

氏 名	とだ ゆういちろう 戸田 雄一郎
所 属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	シス博 第 85 号
学位授与の日付	平成 29 年 3 月 25 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題名	マルチロボットフォーメーションに基づく遠隔モニタリングのための の知能化技術
論文審査委員	主査 教授 久保田 直行 委員 准教授 武居 直行 委員 准教授 金崎 雅博 委員 教授 國井 康晴(中央大学)

### 【論文の内容の要旨】

近年，災害現場などにおいて遠隔地から状況把握を行うための手段として移動ロボットによる遠隔モニタリングに関する研究が注目されている．遠隔モニタリングにおいて重要なことは，遠隔地と操作者をシームレスにつなぐことであり，操作者にとって対象とする環境の状態把握のために，3次元環境の特徴量の可視化が必要とされる．また，操作負担を減らすために，ロボットは，環境探索のための2次元環境地図の構築等の知能化技術が必要となる．地図構築を行う手法は，Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)の研究分野において提案されてきた．SLAMは大規模データを扱う必要があり，環境情報の粒度の必要に応じた調整により，高速化や高精度化は可能である．しかしながら，シングルロボットでの環境探索では，膨大な時間を要してしまう．したがって，この問題を解決するために，マルチロボットフォーメーションによる遠隔モニタリングに関する研究が行われてきた．マルチロボットフォーメーションを用いることにより，遠隔地における「大域分散的探索」と探索された対象の「局所集中的計測」が可能となるが，これらは個別の問題として扱われており，フォーメーションを考慮した探索と計測に関する体系化された方法論は確立されていない．

本論文では，マルチロボットフォーメーションに基づく遠隔モニタリングシステムの構築を目的とし，(1) 知能化技術を用いたシングルロボットによる遠隔モニタリングシステムを提案し，次にこれをマルチロボットに拡張することにより，(2) 大域分散的探索と局所集中的計測を行うためのマルチロボットフォーメーションに基づく遠隔モニタリングシステムを提案する．具体的には，知能化技術を用いることにより，シングル/マルチロボットの制御の観点から，高速化と高精度化を目的とした SLAM 及び環境探索手法，操作者の遠

隔モニタリングの観点から環境地図の可視化を行うための手法を提案する．さらに，屋内外における SLAM に関する実験，マルチロボットフォーメーションに関する実験，環境地図の可視化と遠隔モニタリングなどに関する実験を行い，これらの提案手法の有効性を示す．本論文は 7 章から構成されている．

第 1 章では，研究背景の詳細と研究目的を述べる．

第 2 章では，まず，本研究に関する遠隔モニタリングとユーザインタフェースの従来研究について述べる．次に，移動ロボットのための SLAM と操作者のための環境地図の可視化技術について述べるとともに，マルチロボットシステムによる大域分散的探索と局所集中的計測に関する従来研究を紹介し，遠隔モニタリングシステムに関する問題点を明確にする．

第 3 章では，シングルロボットにおける環境地図構築手法として，Evolution Strategy (ES) に基づく 2 次元 SLAM を提案する．自己位置推定的高速化に，ES の 1 つである  $(\cdot + 1)$ -ES を用い，高精度化のために占有度合いを考慮した新たな評価関数を用いることで，いくつかの実験において，SLAM の従来手法と比較して良好な結果が得られることを示した．また，2 次元地図における特徴抽出手法として，環境地図の解像度をタスクに応じて変更可能な Multi-resolution Map (MM) を提案する．本手法を操作者が指定した目的地までの経路計画に適用し，実環境においてその有効性を検証した．

第 4 章では，遠隔モニタリングシステムにおける環境地図の可視化として，3 次元 SLAM の構築手法を提案する．RGB-D センサを用いた 3 次元 SLAM において，誤対応点を多く含むデータ集合から正しい対応点を探索するための手法として，ES に基づく Evolution Strategy Sample Consensus と呼ばれる手法を提案し，従来手法と比較して安定かつ高速な対応点探索が可能であることを示した．また，Growing Neural Gas (GNG) を用いた 3 次元環境地図の位相構造学習手法を提案するとともに，環境地図の特徴量の抽出及び可視化することにより，遠隔モニタリングが円滑に行えることを示した．

第 5 章では，マルチロボットによる環境地図構築手法を提案する．マルチロボットが協調的に環境地図を構築するためには，互いの位置情報を共有する必要がある．そこで，3 章において提案した MM と ES を組み合わせた位置推定手法を提案する．次に，マルチロボットが大規模データから必要な粒度の環境情報を抽出するための手法として，階層的に位相構造学習を行う Multi-layer Batch Learning GNG (MBL-GNG) を提案し，多くのベンチマーク用データセットにおいて，良好な結果が得られた．さらに，2 次元測域センサから取得した距離データに対して，本手法を適用することによって各階層における位相構造を用いた 2 次元環境地図の構築が可能であることを示した．

第 6 章では，マルチロボットによる大域分散的探索と局所集中的計測に関する方法論を

提案する．大域分散的探索では，マルチロボットにおける環境探索のためのフォーメーション行動を仮想的なバネモデルとファジィ制御により行う手法を提案する．局所集中的計測では，対象物の取り囲み位置を決定する手法として，MBL-GNGにより環境情報とロボット位置の位相構造を学習することにより，シミュレーション環境内において，適切な取り囲み位置を決定できることを示した．最後に，これらの提案手法を用いて，マルチロボットフォーメーションに基づく遠隔モニタリングのための3階層モデルに基づくシステムアーキテクチャとして体系化し，様々な環境での適用可能性を検証した．

第7章では，本論文のまとめとして，結論と考察について述べ，今後の展望について述べる．