

氏名（本籍）	ルイス ブリト ルイス アルトゥーロ	（メキシコ合衆国）
学位の種類	博士（工学）	
学位記番号	甲第 202 号	
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 22 日	
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当	
学位論文題目	複数移動ロボットシステムを用いる屋内 UAV ロボットの実時間自己位置推定に関する研究	
論文審査委員	（主査） 教授 王 志東 （副査） 教授 菊池 耕生 教授 林原 靖男 教授 南方 英明 教授 太田 祐介 准教授 青木 岳史	

学位論文の要旨

複数移動ロボットシステムを用いる屋内 UAV ロボットの実時間自己位置推定に関する研究

屋内環境で移動する無人飛行ロボット（UAV）にとっては、正確な自己位置を推定することは極めて重要であり、指定された目標位置へ正確な移動は、UAV ロボットの効率的に各種作業の遂行に大きく寄与する。GPS による位置推定が利用できない屋内環境においては、測位センサやカメラによる周囲環境に基づく自己位置推定手法には、センサ自身及び処理に多くの電力を消費し、UAV ロボットの長期間な作業に影響している。本研究では、屋内環境で活動する複数の移動ロボットのフォーメーションによる UAV ロボットの実時間の三次元自己位置推定の手法を提案し、移動ロボットの位置及び UAV ロボットの計測の不確実性による UAV 位置推定の誤差伝搬及び自己位置推定の可解性問題を研究し、自己位置推定の性質を解明し、UAV との協調運動の制御戦略を提案し、数値シミュレーション及び実機を用いて検証を行った。提案した UAV の三次元自己位置推定手法は、複数移動ロボットが構築したフォーメーションから三辺測量手法に基づくものであり、移動ロボットに搭載したカメラから測定した UAV ロボットとの距離と SLAM アルゴリズムから推定した移動ロボットの位置の二種類の情報で実装できる。従って提案する自己位置推定法は、移動ロボットの種類や構造に依存しなく、異なる座標系で制御されるロボットに実装でき、不整地で作業するロボットフォーメーションからも適用できる優位性がある。本論文では、不確実性を有する移動ロボットのフォーメーションから UAV ロボットの自己位置推定システムの構築及びアルゴリズムを

提案し、拡張カルマンフィルタとパーティクルフィルタの二つの実装を示し、数値シミュレーションと実機ロボットを通して有効性を示した。さらに、実環境で不確実性の要素からロボットシステムの運動制御への影響について、理論面から複数移動ロボットのフォーメーション誤差及び計測誤差から UAV ロボットの位置推定への伝搬特性の定式化と、自己位置推定の可解性マップ (Solvability Map) という新しいコンセプトの提案を行った。その上、確率方程式による三次元可解性マップの高速計算アルゴリズムを提案し、フォーメーションと三次元可解性との関係を分析すると共に、自己位置推定の可解性を維持する移動ロボットのフォーメーション制御戦略を構築し、実システムに実装を行い、実験を通して有効性を示した。以上のように、本論文では、複数移動ロボットのフォーメーションによる UAV ロボットの自己位置推定の新しい協調ロボットシステムを提案した上、不確実性を有するシステムにおいて理論的な要素を研究し、誤差伝搬および可解性マップに基づく協調運動制御の手法を確立した。これらの成果は、今後実システムへの応用において、有効なシステム構築の指針と協調運動制御の手段となる。

審査結果の要旨

屋内環境で移動する無人飛行ロボット (UAV) にとっては、正確な自己位置を推定することは極めて重要であり、指定された目標位置へ正確な移動は、UAV ロボットの効率的に各種作業の遂行に大きく寄与する。GPS による位置推定が利用できない屋内環境においては、測位センサやカメラによる周囲環境に基づく自己位置推定手法には、センサ自身及び処理に多くの電力を消費し、UAV ロボットの長期間な作業に影響している。本研究では、屋内環境で活動する複数の移動ロボットのフォーメーションによる UAV ロボットの実時間の三次元自己位置推定の手法を提案し、移動ロボットの位置及び UAV ロボットの計測の不確実性による UAV 位置推定の誤差伝搬及び自己位置推定の可解性問題を研究し、自己位置推定の性質を解明し、UAV との協調運動の制御戦略を提案し、数値シミュレーション及び実機を用いて検証を行った。提案した UAV の三次元自己位置推定手法は、複数移動ロボットが構築したフォーメーションから三辺測量手法に基づくものであり、移動ロボットに搭載したカメラから測定した UAV ロボットとの距離と SLAM アルゴリズムから推定した移動ロボットの位置の二種類の情報で実装できる。従って提案する自己位置推定法は、移動ロボットの種類や構造に依存しなく、異なる座標系で制御されるロボットに実装でき、不整地で作業するロボットフォーメーションからも適用できる優位性がある。本論文では、不確実性を有する移動ロボットのフォーメーションから UAV ロボットの自己位置推定システムの構築及びアルゴリズムを提案し、拡張カルマンフィルタとパーティクルフィルタの二つの実装を示し、数値シミュレーションと実機ロボットを通して有効性を示した。さらに、実環境で不確実性の要素からロボットシステムの運動制御への影響について、理論面から複数移動ロボットのフォーメーション誤差及び計測誤差から UAV ロボットの位置推定への伝搬特性の定式化と、自己位置推定の可解性マップ (Solvability Map) という新しいコンセプトの提案を行った。その上、確率方程式による三次元可解性マップの高速計算アルゴリズムを提案し、フォーメーションと三次元可解性との関係を分析すると共に、自己位置推定の可解性を維持する移動ロボットのフォーメーション制御戦略を構築し、

実システムに実装を行い、実験を通して有効性を示した。以上のように、本論文では、複数移動ロボットのフォーメーションによる UAV ロボットの自己位置推定の新しい協調ロボットシステムを提案した上、不確実性を有するシステムにおいて理論的な要素を研究し、誤差伝搬および可解性マップに基づく協調運動制御の手法を確立した。

本論文は、11 章により構成されている。第 1 章では、UAV ロボットの位置推定問題を示すと共に、本研究の目的、研究の概要及び論文の構成を述べている。第 2 章では、屋外や屋内 UAV の位置推定と複数ロボットによる協調位置推定など関連研究を概観している。第 3 章では、複数移動ロボットによる UAV ロボットの位置推定を用いる三辺測定の推定手法の理論及び特徴を論じ、第 4 章では、UAV ロボットの位置推定に用いる複数移動ロボットの自己位置及びフォーメーションの観測、UAV ロボットへの距離観測の基本手法および誤差特性について述べている。第 5 章では、提案する複数移動ロボットによる UAV ロボットの位置推定のシステム設計、推定手法、及び、拡張カルマンフィルタとパーティクルフィルタの二つのアルゴリズムを用いる実現手法を示している。第 6 章では、提案した UAV ロボットの位置推定の手法において、移動ロボットの位置誤差及び UAV ロボットへの距離計測誤差から位置推定への誤差伝搬特性を定式化し、UAV ロボットの 3 次元位置推定誤差を定量的に分析する手法を確立する共に、SLAM アルゴリズムを用いることにより、位置推定の誤差上限を有することを示した。第 7 章では、移動ロボットの位置や UAV ロボットへの距離測定の不確実性からの自己位置推定の可解性問題を論じ、自己位置推定の可解性マップ (Solvability Map) という新しいコンセプトの提案を行い、確率方程式による三次元可解性マップの高速計算アルゴリズムを提案している。第 8 章では、得られた知見を基に、複数冗長ロボットシステムによる UAV 位置推定に関するフォーメーション選択手法を構築していると共に、フォーメーションと三次元可解性との関係の分析に基づき、自己位置推定の可解性を維持する移動ロボットのフォーメーション制御戦略を構築している。第 9 章と第 10 章では、上記提案した UAV ロボットの位置推定、フォーメーションの選択、可解性に基づく実時間フォーメーションの制御の提案手法について、数値シミュレーションと実機ロボットシステムによる検証実験の結果を示し、提案手法の有効性を示している。第 11 章では、本研究の結論がまとめられ、最後に、実用化に向けての今後の課題が示されている。

以上に示すように、本論文は、屋内環境における不確実性を有する移動ロボットのフォーメーションから UAV ロボットの自己位置推定システムの構築及びアルゴリズムを提案したものであり、移動ロボットのフォーメーション誤差及び計測誤差から UAV ロボットの位置推定への伝搬特性の定式化、自己位置推定の可解性マップ及び確率方程式による三次元可解性マップの高速計算アルゴリズムの提案、自己位置推定の可解性を維持する移動ロボットのフォーメーション制御の実現など、多くの重要な知見を得、UAV を有する複数ロボットシステム構築と協調運動制御の実現へ大きく貢献したものであるとして高い価値がある。したがって、学位申請者であるルイスブリトルイスアルトゥーロは、博士 (工学) の学位を得る資格があると認める。