

# 技術紹介

12

## 2 軸ストラップダウン方位計測アルゴリズムの開発 (North Finding System)

Development of Two-axis Strap Down Direction Measuring Algorithm (North Finding System)

森元 誠一 Seichi Morimoto

航機事業部 第一技術部 シニアマネージャ

増田 雄一 Yuichi Masuda

航機事業部 第一技術部 主任

木村 剛士 Tsuyoshi Kimura

航機事業部 第一技術部

キーワード：慣性装置、方位角、ジャイロ、加速度計

Keywords : Inertial system, Azimuth, Gyroscope, Accelerometer

### 要 旨

従来の慣性装置では、ジャイロ、加速度計を直交 3 軸 (X-Y-Z) に配置して方位角を計測していましたが、ここで開発した方位計測アルゴリズムは、長年培ってきた慣性装置技術を応用・発展させることにより、ジャイロ、加速度計の直交 2 軸 (X-Y) ストラップダウン (車体軸に固定) 配置構成にて方位計測を可能とする技術であり、静止車両の方位計測用として従来方式と同等な性能を有し、従来品より低価格な方位計を実現することができました。

### SUMMARY

In the conventional inertial systems, azimuth is measured by orthogonal arrangement of gyroscopes and accelerometers in three axes (X-Y-Z). The newly developed direction measuring algorithm is a technology that enables to measure direction by a configuration of orthogonal strap-down (fixed on the body's axis) arrangement of gyroscopes and accelerometers in two axes (X-Y). This becomes possible by derivation and development of our inertial system technology accumulated for a long time. Thus, the low-cost direction finding system becomes available, while keeping the equivalent performance to that of the conventional system, for application of direction finding of stationary vehicles.

## 1 まえがき

現在、方位の計測には、地磁気を利用した方法、測量による方法、地球自転角速度を利用した慣性装置による方法等さまざまなものがあります。地磁気を利用した方法は、簡単ではありますが、建物等周囲の磁気環境に大きく影響を受け、精度良く方位を計測することが不可能な場合もあります。測量による方法は、測量に複数の人員が必要で有り、他の計測方法に比較し多くの時間を必要とします。これらに対して、地球自転角速度を利用した慣性装置による方法は、高精度な方位計測を短時間にかつ人手を掛けずに実現できるのですが、従来の慣性装置は高価格であり、航空機や車両の方位計測等、特殊な用途に限られていました。

今回開発した2軸ストラップダウン方位計測アルゴリズムを使用した方位計は、従来の3軸ストラップダウン慣性装置の方位計測と同等な精度の実現が可能であり、かつ小型軽量化・低価格化が実現でき、より多くの市場で採用されることが期待されます。

## 2 開発のポイント

車両の走行中や航空機の飛行中のようなダイナミックな動きが入らない状況を運用の条件とし、従来の3軸ジャイロ及び加速度計の構成を2軸にて方位計測を可能とするためには、以下の技術課題をクリアする必要があります。

### 2.1 技術的課題

地球自転角速度による方位計測の原理を図1に示します。

水平面での地球自転角速度は、南北方向で最大( $\pm \Omega \cdot \cos \lambda$ )となり、東西方向で0、となります。水平面内に直交2軸のジャイロを配し、これらジャイロの検出した地球自転角速度から、真北からの方位角を計算することができます。

$\Omega$  : 地球自転角速度 =  $15.04^\circ / \text{H}$

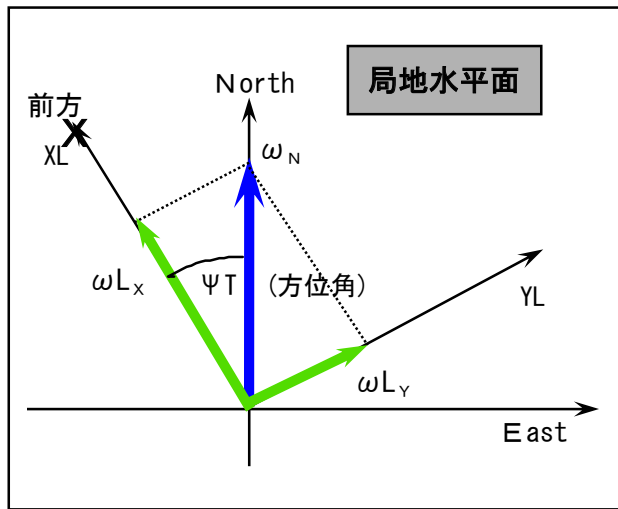
$\lambda$  : 計測地点の緯度

従来のセンサ3軸構成慣性装置の場合、3軸のジャイロで検出した角速度を姿勢角情報による姿勢変換行列により水平面に変換できたのですが、センサ2軸構成では2軸のジャイロしか持たないため、そのままでは水平面へ変換した角速度に誤差が発生してしまいます。

この誤差は、図2に示す水平からピッチ角 $\theta$ の姿勢では、水平角速度 $\omega_{Lx}$ に $\sin \theta \cdot \omega_{Bz}$ の推定誤差としてあらわれ、結果推定方位角に誤差が生じてしまいます。

また、車両の停止時には、わずかながら水平面からの姿勢角変化が装置に入ります。センサ2軸構成では、装置Z軸方向にはジャイロを有さないため、装置Z軸に角速度が入るような姿勢角変化があると、姿勢角の計測結果に誤差が発生し、やはり水平変換時に誤差が発生してしまいます。つまり、本装置のZ軸に入力する角速度を正確に推定し、これによるわずかな姿勢変化を検知する必要があります。

■ 水平面の直交2軸(XL,YL)の自転角速度成分から、方位角を求める。



$$\omega_{Lx} = \omega_N \cdot \cos \Psi T$$

$$\omega_{Ly} = -\omega_N \cdot \sin \Psi T$$



方位角 ( $\Psi T$ )

$$= \tan^{-1} (-\omega_{Ly} / \omega_{Lx})$$

添字Lは 水平、垂直軸を示す

図1 方位計測の原理

■ 装置3軸(XB,YB,ZB)成分を、姿勢角で座標変換し、水平成分 $\omega_{Lx}$ 、 $\omega_{Ly}$ を求める。

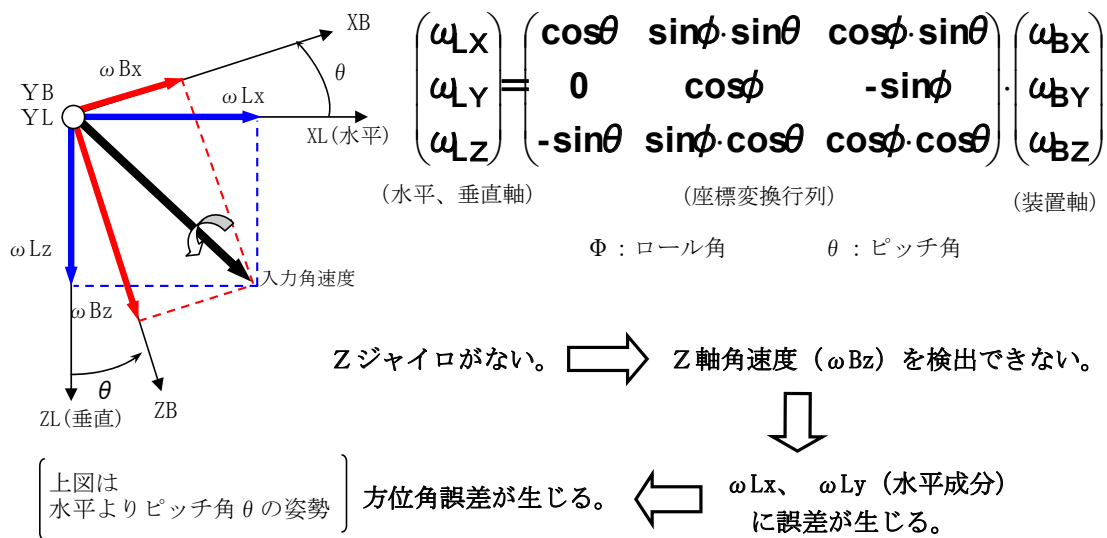


図2 角速度の水平変換

## 2.2 解決策

Z 軸入力角速度の推定方法について検討した結果、「方位計測中に方位角は変化しない」＝「鉛直軸には地球自転角速度以外の回転は入らない」ことを利用し、姿勢角、ジャイロで検出する 2 軸の角速度、計測地点の入力緯度（ $\lambda$ ）から、Z 軸角速度を推定する「Z 軸角速度推定器」を採用することとしました。

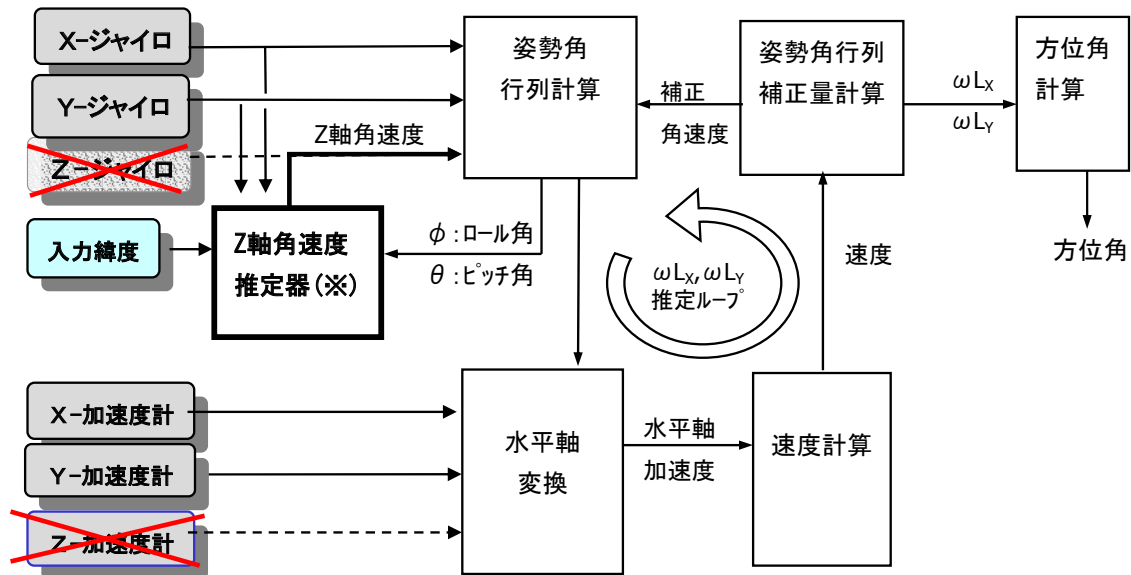
この「Z 軸角速度推定器」では、次式により Z 軸角速度が推定計算されます。

$$\omega_{Bz} = (-\Omega \cdot \sin \lambda + \sin \theta \cdot \omega_{Bx} - \sin \Phi \cdot \cos \theta \cdot \omega_{By}) / (\cos \Phi \cdot \cos \theta)$$

$\omega_{Bx}$  : X 軸角速度  
 $\omega_{By}$  : Y 軸角速度

この $\omega_{Bz}$ は、Z 軸ジャイロが検出する角速度とみなすことができるため、従来の 3 軸慣性装置と同様に正確な方位を検出することが可能となりました。

本方式による方位角算出の構成図を図 3 に示します。



(※) 「Z軸角速度推定器」を追加（特許出願中）

図 3 2 軸ストラップダウン方式の構成

### 3 製品への応用

本技術を応用した2軸ストラップダウン方位計をこの度開発しました。

本装置は、小型RLG、小型サーボ加速度計を各々直交2軸(X,Y)に配置し、これらセンサにより、地球自転角速度及び装置の姿勢角(傾き)を計測し、方位角を演算出力する高精度の方位計です。

センサはいずれも装置に固定されており(ストラップダウン型)、物理的に水平面を維持するいわゆるジンバル構造等の可動部位はなく、そのために機械的な構成がシンプルであり、振動や衝撃に強く耐環境性に優れており、メンテナンスフリーとなっています。

電気的なインタフェースとして、RS-422によるシリアル通信機能を備え、電源投入により自動的に方位を計測することができます。

装置の仕様を表1に、機能ブロックを図4に示します。

表1 2軸ストラップダウン方位計の設計目標値

機能		内容	
方位計測機能		・電源投入による自動的な方位角の計測機能。	
姿勢角計測機能		・姿勢角の計測機能。	
外部インタフェース		・シリアル通信 (RS-422) による外部制御信号の入力機能。 ・シリアル通信 (RS-422) による計測データ (方位角 / ロール角 / ピッチ角) および内部ステータスの出力機能。 ・自己診断による故障情報出力機能。	
項目		目標値	備考
方位角精度	計測時間 5 分	0.3° (1 $\sigma$ )	・静止
	計測時間 20 分	0.1° (1 $\sigma$ )	
姿勢角精度		0.1° (1 $\sigma$ )	
消費電力		20W 以下	
質量		7kg 以下	

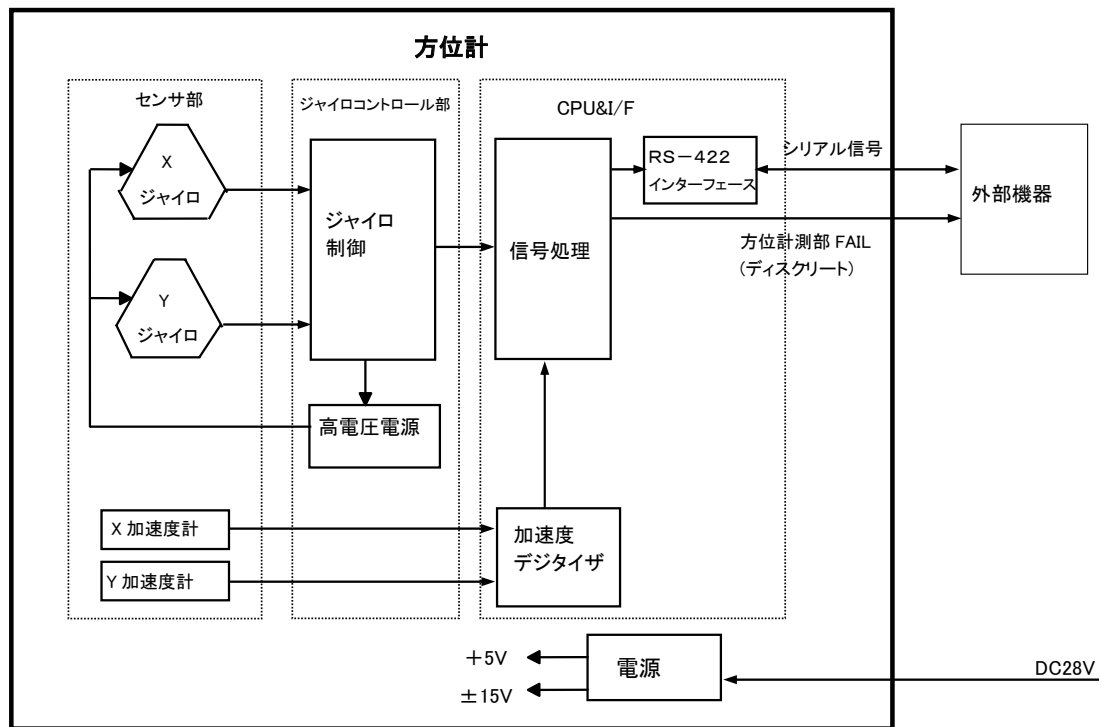


図 4 2 軸ストラップダウン方位計機能ブロック図

## 4 開発成果

今回開発した2軸ストラップダウン方位計測アルゴリズムを使用した方位計の技術成果を以下に示します。

### 4.1 静止時の方位角精度

本装置の静止時の方位角精度（実測値）を図5に示します。

目標を達成する結果を得ることができました。

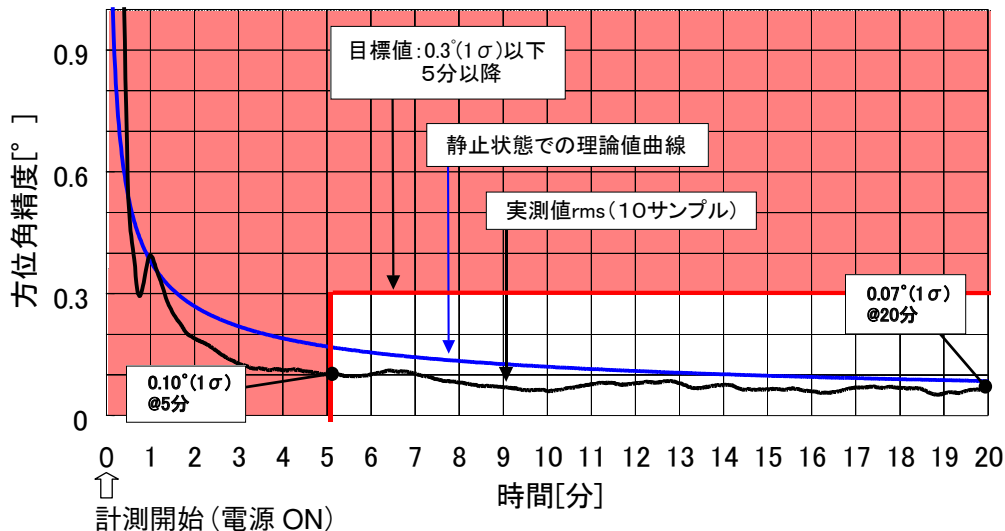
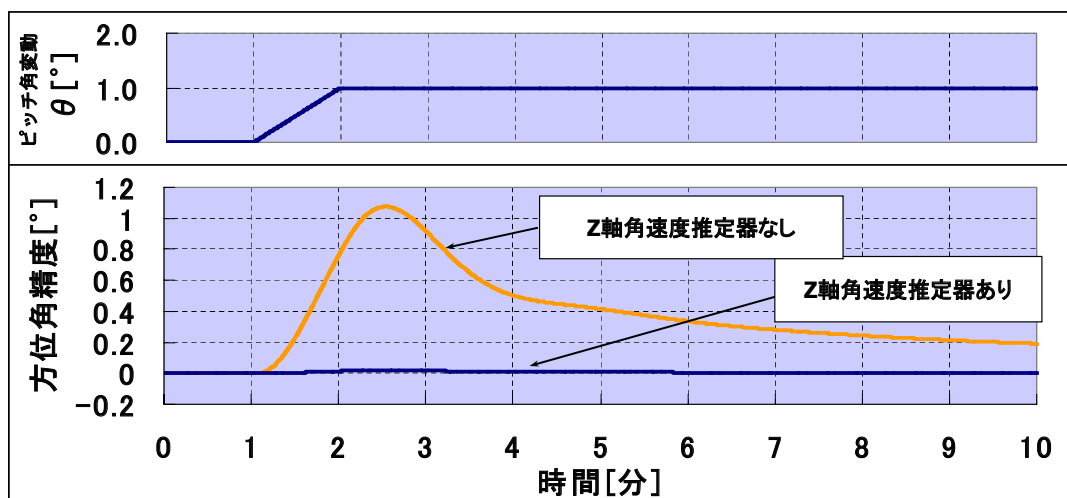


図5 静止時の方位角精度（実測値）

### 4.2 動揺に対する方位角誤差

方位計測中に角度変化が入った場合の方位角精度（シミュレーション結果）を図6に示します。また、このシミュレーションと同様の角度変化を実際に与えた場合の方位角の挙動についても、シミュレーションの結果とほぼ一致することが確認できました。



動揺印加条件:

方位角 $0^\circ$ 、 $\phi$  (ロール角) $=6^\circ$ 、標定開始後1分～2分にかけて  $\theta$  (ピッチ角) が  $0 \Rightarrow 1^\circ$  への動揺を印加した場合

図6 角度変化時の方位角精度

表 2 開発結果まとめ

項目		目標	結果
方位角精度	計測時間 5 分	$0.3^{\circ} (1\sigma)$	$0.10^{\circ} (1\sigma)$
	計測時間 20 分	$0.1^{\circ} (1\sigma)$	$0.07^{\circ} (1\sigma)$
消費電力		20W 以下	17W
質量		7kg 以下	6.9kg

## 5 むすび

今回、2 軸ストラップダウン方式による方位計測のアルゴリズムを開発し、目標とする成果を達成することができました。

今後は、小型軽量化・低価格のメリットを生かし、本技術をトンネル掘削機用方位計等の製品に適用し、静止体の方位計測分野への展開を図ります。