

(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2017-106919

(P2017-106919A)

(43) 公開日 平成29年6月15日(2017.6.15)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO1C 21/16 (2006.01)	GO1C 21/16	2F129
B64G 1/36 (2006.01)	B64G 1/36	A
F42B 15/01 (2006.01)	F42B 15/01	

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2016-237348 (P2016-237348)
 (22) 出願日 平成28年12月7日 (2016.12.7)
 (31) 優先権主張番号 1521539.5
 (32) 優先日 平成27年12月7日 (2015.12.7)
 (33) 優先権主張国 英国 (GB)

(71) 出願人 508296554
 アトランティック・イナーシャル・システムズ・リミテッド
 Atlantic Inertial Systems Limited
 イギリス国、ピーエル6・6ディーイー、デボン、プリマス、サウスウェイ、クリッタフォード・ロード (番地なし)
 Clittaford Road, Southway, Plymouth, PL6 6DE, United Kingdom
 (74) 代理人 100086232
 弁理士 小林 博通

最終頁に続く

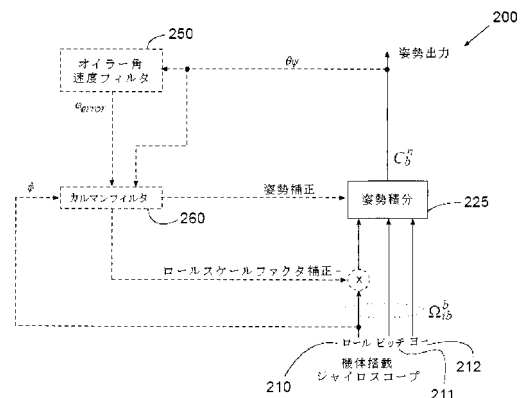
(54) 【発明の名称】 慣性航法システム

(57) 【要約】

【課題】 スピンする飛翔体の慣性測定システムが提供される。

【解決手段】 スピンする飛翔体の慣性測定システムは、飛翔体のスピン軸にほぼ平行に向けられた第1のロールジャイロと、三次元座標系を規定するようにロールジャイロに対して配置された軸を有する第2のジャイロ及び第3のジャイロと、コントローラとを備える。コントローラは、第1、第2、及び、第3のジャイロの出力からロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算し、計算したピッチ角及びヨー角と予想のピッチ角及びヨー角との差に基づいてロール角誤差を計算し、ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力としてロール角誤差を提供し、計算したロール角補正とロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロの出力に適用する。カルマンフィルタは、ロール速度と1つまたは複数の風の変数との関数として、ロール角誤差をモデル化する。

【選択図】 図2



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

スピンする飛翔体の慣性測定システムであって、
前記飛翔体のスピン軸にほぼ平行に向けられた第 1 のロールジャイロと、
三次元座標系を規定するように前記ロールジャイロに対して配置された軸を有する第 2 のジャイロ及び第 3 のジャイロと、
コントローラであって、

前記第 1、第 2、及び、第 3 のジャイロの出力から、ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む、現在の飛翔体の姿勢を計算し、

前記計算したピッチ角及びヨー角と、予想のピッチ角及びヨー角との差に基づいて、
ロール角誤差を計算し、

ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力として前記ロール角誤差を提供し、かつ、

前記計算したロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を前記ロールジャイロの前記出力に適用する、

前記コントローラと、を備え、

前記カルマンフィルタは、ロール速度と 1 つまたは複数の風の変数との関数として、ロール角誤差をモデル化する、

前記慣性測定システム。

10

【請求項 2】

前記カルマンフィルタは、ロール速度に相関する成分及び、風の影響に相関する別個の成分を有するとして、前記ロール角誤差をモデル化する、請求項 1 に記載の慣性測定システム。

20

【請求項 3】

前記カルマンフィルタは、使用中、反復して、モデルパラメータを更新するように構成される、請求項 1 または 2 に記載の慣性測定システム。

【請求項 4】

前記コントローラは、前記カルマンフィルタの初期条件として、前記カルマンフィルタに気象データを供給するように配置される、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の慣性測定システム。

30

【請求項 5】

前記コントローラは、前記ロール速度スケールファクタ補正を前記ロールジャイロの出力に直接適用するように構成され、かつ、前記ロール角補正を姿勢積分ユニットに適用するように構成される、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の慣性測定システム。

【請求項 6】

前記ロールジャイロは、MEMS ジャイロである、請求項 1 から 5 のいずれかに記載の慣性測定システム。

【請求項 7】

飛行時間の関数として前記予想のピッチ角及びヨー角は、平らな弾道の飛行から予想したピッチ角及びヨー角である、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の慣性測定システム。

40

【請求項 8】

前記ロール角誤差は、正接が、前記計算したピッチ角の変化速度に対する前記計算したヨー角の変化速度の比である角度として計算される、請求項 7 に記載の慣性測定システム。

【請求項 9】

前記ヨー角の前記変化速度及び前記ピッチ角の前記変化速度を計算する前に前記ヨー角及び前記ピッチ角の変化の高周波成分を除去するように配置されたローパスフィルタをさらに備える、請求項 8 に記載の慣性測定システム。

【請求項 10】

飛行時間の関数としてピッチ角及びヨー角の前記予想の値は、事前に計算した非平面で

50

あり得る飛行軌道から求められる、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の慣性測定システム。

【請求項 1 1】

前記システムは、直線加速度計を備えていない、請求項 1 から 1 0 のいずれかに記載の慣性測定システム。

【請求項 1 2】

前記ロール角補正及び前記ロールスケールファクタ補正は、誘導行動が開始される前のみ適用される、請求項 1 から 1 1 のいずれかに記載の慣性測定システム。

【請求項 1 3】

前記コントローラは、前記計算したピッチ角速度及びヨー角速度と、予想のピッチ角速度及びヨー角速度との差に基づいて、前記ロール角誤差を計算するように配置される、請求項 1 から 1 2 のいずれかに記載の慣性測定システム。

10

【請求項 1 4】

スピンする飛翔体の慣性測定システムにおけるロール角補正方法であって、
ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算することと、
前記計算したピッチ角及びヨー角と、予想のピッチ角及びヨー角との差に基づいて、ロール角誤差を計算することと、

ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力として前記ロール角誤差を提供することと、

前記計算したロール角補正とロール速度スケールファクタ補正とをロールジャイロの出力に適用することと、

20

を含み、

前記カルマンフィルタは、ロール速度と 1 つまたは複数の風の変数との関数として、ロール角誤差をモデル化する、

前記ロール角補正方法。

【請求項 1 5】

長手状の飛翔体の慣性航法システムにおけるロール角補正方法であって、

ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算することと、

前記ピッチ角及び前記ヨー角の変化速度を計算し、これらの速度を用いて、ロール角誤差を計算し、ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力として前記ロール角誤差を提供することと、

30

前記計算したロール角補正を前記計算した姿勢に、前記ロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロの出力に適用することと、

を含み、

前記カルマンフィルタは、ロール速度と 1 つまたは複数の風の変数との関数として、ロール角誤差をモデル化する、

前記ロール角補正方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

40

本開示は、慣性航法システムに関し、詳細には、飛翔体、例えば、誘導ロケットに使用される慣性航法システムに関する。慣性航法システムは、誘導飛翔体上で使用できて、位置情報を提供し、その位置情報を用いて、飛翔体の経路を標的に合わせて補正することができる。

【背景技術】

【0002】

航法システムは、様々な異なるセンサを用いて、物体の運動及び向きの変化を検出できる。例えば、加速度計、ジャイロ、及び、磁力計を使用することが多い。加速度計は、加えられた力を検出し、ジャイロは、回転速度を検出し、また、磁力計は、地球の磁場を検出して絶対的な向きの判断に使用できる。

50

【 0 0 0 3 】

慣性航法システムは、加速度計及びジャイロスコープに基づき、それだけで、または、GPS等の他の航法システムと共に使用できる。ロケット及び他の弾薬の航法/誘導には、微小電気機械(MEMS)センサが、サイズの小ささと低費用のために使用されることが多い。これらのセンサの精度は、外部センサを使用して、慣性センサ誤差を推定、補正しない限り、相対的に劣り、典型的な航法要件を満たすには十分でない。このような追加の補助センサの使用は、「統合航法」として知られているものの基礎である。

【 0 0 0 4 】

統合航法はカルマンフィルタリングとして知られるアルゴリズム技法に通常、基づいている。カルマンフィルタリングは、慣性センサ及び外部の補助センサからのデータを最適な方法で融合させるプロセスである。この技術をロバストに働かせるために、航法誤差は、常に一定の範囲内に維持されなければならない、さもなければ、カルマンフィルタの基礎となる直線性の仮定が有効でなくなり、統合航法による解決が、非常に不正確になり得る。飛翔体の飛行中、航法誤差の増加を抑制することによって、この状況を避けることが望ましい。

10

【 0 0 0 5 】

ロケット、ミサイル、及び、他の回転するプラットフォームを伴う適用に航法カルマンフィルタリングを考えると、正確なロール(バンク)角を初期設定して維持することが最大の課題である。このような適用における慣性誘導技術の使用に関連する問題の分析は、「Inertial Sensor Performance Requirements for a Long Range Artillery Rocket」(DTIC ADA 279936)において、J. S. Birdによって提供されており、ロールジャイロスケールファクタの精度が非常に重要で、5 ppm (parts per million)未満であることが必要だという結論を示している。

20

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 6 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 8 0 4 7 0 7 0 号明細書

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

30

【 0 0 0 7 】

残念なことに、低廉な低級MEMSジャイロスコープは、数千ppmのスケールファクタ誤差を有する。5 ppm未満のスケールファクタ精度を有するジャイロスコープを用いることは、費用という点で現実的ではない。従って、スケールファクタ精度がかなり低い低廉なセンサを用いて、所望の精度を達成できるシステムが必要である。

【 0 0 0 8 】

ジャイロスコープセンサの誤差は、偏り誤差とスケールファクタ誤差に大きく分かれる。これらの誤差及び他の誤差は、工場での校正プロセスの一部として測定し、除かれるが、センサが実際に使用される時、残余誤差が常に存在する。残余誤差は、温度及び湿度の変化や、装置に影響を与える他の物理的応力等、様々な理由により発生する。一般的に、これらの誤差は、装置にスイッチを入れるたびに、異なり得る。

40

【 0 0 0 9 】

上記で参照したJ. S. Birdの論文に記載されているように、ストラップダウン慣性航法システム(すなわち、慣性センサが、自由に回転して常に同じ水準に留まるようにジンバルプラットフォームに取り付けられるのではなく、機体本体に固定される)において、最大の問題の1つは、ロール速度が高いことから生じる。典型的に、弾道飛翔体のロール速度は、毎秒10~20の全回転、すなわち、毎秒、数千度台の回転速度となり得る。よって、1000 ppmの典型的なロール速度スケールファクタ誤差では、このジャイロから計算されたロール角(バンク角)は、毎秒数度の誤差となる。30~60 kmの典型的な飛翔範囲及び1~2分の典型的な飛行時間に関しては、この誤差は、すぐに増大して

50

許容できない程度になる。

【0010】

ジャイロの偏り誤差は、ジャイロが非回転状態であることが分かっている間に、例えば、ロケットまたはミサイル等の飛翔体の場合、発射前に、一連の読み取り値を平均することによって使用直前に容易に補償できる。しかしながら、スケールファクタ誤差は、速度に依存し、静止中は、測定、補正できない。これは、飛行中に完全に自己完結型で動作するスケールファクタ誤差補正プロセスの必要性を示唆している。本開示は、このようなプロセスを詳細に記載する。

【0011】

ロールの精度を維持する試みで用いられてきた代替技術は、磁力計、光センサ、GPS、及び/または、サーモパイル等の非慣性センサで補助することを含む。これらのアプローチは、複雑さと費用を増し、追加の性能制約をもたらす。例えば、M. J. Wilsonの「Attitude Determination with Magnetometers for un-Launched Munitions」DTIC ADA 425992、及び、T. E. Harkinsの「On the Viability of Magnetometer-Based Projectile Orientation Measurements」DTIC ADA 474475を参照されたい。

10

【0012】

L. D. FairfaxとF. E. Fresconiの「Position Estimation for Projectiles Using Low-cost Sensors and Flight Dynamics」(DTIC ADA 560811)には、この問題に対する別の解決法、すなわち、位置及び速度の推定を多状態拡張カルマンフィルタに依存する迫撃砲が記載されているが、ロール角は、追加の姿勢補助装置を介して決定される。この技術は、典型的なロケット弾より良好なロール速度プロフィールを有する適用に用いられる。

20

【0013】

特許文献1は、砲発射された飛翔体のロール角を推定するプロセスを記載している。特許文献1は、導出されたオイラー角ではなく、飛翔体本体の角速度データをその測定値として用いる。特許文献1は、ロール速度スケールファクタ誤差の推定も補正も行わず、仰角及び機首方位の精度を保持するようにも働かない。

30

【課題を解決するための手段】

【0014】

本開示は、スピンする飛翔体の慣性測定システムを提供する。慣性測定システムは、飛翔体のスピン軸にほぼ平行に向けられた第1のロールジャイロと、三次元座標系を規定するようにロールジャイロに対して配置された軸を有する第2のジャイロ及び第3のジャイロと、コントローラとを備える。コントローラは、第1、第2、及び、第3のジャイロの出力から、ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算し、計算したピッチ角及びヨー角と予想のピッチ角及びヨー角との差に基づいてロール角誤差を計算し、ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力としてロール角誤差を提供し、計算したロール角補正とロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロの出力に適用する。カルマンフィルタは、ロール速度と1つまたは複数の風の変数との関数としてロール角誤差をモデル化する。

40

【0015】

このシステムは、例えば、回転する飛翔体に固定された慣性測定ユニット(IMU)のロール軸速度ジャイロスケールファクタの校正を向上させる。上記のように、ロール速度測定の誤差は、ロール速度の高い航法システムにおいて、誤差の最も重大な原因である。初期のシステムは、飛行の最も初期、すなわち、発射後すぐに存在する高いロール速度に対処する努力をしてきた、そして、これらの影響を緩和する試みがなされてきた。例えば、1つの可能性は、中間の姿勢リセット機能を採用して、最初の高いロール速度がより管

50

理できるレベルまで下がった後、ある時点で、姿勢をリセットしてよい。しかしながら、このような姿勢リセット機能は、現在の速度の測定値を提供する直線加速度計の存在に依存することになる。本開示のシステムは、このような姿勢のリセットを全く必要とせず、代わりに、発射直後から動作させることができ、発射直後のロール速度の高い段階でさえ、ロール速度を良好に補正する。

【0016】

詳細には、カルマンフィルタを使用する既存のシステムは、高いロール速度と、ロール角誤差の急速な蓄積が原因で、フィルタの安定性達成に苦心してきた。本明細書に記載のプロセスは、別個のプロセス（オイラー角フィルタ）を用いて、カルマンフィルタを使用せずにロール角誤差の推定値を計算する。このプロセスは、英国特許出願第GB1403426.8号に記載される。このロール角誤差測定は、カルマンフィルタへの入力として提供することができ、そうすると、カルマンフィルタは、安定的に動作でき、フィルタゲイン（単数または複数）を最適化してロール速度スケールファクタ誤差推定を向上できることが分かっている。カルマンフィルタは、時変ゲインを使用して、広範囲の動作状況の下で、ロール角誤差及びロール速度スケールファクタ誤差をより正確に計算する。詳細には、カルマンフィルタは、補正しなければ大きく性能を減じる横風の影響を推定、補正するように構成できることが分かっている。

10

【0017】

このプロセスは、調整されたカルマンフィルタリング技術を採用してバンク（ロール）角誤差観察プロセスから最大の利益を引き出すことができるという点で、以前の設計に対する改良となる。利益には、既存の設計を特定の軌道に合わせて調整する一方、プロセスは、このアーキテクチャを用いてリアルタイムで軌道の特徴に対応するので、より広範囲の異なるミッションに対処できること、が含まれる。姿勢角とロール軸スケールファクタの誤差は、この実施態様を用いることによって、偏差がより小さく短くなる。さらなる利益は、カルマンフィルタが、横風の摂動効果（*perturbing effect*）を推定、補正できるフレームワークを提供することである。これは、一定の飛行状況の下では風の影響が非常に大きくなり得るので、性能を大きく向上させる可能性がある。

20

【0018】

ロール角誤差は、実際の角度と予想の角度との差に基づいて計算されてよいが、好ましい例においては、計算された角速度（すなわち、ヨー角とピッチ角の変化速度）と予想された角速度との差に基づいている。これらの計算は、規則的な時間間隔で行われるので、本質的に同等である。

30

【0019】

ある好ましい例においては、飛翔体は長手状の飛翔体であり、スピン軸は前後軸である。

【0020】

本開示は、ミッションの少なくとも一部に何らかのスピン運動のある任意のプラットフォームに関することを理解されよう。常にスピンしている必要はない。これらのプラットフォームは、スピン安定されてよい（すなわち、例えば、砲弾の場合等、スピンを故意に与えて安定させる）。逆に、スピンは、例えば、ロケットモータの運転に伴う副次的影響として付随的に生じる場合もある。これらの後者のプラットフォームは、フィンを有してよく、砲弾よりも安定し得るが、低速でさえスピンする。

40

【0021】

好ましくは、カルマンフィルタは、ロール速度と関連し、ひいては、根本的なジャイロスケールファクタに関連する成分と、風の影響に相關する別個の成分を有するとして、ロール角誤差をモデル化する。カルマンフィルタは、ロール速度に比例する成分と、風の影響に比例する別個の成分を有するとしてロール角誤差をモデル化してよい。

【0022】

一般に、飛行中の横風の存在は、計算した機首方位とピッチ角の変化を通常引き起こし、その変化はロール角誤差のみから生じる同様の变化から区別できないので、ロール角ノ

50

スケールファクタ補正プロセスの精度に影響を与える。しかしながら、多くの適用において、プラットフォームの回転速度は、可変であり（例えば、飛翔体が、例えば、ライフルバレルから発射される場合のように、ロール速度は、空気との摩擦の影響により飛行中に低くなり得る）、また、根底にあるロール速度スケールファクタは、ロール速度と相関性のある誤差効果を生み出す。対照的に、風の影響は、特に、飛行時間が短いと（例えば、1～2分）一般に相対的に一定である。

【0023】

好ましくは、カルマンフィルタは、使用中、反復して、モデルパラメータを更新するように構成される。経時的な観察を用いて、カルマンフィルタは、相関誤差の寄与と無相関誤差の寄与を分離することができるので、風の影響（例えば、横風の影響）を推定、補正できる。

10

【0024】

カルマンフィルタは、三次元で風をモデル化するように構成されてよいが、重要なのは特に横風であることは理解されよう。飛翔体は、一般に、前後方向に多くのエネルギー/運動量を有し、軸方向の風は、一般的に、飛翔体の姿勢に大きく影響を与えない。逆に、横風は、一般的に、姿勢（特に機首方位）を乱す、よって、カルマンフィルタは、ある例においては、横風をモデル化するように構成されてよい。これは、二次元では（機首方位及び仰角の両方に対する摂動のモデル化）、または、一次元では（機首方位に影響を与える摂動のみをモデル化）という風のモデル化によって行われてよい。

【0025】

20

ある例においては、コントローラは、カルマンフィルタの初期条件として、フィルタに気象データを供給するように配置してよい。このように、プロセスは、気象条件が入手可能な時は、気象条件の予備知識を活用できる。これは、フィルタ内に記憶される横風速度の事前推定値として提供されてよく、フィルタは、次に、この事前推定値の誤差を推定、補正する。

【0026】

コントローラは、ロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロの出力に直接、適用するように配置してよく、姿勢積分ユニットにロール角補正を適用するように配置してよい。

【0027】

30

好ましくは、ロールジャイロは、MEMS（微小電気機械システム）ジャイロであってよい。3つのジャイロは全て、MEMSジャイロであってよい。ある例においては、ロールジャイロは、100ppmより大きい速度スケールファクタ誤差を有するMEMSジャイロであってよい。ある例においては、速度スケールファクタ誤差は、1000ppmより大きくてよい。スケールファクタ誤差は、フィードバックシステムによって補正できるので、高いスケールファクタ誤差を許容できる。従って、より低い品質の、より低廉な部品を使用でき、優れた精度を維持しながら、システム費用を低減する。詳細には、これらの低廉なジャイロは、最終的に処理及び精度の向上を達成するためにカルマンフィルタと共に使用できる。

【0028】

40

ある例においては、時間の関数としてのピッチ角及びヨー角の予想値は、平らな弾道の飛行からの予想値である。平らな弾道の飛行とは、機体に作用する大きな力が、重力と、前後方向軸に作用する空力抵抗のみの時の軌道を指す。一般には、他の力が常に存在する。これらの力には、小さいものもあれば、機体の回転運動が原因の中立的（neutral）偏向効果を有するものもある。横風の影響等、他の力は、次の補正段階でカルマンフィルタによって補正できる。しかしながら、最初のオイラー角フィルタの目的のために、弾道飛行軌道は、ほぼ1つの平面内と考えられ、このような飛行の間、機首方位角（ヨー角）が飛行期間中、変わるとは予想されない。同時に、仰角（ピッチ角）は、スピンする飛翔体（典型的には長手状）が、その軌道に対して接線方向に向く傾向があるので、飛行中を通して既知の速度で減少が予想される。この飛行は、より複雑な飛行プランの一段階で

50

あってよく、平らな軌道からそれる補正操縦を伴う次の段階を有することに留意されたい。

【0029】

予想されるヨー角及びピッチ角に対して平らな弾道の機首方位角及び仰角を用いることは、システムが、計算したヨー角及びピッチ角の予想した弾道軌道からの偏差をロール角計算の誤差から生じたものとして扱うことを意味する。オイラー角フィルタは、この仮定を用いて、ロール角誤差を生成し、そのロール角誤差はさらなる処理のためにカルマンフィルタに提供される。

【0030】

好ましくは、ロール角誤差は、正接が計算されたピッチ角の変化速度に対する計算されたヨー角の変化速度の比である角度として計算される。ある例においては、比は、形状定義による負の符号を含んでよい。例えば、ロール角誤差は、正接が計算されたピッチ角の変化速度の負数に対する計算されたヨー角の変化速度の比である角度として計算されてよい。

【0031】

慣性測定システムは、ローパスフィルタをさらに含んでよく、ローパスフィルタは、ヨー角の変化速度及びピッチ角の変化速度を計算する前に、ヨー角及びピッチ角の変化の高周波成分を除去するように配置される。ローパスフィルタの時定数は、ロール速度が高い時に増加し、ロール速度が低い時に減少してよい。

【0032】

純粹に平らな軌道には従わなくても、予測可能な軌道に従う飛翔体であれば、飛行中を通して、予測されたヨー角及びピッチ角（または角速度）を基準値として使用できる。このような例の1つは、（毎秒100回転を超える）非常に高速でスピンするスピン安定された砲弾で、砲弾の経路を変えるように作用する多くの力を生じる。ヨー角及びピッチ角（または角速度）の基準値からの偏差はいずれも、ロール角計算の誤差から生じたと考えることができる。このような場合、事前に計算した飛行軌道情報は、機上航法システムにロードされる。これは、飛行経路補助表（flight path aiding table）（FPAT）または類似の形式であってよい。多くの飛翔体／弾薬に関して、事前発射ミッション計画プロセス中に、発射地点から目標まで同様の飛行軌道を構築する。このプロセスによって、通常、飛行時間の関数として飛翔体の予想される位置、速度、及び、姿勢を記述する表形式データ（FPAT）を生成する。このデータは、飛翔体に転送されてよく、飛行中、航法／誘導に関する様々な目的に使用されてよい。飛行中、必要に応じて、予想されるヨー値及びピッチ値を連続して調べてよい。よって、時間の関数としてのピッチ角及びヨー角の予想値は、平らではない場合もある予め計算された飛行軌道の情報から求められてよい。角速度は、使用される場合、この情報に含まれてもよく、この情報から計算されてもよい。

【0033】

ロール軸ジャイロスケールファクタ誤差及びロール角補正を補正する本明細書に記載のプロセスは、他のシステムを補完するものであり、他のシステムと組み合わせて使用できる、または、スタンドアロンシステムとして使用できる。

【0034】

上記のように、システムは、簡単または複雑なシステムと共に用いてよく、ロールスケールファクタ誤差補正が唯一のフィードバック要素であってもよく、他の補正及び／またはフィードバック機構を補完するものであってもよい。しかしながら、ある好ましい例においては、慣性測定システムは、直線加速度計を備えていない。このような実施態様に必要なハードウェア（すなわち、IMU）は、6自由度のIMU等のより複雑なIMUほど高価ではない。他の好ましい例においては、システムは、角速度測定装置、例えば、ジャイロのみを有する。

【0035】

ある例においては、ロール角補正及びロールスケールファクタ補正は、誘導行動が開始

10

20

30

40

50

される前にのみ適用されてよい。

【0036】

別の態様によると、本開示は、スピンする飛翔体の慣性測定システムでロール角を補正する方法を提供する。方法は、ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算することと、計算したピッチ角及びヨー角と、予想のピッチ角及びヨー角との差に基づいてロール角誤差を計算することと、ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力としてロール角誤差を提供することと、計算したロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロの出力に適用することと、を含み、カルマンフィルタは、ロール速度と1つまたは複数の風の変数との関数としてロール角誤差をモデル化する。

10

【0037】

別の態様によると、本開示は、長手状の飛翔体の慣性航法システムにおいてロール角を補正する方法を提供する。方法は、ロール角、ピッチ角、及び、ヨー角を含む現在の飛翔体の姿勢を計算することと、ピッチ角及びヨー角の変化の速度を計算して、これらを変化の予想速度と比較することと、この比較の結果を使用して、ロール角誤差を計算し、ロール角補正及びロール速度スケールファクタ補正を出力するカルマンフィルタへの入力としてこれを提供することと、計算したロール角補正を計算した姿勢に、ロール速度スケールファクタ補正をロールジャイロ出力に適用することと、を含み、カルマンフィルタは、ロール速度と1つまたは複数の風の変数の関数としてロール角誤差をモデル化する。

20

【0038】

システムに関する上記好ましい特徴の全ては、対応する方法に等しく適用可能である。好ましい例においては、方法及びシステムは、ロール速度の高い飛翔体、すなわち、飛行中、例えば、毎秒5回転より大きい、10回転より大きい、または、15回転より大きい高いロール速度を与えられることが意図されている飛翔体に特に適用可能である。

【0039】

1つまたは複数の制限を目的としない例を、ほんの一例として、図面を参照しながら記載する。

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1a】飛行中の飛翔体を示す図である。

30

【図1b】飛翔体の姿勢を示す図である。

【図2】慣性航法システムを示す図である。

【図3】ロール制御プロセスを詳細に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0041】

回転する飛翔体100に取り付けられた慣性測定ユニット(IMU)のロール軸速度ジャイロスケールファクタを飛行中に校正する(すなわち、測定して補正する)方法を以下に記載する。

【0042】

図1aは、飛行中のロケット100を示す。ロケット100の軌道110を破線で示す。ロケット100は、ノーズ部101と、フィン103を有する尾部102とを有する。フィン103は、静止していてもよく、ロケット100の飛行経路を変更するために方向制御を行うように可動であってもよい。

40

【0043】

慣性航法用語においては、機体/プラットフォームの向きは、3つのオイラー角である「機首方位角」「仰角」及び「バンク角」で記載される。同意義の用語「ヨー」、「ピッチ」、及び、「ロール」も使用する。機体の向きは、一般に、「姿勢」という語を用いて表される。厳密に言うと、「姿勢」という語は、仰角及びバンク角のみを指すが、本明細書においては、より幅広い定義を用いる。よって、本明細書においては、「姿勢」という語は、機首方位角、仰角、及び、バンク角(または、同意義のヨー、ピッチ、及び、ロール

50

)の3つ全てを指す。

【0044】

図1bにおいて、ロケット100の姿勢125が、航法座標系の軸120に対して示されている。姿勢125の水平面への投影は、点線126で示す。ロケットの機首方位角すなわちヨー角は、角121で示し、ロケットの仰角すなわちピッチ角は、角122で示し、ロケットの前後軸に対するロケットのバンク角すなわちロール角は、矢印123で示す。ロケット100は、図示のように背後から見ると反時計回りに回転している。

【0045】

図2は、ロール角補正及びスケールファクタ誤差推定プロセスを通常の姿勢積分プロセスにどのように適合させるかを一般的に示したものである。慣性航法システム200からの生入力は、機体搭載ジャイロスコープからの、それぞれ、210、211、212で示されるロール速度、ピッチ速度、ヨー速度である。

10

【0046】

(差し当たり、この例の追加のロール制御機能が無視する)標準的な航法システムにおいては、ジャイロスコープの出力210、211、212は、姿勢積分関数225によって積分される。

【0047】

図2は、標準的な慣性ストラップダウンプロセス(標準的なプロセスは実線で示されている)と共存する通常の姿勢積分関数225と組み合わせた2つの追加のプロセス250、260を伴うアーキテクチャ全体を示す。第1の追加プロセス(オイラー角速度フィルタ250)は、姿勢積分関数225によって生成されたオイラー角をモニタし、バンク角誤差の値を推定する。この推定値は、(姿勢情報と共に)カルマンフィルタ260に渡され、カルマンフィルタ260は、バンク角及びロール速度スケールファクタに適用する補正を導き出す。ロール角補正は、姿勢積分ユニット225に適用され、ロールスケールファクタ補正は、ロールジャイロ210の出力に適用される。

20

【0048】

前述したように、この例は、機能するために、直線加速度計を必要としない。しかしながら、機体搭載直線加速度計を備えるより複雑なシステムにおいては、姿勢積分関数は、地球速度補正、輸送速度補正、コリオリ及び向心力補正、及び、重力補正等の他の補正も考慮してよい。これらの補正はそれぞれ、加速度計から得た位置及び速度データに基づいている。これらの補正及び座標系間の関連する変換は、良く知られており、理解されているので、ここにさらに記載することはしない。しかしながら、理解の助けとして、図2、図3の符号の意味を下記に記載する。

30

【0049】

C_b^n 変換行列：航法座標系に対する機体、
 i_b^b 機体基準系における機体回転速度、
 慣性によって導かれた (Inertially derived) 仰角 (ピッチ角)、

慣性によって導かれたバンク角 (ロール角)、

慣性によって導かれた機首方位角 (ヨー角)

40

$error$ バンク (ロール) 角誤差推定値、

慣性測定されたロール速度、

/ t 慣性によって導かれた仰角 (ピッチ角) 速度、

/ t 慣性によって導かれた機首方位角 (ヨー角) 速度。

【0050】

オイラー角速度フィルタ推定プロセス250及びカルマンフィルタ260は、実線で示される従来の姿勢積分関数225の追加として、図2に破線で示される。この完全なプロセスは、地上発射型ロケットまたはロール速度の高い他の飛翔体の初期の飛行段階、ロール速度が典型的に高い(例えば、10Hz~20Hz)時の動作に適している。

【0051】

50

図2の慣性航法システム200は、姿勢積分関数からの出力の2つ(仰角及び機首方位角)を組み合わせて、主なロール角誤差を推定する。カルマンフィルタ260は、この誤差推定値と、姿勢積分関数225の出力及びロール速度とを組み合わせて、ロール角誤差とロールジャイロスケールファクタ誤差の最適推定値を計算し、ロール角誤差の最適推定値は姿勢積分関数にフィードバックされ、ロールジャイロスケールファクタ誤差の最適推定値は、ロール軸速度測定の補正に利用される。

【0052】

図3は、慣性航法システム200をより詳細に示す。

【0053】

オイラー角速度フィルタ関数250の詳細を図3に破線によって示す。パラメータ ϵ_{roll} 330は、仰角及び機首方位角というオイラー角(及び)から導かれる。オイラー角速度フィルタ250は、姿勢積分関数225によって計算された仰角及び機首方位角を用いて、ローパスフィルタ315、時間導関数320、比率関数325、及び、逆タンジェント関数327に連続して適用して、瞬間のバンク角誤差330を推定する。

10

【0054】

より詳細には、オイラー角速度フィルタ250は、以下のように働く。

【0055】

ϵ_{roll} は、既存のバンク角(ロール角)への補正の仮推定値として導かれる。補正は、姿勢積分モジュール225から計算された機首方位角(ヨー)速度と仰角(ピッチ)速度の比である。言い換えると、仮バンク角誤差は、三角法の正接として、仰角(ピッチ)速度に対する機首方位角(ヨー)速度の比を有する角度である。この計算は、ロケットの軌道は、純粋に平らである、すなわち、飛行中、一定した同じ機首方位を維持するという仮定に基づいている。このような飛行の仰角は、また、一定の予測可能な速度で減少すると予想される。この計算は、機首方位(ヨー)角の偏差はいずれも、バンク(ロール)角計算の誤差によって生じたものであるという仮定に基づいている。この技術は、しかしながら、予想機首方位プロフィールの予備知識を用いて、非平面の軌道(例えば、スピンしている砲弾)を伴う適用に拡張されてよい。このような場合、予想/予測した機首方位(ヨー)角と比較され計算された機首方位(ヨー)角の偏位を用いて、そのような偏位はいずれもバンク(ロール)計算における誤差によって生じたという仮定の下、類似の計算を行ってよい。

20

30

【0056】

機首方位角(ヨー)速度及び仰角(ピッチ)速度は、姿勢積分モジュール225からの機首方位角(ヨー角)及び仰角(ピッチ角)をローパスフィルタリングされた形の時間導関数として、連続的に計算される。

【0057】

図3を参照すると、機首方位(ヨー角、プサイ)及び仰角(ピッチ角、シータ)が、姿勢積分モジュール225から抽出されて、ローパスフィルタ315に入力され、ローパスフィルタ315は、不要な高周波成分を除去する。仰角(ピッチ角) θ / t 、及び、機首方位角(ヨー角) ψ / t の時間導関数は、時間導関数モジュール320によって計算され、これらの時間導関数の比は、比率モジュール325において計算される。比は、仮ロール角誤差(ϵ_{roll}) 330として出力される。

40

【0058】

仮ロール角誤差330は、システムの状態の十分に安定した測定値である値で、カルマンフィルタ260を用いて改善できる。

【0059】

この例は、オイラー角フィルタ250の能力を活用して、ロール速度とロール軸ジャイロスケールファクタ誤差、及び、風の影響の組み合わせによって生じるバンク角誤差(ϵ_{roll})の増加を決定する。以前のシステムにおいては、 ϵ_{roll} を用いて、実質的に一定またはロール速度と単純な関係を有するフィルタゲインを用いて、バンク角補正及びロール軸ジャイロスケールファクタ補正を計算してきたが、この場合、カルマ

50

ンフィルタ260が、時間的に変化するゲインを計算する。このアプローチは、幾つかの利益を提供する。すなわち、バンク角補正及びロール軸ジャイロスケールファクタ補正は、広範な動作条件において、より正確により速く計算され、フィルタ260は、補正されなければ、大きく性能を低下させる横風の影響を推定、補正するように構成できる。

【0060】

上記のように、飛行中の横風の存在は、一般的に、計算した機首方位及びピッチ角の変化をもたらし、その変化はロール角誤差のみによって生じる同様の变化とは区別できないので、ロール角/スケールファクタ補正プロセスの精度に影響を与える。多くの適用において、プラットフォームの回転速度は、可変であり（例えば、ロール速度は、飛行中の空気抵抗により徐々に低下する）、根底にあるロール速度スケールファクタは、ロール速度と相関する誤差効果を生み出す。対照的に、風の影響は、一般に、相対的に一定している。経時的な観察を使用して、カルマンフィルタ260は、相関誤差寄与と無相関誤差寄与を分離することができ、従って、横風の影響を推定して補正することができる。

10

【0061】

カルマンフィルタ260は、ロール角誤差、ロールスケールファクタ誤差、及び、風の影響の間の関係のモデルを使用する。このモデルをシステム状態の測定値（または観察値）と共に使用して、カルマンフィルタ260は、オイラー角速度フィルタ250からのロール角誤差推定値330をロール速度スケールファクタ及びロール角の補正值に変換できる。このモデルを用いて、カルマンフィルタ260は、横風の悪影響を分離、補正できる。（機首方位角及び仰角の偏差を引き起こすことによって）横風がロール角誤差に行う寄与を識別することによって、カルマンフィルタは、広く一般に存在する横風の推定値を維持することができ、それによって、残りのロール角誤差はより正確にロールジャイロスコープのスケールファクタ誤差に起因することになり、従って、ジャイロスコープの出力、姿勢積分ユニット225、及び、全てのその後の航法プロセスの精度を向上させる。さらに、横風がロール角誤差に与えた影響を識別することによって、計算した姿勢に直接ロール角補正を適用する解決法の精度を最大にする。

20

【0062】

カルマンフィルタ260は、仮ロール速度スケールファクタ推定330にのみ依存する簡単なモデルを用いてよいが、入手可能な場合はより多くの情報を考慮するのが好ましい。図3に示すように、カルマンフィルタは、また、入力として、ジャイロから直接、ロール速度210、姿勢積分モジュール225から計算した機首方位角及び仰角（シータ及びプサイ）、他の機体搭載加速度計（備えられている場合）から機体固有の力、及び、気象データ（入手可能な場合）を受信する。

30

【0063】

気象データは、常に入手可能とは限らないが、入手可能な（例えば、発射前にシステムにロードできる）場合、風の影響の事前推定値として、例えば、横風速度の事前推定値として使用でき、例えば、初期条件として、フィルタ260内に記憶できる。フィルタ260は、展開し始めると、この事前推定値の誤差を推定、補正する。

【0064】

本開示は、調整したカルマンフィルタリング技術を採用して、バンク角誤差観察プロセスから最大の利益を導き出すことによって、以前の設計を改良したものである。利益は、既存の設計を特定の軌道に合わせて調整する一方、プロセスは、このアーキテクチャを用いて、リアルタイムで軌道の特徴に対応するので、より広範囲の異なるミッションに対処できるということである。姿勢角誤差及びロール軸スケールファクタ誤差は、この実施形態を用いることによって、より小さく、短くなる。本明細書に記載の例の主な利益は、横風の影響を推定、補正するカルマンフィルタ620の能力である。一定の飛行条件の下では、風の影響が非常に大きくなり得るので、これによって、性能が大きく向上する可能性がある。

40

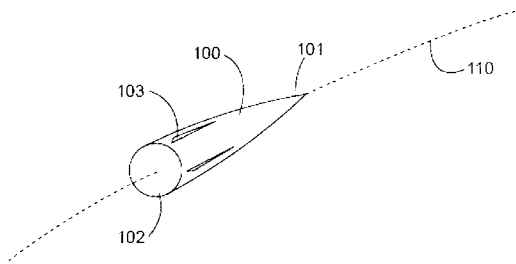
【0065】

本明細書に記載のプロセスは、飛行軌道の初期から長期にわたる高いロール速度条件下

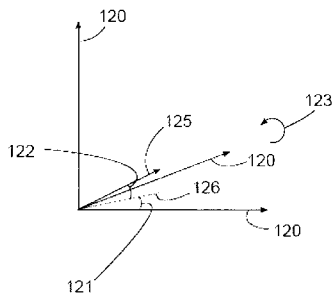
50

で、ロール速度スケールファクタ誤差を校正する能力を提供することによって、技術を向上させ、性能を向上させる。プロセスは、（特に、カルマンフィルタ 260 は典型的に急速に収束するので）、IMU ロール軸スケールファクタ誤差をより正確に、より初期に補正する。さらに、このプロセスは、完全な航法による解決法に依存する必要がなく（例えば、直線加速度計に必ずしも依存しない）、より簡単な誘導適用、及び、速度のみの IMU に適用でき、従って、費用を節約し、実施態様を簡単に行うことができる。

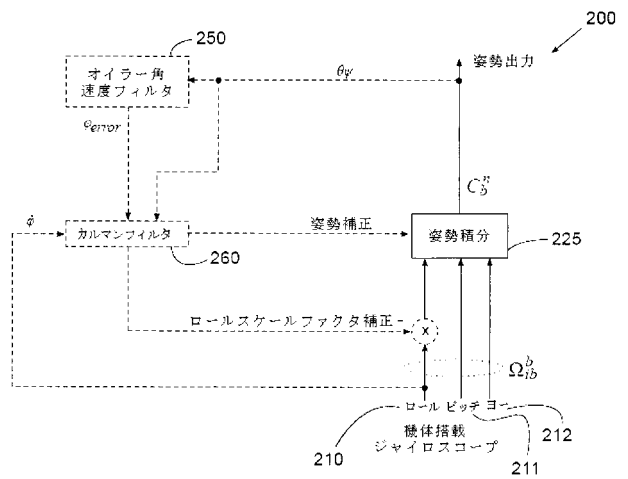
【図 1 a】



【図 1 b】



【図 2】



フロントページの続き

(74)代理人 100092613

弁理士 富岡 潔

(72)発明者 ジョン キース シェアード

イギリス, デヴォン, プリマス, サウスウェイ, クリッタフォード ロード

(72)発明者 ニコラス マーク フォルクナー

イギリス, デヴォン, プリマス, サウスウェイ, クリッタフォード ロード

Fターム(参考) 2F129 AA11 BB23 BB24 BB25 BB26 BB38 BB43 BB48