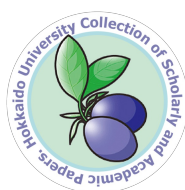




HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	農用車両のための航法センサに関する研究
Author(s)	水島, 晃
Description	北海道大学博士論文 (2003) Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2003)
Citation	北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 27(1), 199-267
Issue Date	2005-02-28
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/5625
Type	departmental bulletin paper
File Information	27(1)_MIZUSIMA_16494.pdf



農用車両のための航法センサに関する研究*

水 島 晃

(北海道大学大学院農学研究科生物資源生産学専攻生物生産工学講座農用車両システム工学分野)

Study of Navigation Sensors for Agricultural Vehicle*

Akira MIZUSHIMA

Laboratory of Agricultural Vehicle Systems Engineering, Research Group of
Bioproduction Engineering, Division of Bioresources and Product Science,
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

I. 緒 論

A. 研究の背景

a. 世界の人口と食料生産

「人口と食糧生産のアンバランスは貧困や飢餓による死亡率の増加によってしか解決されない。これは、18世紀末にイギリスの社会経済学者マルサスが人口論のなかで述べた言葉である。つまり、人口増加と食糧生産のギャップは、貧しい人々が飢えて死ぬことでしか解決されないと予言しているのである。しかし、その後の世界はマルサスの指摘したようにはならなかった。その要因の一つとして1950年頃起こった「緑の革命」があげられる。「緑の革命」は世界大戦後、科学技術が急速に進歩し、化学肥料・農薬が次々と生み出され、農作物の生産量を飛躍的に増大させたこと、品種改良の技術がさらにこれを増幅したことなどを指す。この「緑の革命」により、世界の穀物生産量は1950年から1984年までの34年間で年間6億トンから16億トンに、約2.7倍の飛躍的増加を実現した。その間、人口の推移に目を転じると、21世紀を迎えた今日、世界の総人口は60億人にもなる。50年前の1950年にはわずか25億人であったことを考えると、世界人口も「緑の革命」による生産量の増加に劣らず爆発的に増加したとい

える。増加は今後も進行しており、このまま増加し続けると、2050年には90億人を突破すると推計されている。それに対して、1984年以降世界の穀物生産量は18~19億トンで頭打ちとなり、ほぼ横ばいで推移して現在にいたっており、今後も増加の見通しは立っていない。さらに、「緑の革命」は大増産をもたらした代償として、化学肥料や農薬の大量投入によって土壌の砂漠化・劣化などの副作用を引き起こし、土地生産性を引き下げる結果を招いたのである。今後、人口増加に対応した食糧の増産が急務であるにもかかわらず、逆に農耕地を増やし土地生産性を高めることが難しくなっているのが現状である。仮に食糧生産を現在の水準のままで維持したとしても、地球が扶養できる限界人口は75億人程度ではないかといわれている。つまり、20年後の2020年頃に扶養限界に達することになる。このようなことから、近い将来、食料需要は行き詰まり、いつ食糧危機が起こっても不思議ではない状況にある。そのとき、世界情勢はどうなるのであろうか？ 当然、食糧自給できない国は、高いコストを払わなければ生活するための食糧を得ることができなくなるであろう。さらに悲観的に考えると、食糧をめぐる争い、地域紛争や戦争、飢餓難民の大量発生など、マルサスの予言が現実のものとなることも考えられる。今後、このような事態を回避する救世主として、「緑の革命」にかわる新たな「農業革命」を起こすことが人類の短期的な幸福において不可欠である。

*北海道大学博士論文 (2003)

Doctorial thesis submitted to the Graduate School of Agriculture, Hokkaido University (2003)

b. 日本の食料・農業事情

以上のような世界情勢の中、日本の食料・農業事情について概観してみる。図1.1に農林水産省が作成した平成12年度の食糧需給表による日本の自給率の推移¹⁾を示す。日本の食料自給率(カロリーベース)は、昭和40年度の73%から50年度には54%へと短期間に大きく低下した。その後、ほぼ横ばいで推移したが60年度以降再び大きく低下し、平成10年度には40%となった。このような中、10年度以降、3年連続で40%と横ばいで推移している。食料需給表をもとにまとめた「食糧自給率レポート平成12年度版」²⁾によると、12年度の食料消費の動向は、米の消費が減少し、畜産物や油脂類の消費が増加するという従来の傾向が継続したとしている。また、国内生産の動向は、小麦、大豆の生産量が大幅に増加する一方、果実や砂糖類の生産量はかなり減少したと述べている。その結果、12年度の食糧自給率は40%で横ばいとしている。日本の自給率が著しく低下した主な要因として、

1. 経済成長にしたがって国民の食生活が畜産物を多消費するようになって、大量の飼料穀物を必要とするようになった。
2. 経済成長の始まった1960年当時は約

607万haあった耕地が、1996年には500万ha以下に減少した。

3. 輸入原料に依存せざるを得ない油脂類の消費が増加した。
4. 利益の少ない裏作がほとんど全面的に放棄された。

などが挙げられる。現在、日本が輸入している主な農産物の生産に必要な海外の農地面積は、国内農地面積(483万ha)の約2.5倍に相当する1,200万haに及んでいる。仮に、本当に食糧危機が発生すれば、日本は真っ先にパニックに陥る状況にある。

これらの事情をふまえて、平成11年7月に「食料・農業・農村基本法」が政府によって施行され、

- 1) 食料の安定供給と確保
- 2) 多面的機能の発揮
- 3) 農業の持続的な発展
- 4) 農村の振興

などの方向性が示された。さらに、この4つの基本理念を実行するために、平成12年3月、「食料・農業・農村基本計画」が策定された。この計画の中で食糧自給率の目標を掲げており、供給熱量ベースで現在の4割程度から、5割以上を国内生産でまかなうことを目指すことが適当とし、望ましい栄養バランスが実現するとともに、食料の廃棄などが減少することを前提とした望ましい食料消費の姿が提示されている。また、生産面では、品目ごとに生産努力目標が提示され、10年後の22年度の目標を45%とする供給熱量総合食料自給率が示された。また、食料自給率45%の達成のために、平成22年度の全体の延べ作付面積を平成10年に比べて7%、33万ha拡大させる計画となっている。農地面積は491万haから470万haに減少するが、耕地利用率を94%から105%に高めて作付けの拡大を図る計画である。しかし、日本農業は以下に掲げるような問題点が、これらの計画実行の妨げになっている。

- 1) 農業従事者の減少と高齢化
- 2) 農業後継者の激減
- 3) 耕地面積の減少

1960年以降の国民経済の高度成長で、2次、

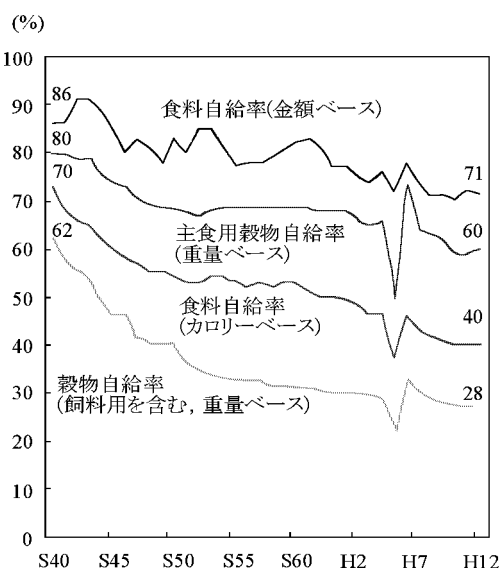


図1.1 日本の自給率の推移

3次産業の従事者所得が急上昇したが、農業の従事者所得は追従し得ず、その所得格差の拡大とともに、農業従事者および後継者の激減が顕著となった。農業従事者はここ20年で200万戸も減少²⁾³⁾しており、現在では312万戸⁴⁾となっている。また、平成10年1月1日現在、農業後継者は2万7,370人、農家120.3戸に1人となり、後継者1人あたり179.2haの耕地が国内に存在する状況⁵⁾となっている。その結果、都道府県で4ha以上、北海道では50ha以上の階層が増加しており、規模の大きい階層の割合が高まる傾向が続いている。さらに、65歳以上の割合は5年前の25%から29%へ上昇し一層高齢化が進行している⁴⁾。また、宅地等への転用、耕作放棄等による改廃などが理由で、平成13年8月1日現在の全国の耕地面積は479万haで前年に比べ3万ha減少⁶⁾、農作物作付(栽培)延べ面積も452万haで前年に比べて4万ha減少、土地利用率(耕地面積に対する作付延べ面積の割合)は94.3%で、前年に比べて0.2ポイント低下⁷⁾、といずれも減少傾向にある。

以上の日本農業の背景から、「農地の拡大」、「生産性の向上」を実現するには、作業負担の軽減、省力化は不可欠であり、その解決策の一つとして農作業の自動化が挙げられている。農林水産省では、平成4年の「新しい食糧・農業・農村政策の方向」で農業用ロボットを農業技術の開発方針とすることを示唆し⁸⁾、この方針に沿うため、農林水産技術会議事務局は総合開発研究「未来型農業技術確立のための基盤技術に関する総合研究」(略称「軽労化農業」)を設置して、2010年の未来型農業技術の招来を想定した9年間のプロジェクト研究を開始した。さらに、農林水産省が平成5年度より開始した「農業機械等緊急開発実用化事業」(略称「緊プロ」)の中でも農業の開発が取り組まれている⁸⁾。最近では、通商産業省(現 経済産業省)の地域コンソーシアムプロジェクトとして「大規模農業向け精密自律走行作業支援システムの開発研究委員会」^{9)~11)}が発足し、平成10年~12年の3ヶ年計画で、Precision Farming (PF)^{12)~17)}と融合した次世代の農業ロボットの開発研究が行われている。

このように、日本国内では「農業用ロボット」の研究開発に注目が集まっており、日本だけでなく世界中で、新たな「農業革命」の起爆剤になる可能性を秘めていると期待されている。

c. 農業用ロボットへの期待と可能性

ここで、農業用ロボットへの期待と可能性についての例を示す。これまで、農家の最重要かつ苦労の多い作業の一つが除草作業であったが、除草剤の登場によって農家の負担は大きく改善された。しかし、畑作の場合は除草剤だけでは雑草を抑えきれず、カルチベータ(中耕除草)による機械除草が必要となる。カルチベータの作業ができれば一人前の農家として認められる程、この作業は精密な操作が要求され、かなりの精神的な負担となる¹⁸⁾。さらに、オペレータは後ろを振り向きながら無理な姿勢での作業をすることから、肉体的にも大きな負担がかかる。この作業の負担を小さくする手段として、最初の播種作業で畦を真っ直ぐに引くかが重要である。播種作業の直進精度によってカルチベータ作業の精度が決まる。しかし、数百メートルもある長い畦を真っ直ぐな直線で引くのは、いかに熟練のオペレータでも不可能である。この播種作業をロボットで行うだけでなく、カルチベータの作業も行えば作業負担を大幅に軽減することができる。

また、環境保全型農業が叫ばれている一方で、化学合成農薬の最大の被害者は、消費者ではなく実は生産者そのものであるということはいまだに知られていない。十勝の畑作農家では、30ヘクタール規模の畑作農家で、1シーズンで100時間も農薬散布に費やしている⁵⁾。その結果、農薬中毒となり、ピーク時には2,600人前後、現在では毎年全国で1,200~1,300人前後の人が死亡しているとの年次推計がある⁵⁾。このように、生産者は消費者が食物から取り込む量の数千倍の農薬を取り込んでいることになる。農家の労働の中で最もつらい作業が農薬散布であり、この作業がロボットで行われるのであれば、農薬の人体への摂取量はゼロとなり、農家にとってこの上ない朗報となる。さらに、ロボットが作物の病害虫を判断して必要なところだけ必要量散布できれば、環境保全に貢献できるだ

けなく、農薬の消費量を大幅に削減でき、コスト低減を図ることができる。さらに、その作業を夜間に行えとなれば、農家にも周辺住民にとっても大きなメリットとなる。

世界に目を向けてみてもロボットに対する期待は大きい^{19)–21)}。数百 ha の大農場を経営する米国・オーストラリアでは数千万円に及ぶ大型農機を使用しているため、その重量によってほ場に耕盤ができるという問題を抱えている。そのため、3年に1回くらい、1メートル以上の深土耕が必要となる。そこで、農業用小型ロボットを複数同時に作業させることや、昼夜連続作業させることによって、小型軽量機械で大面積を負担することができ土壌踏圧を軽減することが可能となる。

このように、農業用ロボットへの期待は幅広く、単なる作業負担の軽減、省力化による農地の拡大、生産性の向上だけにとどまらず、安全性の向上、環境保全型農業の実現といった波及効果も期待できる²²⁾。

B. 既往の研究

a. 農業用ロボットの歴史

最も古い農業用ロボットの研究としては、1924年にWillrodtが提案したUS Patentがある。ステアリングホイールと前方に設置したガイドホイールを結び、ガイドホイールが溝をなぞる接触センサとして機能することで、ステアリングを制御する自動操舵手法である。1939年にはSissionsが、1941年にはUS Patentでイリノイ大の研究者のAndrewが、農場の中心にピアノ線をつなぎ、車両が螺旋状に旋回しながら自動操舵する手法を提案した。1960年頃になると、プラウなどのれき溝や作物列をなぞる接触式センサによる自動走行車両が英国やオランダなどで開発され、研究の数も多く見られるようになる。日本では1970年頃からガントリー方式が初めて無人作業装置として報告され、その後接触センサを利用したならい方式の条追従自動操向機能を有した自脱型コンバインが1974年頃市販化されている。また、ケーブル誘導方式などが発表されるようになったのもこの頃である。1980年頃からは、コンピュータ、画像処理装置、ジャイロスコプ等のエレクトロ

ニクス技術を駆使したセンサが容易に使用できるようになり、ガントリーや接触式のように経路が制約されない自動走行車両の開発が多く発表されるようになった。1990年代後半になると、GPS等の高精度に絶対位置を計測できるセンサを使用した自動走行車両の開発が可能となり、GPSをベースとした研究が現在の主流となっている。

b. 航法センサによる農業用ロボットの分類

農業分野の自動走行は航法センサの方式によって行本がかなり詳しく分類しているが、最近の主流は大別すると、接触追従方式、環境整備方式、マシンビジョン方式、内界センサ方式、絶対位置取得方式の5つに分類される。ここで、5つの方式について詳しく述べる。

接触追従方式は研究の歴史でも述べたように最も古い方式で、機械式のガイドを、プラウなどのれき溝や作物列などに接触させてなぞること、車両を操舵する方式である。接触追従方式の研究例を表1.1に示す。GPSや画像処理、コンピュータなどの利用が考えられなかった時期に多用された方式で、目標経路に対する追従精度はある程度確保できるが、接触させる対象が必要となるため利用条件、環境が限定されるという問題がある。1980年以降はこの方式の研究はほとんど見られなくなった。また、現在市販化されている条追従自動操向機能を有した自脱型コンバインもこの方式である。

環境整備方式の研究報告を表1.2に示す。環境整備方式は、施設園芸³³⁾のような行動範囲が限られ、周辺環境が制御できるような状況で頻繁に使用されている。具体的には、ほ場にレールやU字溝、パイプ等を用いて固定経路を設置して車両を制御する方法や、ほ場にガイドとして磁界を発生させるケーブルを埋設し、センサで磁気を検出することによって位置、方位情報を取得する方法、レーザービームと光センサによるもの、ガントリーシステム³⁴⁾等がある。いずれも周辺環境を整備することによって車両のほ場に対する相対的な位置、方位を検出して車両を制御する。この方法は、位置決め精度、技術の完成度では優れているが、ほ場作業の障害物となるものを設置しなくてはならない点、

表 1.1 接触追従方式の研究事例

年次	研究機関・著者等	作業	センサ	文献
1959	Richey, C. B.	トラクタ	機械式接触	23)
1962	Sieling, S.	プラウ耕	機械式接触	24)
1962	Liljedahl, L. A.	中耕	機械式接触	25)
1963	Mittebach, B.	プラウ耕	機械式接触	26)
1968	Hesse, H.	基礎実験	光電型電気容量型	27)
1972	Warner, M. G. R.	プラウ耕	機械式接触超音波センサ	28)
1974	Hesse, H.	中耕	電気容量型	29)
1974	池田善郎	コンバイン	接触型リミットスイッチ	30)
1976	笈田 昭	プラウ耕	機械式接触	31)
1983	Upchurch, B. L.	りんご収穫	機械式接触	32)

表 1.2 環境整備方式の研究事例

年次	研究機関・著者等	作業	センサ	備考	文献
1965	Pichon, D. J.	基礎実験	電 磁 誘 導 ケーブル		35)
1972	Widden, M. B.	ほ条実験	機械式ケー ブル		36)
1974	Puckett, H. B.		電磁誘導	ラジコン併用	37)
1982	堀尾尚志	耕うん	光電センサ	石灰を誘導マー カとする	38), 39)
1983	Gilley, J. R.	灌漑システム	センターピ ボット		40)
1996	岡崎紘一郎	カンキツ園	モノレール		41)
1996	戸崎紘一	果樹園防除	誘導ケーブ ル		42)–45)
1999	Sogaard, H. T.	トラクタ播種	レーザー	ほ場の周囲に reflector 設置	46)

走行経路が限定されるため土壌踏圧問題を生じる点、また、そのシステムの設置にコストがかかり、大規模な屋外環境のほ場には適さない点等の問題点も多く存在し、その利用範囲は限られている。この方式は、工業分野⁴⁷⁾や建設機械⁴⁸⁾や自動車産業^{49), 50)}などでも広く利用されている。

マシンビジョン方式は文字どおり車両に CCD カメラを取りつけ、画像処理を利用して車両位置を検出する方式である。表 1.3 に研究事例を示す。この方式は、作物列等の目標となるものから、車両の相対的な位置、方位を取得す

る。そのため、ほ場に目印となるものが常に必要のため、その使用方法が限定される。コンピュータの処理速度が進歩したため処理に時間がかかるといった問題点はほぼ解消されているが、明るさによって認識力が低下する、作物列と雑草の判別が難しい等、精度的にも技術的にも依然研究段階であり、信頼性に欠ける部分もある。しかし、障害物回避等のロボット研究が直面している問題の解決策の一つとして期待されている。

内界センサ方式は推測航法 (Dead Reckoning)⁶⁹⁾ともよばれ、航空機や船舶の分野で多用

表 1.3 マシンビジョン方式の研究事例

年次	研究機関・著者等	作業	備考	文献
1989	三竿善明		直進作業	51)
1990	韋 学軍	トラクタ間引き		52)
1992	端 俊一	トラクタ間引き		53), 54)
1995	鳥居 徹	作物列追従		55)–57)
1995	生研機構	作物列追従		58)
1996	森 英雄	作物列追従	盲導犬ロボット	59)
1996	Tillett, N. D.	作物列追従	ハフ変換	60), 61)
1998	Pinto, F. A. C.	作物列追従作業全般		62), 63)
1999	岡本 博	トラクタ除草		64)–66)
1999	Cho, S. I.		超音波センサで 障害物認識	67)
2001	Benson, E. R.	コンバイン		68)

されてきた方法である。具体的には地磁気方位センサやジャイロ스코ープ等の方位センサによって方位情報を取得し、車輪の回転数や、速度センサによって車両の進んだ距離を求め、距離と方位情報を使用してスタート位置からの相対的な位置を推定する。車輪の滑りによる誤差や方位情報の誤差が積算されるため、精度、再現性に多くの問題を抱えている。代表的な研究事例を表 1.4 に示す。主にトラクタや田植機等に適用されているが、その用途はこのような理由から、直進自動走行にほぼ限定されているといつてよい。

絶対位置取得方式は現在もっとも数多く研究されている手法で、位置計測装置によって車両の絶対位置を検出する。表 1.5 に研究事例を示す。この方式は、カーナビゲーションシステムでも有名な GPS (Global Positioning System) の出現により、ここ 4, 5 年で急激に発展し、精度も技術的にも最も信頼できる手法である。トータルステーションによって位置情報を取得する方法もある。一般的には、方位センサの位置情報と融合することで精度の向上を図っている。農業分野でも、かなり完成度の高い研究も報告されており、技術的には実用に一番近いと

表 1.4 内界センサ方式の研究事例

年次	研究機関・著者等	作業	センサ	備考	文献
1960	Gilmour, W. D.	following rows	機械式ジャイロ		70)
1970	Grovum, M. A.		機械式ジャイロ	機械式接触 センサ併用	71)
1973	Schlottmann, K.	simulation	コンパス		72)
1993	野波和好	田植機	振動ジャイロ, 速度計		73)–75)
1996	西村秀司	牧草収穫作業	光ファイバージャイロ		76)
1996	岡戸敦史	飼料生産	光ファイバージャイロ		77)
1996	玉城勝彦	施肥作業	地磁気方位センサ	傾斜地作業	78)–80)
1998	石田三佳	飼料生産	光ファイバージャイロ		81)
2001	水島 晃	トラクタ作業	地磁気方位センサ, ジャイロ스코ープ		82)–87)

表 1.5 絶対位置取得方式の研究事例

年次	研究機関・著者等	作業	センサ	備考	文献
1990	Choi, C. H.		AgNav (DGPS)		88)
1994	石井一暢		視覚センサ, 地磁気方位センサ		89)–92)
1995	Elkaim, G., O'Connor, M., Bell		carrier-phase GPS	GPS4 つ 使用	93)–96)
1996	Bergeijk, J.		DGPS, 地磁気方位センサレー ダ速度計 車輪速度計	デッドレコ ニング併用	97), 98)
1996	鳥居 毅	草刈りロ ボット	DGPS, 地磁気方位センサ		99)
1997	長坂善禎	田植機	RTK-GPS 光 ファイ バージャイロ		100)–102)
1998	井上慶一	ロータリー 耕うん, 防 除	DGPS 光ファイバージャイロ		103), 104)
1998	Will, J., D.		AgNav (DGPS), 地磁気方位センサマシ ンビジョン	基礎研究	105)
1998	行本 修	耕うんロ ボット	トータルステーション 地磁気方位センサ		106)–108)
1998	Noguchi, N.		DGPS, 地磁気方位センサ		109)
2000	宮本健太郎		RTK-GPS 光ファイバージャイロ	マルチロ ボット	110)
2000	木瀬道夫	牧草収穫作 業	DGPS 地磁気方位センサ		111)
2001	松尾陽介	耕うんロ ボット	トータルステーション 地磁気方位センサ	性能試験	112)–114)
2001	木瀬道夫	トラクタ通 年作業	RTK-GPS 光ファイバージャイロ		115)–120)

いえる。しかし、まだコストや安全対策等課題も存在する。

c. 実用化の課題と動向

農業用ロボットの研究の歴史は1.3.1節でも述べたように約80年近くあり、ここ30年に盛んに行われてきたにもかかわらず、現在、国内で市販されている完全ロボット機能を備えたものは、ならいセンサ方式、ケーブル誘導方式などの走行経路が規定されたものに限られており、トラクタによる畑作や、田植機など畑を自由に動き回る作業の農業用ロボットは実用化さ

れていない。その理由としてはいくつか存在するが、最も大きな課題は、「コスト」と「信頼性」の2点に集約される。

特に、「コスト」は実用化を考える上で最重要課題である。農業用ロボットに要求される精度は船舶・航空機の自動操縦などの他産業に要求される精度に比べ高く、そのため高精度ではあるが高価な航法センサが必要となる。例えば、RTK-GPSを導入する場合、その価格は600万円近くに及ぶ。現在、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%とい

うことを考えると、いくら高機能で高性能な農業用ロボットを開発しても、このコストの増大は実用化には大きな障害となる。

「信頼性」とは、作業中の予期せぬ事態に遭遇したときの適応能力や安全性の確保、長時間の使用に対する耐久性、故障したときのサポート体制などを意味する。農作業は、天候、作物、ほ場条件などが常に変化するため、その条件変化に柔軟に対応して作業する能力や、センサやアクチュエータの故障を判別して処理する能力などのロバスト性が要求される。また、これらの予期せぬ事態が起きたときに、事故が起きることを回避する安全性の確保は実用化には避けて通れない問題である。安全性の確保に関する研究報告も数多くあり、超音波センサや接触センサ、マシンビジョンなどによって人や障害物を認識し回避する方法が提案されている^{121)~123)}。さらに、農家の安全利用に対する教育、意識改革や安全な利用のための厳格な規則や資格の検討なども必要であろう。また、農業用ロボットの利点として、24時間の作業によって能率の向上が挙げられるが、実際それだけ長時間の使用に耐えられるシステムの構築が可能であるかどうかは、検討した研究報告もなく今のところ未知である。当然、精密機械となるため故障は避けられないが、そうしたときの企業や国のサポート体制も整える必要があると考えられる。

このような「コスト」と「信頼性」の問題があるため、完全無人による農業用ロボットの実用化は近い将来には難しいと予測される。完全無人ではなく、人が乗ることを前提とした半自動の農業用ロボットの開発が、現在の実用化に向けた国際的な動きである。例えば田植え作業の直進走行部分のみを自動化し、旋回や次行程への移動は人間が行うような田植機が研究されている^{124)~126)}。走行精度の劣化は人間が判断し修正することができるので、航法センサのコスト問題も大きくならず、作業環境の変化や認識、判断も人間が行うので信頼性の問題も解決している。実際に、ドイツのGeotec社は1999年秋より自動作業機能を有するトラクタを市販化し、2001年秋までに20セット近く販売したと

いう¹²⁷⁾。また、John Deere社では図1.5のような、キャビンのない果樹園用の無人トラクタを試作し、一般公開して市販化を視野に入れた開発を継続している¹²⁸⁾。

d. 農業用ロボットの省力効果及び経済効果

実際、農業用ロボットを導入することによる省力効果、経済効果について注目してみると、行本は30 ha規模で、水稻、小麦、大豆の2年3作の輪作を想定して、完全ロボット機能を用いた場合の省力効果及び経済効果について検討している¹²⁹⁾。作業体系は、地域、作型、労働事情などの多くの要因で千差万別であるが、いくつかの作業体系に関する資料を参考に機械装備や作業速度など考慮した各作物の作業体系と労働時間を試算し、それらをもとにロボットによる省力効果を算出した結果、水稻で約22%、小麦で30%、大豆で約35%の省力化を可能としている。また、経済効果については、ロボット化のための機械投資額は、慣行農機具費(機械投資)の1/4の120万円/年とし、機械類の償却年限8年として順次ロボット対応機械に入れ替えていくものとする、8年間でロボットへの投資額は計1,000万円となる。そして、この投資によって削減される労働時間をすべて雇用的労働と見なし、労働経費の削減が行われると考えると所得はロボットの投資を行ってなお130万円/年の増加になるとしている。この所得増加を規模拡大に振り向ければ、土地所得経費の償却または増加分の借地料を考慮していないが約200万円/年の所得増が見込まれると結論している。ここでの結果はあくまで試算であり、確定的なも



図1.2 果樹園用無人トラクタ

のではない。これらの試算結果を裏付ける体系的な実証研究も今後必要となろう。

C. 研究の目的及び範囲

以上の背景より，本研究は農用車両の自動化の課題となっている「コスト」の問題を解決するために，低コストな航法センサによって農用車両の自動化に必要な不可欠な位置・方位・傾斜角を計測し，実用化を考慮した安価な航法システムを構築することを最終目標とした。また，位置・方位・傾斜角を計測する航法システムは自動化だけでなく Precision Farming やトラクタの運転支援機能などに適用することもできる。

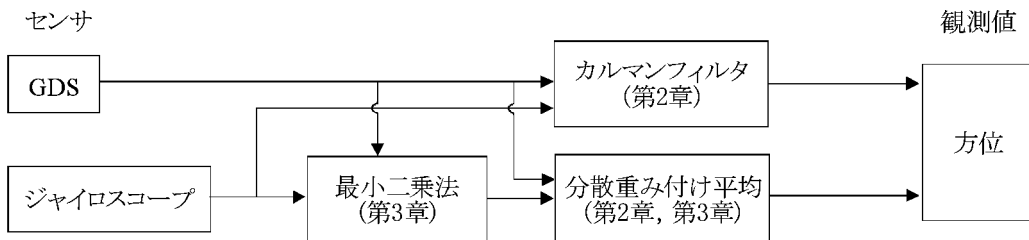
本研究で構築した航法システムは図 1.6 に示すように

- 1) 地磁気方位センサ (GDS) ベースセンシングシステムによる航法システム
- 2) GPS ベースセンシングシステムによる

航法システム
に大別できる。

GDS ベースセンシングシステムは，航法センサとして GDS とジャイロスコープを適用した方位センサのみで構成されるシステムであり，センサのコストを抑えた自動直進走行システムの構築を想定した方位推定法を考案し，位置はデッドレコニングで取得するシステムとした。GDS は農業用ロボットのナビゲーション技術においてよく適用され，特に屋外環境下における農作業に対してロボット化を実現するには有効な方位センサである。まず，GDS の欠点である低い S/N 比，磁気環境の変動に伴う精度の劣化及びジャイロスコープのドリフトを補償するために，GDS と光ファイバージャイロ (FOG) をカルマンフィルタ，分散重み付け平均によって融合し精度，再現性の向上を図った (第 2 章)。また，FOG の代わりに低コストな振

1) 地磁気方位センサ(GDS)ベースセンシングシステム(第2章, 第3章)



2) GPSベースセンシングシステム(第4章, 第5章)

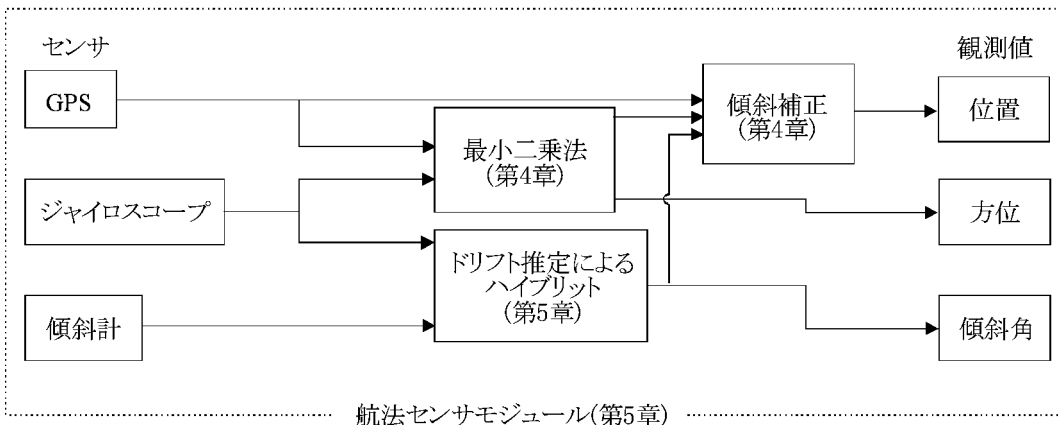


図 1.3 本研究の構成とフロー

動ジャイロ스코ープを使用して、GDS と併用した方位推定法(最小二乗法+分散重み付け平均)を考案し、高精度な自動直進走行システムの開発を行った。(第3章)。

GDS ベースの方位センサのみのセンシングシステムによって方位・位置を取得する手法は、位置の計算にデッドレコニングを使用するため誤差が積算するという問題があり、長時間使用することはできない。また、その計測位置も初期位置からの相対位置であることから適用範囲も制限される。そこで、GPS をベースとしたセンシングシステムによる方位・位置・傾斜角の高精度化手法を考案した。GPS と振動ジャイロを最小二乗法でセンサフュージョンし絶対方位の取得及びドリフトを推定する手法を考案した(第4章)。また、傾斜角がGPS 計測に与える影響を補正する手法を考案して、位置情報の高精度化を図った(第4章)。さらに、GPS の傾斜補正に必要な傾斜角も、振動ジャイロと傾斜計をハイブリットしてドリフト推定することで取得する手法を考案した(第5章)。最後に第5章においてGPS, 振動ジャイロ, 静電容量型傾斜計をハイブリットして位置・方位・傾斜角を観測できる航法センサモジュールを開発し、その精度を評価した。

II. 地磁気方位センサの出力特性と高精度化

A. はじめに

方位情報は、農業用ロボットに限らず、航空機・船舶・ロケット・車両などの移動体のナビゲーション技術において重要なパラメータの一つである。そのため、絶対方位及び相対方位を計測する方位センサは、移動体の高精度航法システムには不可欠な航法センサであり、今日、様々な方位センサが開発されている。また、方位センサは移動体の走行方向と距離を積算して自己位置を推定するデッドレコニングに適用することで広くナビゲーション技術に応用されており、低コストな位置計測法としても有力なセンサである。地磁気方位センサ(Geomagnetic direction sensor; GDS)は代表的な方位センサであり、これまで、幅広い分野の移動ロボットのナビゲーションに採用されている。GDS は、

磁気コンパスとして機能し、地磁気を検出することで地球座標系における絶対方位の測位が可能である。GDS は農用移動ロボットのナビゲーション技術においても適用され、特に、屋外環境における農作業に対してロボット化を実現するには有効な方位センサである。

本章では、GDS を使用した方位計測の高精度化手法を提案する。まず、GDS と同様にナビゲーションに広く使われている、光ファイバージャイロ스코ープ(FOG)をカルマンフィルタによってセンサフュージョンすることで高精度化を図った。次に、GDS を使用する上で問題となる地磁気の時間・空間変動をリアルタイム補正する手法を考案し、走行再現性の向上を図った。

B. 地磁気方位センサの原理と特徴

a. 地磁気方位センサ¹³⁰⁾とは

地磁気は方向と大きさを持った3次元ベクトルである。GDS は、この地磁気の大きさ、つまり磁束密度を計測する磁気コンパスとして機能する。地球全土における地磁気の磁束密度の平均値は約0.5 G(ガウス)となる。磁束密度の単位、G, T(テスラ), γ (ガンマ)の関係は $1\text{ T} = 10^4\text{ G} = 10^9\gamma$ で表わされる。図2.1のように、ある地点での地磁気のベクトルを F で示す。 F の水平面内の分力を水平分力、鉛直平面内の分力を鉛直分力と呼び、それぞれ H , Z とする。水平分力 H の方向が磁北で、磁北と地理的真北のなす角度を偏角 D , F が水平面となす角を俯角 I として表せる。磁北は真北つまり地球の回転軸に対して 11° 傾いている。GDS は、地磁気の水平分力 H を計測することで、磁北に対する絶対方位を算出することができる。

磁気を検出する磁気センサは、現在様々な種

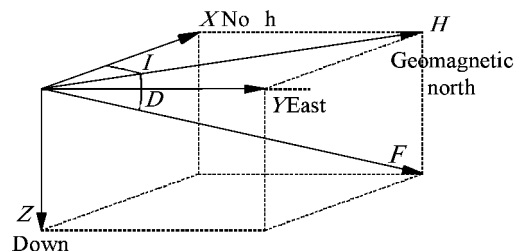


図2.1 地磁気の概要

類のセンサが開発されており、GDS として機能するものは以下のような種類に分類できる。

- ・機械式磁石型センサ
- ・ホール効果 (Hall effect) 型センサ
- ・フラックスゲート (Fluxgate) 型センサ
- ・磁気抵抗 (Magnetoresistive) 型センサ
- ・磁気誘導 (Magnetoductive) 型センサ
- ・磁気弾性 (Magnetoelastic) 型センサ

それぞれ、構造、コスト、精度やサイズが異なり用途にあわせてセンサを選定する必要がある。

b. フラックスゲート型 GDS の原理と特徴^{131),132)}

フラックスゲートセンサは約 1928 年頃開発され、ナビゲーションシステムに最適な GDS である。第二次世界大戦中には、航空機による磁気探査や潜水艦探知、鉱物資源探査、磁性金属探知機に広く使用されたが、現在は、カーナビ用の方位センサや、人工衛星の姿勢制御用センサなどに使用されている。計測範囲はおよそ $10^{-6} \sim 10^2 \text{ G}$ である。フラックスゲートという名前は、Pioneer Bendix 社の飽和磁心 (saturable-core) 磁力計の商標名で、交流励起コイルによって透磁率が変化する磁性磁心に磁束 (flux) の通門 (gating) 作用が生じることに由来する。フラックスゲートセンサの原理を説明する前に、透磁率について簡単に説明する。ある物体における透磁率 μ は、その物体がいかに磁力線の通路となりえるかという指標である。つまり、「透磁率が高い」=「磁気の抵抗が低い (磁気が通りやすい)」となる。

透磁率は磁束密度と磁界強度に密接な関係があり、以下のように表わされる。

$$B = \mu H \quad (2.1)$$

ここで、 B ：磁束密度、 μ ：透磁率、 H ：磁界強度である。(2.1) 式を図示したものを $B-H$ 曲線と呼ぶ。図 2.2 に鋼板、鋳鋼、非磁性体の $B-H$ 曲線を示す。図から $B-H$ 曲線は非線形であり、 H が 0 付近では B は急勾配で増加するが、 H が一定量以上になるとほぼ水平となりほとんど増加しなくなる。この状態を、飽和励磁状態と呼び、透磁率 μ はほぼ 0 となる。フラックスゲートセンサはこの磁性体の飽和励磁現象を利

用している。

図 2.3 に基本的なフラックスゲートセンサの構造を示す¹³³⁾。透磁率の高い強磁性体の磁心に、励磁コイルと検出コイルを巻き、励磁コイルに交流を流し磁性磁心が飽和するまで励磁させる。外部に一樣磁界が存在する場合、磁性磁心が飽和励磁していなければ、磁性磁心の比透磁率が高いので、外部磁界は図 2.3-a) のように磁性磁心に引き込まれる。このとき、検出コイルは磁束の変化にともなって、誘起電圧が生じる。磁心が飽和状態に達すると透磁率は 0 となり、外部磁界は磁心内部から放出される (図 2.3-b))。同時に、磁心内部の磁束は一定値と

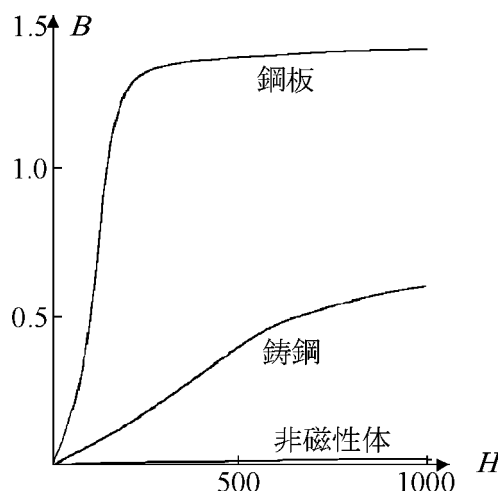


図 2.2 軟鋼の $B-H$ 曲線

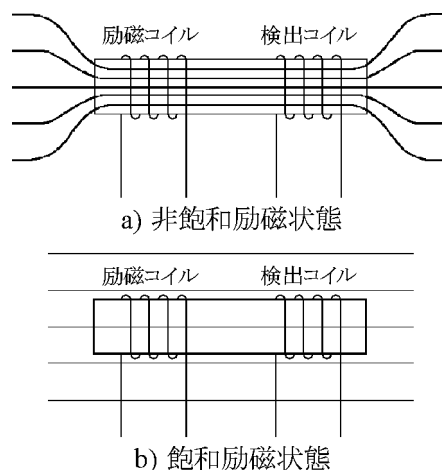


図 2.3 フラックスゲート型 GDS の構造

なり、検出コイルには誘起電圧が検出されなくなる。検出コイルの誘起電圧の振幅から外部磁界を求めることができる。しかし、図2.3のような構造だと誘起電圧には外部磁界だけでなく、励磁コイルと検出コイル間の共振電圧も含まれてしまうため検出精度が劣化、実際の B - H 曲線は物体の保磁力によってヒステリシス曲線となるため精度が悪化するなどの問題もある。また、この構造では磁心方向の磁界強度しか検出されないため、地磁気の方位を計測することができない。地磁気の方向を検出するには、直角に交わった2個の検出コイルが必要となる。

トロイダルコア（ドーナツ状の磁心）を用いたフラックスゲートセンサは、地磁気の方位を検出でき、かつ精度劣化の問題を除去することができるセンサで、高精度かつ低コストなフラックスゲートセンサとして広く普及している。図2.4に2軸のトロイダルコアのフラックスゲートセンサ¹³⁴⁾を示す。磁心全体に励磁コイルを巻き、それを十字のリボンをかけるように直交に巻いた2つの検出コイルによって構成される。励磁コイルによって磁性磁心を飽和直前まで励磁する。外部磁界が存在しなければ図の S_1, S_2 における磁束密度 B_1, B_2 は図のように大きさが同じで、方向が反対となる。この結果、検出コイル X を通過する磁束変化は0となり、検出コイル X に誘起電圧は生じない。同様に、検出コイル Y にも生じない。外部磁界（地磁気）が検出コイルに直交するように加わると、外部磁界 H_{ex} により磁心内部の磁束密度にバイアス加わる、このため、図2.4-dのように S_1, S_2 における磁束密度 B_1, B_2 は非対称となり、検出コイルには図2.4-eのような誘起電圧が生じる。一方、検出コイル Y の内部には外部磁界が通過しないので誘起電圧は生じない。

外部磁界から θ の角度をもった状態では、検出コイルの誘起電圧から次のような関係の電圧 V_x, V_y を得ることができる。

$$V_x = r \cos \theta \quad (2.2)$$

$$V_y = r \sin \theta \quad (2.3)$$

ここで、 r は検出コイルと外部磁界の水平分力に依存する定数である。よって、外部磁界の方

向は、

$$\theta = \tan^{-1}(V_x/V_y) \quad (2.4)$$

として、算出することができる。さらに、式(2.2), (2.3) は以下のように変形できる。

$$V_x^2 + V_y^2 = r^2 \quad (2.5)$$

これは、 X, Y の原点 O を中心とし、半径 r の円を表わす。すなわち、センサを 360° 回転させたときの V_x, V_y の描く軌跡は円となる。この円を地磁気円と呼ぶ。

c. GDS の検出誤差^{135), 136)}

GDS の検出誤差は大まかな以下の4つに分類できる。

- ・センサ自体の誤差
- ・自然現象の影響による誤差
- ・人工物の影響による誤差
- ・センサの傾斜による誤差

センサ自体の誤差は、検出コイルの直交性やトロイダルコアの生成精度、検出回路を構成する素子の精度や温度特性などである。検出コイルの直交性など、誤差が一定値となる場合は補正が可能である。

自然現象による誤差は、太陽黒点や磁気嵐などの地磁気自体に影響を及ぼすものである。こ

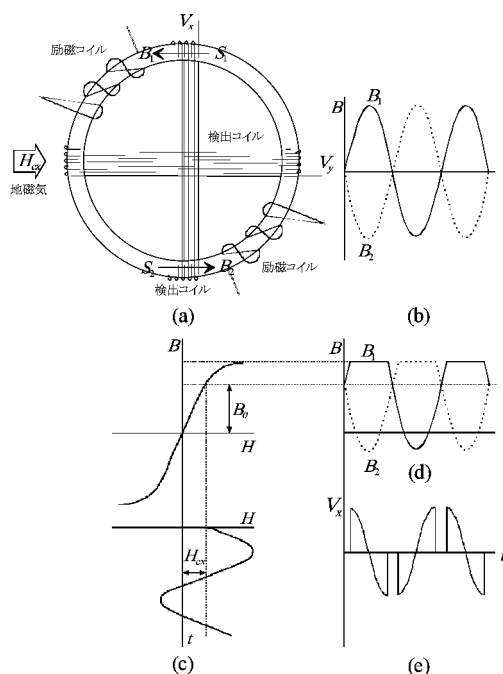


図2.4 2軸のフラックスゲート型GDSの構造

これらの誤差は、時間とともに変動するため補正が困難である。

人工物の影響による誤差は、架橋やビル、高圧電流線、金属構造物、センサを搭載しているプラットホームなど、センサの周辺環境が地磁気に影響を及ぼした結果生じる誤差である。プラットホームの誤差はセンサとともに相対位置関係が変化しないため一定値となり補正は可能である。この場合、地磁気円を計測することによって補正することができる¹³⁷⁾。架橋やビルなどのセンサの位置や時間によって変化する誤差はGDS単独での補正は困難であるが、ジャイロスコープなど他のセンサを併用する方法がある^{138), 139)}。

センサ傾斜による誤差は、傾斜によって、検出コイルから算出した地磁気の水平成分 V_x , V_y の検出値に誤差が含まれてしまうものである。センサの取りつけにジンバル機構を持たせて、常にセンサを水平に保つことで除去する方法や、傾斜角を計測することで補正する方法、ニューラルネットワークによって補正する方法¹⁴⁰⁾などが考案されている。

d. 供試地磁気方位センサと自動走行精度

供試GDSとしてWatson Industries社製、FGM-200Aで3軸フラックスゲート型を採用した。外観と主要諸元を表2.1示す。

行本ら¹⁴¹⁾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前述した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



図2.5 供試GDSの外観

表2.1 供試GDSの主要諸元

Power supply	+6to +40DC
Current consumption	Less than 25mA
Range	$\pm 1000\text{mG/V}(\pm 4\text{V})$
Sensitivity	250mG/V
Zero bias field	0V $\pm 1\%$ full scale -40 to $+80^\circ\text{C}$
Axis alignment	$\pm 1^\circ$ to case
Linearity error	Less than $\pm 0.5\%$
Output ripple	Less than 5mVrms
Output impedance	Less than 700ohms
Frequency response	DC to 20Hz

手法も踏襲した。コントローラとなる制御式の構成を式(2.6), (2.7)に記述した。

$$\psi(k) = \alpha \Delta \phi(k) + \beta \varepsilon(k) \quad (2.6)$$

$$\varepsilon(k) = \sum v(k) \Delta t \sin \Delta \phi(k) \quad (2.7)$$

ここで、 $\psi(k)$ は操舵角、 $\Delta(k)$ は目標方位との偏差、 α , β 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、 Δt は制御周期となる。

傾斜補正に必要となる傾斜角の計測には、日本航空電子工業(株)製 FOG 姿勢計測装置 (Internal measurement unit; IMU) JCS-7401Aを使用した。IMU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2.6に、また、自動走行の結果を図2.7に示す。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。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¹⁴²⁾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。

C. 光ファイバージャイロによる地磁気方位センサの高精度化

GDSのS/N比の低さを解決するために光



図2.6 自動走行システムの外観

ファイバージャイロを併用して精度の向上を試みた。ジャイロスコープは周辺の電磁気や磁性体などから影響を受けず、宇宙空間などの地磁気が全く存在しない場所でも角速度および角度（方位）を計測することができるセンサである¹⁴³⁾。ただし、検出方位は慣性の法則に基づき、初期の状態をゼロ（基準）とした相対的な方位となる。これまでは、高価で寿命が短く扱いにくかったため、船舶・航空・宇宙分野に使用が限られていた。しかし、最近では圧電素子や光ファイバーなどを使用した新たなジャイロが開発され、ビデオカメラの手ぶれ補正や、自動車のカーナビ及び挙動制御などにも使われるようになった。

ジャイロスコープは、その動作原理からみると大きく別けて次の3つに分類できる。

- ・慣性と歳差運動
- ・コリオリ力
- ・サグナック効果

慣性と歳差運動を利用したジャイロは、機械式ジャイロとも呼ばれ、回転体（こま）の回転

軸が慣性空間の一方向を向きつづけるという角運動量の保存則を利用したジャイロで、内部に回転体（こま）が入っている。機械式ジャイロの基本的構造を図2.8に示す。可動部分があることから製作、保守（寿命が短い）が困難で、非常に高価である。

コリオリ力とは、速度をもったものに角速度が印加されると速度と角速度がともに直交する方向に発生する力である。コリオリ力を利用したジャイロスコープとして、流体式ジャイロや、振動ジャイロ等がある。

サグナック効果は、光学式ジャイロに利用されている原理で、環状に構成した光路に、互いに反対方向に伝播するように光を加えたとき、環状の光学系に回転が加わると、左右両方向に進む光の経路に距離差を生じ、互いに逆行する光の位相差が生じる現象である。光学式ジャイロとしては光ファイバージャイロやリングレーザージャイロ¹⁴⁴⁾等がある。

a. 光ファイバージャイロの原理と特徴¹⁴⁵⁾

従来は角運動の保存則を用いた機械式のものが主流であったが、精度を向上させるために回転体の均一度、軸受の摩擦低減などに困難が生じ、コストが高くなっていた。これに対し、サグナック効果を利用したFOGは本質的に静止した構成ででき、可動部分がなく加加速度に強い、構造が簡単、起動時間が短い、感度、直進性が高い、消費電力が少ない、信頼性が高い、といった特徴があげられ、航空機用や船舶用だけでなく、自動車用カーナビゲーションシステム、産業用ロボット等の技術の新たな進展も期待されている。

FOGはサグナック(Sagnac)効果と呼ばれる

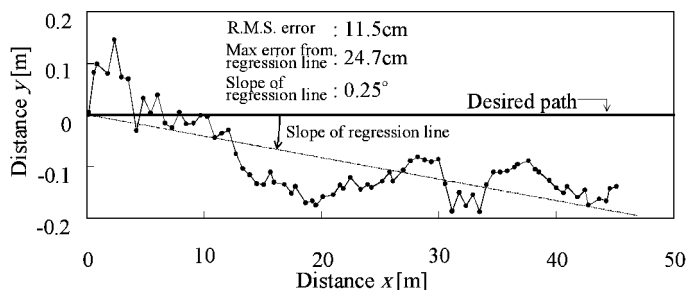


図2.7 GDSによる自動走行の軌跡

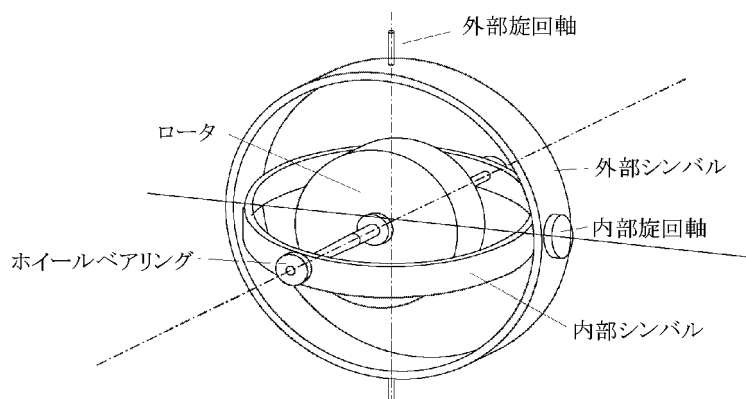


図 2.8 機械式ジャイロの基本的構造

光の原理を利用している。図 2.9 のような円形の光路にビームスプリッタを用いて右回り光および左回り光を伝搬させる。このとき光学系が慣性空間に対して静止していれば、右回り、左回り光ともに同一の経路を逆回りに伝搬するだけなので、伝搬後のビームスプリッタで観測される際の両光波間の位相差は 0 となる。ところが、この光学系が図のように矢印の方向に円形光路を含む面内で慣性空間に対して角速度 Ω で回転すると両光波間に位相差が生じる。簡単のため光路の屈折率を 1 と仮定する。円形光路の半径を a とすると、ビームスプリッタによって光路に導かれてから再びビームスプリッタに到達するまでに要する時間は、

〈右回り〉

$$t_r = \frac{2\pi a + a\Omega t_r}{c} \quad (2.8)$$

〈左回り〉

$$t_l = \frac{2\pi a - a\Omega t_l}{c} \quad (2.9)$$

となる。ここで c は光速である。ここで、 $c \gg a\Omega$ より近似して、

$$\Delta t = t_r - t_l \doteq \frac{4\pi a^2}{c^2} \Omega = \frac{4S}{c^2} \Omega \quad (2.10)$$

なる伝搬時間差 Δt が生ずる。これは

$$\Delta L = \frac{4S}{c} \Omega$$

なる光路差が生じる。位相差 $\Delta\phi$ で表わすと

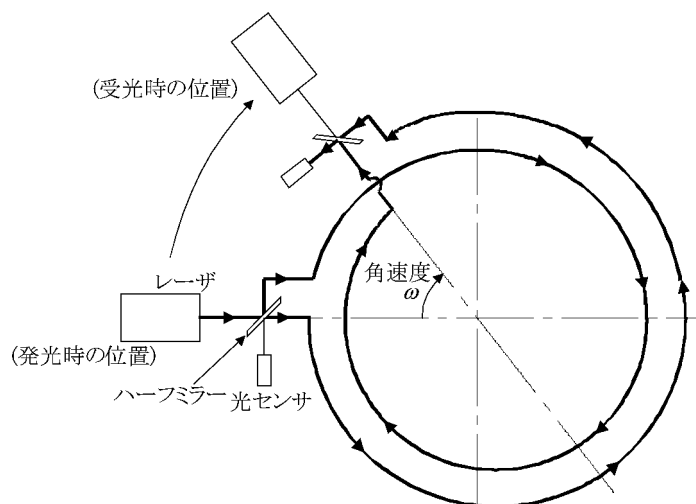


図 2.9 光ファイバージャイロの原理

$$\Delta\phi = \frac{4kSN}{c}\Omega = \frac{4\pi La}{c\lambda}\Omega \quad (2.11)$$

ここでは光路の囲む面積, は波数, N は光ファイバーの巻数, は光路の長さ, a はそのループの半径, は光の波長であり, 以上をサグナック効果という。

サグナック効果の感度を向上させるには光路 L を大きくする必要があるが, 実際の FOG では光路である光ファイバーを何重にも巻いて L を長くとしている。光ファイバーは半径数 cm に巻いても破損せず有意な損失増も見られないことから, 半径を 2~5 cm に保ったまま光路 L を数 km までにすることが可能である。適当な光学系を構成して $\Delta\phi$ を高精度に測定し, 式 (2.11) から Ω を得るのが FOG の測定原理である。

(2.11)式から, 系に角速度が加わった時の左右両まわりの光の位相差が与えられるが, このままでは以下の問題が存在する。

光の周波数は 100 THz (テラヘルツ; 1,014 Hz) オーダーであり, 現在この位相差を直接検出する手段は存在しない。そこで, 左右両回りの光の干渉出力を検出する。すなわち, 系が静止状態では光の干渉位相差はゼロであるので干渉光出力が最大となる。干渉位相差が増大するにしたがって出力が減少し, 干渉位相差が π となるとゼロとなる。検出される干渉光出力は系に入力される角速度の余弦関数となって表れる。位相差ゼロ付近では変化率が小さいため, 微小回転の検出が不可能となる。この問題を解決し微小回転に対する感度を最適化するために, 位相を変調して出力を正弦関数にする位相変調法やセロサイン法, 光の共振周波数の差を利用したリング共振型などが開発されている。

b. 供試光ファイバージャイロと自動走行精度

1) 供試 FOG の計測精度

供試 FOG には GDS の傾斜補正に使用している IMU のヨー角出力を採用した。また, IMU よりもさらに高精度な日本航空電子工業㈱製の FOG, JG 35 FD (高精度 FOG) を評価用として使用した。IMU と高精度 FOG の公称精度の比

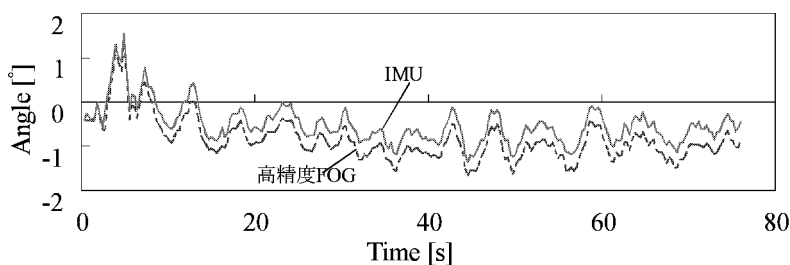
較を表 2.2 に示す。また, 図 2.10 に有人で直進走行したときの IMU と高精度 FOG の方位角出力を調べた比較結果を示す。高精度 FOG の推移と比較して, IMU は時間ドリフトを含む誤差が時間経過とともに増大していることが確認された。80[s] 間で約 0.4° の偏差が生じた。しかし, IMU は S/N 比が高く, 高精度 FOG と比較しても推移過程に高い一致が認められ, 微小時間における角度変化を高精度に計測できることがわかった。以上より, センサフュージョンし GDS の高精度化を図るうえで, FOG ドリフトを観測することが必須条件と考えられた。

2) 供試 FOG の自動走行精度

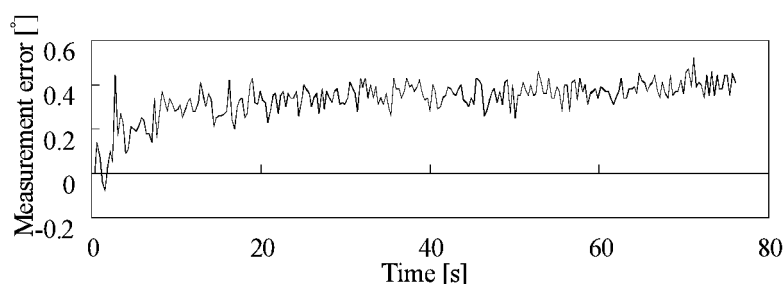
IMU による自動直進走行試験を行い, FOG を航法センサとして使用した場合の自動直進走行の精度を評価した。目標方位は前述の GDS 自動直進走行と同様, 横軸となる x 軸方向と一致させた。操舵コントローラとなる制御式は GDS による自動直進走行時と同じ (2.6) 式を用いた。しかし, FOG の計測方位は相対方位であるため, 初期状態において絶対方位である目標方位を取得することはできない。そこで, 走行開始から 10[s] 前後 GDS を使用して GDS を用いたティーチング走行で取得した目標方位によって走行し, その間取得した FOG のデータを FOG の目標方位として方位偏差 $\Delta\phi$ 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 2.11 に示す。図 2.12 に自動直進走行試験の走行軌跡を示す。45 m の走行距離に対して, 40 cm 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

表 2.2 IMU と高精度 FOG の精度

	IMU	高精度 FOG
Resolution	Less than 0.1°	Less than 0.01°
Range	±180°	±180°
Linearity	Less than ±1%	Less than ±1%
Bias drift	Less than ± 2°/min	Less than ±3°/h
Output range	±10V	±5V



a) IMUと高精度FOGの有人直進走行時の方位角出力



b) 有人直進走行時のIMUの誤差の推移(IMU-高精度FOG)

図 2.10 IMU のヨー角の精度評価

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幅は 11.1 cm に納まっている。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こと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。

c. カルマンフィルタによるセンサフュージョン

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¹⁴⁶⁾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。

$$x(k+1) = A(k)x(k) + u(k) + B(k)w(k)$$

$$(2.12)$$

$$y(k) = Cx(k) + n(k) \quad (2.13)$$

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

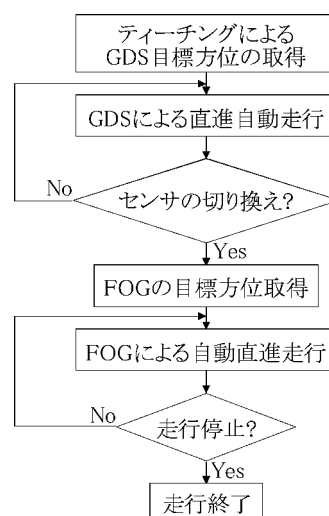


図 2.11 FOG による自動直進走行のフローチャート

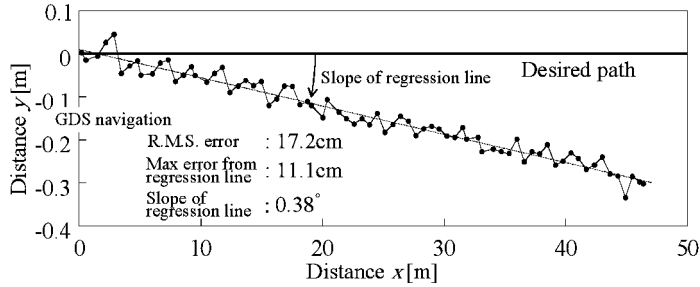


図 2.12 IMU の自動直進走行試験の走行軌跡

のように, $Q(k)$, $R(k)$ が定義できる。

$$E(\omega(k)\omega^T(s)) = \delta(k-s)Q(k) \quad (2.14)$$

$$E(n(k)n^T(s)) = \delta(k-s)R(k) \quad (2.15)$$

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になる。

$$x(k+1) = A(k)x(k) + u(k) + K(k)(y(k) - Cx(k)) \quad (2.16)$$

$$K(k) = A(k)P(k)C^T(R(k) + CP(k)C^T)^{-1} \quad (2.17)$$

$$P(k+1) = A(k)[P(k) - P(k)C^T(R(k) + CP(k)C^T)^{-1}CP(k)]A^T(k) + B(k)Q(k)B^T(k) \quad (2.18)$$

(2.16) 式は状態推定方程式, (2.17) 式はカルマンゲイン方程式, $P(k)$ は推定誤差の共分散行列であり (2.18) 式はリカッチの方程式と呼ばれる。図 2.13 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。

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

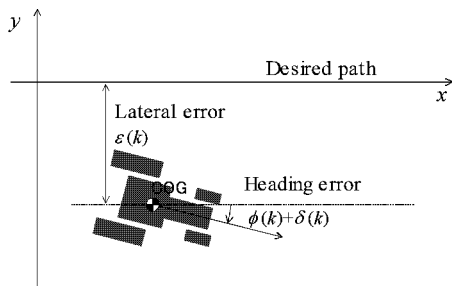


図 2.13 車両の運動モデル

(2.19)

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。

$$\phi(k+1) = \phi(k) + r(k)dt \quad (2.20)$$

ここで, $r(k)$ は車両の旋回角速度である。

(2.20) 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

$$\approx \sin\phi(k)\cos\{r(k)dt\} + \sin\{r(k)dt\} \quad (2.21)$$

$\eta(k) = \sin\phi(k)$, $\mu(k) = \sin\delta(k)$, $\mu(k+1) = \mu(k)$ とおくと, システム方程式 (2.21) 式は,

(2.22) 式として表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \varepsilon(k+1) \\ \eta(k+1) \\ \mu(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta d(k) & \Delta d(k) \\ 0 & \cos\{r(k)dt\} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \eta(k) \\ \mu(k) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} 0 \\ \sin\{r(k)dt\} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1(k) \\ \omega_2(k) \\ \omega_3(k) \end{bmatrix} \quad (2.22) \end{aligned}$$

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 ω_1 , ω_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。

$$\omega_1(k) = \frac{\partial \varepsilon}{\partial d} n_d = \frac{\partial \varepsilon}{\partial d} n_{speed} dt \quad (2.23)$$

$$\omega_2(k) = \frac{\partial \eta}{\partial r} n_{rate} \quad (2.24)$$

ここで、 n_{speed} 、 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 (2.25) 式となる。

$$\begin{bmatrix} \omega_1(k) \\ \omega_2(k) \\ \omega_3(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\eta(k) + \mu(k)\} dt \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin\{r(k) dt\} \eta(k) \\ 0 \end{bmatrix} + \cos\{r(k) dt\} dt \begin{bmatrix} n_{speed} \\ n_{rate} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

また、GDS と FOG の観測量は以下のように記述できる。

$$\phi_{GDS}(k) = \phi(k) + \delta(k) + n_{GDS} \quad (2.26)$$

$$\phi_{FOG}(k) = \phi(k) + n_{FOG} \quad (2.27)$$

両辺の正弦値をとって、

$$\begin{aligned} \sin \phi_{GDS}(k) &= \sin\{\phi(k) + \delta(k) + n_{GDS}\} \\ &= \sin\{\phi(k) + \delta(k)\} \cos n_{GDS} \\ &\quad + \cos\{\phi(k) + \delta(k)\} \sin n_{GDS} \\ &\approx \sin\{\phi(k) + \delta(k)\} + \sin n_{GDS} \\ &\approx \sin \phi(k) + \sin \delta(k) + \sin n_{GDS} \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \sin \phi_{FOG}(k) &= \sin\{\phi(k) + n_{FOG}\} \\ &\approx \sin \phi(k) + \sin n_{FOG} \end{aligned} \quad (2.29)$$

したがって、観測方程式 (2.22) 式は (2.30) 式で記述できる。

$$\begin{bmatrix} \eta_{GDS}(k) \\ \eta_{FOG}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon(k) \\ \eta(k) \\ \mu(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin n_{GDS} \\ \sin n_{FOG} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

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

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 (MS 750) 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。MS 750 の公称精度は 2 cm である。カルマンフィルタに必要な GDS, FOG の角速度、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 2.3 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 2.14 に示した。GDS と FOG の走行軌跡は (2.31) 式によるデッドレコニングを仮定して計算した。

$$\varepsilon = \Delta d(k) \sum_k \sin \Delta \phi(k) \quad (2.31)$$

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かけることで算出した。

走行軌跡の FOG による推定値では、デッドレコニング特性とドリフトエラー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

表 2.3 カルマンフィルタの初期パラメータ

n_{speed} n_{rate}	$\mathbf{Q}(k)$	$= \begin{bmatrix} 0.003335 & 0 \\ 0 & 0.039741 \end{bmatrix}$
$\sin(\text{GDS})$ $\sin(\text{FOG})$	$\mathbf{R}(k)$	$= \begin{bmatrix} 0.0000527340 & 0 \\ 0 & 0.0000010695 \end{bmatrix}$
Initial error covariance	$\mathbf{P}(0)$	$= \begin{bmatrix} -43.593211 & 0.000068 & 0.000062 \\ 0.000068 & 0.047277 & 0.000001 \\ 0.000062 & 0.000001 & 0.000001 \end{bmatrix}$

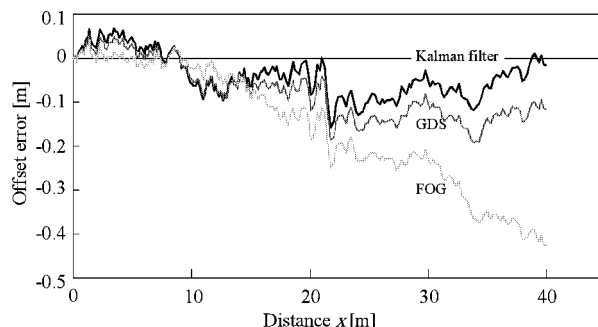


図 2.14 シミュレーションによる横方向偏差の比較

方向 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 2.15 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 2.16 にカルマンフィルタにより推定された FOG ドリフトとドリフトの少ない高精度 FOG から算出した IMU (FOG) の計測誤差の比較を示す。すなわち高精度 FOG のドリフトが非常に小さいと仮定した場合の IMU 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° となっていない。IMU 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

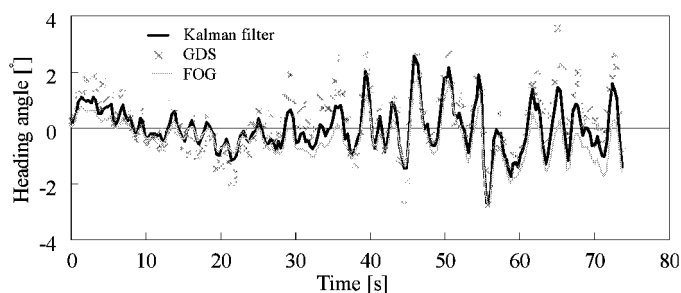


図 2.15 シミュレーションによる方位角の比較

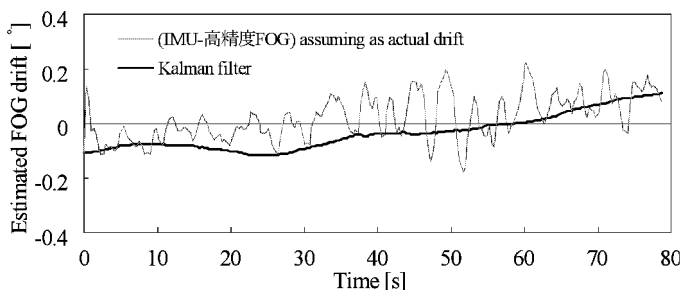


図 2.16 FOG のドリフト推定値

している。それに対して、推定ドリフトは高精度 FOG 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[s] 間で約 0.2° となっており、IMU 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。

d. 自動直進走行試験による精度評価

走行シミュレーションの結果、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 40 m 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 (2.6) 式を用いた。ただし、(2.6) 式中の横方向偏差 ε 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、(2.7) 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 2.17 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° 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れ幅は ± 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 ± 10 cm の誤差を満足している。しかし、磁気環境の変動が存在するほ場によっては図 2.18 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、長周期の変動を有した走行となっている。この原因として、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、実際はガウシェンノイズではなく地磁気の空間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節で取り扱う。

D. 地磁気の時間・空間変動のリアルタイム補正による走行再現性の向上

前節では、GDS と FOG をカルマンフィルタ

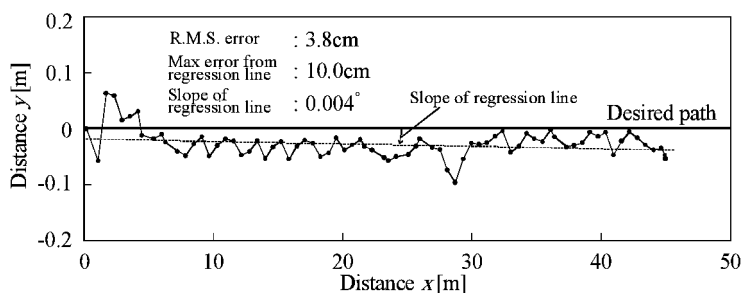


図 2.17 センサフュージョンによる自動走行軌跡(1)

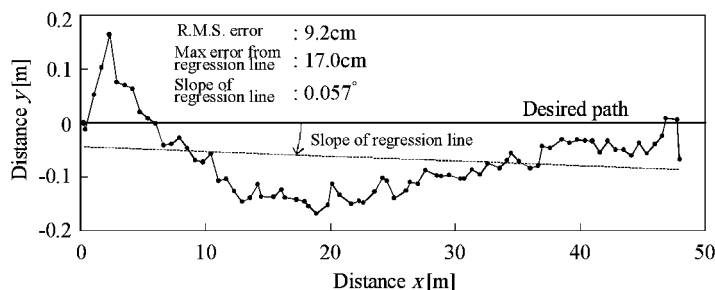


図 2.18 センサフュージョンによる自動走行軌跡(2)

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。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。そこで、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。

a. 分散重み付け平均化手法による高精度化

ここでは、GDSとFOGのフュージョンによる高精度化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、最適な解 $x_{estimate}$ をこれらの線形結合として求めることを考える¹⁴⁷⁾。

$$x_{estimate} = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (2.32)$$

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。

$$x_{estimate} = (1 - \alpha_2) x_1 + \alpha_2 x_2 \quad (2.33)$$

また、 $x_{estimate}$ の推定誤差分散は次のようになる。

$$(\sigma_{estimate})^2 = (1 - \alpha_2)^2 \sigma_1^2 + \alpha_2^2 \sigma_2^2 \quad (2.34)$$

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。

$$\alpha_2 = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2.35)$$

以上より、最適な推定値は次式で示される。

$$\begin{aligned} x_{estimate} &= \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}\right) x_1 + \frac{\sigma_1^2 x_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \\ &= \frac{\sigma_2^2 x_1 + \sigma_1^2 x_2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \end{aligned} \quad (2.36)$$

推定値の精度を誤差分散の逆数で定義すると、(2.36) 式から明らかなように、 $x_{estimate}$ は

x_1 , x_2 の相対精度による重み付き平均値^{148),149)} (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 (2.36) 式より、

$$\phi_{estimate} = \frac{\sigma_{FOG}^2 \phi_{GDS} + \sigma_{GDS}^2 (\phi_{FOG} - \eta)}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{FOG}^2} \quad (2.37)$$

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 (2.37) 式をそのまま使用することはできない。

b. 地磁気の時間・空間変動の補正

そこで、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 2.19 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

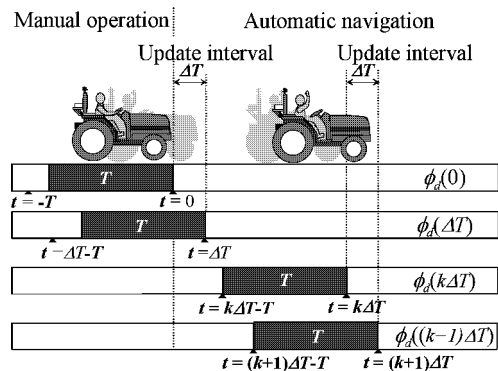


図 2.19 可変目標方位制御による自動直進アルゴリズムの概要

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。ここでは、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 2.20 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。

$$\phi_{GDS}(t) = \phi_{true}(t) + \delta_{GDS}(t, \Omega) + \varepsilon_{GDS}(t) \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \phi_{FOG}(t) = & \phi_{true}(t) + \eta(k\Delta T - T) \\ & + \int_{k\Delta T - T}^t \delta_{FOG}(i) di + \varepsilon_{FOG}(t) \end{aligned} \quad (2.39)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) = & \bar{\phi}_{true}(k\Delta T, T) \\ & + \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) + \varepsilon_{GDS}(k\Delta T, T) \end{aligned} \quad (2.40)$$

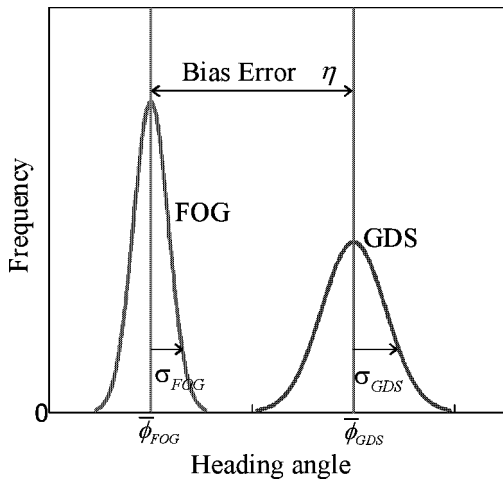


図 2.20 GDS と FOG の出力特性の概念図

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) = & \bar{\phi}_{true}(k\Delta T, T) \\ & + \eta(k\Delta T - T) + \delta_{FOG}(k\Delta T, T) \\ & + \bar{\varepsilon}_{FOG}(k\Delta T, T) \end{aligned} \quad (2.41)$$

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、(2.40)、(2.41) 式は、

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) = & \bar{\phi}_{true}(n\Delta T, T) \\ & + \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) = & \bar{\phi}_{true}(n\Delta T, T) \\ & + \eta(k\Delta T, T) \end{aligned} \quad (2.43)$$

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、(2.37) 式に基づき (2.44) 式によって計算できる。

$$\begin{aligned} \phi_d(k\Delta T, T) = & \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T) (\bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T) - \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T)) \\ & + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) (\bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T) - \eta(k\Delta T - T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \end{aligned} \quad (2.44)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) = & \frac{1}{T} \sum_{l=k\Delta T - T}^{k\Delta T} (\phi_{GDS}(i) \\ & - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T))^2 \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T) = & \frac{1}{T} \sum_{l=k\Delta T - T}^{k\Delta T} (\phi_{FOG}(i) \\ & - \bar{\phi}_{FOG}(k\Delta T, T))^2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

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 (2.37)、(2.38)、(2.39) 式より、

$$\begin{aligned} \phi_{estimate}(t) = & \sigma_{FOG}^2(t) (\phi_{GDS}(t) - \delta_{GDS}(t, \Omega)) \\ & + \sigma_{GDS}^2(t) (\phi_{FOG}(t) - \eta(k\Delta T) - \int_{k\Delta T}^t \delta_{FOG}(i) di) \\ & \frac{\sigma_{GDS}^2(t) + \sigma_{FOG}^2(t)}{\sigma_{GDS}^2(t) + \sigma_{FOG}^2(t)} \end{aligned} \quad (2.47)$$

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、

$$\delta_{GDS}(t, \Omega) = \bar{\delta}_{GDS}(k\Delta T, T) \quad (2.48)$$

$$\eta(k\Delta T) = \eta(k\Delta T - T) \quad (2.49)$$

$$\int_{k\Delta T}^t \delta_{FOG}(i) di = 0 \quad (2.50)$$

が成り立つ。また、

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

とすると、推定方位 $\phi_{estimate}$ は

$$\begin{aligned} \phi_{estimate}(t) = & \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T) (\phi_{GDS}(t) - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T)) + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) (\phi_{FOG}(t) - \bar{\eta}(k\Delta T - T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \end{aligned} \quad (2.51)$$

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 (2.44), (2.51) 式より、

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{estimate}(t) = & \phi_{estimate}(t) - \phi_d(k\Delta T, T) = \\ & \frac{\sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T) (\phi_{GDS}(t) - \bar{\phi}_{GDS}(k\Delta T, T)) + \sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) (\phi_{FOG}(t) - \bar{\eta}_{FOG}(k\Delta T, T))}{\sigma_{GDS}^2(k\Delta T, T) + \sigma_{FOG}^2(k\Delta T, T)} \end{aligned} \quad (2.52)$$

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相殺することができる。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。

実際に GDS (FGM-300 A; Watson Industries) と FOG (JCS-7401 A; 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 (2.52) 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 GL 320) を使用した。約 400[s] 間マニュアルで直進走行した。走行した場所は、耕うん整地され比較的傾斜の小さい状態であった。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-35 FD; 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 2.21 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[s] 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 2.22 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 2.22 から、 W が 12[s] 前後まではほぼ一定

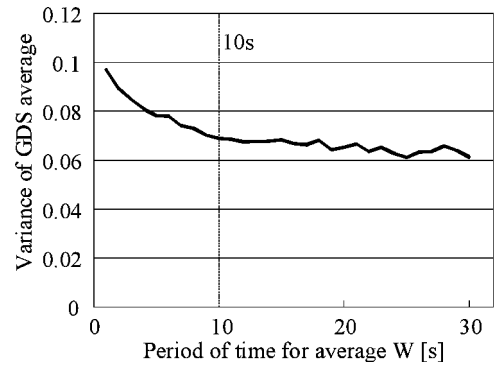


図 2.21 平均化時間と GDS 平均値の分散の関係

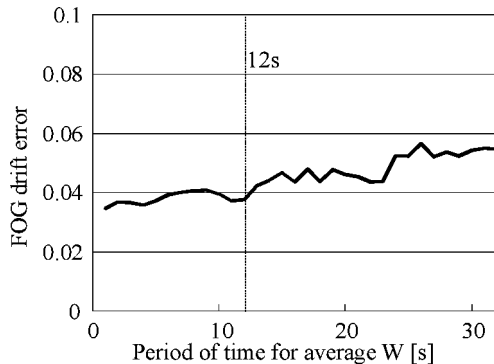


図 2.22 平均化時間と FOG ドリフトの関係

値となっているが、13[s]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($T + \Delta T$) ≤ 12 と決定した。これらのことから、 $T=10$ より $\Delta T=2$ [s]と決定した。

図2.23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10[s]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2.23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、ノイズ成分は大きくなっている。また、250~400[s]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2.24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、

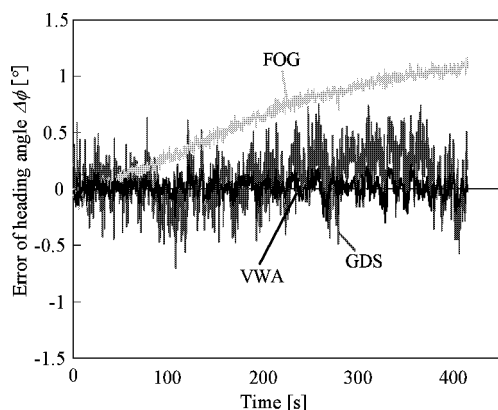


図 2.23 GDS, FOG, VWA から算出した方位偏差の誤差の比較

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2.25に評価用FOGから算出したバイアスエラー η とFOGの誤差推移、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 , ΔT が適切であることが確認された。

c. 自動直進走行試験による精度比較

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、ティーチャング

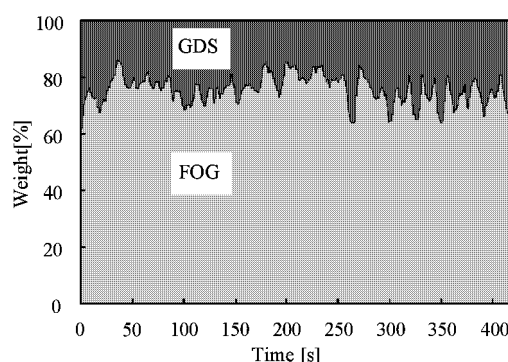


図 2.24 VWAにおけるGDSとFOGの重み付けの推移

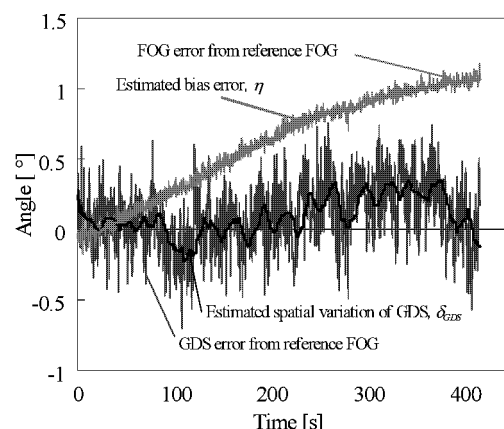


図 2.25 FOGの誤差とバイアスエラー及びGDSの誤差と空間変動の推移

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2.26に示す。操舵制御は(2.6)式(2.7)式で表される横方向偏差 $\varepsilon(t)$ と方位偏差 $\Delta\phi(t)$ から構成されるPI制御器を使用した。また、本試験では(2.7)式における $v(k)$ は0.5 m/sと一定とした。(2.7)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。ここでは、 $\Delta\phi(k)$ 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、(2.6)、(2.7)式を適用した。

ここで使用した自動直進走行システムの概観を図2.27に示す。GDSをトラクタの上部に、FOGを座席後部に設置した。

また、比較のために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。再現性の精度を確認するため、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、地磁気の時間変

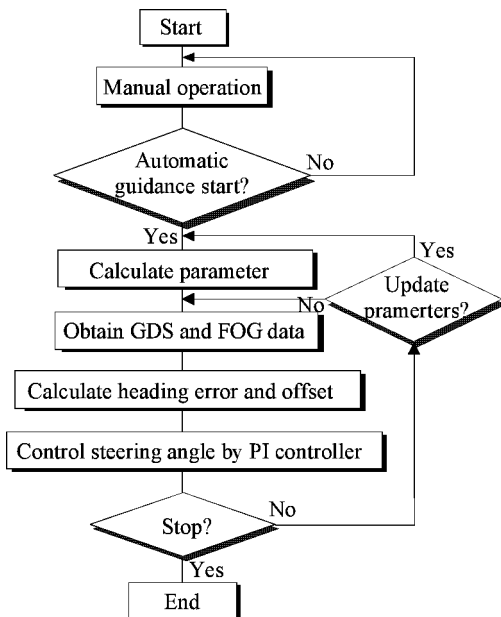


図 2.26 可変目標方位制御のフローチャート

動はないと考えられる。試験ほ場は VWA の精度評価試験で使用し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を使用した。

図 2.28 に自動直進走行の走行軌跡を示す。走行軌跡は自動追尾トータルステーション AP-L 1(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 2.4 に示



図 2.27 自動走行システムの外観

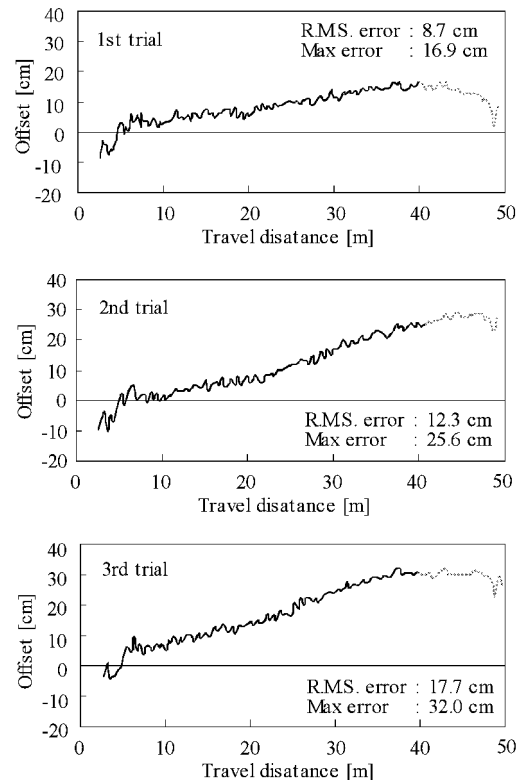


図 2.28 GDS による自動直進走行の精度と再現性

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 2.28 の実線部分) から表 2.4 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 2.29 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 (2.7) 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 2.29 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。

次に 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 2.5 に示した。 $T, \Delta T$ 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 $T=10, \Delta T=2$ を最適と判断して使用した。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するよう運転した。図 2.30 に VWA による可変目標方位制御を適用

表 2.4 GDS の自動直進走行試験の総合結果

	Test No.			
	1	2	3	Average
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	35	35	35

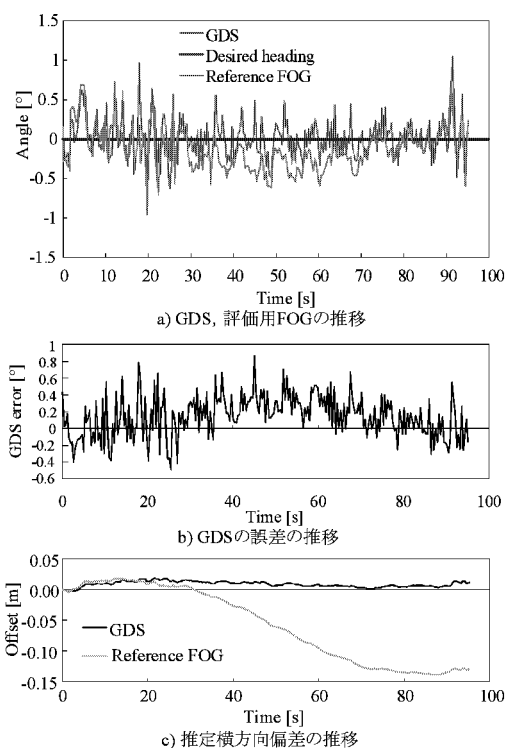


図 2.29 GDS による自動直進走行の評価

表 2.5 VWA による可変目標方位制御時の制御パラメータの設定

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

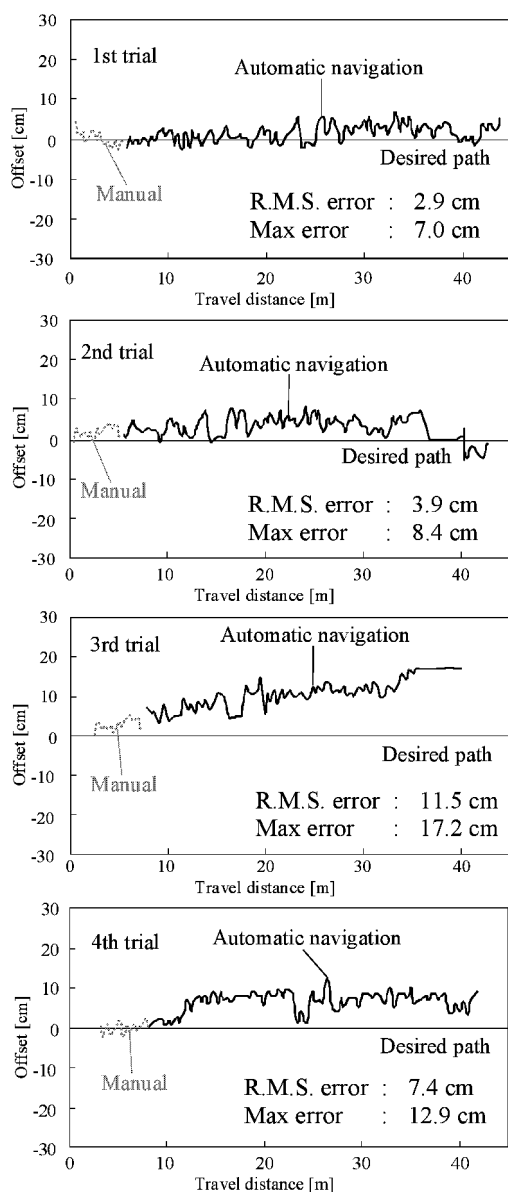


図 2.30 VWA による自動直進走行の走行軌跡

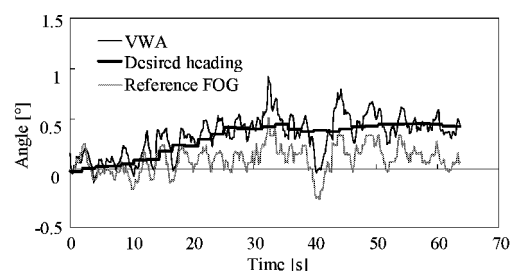
した自動直進走行の走行軌跡を示した。また、このときの総合結果を表 2.6 に示した。評価値は GDS の自動直進走行試験と同様である。VWA による可変目標方位制御は、全体的に GDS による固定目標方位制御の自動直進走行よりも、良好な結果となった。3 回目の走行で、若干左に曲がった走行となっており、終端位置で最大誤差は 17.2 cm となった。3 回目の走行における、VWA、評価用 FOG、目標方位の推移、VWA の誤差の推移、推定横方向偏差の推移を図 2.31 に示す。評価用 FOG の推移から、車両は一定方向に精度良く直進走行しているのがわかる。また、誤差の推移から GDS の時と同様、地磁気の空間変動の影響により VWM 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となっている。これらのことから、軌跡が曲がった原因として、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大きく影響し、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 を示し、大幅に走行精度と再現性が改善された。また、回帰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 2.32 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 2.33 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。

E. ま と め

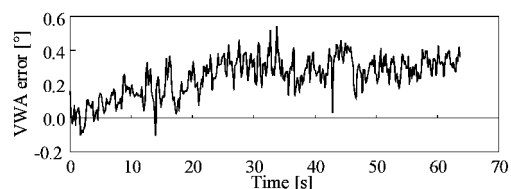
本章では地磁気方位センサ (GDS) をベース

表 2.6 VWA の自動直進走行試験の総合結果

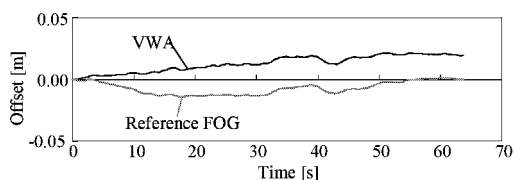
	Test No.				
	1	2	3	4	Average
R. M. S error [cm]	2.9	3.9	11.5	7.4	6.4
Max error from desired path [cm]	7.0	8.4	17.2	12.9	11.4
Max error from regression line [cm]	4.7	6.0	5.3	5.9	5.5
Slope of regression line [$^{\circ}$]	0.05	0.06	0.21	0.04	0.09
Travel distance [m]	37	37	31	33	35



a) VWA, 評価用FOGの推移



b) VWAの誤差の推移



c) 推定横方向偏差の推移

図 2.31 VWA による自動直進走行の評価

としたセンシングシステムを提案し、方位計測の高精度化手法を構築することを目的とした。また、本システムは方位センサのみで構成されるため、コストを抑えることが期待できる。さらに、使用環境の制約が少ないといった利点もあり、GPS やマシンビジョンなどが計測できない状況における補償手段としても適用することができる。

1) GDS を使用した自動直進走行試験を実

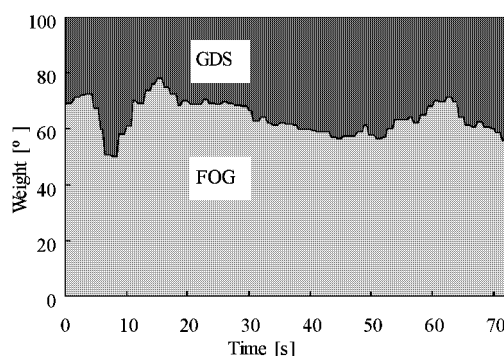


図 2.32 自動直進走行試験における GDS と FOG の重み付けの推移

施して GDS の基本性能を調べた結果、45 m の走行に対して細かく振動した軌跡となり、目標経路からの横方向の最大誤差は 20 cm となった。これは、GDS の S/N 比の低さに起因していることが明らかとなった。

2) GDS の S/N 比の低さを解決するために光ファイバージャイロ (FOG) を併用して精度を改善することを考えた。FOG を使用した自動直進走行試験を行って FOG の基本性能を把握した結果、絶対方位の取得法及びドリフトが問題であることが確認された。しかし、S/N 比が高いため、振動の少ない自動直進走行が可能であることがわかった。

3) GDS と FOG のセンサフュージョン手法にカルマンフィルタを採用し、GDS の S/N 比の改善及び FOG のドリフトを補償

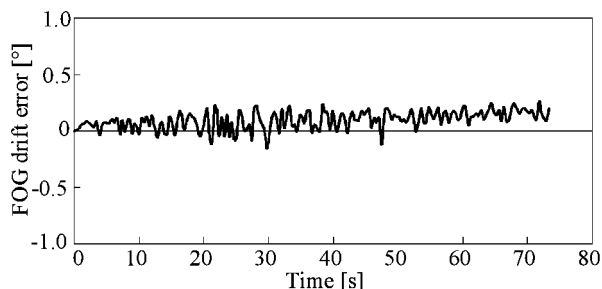


図 2.33 自動直進走行試験における FOG の誤差推移

した方位推定法を考案した。走行データをを使用してカルマンフィルタのシミュレーションを実施した結果、高精度に横方向偏差、車両方位を推定できることが可能であった。

- 4) カルマンフィルタを適用して自動直進走行試験を行った結果、40 m 程度の走行に対して目標経路からの誤差の R.M.S. が 3.8 cm, 回帰直線に対する振れ幅が ± 5 cm 以下と振動が少ない直進性の高い走行結果が得られた。しかし、地磁気の時間・空間変動に起因して再現性が確保できない問題も生じた。
- 5) GDS を使用する上で問題となる地磁気の時間・空間変動をリアルタイム補正する手法を考案し、走行再現性の向上を図った。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 を融合して GDS の S/N 比を改善した。また、目標方位を逐次更新する可変目標方位制御を提案して、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。
- 6) 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精度を評価した結果、方位誤差の R.M.S. が FOG は 0.71° , GDS が 0.26° であったのに対して、VWA は 0.08° と GDS に比べ約 70% 精度が向上した。
- 7) 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。

III. 振動ジャイロと地磁気方位センサのセンサフュージョンによるナビゲーション

A. はじめに

2 章では、地磁気方位センサの高精度化について検討し、地磁気方位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。地磁気方位センサを適用する上で問題となる S/N 比の低さ、地磁気の時間・空間変動を補償する手段として光ファイバージャイロを適用した。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、コスト面から農業用ロボットに適用するには無理がある。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ことが望ましい。これらのことから、本章ではジャイロスコープに圧電振動ジャイロスコープを、傾斜計に静電容量型傾斜計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。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、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^{150)–153)}。しかし、オドメトリを基本としているため車輪のすべ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。Borenstrein ら¹⁵⁴⁾ 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¹⁴⁹⁾。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・すべ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業用ロボットには適さない。

オドメトリを使用しないで振動ジャイロスコプのドリフトをGDSにより推定する高精度な方位推定手法を考案した。まず、振動ジャイロスコプと静電容量タイプの傾斜計の精度を把握した。次に、傾斜計のノイズ除去、振動ジャイロスコプのドリフト推定、及びGDSと振動ジャイロスコプを併用した方位推定法を考案した。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。

B. 振動ジャイロの原理と特徴

振動ジャイロは、ある1方向に振動する質量が角速度をもつとコリオリ力によってそれに直交する方向にも振動が発生する現象を利用したものである。機械式と比べて、可動部分がないために長寿命で起動時間が短い。構造が簡素であるために小型化に適しており低消費電力で安価である。振動ジャイロの原理は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、振動式ジャイロスコプは小型・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使用されている。

a. コリオリ力

角速度 Ω で等速回転する半径 r の円盤の座標系上に、円盤の縁に沿いながら速度 V_n で運動する質量 m の物体を想定する(図3.1)。静止している観測者(慣性系)からの物体の速度 V_i は、円盤の縁の速度は $r \cdot \Omega$ であるので、

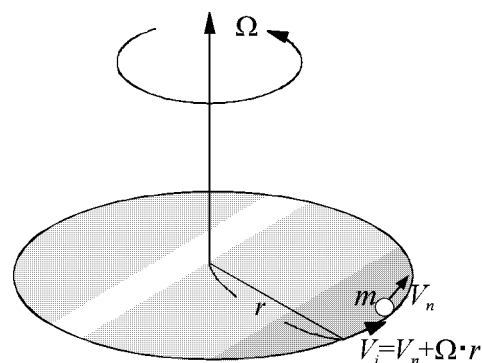


図3.1 コリオリ力の概要

$$V_i = V_n + r \cdot \Omega \quad (3.1)$$

となる。慣性系に関する物体の加速度は

$$W_i = V_i^2 / r = V_n^2 / r + 2\Omega V_n + \Omega^2 r \quad (3.2)$$

となる。よって物体に作用する力は

$$F = m W_i \quad (3.3)$$

となる。次に、円盤上の観測者から物体の運動を観測すると、物体は観測者に対して半径 r 、速度 V_n の円運動をすることになる。したがって、物体の加速度と作用する力は

$$W_n = V_n^2 / r \quad (3.4)$$

$$F_n = m W_n \quad (3.5)$$

となる。(3.2)式、(3.3)式、(3.4)式より、(3.5)式は

$$F_n = F - 2m\Omega V_n - m\Omega^2 r \quad (3.6)$$

となる。このように、回転する座標系では、物体に真の力 F 以外に2つの力($-2m\Omega V_n$)と($-m\Omega^2 r$)が作用する。前者をコリオリ力と呼び、後者を遠心力と呼ぶ。コリオリ力は運動している物体のみに作用し、速度によって異なる。しかし、座標系の物体の位置には関係ない。一般に回転座標系に対して任意の速度 V_n で運動する物体に作用するコリオリ力は、

$$2m \cdot \vec{V}_n \times \vec{\Omega} \quad (3.7)$$

となり、回転軸及び物体の速度に垂直な方向に作用する。

b. 振動ジャイロスコプの原理¹⁵⁵⁾

振動ジャイロスコプの力学モデルを図3.2に示す。質点 m が x 軸方向に振動速度で振動している状態(1次振動)で z 軸回りに角速度 Ω_0 が加わると、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

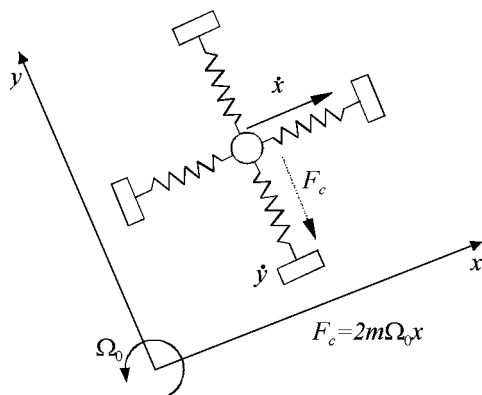


図3.2 振動ジャイロの力学モデル

幅（振動速度）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。1次振動の励起、回転運動による2次振動の検出とともに圧電素子の圧電効果を利用している振動ジャイロスコープが現在の主流である。

圧電効果とは、水晶などの素子に応力を加えた際に、その応力に比例した電化が素子の両面に現れる現象と、逆に、素子に電界を印加した際に、電界に比例した応力や歪が発生する現象である。交流電圧を印加すると、圧電素子は伸び縮みを繰り返して振動する。圧電振動ジャイロの基本的構造を図3.2に示す¹⁵⁶⁾。振動用圧電素子に交流電圧を印加して恒弾性金属などの振動体を振動させ、検出用圧電素子から出力された電圧より、角速度を知ることができる。

圧電振動ジャイロの種類には、図3.3のような四角柱型構造の他に、三角柱型、円柱型、音叉型、円盤形、T型などの振動子もある。圧電素子としては水晶などの単結晶が有名であるが、生産性が悪く、加工が困難なため、近年では圧電セラミックスが圧電素子として使用されている。今後、シリコンマイクロマシニング技術を取り入れ、さらに小型で高性能な振動ジャイロの開発が期待されている。

C. ジャイロスコープと傾斜計の精度評価

a. 傾斜計の精度評価

第2章では、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

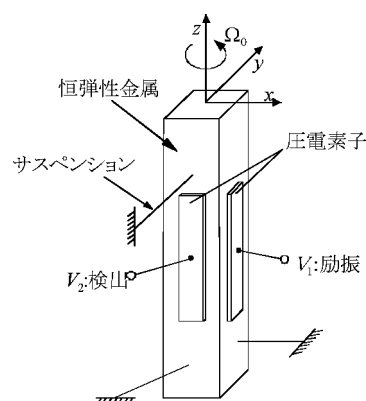


図3.3 圧電振動ジャイロの構造

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、本章では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3.1に示す。傾斜計は静電容量タイプの傾斜計で、IMUに比べ大幅に低価格にできる反面、応答周波数が0.5 Hzと応答性が悪いなど、精度にも問題がある。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行った。傾斜計を図3.4のようにトラクタに搭載してほ場を直進走行し、50 Hzでデータを取得した。図3.5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 s間の停止区間（静的データ）では、傾斜計

表3.1 傾斜計の主要諸元

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

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。



図 3.4 傾斜計とその配置

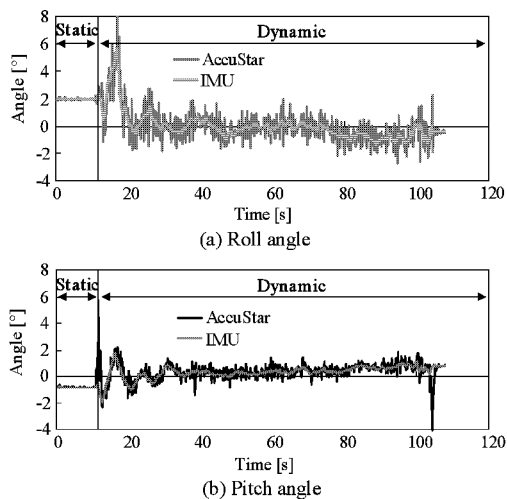


図 3.5 傾斜計と IMU のロール角・ピッチ角の推移比較

そこでここでは、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。

b. 振動ジャイロ스코プの精度評価

振動ジャイロスコプとして小型・低価格なジャイロスター(ENV-05 D-52, 榎村田製作所)を採用した。主要諸元を表 3.2 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。圧電振動ジャイロスコプからの検出角速度 ω_{gyro} は以下の (3.8) 式で算出される。

$$\omega_{\text{gyro}} = K_{\text{gyro}} (V_{\text{out}} - V_{\text{static}}) \quad (3.8)$$

ここで、 V_{out} は振動ジャイロスコプの出力電圧、 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、振動ジャイロスコ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、

$$\delta\theta_{\text{gyro}} = \omega_{\text{gyro}} \Delta T \quad (3.9)$$

となることから、振動ジャイロスコプの計測方位は、

$$\theta_{\text{gyro}} = \sum_{k=0}^n \delta\theta_{\text{gyro}}(k) \quad (3.10)$$

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 $V_{\text{static}} = 2.5 \pm 0.3 \text{ VDC}$ 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

表 3.2 振動ジャイロの主要諸元

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

の出力を計測し、その変化過程を調べた。図3.6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8 mV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2.604~2.612 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、このドリフト補正の必要性が確認された。

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3.7に示す。計測開始直前に停止状態で振動ジャイロスコープを1,000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 s程度の計測に対して 14° 以上の誤差が生じ、R.M.S.誤差は 7.5° 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 s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

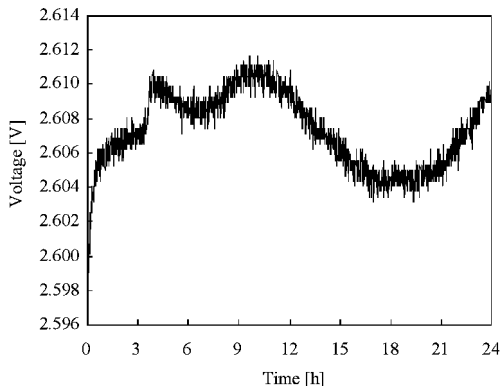


図3.6 静止時に計測した振動ジャイロの出力電圧の推移

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。

D. 供試センサの誤差補正法とセンサフュージョン

a. 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¹⁵⁷⁾。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3.8にALEのブロックダイアグラムを示す。図3.8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たっている。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。本研究では、 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

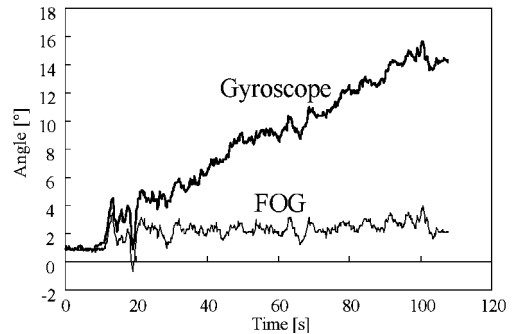


図3.7 直進走行時のFOGと振動ジャイロの方位出力の推移比較

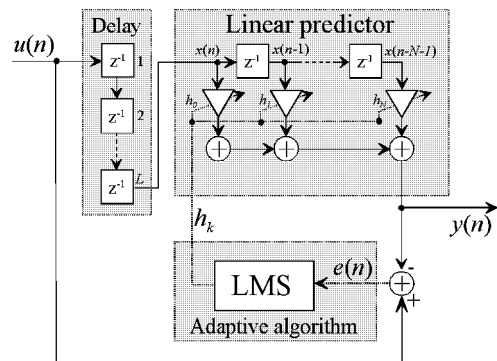


図3.8 適応線スペクトル強調器 (ALE) のブロックダイアグラム

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。

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k(n)x(n-k), \quad x(n) = u(n-L) \quad (3.11)$$

$$h_k(n+1) = h_k(n) + \mu e(n)x(n-k) \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (3.12)$$

$$e(n) = y(n) - u(n) \quad (3.13)$$

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(3.12)は予測係数 h_k を適応的に制御する手法で LMS (least-mean-square) アルゴリズムと呼ばれる¹⁵⁸⁾。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3.9にロール、ピッチ角の係数次数と誤差の関係を示す。図から、ロール、ピッ

チ角ともに50次で 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3.10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0.7s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

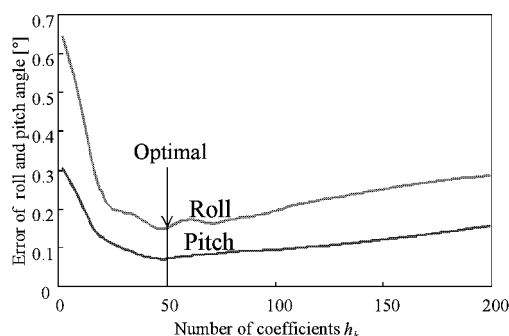


図3.9 ロール角、ピッチ角推定の適応線スペクトル強調器の係数 h_k の数 k と誤差の関係

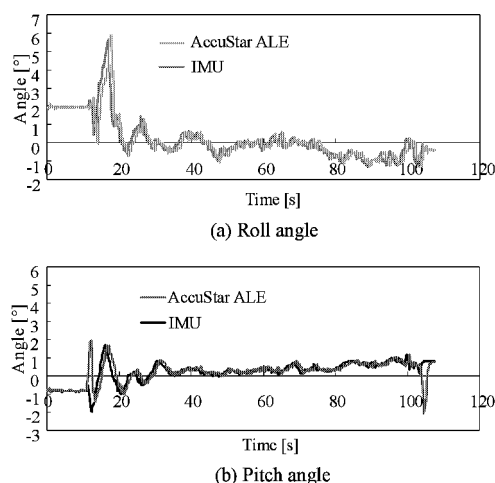


図3.10 適応線スペクトル強調器 (ALE) 出力後の傾斜計の出力精度

一致させる必要があるため、GDSを0.7s遅らせてから傾斜補正を実行した。図3.11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0.7s遅らせたGDSによる0.7s時間遅れのある傾斜補正のデータの比較を示す。GDSを0.7s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。

6. 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、

$$\omega_{est}(t) = \omega_{gyro}(t) + d(t) \quad (3.14)$$

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(3.15)で表せる。

$$\omega(t) = \frac{\phi_{GDS}(t) - \phi_{GDS}(t-1)}{\Delta t} = \omega_{GDS}(t) \quad (3.15)$$

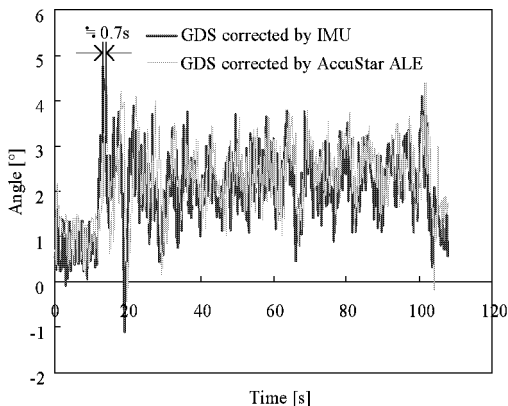


図3.11 静電容量型傾斜計によるGDS傾斜補正の精度

したがって、時刻 t における二乗誤差 $\epsilon(t)$ は、

$$\epsilon(t) = \{\omega_{est}(t) - \omega(t)\}^2 = \{\omega_{gyro}(t) + d(t) - \omega_{GDS}(t)\}^2 \quad (3.16)$$

となり、最小二乗法を適用すると、

$$I(t) = \sum_{i=t-M}^t \{\omega_{gyro}(i) + d(i) - \omega_{GDS}(i)\}^2 \quad (3.17)$$

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_t 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、

$$d_t = \frac{\sum_{i=t-M}^t \{\omega_{GDS}(i) - \omega_{gyro}(i)\}}{M+1} \quad (3.18)$$

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0.7sの遅れが存在し、計測周期が50Hzであることから、(3.17)式において $\omega_{gyro}(i)$ を $\omega_{gyro}(i-35)$ として0.7s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0.7s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、(3.18)式における M とドリフト推定後の振動ジャイロスコープによる推定方位の誤差の関係を図3.12に示す。誤差は高精度FOG(JG-35FD, 日本航空電子工業㈱)を真値として算出した。図から $M=175$ 、つまり3.5s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

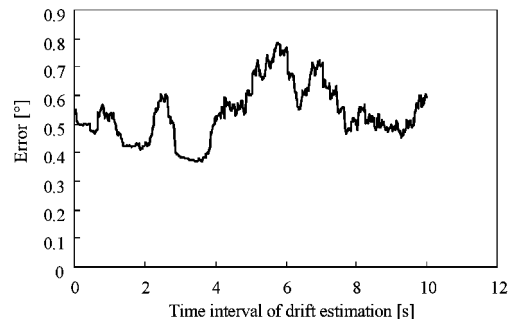


図3.12 推定値算出区間とドリフト補正方位データの誤差の関係

た。したがって、ここでは、 $M=175$ (3.5 s) を最適ドリフト推定区間と決定した。図 3.13 に FOG, 振動ジャイロスコプの生データ, $M=175$ としたときのドリフト推定後の振動ジャイロスコプの比較を示す。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 s 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。

c. センサフュージョン

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スコプのデータを第 2 章で提案した分散重み付け平均 (VWA) に適用して複合化を図った。再掲すると (3.19) 式となる。

$$\phi_{VWA} = \frac{\sigma_{Gyro}^2 \phi_{GDS} + \sigma_{GDS}^2 (\phi_{Gyro} - \eta)}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{Gyro}^2} \quad (3.19)$$

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スコプ方位、 σ_{GDS}^2 、 σ_{Gyro}^2 はそれぞれの分散値、 η は GDS とジャイロスコプのオフセットで、それぞれ以下の式で算出される。

$$\sigma_{GDS}^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=k-T}^k (\phi_{GDS}(i) - \bar{\phi}_{GDS})^2 \quad (3.20)$$

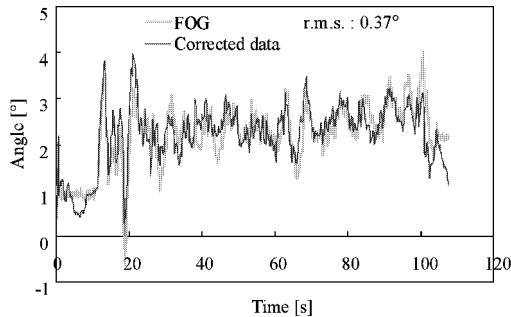


図 3.13 FOG と振動ジャイロスコプ補正データの比較

$$\sigma_{Gyro}^2 = \frac{1}{T} \sum_{i=k-T}^k (\phi_{Gyro}(i) - \bar{\phi}_{FOG})^2 \quad (3.21)$$

$$\eta = \bar{\phi}_{Gyro} - \bar{\phi}_{GDS} \quad (3.22)$$

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

$$\begin{aligned} \phi_{VWA}(t-35) = & \frac{\sigma_{Gyro}^2 \phi_{GDS}(t) + \sigma_{Gyro}^2 (\phi_{Gyro}(t-35) - \eta)}{\sigma_{GDS}^2 + \sigma_{Gyro}^2} \end{aligned} \quad (3.23)$$

として 0.7 s 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スコプで補償した、

$$\begin{aligned} \phi_{estimate}(t) = & \phi_{VWA}(t-35) \\ & + \sum_{k=t-35}^t (\omega_{gyro}(k) + d(k)) \Delta T \end{aligned} \quad (3.24)$$

を推定方位とした。

図 3.14 に、式 (3.24) 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 (3.19)) 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、ジャイロスコプに IMU を使用した場合と同程度の精度を得ることができた。

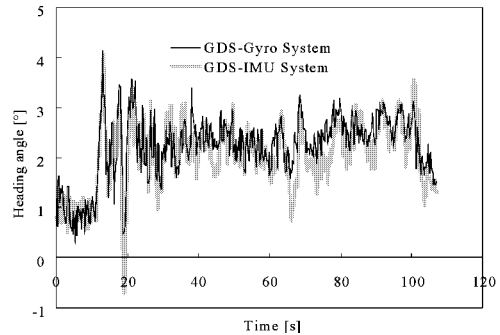


図 3.14 GDS-Gyro システムと GDS-IMU システムの比較

E. 実機による自動直進走行試験

圧電振動ジャイロスコプと傾斜計および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、考案した方法の有効性を評価した。ここで、振動ジャイロスコプ、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を図3.15に示す。まず、傾斜計のノイズをALEによって除去し、振動ジャイロスコプのドリフトはGDSを使用して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章で考案した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プの出力で補間した。供試車両として、第2章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(2.6)式、(2.7)式による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0.5 m/s、走行距離約50 m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3.16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小さく、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関わらず、良好に方位が推定され、高精度な自動直進走行が達成できた。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スコプおよびGDSを適用した場合でも精度

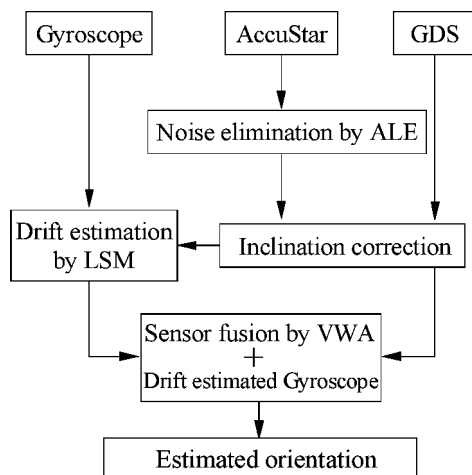


図3.15 方位推定システムのデータ処理フローチャート

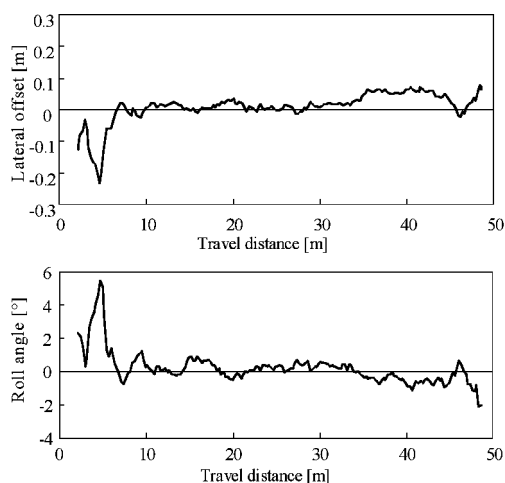


図3.16 自動直進走行試験時の走行軌跡とロール角の推移

の高い自動直進走行が可能であることが確認された。

F. まとめ

地磁気方位センサ(GDS)、振動ジャイロスコプ及び静電容量型傾斜計を使用して、第2章のGDSをベースとしたセンシングシステムをさらに低コスト化した航法センサによる方位推定法を考案した。

- 1) GDSの傾斜補正に使用した静電容量型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 s 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。

2) 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 (LSM) によって推定した。走行データによるシミュレーションの結果、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。

3) GDS と振動ジャイロスコープのドリフト補正後の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° まで抑えることであった。この精度はジャイロスコープに FOG を使用した場合と同程度の精度である。

4) 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、考案した方位推定法によって、GDS、振動ジャイロスコープおよび静電容量型傾斜計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。

IV. GPS 利用による方位・位置情報の高精度化

A. はじめに

第 2 章、第 3 章では GDS やジャイロスコープなどの方位センサのみを適用した航法センサの高精度化について論述した。農用車両の自動化や Precision Farming を実現するために必要な情報は方位と位置であることはすでに述べた。方位センサのみを使用して、位置の取得にデッドレコニングを使用する手法は低コストなセンサで構成できるシステムとして注目されているが、誤差が積算するという問題があり、長時間使用するような場合には適さない。また、その計測位置も初期位置からの相対位置であることも問題となる。したがって、適用される作業も限定され、農用車両に人が乗り、旋回や次の作業行程への移動は人間が行い、直進部分のみを自動で走行するような半自動のシステムに限られる。長時間の作業や完全無人のロボットを実現するためには、GPS のような絶対位置を

提供するセンサが必要不可欠となる。これまで、RTK-GPS を使用した農業用ロボットに関する研究がいくつか報告され成果をあげている一方で、GPS を使用したシステムは高価であることが問題視されていた。しかし、最近では仮想基準局 (Virtual Reference Station: VRS)¹⁵⁹⁾ や静止衛星による補正信号¹⁶⁰⁾ などのインフラが進んでおり、基地局を設置する必要がなくなりつつあることや、GPS 本体の価格も低価格化が進んでいることなどから、GPS を容易に使用できる環境が整いつつある。

そこで、第 4 章では GPS をベースとしたセンシングシステムにおいて、方位・位置情報の精度の向上を図った。本章における構成は以下の 2 つに分類できる。

- 1) GPS と振動ジャイロを併用した方位情報の高精度化
- 2) 傾斜補正による GPS 位置情報の高精度化

方位を計測する場合、GPS の位置を利用して車両の方位を算出する方法もあるが、その方位はノイズが大きく自動走行に使用するには問題となる。しかも、その方位は現在の位置と過去の位置を使用しているため、時間遅れが生じることは明らかである。そのため、方位センサを適用して GPS と方位センサによって高精度な方位と位置を推定するのが一般的となっている。そこで、GPS と振動ジャイロスコープを使用して絶対方位を取得すると同時に振動ジャイロのドリフトを推定する手法を考案した。また、GPS 位置データを使用する場合に問題となる、車両傾斜による GPS アンテナ位置と車両重心位置との誤差を補正する手法を考案し、位置情報の高精度化を図った。

B. DGPS による振動ジャイロの高精度化

振動ジャイロは GDS 同様低コストなセンサであり、GDS に比べ S/N 比が高い特徴がある。また、磁気環境にも影響されず、作業機などを取り替えることによって磁気環境が頻繁に変動する場合にも影響のない方位センサである。しかし、その計測方位は相対方位であり GDS や GPS などの絶対方位・位置を取得できるセンサで補正する必要がある。さらに、これまでも述

べたように振動ジャイロはドリフトが大きくその誤差因子は無視できない。そこで、DGPS を使用して振動ジャイロのドリフトを推定し精度の向上を図った。

a. 振動ジャイロのドリフト推定

本研究では、公称精度 1 m, 計測周期 1 Hz の DGPS の使用を想定した振動ジャイロのドリフト推定を行う。GPS とジャイロスコープによる方位推定法として、木瀬らが提案した RTK-GPS と FOG を使用したジャイロスコープのバイアス推定法がある¹⁶⁾。すべりを無視した車両運動モデルを考えると、

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= X_k + \int_k^{k+1} V(t) \sin \phi(t) dt \\ &\approx X_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\sin \phi_k + \sin \phi_{k+1}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} Y_{k+1} &= Y_k + \int_k^{k+1} V(t) \cos \phi(t) dt \\ &\approx Y_k + \frac{1}{2} V_k \Delta t (\cos \phi_k + \cos \phi_{k+1}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

として表される。ここで、 (X_k, Y_k) は時刻 k の GPS 座標系における車両の重心位置、 ϕ は GPS 座標系における絶対方位、 V は車両速度である。ここでジャイロによって計測される角度を ϕ_{gk} とすると ϕ_k は以下の式で表される。

$$\phi_k = \phi_{gk} + b_k \quad (4.3)$$

b_k はジャイロのバイアスを表し、絶対方位 ϕ_k を算出する上でジャイロの初期偏差と時間ドリフトを補償する補正值となる。すると評価関数は

$$\begin{aligned} I_k &= \sum_{i=k-N}^k \left[\left\{ X_i - X_{i-1} - \frac{1}{2} V_i \Delta t (\sin \phi_i + \sin \phi_{i-1}) \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ Y_i - Y_{i-1} - \frac{1}{2} V_i \Delta t (\cos \phi_i + \cos \phi_{i-1}) \right\}^2 \right] \end{aligned} \quad (4.4)$$

として表せる。最小二乗法 (Least square method: LSM) によって推定されるジャイロバイアス値 b_k は、

$$\frac{dI_k}{db_k} = 0 \quad (4.5)$$

を満たせばよい。(4.4) 式に (4.3) 式を代入して、(4.5) 式を計算すると、

$$b_k = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=k-N}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=k-N}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) & (k > N) \\ \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=0}^k (dX_i C_i - dY_i S_i)}{\sum_{i=0}^k (dX_i S_i + dY_i C_i)} \right) & (k \leq N) \end{cases} \quad (4.6)$$

$$dX_i = X_i - X_{i-1} \quad (4.7)$$

$$dY_i = Y_i - Y_{i-1} \quad (4.8)$$

$$S_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\sin \phi_{fi} + \sin \phi_{fi-1}) \quad (4.9)$$

$$C_i = \frac{1}{2} V_i \Delta t (\cos \phi_{fi} + \cos \phi_{fi-1}) \quad (4.10)$$

として、 b_k を算出することができる。以下、このモデルを木瀬 LSM と呼ぶ。木瀬 LSM を DGPS と振動ジャイロのシステムに適用することは可能であるが、DGPS の計測周期が 1 Hz と遅いため、バイアス値の推定周期も 1 Hz に制限される。1 Hz では自動走行の制御には遅すぎるので

$$\phi(t) = \phi_k + \Delta \phi_g(t) = \phi_{gk} + b_k + \sum_{i=t-N}^t \omega_g(i) \Delta T \quad (4.11)$$

として、計測周期を速める必要がある。ここで、 $\omega_g(i)$ は振動ジャイロの角速度、 ΔT は振動ジャイロの計測周期である。したがって、 $\sum_{i=t-N}^t \omega_g(i) \Delta T$ は、最新のバイアス推定時刻から現在時刻までの方位変化量である。しかし、 $\sum_{i=t-N}^t \omega_g(i) \Delta T$ にはドリフトも含まれるため問題となる。また、DGPS の精度が 1 m であるため、バイアス推定精度も低くなると考えられる。そこで、第 4 章で提案したドリフト推定法を応用して振動ジャイロのドリフト推定を振動ジャイロの計測周期におけるドリフトを推定し精度の向上を図った。

時刻 t における振動ジャイロによる角速度を $\omega_{gyro}(t)$ 、ドリフトを $d(t)$ とすると、角速度推定値 $\omega_{est}(t)$ は

$$\omega_{est}(t) = \omega_{gyro}(t) + d(t) \quad (4.12)$$

となる。また、木瀬 LSM の推定方位を ϕ_{KLSM} 、計測時間を ΔT として

$$\omega(t) = \frac{\phi_{KLSM}(t) - \phi_{KLSM}(t-1)}{\Delta T} = \omega_{KLSM}(t) \quad (4.13)$$

と仮定して、時刻 t における二乗誤差 $\varepsilon(t)$ を算出すると、

$$\varepsilon(t) = \{\omega_{est}(t) - \omega(t)\}^2 = \{\omega_{gyro}(t) + d(t) - \omega_{KLSM}(t)\}^2 \quad (4.14)$$

と表せる。最小二乗法を適用すると

$$I(t) = \sum_{i=t-M}^t \{\omega_{Gyro}(i) + d(i) - \omega_{KLSM}(i)\}^2 \quad (4.15)$$

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_t 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、

$$d_t = \frac{\sum_{i=t-M}^t \{\omega_{KLSM}(i) - \omega_{Gyro}(i)\}}{M+1} \quad (4.16)$$

となる。本式は (3.18) 式の $\omega_{GDS}(i)$ を $\omega_{KLSM}(i)$ に入れ替えた式となる。しかし、 $\omega_{KLSM}(i)$ の計測周期は 1 Hz であり、(4.13) 式からも分かるように、1 秒間の方位変化量から推定した角速度となるため、振動ジャイロによる角速度も 1 秒間の角速度の平均値として次元をあわせる必要がある。したがって、

$$\omega_{Gyro}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=i-N}^i \omega_{Gyro_k} \quad (4.17)$$

を (4.16) 式に代入してドリフトを推定した。ここで、 N は振動ジャイロの計測周期である。

b. 精度評価

DGPS による振動ジャイロのドリフト推定の精度を評価するため、走行試験を行いデータを計測した。DGPS にはビーコンで補正情報を取得する AgGPS 132(株トリンプル)、振動ジャイロにはジャイロスター (ENV-05 F-52, 株村田製作所) を使用した。AgGPS 132 の精度は 1 m であり、計測周期は 1 Hz とグレードは中精度に位置づけられる。計測周期は GPS が 1 Hz、振動ジャイロが 100 Hz で、走行速度は約 0.5

m/s であった。また、評価用に FOG 姿勢各装置 IMU (日本航空電子工業株) を採用して参照値とした。図 4.1 に GPS、FOG、振動ジャイロの方位計測値を示す。GPS 方位はノイズが大きく $\pm 5^\circ$ で振動した値となっており、FOG から算出した誤差の R.M.S. は 2.36° となった。また、振動ジャイロはドリフトによって誤差が増加しており、終端地点での誤差は -3.60° となり、誤差の R.M.S. は 1.83° となった。これらのデータを使用して方位推定した結果を図 4.2 に示す。考案した補正ジャイロ (Corrected gyro) の他に木瀬 LSM のデータも同時に示した。木瀬 LSM は振動ジャイロのドリフトを抑えてはいるものの、推移過程は FOG と一致していない。その結果、最大偏差は 1.66° 、誤差の R.M.S. は 0.74° となった。これは、バイアス推定周期が 1 Hz と遅く、1 秒間の間に変動するバイアス値が推定できなかったことが原因と考えられる。また、計測周期が遅いことから積算量が小さくなり、GPS のノイズの影響を受けやすくなったことも誤差要因として考えられる。それに対して、方位推定値は、精度良く FOG を追従してい

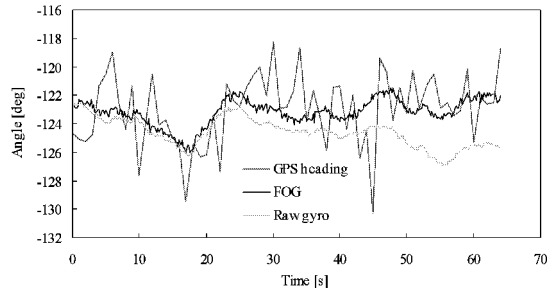


図 4.1 GPS、FOG、振動ジャイロの方位比較

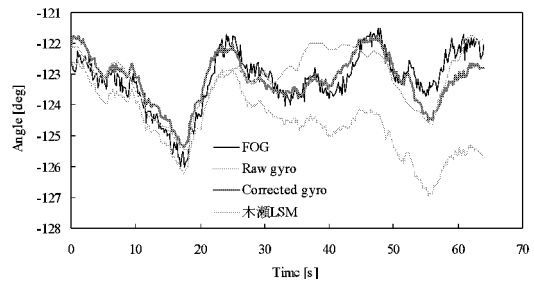


図 4.2 FOG、振動ジャイロ、木瀬 LSM、補正ジャイロの方位比較

るのが確認できる。その結果、終端誤差が -0.74° 、誤差のR.M.S.が 0.51° と良好な結果を得ることができた。以上より、本章で考案したGPSによる振動ジャイロのドリフト推定法によって有効にドリフトを推定できることが明らかとなった。

C. GPS 位置情報の傾斜補正

GPS 位置データを使用する場合、車両の傾斜による影響を除去することが必要である。特に高精度作業を想定した自律走行システムにGPSを適用する場合など高精度な位置情報が必要とする場合、GPSの傾斜補正は重要課題となる。車両を自動制御する場合に必要な位置は、厳密に言うとは場を表現する2次元の座標平面上に車両重心を投影した位置となる。しかし、GPSで計測する位置はアンテナ位置であり、なるべく衛星を補足しやすくするために車両のキャビン上部などの見通しに良い場所に設置される。その高さは、車両のサイズによるが2~3mに及ぶ。現在、RTK-GPSは2~3cm程度の精度で測位が可能であるが、車両に図4.3のように 5° の傾斜が生じることによって、地上より3mに設置されたアンテナ位置は車両重心と20cm以上のずれとして測定される¹⁶²⁾。ほ場の表面は平坦ではなく様々な傾斜や凹凸が存在し、特に高速走行で行う牧草作業などでは車両のロール、ピッチ方向の揺動運動が大きくなることも考えられる。この傾斜が位置計測精度に与える影響はナビゲーションセン

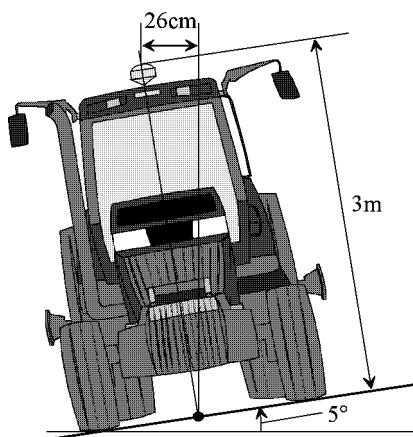


図4.3 GPSの傾斜による誤差の概要

サの誤差として無視できない。GPSの他にも、マシンビジョンガイダンスにおける画像の誤差¹⁶³⁾、地磁気方位センサの誤差など、傾斜による誤差要因を考慮する必要があるものは他にも多くのセンサで存在しその補正が重要である。さらに、農業用ロボットは、傾斜地における作業にも対応できる必要がある。そこで、傾斜角計測してGPSデータの補正手法を考案し、実際の自動走行システムに適用することによって、その精度、有用性を検討した¹⁶⁴⁾。

a. オイラー角の定義

傾斜補正には、実際に航空機の運動学に適用されているオイラー角の定義を使用した^{165), 166)}。地上座標系としてZ軸の正方向を鉛直上方とした直交右手系(X, Y, Z)を定義する。また、車両座標系として、車両の前方向をy軸、右方向をx軸、垂直上方をz軸とした直交右手系(x, y, z)を定義する。地上座標系と車両座標系の概略を図4.4に示す。任意の姿勢のときy軸周りに回転させx軸が水平になった時、y軸回りの回転角をロール角 θ_r とし、極性は水平に対しx軸が右下がりやを正とした。さらにx軸が水平になった状態から、x軸回りに回転させ、y軸が水平になったときのy軸回りの回転角をピッチ角 θ_p とし、極性は水平に対し前上がりやを正とした。また地上座標系(GPS座標系)XYZから、X軸とx軸のなす角をヨー角 ϕ とし、X軸から地上座標系の原点回りの右回転を ϕ の正方向とした。

オイラー角とは、このように3つの順序を有する回転 ϕ , θ_p , θ_r によって定義される。図4.5

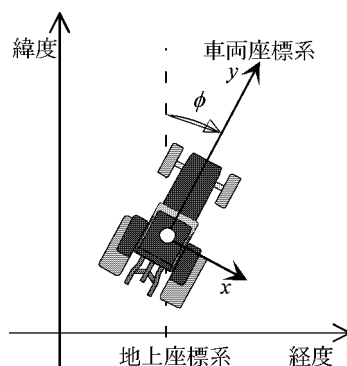


図4.4 地上座標系と車両座標系

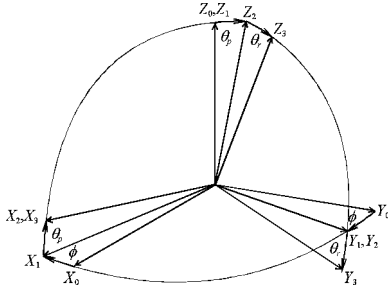


図 4.5 オイラー角の定義

に示すように、まず、 $X_0 Y_0 Z_0$ 系を Z 軸回りに回転角 ϕ 回転し $X_1 Y_1 Z_1$ 系とする。さらに $X_1 Y_1 Z_1$ 系を Y 軸回りに回転角 θ_p 回転し $X_2 Y_2 Z_2$ 系、 $X_2 Y_2 Z_2$ 系を X 軸回りに回転角 θ_r 回転し $X_3 Y_3 Z_3$ 系とする。

ここで、GPS データの傾斜による誤差を補正するためにオイラー角の定義を適用し、各座標軸を水平にした。それぞれの車両座標系の各軸を地上座標系の各軸に平行にする変換行列を考えると、

$$\text{ロール角 } \theta_r \quad F_1(\theta_r) = \begin{pmatrix} \cos\theta_r & 0 & -\sin\theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_r & 0 & \cos\theta_r \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

$$\text{ピッチ角 } \theta_p \quad F_2(\theta_p) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_p & \sin\theta_p \\ 0 & -\sin\theta_p & \cos\theta_p \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

$$\text{ヨー角 } \phi \quad F_3(\phi) = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

となる。したがって車両座標系上のベクトルを地上座標系上のベクトルに変換する行列は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = E(-\phi, -\theta_p, -\theta_r) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

ただし、

$$\begin{aligned} E(-\phi, -\theta_p, -\theta_r) &= F_3(-\phi) \cdot F_2(-\theta_p) \cdot F_1(-\theta_r) \\ &= \begin{pmatrix} \cos\theta_r \sin\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \sin\phi & \cos\theta_r \sin\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \sin\phi + \sin\theta_r \cos\phi \\ -\cos\theta_r \sin\phi + \sin\theta_r \sin\theta_p \cos\phi & \cos\theta_r \cos\phi & -\cos\theta_r \sin\theta_p \cos\phi - \sin\theta_r \sin\phi \\ -\sin\theta_r \cos\theta_p & \sin\theta_p & \cos\theta_r \cos\theta_p \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.22)$$

となる。

ここで、車両座標系における GPS 受信機の位置を (a, b, h) 、地上座標系における GPS 受信機の位置を $(X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS})$ 、補正量を $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ とすると、

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} -\phi, -\theta_p, -\theta_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ h \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

となり、補正後の重心位置 (X', Y', Z') は、

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

となる。

b. 傾斜補正の効果

考案した傾斜補正法の精度を評価するために、有人運転で直線走行を行った。経路途中に枕木を設置して、左右片側車輪が枕木上を通過するように走行することで車両を傾斜させた。このときの車両方位角、ロール角、ピッチ角及び GPS データを計測してオフラインで傾斜補正を行い、傾斜補正法を評価した。RTK-GPS として NovAtel 社製 RT-2 を使用した。ロール、ピッチ角の計測には日本航空電子工業(株)製 FOG 姿勢角装置 IMU (JCS-7401 A) を採用した。ヨー角の計測には日本航空電子工業(株)製の 1 軸 FOG (JG-35 FD) を使用した。これらのセンサを供試トラクタに搭載し、トラクタに搭載されているコンピュータによって AD ボードと RS-232 C を介して計測した。また評価基準としてトータルステーション TOPCON 社製光波距離計 AP-L 1 を使用した。AP-L 1 プリズムは傾斜による影響を最小限に抑えるため、図 4.6 のように GPS アンテナの真下となる PTO 軸付近に設置した。また補正目標については車両の重心ではなく AP-L 1 プリズムの位置に補正することとした。したがって、プリズムと GPS アンテナまでの距離は 1.751 m となり、式 (4.35) 中の (a, b, h) は $(0, 0, 1.751)$ となった。計測周期は GPS の限界である 4 Hz に設定した。

図 4.7 に精度評価実験による走行軌跡を示す。車両進行方向は矢印に示した向きであり、左側車輪が枕木上を通過するように走行させた。傾



図4.6 AP-L1プリズムの取り付け位置



図4.8 供試トラクタの外観

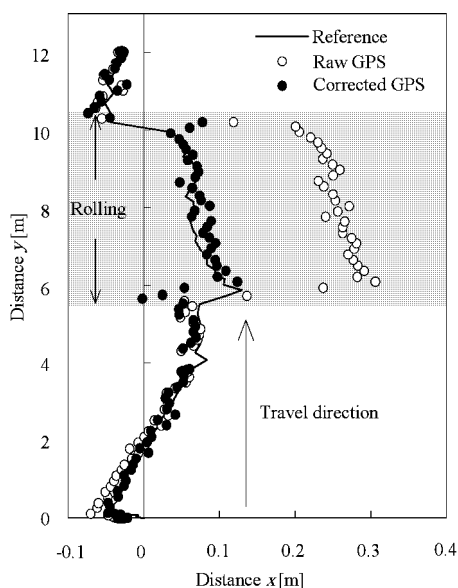


図4.7 有人走行の走行軌跡

斜中のロール角は約 6° で、補正を行わなかった場合の測位誤差は平均17.1 cm、最大21.3 cmであった。これに対し補正を行った場合は平均2.1 cm、最大12.1 cmであり、ピーク時を除けば最大2.4 cmと傾斜による影響をほぼ除去することができた。

c. 実機実験による自動走行

この傾斜補正を適用した自動走行実験を行った。供試トラクタは、ケース社製MX 240を自動走行用に改造して使用した。図4.8に供試トラクタの外観を示す。最大出力179 kWと大型で高速走行が可能である。キャビン上部にGPSアンテナとGPS補正信号受信用無線アンテナ

を取り付けた。(4.35)式中の (a, b, h) は(0 m, -1.67 m, 3.23 m)となった。またキャビン内部のブレーキペダルの下にFOGを、座席シート横にGPS受信機とIMUを取り付けた。FOGは日本航空電子工業(株)製のJG-108 FDを使用した。JG-108 FDのドリフトは $20^\circ/\text{h}$ 以下である。供試GPS受信機はTrimble 7400 Msiを採用し、前節で使用したNovAtel社製RT-2と同じRTK-GPSである。L1, L2の両波の使用が可能であり、公称精度は5 Hz計測で3~5 cmである。なお、GPS、FOG、IMUのデータの計測周期は5 Hz、GPSのボーレートは9,600 bpsとした。

自動走行に使用したステアリングコントローラはGPSとFOGによって横方向偏差、方位誤差を推定し、PIDフィードバック制御を行う方式を採用した。制御周期はGPSの限界である5 Hzに設定した。直進自動走行時のフローチャートを図4.9に示す。GPS、FOGの精度、特にGPSの精度が高いため、本研究で採用した傾斜補正法が基礎実験の精度を満たせば、横方向偏差と方位偏差によるフィードバック制御で十分直進制御可能と判断した。また、走行開始地点から約3 mマニュアルで直進走行し、この間のGPSデータから算出した絶対方位とFOGの方位をあわせることで、GPS座標系の方位と車両座標系の初期方位のマッチングをはかった。

また、直進精度を評価するために、傾斜補正をおこなった走行実験と、傾斜補正を行わずにGPSの生データで走行を行い、その精度を比較

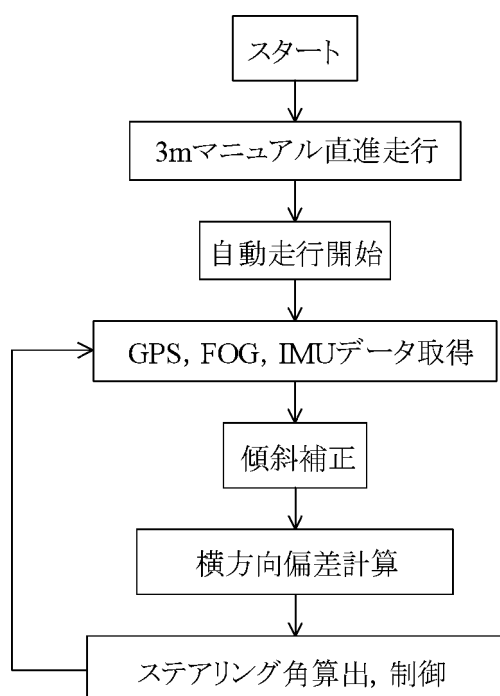


図 4.9 自動走行試験時の走行フローチャート

した。さらに、軌跡評価用に AP-L1 を使用し、走行軌跡を把握して、走行精度の評価を行った。なお、AP-L1 プリズムはキャビン上部に設置した。試験は、耕うん整地したほ場を使用し、走行距離は約 150 m である。また、自動走行の設定速度は約 4.3 m/s と、特に車両が大きく揺動するような、高速で実験を行った。

図 4.10 に走行軌跡を示す。図 4.10 から明らかに傾斜補正を行った走行の方が、目標経路に対して精度よく走行できていることがわかる。傾斜補正なしの走行では誤差の R.M.S. が 10.4 cm、最大誤差 25 cm であるのに対して、傾斜補正ありでは R.M.S. が 3.8 cm、最大誤差 9.6 cm と約 64% の精度向上が確認された。約 4.3 m/s と高速な走行にもかかわらず、この精度は、 ± 10 cm の精度が達成された。また、傾斜補正なしの走行ではロール角の最大値は 1.42° 、最小値は -2.91° 、傾斜補正ありでは最大値 2.02° 、最小値は -1.92° であった。傾斜補正を行った走行時のロール角の変動幅は 3.94° であるのに対して、傾斜補正なしでは 4.33° と変動幅が大きくなった。傾斜補正を行っていない

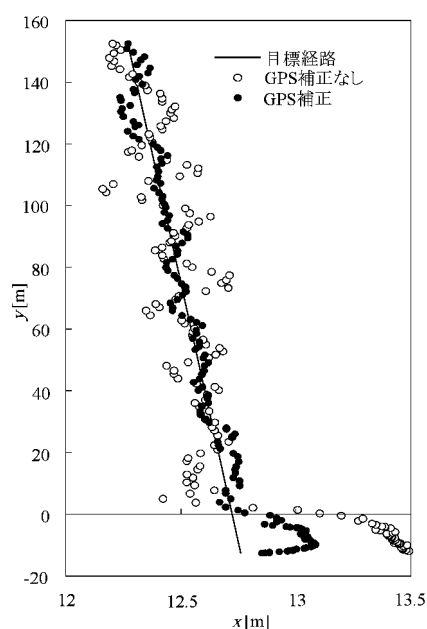


図 4.10 自動走行時の走行軌跡の比較

いたために位置計測精度、走行精度が低下して、その走行軌跡は最大約 ± 20 cm の振幅で蛇行している。車両が高速度で大きく蛇行したため、地盤の傾斜だけでなく、旋回時の加速度により車両のロール角が増大したことが計測されたロール角の増大原因と考えられる。以上より、車両の傾斜角を計測し傾斜補正を行うことで、車両の走行精度は大幅に改善されることが明らかとなった。

D. まとめ

農用車両の自動化や Precision Farming (PF) を実現するためには、高精度に位置・方位・傾斜角を計測する必要がある。第 2 章、第 3 章では地磁気方位センサ (GDS) をベースとした方位センサのみのセンシングシステムによって方位・位置を取得する手法を考案したが、位置の取得にデッドレコニングを使用するため誤差が積算するという問題があり、長時間使用するような場合には適さない。また、その計測位置も初期位置からの相対位置であることも問題となる。そこで、本章では GPS をベースとしたセンシングシステムを提案し、方位・位置情報の高精度化手法を構築することを目的とした。

- 1) 公称精度 1 m, 計測周期 1 Hz の DGPS と振動ジャイロを併用した, 絶対方位の取得法及びドリフト推定法を考案した。走行データを使用して方位推定のシミュレーションを行った結果, 良好にドリフト値を推定し絶対方位を計測できることがわかった。
- 2) 傾斜角が GPS 計測に与える影響を補正する手法を考案して, 位置情報の高精度化を図った。経路に枕木を設置することによって傾斜を与えた走行データよりシミュレーションを行った結果, 補正を行わなかった場合の横方向偏差は平均 17.1 cm, 最大 21.3 cm であったのに対し, 補正を行った場合は平均 2.1 cm, 最大 12.1 cm であり, ピーク時を除けば最大 2.4 cm と傾斜による影響をほぼ除去することができた。
- 3) 傾斜補正を適用した場合と, 傾斜補正を適用しないで生の GPS データを使用した場合の自動走行試験を行なって走行精度を比較した結果, 傾斜補正を行わなかった自動走行では, 最大誤差が 25 cm, 誤差の R.M.S. が 10.4 cm となったのに対し, 傾斜補正を行った自動走行では最大誤差が 9.6 cm, 誤差の R.M.S. は 3.8 cm の R.M.S. で約 64% の精度の向上が確認された。

V. 農用車両のための

航法センサモジュールの開発

A. はじめに

第4章では, GPS をベースとした航法システムを想定し, GPS と振動ジャイロを併用した絶対方位の推定法及び GPS と FOG を使用した位置補正法を考案し, その必要性・有効性を示した。絶対方位推定は DGPS と振動ジャイロを使用することでコストを抑えたシステムで構成された。しかし, 位置補正のための傾斜角計測には FOG を使用していたため, 位置推定には高価なシステムとなった。現在農用車両の自動化に適用できるような傾斜角センサは FOG や高精度なサーボ型加速度計などの高価なセンサに限られている。また, FOG や加速度計を用い

ずに GPS を4個使用することで方位・傾斜角を計測するといった非常に高価なセンシングシステムを利用している研究も報告されている^{93)–96)}。このように, 傾斜角計測は高価なセンサに頼っているのが現状である。そこで本章では, 第4章の航法システムを導入した位置・方位計測に加えて傾斜角の3要素を推定する低コストな航法システムの開発を目的とした。

傾斜角を計測する場合, 路面の凹凸による過渡的な変動を計測する必要があるため応答性が重要となる。本論文では, 第3章で低価格な静電容量型の傾斜計を使用しているが, 応答性, ノイズ, 横方向の加速度の検出等の問題から補正をする必要があった。また, 補正後も時間遅れが生じたためにリアルタイムでの計測ができない問題も生じた。そこで, 静電容量型傾斜計と併せて, 応答性が良く, S/N 比の高い振動ジャイロも傾斜角計測に使用し, 低コストで実現する航法センサモジュールを構築した。

航法センサモジュールは以下のセンサで構成した。

- ・DGPS (位置・方位推定)
- ・振動ジャイロ (方位・位置・傾斜角推定)
- ・静電容量型傾斜計 (傾斜角推定)

まず, 振動ジャイロ3個と静電容量型傾斜計2個を使用して姿勢角センサパッケージを試作し, 相対方位・傾斜角を計測するシステムを構築した。さらに, 姿勢角センサパッケージと DGPS をハイブリットして, 車両の絶対方位・位置を計測する航法センサモジュールを構成した。この航法センサモジュールによって, RTK-GPS/FOG システムに比べ10分の1以下, DGPS/FOG システムに比べ4分の1のコストで構築できることが期待できる。また, 航法センサモジュールは, 農用車両の自動化だけでなく, PF や運転支援のための航法センサとしても適用できる。PF で適用する場合, 収穫マップや生育マップなどのマップを構築するための位置計測や, GPS 位置と取得画像の座標系の一致法, 補正法などマップベース PF, センサベース PF の両方に適用することができ, その適用範囲は広い。また, 航法センサモジュールの精度を評価するために, アスファルト平坦路面, 草

地斜面，人工悪路の3種類の条件で走行試験を行い，位置・方位・傾斜角の推定精度を評価した。

B. 航法センサモジュールの構築

振動ジャイロをロール・ピッチ・ヨー角の3軸周りの回転が計測できるように3個，静電容量型傾斜計をロール，ピッチ角の2軸が計測できるように2個，計5個のセンサを使用して相対方位・傾斜角を推定する姿勢角センサパッケージを構成した。さらに，姿勢角センサパッケージと DGPS を使用して，位置・絶対方位・傾斜角を計測する航法センサモジュールを構築した。それぞれ採用したセンサについて述べ，試作した姿勢角センサパッケージの仕様，供試 GPS，航法センサモジュールの構成を示す。

a. 振動ジャイロ

振動ジャイロには株式会社村田製作所製のジャイロスターENV-05 F-03 (以下振動ジャイロと呼ぶ)を採用した。この振動ジャイロはカーナビゲーション用に開発された小型で低コストな圧電振動ジャイロである。構造は四角柱振動子のように駆動と検出が直交せず，斜交配置となる独自の形状の三角柱振動子で構成されている。振動ジャイロの主要諸元を表 5.1 に外観を図 5.1 に示す。応答性は 10 Hz，分解能は $0.1^{\circ}/s$

表 5.1 振動ジャイロの主要諸元

Supply voltage	+5VDC
Current consumption	15mA (max)
Maximum angular velocity	$\pm 60^{\circ}/s$
Output	$2.5 \pm 0.4VDC$
Scale factor	
-10 to $+60^{\circ}$	$25 \pm 2.0mV/^{\circ}/s$
-30 to $+80^{\circ}$	$25 \pm 3.3mV/^{\circ}/s$
Resolution (deg/sec)	$0.1^{\circ}/s$
Linearity	$\pm 0.5\%FS$
Offset drift	$9^{\circ}/s$ (max)
Bandwidth (Response)	DC to 10Hz
Noise level	10mVrms (max)
Operating temperature range	-30 to $+80^{\circ}C$
Weight	20g
Dimension	11.5(D)×19.6(W) ×23.2(H)



図 5.1 振動ジャイロの外観

と高速・高分解能であり，要求仕様を十分満たしている。

b. 静電容量型傾斜計

静電容量型傾斜計にはオムロン社製のリニア傾斜センサ D 5 R-L 02-15 (以下，傾斜計と呼ぶ)を使用した。傾斜計の主要諸元を表 5.2 に外観を図 5.2 に示す。検出角度範囲は $\pm 15^{\circ}$ と比較的狭いが $100 mV/^{\circ}$ と高分解能が実現され，農用車両の走行環境を考えると十分な検出範囲であると判断された。また， 15° から 0° の応答時間は 2.5 秒以下と遅いが，高周波領域は振動ジャイロによって計測するため問題はない。傾斜計の役割は，低周波数領域の絶対傾斜角を計測し，振動ジャイロのドリフトを推定することにある。

c. 供試 GPS

供試 GPS として，NavCom 社製の StarFire (SF-2050 M) を採用した。StarFire の外観を図 5.3，主要諸元を表 5.3 に示す。StarFire は静止衛星から補正情報を受信するタイプの DGPS で公称精度は 15 cm であるが，短時間における相対誤差は 2～3 cm の精度で計測が可能である。StarFire と姿勢角センサパッケージのヨー角出力を第 4 章で考案した (4.28) 式で表される最小二乗法によってハイブリットして絶対方位を推定すると同時に，姿勢角センサパッケージより算出した傾斜角から傾斜補正を行い，位置を補正した。また，本論文では計測周期を 1 Hz に設定した。

d. 姿勢角センサパッケージの試作

振動ジャイロを 3 個，傾斜計を 2 個，計 5 個

表 5.2 傾斜計の主要諸元

Supply voltage	DC5V $\pm$ 0.5V
Current consumption	20mA (max)
Range	$\pm 15^\circ$
Output	2.5 $\pm$ 0.05VDC
Scale factor	100mV/ $^\circ$ $\pm$ 3%
Linearity	$\pm 1\%$ FS (max)
Step Response (90%)	2.5s (max) (+15 to 0)
Operating temperature range	-20 to +60 $^\circ$ C
Weight	70g
Dimension	45(D) $\times$ 48(W) $\times$ 46(H)



図 5.2 傾斜計の外観



図 5.3 供試 GPS, StarFire システムの外観

を使用して姿勢角センサパッケージを試作した。センサパッケージの外観を図 5.4 に示す。縦幅 150 mm, 横幅 110 mm, 高さ 65 mm, 重量 540 g と IMU より大幅に小型・軽量化することができた。図に示すように, 回路基板をパッケージ内後方に 3 軸垂直に取り付け, その上に振動

表 5.3 StarFire システムの主要諸元

Supply voltage	10V DC to 30VDC
Consumption	<10W
Temperature	-40 $^\circ$ C to 55 $^\circ$ C
Operating	-40 $^\circ$ C to 85 $^\circ$ C
Storage	
DGPS Accuracy	StarFire differential service
Horizon	<15cm
Vertical	<30cm
Update rate	25, 10, 5, 2, 1Hz
Data latency	<20ms
Time to first fix	60s
Differential correction signals	L-Band :StarFire differential service :WAAS (Accuracy 1m) :EGNOS (Accuracy 1m)

ジャイロを設置した。傾斜計は前方にパッケージ本体に直接取り付けした。これらのセンサのアナログ出力を 15 ピンの D サブコネクタを取り付けて取得できるように構成した。入力電源は 12 V とし, 使用電圧が振動ジャイロ, 傾斜計ともに 5 V であるため, 12/5 V の DC-DC コンバータを内部に取り付けた。また, 振動ジャイロの誤差特性として, 入力電圧の変動によって影響を受けることがあるので, センサへの入力電圧も 15 ピンの信号コネクタから取得できるようにした。座標系は, ロール角が水平に対して右下がり, ピッチ角は水平に対して前上がり, ヨー角は基準方位に対して右回転を正とする。試作したセンサパッケージより出力される振動ジャイロ, 傾斜計のデータを使用して, 高精度な傾斜角を推定することにした。

傾斜角計測における振動ジャイロのドリフト推定は, 第 3 章で考案した方法に基づいて行った。第 3 章では GDS から二乗誤差を算出し最小二乗法で補正を行った。そこで, 傾斜計を使用して振動ジャイロのドリフトを推定し, 低周波領域における静的な傾斜角の検出と同時に高周波領域の動的な傾斜角の検出が可能な姿勢角センサの構成を試みた。

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傾斜角の角速

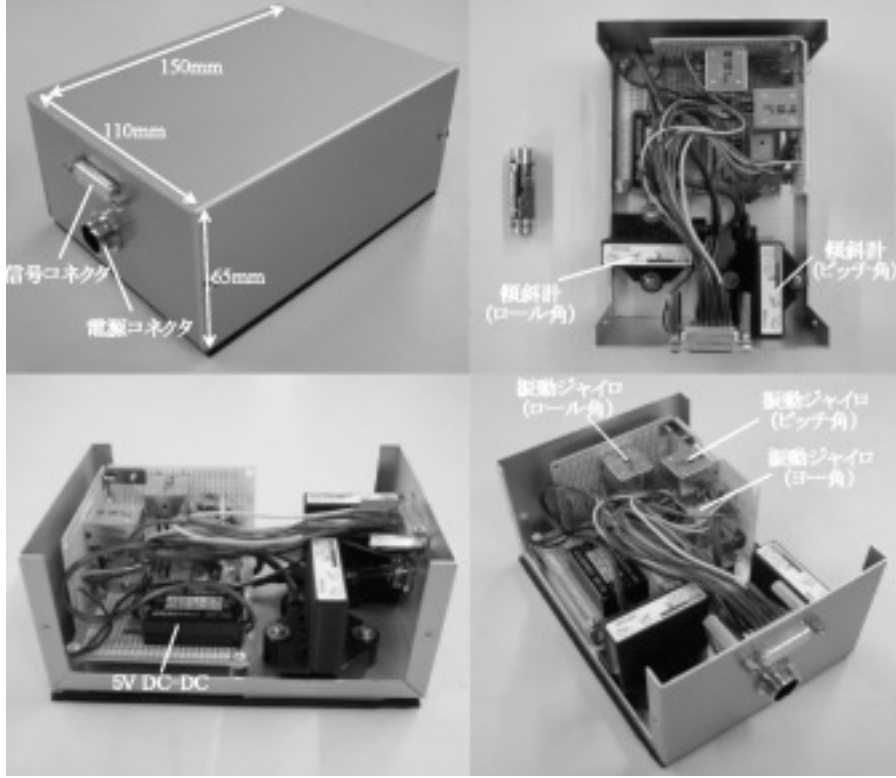


図 5.4 姿勢角センサパッケージの外観

度を $\omega_{gyro}(t)$ ，その時のドリフトを $d(t)$ とすると，傾斜角速度推定値 $\omega_{est}(t)$ は，

$$\omega_{est}(t) = \omega_{gyro}(t) + d(t) \quad (5.1)$$

となる。真の傾斜角速度を $\omega_{True}(t)$ とすると， t における二乗誤差 $\varepsilon(t)$ は，

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \{\omega_{est}(t) - \omega(t)\}^2 \\ &= \{\omega_{gyro}(t) + d(t) - \omega_{True}(t)\}^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

となり，最小二乗法を適用すると，

$$I(t) = \sum_{i=t-M}^t \{\omega_{Gyro}(i) + d(i) - \omega_{True}(i)\}^2 \quad (5.3)$$

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_t 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，

$$d_t = \frac{\sum_{i=t-M}^t \{\omega_{True}(i) - \omega_{Gyro}(i)\}}{M+1} \quad (5.4)$$

で表せる。さらに，この (6.5) 式は，

$$d_t = \frac{\sum_{i=t-M}^t \omega_{True}(i) - \sum_{i=t-M}^t \omega_{Gyro}(i)}{M+1} \quad (5.5)$$

として表せる。真の傾斜角を ϕ_{True} ，傾斜計によって計測された傾斜角を ϕ_{Inc} とすると，

$$\phi_{True}(i) = \phi_{Inc}(i) + \varepsilon(i) \quad (5.6)$$

となる。ここで， $\varepsilon(i)$ は傾斜計の誤差で平均値 0 のガウシアンノイズである。

$\omega_{True}(i) = \frac{\phi_{True}(i) - \phi_{True}(i-1)}{\Delta T}$ (ΔT : サンプリング時間) であるから。

$$\begin{aligned} \sum_{i=t-M}^t \omega_{True}(i) &= \sum_{i=t-M}^t \frac{\phi_{True}(i) - \phi_{True}(i-1)}{\Delta T} \\ &= \sum_{i=t-M}^t \frac{\phi_{Inc}(i) + \varepsilon(i) - \phi_{True}(i-1) - \varepsilon(i-1)}{\Delta T} \\ &= \sum_{i=t-M}^t \left\{ \frac{\phi_{Inc}(i) - \phi_{Inc}(i-1)}{\Delta T} \right\} + \frac{1}{\Delta T} \\ &\quad \left\{ \sum_{i=t-M}^t \varepsilon(i) - \sum_{i=t-M}^t \varepsilon(i-1) \right\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

と表すことができる。 $\varepsilon(i)$ ， $\varepsilon(i-1)$ は平均値 0

- 1) アスファルト平坦路面
- 2) 草地斜面
- 3) 人工悪路

の3種類で試験した。すべて生物系特定産業技術研究推進機構所有のテストフィールド内における試験路面である。アスファルト平坦路面は、傾斜角の揺動は比較的少ない路面であるが、比較的長時間の使用により絶対方位・位置・傾斜角の推定精度と安定性を調べることができる。草地路面は、緩やかに右下がりロールしていく草地路面であり、低周波領域での絶対的な傾斜角の検出が要求される。また、位置の傾斜補正精度は絶対方位推定精度に影響を及ぼす可能性があり、詳しく検証する必要がある。人工悪路は、農用車両の性能を試験するために人工的に作られた路面で、様々なロール、ピッチ角の揺動が起きるように設計されており、高周波領域における動的な傾斜角の検出が要求される。また、GPS アンテナ位置の揺動も多くなることが想定され、傾斜補正の効果が大きく現れることが予想される。精度評価の参照値として、Trimble 社製の RTK-GPS (MS 750) と日本航空社製の FOG 姿勢角計測装置 IMU (JCS-7400 A) を同時に計測した。

a. アスファルト平坦路面における精度評価

約 15 m×45 m のアスファルト平坦路面を周回してデータを計測した。走行時間は約 200 s、走行速度 0.8 m/s、姿勢角センサパッケージの計測周期は 100 Hz、GPS の計測周期は 1 Hz で

あった。表 5.4 にすべての路面における試験結果を示す。表は参照値からの r.m.s. 誤差である。

斜角推定については、振動ジャイロはドリフトが大きく終端地位での誤差はロールが -19.0° 、ピッチが -16.7° 、R.M.S. 誤差はロールが 12.5° 、ピッチが 12.1° となった。それに対して、傾斜計はロール、ピッチともに終端誤差がほとんど確認されず、R.M.S. 誤差はロールが 0.46° 、ピッチが 0.48° と振動ジャイロに比べ精度が高かった。しかし、時間遅れ、ノイズが確認された。特に、ピッチ角に関しては、スタート、ストップ時の加速度を検出してしまい誤差が増大しているのが確認された。これらのデータを使用して、(5.11) 式によって傾斜角を推定した。本研究では (5.11) 式における M をロール角が 270、ピッチ角が 200 とした。つまり、それぞれ過去 2.7 s 間、2.0 s 間のデータよりドリフト推定することになる。その結果、推定ロール角の誤差の r.m.s. は 0.24° 、推定ピッチ角の誤差の r.m.s. は 0.37° となり、約 200 秒の使用でも高精度に傾斜角を計測できた。

振動ジャイロによる方位角はドリフトによって誤差が積算し終端誤差で 7.15° 、誤差の r.m.s. は 4.37° となった。それに対して、航法センサモジュールによる推定値は、参照値と良好に一致して誤差の推移も $\pm 2^\circ$ の範囲に収めることができた。終端誤差 0.68° 、誤差の r.m.s. は 0.63° と振動ジャイロの誤差を約 15% に抑えること

表 5.4 3 路面における計測 r.m.s. 誤差

		アスファルト路面	傾斜草地	人工悪路
ロール角 [$^\circ$]	ジャイロ	12.49	2.33	4.54
	傾斜計	0.46	0.88	3.28
	航法センサモジュール	0.24	0.23	0.43
ピッチ角 [$^\circ$]	ジャイロ	12.07	6.78	6.25
	傾斜計	0.48	0.71	1.84
	航法センサモジュール	0.37	0.28	0.61
方位角 [$^\circ$]	ジャイロ	4.37	3.51	7.60
	NSM	0.63	0.64	0.59
位置 [cm]	GPS	8.00	25.90	8.40
	航法センサモジュール	6.50	3.00	3.70

が可能であった。

推定した傾斜角，絶対方位を使用して，GPSの傾斜補正とデッドレコニングを併用して位置を推定した。参照位置データからの誤差の r.m.s. は GPS 位置データが 8.0 cm であったのに対して，推定位置は 6.5 cm であった。平坦な路面であるため傾斜補正の効果はそれほど顕著に表れていないため大幅な精度改善は確認できなかったが，約 20% 精度を改善することができた。

b. 草地斜面における精度評価

図 5.6 の a) に示す傾斜草地での試験では，直進走行を約 80 s 行ってデータを取得した。計測周期，走行速度はアスファルト平坦路面同様 100 Hz, 0.8 m/s とした。

傾斜草地における，振動ジャイロの終端位置での誤差はロールが 3.17° ，ピッチが -12.03° ，r.m.s. 誤差はロールが 2.33° ，ピッチが 6.78° となった。アスファルト平坦路面に比べると精度が良いが，これは計測時間が短かったため，誤



a) 傾斜草地



b) 人工悪路

図 5.6 傾斜草地，人工悪路での走行試験

差の積算量が少なくなったことが原因である。それに対して，傾斜計はロール，ピッチともにアスファルト平坦路面同様，終端誤差がほとんど確認されなかった。しかし，R.M.S. 誤差はロールが 0.88° ，ピッチが 0.71° と平坦路面に比べ精度が低下している。これは，緩斜面での走行がアスファルト平坦路面に比べて揺動が大きかったためと考えられる。そのため，高周波領域の傾斜を検出できず，逆にノイズが大きくなり誤差が増大したと考えられる。草地路面でアスファルト平坦路面と同様にロール角が $M=270$ ，ピッチ角が $M=200$ として傾斜角推定値を算出した。図 5.7 にロールの推定結果を示す。高精度に IMU を追従しているのが確認できる。推定ロール角の誤差の r.m.s. は 0.23° ，推定ピッチ角の誤差の r.m.s. は 0.28° となり，傾斜草地のような低周波領域の傾斜でも絶対傾斜角を高精度に推定できることがわかった。

振動ジャイロによる方位計測は，ドリフトによって誤差が積算し終端誤差で 4.95° ，誤差の r.m.s. は 3.51° となった。それに対して，航法センサモジュールによる推定値は，誤差の推移を $\pm 1^\circ$ の範囲に収め，終端誤差は -0.68° ，r.m.s. は 0.64° とアスファルト平坦路面と同程度の精度が達成された。振動ジャイロに比べて誤差を約 18% に抑えることができた。

図 5.8 に推定位置データと GPS 位置データの誤差の推移を示す。GPS 位置データは，走行距離 25 m を過ぎたあたりから傾斜の影響で誤差が増加しており，走行距離 40 m では 40 cm

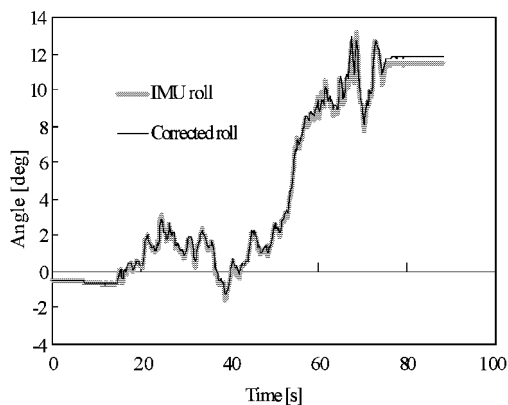


図 5.7 傾斜草地におけるロール角の推定結果

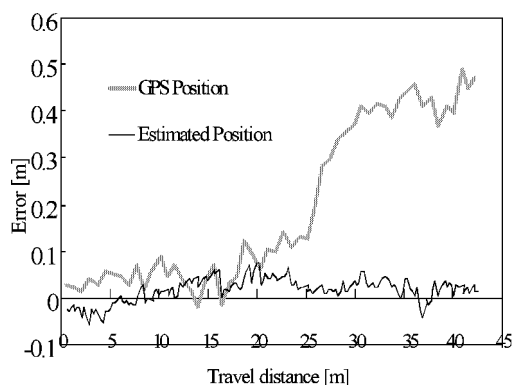


図 5.8 傾斜草地における位置誤差の推移

の誤差を生じている。その結果、誤差の r.m.s. は 25.9 cm となった。一方、推定位置データは ± 10 cm 以下の誤差で推移しており、誤差の R.M.S. は 3.0 cm と、誤差を約 90% 改善し、ロール角の影響をほとんど除去することができた。

c. 人工悪路走行における精度評価

図 5.6 の b) に示すような約 50 m の人工悪路を、速度 0.8 m/s で直進走行し、データを計測した。計測周期は 100 Hz である。人工悪路は、約 $\pm 5^\circ$ の傾斜がロール、ピッチ角方向にランダムに存在し、車両はかなり揺動した。

振動ジャイロによる傾斜角の計測は、終端位置での誤差はロールが 7.86° 、ピッチが -11.13° 、r.m.s. 誤差はロールが 4.54° 、ピッチが 6.25° となり、傾斜草地とほぼ同等の精度であった。一方、傾斜計はロール、ピッチともに終端誤差はこれまで同様ほとんど確認されなかったが、r.m.s. 誤差はロールが 3.28° 、ピッチが 1.84° と平坦路面、緩斜面に比べ極端に精度が低下している。これは、傾斜計が高周波領域の傾斜を検出できないという特性が顕著に現れたためである。走行中は激しく揺動し、横方向の加速度がかなり車両にかかっていたと考えられる。その結果、傾斜計の出力は大きく振動し、誤差を増幅させたものと推察される。それに対して、推定ロール角の誤差の r.m.s. は 0.43° 、推定ピッチ角は 0.61° となった。推定ピッチ角が 0.61° では精度がそれほど高くないようにみえるが、 0.61° という誤差は、例えば 2 m の位置に GPS

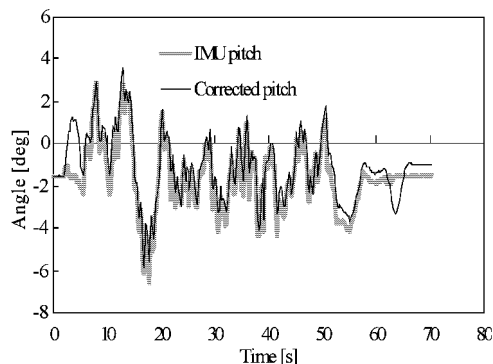


図 5.9 人工悪路におけるピッチ角の推定結果

アンテナが設置されている場合の位置誤差に換算すると 2.1 cm となる。この位置誤差は、 $\pm 5^\circ$ の変動で位置誤差が ± 17 cm の及ぶことを考えるとその補正精度は十分と考えることができる。また、図 5.9 に推定ピッチ角の推移を示す。ピッチ角はスタート・ストップ時に傾斜計が受ける横方向の加速度の影響による誤差の増大が原因で精度が悪化しているため、この部分の誤差を除いて r.m.s. を算出すると 0.49° となった。以上の結果より、振動ジャイロと傾斜計によって構成した姿勢角センサによって、傾斜の高周波成分に対しても、高精度に傾斜角を計測できることが明かとなった。

振動ジャイロによる方位は、r.m.s. 誤差が 7.6° となりアスファルト路面、傾斜草地にくらべドリフトが顕著に表れた。それに対して、ドリフトが増大したにもかかわらず航法センサモジュールによる方位推定値は r.m.s. 誤差は 0.59° となり振動ジャイロの誤差に対して約 8% と大幅に精度を改善することができた。

図 5.10 に推定位置データと GPS 位置データの誤差の推移を示す。GPS 位置データは、約 5 cm のオフセットを持ちながら 10 cm の振幅で振動しており、誤差の r.m.s. は 8.4 cm となった。一方、推定位置データは ± 5 cm 以下の誤差で推移している。誤差の r.m.s. は 3.7 cm と GPS 位置データに対して約 56% 誤差を改善し、ロール角の影響を効果的に除去することができた。また、図 5.11 に推定位置データから算出した走行速度と GPS 位置データから算出した走行速度の誤差の推移を示す。ピッチ角の揺

動が $\pm 5^\circ$ と大きかったためGPS位置データの進行方向の誤差が増大し、速度誤差も $-0.1 \sim 0.2$ m/sの間で振動した推定結果となった。一方、推定位置データによる走行速度はノイズの小さい安定した走行速度を推定できている。r.m.s. 誤差はGPS位置データによる走行速度が 0.064 m/s、航法センサモジュールの推定位置データによる走行速度は 0.037 m/sとなった。以上より、推定位置データが高周波成分のピッチ角の影響を除去した位置データを観測できることも明らかとなった。

以上の試験結果より、機能・精度・コストの観点から判断して、開発した姿勢角センサは位置・方位・傾斜角を観測する航法システムとしての目標仕様を十分に達成し、農用車両の自動化やPFに有効なセンサと考えられる。

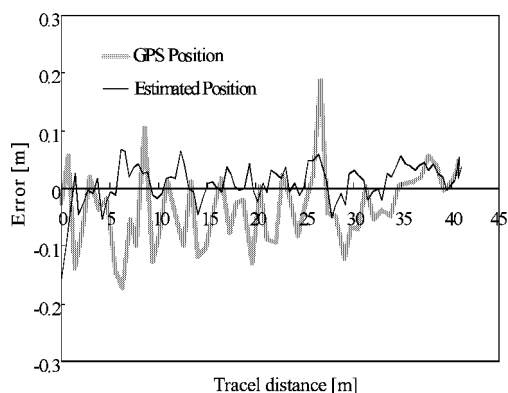


図 5.10 人工悪路における位置誤差の推移

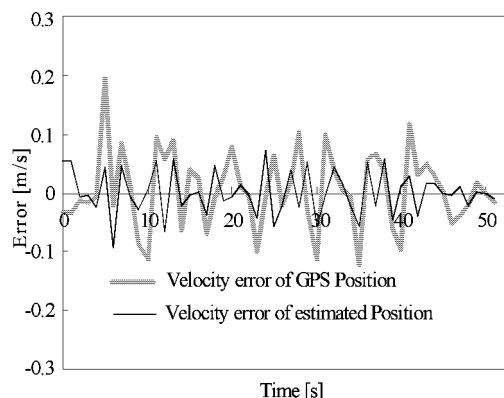


図 5.11 人工悪路における推定走行速度の誤差の推移

D. ま と め

車両の位置・方位・傾斜角の計測は農用車両の自動化やPFを実現するためには重要な要件である。第4章ではGPSをベースとしたセンシングシステムにおいて方位・位置情報の高精度化手法を確立した。しかし、傾斜補正にFOGを使用していたため高価なシステムとなった。そこで、本章では第4章の航法システムを導入した位置・方位計測に加えて傾斜角の3要素を推定する低コストな航法システムの開発を目的とした。

- 1) 振動ジャイロを3個、傾斜計を2個使用して相対方位と傾斜角を計測する姿勢角センサパッケージを試作した。縦幅150 mm, 横幅110 mm, 高さ65 mm, 重量540 gと従来の姿勢角センサ(IMU)に比べ小型・軽量・低コスト化できた。
- 2) 試作した姿勢角センサパッケージとGPSをハイブリットして絶対方位・位置・傾斜角を計測できる航法センサモジュールを構築した。振動ジャイロとGPSを使用してドリフトを推定すると同時に絶対方位を取得し、傾斜角を使用してGPSの傾斜補正を行った。また、GPSの計測周期間の位置データをデッドレコニングによって補償するシステムとした。
- 3) アスファルト平坦路面、草地斜面、人工悪路の3種類の条件で走行試験を行い、航法センサモジュールの精度を評価した結果、誤差のR.M.S.はロール角が 0.30° 、ピッチ角が 0.42° 、方位角は 0.62° 、位置が 4.4 cmとなった。機能・精度・コストの観点から判断して、開発した航法センサモジュールは位置・方位・傾斜角を観測する航法システムとしての目標仕様を十分に達成し、農用車両の自動化やPFに有効に利用できると考えられる。

VI. 総 括

21世紀を迎え世界の人口は60億人を突破した。今後、危惧されている食糧危機に備えて、世界中で食料の増産が必要不可欠な状況にあるにもかかわらず、日本の自給率は低下し続けて

いる。農業従事者の減少と高齢化、それに伴う耕地面積の減少が日本の農業の現状であり、こうした中で「農地の拡大」、「生産性の向上」を実現して、食料生産の増大を図るには、作業負担の軽減、省力化や作業効率の拡大、作業投資の軽減などが不可欠である。その解決策として農用車両の自動化や Precision Farming が挙げられ、近年盛んに研究されている。

農用車両の自動化や Precision Farming の基盤技術は、

- 1) 位置
- 2) 方位
- 3) 傾斜角 (姿勢角)

をリアルタイムに計測することにある。現在、農用車両に適用できるような、位置・方位・傾斜角を計測する航法センサは、高価なセンサに限られているため実用化の障害になっているという問題がある。そこで、本研究は「コスト」の問題を解決するために、低コストな航法センサによって位置・方位・傾斜角を計測する、農用車両の自動化や Precision Farming に適用できる安価な航法システムを構築することを最終目標とした。

まず、地磁気方位センサ (GDS) ベースのセンシングシステムによる航法システムを構築して、方位センサのみによる安価な航法システムの有効性を示した (第2章, 第3章)。さらに、GPS ベースのセンシングシステムによる航法システムを想定した、方位・位置・傾斜角の高精度化手法を考案した (第4章)。最後に、安価な航法センサによって方位・位置・傾斜角を観測する航法センサモジュールを開発し、その有効性を検討した (第5章)。

A. 地磁気方位センサの出力特性と高精度化

地磁気方位センサ (GDS) をベースとしたセンシングシステムを提案し、方位計測の高精度化手法を構築することを目的とした。また、本システムは方位センサのみで構成されるため、コストを抑えることが期待できる。さらに、使用環境の制約が少ないといった利点もあり、GPS やマシンビジョンなどが計測できない状況における補償手段としても適用することができる。

まず、GDS を使用した自動直進走行試験を実施して GDS の基本性能を調べた結果、45 m の走行に対して細かく振動した軌跡となり、目標経路からの横方向の最大誤差は 20 cm となった。これは、GDS の S/N 比の低さに起因していることが明らかとなった。そこで、GDS の S/N 比の低さを解決するために光ファイバージャイロ (FOG) を併用して精度を改善することを考えた。FOG を使用した自動直進走行試験を行って FOG の基本性能を把握した結果、絶対方位の取得法及びドリフトが問題であることが確認された。しかし、S/N 比が高いため、振動の少ない自動直進走行が可能であることがわかった。GDS と FOG のセンサフュージョン手法にカルマンフィルタを採用し、GDS の S/N 比の改善及び FOG のドリフトを補償した方位推定法を考案した。走行データを使用してカルマンフィルタのシミュレーションを実施した結果、高精度に横方向偏差、車両方位を推定できることが可能であった。さらに、カルマンフィルタを適用して自動直進走行試験を行った結果、40 m 程度の走行に対して目標経路からの誤差の R.M.S. が 3.8 cm、回帰直線に対する振れ幅が ± 5 cm 以下と振動が少ない直進性の高い走行結果が得られた。しかし、地磁気の時間・空間変動に起因して再現性が確保できない問題も生じた。

そこで、GDS を使用する上で問題となる地磁気の時間・空間変動をリアルタイム補正する手法を考案し、走行再現性の向上を図った。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 を融合して GDS の S/N 比を改善した。また、目標方位を逐次更新する可変目標方位制御を提案して、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。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精度を評価した結果、方位誤差の R.M.S. が FOG は 0.71° 、GDS が 0.26° であったのに対して、VWA は 0.08° と GDS に比べ約 70% 精度が向上した。また、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。

B. 振動ジャイロと地磁気方位センサのセンサフュージョンによるナビゲーション

地磁気方位センサ (GDS)、振動ジャイロスコップ及び静電容量型傾斜計を使用して、第2章の GDS をベースとしたセンシングシステムをさらに低コスト化した航法センサによる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、振動ジャイロスコッ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ッ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ッ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、ジャイロスコップに 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ップおよび 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。

C. GPS 利用による方位・位置情報の高精度化

農用車両の自動化や Precision Farming (PF) を実現するためには、高精度に位置・方位・傾斜角を計測する必要がある。第2章、第3章では地磁気方位センサ (GDS) をベースとした方位センサのみのセンシングシステムによって方位・位置を取得する手法を考案したが、位置の取得にデッドレコニングを使用するため誤差が積算するという問題があり、長時間使用することはできない。また、その計測位置も初期位置からの相対位置であることも問題となる。そこで、本章では GPS をベースとしたセンシングシステムを提案し、方位・位置情報の高

精度化手法を構築することを目的とした。

まず、公称精度 1 m、計測周期 1 Hz の DGPS と振動ジャイロを併用した、絶対方位の取得法及びドリフト推定法を考案した。走行データを使用して方位推定のシミュレーションを行った結果、良好にドリフト値を推定し絶対方位を計測できることがわかった。

次に、傾斜角が GPS 計測に与える影響を補正する手法を考案して、位置情報の高精度化を図った。経路に枕木を設置することによって傾斜を与えた走行データよりシミュレーションを行った結果、補正を行わなかった場合の横方向偏差は平均 17.1 cm、最大 21.3 cm であったのに対し、補正を行った場合は平均 2.1 cm、最大 12.1 cm であり、ピーク時を除けば最大 2.4 cm と傾斜による影響をほぼ除去することができた。傾斜補正を適用した場合と、傾斜補正を適用しないで生の GPS データを使用した場合の自動走行試験を行なって走行精度を比較した結果、傾斜補正を行わなかった自動走行では、最大誤差が 25 cm、誤差の R.M.S. が 10.4 cm となったのに対し、傾斜補正を行った自動走行では最大誤差が 9.6 cm、誤差の R.M.S. は 3.8 cm の R.M.S. で約 64% の精度の向上が確認された。

D. 農用車両のための航法センサモジュールの開発

車両の位置・方位・傾斜角の計測は農用車両の自動化や PF を実現するためには重要な要件である。第4章では GPS をベースとしたセンシングシステムにおいて方位・位置情報の高精度化手法を確立した。しかし、傾斜補正に FOG を使用していたため高価なシステムとなった。そこで、本章では第4章の航法システムを導入した位置・方位計測に加えて傾斜角の3要素を推定する低コストな航法システムの開発を目的とした。

まず、振動ジャイロを3個、傾斜計を2個使用して相対方位と傾斜角を計測する姿勢角センサパッケージを試作した。縦幅 150 mm、横幅 110 mm、高さ 65 mm、重量 540 g と従来の姿勢角センサ (IMU) に比べ小型・軽量・低コスト化ができた。さらに、試作した姿勢角センサパッ

ケージと GPS をハイブリットして絶対方位・位置・傾斜角を計測できる航法センサモジュールを構築した。振動ジャイロと GPS を使用してドリフトを推定すると同時に絶対方位を取得し、傾斜角を使用して GPS の傾斜補正を行った。また、GPS の計測周期間の位置データをデッドレコニングによって補償するシステムとした。

最後に、アスファルト平坦路面、草地斜面、人工悪路の 3 種類の条件で走行試験を行い、航法センサモジュールの精度を評価した結果、誤差の R.M.S. はロール角が 0.30° 、ピッチ角が 0.42° 、方位角は 0.62° 、位置が 4.4 cm となった。機能・精度・コストの観点から判断して、開発した航法センサモジュールは位置・方位・傾斜角を観測する航法システムとしての目標仕様を十分に達成し、農用車両の自動化や PF に有効に利用することができると考えられる。

量記号一覧

A	：システム行列	
a	：円形光路の半径	[m]
	：地磁気円中心の x 座標	[V]
	：車両座標系における GPS	
	アンテナの x 座標	[m]
B	：磁束密度	
B	：ゲイン行列	
b	：地磁気円中心の y 座標	[V]
b	：車両座標系における GPS	
	アンテナの y 座標	[m]
B_x	：GDS の x 出力	[V]
B_x'	：傾斜補正後の GDS の x 出力	[V]
B_y	：GDS の y 出力	[V]
B_y'	：傾斜補正後の GDS の y 出力	[V]
B_z	：GDS の z 出力	[V]
C	：観測行列	
C_{xy}	：相互相関	
c	：光速	[m/s]
d	：振動ジャイロのドリフト	[°/s]
d_t	：計測区間	[m]
e	：誤差信号	

F	：遠心力	
F_n	：物体にかかる力	
H	：磁界強度	
h	：車両座標系における GPS	
	アンテナの z 座標	[m]
h_k	：予測係数	
K	：カルマンゲイン	
K_{gyro}	：振動ジャイロのスケール	
	ファクタ	
k	：波数	
L	：光路の長さ	[m]
	：遅延器の数	
l	：前方注視距離	[m]
m	：物体の質量	[kg]
N	：光ファイバーの巻き数	
	：予測器の数	
n	：観測ノイズ	
n_{FOG}	：FOG のノイズ	
n_{GDS}	：GDS のノイズ	
n_{rate}	：旋回角速度のノイズ	
n_{speed}	：速度のノイズ	
P	：推定誤差の共分散行列	
PR_i	：疑似距離	[m]
Q	：システムノイズの共分散行列	
R	：観測ノイズの共分散行列	
R_{xy}	：相互相関係数	
r	：検出コイルと外部磁界の水	
	平分力に依存する定数	
	：車両の旋回角速度	
	：円盤の半径	[m]
S	：光路を囲む面積	[m ²]
t_{ai}	：衛星からの信号の発信時刻	[s]
t_l	：円形光路を光が左回りに 1	
	回転する時間	[s]
t_r	：円形光路を光が右回りに 1	
	回転する時間	[s]
t_{si}	：衛星からの信号の受信時刻	[s]
u	：システム入力	
u	：入力信号	
V_n	：物体の速度	[m/s]
V_{out}	：振動ジャイロの出力電圧	[V]

V_{static}	: 振動ジャイロの静止時出力 電圧	[V]	ϕ_{GPS}	: GPS から算出した方位	[°]
V_x	: 検出コイルXの誘起電圧	[V]	ϕ_{Inc}	: 傾斜計の角度	[°]
V_y	: 検出コイルYの誘起電圧	[V]	ϕ_{true}	: 真の車両方位	[°]
v	: 走行速度	[m/s]	η	: FOG 出力の正弦値	
w	: システムノイズ			: FOG のバイアスエラー	[°]
W_i	: 慣性系に関する物体の加速 度	[m/s ²]	η_{FOG}	: FOG 観測値の正弦値	
x	: 予測器入力		η_{GDS}	: GDS 観測値の正弦値	
$\mathbf{x}$	: 状態変数		λ	: 光の波長	[m]
$\mathbf{y}$	: 観測信号		μ	: 透磁率	
α	: 方位偏差の制御ゲイン			: FOG ドリフトの正弦値	
β	: 横方向偏差の制御ゲイン			: ステップサイズパラメータ	
Δd	: 計測区間で車両が進行した 距離	[m]	θ	: 外部磁界の方位	[°]
$\Delta\phi$	: 方位偏差	[°]	θ_{gyro}	: 振動ジャイロの方位	[°]
	: 光の位相差		θ_p	: 車両のピッチ角	[°]
$\Delta\phi_{estimate}$	: 推定方位偏差	[°]	θ_r	: 車両のロール角	[°]
ΔL	: 光路差	[m]	ρ_i	: 補正疑似距離	[s]
ΔT	: 計測区間	[s]	σ_{FOG}^2	: FOG の分散	
Δt	: 制御周期	[s]	σ_{GDS}^2	: GDS の分散	
	: 光が円形光路を回る時の右 回りと左回りの時間差		Ω	: 慣性空間に対しての角速度[rad/s]	
Δx	: GPS の傾斜補正量の x 成 分	[m]		: 地磁気の空間パラメータ	
Δy	: GPS の傾斜補正量の y 成 分	[m]	ω	: プラントノイズ	
Δz	: GPS の傾斜補正量の z 成 分	[m]	ω_{est}	: 角速度推定値	[°/s]
δ	: FOG ドリフト		ω_{gyro}	: 振動ジャイロの検出角速度	[°/s]
δ_{GDS}	: GDS の時間・空間変動		ω_{True}	: 真の角速度	[°/s]
$\delta\theta_{gyro}$	: 計測区間に振動ジャイロに よって算出される方位	[°]	Ψ	: 操舵角	[°]
ε	: 横方向偏差	[m]			
	: 二乗誤差				
	: 傾斜計のノイズ				
ε_{FOG}	: FOG のノイズ				
ε_{GDS}	: GDS のノイズ				
ε_i	: GPS の位置計測誤差	[m]			
ϕ_d	: 目標方位	[°]			
$\phi_{estimate}$	: 推定車両方位	[°]			
ϕ_{FOG}	: FOG の観測値	[°]			
ϕ_{GDS}	: GDS の観測値	[°]			

参考文献

- 1) 食料自給率の動向, 食糧自給率レポート平成12年度版, 6-15, 2002
- 2) 近藤 直: 農業分野におけるロボット化技術, 農業機械学会シンポジウム「次世代農業のアプローチ——注目されるロボット化技術——」講演要旨, 45-53, 1997
- 3) 近藤 直: 農業ロボットの技術動向, 自動化技術 29(1), 7-11, 1997
- 4) 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
- 5) 武田邦太郎, 宮本悦郎, 倉部喜一郎他: IT 時代の農業革命, 農政と平和研究所, 2000
- 6) 平成13年耕地面積, 農林水産統計速報 13-247(生産-103), 農林水産統計情報部, 2001 年
- 7) 平成13年農作物作付(栽培)延べ面積及

- び土地利用率, 統計情報, 農林水産統計情報部, 2002
- 8) 唐橋 需: 農業ロボットへの期待, 農機誌 57(6), 145-150, 1995
 - 9) 日本経済新聞: 1999年10月23日朝刊
 - 10) 北海道新聞: 1999年10月19日朝刊
 - 11) 原 令幸: 北海道におけるPF農業研究, 農機誌 61(4), 19-23, 1999
 - 12) 澁澤 栄: Precision Farming in Japan in the 21st Century, セミナー「大規模農業に必要なメカトロニクスとその周辺」資料, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 1-12, 1998
 - 13) Tian, L.: New Precision Farming Equipment Research in University of Illinois, セミナー「大規模農業に必要なメカトロニクスとその周辺」資料, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 13-22, 1998
 - 14) Agricultural Primer: The Precision-Farming Guide for Agriculturists, John Deere Publishing Dept., 1997
 - 15) 野口 伸: 米国穀倉地帯におけるプレシジョンアグリカルチャ, 農機誌 61(1), 12-16, 1999
 - 16) 野口 伸: マシンビジョンをベースにした精密ほ場管理, シンポジウム「日本型プレシジョンファーマーをを考える」資料, 農業機械学会, 1-8, 1998
 - 17) S. W. Searc: Engineering Challenges and Opportunities in Precision Agriculture, セミナー「大規模農業における精密農法と情報化技術」資料, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 1-13, 1999
 - 18) 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
 - 19) Keicher, R., Seufert, H.: Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe, Computers and electronics in agriculture, 25, 169-194, 2000
 - 20) Reid, J. F., Zhang, Q., Noguchi, N., Dickson, M.: Agricultural automatic guidance research in North America, Computers and electronics in agriculture 25(1-2), 155-167, 2000
 - 21) Wilson, J. N.: Guidance of agricultural vehicles-a historical perspective, Computers and electronics in agriculture 25, 3-9, 2000
 - 22) 行本 修, 松尾陽介: 耕耘ロボットの航法技術, 国際シンポジウム「大規模機械化農業に出現したLBS技術とPA」, 79-94, 1997
 - 23) Richey, C. B.: "Automatic Pilot" for farm tractors, Agricultural engineering, 78-79, 93, 1959
 - 24) Sieling, S.: Self-steering tractor ready for production, Farm mechanization, 282, 1962
 - 25) Pichon, D. J., Steinburegge, G. W.: Propagating audio-frequency magnetic field through soil, Trans. ASAE 8(2), 236-266, 1965
 - 26) Mittebach, B.: Ein Automatischen Pflug, Landtechnische Forschung 13(2), 51-52, 1963
 - 27) Hesse, H., Zabeltitj, Chr. V.: Untersuchung von optischen und elektrischen Fuelern fuer automatische Vereinzelung- und Nachfuelungssysteme, Grundlagen der Landtechnik 18(3), 107-112, 1968
 - 28) Warner, M. G. R., Harries, G. O.: An Ultrasonic Guidance System for Driverless Tractor, Journal of agricultural engineering research 17(1), 1-9, 1972
 - 29) Hesse, H.: An Automatic Impulse Controlled Implement Control System for Plant Row, Journal of agricultural engineering research 19(2), 101-109, 1974
 - 30) 池田善郎 他: コンバインの自動操向装置に関する研究, 農機誌 35(4), 368-377, 1974
 - 31) 笈田 昭, 田野信博: トラクタの自動走行, 農機誌 38(3), 438-440, 1976
 - 32) Upchurch, B. L., Tennes, B. R., Sur-

- brook, T. C.: A Microprocessor-based Steering Controller, Transactions of the ASAE 26(1), 29-32, 1983
- 33) 山下 淳: 施設園芸無人作業車, 計測と制御 28(2), 38-39, 1989
- 34) 岡本嗣男: 農業ロボット研究の現状と課題, 農機誌 58(1), 128-144, 1996
- 35) Pichon, D. J., Steinburegge, G. W.: Propagating audio-frequency magnetic field through soil, Trans. ASAE 8(2), 236-266, 1965
- 36) Widden, M. B., Blair, J. R.: A New Automatic Guidance System, Journal of agricultural engineering research 17(1), 10-21, 1972
- 37) Puckett, H. B., Hyde, G. M., Olevier, E. F., Beaty, H. H.: Automatic Control of a Forage and Concentrate Distribution Vehicle, Transactions of the ASAE 17(7), 614-619, 1974
- 38) 堀尾尚志: クラブ・ステアリング車による自動耕うんの研究(第2報), 農機誌 43(4), 523-531, 1982
- 39) 堀尾尚志: クラブ・ステアリング車による自動耕うんの研究(第1報), 農機誌 43(4), 523-531, 1982
- 40) Gilley, J. R. et al: An Experimental Center-Pivot Irrigation System for Reduced Energy Crop Production Studied, Transactions of ASAE 26(5), 1375-1379, 1385, 1983
- 41) 岡崎紘一郎・宮崎昌宏・長崎裕司・糸川信弘: 樹上走行モノレールによるカンキツ園の農作業自動化, 農機誌 58(3),
- 42) 戸崎紘一: 誘導ケーブル式果樹園無人防除ロボット, 自動化技術 29(1), 12-16, 1997
- 43) 戸崎紘一他: 誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発(第1報), 農機誌 58(6), 101-110, 1996
- 44) 戸崎紘一他: 誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発(第2報), 農機誌 59(4), 87-96, 1997
- 45) 戸崎紘一他: 誘導ケーブル式果樹無人防除機の開発(第3報), 農機誌 60(3), 97-106, 1998
- 46) Sogaard, H. T.: Evaluation of the Accuracy of a Laser Optic Position Determination System, Journal of agricultural engineering research 74, 275-280, 1999
- 47) 津村俊弘: 無人運搬車とその制御, 計測と制御 26(7), 43-38, 1987
- 48) 大島 寛, 伊藤光一郎: 無人建設機械の将来性, 建設機械 35(8), 66-72, 1999
- 49) 津村俊弘: 最近無人車の開発状況, 自動車技術 16(10), 26-29, 1984
- 50) 平松敬之, 小泉和夫: 無人搬送車, 自動車技術 41(2), 236-241, 1987
- 51) 三竿善明: 自動操向トラクタの開発(第1報), 農機誌 51(1), 21-28, 1989
- 52) 韋 学軍, 高井宗宏: 低速無人作業機の自動操向制御に関する研究(第1報), 農機誌 52(5), 19-26, 1990
- 53) 端 俊一: 一次元イメージセンサを使用した作物列センサ, 農機誌 54(1), 1992
- 54) 端 俊一: 作物畦追従制御のための作物列センサ開発, セミナー「屋外環境下のロボットにみるナビゲーション技術」資料, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 23-43, 1998
- 55) 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), 53-39, 1995
- 56) 鳥居 徹他: 画像処理による自律走行トラクタの走行制御, 第57回農業機械学会年次大会講演要旨, 401-402, 1998
- 57) 鳥居 徹: 自動走行のための作物列の画像処理に関する研究, 農業機械学会アクティ21 SAV「自動走行研究会」資料, 42-43, 1996
- 58) 生物系特定産業技術研究推進機構: ビジョンセンサと地磁気方位センサを用いた自律走行の研究, 平成2~6年度受託研究報告書, 1995
- 59) 森 英雄: 盲導犬ロボットの開発と画像処理によるナビゲーション, 農業機械学会アクティ21 SAV「自動走行研究会」資料,

- 1-15, 1996
- 60) Tillett, N. D., Hague, T., Marchant, J. A.: Autonomous Plant Scale Crop Protection, International AgEng'96 Conference on Agricultural Engineering, PAPER96A-124, 1996
- 61) Tillett, N. D., Hague, T., Marchant, J. A.: A robotic system for plant-scale husbandry, Journal of agricultural engineering research 69(), 169-178, 1998
- 62) Pinto, F. A. C., Reid, J. F., Zhang, Q., Noguchi, N.: Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal component analysis, Journal of agricultural engineering research 75, 257-264, 2000
- 63) Pinto, F. A. C., Reid, J. F.: Heading Angle and Offset Extermination using Principal Component Analysis, ASAE Paper 983113, 1998
- 64) 岡本 博, 端 俊一, 高井宗宏: 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
- 65) 岡本 博他, 端 俊一, 高井宗宏: 自動うね合わせのための作物列センサ (第2報), 農機誌 62 (2), 62-72, 2000
- 66) Okamono, H., Hamada, K., Kataoka, T., Terawaki, M., Hata, S.: Automatic Guidance System With Crop Row Sensor, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 307-316, 2002
- 67) Cho, S. I., Ki, N. H.: Autonomous speed sprayer guidance using machine vision and fuzzy logic, Transactions of the ASAE 42(4), 1137-1143, 1999
- 68) Benson, E. R., Reid, J. F., Zhang, Q.: Machine Vision Based Steering System for Agricultural Combines, 2001 ASAE Annual Meeting, Paper number 011159, 2001
- 69) H. R. Everett: Sensors for Mobile Robots, A K Peters Ltd, 35-68, 1995
- 70) Gilmour, W. D.: An automatic control system for farm tractors, Journal of Agricultural engineering research 5(4), 418-432, 1960
- 71) Grovum, M. A., Zoerb, G. C.: An automatic guidance system for farm tractors, Transactions of the ASAE, 565-573, 576, 1970
- 72) Schlottmann, K.: Ein automatisches F hrungssystem fuer Landfahrzeuge, Grundlagen der Landtechnik 23(2), 36-38, 1973
- 73) 野波和好, 小松 寛, 樋口英夫, 中尾清治, 足立憲一: 乗用田植機の走行制御に関する研究 (第1報), 農機誌 55 (4), 107-114, 1993
- 74) 野波和好, 小松 寛, 樋口英夫, 中尾清治, 足立憲一: 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
- 75) 野波和好, 小松 寛, 樋口英夫, 中尾清治: 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
- 76) 西村秀司他: 牧草収獲作業のためのトラクタの自動操縦に関する研究, 農機誌 58 (2), 31-38, 1996
- 77) 岡戸敦史: 飼料生産圃場における自律走行研究——光ファイバージャイロと超音波速度計を使用した自律走行——, 農機学会アクティ21-SAV 自律走行研究会講演要旨, 34-35, 1996
- 78) 玉城勝彦, 瀬川 敬, 渋谷幸憲, 飯嶋 渡: 傾斜装置における広幅施肥作業に向けた自動走行制御技術 (第1報), 農機誌 63 (5), 109-115, 2001
- 79) 玉城勝彦: 傾斜草地における自律走行研究——施肥作業を前提としたクローラ車両の自律走行, 農機学会アクティ21-SAV 自律走行研究会講演要旨, 36-37, 1996
- 80) 玉城勝彦: 傾斜地自律走行ロボット, 自動化技術 29 (1), 57-61, 1997
- 81) 石田三佳他: 飼料生産圃場における自律

- トラクタに関する研究, 農機誌 60 (2), 59-66, 1998
- 82) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男, 行本 修, 山本聡史: 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
- 83) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男, 行本 修, 山本聡史: 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2報), 農機誌 64 (2), 62-70, 2002
- 84) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男, 行本 修, 山本聡史: 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), 農機誌 65 (1), 54-62, 2003
- 85) Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H.: Automatic Navigation of the Agricultural Vehicle by the Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 204-211, 2002
- 86) Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao: Automatic Guidance System Based on Sensor Fusion with Geomagnetic Direction Sensor and Gyroscope, Proceedings of the 4th IFAC symposium on Intelligent autonomous vehicles, 109-114, 2001
- 87) Mizushima, A., Noguchi, N., Ishii, K., Terao: Automatic Guidance System Composed of Geomagnetic Direction Sensor and Fiber Optic Gyroscope, Proceedings of 2nd IFAC/CIGR international workshop on Bio-robotics, Information technology and intelligent control for bio production systems, 311-315, 2000
- 88) Choi, C. H., Erbach, D. C., Smith, R. J.: Navigational tractor guidance system, Transactions of the ASAE 33(3), 699-706, 1990
- 89) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口 伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第2報), 農機誌 57 (6), 61-67, 1995
- 90) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口 伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第1報), 農機誌 56 (4), 53-60, 1994
- 91) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口 伸: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第3報), 農機誌 60 (1), 51-58, 1998
- 92) 石井一暢, 寺尾日出男, 野口 伸, 木瀬道夫: 学習機能を有した自律走行車両に関する研究 (第4報), 農機誌 60 (2), 53-58, 1998
- 93) Bell, T.: Automatic tractor guidance using carrier-phase differential GPS, Computers and electronics in agriculture 25(1-2), 53-66, 2000
- 94) Elkaim, G., O'Connor, M., Bell, T., Parkinson, B.: System Identification of Farm Vehicles using Carrier Phase Differential GPS, ION GPS-96 Missouri, KC, 1996
- 95) O'Connor, M., Bell, T., Elkaim, G., Parkinson, B.: Automatic Steering of Farm Vehicles Using GPS, 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, Minnesota, 23-26, 1996
- 96) O'Connor, M., Elkaim, G., Parkinson, B.: Kinematic GPS for Closed Loop Control of Farm and Construction Vehicles, ION GPS-95, Palm Springs, CA, 12-15, 1995
- 97) Bergeijk, J., V., Goense, D., and Keesman, K., J., Dpeelman, L.: Enhancement of Global Positioning System with Dead Reckoning, International AgEng'96 Conference on Agricultural Engineering, PAPER96G-013, 1996
- 98) Bergeijk, J., V., Goense, D., and Keesman, K., J., Dpeelman, L.: Digital Filters to Integrate Global Positioning System

- and Dead Reckoning, Journal of agricultural engineering research 70, 135-143, 1998
- 99) 鳥居 毅：草刈りロボットとその航法装置, 農機学会アクティ21-SAV 自律走行研究会講演要旨, 22-27, 1996
- 100) 長坂善禎, 谷脇 憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘：自動走行田植機の開発, 農機誌 61 (6), 179-186, 1999
- 101) 長坂善禎, 谷脇 憲, 大谷隆二, 重田一人, 佐々木泰弘：ハイブリッドセンシングによる水田作業車の自動走行の研究 (第1報), 農業機械学会第56回大会講演要旨, 321-322, 1997
- 102) Nagasaka, N., Umeda, N., Kanetai, Y.: Automated Rice Transplanter with GPS and FOG, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 190-195, 2002
- 103) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 内山雅之, 射落周幸：GPS とジャイロを用いたトラクタの自律走行技術, セミナー「屋外環境下のロボットにみるナビゲーション技術」資料, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門, 11-22, 1998
- 104) 井上慶一, 大塚寛治, 杉本光穂, 村上則幸, 黎 文：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, 農機誌 61 (4), 103-113, 1999
- 105) Will, J., D., Stombaugh, T., S., Benson, E., R., Noguchi, N., Reid, and J., F.: Development of a Flexible Platform for Agricultural Automatic Guidance Research, 1998 American Society of Agricultural Engineers Meeting, Paper No.983202, 1998
- 106) 行本 修, 松尾陽介, 野口 伸, 鈴木正肚：耕うんロボットシステムの開発 (第1報), 農機誌 60 (3), 37-44, 1998
- 107) 行本 修, 松尾陽介, 野口 伸, 鈴木正肚：耕うんロボットシステムの開発 (第2報), 農機誌 60 (4), 29-36, 1998
- 108) 行本 修, 松尾陽介, 野口 伸, 鈴木正肚：耕うんロボットシステムの開発 (第3報), 農機誌 60 (5), 53-61, 1998
- 109) Noguchi, N., J. F. Reid, J. D. Will, E. R. Benson: Vehicle Automation System based on Multi-Sensor Integration, ASAE, Paper 983111, 1998
- 110) 宮本健太郎, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男：農用移動ロボット協調作業のための制御アルゴリズム (第1報), 第60回農業機械学会年次大会講演要旨, 273-274, 2000
- 111) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男：DGPS を利用した農用移動ロボットのナビゲーション, 農機誌 62 (6), 145-153, 2000
- 112) 松尾陽介, 行本 修, 入江康夫, 一杉則昭, 寺尾日出男, 芳賀泰典：耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第1報), 農機誌 63 (3), 114-121, 2001
- 113) 松尾陽介, 行本 修, 入江康夫, 一杉則昭, 寺尾日出男, 芳賀泰典：耕うんロボットの航法技術と作業性能 (第2報), 農機誌 63 (3), 122-129, 2001
- 114) Matuo, Y., Yamamoto, S., Yukumoto, O.: Development of Tilling Robot and Operation Software, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 184-189, 2002
- 115) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第1報), 農機誌 63 (5), 74-79, 2001
- 116) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第2報), 農機誌 63 (5), 80-85, 2001
- 117) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第3報), 農機誌
- 118) 木瀬道夫, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出

- 男：RTK-GPS と FOG を使用したほ場作業ロボット (第4報), 農機誌
- 119) Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H.: Development of the Autonomous Tractor with Steering Controller Applied by Optimal Control, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 367-373, 2002
- 120) Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K., Terao, H.: Enhancement of Turning Accuracy by Path Planning for Robot Tractor, Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 26-27 July Conference, Chicago, 398-404, 2002
- 121) 門田充司, 近藤 直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム (第1報), 農機誌 61 (1), 81-90, 1999
- 122) 門田充司, 近藤 直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム (第2報), 農機誌 61 (2), 91-100, 1999
- 123) 門田充司, 近藤 直: 農業用ロボットのマン・マシン協調システム (第3報), 農機誌 61 (3), 73-81, 1999
- 124) 手島 司, 行本 修, 山本聡史: 農用車両用自動直進装置の開発 (第1報) —— 目標と機器と概要, 第60回農業機械学会年次大会講演要旨, 259-260, 2001
- 125) 松尾陽介, 浜田安之, 津賀幸之助, 山本聡史, 行本 修, 後藤克典: 農用車両用自動直進装置の開発 —— 直進田植機の開発 (第1報), 第61回農業機械学会年次大会講演要旨, 309-310, 2002
- 126) 増田雄一: 自動直進装置の開発, 農機誌 64 (5), 30-31, 2002
- 127) 西脇健太郎: 西ヨーロッパにおける自律走行車両の技術動向について, 農業機械へのCAN-LBSの導入に関する研究, 13-16, 2001
- 128) Reid, J.F.: Automated and autonomous systems for agricultural production, Proceedings of the 4th IFAC symposium on Intelligent autonomous vehicles, 20-26, 2001
- 129) 行本 修: 自律走行ロボットによる圃場作業の可能性, 農業機械学会シンポジウム「未来の食糧生産を支える農業ロボット・自動化フォーラム」講演論文集, 1-20, 2002
- 130) Caruso, M. J., et al: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Sensors 15(12), 34-46, 1998
- 131) Mapps, D. J.: Magnetoresistive sensors, Sensors and Actuators A 59, 9-19, 1997
- 132) Popovic, R. S., et al: The future of magnetic sensors, Sensors and Actuators A 56, 39-55, 1996
- 133) Lenz, J. E.: A review of magnetic sensors, Proc. IEEE 78(6), 973-989, 1990
- 134) 河村史郎ほか: 自動車用ナビゲーション装置の開発, 自動車技術 39 (5), 525-531, 1985
- 135) Ojeda, L., Borenstein, J.: Experimental Results with the KVH C-100 Fluxgate Compass in Mobile Robot, Proc. of the IASTED Int. Conference Robotics and Applications 2000, 2000
- 136) 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
- 137) 伊藤久嗣, 魚田耕作: 自動車用電子コンパス, 自動車技術 37 (2), 196-200, 1983
- 138) Hoshino, M., et al: A Kalman Filter to Estimate Direction for Automotive Navigation, Proceeding of the IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 145-150, 1996
- 139) Lobo, J., et al: Inertial Navigation System for Mobile Land Vehicles, Proc. ISIE '95, 843-848, 1995
- 140) 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
- 141) 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

- 142) 坂本 修, ほか: ジャイロ活用技術入門, 工業調査会, 2002
- 143) 辻本博司, 早川義彰: 宇宙用ジャイロの展望, 計測と制御 23 (1), 117-122, 1986
- 144) 大越孝敬, ほか: 光ファイバセンサ, オーム社, 207-252, 1986
- 145) 保立和夫: 光ファイバセンサ, 日本機械学会誌 95(12), 1064-1068, 1992
- 146) 西山 清: パソコンで解くカルマンフィルタ, 丸善, 1993
- 147) Ghil, M., and P. Malanotte-Rizzoli: Data assimilation in meteorology and oceanography, *Advance in Geophysics*, 33, Academic Press, 157-157, 1991
- 148) Abidi, M. A., and R. C. Gonzalez: *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*, Academic Press, Inc., San Diego, 41, 1992
- 149) 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一: 移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロセンサの融合によるデッドレコニング・システム, 日本ロボット学会 15 (8), 1180-1187, 1997
- 150) Barshan, B., Durrant-Whyte, H. R.: An Inertial Navigation System for a Mobile Robot. *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems* 3, 2243-2248, 1993
- 151) Barshan, B., Durrant-Whyte, H. R.: Evaluation of a Solid-State Gyroscope for Robotics Application. *Trans. on Instrumentation and Measurement*. IEEE 44(1), 61-67, 1994
- 152) Barshan, B., Durrant-Whyte, H. R.: Orientation estimate for mobile robots using gyroscopic information. *Proc. of IEEE/RSJ/GI Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems*, 1867-1874, 1994
- 153) Barshan, B., Durrant-Whyte, H. R.: Inertial Navigation Systems for Mobile Robots. *Trans. on Robotics and Automation* 11(3), 328-342, 1995
- 154) Borenstein, J., Feng, L.: 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, 1996
- 155) J. S. Burdett, et al: A review of vibratory gyroscopes, *Engineering Science and Education Journal* 3(6), 249-254, 1994
- 156) 富井義郎, ほか: 超音波エレクトロニクス振動論 基礎と応用, 朝倉書店, 216-222, 1998
- 157) Mikami, N.: *Digital Signal Processing and DSP (in Japanese)*. CQ publisher, Tokyo, 93-100, 1999
- 158) Haykin, S., Takebe, T.: *Introduction to Adaptive Filters*. Gendaikougakusha Co., Tokyo, 108-111, 1987
- 159) 岡本 修: VRS 方式 RTK-GPS の測位精度評価, *GPS シンポジウム 2002 テキスト*, 157-162, 2002
- 160) Hatch, R., Sharpe, T., Galyean, P.: A Global High Accuracy Differential GPS, *GPS シンポジウム 2002 テキスト*, 57-68, 2002
- 161) Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K., Terao: Development of the Agricultural Autonomous Tractor with an RTK-GPS and a FOG, *Proceedings of the 4th IFAC symposium on Intelligent autonomous vehicles*, 103-108, 2001
- 162) Speckmann, H.: Providing measured position data for agricultural machinery, *Computers and electronics in agriculture* 25, 87-106, 2000
- 163) C. Debain, T. Chateau, M. Berducat, P. Martinet, P. Bonton: A guidance-assistance system for agricultural vehicles, *Computer and electronics in agriculture* 25, 29-51, 2000
- 164) 水島 晃, 野口 伸, 石井一暢, 寺尾日出男: 自律走行車両の GPS 位置計測に関

- わる傾斜補正, 農機誌 62 (4), 146-153, 2000
- 165) 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治: 航空力学入門, 東京大学出版会, 1-22, 1982
- 166) 太田裕文: 飛行機のダイナミクスと制御, 計測と制御 36 (7), 512-517, 1997

(受付: 2004.8.30 受理: 2004.11.19)

Summary

I. Introduction

In the 21st century, the world population exceeded over 6 billion. It is supposed that the world food production will be short supply in the near future. The increase of food production has been required in the world. However, the self-sufficiency rate of Japan keeps on decreasing because of decrease in number of farmers, decrease in farm field and utilization rate of cultivated land. Therefore, to increase the self-sufficiency rate of food, the drastic improvement of productivity is required. Automatic navigation of agricultural vehicle and the precision farming are expected as the solutions of this problem.

The required sensor elements of the agricultural vehicle automation and the precision farming are:

- 1) Position
- 2) Heading angle
- 3) Inclination angle

Currently, there is the problem that the cost of navigation sensors which are able to apply to the agricultural vehicle is too expensive to be commercialized. The objective of this study is to develop the low cost navigation sensor module which can provide the position, the heading angle and the inclinations for the agricultural vehicle.

First, the navigation system based on the geomagnetic direction sensor (GDS) was developed. This system was composed of the heading sensors such as a GDS, a fiber optical gyroscope and a vibratory gyroscope. Second, the measurement methods of the position, heading angle and inclinations by the navigation system based on the global

positioning system (GPS) were proposed. Finally, the navigation sensor unit composed of vibratory gyroscopes and inclinometers and the DGPS was developed.

II. Enhancement of Heading Accuracy of Geomagnetic Direction Sensor

The precise estimation method of the vehicle heading angle by a geomagnetic direction sensor (GDS) was proposed. The GDS is frequently used as a navigation sensor. In particular, it is suitable for an off road vehicle, because it can provide the absolute direction from north-pole. But, the low signal to noise ratio of the GDS is a problem as a navigation sensor. A fiber optical gyroscope (FOG) was utilizing to improve this low signal to noise ratio of GDS measurement. As an integration technique of the GDS and the FOG, a Kalman filter was applied in this study. 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 in the field. The developed fusion technique was able to control the vehicle automatically with higher accuracy compared to that using single navigation sensor.

Additionally, I 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 field test,

the accuracy and robustness of the guidance system were improved by utilizing the proposed sensor fusion method using the GDS and the gyroscope.

III. Automatic Navigation by Vibratory Gyroscope and Geomagnetic Direction Sensor

In this chapter, the precise estimation method of the vehicle heading by a gyroscope and a GDS was proposed. First, the noise of the GDS and the inclinometer were eliminated by the adaptive line enhancer (ALE). As the result of inclination correction of the GDS by ALE, the corrected GDS output was consistent with the actual orientation. Second, the drift error of the gyroscope was estimated by a least square method. 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 outdoor field. As the result of the automatic navigation test, it was confirmed that proposed estimation method had the ability to navigate the vehicle to the desired straight path with high accuracy.

IV. Enhancement of the Heading Angle and the Position Accuracy by Navigation System based on Global Positioning System

In this chapter, the navigation system based on the global positioning system (GPS) was proposed. The measurement methods of the position and the heading angle by the GPS, geomagnetic direction sensor and vibratory gyroscope were developed.

First, the real time compensation method of geomagnetic distortion effected to the GPS output was invented by using a GPS. At the same time, the coincidence method of the GPS and the GDS coordinate system was proposed. To evaluate the accuracy of the

developed fusion method, the computer simulation using the RTK-GPS when vehicle traveled to four directions (to north, south, east, and west) was conducted. From the result of the simulation, the maximum error of conventional method was up to 6.5° . On the other hand, the proposed method could reduce to the maximum error of 1.3° . The result of heading estimation in 90° turning navigation using the DGPS indicated that proposed method could compensate the geomagnetic distortion and difference of the GDS/GPS coordinate systems in real time.

Second, the precise heading estimation method using the GPS and the vibratory gyroscope was proposed. The proposed method utilizes the low-grade GPS whose sampling rate is 1Hz and accuracy is 1m. From the result of simulation test, heading angle obtained by GPS only was very noisy and the R.M.S. error was up to 2.36° . The heading angle obtained by the vibratory gyroscope also indicated large drift error. On the other hand, the proposed method could estimate the heading angle with 0.51° R.M.S. error and -0.74° integrated error.

Third, the correction method of the GPS position error caused by vehicle inclinations was proposed. To evaluate a performance of the developed correction method, the travel test by giving roll and pitch was conducted. The average of lateral error indicated about 17.1cm, when the vehicle traveled without inclination correction, while the average error was reduced up to about 2.1cm by introducing the inclination correction. In addition, to investigate the performance under higher velocity, the traveling test in which running speed exceeding 4.0 m/s was also carried out. Without the inclination correction, the R.M.S. error in the lateral direction of the vehicle reached 10.4cm. On the other hand, when the developed correc-

tion method was utilized, the R.M.S. error decreased to about 3.8cm. From this result, the importance of inclination measurement and correction of GPS position were certified.

V. Development of Navigation Sensor Unit for the Agricultural Vehicle

In this chapter, low cost navigation sensor unit composed of three vibratory gyroscopes and two inclinometers and the DGPS was developed. The sensor can provide the position corrected by inclination, heading angle and roll/pitch inclinations. And the measured position was interpolated by the dead reckoning, because the sampling rate of the DGPS was 1Hz.

To measure the accuracy of developed sensor unit, the field test was conducted on the flat field, gentle slope and bumpy road. On the flat field, the developed sensor unit could estimate the roll angle with 0.24° R.M.S. error, the pitch angle with 0.37° , the head-

ing angle with 0.63° and the position with 6.5cm. On the gentle slope field, it was confirmed that developed sensor unit could detect the low frequency angulations which inclined about 10° . The measurement error of the roll angle was 0.23° , pitch angle was 0.28° , heading angle was 0.64° and the position was 3.0cm. The bumpy road was consist of random inclinations about $\pm 5^\circ$ and the vehicle wobbled very roughly. The measurement error of the roll angle was 0.43° , pitch angle was 0.61° , heading angle was 0.59° and the position was 3.7cm. In spite of such rugged condition, the developed sensor unit could detect the inclination, heading angle and position at high frequency response.

Judging from a viewpoint of a function, accuracy and cost, the developed sensor unit achieved the target specification as a navigation system and it is possible to utilize to the agricultural vehicle automation and the precision farming effectively.