

学 位 論 文 題 名

農用車両のための航法センサに関する研究

学位論文内容の要旨

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、本論文は「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)。

地磁気方位センサの出力特性と高精度化(第2章)

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構築し、方位計測の高精度化手法を考案した。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。

GDS を使用する場合、S/N 比の低さが問題となる。そこで、光ファイバージャイロ(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。その結果、速度 0.63m/s、距離 40m 程度の走行に対して R.M.S.は 3.8cm、最大偏差 10cm と振動が少ない直進性の高い走行を実現することができた。

さらに、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。地磁気の時間・空間変動を有する場所では、従来の固定目標方位制御で

は、高精度かつ高い再現性で走行させるには限界があると考えられた。センサの誤差分散による重み付き平均値(VWA)によって GDS と FOG を融合し、目標方位を逐次更新する可変目標方位制御を考案した。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。

振動ジャイロスコープ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(第 3 章)

地磁気方位センサ(GDS)、振動ジャイロスコー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、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結果、R.M.S.誤差がロール角、ピッチ角、共に約 80%以上精度を改善することができた。次に、振動ジャイロスコープのドリフトを最小二乗法によって推定した結果、高精度にドリフトを推定することができた。さらに、GDS と振動ジャイロスコープの補正出力を分散重み付け平均(VWA)で融合し、ALE で生じた時間遅れを振動ジャイロスコープで補償することで、ジャイロスコープに FOG を使用した場合と同程度の精度が達成された。最後に構築した方位推定法の精度を評価するために自動直進走行試験を行った結果、本論文で考案した方位推定法によって、傾斜計と圧電振動ジャイロスコープおよび GDS を適用した場合でも精度の高い自動直進走行が可能であった。

GPS 利用による方位・位置情報の高精度化(第 4 章)

地磁気方位センサ(GDS)をベースのセンシングシステムは、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ため、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、GPS をベースとしたセンシングシステムによる、方位・位置情報の高精度化手法を構築した。

まず、GPS と GDS を併用して GDS の磁気環境をリアルタイムに推定し補正すると同時に、GDS の方位を GPS 座標系に一致させて絶対方位を取得する手法を考案した。RTK-GPS と DGPS を使用してシミュレーションを行った結果、提案した方位推定値は歪みをほとんど生じず、リアルタイムで GPS と GDS の座標系を一致させて磁気環境を補正する機能を有していることが明かとなった。

次に、公称精度 1m、計測周期 1Hz 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。

さらに、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。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、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、誤差の R.M.S.で約 64%走行精度が向上した。

農用車両のための航法センサモジュールの開発(第 5 章)

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を開発した。

振動ジャイロスコープを 3 個、静電容量型傾斜計を 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 150mm、横幅 110mm、高さ 65mm、重量 540g 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。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。

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 4.4cm 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・傾斜角を観測し、農用車両の自動化や Precision Farming に適用できる航法システムとしての目標仕様を十分に達成できた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 寺 尾 日出男

副 査 教 授 端 俊 一

副 査 助教授 野 口 伸

学 位 論 文 題 名

農用車両のための航法センサに関する研究

本論文は、図 124, 表 17, 引用文献 179, 総頁数 181 の和文論文で、他に参考論文 4 編が添えられている。

位置・方位・傾斜角をリアルタイムに精度よく計測でき、農用車両の自動化にも適用できる航法センサ類は、現在のところ、航空機向け仕様に開発された機器が流用されており、きわめて高価で、汎用ロボットシステムの実用化とその普及にとって大きな障害の一つに数えられている。

本研究は、低価格な航法センサによって農用車両の位置・方位・傾斜角を計測し、汎用ロボットの航法システムが取得するデータの精度補償と処理手法を提案し、これらを組み合わせることによって、手頃な農用車両用の航法システム開発を最終目的としたものである。得られた成果は下記に要約される。

1. 地磁気方位センサ GDS・圧電型振動ジャイロスコープ・静電容量型傾斜計のセンサ融合技術の開発

1) 地磁気方位センサ (GDS) ベースのセンシングシステムは、方位センサのみで構成されるので価格を抑えられる、使用環境に制約されない利点のある反面、地磁気の時間・空間変動をリアルタイムに補正する必要がある。従来の固定目標方位制御からセンサの誤差分散による重み付け平均値によって GDS と FOG の出力データを融合し、目標方位を逐次更新する可変目標制御法を考案した。その結果は GDS 単独走行に比べ走行精度、再現性の改善が見られることを明らかにした。

2) 方位推定法として傾斜計出力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結果、ロール角、ピッチ角共に rms 誤差精度が約 80%以上改善されたこと、振動ジャイロスコープのドリフトを最小二乗法によって推定した結果、高精度にドリフトを予測可能であること、また GDS と振動ジャイロスコープの補正出力を分散重み付け平均 (VWA) で融合し、ALE で生じた時間遅れを振動ジャイロスコープで補償することで、上述 1) と同程度の精度が達成できること、この方位推定法によって、傾斜計と圧電振動ジャイロスコープおよび GDS を適用した場合でも精度の高い自動直進走行が期待できること、などを明らかにした。

2. GPS ベースによる方位・位置情報の高度センシング技術の開発

1) GDS ベースのセンシングシステムは、位置の取得にデッドレコニングを使用するので誤差が積算するため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であることから、GPS と GDS を併用して GDS の磁気環境をリアルタイムに推定し補正すると同時に、GDS の方位を GPS 座標系に一致させて絶対方位を取得する手法を考案した。RTK-GPS と DGPS を使用してシミュレーションを行った結果、提案した方位推定値にはバイアスエラーもなく、実時間で GPS と GDS の座標系を一致させて磁気環境を補正する機能のあることが明らかとなった。

2) 公称精度 1m, 計測周期 1Hz 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、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、逐次ドリフト値を推定し絶対方位を計測できた。さらに、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。傾斜地走行データのシミュレーション結果からは、その影響をほぼ完全に除去することができた。GPS を使用した自動走行試験結果からは、傾斜補正を行うことで誤差精度は rms で約 64% 走行性能が向上した、と述べている。

3. 農用車両のための航法センサモジュールの開発

振動ジャイロスコップを 3 個、静電容量型傾斜計を 2 個使用して農用車両の相対方位と傾斜角を計測する姿勢角センサパッケージ（縦幅 150mm, 横幅 110mm, 高さ 65mm, 質量 540g）を試作し、これと GPS を併用して絶対方位・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 出力からドリフト量を推定すると同時に絶対方位を取得し、GPS の傾斜補正を行い、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機能も内蔵した。アスファルト平坦路面・傾斜草地路面・人工悪路面と 3 種類の走行条件下での試験結果からは、航法センサモジュールの誤差精度は rms 値でロール角 0.30° , ピッチ角 0.42° , 方位角 0.62° , 位置 4.4cm, これらの値は当初の目標仕様を十分に達成できた、と述べている。

以上より、「農用車両のための航法センサに関する研究」は、農用ロボット車両の普及への契機となる成果であると農業機械学会から高く評価されている。よって審査員一同は、水島 晃が博士（農学）の学位を受けるのに十分な資格があるものと認めた。