

審査の結果の要旨

氏名 池 勇 勳

池勇勳氏の博士論文は、「RGB-D SLAM and Automatic Calibration of Camera Sensor Network for Mobile Robotic Applications in Indoor Environments」と題し、全6章より構成される。本論文では屋内環境におけるサービスロボットの運用のための必須技術である環境の地図情報を生成する SLAM (simultaneous localization and mapping) 技術及び地図情報を用いて環境内に分散設置されたカメラセンサネットワークを自動キャリブレーションするシステムの提案を行っている。

第1章では、本論文の背景である人間・ロボット共存環境において安全かつ効率的な移動ロボットのナビゲーション技術は非常に重要である点に関して概観した。環境に対する地図を生成する SLAM 技術や環境内に分散センサネットワークを構築する環境知能化の必要性を論じた上で、正確な地図生成及びセンサネットワークのキャリブレーション作業の自動化の重要性と意義を主張している。それらの先行研究における各要素技術の問題点について述べた上で、本論文の達成すべき目標を設定している。

第2章では、屋内環境における RGB-D SLAM 技術が提案されている。具体的には、3次元情報の取得が可能な RGB-D センサと、ドア表札の認識のためのカメラを移動ロボットに搭載し、密な3次元セマンティック地図を生成している。ロボットの位置と姿勢は車輪のエンコーダ情報から計算されるオドメトリと画像データを用いて推定され、この際 EKF SLAM と呼ばれる拡張カルマンフィルタに基づいた SLAM を通じて消失点及びドアの表札情報のマッチングが行われる。消失点及びドアの表札情報は、屋内環境で頻繁に観察可能な情報であり、SLAM を行う際、非常に明確な特徴として活用可能である点から、それらのマッチングのための新規な観測モデルがそれぞれ提案されている。また、実環境における比較実験を行い、提案した RGB-D SLAM 技術の有効性を確認している。

第3章では、知能化空間に分散設置されているカメラセンサネットワークと

移動ロボットの軌跡を同時に推定する SLAC (simultaneous localization and calibration) 技術が提案されている。具体的には、分散カメラの観測情報に基づいた目的関数を定義し、最大事後確率推定法を用いてロボットの軌跡とカメラパラメータの最適化を行っている。この際、一般にカメラネットワークなどの環境のモニタリングのための分散センサは屋内環境の壁面に設置しなければならない空間上の制約がある点に着目し、屋内環境の壁情報が含まれている格子地図情報を目的関数の追加拘束条件として用いている。シミュレーション及び地図情報の拘束を用いた場合と用いない場合に対する比較実験を行い、提案した SLAC 技術による性能向上を証明している。

第 4 章では、移動ロボットを利用せず、環境内のカメラセンサネットワークの配置を地図情報のみで自動的にキャリブレーションする手法を提案している。具体的には、3次元地図情報を3次元直線パラメータの集合に変換した後、パーティクルフィルタに基づくマッチングによるパラメータ同定を行っている。この際、第 3 章で述べた同じ理由から3次元地図情報をカメラパラメータに対する拘束条件として活用する。パラメータ最適化における目的関数の定義に関しては、カメラ画像から抽出される直線情報から生成される QLH ディスクリプタを採用している。新しく提案した QLH ディスクリプタはカメラ画像内の併進、回転変化に非常に敏感に反応する特性を持っているため、これらを用いたマッチングを行うことで、ロバストなパラメータ同定が可能である。シミュレーションと実環境における検証実験を行い提案したキャリブレーション手法の有効性を確認している。

第 5 章では、第 2 章で生成した環境の地図情報と、第 3, 4 章で提案した手法を用いてパラメータ同定が完了されたカメラセンサネットワークからの情報を融合した移動ロボットのためのアプリケーションの例を紹介している。サービスロボットを環境内で運用するための必要不可欠な技術であるナビゲーション技術(自己位置推定、経路生成手法など)において、静的な地図情報だけではなく、分散カメラネットワークセンサから得られる動的な環境情報も同時に処理可能な新しい移動ロボットのナビゲーションパラダイムを構築している。

第 6 章では、本論文の成果が総括されている。また今後の方向性として、本論文で提案された要素技術を人間・ロボット共存環境に応用することで安全かつ効率的なサービスロボットの運用が可能となる点などが述べられている。

以上、本論文では人と共存する環境でのロボットの運用のための必須技術である屋内環境の **SLAM** とカメラセンサーネットワークの自動キャリブレーション技術の構築を達成した。従来の画像ベースの **SLAM** 技術の問題点を克服し、知能化空間におけるカメラセンサーネットワークの 6 自由度パラメータ同定を独自のアプローチで新規に達成しており、それらの有効性も十分に検証されている。以上の点において、博士論文として十分な独自性と貢献があると判断する。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。