

Central Pattern Generator モデルに基づく四脚歩行ロボットの歩行制御

土屋 和雄* 辻田 勝吉*

Locomotion Control of a Quadruped Locomotion Robot based on Central Pattern Generator Model

Kazuo Tsuchiya* and Katsuyoshi Tsujita*

Key Words: Quadruped locomotion robot, Locomotion control, Gait pattern control, Central pattern generator

1. ま え が き

未知な環境の中で行動を通して環境認識を行ない、環境認識にもとづいて行動する機械システムを自律行動機械システム(自律行動ロボット)と呼ぶ。自律行動機械システムの開発は現在の技術課題の1つである。

動物の運動の特徴をロシアの動物行動学者 N.Bernstein は多数の筋、骨格系が協調して、状況及び行動目的に応じた多様な行動パターンを形成することにあると指摘した^[1]。現在、この動物の運動の特徴は動的システム理論にもとづいて、J.A.S. Kelso らによってモデル論的な研究が行われている^[2]。彼らは、動物の運動の特徴を problem of complexity of substance, problem of complexity of pattern とまとめ、これらの特徴を環境からの入力によりその構造を変化することのできる適応機能を持った要素から構成される非線形システムにおけるパターン形成として説明しようとしている。

一方、自律行動機械システムの開発は N.Bernstein の指摘した動物の行動の特徴を実現するシステムを工学的に作り上げることである。E.von Holst は、トレッドミルを用いた小馬の歩行実験を行ない、その特徴を次のようにまとめた^[3]：小馬はある歩行速度において、いくつかの歩行パターンを変化させ安定に歩行することができる。しかし、通常の歩行では酸素消費量の多い歩行パターンを避け、酸素消費量の少ない歩行パターンを選択し歩行を行なっている。我々は E.von Holst の実験結果を参考にして研究対象とする自律行動機械システムとして四脚歩行ロボットを取り上げ、そのタスクとして床面の状態の変化、歩行速度の変化等、力学的な環境変化に適応した歩行パターン

を自発的に形成・実現して安定に歩行することと設定し、この種の自律行動機械システムの構成原理を明らかにすることを考えた。対象とする四脚歩行ロボットを図 1 に示す。このロボットは各脚に 2 関節、胴体に 1 関節の運動自由度を持つ。センサーとして関節角センサーのほかに脚先の接触センサーを持つ。

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困難である。一方、Bottom-up approach は動物行動学にもとづく方法である。神経行動学の研究によれば、動物の歩行運動は Central Pattern Generator (CPG) で形成・制御されていると考えられる^[4]。CPG は非線形振動子系でモデル化される。CPG は外部入力のない状態で定常的な振動パターンを形成するが、脚先の接地センサー入力あるいは上部入力等外部入力に敏感であり、その影響のもとで多様な振動パターンを形成する。

対象とする四脚歩行ロボットの運動制御系を CPG 原理に基づいて設計する^[5]。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。制御系は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及びハードウェア実験で検証する。

原稿受付

*京都大学 工学研究科

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

2. モデル

図 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 個のリンクから構成されている。

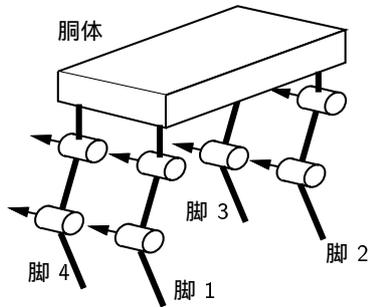


図 1. 四脚歩行ロボット

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。

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

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

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。

3. 歩行制御系の設計

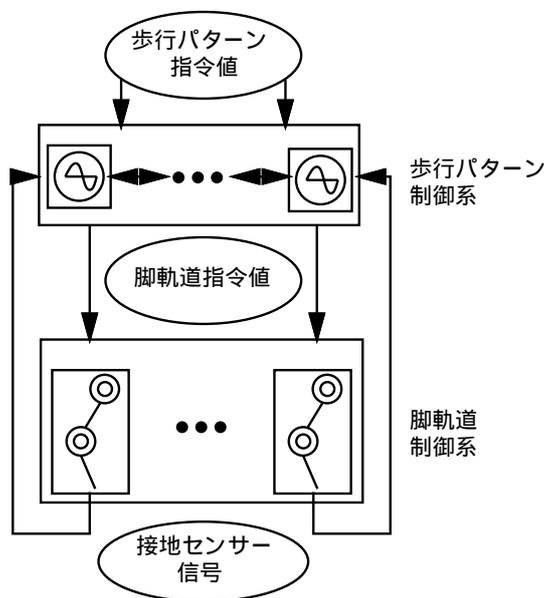


図 2. 提案する制御系の構成

制御系の構成を 図 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。脚軌道制御系は、歩行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対応した振動子が備えられており、振動子は振動子間の相互作用ととも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。歩行パターン制

御系は、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を生成する。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。

3.1 歩行設計

まず、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を、対応する振動子の位相の関数として与える。すなわち、脚 i の脚先の目標軌道 $\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ を遊脚軌道 $\hat{r}_{eF}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ 及び支持脚軌道 $\hat{r}_{eS}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ 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する。ここで、 $*$ は基準値を表す (図 3)。

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

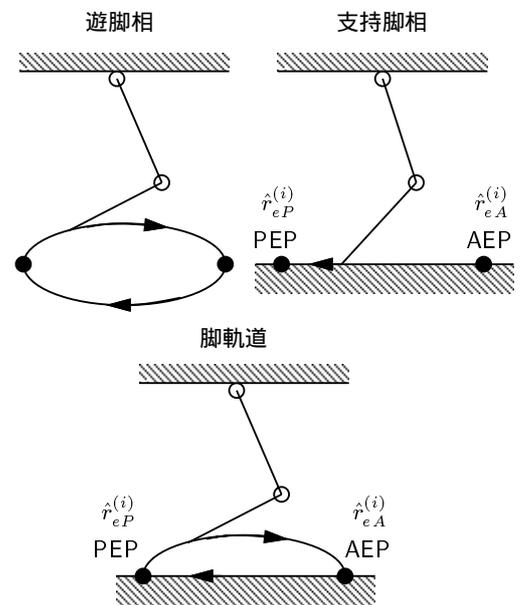


図 3. 脚先の軌道

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 $\hat{\beta}^{(i)}$ 、脚 i の基準歩幅 $\hat{S}^{(i)}$ 、基準歩行速度 \hat{v} および基準歩行周期 \hat{T} は以下の関係で結ばれている。

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

$$\hat{S}^{(i)} = \hat{r}_{eA}^{(i)} - \hat{r}_{eP}^{(i)} \quad (6)$$

$$\hat{v} = \frac{\hat{S}^{(i)}}{\hat{\beta}^{(i)}\hat{T}} \quad (7)$$

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 (図 4)。同図において、太線は各脚の支持脚相期間を表す。一般に、歩行パターン m は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ことができる。

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

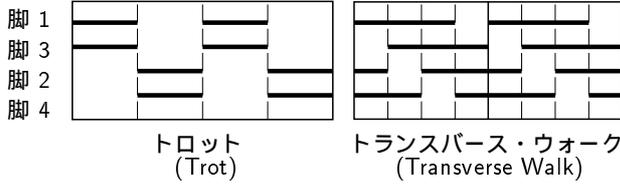


図 4. 歩行パターン

3.2 歩行制御

脚 i のジョイント j の目標運動を以下のように表す。

$$\hat{\theta}_j^{(i)} = \hat{\theta}_j^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)}) \quad (9)$$

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。

$$\tau_j^{(i)} = K_{Pj}(\hat{\theta}_j^{(i)} - \theta_j^{(i)}) + K_{Dj}(\dot{\hat{\theta}}_j^{(i)} - \dot{\theta}_j^{(i)}) \quad (10)$$

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。

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g_1^{(i)} + g_2^{(i)} \quad (11)$$

$$g_1^{(i)} = -K(\phi^{(i)} - \phi^{(j)} - \Gamma_{ij}^{(m)}) \quad (12)$$

$$g_2^{(i)} = [\dot{\phi}^{(i)} - \dot{\phi}_A^{(i)}] \delta(t - t_0) \quad (13)$$

ここで、 t_0 は脚 i の着地時刻である。

4. 数値及びハードウェア実験結果

4.1 数値実験結果

基準歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ を Transverse walk $\Gamma^{(1)}$ に固定し、デューティ比 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。基準遊脚相期間を 0.2 [sec] とした。

実現される歩行パターンと基準歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ との近さを (14) 式で定義される近さ $D^{(m)}$ をデューティ比をパラメータとして求めた結果を図 5 に示す。

$$D^{(m)} = \frac{1}{4} \text{trace}(\widehat{W}^{(m)T} W) \quad (14)$$

$$W_{ij} = \frac{\langle \zeta_i \zeta_j \rangle}{\sqrt{\langle \zeta_i^2 \rangle} \sqrt{\langle \zeta_j^2 \rangle}} \quad \langle * \rangle = \int * dt$$

$$\zeta_i = \begin{cases} 1 & ; \text{遊脚相期間} \\ \frac{1}{1-\beta} & \\ -\frac{1}{\beta} & ; \text{支持脚相期間} \end{cases}$$

並進歩行速度を上げる（デューティ比 β 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。一方、図 6 は (15) 式で定義される単位移動距離あたりのエネルギー消費を、歩行パターンを Transverse walk に固定した場合と提案する制御系とで比較したものである。

$$E_c = \frac{\langle \sum_{i,j} \tau_j^{(i)} \theta_j^{(i)} \rangle}{\langle v \rangle} \quad (15)$$

これらの図から提案する制御系における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。図 7 は、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の状態遷移図を表す。ここで、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。図 7 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。そして、これらの遷移の結果、制御エネルギーの上昇が抑えられていることが示されている。すなわち、この四脚歩行ロボットは E.von Holst の小馬の歩行特性を人工的に一部実現していると考えられる。

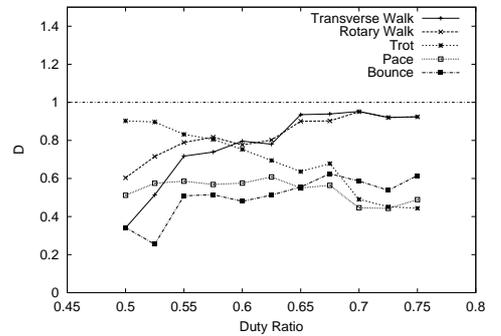


図 5. 歩行パターンの類似度 $D^{(m)}$

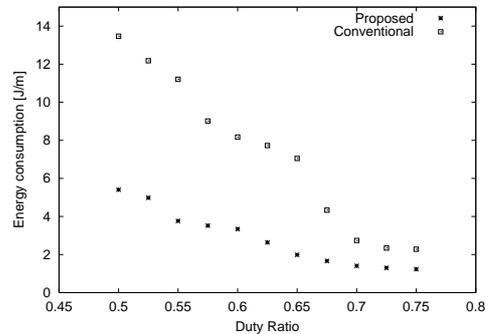
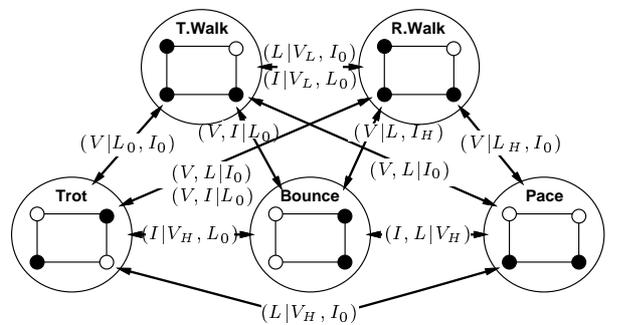


図 6. エネルギー消費 E_c



Walking velocity $V = (V_L, V_H)$
 Load offset $L = (L_0, L_H)$
 Inclination of the ground $I = (I_0, I_H)$

図 7. 歩行パターン状態遷移図

4.2 ハードウェア実験結果

ハードウェア実験装置の概観,及びハードウェア実験装置の構成をそれぞれ 図 8,9 に示す.基準歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ を Transverse walk $\Gamma^{(1)}$ に固定し,歩行中にデューティ比 β を変化させた場合の実験結果を 図 10 に示す.(a) では,デューティ比は,10 [sec] から 15 [sec] の間に 0.75 から 0.50 まで変化させている.逆に (b) では,デューティ比は,10 [sec] から 15 [sec] の間に 0.50 から 0.75 まで変化させている.図 9 から,提案する制御系は,歩行中にデューティ比が変化した場合,すなわち歩行速度が変化した場合,その歩行速度に応じて適応的に歩行パターンを変化させ,安定な歩行を実現していることが判る.



図 8. ハードウェア実験装置概観

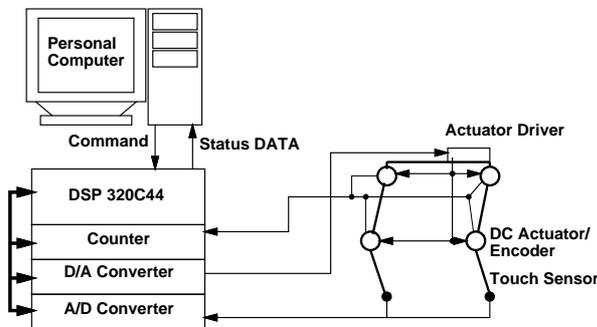


図 9. ハードウェア実験装置構成

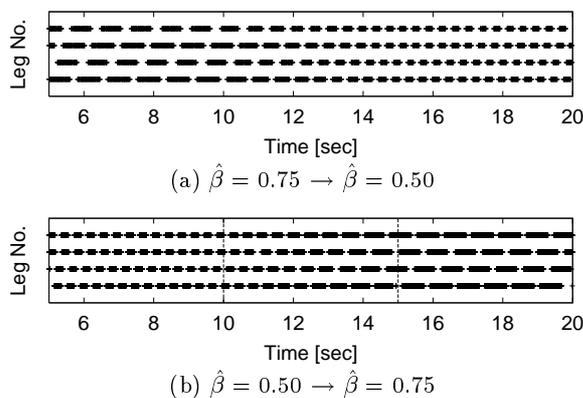


図 10. 歩行パターン

5. ま と め

提案する制御系によって制御されるロボットは振動子で構成された力学系として次のような解釈ができる;振動子は連続的な相互作用とパルスの相互作用で結合している.連続的な相互作用はポテンシャルから導かれ,ある与えられた歩行パターンを実現する方向に働く.一方,パルスの相互作用は脚先の接地センサー信号によってタイミングが取られる.脚先の接地タイミングは胴体の並進,回転変位によって決定され,胴体の並進,回転変位は各脚の変位によって決定される.すなわち,パルスの相互作用は胴体の変位を介して全ての振動子が相互作用を行なうパルス型平均場相互作用であり,環境に適応した胴体の運動を実現する方向に働く.このような異なった性質を持つ相互作用で結合された振動子力学系が環境に対応した安定な時空間パターンを形成することが,提案する制御系によって制御されるロボットが環境変化に適応した歩行パターンを形成し歩行することを可能にしている.

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] N.A.Bernstein: "Co-ordination and Reguration of Movements," Oxford, Pergamon Press, New York, 1967
- [2] J.A.S.Kelso: "Dynamic Patterns: The Self Organization of Brain Behavior," Boston, MIT Press, 1995
- [3] D.F.Hoyt and C.R.Taylor: "Gait and Energetics of Locomotion in Horses," Nature, 292, pp.239-240, 1981
- [4] S.Grillner: "Neurobiological Bases of Rhythmic Motor Acts in Vertebrate," Science, Vol.228, pp.143-149, 1985
- [5] K.Tsujita, K.Tsuchiya and A.Onat: "Adaptive Gait Pattern Control of a Quadruped Locomotion Robot," Proc. of IROS 2001, pp.2318-2325, 2001

土屋和雄 (Kazuo Tsuchiya)

1943 年 8 月 9 日 生 . 1966 年 京 都 大 学 工 学 部 航 空 工 学 科 卒 業 , 1968 年 同 大 学 院 工 学 研 究 科 修 士 課 程 修 了 . 同 年 4 月 三 菱 電 機 (株) 入 社 . 1990 年 4 月 大 阪 大 学 工 学 部 電 子 制 御 機 械 工 学 科 教 授 , 1995 年 4 月 京 都 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 航 空 宇 宙 工 学 専 攻 教 授 と な り , 現 在 に 至 る . 宇 宙 工 学 , 非 線 形 シ ス テ ム 論 に 関 す る 研 究 に 従 事 . 工 学 博 士 . 計 測 自 動 制 御 学 会 , AIAA な ど の 会 員 . (日 本 ロ ボ ッ ト 学 会 正 会 員)

辻田勝吉 (Katsuyoshi Tsujita)

1967 年 1 月 26 日 生 . 1991 年 大 阪 大 学 工 学 部 電 子 制 御 機 械 工 学 科 卒 業 , 1993 年 同 大 学 院 工 学 研 究 科 修 士 課 程 修 了 . 同 年 4 月 同 大 学 工 学 部 電 子 制 御 機 械 工 学 科 助 手 , 1996 年 4 月 京 都 大 学 大 学 院 航 空 宇 宙 工 学 専 攻 助 手 と な り , 現 在 に 至 る . 歩 行 ロ ボ ッ ト な ど の 研 究 に 従 事 . 工 学 修 士 . 日 本 機 械 学 会 , 計 測 自 動 制 御 学 会 な ど の 会 員 . (日 本 ロ ボ ッ ト 学 会 正 会 員)