

ヒューマノイドロボットの状態空間におけるアトラクタ設計と自律運動の生成・制御

大里健太 (東京大学) 岡田昌史 (東京大学) 中村仁彦 (東京大学)

Autonomous motion generation and control based on the attractor in the state space of the humanoid robots

Kenta OSATO (University of Tokyo), Masafumi OKADA (University of Tokyo),
Yoshihiko NAKAMURA (University of Tokyo)

Abstract—The humanoid motion is realized by the robust controller stabilizing the robot around equilibrium points and the motion pattern data that is the time sequence data of the equilibrium points with time stamp. On the other hand, the human motion is generated because of the interaction between the dynamics of the information processing, body and environments. In this paper, we propose autonomous motion generation of humanoid robots through the interaction. Motion is expressed as a curved line in the state space which is based on the dynamics of body and environments. By designing the dynamical system which makes this curved line attractor, the humanoid generates motion autonomously and stably.

Key Words: humanoid, autonomous motion generation, interaction with environment

1. はじめに

ヒューマノイドロボットの運動生成では、ロボットを平衡点へと安定化した閉ループ系に対して、タイムスタンプを持つ目標値を平衡点の時系列信号として与えるのが一般的である。この場合、ロボットは運動生成器としての役割を担い、環境の存在とは無関係に運動が生成される。一方、実際の人間の運動生成では、情報処理系と身体と環境の相互作用から運動が自律生成されている。ここではこれらのシステムが引き込み現象を起こし、運動はその結果として現れているとみなすことができる。この現象は「身体性」という観点から知能の根源に迫る発想のものであり、運動パターンが先に存在するのではなく、情報処理系が身体を通して環境と相互作用し、その結果として目的に合った、身体の力学に矛盾しない運動が生成されていると考えるものである。

この観点から、土屋ら¹⁾や木村ら²⁾は神経振動子の引き込み現象を利用し、四足・二足ロボットの歩行制御を行った。しかし、これらのものは生成された運動に対する現象論的なアプローチであり、神経振動子におけるパラメータのチューニングが大きな役割を果たす。

上述の、引き込み現象を利用した運動生成の設計論を展開するためには、情報処理系を力学系として表現し、これが環境との相互作用によってアトラクタを有するよう設計する必要がある。Ijspeertら³⁾は見まね学習を力学系を用いて行う方法を提案した。ここでは神経振動子がベースとなっており、リミットサイクルが実現されているもののアトラクタの設計はされていない。一方、岡田ら⁴⁾はヒューマノイドロボットの全身運動を N 次元空間内の曲線とし、これをアトラクタとする力学系の設計法を力学的情報処理系として提案した。これは力学系として表現された情報処理系をロボットの身体と結びつけたものであり、比較的低次な

多項式によって力学系を設計する手法である。

本研究では、力学的情報処理をロボットの身体ダイナミクス、環境のダイナミクスを導入した方法へと応用する。情報処理・身体・環境の相互作用を持つアトラクタを設計することによって、環境との相互作用による自律運動生成を実現する。

2. ダイナミクスを考慮したアトラクタの設計法

制御対象において、身体である各関節角の値や、環境からの重力などの外力の値、入力である関節トルクなどの値から運動方程式を求め、それをサンプリングタイム T_d で離散化した離散状態方程式

$$x[k+1] = x[k] + f_d(x[k], u[k]) \quad (1)$$

で表現する。この x の状態空間に運動の軌道 C をサンプリングタイム T_d で与える。

$$C = \left[\xi_1 \quad \xi_2 \quad \xi_3 \quad \cdots \quad \xi_N \right] \quad (2)$$

C をアトラクタとするような入力 $u[k] = g(x[k])$ を求めることにより、運動を生成する入力値を求めることを考える。ここで C はアトラクタ設計のための参照値であり、実際に生成されるアトラクタは身体の力学により変化する。力学的に矛盾がないよう修正が行われるため、参照として与えられた軌道そのままをアトラクタとするのではないのである。なおここでは $g(x[k])$ として $x[k]$ の多項式表現⁴⁾を用いることとする。

ここで C をアトラクタとする力学系を設計するために、 ξ_i の近傍点において ξ_{i+1} へと向かう $f_d(x, u)$ を定める入力 u を求めることを考える。従来の力学的情報処理においては空間内の多くの点に対して f_d をベクトル場として定め、これを関数近似しているが、本設計

法では f_d 中の入力 u のみを定めることにより力学系を設計しなければならない．Fig.1 のように入力 u の変化による f_d の取りうる値はある範囲内（図の点線上）に限られてしまうため， ξ_{i+1} へと向かうための入力 u は一般的に存在しない．これは身体のダイナミクスによる制約である．この制約の中でアトラクタを設計するには，次の点に近づいていくというだけでなく，より多様性を持ったベクトル場の定義法が必要とされる．

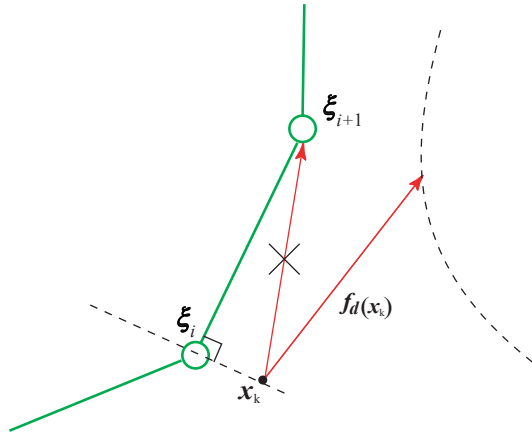


Fig.1 Design of vector field

そこでひとつ先ではなく，複数ステップ先において軌道へと収束していくベクトル場を設計する．その様子を Fig.2 に示す． $x[k]$ は各ステップにおける到達可能領域を進みながら 4 ステップで ξ_{i+4} へと到達する．複数ステップの考慮により，アトラクタに対したただ近づくだけでなく，迂回や回転をしながら引き込まれていくよう，与えられた軌道へと収束するための適切なベクトル場が導きだされる．

ベクトル場の具体的な設計法について述べる．まず，与えられた軌道上のすべての点 ξ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) の周りで，離散状態方程式 (1) を線形近似し次式を得る．

$$x[k+1] = A_{d_i} x[k] + B_{d_i} u[k] \quad (3)$$

ここで， ξ_i の近傍に定義された点を $x[0]$ とし， j ステップ後の状態 $x[j]$ を考える．状態が最も近い ξ_k 周りの線形近似系に従い遷移していくと考えると $x[j]$ は次の式で表される．

$$x[j] = \prod_{k=i}^{i+j} A_{d_k} x[0] + C_b u_j \quad (4)$$

ただし， C_b ， u_j は次のようになる．

$$C_b = \begin{bmatrix} \prod_{k=i+1}^{i+j-1} A_{d_k} B_{d_i} & \cdots & B_{d_{i+j}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u_j = \begin{bmatrix} u[0]^T & \cdots & u[j-1]^T \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

この j ステップ後の状態 $x[j]$ が ξ_{i+j} に収束するような入力 u_j を求める．ここで j が大きいほど C_b は横長となり行ランクが増していき， j を十分に大きくする

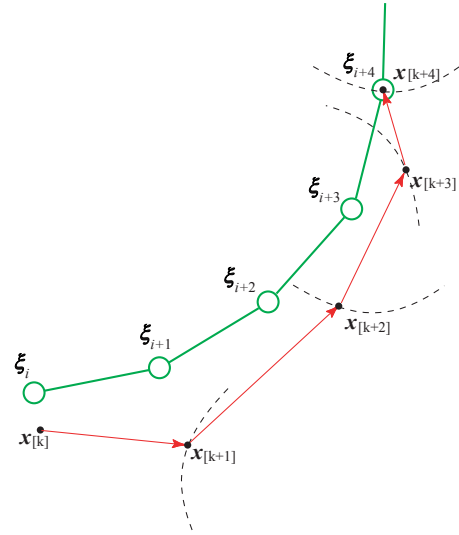


Fig.2 Multistep attracting vector

と C_b は行フルランクとなる．特に可制御な線形システムを考えると， $j \geq n$ を満たせば， C_b は拡大可制御性行列に等しく行フルランクとなる． C_b が行フルランクならば， $\xi_{i+j} = x[j]$ を満たす解 u_j は必ず存在する．これは線形システムにおける可到達性に対する議論に等しい．ここで，

$$u = C_b^\# \left(\xi_{i+j} - \prod_{k=0}^{i+j-1} A_{d_k} x[0] \right) \quad (7)$$

から， u_j のノルム最小解が求まる．

以上の計算を $1 \leq i \leq N$ の各点で， ξ_i の多数の近傍点に対し行う．それぞれの点で求めた $u[k]$ ， $x[k]$ ($k = 0, 1, \dots, j-1$) について，最小二乗法を用いることにより近似解として $g(x)$ が求まる．この式から現在の状態 x から入力値 u を計算し，それを入力することにより運動の軌道へと引き込まれていくため安定に運動が生成される．さらにこれをオンラインで計算することにより，自律的な運動生成が可能となるのである．

3. ヒューマノイドの運動生成

前章で述べた実世界のダイナミクスに基づくアトラクタの設計による運動生成法でヒューマノイドロボットの運動を生成することを考える．まず，ヒューマノイドの運動方程式を求める．本研究では全身の重心に注目し，ZMP⁵⁾ を支持点とする倒立振り子モデル⁶⁾ により求めることとする．それにより，次の式が得られる．

$$\ddot{x}_G = \frac{K}{M} (x_G - x_{zmp}) \quad (8)$$

$$\ddot{y}_G = \frac{K}{M} (y_G - y_{zmp}) \quad (9)$$

$$K = \frac{M(\ddot{z}_G + g)}{z_G - z_p} \quad (10)$$

ここで重心の位置ベクトル $x_G = [x_G \ y_G \ z_G]^T$ ，ZMP の位置ベクトル $x_{zmp} = [x_{zmp} \ y_{zmp} \ z_{zmp}]^T$ ，重心加速度 $g = [0 \ 0 \ -g]^T$ ，全身質量 M ，床面高

さ z_p , 実数係数 K である．ここで ZMP を入力値として，重心を運動の軌道へと引き込ませるために必要な入力値を求めることで安定に運動を実現させる．

しかし，ある重心の軌道を実現する全身関節角の解は無数に存在するため，重心の軌跡を軌道に引き込ませたとしても運動は発現しない．そのため全身関節角 θ の中から望む運動において主要な役割を果たすと考えられる関節 θ_m を選び出し， θ_m および重心の軌道を合わせてアトラクタを設計することとする．一方，残りの関節角を θ_s として重心の制御のために用いることとする．例えば，スクワット運動においては膝と足首の関節角が θ_m にあたる．これにより，運動において主となる関節角の動きを保ちつつ，重心を安定に維持することが可能となる．

また，ZMP 値は直接入力することはできない．ここでは参考文献⁶⁾の方法に従い，入力である ZMP を実現するための重心加速度 $cmd\ddot{x}_G$ を求め，それを積分し $cmd\dot{x}_G$ を得る．これを重心ヤコビアンを用いて解くことにより，目標全身関節角速度 $cmd\dot{\theta}$ を求め，これをヒューマノイドロボットに入力することにより，安定な軌道に引き込まれた運動を実現することができる．

4. ヒューマノイドロボットの運動生成

まず前章でのヒューマノイドの運動生成法の有効性を確認するために，OpenHRP⁷⁾を用いてシミュレーションを行った．ヒューマノイドのモデルとしては，HOAP-1⁸⁾を用いた．与える運動の軌道はスクワットデータとした．主関節角 θ_m としては膝関節 θ_{knee} ，足首関節 θ_{ankle} を用い，重心を制御する θ_s として股関節 θ_{hip} ，肩関節 $\theta_{shoulder}$ ，肘関節 θ_{elbow} を用いた．

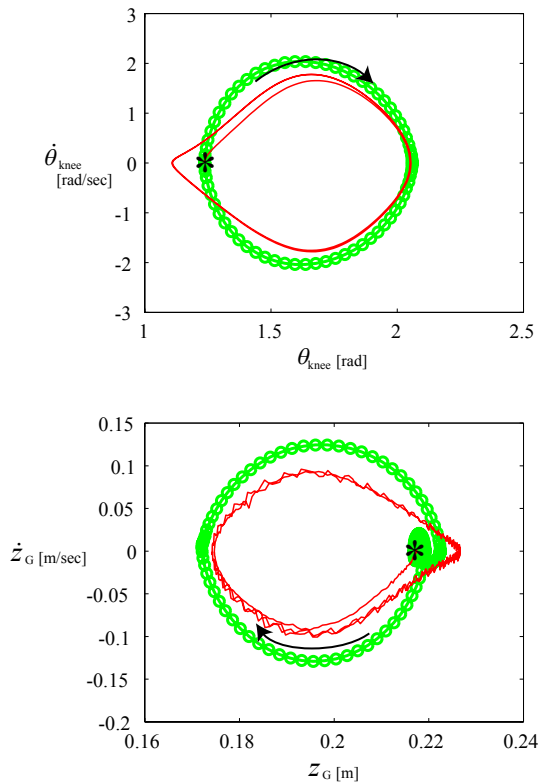


Fig.3 Trajectory of θ_{knee} and z_G

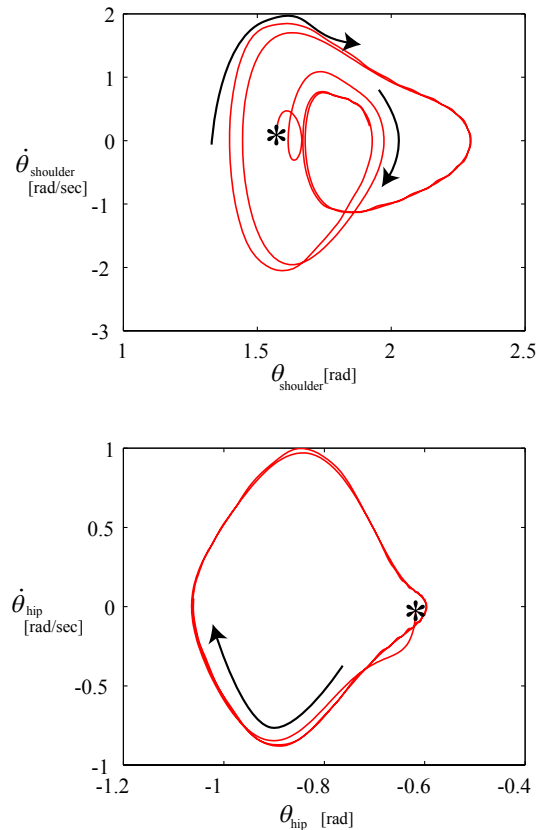


Fig.4 Trajectory of $\theta_{shoulder}$ and θ_{hip}

以上の条件の下でアトラクタの設計を行い，前節の手順に従いシミュレーションを行った．まず，Fig.3 にアトラクタ生成に用いた変数のうち， θ_{knee} ， z_G のアトラクタへの引き込みの様子を示す．Fig.3において「 \bullet 」がアトラクタ設計において与えた軌道であり，実線が実際の軌跡である．「 $*$ 」が初期値であり，矢印に沿った動きを示した．次にアトラクタ設計において特に引き込みを指定していない $\theta_{shoulder}$ ， θ_{hip} ，について同様のグラフを Fig.4 に示す．これらの結果を見るとアトラクタの設計を行っていない関節についても，ある周期軌道に引き込まれることが確認される．このことから安定に自律的な運動生成がなされていることが分かる．さらに，上記のシミュレーションにおいて1秒間 θ_{knee} ， θ_{ankle} ， θ_{hip} を固定したシミュレーションを行った．これは頭を押さえつけるなどの環境からの入力により脚関節が動かない時間ができたということを想定している．その結果の時間遷移を Fig.6 に示す．外乱により動きが抑えられても無理に運動軌道に追従しようとせず，滑らかに軌道へと引き込まれていることが確認される．つまり決まった運動を再生するのではなく，環境からの作用により自律的に運動が生成されていることが分かる．

次に実機を用いての運動生成を確認した．ここでは，エンコーダから読み取られた現実の関節角度を用いずに，計算機内部でアトラクタへの引き込みを起こしそのデータをヒューマノイドへ入力することにより生成される運動の確認を行った．この結果，生成された運動の様子を Fig.5 に示す．Fig.5 を見ると，陽にアトラ

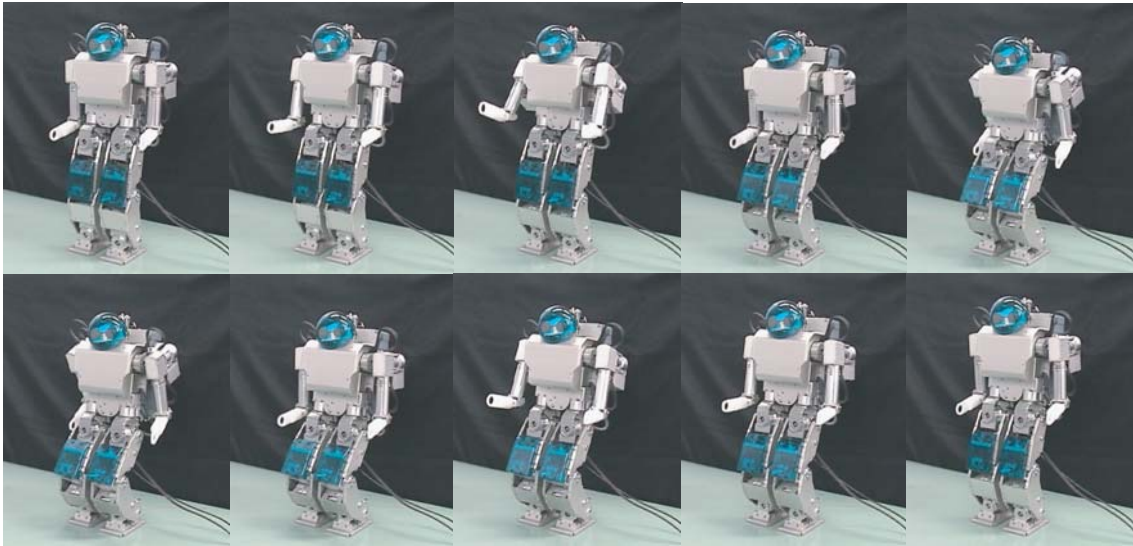


Fig.5 Squat motion

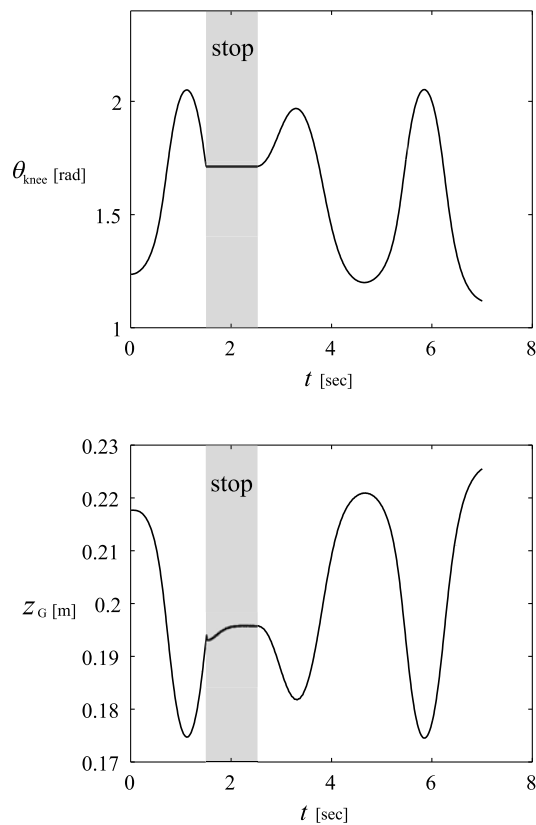


Fig.6 Simulation result of θ_{knee} and z_G with disturbance

クタを設計していない股関節や腕についてもスクワットの動きを実現していることが確認される。

5. おわりに

本研究では、情報処理・身体・環境の相互作用からなる力学系を運動方程式を用いモデル化し、実世界の力学を考慮した場におけるアトラクタを持つ力学系の

設計法を示した。また、ヒューマノイドにおいてのアトラクタ設計により、環境との相互作用による自律運動の生成を行った。

本研究は科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業 (CREST)「脳を創る」「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」(代表: 中村仁彦), 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」(代表: 岡田昌史) の支援を受けた。

参考文献

- 1) S.Aoi K.Tsuchiya and K.Tsujita. A turning strategy of a multi-legged locomotion robot. In *Proc. of AMAM2003, ThP-I-1*, 2003.
- 2) 木村. 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.
- 3) Auke Jan Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots. In *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1398-1403, 2002.
- 4) K.Tatani M.Okada and Y.Nakamura. Polynomial design of the nonlinear dynamics for the brain-like information processing of whole body motion. In *Proc. of IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1410-1415, 2002.
- 5) D.Surla and D.stokic M.Vukobratovich, B.Borovac. Biped locomotion, dynamics, stability, control and application. In *Springer Verlag*, 1990.
- 6) 杉原, 井上. 倒立振子に基づいた zmp 操作によるヒューマノイドの実時間動作生成. 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, 2001.
- 7) Hirukawa.H. et al. OpenHRP: Open Architecture Humanoid Robot Platform. In *Proc. International Sounder Reunion Registry*, 2001.
- 8) 村瀬, 安川, 境, 植木. 研究用小型ヒューマノイドの設計. ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演会論文集, pp. 790-791, 2001.