

2024 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所 属 機 関	電気通信大学 大学院情報理工学研究科 情報学専攻
職位または役職	助教
氏 名	木村 航平

1. 研究題目

吸盤併用グリップの構成検討に基づく登攀ロボットおよびマニピュレーションへの応用

2. 研究目的

日常的な点検作業から災害時の緊急事態対応に至るまで、人の代わりに格子面や壁面を登攀移動できるロボットが求められる。異なる登攀面に対しては異なるエンドエフェクタが要求される。梯子やフェンスのような棒状や格子状の登攀面に対してはグリップによる把持、掴み所の無い壁面に対しては吸盤や磁力による吸着、が各々要求されるため同一機体での解決が困難であった。

以上の背景を踏まえて、吸盤による吸着・グリップによる把持・両者の同時実行、が可能な吸盤併用グリップ[特開 2024-111388]を開発した。開発したグリップは登攀用途に限らず、物体把持と吸着を実現できるためマニピュレーションへの応用も期待できる。一方で、自重の負荷を受け登攀中に関節モータが発熱し、タスク継続が困難である課題も挙げられる。そこで、(A)アクチュエータ数の削減、(B)ロボット身体部位での分散構成戦略、からなる機体の構成検討に基づき、上述の課題を解決するため(C)登攀ロボットおよびマニピュレーションへの応用、を目的とした研究を遂行する。

3. 研究内容及び成果

【吸盤の脱着制御の省アクチュエータ化】

従来の吸盤併用グリップ[特開 2024-111388]に対して、吸盤脱着のためのワイヤ駆動のアクチュエータをロボットの既存関節のアクチュエータで代用させて、図 1 のように 1 モジュールあたりのアクチュエータ数の削減を図った。従来の吸盤併用グリップは、吸盤の脱着制御のために専用のアクチュエータが追加で必要であり、複数モジュールの吸盤併用グリップを登攀ロボットに分散配置する際に自重の増加につながる課題が挙げられていた。そこで、登攀やマニピュレーション用途の関節・リンクの回転運動を吸盤の脱着制御に共通利用することで省アクチュエータ化を実現した。

【吸盤併用グリップの改良と吸盤併用かぎ爪の開発】

前項の省アクチュエータ化を登攀ロボット実機の 2 種類のエンドエフェクタ(グリップおよびかぎ爪)に適用した結果を図 2 に示す。グリップにおいては、壁面吸着時に支点開閉グリップを開いて内部の吸盤を押し付けることで吸着状態になる。吸着状態において手首の roll 軸の関節を回転させることで、ワイヤの取り付け点間の距離が変化し、ワイヤが牽引状態となり吸盤の真空が解除されて剥離が実現される。かぎ爪においては、リンクの途中に吸盤が配置されており、かぎ爪の pitch 軸

の関節を回転させることで、ワイヤの牽引・弛緩を制御し吸盤の脱着を実現している。これにより、同一機体でエンドエフェクタの形態をグリップ/かぎ爪/吸盤と変化させることが可能となった。

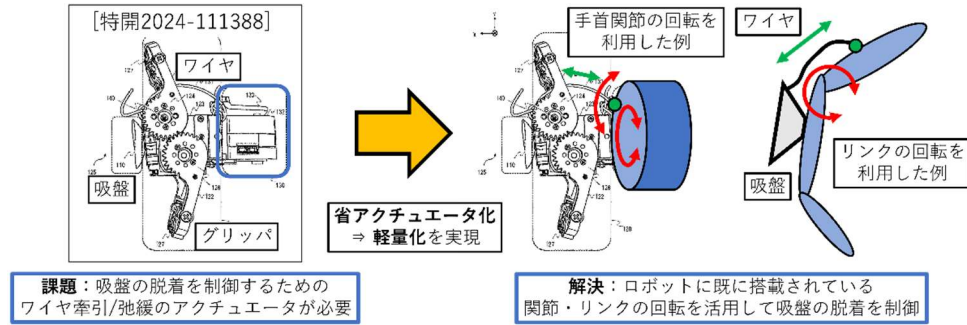


図 1 吸盤併用グリップ[特開 2024-111388]に対する省アクチュエータ化

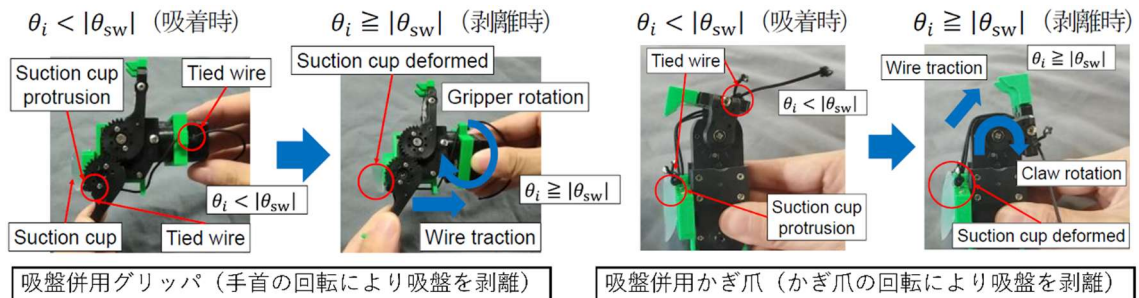


図 2 改良した吸盤併用グリップと新たに開発した吸盤併用かぎ爪

【形態変化型の登攀ロボットによるフェンスと壁面の同一機体での登攀】

前年度に開発した平地車輪移動とフェンス登攀移動が可能な車輪付き登攀ロボットのエンドエフェクタに対して、前項の吸盤併用グリップ 2 つと吸盤併用かぎ爪 1 つを分散配置させた(図 3 左)。これにより、平地では車輪移動、鉛直フェンス面ではグリップによる把持、鉛直壁面では吸盤による吸着を活用した登攀移動がそれぞれ可能な形態変化型の登攀ロボット(機体重量: 1.36[kg])が構成された。グリップ/かぎ爪/吸盤の形態変化を活用して、把持によるフェンス登攀・吸着による壁面登攀の実機動作検証を行った様子を図 3 右に示す。つかみ損ないや吸着し損ないによる落下を防ぐために把持確認や引っ掛かり確認、吸着確認を導入した条件下で、フェンス登攀は平均 72.6[mm/min]、壁面登攀は平均 23.5[mm/min]の移動速度が得られた。今後は、確認フェーズの短縮による移動速度の向上や、壁面登攀における機体の傾斜角の修正方策が求められる。

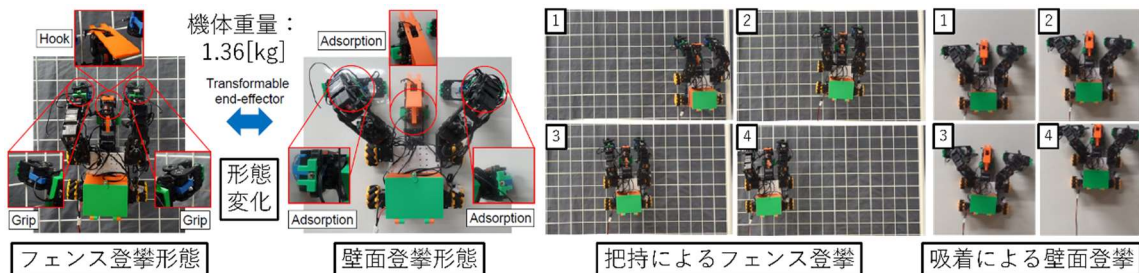


図 3 形態変化型の登攀ロボットの構成と同一機体でのフェンスおよび壁面の登攀

【ネットの把持確認が可能なカラビナ型グリップの開発とネット登攀およびマニピュレーション】

フェンス登攀の応用として、柔軟なネットを登攀可能なマニピュレータ付き登攀ロボットを開発した。ネットはフェンスと異なりその柔軟性から把持箇所が定まらない課題が挙げられる。そこで、カラビナの構造に着目した。カラビナは可動部に張った紐などが接触すると、可動部が動いて環状内部に対象を把持することができる。この構造に基づき、カラビナを模した「カラビナ型グリップ」を新たに開発した。図 4-(I)に示すように、カラビナ型グリップはネットの把持確認が可能であり、カラビナの可動部の回転軸に相当する部分に脱力可能かつ回転角度の読み取りが可能なサーボモータを備えることで、ネットの紐がグリップの内部に入ったか否かを判断することが可能である。(I)の把持確認に基づき、図 4-(II)に示されるようなネット登攀が実現可能となった。また、カラビナ型グリップはネット登攀に特化したエンドエフェクタではなく、汎用的なグリップとしても利活用が可能であり、図 4-

(III)に示すように物体把持とそれを応用した高所マニピュレーションにも共通活用することができた。

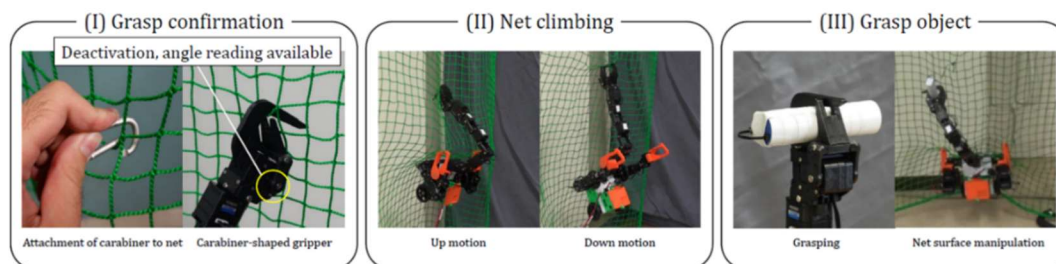


図 4 カラビナ型グリップによるネットの把持確認・登攀・マニピュレーション

【関節負荷フィードバック型バイラテラル制御に基づくネット登攀ロボットの遠隔物体操作】

前項のネット登攀ロボットにおける課題として、i) ボタンコントローラーでの操作が直感的でなく習熟コストが高い、ii) 遠隔環境では物体把持の手応えやその成否の判断が困難である、iii) 物体操作時においてグリップがネットを巻き込む、といった課題が挙げられた。これらの課題を解決するために、登攀ロボットのマニピュレータ構成と同一な遠隔操縦デバイスを開発し、フォロワー（ロボット側）が受ける関節負荷をリーダー（操縦デバイス側）に帰還可能な力センサレスを特長とする関節負荷フィードバック型バイラテラル制御を実装した。図 5 に示すようにフォロワーの各関節の実測値と指令値の差分を負荷情報として利用し、操作者がもつコントローラーに帰還して手応えとして変換する。成果として、図 6 のように Wi-Fi を介した屋内遠隔環境でネットの細かい網目が視認しづらいモニター越しにおいて、物体のつかみ応えやネットの巻き込み検出が帰還可能なことを示した。

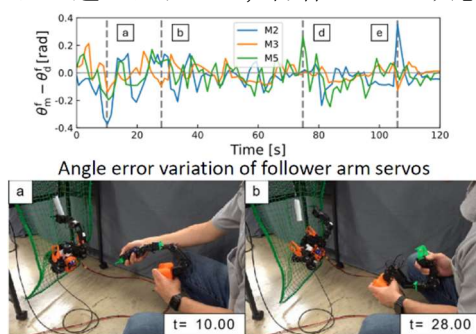


図 5 関節負荷フィードバック型バイラテラル制御

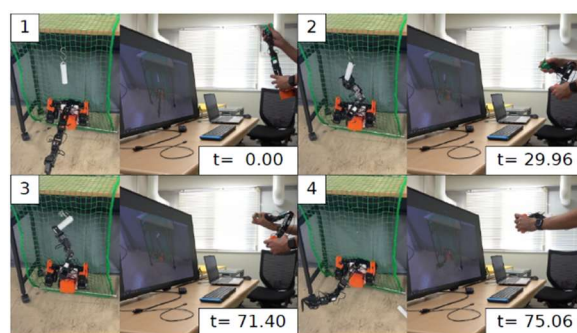


図 6 ネット登攀ロボットの遠隔物体操作

4. 今後の研究の見通し

本年度は主に、i) 吸盤併用グリップの省アクチュエータ化、ii) 吸盤併用かぎ爪の開発、iii) i と ii に基づく同一機体でのフェンス・壁面登攀、iv) ネットの把持確認が可能なカラビナ型グリップの開発、v) 関節負荷フィードバック型バイラテラル制御の実装、に関する成果を得た。今後は、(a)グリップ要素開発の側面で格子形状の異なるフェンスやネットに応用可能な形態変化型グリップの開発、(b)登攀ロボット研究の側面で吸盤併用グリップを活用した鉛直壁面と水平床面の双方向遷移、(c)マニピュレーション研究の側面で壁面吸着時における物体操作の反作用の考慮、といった課題に取り組む。また、把持確認・引っ掛かり確認・吸着確認の安全性に係る時間コストと登攀速度向上のトレードオフの関係を最適化した登攀移動およびマニピュレーション実装を目指す。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

○ 学術論文(査読付)

[1] 伊藤 一步, 工藤 俊亮, 木村 航平, “把持確認が可能なカラビナ型グリップを有するマニピュレータによるネット登攀”, 計測自動制御学会論文集, Under Review.

○ 国際会議(査読付)

[2] Takamichi Hamada, Shunsuke Kudoh, Kohei Kimura, “Transformable robot with suction cup assisted grippers for climbing fences and walls”, In Proceedings of The 2025 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO2025), Accepted, To be presented in December 2025.

○ 国内会議(査読無)

[3] 伊藤 一步, 工藤 俊亮, 木村 航平, “ネット登攀ロボットのネット面でのバイラテラル制御による物体把持”, 第 26 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), 3C5-01, 2025 年 12 月発表予定。