

非線形力学系のアトラクタ設計によるヒューマノイドロボットの運動創発[†]

岡田 昌史*・大里 健太**・中村 仁彦**

Motion Emergency of Humanoid Robots by Attractor Design of a Nonlinear Dynamics

Masafumi OKADA*, Kenta OSATO** and Yoshihiko NAKAMURA**

The human motions are generated through the interaction between the body and its environments. The information processing system defines the current motion using the signal feedback of the body state and environments. The motion pattern dose not exits a priori but emerges as the result of the entrainment phenomenon for the dynamics of the information processing, the human body and its environments. In this paper, based on the dynamics-based information processing system, we propose the motion emergency system design method for a humanoid robot designing a dynamical system that has an attractor considering the robot body dynamics. From the control engineering point of view, the proposed method designs a controller that stabilizes the robot to an equilibrium trajectory.

Key Words: motion emergency, attractor design, humanoid robot, dynamics-based information processing, nonlinear dynamics

1. はじめに

ロボットの運動制御では Fig.1 に表されるように、先に運動パターンが用意され、これに追従するための安定化コントローラ的设计によりロボットの運動が実現されてきた。運

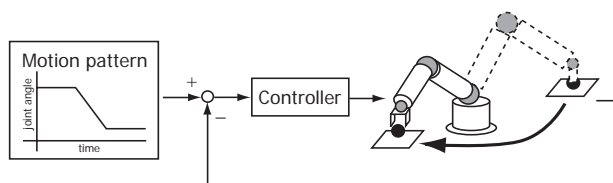


Fig. 1 Motion control of robots

動パターンは最大出力トルク、最大角速度、目標角度と目標角速度の整合性といったロボットの力学的な拘束を満たすように設計され、コントローラはモデル化誤差や外乱に対してもロボットを運動パターンへ安定に追従させるロボスタ性に重点が置かれる。運動の変化に対しては、複数の運動パターンが用意されこれらの切り換えによって実現される。この方

法は精密なタスクの実行を要求される産業用ロボットに対して有効な手法であり、同様の方法がヒューマノイドロボットにも用いられてきた。目標運動パターンは、ZMP(Zero Moment Point) や重心位置を考慮した安定な軌道として設計され、ロボスタコントローラが関節角や角速度が目標運動パターンに追従するように設計される。この制御法には、以下のような改善すべき点が挙げられる。

(1) ヒューマノイドロボットは産業用ロボットとは異なり、精密な動きよりも変化する環境の中を自律的に動き回ることが要求される場合が多い。そのため、決まった運動パターンを再生するよりも環境に合わせてパターンを変化させることが必要である。

(2) 目標運動パターンは始点から終点までの時系列データで構成されている。そのため、運動を変化させるには運動の始点を通させることで運動の連続性を保つ場合が多い。また、コントローラも目標運動パターンに合わせて変化させる場合が多く、これらはロボットの運動切り換え時における不連続な目標運動パターンを生み出しロボットは無理な動きをする。

(3) 目標運動パターンはタイムスタンプを持っており、ロボットの状態に関わらず時間と共に進む。これにより、ロボットが転倒しながらでも決められた歩行運動パターンをとり続けるといった事態も起こりうる。

これらの内容は従来のロボット運動生成法の本質に関わる部分であり、改善のためには新たな設計法を考える必要がある。

一方、人間の動きは身体と環境の相互作用の中から生まれ

[†] 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会で発表 (2004・5)

* 東京工業大学大学院理工学研究科 目黒区大岡山

** 東京大学大学院情報理工学系研究科 文京区本郷

* Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Ookayama, Meguro-ku, Tokyo

** Graduate School of Information Science and Technology, Univ. of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received November 1, 2004)

(Revised March 1, 2005)

る．Fig.2 に表されるように，情報処理系が環境から得られ

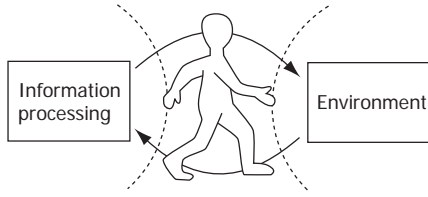


Fig. 2 Motion generation of the human

る信号に基づいて現在の人間の動きを決定し，情報処理系，環境の身体を介した閉ループ系が引き込み現象を起こすことで，運動が生成されると考えられる．引き込みの効果によって身体は安定化され，閉ループ系は環境の変化や外乱に対してロバスト性を有し，さらに，運動の変化は連続的な現象として現れる．これより，運動パターンが先に用意されているのではなく，引き込み現象の結果として運動パターンが現れ，環境や情報処理系の変化によって運動の変化がもたらされると考えることができる．このコンセプトは身体と知能の密接な関連を表す「身体性」の考え方とも合致しており，環境の中を知的に行動するロボットの設計には，環境・情報処理の力学系の引き込み現象として表された運動創発を設計する必要があるだろう．

これまでに，引き込み現象を利用したロボットの運動生成に関する研究がいくつか報告されてきた．Ijspeertらは神経振動子を利用した見まね学習の方法を提案した¹⁾．これは神経振動子の引き込み現象を利用して学習した運動の生成を行うものである．琴坂らは神経振動子を用いてリズム的な運動の生成を行った²⁾．我々は N 次元空間内の閉曲線をアトラクタとする力学系の設計法を示し，運動の記憶と生成を行う力学的情報処理を提案した³⁾．これらの方法は，主に運動パターン発生器の生成であり環境とは切り離された世界での設計となっている．Taniはリカレントニューラルネットワーク(RNN)を用いてロボットのナビゲーションシステムを設計し，引き込み現象の記号操作，記号創発の可能性を示し，知能との関連を示した⁴⁾．Tsujitaら⁵⁾や木村ら⁶⁾は神経振動子にセンサ信号をフィードバックすることで2足，4足ロボットの歩行動作を引き込み現象によって実現した．これらの方法では既存の力学系を用いるため，その解析は定性的，現象論的であり設計においてはパラメータチューニングが大きな役割をしめる．

本論文では，参考文献3)における力学系の設計法を基礎として，ヒューマノイドロボットの運動創発の設計を行う．これはロボットの身体の力学系を考慮しながら非線形力学系のアトラクタを設計するもので，制御工学の観点からすると平衡点への安定化と平衡点の移動(目標値の動き)による運動生成ではなく，力学系の状態を平衡軌道へ安定化させることでロボットの運動を実現するものである．具体的には実現したい運動のパターンの概略を創発のための種として与

え，ロボットのダイナミクスを考慮しながら状態空間内にアトラクタを形成するようフィードバックコントローラを設計するものである．

2. 力学系のアトラクタ設計法

2.1 力学系とロボットの全身運動

まず，力学系とロボットの全身運動に関して説明する³⁾．いま， N 個の関節を持つロボットの周期的な運動 \mathcal{M} を考える．全身の関節角度 $\theta[k]$ として表現された時刻 k のロボットの姿勢は N 次元空間内の点として表現される．さらに， $\theta[k]$ を並べて構成される行列 M

$$M = \begin{bmatrix} \theta[1] & \theta[2] & \cdots & \theta[m] \end{bmatrix} \quad (1)$$

はFig.3に表されるように N 次元空間内の閉曲線 C として表される．ここで， m はデータの個数を意味する．一方，

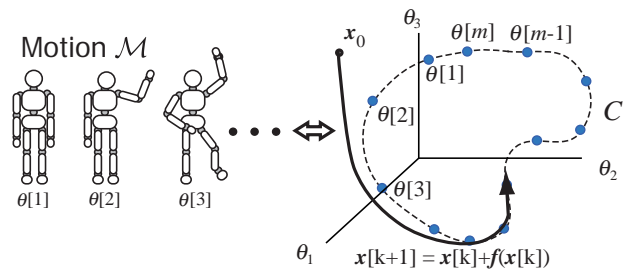


Fig. 3 The robot posture, motion in the joint space

次の差分方程式で表される力学系を考える．

$$x[k+1] = x[k] + f(x[k]) \quad (2)$$

このとき，式(2)の力学系が閉曲線 C をアトラクタとするとする．ここで，力学系が閉曲線をアトラクタとするというのは，初期値 x_0 から出発した力学系の状態変数 $x[k]$ が次式を満たすということである．

$$\lim_{k \rightarrow \infty} x[k] = \theta[k + k_0] \quad (3)$$

ここで， k_0 は x_0 によって決まる定数である．このとき，力学系は全身運動 \mathcal{M} のデータ M を記憶しており，さらに，これを再生可能であると言える．

2.2 力学的情報処理

次に，参考文献3)の力学的情報処理における力学系の設計法について述べる．式(2)の $f(x[k])$ は x 空間におけるベクトル場を表現していると思えることができる．そこで，まず力学系が閉曲線 C をアトラクタとするように空間内のベクトル場を定義し，これを関数近似することで $f(x[k])$ を求める．Fig.4のように $\theta[k]$ の近傍に複数の点 η_j^k を設定し，それぞれの点に対して次式のような $f(\eta_j^k)$ を定める．

$$f(\eta_j^k) = \theta[k+1] - \eta_j^k \quad (4)$$

これは η_j^k の点から出発した力学系が次の時刻に閉曲線に収束することを意味している．このベクトル場を x の多項式で表現すると $f(x[k])$ は次式で表される．

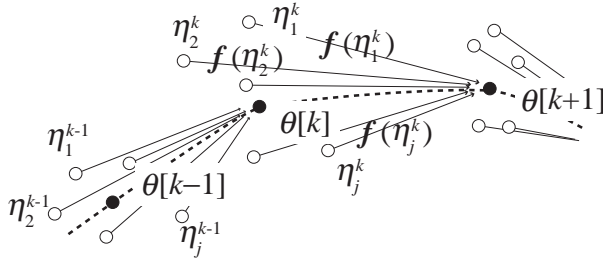


Fig. 4 Definition of the vector field

$$f(x[k]) = \Theta\phi(x[k]) \quad (5)$$

ここで Θ は多項式の係数からなる行列で, $\phi(x[k])$ は $x[k]$ のべき乗によって構成されるベクトルである. この関係から, 定義した η_j^k と $f(\eta_j^k)$ を用いて Θ を最小二乗近似によって求める.

$$\Theta = F\Phi^\# \quad (6)$$

$$F = \begin{bmatrix} f(\eta_1^1) & \cdots & f(\eta_j^1) & \cdots & f(\eta_j^k) & \cdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \phi(\eta_1^1) & \cdots & \phi(\eta_j^1) & \cdots & \phi(\eta_j^k) & \cdots \end{bmatrix} \quad (8)$$

これにより近似精度が良ければ式 (2) の力学系は閉曲線をアトラクタとする. ここで設計された力学系は関節角空間で設計されたものであり, ロボット身体の力学, 環境の力学は考慮されていない. そのため, 力学系は運動パターン生成器としての役割を持つ. 次節ではこれにロボット身体の力学を埋め込み, 安定化コントローラ的设计を行う.

2.3 ロボットの身体力学を考慮したアトラクタ設計

本節では 2.2 節における力学系の設計法を基礎として, 運動創発システムの設計を行う. 簡単のため, ここでは線形システムを用いて設計法を示す. 次式の状態方程式で記述される離散時間線形システムを考える.

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k], \quad x[k] \in \mathbf{R}^N \quad (9)$$

ここで $x[k]$ は状態ベクトル, $u[k]$ はシステムへの入力ベクトルであり, このシステムは可制御であることを仮定する. $x[k]$ の目標運動パターン Ξ が次式のように与えられているとする.

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi[1] & \xi[2] & \cdots & \xi[m] \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\xi[k]$ は時刻 k における $x[k]$ の目標点で Ξ は N 次元空間内の閉曲線を描く. また, Ξ は式 (9) の力学系の物理的拘束条件を満たすものとする. これは, $x[k]$ が Ξ 上を動くための入力 $u[k]$ が存在することを意味する. いま, Fig. 5 に表されるように $\xi[k]$ の近傍に点 $\eta^k[0]$ を定義する. 式 (9) の行列 B が正則ではないとき, $\eta^k[1]$ の到達可能領域は B の張る空間 (span) によって制約を受ける. これは式 (4) のように $f(\eta^k[0])$ を自由に定義することができないことを意味する. そこで, ここでは多段先での収束を考える. つまり, $\eta^k[0]$ が λ ステップ先で $\xi[k+\lambda]$ に一致するようにする. 式 (9) の線形システムが可制御ならば, N ステップ先で $\xi[k+N]$

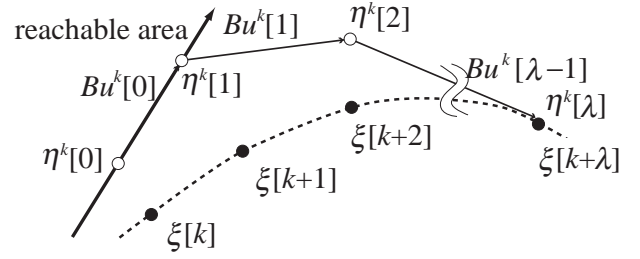


Fig. 5 Definition of the vector field for physical dynamics

に一致するための入力 $u^k[\ell]$ ($\ell = 0, 1, \dots, N$) が存在するので, $\lambda \geq N$ と設定する. $u^k[\ell]$ と $\eta^k[\ell]$ は以下のように計算される. 式 (9) の関係から $\eta^k[\lambda]$ は次式のように書ける.

$$\eta^k[\lambda] = A\eta^k[\lambda-1] + Bu^k[\lambda-1] \quad (11)$$

$$= A^\lambda \eta^k[0] + \Gamma U \quad (12)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} B & AB & \cdots & A^{\lambda-1}B \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$U = \begin{bmatrix} u^{kT}[\lambda-1] & u^{kT}[\lambda-2] & \cdots & u^{kT}[0] \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

この関係を用いて以下の式から $u^k[\ell]$ を得る.

$$U = \Gamma^\# (\xi[k+\lambda] - A^\lambda \eta^k[0]) \quad (15)$$

ここで Γ は拡大可制御性行列であるので $\Gamma^\#$ が存在する. 得られた $u^k[\ell]$ を用い, 式 (9) に基づいて $\eta^k[\ell]$ が得られる. 2.2 節と同様に複数の点 $\eta_j^k[0]$ ($k = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots$) を設定し, $\eta_j^k[\ell]$ と $u^k[\ell]$ のデータ集合を得ることで $u^k[\ell]$ を以下の多項式関数近似によって得る.

$$u[k] = f(x[k]) = \Theta\phi(x[k]) \quad (16)$$

非線形システムの場合は, Ξ 上の点 $\xi[i]$ 周りでの線形近似システム

$$x[k+1] = A_i x[k] + B_i u[k] + C_i \quad (17)$$

を求め (C_i は定数項), 式 (15) を

$$U = \hat{\Gamma}^\# \left(\xi[k+\lambda] - \prod_{i=k}^{k+\lambda-2} A_i \eta^k[0] - \Lambda \right) \quad (18)$$

$$\hat{\Gamma} = \begin{bmatrix} B_{k+\lambda-1} & \cdots & \prod_{i=k}^{k+\lambda-3} A_i B_k \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\Lambda = \left(C_{k+\lambda-1} + \cdots + \prod_{i=k}^{k+\lambda-3} A_i C_k \right) \quad (20)$$

に変更することで $u^k[\ell]$ を求める.

提案手法に関して以下の考察を行う.

λ の選択に関して λ は $\lambda \geq N$ を満たすように設定され, これは $x[k]$ の収束の速さを決定する. これより, λ の選択はフィードバックコントローラのゲインの設定に相当する.

入力信号の最小化 式(15)において Γ の擬似逆行列が用いられているが、これは入力信号 $u[k]$ の最小化に相当する(正確には $\|U\|$ の最小化)。

$\hat{\Gamma}^\#$ の存在性 式(18)において、 $\hat{\Gamma}^\#$ の存在性は保証できない。しかし、非線形システムが可到達な場合 $\hat{\Gamma}^\#$ は存在しやすい。

線形近似システムの近似精度 $\eta^k[\ell]$ と $\xi[k+\ell]$ の距離が小さくない場合、線形近似システムの近似精度は低くなる。この場合は A_i, B_i, C_i を $\eta^k[\ell]$ の周りで設計し直す繰り返し設計が必要であろう。

コントローラの構造 式(16)のコントローラはFig.2における情報処理系として働き、これは非線形の状態フィードバックである。線形のフィードバックでは線形システムは平衡点にしか安定化できないが、非線形のフィードバックを用いることで平衡軌道への安定化を可能としている。

3. シミュレーションによる設計法の検証

提案手法の有効性を検証するために、ここでは簡単な数値例を示す。Fig.6に表される倒立振り子システムを考える。 θ は振り子の回転角、 y はカートの位置、 u はカートの車輪に

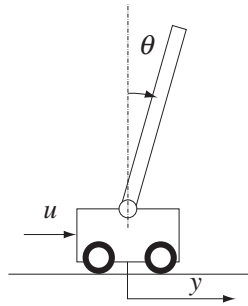


Fig. 6 Inverted pendulum system

よって発生される推進力である。このシステムの運動方程式を求め、 $\theta = 0$ の近傍で線形近似し、さらに、離散化することで次式の離散時間力学系が得られる。

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k] \tag{21}$$

$$x[k] = \begin{bmatrix} \theta[k] & \dot{\theta}[k] & y[k] & \dot{y}[k] \end{bmatrix}^T \tag{22}$$

このシステムに対して、目標平衡軌道としてFig.7に表される軌道を与える。これを θ, y, \dot{y} に関して3次元空間で表示するとFig.8となる。この軌道は式(21)の力学系に対して安定化コントローラを設計して閉ループ系を構成し、 y に適切な目標値を与えることで求めたものである。そのため、この軌道は倒立振り子システムの力学的な拘束条件を満たしており、この軌道を達成する入力 $u[k]$ が存在する。提案手法に従って $\eta_j^k[0]$ ($k = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots$)を設定し、 $u^k[\ell]$ と $\eta_j^k[\ell]$ ($\ell = 1, 2, \dots, \lambda$)を設計した。ただし、 $\lambda = 18$ とした。Fig.9に $\eta_j^k[0]$ と $\eta_j^k[\ell]$ をそれぞれ'o'と'*'で示す。ただし、見やすさのために定義した $\eta_j^k[\ell]$ よりも個数を減ら

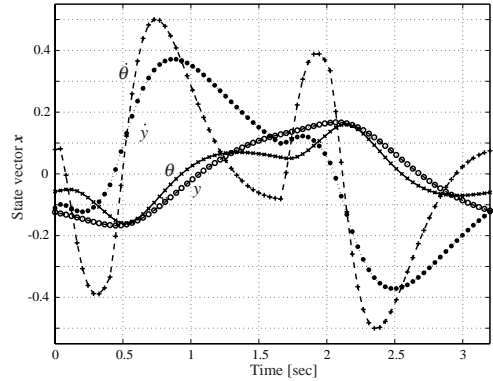


Fig. 7 Motion trajectory and closed curved line

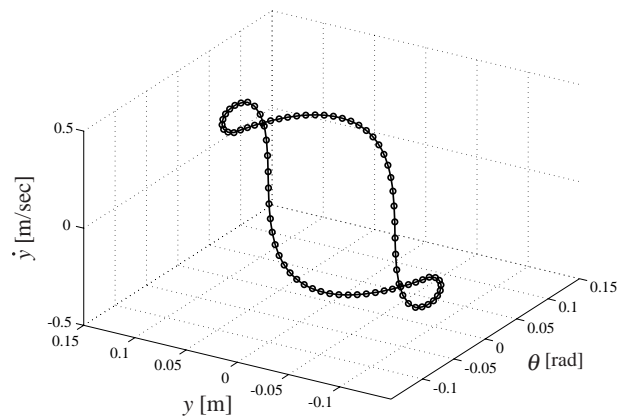


Fig. 8 3D plot of the desired trajectory

して表現した。λステップ先で閉曲線に一致することを拘束条件として、それまでの軌跡 $\eta_j^k[\ell]$ ($\ell = 1, 2, \dots, \lambda - 1$)が得られている。

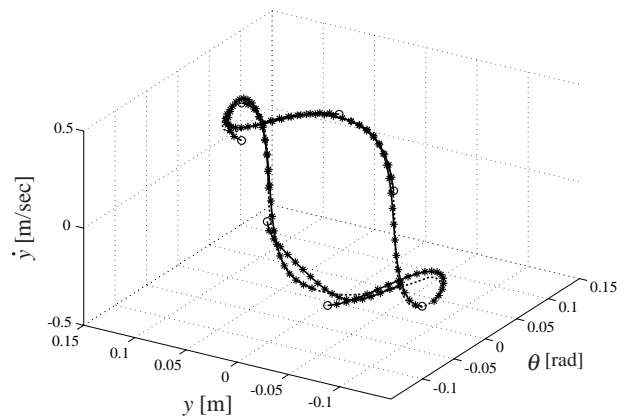


Fig. 9 Defined vector field

定義した $u[k]$ を $x[k]$ の4次多項式で近似した。Fig.10はいくつかの初期値から出発した $x[k]$ の動きを示す。'+ 'が初期値で'* 'が各時刻における $x[k]$ を示す。'o 'は目標とした軌道である。アトラクタが設計され、力学系が目標とした軌道に引き込まれている様子が分かる。Fig.11はFig.10

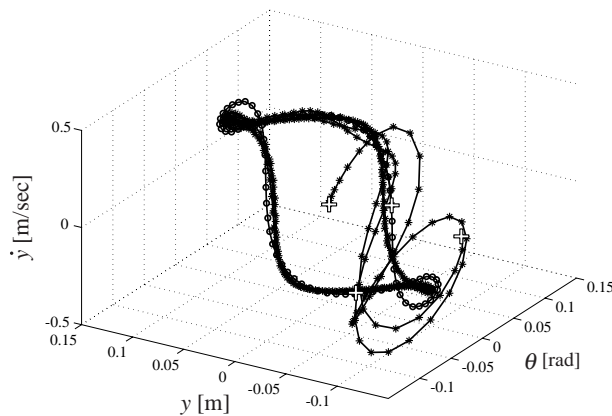


Fig. 10 Motion of the controlled dynamics

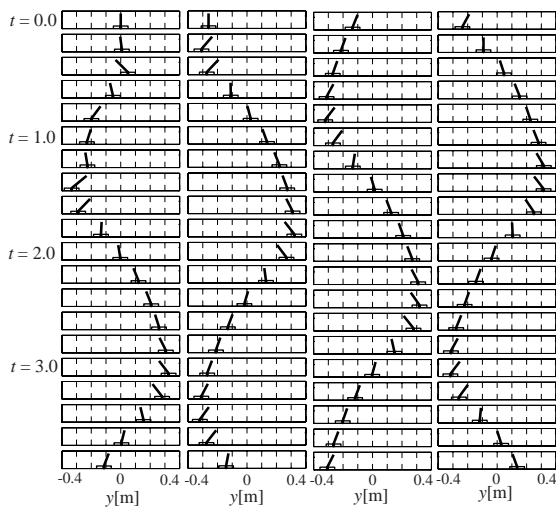


Fig. 11 Motions of the inverted pendulum system

における力学系の動きを倒立振りシステムの動きとして表現したものである。初期状態が違えば同じ動きへと引き込まれている。それぞれの運動の位相の違いが、運動パターンは存在せず、環境の情報(ここでは重力によって振子が傾くこと)を取得して自律的に動いている様子を示している。

4. ヒューマノイドロボットの運動創発

4.1 ヒューマノイドロボットの運動方程式

本章では、前述の方法をヒューマノイドロボットに適用し、運動創発を行う。ここでは、Fig.12 に示されるヒューマノイドロボット HOAP-1 を用いる。このロボットは合計 20 個の関節を持つ。このロボットに対して倒立振りモデル⁷⁾に基づいて以下の運動方程式を求めた。

$$M\ddot{x}_G = K(x_G - x_z) \quad (23)$$

$$M\ddot{y}_G = K(y_G - y_z) \quad (24)$$

$$K = \frac{M(\ddot{z}_G + g)}{z_G - z_z} \quad (25)$$

ここで $X_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ は重心位置の座標、

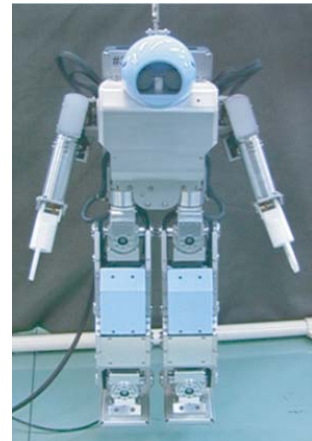


Fig. 12 Humanoid robot HOAP-1

$X_z = [x_z \ y_z \ z_z]^T$ は零モーメントポイント (ZMP) の位置、 M はロボットの質量、 g は重力加速度を意味する。状態ベクトル x を

$$x = [X_G^T \ \dot{X}_G^T]^T \quad (26)$$

とすることで、ヒューマノイドロボットの運動方程式

$$\dot{x} = f(x) + h(x, X_z) \quad (27)$$

が得られる。ここでは X_z を入力とした。また、これを離散化することで、式 (27) は

$$x[k+1] = x[k] + F(x[k]) + H(x[k], X_z) \quad (28)$$

となる。実際に X_z を入力とすることはできない。そこで、ここでは参考文献 8) の方法に基づき、以下の手順によってヒューマノイドロボットを制御する。

- (1) 制御のための X_z を求める。
- (2) 式 (28) から、 X_z を実現するための $\ddot{X}_G[k]$ を求める。
- (3) $\ddot{X}_G[k]$ から、

$$\dot{X}_G[k+1] = \dot{X}_G[k] + \ddot{X}_G[k]T \quad (29)$$

により、 $\dot{X}_G[k+1]$ を求める。ここで、 T はサンプリングタイムを意味する。

- (4) 重心ヤコビアン J_G に基づいて、 $\dot{X}_G[k+1]$ を実現する全身関節角速度

$$\dot{\theta}[k+1] = J_G^\# \dot{X}_G[k+1] \quad (30)$$

を求める。

- (5) $\dot{\theta}$ を用いて、2 ステップ先の関節角度の目標値を

$$\theta_r[k+2] = \theta[k+1] + \dot{\theta}[k+1]T \quad (31)$$

によって求め、この値に関節角度が追従するように制御する。

4.2 運動の創発

ここではヒューマノイドロボットのスクワット運動を考える。式 (28) の力学系はヒューマノイドロボットの重心位置と ZMP の関係のみを表しているため、このままでは運動は実現できない。そこで、スクワットを実現するために目標の

軌道として重心位置と速度、膝・足首関節角度に関して、アトラクタを設計する．このため、式 (28) を

$$\hat{x}[k+1] = \hat{x}[k] + \hat{F}(\hat{x}[k]) + \hat{H}(\hat{x}[k], X_z) \quad (32)$$

$$\hat{x}[k] = \begin{bmatrix} x^T[k] & \theta_m^T[k] \end{bmatrix}^T \quad (33)$$

へと拡張する．ここで θ_m は膝と足首の関節角度を意味する．この式に対して \hat{F} の一部 (θ_m に関する部分) と

$$X_z = \Theta\phi(\hat{x}) \quad (34)$$

を求めることで、スクワット運動を表現するアトラクタの設計を行う．なお、簡単のため上半身は固定し股関節の回転角度によって重心の制御を行った．

Fig.13 に膝関節角 $\theta_{knee}[k]$ と重心位置の x 成分 $x_G[k]$ の参照軌道と実際に得られた軌道を表す．実線が参照軌道、鎖

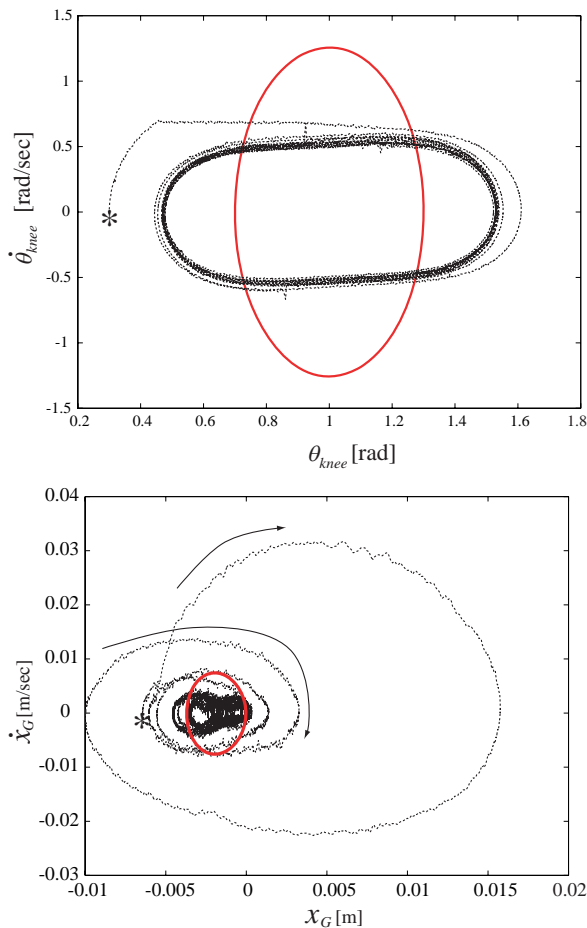


Fig.13 Trajectories of the knee joint angle θ_{knee} and X_{Gx}

線が実験結果であり * は初期値を意味する．参照軌道とは異なるがアトラクタに引き込まれ安定な運動が実現されている様子が分かる．Fig.14 は股関節の動きを示す．股関節には参照軌道は存在せず、ヒューマノイドロボット安定化のために関節が動いてバランスをとっている．Fig.15 に生成されたヒューマノイドロボットの運動を示す．これらの結果から、アトラクタ設計によってヒューマノイドロボットの

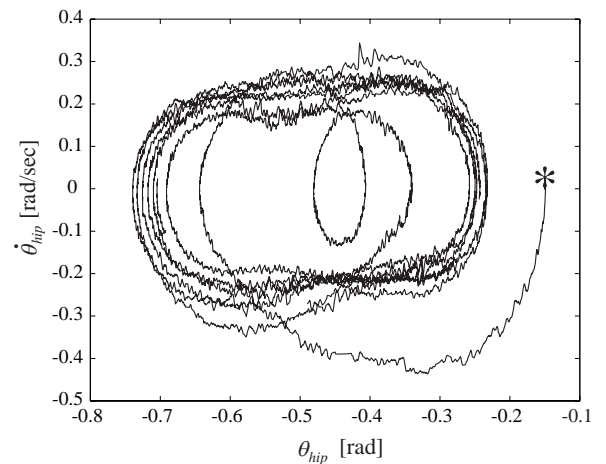


Fig.14 Trajectories of the hip joint θ_{hip}

自律的な運動創発が実現されたことが分かる．

4.3 考察

- 実験結果では目標の軌道と実際の軌道が大きく離れた．目標の運動が生成されない理由としては、(1) はじめに与えた参照軌道がロボットの物理的拘束を満たしていないこと (軌道の不備)、(2) ロボットのモデル化誤差がにより正しい入力計算されていないこと (モデルの不備)、(3) ベクトル場を多項式で近似したときの近似誤差、が考えられ、ここでは (2) が大きな要素と考えられる．はじめのスクワット運動の軌道は関節角を三角関数で動かすものとして与えた．また、ヒューマノイドロボットのダイナミクスを倒立振り子としてモデル化しているにも関わらず、ロボットの制御システムの制約から目標全身関節角度として与えている．ここでは、関節角のハイゲインフィードバックが仮定されているが、実際のフィードバックゲインは大きくない．さらに、ギアの摩擦も大きく、目標角度への収束は遅い．これは、Fig.13 において速度 ($\dot{\theta}_{knee}$, \dot{x}_G) が目標よりも小さくなっていることからも理解できる．

- コントローラ的设计時にはロボットのダイナミクスが考慮されているため、はじめに与えた軌道が物理的な拘束条件を満たしていない場合には、与えた軌道に類似で物理的拘束条件を満たした軌道がアトラクタとして設計されると考えられる．これより、はじめに与えた運動パターンは運動のための参照として用いられたものであり、運動創発のための種であると言える．

- 最終的に設計されたものは式 (16) のパラメータ Θ であり、この値だけでは意味を持たない．このコントローラとロボットの身体の力学、環境の力学 (ここでは重力) が相互作用を行うことではじめて、ロボットのスクワット運動が生成される．これより、本論文の結果は種として与えた参照軌道に基づいて情報処理系 (コントローラ) を求め、これとロボット、環境の組み合わせによって創発される運動を設計したということを示している．

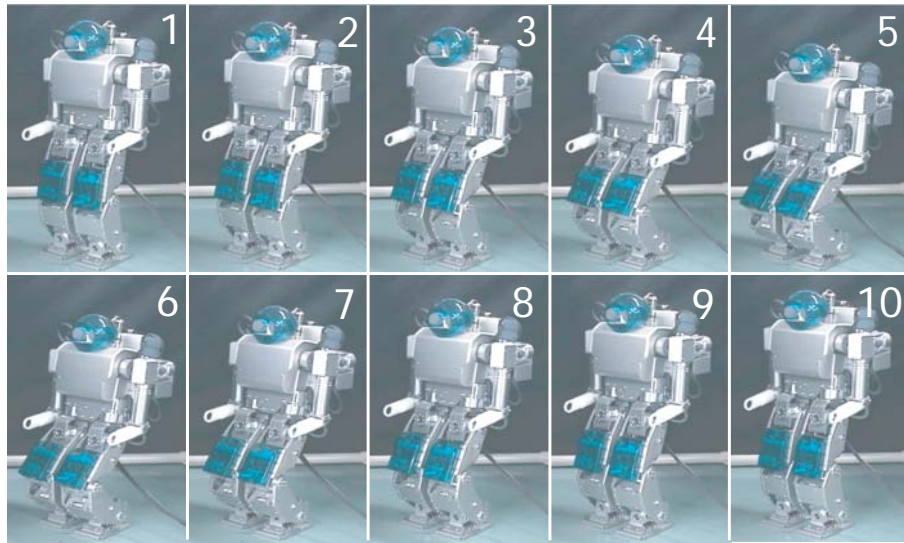


Fig. 15 Generated squat motion

•ここではヒューマノイドロボットのスクワット運動を取り扱ったが、上記(1),(2),(3)の理由だけでなく、生成される軌道がもとの軌道と離れる傾向があり、これは3章の結果にも現れている。特に、速度の大きい運動や歩行といったロボットのダイナミクスが大きく変化する運動において、この傾向は顕著に現れる。今後、設計されるアトラクタの特性、コントローラ的设计法を考察する必要がある。

5. おわりに

本論文では、力学系の状態空間内でアトラクタを設計することでロボットの運動創発システムの設計を行った。この方法では、環境、身体、情報処理の力学系が相互作用を行うことでアトラクタに引き込まれ自律的な運動が生成される。本論文の結果を以下に示す。

- (1) ロボットの身体の力学を考慮しながら、アトラクタを設計する方法を提案した。
- (2) この方法は、制御工学の観点からすると平衡点ではなく平衡軌道へ安定化するコントローラ的设计である。
- (3) 提案手法はベクトル場の定義とその関数近似であり、その設計プロセスを示すために線形近似された倒立振り子モデルで安定化を行った。
- (4) 上記提案手法を用いて、ヒューマノイドロボットの運動創発システムを設計し、実験によって有効性を確認した。

謝辞

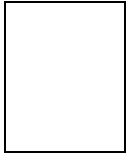
本研究は科学技術振興事業団「自律行動単位の力学的結合による脳型情報処理機械の開発」(プロジェクトリーダー: 中村仁彦) および文部科学省科学研究補助金特定領域研究(A03)「力学的情報処理の階層化に基づく知能ロボットのリアルタ

イムカーネルの構築」(研究代表者: 岡田昌史)の支援を受けた。水川秀氏にはヒューマノイドロボットのシミュレータ、実験においてご協力いただいた。

参考文献

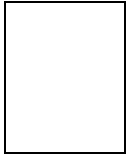
- 1) A.J.Ijspeert, J.Nakanishi and S.Schaal: Movement Imitation with Nonlinear Dynamical Systems in Humanoid Robots, Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1398-1403 (2002)
- 2) S.Kotosaka and S.Schaal: Synchronized robot drumming by neural oscillators, Proc. of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, pp.8-12 (2000)
- 3) 岡田, 中村: 脳型情報処理を行う力学系の多項式設計法とそのヒューマノイドの全身運動生成への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.8, pp.1050-1060 (2004)
- 4) J.Tani: Symbol and Dynamics in Embodied Cognition: Revisit a Robot Experiment, Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems, M.V.Butz, O.Sigaud and P.Gerard (Eds.) Springer-Verlag, pp.167-178 (2003)
- 5) K.Tsujita, K.Tsuchiya and A.Onat: Decentralized Autonomous Control of a Quadruped Locomotion Robot, Proc. of 3rd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, WeA-I-2 (2003)
- 6) 木村 浩: 生物規範型ロボット - 制御筋骨格系と神経系のカップリング -, 計測と制御, Vol.40, No.6, pp.441-447 (2001)
- 7) T.Sugihara, Y.Nakamura and H.Inoue: Realtime Humanoid Motion Generation through ZMP Manipulation based on Inverted Pendulum Control, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1404-1409 (2002)
- 8) T.Sugihara and Y.Nakamura: Whole-body Cooperative Balancing of Humanoid Robot using COG Jacobian, Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2575-2580 (2002)

岡田昌史（正会員）



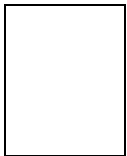
1969年3月21日生。92年3月京都大学工学部精密工学科卒業。96年9月同大学大学院応用システム科学専攻博士課程修了，博士（工学）。96年10月日本学術振興会特別研究員（PD）。97年2月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アシシエイト。00年4月同大学大学院工学系研究科講師。01年4月同大学大学院情報理工学系研究科講師，04年4月東京工業大学大学院理工学研究科助教授となり現在に至る。ヒューマノイドロボットの機構開発，力学系を用いた情報処理系の研究に従事。日本ロボット学会，IEEEの会員。

大里健太



1981年8月26日生。2004年3月東京大学工学部機械情報工学科卒業。2004年4月同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程進学。現在に至る。非線形力学系，ロボットの運動制御の研究に従事。日本ロボット学会会員。

中村仁彦（正会員）



1954年9月22日生。1982年京都大学大学院工学研究科精密機械工学専攻博士課程退学。1982年より87年まで同大学助手。1987年より91年3月までカリフォルニア大学サンタバーバラ校助教，準教授。1991年4月より東京大学に勤務。現在，同大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授。ロボットの運動学，動力学，制御，および知能の問題，特に非ホロノミックロボット，脳型情報処理，ヒューマノイドやCGの運動・力学計算，外科手術用ロボットなどの研究に従事。京都大学工学博士。システム制御情報学会，日本ロボット学会，日本機械学会，日本コンピュータ外科学会，日本IFTToMM会議，ASMEなどの会員。

