

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B1)

(11)特許番号

特許第7126645号
(P7126645)

(45)発行日 令和4年8月29日(2022. 8. 29)

(24)登録日 令和4年8月19日(2022. 8. 19)

(51)Int. Cl.		F I	
<i>G 0 1 R 33/02</i>	<i>(2006. 01)</i>	G 0 1 R 33/02	L
<i>H 0 1 L 43/00</i>	<i>(2006. 01)</i>	G 0 1 R 33/02	D
		H 0 1 L 43/00	

請求項の数 3 (全 21 頁)

<p>(21)出願番号 特願2021-73521(P2021-73521)</p> <p>(22)出願日 令和3年4月23日(2021. 4. 23)</p> <p>審査請求日 令和4年2月18日(2022. 2. 18)</p> <p>早期審査対象出願</p>	<p>(73)特許権者 713000630 マグネデザイン株式会社 愛知県名古屋市昭和区福江二丁目9番33号</p> <p>(72)発明者 本蔵 義信 愛知県知多郡東浦町大字緒川字東仙台33番地の10</p> <p>(72)発明者 本蔵 晋平 愛知県知多郡東浦町大字緒川字東仙台33番地の10</p> <p>審査官 續山 浩二</p>
---	---

最終頁に続く

(54)【発明の名称】磁石体の位置・方位検出装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

磁石体、磁界ベクトルセンサ、磁界センサグリッド、センサグリッドデータ処理回路および位置方位演算装置からなる磁石体の位置・方位検出装置において、

前記磁石体は、直径は0.3～2mm、長さは1～15mmの大きさで、前記磁石体の磁気モーメントは $1 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10} \text{ W b m}$ とし、

前記磁界ベクトルセンサは、前記磁石体から発する磁界ベクトルを計測するもので、磁界ベクトルセンサ素子と電子回路と演算回路とからなり、

前記磁界ベクトルセンサ素子は、底辺は0.6mm～6mm、高さは0.3mm～3mmからなり、20度～45度の傾斜角度を有する四角錐台または八角錐台の台座の4つの斜面に4つのGSR素子を4回対称、かつ鏡像対称に貼り付けてなり、

前記電子回路は、前記4つのGSR素子の出力電圧を、磁界検出力は0.1～10nTにて100Hz～10kHzの測定サンプリング速度で、4つの磁界測定値 $H \times 1$ 、 $H \times 2$ 、 $H y 1$ 、 $H y 2$ に変換する機能を有し、

前記演算回路は、

$$H x = (1 / 2 \cos \theta) (H \times 1 - H \times 2)、$$

$$H y = (1 / 2 \cos \theta) (H y 1 - H y 2)、$$

$$H z = (1 / 4 \sin \theta) (H \times 1 + H \times 2 + H y 1 + H y 2)、$$

なる計算式で磁界ベクトル($H x$ 、 $H y$ 、 $H z$)を算出し、

磁界ベクトルセンサグリッドは、平面上に前記磁界ベクトルセンサを5～15mmの間隔

で少なくとも 25 個配置してなり、
 前記センサグリッドデータ処理回路は、前記磁界センサグリッドにより計測した磁界測定データを高速で処理して、位置方位演算装置に転送し、
 前記位置方位演算装置は、そのセンサグリッドデータから磁石体の位置 X、Y、Z と方位、をガウスニュートン法で計算し、位置精度 0.5 mm 以下、方位精度 1 度以下、位置方位測定速度は 1 Hz から 50 Hz で計算して、その計算値を表示装置に出力することを特徴とする磁石体の位置・方位検出装置。

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記センサグリッドデータ処理回路および前記位置方位演算装置は、磁石体 (M) の位置と方位を、前記磁界センサグリッドの中心を原点として、グリッド面を XY 平面、

XY 平面に垂直軸を Z 軸とした XYZ 座標系を指定して、磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ の絶対値が最大となる測定点を中心とする少なくとも 9 個の測定点における測定値を使って、前記磁石体 (M) の位置を (X, Y, Z) とし、方位を Z 軸に対する回転角を θ とし、X 軸に対する回転角を ϕ とし、X、Y、Z、 θ および ϕ を、ガウスニュートン法に従って、以下のステップで

- (1) 前記磁界センサグリッドの位置 (i, j) における磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ を計測し、
 - (2) 前記磁石体 (M) が、位置 (X, Y, Z) および方位 (θ , ϕ) にあるとして、前記磁界センサグリッドの位置 (i, j) につくる磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ の理論値を計算し、
 - (3) 測定誤差を、 $e_{i,j} = \vec{H}_{i,j}(X, Y, Z, \theta, \phi) - \vec{H}_{i,j}$ により計算し、
 - (4) 誤差の平方和を、 $E_{i,j} = \sum e_{i,j}^2$ により計算し、
 - (5) 誤差の平方和を最小とする X、Y、Z、 θ 、 ϕ を算出し、
- かつ、反復プロセスを含まない方法で計算して、位置精度 0.5 mm 以下、方位精度 1 度以下、位置測定速度は 1 Hz ~ 50 Hz で位置・方位を測定することを特徴とする磁石体の位置・方位検出装置。

【請求項 3】

請求項 2 において、

前記磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ の測定値の最大となる絶対値 S がセンサの検出力 N に対して、S/N 比が 5.0 以下の場合において、

- (1) 前記磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ の絶対値が最大となる前記磁界センサグリッド位置 (i, j) を計算上の原点として、
- (2) それを中心に前記磁界ベクトル $\vec{H}_{i,j}$ の絶対値 S に対してセンサの検出力 N に対して、S/N 比が 2.5 以上となる測定点を少なくとも 9 個、最大で 49 個を抽出し、
- (3) 抽出した測定点における測定磁界ベクトルの測定値と理論値の誤差から算出した誤差の平方和を最小にする X、Y、Z、 θ 、 ϕ をガウスニュートン法に従って、算出することを特徴とする磁石体の位置・方位検出装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、微小物体の先端に微小磁石を設けて、微小物体の位置と方位を高精度かつリアルタイムに計測する検出装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

医療分野においては、内視鏡やカテーテルなどの先端部の検出体の位置と方位の計測、デンタル分野では、歯牙や顎堤の移動、治療用ハンドピースの移動距離など、ミニ部品的位置、移動および方位と回転量を正確に計測するニーズが高まっている。

検出体に磁界ベクトルセンサを取り付けて外部から磁界を加えて、磁界ベクトルセンサで外部磁界を測定して位置を計算するシステムや、検出体に磁石を取り付けて位置を計測するシステムが開発されている。

【0003】

検出体に磁石を設けて位置と方位を検出する方法は、簡便であるが、磁石体を小さくすると精度が低下する。磁石体としては直径 0.3 ~ 2 mm 程度の小さなものしか使用できな

いので、しかも外部で磁石体が発する微小磁界を感度よく計測する磁界ベクトルセンサが必要である。磁界ベクトルセンサを高密度に配置した磁界ベクトルセンサグリッドと位置・方位計算プログラム技術が必要であるが、現状では位置決め精度が1～5 mmと市場が要求する0.5 mm以下の精度と比べると大幅に劣るものしか開発されていない。また既存開発品の位置方位測定速度は1 Hzより小さく、大幅な改善が求められている。

【0004】

特許文献1に磁石式の位置・方位算出システムが開示されている。これは、 4.8×10^{-9} Wb m程度の磁気モーメントを有するNdFeB磁石(サイズは0.8 mm×2.5 mmの3個の磁石)を、1 nT程度の磁界検出力を有するFGセンサなどからなる3軸の磁界センサを使って、磁石体の位置を4 mm程度の精度で計測を可能にしたものである。

10

【0005】

この主な原因は、3軸の磁界センサの測定値の位置の相互のずれに起因すると考えられる。本特許文献1には、正確には記載されていないが図2に記載されている磁界センサの径を3 mmから5 mmと仮定するとおおよそ各磁界センサが測定する位置は、1.5 mmから2.5 mm程度相互にずれることになり、これが位置精度を大幅に損なう原因になっていると考えられる。

またこの発明は、磁界ベクトルセンサを使用していないため、ガウスニュートン法に従って計算することができないため、磁場勾配を活用した反復プロセスを行って、測定値と理論値の誤差を最小限にするX、Y、Z、を求めているが、反復プロセスのために計算速度が遅く、リアルタイム性に難点があると思われる。実際本特許文献1には位置測定速度が記載されていない。

20

【0006】

3軸の磁界センサとしては、特許文献2にMIセンサを使ったタイプとして愛知製鋼(株)の電子コンパスが記載されている。これは3個の素子を組み立てたもので、X軸、Y軸、Z軸方向の磁界の測定位置が1 mm程度喰い違っており、ピンポイントで所定の位置の磁界ベクトルを測定できないものである。また磁界検出力は200 nTと劣るものである。したがってこの電子コンパスを特許文献1の発明に応用しても、磁石体の位置精度の改善は期待できない。位置精度の向上のためには、磁界測定には3軸の磁界センサに代えて、3次元の磁界センサを使ってピンポイントに磁界ベクトルを測定できる磁界ベクトルセンサを利用することが重要である。

30

【0007】

磁界ベクトルセンサとしては、特許文献3にホールセンサを使った磁界測定器として旭化成(株)の電子コンパスが記載されている。4個のホール素子と1個のパーマロイ集磁体を組み合わせたもので、センサ素子の間隔は1 mm程度でピンポイントの所定の位置での磁界ベクトルの測定が可能であり、サイズは2 mmでセンサ間隔を高密度に配置したセンサグリッドを製作することは可能であるが、磁界検出能が10 mG (= 1000 nT)程度しかなくて、微小磁界が計測できないという問題がある。

【0008】

また、磁界ベクトルセンサとしては、特許文献4にGMRセンサを使った集積磁力計が記載されている。これはサイズが2 mm×2 mmと小さく、検出力は500 nT程度で、しかもHx、HyとHzの測定精度が異なるという問題があり、特にHx、Hyの測定精度は800 nT程度まで低下してしまう。その結果、微小磁界が計測できないという問題がある。

40

【0009】

また、磁界ベクトルセンサとしては、非特許文献1にFGセンサを使ったMTI社のnTメータが記載されている。検出力は1 nTレベルであるが、サイズが30 mmの立方体の6面に素子を貼り付けたものである。そのためにセンサ素子の間隔は30 mm程度もあり、ミニ磁石が作る大きな勾配の磁界ベクトルを測定した場合、磁場勾配を測定することに

50

なり、特定の位置で磁界測定をピンポイントで測定することはできない。またセンサ間隔を高密度に配置したセンサグリッドを製作することはできないという欠点もあり、本製品を特許文献1の発明に応用しても、磁石体の位置精度の改善は期待できない。

【0010】

一方、特許文献6にはGSRセンサ(特許文献5)を使ったマグネデザイン(株)の電子コンパスが記載されている。4個のGSR素子と一对のパーマロイ集磁体を組み合わせたものである。GSR素子の間隔は0.5mm程度で、ピンポイントの所定の位置の磁界ベクトルの測定が可能で、しかも、磁界検出能が0.5mG(=50nT)程度とホールセンサやMIセンサよりは優れている。しかし、求められている磁界検出力10nT以下と比較すると不十分である。本製品を特許文献1の発明に応用すると、磁石体の位置精度の改善は期待できるが、1.5mm程度が限界と思われる。反復プロセス法である以上、位置測定速度は1Hz未満にならざるを得ないと考えられる。

10

【0011】

検出体に設置した小さな磁石の位置方位を精度良くかつ高速に測定するためには、小型で高い磁界検出力を有する磁界ベクトルセンサの開発が必要である。具体的には、微小磁界10nT以下の検出能で、6mm×6mm×3mm以下の微小空間内でピンポイントの所定の位置の磁界ベクトルを測定でき、かつHx、Hy、Hzの測定値の精度が同じである磁界ベクトルセンサの開発が求められている。

【0012】

磁石体の位置と方位の計算アルゴリズムについて、磁界ベクトルセンサグリッドを使って磁石体の位置と方位を同時に求める方法として、ガウスニュートン法が広く知られている。非特許文献2に誤差関数を定義して、誤差関数を最小にする座標成分X、Y、Zの三成分を求める方法、つまりが記載されている。ただし、と の求め方は記載されておらず、誤算関数から座標成分X、Y、Zの三成分および方位、 を求める方法は記載されていない。

20

なお、非特許文献2に記載されている磁界ベクトルセンサは、厳密には3軸センサの測定位置の間には1.8mmのずれがあり、それを無視して磁界ベクトルセンサとみなして計算をしており、測定位置の誤差は5.5mmと大きく、実用できるレベルのものではない。

【0013】

理論的には、位置と方位の計算精度は、磁石の強さと磁界ベクトルセンサの検出力および磁石体とセンサグリッドの距離などに左右される。また磁界ベクトルセンサグリッドの密度と数およびエリア面積、センサグリッドの組み立て精度にも左右される。さらに計算に使用するデータの取得・選択方法および計算プログラムのアルゴリズムとデータ処理の仕方にも左右される。これら周知技術を基礎に、磁石体の位置方位計算の精度向上が追及されている。

30

【0014】

しかし従来の発明は、いずれも実際には各軸の測定位置が1mmから2mm程度ずれがある磁界ベクトルセンサを利用しているか、検出力が100nTレベルと非常に低いものを使用しているため、位置精度は3mm~5mm程度に過ぎない。本発明者は、使用する優れた検出力を持ち、ピンポイントの位置の磁界ベクトルを測定できる磁界ベクトルセンサを使用することが大前提になることに気が付き、まず初めに高性能な磁界ベクトルセンサの開発を目指すことにした。

40

微小磁石(ミニ磁石)のサイズは直径が0.3~2mm、長さが1~15mm、磁石体の磁気モーメントを $1 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10}$ Wbmと非常に小さく、磁界ベクトルセンサグリッドのエリア面積は一辺が40~200mmの正方形と十分な広さとして、さらに磁石体と磁界ベクトルセンサグリッドの距離を20~100mmと十分な距離を確保するという条件において、高性能な磁界ベクトルセンサとガウスニュートン法を用いて磁石体の位置精度を従来の5mm程度から0.5mm以下と改善し、かつ、1度以下の方位精度および1Hzから50Hzも測定速さの実現を可能とする磁石体の位置・方位検出シ

50

システムを発明することを目指すことにした。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0015】

【特許文献1】特表2001-524012号公報

【特許文献2】特許第3781056号公報

【特許文献3】特開2004-61380号公報

【特許文献4】特表2013-518273号公報

【特許文献5】特許第6506466号公報

【特許文献6】特許第6021239号公報

10

【非特許文献】

【0016】

【非特許文献1】(株)エムティアイ社 ホームページ 製品情報FGS3-1000

【非特許文献2】永岡隆、内山明彦著：立石科学技術振興財団助成研究成果集：15号 52
55ページ(2006年)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0017】

すでに開発されている磁石体の位置方位計算システムに関する原理的技術を前提に、
本発明は、微小な磁石体の位置方位精度と測定速さを大幅に改善することを目指したものである。

20

【0018】

そのための技術開発課題は、第1の課題は、検出力が0.1nTから10nTの磁界ベクトルセンサの開発である。小型で微小磁界を検出することができる磁界センサとしてGSRセンサが開発されており、本発明はGSRセンサを使って、ピンポイントの測定位置の磁界(H_x 、 H_y 、 H_z)を、 H_x 、 H_y 、 H_z の測定誤差を同じとすることができる磁界ベクトルセンサの構造を考案することである。

【0019】

第2の課題は、適切にデザインされた磁界ベクトルセンサグリッドの設計である。センサグリッドの密度が増えるほど位置・方位計算の精度は向上するが、磁石体から離れた点の測定精度は著しく低下し、そのような測定点の測定値を含めると逆に位置・方位計算の精度は低下する。またセンサの数が増えるほど電子回路の制御速度および位置方位の計算速度が低下するので、センサグリッドの大きさと密度の最適化を図る必要がある。

30

【0020】

第3の課題は、ガウスニュートン法を基礎にして、精度よくかつリアルタイム性に優れた磁石体の位置と方位を計算する計算プログラムの考案である。磁界ベクトルセンサグリッドで、磁石体が発する磁界ベクトルを各測定点で磁界ベクトルとして測定した場合、反復プロセスを必要とせず、測定値と理論値のずれを誤差として、それらを加算した関数として誤差関数を定義して、その最小値から X 、 Y 、 Z および、を計算する方法は、ガウスニュートン法として広く知られている。

40

理論的には、計算に使用する測定値が多いほど、計算精度は高くなる。しかし、本発明においては、磁石体が小さく、磁石体が発する磁界は微弱であるため、磁石体の位置から測定位置が離れるほど、測定値に対する誤差が増大する。そのような測定値を計算に含めると逆に計算精度が低下することになる。本発明では、グリッドのエリア面積とセンサ密度を工夫した上で、誤差の小さな測定値のみを取捨選択して、計算精度を確保することに努めることにした。

【課題を解決するための手段】

【0021】

本発明は、磁石体、磁界ベクトルセンサ、磁界ベクトルセンサグリッド、センサグリッドデータ処理回路および位置方位計算プログラムとそれを内蔵した位置方位演算装置とから

50

なっている。そこで、本発明者は、まず第1の課題である高い検出力を有する磁界ベクトルセンサを開発に取り組んだ。

【0022】

本発明者は、GSRセンサに着目して、磁界検出力は10 nT以下で、サイズは6 mm × 6 mm × 高さ3 mm以下の超小型で磁界検出力の優れた磁界ベクトルセンサを開発に成功した。

【0023】

GSRセンサについては、特許文献5に詳細に記載されている。GSRセンサは、図1に示すように、基板上に導電性を有する磁界検出用磁性ワイヤとそれに巻回した周回コイルで形成した検出用コイルとワイヤ通電用の電極2個とコイル電圧検出用電極2個の電極を接続する配線で構成されるGSR素子とその磁性ワイヤにGHzの周波数を持つパルス電流を流す手段とパルス電流を流した時に生じるコイル電圧を検知し、コイル電圧を外部磁界Hに変換する電子回路とからなる超高感度マイクロ磁界センサである。

10

【0024】

GSRセンサの検出力は磁性ワイヤの長さに比例して向上する。本発明者は、10 nT以下の微小磁界を微小空間範囲で測定するために、長さが0.4 ~ 3 mmで、幅が0.2 ~ 0.4 mmの小型のGSR素子を製作し、使用することにした。

【0025】

電子回路は、図2に示すGSRセンサの電子回路を採用し、特定用途用集積回路(以下、ASICという。)を作製して、本発明に用いた。その結果、GSRセンサの検出能は0.1 ~ 10 nTの範囲にあった。

20

【0026】

磁界ベクトルセンサ素子は、図3および図4に示すように、四角錐台の4つの斜面上に、GSR素子を4回対称かつ鏡面对称に貼り付けたものである。サイズは、上面の四角形の一辺の長さはGSR素子の幅に相当し、0.2 ~ 0.4 mmである。底辺は、GSR素子の長さの2 cos 倍 + 上面の四角形の一辺の長さに相当し、最小0.6 mmから最大6 mmである。台座の高さは、GSR素子の長さのsin 倍である。傾斜角度は、20度から45度とした。

【0027】

このGSR素子を、傾斜角を持つ四角錐台の斜面上に4個を4回対称で鏡像(ミラー)対称に貼り付けて、磁界ベクトルセンサ素子を作製した。4個の素子の出力電圧は図5に示す電子回路によって処理され、それら4個素子の磁界測定値 H_{x1} 、 H_{x2} 、 H_{y1} 、 H_{y2} となり、それらの測定値を使って、 $H_x = (1/2 \cos) (H_{x1} - H_{x2})$ 、 $H_y = (1/2 \cos) (H_{y1} - H_{y2})$ 、センサ $H_z = (1/4 \sin) (H_{x1} + H_{x2} + H_{y1} + H_{y2})$ を計算して、測定位置における磁界(H_x 、 H_y 、 H_z)を求めることができる。

30

【0028】

傾斜角が35.2度($\tan = 1/2$ 、 $\sin = 1/3$ 、 $\cos = 2/3$)の時、 $H_x = 6/4 (H_{x1} - H_{x2})$ 、 $H_y = 6/4 (H_{y1} - H_{y2})$ 、 $H_z = 3/4 (H_{x1} + H_{x2} + H_{y1} + H_{y2})$ となる。この時、 H_x 、 H_y 、 H_z の測定誤差 x 、 y 、 z がすべて同じ、つまり $x = y = z = 0.86$ となるので、最も推奨されるべき角度である。実用的には z が $x (= y)$ に比べて、25%程度の差を許容できるとすると、 z は20度から45度程度となる。水平面方向の磁界精度を重視する場合には、35.2度から20度程度へと少し小さくし、垂直方向の磁界の精度を重視する場合は、35.2度から45度へと少し大きくすることができる。

40

【0029】

磁界ベクトルセンサの組み立ては、図6に示すように、4個のGSR素子を組付けた磁界センサ素子をセンサ基板に設置し、磁界センサ素子の電極とセンサ基板の電極とを接合配線する。

さらに、ASICと4個のGSR素子を組付けた磁界センサ素子およびそれらを載せるセ

50

ンサ基板の3部品を組み立てた。

電子回路をASICとして、そのASICの表面配線図を図7に示す。またセンサ基板の表面配線図を図8に示す。

配線は、各素子の4つの電極と基板表面上の16個の素子電極とを導線で接続する。センサ基板上の16個のASIC素子電極とASIC側の素子電極とをハンダ接合する。さらに、ASIC側の外部接続電極とセンサ基板表面側の外部接続電極とをハンダ接合する。

【0030】

素子台座の底辺がASICよりも十分大きい場合、つまり底辺が2mm以上の場合には、底辺側の中央部を中空として、そこにASICを取り付け、両者をセンサ基板上に設置した。底辺が2mm以下の場合には、四角錐台形状の磁界センサ素子の底面に直接ASIC裏面を貼り付けることにした。

10

【0031】

図9に、磁界センサ素子とASICとセンサ基板を組み合わせた磁界ベクトルセンサの組み立て図を示す。センサ基板には、表面側には16個の素子電極と16個のASICの素子電極および複数個の外部接続電極を設け、表面側の外部接続電極はスルーホールを介して裏面側の対応する外部接続電極に接続する配線構造を有している。

これにより素子で検知した外部磁界をASICで信号処理して、磁界ベクトル(H_x 、 H_y 、 H_z)を求め、それをセンサ基板裏面側の外部接続電極から取り出すことができる。

【0032】

GSR素子とASICとの結合は、GSR素子の特設ASIC表面に形成し、4個のGSRセンサを四角錐台の斜面に4個を4回対称でミラー対称に貼り付けて、磁界ベクトルセンサ素子を作製して使用してもよい。

20

【0033】

本発明において、GSR素子を単体で斜面に設置して、コイル電圧をASICまで配線した場合、コイル電圧が低下したり、外部ノイズを感じずる場合がある。このような場合、GSR素子を集積回路ASICの上に直接形成して、GSRセンサ(on-ASICタイプのGSRと呼称する。)とし、それを四角錐体の斜面に張り付けて磁界ベクトルセンサとしてもよい。なお、on-ASICタイプのGSRセンサについては、本発明者が特開2019-191016により開示している。

【0034】

第2の課題である磁界ベクトルセンサグリッドの設計については、エリア面積は、測定部位を考慮して、40mmから200mmの正方形とする必要がある。測定部位によっては、長方形とすることもできる。これを前提に、設計において最も精度を左右する設計因子は、磁界ベクトルセンサグリッドの磁界ベクトルセンサ間隔の影響である。センサグリッド基板上に磁界ベクトルセンサを5~15mmの間隔にて少なくとも25個配置することにした。

30

【0035】

そこで、磁界ベクトルセンサグリッドの磁界ベクトルセンサ間隔の影響について後述する位置方位計算プログラムを使って調査した結果、図13(a)に示すように、磁界ベクトルセンサ間隔が1/2倍と小さくなると4倍程度の位置精度の改善が見られた。方位精度は、図13(b)に示すように、磁界ベクトルセンサ間隔が1/2倍と小さくなると2倍程度の方位精度の改善が見られた。なお調査条件は、磁界ベクトルセンサの検出力は1nT、磁気モーメントは 50×10^{-10} Wbm、磁界ベクトルセンサグリッドと磁石体との距離は40mmである。

40

【0036】

しかし、磁界ベクトルセンサの検出力は、磁界ベクトルセンサのサイズが小さくなるほど低下するので、磁界ベクトルセンサ間隔と磁界ベクトルセンサのサイズとはトレードオフの関係にあり、この関係を考慮して、本発明では、0.5mm以下の位置精度と1度以下の方位精度を得るために磁界ベクトルセンサ間隔は2mm以上、10mm以下とした。現状のGSRセンサの性能を前提にするとその間隔は好ましくは4~8mmである。

50

【 0 0 3 7 】

磁気モーメント、センサの検出力、グリッドの画素サイズの組み合わせは、基本的には0.5 mm以下の位置精度を得るために適当な組み合わせで使用される。あるいは0.5 mmよりも厳しい要求値0.1 mm以下の仕様の場合、その組み合わせをより最適化する必要がある。逆にやや大きな位置精度、例えば1 mm以下の仕様の場合にも本発明は使用可能である。

【 0 0 3 8 】

上記磁界ベクトルセンサを使って磁界ベクトルセンサグリッドを作製した。磁界ベクトルセンサグリッドの基板は、一辺が40 mm～200 mmの正方形にて作製した。なお、本発明の磁界ベクトルセンサグリッド基板はこのサイズや形状に限定されるものではない。磁界ベクトルセンサグリッドの磁界ベクトルセンサの間隔は2～10 mmとした。磁界ベクトルセンサグリッドのエリア面積が小さい場合、少なくとも25個以上の磁界ベクトルセンサを配置することによって、位置と方位を十分な精度で求めることが可能となる。

【 0 0 3 9 】

磁界ベクトルセンサグリッド基板は、図10に示すように、列ごとにマルチプレクサMUXと連結し、次の全データが最終MUXと連結し、外部の信号処理回路に転送される。電源配線は、図示していないが、電源配線VDDとグランド配線GNDとが各センサに連結して、センサグリッド稼働時にはすべての磁界ベクトルセンサに電源が供給できるようにしている。

磁界ベクトルセンサグリッドの組み立て精度については、極力小さくすることが求められて、10 μm以下が望ましい。

【 0 0 4 0 】

第3の課題である磁界ベクトルセンサグリッドを使った位置と方位の計算原理については、ガウスニュートン法が知られている。非特許文献2では、ガウスニュートン法に従って、所定の位置で所定の向きに向いた磁石から発する磁界を各磁界ベクトルセンサ位置における磁界理論値と磁界実測地の差を ϵ_{ij} 誤差として、誤差関数 $E_{ij} = (\epsilon_{ij})^2$ を作成し、それを磁石の位置 X 、 Y 、 Z および磁石の向き θ と ϕ で偏微分して、連立方程式を求め、誤差関数が最小値を取る値を計算して、磁石の測定位置 X 、 Y 、 Z および磁石の向き θ 、 ϕ を計算して求めることが知られている。

【 0 0 4 1 】

しかし、これまで、高い磁界検出力を有するFGセンサなどを使用した3軸磁界センサは、サイズが30 mmと大きく、センサ相互間の位置ずれも1 mmから3 mmと大きいことから、磁界ベクトルを精度よく測定できなかったために位置精度は4 mm程度が限界であった。また既存の磁界ベクトルセンサとしては、ホールセンサタイプやGSRセンサタイプがあるが、検出力(=センサの誤差)が50 nTから1000 nTと低く、位置の計算精度が低いという問題であった。つまり、サイズと検出力はトレードオフの関係にあり、既存磁界ベクトルセンサを使用する限り限界があった。

本発明では、磁界ベクトルセンサの検出力を市販品の100倍以上、あるいはサイズを1/10以下にすることで緻密なセンサ密度を有する磁界ベクトルセンサグリッドを製作し、それを使用することを前提に、位置と方位を同時に求める計算プログラム(図11)を作成した。

【 0 0 4 2 】

ガウスニュートン法に基づく位置と方位を同時に求める計算プログラムは次の通りである。

磁界ベクトルセンサグリッドの中心を原点にして、グリッド面をXY平面、XY平面に垂直軸をZ軸としたXYZ座標系を指定して、磁石体(7)の位置を (X, Y, Z) とし、Z軸に対する回転角を ϕ とし、X軸に対する回転角を θ として、さらに3次元磁界センサはグリッド上の原点を中心に、横方向に $-i$ から $+i$ 、縦方向に $-j$ から $+j$ の位置 (i, j) に $i \times j$ 個の磁界センサが配置されている。ここでセンサの間隔はX軸方向、Y軸方向ともに距離 d とする。これらの磁界ベクトルセンサの測定値 $3 \times i \times j$ 個の測定値を使って、磁石体(7)の位置 X 、 Y 、 Z と方位 θ と ϕ を計算するものである。

【 0 0 4 3 】

10

20

30

40

(1) 先ずステップ101にて、センサグリッド位置 (i, j) における磁界を計測して磁界測定値 \vec{H}_{ij} を求める。

(2) ステップ102にて、磁石体 \vec{M} の直下の最も近い、つまり \vec{H}_{ij} 絶対値が最も大きい磁界センサの位置 (a, b) 番目をグリッドの計算上の計算上の原点 (0, 0, 0) として計算上のグリッド座標系 O-x'y'z' を指定し、この座標系で改めてセンサグリッド位置番号 (i, j) を決める。ここで、 \vec{H}_{ij} 絶対値の最大値 S が、S/N比500以上であることを確認する。また計算上の原点として、それを中心に磁界ベクトル \vec{H}_{ij} の絶対値 S に対してセンサの測定誤差の値 N の割合 S/N が、2.5以上となる測定点を少なくとも9個、最大で49個存在することを確認する。

なお、磁界ベクトル \vec{H}_{ij} の絶対値 S が、S/N比が2.5以下の測定点については、測定誤差が大きくなるので、計算には加えないものとする。計算上の原点から離れるほど、 \vec{H}_{ij} 絶対値は距離の3乗に比例するので、距離が4倍離れた点では、 \vec{H}_{ij} 絶対値は60倍程度小さくなって、計算上の原点でS/N比が500であっても、8程度と低下するので、計算には含まないものとする。つまり精度の高い測定値だけを使って、計算データは少なくとも9個、最大で49個を入力して、計算を実行することにした。

(3) 次に、ステップ103にて、磁石体 \vec{M} がセンサグリッドの (i, j) 番目のセンサ位置である P_{ij} に作る磁界の理論値 \vec{H}_{ij} を式(1)から求める。ここでまた磁石体の傾きを Z 軸に対する回転角を ϕ 、X 軸に対する回転角を θ とする。

【数1】

$$\vec{H}_{ij} = 1/4\pi\mu_0 \cdot \{ -\vec{r}_{ij} / r_{ij}^3 + 3(\vec{M} \cdot \vec{r}_{ij}) \vec{r}_{ij} / r_{ij}^5 \}$$

ここで、磁石体 \vec{M} と位置 P_{ij} までの距離ベクトルを \vec{r}_{ij} とする。 \vec{H}_{ij} は、位置 x, y, z と方位角 θ, ϕ の関数となる。

(4) 次に、ステップ104にて、磁界理論値と磁界測定値との差を測定誤差 e_{ij} として、求める。

$$e_{ij} = \vec{H}_{ij} - \vec{H}_{ij}$$

(5) 次に、ステップ105にて、ステップ103により求めた測定誤差 e_{ij} の誤差関数 E_{ij} を誤差の平方和として求める。

$$E_{ij} = \sum e_{ij}^2$$

(6) 次に、ステップ106にて、ガウスニュートン法で、ステップ104により求めた誤差平方和が最小となる x, y, z, θ, ϕ を、以下の連立方程式を使って求める。
 $\partial E_{ij} / \partial x = 0, \partial E_{ij} / \partial y = 0, \partial E_{ij} / \partial z = 0, \partial E_{ij} / \partial \theta = 0, \partial E_{ij} / \partial \phi = 0$

(7) 次にステップ107にて、計算上の座標系 O-x'y'z' の x と y の値を使って、センサグリッド座標系 O-XY の値 X と Y をステップ106にて求める。同時に Z, $\theta = \theta, \phi = \phi$ も求める。

$$X = x + d \times a, Y = y + d \times b, Z = z, \theta = \theta, \phi = \phi$$

【0044】

上記計算プログラムを使って位置計算をして、磁気モーメントと位置精度との関係を調査した。位置 X、Y、Z の位置精度は、磁石体の高さに依存するが、言い換えれば磁石体とセンサグリッド面との距離に依存する。本実験は、高さを 40 mm と固定し、磁石体を X、Y、Z 方向に ± 10 mm の移動を繰り返して、もとの位置に戻るたびに位置測定を繰り返して、そのばらつきを測定した。

調査条件は、磁界センサグリッドのエリア (196 mm × 196 mm) に磁界ベクトルセンサの間隔は 6 mm、磁界ベクトルセンサの数は 17 個 × 17 個、磁石体と磁界センサグリッドとの距離は 40 mm、磁界ベクトルセンサの磁界検出力は 0.1 nT、1 nT および 10 nT とし、磁石の磁気モーメントの影響を調査した。

その結果、図 12 (a) に示すように、磁気モーメントが増加するほど位置精度は向上した。磁気モーメントが、4 倍になると精度が 4 倍、9 倍になると 9 倍、100 倍になると 100 倍改善するようであった。

【0045】

同様に、上記計算プログラムを使って方位を計算して、磁気モーメントと方位精度との関係を調査した。方位 θ, ϕ の方位精度は、X 方向の水平向きを基準に、XY 面上で ± 10 度の θ, ϕ の回転を繰り返して、また XZ 面に沿って ± 10 度の θ, ϕ の回転を繰り返して、もとの方位に戻るたびに方位測定を繰り返して、そのばらつきを測定した。

調査条件は、上記の位置精度を求めた条件と同じとした。

その結果、図 12 (b) に示すように、磁気モーメントが増加するほど方位精度は向上した。

なお、Y 方向の位置精度および方位精度に及ぼす磁気モーメントの影響と磁界センサ間隔の影響についても同様の結果が得られた。

【0046】

また、磁界ベクトルセンサの検出力を10 nTから0.1 nTへと100倍増加させると、位置精度は100倍程度改善し、方位精度は100倍程度増加していた。本発明では、0.5 mm以下の位置精度と1度以下の方位精度を得るために、磁石体の磁気モーメントを $1 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10}$ Wb mおよび磁界センサの検出力を10 nT以下とすることにした。

【0047】

本発明は、磁石体のサイズを直径0.3~2 mm、長さを3~15 mmと可能な限り小さく、つまり磁石体の磁気モーメントを $1 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10}$ Wb mと小さくし、磁界ベクトルセンサグリッドに用いた磁界ベクトルセンサの検出力を0.1~10 nTとし、磁界ベクトルセンサグリッドの磁界ベクトルセンサ間隔を5~15 mmとして、磁石体が発する磁界を磁界ベクトルセンサグリッドで測定し、それらの全測定データの内部S/N比が25以上の測定点のみを使って、ガウスニュートン法に基づく位置と方位計算プログラムで計算して、センサグリッドデータ処理回路で処理することを特徴とするものである。これによって、磁石体の位置と方位を、位置精度は0.5 mm以下で、方位は1度以下で求めることができる磁石体の位置・方位検出装置の提供が可能となる。

【発明の効果】

【0048】

本発明により、カテーテルや胃カメラなどの生体内ナビゲーションシステム、デンタル治療のハンドピースの精密な制御、顎堤や歯牙の精密な動きの把握が可能となり、治療レベルの大幅な向上が期待される。

【図面の簡単な説明】

【0049】

【図1】GSR素子の平面図である。

【図2】GSRセンサ用の電子回路図である。

【図3】実施例に係る四角錐台形状からなる磁界センサ素子の平面図である。

【図4】実施例に係る四角錐台形状からなる磁界センサ素子のA1-A2線の断面図である。

【図5】実施例に係る磁界ベクトルセンサ用の電子回路図である。

【図6】実施例に係る磁界センサ素子とセンサ基板との電極配線図である。

【図7】実施例に係るASICの表面配置図である。

【図8】実施例に係るセンサ基板の表面配線図である。

【図9】実施例に係る磁界ベクトルセンサの組み立て図である。

【図10】実施例に係る磁界ベクトルセンサグリッドと配線図である。

【図11】計算プログラムのフローチャート図を示す。

【図12】(a)は位置精度に及ぼす磁石の磁気モーメントの影響を示し、(b)は方位精度に及ぼす磁気モーメントの影響を示す図である。

【図13】a)は位置精度に及ぼす磁界ベクトルセンサの間隔の影響を示し、(b)は方位精度に及ぼす磁界ベクトルセンサの間隔の影響を示す図である。

【図14】実施例に係るon-ASICタイプのGSRセンサを用いる磁界センサ素子の平面図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0050】

本発明の磁石体の位置・方位検出装置は、磁石体、磁界ベクトルセンサ、磁界センサグリッド、センサグリッドデータ処理回路および位置方位演算装置からなる。

磁石体としては、サイズは、直径は0.3~2 mm、長さは1~15 mmで、磁石体の磁気モーメントを $1 \times 10^{-10} \sim 500 \times 10^{-10}$ Wb mとし、

磁界ベクトルセンサは、磁界センサ素子3に4個のGSRセンサ素子35を図3および図4に示すように、四角錐台の4つの傾斜角度37を有する斜面上に、4回対称かつ鏡面对称に貼り付けたものである。

【0051】

G S R 素子は、特許文献 5 に詳細に記載されているので引用する。以下に、要旨を説明する。図 1 に示すように、基板 1 1 の上に導電性を有する磁界検出用磁性ワイヤ 1 2 とそれに巻回した周回コイルで形成した検出用コイル 1 3 とワイヤ通電用の電極 (1 5) 2 個とコイル電圧検出用電極 (1 8) 2 個の電極を接続する配線で構成されている。

【 0 0 5 2 】

G S R センサは、G S R 素子の磁性ワイヤに G H z の周波数を持つパルス電流を流す手段とパルス電流を流した時に生じるコイル電圧を検知し、コイル電圧を外部磁界 H に変換する電子回路とからなる超高感度マイクロ磁界センサで、G S R センサの検出力は磁性ワイヤの長さに比例して向上する。そこで、本発明者は、1 0 n T 以下の微小磁界を微小空間範囲で測定するために、長さ 0 . 4 ~ 3 m m で、幅が 0 . 2 ~ 0 . 4 m m の小型の G S R 素子を設計した。

10

電子回路は、図 2 に示す G S R センサの電子回路 2 を採用し、特定用途用集積回路 (以下、A S I C という。) を作製して、本発明に用いた。

【 0 0 5 3 】

磁界ベクトルセンサ素子 3 は、この G S R 素子 3 5 を、傾斜角 (3 7) を持つ四角錐台の台座 3 0 の斜面に 4 個を 4 回対称でミラー対称に貼り付けたものである。サイズは、上面 3 1 の四角形の一辺の長さは G S R 素子の幅に相当し、0 . 2 ~ 0 . 4 m m である。底辺 3 2 は、G S R 素子の長さの $2 \cos$ 倍 + 上面の四角形の一辺の長さに相当し、最小 0 . 6 m m から最大 6 m m である。台座の高さは、G S R 素子 3 5 の長さの \sin 倍である。傾斜角度 は、2 0 度から 4 5 度とした。

20

【 0 0 5 4 】

磁界ベクトルセンサ 4 は、図 6 に示すように、4 個の G S R 素子 3 5 を組付けた磁界センサ素子 3 をセンサ基板 4 0 に載置し、磁界センサ素子 3 の電極 4 1 (6 1) とセンサ基板の A S I C 電極とを接合配線し、さらに、A S I C と 4 個の G S R 素子を組付けた磁界センサ素子 3 およびそれらを載せるセンサ基板 4 0 の 3 部品を組み立てて製作した。

【 0 0 5 5 】

電子回路を A S I C として、その A S I C の表面配線図を図 7 に示す。またセンサ基板の表面配線図を図 8 に示す。

配線は、各素子の 4 つの電極と基板表面上の 1 6 個の素子電極とを導線で接続する。センサ基板上の 1 6 個の A S I C 素子電極と A S I C 側の素子電極とをハンダ接合する。さらに、A S I C 側の外部接続電極とセンサ基板表面側の外部接続電極とをハンダ接合する。

30

【 0 0 5 6 】

台座 3 0 の底辺 3 2 が A S I C よりも十分大きい場合、つまり底辺 3 2 が 2 m m 以上の場合には、底辺側の中央部を中空 3 8 として、そこに A S I C を取り付け、両者をセンサ基板上に設置した。底辺が 2 m m 以下の場合には、四角錐台形状の磁界センサ素子の底面に直接 A S I C 裏面を貼り付けることにした。

【 0 0 5 7 】

図 9 に、磁界センサ素子 3 と A S I C 4 0 A とセンサ基板 4 0 を組み合わせた磁界ベクトルセンサ 4 A の組み立て図 (断面図) を示す。センサ基板 4 0 には、表面側には 1 6 個の素子電極 4 1 と 1 6 個の A S I C の素子電極および複数個の外部接続電極を設け、表面側の外部接続電極はスルーホール 4 4 を介して裏面側の対応する外部接続電極に接続する配線構造を有している。

40

これにより磁界センサ素子 3 で検知した外部磁界を A S I C 4 0 A で信号処理して、磁界ベクトル (H_x 、 H_y 、 H_z) を求め、それをセンサ基板裏面側の外部接続電極から取り出すことができる。

【 0 0 5 8 】

磁界ベクトルは、4 個の G S R 素子の出力電圧は図 5 に示す電子回路によって処理され、それら 4 個の G S R 素子の磁界測定値 H_{x1} 、 H_{x2} 、 H_{y1} 、 H_{y2} となり、それらの測定値を使って、 $H_x = (1 / 2 \cos) (H_{x1} - H_{x2})$ 、 $H_y = (1 / 2 \cos) (H_{y1} - H_{y2})$ 、センサ $H_z = (1 / 4 \sin) (H_{x1} + H_{x2} + H_{y1} + H_{y2})$

50

)を計算して、測定位置における磁界(Hx、Hy、Hz)を求めることができる。

【0059】

傾斜角度が35.2度(tan = 1/2、sin = 1/3、cos = 2/3)の時、Hx = 6/4(Hx1 - Hx2)、Hy = 6/4(Hx1 - Hx2)、Hz = 3/4(Hx1 + Hx2 + Hy1 + Hy2)となる。この時、Hx、Hy、Hzの測定誤差x、y、zがすべて同じ、つまりx = y = z = 0.86となるので、最も推奨されるべき角度である。実用的にはzがx(=y)に比べて、25%程度の差を許容できるとすると、傾斜角度は20度から45度程度となる。水平面方向の磁界精度を重視する場合には、35.2度から20度程度へと少し小さくし、垂直方向の磁界の精度を重視する場合は、35.2度から45度へと少し大きくすることができる。

10

【0060】

磁界ベクトルセンサの性能は、ピンポイントの位置における磁界ベクトル(Hx、Hy、Hz)が測定できて、しかもHx、Hy、Hzの測定感度および測定ノイズは同一で、その磁界検出力は0.1nTから10nT以下で、そのセンサの形状は四角錐体状で、そのサイズは底辺が2mmから6mm、高さが3mm以下で、超小型で磁界検出力に優れている。

【0061】

本発明において、GSR素子を単体で斜面上に設置して、コイル電圧をASICまで配線した場合、コイル電圧が低下したり、外部ノイズを感じることがある。このような場合、GSR素子を集積回路ASICの上に直接形成して、GSRセンサ(on-ASICタイプのGSRセンサと呼称する。)とし、それを四角錐体の斜面上に張り付けて磁界ベクトルセンサとしてもよい。

20

【0062】

磁石体から発する磁界を計測する磁界ベクトルセンサグリッドは、磁界ベクトルセンサを磁界ベクトルセンサ基板の平面上に5~15mmの磁界ベクトルセンサ間隔にて少なくとも25個の配置からなり、磁界ベクトルセンサグリッドにより計測した測定データを処理するセンサグリッドデータ処理回路およびそのセンサグリッドデータから位置と方位を算出する位置方位演算装置とからなる。

【0063】

センサグリッドデータ処理回路および位置方位演算装置は、磁石体(10)の位置と方位を、前記磁界センサグリッドの中心を原点にして、グリッド面をXY平面、XY平面に垂直軸をZ軸としたXYZ座標系を指定して、前記磁石体(10)の位置を(X、Y、Z)とし、Z軸に対する回転角をφとし、X軸に対する回転角をθとして、X、Y、Zおよびθ、φをガウスニュートン法に基づいて計算するものである。

【0064】

以下、詳細に説明する。

<磁石体>

磁石体の磁石のサイズは、直径は0.3~2mm、長さは1~15mmで、磁石体の磁気モーメントは1x10⁻¹⁰~1000x10⁻¹⁰Wbmとする。磁石体は小さいほど好ましいが、小さいと磁気モーメントが小さくなって発生する磁界が弱くなり、位置決め精度が低下することから上記のサイズとする。

40

【0065】

<磁界ベクトルセンサ>

磁界ベクトルセンサグリッド8の1つの画素となる磁界ベクトルセンサ4について説明する。

磁界ベクトルセンサ4は、図9の組み立て図、図3および図4の磁界センサ素子3に示すように、センサ基板40上に台座30と台座30の4つの斜面上に配置されたGSR素子35とからなる磁界センサ素子40Gが搭載され、ASIC40Aおよび電極・配線から構成される。

この磁界ベクトルセンサ4は、3次元磁界ベクトルを測定できて、磁界検出力が0.1~10nTである。

50

【 0 0 6 6 】

G S R 素子の構造は、図 1 に示す。

G S R 素子のサイズは、長さは 0 . 4 ~ 3 m m で、幅は 0 . 2 ~ 0 . 4 m m とする。

【 0 0 6 7 】

電子回路は、図 2 に示す G S R センサの電子回路 2 を採用し、集積回路 (A S I C) を作製した。2 個の検波タイミング調整回路 2 5 a、2 5 b 使用し、サンプルホールド回路では 2 個のコンデンサ 2 8 a、2 8 b と 2 個の電子スイッチ 2 7 a、2 7 b を使用している。なお、本発明の目的に合致する限りでは、本発明はこの組み合わせにこだわるものではない。

【 0 0 6 8 】

磁界センサ素子 4 0 G (3) は、図 3 および図 4 に示すように、傾斜角度 (傾斜角度 3 7) = 3 5 . 2 度 ($\tan = 0 . 5$ 、 $\sin = 1 / 3$ 、 $\cos = 2 / 5$) を持つ四角錐台の斜面 (台座 3 0) に、上記 G S R 素子 (1、3 5) の 4 個を 4 回対称に貼り付けたものである。

【 0 0 6 9 】

4 個の G S R 素子は、図 8 に示す電子回路 2 A に連結され、4 個の G S R 素子 (7 0 X 1、7 0 X 2、7 0 Y 1、7 0 Y 2) の出力 H x 1、H x 2、H y 1、H y 2 は信号処理回路で処理された後、演算回路で H x、H y、H z に変換された後に、データ通信回路から出力される。

【 0 0 7 0 】

磁界ベクトルセンサの配線組み立ては、まず、図 6 および図 9 に示すように、磁界センサ素子 4 0 G とセンサ基板 4 0 がワイヤ連結される。A S I C 表面配線図 5 は、図 7 に示すように、素子電極 5 1 と出力電極 5 2 とからなっている。

センサ基板 4 0 には、図 5 に示すように、表面側には 1 6 個の素子電極 6 1 と 1 6 個の A S I C の素子電極 6 2 および複数個の外部接続電極を設け、表面側の外部接続電極はスルーホールを介して裏面側の対応する外部接続電極に接続する配線構造を有している。

A S I C 4 0 A をセンサ基板 4 0 の表面に接合するが、その際 A S I C 4 0 A の出力電極とセンサ基板 4 0 の A S I C 用出力電極 5 2 を連結し、A S I C の出力電極 5 2 とセンサ基板の出力電極 6 3 とを連結することによって、磁界センサの配線がすべて連結し、センサ基板 4 0 のスルーホール 4 4 を介してセンサ基板裏面にある出力電極 4 6 につながることになる (図 7、図 8) 。

【 0 0 7 1 】

組み立てした磁界センサ 4 A は、図 9 に示すように、A S I C 4 0 A と 4 個の G S R 素子 4 0 G を組付けた磁界センサ素子およびそれら載せるセンサ基板 4 0 の 3 部品の構造からなっている。A S I C の配置位置については、図 3 および図 4 に示すように、台座 3 0 の底辺 3 2 が A S I C 4 0 A よりも十分大きい場合、つまり底辺が 2 m m 以上の場合には、底辺側の中央部を中空 3 8 として、そこに A S I C 4 0 A を取り付け、両者をセンサ基板 4 0 上に設置した。底辺が 2 m m 以下の場合には、四角錐台形状の磁界センサ素子の底面 3 6 に直接 A S I C 裏面を貼り付けることにした。

【 0 0 7 2 】

磁界センサ 4 は、磁界センサ素子 4 0 G で検知した外部磁界を A S I C 4 0 A で信号処理して、磁界測定値 H x 1、H x 2、H y 1、H y 2 を求め、それを演算処理回路で、 $H x = (1 / 2 \cos) (H x 1 - H x 2)$ 、 $H y = (1 / 2 \cos) (H y 1 - H y 2)$ 、 $H z = (1 / 4 \sin) (H x 1 + H x + H y 1 + H y)$ を計算して、測定位置における磁界 (H x、H y、H z) を求め、それをセンサ基板裏面側の外部接続電極から取り出すことができる。

なお、3 次元磁界ベクトルセンサとしては、磁界検出力は、0 . 1 ~ 1 0 n T を有する限り、その構成、種類にこだわるものではない。

【 0 0 7 3 】

< 磁界ベクトルセンサグリッド >

10

20

30

40

50

次に、磁界ベクトルセンサ4を磁界ベクトルセンサリッドにした場合、画素は磁界ベクトルセンサの大きさは最小0.6mmから最大6mmであるが、配線の幅を考慮すると画素の大きさは、最小2mmから最大10mmとなる。

【0074】

センサグリッド基板85は、図10に示すように、列ごとにマルチプレクサMUX82と連結し、次に全データが最終MUX83と連結し、外部の信号処理回路に転送される。電源配線は、電源配線VDDとグランド配線GNDとが各センサに行配線を使って連結している。

【0075】

<センサデータグリッド処理回路および位置と方位を算出する位置方位演算装置>

センサグリッドデータ処理回路および位置方位演算装置は、磁界センサグリッドの中心を原点として、グリッド面をXY平面、XY平面に垂直軸をZ軸としたXYZ座標系を指定して、前記磁石体(M)の位置を(X, Y, Z)とし、Z軸に対する回転角をφとし、X軸に対する回転角をθとして、さらに3次元磁界センサはグリッド上の原点を中心に、横方向に-1から+1、縦方向に-jから+jの位置(i, j)に1×j個の要配置されている。ここでセンサの間隔はX軸方向、Y軸方向ともに距離dとする。これらの磁界ベクトルセンサの測定値3×1×j個の測定値を使って、磁石体(M)の位置X、Y、Zと方位θ、φを計算するものである。

図11は、センサデータグリッド処理およびそのセンサグリッドから位置と方位を算出する計算プログラムのフローチャートである。以下、詳細に説明する。

【0076】

計算プログラムは次の通りである。

(1) 先ず、ステップ101にて、センサグリッド位置(i, j)における磁界を計測して磁界測定値 \vec{H}_{11} を求める。

(2) ステップ102にて磁石体(M)の直下の最も近い、つまり \vec{H}_{11} 絶対値が最も大きい磁界センサの位置(a, b)番目をグリッドの計算上の計算上の原点(0, 0, 0)として計算上のグリッド座標系O-xyzを指定し、この座標系で改めてセンサグリッド位置番号(i, j)を決める。ここで、 \vec{H}_{11} 絶対値の最大値Sが、S/N比50以上であることを確認する。計算上の原点として、それを中心に磁界ベクトル \vec{H}_{11} の絶対値Sに対してセンサの測定誤差の値Nの割合S/Nが、2.5以上となる測定点を少なくとも9個存在することを確認する。入力データとしては、S/N比の大きな順に最大で49個を使用する。S/N比が2.5以下の測定点については、測定誤差が大きくなるので、計算には加えないものとする。

(3) 磁界ベクトル \vec{H}_{11} の絶対値が最大となる前記磁界センサグリッド位置(i, j)を

(4) 次に、ステップ103にて、磁石体(M)がセンサグリッドの(i, j)番目のセンサ位置である P_{11} に作る磁界の理論値 \vec{H}_{11} を式(1)から求める。

【数2】

$$\vec{H}_{11} = 1/4\pi\mu_0 \{ (-\vec{M}/r_{11}^3 + 3(\vec{M} \cdot \vec{r}_{11}) \vec{r}_{11}/r_{11}^5) \}$$

ここで、磁石体(M)と位置 P_{11} までの距離ベクトルを \vec{r}_{11} とする。また磁石の傾きをZ軸に対する回転角をφ、X軸に対する回転角をθとする

(5) 次に、ステップ104にて、磁界理論値と磁界測定値との差を測定誤差 e_{11} として、求める。

$$e_{11} = \vec{H}_{11} - \vec{H}_{11}$$

(6) 次に、ステップ105にて、ステップ103により求めた測定誤差 e_{11} の誤差関数 E_{11} を誤差の平方和として求める。

$$E_{11} = \sum e_{11}^2$$

(7) 次に、ステップ106にて、ガウスニュートン法で、ステップ104により求めた誤差平方和が最小となるx、y、z、θ、φを、以下の連立方程式を使って求める。

$$\partial E_{11} / \partial x = 0, \partial E_{11} / \partial y = 0, \partial E_{11} / \partial z = 0, \partial E_{11} / \partial \theta = 0, \partial E_{11} / \partial \phi = 0$$

(8) 次いで、ステップ107にて、計算上の座標系O-xyzのxとyの値を使って、センサグリッド座標系O-XYの値XとYをステップ106にて求める。同時にZ、θ=θ、φ=φも求める。

$$X = x + d \times a, Y = y + d \times b, Z = z, \theta = \theta, \phi = \phi$$

なお、本発明は、誤差平方和から最適値を計算する仕方は、上記連立方程式の計算方法にこだわるものではない。

【実施例】

【0077】

本発明の実施例1について説明する。

磁石体の磁石のサイズは、直径は0.5mm、長さは5mmのステンレス磁石で、磁石体の磁気モーメントは 5×10^{-9} Wbmである。

なお、ステンレス磁石は直径1.0mmの18Cr-8Ni系オーステナイト系ステンレ

ス鋼を伸線加工して、冷間加工度は75%にて直径0.5mmとした。これにより85%のマルテンサイト量を得た後、3000Oeの磁界を棒状の軸方向に印加して、長さ5mmを着磁して磁石とした。

【0078】

使用したGSRセンサは、図1に示す構造のGSRセンサ素子1でそのサイズは長さ2mmで、幅0.2mmとした。電子回路は、図2に示すGSRセンサの電子回路2を集積回路(ASIC)にしたもので、磁界検出力を0.5nTである。

【0079】

磁界センサ素子3は、上記GSR素子1を、傾斜角度が 35.2 度($\tan = 1/2$ 、 $\sin = 1/3$ 、 $\cos = 2/3$)を持つ四角錐台の台座30の斜面上、図3および図4に示すように4個を4回対称かつ鏡面对称に貼り付けたものである。底辺の長さは、4mmとし、台座の高さは、2.4mmとした。

10

【0080】

4個のGSR素子(70X1、70X2、70Y1、70Y2)は、図5に示す電子回路2Aに連結され、4個の素子の出力 $Hx1$ 、 $Hx2$ 、 $Hy1$ 、 $Hy2$ は信号処理回路72で処理された後、演算回路75で、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy に変換された後に、データ通信回路76から出力される。

【0081】

磁界センサの配線組み立ては、まず、図6に示すように、磁界センサ素子とセンサ基板40がワイヤ連結される。ASIC表面配線図は、図7に示すように、素子電極51と出力電極52とからなっている。センサ基板40には、図8に示すように、表面側には16個の素子電極61と16個のASICの素子電極62および複数個の外部接続電極を設け、表面側の外部接続電極はスルーホールを介して裏面側の対応する外部接続電極に接続する配線構造を有している。

20

ASICをセンサ基板の表面に接合するが、その際ASICの出力電極とセンサ基板のASIC用出力電極を連結し、ASICの出力電極とセンサ基板の出力電極とを連結することによって、磁界センサの配線がすべて連結し、センサ基板のスルーホールを介してセンサ基板裏面にある出力電極につながることになる。

【0082】

組み立てした磁界ベクトルセンサ4Aは、図9に示すように、ASIC40Aと4個のGSR素子を組付けた磁界センサ素子(3)およびそれら載せるセンサ基板40の3部品の構造からなっている。ASIC40Aは、素子台座40Gの底面(36)の中空部(38)に配置した。

30

【0083】

上記磁界ベクトルセンサは、GSR素子で検知した外部磁界をASICで信号処理して、磁界測定値 $Hx1$ 、 $Hx2$ 、 $Hy1$ 、 $Hy2$ を求め、それを演算処理回路にて Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy を傾斜角度が 35.2 度であるので、 $Hx = 3/4(Hx1 - Hx2)$ 、 $Hy = 3/4(Hy1 - Hy2)$ 、 $Hx = 6/4(Hx1 + Hx2 + Hy1 + Hy2)$ の計算式で求める。この時、 Hx 、 Hy 、 Hx 、 Hy の測定誤差 x 、 y 、 x 、 y 、 x 、 y 、 x 、 y がすべて同じ、つまり $x = y = x = y = x = y = 0.86$ となる。しかも使用した磁界センサの検出力よりも14%程度改善することができた。

40

【0084】

磁界ベクトルセンサグリッドは、磁界ベクトルセンサの台座の底辺は4mmであるので、配線の幅を考慮して、画素の大きさは5mmとした。つまり磁界ベクトルセンサの間隔は5mmとした。

【0085】

センサグリッド基板85は、図10に示すように、列ごとにマルチプレクサMUX82と連結し、次に全データが最終MUX83と連結し、外部の信号処理回路に転送される。電源配線系統は図示していないが、磁界ベクトルセンサグリッド稼働には、すべての磁界ベクトルセンサに電源供給するようにしている。

50

【 0 0 8 6 】

磁石体位置と方位の計算プログラムは、図 1 1 に示すフローチャートにより、磁石体の測定位置 X、Y、Z および磁石体の向き、 を計算して求めるというもので、外部のコンピュータを使って、計算する。

【 0 0 8 7 】

これにより、磁石体の位置と方位を、20 Hz の位置方位測定速度で、位置精度は 0 . 3 mm 以下、方位の精度は 0 . 7 度以下で、求めることができる。

【 0 0 8 8 】

本発明の実施例 2 は、on - A S I C タイプの G S R センサ 9 1 を用いた磁界ベクトルセンサからなり、図 1 4 を用いて説明する。

はじめに、磁石体、磁界ベクトルセンサ、電子回路、磁界ベクトルセンサグリッドおよび H x、H y、H z を算出する計算式は、実施例 1 に準拠した構成からなる。

on - A S I C タイプの G S R センサ 9 1 は、G S R 素子 9 1 2 を A S I C 9 1 1 表面に直接形成し、4 つの G S R センサ 9 1 を図 1 4 に示すように四角錐台の台座の長方形 9 0 2 の斜面に設置したものである。

【 0 0 8 9 】

G S R センサ 9 1 のサイズは、長さ 2 . 5 mm、幅 1 . 0 mm、磁界ベクトルセンサのサイズは底辺が 6 mm、高さは 1 . 5 mm、その磁界検出力は 0 . 1 n T で、実施例 1 に使用した G S R センサより 5 倍程度優れたものである。

実施例 2 の位置・方位の精度は、位置精度が 0 . 0 6 mm、方位精度が 0 . 2 度で、位置測定速度は 2 0 H z であった。

【 産業上の利用可能性 】

【 0 0 9 0 】

本発明により、内視鏡やカテーテルなどの先端部の位置と方位の計測、デンタル分野では、歯牙や顎堤の移動、治療用ハンドピースの移動距離など、ミニ部品の位置、移動および方位と回転量を正確に計測することが可能となり、広く応用されるものと期待される。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 1 】

1 : G S R 素子

1 1 : 基板、1 2 : 磁性ワイヤ、1 3 : コイル、1 4 : ワイヤ端子、1 5 : ワイヤ電極、1 6 : 接続配線 (ワイヤ電極用)、1 7 : コイル端子、1 8 : コイル電極、1 9 : 接続配線 (コイル電極用)

2 : 電子回路 (G S R センサの電子回路)

2 1 : パルス発振器、2 2 : G S R 素子、2 2 1 : ワイヤ電極、2 2 2 : コイル電極、2 3 : 寄生容量、2 4 : 回路入力電極、2 5 a : 1 段目検波タイミング調整回路 (T 1)、2 5 b : 2 段目検波タイミング調整回路 (T 2)、2 6 : サンプルホールド回路 (出力側回路)、2 7 a : 1 段目電子スイッチ (S W 1)、2 7 b : 2 段目電子スイッチ (S W 2)、2 8 a : 1 段目サンプルホールド用コンデンサ (C 1)、2 8 b : 2 段目サンプルホールド用コンデンサ (C 2)、2 9 : 増幅器

2 A : 電子回路 (磁界センサの電子回路)

7 0 (7 0 X 1、7 0 X 2、7 0 Y 1、7 0 Y 2) : G S R 素子、7 1 : パルス発振器、7 2 : 信号処理回路、7 3 : 切り替えスイッチ、7 4 : A D コンバータ、7 5 : 演算回路、7 6 : データ通信回路

3 : 磁界ベクトルセンサ素子

3 0 : 台座、3 1 : 上面、3 2 : 底辺、3 3 : 稜線、3 4 : 基軸線マーク、3 5 : G S R 素子 3 5 1 : 磁性ワイヤ、3 6 : 底面、3 7 : 傾斜角度、3 8 : 中空部 (中空)

4、4 A : 磁界ベクトルセンサ (組み立て)

4 0 : センサ基板、4 0 A : A S I C、4 0 G : 素子台座 (台座 3 0 と G S R 素子からなる)、4 1 : 素子電極 (センサ基板 4 0 の表面の素子電極)、4 2 : 接続配線 (素子 3 5 の電極と素子電極 4 1 との配線)、4 3 : 接続配線 (素子電極 4 1 と A S I C 用電極との

10

20

30

40

50

配線)、44:スルーホール、45:接続配線(センサ基板40の裏面の配線)46:出力電極(センサ基板40の裏面の出力電極)

5:ASICの電極配置

51:ASICの素子電極、52:ASICの出力電極

6:センサ基板の表面の配線図

61:素子電極(素子電極41)、62:ASIC用電極(ASICの素子電極)、63:出力電極、64:接続配線(素子電極61とASIC用電極62との配線)

8:磁界ベクトルセンサグリッド

81:磁界ベクトルセンサ、82:信号出力一次マルチブレイクサMUX、83:信号出力二次マルチブレイクサ、84:信号出力端子、85:センサグリッド基板、86:配線基板

10

9:磁界センサ素子(on-ASICタイプ)

90:台座、901:三角形の斜面、902:長方形の斜面、903:正方形の上面

91:GSRセンサ、911:ASIC、912:GSR素子、913:磁性ワイヤ

20

30

40

50

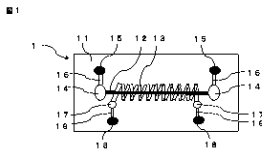
【要約】 (修正有)

【課題】本発明は、GSRセンサを使用した磁界ベクトルセンサグリッドを開発し、微小磁石体の位置と方位を検出することを可能にするものである。

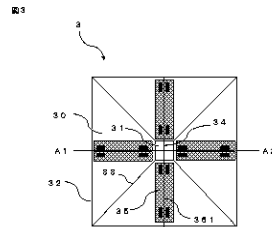
【解決手段】10 nT以下の検出力を有する磁界ベクトルセンサと磁界ベクトルセンサグリッドを開発し、磁石体が発する磁界を計測し、ガウスニュートン法を基礎にした計算方法に、入力データの誤差と数を適切に選択して入力することによって、磁石体の位置と方位を高い精度で検出する装置から構成される。

【選択図】図14

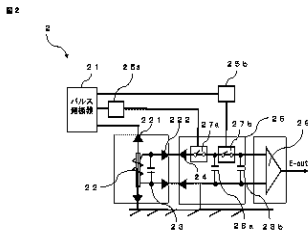
【図1】



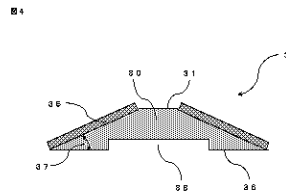
【図3】



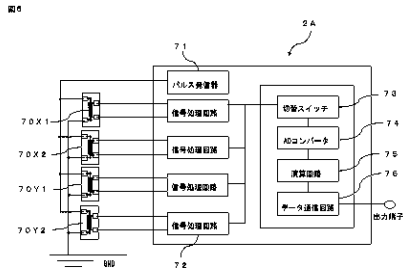
【図2】



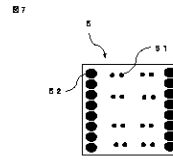
【図4】



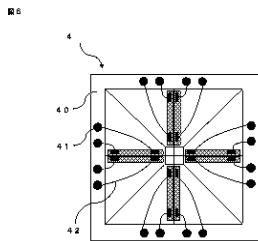
【図5】



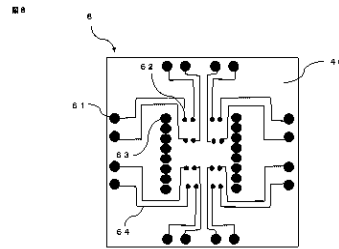
【図7】



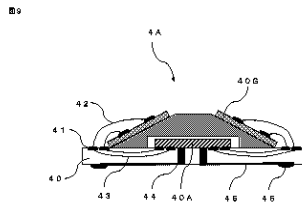
【図6】



【図8】



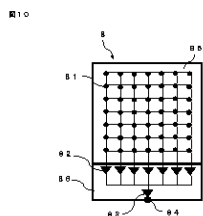
【図9】



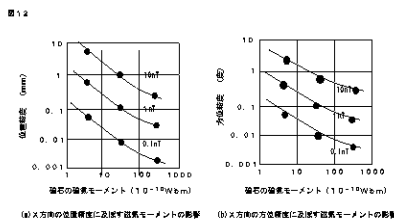
【図11】

- 図11
- 101 センサグリッド位置 (1, 1) における温度分布を T_{11} とする。
 - 102 T_{ij} 行列要素の最大値が、行列が $n \times m$ の場合は n と m の最大値とする。
 行列要素の最大値は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 T_{max} は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 T_{max} は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 T_{max} は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 - 103 行列要素が、センサグリッド位置 (1, 1) での P_{11} による温度の増減は、
 $\Delta T_{ij} = T_{ij} - T_{11} = \alpha \cdot (i - 1)^2 + \beta \cdot (j - 1)^2$ となる。
 ここで α は T_{11} の温度変化率、 β は T_{nm} の温度変化率とする。
 α と β は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 α と β は、 T_{11} と T_{nm} の最大値のうち大きい値を T_{max} とする。
 - 104 温度分布を計算する $T_{ij} = T_{11} + \Delta T_{ij}$
 - 105 温度の平方和を計算する $E_{ij} = T_{ij}^2$
 - 106 マルチノミートン法で、温度分布の最小二乗法による、 α 、 β 、 γ を求める。
 $\alpha = (T_{11} - T_{nm}) / (n^2 - 1)$ 、 $\beta = (T_{nm} - T_{11}) / (m^2 - 1)$ 、 $\gamma = (T_{11} + T_{nm}) / 2$
 - 107 温度分布の計算は、センサグリッド位置 (1, 1) と (n, m) とする。
 $T_{ij} = T_{11} + \alpha \cdot (i - 1)^2 + \beta \cdot (j - 1)^2$ とする。
 温度分布の計算は、 $T_{ij} = T_{11} + \alpha \cdot (i - 1)^2 + \beta \cdot (j - 1)^2$ とする。

【図10】

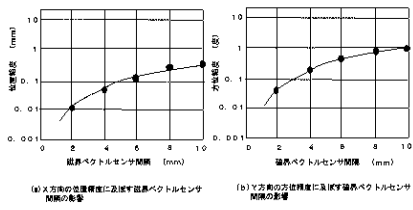


【図12】



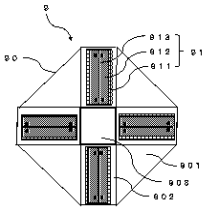
【図 13】

図 13



【図 14】

図 14



フロントページの続き

(56)参考文献 特開2020-160081(JP,A)
特表2013-518273(JP,A)
国際公開第2008/032741(WO,A1)
特開2009-222650(JP,A)
特開2005-249554(JP,A)
中国特許出願公開第112304414(CN,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01R 33/02
H01L 43/00