

非線形力学系の同期を用いたロボットの運動制御

Robot motion control using synchronization of nonlinear dynamical systems

門根 秀樹 岡田 昌史 中村 仁彦 (東京大学)

Hideki KADONE, Masafumi OKADA and Yoshihiko NAKAMURA

Univ. of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, JAPAN

Abstract: Entrainment and synchronization phenomena have been detected to be used efficiently in controlling of motion of the creatures. We propose a motion control strategy for robots based on synchronization between a nonlinear dynamical system and the robot dynamics. Through the interaction of these two synchronized dynamical systems, entrainment into an attractor generates a cyclic motion of the robot. In this paper, we describe a dynamics design method and change the robot motion by modifying the controller dynamics.

Key Words: nonlinear dynamical system, synchronization, brain-like information processing, humanoid robot

1 はじめに

ウサギの嗅球におけるカオスや引き込みの力学現象が Freeman らによって報告され [1], 生体の脳における情報処理と非線形力学系に起こる現象との関連性が注目されている [2]. 記憶がアトラクタへの引き込み現象によって引き起こされることやそのカオス的開放に基づいて, 中村らはカオス力学系に基づいたロボットの運動制御を行い [3], 岡田らはロボットの運動パターンを生成する力学系の設計を行った [4]. これらでは, ロボットはあらかじめ用意されたパターンに沿って動き, その遷移によって行動を変化させる. 一方, 神経振動子を用いて, ロボットの力学系と運動パターンを同期させることにより, 希望の運動を実現する研究もなされてきた [5]. 本研究では, 時変コントローラのパラメータ変化を力学系として表現し, コントローラの力学系とロボットの力学系の同期現象を用いた運動の生成を行う. ロボットの力学系に変化を与えることは難しいため, ロボットの運動の変化を相空間内における変化として与え, これを実現するコントローラの力学系を変化させることで, 希望の運動を獲得する.

2 ロボットとコントローラの力学系

式 (1) で表されるロボットの力学系と式 (2) で表されるコントローラの力学系とが同期した結合系での周期運動を考える.

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{f}_x(\mathbf{x}[k], \boldsymbol{\xi}[k]) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\xi}[k+1] = \mathbf{f}_\xi(\mathbf{x}[k], \boldsymbol{\xi}[k]) \quad (2)$$

ロボットの力学系はその運動方程式によって定式化されるためこれを変更することが困難である. そこで, コントローラの力学構造を変更することで結合系全体の周期軌道の変形を行い, ロボットの運動パターンを変化させる. ロボットの周期的な動きは相空間内での閉曲線を描き, これに直接的な変更を加える. Fig.1 で表されるように, ロボットの軌道の変化を与えることで, それを実現するコントローラの軌道の変化と力学構造の変更量を求

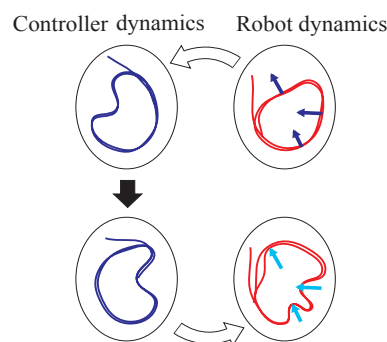


Fig. 1: Modification of Dynamics and Orbit

める. f_ξ を N 次元多項式モデル [4] を用いて, ロボットの周期運動と同期するように設計した. この方法では周期軌道における閉曲線を定義し, これらの点の周囲 η_i におけるベクトル場 $f_\xi(\eta_i)$ を定義する. これらを用いて

$$Y = [f_\xi(\eta_1) \quad f_\xi(\eta_2) \quad \cdots \quad f_\xi(\eta_n)] \quad (3)$$

$$\Phi = [g(\eta_1) \quad g(\eta_2) \quad \cdots \quad g(\eta_n)] \quad (4)$$

を定義することで, $Y = A\Phi$ の関係から

$$A = Y\Phi^\# \quad (5)$$

のように線形問題として力学系を定義するパラメータ A が計算される. ここで, $g(\eta)$ は η に関する各要素の多項式の項を構成する関数で, A はその線形結合の係数を表す行列である. これにより, 閉曲線をアトラクタとする力学系が設計可能である.

3 周期軌道の変更

3.1 コントローラの力学構造の変更

アトラクタを持つ力学系に対し, そのアトラクタの変形を Fig.1 のように複数の点で与える. この変形に対するベクトル場の変化を ΔY とすると, 力学構造の変化量 ΔA は

$$\Delta A = \Delta Y\Phi^\# \quad (6)$$

として与えられる. $\Phi^\#$ はすでに計算されているため, この変更の計算量は少ない. これにより A を $A + \Delta A$ とす

ることで、力学系のアトラクタは希望のものへと変化する．力学系の変更によるアトラクタの変化を Fig.2 に示す．矢印のような変化を与えたところ、アトラクタを含む軌道は破線から実線へと変化した．この方法を利用して、ロボットの軌道を変化させるためのコントローラの軌道変化を行う．

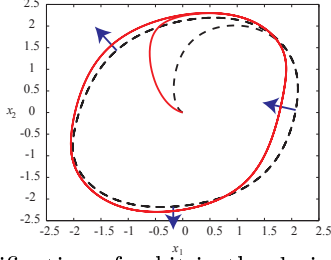


Fig. 2: Modification of orbit in the designed dynamics

3.2 ロボットの周期軌道の変更

ロボットの状態量を x 、コントローラの状態量を ξ として、ロボットの力学系が式 (1) で表されているものとする．このとき、運動の変化量は、

$$\Delta x[k+1] = J_{xx}^k \Delta x[k] + J_{x\xi}^k \Delta \xi[k] \quad (7)$$

$$J_{xx}^k = \left. \frac{\partial f_x}{\partial x} \right|_k, \quad J_{x\xi}^k = \left. \frac{\partial f_x}{\partial \xi} \right|_k \quad (8)$$

で与えられる．式 (7) を再帰的に計算することで、

$$\begin{aligned} \Delta x[k] &= J_{xx}^{k-1} J_{xx}^{k-2} \Delta x[k-2] \\ &+ J_{xx}^{k-1} J_{x\xi}^{k-2} \Delta \xi[k-2] \\ &+ J_{x\xi}^{k-1} \Delta \xi[k-1] \end{aligned} \quad (9)$$

$$= \prod_{i=k}^{k-m} J_{xx}^i \Delta x[k-m] + \prod_{i=k}^{k-m+1} J_{xx}^i J_{x\xi}^{k-m} \Delta \xi[k-m] \quad (10)$$

$$\vdots \quad (11)$$

$$+ J_{x\xi}^{k-1} \Delta \xi[k-1] \quad (12)$$

の関係をj得る．ここで、運動の周期を T とすると、軌道上の点での変化量 $\Delta x[k]$ が与えられたときに、 $\Delta x[k] \equiv \Delta x[k-T]$ を考慮して、

$$(I - J_1^k) \Delta x[k] = J_2^k [\Delta \xi^T[k-T], \dots, \Delta \xi^T[k-1]]^T \quad (13)$$

$$J_1^k := \prod_{i=k-1}^{k-T} J_{xx}^i \quad (14)$$

$$J_2^k := \begin{bmatrix} \prod_{i=k-1}^{k-T+1} J_{xx}^i J_{x\xi}^{k-T} & \dots & J_{x\xi}^{k-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

となる．式 (13) を最小二乗法を用いて解きコントローラの軌道の変化量を求めた．これを用い、前節の手法を用いることでコントローラの力学系の変化を行う．

4 数値例

Fig.3 のような 2 慣性系のバネ・マス・ダンパ系についてシミュレーションを行った．フィードバック制御系で x_2 が正弦波を参照入力として位置制御されているとして、

ひずみ量と x_1 の速度の関係を表す平面内で軌道を変化させた．ひずみを $s = x_1 - x_2$ とおき、ロボットの状態量を $x[k] = [s[k], \dot{s}[k], x_1[k], \dot{x}_1[k]]^T$ とした．また、コントローラは PD コントローラとし、比例ゲイン K_p 、微分ゲイン K_d より $\xi[k] = [K_p[k], K_d[k]]^T$ とすることで、コントローラのパラメータを時変なものとした．フィードバック系を構成することが、コントローラの力学系とロボットの力学系との結合を与えている．結果を Fig.4 に示す．左図の矢印のような変化をロボットの軌道に与えたところ、コントローラの軌道は右図の破線から実線へと変化した．それによってロボットの軌道は左図の破線から実線へと変化した．

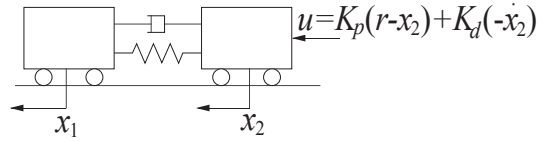


Fig. 3: Spring-Mass System

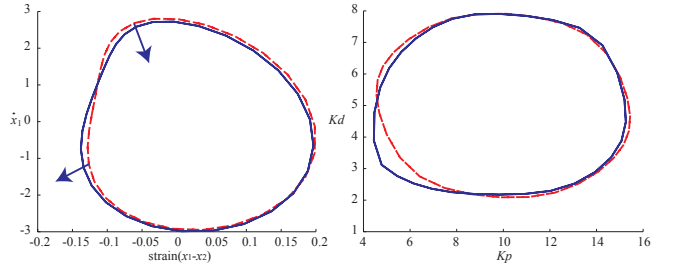


Fig. 4: Modification of Orbit in a Coupled Dynamics

5 おわりに

ロボットと同期するコントローラを設計する手法及び、同期した力学系の変更により、ロボットの周期軌道を変形する手法を提案した．今後の課題として、多項式表現された力学系とロボットの力学系との結合系の安定性解析により、相互結合された力学系の運動変化を与えることが挙げられる．

この研究は、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」及び、平成 13 年度科学研究費補助金 (C-2,1365024) の支援を受けた．

参考文献

- [1] W.J.Freeman and W.Schneider: "Changes in spatial patterns of rabbit olfactory EEG with conditioning to odors", Psychophysiology, Vol.19, pp.44-56, 1982.
- [2] 中村仁彦: "非線形力学系として統合されたロボットの情報処理と制御 - 運動の制御理論から知能の制御理論へ - ", 計測と制御, Vol.40, No.6, pp.426-432, 2001.
- [3] A.Sekiguchi and Y.Nakamura: "Behavior Control of Robot Using Orbits of Nonlinear Dynamics", Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001.
- [4] 岡田昌史, 中村仁彦: "N 次元時系列パターンを記憶連想する非線形力学系の多項式表現" 日本ロボット学会予稿集, pp.1229-1230, 2001.
- [5] 琴坂, S.Schaal: "神経振動子を用いたロボットのリズム的な運動生成" 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.1, pp116-123, 2001.