

Development of Autonomous Agricultural Vehicle using Omnidirectional Camera as Navigation Sensor

(全方位カメラを航法センサとした農用自律走行車両の開発)

学位論文内容の要旨

1. Introduction:

The dissertation presents a novel methodology for vision-based robot navigation in meadow farm to evaluate the applicability of a previously reported work schedule research (Noguchi and Terao, 1995). The proposed algorithm in the research was able to create a work schedule for three vehicle robots to gather the hay bales in the meadow grass land. It was achieved by optimizing the energy consumption or the working time. The machine vision system was decided to perform the mentioned research in the real application. This chapter reviews the fundamentals of conventional 3-D vision, beginning with the mechanics of basic image projection and formation of features, and followed by the inference of 3-D information from these features. The chapter proceeds with background of research, a presentation of the thesis and an overview of its core concepts, and concludes with an outline of the dissertation.

2. Experimental platform and sensors

This chapter presents information about equipments used in the research. The vision system used in the research was an omnidirectional camera, which gives a high resolution spherical panoramic image. The ability of having 360° field of view made it a very promising alternative to be used not only as a sensor for obstacle detection and subsequently enabled obstacle avoidance, but also as a sensor for heading angle detection. The most part of this chapter was allocated about the unidirectional camera. It was continued about how the camera acquisite the image and compress the image. The brief information was be presented about the sensors coordinates, the camera main coordinate, its calibration and the technical specification of the camera as well. However, the other equipments utilized in evaluating the results of algorithms, e.g. absolute heading angle of a vehicle robot, were also introduced here and give their technical characteristics.

3. Visual obstacle detection

It was hoped that the vehicle robot would be able to detect the hay bales in meadow. This was achieved by utilizing the image processing techniques, such as the automatic thresholding method and the segmentation of blue and green channel to eliminate sky part and most of ground in the images. The enclosed rectangle's height, width and area of contours were also used to remove noises from the image and separate the hay bales from the background. The

omnidirectional camera that has the ability to change the image exposure would allow the hay bale detecting algorithm to be used in both sunny and cloudy weather. The algorithm detected approximately 90% of hay bales within the 40m of maximum detection distance. Furthermore, the image processing required about 700 milliseconds per image, which is adequately fast for machine vision based navigation.

4. Orientation recovery

The absolute orientation of the vehicle robot should be identified to enable navigation on desired path. The omnidirectional camera has an edge in this area as well because it provides a 360° field of view, thus the scenes will always be remained in the view. The cross correlation method was developed and applied on the skylines segmented from sequence images to determine the rotation angle of robot while navigating. Then, the absolute heading angle of robot was obtained by using the estimated rotation angle and assistance of RTK-GPS. The RTK-GPS data would be used in the beginning of navigation to give the absolute initial angle relative to north. After that, robot would be able to estimate its absolute heading angle with three proposed methods, continuously changing the reference image (RC), fixing the reference image (RF) and their combination (RCF). Experiments showed that the RC method gave the best result.

5. Obstacle position recovery

The vehicle robot should be able to estimate the orientation and distance of hay bales relative to its coordinate so that the mapping of their location in the world coordinate system would be made possible. The orientation of hay bales was found simply by the definition of spherical panorama image. However, three methods were proposed for finding the distance to hay bales. The threshold of hay bales' area and height were two simple and effective ways to estimate the distance to hay bales. The direction of sunlight and appearing shadow on the hay bales could affect the accuracy; however this problem could be alleviated based on a local discriminant analysis of hue channel image in the region of interest. The stereo vision system was another option in estimating the distance. The stereo vision based approaches have the advantage of directly estimating the object's distance without using the characteristics of hay bales. The estimation of the hay bales distance from the camera generated a root mean squares error (RMSE) of 1.07m. Taking into consideration relating the size of hay bales and the safety turning distance for accident prevention, it is a satisfactory result.

6. Visual based navigation

To verify the performance of the robot navigation algorithm developed based on the omnidirectional camera, a computer simulation was conducted. The simulation program has four parts. First, a vehicle dynamics model was prepared to simulate the vehicle motion. Second, the sensor model was provided to add the error of position and direction by the sensors and methods. Third, a controller model was utilized in order to make vehicle follows the target path and control the speed of vehicle as well. And finally, an obstacle avoidance part was included to escape from collision. If there was any hay bale on the path, a new path would be created to turn around the obstacle. The best result was achieved using the RC method that the RSME of lateral and heading error was 0.06 m and 3.9° respectively. The hay bale avoidance part also worked well and vehicle turn around it with 4.5m distance. Moreover, experiments showed that the proposed methods could be used with low cost GPS as well.

7. Conclusion

A machine vision system was developed for agricultural vehicle robots to navigate autonomously in the grass land and provide the data base information of hay bales location in order to create work schedule. However, the research should be continued to develop the proposed method for multiple robot system.

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	海津	裕

学位論文題名

Development of Autonomous Agricultural Vehicle using Omnidirectional Camera as Navigation Sensor

(全方位カメラを航法センサとした農用自律走行車両の開発)

本論文は、全7章からなる総頁数 173 ページの英文論文である。論文には図 84, 表 11, 引用文献 118 が含まれ、別に参考論文 5 編が添えられている。

日本をはじめEU, 米国など先進諸国では近未来の農業技術として自律走行車両・ロボットの必要性を掲げ、産官学をあげて研究開発を進めている。EUでは2006年に2020年までの長期技術開発戦略を策定した。その中に将来の労働力不足に危機感を抱き、ロボットのさらなる展開の必要性を盛り込んでいる。また、米国においても、生産コスト削減の手段としてロボットに注目している。本研究では全方位カメラを航法センサとした農用自律走行車両の開発を行った。牧草収穫作業のロボット化を具体事例として取り扱い、そこで必要となる車両の自律化のための基礎理論の構築を目的とした。以下に論文内容と審査結果について述べる。

1. 航法センサと自律走行車両

本研究の中核となる航法センサである全方位カメラの原理・機能・キャリブレーション法について論じた。また、車両の測位センサとして供試したRTK-GPSおよび方位精度評価のための姿勢角センサ(Inertial Measurement Unit, IMU)について、その計測原理・精度などを説明した。また、自律走行車両のプラットフォームとして電動ユーティリティビークルを供試して自律化のための改造内容についても詳述した。

2. ビジョンセンサを用いた作業対象物の認識法

全方位カメラを使用して作業対象である牧草地内のヘイバール(以下、バール)を認識できる方法を考案した。青画像と緑画像を使用して画像からバールのみを安定して正確に抽出できる画像処理法である。バールの認識精度を向上させるためにバール候補として抽出された領域の大きさ・形状をバール判定の基準として組み込み、屋外環境下の外乱に対してロバストなシステムになるよう工夫した。カメラから半径40m内において90%の確率でバールを正確に認識できた。

3. 自律走行車両の方位検出法

自律走行に際して重要なことは、車両の現在位置や周辺環境の把握である。本研究では全方位カメラと RTK-GPS を用いて、地上座標系に対して車両の絶対方位角を算出できるアルゴリズム開発を行った。全方位カメラの場合、移動や回転に伴う画像範囲に変化がないことから、2枚の画像について相互相関を算出して方位角を推定できる。参照画像を逐次更新する RC 法、初期の参照画像を使用し続ける RF 法、RC 法と RF 法を融合した RCF 法を考案・試験することで、RC 法が最も誤差の少ない方法であることを明らかにした。RC 法の場合、 2° 以下の誤差で車両方位を算出できた。この手法は方位角算出の演算負荷が大きくないため、方位角算出をリアルタイムに行うことが可能であった。

4. 作業対象物の位置推定法

農用自律走行車両のナビゲーションにおいて、障害物を認識し適切な衝突回避動作を採ることは安全な作業を行う上で重要である。本研究では収穫対象でありかつ障害物にもなるベールを画像中から抽出し、ベール位置を推定できる方法を考案した。ベールの高さ情報、投影面積情報を使用する方法や2枚の画像をステレオ画像として処理する方法を開発し、最大 40m 遠方まで約 90% のベールを正確に認識できた。さらに、判別分析法を導入することで、日影によるベール誤認識を防ぎ、ベールの位置推定精度を向上させた。カメラからベールまでの距離推定の精度は rms 誤差で 1.07m であった。この精度は自律走行車両が牧草地においてベールをリアルタイムに認識するに十分な精度と判定された。

5. 全方位カメラを航法センサとした走行制御法

全方位カメラをセンサとして開発した個別要素技術を統合した自律走行システムを構成し、その評価をコンピュータシミュレーションによって行った。車両の運動モデルを二輪モデルで記述した“Vehicle model”，全方位カメラ、RTK-GPS などのセンサ特性を統計的に包含した“Sensor model”，また操舵制御及び速度制御を司る“Navigation controller”，障害物認識・回避を行う“Safety module”によって構成したシミュレーションモデルを用いて走行制御法(Navigation controller)を構築した。シミュレーションの結果、全方位カメラによる車両方位角、RTK-GPS による車両位置を用いて 1m/s の作業速度のもと 0.034m の横方向偏差、 2.3° の方位偏差で自律走行できる可能性を示した。開発した走行制御法によって走行速度 3m/s まで自律走行できることを確認すると共に、全方位カメラを使用して障害物を認識・回避できるモジュール(Safety module)も開発し、その正常動作と有効性についても評価した。

以上のように本論文は、全方位カメラを自律走行車両の航法センサとして用い、かつベールのような作業対象物・障害物を認識できるセンサとしても利用できる方法論を構築したものである。国際的にも全方位カメラをセンサとした農用自律走行車両の研究事例はなく、学術的価値とともに高いオリジナリティを有する研究内容である。よって審査員一同は、Rahman Farrokhi Teimourlou 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。