

Development of Electronic Utility Robot Vehicle

(電動汎用車両のロボット化に関する研究)

学位論文内容の要旨

I Introduction

The agronomic researchers are finding solutions to address the problems of the severe labor shortage in agriculture, the ever-growing population, the aging farmers especially in Japan and in the USA, the agricultural production cost, and the declining number of skilled workforce. One way to solve these problems is by adopting key technologies of precision agriculture such as GPS and GIS. Precision agriculture or precision farming is an advanced bio-production system based on information technology and robotic technology. In this research, robotic technology was adopted to develop an electronic utility robot vehicle which is one of the applications of precision agriculture. The robotic technology uses new technologies such as RTK-GPS (Real-time kinematic global positioning system), laser scanner, 3-D (three-dimensional) camera, GNSS (Global navigation satellite system), gyroscopes, an omni-directional camera, etc. in guiding the robot vehicle in an autonomous navigation. The research dealt with the development of an ECU (Electronic control unit), a steering system, and a speed controller which were necessary to modify the electronic vehicle into an electronic robot vehicle. The electronic robot vehicle was tested in an open-field and orchard applications. An open-field application used GPS signal in an autonomous navigation. On the other hand, an orchard application used a laser scanner as a navigation sensor where the GPS signal is not available.

II Literature review

Numerous related researches were reviewed on the application of autonomous vehicles in agriculture. Most of the researches about vehicle automation in an open-field used GPS fused with gyroscope or an IMU (Inertial measurement unit) and for an orchard application used the laser scanner and CCD (Charge-coupled device) cameras as navigation sensors. There were also researches studied about the autonomous vehicle application in master-slave robot vehicles, multiple-robot combine harvesters, and greenhouse robot vehicles. Recent studies showed that the research areas in the autonomous machine systems and robot vehicles for bio-production science have been extending greatly especially the advances of the intelligence and information technologies. This is due to the advent of the GPS application in precision agriculture that makes the autonomous vehicle development possible.

III Research platform, navigation sensors, and materials

The platform used in this research was an Electric Utility Vehicle (E-Gator, Deere and Co.). The vehicle is electronically operated using 48-VDC composed of 8-batteries with 6-volt each. It has dimensions (L x W x H) of 2.66, 1.52, 1.13 m, respectively with a weight of 634 kgs including batteries

and without any modifications. The navigation sensors used for an open field application to follow a predetermined-path were RTK-GPS, IMU, and GPS compass. And, to recognize the tree rows as straight-line in an orchard application, a 2-D (two-dimensional) laser scanner was used as the navigation sensor. A rotary encoder was used to control the motor of the electronic robot vehicle during the autonomous navigation. And, for safety purpose a wireless telecom switch was used for emergency stop.

IV Hardware development

In this research, there were three (3) hardwares that were developed needed to modify the electronic utility vehicle into a robot vehicle. (1) An ECU (Electronic control unit) was developed to control the basic functions of the electronic robot vehicle during the autonomous navigation such as movement (forward, backward, and neutral), speed, steering, and emergency stop (manual or remote switch). (2) An automatic steering system was developed to implement the command coming from the steering controller. Steering controller is the control system that converts a control signal from the steering feedback sensor to an appropriate mechanical adjustment in the steering angle. (3) And, a speed controller was developed to control the speed of the vehicle. The speed controller was necessary to include in the vehicle model to control the vehicle in down or up slopes in terrain or ramps.

V Autonomous navigation systems

Before the actual autonomous navigation of the electronic utility robot vehicle, autonomous navigation systems were developed for open-field and orchard applications. Lateral and heading errors were the two-important parameters needed to calculate the steering angle in guiding the vehicle in an autonomous navigation. In an open-field application, there were two types of control methods used to obtain these parameters; (1) RTK-GPS and IMU sensor fusion, and (2) RTK-GPS and GPS compass sensor integration. LSM (Least squared method) was adopted in RTK-GPS and IMU sensor fusion to get the lateral and heading errors. For RTK-GPS and GPS compass sensor integration, RTK-GPS was used to obtain the lateral error and a GPS compass directly output the heading error without any computation. In an orchard application, 2-D laser scanner was used as the navigation sensor and Hough transform algorithm was adopted to recognize the tree rows as straight line. Experiment runs were conducted using these two-navigation systems both in an open-field and an orchard application in different speeds.

VI Conclusion

These developed hardwares were tested by conducting experiments in an autonomous navigation in an open-field and an orchard application. An RTK-GPS, an IMU, and a GPS compass were used as navigation sensors in an open-field autonomous navigation, and 2-D laser scanner was used as navigation in an orchard application. In an open-field application, the lateral and heading RMS errors using RTK-GPS and IMU sensor fusion were 0.021 m and 0.26 deg, respectively with a speed of 1.07 m/s, and the lateral and heading RMS errors using RTK-GPS and a GPS compass sensor integration were 0.032 m and 1.53 deg, respectively with a speed of 1.05 m/s. In an orchard application, the lateral and heading RMS errors using laser scanner as navigation sensor were 0.135 m and 1.7 deg, respectively with a speed of 0.86 m/s. The lateral and heading error evaluated accuracies were enough to navigate the electronic robot vehicle in open-field and orchard applications. Also, different autonomous navigation runs were conducted in different speeds in an open-field application. This method determined the maximum speed that the vehicle could run in an autonomous navigation with acceptable evaluated accuracy. The RTK-GPS and IMU sensor fusion, and RTK-GPS and GPS compass sensor integration maximum speeds were 1.76 m/s and 1.5 m/s, respectively.

I Introduction

日本農業において労働力不足は深刻である。また日本に限らず先進諸国では農業就業者の高齢化が進行している。さらに、生産コストの増加と熟練作業者の減少も今日の農業の抱える課題である。このような背景から先進諸国の農業には自動化・ロボット化を含めた超省力技術の開発が、農業を持続的に発展させる上で必須である。この問題解決に近年欧米で盛んに研究が進められている精密農業技術の適用が考えられる。精密農業は情報技術やロボット技術を活用した先進農業技術である。ロボット技術である RTK-GPS (Real-time kinematic global positioning system)、レーザースキャナ、3D ビジョンセンサ、GNSS (Global navigation satellite system)、ジャイロ스코プなどは自律走行車両の航法センサとして有望である。本研究は電動汎用車両をロボット化するために必要な ECU (Electronic control unit)、操舵制御系、速度制御系などを開発した。また、GPS を航法センサとして使用できる畑地・草地などオープンフィールド用とともに、GPS は使用できないものの汎用車両が頻繁に用いられる果樹園作業用の 2 種類の自律走行システムを開発した。

II Literature review

農業用自律走行車両の研究はすでに数多く行われているが、その既往の研究について文献調査を行った。畑地や水田などで使用される自律走行車両に関する研究のほとんどが GPS とジャイロ스코プ、IMU (Inertial measurement unit) を航法センサとして使用している。他方、果樹園用では 2 次元レーザースキャナや CCD カメラが航法センサとして使用される。また、近年は複数の車両のロボット化についての研究も行われている。マスター・スレーブシステムや複数コンパインの群制御、グリーンハウス用ロボットシステムなどが研究されている。さらに、食料生産を行う上で有用な農作業知を有した自律ロボットの研究も始まったところである。とくに知の創出方法や実装方法について情報科学を適用した知能化システムに関する研究が盛んになりつつある。少なくとも精密農業の普及に伴い GPS 利用が可能になったおかげで、自律走行車両の実用化が目前となった。

III Research platform, navigation sensors, and materials

本研究で供試したプラットフォームはジョンディア社製の電動汎用車両である。車両は 6 V バッテリーを 8 個使用した 48V-DC で駆動される。大きさは全長 2.66m、幅 1.52m、高さ 1.13m でバッテリー搭載時の質量は 634kg である。ナビゲーションセンサは畑地・草地などオープンフィールドで既定の経路を走行させるために、RTK-GPS、IMU、GPS コンパスを使用した。そして、果樹園の樹間を自律的に走行させるために、2 次元レーザースキャナをナビゲーションセンサとして採用した。レーザースキャナによって樹列の認識を行った。また、ロータリエンコーダを車輪に装備して車速を制御できるように工夫した。さらに、安全対策として装備した無線スイッチを用いてロボットを緊急停止させることもできる。

IV Hardware development

本研究では電動汎用車両をロボット化するために 3 種類のハードウェアを試作した。(1) 基本的なロボット機能を付与するための ECU を開発した。ECU は前進・後進・停止などの動作制御、

操舵、緊急停止の機能を有する。(2) ECU からの信号で操舵できる制御系を開発した。操舵制御にはフィードバック制御系を構成した。また、操舵リンク系の調整と実舵角計測キャリブレーションを行った。(3) 車速制御のための速度制御系を開発した。電動モータでは傾斜地の上り、下りなど走行抵抗の変動に応じてモータへの電流量を制御しなければ一定速度で走行できない。そのために、車輪の回転速度をフィードバックすることで定値制御を実現した。

V Autonomous navigation systems

電動汎用車両のロボット化のために、畑地・草地などオープンフィールド用システムと果樹園作業用システムの2種類のナビゲーションシステムを開発した。車両を自律走行させるためには車両の横方向偏差と方位偏差の観測が不可欠で、その2観測値から操舵角を計算する必要がある。オープンフィールド用は横方向偏差と方位偏差の観測のために2種類のセンシングシステムを採用した。(1) RTK-GPS+IMU、(2) RTK-GPS+GPS コンパスである。(1)の RTK-GPS+IMU のセンサフュージョンでは横方向偏差と方位偏差を取得するために、LSM (Least squared method ; 最小自乗法)を採用した。また、(2) RTK-GPS+GPS コンパスでは、GPS から位置、GPS コンパスから車両方位が直接取得できる。したがって、容易に横方向偏差と方位偏差が計算される。果樹園作業用システムではレーザースキャナを航法センサとして採用した。ハフ変換を樹列検出に適用した。本法はロバストに樹列を直線認識できる。

VI Conclusion

開発したオープンフィールド用システムと果樹園作業用システムについて実際に走行試験を行った。いずれのシステムにおいても取得された横方向偏差と方位偏差の精度で、電動汎用車両を自律走行させることができた。また、異なる走行速度で試験を行い、適用可能な最高速度も走行精度から決定した。オープンフィールド用システムでは、(1) RTK-GPS+IMU のシステムの場合、走行速度 1.07m/s のもと横方向偏差 0.02m、方位偏差 0.26° の RMS 誤差で走行させることができた。また、(2) RTK-GPS+GPS コンパスの場合、走行速度 1.05m/s のもと横方向偏差 0.03m、方位偏差 1.53° の誤差で走行させた。果樹園作業用システムの場合、レーザースキャナを使用して走行速度 0.86m/s のもと横方向偏差 0.13m、方位偏差 1.7° の RMS 誤差で走行させた。これらの走行精度から開発した電動汎用ロボットは、畑地・草地などオープンフィールドと果樹園の両環境において使用できると判断された。

学位論文審査の要旨

主査	教授	野口	伸
副査	教授	近江谷	和彦
副査	准教授	石井	一暢
副査	准教授	海津	裕

学位論文題名

Development of Electronic Utility Robot Vehicle

(電動汎用車両のロボット化に関する研究)

本論文は、全6章からなる総頁数 152 ページの英文論文である。論文には図 92, 表 14, 引用文献 92 が含まれ、別に参考論文7編が添えられている。

日本農業において労働力不足は深刻である。また日本に限らず先進諸国では農業就業者の高齢化が進行している。さらに、生産コストの増加と熟練作業者の減少も今日の農業の抱える課題である。この問題解決に近年欧米で盛んに研究が進められている精密農業技術の適用が考えられる。精密農業は情報技術やロボット技術を活用した先進農業技術である。ロボット技術である RTK-GPS (Real-time kinematic global positioning system), レーザースキャナ, 3D ビジョンセンサ, ジャイロスコープなどは自律走行車両の航法センサとして有望である。本研究は電動汎用車両をロボット化するために必要な ECU (Electronic control unit), 操舵制御系, 速度制御系などを開発した。また, GPS を航法センサとして使用できる畑地・草地などオープンフィールド用とともに, GPS は使用できないものの汎用車両が頻繁に用いられる果樹園作業用の2種類の自律走行システムを開発した。

供試したプラットフォームはジョンディア社製の電動汎用車両である。車両は6Vバッテリーを8個使用した48V-DCで駆動される。大きさは全長2.66m, 幅1.52m, 高さ1.13mでバッテリー搭載時の質量は634kgである。ナビゲーションセンサは畑地・草地などオープンフィールドで既定の経路を走行させるために, RTK-GPS, IMU, GPS コンパスを使用した。そして, 果樹園の樹間を自律的に走行させるために, 2次元レーザースキャナをナビゲーションセンサとして採用した。レーザースキャナによって樹列の認識を行った。また, ロータリエンコーダを車輪に装備して車速を制御できるように工夫した。さらに, 安全対策として装備した無線スイッチを用いてロボットを緊急停止させることもできる。

本研究では電動汎用車両をロボット化するために3種類のハードウェアを試作した。(1) 基本的なロボット機能を付与するための ECU を開発した。ECU は前進・後進・停止などの動作制御, 操舵, 緊急停止の機能を有する。(2) ECU からの信号で操舵できる制御系を開発した。操舵制御にはフィードバック制御系を構成した。また, 操舵リンク系の調整と実舵角

計測キャリブレーションを行った。(3) 車速制御のための速度制御系を開発した。電動モータでは傾斜地の上り、下りなど走行抵抗の変動に応じてモータへの電流量を制御しなければ一定速度で走行できない。そのために、車輪の回転速度をフィードバックすることで定値制御を実現した。

電動汎用車両のロボット化のために、畑地・草地などオープンフィールド用システムと果樹園作業用システムの2種類のナビゲーションシステムを開発した。車両を自律走行させるためには車両の横方向偏差と方位偏差の観測が不可欠で、その2観測値から操舵角を計算する必要がある。オープンフィールド用は横方向偏差と方位偏差の観測のために2種類のセンシングシステムを採用した。(1) RTK-GPS+IMU, (2) RTK-GPS+GPS コンパスである。(1)の RTK-GPS+IMU のセンサフュージョンでは横方向偏差と方位偏差を取得するために、LSM (Least squared method ; 最小自乗法)を採用した。また、(2) RTK-GPS+GPS コンパスでは、GPS から位置、GPS コンパスから車両方位が直接取得できる。したがって、容易に横方向偏差と方位偏差が計算される。果樹園作業用システムではレーザースキャナを航法センサとして採用した。ハフ変換を樹列検出に適用した。本法はロボストに樹列を直線認識できる。

開発したオープンフィールド用システムと果樹園作業用システムについて実際に走行試験を行った。いずれのシステムにおいても取得された横方向偏差と方位偏差の精度で、電動汎用車両を自律走行させることができた。また、異なる走行速度で試験を行い、適用可能な最高速度も走行精度から決定した。オープンフィールド用システムでは、(1) RTK-GPS+IMU のシステムの場合、走行速度 1.07m/s のもと横方向偏差 0.02m, 方位偏差 0.26° の RMS 誤差で走行させることができた。また、(2) RTK-GPS+GPS コンパスの場合、走行速度 1.05m/s のもと横方向偏差 0.03m, 方位偏差 1.53° の誤差で走行させた。果樹園作業用システムの場合、レーザースキャナを使用して走行速度 0.86m/s のもと横方向偏差 0.13m, 方位偏差 1.7° の RMS 誤差で走行させた。これらの走行精度から開発した電動汎用ロボットは、畑地・草地などのオープンフィールドと果樹園の両環境において使用できると判断された。

以上のように本研究は環境負荷が小さい電動車両に着目して、ロボット作業を可能にするハードウェア・ソフトウェアを開発・実装し、その有効性を実証した。先進諸国、特にわが国の食料生産の持続性は極めて危機的状況にあり、ロボットを含めた超省力技術の開発が、農業を持続的に発展させる上で必須である。省力効果が期待できる農業ロボットに関する研究はすでに数多く行われているが、トラクタ・コンバイン・田植機が多く果樹園などで使用される汎用車両について研究された例は少なく、この点からも本研究には高い学術的価値、オリジナリティが存在する。よって審査員一同は、Oscar Cabanero Barawid Jr. が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。