

# ヒューマン - ロボット・インタラクションにおける創発的な インタラクション・モード遷移

## Emergent Transition among Interaction Modes in Human-Robot Interaction

塚本 亜美 寺岡 弘貴 高橋 卓見 石崎 祐太 高橋 ともみ 西村 宏武 早川 博章  
廣田 敦士 古橋 翔吾 松尾 星吾 岡 夏樹

Ami Tsukamoto, Koki Teraoka, Takumi Takahashi, Yuta Ishizaki, Tomomi Takahashi,  
Hirotake Nishimura, Hirofumi Hayakawa, Atsushi Hirota, Shogo Furuhashi, Seigo Matsuo,  
Natsuki Oka

京都工芸繊維大学  
Kyoto Institute of Technology

**Abstract:** This paper describes a trial human-robot interaction function of Roomba. Roomba moves in accordance with rhythmical sound made by human in several interaction modes. Although we have not implemented learning function at the moment, we plan to make it possible to emergently interact with humans by means of recurrent neural networks, recurrent neural networks with parametric biases, and intrinsic reward that corresponds to curiosity.

### 1. はじめに

古くから音楽は人と人とのコミュニケーションに用いられてきた。「ロンドン橋落ちた」を歌いながら友人と遊ぶ、ライブ演奏に合わせてオーディエンスがコールするなど、音楽的活動を通じた人と人とのインタラクションを本論文では音楽インタラクションと呼ぶ。音楽インタラクションは友達の受容や承認などを促進し、人間関係の構築を助けるような活動となっている[1]。音楽インタラクションはいくつかの観点で分類することができるが、本研究では複数人で同時に類似した動作を行うインタラクション(Synchrony)と交互に動作を行うインタラクション(Turn-taking)に分類して、考察をすすめる。

Synchrony には、運動会の入場行進で複数人が足並みを揃えて一定のテンポで歩くような動作や、野球などのスポーツの応援の手拍子や鳴り物をファンがリズムを揃えて鳴らす動作が当てはまる。一方、Turn-taking にはライブコンサートにおける演奏者と観客の間で行うかけ合い(Call-and-Response)や、「まねっこリズム」[2]のような幼児教育の場でのリズム遊びが当てはまる。他者と同調した動作を行うという行為は、上手く続くと全体的な一体感を高め、それが高揚感や満足感、達成感へとつながってゆく[3] [4]。

嶋田は、実験者が、2 歳児の発声とほぼ同時に声を重ね合わせる Overlap 条件と、適度な間を置いて声を返す Turn-taking 条件を比較し、前者では 2 歳児がリズムを共有しようとする音楽的な行動が増加し、後者では 2 歳児が指さしや共同注意により他者に働きかけようとする社会的な行動が増加することを示した[5]。人同士のインタラクションがこのような性質（インタラクション・モード（Overlap/Turn-taking）により、行動の傾向が変わる）を持っているとすると、人-ロボット間インタラクションにおいて各モードにふさわしい行動により各モードの特徴的なインタラクションを形作ることができるロボットを実現できれば、人間とロボットの関係構築に有効であると考えられる。

本研究では、各モードでのインタラクションの仕方を設計してあらかじめロボットに与えておくのではなく、学習により典型的なインタラクションの仕方（各モードでの典型的な行動）を獲得させておき、また、適切に設計した内部報酬を定めておくことで、人との相互作用の中で創発的にインタラクション・モードが立ち現れることを目指す。人とロボットのどちらが主導的に動くかの移り変わりも創発的に生じることを目指す。

## 2. 試作システムの概要

本研究では、人の側は、拍手や太鼓を叩くなどにより音でリズムを刻み、ロボット (Roomba) 側は、前進しながら左右の車輪を交互に大きく動かす歩行風の動作 (図 1) によりリズムを刻む、というインタラクションを行うこととした。



図 1: ロボットの動作

まだ、学習機能、創発機能を組み込む前の段階であるが、手始めに試作したシステム[6]の構成を図 2 に示す。本試作システムは

- A) マイクからの入力を受けた時刻を獲得
- M) モード遷移を行う
- B) Synchrony モードにおいて、時刻情報から BPM(Beat Per Minute)を計算し、動作命令を送信
- R) 人間が Call 側の Turn-taking モードにおける動作命令を送信
- H) Roomba が Call 側の Turn-taking モードにおける動作命令を送信
- C) 動作命令が来たら、動作信号を Roomba へ送信

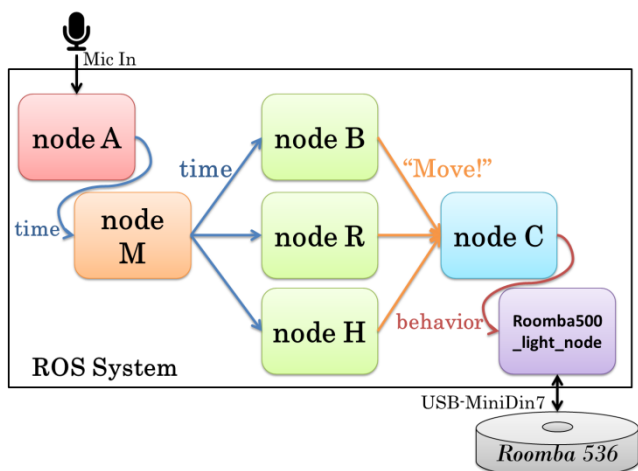


図 2: 試作システムの構成

の 6 つのノードから構成される。以下、各ノードの動作について説明する。

また、Roomba に対しての動作信号を送信するため Arkapravo が作成した ROS パッケージ `roomba_500_ROS_drivers` を使用している。これは、iRobot Open Interface (OI) を用いて Roomba に命令を与えるもので、全ての機能を用いることができる `full node` と、走行距離測定と Roomba の走行速度を指定する機能のみを使える `light node` の 2 種類のノードを持っている。今回はこの内の `light node` を使用した。

ROS は Ubuntu14.04LTS を導入したノートパソコン上で動作し、このノートパソコンと Roomba536 が USB-Mini-DIN7 ケーブルで接続されている。

### 2.1 node A

node A では、マイクからの音声入力を処理する。0.001 秒ごとの入力波の振幅の絶対値を 10 個、すなわち 0.01 秒分取り、それらの平均値を一定値以上超えた振幅の波を捉えた瞬間の時刻を獲得する。つまり、手を叩くなどによる音の立ち上がりを検知した時刻を獲得することになる。獲得した時刻は node M に送信される。

### 2.2 node M

node M では、node A で検知した時刻情報を node B、node R、node H のいずれに渡すかを決定するノードである。創発的なモード切り替えを計画しているが、現状ではキーボード入力を取得し、“B”を入力すると node B、“R”で node R、“H”で node H に送信する。

### 2.3 node B

node B では、node A から送信された 2 つの時刻情報の間隔から BPM を計算する。ここで取得された BPM に合わせた間隔で node C に動作信号を送信する。またここでは Synchrony モードにおいて、音と同期した動きを実現するために BPM を逐次更新し、ユーザの手拍子の速度変化に合わせて動作を行うことができるようにしている。

### 2.4 node R

node R では、人主導の 4 拍子・一小節ごとの交代に限定した Turn-taking モードの実装を行っている。node R は、さらに 2 つのパートに分けられる。

1 つ目は、ユーザが意図するテンポから一小節の長さを取得するためのパートである。ユーザは、意図するテンポで4回音を鳴らす。それらの音と音の時間間隔をそれぞれ保持し、聴き終わった後に3つの時間間隔の平均を計算する。この平均を4倍することで一小節の長さを算出する。

2 つ目は、先のパートで計算した一小節の時間を用いて **Turn-taking** を実現するパートである。一小節の時間内にユーザが任意のタイミングで鳴らした音の、音と音の時間間隔をリストで保持し、一小節分の時間が終わり次第、保持した1小節分の音のタイミングデータと一対一対応するタイミングの動作信号を **node C** に送信する。一小節分の動作信号を送信した後、再びユーザからの音声信号入力を待つ。

## 2.5 node H

**node H** では、Roomba 主導の4拍子・一小節ごとの交代に限定した **Turn-taking** の実装を行っている。**node R** と同様に **node H** も2つのパートに分けられ、1つ目は **node R** と同様の方法で一小節の長さを取得する。

2 つ目のパートでは、一小節分の時間中にランダムに生成されたリズムで Roomba が動き、その後一小節分の時間待機する。人はその間にレスポンスを返すことが期待される。

## 2.6 node C

**node C** では、**node B**、**node R**、**node H** から送信される信号を受け取り、動作を **roomba500\_light\_node** へと送信する。ここで Roomba は直進運動を行いながら回転することで斜めに進行する(図1左)。この回転運動を時計回り、反時計回りと繰り返す(図1右)ことで Roomba は左右に揺れながら前進する、歩行を模した動作を行う。

# 3. 創発的モード遷移に向けて

## 3.1 Recurrent Neural Network によるモデル化

今回の実装ではインタラクション・モードをキーボードからの入力により明示的に切り替えたが、下記の2つの研究を参考にして、Recurrent Neural Network (RNN)や、Recurrent Neural Network with Parametric Biases (RNNPB) を用いて、創発

的なモード遷移を実現することを検討中である。

Ikegami と Iizuka は、RNN と遺伝的アルゴリズムを用いて、カオス的に役割を交代しながら追いかける2体のエージェントを実現した[7]。ターンをとるとは、「他のロボットの後ろの扇形の領域に入ること」と定義し、評価関数の一項目として、両方のロボットがターンをとる機会があった場合に、高い評価となる項目を含めることで、役割交代を実現した。

また、Ito と Tani は、人型ロボットと人が、互いに動きを模倣しあうインタラクションを RNNPB を用いて実現した[8]。まずロボットに、人の周期的な動きとそれに対応するロボットの周期的な動きの時系列パターンを複数学習させた。複数のパターンは、それぞれ異なる Parametric Biases (PB) の値と対応する時系列パターンとして学習された。学習後、人とのインタラクション実験を実施し、学習済みの人の動作パターンを与えたときのロボットの動きや、学習時とは異なる人の側の新しい動きに対するロボットの動きが調べられた。学習済みの人の動作パターンを模倣できたこと、および、人の新しい動作パターンに対しては、1) 学習済みの類似パターンの動きを生成する場合、2) 学習パターンとは異なる新しい周期的な動作パターン(人の動きと同期)を生成する場合、3) 不安定な動きをする場合があることが報告された。

本研究で対象とするヒューマン-ロボット・インタラクションを RNNPB で実装する場合の模式図を図3に示す。図中の  $r$  はロボットの動き、 $h$  は人が出す音に、それぞれ対応するノード、 $p$  は PB ノード、 $c$  はコンテキスト・ノードであり、添え字の  $t$ ,  $t+1$  は時刻を示す。学習時は Synchrony, Turn-taking 各モードにおける  $r$  と  $h$  の時系列の例が与えられ、それらを予測できるようにリンクの重みと PB 値の学習が進む。インタラクション中は観測される  $h_{t+1}$  との誤差に基づき PB 値が変化し、それに応じて  $r_{t+1}$  が決まる。

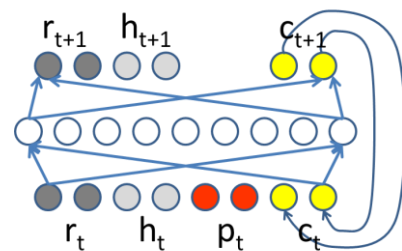


図3: RNNPB の模式図

### 3.2 内発的動機づけの導入計画とその効果についての考察

我々は、以上のような感覚運動系の予測学習に基づくモード遷移に加えて、ロボットに内発的動機づけ[9,10,11,12]を導入して、ロボットと人の間の創発的なインタラクションを実現することを検討している。ロボットは「外部報酬と（内発的動機づけに対応する）内部報酬の和」の期待値が大きい行動を選択する。本研究では内部報酬として、1) **Synchrony** の心地良さに対応する報酬、2) **Turn-taking** の心地良さに対応する報酬、3) 真似できたうれしさに対応する報酬、4) 真似されたうれしさに対応する報酬、5) 新奇性・親近性への選好に対応する報酬（予測誤差の変化に基づき計算；後述）等を導入することを予定している。これらの導入により、インタラクション・モード間の創発的な遷移や、インタラクションの主導権の自発的な移り変わりが実現できると考えている。

今後のシステムの実装は、モジュール組換えを基本演算とするアーキテクチャ[13] (図4) を使用する計画である。ここでのモジュールのいくつかは、時系列の予測・学習機能を持つものであり、RNN または RNNPB で実装する予定である。予測誤差の変化 (図5) に応じて、内部報酬が多くなるように、当該予測モジュール、および、関連するモジュール

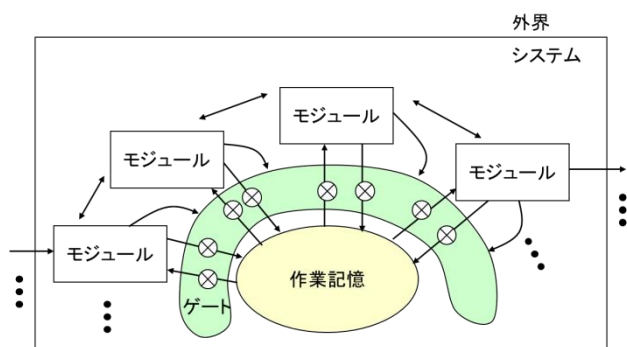


図4: モジュール組換えアーキテクチャ

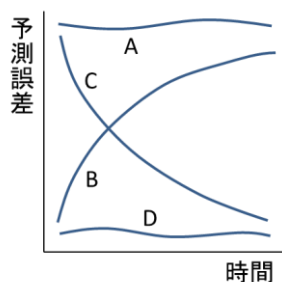


図5: 予測誤差の変化のパターン (4通り)

のゲートの開閉 (モジュールの切換え) を、以下の通り行うことで、新奇性・親近性への選好を表現する計画である。

- A. 予測誤差が大きいままのモジュール：内部報酬が生じず、結果として内部報酬を生み出す他のモジュールに切り換わる。学習できそうにないので飽きた状態に相当。
- B. 予測誤差が増加中のモジュール：内部報酬が生じず、結果として内部報酬を生み出す他のモジュールに切り換わる。予測対象 (相手も含む) が変化したと考えられるため、その変化に応じた行動や内部情報処理をすることに相当。
- C. 予測誤差が減少中のモジュール：内部報酬を生み出し続けるため、そのままそのモジュールを選択し続ける。学習進行中であるので、それへの選好 (親近性への選好) を保ったまま学習を継続することに相当。
- D. 予測誤差が小さいままのモジュール：内部報酬が生じず、結果として内部報酬を生み出す他のモジュールに切り換わる。学習完了しているので、飽きて別の行動や内部情報処理をすること (新奇性への選好) に相当。

なお、RNNPB をモジュールとして用いる場合は、モジュール内に複数の時系列パターンが分散的に埋め込まれているため、これらの選択に内部報酬による選好を加味するためには、その選好を何らかの方法で予測誤差に換算して PB の値を介して制御することになるだろう。

RNN や RNNPB による対人インタラクションでは、基本的には人の側の動きをきっかけとしてロボットが動作することになる。このため、人主導のインタラクションが起こりがちになると思われる。ただし、人の動きが学習済みのものでなかった場合は、ロボットが予測できない動きを始める可能性があり、それがロボット主導の動きのように感じられる可能性がある。また、ロボット主導のインタラクションが人の側の動きをきっかけに開始されるような時系列をあらかじめ学習させておくことは可能であると考えられる。ただし、これら2つのケースでは、ロボット主導に感じられる動作が行われた場合も、そのきっかけを与えたのは人であることに注意すべきである。

これに対して、内発的動機づけを付加したモデルでは、内部報酬をきっかけとしてロボットが動作することにより、ロボット主導のインタラクションを

開始できる機会が、より増えると考えている。具体的には、図5のDのようなケースでは、誤差を小さくするという規準で動作する学習システムは、現状を維持し続けるが、好奇心や飽きに相当する内発的動機を備えたシステムは、主体的に別の動作を試みることになる。このことにより、より豊かで飽きにくいヒューマン-ロボット・インタラクションを実現できる可能性が高まると思われる。

#### 4. まとめ

本論文では、人間とロボットとの間の親密な関係構築を目指して我々が開発中の、家庭用掃除ロボットを用いた簡単な音楽インタラクションシステムの構築について報告した。今後は、ロボットと人とのSynchronyやTurn-takingといったインタラクション・モード間の創発的な遷移をRNNやRNNPBを用いて実現することを試みる計画である。さらに、内発的動機づけを導入して、より創造的なインタラクションの実現を目指したい。これらの有効性は、人とのインタラクション実験により調査していく計画である。

#### 謝辞

本研究は科研費(25330260 および 26118003)の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] 南川 鮎美, 音楽を用いた心理的アプローチが小学生のコミュニケーション行動と学級集団に与える影響, 秋田大学教育文化学部大学院教育学研究科 修教 09-013 (2010)
- [2] 山田俊之, 言葉なしでも気持ちは伝わる! 「まねっこリズム」でコミュニケーション (2016/07/20 アクセス) <http://www.meijitoshoh.co.jp/eduzine/body/p/?id=20120621>
- [3] 岡本健太郎, 山本倫也, 渡辺富夫, 積極的な身体動作で盛り上がり支援する身体的インタラクションシステムの開発, 情報処理学会第74回全国大会講演論文集 4, pp. 241-242 (2012)
- [4] 藤原 満, 山本 知仁, 音楽の共同演奏における演奏リズムと脳活動, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2010 論文集, pp. 675-680 (2010)
- [5] 嶋田 容子, 声重ねによる2歳児の音楽性表出の促進,

日本赤ちゃん学会 第16回学術集会 プログラム抄録集, p. 56 (2016)

- [6] 寺岡弘貴, 高橋卓見, 石崎祐太, 高橋ともみ, 塚本亜美, 西村宏武, 早川博章, 廣田敦士, 古橋翔吾, 松尾星吾, 岡夏樹, 踊 Roomba ~インタラクション・モードの創発~, 2016年度情報処理学会関西支部 支部大会, B-102, 3 pages (2016)
- [7] Ikegami, T. & Iizuka, H., Turn-Taking Interaction as a Cooperative and Co-Creative Process, *Infant Behavior and Development*, Vol.30, No.2, pp.278-288 (2007)
- [8] Ito, M. & Tani, J., On-Line Imitative Interaction with a Humanoid Robot Using a Dynamic Neural Network Model of a Mirror System, *Adaptive Behavior*, Vol.12, No.2, pp.93-115 (2004)
- [9] Schmidhuber, J., Formal Theory of Creativity, Fun, and Intrinsic Motivation (1990-2010), *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, Vol.2, No.3, pp. 230-247 (2010)
- [10] Gottlieb, J., Oudeyer, P.Y., Lopes, M. & Baranes, A., Information-Seeking, Curiosity, and Attention: Computational and Neural Mechanisms, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.17, No.11, pp. 585-593 (2013)
- [11] Kidd, C. & Hayden, B.Y., The Psychology and Neuroscience of Curiosity, *Neuron*, Vol.88, No.3, pp. 449-460 (2015)
- [12] 高井 利将, 岡 夏樹, 早川 博章, インタラクションを通じた数の概念の獲得, 2016年度 人工知能学会全国大会(第30回) 論文集, 104-OS-22a-3, 4 pages (2016)
- [13] Oka, N., Apparent "Free Will" Caused by Representation of Module Control, *No Matter, Never Mind. Proceedings of Toward a Science of Consciousness: Fundamental Approaches*, pp. 243-249 (2002)