

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02119

研究課題名(和文) 超人的ロコモーションを可能とするスパイダーマン型ロボットシステムの研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of Spiderman-Type Robot with Innovative Locomotion

研究代表者

永岡 健司 (Nagaoka, Kenji)

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60612520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、既存ロボットの未踏領域である凹凸急傾斜地形における革新的な移動方式として、スパイダーマン型の超人的なロボット・ロコモーションを提案し、実証することが目的である。既存の多脚型フリークライミング・ロボットの課題であった、鉤爪型ロボット・ハンドの地形凹凸への適応限界と脚の可動域制限に対して、ハンド多指の非同時「しがみ付き」とテザークライミング(複数テザーの長さ制御による空間移動)を相乗的に組み合わせることで、移動可能領域を拡大する新たな移動ロボット技術に挑戦する。これら新規技術を機能的に融合した統合ロボットシステムの開発と技術実証をおこなう。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2009年に日本の月面探査機「かぐや」が世界に先駆けて発見した月の縦孔は、月面地下の溶岩流が形成した洞窟の天窓とされ、月面地下空洞の発見に繋がる大きな科学的成果であり、近年、一気に注目が集まっている。月の地下空洞は、宇宙放射線や隕石からの防壁性と高い温度安定性から、将来の月面基地拠点としても期待されている。そのため、この地下空洞にアクセスするためのキーテクノロジーとして、既存ロボットにとって未踏領域である縦孔や洞窟のような凹凸急傾斜地形にアクセス可能な新しいロボット探査技術の実現が強く望まれる。この技術が実現することにより、月面開発の新たな局面を切り拓いていくことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research aims to propose and demonstrate a spiderman-like robot locomotion as an innovative robotic mobility on uneven and steep terrain, which is an unexplored area for conventional mobile robots. To cope with technical issues that conventional multi-legged climbing robots with spine grippers, such as the limitation of adaptation of the spine gripper to uneven terrain and the limited range of motion of the legs, we challenge to develop a new mobile robot technology that expands the area of mobility in extreme terrain by synergistically combining the non-simultaneous gripping of multiple fingers of the hands and tethered-climbing which is a spatial movement by controlling the length of multiple tethers. We develop and demonstrate an integrated robot system that functionally integrates these new technologies.

研究分野：宇宙ロボット工学

キーワード：クライミングロボット テザークライミング 移動探査ロボット 鉤爪型ロボットグリッパー 極限地形

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2009年に日本の月面探査機「かぐや」が世界に先駆けて発見した月の縦孔は、月面地下の溶岩流が形成した洞窟の天窓とされ、月面地下空洞の発見に繋がる大きな科学的成果であり、近年、一気に注目が集まっている。月の地下空洞は、宇宙放射線や隕石からの防壁性と温度の安定性から、将来の月面基地拠点としても期待されている。そのため、この地下空洞にアクセスするためのキーテクノロジーとして、縦孔や洞窟のような凹凸急傾斜地形にアクセス可能なロボット探査の実現が強く望まれている。このような自然界に多く存在する急峻な凹凸地形は、従来の地形走破型ロボット(例えば、車輪型やクローラ型、脚歩行型のロボット)では単独踏破が困難な未踏領域とされており、新しい移動ロボット技術の開発が求められている。

この難題に対して、これまでに、地形表面にしがみついて移動する多脚型のフリークライミング・ロボットが提案され、月や火星のみならず微小重力な小天体でも有効な移動方法であることが示されている [1-3]。本研究代表者のグループにおいても、技術実証として、主に凸地形への効率的な「しがみ付き」を可能とする鉤爪型ロボット・ハンドを開発し、四脚型ロボットに応用することで、マニュアル操作での凹凸垂直面のロボット・クライミングに成功してきた [2]。その一方で、多脚型フリークライミング・ロボットの研究開発を進める中で見えてきた課題として、多様で不規則な起伏を持つ自然の地形凹凸を想定した際、特定地形への「しがみ付き」を想定して開発された従来のロボット・ハンドでは、多様な自然地形の形状の違いには適応し切れず、その適用範囲は限定的にならざるを得ないことも明らかになってきた。事実、安定して「しがみ付ける」領域がロボット脚の可動域内で極めて限られてしまった結果、クライミング移動が継続困難な状況に出くわす事例が少なくないことが課題となっている。

以上より、自然の急峻な凹凸地形での自在なロボット・クライミング技術を切り拓くための最大の課題として、ロボットの脚の限られた可動範囲の中で「しがみ付ける」領域が十分に存在するか否かは地形依存性が非常に高い、という自然の環境条件を克服するためのロボット技術を実現することが工学的に解決すべき重要課題である。

2. 研究の目的

研究背景を踏まえて、本研究の目的は、既存ロボットの未踏領域である月の縦穴や洞窟などの凹凸急傾斜地形における革新的な移動方式の一つとして、これまでのフリークライミング・ロボット技術を応用・発展させたスパイダーマン型の超人的なロボット・ロコモーション技術に着目し、新たにテザークライミング・ロボットと称する技術の提案し、技術実証するとともに、その学理を理論的・実験的に明らかにすることである。これにより、マクロな形状幾何とミクロな表面粗さを有する多様な自然地形凹凸において、「しがみ付き」を発揮する適応領域を拡大することで、革新的なロボット探査を実現するキーテクノロジーの具現化を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、これまでにないテザークライミング・ロボットに関する研究開発として、以下の4つの技術課題に取り組んだ。

(1) 凹凸適応ハンド機構の創成

凹凸地形表面に適応した「しがみ付き」を実現する方法として、ロボット・ハンド(または、グリッパー)の多指を非同時に1つずつ順に地形に「しがみ付かせる」機構を提案する。凸地形への「しがみ付き」を確保しつつ、凹地形に対しては、ロボット本体から最遠方の指(=鉤爪)1つを最初に凹部に引っ掛けてハンド全体をロボット本体側多指非同時「しがみ付き」に引き寄せる向きに力をかけて強く固定し、その固定点を自由回転の固定端として他指を補助的に順繰りに引っ掛けることで、わずかな地形凹にも十分な「しがみ付き」の実現を目指す。また、ロボット・ハンドのつかみごたえを手首部に搭載する力覚センサで知覚して補償することで、確実に把持状態を実現する方策を構築する。これらハンド試作機のパフォーマンス評価には、把持力評価実験によって定量的に評価することで、凹と凸の地形に対する適応性を明らかにする。

(2) テザークライミングの創成

本研究では、テザー連結したロボット・ハンドを伸展させ、ハンド可動域の拡大を目指す。これにより、ハンドを固定した状態で各テザーの長さを制御することで、テザーで張られた空間内を移動可能となる。本研究では、本体二段構造を採用し、よりシンプルな伸展アーム機構を応用する。テザーはロボット下体のリールに収納して、リールの巻取り駆動によってテザー長を制御する。これにより、ロボット・ハンドの可動域を飛躍的に拡張したテザークライミング・システムの実現を目指す。テザークライミング移動の有効性は、力学モデルに基づく動力学シミュレーション、および試作機による実機実験を通じて評価、検証する。

(3) ハンドアイ・システムの構築

本研究では、ハンドアイ・システムとして、視覚センシング可能な深度センサを搭載したロボットシステムを構築する。対象環境におけるマクロな幾何形状に関する三次元情報を取得して環境を認識することで、環境中の把持可能領域を抽出する技術の研究開発をおこなう。環境認識の有効性は、実機実験を通じて評価、検証する。

(4) システム統合と制御の実装

研究開発する技術を統合したテザークライミング移動型ロボットの試作機を開発し、技術実証をおこなう。テザークライミング移動の有効性は、力学モデルに基づく動力学シミュレーション、およびロボット試作機による実機実験を通じて評価、検証する。

4. 研究成果

(1) 凹凸適応ハンド機構の創成

本研究では、地形凹凸への適応性を有する鉤爪型ロボット・ハンド機構の研究開発をおこなった。図1に試作した多指ハンドの外観を示す。開発したハンドの特長として、過去の研究成果を踏襲して、パッシブ把持で効率的な「しがみ付き」を実現するとともに、把持状態の解放時にのみ単一アクチュエーターを動作させる構造である。各指の動作を逐次的に動作させるようにワイヤーで連結した駆動構造とすることで、凹凸地形への適応性を向上できることを実験により明らかにした。また、逐次動作を実現する過程で、把持状態を解放している状態においても、ワイヤー構造の摩擦力によってエネルギーレスで効率的に状態を持続できることが確認できた。また、図2に示す把持力補償機能として、「なぞり把持制御」と

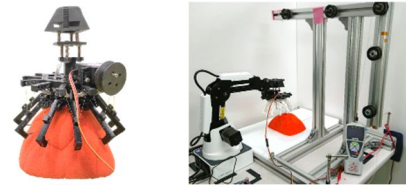


図1：試作ハンドと把持実験の様子



図2：把持力補償機能の概要

「つかみごたえ補償機能」を融合した技術を提案し、その有用性を実験によって示した。実験結果より、把持力補償機能を用いることで、ハンドの性能を最大限利用してクライミング移動を継続できることを実証した。これは、テザークライミング移動に限らず、従来型の多脚型フリークライミング・ロボットに対しても、同様に有効な技術である。

(2) テザークライミングの創成

本研究では、テザークライミング移動の創成に向けて、基本形となるテザー機構のみを用いた移動ロボットにフォーカスして研究開発をおこなった。このテザー移動方式は、多脚型フリークライミング・ロボットの機能を拡張する位置付けにある。図3にテザークライミング・ロボットによる自然地形での移動の概念図を示す。テザークライミング移動の特長は、従来型の平行ワイヤー機構と比べて、テザー（ワイヤー）と環境との接続点を着脱可能なロボット・ハンド化することで、ロボット本体が移動可能な空間を再構成して移動することができる点である。これにより、ハンドの到達領域と移動空間を拡大し、凹凸地形での移動性能を向上させることができる。本研究で得られた成果として、テザークライミング・ロボットの力学理論について、ハンドの把持性能を考慮した、運動学と静力学を導出し、伸展アームの作業空間を計算する方法、および歩容計画、運動制御のフレームワークを構築した。歩容計画においては、ロボットの安定性も考慮した、単純なA*アルゴリズムによる経路探索に基づいて、テザー移動の歩容が実現できることを示した。図4に動力学シミュレーションによるテザークライミング・ロボットの運動の結果を示す。さらに、試作機による検証実験の結果も踏まえて、テザーで張られた空間を変化させながら、ロボットが空間移動を制御する本手法の有効性を示すことができた。

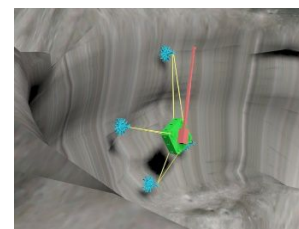


図3：テザークライミング・ロボットの概念図

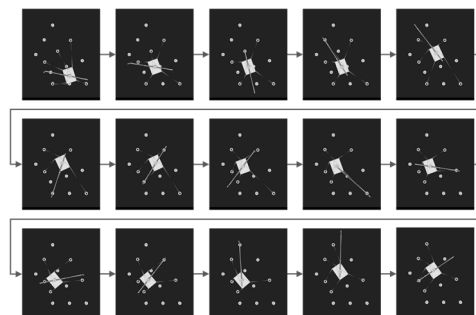


図4：動力学シミュレーションによるテザークライミング・ロボットの移動

(3) ハンドアイ・システムの構築

ハンドアイ・システムとして、小型の深度センサを用いた対象地形の三次元地形認識をおこなった。本研究では、(1)凹凸適応ハンドの研究開発で得られた、ハンドの把持力性能を基準として、把持可能な幾何形状を定義し、環境中にある把持可能な領域を抽出することを実現した。深度センサを用いて抽出した把持可能領域の実験結果の一例を図5に示す。これにより、ロボット自身がオンボードセンサによって、把持可能領域を認識できることを示した。なお、当初計画ではハンドアイとして、各ハンドに搭載することを想定していたが、(1)で開発したハンドの把持性能、および地形の抽出精度の結果を総合的に考慮して、ロボット本体に搭載した深度センサで環境認識をおこなうこととし、その有効性を示した。

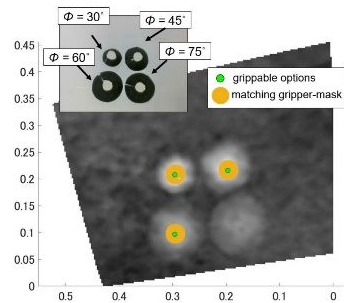
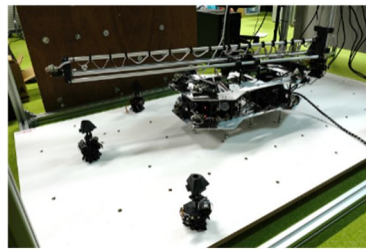


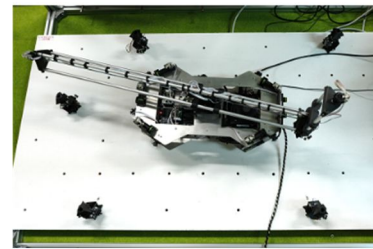
図5：把持可能領域の抽出結果の一例

(4) システム統合と制御の実装

本研究で得られた成果技術を踏まえて、統合ロボットシステムを設計開発した。図6に開発したテザークライミング・ロボット試作機の外観を示す。また、テザー移動を実現するロボット・ハンド



(a)全体写真



(b)上面からみた写真

図6：テザークライミング・ロボットの試作機

への拡張として、図7に示すテザー付きハンドを開発した。(2)のテザー移動の安定性解析の結果も踏まえて、各ハンドはロボット本体と2本のテザーで接続されており、計5個のハンドを有するシステムとなっている。本研究では、テザークライミング・ロボットが新たに提示するテザー移動のコンセプトを技術実証することに焦点を当て、微小重力環境な天体上での移動を模擬して二次元平面上での動作実証実験をおこない、その有効性を示した。

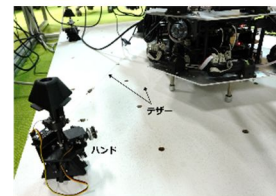


図7：テザー付きハンド

< 引用文献 >

- [1] A. Parness et al., “LEMUR 3: A limbed climbing robot for extreme terrain mobility in space”, Proc. 2017 IEEE Int. Conf. on Robot. Automat., 5467-5473, 2017.
- [2] K. Nagaoka et al., “Passive spine gripper for free-climbing robot in extreme terrain”, IEEE Robot. Automat. Lett., 3(3), 1765-1770, 2018.
- [3] W.F.R. Ribeiro, K. Uno, K. Nagaoka, K. Yoshida, “Analysis of motion control for a quadruped ground-gripping robot for minor body exploration”, Proc. 32nd Int. Symp. on Space Tech. Sci., #2019-k-33, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 川野智博, 木村遼哉, 川口大輝, 永岡健司	4. 巻 40
2. 論文標題 把持力補償機能を有する4脚型ロックライミングロボットの垂直登攀実験	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本ロボット学会誌	6. 最初と最後の頁 647-650
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.40.647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Simon Harms, Tomohiro Kawano, Kenji Nagaoka	4. 巻 -
2. 論文標題 A tethered-climbing robot system for lunar terrain: modeling and analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics	6. 最初と最後の頁 1537-1544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ROBI055434.2022.10011803	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kentaro Uno, Naomasa Takada, Taku Okawara, Keigo Haji, Candalot Arthur, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida	4. 巻 -
2. 論文標題 HubRobo: A lightweight multi-limbed climbing robot for exploration in challenging terrain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots	6. 最初と最後の頁 209-215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/HUMANOIDS47582.2021.9555799	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Warley F. R. Ribeiro, Kentaro Uno, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida	4. 巻 -
2. 論文標題 Dynamic equilibrium of climbing robots based on stability polyhedron for gravito-inertial acceleration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines	6. 最初と最後の頁 297-304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.13180/clawar.2020.24-26.08.18	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Simon Harms, Tomohiro Kawano, Kenji Nagaoka
2. 発表標題 A tethered-climbing robot system for lunar terrain: modeling and analysis
3. 学会等名 The 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇園皓士, 奥座夕貴, 川口大輝, 永岡健司
2. 発表標題 フリークライミングロボットのための鉤爪型ロボットグリッパ の把持特性解析
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥座夕貴, 永岡健司
2. 発表標題 鉤爪型グリッパーの凹凸地形把持点に関する実験解析
3. 学会等名 日本機械学会九州支部 第54回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川野智博, 川口大輝, 永岡健司
2. 発表標題 極限地形での空間移動が可能なテザークライミング型ロボットのための伸展アーム機構のプロトタイプ開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川野智博, 木村遼哉, 川口大輝, 永岡健司
2. 発表標題 把持力補償機能を有する四脚型ロッククライミングロボットの垂直登攀実験
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大輝, 川野智博, 脇園皓士, 永岡健司
2. 発表標題 洞窟探査のための四脚型フリークライミングロボットの天井歩行実験
3. 学会等名 第17回「運動と振動の制御」シンポジウム (MoVic) / 第30回スペース・エンジニアリング・コンファレンス (SEC)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口大輝, 永岡健司
2. 発表標題 凹凸地形における鉤爪型ロボットグリッパ のなぞり把持の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Warley F. R. Ribeiro, Kentaro Uno, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 Dynamic equilibrium of climbing robots based on stability polyhedron for gravito-inertial acceleration
3. 学会等名 The 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Uno, Yusuke Koizumi, Keigo Haji, Maximilian Keiff, Simon Harms, Warley F. R. Ribeiro, William Jones, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 Non-periodic gait planning based on salient region detection for a planetary cave exploration robot
3. 学会等名 The 15th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Uno, Naomasa Takada, Taku Okawara, Keigo Haji, Candalot Arthur, Warley F. R. Ribeiro, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 HubRobo: A lightweight multi-limbed climbing robot for exploration in challenging terrain
3. 学会等名 The 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------