分散型歩行制御によるムカデ型多脚歩行ロボットの高機動性の実現

Highly-Mobile Centipede-Like Multi-Legged Robot based on Decentralized Control

○正 稲垣 伸吉 (名古屋大), 非 丹羽 智也 (名古屋大), 正 鈴木 達也 (名古屋大)

Shinkichi INAGAKI, Nagoya University, inagaki@nuem.nagoya-u.ac.jp

Tomoya NIWA and Tatsuya SUZUKI, Nagoya University

This paper addresses on decentralized walking control of multi-legged robots based on Follow-the-Contact-Point (FCP) gait control and averaging control of leg contact force. These control schemes realize gait control and navigation control on uneven terrain simultaneously with perfectly decentralized manner. In this paper, we introduce the control laws and show its availability by using a physical simulation of centipede-like multi-legged robot.

Key Words: Multi-Legged Robot, Uneven Terrain Walking, Decentralized Control, Event-Driven Control, Averaging leg contacting force

1. は じ め に

多脚歩行ロボット (6 脚以上の脚を持つ歩行ロボット) は高い安定性による優れた不整地踏破性能と, 冗長自由度による高い耐故障性能という特徴を持つ. その中でも, Fig.1 のようなムカデ型多脚歩行ロボットは, 多脚歩行ロボットとしての特徴に加え, 蛇型ロボットのような高い環境適応能力を併せ持つものと期待される.

これまで, その歩行制御においては, 隣接する脚間で一定の位相差を保つことを目的とした制御法 (事象駆動型制御⁽¹⁾, Central Pattern Generator (CPG) を用いた制御⁽²⁾⁽³⁾) が提案されている. しかし, 不整地での歩行を実現するには至っていない.

これに対し筆者らは, 接地点計画に基づく多脚歩行ロボットの不整地歩行制御を, 分散制御により実現する「接地点追従法; Follow-the-Contact-Point (FCP) gait control」を提案している⁽⁴⁾. 接地点追従法は, 最前脚が接地した点 (接地点) に, 後に続く脚が必ず接地するという実際のムカデの行動学的知見⁽⁵⁾に基づいた方法であり, 各脚は, 隣接脚の状態に基づいて制御モードを切替える事象駆動型制御に基づき制御される.

接地点追従法では脚先を接地点に維持することが, 機動性能を向上することに重要であることから, 本論文ではさらに脚先に働く反力の平均化に基づく脚先高さの制御を導入する. そして, 物理シミュレーション環境に構築したムカデ型多脚歩行ロボットに接地点追従法を適用し, その実験結果について述べる.

2. セグメントと制御域の定義

Figure 2 のように, 体節と左右の脚, および前方の体節とつながるリンク (体節間リンク) を合わせて一つのセグメントとして, 3 セグメント以上 (つまり, 6 脚以上) で構成されているロボットを考える.

セグメント $i \in \{1, \dots, N\}$ における, 左 (l) と右 (r) の各

Fig. 1 Multi-legged robot in simulation environment

Fig. 2 Segments and control area

脚に対し, その付け根に原点を持つ座標系 $C_i^s = (x_i^s, y_i^s, z_i^s)$, $s \in \{l, r\}$ を定義する. そして, この座標系 C_i^s を持つ脚の脚先の可到達域を M_i^s としたとき, 制御域 $A_i^s \subset M_i^s$ を定義する. ここで, 制御域は各脚の座標系に固定された領域であり, ロボットの進行にあわせて制御域も移動することに注意されたい.

Fig. 3 Automaton of leg control in FCP gait control

制御域 A_i^s は、前後に接続された体節の姿勢に応じて、次の、多くて3つの領域に分けることができる。

Area 1: 制御域 A_{i-1}^s と重なる領域、

Area 2: 重なりがない領域、

Area 3: 制御域 A_{i+1}^s と重なる領域。

以降では、表記を簡単化するために、変数の「左・右」を表す添え字 $s \in \{r, l\}$ を、必要がない限り省略する。

3. 接地点追従法

本節では、接地点追従法 (Follow-the-Contact-Point (FCP) gait control) について概要を述べる。詳細は文献⁽⁴⁾を参照されたい。

3.1 各脚の制御モード 接地点追従法では、遊脚相と接地相のそれぞれにおいて、脚先を目標位置に収束させるように各モータを制御する。この制御は次のようなPD制御により実現できる。

$$\tau_m = K_p(\hat{\theta}_m - \theta_m) - K_d\dot{\theta}_m. \quad (1)$$

ここで、 τ_m は脚のモータ $m \in \{1, 2, 3\}$ のトルクであり、 θ_m はその角度、 $\hat{\theta}_m$ は目標角度、 K_p , K_d は正定数である。目標角度 $\hat{\theta}_m$ は、次に説明する各制御モード (遊脚相が制御モード1~3, 支持脚相がモード4に対応) において設定される、脚先の目標位置の逆運動学より計算される。

制御モード1 (接地点からの離脱): 制御モード1では、脚先を接地点から離し、空中の中間点 P_{up} に向かって動かす。(1)式における目標角度 $\hat{\theta}_m$ は、 P_{up} の逆運動学により求められる。

制御モード2 (中間点での停留): 制御モード2では、脚 i の脚先を、前方脚 $i-1$ の接地点が、脚 i の制御域における **Area 1** に入るまで、中間点 P_{up} に待避させる。ただし、最前脚 ($i=1$) については、新たな接地点となる点を進行方向前方の地面に生成し、その点が脚1の制御域における **Area 1** に入るまで、中間点 P_{up} に待避させる。この場合も、(1)式における目標角度 $\hat{\theta}_m$ は、 P_{up} の逆運動学により求められる。

制御モード3 (新接地点への接近): 制御モード3では、脚 i の脚先を、新たな接地点 P_{newi} に向かって動かす。最前脚 ($i=1$) の新たな接地点は、制御モード2において

進行方向前方に生成した点である。それ以外の脚 ($i \neq 1$) については、前方脚 $i-1$ の接地点の、脚先の大きさの分だけ後方にずらした点が新たな接地点となる。

制御モード4 (推進力の生成): 脚先 i が次の接地点 P_{newi} に接地後、次式の見標点を各時刻において計算する。

$$\hat{P}_i = P_i + \frac{\Delta_i}{|P_{target} - P_i|} (P_{target} - P_i) \quad (2)$$

ここで、 Δ_i は見標点の変化速度、 P_{target} は限界見標点、 $|P_A - P_B|$ は2点 P_A と P_B の間の距離を表す。限界見標点は制御域の端点であり、ここに達するまでに支持脚は遊脚に移る必要がある。

見標点の変化速度 Δ_i はロボットの移動速度を調整するパラメータである。 Δ_i は前脚 $i-1$ から接地点を引き継いだ時に、 $\Delta_i = \Delta_{i-1}$ と更新する。支持脚 i が遊脚に移るタイミングは、後脚 $i+1$ が脚先 i の接地点を受け継いだ瞬間である。最後脚については脚先がある位置を超えた瞬間に遊脚する。この制御モードでは、(1)式における目標角度 $\hat{\theta}_m$ は、 $\hat{P}_i$ の逆運動学から求まる。

3.2 制御モードの遷移 接地点追従法における各脚の制御モードの遷移は、事象駆動型の状態遷移図により記述できる。Figure 3は、各脚の制御モードの切り替えを表す、Mealy型のオートマトンである。

Mealy型オートマトンにおける状態遷移は、

$$\text{inEvent}[\text{guard}]/\text{outEvent}; \dots; \text{outEvent} \quad (3)$$

と書くことができ、入力イベント“inEvent”が発生し、ガード条件“guard”が成り立つとき、状態遷移と共に、出力イベント“outEvent”を発生する⁽⁶⁾。それぞれの項目は省略することができ、特に、入力イベントもガード条件も省略されている場合 (/...) は、常に状態遷移と出力イベントの生成が行われる。また、出力イベントが省略されている場合 (.../) は、遷移のみが行われる。遷移のチェックはロボットの制御周期毎に行われるものとし、入力イベントもガード条件も省略されている遷移と、入力イベントが省略されていない遷移の発火条件が同時に満足する場合は、省略されていない遷移を優先するものとする。Figure 3において、最前脚 ($i=1$)、中間脚 ($i \neq 1, N$)、最後脚 ($i=N$) では、隣接するセグメントの関係により、

Fig. 4 New contact point of first leg

Fig. 5 New contact point of first leg to get over obstacle

制御アルゴリズムが違っていることに注意されたい。この制御アルゴリズムから、各脚 i は、前方の脚 $i-1$ から接地点の座標 P_{i-1} と目標点の変化速度 Δi_{i-1} を、後方の脚 $i+1$ から接地を示すメッセージを受け取るだけでよく、近接の脚の情報のみを用いるという点で分散制御が実現できていることが分かる。接地点追従法では、各脚において Fig.3 のオートマトンを並列して実行する。

3.3 先頭接地点の設定 ロボットの前頭となるセグメントは，進行方向の地面上に新しい接地点 P_{new1} を作る．新しい接地点 P_{new1} の配置の仕方によって，ロボットの進行方向を制御でき (Fig.4)，また，障害物上に配置することで障害物の乗り越えが可能となる (Fig.5)．

また，進行方向の制御においては，進行方向に応じた新しい接地点の接地と共に，目標点の変化速度 Δ_1 を左右で別の値に設定する．つまり，曲がりたい方向側の脚における目標点の変化速度 Δ_1 を小さく，逆側の値を大きくする．

4. 接地点追従法のシミュレーション結果と問題点

提案手法を検証するために、物理シミュレータ PhysX [www.nvidia.com] を用いた。Figure 1 は、シミュレータ環境内に構築したロボットであり、10 セグメント、つまり 20 脚により構成されている。このロボットの歩行制御として接地点追従法を用い、制御周期 10 [ms]、シミュレーションのサンプリングタイム 1 [ms] として検証を行った。

Figure 6 は平地において最前脚の接地点を Fig.4 のよう

Fig. 6 Operation performance

Fig. 7 Simulation result of 10 segments robot: (a) (b) going up and down stairs, (c) walking through tiled uneven ground

に切換える事で、前進、右折、左折を行った結果である。図中の点は先頭のセグメントが生成した接地点を表し、接地点を切り替えた箇所が線分で示したある。なお、接地点の切換は操作者が行った。

次に、Figure 7 に、(a)(b)1 段の高さがロボットの地面から胴体までの高さの半分である階段の乗り越え実験、(c) 同じ段をタイル状に並べた障害物の踏破実験の様子を示す。図中の地面上の四角は、先頭のセグメントが生成した接地点である。いずれの場合も、障害物を踏破することができた。しかしながら、特にタイル状の障害物など、左右の脚で接地する地面の高さが違うときなどに、接地相にある脚先が接地点を離れてしまい推進力が得られず、前進できないという問題が生じた。次節ではこの問題を解決するために、接地相にある脚の間で接地加重を平均化する分散制御を提案する。

Fig. 8 5 segments robot walking over tiled obstacles with implementation of averaging contacting-force

5. 分散制御に基づく脚先反力平均化制御

接地相つまり制御モード4における脚先の目標点を(2)式の代わりに次式とする.

$$\hat{P}_i = P_i + \frac{\Delta_i}{|P_{target} - P_i|} (P_{target} - P_i) + \alpha(F_{di} - F_i)\vec{e}_z \quad (4)$$

ここで, α は正定数, F_{di} , F_i はそれぞれ脚 i の目標床反力と床反力, $\vec{e}_z$ は脚 i の座標系における z 方向単位ベクトルである. つまり, 接地相において脚先が床から適当な反力を受けるように脚先高さをフィードバック制御することにより, 脚先を床から離れないように制御するのである. 目標床反力の導出については接地脚間での床反力平均化に基づく方法⁽⁷⁾が提案されているが, ムカデ型多脚歩行ロボットでは不良設定問題への対応が困難である. そこで, 拡散方程式 (Diffusion equation) に基づく各モジュールにおける局所演算により, 接地脚間での平均床反力を算出する.

まず, 各制御周期における各セグメント i の接地相 (制御モード4) にある脚数を $X_i \in \{0, 1, 2\}$ とする. そして, 制御周期を分割した時間 $\tau = (0, \dots, T)$ において平均接地脚数 $x_i(\tau)$ を次の発展方程式を計算する. $i = 1, 2, \dots, N$ に対して,

$$x_i(0) = X_i \in \{0, 1, 2\}, \quad (5)$$

$$\frac{dx_i(\tau)}{\tau} = \sum_{j=\{i-1, i+1\} \setminus \{0, N+1\}} (x_j(\tau) - x_i(\tau)) \quad \text{for } \tau = 1, \dots, T \quad (6)$$

そして, 次の制御周期の目標床反力を次式から算出する.

$$F_{di} = M_{seg}/x_i(T). \quad (7)$$

ここで, M_{seg} はセグメントの重量である. 脚先反力平均化制御を搭載した場合のシミュレーション結果を Fig.8 に, 各セグメントの平均接地脚数を Fig.9 に示す. タイル状不整地でも接地を維持し, 前進できていることが分かる.

6. お わ り に

本稿では, ムカデ型歩行ロボットの分散型歩行制御法として, 接地点追従法に分散制御に基づく脚先反力平均

Fig. 9 Update of average number of contacting legs in each segment based on diffusion equation

化制御を導入し, 物理シミュレータを用いて不整地踏破が可能であることを示した. 最前脚接地点の計画法, 実機開発が今後の課題である.

文 献

- (1) A.Torige, S.Yagi, H.Makino, T.Yagami, N.Ishizawa "Centipede type walking robot (CWR-2)," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.402-407, 1997.
- (2) S.Aoi, H.Sasaki, and K.Tsuchiya: "A multilegged modular robot that meanders: investigation of turning maneuvers using its inherent dynamic characteristics," *SIAM J. on Applied Dynamical Systems*, Vol.6, No.2, pp.348-377, 2007.
- (3) L.Matthey, L.Righetti and A.J.Ijspeert: "Experimental study of limit cycle and chaotic controllers for the locomotion of centipede robots," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.1860-1865, 2008.
- (4) 稲垣伸吉, 丹羽智哉, 鈴木達也: "ネットワーク型多脚歩行ロボットの接地点追従法に基づく分散制御," 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, pp.252-257, 2009.
- (5) B.D.Anderson, R.J.Full, T.Chen, "Mechanics of locomotion in centipedes," *American Zoologist*, Vol.30, No.4, p.135A, 1990.
- (6) 阪田史郎, 高田広章: "組込みシステム," オーム社, 2006.
- (7) 米田完, 飯山浩幸, 広瀬茂: "4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御," 日本ロボット学会誌, vol.12, no.7, pp.1066-1071, 1994.