

京都大学	博士 (工学)	氏名	吉村 僚太
論文題目	Reinforcement Learning Based Generation of Highlighted Map for Mobile Robot Localization and Its Generalization to Particle Filter Design (自己位置推定のためのハイライト地図の強化学習による生成と粒子フィルタ設計への一般化)		

(論文内容の要旨)

ロボットが自律移動を行うためには、自身の現在位置を推定する自己位置推定が必要であり、そのアルゴリズムとして Monte Carlo localization (MCL) が広く使われている。これは、ロボットに搭載された地図に基づいてセンサ計測値の尤度を計算することで自己位置をバイズ推定するものである。この手法は 20 年以上にわたって盛んに研究されており、さまざまな拡張や応用事例がある。MCL は多くの環境で良好に動作するが、柵が等間隔に置かれた倉庫や細長い通路など形状に特徴が少ない環境では、しばしば推定に失敗し、このような環境における性能の改善が課題となっている。本論文では、尤度の計算に用いる地図データを、実際の自己位置推定における性能を指標として機械的に修正する方法を提案し、その拡張や一般化を議論している。この修正された地図を論文中ではハイライト地図と呼称している。MCL で用いられる尤度場地図は高次元のパラメータで表現されるため、自己位置推定のような複雑なタスクにおける性能に基づいて最適化することは容易ではなく、実現には工夫を要する。これらの課題に対する研究成果を以下の 6 章にまとめている。

第 1 章は緒言であり、本論文の背景と概要を説明している。まず、自律移動を行うロボットで用いられる MCL に関する研究背景について述べたあと、MCL の概略と単調な環境において生じる従来法の問題について説明し、既存の研究で行われてきた対策をまとめている。つぎに、第 3 章で提案するハイライト地図の基本的なアイデアを説明し、その機能とメリットを説明している。また、その生成法について検討し、強化学習に基づいた自動生成が有力なアプローチであることを説明している。つづいて、第 4 章で提案するロバストなハイライト地図を生成する方法と、その背景となるロバスト敵対的強化学習の概略について説明し、第 5 章で行う粒子フィルタの設計への一般化について背景となる過去の研究をまとめている。また第 1 章の最後では論文の構成と表記について説明している。

第 2 章では以降の章の準備として、MCL のアルゴリズムと MCL を構成する尤度場地図や観測モデルなどの要素について説明している。また、ハイライト地図の生成に用いる強化学習についても、概要とアルゴリズムを説明している。

第 3 章では、まずハイライト地図を自動生成する問題を定式化する。つぎに、MCL アルゴリズムに含まれるランダム性を、強化学習に必要とされるランダム性とみなすことで、MCL を強化学習の枠組みに当てはめてハイライト地図を生成する方法を提案している。提案法の特徴は、自己位置推定に有用な目印を自動的に検出および強調できること、地図は実際に計測したセンサ計測値を学習データとして用いるが、他の強化学習アプリケーションと異なり、ロボットを走行させるのは 1 回だけで良いこと、さらに、実際のセンサ計測値を用いるため、ロボットやセンサのスペックに特化した地図を得られることである。また、いくつかの条件を満たせば提案アルゴリズムの最適化計算が収束するこ

京都大学	博士 (工学)	氏名	吉村 僚太
<p>とを保証している。さらに、基本的な MCL 以外の自己位置推定法と組み合わせても性能の向上が見込める点も特徴である。実際に数値シミュレーションを用いた検証では、提案法によって生成されたハイライト地図が、基本的な MCL との組み合わせにおいて通常の尤度場地図より高い自己位置推定精度を実現するだけでなく、KLD (Kullback-Leibler divergence) サンプルングに基づく MCL やスキャンマッチングに基づいた MCL との組み合わせにおいても自己位置推定精度を改善することを示している。また、提案法による性能改善幅は、KLD サンプルングやスキャンマッチングを単独で用いた場合の改善幅に劣らず良好であることも示されている。さらに、実環境から得られたデータに対しても、提案法によるハイライト地図が自己位置推定精度を改善することを確認している。</p> <p>第 4 章では、ロバストなハイライト地図を生成する方法について述べている。まず、前章で提案したハイライト地図の自動生成法は、想定外の移動する障害物に弱いことを指摘している。つぎに、仮想的な移動する障害物を導入してロバストなハイライト地図を生成する問題を定式化している。そして、仮想的な移動する障害物と MCL で構成されるシステムが、最適なハイライト地図を作成する問題と、地図作成を邪魔するように障害物の振舞いを最適化する問題の二つの強化学習問題に変換できることを示している。敵対的強化学習の枠組みでこれら二つの問題を同時に最適化することで、ロバストなハイライト地図を生成するアルゴリズムを提案している。さらに、提案するアルゴリズムによって、実際に先述の障害物に対するロバスト性が高いハイライト地図が生成されたことを、数値シミュレーションにおいて確認している。</p> <p>第 5 章では、第 3 章で提案された方法を、ハイライト地図を含む観測モデル部分のパラメータに加えてシステムモデル部分のパラメータも設計できる方法に拡張し、一般的な状態推定アルゴリズムである粒子フィルタを設計する方法として提案している。そこでは、粒子フィルタ・アルゴリズムに含まれる状態予測およびサンプリングという二つのランダム性を持つ処理を共に、強化学習に必要とされるランダム性とみなすことで、粒子フィルタを強化学習の枠組みに当てはめてシステムモデルおよび観測モデル部分のパラメータを最適化している。また、提案アルゴリズムの収束の条件を理論的に示すとともに、ロボットの自己位置推定問題に提案法を適用して、数値実験で有効性を確認している。</p> <p>第 6 章では結論として本論文の内容をまとめたあと、今後の研究の方向性について議論している。</p>			

氏名	吉村 僚太
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文の中心的なアイデアは、ロボットが自律移動を行ううえで必要不可欠な自己位置推定において、一般的に用いられる尤度場地図を、現実のロボットの移動性能やセンサの精度、典型的なタスクの下で最適化することである。最適化によって得られた地図は自己位置推定に有用な情報を強調したものとなり、本論文ではハイライト地図と呼称されている。尤度場地図に基づく自己位置推定は20年以上にわたって盛んに研究されており、本論文が扱う問題には十分な工学的意義があると考えられる。また、ロボット自体にハードウェアやソフトウェアを追加することなく地図データを置き換えるだけで自己位置推定性能を改善することが可能であり、本論文のアイデアは新規かつ実用性が高い。

一方、尤度場地図は高次元のパラメータで表現されるため、自己位置推定のような複雑なタスクにおける性能を指標として最適化することは容易ではなく、工夫を要する。本論文では、ハイライト地図の生成問題を強化学習の枠組みにあてはめることによって、近年その有効性が評価されている強化学習の技法の援用を可能にし、いくつかの条件のもとで提案アルゴリズムの収束性を証明しており、学術的な貢献を有する。また、シミュレーション環境および実環境で得られたデータのもとで提案法の有効性が確認されており、実用的にも価値の高い成果と言える。

さらに、自己位置推定問題において重要な、移動する障害物へのロバスト性を高めるため、仮想的な障害物を導入して敵対的強化学習のアイデアを援用することでロバスト性を持ったハイライト地図を生成する方法を提案している。この方法でも数値シミュレーションを用いて有効性を示している。さらに、地図作成という特定のアプリケーションだけでなく、より一般的な状態推定法である粒子フィルタの最適化問題を扱えるように提案法を拡張する方法も示している。これらの拡張は、それら自体が有用であるだけでなく、本論文のアイデアが広範な問題に適用可能であることを示唆している。

以上要するに、本論文はロボットの自己位置推定問題、およびより一般的な粒子フィルタの設計問題に対して、理論的にも実用的にも有用な方法を与えたものであり、その成果は学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また令和4年4月21日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。