

DGPS/INS/VMS を統合した高精度車両位置計測アルゴリズム

DGPS/INS/VMS Integration for High Accuracy Land-Vehicle Positioning

熊谷 秀夫^{*,**}・久保 幸弘^{*}・木原 雅人^{*}・杉本 末雄^{*}
Hideo KUMAGAI, Yukihiro KUBO, Masato KIHARA and
Sueo SUGIMOTO

Abstract: In this paper, we investigate the land-vehicle positioning by DGPS/INS/VMS integration. Our main purpose of the present investigation is to integrate these systems and to develop the high precision positioning system in all circumstances, especially at the point of switching between DGPS/INS and INS/VMS by estimating the Vehicle Motion Sensor Error simultaneously in the case of DGPS/INS mode.

1. まえがき

近年、車両を用いた道路のIRI (International Roughness Indication) 指標に基づく凹凸計測やGISにおける国土空間情報を取得するための高精度位置計測システムが求められている。現在トランスファードイファレンシャルGPS (DGPS) やキネマティックGPS (KGPS) とのINSハイブリッドシステムに関しては、種々の研究発表や一部市販されている計測装置もある^{1),2),3)}。一方、低精度のジャイロや、磁気センサを用いてGPS受信が不可能な時に精度を維持する試みの研究もある^{4),5),6)}。さらにその際VMS (Vehicle Motion Sensor) のスリップや車両搭載重量によるタイヤの変形を推定する試みも行われている⁷⁾。

これらの研究や装置は、(D/K)GPS測位結果あるいは擬似距離を観測値としてカルマンフィルタによりINS信号の誤差を、あるいはGPSにおけるクロック

バイアスを推定し(D/K)GPS信号の間隔を補間したり、(D/K)GPS受信が不可能な場合にINSのみで位置を計測するものであり基本的にはGPS信号を用いることを前提としている。しかし国土空間情報や磨耗の激しい道路の集中している市街地においては、KGPS搬送波のサイクルスリップはもとよりGPS信号そのものを受信できないため、実際には相当な運用制限を余儀なくされている。そこで、(D/K)GPSの運用が不可能な場合、車両の速度VMSとINSをハイブリッドするシステムが提案され利便性を向上することが可能になっている^{8),9)}。この場合VMS信号だけではその時間的累積誤差が(K/D)GPS精度を上まることが不可能なために、衛星受信状況の良い場合は(K/D)GPS/INS、そうでない場合はINS/VMSと言うようにそのアルゴリズムを切り替え、ハイブリッドを行うシステムが用いられている。しかしこの方法もまた、切り替え時に発生するカルマンフィルタの推定誤差共分散行列の初期化が、そのときのシステム誤差を反映していないと言う問題が存在し、ハイブリッドシステムの総合精度を劣化させる原因となっている^{8),9)}。

そこで、本論文では推定誤差共分散行列の初期化を行わずに(K/D)GPSとVMSの切り換えを行うことにより、衛星受信状況の変化にもスムーズに対応する位置計測アルゴリズムを提案するものである。本システムは、目標総合精度を3m(cep)としているため、DGPSを採用しDGPS/INS/VMSと呼称することに

* 立命館大学 理工学研究科
 Dept. Electrical and Electronic Engineering, Ritsumeikan Univ.

〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1

1-1-1, Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577 Japan

** 多摩川精機株式会社/Tamagawa Seiki Co., Ltd.

〒395-8515 長野県飯田市大休1879

1879, Oyasumi, Iida, Nagano 395-8515 Japan

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 41, NO. 4, 2002

する。

2. DGPS/INS/VMS アルゴリズム

DGPS/INS/VMS の基本動作は、移動中の計測モードと初期化の二つに大別される。初期化には、静止状態で行われる初期化と、移動中に行われる初期化があるが¹⁰⁾、要求精度の観点から通常では静止状態での初期化が行われる。この初期化とは、INS の構成部品である慣性センサ（角速度計、加速度計）を用いて、地球の重力を基準とした姿勢（ロール角、ピッチ角）と地球の自転角速度を基準とした真方位を計測するものである。本論文では、初期化は従来¹¹⁾で行い、その後の計測モードを研究の対象としている。

本来 INS は慣性センサに基づく演算であるために、使用する慣性センサの誤差により位置計測結果に誤差を生じる。本研究で使用した慣性センサの仕様を Table 1 に示す。この慣性センサは、いわゆる位置誤差 2 nm/h (1 nm : 1 海里 = 約 1852m) クラスの装置に使用する比較的高精度なセンサである¹¹⁾。

本来 INS に使用する慣性センサ誤差がゼロであれば真の位置が計測できるが、実際には上記のような誤差を持つために、ハイブリッドシステムでは、外部情報を観測値として INS の補正を行い DGPS 受信不能

Table 1 Error Budget of Inertial Sensor (1 σ)

Term	Gyro	Accelerometer
Bias	0.03 deg/h	80 μ G
Scale Factor	150 ppm	150 ppm
Misalignment	50 arc-sec	50 arc-sec
Random Walk	0.008 deg/h ^{1/2}	—

時に高精度の INS として使用できることを目的として構築されている。しかし外部情報にも誤差は含まれており、その誤差を補正することもこのハイブリッドの目的である。本論文では、INS に内在する誤差と外部情報である DGPS, VMS の誤差を設定しそれぞれの誤差を推定する方法について提案する。

3. 従来型アルゴリズムとの比較

従来型演算アルゴリズム⁹⁾を Fig. 1 に、提案するアルゴリズムを Fig. 2 に示す。従来型アルゴリズムでは、DGPS の受信状態(ここでは PDOP 値を参照しているが、補正情報エイジが加わる場合もある)に応じて DGPS が有効な場合は GPS 情報を観測値として用い、DGPS が無効の場合は VMS 情報を観測値とするように、観測値毎の状態変数を用いている。

この方式では、使用する外部情報源が変更される度にカルマンフィルタが初期化される。この際、場合によってはシステムの状態を適切に反映した初期化が行われないという問題が発生する。これに対して本研究で提案するアルゴリズムでは、状態方程式を固定し DGPS 有効時に使用する観測値を DGPS と VMS, 無効の場合は VMS とし、DGPS の受信状態に応じて観測値(観測式)のみが変更されるものである。

3.1 状態変数と状態モデル

本論文で使用する状態変数とシステムモデルを以下に説明する。状態変数は INS にかかわる部分と VMS にかかわる部分があり、それらの意味を Table 2 に示す。

ここで、文献11)に示された NED 座標系での方程式

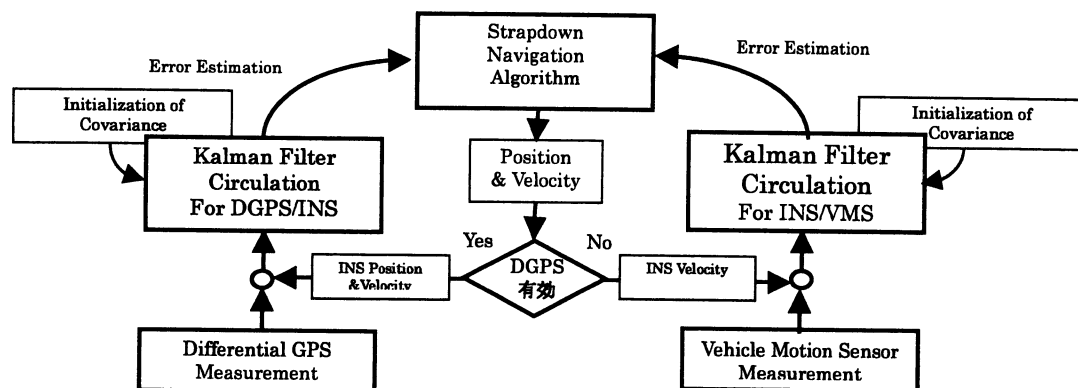


Fig. 1 Previous system

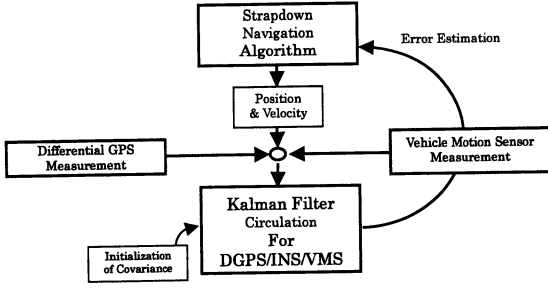


Fig. 2 Proposed system

Table 2 List of States

Symbol	Error State
δr_x	Position Error x
δr_y	Position Error y
δv_x	Velocity Error x
δv_y	Velocity Error y
δv_z	Velocity Error z
$\delta \theta_x$	Tilt Error x
$\delta \theta_y$	Tilt Error y
$\delta \theta_z$	Tilt Error z
δh	Position Error z
ϵ_a	VMS boresight Azimuth
ϵ_s	VMS Scale Factor Error
ϵ_p	VMS boresight Pitch
b_x	Acceleration Bias x
b_y	Acceleration Bias y
b_z	Acceleration Bias z
d_x	Gyro Bias x
d_y	Gyro Bias y
d_z	Gyro Bias z

を、真方位角 α だけ偏角した自由方位座標系に書き直すと⁹⁾、Table 2 中の各変数の間には以下のような関係式を得る（慣性航法演算に関する述語については、例えば文献14)の5, 6章を参照）。なお、Table 2 の各変数は速度 v などの変数前に“ δ ”を付加することで各変数の誤差を表すこととした。

はじめに、位置誤差 δr_x , δr_y はトランスポートレート ρ_x , ρ_y 、速度誤差 δv_x , δv_y 、方位角誤差 $\delta \theta_z$ に起因すると考え

$$\delta \dot{r}_x = \frac{\delta v_x}{R_x + h} - \rho_y \delta \theta_z + \eta_{r,x} \quad (1a)$$

$$\delta \dot{r}_y = -\frac{\delta v_y}{R_y + h} - \rho_x \delta \theta_z + \eta_{r,y} \quad (1b)$$

$$\delta \dot{h} = \delta v_z + \eta_h \quad (1c)$$

となる。ただし、高度誤差 δh は z 軸速度誤差 δv_z のみによるものとする。また、速度誤差 δv_x , δv_y , δv_z は、加速度計バイアス誤差 b_x , b_y , b_z 、傾斜誤差 $\delta \theta_x$, $\delta \theta_y$ による重力加速度誤差、および速度誤差によるコリオリ誤差 $(\rho + 2\Omega)\delta v$ に起因すると思われる

$$\delta \dot{v}_x = B_{11}b_x + B_{12}b_y + B_{13}b_z + g_z \delta \theta_y - (\rho_y + 2\Omega_y)\delta v_x + (\rho_z + 2\Omega_z)\delta v_y + \eta_{v,x} \quad (2a)$$

$$\delta \dot{v}_y = B_{21}b_x + B_{22}b_y + B_{23}b_z - g_z \delta \theta_x - (\rho_z + 2\Omega_z)\delta v_x + (\rho_x + 2\Omega_x)\delta v_z + \eta_{v,y} \quad (2b)$$

$$\delta \dot{v}_z = B_{31}b_x + B_{32}b_y + B_{33}b_z - (\rho_x + 2\Omega_x)\delta v_y + (\rho_y + 2\Omega_y)\delta v_x + \eta_{v,z} \quad (2c)$$

となる。ただし B_{**} は姿勢角の方向余弦、 ρ はトランスポートレート、 Ω は地球の自転角速度である。

姿勢角誤差 $\delta \theta_x$, $\delta \theta_y$, $\delta \theta_z$ は、ジャイロバイアス誤差 d_x , d_y , d_z 、速度誤差 δv_x , δv_y 、および位置誤差 δv_x , δv_y 、に起因すると思え

$$\delta \dot{\theta}_x = B_{11}d_x + B_{12}d_y + B_{13}d_z - \frac{\delta v_y}{R_x + h} - (\Omega \sin \lambda \sin \alpha \cos \alpha) \delta r_x - (\Omega \sin \lambda \cos \alpha \cos \alpha) \delta r_y - (\Omega \cos \lambda \sin \alpha) \delta \theta_z + \eta_{\theta,x} \quad (3a)$$

$$\delta \dot{\theta}_y = B_{21}d_x + B_{22}d_y + B_{23}d_z - \frac{\delta v_x}{R_y + h} - (\Omega \sin \lambda \sin \alpha \cos \alpha) \delta r_x - (\Omega \sin \lambda \cos \alpha \cos \alpha) \delta r_y - (\Omega \cos \lambda \cos \alpha) \delta \theta_z + \eta_{\theta,y} \quad (3b)$$

$$\delta \dot{\theta}_z = B_{31}d_x + B_{32}d_y + B_{33}d_z - \frac{\sin \alpha \tan \lambda}{R_y + h} \delta v_x + \frac{\cos \alpha \tan \lambda}{R_x + h} \delta v_y + (\rho_x \sin \alpha \tan \lambda + \rho_y \cos \alpha \tan \lambda) \delta \theta_z + \eta_{\theta,z} \quad (3c)$$

となる。ただし、 R_x , R_y は x , y 軸の曲率半径、 α は自由方位角、 λ は緯度である。加速度計バイアス誤差 b_x , b_y , b_z 、ジャイロバイアス誤差 d_x , d_y , d_z 、VMS スケールファクタ誤差 ϵ_s 、およびボアサイト（アジマス、ピッチ）誤差 ϵ_a , ϵ_p は各々1次のマルコフ過程として表されるものとする。すなわち

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_a &= -\frac{1}{\tau_a} \varepsilon_a + \eta_{\varepsilon,a} \\
\dot{\varepsilon}_s &= -\frac{1}{\tau_s} \varepsilon_s + \eta_{\varepsilon,s} \\
\dot{\varepsilon}_p &= -\frac{1}{\tau_p} \varepsilon_p + \eta_{\varepsilon,p} \\
\dot{b}_x &= -\frac{1}{\tau_b} b_x + \eta_{b,x} \\
\dot{b}_y &= -\frac{1}{\tau_b} b_y + \eta_{b,y} \\
\dot{b}_z &= -\frac{1}{\tau_b} b_z + \eta_{b,z} \\
\dot{d}_x &= -\frac{1}{\tau_d} d_x + \eta_{d,x} \\
\dot{d}_y &= -\frac{1}{\tau_d} d_y + \eta_{d,y} \\
\dot{d}_z &= -\frac{1}{\tau_d} d_z + \eta_{d,z}
\end{aligned} \tag{4}$$

となる。ただし、 τ はそれぞれの変数の自己相関時定数である。ここで(1)~(4)式をベクトル行列表現すると次式を得る。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\eta}(t) \tag{5}$$

ただし \mathbf{x} は Table 2 に示した変数を要素とする状態ベクトルであり、プロセスノイズ $\boldsymbol{\eta}(t)$ は共分散値行列 N をもつ平均零の白色雑音である。

3.2 観測方程式

観測方程式は、DGPS/INS モード、INS/VMS モードそれぞれについて構成される。DGPS/INS モードにおいては、観測値は DGPS と INS の位置、速度の差である。したがって観測式は(6)式のようになる。

$$\begin{aligned}
z_1(k) &= \delta r_x(k) + n_1(k) \\
z_2(k) &= \delta r_y(k) + n_2(k) \\
z_3(k) &= \delta h(k) + n_3(k) \\
z_4(k) &= \delta v_x(k) + n_4(k) \\
z_5(k) &= \delta v_y(k) + n_5(k) \\
z_6(k) &= \delta v_z(k) + n_6(k)
\end{aligned} \tag{6}$$

ここで $\{n_1(k), n_2(k), \dots, n_6(k)\}$ は、DGPS の位置、速度の観測雑音である。これらをベクトル行列表記すると、以下の(7)~(10)式で表現できる。

$$\mathbf{z}_g(k) = \mathbf{H}_g(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}_g(k) \tag{7}$$

$$\mathbf{z}_g(k) = [z_1(k), z_2(k), \dots, z_6(k)]^T \tag{8}$$

$$\mathbf{n}_g(k) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_6(k)]^T \tag{9}$$

$$\mathbf{H}_g(k) \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Big|_{0_{6 \times 9}} \tag{10}$$

一方 INS/VMS モードにおいては、観測値は VMS と INS の速度差である。しかし VMS には、その速度信号の中に速度のスケールファクタ、ポアサイト（アジマス、ピッチ）誤差が含まれるため、車輪径の変化は走行中小さく、スリップは小さく車両速度に比例するものと仮定すると、次式を得る^{8),9)}。

$$z_7(k) = \frac{1}{\{1 + \varepsilon_s(k)\} \cos \varepsilon_a(k)} \{v_x(k) - \delta v_x(k)\} + \eta_7(k) \tag{11a}$$

$$z_8(k) = \frac{1}{\{1 + \varepsilon_s(k)\} \cos \varepsilon_a(k)} \{v_y(k) - \delta v_y(k)\} + n_8(k) \tag{11b}$$

$$z_9(k) = \frac{1}{\{1 + \varepsilon_s(k)\} \cos \varepsilon_a(k)} \{v_z(k) - \delta v_z(k)\} + n_9(k) \tag{11c}$$

ここで $\{n_7(k), n_8(k), n_9(k)\}$ は、VMS の観測雑音であり、また v_x, v_y, v_z は INS 速度である。これらをベクトル行列表記すると次式の観測方程式を得る。

$$\mathbf{z}_w(k) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(k)) + \mathbf{n}_w(k) \tag{12}$$

$$\mathbf{z}_w(k) = [z_7(k), z_8(k), z_9(k)]^T \tag{13}$$

$$\mathbf{n}_w(k) = [n_7(k), n_8(k), n_9(k)]^T \tag{14}$$

ここで、上式は線形でないため一段予測値の周りでテイラー展開し線形化を行うと、次式の観測方程式を得る¹²⁾。

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{z}}_w(k) &\equiv \mathbf{z}_w(k) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) + \mathbf{H}_w(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \\
&= \mathbf{H}_w(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}_w(k)
\end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}_w(k) &\equiv \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}(k))}{\partial \mathbf{x}(k)} \Big|_{\mathbf{x}(k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)}^T \\
&= \begin{bmatrix} 0 & 0 & h_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{1,10} & h_{1,11} & h_{1,12} \\ 0 & 0 & 0 & h_{2,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{2,10} & h_{2,11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_{3,9} & 0 & h_{3,11} & h_{3,12} \end{bmatrix} \Big|_{0_{3 \times 6}} \tag{16}
\end{aligned}$$

ただし

$$h_{1,3}(k) = -\frac{1}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_p \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{1,10}(k) = \frac{v_x \tan \hat{\varepsilon}_a}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_p \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{1,11}(k) = -\frac{v_x}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_p \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{1,12}(k) = -\frac{v_x \tan \hat{\varepsilon}_p}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_p \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{2,4}(k) = -\frac{1}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{2,10}(k) = \frac{v_y \sin \hat{\varepsilon}_a}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos^2 \hat{\varepsilon}_p}$$

$$h_{2,11}(k) = -\frac{v_y}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_a}$$

$$h_{3,9}(k) = -\frac{1}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos \hat{\varepsilon}_p}$$

$$h_{3,11}(k) = -\frac{v_z}{(1 + \hat{\varepsilon}_s)^2 \cos \hat{\varepsilon}_p}$$

$$h_{3,12}(k) = \frac{v_z \sin \hat{\varepsilon}_p}{(1 + \hat{\varepsilon}_s) \cos^2 \hat{\varepsilon}_p}$$

(17)

である。ここで、DGPSに関する観測方程式(7)式とVMSに関する観測方程式(15)式がそれぞれ得られたことになる。本論文では、VMS信号はDGPS受信状況に影響されることなく観測できることに着目しDGPS/INSモードの場合にINS/VMSを組み込むことを考え観測方程式を式(18)~(21)式のように記述する。これは、DGPS/INSモード時の観測値にVMSを加えて、観測行列を追加するものである。

$$z_{gw}(k) = \mathbf{H}_{gw}(k) \mathbf{x}(k) + \mathbf{n}_{gw}(k) \quad (18)$$

$$\mathbf{H}_{gw}(k) = [\mathbf{H}_g^T(k), \mathbf{H}_w^T(k)]^T \quad (19)$$

$$z_{gw}(k) = [z_g^T(k), z_w^T(k)]^T \quad (20)$$

$$\mathbf{n}_{gw}(k) = [\mathbf{n}_g^T(k), \mathbf{n}_w^T(k)]^T \quad (21)$$

この組み合わせによりDGPSモードの場合にもVMS信号の誤差推定が可能になり、モード切替時にVMSスケールファクタ等の推定が可能となる。

ここでINSの演算手順を解説する。慣性航法演算はアライメント完了後Fig. 3に従ったアルゴリズムにより慣性センサのみを用いた姿勢・方位・速度・位置を計算するアルゴリズムである。本研究では、自由方位座標系とWGS84地球楕円体を用いて計算を行った。また本研究でのカルマンフィルタアルゴリズムのブロック図をFig. 4に示す。ここでの演算ステップは以下の計算ステップからなる。

1. 共分散値の初期化と推定量の初期化
2. DGPS受信状況の把握と観測式の決定
3. 観測値の算出
4. カルマンゲイン計算
5. 推定量の算出
6. 共分散値の更新
7. 共分散値の計算

従来法ではDGPS受信状況に応じて観測行列を変更すると同時に状態変数をも変更し、それに伴って誤差共分散値の初期化を行う必要があった。それに対し

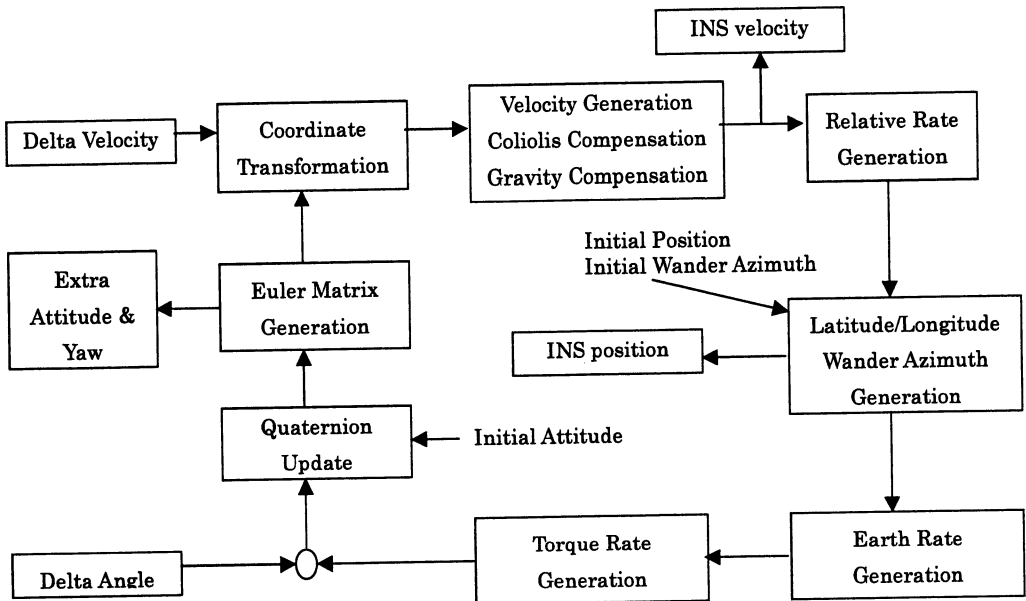


Fig. 3 Pure Navigation Block Diagram

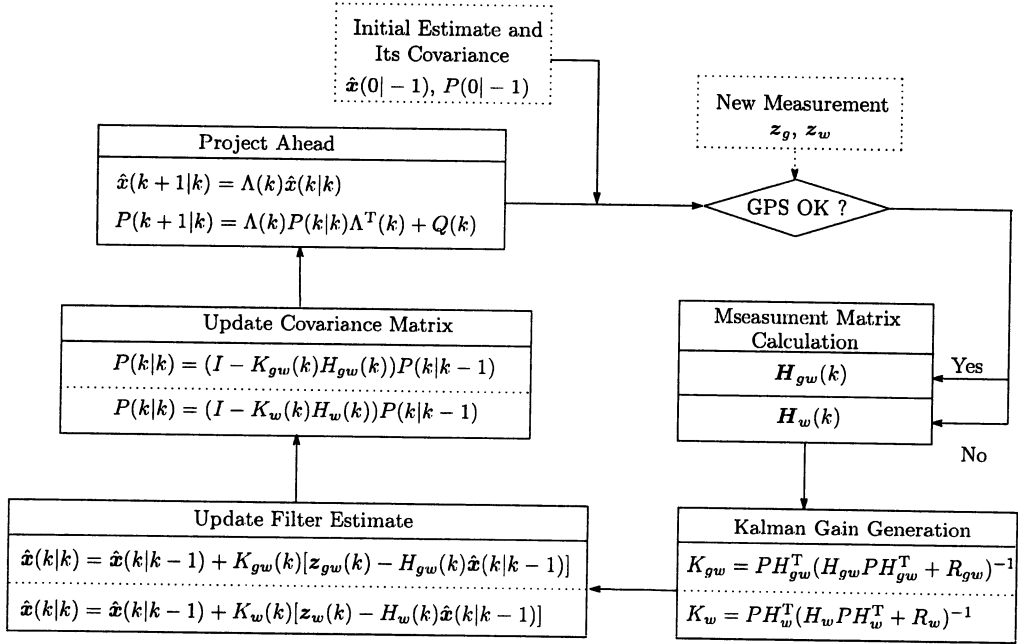


Fig. 4 Kalman Filter Circulation

本研究で提案する方法では、状態変数および状態モデルを変更せずに観測式のみを変更するため、システムに応じて誤差共分散値も変化することになり、DGPSの切り替わりにおいてもシステムの状態を正しく反映できる。

4. 実験結果

本研究で提案するアルゴリズムの特性・精度を検証するために DGPS/INS/VMS 等で構成される実車両システムを構築し、データを取得した。この DGPS/INS/VMS システムは、具体的に次のような装置により構成されている。

- 慣性航法装置 (多摩川精機製: TA7421)
- G12 GPS 受信機 (Ashtech 社製)
単独測位用 GPS 受信機
- VMS 光学式エンコーダ
(多摩川精機製: TS5300)
500PLS/rev インクリメンタル方式
- MIL-STD-1553B BUS Controller
(Ballard Technology 社製)
ISA バス対応 10MBPS
- 携帯電話
- 4000SS GPS 受信機 (Trimble 社製)

搬送波位相 GPS 受信機

これらは、計測車両に搭載された装置であり、DGPS 補正情報取得のために日本船舶通信(株)の DGPS 補正情報サービスと、車両位置の基準データのために 4000 SS GPS 受信機 (Trimble 社製) と取得解析ソフトウェア (Flykin; Calgary 大学) を使用した。このシステムブロック図を Fig. 5 に示す。

データ取得には GPS 衛星の視通可能な場所を選択し、MIL-STD-1553B データバスを用いてオフライン計算に必要な INS/IMU/DGPS/VMS データを内蔵する GPS 受信機の 1 PPS を使った同期用タイムタグ

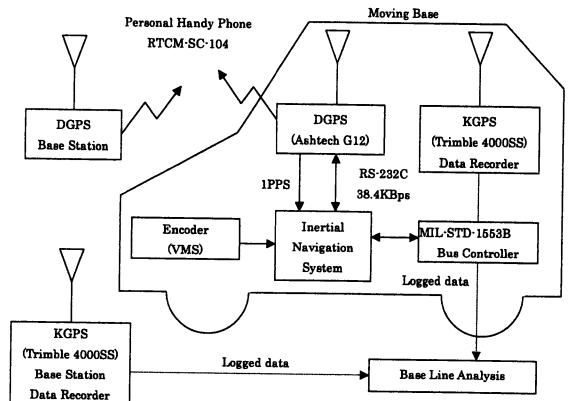


Fig. 5 System Block Diagram

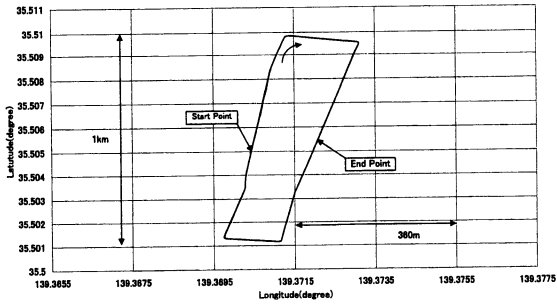


Fig. 6 Trajectory of test course (by KGPS)

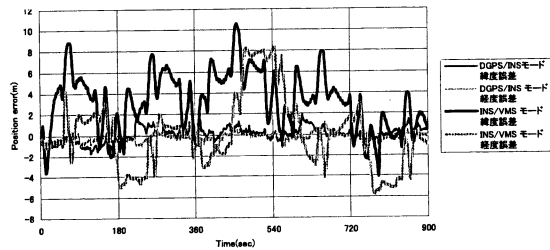


Fig. 7 Position error of previous method

(1 MHz) と同時にパーソナルコンピュータに記録した。また同時に解析時の基準データとなる KGPS データも記録した。実データ取得のために、Fig. 6 に示す全周約2.2Kmの矩形的なコースを約15分間(約4.5周)走行した。

まず従来の方式による DGPS/INS と VMS/INS についてのオフライン計算の結果を Fig. 7 に示す。それぞれについて緯度・経度誤差は精度の高い KGPS の測位結果に基づき評価したものであり、この結果により DGPS/INS モードにおいては概ね1.0m rms、INS/VMS モードにおいては概ね5.0m rms 以下の精度であることが分かる。

DGPS/INS モードにおいては、DGPS の仕様からこの結果は満足すべきものであり、十分実用的であることが分かるが、INS/VMS モードにおいても時間ともに位置誤差が増加して傾向が少ないので通常の運用において有効的であると言える。

上記シミュレーションにおいては、式(4)に示す自己相関時定数並びに観測雑音をそれぞれ次のように決定した。

(1) 慣性センサのパラメータ同定

慣性センサからの出力信号から相関時間を求めるとほぼ指数関数となり、一次マルコフ過程の相関関数の近似式、 $Ce^{-t/\tau}$ (C は定数、 τ は相関時間) との対比

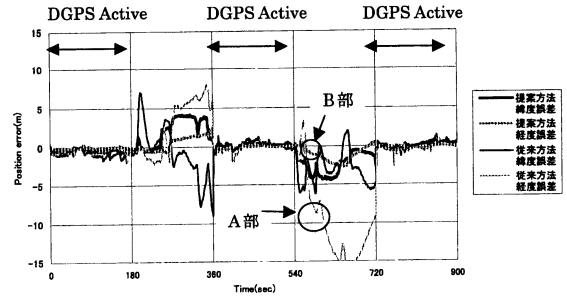


Fig. 8 Position error of proposed method

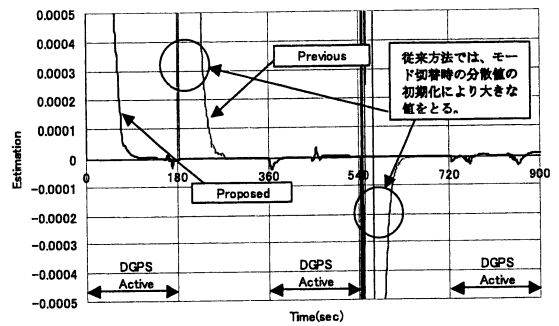


Fig. 9 Estimation of scale Factor Error

により τ の値を求め、本実験では $\tau=300\text{sec}$ とした。

(2) VMS のパラメータ同定

VMS 単独のシミュレーションにおいてノイズ量をパラメータ化し最適値を算出した⁹⁾。

(3) DGPS のパラメータ同定

静止状態での DGPS 信号を観測し、速度・位置のノイズ量を計測した。

最後に本研究で提案する方法と従来の方法を比較するために、同じデータを用いて意図的にハイブリッドモードを切り替えて(切り換え時刻は180sec 毎.180 sec, 540sec で VMS モード)シミュレーションを行った。その結果を Fig. 8, 9 に示す。従来の方法では演算モード切替時に状態変数の推定誤差分散行列を初期化する必要があり、切り替わり後に誤差が発生しているが、本論文で提案する方法では演算モードが変っても誤差共分散値を初期化せず、そのまま状態方程式を更新するため、それぞれの誤差分散が維持され切り替わりによる精度劣化を防止していることが分かる。

一般的に提案方法による結果は、改善の傾向が見られるが Fig. 8 の従来方法での経度誤差 A 部の位置誤差の増加と提案方法での経度誤差 B 部の位置誤差の増加に顕著に現れている。これは、従来方法では、Fig. 9 に代表的に示す状態変数 VMS スケールファクタの

推定量がハイブリッドモードの切り替え時 (Fig. 9 内の180sec, 540sec 後の丸印の部分) に, 新たな初期化に伴い, 大きく変動するためであると考えられる。

5. 結 論

本論文で提案したアルゴリズムにより, DGPS と VMS を同時に観測値として扱うことが可能になった。これにより, GPS 有効時に VMS 推定を行うことや GPS の位置誤差を VMS 側から推定することが可能になった。従って, 市街地走行のような PDOP (Position Dilution of Precision) が十分な精度で得られない場合にも VMS 側からの補正で DGPS よりも高精度な位置データが得られる可能性があり, 市街地でのオンライン実験等を含め今後の検証課題とした。さらに, VMS の推定値もアルゴリズムの切り替えが無いためにその推定値がスムーズに推移し位置誤差を低減することが可能となる。また, 本論で使用した INS はいわゆる中精度のリングレーザジャイロであるため更に低精度かつ低価格な慣性センサ (例えば MEMS IMU: Micromachined Electrical Mechanical System Inertial Measurement Unit) を用いた場合の本アルゴリズムの有効性について検証していくことも今後の課題とした。

6. 謝 辞

本研究は, アジア航測(株)の御協力を賜った。その関係各位に搭載車両並びに基準測量に多大な御協力を頂いたことを記し, 深甚の謝意を表します。

(受付日2002.2.28, 受理日2002.7.16)

参考文献

- 1) EL-Sheimy, N. and Schwarz, K.P.: Navigation Urban Areas by VISAT-A Mobile Mapping System Integrating GPS/INS/Digital Cameras for GIS Applications, *Navigation, Journal of the Institution of Navigation*, Vol. 45, No. 4, Winter 1998-1999, pp.275-285.
- 2) *Global Positioning System: Theory and Applications* (Chap.7), ed. By Parkinson, B.W., AIAA, Washington, DC, 1997.
- 3) Zickel, R. and Nehemia, N.: GPS Aided Dead Reckoning Navigation, *Proc. of ION National Technical Meeting*, pp.577-586, 1994.
- 4) Geier, G.J., A. Heshmati, P. McClain, K. Johnson, and M. Murphy: Integration of GPS with dead reckoning for vehicle tracking applications, *Proc. of ION 49th Annual Meeting*, pp.75-81, 1993.
- 5) Ramjattan, A.N., and P.A. Cross: A Kalman Filter filter model for an integrated land vehicle navigation system, *Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 48, No. 2, pp.293-302, 1995.
- 6) P. Cederholm: Integrating GPS with Dead Reckoning Sensors, *Surveying and Land Information Systems*, Vol. 60, No. 4, pp.259-266, 2000.
- 7) 渡辺, 家入, 岡田, 倉持: 雑音で乱される加速度と誤差を含む車輪速度からの車両絶対速さの推定, 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 5, pp.544-549, 1990.
- 8) H. Kuamgai, T. Kindo, Y. Kubo, and S. Sugimoto: DGPS/INS/VMS Integration for High Accuracy Land-Vehicle Positioning, *Proc. of the Institution of Navigation ION, GPS-2000*, Salt Lake, UT, September, 2000.
- 9) Y. Kubo, T. Kindo, A. Ito and S. Sugimoto: DGPS/INS/Wheel Sensor Integration for High Accuracy Land-Vehicle Positioning, *Proc. of the Institution of Navigation, ION GPS-99*, pp.555-564, Nashville, TN, September, 1999.
- 10) M. Robert: Large Azimuth INS Error Models for In-Motion Alignment Land-Vehicle Positioning, *Proc. of The Institution of Navigation, National Technical Meeting*, Long Beach, CA, 2001.
- 11) Siouris, G.M.: *Aerospace Avionics Systems: A Modern Synthesis*, Academic Press, San Diego, 1993.
- 12) Maybeck, P.S.: *Stochastic Models, Estimation and Control*, Vol. 1, Academic Press, San Diego, 1979.
- 13) Lapucha, D., Schwarz, K.P., Cannon, M.E. and Martel, H.: The Use of INS/GPS in a Highway Survey System, *Proc. of IEEE PLANS*, 1990.
- 14) 多摩川精機(株)編: ジャイロ活用技術入門, 工業調査会, 2002.