

光波距離センサを用いた海洋波の波速, 方位及び波高計測

谷本和也*・岡健太郎**
河野進***・田中正吾*

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

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

The paper proposes a sensing system for measuring the wave velocity, the direction and the height of sea waves. The measurement of the three quantities is achieved using three optical range sensors which are adequately located over the sea surface adjacent to the platform. For the measurement, the sensor outputs (i.e., the displacements of the sea wave below the sensors) 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 simulations and experiments. That is, almost exactly for wave velocity, and the error of several degrees for direction by simulations and experiment.

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

1. 緒言

これまで、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、通常、人が波の速度、方位、波高を目視し操船していた¹⁾。これは、これら諸量を一括計測できる方法がなかったからである。たとえば、これまでこれらの量の計測に対しては、岸壁など取り付けられた複数の波高計のデータを利用する定点観測法²⁾や船舶搭載型ドップラー流速計¹⁾があったが、前者は波高のみしか、また後者は速度のみしか計測できなかった。

しかしながら、船舶の効率の良い操船のためには、波の速度、方位、波高を同時に高精度に測ることが必要であり、現在の目視による方法では精度が悪く、改善が望まれていた。さらに、この目視の方式では夜間の操船は困難であった。

そこで本論文では、昼夜を問わず、このような船舶の操船を支援するため、プラットフォームから海面上に突き出したアームにセットした3個の光センサを用いて、波の速度、方位、波高を同時にリアルタイムに計測するシステムを考えることとした。なお本論では、波の速度として波速 (wave velocity) を考える。

具体的には、3つの光センサ (距離センサ) により各々のセンサの直下の海面までの距離を測ることにより波面の挙動の情報を取り入れ、一方、これらセンサ出力から平均海面位を差し引いたもの (つまり、センサ直下の海面位の変動分) 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、各センサ間の波の伝播時間を高精度に求め、波速、方位、波高を計測することにした³⁾。

なお、海洋波は通常の波以外に大型船舶の運航を始め種々の理由により多方向からの合成波になることもあるが、すべてが同程度の振幅ではなく、ここでは基本的に重要な1方向および2方向の波の場合を取り扱うこととした。もちろん、3方向以上の場合にも、(システムは複雑になるが) 拡張は可能である。

2. 計測原理

Fig. 1 に、3センサの具体的な配置を示す。つまり、アームをプラットフォームから海面上に水平に押し出し、このアームに3センサをセンサ位置が正三角形を構成するよう取り付けられた。正三角形に配置した理由は、どの方位の波に対しても、精度よく波速、方位、波高が計測できるようにするためである。

波速及び方位の計測原理であるが、ひとつのセンサの真下を通過した波が、どれ位の時間を経て他の2つのセンサに観測されるかを見て、波速、方位を計測するものである。もちろん、波高に関しては3センサのセンサ出力をみて計測される。したがって、これ以降は、特に波速、方位の計測システムについて議論することとする。

* 山口大学大学院理工学研究科 宇部市常盤台 2-16-1

** トヨタテクニカルデベロップメント(株) 豊田市花本町

*** 広島国際大学 呉市広古新開 5-1-1

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

** Toyota Technical Development Ltd., Toyota

*** Hiroshima International University, Kure

(Received September 5, 2007)

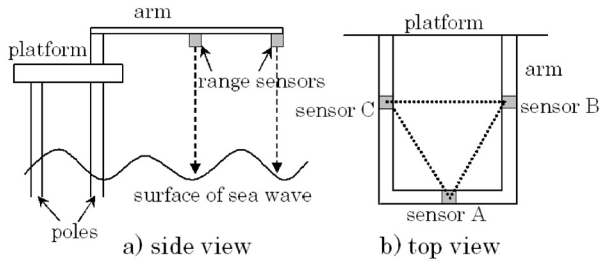


Fig. 1 Sensor arrangement

3. 計測方式

3.1 波が1方向のみの場合

まず、波の進行方向が1つの場合について考える。このとき、あるセンサの出力信号は局所的にはつぎのように異なる周波数の正弦波の和でモデル化できる（ここでは、センサ A に対するものを考える）。ただし、ここで言うセンサ出力とは、緒言でふれたように、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を考えており、これ以降、（センサ出力と言え）生のセンサ出力ではなく、この平均海面位を差し引いた海面変動分を指すものとする。

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

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

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。また基本周波数 f_0 は、波の速度を V 、波長を λ とすると、 $f_0 = V/\lambda$ 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、センサ A 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^{4), 5)}。

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

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

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

ここで、 $\mathbf{w}(t)$ は遷移雑音であり、 $\mathbf{w}(t) = (0, w_1(t), 0, w_2(t), \dots, 0, w_n(t))^T$ (T : 転置記号) である。なお、 $\mathbf{w}(t)$ を仮定したのは、各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（時間関数）ではないため、この周期波

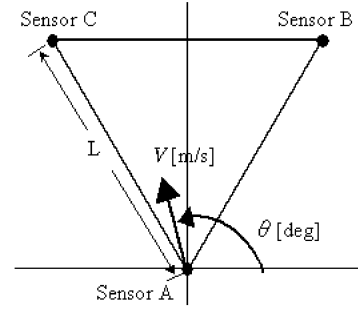


Fig. 2 Relative relation of the sensors, the speed and the direction of the sea wave

の時間的なわずかな変化（あるいは”形のくずれ”）を補償したからである。

(1) 式がセンサ A に観測されるとすれば、センサ A 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

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

と表わされる。しかしながら、センサ B では、センサ A の出力信号が時間 T_B 後に観測されるため、センサ B の出力信号の ω_j 成分は、上記の状態成分を用いてつぎのように表わされる。

$$a_j \sin(\omega_j(t - T_B) + \phi_j)$$

$$= \cos(\omega_j T_B) x_j - \frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_B) \dot{x}_j \quad (5)$$

よって、センサ B に対する観測ベクトル \mathbf{h}_2 は

$$\mathbf{h}_2 = (c_{1B}, s_{1B}, c_{2B}, s_{2B}, \dots, c_{nB}, s_{nB})^T \quad (6)$$

で与えられる。同様に、センサ C に対しては

$$\mathbf{h}_3 = (c_{1C}, s_{1C}, c_{2C}, s_{2C}, \dots, c_{nC}, s_{nC})^T \quad (7)$$

ただし、(6), (7) 式において、

$$\left. \begin{aligned} c_{jB} &= \cos(\omega_j T_B), & s_{jB} &= -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_B) \\ c_{jC} &= \cos(\omega_j T_C), & s_{jC} &= -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_C) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

である。なお T_B, T_C は、Fig. 2 の 3 センサと波速、方位の関係より、波速 V 、方位角 θ を用いて、つぎのように表わされる。

$$T_B = \frac{L \cos(60^\circ - \theta)}{V} \quad (9)$$

$$T_C = \frac{L \cos(120^\circ - \theta)}{V} \quad (10)$$

なお、 T_B, T_C は正負いずれの値もとる得る。

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誤差を合わせたものを観測雑音 $\boldsymbol{\xi}(t)$ と見なせば、3 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される。

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\xi}(t) \quad (11)$$

なお、 $H = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3]^T$ である。また、システムを簡単化するため、 $\boldsymbol{\xi}(t)$ 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、観測行列 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) 式、観測方程式 (11) 式を離散値化すると⁴⁾,

$$\mathbf{x}_{k+1} = F\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_k = H\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\xi}_k \quad (13)$$

ここで、 F は遷移行列であり、次式で定義される。

$$F = \Phi(\Delta T), \quad \Phi(t) = \mathcal{L}^{-1}[(sI - A)^{-1}] \quad (14)$$

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、 I は $2n$ つぎの単位行列である。また、遷移雑音 \mathbf{w}_k は

$$\mathbf{w}_k = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \Phi((k+1)\Delta T - t)\mathbf{w}(t)dt \quad (15)$$

で定義されるので、 \mathbf{w}_k は平均値ゼロ、共分散行列が

$$\begin{aligned} W &= E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] \\ &= E\left\{ \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau)\mathbf{w}_k(\tau)d\tau \right. \\ &\quad \left. \left\{ \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau)\mathbf{w}_k(\tau)d\tau \right\}^T \right\} \\ &= \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau)\Sigma\Phi^T(\Delta T - \tau)d\tau \end{aligned} \quad (16)$$

の白色ガウス雑音となる⁵⁾。

このように、状態ベクトルに関する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の推定がカルマンフィルタによりなされる。

しかしながら、速度 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を適用できない。そこで、これらの未知パラメータをまとめたベクトル $\boldsymbol{\alpha} = (V, \theta, \lambda)^T$ を定義し、これに適当な値をいったん与えれば、以下のカルマンフィルタが適用できる。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = F\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1} \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + K_k\gamma_k \quad (18)$$

$$\gamma_k = \mathbf{y}_k - H\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \quad (19)$$

$$P_{k/k-1} = FP_{k-1/k-1}F^T + W \quad (20)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_kHP_{k/k-1} \quad (21)$$

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

ここで、

$$K_k = P_{k/k-1}H^T\Lambda_k^{-1} \quad (22)$$

$$\Lambda_k = HP_{k/k-1}H^T + R \quad (23)$$

であり、 R は観測雑音 $\boldsymbol{\xi}_k$ の共分散行列を表す。

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

$$J(\boldsymbol{\alpha}) = \prod_{k=1}^K p(\mathbf{y}_k/\boldsymbol{\alpha}, Y^{k-1}) \quad (24)$$

ここで、 $p(\mathbf{y}_k/\boldsymbol{\alpha}, Y^{k-1})$ は観測情報 $Y^{k-1} = \{\mathbf{y}_j/\ 0 \leq j \leq (k-1)\}$ 及びパラメータ $\boldsymbol{\alpha}$ の下での観測値 \mathbf{y}_k の条件付き確率密度関数を表しており、

$$\begin{aligned} p(\mathbf{y}_k/\boldsymbol{\alpha}, Y^{k-1}) &= \frac{1}{(2\pi)^{n/2}(\det[\Lambda_k(\boldsymbol{\alpha})])^{1/2}} \\ &\times \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{y}_k - H\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}(\boldsymbol{\alpha}))^T \right. \\ &\quad \left. \times \Lambda_k^{-1}(\boldsymbol{\alpha})(\mathbf{y}_k - H\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}(\boldsymbol{\alpha}))\right] \end{aligned} \quad (25)$$

で与えられる。なお、 K は用いる観測値の数を表す。従って、(24) 式を最大化する $\boldsymbol{\alpha}$ が求めるべき最適パラメータとなる。

$\boldsymbol{\alpha}$ の探索に際しては、パウエル法という効率的な探索手法を使用しているため、データ取得後 2[sec] 程度の探索時間で最適パラメータが求まり、海面の状況のリアルタイム計測が可能である。

3.2 2方向の波が同時にある場合

つぎに、異なる方向に進行する2つの波が合成されて3センサに観測される場合を考えてみる。このときのセンサ A の出力信号は、2つの波が合成されて観測されるため、つぎのようにモデル化できる。

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{j=1}^{n_1} \mathbf{x}_{1j}(t) + \sum_{j=1}^{n_2} \mathbf{x}_{2j}(t)$$

$$\mathbf{x}_{1j} = a_{1j} \sin(\omega_{1j}t + \phi_{1j}) \quad (j = 1, 2, \dots, n_1)$$

$$\mathbf{x}_{2j} = a_{2j} \sin(\omega_{2j}t + \phi_{2j}) \quad (j = 1, 2, \dots, n_2) \quad (26)$$

ここで、右辺第1項目は1つ目の波を表しており、第2項目は2つ目の波を表している。 $\omega_{1j} = 2\pi f_{1j}$ ($j = 1, 2, \dots, n_1$) は1つ目の波の主要な角周波数であり、 n_1 はそのモード数を表す。また、 $\omega_{2j} = 2\pi f_{2j}$ ($j = 1, 2, \dots, n_2$) は2つ目の波の主要な角周波数であり、 n_2 はそのモード数を表す。もちろん、海洋波の性質より、前節のようにフーリエ級数展開を考えることにより $f_{1j} = j \times f_{01}$ ($j = 1, 2, \dots, n_1$)、 $f_{2j} = j \times f_{02}$ ($j = 1, 2, \dots, n_2$) である。

いま、状態ベクトルをつぎのように定義する。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} = & (x_{11}, \dot{x}_{11}, x_{12}, \dot{x}_{12}, \dots, x_{1n_1}, \dot{x}_{1n_1}, \\ & x_{21}, \dot{x}_{21}, x_{22}, \dot{x}_{22}, \dots, x_{2n_2}, \dot{x}_{2n_2})^T \end{aligned} \quad (27)$$

前半部分は、1つ目の波の状態成分を表し、残りは2つ目の波の状態成分を表している。また、状態ベクトルをこのように定義したことにより、前節と同様なダイナミック方程式が得られる。しかし、ここでは、ダイナミック方程式の遷移行列 A は次式で定義される。

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & O \\ O & A_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

ここで、

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & O & \dots & O \\ O & A_{12} & \dots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & \dots & A_{1n_1} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{21} & O & \dots & O \\ O & A_{22} & \dots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & \dots & A_{2n_2} \end{bmatrix} \quad (29)$$

ただし、

$$A_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_{1j})^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, n_1)$$

$$A_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_{2j})^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, n_2) \quad (30)$$

もちろん、 A_1 は1つ目の波に、 A_2 は2つ目の波に対応する。また、状態ベクトルの次元が $2(n_1+n_2)$ であるため、遷移行列 A は $2(n_1+n_2) \times 2(n_1+n_2)$ の正方行列となる。また、遷移雑音 $\mathbf{w}(t)$ は $\mathbf{w}(t) = (0, w_1(t), 0, w_2(t), \dots, 0, w_{n_1+n_2}(t))^T$ のように定義される。ここでも、問題の簡単化のため $\mathbf{w}(t)$ の各成分は平均値ゼロ、分散 R の互いに独立な白色ガウス雑音とする。

また、この場合、センサ A に対する観測ベクトル \mathbf{h}_1 は (4) 式と同様、

$$\mathbf{h}_1 = (1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0)^T \quad (31)$$

となる。また、センサ A を通過した2つの波がそれぞれ時間 T_{B_1}, T_{B_2} 後にセンサ B の箇所に到達したとすると、一方の波の ω_i 成分、他方の波の ω_j 成分は、それぞれ上記の状態成分を用いて

$$\begin{aligned} & a_i \sin(\omega_i(t - T_{B_1}) + \phi_i) + a_j \sin(\omega_j(t - T_{B_2}) + \phi_j) \\ &= \cos(\omega_i T_{B_1}) x_i - \frac{1}{\omega_i} \sin(\omega_i T_{B_1}) \dot{x}_i \\ & \quad + \cos(\omega_j T_{B_2}) x_j - \frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_{B_2}) \dot{x}_j \end{aligned} \quad (32)$$

のように表わされるので、センサ B に対しての観測ベクトル \mathbf{h}_2 は

$$\mathbf{h}_2 = (c_{1B_1}, s_{1B_1}, \dots, c_{n_1B_1}, s_{n_1B_1}, c_{(n_1+1)B_2}, s_{(n_1+1)B_2}, \dots, c_{(n_1+n_2)B_2}, s_{(n_1+n_2)B_2})^T \quad (33)$$

となる。同様に、センサ C に対しては、

$$\mathbf{h}_3 = (c_{1C_1}, s_{1C_1}, \dots, c_{n_1C_1}, s_{n_1C_1}, c_{(n_1+1)C_2}, s_{(n_1+1)C_2}, \dots, c_{(n_1+n_2)C_2}, s_{(n_1+n_2)C_2})^T \quad (34)$$

$$s_{(n_1+1)C_2}, \dots, c_{(n_1+n_2)C_2}, s_{(n_1+n_2)C_2})^T \quad (34)$$

と表される。ただし、(33), (34) において、

$$\left. \begin{aligned} c_{jB_1} &= \cos(\omega_j T_{B_1}), \quad s_{jB_1} = -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_{B_1}) \\ c_{jC_1} &= \cos(\omega_j T_{C_1}), \quad s_{jC_1} = -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_{C_1}) \end{aligned} \right\} (j = 1, 2, \dots, n_1) \quad (35)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{jB_2} &= \cos(\omega_j T_{B_2}), \quad s_{jB_2} = -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_{B_2}) \\ c_{jC_2} &= \cos(\omega_j T_{C_2}), \quad s_{jC_2} = -\frac{1}{\omega_j} \sin(\omega_j T_{C_2}) \end{aligned} \right\} (j = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, (n_1 + n_2)) \quad (36)$$

である。なお、 $T_{B_1}, T_{C_1}, T_{B_2}, T_{C_2}$ は一方の波の速度 V_1 、方位角 θ_1 及び他方の波の速度 V_2 、方位角 θ_2 を用いて、つぎのように表わされる。

$$T_{B_1} = \frac{L \cos(60^\circ - \theta_1)}{V_1} \quad (37)$$

$$T_{C_1} = \frac{L \cos(120^\circ - \theta_1)}{V_1} \quad (38)$$

$$T_{B_2} = \frac{L \cos(60^\circ - \theta_2)}{V_2} \quad (39)$$

$$T_{C_2} = \frac{L \cos(120^\circ - \theta_2)}{V_2} \quad (40)$$

このようにして、未知パラメータ $V_1, V_2, \theta_1, \theta_2, \lambda_1, \lambda_2$ を含む線形ダイナミックシステム表示が行なえたが、 $V_1, V_2, \theta_1, \theta_2$ の計測に当たっては、未知パラメータベクトルを $\boldsymbol{\alpha} = (V_1, V_2, \theta_1, \theta_2, \lambda_1, \lambda_2)^T$ として、前節の手順（つまり、最尤法）に従えばよい。

4. シミュレーション及び検討

4.1 波が1方向のみの場合

提案システムの有効性を確認するため、まず波が1方向の場合のシミュレーションを行なってみる。シミュレーション波形には **Fig. 3** に示すような三角波を用いた。

Fig.3 は、波速を $V=1.2$ [m/s]、方位を $\theta=30$ [deg] としたときの各センサに観測される波形であり、センサ A からセンサ B, C への伝播時間遅れは、センサ間距離 L が $L = 0.5$ [m] であるため、それぞれ $T_B = 0.36$ [sec]、 $T_C = 0.0$ [sec] となる。また、解析に用いるデータウィンドウ長は 15 [sec]、モード数は $n = 4$ とした。

このようなセンサ出力に対し提案手法を適用したとき、カルマンフィルタによる推定波形は **Fig. 4** のようになった。図より波の形状が高精度に推定されていることがわかる。このときの計測結果は、 $V^*=1.2$ [m/s]、 $\theta^*=30.4$ [deg]、 $\lambda^*=2.0$ [m] であり、真値 $V=1.2$ [m/s]、 $\theta=30$ [deg]、 $\lambda=2.0$ [m] に対し、高精度な計測が行なえている。

参考のために、センサ出力波形の波長を計測値 $\lambda^*=2.0$ [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. 5** に示す。なお、**Fig.5** 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、尤度が高い箇所は白く、

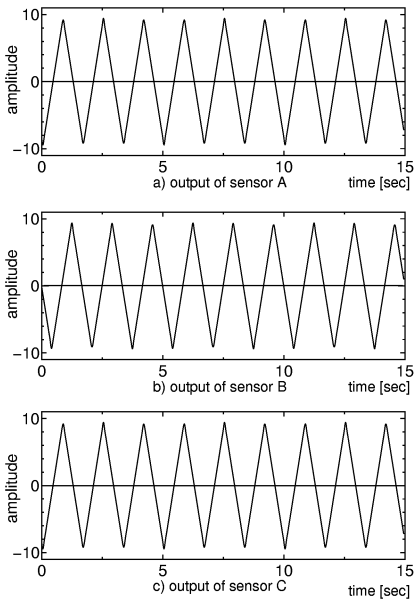


Fig. 3 Simulated sensor outputs

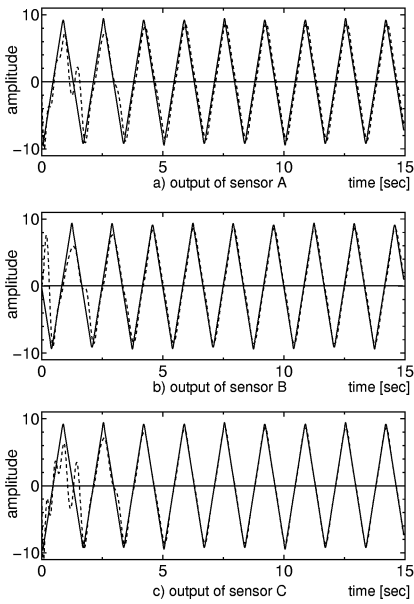


Fig. 4 Sensor outputs (solid lines) and the estimated ones (dotted lines)

尤度が低い箇所は黒で表示している．図中の×をつけた箇所が最も尤度が高くなっており，この点に対する V, θ が求める解 $V^* = 1.2[\text{m/s}]$, $\theta^* = 30.4[\text{deg}]$ である．また，この尤度関数の形状から，パウエル法によって容易に最適解が得られることがわかる．

4.2 2方向の波が同時にある場合

つぎに，2方向に進行する波が同時に観測される場合のシミュレーションを行なってみる．ここでも，先ほどと同様，三角波を用いる．

まず，1つ目の波の波速を $V_1 = 1.2[\text{m/s}]$ ，方位を $\theta_1 = 30.0[\text{deg}]$ とし，2つ目の波の波速を $V_2 = 1.2[\text{m/s}]$ ，方位を $\theta_2 = 0.0[\text{deg}]$

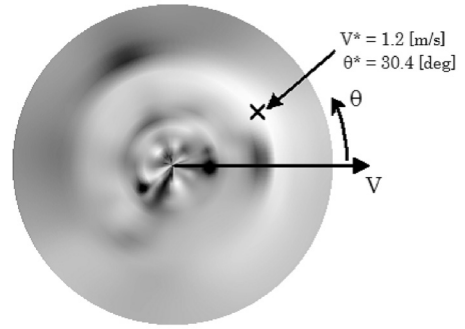


Fig. 5 Likelihood function for the fixed wave length λ^*

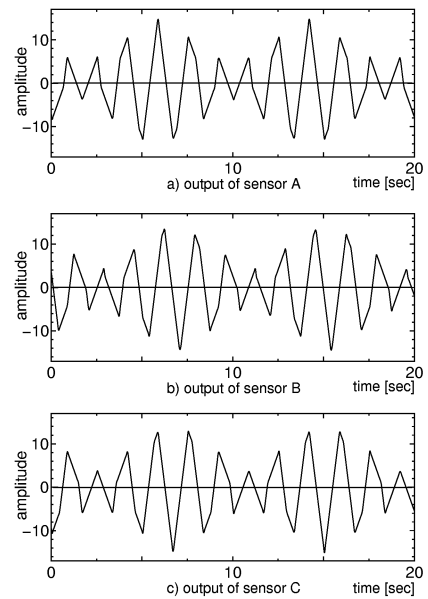


Fig. 6 Sensor outputs in the case of two different waves

としたときに，各センサにおいて2つの波が合成されて観測される場合を考える．センサ間距離は前節と同じく $L = 0.5[\text{m}]$ としているので，このときのそれぞれの波の伝播時間は $T_{B_1} = 0.36[\text{sec}]$, $T_{C_1} = 0.0[\text{sec}]$, $T_{B_2} = 0.21[\text{sec}]$, $T_{C_2} = -0.21[\text{sec}]$ である．

各センサには2つの波が足し合わされて観測されるため，Fig. 6のような出力波形となる．また，異なる周波数の波を分離しやすくするため，計測に際してのデータウィンドウ長は1方向の波の場合に比べて少し長めの $20[\text{sec}]$ とした．また，このときのモード数は計算時間を考慮し n_1, n_2 共に2とした．

センサ出力に提案手法を適用したときのカルマンフィルタによる推定波形は Fig. 7 ようになる．図より，2方向の波が同時にある場合でも，波形の形状が高精度に推定されていることがわかる．また，このときの計測結果は $V_1^* = 1.2[\text{m/s}]$, $\theta_1^* = 28.8[\text{deg}]$, $V_2^* = 1.2[\text{m/s}]$, $\theta_2^* = 3.0[\text{deg}]$ となった．波速の計測結果は，いずれの波においても真値と

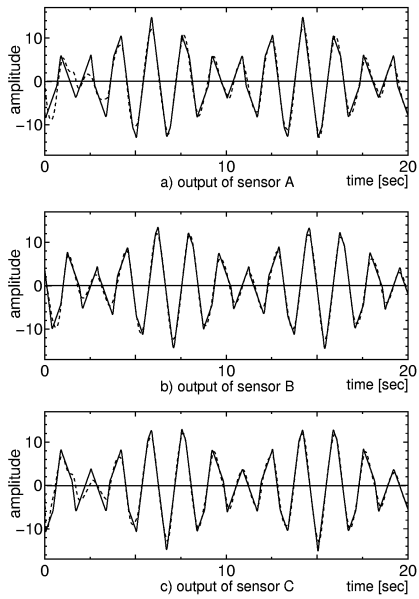


Fig. 7 Sensor outputs (solid lines) and the estimated ones (dotted lines)

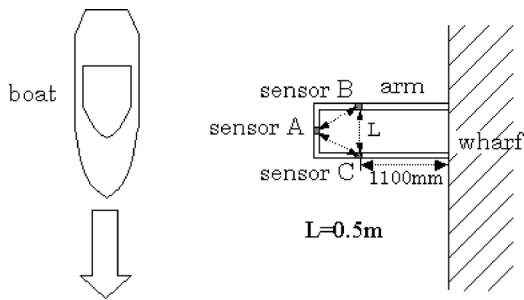


Fig. 8 Relative relation of the sensors and the ship's run in the experiment

一致していることがわかる。ただ、方位については、波が1方向のみの場合と比べると誤差は少し大きくなったが、どちらも3[deg]以内の誤差であり、比較的高精度な計測結果が得られたといえる。もちろんデータウィンドウを長めに設定すれば、当然誤差は小さくなる。例えば、ウィンドウ長を30[sec]にすると、計測結果は $V_1^*=1.2$ [m/s]、 $\theta_1^*=30.0$ [deg]、 $V_2^*=1.2$ [m/s]、 $\theta_2^*=1.6$ [deg]となり、波速の計測値は真値のままで、方位の計測誤差は更に小さくなっている。

5. 実験及び検討

5.1 実験の概要

沖合いのプラットホームにセンサを設置するには、コストや準備の面で困難であったため、**Fig. 8**に示すようにセンサ及びその取り付け台を岸壁に設置した。実験当日の天気は晴天で、ほぼ風はなく波も穏やかだった。そのため、岸壁に対し平行にボートを走らせ人工的に波を作り、光センサでそのときの波面の変化を観測した。このとき使用した光センサはO & E製OMS-1で、測距可能範囲3[m]~30[m]、測距精度 ± 10 [mm]である。そして、センサ間の距離 L は $L = 0.5$ [m]、

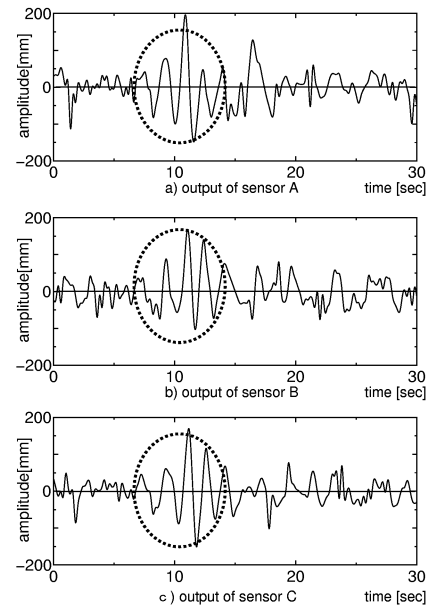


Fig. 9 Signal-processed sensor outputs

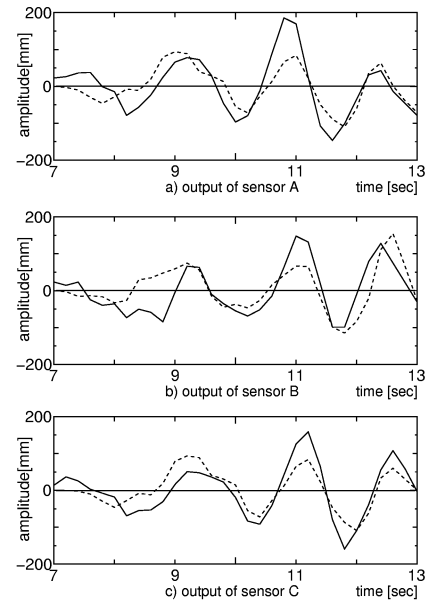


Fig. 10 Magnified signal-processed sensor outputs (solid lines) and the estimated ones (dotted lines)

データ収録のサンプリング周期は0.2[sec]とした。また、光センサによる波面観測と同時に、ビデオカメラを用いて波の様子も録画した。

5.2 計測結果及び検討

実験により得られた海洋波のセンサ出力の1例を**Fig. 9**に示す。ただし、3.1節で述べたように、**Fig. 9**には信号の前処理として、計測に用いるデータウィンドウ内でセンサ生信号の平均値を計算し、これを生信号から差し引くことにより基準値からの変化量として表わしている。

Fig. 9を見ると、10[sec]前後の点線で囲んだ部分が互いに似かよっていることがわかる。これは、ボートを走らせた

きに生じた波を各センサが次々に観測しているからである。この部分を時間軸方向に拡大したものを Fig. 10 に実線で示す。波速、方位の計測に際しては、この時間帯 (6[sec] 間) のデータをデータウィンドウとして使用する。これ以降のデータ (つまり 12[sec] 以後のデータ) に関しては、岸壁近くで実験を行なったため、返し波の影響により波の形状が複雑になることから、今回は用いていない。

このセンサ出力に提案手法を適用すると、波速及び方位の計測値はそれぞれ $V^*=2.0$ [m/s]、 $\theta^*=82.4$ [deg] と求めた。この計測値に基づく海面位変動分の推定波形を破線で Fig. 10 に示すが、カルマンフィルタが持つ過渡状態及びデータウィンドウが 6[sec] と短いことから、最初の 3[sec] 間は推定が少々悪いが、後半の 3[sec] 間では徐々に良くなり、最後に至ってはかなり高精度に海面位の変動をとらえていることがわかる。

今回は、ボートを走らせることにより部分的な波を作ったが、本来はもっと長い時間にわたって周期的に変化する周期波を念頭においているため、本システムでは、そのような場合、シミュレーションと同様高精度に海面位の変動を推定できると思われる。とは言え、このような局所的に生ずる波 (つまり、波の数の少ない波) の場合にも、その方位、波速、波高を応答よく高精度に測れるよう、さらに検討を加えたい。

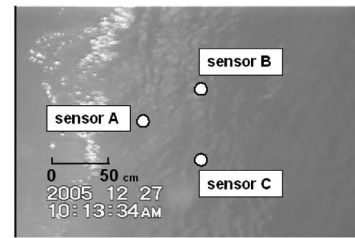
ところで、つぎにこれらの計測値の信頼性を、波面観測と同時に行ったビデオカメラによる映像により確認しよう。ボートを走らせて作った波を観測したときの海面の様子を Fig. 11 に示す。なお、ビデオカメラは正三角形に配置された 3 センサの重心に設置し、海面を真上から撮影したものである。

それぞれの画像において、白丸をつけた場所に各センサが設置されている。同図 (a) は 10 時 13 分 34 秒 10 のときの画像、(b) はその 0.2 秒後の画像である。2 つの画像において、白く表示されている部分があるが、これは、ボートで作った波の波頭に太陽光が当たって反射し白く写っているものに対応し、波の稜線を表している。

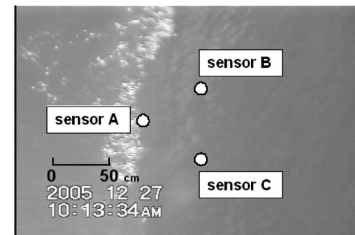
いま、2 つの画像を見ると、(a) の画像において左側にあった白い稜線が、0.2 秒後の (b) の画像ではほぼ中央寄りに移動しているのがわかる。2 つの画像の時間の間隔は 0.2 秒で、その間の波の移動距離は約 0.4m であった。従って、このときの波は、波速が約 2.0[m/s] で、画像の左から右に向かって進行していることになる。また、提案システムでは、3 センサと速度方位の位置関係は Fig.2 に示した通りなので、このときの波の方位は 85~90[deg] と推測される。このことから、提案方式による計測結果と画像により確認した計測値はほぼ一致していると言える。

6. 結 言

本論文では、3 つの光センサにより波面の移動の情報を取り入れ、センサ出力を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、各センサ間の波の伝播時間を求め、海洋波の波速、方位、波高を計測する方法を提案した。



(a) 10:13:34:10



(b) 10:13:34:30

Fig. 11 Photographic images by a video camera

そして、提案システムの有効性の確認のために、まず、1 方向の波の場合だけでなく、2 方向の波の場合についてのシミュレーションを行ない、いずれの場合についても波速、方位共に高精度な計測結果が得られることを確認した。

つぎに、実際に光センサを用いて、海洋波の波速、方位、波高を求める実験を行なった。実験では、センサを設置した場所が岸壁に近いので、返し波の影響が大きく、満足にデータを得ることが出来なかったが、それでも、本提案システムでは計測が可能であることが確認された。

今後はセンサを沖合いのプラットホームに設置し、計測実験を行ない、システムの有効性を確認することが課題である。また、センサ間隔を今回は 0.5[m] としてシミュレーション及び実験を行なったが、実際に起こる波の波長は様々であり、適切なセンサ間隔についても今後検討する必要がある。さらに、コスト削減のためセンサの個数を減らしたり、あるいは (波の数が少ない) 局所的な波の場合にも、応答よく波の方位、波速、波高を高精度に測れる計測システムの研究・開発が今後の課題である。

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) 安田明生, 金居康文, 桑島進: マイクロ波を用いた船用簡易波高計の開発, 日本航海学会論文集, **66**, 31/38 (1982)
- 3) K.Oka, S.Kouno and S.Tanaka: Measurement of Speed, Height and Direction of Sea Waves Using Optical Range Sensors, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 1980/1985 (2006)
- 4) 田中正吾: 計測システム工学, p.100, 朝倉書店 (1994)
- 5) 田中正吾: 知能化計測の基礎と応用, p.150, アイビーシー出版 (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速度, 方位, 波高計測の研究に従事.

岡 健太郎



2007年, 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程修了. 現在, トヨタテクニカルデベロップメント(株)勤務. 在学中は, 光波距離センサを用いた海洋波の速度, 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.