

## 予測的認知と「間」の関係

### 一言葉を話せないロボットによるしりとりを題材とした考察

#### The Relation between Predictive Cognition and Silence Time : the language game with a robot which can't use natural language

大藤 聖菜<sup>1\*</sup> 妹尾 卓磨<sup>1</sup> 清丸 寛一<sup>2</sup> 川崎 邦将<sup>3</sup>

大澤 正彦<sup>14</sup> 長田 茂美<sup>3</sup> 今井 倫太<sup>1</sup>

Kiyona Oto<sup>1</sup>, Takuma Seno<sup>1</sup>, Hirokazu Kiyomaru<sup>2</sup>, Kunimasa Kawasaki<sup>3</sup>

Masahiko Osawa<sup>1</sup>, Shigemi Nagata<sup>3</sup>, Michita Imai<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 慶應義塾大学

<sup>1</sup> Keio University

<sup>2</sup> 京都大学

<sup>2</sup> Kyoto University

<sup>3</sup> 金沢工業大学

<sup>3</sup> Kanazawa Institute of Technology

<sup>4</sup> 日本学術振興会特別研究員 (DC1)

<sup>4</sup> Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science(DC1)

**Abstract:** In this research, in order to design minimal artifacts such as robots and agents, we discuss communication with a robot which can't speak natural language. We investigated relationships between predictive cognition and response time in communication highly depending on predictive cognition, which is a guideline how to help listeners understand talks with timeliness. From this experiment, we couldn't confirm hypothesis that people use predictive cognition strongly after robots take long silence to respond. However, we found that the length of silence before human's reactions would be a clue which tells whether people use predictive cognition or not.

## 1 はじめに

本研究では、ロボットやエージェントといった人工物への最小限のデザインを実現するために、自然言語を使用しないロボットとのコミュニケーションを扱う。最小限の機能やデザインを利用することで、処理速度の問題を解決できたり、人からの期待値の操作ができたりするため、人にとっても人工物にとっても負担のないスムーズなコミュニケーションを実現できると考える。最小限のデザインの実現の一つとして、自然言語の使用なしでコミュニケーションを試みる研究 [1][2][3] が行われている。自然言語を使用せずともスムーズなコミュニケーションを行うためには、聞き手の発話理解を助ける操作や機能が必要であり、表情、視線、ジェスチャーや音声に含まれる韻律といった非言語情報の

使用が重要となる。

小松ら [1] は、発話中のパラ言語情報と機能との結びつきを学習することで発話の意味を理解していくような意味獲得プロセスを観察する実験を行った。結果として、互いに相手を学習し、学習結果に応じて行動変化をするといった相互適応的なプロセスが観察された。[2] では、単純な人工音によって、エージェントの内部状態をユーザに直感的かつ正確に伝達できることが検証された。[1] や [2] において、人は他者の発話の意味や内部状態をボトムアップ的に解釈することが想定されている。一方で、人は、状況や文脈、事前知識をもとに、相手の発話や行動をトップダウン的に解釈する場合もあると考えられる。そこで清丸ら [3] は、自然言語を用いない相手としりとりを行うインタラクション実験を行い、聞き手側のトップダウン的な予測に頼った認知を利用すれば、自然言語を用いないロボットとも言語的なコミュニケーションが成立する可能性を示唆した。

\*連絡先：慶應義塾大学大学院理工学研究科  
〒 223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1  
E-mail: oto@ailab.ics.keio.ac.jp

[2]においては、人工音が人工物からの一方的な情報の表出としての利用に留まっており、人工音のみで相互適応的プロセスを経ることは想定されていない。また、[3]において、予測的認知の利用によってコミュニケーションが成立したとしても、人の応答が全て予測的認知のもとになされたものかどうかは明らかではない。[1]において明らかとなった、パラ言語情報の意味獲得プロセスに相互適応的なプロセスがあるという知見は、人が人工物のパラ言語情報から意味獲得を行うような場面においても参考にできる。するとここで、人工物がとるべき相互適応的プロセスの実時間的分析が必要となる。なぜなら、コミュニケーションにおいて、相手が時間的随伴性をもって自分に反応してくれるかどうかは重要であり、未知の音声や非自然言語の理解が正しく行われたか否かの判定や相互適応的な行動変化も実時間で実行されることが望まれるからだ。人工物が相手の予測的認知の利用の有無を判断できれば、相互適応的な行動変化を実時間で実行することにつながる。

したがって、本研究では、予測的認知に頼ったコミュニケーションの場面における予測的認知の利用と時間の関係を調査する。ここで、予測的認知を「(意識的・無意識的を問わず)相手の発言よりも先に相手の発言を予測し、その予測が発言の意味獲得に使用された認知」と定義する。そして、聞き手の発話理解を助ける操作を時間的随伴性をもって実行するための指針を探る。また、筆者らは、会話中に発生する沈黙や反応に要した時間といった「間」と予測的認知との関係として以下のような仮説を立てた。

**仮説 1** 発話者のとった「間」が長い場合、受け手の予測的認知はより引き出される。

**仮説 2** 予測的認知が行われたか否かは、受け手の反応までの「間」の長さによって分類できる。

仮説検証のために、ロボットとの簡単な言語的コミュニケーション実験を行った。一般のコミュニケーションは応答の自由度が高いため、予測的な認知を引き出すための要素や条件を検証するための例題としてしりとりを用いた。会話分析に時間軸を導入し返答を行うタイミングを計測することによって、予測的認知と「間」の関係を考察する。

本論文の構成は、まず第2章において、インタラクションが成立する最小レベルや「間」の意味と原因に関する先行研究を紹介する。次に、第3章で実験で使用したロボットとシステムの概要を示し、第4章で実験内容と結果を示す。第5章で考察を行い、第6章で今後の課題を述べたあと、第7章でまとめとする。

## 2 関連研究

### 2.1 アシストを引き出す最小レベルのインタラクション

岡田 [4] は、他者からの助けを引き出しながら一緒に好意を組織する関係論的なロボットである「弱いロボット」を展開している。「弱いロボット」の一つに、相手の聞き手としての関心を引くために、むしろ非流暢ともとれるたどたどしい発話を行うロボット「トーキング・アリー」がいる。

今回筆者らが扱う自然言語を使用しないロボットは、「トーキング・アリー」の能力をさらに制限したロボットとみなすことができ、「トーキング・アリー」同様に相手の聞き手としての関心をより引くことができると考えられる。また、「弱いロボット」で取り入れられている不完全さを参考にして、本研究でも小さくて弱そうに見えるロボットのサイズ、機能の不十分さが窺える抽象的な形を取り入れ、ユーザの助けを積極的に引き出せるようなシステムを目指した。

また、[5]では、「弱いロボット」の不完全な発話に対して、抜け落ちた情報について人の方からロボットに積極的に質問がなされたことが確認された。不完全な発話は、(1) 簡単な文法構造を用いる、(2) 一発話あたりの文節数を約3文節とする、といった特徴をもっており、一つの発話では多くの情報が伝えられず、その欠けた情報に対して人から聞き直しや質問が行われた。これは、ロボットが行った不完全な発話に対して人側が補完的な認知を行っていたと考えられ、一種の予測的認知の利用があったとも捉えることができる。よって、「弱いロボット」のもつ特徴は、予測的認知を引き出しやすいものであると言える。

### 2.2 自然言語を使用しないコミュニケーション

コミュニケーションにおいて自然言語を使用しない例として、小松らの [1] や [2] が挙げられる。[1] では、発話中のパラ言語情報と機能との結びつきを学習することで発話の意味を理解していくような意味獲得プロセスを観察する実験を行った。これは、人工物がユーザのパラ言語情報から意味獲得を行うシステム構築実現に向けての知見を得るために行われた。具体的な実験方法としては、教示者の音声をローパスフィルタにかけることで音韻情報を失ったパラ言語へと変換し、この音声教示を頼りに操作者がTVゲームの操作を行うというものであった。結果として、未知の音声の意味獲得を行いコミュニケーションを成立させるためのプロセスとして、(1) 韻律情報による注意喚起、(2) 複合報酬による強化学習的な意味獲得プロセス、(3) 相互適

応的な行動の変化，が確認された。(3)の相互適応的な行動の変化は，互いに相手を学習し，学習結果に応じて行動変化をするといったものであり，人工物が人工物のパラ言語情報からユーザに意味獲得を行ってもらった場合にも参考にできると考える。

[2]では，「単一モダリティでシンプルに構成され，コミュニケーションにおける主たるプロトコルに干渉することなくエージェントの内部状態を直感的にかつ正確にユーザに伝達できる表現」が Artificial Subtle Expression(ASE)と定義された。

本研究で扱うシステムは，非自然言語の情報を人間に提示する点で ASE と共通しているが，人間が状況や文脈を踏まえてシステムの応答をトップダウン的に解釈する必要がある点で異なる。したがって本研究は，状況に応じて同一あるいは類似した表出に異なる意味を与えられる，ASE の発展として位置づけられる。

## 2.3 「間」の意味と原因

会話中に発生する沈黙や応答までの遅延といった「間」に関して，社会心理学や社会言語学といった分野では多く扱われてきた。[7]では，沈黙を扱うための基本的な理論的枠組みの確立のため，心理的沈黙，相互作用の沈黙，社会文化的沈黙の3種類の沈黙を定義した。人が会話内容の処理に時間を要す場合があることは明らかであり，相互作用の沈黙には，メッセージの意味推論や判断にかかった時間である認知的要因による沈黙が含まれる。

さらに，「間」は，人と人の会話のみならず，人とロボットの会話においても発生する[8]。人はためらいや拒否といった心理的要因からロボットに対しても「間」を使用する場合があります，さらに，ロボットのとった「間」も単なる機械的な処理時間以外として相互作用的な意味が付加される場合が認められた。

以上のことから，「間」の使われ方や作用を観察していくことは，自然言語を用いないロボットとのコミュニケーションにおいても有意であると言える。よって，本研究でも「間」の使われ方や作用に着目して予測的認知の利用を観察する。

## 2.4 予測的認知に関する研究

清丸ら[3]は，自然言語を用いない相手とのしりとりを例題としたインタラクション実験を行い，聞き手側の予測に頼った認知を利用すれば，自然言語を用いないロボットとも言語的なコミュニケーションが成立する可能性を示唆した。

予測的認知を裏付ける理論として Predictive coding というものがあり，Predictive coding は，脳は常に次

に受け取る入力について予測を行っているという脳情報処理に関する理論である[6]。Predictive coding によれば，脳は学習で獲得した内部予測モデルに従って上の層から下の層へトップダウンの予測信号を伝達しており，予測信号と入力刺激の誤差情報が下の層から上の層へと伝達され，内部予測モデルが更新される。

本研究では，[3]で行われた実験で使用されたしりとりシステムを実体としてのロボットに組み込み，実験参加者にこのロボットとインタラクションしてもらうことで再び予測的認知に関して実験を行った。

## 3 自然言語を使用しないロボットとしりどりのシステム

本章では，実験に使用した自然言語を使用しないコミュニケーションロボットと，ロボットのしりとりシステムについての概要をまとめる。

### 3.1 コミュニケーションロボットの概要

開発したコミュニケーションロボットは，20cm以下の比較的小型のロボットであり，頭部に3自由度と腕部に2自由度の計5自由度，音声対話機能と移動機能を搭載している。外観は，2頭身で丸い頭を持ち，親しみやすい外観となっている。加えて，様々なインタラクション実験を想定し，制御ボードに Raspberry pi と Linux ベースの OS を採用することで，アプリケーション開発にかかるコストを軽減している。開発したロボットの外観と仕様を図1と表1に示す。

本ロボットの外観は，白一色に統一され，顔のパーツといったものが描かれていない抽象的な見かけをしている(図1)。个性的要素を排除した中立的な見かけをしたテレノイドが，ユーザに対してテレノイドを遠隔操作する相手の個性推測をより引き出すこと[10]と同様に，本ロボットも対話相手である人側の自由な他者イメージの投影を誘発できると考えられる。

### 3.2 発話システムの設定

しりとりシステムは，予測的な認知を引き出すことを目的に，応答可能な語彙，音声データ，そして応答の選択確率に配慮して構築されている。システムの処理の流れを2に示す。

はじめに，システムの語彙について説明する。語彙の水準は幼稚園児程度である。語彙データは，神奈川県内の幼稚園の協力のもと実施された15名の幼稚園児(3~5歳)と幼稚園教諭のしりとりデータをもとに構築されている。幼稚園児の語彙を使用した意図としては，



図 1: 使用したロボットの外観

表 1: 使用したロボットの仕様

Size(H × W × D)	196 × 153 × 109 mm
Weight	655 g
Number of DOFs	Head, 3 Arm, 1 × 2 Wheel, 1 × 2
Sensors	CMOS camera Microphones × 2 Speaker × 2 IMU, MPU-9250
CPU Board	Raspberry Pi 3 Model B
OS	Linux (Ubuntu 16.04)
Servomotors	SG-92R
DC motors	75:1 Micro Metal Gear motor
Battery	DC 5V 6000mAh

まず、幼稚園児が知っている語彙であればしりとりで一般的な語彙になりやすいと想定したからだ。さらに、幼稚園児が知っている語彙と教示することで有り得る応答語彙の数が少ないと分かり、予測的な認知による発話理解が容易になると考えたからだ。現在、出現頻度が2回以上で「ん」で終わらない合計68語が応答可能な語彙として採用されている。図3にシステムの語彙を示す。図3より、しりとりには典型的な応答パターンが存在し、語の出現頻度に偏りがあることが分かる。

次に、応答の音声データについて説明する。応答のための音声は、芸能プロダクション Artist Crew の協力のもと作成されたプロの声優による読み上げデータである。これは、語の抑揚やアクセントが予測的な認知を促すことを期待したものである。音声データに肉声を採用しているのは、既存の音声合成ソフトウェアの多くが自然言語の発話を前提としており、限られた音で複雑なニュアンスを伝えることに最適化されていないからである。また、音声データは、応答可能な語彙の他に、喜び、悲しみ、怒りの感情についても収録して

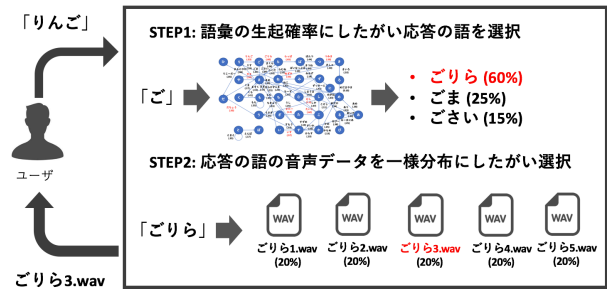


図 2: しりとりシステムの処理の流れ

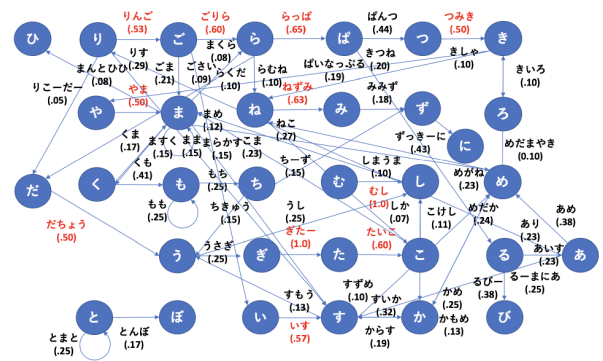


図 3: しりとりシステムの語彙とその生起確率のグラフ

いる。感情の音声データは、[3]の著者らが、収録された音声喜び、悲しみ、怒りの各感情に不明を加えた4種類のラベルのうちどれに該当するか識別し、不明以外でラベルが一致した音声のみを採用している。それぞれの応答ごとに音声は複数回収録されており、応答の際にはそれらの中の一つが無作為に選ばれ再生される。

最後に、応答の選択確率について説明する。しりとりの応答は、幼稚園で実施されたしりとりにおける各単語の頻度に基づいて確率的に選択される。これは、しりとりが存在する典型的な応答パターンに従った返答を生成することを目指している。また、語彙が非常に少ないため、応答可能な語が存在しない場合には怒りの感情の音声データを返す。

## 4 実験

本章では、前章で説明したシステムを使用して、しりとりを題材とした人とロボットのコミュニケーション実験について説明する。



図 4: 実験の様子

## 4.1 目的と概要

本実験の目的は、第 1 章で挙げた仮説 1、仮説 2 の検証を行うことである。さらに、自然言語を使用しないロボットと人のインタラクションを通して、予測的認知の利用や「間」の作用を観察し、発話の意味獲得を助ける相互適応的な行動の変化に関する知見を探ることである。

## 4.2 手順

実験参加者には、図 4 のように、机の上に置かれたロボットに向き合う形で着席してもらった。ロボットの動作は Wizard of Oz 方式で、操作者が実験参加者からは見えないところでロボットの操作をした。

しりとりは、ロボット側の「しりとり」という単語に対応する非自然言語音声から開始され、実験参加者は「り」から始まる単語を答える。その後、通常のしりとりと同様のやりとりを続けるのだが、ロボットの単語の返答から人の予測的認知までの時間を計測するために、実験参加者のターンでは、まず、ロボットが回答したと思った単語をロボットに確認してもらい、ロボットのフィードバックを得てから、ロボットの単語に続く自身の単語を答えてもらった。

例えば、ロボットのターンにおいてロボットが「りんご」に対応する非自然言語の音声データを発話した場合、人のターンでまずロボットに「りんご？」と確認してもらった。ロボットが意図した単語と一致していれば、ロボットは喜ぶようなポジティブなジェスチャーと発話をした。それから人は「りんご」に続く「ご」から始まる単語を答えて、しり通りのやりとりが続く。

実験参加者の確認したロボットの単語がロボットの意図した単語と一致していなかった場合、ロボットは困ったようなネガティブなジェスチャーと発話をした。1 回目の確認が誤っていたと分かった実験参加者には、2 回目の確認をしてもらった。2 回目の確認の際には、

実験参加者の確認した単語とロボットの意図した単語が一致していない場合でも、ロボットはポジティブなフィードバックを返した。これは、しり通りのやりとりをできるだけ続けてもらえることをねらった理由からである。

しりとりの中で、ロボットが何を言ったのかが全く思い浮かばなかった場合は聞き返すことも可能とした。また、しり通りのターンがロボット側にあるのか実験参加者側にあるのかがあいまいになったり、実験参加者があまりに長く考え込んだりしたりした場合には、しりとりがこれ以上続かないと判断し、しりとりを最初から再スタートさせた。

実験参加者には、以上の手順に加え、(1) 自然言語を使えないロボットが言葉遊びできるか検証する実験であること、(2) ロボットが使用する語彙は幼稚園児レベルであること、(3) ロボットは自然言語を理解することができるが自然言語を話すことができないこと、(4) ロボットが何を言いたかったのかを察してあげながらしりとりをすること、を教示として事前に説明した。実験は、しり通りのターンのやりとりがおおよそ 20 往復、もしくは全体の経過時間が約 10 分間経過した時点で終了とした。

実験結果は、撮影した動画と音声データをもとに分析した。

## 4.3 実験参加者

実験には、学生 7 人に参加してもらい、うち男性 4 人女性 3 人であった。

## 4.4 結果

図 5 は、横軸にロボットの単語の回答までの沈黙時間の長さを取り、縦軸に人の 1 回目の確認までの沈黙時間の長さをとって、ロボットの「間」の長さとの「間」の長さの関係性を調べたものである。ロボットは操作の関係上、おおよそどの回答にも 5~10 秒を要した。人はロボットの要した回答時間に関係なく、0~5 秒までの確認が最も多く、仮説 1 で想定した結果は得られなかった。近似直線は-0.0452 の傾きをもち、R の二乗値は 0.0044 であった。

1 回目の確認までの沈黙時間の全データから箱ひげ図を作成し、外れ値を確認したところ、7.46 秒より長い沈黙は外れ値となった。外れ値を除いてヒストグラムを作成し、ガンマ分布のパラメータ推定を行い近似曲線を引いた。同様にして、2 回目の確認までの沈黙時間の外れ値も除いて、ガンマ分布で近似曲線を引いたものをまとめたものが図 6 である。

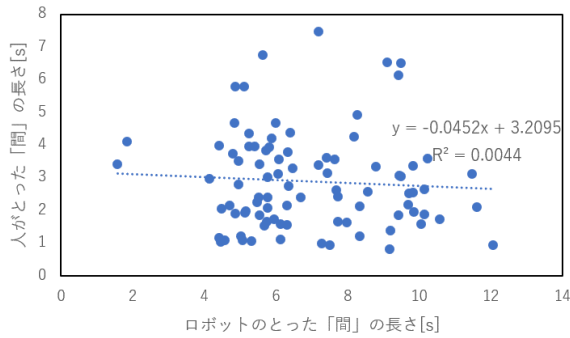


図 5: ロボットの「間」の長さとの「間」長さの関係

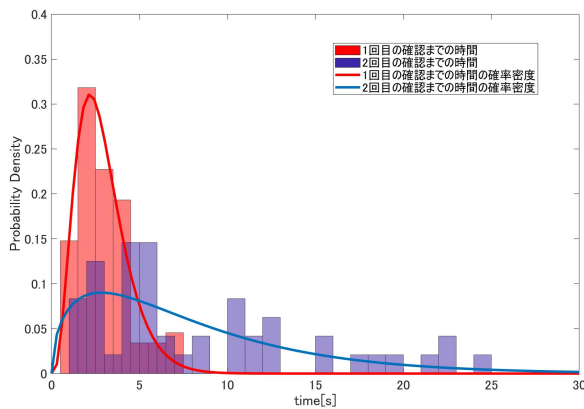


図 6: 予測的認知の使用時間と近似曲線

## 4.5 考察

### 4.5.1 仮説 1 について

図 5 より、長い「間」をとった場合、人の予測的認知はより引き出される、という仮説は確認できなかった。理由としては、予測的認知における予測というものがそもそも時間を長く要するものではなく、直感的に行われるものであったということが考えられる。また、実験参加者によっては、ロボットがとった「間」をロボットの動作上の不自然な処理時間と捉えていた様子がうかがえた。ロボットの不自然な振る舞いは、人がロボットの行動や発話を予測するのを妨げた可能性があり、そのために反応時間が特に早まることもなかったとも考えられる。ロボットがとる「間」に自然な振る舞いを入れることができれば、人の反応時間が変わる可能性が考えられ、これは今後検証する必要がある。

一方で、今回はロボットの操作を手動で行っていたため、「間」をとらない早い回答でも 1 秒以上かかってしまった。今後、ロボットが全く「間」をとらない即座の回答を行った場合の検証をすることによって、予測的認知と時間の関係をさらに調査できるだろう。

### 4.5.2 仮説 2 について

予測的認知によって、自然言語を用いないロボットとも言語的なコミュニケーションが成立したこと [3] から、本実験においても予測的認知があったと考えられる。しかし、外れ値となった 7.46 秒より長い沈黙が発生した返答は、予測的認知というよりは、純粋な推測をロボットの回答後に一から行っていた返答であると分類できる。推測的な返答は、ロボットの発話後から再び考え直して、ロボットの音声のイントネーションや非自然言語の音数といった情報をもとに自身の中で単語検索を行い、非自然言語から自然言語への変換のための推測を行ったために時間がかかった可能性がある。

図 6 で、1 回目の確認までの時間の確率密度分布と 2 回目の確認までの時間の確率密度分布と比較すると、分布の様子が大きく違ってくるのが分かる。具体的には、1 回目の沈黙時間は最頻値の 2.18 秒で 0.3 を超える確率をもつが、一方の 2 回目の沈黙時間は最頻値が 2.83 秒となり、以降なだらかに減少していく。約 5 秒を境に 1 回目の沈黙時間と 2 回目の沈黙時間の確率密度が逆転し、1 回目の確認までの時間の確率密度は低くなっている。

1 回目と 2 回目の確認までの時間に大きな分布の差が出た原因として、予測的認知の利用の有無が関係していると考えられる。1 回目の確認はほとんどの場合が確率分布の最頻値周辺で行われており、全体を通して予測的認知の利用の割合が高いと想定できる。一方、2 回目の確認においては、ある程度時間が経過したところまで確率分布が広がっており、1 回目と比較して予測的認知の利用の割合が低くなったと考えられる。2 回目の確認を行った場合では、全体的に返答までに時間がかかり、7.46 秒以降の確認が多くなっていることから、うまく予測的認知が働かなかった場合には、単語を考え込んだために単語の想起までに時間がかかっていることがうかがえる。2 回目の確認の最頻値が 1 回目の確認の最頻値と近いところにあったことから、2 回目の確認の中にも予測的認知を利用した確認は一定数あったと考えられる。

1 回目の 0~7.46 秒からの返答には予測的認知の利用割合が高かったと仮定すれば、6 で得た 1 回目の確認までの時間の確率密度を、予測的認知を利用したときにかかる反応時間の確率分布とみなすことができる。したがって、およそ 7.5 秒までの返答を基準に予測的認知の利用がある可能性があり、1 回目の沈黙時間と 2 回目の沈黙時間の確率密度が逆転するおよそ 5 秒が、予測的認知の利用の有無を判定するのに重要な基準になると言えそうだ。

## 5 今後の課題

今回の実験からは、仮説1については十分な検討ができなかったと言える。ロボットが沈黙して「間」をとっている時間において、ロボットに自然な振る舞いを追加したうえで今回と同様の実験を行う必要がある。人側の注意が必要以上にロボットに向いてしまわない条件にしたうえで、予測的認知の予測にかかる時間をより正確に検討していきたい。

また、今回は1回目の0~7.46秒からの返答に予測的認知の利用があったと仮定した。しかし、1回目の確認までに要した時間の全データから外れ値を除いたもので、具体的な閾値を得たり、正確な確率分布を得たりする過程にまで至ってはいない。今後は、0~7.46秒からの返答に予測的認知の利用があったという仮定を更に検討していく必要がある。予測的認知の利用の有無を判定する基準として、返答まで5秒かかるか否かを挙げたが、この5秒という数値に関しても更に慎重に吟味していきたい。

さらに、実験参加者を増やして分析できるデータを増やすことによって、統計的に有意な結果を得たり、様々な予測的認知のパターンの知見を得たりできることが考えられる。

以上のことを踏まえてさらなる調査を重ね、将来的には相互適応的な行動の変化を実時間で実行し、自然言語を使用せずともスムーズなコミュニケーションを行える人工物の実現に取り組みたい。

## 6 おわりに

本研究では、ロボットやエージェントといった人工物への最小限のデザインを実現するために、自然言語を使用しないロボットとのコミュニケーションを扱った。自然言語を使用せずともスムーズなコミュニケーションを行うためには、聞き手の発話理解を助ける操作や機能が必要であり、表情、視線、ジェスチャーや音声に含まれる韻律といった非言語情報の使用が重要となる。今回、予測的認知を利用すれば、自然言語を話せない相手との会話場面においてもコミュニケーションが成立することを示唆した清丸らの従来研究をもとに実験を行った。聞き手の発話理解を助ける操作を時間的随伴性をもって実行するための指針として、予測的認知に頼ったコミュニケーションの場面における予測的認知の利用と時間の関係を調査した。

今回の実験からは、発話者のとった「間」が長い場合、受け手の予測的認知はより引き出される、という仮説は確認できなかった。一方で、受け手の反応までの「間」の長さによって、ロボットが使用した非自然

言語に対して受け手が予測的認知を利用したか否かを判断できる可能性を見出した。

今後は、予測的認知の利用と時間の関係のさらなる調査が望まれる。将来的には相互適応的な行動の変化を実時間で実行し、自然言語を使用せずともスムーズなコミュニケーションを行える人工物の実現に取り組む予定である。

## 謝辞

本研究は、全脳アーキテクチャ若手の会と一般財団法人 ZERO 財団の助成を受けた。また、幼稚園児の語彙の収集に際しては日吉台光幼稚園に協力を頂いたほか、音声データの作成とロールプレイングに際しては株式会社 Artist crew の皆様に協力を頂いた。

## 参考文献

- [1] 小松孝徳, 鈴木健太郎, 植田一博, 開一夫, 岡夏樹: パラ言語情報を利用した相互適応的な意味獲得プロセスの実験的分析, 認知科学, Vol. 10, No. 1, pp. 121-138 (2003)
- [2] 小松孝徳, 山田誠二, 小林一樹, 船越孝太郎, 中野幹生: Artificial Subtle Expressions: エージェントの内部状態を直感的に伝達する手法の提案, 人工知能学会誌, Vol. 25, No. 6, pp. 773-741 (2010)
- [3] 清丸寛一, 大澤正彦, 今井倫太: 予測的認知を用いた非自然言語による言語的コミュニケーション人工知能学会 第6回汎用人工知能研究会, (2017)
- [4] 岡田美智男: 人とのかかわりを指向する〈弱いロボット〉とその展開, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 5, pp. 299-303 (2016)
- [5] 西脇裕作, 岡田美智男: 〈不完結な発話〉の備える対話性について, 日本認知科学会, 第34回大会 pp. 431-441 (2017)
- [6] Rajesh P. N. Rao, Dana H. Ballard: Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects *Nature Neuroscience*, Vol. 2, No. 1, pp. 79-87 (1999)
- [7] T. J. Bruneau.: Communicative Silence: Forms and Functions, *J. Communication*, Vol. 23, No. 1, pp. 17-46 (1973)

- [8] Kiyona Oto, Jianmei Feng, Michita Imai: Investigating how people deal with silence in a human-robot conversation, *the IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 195-200 (2017)
- [9] 川崎邦将, 大澤正彦, 今井倫太, 長田茂美: 認知的制約付き擬人化キャラクターに着目したコミュニケーションロボットの設計と開発人工知能学会 第6回汎用人工知能研究会, (2017)
- [10] Ogawa, K., Nishio, S., Koda, K., Balistreri, G., Watanabe, T., Ishiguro, H: Exploring the natural reaction of young and aged person with telenoid in a real world, *JACIII*, Vol. 15, No. 5, pp. 592-597 (2011)