

振動子を用いた多脚歩行ロボットの歩行制御

土屋和雄 青井伸也 辻田勝吉 (京都大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学専攻)

Locomotion Control of a Multi-legged Locomotion Robot using Oscillators

Kazuo Tsuchiya, *Shinya Aoi, Katsuyoshi Tsujita

(Dept. of Aeronautics and Astronautics, Graduate School of Engineering, Kyoto University)

Abstract— This paper proposes the locomotion control system for a multi-legged locomotion robot. The proposed control system is composed of leg motion controllers and a gait pattern controller. The leg motion controllers drive the actuators of the legs by using local feedback control. The gait pattern controller is composed of non linear oscillators. Various gait patterns emerge through the mutual entrainment of these oscillators. As a result, the robot with the controller walks stably by changing its gait patterns in a wide range of locomotion speed. Moreover, it continues to walk even if a part of leg controller breaks down. The performance of the proposed control system is verified by numerical simulations.

Key Words: Locomotion control, multi-legged locomotion robot, central pattern generator model

1. はじめに

脚構造は移動ロボットの移動を実現させる一つの方法である。脚歩行は不整地でも移動することができるという利点を持つが、各脚が不連続に胴体を支えるため歩行の安定性が損なわれやすい。多脚歩行ロボットではこの問題を解消できる。しかし、ロボットの構造自体が複雑化してしまうという問題が生じる。

このような多脚歩行ロボットに対して、現代制御論から制御系を設計することには幾つか難点がある。すなわち、制御系は数学モデルを基礎にして設計されるためその構成は複雑になり、環境の変化に対して適応できない。一方、生物学的な観点から多脚歩行ロボットの制御の研究がなされている¹⁾。例えばCruse, H. et al. はナナフシの行動学の研究を基礎として6脚歩行に対して'walknet'という制御系を提案している²⁾。

動物の歩行はセントラル・パターン・ジェネレータ(CPG)³⁾によって生成され、制御されていると考えられている。CPGはセンサーフィードバックや脳からの入力がなくともリズムを生成することのできる神経集合である。本論文では10本の脚を持つ多脚歩行ロボットに対しCPGに基づく制御系を提案する。すなわち振動子を各脚に配置し、脚の周期運動を実現させる。振動子の位相は脚先の接地センサーからのシグナルによって制御される。

本論文の目的は、提案する制御系が歩行速度の変化に応じて歩行パターンを自律的に変化させることができる環境変化に対する適応性を持つこと、更に制御系の一部が故障したときにも性能をそれほど落とさず安定に歩行できる耐故障性を持つことを示すことである。

2. 運動方程式

Fig.1 に示すような多脚歩行ロボットについて考える。ロボットはそれぞれ2本の脚を持つ5つのモジュールから構成される。それぞれの脚は2リンクから成り、1回転自由度のジョイントで結合されている。それぞれのモジュールは3回転自由度を持つジョイントで結合されている。慣性空間に固定された単位ベクトル系を

$[a_0] = [a_{01}, a_{02}, a_{03}]$ とし、先頭のモジュール胴体に固定された単位ベクトル系を $[a_1] = [a_{11}, a_{12}, a_{13}]$ とする。ただし、進行方向に対してロール方向を1軸方向、ピッチ方向を2軸方向、ヨー方向を3軸方向とする。Fig.1のように先頭からモジュールを番号付け、左脚と右脚をそれぞれ脚1、脚2とする。各脚のジョイントとリンクも図のようにそれぞれ番号づける。 $[a_0]$ 系原点から $[a_1]$ 系原点までの距離ベクトルを $r_0 = [a_0]r_0$ と定義する。 $[a_i]$ 系の $[a_{i-1}]$ 系に対する角速度ベクトルを $\omega_i = [a_i]\omega_i (i = 1, \dots, 5)$ と定義する。 $[a_{i-1}]$ 系から $[a_i]$ 系への3-1-2Euler角を θ_i とする。また、モジュール*i*脚*j*リンク*k*のジョイント角を $\theta_{ik}^{(j)}$ とする。

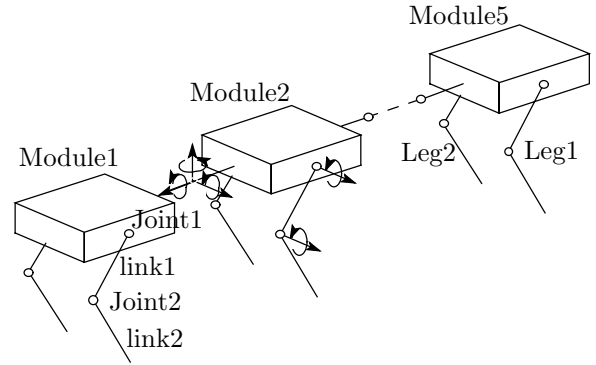


Fig.1 多脚歩行ロボットの概略図

状態変数を次のように定義する。

$$q^T = [r_{0m} \theta_{im} \theta_{ikm}^{(j)}] \quad (1)$$
$$i = 1, \dots, 5, j = 1, 2,$$
$$k = 1, 2, m = 1, 2, 3$$

状態変数 q に対する運動方程式はラグランジュの運動方程式から次のように得られる。

$$M\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = G + \sum (\tau_{ik}^{(j)}) + \Lambda \quad (2)$$

ただし、 M は慣性マトリクス、 $H(q, \dot{q})$ はコリオリ力や遠心力を含んだ非線形項、 G は重力項、 $\tau_{ik}^{(j)}$ はモジュール i 脚 j ジョイント k に加えられるアクチュエータのトルク、 Λ は脚先が床に接しているときに加えられる床からの反力である。

3. 歩行制御系⁴⁾

制御系は脚制御系と歩行パターン制御系から構成される (Fig.2)。脚制御系は、歩行パターン制御系から与えられる軌道運動を実現するように、脚のジョイントアクチュエータを動かす。歩行パターン制御系は各脚に配置された非線形振動子から構成される。そして、基準となる歩行パターンの指令値と各脚先の接地センサーからのフィードバック信号を受け取り、それらを基にして位相ダイナミクスから歩行パターンを構成し、脚制御系へ指令信号を送る。

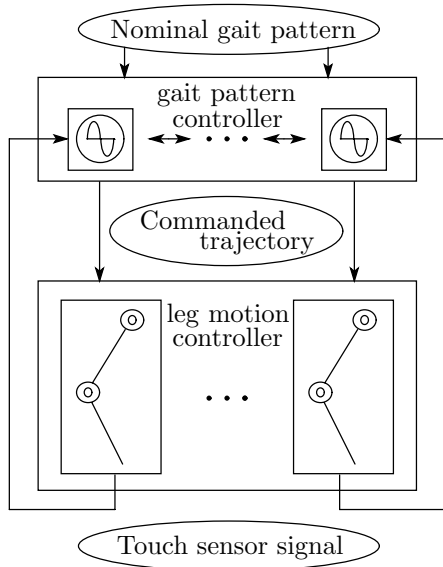


Fig.2 歩行制御系

まず、脚先の基準軌道を設計する。脚先の位置が遊脚相から支持脚相へ移る点を前 endpoint (AEP)、支持脚相から遊脚相へ移る点を後 endpoint (PEP) と定義する。基準となる AEP, PEP を座標系 $[a_0]$ において $\hat{\eta}_{iA}^{(j)}$, $\hat{\eta}_{iP}^{(j)}$ と表す。遊脚相の基準軌道は点 $\hat{\eta}_{iA}^{(j)}$ と点 $\hat{\eta}_{iP}^{(j)}$ を含んだ閉曲線 $\hat{\eta}_{iSw}^{(j)}$ で与えられ、支持脚相の基準軌道は点 $\hat{\eta}_{iA}^{(j)}$ と点 $\hat{\eta}_{iP}^{(j)}$ を含んだ直線 $\hat{\eta}_{iSp}^{(j)}$ で与えられる。

これらの軌道は振動子の位相の関数として与えられる。すなわち、モジュール i 脚 j に配置する振動子 (i, j) を次のように設定する。

$$z_i^{(j)} = \exp(j\phi_i^{(j)}) \quad (3)$$

ここで、 $z_i^{(j)}$, $\phi_i^{(j)}$ は振動子の状態と位相を表す。

AEP と PEP での振動子 (i, j) の基準位相 $\hat{\phi}_i^{(j)}$ を次のように設定する。

$$\hat{\phi}_i^{(j)} = \hat{\phi}_{iA}^{(j)} \quad \text{at AEP}, \quad \hat{\phi}_i^{(j)} = 0 \quad \text{at PEP} \quad (4)$$

基準軌道 $\hat{\eta}_{iSw}^{(j)}$ と $\hat{\eta}_{iSp}^{(j)}$ は振動子の基準位相 $\hat{\phi}_i^{(j)}$ の関

数であり、それぞれ次のように与えられる。

$$\hat{\eta}_{iSw}^{(j)} = \hat{\eta}_{iSw}^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) \quad (5)$$

$$\hat{\eta}_{iSp}^{(j)} = \hat{\eta}_{iSp}^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) \quad (6)$$

脚先の基準軌道 $\hat{\eta}_i^{(j)}$ はこれら 2 つの軌道を切り替えることで次のように与えられる (Fig.3)。

$$\hat{\eta}_i^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) = \begin{cases} \hat{\eta}_{iSw}^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) & 0 \leq \hat{\phi}_i^{(j)} < \hat{\phi}_{iA}^{(j)} \\ \hat{\eta}_{iSp}^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) & \hat{\phi}_{iA}^{(j)} \leq \hat{\phi}_i^{(j)} < 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

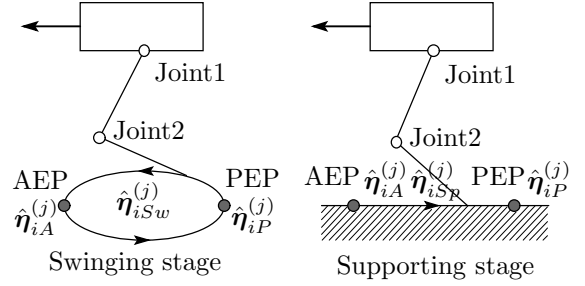


Fig.3 基準脚軌道

次に歩行パターン、すなわち振動子の位相差の設計を行う。振動子の基準位相ダイナミクスを次のように設定する。

$$\dot{\hat{\phi}}_i^{(j)} = \hat{\omega} \quad (8)$$

モジュール i 脚 j ジョイント k の相対角度 $\hat{\theta}_{ik}^{(j)}$ は、基準位相 $\hat{\phi}_i^{(j)}$ の関数として次のように表される。

$$\hat{\theta}_{ik}^{(j)} = \hat{\theta}_{ik}^{(j)}(\hat{\phi}_i^{(j)}) \quad (9)$$

各脚のジョイントに加えられるトルクは、次のようなローカル PD フィードバック制御を用いて与えられる。

$$\tau_{ik}^{(j)} = K_{Pk}(\hat{\theta}_{ik}^{(j)} - \theta_{ik}^{(j)}) + K_{Dk}(\dot{\hat{\theta}}_{ik}^{(j)} - \dot{\theta}_{ik}^{(j)}) \quad (10)$$

ここで、 $\tau_{ik}^{(j)}$ はモジュール i 脚 j ジョイント k に与えられるアクチュエータトルクであり、 K_{Pk} , K_{Dk} はフィードバックゲインである。

位相ダイナミクスを次のように与える。

$$\dot{\phi}_i^{(j)} = \hat{\omega} + g_{1i}^{(j)} + g_{2i}^{(j)} \quad (11)$$

ここで、 $g_{1i}^{(j)}$ は他の振動子との相互作用から得られる項であり、 $g_{2i}^{(j)}$ は脚先の接地センサーからのフィード

バックシグナルによるパルス的な項である。 $g_{1i}^{(j)}$ は次のようにして与えられる。

$$g_{1i}^{(j)} = -(-1)^j K(\phi_i^{(2)} - \phi_i^{(1)} - \gamma) \quad (12)$$

$g_{2i}^{(j)}$ は次のように与えられる。

$$g_{2i}^{(j)} = (\hat{\phi}_{iA}^{(j)} - \phi_{iA}^{(j)})\delta(t - t_{hsi}^{(j)}) \quad (13)$$

$g_{2i}^{(j)}$ によってモジュール i 脚 j が接地した瞬間、次のような手順がとられる。

1. モジュール i 脚 j の振動子の位相を $\phi_{iA}^{(j)}$ から $\hat{\phi}_{iA}^{(j)}$ に変える。
2. モジュール i 脚 j の基準軌道を基準遊脚軌道 $\hat{\eta}_{iSw}^{(j)}$ から基準支持脚軌道 $\hat{\eta}_{iSp}^{(j)}$ に変える。
3. 基準軌道 $\hat{\eta}_{iSp}^{(j)}$ のパラメータの一つである $\hat{\eta}_{iA}^{(j)}$ を $\eta_{iA}^{(j)}$ に置き換える。

ここで、 $\phi_{iA}^{(j)}$ をモジュール i 脚 j が接地した瞬間の位相とし、そのときの脚先の位置を $\eta_{iA}^{(j)}$ とする。 $t_{hsi}^{(j)}$ はモジュール i 脚 j が接地した瞬間の時刻である。

4. 数値解析

数値解析で用いるロボットのパラメータを次の表に示す。

Table 1 ロボットの物理パラメータ

胴体の長さ	0.13	[m]
胴体の質量 (モジュール 1,5)	0.25	[kg]
胴体の質量 (モジュール 2,3,4)	0.50	[kg]
リンク 1,2 の長さ	0.07	[m]
リンク 1,2 の質量	0.050	[kg]

数値シミュレーションにおいて基準歩幅 $\hat{S}_i^{(j)}$ を 0.03[m]、ジョイント 1,2 のバンド幅を 2[Hz] とする。 $g_{1i}^{(j)}$ 項は各モジュールの 2 つの振動子が同相になるように、つまり位相差 $\gamma = 0$ となるようにフィードバックゲイン K を十分大きく設定する。基準デューティ比 $\hat{\beta}$ をパラメータとして選び、環境の変化として歩行速度を変化させる。遊脚相の基準時間 \hat{T}_{Sw} は 0.3[s] とする。位相ダイナミクスの初期条件として、前後の振動子の位相差を $2\pi/5$ にする。

アクチュエータのエネルギー消費量 E_c と実現した歩行速度を用いてこの制御系の性能を評価する。エネルギー消費量 E_c は次のように定義される。

$$E_c = \frac{\int_t^{t+T_\beta} \sum_{i,j,k} \tau_{ik2}^{(j)} \omega_{ik2}^{(j)} dt}{S_\beta} \quad (14)$$

ここで、 S_β は歩行周期 T_β の間に進んだ距離である。

性能を比較するために、歩行パターンを固定した制御系についても調べる。固定した歩行パターンとしては前後の振動子の位相差を $2\pi/5$ に固定したウェーブパターンを用いる。

Fig.5 はパラメータ $\hat{\beta}$ の時系列データを示し、横軸は歩数を表す。まず $\hat{\beta}$ を減少させ、そして増加させる。

これはロボットの歩行をまず加速させ、そして減速させていることに対応する。Fig.6 はパラメータ $\hat{\beta}$ に対する歩行速度と、エネルギー消費量を示している。ただし、'Prop. ac.', 'Prop. dec.' はそれぞれ提案する制御系での加速時と減速時での値であり、'Fix.' は歩行パターンを固定した場合での値である。また 'Theor.' は基準歩行速度である。Fig.6(a) において、歩行パターンを固定した制御系では速度の速い領域で性能が悪くなっているが、提案する制御系では広い速度領域で良い速度性能が得られることがわかる。Fig.6(b) において、歩行パターンを固定した制御系では速度を速くするに従ってエネルギー消費量が増加しているが、提案する制御系では広い速度領域でエネルギー消費量がほぼ一定に保たれるのがわかる。これらの図から、歩行パターンを固定した制御系では速度の速い領域においてスムーズな歩行は実現できないが、提案する制御系では広い速度領域においてスムーズな歩行が実現されると考えられる。

Fig.7,8 は提案する制御系で歩行速度に従って実現される歩行パターンを示したものである。これより、歩行パターンを固定した制御系では環境変化に対して適応性がないが、提案する制御系では環境変化に適応して歩行パターンを作り出している様子がわかる。

最後に、制御系の一部が故障したときの性能の悪化について調べる。故障はモジュール#の脚制御系が故障し、脚にトルクが働かない状態になる場合を想定する。結果として、そのモジュールの振動子にはフィードバックシグナルが入らず、自由に振動してしまう状態になる。

Fig.9 は実現する歩行速度の変化を示したものである。ここで 'normal' と 'failure (L#)' はそれぞれ故障前とモジュール#の脚が故障したときの値である。歩行パターンを固定した制御系に比べて、提案する制御系では性能の悪化が押さえられることがわかる。

Fig.10 は各振動子のモジュール 5 に対する位相差の変化を示したものである。ここで矢印は故障が起こった瞬間を示すものである。この図から、位相パターンを変化させることで性能の悪化を押さえられていることがわかる。

参考文献

- 1) Special Issue on Biomimetic Robotics, Robotics and Autonomous Systems, vol. 30, (2000).
- 2) Cruse, H. Kindermann, Th., Schumm, M., Dean, J. and Schmitz, J.: Walknet - a biologically inspired network to control six-legged walking, Neural Networks, vol. 11, pp. 1435-1447 (1998).
- 3) Grillner, S.: Neurobiological basis of rhythmic motor acts in vertebrates, Science, vol. 228, pp. 143-149 (1985).
- 4) Kazuo Tsuchiya, Katsuyoshi Tsujita, Manabu Kawakami, Shinya Aoi: An emergent control of gait patterns of legged locomotion robots, IAV2001, pp. 271-276 (2001).

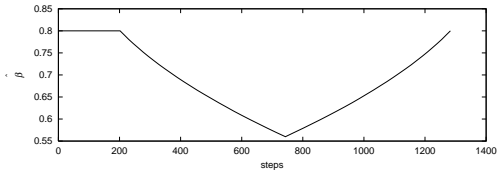
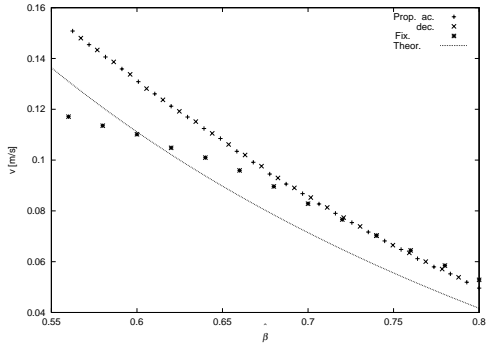
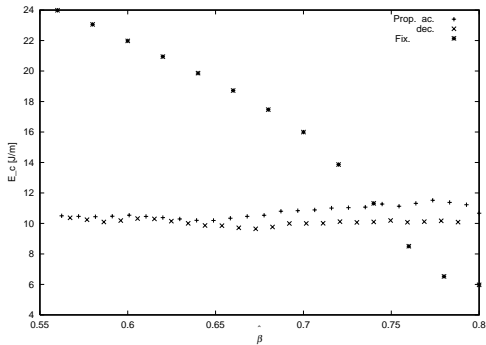


Fig.4 $\hat{\beta}$ の時間履歴



(a) 歩行速度



(b) エネルギー消費量

Fig.5 制御系の性能

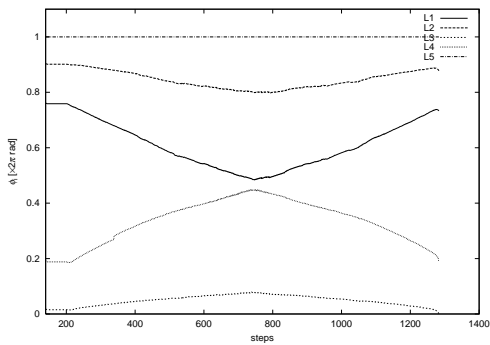
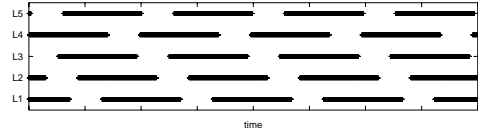
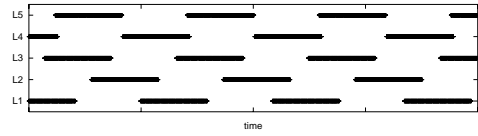


Fig.6 モジュール 5 に対する振動子の位相差



(a) $\hat{\beta} = 0.70$



(b) $\hat{\beta} = 0.50$

Fig.7 歩行パターン (足跡)

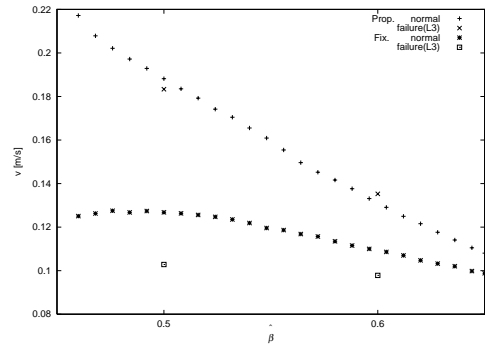


Fig.8 歩行速度 (故障時)

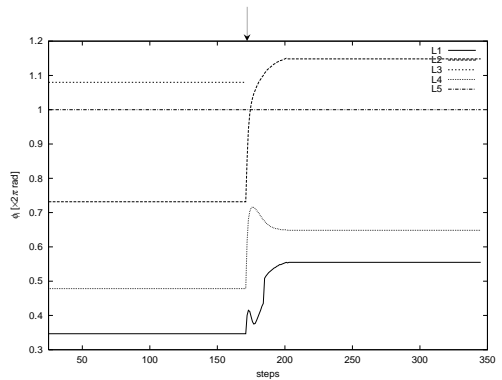


Fig.9 モジュール 5 に対する振動子の位相差 (故障時, $\hat{\beta} = 0.5$)