

「手応え関数」に基づく 6 脚歩行の脚間協調制御則の構築

Design of Interlimb Coordination Mechanism for Hexapod Based on “TEGOTAE function”

○郷田将*, 宮澤咲紀子*, 板山晋*, 大脇大*, 加納剛史*, 石黒章夫*,†

○Masashi Goda*, Sakiko Miyazawa*, Susumu Itayama*
Dai Owaki*, Takeshi Kano*, Akio Ishiguro*,†

* 東北大学, †JST CREST

*Tohoku University, † JST CREST

キーワード : 自律分散制御 (decentralized locomotion), 6 脚ロコモーション (hexapod locomotion)
手応え関数 (TEGOTAE function)

連絡先 : 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1
東北大学 電気通信研究所本館 4 階

Tel : 022-217-5465, Fax : 022-217-5464, E-mail : m.goda@riec.tohoku.ac.jp

1 緒言

昆虫は $10^5 \sim 10^6$ 程度の限られた数の神経細胞しか持たないにもかかわらず、歩行、飛翔、遊泳 [1] といった多様なロコモーションを環境適応的に発現する能力を有している。歩行運動に着目すると、各脚の運動を巧みに協調させること（脚間協調）によって、移動速度の変化に応じて歩行パターン（歩容）を適応的に変化させる [2]。また、脚に故障が生じた場合でも残存機能に応じた歩容を発現可能である [3]。このように高い適応性を示す昆虫の脚間協調メカニズムを解明することで、生物学への貢献のみならず、ロボット工学の分野においても優れた適応性や耐故障性を有するロボットの実現に資することが期待される。

生物学的知見から、昆虫のロコモーションは胸部神経節 (図1) に存在する神経回路によって各脚が自律分散制御されていると考えられている [4]。この知見に基づき、Central Pattern Generator (CPG) と呼ばれる自発的に周期的な運動パター

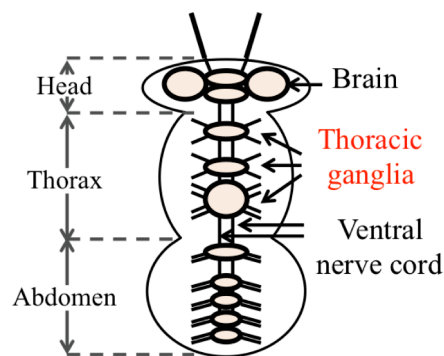


Fig. 1: Insect's nervous system.

ンを生成する神経回路に基づいたモデル [5][6] や、反射の連鎖によって歩行運動を生成するモデル [7][8] などが提案されてきた。しかしながら、既存のモデルでは、神経回路内の結合や感覚フィードバックはモデル毎にアドホックに設計されている。このため、脚間協調を実現する制御則のシステムティックな設計方策はいまだ提唱されていないのが現状である。

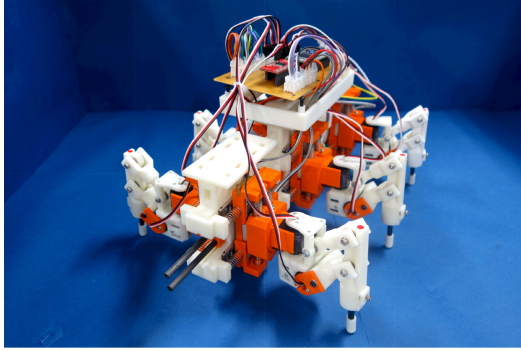


Fig. 2: Hexapod robot.

そこで筆者らは、「手応え関数」という新たな概念に基づき、制御則をシステムティックに設計することを試みる。ここで「手応え」とは、ある運動における制御系の意図と、当該運動を実行した結果として得られる感覚情報の整合性を評価したものである。そして、これら2つの要素から構成される手応えを定量化したものを「手応え関数」と定義した [9]。この手応え関数に基づく感覚フィードバックにより、各制御器は当該運動が制御系の意図に利するか否かをリアルタイムに峻別し、良い手応えを増やすように制御指令を修正する。

本稿では、この手応え関数に基づき6脚歩行の脚間協調制御則をし、ロボット実機による検証を行ったので報告する。

2 提案モデル

2.1 機構系

6脚歩行ロボットの全体像を図2に示す。ロボットは同一の機械構造の脚(図3)を6本とそれらを接続する胴体から構成され、体長30 [cm]、横幅25 [cm]、高さ10 [cm]、重量1.5 [kg]である。各脚には2つのサーボモータ(FUTABA社製:RS303MR)が実装されており、yawおよびpitch方向に回転し、脚を駆動する役割を担っている。ロボットはマイクロコンピュータ(mbed: NXP LPC 1768)を搭載しており、各脚のサーボモータを制御している。図4に示すように、 i 番目の脚 i の軌道は各脚に実装する位相振動子の位相 ϕ_i に応じて制御される。

具体的には位相 ϕ_i が0から π のときは楕円軌道の上半分(Swing phase)、 π から 2π のと

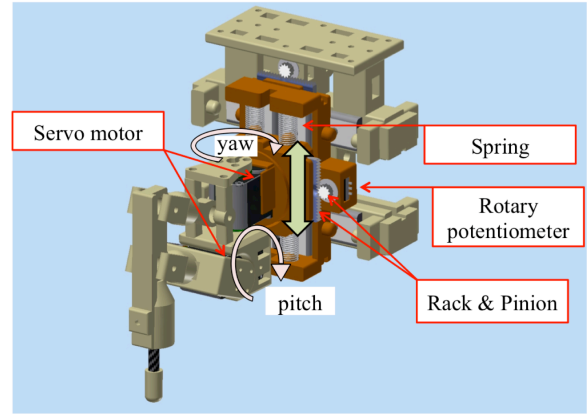


Fig. 3: Detailed structure of a segment.

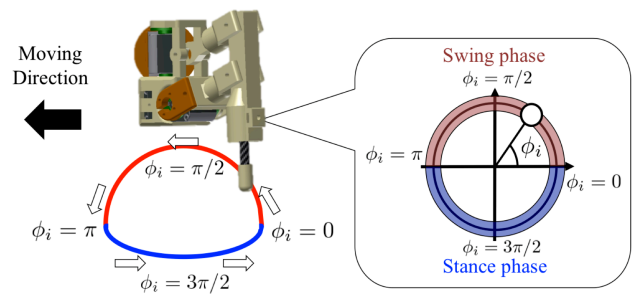


Fig. 4: Relationship between oscillator phase and leg trajectory.

きは楕円軌道の下半分(Stance phase)を描くように制御している。各脚には感覚情報を取得するために角度センサ(ロータリーポテンシオメータ:RDC506002A)が実装されており、脚と胴体を接続するユニットがバネを介して上下したときの変位量を、脚が感じた地面に対して垂直な方向の反力として検出する。

2.2 制御系

2.2.1 手応え関数に基づく脚間協調制御則の構築

本節では、「手応え関数」およびこれを用いた脚間協調制御則の設計スキームについて説明する。前述した通り、手応えとは、運動における制御系の意図と、当該運動の結果として得られる感覚情報の整合性を評価した情報である。これら2つの要素からなる手応えを定量化したも

のを手応え関数と定義し、次式で表す：

$$T(x, \mathbf{S}) = f(x)g(\mathbf{S}). \quad (1)$$

$f(x), g(\mathbf{S})$ はそれぞれ運動における制御系の意図、当該運動を実行した結果として得られる各感覚器官からの感覚情報を表しており、手応え関数 $T(x, \mathbf{S})$ はこの2つの項の積で構成される。このとき、制御系が意図した運動を実行した結果、当該運動に利する感覚情報が得られれば得られるほど、大きな値を取るよう設計する。

手応え関数に基づき、脚間協調制御則の構築を行う。位相振動子の位相 ϕ_i を制御変数として、その時間発展を次式で表す。

$$\dot{\phi}_i = \omega + \frac{\partial T_i(\phi_i, \mathbf{N})}{\partial \phi_i}. \quad (2)$$

ただし、 ω は位相振動子の固有角速度、 \mathbf{N} は各脚が環境から受ける地面に対して垂直な方向の床反力である。第1項は歩行速度を規定するパラメータである。第2項は手応えに応じて位相を調整する項であり、手応え関数の位相による偏微分をフィードバックすることで、良い手応えは増やす、あるいは悪い手応えは減らすように位相を修正することが可能となる。このような設計スキームを適用することで、制御則の設計を手応え関数について考えるという問題のみに帰着できる。

2.2.2 手応え関数の設計

脚間協調を実現するための手応え関数を設計するにあたり、感覚情報に基づく自脚の協調と他脚との協調という2つの着眼点を持つ必要があると考えた。具体的に述べると、前者は、歩行中に自脚が床反力を感じたら転倒しないために身体の支持を行いながら歩行する必要があるという点、後者は、自脚が遊脚する際にはその脚の近傍の脚が身体の支持を担う必要があるという点である。このような観点で設計した手応え関数を以下に示す：

$$T_i = \sigma_1 T_{i,1} + \sigma_2 T_{i,2}, \quad (3)$$

$$T_{i,1} = -N_i \sin \phi_i, \quad (4)$$

$$T_{i,2} = \left(\frac{1}{n_L} \sum_{j \in L(i)} N_j \right) \sin \phi_i. \quad (5)$$

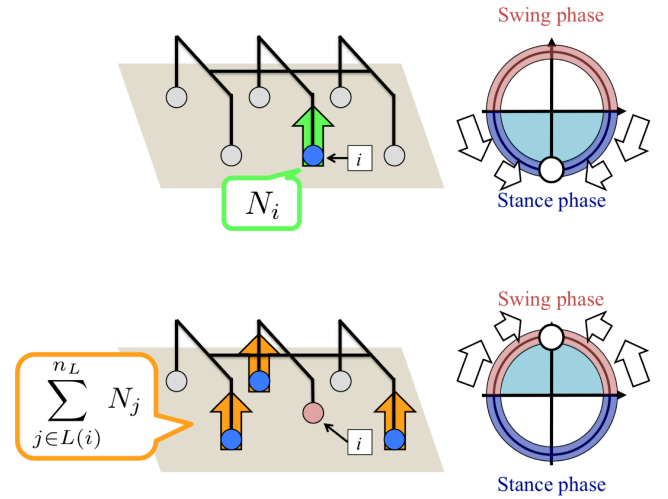


Fig. 5: Feedback mechanism based on TEGO-TAE function.

ただし、 σ_1, σ_2 はフィードバックの重み係数、 N_i は脚 i が環境から受ける地面に対して垂直な方向の床反力、 $L(i)$ は脚 i の近傍の脚の集合、 n_L は集合 $L(i)$ の要素数を表す。例えば、左前脚に対する L は右前脚と左中脚であり、 $n_L = 2$ 、左中脚に対する L は左前脚と右中脚と左後脚であり、 $n_L = 3$ となる。

$T_{i,1}$ は身体の支持という観点から、自脚の協調関係に着目した手応え関数である。この関数は、脚 i の位相振動子が支持脚期でありたいという意図 (π から 2π : すなわち $-\sin \phi_i > 0$) を持った状態の時、感覚情報として床反力 ($N_i > 0$) を検知するほど大きな値をとる。結果として、脚が床反力を感じるほど、身体の支持を行うために支持脚期であり続けようとするフィードバックが働く (図5 (上))。

$T_{i,2}$ は遊脚期における、他脚との協調関係に着目した手応え関数である。この関数は、脚 i の位相振動子が遊脚期でありたいという意図 (0 から π : すなわち $\sin \phi_i > 0$) を持った状態の時、近傍の脚が床反力を検知するほど大きな値をとる。結果として、近傍の脚が身体の支持を担っている時に、脚 i を遊脚期に遷移させようとするフィードバックが働く (図5 (下))。

3 実験結果

提案した制御則を6脚歩行ロボットに実装し、実世界環境下での実機実験を行った。各位相振動子の初期位相は $3\pi/2$ 、重み係数のパラメータ

は $\sigma_1 = 25$, $\sigma_2 = 11$ として固定した. $\omega = 7.5$, 6.0 と変化させ, トレッドミル上で歩行実験を行った.

各施行の結果をゲイトダイアグラム (図 6) で示す. ゲイトダイアグラムは着色部が支持脚期, 空白部が遊脚期を表している. 得られたゲイトは実際の昆虫のように, 高速歩行時 (図 6 (上)) には Tripod (図 7 (上)) と呼ばれる 3 脚が常に交互に接地・離地を繰り返す歩容 [2], 低速歩行時 (図 6 (下)) には Tetrapod (図 7 (下)) と呼ばれる脚の遊脚する順序が後脚・中脚・前脚の順番となる歩容 [2] へ収束することが確認された. また, どちらの条件でも歩行開始から 3 歩以内に歩容が安定した. このように, 各脚の振動子が神経的に結合していないにもかかわらず, 固有角速度のパラメータに応じて異なる歩容へ収束することは, 非自明であり極めて興味深い.

また, 耐故障性を調べるために, 各パラメータは $\sigma_1 = 25$, $\sigma_2 = 11$, $\omega = 7.5$ で固定したまま, 中脚を 2 本外して歩行させる実験を行った. その結果, 脚歩行動物に見られる Trot と呼ばれる歩容の再現に成功した. このような振る舞いはゴキブリの脚を切断して歩行させた生物実験 [10] でも確認されている. このように, 提案制御則によって実際の昆虫が示す適応的ロコモーションの一部を再現することに成功した.

4 結言

本稿では, 手応え関数に基づく 6 脚歩行の脚間協調制御則を提案し, ロボット実機による歩行実験にて妥当性を検証した. 提案制御則によって, 実際の昆虫の振る舞いの再現に成功した. 今後は様々な脚の故障パターンへの対応を目指す.

謝辞

北海道大学電子科学研究所複雑系数理研究分野の青沼仁志准教授からは, 本研究に対し数々の貴重なご助言をいただきました. ここに感謝の意を表します.

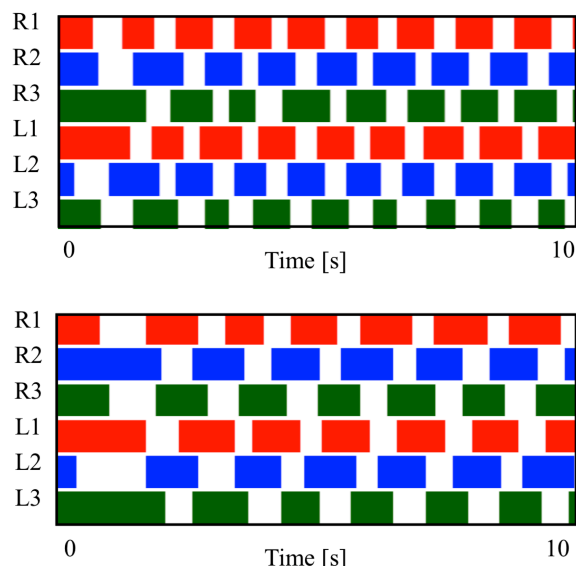


Fig. 6: Gait diagram : (top) $\omega = 7.5$ and (bottom) $\omega = 6.0$.

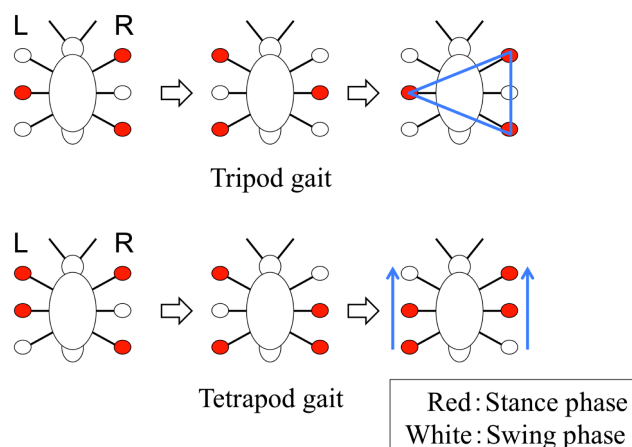


Fig. 7: Gait pattern of insects : (top) Tripod and (bottom) Tetrapod.

参考文献

- [1] Aonuma, H., Goda, M., Kuroda, S., Kano, T., Owaki, D. and Ishiguro, A., "Cricket switches locomotion patterns from walking to swimming by evaluating reaction forces from the environment" 7th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines (AMAM2015), 2015.
- [2] Graham, D., "A Behavioural Analysis of the Temporal Organisation of Walking Movements in the 1st Instar and Adult Stick Insect (*Carausius morosus*)," *J. Comp. Physiol.*, vol. 81, pp. 23-52, 1972.
- [3] Graham, D., "The Effect of Amputation and Leg Restraint on the Free Walking Coordination of the

- Stick Insect *Carausius morosus*," *J. Comp. Physiol.*, vol. 116, pp. 91-116, 1977.
- [4] 下澤楯夫, 針山考彦, "昆虫ミメティクス ~昆虫の設計に学ぶ~", NTS, pp. 50-57, 2008.
- [5] Kimura, S., Yano, M. and Shimizu, H., "A self-organizing model of walking patterns of insects," *Biol. Cybern.*, vol. 69, pp. 183-193, 1993.
- [6] Ambe, Y., Nachstedt, T., Manoonpong, P., Worgotter, F., Aoi, S. and Matsuno, F., "Stability Analysis of a Hexapod Robot Driven by Distributed Nonlinear Oscillators with a Phase Modulation Mechanism," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2013), pp 5087-5092, 2013.
- [7] Cruse, H., Dürr, V. and Schmitz, V., "Insect walking is based on a decentralized architecture revealing a simple and robust controller," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 365, pp. 221-250, 2007.
- [8] Beer, R., D., Quinn, R. and Chiel, H., "Biologically Inspired Approaches to Robotics," *Communications of the ACM*, vol. 40, pp. 30-38, 1997.
- [9] 堀切舜哉, 大脇大, 西井淳, 石黒章夫, "「手応え閾数」に基づく適応的二足歩行制御" 第28回自律分散システムシンポジウム, 1B2-3, 2016.
- [10] Kaliyamoorthy, S., Quinn, R., D. and Zill, S., N., "Force Sensors in Hexapod Locomotion," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 24, no. 7, pp. 563-574, 2005.