解説

接地点追従法と6脚移動ロボット

Follow-the-Contact Point Gait Control and Hexapod Robots

稲垣伸吉* 村田勇樹* *名古屋大学大学院工学研究科

Shinkichi Inagaki* and Yuki Murata* *Nagoya University, Graduate School of Engineering

1. はじめに

我々が懐中電灯一つで足場の悪い暗闇を進まなければならない場合、どのように歩を進めるだろうか？ おそらく、一歩ごとに足下と進むべき方向の少し先を照らし、どこに足を着くかを考えながら歩いて行くだらう。これは未知の不整地環境に身を置く脚移動ロボットにとっても同じ状況である。カメラや測距センサを用いてこれから移動する環境、特にロボットの近傍（足下）を観測し、どこに接地するか、どのように胴体を進めるかを計画し、一歩から数歩の歩みを制御する。そして、移動することで先に見ることができなかった障害物や溝などに出くわし、再び観測・計画・制御を繰り返す。

本解説で扱うような6脚以上の多脚移動ロボットでは、計画と制御の計算時間が問題となる。多数の脚の接地の仕方、多数のモータの協調的な動かし方は組み合わせ問題となり、現実的な時間での最適解の導出は困難になるからである[1]。これに対して筆者らは、接地点計画と分散歩行制御が有機的に結合した「接地点追従法 (Follow-the-Contact-Point gait control)」を提案してきた[2]。『各脚は前脚が接地していた接地点を引き継いで接地する』という制御方策を事象駆動型の分散歩行制御により実現したものである。最前脚が計画した接地点を後脚が踏襲することで、全脚に必要な接地点計画を最前脚のそれのみに集約することができる。そのため、脚数にかかわらず計画にかかわる計算量は同じである。また各脚をほぼ同じ局所制御系で動かせるため、脚数の増加に対して制御にかかわる計算量は、組み合わせではなく線形に増加するだけである。

本解説では接地点追従法と6脚移動ロボットのために改良した点について概説する。そして、その制御法を適用するために開発したロボット実機を紹介する。

2. 接地点追従法とその改良

本章では接地点追従法[2]と6脚移動ロボットの不整地踏破能力を向上させるために改良した点について概説する。これらの制御法の説明において、図1のような6脚移動口

ボットのモデルを考える。各脚は進行方向に対して Leg [1] ~ Leg [6] とラベルが振られている。各脚は脚先を任意の位置に移動できるよう、少なくとも3自由度を持っている。接地点追従法では隣接する脚の脚先がお互いに届く領域で接地点を交換する。そのため、脚先の可到達域が重なるように脚が配置されているものとする。このモデルに対応する実機については第3章において説明する。

2.1 接地点追従法 [2]

接地点追従法では、各脚に図2のようなオートマトン（制御オートマトン）が配置されている。各状態①~④は脚の制御の仕方（制御モード）に対応し、隣接脚の状態も参照しながら遷移する。制御モード4は支持脚相で、脚先を接

図1 6脚移動ロボットのモデルと脚のラベル, および脚の軌道と接地点追従法における制御モードとの対応

図2 接地点追従法における各脚の制御オートマトン: 2.2~4 (節番号) は6脚移動ロボットのためにオリジナルの接地点追従法に加えた制御

原稿受付 2019年1月16日

キーワード: Hexapod Robot, Decentralized Control, FCP Gait Control, Uneven Terrain

*〒464-8603 名古屋市千種区不老町

*Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi

地点に維持しながら胴体を目標軌道・姿勢に追従させるよう、脚を制御する。そして、後脚が自脚の接地点に接地して接地点を引き渡せたら（最後脚は側脚が支持脚相であれば[†]）状態はモード 4 から 1 へと遷移する。残りの制御モード 1~3 は遊脚相である。モード 1 は脚先を中間点（図 1 の P_1 ）に向けて動かす。脚先が中間点に達したらモード 2 へ遷移し、脚先をそこに維持する。また、最前脚はモード 2 において眼下の移動面から次の接地点を計画する。前脚の接地点が（最前脚は計画した接地点が）自脚の脚先の可到達域に入ったら次のモード 3 に遷移する。モード 3 は次の接地点に向けて脚を下ろす状態であり、接地したらモード 4 に遷移する。

接地点追従法では、このように各脚に局所制御系を配し、ロボット全体で分散制御系を成す。このとき、各脚の局所制御系は隣接する脚（自脚から見て前後脚と側脚）とのみ情報をやりとりする。そのため、脚数が増えても局所制御系を連結して増やすだけでロボットの歩行制御系を構成できる。これによって平地を歩行するロボットでは後方から前方への wave gait に近い歩容が観測される。

ただし、複雑な不整地を歩行させようとする場合、接地点追従法のみでは不十分である。一対の脚を持つ体節を関節で連結して構成したムカデ型移動ロボットでは、体節間の関節も能動的に制御することで、優れた不整地踏破を実現させることができる [3]。また、6 脚移動ロボットでは転倒を防止するための改良を加える必要がある。本章の残りでは、その改良について概説する。

2.2 遊脚に遷移する際の支持脚の組み合わせ条件 [4]

まず、各脚が遊脚する際に静的な安定性を確保するための条件を考える。これは接地点追従法（図 2）において制御モード 4 から 1 へ遷移する際に、 $\text{Leg}[i]$ ($i = 1, \dots, 6$) に対して次の条件に加える。

条件 1: $\text{Leg}[m + (i \bmod 2)]$, $m \in \{1, 3, 5\}$ の 3 脚すべてが接地している。

条件 2: $\text{Leg}[m + (i \bmod 2)]$, $m \in \{1, 3, 5\}$ の三つの接地点を重力方向に投影して作られる三角柱に安定余裕を取った領域に胴体の重心が含まれている。

条件 1 は、6 脚移動ロボットが少なくとも対角の 3 本の脚で接地し、支持多角形を形成するためのもの、条件 2 は静的な安定性を保つためのものである。なお、重力方向はロボットに搭載された姿勢センサ（グローバル座標系での胴体のピッチ角 ϕ とロール角 ψ を計測できるセンサ）により算出する。

2.3 姿勢センサを用いた胴体のバランス制御 [4]

次に、胴体をグローバル座標系で水平に保ちながら推進させることを考える。接地点追従法において理想的には支持脚は接地点を維持するように駆動されるが、実際は障害物から踏み外すなど接地点を維持できず転倒に至る場合がある。そこで、姿勢センサを用いて胴体を常に水平に保つ

ことで胴体のモーメントを抑えて転倒を防ぐのである。このとき支持脚を、脚先を接地点に維持しながら次のように制御する。

まず、胴体の目標位置を定める。胴体の重心を原点に持つローカル座標系 Σ_B に対し、支持脚の現在の座標をそれぞれ C_a , C_b , C_c とする。また、姿勢センサから得られるピッチ角とロール角から、グローバル座標系から胴体の局所座標系への回転行列を $R_{(\phi, \psi)}$ と算出する。そして、支持している（制御モード 4 にある）対角脚が作る支持三角形の重心から鉛直上向きに一定の高さ h だけ移動させた点を最終目標位置として

$$P = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} + R_{(\phi, \psi)}^{-1}(0, 0, h)^T \quad (1)$$

と算出する。胴体の各時刻の目標位置は

$$\Delta P = \frac{P}{|P|} v_4 \Delta t \quad (2)$$

とし、胴体の重心が P に十分近い場合は $\Delta P = (0, 0, 0)^T$ とする。ここで、 v_4 は胴体の移動速度、 Δt は制御周期である。また、支持脚 i の各時刻の目標位置は、胴体の移動方向とは逆向きに脚先を動かし、胴体姿勢を水平になるように回転させた

$$C'_i = R_{(\phi, \psi)}^{-1}(C_i - \Delta P) \quad (3)$$

と計算する。

最前脚が新しい接地点を計画した場合は、前方の接地点二つ C_a , C_b と新しい接地点 C'_c で支持三角形を作り、新たな最終目標位置 P' を作る（図 3）。新しい接地点の計画は、 A^* 探索を用いた自律的な計画手法 [5]、操作者が指示する半自律的な方法 [6] がある。

2.4 形式検証を利用した時間制約 (Timekeeper 制御) の導入 [11]

図 2 で示したのは、あくまで各脚の局所制御系である。これらの局所制御系を集めて（今更ではあるが）果たしてうまく歩行できるのだろうか？ 本節では、接地点追従法によって制御されるロボットに対して、歩行を可能とする条件の一部（必要条件）を保証するようなパラメータの

図 3 支持三角形と胴体の最終目標位置 P : 新しい接地点 C'_c が計画されると胴体の最終目標位置も更新される

[†]オリジナル [2] では「最後脚は後方のある距離まで達したら」という条件だったものを、6 脚移動ロボット用に変更した。

設計法 [9] [10], 適応的な制御 [11] について説明する.

まず, 各脚 $i \in \{1, \dots, 6\}$ の制御モード $j \in \{1, \dots, 4\}$ における滞在時間 t_j^i に式 (5) のような最小値 $T_j^{\min}$ と最大値 $T_j^{\max}$ が存在すると考える.

$$T_j^{\min} \leq t_j^i \leq T_j^{\max}, j \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad (4)$$

そして, 各モードにおける式 (5) の滞在可能時間と遷移条件, 各脚同士の同期条件を記述した時間オートマトン[†]を作成する [9] [10]. この時間オートマトンは図 2 の制御のみでなく脚の運動も含めて表現しているため, 動作オートマトンとよばれている. さらに, 動作オートマトンが満たすべき目標の挙動 (仕様) として次の 3 点を考える:

- (1) デッドロックを起こさないこと.
- (2) 脚先が移動面を引き摺ることがないこと.
- (3) ロボットを支える接地点数が 3 点以上であること.

これらの仕様を満たす最小値 $T_i^{\min}$ と最大値 $T_i^{\max}$ を導出するために, 形式検証のモデル検査ツール UPPAAL [7] [8] を用いたアルゴリズムを開発した (図 4). 形式検証は数理モデルが特定の仕様を満たすか否かを数学的に検証する研究分野である. モデル検査は形式検証のうち, 検証する対象をオートマトン等で表現して仕様の充足性を計算機により判定するものである. 導出の詳細は省略するが, 導出の結果として次式が得られた.

$$\begin{pmatrix} T_1^{\max} T_2^{\max} T_3^{\max} T_4^{\max} \\ T_1^{\min} T_2^{\min} T_3^{\min} T_4^{\min} \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & 1 \\ \frac{1}{4} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

ここで, 係数 $k (> 0)$ は実時間に変換するための係数である.

これまでに, 6 脚移動ロボットに対して, 係数 k を固定して式 (5) から仕様の (1)~(3) を満たすような各脚の接地可能範囲を導出する方法 [10], 逆にロボットの挙動から観測される各制御モードの経過時間から, 式 (5) を満たすように係数 k を適応的に変化させて, 制御モードの遷移に制約を加える Timekeeper 制御 [11] を提案した. 係数 k を変化させることにより, 特に式 (5) の $T_1^{\min}$ が変化することで遊脚の時間が適応的に調整される.

図 4 形式検証ツール UPPAAL を用いた時間パラメータの範囲の許容範囲の導出

[†]時間の経過も表現したオートマトン.

モデル検査を用いる重要な点は, 仕様の充足性が時間オートマトンのあらゆる時間経過と状態遷移について網羅的に調べられるということである. これは脚すべてのあらゆる動作を網羅的に調べることを意味する. 脚移動ロボットは環境と接触して移動するので, 本来, 環境を特定しなければ歩行できるかを判定することはできない. あらゆる環境を想定することは不可能であり, 脚移動ロボットの制御系を設計する上での難しい点である. 一方で, モデル検査を用いることで, 環境を限定しなくても (無限定環境においても) 仕様を保証する歩行の条件を導出することができるのである.

3. 6 脚移動ロボットを用いた実験

6 脚移動ロボットの実機を図 5 に示す. 脚の各リンクと胴体は 3D プリントで作成した. 各脚は 3 自由度を持ち, 各関節にはサーボモータ (Kondo 社 KRS-3304 ICS) を組み込んでいる. 胴体との接続は図 1 と同じである. 根元の関節の回転軸を鉛直方向から外向きに 45 度傾けている. これは, 接地点交換をする際に脚同士の衝突を防ぐためである. 制御系には Microchip Technology 社の 8 ビットマイコン Atmel AVR ATMEGA644P 20 MHz を用いている. また, 姿勢センサを組み込んでいる. ロボットの駆動には外部電源を用いている. ロボットの重量は 1.34 [kg] である.

胴体上部には二つのセンサを取り付けている. 一つは pmdtechnologies 社の深度センサ Cam board pico flexx, もう一つは BUFFALO 社のカメラ BSW200MBK である. 深度センサは周囲に赤外線を照射し, その反射光を読み取ることで, 周囲環境とカメラとの距離を示すセンサである. 実際に読み取ったセンサの画像は図 6 のようになる. また, その隣には周囲環境をロボットの操作者が直接見られるようにカメラの映像も添えている. 最前脚が制御モード 2 に遷移した際に, これらの画像を外部の PC に送り, 人が画面上で次の接地点を設定する.

約 10 [cm] の高さの台を乗り越える様子を図 7 に示す. 実験の最中, 人が接地点を設定する時間にばらつきが出て, 制御モード 2 の滞在時間が変化する. また, 脚の軌道によって各制御モードの滞在時間も変化する. このような滞在時間のばらつきがあっても, Timekeeper 制御 [11] によって

図 5 6 脚移動ロボット

図 6 深度センサとカメラの画像

図 7 6 脚移動ロボットの障害物 (高さ 10 [cm]) 乗り越えの様子

脚間の協調が維持され歩行を継続できる。

4. お わ り に

本解説では、接地点追従法と 6 脚移動ロボットのためのその改良、実機実験について説明した。第 1 章で述べたように、接地点追従法は脚数の増加に強い。現在、筆者らは同じ制御の枠組みで 6 脚移動ロボットのほかにムカデ型ロボット [12] の開発も進めている。実験結果については別の機会で報告したい。

謝 辞 本研究は科研費 (16K06181) の助成を受けたものである。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- [1] 稲垣伸吉: “接地点追従による多脚移動ロボットの歩行制御～古くて新しい分散歩行制御～”, 計測と制御, vol.54, no.4, pp.265–271, 2015.
- [2] 稲垣伸吉, 丹羽智哉, 鈴木達也: “受動体節間関節を持つムカデ型多脚歩行ロボットの接地点追従法による分散歩行制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.47, no.6, pp.282–290, 2011.
- [3] R. Takahashi and S. Inagaki: “Walk control of segmented multi-legged robot based on integrative control of legs and 2-DoF active intersegment joints,” Advanced Robotics, vol.30, no.20, pp.354–364, 2016.
- [4] 村田勇樹, 鈴木義久, 稲垣伸吉, 鈴木達也: “接地点追従法と姿勢制御に基づく 6 脚移動ロボットの実機開発”, 第 31 回自律分散システム・シンポジウム, 1C3-2, 2019.
- [5] S. Kishi and S. Inagaki: “Graph-Search Based Footstep Planning for Multi-Legged Robots on Irregular Terrain by Using Depth-Sensor,” 17th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR), pp.417–424, 2014.
- [6] 村田勇樹, 鈴木義久, 稲垣伸吉: “接地点追従に基づく半自律 6 脚移動ロボットの実機開発”, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 3P1-03, 2018.
- [7] K. Havelund, A. Skou and K.G. Larsen: “Formal modeling and analysis of an audio/video protocol: an industrial case study using UPPAAL,” Real-Time Systems Symposium, pp.2–13, 1997.
- [8] P. Herrmann, J.O. Blech, F. Han and H. Schmidt: “A Model-based Toolchain to Verify Spatial Behavior of Cyber-Physical Systems,” International Journal of Web Services Research (IJWSR), vol.13, no.1, pp.40–52, 2016.
- [9] K. Nomura and S. Inagaki: “Cutting a parameter space for a multi-legged robot based on model checking, SICE Journal of Control,” Measurement, and System Integration, vol.10, no.4, pp.317–323, 2017.
- [10] 村田勇樹, 稲垣伸吉, 鈴木達也: “時間オートマトンとモデル検査を用いた 6 脚移動ロボットの接地可能領域の導出”, 計測自動制御学会論文集, vol.53, no.11, pp.590–600, 2017.
- [11] 村田勇樹, 稲垣伸吉, 鈴木達也: “Timekeeper 制御を用いた接地点追従式 6 脚移動ロボットの適応歩行”, 計測自動制御学会論文集, vol.55, no.1, pp.51–58, 2019.
- [12] 稲垣伸吉, 出島貴将, 木俣岳志: “3 自由度体節間関節を持つムカデ型ロボットの分散歩行制御と実機開発”, システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, vol.62, 2018.

稲垣伸吉 (Shinkichi Inagaki)

2003 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年名古屋大学大学院工学研究科助手。2007 年同助教。2008 年同講師。2015 年同准教授。現在に至る。分散システム, 多脚移動ロボット, 人間行動モデル, エネルギー管理システムに関する研究に従事。博士 (工学)。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE の各会員。

(日本ロボット学会正会員)

村田勇樹 (Yuki Murata)

2017 年名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻・電子機械分野博士前期課程修了。同年同大学機械システム工学専攻後期課程入学。6 脚移動ロボットを対象とし、オートマトン理論に基づく分散システムの制御に関する研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)