

(別紙5)

補助事業番号 2023M-247

補助事業名 2023年度 インフラ構造物点検のための壁面・管路内を自在移動可能な
マイクロ多脚ロボットの開発 補助事業

補助事業者名 室蘭工業大学工学部創造工学科 水上雅人

1 研究の概要

壁面・管路内を自在に移動できるロボットの移動機構に関する検討を行った。ロボットの移動機構、ロボット自体の小型化構成及び駆動系の高密度実装に関する設計指針確立を目指し、(1)壁面・管路内対応多脚型移動機構の検討、(2)脚構造・吸着メカニズムの検討、(3)小型移動ロボットの設計・試作検証を実施した。多脚型移動機構及び小型移動ロボットの設計・試作の検討について、平地走行、垂直壁面での移動も可能とする多脚構成設計に資するロボットシミュレータの構築ができた。また負圧吸着機構の設計に資するアクチュエータの評価系を構築し、実験により有用性を確認できた。さらに脚構造・吸着メカニズムの検討に関して、小型化に適した脚機構の設計・試作・検証ができた。

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技術が有効と考えられている。水道・ガス・通信用配管などでは、直径10cm以下の狭隘空間内での作業が必要であり、しかも大多数は地下埋設構造物である。またビル内にある天井ダクト裏や配管設備が地下空間に敷設される、とう道などのトンネルでは設備と壁の間が非常に狭隘な空間となっている。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。

本研究では1台で壁面・管路内を含めた様々な環境に対応できるロボットを実現するために、壁面・管路内を自在に移動できるロボットの移動機構に関する検討を行う。壁面及び管路内移動に適したロボットの移動機構を考案するとともに、狭隘空間での作業を行うために必要となる、ロボット自体の小型化構成及び駆動系の高密度実装に関する設計指針確立を目的とする。

3 研究内容(u.muroran-it.ac.jp/pmechsys/index3.html)

(1) 壁面・管路内対応多脚型移動機構の検討

直径100mm以下の管径、設備と壁面間が50mm以下の空隙となる狭隘空間で作業するためのロボットサイズの見積もり及び管路構造を条件として、壁面に静止し、移動するのに最適な脚本数の検討を進めた。50mm以下の狭隘空間で動作する車輪型管内走行ロボットの小型化検討との比較及びクローラ型壁面吸着ロボットとの比較検討を実施し、4脚もしくは6脚型をベース検討を進めることとした。

(2) 脚構造・吸着メカニズムの検討

4脚型壁面吸着型ロボット機構の力学モデル化(図1, 図2)を行った。静止時に必要な脚の吸着力条件として式(1)、移動時に必要な脚の吸着力条件として式(2)を導出した。

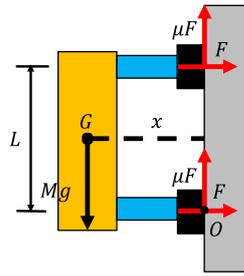


図1 静止状態モデル

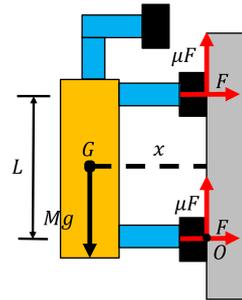


図2 移動状態モデル

$$F_s \geq \max\left(\frac{Mg}{n\mu}, \frac{2Mgx}{nL\mu}\right) \quad (1)$$

$$F_d \geq \max\left(\frac{Mg}{(n-n_f)\mu}, \frac{Mgx}{\sum_{i=1}^n s_i d_i}\right) \quad (2)$$

静止時に必要な吸着力を F_s 、動作時に必要な吸着力を F_d とすると、壁面吸着ロボットに必要な吸着力 F は式(3)で計算できることになると考えられる。

$$F \geq \max(F_s, F_d) \quad (3)$$

脚機構に搭載する負圧機構に用いるアクチュエータは、上記の条件式により求める吸着力を満たすように設計を行えばよいことが見込まれる。

移動動作の経路計画及び脚駆動動作設計を行うために、4脚型ロボットをモデルベースとして、平面内移動に関するロボットシミュレータを構築した。シミュレータはLinuxベースで構築し、ROSのライブラリを用い、実機を動作させた状態を計算するための物理シミュレータはGazeboを使用した。Gazebo上で実施したシミュレーション結果のデータを再生し、表示するためのツールとしてRvizを用いた。シミュレーション環境で構築するロボットでは、狭隘空間で作業可能とするため小型化を指向してサイズなどを決定した。実機でのロボット構成及びシミュレーション環境構築の原理確認のため、安定した歩容が可能な最低脚数である四脚型を採用した。Gazebo上で行った歩容シミュレーション結果を時系列で示したものを図3に示す。各脚が設定した回転角に基づいて、回転し、クロール歩容を表現できている。

ロボットの脚機構に搭載される吸着機構に関して、壁面移動時に必要な吸着力を求めるため、歩容シミュレーション環境の構築及び簡易モデルとして四脚型ロボットを用いたシミュレーション環境の基本特性評価を行った。その結果、歩容シミュレーション時のロボットの移動状態や評価を行うシミュレーション環境の基本的な動作は確認できた。

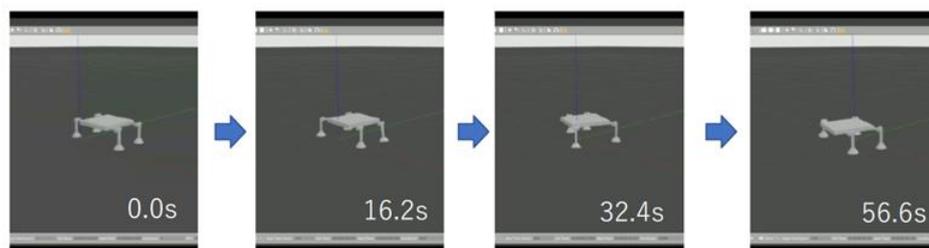


図3 歩容シミュレーション結果

各脚に取り付ける負圧吸着型アクチュエータの設計に資するため、吸着力評価実験系を構築し、吸着機構の評価実験を行った。実験系は実験容器に排気系と圧力センサを取り付け、排気を行った際の圧力推移を測定することができる。構築した評価実験系を図4に示す。

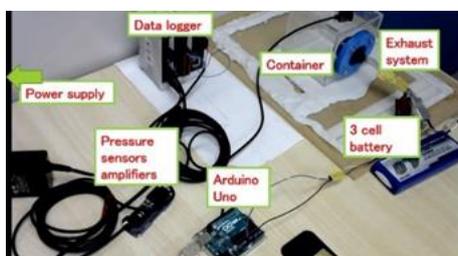


図4 吸着機構用負圧アクチュエータ評価実験系

実験に使用した容器は一辺の長さが80, 150, 200mmの亚克力製立方体容器を製作し実験を行った。横軸に負圧アクチュエータに用いたダクトファンの回転数と縦軸に大気圧と終端圧力との差圧を取った結果を図5に示す。

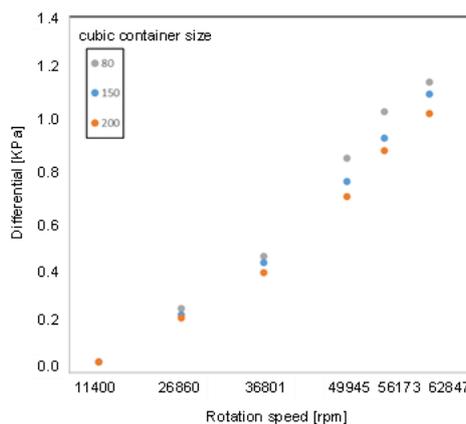


図5 ダクトファン回転数と排気性能の関係

実験結果から、ダクトファンにより、回転数に依存した一定の負圧が得られることを確認した。壁面移動ロボットの脚に負圧発生アクチュエータを設置した場合には、回転数制御により、遊脚状態の実現や、遊脚以外の支持脚の吸着力を増すことにより、より安定し

た歩容制御が実現できる可能性を確認した。本実験では、真空ポンプを利用した負圧吸着機構ではなく、負圧吸着機構の排気用にはダクトファンモータを用いているため、当初は体積が一定値、排気速一定値になったところで、圧力低下はそれ以上進まないことが想定された。そのため最大圧力低下値は各容器サイズに依存しないことが想定された。しかしながら、実験結果では各容器サイズと最大差圧には、一定の関係性があるような結果となった。これはダクトファン自体は空気排出とともに空気の流入もあるが、空気の漏れの原因としては、容器の空気漏れは完全に防ぐことが出来ていなかった可能性があり、容器が大きいと、空気漏れが影響することが考えられた。部品把持用にロボットハンドに用いられるような、真空ポンプを用いた吸着機構を用いる場合には、理論的には容器体積の大きさが大きいほど差圧は小さくなるが見込まれる。そのため、排気速度の推移によって任意の容器体積において圧力差を推定可能になると考える。また、上記で示した線形化と組み合わせることで内圧を計測することが難しいような形状及びサイズの吸着機構を作成した場合には理論値として応用可能なことが見込まれる。本実験系により、負圧アクチュエータの評価に使い、アクチュエータ設計にフィードバックが可能な見通しを得た。

(3) 小型移動ロボットの設計・試作検証

多脚型壁面移動用小型ロボットによる壁面移動及び管路内移動に関する歩行動作検証を狙いとして、まずは壁面吸着するための脚機構単体の改良検討を進めた。小型化を指向し、できるだけ軽量化したロボットを検討することとした。吸着機構としては、パッシブ吸着を採用し、吸盤型を検討した。吸盤型は基本的には大気圧と吸盤の面積に依存した吸着力を得ることが出来、吸盤の縁をはく離させることにより、少ない力で壁から脱着することができる。6脚型壁面移動ロボットの構成を図6に示す。図7に脚機構構成を示す。

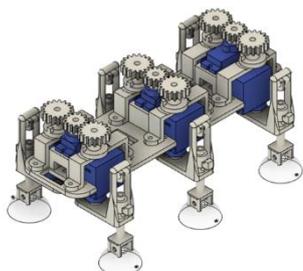


図6 吸盤吸着型6脚移動ロボット構成

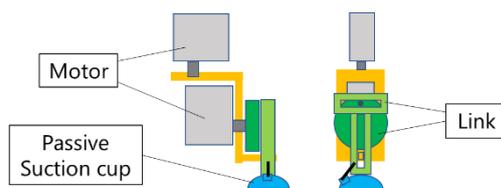


図7 脚機構構成

30mm吸盤を使用した場合では、3mm押し付けの時、吸着・剥離ともに成功した。様々なパーツを組み合わせて製作していること、今回は原理確認のため3Dプリンタで樹脂部品を製作したことなどから、それぞれの寸法の誤差や、接続の度合いによって、結果的に押し付けが始まる位置が、想定した位置よりアクリル板から遠くなり、結果、押し付け量が足りなくなると失敗することが分った。そのため、6脚移動ロボットに脚機構を搭載する際には、壁面とロボットの間隔を一定に保ちながら、壁面に対して吸盤を3mm以上押し付けることが可能な構造が必須となることが明らかとなった。

(別紙5)

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、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を可能とするべく、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」の実現を目指し、歩容方法検討などロボット設計に資するシミュレータ構築及び使用する脚機構設計にする評価実験系構築など要素技術に関する検証を行い、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、小型多脚型移動ロボットを試作し、壁面及び管路内移動実証実験に関する研究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] M. Watanabe, M. Mizukami, N. Hanajima, Y. Fujihira: "Small Multi-legged Robots for Moving on Wall Surfaces and its Evaluation System for Adsorption Mechanism with Negative Pressure", Proc. of the 10th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, No.004, Hongkong, 2023.11

[2] 渡邊充利穰, 伊藤正孝, 小野瀬陽登, 水上雅人: "壁面移動ロボットの小型化実装設計に関する検討", 2023年度精密工学会春季大会学術講演会, B43, 東京, 2024.3

[3] 渡邊充利穰, 水上雅人, 花島直彦, 藤平祥孝: "小型壁面吸着移動ロボットの歩容シミュレーション環境構築と評価", 日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, IIPF-1-2, 岡山, 2024.3

[4] SHI YUJIE, 水上雅人, 花島直彦, 藤平祥孝: "直径30mm細径管路内走行マイクロロボットの移動機構の検討", 日本機械学会情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会, IIPH-3-5, 岡山, 2024.3

(別紙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>