

コミュニケーションロボットの同時性行動の検証と実装

田口 雅彦[†] 石井健太郎[†] 今井 倫太^{††}

[†] 慶應義塾大学大学院理工学研究科

^{††} 慶應義塾大学理工学部

E-mail: [†]{taguchi,kenta,michita}@ayu.ics.keio.ac.jp

あらまし 近年ヒューマンロボットインタラクションにおいて、実世界の情報への共同注意を実現するにはロボットの視線やジェスチャが重要と分かってきた。しかし、それが人間の行動を中断させる強制力を生むかは分かっていない。本研究ではロボットの同時性行動により人間に強制力が働くかを実験で検証し、同時性行動を自動で行なうシステムの開発について述べる。

キーワード 同時性行動, ヒューマンロボットインタラクション

Verification and Implementation of Simultaneous Behavior of Communication Robots

Masahiko TAGUCHI[†], Kentaro ISHII[†], and Michita IMAI^{††}

[†] Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{††} Faculty of Science and Technology, Keio University

E-mail: [†]{taguchi,kenta,michita}@ayu.ics.keio.ac.jp

Abstract Recently, gaze-drawing and gesture of robots are found to be essential elements to realize joint attention of real world for human-robot interaction. But no one confirms that these non-verbal information interrupt human actions. In this research, we conduct an experiment that a robot tries to interrupt human action and confirm superiority of an interactive robot acting simultaneously. We develop a human motion prediction system for robots to perform simultaneous behavior automatically.

Key words Simultaneous behavior, Human-robot interaction

1. ま え が き

近年、ヒューマンロボットインタラクションの研究が進んでおり、実世界の情報を用いたコミュニケーションが注目されている。

実世界の情報を人間とロボットで共有する際には、共同注意を実現する必要があるため、視線やジェスチャといった非言語情報を用いることが重要となり、多くの研究[3]~[5]が行なわれている。

川上らは、握手動作のなかで握手が行なわれるまでの接近動作に着目し、人間心理に受け入れられる接近動作を実現できる握手ロボットシステム[1]を開発した。握手ロボットシステムは、人間の動作に2次遅れ要素を付加することで、ロボットを動作させる握手接近動作モデルをロボットアーム上に実装している。この2次遅れ要素は、人間同士の握手動作の解析結果から求めた固有振動数である。システムの効果を検証する実験では、3つの固有振動数での印象評価を行っており、握手を

する際の人間にとって適切なタイミングを示している。また、Sugiyamaらは、人間が実世界の物体に指差し行動をした際のロボットの行動を行なう際に0.3秒後に指す物体を予測し、人間の指差しが終了する前にロボットが視線を向けている同時性行動システム[2]を開発した。人間の行動はViconモーションキャプチャシステムで計測を行なっている。システムの有効性を示すための実験では、人間の指差し終了後にロボットが視線を向ける場合を対照群としている。実験中、人間は物体につけられたラベル(番号)が指示語のいずれかを用いる。実験の結果として、ロボットの同時性行動により人間が指示語を使用しやすくなり、かつ共有感が向上するという結果を得ている。

[1],[2]のいずれも、ロボットの視線やジェスチャが人間の行動に対してどれだけの強制力を与えることができるかは議論していない。そのため、ある人の行動を別の人が制止するといった人間同士では自然なコミュニケーションが、人間とロボットの間で有効にはたらくかは確かめられていない。

本研究ではロボットの同時性行動(人間の行動が完了する前

にロボットが動作すること)を用いて人間の行動に強制力がはたらくかを検証する。また本研究では、同時性行動を実現するシステムとして、小規模なシステムをヒューマノイドロボット上で実現することを目指す。

本稿の構成は、以下の通りである。まず2章で、ロボットが人間の行動に強制力を与えることを定式化する。続いて3章で同時性行動について説明し、同時性行動による問題解決手法を述べる。そして4章で提案手法を検証する実験と実験結果について述べ、5章で考察を行なう。また、6章で同時性行動を自動で行なうシステムの開発について述べる。7章で今後の課題について触れた後、最後に8章で本稿のまとめを行なう。

2. 人間がロボットの意図理解をして行動を中断するモデル

本章では、ロボットが人間の行動に強制力を与えることを定式化する。

ロボットが人間の行動に強制力を与えるということは、ロボットが人間に意図を伝えるための何らかの行動を行ない、その結果人間が行動を中断すると考えられる。これらを定式化すると、ロボットが人間に意図を伝えるための何らかの行動をすることは、式(1)のように表される。式(1)の各記号は、 R がロボットを表し、 $Act(I, H, B)$ は H に対して I を伝えるために B という行動を行なうことになる。そして、 H はロボットの行動の対象となる人間、 I はロボットが伝えようとする意図、 B が行動の種類となる。

$$R.Act(I, H, B) \quad (1)$$

$$R = Robot$$

$$Act(I, H, B) = to\ communicate\ I\ to\ H\ using\ B$$

$$I = Intention\ of\ Robot$$

$$H = Human$$

$$B = Behavior$$

また、人間が行動を変化させることは式(2)のように表せる。ここで変化する行動が現在の行動を中断する場合は、式(3)のように表すこととする。式(2)・式(3)の H は式(1)でロボットの行動の対象となる人間で、 $ChangeAction(X)$ は X に行動を変化させることを表す。また式(2)の New は行動が変化した後に行なう行動を示し、式(3)のように $Int(This)$ とすることで現在の行動を中断するということを示す。

$$H.ChangeAction(New) \quad (2)$$

$$ChangeAction(X) = Change\ Action\ to\ X$$

$$New = New\ Action$$

$$H.ChangeAction(Int(This)) \quad (3)$$

$$Int(X) = Interrupt\ X$$

$$This = The\ action\ which\ doing\ now$$

そして、 A が行なわれその結果 B が起こるという2つの事

象をつなげる関係を式(4)のように表すことにする。

$$CA \rightarrow RA \quad (4)$$

$$CA = Causative\ Action$$

$$RA = Resulting\ Action$$

以上の式(1)から式(4)を用いると、式(5)を表すことができる。式(5)は章の最初に取り上げた「ロボットが人間に意図(I)を伝えるための何らかの行動(B)を行ない、その結果人間が行動を中断する」ということを表現している。本稿では式(5)の成立を示すことが課題となる。

$$R.Act(I, H, B) \rightarrow H.ChangeAction(Int(This)) \quad (5)$$

3. 提 案

本研究では2章で示した「ロボットが人間に意図を伝えるために何らかの行動を行ない、その結果人間が行動を中断する」ことを解決するために同時性行動を用いる。

同時性行動は、人間同士コミュニケーションでは行動を制する時の視線やジェスチャのように自然に行なわれている。例えばある人がお菓子を取ろうとするのを「ダメ」と言ってやめさせようとする場合に、相手の取ろうとしている姿を自然と目で追っていることが同時性行動である。この例では、お菓子を取ろうとしている人の行動が終わる前に、もう1人が行動を始めていることが分かる。こうした相手の動作が完了する前に自分の動作を始めることを同時性行動と呼ぶ。同時性行動をロボット上で設計すると、人間の動作が完了するまでにロボットが動作を始め、人間とロボットが同時に動作するようにみせることになる。

本研究では、こうした同時性行動を式(5)の B とした式(6)の成立を目指し、ロボットの行動が人間の行動に強制力を与えるようにする。

$$R.Act(I, H, SB) \rightarrow H.ChangeAction(Int(This)) \quad (6)$$

$$SB = Simultaneous\ Behavior$$

4. 実 験

本稿では式(6)の成立を確かめるために、まず実験を行なうことでロボットの同時性行動が人間の行動に強制力がはたらくかを調べる。

4.1 仮 説

同時性行動をするロボットは、そうでないロボットに比べて、人間の行動に強制力がはたらく。

4.2 実験方法

4.2.1 実験概要

本実験では4.1節の仮説を確かめるために、3種類のお菓子を被験者に順番にとってもらい、3つ目のお菓子を取ろうとする際に「ダメ」と発話することで、強制力がはたらくかを調べた。ここで式(6)の I にあたるロボットの意図は「お菓子を取ってはダメ」ということとする。ロボットは、実験群ではお



図 1 Robovie-II

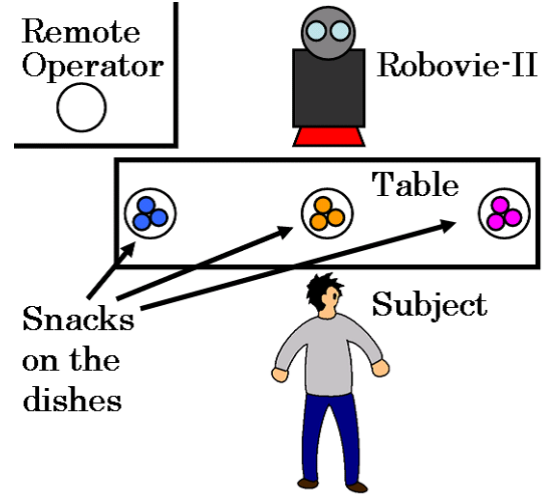


図 2 Experimental Room

表 1 Specifications of Robovie-II

Size	H 1140mm × W 520mm × D 500mm
Weight	39kg
Degrees and Arrangements of Freedom	Power Wheeled Steering, 1 Caster Eye 2DOF × 2 Head 3DOF Arm 4DOF × 2
Speed	1.6m/sec(max)
Sensors	Omni-Directional Camera × 1 Color CCD Camera × 2 Ultrasonic Range Sensor × 24 Bumper Sensor × 10 Touch Sensor × 2 Tactile Sensor (Pressure Conductive Elastmer) × 16 Microphone × 1 Joint Angle Sensor (potentiometer) × 11 Encoder × 2
Controller	Intel Pentium III 933 MHz HDD 20GByte OS Linux
Communication	Wireless LAN (IEEE801.11b)
Power Supply	DC 24V
Operating Time	4hours



図 3 Experimental Scene

菓子を取りに行こうとすると視線を向ける同時性行動を行ない、対照群ではお菓子を取ったら視線を向けるように同時性行動は行なわない。したがって実験群では式 (6) の左辺が *True* になり、対照群では式 (6) の左辺は *False* になる。ロボットは Wizard-of-Oz による操作をする。

4.2.2 実験器材

本実験ではコミュニケーションロボット Robovie-II [6] を使用した。図 1 に Robovie-II の全身を示す。また表 1 に Robovie-II の仕様を示す以降は単に Robovie と呼ぶことにする。Robovie は人間とのコミュニケーションを目的とした上半身ヒューマノイドロボットである。

4.2.3 被験者

実験では 20 代前半の理工系男女大学生・大学院生 27 名を、実験群 13 名・対照群 14 名に割り当てた。

4.2.4 実験手順

実験環境では被験者と Robovie が 1 対 1 で存在している。実験はお菓子の乗せた皿が 3 つ置かれているテーブルが被験者と Robovie の間に置かれている部屋で行なった。実験環境を図 2 に示し、実験の様子を図 3 に示す。図 3 の上の写真が実験群、下の写真が対照群の被験者がお菓子を取りに行く様子となっている。

また、被験者は実験会場に向かう前に説明者から下記の教示

表 2 Experimental result of Experimental Group

	Can't be heard robot's voice	Don't understand robot's intention	Understand robot's intention	total
Not stop action	0	2	1	3
Stop action once	3	1	1	5
Pull back hand or move back default position	0	0	0	0
Not take to the end	0	0	5	5
total	3	3	7	13

(measure:person)

表 3 Experimental result of Control Group

	Can't be heard robot's voice	Don't understand robot's intention	Understand robot's intention	total
Not stop action	2	0	1	3
Stop action once	1	1	1	3
Pull back hand or move back default position	1	2	4	7
Not take to the end	0	0	1	1
total	4	3	7	14

(measure:person)

を受けている。

(1) ロボットの前の3種類のお菓子を取りどれが一番おいしいかを伝えることが目的である: 実験の真の目的を悟られないようにするため。

(2) これからどれがおいしいかを教えるとの内容で最初にロボットと対話をする: ロボットの音声に慣れさせるため。

(3) お菓子を取ったら正面に戻る: お菓子を取るたびにロボットが行動をすることを分かりやすくするためと, Wizard-of-Oz での操作を分かりやすくするため。

被験者が3つ目のお菓子を取って30秒したら実験を終了しアンケートを実施した。アンケート内容は, ロボットの「ダメ」という発話が聞き取れたかを(はい/いいえ)で行ない, また「何の事をダメと言われたと思ったか」を記述式で行なった。

4.2.5 評価方法

同時性行動がある/なしを独立変数とし, 3つ目のお菓子を取った/取らないを従属変数とする χ^2 検定を実施する。独立変数は式(6)のSBに相当し, 同時性行動を行なう場合は左辺はTrueとなり, 同時性行動を行わない場合はFalseとなる。従属変数は式(5)のH.ChangeAction(Int(This))に相当し, 3つ目のお菓子をとった場合は人間の行動が中断しなかったため右辺はFalseとなり, 3つ目のお菓子を取らなかった場合は人間の行動が中断したため右辺はTrueとなる。対象は, 条件1としてロボットの「ダメ」という発話が聞き取れただけの人と条件2としてダメと言われたのが「お菓子を取ってはいけない」と分かった人で行なった。

4.3 実験結果

実験群の被験者の実験結果を表2に示し, 対照群の被験者の実験結果を表3に示す。表2と表3の各行は「ためらわずにお菓子を取った」「一端手を止めた」「手を引いたか元の位置に戻った」「最後までお菓子を取らなかった」とした。最後までお菓子を取らなかった被験者以外はお菓子を取ったことになる。また各列は「ロボットの発話を聞き取れない」「ロボットの発話

表 4 Experimental result of contion 1

	Experimental Group	Control Group	total
Take final snack	5	9	14
Not take final snack	5	1	6
total	10	10	20

(measure:person)

表 5 Experimental result of contion 2

	Experimental Group	Control Group	total
Take final snack	2	6	8
Not take final snack	5	1	6
total	7	7	14

(measure:person)

が聞き取れたがお菓子を取ってはダメと理解していない」「発話を聞き取りお菓子を取ってはダメと理解した」とした。

表2と表3の情報を条件1にしたがって一部を取り上げたものを表4に示す。 χ^2 検定の結果は $p=0.051 < 0.10$ となった。したがって有意水準10%で「同時性行動があるほうがお菓子を取らなくなる」という有意差があることが確認できた。また, 表2と表3の情報を条件2にしたがって一部を取り上げたものを表5に示す。 χ^2 検定の結果は $p=0.031 < 0.05$ となった。したがって有意水準5%で「同時性行動があるほうがお菓子を取らなくなる」という有意差があることが確認できた。

以上より「同時性行動をするロボットは, そうでないロボットに比べて, 人間の行動に強制力がはたらく」という仮説が成立した。また式(6)において, $True \rightarrow True$ と $False \rightarrow False$ が示されたため, 式(6)が成立すると考えられる。

5. 考察

5.1 ロボットの発話の聞き取り

表2と表3によると, 発話が聞き取れなかった被験者の「何



図 4 B-Pack

の事をダメと言われたと思ったか」について、実験群 3 名の内 2 名と対照群 4 名の内 2 名は「何か言われたが分からなかった」と回答しており、対照群 4 名の内 1 名は「上と聞こえた」と回答している。それ以外の 2 名は未記入である。したがって被験者がロボットの発話を聞きとれるかは、同時性行動のあるなしに関わらないと考えられる。

ただし発話が聞き取れ意味を理解した対照群の被験者 1 名が、「少し聞き取りづらいが、ダメと言ったように聞こえた」と回答している。また実験の際に音声は「ダ、メ」のように途切れて再生されることがあったため、音声を再生させるデバイスや再生のモジュールを改善する必要もあると考えられる。

5.2 ロボットの意図理解

表 2 と表 3 から、ロボットの発話を聞き取れたが意味を理解できなかった被験者は実験群と対照群でそれぞれ 3 名いた。「何のことをダメと言われたと思ったか」についての回答は、実験群の被験者では「3 個目を食べたのを 4 個目と認識したこと」「自分が変な動きをしたこと」「手に持っているお菓子を認識できてないことか、自分の動作に問題があったこと」となり、対照群の被験者では「ロボットが食べたことを認識してないので次の行動に移ってはいけないこと」「自分の動作が静止してなくてロボットが認識できなかったこと」「お菓子を食べる前に次のお菓子を食べに行くことか、ロボットが認識できる早さを超えて食べに行くこと」となっている。これらの回答はロボットが認識ミスをしたという点で一致しており、被験者はインタラクションではなく実験に集中していると考えられる。この点は、インタラクションへの引き込みの研究 [7] によりロボットの意図をより伝えやすくできると言える。

5.3 最後までお菓子を取らなかった被験者

ロボットの意図理解をした被験者を表 5 でまとめており、最終的にお菓子を取らなかった被験者は実験群 5 名と対照群 1 名である。実験群 5 名はダメと言われた理由について「ロボットが実験終了と判断した」「ロボットの好物だから」「分からなかったの聞いてみた」「ロボットのものだったから」「分かりません」と回答しており、対して対照群 1 名では「実験終了の時間」と回答している。以上より、実験群の被験者はロボット自身がダメと言っていると考えているのに対し、対照群の被験者ではロボットの意図の奥にある実験者の意図を推定していると言える。



図 5 Glove with B-Pack

6. 同時性行動を自動で行なうシステム

本章では同時性行動を自動で行なうシステムの開発について述べる。システムは、人間とロボットの間のテーブルの上に 2 つのコップが左側と右側にある環境でのロボットの同時性行動の実現を目指した。この環境は 4 章で述べた実験環境を簡易化し、同時性行動を確認するための環境である。

人間の動作は手先の加速度の計測を予測することで行なった。加速度の計測には、3 次元小型無線加速度センサ B-Pack [8] を用いた。図 4 に B-Pack を示す。B-Pack は最短 10 ミリ秒間隔で Bluetooth を介して加速度計測値をコンピュータに送信する。また手先に B-Pack を装着するために、図 5 のような手の甲側に B-Pack を取り付け付けた手袋を用意した。

システムは下記の流れで動作する。

- (1) 10 ミリ秒間隔で 3 次元加速度計測値が B-Pack からラップトップ PC に送信される (Bluetooth)
- (2) ラップトップ PC 内の Predictor が、加速度計測値を受信し、現在時刻から前 100 ミリ秒の加速度値を元に手が動いたかを判断する
- (3) 手が動いていると Predictor が判断したら、以後 200 ミリ秒の加速度値を計測し、左右のどちらに手が動いたかを計算する。これは左側のコップと右側のコップを取りに行こうとするかを予測したことに対応づけられる
- (4) Predictor は左右の判断を完了したら、TCP/IP を介して Robot に予測結果を送信する (TCP/IP port:5757)
- (5) Robot の制御プログラムは、Predictor から予測結果を受け取ったら、記述されたルールに基づきモータ・スピーカを動作させ、予測された方向に首を向け発話を行なう

システムの動作をデータの流れについてまとめたものを図 6 に示す。このシステムの動作例を図 7 に示す。コップを取りにいくという動作の最中に、ロボットが首を向ける同時性行動を行なうことを確認し、システムが同時性行動を実現することができた。

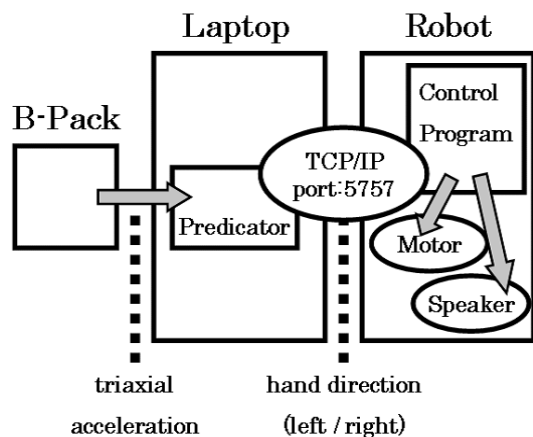


図 6 Data flow of the system



図 7 Demonstration of system

7. 今後の課題

4 章の実験にて条件 1 で同時性行動がある場合でも、半分の人がお菓子を取ってしまっている結果になっている。これは実験の教示が人間である説明者から行なわれ、ロボットより優先度が高くなったからだと言える。実験の教示を人間でなくもう 1 体のロボットが行なうことで、より多くの人がお菓子を取らなくなるかを検証する必要がある。

8. おわりに

本稿では、ロボットの同時性行動が人間の行動に強制力を与えることを実験により確認し、同時性行動を自動で行なうシステムの開発と動作確認を行なった。

文 献

- [1] 川上祐輔, 神代充, 渡辺富夫, “人間の握手動作に基づく握手ロボットシステムの開発,” ヒューマンインターフェースシンポジウム 2006 予稿集, pp. 63–68, Kurashiki, Okayama, Japan, Sep. 2006.
- [2] O. Sugiyama, T. Kanda, M. Imai, T. Ishiguro and N. Hagita, “Natural deictic communication with humanoid robots,” In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2007)*, pp. 1441–1448, San Diego, CA, USA, Oct. 2007.
- [3] M. Imai, T. Ono and H. Ishiguro, “Physical relation and expression: Joint attention for human-robot interaction,” In *IEEE Transaction on Industrial Electronics (ITIED 6)*, Vol. 50, No. 4, pp. 636–643, Aug. 2003.

- [4] H. Kozima, C. Nakagawa and Y. Yasuda, “Interactive robots for communication-care: A case-study in autism therapy,” In *Proceedings of 14th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005)*, pp. 341–346, Nashville, TN, USA, Aug. 2005.
- [5] 神田崇行, 鎌島正幸, 今井倫太, 小野哲雄, 坂本大介, 石黒浩, 安西祐一郎, “人間型対話ロボットのための協調的身体動作の利用,” 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.7, pp.132–143, Oct. 2005.
- [6] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平, “研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット” Robovie”の開発,” 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380–389, Apr. 2002.
- [7] 今井倫太, 鳴海真里子, “人間の五感を利用したロボットとのコミュニケーションへの没入の実現,” 計測自動制御学会論文集, Vol.42, No.4, pp. 342–350, Apr. 2006.
- [8] R. Ohmura, F. Naya, H. Noma and K. Kogure, “B-Pack: A Bluetooth-based Wearable Sensing Device for Nursing Activity Recognition,” In *Proceedings of 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2006 (ISWPC 2006)*, CD-ROM, Phuket, Thailand, Jan. 2006.