

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4929445号  
(P4929445)

(45) 発行日 平成24年5月9日(2012.5.9)

(24) 登録日 平成24年2月24日(2012.2.24)

(51) Int.Cl.

G 0 1 C 19/00 (2006.01)

F I

G O 1 C 19/00

Z

請求項の数 16 (全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2004-569683 (P2004-569683)  
 (86) (22) 出願日 平成15年11月12日(2003.11.12)  
 (65) 公表番号 特表2006-514294 (P2006-514294A)  
 (43) 公表日 平成18年4月27日(2006.4.27)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2003/035884  
 (87) 国際公開番号 W02004/083782  
 (87) 国際公開日 平成16年9月30日(2004.9.30)  
 審査請求日 平成18年10月10日(2006.10.10)  
 (31) 優先権主張番号 10/390,200  
 (32) 優先日 平成15年3月17日(2003.3.17)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 505363341  
 ノースロップ グラマン システムズ コ  
 ーポレーション  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州、ロサ  
 ンゼルス、センチュリー パーク イース  
 ト 1840  
 (74) 代理人 100095407  
 弁理士 木村 満  
 (72) 発明者 リュウ、ジー、ケビン  
 アメリカ合衆国、カリフォルニア州 93  
 065、シミ バレー、マーブルヘッド  
 アベニュー 105

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 力に依存するジャイロスコープの感度を測定する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ジャイロスコープを有する慣性機器の出力に依存する力に依存する (force-dependent) エラーを校正する方法であって、

前記ジャイロスコープによる測定結果を複数回作成することと、

前記ジャイロスコープの出力に存在する力に依存するエラーの力効果 (force-effect) モデルを、前記ジャイロスコープを有する慣性機器に作用する力と当該力が作用したときの前記測定結果のエラーとから導出し、前記力効果モデルは力ベクトルを乗じた力効果モデルのパラメータマトリクスにより定義される 1 または複数のパラメータを有することと

、

1 または複数の力に依存するエラーと前記力効果モデルが有する前記パラメータとの関係を作成し、前記 1 または複数の力に依存するエラーは回転のシーケンスから作成されることと、

から構成される方法。

【請求項 2】

前記力効果モデルは、前記機器に作用する力の関数として導出されることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記力効果モデルは、式

$$\dot{\phi}_S^B = S * \dot{G}^B$$

により生成され、

$$\dot{\phi}_S^B$$

は前記機器の出力、 $S$  は前記力効果モデルのパラメータマトリクス、 $G^B$  は前記機器によって測定される  $G$  の力のベクトルであることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

10

前記力に依存するエラーと前記力効果モデルが有する前記パラメータとの関係は、状態ダイアグラムで表されることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

複数の軸を有するテーブルの 1 または複数の軸について、前記機器が、ある位置から別の位置に回転し、前記回転による結果として生じるエラーを表す前記状態ダイアグラムを生成することを特徴とする請求項 4 に記載の方法。

【請求項 6】

前記慣性機器を励起させ、前記 1 または複数の力に依存するエラーを観察するために、最初の回転シーケンスのセットを探すことをさらに備える請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

20

前記最初の回転シーケンスのセットは、複数軸をサポートするシステムにおける 1 または複数の軸に関する機器の一連の回転であって、そのシステムは前記機器の測定結果に影響を与えるエラーパラメータを顕わにするものであることであり、

前記力に依存するエラーと前記力効果モデルが有する前記パラメータとの関係の状態ダイアグラムは、その軸に関する前記機器の一連の回転によって引き起こされうるエラーパラメータの影響を含む、

ことを特徴とする請求項 6 に記載の方法。

【請求項 8】

複数の機器の回転を表す前記状態ダイアグラムを通して少なくとも 1 つのパスを決定することをさらに備えることを特徴とする請求項 7 に記載の方法。

30

【請求項 9】

前記少なくとも 1 つのパスを決定することには、前記状態ダイアグラムを通してあり得るクローズドな多数のループパスを決定することを含み、クローズドなループパスは回転パスであってその初期の位置へと戻る回転パスである、

ことを特徴とする請求項 8 に記載の方法。

【請求項 10】

クローズドなループパスの数を決定するにあたり、前記あり得るパスから、サーチした多数のパスを減らすパス除去プロセスを実行すること、

をさらに備えることを特徴とする請求項 9 に記載の方法。

【請求項 11】

40

前記クローズドなループパスのサーチは、大きなエラー感度を示す最も短い回転回数を有する回転シーケンスを認定することを特徴とする請求項 10 に記載の方法。

【請求項 12】

較正目的のための前記力効果モデルが有する前記パラメータを解くこと、

をさらに備えることを特徴とする請求項 1 に記載の方法。

【請求項 13】

ジャイロスコープを有する慣性機器の出力に依存する力に依存するエラーを決定する 1 または複数の指示を有し、プロセッサにより実行されるとき、プロセッサに対し指示を実行させるためのプログラムであって、

コンピュータに、

50

前記ジャイロスコープによる測定結果を複数回作成することと、

前記ジャイロスコープの出力に存在する力に依存するエラーの力効果モデルを、前記ジャイロスコープを有する慣性機器に作用する力と当該力が作用したときの前記測定結果のエラーとから導出し、前記力効果モデルはカベクトルを乗じた力効果モデルのパラメータマトリクスにより定義される１または複数のパラメータを有することと、

１または複数の力に依存するエラーと前記力効果モデルが有する前記パラメータとの関係を作成し、前記１または複数の力に依存するエラーは回転のシーケンスから作成されることと、

を実行させるためのプログラムを格納する機械可読な記録媒体。

【請求項１４】

前記機器の多数の回転を表す状態ダイアグラムを通して、少なくとも１つのパスを決めるために回転パスを導出させる

ことを特徴とするプログラムを格納する請求項１３に記載の機械可読な記録媒体。

【請求項１５】

前記回転パスは、前記状態ダイアグラムを通してあり得る多数のクローズドなループパスを決定し、クローズドなループパスは回転パスであり、その初期の位置へと戻る回転パスであって、

クローズドなループパスの数を決定する際に、前記あり得るパスから、サーチした多数のパスを減らすためのパス除去プロセスを実行させる

ことを特徴とするプログラムを格納する請求項１４に記載の機械可読な記録媒体。

【請求項１６】

前記力効果モデルを、前記機器に作用する力の関数として導出させる

ことを特徴とするプログラムを格納する請求項１５に記載の機械可読な記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、力に依存する（force-dependent）エラーによるジャイロスコープの出力を訂正するシステムおよび方法に関する。特に本発明の一実施例は、力効果モデルを利用するジャイロスコープの較正方法に関連する。

【背景技術】

【０００２】

飛行機の慣性飛行は、飛行機が離陸準備をするときから始まり、飛行機が着陸し動きが止まって終わるシーケンスの間にデータを積分することに依存する。飛行機の慣性飛行システム（Inertial Navigation System; INS）は加速度計やジャイロスコープのような複数のコンポーネントを含む。それらは、慣性力の効果を加速度、速度、位置測定に変換する。加速度計は３つの直交した感度軸（orthogonal sensitive axes）に沿って加速の力を決定し、このデータは、データの積分を通じて、飛行機の速度や位置に変換される。飛行機の幾何学的な関係において、加速度計が固定されているストラップダウン（strapdown）システムでは、飛行機の姿勢を測定するジャイロスコープは、加速度計の軸の姿勢をも測定する。ジャイロスコープで測定されたデータは、空間的に安定した適切な軸に沿って、加速度計の出力を解くために採用される。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００３】

ジャイロと加速度計との出力の正確さに影響を与えるエラーのため、飛行システムの測定や機能の正確さを保証するために補償が必要になる。システムや機器は、様々な形式を採り、また、出力を行うための本質的に異なるテクノロジーに依存する。ジャイロスコープは、ジンバル（gimbaled）機械または電気機械の装置（arrangement）や、リングレーザや光ファイバの装置や、その他の装置を含んでいてもよい。一方、加速度計はぶら下がった塊の形状からなることができ、および／または圧電技術やシリコン技術を採用するこ

10

20

30

40

50

ともできる。にもかかわらず、それぞれの慣性飛行システムの装置は、多かれ少なかれ、その機能的なコンポーネントのエラー特性のために、不正確さに直面する。

【 0 0 0 4 】

なぜならば、慣性の格付け (grade) 機器は、動きに対して非常に大きなダイナミックレンジを測定することを要求されるからであり、通常は、それらの機器は最新の技術に依存する。これらのセンサは非常に小さい量を測定できなければならない。たとえば、飛行を格付けする加速度計は標準の重力加速度の数百万分の一の加速度を測定しなければならない。また、ジャイロは地球の自転速度の数十万分の一を測定しなければならない。しばしば、これらの大きさについて詳細なエラーの原因を正確に認定することが不可能になる。可能であればいつでも、測定が汚染されることを防ぎ、ドリフトに対する感度を減少させるために、個々のエラーの原因を孤立させるべきである。特に、ジャイロのエラーの見積については、加速度計のエラーに対して不感とすべきである。というのは、加速度計のエラーは、通常は、ジャイロのエラーよりもずっと大きいからである。

【 0 0 0 5 】

較正モデルを使うことで加速度計のエラーとは独立にジャイロのエラーを見積もる 1 つのアプローチは、J. Mark et al., in "Fast Orthogonal Calibration of a Ring Laser Strapdown System," Symposium Gyro Technology, Sept. 1986, Stuttgart, West Germany の記事に記載されている。この記事の執筆者の何人かは、本出願の発明者でもある。この記事で公開された内容は、本出願に参照として含まれる。このアプローチは、スケール係数 (scale factor) 及びジャイロのトライアド (gyro triad) の直交エラーについて、2 軸のレートテーブル (rate table) の各軸の周りの 90 度の回転が、どのように、傾斜軸及び方位角のエラーの増加をもたらすかを図示した状態ダイアグラムを用いて、直交するジャイロのトライアドの高速な較正を提供した。総合的な姿勢のエラーの変化は、状態ダイアグラム上のある位置から別の位置に移動することにより起こる。ジャイロの較正のプロセスにおいて、加速度計のエラーの影響を最小限にするため、スタート地点に戻って終わる状態ダイアグラムを通る回転パス (rotation path) がこのアプローチにおいて利用され、加速度計の定常的なエラーによる水平傾斜の観測 (level tilt observations) の汚染を除去した。

【 0 0 0 6 】

高速な直交較正手法や、他の過去のアプローチは、加速度計のエラーとは独立にジャイロのエラーを見積もる方法を提供した。しかし、これらの過去の手法は、力のかかる状態の下でジャイロスコープが示すことが明らかになったエラー出力の理由を説明しなかった。力に依存するジャイロスコープのエラーは、較正の手順の間にスケール係数およびジャイロのトライアドの直交エラーを見積もるという過去のアプローチの計算を汚染しうる。

【 0 0 0 7 】

前述の先行技術の欠点および不利益は、力に依存するジャイロスコープの感度を測定するシステムおよび方法を提供する本発明の一つの側面により軽減される。ジャイロスコープの出力に関する加速度または力の効果の力効果モデルは、本発明により初期的に決定される。本発明では、さらに、前述の力効果モデルのパラメータを励起し、観察する回転シーケンスを利用する方法を示す。これらのパラメータは、その後、力に依存するエラーの較正に使われてもよい。ジャイロスコープの力効果モデルのパラメータを含む状態ダイアグラムは力効果モデルから導出され、状態ダイアグラムにおいてある位置から別の位置への移動は、対応する動きにしたがってジャイロスコープのトライアドが回転することで起きるジャイロスコープのエラーを示す。本発明は、加速度計の較正からジャイロスコープのエラーの較正を分離するために特定の回転の数を有する 2 軸のレートテーブルの状態ダイアグラムを用いて、達成可能な、あり得るすべてのクローズドなループパスを探し出す新しいアルゴリズムを提供する。最小限の長さを有し、より大きなエラー感度を示すクローズドなループパスは、エラーのパラメータを較正し、力に依存するジャイロスコープの感度を下げるために選択される。

【 0 0 0 8 】

新規なものであると信じる本発明の特徴は、添付の請求項の詳細とともに示される。本発明は、その機構および実施手法に関して、さらなる有益性とともに、参照番号が図面のいたるところをパーツのように指定している添付の図面を取り込み、以下の記載を参照することで最良の理解をできるかもしれない。

【課題を解決するための手段】

【0009】

以下の記載は、当業者が本発明を利用し、発明を実行できるように、発明者により熟考されたベストモードを説明するために提供される。しかし、様々な変形は、当業者にとっては容易に明らかである。というのは、ここに記載した本発明の一般原則は、特に、力に依存するジャイロ스코プの感度を測定する方法を提供するために定義されたものだからである。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0010】

ジャイロのいくつかの型をテストしている間に、本発明の発明者はジャイロの出力はジャイロの感度軸(sensing axis)に沿って加えられた力および入力周波数に比例することを発見した。テストにおいては、ジャイロは、線形のGの力がジャイロの感度軸のz軸に沿って加わるように、振動するテーブルの上に垂直にマウントされた。ジャイロの出力の周波数応答は、50から500Hzまでの間の周波数範囲において、一定のGの力を正弦曲線を描いて振動して及ぼすようにして得られた。

【0011】

20

図1は、本発明の一の実施例の一面にしたがって、ジャイロのトライアッドの較正を行う方法を例示するフローダイアグラムである。テスト結果から、ジャイロの出力はGの力および振動周波数に比例すると観測された(102)。ジャイロの出力は以下のようにモデル化できる：

【0012】

【数1】

$$\beta(f) = k * f * G$$

30

【0013】

ここで、(f)はジャイロのバイアス出力(bias output)であり、単位はdeg/secまたはarcsec/secであり、周波数領域である。fは入力周波数であり、単位はHzである。Gは入力されるGの力であり、単位はgである。そしてkは比例定数であり、単位は(deg/sec)/g/Hzまたは(arcsec/sec)/g/Hzである。

【0014】

周波数領域にあるこの入力/出力関係は、時間の領域に変換することができる(104)：

40

【0015】

【数2】

$$\dot{\phi}(t) = \beta(t) = \frac{k}{2\pi} * 2\pi f * G = \frac{k}{2\pi} * \omega * G = \frac{k}{2\pi} * \dot{G}$$

【0016】

【数 3】

$$\phi = \int \frac{k}{2\pi} * \dot{G} dt$$

10

【0017】

ここで、(・)は時間の導関数であり、kの単位は、sec\*Hz=1に注意して、deg/gまたはarcsec/gに変換される。

【0018】

ストラップダウンの慣性飛行システム (INS) における 力の効果 のモデリング

20

【0019】

上記の等式群は、ストラップダウンの慣性飛行システム (INS) における 3 次元の状況に、以下のように拡張することができる (106) :

【0020】

【数 4】

$$\dot{\phi}_S^B = S * \dot{G}^B$$

30

【0021】

ここで、Sは3×3の力効果モデルのパラメータの行列であり、次のように定義される。

40

【0022】

【数 5】

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}$$

10

20

【 0 0 2 3 】

また、それぞれの  $S_{ij}$  は上述の  $k$  と同じ単位であり、一方で  $G^B$  はボディーフレーム (body frame)  $B$  における  $G$  の力のベクトルであり、加速度計により測定される。

【 0 0 2 4 】

飛行フレーム (navigation frame)  $N$  の傾きのエラーは、以下に示すように計算される ( 1 0 8 ) :

【 0 0 2 5 】

【数 6】

$$\dot{\phi}_S^N = C_B^N * \dot{\phi}_S^B = C_B^N * S * \dot{G}^B$$

30

【 0 0 2 6 】

なぜならば、

【 0 0 2 7 】

【数 7】

$$G^B = C_N^B * G^N$$

40

【 0 0 2 8 】

【数 8】

$$\dot{G}^B = \dot{C}_N^B * G^N = -\omega_{NB}^{BX} * C_N^B * G^N$$

【0029】

であるから、

【0030】

【数 9】

$$\dot{\phi}_S^N = -C_B^N * S * \omega_{NB}^{BX} * C_N^B * G^N = C_B^N * S * \omega_{NB}^{BX} * C_N^B * F^N$$

10

【0031】

ここで、 $F^N = -G^N$  は、加速度計により測定される特有の力のベクトルである。式 9 は、容易に積分でき、その力が誘導した傾きのエラーを評価できる。

【0032】

較正の結果に関する力の効果

【0033】

スケール係数および照準のずれ (misalignment) のエラーによるジャイロの傾きのエラーは次のようにモデル化できる：

20

【0034】

【数 10】

$$\dot{\phi}_G^N = C_B^N * M * \omega_{NB}^B$$

30

【0035】

ここで、M は  $3 \times 3$  のジャイロのエラーのパラメータの行列であり、数 11 の巡回行列または数 12 の下三角行列として定義される：

【0036】

【数 1 1】

$$\begin{bmatrix} S_x & 0 & M_{xz} \\ M_{yx} & S_y & 0 \\ 0 & M_{zy} & S_z \end{bmatrix}$$

10

20

【 0 0 3 7】

【数 1 2】

$$\begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ M_{yx} & S_y & 0 \\ M_{zx} & M_{zy} & S_z \end{bmatrix}$$

30

40

【 0 0 3 8】

ここで、 $S_i$  はジャイロのスケール係数のエラーであり、 $M_{ij}$  は照準のずれのエラーである。これらの2つの行列のどちらかが、 $M_{xz}$  と  $M_{zx}$  とを入れ替えただけの違いであろう差分 (difference) とともに、以下の微分で使われる。通常、INSシステムの較正のためには、一組のシステムの回転 (system rotation) が用いられ、すべてのエラー変数の値を計算するために、測定の観察におけるそれらの変数を表す。好ましい較正手法は、高速直交較正であり、これは John Mark, et al. の参照として含まれる上述の記事に記載がある。このアプローチは、ジャイロのトライアドの回転により生じる全てのエラーパラメータの影響を示す、較正の「状態ダイアグラム」を創り出した。回転シーケンスは

50

、最大の感度を提供し、全体のテストの時間を短縮するだけでなく、二次汚染を防止するために、ジャイロのエラーを、加速度計のエラーから切り離すように選択される。本発明では、この状態ダイアグラムの手法を、同じ利益を得るために利用できる。

【 0 0 3 9 】

状態ダイアグラムは、上述の力効果モデルに由来する ( 1 1 0 )。較正の手順を単純化し、較正の時間とコストを削減するために、本発明の好ましい実施例では、低コストの2軸のレートテーブルを用い、回転を90度の整数倍に制限した。この好ましい実施例では、全部で16のシステム指向性 ( system orientation ) がありうる。対応するパスに依存するジャイロの傾きのエラーは、数10の積分によって計算され、また、図3に示す状態ダイアグラム行列の形で提供される。ジャイロのトライアドにおける90度の内部のジンバルローテーションの垂直な移り変わりに対応した4つの平行なグループがあり、また、それぞれのグループには、90度の外部のジンバルローテーションの垂直な移りわりに対応した4つのエントリがある。4 x 4のテーブルのそれぞれのエントリは、最初の3つの列は水平の ( 外部ジンバル ) 移りわりによる3つの ( x、y、z ) 傾きのエラーであり、第2の3つの列は垂直の ( 内部ジンバル ) 移りわりによる3つのエラーである。座標の定義は以下の通りである：xはロール軸であり、yはピッチ軸であり、zはヨー/ヘディング軸である。ヘディングが0であるとき、xは正の外部ジンバルが北を指しているのと同じ方向であり、zは正の内部ジンバルが下方を指しているのと同じ方向である。

10

【 0 0 4 0 】

ジャイロのエラーは、初期位置にいつも戻ってくる一方でクローズドなループパス ( closed loop path ) として参照される回転パスを選択することにより、加速度計のエラーとは別個に見積もることができる。指定した回転の数に依存するため、上記の条件を満足できるパスの数は限られている。しかし、これらのクローズドなループパスをサーチするためには、指定した回転の数とともにサーチの時間は指数的に増大する。

20

【 0 0 4 1 】

クローズドなループパスのサーチについてより効率的な手法を提供するために、本発明ではパス除去のプロセスを用いた新しいサーチアルゴリズムを使用する ( 1 1 2 )。

【 0 0 4 2 】

図2は、本発明の一実施例の一つの側面にしたがって新しいサーチアルゴリズムを実行する方法を例示したフローダイアグラムである。内部 ( i ) および外部 ( o ) の回転軸を有する2軸のレートテーブルであって、その上にジャイロのトライアドが紐付けされているまたは取り付けられているものを用いることが、このアルゴリズムでは仮定されている。また、このテーブルは各ステップにおいて、各軸90度回転されることが仮定されている。したがって、全部で16 ( 4 x 4 ) の異なった状態、又はジャイロのトライアドの向きがあり得る。

30

【 0 0 4 3 】

サーチのパス長 ( パス長 N ) は、ジャイロのトライアドが取り付けられているテーブルまたはプラットフォームが、最初の元の方角に戻るために特定される回転の数である。カウンタ ( カウンタ k 2 0 2 ) は、サーチ中の今までのステップ数をカウントする。カウントは1からはじまり、Nまで上昇し、サーチの終わりには0で終わる ( 2 0 4 )。サーチの現在の状態 ( Current State 2 0 2 ) は、サーチ中のジャイロのトライアドの現在の向きを認定し、また、デフォルトの最初の状態として初期化される。パスの除去のプロセスは、現在の状態が、テーブルの動きの過去の状態 2 1 0 および 2 1 4 のいずれにも重ならないことを確認するために実装される。これによって、冗長なサーチの数が減り、サーチ時間を短縮できる。サーチの現在の状態は、現在のテーブルのローテーションのステップ、たとえば、外部の軸の回転に初期化される io の条件にしたがって新しい状態へ移り変わる ( 2 0 6 )。最終的には、特定されたパス長 N の終わりに ( 2 0 8 )、サーチの現在の状態が最初の状態に戻ったかどうかチェックされる ( 2 1 6 )。もし戻っていたら、それを成功したクローズドなループパスとして得点し、将来のエラーの分析のために記録さ

40

50

れる(218)。もし戻っていなければ、もしくはサーチの終了までにたどり着いていなければ(208)、プロセスが全てのあり得る外部のノ内部の回転の組み合わせ212、220、222を周期的に繰り返すことを継続する。

【0044】

改良されたアルゴリズムは、全てのあり得るクローズドなループパスを探すのに必要な時間を減らすことによって向上した効率を提供する。下記の表1はサーチ結果を示す。パス長Nは選択されたジャイロのトライアドの回転数である。あり得るパスはあり得る内側のノ外側のジンバルの回転の組み合わせ(io)であり、総数は $4^N$ になる。サーチパスは本発明のアルゴリズムを用いて実際にサーチされたパスの数である。ありうるパスの数に比べて大幅に少ない数のサーチパスが要求されることが表1よりわかる。クローズドなループパスは求めるべきサーチ結果の数である。

【0045】

【表1】

パス長N	ありうるパス数 $4^N$	サーチパス	クローズドな ループパス
2	16	16	0
4	256	144	12
6	4,096	1,296	120
8	65,536	11,664	1,164
10	1,048,576	104,976	9,552
12	16,777,216	944,784	89,004
14	268,435,456	8,503,056	797,448
16	4,294,967,296	76,527,504	7,174,380

【0046】

一旦全てのクローズドなループパスが発見されると、それらのパスに沿って蓄積されたジャイロの傾きのエラーが、先に開発された状態ダイアグラムを用いて計算される。水平の傾きで観測できるもののそれぞれのの中のエラーパラメータの単純な組み合わせを生み出す独立したパスが好ましくは選択される。全てのエラーパラメータを観測することができるようにするため、我々はジャイロのエラーの較正を完成させるいくつかのパラメータのために、45度の回転を使うことを必要とする。

【0047】

上述の回転のシーケンスの間に蓄積された2軸の水平の傾きのエラーのためのジャイロの較正の結果を、下記の表2に示す。したがって、これらのエラーは水平軸の加速を測定することにより得られたものである。同じ表2に、同じ回転のシーケンスにより蓄積された力効果(force-effect)によるエラーをリストとして示す。

【0048】

【表 2】

	テスト1		テスト2		テスト3	
	ジャイロ	力	ジャイロ	力	ジャイロ	力
Xの傾き	$4\pi S_x$	$-8 S_{xz}$	$4\pi S_y$	$8 S_{yz}$	$-4\pi M_{yx}$	$-2\pi (S_{xx}+S_{yy})$
Yの傾き	$-8 M_{xz}$	$2\pi (S_{yy}+S_{zz})$	$8 M_{zy}$	$2\pi (S_{xx}+S_{zz})$	$4\pi S_z$	$2\pi (S_{xy}+S_{yx})$

10

## 【0049】

見て分かるとおり、ジャイロに作用する力から誘導されるエラーは、ジャイロのエラーと対応し、較正がなければエラーの主要源を構成するであろう。

## 【0050】

2軸のレートテーブルを用いた力効果の較正

## 【0051】

ジャイロのエラーから加速度のエラー（または力のエラー）を分離するために、図3に示す状態ダイアグラム行列に類似するものが、力効果のために、数9を積分することによって生成される。この表は図4に例示される。全体の蓄積された傾きのエラーを計算するために、早く見つかった同じクローズドなループパスが再使用され、今回は、図3と図4との両方をまとめた状態ダイアグラム行列が用いられた。これらの結果から、3つの独自の回転シーケンスが最良の結果を得るために選択された。これらの回転のシーケンスは下記の表3に、テスト1～3のリストとしてある。これらの新しいテストは、データを生むための古いテスト4～6に付け加えられた：

20

## 【0052】

【表 3】

テスト	Xの傾き	Yの傾き
1	$4\pi S_x$	$2\pi(S_{yy}+S_{zz})$
2	$4\pi S_y$	$2\pi(S_{xx}+S_{zz})$
3	$2\pi(S_{xx}+S_{yy})$	$-4\pi S_z$
4	$4\pi S_x-8S_{xz}$	$2\pi(S_{yy}+S_{zz})-8M_{xz}(M_{zx})$
5	$4\pi S_y+8S_{yz}$	$2\pi(S_{xx}+S_{zz})+8M_{zy}$
6	$-2\pi(S_{xx}+S_{yy})-4\pi M_{yx}$	$2\pi(S_{xy}+S_{yx})+4\pi S_z$

10

テスト1: O720

総計: 720°

テスト2: I90 O720 I-90

総計: 900°

20

テスト3: O90 I720 O-90

総計: 900°

テスト4: O180 I180 O180 I180 O180 I-180 O180 I-180

総計: 1440°

テスト5: I90 O180 I180 O180 I-180 O180 I-180 O180 I90

総計: 1440°

テスト6: I45 O270 I270 O-720 I450 O450 I-45

総計: 2250°

## 【0053】

興味のある力効果モデルの個々のパラメータを選び出すためには、これらのテストはさらなる修正を要求する。そうするために、力効果モデルのパラメータの行列内のさらに9つ増えたパラメータのために、回転のシーケンスを追加することが必要になる。結果として、本発明では3つの追加テスト、すなわち下記の表4記載のテスト7～9を利用し、全てのエラーパラメータの観測を完了する。

30

## 【0054】

【表 4】

テスト	Xの傾き	Yの傾き	Zの傾き
1	$4\pi S_x$	$2\pi(S_{yy}+S_{zz})$	$-2\pi(S_{yz}-S_{zy})$
2	$4\pi S_y$	$2\pi(S_{xx}+S_{zz})$	$2\pi(S_{zx}-S_{xz})$
3	$2\pi(S_{xx}+S_{yy})$	$-4\pi S_z$	$-2\pi(S_{xy}-S_{yx})$
4	$4S_{xz}$	$4M_{xz}(M_{zx})$	$\pi(S_{yz}-S_{zy})$
5	$4S_{yz}$	$4M_{zy}$	$\pi(S_{zx}-S_{xz})$
6	$-4\pi M_{yx}$	$2\pi(S_{xy}+S_{yx})$	$2\sqrt{2}\pi(S_{zx}-S_{xz})$
7	0	$-2(S_{yz}-S_{zy})$	$4M_{xz}$
8	0	$2(S_{zx}-S_{xz})$	$-4M_{zy}$
9	0	$-2\pi(S_{xy}-S_{yx})$	0

テスト1:0720

総計:720°

テスト2:I90 O720 I-90

総計:900°

テスト3:O90 I720 O-90

総計:900°

テスト4:I180 O180 I+180 O-180

総計:720°

テスト5:I90 O180 I+180 O-180 I90

総計:720°

テスト6:I45 O720 I-90 O-720 I45

総計:1620°

テスト7:O90 I180 O90 I-180 O-90 I-180 O-90 I-180

総計:1080°

テスト8:I90 O90 I180 O90 I180 O-90 I-180 O-90 I90

総計:1080°

テスト9:O135 I-360 O-90 I360 O-180 I360 O90 I-360 O45 総計:1980°

## 【0055】

上述の通り、本発明の様々な実施例にしたがって実施された、力に依存するジャイロスコープの感度の測定方法は、ジャイロスコープの出力に依存する力に依存するエラーを決定する新しい手法を提供する。このような力に依存するエラーを決定し、孤立させることで、本発明はそのような力に依存するエラーが、較正中に、ジャイロのトライアドのスケール係数のエラーや直交エラーを二次的に汚染することを防ぐことができる。

## 【0056】

本発明は、慣性機器に依存する力に依存するエラーのモデル化や見積の方法を提供することもできる。本発明で示した内容を適用することで、本発明は飛行機のINSと結合してすでに使われているハードウェア以外のハードウェアを要求せず、また、INSの設定に関係なく、ジャイロや加速度計を含む構成機器の較正手順を、実質上、より使いやすくする。それゆえ、その方法は、リングレーザ、光ファイバ、機械式、電気機械式、圧電式を含む広範囲な機器技術を採用するが、これらに限定されないストラップダウン及びジンバル装置に基づいたINSの性能を包含し、高める。

## 【 0 0 5 7 】

添付の図面中に具体的な実施例が記載され、提示された一方で、そのような実施例は例示に過ぎず、その広い発明に関してはそのような実施例に限定されないものと理解される。また、この発明は提示され、記載された特定の構造や装置に限定されないものと理解される。というのは様々な他の修正が可能だからである。さらに、本発明やそのいくつかの特徴をハードウェアやプログラマブルデバイス、ファームウェア、ソフトウェア、これらの結合として実装することも可能である。たとえば、本発明または本発明の部分は、磁気、光学、または半導体ストレージメディアのような、プロセッサが可読なストレージメディアや機械可読なメディアの中に具現化されうる。当業者は、本発明の範囲または精神から離れることなく、記載された好ましい実施例の様々な適応や修正を形作ることができることを正しく認識するであろう。それゆえ、添付の請求項の範囲の中で、本発明は、特にここで記載したものと異なるものを実施されうるものと理解される。

10

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 5 8 】

【図 1】本発明の一実施例の一面にしたがったジャイロのトライアドの較正方法を示すフローダイアグラムである。

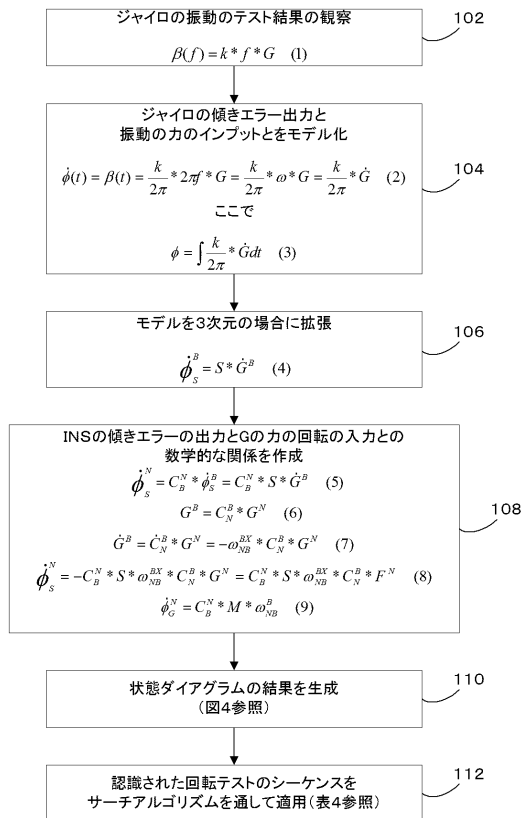
【図 2】本発明の一実施例の一面にしたがった新しいサーチアルゴリズムを実施する方法を示したフローダイアグラムである。

【図 3】本発明の一実施例の一面に対応したジャイロのトライアドの内外のジンバルの回転のためのジャイロのエラー状態ダイアグラム行列である。

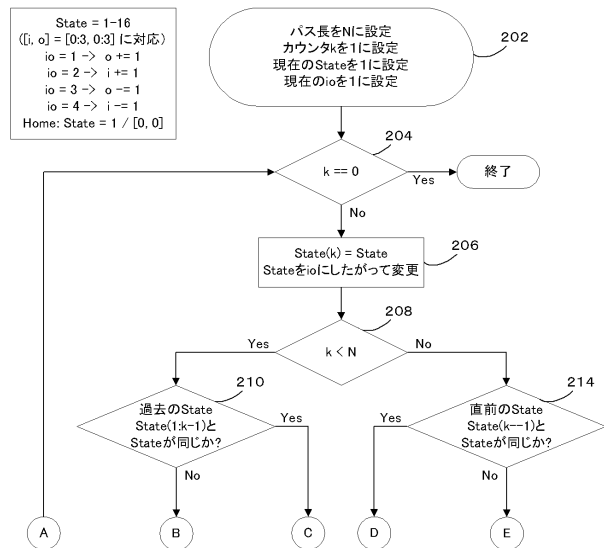
20

【図 4】(A)、(B)、(C)および(D)は、本発明の一実施例の一面に対応したジャイロのトライアドのジンバル回転のための力に依存するエラー状態ダイアグラム行列である。

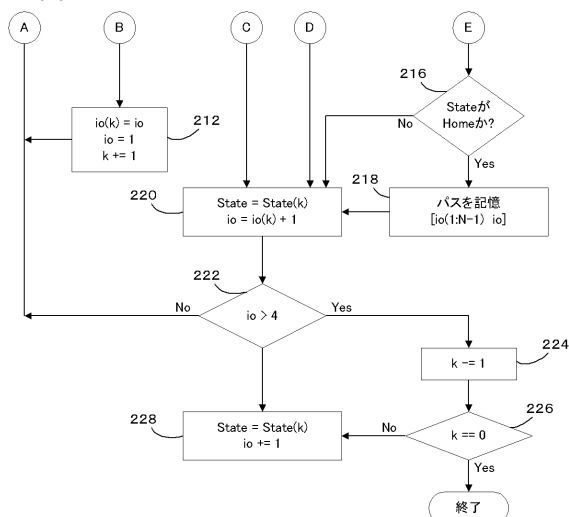
## 【図 1】



## 【図 2 A】



【 ㊦ 2 B 】



【圖 3】

```
For n=1; [phi (n, :, 1) ;phi (n, :, 2)]
```

$$\begin{bmatrix} 1/2 * \pi * Sx, & 1/2 * \pi * Sx, & 1/2 * \pi * Sx, & 1/2 * \pi * Sx \\ Myx, & -Myx, & -Myx, & Myx \\ Myx, & Myx, & -Myx, & -Myx \\ Mxz, & Mxz, & Mxz, & Mxz \\ Mxz, & -1/2 * \pi * Sz, & -Mxz, & 1/2 * \pi * Sz \\ 1/2 * \pi * Sz, & Mxz, & -1/2 * \pi * Sz, & -Mxz \end{bmatrix}$$

```
For n=2: [phi (n, :, 1) ;phi (n, :, 2)]
```

$1/2 * \pi^* S_y$ ,	$1/2 * \pi^* S_y$ ,	$1/2 * \pi^* S_y$ ,	$1/2 * \pi^* S_y$
$Mzy$ ,	$Mzy$ ,	$-Mzy$ ,	$-Mzy$
$-Mzy$ ,	$Mzy$ ,	$Mzy$ ,	$-Mzy$
$-Mxz$ ,	$-Mxz$ ,	$-Mxz$ ,	$-Mxz$
$Mxz$ ,	$-1/2 * \pi^* S_z$ ,	$-Mxz$ ,	$1/2 * \pi^* S_z$
$1/2 * \pi^* S_z$ ,	$Mxz$ ,	$-1/2 * \pi^* S_z$ ,	$-Mxz$

```
For n=3; [phi (n, :, 1) ;phi (n, :, 2)]
```

$$\begin{bmatrix} 1/2 * \pi^* Sx, & 1/2 * \pi^* Sx, & 1/2 * \pi^* Sx, & 1/2 * \pi^* Sx \\ Myx, & -Myx, & -Myx, & Myx \\ Myx, & Myx, & -Myx, & -Myx \\ -Mxz, & -Mxz, & -Mxz, & -Mxz \\ -Mxz, & -1/2 * \pi^* Sz, & Mxz, & 1/2 * \pi^* Sz \\ 1/2 * \pi^* Sz, & -Mxz, & -1/2 * \pi^* Sz, & -Mxz \end{bmatrix}$$

```
For n=4; [phi (n, :, 1) ;phi (n, :, 2)]
```

$$\begin{bmatrix} 1/2 * \pi^* S_y, & 1/2 * \pi^* S_y, & 1/2 * \pi^* S_y, & 1/2 * \pi^* S_y \\ -Mzy, & -Mzy, & Mzy, & Mzy \\ Mzy, & -Mzy, & -Mzy, & Mzy \\ Mxz, & Mxz, & Mxz, & Mxz \\ -Mxz, & -1/2 * \pi^* Sz, & Mxz, & 1/2 * \pi^* Sz \\ 1/2 * \pi^* Sz, & -Mxz, & -1/2 * \pi^* Sz, & Mxz \end{bmatrix}$$

【 図 4 A 】

```
>> n=1: (phi(n, :, 1) : phi(n, :, 2))
ans=
[
    1/2*Sx*pi+Sxy-Sxz,
    Myx+1/4*Syy*pi+1/4*Szz*pi-1/2*Szy-1/2*Syz,
    Myx+1/4*Szy*pi+1/4*Syz*pi+1/2*Syy-1/2*Szz,
    Mxz,
    Mxz,
    1/2*Sz*pi,
>> n=2: (phi(n, :, 1) : phi(n, :, 2))
ans=
[
    1/2*Sy*pi-Syx+Syz,
    Mzy+1/4*Sxx*pi+1/4*Szz*pi-1/2*Szx-1/2*Sxz,
    -Mzy+1/4*Szx*pi-1/4*Sxz*pi+1/2*Sxx-1/2*Szz,
    -Mxz,
    Mxz,
    1/2*Sz*pi,
>> n=3: (phi(n, :, 1) : phi(n, :, 2))
ans=
[
    1/2*Sx*pi+Sxy+Sxz,
    Myx+1/4*Syy*pi+1/4*Szz*pi+1/2*Szy+1/2*Syz,
    Myx-1/4*Szy*pi+1/4*Syz*pi+1/2*Syy-1/2*Szz,
    -Mxz,
    -Mxz,
    1/2*Sz*pi,
>> n=4: (phi(n, :, 1) : phi(n, :, 2))
ans=
[
    1/2*Sx*pi-Syx-Syz,
    -Mzy+1/4*Sxx*pi+1/4*Szz*pi+1/2*Szx+1/2*Sxz,
    Mzy-1/4*Szx*pi+1/4*Sxz*pi+1/2*Sxx-1/2*Szz,
    Mxz,
    -Mxz,
    1/2*Sz*pi,
```

【 ㊦ 4 B 】

$$\begin{aligned} & 1/2*Sx*pi-Sxz-Sxy, \\ -Myx+1/4*Syy*pi+1/2*Szy+1/2*Syz+1/4*Szz*pi, \\ Myx-1/2*Syy+1/4*Syz*pi-1/4*Syz*pi+1/2*Szz, \\ Mxz+1/4*Syy*pi+1/4*Sxx*pi-1/2*Sxy-1/2*Syz, \\ & -1/2*Sz*pi-Sxz+Szy, \\ Mxz-1/4*Sxy*pi+1/4*Syx*pi-1/2*Syy+1/2*Sxx, \\ & 1/2*Sy*pi+Sy+Syz+Syx, \\ Mzy+1/4*Sxx*pi+1/2*Szx+1/2*Sxz+1/4*Szz*pi, \\ Mzy-1/2*Sxx+1/4*Szx*pi-1/4*Sxz*pi+1/2*Szz, \\ -Mxz+1/2*Sxy+1/4*Syy*pi+1/4*Sxx*pi+1/2*Syx, \\ & -1/2*Sz*pi+Szy+Szx, \\ Mxz-1/4*Sxy*pi+1/2*Syy-1/2*Sxx+1/4*Syx*pi, \\ & 1/2*Sx*pi+Sxz-Sxy, \\ -Myx+1/4*Syy*pi-1/2*Szy-1/2*Syz+1/4*Szz*pi, \\ Myx-1/2*Syy-1/4*Szy*pi+1/4*Syz*pi+1/2*Szz, \\ -Mxz+1/4*Syy*pi+1/4*Sxx*pi-1/2*Sxy-1/2*Syz, \\ & -1/2*Sz*pi+Sxz-Szy, \\ -Mxz-1/4*Sxy*pi+1/4*Syx*pi-1/2*Syy+1/2*Sxx, \\ & 1/2*Sy*pi+Sy+Syz+Syx, \\ -Mzy+1/4*Sxx*pi-1/2*Szx-1/2*Sxz+1/4*Szz*pi, \\ -Mzy-1/2*Sxx-1/4*Szx*pi+1/4*Sxz*pi+1/2*Szz, \\ Mxz+1/2*Sxy+1/4*Syy*pi+1/4*Sxx*pi+1/2*Syx, \\ & -1/2*Sz*pi-Szy-Szx, \\ -Mxz-1/4*Sxy*pi+1/2*Syy-1/2*Sxx+1/4*Syx*pi, \end{aligned}$$

【図 4 C】

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sx * pi - Sxy + Sxz, \\
-Myx + 1/4 * Syy * pi + 1/4 * Szz * pi - 1/2 * Szy - 1/2 * Syz, \\
-Myx + 1/4 * Szy * pi - 1/4 * Syz * pi + 1/2 * Syy - 1/2 * Szz, \\
& Mxz, \\
& -Mxz, \\
& -1/2 * Sz * pi,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sy * pi + Syx - Syz, \\
-Mzy + 1/4 * Sxx * pi + 1/4 * Szz * pi - 1/2 * Sxz - 1/2 * Sxz, \\
Mzy + 1/4 * Sxz * pi - 1/4 * Sxz * pi + 1/2 * Sxx - 1/2 * Szz, \\
& -Mxz, \\
& -Mxz, \\
& -1/2 * Sz * pi,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sx * pi - Sxy - Sxz, \\
-Myx + 1/4 * Syy * pi + 1/4 * Szz * pi + 1/2 * Szy + 1/2 * Syz, \\
-Myx + 1/4 * Szy * pi + 1/4 * Syz * pi + 1/2 * Syy - 1/2 * Szz, \\
& -Mxz, \\
& Mxz, \\
& -1/2 * Sz * pi,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sx * pi - Syx - Syz, \\
Mzy + 1/4 * Sxx * pi + 1/4 * Szz * pi + 1/2 * Sxz + 1/2 * Sxz, \\
-Mzy - 1/4 * Sxz * pi + 1/4 * Sxz * pi + 1/2 * Sxx - 1/2 * Szz, \\
& Mxz, \\
& Mxz, \\
& -1/2 * Sz * pi,
\end{aligned}$$

【図 4 D】

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sx * pi + Sxz + Sxy] \\
Myx + 1/4 * Syy * pi + 1/2 * Szy + 1/2 * Syz + 1/4 * Szz * pi] \\
-Myx - 1/2 * Syy + 1/4 * Syz * pi - 1/4 * Syz * pi + 1/2 * Szz] \\
Mxz - 1/4 * Syy * pi - 1/4 * Sxx * pi + 1/2 * Sxy + 1/2 * Syx] \\
& 1/2 * Sz * pi - Sxz + Szy] \\
-Mxz - 1/4 * Sxy * pi + 1/4 * Syx * pi - 1/2 * Syy + 1/2 * Sxx]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sy * pi - Syz - Syx] \\
-Mzy + 1/4 * Sxx * pi + 1/2 * Sxz + 1/2 * Sxz + 1/4 * Szz * pi] \\
-Mzy - 1/2 * Sxx + 1/4 * Sxz * pi - 1/4 * Sxz * pi + 1/2 * Szz] \\
-Mxz - 1/2 * Sxy - 1/4 * Syy * pi - 1/4 * Sxx * pi - 1/2 * Syx] \\
& 1/2 * Sz * pi + Szy + Sxz] \\
-Mxz - 1/4 * Sxy * pi + 1/2 * Syy - 1/2 * Sxx + 1/4 * Syx * pi]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sx * pi - Sxz + Sxy] \\
Myx + 1/4 * Syy * pi - 1/2 * Szy - 1/2 * Syz + 1/4 * Szz * pi] \\
-Myx - 1/2 * Syy - 1/4 * Szy * pi + 1/4 * Syz * pi + 1/2 * Szz] \\
-Mxz - 1/4 * Syy * pi - 1/4 * Sxx * pi + 1/2 * Sxy + 1/2 * Syx] \\
& 1/2 * Sz * pi + Sxz - Szy] \\
Mxz - 1/4 * Sxy * pi + 1/4 * Syx * pi - 1/2 * Syy + 1/2 * Sxx]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 1/2 * Sy * pi + Syz - Syx] \\
Mzy + 1/4 * Sxx * pi - 1/2 * Sxz - 1/2 * Sxz + 1/4 * Szz * pi] \\
Mzy - 1/2 * Sxx - 1/4 * Sxz * pi + 1/4 * Sxz * pi + 1/2 * Szz] \\
Mxz - 1/2 * Sxy - 1/4 * Syy * pi - 1/4 * Sxx * pi - 1/2 * Syx] \\
& 1/2 * Sz * pi - Szy - Sxz] \\
Mxz - 1/4 * Sxy * pi + 1/2 * Syy - 1/2 * Sxx + 1/4 * Syx * pi]
\end{aligned}$$

---

フロントページの続き

(72)発明者 マーク、ジョン

アメリカ合衆国、カリフォルニア州 91106、パサデナ、ボニータ レーン、シエラ 1640

(72)発明者 タザルテ、ダニエル、エー

アメリカ合衆国、カリフォルニア州 91304、ウエスト ヒルズ、ジャスティス ストリート 23729

審査官 大和田 有軌

(56)参考文献 特表2005-509149(JP,A)

特表2003-509697(JP,A)

特開平09-318382(JP,A)

特開平09-005104(JP,A)

特開昭53-095067(JP,A)

特開昭51-075491(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01C 19/00 - 25/00

G01P 9/00 - 9/04

G01P 15/00 - 21/02