

光波距離センサを用いた非定常海洋波の波速，方位および変位計測

谷本和也*・三吉翔三*
山根健治**・田中正吾*

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

Kazuya TANIMOTO*, Shozo MIYOSHI*,
Kenji YAMANE** and Shogo TANAKA*

The paper proposes a sensing system for measuring the velocities, the directions and the heights of stationary and nonstationary waves. The nonstationary wave is the one which is made for example by a big ship traveling nearby. 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 displacements of the sea wave below the sensors are modeled as outputs of a linear dynamic system, and a Kalman filter and the maximum likelihood method are applied. The validity of the system is verified by an experiment.

Key Words: optical range sensor, nonstationary sea wave, velocity, direction, height, 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，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開発・提案した。なお，波の速度としては波速(wave velocity)を考えている。

具体的には，3つの光センサ(距離センサ)によりおのおののセンサ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，波高を計測した^{3),4)}。

なお，その際，海洋波としては1タイプの波の場合と，波速，方位の異なる2タイプの波の合成波で与えられる場合の2つの場合を考え，共に定常波とした。

しかしながら，このような定常波に加え，突然大型船舶の運行などにより大きな波が発生することもあり，小型船舶などには，このような海洋波の状況をできるだけ正確に時々刻々周知させることも，操船および海洋土木工事においては重要なことである。

そこで本論文では，定常波に大きな非定常波が突発的に加わっても，定常波と非定常波を分離し，おのおのの波速，方位，変位を高精度に計測できる計測システムを提案する。なおここでは，一般性を失なうことなく，定常波，非定常波としてはそれぞれ1タイプを考える。

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。正三角形に配置した理由は，どの方位の波に対しても，

* 山口大学大学院理工学研究科 宇部市常盤台 2-16-1

** 宇部工業高等専門学校 宇部市常盤台 2-14-1

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

** Ube National College of Technology, Ube

(Received January 5, 2009)

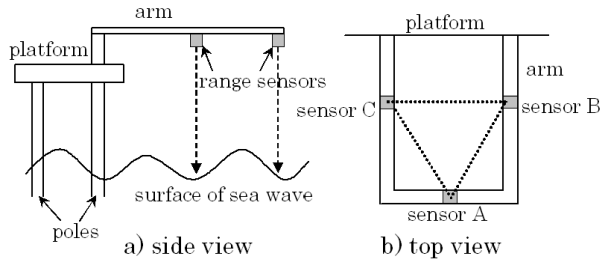


Fig. 1 Sensor arrangement

精度よく波速，方位が計測できるようにするためである．

波速および方位の計測原理であるが，1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，定常波，非定常波の波速，方位を計測するものである．もちろん，変位に関しては，おのおののダイナミクスに基づく出力の推定値をみれば計測できる．

3. 計測方式

波が[1方向の定常波]および[異なる方向の2つの定常波が合成されたもの]で与えられる場合は，共に参考文献3),4)に詳しいので，ここでは割愛し，1つの定常波に他の1つの非定常波が途中で加わる場合を考察する．

3.1 モデル化

このとき，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．

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

$$x_{1i} = a_{1i} \sin(\omega_{1i}t + \phi_{1i}) \quad (i = 1, 2, \dots, n_1)$$

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

ここで，右辺第1項目は1つ目の波（定常波）を表しており，第2項目は2つ目の波（非定常波）を表している． $\omega_{1i} = 2\pi f_{1i}$ ($i = 1, 2, \dots, n_1$) 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わす．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わす．ここに，1つ目の波は定常波（周期波）であるため $f_{1i} = i \times f_{11}$ ($i = 1, 2, \dots, n_1$) を満たすが，2つ目の波は非定常波（非周期波）のため， $\{f_{2j}\}$ 全てが独立な変数である．

いま，状態ベクトルをつぎのように定義する．

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

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，つぎのダイナミック方程式が得られる．

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (3)$$

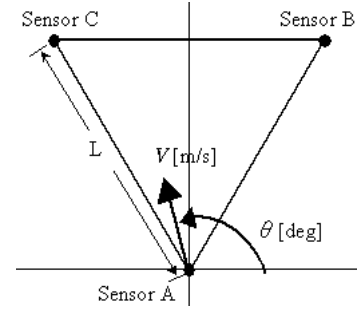


Fig. 2 Relative relation of the sensors, the speed and the direction of the sea wave

ただし，遷移行列 A は次式で定義される．

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & O \\ O & A_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで，

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

$$A_2 = \begin{bmatrix} A_{21} & O & \dots & O \\ O & A_{22} & \dots & O \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ O & O & \dots & A_{2n_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし，

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

$$A_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\omega_{2j})^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, n_2) \quad (6)$$

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．この遷移雑音は，海洋波の時間的なわずかな変化（あるいは”形のくずれ”）を補償するため導入している^{3),4)}．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している．

このとき，センサAに対する観測ベクトル \mathbf{h}_1 は

$$\mathbf{h}_1 = (1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0)^T \quad (7)$$

と与えられる．もちろん，参考文献3),4)と同じように，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、ここでのセンサ出力と考えている。つまり、海面変動分を改めてセンサ出力としている（これ以降もこのように考える）。

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 の箇所到達したとすると、一方の波の ω_{1i} 成分, 他方の波の ω_{2j} 成分は, それぞれ上記の状態成分を用いて

$$\begin{aligned} & a_{1i} \sin(\omega_{1i}(t - T_{B_1}) + \phi_{1i}) + a_{2j} \sin(\omega_{2j}(t - T_{B_2}) + \phi_{2j}) \\ &= \cos(\omega_{1i}T_{B_1})x_{1i} - \frac{1}{\omega_{1i}} \sin(\omega_{1i}T_{B_1})\dot{x}_{1i} \\ &+ \cos(\omega_{2j}T_{B_2})x_{2j} - \frac{1}{\omega_{2j}} \sin(\omega_{2j}T_{B_2})\dot{x}_{2j} \quad (8) \end{aligned}$$

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

$$\mathbf{h}_2 = (c_{1B_1}, s_{1B_1}, \dots, c_{n_1B_1}, s_{n_1B_1}, c_{(n_1+1)B_2}, s_{(n_1+1)B_2}, \dots, c_{(n_1+n_2)B_2}, s_{(n_1+n_2)B_2})^T \quad (9)$$

となる。同様に, センサ C に対しては,

$$\mathbf{h}_3 = (c_{1C_1}, s_{1C_1}, \dots, c_{n_1C_1}, s_{n_1C_1}, c_{(n_1+1)C_2}, s_{(n_1+1)C_2}, \dots, c_{(n_1+n_2)C_2}, s_{(n_1+n_2)C_2})^T \quad (10)$$

と表される。ただし, (9), (10) において,

$$\left. \begin{aligned} c_{jB_1} &= \cos(\omega_{1i}T_{B_1}), \quad s_{jB_1} = -\frac{1}{\omega_{1i}} \sin(\omega_{1i}T_{B_1}) \\ c_{jC_1} &= \cos(\omega_{1i}T_{C_1}), \quad s_{jC_1} = -\frac{1}{\omega_{1i}} \sin(\omega_{1i}T_{C_1}) \end{aligned} \right\} (11)$$

$$\left. \begin{aligned} c_{jB_2} &= \cos(\omega_{2j}T_{B_2}), \quad s_{jB_2} = -\frac{1}{\omega_{2j}} \sin(\omega_{2j}T_{B_2}) \\ c_{jC_2} &= \cos(\omega_{2j}T_{C_2}), \quad s_{jC_2} = -\frac{1}{\omega_{2j}} \sin(\omega_{2j}T_{C_2}) \end{aligned} \right\} (12)$$

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 および他方の波の速度 V_2 , 方位角 θ_2 を用いて, つぎのように表わされる (Fig. 2 参照)。

$$T_{B_1} = \frac{L \cos(60^\circ - \theta_1)}{V_1} \quad (13)$$

$$T_{C_1} = \frac{L \cos(120^\circ - \theta_1)}{V_1} \quad (14)$$

$$T_{B_2} = \frac{L \cos(60^\circ - \theta_2)}{V_2} \quad (15)$$

$$T_{C_2} = \frac{L \cos(120^\circ - \theta_2)}{V_2} \quad (16)$$

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, 波速, 方位, 周波数が未知であるため, 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 $\alpha = (V_1, \theta_1, f_{11}, V_2, \theta_2, f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2n_2})^T$ 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。ただし, $H = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \mathbf{h}_3]^T$ である。

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

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

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

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

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

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

ここで,

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

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

であり, R は観測雑音 ξ_k の共分散行列を表す。

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^{5), 6)}。

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

ここで, $p(\mathbf{y}_k / \alpha, Y^{k-1})$ は観測情報 $Y^{k-1} = \{\mathbf{y}_j / 0 \leq j \leq (k-1)\}$ およびパラメータ α 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,

$$\begin{aligned} p(\mathbf{y}_k / \alpha, Y^{k-1}) &= \frac{1}{(2\pi)^{3/2} (\det[\Lambda_k(\alpha)])^{1/2}} \\ &\times \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{y}_k - H \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}(\alpha))^T \right. \\ &\quad \left. \times \Lambda_k^{-1}(\alpha) (\mathbf{y}_k - H \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}(\alpha)) \right] \quad (25) \end{aligned}$$

で与えられる。なお, K は用いる観測値の数を表す。

3.2 最適化の工夫

尤度関数 (24) 式をこの未知パラメータについて最大化することにより, 定常波および (非定常波が生じた場合には) 非定常波の波速, 方位, 変位がそれぞれ求まることになるが, 未知パラメータの数が多いのが難点である。仮に, $n_1=3$, $n_2=3$ としても, 全体で 8 個である。

そこで, 本論文では, 定常波の未知パラメータについては, 定常波は比較的長い時間一定, あるいは変化してもごくわずかであることから, 最適化に際しては, 前時刻での推定値の近傍で局所探索するなどの工夫を行えば, 実質的に非定常波の未知パラメータ (5 個) についてのみ最適化を行うだけでよく, 比較的少ない計算時間で非定常波の波速, 方位, 変位をリアルタイムに計測することができる。しかも, 非定常波に関しても, いったん求められた未知パラメータも非定常波の出現している時間帯はほぼ一定の値を持つため, 計測時刻毎に大域的探索する必要はない。つまり, 前の時刻で求められたパラメータ推定値の近傍でのみ局所探索すればよい。このようにすれば, 計測にほとんど計算時間を費やす必要はなく, リアルタイムで実行できる。

なお, 最適化に当っては, 先の報告^{3), 4)} 同様, 計算速度の

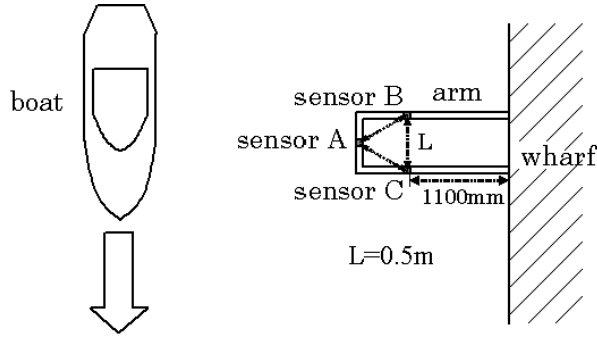


Fig. 3 Relative relation of the sensors and the ship's run in the experiment

早い Powell 法を適用するものとする。

4. 実験および検討

本章では、定常波に非定常波が加わる先の実験データ^{3),4)}に対し、本論文の手法を適用しその有効性を検討する。

4.1 実験

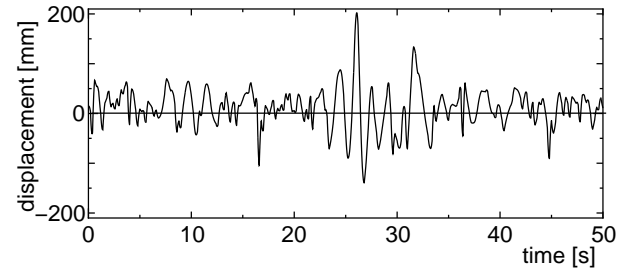
実験の概要を示すため、データ収集の方法および実験データを簡潔に再掲する。Fig. 3 は岸壁に設置した光センサおよびその取り付け台を示す。実験では、岸壁に対し平行にボートを走らせ人工的に波を作り、光センサでそのときの波面の変化を観測した。このとき使用した光センサは O & E 製 OMS-1 で、測距可能範囲 3[m] ~ 30[m]、測距精度 ± 10 [mm] である。そして、センサ間の距離 L は $L = 0.5$ [m]、データ収録のサンプリング周期は 0.2[s] とした。

この実験により得られた海洋波に対するセンサ出力の一例を Fig. 4 に示す。ただし、Fig. 4 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のセンサ生信号の平均値を計算し、この平均値を生信号から差し引くことにより、海洋波の基準面からの変化量として表わしている。Fig. 4 を見ると、3 つのセンサ出力で共に 27[s] 前後で振幅の大きな似通った波が観測される。これは、ボートを走らせたときに生じた非定常波を各センサが観測した結果に他ならない。

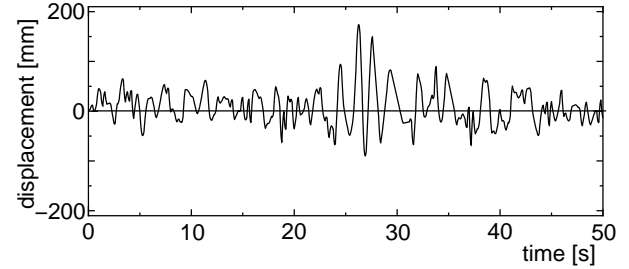
4.2 定常波としての計測結果および検討

本節では、Fig. 4 のセンサ出力に対して、まず波速 V_1 、方位 θ_1 、基本周波数 f_{11} の 3 つのパラメータを未知として、定常波に先に提案の方式^{3),4)}を適用してみる。すなわち、基本周波数の整数倍の周波数を有する 3 つのモード ($n_1 = 3$) で定常波がモデル化できるものとし、データウィンドウ長を 15[s] とし、その開始時刻を 1[s] ずつシフトしつつ波速、方位および基本周波数を計測した結果を Fig. 5 に示す。ただし、カルマンフィルタによる過渡応答を考慮し、データウィンドウ長の後半 50[%] に対してのみ最尤法を適用した。

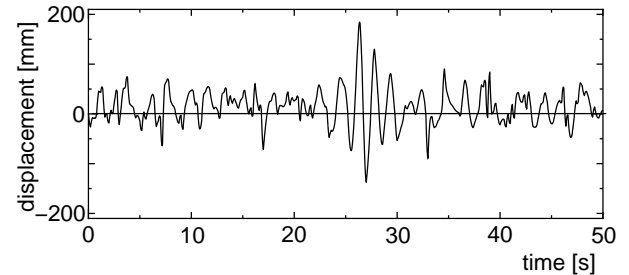
図において横軸は計測を行った時刻、つまりウィンドウの終端時刻を表わす。図より、定常波のみが存在すると考えられる区間 [15, 26][s] の波速、方位、基本周波数の計測結果はそれぞれ時間的にほぼ一定で、その平均値はそれぞれ $V_1^* = 1.3$ [m/s]、



a) output of the sensor A



b) output of the sensor B



c) output of the sensor C

Fig. 4 Signal-processed sensor outputs

$\theta_1^* = 176$ [deg]、 $f_{11}^* = 0.26$ [Hz] となった。また、ボートにより生じた非定常波が現れる区間 [27, 36][s] においては、波速、方位、基本周波数の平均計測結果が、定常波の計測結果と異なり、 $V_1^* = 2.1$ [m/s]、 $\theta_1^* = 108$ [deg]、 $f_{11}^* = 0.31$ [Hz] となった。

非定常波を定常波モデルで表わしたためか、定常波のときに比べ計測結果が時間的に変動していることがわかる。そして、その後 (37[s] 以後) の波速、方位、基本周波数の計測結果は再びほぼ一定となり (平均値は $V_1^* = 1.3$ [m/s]、 $\theta_1^* = 172$ [deg]、 $f_{11}^* = 0.25$ [Hz])、ボートにより生じた非定常波が来る前とほぼ同一の結果となった。

参考のため、時刻 30[s] における計測値に基づく (カルマンフィルタによる) 各センサ出力の推定波形を Fig. 6 に示すが、図より、非定常波の推定が余り良くないことがわかる (特にセンサ A, B)。また、最大尤度の時間変化を Fig. 7 に示すが、図より、非定常波が現れたとき最大尤度の値が急激に低下することがわかる。

4.3 提案手法による計測結果および検討

ここでは、 $n_1 = 3$ 、 $n_2 = 3$ として本論の手法を適用してみる。なお、その他の計測条件は前節と同じである。その結果、得られた波速、方位の計測結果を Fig. 8 に示す。ただし、定常波の未知パラメータについては、本論で述べたように、前

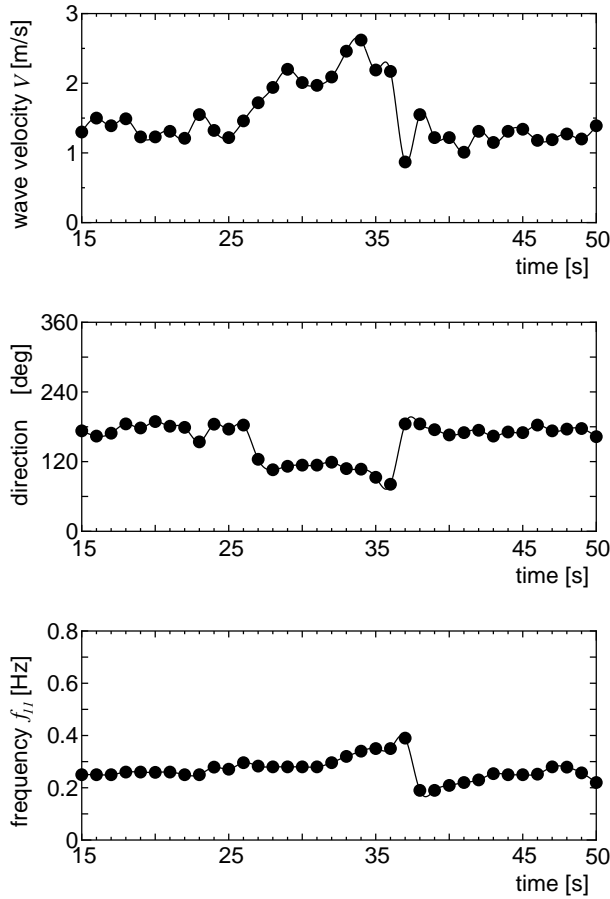


Fig. 5 Measurement results by the stationary wave model ($n_1=3$)

時刻の推定値の近傍で局所探索することにした。

図から、まず区間 [15, 25][s] では定常波、非定常波共にほぼ同一の計測結果が得られた。したがって、この時間帯では定常波のみが存在していることがわかる。

次に、区間 [26, 35][s] に対しては、定常波と非定常波の波速および方位が別々に求められている。このときの計測結果の平均値は、定常波に関しては $V_1^* = 1.0$ [m/s], $\theta_1^* = 176$ [deg] となり、その前の区間 [15, 25][s] の計測結果に比べ、方位については同程度の計測結果が、また波速については 20[%] 程度小さな計測結果が得られている。これは、定常波の振幅がポートによる非定常波に比べ 3 分の 1 程度と小さなものであったため、十分に分離が行えなかったのではないかと考えられる。

また、非定常波に関しては、平均値が $V_2^* = 2.2$ [m/s], $\theta_2^* = 104$ [deg] となり、文献 3), 4) で示された計測結果に近い値が得られている。このときの定常波と非定常波の波速、方位を視覚的にわかりやすく描いたものを Fig. 9 に示す。図において、矢印の長さは波速の大きさを、波線の間隔は波長を表している。

ところで、36[s] 以降は、再び非定常波の計測結果が定常波とほぼ一致しているため、非定常波が消失したものとみら

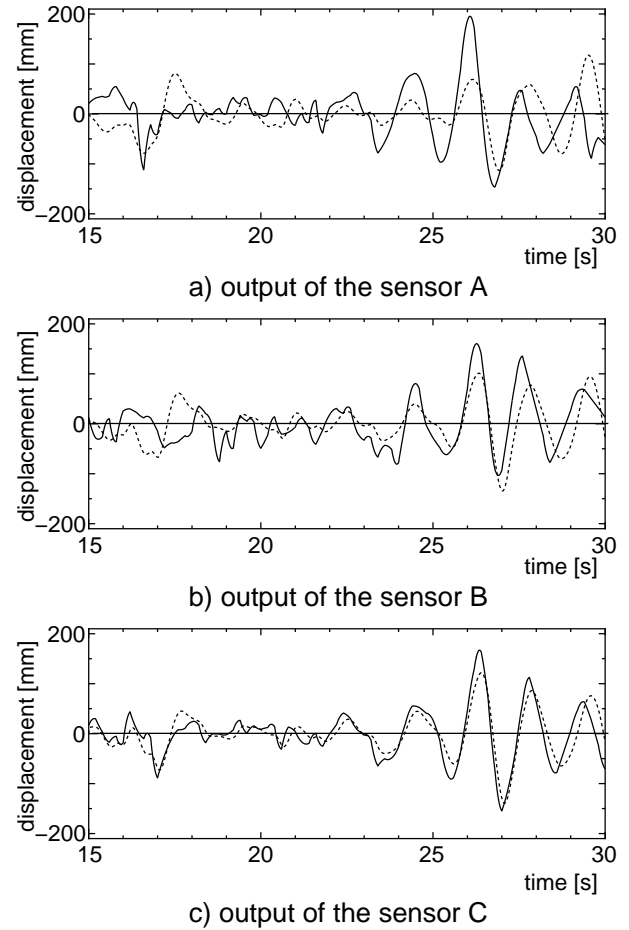


Fig. 6 Sensor outputs (solid lines) and estimated ones (dotted lines) for the stationary wave model ($n_1=3$) in 30 seconds

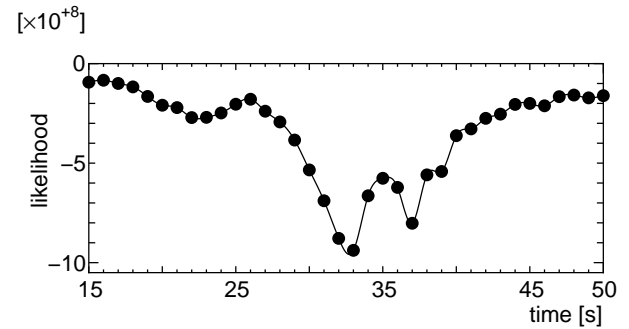


Fig. 7 Likelihood function by the stationary wave model ($n_1=3$)

れる。

以上は波速と方位に関する計測結果であったが、次に参考のため、定常波および非定常波に対する周波数計測結果を Fig. 10 に示す。図から、非定常波の計測結果において、区間 [15, 25][s] および [36, 50][s] の周波数が大体整数倍の関係になっており、かつ定常波のそれにほぼひとしくなっているが、区間 [26, 35][s] では整数倍の関係にはなっておらず、0.6[Hz] 付近の近接した値をとっている。つまり、この時間帯

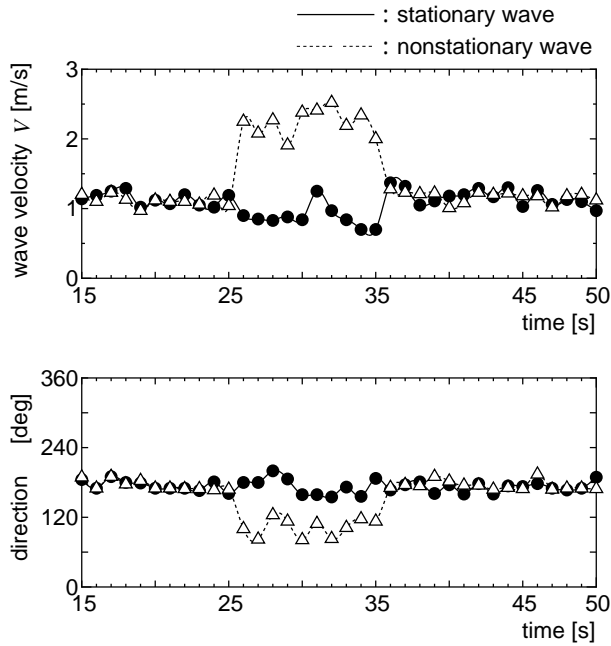


Fig. 8 Measurement results by the proposed method ($n_1 = 3, n_2 = 3$)

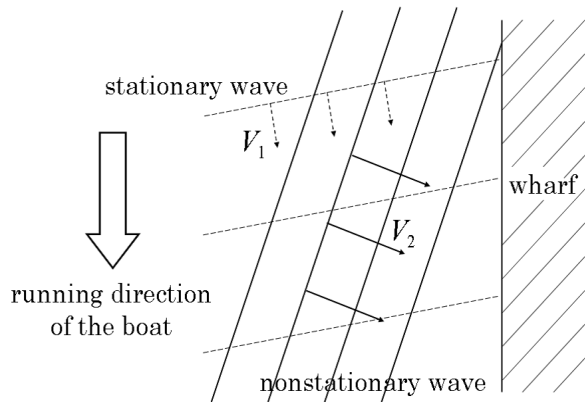


Fig. 9 The directions of the stationary and nonstationary waves

ではうねりを表わすような周波数が計測されており、これはボートからの波を表現したものに他ならない。

参考のため、時刻 30[s] における計測値に基づくカルマンフィルタによる各センサ出力の推定波形を Fig. 11 に示すが、定常波のみとして計測したときの推定波形 (Fig. 6) に比べ、特に 23~30[s] の間の非定常波の箇所が推定が良くなり、提案手法の有効性が確認できる。

また、提案手法による最大尤度と前節で示した定常波モデルによる最大尤度 (Fig. 7) を比較したものを Fig. 12 に示すが、本提案システムを用いることにより、非定常波が検出された箇所においても最大尤度が大幅に増加することが確認できる。ただし、定常波のみが検出された時間帯 ([15, 25][s] および [36, 50][s] の区間) に比べ、まだ少し低下している。これは、非定常波が複雑で $n_2 = 3$ ではまだ完全なモデル化が

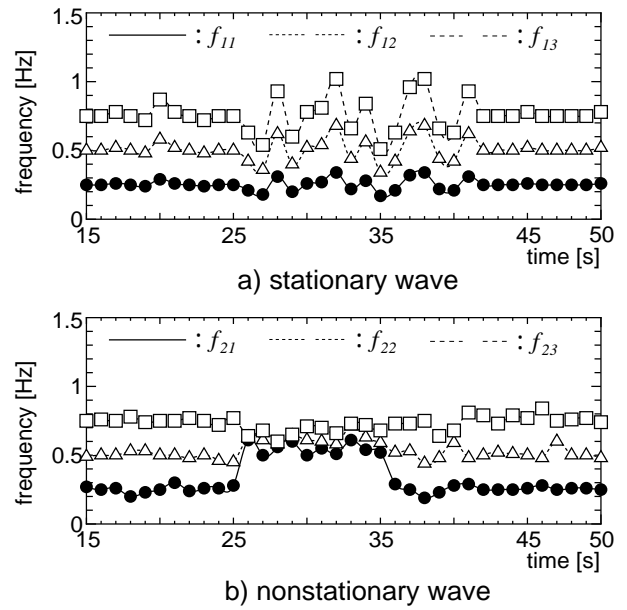


Fig. 10 Measurement results of the frequencies by the proposed method ($n_1 = 3, n_2 = 3$)

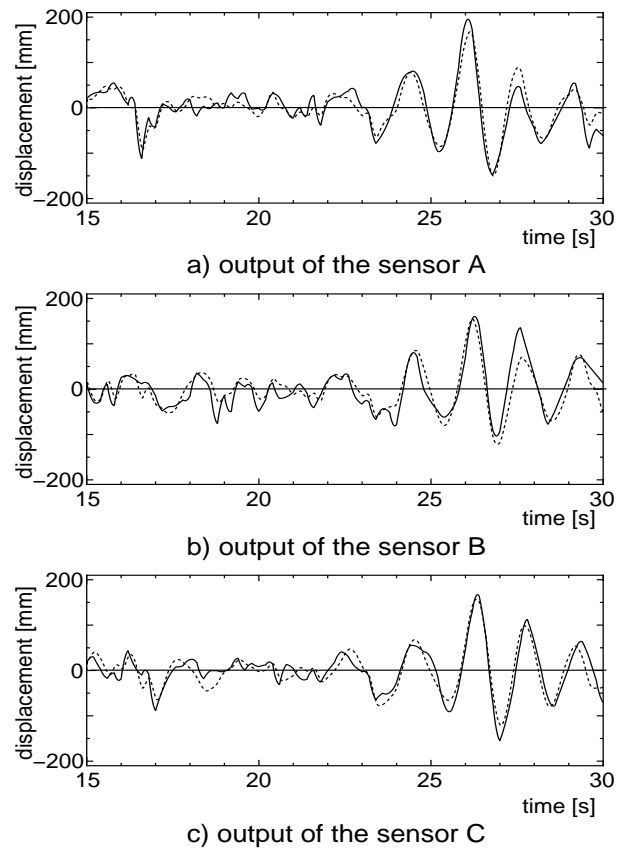


Fig. 11 Sensor outputs (solid lines) and estimated ones (dotted lines) for the proposed method ($n_1 = 3, n_2 = 3$) in 30 seconds

できていないことを示している。しかしながら、リアルタイムで計測するには、余り n_2 を大きくすることは得策ではなく、かつ、この $n_2 = 3$ のモデルでも十分に波速、方位が計

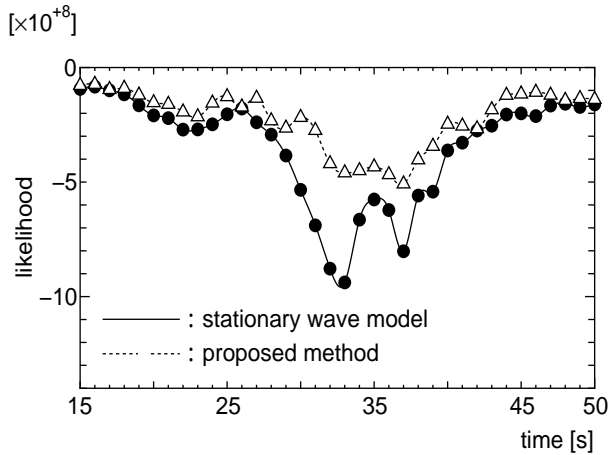


Fig. 12 Likelihood functions by the stationary wave model ($n_1=3$) and the proposed method ($n_1=3, n_2=3$)

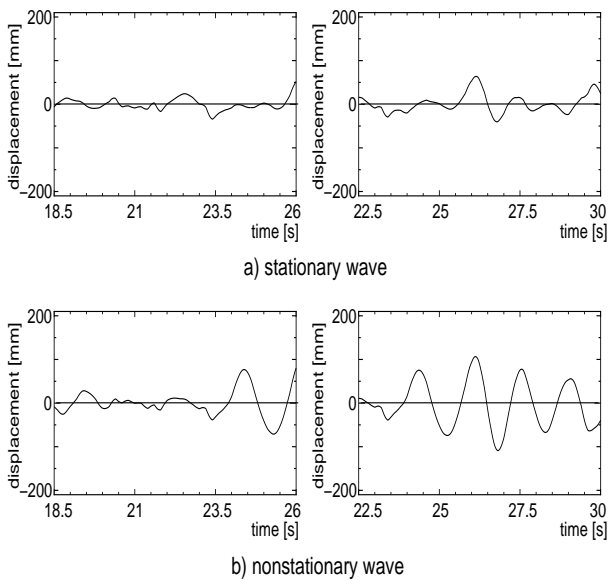


Fig. 13 Estimated stationary and nonstationary waves for the sensor A

測できていることから、これ位の低下は許容できるものと思われる。

以上、定常波、非定常波の分離およびおのおのの波速、方位の計測法を論じたが、最後に、定常波および非定常波の変位の計測について論じる。これらの変位は、それぞれ(2)式で定義した状態ベクトルの前半部分の奇数番目を加えたもの(定常波の変位分)および後半部分の奇数番目を加えたもの(非定常波の変位分)として与えられる。

いま、参考のため 26[s] および 30[s] の時点での過去 7.5[s](データウィンドウ長 15[s] のうち最尤法を適用した後半 50[%])の定常波および非定常波の推定波形を描いたものが Fig. 13 である。なお、時刻 26[s] は本提案方式で非定常波が検出された最初の時刻である (Fig. 8 参照)。図より、定常波の推定波形は時間的にほとんど変化していないのに対し、非定常波のほうはボートの波が加わったと考えられる時間帯

[24, 26][s] において振幅が大きく変化している。よって、提案システムでは非定常波が到来した初期の段階でも非定常波の到来が明確に検知されることがわかる。また、このときの非定常波の波速・方位の計測結果はそれぞれ $V_2^*=2.3[\text{m/s}]$, $\theta_2^*=100[\text{deg}]$ であり, Fig. 8 で非定常波が検出された区間 [26, 35][s] における平均計測結果 $V_2^*=2.2[\text{m/s}]$, $\theta_2^*=104[\text{deg}]$ に近い値となっており、波速、方位に関しても初期段階で高精度な計測が行われることがわかる。

ところが、時刻 30[s] では、先ほどとは異なり、非定常波が大きくなるとして全容が観測できる。なお、このとき定常波においても 26[s] 付近で振幅が少し大きくなっている箇所があるが、これは $n_2=3$ の非定常波モデルでは推定しきれなかった変位分を定常波で調整したためと考えられる。この時間帯での定常波の波速が、それ以前のものに対して 20[%] 程度変化してしまったのも、これに起因する。

本論文では、ポートにより突発的な短期間の非定常波を作ったが、実際には大型船舶の航行などにより、もっと長期間の非定常波が発生することもあるため、これらの非定常波の振幅が小さい段階でその後に来るであろう大きな非定常波の到来を早期に検知し、かつその波速、方位を高精度に計測し、他の船舶に通報できる本システムは有効であると思われる。

なお、非定常波の検出の速さに関しては、Fig. 8 の波速、方位の計測結果を参考にする方法では 26[s] 位の時点であるが、定常波モデルと提案法の二つの方式の最大尤度の差をモニターすれば(つまり、提案法と定常波モデルの最大尤度の差をみる方式を採れば)、数 s 程度速められることがわかる (Fig. 12 参照)。よって、本システムの適用に当たっては、提案方式だけでなく、定常波モデルによる最大尤度も合わせて求めることが望まれる。

また、検出を速める別のアプローチとしては、データウィンドウ長をもっと短くすることも考えられる。詳細については省くが、データウィンドウ長を 15[s] から 8[s] にしても、波速に関しては 10[%] 程度、方位に関しては 5[deg] 程度異なる結果が得られたが、定常波と非定常波の分離は行うことができ、かつ、非定常波の検知時刻は先の方式による 26[s] に比べ 21[s] に速められるので、非定常波の到来をもっと早く検知できる。なお、データウィンドウ長を 15[s] とした当初の提案方式では、波速・方位を 1[s] 置きに計測しているが、Dell Japan 製 XPS 730x(CPU: インテル(R) Core(TM) i7-940 プロセッサ、メモリ: 6GB) によれば 0.5[s] 程度で計測可能である。

5. 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、かつセンサ出力をダイナミックシステムの出力としてモデル化し、これにカルマンフィルタ、最尤法を適用することにより、定常波および非定常波の分離およびこれらの波速、方位、変位を計測する手法を提案した。そして、実験により、船舶の航行などにより生じる不規則な非定常波が定常

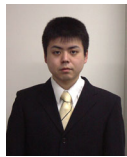
波に重畳した場合にも，リアルタイムでこれらの波速，方位，変位を分離して計測できることを確認した．

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) 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，方位および波高計測，計測自動制御学会産業論文集，7，つぎの1，1/8（2008）
- 5) 田中正吾：計測システム工学，朝倉書店（1994）
- 6) 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



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非正常海洋波の波速，方位および変位計測の研究に従事．

三 吉 翔 三（学生会員）



2008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非正常海洋波の波速，方位および変位計測の研究に従事．

山 根 健 治（正会員）



1974年，九州大学大学院機械工学専攻修士課程修了．同年4月同大学助手．1976年4月宇部工業高等専門学校講師を経て，1979年4月同校助教授．1998年同校制御情報工学科教授，現在に至る．1995年3月山口大学大学院博士後期課程システム工学専攻修了．位置・形状・力量量などに関する計測システムおよび異常診断システムに関する研究に従事．博士（工学）．日本機械学会，電気学会などの会員．

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．