

2 個の光波距離センサを用いた海洋波の波速, 方位及び変位の計測

谷本和也*・河野進**・田中正吾*

Measurement of Wave Velocity, Direction and Height of Sea Waves Using Two Optical Range Sensors

Kazuya TANIMOTO*, Susumu KOUNO** and Shogo TANAKA*

The paper proposes a sensing system for measuring the wave velocity, the direction and the height of sea wave. The measurement of the three quantities is achieved using two optical range sensors. One of the sensor is fixed, another sensor is rotating around fixed sensor. And each sensor outputs the distance to the surface of the sea wave under the sensor. For the measurement, the sensor outputs are modeled as an output of a linear dynamic system and a Kalman filter and maximum likelihood method are applied. The validity of the system is verified by simulation.

Key Words: optical range sensor, wave velocity, direction, height, sea wave, Kalman filter, maximum-likelihood method

1. 緒言

船舶を岸壁あるいは沖合に設けられたプラットフォームに接岸する際、効率の良い操船を行なうためには、海洋波の波速と方位を一括計測する必要がある。これまで、波速計測に対しては、船舶搭載型ドップラー流速計¹⁾があったが、波速のみしか計測できなかった。しかも船舶搭載型であるため、他の船舶は情報を利用できない欠点がある。そのため、人が波の波速と方位を目視し、操船していたが、この方式では精度が悪く、改善が望まれていた。さらに、この方式では夜間の操船は困難であった。

このような観点から、著者らは先に、昼夜を問わず、このような船舶の操船を支援するため、光波距離センサを用いた波の波速と方位の同時計測システムを考えた^{2),3)}。

具体的には、プラットフォーム上に設けたアームに固定した3個の光センサにより波面の移動情報を取り入れると共に、このセンサ出力を線形ダイナミックシステムの出力として表現し、これにカルマンフィルタと最尤法を適用することにより、海洋波の波速と方位を高精度に自動計測できるシステムを提案した^{2),3)}。

本論文では、この光センサの数を2個に減じた新たな方式を提案する。具体的には、1個のセンサを固定し、他のセンサを固定センサの周りに回転させる方式を考えることとした。

2. 計測方式

Fig. 1に、まず本論で提案する2センサ方式のセンサの配置を示す。2センサを固定すると、特定の方位の波しか計測できないため、図に示すように、1つのセンサを固定し(以降“固定センサ”と記述)、他のセンサは固定センサの周りに一定の速度で回転させる(以降“回転センサ”と記述)。なお、ここでは反時計回りに回転させるとする。

波速及び方位の計測原理であるが、先の論文^{2),3)}にて紹介したように、固定したセンサの真下を通過した波が、どれ位の時間を経て他のセンサ(ここでは回転センサ)に観測されるかを時々刻々見て、波の波速、方位を計測するものである。波の高さ(変位)は固定センサのセンサ出力を見て容易に計測されるので、これ以降は、特に波速、方位の計測について論じる。

固定センサの出力信号は局所的には(1)式に示すように異なる周波数の正弦波の和でモデル化できる。ただし、ここで言うセンサ出力とは、生のセンサ出力(海面までの距離計測値)から波の平均変位を差し引いたものである。

$$x(t) = \sum_{j=1}^n x_j(t)$$

$$, x_j(t) = a_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

ここで、 ω_j ($j = 1, 2, \dots, n$) は観測される海洋波の主な角周波数成分であり、 $\omega_j = 2\pi f_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$) である。

海洋波は短時間内では周期波とみなせるため、周期波のフーリエ級数展開を考え、 $f_j = j \times f_0$ ($j = 1, 2, \dots, n$) とする。なお、 n は海面位の時間変動をモデル化するに十分な正弦波の数である。また、このときの基本周波数 f_0 は、波の波

* 山口大学大学院理工学研究科 宇部市常盤台 2-16-1

** 広島国際大学 呉市広古新開 5-1-1

* Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, Ube

** Hiroshima International University, Kure

(Received August 29, 2008)

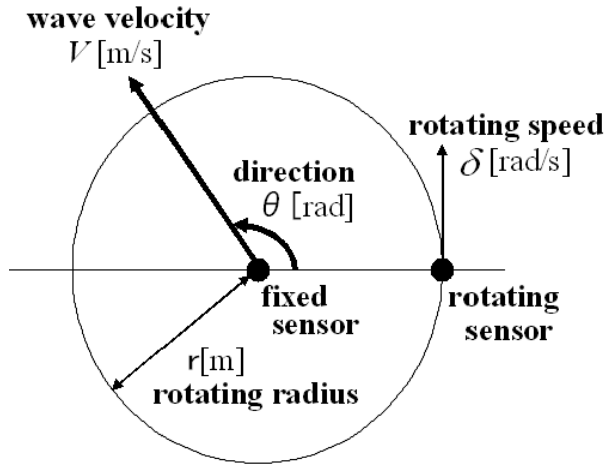


Fig. 1 Sensor arrangement

速を V 、波長を λ として、 $f_0 = V/\lambda$ で表わされる。

いま、状態ベクトルを $\mathbf{x} = (x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, \dots, x_n, \dot{x}_n)^T$ (T : 転置記号) と定義すれば、固定センサで観測される波の変位に関して、つぎのダイナミック方程式が得られる²⁾⁻⁴⁾。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_j^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{w}(t)$ は遷移雑音であり、 $\mathbf{w}(t) = (0, w_1(t), 0, w_2(t), \dots, 0, w_n(t))^T$ である。なお、 $\mathbf{w}(t)$ を導入したのは、センサ直下で観測される海面位の時間変化が必ずしも厳密な意味での周期波ではないため、このわずかな変化(あるいは”形のくずれ”)を補償したからである。

(1) 式が固定センサに観測されるとすれば、固定センサに対する観測ベクトルは、当然、状態ベクトル $\mathbf{x}(t)$ の定義により

$$\mathbf{h}_1 = (1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0) \quad (4)$$

と表わされる。しかしながら、回転センサでは、固定センサの出力信号(波の変位)がある時間後(ここでは T_s と表記)に観測される。したがって、センサの出力信号の ω_j 成分が状態成分を用いて

$$a_j \sin(\omega_j(t - T_s) + \phi_j) = \cos(\omega_j T_s) x_j - \frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_s) \dot{x}_j \quad (5)$$

のように書き表せることから、回転センサに対する観測ベクトル \mathbf{h}_2 は

$$\mathbf{h}_2 = (c_1, s_1, c_2, s_2, \dots, c_n, s_n) \quad (6)$$

で与えられる。ただし、(6) 式において、

$$c_j = \cos(\omega_j T_s), \quad s_j = -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_s) \quad \left. \begin{array}{l} \} \\ (j = 1, 2, \dots, n) \end{array} \right\} \quad (7)$$

である。なお、遅れ時間 T_s は、Fig. 1 の 2 センサと波速と方位の関係より、波速 V 、方位 θ を用いてつぎのように表わされる。

$$T_s = \frac{r \cos(\theta - \delta t)}{V} \quad (8)$$

ここで、 r 、 δ はそれぞれ回転センサの回転半径、回転速度を表しており、 T_s は正負いずれの値もとり得る。なお、Fig. 1 では時刻 $t=0$ での回転センサの位置を示している。

一方、計測の際に生じるセンサ雑音や(1) 式のモデル化によるモデリング誤差を合わせたものを観測雑音 $\xi(t)$ と見なせば、2 センサの出力信号は、結局、つぎのように観測方程式として表わされる。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \xi(t) \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1^T, \mathbf{h}_2^T]^T$ である。また、システムを簡単化するため、 $\xi(t)$ は平均値がゼロ、共分散が R の白色ガウス雑音とする。このようにして、観測行列 \mathbf{H} に波速 V と方位角 θ が反映される。

いま、ダイナミック方程式(2)、観測方程式(9)を離散値化すると⁴⁾、

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (10)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \xi_k \quad (11)$$

が得られる。ここで、 \mathbf{F} は遷移行列であり、次式で定義される。

$$\mathbf{F} = \Phi(\Delta T), \quad \Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}] \quad (12)$$

ここに、 ΔT はサンプリング周期、 $\mathcal{L}^{-1}[\cdot]$ は逆ラプラス変換、 s はラプラス演算子、 \mathbf{I} は $2n$ つぎの単位行列を表わす。また、遷移雑音 \mathbf{w}_k は

$$\mathbf{w}_k = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \Phi((k+1)\Delta T - t) \mathbf{w}(t) dt \quad (13)$$

で定義されるので、 \mathbf{w}_k は平均値ゼロ、共分散行列が

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] \\ &= E\left\{ \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \mathbf{w}(\tau) d\tau \right. \\ &\quad \times \left. \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \mathbf{w}(\tau) d\tau \right\}^T \\ &= \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \Sigma \Phi^T(\Delta T - \tau) d\tau \end{aligned} \quad (14)$$

の白色ガウス雑音となる⁴⁾。ここで、 Σ は遷移雑音 $\mathbf{w}(t)$ の共分散行列 $\Sigma = \text{diag}\{0, \sigma_1^2, 0, \sigma_2^2, \dots, 0, \sigma_n^2\}$ を表わしている。

このように、ダイナミック方程式が線形で与えられ、かつ

観測雑音, 遷移雑音が白色ガウス性を有することにより, 波の形状に関連した状態ベクトル x_k の推定にカルマンフィルタが適用できる.

しかしながら, 波速 V , 方位 θ , 波長 λ が未知であるため, このままではカルマンフィルタは適用できない. そこで, これらの未知パラメータをまとめたベクトル $\alpha = (V \ \theta \ \lambda)^T$ を定義し, これに適当な値を与えれば, 以下のカルマンフィルタが適用できる.

$$\hat{x}_{k/k-1} = F \hat{x}_{k-1/k-1} \quad (15)$$

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k \gamma_k \quad (16)$$

$$\gamma_k = y_k - H \hat{x}_{k/k-1} \quad (17)$$

$$P_{k/k-1} = F P_{k-1/k-1} F^T + W \quad (18)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_k H P_{k/k-1} \quad (19)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots)$$

ここで,

$$K_k = P_{k/k-1} H^T \Lambda_k^{-1} \quad (20)$$

$$\Lambda_k = H P_{k/k-1} H^T + R \quad (21)$$

であり, R は観測雑音 ξ_k の共分散行列を表わす.

これにより, 任意に与えた α に対し波の挙動が推定されるが, α の妥当性はつぎの尤度関数の値により評価される^{4), 5)}.

$$J(\alpha) = \prod_{k=1}^K p(y_k/\alpha, Y^{k-1}) \quad (22)$$

ここで, $p(y_k/\alpha, Y^{k-1})$ は観測情報 $Y^{k-1} = \{y_j | 0 \leq j \leq (k-1)\}$ 及びパラメータ α の下での観測値 y_k の条件付き確率密度関数を表わしており,

$$p(y_k/\alpha, Y^{k-1}) = \frac{1}{2\pi(\det[\Lambda_k(\alpha)])^{1/2}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (y_k - H \hat{x}_{k/k-1}(\alpha))^T \times \Lambda_k^{-1}(\alpha) (y_k - H \hat{x}_{k/k-1}(\alpha)) \right] \quad (23)$$

なお, K は用いる観測値の数を表わす. また, $\Lambda_k(\alpha)$, $\hat{x}_{k/k-1}(\alpha)$ はそれぞれパラメータ α の下での観測予測誤差の共分散行列 Λ_k 及び状態ベクトルの予測値 $\hat{x}_{k/k-1}$ である. したがって, (22) 式を最大化する α が求めるべき最適パラメータとなる. ところで, この最大化に際してはパウエル法なる効率的な探索手法が使用できるので, 波速, 方位のリアルタイム計測が可能である.

3. シミュレーション及び検討

3.1 シミュレーション概要

シミュレーション波形として, (24) 式のようなものを考えた.

$$y(t) = 10 \sin(\omega_0 t) + 5 \sin(2\omega_0 t - \pi) \quad (24)$$

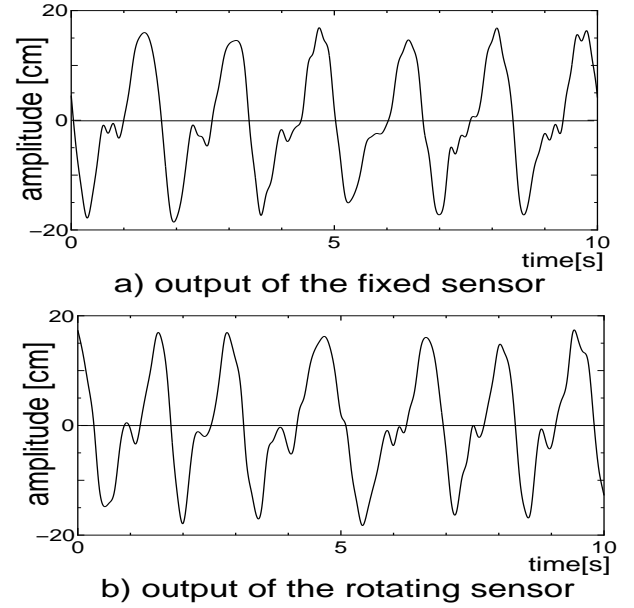


Fig. 2 Simulated sensor outputs

なお, v は平均値 0, 標準偏差 0.1 の白色ガウス雑音とした. ただし, 波速 $V=1.2$ [m/s], 方位 $\theta=30$ [deg], 波長 $\lambda=2$ [m], 回転センサの回転半径 $r=0.3$ [m], サンプル周期 $\Delta T=0.1$ [s], 回転センサの回転速度 $\delta=\pi/3$ [rad/s] としている. このとき, 固定センサ及び回転センサの出力波形は Fig. 2 のようになる. このようなセンサ出力に対し, モード数 n を 1, 2, 3 と変化させたときの提案手法による有効性を検討してみよう.

さらに, データウィンドウ長, 回転センサの回転速度の影響と合わせ, 固定 3 センサ方式との比較も行なう. ただし, 過渡状態の影響を考慮し, 最尤法の適用に際しては, データウィンドウ長の後半 50[%] のデータのみを用いる.

3.2 モード数 n を変えたときの計測結果及び検討

計測に必要なモード数の情報を得るため, モード数 n を 1, 2, 3 と変化させたシミュレーションを行なう. なお, 計測に際してのデータウィンドウ長は共通に 10[s] とした. また, 変位計測に関しては, 固定センサの出力波形誤差の実効値を変位誤差としている. ただし, 変位 (波の高さ) 計測に際しても, 過渡状態の影響を考慮し, データウィンドウ長の後半 50[%] での処理を考える.

3.2.1 モード数 $n=1$ のとき

まず, モード数 n を 1 としたときの計測結果は, 波速 1.38 [m/s], 方位 33.3 [deg], 波長 2.21 [m] であった. 計測誤差及び計測誤差率では, それぞれ 15.0 [%], 3.3 [deg], 10.6 [%] である. なお, 方位に関しては, 誤差率で表わすことが困難なため絶対誤差で表わした.

参考のため, このときのカルマンフィルタによるセンサ出力の推定波形を実波形と比較して Fig. 3 に示す. 図より, 出力波形に対して低周波成分はほぼ正確に推定できているが,

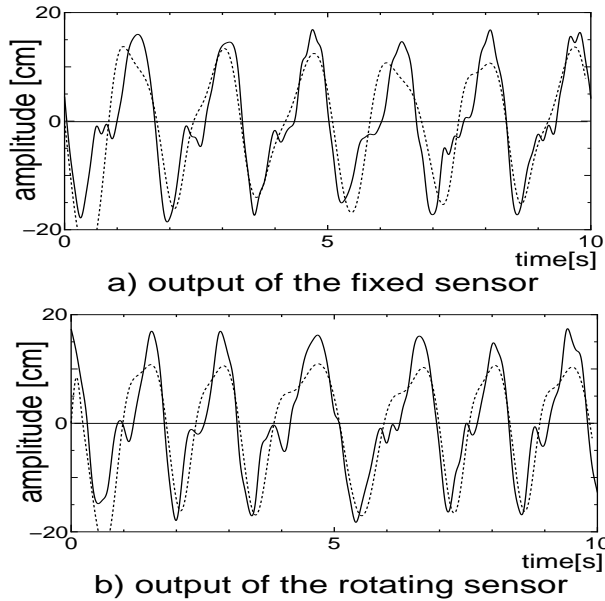


Fig. 3 Sensor outputs (solid lines) and estimated ones (dotted lines) for the case of one mode

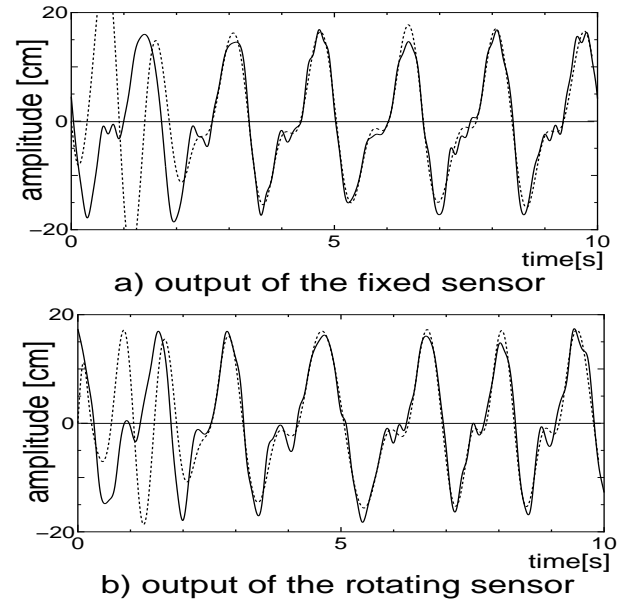


Fig. 5 Sensor outputs (solid lines) and estimated ones (dotted lines) for the case of two modes

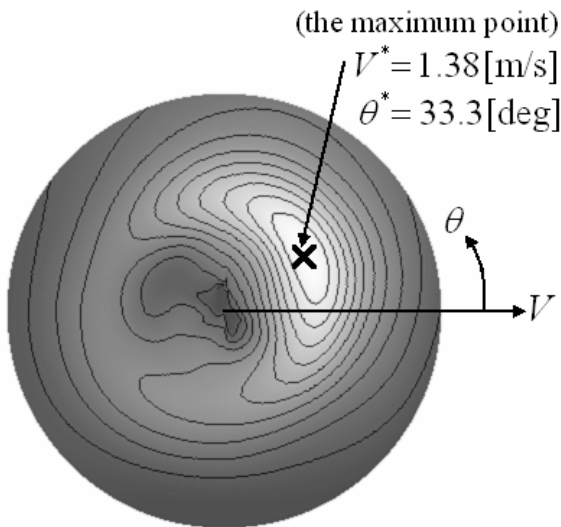


Fig. 4 Likelihood function for the case of one mode

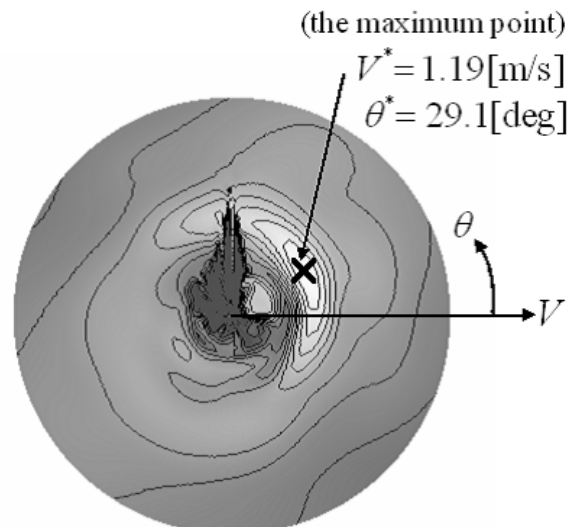


Fig. 6 Likelihood function for the case of two modes

小さな高周波リップルが推定できていないことがわかる。このときの変位計測誤差率は26.0[%]である。

参考のため波長 λ を計測値の $\lambda^*=2.21[\text{m}]$ に固定し、波速 V と方位 θ に関する尤度関数の等高線を描いたものをFig. 4に示す。図では、 V と θ について極座標形式で表示している。つまり、半径方向を波速、円周方向を方位としている。図において、尤度が高い所は白く、尤度が低い所は黒の濃淡で表示している。図中 x をつけた箇所が最大尤度の点であり、この点に対する V 、 θ が先に示した計測値 $V^*=1.38[\text{m/s}]$ 、 $\theta^*=33.3[\text{deg}]$ である。

3.2.2 モード数 $n=2$ のとき

つぎに、モード数 n を2としたときの計測結果は波速

$1.19[\text{m/s}]$ 、方位 $29.1[\text{deg}]$ 、波長 $1.98[\text{m}]$ となった。計測誤差及び計測誤差率ではそれぞれ $1.2[\%]$ 、 $0.9[\text{deg}]$ 、 $0.9[\%]$ 。これより、どのパラメータに対しても高精度な計測ができており、かつモード数 $n=1$ のときよりも格段に高精度な計測がなされていることがわかる。このときのカルマンフィルタによるセンサ出力の推定波形を実波形と比較してFig. 5に示すが、データウインドウの初めの頃(過渡状態)は波形の推定が悪いものの、少し時間が経ってからは、出力波形と推定波形が高周波成分も含めて高精度に推定されていることが確認できる。このときの変位計測誤差率は $2.5[\%]$ であり、変位に関して高精度な計測が行われている。

参考のため、波長 λ を計測値の $\lambda^*=1.98[\text{m}]$ に固定し、波速

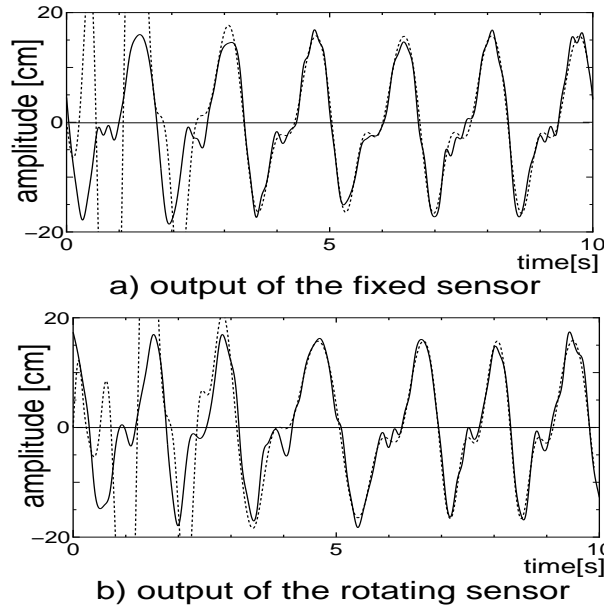


Fig. 7 Sensor outputs (solid lines) and estimated ones (dotted lines) for the case of three modes

V と方位 θ に関する尤度関数の等高線を描いたものを Fig. 6 に示す．図において \times をつけた箇所が尤度の最大の点であり，この点に対する V ， θ が上に挙げた解 $V^* = 1.19[\text{m/s}]$ ， $\theta^* = 29.1[\text{deg}]$ である．

3.2.3 モード数 $n=3$ のとき

最後に，モード数 n を 3 としたときの計測結果は波速 $1.20[\text{m/s}]$ ，方位 $29.6[\text{deg}]$ ，波長 $2.00[\text{m}]$ となった．計測誤差（あるいは計測誤差率）ではそれぞれ $0.0[\%]$ ， $0.4[\text{deg}]$ ， $0.2[\%]$ ．これより，モード数 $n=2$ のときと同様，どのパラメータに対しても高精度な計測ができていることがわかる．当然のことながら， $n=2$ のときよりも計測精度が上がっている．また，このときのカルマンフィルタによるセンサ出力の推定波形を実波形と比較して Fig. 7 に示す．推定波形に関しても， $n=2$ のとき同様，データウィンドウ後半では出力波形とほとんど一致していることがわかる．ただし， $n=3$ としたことにより，過渡状態が $n=2$ のときよりも少し長くなっていることがわかる．このときの変位計測誤差率は $1.9[\%]$ であり，変位に関しても高精度な計測が行われていることがわかる．

参考のため，波長 λ を計測値 $\lambda^* = 2.00[\text{m}]$ に固定し，波速 V と方位 θ に関する尤度関数の等高線を描いたものを Fig. 8 に示す．図において \times をつけた箇所が最大尤度の点を表わしており，この点に対する V ， θ が上に示した解 $V^* = 1.20[\text{m/s}]$ ， $\theta^* = 29.6[\text{deg}]$ である．また，最適解以外にも 2, 3 の極値が散見されるが，これらの尤度は最大尤度に比べ十分に小さく， n の値に拘らずパウエル法によっても容易に最適解が得られることがわかる．

3.2.4 モード数選定に対する検討

以上，モード数 n を変化させてシミュレーションを行なったが， $n=1$ でも波速，方位の計測がほぼ可能であり，モード

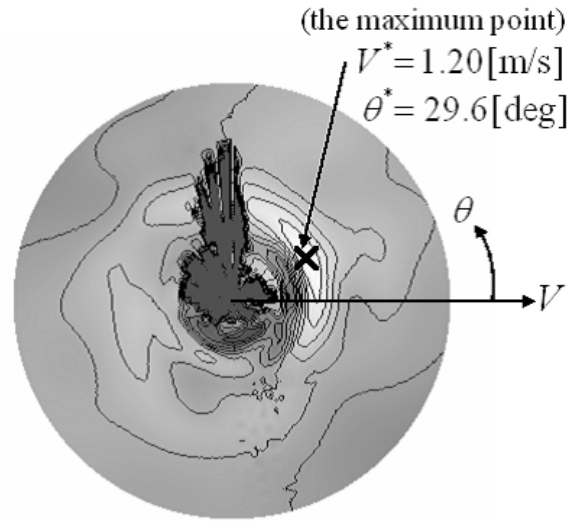


Fig. 8 Likelihood function for the case of three modes

数 n を 2, 3 にすることにより，波速，方位が極めて高精度に計測できることが確認できた．ただ，当然のことではあるが， n を大きくするにつれ，過渡状態が少しずつ長くなることも確認できた．

今回は，3 つの正弦波に白色雑音を加えたものをシミュレーション波形として考えたが，実際はもっと多くの周波数成分を持っていると思われる．しかし，そのような場合でも，すべての周波数を使う必要はなく，主要な周波数成分のみをモデルとして採用すれば十分であることが，今回のシミュレーションから確認できる（本例の場合，振幅が 10 と 5 の 2 モードを採用すれば十分であることが確認できたように）．もちろん，多くの周波数を使うことにより計測精度はさらに改善されるが，システムの次元が増大し，応答性が損なわれる．

よって，計測精度と応答性のバランスを考え，支配的なモード数に対応したモード数を採用することが望まれる．なお，主要なモード数 n は，FFT などで事前に周波数分析を行なうことによりほぼ正確に知り得るので，実際上特に問題は生じないと思われる．

3.3 データウィンドウ長を変えたときの計測結果及び検討

つぎに，データウィンドウ長が計測精度に与える影響をみるため，データウィンドウ長を $3[\text{s}] \sim 15[\text{s}]$ まで $1[\text{s}]$ ずつ変化させ，シミュレーションを行なってみる．なお，前節の結果より，モード数 n は 2 と固定し，その他のシミュレーション条件は 3.1 節と同じにした．

このときのシミュレーション結果を Fig. 9 に示す．図において，横軸はデータウィンドウ長，縦軸は計測誤差を示している．なお，3.2 節と同様，波速及び波長については誤差率，方位については絶対誤差で示している．この図から，データウィンドウ長が短すぎると大きな誤差が生じるものの， $5[\text{s}]$ 程度以上ではデータウィンドウ長に拘らず高精度な計測が行なえている．なお，ここでは n が 2 の場合のみ計測結果を示

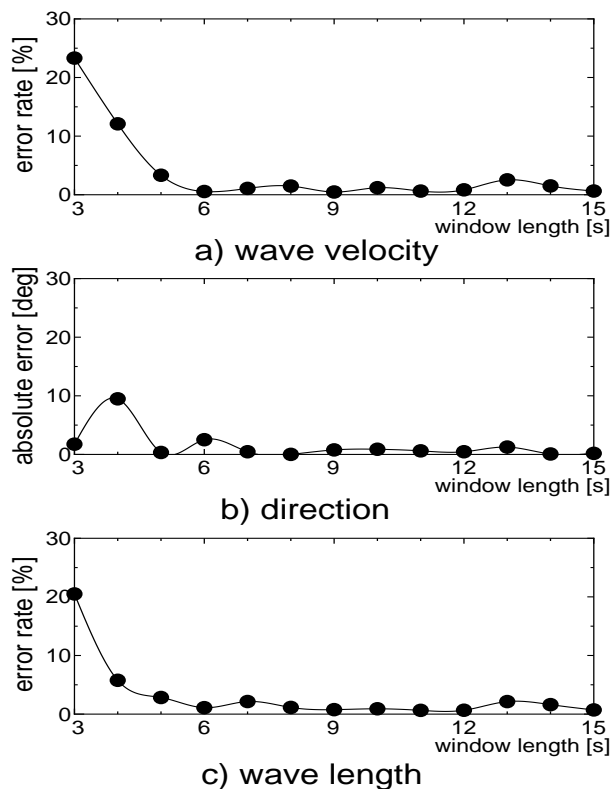


Fig. 9 Error rates/error versus the window length

したが、 n が 1, 3 の場合でも同様な傾向が見られる (詳細は略)。もちろん、前節で述べたように、 n によって応答の速さは異なる。

3.4 回転速度を変えたときの計測結果及び検討

続いて、回転センサの回転速度 δ を $\pi/3, \pi/6, \pi/9$ [rad/s] と変えたときを考えてみる。なお、その他のシミュレーション条件は前節と同じく、3.1 節と同じとした。

このときの計測結果を Fig. 10 示す。図から、回転センサの回転速度が速いほど応答性が高く、回転速度 $\delta = \pi/3$ [rad/s] のときはデータウィンドウ長 5[s] 程度で計測誤差が小さくなっているのに対し、 $\delta = \pi/6$ [rad/s] のときは 9[s]、 $\delta = \pi/9$ [rad/s] のときは 14[s] 程度必要であることが確認できる。

3.5 先に提案の固定 3 センサ方式との比較

最後に、著者らが先に提案した固定 3 センサ方式との比較を行なう。ただし、前回の方法において、3 センサ間の距離は $L=0.5$ [m] とした。また、新旧 2 つの方式において、モード数は共に $n=2$ として比較を行なってみる (その他のシミュレーション条件は 3.1 節と同じ)。

このときの計測結果を Fig. 11 に示す。図より、本論の方式がセンサ数が少ない分だけ応答性は劣るものの、データウィンドウ長が 5[s] 程度以上では、前回の方法と同程度の高精度な計測が行えている。

4. 結言

本論文では、光センサを 2 個に減じて海洋波の波速、方位

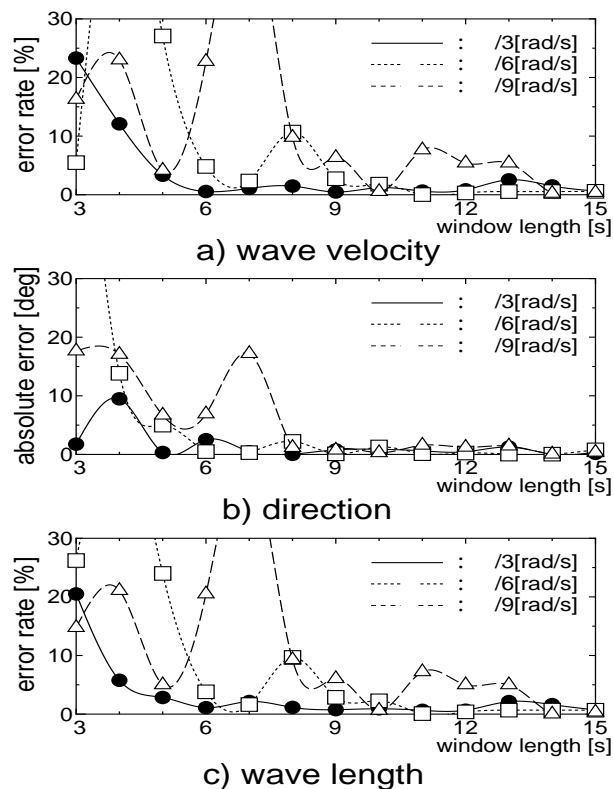


Fig. 10 Error rates/error versus the rotating speed

及び変位を計測する手法について考えた。具体的には、1 つのセンサを固定し、他のセンサを固定センサの周りに一定の速度で回転させることにより、波面の移動情報を取り入れ、海洋波の波速、方位、変位を計測するシステムを提案した。つまり、センサ出力を線形ダイナミックシステムの出力として表現し、これにカルマンフィルタ、最尤法を適用することにより、2 センサ間の波の伝播時間を求め、海洋波の波速、方位、変位を計測するシステムを提案した。

そして、提案システムの有効性を検証するため、まずモード数を変化させたシミュレーションを行ない、主要なモード数を用いることにより高精度に計測が行えることを確認した。つぎに、データウィンドウ長及び回転センサの回転速度を変えシミュレーションを行ない、適切なデータウィンドウ長を与えることにより、高精度な計測が行えることを確認した。

さらに、先に著者らが開発した固定 3 センサ方式との比較を行い、センサ数の減を補償する適切なデータウィンドウ長ささえ与えれば、前回の方法に遜色のない高精度な計測が行えることを確認した。前回の方法の有効性は実験によってもその有効性を確認したため、今回は、シミュレーションのみで提案システムの有効性を確認したが、本システムに対しても機会があれば新たな実験を行なってみたい。

参考文献

- 1) 田口一夫, 田畑雅洋: 海洋計測工学概論, 成山堂書店 (2005)
- 2) K.Oka, S.Kouno and S.Tanaka: Measurement of Speed, Height and Direction of Sea Waves Using Optical Range

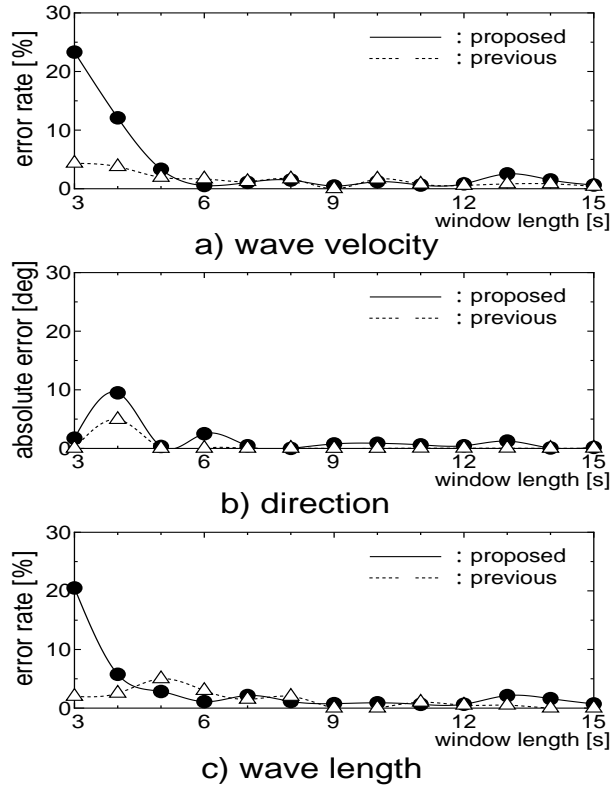


Fig.11 Comparison between the previous and proposed methods (error rates/error versus the window length)

Sensors, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 1980/1985 (2006)

- 3) 谷本和也, 岡健太郎, 河野進, 田中正吾: 光波距離センサを用いた海洋波の速度, 方位及び波高計測, 計測自動制御学会産業論文集, Vol.7, No.1, 1/8 (2008)
- 4) 田中正吾: 計測システム工学, 朝倉書店 (1994)
- 5) 田中正吾: 知能化計測の基礎と応用, アイピーシー出版 (1997)

[著者紹介]

谷本和也 (学生会員)



2007年, 山口大学工学部電気電子工学科卒業, 同年同大学大学院理工学研究科博士前期課程進学. 現在, 光波距離センサを用いた海洋波の波速, 方位, 波高計測の研究に従事.

河野進 (正会員)



1974年, 九州工業大学工学部制御工学科卒業, 同年三菱重工業(株)広島研究所入社, 2007年同社退職後, 広島国際大学に勤務. 現在, 同大学工学部機械ロボティクス学科教授. 博士(工学). この間, 97年山口大学大学院理工学研究科システム工学専攻博士後期課程修了. 各種プラント・機械の制御システム, 運転訓練シミュレータ及び各種センサなどの開発研究に従事.

田中正吾 (正会員)



1976年, 九州大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了. 同年同大学助手. 1980年山口大学工学部電子工学科助教授. 1991年同大学電気電子工学科教授. 2006年4月より改組に伴い同大学大学院理工学研究科教授. 工学博士. 主として知的音響応用計測, 非破壊検査, 生体計測などの理論および応用研究に従事. 電気学会, 非破壊検査協会などの会員, 中国文化賞(2003), 文部科学大臣賞(2004), 日本工学教育協会賞(2004), 本学会賞(2005, 2006)などを受賞. 本会フェロー.