

四脚歩行ロボットの自律分散型歩行制御

— 反射型遊脚軌道補正による障害物回避 —

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。筆者らは、これまで歩行ロボットの歩行制御系として、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、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されることを検証した。

本稿では、視覚系などの環境の特性を予測するセンサーが無い場合に、四脚歩行ロボットが歩行中の障害物を踏破する反射的脚軌道修正器の提案を行う。脚先軌道生成器は外部入力を持つ緩和型力学系で構成され、ロボットの爪先に設置された接触センサーの信号がフィードバックされる。爪先が障害物に接触した場合、接触センサーからインパルス状の信号が脚先軌道修正器に入力される。入力された接触信号をもとに反射的に脚先軌道を基準軌道から補正され、障害物を回避する。緩和時間の後に脚先軌道は基準軌道に復帰し、定常な歩行状態に収束する。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。

2. モデル

Fig. 1 のような 2 自由度の関節を持つ 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。

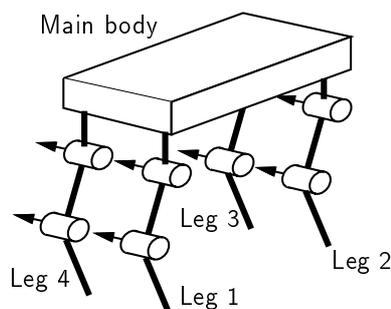


Fig. 1 Schematic model of a quadruped robot

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、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軌道補正器に脚軌道の基準値として与えられる。脚先軌道補正器には、脚先に備えられた障害物接触センサーのフィードバック信号が与えられ、脚先軌道の補正を行なう。補正された軌道は、脚の制御系に指令値として与えられる。

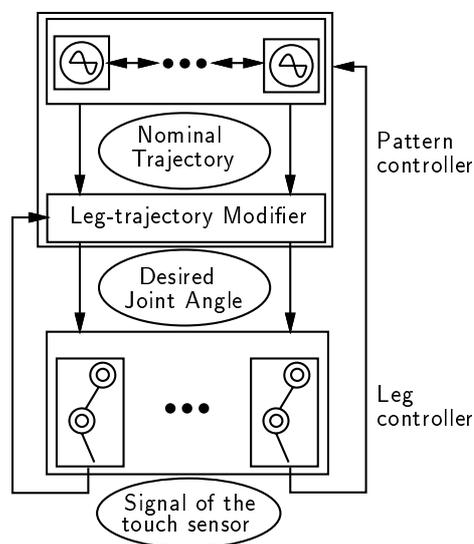


Fig. 2 Architecture of the proposed controller

前報までで提案した制御系の詳細は、文献 4) を参照されたい。

3.2 歩容設計

• 脚軌道

胴体座標系で表した脚先の軌道 $\hat{r}_e^{(i)} = (x_e^{(i)}, y_e^{(i)})$ 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。

$$z^{(i)} = \exp(j \phi^{(i)}) \quad (1)$$

脚先の目標軌道 $\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ は遊脚軌道 $\hat{r}_{eF}^{(i)}$ 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。

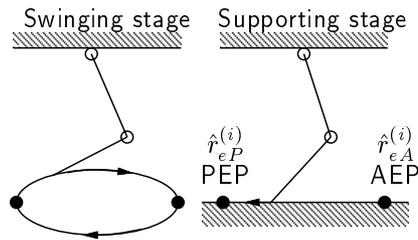


Fig. 3 Nominal trajectory of the leg

3.3 脚軌道修正器

ここでは、視覚系などの環境の特性を予測するセンサーが無い場合に、四脚歩行ロボットが歩行中に床面に段差などの障害物に接触した際、遊脚の軌道を反射的に修正し、障害物を踏破することを考える。障害物は床面にあり、障害物とロボットの各脚との接触は遊脚相の時に起こると仮定し、脚の爪先に取り付けられた接触センサーにより障害物との接触を検知できるものとする。脚軌道修正器は、ロボットの脚先が障害物に接触した時に、遊脚の脚先の軌道を3.2節で設計した基準軌道から補正することにより障害物を回避する制御を行なう。

脚 i の脚先の基準軌道からの補正量を決定する変数 $u^{(i)}$ を導入し、そのダイナミクスを以下のように設計する。

$$\dot{u}^{(i)} = -K_O u^{(i)} + w \delta(t - t_O) \quad (2)$$

t_O : 脚 i の障害物接触時刻

ここで、 δ はデルタ関数であり、 K_O は緩和時間を決定する定数である。脚 i が障害物に接触した瞬間に変数 $u^{(i)}$ には脚先に設置された接触センサーから大きさ w のインパルス状の入力がフィードバック信号として加えられる。フィードバック信号の感度 w は以下のように設定する。

$$w = w(\phi) \quad (3)$$

$$w(0) = w_A, \quad w(\phi_A) = 0$$

感度 w は、遊脚相の始まりでは最大値を取り、遊脚相の終りでは、最小値 0 を取る関数である。これは、遊脚相の始まりの次期に障害物に接触した場合、回避行動が容易であるが、遊脚相の終りの次期では、その相では回避が困難であることに対応する。

変数 $u^{(i)}$ を用いて、脚 i の脚先の座標 $(x_e^{(i)}, y_e^{(i)})$ は以下のように修正される。

$$x_e^{(i)} = x_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) - K_x u^{(i)} \quad (4)$$

$$y_e^{(i)} = y_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) + K_y u^{(i)} \quad (5)$$

ただし、 K_x, K_y は、軌道補正量を調節するパラメータである。

4. シミュレーション結果

用いたモデルは、胴体幅 × 長 × 高 = 0.182 [m] × 0.338 [m] × 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、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。Fig. 4 に、ロボットの脚先が歩行中に障害物を乗り越える様子を示す。図中、ロボットの爪先が障害物に初めて接触した瞬間の接触点を × 印で示す。障害物のサイズ

は、高さ 0.01 [m]、長さ 0.2 [m] とした。提案する制御系のより、ロボットが障害物を乗り越え、その後も安定な歩行を続けていることが解る。Fig. 5 に、ロボットが乗り越えられる障害物の位置と高さを示した。図中、実線が脚先の基準軌道であり、点は障害物のエッジの位置を表す。この図から広い範囲でロボットは障害物が存在しても安定な歩行を続けることができることが解る。

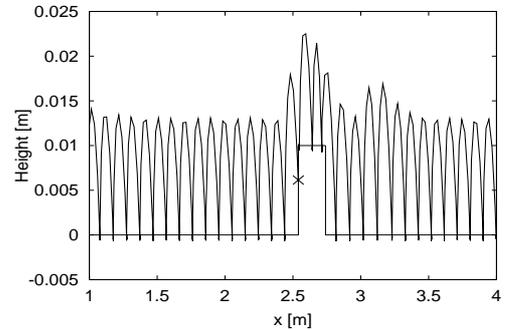


Fig. 4 Trajectory of the end of the leg

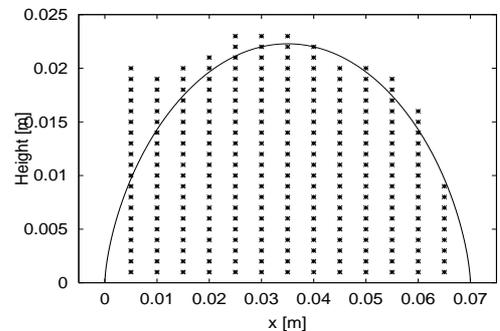


Fig. 5 Obstacle size which the robot succeeded to ride over

5. おわりに

本報告では、これまで提案している四脚歩行ロボットの歩行制御系に、障害物回避を行なう反射的脚軌道制御器付加した制御系を提案した。ロボットが歩行中に床面の障害物に接触した際の反射的な遊脚の軌道補正を行ない障害物を踏破する軌道補正器を力学系を用いて構成した。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, "Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator," *Proc. of IROS*, Vol. 1, pp. 50-57, 1998
- 2) K. Akimoto, S. Watanabe and M. Yano, "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, 1999
- 3) T. Mita and T. Ikeda, "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, 1999
- 4) 辻田勝吉, 土屋和雄, "四脚歩行ロボットの自律分散制御," 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 2, pp. 785-786, 2000