

自律分散システムとしての歩行ロボット (CPGモデルにもとづく脚歩行ロボットの歩行制御)

土屋和雄 辻田勝吉 (京都大学)

Locomotion Robot as a Decentralized Autonomous System

Kazuo Tsuchiya, Katsuyoshi Tsujita (Kyoto University)

Abstract: This paper deals with a class of a quadruped locomotion robot. The locomotion control system is composed of nonlinear oscillators. The robot with the controller may be considered as a decentralized autonomous system if each of legs with oscillators is identified with a motion unit. The characteristic behaviors of the robot such as real-time formation of adaptive gait patterns etc. are interpreted as the inherent nature of a decentralized autonomous system.

Keywords: quadruped locomotion robot, decentralized autonomous system, nonlinear oscillators

1. はじめに

システム科学において、自律分散システムと呼ばれるシステム概念が提案されている。自律分散システムは自律的な要素から構成されるシステムである。ここで自律的な要素とは、心理学者L.S.Vygotskyの提案した”単位”に近い概念である。L.S.Vygotskyは”単位”とは要素とは異なり全体に固有な基本的特質の全てをそなえ、それ以上にはこの統一体の生きた部分として分解できないものと定義した¹⁾。自律分散システムは要素間の相互作用及び環境との相互作用を通して、環境に対応した時空間パターンを形成し、形成されたパターンを介して、機能を実現する。

生物の遊泳、歩行などのリズム運動に関し、その形成・実現システムとしてCentral Pattern Generator(CPG)の概念が提案されている。CPGはニューロンを要素とするシステムであり、ニューロンは単独あるいは、幾つかが組み合わせられて振動子を構成する。構成された振動子系は外部入力がなくとも定常的な振動パターンを形成するが、上部入力あるいは末梢からのフィードバック信号に敏感であり、その影響のもとで多様な振動パターンを形成する。現在、CPGは節足動物から哺乳動物まで広くその存在が認められている。CPGはニューロンで構成された振動子を単位とする自律分散システムと考えることができる。

一方、行動生理学者H.Cruiseはナナフシの歩行運動の研究を行っている²⁾。彼はナナフシの脚を末梢からのフィードバック信号のもとで自律的に遊脚相、支持脚相の切りかえを行う器官としてとらえ、各脚の間の相互作用を詳細に解析し、脚全体が形成・実現する歩行パターンの分析を行っている。ここでは、

ナナフシの歩行パターンを形成・実現するシステムは脚運動を単位とする自律分散システムととらえることができる。

脚歩行ロボットの歩行制御システムを自律分散システムで構成しようとする研究が行われている。非線形振動子を単位とする自律分散システムを用いた脚歩行ロボットの歩行制御システムに関する研究は矢野等³⁾、木村等⁴⁾がある。またH.Cruise等⁵⁾は、彼らのナナフシの歩行に関する研究をもとに、自律的な往復運動を行う脚を単位とした、自律分散システムによって6脚歩行ロボットの歩行制御システムを構成している。

我々は4脚歩行ロボットの歩行制御の研究を行っている⁶⁾。4脚歩行ロボットのタスクとして、床面の状態変化、歩行速度の変化等、力学的環境変化に対して適応した歩行パターンを形成・実現して安定して歩行することを設定した。この種の機能を実現するロボットの歩行制御システムを脚と対応する振動子を構成単位とする自律分散システムで構成することを試みている。その概要を述べる。

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ロボットを考える。各脚に1~4の番号を付ける。各脚は2個のリンクから構成されている。状態変数 q を用い、運動方程式は以下のように求められる。

$$K\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = G + \tau + \Lambda \quad (1)$$

$$q^T = \left[r^{(0)T} \quad \theta^{(0)T} \quad \theta_j^{(i)T} \quad \dots \quad \theta_3^{(4)T} \right] \quad (2)$$

ここで、 $r^{(0)}, \theta^{(0)}$ は胴体の並進、回転変位、 $\theta_j^{(i)}$ は

脚 i 、リンク j の回転角で与え、 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。

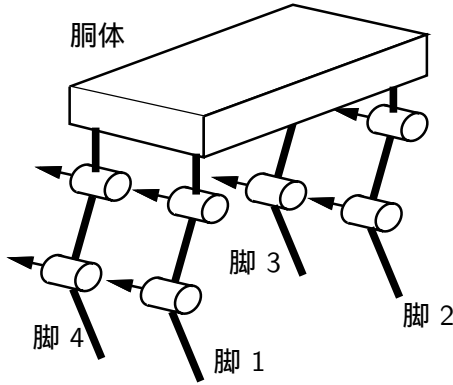


Fig. 1: 四脚歩行ロボット

3. 歩行制御系

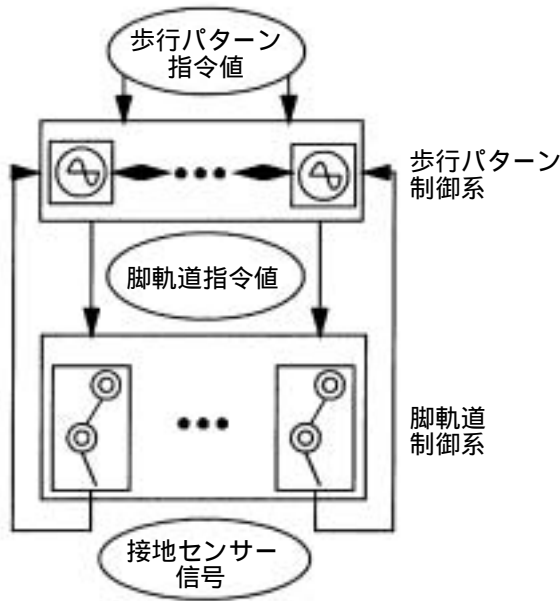


Fig. 2: 提案する制御系の構成

制御系の構成を Fig. 2 に示す。制御系は、脚軌道制御系と歩行パターン制御系から構成されている。脚制御系は各脚の関節に取り付けられたモータとその駆動系から構成され、歩行パターン制御系は各脚に対応した振動子から構成される。各脚は振動子からの指令によって、それぞれ独立に楕円軌道の往復運動 (遊脚相) を行うが、脚先が床面に接地すると胴体に平行な一方向の直線運動 (支持脚相) に切り替わる (脚先が接地点に固定されているとき、この脚の運動は胴体の並進運動を引き起こす)。そして脚先が床面

から離脱すると再び楕円軌道上の往復運動に切り替わる。この脚の運動を次のように表す。

脚 i の振動子の状態を以下のように表す。

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

胴体座標系で表した脚先の基準軌道 $\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ を、対応する振動子の位相の関数として与える (Fig. 3)。ここで AEP、PEP は着地点と離脱点である。

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

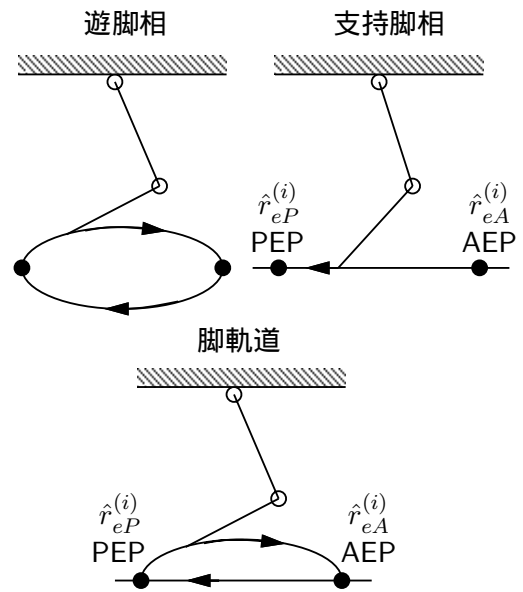


Fig. 3: 脚先の軌道

脚先の運動 $\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ に対応した脚 i のジョイント j の目標運動を以下のように表す。

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

各脚の各関節の制御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る。

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

このような振動子の指令によって、それぞれ独立に遊脚相・支持脚相の間の往復運動を行う脚・振動子をここでは運動単位と考える。

歩行パターンは振動子の位相差で決定される。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り、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 (Fig. 4)。同図において、太線は各脚の支持脚相期間を表す。歩行パターン m を振動子間の位相差マトリクス $\Gamma^{(m)}$ を用いて以下のように表す。

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

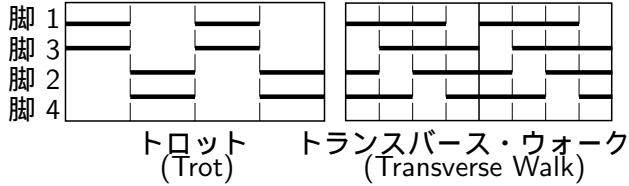


Fig. 4: 歩行パターン

環境に対応した歩行パターンを形成するため脚 i に対応したの振動子の位相 $\phi^{(i)}$ に対し、位相ダイナミクスを以下のように設計する。

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g_1^{(i)} + g_2^{(i)} \quad (8)$$

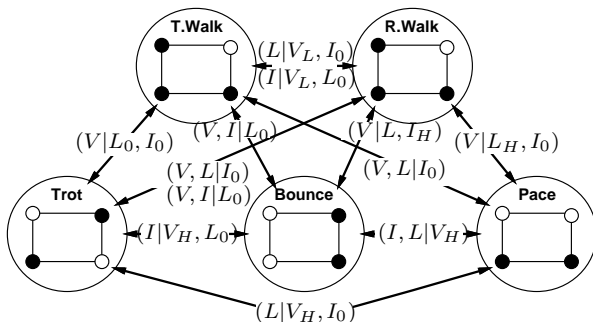
$$g_1^{(i)} = -K (\phi^{(i)} - \phi^{(j)} - \Gamma_{ij}^{(m)}) \quad (9)$$

$$g_2^{(i)} = [\hat{\phi}^{(i)} - \phi_A^{(i)}] \delta(t - t_0) \quad (10)$$

ここで、 t_0 は脚 i の着地時刻である。

4. シミュレーション結果

Fig. 4 は、シミュレーション結果を歩行速度 V 、荷重位置 L 、床面傾斜角 I を環境パラメータとして、その変化に対応して形成される歩行パターンを状態遷移図としてまとめたものである。荷重オフセットは荷重 (1.0[kg]) を胴体中心より左右にずらして搭載することを意味する。Fig. 4 において各円は歩行パターンを表わし、それを結ぶ矢印は両状態を遷移することを表わし、(|) は遷移する条件を示している。例えば T.Walk(Transverse walk) は歩行速度 (V) を大きくすることにより Trot に遷移する。逆に Trot は V を小さくすることにより T.Walk に遷移する。



Walking velocity $V = (V_L, V_H)$

Load offset $L = (L_0, L_H)$

Inclination of the ground $I = (I_0, I_H)$

Fig. 4: 歩行パターン状態遷移図

5. 得られた成果と今後の課題

行動生理学者 M.Shik⁷⁾ はトレッドミルを用いた脊髓ネコ (脊髓と上位中枢の連絡を絶ったネコ) の歩行実験を行い、次の結果を得た；脊髓ネコをトレッドミル上に乗せ、脳歩行誘導野に電気刺激を与えると歩行を始める。トレッドミルの速度を上げていくと歩行パターンはウォークからトロット、ギャロップへと変化した。これは、脊髓の CPG で形成されたリズム運動が末梢からのフィードバック信号によって修飾され、環境に対応した歩行パターンとして実現されたものと考えられる。一方、我々の 4 脚歩行ロボットの実現した歩行パターンの遷移 (Fig. 4) は脚・振動子を運動単位とする歩行制御系に形成されるリズム運動が、脚先の接地センサー信号によって調整され、環境に適応した歩行パターンとして実現したものであり、M.Shik の実験と対応するものと考えられる。

脊髓ネコのトレッドミル上の歩行運動は正常なネコの歩行運動に比べ、ぎこちのないものである。これは脊髓ネコでは上位中枢、特に小脳からの制御信号がなく、小脳による適応制御が行われていないことによる。我々の 4 脚歩行ロボットにおいても、より巧みな歩行運動を実現するには、小脳に対応した適応制御機能を組み込むことが必要である。これは各脚において、振動子の位相と各関節の関節角の写像に含まれるパラメータの調整則として実現できると考えられる。

さて、動物行動学者 N.Tinbergen⁸⁾ は動物の目標指向性行動に対して階属モデルを提案した。すなわち、目標指向性行動は相互に代替可能な一団の行動パターンの中から探索的行動を介して、ある行動パターンが選択され、実現されることによって行われる。一方、神経行動学者 S.Grillner⁹⁾ は CPG モデルに関し、単位 CPG 仮説を提案している。すなわち、CPG は多数の単位 CPG で構成されており、遊泳、歩行における種々の行動パターンは、それぞれの行動パターンに対応した単位 CPG の組み合わせが活性化され実現される。

以上の事柄は次のことを示している。すなわち、

ニューロンを要素とする CPG はニューロンで構成された振動子を運動単位とする自律分散システムとしてとらえたとき、環境に適応した歩行パターンの形成・実現を適切に分析、構成することができた。更に CPG を、運動パターンを行動単位とした自律分散システムとしてとらえたとき、視覚誘導歩行等、随意運動すなわち目標指向性行動の適切な分析と構成が可能になると考えられる。

我々の 4 脚歩行ロボットにおいて、目標指向性行動を実現するためには、幾つかの課題を解決しなければならない。

まず、我々の 4 脚歩行ロボットは環境変化に対応してその歩行パターンを変化させるが、その変化は連続的なものである。歩行パターンを行動単位とする自律分散システムを構成するためには、連続的に変容する歩行パターンを分節化し、規範化しなければならない。これは CPG を力学系としてみたとき、代表的な歩行パターンをその中に安定なポイントアトラクターとして埋め込むことを意味する。この操作は適当な学習課程を通して実現できると考えられる。次に、歩行パターンを行動単位とする CPG において、環境に応じ、目標指向的な行動パターンを効率的に探索、実現する方法を組み込む必要がある。しかし、自律分散システムにおける効率的な実時間探索法は未だ充分には研究されていない。今後の興味ある研究課題と考えられる。

spired network to control six-legged walking,” *Neural Networks*, Vol.11, pp.1435/1447(1998)

- [6] K.Tsujita, K.Tsuchiya and Onat: “Adaptive gait pattern control of a quadruped locomotion robot,” *Proc. of the 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.2318/2325, Maui, Hawaii, USA, Oct.29-Nov.03 2001
- [7] M.Shik,G.N.Orlovskii and F.V.Severin: “Organization of locomotion synergism,” *Biophysics*, 13, pp.127/135(1966)
- [8] N.Tinbergen: “The Study of Instinct,” Oxford Univ. Press, (1951)
- [9] S.Grillner: “Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrates,” *Science*, Vol.228, pp.143/149(1985)

参考文献

- [1] ヴィゴツキー: “思想と言語,” 新読書社, (2001)
- [2] H.Cruise: “The functional sense of central oscillations in walking,” *Biol.Cybern.*86, pp.271/280(2002)
- [3] K.Akimoto, S.Watanabe and M.Yano: “An 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)
- [4] H.Kimura, K.Sakaura and S.Akiyama: “Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator,” *Proc.of IROS'98*, Vol.1, pp.50/57(1998)
- [5] H.Cruise, Th.Kindermann, M.Shumm, J.Dean and J.Schmitz: “Walknet - a biologically in-