ブラキエーションロボットの制御

山 川 雄 司^{1†}

¹ 東京大学大学院情報学環

要旨：本稿では、移動ロボットに焦点を当て、著者が開発している2自由度のシンプルな機構のブラキエーションロボットを紹介する。開発したブラキエーションロボットは小型高速のアクチュエータで駆動制御され、手先にはロボット自身を支え、落下を防ぐためのフック型のエンドエフェクタが取り付けられている。そのロボットの高速性能を利用して、剛体の運動原理（振り子運動）に基づく簡単な運動計画法も提案している。開発したブラキエーションロボットと提案した運動戦略により、下り傾斜および上り傾斜での動的なブラキエーション運動を実現している。

キーワード：ブラキエーション, 移動ロボット, 高速アクチュエータ, 軌道生成, 制御

1. 緒論

ロボットの実応用を想定すると、ロボット自身が目的の場所へ自律的に移動するロコモーション技術と、移動後にその場所で器用に作業を行うマニピュレーション技術が不可欠な技術と考えられる。本解説論文では、ロコモーション技術に焦点を当て、バイオミメティクス技術にも資すると思われる「ブラキエーション」運動を対象に、これまでに行われてきた研究を簡単に述べるとともに、著者が研究開発しているロボットとその運動制御について紹介する。

これまでに研究されてきているロボットの代表的な移動方法としては、1) 人間を模倣した二足歩行・走行、2) 昆虫のような六脚や八脚等の歩行・走行、3) タイヤやクローラ等を用いた回転運動による走行等が挙げられる。これらの移動方法は地面との接触における力学的作用を利用して達成されるものである。近年では、空力学的作用を利用したマルチコプタやドローン等に代表される飛行ロボットに関しても、ロボット工学の観点から研究開発が進んでいる。これらのロボットの運動制御に加えて、自己位置推定や周辺環境認識等を行うセンシング技術も並行して研究開発が行われている。

本解説論文では、これらの移動方法とは異なるロボットの移動方法として、サルが木の枝等の物体を把持しながら振り子運動によって移動する「ブラキエーション」(日本語訳では、腕渡り)とその運動を実現するロボットの制御について概説する。特に、著者が進めている高速運動制御に基づく、シンプルなロボット構造によるブラキエーション運動の研究成果を紹介する^{1,2)}。これまでもブラキエーションロボットの

研究³⁻¹³⁾は行われてきたが、著者の研究成果は比較的簡易なシステムと制御によって実現されている点が従来研究とは異なる点である。このように全体システムを簡易化することによって、ブラキエーション運動の本質な特性を理解することに貢献できると考えている。

ブラキエーションは基本的に重力を利用した振り子運動に基づく移動方法であり、ロボットでその運動を実現する場合においても、そのロボットの振り子運動をベースにした方法であることから、その周期運動を適切に利用することにより、効率的な移動が可能になると考えられる。

2. ブラキエーションロボットに関する研究

本章では、これまでに研究開発されてきたブラキエーションロボットについて紹介する。

福田らは、様々なブラキエーションロボットを開発し、ブラキエーションに必要な各運動方法を提案するとともに、それを実現している³⁻⁵⁾。Gomes らは、5リンクのロボットを対象に制御方法を提案し、シミュレーションにより有効性を確認している⁶⁾。Menezes de Oliveira らは、制御工学的アプローチからブラキエーション運動の実現を試みている⁷⁾。Rosa Jr. らは、垂直な壁でのブラキエーションを実現するためのロボット開発と制御手法を提案している⁸⁾。Ebrahimi らは、ポート・ハミルトン系として制御手法を提案している⁹⁾。Cheng らは、空中相を有するブラキエーションを目指して、モデル化と軌道生成を行い、シミュレーションにて有効性を確認している¹⁰⁾。Yang らは、把持物体が離れている場合に飛び移るための運動方法を提案し、サルのようなブラキエーションとは若干異なるが、その運動を実現している¹¹⁾。Davies らは、新しいブラキエーションロボットを開発しており、把持物体をケーブルに限定して、それに適したメカニズムと運動方法を提案している¹²⁾。Cheng らは、軌道生成に機械学習を導入することにより、その運動実現を行っている¹³⁾。

2020年1月6日受付

[†] 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

東京大学大学院情報学環

山川 雄司

Tel: 03-5452-6178 Fax: 03-5452-6180

E-mail: y-yumkw@iis.u-tokyo.ac.jp

3. ブラキエーションロボットシステム^{1,2)}

著者の研究では、シンプルな構造でブラキエーション運動を可能とする新しいロボットを開発している。特に、比較的簡易な動作と制御でブラキエーションを可能にするため、小型軽量で高出力なアクチュエータを用いている。このアクチュエータは勝率 100% じゃんけんロボット¹⁴⁾等を使用している高速多指ロボットハンド¹⁵⁾に搭載されているのと同じであり、高速な動作を可能にする。

3.1 2 自由度ロボット

開発した 2 自由度ブラキエーションロボット (図 1) は、

- 2つの小型高出力サーボモータ¹⁵⁾
- 2つのフック形状エンドエフェクタ
- これらをつなぐ腕に相当する剛体リンク

から構成されている。2つのサーボモータの回転軸は同一直線状となるようにリンクでつながれている。サーボモータの回転軸に腕に相当するリンクが設置されており、今回把持対象としたバーにかけ、自身を支えるためにリンク手先にフックを取り付けた。ロボットの手先間距離は 0.070 m、サーボモータ回転軸から手先先端位置までの距離は 0.135 m、質量 (ケーブルを除く) は約 0.33 kg である。また、フックの内半径および幅はそれぞれ 0.035 m、0.015 m である。

3.2 全体システム

制御系を含む全体システムの概要図を図 2 に示す。リアルタイムコントローラにおいて、全体の入出力、運動生成、制御則が計算され、計算結果に応じてサーボモータの駆動トルクが出力される。サーボモータについてはモータドライバを介して駆動される。制御系には目標関節角度に対する比例微分制御 (PD 制御) を使用している。

3.3 ロボットの特徴

開発したロボットの特徴は、高速な運動性能 (180 deg / 0.1 秒) と目標関節角度への追従特性であり、これによりロボットダイナミクスを考慮することなく、ブラキエーション運動を実現しており、ダイナミクスの代わりに、ロボッ

図 1 2 自由度ブラキエーションロボット^{1,2)}

図 2 全体システム^{1,2)}

トの目標関節角度 (目標状態) が重要となる。

ブラキエーション運動は基本的に周期的な運動であるため、この高速性によって運動周期よりも早く目標状態に移移することができれば、幾何学的な条件から導出される目標状態だけを考えれば良いとしている。

4. ブラキエーション運動の制御戦略

本節では、ブラキエーション運動の制御戦略 (運動原理、基本運動、およびその概要) について述べる。

著者の研究の基本コンセプトとして、シンプルなロボット機構および制御方法でのブラキエーション運動の実現を目指している。また、3.3 節の特徴に記述した通り、ロボットダイナミクスを考慮する必要がなく、幾何学的な条件からロボットの目標関節角度 (目標状態) を導出するだけで実現できる方法を提案している。

4.1 運動原理

図 3 に示すように、ブラキエーションの基本的な運動原理は振り子運動に基づく周期運動である。そこで、図 4 に示すようなモデルを基にブラキエーション運動中の周期を導出することができる。この周期を計算することにより、適切なタイミングでブラキエーションロボットのフックをバーにかけ

図3 運動原理の模式図^{1,2)}

図4 振り子モデル^{1,2)}

図5 基本運動の模式図^{1,2)}

ることができる. 図4のモデルからブラキエーションロボットの振り子運動の周期 T は一般的な剛体振り子の式から導出できる.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgd}} \quad (1)$$

開発したブラキエーションロボットにおいて, 3.1 節に記載した通り, ブラキエーションロボットの質量 M は 0.33 kg, モータ回転軸からエンドエフェクタを含むリンク先端までの距離 d は 0.135 m である. また, 重力加速度 g は 9.8 m/s^2 であり, 慣性モーメント I は $I = 1/3 M d^2 \text{ kgm}^2$ から得られる. これらの数値を基に計算すると, ブラキエーションロボットの振り子運動の周期 T は約 0.6 秒となる. しかしながら, 実際のブラキエーション運動ではロボットの姿勢によりその周期が変化し, その変化量は約 10% である.

4.2 基本動作とロボット動作制御

本節では, 連続したブラキエーション運動を実現するためのロボットの基本的な運動方法について述べる. 特に, ロボットの姿勢と各関節角度が連続動作の重要な要素であり, 本研究では図5を参考に振り子運動を基本とした動作方法を提案している. Phase 1 は準備姿勢で, 両フックがバーにかかっている状態であり, この時進行方向に対して前方のリンクを “arm_f” とし, 後方のリンクを “arm_b” とする.

具体的な運動手順は以下の4つのPhaseであり, これらの動作を繰り返すことにより, 連続したブラキエーション運動が実現される.

(Phase 1) 後方のバーにかかっているリンク (arm_b) のフックを外す.

→ 2つのリンクの間の角度が増加するように arm_b 側のモータを回転させる.

(Phase 2) バーからフックを外したリンク (arm_b) のモータを反時計回りに駆動させ, もう一方のリンク (arm_f) のモータは駆動しない.

→ バーからフックを外したリンク (arm_b) に対する関節角度は, ロボットの重心が最下点となる時に, リンク位置も最下点となるように制御される.

(Phase 3) リンク (arm_b) を振り上げる.

→ リンクとバーが衝突しないように, またリンクがバーの高さを超えるように, リンク (arm_b) のモータを駆動させる.

(Phase 4) リンク (arm_b) のフックをバーにかける. 同時に, リンクの記述が, arm_b → arm_f, arm_f → arm_b へ遷移する.

→ リンク (arm_b) のフックがバーにかかるように, リンク (arm_b) のモータを回転させる.

この運動を実現するのに重要なのが, 運動の開始時点と終

了時点および運動中におけるロボットの目標関節角度（モータの回転角度）である。これらの目標関節角度を時系列で遷移させること（軌道生成）によりブラキエーション運動が達成される。目標関節角度および軌道生成について以下に述べる。

(1) 運動時の拘束条件

連続したブラキエーション運動を行うには、定常状態におけるロボットの姿勢が常に同じ姿勢であることが望ましい。これは、図6に示すようにブラキエーション運動前の姿勢とブラキエーション運動後の姿勢が同じであることを意味しており、その拘束条件は次のような式で記述することができる。

$$\phi(0) = \phi(1) = \phi(2) = \dots = \phi(i) = \dots = \phi(N) = \phi_0 \quad (2)$$

ここで、 i はブラキエーション運動の回数、 $\phi(i)$ はリンク arm_f とリンク arm_b との間の角度を表している。この拘束条件を基に、定常状態における各目標関節角度が計算され、制御される。重要なパラメータである $\phi(i) = \phi_0$ は、バー間の距離 L とリンク長さ d から導出される。

この拘束条件が満たされるようにロボットが制御されることにより、連続したブラキエーションが可能となるため、目標関節角度への追従性が必要であり、高速性が鍵となる。

(2) 目標関節角度の導出

連続したブラキエーション運動は図6に示す (a) と (b) の状態を繰り返すことで実現される。したがって、それぞれの状態における目標関節角度を求めれば良い。また、2回のブラキエーションを1セットとして、このセットを繰り返せばよい。

初めのブラキエーション運動（1回目のブラキエーション運動）を図6 (a) から図6 (b) に遷移するものとし、その時の目標関節角度 θ_f , θ_b (図6 (b) の目標姿勢) は図6 (a) における関節角度とブラキエーション運動時の振り子運動での姿勢変化角度 θ_B および拘束条件 ϕ_0 から求められる。

図6 (b) から図6 (a) に遷移する、次のブラキエーション運動（2回目のブラキエーション運動）については、図6 (a) の状態を目標姿勢とするため、1回目のブラキエーション運動における関節角度をそれぞれに足せば良い。

これを、奇数回目と偶数回目に分けて目標関節角度を計算すれば、連続したブラキエーション運動が可能となる。

具体的な計算過程は論文^{1,2)}を参照していただきたい。

(3) 目標関節角度軌道と関節角度制御

図6 拘束条件^{1,2)}

各 Phase における目標関節角度は、上述した方法およびバー間の距離を基に計算される。その目標関節角度を時系列軌道として補完するために、本研究では時間に関する線形関数として与えた。

時間で線形補完する際に各 Phase での動作時間が実験パラメータとなるが、Phase 3 では振り子運動の周期 T の半分 $T/2$ として与え、Phase 2 はこの動作時間の間に行うように設定した。また、Phase 1 と 4 はブラキエーション運動における振り子運動とは直接関連しない部分であるため、試行錯誤的に決定した。

目標関節角度に対する関節角度制御は一般的な PD 制御を 1 kHz で実施した。これにより高速アクチュエータの特性を活かした、即応性の良い応答を得ることができる。また、一定の目標関節角度への制御ではなく時系列の目標関節角度軌道であるため、積分動作 (I 動作) は用いておらず、PD 制御だけでも目標関節角度軌道に対する偏差が十分に小さいことを確認している。

上述した目標状態のみを考える方法では、Phase 3 において、両リンク先端間の距離がバー間の距離よりも短くならず、バーを超えようとする際にリンク先端がバーに当たる問題が生じる。それを解決するために、Phase 3 では目標関節角度の修正を行っているが、その修正方法は論文^{1,2)}を参照していただきたい。

5. 実験

本章では、開発したロボットシステムと提案した運動方法を用いたブラキエーション運動の実験結果を示す。また、実験の動画はウェブサイト*で見ることができる。

5.1 実験システム設定

バーの直径および長さはそれぞれ 0.03 m, 0.3 m であり、バー間の距離は 0.22 m とした。角度 ϕ_0 と θ_B はシミュレーションにより事前に計算、確認し、120 deg, 100 deg とした。また、ブラキエーション運動間の停止時間は 0.2 秒とした。

5.2 下り傾斜での実験結果

下り傾斜での実験環境における実験結果の連続写真を図7に示す。本実験における下り傾斜の角度は約 18 deg である。この結果から、開発したブラキエーションロボットと提案した簡易な運動方法を用いることにより、ブラキエーション運動を実現していることがわかる。また、ブラキエーション運動が振り子運動に従って実現されていることも確認できる。今回のブラキエーション運動中の平均速度は約 0.19 m/s であった。

* 山川研究室,
<http://www.hfr.iis.u-tokyo.ac.jp/research/Brachiation/index-j.html>
(2019/12/10 確認)

5.3 上り傾斜での実験結果

次に、上り傾斜での実験環境における実験結果の連続写真を図8に示す。本実験における上り傾斜の角度は約5 degである。この結果から、開発したブラキエーションロボットと提案した簡易な運動方法を用いることにより、上り傾斜においてもブラキエーション運動を実現していることがわかる。従来のブラキエーションロボットでは、図7のような下り傾斜もしくは水平方向の運動のみであったが、上り傾斜でもブラキエーション運動を実現した点が画期的な点である。加えて、下り傾斜と同じ運動方法にて実現している点も提案方法の優位性と考えている。

これらの実験結果から、開発したブラキエーションロボットと提案した運動方法は有効的な方法であると考えられる。また、環境（傾斜）に大きな影響を受けずに実現できる方法

であり、かつ汎用性のある方法と考えられる。特に、ロボットの高速性を活用することにより、ダイナミクス計算を必要とせず、運動学計算のみで実現している点は独自性の高いものと考えている。しかしながら、提案するブラキエーション方法は高速性を必要とするものであるため、低速な動作のみが可能なハードウェア環境では適用できない欠点も存在するため、今後汎用的なハードウェアで実現できる方法の提案が必要であるとする。

6. 結論

本解説論文では、サルが木の枝等の物体を把持しながら振り子運動によって移動する「ブラキエーション」に焦点を当て、これまでの研究成果と著者の取り組みを紹介した。

著者が取り組んでいる研究では、(1) 簡易なブラキエーション

図7 下り傾斜での実験結果^{1,2)}

図8 上り傾斜での実験結果²⁾

ンロボットの開発, (2) そのロボットの特徴を活かしたシンプルな運動方法, および (3) これらを用いた下り傾斜・上り傾斜でのブラキエーション運動を実現している。特に, ロボットの高速性を活かすことにより, シンプルな制御でのブラキエーション運動の実現に貢献している。

現状のブラキエーションでは, 落下しないためにロボットが物体を必ず把持しなければならないといった条件が存在する。しかしながら, サルはブラキエーション運動時に巧みに自身を加速させ, 把持物体から両手を離した状態での移動を可能にしている。そのため, 今後は, このようなダイナミックなブラキエーション運動を目指した研究開発が必要であろうと考えており, 実現していきたい。

加えて, 緒論でも述べたように, ブラキエーションは基本的に重力を活用した振り子運動に基づく移動方法であることから, ロボットの適切なメカニズムが開発されれば, 受動歩行のようにポテンシャルエネルギーだけを用いた受動ブラキエーションが実現できるのかもしれない。

最後に, 比較的簡易なメカニズムと運動方法によってブラキエーション運動を実現した本研究の成果が, 今後, ブラキエーション運動の解明, そのロボットの開発と制御, さらにはサルの運動の理解に役立てば幸いである。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 15K12114 の助成を受けて行われたものである。

参 考 文 献

- 1) Yamakawa, Y., Ataka, Y. and Ishikawa, M.: Development of a brachiation robot with Hook-shaped end effectors and realization of brachiation motion with a simple strategy, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics 737-742, (2016).
- 2) Yamakawa, Y.: Brachiation motion by a 2-DOF brachiating robot with hook-shaped end effectors, Mechanical Engineering Letters, 4, 18-00094, (2018).
- 3) 福田敏夫, 細貝英実, 近藤裕二: ブラキエーション形移動ロボットの研究 - 第1報, 動特性解析とシミュレーション -, 日本機械学会論文集 (C 編), 56(527), 1839-1846, (1990).
- 4) Saito, F., Fukuda, T. and Arai, F.: Swing and locomotion control for a two-link brachiation robot, IEEE Control Systems Magazine, 14(1), 5-12, (1994).
- 5) Nakanishi, J., Fukuda, T. and Koditschek, D.: A brachiating robot controller, IEEE Trans. Robotics & Automation, 16(2), 109-123, (2000).
- 6) Gomes, M. W. and Ruina, A. L.: A five-link 2D brachiating ape model with life-like zero-energy-cost motions, Journal

of Theoretical Biology, 237, 265-278, (2005).

- 7) Menezes de Oliveira, V. and Lages, F. W.: Real-time predictive control of a brachiation robot, Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, 1-6, (2009).
- 8) Rosa, Jr. N., Barber, A., Gregg, R. D. and Lynch, K. M.: Stable open-loop brachiation on a vertical wall, Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1193-1199, (2012).
- 9) Ebrahimi, K. and Namvar, M.: Port-Hamiltonian control of a brachiating robot via generalized canonical transformations, Proceedings of the 2016 American Control Conference, 1-6, (2016).
- 10) Cheng, H., Rui, C. and Hao, L.: Motion planning for ricochet brachiation locomotion of bio-primitive robot, Proceedings of the 7th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 259-264, (2017).
- 11) Yang, Z. H. and Lin, C. Y.: Experimental investigation on flying motion of transverse brachiation robot, Proceedings of the 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1402-1407, (2018).
- 12) Davies, E., Garlow, A., Farzan, S., Rogers J. and Hu, A. P., Tarzan: Design, prototyping, and testing of a wire-borne brachiating robot, Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 7609-7614, (2018).
- 13) Cheng, Z., Cheng, H. and Xu, H.: Deep reinforcement learning based brachiation control for two-link bio-primate robot, Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 856-861, (2018).
- 14) 山川雄司: 高速ビジョンと高速ロボットによる人間機械協調, 日本ロボット学会誌, 35(8), 596-599, (2017).
- 15) Namiki, A., Imai, Y., Ishikawa, M. and Kaneko, M.: Development of a high-speed multifingered hand system and its application to catching, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2666-2671, (2003).

山川雄司 (やまかわ ゆうじ)

2011 年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。博士 (情報理工学)。2011 年東京大学大学院情報理工学系研究科創造情報学専攻特任助教。2014 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助教。2017 年東京大学生産技術研究所講師。現在, 東京大学大学院情報学環講師。主として高速ロボット, 移動ロボット, 人間ロボット協調, ロボットマニピュレーション, センサネットワーク等の研究開発に従事。SICE, JSME, RSJ の会員。