

2024 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	推定外乱と機械学習によるクローラロボットの速度推定方法の研究 ー学習方法と環境ロバスト性に関する実験的検討ー
キーワード	①メカトロニクス、②機械学習、③速度推定

研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏 名	クワハラ ヒロアキ 桑原 央明
配付時の所属先・職位等 (令和6年4月1日現在)	芝浦工業大学 システム理工学部・助教
現在の所属先・職位等	芝浦工業大学 システム理工学部・准教授
プロフィール	・2010 年 慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程修了 ・2010～2022 年 株式会社東芝にて、製造・保守高度化に係るメカトロニクス、ロボティクスの研究開発に従事 ・2014～2015 年 Italian Institute of Technology の訪問研究員として、フィールドロボットモーションコントロールの研究開発に従事 ・2022 年 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了 博士(工学) ・2023～2024 年 芝浦工業大学システム理工学部 助教 ・2025 年より、芝浦工業大学システム理工学部 准教授 現在に至る。

1. 研究の概要

クローラロボットは、不整地や路面状況の予測が困難な月惑星面や災害現場などにおいて移動し、探査や救助といったタスクを遂行するロボットとして活用されている。クローラロボットは、構造が類似する対向二輪型ロボットと比較して、履帯と路面の接触面を広く確保できる点から、高い走行性能を有する。しかしながら、移動中に路面と履帯間で発生するせん断応力の分布が変化することで滑りが生じる。対向二輪型ロボットの自律走行制御では、車輪と路面の間で滑りが生じないことを前提とする例が多いが、クローラロボットでは滑りが避けられず、従来の自律走行制御手法の適用が困難である。そのため、クローラロボットの自律走行制御には、滑りの推定手法とその制御への応用手法の開発が不可欠である。

これまで、クローラロボットの滑りに関しては国内外で多数の先行研究が行われてきた。テラメカニクスの分野では、履帯と土壌間のダイナミクスを扱い、滑りのメカニズム解明を目的とした研究が存在する。ただし、これらは複雑な土壌モデルを用いるため、実時間制御への適用には高い計算コストが課題となる。一方、ロボティクス分野では、実時間制御を前提に、事前同定した履帯と路面の接触点群を用いた簡易摩擦モデルによる滑り推定や、クローラロボットの駆動電流と滑り速度の関係を実験的にモデル化して制御に応用した報告がある。これらの手法は、滑りを物理次元の低い力情報として扱い、制御に活かす点で有効であるものの、履帯への電流センサなどの追加センサを必要とし、モデル化誤差も残るため、実運用化には至っていない。

以上の背景を踏まえ、クローラロボットの内部情報のみを用いて滑りを含む速度を高精度に推定し、滑りを考慮した制御手法の開発に取り組んだ。

2. 研究の動機、目的

申請者は、クローラロボットの駆動軸にかかる外乱力が履帯と接触する環境情報を含むことに着目し、駆動軸へ外乱と機械学習によるクローラロボットの滑りを含む速度の推定方法および推定速度を用いた駆動力制御方法を提案し、研究を進めてきた。提案する速度推定方法では、制御工学の分野にて開発された外乱オブザーバを用いて滑りの情報を含む駆動軸への外乱を推定する。図1に示す、推定外乱を含むクローラロボットの情報から速度を推定するニューラルネットワーク（以下、「速度推定ニューラルネットワーク」と呼称）を構成し、画像処理を用いた俯瞰システムにより学習させる。これまで、学習時と走行時に環境が同じである条件下では、従来手法より高速・高精度な速度推定性能を有することと、繰り返し測定による推定再現性を確認している（Kuwahara IEEJ/JIA 2022）。さらに、推定速度を用いてクローラの運動エネルギーのダイナミクスソースである駆動力を推定し、制御する方法を開発し、クローラロボットの滑りを抑制する効果を実証している（Kuwahara IEEE 2022）。

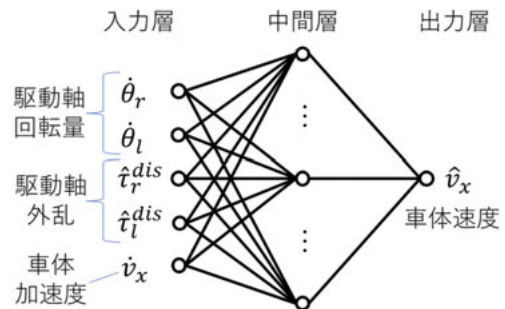


図1. 速度推定ニューラルネットワーク

一方で、一般的なニューラルネットワークの特徴として、推定性能が学習時の条件に強く依存することが知られている。走行環境の摩擦係数は外乱に影響するため、速度推定も環境変化に影響を受けると考えられる。

そこで、本研究では、申請者らが提案する速度推定ニューラルネットワークの適用範囲および機械学習の指針を明らかにすることを目的にする。学習時と走行時の環境条件を変えて速度推定性能を評価し、提案手法における学習の方針について検討する。さらに、提案する速度推定方法において、推定外乱は環境情報をニューラルネットワークに付与するため、学習によりニューラルネットワークは環境変化に対するロバスト性を確保できると仮説を立てている。そこで、推定外乱による速度推定性能の環境変化に対するロバスト性についても実験的に評価する。

3. 研究の結果

図2に示す実験環境を用いて、(1) 異なる路面環境での性能評価、(2) 外乱（モータ抵抗）の効果検証、(3) 重力補償の効果検証を行った。

(1) 異なる路面環境での性能評価

実験室の床やローラ上など、摩擦の異なる路面環境を用いて、クローラロボットの速度推定精度を評価した。結果として、学習時と同一の路面環境では高い精度を維持したが、異なる路面環境では推定誤差が増加した。一方、複数の異なる路面環境で学習を行うことで、すべての環境において安定した推定性能を得られた。特に、高摩擦および低摩擦の両方の路面環境で学習を行うことで、中間的な特性を持つ路面環境にも対応可能となった。

(2) 外乱（モータ抵抗）の効果検証

提案手法と、外乱の代わりにランダム変数を入力とする速度推定ニューラルネットワークの速度推定性能を比較した。モータにかかる抵抗を学習の入力に含めることで、路面環境の違いに対する推定精度が向上することを確認した。モータ

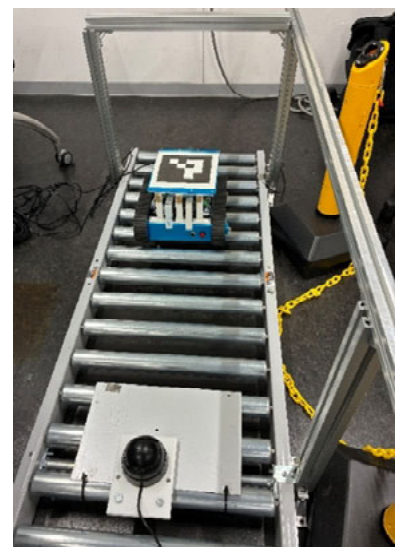


図2. 実験環境

回転数や加速度情報のみを用いた場合と比較し、外乱情報の追加が有効であることを示した。

(3) 重力補償の効果検証

傾斜路面環境における走行では、重力が加速度値に影響するため、これを補正する「重力補償」を導入した。これにより、平坦な路面環境で学習したモデルでも傾斜路面での走行に適用可能となった。

上記、(1) ～ (3) の結果から、以下の知見を得た。

- ・ 学習環境の多様性が重要：多様な路面環境を学習に含めることで、未知環境への対応力が向上する。
- ・ 外乱の活用が有効：駆動抵抗は路面状態や滑りを反映し、推定精度の向上に寄与する。
- ・ 重力補償により地形の違いにも対応可能：傾斜による重力影響を除去することで、正確な速度推定が可能となる。

従来、滑りを含む速度推定には外部センサやGPSの導入が不可欠であったが、本手法はロボット内部のデータのみを用いる点で、シンプルかつ実用的なアプローチである。滑りを伴う環境下においても、以下の成果を得ることができた。

- ・ 学習に使っていない地面でも高い予測精度を維持できた。
- ・ モータにかかる力の情報を加えることで、地面の変化に対して強くなった坂道などでも、重力の影響を除去することで正確な予測が可能になった。

この技術は、建設現場、災害対応、農業、点検ロボットなど、多くの分野に応用が期待される。将来的には、車両が自ら環境を判断し、状況に応じた動きを柔軟に選べるような「賢いモビリティ」の実現につながると考えられる。

4. 研究者としてのこれからの展望

本研究の遂行により、申請者の提案するクローラロボットの内部情報のみで滑りを含む速度推定方法および滑りを抑制する制御手法の適用範囲を拡張し、構造物内や未知環境を移動しタスクを実行できる移動ロボット制御技術へと発展させたい。

5. 支援者（寄付企業等や社会一般）等へのメッセージ

本研究を採択いただきまして、誠にありがとうございます。本助成により研究を着実に推進することができました。厚くお礼申し上げます。今後も、社会で必要とされるメカトロニクス技術を開発していきたいと思っております。今後とも、変わらぬ支援をいただけますと幸いです。よろしく願いいたします。