

自律行動機械システムの構成原理

京都大学 工学研究科 土屋和雄 辻田勝吉

A Principle of Design of an Autonomous Mobile Robot

Kazuo TSUCHIYA and Katsuyoshi TSUJITA
Graduate School of Engineering, Kyoto University

Abstract An autonomous robot is a robot which carries out a task in a real world recognizing an unstructural environment through actions. This paper explains a principle of design of an autonomous robot: The information processing system of this class of robot composed of modules, recognition module and interface module. Three modules are designed by dynamical systems with internal models. As an example, motion control module is explained in more details. The module is composed of nonlinear oscillators with mutual interactions and feedback signals from the touch sensors mounted on the legs. Through the mutual entrainments, the gait patterns adapted to the environments are formed. It is shown by the experiment that the robot with the controller can locomote stably in a changing environment.

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、それにもとづいて目的遂行のための行動計画を立て実現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ことを指摘した。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。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 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。

2 自律行動機械システムの設計原理

自律行動機械システムの情報処理系の機能は種々のセンサー信号から目的遂行のための行動計画を立て、それを実現する運動制御指令値を求めることであり、その機能を実現するための計算原理は最適化原理である。すなわち、環境による情動的、物理的拘束条件のもと

で、与えられた目的に対し、最適な行動パターンを実時間で探索、形成し、実行することである。情報処理系の設計は、この種の最適化計算を効率的に実行する情報処理系を設計することである。設計のための原理、設計原理として我々は以下3つの原理を提案する。第1はモジュール化原理である。すなわち、情報処理系を3つのモジュールから構成する。各モジュールは種々のセンサ情報から環境の構造を抽出しモデル化する環境認識系、機構系の運動を制御する運動制御系、及び環境認識系と運動制御系を統合し、目的指向行動を生成する統合・計画系である。モジュール化原理は大規模な最適化を小規模な部分問題に分割し、探索を効率化することに対応する(図1)。これらの種々の機能を持つモジュールに対して、我々は2つの共通な構成原理を採用する。一つは、内部モデル原理である。環境認識系に於いては、各種センサ情報に対して内部モデルを先験情報としてベイズ推定を行ない情報処理を行なう。運動制御系に於いては、内部モデルからの出力をフィードフォワード信号として用いる。統合・計画系は内部モデルを拘束条件として環境認識系、運動制御系の出力を入力として最適化計算を行なう。これらの内部モデルはそれぞれの情報処理系に重なりをもって使用され、それぞれの情報処理系相互の協調を保證する。また、内部モデルは、行動結果にもとづいて変化する動的なモデルであり、それによって環境変化に対する適応機能を保證する。内部モデル原理は最適化においてその探索空間を制御し、最適化計算を効率化することに対応する。他方の構成原理は並列分散処理原理である。すなわち、各情報処理系は多数の動的な

素集団のダイナミクスを通して情報処理を行なう。この動的要素集団として我々の提案している二重力学系を用いる^[1]。二重力学系は要素ダイナミクス、ルールダイナミクスと呼ばれる2つの力学系から構成される。要素ダイナミクスは単純な動特性を持つ要素が非線形の相互作用で結合した力学系であり、ルールダイナミクスは相互作用を特徴づけるパラメタを状態変数とする力学系である。二重力学系では与えられた環境のもとで要素ダイナミクスの中に分岐を通して多重な時空間パターンが生成され、その中の1つがルールダイナミクスにより選択され要素ダイナミクスの上に実現される(図2)。

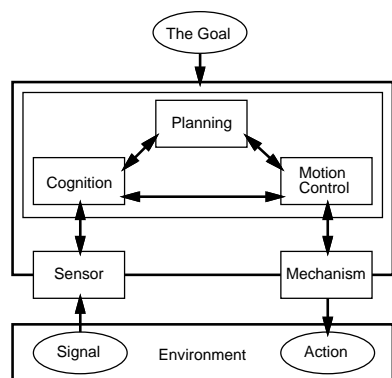


図 1. 自律行動システム (情報処理系)

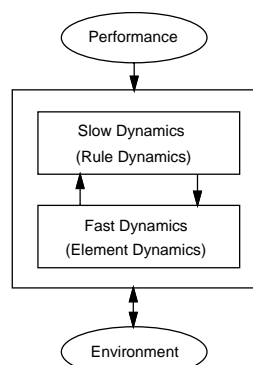


図 2. 二重力学系

3 運動制御系の設計

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: 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脚歩行ロボットを取り上げた。対象とする四脚歩行ロボットを図3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視覚センサーと脚先の接触センサーを持つ。この四脚歩行ロボットに対して、移動ターゲットの運動を認識し、ターゲットの運動及び力学的環境に応じて最適な歩行パターンを生成、実現して追従するタスクを課す。

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。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^[2]。CPG は二重力学系を用いて構成する。すなわち、要素ダイナミクスを4個の非線形振動子で構成する。各振動子は各脚の運動を生成する。振動子間の相互作用はルールダイナミクスに組み込まれる。各振動子は、各振動子間の相互作用とともに外部入力として脚先に取り付けられた接地センサー信号からの入力を受け、その位相を調整する。

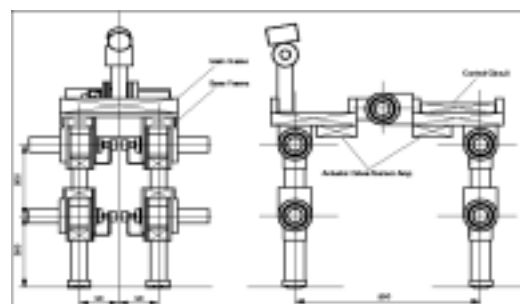


図 3. 四脚歩行ロボット

3.1 制御系構成

制御系の構成を図4に示す。脚制御系は、歩行パターン制御系からの目標軌道を指令値と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は各脚に配置された振動子の位相差により目標歩行パターンを生成する。

3.2 制御系の設計

脚 i のジョイント j の目標回転角 $\hat{\theta}_j^{(i)}$ は以下のように表わす。

$$\hat{\theta}_j^{(i)} = \hat{\theta}_j^{(i)}(\phi^{(i)}) \quad (1)$$

ここで、 $\phi^{(i)}$ は脚 i に配置された振動子の位相を表す。また、 $*$ は基準値を表す。各脚の各関節のアクチュエータに対して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。

$$\tau_j^{(i)} = K_{Pj}(\hat{\theta}_j^{(i)} - \theta_j^{(i)}) + K_{Dj}(\dot{\hat{\theta}}_j^{(i)} - \dot{\theta}_j^{(i)}) \quad (2)$$

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.

$$\dot{\phi}^{(i)} = \omega + g_1^{(i)} + g_2^{(i)} \quad (3)$$

$$g_1^{(i)} = -K \left(\phi^{(i)} - \phi^{(j)} - \Gamma_{ij}^{(m)} \right) \quad (4)$$

$$g_2^{(i)} = [\hat{\phi}^{(i)} - \phi_A^{(i)}] \delta(t - t_0) \quad t_0: \text{脚 } i \text{ 着地時刻} \quad (5)$$

ただし, 項 $\Gamma_{ij}^{(m)}$ は歩行パターン m ($m = 1: \text{Transverse walk}, m = 2: \text{Trot}, \dots$) における振動子 i 及び j の間の位相差である. (4) 式において, 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 m を実現する. 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る.

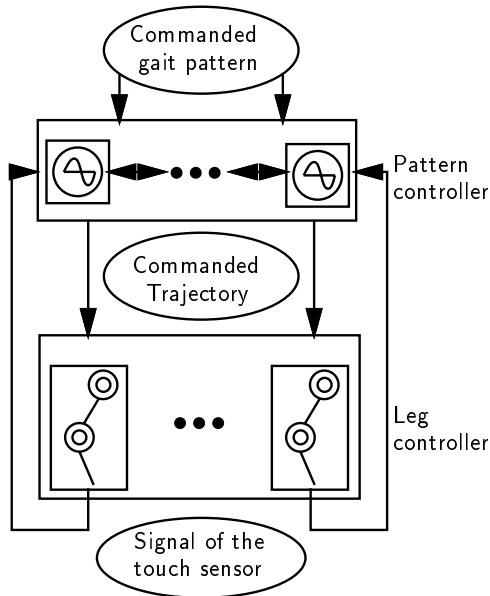


図 4 制御系構成

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.

(6) 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 $\Gamma^{(m)}$ 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図 5 に示す.

$$D^{(m)} = \frac{1}{4} \text{trace}(\widehat{W}^{(m)T} W) \quad (6)$$

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

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

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. 図 6 は (7) 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.

$$E_c = \frac{\langle \sum_{i,j} \tau_j^{(i)} \theta_j^{(i)} \rangle}{\langle v \rangle} \quad (7)$$

この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. 図 7 に於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, これらの遷移は制御エネルギー上昇を抑える方向に生じることが示される. すなわち, この 4 脚ロボットは 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.

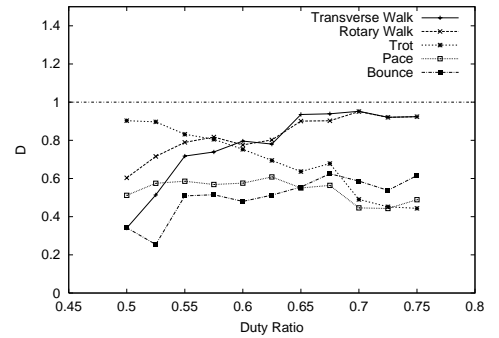


図 5. 歩行パターンの類似度 $D^{(m)}$

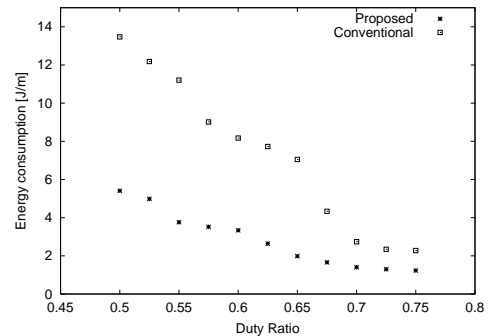
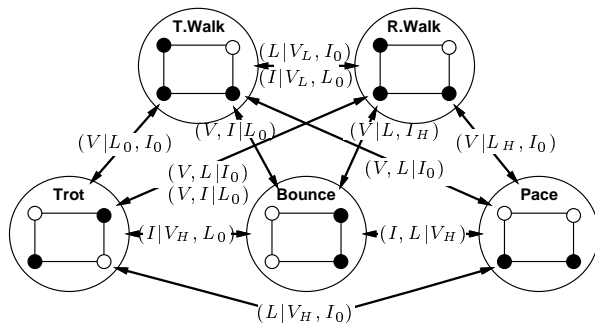


図 6. エネルギー消費 E_c



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

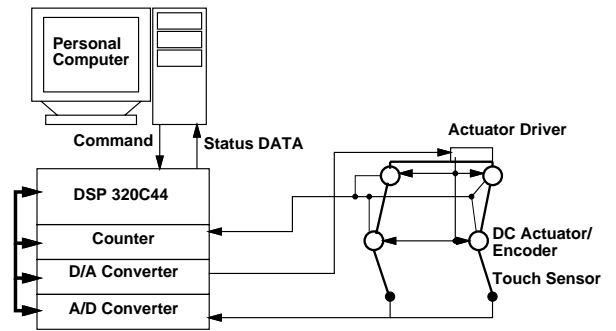


図 9. ハードウェア実験装置構成

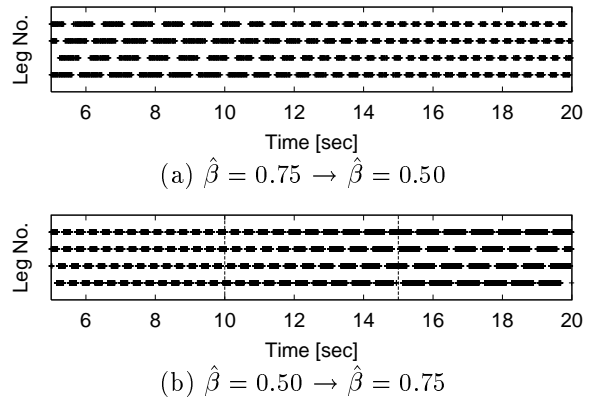


図 10. 歩行パターン

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」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] K.Tsuchiya and K.Tsujita: Design of a Complex System based on the Maximum Entropy Principle, Artificial Life and Robotics 1, pp.65-68, (1997)
- [2] K.Tsujita, K.Tsuchiya and A.Onat: Autonomous Decentralized Control of a Quadruped Locomotion Robot: Proc. of International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, E-18, (2000)