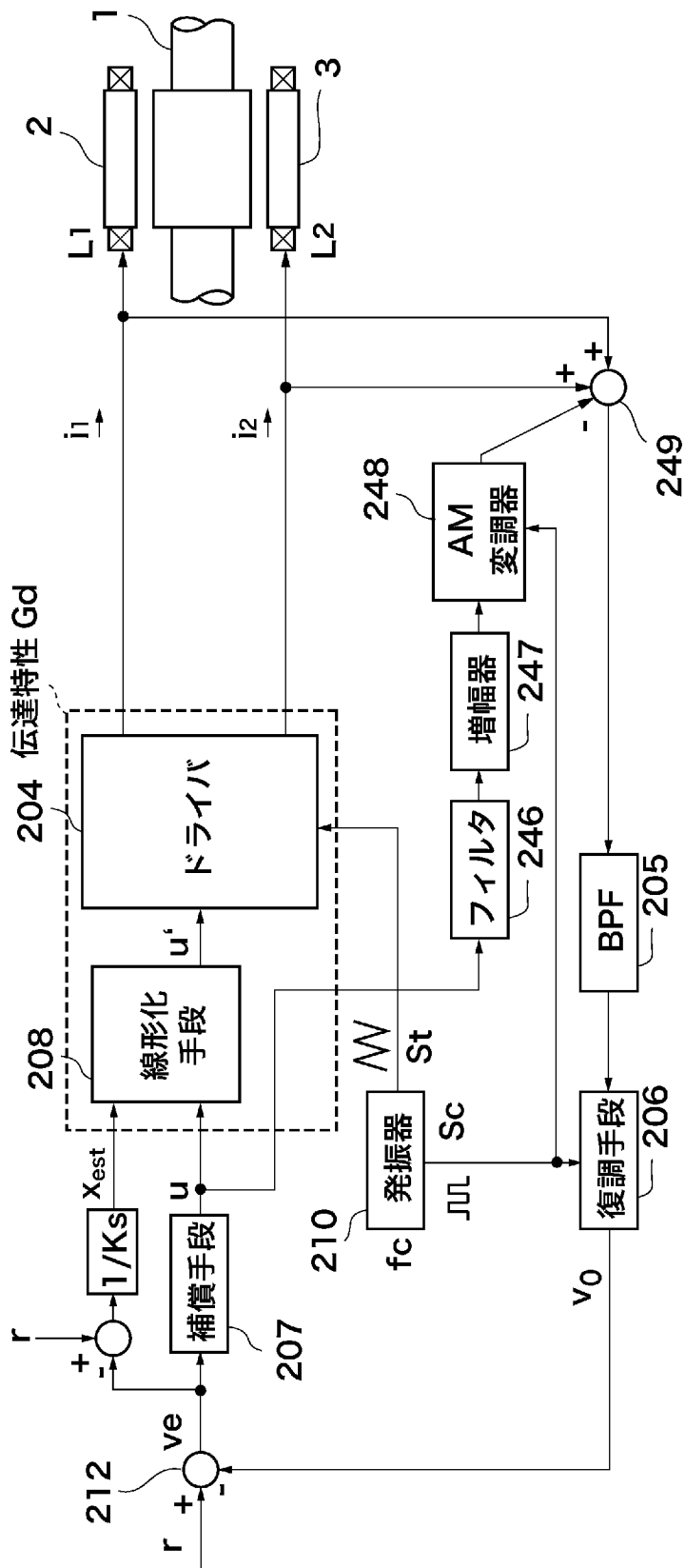
[図12]



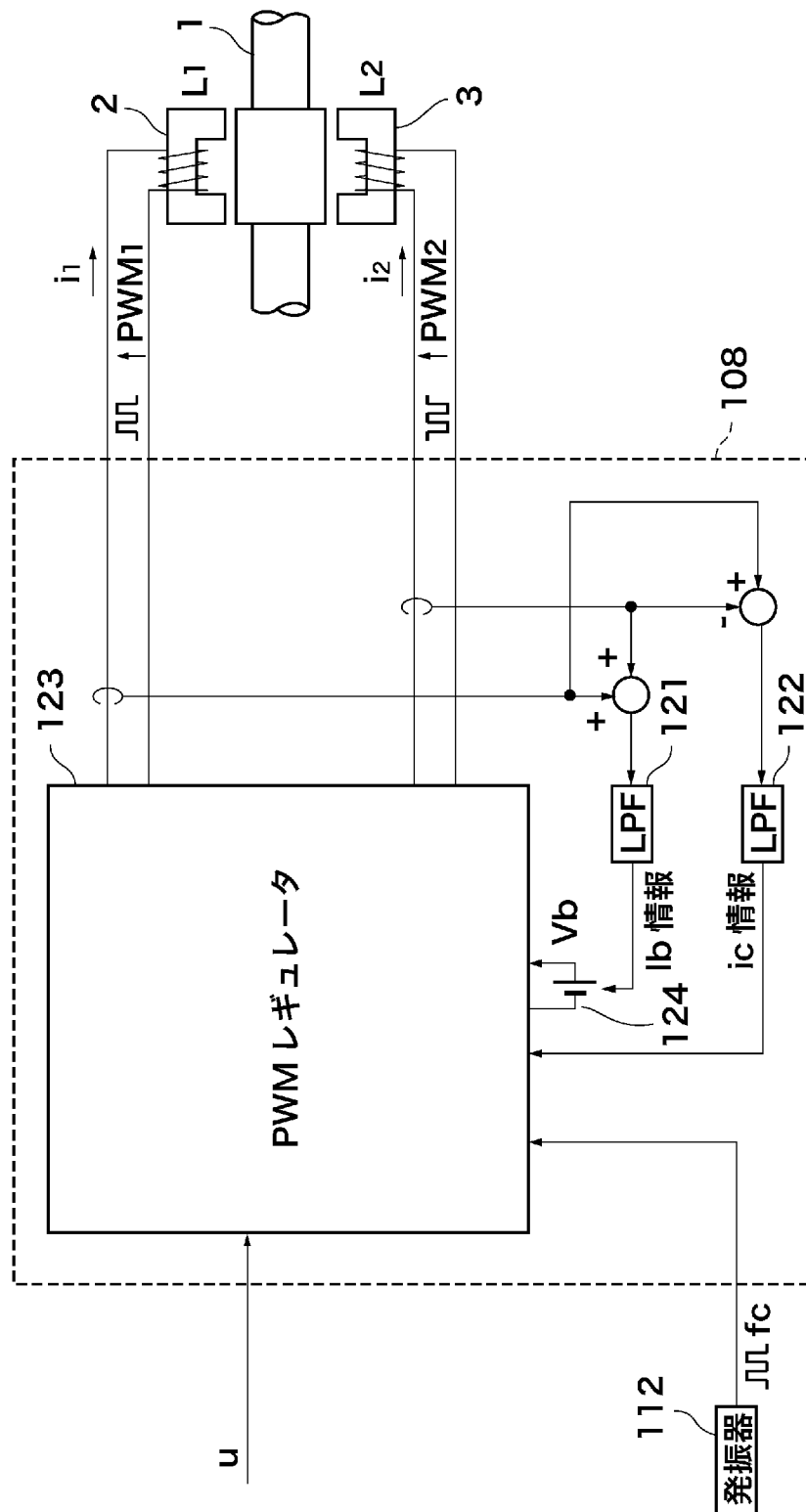
[図14]



[図16]



[図17]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/313340

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER <i>F16C32/04 (2006.01) i</i>										
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC										
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) <i>F16C32/04</i>										
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched <table border="0"> <tr> <td><i>Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td><i>1922-1996</i></td> <td><i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i></td> <td><i>1996-2006</i></td> </tr> <tr> <td><i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td><i>1971-2006</i></td> <td><i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i></td> <td><i>1994-2006</i></td> </tr> </table>			<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2006</i>	<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2006</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2006</i>
<i>Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1922-1996</i>	<i>Jitsuyo Shinan Toroku Koho</i>	<i>1996-2006</i>							
<i>Kokai Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1971-2006</i>	<i>Toroku Jitsuyo Shinan Koho</i>	<i>1994-2006</i>							
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)										
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT										
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.								
A	JP 2004-132537 A (Ebara Corp.), 30 April, 2004 (30.04.04), Claims (Family: none)	1-34								
A	JP 6-313426 A (Ebara Corp.), 08 November, 1994 (08.11.94), Claims (Family: none)	1-34								
A	JP 5-118329 A (Ebara Corp.), 14 May, 1993 (14.05.93), Claims (Family: none)	1-34								
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.										
<table border="0"> <tr> <td> * 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 </td> <td> "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 </td> </tr> </table>			* 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						
* 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 20 October, 2006 (20.10.06)		Date of mailing of the international search report 31 October, 2006 (31.10.06)								
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer								
Facsimile No.		Telephone No.								

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/313340

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 5-87140 A (Ebara Corp.), 06 April, 1993 (06.04.93), Claims (Family: none)	1-34

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/313340

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

There exists no "special technical feature" within the meaning of PCT Rule 13.2, second sentence common to the inventions of claims 1-11, 21-28 and claims 12-20 and 29-34. Accordingly, no technical relationship within the meaning of PCT Rule 13 between the different inventions can be seen.

Consequently, it is obvious that the inventions of claims 1-34 do not satisfy the requirement of unity of invention.

1. ☒ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest
the

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, payment of a protest fee..
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☒ No protest accompanied the payment of additional search fees.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. F16C32/04(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（I P C）） Int.Cl. F16C32/04			
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 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 0 6 年 日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 0 6 年 日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 0 6 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 請求の範囲の番号	
A	JP 2004-132537 A（株式会社荏原製作所）2004. 04. 30, 【特許請求の範囲】（ファミリーなし）	1-34	
A	JP 6-313426 A（株式会社荏原製作所）1994. 11. 08, 【特許請求の範囲】（ファミリーなし）	1-34	
A	JP 5-118329 A（株式会社荏原製作所）1993. 05. 14, 【特許請求の範囲】（ファミリーなし）	1-34	
☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ 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 2 0 . 1 0 . 2 0 0 6		国際調査報告の発送日 3 1 . 1 0 . 2 0 0 6	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号1 0 0 - 8 9 1 5 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） 岡野 卓也 電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 2 8	3 J 9 0 3 6

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 請求の範囲の番号
A	JP 5-87140 A (株式会社荏原製作所) 1993. 04. 06, 【特許請求の範囲】 (ファミリーなし)	1-34

第Ⅱ欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見（第1ページの2の続き）

法第8条第3項（P C T 17条(2)(a)）の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 _____ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 _____ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 _____ は、従属請求の範囲であってP C T 規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

第Ⅲ欄 発明の単一性が欠如しているときの意見（第1ページの3の続き）

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1-11, 21-28に係る発明と請求の範囲12-20, 29-34に係る発明の間には、P C T 規則13.2の第2文の意味において「特別な技術的特徴」と考えられる共通の事項は存在しないので、それら発明の間にP C T 規則13の意味における技術的な連関を見出すことはできない。

よって、請求の範囲1-34に係る発明は、発明の単一性の要件を満たしていないことは明らかである。

1. ☒ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☐ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。

追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料及び、該当する場合には、異議申立手数料の納付と共に、出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあったが、異議申立手数料が納付命令書に示した期間内に支払われなかった。
- ☒ 追加調査手数料の納付を伴う異議申立てがなかった。