

歩行ロボットの適応的歩行制御

土屋和雄, 辻田 勝吉
京都大学 工学研究科 航空宇宙工学専攻

Key Words: Quadruped locomotion robot, Adaptation, Locomotion pattern, Non-linear oscillators

1. はじめに

次世代の宇宙開発の目標の一つとして月,火星を中心とした惑星探査がある. 惑星探査の手段として移動機能を持つロボットである惑星ローバが検討されている. 移動機能を実現する機構の一つとして脚歩行がある. 脚歩行は不整地における移動も可能であり, 惑星ローバを対象とした研究も行われている.

本論文は四脚歩行ロボットの歩行制御に関するものである. 脚歩行ロボットの歩行制御系の設計法として2つの方法, Top-down approach, Bottom-up approach がある. Top-down approach は制御理論にもとづく方法である; まず歩行機械の動力学モデルをもとに基準歩行運動を決定し, 制御系はそれを指令値として制御を行う. Top-down approach は制御対象の数学モデルにもとづく制御法であり, 環境変化に対して適応することができない. 一方, Bottom-up approach は動物行動学にもとづく方法である. 昆虫を対象とした動物行動学の研究によれば, 昆虫の各脚は自由な状態では固有な往復運動を実現している. そして, その脚先の接地センサー信号により, 往復運動の位相を調整する. その結果, 歩行速度, 床面の傾き等の環境変化に適応した歩行パターンが実現されている. 本論文は Bottom-up approach にもとづく四脚歩行ロボットの歩行制御系に設計法の提案である; 制御系は各脚の往復運動を制御する脚運動制御系と脚間の往復運動の位相関係を制御する歩行パターン制御系から構成される. 脚運動制御系は, 各脚のジョイントに取り付けられたモータによ

る局所フィードバック制御系であり, 歩行パターン制御系は各脚に対して設置された非線形振動子間の力学系として構成される. 各脚先に取り付けられた接地センサー信号による振動子間の相互引き込みにより, 環境に適応した歩行パターンが形成され, 脚運動制御系を介して実現される. 提案する制御系の設計法の有効性を数値シミュレーションで検証する. 又, そのハードウェア実験による結果をビデオにより紹介する.

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.

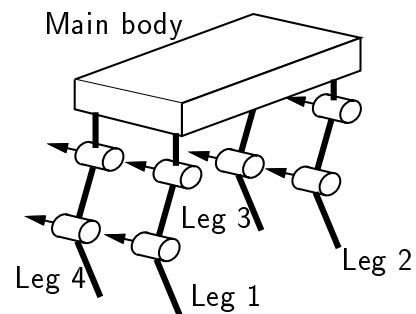


Fig. 1 Schematic model of a quadruped robot

状態変数を以下のように取る.

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

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。

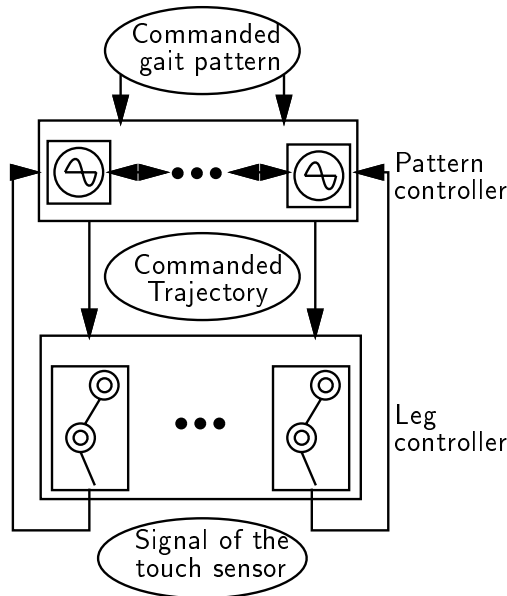


Fig. 2 Architecture of the proposed controller

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 $\hat{r}_{eF}^{(i)}$ 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。

$$\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) = \begin{cases} \hat{r}_{eF}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) & 0 \leq \hat{\phi}^{(i)} < \hat{\phi}_A^{(i)} \\ \hat{r}_{eS}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) & \hat{\phi}_A^{(i)} \leq \hat{\phi}^{(i)} < 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

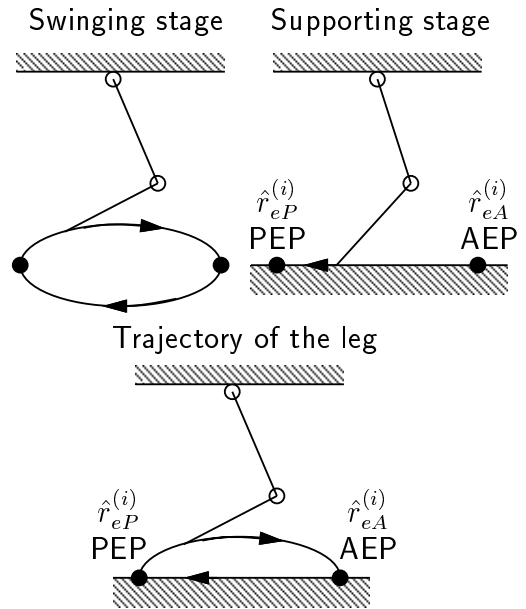


Fig. 3 Trajectory of the leg

脚 i の全歩行周期に対する支持脚相の時間的比率を表すデューティ比 $\hat{\beta}^{(i)}$ は以下のように表される。

$$\hat{\beta}^{(i)} = 1 - \frac{\hat{\phi}_A^{(i)}}{2\pi} \quad (5)$$

脚 i の基準歩幅 $\hat{S}^{(i)}$ および基準歩行速度 \hat{v} は以下のように表される。

$$\hat{S}^{(i)} = \hat{r}_{eA}^{(i)} - \hat{r}_{eP}^{(i)}, \quad \hat{v} = \frac{\hat{S}^{(i)}}{\hat{\beta}^{(i)}\hat{T}} \quad (6)$$

ここで, \hat{T} は基準歩行周期である。

3.2.2 歩行パターン設計

各脚の運動の関係を決定する歩行パターンを設計する．常に3本の脚が接地した状態で歩行する歩行パターンの一つに Transverse walk と呼ばれる歩行パターンがある．一方，常に2本の脚が接地した状態で歩行する歩行パターンの一つに Trot がある．Trot から各脚の往復運動の位相を $\frac{\pi}{2}$ ずらすことによって Transverse walk のパターンが得られる (Fig. 4)．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．

$$\phi^{(j)} = \phi^{(i)} + \Gamma_{ij}^{(m)} \quad (7)$$

ここで， $m = 1, 3$ はそれぞれ，Transverse walk, Trot を表す．

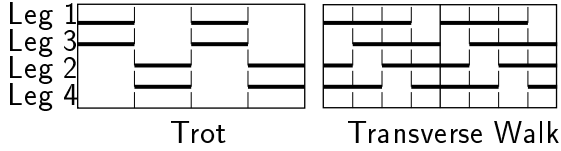


Fig. 4. The trot and the transverse walk patterns

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．

$$\hat{\theta}_j^{(i)} = \hat{\theta}_j^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) \quad (8)$$

$\hat{*}$ 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．

$$\tau_j^{(i)} = K_{Pj}(\hat{\theta}_j^{(i)} - \theta_j^{(i)}) + K_{Dj}(\dot{\hat{\theta}}_j^{(i)} - \dot{\theta}_j^{(i)}) \quad (9)$$

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．

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g_1^{(i)} + g_2^{(i)} \quad (10)$$

$$g_1^{(i)} = -K(\phi^{(i)} - \phi^{(j)} - \Gamma_{ij}^{(m)}) \quad (11)$$

$$g_2^{(i)} = \hat{\phi}^{(i)} - \phi_A^{(i)} \quad \text{at 脚 } i \text{ 着地} \quad (12)$$

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

シミュレーションに用いたロボットの物理パラメータを Table 1 に示す．

Table 1

Main body		
Width	0.182	[m]
Length	0.338	[m]
Height	0.05	[m]
Total Mass	9.67	[kg]
Legs		
Length of link 1	0.188	[m]
Length of link 2	0.193	[m]
Mass of link 1	0.918	[kg]
Mass of link 2	0.595	[kg]

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．

(13) ~ (15) 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 (16) で定義される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．

$$\zeta_i = \begin{cases} \frac{1}{1-\beta} & \text{Swinging stage} \\ -\frac{1}{\beta} & \text{Supporting stage} \end{cases} \quad (13)$$

$$W_{ij} = \frac{\langle \zeta_i \zeta_j \rangle}{\sqrt{\langle \zeta_i \rangle} \sqrt{\langle \zeta_j \rangle}} \quad (14)$$

$$\langle * \rangle = \int * dt \quad (15)$$

$$D^{(m)} = \frac{1}{4} \text{trace}(\widehat{W}^{(m)T} W) \quad (15)$$

$$E_c = \frac{\langle \sum_{i,j} \tau_j^{(i)} \theta_j^{(i)} \rangle}{\langle v \rangle} \quad (16)$$

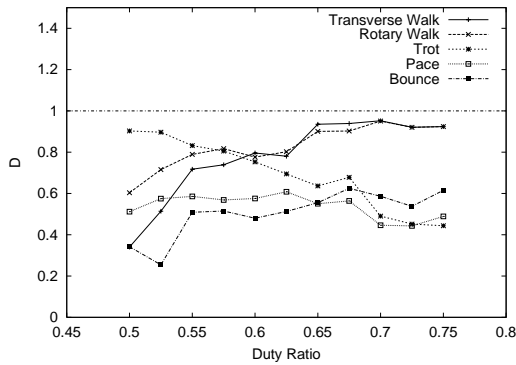


Fig. 5. Similarity of the gait pattern

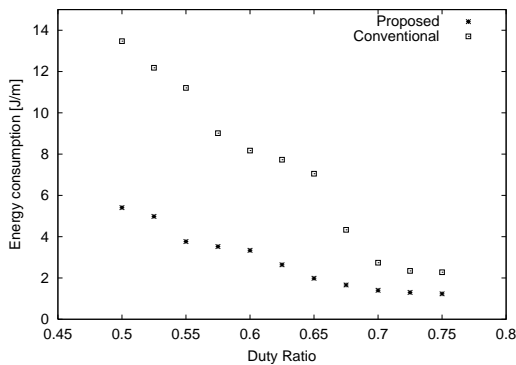


Fig. 6. Energy consumption

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