

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6536632号
(P6536632)

(45) 発行日 令和1年7月3日(2019.7.3)

(24) 登録日 令和1年6月14日(2019.6.14)

(51) Int.Cl.			F I		
GO 1 D	5/244	(2006.01)	GO 1 D	5/244	J
GO 1 D	5/245	(2006.01)	GO 1 D	5/245	B
GO 1 R	33/02	(2006.01)	GO 1 R	33/02	L
			GO 1 R	33/02	N

請求項の数 17 (全 37 頁)

(21) 出願番号	特願2017-122772 (P2017-122772)	(73) 特許権者	000003067
(22) 出願日	平成29年6月23日 (2017.6.23)		TDK株式会社
(65) 公開番号	特開2018-96966 (P2018-96966A)		東京都中央区日本橋二丁目5番1号
(43) 公開日	平成30年6月21日 (2018.6.21)	(74) 代理人	110002907
審査請求日	平成29年12月13日 (2017.12.13)		特許業務法人イトーシン国際特許事務所
(31) 優先権主張番号	特願2016-239055 (P2016-239055)	(74) 代理人	100107559
(32) 優先日	平成28年12月9日 (2016.12.9)		弁理士 星宮 勝美
(33) 優先権主張国	日本国(JP)	(74) 代理人	100166257
			弁理士 城澤 達哉
		(74) 代理人	100076233
			弁理士 伊藤 進
		(72) 発明者	穴川 賢吉
			東京都港区芝浦三丁目9番1号 TDK株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 角度センサおよび角度センサシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサであって、
それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、
前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、
前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、
前記角度演算部は、前記複数の合成磁界情報の推定情報である複数の推定合成磁界情報を想定し、前記複数の合成磁界情報と複数の推定合成磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように、前記角度検出値に対応する第1の推定値と前記ノイズ磁界に対応する第2の推定値を決定し、前記第1の推定値に基づいて前記角度検出値を生成することを特徴とする角度センサ。

【請求項2】

前記複数の合成磁界情報生成部の各々は、前記合成磁界の、互いに異なる方向の2つの成分の強度を表す2つの検出信号を生成する2つの検出信号生成部を含み、前記合成磁界情報は、前記2つの検出信号に基づいて生成されることを特徴とする請求項1記載の角度センサ。

【請求項3】

前記 2 つの成分は、前記合成磁界の、互いに直交する方向の 2 つの成分であることを特徴とする請求項 2 記載の角度センサ。

【請求項 4】

前記 2 つの検出信号生成部の各々は、少なくとも 1 つの磁気検出素子を含むことを特徴とする請求項 2 または 3 記載の角度センサ。

【請求項 5】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサであって、
それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、

10

前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、
前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、

前記複数の合成磁界情報の各々は、前記合成磁界の方向と強度の情報を含み、
前記角度演算部は、前記複数の合成磁界情報と複数の推定合成磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように第 1 および第 2 の推定値を決定し、前記第 1 の推定値に基づいて前記角度検出値を決定し、

前記第 1 の推定値は、前記角度検出値に対応する方向の情報と所定の位置における前記検出対象磁界の強度に対応する大きさの情報とを含み、

前記第 2 の推定値は、前記ノイズ磁界の方向に対応する方向の情報と前記ノイズ磁界の強度に対応する大きさの情報とを含み、

20

前記複数の推定合成磁界情報は、それぞれ前記複数の合成磁界情報の推定情報であり、前記第 1 および第 2 の推定値に基づいて生成されることを特徴とする角度センサ。

【請求項 6】

前記複数の検出位置において、前記検出対象磁界の強度が互いに異なることを特徴とする請求項 1 ないし 5 のいずれかに記載の角度センサ。

【請求項 7】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサであって、
それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、

30

前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、
前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、

前記複数の検出位置において、前記検出対象の角度に応じた前記検出対象磁界の方向の変化の様相が互いに異なり、

前記角度演算部は、前記複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、前記角度検出値を生成することを特徴とする角度センサ。

【請求項 8】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサであって、
それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、

40

前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、
前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、

前記複数の合成磁界情報の各々は、前記合成磁界の方向の情報を含み、
前記角度演算部は、第 1 の未知数と、第 2 の未知数と、複数の想定磁界情報とを想定し、

前記第 1 の未知数は、前記角度検出値に対応する値であり、

50

前記第 2 の未知数は、前記ノイズ磁界の強度に対応する値であり、

前記複数の想定磁界情報は、前記第 1 および第 2 の未知数に基づいて想定される、前記複数の合成磁界情報に対応する情報であり、

前記角度演算部は、更に、前記複数の合成磁界情報と複数の想定磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように前記第 1 および第 2 の未知数を推定し、推定された第 1 の未知数に基づいて前記角度検出値を決定することを特徴とする角度センサ。

【請求項 9】

前記複数の合成磁界情報生成部の各々は、

前記合成磁界の方向が基準方向に対してなす角度の余弦と対応関係を有する第 1 の信号を生成する第 1 の信号生成部と、

前記合成磁界の方向が前記基準方向に対してなす角度の正弦と対応関係を有する第 2 の信号を生成する第 2 の信号生成部と、

前記第 1 および第 2 の信号に基づいて、前記合成磁界情報として、前記合成磁界の方向が前記基準方向に対してなす角度を表わす個別角度値を生成する個別角度演算部とを有することを特徴とする請求項 8 記載の角度センサ。

【請求項 10】

前記第 1 および第 2 の信号生成部の各々は、少なくとも 1 つの磁気検出素子を含むことを特徴とする請求項 9 記載の角度センサ。

【請求項 11】

前記複数の検出位置のうちの少なくとも 2 つの検出位置において、前記検出対象磁界の強度が互いに異なることを特徴とする請求項 8 ないし 10 のいずれかに記載の角度センサ。

【請求項 12】

請求項 1 記載の角度センサと、

前記検出対象磁界を発生する磁界発生部とを備えたことを特徴とする角度センサシステム。

【請求項 13】

前記複数の検出位置は、前記磁界発生部からの距離が互いに異なり、

前記複数の検出位置において、前記検出対象磁界の強度が互いに異なることを特徴とする請求項 12 記載の角度センサシステム。

【請求項 14】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサと、検出対象磁界を発生する磁界発生部とを備えた角度センサシステムであって、

前記角度センサは、

それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、前記検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、

前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、

前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、

前記角度演算部は、前記複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、前記角度検出値を生成し、

前記複数の検出位置は、前記磁界発生部を通過する仮定の直線上の互いに異なる位置であって、前記磁界発生部からの距離が互いに異なり、

前記複数の検出位置において、前記検出対象磁界の強度が互いに異なることを特徴とする角度センサシステム。

【請求項 15】

検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサと、検出対象磁界を発生する磁界発生部とを備えた角度センサシステムであって、

前記角度センサは、

10

20

30

40

50

それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、前記検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、前記合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、

前記角度検出値を生成する角度演算部とを備え、

前記複数の検出位置の各々において、前記検出対象磁界の方向は、前記検出対象の角度に応じて変化し、

前記角度演算部は、前記複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、前記角度検出値を生成し、

前記複数の検出位置は、同一平面上にあることを特徴とする角度センサシステム。

【請求項 16】

前記複数の検出位置において、前記検出対象の角度に応じた前記検出対象磁界の方向の変化の様相が互いに異なることを特徴とする請求項 15 記載の角度センサシステム。

【請求項 17】

前記複数の検出位置のうちの少なくとも 2 つの検出位置において、前記検出対象磁界の強度が互いに異なることを特徴とする請求項 15 記載の角度センサシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサおよび角度センサシステムに関する。

【背景技術】

【0002】

近年、自動車におけるステアリングホイールまたはパワーステアリングモータの回転位置の検出等の種々の用途で、検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成する角度センサが広く利用されている。角度センサとしては、例えば磁気式の角度センサがある。磁気式の角度センサが用いられる角度センサシステムでは、一般的に、対象物の回転や直線的な運動に連動して方向が回転する検出対象磁界を発生する磁界発生部が設けられる。磁界発生部は、例えば磁石である。磁気式の角度センサにおける検出対象の角度は、基準位置における検出対象磁界の方向が基準方向に対してなす角度と対応関係を有する。

【0003】

磁気式の角度センサとしては、特許文献 1, 2 に記載されているように、互いに位相が異なる複数の検出信号を生成する複数の検出回路を備え、複数の検出信号を用いた演算によって角度検出値を生成するものが知られている。複数の検出回路の各々は、検出対象磁界を検出する。また、複数の検出回路の各々は、少なくとも 1 つの磁気検出素子を含んでいる。

【0004】

特許文献 1, 2 に記載されているように、磁気式の角度センサでは、複数の検出回路の各々に、検出対象磁界の他に、検出対象磁界以外のノイズ磁界が印加される場合がある。ノイズ磁界としては、例えば地磁気やモータからの漏れ磁界がある。このように複数の検出回路の各々にノイズ磁界が印加される場合には、複数の検出回路の各々は、検出対象磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出することになる。そのため、検出対象磁界の方向とノイズ磁界の方向が異なるときには、角度検出値に誤差が生じる。以下、角度検出値に生じる誤差を、角度誤差と言う。

【0005】

特許文献 1, 2 には、ノイズ磁界に起因した角度誤差を低減できるようにした回転磁界センサが記載されている。特許文献 1, 2 に記載された回転磁界センサは、いずれも、回転磁界を発生する磁界発生部と、第 1 および第 2 の検出部とを備えている。回転磁界は、第 1 の位置における第 1 の部分磁界と第 2 の位置における第 2 の部分磁界とを含んでいる。第 1 の部分磁界と第 2 の部分磁界は、磁界の方向が互いに 180° 異なり且つ同じ回転方向に回転する。第 1 の検出部は、第 1 の位置において、第 1 の部分磁界とノイズ磁界と

10

20

30

40

50

の合成磁界を検出する。第2の検出部は、第2の位置において、第2の部分磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出する。特許文献1, 2に記載された回転磁界センサでは、第1の検出部の出力と第2の検出部の出力を用いた演算を行って、ノイズ磁界に起因した角度誤差が低減された角度検出値を生成する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特許第5062449号公報

【特許文献2】特許第5062450号公報

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

特許文献1, 2に記載された回転磁界センサでは、前述のように規定された第1の部分磁界と第2の部分磁界とを含む回転磁界を発生する特殊な磁界発生部が必要であると共に、回転磁界の態様に応じて第1および第2の検出部の位置が制約される。そのため、この回転磁界センサでは、構成や設置に関して大きな制約が生じるという問題点がある。

【0008】

本発明はかかる問題点に鑑みてなされたもので、その目的は、構成や設置に関して大きな制約を生じさせることなく、ノイズ磁界に起因した角度誤差を低減できるようにした角度センサおよび角度センサシステムを提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の角度センサは、検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値を生成するものである。本発明の角度センサは、それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する複数の合成磁界情報生成部と、角度検出値を生成する角度演算部とを備えている。

【0010】

複数の検出位置の各々において、検出対象磁界の方向は、検出対象の角度に応じて変化する。角度演算部は、複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、角度検出値を生成する。

30

【0011】

本発明の角度センサにおいて、複数の合成磁界情報生成部の各々は、合成磁界の、互いに異なる方向の2つの成分の強度を表す2つの検出信号を生成する2つの検出信号生成部を含んでいてもよい。また、合成磁界情報は、2つの検出信号に基づいて生成されてもよい。上記の2つの成分は、合成磁界の、互いに直交する方向の2つの成分であってもよい。また、2つの検出信号生成部の各々は、少なくとも1つの磁気検出素子を含んでいてもよい。

【0012】

また、本発明の角度センサにおいて、複数の合成磁界情報の各々は、合成磁界の方向と強度の情報を含んでいてもよい。この場合、角度演算部は、複数の合成磁界情報と複数の推定合成磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように第1および第2の推定値を決定し、第1の推定値に基づいて角度検出値を決定してもよい。第1の推定値は、角度検出値に対応する方向の情報と所定の位置における検出対象磁界の強度に対応する大きさの情報とを含んでいる。第2の推定値は、ノイズ磁界の方向に対応する方向の情報とノイズ磁界の強度に対応する大きさの情報とを含んでいる。複数の推定合成磁界情報は、それぞれ複数の合成磁界情報の推定情報であり、第1および第2の推定値に基づいて生成される。

40

【0013】

また、本発明の角度センサにおいて、複数の検出位置において、検出対象磁界の強度が

50

互いに異なっていてもよい。あるいは、複数の検出位置において、検出対象の角度に応じた検出対象磁界の方向の変化の態様が互いに異なっていてもよい。

【0014】

また、本発明の角度センサにおいて、複数の合成磁界情報の各々は、合成磁界の方向の情報を含んでいてもよい。この場合、角度演算部は、第1の未知数と、第2の未知数と、複数の想定磁界情報とを想定してもよい。第1の未知数は、角度検出値に対応する値である。第2の未知数は、ノイズ磁界の強度に対応する値である。複数の想定磁界情報は、第1および第2の未知数に基づいて想定される、複数の合成磁界情報に対応する情報である。角度演算部は、更に、複数の合成磁界情報と複数の想定磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように第1および第2の未知数を推定し、推定された第1の未知数に基づいて角度検出値を決定してもよい。

10

【0015】

また、本発明の角度センサにおいて、複数の合成磁界情報の各々が、合成磁界の方向の情報を含む場合、複数の合成磁界情報生成部の各々は、合成磁界の方向が基準方向に対してなす角度の余弦と対応関係を有する第1の信号を生成する第1の信号生成部と、合成磁界の方向が基準方向に対してなす角度の正弦と対応関係を有する第2の信号を生成する第2の信号生成部と、第1および第2の信号に基づいて、合成磁界情報として、合成磁界の方向が基準方向に対してなす角度を表わす個別角度値を生成する個別角度演算部とを有していてもよい。また、第1および第2の信号生成部の各々は、少なくとも1つの磁気検出素子を含んでいてもよい。

20

【0016】

また、本発明の角度センサにおいて、複数の合成磁界情報の各々が、合成磁界の方向の情報を含む場合、複数の検出位置のうち少なくとも2つの検出位置において、検出対象磁界の強度が互いに異なっていてもよい。

【0017】

本発明の角度センサシステムは、本発明の角度センサと、検出対象磁界を発生する磁界発生部とを備えている。

【0018】

本発明の角度センサシステムにおいて、複数の検出位置は、磁界発生部からの距離が互いに異なっていてもよく、複数の検出位置において、検出対象磁界の強度が互いに異なっていてもよい。この場合、複数の検出位置は、磁界発生部を通過する仮想の直線上の互いに異なる位置であってもよい。

30

【0019】

また、本発明の角度センサシステムにおいて、複数の検出位置は、同一平面上にあってもよい。この場合、複数の検出位置において、検出対象の角度に応じた検出対象磁界の方向の変化の態様が互いに異なっていてもよい。あるいは、複数の検出位置のうち少なくとも2つの検出位置において、検出対象磁界の強度が互いに異なっていてもよい。

【発明の効果】

【0020】

本発明の角度センサおよび角度センサシステムでは、複数の合成磁界情報生成部によって生成される複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、角度検出値が生成される。これにより、本発明によれば、構成や設置に関して大きな制約を生じさせることなく、ノイズ磁界に起因した角度誤差を低減することができるという効果を奏する。

40

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】本発明の第1の実施の形態に係る角度センサシステムの概略の構成を示す斜視図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態における方向と角度の定義を示す説明図である。

【図3】本発明の第1の実施の形態に係る角度センサの構成を示す機能ブロック図である。

50

【図 4】本発明の第 1 の実施の形態における角度演算部の構成の一例を示す機能ブロック図である。

【図 5】本発明の第 1 の実施の形態における第 1 の検出信号生成部の構成の一例を示す回路図である。

【図 6】本発明の第 1 の実施の形態における第 2 の検出信号生成部の構成の一例を示す回路図である。

【図 7】図 5 および図 6 における 1 つの磁気検出素子の一部を示す斜視図である。

【図 8】本発明の第 1 の実施の形態における角度誤差の波形の一例を示す波形図である。

【図 9】本発明の第 2 の実施の形態に係る角度センサシステムの概略の構成を示す斜視図である。

【図 10】本発明の第 2 の実施の形態における角度誤差の波形の一例を示す波形図である。

【図 11】本発明の第 3 の実施の形態に係る角度センサの構成を示す機能ブロック図である。

【図 12】本発明の第 4 の実施の形態に係る角度センサシステムの概略の構成を示す斜視図である。

【図 13】本発明の第 4 の実施の形態に係る角度センサの構成を示す機能ブロック図である。

【図 14】本発明の第 4 の実施の形態における合成磁界情報生成部の構成の一例を示す機能ブロック図である。

【図 15】本発明の第 4 の実施の形態における磁界発生部が発生する検出対象磁界の強度の分布を模式的に示す説明図である。

【図 16】本発明の第 4 の実施の形態における合成磁界の強度および方向の分布を模式的に示す説明図である。

【図 17】本発明の第 4 の実施の形態における第 1 および第 2 の合成磁界とノイズ磁界との関係を模式的に示す説明図である。

【図 18】本発明の第 4 の実施の形態に関するシミュレーションにおける磁界発生部が発生する検出対象磁界の強度の分布を模式的に示す説明図である。

【図 19】本発明の第 4 の実施の形態に関するシミュレーションにおける複数の検出位置を示す説明図である。

【図 20】本発明の第 4 の実施の形態における個別検出角度の角度誤差の波形の一例を示す波形図である。

【図 21】本発明の第 4 の実施の形態における角度検出値の角度誤差の波形の一例を示す波形図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

[第 1 の実施の形態]

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。始めに、図 1 を参照して、本発明の第 1 の実施の形態に係る角度センサシステムの概略の構成について説明する。本実施の形態に係る角度センサシステム 100 は、本実施の形態に係る角度センサ 1 と、磁界発生部 5 とを備えている。角度センサ 1 は、特に、磁気式の角度センサである。磁界発生部 5 は、角度センサ 1 が検出すべき本来の磁界である検出対象磁界を発生する。

【0023】

本実施の形態における磁界発生部 5 は、円柱状の磁石 6 である。磁石 6 は、円柱の中心軸を含む仮想の平面を中心として対称に配置された N 極と S 極とを有している。この磁石 6 は、円柱の中心軸を中心として回転する。これにより、磁石 6 が発生する検出対象磁界の方向は、円柱の中心軸を含む回転中心 C を中心として回転する。

【0024】

角度センサ 1 は、検出対象の角度と対応関係を有する角度検出値 s を生成するもので

10

20

30

40

50

ある。本実施の形態における検出対象の角度は、基準位置における検出対象磁界の方向が基準方向に対してなす角度と対応関係を有する。以下、基準位置における検出対象磁界の方向が基準方向に対してなす角度を回転磁界角度と言い、記号 M で表す。

【 0 0 2 5 】

基準位置は、磁石 6 の一方の端面に平行な仮想の平面（以下、基準平面と言う。）内に位置する。この基準平面内において、磁石 6 が発生する検出対象磁界の方向は、基準位置を中心として回転する。基準方向は、基準平面内に位置して、基準位置と交差する。以下の説明において、基準位置における検出対象磁界の方向とは、基準平面内に位置する方向を指す。

【 0 0 2 6 】

角度センサ 1 は、複数の合成磁界情報生成部を備えている。複数の合成磁界情報生成部は、それぞれ互いに異なる複数の検出位置において、検出対象磁界と、それ以外のノイズ磁界との合成磁界を検出し、合成磁界の方向と強度のうちの少なくとも方向の情報を含む複数の合成磁界情報を生成する。複数の検出位置の各々において、検出対象磁界の方向は、検出対象の角度および回転磁界角度 M に応じて変化する。本実施の形態では特に、複数の検出位置は、磁界発生部 5 からの距離が互いに異なる。複数の検出位置において、検出対象磁界の強度は、互いに異なる。

【 0 0 2 7 】

検出位置の数は 2 以上であればよい。以下、複数の検出位置が、第 1 の検出位置 P_1 と第 2 の検出位置 P_2 と第 3 の検出位置 P_3 と第 4 の検出位置 P_4 である場合について説明する。この場合、複数の合成磁界情報は、第 1 の合成磁界情報と第 2 の合成磁界情報と第 3 の合成磁界情報と第 4 の合成磁界情報である。複数の合成磁界情報生成部は、第 1 の合成磁界情報生成部 10 と第 2 の合成磁界情報生成部 20 と第 3 の合成磁界情報生成部 30 と第 4 の合成磁界情報生成部 40 である。第 1 ないし第 4 の合成磁界情報生成部 10, 20, 30, 40 は、磁石 6 の一方の端面に対向するように配置される。

【 0 0 2 8 】

第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、磁界発生部 5 を通過する仮想の直線上の互いに異なる位置であってもよい。この仮想の直線は、回転中心 C と一致していてもよいし、一致していなくてもよい。図 1 には、前者の場合の例を示している。この例では、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、磁界発生部 5 から遠ざかる方向に、この順に並んでいる。なお、必ずしも、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ の全てが同一直線上にある必要はない。

【 0 0 2 9 】

第 1 の合成磁界情報生成部 10 は、第 1 の検出位置 P_1 において、検出対象磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出し、第 1 の合成磁界情報を生成する。第 2 の合成磁界情報生成部 20 は、第 2 の検出位置 P_2 において、検出対象磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出し、第 2 の合成磁界情報を生成する。第 3 の合成磁界情報生成部 30 は、第 3 の検出位置 P_3 において、検出対象磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出し、第 3 の合成磁界情報を生成する。第 4 の合成磁界情報生成部 40 は、第 4 の検出位置 P_4 において、検出対象磁界とノイズ磁界との合成磁界を検出し、第 4 の合成磁界情報を生成する。

【 0 0 3 0 】

以下、第 1 の検出位置 P_1 における検出対象磁界を特に第 1 の部分磁界 MF_a と言い、第 2 の検出位置 P_2 における検出対象磁界を特に第 2 の部分磁界 MF_b と言い、第 3 の検出位置 P_3 における検出対象磁界を特に第 3 の部分磁界 MF_c と言い、第 4 の検出位置 P_4 における検出対象磁界を特に第 4 の部分磁界 MF_d と言う。第 1 ないし第 4 の部分磁界 $MF_a \sim MF_d$ の方向は、検出対象の角度および回転磁界角度 M に応じて変化する。第 1 ないし第 4 の部分磁界 $MF_a \sim MF_d$ の強度は、互いに異なる。

【 0 0 3 1 】

本実施の形態では、以下のように、複数の合成磁界情報の各々は、合成磁界の方向と強度の情報を含む。第 1 の合成磁界情報は、第 1 の検出位置 P_1 における合成磁界の方向と

10

20

30

40

50

強度の情報を含む。第2の合成磁界情報は、第2の検出位置P2における合成磁界の方向と強度の情報を含む。第3の合成磁界情報は、第3の検出位置P3における合成磁界の方向と強度の情報を含む。第4の合成磁界情報は、第4の検出位置P4における合成磁界の方向と強度の情報を含む。以下、第1の検出位置P1における合成磁界を特に第1の合成磁界MF1と言い、第2の検出位置P2における合成磁界を特に第2の合成磁界MF2と言い、第3の検出位置P3における合成磁界を特に第3の合成磁界MF3と言い、第4の検出位置P4における合成磁界を特に第4の合成磁界MF4と言う。

【0032】

第1ないし第4の検出位置P1～P4におけるノイズ磁界の方向は互いに等しく、第1ないし第4の検出位置P1～P4におけるノイズ磁界の強度は互いに等しい。以下、ノイズ磁界を記号 M_{ex} で表す。ノイズ磁界 M_{ex} は、その方向と強度が時間的に一定の磁界であってもよいし、その方向と強度が時間的に周期的に変化する磁界であってもよいし、その方向と強度が時間的にランダムに変化する磁界であってもよい。第1の合成磁界MF1は、第1の部分磁界MFaとノイズ磁界 M_{ex} との合成磁界である。第2の合成磁界MF2は、第2の部分磁界MFbとノイズ磁界 M_{ex} との合成磁界である。第3の合成磁界MF3は、第3の部分磁界MFcとノイズ磁界 M_{ex} との合成磁界である。第4の合成磁界MF4は、第4の部分磁界MFdとノイズ磁界 M_{ex} との合成磁界である。

【0033】

なお、本実施の形態に係る角度センサシステム100の構成は、図1に示した例に限られない。例えば、図1に示したように配置された磁界発生部5と第1ないし第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40において、磁界発生部5が固定されて第1ないし第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40が回転してもよいし、磁界発生部5と第1ないし第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40が互いに反対方向に回転してもよいし、磁界発生部5と第1ないし第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40が同じ方向に互いに異なる角速度で回転してもよい。

【0034】

ここで、図1および図2を参照して、本実施の形態における方向と角度の定義について説明する。まず、図1に示した回転中心Cに平行で、図1における下から上に向かう方向をZ方向とする。図2では、Z方向を図2における奥から手前に向かう方向として表している。次に、Z方向に垂直な2方向であって、互いに直交する2つの方向をX方向とY方向とする。図2では、X方向を右側に向かう方向として表し、Y方向を上側に向かう方向として表している。また、X方向とは反対の方向を $-X$ 方向とし、Y方向とは反対の方向を $-Y$ 方向とする。

【0035】

回転磁界角度 M は、基準方向DRを基準にして表される。本実施の形態では、X方向を基準方向DRとする。

【0036】

第1ないし第4の合成磁界MF1～MF4の方向は、いずれも、図2において反時計回り方向に回転するものとする。図2に示したように、第1の合成磁界MF1の方向が基準方向DRに対してなす角度を記号 θ_1 で表し、第2の合成磁界MF2の方向が基準方向DRに対してなす角度を記号 θ_2 で表し、第3の合成磁界MF3の方向が基準方向DRに対してなす角度を記号 θ_3 で表し、第4の合成磁界MF4の方向が基準方向DRに対してなす角度を記号 θ_4 で表す。角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ は、基準方向DRから反時計回り方向に見たときに正の値で表し、基準方向DRから時計回り方向に見たときに負の値で表す。

【0037】

第1の合成磁界MF1の主成分は、第1の部分磁界MFaである。第2の合成磁界MF2の主成分は、第2の部分磁界MFbである。第3の合成磁界MF3の主成分は、第3の部分磁界MFcである。第4の合成磁界MF4の主成分は、第4の部分磁界MFdである。第1ないし第4の部分磁界MFa～MFdの方向は、同じ方向になる。また、第1ないし第4の部分磁界MFa～MFdが基準方向DRに対してなすそれぞれの角度は、互いに

10

20

30

40

50

等しくなる。

【0038】

本実施の形態では、第1ないし第4の部分磁界MF a ~ MF dの方向は、基準位置における検出対象磁界の方向に一致するものとする。また、第1ないし第4の部分磁界MF a ~ MF dが基準方向DRに対してなすそれぞれの角度は、回転磁界角度Mと等しいものとする。これらの角度の正負の定義は、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ と同様である。

【0039】

基準位置は、上記の第1ないし第4の部分磁界MF a ~ MF dと基準位置における検出対象磁界との関係を満たす限り、第1ないし第4の検出位置P1 ~ P4のいずれかと一致していてもよいし、これらの位置とは異なる、回転中心C上の位置であってもよい。

10

【0040】

後で詳しく説明するが、合成磁界情報は、合成磁界の、互いに異なる方向の2つの成分の強度に基づいて生成される。本実施の形態では特に、この2つの成分は、合成磁界の、互いに直交する方向の2つの成分である。本実施の形態では、この2つの成分の基準となる2つの方向を、X方向とY方向とする。

【0041】

次に、図3を参照して、角度センサ1の構成について詳しく説明する。図3は、角度センサ1の構成を示す機能ブロック図である。前述の通り、角度センサ1は、複数の合成磁界情報生成部を備えている。複数の合成磁界情報生成部の各々は、合成磁界の、互いに異なる方向の2つの成分の強度を表す2つの検出信号を生成する2つの検出信号生成部を含んでいる。合成磁界情報は、2つの検出信号に基づいて生成される。2つの検出信号生成部の各々は、少なくとも1つの磁気検出素子を含んでいる。少なくとも1つの磁気検出素子は、少なくとも1つの磁気抵抗効果素子を含んでいてもよい。磁気抵抗効果素子は、GMR（巨大磁気抵抗効果）素子でもよいし、TMR（トンネル磁気抵抗効果）素子でもよいし、AMR（異方性磁気抵抗効果）素子でもよい。また、少なくとも1つの磁気検出素子は、ホール素子等、磁気抵抗効果素子以外の磁界を検出する素子を、少なくとも1つ含んでいてもよい。

20

【0042】

本実施の形態では、複数の合成磁界情報生成部は、第1の合成磁界情報生成部10と第2の合成磁界情報生成部20と第3の合成磁界情報生成部30と第4の合成磁界情報生成部40である。第1の合成磁界情報生成部10は、第1の検出信号生成部11と第2の検出信号生成部12とを含んでいる。第1の検出信号生成部11は、第1の合成磁界MF1の、X方向の成分の強度を表す第1の検出信号S1を生成する。第2の検出信号生成部12は、第1の合成磁界MF1の、Y方向の成分の強度を表す第2の検出信号S2を生成する。

30

【0043】

第1の合成磁界情報は、第1および第2の検出信号S1, S2に基づいて生成される。本実施の形態では、第1の合成磁界情報は、第1の合成磁界MF1の方向と強度の情報を含むベクトルで表わされる。第1の合成磁界情報生成部10は、更に、アナログ-デジタル変換器（以下、A/D変換器と記す。）13, 14と、第1のベクトル生成部15とを含んでいる。A/D変換器13, 14は、それぞれ、第1および第2の検出信号S1, S2をデジタル信号に変換する。第1のベクトル生成部15は、それぞれA/D変換器13, 14によってデジタル信号に変換された第1および第2の検出信号S1, S2を用いて、第1の合成磁界情報を表すベクトルY1を生成する。第1のベクトル生成部15は、例えば、特定用途向け集積回路（ASIC）によって実現することができる。

40

【0044】

第2の合成磁界情報生成部20は、第3の検出信号生成部21と第4の検出信号生成部22とを含んでいる。第3の検出信号生成部21は、第2の合成磁界MF2の、X方向の成分の強度を表す第3の検出信号S3を生成する。第4の検出信号生成部22は、第2の合成磁界MF2の、Y方向の成分の強度を表す第4の検出信号S4を生成する。

50

【 0 0 4 5 】

第2の合成磁界情報は、第3および第4の検出信号 S_3 、 S_4 に基づいて生成される。本実施の形態では、第2の合成磁界情報は、第2の合成磁界 MF_2 の方向と強度の情報を含むベクトルで表わされる。第2の合成磁界情報生成部20は、更に、A/D変換器23、24と、第2のベクトル生成部25とを含んでいる。A/D変換器23、24は、それぞれ、第3および第4の検出信号 S_3 、 S_4 をデジタル信号に変換する。第2のベクトル生成部25は、それぞれA/D変換器23、24によってデジタル信号に変換された第3および第4の検出信号 S_3 、 S_4 を用いて、第2の合成磁界情報を表すベクトル Y_2 を生成する。第2のベクトル生成部25は、例えば、ASICによって実現することができる。

10

【 0 0 4 6 】

第3の合成磁界情報生成部30は、第5の検出信号生成部31と第6の検出信号生成部32とを含んでいる。第5の検出信号生成部31は、第3の合成磁界 MF_3 の、X方向の成分の強度を表す第5の検出信号 S_5 を生成する。第6の検出信号生成部32は、第3の合成磁界 MF_3 の、Y方向の成分の強度を表す第6の検出信号 S_6 を生成する。

【 0 0 4 7 】

第3の合成磁界情報は、第5および第6の検出信号 S_5 、 S_6 に基づいて生成される。本実施の形態では、第3の合成磁界情報は、第3の合成磁界 MF_3 の方向と強度の情報を含むベクトルで表わされる。第3の合成磁界情報生成部30は、更に、A/D変換器33、34と、第3のベクトル生成部35とを含んでいる。A/D変換器33、34は、それぞれ、第5および第6の検出信号 S_5 、 S_6 をデジタル信号に変換する。第3のベクトル生成部35は、それぞれA/D変換器33、34によってデジタル信号に変換された第5および第6の検出信号 S_5 、 S_6 を用いて、第3の合成磁界情報を表すベクトル Y_3 を生成する。第3のベクトル生成部35は、例えば、ASICによって実現することができる。

20

【 0 0 4 8 】

第4の合成磁界情報生成部40は、第7の検出信号生成部41と第8の検出信号生成部42とを含んでいる。第7の検出信号生成部41は、第4の合成磁界 MF_4 の、X方向の成分の強度を表す第7の検出信号 S_7 を生成する。第8の検出信号生成部42は、第4の合成磁界 MF_4 の、Y方向の成分の強度を表す第8の検出信号 S_8 を生成する。

30

【 0 0 4 9 】

第4の合成磁界情報は、第7および第8の検出信号 S_7 、 S_8 に基づいて生成される。本実施の形態では、第4の合成磁界情報は、第4の合成磁界 MF_4 の方向と強度の情報を含むベクトルで表わされる。第4の合成磁界情報生成部40は、更に、A/D変換器43、44と、第4のベクトル生成部45とを含んでいる。A/D変換器43、44は、それぞれ、第7および第8の検出信号 S_7 、 S_8 をデジタル信号に変換する。第4のベクトル生成部45は、それぞれA/D変換器43、44によってデジタル信号に変換された第7および第8の検出信号 S_7 、 S_8 を用いて、第4の合成磁界情報を表すベクトル Y_4 を生成する。第4のベクトル生成部45は、例えば、ASICによって実現することができる。

40

【 0 0 5 0 】

検出対象磁界の方向が所定の周期で回転すると、回転磁界角度 M は所定の周期で変化する。この場合、第1ないし第8の検出信号 $S_1 \sim S_8$ は、いずれも、上記所定の周期と等しい信号周期で周期的に変化する。第2の検出信号 S_2 の位相は、第1の検出信号 S_1 の位相に対して、信号周期の $1/4$ の奇数倍だけ異なっている。第3、第5および第7の検出信号 S_3 、 S_5 、 S_7 の位相は、それぞれ、第1の検出信号 S_1 の位相と一致している。第4、第6および第8の検出信号 S_4 、 S_6 、 S_8 の位相は、それぞれ、第2の検出信号 S_2 の位相と一致している。なお、磁気検出素子の作製の精度等の観点から、これらの信号の位相の関係は、上記の関係からわずかにずれていてもよい。

【 0 0 5 1 】

50

角度センサ 1 は、更に、複数の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、角度検出値 s を生成する角度演算部 50 を備えている。前述のように、複数の検出位置は、互いに異なる。そのため、複数の合成磁界情報に与えるノイズ磁界 M_{ex} の相対的な影響に違いが生じる。その結果、複数の合成磁界情報間には、ノイズ磁界 M_{ex} に依存した違いが生じ得る。この性質を利用すると、ノイズ磁界 M_{ex} の影響が排除された検出対象の角度を推定することが可能である。角度演算部 50 は、この性質を利用して、角度検出値 s を生成する。角度演算部 50 は、例えば、ASIC またはマイクロコンピュータによって実現することができる。角度演算部 50 の構成と角度検出値 s の生成方法については、後で説明する。

【0052】

次に、第 1 ないし第 8 の検出信号生成部 11, 12, 21, 22, 31, 32, 41, 42 の構成について説明する。図 5 は、第 1 の検出信号生成部 11 の具体的な構成の一例を示している。この例では、第 1 の検出信号生成部 11 は、ホイートストンブリッジ回路 17 と、差分検出器 18 とを有している。ホイートストンブリッジ回路 17 は、電源ポート V_1 と、グランドポート G_1 と、2 つの出力ポート E_{11} , E_{12} と、直列に接続された第 1 の対の磁気検出素子 R_{11} , R_{12} と、直列に接続された第 2 の対の磁気検出素子 R_{13} , R_{14} とを含んでいる。磁気検出素子 R_{11} , R_{13} の各一端は、電源ポート V_1 に接続されている。磁気検出素子 R_{11} の他端は、磁気検出素子 R_{12} の一端と出力ポート E_{11} に接続されている。磁気検出素子 R_{13} の他端は、磁気検出素子 R_{14} の一端と出力ポート E_{12} に接続されている。磁気検出素子 R_{12} , R_{14} の各他端は、グランドポート G_1 に接続されている。電源ポート V_1 には、所定の大きさの電源電圧が印加される。グランドポート G_1 はグランドに接続される。

【0053】

第 3、第 5 および第 7 の検出信号生成部 21, 31, 41 の各々の構成は、第 1 の検出信号生成部 11 の構成と同じである。そのため、以下の説明では、第 3、第 5 および第 7 の検出信号生成部 21, 31, 41 の構成要素について、第 1 の検出信号生成部 11 の構成要素と同じ符号を用いる。

【0054】

図 6 は、第 2 の検出信号生成部 12 の具体的な構成の一例を示している。この例では、第 2 の検出信号生成部 12 は、ホイートストンブリッジ回路 27 と、差分検出器 28 とを有している。ホイートストンブリッジ回路 27 は、電源ポート V_2 と、グランドポート G_2 と、2 つの出力ポート E_{21} , E_{22} と、直列に接続された第 1 の対の磁気検出素子 R_{21} , R_{22} と、直列に接続された第 2 の対の磁気検出素子 R_{23} , R_{24} とを含んでいる。磁気検出素子 R_{21} , R_{23} の各一端は、電源ポート V_2 に接続されている。磁気検出素子 R_{21} の他端は、磁気検出素子 R_{22} の一端と出力ポート E_{21} に接続されている。磁気検出素子 R_{23} の他端は、磁気検出素子 R_{24} の一端と出力ポート E_{22} に接続されている。磁気検出素子 R_{22} , R_{24} の各他端は、グランドポート G_2 に接続されている。電源ポート V_2 には、所定の大きさの電源電圧が印加される。グランドポート G_2 はグランドに接続される。

【0055】

第 4、第 6 および第 8 の検出信号生成部 22, 32, 42 の各々の構成は、第 2 の検出信号生成部 12 の構成と同じである。そのため、以下の説明では、第 4、第 6 および第 8 の検出信号生成部 22, 32, 42 の構成要素について、第 2 の検出信号生成部 12 の構成要素と同じ符号を用いる。

【0056】

本実施の形態では、磁気検出素子 $R_{11} \sim R_{14}$, $R_{21} \sim R_{24}$ の各々は、直列に接続された複数の磁気抵抗効果素子 (MR 素子) を含んでいる。複数の MR 素子の各々は、例えばスピバルブ型の MR 素子である。このスピバルブ型の MR 素子は、磁化方向が固定された磁化固定層と、検出対象磁界の方向に応じて磁化の方向が変化する磁性層である自由層と、磁化固定層と自由層の間に配置された非磁性層とを有している。スピバルブ

10

20

30

40

50

ブ型のMR素子は、TMR素子でもよいし、GMR素子でもよい。TMR素子では、非磁性層はトンネルバリア層である。GMR素子では、非磁性層は非磁性導電層である。スピンバルブ型のMR素子では、自由層の磁化の方向が磁化固定層の磁化の方向に対してなす角度に応じて抵抗値が変化し、この角度が 0° のときに抵抗値は最小値となり、角度が 180° のときに抵抗値は最大値となる。図5および図6において、塗りつぶした矢印は、MR素子における磁化固定層の磁化の方向を表し、白抜きの矢印は、MR素子における自由層の磁化の方向を表している。

【0057】

第1の検出信号生成部11では、磁気検出素子R11, R14に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向はX方向であり、磁気検出素子R12, R13に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向は-X方向である。この場合、第1の合成磁界MF1のX方向の成分の強度に応じて、出力ポートE11, E12の電位差が変化する。差分検出器18は、出力ポートE11, E12の電位差に対応する信号を第1の検出信号S1として出力する。従って、第1の検出信号生成部11は、第1の合成磁界MF1のX方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第1の検出信号S1を生成する。

10

【0058】

第2の検出信号生成部12では、磁気検出素子R21, R24に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向はY方向であり、磁気検出素子R22, R23に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向は-Y方向である。この場合、第1の合成磁界MF1のY方向の成分の強度に応じて、出力ポートE21, E22の電位差が変化する。差分検出器28は、出力ポートE21, E22の電位差に対応する信号を第2の検出信号S2として出力する。従って、第2の検出信号生成部12は、第1の合成磁界MF1のY方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第2の検出信号S2を生成する。

20

【0059】

第3の検出信号生成部21では、第2の合成磁界MF2のX方向の成分の強度に応じて、出力ポートE11, E12の電位差が変化する。差分検出器18は、出力ポートE11, E12の電位差に対応する信号を第3の検出信号S3として出力する。従って、第3の検出信号生成部21は、第2の合成磁界MF2のX方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第3の検出信号S3を生成する。

30

【0060】

第4の検出信号生成部22では、第2の合成磁界MF2のY方向の成分の強度に応じて、出力ポートE21, E22の電位差が変化する。差分検出器28は、出力ポートE21, E22の電位差に対応する信号を第4の検出信号S4として出力する。従って、第4の検出信号生成部22は、第2の合成磁界MF2のY方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第4の検出信号S4を生成する。

【0061】

第5の検出信号生成部31では、第3の合成磁界MF3のX方向の成分の強度に応じて、出力ポートE11, E12の電位差が変化する。差分検出器18は、出力ポートE11, E12の電位差に対応する信号を第5の検出信号S5として出力する。従って、第5の検出信号生成部31は、第3の合成磁界MF3のX方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第5の検出信号S5を生成する。

40

【0062】

第6の検出信号生成部32では、第3の合成磁界MF3のY方向の成分の強度に応じて、出力ポートE21, E22の電位差が変化する。差分検出器28は、出力ポートE21, E22の電位差に対応する信号を第6の検出信号S6として出力する。従って、第6の検出信号生成部32は、第3の合成磁界MF3のY方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第6の検出信号S6を生成する。

【0063】

50

第7の検出信号生成部41では、第4の合成磁界MF4のX方向の成分の強度に応じて、出力ポートE11、E12の電位差が変化する。差分検出器18は、出力ポートE11、E12の電位差に対応する信号を第7の検出信号S7として出力する。従って、第7の検出信号生成部41は、第4の合成磁界MF4のX方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第7の検出信号S7を生成する。

【0064】

第8の検出信号生成部42では、第4の合成磁界MF4のY方向の成分の強度に応じて、出力ポートE21、E22の電位差が変化する。差分検出器28は、出力ポートE21、E22の電位差に対応する信号を第8の検出信号S8として出力する。従って、第8の検出信号生成部42は、第4の合成磁界MF4のY方向の成分の強度を検出して、その強度を表す第8の検出信号S8を生成する。

10

【0065】

なお、検出信号生成部11、12、21、22、31、32、41、42内の複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向は、MR素子の作製の精度等の観点から、上述の方向からわずかにずれていてもよい。

【0066】

ここで、図7を参照して、磁気検出素子の構成の一例について説明する。図7は、図5および図6に示した検出信号生成部11、12における1つの磁気検出素子の一部を示す斜視図である。この例では、1つの磁気検出素子は、複数の下部電極162と、複数のMR素子150と、複数の上部電極163とを有している。複数の下部電極162は図示しない基板上に配置されている。個々の下部電極162は細長い形状を有している。下部電極162の長手方向に隣接する2つの下部電極162の間には、間隙が形成されている。図7に示したように、下部電極162の表面上において、長手方向の両端の近傍に、それぞれMR素子150が配置されている。MR素子150は、下部電極162側から順に積層された自由層151、非磁性層152、磁化固定層153および反強磁性層154を含んでいる。自由層151は、下部電極162に電氣的に接続されている。反強磁性層154は、反強磁性材料よりなり、磁化固定層153との間で交換結合を生じさせて、磁化固定層153の磁化の方向を固定する。複数の上部電極163は、複数のMR素子150の上に配置されている。個々の上部電極163は細長い形状を有し、下部電極162の長手方向に隣接する2つの下部電極162上に配置されて隣接する2つのMR素子150の反強磁性層154同士を電氣的に接続する。このような構成により、図7に示した磁気検出素子は、複数の下部電極162と複数の上部電極163とによって直列に接続された複数のMR素子150を有している。なお、MR素子150における層151～154の配置は、図7に示した配置とは上下が反対でもよい。

20

30

【0067】

次に、第1ないし第4の合成磁界情報の生成方法について説明する。第1の合成磁界情報生成部10の第1のベクトル生成部15は、第1の合成磁界情報を表すベクトルY1を生成する。第1のベクトル生成部15は、それぞれA/D変換器13、14によってデジタル信号に変換された第1および第2の検出信号S1、S2に基づいて、ベクトルY1の方向 D_1 と大きさ Ma_1 を求める。方向 D_1 は、第1の合成磁界MF1の方向の情報に対応する。本実施の形態では、方向 D_1 を、第1の合成磁界MF1の方向が基準方向DRに対してなす角度 θ_1 (図2参照)を用いて表す。大きさ Ma_1 は、第1の合成磁界MF1の強度の情報に対応する。

40

【0068】

第2の合成磁界情報生成部20の第2のベクトル生成部25は、第2の合成磁界情報を表すベクトルY2を生成する。第2のベクトル生成部25は、それぞれA/D変換器23、24によってデジタル信号に変換された第3および第4の検出信号S3、S4に基づいて、ベクトルY2の方向 D_2 と大きさ Ma_2 を求める。方向 D_2 は、第2の合成磁界MF2の方向の情報に対応する。本実施の形態では、方向 D_2 を、第2の合成磁界MF2の方向が基準方向DRに対してなす角度 θ_2 (図2参照)を用いて表す。大きさ Ma_2 は、第2の

50

合成磁界MF2の強度の情報に対応する。

【0069】

第3の合成磁界情報生成部30の第3のベクトル生成部35は、第3の合成磁界情報を表すベクトルY3を生成する。第3のベクトル生成部35は、それぞれA/D変換器33, 34によってデジタル信号に変換された第5および第6の検出信号S5, S6に基づいて、ベクトルY3の方向D₃と大きさMa₃を求める。方向D₃は、第3の合成磁界MF3の方向の情報に対応する。本実施の形態では、方向D₃を、第3の合成磁界MF3の方向が基準方向DRに対してなす角度₃(図2参照)を用いて表す。大きさMa₃は、第3の合成磁界MF3の強度の情報に対応する。

【0070】

第4の合成磁界情報生成部40の第4のベクトル生成部45は、第4の合成磁界情報を表すベクトルY4を生成する。第4のベクトル生成部45は、それぞれA/D変換器43, 44によってデジタル信号に変換された第7および第8の検出信号S7, S8に基づいて、ベクトルY4の方向D₄と大きさMa₄を求める。方向D₄は、第4の合成磁界MF4の方向の情報に対応する。本実施の形態では、方向D₄を、第4の合成磁界MF4の方向が基準方向DRに対してなす角度₄(図2参照)を用いて表す。大きさMa₄は、第4の合成磁界MF4の強度の情報に対応する。

【0071】

以下、ベクトルY1~Y4の生成方法について具体的に説明する。第1のベクトル生成部15は、第1の検出信号S1と第2の検出信号S2の比のアークタングェントを計算してベクトルY1の方向D₁すなわち角度₁を求める。具体的には、第1のベクトル生成部15は、下記の式(1)によって、角度₁を求める。なお、“atan”は、アークタングェントを表す。

【0072】

$$\theta_1 = \text{atan}(S2/S1) \quad \dots (1)$$

【0073】

θ_1 が0°以上360°未満の範囲内では、式(1)における θ_1 の解には、180°異なる2つの値がある。しかし、S1, S2の正負の組み合わせにより、 θ_1 の真の値が、式(1)における θ_1 の2つの解のいずれであるかを判別することができる。第1のベクトル生成部15は、式(1)と、上記のS1, S2の正負の組み合わせの判定により、0°以上360°未満の範囲内で θ_1 を求める。

【0074】

また、第1のベクトル生成部15は、第1の検出信号S1の二乗と第2の検出信号S2の二乗との和 $S1^2 + S2^2$ を計算してベクトルY1の大きさMa₁を求める。前述のように、第1の検出信号S1は第1の合成磁界MF1のX方向の強度を表し、第2の検出信号S2は第1の合成磁界MF1のY方向の強度を表している。従って、 $S1^2 + S2^2$ は、第1の合成磁界MF1の強度と対応関係を有するパラメータである。

【0075】

第2のベクトル生成部25は、第3の検出信号S3と第4の検出信号S4の比のアークタングェントを計算してベクトルY2の方向D₂すなわち角度₂を求める。具体的には、第2のベクトル生成部25は、角度₁と同様に、下記の式(2)によって、0°以上360°未満の範囲内で角度₂を求める。

【0076】

$$\theta_2 = \text{atan}(S4/S3) \quad \dots (2)$$

【0077】

また、第2のベクトル生成部25は、第3の検出信号S3の二乗と第4の検出信号S4の二乗との和 $S3^2 + S4^2$ を計算してベクトルY2の大きさMa₂を求める。前述のように、第3の検出信号S3は第2の合成磁界MF2のX方向の強度を表し、第4の検出信号S4は第2の合成磁界MF2のY方向の強度を表している。従って、 $S3^2 + S4^2$ は、第2の合成磁界MF2の強度と対応関係を有するパラメータである。

10

20

30

40

50

【 0 0 7 8 】

第3のベクトル生成部35は、第5の検出信号S5と第6の検出信号S6の比のアークタングェントを計算してベクトルY3の方向D₃すなわち角度θ₃を求める。具体的には、第3のベクトル生成部35は、角度θ₁と同様に、下記の式(3)によって、0°以上360°未満の範囲内で角度θ₃を求める。

【 0 0 7 9 】

$$\theta_3 = \text{atan}(S6 / S5) \quad \dots (3)$$

【 0 0 8 0 】

また、第3のベクトル生成部35は、第5の検出信号S5の二乗と第6の検出信号S6の二乗との和 $S5^2 + S6^2$ を計算してベクトルY3の大きさMa₃を求める。前述のように、第5の検出信号S5は第3の合成磁界MF3のX方向の強度を表し、第6の検出信号S6は第3の合成磁界MF3のY方向の強度を表している。従って、 $S5^2 + S6^2$ は、第3の合成磁界MF3の強度と対応関係を有するパラメータである。

【 0 0 8 1 】

第4のベクトル生成部45は、第7の検出信号S7と第8の検出信号S8の比のアークタングェントを計算してベクトルY4の方向D₄すなわち角度θ₄を求める。具体的には、第4のベクトル生成部45は、角度θ₁と同様に、下記の式(4)によって、0°以上360°未満の範囲内で角度θ₄を求める。

【 0 0 8 2 】

$$\theta_4 = \text{atan}(S8 / S7) \quad \dots (4)$$

【 0 0 8 3 】

また、第4のベクトル生成部45は、第7の検出信号S7の二乗と第8の検出信号S8の二乗との和 $S7^2 + S8^2$ を計算してベクトルY4の大きさMa₄を求める。前述のように、第7の検出信号S7は第4の合成磁界MF4のX方向の強度を表し、第8の検出信号S8は第4の合成磁界MF4のY方向の強度を表している。従って、 $S7^2 + S8^2$ は、第4の合成磁界MF4の強度と対応関係を有するパラメータである。

【 0 0 8 4 】

大きさMa₁, Ma₂, Ma₃, Ma₄は、それぞれ、 $S1^2 + S2^2$, $S3^2 + S4^2$, $S5^2 + S6^2$, $S7^2 + S8^2$ そのものであってもよい。あるいは、大きさMa₁, Ma₂, Ma₃, Ma₄は、それぞれ、 $S1^2 + S2^2$, $S3^2 + S4^2$, $S5^2 + S6^2$, $S7^2 + S8^2$ から求めた合成磁界MF1, MF2, MF3, MF4の強度であってもよい。あるいは、ベクトル生成部15, 25, 35, 45は、それぞれ、 $S1^2 + S2^2$, $S3^2 + S4^2$, $S5^2 + S6^2$, $S7^2 + S8^2$ 以外の、合成磁界MF1, MF2, MF3, MF4の強度と対応関係を有するパラメータの値を求めて、これらのパラメータの値に基づいて大きさMa₁, Ma₂, Ma₃, Ma₄を求めてもよい。

【 0 0 8 5 】

次に、角度演算部50の構成と角度検出値sの生成方法について説明する。始めに、本実施の形態における角度検出値sの生成方法について、概念的に説明する。本実施の形態では、角度演算部50は、最小二乗法を用いて角度検出値sを生成する。より詳しく説明すると、角度演算部50は、複数の合成磁界情報と複数の推定合成磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように第1の推定値Mおよび第2の推定値Eを決定する。第1の推定値Mは、角度検出値sに対応する方向の情報と所定の位置における検出対象磁界の強度に対応する大きさの情報とを含む。第2の推定値Eは、ノイズ磁界Me_xの方向に対応する方向の情報とノイズ磁界Me_xの強度に対応する大きさの情報とを含む。

【 0 0 8 6 】

複数の推定合成磁界情報は、それぞれ複数の合成磁界情報の推定情報である。複数の推定合成磁界情報は、第1および第2の推定値M, Eに基づいて生成される。本実施の形態では、複数の推定合成磁界情報を、下記の式(5)のようにモデル化する。

【 0 0 8 7 】

10

20

30

40

50

$$z = H x \quad \dots (5)$$

【0088】

式(5)における z は、求めるべき第1および第2の推定値 M 、 E に基づいて生成された複数の推定合成磁界情報と対応関係を有する m 個の要素を含む m 次元列ベクトルである。なお、 m は、複数の推定合成磁界情報の数を表す整数であり、これは、複数の合成磁界情報の数と同じである。式(5)における H は、複数の検出位置における検出対象磁界とノイズ磁界 $M_e x$ の態様に応じて規定される m 行2列の行列である。式(5)における x は、第1の推定値 M と第2の推定値 E を要素とする2次元列ベクトルである。

【0089】

本実施の形態では、列ベクトル x を決定することにより、第1および第2の推定値 M 、 E を決定する。ここで、複数の合成磁界情報と対応関係を有する m 個の要素を含む m 次元列ベクトルを記号 y で表す。列ベクトル x は、列ベクトル y の m 個の要素と列ベクトル z の m 個の要素の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように決定される。これは、具体的には、列ベクトル x を決定するための最小二乗コスト関数 F を定義して、この関数 F の値を最小にする列ベクトル x を求めることによって実現される。関数 F は、下記の式(6)によって定義される。

【0090】

$$\begin{aligned} F &= \|y - z\|^2 \\ &= \|y - Hx\|^2 \\ &= (y - Hx)^T (y - Hx) \\ &= y^T y - x^T H^T y - y^T H x + x^T H^T H x \quad \dots (6) \end{aligned}$$

【0091】

式(6)を x によって偏微分すると、下記の式(7)が得られる。

【0092】

$$F / x = 2(-H^T y + H^T H x) \quad \dots (7)$$

【0093】

関数 F の値を最小にする x は、 $F / x = 0$ を満たす。従って、関数 F の値を最小にする x は、下記の式(8)によって表される。

【0094】

$$x = (H^T H)^{-1} H^T y \quad \dots (8)$$

【0095】

本実施の形態では、角度演算部50は、式(8)によって算出された列ベクトル x の2つの要素の一方である第1の推定値 M に基づいて、角度検出値 s を決定する。

【0096】

なお、前述のように、列ベクトル y は、複数の合成磁界情報と対応関係を有する複数の要素を含み、列ベクトル z は、複数の推定合成磁界情報と対応関係を有する複数の要素を含む。従って、式(6)~(8)を参照して説明した列ベクトル x の決定方法は、複数の合成磁界情報と複数の推定合成磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように、第1および第2の推定値 M 、 E を決定する方法と言える。

【0097】

次に、図4を参照して、角度演算部50の構成と角度検出値 s の生成方法について具体的に説明する。本実施の形態では、角度演算部50における演算は、例えば、複素数を用いて行われる。図4は、角度演算部50の構成の一例を示すブロック図である。この例では、角度演算部50は、第1の変換部51と、第2の変換部52と、第3の変換部53と、第4の変換部54と、推定値決定部55と、偏角演算部56とを含んでいる。

【0098】

第1の変換部51は、第1の合成磁界情報を表すベクトル Y_1 を複素数 y_1 に変換する。複素数 y_1 の実部 Re_1 と虚部 Im_1 は、それぞれ下記の式(9A)、(9B)によって表される。

【0099】

10

20

30

40

50

$$\text{Re}_1 = A_1 \cdot \cos \theta_1 \quad \dots (9A)$$

$$\text{Im}_1 = A_1 \cdot \sin \theta_1 \quad \dots (9B)$$

【0100】

第2の変換部52は、第2の合成磁界情報を表すベクトルY2を複素数 y_2 に変換する。複素数 y_2 の実部 Re_2 と虚部 Im_2 は、それぞれ下記の式(10A)、(10B)によって表される。

【0101】

$$\text{Re}_2 = A_2 \cdot \cos \theta_2 \quad \dots (10A)$$

$$\text{Im}_2 = A_2 \cdot \sin \theta_2 \quad \dots (10B)$$

【0102】

第3の変換部53は、第3の合成磁界情報を表すベクトルY3を複素数 y_3 に変換する。複素数 y_3 の実部 Re_3 と虚部 Im_3 は、それぞれ下記の式(11A)、(11B)によって表される。

【0103】

$$\text{Re}_3 = A_3 \cdot \cos \theta_3 \quad \dots (11A)$$

$$\text{Im}_3 = A_3 \cdot \sin \theta_3 \quad \dots (11B)$$

【0104】

第4の変換部54は、第4の合成磁界情報を表すベクトルY4を複素数 y_4 に変換する。複素数 y_4 の実部 Re_4 と虚部 Im_4 は、それぞれ下記の式(12A)、(12B)によって表される。

【0105】

$$\text{Re}_4 = A_4 \cdot \cos \theta_4 \quad \dots (12A)$$

$$\text{Im}_4 = A_4 \cdot \sin \theta_4 \quad \dots (12B)$$

【0106】

推定値決定部55は、ベクトルY1～Y4と対応関係を有する複素数 $y_1 \sim y_4$ を用いて、第1および第2の推定値M、Eを決定する。ここで、それぞれ第1ないし第4の合成磁界情報の推定情報である第1ないし第4の推定合成磁界情報を、記号 z_1, z_2, z_3, z_4 で表す。本実施の形態では、第1ないし第4の推定合成磁界情報 $z_1 \sim z_4$ を、下記の式(13)のようにモデル化する。

【0107】

【数1】

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{(r_1)^3} & 1 \\ \frac{1}{(r_2)^3} & 1 \\ \frac{1}{(r_3)^3} & 1 \\ \frac{1}{(r_4)^3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} \quad \dots (13)$$

【0108】

式(13)の左辺の4次元列ベクトルは、式(5)における z に対応する。

【0109】

式(13)の右辺の4行2列の行列は、式(5)におけるHに対応する。以下、この行列を記号 H_c で表す。行列 H_c の第1列の4つの要素は、第1ないし第4の検出位置P1～P4における検出対象磁界、すなわち第1ないし第4の部分磁界Mfa～Mfdの態様に応じて規定される。本実施の形態では、第1ないし第4の部分磁界Mfa～Mfdの方向が互いに等しく、検出対象磁界の強度が磁界発生部5から検出位置までの距離の3乗に反比例して小さくなると仮定して、行列 H_c の第1列の4つの要素を規定した。具体的には

10

20

30

40

50

、式(13)に示したように、行列 H_c の第1列の4つの要素を、 r_1, r_2, r_3, r_4 を用いて規定した。 r_1, r_2, r_3, r_4 は、それぞれ、磁界発生部5から前記所定の位置までの距離に対する、磁界発生部5から検出位置 P_1, P_2, P_3, P_4 までの距離の比率である。

【0110】

行列 H_c の第2列の4つの要素は、第1ないし第4の検出位置 $P_1 \sim P_4$ におけるノイズ磁界 Mex の態様に応じて規定される。本実施の形態では、第1ないし第4の検出位置 $P_1 \sim P_4$ におけるノイズ磁界 Mex の方向が互いに等しく、第1ないし第4の検出位置 $P_1 \sim P_4$ におけるノイズ磁界 Mex の強度が互いに等しいと仮定して、行列 H_c の第2列の4つの要素を規定した。具体的には、式(13)に示したように、行列 H_c の第2列の4つの要素を、いずれも1とした。

10

【0111】

式(13)の右辺の2次元列ベクトルは、式(5)における x に対応する。以下、この列ベクトルを記号 x_c で表す。列ベクトル x_c は、第1の推定値 M と第2の推定値 E を要素として含んでいる。本実施の形態では、第1および第2の推定値 M, E は、いずれも複素数である。第1の推定値 M の偏角は、角度検出値 s に対応する方向の情報を表す。第1の推定値 M の絶対値は、所定の位置における検出対象磁界の強度に対応する大きさの情報を表す。本実施の形態では、所定の位置を、前記基準位置とする。第2の推定値 E の偏角は、ノイズ磁界 Mex の方向に対応する方向の情報を表す。第2の推定値 E の絶対値は、ノイズ磁界 Mex の強度に対応する大きさの情報を表す。

20

【0112】

推定値決定部55は、式(8)に基づいて、列ベクトル x_c を決定する。ここで、複素数 $y_1 \sim y_4$ を要素とする4次元列ベクトルを、記号 y_c で表す。列ベクトル y_c は、下記の式(14)によって表わされる。

【0113】

$$y_c^T = [y_1, y_2, y_3, y_4] \quad \dots (14)$$

【0114】

推定値決定部55は、式(8)における H, x, y をそれぞれ H_c, x_c, y_c に置き換えた式を用いて、 x_c を算出する。これにより、第1および第2の推定値 M, E が決定される。

30

【0115】

偏角演算部56は、推定値決定部55によって決定された第1の推定値 M に基づいて、角度検出値 s を決定する。本実施の形態では、第1の推定値 M の偏角を、角度検出値 s とする。従って、偏角演算部56は、第1の推定値 M の偏角を求めることによって、角度検出値 s を算出する。具体的には、偏角演算部56は、例えば、第1の推定値 M の実部 Re_M と虚部 Im_M を用いて、下記の式(15)によって s を算出する。

【0116】

$$s = \text{atan}(Im_M / Re_M) \quad \dots (15)$$

【0117】

s が 0° 以上 360° 未満の範囲内では、式(15)における s の解には、 180° 異なる2つの値がある。しかし、 Re_M, Im_M の正負の組み合わせにより、 s の真の値が、式(15)における s の2つの解のいずれであるかを判別することができる。偏角演算部56は、式(15)と、上記の Re_M, Im_M の正負の組み合わせの判定により、 0° 以上 360° 未満の範囲内で s を求める。

40

【0118】

本実施の形態では、第1ないし第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40によって生成される第1ないし第4の合成磁界情報に基づいて、最小二乗法を用いて、角度検出値 s が生成される。第1ないし第4の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、互いに異なる。これにより、第1ないし第4の合成磁界情報に与えるノイズ磁界 Mex の相対的な影響に違いが生じる。その結果、第1ないし第4の合成磁界情報間には、ノイズ磁界 Mex に依存した

50

違いが生じ得る。本実施の形態では特に、磁界発生部 5 から検出位置までの距離が大きくなるに従って、ノイズ磁界 M_{ex} の相対的な影響が大きくなる。

【0119】

上記の性質を利用すると、所定の位置における理想的な検出対象磁界（以下、理想磁界と言う。）と、ノイズ磁界 M_{ex} を推定することができる。理想磁界とは、その方向が基準方向 DR に対してなす角度が、角度センサ 1 の真の検出対象の角度に相当することになる仮想の磁界である。本実施の形態では特に、理想磁界の方向が基準方向 DR に対してなす角度は、回転磁界角度 M と等しい。

【0120】

本実施の形態において、推定値決定部 55 によって決定された第 1 の推定値 M は、推定された理想磁界に対応し、推定値決定部 55 によって決定された第 2 の推定値 E は、推定されたノイズ磁界 M_{ex} に対応する。本実施の形態では、第 1 の推定値 M に基づいて角度検出値 s を決定する。これにより、本実施の形態によれば、ノイズ磁界 M_{ex} の影響が排除された角度検出値 s を推定することができる。すなわち、本実施の形態によれば、ノイズ磁界 M_{ex} に起因した角度誤差を低減することができる。

【0121】

なお、上述のように角度検出値 s を決定するためには、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ が互いに異なるという条件を満たす必要があるが、この条件は、角度センサ 1 および角度センサシステム 100 の構成や設置に関して大きな制約を生じさせるものではない。例えば、本実施の形態のように、磁界発生部 5 から第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ までの距離を互いに異ならせることによって、簡単に、上記の条件を満たすことができる。

【0122】

以上のことから、本実施の形態によれば、角度センサ 1 および角度センサシステム 100 の構成や設置に関して大きな制約を生じさせることなく、ノイズ磁界 M_{ex} に起因した角度誤差を低減することができる。

【0123】

以下、シミュレーションの結果を参照して、本実施の形態の効果について説明する。シミュレーションでは、方向と強度が一定のノイズ磁界 M_{ex} が存在する状況の下で、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ および角度検出値 s を生成したときの、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ のそれぞれの角度誤差と角度検出値 s の角度誤差を求めた。なお、このシミュレーションでは、真の検出対象の角度に相当する基準角度 r を用いて、角度誤差を求めた。具体的には、角度 θ_1 と基準角度 r の差を角度 θ_1 の角度誤差とし、角度 θ_2 と基準角度 r の差を角度 θ_2 の角度誤差とし、角度 θ_3 と基準角度 r の差を角度 θ_3 の角度誤差とし、角度 θ_4 と基準角度 r の差を角度 θ_4 の角度誤差とし、角度検出値 s と基準角度 r の差を角度検出値 s の角度誤差とした。また、このシミュレーションでは、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の値に、それぞれ乱数で生成した誤差を重畳した。この誤差は、角度センサ 1 において生じる通常の誤差を想定したものである。通常の誤差は、第 1 ないし第 4 の合成磁界情報生成部 10, 20, 30, 40 の非線形性による誤差と白色ノイズによる誤差を含む。この通常の誤差に起因した角度誤差は、ノイズ磁界 M_{ex} に起因した角度誤差よりも十分に小さい。

【0124】

図 8 は、シミュレーションによって得られた角度誤差の一例を示す波形図である。図 8 において、横軸は基準角度 r を示し、縦軸は角度誤差を示している。また、符号 8 1 は角度 θ_1 の角度誤差を示し、符号 8 2 は角度 θ_2 の角度誤差を示し、符号 8 3 は角度 θ_3 の角度誤差を示し、符号 8 4 は角度 θ_4 の角度誤差を示し、符号 8 5 は角度検出値 s の角度誤差を示している。図 8 に示したように、角度検出値 s の角度誤差は、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ のそれぞれの角度誤差に比べて極めて小さい。角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差は、主にノイズ磁界 M_{ex} に起因して生じたものである。一方、角度検出値 s の角度誤差は、主に通常の誤差に起因して生じたものである。このように、本実施の形態によれば、ノイズ磁界 M_{ex} に起因した角度誤差を低減することができる。

10

20

30

40

50

【 0 1 2 5 】

図 8 に示したように、角度 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ の角度誤差の振幅は、互いに異なる。これは、第 1 ないし第 4 の合成磁界情報に与えるノイズ磁界 M_{ex} の相対的な影響の違いに起因するものである。本実施の形態では、第 1 ないし第 4 の検出位置 P_1, P_2, P_3, P_4 は、磁界発生部 5 から遠ざかる方向に、この順に並んでいる。そのため、第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa}, M_{Fb}, M_{Fc}, M_{Fd}$ の強度は、この順に小さくなる。その結果、角度 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ の角度誤差の振幅は、この順に大きくなる。

【 0 1 2 6 】

[第 2 の実施の形態]

次に、本発明の第 2 の実施の形態について説明する。始めに、図 9 を参照して、本実施の形態に係る角度センサシステム 100 の構成について説明する。本実施の形態に係る角度センサシステム 100 は、以下の点で第 1 の実施の形態と異なっている。図 9 に示したように、本実施の形態では、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、磁石 6 の一方の端面に平行な同一平面上にある。以下、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ を含む仮想の平面を記号 P で表す。本実施の形態では特に、磁界発生部 5 からの距離が互いに等しくなるように、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ が規定されている。第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、図 9 に示したように、仮想の平面 P 上にある、回転中心 C を中心とした 1 つの円の円周上にあってもよい。図 9 に示した例では、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ は、上記円周上において、反時計回り方向に、この順に並んでいる。なお、必ずしも、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ の全てが上記円周上にある必要はない。

【 0 1 2 7 】

第 1 の実施の形態と同様に、第 1 の検出位置 P_1 における検出対象磁界を特に第 1 の部分磁界 M_{Fa} と言い、第 2 の検出位置 P_2 における検出対象磁界を特に第 2 の部分磁界 M_{Fb} と言い、第 3 の検出位置 P_3 における検出対象磁界を特に第 3 の部分磁界 M_{Fc} と言い、第 4 の検出位置 P_4 における検出対象磁界を特に第 4 の部分磁界 M_{Fd} と言う。

【 0 1 2 8 】

第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向は、理想的には、第 1 の実施の形態で説明した理想磁界の方向と一致する。しかし、本実施の形態のように、第 1 ないし第 4 の検出位置 $P_1 \sim P_4$ が回転中心 C から離れた位置にある場合には、第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向が、常に理想磁界の方向と一致するとは限らない。

【 0 1 2 9 】

ここで、第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向が理想磁界の方向に対してなす角度を、それぞれ、第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向誤差と言う。第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向誤差は、第 1 の実施の形態で説明した角度 $\alpha_1 \sim \alpha_4$ の角度誤差を生じさせる。検出対象の角度が所定の周期で変化する場合、第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向誤差は、上記所定の周期の $1/2$ の周期で変化し、且つその変化の位相が互いに異なる。従って、検出対象の角度に応じた第 1 ないし第 4 の部分磁界 $M_{Fa} \sim M_{Fd}$ の方向の変化の態様は、互いに異なる。

【 0 1 3 0 】

次に、本実施の形態における角度検出値 s の生成方法について説明する。角度検出値 s の生成方法は、基本的には、第 1 の実施の形態と同じである。ただし、本実施の形態では、第 1 ないし第 4 の推定合成磁界情報 $z_1 \sim z_4$ を、下記の式 (16) のようにモデル化する。

【 0 1 3 1 】

【 数 2 】

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\{A_1 \sin(2\theta + \alpha_1)\} + i \sin\{A_1 \sin(2\theta + \alpha_1)\} \\ \cos\{A_2 \sin(2\theta + \alpha_2)\} + i \sin\{A_2 \sin(2\theta + \alpha_2)\} \\ \cos\{A_3 \sin(2\theta + \alpha_3)\} + i \sin\{A_3 \sin(2\theta + \alpha_3)\} \\ \cos\{A_4 \sin(2\theta + \alpha_4)\} + i \sin\{A_4 \sin(2\theta + \alpha_4)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ E \end{bmatrix} \quad \dots (16)$$

10

20

30

40

50

【0132】

式(16)の右辺の4行2列の行列は、第1の実施の形態で説明した式(5)におけるHに対応する。以下、この行列を記号 H_d で表す。行列 H_d の第1列の4つの要素は、第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの態様に依りて規定される。本実施の形態では、式(16)に示したように、行列 H_d の第1列の4つの要素を、“ $A_n \sin(2\theta + \phi_n)$ ”(nは1以上4以下の整数)を用いて規定した。 A_n は、第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差の周期的な変化の振幅を表す。 ϕ_n は、第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差の周期的な変化の位相の違いを表す値である。前述のように、第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差は、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差を生じさせる。従って、 $A_1 \sim A_4$ 、 $\phi_1 \sim \phi_4$ は、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差の波形から求めることができる。

10

【0133】

θ_s は、角度センサ1の真の検出対象の角度を表している。本実施の形態では、角度検出値 s を生成する際には、式(16)における θ に、暫定的に算出される角度検出値 s に対応する値 p を代入する。具体的には、例えば、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の平均値を、 p とする。

【0134】

行列 H_d の第2列の4つの要素は、第1ないし第4の検出位置P 1 ~ P 4におけるノイズ磁界M e xの態様に依りて規定される。本実施の形態では、第1の実施の形態と同様に、行列 H_d の第2列の4つの要素を、いずれも1とした。

20

【0135】

本実施の形態では、推定値決定部55(図4参照)は、第1の実施の形態における行列 H_c の代わりに行列 H_d を用いて、第1および第2の推定値M、Eを決定する。

【0136】

第1の実施の形態で説明したように、第1ないし第4の検出位置P 1 ~ P 4が互いに異なることにより、第1ないし第4の合成磁界情報に与えるノイズ磁界M e xの相対的な影響に違いが生じる。本実施の形態では特に、検出対象の角度に応じた第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向の変化の態様が互いに異なるように、第1ないし第4の検出位置P 1 ~ P 4を規定している。これにより、第1ないし第4の合成磁界情報に与えるノイズ磁界M e xの相対的な影響に違いが生じる。その結果、第1ないし第4の合成磁界情報間には、ノイズ磁界M e xに依存した違いが生じ得る。第1の実施の形態で説明したように、この性質を利用すると、理想磁界とノイズ磁界M e xを推定することができる。

30

【0137】

次に、シミュレーションの結果を参照して、本実施の形態の効果について説明する。シミュレーションの内容は、第1の実施の形態におけるシミュレーションと同じである。

【0138】

図10は、シミュレーションによって得られた角度誤差の一例を示す波形図である。図10において、横軸は基準角度 θ_r を示し、縦軸は角度誤差を示している。また、符号91は角度 θ_1 の角度誤差を示し、符号92は角度 θ_2 の角度誤差を示し、符号93は角度 θ_3 の角度誤差を示し、符号94は角度 θ_4 の角度誤差を示し、符号95は角度検出値 s の角度誤差を示している。図10に示したように、角度検出値 s の角度誤差は、角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差に比べて極めて小さい。角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差は、主にノイズ磁界M e xと第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差に起因して生じたものである。一方、角度検出値 s の角度誤差は、主に通常の誤差に起因して生じたものである。このように、本実施の形態によれば、ノイズ磁界M e xと第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差に起因した角度誤差を低減することができる。なお、図10に示したように、基準角度 θ_r に応じた角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ の角度誤差の変化の位相は、互いに異なる。これは、基準角度 θ_r に応じた第1ないし第4の部分磁界M F a ~ M F dの方向誤差の周期的な変化の位相の違いによるものである。

40

【0139】

50

本実施の形態におけるその他の構成、作用および効果は、第1の実施の形態と同様である。

【0140】

[第3の実施の形態]

次に、本発明の第3の実施の形態について説明する。始めに、図11を参照して、本実施の形態に係る角度センサ1の構成について説明する。本実施の形態に係る角度センサ1の構成は、以下の点で第1および第2の実施の形態と異なっている。本実施の形態では、第1および第2の実施の形態における第1ないし第4のベクトル生成部15, 25, 35, 45が設けられていない。また、本実施の形態に係る角度センサ1は、第1および第2の実施の形態における角度演算部50の代わりに、角度演算部250を備えている。角度演算部250は、例えば、ASICまたはマイクロコンピュータによって実現することができる。

10

【0141】

本実施の形態では、第1および第2の実施の形態と同様に、第1の合成磁界情報はベクトル Y_1 によって表わされ、第2の合成磁界情報はベクトル Y_2 によって表わされ、第3の合成磁界情報はベクトル Y_3 によって表わされ、第4の合成磁界情報はベクトル Y_4 によって表わされる。本実施の形態では特に、第1および第2の検出信号 S_1, S_2 を、直交座標系におけるベクトル Y_1 の2つの成分とし、第3および第4の検出信号 S_3, S_4 を、直交座標系におけるベクトル Y_2 の2つの成分とし、第5および第6の検出信号 S_5, S_6 を、直交座標系におけるベクトル Y_3 の2つの成分とし、第7および第8の検出信号 S_7, S_8 を、直交座標系におけるベクトル Y_4 の2つの成分とする。なお、このようにするためには、第1ないし第8の検出信号 $S_1 \sim S_8$ の大きさが、第1ないし第4の合成磁界 $MF_1 \sim MF_4$ の強度の範囲内では飽和しないという条件の下で、第1ないし第8の検出信号生成部11, 12, 21, 22, 31, 32, 41, 42を使用する必要がある。

20

【0142】

また、本実施の形態では、角度演算部250における演算は、角度演算部50と同様に、複素数を用いて行われる。図11には、角度演算部250の構成の一例を示している。この例では、角度演算部250は、推定値決定部251と、偏角演算部252とを含んでいる。角度演算部250では、直交座標系におけるベクトル Y_1 の2つの成分を、複素数 y_1 の実部 Re_1 と虚部 Im_1 とし、直交座標系におけるベクトル Y_2 の2つの成分を、複素数 y_2 の実部 Re_2 と虚部 Im_2 とし、直交座標系におけるベクトル Y_3 の2つの成分を、複素数 y_3 の実部 Re_3 と虚部 Im_3 とし、直交座標系におけるベクトル Y_4 の2つの成分を、複素数 y_4 の実部 Re_4 と虚部 Im_4 とする。具体的には、それぞれA/D変換器13, 14によってデジタル信号に変換された第1および第2の検出信号 S_1, S_2 を、複素数 y_1 の実部 Re_1 と虚部 Im_1 とし、それぞれA/D変換器23, 24によってデジタル信号に変換された第3および第4の検出信号 S_3, S_4 を、複素数 y_2 の実部 Re_2 と虚部 Im_2 とし、それぞれA/D変換器33, 34によってデジタル信号に変換された第5および第6の検出信号 S_5, S_6 を、複素数 y_3 の実部 Re_3 と虚部 Im_3 とし、それぞれA/D変換器43, 44によってデジタル信号に変換された第7および第8の検出信号 S_7, S_8 を、複素数 y_4 の実部 Re_4 と虚部 Im_4 としている。

30

40

【0143】

推定値決定部251は、複素数 $y_1 \sim y_4$ を用いて、第1および第2の推定値 M, E を決定する。第1および第2の推定値 M, E の決定方法は、第1または第2の実施の形態と同じである。

【0144】

偏角演算部252は、第1の推定値 M に基づいて、角度検出値 s を決定する。第1の実施の形態で説明したように、第1の推定値 M は、複素数である。本実施の形態では、第1の推定値 M の偏角を、角度検出値 s とする。偏角演算部252は、第1の推定値 M の偏角を求めることによって、角度検出値 s を算出する。角度検出値 s の算出方法は、

50

第 1 の実施の形態と同じである。

【 0 1 4 5 】

本実施の形態では、第 1 および第 2 の検出信号 S_1 , S_2 が、直接、複素数 y_1 の実部 Re_1 と虚部 Im_1 として用いられ、第 3 および第 4 の検出信号 S_3 , S_4 が、直接、複素数 y_2 の実部 Re_2 と虚部 Im_2 として用いられ、第 5 および第 6 の検出信号 S_5 , S_6 が、直接、複素数 y_3 の実部 Re_3 と虚部 Im_3 として用いられ、第 7 および第 8 の検出信号 S_7 , S_8 が、直接、複素数 y_4 の実部 Re_4 と虚部 Im_4 として用いられる。そのため、本実施の形態では、第 1 の実施の形態で説明した、方向 $D_1 \sim D_4$ 、大きさ $Ma_1 \sim Ma_4$ 、実部 $Re_1 \sim Re_4$ ならびに虚部 $Im_1 \sim Im_4$ を求めるための演算が不要になる。これにより、本実施の形態によれば、第 1 および第 2 の実施の形態に比べて、角度センサ 1 の構成が簡単になると共に、角度検出値 s の生成が容易になる。

10

【 0 1 4 6 】

本実施の形態におけるその他の構成、作用および効果は、第 1 または第 2 の実施の形態と同様である。

【 0 1 4 7 】

[第 4 の実施の形態]

次に、本発明の第 4 の実施の形態について説明する。始めに、図 1 2 を参照して、本実施の形態に係る角度センサシステム 1 0 0 の構成について説明する。本実施の形態に係る角度センサシステム 1 0 0 は、以下の点で第 2 の実施の形態と異なっている。本実施の形態では、複数の検出位置の数を N (N は 2 以上の整数) で表す。 N 個の検出位置は、いずれも、仮想の平面 P 上にある。 N 個の検出位置におけるノイズ磁界 Me_x の方向は互いに等しく、 N 個の検出位置におけるノイズ磁界 Me_x の強度は互いに等しい。

20

【 0 1 4 8 】

本実施の形態では、 N 個の検出位置のうち少なくとも 2 つの検出位置において、検出対象磁界の強度が互いに異なるように、 N 個の検出位置が規定される。基準平面 P 上では、検出対象磁界の強度は、回転中心 C からの距離に依存して変化する。従って、 N 個の検出位置のうち少なくとも 2 つの検出位置は、回転中心 C からの距離が互いに異なる。上記の要件を満たす限り、検出対象磁界の強度が互いに等しい複数の検出位置が存在していてもよい。

【 0 1 4 9 】

また、本実施の形態に係る角度センサ 1 は、第 2 の実施の形態における第 1 ないし第 4 の合成磁界情報生成部 1 0 , 2 0 , 3 0 , 4 0 の代わりに、 N 個の合成磁界情報生成部を備えている。以下、 N 個の合成磁界情報生成部を、便宜上、1 番目ないし N 番目の合成磁界情報生成部と呼ぶ。そして、 n 番目 (n は 1 以上 N 以下の任意の整数) の合成磁界情報生成部を、符号 1 0 I_n で表す。

30

【 0 1 5 0 】

ここで、合成磁界情報生成部 1 0 I_n に対応する検出位置を、符号 P_n で表す。合成磁界情報生成部 1 0 I_n は、検出位置 P_n において、検出対象磁界とノイズ磁界 Me_x との合成磁界を検出し、合成磁界情報を生成する。本実施の形態では、複数の合成磁界情報の各々は、合成磁界の方向の情報を含む。

40

【 0 1 5 1 】

また、合成磁界情報生成部 1 0 I_n が検出する合成磁界が基準方向 DR に対してなす角度を記号 θ_n で表す。図 1 2 には、第 1 の実施の形態で説明した X , Y , Z の各方向を示している。基準方向 DR は、 X 方向とする。後で詳しく説明するが、合成磁界情報生成部 1 0 I_n は、合成磁界情報として、角度 θ_n を表す個別角度値 s_n を生成する。角度 θ_n および個別角度値 s_n の正負の定義は、第 1 の実施の形態における角度 $\theta_1 \sim \theta_4$ と同様である。

【 0 1 5 2 】

次に、図 1 3 および図 1 4 を参照して、本実施の形態に係る角度センサ 1 および合成磁界情報生成部 1 0 I_n の構成について詳しく説明する。図 1 3 は、角度センサ 1 の構成を

50

示す機能ブロック図である。図14は、合成磁界情報生成部10I_nの構成の一例を示す機能ブロック図である。前述のように、本実施の形態に係る角度センサ1は、N個の合成磁界情報生成部10I₁, 10I₂, ..., 10I_Nを備えている。

【0153】

図14に示した例では、合成磁界情報生成部10I_nは、第1の信号生成部11Iと、第2の信号生成部12Iと、A/D変換器13I, 14Iと、個別角度演算部15Iとを有している。第1の信号生成部11Iは、検出位置P_nにおける合成磁界の方向が基準方向DRに対してなす角度θ_nの余弦と対応関係を有する第1の信号S_{1n}を生成する。第2の信号生成部12Iは、検出位置P_nにおける合成磁界の方向が基準方向DRに対してなす角度θ_nの正弦と対応関係を有する第2の信号S_{2n}を生成する。A/D変換器13I, 14Iは、それぞれ、第1および第2の信号S_{1n}, S_{2n}をデジタル信号に変換する。個別角度演算部15Iは、第1および第2の信号S_{1n}, S_{2n}に基づいて、合成磁界情報として、角度θ_nを表す個別角度値s_nを生成する。個別角度値s_nは、検出位置P_nにおける合成磁界の方向の情報に対応する。個別角度演算部15Iは、例えば、ASICによって実現することができる。

10

【0154】

本実施の形態では第1の信号生成部11Iの構成は、第1の実施の形態において図5を参照して説明した第1の検出信号生成部11の構成と同じである。そのため、以下の説明では、第1の信号生成部11Iの構成要素について、図5に示した第1の検出信号生成部11の構成要素と同じ符号を用いる。第1の信号生成部11Iでは、磁気検出素子R₁₁, R₁₄に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向はX方向であり、磁気検出素子R₁₂, R₁₃に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向は-X方向である。この場合、角度θ_nの余弦に応じて、出力ポートE₁₁, E₁₂の電位差が変化する。差分検出器18は、出力ポートE₁₁, E₁₂の電位差に対応する信号を第1の信号S_{1n}として出力する。従って、第1の信号生成部11Iは、角度θ_nの余弦と対応関係を有する第1の信号S_{1n}を生成する。

20

【0155】

また、本実施の形態では、第2の信号生成部12Iの構成は、第1の実施の形態において図6を参照して説明した第2の検出信号生成部12の構成と同じである。そのため、以下の説明では、第2の信号生成部12Iの構成要素について、図6に示した第2の検出信号生成部12の構成要素と同じ符号を用いる。第2の信号生成部12Iでは、磁気検出素子R₂₁, R₂₄に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向はY方向であり、磁気検出素子R₂₂, R₂₃に含まれる複数のMR素子における磁化固定層の磁化の方向は-Y方向である。この場合、角度θ_nの正弦に応じて、出力ポートE₂₁, E₂₂の電位差が変化する。差分検出器28は、出力ポートE₂₁, E₂₂の電位差に対応する信号を第2の信号S_{2n}として出力する。従って、第2の信号生成部12Iは、角度θ_nの正弦と対応関係を有する第2の信号S_{2n}を生成する。

30

【0156】

次に、個別角度値s_nの生成方法について具体的に説明する。個別角度演算部15Iは、下記の式(17)によって、個別角度値s_nを求める。

40

【0157】

$$s_n = \text{atan}(S_{2n}/S_{1n}) \quad \dots (17)$$

【0158】

s_nが0°以上360°未満の範囲内では、式(17)におけるs_nの解には、180°異なる2つの値がある。しかし、S_{1n}, S_{2n}の正負の組み合わせにより、s_nの真の値が、式(17)におけるs_nの2つの解のいずれであるかを判別することができる。個別角度演算部15Iは、式(17)と、上記のS_{1n}, S_{2n}の正負の組み合わせの判定により、0°以上360°未満の範囲内でs_nを求める。

【0159】

図13に示したように、本実施の形態に係る角度センサ1は、第2の実施の形態にお

50

る角度演算部 50 の代わりに、角度演算部 350 を備えている。角度演算部 350 は、複数の合成磁界情報すなわち N 個の個別角度値 s_1, s_2, \dots, s_N に基づいて、最小二乗法を用いて、角度検出値 s を生成する。角度演算部 350 は、例えば、ASIC またはマイクロコンピュータによって実現することができる。

【0160】

次に、本実施の形態における検出対象磁界の一例と合成磁界の一例について説明する。本実施の形態では、磁界発生部 5 が発生する検出対象磁界として、基準平面 P 上において、回転中心 C (図 12 参照) から遠ざかるに従って強度が減少する磁界を想定する。図 15 は、検出対象磁界の強度の分布を模式的に示す説明図である。図 15 における縦軸は、検出対象磁界の強度 (単位は mT) を示している。また、図 15 において、縦軸に直交する 2 つの軸は、基準平面 P 上の直交する 2 方向の位置 (単位は mm) を示している。図 15 では、基準平面 P と回転中心 C との交点 (図 12 参照) を、この縦軸に直交する 2 つの軸の原点とした。

10

【0161】

図 16 は、合成磁界の強度および方向の、基準平面 P 上での分布を模式的に示す説明図である。図 16 における合成磁界は、図 15 に示した検出対象磁界とノイズ磁界 M_{ex} とが合成されたものである。図 16 では、ノイズ磁界 M_{ex} の強度を $1mT$ とし、ノイズ磁界 M_{ex} の方向を、 X 方向から Y 方向に向かって 60° だけ回転した方向とした。また、図 16 では、基準平面 P と回転中心 C (図 12 参照) との交点を原点とした。図 16 における各軸の単位は、 mm である。図 16 において、矢印は、回転磁界角度 M が 0° のときの上記合成磁界の強度および方向を表している。矢印の長さは合成磁界の強度を表し、矢印の方向は合成磁界の方向を表している。

20

【0162】

次に、本実施の形態におけるノイズ磁界 M_{ex} と個別角度値 s_n との関係について説明する。ノイズ磁界 M_{ex} が存在しない場合には、個別角度値 s_n は、回転磁界角度 M と等しくなる。しかし、ノイズ磁界 M_{ex} が存在すると、検出位置 P_n における合成磁界の方向が検出位置 P_n における検出対象磁界の方向からずれて、その結果、個別角度値 s_n が回転磁界角度 M とは異なる値になる場合がある。以下、個別角度値 s_n と回転磁界角度 M の差を、個別角度値 s_n の角度誤差と言う。個別角度値 s_n の角度誤差は、ノイズ磁界 M_{ex} に起因して生じる。

30

【0163】

また、前述のように、本実施の形態では、複数の検出位置 P_1, P_2, \dots, P_N のうちの少なくとも 2 つの検出位置において、検出対象磁界の強度は、互いに異なる。基準平面 P 上では、検出対象磁界の強度は、回転中心 C からの距離に依存して変化する。少なくとも 2 つの検出位置において、検出対象磁界の強度が異なると、それらの検出位置における合成磁界に与えるノイズ磁界 M_{ex} の相対的な影響が変化して、それらの検出位置における合成磁界の方向に違いが生じる。その結果、個別角度値 s_n に違いが生じる。

【0164】

以下、検出位置 P_1 における合成磁界と検出位置 P_2 における合成磁界を例にとって、ノイズ磁界 M_{ex} の影響について説明する。本実施の形態では、符号 $MF1$ は、検出位置 P_1 における合成磁界を表すものとし、符号 $MF2$ は、検出位置 P_2 における合成磁界を表すものとする。以下、合成磁界 $MF1$ を第 1 の合成磁界 $MF1$ とも言い、合成磁界 $MF2$ を第 2 の合成磁界 $MF2$ とも言う。また、本実施の形態では、符号 MFa は、検出位置 P_1 における検出対象磁界を表すものとし、符号 MFb は、検出位置 P_2 における検出対象磁界を表すものとする。以下、検出対象磁界 MFa を第 1 の部分磁界 MFa とも言い、検出対象磁界 MFb を第 2 の部分磁界 MFb とも言う。第 1 の部分磁界 MFa の方向と第 2 の部分磁界 MFb の方向は、基準位置における検出対象磁界の方向に一致するものとする。

40

【0165】

ここで、ノイズ磁界 M_{ex} について、第 1 および第 2 の部分磁界 MFa, MFb に直交する成分 (以下、第 1 の成分と言う。) と、第 1 および第 2 の部分磁界 MFa, MFb に

50

平行な成分（以下、第2の成分と言う。）を想定する。図17は、第1および第2の合成磁界MF1, MF2とノイズ磁界M_{ex}との関係を模式的に示す説明図である。図17における(a)は第1の合成磁界MF1とノイズ磁界M_{ex}の第1の成分との関係を示している。図17における(b)は第2の合成磁界MF2とノイズ磁界M_{ex}の第1の成分との関係を示している。図17において、記号M_{ex1}を付した矢印は、ノイズ磁界M_{ex}の第1の成分を表している。なお、図17では、第1の成分M_{ex1}の大きさを強調して描いている。図17に示したように、第1および第2の合成磁界MF1, MF2の方向は、第1の成分M_{ex1}の影響によって、それぞれ第1および第2の部分磁界MF_a, MF_bの方向からずれる。

【0166】

なお、本実施の形態では、第1および第2の合成磁界MF1, MF2の方向のずれに対するノイズ磁界M_{ex}の第2の成分の影響を無視することができる程度に、ノイズ磁界M_{ex}の強度は、第1および第2の部分磁界MF_a, MF_bの強度に比べて十分に小さいものとする。図17では、第1の合成磁界MF1を、第1の部分磁界MF_aとノイズ磁界M_{ex}の第1の成分M_{ex1}との合成磁界として表し、第2の合成磁界MF2を、第2の部分磁界MF_bとノイズ磁界M_{ex}の第1の成分M_{ex1}との合成磁界として表している。

【0167】

図17における(a)に示したように、第1の合成磁界MF1の方向が第1の部分磁界MF_aの方向からずれると、第1の合成磁界MF1に基づいて生成される個別角度値 s_1 には角度誤差が生じる。第1の部分磁界MF_aの強度を B_1 とし、ノイズ磁界M_{ex}の第1の成分M_{ex1}の強度を B_{ex} とすると、個別角度値 s_1 の角度誤差は、 $\arctan(B_{ex}/B_1)$ になる。

【0168】

また、図17における(b)に示したように、第2の合成磁界MF2の方向が第2の部分磁界MF_bの方向からずれると、個別角度値 s_2 には角度誤差が生じる。第2の部分磁界MF_bの強度を B_2 とすると、個別角度値 s_2 の角度誤差は、 $\arctan(B_{ex}/B_2)$ になる。

【0169】

ところで、 x が十分に小さいときには、 $\arctan(x)$ を $AT \cdot x$ と近似することができる。ATは、定数であり、例えば56.57である。本実施の形態では、ノイズ磁界M_{ex}の第1の成分M_{ex1}の強度 B_{ex} は、第1および第2の部分磁界MF_a, MF_bの強度 B_1, B_2 に比べて十分に小さいため、 $\arctan(B_{ex}/B_1)$ 、 $\arctan(B_{ex}/B_2)$ をそれぞれ $AT \cdot (B_{ex}/B_1)$ 、 $AT \cdot (B_{ex}/B_2)$ と近似することができる。

【0170】

個別角度値 s_1 は、回転磁界角度 M と、個別角度値 s_1 の角度誤差とを用いて表すことができる。同様に、個別角度値 s_2 は、回転磁界角度 M と、個別角度値 s_2 の角度誤差とを用いて表すことができる。具体的には、個別角度値 s_1, s_2 は、それぞれ下記の式(18)、(19)によって表すことができる。

【0171】

$$s_1 = M - AT \cdot (B_{ex} / B_1) \quad \dots (18)$$

$$s_2 = M - AT \cdot (B_{ex} / B_2) \quad \dots (19)$$

【0172】

ここまでは、検出位置 P_1, P_2 における合成磁界を例にとって説明してきた。上記の説明は、検出位置 P_n における合成磁界にも当てはまる。個別角度値 s_n は、下記の式(20)によって表すことができる。式(20)における B_n は、検出位置 P_n における検出対象磁界の強度を表す。なお、検出位置 P_n における検出対象磁界の方向は、基準位置における検出対象磁界の方向に一致するものとする。

【0173】

$$s_n = M - AT \cdot (B_{ex} / B_n) \quad \dots (20)$$

【0174】

10

20

30

40

50

次に、本実施の形態における角度検出値 s の生成方法について説明する。始めに、角度検出値 s の生成方法について、概念的に説明する。本実施の形態では、角度演算部 350 は、第 1 の未知数と、第 2 の未知数と、複数の想定磁界情報とを想定する。第 1 の未知数は、角度検出値 s に対応する値である。第 2 の未知数は、ノイズ磁界 M_{ex} の強度に対応する値である。複数の想定磁界情報は、第 1 および第 2 の未知数に基づいて想定される、複数の合成磁界情報に対応する情報である。

【0175】

角度演算部 350 は、複数の合成磁界情報と複数の想定磁界情報の対応するもの同士の差の二乗和が最小になるように第 1 および第 2 の未知数を推定し、推定された第 1 の未知数に基づいて角度検出値 s を決定する。

10

【0176】

第 1 および第 2 の未知数の推定方法は、第 1 の実施の形態で説明した第 1 および第 2 の推定値 M 、 E の決定方法と同様である。すなわち、第 1 の実施の形態において式 (5) ~ (8) を参照して説明した方法によって列ベクトル x を決定することにより、第 1 および第 2 の未知数を推定することができる。本実施の形態では、式 (5)、(6) における z は、求めるべき第 1 および第 2 の未知数に基づいて生成された複数の想定磁界情報と対応関係を有する N 個の要素を含む N 次元列ベクトルである。式 (5) ~ (8) における H は、ノイズ磁界 M_{ex} と個別角度値 s_n との関係に応じて規定される N 行 2 列の行列である。式 (5) ~ (7) における x は、第 1 の未知数と第 2 の未知数を要素とする 2 次元列ベクトルである。式 (6) ~ (8) における y は、複数の合成磁界情報すなわち N 個の個別角度値 s_1, s_2, \dots, s_N と対応関係を有する N 個の要素を含む N 次元列ベクトルである。

20

【0177】

本実施の形態では、第 1 の実施の形態における式 (8) に、上記の行列 H および列ベクトル y を代入して算出された列ベクトル x の 2 つの要素の一方である第 1 の未知数に基づいて、角度検出値 s を決定する。

【0178】

次に、角度検出値 s の生成方法について具体的に説明する。本実施の形態では、角度演算部 350 における演算は、実数を用いて行われる。本実施の形態では、複数の想定磁界情報の数は N である。ここで、 N 個の想定磁界情報を、記号 z_1, z_2, \dots, z_N で表す。想定磁界情報 z_1, z_2, \dots, z_N は、それぞれ、第 1 および第 2 の未知数に基づいて想定される、個別角度値 s_1, s_2, \dots, s_N に対応する想定磁界情報である。本実施の形態では、 N 個の想定磁界情報を、下記の式 (21) のようにモデル化する。

30

【0179】

【数 3】

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{AT}{B_1} \\ 1 & -\frac{AT}{B_2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & -\frac{AT}{B_N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta MA \\ B_{ex} \end{bmatrix} \quad \dots (21)$$

40

【0180】

式 (21) の左辺の N 次元列ベクトルは、式 (5) における z に対応する。

【0181】

式 (21) の右辺の 2 次元列ベクトルは、式 (5) における x に対応する。以下、この列ベクトルを記号 x_0 で表す。本実施の形態では、回転磁界角度 M は検出対象の角度と一致するものとする。また、本実施の形態では、第 1 の未知数を、回転磁界角度 M に対

50

応する未知数とし、記号 MA で表す。上述のように回転磁界角度 M は検出対象の角度と一致することから、第 1 の未知数 MA は角度検出値 s に対応する値と言える。また、本実施の形態では、第 2 の未知数を、ノイズ磁界 M_{ex} の第 1 の成分 M_{ex1} の強度 B_{ex} に対応する未知数とする。第 2 の未知数は、強度 B_{ex} そのものではないが、式 (21) と以下の説明では、便宜上、第 2 の未知数を記号 B_{ex} で表している。

【0182】

式 (21) の右辺の N 行 2 列の行列は、式 (5) における H に対応する。以下、この行列を記号 H_e で表す。行列 H_e の要素は、ノイズ磁界 M_{ex} と個別角度値 s_n との関係に応じて規定される。ノイズ磁界 M_{ex} と個別角度値 s_n との関係は、式 (20) に示したように、回転磁界角度 M と強度 B_{ex} とを用いて表すことができる。本実施の形態では、式 (20) における M の係数に基づいて、行列 H_e の第 1 列の N 個の要素を規定した。具体的には、式 (21) に示したように、行列 H_e の第 1 列の N 個の要素を、いずれも 1 とした。また、本実施の形態では、式 (20) における B_{ex} の係数に基づいて、行列 H_e の第 2 列の N 個の要素を規定した。具体的には、式 (21) に示したように、行列 H_e の第 2 列の N 個の要素を、 $-AT/B_1, -AT/B_2, \dots, -AT/B_N$ とした。 B_1, B_2, \dots, B_N は、例えば、ノイズ磁界 M_{ex} が存在しない状況の下で、複数の検出位置 P_1, P_2, \dots, P_N の各々における検出対象磁界の強度を測定することによって得られる。

10

【0183】

ここで、 N 個の個別角度値 s_1, s_2, \dots, s_N を要素とする N 次元列ベクトルを、記号 y_e で表す。列ベクトル y_e は、下記の式 (22) によって表わされる。

20

【0184】

$$y_e^T = [s_1, s_2, \dots, s_N] \quad \dots (22)$$

【0185】

角度演算部 350 は、式 (8) における H, x, y をそれぞれ H_e, x_e, y_e に置き換えた式を用いて、 x_e を算出する。これにより、第 1 の未知数 MA と第 2 の未知数 B_{ex} が推定される。

【0186】

角度演算部 350 は、推定された第 1 の未知数 MA に基づいて角度検出値 s を決定する。具体的には、角度演算部 350 は、推定された第 1 の未知数 MA を角度検出値 s とする。

30

【0187】

本実施の形態では、合成磁界の強度の情報を用いずに、角度検出値 s を決定する。そのため、本実施の形態によれば、合成磁界の強度によっては第 1 および第 2 の信号 S_{1n}, S_{2n} の大きさが飽和する場合であっても、精度よく角度検出値 s を決定することができる。

【0188】

なお、本実施の形態では、式 (21) における B_1, B_2, \dots, B_N の単位は、任意でよい。すなわち、 B_1, B_2, \dots, B_N は、それらの間の比率の関係が、検出位置 P_1, P_2, \dots, P_N における検出対象磁界の強度の比率の関係と同じになるような値であればよい。また、式 (21) における AT は、56.57 に限らず、任意の定数であってもよい。 B_1, B_2, \dots, B_N の単位や AT の値が異なると、推定される第 2 の未知数 B_{ex} の値も異なる。それでも、推定される第 2 の未知数 B_{ex} の値は、ノイズ磁界 M_{ex} の強度に応じて変化するため、第 2 の未知数 B_{ex} はノイズ磁界 M_{ex} の強度に対応する値と言える。これは、言い換えると、第 2 の未知数 B_{ex} の単位は任意でよいと言える。また、 B_1, B_2, \dots, B_N の単位や AT の値が異なっても、推定される第 1 の未知数 MA の値が異なることはない。

40

【0189】

次に、シミュレーションの結果を参照して、本実施の形態の効果について説明する。シミュレーションでは、方向と強度が一定のノイズ磁界 M_{ex} が存在する状況の下で、角度検出値 s を生成したときの、個別角度値 s_n の角度誤差と、角度検出値 s の角度誤

50

差を求めた。なお、このシミュレーションでは、真の検出対象の角度に相当する基準角度 r を用いて、角度誤差を求めた。具体的には、個別角度値 s_n と基準角度 r の差を個別角度値 s_n の角度誤差とし、角度検出値 s と基準角度 r の差を角度検出値 s の角度誤差とした。

【0190】

また、シミュレーションでは、図15に示した検出対象磁界と同様に、磁界発生部5が発生する検出対象磁界として、基準平面P上において、回転中心C(図12参照)から遠ざかるに従って強度が減少する磁界を想定した。図18は、検出対象磁界の強度の分布を模式的に示す説明図である。図18における縦軸は、検出対象磁界の強度(単位はmT)を示している。また、図18において、縦軸に直交する2つの軸は、基準平面P上の直交する2方向の位置(単位はmm)を示している。図18では、基準平面Pと回転中心Cとの交点(図12参照)を、この縦軸に直交する2つの軸の原点とした。また、原点における検出対象磁界の強度を80mTとし、ノイズ磁界M_{ex}の強度を4mTとした。

10

【0191】

また、シミュレーションでは、乱数で生成した誤差を検出対象磁界に重畳した。この誤差の最大値と最小値の差は6mTとした。この誤差は、角度センサ1において生じる通常の誤差を想定したものである。通常の誤差は、複数の合成磁界情報生成部の非線形性による誤差と白色ノイズによる誤差を含む。この通常の誤差に起因した角度誤差は、ノイズ磁界M_{ex}に起因した角度誤差よりも十分に小さい。

【0192】

また、シミュレーションでは、複数の検出位置の数を16とした。図19は、シミュレーションにおける複数の検出位置を示す説明図である。図19において、複数の黒丸は、複数の検出位置を表している。シミュレーションでは、複数の検出位置をX方向とY方向に等間隔に配置した。X方向に隣接する2つの検出位置の間隔と、Y方向に隣接する2つの検出位置の間隔は、いずれも0.8mmとした。

20

【0193】

図20は、シミュレーションによって得られた個別角度値 $s_1 \sim s_{16}$ の16個の角度誤差の波形の一例を示す。図20において、横軸は基準角度 r を示し、縦軸は角度誤差を示している。図20に示した16個の角度誤差の波形の間における振幅の違いは、検出位置毎の合成磁界に与えるノイズ磁界M_{ex}の相対的な影響の違いに起因するものである。ノイズ磁界M_{ex}の相対的な影響は、検出位置P_nと回転中心Cとの距離が大きくなるに従って大きくなる。従って、角度誤差の振幅は、検出位置P_nと回転中心Cとの距離が大きくなるに従って大きくなる。

30

【0194】

図21は、シミュレーションによって得られた角度検出値 s の角度誤差の波形の一例を示す。図21において、横軸は基準角度 r を示し、縦軸は角度誤差を示している。図21に示したように、角度検出値 s の角度誤差は、図20に示した個別角度値 $s_1 \sim s_{16}$ の16個の角度誤差のいずれと比べても十分に小さい。個別角度値 $s_1 \sim s_{16}$ の16個の角度誤差は、主にノイズ磁界M_{ex}に起因して生じたものである。一方、角度検出値 s の角度誤差は、主に通常の誤差に起因して生じたものである。このように、本実施の形態によれば、ノイズ磁界M_{ex}に起因した角度誤差を低減することができる。

40

【0195】

なお、本実施の形態における複数の検出位置は、第1の実施の形態における第1ないし第4の検出位置P1~P4と同様に、磁界発生部5を通過する仮想の直線上の互いに異なる位置であってもよい。この場合、複数の検出位置において、検出対象磁界の強度は互いに異なる。本実施の形態におけるその他の構成、作用および効果は、第1または第2の実施の形態と同様である。

【0196】

なお、本発明は、上記実施の形態に限定されず、種々の変更が可能である。例えば、本発明における複数の合成磁界情報生成部の各々は、第1の実施の形態における第1ないし

50

第4の合成磁界情報生成部10, 20, 30, 40と同様にして合成磁界の方向の情報のみを生成する部分と、それとは別個の、合成磁界の強度の情報のみを生成する部分とを含んでいてもよい。

【0197】

また、各合成磁界情報に含まれる合成磁界の強度の情報を予め決められた一定値にしても、ノイズ磁界に起因した角度誤差が許容範囲に収まる場合には、各合成磁界情報に含まれる合成磁界の強度の情報を上記一定値にしてもよい。この場合は、各合成磁界情報生成部は、実際に検出した合成磁界の方向の情報を含むと共に、実際に検出した合成磁界の強度の情報ではない上記一定値の強度の情報を含む合成磁界情報を生成してもよい。

【0198】

また、本発明では、複数の検出位置において、検出対象の角度に応じた検出対象磁界の強度の変化の態様が互いに異なってもよい。この場合には、複数の検出位置における検出対象磁界の強度の変化の態様を考慮して、複数の推定合成磁界情報をモデル化することにより、第2の実施の形態と同様にして、ノイズ磁界M_{ex}の影響が排除された角度検出値sを推定することができる。複数の検出位置において、検出対象の角度に応じた検出対象磁界の強度の変化の態様が互いに異なる場合としては、例えば、第2の実施の形態において、磁石6が偏心して回転する場合がある。

【0199】

また、本発明では、複数の検出位置において、検出対象の角度に応じた検出対象磁界の方向の変化の態様が互いに異なると共に、検出対象磁界の強度またはその検出対象の角度に応じた変化の態様が互いに異なってもよい。この場合には、複数の検出位置における、検出対象磁界の強度またはその変化の態様と検出対象磁界の方向の変化の態様とを考慮して、複数の推定合成磁界情報をモデル化することにより、ノイズ磁界M_{ex}の影響が排除された角度検出値sを推定することができる。

【符号の説明】

【0200】

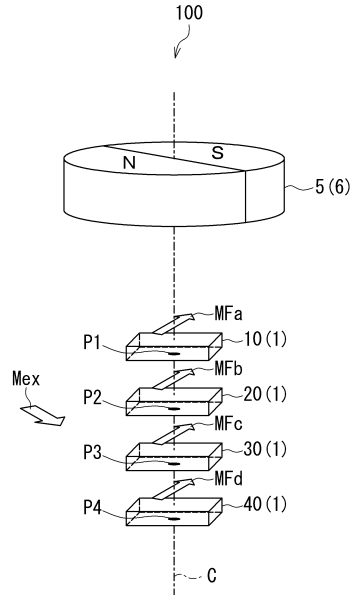
1...角度センサ、5...磁界発生部、6...磁石、10...第1の合成磁界情報生成部、11...第1の検出信号生成部、12...第2の検出信号生成部、20...第2の合成磁界情報生成部、21...第3の検出信号生成部、22...第4の検出信号生成部、30...第3の合成磁界情報生成部、31...第5の検出信号生成部、32...第6の検出信号生成部、40...第4の合成磁界情報生成部、41...第7の検出信号生成部、42...第8の検出信号生成部、50...角度演算部、100...角度センサシステム。

10

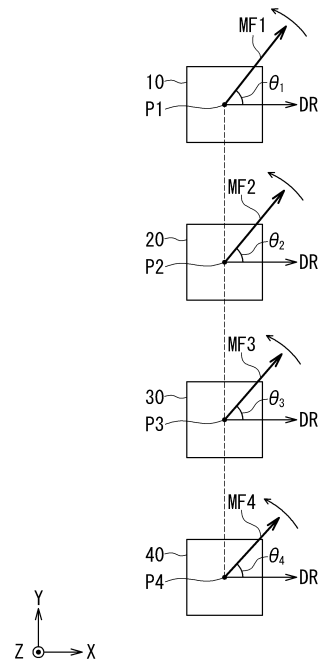
20

30

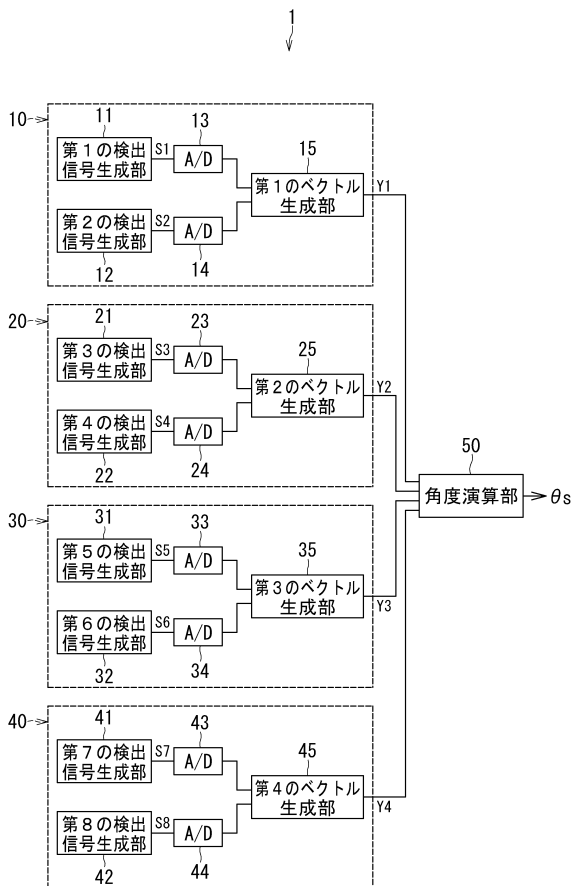
【図1】



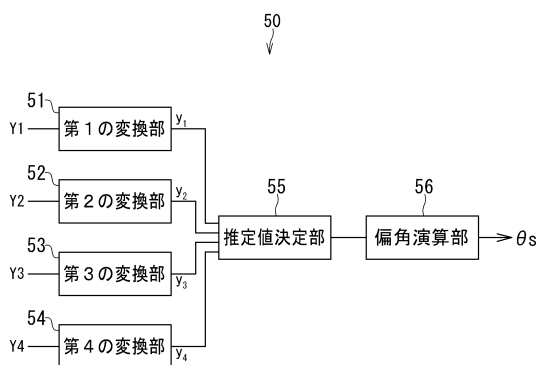
【図2】



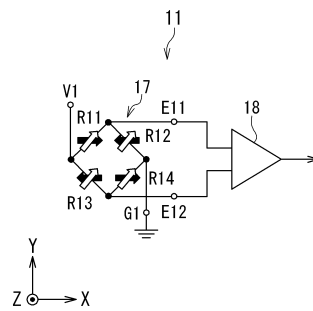
【図3】



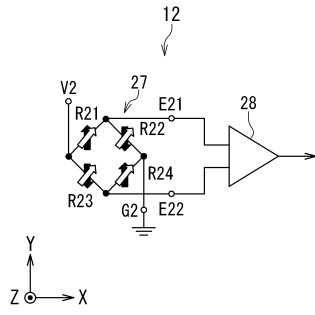
【図4】



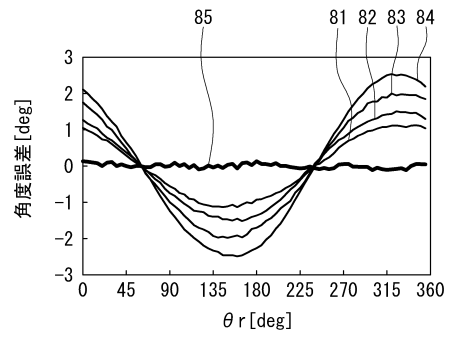
【図5】



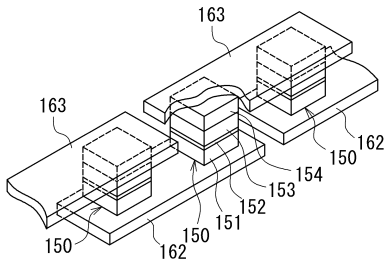
【 図 6 】



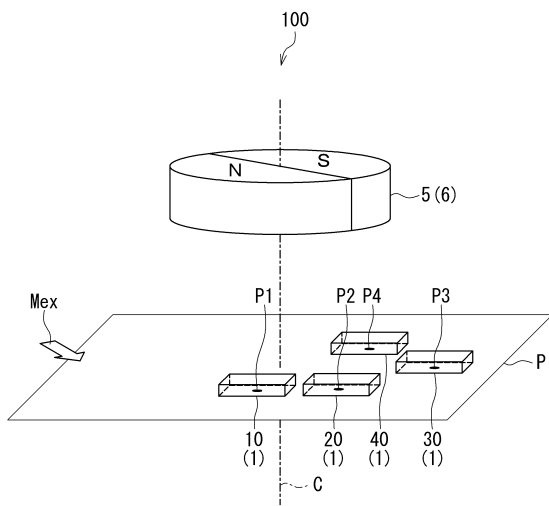
【 図 8 】



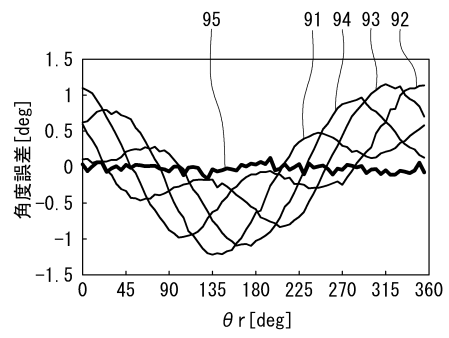
【 図 7 】



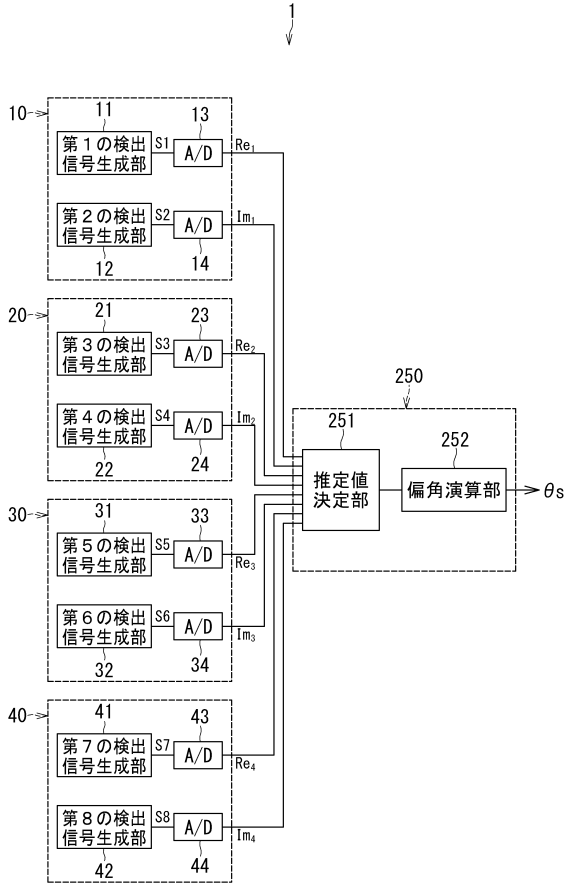
【 図 9 】



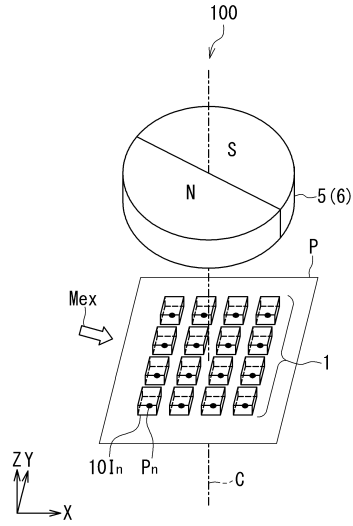
【 図 10 】



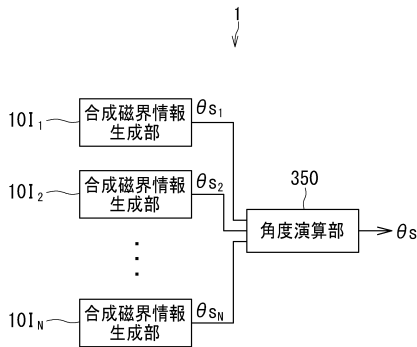
【図11】



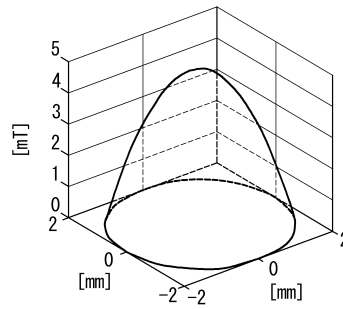
【図12】



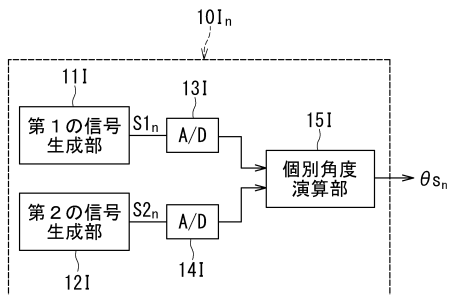
【図13】



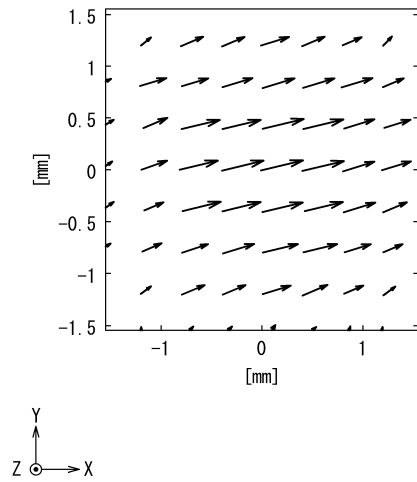
【図15】



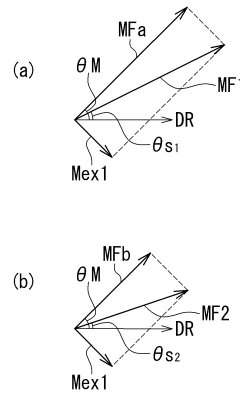
【図14】



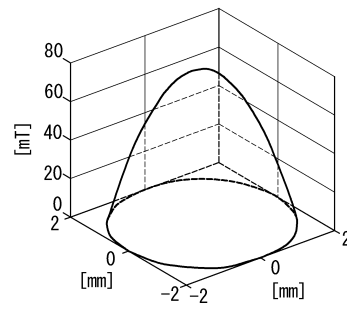
【 図 16 】



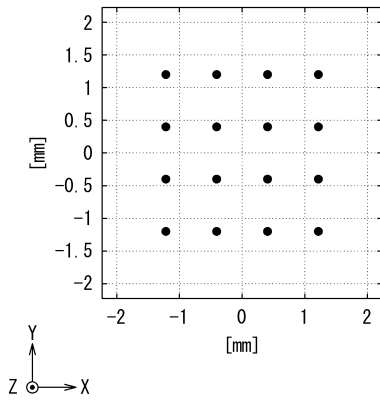
【 図 17 】



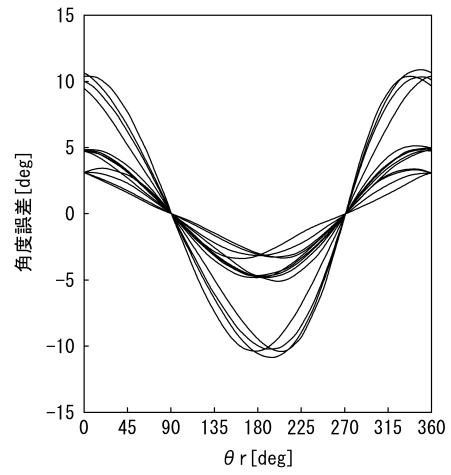
【 図 18 】



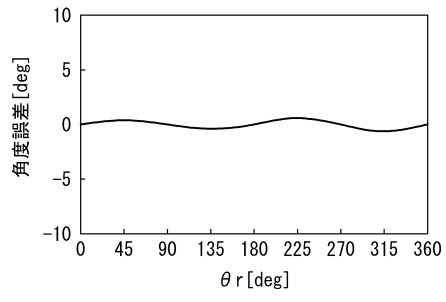
【 図 19 】



【 図 20 】



【図 2 1】



フロントページの続き

- (72)発明者 望月 慎一郎
東京都港区芝浦三丁目9番1号 TDK株式会社内
- (72)発明者 平林 啓
東京都港区芝浦三丁目9番1号 TDK株式会社内
- (72)発明者 渡部 司也
東京都港区芝浦三丁目9番1号 TDK株式会社内

審査官 吉田 久

- (56)参考文献 特許第5062450(JP, B2)
特開2002-148009(JP, A)
特開2015-175755(JP, A)
特開2003-148999(JP, A)
米国特許出願公開第2011/0267048(US, A1)
米国特許出願公開第2005/0140362(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D 5/00 - 5/252
G01B 7/00 - 7/34
G01R 33/00 - 33/18