

報告番号	甲 第 13613 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 自律移動体の位置推定のロバスト性向上を
目指したセンサ融合に関する研究
(Sensor Fusion for Improving Robustness
of Localization for Autonomous Robot)

氏 名 大橋 臨

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、自律移動体の位置推定のロバスト性向上を目指したセンサ融合に関する研究の成果をまとめたものである。

コンピュータ技術の小型化、高性能化、低価格化、高信頼化を背景に、ロボットの知能化が進んでいる。それに伴い、ロボットの活用範囲は、生産現場において素早く正確にもつくりをこなす産業用ロボットから、災害現場や人の生活環境などで、人の生活や行動を支援するロボットへと広がりつつある。中でも、人の操縦によらず自動で移動してタスクをこなす自律移動体への期待は大きい。物品の自動搬送、オフィスの自動警備・清掃、社会インフラ・プラントの自動保全・点検、農作業を自動で行う移動体に加え、自動運転車など、極めて広い分野での利用が検討されている。労働力不足が懸念される本国にとって、自律移動体による人の作業の代替による効果は大きい。

移動体が自律的に移動するためには、移動体の現在位置を把握する位置推定技術が重要である。位置推定により算出される現在の位置は、自律移動における経路生成や障害物回避で利用される。しかし、算出される位置情報に非常に大きな誤差が含まれると、誤った経路が算出されて移動体が目的地に辿り着けないのみならず、進行すべきでない方向に移動体が進行することで、重大事故を引き起こす危険性がある。そのため、自律移動における位置推定技術には、高いロバスト性が要求される。位置推定における誤差は、「偶然誤差」と「系統誤差」に分類される。一般的な位置推定系の開発では、センサの観測の時系列処理により偶然誤差に対処し、環境要因のモデル化により系統誤差に対処してきた。しかし、移動体が活動する実環境は、非常に多くの環境要因が予測不能に変化してしまうため、モ

モデル化されていない環境要因の変化により壊滅的な位置推定誤差が生じてしまう場合がある。モデル化されていない環境要因の変化により壊滅的な推定誤差が生じた場合、自律移動系全体の動作が破綻し、重大事故につながる危険性がある。位置推定の破綻を防ぐためには、環境要因のモデル化に加え、それとは異なるアプローチにより系統誤差に対処する必要がある。

本研究では、環境要因のモデル化に加え、「センサと位置推定法の多重化により得る複数の位置情報を外れ値処理を施して融合する」ことで系統誤差に対処し、位置推定のロバスト性向上を目指す。移動体に搭載されるセンサの数は、センサの小型化や多様化を背景に増加傾向にあり、これらセンサを利用した位置推定法も多種多様な手法が提案されている。2019年のIEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2019)では、全1127件のオーラル発表のうち、106件とほぼ1割の発表が自己位置推定およびSLAMにかかわる発表であった。それら位置推定法は、オープンソース化が進んでおり、Robot Operating System (ROS)などの共通プラットフォームで容易に利用することができる。各位置推定法は、それぞれ異なった観点からセンサの観測を処理していることから、環境要因による推定誤差の大きさや壊滅的な誤差が生じる頻度は、センサや位置推定法によって異なると思われる。このことから、本研究では、「複数の位置推定法で同時に同様の壊滅的な推定誤差を含む位置情報が算出されることは稀である」という仮定をおく。この仮定のもとでは、壊滅的な推定誤差を含む位置情報は、他の推定位置に対して著しく離れた外れ値になることが想定される。壊滅的な系統誤差を含んだ位置情報を外れ値処理により検出・排除、残りの位置情報を融合する手法を提案する。これにより、モデル化されていない環境要因の変化により壊滅的な系統誤差が生じた場合でも、提案する外れ値処理で対処することで、ロバスト性が高い位置推定を行えるシステムの実現を目指す。本論文では、上記仮定のもと、「系統誤差」と「偶然誤差」に対処できる位置推定法の提案を目指し、1.「系統誤差」に対する外れ値処理の有効性の検証、2.「系統誤差」と「偶然誤差」への対処を目指した、外れ値処理法を利用したベイズフィルタによる位置推定法の提案に取り組む。さらに、3.位置推定のロバスト性向上を目指した2.の応用として、位置推定法の信頼性マップ構築法の提案を行う。以下詳細を述べる。

1. モデル化されていない環境要因の変化により生じる「系統誤差」に対する外れ値処理の有効性の検証

複数の位置推定法から得る位置情報を外れ値処理により融合することの有効性を検証する。位置を融合する方法には、平均やメディアンがある。平均は、全ての位置を均等に融合した位置となるが、融合する位置情報の中に一つでも壊滅的な推定誤差を含む位置が含まれると、平均の位置に大きな影響を及ぼすことが懸念される。一方、メディアンは、他の位置との距離の和を最小にする位置として定義される。これは、他の位置に対して著しく離れた外れ値の影響を受けにくいとされる。モデル化されていない環境要因の変化により系統誤差が生じてしまった場合において、外れ値の影響を受けにくい

メディアンにより位置を融合することで、位置推定のロバスト性が向上するかどうかを検証する。

2. 「系統誤差」と「偶然誤差」への対処を目指した外れ値処理法を利用したベイズフィルタによる位置推定法の提案

ベイズフィルタに代表される確率的位置推定法は、「偶然誤差」に対処できることから、位置推定の分野で広く活用されている。確率的位置推定法では、各位置推定法から得る位置情報を位置の存在確率分布として算出することで、位置の不確実性を表現する。センサ融合では、各位置推定法から得る確率分布を積により融合することで、位置の不確実性を考慮して融合できる。しかし、積により融合される分布の中に、真の位置における存在確率が著しく低い分布（バイアス分布）が含まれると、位置推定が破綻する例が報告されている。バイアス分布は、モデル化されていない環境要因の変化により生じる「系統誤差」が反映された分布であり、確率的位置推定法では対処できない。そこで、確率的位置情報において、存在確率分布の相対比較により外れ値を排除し、融合することで、系統誤差に対処可能な手法を提案する。これにより、「系統誤差」と「偶然誤差」へ対処できる、外れ値処理法を利用したベイズフィルタによる位置推定法の実現を目指す。

3. 位置推定法の信頼性マップ構築に向けた相対評価法の応用

相対比較による外れ値処理法の応用として、位置推定法の信頼性マップ構築法について述べる。位置推定法の信頼性マップは、相対比較の結果を可視化することで、位置推定法の信頼性が低い領域を位置推定法ごとに教示するものである。複数の位置推定法で信頼性が低いと判定された領域は、「同時に同様の壊滅的な推定誤差を含む位置情報が算出されることは稀である」という仮定を満たさず、外れ値処理に基づく融合システムにおいて誤差を適切に排除できない可能性が高い領域である。複数の位置推定法の信頼性が低い領域を信頼性マップから読み取り、その領域で機能する位置推定法を移動体に増設するか、環境に位置推定を補助するセンサを設置することで、その領域における位置推定の信頼性を向上させることができる。そこで、位置推定法の信頼性マップの構築法と、これを活用して位置推定のロバスト性を向上させる方法について言及する。

以下に本論文の構成を記す。

第2章では、移動体の位置推定のロバスト性向上に向けた既存の取り組みを紹介する。まず、位置推定に利用されるセンサと位置推定法について紹介し、環境要因による推定誤差について述べる。推定誤差を軽減させる取り組みとして、センサの観測の時系列処理とセンサの多重化による取り組みを紹介し、それぞれの利点と限界について言及する。

第3章では、「系統誤差」の減少を目的として、センサと位置推定系の多重化により得る複数の位置情報の外れ値処理に基づく融合法について検討する。検証では、カメラとLiDARから得る観測データを、LiDARによる位置推定法、カメラによる位置推定法、LiDARとカメラによる位置推定法を通して複数の推定位置を算出する。統計処理の基本である平均と

メディアンを利用して推定位置を融合し、モデル化されていない環境要因の変化による系統誤差が生じてしまった場合において、外れ値の影響を受けにくいメディアンにより推定位置を融合することで、位置推定のロバスト性が向上するかどうかを検証する。

第4章と第5章では、「系統誤差」と「偶然誤差」への対処を目指した、外れ値処理法を利用したベイズフィルタによる位置推定法を提案する。第4章では、確率的な位置情報における外れ値除去法を提案する。第5章では、第4章で提案する「系統誤差」に対処できる外れ値除去法を、「偶然誤差」を減少させるパーティクルフィルタによる時系列処理に適用した位置推定法を提案する。

第6章では、確率的な位置情報における外れ値除去法の応用として、位置推定法の信頼性を領域ごとに評価し、位置推定が破綻する可能性がある領域を提示する方法を提案する。

第7章では、実世界データ循環の枠組みにより、本論文で目指す位置推定のロバスト化を実現する方法について述べる。

第8章は、結言である。