

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25280094

研究課題名(和文) 抗重力・閉空間で移動作業可能な腕脚統合型ロボットに関する研究

研究課題名(英文) Research on mobile workable multi-legged robot in anti-gravity / closed narrow space

研究代表者

新井 健生 (Arai, Tatsuo)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：90301275

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、壁面・天井(抗重力空間)やパイプなどの内部(閉空間)での移動およびそれらの過程でのメンテナンスといった作業が可能な腕脚統合型ロボットを開発するものである。具体的には、従来研究として取り組んできた「腕脚統合型ロボットの3次元環境作業移動」の研究を発展させ、一般的な抗重力・閉空間での移動作業の実現を目指し、抗重力環境下において自重を支えることができる脚先のデザイン、作業のためのエンドエフェクタおよび脚の機構開発を行った。さらに、柔軟かつロバスト性の高い移動を実現する制御手法の確立も行い、点検や保守作業への適用を見据え、有用性の検証に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is development of the multi legged robot, which could achieve the inspection and maintenance work in specific place such as wall and ceiling (anti-gravitational space) and in the interior of pipes and other (closed narrow space). Specifically, we aim to achieve general anti-gravity / closed space movement with tasks, we designed the legs and motion that can support their own weight under anti-gravity environment and developed end effector and leg mechanism for work. Furthermore, we established a control method that achieves flexible and robust movement. Finally, we evaluate developed system and toward to apply inspection and maintenance work.

研究分野：ロボット工学

キーワード：腕脚統合型ロボット 作業移動 動作計画 センシング アクチュエーション

### 1. 研究開始当初の背景

天井裏などの人が入りにくい閉鎖空間の点検作業や、壁面における作業に対してロボットを用いて代替することを目指した研究が広く行われている。例えば、管内の点検作業を目的とした蛇型ロボットなどの開発が進められているが、これらのロボットでは、人が作業をしにくい環境における移動や作業を実現しているが、適用環境は限定されている。より多様な環境において移動・作業を可能にするロボットの実現は、幅広い点検・保守作業への応用が期待でき、有用な取り組みと言える。

これまで、我々は6脚を有する多脚ロボット「ASTERISK」の開発を行ってきた。このロボットは、地面と平行な平面に対して対称なロボットとなっており、状況に応じて脚を腕のように用いることで、簡単な作業を行うことができる。このロボットを用いて、これまで、「腕脚統合型ロボットの3次元環境作業移動」に関する研究に取り組んできた。この研究では、腕脚統合型ロボットの利点を生かし、格子壁面を鉛直上向きに移動する技術、さらには格子天井移動、建物と建物の間に引かれたケーブルを伝う移動、壁面における棚状の限られた足場を用いた移動など、多様な環境での移動を実現してきた。さらに、空間内の柱や、地面に存在するケーブルなどの障害物を柔軟に回避する手法も提案すると同時に、作業としてロボットの全身を用いた物体の押し動作、脚を腕のように用いた物体のマニピュレーション、脚につけたセンサによる点検作業なども推進している。しかし、腕脚統合型ロボットをビルの壁面(抗重力環境)や、天井裏、プラントのパイプなどの管内(閉空間)など、人に変わってロボットによる点検・保守が求められる領域へ適用していくためには、これまでのような限定された環境だけでなく、抗重力環境や閉空間に対して、柔軟に適応し、点検のための移動や、保守のための作業技術を実現していかなければならない。

そこで、本研究では、これまでの研究成果を基盤としながら、抗重力・閉空間における移動・作業能力を有する腕脚統合型ロボットの脚先および脚全体のデザイン、さらには複雑な環境での柔軟な移動を達成するための新たな歩行手法の開発を行う。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、壁面・天井(抗重力空間)やパイプなどの内部(閉空間)での移動およびそれらの過程でのメンテナンスといった作業が可能な腕脚統合型ロボットを開発するものである。従来研究として取り組んできた「腕脚統合型ロボットの3次元環境作業移動」の研究を発展させ、一般的な抗重力・閉空間での移動作業の実現を目指す。これまでの抗重力・閉空間を対象とした研究の多くで

は、移動や、外界センサによるセンシングが中心であり、物理的な作業を対象とはしてこなかった。そこで、本研究では、作業も対象にいれ、下記の課題について明らかにする。

1) 抗重力環境下における移動を実現する脚先設計と動作生成

2) 作業を可能にするエンドエフェクタを含めた新たな脚機構の設計

3) 障害物回避など環境への柔軟な対応を実現する新たな制御に基づく全方位歩行動作生成手法の開発

1)では、抗重力環境下において自重を支えることが可能な脚先の設計を目的としており、高分子材料および微細加工技術を用い、脚先に適した機能を有する脚先設計を行う。さらに、これらを用いた動作の生成も行う。2)では、1)での成果を元に、抗重力環境下での移動を可能としながらも最低限の把持作業が可能となる機構、およびその機構を組み込みながらも自由度を維持した動作が可能な脚全体の設計を行う。また、従来研究において、足障害物の検知・回避手法、胴体側面や脚に障害物が存在する場合の検知・回避手法についての検討を行ってきた。3)ではこれに加え、さらに、柔軟かつロバスタ性の高い移動を実現する制御手法の確立も行い、障害物回避や、脚を故障した場合等でも安定して歩行可能なシステムを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究では、1)抗重力環境下における移動を実現する脚先設計および動作生成、2)作業を可能にするエンドエフェクタを含めた脚機構の設計、3)フィードバック制御に基づく障害物回避など環境への柔軟な対応を実現する全方位歩行動作生成手法の開発および、4)動作生成のためのシミュレータ環境の開発の4つの課題を設定して研究を進める。1)と2)を並列にすすめ、適宜成果を適用しながら研究を進める。また、3)、4)については既存の腕脚統合型ロボットを用いて制御手法、およびシミュレータの開発を行う。最終的には成果を融合させながら、抗重力・閉空間、特に天井裏およびパイプ管内の点検や配線作業をモデル作業として設定し、移動・作業能力の検証を進める。

1) 抗重力環境下における移動を実現する脚先設計および動作生成

本研究では移動に加えて、作業についても検討する必要があり、脚先をグリッパのように利用することまで考えた上で、適切な脚先デザインを行う必要がある。抗重力環境下での移動を考えると、他のロボットで採用されている吸着や、磁石を用いる方法、ヤモリの足裏を模倣した素材を用いた手法をそのまま利用することは困難で、グリッパ形状に融合して実装する必要がある。そこで、本研究では、基盤として円形の脚先を検討し、この

脚先を用いた抗重下での歩行動作の生成に取り組む。脚先を構成する材料としてPDMS(Poly-dimethylsiloxane)を用い、微小凹凸構造を有する脚先のデザインも行う。また、ユニバーサルジョイントと組み合わせた吸着・磁石の実装・グリッパとの切り替えも検討し、抗重力環境下での移動の実現に取り組む。

#### 2) 作業を可能にするエンドエフェクタを含めた脚機構の設計

物体の搬送だけでなく、配線作業などの対象物を把持する必要がある作業を遂行するためには、エンドエフェクタが把持機能を有する必要がある。そこで、本研究では、エンドエフェクタへの把持機能の付加、およびエンドエフェクタの駆動、および柔軟な把持作業を実現する脚機構の設計が不可欠となる。エンドエフェクタを開閉はワイヤ駆動で行うものとし、脚先の制作時に、ワイヤを材料に組み込んで成型することで、駆動機構を実現する。エンドエフェクタの機能として、開閉機能を最低限の機能としながら、より柔軟な把持が可能な機構デザインについても合わせて検討を進める。また、エンドエフェクタ駆動系が歩行、作業に影響を及ぼさないように、脚全体の機構設計も合わせて行う。

#### 3) フィードバック制御に基づく障害物回避など環境への柔軟な対応を実現する全方位歩行動作生成手法

腕脚統合型ロボットにおける内界センサの情報を用いたコンプライアンス制御による障害物回避手法についてはこれまでも検討を行ってきた。従来研究では、歩行経路にケーブル等が横たわっており、脚がケーブルに乗った場合の回避手法、脚や胴体が柱に触れた場合の障害物回避手法を開発してきた。これらの研究を通じて、ロボットの接地面、および接地面に平行な面内での障害物回避手法と2.5次元での障害物回避を実現してきた。さらに環境への柔軟な対応を実現するため、脚先のセンシング情報を用いたフィードバック制御に基づいた歩行動作生成手法に取り組む。これまでの手法では、障害物の存在する方向で、制御手法を切り替えてきた。本研究では、特に共通ロジックに基づくセンサ情報を用いた全方位歩行動作生成手法を開発する。

#### 4) 移動・作業および障害物回避などのモーションプランニングが可能なシミュレータの開発

本研究では、対象とする環境が多様であるため、逐一実機により障害物回避手法などの動作検証を行うことは非効率であり、物理シミュレータを用いた制御アルゴリズムの基礎検証は不可欠と言える。そこで、本研究では、移動・作業および障害物回避など、本研究で検討する課題の検証を可能にするシミュレータの開発を行う。

このシミュレータでは、最適な動作生成を行うための、小型ロボットを応用したインターフェイスを開発する。小型ロボット用いて直接教示をすることにより、複雑な環境下での最適なモーションプランニングを実現し、効率的な動作生成、シミュレーション環境での確認を可能とする。

#### 4. 研究成果

##### 1) 抗重力環境下における移動を実現する脚先設計および動作生成

パイプなどの内部(閉空間)の抗重力動作を想定した高い摩擦力を生み出す球状の脚先を設計し、シミュレーションによりパイプなどの内部(閉空間)を想定した抗重力空間における歩容の検討を行った。様々な脚先の動作経路に関して検討を行い、各モータへの負荷、動作に必要な電力量を考慮した環境に最適化された動作を実現した。また、実機での実証実験を行い、抗重力空間を移動可能であることを確認した。また、新たに抗重力下での移動を実現する電磁石を用いた脚先を設計した。この脚先にはユニバーサルジョイントを用い、脚先の目的とする面への隙間無い接地を可能とした。開発した脚先を用いて金属壁面上での抗重力状況における移動の実現に取り組み、狭い通路を走破するための歩容とトライポッド歩容に関して天井にとりついた状態での移動を実現し、有用性を確認した。

##### 2) 作業を可能にするエンドエフェクタを含めた脚機構の設計

閉空間での作業点検を行うために必要なハンド機能・カメラ機能・力センサ機能を統合した多機能脚先の開発を行った。脚先にはワイヤにより開閉するハンド内部に目視点検画像撮影を行うカメラを搭載し、本カメラによる光学的な計測により脚先に加わる力を計測可能にした。更に、開発した多機能脚先を実機に実装し評価を行い、開発した多機能脚先が作業において有用であることを確認した。また、電磁石を用いた脚先を設計し、集音センサと組み合わせ、ボルトのゆるみなどを確認する打音検査を行った。実機を用いた実験から、予備的な結果であるがその有効性が示され、この複合エンドエフェクタも作業に利用可能であることが確認された。

##### 3) フィードバック制御に基づく障害物回避など環境への柔軟な対応を実現する全方位歩行動作生成手法

これまでのコンプライアンス制御に加えて、中枢パターン生成器(CPG)を応用した歩行動作生成手法を開発した。CPGモデルを改変した歩行制御系の遊脚相における位相間協調制御を提案し、脚ロボットの遊脚時における脚間の位相協調を用いることによって、

適応的に安定した歩容の生成を実現した。シミュレータを用いて検証を行い、まず、不整地走破に適用し、段差の高さが異なる不整地に対しても適応的にボディの安定性を維持した歩容を生成可能なことを確認した。また、過酷な環境では故障発生率が高まるといった問題を考え、脚故障を想定し実験を行った。その結果、脚が故障した場合にも、ロボットが移動能力を確保するための歩容を自律生成できることが確認された。さらに、実機を用いた評価も行い、提案手法が有効であることを確認した。

4) 移動・作業および障害物回避などのモーションプランニングが可能なシミュレータの開発

移動・作業および障害物回避など、本研究で検討する課題の検証を可能にするシミュレータの開発を行った。このシミュレータでは、最適な動作生成を簡易に行うため、実機と相似形の小型ロボットを開発し、この小型ロボットをインターフェイスとして用いた。画像処理により小型ロボットの脚先、ボディの位置を計測し、この姿勢情報をフィードバックすることで、小型ロボットの各脚先の空間上への擬似的な固定を実現した。これにより、シミュレーション空間上での動きと一致させることが可能となった。さらに、シミュレーション空間上での設置物との接触の力感フィードバックも行い、開発した小型ロボット用いたシミュレーション上への直接指示による、複雑な環境下での効率的な動作生成、最適なモーションプランニングを実現した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

(1) Pakpoom Kriengkamol, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, and Tatsuo Arai, A New Close-Loop Control Method for an Inspection Robot Equipped with Electropermanent-Magnets, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28 No.2 p.185-193, 2016

[学会発表](計18件)

(1) 戸田武, 大原賢一, 神山和人, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生、腕脚統合型ロボットによる抗重力・閉空間移動技術の開発と解析、第31回日本ロボット学会学術講演会、首都大学東京南大沢キャンパス、2013年09月04日~2013年09月06日

(2) 戸田武, 大原賢一, 神山和人, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生、エネルギー効率

を考慮した脚移動ロボットによる閉空間3次元移動、第14回建設ロボットシンポジウム、中央大学 後楽園キャンパス、2014年08月28日

(3) Takeshi Toda, Kenichi Ohara, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, 3D Movement of Legged Robot in Narrow Space, International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, Nagoya, 2014.11.09~2014.11.12

(4) 戸田武, 大原賢一, 神山和人, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生、電力効率を考慮した脚移動ロボットによる閉空間3次元移動、第14回建設ロボットシンポジウム、東京、2014年08月28日

(5) 秋山亮, 神山和人, 小嶋勝, 大原賢一, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生、目視点検・力センシング可能な腕脚統合型ロボットのハンド機構開発、第32回日本ロボット学会学術講演会、福岡、2014年09月04日~2014年09月06日

(6) Ryo Akiyama, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, Development of Multifunctional Robot Hand for Visual Inspection Equipped with 3D Force Sensing, 2015 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science(MHS2015), Nagoya University, Nagoya, 2015.11.23~2015.11.25

(7) Pakpoom Kriengkamol, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, Hammering Sound Analysis for Infrastructure Inspection by Leg Robot, the 2015 IEEE Conference on Robotics and Biomimetics, Zhuhai Dehan Hotel, Zhuhai, China, 2015.12.06~2015.12.09

(8) Tatsuo Arai, Kazuto Kamiyama, Pakpoom Kriengkamol, Yasushi Mae, Masaru Kojima, Inspection Robot In Complicated 3D Environments, 32nd International Symposium on Automation and Robotics and Mining, University of Oulu, Oulu, Finland, 2015.06.15~2015.06.18

(9) 秋山亮, 神山和人, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生、点検・把持・力センシングが可能な腕脚統合型ロボットの開発、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、京都市勧業館「みやこめっせ」、京都、2015年05月17日~2015年05月19日

(10) 戸田武, 大原賢一, 神山和人, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生, 腕脚統合型ロボットによる電力効率を考慮した閉空間3次元移動、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、京都市勧業館「みやこめっせ」、京都、2015年05月17日~2015年05月19日

(11) 神山和人, Pakpoom KRIENGGOMOL, 小嶋勝, 洞出光洋, 前泰志, 新井健生, 電磁石脚先を搭載した脚ロボットによる橋梁裏点検、日本機械学会2015年度年次大会、北海道大学工学部、2015年09月13日~2015年09月16日

(12) Pakpoom Kriengkomol, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, New Tripod Walking Method for Legged Inspection Robot, 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Harbin, China 2016.08.07~2016.08.10

(13) 河田武之, 小嶋勝, 前泰志, 新井健生, 耐故障性向上のための脚ロボットの適応歩容生成、第16回建設ロボットシンポジウム、中央大学後楽園キャンパス(東京都文京区) 2016年08月31日~2016年09月02日

(14) 井上利彦, 前泰志, 小嶋勝, 新井健生, 相似形小型ロボットを用いた多脚ロボットの直接遠隔教示、第34回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2016)、山形大学(山形県山形市) 2016年09月07日~2016年09月09日

(15) 河田武之, 小嶋勝, 前泰志, 新井健生, 脚間の位相協調を用いた脚故障時における自律歩容生成、第34回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2016)、山形大学(山形県山形市) 2016年09月07日~2016年09月09日

(16) Takeyuki Kawata, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, Fault-Tolerant Adaptive Gait Generation for Multi-Limbed Robot, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea, 2016.10.09~2016.10.14

(17) Ryo Akiyama, Kazuto Kamiyama, Masaru Kojima, Mitsuhiro Horade, Yasushi Mae, Tatsuo Arai, Development of Multi-functional Robot Hand for Multi-Legged Robot, 2016 IEEE International Conference on Robotics and

Biomimetics, Qingdao, China, 2016.12.03~2016.12.07

(18) Toshihiko Inoue, Yasushi Mae, Masaru Kojima and Tatsuo Arai, Direct Tele-teaching with Handy Homothetic Robot for Multi-limbed Working Robot, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Qingdao, China, 2016.12.03~2016.12.07

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

<http://www-arai lab.sys.es.osaka-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新井 健生 (Arai, Tatsuo) 大阪大学・基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 90301275

### (2) 研究分担者

前 泰志 (Mae, Yasushi) 大阪大学・基礎工学研究科・准教授  
研究者番号: 50304027  
小嶋 勝 (Kojima, Masaru) 大阪大学・基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 00533647  
大原 賢一 (Ohara, Kenichi) 名城大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 50517886