

MEMS 慣性計測装置を用いた高精度リアルタイム補正 音響測深システム

正会員 丹 康弘*
石川 聖二**

タン ジュークイ**

High-precision real-time correction sounding system using MEMS Inertial Measurement Units

by Yasuhiro Tan, *Member* Joo Kooi Tan
Seiji Ishikawa

Summary

This paper proposes a high-precision real-time correction sounding system using Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) inertial measurement units, which can correct the effective depth from the sea surface to the seabed in real-time. The advantages of the proposed system are as follows: (1) The system outperforms a single-beam sounder available on the market in that the range of depth errors caused by the swing of a research vessel is about 2%; (2) Since the proposed system is small compared to the existing attitude and heading reference system, it can be employed for unmanned surface vehicle, remotely operated underwater vehicle, autonomous underwater vehicle, and so on. Experimental results show that an attitude, heading and depth measured by the developed system are within the acceptable range, and the system can give a stabilized attitude, heading and depth information for a long time.

1. 緒言

沿岸域の海底地形は、波浪の影響を受けて年間を通じて大きく変化する。そのため、水深データに基づく海底地形の変化パターンを読み取ることは沿岸域の堆積学・地形学的研究にとって重要である。また、水深データは湖沼や沿岸域における堆積物採取のための深度推定や採取地点の選定に必要な不可欠なデータである。さらに水深データは、高潮や津波の伝搬および遡上についてのシミュレーションや浸水被害予測の高度化など沿岸域防災における基礎的なデータでもあり、その重要性はますます増加している。しかしながら、現在、海底砂州の形成プロセスを考慮する上で最も重要な浅水域である沿岸部、またダム湖の水際部や溜め池などの閉水域の水深を高精度で計測することは困難である。その理由としては、通常の測量船では進入が困難であり、また、測量尺による直接測量¹⁾では安全確保の上で制約がある。近年、J.P. Duganら²⁾によって水上ジェットスキーに測深機を搭載した手法や小型流速計(ADCP)を利用した自動潜水艇が提案されているが、藻やロープ類等、自動潜水艇等の運用に支障をきたす物体があるため、溜め池や漁港内などでは不向きである。

一方、無線操縦船舶による手法も考えられるが、一般的に大型船舶と異なり小型無線操縦船舶は小さな波の影響を受けやすく、動揺しやすい。従って、無線操縦による小型船に測深機のみを搭載しても、水深精度を著しく低下させる。これらの問題を解決する機器は未だ見受けられない。そこで本論文では、小型無人水上艇に搭載するための Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 慣性計測装置を用いた高精度リアルタイム補正音響測深システムを提案する。提案法は、小型無線操縦船舶の運搬性運用性を考慮し、高精度であるがシステム全体が複雑なマルチビーム測深機ではなく、構造が小型シンプルでコスト面に優れたシングルビーム音響測深機を採用する。なお、小波浪におけるシングルビームによる船体揺動の測定誤差を補正する手法は他に見受けられない。

以下、第2節では MEMS 慣性計測装置を用いた姿勢方位推定法を説明する。また、第3節で本システムを使用した標準水深での水深補正の実験結果を示して考察を与え、第4節で結論を述べる。

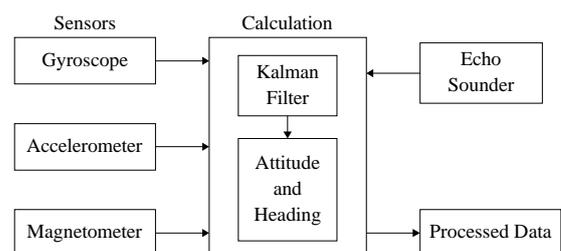


Fig. 1 Diagram of the proposed depth correction filter based on MEMS inertial measurement units.

* 株式会社 国際海洋開発

**九州工業大学大学院工学府

2. 姿勢方位推定法

姿勢方位角推定システムの構成は、センサ部と演算部に分けられる。センサ部は船体軸のロール、ピッチ、ヨーの3軸の角速度を検出するジャイロセンサーと、船体軸の x, y, z 方向の3軸加速度を検出する加速度センサの慣性計測装置及び船首の向きを検出する磁気方位センサで構成される。各センサ部はボディに直接固定するストラップダウン方式を採用する。加速度センサから求められる傾斜角は、角速度の積分によるロール・ピッチの累積誤差と磁気方位センサの方位角によって、ヨー角の累積誤差を補正する。

本論文では、MEMS 技術により小型化されたジャイロ・加速度・地磁気センサ³⁻⁶⁾を用い、カルマンフィルタ⁷⁻⁹⁾により小型測量船の姿勢方位角を推定し、推定した姿勢方位角をもとに、実測水深値(動揺による斜距離)を実効水深値(鉛直距離)に補正するシステムを提案する。提案システムの構成を Fig.1 に示す。

2.1 姿勢方位推定法

高精度な姿勢計測技術には、加速度センサや角速度センサなどのいわゆる慣性センサが用いられる。加速度センサではセンサダイナミクスによる遅れ、角速度センサは積分誤差の累積が特に問題となり、一種類のセンサのみによる姿勢推定は難しい。このため、異種のセンサを組み合わせる推定精度の向上を図るセンサフュージョン技術が提案されてきた¹⁰⁻¹²⁾。このような姿勢推定技術の一つとしてカルマンフィルタが広く用いられている。これは時間領域で表現されたセンサモデルに基づいて状態量の推定を行う技術である。

本論文では、姿勢方位推定法として、単位四元数を用いて比較的高速で大きな姿勢変化を推定できるクォータニオンに基づいた拡張カルマンフィルタを用いる⁹⁾。船体軸回りの動きのオイラー角(roll ϕ , pitch θ , yaw ψ)を Fig. 2 に示す。

このフィルタでは、姿勢表現として単位クォータニオン $q=[q_0, q_1, q_2, q_3]$ を用いる。クォータニオン q は、1個の実数成分(回転角)と3個の虚数成分(回転軸)よりなる4成分で3次元空間の回転を表現する。直交座標系 xyz 軸の基底ベクトルをそれぞれ i, j, k とすれば、 q は次のように書かれる。

$$\begin{aligned} q &\equiv q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \\ &= (q_0, q_1, q_2, q_3) \end{aligned} \quad (1)$$

また、単位ベクトル n と回転角 θ をクォータニオンで表現すれば式(2)となる。

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + n \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

ただし、

$$\|q\| = 1$$

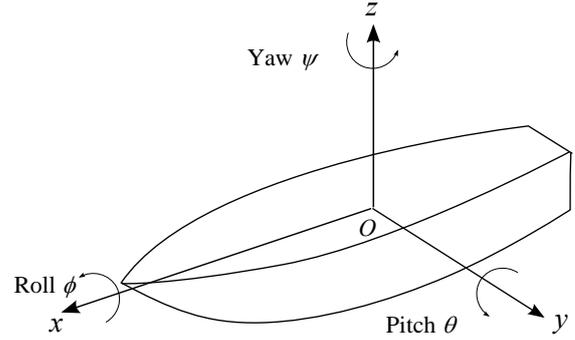


Fig. 2 The attitude representation w.r.t. the body axes.

クォータニオン表現による慣性座標系から船体座標系への変換行列 T_b^n は、以下のように表現される。

$$\begin{aligned} T_b^n &= \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

オイラー角をクォータニオンで表現すれば式(4)となる。

$$\begin{aligned} \phi_q &= \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_2q_3 + q_1q_0)}{2q_0^2 - 1 + 2q_2^2} \right\} \\ \theta_q &= \sin^{-1} \{ 2(q_3q_1 - q_2q_0) \} \\ \psi_q &= \tan^{-1} \left\{ \frac{2(q_1q_2 + q_0q_2)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

2.1.1 初期化

今、傾斜状態での加速度センサの出力を $a = [a_x, a_y, a_z]$ 、磁気センサの出力を $m = [m_x, m_y, m_z]$ とすれば、加速度・磁気センサの出力値を使用したピッチ角 θ_a 、ロール角 ϕ_a 、ヨー角 ψ_m は以下の式で計算される。

$$\begin{aligned} \theta_a &= \sin^{-1}(a_x), \quad \phi_a = \sin^{-1} \left(\frac{a_y}{\sqrt{1-a_x^2}} \right) \\ \psi_m &= \tan^{-1} \left(\frac{m_z \cos \theta_a + m_x \sin \theta_a}{m_x \cos \phi_a + m_y \sin \theta_a \sin \phi_a - m_z \cos \theta_a \sin \phi_a} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

加速度・磁気センサによる姿勢方位角は様々なノイズを含んでおり、誤差が大きい。また、角速度センサによる姿勢角は、その出力特性によりドリフトによる影響が大である。

そこで、より確からしい姿勢方位角を推定する手法として、加速度・磁気センサによる姿勢方位と角速度センサからの姿勢を拡張カルマンフィルタに通すことによる姿勢方位角推定法を採用する。

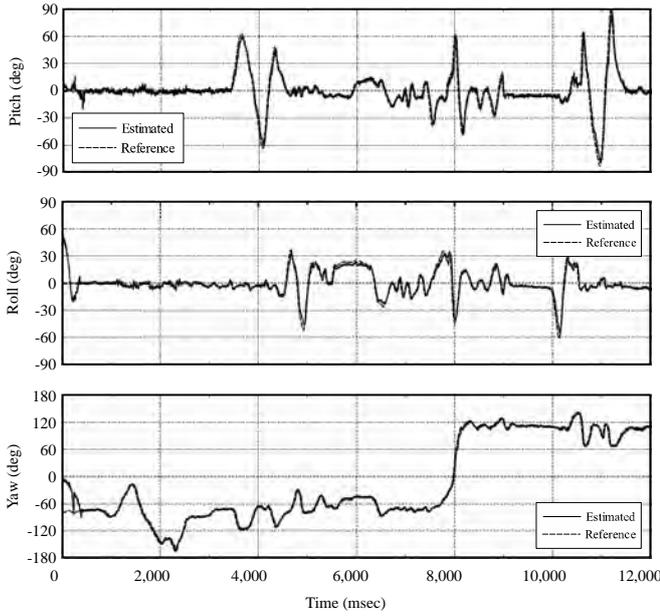


Fig. 3 Attitude-heading outputs and the reference values for the dynamic test on the ground. The vertical axis is the attitude-heading angle of orientation, and the horizontal axis is the sampling time (msec).

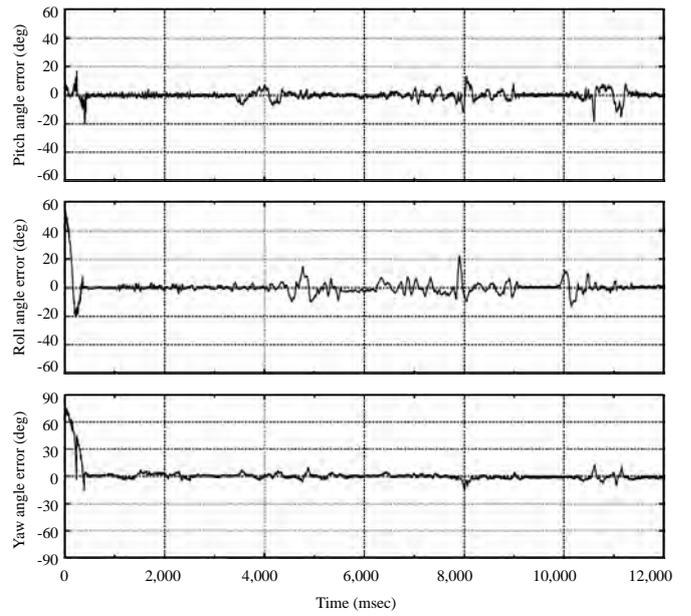


Fig. 4 The error between attitude-heading outputs and the reference values for the dynamic test on the ground. The vertical axis is the attitude-heading angle error of orientation, and the horizontal axis is the sampling time (msec).

2.1.2 姿勢方位推定フィルタ

システム状態量を $\mathbf{x} = [\mathbf{q} \ \boldsymbol{\omega}_{bias}]^T$ と置けば、状態方程式と観測方程式はそれぞれ式(6),(7)で与えられる。ここで、 $\boldsymbol{\omega}_{bias}$ 、 $\boldsymbol{\omega}_{meas}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 、 \mathbf{g} はそれぞれ、ジャイロのバイアス値、角速度観測値、定数パラメータ、重力加速度である。また、 \mathbf{w}_t はシステムノイズであり、 \mathbf{v}_t はアナログセンサから観測されるノイズである。これらのノイズは正規性白色ノイズである。

$$\mathbf{x}_t = f(\mathbf{x}_t) + \mathbf{w}_t \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_t = h(\mathbf{x}_t) + \mathbf{v}_t \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_t = \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \boldsymbol{\omega}_{bias} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_t = \begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\theta \\ \delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_a - \phi_q \\ \theta_a - \theta_q \\ \psi_m - \psi_q \end{bmatrix}$$

$$f(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} (\boldsymbol{\omega}_{meas} - \boldsymbol{\omega}_{bias}) \\ \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\omega}_{bias} \end{bmatrix}_{\Delta t}$$

$$h(\mathbf{x}_t) = T_b^n \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

拡張カルマンフィルタは非線形システムを各時刻において線形化し、それぞれの時刻において時間変化カルマンフィルタを適用するという考えに基づいている。時刻 t における \mathbf{x}_t の推定値を $\hat{\mathbf{x}}_t$ 、予測推定値を $\hat{\mathbf{x}}_{t-1}$ とすれば、状態遷移行列 \mathbf{F} および観測行列 \mathbf{H} は次式で表される。

$$\mathbf{F} = \left(\frac{\partial f(\mathbf{x}_t)}{\partial \mathbf{x}_t} \right)_{\hat{\mathbf{x}}_t} \quad (8)$$

$$\mathbf{H} = \left(\frac{\partial h(\mathbf{x}_t)}{\partial \mathbf{x}_t} \right)_{\hat{\mathbf{x}}_{t-1}} \quad (9)$$

観測値の更新において、これらの行列を用いた拡張カルマンフィルタは次式で計算される。なお、 \mathbf{Q}_t はシステムノイズの共分散行列、 \mathbf{R}_t は観測ノイズの共分散行列である。

カルマンゲイン

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{H}_t^T [\mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t]^{-1} \quad (10)$$

観測値による推定更新

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \mathbf{K}_t [\mathbf{y}_t - \mathbf{h}_t(\hat{\mathbf{x}}_{t-1})] \quad (11)$$

推定誤差の共分散行列

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{P}_{t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t \mathbf{P}_{t-1} \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{t+1} = \mathbf{F}_t \mathbf{P}_t \mathbf{F}_t^T + \mathbf{Q}_t \quad (13)$$

従って、式(11)よりクォータニオンの時間更新値が求められ、求めたクォータニオンを式(4)に代入することにより移動体の姿勢方位角が求められる。

真値のアンサンブル平均と推定値のアンサンブル平均の

差は無視できるほど小さく、式(13)の推定誤差の共分散行列の更新には影響はない。

このことから、システムノイズ w_i が有色であっても、式 (6), (7) で構成される状態空間モデル (状態方程式と観測方程式) であれば、カルマンフィルタの適用は可能¹³⁾である。

2.2 姿勢方位角の推定実験と結果の解析

姿勢角の推定実験の精度検証には、高精度モーションセンサ Teledyne TSS DMS-05 を使用する。DMS-05 は傾斜角を 0.05 (deg)の精度で検出可能なセンサであり、高精度マルチビーム深淺測量で利用されている¹⁴⁾。また、方位角の精度検証は、Hemisphere GPS Compass Vector sensor V103 の出力結果と比較することによって行う。V103 は方位角を 0.3 (deg)の精度で検出可能なセンサである。DMS-05, V103 および本姿勢方位センサを固定し、実験を行った。実験手法は、地上で基準装置と本姿勢方位センサを板の上に固定し、運動が一律に伝わる状態で一輪台車に載せ、実環境を想定して約 4km/h で手動動揺させながら走行させた。なお、サンプリング周期は 5msec である。実験結果を Fig. 3 に示す。縦軸は姿勢方位角度(degree)、横軸はサンプリング時間(msec)である。また、基準値との誤差を Fig. 4, 統計結果を Table 1 に示す。

実験結果から、ピッチ角、ロール角およびヨー角の平均誤差は、それぞれ-0.01, 0.40, 1.11 (deg)であった。Fig. 4 は基準値を安定して追跡できることを示しているが、カルマンフィルタでの推定初期において過大な誤差が確認された。特に、ロール角においては、初期段階で大きく誤差が生じた。これは、手動動揺による実験精度に起因すると考える。角速度センサより得られる角度誤差は小さな誤差に敏感であり、初期誤差は指数関数的に成長する。従って、このような初期誤差は角速度センサにおけるバイアスが低周波成分を主に含むため、ハイパスフィルタにより軽減できると考える。また、センサを大きく動揺させた時に、推定遅延が約 7msec 発生した。そのため、姿勢方位センサと基準装置の同時刻において誤差が大きくなり、総サンプリング時間内での誤差値が大きくなる結果となった。なお、本実験では速度計を使用しておらず、速度信号を利用していないため、移動開始直後に加速度誤差が生じる結果となった。

しかしながら、本姿勢方位センサは海上での使用を想定しており、無人航空機のように高速での移動・姿勢変化が生じ難いことから、遅延時間 7msec は影響少と考える。したがって、これらの結果は、本姿勢方位センサが安定した結果を出力し、基準値を十分に追跡できることを示している。

3. 深淺測量システム

3.1 実測水深値の鉛直補正

小型船舶で音響測深機による深淺測量を行う場合、船体の姿勢角は音響測深データに多大な影響を及ぼすことから、ピ

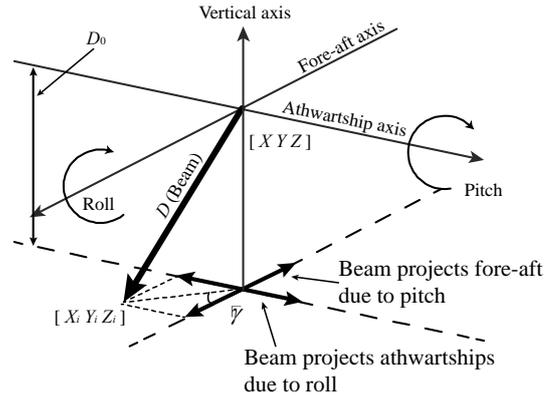


Fig. 5 Attitude and heading effects on a single beam depth.

Table 1 Attitude and heading error statistics.

Angle (axis)	Mean (deg)	Standard deviation
Pitch	-0.0070	2.7781
Roll	0.4008	7.7062
Yaw	1.1067	8.4647

Table 2 Roll/Pitch error on the near-vertical beam.

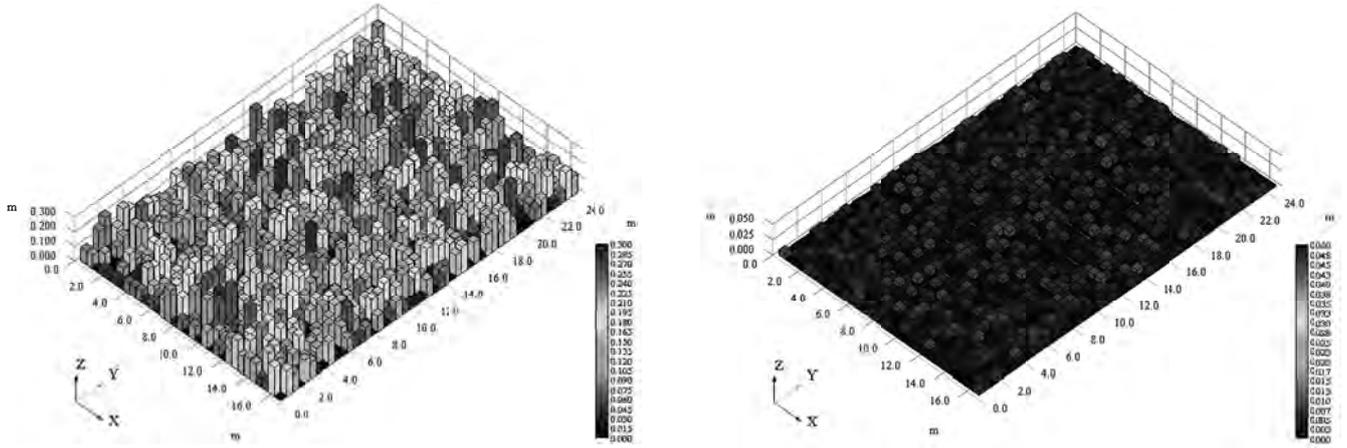
Roll/Pitch (deg)	Error at Depth (m)			
	5	10	15	20
1	0.00	0.00	0.00	0.01
5	0.04	0.08	0.11	0.15
10	0.15	0.30	0.45	0.59
15	0.32	0.65	0.97	1.30
20	0.55	1.11	1.66	2.22

Table 3 Maximum allowable Roll/Pitch angle to maintain ±0.2m error.

Project Depth (m)	Max angle (deg)
5	11.6
10	8.2
15	6.6
20	5.7

Table 4 Statistical results of the sounding under wave conditions.

Statistics	Status	Artificial wave height (m)	
		0.0	0.2
Maximum	Non-correction	0.064 m	0.180 m
	With correction	0.008 m	0.009 m
Mean	Non-correction	0.016 m	0.062 m
	With correction	0.004 m	0.003 m
SD	Non-correction	0.022 m	0.043 m
	With correction	0.003 m	0.002 m



(a) No estimation of the attitude angles.

(b) Correction by the estimation of the attitude angles.

Fig. 6 Experimental error distribution values resulting in a test tank by using echo sounder.

ッチ角, ロール角およびヨー角に対する実測水深値の鉛直補正を行わなければならない. 測量船が Fig. 5 に示すように傾いた場合を考える. 実測水深値 D を鉛直補正值 D_0 に補正する.

船体の進行方向成分を x , 船首と直交する成分を y , 鉛直成分を z , ピッチ角 θ とロール角 ϕ の合成ベクトルと船首前後成分とのなす角を γ とすれば,

$$\begin{aligned} x &= \frac{D \tan \theta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \\ y &= \frac{D \tan \phi}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \\ z &= \frac{D}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \\ \gamma &= \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

の関係が成り立つ.

ここで, ビーム発信源の三次元座標値を $[X Y Z]$, ビーム中心が海底と交差する点の三次元座標値を $[X_i Y_i Z_i]$, 方位角を ψ とすれば,

$$\begin{aligned} X_i &= X + \frac{D \sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi}}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \cdot \cos \left[\psi + \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right) \right] \\ Y_i &= Y + \frac{D \sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi}}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \cdot \sin \left[\psi + \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} \right) \right] \\ Z_i &= Z + \frac{D}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \end{aligned} \quad (15)$$

となり, 鉛直補正值 D_0 は

$$D_0 = \frac{D}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \phi + 1}} \quad (16)$$

となる. よって, 音響ビームが海底と交差する点の三次元座標値 $[X_i Y_i Z_i]$ は, 計測装置から出力される, GNSS による位置 $[X Y Z]$, 姿勢方位センサによる姿勢方位角 $[\phi \theta \psi]$, 実効水深値 D のみで表すことができる.

鉛直補正值は, 姿勢角が小さく観測水域の水深が浅い場合ほど影響が少ない. 観測水域の水深が 20m までの姿勢角と鉛直誤差 $(D-D_0)$ の関係を Table 2 に示す. また Table 3 に, 鉛直誤差が 0.2 m の場合の観測水域の水深と限界姿勢角の関係を示す. 両表から観測水域の水深が浅く静穏水域であるほうが鉛直誤差は小さいことを示している.

3.2 実用性の評価

本測深システムの実用性を評価するため, 無人小型水上艇 (全長 1.5 m, 全幅 0.5 m, 吃水 0.15 m) を製作し, 本測深システムと, 発信周波数 200kHz, 半減半角 6 (deg) の能力を有する音響測深機と GNSS (更新 10Hz, 水平精度 0.6m 以下) を搭載し, 25 m \times 17 m, 標準水深 3.3 m の屋外水槽中の水深計測を行った. 測深計画として, 水槽の短幅に直交する 49 本の計画測線 (測線長 24.5 m, 測線間隔 0.5 m) を設定した. なお, 深浅測量時に人工的に波を起こしている (周期 4sec, 波高約 0.2m). この波が小型無人水上艇に与える姿勢角変化の最大値は実験的に約 14 (deg) であった. 計測値は, 測器中の電磁記録媒体に記録し, オフラインで解析した.

Fig. 6 に, 姿勢角計測装置を使用せず音響測深機のみで水槽の水深を計測した場合の誤差(a), と本測深システムを適用した場合の誤差(b)の結果を示す. 同図の XY 軸は水槽の長短幅を示しており, Z 軸は標準水深 3.3m からの誤差値を示している. 実験結果の統計値を Table 4 に示す. 音響測深機のみで計測した場合の計測誤差は, 最大値 0.18 m, 平均値

0.062 m, 標準偏差は 0.043 であった。また, 本測深システムを適用した場合の計測誤差は, 最大値 0.009 m, 平均値 0.003 m, 標準偏差は 0.002 であった。また, 本センサの波高と測深誤差の関係を調査するために同様の実験を波高 0 m でも行った。その結果, 音響測深機のみで計測した場合の計測誤差は, 最大値 0.064m, 平均値 0.016 m, 標準偏差は 0.022 であった。波高 0 m であっても最大誤差が 0.064 m 発生した原因は, 水槽中に発生する航跡波により調査船が動揺したためである。実環境ではたびたび航跡波は発生することから, Table 4 より, 本センサを使用すると波高 0 m であっても生じる測深誤差を高精度で消去していることを示している。

これらの結果は, 本測深システムが小型無人水上艇などの小型船舶において, 姿勢方位角の変化による測深結果の誤差を実測水深値の 2% (3.3m の 2% は 0.066) の範囲で軽減できることを意味している。

なお, 本システムは波の振幅による上下方向 (Heave 成分) の補正は行っていない。マルチビームのような指向角が狭く高精度大水深の深浅測量を行う場合と異なり, 本システムは小型無線操縦船舶に搭載し, 比較的小さな波の発生する浅水域を想定している。シングルビームは指向角が広くビーム範囲内の浅い水深を直下の値とする特性を持っているため, 小さな波における上下方向の誤差を相殺できると考える。波高 h の正弦波を考えた場合, 上下の最大誤差は時刻 $\pi/2, 3/2\pi$ のときに $|1/2h|$ となる。実験では波高 0.2m であるので, 誤差は 0.1m となる。シングルビームの測深精度が $\pm(0.03+D/1,000)$ m である。実験水槽より, 音響測深機の測深精度は $0.03\text{m}\pm 0.003$ であるため, 上下揺れによる最大誤差は 0.13m となる。対して, 船舶の動揺による誤差は, 時刻 $\pi, 2\pi$ のときに最大となり, 測深機の半減半角 6 度より動揺によるビーム最大角は 39 度となる。ここで, 式(16)より $D-D_0$ は, 深度 3.3m で, 誤差 1.13m となり, 上下誤差より波浪による動揺誤差のほうが小型船舶に与える影響は遥かに大きいと言える。浅海域で小波浪の場合, 波浪の周期が短いことと, 測深サンプリングレートが 2Hz であることから計算最大誤差が発生しにくいと考える。このことは表 4 の観測最大誤差が 0.18m であることが示している。シングルビームの測深精度が $\pm(0.03+D/1,000)$ m であることを考えれば, 上下方向の動揺誤差よりも傾斜角による測深誤差のほうが測深精度に与える影響は大きい。ただし, 波高が高く周期の長いウネリをとまなう様々な海洋環境が想定できる外海域では, Heave 補正は必要と考える。このことから, 小さな波の影響を受けやすく, 動揺しやすい小型船舶等による本測深システムの有効性は高いと言える。

4. 結 言

本論文では, 動揺しやすい小型船舶等での音響測深の精度向上を目的として, MEMS 慣性計測装置と拡張カルマンフ

ィルタによる高精度リアルタイム補正音響測深システムを提案し, 標準水深 3.3m の水槽を用いた実験によって, その有効性を示した。特に MEMS 慣性計測装置を用いた姿勢角の推定により, 実測水深値の測深精度を 2% 軽減させることができた。なお, 小型無人水上艇 (全長 1.5m) で姿勢方位角を推定し, 音響測深機の実効水深値をリアルタイム補正できるシステムは過去の文献には見られない。この点は本論文の大きな特徴の一つである。もう一つの特徴として, MEMS 技術の恩恵によりシステム全体の小型化を実現できた。

また, 様々な凹凸や斜面などの海底環境が想定される実海域で本システムを用いる場合, 動揺の上下方向 (Heave 成分) の補正が必要となる。

提案法は拡張カルマンフィルタを用いており, 計算量が多い。このことが 7msec の遅延時間を発生させていると考えられる。加速度センサや角速度センサなどの慣性センサは, その種類ごとに信頼できる周波数領域がそれぞれ異なっており, カルマンフィルタではセンサのノイズ特性モデルやパラメータの調整が容易でないという問題を抱えているため, 計算が複雑になりやすく, 遅延を発生させやすい。そこで今後は, センサの周波数特性に基づき, 信号を相補的に統合する相補フィルタ¹⁵⁻¹⁷⁾の導入を検討する。加速度センサのような低い周波数領域が信頼できるセンサにはローパスフィルタを適用し, 逆に角速度センサのような高周波数領域が信頼できるセンサにハイパスフィルタを適用して, フィルタ出力を相補的に組み合わせることにより, 推定精度を向上させる手法の開発を目指す。

参考文献

- 1) Kayanne, H., Harii, S., Ide, Y. and Akimoto, F., "Recovery of coral populations after the 1998 bleaching on Shiraho Reef, in the southern Ryukyus", NW Pacific. Marine Ecology Progress Series, vol. 239, pp.93-103, 2002.
- 2) J. P. Dugan, W. D. Morris, K. C. Vierra, C. C. Piotrowski, G. J. Farruggia, D. C. Campion, "Jetski-Based Nearshore Bathymetric and Current Survey System", Journal of coastal research, Vol.17, No.4, pp.900-908, 2001.
- 3) P. Martin and E. Salau'n, "Design and implementation of a low-cost aided attitude and heading reference system," in Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2008.
- 4) W. Geiger, J. Bartholomeyczik, U. Breng et al., "MEMS IMU for AHRS applications," in Proceedings of the IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS '08), pp. 225-231, May 2008.
- 5) S. Sukkarieh, P. Gibbens, B. Grocholsky, K. Willis, and H. F. Durrant-Whyte, "Low-cost, redundant inertial measurement unit for unmanned air vehicles," International Journal of Robotics Research, vol. 19, no. 11, pp. 1089-1103, 2000.

- 6) L. Sherry, C. Brown, B. Motazed, and D. Vos, "Performance of automotive-grade MEMS sensors in low cost AHRS for general aviation," in Proceeding of the 22nd Digital Avionics Systems Conference, vol. 2, pp. 12.C.2/1-12.C.2/5, October 2003.
- 7) E. J. Lefferts, F. L. Markley and M. D. Shuster, "Kalman Filtering for Spacecraft Attitude Estimation", Journal of Guidance, Control and Dynamics, vol.5, No.5, pp.417-429, 1982.
- 8) G. Creamer, "Spacecraft Attitude Determination Using Gyros and Quaternion Measurements", The Journal of the Astronautical Sciences, vol.44, No.3, pp.357-371, 1996.
- 9) X. Yun, C. Aparicio, E. R. Bachmann and R. B. McGhee, "Implementation and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.317-322, 2005.
- 10) A. J. Baerveldt and R. Klang, "A Low-cost and Low-weight Attitude Estimation System for an Autonomous Helicopter", Intelligent Engineer Systems, pp.391-395, 1997.
- 11) A. El Hadri, and A. Benallegue, "Attitude estimation with gyros-bias compensation using low-cost sensors", Proceeding of the 48th Conference on Decision and Control, pp.8077-8082, 2009.
- 12) Ken Masuya, Tomomichi Sugihara, Motoji Yamamoto, "A High-fidelity Attitude Estimation by Complementary Use of Inertial Sensor with Dynamics Compensation and Magnetometer (in Japanese)", Proceedings of the 29th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2L1- 6, 2011.
- 13) L. Ma, H. Wang, J. Chen, "Analysis of Kalman Filter with Correlated Noise under Different Dependence." Journal of Information and Computational Science, vol. 7, no.5, pp.1147-1154, 2010.
- 14) de Moustier, Christian, "Field evaluation of sounding accuracy in deep water multibeam swath bathymetry." OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition. Vol. 3, pp.1761-1765, 2001.
- 15) W. H. Wrikler, "Aircraft Course Stabilizing Means", U. S. Patent 2,548,278, 1951-04-10.
- 16) M.Euston, P.Coote, R.Mahony, J.Kim, and T.Hamel, "A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV", Proceedings of 2008 IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems, pp.340-345, 2008.
- 17) R. Mahony, T. Hamel and J. M. Pflimlin, "Nonlinear Complementary filter on the Special Orthogonal Group", IEEE Transaction on Automatic Control, vol.53, No.5, pp.1203-1218, 2008.