

四脚歩行ロボットの自律分散型歩行制御

辻田 勝吉, 土屋 和雄
京都大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻

Decentralized Autonomous Control of a Quadruped Locomotion Robot

Katsuyoshi Tsujita and Kazuo Tsuchiya
Dept. of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.

Key Words: Quadruped locomotion robot, Decentralized autonomous control, Non-linear oscillators

1. はじめに

機械システムの運動制御において、歩行機械の運動制御系の開発は重要な課題の一つである。近年、歩行機械の運動制御において、非線形振動子と筋骨格系の相互引き込みを用いた運動制御が盛んに行われている^{1),2)}。また、環境に応じた、安定な歩行パターンの実現可能性をモデルベースで解析する研究も行なわれている。これに対し、本稿は、四脚歩行機械の、環境及び与えられた条件に応じた自律的な歩行パターンの生成を目的とした運動制御に関する論文である。四脚歩行機械の歩行運動は、歩行パターンと歩幅、及び デューティー比をパラメータとしてパラメトライズされる。歩幅とデューティー比が与えられることにより、目標歩行速度が決定される。四脚歩行機械において、歩行運動中の各脚の運動の位相関係が歩行パターンである。本稿では、非線形振動子の相互引き込みを利用して環境に応じた歩行パターンを自律的に生成する制御系を考案した。提案する制御系は、脚制御系、歩行パターン制御系から構成される階層構造制御系である。提案した制御系を用いて、歩行速度や、床の傾度、負荷荷重などの環境条件を変化させ、与えられた環境に適した歩行パターンが自律的に生成され、安定な歩行運動を実現することを、数値シミュレーションにより検証した。

2. モデル

Fig. 1 のような 4 本の脚と胴体から構成される四脚歩行機械を考える。各脚に 1 ~ 4 の番号を付ける。各脚は 2 自由度から構成されている。

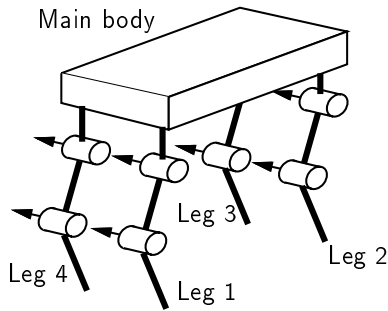


Fig. 1 Schematic model of a quadruped robot

状態変数を以下のように取る。

$$q^T = \left[r_{-1}^T \quad \theta_{0-1}^{(0)T} \quad \theta_{j,j-1}^{(i)T} \quad \dots \quad \theta_{32}^{(4)T} \right] \quad (1)$$

状態変数に対する運動方程式は以下のように求められる。

$$K\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = G + \tau + \Lambda \quad (2)$$

ここで、 H は非線形項、 τ は入力トルク、 G は重力項、 Λ は足先の接地点における床からの反力である。

3. 各脚の運動制御則

3.1 歩容制御系構成

制御系の構成を Fig. 2 に示す。制御系は、脚制御系と歩行パターン制御系から構成されている。脚制御系は、パターン制御系からの目標軌道に対して脚の各関節のモータを制御する。

歩行パターン制御系には各脚に振動子が備えられており、歩行パターンは、振動子の位相差により決定される。振動子に脚先の接地センサーのフィードバック信号が入力されることにより振動子間の相互引き込みを通して、与えられた基準歩行パターンから修正された歩行パターンが生成される。生成された歩行パターンは脚の制御系に指令値として与えられる。

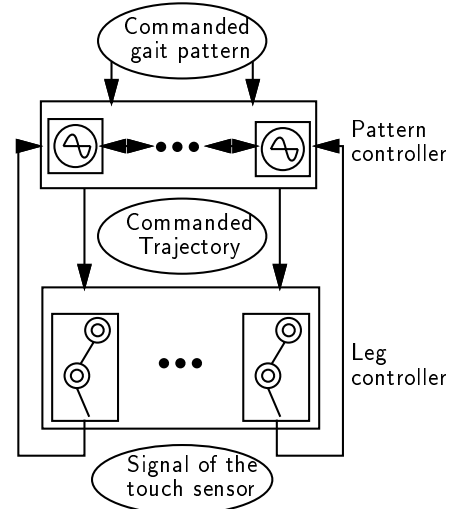


Fig. 2 Architecture of the proposed controller

3.2 歩容設計

3.2.1 脚軌道の設計

胴体座標系で表した脚先の軌道を決定する。各脚の脚先の軌道上での位置は対応する振動子の位相の関数として与えられる。脚 i の振動子の状態は以下のように表される。

$$z^{(i)} = \exp(j \phi^{(i)}) \quad (3)$$

ここで、 $z^{(i)}$ は振動子の状態を表す複素数、 $\phi^{(i)}$ は振動子の位相変数である。

脚先の目標軌道 $\hat{r}_e^{(i)}$ ($\hat{\phi}^{(i)}$) は遊脚軌道 $\hat{r}_F^{(i)}$ 及び支持脚軌道 $\hat{r}_{eS}^{(i)}$ をそれぞれ AEP (着地点) と PEP (離脱点) において切替えることにより生成される。

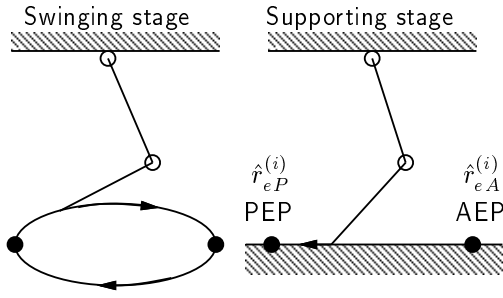


Fig. 3 Trajectory of the leg

3.2.2 歩行パターンの設計

各脚の運動の関係を決定する歩行パターンを設計する。各歩行パターンは振動子の位相差マトリクス $\Gamma_{ij}^{(m)}$ を用いて以下のように表される。

$$\phi^{(j)} = \phi^{(i)} + \Gamma_{ij}^{(m)} \quad (4)$$

3.3 歩行制御

3.3.1 各脚の制御系

脚 i のジョイント j の目標運動は以下のように表せる。

$$\hat{\theta}_j^{(i)} = \hat{\theta}_j^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) \quad (5)$$

$\hat{*}$ は基準値を表す。各脚の各関節のアクチュエータには以下のようなローカル PD フィードバック制御則を用いた。

$$\tau_j^{(i)} = K_{Pj}(\hat{\theta}_j^{(i)} - \theta_j^{(i)}) + K_{Dj}(\dot{\hat{\theta}}_j^{(i)} - \dot{\theta}_j^{(i)}) \quad (6)$$

3.3.2 歩行パターン制御系

各脚の振動子の位相ダイナミクスを以下のように設計する。

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g_1^{(i)} + g_2^{(i)} \quad (7)$$

$$g_1^{(i)} = -K(\phi^{(i)} - \phi^{(j)} - \Gamma_{ij}^{(m)}) \quad (8)$$

$$g_2^{(i)} = \hat{\phi}^{(i)} - \phi_A^{(i)} \quad \text{at 脚 } i \text{ 着地} \quad (9)$$

ただし、 K は重みを表すスカラー量である。

4. シミュレーション結果

用いたモデルは、胴体幅 \times 長 \times 高 = 0.182 [m] \times 0.338 [m] \times 0.05 [m]、全質量 = 8.41 [kg] である。

基準歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ を Transverse walk に固定し、デューティー比 β をパラメータとして、提案した制御則について歩行シミュレーションを行った。目標遊脚相期間は $T = 0.2$ [sec] とした。

(10) ~ (12) 式で定義される、実現される歩行パターンと基準歩行パターンとの近さ $D^{(m)}$ をデューティー比をパラメータとして求めた結果を Fig. 4 に示す。並進歩行速度を上げる(デューティー比を小さくする)に従って、歩行パターンが Transverse walk から Trot に変化している。Fig. 5 は単位移動距離あたりのエネルギー消費を、歩行パターン固定の場合と提案する制御系とで比較したものである。この歩行パターンの変化は、結果として、制御エネルギーの増加を抑えていることが解る。

$$\zeta_i = \begin{cases} \frac{1}{1-\beta} & \text{Swinging stage} \\ -\frac{1}{\beta} & \text{Supporting stage} \end{cases} \quad (10)$$

$$W_{ij} = \frac{\langle \zeta_i \zeta_j \rangle}{\sqrt{\langle \zeta_i \rangle} \sqrt{\langle \zeta_j \rangle}} \quad \langle * \rangle = \int * dt \quad (11)$$

$$D^{(m)} = \frac{1}{4} \text{trace}(\widehat{W}^{(m)T} W) \quad (12)$$

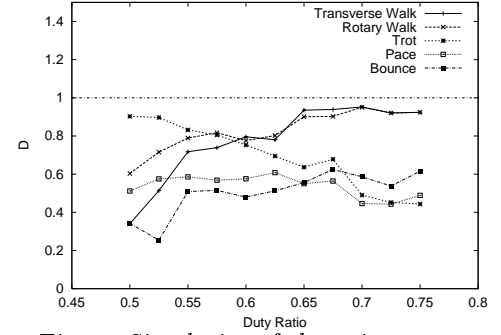


Fig. 4. Similarity of the gait pattern

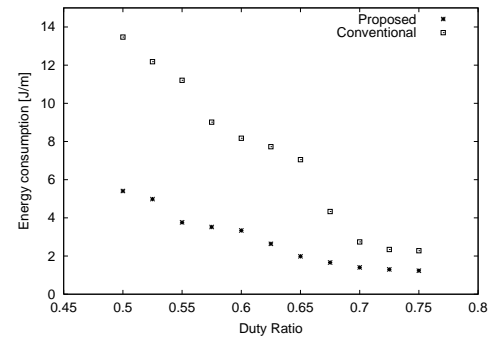


Fig. 5. Energy consumption

5. おわりに

本報告では、四脚歩行ロボットの歩行制御系として階層構造型制御系を提案した。提案した制御系は各脚に対応した非線形振動子を有し、脚先からの接地センサの信号をフィードバックすることにより、制御系は振動子間の相互引き込みを通して環境に適した歩行パターンを生成する。提案した制御系の有効性を、数値シミュレーションにより検証した。本研究は、未来開拓学術研究推進事業「生命情報の数理と工学的設計論への展開」及び戦略的研究推進事業「ロボットの脳を創る」の一環として行なった。

参考文献

- 1) H. Kimura, K. Sakaura and S. Akiyama, 1998, "Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator," *Proc. of IROS*, Vol. 1, pp. 50-57
- 2) K. Akimoto, S. Watanabe and M. Yano, 1999, "A insect robot controlled by emergence of gait patterns," *Proc. of International Symposium on Artificial Life and Robotics*, Vol. 3, No. 2, pp. 102-105
- 3) T. Mita and T. Ikeda, 1999, "Proposal of a Variable Constraint Control for SMS with Application to a Running and Quadruped," *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, Vol. III, pp. 140-145
- 4) K. Tsujita, A. Onat, K. Tsuchiya et al, 2000, "Autonomous Decentralized Control of a Quadruped Locomotion Robot using Oscillators," *Proc. of the 5th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, Vol. 2, pp. 703-710