

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-165190

(P2015-165190A)

(43) 公開日 平成27年9月17日(2015.9.17)

(51) Int.Cl. F 1 テーマコード (参考)  
**GO 1 C 19/00 (2013.01)** GO 1 C 19/00 Z 2 F 1 O 5

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2014-39939 (P2014-39939)  
 (22) 出願日 平成26年2月28日 (2014.2.28)

(71) 出願人 504151365  
 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
 茨城県つくば市大穂1番地1  
 (74) 代理人 100093816  
 弁理士 中川 邦雄  
 (72) 発明者 久米 達哉  
 茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内  
 Fターム(参考) 2F105 BB08 BB12

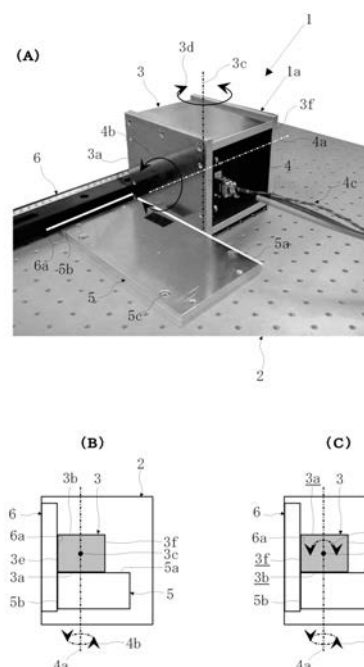
(54) 【発明の名称】 ジャイロレートオフセット除去方法

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 ジャイロレートオフセットの変動に追従し、簡易な構成で、かつジャイロの反転にも追従するとともに、地球自転のようなジャイロの反転に追従しないレートオフセット成分をも除去することができる、簡便なジャイロレートオフセット除去方法、ジャイロ装置を提供する。

【解決手段】 ジャイロ1と、位置保障された測定対象面2及び前記測定対象面2との位置が保障された基準エッジ5aとの位置関係を利用しながら前記ジャイロ1を前記測定対象面2に垂直な反転軸3cを中心に周期的に反転させ、ジャイロレートオフセットの変動に追従してジャイロレートオフセットを除去するとともに、前記ジャイロ1の反転前後のジャイロ角度検出値の差分値の時間変化量から、前記ジャイロ1の反転に関係なく加わるジャイロレートオフセット成分を検出し、除去する。

【選択図】 図3



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

ジャイロと、位置保障された測定対象面及び前記測定対象面との位置が保障された基準エッジとの位置関係を利用しながら前記ジャイロを前記測定対象面に垂直な反転軸を中心に周期的に反転させ、ジャイロレートオフセットの変動に追従してジャイロレートオフセットを除去するとともに、

前記ジャイロの反転前後のジャイロ角度検出値の差分値の時間変化量から、前記ジャイロの反転に関係なく加わるジャイロレートオフセット成分を検出し、除去することを特徴とするジャイロレートオフセット除去方法。

**【請求項 2】**

前記基準エッジが、1本の基準バー又は2本の基準バーであることを特徴とする請求項1に記載のジャイロレートオフセット除去方法。

**【請求項 3】**

前記基準エッジが、1本の基準バーと1点又は1本の柱、或いは、3点又は3本の柱であることを特徴とする請求項1に記載のジャイロレートオフセット除去方法。

**【請求項 4】**

ジャイロレートオフセット変動、ジャイロ反転及びジャイロ反転に追従しないジャイロレートオフセットを除去できるジャイロ装置であって、

測定対象面に載置される底面、側面を備えた枠と、

前記枠に固定したジャイロと、

前記測定対象面に対して垂直な位置に固定された第一基準エッジと、

前記第一基準エッジと直角をなして前記測定対象面に対して垂直な位置に固定された第三基準エッジと、

を備え、

ジャイロレートオフセットを検出するに際し、

前記枠の対向する2面を、交互に前記第一基準エッジ及び第三基準エッジに当接させる反転を繰り返すことを特徴とするジャイロ装置。

**【請求項 5】**

ジャイロレートオフセット変動、ジャイロ反転及びジャイロ反転に追従しないジャイロレートオフセットを除去できるジャイロ装置のジャイロユニットであって、

測定対象面に載置される底面、前記底面に垂直に起立する第一面、前記底面に垂直に起立しかつ前記第一面に平行な第二面、前記第一面及び第二面に対して直角で前記底面に連設する第三面、前記第一面及び第二面に対して直角かつ前記第三面と平行で前記底面に連設する第四面を備えた枠と、

前記枠に固定されたジャイロと、

からなることを特徴とするジャイロユニット。

**【発明の詳細な説明】****【技術分野】****【0001】**

本発明は、ジャイロを用いた角度検出において大きな誤差要因となるレートオフセット（角速度誤差）を除去する方法に関する。ジャイロレートオフセット（単に、レートオフセットということもある）とは、ジャイロが静止状態では角速度出力値が0でなければならないところ、実際に出力される角速度値（信号値）のことである。

**【背景技術】****【0002】**

回転角度をジャイロにより検出測定する場合にレートオフセットが存在すると、検出角速度を積分して得られる検出角度にはオフセット値が時間的に積分された角度誤差も含まれることになる。従って、正確な角度検出、測定を実施するためには、ジャイロは、レートオフセットが極く小さくなければならない。

**【0003】**

10

20

30

40

50

従来のレートオフセットの除去方法として、次の技術が知られている。

(1) ジャイロを一定時間静止させ、得られた信号をレートオフセットと定め、その後の測定値から静止状態の信号(値)を測定値から差し引く方法。

(2) 図1に示すように、ジャイロ角度検出方向と直交する方向に、周期的にジャイロを揺動し、得られた信号からレートオフセット分を除去する方法(特許文献1)。

(3) 図2に示すように、ジャイロ角度検出方向と直交する方向に、ジャイロを反転させ得られた信号からレートオフセット分を除去する方法(特許文献2)。

【0004】

しかしながら、上記従来のレートオフセット除去方法(1)は、ジャイロレートオフセットの変動に追従した除去をすることができない。(2)の方法では、レートオフセット値の変動に追従し除去することが可能であるが装置が複雑となる。(3)の方法では、ジャイロの反転に追従するレートオフセット成分を除去することができるが、地球自転のように、ジャイロの反転に追従しないレートオフセット成分を除去することができない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2008-233095号公報

【特許文献2】特開2009-092583号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

そこで、本発明は、ジャイロレートオフセットの変動に追従し、簡易な構成で、かつジャイロの反転にも追従するとともに、地球自転のようなジャイロの反転に追従しないレートオフセット成分をも除去することができる、簡便なジャイロレートオフセット除去方法、ジャイロ装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

ジャイロの反転測定によるジャイロドリフト除去・抑制の検討を行う中で、ジャイロレートオフセットが簡便に検出され、除去可能である、当該発明を完成するに至った。

具体的には、上記の課題を解決するために、本発明は、

(1)

ジャイロと、位置保障された測定対象面及び前記測定対象面との位置が保障された基準エッジとの位置関係を利用しながら前記ジャイロを前記測定対象面に垂直な反転軸を中心に周期的に反転させ、ジャイロレートオフセットの変動に追従してジャイロレートオフセットを除去するとともに、

前記ジャイロの反転前後のジャイロ角度検出値の差分値の時間変化量から、前記ジャイロの反転に関係なく加わるジャイロレートオフセット成分を検出し、除去することを特徴とするジャイロレートオフセット除去方法。

(2)

前記基準エッジが、1本の基準バー又は2本の基準バーであることを特徴とする(1)に記載のジャイロレートオフセット除去方法。

(3)

前記基準エッジが、1本の基準バーと1点又は1本の柱、或いは、3点又は3本の柱であることを特徴とする(1)に記載のジャイロレートオフセット除去方法。

(4)

ジャイロレートオフセット変動、ジャイロ反転及びジャイロ反転に追従しないジャイロレートオフセットを除去できるジャイロ装置であって、

測定対象面に載置される底面、側面を備えた枠と、

前記枠に固定したジャイロと、

前記測定対象面に対して垂直な位置に固定された第一基準エッジと、

10

20

30

40

50

前記第一基準エッジと直角をなして前記測定対象面に対して垂直な位置に固定された第三基準エッジと、

を備え、

ジャイロレートオフセットを検出するに際し、

前記枠の対向する2面を、交互に前記第一基準エッジ及び第三基準エッジに当接させる反転を繰り返すことを特徴とするジャイロ装置。

(5)

ジャイロレートオフセット変動、ジャイロ反転及びジャイロ反転に追従しないジャイロレートオフセットを除去できるジャイロ装置のジャイロユニットであって、

測定対象面に載置される底面、前記底面に垂直に起立する第一面、前記底面に垂直に起立しかつ前記第一面に平行な第二面、前記第一面及び第二面に対して直角で前記底面に連結する第三面、前記第一面及び第二面に対して直角かつ前記第三面と平行で前記底面に連結する第四面を備えた枠と、

前記枠に固定されたジャイロと、

からなることを特徴とするジャイロユニット。

、である。

【発明の効果】

【0008】

本発明は、上記構成であるので、以下の効果を発揮する。ジャイロレートオフセットの変動に追従し、簡易な構成で、かつジャイロの反転にも追従するとともに、地球自転のようなジャイロの反転に追従しないレートオフセット成分をも除去することができる、簡便なジャイロレートオフセット除去方法、ジャイロ装置を提供することができた。

【0009】

すなわち、本発明ではジャイロを位置保障された測定対象面と測定対象面との位置が保障基準エッジの位置関係を用いて、前記ジャイロを周期的に測定対象面に垂直な反転軸を中心に測定対象面と平行な面内で反転させることで、変動するレートオフセットの除去を可能としつつ、装置の複雑化を避けることができた。さらに、ジャイロの反転時前後のジャイロ角度検出値差分値の時間変化量から、ジャイロの反転とは無関係に加わるレートオフセット成分をも検出し除去することができる。

【0010】

基準エッジとしては、2本の基準エッジ、例えば第一、第三基準エッジ、の併用、それらは、直交されていても、直交されていなくてもよく、また、それらの基準エッジの一方を単体で用いることもできる。2本の基準エッジを併用すると、ジャイロの位置が一意に簡単に決められるため、反転操作が楽になり、望ましい。

【0011】

さらに、基準エッジとして、1本の基準エッジと1点又は測定対象面に垂直な柱も採用できる。さらには3点又は3本の柱の基準であっても同様に基準エッジとなる。加えて、2点と1本の柱、1点と2本の柱も採用できる。これらであれば枠と2本の基準エッジほどの組み立て精度を要しない。いずれにしても、ジャイロが同一面で位置保障され180°の反転が可能であればよい。

【図面の簡単な説明】

【0012】

【図1】従来(特許文献1)の周期的にジャイロを揺動し、得られた信号からレートオフセットを除去した角度値を導出する技術の説明図である。

【図2】従来(特許文献2)の周期的にジャイロを反転し、得られた信号からレートオフセットを除去する方法の説明図である。

【図3】本発明であるジャイロレートオフセット除去方法に用いる、ジャイロ装置1の斜視写真(A)、及び反転軸3cを回転中心として、ジャイロ4を固定した枠3(ジャイロユニット1a)を反転方向3dに交互に180°反転させて、ジャイロ角度検出軸4aを回転中心としたジャイロ4の傾き角度を測定する場合の模式図(B)(C)である。図3

10

20

30

40

50

(B)の枠3を180°反転方向3dに反転させると、図3(C)になる。

【図4】ジャイロ装置を反転させて、ジャイロレートオフセットを検出するモデルのジャイロ角度検出軸方向から見た図である。

【図5】ジャイロレートオフセット成分の導出式である。

【図6】同一位置にて、図3の枠の反転の繰り返しを1時間行った場合に得られたジャイロ角度出力(t)の測定値である。

【図7】図6の測定値(ジャイロ角度出力(t))から求められた反転前後のジャイロ角度出力(t)の差である。傾斜分を直線(a)、直線(b)で示した。この図は、図5の(4)、(5)式で示される関係に相当する。

【図8】振動グラフは、図6の測定値(ジャイロ角度出力(t))から求められた1周期離れたジャイロ角度出力(t)の差である。白抜きラインは、移動平均処理により高周波ノイズ分を除去した値である。直線(c)は、ジャイロレートオフセット成分のジャイロ反転に追従する成分 $r_0$ に比例する成分((6)式の右辺 $2 \cdot t \cdot r_0$ )である。

10

【発明を実施するための形態】

【0013】

以下、添付の図面3-8を参照し、本発明の実施の形態について、詳細に説明する。なお、本発明は下記実施例に限定されるものではない。

【実施例1】

【0014】

図3の写真に示すように、ジャイロレートオフセット変動、ジャイロ反転及びジャイロ反転に追従しないジャイロレートオフセットの検出(導出)、除去に使用されるジャイロ装置1は、測定対象面2に載置されると、枠3と、ジャイロ4と、基準プレート5と、基準バー6と、からなる。なお、枠3とジャイロとで、ジャイロユニット1aを形成する。

20

【0015】

測定対象面2は、設置位置が保障されている。即ち、測定対象面2は、ジャイロ4の反転動作の間は、位置(方位、傾き)が変化しない。なお、測定対象面2の近傍の他の測定対象面でジャイロレートオフセットを除去した後、実際の測定対象面2で測定することもできる。

【0016】

枠3は、測定対象面2に載置される底面、前記底面に垂直に起立する第一面3a、前記底面に垂直に起立しかつ第一面3aに平行な第二面3b、第一面3a及び第二面3bに対して直角で前記底面に連設する第三面3e、第一面3a及び第二面3bに対して直角かつ第三面3eと平行で前記底面に連設する第四面3fを備える。

30

【0017】

ここでは、枠3は内部空洞で、第三面3e、第四面3fはそれぞれ開口部を有し、連通する。枠3に前記開口部を備えることで、ジャイロ4の設置、配線4cの引き出しが容易になる。また、上面にも板が嵌められている。そして、第一面3aと第二面3bは同形で、上面と底面も同形である。

【0018】

このような枠3であれば、検出すべき角度に合わせて、ジャイロユニット1aの必要な面(第一~第四面、上面、底面)を向け、測定対象面2に設置すればよい。なお、ジャイロ4が基準エッジに対して、位置保障されて反転できれば、当該枠の形状に限定されるものではない。

40

【0019】

測定対象面2に垂直なジャイロ4の反転軸3cを中心とする反転方向3dに、ジャイロ4を測定対象面2において180°反転させることで、測定対象面2と平行なジャイロ角度検出軸4aを中心とする回転方向であるジャイロ角度検出方向4bに不要な角度変化を与えない。反転に際して、ジャイロを測定対象面2に接触させながら反転させると、不要な角度変化を一層抑えることができる。

【0020】

50

ジャイロ 4 は、物体の角度や角速度を検出する計測器で、ジャイロスコープ、ジャイロセンサとも呼ばれる。検出信号を計算機（図示省略）に配線 4 c を介して送信する。

【0021】

ここでは、枠 3 の底面に平行かつ第一面 3 a と第二面 3 b を貫通するジャイロ角度検出軸 4 a とジャイロ角度検出軸 4 a と直交するジャイロ 4 の反転軸 3 c との交点位置に中心を位置させ底面を第一面 3 a の内側に固定したジャイロ 4 とした。これにより、ジャイロ角度検出軸 4 a を回転中心としたジャイロ角度検出方向 4 b の基準 2 a に対する回転角を測定することができる。ジャイロ 4 は自己の位置基準を備えるため、基準 2 a は任意に設定できる。この場合、反転せずに検出されるジャイロ角出力信号には、基準 2 a に対する実際の検出すべき角度成分（後述の  $r$ ）の他に、後述の  $r_0$  と  $r_g$  をも含む。

10

【0022】

基準プレート 5 は、ここでは、測定対象面 2 に垂直な側面が第一基準エッジ 5 a 及び第二基準エッジ 5 b となり、測定対象面 2 にボルト 5 c などで固定され、位置保障されている。枠 3 の面に当接し、ジャイロ 4 の反転中位置保障されていれば、測定対象面 2 に固定されていなくてもよい。

【0023】

基準バー 6 は、ここでは、測定対象面 2 に垂直な側面が第三基準エッジ 6 a となり、基準プレート 5 の第二基準エッジ 5 b に当接した上で、測定対象面 2 にボルトなどで固定され、位置保障されている。枠 3 の面に当接し、ジャイロ 4 の反転中位置保障されていれば、測定対象面 2 に固定されていなくてもよい。また、基準バー 6 に当接しなくてもよい。

20

【0024】

基準プレート 5 と基準バー 6 との当接で形成される第一基準エッジ 5 a と第三基準エッジ 6 a との角度は  $90^\circ$  である。枠 3 の第一面 3 a と第三面 3 e、第三面 3 e と第二面 3 b、第一面 3 a と第四面 4 f との角度もそれぞれ  $90^\circ$  で、枠 3 の底面を測定対象面 2 に接触させながら、枠 3 の第一面 3 a 及び第三面 3 e と、第二面 3 b 及び第四面 3 f の組み合わせを、交互に第一基準エッジ 5 a 及び第三基準エッジ 6 a に当接させる反転を繰り返し、ジャイロレートオフセット成分を検出する。

【0025】

ここでは、基準プレート 5 及び基準バー 6、すなわち、第一基準エッジ 5 a と第三基準エッジ 6 a は、別体としたが、一体としてもよい。

30

【0026】

ジャイロ装置 1 では、図 3 に示すように、ジャイロ 4 を備える枠 3 を、水平方向に対する角度検出のためのジャイロ角度検出軸 4 a と直交する反転軸 3 c を中心に周期的に  $180^\circ$  反転（反転方向 3 d）させることで、ジャイロレートオフセットの変動に追従してジャイロレートオフセットを除去することができる。

【0027】

このとき、基準エッジにより、ジャイロの反転軸 3 c を反転中心とする反転方向 3 d への反転角度（ $180^\circ$ ）と反転前後のジャイロ 4 の位置関係を保障し、さらに、測定対象面 2 に接触させながらジャイロ 4 を反転させ、無用な角度変化をジャイロ角度検出方向 4 b に与えないようにすることで、特許文献 1 のジャイロレートオフセット方法において問題となる装置の複雑化を避けた上で、反転時の誤差を軽減することができる。

40

【0028】

さらに、反転前後のジャイロ 4 の角度検出値差分値の時間変化量から、ジャイロ 4 の反転とは無関係なレートオフセット成分を検出し、除去することができる。

【0029】

次に、図 4 のモデル、図 5 の式を参照して、ジャイロレートオフセット成分の導出、除去方法について説明する。

【0030】

ここでは、図 4 に示すように、検出すべき角度を  $r$ 、ジャイロ角度オフセットを  $r_0$ 、ジャイロ 4 の反転に追従するレートオフセット成分を  $r_g$ 、地球自転の影響などジャイ

50

口4の反転に追従しないレートオフセット成分を $r_g$ とする。

【0031】

このときジャイロ4が、その角度検出面内にある反転軸3cに対して一定の時間間隔 $t$ で反転方向3dに反転するものと考え、時刻 $t$ および $t + t$ でのジャイロ角度出力 $(t)$ 、 $(t + t)$ はそれぞれ、図5の(1)、(2)式のように表される。(1)、(2)式から(3)~(6)式が導き出せる。

【0032】

(3)式は、測定対象物の角度 $r$ の導出式である。(4)、(5)式は反転前後のジャイロ角度出力の差、(6)式は1周期離れたジャイロ角度出力の差を表している。

【0033】

(4)、(5)式それぞれの右辺第3項の $2r_g \cdot t$ 、および、 $-2r_g \cdot t$ は、時間 $t$ の比例項であり、(4)、(5)式の関係性を時間 $t$ のグラフで示した場合、反転間隔 $t$ で入れ替わる直線の傾き成分となる。一方、(6)式右辺第1項の $-2 \cdot t \cdot r_0$ はジャイロ4の反転に追従するレートオフセット成分項であり、(6)式の関係性を時間 $t$ のグラフで示した場合、直線のオフセット成分となる。

【0034】

すなわち、(4)、(5)式を示すグラフの傾きから、ジャイロ4の反転に追従しないレートオフセット成分 $r_g$ が導出できる。また、(6)式の関係性を示すグラフのオフセットから、ジャイロ4の反転に追従するレートオフセット成分 $r_0$ が導出できることを示す。

【0035】

次に、図3のジャイロ装置1、図5の式を用いて、ジャイロレートオフセット成分の検出について検討した結果を説明する。

【0036】

時間間隔 $t = 60 \text{ s}$ の反転測定を行い、その効果を検証した。ここでは、反転方向3d(反転軸3c)と独立したジャイロ角度検出方向4d(ジャイロ角度検出軸4a)を持つことから反転測定に対する制約が少なく、高精度、かつ、機械的に堅牢な光ファイバジャイロ(FOG)ユニットを用いた。測定は、 $23 \pm 1$ で空調制御された恒温室内の石定盤上に設置された光学プレート(測定対象面2)上にて行われた。

【0037】

実験では、図3に示されるようにジャイロ4の基準側面(第一面3a及び第二面3b、第三面3e及び第四面3f)が、基準エッジ(第一基準エッジ5a、第三基準エッジ6a)への当接面となるように、ジャイロ4を光学プレート上の枠3に設置し、その底面が常に光学プレートに接触するように反転することで、ジャイロ角度検出方向4bへ不要な角度変化を与えることの無い反転測定を実現した。

【0038】

同一位置にて反転を繰返し1時間行った場合に得られたジャイロ角度出力 $(t)$ を図6に示す。一方、図6に示されるジャイロ角度出力 $(t)$ から求められた(4)、(5)式で示される、反転前後のジャイロ角度出力の差、および、(6)式で示される1周期離れたジャイロ角度出力の差をそれぞれ図7、8に示す。

【0039】

図7に示された関係から、各反転測定回における $r_g$ の値を求めると、 $r_g = -55 \pm 15$ (標準偏差) $\mu\text{rad/s}$ となる。

【0040】

一方、図8に示された関係から各反転測定回における $r_0$ の値を求めると、 $r_0 = 61 \pm 39$ (標準偏差) $\mu\text{rad/s}$ となる。 $r_g$ の値については、測定地点の緯度約 $36^\circ$ と角度検出面の子午線からの偏角約 $90^\circ$ から導出した $59 \mu\text{rad/s}$ に近い値となっている。

【0041】

これらの値を(3)式に代入することで、 $r_0$ 、 $r_g$ の影響を受けることなく測定対象

10

20

30

40

50

の角度  $\theta_r$  を求めることができる。すなわち、測定値からジャイロレートオフセットを除去できることとなる。この場合、繰返し1時間行われた各反転測定回で得られた角度は、 $\theta_r = 9.1 \pm 0.4$  (標準偏差) mradとなる。

【0042】

本発明であるジャイロレートオフセット除去方法は、方位測定、慣性航法、角度測定、形状測定、測量技術に応用でき、既存機器に大きな改造を施すことなく、高精度で、前記技術に適用することができる。

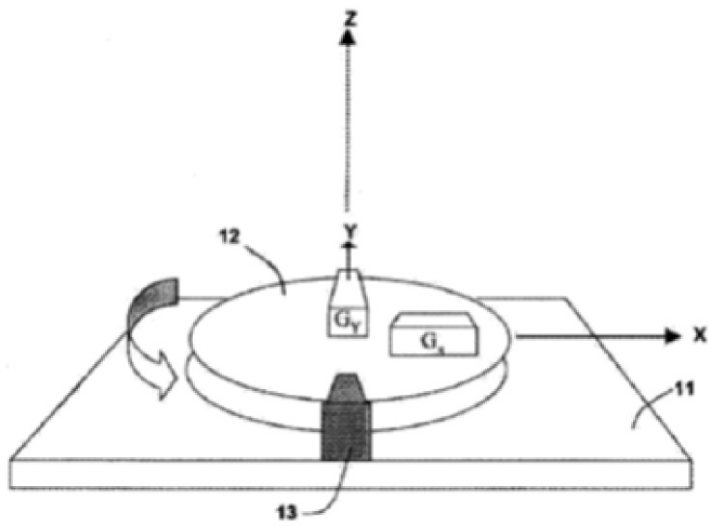
【符号の説明】

【0043】

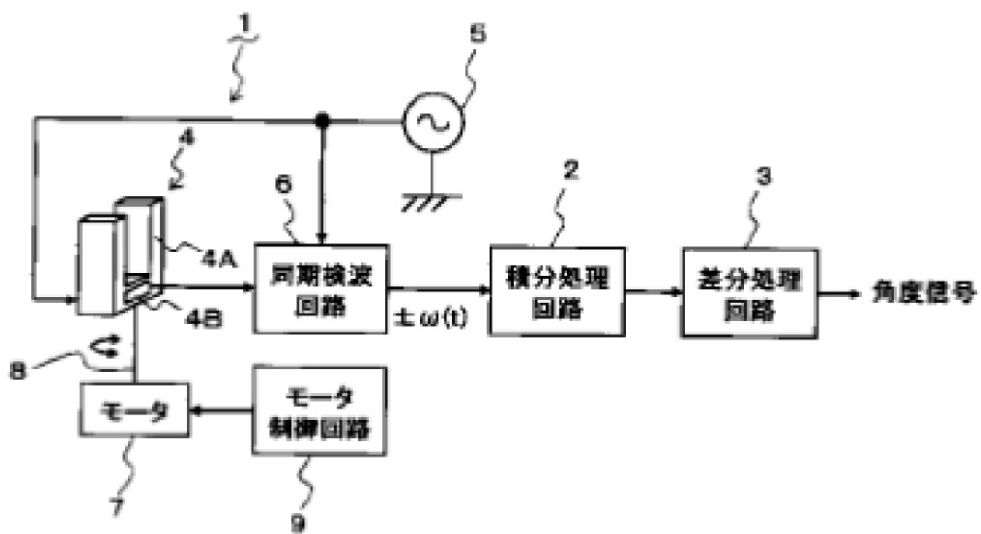
- |     |            |    |
|-----|------------|----|
| 1   | ジャイロ装置     | 10 |
| 1 a | ジャイロユニット   |    |
| 2   | 測定対象面      |    |
| 2 a | 基準         |    |
| 3   | 枠          |    |
| 3 a | 第一面        |    |
| 3 b | 第二面        |    |
| 3 c | 反転軸        |    |
| 3 d | 反転方向       |    |
| 3 e | 第三面        |    |
| 3 f | 第四面        | 20 |
| 4   | ジャイロ       |    |
| 4 a | ジャイロ角度検出軸  |    |
| 4 b | ジャイロ角度検出方向 |    |
| 4 c | 配線         |    |
| 5   | 基準プレート     |    |
| 5 a | 第一基準エッジ    |    |
| 5 b | 第二基準エッジ    |    |
| 5 c | ボルト        |    |
| 6   | 基準バー       |    |
| 6 a | 第三基準エッジ    | 30 |



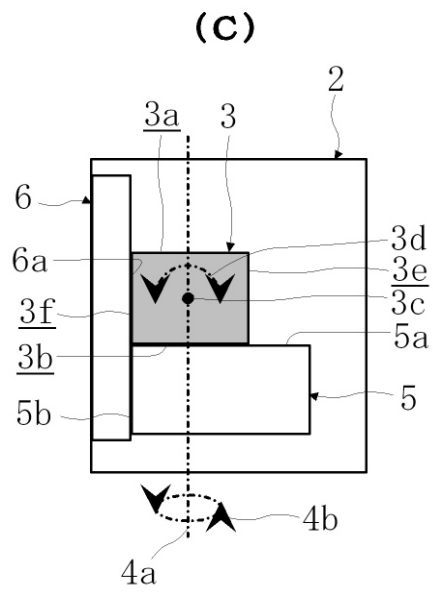
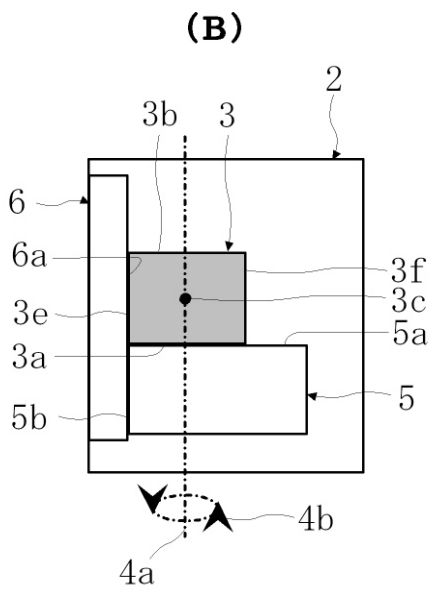
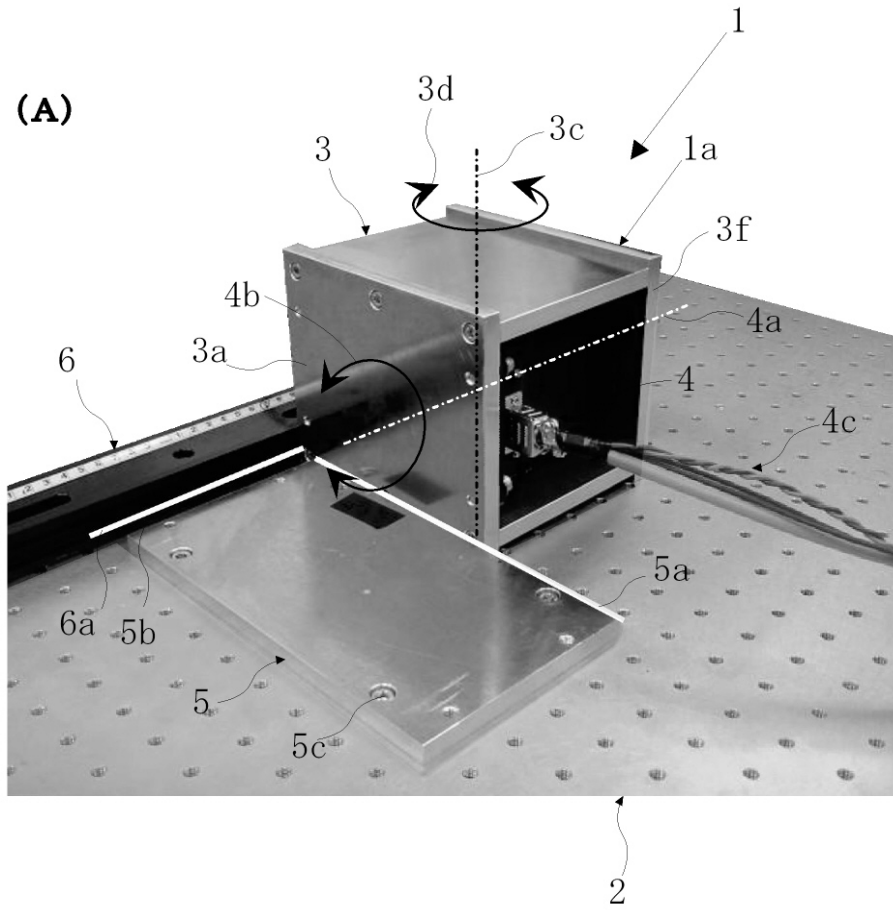
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 3 】





【 図 5 】

$$\theta(t) = \theta_r + \theta_o + (r_o + r_g) \cdot t \quad (1)$$

$$\theta(t + \Delta t) = -\theta_r + \theta_o + r_o \cdot (t + \Delta t) + r_g \cdot (\Delta t - t) \quad (2)$$

(1),(2)式から(3)~(6)式が得られる.

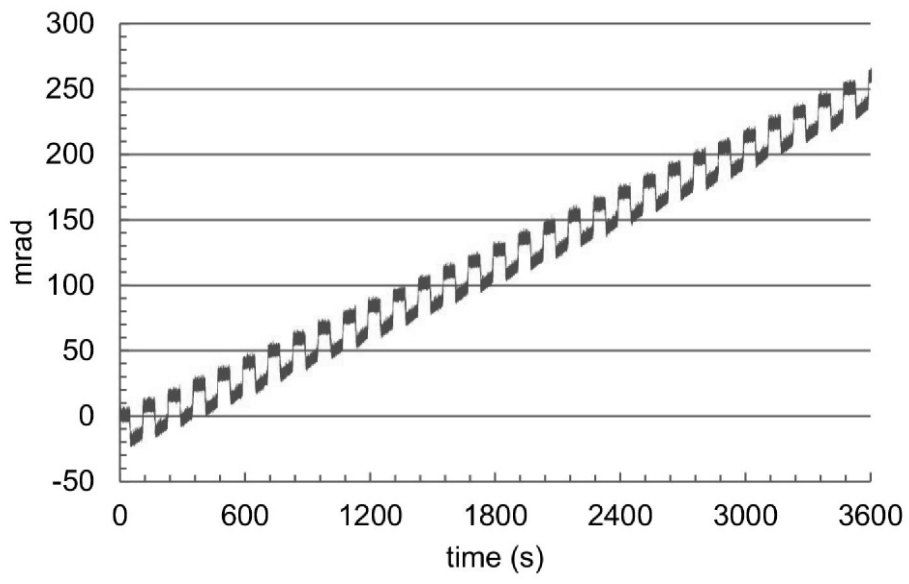
$$\theta_r = \frac{\theta(t) - \theta(t + \Delta t)}{2} + \frac{(r_o + r_g) \cdot \Delta t}{2} - r_g \cdot t \quad (3)$$

$$\theta(t) - \theta(t + \Delta t) = 2\theta_r - (r_o + r_g) \cdot \Delta t + 2r_g \cdot t \quad (4)$$

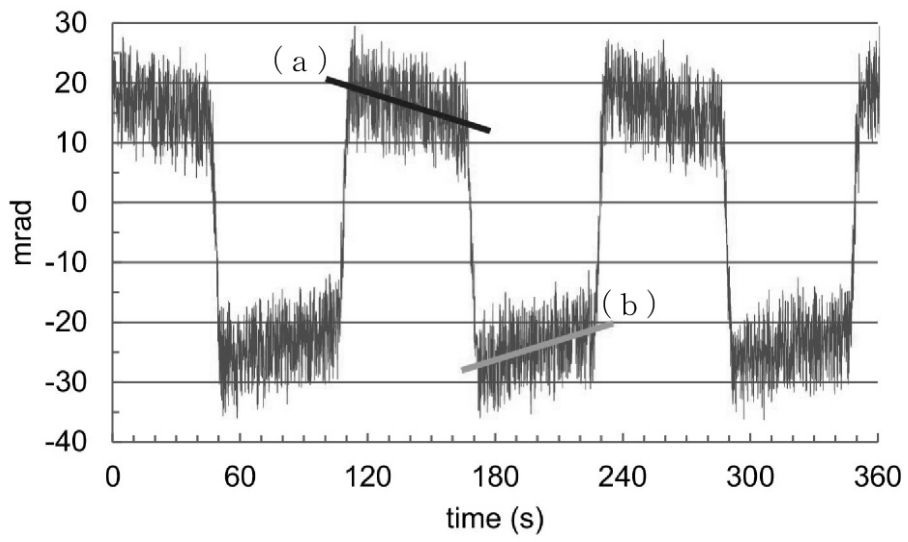
$$\theta(t + \Delta t) - \theta(t + 2\Delta t) = -2\theta_r - (r_o - r_g) \cdot \Delta t - 2r_g \cdot t \quad (5)$$

$$\theta(t) - \theta(t + 2\Delta t) = -2\Delta t \cdot r_o \quad (6)$$

【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】

