

(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2015-148450

(P2015-148450A)

(43) 公開日 平成27年8月20日 (2015. 8. 20)

(51) Int. Cl.			F I			テーマコード (参考)		
<b>GO 1 C</b>	<b>21/26</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 C	21/26	Z	2 F 1 0 5		
<b>GO 1 C</b>	<b>19/00</b>	<b>(2013. 01)</b>	GO 1 C	19/00	Z	2 F 1 2 9		
<b>GO 1 P</b>	<b>21/00</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 P	21/00				
<b>GO 1 C</b>	<b>21/16</b>	<b>(2006. 01)</b>	GO 1 C	21/16				
<b>B 6 4 D</b>	<b>45/00</b>	<b>(2006. 01)</b>	B 6 4 D	45/00	Z			

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2014-19943 (P2014-19943)  
 (22) 出願日 平成26年2月5日 (2014. 2. 5)

(71) 出願人 000166247  
 古野電気株式会社  
 兵庫県西宮市芦原町9番52号  
 (74) 代理人 110000970  
 特許業務法人 楓国際特許事務所  
 (72) 発明者 笹倉 浩史  
 兵庫県西宮市芦原町9番52号 古野電気株式会社内  
 Fターム(参考) 2F105 AA03 AA05 BB07 BB17  
 2F129 AA11 BB23 BB24 BB25 BB27  
 BB28 BB29 BB38 BB39 BB40  
 BB41 BB43

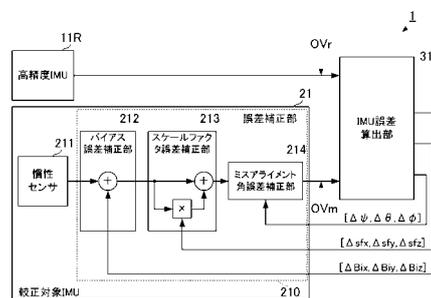
(54) 【発明の名称】 センサ誤差補正装置、IMU較正システム、IMU較正方法、および、IMU較正プログラム

(57) 【要約】

【課題】 IMU出力のみを用いて、較正対象IMUを高精度に較正する。

【解決手段】 IMU較正システム1は、IMU誤差算出部31と、バイアス誤差補正部212、スケールファクタ誤差補正部213、およびミスアライメント誤差補正部214からなる誤差補正部とを備える。IMU誤差算出部31は、分離が行われる以前の第1期間において、高精度IMUが出力するリファレンス計測値と、較正対象IMUが出力する較正対象計測値とを用いて、較正対象計測値に含まれるバイアス誤差、スケールファクタ誤差、およびミスアライメント誤差を順次推算算出する。誤差補正部は、第2移動体に装着されており、第1期間においてIMU誤差算出部で推算算出した各誤差を用いて較正対象IMUに備えられたセンサの出力値を順次補正する。誤差補正部は、分離が行われて以降の第2期間では分離のタイミングでの補正を維持する。

【選択図】 図2



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

高精度 I M U が装着された第 1 移動体と前記高精度 I M U のセンサよりも精度の低いセンサを備える較正対象 I M U が装着された第 2 移動体とが一体に移動する第 1 移動態様と、該第 1 移動態様に続く移動態様であり前記第 1 移動体と前記第 2 移動体とが分離して移動する第 2 移動態様とを有し、

前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正するセンサ誤差補正装置であって、

前記第 1 移動態様では前記高精度 I M U の計測データと前記較正対象 I M U の計測データとから継続的に算出された前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データに含まれるバイアス誤差、スケールファクタ誤差、およびミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを継続的に補正し、

前記第 2 移動態様では前記第 1 移動態様から前記第 2 移動態様に移行するタイミングで得られた前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正する、

誤差補正部を備える、

センサ誤差補正装置。

**【請求項 2】**

請求項 1 に記載に記載のセンサ誤差補正装置であって、

前記誤差補正部は、

前記較正対象 I M U の計測データに含まれる前記バイアス誤差を補正するバイアス誤差補正部と、

前記バイアス誤差補正後の前記較正対象 I M U の計測データに含まれる前記スケールファクタ誤差を補正するスケールファクタ誤差補正部と、

前記スケールファクタ誤差補正後の前記較正対象 I M U の計測データに含まれる前記ミスアライメント誤差を補正するミスアライメント誤差補正部と、を備える、

センサ誤差補正装置。

**【請求項 3】**

請求項 1 または請求項 2 に記載のセンサ誤差補正装置であって、

前記計測データは、加速度と角速度を含み、

前記誤差補正部は、

前記高精度 I M U の計測データの計測位置と前記較正対象 I M U の計測データの計測位置との相対位置の差によって生じる前記較正対象 I M U の加速度に含まれる誤差を補正するレバーアーム効果補正部を、備える、

センサ誤差補正装置。

**【請求項 4】**

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれかに記載のセンサ誤差補正装置であって、

前記誤差補正部は、

前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、前記ミスアライメント誤差を、前記第 1 移動体および前記第 2 移動体の移動態様に応じた直交三軸の成分で補正する、

センサ誤差補正装置。

**【請求項 5】**

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれかに記載のセンサ誤差補正装置と、

前記第 1 移動態様において、前記高精度 I M U の計測データと前記較正対象 I M U の計測データとから継続的に算出された前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データに含まれる前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を継続的に算出する I M U 誤差算出部と、

を備える、 I M U 較正システム。

**【請求項 6】**

請求項 5 に記載の I M U 較正システムであって、

10

20

30

40

50

前記 I M U 誤差算出部は、前記第 1 移動体に装着されている、  
I M U 較正システム。

【請求項 7】

高精度 I M U が装着された第 1 移動体と前記高精度 I M U のセンサよりも精度の低いセンサを備える較正対象 I M U が装着された第 2 移動体とが一体に移動する第 1 移動態様と、該第 1 移動態様に続く移動態様であり前記第 1 移動体と前記第 2 移動体とが分離して移動する第 2 移動態様とを有し、

前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正する I M U 較正方法であって、

前記高精度 I M U の計測データと前記較正対象 I M U の計測データとから継続的に算出された前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データに含まれる前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を継続的に算出する I M U 誤差算出工程と、

前記第 1 移動態様において、前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを継続的に補正する第 1 誤差補正工程と、

前記第 2 移動態様では前記第 1 移動態様から前記第 2 移動態様に移行するタイミングで得られた前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正する第 2 誤差補正工程と、

を有する、I M U 較正方法。

【請求項 8】

請求項 7 に記載の I M U 較正方法であって、

前記較正対象 I M U の計測データには角速度及び加速度が含まれており、

前記第 1、第 2 誤差補正工程は、

前記高精度 I M U の計測データの計測位置と前記較正対象 I M U の計測データの計測位置との相対位置の差によって生じる前記較正対象 I M U の加速度に含まれる誤差を補正する工程をさらに有する、I M U 較正方法。

【請求項 9】

高精度 I M U が装着された第 1 移動体と前記高精度 I M U のセンサよりも精度の低いセンサを備える較正対象 I M U が装着された第 2 移動体とが一体に移動する第 1 移動態様と、該第 1 移動態様に続く移動態様であり前記第 1 移動体と前記第 2 移動体とが分離して移動する第 2 移動態様とを有し、

前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正する処理をコンピュータに実行させる I M U 較正プログラムであって、

前記コンピュータは、

前記高精度 I M U の計測データと前記較正対象 I M U の計測データとから継続的に算出された前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データに含まれる前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を継続的に算出する I M U 誤差算出処理と、

前記第 1 移動態様において、前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを継続的に補正する第 1 誤差補正処理と、

前記第 2 移動態様では前記第 1 移動態様から前記第 2 移動態様に移行するタイミングで得られた前記バイアス誤差、前記スケールファクタ誤差、および前記ミスアライメント誤差を用いて、前記較正対象 I M U に備えられたセンサの計測データを補正する第 2 誤差補正処理と、

を実行する、I M U 較正プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

20

30

40

50

## 【0001】

この発明は、慣性姿勢計測装置 (Inertial Measurement Unit) に備えられた慣性センサの計測データの誤差を補正するセンサ誤差補正装置、該センサ誤差補正装置を含むIMU較正システムに関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来、角速度センサ (ジャイロセンサ) や加速度センサ等の慣性センサを用いて、移動体の姿勢を検出する慣性姿勢計測装置が各種考案されている。慣性姿勢計測装置は、Inertial Measurement Unit のことであり、一般的にIMUの略称で表されている。

10

## 【0003】

このようなIMUでは、慣性センサの計測データ (角速度や加速度) に含まれる誤差や、IMUに対する慣性センサの取付角度による誤差等により、計測する姿勢に誤差が生じることが知られている。

## 【0004】

このような誤差の影響を無くすために、慣性センサの出力値を較正してから姿勢計測を行っていた。例えば、特許文献1では、移動体に装着されたジャイロセンサと、当該移動体を発射する移動母体に装着されたジャイロセンサとの物理的な角度差を検出している。そして、物理的な角度差に基づいて、移動体に装着されたジャイロセンサのバイアス誤差を算出している。

20

## 【先行技術文献】

## 【特許文献】

## 【0005】

【特許文献1】特開平6 - 26877号公報

## 【発明の概要】

## 【発明が解決しようとする課題】

## 【0006】

しかしながら、上述の特許文献1に示す較正方法では、IMUにおけるバイアス誤差が較正することができず、高精度な姿勢計測結果を得ることが難しい。また、移動体のジャイロセンサ、移動母体のジャイロセンサ、および較正処理を行う装置の他に、物理的な角度を検出する手段を別途設けなければならない。

30

## 【0007】

したがって、本発明の目的は、IMU出力のみを用いて、較正対象のセンサの誤差をより高精度に補正することができるセンサ誤差補正装置および、当該センサ誤差補正装置を備えるIMU較正システムを提供することにある。

## 【課題を解決するための手段】

## 【0008】

この発明のセンサ誤差補正装置は、高精度IMUが装着された第1移動体と高精度IMUのセンサよりも精度の低いセンサを備える較正対象IMUが装着された第2移動体とが一体に移動する第1移動態様と、該第1移動態様に続く移動態様であり前記第1移動体と前記第2移動体とが分離して移動する第2移動態様とを有し、較正対象IMUに備えられたセンサの計測データを補正する誤差補正部を備える。誤差補正部は、第1移動態様では高精度IMUの計測データと較正対象IMUの計測データとから継続的に算出された較正対象IMUに備えられたセンサの計測データに含まれるバイアス誤差、スケールファクタ誤差、およびミスアライメント誤差を用いて、較正対象IMUに備えられたセンサの計測データを継続的に補正する。誤差補正部は、第2移動態様では第1移動態様から第2移動態様に移行するタイミングで得られたバイアス誤差、スケールファクタ誤差、およびミスアライメント誤差を用いて、較正対象IMUに備えられたセンサの計測データを補正する。

40

## 【0009】

50

この構成では、高精度IMUと較正対象IMUが同じ移動態様にある期間に、高精度IMUのリファレンス計測値を用いて、較正対象IMUのセンサの計測データを高精度に補正することができる。そして、較正対象IMUが装着された第2移動体が、高精度IMUが装着された第1移動体と別の移動態様になっても、較正対象IMUは高精度を維持することができる。

【0010】

また、この発明のセンサ誤差補正装置では、計測データは、加速度と角速度を含む。誤差補正部は、高精度IMUの計測データの計測位置と較正対象IMUの計測データの計測位置との相対位置の差によって生じる較正対象IMUの加速度に含まれる誤差を補正するレバーアーム効果補正部を、備える。

10

【0011】

この構成では、高精度IMUと較正対象IMUとの間に距離があっても、較正対象IMUに備えられたセンサの加速度を高精度に補正することができる。

【発明の効果】

【0012】

この発明によれば、リファレンスのIMUと較正対象のIMUの出力のみを用いて、較正対象IMUの較正をより高精度に行うことができる。そして、高精度に較正されたIMUを用いて高精度な姿勢計測を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

20

【図1】本発明の第1の実施形態に係るIMU較正システムの概略構成図である。

【図2】本発明の第1の実施形態に係るIMU較正システムの構成を示すブロック図である。

【図3】本発明の第1実施形態に係るIMU較正方法を示すフローチャートである。

【図4】計測値が角速度の場合のIMU較正システムの構成を示すブロック図、および、計測値が加速度の場合のIMU較正システムの構成を示すブロック図である。

【図5】本発明の第2の実施形態に係るIMU較正システムの構成を示すブロック図である。

【図6】本発明の第2実施形態に係るIMU較正方法を示すフローチャートである。

【図7】本発明の第3の実施形態に係るIMU較正システムの構成を示すブロック図である。

30

【図8】本発明の第3実施形態に係るIMU較正方法を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明の第1の実施形態に係るIMU較正システムおよびIMU較正方法について説明する。図1は、本発明の第1の実施形態に係るIMU較正システムの概略構成図である。

【0015】

IMU較正システム1は、リファレンスIMUとなる高精度IMU11R、較正対象IMU21、および、IMU誤差算出部31を備える。高精度IMU11RおよびIMU誤差算出部31は、飛行機910に装備されている。較正対象IMU21は、ロケット920に装備されている。

40

【0016】

ロケット920は、初期状態では飛行機910に装着されており、飛行機910によって所定高度まで搬送される。飛行機910が本発明の「第1移動体」に相当する。また、ロケット920が本発明の「第2移動体」に相当する。ロケット920と飛行機910が一体で移動する態様が本発明の「第1移動態様」に相当する。ロケット920は、所定高度に達すると、飛行機910から切り離され、以後は自機で発生する推進力によって、宇宙空間まで到達する。このロケット920と飛行機910が別体で移動する態様が本発明の「第2移動態様」に相当する。

【0017】

50

高精度IMU11Rに備えられた慣性センサは、較正対象IMU21に備えられた慣性センサよりも高精度な計測が可能である。したがって、高精度IMU11Rは、較正対象IMU21よりも高精度な姿勢計測を行うことができる。例えば、高精度IMU11Rは地球の自転による角速度や加速度も含んで高精度な姿勢計測を行える。

【0018】

高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、同じ慣性力に基づく計測値を計測することができる。例えば、高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、ともに少なくとも加速度を検出できる。また、例えば、高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、ともに少なくとも角速度を検出できる。また、例えば、高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、ともに加速度と角速度の両方を検出できる。

10

【0019】

ロケット920が飛行機910に装着されている状態では、高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、IMU誤差算出部31に接続されている。高精度IMU11Rおよび較正対象IMU21は、計測値(角速度や加速度)を、IMU誤差算出部31に出力する。以下、高精度IMU11Rからの計測値を、リファレンス計測値と称する。このリファレンス計測値が、本発明の「高精度IMUの計測データ」に相当する。また、較正対象IMU21からの計測値を、較正対象計測値と称する。この較正対象計測値が、本発明の「較正対象IMUの計測データ」に相当する。

【0020】

IMU誤差算出部31は、較正対象計測値とリファレンス計測値とを用いて、較正対象IMU21に対するミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差を、所定のサンプリングタイミング毎に順次算出する。なお、より具体的なIMU較正方法については後述する。IMU誤差算出部31は、算出したミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差を、較正対象IMU21に順次与える。

20

【0021】

図2は、本発明の第1の実施形態に係るIMU較正システムの構成を示すブロック図である。図2に示すように、較正対象IMU21は、慣性センサ211、バイアス誤差補正部212、スケールファクタ誤差補正部213、および、ミスアライメント誤差補正部214を備える。バイアス誤差補正部212、スケールファクタ誤差補正部213、および、ミスアライメント誤差補正部214からなる部分が、本発明の「誤差補正部」に相当する。慣性センサ211は、加速度センサおよび角速度センサの少なくとも一方を備える。慣性センサ211の出力端はバイアス誤差補正部212の入力端に接続する。バイアス誤差補正部212の出力端は、スケールファクタ誤差補正部213の入力端に接続する。スケールファクタ誤差補正部213の出力端は、ミスアライメント誤差補正部214の入力端に接続する。ミスアライメント誤差補正部214の出力端は、IMU誤差算出部31に接続する。

30

【0022】

較正対象IMU21は、IMU誤差算出部31から順次与えられたミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差を用いて、バイアス誤差補正部212、スケールファクタ誤差補正部213、および、ミスアライメント誤差補正部214で、慣性センサ211の出力値を順次補正する。この補正は第1移動態様の間、継続的に行われる。このように、姿勢誤差を構成する三種類の誤差を用いて、較正対象の慣性センサ211の計測値に含まれる誤差を補正することで、補正後には、較正対象IMU21から出力される計測値は、高精度な値となる。すなわち、較正対象IMU21は、高精度な姿勢検出が可能のように較正される。

40

【0023】

ロケット920が飛行機910から切り離され、較正対象IMU21がIMU誤差算出部31から切り離されると、IMU誤差算出部31からミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差が較正対象IMU21に入力されなくなる。較正対象IMU21は、ロケット920が飛行機910から切り離されたタイミング以降の期間(

50

第2移動態様の期間)では、最終的に入力された誤差による補正値を記憶しておき、当該記憶した補正値で慣性センサ211の計測値を補正し続ける。これにより、ロケット920が飛行機910から切り離され以降も、較正対象IMU21を、高精度に較正し続けることができる。

【0024】

このように、較正後の較正対象IMU21から出力される姿勢の計測値は高精度であるので、ロケット920が飛行機910から切り離されても、ロケット920は、高精度な軌道で推進することができる。

【0025】

また、このIMU較正システム1では、高価な高精度IMU11Rが飛行機910に装備され、較正されていなければ高精度IMU11Rよりも精度が低く、安価な較正対象IMU21がロケット920に装備されている。したがって、高価な高精度IMU11Rは、何回も使用可能であり、宇宙空間等の回収不能な場所に放出するIMUに、安価な較正対象IMU21を用いることができる。

【0026】

ここで、本実施形態に係るIMU較正システムにおけるIMU較正方法の具体的な処理について、図3を参照して説明する。図3は、本発明の第1実施形態に係るIMU較正方法を示すフローチャートである。

【0027】

IMU誤差算出部31は、較正対象IMU21と高精度IMU11Rとが一体で移動中に、較正対象計測値とリファレンス計測値とを順次取得する(S101)。

【0028】

IMU誤差算出部31は、時間的に変化しないミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を未知数とする方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、較正対象計測値とリファレンス計測値を観測値(既知数)として方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、この方程式に対して、経時的に順次取得できる較正対象計測値とリファレンス計測値とを観測値(既知数)として代入することで、ミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を推定算出する(S102)。例えば、IMU誤差算出部31は、カルマンフィルタ等の状態推定処理や最小二乗法を用いて、ミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を算出する。

【0029】

IMU誤差算出部31は、算出した上述の三種類の誤差を、較正対象IMU21にフィードバックし、較正対象IMU21は、フィードバックされた誤差を用いて較正される(S103)。

【0030】

このような処理を実行することで、較正対象IMUに用いられた慣性センサの計測精度が低く安価なものであっても、上述のように高精度に較正が行われた状態で使用することができる。すなわち、安価であって計測精度が高精度に補償されたIMUとして使用できる。

【0031】

次に、本実施形態における具体的なIMU較正の理論について説明する。なお、以下では、状態推定方程式を用いる場合、特にカルマンフィルタを用いる場合について、説明する。また、以下では、直交三軸において、X軸が特定の移動方向に平行な軸(例えば飛行機910の前後方向)、Y軸が移動方向(X軸)に直交する方向に平行な軸(例えば飛行機910の横方向)、Z軸が移動方向(X軸)およびY軸に直交する軸としている。さらに、X軸は前進方向を正方向とし、Y軸は右方向を正方向とし、Z軸は下方向を正方向としている。

【0032】

(A) ジャイロセンサ(角速度センサ)の場合

10

20

30

40

50

まず、較正対象 IMU 2 1 の誤差モデルから、観測モデルを導出する。較正対象 IMU 2 1 で計測した角速度  $\omega_{mes}$  に含まれる誤差は、主にミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差である。したがって、直交三軸の内、一軸での角速度  $\omega_{mes}$  において、当該一軸方向のバイアス誤差を  $B_i$  とし、当該一軸方向のスケールファクタ誤差を  $sf$  とすると、次式のように表すことができる。ここで、 $\omega_{real}$  は真の角速度である。

【 0 0 3 3 】

【数 1】

$$\omega_{mes} = \omega_{real} + \Delta B_{i_{\omega}} + (\omega_{real} + \Delta B_{i_{\omega}}) \cdot \Delta sf_{\omega}$$

10

【 0 0 3 4 】

この式は、バイアス誤差  $B_i$  とスケールファクタ誤差  $sf$  の乗算値が、他の項よりも十分に小さくなるので、次に示すように近似できる。

【 0 0 3 5 】

【数 2】

$$\omega_{mes} \cong \omega_{real} + \Delta B_{i_{\omega}} + \omega_{real} \cdot \Delta sf_{\omega} \quad - \text{(式1)}$$

【 0 0 3 6 】

高精度 IMU 1 1 R の座標系と較正対象 IMU 2 1 の座標系とのミスアライメント角をとした時の変換行列  $C_{tr_{mes}^{ref}}$  は、次式で表すことができる。なお、 $C_{mes}^{ref}$  は、既知の取付角の座標変換行列、すなわち、高精度 IMU 1 1 R の飛行機 9 1 0 に対する取付角の座標変換行列である。

20

【 0 0 3 7 】

【数 3】

$$C_{tr_{mes}^{ref}} = (I + S(\Theta)) \cdot C_{mes}^{ref} \quad - \text{(式2)}$$

【 0 0 3 8 】

なお、ここで、 $I$  は単位行列である。また、 $S(\Theta)$  は、 $X$  軸のミスアライメント角を、 $Y$  軸のミスアライメント角を、 $Z$  軸のミスアライメント角をとして、次式から得られる。

30

【 0 0 3 9 】

【数 4】

$$S(\Theta) = \begin{bmatrix} 0 & -\Delta\phi & \Delta\theta \\ \Delta\phi & 0 & -\Delta\psi \\ -\Delta\theta & \Delta\psi & 0 \end{bmatrix}$$

【 0 0 4 0 】

(式 1)、(式 2) より、上述のミスアライメント誤差、バイアス誤差、スケールファクタ誤差を含んだ直交三軸での角速度計測値  $\omega_{mes}$  の観測モデルは、次式で表される。

40

【 0 0 4 1 】

【数 5】

$$\omega_{mes} = C_{tr_{mes}^{ref}} \cdot \omega_{mes} = [I - S(\Theta)] \cdot C_{mes}^{ref} \cdot (\omega_{real} + \Delta B_{i_{\omega}} + \omega_{real} \cdot \Delta sf_{\omega})$$

【 0 0 4 2 】

ここで、二次項以下の値は微少なものとすると、さらに次式で表される。

【 0 0 4 3 】

【数 6】

$$\omega_{mes} \cong C_{mes}^{ref} \omega_{real} + C_{mes}^{ref} \Delta Bi_{\omega} + C_{mes}^{ref} \omega_{real} \cdot \Delta sf_{\omega} - S(\Theta) C_{mes}^{ref} \omega_{real}$$

- (式 3)

【0044】

高精度 IMU 11R で計測した角速度を  $\omega_{ref}$  とし、当該高精度 IMU 11R の観測ノイズを  $v$  とすると、次式が得られる。

【0045】

【数 7】

$$\omega_{ref} = C_{mes}^{ref} \omega_{real} + v \quad - \text{(式 ref A)}$$

10

【0046】

したがって、(式 ref A) と (式 3) を用いて、直接観測できない真の角速度  $\omega_{real}$  を消去すると、次式が得られる。

【0047】

【数 8】

$$\omega_{mes} = \omega_{ref} + C_{mes}^{ref} \Delta Bi_{\omega} + \omega_{ref} \cdot \Delta sf_{\omega} - S(\Theta) \omega_{ref} + v$$

【0048】

20

観測値  $z$  として、高精度 IMU 11 の計測した角速度  $\omega_{ref}$  から、較正対象 IMU 21 の計測した角速度  $\omega_{mes}$  を減算した値を用いる。これにより観測ノイズの影響を抑圧する。すなわち、 $z = \omega_{ref} - \omega_{mes}$  とする。このように設定された観測値  $z$  に対して、次に示すように観測行列を設定することができる。

【0049】

【数 9】

$$z = \omega_{ref} - \omega_{mes} = C_{mes}^{ref} \Delta Bi_{\omega} + \omega_{ref} \cdot \Delta sf_{\omega} - S(\Theta) \omega_{ref} \quad - \text{(式 4)}$$

$$= Hx$$

【0050】

30

ここで、 $x$  は状態変数ベクトルであり、 $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸のミスアライメント角をそれぞれ  $\Delta\psi_{\omega}$ 、 $\Delta\theta_{\omega}$ 、 $\Delta\phi_{\omega}$  とし、 $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸のバイアス誤差をそれぞれ  $\Delta Bi_{x_{\omega}}$ 、 $\Delta Bi_{y_{\omega}}$ 、 $\Delta Bi_{z_{\omega}}$  とし、 $X$  軸、 $Y$  軸、 $Z$  軸のスケールファクタ誤差をそれぞれ  $\Delta sf_{x_{\omega}}$ 、 $\Delta sf_{y_{\omega}}$ 、 $\Delta sf_{z_{\omega}}$  とすると、次式で表される。

【0051】

【数 10】

$$x = [\Delta\psi_{\omega} \quad \Delta\theta_{\omega} \quad \Delta\phi_{\omega} \quad \Delta Bi_{x_{\omega}} \quad \Delta Bi_{y_{\omega}} \quad \Delta Bi_{z_{\omega}} \quad \Delta sf_{x_{\omega}} \quad \Delta sf_{y_{\omega}} \quad \Delta sf_{z_{\omega}}]$$

【0052】

40

また、高精度 IMU 11 で計測した角速度  $\omega_{ref}$  の  $X$  軸成分、 $Y$  軸成分、 $Z$  軸成分をそれぞれ  $\omega_{refx}$ 、 $\omega_{refy}$ 、 $\omega_{refz}$  とすると、変換行列  $H$  は次のように表される。

【0053】

【数 11】

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{refz} & -\omega_{refy} & -C_{mes}^{ref}(1,1) & -C_{mes}^{ref}(1,2) & -C_{mes}^{ref}(1,3) & -\omega_{refx} & 0 & 0 \\ -\omega_{refz} & 0 & \omega_{refx} & -C_{mes}^{ref}(2,1) & -C_{mes}^{ref}(2,2) & -C_{mes}^{ref}(2,3) & 0 & -\omega_{refy} & 0 \\ \omega_{refy} & -\omega_{refx} & 0 & -C_{mes}^{ref}(3,1) & -C_{mes}^{ref}(3,2) & -C_{mes}^{ref}(3,3) & 0 & 0 & -\omega_{refz} \end{bmatrix}$$

【0054】

なお、 $C_{mes}^{ref}$  は次式となる。

50

【 0 0 5 5 】

【 数 1 2 】

$$C_{mes}^{ref} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\phi) & \sin(\Delta\phi) \\ 0 & -\sin(\Delta\phi) & -\cos(\Delta\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta) & 0 & -\sin(\Delta\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Delta\theta) & 0 & \cos(\Delta\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\Delta\psi) & \sin(\Delta\psi) & 0 \\ -\sin(\Delta\psi) & \cos(\Delta\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} C(1,1) & C(1,2) & C(1,3) \\ C(2,1) & C(2,2) & C(2,3) \\ C(3,1) & C(3,2) & C(3,3) \end{pmatrix}$$

10

$$C(1,1) = \cos(\Delta\psi)\cos(\Delta\theta)$$

$$C(2,1) = -\sin(\Delta\psi)\cos(\Delta\phi) + \cos(\Delta\psi)\sin(\Delta\theta)\sin(\Delta\phi)$$

$$C(3,1) = \sin(\Delta\psi)\sin(\Delta\phi) + \cos(\Delta\psi)\sin(\Delta\theta)\sin(\Delta\phi)$$

$$C(1,2) = \sin(\Delta\psi)\cos(\Delta\theta)$$

$$C(2,2) = \cos(\Delta\psi)\cos(\Delta\phi) + \sin(\Delta\psi)\sin(\Delta\theta)\sin(\Delta\phi)$$

$$C(3,2) = -\cos(\Delta\psi)\cos(\Delta\phi) + \sin(\Delta\psi)\sin(\Delta\theta)\cos(\Delta\phi)$$

20

$$C(1,3) = -\sin(\Delta\theta)$$

$$C(2,3) = \cos(\Delta\theta)\sin(\Delta\phi)$$

$$C(3,3) = \cos(\Delta\theta)\cos(\Delta\phi)$$

【 0 0 5 6 】

次に、システムモデルを導出する。

システムモデルは、w をシステム誤差として、次式で表される。

【 0 0 5 7 】

【 数 1 3 】

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bw \quad - \text{(式 5)}$$

30

【 0 0 5 8 】

ここで、上述の状態変数 x は、ミスアライメント誤差、バイアス誤差、スケールファクタ誤差からなるので、時間に関係なく一定と仮定することが可能である。したがって、A = 0、B = 0 と定義できる。

そして、(式 5) を離散系で表すと、次式となる。

【 0 0 5 9 】

【 数 1 4 】

$$X_{k+1} = X_k + W_k \quad - \text{(式 6)}$$

40

【 0 0 6 0 】

これにより、状態モデル式は、次式となる。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 5 】

$$X_{k+1} = X_k + W_k$$

$$Z_k = HX_k + v_k$$

【 0 0 6 2 】

これらの状態モデル式をカルマンフィルタに適用することで、状態変数 x で表される角

50

速度による I M U 誤差を計測することができる。

【 0 0 6 3 】

なお、カルマンフィルタの観測更新は、既知の通り、以下の式で表される。

【 0 0 6 4 】

【数 1 6】

$$\begin{aligned} K_k &= \bar{P}_k H_k^t (H_k \bar{P}_k H_k^t + R_k)^{-1} \\ X_{\text{mesk}} &= \bar{X}_k + K_k (z_k - H_k \bar{X}_k) \\ P_k &= (I - K_k H_k) \bar{P}_k \end{aligned}$$

10

【 0 0 6 5 】

また、カルマンフィルタの時間更新は、既知の通り、以下の式で表される。

【 0 0 6 6 】

【数 1 7】

$$\begin{aligned} \bar{X}_{k+1} &= A_k X_{\text{mesk}} + B_k u_k \\ \bar{P}_{k+1} &= A_k \bar{P}_k A_k^t + Q_k \end{aligned}$$

【 0 0 6 7 】

( B ) 加速度センサの場合

20

加速度の誤差計測の場合も、基本的には角速度の誤差計測と同様にカルマンフィルタを適用することができる。ただし、加速度の場合、レバーアーム効果が加わるため、そのための補正項を追加する必要がある。したがって、以下では、加速度の誤差計測と角速度の誤差計測での異なる箇所を具体的に説明し、上述の角速度の誤差計測処理を流用できる箇所は、説明を省略する。

【 0 0 6 8 】

まず、較正対象 I M U 2 1 の誤差モデルから、観測モデルを導出する。較正対象 I M U 2 1 で計測した加速度  $a_{\text{mes}}$  に含まれる誤差は、主にミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差である。したがって、直交三軸の内、一軸での角速度  $a_{1\text{mes}}$  は、当該一軸方向のバイアス誤差を  $B i_a$  とし、当該一軸方向のスケールファクタ誤差を  $s f_a$  とすると、次式のように表すことができる。ここで  $a_{\text{real}}$  は真の加速度である。

30

【 0 0 6 9 】

【数 1 8】

$$a_{1\text{mes}} = a_{\text{real}} + \Delta B i_a + (a_{\text{real}} + \Delta B i_a) \cdot \Delta s f_a$$

【 0 0 7 0 】

この式は、バイアス誤差  $B i_a$  とスケールファクタ誤差  $s f_a$  の乗算値が、他の項よりも十分に小さくなるので、次に示すように近似できる。

【 0 0 7 1 】

40

【数 1 9】

$$a_{1\text{mes}} \cong a_{\text{real}} + \Delta B i_a + a_{\text{real}} \cdot \Delta s f_a \quad - \text{(式7)}$$

【 0 0 7 2 】

そして、上述の角速度の場合と同様に、直接観測できない真の角速度  $a_{\text{real}}$  を消去する処理を行うことで、次式が得られる。

【 0 0 7 3 】

【数 2 0】

$$a_{\text{mes}} = a_{\text{ref}} + C_{\text{mes}}^{\text{ref}} \Delta B i_a + a_{\text{ref}} \cdot \Delta s f_a - S(\Theta) a_{\text{ref}} + v$$

50

## 【 0 0 7 4 】

ここで、観測値  $z$  として、リファレンス IMU 1 1 R の計測した加速度  $a_{ref}$  から、較正対象 IMU 2 1 の計測した加速度  $a_{mes}$  を減算した値を用いる場合、レバーアーム効果を考慮する。

## 【 0 0 7 5 】

具体的には、高精度 IMU 1 1 R の位置を基準位置として、較正対象 IMU 2 1 の相対位置を  $P_{mes}$  と設定する。相対位置  $P_{mes}$  は、X 軸成分、Y 軸成分、Z 軸成分に分解でき、それぞれ  $P_{mesx}$ 、 $P_{mesy}$ 、 $P_{mesz}$  である。

## 【 0 0 7 6 】

ここで、レバーアーム補正値を  $AA$  とすると、レバーアーム補正値  $AA$  は、相対位置  $P_{mes}$  と、高精度 IMU 1 1 R で計測したリファレンス角速度  $\omega_{ref}$  に依存する。

## 【 0 0 7 7 】

## 【 数 2 1 】

$$AA \propto f(P_{mes}, \omega_{ref})$$

## 【 0 0 7 8 】

したがって、加速度の場合、観測値  $z$  は、次式で表される。

## 【 0 0 7 9 】

## 【 数 2 2 】

$$z = a_{ref} - (a_{mes} - AA) \quad \text{— (式 4' )}$$

$$= Hx$$

## 【 0 0 8 0 】

この (式 4' ) の観測値  $z$  を用いることで、状態変数  $x$  で表される加速度による IMU 誤差を計測することができる。

## 【 0 0 8 1 】

なお、高精度 IMU 1 1 R の位置と較正対象 IMU 2 1 の位置とが近接している場合や、角速度が生じる動作が十分に遅く、位置関係により二点の角速度が殆ど変化しないような場合には、レバーアーム補正値を用いず、上述の角速度の場合と同じ方法で、加速度による IMU 誤差を計測することができる。

## 【 0 0 8 2 】

以上のように、本実施形態の方法を用いることで、角速度センサや加速度センサの出力のみを用いて、計測値に含まれるミスアライメント誤差、バイアス誤差、およびスケールファクタ誤差を、高精度に計測することができる。この計測した誤差を用いることにより、較正対象 IMU の較正を高精度に行うことができる。

## 【 0 0 8 3 】

次に、上述の IMU 較正方法を実現するための IMU 較正システムの較正を、図 2 を用いて、より具体的に説明する。

## 【 0 0 8 4 】

IMU 誤差算出部 3 1 には、リファレンス計測値  $OV_r$  と較正対象計測値  $OV_m$  とが入力される。IMU 誤差算出部 3 1 は、リファレンス計測値  $OV_r$  と後述の誤差補正後の較正対象計測値  $OV_m$  に基づいて、ミスアライメント誤差 [ , , ]、バイアス誤差 [  $B_{ix}$ ,  $B_{iy}$ ,  $B_{iz}$  ]、スケールファクタ誤差 [  $sfx$ ,  $sfy$ ,  $sfz$  ] を推定算出する。

## 【 0 0 8 5 】

IMU 誤差算出部 3 1 は、バイアス誤差 [  $B_{ix}$ ,  $B_{iy}$ ,  $B_{iz}$  ] を、バイアス誤差補正部 2 1 2 にフィードバックする。バイアス誤差補正部 2 1 2 は、フィードバックされたバイアス誤差を用いて、慣性センサ 2 1 1 からの出力値を補正し、スケールファクタ誤差補正部 2 1 3 に出力する。

## 【 0 0 8 6 】

10

20

30

40

50

IMU誤差算出部31は、スケールファクタ誤差[  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ]をスケールファクタ誤差補正部213にフィードバックする。スケールファクタ誤差補正部213は、フィードバックされたスケールファクタ誤差を用いて、バイアス誤差補正部212からの出力値を補正し、ミスアライメント誤差補正部214に出力する。

【0087】

IMU誤差算出部31は、ミスアライメント誤差[ , , ]をミスアライメント誤差補正部214にフィードバックする。ミスアライメント誤差補正部214は、フィードバックされたミスアライメント誤差を用いて、スケールファクタ誤差補正部213からの出力値を補正し、誤差補正後の較正対象計測値OVmとして出力する。

【0088】

このような誤差推定と誤差補正のループ処理を繰り返すことで、各誤差は収束し、ミスアライメント誤差[ , , ]、バイアス誤差[  $B i x$  ,  $B i y$  ,  $B i z$  ]、スケールファクタ誤差[  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ]を高精度に推定算出することができる。そして、較正対象IMU21から出力される較正対象計測値OVmを、リファレンス計測値OVrと同等の精度にすることができる。

【0089】

次に、慣性センサが角速度センサの場合と、慣性センサが加速度センサの場合について、具体的に説明する。

【0090】

図4(A)は計測値が角速度の場合のIMU較正装置の構成を示すブロック図であり、図4(B)は計測値が加速度の場合のIMU較正装置の構成を示すブロック図である。図4(A)に示す態様では、高精度IMUと較正対象IMUが角速度のみを出力する場合を示し、図4(B)に示す態様では、高精度IMUと較正対象IMUが加速度のみを出力する場合を示す。

【0091】

(A)計測値が角速度のみの場合

図4(A)に示すように、IMU較正システム1は、高精度角速度センサ11R、較正対象IMU21、およびIMU誤差算出部31を備える。較正対象IMU21は、較正対象角速度センサ211T、バイアス誤差補正部212、スケールファクタ誤差補正部213、および、ミスアライメント誤差補正部214を備える。

【0092】

IMU誤差算出部31は、高精度角速度センサ11Rからのリファレンス角速度  $r_{e f}$  と、較正対象IMU21からの較正対象角速度  $m e s$  とを用いて、上述の算出方法で、ミスアライメント誤差[ , , ]、バイアス誤差[  $B i x$  ,  $B i y$  ,  $B i z$  ]、スケールファクタ誤差[  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ]を推定算出する。

【0093】

IMU誤差算出部31は、バイアス誤差[  $B i x$  ,  $B i y$  ,  $B i z$  ]をバイアス誤差補正部212にフィードバックする。IMU誤差算出部31は、スケールファクタ誤差[  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ]をスケールファクタ誤差補正部213にフィードバックする。IMU誤差算出部31は、ミスアライメント誤差[ , , ]をミスアライメント誤差補正部214にフィードバックする。

【0094】

バイアス誤差補正部212は、フィードバックされたバイアス誤差[  $B i x$  ,  $B i y$  ,  $B i z$  ]を用いて、較正対象角速度センサ211Tからの出力値を補正し、スケールファクタ誤差補正部213に出力する。スケールファクタ誤差補正部213は、フィードバックされたスケールファクタ誤差[  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ]を用いて、バイアス誤差補正部212からの出力値を補正し、ミスアライメント誤差補正部214に出力する。ミスアライメント誤差補正部214は、フィードバックされたミスアライメント誤差[ , , ]を用いて、スケールファクタ

10

20

30

40

50

誤差補正部 2 1 3 から出力値を補正し、較正対象角速度  $m e s$  として、IMU 誤差算出部 3 1 に出力する。

【0095】

このような誤差推定と誤差補正のループ処理を繰り返すことで、各誤差は収束し、ミスアライメント誤差 [  $\quad, \quad, \quad$  ]、バイアス誤差 [  $B i x \quad, B i y \quad, B i z \quad$  ]、スケールファクタ誤差 [  $s f x \quad, s f y \quad, s f z \quad$  ] を高精度に推定算出することができる。そして、較正対象 IMU 2 1 から出力される較正対象角速度  $m e s$  を、リファレンス角速度  $r e f$  と同等の精度にすることができる。

【0096】

(B) 計測値が加速度のみの場合

図 4 (B) の構成では、レバーアーム効果が生じない態様もしくは無視できる程小さい態様において好適である。

【0097】

図 4 (B) に示すように、IMU 較正システム 1 は、高精度加速度センサ 1 1 R a、較正対象 IMU 2 1 a、および IMU 誤差算出部 3 1 を備える。較正対象 IMU 2 1 a は、較正対象加速度センサ 2 1 1 T a、バイアス誤差補正部 2 1 2 a、スケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a、および、ミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a を備える。

【0098】

IMU 誤差算出部 3 1 は、高精度加速度センサ 1 1 R a からリファレンス加速度  $a_{r e f}$  と、較正対象 IMU 2 1 a から較正対象加速度  $a_{m e s}$  とを用いて、上述の算出方法で、ミスアライメント誤差 [  $\quad_a, \quad_a, \quad_a$  ]、バイアス誤差 [  $B i x_a, B i y_a, B i z_a$  ]、スケールファクタ誤差 [  $s f x_a, s f y_a, s f z_a$  ] を推定算出する。

【0099】

IMU 誤差算出部 3 1 は、バイアス誤差 [  $B i x_a, B i y_a, B i z_a$  ] をバイアス誤差補正部 2 1 2 a にフィードバックする。IMU 誤差算出部 3 1 は、スケールファクタ誤差 [  $s f x_a, s f y_a, s f z_a$  ] をスケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a にフィードバックする。IMU 誤差算出部 3 1 は、ミスアライメント誤差 [  $\quad_a, \quad_a, \quad_a$  ] をミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a にフィードバックする。

【0100】

バイアス誤差補正部 2 1 2 a は、フィードバックされたバイアス誤差 [  $B i x_a, B i y_a, B i z_a$  ] を用いて、較正対象角速度センサ 2 1 1 T a から出力値を補正し、スケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a に出力する。スケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a は、フィードバックされたスケールファクタ誤差 [  $s f x_a, s f y_a, s f z_a$  ] を用いて、バイアス誤差補正部 2 1 2 a から出力値を補正し、ミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a に出力する。ミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a は、フィードバックされたミスアライメント誤差 [  $\quad_a, \quad_a, \quad_a$  ] を用いて、スケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a から出力値を補正し、較正対象加速度  $a_{m e s}$  として、IMU 誤差算出部 3 1 に出力する。

【0101】

このような誤差推定と誤差補正のループ処理を繰り返すことで、各誤差は収束し、ミスアライメント誤差 [  $\quad_a, \quad_a, \quad_a$  ]、バイアス誤差 [  $B i x_a, B i y_a, B i z_a$  ]、スケールファクタ誤差 [  $s f x_a, s f y_a, s f z_a$  ] を高精度に推定算出することができる。そして、較正対象 IMU 2 1 a から出力される較正対象加速度  $a_{m e s}$  を、リファレンス加速度  $a_{r e f}$  と同等の精度にすることができる。

【0102】

次に、本発明の第 2 の実施形態に係る IMU 較正システムおよび IMU 構成方法について、図を参照して説明する。図 5 は本発明の第 2 の実施形態に係る IMU 較正システムの構成を示すブロック図である。なお、本実施形態の IMU 較正システムは、第 1 の実施形態に示した IMU 較正システムに対して、レバーアーム効果補正部 2 1 5 a を追加したも

10

20

30

40

50

のである。したがって、異なる箇所のみを具体的に説明する。なお、このレバーアーム効果補正部 215a も本発明の「誤差補正部」の一構成要素に相当する。

【0103】

IMU 較正システム 2 は、高精度 IMU 11R、較正対象 IMU 21'、および、IMU 誤差算出部 31 を備える。高精度 IMU 11R は、高精度加速度センサ 11Ra および高精度角速度センサ 11R を備える。高精度加速度センサ 11Ra は、リファレンス加速度  $a_{ref}$  を出力する。高精度角速度センサ 11R は、リファレンス角速度  $r_{ef}$  を出力する。

【0104】

IMU 誤差算出部 31 は、高精度 IMU 11R からのリファレンス加速度  $a_{ref}$  と、較正対象 IMU 21' からの較正対象加速度  $a_{mes}$  に基づいて、ミスアライメント誤差 [  $a_x, a_y, a_z$  ]、バイアス誤差 [  $Bix_a, Biy_a, Biz_a$  ]、スケールファクタ誤差 [  $sfx_a, sfy_a, sfz_a$  ] を推定算出する。

【0105】

較正対象 IMU 21' は、較正対象加速度センサ 211Ta、バイアス誤差補正部 212a、スケールファクタ誤差補正部 213a、ミスアライメント誤差補正部 214a、および、レバーアーム効果補正部 215a を備える。バイアス誤差補正部 212a、スケールファクタ誤差補正部 213a、ミスアライメント誤差補正部 214a、および、レバーアーム効果補正部 215a からなる部分が本発明の「誤差補正部」に相当する。

【0106】

レバーアーム効果補正部 215a には、高精度 IMU 11R からリファレンス角速度  $r_{ef}$  が入力される。また、レバーアーム効果補正部 215a には、高精度 IMU 11R の位置を基準とする較正対象 IMU 21' の相対位置  $P_{mes}$  が入力される。この相対位置  $P_{mes}$  は、例えば、別途予め測定しておけばよい。

【0107】

レバーアーム効果補正部 215a は、相対位置  $P_{mes}$  と高精度角速度  $r_{ef}$  から算出したレバーアーム効果補正值 AA を用いて、較正対象加速度センサ 211Ta から出力された加速度を補正する。

【0108】

バイアス誤差補正部 212a は、IMU 誤差算出部 31 で推定されたバイアス誤差 [  $Bix_a, Biy_a, Biz_a$  ] を用いて、レバーアーム効果補正後の加速度を補正する。スケールファクタ誤差補正部 213a は、IMU 誤差算出部 31 で推定されたスケールファクタ誤差 [  $sfx_a, sfy_a, sfz_a$  ] を用いて、バイアス誤差補正後の加速度を補正する。ミスアライメント誤差補正部 214a は、IMU 誤差算出部 31 で推定されたミスアライメント誤差 [  $a_x, a_y, a_z$  ] を用いて、スケールファクタ誤差補正後の加速度  $a_{mes}$  を補正する。これらの誤差補正が行われた加速度は、較正対象加速度  $a_{mes}$  として IMU 誤差算出部 31 に出力される。

【0109】

このような誤差推定と誤差補正のループ処理を繰り返すことで、各誤差は収束していき、ミスアライメント誤差 [  $a_x, a_y, a_z$  ]、バイアス誤差 [  $Bix_a, Biy_a, Biz_a$  ]、スケールファクタ誤差 [  $sfx_a, sfy_a, sfz_a$  ] を高精度に推定算出することができる。特に、本実施形態の構成を用いれば、レバーアーム効果による影響を低減でき、これらの誤差をさらに高精度に推定算出することができる。そして、較正対象 IMU 21' から出力される較正対象加速度  $a_{mes}$  を、リファレンス加速度  $a_{ref}$  と同等の精度にすることができる。

【0110】

なお、上述の処理をプログラム化して、コンピュータ等の演算処理機で実行することで較正処理を行ってもよい。図 6 は本発明の第 2 実施形態に係る IMU 較正方法を示すフローチャートである。

【0111】

10

20

30

40

50

I M U 誤差算出部 3 1 は、較正対象計測値（較正対象加速度  $a_{m e s}$ ）とリファレンス対象計測値（リファレンス加速度  $a_{r e f}$ ）とを順次取得する（S 2 0 1）。

【 0 1 1 2 】

I M U 誤差算出部 3 1 は、時間的に変化しないミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を未知数とする方程式を設定する。I M U 誤差算出部 3 1 は、較正対象計測値とリファレンス計測値を観測値（既知数）として方程式を設定する。I M U 誤差算出部 3 1 は、相対位置  $P_{m e s}$  とリファレンス角速度  $r_{e f}$  から算出したレバーアーム効果補正值  $A A$  を方程式に適用する。I M U 誤差算出部 3 1 は、この方程式に対して、経時的に順次取得できる較正対象加速度  $a_{m e s}$  とリファレンス加速度  $a_{r e f}$  とを観測値（既知数）として代入することで、ミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を推定算出する（S 2 0 2）。

10

【 0 1 1 3 】

I M U 誤差算出部 3 1 は、算出した上述の誤差を較正対象 I M U 2 1 ' にフィードバックし、較正対象 I M U 2 1 ' は、フィードバックされた誤差を用いて較正を行う（S 2 0 3）。

【 0 1 1 4 】

次に、本発明の第 3 の実施形態に係る I M U 較正システムおよび I M U 構成方法について、図を参照して説明する。図 7 は本発明の第 3 の実施形態に係る I M U 較正システムの構成を示すブロック図である。なお、本実施形態の I M U 較正システムは、加速度に対する各誤差と、角速度に対する各誤差を推定演算し、較正に利用するものであり、基本的な加速度に対する各誤差の推定演算および較正への利用、および角速度に対する各誤差の推定演算および較正への利用については、上述の実施形態と同じである。したがって、本実施形態の構成に特有の箇所のみを具体的に説明する。

20

【 0 1 1 5 】

I M U 較正システム 3 は、高精度 I M U 1 1 R、較正対象 I M U 2 1 "、および、I M U 誤差算出部 3 1 を備える。高精度 I M U 1 1 R は、高精度加速度センサ 1 1 R a および高精度角速度センサ 1 1 R を備える。高精度加速度センサ 1 1 R a は、リファレンス加速度  $a_{r e f}$  を出力する。高精度角速度センサ 1 1 R は、リファレンス角速度  $r_{e f}$  を出力する。

30

【 0 1 1 6 】

I M U 誤差算出部 3 1 は、高精度 I M U 1 1 R からのリファレンス角速度  $r_{e f}$  と、較正対象 I M U 2 1 " からの較正対象角速度  $m_{e s}$  を用いて、角速度に対するミスアライメント誤差 [  $\quad$  ,  $\quad$  ,  $\quad$  ]、バイアス誤差 [  $B_{i x}$  ,  $B_{i y}$  ,  $B_{i z}$  ]、スケールファクタ誤差 [  $s f x$  ,  $s f y$  ,  $s f z$  ] を推定算出する。

【 0 1 1 7 】

較正対象 I M U 2 1 " は、較正対象加速度センサ 2 1 1 T a、較正対象角速度センサ 2 1 1 T 、加速度用のバイアス誤差補正部 2 1 2 a、加速度用のスケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a、加速度用のミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a、レバーアーム効果補正部 2 1 5 a、角速度用のバイアス誤差補正部 2 1 2 、角速度用のスケールファクタ誤差補正部 2 1 3 、および、角速度用のミスアライメント誤差補正部 2 1 4 を備える。加速度用のバイアス誤差補正部 2 1 2 a、加速度用のスケールファクタ誤差補正部 2 1 3 a、加速度用のミスアライメント誤差補正部 2 1 4 a、レバーアーム効果補正部 2 1 5 a、角速度用のバイアス誤差補正部 2 1 2 、角速度用のスケールファクタ誤差補正部 2 1 3 、および、角速度用のミスアライメント誤差補正部 2 1 4 からなる部分が本発明の「誤差補正部」に相当する。

40

【 0 1 1 8 】

較正対象 I M U 2 1 " における較正対象加速度センサに対する較正は、上述の第 2 の実施形態に係る較正対象 I M U 2 1 ' と同じであり、説明は省略する。

50

## 【0119】

角速度用のバイアス誤差補正部212は、IMU誤差算出部31で推定された角速度に対するバイアス誤差 $[B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}]$ を用いて、較正対象角速度センサ211Tから出力された角速度を補正する。

## 【0120】

角速度用のスケールファクタ誤差補正部213は、IMU誤差算出部31で推定された角速度に対するスケールファクタ誤差 $[s_{fx}, s_{fy}, s_{fz}]$ を用いて、バイアス誤差補正後の角速度を補正する。

## 【0121】

角速度用のミスアライメント誤差補正部214は、IMU誤差算出部31で推定された角速度に対するミスアライメント誤差 $[\quad, \quad, \quad]$ を用いて、スケールファクタ誤差補正後の角速度を補正する。これらの誤差補正が行われた角速度は、較正対象角速度 $m_{es}$ としてIMU誤差算出部31に出力される。

10

## 【0122】

このような誤差推定と誤差補正のループ処理を繰り返すことで、各誤差は収束していき、角速度に対するミスアライメント誤差 $[\quad, \quad, \quad]$ 、バイアス誤差 $[B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}]$ 、スケールファクタ誤差 $[s_{fx}, s_{fy}, s_{fz}]$ を高精度に推定算出することができる。そして、較正対象IMU21"から出力される較正対象角速度 $m_{es}$ を、リファレンス角速度 $r_{ef}$ と同等の精度にすることができる。

20

## 【0123】

なお、上述の処理をプログラム化して、コンピュータ等の演算処理機で実行することで較正処理を行ってもよい。図8は本発明の第3実施形態に係るIMU較正方法を示すフローチャートである。

## 【0124】

IMU誤差算出部31は、較正対象計測値（較正対象加速度 $a_{mes}$ および較正対象角速度 $m_{es}$ ）とリファレンス計測値（リファレンス加速度 $a_{ref}$ およびリファレンス角速度 $r_{ef}$ ）とを順次取得する（S301）。

## 【0125】

IMU誤差算出部31は、角速度に対して、時間的に変化しないミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を未知数とする方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、較正対象角速度 $m_{es}$ とリファレンス角速度 $r_{ef}$ を観測値（既知数）として方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、この方程式に対して、経時的に順次取得できる較正対象角速度 $m_{es}$ とリファレンス角速度 $r_{ef}$ とを観測値（既知数）として代入することで、角速度に対するミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を推定算出する（S302）。

30

## 【0126】

IMU誤差算出部31は、加速度に対して、時間的に変化しないミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を未知数とする方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、較正対象加速度 $a_{mes}$ とリファレンス加速度 $a_{ref}$ を観測値（既知数）として方程式を設定する。IMU誤差算出部31は、相対位置 $P_{mes}$ とリファレンス角速度 $r_{ef}$ と角速度に対するミスアライメント誤差 $[\quad, \quad, \quad]$ から算出したレバーアーム効果補正值 $AA$ を方程式に適用する。IMU誤差算出部31は、この方程式に対して、経時的に順次取得できる較正対象加速度 $a_{mes}$ とリファレンス加速度 $a_{ref}$ とを観測値（既知数）として代入することで、加速度に対するミスアライメント誤差の三軸成分、バイアス誤差の三軸成分、およびスケールファクタ誤差の三軸成分を推定算出する（S303）。

40

## 【0127】

IMU誤差算出部31は、算出した上述の誤差を、較正対象IMU21"にフィードバ

50

ックし、較正対象IMU 2 1”は、フィードバックされた誤差を用いて較正を行う（S 3 0 4）。

【0128】

なお、上述の説明では、加速度に対する各誤差と、角速度に対する各誤差を別処理で推定算出する例を示した。しかしながら、加速度と角速度を同じ処理で推定してもよい。すなわち、較正対象加速度  $a_{mes}$ 、リファレンス加速度  $a_{ref}$ 、較正対象角速度  $\omega_{mes}$ 、およびリファレンス角速度  $\omega_{ref}$  を観測値として、加速度に関する三軸のミスアライメント誤差  $[a_x, a_y, a_z]$ 、バイアス誤差  $[Bix_a, Biy_a, Biz_a]$ 、スケールファクタ誤差  $[sfx_a, sfy_a, sfz_a]$ 、および角速度に関する三軸のミスアライメント誤差  $[a_x, a_y, a_z]$ 、バイアス誤差  $[Bix, Biy, Biz]$ 、スケールファクタ誤差  $[sfx, sfy, sfz]$  を未知数として、一つのカルマンフィルタを適用してもよい。

10

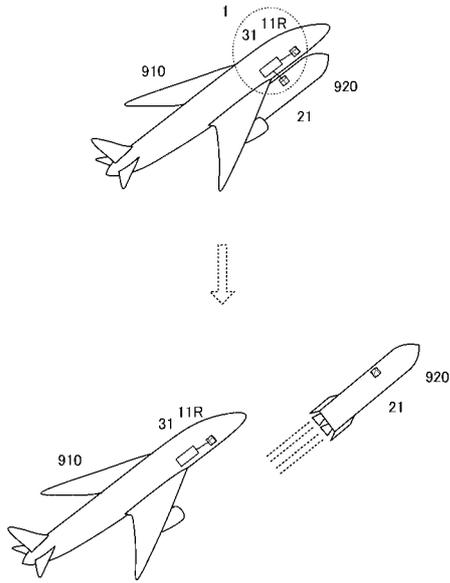
【符号の説明】

【0129】

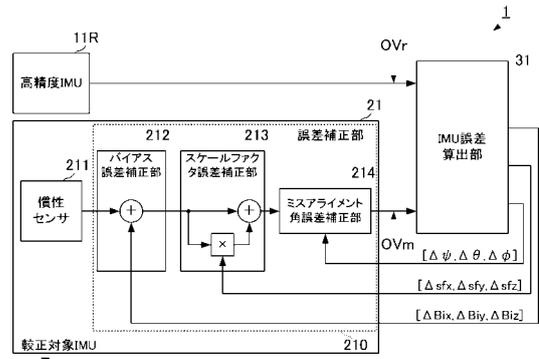
1, 2, 3 : IMU較正システム  
 1 1 R : 高精度IMU  
 1 1 R a : 高精度加速度センサ  
 1 1 R : 高精度角速度センサ  
 2 1, 2 1', 2 1" : 較正対象IMU  
 2 1 0, 2 1 0', 2 1 0" : 誤差補正部  
 2 1 1 T a : 較正対象加速度センサ  
 2 1 1 T : 較正対象角速度センサ  
 3 1 : IMU誤差算出部  
 2 1 2 a, 2 1 2 : バイアス誤差補正部  
 2 1 3 a, 2 1 3 : スケールファクタ誤差補正部  
 2 1 4 a, 2 1 4 : ミスアライメント誤差補正部  
 2 1 5 a : レバーアーム効果補正部  
 9 1 0 : 飛行機  
 9 2 0 : ロケット

20

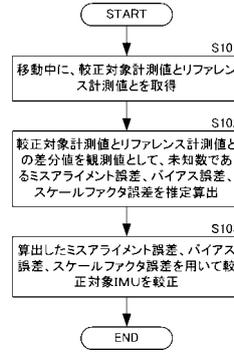
【図1】



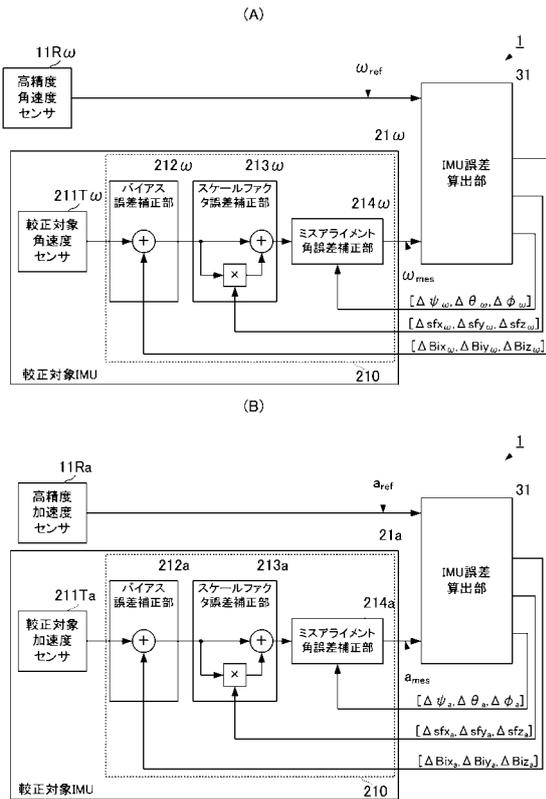
【図2】



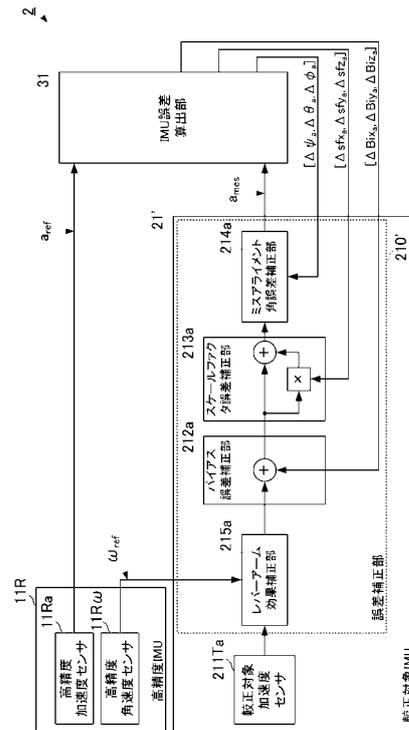
【図3】



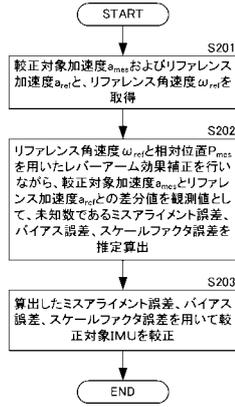
【図4】



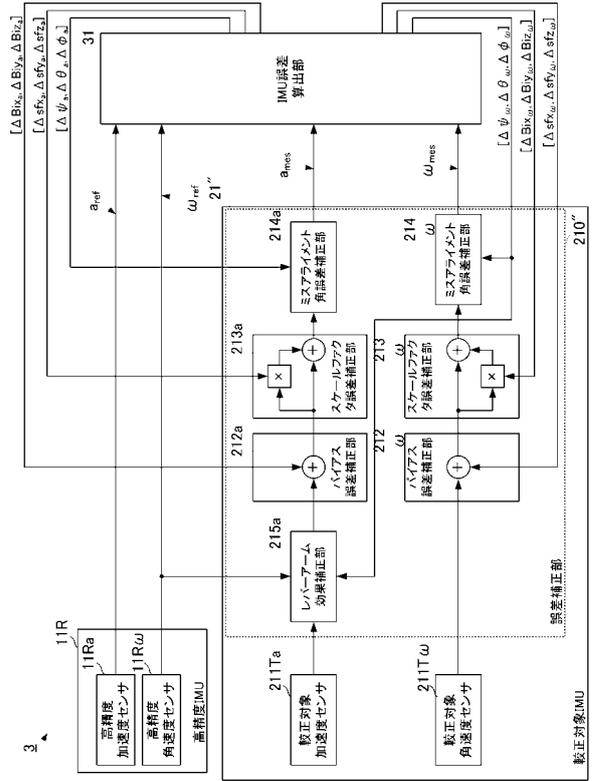
【図5】



【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】

