

# 技術紹介

## 6 無人探査機用慣性装置の開発

Development of Inertial navigation system for Unmanned research vehicle

|       |                 |                    |
|-------|-----------------|--------------------|
| 山田 雅喜 | Masaki Yamada   | 航機事業部 第一技術部 マネージャー |
| 木村 剛士 | Tsuyoshi Kimura | 航機事業部 第一技術部        |
| 奥山 貴之 | Takashi Okuyama | 航機事業部 第一技術部        |

キーワード: 慣性装置、複合航法、ドップラセンサ、RLG、加速度計

Keywords: Inertial navigation system, Hybrid Navigation, Doppler sensor, RLG, Accelerometer

### 要 旨

海洋研究開発機構殿(以下、JAMSTEC 殿という)は、1998 年から海底火山などの人間が近づくことのできない海域の調査や海底の精密調査に使用するための無人深海巡航探査機「うらしま」の開発を開始し、当社は JAMSTEC 殿からの依頼を受けて「うらしま」に搭載するための慣性装置の開発を行った。この装置は高精度な慣性センサ(ジャイロ、加速度計)とドップラセンサを使用した複合航法により、水中において長時間に渡り高精度な位置、速度、方位及び姿勢を検出可能な装置であった。

今回、当社は同じく JAMSTEC 殿からの依頼を受け、「うらしま」用慣性装置に対し、母艦とケーブル接続なしで水中を自力で航行し(自律航行)自動観測が可能な精度を保ちつつ、大幅な小型・軽量化および拡張した複合航法機能を有する無人探査機用慣性装置を開発した。

### SUMMARY

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) began the development of the unmanned deep-sea cruising vessel URASHIMA to use for the survey of sea area such as submarine volcano that was not able to be approached and for accurate investigation of the bottom of the sea in 1998, and we developed an inertial navigation system to install it in URASHIMA by the request of JAMSTEC. This was the system that was able to detect a highly accurate position, the speed, the azimuth, and the attitude in water for a long time by the hybrid navigation using a highly accurate inertia sensor (gyroscope, accelerometer) and a Doppler sensor.

This time, we received the request to the inertial navigation system for URASHIMA from JAMSTEC similarly, and developed an considerably small and light inertial navigation system for the robot craft that had an extended hybrid navigation function and kept accuracy that it sailed in water for oneself (autonomous navigation) without cable connection to the mother-ship and the automatic observation is possible.

## 1. まえがき

水中航走、中でも無人探査機は、水中を長時間に渡り航行するため、搭載される慣性装置は、高精度な位置、速度、方位角及び姿勢角を検出する必要があるが、無人探査機の耐圧容器は可能な限り小型・軽量化する必要があるため、その中に搭載される慣性装置も小型・軽量化する必要がある。

過去、JAMSTEC 殿に採用して頂いた当社の慣性装置は、精度的には、世界最高クラスの位置、速度、方位角及び姿勢角の検出が可能な慣性装置であったが、大型であるため、小型の水中航走体に搭載することは困難であった。

そのため、従来の慣性装置の大型化の主要因であったRLG(Ring Laser Gyro)に小型RLGを使用し、装置として小型・軽量化を図り、水中での自律航行が可能となる精度を達成した無人探査機用慣性装置について紹介する。

## 2. 小型・軽量化への取り組み

### 2.1 RLGの選定

当社は、高性能ジャイロとしてRLGを生産している。その諸元を表1に示す。

Type1(従来品)は、「うらしま」用慣性装置に使用したRLGであり、大型であるが、極めて高性能を有している。

Type2は、小型・軽量化を目的に近年開発したRLGであり、性能的にはType1 より悪いものである。

慣性装置の小型・軽量化に向け、小型RLG Type2を用いた慣性装置の性能実現について検討する。

表1 RLG性能の比較表

|         | Type1(従来品)    | Type2        |
|---------|---------------|--------------|
| 容量      | 1.1ℓ          | 0.3ℓ         |
| 質量      | 1300g         | 360g         |
| バイアス安定性 | 0.002° /h(1σ) | 0.02° /h(1σ) |

開発に当り、本装置の目標位置精度を次の通り設定した。

$$\text{位置精度} = \frac{\text{移動距離} \times 0.7\%}{\cos \text{緯度}} \quad \text{m rms 以下} \quad \dots (1)$$

慣性装置の位置精度は、原理的に方位角誤差に大きく起因しており、その方位角誤差の主な発生要因としては、次の2つである。

- (1) 初期方位角誤差(アライメント誤差)による方位角誤差
- (2) 航法中にRLG誤差により発生する方位角ドリフト(誤差)

### 2.1.1 位置精度を満足する方位角誤差の検討

式(1)より、赤道(緯度=0°)における位置精度と移動距離の関係は、次式の通りとなる。

$$\frac{\text{位置精度}}{\text{移動距離}} = 0.7\% \text{ m rms 以下} \quad \dots (2)$$

一方、位置精度の主要因である方位角誤差と位置精度の関係は、図1より、次式の通りとなる。

$$\frac{\text{位置精度}}{\text{移動距離}} = \tan \text{方位角誤差} \quad \dots (3)$$

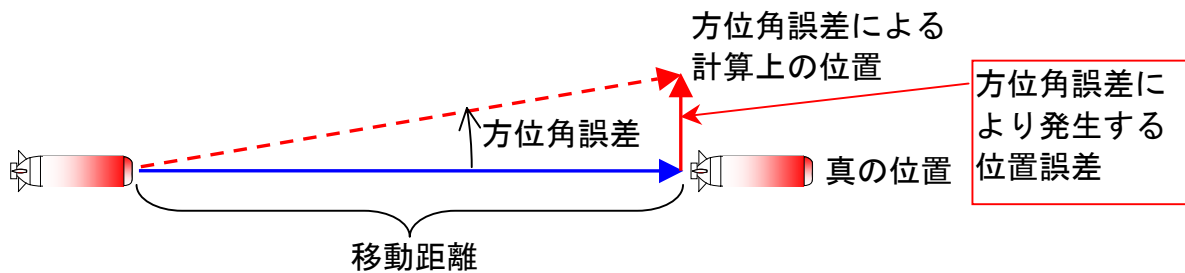


図1 方位角誤差と位置精度の関係

式(2)及び式(3)より、

$$\tan \text{方位角誤差} = 0.7\% \quad \dots (4)$$

と表され、方位角誤差は、

$$\begin{aligned} \text{方位角誤差} &= \arctan 0.7\% \\ &= 0.4^\circ \end{aligned}$$

となる。

従って、式(1)の位置精度要求を満足するためには、初期方位角誤差と航行中にRLG誤差により発生する方位角ドリフトの総和が0.4°以下でなければならない。

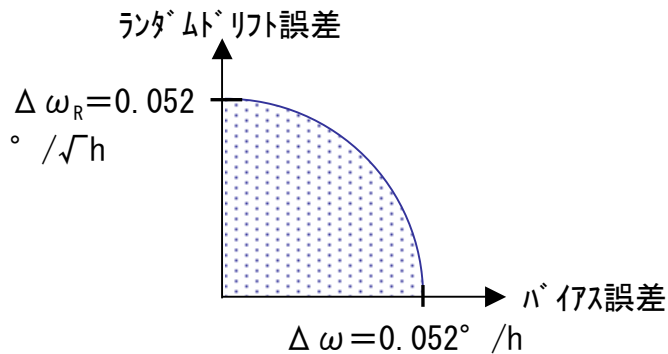
### 2.1.2 初期方位角誤差の算出

慣性装置は、使用する前に短時間において、ジャイロにより地球自転角速度を検出し、その検出した地球自転角速度の水平2軸成分の大きさより、探北すなわち初期方位角を推定する。(本機能をアライメントと言う。)

アライメントにより生じる初期方位角誤差は、主に水平方向のRLG誤差より発生し、式(5)のように表される。

従って、方位角誤差  $0.4^\circ$  を満足するためには、最低限、図 2 の扇円の内部に入るRLG精度が必要となる。

$$\text{初期方位角誤差} = \sqrt{\arcsin^2 \left( \frac{\Delta \omega}{\Omega \cos \lambda} \right) + \arcsin^2 \left( \frac{\Delta \omega_R}{\Omega \cos \lambda \sqrt{t}} \right)} \quad \dots (5)$$



$\Delta \omega$  : RLG バイアス誤差  
 $\Delta \omega_R$  : RLG ランダムドリフト誤差  
 $\Omega$  : 地球自転レート  
 $\lambda$  : 緯度  
 $t$  : アライメント時間

図 2 ジャイロの条件

### 2.1.3 航法中のRLG誤差により発生する方位角ドリフトの検討

慣性装置は、初期方位角を算出後、ドップラとの複合航法演算を行うが、複合航法時においても前述の初期方位角誤差と同様に、水平方向のRLG誤差は、固定的な方位角誤差として発生する。これは、方位角誤差とRLG誤差が釣合っているためである。

加えて、垂直方向のRLG誤差は、時間と共に方位角をドリフトさせ、方位角誤差が大きくなる。

### 2.1.4 方位角誤差と位置精度の要求を満足させるための方策

航行時間を 10 時間とした場合の方位角誤差は、表 2 の通りであるが、今回のRLG Type2を使用して、Type1と同様の航法演算処理を行った場合は、目標方位角精度: $0.4^\circ$  をわずかながら超えてしまう。

表 2 水中航行中の方位角誤差

|                      | Type1        | Type2        |                     | 備考                      |
|----------------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------------|
|                      |              | 従来处理         | 新処理                 |                         |
| 初期方位角誤差              | $0.03^\circ$ | $0.22^\circ$ | $0.20^\circ$<br>(注) | RLG性能から計算される<br>初期方位角誤差 |
| 10 時間での<br>方位角ドリフト誤差 | $0.02^\circ$ | $0.20^\circ$ |                     | RLG性能による<br>方位角ドリフト量    |
| 方位角誤差 計              | $0.05^\circ$ | $0.42^\circ$ | $0.20^\circ$        |                         |

(注) 運動印加時

そこで、今回、RLG Type2において、カルマンフィルタを使用した複合航法により、方位角誤差の主要因である“ジャイロの誤差”の推定を実施し、RLG誤差の抑制を図った。

複合航法とは、慣性センサより計算された速度と基準となる外部から入力されるドップラ速度を比較した速度誤差(観測量という)から慣性装置の誤差を推定する推測航法であり、その推定量をフィードバックすることで慣性装置の精度を向上させるものである。

複合航法では、慣性装置の誤差方程式を状態方程式(式(6))、基準と慣性装置の差、即ち、慣性装置の誤差を観測方程式(式(7))として次の通り与えられる。

$$\underline{\dot{x}} = A\underline{x} + \underline{v} \quad \dots (6)$$

$$\underline{y} = H\underline{x} + \underline{w} \quad \dots (7)$$

但し、

$\underline{x}$ : 状態遷移ベクトル

$A$ : 状態遷移行列

$\underline{v}$ : システム・ノイズ・ベクトル

$\underline{y}$ : 観測ベクトル

$H$ : 観測行列

$\underline{w}$ : 観測ノイズ・ベクトル

従来の慣性装置は、位置誤差、速度誤差、姿勢角誤差、方位角誤差を推定量として複合航法を行っていた。しかし、今回は推定量にジャイロ誤差等のセンサ誤差を追加することにより、RLGの高精度化が可能となり、運動印加時の方位角誤差の推定精度が向上し、方位角誤差の低減が可能となった。

表3に従来の複合航法と今回の複合航法で使用する慣性装置の誤差推定項目(状態遷移ベクトル)を示す。

表 3 状態遷移ベクトル

| 番号 | 従来処理   | 新処理      |
|----|--------|----------|
| 1  | 緯度誤差   | 緯度誤差     |
| 2  | 経度誤差   | 経度誤差     |
| 3  | 南北速度誤差 | 南北速度誤差   |
| 4  | 東西速度誤差 | 東西速度誤差   |
| 5  | ロール角誤差 | ロール角誤差   |
| 6  | ピッチ角誤差 | ピッチ角誤差   |
| 7  | 方位角誤差  | 方位角誤差    |
| 8  | —      | X軸ジャイロ誤差 |
| 9  | —      | Y軸ジャイロ誤差 |
| 10 | —      | Z軸ジャイロ誤差 |
| 11 | —      | X軸加速度計誤差 |
| 12 | —      | Y軸加速度計誤差 |
| 13 | —      | Z軸加速度計誤差 |

水平方向のジャイロ誤差(X軸ジャイロおよびY軸ジャイロ)と方位角誤差は、運動印加時に、誤差が釣りあわなくなるため、誤差分離が可能となる。従って、上記の通りジャイロ誤差推定を追加することにより、ジャイロ誤差によって発生していた方位角誤差を低減させることができる。

また、複合航法は、慣性装置の速度誤差により慣性装置の誤差を推定するが、垂直方向のジャイロ誤差(Zジャイロ誤差)は、その誤差により発生する速度誤差が小さいため、垂直方向のジャイロ誤差の推定は困難である。しかし、上記の通り、水中航走体が回転により水平方向のジャイロ誤差と方位角誤差を推定することにより、垂直方向のジャイロ誤差により発生した方位角ドリフト誤差を低減することも可能となり、総合的に方位角誤差は、従来処理と比較し半分以下になる。

以上の通り、RLG Type2を使用した場合においても位置誤差の目標を満足するための方位角誤差を  $0.4^{\circ}$  以下にすることが可能となった。

## 2.2 ハードウェアの小型・軽量化

RLGに小型のType2を選定し、それに伴いセンサを取付けるブロックも再設計し、小型・軽量化を図った。結果を表 4 に記載する。

表 4 センサブロック比較

|    | RLG Type1用(従来品) | RLG Type2用(開発品) | 比較   |
|----|-----------------|-----------------|------|
| 容量 | 7.0ℓ            | 3.1ℓ            | 56%減 |
| 質量 | 8.4kg           | 3.0kg           | 64%減 |

また、電気回路においても、全ての回路構成及び使用部品の見直しを行うことにより、大幅な集積化を図り基板枚数を6枚から2枚へ削減した。

以下に実施した高密度化の概要を示す。

- ・ 全ての電気回路基板の両面実装化・高密度実装化
- ・ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の採用による部品点数削減
- ・ 基板用作動電源及びRLG駆動用高圧電源のモジュール化
- ・ センサ信号処理回路の見直しによる部品点数の削減  
(電流/周波数変換から電圧/周波数変換に変更)
- ・ センサキャリブレーションをハードウェアキャリブレーションからソフトウェアキャリブレーションに変更

### 3. 開発の成果

#### 3.1 小型・軽量化

今回、開発した慣性装置の小型・軽量化の結果を表5に、外観図を図3に記載する。  
サイズ／容量で59%減、質量で60%減の成果を上げることができた。

表5 慣性装置結果

|        | 従来品                     | 開発品                    | 比較結果 |
|--------|-------------------------|------------------------|------|
| サイズ／容量 | 210×210×460mm<br>／20.2ℓ | 185×185×240mm<br>／8.2ℓ | 59%減 |
| 質量     | 21kg                    | 8.5kg                  | 60%減 |



図3 開発した慣性装置外観図



### 3.2 性能評価

初期方位角精度を図 4 に、複合航法時の方位角精度を図 5 に示す。

図 4 は、進行方向の軸を 4 方向（北、東、南、西）に向け、それぞれ 3 回のアライメント（初期方位角推定）を行った場合の方位角誤差の結果であり、アライメント開始から 60 分後の方位角誤差は  $0.16^{\circ}$  rms であり、初期化として必要な精度を達成している。

図 5 は、複合航法開始後、進行方向の軸を図示の通り変化させた場合の方位角誤差の結果であり、方位角が一定の場合は、RLG誤差により方位角がドリフトするが、方位角変化によって方位角誤差の推定がなされ、誤差が小さくなっており、位置精度の要求を満足するための方位角誤差  $0.4^{\circ}$  を十分満足する結果が得られた。

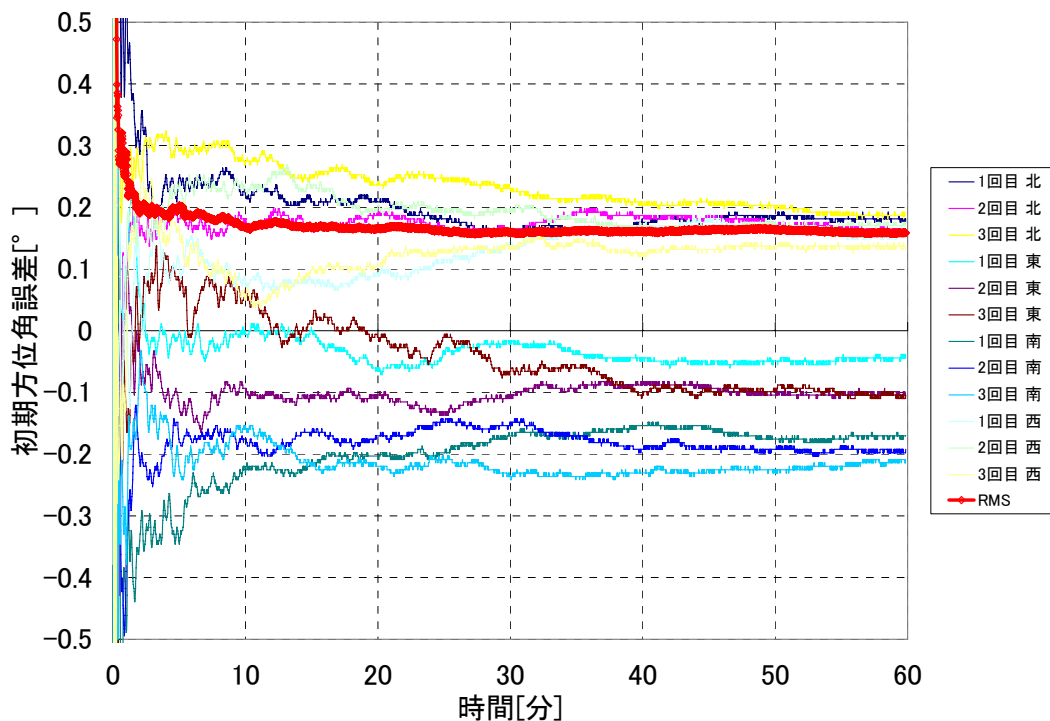


図 4 初期方位角精度結果



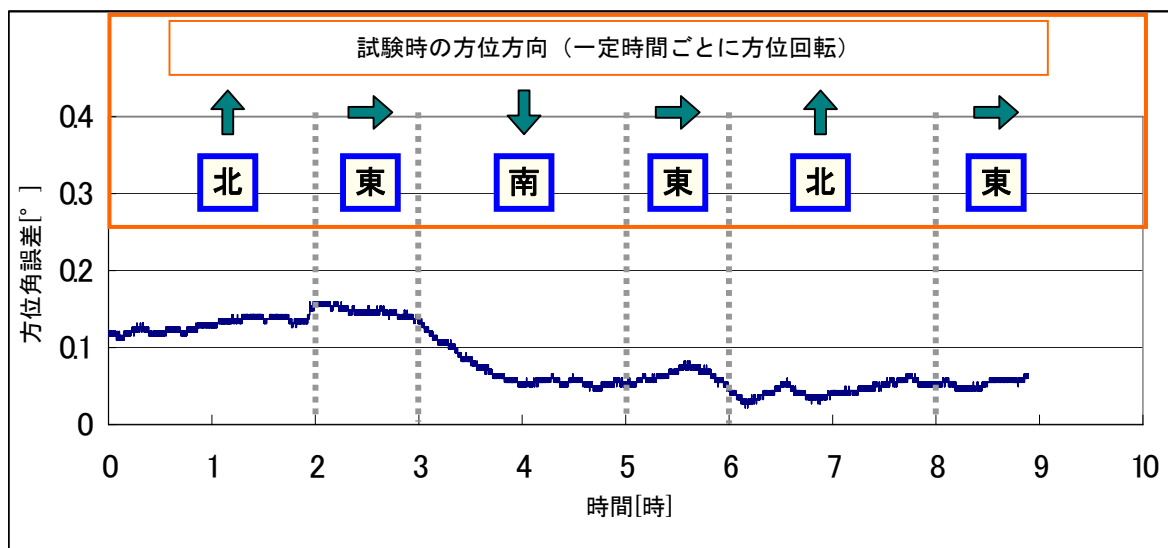


図 5 複合航法時の方位角精度結果

## 4. おわりに

今回、JAMSTEC 殿のご協力により、小型・軽量の慣性装置を開発することができましたが、今後、JAMSTEC 殿における実航行による評価結果を踏まえ、アルゴリズムの最適化等により、更なる性能向上を図っていきます。

今後、慣性センサ(RLG、加速度計)の性能改善や、高環境(温度、高度等)への対応化、さらには低価格化などに取り組み、様々なお客様のニーズに応えるとともに新規市場開拓を行っていきます。