

ハンドアイカメラを用いた 脚型クライミングロボットののための把持状態判定手法

Gripping State Determination Method Using a Hand-Eye Camera for a Legged Climbing Robot

○大河原拓*, 宇野健太郎*, 高田尚昌*, 吉田和哉*

○Taku Okawara*, Kentaro Uno*, Naomasa Takada*, Kazuya Yoshida*

* 東北大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻 宇宙ロボット研究室

*Space Robotics Laboratory, Department of Aerospace Engineering, Tohoku University

キーワード： ハンドアイカメラ (Hand-Eye Camera), 状態推定 (State Estimation),
脚型クライミングロボット (Legged Climbing Robot), ビジュアルオドメトリ (Visual Odometry),
ロボットビジョン (Robot Vision)

連絡先： 〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01 東北大学 工学研究科 機械系 1 号館 416 室
Tel.: 022-795-6993, Fax.: 022-795-6993, E-mail: okawara.taku.t3@dc.tohoku.ac.jp

1. はじめに

移動ロボットが重要な役割を担う分野の一つとして、極限環境での探査が挙げられる。極限環境とは、人間が立ち入ることが困難、あるいは多大なリスクを伴う環境であり、災害現場や火山火口、宇宙空間などがその代表例である。このような過酷な環境における情報収集や人・物の運搬作業は、科学調査や救援活動のために必須であり、これらの危険な作業の実施者は人間でなくロボットに代替されることが望ましい。これまで、極限環境で作業を行う移動ロボットが数多く開発されてきたものの、従来の車輪やクローラを用いた移動機構を有するロボットでは走行困難な地形が自然界に広く存在している。地上の急峻な渓谷や切り立った崖に加え、JAXA



Fig. 1: Legged climbing robot platform: HubRobo equipped with a hand-eye camera.

つながる地下空洞もその例の1つである。特に、人類の月面基地候補地とも考えられている縦孔内部の探査の必要性は極めて高まっている¹⁾ 一方で、こうした急傾斜で凹凸が激しい地形は移動ロボットの未踏領域となっている。

本研究チームでは、急傾斜、凹凸地形を踏破可能な移動ロボットプラットフォームとして、

Fig. 1 に示すような脚型クライミングロボット HubRobo を開発した。このロボットの特徴は、把持を行うときにアクチュエータを必要としない鉤爪型グリップを全脚先に装備していることである。このグリップで地形内に点在する凸部(以降、これを把持可能点と記す)にしがみ付きながらほふく移動することにより、急傾斜、凹凸地形の踏破を可能としている。本研究グループでは HubRobo のような脚型クライミングロボットを極限環境で自律運用させるために必要な要素技術の研究開発を行ってきた。これまでに、鉤爪型グリップの力学的特性を明らかにし²⁾、一般的な脚型ロボットの転倒安定性理論を、グリップの把持性能が寄与する項を組み込むことで拡張した³⁾。また、既知である3次元地形情報から把持可能点を検出するアルゴリズムを提案してきた。⁴⁾

しかしながら、脚型クライミングロボットの自律化にはまだ課題が残されている。その一つとして把持状態の判定が挙げられる。把持可能点はロボットに搭載された外界センサのデータから構築した3次元環境地図内に検出されるが、この環境地図は誤差を含むため、結果としてロボットから見た把持可能点の位置情報には不確実性が含まれる。したがって、この地形情報が有する不確実性と脚の制御に関する誤差により、把持可能点を選択的に掴みながら移動する際、ロボットのグリップの状態は、以下に示すような不適切な把持状態になり得る。

- 把持可能点を掴むつもりでグリップを閉じても、実際は把持可能点を十分に把持していない空振り状態
- 把持を開放するつもりでグリップを開いても、意図しない鉤爪の引っ掛かりが残る状態

ある脚が不十分な把持状態の時に他の脚を遊脚化させた場合、ロボットの上体が不安定となり、

滑落を引き起こす。そのため、把持状態が適切かどうかをリアルタイムに判定する手法が必要となる。本研究グループでは、IMU(Inertial Measurement Unit)を脚先の内部に搭載し、振動を解析することで把持状態を判定する手法を提案している⁵⁾。

一方本研究では、ハンドアイカメラによるビジュアルオドメトリを用いて把持状態を判定する手法を提案する。ビジュアルオドメトリにより実際の脚先軌道を推定し、目標の脚先軌道と実際の脚先軌道のずれに着目して把持状態の適切性を判定する。

本稿では、ハンドアイカメラを用いた把持状態判定手法の詳細を述べ、HubRoboを用いた実験を通して本手法が有効であることを示す。

2. ハンドアイカメラ

ハンドアイカメラの主な用途は、広範囲の環境地図を作成することである。脚型ロボットは各脚を移動機構としてだけではなく、カメラを搭載したロボットアーム(ハンドアイシステム)としても活用することで、遊脚運動に伴って広範囲な環境地図を作成できる。

本研究では、ハンドアイカメラを環境地図の作成ではなく、把持状態の判定に応用する。環境地図を得るには脚先の位置も必要となり、脚先位置はビジュアルオドメトリで推定されるため、このプロセス内で推定された脚先位置を用いて把持状態の判定を行う。ここで、ビジュアルオドメトリとは、連続画像を解析することでカメラの移動量を計算する手法である⁶⁾。カメラの移動量を座標変換し、初期位置に積算することで、脚先位置が推定できる。また、先行研究としてIMUを用いた把持状態判定手法について述べたが、ハンドアイカメラで把持状態の判定ができれば脚先にIMUを搭載する必要がなくなる。こうしてセンサの数を少なくすることは、システムの複雑化と計算量の増加を防ぐ

ことにつながるため、極限環境を自律移動するロボットのように計算リソースが限られている場合には極めて有効である。

3. 把持状態判定手法

本章では、はじめに本手法で判定する把持状態の種類を示し、次に、これらの把持状態の適切性を判定するための評価関数、アルゴリズムについて詳細に述べる。

3.1 考慮する把持状態

あるグリップの把持状態が不適切にも関わらず他の脚が遊脚化した場合、脚型クライミングロボットは安定性を失い、最悪の場合滑落してしまうことを述べた。つまり、自律化のためには、グリップの把持状態が適切かどうかをリアルタイムで判定しなければならない。そのため、提案する手法により、Fig. 2に示すような4つの把持状態を判定する。Case 1はグリップが閉じている状態であるが、その中でもCase 1-1はグリップが適切に閉じて把持可能点を十分に把持している状態 (Successful grasping), Case 1-2は把持可能点を十分に把持できていない状態 (Failed grasping) を表す。一方でCase 2はグリップが開いている状態であるが、その中でもCase 2-1はグリップが適切に解放している状態 (Successful releasing) であり、所望の脚軌道を追従できる。そして、Case 2-2はグリップは開いているが、引っ掛かりが残る状態 (Failed releasing) を表す。把持状態がFailed releasingの時、Fig. 2(d)で示した矢印方向に脚の軌道を与えた場合、赤い丸で囲んだ鉤爪が引っ掛かる。

3.2 評価関数

グリップが地形の凸部に引っ掛かっている状態で脚を動かしたとき、その引っ掛かりが所望のものかどうかに関わらず、脚は所望の軌道を追従できない。これが本手法において着目すべ

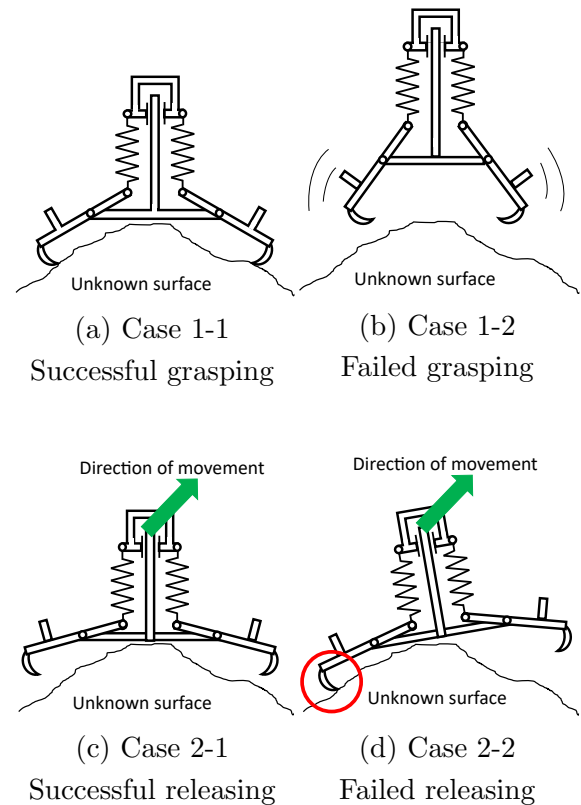


Fig. 2: Classification of the gripper's states considered in the proposed method.

き点である。つまり、引っ掛かりがある状態で脚を動かしたとき、目標の脚先軌道と実際の脚先軌道が異なる。

本手法では、目標脚先軌道と実際の脚先軌道のずれを、脚先速度を逐次比較することで評価する。実際の脚先速度を求める方法としては、IMUの加速度データや関節角度センサ情報にもとづく算出方法が多数あるが、本手法では、ハンドアイカメラによるビジュアルオドメトリをもとに実際の脚先速度を求める。こうすることで、更なるセンサを追加せずに把持状態の判定が行える。

ビジュアルオドメトリにより得られた脚先位置の時間数値微分をとることで脚先速度を求め、これを用いて評価を行う。具体的にはEq. (1)で示すように、ビジュアルオドメトリで推定した脚先速度 \mathbf{V}_n^{vo} と目標脚先速度 \mathbf{V}_n^{des} の差を $|\mathbf{V}_n^{des}|$ で除した値 R_n を把持状態判定のための評価関数に用いる。ただし、 n は時系列データのステッ

プ数を表し、 $\mathbf{V}_n^{\text{des}} \neq \mathbf{0}$ の時にのみ R_n は計算される。また、 R_n は基本的には 0~1 の値となるが、センサの計測誤差等により R_n が 1 を超えることもある。Eq. (1) では $\mathbf{V}_n^{\text{des}}$ の大きさの影響を取り除くために $|\mathbf{V}_n^{\text{des}}|$ で正規化している。Eq. (1) の意味としては、ある客を遊脚化するため、その脚を引き上げるような目標軌道を与えた時、 R_n が 0 に近ければ、目標軌道と実際の軌道の相対速度が 0 に近く、両者の軌道が一致していることからグリップには引っ掛かりがないことを示し、反対に R_n が 1 に近ければ、グリップの引っ掛かりがあることによって両者の軌道が一致していないことを表す。

ここで、本手法ではビジュアルオドメトリで推定した脚先位置の差分をとって \mathbf{V}^{vo} を計算しているが、ノイズに対するロバスト性を高めるため、Eq. (2) で示すように、ビジュアルオドメトリの分散 σ_n^2 を重みとして R_n を平滑化した移動加重平均 W_n を計算する。そして、この W_n を本手法における把持状態を判定するための評価関数として設定する。ただし、 N は移動加重平均を計算する際に使用するデータ総数を表す。

$$R_n = \frac{|\mathbf{V}_n^{\text{des}} - \mathbf{V}_n^{\text{vo}}|}{|\mathbf{V}_n^{\text{des}}|} \quad (1)$$

$$W_n = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sigma_{n-i}^{-2} R_{n-i}}{\sum_{i=0}^{N-1} \sigma_{n-i}^{-2}} \quad (2)$$

3.3 把持状態判定のアルゴリズム

2.3 節で導入した W_n を評価し、グリップが閉じている時は Successful grasping と Failed grasping, 開いている時は Successful releasing と Failed releasing を判定するアルゴリズムについて述べる。脚に遊脚の指令を与えた時、 W_n が 0 に近ければ引っ掛かりがなく、 W_n が 1 に近ければ引っ掛かりがある状態となる。そのた

め、グリップが閉じているならば W_n が 1 に近い値、あるいは、グリップが開いている時に W_n が 0 に近い値であれば、適切な把持状態と判定できる。一方、グリップが閉じているのに W_n が 1 に近い値、または、グリップが開いているにも関わらず W_n が 0 に近い値の場合は不適切な把持状態と判定できる。

上記のことから、グリップの開閉の状態に応じて W_n に関する閾値が存在すれば、Fig. 2 で示した把持状態を判定できる。グリップが閉じている時の閾値を $W_{\text{th}}^{\text{grasp}}$, グリップが開いている時の閾値を $W_{\text{th}}^{\text{release}}$ とする。これらの閾値を決定できれば、Fig. 3 に基づいて逐次的に W_n と比較することで、現在の把持状態の適切性を判定できる。グリップが閉じている時は、 W_n が $W_{\text{th}}^{\text{grasp}}$ を超えればグリップが適切に把持可能点を把持している把持状態 (Successful grasping) と判定され、逆に W_n が $W_{\text{th}}^{\text{grasp}}$ 未満の時はグリップが把持可能点を把持できていない不十分な把持状態 (Failed grasping) と判定される。一方、グリップが開いている時は、 W_n が $W_{\text{th}}^{\text{release}}$ 未満ならば適切にグリップが開いている把持状態 (Successful releasing) と判定され、逆に W_n が $W_{\text{th}}^{\text{release}}$ を超えたときはグリップは開いているが引っ掛かりが残る不適切な把持状態 (Failed releasing) と判定される。

把持状態を判定するための閾値は、実験によって得られた W_n の傾向を調べることで決定する。そのため、Case 1-1 と Case 1-2, Case 2-1 と Case 2-2 において W_n の比較を行う。実験で得た W_n の全時系列データより、引っ掛かりがある Case 1-1 と Case 2-2 からは W_n の最小値 $W_{n,\text{successful}}^{\text{grasp}}$ と $W_{n,\text{failed}}^{\text{release}}$, 引っ掛かりがない Case 1-2, Case 2-1 からは W_n の最大値 $W_{n,\text{failed}}^{\text{grasp}}$ と $W_{n,\text{successful}}^{\text{release}}$ を記録する。そして、Case 1-1 と Case 1-2, Case 2-1 と Case 2-2 の比較を行い、 W_n の時系列データがそれぞれの Case で二分する閾値を決定す

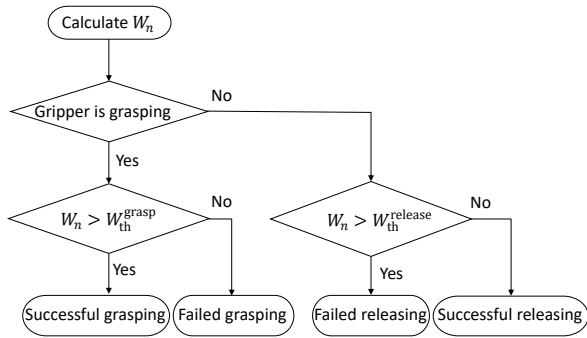


Fig. 3: Flow chart for the proposed method to determine the gripper's state.

る。つまり、Case 1-1 と Case 1-2, Case 2-1 と Case 2-2 の比較を行ったとき、Eq. (3), Eq. (4) を満たす W_{th}^{grasp} , $W_{th}^{release}$ を決定できれば、把持状態を判定できる。ここで、Eq. (3) に関してまとめた模式図を Fig. 4 に示す。Fig. 4 で示すように Case 1-1 と Case 1-2 の W_n の時系列データが二分されているならば W_{th}^{grasp} を決定できる。Case 1 についてまとめたが、同様のことが Case 2 でもいえる。

$$W_{n,failed}^{grasp} < W_{th}^{grasp} < W_{n,successful}^{grasp} \quad (3)$$

$$W_{n,successful}^{release} < W_{th}^{release} < W_{n,failed}^{release} \quad (4)$$

4. 実験

本章では、Eq. (2) で示した W_n を実験により算出する方法を述べ、実験により得られた結果を示す。そして、Eq. (3), Eq. (4) を満たす閾値 W_{th}^{grasp} , $W_{th}^{release}$ が決定できることを実験により検証する。

4.1 実験方法

はじめに、 W_n を計算するための実験方法について述べる。実験環境は Fig. 1 に示すようになっており、ハンドアイカメラが搭載されている左前の脚において、それぞれの Case で以下に示す手順に沿って実験を 5 回ずつ行った。ただし、移動加重平均 W_n を計算する際に使用するデータ総数 N は 5 とした。

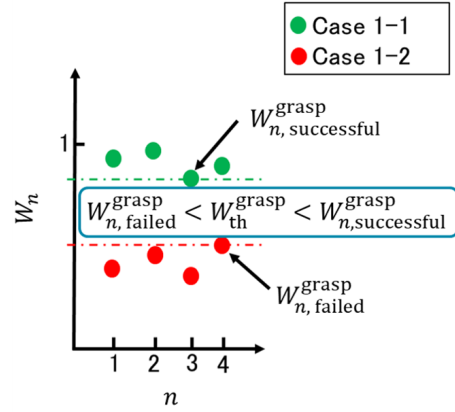


Fig. 4: Schematic diagram for determination the threshold W_{th}^{grasp} .

- 1) 左前の脚を 5 秒間直線運動させる指令を送る
- 2) 順運動学に基づく目標脚先位置とビジュアルオドメトリに基づく実際の脚先位置をそれぞれ計算する
- 3) それぞれの脚先位置のタイムスタンプを同期させる
- 4) 同期された脚先位置の差分をとり、脚先の速度 V_n^{vo} , V_n^{des} を計算する
- 5) W_n を計算する

4.2 実験結果

Case 1-1 と Case 1-2, Case 2-1 と Case 2-2 において、 W_n におけるステップ数 n の履歴をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。Fig. 5, Fig. 6 より、Case 1-1 と Case 2-2 から 5 回の実験での W_n の最小値 $W_{n,successful}^{grasp}$ と $W_{n,failed}^{release}$, そして Case 1-2 と Case 2-1 からは W_n の最大値 $W_{n,failed}^{grasp}$ と $W_{n,successful}^{release}$ を求める。Fig. 5 より、 $W_{n,successful}^{grasp} = 0.89$, $W_{n,failed}^{grasp} = 0.58$ となった。また、Fig. 6 より、 $W_{n,successful}^{release} = 0.76$, $W_{n,failed}^{release} = 0.91$ となった。よって、Fig. 5 と Fig. 6 は Eq. (3) は Eq. (4) を満たす結果となった。すなわち Case 1-1 と Case 1-2, Case 2-1 と Case 2-2 における W_n の時系列データをそれぞれ二分する閾値を決定できることが検証できた。この閾値を Fig. 3 のアルゴリズムに適用するこ

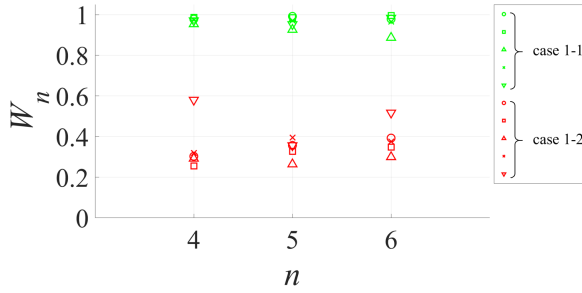


Fig. 5: Experimental results for Case 1-1 and Case 1-2.

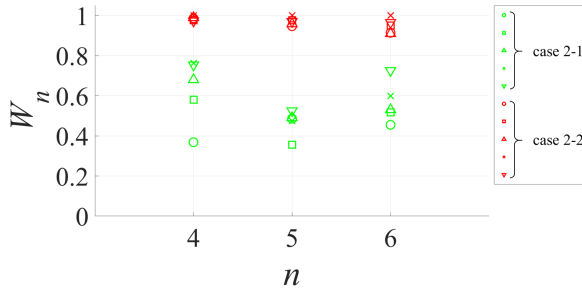


Fig. 6: Experimental results for Case 2-1 and Case 2-2.

とで、ロボットは把持状態を判定できる。

Fig. 6 での $n=4$ の箇所を見ると、Case 2-1 における W_n の 1 ステップ目が大きくなりやすい傾向にあることが分かる。本来なら Case 2-1 における W_n は、Case 1-2 と同じように 0.3 程度になるはずである。この原因として、Case 2-1 では脚を把持可能点に押し付けすぎていることが考えられる。このような場合、脚を持ち上げる脚軌道を与えた時、脚が実際に持ち上がるまでに若干の遅れが生じるため、脚が動き出した直後の R_n が 1 に近い値となる。しかし、 R_n を平滑化して W_n を計算しているため、Case 2-1 と Case 2-2 における W_n の時系列データがそれぞれ二分され、閾値 $W_{th}^{release}$ を決定できる結果となっている。

5. 結論

本稿では、ハンドアイカメラによるビジュアルオドメトリを用いた脚型クライミングロボットの把持状態判定手法を提案した。そして、閾値

を適切に設定することで、グリッパが閉じている時は Successful grasping と Failed grasping, 閉じている時は Successful releasing と Failed releasing をそれぞれ判定可能であることを、実機を用いた実験結果にもとづき明らかにした。今後は、不十分な把持状態と判定されたとき、適切な把持状態に復帰させる動作を考える。また、今回はハンドアイカメラは 1 台のみであったが、今後は全ての脚先にハンドアイカメラを搭載する。これらにより、全ての脚に関する把持状態を判定でき、脚型クライミングロボットの自律移動の達成に近づくと考える。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19J20685 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) T. Kaku, J. Haruyama, W. Miyake, A. Kumamoto, K. Ishiyama, T. Nishibori, K. Yamamoto, S. T. Crites, T. Michikami, Y. Yokota, *et al.*, “Detection of intact lava tubes at Marius Hills on the Moon by SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder,” *Geophysical Research Letters*, vol. 44, no. 20, pp. 10–155, 2017.
- 2) K. Nagaoka, H. Minote, K. Maruya, Y. Shirai, K. Yoshida, T. Hakamada, H. Sawada, and T. Kubota, “Passive Spine Gripper for Free-Climbing Robot in Extreme Terrain,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 1765–1770, 2018.
- 3) K. Uno, W. F. Ribeiro, W. Jones, Y. Shirai, H. Minote, K. Nagaoka, and K. Yoshida, “Gait planning for a free-climbing robot based on tumble stability,” in *Proceedings of the 2019 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2019, pp. 289–294.
- 4) 羽地啓悟, 宇野健太朗, 永岡健司, 吉田和哉, “フリークライミングロボットのための地形とグリッパの幾何学形状にもとづく把持候補点検出手法”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, no. 2P1-B06, 2020.
- 5) 比内俊樹, 宇野健太朗, 吉田和哉, “鉤爪型グリッパを有するクライミングロボットのための機械学習を用いた把持状態判定手法”, 第 21 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, no. 1H3-04, 2020.
- 6) D. Scaramuzza and F. Fraundorfer, “Visual odometry [tutorial],” *IEEE robotics and automation magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 80–92, 2011.