

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：17104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13721

研究課題名（和文）異方性と不確定性を内包したフリークライミングロボットの自律歩容原理

研究課題名（英文）Autonomous Gait Principle for a Free-Climbing Robot with Mechanical Anisotropy and Uncertainty

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、崖地などの凹凸急傾斜地形でのフリークライミングロボットの実現を目的とし、自律歩容制御原理の構築に取り組んだ。本研究の主な成果として、鉤爪型グリッパによる力学体系を明らかにし、グリッパ把持力の力学的異方性を考慮した把持可能点を抽出する手法を構築した。さらに、これら情報を融合して、目的地方向への移動量、転倒や滑落に対する（静的・動的な）安定余裕とグリッパの可到達範囲を考慮した歩容制御則を構築した。本研究による提案手法は、実機実験とシミュレーションを組み合わせた検証により、その有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で扱うフリークライミングロボティクスは、グリッパ（ロボットハンド）の力学的異方性を内包した歩容原理を扱う点で、従来の理想条件下での脚歩行ロボットの研究を包括する。したがって、より一般化した多脚歩容の力学体系を切り開く研究領域といえる。さらに、本研究により実問題を想定した新しい自律歩容制御則を構築することで、これまで無人の探査ロボットがアクセスできなかった過酷な自然の極限環境（特に、急峻な崖や洞窟、渓谷など）でのロボット技術の応用を可能とすることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project has addressed development of a gait control law for a four-limbed free-climbing robot in extreme terrain, such as a cliff wall. This project contributes to development of gripping mechanics of the spine-typed gripper, including its mechanical anisotropy. Moreover, based on the gripping mechanics, a method of which the grippable region is detected by a ranging sensor was proposed and validated by experiments. With these data as feedback information to the control law, the intelligent gait control law was established to satisfy multiple evaluation indexes: distance from the destination, motion stability, the grippable region, and reachable range of the gripper. The developed control method was evaluated by several experiments and numerical simulation, and the results confirmed the validity of the proposed method.

研究分野：宇宙ロボティクス

キーワード：フリークライミング 鉤爪グリッパ 把持力 自律歩容原理 断崖絶壁クライミング 惑星探査ロボット

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昨今の活発化する火山での情報収集や、災害現場での人命探索、月や火星での科学探査は、極めて苛酷な環境での作業である。近年、これらの作業をおこなうロボット技術への需要が急速に高まっている。その一方で、需要の大きさに反して、険しい崖や洞穴、縦穴に代表される凹凸急傾斜地形はロボット未踏領域の一つとされている。研究代表者らのこれまでの研究において、この凹凸急傾斜地形を踏破する自律フリークライミングロボットの実現へ向けて、地層や岩石の表面への効率的な「しがみ付き」を可能とするパッシブ鉤爪グリッパを開発してきた(図1)。その中で、グリッパを引き剥がそうとする外力(引剥力)に対して、「しがみ付き」を維持できる引剥力の最大値(=保持力)には力学的異方性が存在することを明らかにした。さらに、このグリッパを汎用4脚ロボットに応用し、目視でのマニュアル操作によって、垂直な凹凸面でのクライミング能力を実証してきた(図2)。

この一連の研究から見えた課題として、操縦者(人)が俯瞰でおこなう知的判断(「きちんと凹凸をつかめているか?」、「次にどこの凹凸をつかむべきか?」などへの判断)をロボット一人称視点での制御則に具現化することが、自律フリークライミングロボットのキーテクノロジーであるとの考えに至った。その際、俯瞰的な視点の場合には広域を見渡して大局的判断が可能であるのに対して、ロボット自身が取得するセンサ情報をもとに移動する場合には、遠方の環境情報の不確定性を考慮した判断が必要となる。また、対象地形のミクロな表面粗さは一般に未知であり、直接センシングも困難であることから、グリッパと地形との相互力学には不確定性を伴う。したがって、地形の環境不確定性とグリッパの力学的異方性を踏まえた上で、フリークライミング移動の継続に適した自律歩容原理(=知的判断を伴う制御則)を確立することが工学的課題であるといえる。

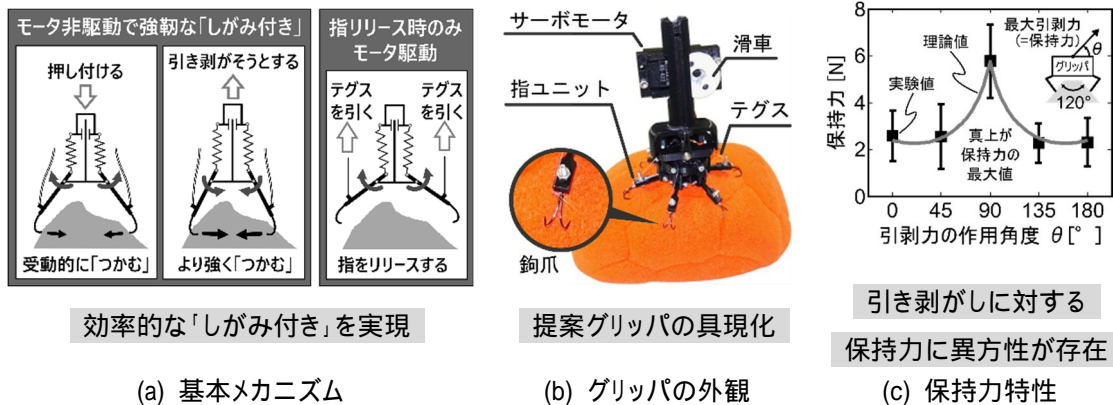


図1: パッシブ鉤爪グリッパの開発と評価

(In: K. Nagaoka et al., IEEE Robot. Automat. Lett., Vol. 3, Issue 3, pp. 1765-1770, 2018.)



図2: フリークライミング動作の実証

(In: K. Nagaoka et al., IEEE Robot. Automat. Lett., Vol. 3, Issue 3, pp. 1765-1770, 2018.)

2. 研究の目的

本研究の目的は、フリークライミングロボットのためのパッシブ鉤爪グリップが有する力学的異方性と地形の環境不確定性を内包した自律歩容原理を確立することである。その中で達成すべき目標として、まず一般化した凸地形に対するグリップ保持力の力学的異方性の体系化が挙げられる。次いで、グリップの「しがみ付き」状態と「しがみつくべき」領域を判断する、実践的な自律制御則の構築が必要である。特に、図3に示すように、未センシング領域のマクロな地形凹凸のみならず、現・既センシング領域における地形のミクロな表面粗さの不確定性を考慮した制御則の実現が重要となる。グリップ力学特性の体系的理解と知的判断を融合することにより、フリークライミング移動の自律歩容制御を実現することが最終目標である。

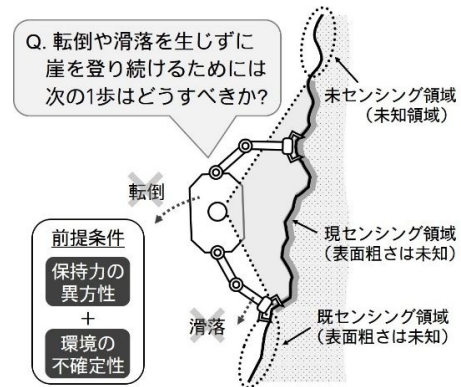


図3: フリークライミングロボットの自律歩容制御に向けた課題

3. 研究の方法

本研究では、フリークライミングロボットの自律歩容原理の確立に向けた研究アプローチとして、鉤爪グリップの力学的異方性の体系化にもとづいた自律歩容制御則の構築をおこなう。また、制御則へのフィードバック情報として、地形環境を三次元形状としてセンシングし、鉤爪グリップの「つかみごたえ」をグリップ把持力学と融合させて環境を知覚化することで「しがみ付き」可能領域の抽出を制御則に組み込む手法を実現する。また、自律歩容制御には、これらのフィードバック情報にもとづいた多面的な指標が必要となる。本研究では、目的地方向への移動量、転倒や滑落に対する(静的・動的な)安定余裕とグリップの可到達範囲を考慮して歩容制御則を構築する。

4. 研究成果

本研究では、周囲の地形情報を取得する外界センシング機器として、RGB-D センサ RealSense D435i (Intel 社製) を使用し、地形表面までの三次元距離情報を取得した。ここで得られた点群データに対して、回帰平面を算出し、平面固定の座標系における地形配列として扱った。次いで、グリップによる把持力学特性を考慮して決定される把持可能な領域を、グリップマスクとして三次元幾何形状で定義した。最後に、地形配列とグリップマスクとの照合により、ロボットのセンシング範囲にある把持可能点を抽出することを実現した。RGB-D センサを用いた把持可能領域の抽出結果の一例を図4に示す。本結果より、ロボットが把持可能な領域のみを抽出できていることが確認でき、提案手法の有効性を示すことができた。

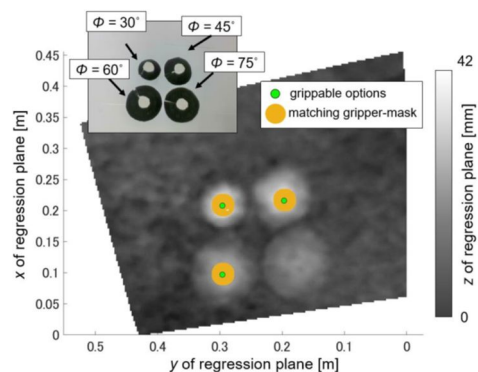


図4: 把持可能領域の抽出結果 (30° 60° が把持可能な場合)

次いで、本研究では、多脚歩行型ロボットの転倒安定余裕の概念を対象とするフリークライミングロボットに適用可能な形式で再定義し、ロボット上に可視化をおこなった。比較的平坦な地面を歩行するロボットと比べて傾斜角が大きなフリークライミング運動の場合には、重力ベクトルと支持多角形(支持脚点を結んだ平面上の多角形)によって視覚的に転倒安定性を理解することができないため、支持多角形を多面体の立体表現に拡張することで、これまでの転倒安定余裕と同一の議論を可能とした。さらに、実際の運動を考慮して、重力による静的な安定性だけで

なく，ロボットの運動（加減速）による慣性力を考慮して安定余裕を定式化した．傾斜地形でのロボット慣性力を考慮した転倒安定余裕の可視化した結果の一例を図 5 に示す．図中の赤色ベクトルが合成されたロボットの加速度であり，この加速度が多面体形式で表現される安定余裕内に収まっていれば，ロボットは動的に安定であると判断することができる．これにより，ロボットの歩容生成に向けた安定性の概念をより一般化して表現することができた．本研究では，自律歩容制御を目的としていたため，多面体表現を「直接的に」用いた歩容計画への拡張は実施していないが，多面体表現は遠隔操縦で人がロボットを操作する場合にも適用可能な概念である．

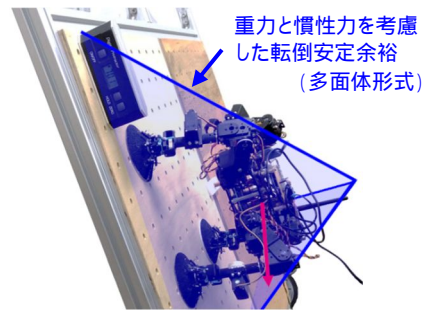


図 5: 傾斜地形でのロボット慣性力を考慮した転倒安定余裕の可視化

以上の基盤技術を融合して，自律歩容制御則の構築をおこなった．本研究では，対象とするフリークライミングロボットの歩容計画手法を単純化するため，基準歩容であるクロール歩容における歩容パラメータの一部を固定して，静的安定性を保ちながら離散的に与えられた把持点を選択する非定常歩容を計画した．まず，ロボットに対して移動目標地点を与える．次に，1脚を遊脚とした場合の，センシング領域と到達可能領域，および把持可能点の抽出をおこなう．その概念図を図 6 に示す．ここで，ロボット重心が目標地点に向かう移動ベクトルを最大化するような把持可能点を選択し，最終的な歩容を生成する．図 7 に歩容制御にもとづくロボット運動のシミュレーション結果の一例を示す．本結果より，把持可能点がランダムに配置された傾斜地形に対して，ロボットは転倒安定余裕を保ちながら，目標地点まで安定して歩容を継続できていることが確認でき，制御則の有効性を示すことができた．また，図 6(b)より，ロボット重心投影点の移動軌跡が地形面に対して左右に揺動していることが確認できる．これは，多脚ロボットの歩容制御則として提案されている左右揺動歩容に似た動きを示している．本研究の制御手法では，ロボット本体の揺動運動を明示的には与えていないが，転倒安定余裕を保つという評価関数が，結果的に左右揺動歩容と同じ動作および力学的な作用（ただし，従来の左右揺動歩容はより動的な歩容を実現するための手法であり，効果の程度は同一ではない）を生み出すことに繋がったと考えられ，リーズナブルな結果であると判断できる．さらに，斜面進行方向の側面からみた結果として，傾斜登攀時のロボット姿勢はやや前傾姿勢になっていたことが確認された．これは多脚ロボットで提案されている傾斜適応歩容そのものであると考えられ，転倒に対する安定余裕を保つための優位な姿勢である（ただし，従来の傾斜適応歩容は比較的緩やかな傾斜の歩行を対象としている）．したがって，フリークライミング運動を想定して転倒安定余裕を考慮して構築した歩容制御則が，従来型の歩容制御則を内包した形で最終的な歩容制御を実現することができた，と結論付けることができる．

以上の基盤技術を融合して，自律歩容制御則の構築をおこなった．本研究では，対象とするフリークライミングロボットの歩容計画手法を単純化するため，基準歩容であるクロール歩容における歩容パラメータの一部を固定して，静的安定性を保ちながら離散的に与えられた把持点を選択する非定常歩容を計画した．まず，ロボットに対して移動目標地点を与える．次に，1脚を遊脚とした場合の，センシング領域と到達可能領域，および把持可能点の抽出をおこなう．その概念図を図 6 に示す．ここで，ロボット重心が目標地点に向かう移動ベクトルを最大化するような把持可能点を選択し，最終的な歩容を生成する．図 7 に歩容制御にもとづくロボット運動のシミュレーション結果の一例を示す．本結果より，把持可能点がランダムに配置された傾斜地形に対して，ロボットは転倒安定余裕を保ちながら，目標地点まで安定して歩容を継続できていることが確認でき，制御則の有効性を示すことができた．また，図 6(b)より，ロボット重心投影点の移動軌跡が地形面に対して左右に揺動していることが確認できる．これは，多脚ロボットの歩容制御則として提案されている左右揺動歩容に似た動きを示している．本研究の制御手法では，ロボット本体の揺動運動を明示的には与えていないが，転倒安定余裕を保つという評価関数が，結果的に左右揺動歩容と同じ動作および力学的な作用（ただし，従来の左右揺動歩容はより動的な歩容を実現するための手法であり，効果の程度は同一ではない）を生み出すことに繋がったと考えられ，リーズナブルな結果であると判断できる．さらに，斜面進行方向の側面からみた結果として，傾斜登攀時のロボット姿勢はやや前傾姿勢になっていたことが確認された．これは多脚ロボットで提案されている傾斜適応歩容そのものであると考えられ，転倒に対する安定余裕を保つための優位な姿勢である（ただし，従来の傾斜適応歩容は比較的緩やかな傾斜の歩行を対象としている）．したがって，フリークライミング運動を想定して転倒安定余裕を考慮して構築した歩容制御則が，従来型の歩容制御則を内包した形で最終的な歩容制御を実現することができた，と結論付けることができる．

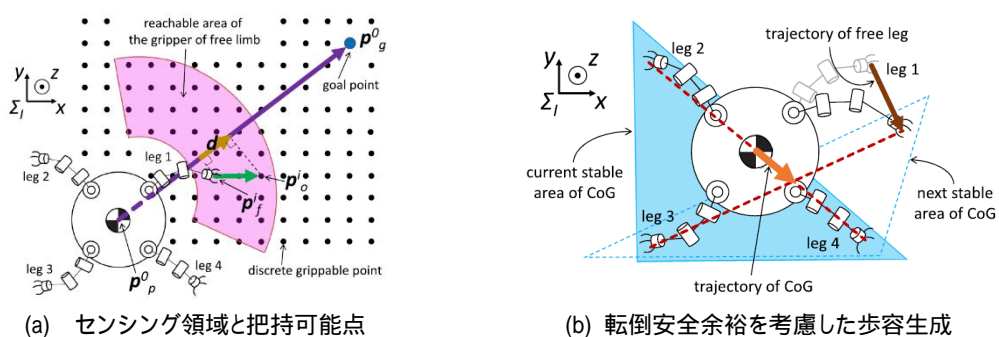
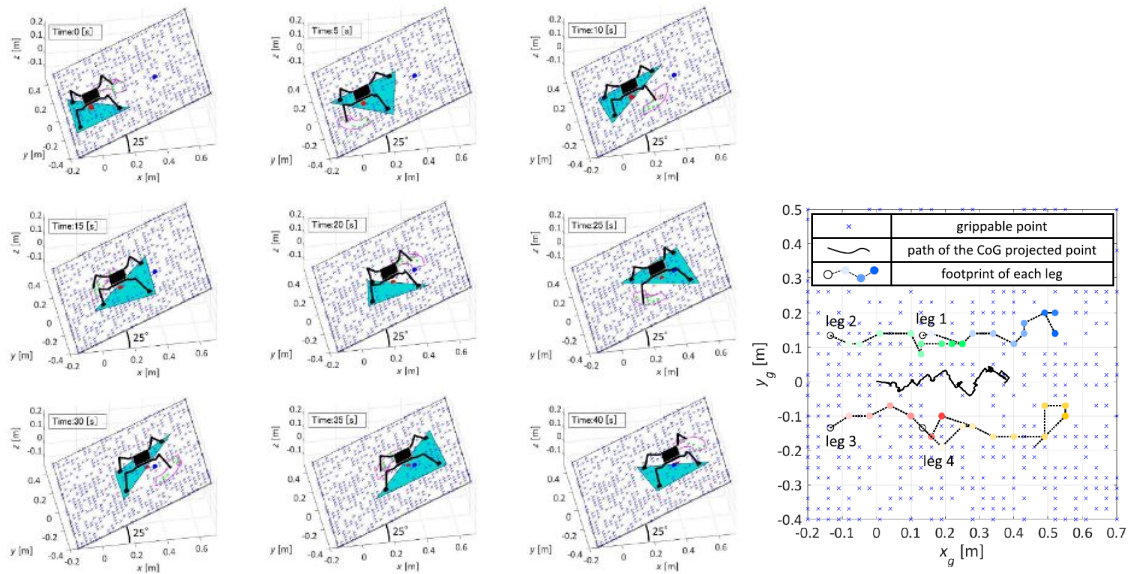


図 6: 自律歩容制御のための歩容生成の概略図



(a) 歩容の様子

(b) 重心投影点と足跡の軌跡

図 7: ランダム把持可能点を有する傾斜地形における自律歩容制御シミュレーションの結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Yuki Shirai, Hayato Minote, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 Gait Analysis of a Free-Climbing Robot on Sloped Terrain for Lunar and Planetary Exploration
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇野健太郎, Warley F. R. Ribeiro, 白井有樹, 永岡健司, 吉田和哉
2. 発表標題 フリークライミングロボットのための歩容計画法の提案
3. 学会等名 第19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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田和哉, 永岡健司, 宇野健太郎, 白井有樹, William Jones
2. 発表標題 崖降り・崖登り探査のための脚型ロボットの研究開発
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Uno, Warley F. R. Ribeiro, William Jones, Yuki Shirai, Hayato Minote, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 Gait Planning for a Free-Climbing Robot based on Tumble Stability
3. 学会等名 The 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Warley F. R. Ribeiro, Kentaro Uno, Kenji Nagaoka, Kazuya Yoshida
2. 発表標題 Analysis of Motion Control for a Quadruped Ground-Gripping Robot for Minor Body Exploration
3. 学会等名 The 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Nagaoka, Hayato Minote, Kyohei Maruya, Yuki Shirai, Kazuya Yoshida, Takeshi Hakamada, Hirotaka Sawada, and Takashi Kubota
2. 発表標題 Passive Spine Gripper for Free-Climbing Robot in Extreme Terrain
3. 学会等名 The 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽地啓悟, 宇野健太郎, 永岡健司, 吉田和哉
2. 発表標題 フリークライミングロボットのための地形とグリップの幾何学形状にもとづく把持候補点検出手法
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 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プ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
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----