

## 学位論文題名

## 農用車両の自動走行制御のための画像処理手法の研究

## 学位論文内容の要旨

近年、日本の農業においては農業従事者の減少や高齢化が進行しており、農業生産力の低下が問題となっている。このような状況に対して、トラクタや収穫機などの農用車両の運転者の負担軽減や、未熟練者でも高能率・高精度な作業を可能とする運転支援技術の開発が求められている。本研究は、このような運転支援技術の一環として自動直進走行と自動追従走行を行うシステムの開発にあたり、これらの機能の実現において最も重要な技術要素である、走行制御に必要な外界の情報を検出する画像処理手法を研究するものである。

第1章では、研究の背景として上記のような日本の農業における諸問題を概観し、その対策として農用車両の自動直進走行と自動追従走行の2種類の運転支援機能が有効であることを述べた。続いて本研究を、これらの走行制御に必要な外界の情報を検出する画像処理手法の開発と位置付け、目標とする機能と性能は、自動直進走行では100 m以上の直進走行が可能で、走行軌跡の直進経路からの横方向の偏差(以下、横偏差)が±10 cm以内の精度、自動追従走行ではおよそ10 cm以上の高さを有する作物列、マーカ跡、畝、段差の4種類の対象物に追従走行が可能で、走行軌跡は±10 cm以内の精度と設定した。

第2章では、農業分野や自動車分野などに適用される画像処理技術や他のセンシング技術を概観し、その結果、次のような課題を明らかにし、研究の方針を以下のように定めた。

1) 自動直進走行に関する技術では、GNSSを用いるシステムはコスト面と衛星電波の安定性に課題があること、広視野のカメラを用いる自己位置の検出方法では目標精度の達成が困難であること、目標地点の簡便な指示方法が必要であることなどの課題を明らかにし、本研究では構成する技術要素を根本的に検討する方針とした。

2) 自動追従走行に関する技術では、マーカ跡や畝などの地面の凹凸形状を三次元的に認識する機能が必要であるが、これには自動車分野で開発されたステレオ画像装置の適用が有効であると判断した。一方、農用車両に適合したステレオカメラと距離画像を解析する認識アルゴリズムが必要であることを明らかとし、本研究ではこれらの技術要素を開発する方針とした。

第3章では、自動追従走行で適用するステレオ画像技術の検討を行った。まず、自動車用として開発されたステレオ画像装置について、その技術内容を概説し、実環境でステレオ画像処理を安定に動作させるためにハード・ソフト両面で様々な機能が構築されていること、また、自動車の交通環境に適合した専用の認識アルゴリズムが構築されていることを示した。続いて、農用車両に適合するステレオカメラの設計方法を開発した。

1) 前方部搭載型とルーフ搭載型の2種類のステレオカメラを設定し、各カメラともに前方の所定の検出範囲をカバーするようにレンズの視野角を設定し、また、地面上の10 cmの高低差に対して3画素分の視差が生じるようにステレオカメラの基線長を設定する設計方法である。

2) 製作した前方部搭載型とルーフ搭載型のステレオカメラによる圃場の畝の距離画像を分析し、地面の 10 cm の高低差の検出に対し、十分な空間分解能が得られていることを示した。よって、提案した設計方法は圃場の対象物の検出に有効である。

第 4 章では、農用車両を自動直進走行させる機能に対応した画像処理手法を検討し、目標地点に向かう直進経路からの横偏差を高精度に検出する手法を開発した。

1) 高さ 30 cm、幅 10 cm の大きさで、周期的に点滅するランプを置いて目標地点の位置を指示する方法とした。カメラの画像を処理して目標地点のランプを検出すると共に、ランプの画像上のにじみ幅を推定する手法を開発し、にじみ幅を補正することでランプまでの距離推定の高精度化を実現した。この距離値を使うことで消失点の位置推定を高精度化し、さらに、画像上での地面の動きを検出し、消失点の位置と対比することで、高精度な横偏差の検出を可能とする画像処理手法である。

2) 農用車両に 0.1 秒周期で動作する画像システムを搭載し、検出される横偏差に基づいて舵角を自動制御して直進走行する試験を実施した。平坦な舗装路上の約 150 m の走行での横偏差は± 2 cm 以内となり、高精度な直進性能が確認された。また、傾斜した草地や圃場での耕うん作業においても横偏差はほぼ 10 cm 以内となり、目標性能は概ね達成され、よって、提案する画像処理手法は自動直進走行の機能実現に有効である。

第 5 章では、農用車両を自動追従走行させる機能に対応した画像処理手法を検討し、農用車両に搭載したステレオ画像装置にて生成される距離画像を三次元的に解析し、圃場の作物列、マーカ跡、畝、段差の 4 種類の対象物を検出する認識アルゴリズムを開発した。

1) 作物列に対しては、距離画像の各データを地面と作物に分離し、作物のデータに対してハフ変換を行い、作物の列の位置を検出する認識アルゴリズムであり、疎らな作物も検出可能である。また、マーカ跡、畝、段差の検出では、地表面の断面の輪郭に対して、各対象物の形状パターンとの一致度をパターンマッチングの手法で計算し、地面上の一致度の分布に対してハフ変換を適用し、対象物の位置を直線として検出する認識アルゴリズムである。

2) 開発した認識アルゴリズムはステレオ画像装置上で 0.1 秒周期での動作が可能である。また、前方部搭載型とルーフ搭載型の両ステレオ画像装置において、約 10 cm の高低差のマーカ跡や段差の検出が可能であり、各対象物への追従走行の試験では、走行軌跡の誤差はほぼ 10 cm 以内となり、目標性能は概ね達成され、よって、提案する画像処理手法は自動追従走行の機能実現に有効である。

第 6 章では本論文を総括し、また、今後の展望として、本研究で開発した技術を実用化に繋げるためのコスト低減等の努力、行程端での方向転換操作の自動化や危険な状況の警報などの運転支援の機能拡充のニーズ、撮像素子の一層の性能向上のニーズなどを論じた。

最後に、開発した画像処理手法によって、高精度な直進走行が可能であること、又、圃場の各種対象物への追従走行が可能であることを明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 金 子 俊 一  
副 査 教 授 小 笠 原 悟 司  
副 査 教 授 山 下 裕  
副 査 准教授 田 中 孝 之

## 学位論文題名

### 農用車両の自動走行制御のための画像処理手法の研究

近年、日本の農業においては農業従事者の減少や高齢化が進行しており、農業生産力の低下が問題となっている。このような状況に対して、トラクタや収穫機などの農用車両(以下、トラクタ)の運転者の負担軽減や、未熟練者でも高能率・高精度な作業を可能とする運転支援技術、特にトラクタを自動的に直進走行させる機能と、作物や畝に対して自動的に追従走行する機能の実現を可能とする技術の開発が求められている。しかしながら、実際の圃場において実用となる高い精度で直進走行を行うには、既存の技術では高価な装置が必要であり、実用性には難点がある。また、追従走行の対象物である畝などは地面の凹凸形状であり、これを安定的に検出する技術は未だ確立されていない状況にある。

本論文はトラクタに搭載したカメラの画像を処理することにより、直進走行に必要な走行軌跡の偏差情報と、追従走行の対象物の位置情報の検出が可能であるとしている。開発された画像処理手法は試験用のトラクタに組み込まれ、圃場等での走行試験が行われ、実用となる精度での自動直進走行と自動追従走行が可能であることを実験的に示し、その有効性を示している。

第1章では、研究の背景として日本の農業における諸問題を概観し、その対策としての本研究の位置付けと目的を明確にしている。

第2章では、農業分野や自動車分野などに適用される画像処理技術や他のセンシング技術を概観し、それらの技術の特徴と課題を明らかにしている。

第3章では、自動追従走行で使用されるステレオ画像技術の検討が行われている。自動車用として開発されたステレオ画像装置をベースとし、トラクタに搭載可能とするための改修の範囲と設計の考え方が示され、また、製作したステレオ画像装置における認識性能の妥当性が示されている。

第4章では、トラクタを自動直進走行させる機能に対応した画像処理手法が示されている。直進走行の目標地点には点滅するランプが置かれ、このランプをカメラ画像で検出する手法、ランプまでの距離をカメラ画像から推定する手法、画像上での地面の動きを追跡して直進経路からの横方向の偏差を推定する手法などを示し、これらの機能を組み合わせることで、直進経路からの横偏差を高精度に検出する画像処理手法を示している。また、トラクタによる直進走行試験では、高精度な直進走行の軌跡が示され、それら手法の有効性を示している。

第5章では、トラクタを自動追従走行させる機能に対応した画像処理手法が示されている。第3章で設計・製作されたステレオ画像装置が使用され、生成される距離画像を三次元的に解析し、圃

場の作物列, マーカ跡, 畝, 段差の 4 種類の対象物を検出する認識アルゴリズムが示されている。また、トラクタによる追従走行試験では、実用的な精度での追従走行の軌跡が示され、それらの手法の有効性を示している。

第 6 章は本論文の結論となっている。

第 1 章では、トラクタの運転支援システムの使用が想定される圃場や天候などの条件に関し、その説明に留意が必要であることを指摘した。また、本研究は複数の手法を開発し、それらを組み合わせることで、目的とする実用的な機能を実現していることを評価した。一方、その開発の方向性に関する説明に留意が必要であることを指摘した。

第 3 章では、自動車向けの技術とトラクタ向けの技術について、それらの位置付けの説明に留意が必要であることを指摘した。

第 4 章では、ランプの画像上のにじみの大きさを推定し、ランプまでの距離の推定精度を向上させる手法が独創的であることを評価した。また、従来にない高い精度での直進走行を実現したことを評価した。一方、走行試験における画像処理側の検出精度と、トラクタの操舵制御方法の影響に関する説明に、留意が必要であることを指摘した。

第 5 章では、実際の圃場においてトラクタの走行制御が可能なアルゴリズムを開発したことを評価した。一方、アルゴリズムを構成する個々の手法について、それぞれの効果の説明に留意が必要であることを指摘した。また、検出した対象物の位置を時間的に追跡する機能を強化することで、さらに有用性が高まるとの意見を述べた。

以上を要するに、著者は、トラクタに搭載したカメラの画像を処理することによって、トラクタの自動直進走行と自動追従走行に必要な外界の情報を検出する手法を開発し、走行試験によってその有用性を明らかにした。自動直進走行では独創的な手法を組み込むことにより、従来にない高い精度を実現した。また、自動追従走行ではマーカ跡や畝、段差などの地面の凹凸形状を安定的に検出することを実現した。本研究の成果は、画像処理分野ならびに農業機械分野の発展に寄与するところ大なるものがある。よって、著者は北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。