

学位論文題名

Development of in-field transportation robot vehicle using multiple sensors

（マルチセンサを使用した農用運搬ロボットに関する研究）

学位論文内容の要旨

I Introduction

Precision agriculture (PA) has been used for solving various problems for agriculture including the expanding global population, shortage and aging of the workforce involved in agricultural production, decreasing number of skilled farmers, and deteriorating environment. As an important branch of PA, agricultural robotics allows realization of great improvement in productivity, labor saving, intelligent operations and environment-friendly farming based on modern technologies including GPS, GIS, expert systems and computer science. The objective of this research is to find a low-cost but effective solution to in-field autonomous transportation of agricultural materials and necessities based on technologies in agricultural robotics. The research platform was an electrical vehicle equipped with an automatic steering system, a speed control system and a manipulating unit instead of its manually operated mechanisms. By using a real-time kinematics GPS (RTK-GPS), an inertial measurement unit (IMU) and a 3D camera, a map-based and target-following autonomous transportation robot vehicle was developed. Field tests showed that the completed transportation robot vehicle was capable of performing transportation tasks along pre-planned paths or following the target with a high level of accuracy.

II Literature review

Agricultural robot vehicles have attracted the attention of researchers all over the world. In some studies, an RTK-GPS, an IMU or a combination of both was used for global autonomous navigation in an open field. A laser scanner, a CCD camera or a 3D camera was also used in some studies to detect the surrounding environment for local guidance in an open field or in an orchard. Other studies focused on multi-robot systems that incorporate several robot vehicles working collaboratively or independently. Recently, many studies revealed that comprehensive analysis of information obtained through integration of an RTK-GPS and other sensors, such as soil sensor, yield sensor and machine vision, were done by researchers to generate prescriptions of agricultural inputs such as fertilizer and pesticide.

III Research platform and materials

An electrical vehicle was used as the research platform that features electronic control and operation, a 48 VDC power supply by eight 6-volt batteries, small dimensions of 2.66 (L) × 1.52 (W) × 1.33 (H) m, a payload of 4 kN and a towing capacity of 2.7 kN. For vehicle automation, ECU components and

sensors including a potentiometer and speed encoder were used to develop automatically operating systems. Navigation sensors including an RTK-GPS, IMU and 3D camera were integrated into the vehicle system for development of an autonomous transportation robot vehicle. The 3D camera was also utilized to help the robot vehicle in avoiding collisions during map-based navigation.

IV Vehicle automation

Having the electrical vehicle as the research platform, it was necessary to modify it into an automatically operated vehicle by installing instead of the manually operated mechanisms three sub-systems including (1) an automatic steering system that realizes a desired steering angle through a potentiometer, a steering mechanism and motor and a PID controller, (2) a speed control system that keeps the robot vehicle running at a constant speed even on upslopes or downslopes, and (3) an automatic manipulating unit that switches the robot vehicle between reverse, forward or stop by controlling corresponding combinations of some circuits. Each sub-system had its own electric control unit (ECU) that could communicate with other ECUs through a controller area network (CAN). The vehicle computer, utilized for data and image processing, was also integrated as a node of the CAN.

V Autonomous transportation systems

The map-based transportation system utilized the RTK-GPS and the IMU to guide the robot vehicle along pre-determined paths to transport agricultural materials and necessities to a destination in an open field. In this system, a fusion algorithm was used to calculate the actual position and absolute heading direction of the robot vehicle. A map navigation algorithm was used to calculate both lateral and heading errors, based on which a steering controller was designed to determine the appropriate steering angle. The target-following transportation system performed transportation tasks by following a target person or vehicle with the 3D camera as its single navigation sensor. With a pan-tilt control unit, the 3D camera obtained an extended field of view, up to 90 degrees for both pan and tilt directions. Based on a pursuit strategy, the steering angle was calculated so that the robot vehicle could adjust its heading direction quickly enough to keep the target at its center line. A PID controller was used to keep spacing from the target by commanding the robot vehicle to run at an appropriate speed.

VI Conclusions

An autonomous navigation robot vehicle was developed by using multiple navigation sensors. An RTK-GPS and IMU were used for a map-based transportation system, while a 3D camera was used in a target-following transportation system. Field experiments were conducted to validate the performance of the multi-sensor autonomous transportation robot vehicle. In map-based autonomous navigation, the lateral and heading errors were less than 5 cm and 4 degrees, respectively, in terms of straight lines at an average speed of 1.5 m/s. In following a person as a target moving almost along a straight line at a speed of 1.12 m/s, the spacing and deflection angle had RMS errors of 1.0 m and 1.33 degrees, respectively. To verify the performance of the obstacle detection system, we let the field robot run autonomously when a person walked into its paths. Results showed that the robot vehicle avoided the obstacle by slowing down or stopping when the person was sensed as an obstacle.

学位論文審査の要旨

主査	教授	野口	伸
副査	教授	柴田	洋一
副査	准教授	石井	一暢
副査	准教授	岡本	博史

学位論文題名

Development of in-field transportation robot vehicle using multiple sensors

(マルチセンサを使用した農用運搬ロボットに関する研究)

本論文は、全7章からなる総頁数 123 ページの英文論文である。論文には図 77、表 11、引用文献 61 が含まれ、別に参考論文 4 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高度利用した先進農業技術である。RTK-GPS (Real-time kinematic global positioning system)、レーザスキャナ、3D ビジョンセンサ、ジャイロ스코ープなどはロボットの航法センサとして有望である。本研究は農用運搬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、速度制御系などを構築し、RTK-GPS、IMU (Inertial measurement unit)、3D ビジョンセンサなどを利用した運搬ロボットを開発することを目的とした。本研究ではナビゲーションマップに基づいて任意経路走行ができる「自律運搬機能」と人間など移動体を自動追従できる「ターゲット追従機能」を開発した。特に人間を自動追従する「ターゲット追従機能」は人間が資材・収穫物をハンドリングし、その運搬をロボットが行うといった人間とロボットの協調作業を可能にするシステムである。

本研究では電動運搬車両をロボット車両のプラットフォームとした。供試車両は8つの6V バッテリ、計 48VDC によって駆動し、全長 2.66m、全幅 1.52m、全高 1.33m、最大積載量 4kN、最大けん引力 2.7kN である。本機には制御用 ECU、ポテンシオメータ、車輪回転計測用ロータリエンコーダなどを組み込み、さらに RTK-GPS、IMU、3D ビジョンセンサなどを装備した。RTK-GPS、IMU は航法センサとして、3D ビジョンセンサはターゲット追従と障害物検出のために採用した。

まず、本研究のプラットフォームである電動運搬車両をロボット化するために不可欠な3種類の下位階層制御システムを構築した。(1)ポテンシオメーター操舵リンク機構

ー電動モーターによる自動操舵機能、(2)傾斜走路でも一定速度で走行できる速度制御機能、(3)前進－後進－停止を電氣的に切り替えられるマニピレーション機能、以上3サブシステムは ECU によって機能化されており、各制御システム間は CAN(Control Area Network)によって通信することができる。さらに車両 PC は CAN のノードとして統合化されており、ロボットの意思決定を司るように機能設計した。

「自律運搬機能」は、ロボットが目標地点まで肥料・種子などの資材を運搬することを想定し、予め設計された経路を RTK-GPS と IMU を航法センサとして自律走行させることを可能にする。走行システムにはロボットの位置と方位を逐次誤差を抑えながら計算するセンサフュージョンのアルゴリズムを搭載している。またロボットの操舵角決定には横方向偏差および方位偏差から操舵角を算出するフィードバック制御系を構成した。

「ターゲット追従機能」は 3D ビジョンセンサを用いて、ターゲットとなる人間を追従することを可能にする。3D ビジョンセンサはパン方向、チルト方向に姿勢制御できるパン・チルトユニットを介して装備することでパン方向、チルト方向とも 90° まで検出範囲を拡大させた。「ターゲット追従機能」の制御アルゴリズムでは、まずターゲットの大きさ、テクスチャー情報に基づいて追従対象を認識させているため、システム外乱となるターゲット以外の人間などの障害物があっても誤認することがないように工夫している。ターゲットが車両進行方向中心に位置するよう操舵角を決定して制御する。さらにターゲットまでの距離は一定距離を維持するよう車両速度をフィードバック制御した。これらの計測・制御アルゴリズムの性能を評価するために北海道大学北方生物圏フィールド科学センター生物生産研究農場の試験圃場において試験を行った。

「自律運搬機能」であるマップベース自律走行では直線経路を約 1.5 m/s で走行し、横方向偏差および方位偏差はそれぞれ 5cm 以下および 4° 以下の高い走行精度を得た。他方、「ターゲット追従機能」については 1.1 m/s で移動する人間をターゲットとした追従試験ではターゲットと車両間の距離および角度の RMS 誤差は 1.0m と 1.3° であった。また、ターゲット以外の人間の存在に対しても誤認しないロバストな追従システムであることを実験によって確認した。障害物検知と回避動作についてもその有効性を試験した。人間を障害物として検知した際に、ロボットは速度を落とす、または停止するといった方法で障害物との衝突を回避することができた。

以上のように本研究は運搬車両のロボット化を可能にするハードウェア・ソフトウェアを開発した。農用ロボット車両は世界中で盛んに研究されているが、人間との協調を念頭に置いた運搬ロボットは国際的にもユニークであり、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、印 祥が博士（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。