

コミュニケーションロボットとの対話を用いた 発話と身振りのタイミング機構の分析

高杉 将司*・山本 知仁**・武藤 ゆみ子*
阿部 浩幸***・三宅 美博*

Analysis of Timing Control Mechanism of Utterance and Body Motion
Using Dialogue between Human and Communication Robot

Shoji TAKASUGI*, Tomohito YAMAMOTO**, Yumiko MUTO*,
Hiroyuki ABE*** and Yoshihiro MIYAKE*

The purpose of this study is to clarify the effects of timing control of utterance and body motion in human-robot interaction. Our previous study has already revealed the correlation of timing of utterance and body motion in human-human communication. Here we proposed a timing control model based on our previous research and estimated its influence to realize human-like communication using a questionnaire method. The results showed that the difference of effectiveness between the communication with the timing control model and that without it was observed. In addition, elderly people evaluated the communication with timing control much higher than younger people. These results show not only the importance of timing control of utterance and body motion in human communication but also its effectiveness for realizing human-like human-robot interaction.

Key Words: human-robot interaction, human communication, dialogue, timing control, synchronization

1. はじめに

人はコミュニケーションを介して、他者との意思疎通を図ることができる。その際、言語によるバーバル情報だけではなく、周辺言語としてのパラ言語や、視線、傾き、表情、身振りなどの身体動作といった言葉によらないノンバーバル情報も重要な要素である。そして、これらの多様なコミュニケーション・チャンネルを統合することでコミュニケーションを円滑に進めている¹⁾。たとえば Birdwhistell²⁾の報告によると、対話において言語によって伝えられるメッセージは全体の35%にすぎないといわれる。これらのことから、言語的コミュニケーションとともに非言語的コミュニケーションが重要と考えら

れるが、人間がそれらのチャンネルから得られた多様な情報を用い、どのようなメカニズムで円滑なコミュニケーションを実現するのかについては、いまだ明らかにされていない。

この非言語的コミュニケーションの中では、話し手はもちろん、話し手と聞き手などのインターパーソナルな関係において、ノンバーバル情報が相互に同期したり類似する現象が、さまざまなコミュニケーション・チャンネルで観察されてきた。

特にインターパーソナルな側面に関しては、対話における発話や身振りなどが相互に同期したり類似する“同調傾向”が報告されている³⁾。この現象は、2者間の対話における話者間の発言量⁴⁾、交替潜時長(相手話者が発話を終了してから自らが発話するまでの時間長、沈黙時間、反応潜時とも呼ばれる)^{5),6)}、発話速度⁷⁾などにおいて観察される⁸⁾。また、発話だけではなく、身体動作の同調⁹⁾や呼吸の同期^{10),11)}なども報告されている。さらに、乳児の身体動作と養育者の発話の同調^{12)~14)}や、ロボットなどのインタフェースへの実装^{15),16)}も進められている。

一方、イントラパーソナルな側面に関しては、身体的リズムの同調に着目し、あいさつや情報提示のインタラクションにおいて、人自身の発話と身体動作の生成タイミングが分析されている^{17),18)}。

このような先行研究の成果は、人間のコミュニケーションにおいては、言語だけではなく非言語的コミュニケーション

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 横浜市緑区長津田町
** 金沢工業大学情報学部 石川郡野々市町扇が丘7-1
*** 金沢工業大学大学院工学研究科 石川郡野々市町扇が丘7-1
* Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Nagatsuta, Midori, Yokohama
** College of Information Science and Human Communication, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa
*** Graduate School of Engineering, Kanazawa Institute of Technology, 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa
(Received September 18, 2008)
(Revised February 24, 2009)

が重要な役割を担っていること、そして、非言語的コミュニケーションの具体例として同調傾向が重要であることを意味しており、これらはコミュニケーション研究における大きな成果である。

しかしながら、これらの先行研究には、まだ本質的な問題が残されている。コミュニケーションとは言語的チャネルだけではなく、多様な非言語的チャネルも併用した重層的な現象であるにもかかわらず、特定のコミュニケーション・チャネルを選択し、そのチャネルについてのみ分析を行なっているからである^{19)~23)}。そのため、多様なコミュニケーション・チャネルがどのように統合され、円滑なコミュニケーションを実現するのか、そのメカニズムについては、ほとんど明らかにされていない。

これまで、われわれの研究グループは、コミュニケーションを特定のチャネルに限定して分析するのではなく、複合したチャネルとして捉え、バーバル情報としての発話だけではなく、ノンバーバル情報としての多様な身振りも同時に計測し、かつ、それらのチャネルの組み合わせを定量的に分析する包括的なアプローチに取り組んできた。さらに、インターパーソナルな側面とイントラパーソナルな側面の両方から人間の対話コミュニケーションの分析を行なってきた^{24), 25)}。その結果、これまであまり考慮されなかった発話と身振りのタイミングという対話の時間的構造において、3種類の有意な相関関係を見出したのである。

しかし、このような人間同士の対話において明らかにされてきたタイミングの相関関係が、実際の対話に対してどのような影響を及ぼすのかについては、まだ調査されていない。そこで、われわれは対話コミュニケーションのメカニズムを解明するための第一歩として、コミュニケーション・チャネルを人為的に操作できる人工物（ロボットやエージェントなど）を用い、インタラクションを再構成²⁶⁾することが重要と考えた。特に、人間との円滑なコミュニケーションを目的としたヒューマノイドロボットは、対話コミュニケーションの性能向上が強く求められているという背景をもち、このような再構成に適している。また、このようなロボットとして構成することで、新たなヒューマン-ロボットインタラクションの在り方が明らかになる可能性も期待される。

そこで本研究では、われわれの先行研究から明らかにされた発話と身振りのタイミングの相関関係が、対話コミュニケーションに与える影響を、人とロボットのインタラクションにおいて構成論的に分析することを目標とする。さらに、高齢者と若年者の2つの世代間での比較も試みる。この理由は、コミュニケーションの非言語的チャネルにおいては、主観的な時間が影響している可能性もあり、この基盤にある時間認知が加齢により変化することが知られている²⁷⁾からである。

以下、第2章で人間同士の対話の分析によって明らかになった相関関係について説明し、第3章でこの相関関係を人とロボットのインタラクションを用いて構成的に分析する手法について述べる。第4章で結果を示し、第5章で考察し、第6

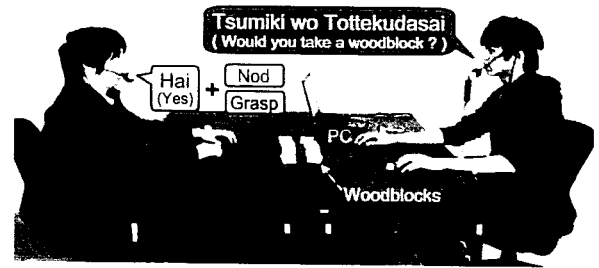


Fig. 1 Experimental task in our previous study

章でまとめを行なう。

2. 人間同士の対話におけるタイミング機構

本章では、われわれの研究グループの先行研究である人間同士の対話コミュニケーションにおける発話と身振りの時間的構造の分析結果について述べる。

山本知仁ら^{24), 25)}は、2者間での指示・応答場面を実験対象とし、課題をつぎのように設定した。被験者は、Fig. 1に示すような10個の同じ形の積み木が置かれた机に、1.2m程度離れて2人が向かい合って座る。そして、以下の2つの発話と身振りからなる指示・応答対話を行なった。

発話 1. 指示者が「積み木を取ってください」という指示を被指示（応答）者に出す

発話 2. 被指示者はその指示に対して「はい」という応答と頷き動作をしてから机の上の積み木を1つ取る

この実験課題において、発話速度の変化が発話行動の時間的構造に与える影響を明らかにするために、指示者の発話速度を意図的に「はやい」、「ふつう」、「おそい」の3段階に変化させるよう指示し、上記の対話を30回繰り返した。また、この実験には、20代（平均年齢：22.8歳）の男子学生4人が被験者として参加し、すべての組合せ12組分の実験を行なった。

山本らは、この実験内容を映像と音声で記録した。記録にはビデオカメラ（SONY社：DR-SR8）を使用し、音声はヘッドセット（Audio Technica社：PRO8HEW/P）より入力した。身振りについては、光学式モーションキャプチャーシステム（ライブラリー社：Radish/3D）を用いて、指示者と被指示者の顎と手の6点を記録し、頷きに関しては、顎が下がり始めた時刻を頷き開始点とし、顎が下がりきった時刻を頷き終了点とした。掴みに関しては、手が動き始めた時刻を掴み開始点とし、積み木を掴んだ時刻を掴み終了点とした。解析の精度については、音声データが1ms、身振りが6.7ms(150fps)で行なった。その際、分析に用いる時間的特徴量をTable 1, Fig. 2に示す。

音声に関しては、指示者の指示発話長、被指示者の応答発話長に加え、インターパーソナルな量として、指示発話の終了から応答発話の開始に対応する「間(ま)」である交替潜時長の3つを用いた。身体動作に関しては、被指示者が応答時に行なう頷き長と、積み木を取得する動作である掴み長に加え、

Table 1 Definition of indices of dialogue in human-human communication

Sd_i	Speech duration of instructor
Sd_r	Speech duration of responder
Pd	Pause duration
Nd	Nodding duration of responder
Gd	Grasping duration of responder
Np	Time difference between nodding and utterance
Gp	Time difference between grasping and utterance

イントラパーソナルな音声と身体動作の関係として、頷き開始時刻と応答発話開始時刻の時間差(頷きの先行時間長)、掴み開始時刻と応答発話開始時刻の時間差(掴みの遅延時間長)の4つを特徴量として用いた。

山本らは、以上の特徴量のすべての組み合わせについての相関分析を行なうことで、指示・応答対話における発話と身振りのタイミングを包括的に分析した。その結果、被指示(応答)者の発話と身振りの開始タイミングが、指示者の発話長に依存して変化することを明らかにし、Fig. 2 に示すような3つの相関関係の存在を報告した。

1. 発話長(指示者)(Sd_i)—交替潜時長(Pd)
2. 交替潜時長(Pd)—頷きの先行時間長(被指示者)(Np)
3. 交替潜時長(Pd)—掴みの遅延時間長(被指示者)(Gp)

まず、 Sd_i — Pd の相関関係の一例をFig. 3に示す。同図のように、指示発話長(Sd_i)と交替潜時長(Pd)の間に強い正の相関(相関係数:0.820)が観察された。この結果から、 Sd_i が長くなると Pd も長くなることが示唆された。

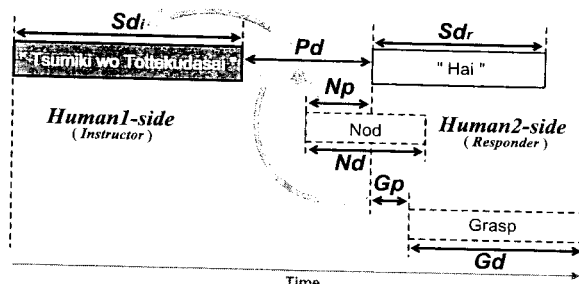
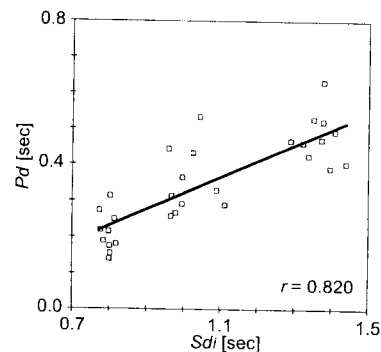
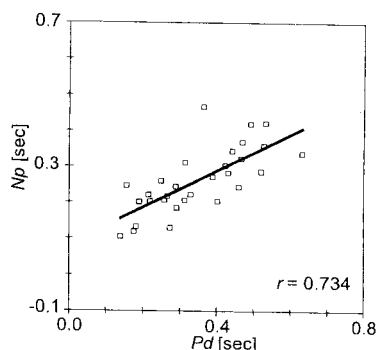
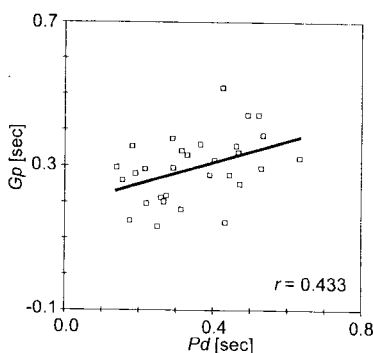
つぎに、 Pd — Np の相関関係の一例をFig. 4に示す。同図のように、交替潜時長(Pd)と被指示者の頷きの先行時間長(Np)の間に強い正の相関関係(相関係数:0.734)が観察された。この結果から、 Pd が長くなると Np も長くなることが示唆された。

最後に、 Pd — Gp の相関関係の一例をFig. 5に示す。同図のように、交替潜時長(Pd)と被指示者の掴みの遅延時間長(Gp)の間に中程度の正の相関関係(相関係数:0.433)が観察された。この結果から、 Pd が長くなると Gp も長くなることが示唆された。

3. 相関関係の再構成とその分析

3.1 研究方針

本研究では、われわれが明らかにした指示・応答対話におけるタイミングの相関関係が、対話コミュニケーションに及ぼす影響を、人とロボットのインタラクションを用いて構造的に分析する。この目的のため、人間同士の指示・応答対話で観察された相関関係に基づき対話のタイミング制御モデルを構成した。そして、このモデルをロボットに実装し対話の印象評価実験を行なうことで、タイミング制御モデルが対話にどのような影響を与えるかを調べた。そのため、山本らが用いた2者間での指示・応答対話と同等の対話を用い、被指示(応答)者側のみをロボットに置き換えた。

**Fig. 2** Correlation in human-human communication**Fig. 3** Correlation between Sd_i and Pd **Fig. 4** Correlation between Pd and Np **Fig. 5** Correlation between Pd and Gp

しかし、この方針は、必ずしもロボットを人間と等価に構成することを意味しているわけではない。たとえば、山本ら^{24), 25)}の人間同士の指示・応答対話の分析では、平均交替潜時長は300ms程度であった。しかし、武藤ら²⁸⁾が行なっ

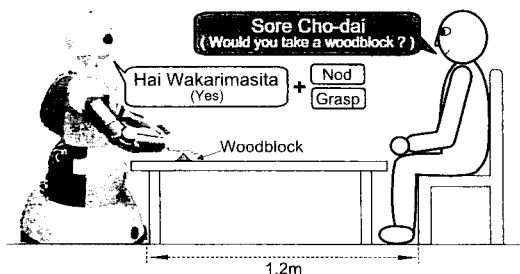


Fig. 6 Experimental task in human-robot interaction

た人とアバターの指示・応答対話の分析においては、交替潜時長が600ms~900msのときに、アバターの発話タイミングが自然であったという報告がある。このように、人間-アバターの知見と、人間-人間の知見が異なる理由として、対話する相手が機械であると認識することで人の発話速度が遅くなる可能性や、人が機械に対して期待する応答のタイミングが人間同士の対話と異なる可能性が考えられる。これらの点をふまえ、本研究のタイミング制御モデルでは、人間の特性を考慮するだけではなく、対人と対ロボットの違いも考慮してロボットに実装されることが重要である。本章では、この手法について述べる。

3.2 実験システム

コミュニケーションロボットにおいて、発話と身振りのタイミングを制御できる、人とロボットのインタラクション系を構成した(Fig. 6)。実験システムとしては、被験者の指示に対して応答するロボットと、これを制御するPCから構成されている。ロボットは三菱重工業(株)で開発されたホームユースロボット“wakamaru”^{29),30)}を使用した。ロボットには対話のタイミング制御モデルを実装する。そのモデルとしては、Fig. 7に示すように被指示者をロボットに置き換え、人間とロボットの2者間に対応させたタイミング制御モデルを用いる。

また、wakamaruにはいくつかの動作制御上の制約があるため、人間同士で観察された頷きと掴みについては1つの身振りとして扱った。そのため、今回の実験では、人間同士の指示・応答対話で観察された3つの相関関係のうち、2つの相関関係($Sd_i - Pd$, $Pd - Np$)についてのみ考慮する。さらにwakamaruの音声認識上の制約から、指示発話「積み木を取って下さい」を「それちょーだい」に変更した。

3.3 実験課題

被験者は、Fig. 6に示すような三角形の積み木が置かれた机をはさんで、1.2m程度離れてロボットと向かい合って座る。そして、つぎの2つの発話と身振りからなる指示・応答対話を行なう。

発話1. 被験者が「それちょーだい」という指示を被指示者であるロボットに出す。

発話2. ロボットは被験者からの指示に対し、「はい、わかりました」という発話と頷き動作、掴み動作の3つの応答を示す。

発話1において、被験者がロボットに指示する際、山本が行なった実験と同様に、指示発話速度を「はやく」、「ふつう」、「おそい」の3段階で試行ごとに1つずつ指示し、発話速度を意図的に変化させた。そして、これに対応してロボットの応答タイミングを制御する条件(Model条件)と固定する条件(Fix条件)を比較する。

3.4 タイミング制御モデル

タイミング制御モデルは、人間同士の指示・応答対話で観察された相関関係に基づき、ロボットの応答発話開始タイミングと身振りの開始タイミングを決定するモデルである。

Fig. 7に示すように、まず $Sd_i - Pd$ の相関関係から、ロボットの発話開始タイミングを決定する。この相関関係では、指示者と応答者の時間的な前後関係から、 $Sd_i \rightarrow Pd$ の関係を仮定することが可能であり、人間(指示者)の指示発話長(Sd_i)を入力値、ロボットが発話開始するまでの交替潜時長(Pd)を出力値とし、入力された Sd_i が長くなるとそれに応じて出力値の Pd が長くなるモデルとした。さらに、 $Pd - Np$ の相関関係から、ロボットの身振りの開始タイミングを決定する。しかし、この相関関係では、Fig. 7に示すように、 Pd と Np の終了が同一時刻であることから、因果関係を仮定するのは困難である。しかし、 Pd は $Sd_i - Pd$ の相関関係から値を定めているので、 Sd_i を入力値とすることで Np の値を定められる。つまり、 $Sd_i \rightarrow Np$ という関係を仮定することにより、頷きの先行時間長(Np)を定めることが可能となり、入力された Sd_i が長くなるとそれに応じて出力値の Np も長くなるモデルとして設定できる。したがって、タイミング制御モデルは、Fig. 8に示すように、人間(指示者)の指示発話長(Sd_i)に依存して、交替潜時長(Pd)と頷き先行時間長(Np)の値が決まり、これによって、ロボットの応答発話(Pd)と身振り($Pd - Np$)の開始タイミングを決定するモデルである。

また、具体的にモデルを構築する上ではさまざまな方法が考えられる。しかし、現状では、山本らが観察した人間同士の指示・応答対話におけるタイミングの相関関係だけから、人とロボットのインタラクションのモデルを一意的に決めることは難しい。そこで、本研究では、その第一段階として、最も基本的なモデルである静的かつ線形なモデルを採用した。

実験では、タイミングを制御する条件(Model条件)と、タイミングを固定する条件(Fix条件)の2つを用意し比較する。このときModel条件は、以下のように設定した。

$$Pd = 0.9347Sd_i + 110.15 \quad (1)$$

$$Np = 0.6667(Pd - 700) \quad (2)$$

Fix条件は、以下の値に設定した。

$$Pd = 1000 \quad (3)$$

$$Np = 200 \quad (4)$$

なお、上記の比較が唯一の方法ではないが、このような対比

からタイミング制御の影響を評価することを始めた。

また、モデルのパラメータについては、3人の男子学生(被験者 a:23歳, 被験者 b:23歳, 被験者 c:25歳)を対象に行なった予備調査に基づいて定めた。まず Fix 条件では、交替潜時長 (Pd) について、ロボットが最も速く発話を開始するタイミングの 700ms から 2500ms の間を 100ms 刻みで最も自然と感じる値を調査し、1000ms を Fix 条件の Pd の値に設定した。頷きの先行時間長 (Np) については、上記で決定した Pd の 1000ms の条件において、-300ms ~ +800ms の間を 100ms 刻みで最も自然と感じる値を調査し、ロボットの発話開始に 200ms 先行して頷きを開始する値に Np を設定した。つぎに、Model 条件では、指示発話「それちょうだい」を、被験者らが「ふつう」に話した際の平均指示発話長 (Sd_i) が 950ms 程度であったことから、この結果と Fix 条件で設定した値を用いて、 Sd_i が 950ms のとき、 $Pd = 1000$, $Np = 200$ に重なるように (1), (2) 式のパラメータを設定した。

3.5 ロボットの身振り

ロボットの身振りとしては Fig. 9 に示したような動作を用いた。これは山本が行なった人間同士の指示・応答対話における被指示(応答)者の身振りに基づき設定したものである。

人間同士の指示・応答対話では、まず、手を机の上に置いた状態で実験を開始させていた。そして、指示者から指示されると、初めに頷き動作(頭が下がり始めてから、再び上がるまでの動作)を開始する。つぎに応答発話が始まり、そして、掴み動作(腕が動き始めてから、積み木を掴むまでの動作)を開始する。最後に、応答発話が終了した後に、掴み動作が終了する。ただし、本実験における掴みについてはすでに説明したとおり、ロボットの制御上の制約によって掴み開始時刻を頷き開始時刻に一致させた。また、頷きと掴みの開始時刻は、頷き動作および掴み動作の開始時刻とした。それ以外のロボットの身振りについては、上記の被指示者の身振りと同様にした。

3.6 実験手順

実験の手順は以下のとおりである。なおすべての実験は、実験室内に設置してある防音室(サイレントデザイン社:組立式防音室 3.0 帖ロング)で実施された。

(1) 被験者に、Model 条件、Fix 条件のどちらか一方の条件に対し、どの条件であるかを告げず「A の条件」と提示し、第 3.3 節で示した対話実験を行なった。提示する Model 条件、Fix 条件に関しては被験者間でランダムに行なった。

(2) 実験の対話開始のタイミングは、ロボット側から「テスト」という音声による発話指示がなされてから始めた。また、被験者に、ロボットと対話する際は意図的に身体を動かすことを禁止した。

(3) 1つの対話を終了後、つぎの対話の開始まで 2~5 秒程度の時間がランダムに与えられるようロボットに設定した。これは、同一条件の試行間での対話行動がリズム化してしまうのを防止するためである。

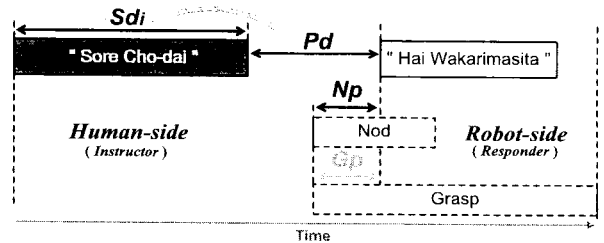


Fig. 7 Correlation used in human-robot interaction

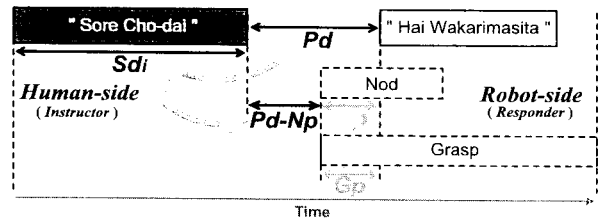


Fig. 8 Timing control model in human-robot interaction

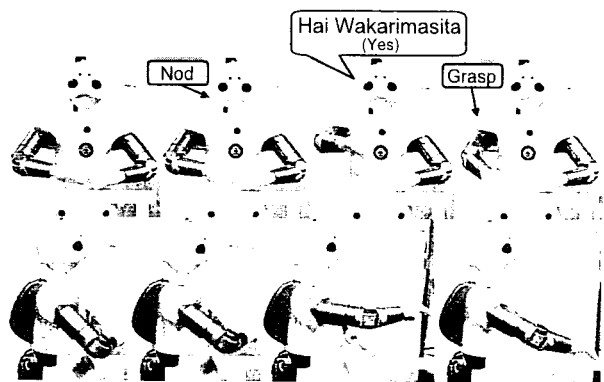


Fig. 9 Robot's response motion

(4) 1つの対話を 1 試行とし、同一条件内で 6 試行を行なう。6 試行が終了後、その条件での実験を終了とした。

(5) 被験者にもう 1 つの条件を「B の条件」と提示し、上記 (1) ~ (4) の手順に従い実験を繰り返す。

(6) 2 つめの条件の実験が終了した直後、被験者は 2 つの条件のロボットの応答タイミングの印象を比較し、Table 2 に示す質問項目に対し、どちらの条件がより当てはまるかを回答する。

3.7 質問項目

質問の内容については、質問項目 1~3 番の「自然さ」「信頼性」「知的さ」は、ロボットの対人的な印象について問う項目である。質問項目 4, 5 番の「速さ」「近さ」は、被験者とロボットとの関係における主観的な時間と空間について問う項目である。質問項目 6 番の「肯定的」は、発話と身振りのタイミング制御から発話の意味解釈への影響について問う項目である。

3.8 被験者

本研究では、高齢者と若年者の 2 つの世代を用いて印象評価実験を行なった。高齢者では 66 歳から 74 歳まで(平均年

Table 2 Questionnaire items

1	Which feels more natural ? (natural)
2	Which feels more reliable ? (reliable)
3	Which feels more intelligent ? (intelligent)
4	Which feels faster ? (fast)
5	Which feels closer (psychologically) ? (close)
6	Which response feels more positive ? (positive)

齢：69.0歳)の18名(男性9名,女性9名),若年者では20代(平均年齢:22.9歳)の学生18名(男性9名,女性9名)が被験者として参加した。なお,専門知識をもたない被験者を集めるため,被験者アルバイトとして募集した。

4. 結果

人間同士の指示・応答対話で観察された発話と身振りのタイミング機構が,人間とロボットの間にも再構成された対話に与える影響を明らかにするために,対話の印象評価を質問紙法を用いて行った。その結果をFig. 10, 11に示す。各質問項目に対して,全被験者中の何%がそれぞれModel条件とFix条件を評価したかを示している。

4.1 高齢者

高齢者における結果をFig. 10に示す。高齢者においては,タイミングを制御する条件(Model条件)とタイミングを固定する条件(Fix条件)の間で,対話の印象評価に顕著な差が観察された。そこで,タイミング制御モデルの有無による印象評価の違いがあるかどうかを調べるために,各評価値の項目間平均を両条件間でt検定した。その結果,Fix条件($m = 37.96\%$, $SD = 4.18\%$)とModel条件($m = 62.04\%$, $SD = 4.18\%$)の間に有意な差が確認され($t(10) = 9.97$, $p < 0.01$),タイミング制御モデルの有無によって,対話の印象評価に違いが現われることが示された。

このとき,Model条件の印象評価が高く,特に,質問項目「自然さ」「信頼性」「知的さ」「速さ」「肯定的」の5項目において顕著な違いが見られた。

4.2 若年者

若年者における結果をFig. 11に示す。若年者においては高齢者と異なり,Model条件とFix条件の間で対話の印象評価の差はあまり見られなかった。

5. 考察

5.1 タイミング機構の重要性について

上記の結果より,高齢者においてはタイミング制御モデルを使用する条件(Model条件)とタイミングを固定する条件(Fix条件)の間で,対話の印象評価に顕著な差が現われることが確認された。

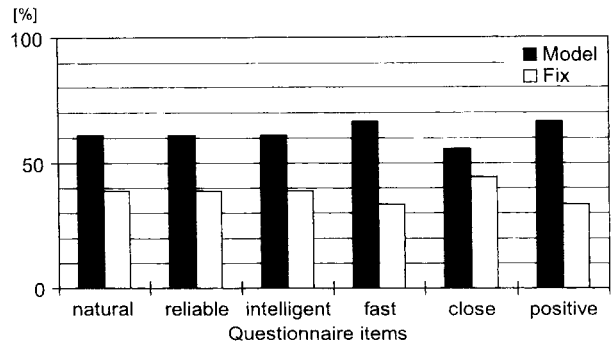


Fig. 10 Questionnaire result (Elderly participants N=18)

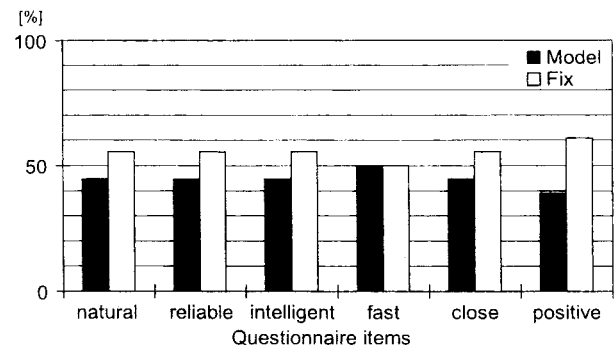


Fig. 11 Questionnaire result (Younger participants N=18)

質問項目1~3番の「自然さ」「信頼性」「知的さ」は,ロボットの対人的な印象について問う項目である。この項目では,高齢者においてModel条件とFix条件が大きく異なった。これは,対話におけるタイミング機構が,自然で円滑なコミュニケーションを実現する上で重要な役割を担っていることを意味している。質問項目4,5番の「速さ」「近さ」は,被験者とロボットとの関係における主観的な時間と空間について問う項目である。この項目でも,Model条件とFix条件の間に差が現われた。これは対話におけるタイミングが,高齢者の対話において重要な要素になっていることを示唆している。質問項目6番の「肯定的」は,「はい,わかりました」という発話の解釈へのタイミングからの影響を調べる項目である。この項目でも顕著な差が現れ,被験者はFix条件よりもModel条件のロボットの応答をより肯定的に解釈していることが明らかになった。このことは,発話や身振りのタイミングが人間側の意味解釈にも影響を及ぼす可能性を示唆している。

これらの結果から,発話タイミングだけではなく身振りも含めたタイミングが,高齢者における対話の印象生成や言語メッセージの解釈に大きい影響を与えていることが明らかになった。したがって,今後,円滑なコミュニケーションを実現させるメカニズムを解明するためには,発話や身振りなどの個別の機能について調査するだけでなく,それらがどのような時間的關係で動作すればよいのかというタイミングにかかわる問題を明らかにしていくことが必要であろう。特に,

タイミングから言語メッセージの解釈への影響評価は重要と考えられる。そして「はい、わかりました」という相対的に強い肯定的表現の代わりに、たとえば、「はい」や「ええ」のような中間的な表現を用いることでタイミングからの影響をより正確に分析できる可能性がある。さらに印象評価の項目に、「肯定的」だけでなく「否定的」という形容詞も同時に加え、一対比較することによって、より高い分解能を伴って評価することも可能になるであろう。

これらの結果は、人間同士の対話の時間的構造に基づき、人とロボットの発話と身振りのタイミングを再構成することによって、初めて明らかにされたことである。このことから、人間、特に高齢者の対話を分析する上で、コミュニケーション・チャンネルを包括的に扱うことの重要性が示された。さらに、それを実証する上で、コミュニケーションロボットを用いる構成論的方法の有効性も示唆される。

さらに、高齢者において Model 条件と Fix 条件の間に差が現われた際、Model 条件の印象評価が有意に高かった。特に、質問項目 1~3 番のロボットの対人的な印象について問う項目では、すべての項目で Model 条件の評価が高く、これは、タイミング制御モデルを搭載したロボットのほうが好ましいインタラクションを生成することを意味している。質問項目 4, 5 番の被験者とロボットとの関係における主観的な時間と空間について問う項目でも、主観的な時間について Model 条件の評価が顕著に高かった。これは、発話と身振りのタイミングが変化することによって、固定された場合よりも主観的に速く感じることに対応する。質問項目 6 番の発話の意味解釈への影響を問う項目でも、Model 条件の評価が顕著に高く、タイミングが変化することで解釈に肯定的印象を与えることが示された。これらのことは、Model 条件のように対話におけるタイミングを変化させることによって、少なくとも高齢者に対しては、対話の印象を改善する効果があることを意味している。

また、本研究のタイミング制御モデルは、若年者の予備調査に基づいて、若年者に合わせてパラメータ調整されていた。しかし、このモデルが若年者よりも高齢者に効果があり、評価が高かったという結果は重要である。このことから、少なくとも高齢者にとっては、対話においてタイミング機構が重要な役割を担っていることが確認されるからである。ただし、Model 条件のパラメータが異なれば、高齢者における印象に変化が生じる可能性も考えられることから、今後は、パラメータへの依存性も含めて調査する必要がある。

5.2 高齢者と若年者の違いについて

つぎに、Model 条件と Fix 条件の印象評価の差が高齢者で顕著に見られ、若年者ではあまり見られなかったことについて考察する。このような結果が得られた原因としては 4 つの可能性が考えられる。

まず、最初の原因としては、ロボットに対する心理的なイメージの違いからの影響が推測される。たとえばロボットをパートナーと捉えるか機械と捉えるかで、応答が大きく異なっ

てくるものと予想されるからである。そして、このようなロボットに対する期待の違いが本実験の結果に影響した可能性がある。これを確認するためには、被験者のロボットに対する心理的イメージの調査を行ない、それを世代間で比較し、ロボットに対する期待からの影響を評価することが必要と考えられる。

第 2 の原因として、被験者の年齢に依存した認知的な違いからの影響が推測される。特に、高齢者は加齢によりさまざまな感覚機能や認知機能が低下し、相手に合わせて発話スピードを変化させることが難しくなるため、相手が自分に合わせてくれることを望む傾向にある^{31), 32)}。また、時間認知についても、加齢に伴って変化することが知られている²⁷⁾。これらの原因によって高齢者と若年者で印象の違いが出た可能性がある。これを確認するためには、人間同士の対話の分析を、若年者だけではなく高齢者においても行なう必要がある。これによって高齢者の発話と身振りのタイミング機構および時間認知機構が明らかになるからである。そして、将来的には、タイミング制御モデルを構築する上で年齢を考慮することが重要となる。

第 3 の原因としては、ロボットの動作上の制約がある。1 つは顔きの動作タイミングと掴みの動作開始タイミングを時間的に分離して制御できないという制約である。このため、人間同士の対話で観察された 3 つの相関関係のうち 2 つの相関しかロボットに実装できず、それによって高齢者と若年者で印象の違いが出た可能性も考えられる。さらに、ロボットの応答速度に関して、700ms 程度の遅れ(応答ラグ)が定常的に発生しており³³⁾、その結果、指示発話終了後 700ms より速いタイミングでのロボットの応答を再現できないことも関係している可能性がある。これらの制約の克服にはロボットの制御技術の改善が不可欠である。

最後に、第 4 の原因として、タイミング制御のモデル化にかかわる問題が残されている。モデル化に際して今回考慮しているのは山本らが観察した若年者同士の対話のタイミングの相関関係であるが、その結果だけから人間とロボットのインタラクションのモデルを推定することには困難が伴う。そこで本研究では 2 つの仮説を導入した。1 つは人間同士(若年者も高齢者も含む)のタイミング制御と人間とロボットのタイミング制御が定性的に対応することであり、もう 1 つは、静的かつ線形なシステムとしてモデル化が可能とみなすことである。これらはあくまでも仮説であり、今後とも継続した調査が求められる。

5.3 タイミング制御における因果関係と双方向性について

本研究のタイミング制御モデルは、人間同士の指示・応答対話で明らかにされたタイミングの相関関係に基づき、そこから因果関係を想定したモデルである。しかしながら、“相関関係がある”ということは、必ずしも“因果関係がある”ことを意味しない。このタイミング制御モデルにおいて、相関関係から因果関係を想定できると考えた理由としては、本研究で用いた実験課題が関係している。この課題では、指示者(人

間)が話し終わった後に被指示者(ロボット)が応答するという一方向的な作用関係のみを取り上げているからである。この前提により、指示者から被指示者へという時間的な前後関係が存在し、指示者の発話長と被指示者の発話と身振りの開始タイミングとの間に因果関係を仮定することができる。

しかし、われわれは人間の円滑な対話コミュニケーションのメカニズムを解明することを目標として研究を進めている。ここで“対話”とは、双方向的な作用関係がある自然な対話である。このような対話に関しては、相互行為の進行に伴って双方向的に調整がなされていることが、近年明らかになりつつある³⁴⁾。このような知見は非常に重要と考えられる。しかし、この相互調整が、どのような作用関係から構成され、どのようなメカニズムで円滑なコミュニケーションを実現するのは、双方向的な対話のもつ複雑性が原因となり、いまだ明らかになっていない。そこで、われわれは、まず一方向的な実験課題に限定し、さらに、タイミングという時間的構造に注目し、因果関係ができるだけ明らかになる形式から再構成を進めている。そして、このような構成論的な分析を積み重ねることによって、最終的に対話の双方向性のダイナミクスの全体像の解明につながるものと考えている。

5.4 今後の展開

本研究は、従来のコミュニケーション研究において取り上げられなかった包括的アプローチの有効性を実証した。加えて、コミュニケーションにおける発話と身振りのタイミング機構という対話の時間的構造の重要性を構成論的に示した。これは特定のコミュニケーション・チャンネルに注目し、それを分析する先行研究とは一線を画しており、このような方法によって、コミュニケーション研究に新しい視点ももち込まれたといえるであろう。

ただし、本研究で取り上げたコミュニケーションの場面は、2者間での指示と応答からなる対話であった。本来、人間のコミュニケーションは、2者の対話のみではなく、3者以上の対話も含まれる。さらに、あいさつや呼びかけ、質問など指示・応答以外の場面での対話もある。そこで、今後は、さまざまな状況での対話に拡張し、コミュニケーション研究としての知見を蓄積していく予定である。

また、本研究の成果は、将来的には、さまざまな社会的問題に活用される可能性がある。たとえば、少子高齢化社会の問題が挙げられるが、そこでは高齢者のコミュニケーション支援などにおいて、非言語的コミュニケーションをロボットに応用する取り組みがすでに進められているからである^{35)~37)}。これらは social robot や social interactive robot と呼ばれ、社会性をもち、人間との共生・共存を目標として開発されている。したがって、本研究で示されたタイミング機構を人とロボットのインタラクションに活用することによって、より効果的な高齢者のコミュニケーション支援が期待できるであろう。このような社会的発展の基盤技術としても研究を進めなければならない。

6. ま と め

われわれは、人間の多様なコミュニケーション・チャンネルがどのように統合され、円滑なコミュニケーションを実現するのか、そのメカニズムを明らかにすることをめざしている。本研究では、対話におけるコミュニケーション・チャンネルの重層性を考慮することによって明らかにされた発話と身振りのタイミング機構を、人とロボットのインタラクションとして再構成し、その影響を質問紙法によって評価した。特に、指示・応答対話におけるタイミング制御モデルを構成し、このモデルの有無の違いを評価する対比実験を行ない、タイミング制御が対話の印象に対してどのような影響を及ぼすかを分析した。その結果、このタイミング制御の有無によって、対話の印象評価に差が現れることが示された。特に、高齢者においてこの差が顕著に現われ、タイミング制御モデルを搭載したロボットとのインタラクションが好ましい印象を与えることが明らかになった。このことから発話と身振りのタイミング機構という時間的構造が、対話において重要な役割を担っていることが実証された。さらに、タイミング制御によって言語的メッセージの解釈に変化が生じる可能性も示された。

謝辞 本研究は、NEDO「戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト」として実施されたものである。ロボットのプログラム設計にあたっては、三菱重工業(株)見持圭一氏、日浦亮太氏、宅原雅人氏に専門的助言をいただいた。実験の実施にあたっては東京工業大学大学院 高野弘二氏、滑健作氏に協力をいただいた。記して心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大坊郁夫：しぐさのコミュニケーション：人は親しみをどう伝えあうか、セレクション社会心理学 14, サイエンス社 (1998)
- 2) R.L. Birdwhistell: Kinesics and context: Essays on body motion communication, University of Pennsylvania Press (1970)
- 3) 大坊郁夫：同調傾向, 心理学辞典, 中島・安藤・子安・坂野・繁柳・立花・箱田(編), 有斐閣 (1999)
- 4) J.D. Matarazzo, M. Weitman, G. Saslow and A.N. Wiens: Interviewer influence on durations of interviewee speech, *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, **1**, 451/458 (1963)
- 5) J.D. Matarazzo and A.N. Wiens: Interviewer influence on durations of interviewee silence, *Journal of Experimental Research in Personality*, **2**, 56/69 (1967)
- 6) 長岡, 小林, 中村：対話における交替潜時長の2者間相互影響, *人間工学*, **38**, 316/323 (2002)
- 7) J.T. Webb: Interview synchrony: An investigation of two speech rate measures in an automated standardized interview, In B. Pope and A.W. Siegman (Eds.), *Studies in Dyadic Communication*, Pergamon, 115/133 (1972)
- 8) 大坊郁夫：対人コミュニケーションにおける同調傾向：主に音声的行動について, *山形心理学レポート*, **4**, 1/15 (1985)
- 9) A. Kendon: Movement coordination in social interaction: Some examples described, *Acta Psychologica*, **32**, 101/125 (1970)
- 10) 中村敏枝：「間」における演奏者と伴奏者の呼吸の同期, *日本心理学会第59回大会発表論文集*, 631 (1995)
- 11) 長岡, 小林, 中村：練習が演奏者間の呼吸の一致に及ぼす効

- 果：ピアノ連弾に関する事例的研究，日本心理学会第64回発表論文集，603 (2000)
- 12) 渡辺富夫：身体的コミュニケーションにおける引き込み，日本新生児学会雑誌，**34**，734/738 (1998)
- 13) W.S. Condon and L.W. Sander: Neonate movement is synchronized with adult speech: Interactional participation and language acquisition, *Science*, **183**, 99/101 (1974)
- 14) F.J. Bernieri, J.S. Reznick and R. Rosenthal: Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony: Measuring the entrainment process in mother-infant interactions, *Journal of Personality and Social Psychology*, **54**, 243/253 (1988)
- 15) 渡辺，大久保，小川：発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム，日本機会学会論文集 (C編)，**66-648**，2721/2728 (2000)
- 16) 渡辺富夫：身体的コミュニケーション技術とその応用，システム制御情報学会誌，**49-11**，431/436 (2005)
- 17) 山本，渡辺：身体的エージェントの情報提示インタラクションにおける動作に対する発声タイミング制御の効果，ヒューマンインタフェース学会論文集，**10-2**，135/143 (2008)
- 18) 山本，渡辺：ロボットとのあいさつインタラクションにおける動作に対する発声遅延の効果，ヒューマンインタフェース学会論文集，**6-3**，87/94 (2004)
- 19) 木村，余語，大坊：感情エピソードの会話場面における同調傾向の検討：擬似同調傾向実験パラダイムによる測定，対人社会心理学研究，**4**，97/104 (2004)
- 20) 大坊郁夫：対人行動としてのコミュニケーション，対人行動の心理学，対人行動研究会 (編)，誠信書房，193/224 (1986)
- 21) 伊藤哲司：ノンバーバル行動の基本的な表出次元の検討，実験社会心理学研究，**31**，1/11 (1991)
- 22) M.L. バターソン：非言語コミュニケーションの基礎理念，誠信書房 (1995)
- 23) 和田実：好意，対人距離，話題が非言語行動と自己開示に及ぼす影響，実験社会心理学研究，**26**，1/12 (1995)
- 24) 山本，武藤，高野，小林，三宅：対話コミュニケーションにおける「間(ま)」の創出と二重性，第8回 SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2007)，1141/1142 (2007)
- 25) 山本，平野，小林，高野，武藤，三宅：対話コミュニケーションにおける2種類の発話タイミング相関，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 講演論文集，631/634 (2007)
- 26) 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，**2**，4/12 (2003)
- 27) T.R. Hibbard, J.N. Migliaccio, S. Goldstone and W.T. Lhamon: Temporal information processing by young and senior adults and patients with senile dementia, *Journal of Gerontology*, **30-3**，326/330 (1975)
- 28) 武藤，高野，大良，小林，山本，三宅：音声インタフェースにおける発話タイミング制御とその評価，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2007 講演論文集，639/642 (2007)
- 29) 川内，古結，長島，大西，日浦：ホームユースロボット wakamaru，三菱重工技報，**40-5**，270/273 (2003)
- 30) 塩谷，塘中，見持，浅野，大西，日浦：人と暮らす世界初の本格的コミュニケーションロボット wakamaru，三菱重工技報，**43-1**，44/45 (2006)
- 31) 井上，木村：新版 老年心理学，朝倉書店 (1993)
- 32) D.C. Park and N. Schwarz: Cognitive aging: A primer, Psychology Press (1999)
- 33) K. Namera, S. Takasugi, K. Takano, T. Yamamoto and Y. Miyake: Timing control of utterance and body motion in human-robot interaction, Proc. of 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2008), 119/123 (2008)
- 34) 城，細馬：多人数会話場面で見られる同期現象の考察，日本認知心理学会第6回大会発表論文集，20 (2008)

- 35) 伊吹，木村，武田：コミュニケーションロボットを用いた高齢者生活支援システム，日本機械学会誌，**108-1038**，392/395 (2005)
- 36) 後藤，加納，加藤：感性ロボットのための感情領域を用いた表情生成，人工知能学会論文誌，**21**，55/62 (2006)
- 37) 山本，水谷：高齢者コミュニケーション支援システムの開発，日本ロボット学会誌，**18-2**，192/194 (2000)

[著者紹介]

高杉 将司



2007年横浜国立大学工学部II部生産工学科卒業。同年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士前期課程に進学し，現在に至る。

山本 知仁 (正会員)



2004年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士課程修了(博士(工学))。現在，金沢工業大学情報学部情報工学科講師。主としてヒューマンインタフェース，ヒューマンコミュニケーションの研究に従事，電子情報通信学会などの会員。

武藤 ゆみ子



2004年～2005年ミュンヘン大学医学的心理学研究所属 GRP 研究所にて研究員(感覚運動連関における時間の階層性の研究に従事)。2006年東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻博士前期課程修了。同年同専攻博士後期課程進学。2008年より日本学術振興会特別研究員(DC)，現在に至る。

阿部 浩幸



2007年金沢工業大学工学部情報工学科卒業。同年金沢工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程に進学し，現在に至る。主としてコミュニケーションの研究に従事。

三宅 美博 (正会員)



1989年東京大学大学院薬学系研究科博士課程修了(薬学博士)。金沢工業大学情報工学科助手，講師，助教授を経て，96年より東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム専攻准教授。99年よりミュンヘン大学客員教授併任。主として生命的自律性の研究に従事，生物物理学会，IEEEなどの会員。