

報告番号	甲 第 11464 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

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

氏 名 福川 智哉

### 論 文 内 容 の 要 旨

第1章では、本論文の研究背景、従来研究、研究目的を述べた。現在、日本を始め世界中の先進国で農業従事者の高齢化や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。精密農業は、今日まで発展してきた観測技術、制御技術、統計解析技術を圃場管理に積極的に導入し、作物の生産性や収益性、品質を向上するための圃場管理手法である。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た。

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。しかしながら、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。したがって、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。こうした

問題の解決方法として、嵌合作業を簡易化するための嵌合治具の利用がある。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ことを示した。

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。除草作業は、農作業の中でも作物の生育に大きく影響を与えるため、頻繁に行われなければならない作業である。このような理由から、除草ロボットの需要がある。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、芝地環境において作業状態を認識しながら芝刈り作業を行うロボット芝刈り機を実現することを目標とした。ロボット芝刈り機は、指定された領域を刈り残しが無いように走行する必要がある。これまでのロボット芝刈り機の作業方策であるランダム走行やGPS誘導制御の方策は、刈り残しが残る可能性があるといった点で作業精度が高いとは言えない。そこで、本研究では、ビジョンベースでロボット芝刈り機を誘導する方策を取ることにした。したがって、本研究の目的は、カメラ画像から芝の刈取状態を認識することである。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。そこで、本研究では、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。提案手法は、(1) フィルタリング、(2) クラスタリング、(3) 境界検出の3つのステップから構成される。フィルタリングでは、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

像に対し、36個のガボールフィルタから構成されるフィルタバンクを適用する。クラスタリングでは、36枚の応答画像から各画素毎にカイ二乗統計量を算出し、カイ二乗統計量の値の閾値処理によりクラスタリング画像を生成する。境界検出では、クラスタリング画像の領域分割により境界点を検出し、検出境界点に対しRANSAC手法を適用することで芝の刈取前後の境界線を推定する。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した。

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。そこで、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、ワイナード管理ロボットの需要がある。ワイナード管理ロボットのための要素技術として、ワイナ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。これまでの消失点検出手法は、都市環境を対象として、Hough変換による直線検出を利用した手法が主であるが、自然環境のように明確な直線が無い環境では適用できない。また、自然環境での消失点検出では、色特徴量に基づいて路面や果樹を識別し、間接的に消失点を検出する手法があるが、照明条件や果樹の育成状態、土壌の色の違いなどの環境のばらつきへの適応が難しいといった問題がある。これらの問題を考慮して、本研究では、ワイナード環境の相似性に着目し、「自己相関によるワイナ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ナ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。ワイナード環境はその構造に相似性を有するため、相関値が高い点が消失点を指し示す。また、提案手法は、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ている。提案手法の特徴は、入力画像とその縮小画像の自己相関を利用している点にある。これにより、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ことを示した。

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。