オメガと推測航法によるハイブリッド航法

阿部 眞治*・田中 鉄一*・西 周次**

The Hybrid Navigation Combining Omega and Dead Reckoning

Shinji ABE, Eiichi TANAKA and Shuji NISHI

Abstract

A hybrid navigation system combining Omega navigation and dead reckoning was proposed here, and its data processing algorithm by means of Kalman filter was shown. Also, various simulations were carried out and these results were shown here.

As the main result of the simulations, the position error of the hybrid navigation after one hour sailing was 0.8 n. m., on condition that the ocean current was 3 knots. This value was nearly equal to 1/5 of dead reckoning (4.31 n. m.), and to 1/6 of Omega navigation (4.68 n. m.).

1. ま え が き

NNSS は精度がよく、かつ全世界的な有効範囲をもっているため、現在大洋航海中の船舶に多く利用されている。しかし、その測位間隔は平均約 1.5 時間もあり、その間の船位は通常推測航法により求められているが、海流や風などの外乱のため時間と共に誤差が増大する欠点がある。この欠点を補うため、推測航法と他の電波航法を組み合わせたハイブリッド航法の研究はいくつか行なわれ、一部は実用に供されているが、著者らはこの推測航法に NNSS と同じ全世界的な有効範囲をもち、かつ連続して使用できるオメガを組み合わせ、カルマンフィルタによって計算処理を行ない測位精度の向上をはかることを試みた。

今迄は、オメガと他の航法システムを組み合わせる場合には、ある時点で得られたオメガの補正値を次の測位を行う時間まで一定であると仮定して計算を行なっている場合が多い。しかし、オメガを一種の対地速度センサとして用い、これで推測航法の精度を改善しようとする場合には、オメガ補正値の傾斜（変化分）に注目し、あらかじめわかる範囲内でこの値をフィルタ計算に入れる必要がある。本論文においては、オメガ補正値の傾斜をピアースモデルを用いて計算し、この値を各サンプリング時間ごとに入力することにより、通常のオメガと推測航法では得られない測位精度を得ることができた。

まず、オメガと推測航法とを組み合わせたハイブリッド航法にカルマンフィルタを適用するための計算式を示し、実際の航行条件について計算機を用いたシミュレーションを行ない、船位、船速等の誤差が推測航法またはオメガ航法単独の場合に比べてどのように改善されるかを検討する。

2. カルマンフィルタによる計算方法

オメガと推測航法によるハイブリッド航法にカルマンフィルタを適用するため、文献(1)を参照して状態ベクトル $\mathbf{X}$ を次のように定義した。

$$\mathbf{X} = [P_x, P_y, D_x, D_y, C_1, C_2, e_1, e_2]^T \quad (1)$$

上式において、 P は船位（ラジアン）、 D は対地船速の誤差（ラジアン/分）であり、大部分は海流によるものであるが、風やコンパス及びログの誤差も含む。 C はオメガの補正値（レーン）、 e はオメガ補正値の傾斜値のもつ誤差で各サンプリング時間における観測値の傾斜と入力する補正値の傾斜の差（レーン/分）である。なお、各変

* 正会員 東海大学（静岡県清水市折戸1000）

** 正会員 電子航法研究所（三鷹市新川6-38-1）

数の添字のうち、 x は経度方向、 y は緯度方向、また1, 2はオメガの2つのペアを示している。

次に状態ベクトル $\mathbf{X}$ の微分方程式は式(2)のようになる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{f} + \mathbf{n} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_y \\ \dot{D}_x \\ \dot{D}_y \\ \dot{C}_1 \\ \dot{C}_2 \\ \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/T_{dx} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T_{dy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/T_{e2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_x \\ P_y \\ D_x \\ D_y \\ C_1 \\ C_2 \\ e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ 0 \\ 0 \\ g_1 \\ g_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ n_{dx}/T_{dx} \\ n_{dy}/T_{dy} \\ 0 \\ 0 \\ n_{e1}/T_{e1} \\ n_{e2}/T_{e2} \end{pmatrix} \quad (2)'$$

上式で $\mathbf{F}$ は 8×8 の行列で T_d は海流等船速の誤差 D の時定数、 T_e は補正値の傾斜の誤差 e の時定数である。 $\mathbf{f}$ は各サンプリング時間ごとに入力するベクトルであり、ここで V は電磁ログ、ジャイロコンパスで決まる見かけの船速(ラジアン/分)、 g は既に発表されているデータから得られるオメガの補正値の傾斜(ここではピアースモデルを使って計算した、レーン/分)、また外乱を表わす $\mathbf{n}$ 行列の n_d , n_e は船速、傾斜値に含まれるホワイトノイズである。

図1は清水市において昭和54年9月26~27日に観測したオメガのA-C及びA-Eペアの日変化曲線を、ピアースモデルによる計算式及びPPC表により求めた日変化の予測値と比較して示したものである。この図からわかるように、予測値は観測値と値そのものは異なるが、その変化の傾向がよく似ていることがわかる。従って、この補正値の予測値の傾斜を計算式に入れることによって、測位精度を上げることが期待できる。式(2)'においてオメガ補正値の予測値の傾斜 g_1 , g_2 を用いているのはそのためである。

次にカルマンフィルタの計算に用いる各行列について説明する。

遷移行列 Φ は式(2)を用いて次のように定義される。

$$\Phi = e^{\mathbf{F}t} = \mathbf{I} + \mathbf{F}t + \frac{1}{2!}(\mathbf{F}t)^2 + \frac{1}{3!}(\mathbf{F}t)^3 + \dots \quad (3)$$

式(3)で $\mathbf{I}$ は単位行列(8×8)、 t はサンプリング時間である。これを解くと、

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & T_{dx}(1-M) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & T_{dy}(1-N) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & T_{e1}(1-A) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & T_{e2}(1-B) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{pmatrix} \quad (3)'$$

ここで、 $M = e^{(-1/T_{dx})t}$, $N = e^{(-1/T_{dy})t}$, $A = e^{(-1/T_{e1})t}$, $B = e^{(-1/T_{e2})t}$ である。

外乱の共分散行列 $\mathbf{Q}$ は次式で定義される。

$$\mathbf{Q} = \int_0^t \Phi(\tau) \cdot \mathbf{E}[\mathbf{n}(\tau) \cdot \mathbf{n}^T(\tau)] \cdot \Phi^T(\tau) \cdot d\tau \quad (4)$$

図1 オメガの日変化曲線の実測値と予測値の比較

式(4)で、 $\mathbf{E}[\]$ は括弧内の値の期待値を表わし、 $\mathbf{n}$ は式(2)' に示されている。これを解くと、 $\mathbf{Q}(8 \times 8)$ は次の要素以外は全て0である。

$$Q(1, 1) = \sigma_{dx}^2 \cdot T_{dx} \cdot (2t - T_{dx} \cdot (1-M) \cdot (3-M))$$

$$Q(2, 2) = \sigma_{dy}^2 \cdot T_{dy} \cdot (2t - T_{dy} \cdot (1-N) \cdot (3-N))$$

$$Q(1, 3) = \sigma_{dx}^2 \cdot T_{dx} \cdot (1-M)^2$$

$$Q(2, 4) = \sigma_{dy}^2 \cdot T_{dy} \cdot (1-N)^2$$

$$Q(3, 3) = \sigma_{dx}^2 \cdot (1-M^2)$$

$$Q(4, 4) = \sigma_{dy}^2 \cdot (1-N^2)$$

$$Q(5, 5) = \sigma_{e1}^2 \cdot T_{e1} \cdot (2t - T_{e1} \cdot (1-A) \cdot (3-A))$$

$$Q(6, 6) = \sigma_{e2}^2 \cdot T_{e2} \cdot (2t - T_{e2} \cdot (1-B) \cdot (3-B))$$

$$Q(5, 7) = \sigma_{e1}^2 \cdot T_{e1} \cdot (1-A)^2$$

$$Q(6, 8) = \sigma_{e2}^2 \cdot T_{e2} \cdot (1-B)^2$$

$$Q(7, 7) = \sigma_{e1}^2 \cdot (1-A^2)$$

$$Q(8, 8) = \sigma_{e2}^2 \cdot (1-B^2)$$

$$Q(3, 1) = Q(1, 3), \quad Q(4, 2) = Q(2, 4)$$

$$Q(7, 5) = Q(5, 7), \quad Q(8, 6) = Q(6, 8)$$

ここで、 σ_d は船速の誤差 D の標準偏差、 σ_e は傾斜の誤差 e の標準偏差であり、添字の意味、他の変数は前と同じである。

観測ベクトル $\mathbf{Z}$ は次のようになる。

$$\mathbf{Z} = [l_1, l_2]^T \quad (5)$$

ここで、 l_1, l_2 は2つのオメガ局の組み合わせの観測値(レーン)である。従って、観測値の共分散行列 $\mathbf{R}$ は次のように定義される。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{l1}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{l2}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで、 σ_l は各ペアの観測値のバラツキの標準偏差である。

次に、観測ベクトル $\mathbf{Z}$ と状態ベクトル $\mathbf{X}$ との関係を示す行列 $\mathbf{H}$ は、文献(2)、(3)を参照して次のように定義した。ここでは、地表面の観測点における座標軸のうち経度方向を e 、緯度方向を n 、地球中心を原点とする互いに直交する座標軸を x, y, z として説明する。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \partial l_1 / \partial P_e & \partial l_1 / \partial P_n & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \partial l_2 / \partial P_e & \partial l_2 / \partial P_n & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 $H(1, 1), H(1, 2), H(2, 1), H(2, 2)$ は船位の単位距離当りのオメガチャートレーン変化量を経度方向、緯度方向について計算したもので、以下にその求め方を示す。

ここで、地球中心を原点にとりA、B点を2つのオメガ局の位置、P点を観測位置とすると、図2に示すように $\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_P$ はそれぞれA、B、Pにおいて地球中心から天頂方向へ向かう単位ベクトル、 $\bar{U}_e, \bar{U}_n$ は座標軸 e, n 方向へ向かう単位ベクトルであり、また $\bar{U}_{AP}, \bar{U}_{BP}$ はそれぞれP点におけるA、B局よりP点に向かう大円にそって単位ベクトルである。 D_1 をレーン値 l_1 に相当する距離差とすると、

$$\begin{cases} \partial D_1 / \partial P_e = (\bar{U}_{AP} - \bar{U}_{BP}) \cdot \bar{U}_e \\ \partial D_1 / \partial P_n = (\bar{U}_{AP} - \bar{U}_{BP}) \cdot \bar{U}_n \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \bar{U}_{AP} = \cot \theta_{AP} \cdot \bar{U}_P - \operatorname{Cosec} \theta_{AP} \cdot \bar{U}_A \\ \bar{U}_{BP} = \cot \theta_{BP} \cdot \bar{U}_P - \operatorname{Cosec} \theta_{BP} \cdot \bar{U}_B \end{cases} \quad (9)$$

上式で、 $A \rightarrow P$ 間、 $B \rightarrow P$ 間の角距離 θ_{AP}, θ_{BP} は、

$$\begin{cases} \theta_{AP} = \cos^{-1}(\bar{U}_A \cdot \bar{U}_P) \\ \theta_{BP} = \cos^{-1}(\bar{U}_B \cdot \bar{U}_P) \end{cases} \quad (10)$$

で表わされる。

ここで、

A_λ, A_φ ; オメガ局Aの緯度、経度

B_λ, B_φ ; オメガ局Bの緯度, 経度

P_λ, P_φ ; 観測点Pの緯度, 経度

とすると,

$$\begin{cases} U_{Ax} = \cos A_\varphi \cdot \cos A_\lambda \\ U_{Ay} = \cos A_\varphi \cdot \sin A_\lambda \\ U_{Az} = \sin A_\varphi \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} U_{Bx} = \cos B_\varphi \cdot \cos B_\lambda \\ U_{By} = \cos B_\varphi \cdot \sin B_\lambda \\ U_{Bz} = \sin B_\varphi \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} U_{Px} = \cos P_\varphi \cdot \cos P_\lambda \\ U_{Py} = \cos P_\varphi \cdot \sin P_\lambda \\ U_{Pz} = \sin P_\varphi \end{cases} \quad (13)$$

となるので,

$$\begin{cases} \theta_{AP} = \cos^{-1} (U_{Ax} \cdot U_{Px} + U_{Ay} \cdot U_{Py} + U_{Az} \cdot U_{Pz}) \\ \theta_{BP} = \cos^{-1} (U_{Bx} \cdot U_{Px} + U_{By} \cdot U_{Py} + U_{Bz} \cdot U_{Pz}) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_{APx} = \cot \theta_{AP} \cdot U_{Px} - \operatorname{cosec} \theta_{AP} \cdot U_{Ax} \\ U_{APy} = \cot \theta_{AP} \cdot U_{Py} - \operatorname{cosec} \theta_{AP} \cdot U_{Ay} \\ U_{APz} = \cot \theta_{AP} \cdot U_{Pz} - \operatorname{cosec} \theta_{AP} \cdot U_{Az} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_{BPx} = \cot \theta_{BP} \cdot U_{Px} - \operatorname{cosec} \theta_{BP} \cdot U_{Bx} \\ U_{BPy} = \cot \theta_{BP} \cdot U_{Py} - \operatorname{cosec} \theta_{BP} \cdot U_{By} \\ U_{BPz} = \cot \theta_{BP} \cdot U_{Pz} - \operatorname{cosec} \theta_{BP} \cdot U_{Bz} \end{cases} \quad (16)$$

また,

$$\begin{cases} U_{ex} = -\sin \lambda \\ U_{ey} = \cos \lambda \\ U_{ez} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} U_{nx} = -\sin \varphi \cdot \cos \lambda \\ U_{ny} = -\sin \varphi \cdot \sin \lambda \\ U_{nz} = \cos \varphi \end{cases} \quad (18)$$

よって,

$$\begin{cases} \partial D_1 / \partial P_e = (U_{APx} - U_{BPx}) \cdot U_{ex} + (U_{APy} - U_{BPy}) \cdot U_{ey} + (U_{APz} - U_{BPz}) \cdot U_{ez} \\ \partial D_1 / \partial P_n = (U_{APx} - U_{BPx}) \cdot U_{nx} + (U_{APy} - U_{BPy}) \cdot U_{ny} + (U_{APz} - U_{BPz}) \cdot U_{nz} \end{cases} \quad (19)$$

$$\therefore \begin{cases} \partial l_1 / \partial P_e = (\partial D_1 / \partial P_e) / \lambda_0 \\ \partial l_1 / \partial P_n = (\partial D_1 / \partial P_n) / \lambda_0 \end{cases} \quad (20)$$

ただし, λ_0 はオメガ電波の波長 (29.468km) である。

以上のように各行列を定義すると, カルマンフィルタの計算式は次のようになる。

$$\mathbf{X}'_k = \Phi \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{f}t \quad (21)$$

$$\mathbf{P}'_k = \Phi \mathbf{P}_{k-1} \Phi^T + \mathbf{Q} \quad (22)$$

$$\mathbf{G}_k = \mathbf{P}'_k \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}'_k \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (23)$$

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}'_k + \mathbf{G}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \mathbf{X}'_k] \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}'_k - \mathbf{G}_k \mathbf{H} \mathbf{P}'_k \quad (25)$$

式(21)~(25)で k は各時間のステップを表わし, k' は $k-1$ で推定した k の時間の状態を示す。

3. シミュレーションの条件とデータの作成

3.1 シミュレーションの条件

2.において構成したハイブリッド航法を評価するため, 下記の条件により計算機を用いてモンテカルロシミュレーションを行なった。

(1) 船はある固定点より, 対水針路 45° , 対水速力12ノットで1時間航走するものとし, かつ, この間一定の強さ

図2 オメガの幾何学モデル

の海流を受けるものとする。なお、この海流の方向と大きさは統計的にランダムに変化すると考えられるので、経度方向と緯度方向別に正規乱数を発生させて合成した。

(2) σ_d と T_d には経度方向と緯度方向、 σ_b 、 T_e 、 σ_e にはオメガのペアによる相異が考えられるがここでは同一とした。

(3) サンプルング時間は1分間とした。

3. 2 オメガデータの作成

3. 1(1)の条件で船が航走中に受信するオメガ観測データは次により求めた。

(1) 3.1 (1)の条件より決まった対地針路、速力による1分ごとの船位の変化に対するレーン変化量を求め、これを固定点(清水市 $34^{\circ}-59'.2N$, $138^{\circ}-31.1E$)での各時刻に対応するオメガ観測値に加えた。

(2) 固定点でのオメガ観測データにはいくつかの組み合わせが考えられたが、ここではA-C, A-Eペアを選び各ペアを1分ごとに24時間観測した(図1参照)。そして、これを1時間毎に区切り24組にまとめた。

4. シミュレーションによる検討結果

4. 1 最適条件の検討

上記により各データを作成し計算を行なった。計算に当っては σ_e 、 σ_b 、 T_e 、 σ_d の各値を変化させて100回のモンテカルロシミュレーションを行ない船位を求めた。ただし、ここでは海流の大きさ及び方向は1時間の間一定と仮定しているので、その時定数 T_d は 1×10^5 分として計算した。各変数を変化させた場合の計算結果を表1~5に示す。結果は1時間後の真値(3.1 (1)による計算値)からのずれをRMS値(n.m)で表わしている。

(1) 条件1の場合(表1)

表1. オメガ補正值の傾斜値の誤差の標準偏差 σ_e を変化(σ_d , T_e , σ_b は一定)させたときの位置誤差

σ_e (cel/分)	0.05	0.1	0.2	0.4
位置誤差(マイル)	0.800	0.780	0.777	1.092

表4. 船速の誤差の標準偏差 σ_d を変化(σ_e , T_e , σ_b は一定)させたときの位置誤差

σ_d (ノット)	1	2	3
位置誤差(マイル)	0.719	0.769	0.777

表2. オメガ観測値の誤差の標準偏差 σ_b を変化(σ_d , σ_e , T_e は一定)させたときの位置誤差

σ_b (cel)	2	5	10
位置誤差(マイル)	0.803	0.777	0.783

表5. 推測航法のみ($\sigma_b=100$ レーン)の位置誤差

σ_d (ノット)	1	2	3
位置誤差(マイル)	1.457	2.914	4.310

表3. オメガ補正值の傾斜値の時定数 T_e を変化(σ_d , σ_e , σ_b は一定)させたときの位置誤差

T_e (分)	1	8	15	30
位置誤差(マイル)	0.793	0.768	0.777	0.807

σ_e の値を0.05, 0.1, 0.2 cel/分と変化させても位置誤差にほとんど差がなかったが、0.2 cel/分が1番小さかった。0.4 cel/分になると位置誤差が急に大きくなった。

たので、 σ_e の最適値を0.2 cel/分と決定した。

(2) 条件2の場合(表2)

σ_b の値を2, 5, 10 celと変化させても位置誤差に大きな差はなかったが、5 celが一番小さかったので σ_b の最適値を5 celと決定した。

(3) 条件3の場合(表3)

T_e の値を1, 8, 15, 30分と変化させても位置誤差に大きな差がなく、数値的には8分が一番小さい値であったが、ここでは計算の都合上15分を最適値とした。

(4) 条件4の場合(表4)

σ_d の値を1, 2, 3 ノットと変化させた時(同時にシミュレーションで入れる海流の大きさも変化する。), 位置誤差は0.719, 0.769, 0.777 n.mと変化した。一般に海流の強い場所では3ノットの海流は十分に考えられるので、 σ_d の値は3ノットと決定した。

(5) 条件5の場合(表5)

これは、 σ_b の値を100レーンすなわち、オメガ観測値がない場合で、推測航法だけの場合と同じ条件の位置誤差である。この位置誤差によりシミュレーションに用いた海流の大きさが正しかったかどうか分かる。

以上の結果として、本航法では $\sigma_d = 3$ ノット, $T_d = 1 \times 10^5$ 分, $\sigma_e = 0.2$ cel/分, $T_e = 15$ 分, $\sigma_i = 5$ cel を最適条件とした。これらの値をもとにあらためて 500 回のシミュレーションを行なった。

4. 2 最適条件による結果

カルマンフィルターの計算式(2)の P により求まる誤差の理論値とシミュレーションにおける最確値の真値からのずれを状態ベクトルの各変数について求めたのが図 3～6 である。図 3 と 4 は距離誤差を経度方向と緯度方向について示し、図 5 と 6 は同じく船速の誤差について示している。また図では理論値は全て実線で表わしシミュレーションによる値は破線で表わした。

図 3 オメガ/推測航法ハイブリッド航法の経度方向距離誤差

図 4 オメガ/推測航法ハイブリッド航法の緯度方向距離誤差

図 5 ハイブリッド航法の経度方向船速誤差

図 6 ハイブリッド航法の緯度方向船速誤差

シミュレーションによる値を破線で表わした。図からわかる通り値はほぼ一致しており、本研究に用いたカルマンフィルターの計算式及びシミュレーションの条件が適当であることがわかった。シミュレーションによる誤差の方が理論値よりも多少小さくなっているのは、本研究に用いた A-C, A-E ペアの観測値の日変化と、ピアースモデルにより求めた補正值の日変化とが設定した条件よりもよく合っていたためと考えられる。

次に、500 回のシミュレーションの結果を図 7 に示す。これは 500 回のうち 5 回目ごとに 100 点をプロットしたものである。図に円で示した位置誤差（以下全て RMS 値）は 0.80 n.m. であった。図 8 は $\sigma_i = 100$ レーンとし

図 7 オメガ/推測航法ハイブリッド航法による位置誤差

図 8 推測航法のみによる位置誤差

図9 オメガ航法（市販PPC表）による位置誤差 図10 オメガ航法（ピアースモデル）による位置誤差で推測航法と同じ条件にしたものを上と同じようにプロットしたものである。円で示した位置誤差は 4.31n.m であった。これらと比較するために、オメガのみにより位置を求めた結果を図9と10に示す。オメガ観測値は本研究に用いた固定点での24時間の観測値のうち、3分ごとの計480個を用いた。市販のPPC表を用いて位置を求めたものが図9であり、ピアースモデルの補正值により位置を求めたのが図10である。両方とも480個の内100点のみをプロットしてある。円で示した位置誤差は前者が 4.68n.m, 後者が 3.66n.m であった。

以上の位置誤差の結果を比較すると、オメガ／推測航法ハイブリッド航法の場合は、推測航法のみの場合に比べて約 $\frac{1}{6}$, オメガのみの場合（市販のPPC表）に比べて約 $\frac{1}{6}$ に精度が改善されていることがわかる。

4.3 オメガデータにブランクがある場合

次に、航法中にオメガデータが何らかの理由で得られなくなった場合についてシミュレーションを行なった。シミュレーションの条件は前節と同じであり、ブランクの時間は $\sigma_t=100$ レーンとして、この間は推測航法のみになるようにした。まず最初に、実際のシミュレーションにおける誤差が理論値と一致しているかどうかを確かめたのが図11である。図において実線は開始から30分間ブランクがある場合の理論値を示し、シミュレーションによる誤差を破線で示してある。この図より、シミュレーションによる値が理論値とよく一致しているので、こ

図11 ブランクのある場合のシミュレーション結果（緯度方向）

図12 オメガ観測値にブランクがある場合の理論値（10分～30分）

図13 オメガ観測値にブランクがある場合の理論値（20分～40分）

図14 オメガ観測値にブランクがある場合の理論値（30分～50分）

ここで構成したカルマンフィルタの計算式及びシミュレーションの条件が適当であることがわかった。従って、以下の検討は理論値のみで行なった。

航法中に20分間のブランクがある場合の緯度方向の距離誤差について理論値を調べたのが図12~14である。それぞれ図12は航法を開始してから10分後、図13は20分後、図14は30分後から20分間ブランクがある場合である。図において実線はブランクのない場合であり、破線はブランクがある場合である。図から明らかなように、いずれもブランクの期間誤差が増大するが再びオメガ観測値が入力される ($\sigma_t = 5 \text{ cel}$) と、急激に誤差が小さくなり、約5分後には実線に重なる。また、ブランクの生じる前の航法の時間の長さによって、ブランクが生じた場合の実線からのずれの大きさが変わり、図12では0.4n.m、図13では0.16n.m、図14では0.14n.m 誤差が増大する。航法の時間が長いほど誤差が小さいが、その訳は、この期間に船速の値が次第に正確になるためである。この条件では、航法の時間が20分以上あると、ずれの大きさがあまり大きくならないことがわかった。

5. あとがき

シミュレーションによる検討結果より、オメガと推測航法を組み合わせたハイブリッド航法について次のような結論を得た。

- (1) 本ハイブリッド航法によると、最適条件下で海流が3ノットで、1時間航行後の船位誤差として約0.80n.m. が得られた。この値は推測航法のみによる位置誤差に対し約 $\frac{1}{6}$ 、また通常の市販のPPC表を用いたオメガのみによる位置誤差に対しては約 $\frac{1}{6}$ に近い改善度であった。
 - (2) オメガデータ入力に20~30分ブランクが生じても出発点の位置と出発時間のオメガ観測値がはっきりしていれば、それが何時起きても元の精度に戻るまで余り時間がかからないこと、及び出発後ある程度時間が経過しておれば、誤差があまり大きくならないことがわかった。
 - (3) オメガ観測値の補正值の計算にピアースモデルによる傾斜値を取入れたが、かなり補正值の持つ固定誤差を排除するのに効果があったと考えられる。
- しかし、今回のオメガデータとしては時間の都合で、特定の場所、時期、ペア等でしか検討できなかったの
で、今後多くのオメガデータにより、本方法をさらに広範囲に適用できるように検討する必要がある。
- (4) 本研究では、1時間の間一定な方向と強さの海流があると仮定したが、海流の方向と強さが一定でない場合についても研究する必要がある。
 - (5) 今後本ハイブリッド航法に実際の船上で採取したデータを適用し評価試験を行ない、改善を加える必要がある。

参 考 文 献

- (1) A. E. Bryson Jr. and J. C. Bobick : Improved Navigation By Combining VOR/DME Information and Air Data, J. AIRCRAFT VOL. 9, No. 6, 1972
- (2) 西 周次 : カルマンフィルタの航法への応用-II 日本航海学会誌 第54号 1977. 12
- (3) 西 周次 : カルマンフィルタの NNSS への応用 (第3報) 電子航法研究所研究発表会 第7回 1975. 6
- (4) Kasper, J. F., Jr., "OMEGA Utilization for Non-Military Subscribers, Volume I of II" The Analytic Sciences Corporation, TR-192-2, Jan. 1971

質 疑 応 答

樽美幸雄 : シミュレーションの計算では流向、流速を仮定しておられるようだが、現実の問題としては、これらの値の推定が最も困難であると思う。推定した流向、流速の誤差範囲というか、その変化幅をある程度見積った状態での計算を是非やっていただきたい。

阿部真治 : ここで正規乱数により求めた海流は、実際に航行中に受信するオメガ観測データを得るために作成したものです。このハイブリッド航法の出発時点では、海流や風等による対地船速の誤差はわからないとしていきますので、状態ベクトル $\mathbf{X}$ の初期値の D_x と D_y には0を入れ、その誤差の標準偏差として3ノットを入れています。

佐々木幸康 : 風向、風力と船の針路に対して、船首方位が原針路とある角度をなすことも考えられますが、この

点についてお尋ねします。

阿部真治：今回は、固定点でのオメガ観測データによりシミュレーションを行なったので、海流や風等による対地船速の誤差を1つにまとめています。今後、実際に航行中に観測したデータにより行なう予定ですので、その時に、御指摘の件について考えたいと思います。

大久保 博：実際の観測データの場合、流向、流速の誤差はホワイトではなくカラーであると考えられるが、何か研究されていますか。

阿部真治：今回は、対地船速の誤差として、海流や風等を考えて、1つにまとめシミュレーションに入れ、この誤差の入力がホワイトであり、それが船速にある時定数をもって影響を及ぼすと考えました。詳しいことは、実際の航行中に得たデータで行う時には、考えてみたいと思います。