

技術紹介

4

高性能小型慣性航法装置の開発

Development of Inertial Navigation System for Unmanned Research Vehicle

小林 雅夫	Masao Kobayashi	航機事業部 第一技術部 シニアエキスパート
吉田 和弘	Kazuhiro Yoshida	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
関根 和則	Kazunori Sekine	航機事業部 第三技術部
宇野 喬	Takashi Uno	航機事業部 第一技術部

キーワード： 慣性装置、ハイブリッド航法、ドップラ速度計、RLG

Keywords: Inertial navigation system, Hybrid Navigation, Doppler velocity log, RLG

要旨

海洋研究開発機構殿(以下、JAMSTEC 殿という)は、1998 年から人間が近づくことのできない海域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を開発しました。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亘り高精度な位置、速度、方位及び姿勢を検出可能な装置です。

また、2007 年には、小型化された無人深海探査機に搭載するため、小型・軽量化を図った試験機用慣性装置を完成させました。

今回、さらに小型化しつつ、大幅に性能を向上させた世界最高水準の高性能小型慣性航法装置を開発し、JAMSTEC 殿の新型探査機に搭載されることになりました。

SUMMARY

The Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) developed the unmanned deep-sea cruising vessel "URASHIMA" in 1998 to survey inaccessible sea areas, such as submarine volcanoes, and to investigate the sea floor. At the request of JAMSTEC, we have developed an inertial navigation system (INS) to install in URASHIMA. This INS consists of a highly accurate inertial sensor (gyroscope and accelerometer) and Doppler sensor, and enables detecting with high accuracy the position, speed, azimuth, and attitude under the sea for long periods of time.

In addition, we demonstrated a miniature and weight-saving INS for use in testing of a smaller unmanned deep-sea cruising vessel in 2007.

This report explains our development of a further miniaturized and weight-saving INS with the world's highest navigation performance for use in the forthcoming JAMSTEC developed cruising vessel.

1. まえがき

海中探査機は海中を長時間に亘り航行するため、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ります。しかしながら、無人探査機の耐压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ります。過去、JAMSTEC 殿に採用して頂いた当社の慣性装置は、精度的に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となっておりますが、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した。そのため、2007 年には、それまでの慣性装置に搭載していたRLG(Ring Laser Gyro)を小型化し、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(試験機)用慣性装置を開発しました。そして今回、その開発成果を基に、RLGをさらに小型高性能化し、新型無人探査機に搭載可能な小型慣性航法装置を完成させました。

2. 小型高性能化のためのRLGの選定

慣性装置の小型・軽量化にあたり、電子回路の小型化に加えて、従来の探査機用慣性装置において容積の約 1/2 を占めていたRLGの小型化にも取り組む必要がありました。(表 1 参照)

Type1 RLG(従来機用)は、「うらしま」用慣性装置に使用したRLGであり、大型ですが、極めて高い性能を有しています。Type2 RLG(試験機用)は、小型・軽量化を目的に開発したRLGであり、性能的には従来機に及びませんが、2007 年の試験機用慣性装置に採用し、慣性装置の容積小型化に目処をつけました。Type3 RLG(新型機用)は、Type2 RLGを更に小型・軽量化したものであり、性能的にも Type2 から大幅な高精度化を実現したものです。今回の新型機用慣性装置開発では Type3 RLGを採用し、「うらしま」用慣性装置に対して容積・質量約 1/3 を実現しました。

表 1 RLG性能の比較表

RLG	Type1 RLG (従来機用)	Type2 RLG (試験機用)	Type3 RLG (新型機用)
容量	1.3L	0.5L	0.4L
質量	1400g	600g	550g
バイアス安定性	0.002° /h(1σ)	0.02° /h(1σ)	0.0044° /h(1σ)

3. 慣性航法装置の機能

本装置は海中航行中の位置、速度、姿勢角、方位角、角速度および加速度等を入力する装置で、下記の作動モードを有しています。

(1) アライメント(初期整定)モード

- ① 地上アライメント……………地上静止状態で初期整定する。
- ② 海底アライメント……………海底静止状態で初期整定する。
- ③ 船上アライメント……………船上動揺状態で GPS の位置データをリファレンスとして初期整定する。
- ④ ストアドヘッドインングアライメント…電源遮断前の方位角を不揮発性メモリに記憶し、電源再投入時に不揮発性メモリのデータを基準に短時間でアライメントを実施。(海中や海底において短時間で電源を再投入する場合等に使用。方位の変動がないことが条件となる。)

(2) 航法モード

- ① 純慣性航法
- ② 純慣性航法 + 音響測位ハイブリッド
- ③ 純慣性航法 + ドップラ(DVL)ハイブリッド航法
- ④ 純慣性航法 + ドップラ(DVL)ハイブリッド航法 + 音響測位ハイブリッド
- ⑤ 純慣性航法 + GPS ハイブリッド航法モード

(注)②～⑤ではカルマンフィルタによる誤差推定を実施する。

4. 純慣性航法性能

慣性航法装置の精度指標は純慣性航法精度で表すことができます。前回開発した試験機用慣性装置と今回開発した新型機用慣性装置の性能目標比較を表2に示します。

表2 純慣性航法性能

性能諸元	試験機用慣性装置 (Type2 RLG)	新型機用慣性装置 (Type3 RLG)
姿勢角精度(° rms)	0.1	0.01
方位角精度(° rms)	$0.4 / \cos \lambda$	$0.05 / \cos \lambda$
速度精度 (m/s rms)	5	0.7
位置精度(NM/H ^{*1} CEP ^{*2})	6	0.5

λ : 試験地の緯度

新型機の性能達成の為にはRLGのバイアス安定性 $0.005^\circ / h(1\sigma)$ のレベルが必要ですが、RLGをType2からType3にすることで実現しました。

*1 NM/H Nautical Mile per Hour (海里/時間)

*2 CEP Circular Error Probability (平均誤差半径)

5. ハイブリッド航法機能

ここでは、DVLハイブリッド及び音響測位ハイブリッド機能について説明します。純慣性航法では表2に示すように、0.7m/sの速度誤差及び1時間当たり0.5NMの位置誤差が発生します。このため、長時間に及ぶ純慣性航法は実際の海中探査では使用できません。このため、海中ではDVL速度計の速度信号を観測値としたカルマンフィルタによるハイブリッド航法演算により誤差の推定、補正を行い、位置、速度誤差を抑制します。

航法誤差の状態方程式を次のように表します。

$$dx/dt = Ax + w$$

x は誤差状態ベクトルで以下の要素からなります。

$$x = (\delta \lambda, \delta \mu, \delta V_n, \delta V_e, \varepsilon_n, \varepsilon_e, \varepsilon_d, \delta \omega_x, \delta \omega_y, \delta \omega_z, \delta A_x, \delta A_y, \delta A_z)^T$$

ここで、

$\delta \lambda, \delta \mu$: 緯度、経度誤差

$\delta V_n, \delta V_e$: 北方向速度誤差、東方向速度誤差

$\varepsilon_n, \varepsilon_e, \varepsilon_d$: チルト誤差及び方位誤差

$\delta \omega_x, \delta \omega_y, \delta \omega_z$: ジャイロバイアス誤差

$\delta A_x, \delta A_y, \delta A_z$: 加速度計バイアス誤差

A は航法誤差の伝達を定義する状態遷移行列です。

w はセンサのノイズ等からなるシステムノイズベクトルです。

また、観測方程式は次の通り与えられます

$$z = Hx + v$$

z は観測ベクトルであり、DVL速度が入力された場合は慣性装置の計算速度とDVL速度の差になります。また、音響測位データが入力された場合には、慣性装置の計算位置と音響測位データとの差が観測値となります。

H は観測行列であり、DVL速度が入力された場合や音響測位データが入力された場合の観測を定義します。 v は観測ノイズであり、DVLのノイズの標準偏差や音響測位データの誤差標準偏差を定義します。

特に、音響測位データのノイズ標準偏差は設置されている音響トランスポンダまでの距離等により変動します。また、海中での音速は約1500m/sであるため、音響測位データは遅延があります。このため、音響測位誤差の標準偏差及び遅延時間を外部制御機器で計算し、慣性装置へ音響測位データと同時にデータの遅延時間及び誤差標準偏差を送信することで、より正確な誤差推定ができるように構成されています。

6. 開発の成果

6.1 小型・軽量化

今回開発した新型機用慣性装置の小型・軽量化の結果を表3に、外観図を図1に示します。基板、電源、シャーシ形状等の設計を見直し、熱解析や強度解析等で確認することで、小型・軽量化を実現しました。

表3 慣性装置結果

	試験機用慣性装置 (Type2 RLG)	新型機用慣性装置 (Type3 RLG)	比較結果
サイズ／容量	185 × 185 × 240mm ／8.2L	168.5 × 168.5 × 159.0mm ／4.5L	45%減
質量	8.5kg	6.4kg	25%減



図1 新型機用慣性装置外観図

6.2 性能評価

1 時間アライメント実施後の純慣性航法性能結果を図2(位置精度)及び図3(方位角精度)に示します。

図2は 10 分おきにラジアル位置誤差(緯度誤差と経度誤差の RSS^{*3})をプロットしたものです。rmsは10回の試験データのrms値で0.41NMとなりました。CEP はrms値の0.83倍となるので、1時間では0.34NM/h CEP となり、目標性能の0.5NM/hを満足します。

また、図3に示す方位角精度は0.026° rmsとなり、目標性能の0.05° を満足しました。

*3: RSS Root Sum Square (二乗和根)

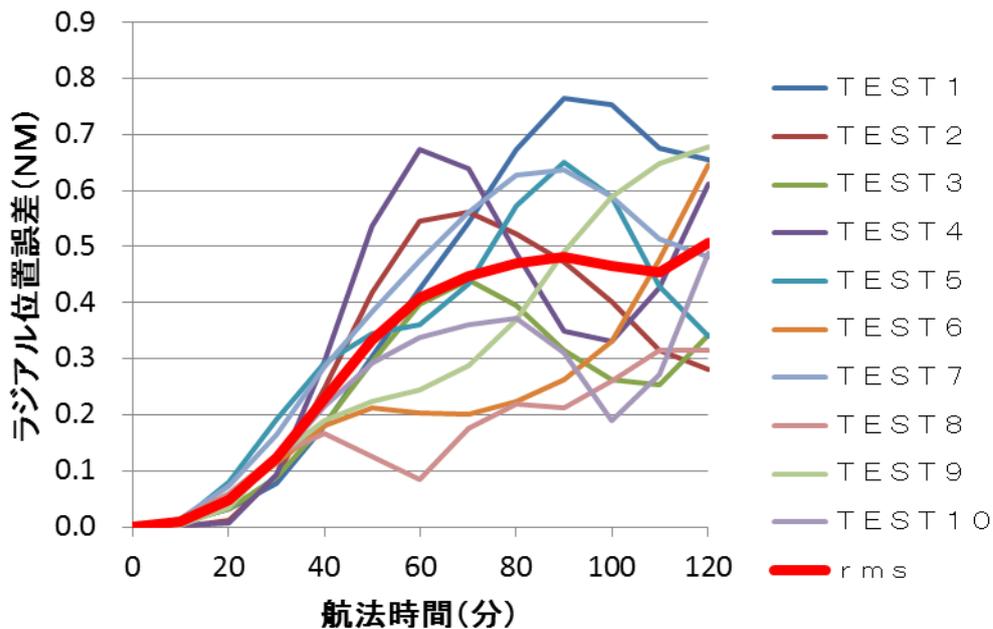


図2 純慣性航法 位置性能結果

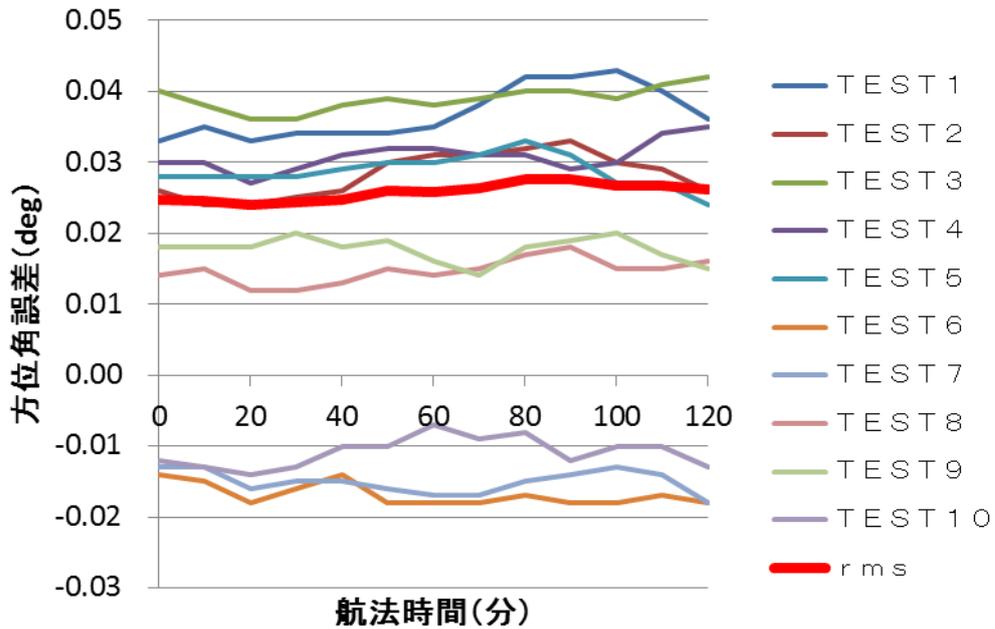


図3 純慣性航法 方位角性能結果

図4に DVL ハイブリッド航法時の方位角性能を示します。本試験では10分毎に方位を90°回転する運動パターンを模擬しています。この場合 RLG のバイアス誤差により初期方位角に誤差がある場合もバイアスを推定し、徐々に誤差が収束することが確認されました。

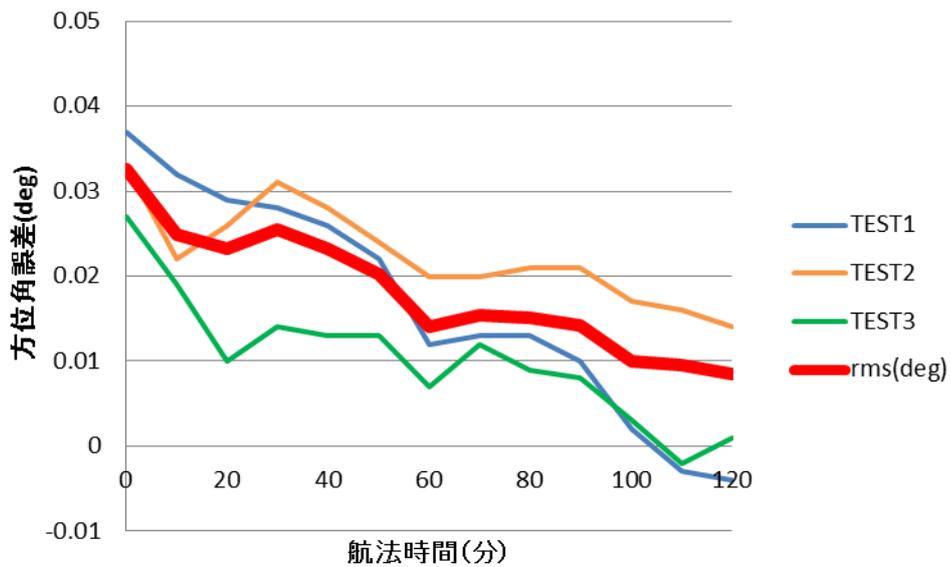


図4 DVL ハイブリッド航法方位角性能結果

7. むすび

今回、JAMSTEC 殿のご指導、ご助言により、小型・軽量な高性能慣性装置を開発することができました。本装置は JAMSTEC 殿が開発した新型探査機に搭載されます。JAMSTEC 殿における海域試験による評価結果を踏まえ、フィルタゲインの最適化等により、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、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。