応答予測と馴化・脱馴化に基づき 人とやりとりルールを探索・共創するロボットモデル

栗山 貴嗣^{*1*2} 國吉 康夫^{*1*2}

A Robot Model That Searches for and Co-creates Interaction Rules with Human Partner Based on Response Prediction and Habituation/Dishabituation

Takatsugu Kuriyama^{*1*2} and Yasuo Kuniyoshi^{*1*2}

A human partner returns a specific response after a robot acts a specific social cue. We define this as interaction rules. The partner and robot continuously search for and co-create interaction rules as inspired by social games played between an infant and a caregiver. We propose a scheme composed of “making response prediction,” “confirming response prediction,” and “habituation/dishabituation to response prediction,” and developed a robot model composed of response-predictability and response-habituation. The robot generates actions, observes the partner’s response, and get to predict them. It identifies relationships between its actions and the responses, and generates actions to confirm specific responses from the partner. The interaction is reciprocated as a result. After it is habituated to the responses, it inhibits the confirmation and generates other actions. This makes a chance for other rules. We conducted experiments in human-robot interaction using a ball based on this model to investigate whether response-habituation is needed or not, while response-prediction is required by the definition of interaction rules. As a result, analysis with causality measure proved that an appropriate response-habituation supports interaction reciprocation. Various patterns of interaction emerged, such as passing the ball back and forth, rolling and catching, feint passing, and role-reversal feint passing. Response-predictability increases when an interaction is reciprocated. Then response-habituation increases and the dyad quits the reciprocated interaction and search for another rule, indicating that the scheme and the model work.

Key Words: Social Games, Interaction Rule, Co-creation, Contingency, Cognitive Developmental Robotics

1. 序 論

1.1 背景

ロボットへの指示・報告や作業協調などタスク遂行上必要なやりとりに加えて、あるいは純粋に、やりとり自体を楽しむためのロボットが注目されている [1] [2]. 犬型ペットロボットの AIBO [3], アザラシ型メンタルケアロボットの PARO [4], チャイルドケアロボットの PaPeRo [5], 人型コミュニケーションロボットの QRIO [6] や Robovie [7], 社交ダンスロボットの Ms DanceR [8] など代表例として様々なプラットフォームが開発されている. 機械的な情報の受け渡しのみならず, 人にやりとりを楽しんでもらう. このようなロボットには何が求められているだろうか.

事前にプログラムされた画一的な働きかけ・応答をするロボットとのやりとりは, ある決められたシナリオをなぞるものに過ぎない. これに対して我々は, 人間同士のようにやりとりを通してやりとりを広げ, 共有感を持ちながら飽きずに長く付き合っていけるロボット実現のために, 人間同士のやりとりの以下の性質に着目する.

未定的: やりとりは事前に作り込むことができないくらい多様な可能性が確保されている.

共創的: やりとりは行き来であって二者のどちらか一方に帰属できるものではなく, 二人の関係性から生まれる.

収束的かつ探索的: やりとりは同じパタンの繰り返しのような安定に向かうとともに, 常に新しい可能性に対して開かれていて探索的である.

Schegloff は, 一方的に成り立つ会話は実質的にはなく, 完全に筋書きが決まっていることも実質的にはないと指摘している [9]. Sawyer は Jazz や演劇の即興がどんなやりとりをするか決まりきっておらず, 協力的創発であって個々人に関する問題へ落とし込むことができないことと類比しながら, 我々の日常会話が即興的であると指摘している [10]. これらはやりとりの未定的・

原稿受付 2009 年 12 月 20 日

^{*1}東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻

^{*2}JST ERATO 浅田共創知能プロジェクト

^{*1}Department of Mechano-Informatics, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

^{*2}JST ERATO Asada Synergistic Intelligence Project

■ 本論文は提案性で評価されました.

共創的な性質を支持していると考えられる。また Burgoon らは対人適応現象として、収束と発散、同期と非同期、接近・回避を指摘している [11]。これはやりとりの収束的かつ探索的な性質を支持していると考えられる。このようなやりとりを実現するために、どのようにロボットを設計したらよいかが筆者らの問題意識である。

1.2 関連研究

Reeves らは、人はコンピュータをはじめとした機械と、人と同じように接することを指摘し、これをメディアの等式 (The Media Equation) と呼んだ [12]。本稿の文脈で言えばこれは、人は人と自然にやりとりできるのだから、人がロボットと楽しんでやりとりするためには、ロボットは人と同じ様式でやりとりの有効であることを意味している。この観点から、ロボットは人にどのように働きかけ、応答するべきであるかというやりとり方策を人のそれに近づける試みが行われてきた。

Breazeal は情動表出に着目し、韻律情報から人の発声を、中立、禁止、注目、承認、慰めの 5 種類に分類し、それに応じて、喜び、怒り、恐れ、嫌悪、悲哀、興奮・驚きの 6 種類の応答を返すロボットを提案した [13]。Michalowski らは人が相手のリズムに引き込まれる現象に着目し、ロボットも同じく人のリズムに引き込まれるようにすることで、人とロボットで同期したダンスを楽しむことができるロボットを提案した [14]。これらの研究では、やりとりの往復パターン (内容やテンポ) は人依存である点でやりとりは未定的・共創的であるものの、ロボットのやりとり方策が固定されている点で用意されたやりとりの可能性から人がそれを選び取っているとも言え、未定的・共創的・探索的な性質は限定される。

Taniguchi らは役割交替模倣に着目し、人がいくつかの行動をロボットに実演して見せたあと、ロボットがこれを模倣、この模倣に対して人が単語を付与することで、行動と単語の対応関係を学習するロボットを提案した [15]。この研究では、どのような単語や行動があって、それらにどのような関連があるのかは未定的であるが、教示であるので共創的・探索的ではない。

さらにロボットを人に近づけていくにはどうしたらよいか。メディアの等式を考えるならば、人が発生してからやりとりできるまでに発達した過程を無視することはできない。近年、認知発達ロボティクスという研究分野が注目されている [16] [17]。これは、発生から 2 歳程度まで乳児の認知発達を、ロボティクスを用いて構成的にモデル化することを目的としている。

Ogino らは、ロボットの運動探索、養育者によるその模倣を通して、養育者の視覚イメージとロボット自身の自己受容感覚を関連付けすることで、ロボットに模倣行動を獲得させた [18]。Ogata らは、ロボットの物体操作探索による物体操作レパトりの獲得、養育者によるその模倣を通して、養育者とロボットの物体操作視覚イメージを関連付けすることで、ロボットに物体操作模倣を獲得させた [19]。Kuriyama らは、ロボットの模倣と随伴性確認行動を通して、ロボットにやりとりルールを獲得させた [20]。これらの研究ではやりとりは未定的・収束的であるが、人が教示的であるため共創的・探索的ではない。

Ishihara らは、人は声を聴くとき自分の使っている母音に近く聞こえる現象に着目し、親子の相互発声模倣が乳児の母音獲

得につながるというモデルを提案した [21]。Sumioka らは、乳児の随伴性を再現しようとする行動が、複数の共同注意関連行動の追加的な獲得につながるというモデルを提案した [22]。これらの研究では、やりとりは乳児の確認的行動と養育者の自然な行動から生まれるため、やりとりは未定的・共創的であるが、収束的であって探索的ではない。

1.3 目的とアプローチ

人同士のような未定的、共創的、収束的かつ探索的なやりとりを実現するにはどうすればよいか。この問題を紐解くために我々はやはり人の発達に立ち戻る。そもそも人はいつからこのようなやりとりができるようになったのか。我々はこのような性質を持つやりとりとして、生後 6ヶ月ごろから徐々に始まるやりとり遊び (social games) に着目する。これは乳児と養育者の間で行われる遊びで、いないいないばあをはじめ、ボール遊び、物の受け渡し、追いかけて、積み木を積んで崩すなど代表例とする [23]。やりとり遊びは言語の基礎的な性質を持っており、その解析は言語獲得へつなげて議論できるため [24]、やりとりの中でもこれに着目することは有益である。やりとり遊びはやりとりの一種であるから、未定的、共創的、収束的かつ探索的という性質を持っている。どのような言葉、身振り・動作、おもちゃなどを使うのか、それらを使ってどのようなやりとりをするのかを乳児は知らない状態から学習するため、やりとりは事前に作り込むことができないくらい多様な可能性が確保されており、未定的である [25] [26]。また、やりとりは行き来であって二者のどちらかに帰属できるものではなく、養育者や乳児の働きかけとそれに対する解釈・応答、運動能力、認知能力、おもちゃの物理的制約などによって決まるため共創的である [25] [26]。そして、あるルールに基づいたやりとりの繰り返しにたどり着くだけでなく、変化が生まれて新たなルールに基づくやりとりにたどり着くため、収束的かつ探索的である [25] [26]。

さらにやりとり遊びならではの特徴として Ratner らは、登場する要素が少なく型にはまっていること、明確な繰り返し構造を持つことを挙げている [24]。また Goldman らは、参加者が相互関与すること、順番にやりとりすること (turn-taking)、少なくともやりとりが 2 往復する連続的反復があることを挙げている [27]。Ratner, Bruner らは、やりとり遊びはルールで構成されていると指摘している [24] [25]。つまりやりとり遊びは、互いの行動の関係を規定するルールがあって、それが繰り返されると言える。また Stern は、乳児に誘発される養育者の社会的振る舞い (infant-elicited caregiver's social behaviors) がやりとり遊びにおいて重要な役割を担っていると指摘している [28]。以上を踏まえて我々は、やりとり遊びにおけるルールを代表するものとして、乳児の行動とそれに対する養育者の応答行動との、行動対行動の対応関係に着目し、これを本稿ではやりとりルール (interaction rule) と呼ぶ。

本稿ではロボットを乳児、人が養育者の役割を担うものとして捉え、ロボットの行動とそれに対する人の応答との対応関係をやりとりルールとする (Fig. 1)。人からの働きかけはロボット行動の文脈としてルールに含まれる。我々は人とロボットのやりとりが未定的、共創的、収束的かつ探索的となるべく、やりとり遊びを乳児の発達原理を基に再構成することにより、人

Fig. 1 Interaction rule: correspondence between a robot's action and a partner's response. A partner's social cue is included in a context of a robot's action

とロボットで互いに成り立つやりとりルールを探索し共創し続ける枠組み、およびそのためのロボットモデルを提案する。

2. やりとりルール共創の枠組み

やりとり遊びは次の4段階で発達するとされる[25][26]。乳児は受動的な役割から積極的な役割へと次第に移行していく。

- (1) 受動的に観察：乳児はただ養育者を受動的に観察する。一方的に手助けされるのを含む。
- (2) 部分的に参加：乳児はやりとり遊びの要素の一つに参加する。そのうちより多くの要素を自分から始めるようになる。
- (3) 活動を共有：両者はやりとり遊びのしきりに基づいたうまく構成されたやり方で交互にやりとりする。
- (4) 変化を起こす：乳児はやりとり遊びのルールを変化させる。乳児はやりとり遊びのルール構造をよく分かっていて、新しいルールを追加することができる。

ここでしきり (**convention**) という言葉が使われているのは、やりとりルールはある絶対的に正しいものが規定されるというものではなく、両者がやりとり経験の中から見出した暗黙の了解であることをよく表している。

ロボットを構成するためには乳児についてのよりメカニズム的な視点が必要になる。Watson は乳児の随伴性確認行動について報告している[29]。乳児は自分の体を数回動かして、自分の動きに対しておもちゃが応答するという随伴性があると分かると確認を止める。おもちゃが乳児と無関係に動作する場合も、乳児は自分の体を数回動かして、随伴性がないと分かると確認を止める。また Rochat は乳児の一般発達原理として、規則性の探索、馴化と好奇心を挙げている[30]。これらの知見を取り入れながら、我々はやりとり遊びの発達段階をやりとりルール共創の段階として解釈し直し、人とロボットがやりとりルールを探索し共創し続ける枠組みを提案する。これらの段階は明確に分かれているわけではなく、またやりとりのなかで繰り返される。

応答予測の形成：ロボットは単純に様々な行動を試行する。ロボットは自分の行動の次にくる人の行動を、やりとりルールに基づいた応答として仮定し、予測するようになる。やりとりはまだルールに基づいていないが、ロボットが偶然に人が解釈できるような行動をした場合、人がそれに応答することでやりとりが成立することもある。

応答予測の確認：ロボットは人の応答が予測できる行動をし、ルールに基づいた応答が得られるか確認する。応答が予想どおりであった場合はこのルールを信頼し、応答が予想と

食い違った場合は棄却される。ルールが存在した場合、やりとりは繰り返されることになる。

予測される応答に対する馴化・脱馴化：ロボットは何度も確認したルールの確認を抑制する。つまり、ロボットが人からどのような応答が得られるか分かり切っている行動を避けることで、結果としてやりとりに変化がもたらされ、新しいやりとりルールが発見される余地ができる。

以上ではロボットについて言及したが、ロボットの相手をする人についても乳児のメカニズムの延長として同様のことが起こると期待できる。人の場合にはさらに、ある特定の遊びに誘導しようとする行動傾向や、ロボットの行動を自分なりに解釈して応答する行動傾向が期待できる。もちろん、これらの行動傾向は人によって共通のものもあれば異なるものもある。

3. やりとりルール共創のロボットモデル

3.1 モデルの構成

やりとりルール共創の枠組みにおいて、ロボットは行動を決める際、応答を得るために応答が確実に期待できるか評価している。また分かりきった応答を避けるために応答をよく知っているか評価している。このことからロボットの行動決定のためには以下のような二つの指標が必要であると考えられる。

応答予測度 $ruled(c, a)$ 文脈 c におけるロボットの行動 a に対して、人のある特定の応答が予測できる度合い。ルールに基づいた人の応答が期待される確実さを評価する。

応答馴化度 $habit(c, a)$ 文脈 c におけるロボットの行動 a に対して、人のある応答がルール付けられていることを確認して予想通りであった経験度。

なお、 a はロボットの行動、 r は人の応答、 c はロボット行動の文脈である。おもちゃの応答も人の応答と同様に扱う。文脈はロボットが行動を開始する直前の人の働きかけ、自分の行動、おもちゃの動きなどとする。

これらの指標を用いてやりとりルールを探索し共創し続けるロボットモデルを提案する。ロボットモデルを **Fig. 2** に示す。ロボットは自分のどの行動に対して人のどの応答が得られたかの経験記憶に基づいて、応答予測度と応答馴化度を計算する。ロボットは人のルールに基づいた応答が得られることを確認するように、現在の文脈で応答予測度が高い行動を選んで行動する。この際、応答馴化度が高い行動はルールに基づいた人の応答が十分に確認されているとして抑制される。ロボットは自分が行動した直後の人の行動を自分の行動に対する応答として観察し、行動開始時の文脈・行動・得られた応答の組を記憶する。この流れが繰り返される。

3.2 期待されるモデル挙動

提案したロボットモデルがどのように動作するか説明する。**Fig. 3** にやりとりルール共創の枠組みの段階と、それに対応するロボットモデル内の応答予測度 $ruled(c, a)$ 、応答馴化度 $habit(c, a)$ の状態を示す。 $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ は同じ行動空間 A 上に定義されている。それぞれの空間上の色の広がりには指標が高い部分を示している。矢印はロボットが選ぶ行動 a を指し示している。その a では $ruled(c, a)$ が大きく、 $habit(c, a)$

Fig. 2 The proposed robot model with the two indices: response-predictability $ruled(c, a)$ and response-habituation $habit(c, a)$

Fig. 3 The developmental stages of social games, and corresponding states of the two indices on the act space A

が小さくなっている。二つの指標が各段階でどのようなになるか説明する。

応答予測の形成：やりとりの始めはやりとり経験がないため、 $ruled$, $habit$ はともに A 上で平坦であり、ロボットは行動 a を適当に選ぶ。この際に得られた人の応答をルールに基づいたものと仮定することで、 $ruled(c, a)$ が上昇する。

応答予測の確認：ロボットはルールに基づいた人の応答が得られると期待して、 $ruled(c, a)$ が高い a を選んで行動する。この際に得られた人の応答がルールに基づいた一貫したものであった場合、応答は予想どおりとなり $ruled(c, a)$ は上昇する。応答予測の確認を繰り返すことで、ルールに基づいたやりとりが繰り返される。 $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ がともに上昇することになる。逆に、ルールが存在しなかった場合、得られた人の応答は予想と食い違ったものとなり、

$ruled(c, a)$ は低下してルールが棄却される。

予測される応答に対する馴化・脱馴化：ルールに基づいたやりとりが何回か繰り返され $habit(c, a)$ が十分高い値になると、ルールに基づいた応答が得られると分かりきったものと見なされ、繰り返されていた行動 a は抑制される。これが馴化プロセスである。これにより a とは別の行動を選びながら応答予測の形成に戻ることで、新しいルールを探すことになる。やりとりを繰り返している途中で予想と違った応答が得られた場合、または経験を忘却した場合、 $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ が低下して学習し直すことになる。これが脱馴化プロセスである。

このようにして、ロボットは「応答予測の形成」「応答予測の確認」「予測される応答に対する馴化・脱馴化」を通して、人とやりとりルールを探索し共創し続ける。

3.3 数理モデル

3.1 節で提案した概念的ロボットモデルを実装するにあたり、ここでは蓄積された経験により応答予測度や応答馴化度を評価するという統計的観点から、確率を用いた数理モデルへの定式化例を示す。なお提案した概念的モデルを支持するものであれば他の定式化や実装、例えばニューラルネットワークを用いたものであっても 3.2 節で示した挙動が期待できると考えられる。

a をロボットの行動、 r を人の応答、 c をロボットが行動を開始する際の文脈とする。ロボットは現在の文脈 c において、応答予測度 $ruled(c, a)$ が高くて応答馴化度 $habit(c, a)$ が低い行動 a を選択する。この、どれほど $ruled(c, a)$ が高くて $habit(c, a)$ が低いかの度合いを式 (1) に示す動機 $motiv(c, a)$ として定義する。ロボットは $motiv(c, a)$ を最大化する行動 a を選択する。

$$motiv(c, a) = ruled(c, a) \times e^{-habit(c, a)}. \quad (1)$$

$ruled(c, a)$ は式 (2) のように定式化する。

$$ruled(c, a) = I(c, a; R) \text{ trust}(c, a). \quad (2)$$

ここで $I(c, a; R)$ は a とあらゆる人の応答 R との相関の期待値である。 a に対して人の応答がルール付けられていれば $I(c, a; R)$ は大きくなる。 $I(c, a; R)$ は式 (3) のように定式化する。

$$I(c, a; R) = \int_{r \in R} \frac{p(c, a, r)}{p(c, a)} \log \left(\frac{p(c, a, r)}{p(c, a)p(r)} \right) dr. \quad (3)$$

これは 2 変数間の相関を評価する相互情報量を変形したものである [31]。 a に対して r が時間的に遅れていることを考えると遅れ付き相互情報量と見ることができ、本稿では a から r への因果指標として用いている。しかしながら経験していない (c, a) に関して $I(c, a; R)$ は未定であり、実際には過大に評価される。これを回避するため、どれだけ (c, a) を経験したかという指標 $trust(c, a)$ を用意して、 $ruled(c, a)$ 算出の際には式 (2) のように $I(c, a; R)$ に対してこれを掛け合わせている。 $trust(c, a)$ は $I(c, a; R)$ の定義域を規定しているとも言える。 $trust(c, a)$ は式 (4) のように定式化される。

$$\text{trust}(c, a) = (p(c, a))^\beta, \quad 0 < \beta < 1. \quad (4)$$

ここで $0 < \beta < 1$ は, $\text{trust}(c, a)$ が $p(c, a)$ に対して狭義単調増加となるように設けている.

ロボットは人の応答を観察して, 式 (5) のように $\text{habit}(c, a)$ を更新する. $\text{habit}(c, a)$ の初期値は 0 であり, 常に 0 以上に制約される.

$$\Delta \text{habit}(c, a) = h(H(R|c, a) - I(r|c, a)). \quad (5)$$

式 (5) では観察された人の応答が予測どおりであったかどうかを判別している. $I(r|c, a)$ は今実際に観察された人の応答の情報量であり, $H(R|c, a)$ は人のあらゆる応答に関する平均情報量であり, これらの大小を比較している. 応答が予測どおりであればその応答の情報量は少なく, すなわち $I(r|c, a)$ は小さい値となる. 逆に, 応答が予想と食い違えばその応答の情報量は多くなり, $I(r|c, a)$ は大きな値となる. $I(r|c, a)$ が大きい小さいかを判別するための基準値として平均情報量である $H(R|c, a)$ を用いている. $h(x)$ は情報量から馴化度への変換関数である. $h(0) = 0$ で, かつ, $h(x)$ は単調増加である必要がある.

4. 実験

4.1 目的

一続きのやりとりのなかで, 人と提案モデルによるロボットが事前には決まっていないうやりとりルールを探索し共創できるか, 被験者とモデルを実装したロボットとのやりとり実験にて確かめる. また, モデルにおいて応答予測はやりとりルールそのものであるため, ルールを発見するのに必要であるが, 応答馴化・脱馴化がやりとりルールを探索し共創するために必要であるか検証する.

4.2 環境

やりとり遊びの一般的な場面として, 物を介した三項関係でのやりとり遊びを考える. このなかでも習得が容易とされるボールを使った遊び [26] に場面を設定する. ロボットのシンプルな実装として, コンピュータ上にロボット (Fig. 4 右) の体を構築し, このロボットと向き合う形で養育者役のエージェント (Fig. 4 左) を配置する. 簡単のため, 手とボールの位置は sagittal 面 (両者にとって上下前後の面) に拘束する. ロボットは提案したモデルが実装されており, 養育者役のエージェントは被験者が Fig. 5 に示すゲームパッドで操作する. ロボットとエージェントは手の位置・手の握りを変えることができ, エージェントの手の位置は 2 軸アナログジョイスティックで, 手の握りはボタンで操作する. 被験者が自分が操作するエージェントやロボットがボールを握っているか否かを把握できるようにするため, 手を握っていないときは手は黄色に表示, 手を握ってボールをつかんだ場合は赤く表示 (Fig. 6), 手を握ってボールが手に触れていなかった場合はオレンジ色に表示される (Fig. 7). なお, 人とロボットがボールが転がるなどの物理現象をやりとりに利用できるようにするため, 物理シミュレーションを導入する.

4.3 条件

三項関係のやりとり遊びは多様であり, やりとり遊びの成立

Fig. 4 Simulation environment with physical simulation

Fig. 5 Game pad Fig. 6 Grasping ball Fig. 7 Grasping

にはやりとりルールが繰り返されることが重要 [24] であって, 具体的なルールは規定されない [32] ことから, 被験者への指示は「ボールを使って自由に遊んでください。」とする. 被験者は 20 代の男女 10 名 (A~J) で, ロボットの応答馴化がやりとりルールの探索・共創に与える影響を調べるため, 以下の二つの条件で実験を行う. なお, 3 分間という時間は予備実験によりこの実験環境で被験者が飽きてしまう時間から設定した.

- (1) 馴化の速いロボットを相手に被験者 A, B, C, D, E がそれぞれ 3 分間のやりとりを行う.
- (2) 馴化の遅いロボットを相手に被験者 F, G, H, I, J がそれぞれ 3 分間のやりとりを行う.

4.4 実装詳細

ロボットと養育者役のエージェントの自由度は手の位置 (二次元) と手の握り度 (一次元) であり, これを併せて体勢 (三次元) と呼ぶ. ロボットは毎秒, 1 秒後の目標体勢 (以下行動と呼ぶ) を設定して, 連続的に体勢を変化させる. 行動の設定が 1 秒ごとであるのは, これより短いとロボットの行動を解釈して応答するうえで養育者役がロボットについていけないためである. 連続時間上での観察対象 (人やボール) の動きの特徴を捉えるため, ロボットは対象の動きの方向が変わった時点, または止まった時点で, 対象の体勢や位置を観察するとする. 動きがないという情報も取るため, 前回の観察から 1 秒間動きがなかった場合はその時点で観察する.

ボールを使った三項関係でのルールとボール操作のためのルールを捉えるため, それぞれ Fig. 8 (a), Fig. 8 (b) に示すやりとりルールを用意する. ロボットは Fig. 8 に示す (文脈 c , 行動 a , 応答 r) に関する 2 種類のルールでそれぞれ $\text{motiv}(c, a)$ を計算し, その合計を最大化する行動 a を選択する. 文脈 c , 行動 a , 応答 r のそれぞれの次元は 0~1 に正規化される. $\text{motive}(c, a)$ を最大化する行動 a を探索する実装の計算量の都合上, 行動 a の各次元は 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 の五つの値に離散化する. 文脈 c と応答 r の各次元が取る値は連続値である. 手の握り度は, ボタンを押している間は 0.8 まで徐々に増え, ボタンを放している間は 0.2 まで徐々に減る. 手の握り度が 0.5 未満のとき, 手は握っていない状態となる. 手の握り度が 0.5 を超える

Fig. 8 2 types of interaction rule

瞬間にボールが手に触れていた場合、手とボールがその状態で物理的に拘束されてボールをつかむことになる。

$p(c, a, r)$ の推定には核密度推定法を用いる。ロボットは文脈 c で行動 a した際に応答 r が得られたという経験を、 (C, A, R) 空間上の (c, a, r) にガウシアンカーネル ($\sigma = 0.2$) を置くことで記憶する。記憶には最新 120 個のカーネルが保持され、やりとり開始時はランダムな (c, a, r) に置かれた 120 個のカーネルとして初期化される。 $h(x)$ は $h(x) = \gamma$ if $x > 0$, 0 else とする。速い馴化では $\gamma = 3$, 遅い馴化では $\gamma = 1$ とする。

4.5 結果：両者間の因果関係

やりとり遊びにおいて、やりとりルールが繰り返し成立していたか、つまり自分の行動が相手の行動に影響を与える規則性があったかを評価するため、情報理論に基づく因果指標である Transfer Entropy [33] を用いて解析する。Transfer Entropy はある変数 X の時系列から別のある変数 Y の時系列に情報量がどれだけ伝わったかを算出するもので式 (6) のように書く。

$$T_{X \rightarrow Y} = \iiint p(y_{t+1}, y_t^{(k)}, x_t^{(l)}) \log \frac{p(y_{t+1}|y_t^{(k)}, x_t^{(l)})}{p(y_{t+1}|y_t^{(k)})} dy_{t+1} dy_t^{(k)} dx_t^{(l)}. \quad (6)$$

ここでは、直前の k 個の Y のサンプル $y_t^{(k)}$ が与えられた場合の y_{t+1} のエントロピーから、直前の k 個の Y のサンプル $y_t^{(k)}$ かつ直前の l 個の X のサンプル $x_t^{(l)}$ が与えられた場合の y_{t+1} のエントロピーが差し引かれていることが分かる。これにより Y 自身のダイナミクスの影響を除外しながら、 $x_t^{(l)}$ が与えられることによる y_{t+1} のエントロピーの低下、つまり X が未来の Y に与える情報量、因果を評価している。本実験設定ではロボットが考慮する文脈 c は行動決定する瞬間の一時点であることから $k = l = 1$ とし、また行動を決定してから応答 r を観察するまで時間遅れには幅があることから式 (7) を用いて解析する。

$$T_{X \rightarrow Y} = \iiint p(y_{t+q}^{(m)}, y_t, x_t) \log_2 \frac{p(y_{t+q}^{(m)}|y_t, x_t)}{p(y_{t+q}^{(m)}|y_t)} dy_{t+q}^{(m)} dy_t dx_t. \quad (7)$$

ここでは $y_{t+q-m+1} \dots y_{t+q}$ について、つまり q 時間ステップ先の Y について m 時間ステップの幅を持って、 X からの情報量を計っている。単位は bit である。

解析に用いる時系列は 10 [Hz] とする。まず $q = m = 30$ とし時間遅れ 3 秒以内の因果を解析した。また RS (random

Fig. 9 Causal relationship between the two. Bars of the surrogate data are positioned over ones of the actual data

Fig. 10 Causality depending on response delay

shuffle) サロゲート法 [34] を用いて因果関係の有意性を判定した。RS サロゲート法は解析対象の時系列を時間方向にランダムに入れ替えた時系列 (サロゲートデータ) を多数作成し、それらと解析対象の時系列との解析指標の有意差を示すことで、解析対象時系列の時間関係が解析指標において無意であることを棄却するものである。ここでは解析指標は因果指標であり、因果関係が存在しないことを棄却するものである。サロゲートデータは 39 本作成して、解析対象の時系列と合わせて 40 本の時系列とし、有意確率 $p = 0.05$ として有意差を判定した。

結果を Fig. 9 に示す。各被験者の実験について、ロボットから被験者への因果度と、被験者からロボットへの因果度を示しており、サロゲートデータの因果度を上書き表示している。サロゲートデータには標準偏差を表示しており、 $p = 0.05$ で判定した有意差を*印で示している。双方向に因果関係があった例は、馴化の速いロボットを相手にした被験者 A, B, C, D, 馴化の遅いロボットを相手にした被験者 F, H であった。馴化の速いロボットの方がやりとりルールが成立しやすいことが分かる。また、被験者からロボットへの因果度が高く出たケースの理由としては、被験者がロボットの行動を理解できずにじっと止まるかロボットの行動に関係なくロボットに意味ある行動をするように催促するような、一方的な場面が多かったことを意味していると考えられる。

また、ロボットの行動に対してどの程度の時間遅れで被験者が応答していたのかを調べるため、 $m = 1$ として $q = 0, 1, 2 \dots 30$ つまり時間遅れ 0~3 秒の因果を解析した。結果を Fig. 10 に示す。馴化の速いロボットを相手にした場合 (A~E) と、馴化の遅いロボットを相手にした場合 (F~J) の 2 群に分け、因果度の平均値と標準偏差を表示している。馴化の速いロボットを

Fig. 11 Passing the ball back and forth

Fig. 13 Rolling and catching

Fig. 12 Dropping the ball and taking it

Fig. 14 Feint passing

相手にした場合、1.2秒後をピークに時間遅れの広い範囲で応答が分布して見られることが分かる。馴化の遅いロボットを相手にした場合、馴化の速い場合と比較して、0～3秒後を通して明確なピークが存在せず応答が不鮮明であることが分かる。この観点からも馴化の速いロボットを相手にしたほうがやりとりルールが成立しやすいことが分かる。

4.6 結果：具体的なやりとり遊びの例

次に、実験で見られた具体的なやりとり遊びの例について述べる。被験者に応じて様々なやりとりが共創された。まず、馴化の速いロボットを相手にした結果を述べる。予備実験として筆者が1分のやりとりを行った際の結果も合わせて述べる。筆者では、人とロボットが互いにボールを渡して受け取る、というやりとりが2回続けて起こった (Fig. 11)。被験者 A と C、筆者では、ロボットがボールを落とし、人がそれを拾ってロボットがそれを受け取ってまた落とす、というやりとりが繰り返された (Fig. 12)。被験者 D では、人とロボットが互いにボールを転がして受け止める、というやりとりが3回続けて起こった (Fig. 13)。被験者 B では、ロボットがボールを持って差し出し、人がそれを取ろうと手を伸ばすと、ロボットはボールを渡さずに手を引っ込め、人もあきらめて手を引っ込める、というやりとりが3回続けて、また8秒後と34秒後に起こった (Fig. 14)。これはボールを渡しそうで渡さないフェイントと見ることもできる。また、人がボールを差し出し、ロボットがボールに手を伸ばすと、人がボールを引っ込めるといふ人とロボットの立場が入れ替わったフェイントも見られた。被験者 E では、明確なやりとりは見られなかった。次に、馴化の遅いロボットを相手にした結果を述べる。被験者 H では、ロボットが腕を伸ばすと人が腕を引き、ロボットが腕を引くと人が腕を伸ばす、というやりとりが2回続けて起こった。被験者 F, G, I, J では明確

なやりとりは見られなかった。遅い馴化のロボットは同じ行動を多く繰り返す傾向が見られた。これにより、ロボットの適切な馴化速度が重要であることが分かる。

様々なやりとりが現れたがこれらは事前に決まっていたものではなく、両者が相互参与するなかで創発したものである。特にフェイントの例は筆者も被験者も予想していなかったものであった。このことから提案した枠組みは、教える・教わるの関係を越えて相互参与によって人とロボットが柔軟に関係を構築するものとなっていると言える。やりとり遊びはその性質から養育者の接し方に依存し、また人によって接し方は異なるため、見られるやりとりは名前のついている典型的なものに限られない [32]。実験で見られたフェイントはまさにその例であると言える。

このフェイントが現れた被験者 B とロボットのやりとりを取り上げ、やりとりが具体的にどのように推移しているのか見る。Fig. 15 は人とロボットの体勢、ボールの位置の推移を示している。ロボットは1秒ごとに行動しており、Fig. 16 は毎秒ごとの $ruled(c, a)$ の推移を示している。これはロボットが選んだ行動に随伴してある特定の応答が得られることをどの程度期待したかの推移を示している。Fig. 17 は行動後の1秒間で観察された応答の情報量のなかで最も小さかったものの推移を示している。なお、応答と対応づけられている行動は1秒前のものである。情報量が小さいということは応答が予測できたことを意味している。また、観察された応答に対して馴化が起こった場合はその時刻に印を付している。馴化が起きたということはやりとりルールを知っているものとしてやりとりが繰り返されたことを意味している。確認・馴化されたやりとりルールのうち六つについて、Fig. 18 に対応する $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ の推移を示した。これは一連のやりとりを通して、複数のやり

Fig. 15 Transition of interaction. In horizontal position, 1 is partner side, and 0 is robot side. In vertical position, 1 is as high as neck, and 0 is on the floor

Fig. 16 Transition of $ruled(c,a)$: how much partner's/ball's response will be ruled when the robot starts action a in context c

Fig. 17 Transition of partner's response information and robot's habituation timing

Fig. 18 Transition of $ruled(c,a)$ and $habit(c,a)$. (c,a) is fixed on corresponding rules

とりルールが発見，確認・繰り返され，馴化・脱馴化されるプロセスを示している。なお，動機 $motiv(c,a)$ は式 (1) のように計算されるため， $habit(c,a)$ は指数を取って示している（馴化が起きるほどグラフでの数値は 1 から 0 に向かって下がる）。

それではやりとりの流れを順に追って見ていく。

0～18 秒：人はボールを拾ってはロボットの手に落としている (Fig. 15)。

18～27 秒：ロボットはボールをつかんだままじっとして、人はボールをつかみつつ自分のもとへ繰り返し引き寄せようとしている (Fig. 15)。このやりとりルールを「ボールの取り合い」と呼ぶ。この間 $ruled(c,a)$ は上昇し (Fig. 16)，応答の情報量は落ち，馴化が起きている (Fig. 17)。人の応答が安定していることで応答の予測が安定し，ロボットの応答予測確認を通してやりとりが繰り返されている。「ボール

の取り合い」のルールについて $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ を見ると, $ruled(c, a)$ が上昇してルールが理解されとともに, 追うようにして馴化が起きている (Fig. 18). この馴化により繰り返されていた確認行動は抑制され, 23 秒以降ではそれまでじっとボールをつかんでいたロボットの行動に変化が現れ, 「ボールの取り合い」から抜け出して遂にロボットは手を離してボールは人に渡る (Fig. 15).

27~34 秒: 人はボールを拾ってはロボットの手に落としている (Fig. 15).

34~43 秒: ロボットは手を上げて腕でガードするようにボールをじっと胸に抱え込んでいて, 人はボールを取ろうと手を伸ばしている (Fig. 15). このやりとりルールを「ボールの抱え込み」と呼ぶ. 同様に $ruled(c, a)$ の上昇 (Fig. 16) と応答情報量の低下, 馴化 (Fig. 17) が起きている. 「ボールの抱え込み」についてルールが理解され, 追うようにして馴化が起きている (Fig. 18). この馴化により 41 秒以降ではロボットが手を下げることでボールが転がって人に渡る (Fig. 15).

43~50 秒: 人はボールを拾ってはロボットの手に落としている (Fig. 15).

50~60 秒: ロボットはボールを手に乗せて上下させていて, 人は手を引っ込めていたり, 手を伸ばして催促したりしている (Fig. 15). $ruled(c, a)$ と応答情報量, 馴化については同様である (Fig. 16, Fig. 17). この馴化により 57 秒以降では手を上下に動かすのをやめ, 60 秒では手を下げることでボールが転がって人に渡る (Fig. 15).

60~67 秒: 人はボールを拾って差し出し, ロボットがこれを受け取る (Fig. 15).

67~71 秒: ロボットはボールを持って上下に振っていて, 人もそれに合わせるように手を上下させている. このやりとりを「ボール振り」と呼ぶ. $ruled(c, a)$ と応答情報量, 馴化については同様である (Fig. 16, Fig. 17). 「ボール振り」についてルールが理解され, 馴化が起きている. なお, 51 秒, 54 秒にも似たようなやりとりがあり, その時点で少し $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ が反応している (Fig. 18).

71~94 秒: ロボットはボールを持って上下させたり, 人がボールを取り上げて渡し直したりしている (Fig. 15).

94~103 秒: ロボットはボールをつかんだままでいて, 人は手を上下に振っている (Fig. 15). このやりとりを「ボール把持」と呼ぶ. $ruled(c, a)$ と応答情報量, 馴化については基本的に同様だが, 100 秒で人が手を振るのをやめた影響で (Fig. 15), $ruled(c, a)$ が下がっている (Fig. 16, Fig. 17). これはロボットがボールをつかんだままでいることに対する人側の馴化と見ることもできる. 「ボール把持」について, ロボットも同時にルール理解とともに馴化しており (Fig. 18), ロボットはボールを離して人がボールを取り上げている (Fig. 15).

103~127 秒: 人はボールをロボットの手に落としたり取り上げたりしている (Fig. 15).

127~134 秒: ロボットがボールを差し出すと人が手を伸ばし, ロボットがボールを渡さずに手を引くと人も手を引くという

やりとりが繰り返される (Fig. 15). このやりとりを「フェイント」と呼ぶ. $ruled(c, a)$ と応答情報量, 馴化については基本的に同様であるが, 人の動きがだまかには同じでも始点終点の座標が毎回多少異なるため, $ruled(c, a)$ は安定していない (Fig. 16, Fig. 17). 「フェイント」について, ルールが理解され, 追うようにして馴化が起きている (Fig. 18). この馴化により 134 秒ではロボットはボールを手から離して人のほうに転がしている (Fig. 15).

134~145 秒: 人はボールを拾ってはロボットに渡し, 140 秒付近で「フェイント」のやりとりがもう一度起こっている. 人はボールを取り上げる (Fig. 15).

145~164 秒: 人はボールを差し出し, ロボットの手が近づくとボールを引っ込めることで, 「立場反転フェイント」のやりとりをしようとしている. 156 秒付近と 159 秒付近でやりとりがなされている. $ruled(c, a)$ と応答情報量, 馴化については同様である (Fig. 16, Fig. 17). 「立場反転フェイント」についてルールが理解され, 追うようにして馴化が起きているが, 人の応答が安定していないため, $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ は少しだけ反応している (Fig. 18). 人はボールをロボットの手の上に落とす (Fig. 15).

164~173 秒: 166 秒付近で「フェイント」が起こる. 人はボールを取り上げる (Fig. 15).

173~180 秒: 176 秒付近で「立場反転フェイント」が起こる (Fig. 15). 「立場反転フェイント」についてルールが理解され, 馴化が起きている (Fig. 18). 人はボールをロボットの手の上に落とす (Fig. 15).

このように一連のやりとりのなかで人とロボットは複数のやりとりルールを探索し共創し続けている. なお, Fig. 18 にて 0 秒の時点で各 $ruled(c, a)$ が完全に 0 ではないのは 120 個のランダムな観察で経験を初期化しているためである. また, 各ルールが検出された後約 60 秒後に $ruled(c, a)$ と $habit(c, a)$ が初期値に戻っているのは, ロボットが最新 120 個の観察しか経験に保持せずにそれ以前の観察は忘却しているためである. つまり, このやりとりではロボットは 1 秒に平均 2 回観察している. また忘却による脱馴化が起きており, 同じやりとりが起こる余地が生まれている.

Fig. 18 にて各ルールの $ruled(c, a)$ が繰り返されるやりとりのなかで徐々に上がっているのは, やりとりの始めの行動では応答を期待せずに偶然に成立したもののだが, そのうちルールを理解してそれを確認するように行動していることが分かる. また追うようにして馴化が起こることで同じやりとりの繰り返しから抜け出し, 後に別のやりとりルールが共創されている. このことから「応答予測の形成」「応答予測の確認」「予測される応答に対する馴化・脱馴化」が機能していることが分かる.

5. 議 論

一連のやりとりのなかで複数のやりとりルールが共創されていることから, 遊びとしての意図が理解しやすいフェイントのようなやりとりルールは, 単体で突然出てくるわけではなくいくつものやりとりルールが探索・共創され続けるなかで出現していることが分かる. このことは, (1) 遊びとして理解しやす

いやりとりルールが出てくるにはやりとりルールを探索し共創し続けることが必要だということ、(2) 遊びとして理解しやすいやりとりルールと本稿で数理的に定義したやりとりルールには距離があることを示唆している。

(1) について、馴化が遅いロボットを相手にした場合はやりとり遊びらしいやりとりが見られにくかった結果からも裏付けられる。これは馴化が遅いロボットは同じ行動に固執して人の解釈できる行動が生まれにくく、人が応答する機会を持ってないことでロボットがやりとりルールを理解する機会が少なかったからだと考えられる。また、ロボットが人が解釈できるような行動をするようになるのを人が待ちきれずにロボットの行動に関係なくボールを取り上げてしまうことがあれば、さらに遊びとして理解しやすいやりとりルールを共創する機会は失われることになる。逆にロボットの馴化が速いとロボットは様々な行動に移り変わりやすく、人が解釈できる行動が生まれやすいことで、人が応答する機会が生まれたと考えられる。

(2) について、本稿で数理的に定義したやりとりルールには何が足りないか。Stern は、やりとり遊びは両者の注意と興奮の維持・共有によって成り立っているとしている [28]。人はつまらないやりとりだと思えば早く別のやりとりに移りたいだろうし、面白いやりとりならばしばらく続けたいだろう。現在のモデルはこれを扱っていない。これには、視線などによりロボットの注意を表出し、また人の注意を理解すること、表情などによりロボットの興奮を表出し、また人の興奮を理解することが有用であるように考えられる。注意の維持・共有により、本稿の実験では与えてしまったやりとりルールの種類とその次元 (Fig. 8) を推定する問題、および興奮の維持・共有によりやりとりルールを遊びとして楽しむために馴化速度をお互いに調歩する問題が解かれる可能性がある。

現れたやりとりについて、「ボールの受け渡し (Fig. 11)」「ボールの転がし合い (Fig. 13)」では人とロボットの立場が対称であるのに対し、「ボールを落として拾う (Fig. 12)」「フェイント (Fig. 14)」では人とロボットの立場は非対称である。Ratner らはやりとり遊びには立場の反転が存在するとしている [24]。その意味で「フェイント」のやりとりのあとに「立場反転フェイント」のやりとりが起こっているのは注目に値する。Rochat は乳児が発達する環境としての養育者の性質として、乳児を模倣してしまう脅迫観念を挙げている [30]。立場反転が起こった理由として、共創されたやりとりルールでのロボットの役割を人が模倣したものと考えられる。

本稿実験でのやりとりルール (Fig. 8) は文脈 c 、行動 a 、応答 r についてある一時点の多次元値としてしか扱っていない。にもかかわらず、複数時刻ステップにまたがるやりとりが現れたのは、やりとりルールが鎖のようにつながって、状態遷移がループを成したオートマトンのように機能していたからだと考えられる。これはロボットの行動 a 、人の応答 r が次の時刻ステップのやりとりルールの文脈 c になっていることから理解できる (Fig. 8)。しかしながら、より一般的にやりとりルールを捉えるならば、ある一時点の値ではなくある時間幅を持たせてマルチ時間スケールで因果関係を推定する必要があるだろう。

6. 結 論

ロボットがある行動をすると人がそれに対して応答を返す、この対応関係をやりとりルールと呼ぶ。乳児と養育者の間で行われるやりとり遊びの知見に基づき、「応答予測の形成」「応答予測の確認」「予測される応答に対する馴化・脱馴化」を通して人とロボットでやりとりルールを探索・共創し続ける枠組み、および応答予測度と応答馴化度を核としたロボットモデルを提案した。ロボットは行動して人の応答を観察することで応答予測を形成し、予測した応答を確かめるように行動する。これによりやりとりが繰り返される。十分に応答を確かめると飽きて他の行動を取るようになる。これにより他のルールが発見される余地が生まれる。応答予測はやりとりルールそのものであるからルールの探索・共創に必要なが、応答馴化・脱馴化が必要であるか確かめるため、被験者と提案したモデルによるロボットでの自由なボール遊びをタスクとした実験を行った。結果として、因果指標を用いたやりとりの解析から適切な馴化がやりとりルールの成立を助けることが分かった。具体的なやりとり遊びとしては被験者に応じて、ボールを互いに受け渡したり、転がし合ったり、ボールを渡すかのように渡さないなどの多様なやりとりが発現した。またやりとりが繰り返されるとき応答予測度が上昇し、追うようにして応答馴化度が上昇してやりとりの繰り返しから抜け出ることから、提案した枠組みおよびモデルが機能して、人とロボットはやりとりルールを探索し共創し続けていることが分かった。課題として、何がやりとりに関連しているのかの推定やマルチ時間スケールでの因果推定などによるやりとりルールの一般化、注意・興奮の維持・共有を考慮したモデルへの拡張、実機ロボットへの適用がある。また、コミュニケーション促進システムとしての応用可能性を探る。

謝 辞 議論していただいた金城海途氏、杉山弘晃氏、住岡英信氏に感謝する。本研究の一部は JST ERATO 浅田共創知能プロジェクトの支援による。

参 考 文 献

- [1] M.A. Goodrich and A.C. Schultz: "Human-Robot Interaction: A Survey," *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, vol.1, no.3, pp.203–275, 2007.
- [2] T. Fong, I. Nourbakhsh and K. Dautenhahn: "A survey of socially interactive robots," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.42, pp.143–165, 2003.
- [3] M. Fujita: "On activating human communications with pet-type robot AIBO," *Proceedings of the IEEE*, vol.92, no.11, pp.1804–1813, 2004.
- [4] K. Wada and T. Shibata: "Robot Therapy in a Care House—Its Sociopsychological and Physiological Effects on the Residents—," *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2006)*, pp.3966–3971, 2006.
- [5] J. Osada, S. Ohnaka and M. Sato: "The Scenario and Design Process of Childcare Robot, PaPeRo," *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, no.80, 2006.
- [6] F. Tanaka, B. Fortenberry, K. Aisaka and J.R. Movellan: "Developing Dance Interaction between QRIO and Toddlers in a Classroom Environment: Plans for the First Steps," *Proceedings of the 2005 IEEE International Workshop on Robot and*

- Human Interactive Communication (RO-MAN2005), pp.223–228, 2005.
- [7] N. Mitsunaga, T. Miyashita, H. Ishiguro, K. Kogure and N. Hagita: “Robovie-IV: A Communication Robot Interacting with People Daily in an Office,” Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2006), pp.5066–5072, 2006.
- [8] K. Kosuge, T. Hayashi, Y. Hirata and R. Tobiya: “Dance Partner Robot—Ms DanceR—,” Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), pp.3459–3464, 2003.
- [9] E.A. Schegloff: ‘Issues of Relevance for Discourse Analysis: Contingency in Action, Interaction, and Co-participant Context,’ E.H. Hovy and D.R. Scott (eds), Computational and Conversational Discourse, pp.3–35, Springer, 1991.
- [10] R.K. Sawyer: *Improvised Dialogues: Emergence and Creativity in Conversation*, Ablex Publishing Corporation, pp.1–12, 2002.
- [11] J.K. Burgoon, L.A. Stern and L. Dillman: *Interpersonal Adaptation: Dyadic Interaction Patterns*. Cambridge University Press, 1995.
- [12] B. Reeves and C. Nass: *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media like Real People and Places*. Cambridge University Press, 1998.
- [13] C. Breazeal: “Regulation and Entrainment in Human-Robot Interaction,” *International Journal of Experimental Robotics*, vol.21 no.10–11, pp.883–902, 2003.
- [14] M.P. Michalowski, S. Sabanovic and H. Kozima: “A Dancing Robot for Rhythmic Social Interaction,” Proceedings of 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction (HRI2007), pp.89–96, 2007.
- [15] T. Taniguchi, N. Iwahashi, K. Sugiura and T. Sawaragi: “Constructive Approach to Role-Reversal Imitation Through Unsegmented Interactions,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.20, no.4, pp.567–577, 2008.
- [16] M. Asada, K.F. MacDorman, H. Ishiguro and Y. Kuniyoshi: “Cognitive Developmental Robotics As a New Paradigm for the Design of Humanoid Robots,” *Robotics and Autonomous System*, vol.37, pp.185–193, 2001.
- [17] M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, T. Inui, Y. Yoshikawa, M. Ogino and C. Yoshida: “Cognitive Developmental Robotics: A Survey,” *IEEE Transaction on Autonomous Mental Development*, vol.1, no.1, pp.12–34, 2009.
- [18] M. Ogino, H. Toichi, Y. Yoshikawa and M. Asada: “Interaction rule learning with a human partner based on an imitation faculty with a simple visuo-motor mapping,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.54, no.5, pp.414–418, 2006.
- [19] T. Ogata, R. Yokoya, J. Tani, K. Komatani and H.G. Okuno: “Prediction and Imitation of Other’s Motions by Reusing Own Forward-Inverse Model in Robots,” Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robots and Automation (ICRA2009), pp.4144–4149, 2009.
- [20] T. Kuriyama and Y. Kuniyoshi: “Acquisition of Human-Robot Interaction Rules via Imitation and Response Observation,” Proceedings of the 10th International Conference on the Simulation of Adaptive Behavior (SAB2008), pp.467–476, 2008.
- [21] H. Ishihara, Y. Yoshikawa, K. Miura and M. Asada: “Care-giver’s sensorimotor magnets guide infant’s vowels through auto mirroring,” Proceedings of 7th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL2008), pp.49–54, 2008.
- [22] H. Sumioka, Y. Takeuchi, Y. Yoshikawa and Minoru Asada: “Bottom-up Social development through reproducing contingency with sensorimotor clustering,” Proceedings of Ninth International Conference on Epigenetic Robotics, pp.169–176, 2009.
- [23] G.E. Gustafson, J.A. Green and M.J. West: “The infants’ changing roles in mother-infants games: The growth of social skills,” *Infant Behavior and Development*, vol.2, pp.301–302, 1979.
- [24] N. Ratner and J. Bruner: “Games, social exchange and the acquisition of language,” *Journal of Child Language*, vol.5, pp.391–401, 1978.
- [25] J.S. Bruner and V. Sherwood: ‘Peekaboo and the learning of rule structures,’ *Play: Its role in development and evolution*. pp.277–285, Basic Books, 1975.
- [26] T. Rome-Flanders and L. Cossette: “Comprehension of Rules and Structures in Mother-Infant Games: A Longitudinal Study of the Early Two Years of Life,” *International Journal of Behavioral Development*, vol.18, no.1, pp.83–103, 1995.
- [27] B.D. Goldman and H.S. Ross: ‘Social skills in action : An analysis of early peer games,’ *The development of social understanding: Studies in social and cognitive development VI*. pp.177–212, 1978.
- [28] D. Stern: *The First Relationship: Infant and Mother (Developing Child)*. Harvard University Press, 1977.
- [29] J.S. Watson: ‘The perception of contingency as a determinant of social responsiveness,’ *Origin of the Infant’s Social Responsiveness*. 1979.
- [30] P. Rochat: *The Infant’s World*. pp.194–234, Harvard University Press, 2001.
- [31] C.E. Shannon and W. Weaver: *The Mathematical Theory of Information*. University of Illinois Press, 1949.
- [32] H.S. Ross and D.A. Kay: “The Origins of Social Games,” *New Directions for Child and Adolescent Development*, vol.1980, no.9, pp.17–31, 1980.
- [33] T. Schreiber: “Measuring Information Transfer,” *Physical Review Letters*, vol.85, no.2, pp.461–464, 2000.
- [34] T. Schreiber and A. Schmitz: “Surrogate Time Series,” *Physica D*, vol.142, no.3, pp.346–382, 2000.

栗山貴嗣 (Takatsugu Kuriyama)

2007 年東京工業大学工学部情報工学科卒業。2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。同年、同博士課程入学。同年より日本学術振興会特別研究員 (DC1) およびスウェーデンリッヒ大学 AI Lab. 客員研究員、現在に至る。認知発達ロボティクス、人と共生する人工エージェントに興味を持つ。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞。日本バーチャルリアリティ学会、IEEE 学生会員。

(日本ロボット学会学生会員)

國吉康夫 (Yasuo Kuniyoshi)

1991 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了、工学博士。同年電子技術総合研究所入所。1996 年より 1 年間米国 MIT AI Lab. 客員研究員、2001 年東京大学助教授、2005 年同教授、現在に至る。身体性に基づく認知の創発と発達、人間の行為の観察・理解システム、ヒューマノイドロボットなどの研究に従事。佐藤記念知能ロボット研究奨励賞、IJCAI Outstanding Paper Award、日本ロボット学会論文賞、大川出版賞、ゴールドメダル「東京テクノ・フォーラム 21」賞等受賞。人工知能学会、IEEE、日本赤ちゃん学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)