

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2報)

—地磁気の時間・空間変動を考慮した直進制御器の構成—

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

要 旨

本研究の目的は、地磁気方位センサ (Geomagnetic Direction Sensor ; GDS) とジャイロ스코ープを使用した自動直進走行システムの開発である。第1報において目標方位を一定とする従来の自動直進方式では地磁気の時間・空間変動及びジャイロドリフトにより高精度な自動直進走行が実現できないことが明らかとなった。そこで本研究では、地磁気の時間・空間変動とジャイロドリフトを動的に補償した自動直進アルゴリズムを考案した。有人直進走行時のデータを使用してシミュレーションを行った結果、GDS に比べて R.M.S. で約 70% 精度が向上した。また、考案したアルゴリズムを適用して自動直進走行試験を行った結果、高い再現性が確認された。

[キーワード] 自動直進走行, 地磁気方位センサ, ジャイロ스코ープ, センサーフュージョン

Automatic Guidance System based on Sensor Fusion of Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope (Part 2)

—Construction of Steering Controller Considering Geomagnetic Warp—

Akira MIZUSHIMA*¹, Noboru NOGUCHI*¹, Kazunobu ISHII*¹, Hideo TERAOKA*¹,
Osamu YUKUMOTO*², Satoshi YAMAMOTO*³

Abstract

The objective of this research is to develop an automatic guidance system based on sensor fusion of a geomagnetic direction sensor (GDS) and a gyroscope. From the first report, it was confirmed that an accurate automatic navigation by a fixed desired heading direction was very difficult because of a temporal and spatial geomagnetic variation and a drift error of a gyroscope. In this study, we proposed the dynamic compensation method against both a geomagnetic warp and a gyro drift by constructing the adaptive guidance system. From the computer simulation, the accuracy of sensor fusion guidance system improved about 70% compared with the GDS alone. To evaluate robustness of the developed system, a field test using the developed guidance system was carried out. From the test, the accuracy and robustness of the guidance system improved by utilizing the proposed sensor fusion method using the GDS and the gyroscope.

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

* 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 011-706-2568)

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 TEL 0298-38-8812)

Agricultural Research Center, National 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

現在、日本の農業は、後継者不足に伴う高齢化や農作物の輸入自由化による価格低迷など、深刻な問題に直面している。一方、経営耕地規模の推移をみると、都府県では4 ha以上、北海道では50 ha以上と増加しており¹⁾、一戸あたりの耕地面積が増加した結果、農用車両のオペレータの作業負担、精神的負担²⁾は年々大きくなっている。また、海外でも高齢化は日本同様に進んでおり、一戸あたりの耕地面積が200 ha近い北米や平均20 haのヨーロッパなどでは、大型トラクタで高速作業を行うため事故が多発している。このような背景から、農用車両のオペレータの負担を少しでも軽減することが求められている。そこで、本研究では農用車両の直進作業における運転作業を自動化して、オペレータの作業負担を軽減させる自動直進走行システムの開発を目的とした。

自動直進走行システムの実用化を図る上で問題となるのがコストである。現在、RTK-GPSを使用した自動直進走行システムの研究は数多く行われているが、日本の農家で1,000万円以上の収入がある農家割合はわずか6.3%³⁾であり、商品化の目処は立っていない。そこで、本研究ではコストを抑えられる内界センサを使用することが得策と判断し、地磁気方位センサ(GDS)とジャイロスコープを併用した。GDSやジャイロを使用した自動直進走行システムの研究は様々な分野で報告されているが^{4)~6)}、位置計測センサもしくはカメラ画像と併用している研究が多く、内界センサのみで実際の農作業に耐えうるシステム研究報告は少ない^{7)~10)}。

第1報では、GDSと光ファイバージャイロ(FOG)をカルマンフィルタによって融合することで、複合化手法の優位性を確認した^{11)~13)}。しかし、走行の再現性が確保できないといった問題が生じた。その原因として、カルマンフィルタは、GDSの計測誤差が平均値0のガウシアンノイズであるという仮定のもとに成立しているが、自動走行中のGDSの誤差は平均値0のガウシアンノイズではなく、地磁気の時間・空間変動によってバイアスエラーが生じていることが予想された。

本報ではこのような、地磁気の特性を考慮した方位算出アルゴリズム及び直進制御アルゴリズムを考案することで、車両の方位情報の高精度化と自動直進走行の再現性向上を試みた。

II 重み付け平均化手法による センサーフュージョン

1. 分散重み付け平均による GDS と FOG のセンサー フュージョン

ここでは、GDSとFOGのフュージョン手法について説明する。ある物理量の真値 x_{true} に対して、独立な二つの推定値 x_1, x_2 が与えられた場合に、最適解 $x_{estimate}$ をこれらの線形結合として求めることを考える¹⁴⁾。

$$x_{estimate} = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (1)$$

x_1, x_2 は共に不偏推定値であり、その推定誤差に相関はなく、かつそれぞれの分散値は σ_1^2, σ_2^2 である、という統計的な情報は既知であるとする。

$x_{estimate}$ が不偏推定値となるためには $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ でなければならない。したがって $x_{estimate}$ は次のように書ける。

$$x_{estimate} = (1 - \alpha_2)x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (2)$$

また、 $x_{estimate}$ の推定誤差分散は次のようになる。

$$(\sigma_{estimate})^2 = (1 - \alpha_2)^2 \sigma_1^2 + \alpha_2^2 \sigma_2^2 \quad (3)$$

これを最小にするという条件(最小分散推定値)から、 α_2 は次のように求められる。

$$\alpha_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (4)$$

以上より、最適な推定値は次式で示される。

$$x_{estimate} = \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right)x_1 + \frac{\sigma_1^2 x_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \frac{\sigma_2^2 x_1 + \sigma_1^2 x_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5)$$

推定値の精度を誤差分散の逆数で定義すると、(5)式からわかるように、 $x_{estimate}$ は x_1, x_2 の相対精度による重み付き平均値¹⁵⁾(Variance Weighted Average; VWA)となる。

いま、GDSの観測方位 ϕ_{GDS} 、FOGの観測方位 ϕ_{FOG} から、真値 ϕ_{true} を推定する最適な推定値 $\phi_{estimate}$ を求めることを考えると $\phi_{estimate}$ は(5)式より、

$$\phi_{estimate} = \frac{\sigma_{FOG}^2 \phi_{GDS} + \sigma_{GDS}^2 (\phi_{FOG} - \eta)}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{FOG}^2} \quad (6)$$

と表わせる。ここで、 η はFOGを絶対方位に変換するバイアスエラーである。しかし、GDSには時間・空間変動が、FOGにはドリフトが存在するため(6)式をそのまま使用することはできない。

2. 地磁気の時間・空間変動及びジャイロドリフトの 除去

GDSは、地球上どこでも存在する地磁気を検出して、磁北を 0° とした絶対方位を計測することができる。地磁気には、年間を通して変化するゆっくりとした経年変化や1日を周期とする日変化(日較差)などが存在する。また、地磁気の大きさは微弱なため近くに磁性体があるとかかなり大きな局所的変化を生じる。そのため、ほ場全体のGDSの平均値を目標方位とするティーチング走行手法では、地磁気の空間変動が存在するほ場において誤差を含んでしまう。また、日変化も存在するため、1度取得した目標方位は数時間後には使用できない。一方、FOGはS/N比が高く計測精度は高いものの、電源を入れた瞬間を 0° とする相対方位しか計測できないため、なんらかの方法で絶対方位を参照しなければならない。また、誤差が積算するジャイロドリフトが存在するため長時間の使用も難しい。

そこで本研究では、自動直進走行直前の数mをマニュアル走行し、その間のVWA平均値を自動直進走行の初期の目標方位として自動直進走行をおこなった。さ

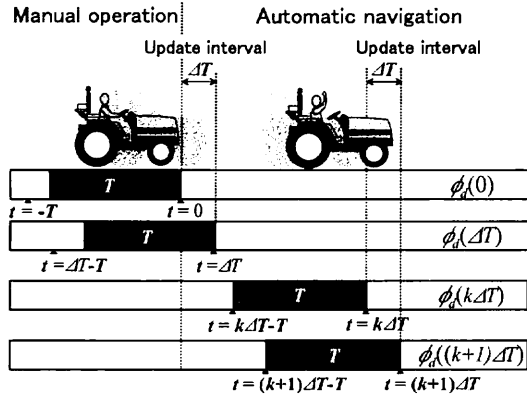


図1 可変目標方位制御による自動直進アルゴリズムの概要
Fig. 1 Algorithm of automatic navigation by variable desired heading control

らに、自動直進走行中に目標方位を逐次更新することで地磁気の時間・空間変動及びジャイロドリフトの除去を試みた。その概要を図1に示す。初期目標方位は自動直進走行開始時刻 $t=0$ から過去 T s 間のマニュアル走行中に取得した VWA とした。その後 ΔT s 間は、初期目標方位を使用して走行するが、 $t=\Delta T$ になった時、 $t=\Delta T$ から過去 T s 間の自動直進走行中及びマニュアル走行中に取得した VWA を新たな目標方位として更新する。つまり、 ΔT s ごとに過去 T s 間の連続データから VWA を目標方位とする。したがって、 $k\Delta T \leq t < (k+1)\Delta T$ において目標方位は $k\Delta T - T < t \leq k\Delta T$ における VWA の平均値となる。本報では、本方式を可変目標方位制御と呼ぶ。

このとき、 $k\Delta T - T < t \leq (k+1)\Delta T$ における GDS, FOG の出力特性を模式的に示すと、図2のようになる。時刻 t における GDS の観測方位 $\phi_{GDS}(t)$ 、FOG の観測方位 $\phi_{FOG}(t)$ は以下の式で表わせる。

$$\phi_{GDS}(t) = \phi_{true}(t) - \delta_{GDS}(t, \Omega) + \varepsilon_{GDS}(t) \quad (7)$$

$$\phi_{FOG}(t) = \phi_{true}(t) + \eta(k\Delta T - T) - \int_{k\Delta T - T}^t \delta_{FOG}(i) di - \varepsilon_{FOG}(t) \quad (8)$$

ここで、 $\phi_{true}(t)$ は真の方位、 $\delta_{GDS}(t, \Omega)$ は GDS の時

$$\phi_d(k\Delta T, T) = \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)(\bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) - \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T)) + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T)(\bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) - \eta(k\Delta T - T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \quad (13)$$

ここで、

$$\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) = \frac{1}{T} \sum_{i=k\Delta T - T}^{k\Delta T} (\phi_{GDS}(i) - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T))^2 \quad (14)$$

$$\phi_{estimatic}(t) = \frac{\sigma_{FOG}^2(t)(\phi_{GDS}(t) - \delta_{GDS}(t, \Omega)) + \sigma_{GDS}^2(t)(\phi_{FOG}(t) - \eta(k\Delta T) - \int_{k\Delta T}^t \delta_{FOG}(i) di)}{\sigma_{GDS}^2(t) + \sigma_{FOG}^2(t)} \quad (16)$$

と計算できる。ここで、 $k\Delta T - T < t \leq (k+1)\Delta T$ 間で地磁気の時間・空間変動が一定、ジャイロドリフトが存在しないという仮定から、

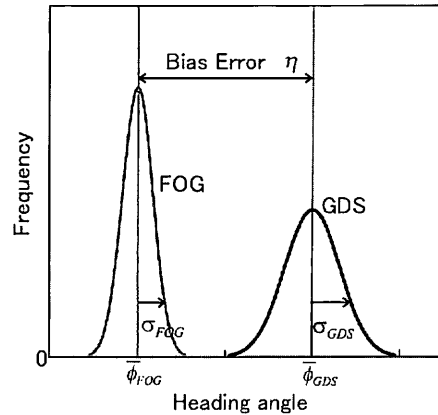


図2 GDS と FOG の出力特性の概念図
Fig. 2 Characteristics of GDS and FOG output

間・空間変動、 Ω は空間パラメータ、 $\varepsilon_{GDS}(t)$ は GDS のノイズである。また、 $\eta(k\Delta T - T)$ は時刻 $(k\Delta T - T)$ における FOG のバイアスエラー、 $\int_{k\Delta T - T}^t \delta_{FOG}(i) di$ は時刻 $(k\Delta T - T)$ から時刻 t までの FOG ドリフトエラー、 $\varepsilon_{FOG}(t)$ は FOG のノイズである。 $k\Delta T - T < t \leq k\Delta T$ における GDS と FOG の平均値は

$$\bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) = \bar{\phi}_{true}(k\Delta T, T) + \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) - \bar{\varepsilon}_{GDS}(k\Delta T, T) \quad (9)$$

$$\bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) = \bar{\phi}_{true}(k\Delta T, T) + \eta(k\Delta T - T) + \bar{\delta}_{FOG}(k\Delta T, T) + \bar{\varepsilon}_{FOG}(k\Delta T, T) \quad (10)$$

と表わせる。 $\delta_{FOG}(k\Delta T, T)$ は $k\Delta T - T < t \leq k\Delta T$ 間のドリフトである。 ε_{GDS} , ε_{FOG} はガウシアンノイズの仮定より $\bar{\varepsilon}_{GDS}(n\Delta T, T) = 0$, $\bar{\varepsilon}_{FOG}(n\Delta T, T) = 0$ となる。さらに、時間 T s 間でジャイロドリフト $\delta_{FOG}(k\Delta T, T)$ は 0 と仮定すると、(9), (10)式は、

$$\bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) = \bar{\phi}_{true}(n\Delta T, T) + \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) \quad (11)$$

$$\bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) = \bar{\phi}_{true}(n\Delta T, T) - \eta(k\Delta T - T) \quad (12)$$

となる。したがって、 $k\Delta T - T < t \leq k\Delta T$ における目標方位 $\phi_d(k\Delta T, T)$ は VWA を用いて、(6)式に基づき(13)式によって計算できる。

$$\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T) = \frac{1}{T} \sum_{i=k\Delta T - T}^{k\Delta T} (\phi_{FOG}(i) - \bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T))^2 \quad (15)$$

また、 $k\Delta T \leq t < (k+1)\Delta T$ 間の時刻 t における推定方位は(6), (7), (8)式より、

$$\delta_{GDS}(t, \Omega) = \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) \quad (17)$$

$$\eta(k\Delta T) = \eta(k\Delta T - T) \quad (18)$$

$\int_{k\Delta T}^t \delta_{FOG}(i) di = 0$ (19) とすると、推定方位 $\phi_{estimate}$ は
 が成り立つ。また、

$$\sigma_{GDS}^2(t) = \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T), \sigma_{FOG}^2(t) = \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)$$

$$\phi_{estimate}(t) = \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)(\phi_{GDS}(t) - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T)) + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T)(\phi_{FOG}(t) - \eta(k\Delta T - T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \quad (20)$$

となる。よって、 $k\Delta T \leq t < (k+1)\Delta T$ 間の時刻 t における推定方位偏差 $\Delta\phi_{estimate}(t)$ は (13), (20) 式より、

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{estimate}(t) &= \phi_{estimate}(t) - \phi_d(k\Delta T, T) \\ &= \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)(\phi_{GDS}(t) - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T)) + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T)(\phi_{FOG}(t) - \bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \end{aligned} \quad (21)$$

と計算できる。よって、VWA による可変目標方位制御を適用することで、GDS の時間・空間変動及び FOG のバイアスエラー、ジャイロドリフトをキャンセルすることができる。また、VWA に使用する GDS, FOG の分散 $\sigma_{GDS}^2, \sigma_{FOG}^2$ を、目標方位の更新と同時に変更する。これは、自動直進走行の制御精度や走行路面の状態によってそれぞれの分散は変動することが予想されることから導入されたものである。制御精度や路面状態が悪化した場合、応答性が低く傾斜に弱い GDS は信頼性が低くなる。しかし、同時に GDS の分散の増加率は、FOG の分散の増加率に比べて大きくなるので、VWA における FOG の優先度は高くなり、信頼性の低くなった GDS の優先度は低くなる。このことから、VWA は制御精度や路面状態の変動に対しても適切に方位が推定されることが期待できる。

3. シミュレーションによる VWA の精度評価

実際に GDS (FGM-300A ; Watson Industries) と FOG (JCS-7401A ; 日本航空電子工業(株) ; 公称精度 $2^\circ/\text{min}$) をトラクタに搭載して直進走行を行い、その計測値から (20) 式による VWA の推定方位偏差を算出するシミュレーションを行うことで、VWA の推定方位偏差の推定精度を評価した。供試車両には、トラクタ (クボタ GL320) を使用した。約 400s 間マニュアルで直進走行した。走行した場合は、耕うん整地され比較的傾斜の少ない状態であった。また、外周がコンクリートで囲ま

れており、その周辺では地磁気の空間変動が存在すると推察された。マニュアル直進走行は、ほ場に直線を引いてそれを追従することによって行った。さらに、高精度の評価用 FOG (JG-35FD ; 日本航空電子工業(株) ; 公称精度 $3^\circ/\text{h}$) を供試して、同時計測した。

このとき計測したデータから計算した GDS 平均値の分散と平均化時間 W の関係を図 3 に示す。 W が大きくなるにしたがって分散は徐々に減少し、10 秒を越えたあたりで安定しているのがわかる。よって、本研究では、最適な平均化時間 T を $T=10\text{s}$ と決定した。また、図 4 に評価用 FOG から求めたバイアスエラーの誤差と平均化時間 W の関係を示す。図 4 から、 W が 12s 前後まではほぼ一定値となっているが、13s を越えたあたりから誤差が増加しているのが確認できる。よって、FOG のドリフトエラーが無視できる範囲 $T + \Delta T$ を $T + \Delta T \leq 12$ と決定した。これらのことから、 $T=10$ より $\Delta T=2\text{s}$ と決定した。

図 5 に FOG, GDS, VWA の方位偏差と評価用 FOG との誤差の推移を示した。走行開始初期 10s 間の平均値をそれぞれ、FOG, GDS, 評価用 FOG の目標方位として方位偏差を算出した。図 5 から供試 FOG の方位偏差の誤差は、ノイズ成分は小さいものの、あきらかにドリフトが生じており、計測終了地点では約 1° を越えた誤差となっている。一方、GDS の方位偏差は誤差の増加が見られず $\pm 0.5^\circ$ の範囲に納まっているが、ノイズ成分は大

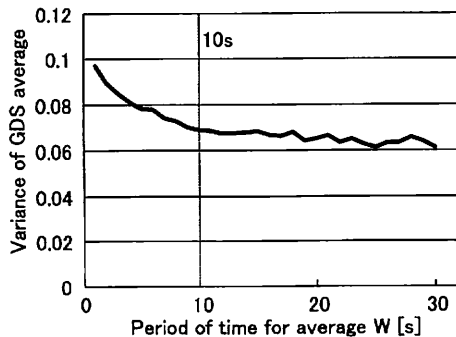


図 3 平均化時間と GDS 平均値の分散の関係

Fig. 3 The relation between period of time of average W and variance of GDS average

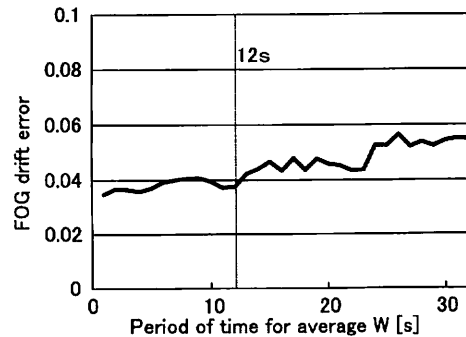


図 4 平均化時間と FOG ドリフトの関係

Fig. 4 The relation between period of time of average W and error of bias error

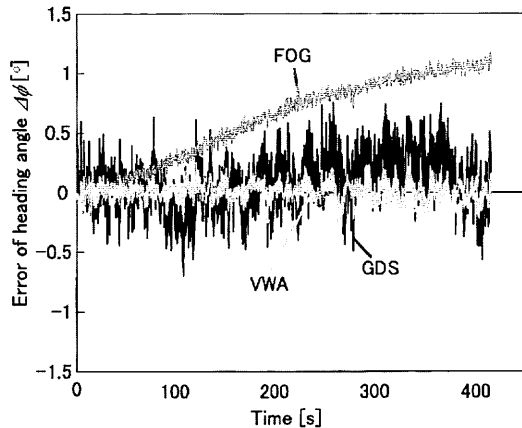


図5 GDS, FOG, VWA から算出した方位偏差の誤差の比較

Fig. 5 Comparison of error of heading offset obtained by GDS, FOG and VWA

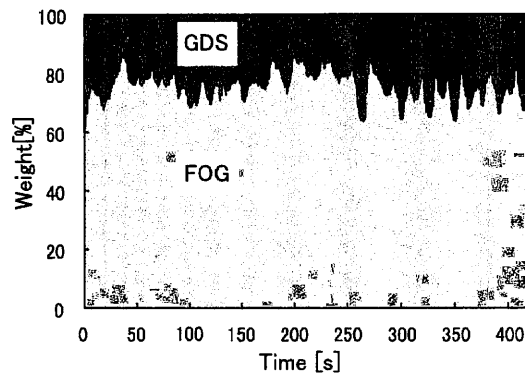


図6 VWA における GDS と FOG の重みづけの推移
Fig. 6 Weighted ratio of GDS and FOG with VWA

きくなっている。また、250s~400sにおいて地磁気の空間変動も確認できる。しかし、VWAではGDSのノイズ成分及びFOGのドリフト成分が良好に除去され、高精度に方位偏差が算出されているのが確認できる。また、評価用FOGからの差を検出方位偏差誤差とし、R.M.S.を計算するとFOGは 0.71° 、GDSが 0.26° であるのに対して、VWAでは 0.08° とGDSに比べ約70%精度が向上した。試験中に算出した方位のGDSデータとFOGデータの重みの時間推移を図6に示した。約70%の重みでFOGデータを採用しており、常にFOGに重きをおいているため、GDSのノイズを最小限に抑えているといえる。また、FOGデータの重みが大きいにもかかわらず、FOGのドリフト成分がのらず、可変目標方位制御によって効果的にFOGドリフトを除去することができた。図7に評価用FOGから算出したバイアスエラー η とFOGの誤差の推移、評価用FOGから算出した空間変動 δ_{GDS} とGDSの誤差の推移を示す。図から、 η 及び δ_{GDS} は良好にFOG, GDSの誤差を追従しており、 $T, \Delta T$ が適切であることが確認された。

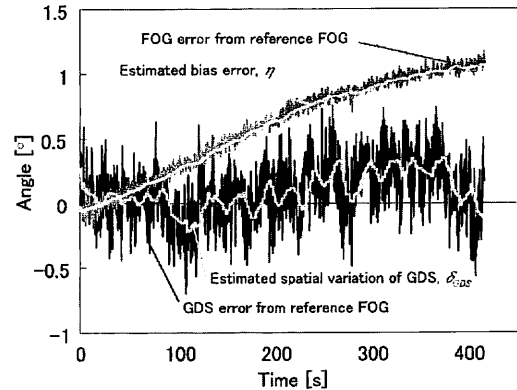


図7 FOGの誤差とバイアスエラー及びGDSの誤差と空間変動の推移

Fig. 7 Transition of FOG error and bias error, and GDS error and spatial error of GDS

III 自動直進走行試験

1. 自動直進走行の制御法

VWAによる可変目標方位制御の精度を評価するため、自動直進走行試験を行った。また、GDS単独による自動直進走行試験も行い、VWAによる可変目標方位制御との比較を行った。GDSによる自動直進走行は、ティーチング走行をおこない従来の目標方位を固定して行う手法を適用した。以降、この方式を固定目標方位制御と呼ぶ。VWAによる可変目標方位制御のフローチャートを図8に示す。操舵制御は第1報と同様のデッドレコニングで算出した横方向偏差 $\varepsilon(t)$ と方位偏差 $\Delta\phi(t)$ から構成されるPI制御器を使用した。

$$\Psi(k) = \alpha \Delta\phi(k) + \beta \varepsilon(k) \quad (22)$$

$$\varepsilon(k) = \sum v(k) \Delta t \sin \Delta\phi(k) \quad (23)$$

ここで、 $\Psi(k)$ は算出操舵角、 α, β は制御ゲイン、 $v(k)$ は車両速度、 Δt はデータサンプリングインターバルである。 α, β は試行錯誤的に求めた。また、本試験では $v(k)$ は 0.5 m/s と一定とした。(23)式は $v(k)$ と $\Delta\phi(k)$ の微小な誤差によって、特に $\Delta\phi(k)$ の誤差によって $\varepsilon(k)$ の誤差は蓄積する。本研究は、 $\Delta\phi(k)$ の誤差をできるだけ除去することを目標として、VWAによる可変目標方位制御を考案し、(22), (23)式を適用した。

2. 自動直進走行システムのハードウェア

GDS, FOG, 供試車両ともに精度評価試験と同様のシステムを使用した。供試車両であるトラクタ(クボタGL320)は4輪駆動の小型トラクタであり、マニュアル走行、自動走行の切り替えが可能である。自動走行のための機能として、エンジン停止、アクセル開度、シャトル位置(前進, 中立, 後進), ブレーキ, ポンパ位置(ヒッチ上下位置), ステアリング角の制御, 及びステアリング角, シャトル位置, ポンパ位置の計測が可能である。自動直進走行システムの概観を図9に示した。GDSをトラクタの上部に、FOGを座席後部に設置した。

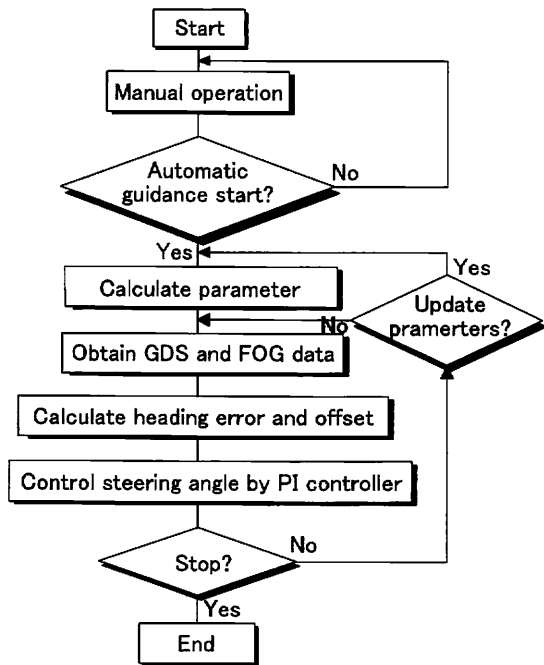


図 8 VWA による可変目標方位制御のフローチャート
Fig. 8 Flow chart of variable desired heading control with VWA



図 9 自動直進システムの概観
Fig. 9 Overview of automatic navigation system

3. GDS による固定目標方位制御を適用した自動直進走行

GDS による固定目標方位制御を適用した自動直進走行試験を行った。再現性の精度も確認するため、同一の場所で 3 回繰り返して走行した。まず、ティーチングを行って目標方位を取得し、3 回の自動直進走行はすべてこの目標方位を使用した。ティーチングから 3 回目の自動直進走行終了までの所要時間は、約 10 分強であったため、地磁気の時変動はないと考えられる。試験場所は VWA の精度評価試験で使ったほ場と同様の耕うん整地されたほ場を使用した。また、GDS の出力方位は、傾斜補正を施した修正方位¹⁶⁾を使用した。

図 10 に自動直進走行の走行軌跡を示す。走行軌跡は

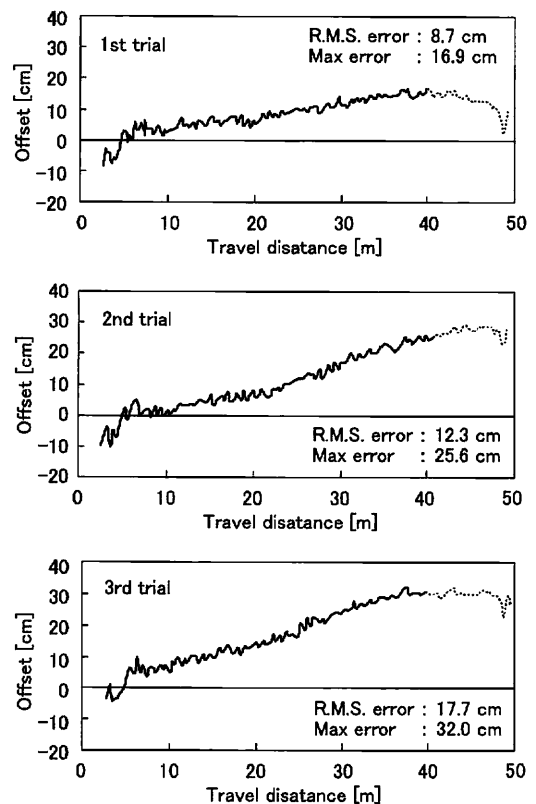
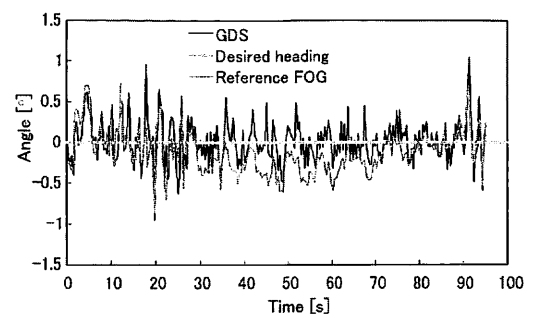
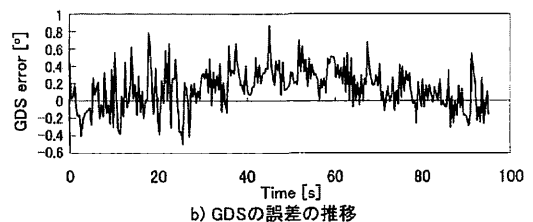


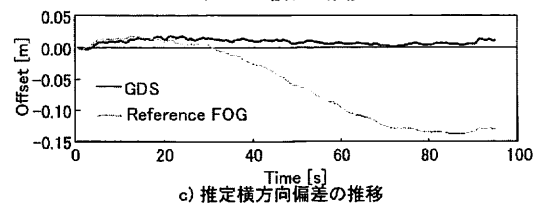
図 10 GDS による自動直進走行の走行軌跡
Fig. 10 Trajectories obtained by automatic navigation with GDS



a) GDS, 評価用 FOG の推移



b) GDS の誤差の推移



c) 推定方向偏差の推移

図 11 GDS による自動直進走行の評価
Fig. 11 Evaluation of automatic navigation with GDS

自動追尾トータルステーション AP-L1 (トプコン社製) によって計測した。また、GDS の自動直進走行試験の総合結果を表1に示す。評価値として、目標経路からの誤差の R.M.S., 目標経路からの最大偏差, 走行軌跡から算出した回帰直線からの最大偏差, 回帰直線の目標経路に対する傾きを算出した。VWA による可変目標方位制御を適用した自動直進走行試験はほ場の大きさと操作方法から 35 m 前後しか走行できないため, 50 m 前後走行した GDS の自動直進走行も, 走行開始 35 m の位置までの走行軌跡 (図 10 の実線部分) から表 1 の性能値を算出した。図から GDS の自動直進走行は精度, 再現性ともに低い結果となっているのが確認できる。図 11 に 2 回目の走行における GDS 及び評価用 FOG の推移, 評価用 FOG から算出した GDS の誤差の推移, GDS, 評価用 FOG のそれぞれから式によって求めた推定横方向偏差の推移を示した。図から, 車両は GDS を使用して正しく目標方位に制御されている。しかし, 高精度 FOG の出力を見ると, 途中で目標方位に対して負の方向に振れた推移となっており, 車両が左方向に振れた走行となっていることが推察される。実際の走行軌跡は, 走行開始から 35 m ぐらいまで, 目標経路に対して左に振れた走行となっている。これは, 地磁気の空間変動によって, 目標方位との方位偏差に誤差が生じていることが原因と考えられる。図 11 の評価用 FOG から算出した

GDS の誤差の推移から, 地磁気の空間変動は最大で 1° 以上あることがわかる。また, 推定横方向偏差の推移からも, GDS の推定横方向偏差は 5 cm 以下におさまっているが, FOG の推定横方向偏差は左に約 15 cm 近く曲がった軌跡となっており, 実際の走行軌跡に近い軌跡となっている。これらのことから, 地磁気の空間変動によって, 方位偏差 $\Delta\phi(k)$ に誤差が生じ, その誤差が蓄積したことで推定横方向偏差の誤差も増加したことがわかった。さらに, GDS のノイズから, 走行軌跡にも細かな振動が生じていることもわかる。R.M.S. 誤差は 12.9 cm, 最大誤差の平均値は 24.8 cm, 回帰直線からの最大偏差の平均値は 8.8 cm, 回帰直線の目標経路からの傾きは 0.44° となった。

4. VWA による可変目標方位制御を適用した自動直進走行

GDS の試験と同様, 再現性及び精度を評価するため VWA による可変目標方位制御の自動直進走行試験は 4 回繰り返して行った。VWA による可変目標方位制御の自動直進走行時の設定を表 2 に示した。T, ΔT はほ場の磁気環境, 路面の状態などによって左右されるが, 本研究では, VWA の精度評価試験で算出した $T=10$, $\Delta T=2$ を最適と判断し使用した。マニュアル走行は精度評価試験と同様, ほ場に直線を引いてそれを追従した。図 12 に VWA による可変目標方位制御を適用した自動直進走行の走行軌跡を示した。また, このときの総合結果

表1 GDS の自動直進走行試験の総合結果

Table 1 Total result of automatic navigation with GDS

| | Test No. | | | Average |
|---------------------------------------|----------|------|------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| R. M. S error [cm] | 8.7 | 12.3 | 17.7 | 12.9 |
| Max error from desired path [cm] | 16.9 | 25.6 | 32.0 | 24.8 |
| Max error from regression line [cm] | 8.0 | 10.2 | 8.3 | 8.8 |
| Slope of regression line [$^\circ$] | 0.34 | 0.54 | 0.43 | 0.44 |
| Travel distance [m] | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 |

表2 VWA による可変目標方位制御時の制御パラメータの設定

Table 2 Parameter settings of variable desired heading control with VWA

| | |
|----------------------------|---------|
| Velocity | 0.5 m/s |
| Sampling rate | 15 Hz |
| Control rate | 3 Hz |
| Data update interval, DT | 2s |
| Manual Travel Distance | 10s |
| Window size of sampling, T | 5 m |

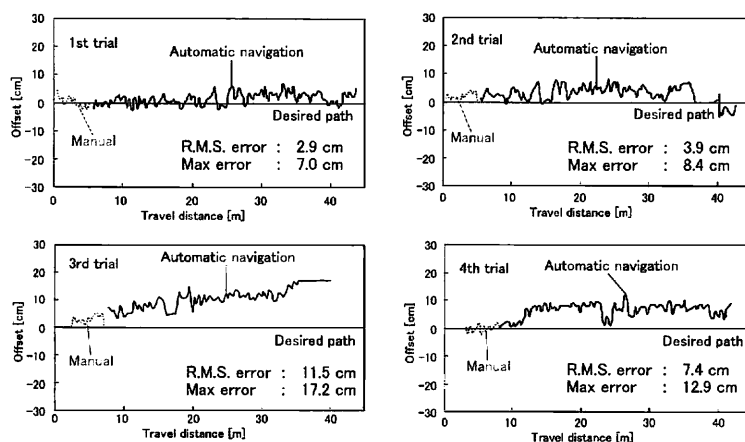


図 12 VWA による自動直進走行の走行軌跡

Fig. 12 Trajectories obtained by automatic navigation with VWA

表3 VWAの自動直進走行試験の総合結果

Table 3 Total result of automatic navigation with VWA

| | Test No. | | | | Average |
|-------------------------------------|----------|------|------|------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| R. M. S error [cm] | 2.9 | 3.9 | 11.5 | 7.4 | 6.4 |
| Max error from desired path [cm] | 7.0 | 8.4 | 17.2 | 12.9 | 11.4 |
| Max error from regression line [cm] | 4.7 | 6.0 | 5.3 | 5.9 | 5.5 |
| Slope of regression line [°] | 0.05 | 0.06 | 0.21 | 0.04 | 0.09 |
| Travel distance [m] | 37.0 | 37.0 | 31.0 | 33.0 | 35.0 |

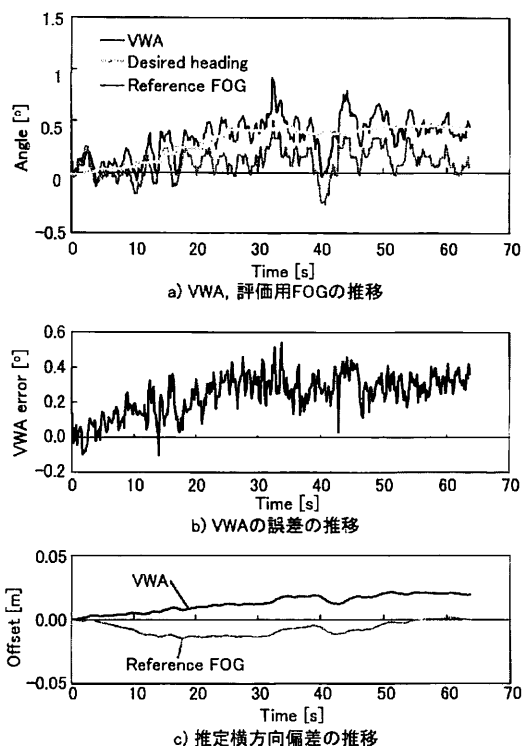


図13 VWAによる自動直進走行の評価

Fig. 13 Evaluation of automatic navigation with VWA

を表3に示した。評価値はGDSの自動直進走行試験と同様である。VWAによる可変目標方位制御は、全体的にGDSによる固定目標方位制御の自動直進走行よりも、良好な結果となった。3回目の走行で、若干左に曲がった走行となっており、終端位置で最大誤差は17.2 cmとなった。3回目の走行における、VWA、評価用FOG、目標方位の推移、VWAの誤差の推移、推定横方向偏差の推移を図13に示す。評価用FOGの推移から、車両は一定方向に精度良く直進走行しているのがわかる。また、誤差の推移からGDSの時と同様、地磁気的空間変動の影響によりVWAの誤差は0.5°以上生じている。しかし、可変目標方位制御を適用することで、空間変動が除去され、VWA可変目標方位から算出した推定横方向偏差は評価用FOGの推定横方向偏差に近い値

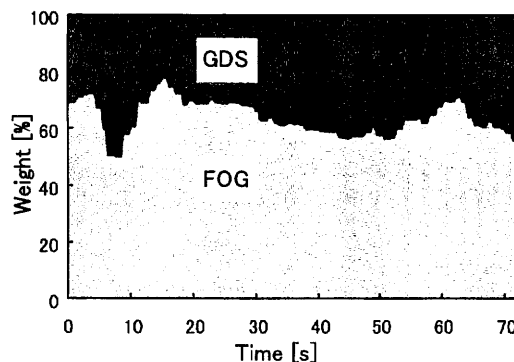


図14 自動直進走行試験におけるGDSとFOGの重みづけの推移

Fig. 14 Weighted ratio of GDS and FOG obtained by automatic navigation with VWA

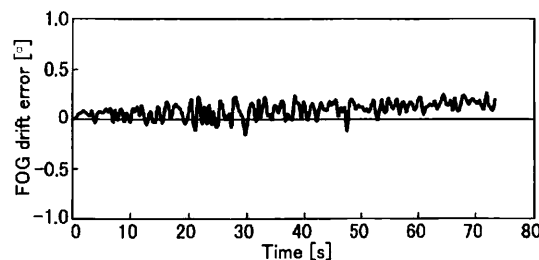


図15 自動直進走行試験におけるFOGの誤差推移

Fig. 15 Transition of FOG error obtained by automatic navigation with VWA

となっている。これらのことから、軌跡が出がった原因として、初期のマニュアル走行の精度が低かったために、初期目標方位が目標経路に対して誤差を含んでしまったものと判断できる。よって、可変目標方位制御を適用する場合、初期マニュアル走行の精度が自動直進走行の精度に依存しており、初期マニュアル走行の精度向上が重要であることがわかった。しかし、マニュアル走行の再現性が保証されていないものの、全体ではR.M.S.誤差で6.4 cmとなり、大幅に走行精度と再現性が改善された。また、帰線直線からの最大偏差が6.0 cmに収まっていることから高い直進性を有していることもわかった。図14にGDSとFOGの重み付けの推移を示した。FOGとGDSの重み比は約2:1となり、基本的にはFOGベースで走行していることがわかる。このときのFOGのドリフトを図15に示す。FOGドリフトは自動直進走行時に約0.2°生じている。しかし、FOGベースの走行にもかかわらず精度の高い走行を実現していることから、VWAによる可変目標方位制御がFOGドリフトを修正する機能を備えていることも確認された。

IV 摘要

地磁気及びジャイロスコープの特性を考慮した再現性が高くロバストな自動直進アルゴリズム及びセンサ複合化手法を考案することで、GDSとFOGを併用した安定

性の高い自動直進走行システムの開発を試みた。

GDSを使用する場合は、磁気空間の時間変動と空間変動が問題点となり、FOGを使用する場合には、ジャイロドリフトが問題となる。そのため、従来の固定目標方位制御では、高精度にかつ高い再現性で走行させるには限界があると考えられた。そこで、本報はセンサの誤差分散による重み付き平均値(VWA)によってGDSとFOGを融合し、目標方位を逐次更新する可変目標方位制御を考案した。

マニュアル直進走行を行いシミュレーションによってVWAによる可変目標方位制御の評価を行った結果、方位偏差の精度がGDSに比べ約70%向上した。

VWAによる可変目標方位の自動直進走行における精度、再現性を評価するためにGDS単独による固定目標方位制御の自動直進走行との比較を行った結果、GDSに比べて走行精度、再現性の向上が確認された。

今後は、適応速度範囲の拡大、さらに低精度ジャイロスコープに移行をはかることが課題と考えられる。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省統計情報部 2000年世界農林業センサス結果概要 I, 2000
- 2) 端 俊一: 農業運転者の視野移動と労働改善, 農機誌, 62(1), 22-25, 2000
- 3) 1) に同じ
- 4) Will, J., Stombaugh, T., Benson, E.N., Noguchi, N., Reid, J.: Development of a Flexible Platform for Agricultural Automatic Guidance Research, ASAE, Paper 983202. Orlando, FL, 1998
- 5) Benson, E., Stombaugh, T., Noguchi, N., Will, J., Reid, J.: An Evaluation of A Geomagnetic Direction Sensor for Vehicle Guidance in Precision Agriculture Applications, ASAE, Paper 983203. Orlando, FL, 1998
- 6) Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H.: Development of an Agricultural Mobile Robot using a Geomagnetic Direction Sensor and Image Sensors, A Review, J. Agric. Engng Res., 67, 1-15, 1997
- 7) Barshan, B., Durrant-Whyte, H.: Inertial Navigation Systems for Mobile Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 11(3), 328-341, 1995
- 8) 山下光司, 市川眞祐, 栗山尚士: 光ファイバージャイロによる農用車両の走行制御, 第59回農業機械学会年次大会講演要旨, 73-74, 2000
- 9) 佐藤邦夫, 法貴 誠, 高木伸二, 柳田金幸, 菰田隆裕, 宮本秀樹: 四輪操舵モアの姿勢角自動制御—ヨーレートセンサの応用—, 農機誌関西支部報, 80, 81-82, 1996
- 10) 山下光司, 市川眞祐, 田尻功朗, 鳥取 寛, 森 正章: 農用車両光ファイバージャイロによるプログラム走行, 農機誌関西支部報, 82, 59-60, 1997
- 11) Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H.: Automatic Guidance System Composed of Geomagnetic Direction Sensor and Fiber Optic Gyroscope, IFAC Bio-Robotics II Sakai Osaka, 311-315, 2000
- 12) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: 地磁気方位センサと光ファイバージャイロスコ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), 第59回農業機械学会年次大会講演要旨, 347-348, 2000
- 13) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: 地磁気方位センサとジャイロスコ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), 農機誌, 63(4), 96-102, 2001
- 14) Ghil, M., P. Malanotte-Rizzoli: Data assimilation in meteorology and oceanography, Advance in Geophysics, 33, Academic Press, 157-157, 1991
- 15) Abidi, M.A., R.C. Gonzalez: Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence, Academic Press, Inc., San Diego, 41, 1992
- 16) 行本 修, 松尾陽介: 磁場のセンシングとその応用, 農機誌, 58(5), 93-98, 1996
(原稿受理: 2001年6月14日・質問期限: 2002年5月31日)

コ メ ン ト

〔読者のコメント〕

この分散の重み付けでセンサーの精度を上げる方法は、ここで用いられたFOGとGDSの場合の他にGPSとGDS、あるいはGPSとFOGなどの場合にも有効と考えてよいでしょうか。その際、センサーの精度指標として誤差分散の他に必要な情報はないでしょうか。

〔コメントに対する著者の見解〕

本研究で使用した分散重み付け平均化手法は同一の観測値である必要があります。したがってGPSの方位情報とFOGまたはGDSとの融合は可能です。注意すべき点として、精度指標として誤差分散を使用しますが、GPSによる方位精度は速度によって変化します。そのため、走行中に動的に誤差分散を算出する必要があると想定されます。