

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年1月20日(20.01.2022)



(10) 国際公開番号

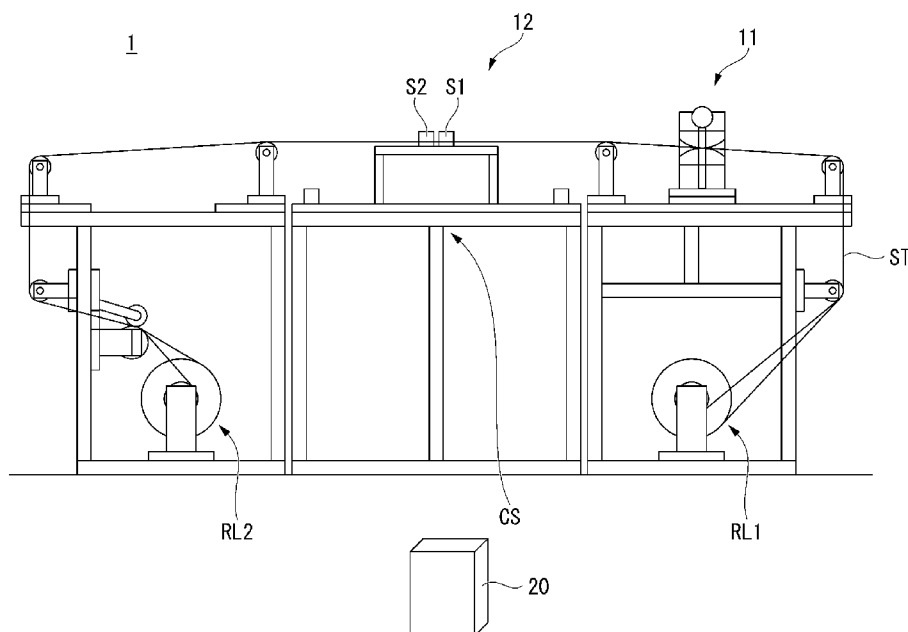
WO 2022/014438 A1

- (51) 国際特許分類:
G01R 33/02 (2006.01) *G01N 27/72* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/025623
- (22) 国際出願日: 2021年7月7日(07.07.2021)
- (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 2020-122886 2020年7月17日(17.07.2020) JP
- (71) 出願人: T D K株式会社(TDK CORPORATION)
[JP/JP]; 〒1036128 東京都中央区日本橋二丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 松田 篤史 (MATSUDA Atsushi);
〒1036128 東京都中央区日本橋二丁目5番1号 T D K株式会社内 Tokyo (JP). 長久保 洋介 (NAGAKUBO Yosuke); 〒1036128 東京都中央区日本橋二丁目5番1号 T D K株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 及川 周, 外 (OIKAWA Shu et al.);
〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 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, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,

(54) Title: GRADIENT MAGNETIC FIELD SENSOR AND MAGNETIC MATTER DETECTION DEVICE

(54) 発明の名称: 勾配磁界センサ、及び磁性物検出装置

[図1]



(57) Abstract: A gradient magnetic field sensor comprising: an alternating current power source connection terminal that is connected to a first power supply terminal of an alternating current power source; a first magnetic core that is connected between the alternating current power source connection terminal and a ground; a second magnetic core that is connected in parallel with the first magnetic core, between the alternating current power source connection terminal and the ground; an alternating current control section that is connected between the alternating current power source connection terminal

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, 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,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (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, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

and at least one of the first magnetic core and the second magnetic core, and that controls the alternating current flowing in the at least one of the first magnetic core and the second magnetic core; a first detection coil that is wound around the first magnetic core; a second detection coil that is wound around the second magnetic core and that is in differential connection with the first detection coil; and a detection circuit that detects a voltage in accordance with the difference between a first voltage output from the first detection coil and a second voltage output from the second detection coil.

(57) 要約：交流電源が有する第1電源端子が接続される交流電源接続端子と、前記交流電源接続端子とグラウンドとの間に接続される第1磁気コアと、前記交流電源接続端子とグラウンドとの間において前記第1磁気コアと並列に接続される第2磁気コアと、前記交流電源接続端子と、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方との間に接続され、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方に流れる交流電流を制御する交流電流制御部と、前記第1磁気コアに巻回される第1検出コイルと、前記第2磁気コアに巻回され、且つ、前記第1検出コイルと差動接続される第2検出コイルと、前記第1検出コイルから出力される第1電圧と、前記第2検出コイルから出力される第2電圧との差分に応じた電圧を検出する検出回路と、を備える勾配磁界センサ。

明 細 書

発明の名称： 勾配磁界センサ、及び磁性物検出装置

技術分野

[0001] 本発明は、勾配磁界センサ、及び磁性物検出装置に関する。

本願は、2020年07月17日に、日本に出願された特願2020-122886号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 2つの異なる地点それぞれにおける磁界の強さの勾配を検出する勾配磁界センサについての研究、開発が行われている。ここで、当該勾配は、当該2つの異なる地点それぞれにおける磁界の強さの差分のことである。

[0003] 勾配磁界センサは、2つの異なる地点それぞれにおける磁界の強さを検出するため、2つのセンサヘッドを備える。勾配磁界センサでは、これら2つのセンサヘッドのうち的一方が、これら2つの異なる地点のうち的一方における磁界の強さを検出する。また、勾配磁界センサでは、これら2つのセンサヘッドのうちの他方が、これら2つの異なる地点のうちの他方における磁界の強さを検出する。そして、勾配磁界センサは、これら2つのセンサヘッドから出力される信号に応じて、これら2つの異なる地点における磁界の強さの勾配を検出する。これら2つの異なる地点における磁界の強さの勾配は、磁界を変化させることが可能な物体の有無によって変化する。これを利用し、勾配磁界センサは、このような物体を検出対象物とし、検出対象物を検出することができる。

[0004] ここで、前述した通り、勾配磁界センサは、2つの異なる地点それぞれにおける磁界の強さの勾配を検出する。一方、一様磁界領域内では、如何なる地点においても同時刻の磁界の強さは、等しい。このため、勾配磁界センサは、当該領域内では、磁界の強さの勾配を検出することがないはずである。なお、一様磁界領域は、本明細書において、一様磁界が印加された領域であり、且つ、一様磁界以外の磁界が印加されていない領域のことである。また

、ある領域内に印加された一様磁界は、本明細書において、当該領域内において強さが位置に依らず一様に変化する磁界のことである。

[0005] しかしながら、勾配磁界センサが備える2つのセンサヘッドのそれぞれは、個体差が大きく、互いに感度が異なることが少なくない。このため、一様磁界領域内であっても、勾配磁界センサは、磁界の強さの勾配を検出してしまう場合があった。このような感度の異なりは、検出対象物の有無の検出における検出精度を低下させる原因となるため、望ましくない。

[0006] これに関し、直流励磁電流及び交流励磁電流のそれぞれが直列に流される2つのセンサヘッドを備え、2つのセンサヘッドそれぞれに流れる直流励磁電流量を調整することにより、2つのセンサヘッドそれぞれの感度を調整可能な勾配磁界センサが知られている（特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0007] 特許文献1：特開2019-002688号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0008] ここで、特許文献1に記載されたような勾配磁界センサが備える2つのセンサヘッドのそれぞれは、直流励磁電流とともに交流励磁電流が流される磁気コアと、磁気コアから発生する磁界により電圧が誘起される検出コイルとにより構成されている。そして、当該2つのセンサヘッドそれぞれの検出コイルは、差動接続されている。このため、一様磁界領域内では、当該2つのセンサヘッドそれぞれの感度が互いに等しい場合、2つの検出コイルのそれぞれに誘起される電圧は、振幅が互いに等しくなる。その結果、当該領域内では、当該場合、2つの検出コイルのそれぞれに誘起される電圧は、位相が互いに逆位相であれば、互いに打ち消し合う。

[0009] しかしながら、特許文献1に記載されたような勾配磁界センサが備える2つのセンサヘッドそれぞれの感度が互いに等しい場合であっても、一様磁界

領域内において、2つの検出コイルのそれぞれに誘起される電圧は、位相が互いに逆位相にならない場合がある。すなわち、当該場合であっても、当該領域内において、2つの検出コイルのそれぞれに誘起される電圧は、互いに打ち消し合わない場合がある。これは、当該領域内であっても、当該勾配磁界センサが、磁界の強さの勾配を検出してしまうことを意味し、望ましくない。なお、2つの検出コイルのそれぞれに誘起された電圧の位相が互いに逆位相とならない原因としては、当該2つのセンサヘッドを含む磁気回路における磁気結合の影響、当該2つのセンサヘッドそれぞれの磁気コアの磁気特性のバラつき等が挙げられる。

[0010] 本発明は、このような事情を考慮してなされたもので、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる勾配磁界センサ、及び磁性物検出装置を提供することを課題とする。

課題を解決するための手段

[0011] 本発明の一態様は、交流電源が有する第1電源端子が接続される交流電源接続端子と、前記交流電源接続端子とグラウンドとの間に接続される第1磁気コアと、前記交流電源接続端子とグラウンドとの間において前記第1磁気コアと並列に接続される第2磁気コアと、前記交流電源接続端子と、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方との間に接続され、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方に流れる交流電流を制御する交流電流制御部と、前記第1磁気コアに巻回される第1検出コイルと、前記第2磁気コアに巻回され、且つ、前記第1検出コイルと差動接続される第2検出コイルと、前記第1検出コイルから出力される第1電圧と、前記第2検出コイルから出力される第2電圧との差分に応じた電圧を検出する検出回路と、を備える勾配磁界センサである。

発明の効果

[0012] 本発明によれば、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]磁性物検出装置 1 の構成の一例を示す図である。

[図2]勾配磁界センサ 1 2 の回路構成の一例を示す図である。

[図3]勾配磁界センサ 1 2 に交流電流調整を行う前後における第 1 誘起電圧、第 2 誘起電圧、差動信号、検波信号、検出信号のそれぞれの時間的な変化の一例を示す図である。

[図4]勾配磁界センサ 1 2 に交流電流調整を行う前後において、巻数が 1 回のコイルによる磁気モーメントを勾配磁界センサ 1 2 が検出した場合の検出信号、差動信号、検波信号のそれぞれの時間的な変化の一例を示す図である。

[図5]図 4 に示した検出信号についての 2 つのグラフそれぞれの一部を拡大した図である。

[図6]勾配磁界センサ 1 2 A の回路構成の一例を示す図である。

[図7]交流電流制御部 C C 3 の回路構成の一例を示す図である。

[図8]ハイパスフィルタ H F を更に備える検出回路 D T の回路構成の一例を示す図である。

[図9]勾配磁界センサ 1 2 D の回路構成の一例を示す図である。

[図10]複数の磁性体を含む第 1 磁気コア C R 1 の構成の一例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0014] <実施形態>

以下、本発明の実施形態について、図面を参照して説明する。

[0015] <磁性物検出装置の概要>

まず、本実施形態に係る磁性物検出装置の概要について説明する。

[0016] 実施形態に係る磁性物検出装置は、実施形態に係る勾配磁界センサを備える。実施形態に係る勾配磁界センサは、交流電源接続端子と、第 1 磁気コアと、第 2 磁気コアと、交流電流制御部と、第 1 検出コイルと、第 2 検出コイルと、検出回路を備える。ここで、交流電源接続端子は、交流電源が有する第 1 電源端子が接続される端子である。第 1 磁気コアは、交流電源接続端子とグラウンドとの間に接続される磁気コアである。第 2 磁気コアは、交流電

源接続端子とグラウンドとの間において第1磁気コアと並列に接続される磁気コアである。交流電流制御部は、交流電源接続端子と、第1磁気コアと第2磁気コアとの少なくとも一方との間に接続される。そして、交流電流制御部は、第1磁気コアと第2磁気コアとの少なくとも一方に流れる交流電流を制御する。第1検出コイルは、第1磁気コアに巻回されるコイルである。第2検出コイルは、第2磁気コアに巻回されるコイルである。そして、第2検出コイルは、第1検出コイルと差動接続される。検出回路は、第1検出コイルから出力される第1電圧と、第2検出コイルから出力される第2電圧との差分に応じた電圧を検出する回路である。

[0017] これにより、実施形態に係る勾配磁界センサ、及び実施形態に係る磁性物検出装置は、一様磁界領域内において磁界の強さの勾配を検出してしまうことを抑制することができ、その結果、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。

[0018] 以下では、実施形態に係る磁性物検出装置と、実施形態に係る勾配磁界センサとのそれぞれの構成について、詳しく説明する。

[0019] <磁性物検出装置の構成>

以下、磁性物検出装置の一例として磁性物検出装置1を例に挙げて、実施形態に係る磁性物検出装置の構成について説明する。ここで、実施形態では、直流電力に応じた電気信号、又は交流電力に応じた電気信号を伝送する導体のことを、伝送路と称して説明する。伝送路は、例えば、基板上にプリントされた導体であってもよく、導体が線状に形成された導線であってもよく、他の導体であってもよい。また、実施形態では、電圧と称した場合、所定の基準となる電位からの電位差を意味し、基準となる電位についての図示及び説明を省略する。ここで、基準となる電位は、如何なる電位であってもよい。実施形態では、一例として、基準となる電位がグラウンド電位である場合について説明する。また、実施形態では、グラウンドと称した場合、同一のグラウンドを示す。

[0020] 図1は、磁性物検出装置1の構成の一例を示す図である。

[0021] 磁性物検出装置 1 は、検出対象物を磁界により検出する装置である。ただし、検出対象物は、磁界を変化させることが可能な物体のことであり、例えば、磁性体のことである。

[0022] 磁性物検出装置 1 は、例えば、枠体 C S と、第 1 ローラ R L 1 と、第 2 ローラ R L 2 と、着磁装置 1 1 と、第 1 センサヘッド S 1 と第 2 センサヘッド S 2 との 2 つのセンサヘッドを備える勾配磁界センサ 1 2 と、情報処理装置 2 0 を備える。なお、図 1 では、図が煩雑になるのを防ぐため、磁性物検出装置 1 における情報処理装置 2 0 と他の部材とを接続するケーブルについては、省略している。また、磁性物検出装置 1 は、枠体 C S と、第 1 ローラ R L 1 と、第 2 ローラ R L 2 と、着磁装置 1 1 と、情報処理装置 2 0 とのうちの一部又は全部を備えない構成であってもよい。また、磁性物検出装置 1 は、枠体 C S と、第 1 ローラ R L 1 と、第 2 ローラ R L 2 と、着磁装置 1 1 と、情報処理装置 2 0 とのうちの一部又は全部に代えて、他の部材、他の装置等を、勾配磁界センサ 1 2 とともに備える構成であってもよい。また、磁性物検出装置 1 は、枠体 C S と、第 1 ローラ R L 1 と、第 2 ローラ R L 2 と、着磁装置 1 1 と、情報処理装置 2 0 との全部に加えて、他の部材、他の装置等を、勾配磁界センサ 1 2 とともに備える構成であってもよい。

[0023] 枠体 C S には、磁性物検出装置 1 の各部材が取り付けられる。枠体 C S は、主として、図示しない天板と、図示しない底板と、天板と底板とを接続する複数の支柱とから構成される。図 1 に示した例では、枠体 C S の外形状は、ほぼ直方体形状である。なお、枠体 C S の外形状は、如何なる形状であってもよい。

[0024] 枠体 C S の内部には、第 1 ローラ R L 1 と、第 2 ローラ R L 2 とが設けられている。

[0025] 第 1 ローラ R L 1 は、検出対象物の付着の有無を検査される対象となるシート部材 S T がロール状に巻かれたローラのことである。第 2 ローラ R L 2 は、第 1 ローラ R L 1 から引き出されたシート部材 S T を所定の経路に沿って搬送させながら巻き取るローラのことである。第 2 ローラ R L 2 は、図示

しないサーボモータ等により回転させられる。これにより、第2ローラRL2は、第1ローラRL1から引き出されたシート部材STを巻き取ることができる。すなわち、第2ローラRL2は、駆動ローラである。そして、第1ローラRL1は、第2ローラRL2の回転に応じてシート部材STが巻き取られながら回転する受動ローラである。なお、当該サーボモータは、例えば、後述する情報処理装置20により制御される。

[0026] シート部材STは、第1ローラRL1から引き出されて第2ローラRL2により巻き取られるまでの間に、着磁装置11により発生させられた磁界の中を搬送させられる。これにより、シート部材STに付着した検出対象物は、磁化する。シート部材STは、当該磁界の中を搬送させられた後、勾配磁界センサ12が検出対象物の有無を検出可能な所定の検出領域を搬送させられる。そして、シート部材STは、第2ローラRL2に巻き付けられる。

[0027] ここで、着磁装置11は、所定の磁化領域に所定の強さの磁界を発生させ、磁化領域内に入った磁性体を磁化する装置である。着磁装置11については、既知の装置であるため、これ以上の詳細な説明を省略する。

[0028] 勾配磁界センサ12は、前述の検出領域における2つの異なる地点のそれぞれに配置されたセンサヘッド、すなわち、第1センサヘッドS1と第2センサヘッドS2とにより、当該2つの異なる地点における磁界の強さの勾配を検出する。これにより、勾配磁界センサ12から出力される検出信号を取得する情報処理装置20は、検出信号に基づいて、検出領域を搬送されたシート部材STに検出対象物が付着していたか否かを判定することができる。なお、以下では、説明の便宜上、第1センサヘッドS1が配置された地点と第2センサヘッドS2が配置された地点との2つの地点における磁界の強さの勾配を、単に勾配と称して説明する。

[0029] 情報処理装置20は、勾配磁界センサ12と通信可能に接続される。そして、前述した通り、情報処理装置20は、勾配磁界センサ12から出力された検出信号に基づいて、検出領域を搬送されたシート部材STに検出対象物が付着していたか否かを判定する。

[0030] 情報処理装置 20 は、例えば、検出領域を搬送されたシート部材 S T に検出対象物が付着していたと判定した場合、前述のサーボモータを制御して第 2 ロール R L 2 によるシート部材 S T の巻き取りを停止させるとともに、シート部材 S T に検出対象物が付着していたことを報知する報知処理を行う。報知処理は、例えば、情報処理装置 20 のディスプレイに、シート部材 S T に検出対象物が付着していたことを示す情報を表示させる処理である。これにより、磁性物検出装置 1 のユーザは、シート部材 S T から検出対象物を除去すること、シート部材 S T を不良品として特定すること等を行うことができる。なお、報知処理は、このような表示処理に代えて、当該情報を示す音声、振動、光等を出力する処理であってもよい。

[0031] 情報処理装置 20 は、例えば、ノート P C (Personal Computer)、タブレット P C、デスクトップ P C、ワークステーション、多機能携帯電話端末 (スマートフォン)、携帯電話端末、P D A (Personal Digital Assistant) 等である。なお、情報処理装置 20 は、マイコン等の他の情報処理装置であってもよい。

[0032] なお、磁性物検出装置 1 において、着磁装置 11 と、勾配磁界センサ 12 と、情報処理装置 20 とのうちの一部又は全部は、一体に構成されてもよい。

[0033] また、検出対象物の付着の検査を磁性物検出装置 1 が行う対象は、シート部材 S T に代えて、検出対象物の有無の検査を行うことが可能な他の物体であってもよい。例えば、勾配磁界センサ 12 を備えた磁性物探知機は、地中における磁性物の有無を検出する。この場合、当該磁性物探知機は、磁性物検出装置 1 の一例である。また、地中における磁性物は、当該場合における検出対象物の一例である。

[0034] <勾配磁界センサの回路構成>

以下、図 2 を参照し、勾配磁界センサ 12 の回路構成について説明する。

図 2 は、勾配磁界センサ 12 の回路構成の一例を示す図である。

[0035] 勾配磁界センサ 12 は、交流電源接続端子 C T 1 と、第 1 センサヘッド S

1と、第2センサヘッドS2と、第0移相回路PS0と、交流電流制御部CC1と、検出回路DTと、検出信号出力端子CT2を備える。また、第1センサヘッドS1は、第1磁気コアCR1と、第1検出コイルCL1を備える。また、第2センサヘッドS2は、第2磁気コアCR2と、第2検出コイルCL2を備える。また、第0移相回路PS0は、入力端子PS01と、出力端子PS02との2つの端子を有する。また、交流電流制御部CC1は、第1入力端子CC11と、第2入力端子CC12と、第1出力端子CC13と、第2出力端子CC14を有する。また、交流電流制御部CC1は、第1移相回路PS1と、第1可変抵抗VR11と、第1コンデンサC1、第2移相回路PS2と、第2可変抵抗VR12と、第2コンデンサC2を備える。また、検出回路DTは、第1入力端子DT1と、第2入力端子DT2と、出力端子DT3を有する。また、検出回路DTは、位相検波回路PDと、ローパスフィルタLFと、誤差アンプEAと、抵抗R1と、第3コンデンサC3を備える。また、位相検波回路PDは、第1入力端子PD1と、第2入力端子PD2と、出力端子PD3を有する。

[0036] また、勾配磁界センサ12は、伝送路を介して、交流電源P1と接続される。より具体的には、勾配磁界センサ12の交流電源接続端子CT1は、伝送路を介して、交流電源P1が有する2つの電源端子のうち的一方である第1電源端子P11と接続される。そして、交流電源P1が有する2つの電源端子のうちの他方である第2電源端子P12は、伝送路を介して、グラウンドに接地される。ここで、交流電源P1は、如何なる交流電源であってもよい。なお、交流電源接続端子CT1と第1電源端子P11との間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第2電源端子P12とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0037] また、勾配磁界センサ12は、伝送路を介して、情報処理装置20と接続される。より具体的には、勾配磁界センサ12の検出信号出力端子CT2は

、伝送路を介して、情報処理装置 20 と接続される。なお、検出信号出力端子 CT 2 と情報処理装置 20 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0038] また、交流電源接続端子 CT 1 は、伝送路を介して、第 0 移相回路 PS 0 が有する入力端子 PS 0 1 と、検出回路 DT が有する第 1 入力端子 DT 1 とのそれぞれと接続される。そして、第 0 移相回路 PS 0 が有する出力端子 PS 0 2 は、伝送路を介して、交流電流制御部 CC 1 が有する第 1 入力端子 CC 1 1 と、交流電流制御部 CC 1 が有する第 2 入力端子 CC 1 2 とのそれぞれと接続される。なお、交流電源接続端子 CT 1 と入力端子 PS 0 1 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、交流電源接続端子 CT 1 と第 1 入力端子 DT 1 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子 PS 0 2 と第 1 入力端子 CC 1 1 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子 PS 0 2 と第 2 入力端子 CC 1 2 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0039] また、交流電流制御部 CC 1 において、第 1 入力端子 CC 1 1 と第 1 出力端子 CC 1 3 との間には、伝送路を介して、第 1 移相回路 PS 1 と、第 1 可変抵抗 VR 1 1 と、第 1 コンデンサ C 1 とが直列に接続される。また、交流電流制御部 CC 1 において、第 2 入力端子 CC 1 2 と第 2 出力端子 CC 1 4 との間には、伝送路を介して、第 2 移相回路 PS 2 と、第 2 可変抵抗 VR 1 2 と、第 2 コンデンサ C 2 とが直列に接続される。なお、第 1 入力端子 CC 1 1 と第 1 出力端子 CC 1 3 との間には、勾配磁界センサ 12 が有する機能を損なわない範囲内において、第 1 移相回路 PS 1 と、第 1 可変抵抗 VR 1

1と、第1コンデンサC1とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第1入力端子CC11と第1出力端子CC13との間において、第1移相回路PS1と、第1可変抵抗VR11と、第1コンデンサC1とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。また、第2入力端子CC12と第2出力端子CC14との間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損なわない範囲内において、第2移相回路PS2と、第2可変抵抗VR12と、第2コンデンサC2とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第2入力端子CC12と第2出力端子CC14との間において、第2移相回路PS2と、第2可変抵抗VR12と、第2コンデンサC2とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。

[0040] また、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13とグラウンドとの間には、伝送路を介して、第1センサヘッドS1の第1磁気コアCR1が接続される。また、交流電流制御部CC1の第2出力端子CC14とグラウンドとの間には、伝送路を介して、第2センサヘッドS2の第2磁気コアCR2が接続される。以下では、説明の便宜上、第1出力端子CC13から第1磁気コアCR1に流れる交流電流を、図2の矢印によって示されるように、第1交流励磁電流AC1と称して説明する。また、以下では、説明の便宜上、第2出力端子CC14から第2磁気コアCR2に流れる交流電流を、図2の矢印によって示されるように、第2交流励磁電流AC2と称して説明する。なお、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損なわない範囲内において、第1磁気コアCR1とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、交流電流制御部CC1が有する第2出力端子CC14とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損なわない範囲内において、第2磁気コアCR2とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0041] また、検出回路DTにおいて、第1入力端子DT1は、伝送路を介して、

位相検波回路PDが有する第1入力端子PD1と接続される。また、位相検波回路PDが有する出力端子PD3は、伝送路を介して、ローパスフィルタLFが有する図示しない入力端子と接続される。また、ローパスフィルタLFが有する図示しない出力端子は、伝送路を介して、誤差アンプEAが有する反転入力端子と接続される。また、誤差アンプEAが有する非反転入力端子は、伝送路を介して、グラウンドに接地される。また、誤差アンプEAが有する出力端子は、伝送路を介して、検出回路DTが有する出力端子DT3と、抵抗R1が有する2つの端子のうち的一方とのそれぞれと接続される。また、抵抗R1が有する2つの端子のうちの他方は、伝送路を介して、位相検波回路PDが有する第2入力端子DT2と、第3コンデンサC3が有する2つの端子のうち的一方と接続される。また、第3コンデンサC3が有する2つの端子のうちの他方は、伝送路を介して、位相検波回路PDが有する第2入力端子PD2と接続される。また、抵抗R1と第3コンデンサC3とを接続する伝送路は、他の伝送路を介して、検出回路DTが有する第2入力端子DT2と接続される。このように、検出回路DTは、PSD (Phase Sensitive Detector) 回路である。なお、第1入力端子DT1と第1入力端子PD1との間には、検出回路DTが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子PD3とローパスフィルタLFが有する入力端子との間には、検出回路DTが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、ローパスフィルタLFが有する出力端子と誤差アンプEAが有する反転入力端子との間には、検出回路DTが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、誤差アンプEAが有する非反転入力端子とグラウンドの間には、検出回路DTが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、誤差アンプEAが有する出力端子と出力端子DT3との間には、検出回路DTが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続

される構成であってもよい。また、誤差アンプE Aが有する出力端子と抵抗R 1との間には、検出回路D Tが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、抵抗R 1と第3コンデンサC 3との間には、検出回路D Tが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第3コンデンサC 3と第2入力端子P D 2との間には、検出回路D Tが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、抵抗R 1と第3コンデンサC 3とを接続する伝送路と第2入力端子D T 2との間には、検出回路D Tが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0042] また、検出回路D Tが有する第2入力端子D T 2は、伝送路を介して、第1検出コイルC L 1が有する2つの端子のうち的一方と接続される。また、第1検出コイルC L 1が有する2つの端子のうち他方は、伝送路を介して、第2検出コイルC L 2が有する2つの端子のうち的一方と接続される。そして、第2検出コイルC L 2が有する2つの端子のうち他方は、伝送路を介して、グラウンドに接地される。ただし、第2検出コイルC L 2は、第1検出コイルC L 1と差動接続される。なお、第2入力端子D T 2と第1検出コイルC L 1との間には、勾配磁界センサ1 2が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第1検出コイルC L 1と第2検出コイルC L 2との間には、勾配磁界センサ1 2が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第2検出コイルC L 2とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ1 2が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0043] <実施形態に係る勾配磁界センサの動作>

次に、勾配磁界センサ1 2の動作について説明する。

[0044] 上記のような回路構成の勾配磁界センサ1 2において、交流電源P 1は、

交流電源接続端子C T 1 に交流電流を入力する。交流電源接続端子C T 1 に入力された交流電流は、2つに分岐される。2つに分岐された交流電流の一方は、交流励磁電流として第0移相回路P S 0に入力される。また、2つの分岐された交流電流の他方は、参照信号として検出回路D T が有する第1入力端子D T 1に入力される。

[0045] 第0移相回路P S 0に入力された交流励磁電流は、第0移相回路P S 0により移相された後、第1交流励磁電流A C 1と第2交流励磁電流A C 2との2つの交流励磁電流に分岐される。

[0046] 第1交流励磁電流A C 1は、第1移相回路P S 1、第1可変抵抗V R 1 1、第1コンデンサC 1を介して第1磁気コアC R 1に流れる。このため、第1交流励磁電流A C 1は、第1移相回路P S 1により移相され、第1可変抵抗V R 1 1により振幅が調整される。これにより、第1検出コイルC L 1には、第1磁気コアC R 1に流れた第1交流励磁電流A C 1と、第1検出コイルC L 1に印加された磁界の強さに応じた電圧が誘起される。すなわち、当該電圧は、外部から第1検出コイルC L 1に印加された磁界の強さに応じて変化する。以下では、説明の便宜上、第1検出コイルC L 1に誘起される電圧を、第1誘起電圧と称して説明する。なお、第1コンデンサC 1は、A C (Alternating Current) カップリングのためのコンデンサである。第1コンデンサC 1の存在により、勾配磁界センサ12では、直流電流が第1出力端子C C 1 3から第1入力端子C C 1 1へ流れてしまうことを抑制することができる。

[0047] 一方、第2交流励磁電流A C 2は、第2移相回路P S 2、第2可変抵抗V R 1 2、第2コンデンサC 2を介して第2磁気コアC R 2に流れる。このため、第2交流励磁電流A C 2は、第2移相回路P S 2により移相され、第2可変抵抗V R 1 2により振幅が調整される。これにより、第2検出コイルC L 2には、第2磁気コアC R 2に流れた第2交流励磁電流A C 2と、第2検出コイルC L 2に印加された磁界の強さに応じた電圧が誘起される。すなわち、当該電圧は、外部から第2検出コイルC L 2に印加された磁界の強さ

に応じて変化する。以下では、説明の便宜上、第2検出コイル CL_2 に誘起される電圧を、第2誘起電圧と称して説明する。なお、第2コンデンサ C_2 は、ACカップリングのためのコンデンサである。第2コンデンサ C_2 の存在により、勾配磁界センサ12では、直流電流が第2出力端子 CC_{14} から第2入力端子 CC_{12} へ流れてしまうことを抑制することができる。

[0048] 勾配磁界センサ12では、このようにして誘起された第1誘起電圧及び第2誘起電圧に応じた信号が、差動信号 V_{out} として検出回路DTが有する第2入力端子DT2に入力する。検出回路DTの位相検波回路PDは、このようにして入力された差動信号 V_{out} と、交流電源P1から入力された参照信号とのずれに応じた信号を、検波信号としてローパスフィルタLFに入力する。ローパスフィルタLFは、位相検波回路PDから入力された検波信号から所定の第1周波数以上の成分を除去した出力信号を誤差アンプEAの反転入力端子に出力する。誤差アンプEAは、誤差アンプEAの反転入力端子に入力された出力信号の電位とグラウンド電位との電位差に応じた信号を検出信号として、検出信号出力端子CT2と抵抗R1とのそれぞれに出力する。なお、第3コンデンサ C_3 は、ACカップリングのためのコンデンサである。また、第3コンデンサ C_3 が有する端子のうち位相検波回路PDと接続された端子と反対側の端子には、バッファ回路（例えば、ボルテージフォロワ等）が接続される。このバッファ回路については、図を簡略化するため、図示を省略している。

[0049] 抵抗R1に入力された検出信号は、図示しないバッファ回路の存在により、第3コンデンサ C_3 へ入力されることなく、帰還電流として第2入力端子DT2から第1検出コイル CL_1 に向かって流れていく。

[0050] このような動作を行う検出回路DTには、調整を行うことにより、差動信号 V_{out} の信号レベルが0[V]である場合、信号レベルが0[V]の検出信号を検出信号出力端子CT2から出力させ、差動信号 V_{out} の信号レベルが0[V]ではない場合、信号レベルが0[V]ではない検出信号を検出信号出力端子CT2から出力させることができる。なお、検出回路DTの

調整については、既知であるため、これ以上の詳細な説明を省略する。

[0051] 以上のような動作により、勾配磁界センサ 1 2 は、勾配を検出する。しかしながら、勾配磁界センサ 1 2 は、第 1 誘起電圧及び第 2 誘起電圧のそれぞれについての調整を行わない場合、一様磁界領域内においても、勾配を検出してしまう場合がある。これは、検出対象物が存在しないにも拘わらず、検出対象物が存在しているとして誤検出してしまうことに繋がるため、望ましくない。そこで、勾配磁界センサ 1 2 は、以下において説明する所定の調整方法によって調整されることにより、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。そこで、以下では、勾配磁界センサ 1 2 における第 1 誘起電圧及び第 2 誘起電圧のそれぞれについての調整方法について説明する。

[0052] <勾配磁界センサにおける第 1 誘起電圧及び第 2 誘起電圧のそれぞれについての調整方法>

以下、勾配磁界センサ 1 2 における第 1 誘起電圧及び第 2 誘起電圧のそれぞれについての調整方法について説明する。

[0053] まず、勾配磁界センサ 1 2 により検出される磁界の強さと、勾配磁界センサ 1 2 から出力される検出信号との関係について説明する。

[0054] ある時刻 t において第 1 センサヘッド S_1 に印加される磁界の強さ $B_1(t)$ が以下の式 (1) によって表され、時刻 t において第 2 センサヘッド S_2 に印加される磁界の強さ $B_2(t)$ が以下の式 (2) によって表される場合を考える。ただし、ここでは、一例として、一様磁界が勾配磁界センサ 1 2 に印加されているとともに、磁化された検出対象物が勾配磁界センサ 1 2 の検出領域内を搬送される場合を考えている。なお、以下では、説明の便宜上、検出対象物から第 1 センサヘッド S_1 に印加される磁界を、第 1 磁界と称して説明する。また、以下では、説明の便宜上、検出対象物から第 2 センサヘッド S_2 に印加される磁界を、第 2 磁界と称して説明する。

[0055] [数1]

$$B_1(t) = B_{01}(t) + B \cos(\omega_n t) \quad \cdots (1)$$

[数2]

$$B_2(t) = B_{02}(t) + B \cos(\omega_n t) \quad \cdots (2)$$

[0056] ここで、上記の式(1)の $B_{01}(t)$ は、時刻 t における第1磁界の強さを示す関数である。また、式(2)の $B_{02}(t)$ は、時刻 t における第2磁界の強さを示す関数である。また、式(1)及び式(2)の $B \cos(\omega_n t)$ は、時刻 t における一様磁界の強さを示す関数である。ただし、 ω_n は、一様磁界の強さの時間的な変化についての角振動数を示す。また、 B は、一様磁界の最大の強さを示す。

[0057] また、時刻 t における参照信号の大きさが、以下の式(3)に示した $V_r(t)$ によって表される場合を考える。ただし、以下の式(3)の A は、参照信号の振幅を示す。また、以下の式(3)の ω は、交流信号である参照信号の角振動数を示す。

[0058] [数3]

$$V_r(t) = A \cos(\omega t) \quad \cdots (3)$$

[0059] また、時刻 t における差動信号 V_{out} の大きさが、以下の式(4)に示した $V_i(t)$ によって表される場合を考える。

[0060] [数4]

$$V_i(t) = a\{1 + k_1 B_1(t)\} \cos(\omega t + \theta + \alpha) + b\{1 + k_2 B_2(t)\} \cos(\omega t + \theta + \beta) \quad \cdots (4)$$

[0061] ここで、上記の式(4)に示した θ は、第0移相回路PS0による交流励磁電流の移相量を示す。また、式(4)に示した α は、第1移相回路PS1による第1交流励磁電流AC1の移相量を示す。また、式(4)に示した β は、第2移相回路PS2による第2交流励磁電流AC2の移相量を示す。また、式(4)の a は、第1可変抵抗VR11による第1交流励磁電流AC1の振幅の調整量を示す。また、式(4)の b は、第2可変抵抗VR12による第2交流励磁電流AC2の振幅の調整量を示す。また、差動信号 V_{out} は、第1磁界がAM変調された結果として誘起された第1誘起電圧と、第2

磁界がAM変調された結果として誘起された第2誘起電圧との差分によって得られる。これらのAM変調の変調指数（すなわち、磁気感度）が、式（4）に示した k_1 及び k_2 である。なお、 k_1 は、第1磁界のAM変調の変調指数である。また、 k_2 は、第2磁界のAM変調の変調指数である。

[0062] 位相検波回路PDは、上記の式（3）によって示される参照信号の大きさ $V_r(t)$ と、上記の式（4）に依って示される差動信号 V_{out} の大きさ $V_i(t)$ とに基づいて、以下に示す式（5）のような信号を、時刻 t における検波信号の大きさ $V_o(t)$ として出力する。

[0063] [数5]

$$\begin{aligned} V_o(t) &= V_r(t) \cdot V_i(t) \\ &= A \cos(\omega t) \cdot a\{1 + k_1 B_1(t)\} \cos(\omega t + \theta + \alpha) \\ &\quad + A \cos(\omega t) \cdot b\{1 + k_2 B_2(t)\} \cos(\omega t + \theta + \beta) \quad \dots (5) \end{aligned}$$

[0064] 上記の式（5）の最下段の右辺は、加法定理を用いて、以下の式（6）のように変形できる。

[0065] [数6]

$$\begin{aligned} V_o(t) &= \frac{A}{2} a\{1 + k_1 B_1(t)\} \{\cos(\theta + \alpha) + \cos(2\omega t + \theta + \alpha)\} \\ &\quad + \frac{A}{2} b\{1 + k_2 B_2(t)\} \{\cos(\theta + \beta) + \cos(2\omega t + \theta + \beta)\} \quad \dots (6) \end{aligned}$$

[0066] 上記の式（6）の右辺の $\cos(\theta + \alpha)$ 及び $\cos(\theta + \beta)$ は、時刻 t によって変動しない項、すなわち、直流成分である。この直流成分は、ローパスフィルタLPFにより除去可能である。そこで、式（6）から当該直流成分を除去した式が、以下の式（7）である。

[0067] [数7]

$$\begin{aligned} V_o(t) &= \frac{A}{2} a\{1 + k_1 B_1(t)\} \cos(2\omega t + \theta + \alpha) + \frac{A}{2} b\{1 + k_2 B_2(t)\} \cos(2\omega t + \theta + \beta) \\ &\quad \dots (7) \end{aligned}$$

[0068] ここで、上記の式（7）において、第0移相回路PS0による移相量 θ と第1移相回路PS1による移相量 α との和である $(\theta + \alpha)$ と、第0移相回

路 P S 0 による移相量 θ と第 2 移相回路 P S 2 による移相量 β との和である $(\theta + \beta)$ との差 $(\alpha - \beta)$ が $-\pi$ であることを要請する。この要請は、第 1 誘起電圧の位相と、第 2 誘起電圧の位相とを逆位相にさせる要請である。そして、この要請は、第 1 移相回路 P S 1 の移相量 α と、第 2 移相回路 P S 2 の移相量 β との少なくとも一方を調整することにより、実現可能である。また、上記の式 (7) において、第 1 可変抵抗 V R 1 1 による調整量 a と変調指数 k_1 との積と、第 2 可変抵抗 V R 1 2 による調整量 b と変調指数 k_2 との積とが等しいこと（すなわち、 $a k_1 = b k_2$ ）を要請する。この要請は、第 1 誘起電圧の振幅と、第 2 誘起電圧の振幅とを等しくさせる要請である。そして、この要請は、第 1 可変抵抗 V R 1 1 の調整量 a と、第 2 可変抵抗 V R 1 2 の調整量 b との少なくとも一方を調整することにより、実現可能である（なお、この調整を行うために変調指数 k_1 及び変調指数 k_2 の値を知る必要はない）。この 2 つの要請を式 (7) に適用すると、式 (7) は、式 (8) のように変形される。

[0069] [数8]

$$V_0(t) = \frac{A}{2} a \cos(\theta + \alpha) \left[k_1 \{B_1(t) - B_2(t)\} + \left(1 - \frac{k_1}{k_2}\right) \right] \cdots (8)$$

[0070] 上記の式 (8) から、上記のような 2 つの調整を行うことにより、検出信号の大きさ $V_0(t)$ から一様磁界の成分 $B \cos(\omega_n t)$ を打ち消し合わせることができることが分かる。以下では、説明の便宜上、これら 2 つの調整を、交流電流調整と称して説明する。すなわち、交流電流調整を行うことにより、勾配磁界センサ 1 2 は、一様磁界の強さを検出せずに、勾配を検出することができる。その結果、勾配磁界センサ 1 2 は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。なお、上記の式 (8) の右辺の大括弧内第 2 項は、オフセット成分である。このオフセット成分は、誤差として検出信号に含まれることになる。このオフセット成分の大きさを知るためには、変調指数 k_1 及び変調指数 k_2 の値を知るか、変調指数 k_1 と変調指数 k_2 との比を知る必要がある。しかしながら、このオフセット成分は、後述す

るように、信号処理により除去することが可能である。信号処理によってオフセット成分を除去する場合、変調指数 k_1 及び変調指数 k_2 の値を知るか、変調指数 k_1 と変調指数 k_2 との比を知る必要はない。なお、このオフセット成分は、一般的に、上記の式（８）の右辺の大括弧内第１項よりも小さい。このため、実施形態では、このオフセット成分を除去せずに誤差として扱う場合について説明する。

[0071] ここで、図３は、勾配磁界センサ１２に交流電流調整を行う前後における第１誘起電圧、第２誘起電圧、差動信号、検波信号、検出信号のそれぞれの時間的な変化の一例を示す図である。

[0072] 図３に示した４つのグラフのうち「調整前」というラベルによって囲まれた左側の２つのグラフは、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ１２における第１誘起電圧、第２誘起電圧、差動信号、検波信号、検出信号のそれぞれの時間的な変化を示す図である。また、当該４つのグラフのうちの「調整後」というラベルによって囲まれた右側の２つのグラフは、交流電流調整を行なった後の勾配磁界センサ１２における第１誘起電圧、第２誘起電圧、差動信号、検波信号、検出信号のそれぞれの時間的な変化を示す図である。ただし、これら４つのグラフのうちの上側２つのグラフは、強さが５０Ｈｚの正弦波状に変化する一様磁界領域内において巻数が１回のコイルによる磁気モーメントを検出させた場合におけるグラフである。また、これら４つのグラフのうちの下側２つのグラフは、磁界が印加されていない領域内に配置された勾配磁界センサ１２における第１誘起電圧、第２誘起電圧、差動信号、検波信号、検出信号のそれぞれの時間的な変化を示す図である。また、これら４つのグラフの横軸は、経過時間を示す。また、これら４つのグラフの縦軸は、電圧を示す。

[0073] 図３の「調整前」の下側のグラフを見ると、第１誘起電圧と第２誘起電圧の位相が互いに逆位相になっていないため、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ１２が配置されているにもかかわらず、差動信号の信号レベルが０〔Ｖ〕になっていない。このため、図３の「調整前」の下側のグラ

フでは、検波信号の信号レベルが0 [V] になっておらず、その結果、検出信号の信号レベルも0 [V] になっていない。この場合、勾配磁界センサ12は、上記の式(8)における検出信号の大きさ $V_o(t)$ から一様磁界の成分 $B \cos(\omega_n t)$ を打ち消し合わせることができないため、一様磁界領域内に配置されると、一様磁界を検出してしまう。このような事情から、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ12では、図3の「調整前」の上側のグラフに示される通り、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ12が配置されている場合における検出信号が、一様磁界領域内において巻数が1回のコイルによる磁気モーメントを検出させた場合における検出信号に重畳される。その結果、図3の「調整前」の上側のグラフでは、例えば、 $-40 \text{ msec} \sim -20 \text{ msec}$ の範囲内、 $20 \text{ msec} \sim 40 \text{ msec}$ の範囲内等において、検出信号の信号レベルが0 [V] とならず、検出信号の信号レベルが0.1 [V] 付近で振動している。そして、このような検出信号の振動は、勾配磁界センサ12による勾配の検出における誤差となる。このため、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ12では、検出する勾配が小さいと、このような振動による誤差に埋もれて検出信号が見えなくなる可能性が高い。

[0074] 一方、図3の「調整後」の下側のグラフを見ると、第1誘起電圧と第2誘起電圧の位相が互いに逆位相になっているため、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ12が配置されている場合において、差動信号の信号レベルが0 [V] になっている。このため、図3の「調整後」の下側のグラフでは、検波信号の信号レベルがほぼ0 [V] になっており（実際には、ノイズ等によって小さく振動しているため、完全に0 [V] となっているわけではない）、その結果、検出信号の信号レベルがほぼ0 [V] になっている。この場合、勾配磁界センサ12は、上記の式(8)における検出信号の大きさ $V_o(t)$ から一様磁界の成分 $B \cos(\omega_n t)$ を打ち消し合わせることができると、一様磁界領域内に配置された場合であっても、一様磁界を検出しない。このような事情から、交流電流調整を行った後の勾配磁界セン

サ 1 2 では、図 3 の「調整後」の上側のグラフに示される通り、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ 1 2 が配置されている場合における検出信号が、一様磁界領域内において巻数が 1 回のコイルによる磁気モーメントを検出させた場合における検出信号に重畳されない。その結果、図 3 の「調整後」の上側のグラフでは、例えば、 $-40\text{ msec} \sim -20\text{ msec}$ の範囲内、 $20\text{ msec} \sim 40\text{ msec}$ の範囲内等において、検出信号の信号レベルがほぼ 0 [V] になる。その結果、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ 1 2 では、検出する勾配が小さくても、勾配を示す検出信号が誤差に埋もれることがない。換言すると、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ 1 2 は、一様磁界の強さを検出せずに、勾配を検出することができる。すなわち、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ 1 2 は、検出対象物の検出を精度よく行うことができる。

[0075] また、図 4 は、勾配磁界センサ 1 2 に交流電流調整を行う前後において、巻数が 1 回のコイルによる磁気モーメントを勾配磁界センサ 1 2 が検出した場合の検出信号、差動信号、検波信号のそれぞれの時間的な変化の一例を示す図である。

[0076] 図 4 に示した「調整前」というラベルによって囲まれた上側の 2 つのグラフのうちの右側のグラフは、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ 1 2 における差動信号及び検波信号の時間的な変化を示す図である。また、当該グラフは、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ 1 2 が配置されている場合における差動信号及び検波信号の時間的な変化を示す図である。一方、図 4 に示した「調整後」というラベルによって囲まれた下側の 2 つのグラフのうちの右側のグラフは、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ 1 2 における差動信号及び検波信号の時間的な変化を示す図である。当該グラフは、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ 1 2 が配置されている場合における差動信号及び検波信号の時間的な変化を示す図である。これら 2 つのグラフを比較すると、交流電流調整を行った後における差動信号は、交流電流調整を行う前における差動信号よりも振幅が 2 桁程度小さくなっ

ていることが分かる。その結果、交流電流調整を行った後における検波信号も、交流電流調整を行う前における検波信号よりも振幅が2桁程度小さくなっている。このような事情から、「調整前」というラベルによって囲まれた下側の2つのグラフのうちの右側のグラフの縦軸の目盛間隔を、「調整前」というラベルによって囲まれた上側の2つのグラフのうちの右側のグラフの縦軸の目盛間隔と同じ目盛間隔に変えた場合、交流電流調整を行った後における差動信号及び検波信号それぞれの振動は、図3の右下のグラフにおける差動信号及び検波信号それぞれの振動のように、見えなくなる。

[0077] 図4に示した「調整前」というラベルによって囲まれた上側の2つのグラフのうちの左側のグラフは、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ12における検出信号の時間的な変化を示す図である。また、当該グラフは、一様磁界領域内において巻数が1回のコイルによる磁気モーメントを検出させた場合における検出信号の時間的な変化を示す図である。一方、図4に示した「調整後」というラベルによって囲まれた下側の2つのグラフのうちの左側のグラフは、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ12における検出信号の時間的な変化を示す図である。また、当該グラフは、一様磁界領域内において巻数が1回のコイルによる磁気モーメントを検出させた場合における検出信号の時間的な変化を示す図である。これら2つのグラフを比較すると、勾配磁界センサ12から出力される検出信号のノイズは、交流電流調整により小さくなっていることが分かる。これは、図4の右下のグラフに示したように、交流電流調整により、磁界が印加されていない領域内に勾配磁界センサ12が配置されている場合における差動信号及び検波信号の振幅が小さくなり、その結果、勾配磁界センサ12が一様磁界を検出しないためである。

[0078] ここで、図5は、図4に示した検出信号についての2つのグラフそれぞれの一部を拡大した図である。図5に示した「調整前」というラベルによって囲まれた上側のグラフは、交流電流調整を行う前の勾配磁界センサ12における検出信号の時間的な変化を示す図である。一方、図5に示した「調整後

」というラベルによって囲まれた下側のグラフは、交流電流調整を行った後の勾配磁界センサ 1 2 における検出信号の時間的な変化を示す図である。これら 2 つのグラフを比較すると、勾配磁界センサ 1 2 から出力される検出信号のノイズは、交流電流調整により小さくなっていることが、図 4 に示したグラフと比べてより明確に分かる。

[0079] このように、これら図 3～図 5 に示したグラフから、勾配磁界センサ 1 2 は、交流電流調整を行うことにより一様磁界の強さを検出せずに勾配を検出することができ、その結果、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができることが分かる。そして、これを実現させている回路構成の一例が、図 2 に示した回路構成である。

[0080] なお、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 は、第 0 移相回路 P S 0 を備えない構成であってもよい。何故なら、前述した通り、第 0 移相回路 P S 0 の移相量 θ は、前述の 2 つの要請において如何なる値であっても無関係だからである。ただし、当該勾配磁界センサ 1 2 が第 0 移相回路 P S 0 を備えることにより、当該勾配磁界センサ 1 2 では、第 1 移相回路 P S 1 による移相量 α と、第 2 移相回路 P S 2 による移相量 β との関係 $\alpha - \beta = -\pi$ を保ったまま、検出信号の振幅を調整することができる。

[0081] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 は、第 1 移相回路 P S 1 と第 2 移相回路 P S 2 とのいずれか一方を備えない構成であってもよい。何故なら、前述の 2 つの要請において、第 1 移相回路 P S 1 の移相量 α と第 2 移相回路 P S 2 の移相量 β との差が $-\pi$ であることが重要だからである。これは、当該勾配磁界センサ 1 2 が第 1 移相回路 P S 1 と第 2 移相回路 P S 2 とのいずれか一方を備えないことが、移相量 α と移相量 β とのいずれか一方を 0 とした場合に相当することからも明らかである。

[0082] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 は、第 1 可変抵抗 V R 1 1 と第 2 可変抵抗 V R 1 2 とのいずれか一方を備えない構成であってもよい。何故なら、前述の 2 つの要請において、第 1 可変抵抗 V R 1 1 の調整量 a と変調指数 k_1 との積と、第 2 可変抵抗 V R 1 2 の調整量 b と変調指数 k_2 との積と

が等しいことが重要だからである。これは、当該勾配磁界センサ 1 2 が第 1 可変抵抗 $V R 1 1$ と第 2 可変抵抗 $V R 1 2$ とのいずれか一方を備えないことが、調整量 a と調整量 b とのいずれか一方を 1 とした場合に相当することからも明らかである。

[0083] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 は、第 1 コンデンサ $C 1$ と第 2 コンデンサ $C 2$ との少なくとも一方を備えない構成であってもよい。ただし、前述した通り、これらは AC カップリングのためのコンデンサである。このため、当該勾配磁界センサ 1 2 は、第 1 コンデンサ $C 1$ と第 2 コンデンサ $C 2$ との両方を備えている方が望ましい。

[0084] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 では、交流電流制御部 $C C 1$ は、第 1 可変抵抗 $V R 1 1$ に代えて、又は、第 1 可変抵抗 $V R 1 1$ に加えて、第 1 交流励磁電流 $A C 1$ の振幅を増幅する第 1 増幅回路を備える構成であってもよい。

[0085] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 では、交流電流制御部 $C C 1$ は、第 2 可変抵抗 $V R 1 2$ に代えて、又は、第 2 可変抵抗 $V R 1 2$ に加えて、第 2 交流励磁電流 $A C 2$ の振幅を増幅する第 2 増幅回路を備える構成であってもよい。

[0086] 以上のように、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 は、交流電源 $P 1$ が有する第 1 電源端子 $P 1 1$ が接続される交流電源接続端子 $C T 1$ と、交流電源接続端子 $C T 1$ とグラウンドとの間に接続される第 1 磁気コア $C R 1$ と、交流電源接続端子 $C T 1$ とグラウンドとの間において第 1 磁気コア $C R 1$ と並列に接続される第 2 磁気コア $C R 2$ と、交流電源接続端子 $C T 1$ と、第 1 磁気コア $C R 1$ と第 2 磁気コア $C R 2$ との少なくとも一方との間に接続され、第 1 磁気コア $C R 1$ と第 2 磁気コア $C R 2$ との少なくとも一方に流れる交流電流を制御する交流電流制御部 $C C 1$ と、第 1 磁気コア $C R 1$ に巻回される第 1 検出コイル $C L 1$ と、第 2 磁気コア $C R 2$ に巻回され、且つ、第 1 検出コイル $C L 1$ と差動接続される第 2 検出コイル $C L 2$ と、第 1 検出コイル $C L 1$ から出力される第 1 誘起電圧と、第 2 検出コイル $C L 2$ から出力される

第2誘起電圧との差分に応じた電圧を、検出信号として検出する検出回路D Tと、を備える。これにより、当該勾配磁界センサ12は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。

[0087] なお、勾配磁界センサ12は、交流電源P1が有する第2電源端子P12がグラウンドに接地される交流電源P1を備える、構成が用いられてもよい。

[0088] また、勾配磁界センサ12では、交流電流制御部CC1は、交流電源接続端子CT1から第1磁気コアCR1に流れる第1交流励磁電流AC1と、交流電源接続端子CT1から第2磁気コアCR2に流れる第2交流励磁電流AC2との少なくとも一方を移相する移相部を含む、構成が用いられてもよい。前述の第1移相回路PS1と第2移相回路PS2のそれぞれは、当該位相部の一例である。

[0089] また、勾配磁界センサ12では、交流電流制御部CC1は、第1交流励磁電流AC1と、第2交流励磁電流AC2との少なくとも一方の振幅を調整する振幅調整部を含む、構成が用いられてもよい。前述の第1可変抵抗VR11と第2可変抵抗VR12とのそれぞれは、当該振幅調整部の一例である。

[0090] また、勾配磁界センサ12では、交流電流制御部CC1は、交流電源接続端子CT1と第1磁気コアCR1との間に接続される第1増幅回路及び第11可変抵抗器の少なくとも一方と、交流電源接続端子CT1と第2磁気コアCR2との間に接続される第2増幅回路及び第12可変抵抗器の少なくとも一方とを、振幅調整部として含む、構成が用いられてもよい。前述の第1可変抵抗VR11は、当該第11可変抵抗器の一例である。また、前述の第2可変抵抗VR12は、当該第12可変抵抗器の一例である。

[0091] <実施形態の変形例1>

以下、図6を参照し、実施形態の変形例1について説明する。なお、実施形態の変形例1では、実施形態と同様な構成部に対して同じ符号を付して説明を省略する。また、以下では、説明の便宜上、実施形態の変形例1に係る勾配磁界センサ12を、勾配磁界センサ12Aと称して説明する。また、実

施形態の変形例 1 において説明する事項は、実施形態のみならず、後述する実施形態の他の変形例のいずれに適用されてもよい。

[0092] 図 6 は、勾配磁界センサ 1 2 A の回路構成の一例を示す図である。

[0093] 勾配磁界センサ 1 2 A は、交流電源接続端子 C T 1 と、第 1 センサヘッド S 1 と、第 2 センサヘッド S 2 と、第 0 移相回路 P S 0 と、交流電流制御部 C C 1 と、検出回路 D T と、検出信号出力端子 C T 2 とに加えて、直流電源接続端子 C T 3 と、直流電流制御部 C C 2 を備える。また、直流電流制御部 C C 2 は、入力端子 C C 2 1 と、第 1 出力端子 C C 2 2 と、第 2 出力端子 C C 2 3 を有する。また、直流電流制御部 C C 2 は、第 1 可変抵抗 V R 2 1 と、第 1 インダクタ L 1 と、第 2 可変抵抗 V R 2 2 と、第 2 インダクタ L 2 を備える。

[0094] また、勾配磁界センサ 1 2 A は、伝送路を介して、交流電源 P 1 に加えて、直流電源 P 2 とも接続される。より具体的には、勾配磁界センサ 1 2 A が有する直流電源接続端子 C T 3 は、伝送路を介して、直流電源 P 2 が有する正極電源端子と接続される。そして、直流電源 P 2 が有する負極電源端子は、伝送路を介して、グラウンドに接地される。ここで、直流電源 P 2 は、如何なる直流電源であってもよい。なお、直流電源接続端子 C T 3 と当該正極電源端子との間には、勾配磁界センサ 1 2 A が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、当該負極電源端子とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ 1 2 A が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0095] また、直流電源接続端子 C T 3 は、伝送路を介して、直流電流制御部 C C 2 が有する入力端子 C C 2 1 と接続される。なお、直流電源接続端子 C T 3 と入力端子 C C 2 1 との間には、勾配磁界センサ 1 2 A が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0096] また、直流電流制御部 C C 2 において、入力端子 C C 2 1 と第 1 出力端子

CC22との間には、伝送路を介して、第1可変抵抗VR21と、第1インダクタL1とが直列に接続される。また、直流電流制御部CC2において、入力端子CC21と第2出力端子CC23との間には、伝送路を介して、第2可変抵抗VR22と、第2インダクタL2とが直列に接続される。なお、入力端子CC21と第1出力端子CC22との間には、勾配磁界センサ12Aが有する機能を損なわない範囲内において、第1可変抵抗VR21と、第1インダクタL1とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、入力端子CC21と第2出力端子CC23との間には、勾配磁界センサ12Aが有する機能を損なわない範囲内において、第2可変抵抗VR22と、第2インダクタL2とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、入力端子CC21と第1出力端子CC22との間において、第1可変抵抗VR21と、第1インダクタL1とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。また、入力端子CC21と第2出力端子CC23との間において、第2可変抵抗VR22と、第2インダクタL2とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。

[0097] また、直流電流制御部CC2の第1出力端子CC22は、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13と第1磁気コアCR1とを接続する伝送路と、他の伝送路を介して接続されている。なお、第1出力端子CC22と、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13と第1磁気コアCR1とを接続する伝送路との間には、勾配磁界センサ12Aが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0098] また、直流電流制御部CC2の第2出力端子CC23は、交流電流制御部CC1が有する第2出力端子CC14と第2磁気コアCR2とを接続する伝送路と、他の伝送路を介して接続されている。なお、第2出力端子CC23と、交流電流制御部CC1が有する第2出力端子CC14と第2磁気コアCR2とを接続する伝送路との間には、勾配磁界センサ12が有する機能を損

なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0099] 次に、勾配磁界センサ 1 2 A の動作について説明する。

[0100] 上記のような回路構成の勾配磁界センサ 1 2 A において、直流電源 P 2 は、直流電源接続端子 C T 3 に直流電流を入力する。直流電源接続端子 C T 3 に入力された直流電流は、直流励磁電流として直流電流制御部 C C 2 に入力される。

[0101] 直流電流制御部 C C 2 に入力された直流励磁電流は、第 1 直流励磁電流 D C 1 と第 2 直流励磁電流 D C 2 との 2 つの直流励磁電流に分岐される。

[0102] 直流電流制御部 C C 2 において、第 1 直流励磁電流 D C 1 は、第 1 可変抵抗 V R 2 1 により大きさが調整される。そして、第 1 直流励磁電流 D C 1 は、第 1 出力端子 C C 2 2 から第 1 磁気コア C R 1 に入力する。これにより、第 1 検出コイル C L 1 には、第 1 磁気コア C R 1 に流れた第 1 交流励磁電流 A C 1 と、第 1 磁気コア C R 1 に流れた第 1 直流励磁電流 D C 1 と、第 1 検出コイル C L 1 に印加された磁界の強さに応じた電圧が誘起される。すなわち、勾配磁界センサ 1 2 A においても、当該電圧は、外部から第 1 検出コイル C L 1 に印加された磁界の強さに応じて変化する。以下では、説明の便宜上、当該電圧を、第 3 誘起電圧と称して説明する。なお、第 1 インダクタ L 1 は、D C (Direct Current) カップリングのためのインダクタである。第 1 インダクタ L 1 の存在により、勾配磁界センサ 1 2 A では、交流電流が第 1 出力端子 C C 2 2 から入力端子 C C 2 1 へ流れてしまうことを抑制することができる。

[0103] 一方、直流電流制御部 C C 2 において、第 2 直流励磁電流 D C 2 は、第 2 可変抵抗 V R 2 2 により大きさが調整される。そして、第 2 直流励磁電流 D C 2 は、第 2 出力端子 C C 2 3 から第 2 磁気コア C R 2 に入力する。これにより、第 2 検出コイル C L 2 には、第 2 磁気コア C R 2 に流れた第 2 交流励磁電流 A C 2 と、第 2 磁気コア C R 2 に流れた第 2 直流励磁電流 D C 2 と、第 2 検出コイル C L 2 に印加された磁界の強さに応じた電圧が誘起される。

。すなわち、勾配磁界センサ 1 2 A においても、当該電圧は、外部から第 2 検出コイル C L 2 に印加された磁界の強さに応じて変化する。以下では、説明の便宜上、当該電圧を、第 4 誘起電圧と称して説明する。なお、第 2 インダクタ L 2 は、D C カップリングのためのインダクタである。第 2 インダクタ L 2 の存在により、勾配磁界センサ 1 2 A では、交流電流が第 2 出力端子 C C 2 3 から入力端子 C C 2 1 へ流れてしまうことを抑制することができる。

[0104] 勾配磁界センサ 1 2 A では、このようにして誘起された第 3 誘起電圧及び第 4 誘起電圧に応じた信号が、検出回路 D T が有する第 2 入力端子 D T 2 に差動信号 V o u t 2 として入力する。検出回路 D T の位相検波回路 P D は、このようにして入力された差動信号 V o u t 2 と、交流電源 P 1 から入力された参照信号とのずれに応じた信号を、検波信号としてローパスフィルタ L F に入力する。ローパスフィルタ L F は、位相検波回路 P D から入力された検波信号から所定の第 1 周波数以上の成分を除去した出力信号を誤差アンプ E A の反転入力端子に出力する。誤差アンプ E A は、誤差アンプ E A の反転入力端子に入力された出力信号の電位とグラウンド電位との電位差に応じた信号を検出信号として、検出信号出力端子 C T 2 と抵抗 R 1 とのそれぞれに出力する。

[0105] 抵抗 R 1 に入力された検出信号は、図示しないバッファ回路の存在により、第 3 コンデンサ C 3 へ入力されることなく、帰還電流として第 2 入力端子 D T 2 から第 1 検出コイル C L 1 に向かって流れていく。

[0106] このような動作を行う検出回路 D T には、調整を行うことにより、差動信号 V o u t 2 の信号レベルが 0 [V] である場合、信号レベルが 0 [V] の検出信号を検出信号出力端子 C T 2 から出力させ、差動信号 V o u t 2 の信号レベルが 0 [V] ではない場合、信号レベルが 0 [V] ではない検出信号を検出信号出力端子 C T 2 から出力させることができる。

[0107] 以上のような動作により、勾配磁界センサ 1 2 A は、勾配を検出する。しかしながら、勾配磁界センサ 1 2 A は、第 3 誘起電圧及び第 4 誘起電圧のそ

れぞれについての調整を行わない場合、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 と同様に、一様磁界領域内においても、勾配を検出してしまう場合がある。これは、検出対象物が存在しないにも拘わらず、検出対象物が存在しているとして誤検出してしまうことに繋がるため、望ましくない。そこで、勾配磁界センサ 1 2 A には、前述の交流電流調整とともに、直流電流調整が行われる。これにより、勾配磁界センサ 1 2 A は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を、より確実に向上させることができる。

[0108] 直流電流調整は、すなわち、第 1 磁気コア C R 1 に流れる電流の大きさと、第 2 磁気コア C R 2 に流れる電流の大きさとを一致させる調整のことである。すなわち、直流電流調整は、第 1 直流励磁電流 D C 1 の大きさと、第 2 直流励磁電流 D C 2 の大きさとを等しくする調整である。そして、このような直流電流調整は、第 1 可変抵抗 V R 2 1 の抵抗値と、第 2 可変抵抗 V R 2 2 の抵抗値との少なくとも一方を調整することにより行うことができる。

[0109] なお、実施形態の変形例 1 に係る勾配磁界センサ 1 2 A は、第 1 可変抵抗 V R 2 1 と第 2 可変抵抗 V R 2 2 とのいずれか一方を備えない構成であってもよい。また、実施形態の変形例 1 に係る勾配磁界センサ 1 2 A は、第 1 可変抵抗 V R 2 1 と第 2 可変抵抗 V R 2 2 とのいずれか一方に代えて、抵抗値を変化させることができない抵抗素子を備える構成であってもよい。何故なら、第 1 直流励磁電流 D C 1 と第 2 直流励磁電流 D C 2 との少なくとも一方の大きさを調整することにより、直流電流調整を行うことが可能だからである。

[0110] また、実施形態の変形例 1 に係る勾配磁界センサ 1 2 A は、事前の試験等の結果を踏まえた上で、上記において説明した第 1 可変抵抗 V R 2 1 及び第 2 可変抵抗 V R 2 2 それぞれの抵抗値と同じ抵抗値の抵抗素子を用意できる場合、第 1 可変抵抗 V R 2 1 と第 2 可変抵抗 V R 2 2 とのいずれか一方又は両方に代えて、抵抗値を変化させることができない抵抗素子を備える構成であってもよい。

[0111] また、実施形態に係る勾配磁界センサ 1 2 A は、第 1 インダクタ L 1 と第

２インダクタＬ２との少なくとも一方を備えない構成であってもよい。ただし、前述した通り、これらはＤＣカップリングのためのコンデンサである。このため、当該勾配磁界センサ１２Ａは、第１インダクタＬ１と第２インダクタＬ２との両方を備えている方が望ましい。

[0112] 以上のように、実施形態の変形例１に係る勾配磁界センサ１２Ａは、実施形態に係る勾配磁界センサ１２が備える部材に加えて、直流電源Ｐ２が有する正極電源端子が接続される直流電源接続端子ＣＴ３と、直流電源接続端子ＣＴ３と第１磁気コアＣＲ１との間に接続される第１可変抵抗ＶＲ２１と、直流電源接続端子ＣＴ３と第１磁気コアＣＲ１との間において第１可変抵抗ＶＲ２１と直列に接続される第１インダクタＬ１と、直流電源接続端子ＣＴ３と第２磁気コアＣＲ２との間に接続される第２可変抵抗ＶＲ２２と、直流電源接続端子ＣＴ３と第２磁気コアＣＲ２との間において第２可変抵抗ＶＲ２２と直列に接続される第２インダクタＬ２と、を更に備える。これにより、勾配磁界センサ１２Ａは、磁界を用いた検出対象物の検出精度を、より確実に向上させることができる。

[0113] また、勾配磁界センサ１２Ａは、直流電源Ｐ２が有する負極電源端子がグラウンドに接地される直流電源Ｐ２を備える、構成が用いられてもよい。

[0114] ＜実施形態の変形例２＞

以下、図７を参照し、実施形態の変形例２について説明する。なお、実施形態の変形例２では、実施形態と同様な構成部に対して同じ符号を付して説明を省略する。また、以下では、説明の便宜上、実施形態の変形例２に係る勾配磁界センサ１２を、勾配磁界センサ１２Ｂと称して説明する。また、実施形態の変形例２において説明する事項は、実施形態の変形例１に適用されてもよい。また、実施形態の変形例２において説明する事項は、実施形態のみならず、後述する実施形態の他の変形例に適用されてもよい。

[0115] 勾配磁界センサ１２Ｂは、交流電流制御部ＣＣ１に代えて、交流電流制御部ＣＣ３を備える。

[0116] 図７は、交流電流制御部ＣＣ３の回路構成の一例を示す図である。なお、

図 7 では、交流電流制御部 C C 3 と他の部材との接続態様を明確に示すため、交流電流制御部 C C 3 とともに、交流電源 P 1 と、交流電源接続端子 C T 1 と、第 0 移相回路 P S 0 と、第 1 磁気コア C R 1 と、第 2 磁気コア C R 2 とのそれぞれを示している。

[0117] 交流電流制御部 C C 3 は、入力端子 C C 3 1 と、第 1 出力端子 C C 3 2 と、第 2 出力端子 C C 3 3 を有する。また、交流電流制御部 C C 3 は、反転回路 R V C と、第 1 切替回路 S W C 1 と、第 1 移相回路 P S 1 と、第 1 可変抵抗 V R 1 1 と、第 1 コンデンサ C 1 と、第 2 切替回路 S W C 2 と、第 2 移相回路 P S 2 と、第 2 可変抵抗 V R 1 2 と、第 2 コンデンサ C 2 を備える。また、反転回路 R V C は、入力端子 R V C 1 と、出力端子 R V C 2 を有する。また、第 1 切替回路 S W C 1 は、第 1 入力端子 S W C 1 1 と、第 2 入力端子 S W C 1 2 と、出力端子 S W C 1 3 を有する。また、第 2 切替回路 S W C 2 は、第 1 入力端子 S W C 2 1 と、第 2 入力端子 S W C 2 2 と、出力端子 S W C 2 3 を有する。

[0118] 交流電流制御部 C C 3 が有する入力端子 C C 3 1 は、伝送路を介して、第 0 移相回路 P S 0 が有する出力端子 P S 0 2 と接続される。なお、入力端子 C C 3 1 と出力端子 P S 0 2 との間には、勾配磁界センサ 1 2 B が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0119] また、交流電流制御部 C C 3 において、入力端子 C C 3 1 は、伝送路を介して、反転回路 R V C が有する入力端子 R V C 1 と、第 1 切替回路 S W C 1 が有する第 2 入力端子 S W C 1 2 と、第 2 切替回路 S W C 2 が有する第 2 入力端子 S W C 2 2 とのそれぞれと接続される。なお、入力端子 C C 3 1 と入力端子 R V C 1 との間には、勾配磁界センサ 1 2 B が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、入力端子 C C 3 1 と第 2 入力端子 S W C 1 2 との間には、勾配磁界センサ 1 2 B が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、入力端子 C C 3 1 と

第2入力端子SWC22との間には、勾配磁界センサ12Bが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0120] また、反転回路RVCが有する出力端子RVC2は、伝送路を介して、第1切替回路SWC1が有する第1入力端子SWC11と、第2切替回路SWC2が有する第1入力端子SWC21とのそれぞれと接続される。なお、出力端子RVC2と第1入力端子SWC11との間には、勾配磁界センサ12Bが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子RVC2と第1入力端子SWC21との間には、勾配磁界センサ12Bが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0121] また、第1切替回路SWC1が有する出力端子SWC13と交流電流制御部CC3が有する第1出力端子CC32との間には、第1移相回路PS1と、第1可変抵抗VR11と、第1コンデンサC1とが直列に接続される。そして、第1出力端子CC32とグラウンドとの間には、伝送路を介して、第1センサヘッドS1の第1磁気コアCR1が接続される。この場合、第1交流励磁電流AC1は、第1出力端子CC32から第1磁気コアCR1に流れる交流電流のことである。なお、交流電流制御部CC3が有する第1出力端子CC32とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ12Bが有する機能を損なわない範囲内において、第1磁気コアCR1とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子SWC13と第1出力端子CC32との間において、第1移相回路PS1と、第1可変抵抗VR11と、第1コンデンサC1とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。

[0122] また、第2切替回路SWC2が有する出力端子SWC23と交流電流制御部CC3が有する第2出力端子CC33との間には、第2移相回路PS2と、第2可変抵抗VR12と、第2コンデンサC2とが直列に接続される。そして、第2出力端子CC33とグラウンドとの間には、伝送路を介して、第

2 センサヘッド S 2 の第 2 磁気コア C R 2 が接続される。この場合、第 2 交流励磁電流 A C 2 は、第 2 出力端子 C C 3 3 から第 2 磁気コア C R 2 に流れる交流電流のことである。なお、交流電流制御部 C C 3 が有する第 2 出力端子 C C 3 3 とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ 1 2 B が有する機能を損なわない範囲内において、第 2 磁気コア C R 2 とともに、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、出力端子 S W C 2 3 と第 2 出力端子 C C 3 3 との間において、第 2 移相回路 P S 2 と、第 2 可変抵抗 V R 1 2 と、第 2 コンデンサ C 2 とは、如何なる順で直列に接続される構成であってもよい。

[0123] 次に、交流電流制御部 C C 3 の動作について説明する。

[0124] 上記のような回路構成の交流電流制御部 C C 3 において、入力端子 C C 3 1 から入力された交流電流は、2 つに分岐される。

[0125] 2 つに分岐された交流電流の一方は、第 1 1 交流励磁電流 A C 1 1 として反転回路 R V C に入力される。これにより、第 1 1 交流励磁電流 A C 1 1 の位相は、反転回路 R V C により反転される。そして、反転回路 R V C から出力された第 1 1 交流励磁電流 A C 1 1 は、第 1 切替回路 S W C 1 が有する第 1 入力端子 S W C 1 1 と第 2 切替回路 S W C 2 が有する第 1 入力端子 S W C 2 1 とのそれぞれに入力される。

[0126] 一方、2 つに分岐された交流電流の他方は、第 1 2 交流励磁電流 A C 1 2 として、第 1 切替回路 S W C 1 が有する第 2 入力端子 S W C 1 2 と第 2 切替回路 S W C 2 が有する第 2 入力端子 S W C 2 2 とのそれぞれに入力される。

[0127] ここで、第 1 切替回路 S W C 1 は、入力された第 1 1 交流励磁電流 A C 1 1 と、入力された第 1 2 交流励磁電流 A C 1 2 とのいずれか一方を、第 1 交流励磁電流 A C 1 として第 1 移相回路 P S 1 に出力する。また、第 2 切替回路 S W C 2 は、入力された第 1 1 交流励磁電流 A C 1 1 と、入力された第 1 2 交流励磁電流 A C 1 2 とのいずれか一方を、第 2 交流励磁電流 A C 2 として第 2 移相回路 P S 2 に出力する。

[0128] すなわち、勾配磁界センサ 1 2 B では、反転回路 R V C と、第 1 切替回路

SWC 1 と、第 2 切替回路 SWC 2 とのそれぞれによって、第 1 交流励磁電流 AC 1 と第 2 交流励磁電流 AC 2 とのそれぞれを、互いに位相が反転している電流とするか、互いに位相が同じ電流とするかを切り替えることができる。その結果、勾配磁界センサ 1 2 B は、第 1 移相回路 PS 1 と第 2 移相回路 PS 2 とのそれぞれとして、互いに位相を進ませる移相回路を備える構成であってもよく、互いに位相を遅らせる移相回路を備える構成であってもよく、位相を遅らせる移相回路と位相を進ませる移相回路とを備える構成であってもよい。すなわち、勾配磁界センサ 1 2 B が交流電流制御部 CC 3 を備えることにより、勾配磁界センサ 1 2 B は、回路設計の自由度を向上させることができる。

[0129] なお、勾配磁界センサ 1 2 B は、第 1 切替回路 SWC 1 と第 2 切替回路 SWC 2 との少なくとも一方を備えない構成であってもよい。

[0130] 以上のように、実施形態の変形例 2 に係る勾配磁界センサ 1 2 B では、交流電流制御部 CC 3 は、第 1 交流励磁電流 AC 1 と第 2 交流励磁電流 AC 2 との少なくとも一方の位相を反転させる反転回路 RVC を含む、構成が用いられてもよい。

[0131] また、勾配磁界センサ 1 2 B では、交流電流制御部 CC 3 は、第 1 磁気コア CR 1 に第 1 交流励磁電流 AC 1 として流す交流電流を、反転回路 RVC によって位相を反転させた交流電流と、反転回路によって位相を反転させていない交流電流とのいずれかに切り替える第 1 切替回路 SWC 1 と、第 2 磁気コア CR 2 に第 2 交流励磁電流 AC 2 として流す交流電流を、反転回路 RVC によって位相を反転させた交流電流と、反転回路 RVC によって位相を反転させていない交流電流とのいずれかに切り替える第 2 切替回路 SWC 2 との少なくとも一方を含む、構成が用いられてもよい。

[0132] これにより、勾配磁界センサ 1 2 B は、回路設計の自由度を向上させることができる。

[0133] <実施形態の変形例 3>

以下、図 8 を参照し、実施形態の変形例 3 について説明する。なお、実施

形態の変形例 3 では、実施形態と同様な構成部に対して同じ符号を付して説明を省略する。また、以下では、説明の便宜上、実施形態の変形例 2 に係る勾配磁界センサ 1 2 を、勾配磁界センサ 1 2 C と称して説明する。また、実施形態の変形例 3 において説明する事項は、実施形態の変形例 1、実施形態の変形例 2 のそれぞれに適用されてもよい。また、実施形態の変形例 3 において説明する事項は、実施形態のみならず、後述する実施形態の他の変形例のいずれに適用されてもよい。

[0134] 勾配磁界センサ 1 2 C の検出回路 D T は、ハイパスフィルタ H F を更に備える。

[0135] 図 8 は、ハイパスフィルタ H F を更に備える検出回路 D T の回路構成の一例を示す図である。

[0136] 図 8 に示した例では、検出回路 D T において、誤差アンプ E A と抵抗 R 1 との間を接続する伝送路と、出力端子 D T 3 との間には、伝送路を介して、ハイパスフィルタ H F が接続される。なお、誤差アンプ E A と抵抗 R 1 との間を接続する伝送路と、ハイパスフィルタ H F との間には、検出回路 D T が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、ハイパスフィルタ H F と、出力端子 D T 3 との間には、検出回路 D T が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0137] ハイパスフィルタ H F は、誤差アンプ E A から出力された検出信号から所定の第 2 周波数以下の成分を除去した信号を、新たな検出信号として出力端子 D T 3 に出力する。これにより、勾配磁界センサ 1 2 C は、前述のオフセット成分を除去することができる。その結果、勾配磁界センサ 1 2 C は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を、より確実に向上させることができる。

[0138] 以上のように、勾配磁界センサ 1 2 C では、検出回路 D T は、P S D (Phase Sensitive Detector) 回路を含む、構成が用いられてもよい。そして、勾配磁界センサ 1 2 C は、P L L 回路から出力される信号から所定の第 2 周波数以下の成分を除去するハイパスフィルタ H F を備える、構成が用いられて

もよい。これにより、勾配磁界センサ 1 2 C は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を、より確実に向上させることができる。

[0139] <実施形態の変形例 4>

以下、図 9 を参照し、実施形態の変形例 4 について説明する。なお、実施形態の変形例 4 では、実施形態と同様な構成部に対して同じ符号を付して説明を省略する。また、以下では、説明の便宜上、実施形態の変形例 4 に係る勾配磁界センサ 1 2 を、勾配磁界センサ 1 2 D と称して説明する。また、実施形態の変形例 4 において説明する事項は、実施形態の変形例 1、実施形態の変形例 2、実施形態の変形例 3 のそれぞれに適用されてもよい。

[0140] 実施形態の変形例 4 では、実施形態の変形例 2 と同様に、直流励磁電流を第 1 磁気コア C R 1 及び第 2 磁気コア C R 2 へと流す。しかしながら、実施形態の変形例 4 に係る勾配磁界センサ 1 2 D は、実施形態の変形例 1 に係る勾配磁界センサ 1 2 A と異なり、直流電流制御部 C C 2 を備えない。

[0141] 図 9 は、勾配磁界センサ 1 2 D の回路構成の一例を示す図である。

[0142] 勾配磁界センサ 1 2 D は、交流電源接続端子 C T 1 と、第 1 センサヘッド S 1 と、第 2 センサヘッド S 2 と、第 0 移相回路 P S 0 と、交流電流制御部 C C 1 と、検出回路 D T と、検出信号出力端子 C T 2 とに加えて、直流電源接続端子 C T 3 と、抵抗 R 2 と、第 3 インダクタ L 3 と、第 4 インダクタ L 4 と、第 4 コンデンサ C 4 を備える。

[0143] また、勾配磁界センサ 1 2 D は、伝送路を介して、交流電源 P 1 に加えて、直流電源 P 2 とも接続される。より具体的には、勾配磁界センサ 1 2 D が有する直流電源接続端子 C T 3 は、伝送路を介して、直流電源 P 2 が有する正極電源端子と接続される。そして、直流電源 P 2 が有する負極電源端子は、伝送路を介して、グラウンドに接地される。ここで、直流電源 P 2 は、如何なる直流電源であってもよい。なお、直流電源接続端子 C T 3 と当該正極電源端子との間には、勾配磁界センサ 1 2 D が有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、当該負極電源端子とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ 1 2 D が

有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0144] また、直流電源接続端子CT3は、伝送路を介して、抵抗R2が有する2つの端子のうち的一方と接続される。また、抵抗R2が有する2つの端子のうちの他方は、伝送路を介して、第3インダクタL3が有する2つの端子のうち的一方と接続される。また、第3インダクタL3が有する2つの端子のうちの他方は、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13と第1磁気コアCR1とを接続する伝送路と、他の伝送路を介して接続される。なお、直流電源接続端子CT3と抵抗R2との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、抵抗R2と第3インダクタL3との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第3インダクタL3と、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13と第1磁気コアCR1とを接続する伝送路との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。なお、第3インダクタL3は、DCカップリングのためのインダクタである。第3インダクタL3の存在により、勾配磁界センサ12Dでは、交流電流が、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13と第1磁気コアCR1とを接続する伝送路から直流電源接続端子CT3へ流れてしまうことを抑制することができる。

[0145] また、交流電流制御部CC1が有する第1出力端子CC13とグラウンドとの間には、第1出力端子CC13側からグラウンド側に向かって、第1磁気コアCR1、第4コンデンサC4の順に、第1磁気コアCR1と、第4コンデンサC4とが直列に接続される。なお、この第4コンデンサC4は、ACカップリングのためのコンデンサである。また、第1磁気コアCR1と第4コンデンサC4とを接続する伝送路と、交流電流制御部CC1が有する第2出力端子CC14と第2磁気コアCR2との間を接続する伝送路との間に

は、他の伝送路を介して、第4インダクタL4が接続される。この第4インダクタL4は、DCカップリングのためのインダクタである。なお、第1磁気コアCR1と第4コンデンサC4との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第4コンデンサC4とグラウンドとの間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第1磁気コアCR1と第4コンデンサC4とを接続する伝送路と、第4インダクタL4との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。また、第4インダクタL4と、第2出力端子CC14と第2磁気コアCR2との間を接続する伝送路との間には、勾配磁界センサ12Dが有する機能を損なわない範囲内において、他の回路素子、他の装置等が接続される構成であってもよい。

[0146] 次に、勾配磁界センサ12Dの動作について説明する。

[0147] 上記のような回路構成の勾配磁界センサ12Dにおいて、直流電源P2は、直流電源接続端子CT3に直流電流を入力する。直流電源接続端子CT3に入力された直流電流は、抵抗R2、第3インダクタL3を介して、第1磁気コアCR1に直流励磁電流DC3として入力される。このため、第1磁気コアCR1には、第1交流励磁電流AC1とともに、直流励磁電流DC3が流れる。また、第1磁気コアCR1に入力された直流励磁電流DC3は、第4インダクタL4を介して、第2磁気コアCR2にも入力される。このため、第2磁気コアCR2には、第2交流励磁電流AC2とともに、直流励磁電流DC3が流れる。なお、第4コンデンサC4及び第4インダクタL4により、第1磁気コアCR1から第2磁気コアCR2に向かって第1交流励磁電流AC1が流れることは、ほぼない。同様に、第4インダクタL4により、第2磁気コアCR2から第1磁気コアCR1に向かって第2交流励磁電流AC2が流れることは、ほぼない。

[0148] このように、勾配磁界センサ 1 2 D では、第 1 磁気コア C R 1 及び第 2 磁気コア C R 2 のそれぞれに対して、同じ大きさの直流電流である直流励磁電流 D C 3 を流すことができる。これにより、勾配磁界センサ 1 2 D は、実施形態の変形例 2 よりも単純な回路構成を用いて、磁界を用いた検出対象物の検出精度を、より確実に向上させることができる。

[0149] なお、上記において説明した第 1 磁気コア C R 1 は、直列に接続された 2 以上の磁性体を含む構成であってもよい。この場合、第 1 磁気コア C R 1 は、これら 2 以上の磁性体のうちの一部又は全部は、非磁性の導体によって直列に接続される構成であってもよい。ここで、図 1 0 は、複数の磁性体を含む第 1 磁気コア C R 1 の構成の一例を示す図である。図 1 0 に示した例では、第 1 磁気コア C R 1 は、2 つの磁性体を含んでいる。より具体的には、当該例では、第 1 磁気コア C R 1 は、磁性体 C R 1 A と、磁性体 C R 1 B と、非磁性の導体 C R 1 C と、端子 C R 1 D と、端子 C R 1 E を有する。そして、磁性体 C R 1 A と磁性体 C R 1 B とは、導体 C R 1 C によって接続されている。また、磁性体 C R 1 A が有する端部のうち導体 C R 1 C と接続されている端部と反対側の端部には、端子 C R 1 D が設けられている。端子 C R 1 D は、例えば、図 2 において、交流電流制御部 C C 1 の第 1 出力端子 C C 1 3 と接続されている端子である。また、磁性体 C R 1 B が有する端部のうち導体 C R 1 C と接続されている端部と反対側の端部には、端子 C R 1 E が設けられている。端子 C R 1 E は、例えば、図 2 において、グラウンドに接地されている端子である。

[0150] また、上記において説明した第 2 磁気コア C R 2 は、直列に接続された 2 以上の磁性体を含む構成であってもよい。この場合、第 2 磁気コア C R 2 は、これら 2 以上の磁性体のうちの一部又は全部は、非磁性の導体によって直列に接続される構成であってもよい。なお、複数の磁性体を含む第 2 磁気コア C R 2 の構成については、複数の磁性体を含む第 1 磁気コア C R 1 の構成と同様の構成であるため、図示による説明を省略する。

[0151] 以上のように、実施形態に係る勾配磁界センサ（上記において説明した例

では、勾配磁界センサ 1 2、勾配磁界センサ 1 2 A、勾配磁界センサ 1 2 B、勾配磁界センサ 1 2 C、勾配磁界センサ 1 2 D) は、交流電源 (上記において説明した例では、交流電源 P 1) が有する第 1 電源端子 (上記において説明した例では、第 1 電源端子 P 1 1) が接続される交流電源接続端子 (上記において説明した例では、交流電源接続端子 C T 1) と、交流電源接続端子とグラウンドとの間に接続される第 1 磁気コア (上記において説明した例では、第 1 磁気コア C R 1) と、交流電源接続端子とグラウンドとの間において第 1 磁気コアと並列に接続される第 2 磁気コア (上記において説明した例では、第 2 磁気コア C R 2) と、交流電源接続端子と、第 1 磁気コアと第 2 磁気コアとの少なくとも一方との間に接続され、第 1 磁気コアと第 2 磁気コアとの少なくとも一方に流れる交流電流 (上記において説明した例では、第 1 交流励磁電流 A C 1) を制御する交流電流制御部 (上記において説明した例では、交流電流制御部 C C 1、交流電流制御部 C C 3) と、第 1 磁気コアに巻回される第 1 検出コイル (上記において説明した例では、第 1 検出コイル C L 1) と、第 2 磁気コアに巻回され、且つ、第 1 検出コイルと差動接続される第 2 検出コイル (上記において説明した例では、第 2 検出コイル C L 2) と、第 1 検出コイルから出力される第 1 電圧 (上記において説明した例では、第 1 誘起電圧、第 3 誘起電圧) と、第 2 検出コイルから出力される第 2 電圧 (上記において説明した例では、第 2 誘起電圧、第 4 誘起電圧) との差分に応じた電圧を検出する検出回路 (上記において説明した例では、検出回路 D T) と、を備える。これにより、勾配磁界センサは、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。

[0152] また、勾配磁界センサは、交流電源が有する第 2 電源端子がグラウンドに接続される交流電源を備える、構成が用いられてもよい。

[0153] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、交流電源接続端子から第 1 磁気コアに流れる第 1 交流電流 (上記において説明した例では、第 1 交流励磁電流 A C 1) と、交流電源接続端子から第 2 磁気コアに流れる第 2 交流電流 (上記において説明した例では、第 2 交流励磁電流 A C 2) との少なく

とも一方を移相する移相部（上記において説明した例では、第1移相回路P S 1、第2移相回路P S 2の少なくとも一方）を含む、構成が用いられてもよい。

[0154] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、交流電源接続端子から第1磁気コアに流れる第1交流電流と、交流電源接続端子から第2磁気コアに流れる第2交流電流との少なくとも一方の振幅を調整する振幅調整部（上記において説明した例では、第1可変抵抗V R 1 1、第2可変抵抗V R 1 2の少なくとも一方）を含む、構成が用いられてもよい。

[0155] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、交流電源接続端子と第1磁気コアとの間に接続される第1増幅回路及び第1可変抵抗器（上記において説明した例では、第1可変抵抗V R 1 1）の少なくとも一方と、交流電源接続端子と第2磁気コアとの間に接続される第2増幅回路及び第2可変抵抗器（上記において説明した例では、第2可変抵抗V R 1 2）の少なくとも一方とを、振幅調整部として含む、構成が用いられてもよい。

[0156] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、交流電源接続端子から第1磁気コアに流れる第1交流電流と交流電源接続端子から第2磁気コアに流れる第2交流電流との少なくとも一方の位相を反転させる反転回路（上記において説明した例では、反転回路R V C）を含む、構成が用いられてもよい。

[0157] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、第1磁気コアに第1交流電流として流す交流電流を、反転回路によって位相を反転させた交流電流（上記において説明した例では、第1交流励磁電流A C 1 1）と、反転回路によって位相を反転させていない交流電流（上記において説明した例では、第2交流励磁電流A C 1 2）とのいずれかに切り替える第1切替回路（上記において説明した例では、第1切替回路S W C 1）と、第2磁気コアに第2交流電流として流す交流電流を、反転回路によって位相を反転させた交流電流と、反転回路によって位相を反転させていない交流電流とのいずれかに切り替える第2切替回路（上記において説明した例では、第2切替回路S W

C 2) との少なくとも一方を含む、構成が用いられてもよい。

[0158] また、勾配磁界センサでは、交流電流制御部は、交流電源接続端子と第 1 磁気コアとの間に接続される AC カップリング用の第 1 コンデンサ（上記において説明した例では、第 1 コンデンサ C 1）と、交流電源接続端子と第 2 磁気コアとの間に接続される AC カップリング用の第 2 コンデンサ（上記において説明した例では、第 2 コンデンサ C 2）とを含む、構成が用いられてもよい。

[0159] また、勾配磁界センサは、直流電源（上記において説明した例では、直流電源 P 2）が有する正極電源端子が接続される直流電源接続端子（上記において説明した例では、直流電源接続端子 C T 3）と、直流電源接続端子と第 1 磁気コアとの間に接続される第 2 1 抵抗器（上記において説明した例では、第 1 可変抵抗 V R 2 1）と、直流電源接続端子と第 1 磁気コアとの間において第 2 1 抵抗器と直列に接続される第 1 インダクタ（上記において説明した例では、第 1 インダクタ L 1）と、直流電源接続端子と第 2 磁気コアとの間に接続される第 2 2 抵抗器（上記において説明した例では、第 2 可変抵抗 V R 2 2）と、直流電源接続端子と第 2 磁気コアとの間において第 2 2 抵抗器と直列に接続される第 2 インダクタ（上記において説明した例では、第 2 インダクタ L 2）と、を更に備える、構成が用いられてもよい。

[0160] また、勾配磁界センサでは、第 2 1 抵抗器と、第 2 2 抵抗器との少なくとも一方は、可変抵抗器である、構成が用いられてもよい。

[0161] また、勾配磁界センサは、直流電源が有する負極電源端子がグラウンドに接続される直流電源を備える、構成が用いられてもよい。

[0162] また、勾配磁界センサでは、検出回路は、P S D（Phase Sensitive Detector）回路を含む、構成が用いられてもよい。

[0163] また、勾配磁界センサでは、検出回路は、P S D 回路から出力される信号から所定の第 1 周波数以上の成分を除去するローパスフィルタ（上記において説明した例では、ローパスフィルタ L F）を備える、構成が用いられてもよい。

[0164] また、勾配磁界センサでは、検出回路は、P S D回路から出力される信号から所定の第2周波数以下の成分を除去するハイパスフィルタ（上記において説明した例では、ハイパスフィルタH F）を備える、構成が用いられてもよい。

[0165] また、実施形態に係る磁性物検出装置（上記において説明した例では、磁性物検出装置1）は、上記に記載の勾配磁界センサを備える。これにより、磁性物検出装置は、磁界を用いた検出対象物の検出精度を向上させることができる。

[0166] 以上、この発明の実施形態を、図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、この発明の要旨を逸脱しない限り、変更、置換、削除等されてもよい。

符号の説明

[0167] 1…磁性物検出装置、11…着磁装置、12、12A、12B、12C、12D…勾配磁界センサ、20…情報処理装置、A C 1…第1交流励磁電流、A C 2…第2交流励磁電流、A C 1 1…第11交流励磁電流、A C 1 2…第12交流励磁電流、C 1…第1コンデンサ、C 2…第2コンデンサ、C 3…第3コンデンサ、C 4…第4コンデンサ、C C 1、C C 3…交流電流制御部、C C 2…直流電流制御部、C L 1…第1検出コイル、C L 2…第2検出コイル、C R 1…第1磁気コア、C R 2…第2磁気コア、C S…枠体、C T 1…交流電源接続端子、C T 2…検出信号出力端子、C T 3…直流電源接続端子、D T…検出回路、D C 1…第1直流励磁電流、D C 2…第2直流励磁電流、D C 3…直流励磁電流、E A…誤差アンプ、H F…ハイパスフィルタ、L 1…第1インダクタ、L 2…第2インダクタ、L 3…第3インダクタ、L 4…第4インダクタ、L F…ローパスフィルタ、P 1…交流電源、P 2…直流電源、P D…位相検波回路、P S 0…第0移相回路、P S 1…第1移相回路、P S 2…第2移相回路、R 1、R 2…抵抗、R L 1…第1ローラ、R L 2…第2ローラ、R V C…反転回路、S 1…第1センサヘッド、S 2…第2センサヘッド、S T…シート部材、S W C 1…第1切替回路、S W C 2…第

2 切替回路、V o u t …差動信号、V o u t 2 …差動信号、V R 1 1、V R
2 1 …第 1 可変抵抗、V R 1 2、V R 2 2 …第 2 可変抵抗

請求の範囲

- [請求項1] 交流電源が有する第1電源端子が接続される交流電源接続端子と、
 前記交流電源接続端子とグラウンドとの間に接続される第1磁気コアと、
 前記交流電源接続端子とグラウンドとの間において前記第1磁気コアと並列に接続される第2磁気コアと、
 前記交流電源接続端子と、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方との間に接続され、前記第1磁気コアと前記第2磁気コアとの少なくとも一方に流れる交流電流を制御する交流電流制御部と、
 前記第1磁気コアに巻回される第1検出コイルと、
 前記第2磁気コアに巻回され、且つ、前記第1検出コイルと差動接続される第2検出コイルと、
 前記第1検出コイルから出力される第1電圧と、前記第2検出コイルから出力される第2電圧との差分に応じた電圧を検出する検出回路と、
 を備える勾配磁界センサ。
- [請求項2] 前記交流電源が有する第2電源端子がグラウンドに接地される前記交流電源を備える、
 請求項1に記載の勾配磁界センサ。
- [請求項3] 前記交流電流制御部は、前記交流電源接続端子から前記第1磁気コアに流れる第1交流電流と、前記交流電源接続端子から前記第2磁気コアに流れる第2交流電流との少なくとも一方を移相する移相部を含む、
 請求項1又は2に記載の勾配磁界センサ。
- [請求項4] 前記交流電流制御部は、前記交流電源接続端子から前記第1磁気コアに流れる第1交流電流と、前記交流電源接続端子から前記第2磁気コアに流れる第2交流電流との少なくとも一方の振幅を調整する振幅

調整部を含む、

請求項 3 に記載の勾配磁界センサ。

[請求項5] 前記交流電流制御部は、前記交流電源接続端子と前記第 1 磁気コアとの間に接続される第 1 増幅回路及び第 1 1 可変抵抗器の少なくとも一方と、前記交流電源接続端子と前記第 2 磁気コアとの間に接続される第 2 増幅回路及び第 1 2 可変抵抗器の少なくとも一方とを、前記振幅調整部として含む、

請求項 4 に記載の勾配磁界センサ。

[請求項6] 前記交流電流制御部は、前記交流電源接続端子から前記第 1 磁気コアに流れる第 1 交流電流と前記交流電源接続端子から前記第 2 磁気コアに流れる第 2 交流電流との少なくとも一方の位相を反転させる反転回路を含む、

請求項 1 から 5 のうちいずれか一項に記載の勾配磁界センサ。

[請求項7] 前記交流電流制御部は、前記第 1 磁気コアに前記第 1 交流電流として流す交流電流を、前記反転回路によって位相を反転させた交流電流と、前記反転回路によって位相を反転させていない交流電流とのいずれかに切り替える第 1 切替回路と、前記第 2 磁気コアに前記第 2 交流電流として流す交流電流を、前記反転回路によって位相を反転させた交流電流と、前記反転回路によって位相を反転させていない交流電流とのいずれかに切り替える第 2 切替回路との少なくとも一方を含む、

請求項 6 に記載の勾配磁界センサ。

[請求項8] 前記交流電流制御部は、前記交流電源接続端子と前記第 1 磁気コアとの間に接続される AC カップリング用の第 1 コンデンサと、前記交流電源接続端子と前記第 2 磁気コアとの間に接続される AC カップリング用の第 2 コンデンサを含む、

請求項 3 から 7 のうちいずれか一項に記載の勾配磁界センサ。

[請求項9] 直流電源が有する正極電源端子が接続される直流電源接続端子と、前記直流電源接続端子と前記第 1 磁気コアとの間に接続される第 2

1 抵抗器と、

前記直流電源接続端子と前記第 1 磁気コアとの間において前記第 2

1 抵抗器と直列に接続される第 1 インダクタと、

前記直流電源接続端子と前記第 2 磁気コアとの間に接続される第 2

2 抵抗器と、

前記直流電源接続端子と前記第 2 磁気コアとの間において前記第 2

2 抵抗器と直列に接続される第 2 インダクタと、

を更に備える請求項 1 から 8 のうちいずれか一項に記載の勾配磁界センサ。

[請求項10] 前記第 2 1 抵抗器と、前記第 2 2 抵抗器との少なくとも一方は、可変抵抗器である、

請求項 9 に記載の勾配磁界センサ。

[請求項11] 前記直流電源が有する負極電源端子がグラウンドに接地される前記直流電源を備える、

請求項 9 又は 1 0 に記載の勾配磁界センサ。

[請求項12] 前記検出回路は、P S D (Phase Sensitive Detector) 回路を含む、

請求項 1 から 1 1 のうちいずれか一項に記載の勾配磁界センサ。

[請求項13] 前記検出回路は、前記 P S D 回路から出力される信号から所定の第 1 周波数以上の成分を除去するローパスフィルタを備える、

請求項 1 2 に記載の勾配磁界センサ。

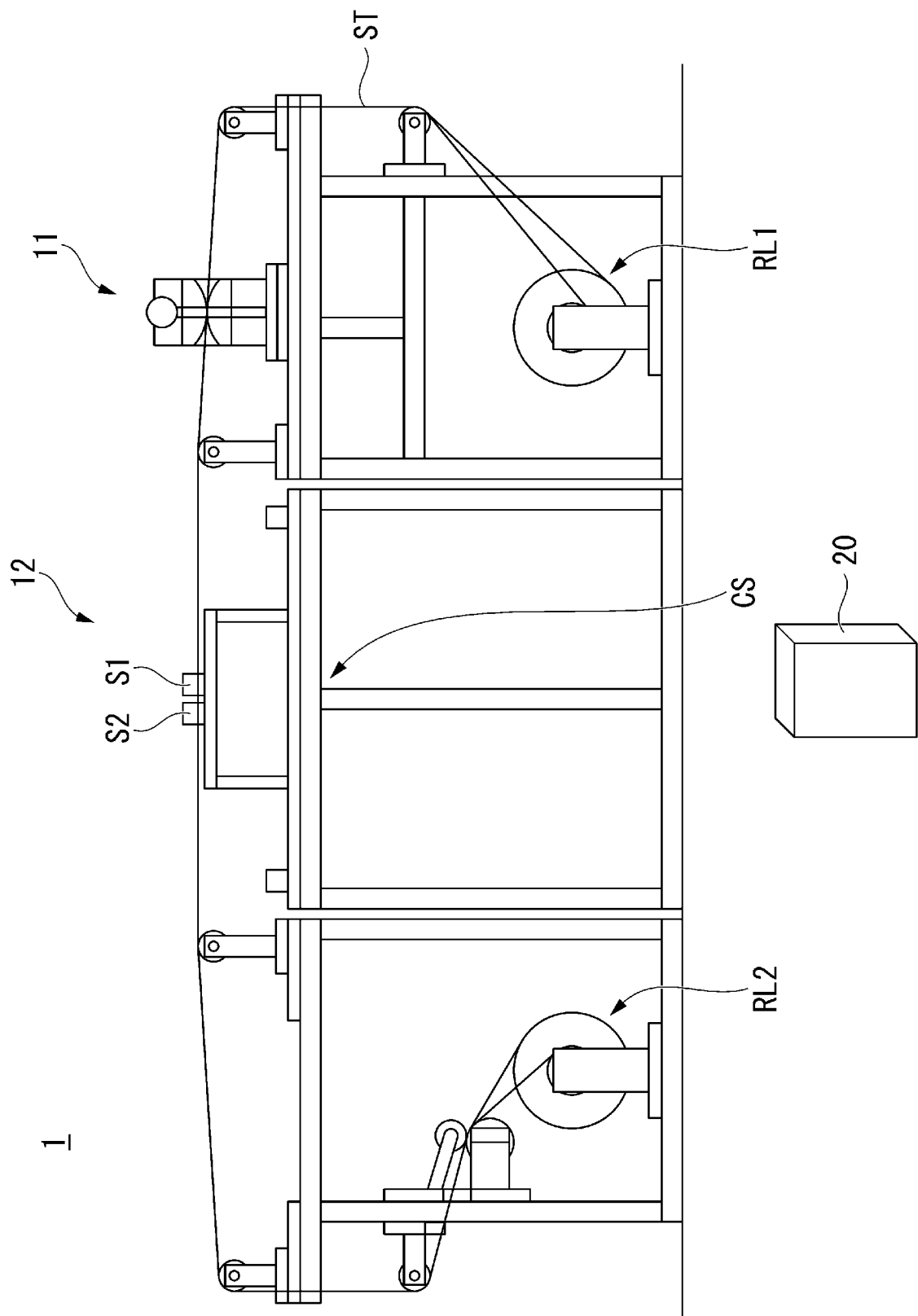
[請求項14] 前記検出回路は、前記 P S D 回路から出力される信号から所定の第 2 周波数以下の成分を除去するハイパスフィルタを備える、

請求項 1 2 又は 1 3 に記載の勾配磁界センサ。

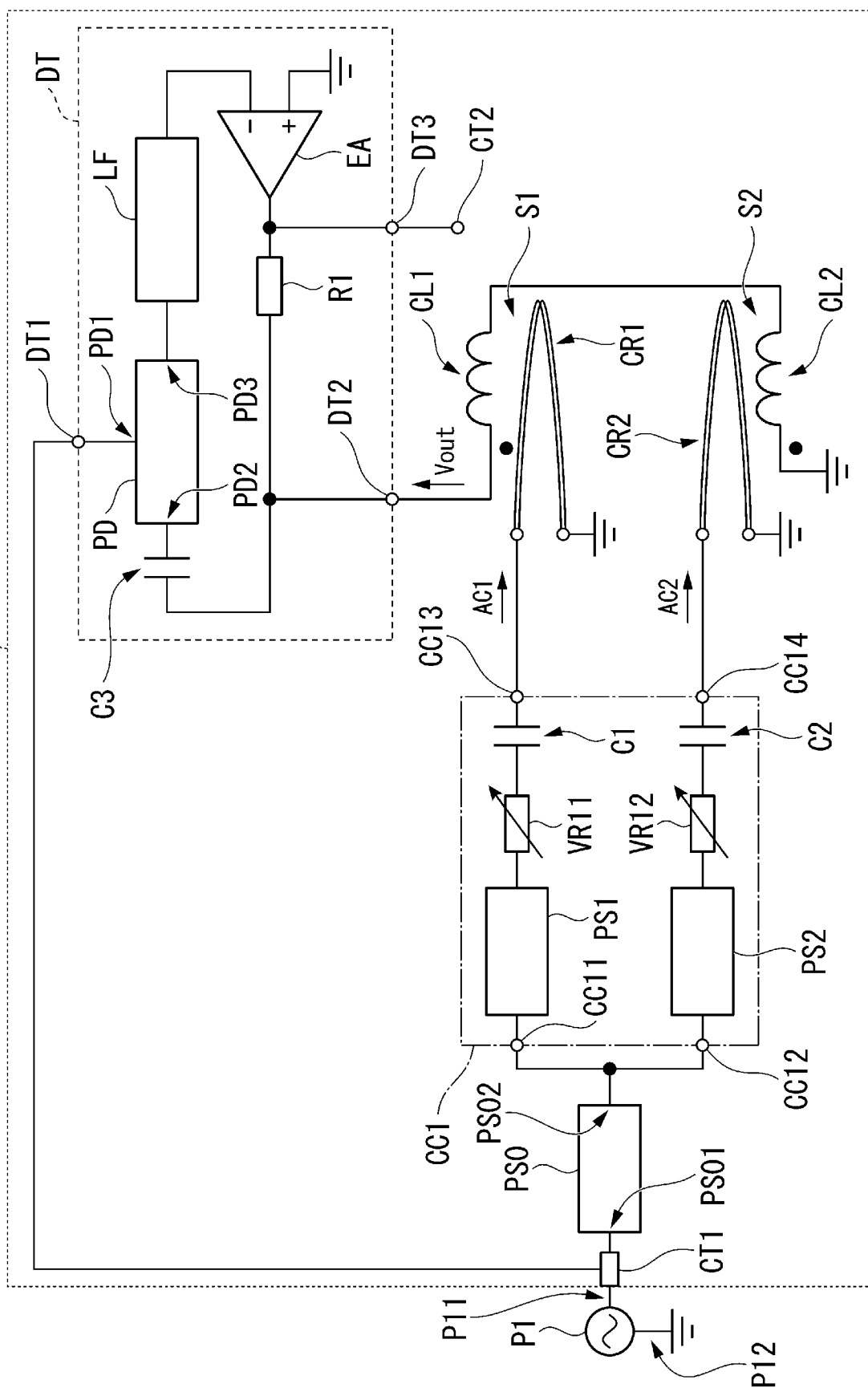
[請求項15] 請求項 1 から 1 4 のうちいずれか一項に記載の勾配磁界センサを備える、

磁性物検出装置。

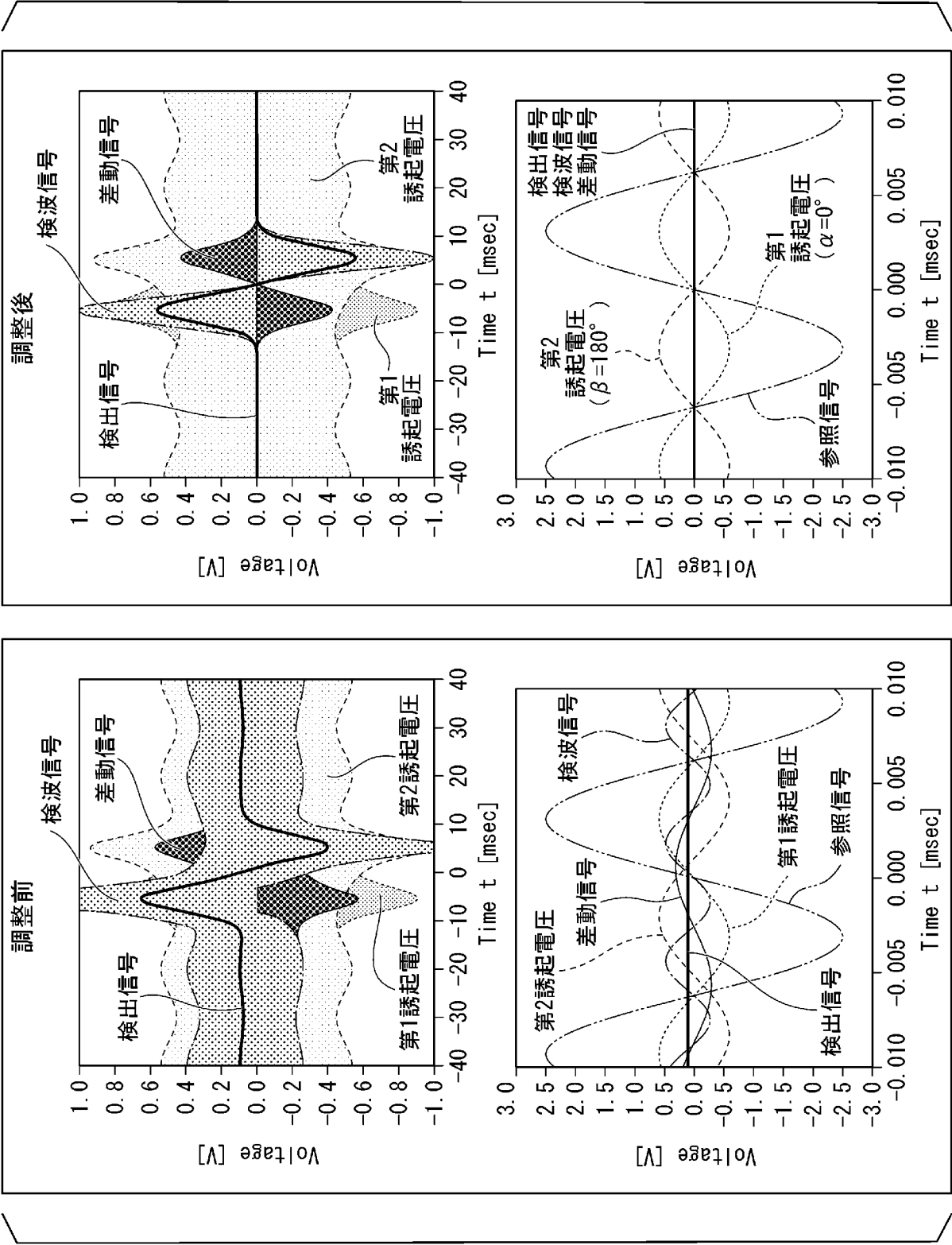
[図1]



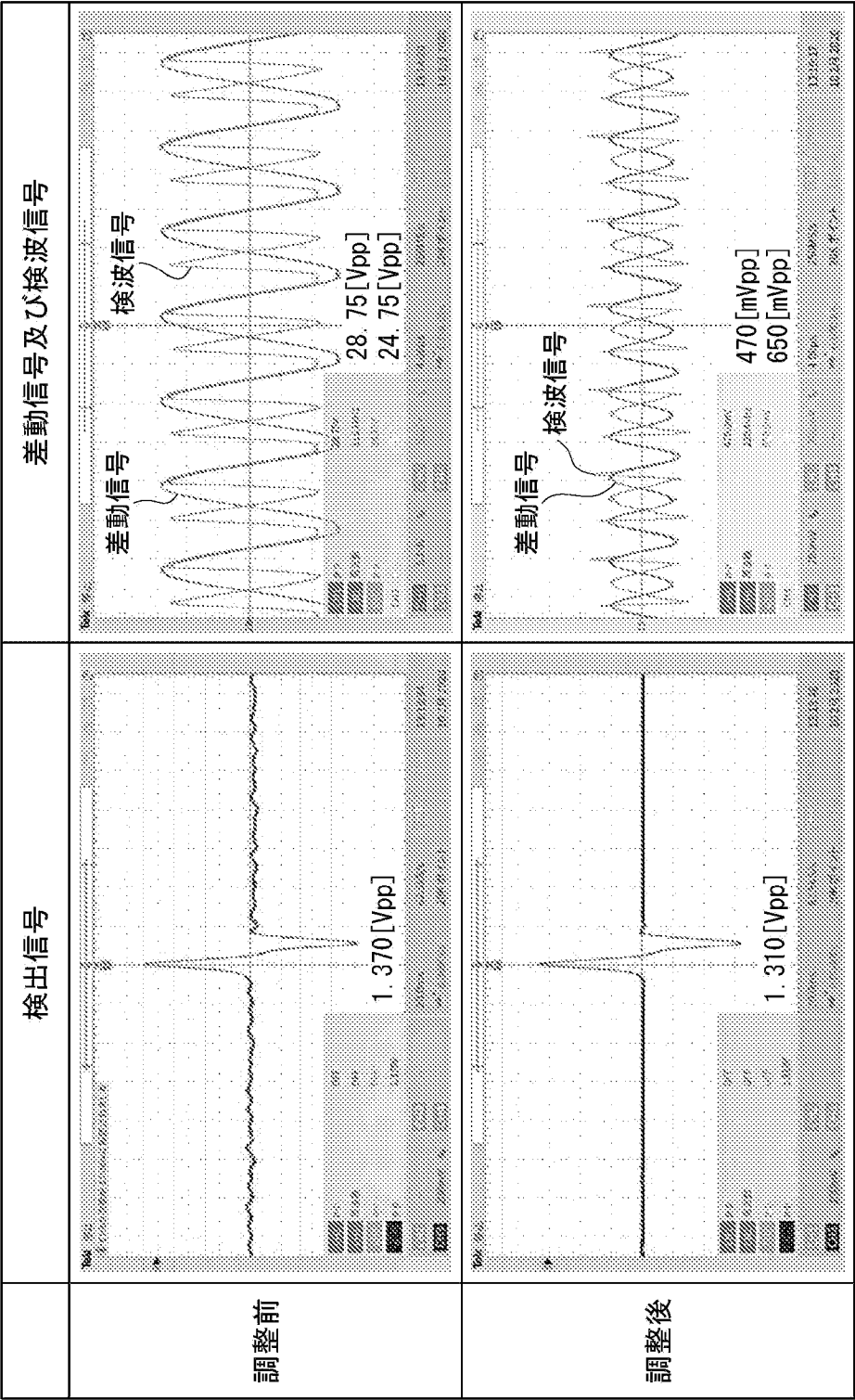
12



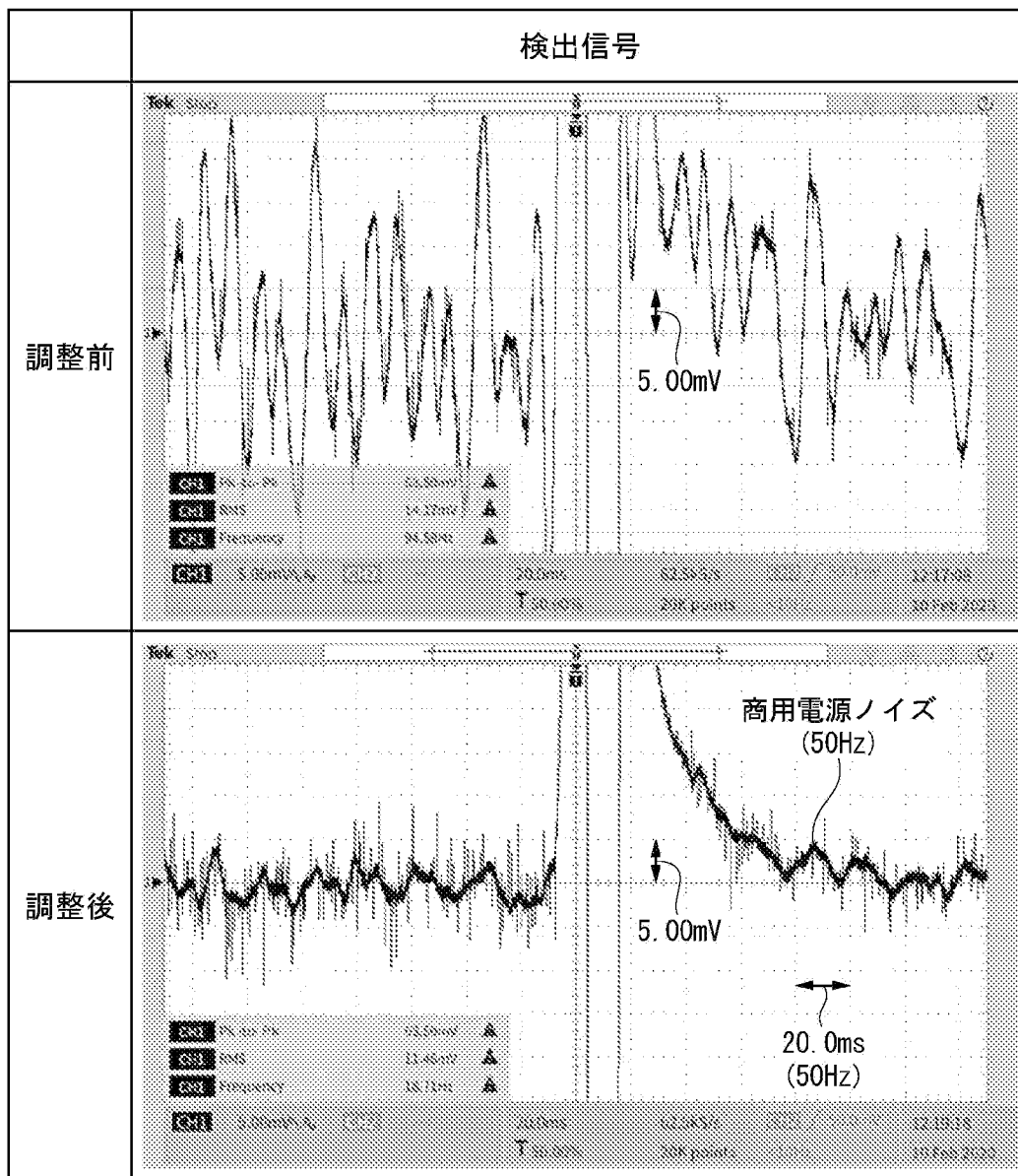
[図3]

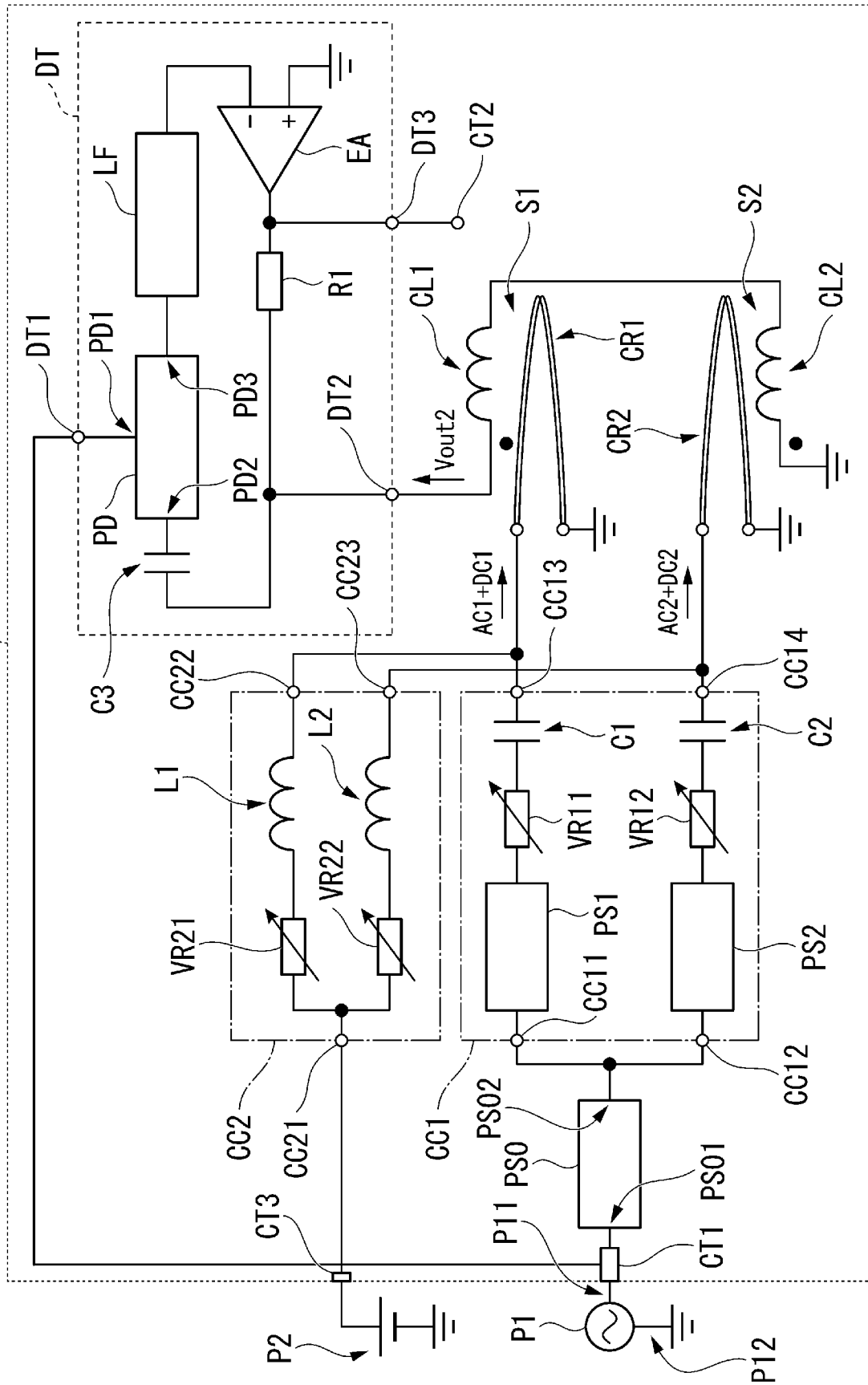


[図4]

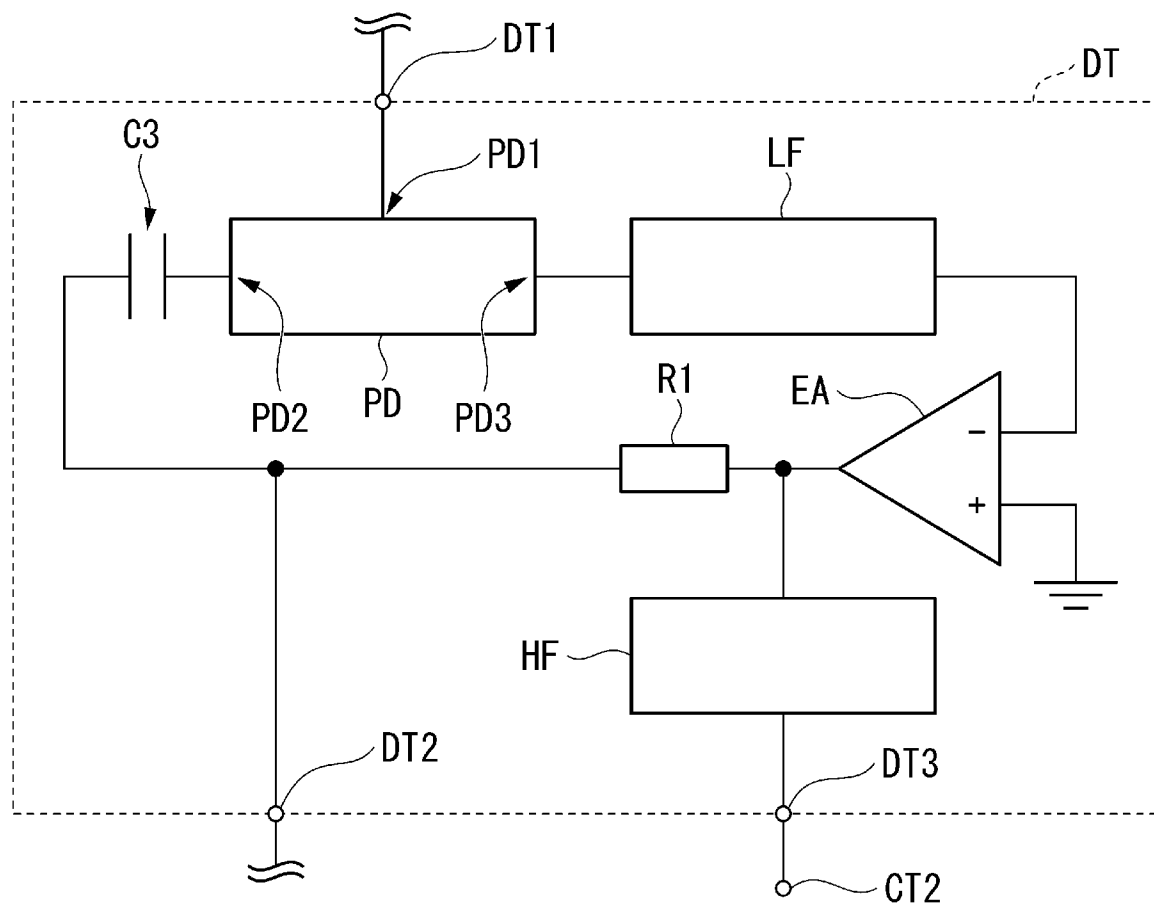


[図5]

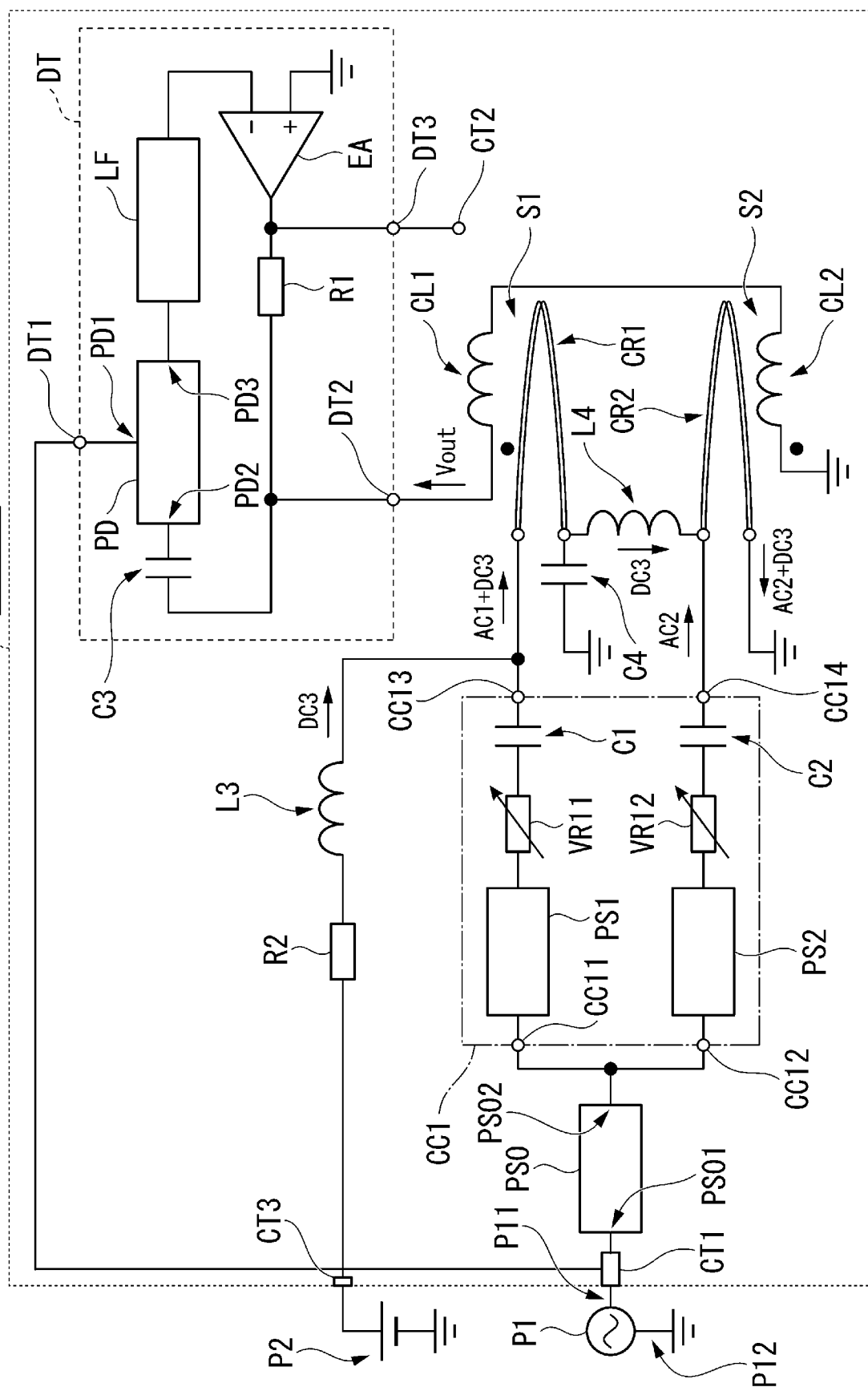


12(12A)

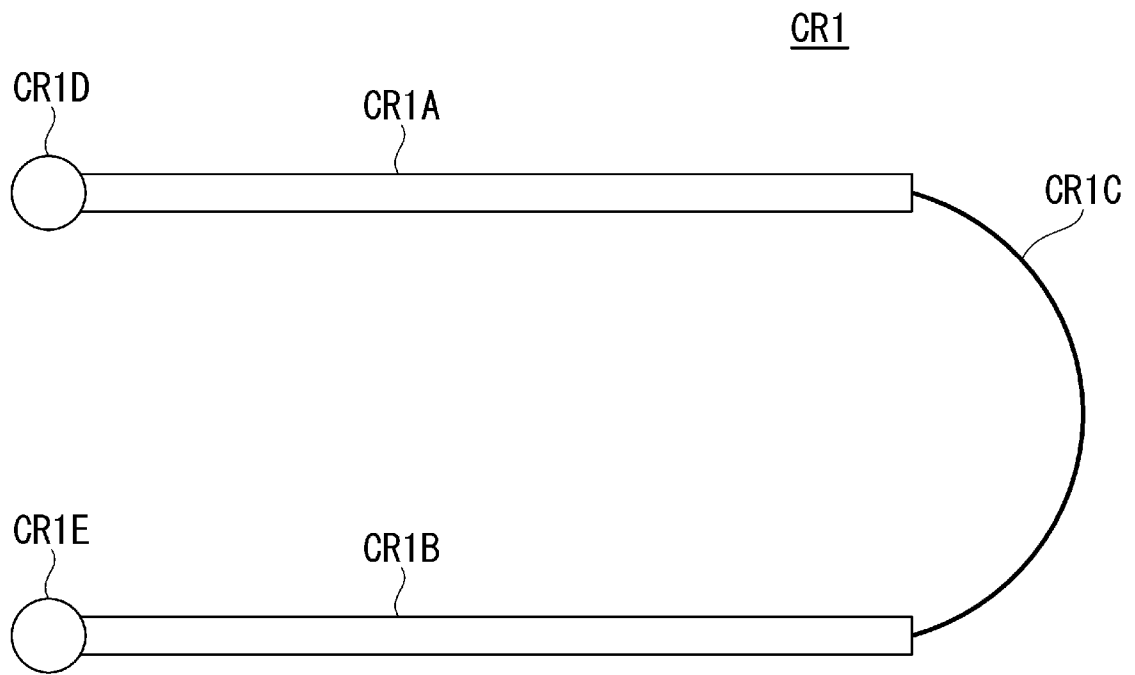
[図8]



12(12D)



[図10]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/025623

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G01R 33/02**(2006.01)i; **G01N 27/72**(2006.01)i

FI: G01R33/02 B; G01N27/72

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)

G01R33/02; G01N27/72; G01R33/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021

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.
X	WO 2015/060344 A1 (KYUSHU UNIVERSITY) 30 April 2015 (2015-04-30) paragraphs [0001], [0008], [0013], [0016]-[0043], [0051]-[0056], fig. 1, 15	1-2, 12-13, 15
A		3-11, 14
A	JP 2015-200524 A (KYUSHU UNIVERSITY) 12 November 2015 (2015-11-12) entire text, all drawings	1-15
A	JP 2005-315812 A (JAPAN SCIENCE AND TECHNOLOGY AGENCY) 10 November 2005 (2005-11-10) entire text, all drawings	1-15
A	JP 48-84612 A (TOKYO DENKI KAGAKU KOGYO K.K.) 10 November 1973 (1973-11-10) entire text, all drawings	1-15
A	JP 2013-57645 A (KYUSHU UNIVERSITY) 28 March 2013 (2013-03-28) entire text, all drawings	1-15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ 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

13 September 2021

Date of mailing of the international search report

05 October 2021

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/025623

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2015/060344	A1	30 April 2015	(Family: none)	
JP	2015-200524	A	12 November 2015	(Family: none)	
JP	2005-315812	A	10 November 2005	(Family: none)	
JP	48-84612	A	10 November 1973	(Family: none)	
JP	2013-57645	A	28 March 2013	US 2014/0327434 A1 entire text, all drawings WO 2013/035581 A1 EP 2755040 A1	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G01R 33/02(2006.01)i; G01N 27/72(2006.01)i FI: G01R33/02 B; G01N27/72		
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）） G01R33/02; G01N27/72; G01R33/04		
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 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2021年 日本国実用新案登録公報 1996-2021年 日本国登録実用新案公報 1994-2021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
X	WO 2015/060344 A1 (国立大学法人九州大学) 30.04.2015 (2015 - 04 - 30) 段落[0001], [0008], [0013], [0016] - [0043], [0051] - [0056], [図1], [図15]	1-2, 12-13, 15
A		3-11, 14
A	JP 2015-200524 A (国立大学法人九州大学) 12.11.2015 (2015 - 11 - 12) 全文, 全図	1-15
A	JP 2005-315812 A (独立行政法人科学技術振興機構) 10.11.2005 (2005 - 11 - 10) 全文, 全図	1-15
A	JP 48-84612 A (東京電気化学工業株式会社) 10.11.1973 (1973 - 11 - 10) 全文, 全図	1-15
A	JP 2013-57645 A (国立大学法人九州大学) 28.03.2013 (2013 - 03 - 28) 全文, 全図	1-15
☐ 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抵触するものではなく、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 13.09.2021		国際調査報告の発送日 05.10.2021
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 永井 皓喜 2S 5701 電話番号 03-3581-1101 内線 3216

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/025623

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO	2015/060344	A1	30.04.2015	(ファミリーなし)	
JP	2015-200524	A	12.11.2015	(ファミリーなし)	
JP	2005-315812	A	10.11.2005	(ファミリーなし)	
JP	48-84612	A	10.11.1973	(ファミリーなし)	
JP	2013-57645	A	28.03.2013	US 2014/0327434 A1	
				全文, 全図	
				WO 2013/035581 A1	
				EP 2755040 A1	