

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	広島大学 先進理工系科学研究科 機械工学プログラム
職位または役職	准教授
氏 名	村松 久圭

1. 研究題目

三脚車輪移動する移動型四腕ロボットの開発と制御

2. 研究目的

本研究は整地に適した車輪移動能力・不整地に適した三脚車輪移動能力・エネルギー効率の高い転がり移動能力・四腕による把持操りの複合能力を有する移動型四腕ロボットとその操作ロボット開発を目的とする。このうち助成期間においては、剛体と柔軟体を織り交ぜた機構設計による移動型四腕ロボットの耐衝撃性獲得、移動型四腕ロボットの移動・操り・基幹動作に関する自由度に基づく操作ロボット開発、歩行・走行・転がり・操りに関する半自動遠隔操作を実現し、実験室および屋外での実験検証を目標とする。本研究を通して汎用的な移動能力および作業能力を有する移動型四腕ロボットを開発し、人命救助、災害復旧、そして建設現場における作業の自動化および安全化に寄与することが期待される。

3. 研究内容及び成果

助成者はこれまで駆動輪付き12軸移動型四腕ロボットを開発した。本ロボットは、先端に1自由度駆動車輪が取り付けられた3自由度の前腕、2つの直列弾性を有する3自由度後腕、背面の2自由度上腕を有する。2つの後腕は歩行移動および物体の把持・操りの双方に利用され、上腕のエンドエフェクタは他腕との協調によって位置および姿勢を決定する。さらに胴体下部には駆動しない受動車輪が2つ取り付けられており、歩行中の胴体支持および車輪走行に利用される。

さらに、移動型四腕ロボットの移動速度・方向・胴体高さ・背腕位置と姿勢を指定する7自由度操作デバイスを開発し、それに応じたロボット動作を生成する半自動遠隔操作制御システムを構築した。

本ロボットを用いて、実験室でのシームレスな歩行・走行・操りの遠隔操作実験に成功した。実験では、車輪走行を伴う運搬、坂の移動、砲取り、坂下り、ブロック不整地の移動、Uターン、砲ぶら下げ、で構成され、一連のタスクを開発した半自動遠隔操作システムを用いることでシームレスに実現することに成功した(YouTube 動画:<https://www.youtube.com/watch?v=KHxmBep2Pek>)。

さらに、上述の移動型四腕ロボットが持つ移動・操り能力を維持しつつ、新たに転がり移動機能を搭載した移動型四腕ロボットを開発した。これにより、よりエネルギー効率の高い転がり移動能力の獲得に成功した。そして、本ロボットはインホイールモータ、ステッピングモータ、さらにハーモニックギアを用いて新たに構成し、軽量化および高トルク化に成功した。加えて、転がりを始動するための動作制御と、転がり後の復帰動作制御を開発し、本ロボットがこれまでに獲得した他の移動モードとシームレスに遷移することに成功した。これらを統合し、本ロボットの転がり実験を実施し、操縦によるシームレスな転がり姿勢への移行・転がり・復帰・走行を確認した。

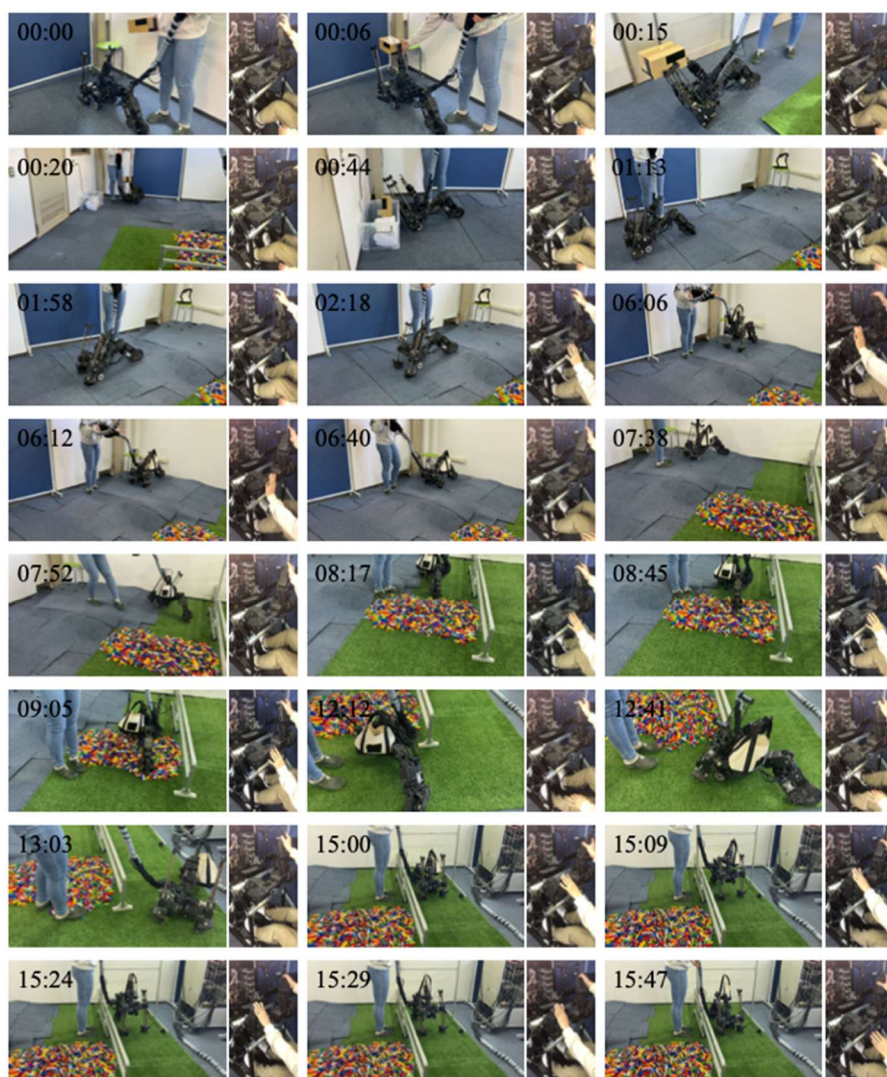


図1. 12軸移動型四腕ロボットの屋内実験結果。

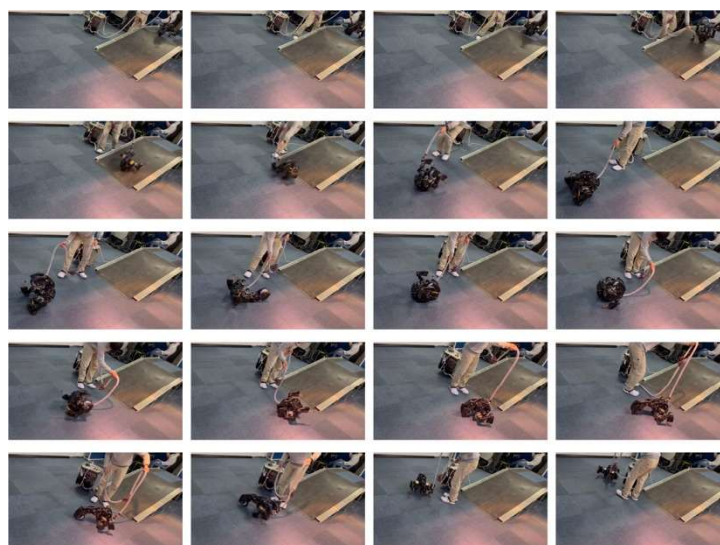


図2. 転がり移動実験。

4. 今後の研究の見通し

現在、移動型四腕ロボットは以下の課題を有している。

- 課題 A 電気・制御系がロボットに搭載されておらず、転がりを阻害する。
 課題 B 前腕先端に配置されたインホイールモータに起因して重心が中心から偏心しており、転がりの慣性モーメントが大きく、転がり始めと停止に大きなトルクが必要となる。
 課題 C 本ロボットの転がり運動モデルが未知であり、転がり運動を制御できていない。
 課題 D 屋外実験へ未だ至っていない。

これらの課題を踏まえ、今後の研究では以下を実施する。

i. 電気・制御系を搭載したロボット再設計

モータドライバ・バッテリー・制御 PC を搭載し、脚移動・車輪移動・転がり移動機能を維持した移動型四腕ロボットを新たに設計する(課題 A の解決)。一方、転がりの慣性モーメントを小さく抑える設計変更を加える。これまでの移動型四腕ロボットは、前腕の先端に駆動車輪を有し、胴体下部に受動車輪を有していた(図3)。これを逆に、前腕先端に受動車輪を配置し、胴体下部に差動歯車を介してモータのトルクを2輪へ振り分ける駆動車輪を設計する。これにより、ロボットの重心が胴体付近に寄り、少ないトルクで転がり移動への移行と停止を可能とする(課題 B の解決)。

ii. 転がり運動のモデル化と制御設計

関節空間から転がりフレームへの順運動学および逆運動学を導出する。特に、逆運動学を利用してロボットが適切な転がり姿勢を取るための、関節角度指令を生成する。さらに動力学として、フラットかつ既知の地形を仮定し、転がり運動に関する運動方程式を構築する。そして、ロボットの姿勢変化が転がり運動へ動的に与える影響と、脚が地面へ発生させる力が転がり運動へ与える影響を明らかにする。立式した運動方程式より、姿勢変化と地面の蹴りを入力とした、転がりの角速度制御則を構築する(課題 C の解決)。

iii. 屋外でのシームレスな歩行・走行・転がり・操り遠隔操作実験

電気・制御系を搭載した移動型四腕ロボットを用いて、広島大学キャンパス内において遠隔操作実験を実施する。屋内・屋外を問わず、キャンパス内の広範囲にわたる移動(歩行・車輪走行・転がり)および運搬タスクを遂行し、ロボットの稼働時間、移動能力、および遠隔操縦性能の限界を検証する。

i で設計したロボットを製作し、制御環境および遠隔通信環境を整備する。構築した環境において、モータ制御等の機能検証とテスト実験を行う(課題 D の解決)。

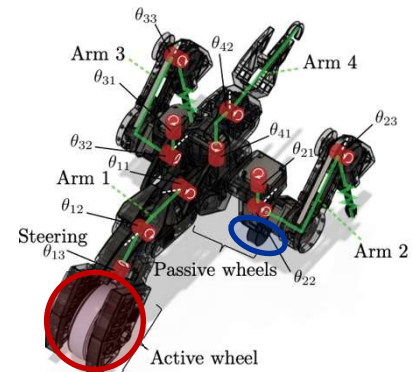


図3. 前腕の**駆動車輪**と胴体下の**受動車輪**。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

学術論文

- Hisayoshi Muramatsu, Keigo Kitagawa, Jun Watanabe, Yuika Yoshimoto, and Ryohei Hisashiki, “A Mobile Quad-Arm Robot ARMS: Wheeled-Legged Tripedal Locomotion and Loco-Manipulation,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 37, no. 2, Apr. 2025.
- Yuika Yoshimoto, Jun Watanabe, Keigo Kitagawa, and Hisayoshi Muramatsu, “Prismatic Joint Mechanism for High Payload Capacity of Hybrid Mobile Robots,” *Advanced Robotics*, Accepted.

国際会議（査読付）

- Yoshimoto, Yuika, Jun Watanabe, Zhaoyang Huang, and Hisayoshi Muramatsu “Transition Motion Trajectory from Wheeled-Legged Locomotion to Rolling Locomotion for Mobile Quad-Arm Robot,” *The 2025 SICE Festival with Annual Conference (SICE FES 2025)*, Chiang Mai, Thailand, 9–12 September 2025.

国内会議（査読なし）

- 渡辺 潤, 久敷 凌平, 吉本 結夏, 村松 久圭, “移動型四腕ロボットの移動動作遷移および動作生成”, 第 67 回 自動制御連合講演会, 姫路商工会議所, 兵庫, 2024 年 11 月 23 日-11 月 24 日.
- 吉本 結夏, 久敷 凌平, 村松 久圭, “車輪, 脚車輪, 転がり移動ロボットの操縦制御におけるモード遷移および動作生成”, 第 25 回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2025), 広島, 2025 年 12 月 10 日-12 月 12 日.