

# フリークライミングロボットのための 不整地登攀実験環境の設計と開発

## Design and Development of a Test-field for Free-Climbing Robots

○宇野健太朗\*, 錦織広樹\*, Arthur Candalot\*, Louis Mamelte\*\*, 吉田和哉\*

○Kentaro Uno\*, Hiroki Nishikori\*, Arthur Candalot\*, Louis Mamelte\*\*, Kazuya Yoshida\*

\* 東北大学, \*\*Sorbonne University

\*Tohoku University, \*\*Sorbonne University

キーワード： ロボットテストフィールド (Robot Test Field), フリークライミングロボット (Free-Climbing Robot), 脚型ロボット (Legged Robot), 重力補償 (Gravity Compensation)

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: unoken@astro.mech.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

火山火口付近や洞窟内部の情報収集, 災害事故現場での救助活動の支援, そして天体表面の科学調査などの現場は, 人の立ち入りが困難な過酷環境と類される. そこで人の代わりにこうした現場に向かい, 必要な作業を行う移動ロボットが積極的に研究・開発されてきた<sup>1, 2, 3)</sup>. 特に, 過酷環境で活動する地上ロボットの従来の移動機構はクローラ型<sup>2)</sup>や車輪型<sup>3)</sup>が一般的であるが, 急峻な渓谷, 切り立った崖, 洞窟内部の岩壁および天井などの凹凸・急傾斜地形は地上移動ロボットの未踏領域の一つとなっている. こうした凹凸・急傾斜地形表面を移動することができるロボットとして, 本研究グループでは, 地表面を把持する機構(グリッパ)を手足に装備した脚型ロボット(本稿ではこの種類のロボットをフリークライミングロボットと呼ぶ)を提案してきており<sup>5)</sup>, 特に, 宇宙天体表

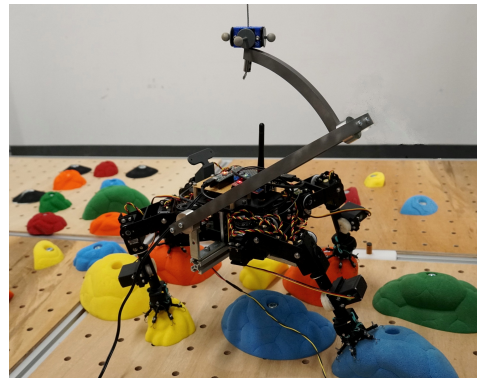


Fig. 1: Developed four-limbed free-climbing robot with passive spine gripper<sup>4)</sup> on developed test-field. Improved version for autonomous perceptive locomotion (named HubRobo) is under development.

面の岩石地帯の移動探査<sup>4, 6)</sup>や, 工場内部の天井や壁の点検<sup>7)</sup>等を目的としたフリークライミングロボットが実用化に向けて現在広く研究開発されている.

フリークライミングロボットの開発において, ロボットの活動現場となる急傾斜や凹凸地形, 重

力を再現した環境での登攀実験を行い、ロボットの性能を評価することは極めて重要であるが、屋外実験では傾斜角度の詳細な設定や模擬重力の変更は困難なため、屋内登攀実験環境を用意する必要がある。特に宇宙ロボット研究の分野では、地上で月（約 $1/6$  G）や火星（約 $3/8$  G）、小天体（微小重力）等の重力下におけるロボットの運動を再現できる実験装置は必須であり、その方法は以下の3つに大別できる。

1) 空気浮上装置を用いた方法<sup>8, 9)</sup>

圧縮空気の対象を石定盤上に浮かせ、摩擦を限りなくゼロに近づけることで二次元平面内の運動において重力の影響を取り除く方法である。石定盤の傾き角度を変えることで、任意の重力を模擬できる。

2) 制御外力を与える方法

対象にロボットアーム<sup>10)</sup>やケーブル<sup>11, 12)</sup>を取り付け、これらを力覚センサデータをフィードバックして制御することで重力以外の外力および外モーメントを作用させ、異なる重力を模擬する方法である。この方法は対象に働く模擬重力を高精度に変更することができるが、装置全体が大型化する傾向がある。

3) カウンターウェイトで重力を補償する方法<sup>13)</sup>

カウンターウェイトを取り付けたワイヤで対象を吊り上げ、対象重心に鉛直上向きの力をかける方法である。対象重量に対するカウンターウェイト重量の割合を変更することで、任意の重力環境を模擬することができる。力を制御しないため2)に比べると精度は劣るが、機構としては最も単純である。

さて、開発中のフリークライミングロボットの登攀性能実証のための実験場は最大2 m四方の傾斜不整地で十分である。そこで今回開発した不整地登攀実験環境は、システム全体として

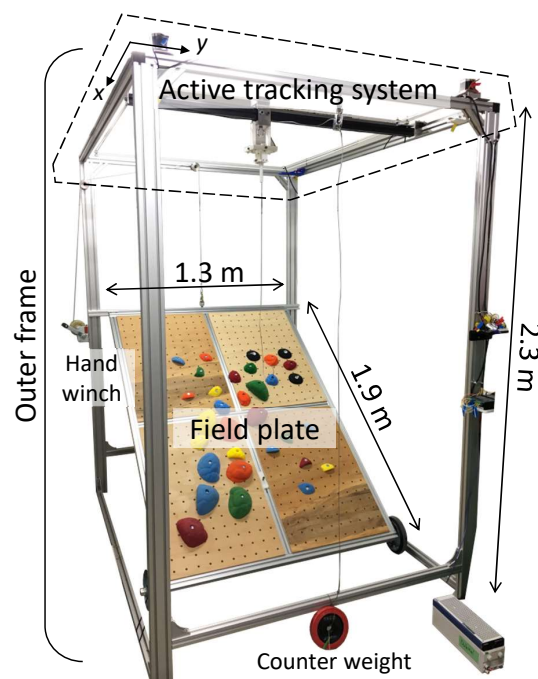


Fig. 2: Developed terrain-, inclination-, and gravity-adjustable test-field.

もできるだけ省スペース低コストなものを目指し、重力模擬の方法は3)を採用した。

本稿は以下の内容から構成される。まず、傾斜角度と補償重力を変更でき、様々な不整地を再現できるフリークライミングロボットのための登攀実験環境（Fig. 2）の設計と開発について述べる。次に、重力補償装置について、移動するロボットに対して補償重力を常に鉛直上向きにかけるために、天井から見たロボットの位置を二次元的に追尾するシステム（本稿ではこれをアクティブトラッキングシステムと呼ぶ）の開発について述べる。最後に動作試験を通して確認したアクティブトラッキングシステムの性能、および結論を述べる。

## 2. 不整地登攀実験環境

フリークライミングロボットが実際に活動するであろう環境を再現するためには、開発する不整地登攀実験環境（本稿では以降これをテストフィールドと呼ぶ）は以下の三つの機能を有する必要がある。

- 地形を任意に変更できること

- 傾斜角度が可変であること
- ロボットにかかる重力を変更できること

これらの設計要求に加え、実際に実験を行うときの利便性・安全性を考慮し、地形環境を変更する手続きは実験者一人で行うことができること、そして地震等により外的な力がかかっても転倒しないことを設計指針として加えた。

以上の設計要求および指針にもとづき開発したテストフィールドを Fig. 2 に示す。本テストフィールドは設置場所に固定される外枠 (Outer frame) と、外枠内部で傾きを変えられるフィールド板 (Field plate)、そして外枠上面を二次元移動するアクティブトラッキングシステム (Active tracking system) で構成されている。

フィールド板はアルミ製フレームと 4 枚の木製の天板から構成されている。天板は取り外し可能で、60 mm 間隔の格子点に穴が開いておりボルダリングホールドを任意の配置で固定できる。なお、天板はフレームに取り付けられた固定具によりロックできる。また、フレームの奥側一辺は外枠にレール固定することで上下運動のみに動きが制限されており、辺の midpoint を手回しウィンチで吊り上げることで簡単に上下に動かすことができる。フィールド板手前側の辺の両端には車輪が取り付けられており、奥側の辺の上下運動にともない前後に受動移動する。これらの機構により、実験者が手回しウィンチを回すことで簡単にフィールド板の傾き角度を変更できる。なお、手回しウィンチはセルフロックを有しており任意の傾きで固定可能である。ウィンチの最大荷重はメーカー公称値で 270 kg であるが、ボルダリングホールドを密に敷き詰めたフィールド板の重量は約 60 kg であり、耐荷重性は十分であると言える。

先述したように、本テストフィールドではカウンターウェイトを用いた重力補償を行う。ワイヤとロボットの接続は、ロボットの回転運動を制限しないように Fig. 1 に示すように roll および pitch 方向に自由回転するジンバルを介し

て接続される。そして、ロボットがフィールド板上を移動する間、ロボット重心にかかる力を常に鉛直上向きに保つ必要がある。このためには、ロボットの移動に合わせてカウンターウェイトとロボットを繋ぐワイヤの向きが常に垂直になるように調節するアクティブトラッキングシステムが必要となる。

### 3. アクティブトラッキングシステム

ここでは、テストフィールド外枠上部に取り付けた、アクティブトラッキングシステムについて述べる。システムの構成を Fig. 3 に示す。アクティブトラッキングシステムは大きく分けて計測制御部と駆動部の二部からなる。ここでは、これら 2 つの部分の機能および機構について述べ、その後アクティブトラッキングシステムを稼働させるために実装したソフトウェアについて述べる。

#### 3.1 計測制御部

計測制御部では IMU (慣性計測装置) で計測された加速度、角加速度、地磁気データをマイコンが I<sup>2</sup>C 通信で取得し、フィルタリング処理を行うことでワイヤの傾斜角度 (roll および pitch) を算出し、roll および pitch が 0、すなわちワイヤが垂直になるように駆動部を動かすフィードバック制御を行う。なお、IMU には InvenSense 社製の MPU-9250 を、マイコンボードには Arduino Mega 2650 を使用した。

IMU は、Fig. 4 に示すワイヤが中心を通るジンバル機構に取り付けられており、ワイヤの傾斜角度を計測する。このジンバル機構により IMU の姿勢は 2 自由度に制限されており、ワイヤのねじれに関係なくワイヤの 2 軸方向それぞれの傾斜角度 (roll および pitch) 情報を正確に取得できる。

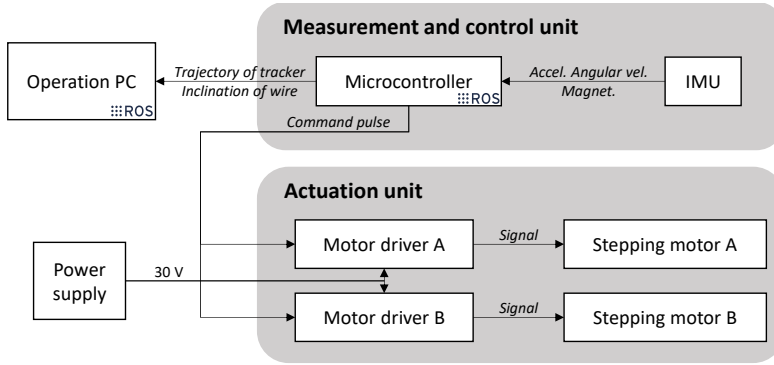


Fig. 3: System diagram of developed active tracking system.

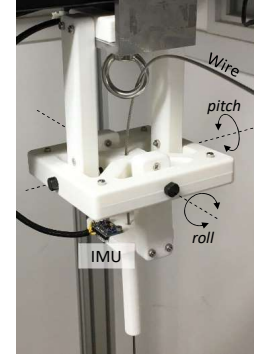


Fig. 4: Mechanical gimbal to mount IMU, attached below the tracker.

また、マイコンにオペレーション PC を USB 接続することで、ROS (Robot Operating System) <sup>14)</sup> の機能を使用して、オペレーション PC 側で駆動部の移動軌跡およびワイヤの傾斜角度の経時変化を記録できる。

### 3.2 駆動部

アクティブトラッキングシステムの駆動部は2台のステッピングモータ、2本のタイミングベルト、移動レール、追尾部分（本稿では以降これをトラッカーと呼ぶ）から構成されている。移動レールの両端は外枠天井部にレール固定されているため前後に受動移動でき、移動レール上をトラッカーが左右に直線移動することができる。そして、トラッカーにはタイミングベルトが固定されており、左右2つのステッピングモータでベルトを送ることで、トラッカーを外枠天井平面内で二次元移動させることができる。なお、ステッピングモータには山洋電気社製 103H7123-5640 を用いた。

またトラッカーの移動平面内に、テストフィールドの手前から奥方向に  $x$  軸を、左から右方向に  $y$  軸をとる。ロボット固定部からトラッカーまでのワイヤの長さを  $l$ 、ワイヤの  $x$  軸および  $y$  軸まわりの垂直状態からの傾斜角度をそれぞれ  $\theta_r$ 、 $\theta_p$  とすると、これら傾きを 0 にするために移動すべきトラッカーの  $x$  軸および  $y$  軸方向

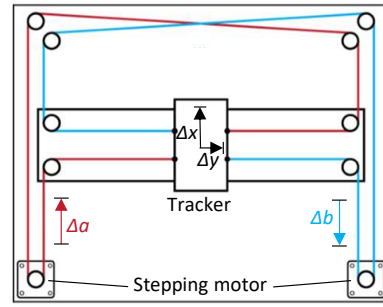


Fig. 5: Schematic drawing of the actuation unit. Red and blue lines represents two timing belts driven by two stepping motors.

の移動量  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  はそれぞれ、Eq. (1)、Eq. (2) のように求められる。

$$\Delta x = l \sin \theta_p \quad (1)$$

$$\Delta y = -l \sin \theta_r \quad (2)$$

そして、トラッカーの移動は Fig. 5 に示すように取り付けられた2本のタイミングベルトの送りによってなされる。2本のベルトは Fig. 5 内にそれぞれ赤線、青線で表されている。この駆動機構を用いると、左右2つのステッピングモータで駆動する2本のベルト送り量をそれぞれ  $\Delta a$ 、 $\Delta b$  とすれば、これらは  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  からそれぞれ Eq. (3)、Eq. (4) として求まる。

$$\Delta a = \Delta x + \Delta y \quad (3)$$

$$\Delta b = \Delta y - \Delta x \quad (4)$$

### 3.3 ソフトウェア

ここでは、アクティブトラッキングシステム計測制御部のマイクロコントローラに実装したソフトウェアフローについて述べる。まず、マイコンはIMUが計測した3軸方向の加速度・角速度・地磁気データをそれぞれ受信し、Madgwick filter<sup>15)</sup>を通して、ワイヤの2軸周りの傾斜角度 $\theta_r$ 、 $\theta_p$ を求める。次に、Eq. (1)~Eq. (4)を用いて2本のベルト送り量を求める。そして、ロボットが実験環境の端に達しておらず、かつ、オペレーションPCとの通信が途切れていない状態であれば駆動部を制御してトラッカーを二次元追従させる。

制御としては $\Delta a$ および $\Delta b$ を偏差としたPI制御を行う(制御周期:50 Hz)。なお、ロボットが傾斜を登り降りするに伴い、実際にはEq. (1), Eq. (2)中の $l$ は変化するが、当研究室で開発しているフリークライミングロボットの移動速度は約数 mm/secであり、1周期ごとの制御量決定における $l$ の影響は非常に小さいことから、制御上 $l$ は固定値としている。

## 4. 動作試験

アクティブトラッキングシステムが正常に動作することを確認するために行った動作試験について述べる。ここでは、ロボットの代わりにロボットと同じ重さのおもり(2.5 kg)をワイヤに接続し、人の手でおもりを前後左右に動かしてロボットの移動を模擬した。カウンターウェイトの質量は1.25 kgとした。おもりは約数 cm/secの速度で $x$ 軸方向に計0.8 m、 $y$ 軸方向に計-0.2 m動かした。

この試験中にIMU計測データから得られたワイヤの傾斜角度の経時変化をFig. 6に示す。Fig. 6から、全体としてワイヤのroll角 $\theta_r$ もpitch角 $\theta_p$ も、それぞれ $\pm 3^\circ$ 程度の範囲に収まっていることが分かる。実際に予想されるロボットの移動速度は今回の動作試験において人の手で

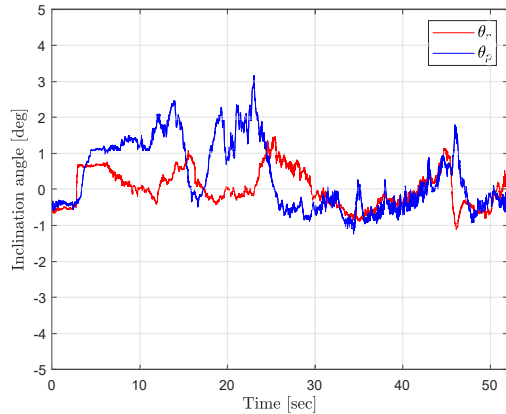


Fig. 6: Time history of the roll  $\theta_r$  and pitch  $\theta_p$  of wire inclination while moving a dummy robot (weight).

動かしたおもりの速度よりも遅い(数 mm/sec)ため、実験時の垂直状態からの平均偏差はより小さいと思われる。

次に応答性について、Fig. 6では $\theta_r$ 、 $\theta_p$ それぞれ、何度か値が大きく振れた後に約5~10秒を要して垂直状態に復帰している様子が見て取れるが、微分ゲインを追加することでこの応答性を速めることができると思われる。しかしながら、トラッカーが動くことによってもワイヤを振動や外力が伝搬し、結果としてロボットにも外乱が加わるため、挙動が過敏にならないように注意を払う必要がある。

今回の動作試験で得られた結果から、アクティブトラッキングシステムがフリークライミングロボットの登攀実験には十分な精度および応答性で動作することを確認した。今後使用する際には、ロボットとカウンターウェイトの重量やロボットの移動速度に応じて制御ゲインの再調整が必要と思われる。

## 5. 結論

本稿では、フリークライミングロボットの登攀実験のために、地形、傾斜角度、そして模擬重力を変更可能な不整地登攀実験環境の設計と開発について述べた。特に、カウンターウェイト



トを用いた重力補償装置のアクティブトラッキングシステムを構築し、動作試験を通して、この装置の性能が十分であることを確認した。

また、今回開発したテストフィールドには拡張性がある。今回は重力補償の方法として、カウンターウェイトと二次元追従装置を用いたが、駆動部に上下方向の直動アクチュエータと力覚センサを追加し、三次元追従と力制御を行う装置に拡張できれば、より高精度な重力模擬が可能になると考えられる。

今後は、このテストフィールドを用いてフリークライミングロボットの登攀実験を行っていく。

## 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) C. Wong, E. Yang, X.-T. Yan, and D. Gu, "An overview of robotics and autonomous systems for harsh environments," in *Proceedings of the 2017 23rd International Conference on Automation and Computing*, 2017, pp. 1–6.
- 2) K. Nagatani, S. Kiribayashi, Y. Okada, S. Tadokoro, T. Nishimura, T. Yoshida, E. Koyanagi, and Y. Hada, "Redesign of rescue mobile robot Quince," in *Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics*, 2011, pp. 13–18.
- 3) J. Walker, N. Britton, K. Yoshida, T. Shimizu, L.-J. Burtz, and A. Pala, "Update on the qualification of the hakuto micro-rover for the google lunar x-prize," in *Proceedings of the 10th Conference on Field and Service Robotics*, 2015, pp. 313–330.
- 4) 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.
- 5) K. Yoshida, T. Maruki, and H. Yano, "A novel strategy for asteroid exploration with a surface robot," in *Proceedings of the 2nd World Space Congress, 34th COSPAR Scientific Assembly*, 2002, pp. 281–286.
- 6) A. Parness, N. Abcouwer, C. Fuller, N. Wiltzie, J. Nash, and B. Kennedy, "LEMUR 3: a limbed climbing robot for extreme terrain mobility in space," in *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2017, pp. 5467–5473.
- 7) T. Bandyopadhyay, R. Steindl, F. Talbot, N. Kottege, R. Dungavell, B. Wood, J. Barker, K. Hoehn, and A. Elfes, "Magneto: A versatile multi-limbed inspection robot," in *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2018, pp. 2253–2260.
- 8) Y. Yuguchi, W. F. Ribeiro, K. Nagaoka, and K. Yoshida, "Experimental evaluation of gripping characteristics based on frictional theory for ground grip locomotive robot on an asteroid," in *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015, pp. 2822–2827.
- 9) 長谷直, 永岡健司, 吉田和哉, "回転浮遊剛体系の衝突を介した運動量交換則の検討", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, #2P2-C10, 2017.
- 10) M. Chacin and K. Yoshida, "A microgravity emulation testbed for asteroid exploration robots," in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation in Space*, 2008.
- 11) B. H. Wilcox, "ATHLETE: A limbed vehicle for solar system exploration," in *Proceedings of the 2012 IEEE Aerospace Conference*, 2012, pp. 1–9.
- 12) B. J. Hockman, A. Frick, R. G. Reid, I. A. Nesnas, and M. Pavone, "Design, control, and experimentation of internally-actuated rovers for the exploration of low-gravity planetary bodies," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, no. 1, pp. 5–24, 2017.
- 13) R. G. Reid, L. Roveda, I. A. Nesnas, and M. Pavone, "Contact dynamics of internally-actuated platforms for the exploration of small solar system bodies," in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, Automation in Space*, 2014, pp. 1–9.
- 14) M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Wheeler, and A. Y. Ng, "ROS: an open-source Robot Operating System," in *Proceedings of the ICRA workshop on open source software*, vol. 3, no. 3.2, 2009, p. 5.
- 15) S. Madgwick, "An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays," *Report x-io and University of Bristol*, vol. 25, pp. 113–118, 2010.