

2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	神戸大学 大学院工学研究科 機械工学専攻
職位または役職	准教授
氏名	田崎 勇一

1. 研究題目

高トルクモータを用いたパラレルリンク式二足歩行ロボットの高機動制御

2. 研究目的

本研究では人型サービスロボットの効率的かつ安全な運用を実現する上で必要不可欠である転倒回避と高速歩行の制御技術を開発し、これを小型人型ロボットを用いて実機評価することを目的とする。近年では重量物の搬送や階段昇降などの作業要求から人型ロボットの大型化・高重量化が進んでおり、それと同時に転倒によってロボット自身や周辺環境が被る損害のリスクが増大している。このため、人型ロボットに人間の作業を代行させたり、人型ロボットと人間の作業者との協調作業を安全に実現するためには転倒回避・転倒安全の技術の実用化が強く求められている。加えて、荷物運びや案内などのサービスを提供するロボットには利用者である人間と同等の移動速度が求められるが、現状において人間の歩行速度に追従できる人型ロボットが開発された例は少ない。そこで本研究では、大きな外乱に耐えるために必要となる踏み出しを伴う転倒回避運動と、高速かつ精確な運足・着地制御が求められる高速歩行を実現可能な人型ロボットの制御手法の開発を行う。加えて、これらの制御手法を実装するには高速な脚運動が可能なハードウェアが不可欠である。そこで、パラレルリンク式脚機構と高トルク・低減速比モータを組み合わせた新たな人型ロボットの実験機を開発する。これを用いて多方向の外乱に対する転倒回避制御の定量的な性能評価を行う。本研究の成果により人型ロボットの転倒安全性が大きく向上し、多方面での実用の促進が期待される。

3. 研究内容及び成果

高速な脚運動を想定した転倒回避および高速歩行制御法の開発

人型ロボットの運動制御の課題の中で、特に高速な脚運動が求められるものに転倒回避と高速歩行がある。大きな外乱が作用したときに転倒を回避するには、すばやく数歩を踏み出す必要がある。本研究では様々な状況における適切な着地位置をデータベース化し、これを利用して制御時に即座に着地位置修正を行う手法を提案した(図 1)。理論面においては、二足歩行ロボットの転倒回避制御に対して、可捕性にもとづく理論解析およびそれを基礎とした制御系設計を行った。可捕性(Capturability)とは、外乱などによってバランスを崩したロボットが何歩か踏み出すことで重心を停止させることができるかを解析するための枠組みであり、近年注目を集めている。本研究では解析の対象となる変数空間を離散化することによって従来手法と比べてより広い状況へ適用可能な解析手法を開発した。本手法による可捕性解析結果をデータベースとしてロボットの制御器に記憶させることで、多方向の外乱に対する転倒回避運動を実時間制約のもとで生成することが可能となった。また、提案手法の転倒回避性能を動力学シミュレーション環境で評価した(図 2)。その結果、本手法を用いることで、従来手法と比べて高い程度の外乱下で歩行を継続できることが確かめられた。本成果を本分野のトップカンファレンスである Humanoids にて発表した。

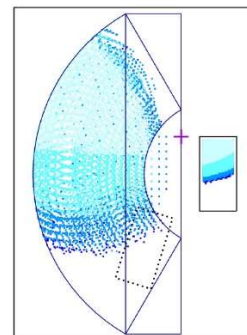


図 1 データベースより得られる着地可能領域の可視化

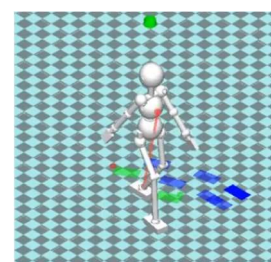


図 2 提案手法を用いた転倒回避シミュレーション

パラレルリンク式二足歩行ロボット実験機の開発

転倒回避制御の実装には高速な脚移動が可能な機構を備えた二足ロボットのハードウェアが必要となる。この要求にこたえるために、報告者が提案してきたパラレルリンク式の脚機構を用いる。また、高速・高トルクの要求を満たすアクチュエータ部の設計が重要であるが、この点については下記の二通りのデザインを並行して検討した。

1. 高回転数モータとボールねじ減速による直動アクチュエータ
 2. 高トルクモータと低減速比の平歯車減速による回転アクチュエータ
- 案 1 は比較的低い消費電力で高い位置決め精度が見込めるという利点があるものの、バックドライバビリティに乏しいため着地衝撃の緩衝性が課題である。案 2 はコンプライアンス性の高い制御が可能となる。

本年度の研究では設計案 1 の実装と評価を重点的に行った。試験の結果、足の位置決め精度や低慣性については設計通りの性能が得られた。また、先行研究で課題となっていたパラレルリンク特有の振動現象に関しても、位置制御の D ゲインを適切に調整することで制振が可能であることが確かめられた。一方で、片脚支持の姿勢において支持脚が自重を支持する際にモータのトルクが不足することが明らかとなった。この問題への対応を含め、機体の開発自体に当初の計画以上の時間を要してしまった結果、実機を用いた転倒回避性能の評価は十分に実施できなかった。この課題については次年度への持越しとしたい。



図 3 試作機の CAD モデル

4. 今後の研究の見通し

多様な環境条件に対応可能な転倒回避制御

転倒回避と高速歩行のための運動生成に関する理論的基礎の構築は一定の進展を見た。2021年度では多様な環境条件に対応できるように転倒回避手法の拡張を行う。基本的な考え方は、理想的な環境条件で事前計算したデータベースを用いる一次フィルタと制御に明らかになる環境条件を考慮した二次フィルタの二段構成とすることである(図4)。周辺障害物の考慮については2020年度から継続して検討する。これに加えて路面の摩擦係数(凍結や濡れた路面など)の扱いを検討する。また、実時間制御のためにはデータベースの検索時間は1ミリ秒程度が望ましいが、データベースの大規模化につれて検索時間の増大が懸念される。そこで検索アルゴリズムの効率化も合わせて検討する。

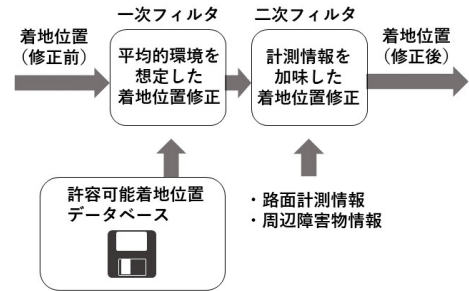


図4 着地位置修正器の処理の流れ

低減速比、高トルクモータを搭載した二足歩行ロボット実験機の開発と改良

低減速比・高出力モータを搭載した二足歩行ロボットの実験機の開発を行う。2020年度において基礎的な設計およびモータやモータドライバの選定はほぼ完了している。機構やセンサまわりの設計の大部分はボールネジ方式と共有するため、その開発期間は短縮されるものと期待される。

動力学シミュレータと外乱印加装置を用いた転倒回避性能の定量的評価

2020年度から継続して外乱印加装置(図5)を利用した実機試験を行う。これと並行して、テストの効率や再現性の観点から利点の多い動力学シミュレーション環境を利用した評価も行う。転倒回避解析に用いられる重心運動モデルでは考慮されない脚同士の自己干渉、反応の遅れによる姿勢の傾斜、路面との接触モード(面接触、点接触、滑りなど)の変化などによる影響について実験を通じて考察する。また、試験を通じ、外乱の強さ、方向や頻度と転倒確率の関係性について統計的な知見を得る。これをもとに、一般に人型ロボットや脚式ロボットの運足速度と許容可能な外乱の強さに関する定量的な知見を得る。

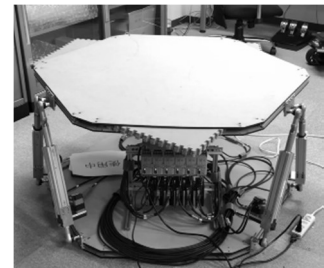


図5 試験装置の外観

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文(査読付)

田崎勇一, 栗林拓輝, 横小路泰義: 可捕領域の事前計算を用いた二足ロボットの実時間着地修正, 日本ロボット学会誌, Vol.38, No.10, pp.985-992, 2020.

国際会議(査読付)

Y. Tazaki: Real-time Step Adaptation for Bipedal Robots Utilizing Pre-computation of Capture Regions, 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2021.