

# 軌道アトラクタを用いたロボットの間調運動制御とコミュニケーションの表現

## Robot Motion Synchronization and Communication Based on Orbit Attractor

村上健治 岡田昌史 岩附信行 (東工大)

\*Kenji MURAKAMI, Masafumi OKADA and Nobuyuki IWATSUKI (Tokyo Inst. of Tech.)

**Abstract**—In human-human communications, we share the common sense and mutually understand. The principal of communication is modeled by an entrainment phenomenon of the brain dynamics. For the robot motion, the principal of the communication is interpreted into the motion synchronization, which is the entrainment phenomenon of the different dynamics. In this paper, we propose a control law for robot motion synchronization to represent the robot communication principle. We design two tap dance robots having different sizes, and realize the motion synchronization by an orbit attractor design method. Experimental result is illustrated and robot-robot communication is realized.

**Key Words:** dynamics-based information processing, attractor design, motion synchronization, robot communication

### 1. はじめに

人間が他者と会話や共同作業を行う場合、意思の疎通・コミュニケーションが発生している。コミュニケーションの概念は単なる情報伝達の一言では言い尽くせない内包をもって我々の日常生活に存在しており、学問的研究の対象としても認知されている。しかし、複雑なあり方を見せるコミュニケーションという概念の本質に迫ることは容易ではなく、例えば Dance らによるコミュニケーションの分類は 126 種にも及ぶ [1]。本研究はこの多様性に対応するべく、人間の高次なコミュニケーションの原理をモデル化する方法を提案する。

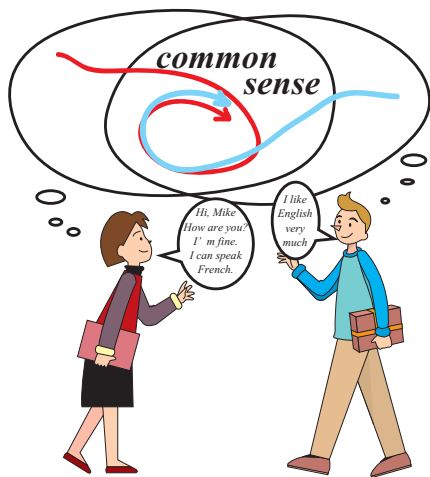


Fig.1 Human-human communication

人間のコミュニケーションにおいては、Fig.1 のように異なるバックグラウンドをもつ個体同士が言語やジェスチャー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ていくという引き込み現象が存在する [2][3]。これは脳のダイナミクスでの引き込み現象として捉えられ、さらに、人間のダンスのような運動のコミュニケーションにおいては、それぞれの個体が個別に獲得した独自の運動を、互いに相手の運動の様子を見ながら同調する、身体のダイナミクスの引き込みも発生する。このようなダイナミ

クスの引き込み現象はコミュニケーション原理の本質に関わる要素であり、コミュニケーションモデルの構築のためには引き込み現象という観点に立った、ダイナミクスによるモデル化が重要である。



Fig.2 Robot-robot communication

本研究では、身体のダイナミクスの引き込み現象として Fig.2 のようなロボット同士の相互作用による同調運動を採り上げ、相違な身体をもつロボットにとって共通に理解可能な概念、すなわちそれぞれが共通に実現可能な運動への引き込み現象を実現することで、コミュニケーション原理を表現する。

### 2. 同調運動制御の手法

#### 2.1 軌道アトラクタ

力学系の引き込み現象の実現のため、引き込みを有する運動表現である軌道アトラクタとしての運動表現 [4] を用い、力学系を安定軌道 (軌道アトラクタ) に引き込ませるようなコントローラを設計する。この手法では、軌道アトラクタとなる状態空間内の閉曲線である周期運動へのベクトル場が設計される。このとき、あるロボットの運動方程式

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

において、力学系への入力である  $u$  は次式のように状態  $x$  によって一意に定まる。

$$u = g(x) \quad (2)$$

この手法ではタイムスタンプを刻まれた点の集合としての運動パターンは存在せず、コントローラがロボットに実装され環境と相互に作用することで結果として

運動が生成される．そこで，これに相手のロボットの情報も取り込み，環境，身体（相手と自分）の相互作用から生まれる運動により，ロボットを同調させることでコミュニケーション原理を実現する．

## 2.2 力学系の軌道変化のための入力 $u_\delta$

同調の実現のため，軌道アトラクタを有する力学系の次ステップの状態を適当な方向に遷移させる入力  $u_\delta$  を考える．非線形な運動方程式をある点  $\xi_i$  の近傍で線形近似すると次式のように書ける．

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

ここで  $x[k+1]$  近傍の点  $x[k+1]+\delta$  に向かうための新たな入力  $u_\delta$  を加えることを考える． $x[k+1]+\delta$  が  $\xi_i$  に十分近ければ  $x[k+1]+\delta$  においても式 (3) が成り立つので

$$x[k+1] + \delta = A_i x[k] + B_i u(x[k]) + u_\delta + C_i \quad (4)$$

が成り立つ．式 (3) と式 (4) より， $\xi_i$  近傍の状態  $x[k]$  から  $x[k+1]+\delta$  に向かうため加えるべき入力は， $B_i$  の擬似逆行列  $B_i^\#$  を用いて

$$u_\delta = B_i^\# \delta \quad (5)$$

となる．

## 2.3 同調運動制御則

2.2 の方法を用い，軌道アトラクタを有する 2 つの相違な力学系を同調させる同調運動制御則について述べる．Fig.3 にその模式図を示す．

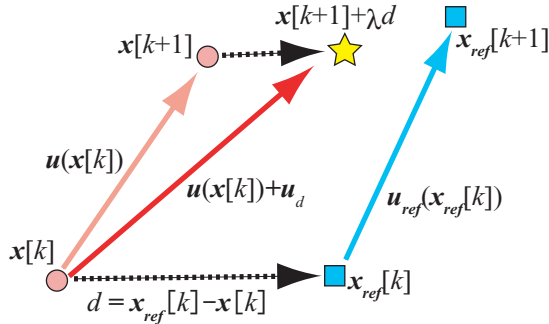


Fig.3 Input  $u_d$  for synchronization

まず，ある瞬間  $k$  における同調する側の状態量  $x[k]$  と同調される側の状態量  $x_{ref}[k]$  を考える．個別に運動している場合の次ステップにおける状態量  $x[k+1]$ ,  $x_{ref}[k+1]$  とする．このとき，2 つの力学系が似通ったものであれば運動の同調は次ステップの状態量の差

$$x_{ref}[k+1] - x[k+1] \quad (6)$$

を小さくしていくことで実現される．そこで，Fig.3 の下部に破線で示した現在の状態量の差を表すベクトル

$$d = x_{ref}[k] - x[k] \quad (7)$$

を定義し，これにスカラーである同調係数  $\lambda$  を乗じたベクトル

$$\lambda d = \lambda(x_{ref}[k] - x[k]) \quad (8)$$

を考える．これを式 (5) に代入した

$$u_d = B_i^\# \lambda d \quad (9)$$

なる入力  $u_d$  を力学系に付加すれば，互いの状態量の差が小さくなることによって同調運動制御が実現される．このとき同調係数  $\lambda$  は相手の状態に引き込まれる度合いを表す．以上の同調運動制御則は，2 つの力学系において以下に挙げる条件，

1. 状態量の同調が運動の同調とみなせる
2. 次ステップに到達する状態が 2 つの力学系でほぼ同じ方向にある

を満たしていることが必要となる．すなわち，身体が大きく異なるロボットであればそのダイナミクスも異なり，同調は実現されない．これはお互いが理解可能なバックグラウンドをもっておらず，コミュニケーションが成立しないことに相当する．

## 2.4 同調運動制御によるコミュニケーションの表現

以上に述べた軌道アトラクタを有する力学系の同調運動制御則により，コミュニケーションの原理を力学系の引き込みによってモデル化・表現する．このモデル化の具体的内容をここで述べる．まず，複数の相違な力学系として力学条件の異なる 2 台のロボットを同調運動制御の対象とする．2.3 の同調運動制御則を実装するにあたっては軌道アトラクタを設計する必要があるため，周期運動を同調の対象としなければならない．そこで，リズムカルで同調の様子が理解しやすい周期運動として，タップダンスを用いる．ここで言うタップダンスとは 2 足ロボットが左右いずれかの足で接地し，接地足を周期的に入れ替えることで一定のリズムを刻む運動である．それぞれが異なる身体をもつという事実を運動方程式により多く含ませるため，接地足は地面と線接触とし動的にタップダンスを行うものとする．

## 3. 実機実験

### 3.1 タップダンスロボット

実機実験の対象であるタップダンスロボットを Large と Small の 2 台設計・製作した．写真を Fig.4 に示す．揺動する頭部，伸縮する 2 本の脚の 3 自由度機構であるが，左右の脚長は胴体の地面に対する傾きに比例して伸縮するものとし，頭部を揺動するモータへの入力  $u$  のみの 1 入力システムとして扱う．足裏は地面と線接触とみなせるよう，前後に長くかつ細く設計した．

軌道アトラクタ設計にあたっては実機を Fig.5 に示すようにモデル化する．脚と胴体からなる下部リンクの地面に対する角度  $\theta$  と頭部の胴体に対する角度  $\phi$  をとり，

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \dot{\theta} & \phi & \dot{\phi} \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

の 4 次元ベクトルを状態量としてとる．このモデルに対し軌道アトラクタを設計し，シミュレーションを行った結果を Fig.6 に示す．状態空間内に設計された軌道アトラクタへの引き込みの様子を 4 次元空間から  $\theta - \dot{\theta} - \phi$  の 3 次元空間に射影して表したものである．

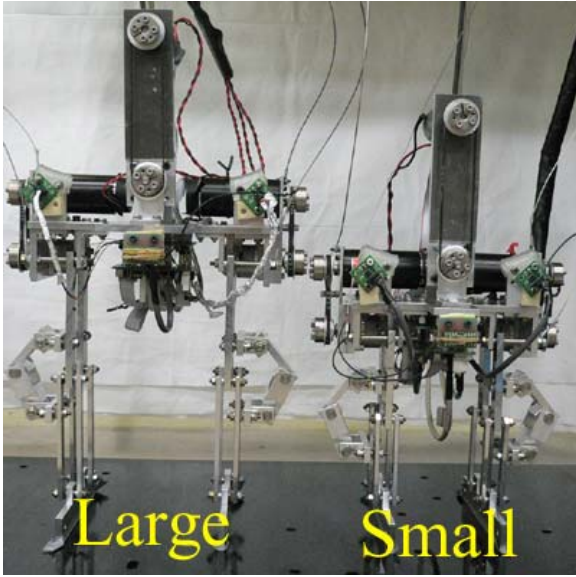


Fig.4 Tap dance robots

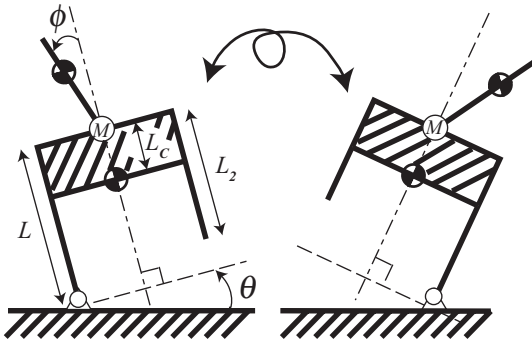


Fig.5 Model of robot

破線が軌道アトラクタとなるべき与えられた周期運動, 実線が状態空間内における状態の軌跡, \*印が初期値

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & -0.01 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

を表す. グラフから軌道アトラクタへの引き込みによってタップダンスが実現できていることがわかる. また, 実機においてもそれぞれのロボットで軌道アトラクタによるタップダンスを実現した.

### 3.2 同調実験

同調運動制御則を用い, 実機による同調実験を行う. 2台のロボットには個別のコントローラが実装されており, 自身の力学特性を利用した動的なタップダンスを行うことが可能である. 同調運動制御の結果 Large, Small 両ロボットが, 共通に理解可能な概念である双方にとって実現可能な運動に引き込まれれば, コミュニケーションの表現として成立する. そこで, 同調運動制御則の式 (8) における同調係数  $\lambda$  を, Large が Small に引き込まれる割合  $\lambda_{Large}$  と Small が Large に引き込まれる割合  $\lambda_{Small}$  の 2 つ定義し, 双方向の同調を行う. なお, このロボットの場合  $\xi_i$  によらず  $B_i^\#$  は一定であり, 式 (9) の同調運動制御則の実装が容易である. 実験の様子を連続写真で Fig.7 に示す. 状態量  $x$  の

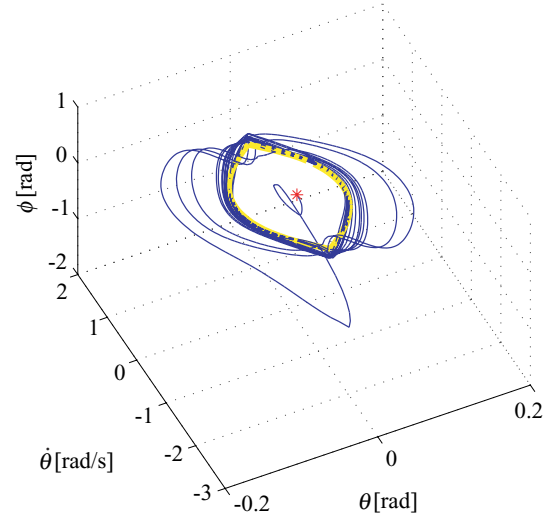


Fig.6 Simulation result of tap dance

内, タップダンスを最もよく表す状態量は胴体のロール角  $\theta$  であり, Large と Small の  $\theta$  の差はタップダンスの同調の程度を表すと考えられるため, 実験結果はこれらの時系列に沿った変化によって示す. Fig.8 に

$$\lambda_{Large} = \lambda_{Small} = 0 \quad (12)$$

として同調制御を行わず実験した結果を, Fig.9 に

$$\lambda_{Large} = 0.2 \quad (13)$$

$$\lambda_{Small} = 0.4 \quad (14)$$

を設定して同調制御を行った結果を示す. なお, Small に関しては静止状態から自律的にタップダンスを開始するコントローラの設計が困難だったため, 手で適当に初期値を与えている.

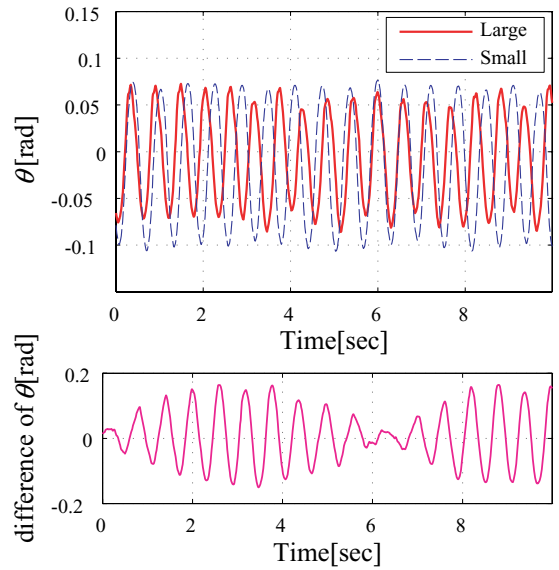


Fig.8 Experimental result for  $\lambda_{Large} = 0, \lambda_{Small} = 0$

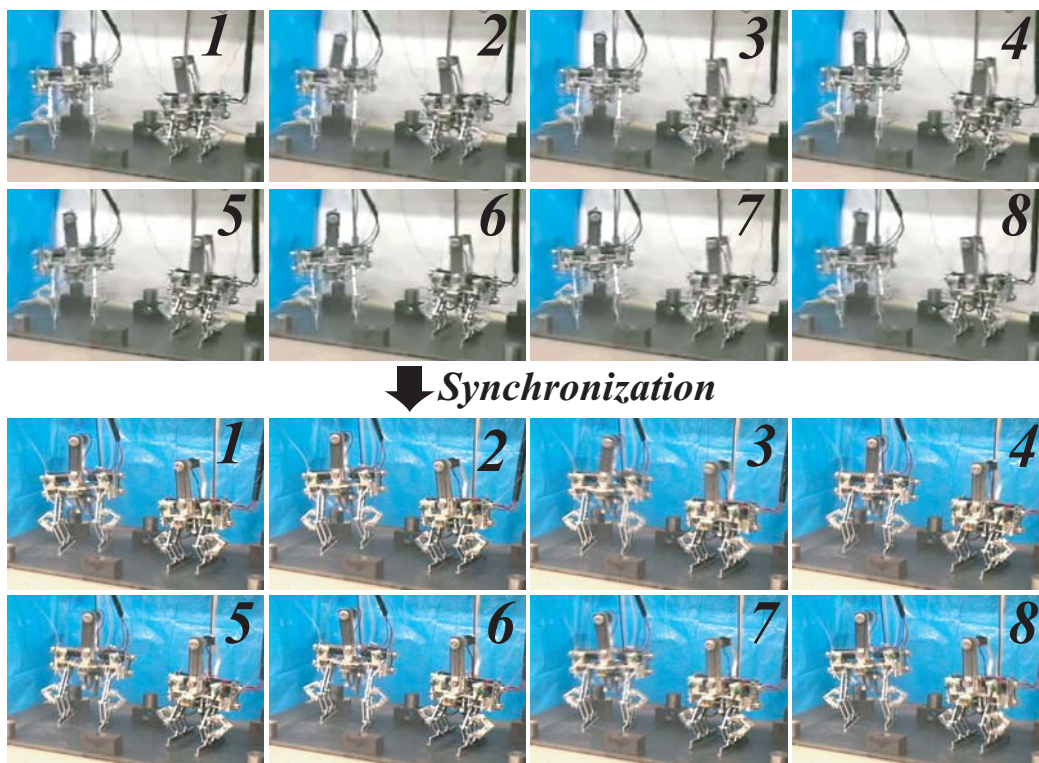


Fig.7 Motion synchronization of tap dance robots

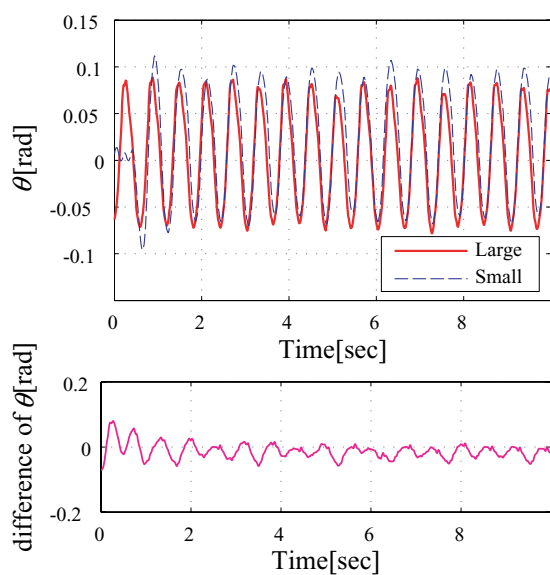


Fig.9 Experimental result for  $\lambda_{Large} = 0.2$ ,  $\lambda_{Small} = 0.4$

グラフを見ると、同調を行わない Fig.8 では Large が約 1.8[Hz], Small が約 1.6[Hz] の周期のタップダンスにおいて平衡軌道となっており、それぞれのタップダンス周波数の違いが  $\theta$  の差にうなりとして現れている。一方同調を行った Fig.9 においては Large, Small 共に約 1.7[Hz] の周期で平衡となっている。実験開始直後より  $\theta$  もほぼ一致し、タップダンスロボットの同調運動制御が成功している。ここにおいて異なる

る身体をもった 2 つのロボットが双方に実現可能な運動に至るとい、コミュニケーションにおける引き込み現象が実現されている。

#### 4. おわりに

本研究は同調運動制御によるコミュニケーションの原理のモデル化とその表現を目的として研究を行った。これにより得られた成果を以下に挙げる。

- タップダンスロボットの設計・製作を行った。
- 軌道アトラクタを有する力学系の同調運動制御則を提案し、実機実験によりこれを検証した。
- 異なる身体をもつ複数ロボットの同調運動制御により、引き込み現象としてコミュニケーションの原理をモデル化した。

#### 謝辞

本研究は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) の支援を受けた。

#### 参考文献

- [1] Dance, F. E. X. & Larson, C. E: The functions of human communication: A theoretical approach. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
- [2] 渡辺富夫: コミュニケーションにおける引き込みと身体性, Neonatal Care, Vol.12, No.2, pp.122-128, 1999.
- [3] 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.1050-1060, 2004.
- [4] 岡田昌史, 大里健太, 中村仁彦: 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