

氏 名	さか 酒 井 悟
学位(専攻分野)	博 士 (農 学)
学位記番号	農 博 第 1359 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	農 学 研 究 科 地 域 環 境 科 学 専 攻
学位論文題目	Design and Evaluation of a Heavy Material Handling Manipulator for Agricultural Robots (農業ロボットのための重量物ハンドリングマニピュレータの設計と評価)
論文調査委員	(主 査) 教 授 梅 田 幹 雄 教 授 笈 田 昭 助 教 授 大 須 賀 公 一

論 文 内 容 の 要 旨

優れた性能とコストを達成する農業ロボットを実現するためには、構造—制御系の合理的な設計と評価が必要である。本論文は、農業ロボットの大域的性能の評価に関する新たな知見を提案したうえで、スイカ収穫作業を技術課題として、運動学やポスト現代制御理論を用いたマニピュレータの合理的な設計を行い、実現したマニピュレータの有用性を圃場実験によって評価した。

第1章では、本研究の背景、関連する既往の研究について概説し、本研究の目的、本論の構成について述べた。

第2章では、大域的性能の評価指標の提案を行った。農業ロボットの作業全体を考えた場合、従来のロボットの評価指標は局所的な性能に関するものであり、理論作業量は既存の作業機械を前提にしている。そこで、巨視的な作業環境モデルと規範的な作業計画に基づく作業空間と作業時間の基礎式を導出し、拡張理論作業量を提案した。農業ロボットの構造系を設計する指針を与える定理を2つ導出し、拡張理論作業量の有用性を示した。

第3章では、構造系の設計を行った。運動学を考慮しつつマニピュレータの設計指針を定めた。幾何学的に無次元化したマニピュレータの運動学モデルの運動学的性能について解析を行い、従来の極座標形、多関節形、円筒座標形、直交座標形、SCARA形と比較して、平行形の手先位置決定部分が可操作性と作業体積に関する設計指針に適していることを示した。また平行形の手先姿勢決定部分が対物安全性とコストに関する設計指針に適していることを示した。スイカ収穫産地の調査結果と拡張理論作業量より導出した設計指針に基づいた実験機を試作した。圃場実験を行い、作業時間40s/1個、作業成功率86.7%を確認して、試作した構造系の有用性を示した。

第4章では、ロバスト安定解析に基づく制御系の設計を行った。作業の高速性を高める戦略、把持したスイカを荷台に積載する戦略をそれぞれ定めた。第3関節と第4関節の干渉系の物理パラメータを同定し、得られた公称値に基づいてLQ制御を用いた閉ループ系を設計した。閉ループ系の構造的不確かさとして物理パラメータ変動をLFT (Linear Fractional Transformation) 形式の重複スカラブロックとして厳密に表現し、さらに、正規化した不確かさを線形静的時変のクラスと線形動的時変のクラスとに区別して表現した。LMI (Linear Matrix Inequality) を用いて定数スケールド H_{∞} ノルムを計算し、閉ループ系のロバスト安定性が成立することを示した。圃場実験を行い、作業時間14s/1個、作業成功率86.7%を確認して、ポスト現代制御理論を用いた制御系の有用性を示した。

第5章では、ロバストゲインスケジューリングによる制御系の設計を行った。1つのハンドアイと2つのベースアイから構成される視覚システムを前提に、ロボットが定位置にてスイカを連続的に収穫するための戦略を定めた。スイカ収穫作業において想定される不確かさを考察し、同定時間と同定精度の点で有利なMD (Multi-Decimation) 同定法を用いて制御対象のモデル集合を同定した。さらに、関節間の干渉に関して試作機に固有に成立する条件式を見出し、D-K反復法による μ -設計を用いて第1関節と第2関節の油圧アクチュエータに想定される不確かさのもとでロバスト制御性能を達成する補償器を設計した。また、第3関節の粘性摩擦係数と関節速度、スイカ質量に関して試作機に固有に成立する関係式を見出し、

LPV (Linear Parameter-Varying) 法によるゲインスケジューリングの仮定が満足されることを確認し、加えて、粘性摩擦係数だけでなく実時間計測値でないスイカ質量の不確かさのもとで、ロバスト制御性能が達成される補償器を設計した。拡張性、安全性、簡便性の点で有利な汎用 Linux を用いて補償器を実装した圃場実験を行い、作業時間 48s/4 個、作業成功率100%を確認して、ポスト現代制御理論を用いた新たな制御系の有用性を示した。

第6章は、最終章として第1章から第5章までの結果をまとめた。

論文審査の結果の要旨

労働負荷の過重さと輸入野菜に押されて、重量野菜生産は近年減少傾向にある。農業の環境保全に果たす役割が認識され、農業の重要性が強調されているが、農業を維持するためには、適切なコスト及び快適な作業環境で生産が実施されることが必要である。特に重労働を要求する重量野菜の生産には農作業負荷の軽減が必要であり、重量物を操作する農業ロボットの実用化が望まれている。

本論文では、農業ロボットの大域的性能の評価に関する新たな知見を提案したうえで、スイカ収穫作業を技術課題として、運動学やポスト現代制御理論を用いたマニピュレータの合理的な設計を行い、実現したマニピュレータの有用性を圃場実験によって確認したもので、評価すべき点は以下のとおりである。

- (1) 農業ロボットの大域的性能を評価するために、理論作業量の問題点を整理した。提案する巨視的な作業環境モデルと規範的な作業計画に基づく作業空間と作業時間の基礎式を導出し、拡張理論作業量を提案した。農業ロボットの構造系を設計する指針を与える定理を2つ導出し、拡張理論作業量の有用性を示した。
- (2) 運動学を考慮しつつマニピュレータの設計指針を定めた。幾何学的に無次元化したマニピュレータの運動学モデルについて解析を行い、平行形の手先位置決定部分が既存の運動学モデルよりも可操作性と作業体積に関する設計指針に適していることを示した。また手先姿勢決定部分が対物安全性とコストに関する設計指針に適していることを示した。スイカ収穫産地の調査結果と拡張理論作業量より導出した設計指針に基づいて、解析した運動学モデルを試作した。収穫実験を行い、作業時間 40s/1 個と作業成功率86.7%を確認した。これにより、試作した構造系の有用性を明らかにした。
- (3) 作業の高速性を高めるための戦略を定め、制御対象の公称モデルに基づいて LQ 制御を用いた閉ループ系を設計したうえで、物理パラメータ変動を厳密に表現し、静的時変なクラスと動的時変なクラスを区別して表現した構造的な不確かさを有する閉ループ系の定数スケールド H_{∞} ノルムを用いてロバスト安定性が成立することを示した。収穫実験を行い、作業時間 14s/1 個と作業成功率86.7%を確認した。これにより、ポスト現代制御理論を用いた制御系の有用性を明らかにした。
- (4) 同定時間と同定精度の点で有利な MD 同定法を用いて同定したモデル集合について、試作機に固有の条件式、関係式を用いたロバストゲインスケジューリングと μ -設計に基づいた制御系を設計した。汎用 Linux を用いて補償器を実装した。連続収穫実験を行い、作業時間 48s/4 個と作業成功率100%を確認した。これにより、ポスト現代制御理論を用いた新しい制御系の有用性を明らかにした。

以上のように、本論文は、優れた性能とコストを達成する農業ロボットの実現を目指し、スイカ収穫作業を技術課題とする試作機単体の有用性を示すだけでなく、提案する大域的性能に関する知見とポスト現代制御理論を用いた合理的な設計手順の有用性を例証したもので、フィールドロボティクス、及び農業システム工学の発展、並びに農業ロボットの実用化に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成15年2月19日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。