解 説

Central Pattern Generatorモデルに基づく4脚歩行ロボットの歩行制御

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

土 屋 和 雄* 辻 田 勝 吉* *京都大学工学研究科

Kazuo Tsuchiya* and Katsuyoshi Tsujita* *Graduate School of Engineering, Kyoto University

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い、それに基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一つである。

動物の運動の特徴をロシアの動物行動学者 Bernstein は多数の筋、骨格系が協調して、状況およ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基づいて、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、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明らかにしようとしている。自律行動機械システムの開発は 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。

Hoyt らは、トレッドミルを用いた小馬の歩行実験を行い、その特徴を次のようにまとめた [3]：小馬は広い歩行速度の範囲でそ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速度を避け、酸素消費量の少ない歩行速度を選択し歩行を行っている。我々は Hoyt ら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脚歩行ロボットを取り上げ、そのタスクとして床面の状況の変化など、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4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。

脚歩行ロボットの歩行制御系の設計法として二つの方法、Top-down approach, Bottom-up approach がある。Top-down approach は制御理論に基づく方法である；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基づく制御法であり、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 は動物行動学に基づく方法である。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4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およびハードウェア実験で検証する。

2. モ デ ル

図1のような4本の脚と胴体から構成される4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。

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。

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

$$q^T = \begin{bmatrix} r_{-1}^T & \theta_{0-1}^{(0)T} & \theta_{j,j-1}^{(i)T} & \cdots & \theta_{32}^{(4)T} \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

原稿受付 2002 年 3 月 6 日

キーワード：Quadruped Locomotion Robot, Locomotion Control, Central Pattern Generator, Gait Pattern

*〒 606-8501 京都市左京区吉田本町

*Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto

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

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振動子が備えられている。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

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 の振動子の状態は以下のように表す。

図1 4脚歩行ロボット

図2 提案する制御系の構成

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

脚 i の脚先の目標軌道 $\hat{r}_e^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ を遊脚軌道 $\hat{r}_{eF}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ および支持脚軌道 $\hat{r}_{eS}^{(i)}(\hat{\phi}^{(i)})$ 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、 $\hat{*}$ は基準値を表す（図3）。

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

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。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。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。

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

図3 脚先の軌道

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 の振動子の位相ダイナミクスを以下のように設計する.

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

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

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

ここで, t_0 は脚 i の着地時刻である. 式 (12) において, 第 2 項 $g_1^{(i)}$ はポテンシャルから導かれる相互作用であり, 与えられた歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ を実現するように位相を調整する. 一方, 第 3 項 $g_2^{(i)}$ は脚先に取り付けられた接地センサー信号によるパルス的なフィードバック項であり, 胴体の運動状態に位相を変化させる効果を持つ.

4. 数値およ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. 基準遊脚相期間を $T = 0.2$ [sec] とした.

実現される歩行パターンと基準歩行パターン $\Gamma^{(m)}$ との近さを式 (14) で定義される近さ $D^{(m)}$ 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.

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

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

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

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

並進歩行速度を上げる (デューティー比 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 は式 (15) 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分かる. 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し, それを結ぶ矢印は両状態を遷移することを表し, (|) 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

図7 歩行パターン状態遷移図

図8 ハードウェア実験装置概観

の上昇が抑えられていることが示される。すなわち、この4脚ロボットは Hoyt ら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。

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、およ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

図9 ハードウェア実験装置構成

図10 歩行パターン

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分かる。

謝辞 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」および戦略的研究推進事業「ロボットの脳を創る」の一環として行った。

参考文献

- [1] N.A. Bernstein: Co-ordination and Regulation 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, vol.292, pp.239-240.
- [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)