



Title	醸造用ブドウ栽培におけるせん定ロボットシステムに関する研究
Author(s)	膝舘, 智明
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16764号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16764
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99609
Type	doctoral thesis
File Information	HIZATATE_Tomoaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 膝館 智明

学 位 論 文 題 名

醸造用ブドウ栽培におけるせん定ロボットシステムに関する研究

果樹産業は農業において重要な地位を占めているが、生産は依然として労働集約的な作業に依存している。特に、果樹の余分な枝を切断して樹形を整えるせん定作業は果樹の収量や品質を直接左右する基幹工程であり、残す枝を適切に選びながら一本ずつ作業する必要があることから、機械化や省力化が困難で人力に大きく依存している。こうした労働集約的な作業は果樹産業の持続可能性に大きな影響を及ぼしており、省力化と効率化による労働生産性の向上が不可欠である。

こうした状況を踏まえ、世界的にせん定作業の自動化に関する研究に注目が集まっている。本研究では垣根式ブドウ栽培に適用可能なせん定ロボットシステムを開発した。開発したロボットは4輪の自律走行プラットフォームとビジョンセンサ、ロボットアームで構成されるモバイルマニピュレータシステムである。本研究では、ビジョンセンサを用いた樹体構造の推定、ロボットアームによるせん定動作、さらに実用化を見据えた電力消費や充電を考慮したロボット作業計画の最適化を統合的に開発し、効率的かつ高精度なせん定作業の自動化を目指した。

RGB-D カメラを用いた樹体構造推定システムの開発

せん定ロボットシステムの一環として、ブドウ樹の三次元構造を推定する新しい手法を提案した。本手法は、ブドウ樹の位相構造を高精度かつ効率的に推定することを目的として開発された。提案手法はTime-of-Flight (ToF) 方式のRGB-D カメラから得られた深度情報のみを用いて構造推定を行う点に特徴がある。得られた深度情報を処理して生成した点群データから最小全域木 (Minimum Spanning Tree: MST) を構築することで、ブドウ樹の位相構造をデータ化した。MSTのコスト関数は、ノード間距離、重力屈性、ノード間接続の滑らかさを考慮して設計した。さらに、植物学的特徴と圃場データに基づく統計解析から、三次元骨格情報のみを用いて結果母枝、結果枝、芽といった構造要素を分類する新しい手法を開発した。

実験は実際のブドウ園における10本の樹木を対象に行い、手動で構築した位相構造との高い整合性を確認した。特に、コスト関数に含まれるパラメータの最適化によって、枝の重なりによるオクルージョンがある条件下でも高精度な推定が可能であった。また、圃場データに基づく統計解析を用いた芽の位置推定は、実用的な精度を達成していた。処理速度も従来手法を上回り、ブドウ樹1本あたり平均619msで処理を完了した。これらの結果から、本手法はせん定ロボットシステムにおけるリアルタイム利用の可能性を示しており、効率的かつ高精度な構造推定を実現することが期待された。

果樹の三次元構造情報を用いたロボットアーム動作計画手法の開発

推定された果樹の大域的な三次元構造情報とエンドエフェクタに搭載したカメラを用いた画像認識 AI 処理を統合したロボットセン定システムを開発し、垣根式ブドウ栽培の圃場において実証試験を行った。開発システムは、移動プラットフォームに搭載した RGB-D カメラで取得した点群データから樹体構造を推定し、セン定位置を決定した後、ロボットアームの動作計画を行う。さらに、セン定直前にエンドエフェクタ搭載カメラで取得した局所視覚情報を用いて、YOLO ベースの枝・芽認識と Dynamic Time Warping による大域視覚情報とのマッチングによりエンドエフェクタ位置を補正することで、構造推定誤差や環境変化に対応した。経路計画には、直交座標系における直線補間とランダムサンプリング手法である RRT-Connect を組み合わせたハイブリッド手法を採用し、計算効率と成功率の両立を図った。

実際の圃場試験では、最大でセン定成功率 83%、芽数制御精度 91%を達成し、局所視点情報を用いたエンドエフェクタ位置補正機構の有効性が確認された。一方で、複雑な枝分岐を有する場合、提案手法が樹体構造の推定精度により性能が頭打ちになることに課題が残った。今後は、植物情報を高解像度取得できる局所視点の有効活用、センサ構成の高度化、AI モデルの改良、巡回順最適化の導入に加え、作業速度の向上と安全性確保を目指す。本研究は、果樹セン定作業の完全自動化に向けた重要なステップであり、農業現場における省力化と持続可能性の向上に寄与することが期待される。

果樹園用電動ロボットのための作業計画最適化

本研究で提案するロボットは電動車両であることから航続距離や作業機への出力供給能力に制約があり、特に傾斜地ではエネルギー消費が大きく変動する。このため、電動車両の性能を最大限に引き出すには経路走行順や充電・補給を含む作業計画の最適化が不可欠である。ここでは問題を一般化し、走行中に質量変化を伴う複数台の電動散布ロボットのための最適作業計画生成アルゴリズムを開発した。

提案手法は、(1) 充電や補給に伴う各ロボットの作業計画の再構築、(2) 経路走行順の最適化、(3) 各走行経路への進入方向の最適化、の 3 問題から構成される。これらの問題を解決するために、階層型遺伝的アルゴリズム (Layered Genetic Algorithm: LGA) を用いた。LGA によって生成された作業計画と総当たり法や焼きなまし法によるスケジュールを比較した結果、LGA は最適あるいは準最適な作業計画を構築できることが確認された。

さらに、複数台のロボットに対する作業計画を作成し、本手法が総作業時間やロボット仕様といった制約条件下における必要台数の決定など、ロボット運用問題に適用可能であることを示した。また、実験結果から、ロボットモデルに関連するパラメータを最適化することで、電動ロボットの作業スケジュールの質が向上することが確認され、本手法がロボット設計への応用可能性を有することが示唆された。