

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3報)

— 振動ジャイロスコープによる方位推定 —

水島 晃^{*1}・野口 伸^{*1}・石井一暢^{*1}・寺尾日出男^{*1}・松尾陽介^{*2}・山本聡史^{*2}

要 旨

本研究は、極力低コストに自動直進走行システムを開発することを目的としている。航法センサとして地磁気方位センサとジャイロスコープを採用した。本報では、地磁気方位センサの傾斜補正用の傾斜計に静電容量タイプの傾斜計を、ジャイロスコープに圧電振動ジャイロスコープを採用し、高精度な方位推定法を提案した。はじめに、傾斜計のノイズを適応線スペクトル強調器によって除去することを試みた。次に、圧電振動ジャイロスコープのドリフトを最小二乗法を適用することで推定した。さらに、地磁気方位センサと圧電振動ジャイロスコープの補正出力を融合し、高精度な方位推定法を構築した。最後に構築した手法の精度を評価するために自動直進走行試験を行った。その結果、地磁気方位センサと光ファイバージャイロスコープを使用した自動直進走行と同等の精度が達成された。

[キーワード] 自動直進走行, 地磁気方位センサ, 振動ジャイロスコープ, 適応線スペクトル強調器, 最小二乗法

Automatic Guidance System based on Sensor Fusion of Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope (Part 3)

— Enhancement of Heading Angle Accuracy using Vibrating Gyroscope —

Akira MIZUSHIMA^{*1}, Noboru NOGUCHI^{*1}, Kazunobu ISHII^{*1}, Hideo TERAO^{*1},
Yousuke MATSUO^{*2}, Satoshi YAMAMOTO^{*2}

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. In this paper, the precise estimation method of the vehicle orientation was proposed. First, the noise of inclinometer were eliminated by an adaptive line enhancer (ALE). Second, the drift error of the gyroscope was estimated by a least square method (LSM). Third, these sensors output were integrated to obtain the accurate vehicle orientation. Finally, to evaluate the accuracy of the proposed estimation method of orientation, the automatic navigation test was carried out in the actually used field. As a result of the automatic navigation test, it was confirmed that the proposed estimation method had the ability to navigate the mobile vehicle with high accuracy.

[Keywords] automatic vehicle guidance, geomagnetic direction sensor, vibratory gyroscope, adaptive line enhancer, least squared method

*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

I 緒 論

本研究は極力低コストな自動直進走行システムの開発を目的としている。コストを抑えるために、航法センサとして地磁気方位センサ (GDS) とジャイロスコープを採用し、デッドレコニングによる走行制御法を適用した。第1報、第2報ではジャイロスコープとして光ファイバージャイロスコープ (FOG) を採用し、内界センサによる農用車両の自動直進走行の適用可能性を示した (Mizushima et al., 2001, Mizushima et al., 2002)。しかし、FOG は高精度ではあるものの、ジャイロスコープの中では高価なものに位置し、極力低コストなシステムの開発という本研究の目的からすると望ましくない。また、GDS の傾斜補正にも、FOG で構成された傾斜計 (Inertial Measurement Unit ; IMU) を使用したため、さらに低コストなセンサに移行する必要がある。これらのことから、本報ではジャイロスコープに圧電振動ジャイロスコープを、傾斜計に静電容量タイプを使用することとした。振動ジャイロスコープはこれまで使用していた FOG に比べ小型、軽量、低消費電力、安価で自動直進走行車両の実用化を考えた場合には非常に有用である。振動ジャイロスコープの原理は 1950 年頃発明されていたが、半導体の製造技術が不十分で高性能なセンサの開発が困難であった。しかし、近年、半導体製造技術や集積回路の発達により、振動ジャイロスコープは小型、低価格なセンサとして、カーナビやビデオカメラなどの家電品に幅広く利用されている。しかし、振動ジャイロスコープを適用する場合、FOG に比べてドリフトが大きくなり、ドリフト推定が重要な課題となる。Barshan らは、振動ジャイロスコープの特性を詳しく解析し、バイアスドリフトを推定した (Barshan and Durrant-Whyte, 1993, 1994 a, 1994 b, 1995)。しかし、オドメトリを基本としているため車輪の滑りを考慮しておらず、屋外環境など路面に凹凸が存在する状況は考慮されていない。Borenstein ら (Borenstein and Feng, 1996) は、ジャイロスコープとオドメトリを融合して位置推定を行う Gyrodmetry という手法を提案し、障害物や段差などにおけるジャイロスコープとオドメトリの相互作用を検証することで、路面に凹凸が存在するような場合を考慮した。また、前山らは車輪の空転等を検出して、滑りを考慮した手法を提案している (Maeyama et al., 1997)。しかし、これらの手法はアスファルトなどの微小な凹凸で断続的に生じる空転・滑りを想定しているため、ほ場のように連続的に滑りが生じる環境での適用は考慮されていない。また、ランドマーク等によって外界情報 (絶対情報) を取得して、誤差をリセットできることを前提としたシステムであり、ほ場での作業を前提とした農用車両の自動直進走行制御には適さない。

本研究では、オドメトリを使用しないで振動ジャイロスコープのドリフトを GDS により推定する、高精度な

方位推定法を考案した。始めに、静電容量タイプの傾斜計と振動ジャイロスコープの精度を検証した。その結果、傾斜計はノイズが、振動ジャイロスコープはドリフトが問題であることがわかった。そこで、傾斜計のノイズを適応線スペクトル強調器 (adaptive line enhancer ; ALE) によって除去し、振動ジャイロスコープのドリフトは GDS を使用して最小二乗法 (LSM) を適用して推定した。また、ALE による傾斜計の推定値は 0.7s の時間遅れがあることから、0.7s 前までは第2報で考案した分散重み付け平均 (VWA) で傾斜補正した GDS とドリフト推定した振動ジャイロスコープで融合し、0.7s 前から現在までの方位をドリフト推定した振動ジャイロスコープで推定した。振動ジャイロスコープ、静電容量型傾斜計、GDS を併用した方位推定システムのデータ処理フローチャートは図1に示した。最後に、考案した方位推定値を適用した自動直進走行試験を行い、その有効性を評価した。

II 供試センサの精度評価

1. 傾斜計の精度評価

第1報、第2報では、GDS の傾斜補正に必要となる傾斜角の計測に FOG 姿勢角装置 IMU (型式: JCS-7400 A, 日本航空電子工業(株)) からのロール角、ピッチ角を使用していた。しかし、IMU は FOG を使用しているため、高精度ではあるが傾斜計の中ではかなり高価なものとなり、さらに低コストな傾斜計を使用する必要があると考えられた。そこで、本報では IMU の代わりに Schaevitz 社製の傾斜計 AccuStar Clino Meter (以下、傾斜計) を採用した。傾斜計の主要諸元を表1に示す。傾斜計は静電容量タイプの傾斜計で、IMU に比べ大幅にコストを抑えることができる反面、応答周波数が 0.5 Hz と応答性が悪いなど、精度に問題がある。そこで、まず傾斜計の静的、動的データを計測して特性の把握を

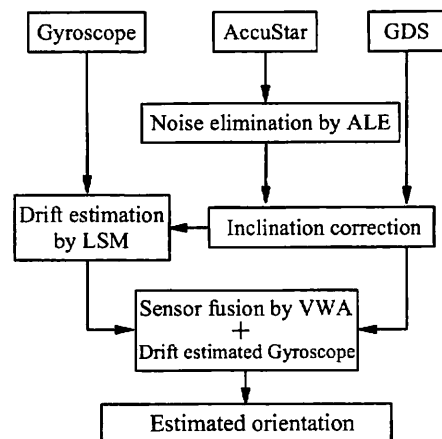


図1 方位推定システムのデータ処理フローチャート
Fig.1 Flow chart of the estimated vehicle orientation system

行った。傾斜計を図2のようにトラクタに搭載しては場を直進走行し、50 Hzでデータを取得した。図3にIMUと傾斜計のロール角、ピッチ角の静的、動的データの比較を示す。0~10秒間の停止区間(静的データ)では、傾斜計の値は安定しておりIMUとほぼ一致した推移となっているが、走行開始後の動的データでは高周波なノイズが混入していることが確認できる。動的試験において、IMU出力を参照値とした場合の傾斜計のr.m.s.誤差はロール角が 0.77° 、ピッチ角が 0.59° であった。また、傾斜計の誤差はガウシアンノイズであることもわかった。この結果から、GDSの傾斜補正を有効に作用させるには傾斜計のノイズ除去が不可欠と判断された。また、傾斜計の応答性の低さは、方向制御をGDSでドリフト補正した圧電振動ジャイロで行うことでカバーし、ここでは静電容量型傾斜計のノイズ除去を行うこととした。そこで本研究では、適応線スペクトル強調器を適用して傾斜計出力のノイズ除去を試みた。

2. 振動ジャイロ스코ープの精度評価

本報ではジャイロ스코ープとして圧電振動ジャイロSCOープを採用した。振動ジャイロSCOープの力学モデル

表1 傾斜計の主要諸元

Table 1 Specification of AccuStar Clino Meter

Total range	$\pm 60^\circ$
Linear range	$\pm 45^\circ$
Resolution	0.001°
Linearity	
0 to 10°	$\pm 0.1^\circ$
10 to 45°	$\pm 1\%$
45 to 60°	Monotonic
Null repeatability	0.05°
Cross axis error	< 1% up to 45°
Time constant	0.3 sec
Freq. response (-3 db)	0.5 Hz
RF susceptibility	< $\pm 2^\circ$



図2 使用した静電容量式の傾斜計 (AccuStar Clino Meter, Schaevitz 社製) とその配置

Fig. 2 Inclinometer (AccuStar Clino Meter, Schaevitz Ltd.) and its mount on a test tractor

(Burdess, J.S. et al., 1994) を図4に示す。質点 m が x 軸方向に速度 \dot{x} で振動している状態 (1次振動) で z 軸回りに角速度が加わる Ω_0 と、コリオリ力 F_c が発生し y 軸方向の振動が励起される (2次振動)。この振動振幅 (速度) は角速度に比例するので、振幅を検出することにより角速度を知ることができる。

振動ジャイロSCOープとして小型・低価格なジャイロスター (ENV-05D-52, (株)村田製作所) を採用した。主要諸元を表2に示す。角速度検出範囲は $\pm 80^\circ/\text{s}$ 、温度ドリフトは $9^\circ/\text{s}$ 以内、出力感度は $22.2 \pm 1.8 \text{ mV}/(^\circ/\text{s})$ である。圧電振動ジャイロSCOープからの検出角速度 ω_{gyro} は以下の式で算出される。

$$\omega_{gyro} = K_{gyro} (V_{out} - V_{static}) \quad (1)$$

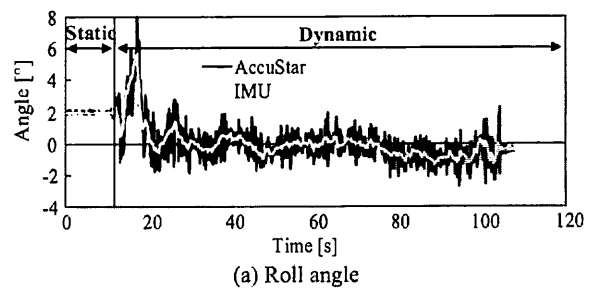
ここで、 V_{out} は振動ジャイロSCOープの出力電圧、 V_{static} は静止時出力、 K_{gyro} はスケールファクタで、諸元より $(1/0.0222)$ と算出できる。したがって、振動ジャイロSCOープから算出される方位は、角速度にサンプリングレート ΔT を乗算し

$$\delta\theta_{gyro} = \omega_{gyro} \Delta T \quad (2)$$

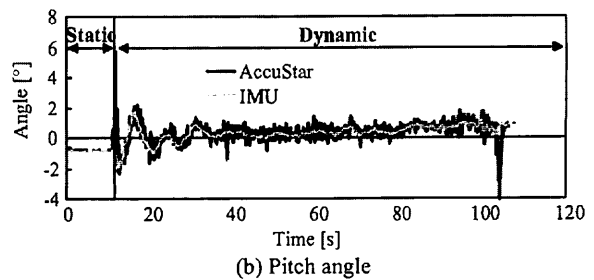
となることから、振動ジャイロSCOープの計測方位は、

$$\theta_{gyro} = \sum_{k=0}^n \delta\theta_{gyro}(k) \quad (3)$$

として算出される。しかし、ジャイロスターの静止時出力は $V_{static} = 2.5 \pm 0.3 \text{ VDC}$ となっており、温度によって $\pm 0.3 \text{ V}$ の範囲で変動する。この静止時出力の温度変動によって生じる静止時出力 V_{static} の変動がドリフトを誘発する主要因となる。そこで、ジャイロスターの静止時の出力を計測し、その変化過程を調べた。図5に24時間計測したときの出力電圧の推移を示す。出力変化の標準



(a) Roll angle



(b) Pitch angle

図3 傾斜計とIMUのロール角・ピッチ角の推移比較
Fig. 3 Transitions of roll and pitch angle measured by AccuStar and IMU

偏差は $0.1^\circ/\text{s}$ となった。起動直後は出力電圧の変化が大きく現われ、1時間で約 8mV 上昇している。これは、起動直後の温度変化が大きいためと考えられる。また、1時間経過後も $2.604\sim 2.612\text{V}$ の範囲で変化しており、安定した出力は得られなかった。また、4~5時間付近のような急激な出力変化も確認された。このように、静止時の出力変化は起動直後に大きく、また、ある程度時間が経過しても変化が継続することがわかった。実際の自動直進走行では起動直後に使用することを前提としているため、静止時出力の変化が大きい状況下での使用は避けられず、このドリフトを補正する必要が確認された。

次に直進走行時の FOG と振動ジャイロスコープから算出した方位を図6示す。計測開始直前に停止状態で振動ジャイロスコープを1000回計測し、その平均値を静止時出力 V_{static} に設定した。計測直前に静止時出力を計測したにも関わらず、100秒程度の計測に対して 14° 以上の誤差が生じ、r.m.s. 誤差は 7.54° となった。このことから、計測開始直前に静止時出力を計測して、その平均値を静止時出力に設定するだけでは十分な精度が得られず、100秒程度の短時間でも出力ドリフトを無視できないことがわかった。そこで、本研究では振動ジャイロスコープから算出した方位と GDS との偏差を使用して、最小二乗法によってリアルタイムにドリフト推定を行い、振動ジャイロスコープによる高精度な方位推定法を検討した。

III 供試センサの誤差補正法

1. 適応線スペクトル強調器による傾斜計のノイズ除去

傾斜計のノイズ除去に適応線スペクトル強調器 (adaptive line enhancer; ALE) を採用した (Mikami, N., 1999)。ALE は広域帯のスペクトルを持つ雑音の背後に埋もれた低レベルの正弦波の検出に用いられる。図7に ALE のブロックダイアグラムを示す。図7に示すように、ALE は遅延器と線形予測器および適応アルゴリズムから成り立っている。予測器入力 $x(n)$ はもとの入力信号 $u(n)$ を L ステップ遅らせた $u(n-L)$ に等しい。

表 2 振動ジャイロの主要諸元

Table 2 Specification of vibratory gyroscope

Supply voltage	+5 VDC
Current consumption	17 mA (max.)
Maximum angular velocity	$\pm 80^\circ/\text{s}$
Output	$2.5 \pm 0.3\text{VDC}$
Scale factor	
-10 to +60°C	$22.2 \pm 1.8\text{mV}/^\circ/\text{s}$
-30 to -80°C	$22.2 \pm 2.9\text{mV}/^\circ/\text{s}$
Resolution (deg/sec)	$0.1^\circ/\text{s}$
Linearity	$\pm 0.5\%\text{FS}$
Offset drift	$9^\circ/\text{s}$ (max.)
Bandwidth (Response)	7 Hz
Noise level	20 mVrms (max.)
Operating temperature range	-30 to -80°C

本報では、 L を遅延器の数と定義する。 L の主な機能は、もとの入力信号 $u(n)$ の雑音成分と遅延された予測器入力 $x(n)$ の雑音成分との間に存在する相関を除去するこ

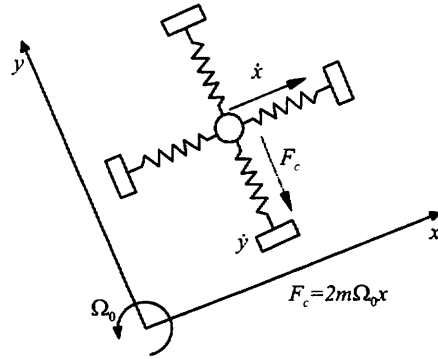


図 4 振動ジャイロの力学モデル

Fig. 4 Mass-spring model of vibratory gyroscope

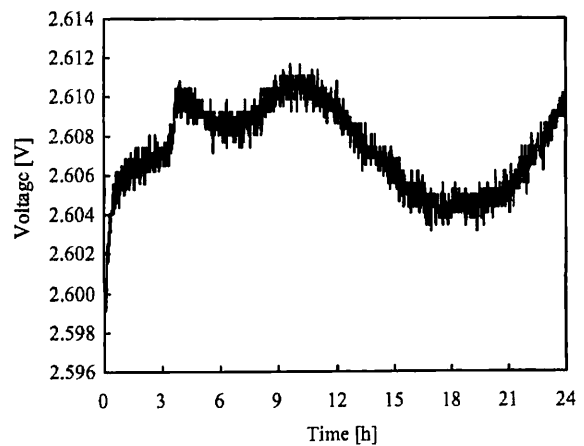


図 5 静止時に計測した振動ジャイロの出力電圧の推移
Fig. 5 Transition of gyro output under stationary situation

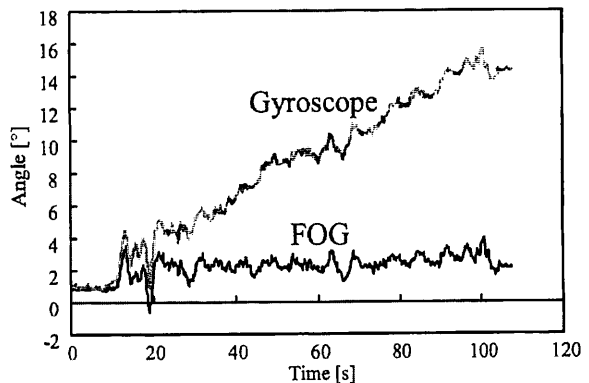


図 6 直進走行時の FOG と振動ジャイロの方位出力の推移比較
Fig. 6 Transitions of heading angle measured by a FOG and a vibratory gyroscope

とである。また、予測器出力 $y(n)$ から入力信号 $u(n)$ を差し引いた誤差信号 $e(n)$ は適応アルゴリズムに入力され、予測器入力 $x(n)$ の係数(予測係数) h_k を適応的に修正するために用いられる。以下に ALE の計算式を示す。

$$y(n) = \sum_{k=0}^N h_k(n)x(n-k), x(n) = u(n-L) \quad (4)$$

$$h_k(n+1) = h_k(n) + \mu e(n)x(n-k) \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

$$e(n) = y(n) - u(n) \quad (6)$$

ここで、 μ はステップサイズパラメータで予測器の収束速度と安定性に影響を及ぼす。 L は遅延器の数、 N は予測器の数、 h_k は予測係数である。遅延器の数 L は雑音の性質にもよるが、ある程度大きな数(10程度)に設定するのが一般的である。特に、雑音が白色雑音の場合、理論的には1以上に設定すれば適応線スペクトル強調器として機能する。式(5)は予測係数 h_k を適応的に制御する手法で LMS (The least-mean-square) アルゴリズムと呼ばれる(Haykin, S., 1987)。LMS アルゴリズムは最急降下法によって2乗平均誤差($e(n)$ の2乗の期待値)を最小にするように h_k を試行錯誤的に繰り返しながら求めていく方法である。

ALE を傾斜計に適用し誤差を最小にする最適な h_k の数を決定するため、コンピュータシミュレーションを行った。また、傾斜計の誤差分布はガウシアンノイズであることから、 L を1に設定した。 h_k の初期値を $1/N$ として傾斜計のデータを ALE に一度入力する。その結果算出された h_k を使用して、傾斜計データを ALE に再入力し、出力された傾斜計データを ALE による傾斜計ノイズ除去データとした。つまり、一回目の ALE への入力は LMS アルゴリズムが2乗平均誤差を最小にする h_k を計算するために行い、二回目の入力では ALE による傾斜計ノイズの除去効果の評価を行うこととした。評価は IMU からの偏差を誤差として r.m.s. を算出した。図8

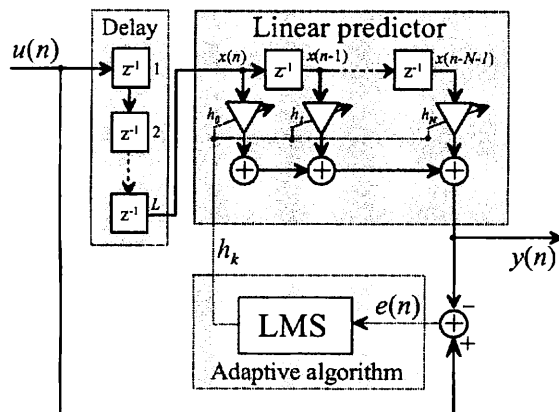


図7 適応線スペクトル強調器(ALE)のブロックダイアグラム

Fig. 7 Block diagram of adaptive line enhancer

にロール、ピッチ角の係数の数と誤差の関係を示す。図から、ロール、ピッチ角ともに係数50個で r.m.s. 誤差が最小となり、それぞれ 0.14° 、 0.08° と共に80%以上精度が改善された。図9に ALE 出力後の傾斜計のロール、ピッチ角と IMU の出力の比較を示す。適切にノイズが除去され IMU 値を追従していることがわかる。ピッチ角において、走行開始地点と終了地点で誤差の増大が確認できる。これは、走行開始と停止による車両のピッチ方向の揺動が大きく、この過渡的な動作に対して傾斜計の誤差が増大したことが原因と考えられる。そこで、走行開始直後のピッチ角の変動は無視して傾斜補正を行うこととした。また、ロール、ピッチ角ともに約0.7秒の時間遅れが存在することも確認された。したがって、傾斜補正を適切に実行するには GDS と傾斜計の時間を一致させる必要がある。GDS を0.7秒遅らせてから傾斜補正を実行した。図10に、IMU と GDS を使用した時間遅れのないデータによる傾斜補正と、傾斜計と0.7秒遅らせた GDS による0.7秒時間遅れのある傾斜補正のデータの比較を示す。GDS を0.7秒遅らせたため右にシフトしているが、傾斜計による傾斜補正は、IMU の場合と同程度の精度で補正することができた。この遅れを振動ジャイロスコープで補償することでさらに精度の向上を試みたが、単純に振動ジャイロスコープの方位を GDS の時間遅れ分だけ補償しても、ドリフトの影響により精度の向上は期待できなかった。そこで、GDS を使用した振動ジャイロスコープのドリフト推定法についても検討した。

2. 最小二乗法による振動ジャイロスコープのドリフト推定

ジャイロスコープのドリフト推定には最小二乗法を適用した。現在の時刻における計算ステップ数を t とし、振動ジャイロスコープによる角速度を $\omega_{gyro}(t)$ 、その時のドリフトを $d(t)$ とすると、角速度推定値 $\omega_{est}(t)$ は

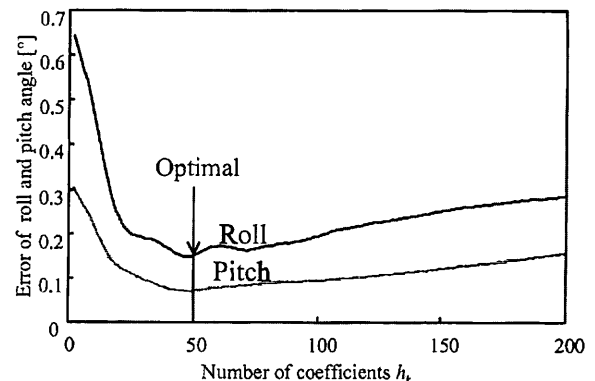


図8 ロール角、ピッチ角推定における適応線スペクトル強調器の係数 h_k の数 k と誤差の関係

Fig. 8 Relationship between the number of coefficients and measurement error

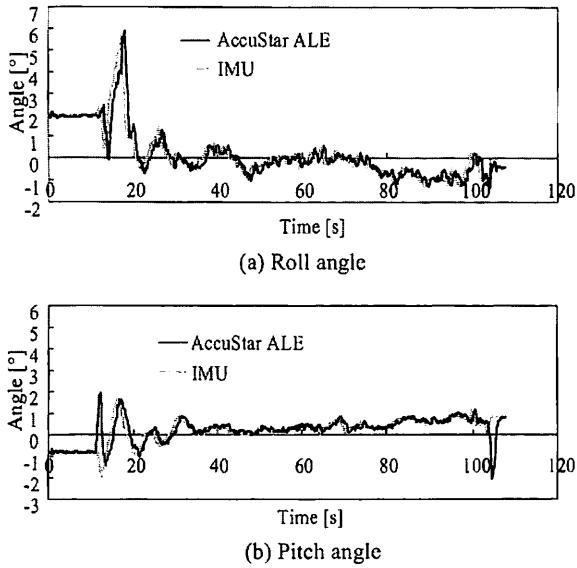


図 9 ALE 出力後の傾斜計の出力精度

Fig. 9 Attitude accuracy of ALE correction by comparing with IMU

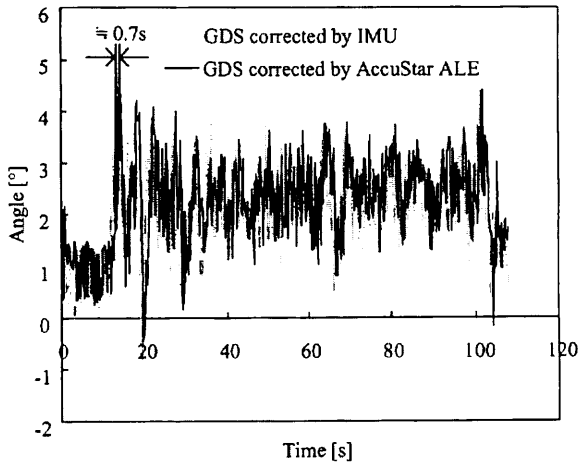


図 10 静電容量型傾斜計による GDS 傾斜補正の精度

Fig. 10 Correction accuracy of AccuStar for GDS output

$$\omega_{est}(t) = \omega_{gyro}(t) + d(t) \quad (7)$$

となる。GDS の方位出力に誤差が含まれないと仮定すると、角速度 $\omega(t)$ は以下の式 (8) で表せる。

$$\omega(t) = \frac{\phi_{GDS}(t) - \phi_{GDS}(t-1)}{\Delta t} = \omega_{GDS}(t) \quad (8)$$

したがって、 t における二乗誤差 $\varepsilon(t)$ は

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \{\omega_{est}(t) - \omega(t)\}^2 \\ &= \{\omega_{gyro}(t) + d(t) - \omega_{GDS}(t)\}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

となり、最小二乗法を適用すると

$$I(t) = \sum_{i=t-M}^t \{\omega_{gyro}(i) + d(i) - \omega_{GDS}(i)\}^2 \quad (10)$$

となる。ここで M はドリフト推定区間である。ドリフト推定値 $d(t)$ を区間 M では一定値 d_i となると仮定する

と、ドリフト推定値は $\frac{\partial I}{\partial d} = 0$ を満たす値となり、

$$d_i = \frac{\sum_{l=t-M}^t \{\omega_{GDS}(l) - \omega_{gyro}(l)\}}{M+1} \quad (11)$$

で表せる。

最小二乗法によるドリフト推定の評価をするためシミュレーションを行った。前節でも記述したように、GDS の計測値は傾斜計の時間遅れから、約 0.7 秒の遅れが存在し、計測周期が 50 Hz であることから、(10) 式において $\omega_{gyro}(i)$ を $\omega_{gyro}(i-35)$ として 0.7 秒前のステップでのドリフト推定値を算出した。ここで、現在から過去 0.7 秒間はドリフト値が変動しないと仮定し、現在のドリフト推定値とした。また、(10) 式における M とドリフト推定後の振動ジャイロ스코ープによる推定方位の誤差の関係を図 11 に示す。誤差は高精度 FOG (JG-35 FD, 日本航空電子工業(株)) を真値として算出した。図から $M=175$ 、つまり 3.5 秒間の区間が最適なドリフト推定区間となり誤差は 0.37° となった。したがって、本研究では、 $M=175$ (3.5 秒) を最適ドリフト推定区間と決定した。図 12 に FOG、振動ジャイロ스코ープの生データ、 $M=175$ としたときのドリフト推定後の振動ジャイロ스코ープの比較を示す。高精度にドリフトが推定され FOG 値を追従しているのがわかる。しかし、初期の車両停止区間 (0~10 秒前後) において微小な変動が確認された。これは、推定区間以下の範囲でのドリフトの微小変動が推定できず、誤差が増大したためと考えられる。この誤差は停止中だけでなく、走行中も存在する可能性があるため、このドリフト推定方位のみを自動直進走行の制御パラメータとして使用するのにはロバスト性に欠ける。そこで、さらに GDS と併用した方位推定値を制御パラメータとして適用する手法を使用した。

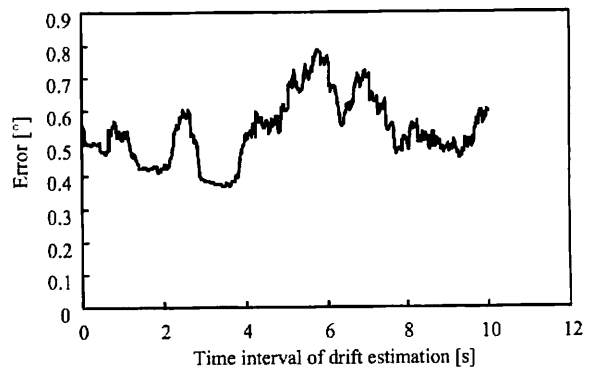


図 11 推定値算出区間とドリフト補正方位データの誤差の関係

Fig. 11 Relationship between the estimation period and the r.m.s. error of corrected orientation

3. GDSと振動ジャイロSCOPEを併用した高精度方位推定法

ノイズ除去した傾斜計による傾斜補正後のGDSとドリフト推定後の振動ジャイロSCOPEのデータを、2報で提案した分散重み付け平均(VWA)に適用し複合化を図った。再掲すると(12)式となる。

$$\phi_{VWA} = \frac{\sigma_{Gyro}^2 \phi_{GDS} + \sigma_{GDS}^2 (\phi_{Gyro} - \eta)}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{Gyro}^2} \quad (12)$$

ここで、 ϕ_{GDS} は傾斜補正後のGDS方位、 ϕ_{Gyro} はドリフト推定後の振動ジャイロSCOPE方位、 σ_{GDS}^2 、 σ_{Gyro}^2 はそれぞれの分散値、 η はGDSとジャイロSCOPEのオフセットで、それぞれ以下の式で算出される。

$$\sigma_{GDS}^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=k-\tau}^k (\phi_{GDS}(i) - \bar{\phi}_{GDS})^2 \quad (13)$$

$$\sigma_{Gyro}^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=k-\tau}^k (\phi_{Gyro}(i) - \bar{\phi}_{FOG})^2 \quad (14)$$

$$\eta = \bar{\phi}_{Gyro} - \bar{\phi}_{GDS} \quad (15)$$

本報では、 σ_{GDS}^2 、 σ_{Gyro}^2 、 η の更新周期を5秒、最適平均化時間 T を15秒として算出した。また、GDSの出力方位が0.7秒の時間遅れが存在することから

$$\phi_{VWA}(t-35) = \frac{\sigma_{GDS}^2 \phi_{GDS}(t) + \sigma_{Gyro}^2 \phi_{Gyro}(t-35) - \eta}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{Gyro}^2} \quad (16)$$

として0.7秒前までVWAで計算し、遅れ分をドリフト推定を行った振動ジャイロSCOPEで補償した、すなわち

$$\phi_{estimat}(t) = \phi_{VWA}(t-35) + \sum_{k=t-35}^t (\omega_{Gyro}(k) + d(k)) \Delta T \quad (17)$$

を推定方位とした。

図13に、式(17)による方位推定(GDS-Gyroシステム)結果を示す。また、IMUを使用してVWA(式(13))を適用した場合(GDS-IMUシステム)の結果も示した。GDS-GyroシステムはGDS-IMUシステムを追従しており、GDS-IMUシステムの高精度FOGからの誤差のr.m.s.が 0.30° であるのに対して、GDS-Gyroシステムのr.m.s.は 0.32° と、ジャイロSCOPEにIMUを使用し

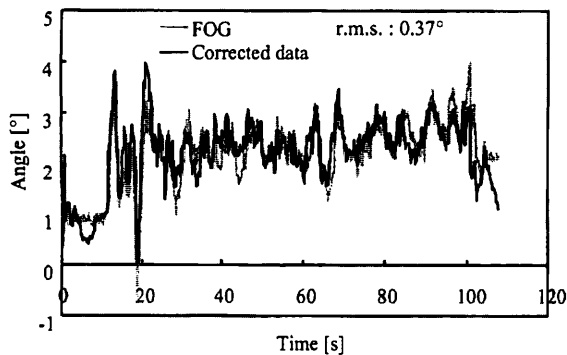


図12 FOGと振動ジャイロSCOPE補正データの比較
Fig.12 Comparison of FOG and corrected orientation of vibratory gyroscope

た場合と同程度の精度を得ることができた。以上の振動ジャイロSCOPE、静電容量型傾斜計、GDSを併用した方位推定システムのデータ処理フローチャートは緒論の図1で既に示した通りである。

IV 自動直進走行試験

圧電振動ジャイロSCOPEと傾斜計およびGDSを併用した方位推定法を使用して自動直進走行試験を行い、本研究で考案した方法の有効性を評価した。供試車両として、第1報、第2報と同じ小型トラクタGL320(クボタ(株))を使用した。走行制御法として第2報で使用した固定目標方位制御を適用した。実験場所は、ある程度耕うん整地された場所で、走行速度0.5m/s、走行距離約50mの走行を行った。また、位置計測にはトータルステーションAP-L1(トプコン(株))を使用した。図14に走行軌跡とロール角の推移を示す。目標方位方向に精度良く走行しており、目標経路からの横方向偏差は走行の安定後は ± 10 cmの精度が達成された。また、今回の実験では磁気環境の空間的歪みが少なく、固定目標方位でも十分な精度が得られた。しかし、走行開始地点の走行で軌跡に大きな揺動が確認できるが、これはロール角の推移でもわかるように、走行開始地点における路面の凹凸により車両が大きく揺動したため、車両上部に搭載したAP-L1のコーナーキューブプリズムが揺動し、計測上は横方向に揺動した軌跡となった。しかし、実際の走行は目標経路上を走行した。このとき約 5° のロール角変化が走行開始地点で生じている。このように、走行開始直後大きく揺動しているにもかかわらず、良好に方位が推定され、高精度な自動直進走行が達成された。このことから、本研究で考案した方位推定法によって、低コストな内界センサとして傾斜計と圧電振動ジャイロSCOPEおよびGDSを適用した場合でも精度の高い自動直進走行が可能であることが確認された。

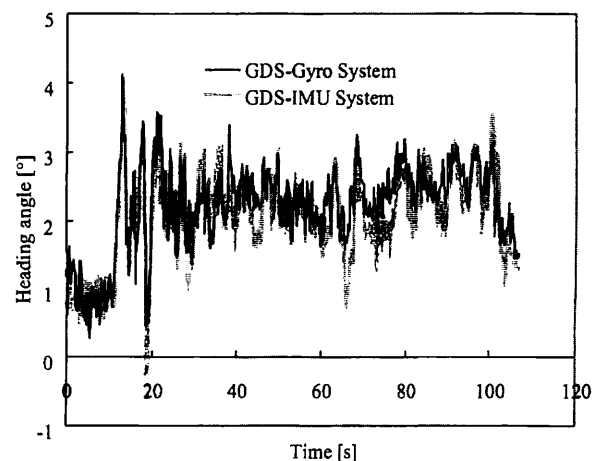


図13 GDS-GyroシステムとGDS-IMUシステムの比較
Fig.13 Comparison between GDS-gyro System and GDS-IMU System

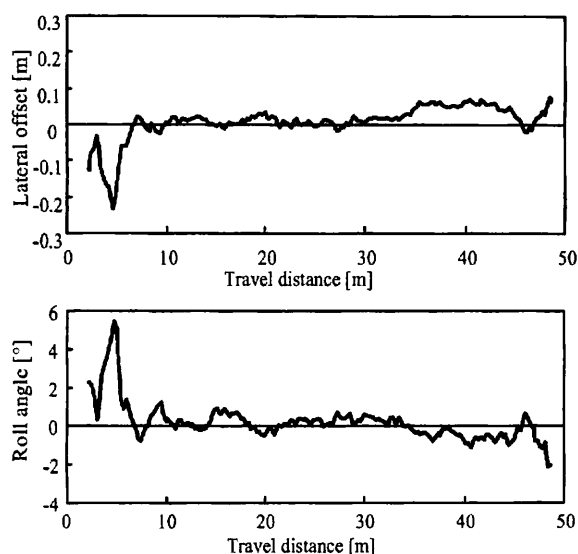


図 14 自動直進走行試験時の走行軌跡とロール角の推移
Fig. 14 Trajectory and roll angle on automatic navigation test

V 摘 要

本報では GDS と振動ジャイロ스코ープを使用し、高精度な方位推定法を考案した。はじめに、GDS の傾斜補正に使用した傾斜計のノイズを適応線スペクトル強調器 (ALE) によって除去を試みた。その結果、0.7 秒の時間遅れが生じたものの r.m.s. 誤差はロール角が 0.77° から 0.14° 、ピッチ角が 0.59° から 0.08° となり、共に約 80% 以上精度を改善することができた。次に、振動ジャイロスコープを使用するうえで問題となるドリフトを最小二乗法を適用することで推定した。その結果、r.m.s. 誤差は 0.37° となり高精度にドリフトを推定することができた。さらに、GDS と振動ジャイロスコープの補正出力を分散重み付け平均 (VWA) で融合し、ALE で生じた時間遅れを振動ジャイロスコープで補償することで r.m.s. 誤差を 0.32° まで抑えることができ、ジャイロスコープに FOG を使用した場合と同程度の精度が達成された。最

後に構築した方位推定法の精度を評価するために自動直進走行試験を行った結果、本研究で考案した方位推定法によって、傾斜計と圧電振動ジャイロスコープおよび GDS を適用した場合でも精度の高い自動直進走行が可能であった。

References

- Barshan, B., Durrant-Whyte, H.R., 1993. An Inertial Navigation System for a Mobile Robot. Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, 3, 2243-2248
- Barshan, B., Durrant-Whyte, H.R., 1994. Evaluation of a Solid-State Gyroscope for Robotics Application. Trans. on Instrumentation and Measurement, IEEE, 44(1), 61-67
- Barshan, B., Durrant-Whyte, H.R., 1994. Orientation estimate for mobile robots using gyroscopic information. Proc. of IEEE/RSJ/GI Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, 1867-1874
- Barshan, B., Durrant-Whyte, H.R., 1995. Inertial Navigation Systems for Mobile Robots. Trans. on Robotics and Automation, 11(3), 328-342
- Borenstein, J., Feng, L., 1996. Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots. Proc. of IEEE Int. Conference on Intelligent Robots and System, 1, 423-428
- Burdess, J.S., Harris, A.J., Cruickshank, J., Wood, D., Cooper, G., 1994. A review of vibratory gyroscope. Engineering Science and Education Journal, 3(6), 249-254
- Haykin, S., Takebe, T., 1987. Introduction to Adaptive Filters. Gendaikougakusha Co., Tokyo, 108-111
- Maeyama, S., Ohya, A., Yuta, S., 1997. Robust Dead Reckoning System by Fusion of Odometry and Gyro for Mobile Robot Outdoor Navigation. Journal of the Robotics Society of Japan
- Mikami, N., 1999. Digital Signal Processing and DSP (in Japanese). CQ publisher, Tokyo, 93-100
- Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H., 2001. Automatic Guidance System based on Sensor Fusion of Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope (Part 1). Journal of JSAM, 63(4), 96-102
- Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H., 2002. Automatic Guidance System based on Sensor Fusion of Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope (Part 2). Journal of JSAM, 64(2), 62-70
- (原稿受理: 2002 年 5 月 22 日・質問期限: 2003 年 3 月 31 日)

コ メ ン ト

[読者のコメント]

地磁気方位センサと振動ジャイロを本報の手法によって FOG と組み合わせた場合と同程度の方位精度を得られるとのことですが、地磁気方位センサは場所によってときおり外乱によりずれる場合があります、これと振動ジャイロのドリフトが重なった場合、原理的に正しい推定は不可能と思われませんが、実際の場合にはこのような例はほとんど起こらないと考えていいでしょうか。また、本方式を実用機の方向センサとして使う場合の解決しなければならない問題は他にどのような課題があるでしょうか。

[コメントに対する著者の見解]

地磁気方位センサの外乱と振動ジャイロのドリフトが重なった場合、原理的には正しい推定が不可能となります。実際には、電信柱等の外乱要因になるようなものがほ場の近辺にはいくつか存在します。このような場合、地磁気の変化にあわせて走行中に目標方位を変化させることで、ある程度走行精度の劣化を抑えることは可能です。この件に関しては前報の第2報で取り扱っています。本方式を実用機の方向センサとして使う場合、再現性の確保、走行距離の拡大などが課題としてあげられます。