

# 地磁気方位センサとジャイロ스코ープの航法センサ 複合化による自動直進アルゴリズム (第1報)\*

—カルマンフィルタによるセンサフュージョン—

水島 晃\*<sup>1</sup>・野口 伸\*<sup>1</sup>・石井一暢\*<sup>1</sup>・寺尾日出男\*<sup>1</sup>・行本 修\*<sup>2</sup>・山本聡史\*<sup>3</sup>

## 要 旨

本研究は内界センサによる推測航法を採用することで極力ローコストな自動直進車両の開発を目的としている。航法センサとして地磁気方位センサ (Geomagnetic direction sensor ; GDS) とジャイロスコープを使用し、センサを複合化することでセンサ精度、直進精度の向上を図った。第1報では、ジャイロスコープに比較的精度の高い光ファイバージャイロ (FOG) 方式を採用し、センサ精度の評価と複合化手法を検討するために、自律走行トラクタによる自動直進走行試験を行い、その性能を評価した。センサの複合化にはカルマンフィルタを適用し、車両の運動モデルを構築することで車両方位と横方向偏差を推定した。カルマンフィルタによって GDS と FOG を複合化することで、個々のセンサ単独による推測航法よりも精度の高い自動直進走行システムを開発することができた。

[キーワード] 自動直進走行, 地磁気方位センサ, ジャイロスコープ, センサフュージョン, カルマンフィルタ

## Automatic Guidance Algorithm Based on Sensor Fusion of Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope (Part 1)\*

—Sensor fusion composed of Kalman filter—

Akira MIZUSHIMA\*<sup>1</sup>, Noboru NOGUCHI\*<sup>1</sup>, Kazunobu ISHII\*<sup>1</sup>, Hideo TERAO\*<sup>1</sup>,  
Osamu YUKUMOTO\*<sup>2</sup>, Satoshi YAMAMOTO\*<sup>3</sup>

## Abstract

The objective of this research is to develop an automatic guidance system composed of relatively low cost sensors. As a navigation sensor, we used a geomagnetic direction sensor (GDS) and a gyroscope. To increase the accuracy of these sensors outputs and guidance performance, these sensor output were integrated by sensor fusion technique. In the paper, a fiber optic gyroscope (FOG) was applied as a gyroscope. To evaluate the performance of these sensors for utilizing on an automatic guidance, and to confirm the effect of sensor fusion technique, the automatic guidance test was conducted on a paddy field. A kalman filter was employed as sensor fusion method. The kinematics of a vehicle was modeled and a heading error and a lateral offset were estimated by the kalman filter. The developed fusion technique was able to control the vehicle automatically with higher accuracy compared to that using single navigation sensor.

[Keywords] automatic vehicle guidance, geomagnetic direction sensor, fiber optic gyroscope, sensor fusion, kalman filter

\* 2000年4月 農業機械学会第59回年次大会(新潟大会)にて講演

\*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL 011-706-3847) School of Agriculture, Graduate School of Hokkaido University, Sapporo, 060-8589, Japan

\*2 会員, 生物系特定産業技術研究推進機構 (〒331-8537 大宮市日進町1丁目40番地2 TEL 048-654-7045) Bio-oriented Technology Research Advancement Institution, 1-40-2, Nisshin, Omiya, Saitama, 331-8537 Japan, 現在, 農業技術研究機構 中央農業総合研究センター (〒305-8666 茨城県つくば市観音台3-1-1) Present address: Agricultural Research Organization, 3-1-1, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8666, Japan

\*3 会員, 生物系特定産業技術研究推進機構

## I 緒 論

生産性の向上、重労働の軽減等を目的とした農用移動ロボットの研究は、現在国内及び海外で試みられており、徐々に実用レベルに近づきつつある。しかし、精度面からは実用レベルといえるものの、コスト面からいまだ実用化・商品化には遠い。その原因は使用するセンサのコストが高いことにある。高精度な作業が要求される農用移動ロボットに必要な情報は、GPS<sup>1)</sup>や自動追尾の光波距離計などの外界センサから得ている。これらのセンサは、年々コストは低下しているものの、農業機械の自動化に適用しうる精度を達成するセンサはいまだ数百万円に達する。一方、位置・方位情報の取得にマシンビジョンを使用した研究も見られる<sup>2),3)</sup>。この手法は比較的安価なセンサで自動走行システムが開発でき、コスト面から実用性は高い。しかし、ほ場に基準となる作物列や目標物が必要となることや光条件に影響される<sup>4)</sup>といった制約条件があり、汎用的に使用することはできない。そこで、本研究では内界センサによる推測航法(Dead reckoning; デッドレコニング)<sup>5)</sup>を適用した自動直進走行システムの開発を行った。デッドレコニングは加速度もしくは方位情報と速度情報(距離情報)によって、現在の位置を推定する航空機や船舶の分野で発達した手法である。この手法を適用した農用車両の自動走行の研究例も既にいくつか報告され<sup>6)-11)</sup>、GPSなどの位置情報が取得できない時の補償手段としての適用例も存在する<sup>12),13)</sup>。本研究では、方位情報を取得する航法センサとして地磁気方位センサ(Geomagnetic Direction Sensor; GDS)<sup>14)</sup>とジャイロスコープ<sup>15),16)</sup>を採用して、その観測値を複合化することで精度向上を図り、併せてこのセンサシステムを前提とした操舵制御の基本アルゴリズムを構築する。車両を蛇行させることなく一直線に、かつ隣接行程と平行に制御するアルゴリズムを極力ローコストなセンサで開発することを、本研究の最終的な目標とした。そこで第1報では、使用するセンサ精度の評価と複合化手法による自動直進走行システムの精度を検討するために、ジャイロスコープにハイコストではあるが比較的精度の高い光ファイバージャイロ(Fiber Optic Gyroscope; FOG)を採用し、自動直進走行試験を行い、考案したシステムの性能を評価した。

## II 航法センサ

### 1. GDSによる自動直進走行

#### 1) GDSを使用した既往の研究

GDSを農用車両の自動走行に適用した研究としては、行本ら<sup>18)</sup>が既に基礎的な研究を行っており、GDSの利用技術に関する知見を蓄積している。GDSの磁気環境補正・傾斜補正<sup>19)</sup>の必要性及び目標方位を取得するためのティーチング走行の導入など、GDSによる農用車両の自動化技術の基礎は行本らによって構築された。耕

うん作業を対象にして、経路の往復行程のマニュアルティーチング走行によって目標方位を取得し、0.5 m/s程度の走行速度で自動走行を行った場合、0.3°程度の方位誤差で往復走行が可能であると報告している。この走行は100 m走行して50 cm横方向にずれることを意味している。また、中島ら<sup>20)</sup>はこれら技術を拡張・発展させた自動走行システムの開発を目的として、ニューラルネットワークを使用した傾斜・磁気環境補正法を考案した。1方向のティーチング走行による目標方位の取得のみで、あらゆる方向の走行に対し目標方位を取得した方向と同程度の誤差で自動直進走行を可能にした。

#### 2) GDSの精度検証

本研究ではまず最初に、行本ら<sup>21)</sup>が開発したシステムと同様のシステムを構築し、GDSによる自動走行の精度を再検証した。磁気環境補正、傾斜補正及び基本制御アルゴリズムは既存の方式を採用し、ティーチングによって目標方位を取得する手法も踏襲した。コントローラとなる制御式の構成を式(1)、(2)に記述した。

$$\Psi(k) = \alpha \Delta\phi(k) + \beta \varepsilon(k) \quad (1)$$

$$\varepsilon(k) = \sum v(k) \Delta t \sin \Delta\phi(k) \quad (2)$$

ここで、 $\Psi(k)$ は操舵角、 $\Delta\phi(k)$ は目標方位との偏差、 $\alpha, \beta$ は制御ゲイン、 $\varepsilon(k)$ は横方向偏差で横滑りを無視した。 $v(k)$ は走行速度、 $\Delta t$ は制御周期となる。

GDSはWatson Industries社製、FGM-200Aで3軸フラックスゲート型GDSを使用した。また、傾斜補正に必要な傾斜角の計測には、日本航空電子工業(株)製FOG姿勢計測装置JCS-7401Aを使用した。これ以降本論文ではFOG-Aと呼ぶ。FOG-Aは3軸方向それぞれにFOGとサーボ型加速度計が配置されており、ロール角、ピッチ角、ヨー角を計測することができる。これらセンサを、自動走行用に改造した供試車両であるクボタ社製GL321に搭載し、数回の繰り返し自動直進走行試験を行った。自動走行システムの概観を図1に示す。

図2は走行軌跡の一例である。走行軌跡はトータルステーション((株)トプコン、AP-L1)によって計測した。



図1 自動走行システムの概観  
Fig. 1 Automatic guidance system

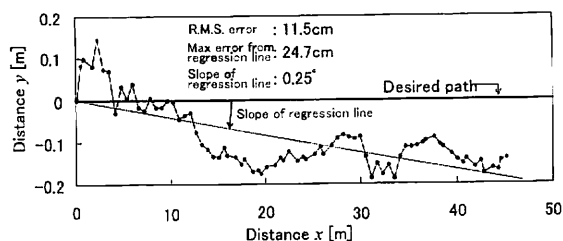


図2 GDSによる自動走行の軌跡一例  
Fig.2 Traveling trajectory obtained by automatic guidance using GDS

この走行の場合、GDSのS/N比が低いために細かく振動した軌跡となっており、45mの走行に対して目標経路からの横方向の最大誤差は20cmに及んでいる。しかし、この精度はGDSによる自動走行での報告された直進精度<sup>21)</sup>とほぼ一致しており、GDSによる自動走行の走行精度の限界と考えられる。

2) FOGによる自動直進走行

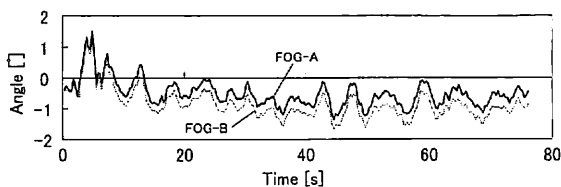
1) 計測精度

方位情報にはGDSの傾斜補正に使用しているFOG-Aのヨー角出力から取得した。また、FOG-Aよりもさらに高精度なFOG-B(日本航空電子工業(株), JG35FD)も評価用として使用した。FOG-AとFOG-Bの公称精度の比較を表1に示す。また、図3に有人で直進

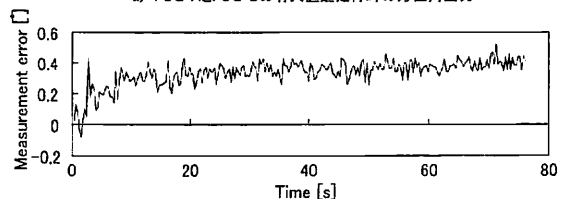
表1 FOG-AとFOG-Bの精度

Table 1 Performance of an experimental FOG and an accurate FOG

	FOG-A (JAE, JCS-7401A)	FOG-B (JAE, JG-35FD)
分解能	0.1°以下	0.01°以下
測定範囲	±180°	±180°
直進性	±1%以下	±0.1%以下
バイアス安定性 (角度ドリフト)	±2°/min以下	±3°/h以下
出力電圧	±10V	±5V



a) FOG-AとFOG-Bの有人直進走行時の方位角出力



b) 有人直進走行時のFOG-Aの誤差の推移((FOG-A)-(FOG-B))

図3 FOG-Aの精度評価  
Fig.3 Evaluation of FOG accuracy

走行したときのFOG-AとFOG-Bの方位角出力を調べた比較結果を示す。FOG-Bの推移と比較して、FOG-Aは時間ドリフトを含む誤差が時間経過とともに増大していることが確認された。80秒間で約0.4°の偏差が生じた。しかし、FOG-AはS/N比が高く、FOG-Bと比較しても推移過程に高い一致が認められ、微小時間における角度変化を高精度に計測できることがわかった。以上より、センサフュージョンを行なううえで、FOGドリフトを観測することが必須条件と考えられた。

2) FOGによる自動直進走行試験

供試 FOG-A による自動直進走行試験を行い、FOGを航法センサとして使用した場合の自動直進走行の精度を評価した。目標方位は前述のGDS自動直進走行と同様、横軸となるx軸方向と一致させた。操舵コントローラとなる制御式はGDSによる自動直進走行時と同じ(1)式を用いた。しかし、FOGの計測方位は相対方位であるため、初期状態において絶対方位である目標方位を取得することはできない。そこで、走行開始から10秒前後GDSを使用してGDSを用いたティーチング走行で取得した目標方位によって走行し、その間取得したFOGのデータをFOGの目標方位として方位偏差 $\Delta\phi$ を算出した。FOGによる自動直進走行のフローチャートを図4に示す。図5に自動直進走行試験の走行軌跡を示す。45mの走行距離に対して、40cm程度横方向に移動しており、目標経路に対して低い走行精度と判断された。これは、FOGによる目標方位取得の困難さを示すものである。すなわち、FOGの走行制御精度はGDSで取得した初期方位の精度に影響していることがあげられる。しかし、GDSに比べてS/N比が高くノイズが小さいために、直進性の高い走行が走行軌跡からも確認できる。走行全体の回帰直線から振れ幅は11.1cmに納まっている

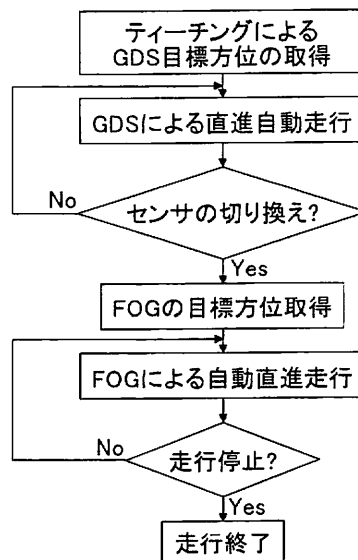


図4 FOG自動走行のフローチャート  
Fig.4 Flow chart of automatic guidance using FOG

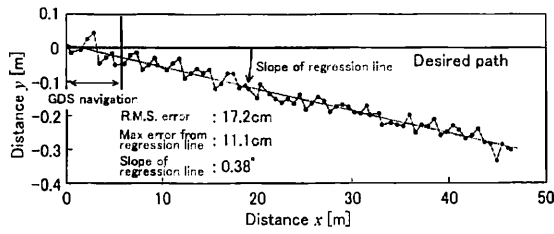


図5 FOGによる自動走行の走行軌跡

Fig.5 Traveling trajectory obtained by automatic guidance using FOG

る。このことから、FOGをベースセンサとして自動直進走行システムを構成するうえで、絶対方位である目標方位をいかに正確に取得し、FOG-GDS間の高精度な座標マッチングをとるかが重要な課題といえる。さらに、前述したようにFOGはその測定原理から出力の時間ドリフトも避けられない。したがって、GDSとFOGの座標マッチングはリアルタイムで行なうことも必須となる。この問題を解決する手段として、本研究では次項で述べるカルマンフィルタを採用し、GDSとFOGそれぞれの長所を活かして短所を補うことによって自動直進走行の精度向上を図った。

### III センサーフュージョンによる直進自動走行

#### 1. カルマンフィルタを適用したセンサーフュージョン

ノイズを含んだGDS出力とFOG出力を用いて、真の車両方位を推定する方法としてカルマンフィルタ<sup>22)</sup>を採用した。車両の運動を表すシステム方程式が以下の式で表される。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{w}(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k) \quad (4)$$

ここに $\mathbf{x}(k)$ は時刻 $t_k$ のシステムの状態、 $\mathbf{A}(k)$ はシステム行列、 $\mathbf{u}(k)$ はシステム入力、 $\mathbf{B}(k)$ はノイズに対するゲイン行列、 $\mathbf{y}(k)$ は観測信号、 $\mathbf{C}$ は観測行列、 $\mathbf{w}(k)$ 、 $\mathbf{n}(k)$ はシステムと観測器への互いに独立な正規性雑音

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(k+1) \\ \eta(k+1) \\ \mu(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta d(k) & \Delta d(k) \\ 0 & \cos\{r(k)dt\} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \eta(k) \\ \mu(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\{r(k)dt\} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1(k) \\ \omega_2(k) \\ \omega_3(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここに $\varepsilon(k)$ は車両の横方向偏差、 $\eta(k)$ はFOG出力の正弦値、 $\mu(k)$ はFOGドリフトの正弦値である。 $\varepsilon(k)$ 、 $\eta(k)$ のプラントノイズ $\omega_1$ 、 $\omega_2$ はそれぞれ $\Delta d(k)$ 、 $r(k)$ で $\varepsilon(k)$ 、 $\eta(k)$ を偏微分することにより得られる。

$$\begin{bmatrix} \omega_1(k) \\ \omega_2(k) \\ \omega_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\eta(k) + \mu(k)\} dt & 0 \\ 0 & \{-\sin\{r(k)dt\}\eta(k) + \cos\{r(k)dt\}\} dt \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{sp,cd} \\ n_{rate} \end{bmatrix} \quad (16)$$

また、GDSとFOGの観測量は以下のように記述でき

る。系列で以下のように、 $\mathbf{Q}(k)$ 、 $\mathbf{R}(k)$ が定義できる。

$$E(\omega(k)\omega^T(s)) = \delta(k-s)\mathbf{Q}(k) \quad (5)$$

$$E(n(k)n^T(s)) = \delta(k-s)\mathbf{R}(k) \quad (6)$$

ここで、 $\delta(k-s)$ はクロネッカデルタであり、 $k=s$ のとき1、その他で0となる。

離散型カルマンフィルタは以下ようになる。

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}(k) + \mathbf{K}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{C}\mathbf{x}(k)) \quad (7)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T(\mathbf{R}(k) + \mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T)^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(k+1) =$$

$$\mathbf{A}(k)[\mathbf{P}(k) - \mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T(\mathbf{R}(k) + \mathbf{C}\mathbf{P}(k)\mathbf{C}^T)^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P}(k)]$$

$$\mathbf{A}^T(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{Q}(k)\mathbf{B}^T(k) \quad (9)$$

(7)式は状態推定方程式、(8)式はカルマンゲイン方程式、 $\mathbf{P}(k)$ は推定誤差の共分散行列であり(9)式はリカッチの方程式と呼ばれる。図6に示したように自動直進走行状態の車両の運動を線形系と仮定すると、横方向偏差 $\varepsilon(k)$ は以下のように表現できる。

$$\begin{aligned} \varepsilon(k+1) &= \varepsilon(k) + \Delta d(k)\sin\{\phi(k) + \delta(k)\} \\ \sin\{\phi(k) + \delta(k)\} &\approx \sin\phi(k) + \sin\delta(k) \text{ と近似して} \\ &\approx \varepsilon(k) + \Delta d(k)\sin\phi(k) + \Delta d(k)\sin\delta(k) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\Delta d(k)$ はサンプリングインターバル $dt$ で車両が進行した距離、 $\phi(k)$ は真の方位からFOGドリフトを差し引いた方位偏差、 $\delta(k)$ はFOGドリフトとなる。また、FOG出力から算出される方位偏差 $\phi(k)$ は以下のように記述できる。

$$\phi(k+1) = \phi(k) + r(k)dt \quad (11)$$

ここで、 $r(k)$ は車両の旋回角速度である。(11)式の両辺の正弦値をとると、

$$\begin{aligned} \sin\phi(k+1) &= \sin\{\phi(k) + r(k)dt\} \\ &= \sin\phi(k)\cos\{r(k)dt\} \\ &\quad + \cos\phi(k)\sin\{r(k)dt\} \end{aligned}$$

ほぼ直進走行している車両は $\cos\phi(k) \approx 1$ と近似できるので

$$\approx \sin\phi(k)\cos\{r(k)dt\} + \sin\{r(k)dt\} \quad (12)$$

$\eta(k) = \sin\phi(k)$ 、 $\mu(k) = \sin\delta(k)$ 、 $\mu(k+1) = \mu(k)$ とおくと、システム方程式(3)式は、(13)式として表される。

$$\omega_1(k) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial d} n_d = \frac{\partial \varepsilon}{\partial d} n_{sp,cd} dt \quad (14)$$

$$\omega_2(k) = \frac{\partial \eta}{\partial r} n_{rate} \quad (15)$$

ここで、 $n_{sp,cd}$ 、 $n_{rate}$ はそれぞれ速度と旋回角速度のノイズである。したがって、プラントノイズは(16)式となる。

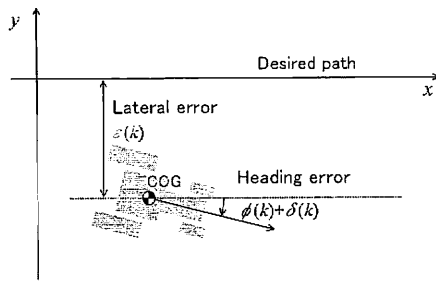


図6 車両の運動モデル

Fig. 6 Vehicle kinematic model

$$\phi_{GDS}(k) = \phi(k) + \delta(k) + n_{GDS} \quad (17)$$

$$\phi_{FOG}(k) = \phi(k) + n_{FOG} \quad (18)$$

両辺の正弦値をとって、

$$\begin{aligned} \sin\phi_{GDS}(k) &= \sin\{\phi(k) + \delta(k) + n_{GDS}\} \\ &= \sin\{\phi(k) + \delta(k)\} \cos n_{GDS} + \cos\{\phi(k) + \delta(k)\} \sin n_{GDS} \\ &\approx \sin\{\phi(k) + \delta(k)\} + \sin n_{GDS} \\ &\approx \sin\phi(k) + \sin\delta(k) + \sin n_{GDS} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sin\phi_{FOG}(k) &= \sin\{\phi(k) + n_{FOG}\} \\ &\approx \sin\phi(k) + \sin n_{FOG} \end{aligned} \quad (20)$$

したがって、観測方程式(4)式は(21)式で記述できる。

$$\begin{bmatrix} \eta_{GDS}(k) \\ \eta_{FOG}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \eta(k) \\ \mu(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin n_{GDS} \\ \sin n_{FOG} \end{bmatrix} \quad (21)$$

ここで、 $\eta_{GDS}(k)$ 、 $\eta_{FOG}(k)$  は GDS と FOG 観測値の正弦値である。

## 2. 走行シミュレーション

上述したカルマンフィルタの動作安定性及び精度を確認するために、コンピュータシミュレーションを実施した。ほ場でマニュアル直進走行によって GDS と FOG データを取得して、カルマンフィルタの入力データとした。さらに直進走行中はトリンプル社製の RTK-GPS (MS750) によって走行軌跡を計測し、シミュレーションによる推定値と比較することでカルマンフィルタの推定値の精度を評価した。MS750 の公称精度は 2cm である。カルマンフィルタに必要な GDS、FOG、角速度、速度の誤差共分散行列  $Q(k)$ 、 $R(k)$  もマニュアル直進走行のデータを用いて算出した。また、推定誤差共分散行列の初期値は、シミュレーションの推定精度が良好だったときに出力された推定誤差共分散行列とした。カルマンフィルタの初期パラメータを表 2 に示す。走行速度は 0.5 m/s で約 40 m 走行し、このとき GPS によって計測した走行軌跡からのモデル出力誤差の推移を図 7 に示した。GDS と FOG の走行軌跡は (22) 式によるデッドレコニングを仮定して計算した。

$$\varepsilon = \Delta d(k) \sum_k \sin \Delta \phi(k) \quad (22)$$

ここで、 $\Delta d(k)$  は時刻  $t_{k-1}$  から  $t_k$  の間に進んだ距離を示

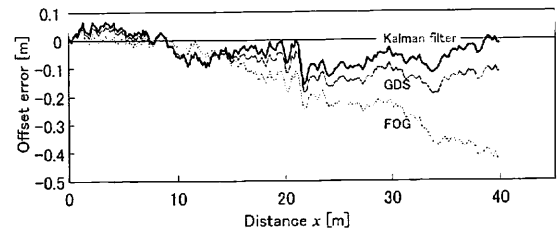


図7 シミュレーションによる横方向偏差の比較

Fig. 7 Comparison of lateral offset calculated by traveling simulation

表2 カルマンフィルタの初期パラメータ

Table 2 Initial parameter for kalman filter

$n_{speed}$ $n_{rate}$	$Q(k) = \begin{bmatrix} 0.003335 & 0 \\ 0 & 0.039741 \end{bmatrix}$
$\sin(GDS)$ $\sin(FOG)$	$R(k) = \begin{bmatrix} 0.0000527340 & 0 \\ 0 & 0.0000010695 \end{bmatrix}$
Initial error covariance	$P(0) = \begin{bmatrix} -43.493211 & 0.000068 & 0.000062 \\ 0.000068 & 0.047277 & 0.000001 \\ 0.000062 & 0.000001 & 0.000001 \end{bmatrix}$

す。走行シミュレーションでは走行速度を 0.5 m/s と一定値に固定して時間を掛けることで算出した。

走行軌跡の FOG による推定値では、デッドレコニングの特性とドリフトエラーの特性が顕著に現れており、終端地点では大きな誤差が確認できる。それに対して、カルマンフィルタを適用することで誤差の増大が抑えられ、精度の高い推定が行われたと推察できる。また、FOG の横方向の R.M.S. 偏差が 19.5 cm、GDS の R.M.S. 偏差が 9.5 cm であるのに対して、カルマンフィルタによる推定値の R.M.S. 偏差は 6.1 cm となり精度の向上が確認できた。本結果から、FOG、GDS、カルマンフィルタの順で横方向偏差の推定精度の向上が認められる。カルマンフィルタによる方位出力と GDS 方位出力、FOG 方位出力を比較したものが図 8 である。カルマンフィルタによる方位出力は、FOG 出力に比べて若干振幅が大きくなっているものの、GDS のノイズ成分を除去し、かつドリフトエラーが積算しない方位を推定していると考えられる。その結果、GDS 出力、FOG 出力の誤差成分を除去し、その効果が横方向偏差の推定精度に好影響を与えたものと推察される。図 9 にカルマンフィルタにより推定された FOG リフトとドリフトの少ない FOG-B から算出した FOG-A の計測誤差の比較を示す。すなわち、FOG-A のドリフトが非常に小さいと仮定した場合の FOG-B のドリフト推定精度をみる事ができる。ドリフトの初期値に GDS と FOG のオフセット値を入力しているため、初期値が  $0^\circ$  となっていない。FOG-B からの誤差はノイズを含んでいるが明らかにドリフト傾向を示している。それに対して、推定ドリフトは FOG-B

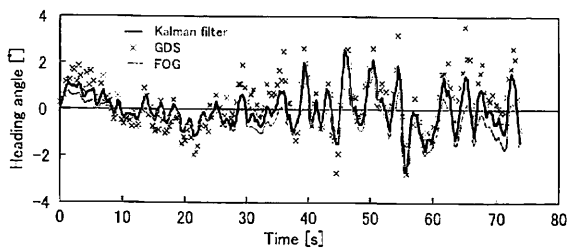


図8 シミュレーションによる方位角の比較

Fig. 8 Comparison of heading angle calculated by traveling simulation

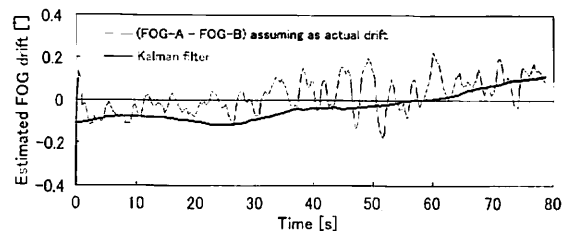


図9 FOGのドリフト推定値

Fig. 9 FOG drift estimated by Kalman filter

からの誤差を追従する形となっており、ノイズも抑えられている。また、推定ドリフトは80秒で約 $0.2^\circ$ となっており、FOG-Aの性能諸元にもほぼ合致することからも、構築したカルマンフィルタは適正にドリフトを推定しているものと考えられる。

### 3. 自動直進走行試験

走行シミュレーションの結果、本研究で考案したカルマンフィルタは車両方位、横方向偏差を精度良く推定できると判定された。そこで、カルマンフィルタによってGDSとFOGを融合した自動直進走行試験をほ場において実施した。目標方位は約40mのマニュアル操作で行ったティーチング走行で取得したGDSの方位データとした。コントローラは前述したGDS自動直進走行システム、FOG自動直進走行システムと同様に(1)式を用いた。ただし、(1)式中の横方向偏差 $\varepsilon$ はカルマンフィルタから出力されるパラメータであるので、(2)式によって計算される値ではなく、フィルタ出力値を使用した。図10は走行速度0.63 m/s時の自動直進走行時の軌跡を表している。40 m程度の走行に対してR.M.S. 偏差は3.8 cm、最大偏差10 cm、目標経路との平行度 $0.004^\circ$ とほぼ目標方位となる $x$ 軸方向と平行となった。また、直進走行開始直後に若干振れているものの、回帰直線に対する振幅は $\pm 5$  cm程度で推移しており、全体としては振動の少ない直進性の高い走行結果が得られた。このデータは横方向のずれで、実作業を可能にする誤差 $\pm 10$  cmを満足している。しかし、磁気環境の変動が存在するほ場によっては図11のような結果も得られた。GDSに比べて精度は向上しているものの最大偏差は17 cmと大きく、長周期な変動を有した走行となっている。この原

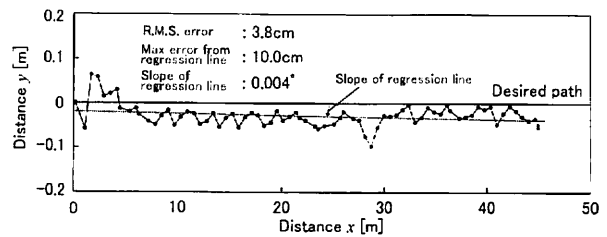


図10 センサーフュージョンによる自動走行の走行軌跡(1)  
Fig. 10 Traveling trajectory obtained by automatic guidance using sensor fusion (1)

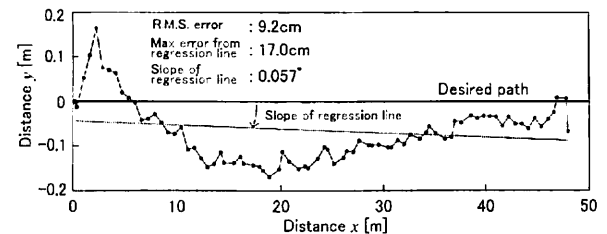


図11 センサーフュージョンによる自動走行の走行軌跡(2)  
Fig. 11 Traveling trajectory obtained by automatic guidance using sensor fusion (2)

因として、本手法のカルマンフィルタではGDSノイズがガウシアンという仮定をしたが、実際はガウシアンノイズではなく地磁気の変動によってバイアスエラーが生じていると推察された。このバイアスエラーが直進精度に影響を及ぼしたのと考えられる。この問題については次報以降で取り扱う。

## IV 摘要

FOGとGDSを融合した自動直進走行システムの制御アルゴリズムの開発を行なった。始めに、個々のセンサの基本性能を把握するために、基礎実験及び自動直進走行試験を行い、センサの誤差特性と自動直進走行の精度を検証した。FOGによる自動直進走行試験では、GDSを使用して目標方位を取得した。45 mの走行距離において、目標経路に対して終端位置で誤差が40 cmと低い精度が確認された。センサーフュージョン手法にカルマンフィルタを採用し、シミュレーション及び自動直進走行試験を実施した。シミュレーションでは、高精度に横方向偏差、車両方位を推定できることを確認した。自動直進走行試験では、速度0.63 m/s、距離40 m程度の走行に対してR.M.S. は3.8 cm、最大偏差10 cm、目標経路との平行度 $0.004^\circ$ とほぼ目標方位と平行に走行できた。回帰直線に対する振幅は $\pm 5$  cm程度で推移しており、振動が少ない直進性の高い走行結果が得られた。今後、磁気環境に影響されにくいシステムを構築することと、さらにFOGから低コストなジャイロスコープへの移行が課題と考えられる。

## 参考文献

- 1) 野口 伸: GPS とその応用, 農機誌, 58(4), 130-134, 1996
- 2) 鳥居 徹: 自律走行のための作物列の画像処理に関する研究(第2報), 農機誌, 57(6), 53-59, 1995
- 3) 岡本博史, ほか: 自動うね合わせのための作物列センサ(第1報), 農機誌, 61(6), 159-167, 1999
- 4) 草野信之, ほか: 自律走行のための作物列の画像処理に関する研究(第1報), 農機誌, 57(4), 37-44, 1995
- 5) Everett, H.R.: Sensors for Mobile Robots, AK Peters Ltd, 35-68, 1995
- 6) 野波和好, ほか: 乗用田植機の走行制御に関する研究(第1報), 農機誌, 56(4), 107-114, 1993
- 7) 野波和好, ほか: 乗用田植機の走行制御に関する研究(第2報), 農機誌, 56(3), 77-84, 1994
- 8) 野波和好, ほか: 乗用田植機の走行制御に関する研究(第3報), 農機誌, 57(6), 69-75, 1995
- 9) 石田三佳, ほか: 飼料生産圃場における自律走行トラクタに関する研究, 農機誌, 60(2), 59-66, 1998
- 10) 西村秀司, ほか: 牧草収穫作業のためのトラクタの自動操舵に関する研究, 農機誌, 58(2), 31-38, 1996
- 11) 行本 修: 耕うん作業を行う自律移動ロボットに関する研究, 78-93, 北海道大学博士学位請求論文, 1998
- 12) 井上慶一, ほか: 自律走行のための GPS とジャイロのカルマンフィルタによるセンサーフュージョン技術(第1報), 農機誌, 61(4), 103-113, 1999
- 13) Bergeijk, J., et al: Enhancement of Global Positioning System with Dead Reckoning, International AgEng'96 Conference on Agricultural Engineering, PAPER96G-013, 1996
- 14) 行本 修, ほか: 磁場のセンシングとその応用, 農機誌, 58(5), 93-98, 1996
- 15) 大越孝敬: 光ファイバーセンサ, オーム社, 207-252, 1986
- 16) 保立和夫: 光ファイバーセンサ, 日本機械学会誌, 95(12), 26-30, 1992
- 17) 11) に同じ
- 18) 11) に同じ
- 19) 14) に同じ
- 20) 中島健一郎, ほか: 航法用地磁気方位センサの高精度補正法(第1報), 農機誌, 59(1), 49-58, 1997
- 21) 11) に同じ
- 21) 西山 清: パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善, 1993  
(原稿受理: 2000年9月25日・質問期限: 2001年9月30日)