

補助事業番号 2025M-324

補助事業名 2025年度狭隘空間におけるインフラ構造物センシングのための3次元自在移動  
マイクロ多脚ロボットの研究 補助事業

補助事業者名 室蘭工業大学工学部創造工学科機械ロボット工学コース 水上雅人

## 1 研究の概要

ロボット自体のさらなる小型化構成及び壁面・管路内両方の環境を対象可能とする狭隘空間を3次元に移動可能なマイクロロボットの実現が、従来人手に頼ったインフラ構造物の点検自動化を実現するためのキー技術になる。先行研究により、吸盤着脱によるパッシブ吸着機構は簡易であり、小型化に有利ではあるものの、吸着の安定性に課題があることが明らかとなった。本研究では、インフラ点検用ロボットの適用可能領域を増大し、低コストで実現することを可能とする。狭隘空間を3次元に移動可能なマイクロロボット多脚ロボットの実現を目指す。さらに、実フィールド模擬実験系を構築し、劣化センシング用センサのロボットへの高密度実装検討により、実フィールドでの自動点検へのロボット適用の有用性を実証する。

## 2 研究の目的と背景

急速に顕在化してきたインフラ設備の老朽化という社会課題に対し、ロボットによる自動点検が期待されている。構造物点検では人手作業が困難な地下埋設物の管路や、ビル内にある天井ダクト裏や設備と壁の間が50mm程度の空隙しかない狭隘空間内での作業が求められる。そのため未だ人手に依存した点検・状態監視が続いている。管路内作業や管路が敷設される屋内空間における作業では、管内移動ロボットや壁面を移動するロボットはそれぞれ独自に開発されており、検査対象によって使い分ける必要があった。狭隘空間での3次元空間を移動可能な小型ロボットに関して、ロボット自体の小型化と吸着安定性を両立するロボットの設計指針を明らかにする。実フィールド検証のために、模擬実験環境を構築し、構造物のモニタリング用小型センサのロボット実装及びフィールド検証を進め、実用化展開に向けた課題を抽出する。

## 3 研究内容 (<https://u.muroran-it.ac.jp/pmechsys/index3.html>)

### (1)フィールド検証用壁面・管路内対応移動ロボットの設計・試作

#### <歩容制御方法検討>

壁面登攀実現を狙いとして、安定した壁面吸着のために吸盤に求められる条件の検討を行い、歩容制御に関し、動作分析を行い、歩容安定化検討を行った。先行研究での3脚が同時に駆動するトライポッド歩容では、ロボット本体内向きに力が発生し、脚に拘束が発生し動作できず、先行研究で壁面登攀が出来なかった原因であることが判明した。吸着・剥離機構の改良によりロボットの傾きを抑制できたとして、脚を1脚ずつ剥離・吸着させ、6脚が壁面に吸着した状態で前進する方法でも現行機構では脚の移動時に拘束が起こり、脚の回転動作が出来ないことが推察された。

6脚型ロボットに関して、コンピュータ上での歩容動作検証ができるように、Unityを用いたシミュレーション環境を構築し、設計したロボットを用いて歩容動作シミュレーションを行った。図1に構築したシミュレーション環境を示す。シミュレーション結果から、歩容動作においては、ロボットの傾き発生が問題となることを明らかにした。ペース歩容の採用が有効な見通しであるが、動的安定性などの検討が必要なが分った。

#### <移動ロボット構成検討>

6脚ロボットの歩容制御検討と合わせて、簡易構造が可能な4脚構造の検討を進めた(図2)。脚先に受動吸盤が取り付けられ、動作は対角で対となる2脚が支持脚となり壁面に吸着する。進行方向にある前方の脚を機体本体部から遠い位置に配置し、後方の脚を機体本体から近い位置に配置する。この状態で各関節を制御し、進行方向へ機体本体を前進させる。この動作を支持脚と遊脚を切り替え繰り返すことで、壁面を移動する。一脚での動作検証を進めた結果、単一の脚ユニットであっても4個のサーボモータを用いる構成は、機械的および電氣的に複雑であり、製作および制御の難易度が高いことが明らかとなった。4脚構成を想定した試作機体では、各脚に複数の高トルクサーボモータを搭載する必要があるため、モータ質量の増加が機体総重量の増大に直結することが確認された。4脚構成は高い安定性を有する一方で、軽量化およびシステム簡素化の観点での課題が明らかとなった。4脚ロボットにおいて得られた知見から、脚ユニットの構成および制御方式は4脚ロボットと同一とし、脚の本数のみを削減する設計方針とした。2脚構成では、遊脚動作時に壁面へ吸着している吸着機構が1つのみとなるため、4脚構成と比較して支持余裕が小さく、安全性の低下が懸念される。そこでこの課題を解決するため、本体部にも新たに吸着機構を搭載する構成を採用した。

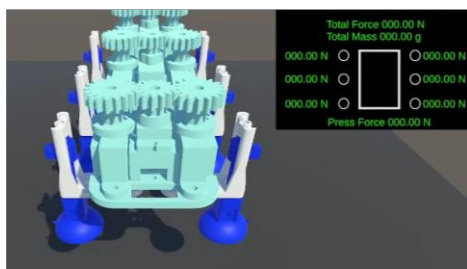


図1 ロボットシミュレータ環境

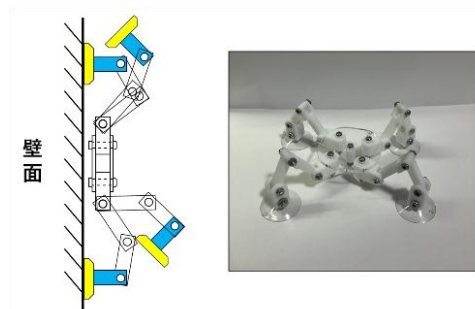


図2 4脚型移動ロボット構成

#### (2)移動ロボット搭載用の点検用センサ・制御回路・ソフトウェアの検討

小型移動ロボットには、壁面や管路内壁面の劣化状態を撮影する小型カメラ及び制御回路が必要となり、その小型実装設計、仕様検討を進めた。センサ搭載・制御回路実装用にロボットプラットフォームを試作し、小型カメラ及び小型マイコンはロボットプラットフォームに実装する構成とした。マイコンはラズパイ pico を用いることとし、小型・高密度実装を検討した。

### (3)壁面・管路内自動点検のフィールド検証

小型ロボットを用いた管路内、壁面を想定した自動点検のフィールド検証を行うために必要となる模擬環境の仕様検討を進めた。床面～壁面をL字型に構成し、それぞれの面に密なコンクリート面、粗なコンクリート面を模擬した面を作成する構成とした。試作した実験環境の外観を図3に示す。模擬フィールド環境で2脚ロボットの壁面吸着及び基本的な移動が可能であることを確認した（図4）。今後は角面を渡る歩容動作に関する検証を進める。



図3 実験環境外観

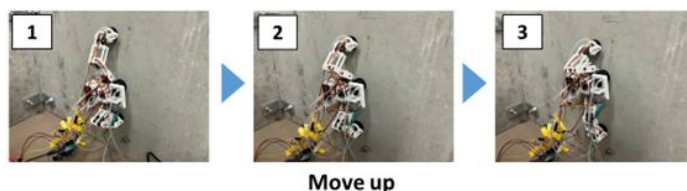


図4 2脚ロボットによる壁面吸着

## 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

汎用性を確保した管路内、壁面移動を同一のロボットで対応可能とする「壁面・管路内を自在移動可能な小型多脚ロボット」はインフラ構造物点検におけるキー技術となると考えられる。狭隘空間において、インフラ点検用ロボットの適用可能領域を増大し、低コストで実現することにつながると考える。本研究の発展性として、近年急速に技術革新が進んでいる超小型センサ回路実装技術やIoTやAIなどの情報処理技術と融合していくことで、自動点検効率化に資するネットワーク接続型マイクロロボット実現が期待できる。インフラ構造物老朽化・熟練者不足という喫緊の社会課題に対するソリューションへの適用展開が見込まれる。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

これまでにインフラ点検自動化に資する点検ロボットの小型化構成に関する研究を実施しており、全方位移動を可能とする管路内走行ロボット、壁面吸着型移動ロボット、多脚型移動ロボットの機構系及び制御に関する方法の提案やロボットの製作を通じて、点検自動化に関する知見及び小型ロボット製作技術を蓄積してきた。今回の研究では、先行研究で明らかとなった壁面・管路移動小型6脚ロボットでの登攀性能の課題を解決するため、改良ロボットシミュレータ及び脚機構評価実験系を用いて、機構改良、歩容方法改良の検証を行い、新たに4脚型・2脚型を小型化に適した構成として提案するとともに、ロボットシミュレータにより歩容制御を再検討し、それらの有用性を確認できた。今後は、今回検証できた要素技術を統合し、壁面での角面を含む移動動作及び管路内移動に関する実証実験を推進していきたい。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

[1] 佐々木優太,土門愛,遠藤友人,水上雅人,花島直彦,藤平祥孝: “狭隘空間作業のための小型壁面移動ロボットの歩容制御に関する検討”, 精密工学会秋季講演会, H26, 京都, 2025.9

- [2] M.Mizukami, A. Hirabayashi, T. Kosakai, Y. Ebina: “Visual Odometry Using Road Surface Motion Images from RGB-D Camera for Remote-Sensing to Inspect Outdoor Underground Infrastructure Facilities” , Proc. of the IEEE Sensors 2025, 5048, カナダ・バンクーバー, 2025.10
- [3] Y. SHI, M.Mizukami, N. Hanajima, Y. Fujihira: “Visual Servo Control for Crack Detection of Worm-Inspired Micro-Robot inspecting in a 30 mm Diameter Pipeline”, Proc. of the 7th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference, pp229-234, 中国, 重慶, 2025.12
- [4] 山内悠輔,野呂周平,松本拓樹, 水上雅人, 花島直彦, 藤平祥孝: “細径管内走行ロボットの小型移動機構設計・制御法の検討”, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, IIP-H3-3, 名古屋, 2026.3
- [5] 松本拓樹, 山内悠輔, 水上雅人: “管内走行マイクロロボットの無線制御化に関する検討”, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, IIP-F2-1, 名古屋, 2026.3
- [6] 佐藤恒太, 遠藤友人, 水上雅人, 花島直彦, 藤平 祥孝: “壁面移動マイクロロボットの負圧吸着型脚駆動機構の検討”, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, IIP-F2-2, 名古屋, 2026.3
- [7] 遠藤友人,水上雅人,花島直彦,藤平祥孝: “二脚型小型壁面移動ロボットの機構設計及び試作機検証”, 精密工学会春季大会学術講演会, I28, 埼玉, 2026.3
- [8] Y. SHI, M.Mizukami, N. Hanajima, Y. Fujihira: “A Vision-Guided Active Crack Alignment Framework for Small-Diameter Pipe Inspection Robots” , Machines, MDPI, Vol.14, No. 5, 516 2026.5

## 7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの 該当なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

前述の発表論文など

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 室蘭工業大学理工学部創造工学科

(ムロランコウギョウダイガクリコウガクブソウゾウコウガッカ)

住 所: 〒050-8585

北海道室蘭市水元町27-1

担 当 者: 教授 水上雅人(ミズカミマサト)

担 当 部 署: 機械ロボット工学コース(キカイロボットコウガクコース)

E - m a i l: m-mizukami@muroran-it.ac.jp

U R L: <https://u.muroran-it.ac.jp/pmechsys/index1.html>