

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 11464 号
------	---------------

氏 名 福川 智哉

論 文 題 目

農業ロボットのためのマニピュレーションと作業状態認識
(Manipulation and Work State Recognition for Agricultural
Robots)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	准教授	関山 浩介
委員	名古屋大学	教授	長谷川 泰久
委員	名古屋大学	教授	山田 陽滋
委員	名古屋大学	教授	大岡 昌博
委員	名城大学	教授	福田 敏男

論文審査の結果の要旨

福川智哉君提出の論文「農業ロボットののためのマニピュレーションと作業状態認識」は精密農業のロボット技術の導入として、精密なマニピュレーションと農作業環境の画像認識手法を提案している。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本論文の研究背景、従来研究、研究目的を述べている。現在、日本の農業就業人口の減少が深刻化しており、農業労働力の不足が懸念されている。こうした背景から、農業労働力の不足を解決するために「精密農業」といった取り組みが世界的に行われている。ロボット技術は、精密農業の取り組みの中で重要な位置づけにあり、ロボットトラクターや無人ヘリコプター、マニピュレーションやマシンビジョン技術などで応用されている。しかしながら、これまで開発・研究されてきた農業ロボットの現状として、(1) 農業ロボットの汎用性の低さ、(2) 農作業の状態評価手法の不足の2つの問題点が挙げられる。このような現状を鑑み、1台で様々な農作業が可能で、かつ農作業の状態評価をしながら作業精度の向上を図る農業ロボットの実現を研究目標に掲げ、本論文の研究目的を農業ロボットののためのマニピュレーションと作業状態認識技術の提案と定めている。

第2章では、マニピュレータによる農作業ツールの取り付けの自動化のために、指形状を利用したリング嵌合手法を提案した。これまでに、各農作業に最適なシステム構成を持つ様々な農業ロボットが開発されてきたが、これらの農業ロボットは、1つの農作業しか行えず、汎用性があるとは言えない。実用性を考慮すると、農業ロボット1台で様々な農作業が行えることが望ましい。そこで、本研究では、農業ロボットに油圧駆動マニピュレータが搭載されていることを想定し、農作業に適したツールをマニピュレータにより自律的に取り付けることができる農業ロボットの実現を目標とした。農作業ツールの取り付け作業は、精密動作が要求される。しかしながら、一般に油圧駆動マニピュレータは位置決め精度が悪く、精密動作に向かないといった問題点がある。そこで本研究では、マニピュレータを用いて、嵌合治具としてモデル化したリング部品を農業ロボット側の被嵌合対象のシャフト部品に嵌合することを研究目的とした。この技術課題の要求条件としては、位置決め精度が悪いマニピュレータでも嵌合治具の取り付けが達成可能であることである。本研究では、このような技術課題に対し、指形状を利用したリング嵌合手法を提案した。提案手法は、(1) アプローチ、(2) 軸調整、(3) 嵌合と挿入の3つのステップから構成される。アプローチでは、リング部品をマニピュレータでシャフト部品の位置まで移動させ、シャフト部品上でリング部品を一度解放する。軸調整では、グリッパーでシャフト部品を把持するとともに、グリッパーの指の腹部に設けたくぼみにリング部品を収める。嵌合と挿入では、リング部品をくぼみに収めた状態でグリッパーを垂直方向に降下させ、リング部品の嵌合と挿入が受動的に行われる。提案手法の特徴は、マニピュレータの被嵌合対象に対する位置決め方法にある。提案手法は、軸調整で力覚フィードバックによりグリッパーの指と被嵌合対象との接触状態からマニピュレータと被嵌合対象間の相対位置誤差を減少させている。これにより、位置決め精度が悪いマニピュレータでも精密な嵌合作業が可能とした。もう1つの提案手法の特徴は、グリッパーの指の腹部に設けたくぼみをリング部品の嵌合に用いている点にある。このくぼみ形状のねらいは、(1) リング部品の変形の防止、(2) リング部品への幾何学的拘束、(3) リング部品への望ましい嵌合力の付与の3つがある。これら3つのねらいを実現するために、リングの幾何学的・力学的嵌合成立条件に基づき、くぼみの設計条件を導出した。嵌合実験により、提案手法は、精密なリング嵌合について高い嵌合成功率を達成できる有用な知見が示された。

第3章では、除草ロボットの作業状態認識のために、フィルタバンクによる芝の刈取状態認識手法を提案した。これまでに、多くの除草ロボットが提案されているが、作業状態を評価し作業に反映させる除草ロボットはなかった。本研究では、作業を評価しながら作業を行う農業ロボットの実現を目指し、カメラ画像から芝の刈取状態を認識する手法を提案した。芝の刈取前後を識別するために色特徴量の変化を利用することは難しいため、芝の刈取前後のテクスチャ変化に着目し、フィルタバンクによる芝の刈取状態認識手法を提案した。提案手法の特徴は、芝環境の特徴を抽出するためにガボールフィルタを選択している点にある。ガボールフィルタは、その設計パラメータにより任意の角度と太さの線成分を検出可能である。したがって、ガボールフィルタは、線成分である芝草の刈取前後の物理的な変化を捉えるのに適している。また、誤検出やノイズに対する頑健性は、移動ロボットのための環境認識にとって重要である。提案手法の誤検出やノイズに対する頑健性は、RANSAC手法を採用することで向上している。検証実験により、提案手法は、適切な密度と長さで管理された芝環境で芝の刈取前後の境界を数 cm クラスの精度で検出できることを示す有用な知見を得た。

第4章では、除草ロボットの作業状態認識のために、畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による芝の刈取状態認識手法を提案した。第3章では、芝の刈取前後の識別のために、テクスチャ変化に着目したアプロー

論文審査の結果の要旨

チを取った。このアプローチでは、フィルタバンクを人為的に設計し、フィルタ応答を特徴量化することにより芝の刈取前後の識別を実現した。しかしながら、芝の刈取前後を識別する上で、設計したフィルタバンクに基づく特徴量が最適かどうかは分からない。そこで、この技術課題に対して、ディープラーニングの枠組みの1つである CNN を識別器としたアプローチを試みた。画像認識への適用において、ディープラーニングは、生画像を入力とし、特徴量の学習を含めた識別器の生成が可能であるため、芝の刈取前後の特徴のような特徴量を生成しにくい識別問題に有用であると考えられる。本研究では、畳み込みニューラルネットワークによる芝の刈取状態認識手法を提案した。提案手法は、(1) 画像分割、(2) 刈取状態マップの生成、(3) 境界検出の3つのステップから構成される。画像分割では、ロボット芝刈り機に搭載したビジョンセンサから得られる芝の刈取前後領域が共存する入力画像を正方形の小画像に分割する。刈取状態マップの生成では、各小画像を CNN に与え、各小画像に対して刈取前後の識別をすることで入力画像全体に対して刈取状態を示したマップを生成する。境界検出では、フィルタバンクによるアプローチでも採用した RANSAC 手法により境界線を検出する。本研究で設計した CNN は、畳み込み層とプーリング層の組み合わせを3層につなげた構造とした。学習したネットワークのエラー率は、約 10%と高い識別精度を示したことから、芝の刈取前後の識別問題に対して CNN を適用することは有用であることを示した。また、検証実験により、提案手法は、芝の刈取前後の境界を数 cm クラスの位置精度で検出できることを示した。

第5章では、ワインヤード管理ロボットの環境認識のために、自己相関によるワインヤード環境の消失点検出手法を提案した。ワインヤードの圃場管理では、人間が広大な土地で腰に負担のかかる姿勢で長時間の作業が強いられることや、農薬散布による健康被害といった問題がある。このような理由から、ワインヤード管理ロボットの需要がある。ワインヤード管理ロボットのための要素技術として、ワインヤードのブドウ樹列間の自律走行がある。移動ロボットの自律走行のための有力な手掛かりの1つとして、消失点が挙げられる。本研究では、ワインヤード環境の相似性に着目し、「自己相関によるワインヤード環境の消失点検出手法」を提案した。提案手法は、ブドウ樹列間を走行するワインヤード管理ロボットに搭載されたビジョンセンサから得られた入力画像とその入力画像を縮小した画像の相関から消失点を推定する。また、最大相関値の探索試行回数の低減のため、最急降下法の概念を取り入れた。提案手法は、入力画像とその縮小画像の自己相関を利用することにより、どの照明条件や土壌の色の環境であっても適用可能である。検証実験より、提案手法は、おおむね正しい消失点を検出できる有用な結果が得られた。

最後に、第6章で本論文のまとめと今後の展望について述べた。

以上のように、論文では精密農業におけるロボット化技術に必要な精密なマニピュレーションおよび農地作業環境認識技術を提案している。これらの提案システムの実験結果は、精密農業のロボット化を推進するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって本論文の提出者である福川智哉君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。