

軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御による コミュニケーション原理の表現

岡田昌史*¹ 村上健治*^{2*3}

Communication Principal based on Robot Motion Synchronization using Orbit Attractor

Masafumi Okada*¹ and Kenji Murakami*^{2*3}

The human communication exists in various situations of our daily life. For human – robot communication or robot – robot communication, it is useful to design a communication model based on communication principal that is an entrainment phenomenon of nonlinear dynamics. In this paper, we focus on the robot motion synchronization for robot – robot communication. The robots are controlled to be entrained to an orbit attractor that corresponds to a robot motion. By exchanging the state variables of each robot, the robots are controlled to entrain one attractor that is possible for both robots and synchronize each other. The results of this paper represent the communication principal by an entrainment phenomenon of nonlinear dynamics.

Key Words: Robot Communication, Motion Synchronization, Attractor Design, Dynamics-based Information Processing

1. はじめに

人間のコミュニケーションは情報伝達だけでは言い表せない内包をもって我々の日常生活に数多く存在しており、学問的研究の対象としても認知されている。しかし、意思疎通・コミュニケーションの概念は極めて複雑なあり方を見せており、この本質に迫ることは容易ではない。例えば Dance らはコミュニケーションを 126 種類ものカテゴリに分類している [1]。複数ロボット間の通信とその情報処理によるコミュニケーション実現を目指した場合、これらの多様さを一つずつ埋め込むのではなく、その根底にある共通性を計算機で実現する原理を設計する必要があるだろう。

人間のコミュニケーションの最も代表的なものとして、会話によるコミュニケーションが挙げられる。この場合、言語は情報伝達の手段であり異なるバックグラウンドを持つ個体どうしが言語やジェスチャを用いて互いの意識の一部を交換し、共通に理解可能な概念へと引き込まれるといった現象が存在しているであろう。そのため、Fig. 1 に表されるように相矛盾する会

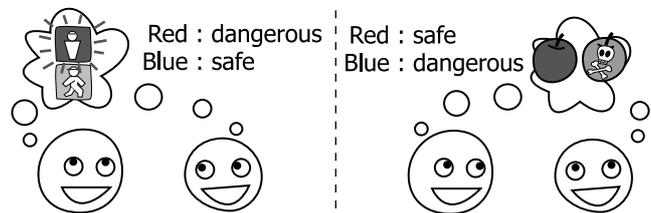


Fig. 1 Human communication via language

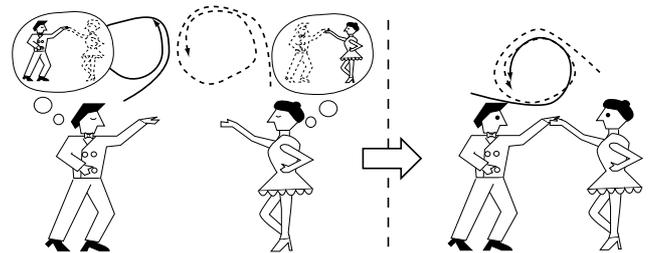


Fig. 2 Human communication on motion synchronization

話（左図では「赤が危険」「青が安全」であるのに対し右図では「赤が安全」「青が危険」に入れ替わる）が成立する。これは二つの個体が会話の流れ（文脈）の中で概念を共有することで成立する現象であり、脳のダイナミクスの引き込み現象とも解釈される。引き込み現象が発生しない場合には意思疎通が成立しておらず、いわゆる「ちぐはぐな会話」となる。一方、Fig. 2 に表されるような運動の同調におけるコミュニケーションではそれぞれの個体が独自の運動を獲得した後、互いに相手の運動

原稿受付 2006年5月8日

*¹東京工業大学大学院理工学研究科機械物理学専攻

*²東京工業大学工学部機械知能システム学科

*³現：東京大学大学院工学系研究科環境海洋工学専攻

*¹Dept. of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology

*²Dept. of Mechanical and Intelligent Systems Engineering, Tokyo Institute of Technology

*³Dept. of Environmental and Ocean Engineering, The University of Tokyo

の様子を見ながら同調することでコミュニケーションが成立する。この場合は脳のダイナミクスだけでなく身体のダイナミクスも互いに同調し、これらの引き込み現象によって同調運動が成立していると考えられる。このように共通概念への引き込みはコミュニケーションの本質にかかわる要素であり、コミュニケーションを引き込み現象として明確に表現し、これを設計する手法を確立することはロボットのコミュニケーション原理を実現する上で重要な役割を果たす。文献 [2] ではコミュニケーションと引き込みの重要性が指摘されており、Hosoda ら [3] の結果も引き込みの結果である Joint Attention の獲得を目指した研究であると言える。

ロボットを用いたコミュニケーションの実現を目指した研究は従来より数多くなされてきた。その内容は以下のように大別される。

1. **人とロボットの言語コミュニケーション** プロトコルとして言語が使用され、音声認識技術と発話のメカニズムの研究が中心となる。河原らは連続音声認識システムを開発し [4]、稲邑ら、山肩らは人間の個人モデルを用いて会話の曖昧さの解消を行った [5] [6]。また、西川らは人間に近い発話を実現するロボットの開発を行った [7]。
2. **非言語プロトコルとこれを実現する機構開発** ロボットと人間の親和性に重点を置き、言語に加えジェスチャ、表情などのプロトコルの検討とこれを利用したコミュニケーションの評価に関する研究が中心となる。尾形らは感情モデルをロボットに埋め込み、これに基づくコミュニケーションを実現して人間とのインタラクションに対する評価を行った [8]。神田らはコミュニケーションのためのロボットを開発し、エピソードルールに従った発話・ジェスチャの発生アルゴリズムを開発し、さらに、RFID タグを用いて各個人に固有の応答を示すインタラクションロボットを開発した [9]。小林ら、Breazeal らは顔の表情を持つロボットを開発し、感情の表現手法に関する研究を行った [10] [11]。
3. **ロボット同士のコミュニケーション** 主に群ロボットの制御に用いられ、コミュニケーションに必要な情報の選択とその利用アルゴリズム、プロトコルの開発がその中心となる。倉林らは群ロボットに対して他の個体の戦略を推定し、競合を避けた行動戦略アルゴリズムを開発した [12] [13]。Matsuo らは S³ Robot Net を開発し、ロボットの位置同定を行いながら作業を実行するネットワークロボットの開発を行った [14]。
4. **人とロボットのインタラクション** パートナーとしてのロボットを目指して、人とロボットのインタラクションのための制御法に関する研究が報告されている。池浦ら [15] は人間の可変インピーダンス特性をロボットへ組み込み、竹田ら [16] は隠れマルコフモデル、橋本ら [17] は神経振動子を用いた人間との同調制御法を提案した。これらの方法では人間を主、ロボットを従として、ロボットが人間の動きへ追従するための制御則を導いている。

これらの方法は主に情報通信、プロトコルに関する研究と信号処理の組み合わせであり、人間のような動的なコミュニケーションの実現は難しい。すなわち、得られた音声・ジェスチャ・その

他の信号を処理しこれに基づいた発話・運動の選択ではロボットは決められた行動の組み合わせしか実現せず、相手を考慮しお互いが理解可能な概念へと引き込まれるといったメカニズムは無数の可能性を作り込まなければ実現されにくい。これに対し、小林らはアンサンブルといった動的なコミュニケーションに焦点を当て、「間」の観点から人間の演奏のダイナミクスに関する相互引き込みに対して解析を行った [18]。これにより、コミュニケーションにおける引き込みの重要性が示されるがこれを実現する設計論には至っていない。

一方、我々はこれまでにロボットの運動を軌道アトラクタとして表現し、これを認識・再生する情報処理系を力学系を用いて設計する手法を提案した [19]。また、これにロボットの運動方程式を埋め込み、安定な運動をし続けるコントローラの設計法を示した [20]。この手法ではロボットの運動パターンは先には存在せず、身体を通じた環境との相互作用の中から運動が決定される。そのため、これに相手の情報を取り入れることでお互いに実現可能な運動への引き込み効果が起こり、同調運動が実現可能と考えられる。

本論文では、ロボットのコミュニケーションを引き込みによるロボットの同調運動としてとらえ、力学系の引き込み現象によって生じるコミュニケーション原理を設計・実現する。まず、従来の軌道アトラクタ設計法に対して改良法を提案し、これを用いて軌道アトラクタとしてのロボットの運動を実現する。さらに、同調運動を実現するための制御アルゴリズムを提案し、複数台のロボットにこれを適用することで同調の様子を示す。これは Fig. 2 に示されるような運動における人間のコミュニケーションをロボットに実現するものであり、相手の情報取得、その情報処理、自分の運動決定という流れが、If-then ルールに従ったアルゴリズムではなく、ロボットの身体を含めた力学計算・現象に基づいているという点においてコミュニケーションの原理が軌道アトラクタへの引き込み現象として表現・実現されるものである。

2. 軌道アトラクタの設計法

2.1 力学的情報処理による軌道アトラクタの設計

本章では文献 [20] で提案した軌道アトラクタの設計法を示す。この方法では、

【仮定 1】ロボットの物理モデルが与えられている。

【仮定 2】ロボットの状態変数 $x \in R^n$ がアトラクタとすべき目標運動パターン Ξ

$$\Xi = [\xi_1 \quad \xi_2 \quad \cdots \quad \xi_N] \in R^{n \times N} \quad (1)$$

が与えられている。ただし、 N はデータの数である。

【仮定 3】 Ξ は実現可能である。すなわち、 Ξ を実現する入力列 $u[k]$ ($k = 1, \dots, N$) が存在する。

を仮定する。ただし、【仮定 2】は希望の運動を定めるものであり生じる運動の創発の種として与えるものである。

ロボットの運動方程式を状態変数を $x[k]$ として

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

とする。これを各 ξ_i 周りでテイラー展開し、二次以上の項を無

視した線形近似システムを

$$x[k+1] = A_i x[k] + B_i u[k] + C_i \quad (3)$$

とする。このとき、式 (2) の力学系が Ξ をアトラクタとするための入力 $u[k]$ を $x[k]$ の ℓ 次多項式として

$$u[k] = \Theta \phi(x[k]) \quad (4)$$

によって設計する。ここで $\phi(x[k])$ は $x[k]$ を多項式に展開したベクトルであり、例えば $x[k] \in R^2$, $\ell = 2$ であれば

$$x[k] = [x_1 \quad x_2]^T \quad (5)$$

$$\phi(x[k]) = [1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_1^2 \quad x_1 x_2 \quad x_2^2]^T \quad (6)$$

と表される。 Θ は多項式の各項にかかる係数で構成される行列である。 Θ の設計法を付録 A に示す。式 (4) の関数は力学系にアトラクタへの引き込み (entrainment) を生じさせることから、安定化を行うコントローラと区別するためエントレーナ (entrainer) と呼ぶことにする。

この設計法において式 (A.6) では入力、すなわち $\|U_i^{i+j-1}\|$ の最小化によって入力列が求められている。そのため、 $x[i]$ の経路は後から決まり、付録 A にある【仮定 4】が満たされない。実際、 $x[i]$ の経路は軌道をショートカットする傾向にあり、得られた (x_i, u_i) の組は Ξ をアトラクタとする場の定義にはなっていない。そのため、これから求めたエントレーナを用いて得られたアトラクタは Ξ とは大きく異なる。これは、運動途中にロボットの力学特性が大きく変化する場合 (歩行など) に致命的となる、といった問題を引き起こす。そこで、以下に示すように設計法を改良し、目標の運動と実現される運動が類似のものとなるようにする。

2.2 経路を考慮したアトラクタ設計法

従来の方では (x_i, u_i) を求める際に経路が考慮されていなかった。そこで、これを経路を考慮した方法へと改良する。従来の方では式 (A.1) により j ステップ先の $x[i+j]$ だけが考慮されていた。これを 1 から j ステップ先すべてを考慮するよう、式 (A.1) を以下のように変形する。

$$X_{i+1}^{i+j} = A x[i] + B U_i^{i+j-1} + C \quad (7)$$

$$X_{i+1}^{i+j} = [x^T[i+1] \quad \cdots \quad x^T[i+j]]^T \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_i^T & \cdots & \left(\prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \right)^T \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_i & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ \left(\prod_{k=i+1}^{i+j-1} A_k \right) B_i & \cdots & B_{i+j-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_i \\ \vdots \\ C_{i+j-1} + \sum_{k=i}^{i+j-2} \left(\left(\prod_{\ell=k+1}^{i+j-1} A_\ell \right) C_k \right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

U_i^{i+j-1} は式 (A.4) で定義される。これは、線形系の場合 (A_i , B_i , C_i が一定の場合)

$$X = \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{j-1} \end{bmatrix} x[i] + \begin{bmatrix} B & 0 \\ \vdots & \ddots \\ A^{j-1} B & \cdots & B \end{bmatrix} U_i^{i+j-1} + \begin{bmatrix} C \\ \vdots \\ C + \cdots + A^{j-1} C \end{bmatrix} \quad (12)$$

であることに相当する。これより、軌道を考慮した入力列は

$$U_i^{i+j-1} = B^\# (\Xi_{i+1}^{i+j} - A x[i] - C) \quad (13)$$

$$\Xi_{i+1}^{i+j} = [\xi_{i+1}^T \quad \xi_{i+2}^T \quad \cdots \quad \xi_{i+j}^T]^T \quad (14)$$

によって与えられる。これは、

$$J = \sum_{k=i+1}^{i+j} \|\xi_k - x[k]\| \quad (15)$$

の最小化に相当し、 $x[k]$ ($k = i+1, \dots, i+j$) が Ξ に沿って移動するための入力列 U_i^{i+j-1} を求めていることに相当する。

2.3 アトラクタ設計によるタップダンス動作生成

2.3.1 タップダンスロボット

ここでは、Fig. 3 に表されるロボットを対象とする。このロボットは左右足の長さや上体部揺動の 3 自由度を有する。上体でバランスをとり安定化しながら左右の足を切り換えて足踏み動作を行うものである。特に脚部は

(1) 足底は常に下を向いたまま足底面と垂直に直線運動をする。これは地面に対して鉛直方向上向きに反力を与え、その場でのタップダンスを実現するためである。

(2) タップダンス動作では地面から大きな衝撃力を受ける。このとき脚部の運動におけるバックラッシュはリンクの破壊を生じさせるため、歯車を使わずにリンク機構とする。

を配慮した。これより Fig. 4 に表されるような空間閉リンク機構を用いて設計した。この機構は 2 組の平行リンクの動きを図の A 部によってカップリングさせるものである。これにより、モータの回転運動を足底の鉛直運動に変換し、しかもバックラッシュのない直線運動を実現した。さらに、コミュニケーションを

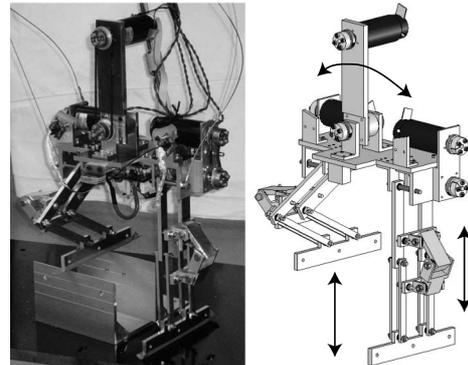


Fig. 3 Tapping dance robot

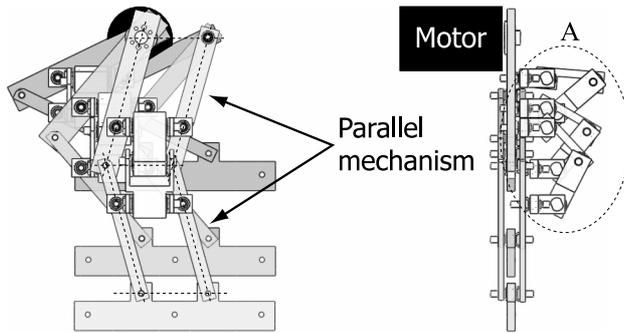


Fig. 4 Leg mechanism with 3D closed loop chain

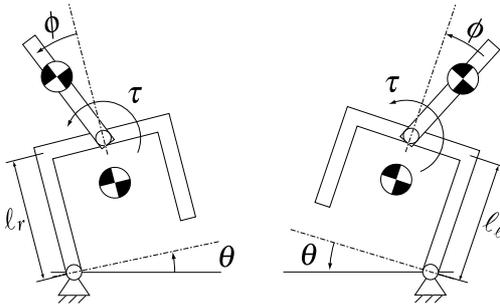


Fig. 5 Dynamical model of tap dance robot

実現するため、大きさの異なる2体のタップダンスロボットを製作した。なお、二つのロボットは高さ350 [mm], 450 [mm], 質量3.3 [kg], 3.4 [kg]のほぼ相似な形をしている。

2.3.2 ロボットのモデル化と状態変数の計測

次に上記の方法を用いてロボットのタップダンス動作を生成する。このロボットをFig. 5のように右足接地状態、左足接地状態の2通りの場合に分けて運動方程式を求めた。ただし、簡単のため l_r , l_l は θ の関数とし、タップダンス動作をしやすくした。これによりロボットの状態変数 $x[k]$ は

$$x[k] = [\theta[k] \quad \dot{\theta}[k] \quad \phi[k] \quad \dot{\phi}[k]]^T \quad (16)$$

であり、入力にはトルク τ である。 θ , $\dot{\theta}$ はロボットに搭載したジャイロセンサ・加速度センサを用いて以下の方法により計測した。 θ は初期値を零としジャイロセンサから得られる角速度 ω_g を積分することで求められる。離散時間系ではサンプリングタイムを T として

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \omega_g T \quad (17)$$

によって得られる。ジャイロセンサ値は温度ドリフトを持ち、また、式(17)は積分のオイラー近似であるため誤差によるドリフトを発生する。そこで、加速度センサを用いてドリフトの補正を行う。機体に働く加速度は重力のみとして加速度センサから得られた情報に基づき θ を求め、これを θ_{acc} とする。実際には θ_{acc} には重力加速度だけでなく運動によって発生する加速度も含まれるため、式(17)を

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \omega_g T + K(\theta_{acc}[k] - \theta[k]) \quad (18)$$

として θ を求めた。ただし、 K は適当な定数である。これによ

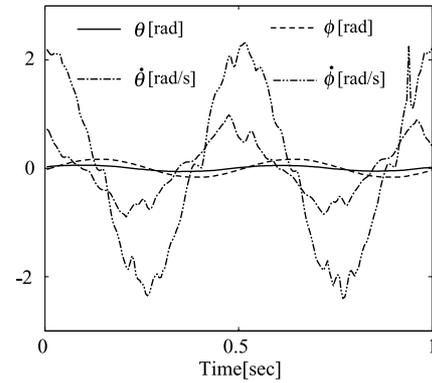
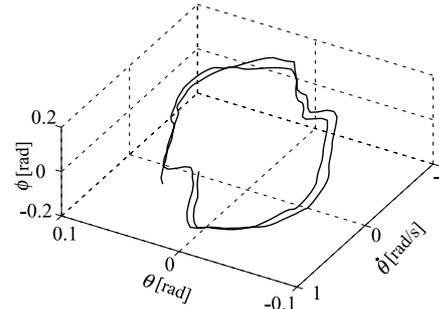


Fig. 6 Experimental data with sine pattern input



り、ドリフト項を除去した角度が得られる。また、このときの $\dot{\theta}$ は

$$\dot{\theta}[k] = \omega_g + \frac{K(\theta_{acc}[k] - \theta[k])}{T} \quad (19)$$

によって得られる。

2.3.3 目標パターンの獲得

タップダンス動作は動作中にロボットの力学特性が大きく変化するため、【仮定3】を満たす目標パターン Ξ を定めにくい。そこで、 ϕ に対して目標角度 ϕ_{ref}

$$\phi_{ref}(t) = a \sin(\omega t) \quad (20)$$

を定め、入力 τ を

$$\tau = K_\phi(\phi_{ref}(t) - \phi) \quad (21)$$

としてロボットを動かした。ただし、 a , ω , K_ϕ は適当な定数として与えた。このとき、適当な初期値を与えることでロボットはFig. 6に示されるような動きをとった。タップダンスの成立・不成立は初期姿勢に大きく依存する。また、この運動はタップダンスを実現しているもののその周期は一定ではない。特に初期値に比べ最終値が軌道の中心から外へ向かっているような場合、これを規範として設計されたアトラクタは外へと広がる形態を持ち、系を不安定化する。そこで、初期値と最終値が一致するよう得られたデータから目標パターン Ξ を以下の方法によってフィルタリングし獲得した。

Step 1 得られたデータ $x[k]$ を次式のようにフーリエ級数展開する。

$$x[k] = \sum_{i=1}^{N/2} a_i \sin(\omega_i k + \phi_i), \quad \omega_i = \frac{2\pi i}{N} \quad (22)$$

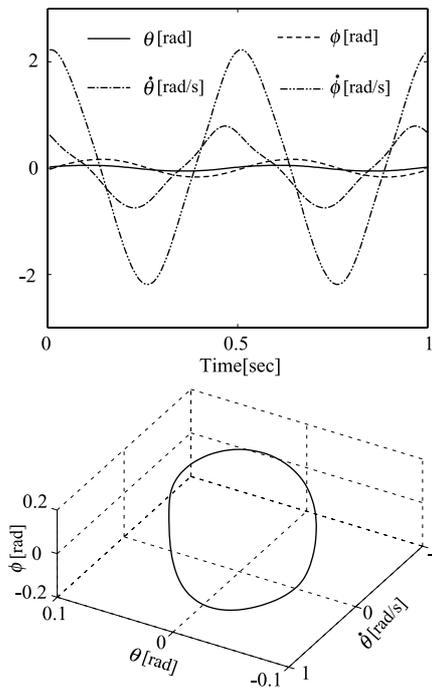


Fig. 7 FFT filtered data

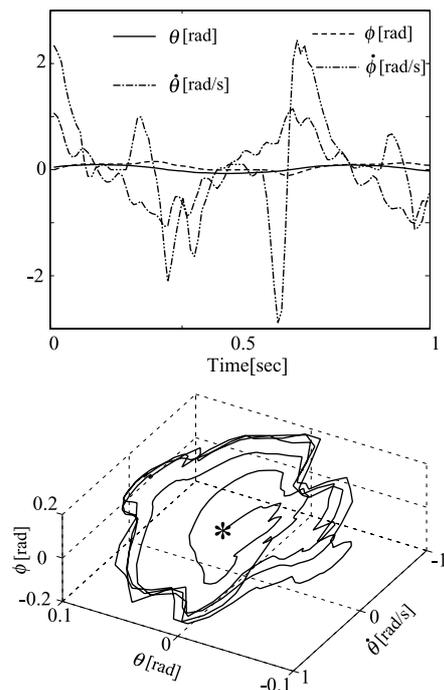


Fig. 8 Experimental data of tap dance via attractor design

Step 2 式 (20) における ω の整数倍の周波数成分のみを取り出して $x[k]$ を再生し, これを $\hat{x}[k]$ とする.

Step 3 得られた $\hat{x}[k]$ を ξ_i とし, Ξ を獲得する. 入力 $\tau[k]$ にも同様のフィルタを施す. これは C_i を求めるときに用いる.

このフィルタリングにより, Fig. 6 の結果は Fig. 7 のように周期的な運動 (初期値と最終値が一致する) となった. さらに, Fig. 7 から分かるように θ, ϕ に比べ $\dot{\theta}, \dot{\phi}$ の数値的なオーダーは大きく異なる. これはエントレーナを設計する際, 式 (6) の多項式展開において n 次の項に大きな差をもたらさ望ましくない. そこで, 主成分分析による座標変換によって状態変数の各要素の大きさをそろえた空間を求め, この状態空間内でエントレーナを設計するものとする. この座標変換行列 T は以下のように得られる. 得られた Ξ を以下のように特異値分解する.

$$\Xi = USV^T \quad (23)$$

$$U \in R^{n \times n}, S \in R^{n \times n}, V \in R^{N \times n} \quad (24)$$

このとき,

$$V^T V = I \quad (25)$$

であることから, V^T の横ベクトルは大きさ 1 となるので求める座標変換行列 T を

$$T = \frac{1}{N} US \quad (26)$$

とする. これによって得られた $\hat{x}[k]$

$$\hat{x}[k] = T x[k] \quad (27)$$

は状態ベクトルの各要素の大きさが正規化されたものとなり, エ

ントレーナの多項式設計を容易にする.

Fig. 7 で得られたデータは【仮定 3】を満たすことを保証しない. 【仮定 3】はアトラクタ設計における実現可能性を示すための仮定であり, これを満たす軌道が先に与えられる場合は少ない. これは目標パターン Ξ はエントレーナから運動が創発されるための種であることを意味している.

2.3.4 アトラクタの実現

上記 Ξ を用いてアトラクタの設計を行い, タップダンス動作を実現した. この結果を Fig. 8 に示す. ここで, * は初期値 $x[0] = 0$ を意味し, 直立した状態からタップダンス運動へ引き込まれる様子を示している. また, Fig. 8 下図はアトラクタへ引き込まれている様子を示しているが, 上図はそのなかの 2 周期分のみを示している. さらに, 実験の様子を Fig. 9 に示す. このように, 運動途中にロボットの力学特性が大きく変化するシステムに対して, 目標の運動を実現させることが可能となった.

3. ロボットの同調制御とコミュニケーション

3.1 同調制御のための制御則

前章の方法により, ロボットの力学系がアトラクタに引き込まれることでタップダンスが実現された. このとき, ロボットは自分の身体・環境の相互作用によって自分の運動を実現している. これはロボット独自の運動を獲得していることに相当する. 本章では, 独自の運動を行っている複数台のロボットが状態変数を交換し, 相手との同調運動を行う制御系の設計を行う. このとき, 複数のロボットはお互いに相手の情報を利用して相手に合った運動をすることから, 自分と相手が理解可能なアトラクタへと引き込まれているといえる. これはお互いに理解可能な概念への相互引き込みととらえられ, コミュニケーション原理に相当するものであると解釈される. すなわち, アトラクタ

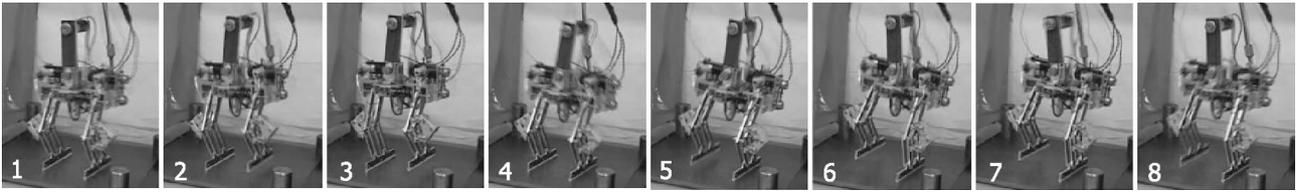


Fig. 9 Realization of tap dance

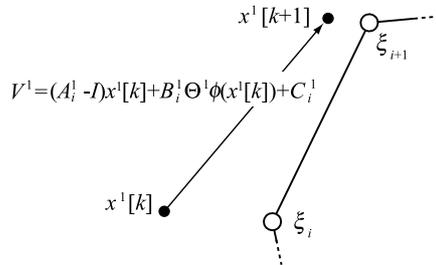


Fig. 10 Movement of the dynamics in state space

に引き込まれることで運動を実現している複数のロボットが同調して運動をするとき、アトラクタへの引き込みとしてコミュニケーションが表現され、さらに、コミュニケーションが成立していると見ることができる。

エントレーナによって軌道アトラクタへと引き込まれている二つの力学系を考える。

$$x^1[k+1] = A_i^1 x^1[k] + B_i^1 u^1[k] + C_i^1 \quad (28)$$

$$u^1[k] = \Theta^1 \phi(x^1[k]) \quad (29)$$

$$x^2[k+1] = A_j^2 x^2[k] + B_j^2 u^2[k] + C_j^2 \quad (30)$$

$$u^2[k] = \Theta^2 \phi(x^2[k]) \quad (31)$$

ここで、式 (28) は Fig. 10 に表されるように現在の状態 $x^1[k]$ が

$$V^1 = (A_i^1 - I)x^1[k] + B_i^1 u^1[k] + C_i^1 \quad (32)$$

によって $x^1[k+1]$ へ移動することを意味している。このとき、二つの力学系の状態変数 $x^\ell[k]$ が相互に近づき合うための入力を考える。式 (29) の入力に対して、

$$u^1[k] = \Theta^1 \phi(x^1[k]) + \delta u^1[k] \quad (33)$$

を考え、これにより式 (28) が次式のように変化したとする。

$$x^1[k+1] + \delta = A_i^1 x^1[k] + B_i^1 (\Theta^1 \phi(x^1[k]) + \delta u^1[k]) + C_i^1 \quad (34)$$

これより、

$$\delta = B_i^1 \delta u^1[k] \quad (35)$$

が導かれる。これより、式 (28) の力学系を式 (30) の力学系に近づけるための入力を

$$\delta u^1[k] = B_i^{1\#} \delta = B_i^{1\#} \Lambda (x^2[k] - x^1[k]) \quad (36)$$

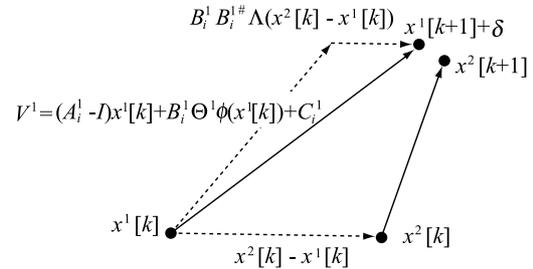


Fig. 11 Movement of the dynamics with motion synchronization

とする。ただし、 Λ は比例定数であり相手への同調度合いを定めるパラメータである。 $\Lambda = 0$ のとき相手の情報を用いず独自の運動をし続け、 $\Lambda = 1$ のとき独自の運動を行わず相手への同調のみを行う。これは Fig. 11 に表されるように、 $x^1[k]$ に

$$\widehat{V}^1 = (A_i^1 - I)x^1[k] + B_i^1 u^1[k] + C_i^1 + B_i^1 B_i^{1\#} \Lambda (x^2[k] - x^1[k]) \quad (37)$$

を加え、 $x^1[k+1] + \delta$ へ持つて行くことを意味している。これより、二つの力学系がお互いに近づき合い同調制御をするための入力は、式 (29)、(31) を

$$u^1[k] = \Theta^1 \phi(x^1[k]) + B_i^{1\#} \Lambda^1 (x^2[k] - x^1[k]) \quad (38)$$

$$u^2[k] = \Theta^2 \phi(x^2[k]) + B_i^{2\#} \Lambda^2 (x^1[k] - x^2[k]) \quad (39)$$

とすればよい。特にタップダンスロボットの場合、 B_i^1 、 B_j^2 は ξ_i^1 、 ξ_j^2 の変化に対して微小変化しかしないため、1 周期における平均の値 \bar{B}^1 、 \bar{B}^2

$$\bar{B}^\ell = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B_i^\ell \quad (40)$$

を用いることとした。

3.2 タップダンスロボットのコミュニケーション実現

二つのタップダンスロボット L (Large) と S (Small) に対してエントレーナを設計し、タップダンス動作を実現した。このときの応答を Fig. 12 に示す。同調の様子を見やすくするため、上図は L 、 S の θ の時間応答のみを示しており、下図はそれらの差を表している。このときロボット L は約 1.8 [Hz] で、ロボット S は約 1.6 [Hz] でタップダンス動作を実現した。正確にはそれぞれのロボットのタップダンス動作はエントレーナによって生成されており、実現された運動は足裏の滑り、着地の

衝撃力などの影響で一定周期の運動は行えない．そのため，これは平均の運動周期である．周波数の違いから θ_L と θ_S の差はうなりを生じている．これはコミュニケーションが成立しておらず，それぞれのロボットが独自の運動を行っていることを表している．次に，式 (38)，式 (39) の Λ^1 ， Λ^2 をそれぞれ Λ^L ， Λ^S とし，

$$\Lambda^L = 0.2I, \quad \Lambda^S = 0.4I \quad (41)$$

として同調制御を行った．このときの応答を **Fig. 13** に示す．**Fig. 12** と同様にロボット L ， S の θ の時間応答とその差を表す．**Fig. 12** と比較し，6 [s] 付近から二つのロボットが同調している様子が理解できる．また， $\theta_L - \theta_S$ の差も小さくなり，同調の様子を示している．さらに，このとき実現されたタップダンスは約 1.7 [Hz] の運動となり，二つのロボットがお互いに実現可能な運動へと引き込まれている．これより，二つのロボットが情

報を相互交換し共通の概念へと引き込まれるコミュニケーションが成立していることが理解できる．実験の様子を **Fig. 14** に示す．上図はコミュニケーションなし，下図がコミュニケーションありの場合の 1 周期分のタップダンス動作を示している．

異なる周期で運動している二つのロボットが同調運動したことは，アトラクタを有している二つの力学系が式 (38)，(39) の制御則によって結合され，二つを合わせた状態空間の中で引き込み現象を起こしたことを意味している．すなわち，二つのロボットが情報交換を行うことで，引き込み現象としてコミュニケーションの成立が実現されたことを意味しているといえる．特に，相手の情報取得，その処理，自分の行動決定といった流れが式 (38)，(39) の制御則によって実現されている点において，コミュニケーションのための情報処理が力学計算として実行されている点に注意したい．また，式 (41) の値によって，同調の度合いが変化することも実験によって確認している．

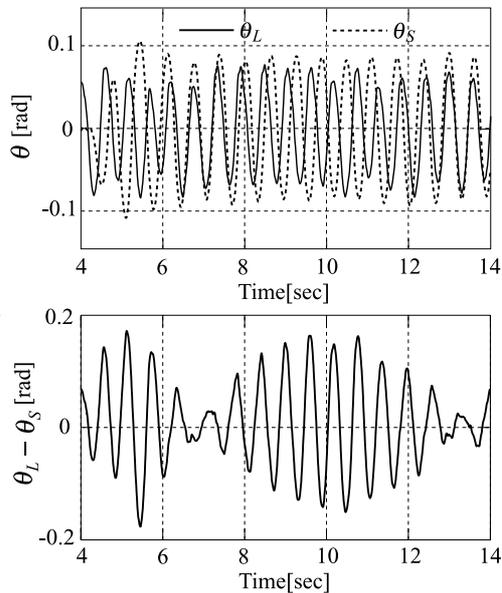


Fig. 12 Tap dance motions without communication

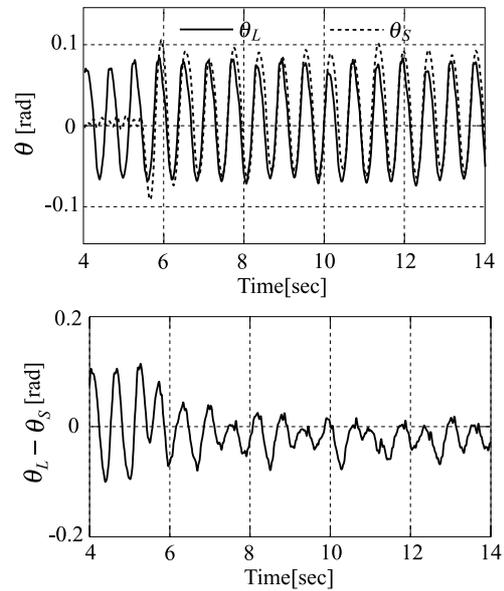


Fig. 13 Tap dance motions with communication

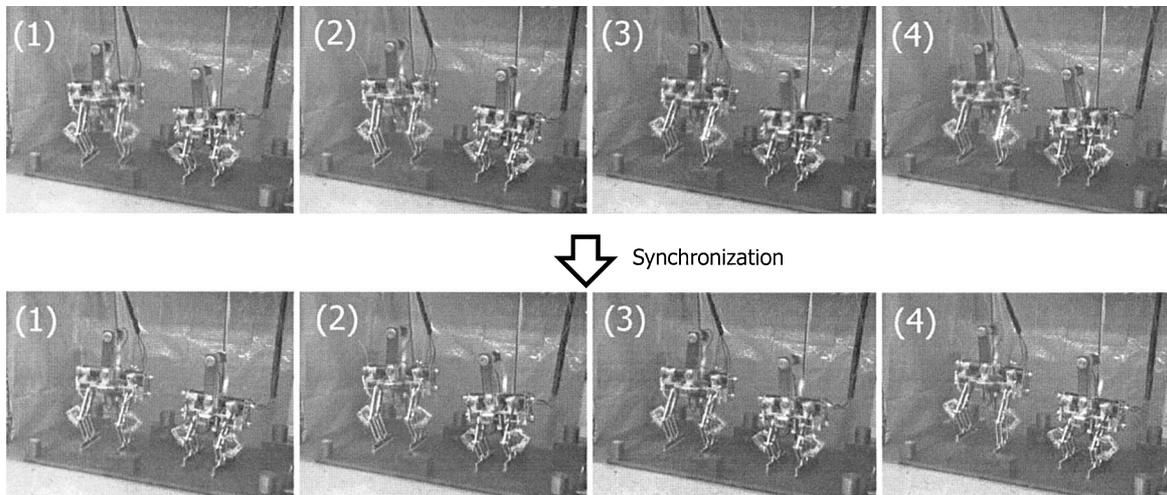


Fig. 14 Motion synchronization of tap dance robots

4. おわりに

本論文ではロボットを軌道アトラクタへと安定化させ、これを用いてロボットのコミュニケーション原理を表現した。本論文の成果を以下に示す。

- 従来のアトラクタ設計法の問題点を明確化し、これを改善する方法を提案した。具体的には、従来法では入力最小化によって入力列を定めていたため、得られる軌道は目標軌道と大きく異なることを指摘し、これを軌道を考慮した設計法に改良した。
- 上記改良法をタップダンスロボットへ適用し、運動途中でロボットの力学特性が大きく変化する運動を軌道アトラクタによって実現した。
- 二つのロボットの状態変数を相互交換することで、同調運動を行うための制御則を提案した。
- 二つのタップダンスロボットを設計し、これらに独自の運動（周波数の異なる運動）を設計した後、同調制御を行うことで共通の周波数の運動へと引き込ませた。
- 本論文の結果は、複数の力学系を共通の軌道へ引き込まれる現象を設計したものであり、これはコミュニケーションにおける概念への引き込みと翻訳可能である。
- 特に、これは運動パターンを持たない運動、すなわち、軌道アトラクタへの引き込みとして運動を生成することに大きな要素を持っている。

謝辞 本研究は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(A03)「力学的情報処理による記号空間と運動空間の結合設計」(研究代表者：岡田昌史)、東京工業大学研究助成(若手教員研究基盤整備助成)、および日本学術振興会科学研究費補助金若手研究(A)「力学的観点に立ったロボットの身体と知能の相互発達と運動の創発」(研究代表者：岡田昌史)の支援を受けた。

参考文献

- [1] F.E.X. Dance and C.E. Larson: The functions of human communication: A theoretical approach. Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [2] 渡辺富夫: “身体的コミュニケーションにおける引き込みと身体性—心が通う身体的コミュニケーションシステム E-COSMIC の開発を通して—”, ベビーサイエンス, vol.2, pp.4-12, 2003.
- [3] K. Hosoda, H. Suminoka, A. Morita and M. Asada: “Acquisition of Human-Robot Joint Attention through Real-time Natural Interaction,” Proc. of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2867-2872, 2004.
- [4] 河原, 李: “連続音声認識ソフトウェア Julius”, 人工知能学会誌, vol.20, no.1, pp.41-49, 2005.
- [5] 稲邑, 稲葉, 井上: “ユーザとの対話に基づく段階的な行動決定モデルの獲得”, 日本ロボット学会誌, vol.19, no.8, pp.983-990, 2001.
- [6] 山肩, 河原, 奥野, 美濃: “音声対話システムにおける物体指示のための信念ネットワークを用いた曖昧性の解消”, 人工知能学会論文誌, vol.19, no.1, pp.47-56, 2004.
- [7] 西川, 林, 高信, 持田, 誉田, 高西: “人間形発話ロボットによる母音および子音発声の実現—第3報, より人間に近い発声を目指した新型発話ロボットの開発—”, 日本機械学会論文集 C, vol.69, no.683, pp.139-144, 2003.
- [8] 尾形, 菅野: “人間とロボットの情緒的コミュニケーションの実験的評価—アーム・ハンドによる人間との物理的インタラクション—”, システム制御情報学会, vol.13, no.12, pp.566-574, 2000.

- [9] 神田, 平野, ダニエル, 石黒: “日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット—語学教育への適用の試み—”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.5, pp.636-647, 2004.
- [10] 小林, 市川, 千田, 椎葉: “顔ロボット IV の開発—制御点の刷新と構造の改良—”, 日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会, 2C14, 2002.
- [11] C. Breazeal and B. Scassellati: “How to build robots that make friends and influence people,” Proc. of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.2, pp.858-863, 1999.
- [12] 藤原, 倉林, 沖田: “協働群における行動戦略最適化—競合期待値を最小化する行動戦略決定—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04, 2A1-L1-32, 2004.
- [13] 沖田, 倉林, 藤原: “協働群における行動戦略最適化—他エージェントの行動戦略推定—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'04, 2A1-L1-33, 2004.
- [14] Y. Matsuo and Y. Tamura: “Three Formation Multi-Robot System for Victim Search in a Devastated Indoor Space,” Proc. of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1071-1076, 2004.
- [15] 池浦良淳: “ロボット—人間協調システムのモデリング”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.3, pp.331-336, 2000.
- [16] 竹田, 小菅, 平田: “ダンスパートなロボットシステム—MS DanceR—第5報: 隠れマルコフモデルを用いたダンスステップの推定と複数ユーザへの適用—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-N-057, 2005.
- [17] 橋本, 春日, 一葉: “同調性を考慮した人間とロボットの握手インタラクション”, 第11回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.56-61, 2006.
- [18] 小林, 三宅: “階層化された相互引き込みモデルに基づくアンサンブルシステム”, 計測自動制御学会論文集, vol.41, no.8, pp.702-711, 2005.
- [19] 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.
- [20] 岡田, 大里, 中村: “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”, 計測自動制御学会論文誌, vol.41, no.6, pp.533-540, 2005.

付録 A. Θ の設計法

式(3)の力学系において、 ξ_i の近傍の点 $x[i]$ を考える。入力 $u[k]$ ($k = i, i+1, \dots, i+j-1$)を施すことで、 $x[i]$ は j ステップ先で

$$x[i+j] = \mathbf{A}x[i] + \mathbf{B}U_i^{i+j-1} + \mathbf{C} \quad (\text{A.1})$$

$$\mathbf{A} = \prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{B} = \left[B_i \quad \cdots \quad \left(\prod_{k=i}^{i+j-1} A_k \right) B_{i+j-1} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$U_i^{i+j-1} = \begin{bmatrix} u^T[i] & \cdots & u^T[i+j-1] \end{bmatrix}^T \quad (\text{A.4})$$

$$\mathbf{C} = \left[C_{i+j-1} + \sum_{k=i}^{i+j-2} \left(\left(\prod_{\ell=k+1}^{i+j-1} A_\ell \right) C_k \right) \right] \quad (\text{A.5})$$

と表される。ただし、ここで

【仮定 4】 $x[k]$ ($k = i, \dots, i+j-1$)は Ξ に沿って移動する。を仮定している。この関係を用いて、 $x[i+j]$ を ξ_{i+j} に一致させるための入力列は

$$U_i^{i+j-1} = B^\#(\xi_{i+j} - Ax[i] - C) \quad (\text{A.6})$$

で得られる。また、そのときの経路は式 (3) に得られた入力を順次加えることで得られる。全ての ξ_i ($i = 1, 2, \dots, N$) の周りで m 個の $x[i]$ を定義することで、 x と u の組 (u_k, x_k) ($k = 1, 2, \dots, iN$) が得られ、これらを用いて

$$U = \Theta\Phi \quad (\text{A.7})$$

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_{iN}] \quad (\text{A.8})$$

$$\Phi = [\phi(x_1) \quad \phi(x_2) \quad \dots \quad \phi(x_{iN})] \quad (\text{A.9})$$

の関係が得られるので、 Θ は

$$\Theta = U\Phi^\# \quad (\text{A.10})$$

によって得られる。



岡田昌史 (Masafumi Okada)

1969年3月21日生。1992年3月京都大学工学部精密工学科卒業。1996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）。1996年10月日本学術振興会特別研究員（PD）。1997年2月東京大学大学院工学系研究科リサーチ・アソシエイト。2000年4月同大学大学院工学系研究科講師。2004年4月東京工業大学大学院理工学系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システムの研究に従事。計測自動制御学会，IEEEの会員。（日本ロボット学会正会員）



村上健治 (Kenji Murakami)

1982年7月27日生。2006年3月東京工業大学工学部機械知能システム学科卒業。2007年4月東京大学大学院工学系研究科海洋環境工学専攻入学。現在に至る。