オメガ／NNSSハイブリッド航法への カルマンフィルタの応用

西 周 次* 木 村 小 一*

An Application of Kalman Filtering to Omega/NNSS Hybrid Navigation

Shuji NISHI and Koichi KIMURA

Abstract

Omega and Navy Navigation Satellite System have been increasing utility value in the electronic sea navigation field.

Both systems have global coverage but individual merit and demerit.

The former has unrestricted user time while the latter has high position fix accuracy as merit.

Contrary to this character, the former has low position fix accuracy while the latter has restricted user time as demerit.

In order to correct these opposit demerits, we propose here Omega/NNSS hybrid navigation system with data processing by Kalman filtering in which Omega works as velocity sensor every two minutes.

The paper describe construction of the hybrid navigation, calculation procedure of the position fix by Kalman filtering and simulation of the system assuming various noises.

Results of Monte Carlo simulation showed that 50~80% accuracy improving is feasible in proposed system compared with normal NNSS position fix method.

1. ま え が き

NNSSは現在実用できる唯一の衛星航法システムであり、その精度も船舶用としては十分なものである。しかし、この方式の大きな欠点は利用できる時間に制限があり、通常1時間半に1回程度の位置決定しかできない。一方、オメガは超長波を用いた全世界的カバレッジをもつ双曲線航法システムであり、利用できる時間に制限がない。しかし、この方式は電波伝搬誤差にもとづく位置決定誤差が大きく、伝搬誤差の修正なしに高精度な位置決定を行なうことは不可能といわれている。そこで筆者らは、これら二つの航法システムの短所を互いに補い合うオメガ／NNSSハイブリッド航法を提案し、この測位情報処理にカルマンフィルタを応用し精度を更に改善する研究を行なった。まず、オメガ／NNSSハイブリッド航法の構成について述べ、次にカルマンフィルタによるデータの処理方法について説明する。最後にオメガおよびNNSS受信機の測定誤差、プラントノイズ等を適当に仮定してモンテカルロ・シミュレーションを行ない、その結果を通常のNNSSの測位計算法と比較する。

2. オメガ／NNSSハイブリッド航法の構成

図1は電子航法研究所において実測したオメガ電波の受信記録の一例である。使用した電波はノルウェイと米国のノースダコタにあるオメガ送信局からのものであり、その位相差をセンチレーン (cel) の単位で測定した。図中に点で示したのが10秒おきの測定値であり、短時間の変動はかなり大きい。しかし、このデータを2分間隔程度に平均をとり平滑化すると図中に記入した曲線となり、これより最大の変化量を求めると約0.25 cel/2分となる。このようにオメガデータを短時間の周期で多くとり、これを平滑化することにより短周期

* 正会員、電子航法研究所 (三鷹市新川6-38-1)

の雑音による位相の変動はかなり軽減できる。もちろん、この平均の変化量は1日の時間により異なりわれわれが測定したデータでは午前中は非常に安定であり、午後は図のデータより一般に変動が大きくなる。しかし、一日の中の大部分で0.5cel/2分程度の安定度が得られることがわかった。

これらのことより、オメガ電波の伝搬誤差は相当大きな絶対値をもつが、短時間の変動量は小さく、これより船の速度を検出することが可能である。NN

SSでは2分間ごとにドプラを測定し位置決定を行なうので2分間ごとのオメガの測位情報より船の速度を検出し、これと約90分間隔で得られるNNSSによる船の正確な位置を組み合わせハイブリッド航法を構成し、そのデータ処理にカルマンフィルタを応用して更に精度を改善しようとするのがこの研究の目的である。

図1 オメガ電波の受信記録 (於電子航法研究所)

3. カルマンフィルタによるデータ処理

カルマンフィルタによるデータ処理は、よく知られたように次の5つの式で示される。

$$\hat{X}_k = \Phi_{k-1} \hat{X}_{k-1} \quad \dots\dots(1)$$

$$P'_k = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad \dots\dots(2)$$

$$K_k = P'_k H_k^T (H_k P'_k H_k^T + R_k)^{-1} \quad \dots\dots(3)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}'_k + K_k (Z_k - h(\hat{X}'_k)) \quad \dots\dots(4)$$

$$P_k = P'_k - K_k H_k P'_k \quad \dots\dots(5)$$

これらの式の意味については他の文献⁽¹⁾⁽²⁾に詳しく述べられているので、ここでは省略し、上式の変数行列にどのような値を入れて計算したかを以下に説明する。

まず、状態ベクトル X_k は次の5個のパラメータを用いた。

$$X_k = \begin{pmatrix} P_\lambda \\ P_\varphi \\ F \\ V_\lambda \\ V_\varphi \end{pmatrix} \quad \dots\dots(6)$$

ここで、 P_λ, P_φ は経度および緯度で表わした利用者(船舶)の位置、 F は NNSS で求めるオフセット周波数、 V_λ, V_φ は経度および緯度方向の船舶の速度である。 P_λ, P_φ, F が NNSS に関するパラメータ、 V_λ, V_φ がオメガに関するパラメータである。

なお、 $\hat{X}_{k-1}$ は X_{k-1} の $k-1$ の段階における推定値、 $\hat{X}'_k, \hat{X}_k$ はそれぞれ X_k の $k-1, k$ の段階における推定値を表わす。

次に遷移行列 Φ_{k-1} は

$$\Phi_{k-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots(7)$$

で表わされる。ここで t はサンプリング時間であり、NNSSを使用する関係から2分とした。

状態ベクトル $\hat{X}_{k-1}$ の共分散行列は P_{k-1} で表わされ、その初期値 P_0 は次のようになる。

$$P_0 = \begin{pmatrix} p_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & p_{45} \\ 0 & 0 & 0 & p_{54} & p_{55} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(8)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} p_{11} &= (T/t) \sigma_{v\lambda}^2 \\ p_{22} &= (T/t) \sigma_{v\varphi}^2 \\ p_{33} &= \sigma_f^2 \\ p_{44} &= q_{44} \\ p_{45} &= q_{45} \\ p_{54} &= q_{54} \\ p_{55} &= q_{55} \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

である。上式で T は NNS S で測位する前までの航行時間、 $\sigma_{v\lambda}$ 、 $\sigma_{v\varphi}$ はそれぞれオメガで測定した船速の経度方向および緯度方向成分の標準偏差である。また σ_f はオフセット周波数の標準偏差を表わし、その他 q_{44} 、 q_{45} 、 q_{54} 、 q_{55} については次の項で説明する。なお、 P_k' 、 P_k はそれぞれ状態ベクトル $\hat{X}_k'$ および $\hat{X}_k$ の共分散行列を表わす。

プラントノイズ（船の運動に対する外乱）の共分散行列 Q_{k-1} は

$$Q_{k-1} = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 & q_{14} & q_{15} \\ q_{21} & q_{22} & 0 & q_{24} & q_{25} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_{41} & q_{42} & 0 & q_{44} & q_{45} \\ q_{51} & q_{52} & 0 & q_{54} & q_{55} \end{pmatrix} \dots\dots(10)$$

で表わされる。ここで

$$\left. \begin{aligned} q_{11} &= q_{44} t^2 \\ q_{12} &= q_{21} = q_{45} t^2 \\ q_{14} &= q_{41} = q_{44} t \\ q_{15} &= q_{24} = q_{42} = q_{51} = q_{45} t \\ q_{22} &= q_{55} t^2 \\ q_{25} &= q_{52} = q_{55} t \\ q_{44} &= (\sigma_v^2 \sin^2 \theta + \sigma_\theta^2 v^2 \cos^2 \theta) c_\lambda^2 \\ q_{45} &= q_{54} = (\sigma_v^2 - v^2 \sigma_\theta^2) \sin \theta \cos \theta \cdot c_\lambda c_\varphi \\ q_{55} &= (\sigma_v^2 \cos^2 \theta + \sigma_\theta^2 v^2 \sin^2 \theta) c_\varphi^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

である。上式で v は船速、 θ は針路（北から時計まわりに測った角度）、 σ_v 、 σ_θ はそれぞれ v および θ の標準偏差である。また、 c_λ 、 c_φ はそれぞれ距離を経度、緯度に換算する定数である。

次にヤコビアン行列（Jacobian matrix） H_k は

$$H_k = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots(12)$$

で表わされる。ここで

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= \partial D / \partial P_\lambda \\ h_{12} &= \partial D / \partial P_\varphi \\ h_{13} &= \partial D / \partial F \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

であり、 D は推定値 $\hat{X}_k'$ における 2 分間の衛星—利用者間の距離差を表わす。これらの値は最小二乗法による通常の NNS S の計算法でも用いる変数である。

測定値の共分散行列 R_k は

$$R_k = \begin{pmatrix} \sigma_d^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{v\lambda}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{v\varphi}^2 \end{pmatrix} \dots\dots(14)$$

で表わされる。ここで σ_d は NNS S で測定するドプラ値の標準偏差、 $\sigma_{v\lambda}$ 、 $\sigma_{v\varphi}$ はオメガで測定する経度方向および緯度方向速度の標準偏差である。これらの誤差要因には互いに相関性がないので、行列の対角要素以外はすべて 0 となる。

次に測定値ベクトル Z_k は

$$Z_k = \begin{pmatrix} m_d \\ m_{v\lambda} \\ m_{v\varphi} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(15)$$

で表わされる。ここで m_d はNNS Sで測定したドプラ値, $m_{v\lambda}$ $m_{v\varphi}$ はオメガで測定した経度方向および緯度方向の速度である。

また, 計算値ベクトル $h(\hat{X}'_k)$ は

$$h(\hat{X}'_k) = \begin{pmatrix} c_d \\ c_{v\lambda} \\ c_{v\varphi} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(16)$$

で表わされる。上式で c_d は推定値 $\hat{X}'_k$ において計算したドプラ値, $c_{v\lambda}$ $c_{v\varphi}$ は推定値 $\hat{X}'_k$ において計算した経度方向および緯度方向の速度である。 $c_{v\lambda}$ $c_{v\varphi}$ は推定値 $\hat{X}'_k$ の V_λ V_φ 成分より直接求められる。

以上の式 (6)~(16) で説明した各変数行列をカルマンフィルタの過程を示す式 (1)~(5) に代入し, 2分ごとに得られるNNS Sのドプラ測定値およびオメガによる速度に対応して式 (1)~(5) をくり返し使用すれば, カルマンフィルタによる最確推定船位を求めることができる。

4. シミュレーションの条件

前節の計算法によってモンテカルロ・シミュレーションを行なったが, シミュレーションの条件として以下のことを仮定した。

- (1) 利用者(船舶)は東経 170°, 北緯 30° の海上を速度 20 ノットで東 (90°) に向かって直進するものとする。
- (2) 衛星は 90 分に 1 回現われ利用者の東側を南より北に向かって通過するものとする。その時の最大仰角は 60° 又は 30° でドプラ測定値は 7~3 (14~6 分) である。
- (3) 船の運動に対する外乱(プラントノイズ)は海流をシミュレーションするための90分間一定な長周期外乱と波, 風などをシミュレーションするための2分ごとに变化する短周期外乱の2種類の外乱を用いた。これらの大きさは長周期外乱が速度1ノット (1 σ), 針路ランダム, 短周期外乱が1 σ で速度1ノット, 針路 3° とした。
- (4) NNS S受信機の誤差は1 σ でドプラ測定値200m (距離差換算), オフセット周波数 10Hz とした。これらの値はNNS Sの実測値より妥当なものと思われる。
- (5) オメガ受信機による速度測定誤差は1 σ で経度, 緯度方向とも 200m/2分とした。この値は図1のオメガの実測データより推定したものであり, 確実な根拠はない。
- (6) シミュレーションは90分単位で1000回行ない, その統計値より精度を求める。
カルマンフィルタについては精度が収束するまで4~5回くり返す。

図2 外乱を受けた船の運動の一例

以上の条件によりシミュレーションを行なったが, (3)のプラントノイズが存在するとき船がどのような運動をするか, その一例を示したのが図2である。

5. シミュレーションの結果

前節のシミュレーションの条件によりモンテカルロ・シミュレーションを行なった結果を図3~5に示す。これらは横軸に航行時間を取り, 縦軸に95%誤差円半径で表わした誤差の大きさを示してある。横軸上にSATと記入した太線の期間は衛星が現われている時間である。

まず, 図3の衛星最大仰角 60°, ドプラカウント7個の場合をみると, 細い実線の推測航法/NNS S一最

小二乗法（通常のNNSSの計算法）が時間に比例してほぼ直線的に誤差が増大していることがわかる。通常、推測航法においては時間の平方根に比例して誤差が増大するが、このシミュレーションでは海流による長周期の外乱を入れたので、このように時間に比例した誤差曲線になる。その最大値は約7.2kmになるが、衛星が現われNNSSによる測位が行なわれると誤差は急激に減少し約2.2kmになる。これに対し点線で表わしたオメガ/NNSS—最小二乗法では時間に対する誤差の増加が推測航法ほど急激でなく、大体時間の平方根に比例している。これは、

この方式でオメガを2分ごとの速度検出センサとして用いているからである。すなわち、この方式では船の運動がどのように変化しても誤差の大きさはオメガの速度検出精度により定まる。その最大値は約4.2kmに達し、NNSSによる測位が行なわれると約2.7kmに減少する。このように誤差の最大値は推測航法/NNSSに比べかなり小さいが、最小値がそれより大きくなる点は精度を比較する上で注意を要する。図中に太い実線で示したのはオメガ/NNSS—カルマンフィルタの場合であって、前二者に比べ最も精度がよい。その最大値と最小値は衛星が現われるごとに次第に増加するが、4回目で完全に収束し、その時の値は最大値が約3.4km、最小値が約1.9kmである。このカルマンフィルタの場合、注意すべき点は最小二乗法が衛星からの全ドプラカウントが計測された後測位計算をするのに対して、1個のドプラカウントが得られるごとに最確位置を求めるので誤差が次第に減少することであり、これは図3をみても明らかである。なお、この図の誤差は95%誤差円半径の大きさで表わしてあるが、これを70%誤差円半径で表わすと、この図の値に0.5~0.6を乗じた値になる。

図4は衛星最大仰角30°、ドプラカウント4個の場合である。一般に衛星の最大仰角が小さくなると得られるドプラカウントの個数も少なくなるが、この場合が代表的な例である。図より推測航法/NNSS—最小二乗法が最大値約7.7km、最小値約3.5km、オメガ/NNSS—最小二乗法が最大値約5.6km、最小値約4.6kmであるのに対して、オメガ/NNSS—カルマンフィルタの場合は最大値約3.9km、最小値約2.4km（収束値）であり、カルマンフィルタの効果が大きいことがわかる。

図5は衛星最大仰角30°、ドプラカウント3個の場合である。ドプラカウント3個はNNSSで位置決定ができる最小の個数であるが、その最悪の条件の下でシミュレーションを行なった。図より推測航法/NNSS

図3 シミュレーションの結果(1) 衛星最大仰角：60°，
ドプラカウント：7個

図4 シミュレーションの結果(2) 衛星最大仰角：30°，
ドプラカウント：4個

一最小二乗法が最大値約9.1km, 最小値約6.3km, オメガ/NNSS—最小二乗法が最大値約8.8km, 最小値約8.2kmと非常に精度が悪いのに対してオメガ/NNSS—カルマンフィルタはその収束値において最大値約4.4km, 最小値約3.1kmであり, カルマンフィルタの効果が顕著であることがわかる。

以上述べた3種類のシミュレーションの結果をまとめたものが表1である。ここでは衛星非使用時(誤差が次第に増加する期間)と衛星使用時(誤差が最小になる時間)を別々に比較して示した。推測航法/NNSS—最小二乗法をすべて100として他の方式をこれに対する%で比較したものである。なお、衛星非使用時はその時間の平均値である。

図5 シミュレーションの結果(3) 衛星最大仰角: 30°,
ドプラカウント: 3個

表1 各種方式の精度の比較

衛星最大仰角 (度)		60	30	30
ドプラカウント (個数)		7	4	3
推測航法/NNSS 最小二乗法	衛星非使用時	100	100	100
	衛星使用時	100	100	100
オメガ/NNSS 最小二乗法	衛星非使用時	89	104	118
	衛星使用時	119	131	132
オメガ/NNSS カルマンフィルタ	衛星非使用時	72	67	53
	衛星使用時	78	68	50

表よりオメガ/NNSS—最小二乗法は衛星最大仰角 60°, ドプラカウント 7 個の場合にのみ衛星非使用時に89%と通常のNNSS計算法より精度がよいが, 他はすべてそれより悪いことがわかる。これに対してオメガ/NNSS—カルマンフィルタは衛星非使用時に約70~50%, 衛星使用時でも約80~50%に精度が改善されていることがわかる。この精度改善の効果は衛星の最大仰角が小さい程, またドプラカウントの個数が少ない程大きいことがわかる。このようにカルマンフィルタはNNSSによる測位情報が不正確な時ほどその効果が大きい特長があり, この点で今後のハイブリッド航法への応用価値が期待できる。

6. あとがき

オメガよりの速度情報とNNSSの位置決定情報を組み合わせたオメガ/NNSSハイブリッド航法を構成し, このデータ処理にカルマンフィルタを応用する研究を行ない, モンテカルロ・シミュレーションによりその精度を評価した。その結果, 通常のNNSSの位置決定計算法に比べ約50~80%精度が改善されることがわかった。

しかし, この方法を実際の航法に応用する場合には次のような問題点がある。その第一は船の運動に対する外乱(プラントノイズ)が, ここで仮定したように完全に正規分布をもつランダムなものとして取扱ってよい

かどうかという問題である。この点については今後実際の船上で測定したNNSSのデータを用いた更に一歩進んだシミュレーションを行ない、その結果より外乱の性質および大きさを検討する予定である。

第二の問題点としては、オメガより速度を検出する方法について更に検討する必要がある。この問題については、今後多くのオメガ受信データを解析して2分間の速度検出方法として最適な方法を研究する予定である。

参 考 文 献

- (1) H.W. Sorenson : Least-squares Estimation from Gauss to Kalman, IEEE Spectrum, July 1970.
- (2) Y.Takahashi, M. J. Rabins, D. M. Auslander : Control and Dynamic Systems, Addison-Wesley publishing company.
- (3) S. G. Wilson : Nonlinear Filter Evaluation for Estimation Vehicle Position and Velocity Using Satellites, IEEE transaction on aerospace and electronic systems, Vol. AES-9, No. 1, Jan. 1973.
- (4) 西 周次 : カルマンフィルタのNNSSへの応用 (第2報), 航行中の船舶への応用, 電子航法研究所49年度研究発表会講演概要, 1974.

質 疑 応 答

清水紀雄 : 次の3点について伺います。

- (1) 共分散行列 P_k の変化のさせ方と, P_k が不適当で解が発散した場合の適応の方法について。
- (2) 一定速度運動を仮定していますが, 加速度を考慮する必要はありませんか。
- (3) この場合のプラントノイズ Q_k の見積りの方法について。

西 周次 : (1)カルマンフィルタの過程を示す式(1)~(5)において, 式(2)の初期値 P_0 を定めれば以後の $P_1, P_2 \cdots P_n$ は式(1)~(5)をくり返し使用することにより自然に求まります。 P_0 については式(8)および(9)に説明してあります。また, P_0 の値が不適当で解が発散する場合は, その値がよほど理論値からかけ離れている場合ですから, P_0 の値の桁を適当に変更することにより解を収束させることができます。実際の船の航法に応用する場合には, この P_0 の値が未知の場合が多く最適値を求めるには cut and try で経験的に求めるのが最良だと思います。

(2) 御意見のとおり実際の船では加速度も考慮する必要があります。今回は時間の関係上, 船が加速, 減速したり, 旋回した場合のシミュレーションはできませんでしたが, この方法では加速運動の場合にも位置決定ができます。

(3) プラントノイズ Q_k の見積りについては式(10)および(11)をご覧ください。

大脇利清 : プラントノイズにおいて速度, 針路の標準偏差が変れば測位精度はどのように変わりますか。

西 周次 : 定量的に求めてありませんので正確なことはいえませんが, プラントノイズの2分毎に変化する短周期外乱による影響は大体その平方根に比例して測位誤差が増大し, 90分間一定な長周期外乱による影響はほとんどないと思います。

大沢謙一 : 速度センサとしてオメガを利用していますが, オメガのみでよいと考えておりますか。

西 周次 : そのようには考えておりません。ここでNNSSとオメガを組み合わせたのは両方ともそのカバレッジが全世界的なものである点に興味をもったからです。他にもっと精度のよい速度センサがあれば, それらのものを利用することも考えています。例えば沿岸ではデッカ, ロラン等の方が精度がよいでしょうし, 遠洋ではロランCの電波を使うことも可能と思います。

樽美幸雄 : シミュレーションの外乱における長周期外乱(海流)の針路ランダムおよび短周期外乱(風, 波)の針路3°の意味がよくつかめなかったので再度ご説明いただきたい。

西 周次 : 長周期外乱というのは90分間一定な速度, 針路をもつ外乱を意味します。但しシミュレーションは1000回行なっていますので, その1回1回についてみれば速度は1σが1ノットで正規分布的に変化し, 針路は全くランダムに変化しています。一方, 短周期外乱は2分ごとに变化する外乱ですから1回のシミュレーションの間に45回変化します。その大きさが1σで1ノット, 針路が1σで3°ということです。