



Title	ロボットからの社会的なはたらきかけのデザインに関する研究
Author(s)	水丸, 和樹
Citation	北海道大学. 博士(情報科学) 甲第15535号
Issue Date	2023-03-23
DOI	10.14943/doctoral.k15535
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/89384">http://hdl.handle.net/2115/89384</a>
Type	theses (doctoral)
File Information	Kazuki_Mizumaru.pdf



[Instructions for use](#)

博士論文

ロボットからの社会的な  
はたらきかけのデザインに関する研究

北海道大学 大学院情報科学院  
情報理工学コース 複合情報工学分野  
ヒューマンコンピュータインタラクション研究室

水丸 和樹

2023年1月23日

Doctor Thesis

Study on Design of Robot-Induced Social Interactions

by

Kazuki Mizumaru

Human-Computer Interaction Laboratory,  
Research Group of Synergetic Information Engineering,  
Course of Computer Science and Information Technology,  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Hokkaido University  
23rd January 2023

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	本論文の背景と目的	1
1.2	本論文の概要	2
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>4</b>
2.1	公共空間におけるロボットの社会的役割	4
2.2	集団による心理的空間が与える影響	6
2.3	感情が関係性の構築に与える影響	7
<b>第3章</b>	<b>ロボットの注意アプローチが行動変容に与える影響</b>	<b>10</b>
3.1	警備員が歩行者に対して行う注意手法	11
3.1.1	データ収集	11
3.1.2	観察と分析	12
3.2	注意アプローチモデル	19
3.3	使用するロボットと実装	20
3.4	フィールド実験	24
3.5	実験結果	26
3.6	考察とまとめ	31
<b>第4章</b>	<b>複数ロボットの活発な会話が行動変容に与える影響</b>	<b>33</b>
4.1	使用するロボットと実装	34
4.2	クラウドソーシング実験	34
4.2.1	実験参加者	36
4.2.2	会話シナリオ	36
4.2.3	実験結果	37
4.3	実験室実験	41
4.3.1	実験参加者	42
4.3.2	会話シナリオ	42
4.3.3	実験結果	43
4.3.4	アンケートの自由記述	47

4.4	考察	47
4.4.1	発話の重なる効果	47
4.4.2	ロボットの集団に創発される空間	49
4.4.3	複数ロボットの会話を観察する実験設定	49
4.5	まとめ	49
<b>第5章</b>	<b>複数ロボットの感情表出が関係性の知覚に与える影響</b>	<b>51</b>
5.1	使用するロボットと実装	52
5.2	事前検証	54
5.3	実験	56
5.4	実験結果	57
5.4.1	arousal (覚醒度) スコア	58
5.4.2	valence (快・不快感) スコア	64
5.4.3	実験結果のまとめ	68
5.5	感情設計を容易にする評価モデル	72
5.5.1	追加検証実験	73
5.5.2	実験結果	73
5.6	考察	75
5.7	まとめ	77
<b>第6章</b>	<b>異なる複数ロボットのインタラクションを実現するシステム</b>	<b>79</b>
6.1	ROSによるシステム構築	79
6.2	会話設計を容易にするためのインタフェース	80
6.3	異なる複数ロボットの応用例	81
<b>第7章</b>	<b>おわりに</b>	<b>84</b>
7.1	本論文のロボットシステムの制約	84
7.2	本論文のまとめ	85
7.3	今後の展望	86



# 第1章 はじめに

## 1.1 本論文の背景と目的

近年さまざまなロボットが多様なタスクを人の代わりに行いつつある。これらのロボットには接客や道案内などといったサービスとして情報を提供するもの、物の運搬や掃除など特定の物理的なタスクを行うものがある。ロボットは人と共生する空間において社会的な影響を与え、HRI (Human-Robot Interaction) では、そのための社会的な振る舞いをデザインする。従来の HRI 研究やロボットの利用方法では、単体のロボットに対して積極的に人がはたらきかけることがほとんどであった。特に公共空間において多くの人とインタラクションする機会があるコミュニケーションロボットは、社会規範を維持するために人の行動変容を生じさせることで高度な社会的機能と豊かな表現を可能にする。将来的には、自律移動ロボットから積極的に人へサービスを提供したり、多種多様なロボットどうしが連携する際に生じるインタラクションによって周囲の人間に影響を与える可能性がある。これらを実現するためにはロボットから積極的に人への呼びかけを行うことで気付かせるほか、ロボットの集団が作り出す心理的な空間によって自然に影響を与えるといった方法がある。このようなロボットからの社会的なはたらきかけをデザインすることによって人とのインタラクションの機会を増やし、社会的役割を強化する必要がある。

本論文では、単体の自律移動ロボットによる人への積極的なはたらきかけと複数ロボットによるインタラクションのデザインおよびそれらの効果を明らかにする実験を行った。単体ロボットにおいては、人に対して注意するためのアプローチがどのような行動変容を促すかについての調査を行い、ロボットから人への積極的なはたらきかけが不適切な行動を止めさせる効果があることを明らかにした。さらに、ロボットの注意行動を実現するための人物追跡および自律移動システムの設計を行った。複数ロボットにおいては、ロボットどうしの活発な会話によって創発された心理的空間がどのような行動変容を促すかについての調査を行い、ロボットどうしのインタラクションによって観察者の動線を変化させる効果があることを明らかにした。また、感情表出を行うロボット間の関係性がどのように知覚されるかについての調査を行い、ロボットの集団における関係性を感情の観点から評価できることを明らかにした。複数ロボットを利用する際には同じアーキテクチャのロボットだけでなく異なるロボットどうしを連携することも必要である。そのため、異なる複数ロボットを接続してロボットどうしのインタラクションを実現するシステムとそれら

のロボットを用いた会話設計を容易にするインタフェースの構築を行った。本論文の自律移動ロボットシステムおよび異なる複数ロボットのインタラクションを実現するシステムの構築には ROS (Robot Operating System) を利用した。

## 1.2 本論文の概要

本論文では、単体および複数コミュニケーションロボットによるインタラクションが人に与える行動変容と関係性知覚の影響について、クラウドソーシング実験、実験室実験およびフィールド実験を通して調査し、それらを実現するためのロボットシステムの設計を行う。本論文の構成を以下に示す。

第2章ではこれまでに研究および利用されてきた公共空間におけるロボットの社会的役割について述べ、単体および複数ロボットが人の代わりに行う社会的タスクの一部としてどのように行動変容を促す必要があるか述べる。さらに、人間の集団による心理的空間や感情の観点から見た関係性が与える影響についてまとめ、それらの機能をどのようにロボットへ適用可能か述べる。

第3章では単体ロボットから人への積極的なはたらきかけが行動変容に与える影響の事例研究として、注意のためのアプローチ方法に着目する。ロボットによる注意アプローチを実現するために、実際の警備員が歩きタバコを行う歩行者役の参加者に対して注意する場合のデータ収集と観察を行い、それに基づいてアプローチモデルを構築する。同様に道に迷っている歩行者役の参加者に対して友好的にアプローチする場合のモデル化も行い、2つのモデルの違いを示す。さらに、それらのモデルを LiDAR センサと全方向移動可能な台車を用いたロボットにどのように実装するかを示し、2つのアプローチ方法を用いて歩きながらのスマートフォン利用（歩きスマホ）を行う歩行者へ注意するフィールド実験の手順と結果をまとめる。実験結果より、警備員の注意行動における重要な要素を適用した注意アプローチでは友好的アプローチと比べて統計的に有意に歩きスマホを止めた人が多かったことを示し、考察をまとめる。

第4章では複数ロボットどうしのインタラクションが行動変容に与える影響の事例研究として、ロボットどうしの会話を観察することによって知覚される心理的空間に着目する。人間の会話でよく見られる発話の重なりをロボットどうしの会話シナリオに適用し、クラウドソーシングを用いたビデオ調査実験によって、発話の重なりには会話の活発さを向上させる効果があることを示す。さらに、活発な会話によってどのような心理的空間が創発され、会話を観察した人間にどのような行動変容を促すか明らかにするための実験室実験の手順と結果をまとめる。実験結果より、発話の重なりが生じる会話を観察した場合には1秒の発話間隔での会話を観察した場合と比べて統計的に有意に2体のロボットの間を避けて通った人が多かったことを示す。つまり、ロボットの集団においても人間の場合と同

様にロボットどうしのインタラクションによって心理的空間が創発され、それを観察した人の行動に影響を与えることを示す。

第5章では複数ロボットを用いた会話以外の表現方法の事例研究として、感情表出するロボット間の関係性の知覚に着目する。先行研究において単体ロボットの感情表出によく利用されるジェスチャと感情に関する研究でよく利用される評価指標であるラッセルの円環モデルを用いて、2体のロボットによる短いインタラクションを作成する方法を示す。また、それらのインタラクション動画を用いてロボット間の関係性を評価するクラウドソーシング実験の手順と結果をまとめる。単体のロボットにおける感情表出については多くの研究が行われているが複数ロボットの感情表出についてはほとんど着目されていない。そのため、ロボットの集団において個々のロボットの感情表出が関係性の評価にどのように影響するか考察をまとめる。

第6章では第4章と第5章における複数ロボットのインタラクションを実現するシステムを構築する際の課題として、同じロボットだけではなく異なるアーキテクチャのロボットを相互に接続して制御できる必要があることを述べる。これを実現するためのシステムを第3章でも利用するフレームワークであるROSを用いて構築し、複数ロボットの会話を容易に設計して制御するためのインタフェースについて提案を行う。

第7章では本論文で設計した自律移動システムを備えた単体ロボットによる注意アプローチと複数ロボットによる集団のインタラクションが人に与える行動変容および関係性知覚の影響について、まとめと今後の展望を述べる。

## 第2章 関連研究

### 2.1 公共空間におけるロボットの社会的役割

公共空間におけるロボットの社会的な役割として、博物館ガイド [1], 買い物支援 [2], 受付 [3], 教室での先生 [4], ゴミ収集 [5] などさまざまなものが検討されており, 自ら積極的にサービスを提供するロボットも存在する. 例えば, 街中を探索するロボットは通行人に立ち止まって情報を入力してもらい [6], 広告を提供するロボットは広告に興味がありそうな歩行者に近づいていく [7]. これらのロボットは人間の労働者 (ガイド, 店員, 受付, 教師, 清掃員) の仕事の一部を代行する. 通常このようなロボットは, 人へ友好的にサービスを提供するために利用されるが, 必要に応じて人間の労働者が注意を与えることも可能である. 将来的には, 人間が行っていた注意タスクをロボットが積極的に行うことにより, 情報提供やコンパニオンロボットとしての利用だけでなく, 人の行動変容を促して社会規範を維持する存在になり得る.

人とロボットが出会う時, 一方はもう一方に接近する必要がある. このような観点から研究されてきたのが近接学 [8] である. HRI では, 人はロボットに対して人と同じような位置取りをすることが多いということが複数の研究で明らかになっている [9, 10]. また, ロボットがどのようにすれば快適で社会的に適切な行動を行うことができるか調査した研究もある. 例えば Michalowski ら [11] は, ロボットがいつ誰と話すかを選択するためにロボットの周りの空間をモデル化し, Mumm ら [12] はロボットが社会的文脈に応じて社会的距離を調整することの重要性を明らかにした. さらに, Sisbot ら [13] は, ナビゲーション計画における社会的制約を考慮する技術を開発し, Hayashi ら [14] は警備員の行動をモデル化してロボットが親しみやすい印象を与えることができる巡回行動を開発した. ロボットによる注意タスクを実現するためには, ロボットから人への積極的なアプローチ行動が必要不可欠となる.

ロボットのアプローチ行動については, これまでにもいくつかの要件が発見されている. 例えば, Dautenhahn ら [15] は人に対してロボットをどの方向から接近させるのが好ましいか調査した. その結果, 人は正面からではなく右や左からのロボットの接近を好むことを発見した. Satake ら [7] は効果的なアプローチ方法を検討し, ロボットが背面からではなく正面から顧客に接近できるような計画アルゴリズムを開発した. Kato ら [16] は人がどのように丁寧にアプローチしているか分析し, アプローチするかまたはされるかを選択

するロボットを開発した。しかし、これらのアプローチ方法はいずれも友好的な文脈で考えられており、注意のためにアプローチすることは考慮されていない。

人は要求されるとロボットを助ける行動を取る。Yamamotoら [17] はロボットの要求に人が応じるケースを明らかにし、Huttenrauchら [18] は人が忙しくない方がロボットをより助けようとするのを明らかにした。さらに、Bainbridgeら [19] は遠隔ロボットよりも物理的に同じ場所にいるロボットの要求に従う人が多いという、物理的な存在感の重要性を発見している。また、Siegelら [20] はロボットの説得力を高める方法を研究し、ロボットの性別が寄付の額に影響すること明らかにした。依頼や説得の技術が注意行動に適用できるかどうかは明らかではないが、一般に依頼や説得の研究では人々はロボットに従うことを望んでいる。一方で、注意する場合には特に自分の行動が好ましくないこと（例えば、禁止されている場所での喫煙など）をすでに行っている場合、人はロボットに従うことを拒絶する可能性が高くなる。

警報、警告、注意の影響と効果に関する人間科学的な研究は、しばしば公衆衛生などのリスクコミュニケーションの文脈で行われている [21]。例えば、公共メッセージにおける恐怖への訴えの効果については、その有効性が疑われてはいるが、調査されている [22]。しかし、タバコの使用など一部の状況では警告メッセージが重要であることが発見されている [23]。また、対面での社会的コミュニケーションの設定に特化した研究もある。例えば、幼児でも注意すべき相手を理解しているように見えることが報告されている [24]。一方で、ロボットによる人への効果的な注意の与え方について報告した研究はほとんどなく、公共空間におけるロボットの注意行動の実現は社会的機能を強化するために必要不可欠である。

将来的には、複数のロボットが協力してショッピングモールでの案内などのサービスを提供し [25]、受動的なソーシャルメディアとして乗客に旅行情報を知らせる [26] などといった状況が頻繁に発生するとともにエンターテイメントとして人々の生活の中に浸透する可能性もある [27]。複数ロボットがこれらのような役割を果たすと同時に、ロボットどうしのインタラクションが発生することにより、それを観察する人々に自然に情報を伝えながら、集団に形成される心理的空間によって社会的な影響を与える可能性がある。しかし、複数ロボットどうしのインタラクションが与える影響についてはほとんど着目されておらず、それらによる社会的機能を強化するためのデザインについてもほとんど考慮されていない。さまざまなロボットが同じ環境に存在して連携する場面においては、ロボットどうしのインタラクションを観察することで間接的に影響を与えることは容易に想像できる。

## 2.2 集団による心理的空間が与える影響

複数ロボットの集団による影響はこれまでの研究や利用方法においてほとんど考慮されてこなかったが、人間の集団には特有の心理的空間が存在する。その中でも社会空間 [28, 29] は、いくつかの個人空間が融合して新たにできる心理的空間であり、人は他者が作る社会空間に影響を受ける。この社会空間の影響を実験により明らかにしている研究がいくつかある。

Cheyne ら [30] は、2人からなる集団が廊下で立ち話をしている場合と話をせずに階下を見下ろしているだけの場合において、2人の間を避けて通り抜ける歩行者の割合を調査した。その結果、立ち話をしている場合の方が2人の間を避けて通り抜ける割合は多かった。Lindskold ら [31] は、4人（男女2人ずつ）からなる集団が歩道に立っており、(1) Control : 4人が別々のことをしている、(2) Audience : 4人がショーウィンドウを覗き込んでいる、(3) Calm Interaction : 静かに立ち話をしている、(4) Angry Interaction : 互いに怒っている、(5) Laughing Interaction : 互いに笑いあっている、という5つの条件で集団の間を通り過ぎる歩行者の割合を調査した。その結果、複数人がコミュニケーションをとっていると歩行者が判断した場合には、とっていないと判断した場合よりも集団の間を避けて通り抜ける割合は多かった。Knowles [32] は、大学の職員と学生が2人もしくは4人からなる集団を作って立ち話をしているときにその間を避けて通り抜ける歩行者の割合を調べた。その結果、地位が高いと判断された大学の職員の間を避けて通り抜ける歩行者の割合は多く、集団の人数が2人よりも4人の方が間を避けて通り抜ける割合が多いということも報告されている。これらの研究は集団に属する人々が相互に作用しており、活発にコミュニケーションをとっているときに社会空間が強く形成されるということを示している。

Imayoshi ら [33] は、人間の集団によって形成される社会空間を考慮したシステムとして人間の発話量を用いて会話の活性度を評価し、ユーザ間のスマートフォンの距離情報を用いて社会空間を認識するロボットシステムを提案した。実験では、2人の人間が会話しているときにロボットがその社会空間に介入し、ロボットに対する印象と影響について評価した。その結果、会話の活性度が高い場合よりも、低い場合の方が人間はロボットをより好意的に受け入れた。以上のように、人間の集団による社会空間については研究されているが、ロボットの集団による空間については十分に研究が行われておらず、それによる影響も十分に考慮されていない。

活発な会話においては発話の重なりという現象が見られる。会話分析において、会話の中で生じる発話の重なりは、話者交代における誤りであったり、対話相手の発話権の侵害であるなど否定的にとらえられていた [34, 35]。しかし、次に示すいくつかの研究は日常会話には至るところで発話の重なりが生じており、肯定的にとらえられると指摘している。

藤井ら [36] は、日本人女性の友人どうしの会話データを用いて、重なる頻度や機能などについて調査した。その結果、平均 3.7 発話に 1 度重なりが生じ、重なり全体の少なくとも 40% 以上は、先行発話への同意・共感・関心などを積極的に示すことで会話を促進させ、話者どうしの連帯感を強める協力的な機能を持つことを示している。また、日本人の友人どうしの雑談を分析した結果、対話相手の発話権を侵害するような発話の重なりは、わずか 18.7% しか生じていなかったという報告もある [37]。町田 [38] は、初対面どうしの会話データを分析し、発話の重なりは話題となる内容が自分にとっても身近であるということ素早く相手に伝え、共感を深めるという機能を持つと主張している。この発話の重なりによる共感的な機能は日本語だけでなく英語の会話においても確認されている [39]。

守屋ら [40] は、ビデオチャットシステムを用いて 3 人グループにおける会話音声の取得と会話活性度の主観的印象の評価を行い、それらの関係性を調査した。その結果、会話活性度とオーバーラップ率（発話の重なる頻度）には個人では中程度、グループ全体では強い相関があるということを示している。

ロボットどうしの対話設計に発話の重なりを取り入れる際、複数ロボットによる効果についても考慮する必要がある。神田ら [41] は、2 体のロボットどうしが指差し対話を行う場合には指差しを行わずに対話する場合および全く対話を行わない場合と比べて、その様子を観察した人間は有意にロボットの発話内容を理解することを示した。さらに、ロボットに対してうなづきなどといった自然なコミュニケーションをとるとすることも示している。つまり、複数ロボットによる発話と身体動作のインタラクションは人とロボットが共生する上で、円滑なコミュニケーションを生み出すためには必要不可欠である。

以上のように、人間の会話における発話の重なりについては研究されているが、ロボットの対話設計においては考慮されていない。複数ロボットの対話において発話の重なりを利用した活発な会話を行うことにより、人間の集団における社会空間と同様の空間が形成され、人の行動変容を促す可能性がある。

## 2.3 感情が関係性の構築に与える影響

これまでの HRI 研究において、ロボットを用いて感情を表現するための様々な手法が提案されてきた。AIBO や Roomba などの家庭用ロボットの動作が人間の知覚する感情にどのような影響を与えるか調査した研究はいくつかある [42, 43]。また、ロボットの動きが限定的であっても、LED の色や人工音、振動、単純な動作、あるいはこれらの組み合わせによって感情を表現することができる [44, 45, 46]。LED の色や音に加えて、ヒューマノイドロボットは体の動きによって感情を表現することができる [47]。ロボットの感情表出に体の動きを利用できることが複数の研究で明らかになっている [48, 49, 50, 51] が、それらは慎重に設計する必要がある。その理由として、アーティストや写真家、漫画家に

とってロボットの感情を表現するための動きをデザインすることは難しく [52], 手を振るといった単純な動作に感情が付随している場合, 拒否するような動作として誤解される可能性もある [53].

ロボットが搭載している機能を用いて設計された感情を評価したものだけではなく, 特定の文脈におけるロボットの感情表出の影響について調べた研究もある. Xu ら [54] は, ロボットが発話とともに気分を変調させた体の動きがストーリーテリングにおける参加者の気分に影響を与えることを示した. さらに, 参加者の気分とロボットが表現する気分が一致し, ロボット気分がポジティブなときにはネガティブなときよりも模倣ゲームでの成績が悪くなることも明らかになっている [55]. また, ゲームの結果や相手の感情状態に応じて適応的に感情表出するロボットは, 子どもの感情表出を引き出すのに効果的であることが報告されている [56].

ロボットの感情表出に関する多くの研究では, 表出された感情にラベルを付け, それが設計者の意図した感情と一致しているかどうかを検証している. しかし, 感情に関する多くの研究ではラッセルの円環モデル [57, 58] が使用されてきた. このモデルにより感情を arousal (覚醒度) と valence (快・不快度) の 2次元軸で評価することで, 個々の感情の比較についてより詳細な定量的な分析が可能となる. Beck ら [59] は, 設計された感情表出を行うジェスチャについてロボットの頭の位置の変化が arousal (覚醒度) と valence (快・不快度) およびそれらの感情の識別率にどのように影響するかを調査した. また, 個々の感情表出を行うジェスチャの中間的な動作を調べ, それらがモデル上で相対的に適切に表現されているかどうかを検討した [60]. これらの研究において, Happiness と Excitement を表すジェスチャの誤認識は, 2次元軸上での 2つの感情の位置が近いために引き起こされたということが補完的に説明されている. このようにモデル上の位置関係によって解釈される感情を評価し, より深い洞察が可能となる.

複数ロボットにおける感情表出にはほとんど着目されていないが, 人間関係における感情や気分の影響に関する先行研究はいくつか存在する. Anderson ら [61] は, カップルや大学の同僚が時間の経過とともに互いの感情表出が似ることを発見した. このことから, 人は互いに良好な関係を築くために感情表現を自然に収束させていることがわかる. さらに, 職場のチームメンバー個人とチームメンバー全体の気分の間にも有意な相関がある [62]. また, 感情や気分の伝染は人間関係において一般的な現象である. Barsade [63] は人間の集団における感情伝染の現象を調査し, ポジティブな感情伝染は手段の対立が少なく, タスクパフォーマンスが良いという認識に影響を与えることを発見した. さらに, これらの効果は集団だけでなく, 集団の外にいる人々にも及ぶ. Knight [64] は, 共有されたポジティブな感情は文脈に関係なく社会的統合とタスクパフォーマンスを促進することを示した. 一方で, 共有されたネガティブな感情は特に外部からの刺激によるネガティブな感情や, 見知らぬ個人が短時間で一緒に仕事をするとときにタスクパフォーマンスを促進するこ



とを示している。しかし、ネガティブな感情の共有は集団形成や所属の初期段階には有効的であるが、後期段階においてはネガティブな影響を与える。

これらのような関係性は、複数ロボットに対してはまだ確立されていない。しかし、人間を対象としたいくつかの研究により、複数ロボットの関係性を与える潜在的な影響と利用方法について考えることができる。特に単体のロボットにおいては、感情表出の方法や人に与える影響について多くの研究が行われている。これらの研究に基づいて、複数ロボットどうしの感情表出によりどのような関係性が構築され、それを人がどのように知覚するか調査することはロボットの表現方法を豊かにするために必要不可欠である。

### 第3章 ロボットの注意アプローチが行動変容に与える影響

公共空間において「ここでタバコを吸うのをやめてくれませんか？」というように、ある不適切な行動をしないように注意する場面がある。ゴミを投げ捨てたり暴れるなどの行為が適切でないとわかっている場合でも、このような場面で人が人に対して注意する行動を取るとき、注意された人は不快に感じるものである。時には注意されたことを無視し、従わないこともある。このような注意する行為は人間にとっては難しい場面があるが、ロボットにとってはどの程度難しいことであるか明らかではない。

社会的なロボットが生活の中で様々な役割を果たし始めており、人に注意する状況は現実のものになりつつある。ここでは、いくつかの社会的役割の一部である「注意する」というタスクについて考える。例えば、警備ロボットは市場を巡回するようになってきている [65]。このロボットは注意する機能を持たないが、必要に応じて人間の警備員が注意することができる。同様に、事務員、受付、教師、警察、警備員などの役割を担うロボットも注意するという機能を役割の一部として果たす必要がある。しかし、このような機能をロボットに実装することにはほとんど注意が払われていない。この理由として、例えば人は人工知能やロボットにコントロールされることを望んでいないなどといった様々な理由が考えられる。しかし、より根本的な原因として注意するというタスク自体がロボットにとって難しいということがある。図 3.1 は予備調査のある場面で、歩きながらタバコを吸う人にロボットが近づいて注意した時の様子である。この場面では、ロボットは喫煙者に向かって移動し、「禁煙にご協力ください」と近くで注意する呼びかけを行った。しかし、この喫煙者はロボットを一目見ただけで、喫煙しながら歩き続けた。この喫煙者は自らがロボットに話しかけられたことに気づいた様子であったが、誰も何も言わなかったかのようにロボットを無視した。

本章では歩行者へロボットが注意する能力の問題に取り組み、ショッピングモールでの警備員の行動を観察することから始め、専門家の注意するためのアプローチ行動の特徴を調査した。具体的には、注意する場面のアプローチ手法と友好的な場面のアプローチ手法とでは、それらはどのように異なるかということである。実際の警備員のデータを収集して観察と分析を行った結果、それらのアプローチには違いがあることが明らかになった。さらに、注意する場面でのアプローチをモデル化し、開発したモデルを全方向移動可能な

ヒューマノイドロボットに実装して、最後にその有効性を確認するためのフィールド実験を実施した。このフィールド実験では、人間の専門家から得たモデルに従えば、ロボットはより効果的な注意を行い、行動変容を促すことができるかどうか明らかにする調査を行った。



図 3.1: ロボットが喫煙者に注意を行い（左図）無視された（右図）場面の様子

### 3.1 警備員が歩行者に対して行う注意手法

実際に警備員として働いている人を採用し、注意する目的と友好的な目的とで異なるアプローチ行動を取るかどうか明らかにするために調査および分析を行った。このデータ分析では、全ての警備員に一般化できるモデルを構築するのではなく、一人の専門家の行動を分析することで、注意アプローチの効果的なデザイン要素を明らかにする方法を採用した。

#### 3.1.1 データ収集

データ収集は、人物追跡システム [66] が設置されたショッピングモールの通路で実施した。この追跡システムにより、周波数 20Hz、およそ 30cm の精度で対象エリア内の全歩行者の位置が取得可能である。さらに、警備員と歩行者の行動を記録するためにビデオカメラも設置された。

専門家には 9 年半の勤務経験を持つ警備員（33 歳・男性）を採用した。公共空間においては、友好的なサービス（障がい者や高齢者のサポート、道案内、迷子の手助けなど）の提供や、注意喚起（立入り禁止区域に入らないように呼びかける、禁煙区域での喫煙など禁止行為をしないよう呼びかけるなど）を行う警備員がよく見受けられる。分析に必要な

データを適切に収集するため、歩行者役を行う参加者を採用し、それらの参加者に対する警備員の行動を観察した。具体的には、12名の参加者（男性2名、女性10名、平均年齢36.8歳）を採用した。

観察対象の警備員に対しては、助ける（例：迷っている人に道を教える）、注意する（例：危険な行動や困った行動に対して）のどちらかで歩行者に接するように指示をした。また、採用した歩行者に対しては、次のいずれかの振る舞いをするように指示をした。

- 不適切な歩行者：禁止されていることを知りつつ歩きながらタバコを吸うふりをする。
- 助けの必要な歩行者：道に迷ったふりをして目的地を探す。

歩行者は一人ずつ観察対象エリアを横切り、単純にするために同じ場所から出発し同じ目的地に向かうようにした。警備員は定位置で待機し、歩行者に気がつくときと接近して注意するか助けるかのどちらかの行動を取った。それぞれの歩行者の各振る舞いはランダムな順番で2回ずつ行われた。現実の場面では、警備員はどのような歩行者が来るか事前に知ることはない。この状況を模擬的に作り出すために警備員には歩行者の振る舞いの種類やその順番を説明しなかった。さらに、警備員が常に歩行者に近づくことを防ぐために歩行者は警備員が近づく必要のない状況でただ歩いていることもあった。これらの場面および警備員と歩行者の軌跡を記録した。また、警備員の発話はワイヤレスマイクで記録し、歩行者に話しかけるタイミングを分析するために使用した。

### 3.1.2 観察と分析

実際に警備員は「助ける」または「注意する」という目的に応じてアプローチ行動を変えていることが明らかになった。不適切な歩行者を注意するためのアプローチ行動を「注意アプローチ」、助けが必要な歩行者を助けるアプローチ行動を「友好的アプローチ」とした。これらのアプローチの具体的な違いを警備員に尋ねると、本人はその違いを自覚していないとのことであったが、注意行動をより成功させるために無意識のうちにこのようなアプローチ手法を身につけた可能性がある。具体的なアプローチ行動の違いについて以下に述べる。

#### 友好的アプローチ

図 3.2 は友好的アプローチの典型的な例の一つである。警備員は対象の歩行者と出会うことができる地点まで直進した（図 3.2.a-c）。この地点を Meeting Point とする。最後に警備員は歩行者の近くで話しかけた。この場合、歩行者は警備員の呼びかけに応じ、歩くのをやめて話し始めた。

## 注意アプローチ

図 3.3 は注意アプローチの典型的な例の一つである。警備員は最初、友好的アプローチと同様に Meeting Point に向かって直進していた (図 3.3.a-b)。しかし、警備員は発話を開始する最後の瞬間にその経路を変更し、歩行者の前に素早く姿を現した (図 3.3.c)。この地点を Turning Point とする。歩行者は警備員を無視して歩くのをやめなかったため、警備員は歩行者の前を歩くことで視界に留まり、注意を与え続けた (図 3.3.d)。

上記の行動を観察し、注意アプローチと友好的アプローチをそれぞれ定義するためのより詳細なパラメータを決定するために、以下の一連の分析を実施した。これらの分析では、観察された全てのアプローチ行動のデータセットを分析した。その結果、24 件の注意アプローチと 24 件の友好的アプローチが分析対象となった。

警備員は両者の距離的に中間の地点で合流しようとする場合、歩行者に応じて速度を調整する必要がある (歩行者が速く歩くと警備員も速く歩くなど)。そうでない場合には、歩行者の速度に応じて Meeting Point が変化する。一方で、警備員が普段から一定の速度で歩いている場合には両者の時間的な中間地点で出会うことになる。どちらの可能性が高いか明らかにするために Meeting Point の分析を行った。

図 3.4 は、友好的アプローチの 2 つの例を示したものである。速い歩行者 (1.36m/sec) に対しては、警備員の原点に近い地点で出会い (図 3.4.a)、遅い歩行者 (0.73m/sec) に対しては、歩行者の原点に近い地点で出会った (図 3.4.b)。また、警備員は速い歩行者に対して 1.14m/sec で歩き、遅い歩行者に対して 1.21m/sec で歩いた。つまり、両方の歩行者について同程度の速度を用いていると考えられる。このことから、警備員は歩行者と時間的な中間地点で出会い、友好的にアプローチしていると考えられる。

図 3.5 は、注意アプローチの 2 つの例を示したものである。速い歩行者 (1.68m/sec) に対しては、警備員の原点に比較的近い地点で出会い (図 3.5.a)、遅い歩行者 (1.04m/sec) に対しては、歩行者の原点に比較的近い地点で出会った (図 3.5.b)。また、警備員は速い歩行者に対して 1.31m/sec で歩き、遅い歩行者に対して 1.15m/sec で歩いた。このように、警備員はわずかに速度を上げる可能性がある一方で Meeting Point には大きなばらつきがあった。そのため、注意アプローチにおいても友好的アプローチと同様に時間的な中間地点で歩行者と出会うようにモデルを構築した。

警備員の注意アプローチと友好的アプローチの平均速度に対して  $t$  検定を適用した結果 (図 3.6)、注意アプローチ (平均: 1.31m/sec, 標準偏差: 0.14m/sec) は友好的アプローチ (平均: 1.13m/sec, 標準偏差: 0.10m/sec) よりも歩行速度が有意に速いことが明らかになった ( $t = 4.751, p < .001$ )。

警備員の行動観察において、注意アプローチには一般的に Turning Point が存在する

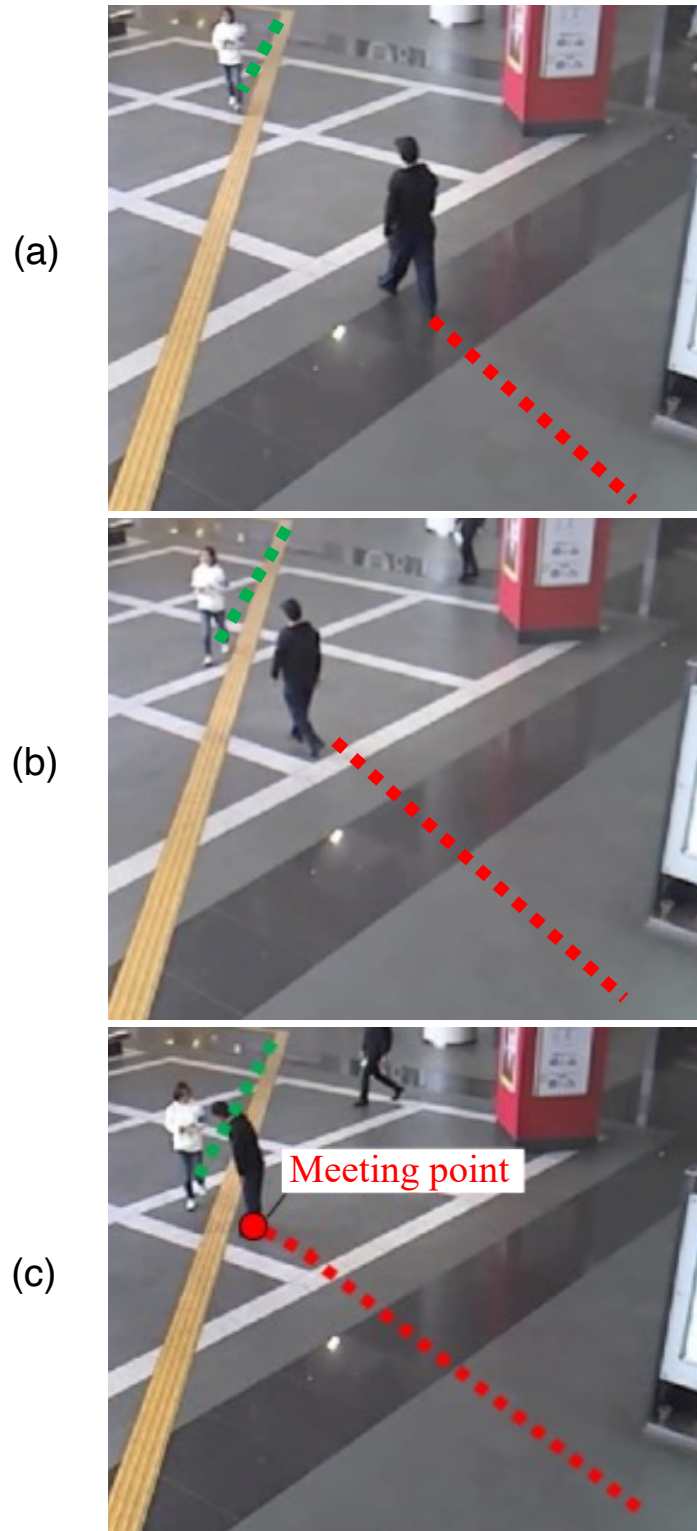
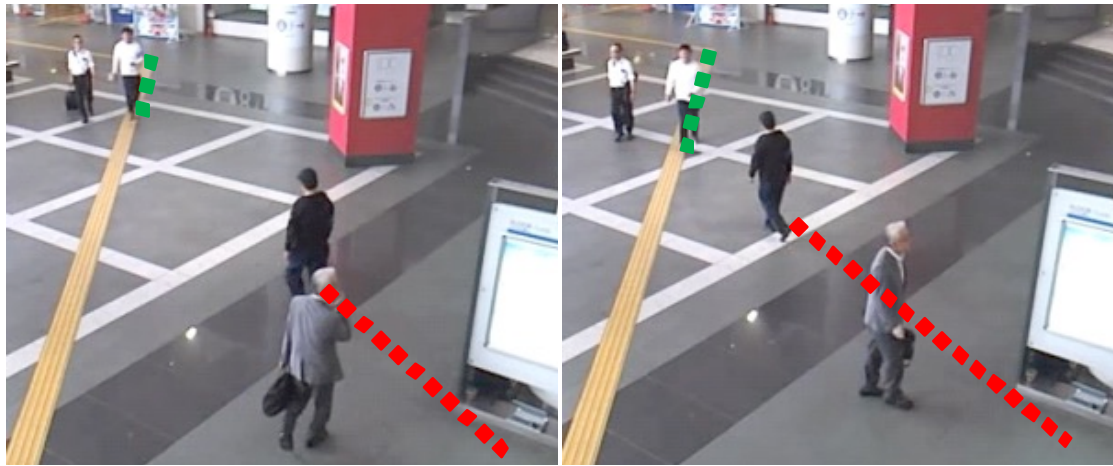


図 3.2: 警備員による友好的アプローチの一例



(a)

(b)



(c)

(d)

図 3.3: 警備員による注意アプローチの一例





(a)

(b)

図 3.4: 友好的アプローチにおける Meeting Point の分析 (左図: 速い速度の歩行者, 右図: 遅い速度の歩行者)



(a)

(b)

図 3.5: 注意アプローチにおける Meeting Point の分析 (左図: 速い速度の歩行者, 右図: 遅い速度の歩行者)



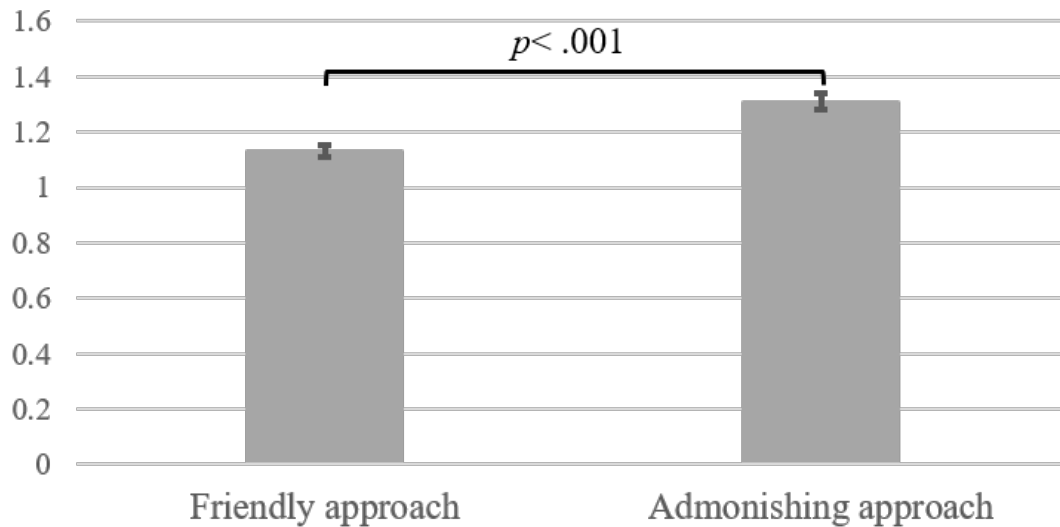


図 3.6: 各アプローチにおける警備員の平均歩行速度

ことが確認されたため、警備員の進行方向の変化を分析した。Turning Point の基準は、Meeting Point から 3m 以内に警備員の進行方向が 30 度以上変化した点と定義した。その結果、24 件の注意アプローチのうち 17 件に Turning Point が確認された。Turning Point が確認されなかった 7 件のうち 5 件は他の歩行者との干渉により、警備員が進行方向を変化させることができなかった。一方で、友好的アプローチでは Turning Point は確認されなかった。したがって、Turning Point は注意アプローチのみに存在する特徴であると判断した。

注意アプローチに Turning Point が存在する理由および進路変更を開始したのは警備員か、または歩行者が警備員のアプローチを避けるために警備員が進路を変更しなければならないような行動を取るのかどうかを確かめるために、警備員が方向を変える前と変えた後の歩行者の速度および方向を分析した。その結果、速度差（平均 0.07m/sec）と方向差（平均 0.96 度）はわずかであり、速度 ( $t = -1.868$ ,  $p = .07$ ) および方向 ( $t = -1.12$ ,  $p = .2781$ ) にはそれぞれ統計的に有意な差は確認されなかった。このことから、歩行者ではなく主に警備員が進路変更を行うと結論づけた。つまり、警備員は歩行者が立ち止まって話を聞かないことを予測して、歩行者と並走しやすいように方向を変えたと考えられる (図 3.3.d)。

Turning Point がどの場所で発生するか明らかにするために、さらにデータ分析を行った。図 3.7 および表 3.1 に示すように、Turning Point における垂直・水平距離 ( $d_{turn}^x$ ,  $d_{turn}^y$ ) と、Meeting Point における垂直・水平距離 ( $d_{meet}^x$ ,  $d_{meet}^y$ ) の 4 つのパラメータで注意アプローチを定義し、Turning Point があった 17 件のデータを平均してパラメータ値を算出した。Meeting Point は歩行者の正面に向かう位置に存在するが、歩行者の動き

を妨げない点である。さらに、Turning Point は Meeting Point のおよそ 0.5m 先の位置に存在する。

また、観察において警備員は Meeting Point に到着する前に発話を始めていた。これを確認するために、発話距離（警備員が発話を開始した歩行者との距離）を詳細に分析した。その結果、注意アプローチでの発話距離は 2.69m（標準偏差 0.43m）であった。これは、警備員が Turning Point の位置で発話を開始したことを示している（Turning Point での警備員から歩行者までの距離は 2.71m）。また、友好的アプローチの場合、発話距離は 2.47m（標準偏差 0.31m）であり、Meeting Point での警備員から歩行者までの距離（1.03m）よりも長かった。t 検定を適用した結果、2 種類のアプローチの間に有意差は確認されなかった ( $t = 1.134$ ,  $p = .26$ )。

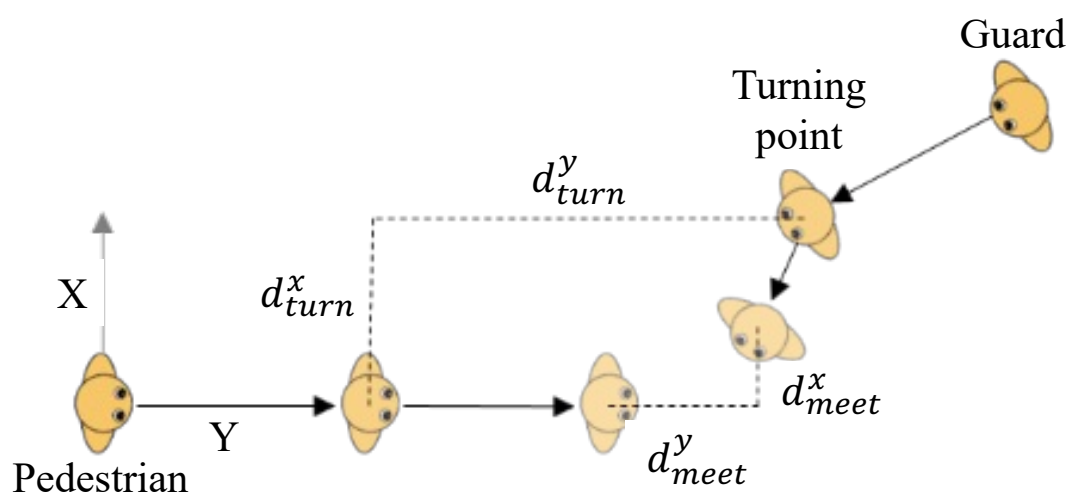


図 3.7: 注意アプローチのパラメータ

表 3.1: 注意アプローチのパラメータ値

パラメータ	値
$d_{turn}^x$	1.24m
$d_{turn}^y$	2.41m
$d_{meet}^x$	0.74m
$d_{meet}^y$	0.71m

## 3.2 注意アプローチモデル

警備員のアプローチ行動のデータ分析に基づいて、注意アプローチを以下のようにモデル化した。

### (距離的ではなく) 時間的な Meeting Point で出会う

友好的アプローチと注意アプローチの両方で警備員は自らの速度を変化させず、一定の速度（望ましい速度とする）を維持する。このため、警備員は対象となる歩行者との間の時間的な Meeting Point で出会うことになる。

### 少し速い速度

友好的アプローチ（1.1m/sec）よりも注意アプローチ（1.3m/sec）の方が警備員は少し速く歩く。

### ショートカット

Turning Point でショートカットするように素早く方向を変え、突然歩行者の前に現れる。その後、注意が終わるまでは一定の距離（ $d_{meeting}$ ）を維持したまま歩行者の前に留まる。

### 到着前に発話を開始する

警備員は Meeting Point に到着する前に発話を開始する。

このモデルを実現するために、ロボットのソフトウェアとハードウェアの設計要件を検討した。自己位置推定や人物追跡機能など多くの自律移動ロボットが持つ標準的な機能も必要であるが、注意アプローチを実現するためには一般的な移動ロボットが必ずしも備えていない以下の機能も必要である。

### 全方向移動

通常の双方向車輪付き移動台（図 3.1 のロボットなど）では、ショートカット動作を行うことは不可能である。Turning Point で素早く方向を変え、Meeting Point 以降は人と並行に移動しながら体の向きを変える必要があるため、体の向きに依存しない方向への移動が必要である。

### 速い最高速度

多くのロボットは歩行者の通常の数値に近い 1.2m/sec 以下で移動するが、注意アプローチを行うロボットは 1.3m/sec で歩行者に近づく必要がある（経験的には歩行者に間に合うように 1.5m/sec で移動する場合もある）。

### 3.3 使用するロボットと実装

上半身は、身長 110cm のヒューマノイドロボットである Robovie-R3 を使用した。また、移動台には Qfeeltech 社製の QFS-02-ver1 を使用した。この台車は全方向に移動可能な車輪を備えており、最大速度 1.5m/sec、最大角速度 30 度/sec であらゆる方向へ移動できる。さらに、高さ 143cm の位置に LiDAR (Velodyne HDL-32E) センサを搭載して自己位置推定と人物追跡に使用した。

図 3.8 にシステム構成を示す。ロボットは主に Velodyne とオドメトリの 2 つのセンサを用いて自己位置推定と人物追跡を行う。システムにおける主要なモジュールの一つは注意アプローチプランナーであり、ターゲット選択モジュールによって与えられたターゲット歩行者にアプローチするための軌道を算出する。最後に、注意行動実行モジュールが計画を実行してロボットの速度を制御し、ロボットのスピーカーを使って発話を出力する。これらのモジュールは ROS フレームワーク上に実装され、0.1 秒間隔で定期的に行われる。

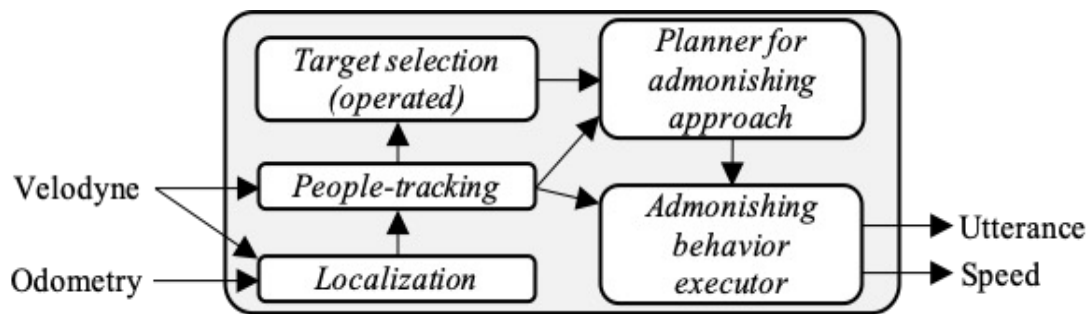


図 3.8: システム構成

プランナーはロボットが望ましい速度で移動することを前提に、ターゲット歩行者の Meeting Point にロボットを到達させる最適なアプローチ計画を探索するものである。プランナーは候補計画の集合を生成し、その中から最大効用を持つ計画を選択する。プランナーは以下の 3 段階で候補計画を生成し、計画待ち合わせ時間  $t_{meet}$  を 0 秒から 10 秒まで 0.01 秒間隔で変化させる。

#### 1. Meeting Point での歩行者位置の計算

与えられた待ち合わせ時間  $t_{meet}$  における歩行者の将来の位置が計算される。単純化のために、この予測は歩行者の現在の速度 ( $v_p$ ) に基づいている。つまり、

$$P_p(t_{meet}) = P_p(t_{now}) + v_p(t_{meet} - t_{now})$$

ここで、 $P_p(t)$  は時刻  $t$  における歩行者の位置、 $t_{now}$  は現在時刻である。

## 2. アプローチ経路の決定

与えられた  $t_{meet}$  に対して、ショートカット経路を含むアプローチ経路を定義する Turning Point および Meeting Point を計算した (図 3.9).

Meeting Point はモデルで設定されたパラメータ ( $d_{meet}^x, d_{meet}^y$ ) (表 3.1) を用いて  $P_p(t_{meet})$  から計算される. そして, Meeting Point が与えられたとき, Meeting Point への入射角を  $\theta_{in}$ , ショートカット距離を  $d_{shortcut}$  と満たす点を Turning Point として計算した. これらのパラメータは警備員に近い印象を与えるために経験的に  $d_{meet}^x = 0.7m$ ,  $d_{meet}^y = 1.1m$ ,  $\theta_{in} = 84.3$  度,  $d_{shortcut} = 1.0m$  に調整した. 使用するロボットは人間の警備員より背が低い一方で幅が広いので, パラメータ値をわずかに調整した.

## 3. 効用の計算

上記で計算された経路の効用は, ロボットが目標位置に到達してから歩行者に出会うまでにどれだけの時間が経過したかに基づいて計算される. つまり, 目標位置の到着時間と歩行者と出会う時間の差が短い経路ほど効用は高くなる. この計算にはターゲットとなる歩行者とロボットの到着時間の差を利用した. したがって, 与えられた  $t_{meet}$  に対する効用  $U(t_{meet})$  を以下のように定義した.

$$U(t_{meet}) = -|t_{arrival} - t_{meet}|$$

ここで,  $t_{arrival}$  は計算された経路を望ましい速度で移動するロボットの到着時刻を表す. さらに, ロボットは全方向移動可能な台車を有すると仮定する. したがって, 到着時間は移動距離を速度で割ることにより, 以下のように単純計算することができる,

$$t_{arrival} = (d(P_{meeting}, P_{turning}) + d(P_{turning}, P_r(t_{now}))) / v_{pref}$$

ここで,  $d(P_1, P_2)$  は点  $P_1$  と  $P_2$  の距離,  $P_{meeting}$  および  $P_{turning}$  は Meeting Point と Turning Point,  $P_r(t_{now})$  は現在のロボット位置,  $v_{pref}$  はロボットの望ましい速度 (注意アプローチでは 1.3m/sec) である.

注意行動実行モジュールはプランナーで作成された計画に基づき, ナビゲーションやロボットの発話を制御するもので以下の状態を持つ.

### 状態 1 : Turning Point への移動 (図 3.10.a-b)

これが初期状態である. 実行モジュールがプランナーから計画を受け取ると, 時間  $t_{meet}$  までに Meeting Point へ到着するためにロボットが取るべき実際の速度を計算する. したがって, 実際の速度は  $v_{pref}$  より高くも低くもなり得る. ロボットが

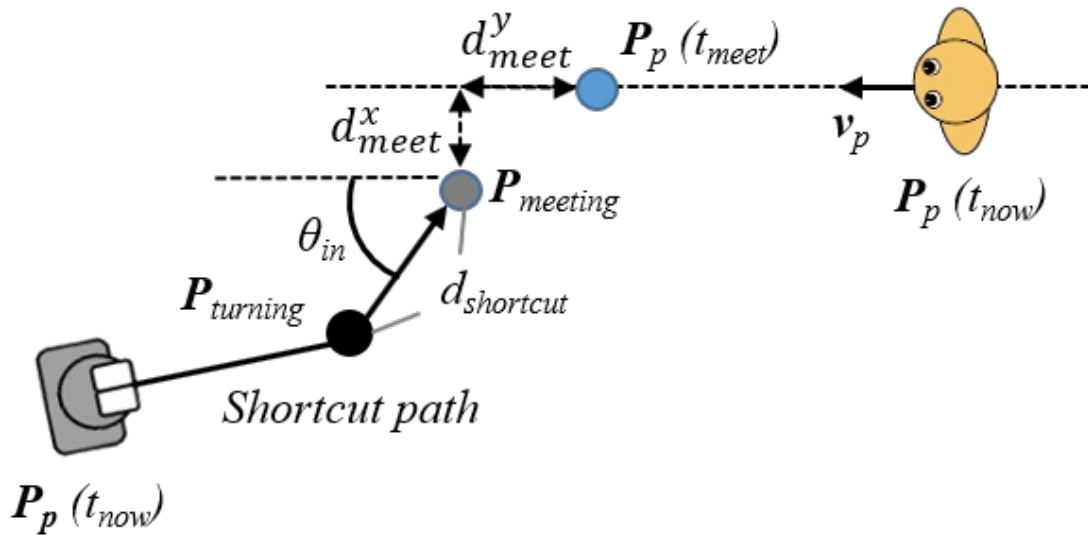


図 3.9:  $t_{meet}$  でのショートカット経路のプランニング

Turning Point に到着すると次の状態に遷移する。そうでなければ、システムがこの状態に留まる限り、プランナーは定期的にアプローチを再計画する。ロボットはターゲット歩行者との距離が閾値よりも小さくなると、注意の発話を開始する。実際にはロボットがショートカット動作を行う前に発話を開始するように閾値を 4m に設定した。

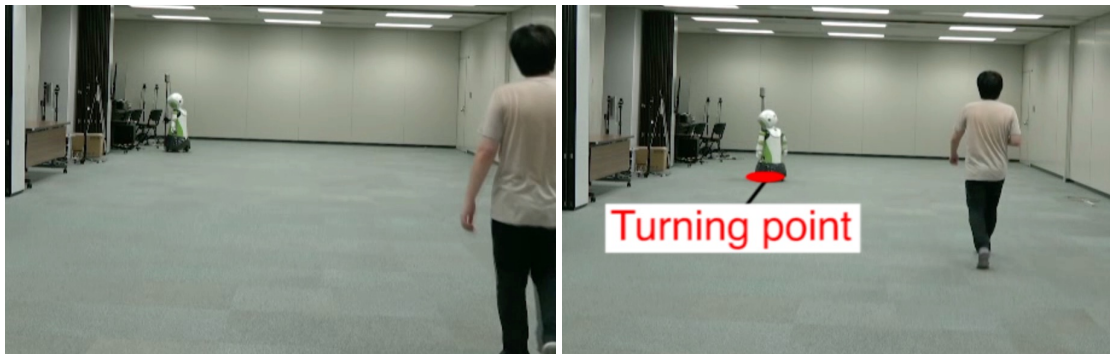
### 状態 2：ショートカット， Meeting Point への移動 (図 3.10.c)

ロボットは Turning Point ( $P_{turning}$ ) を通過した後に方向を変える。次に Meeting Point ( $P_{meeting}$ ) に向かって移動する。この動きをショートカットと呼ぶ。この状態ではプランナーは再計画を停止する。現在時刻が  $t_{meet}$  に達し、ターゲット歩行者との距離が  $d_{meeting}$  以下または Meeting Point に達すると次の状態に遷移する。

### 状態 3：追従 (図 3.10.d)

ロボットは注意の発話が終わるまで歩行者の左前または右前の位置に距離  $d_{meeting}$  を保って平行に移動する。また、歩行者と同じ速度で移動する。

LiDAR とオドメトリのセンサ入力には粒子フィルタベースの手法を適用し、各粒子に対してエンドポイントモデルを用いたマップマッチングを行った。この自己位置推定モジュールは 0.1 秒ごとに定期的にロボットの位置を修正する。あらかじめ 3 次元地図を用意してロボットを周囲に走らせ、3 次元レンジファインダやオドメトリ、IMU のスキャン情報を収集した。データ収集後、3D Toolkit SLAM ライブラリを用いてマップを作成し、連続したスキャンのマッチングと Global Relaxation を行った [67]。



(a)

(b)



(c)

(d)

図 3.10: 注意アプローチを実装したロボットの動作例

LiDAR からの点群に対して人物追跡アルゴリズムを実装した。このアルゴリズムは、背景減算、人物検出、人物追跡の3つの処理から構成される。背景減算は自己位置推定直後に行われ、地図と生の点群を比較して地図に記録されているエンティティを削除し、その後残った点群に移動可能なエンティティが表示される。人物検出ステップではクラスタリングを適用し、人の大きさであるエンティティを検出する。最後に人物追跡ステップでは、検出結果に粒子フィルタを適用することで、人が通り過ぎるなどといったオクルージョンがあっても、人の位置を連続的に追跡することができる。本研究の設定では、ロボットから20m以内にいる人物を0.1秒ごとに追跡した。

ターゲット選択モジュールでは Wizard-of-Oz (WoZ) 方式を利用した。つまり、環境中の歩行者を監視するオペレータがおり、注意すべき対象の歩行者をシステムに通知する。将来的には機械学習によって姿勢からターゲットを自動検出することも可能であると考えられるが、本研究においては人間が正確に判断することが最善であると考えたため、この方式を採用した。

### 3.4 フィールド実験

開発したモデルの効果を検証するため、ショッピングモールでのフィールド実験を行った。これまでの HRI においては友好的なアプローチ方法のみが開発されてきた。しかし、本研究では警備員がアプローチの方法を変えることを明らかにした。具体的には、不適切な行動を取る歩行者には注意するアプローチを取り、助けを必要とする歩行者には友好的なアプローチを取る。これらの行動の違いはわずかなものであるが、警備員が行動を変えるのはそれが自らのタスクのパフォーマンスに影響を与えるためであると考えられる。そこで、ロボットにおいてもアプローチ方法が関係するのではないかという推測に基づき、以下のような予測をした。

#### 予測

注意アプローチを行うロボットは友好的アプローチを行うロボットよりも頻繁に歩行者の不適切な行動を止めることができる。

公共空間では社会的な問題として多くの場所でスマートフォンの利用が禁止されている。スマートフォンの使用による衝突や転倒の危険性などはよく知られており、特に歩行者の多い場所での利用が問題視されている。法的な罰則はないものの、歩きながらのスマートフォンの使用を控えるようにアナウンスや看板で呼びかけが行われている。そこで、本研究では歩きながらスマートフォンを使用する歩行者をターゲットとした。フィールド実験はデータ収集の際に利用したショッピングモールと同じ通路で実施した。このショッピン



グモールでも歩きながらのスマートフォンの利用を禁止しているが、そのような不適切な行動をする歩行者は時折見受けられる。

参加者はショッピングモールの訪問者で歩きながらスマートフォンを操作する人々であった。図 3.11 に示すように、ショッピングモールの通路にロボットを設置した。対象エリアから隠れた人間のオペレータが、他の歩行者に混ざって歩きながらスマートフォンを操作している歩行者を検出し、この歩行者を実験参加者とした。フィールド実験においては以下の2つの条件で比較を行った。

#### 注意アプローチ条件

ロボットは注意アプローチモデルを使用する。参加者に近づき、注意が終わるまで追従することを目的とする。Turning Point の後にショートカットがあり、 $v_{pref}$  は 1.3m/sec である。

#### 友好的アプローチ条件

ロボットは友好的アプローチモデルを使用する。参加者に近づき、注意が終わるまで追従することを目的とする。ショートカットや Turning Point が計算されないことを除いて 3.3 節で述べた実装と同じものを使用する。また、 $v_{pref}$  は 1.1m/sec である。



図 3.11: フィールド実験の環境 (左図) とロボット (右図)

図 3.12 に2つの条件下での目標軌道の違いを示す。調査は平日10日間、13時から18時まで行われ、毎日1組の時間帯を用意した。各組ごとに2つの条件を順番にカウンターバランスで割り当てた。ロボットは人間の参加者に注意を行い、上述の条件で説明したアプローチ方法のいずれかを用いて参加者に接近した。そして、対象となる参加者に近づく

と、「すみません。歩きスマホは危険です。やめてもらっても良いですか?」という言葉を出した。最後に、参加者がロボットから離れた後に実験者が近づき、インタビューを依頼した。インタビューではなぜロボットに従ったのか（あるいは従わなかったのか）を参加者に尋ねた。なお、注意前に歩行者がスマートフォンの使用を中止した場合および外部要因（他の歩行者がロボットの進路を塞ぐなど）によりロボットが接近できない場合はロボットのタスクを中止した。

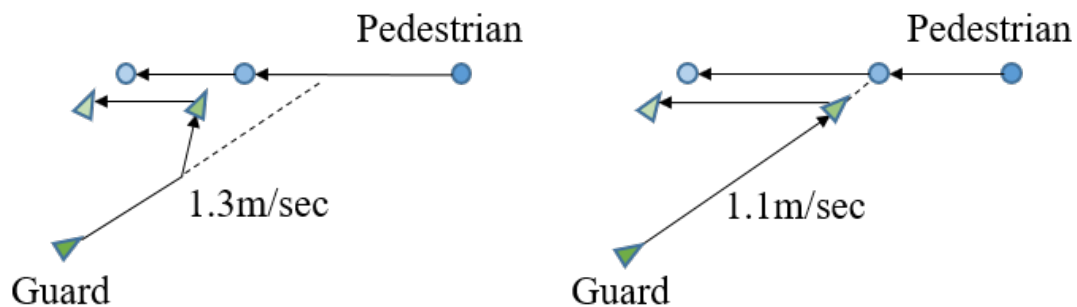


図 3.12: 注意アプローチ（左図）と友好的アプローチ（右図）の目標軌道

### 3.5 実験結果

参加者がロボットからの注意に従ったかどうかをコード化した。その結果、以下のような結果が得られた。

#### 成功率

注意された後、歩きながらスマートフォンを使うのをやめた人の割合。

注意された直後の参加者の行動が評価され、スマートフォンを見るのを一度だけ止め（例：ロボットの声を聞くため）、その後もスマートフォンを使い続けた場合、注意は失敗としてコード化された。コーディングは実験仮説を知らない独立した2人が行い、それらの結果はほぼ一致していた（コーエンのカップパ係数は0.746であった）。分析にはその内1人の結果を利用した。

友好的アプローチ条件では実験中にターゲットとして選ばれた参加者は11名であった。その結果、失敗が9件、成功が2件であった。図 3.13 は友好的アプローチ条件における典型的な失敗例である。ロボットが対象の歩行者に向かって移動し（図 3.13.a）、注意する発話を開始した。参加者はロボットを一目見た（図 3.13.b）が、歩きもスマートフォンの使用もやめず、最終的には歩きながらスマートフォンを操作して立ち去った（図 3.13.c）。同様に失敗した場合にはロボットは無視された。一方で成功した場合にはロボットが近づ

くと立ち止まって話を聞いた。

注意アプローチ条件では13回の試行のうち8回の注意が成功した。図 3.14 は典型的な成功例である。ロボットは対象の歩行者に向かって移動し、発話を開始して Turning Point でショートカットした(図 3.14.a)。すると、参加者はロボットに気づき、ロボットを見た。ロボットは発話中も参加者の前方に留まり、参加者は再びロボットに視線を向けた(図 3.14.b)。最後にスマートフォンの使用を中止し、その場を離れた(図 3.14.c)。同様に成功した場合には、参加者はロボットの話を聞き、スマートフォンの使用をやめた。一方で、失敗した場合には友好的アプローチの例と同様にロボットを無視した。

いくつかの場面ではショートカットが効果的に機能する状況も確認された(図 3.15)。このような状況では、ロボットが進路を変えた瞬間に歩行者がロボットとその発言に気づいた(図 3.15.a)。しかし、歩行者はスマートフォンを使い続け、ロボットを避けるためにわずかに進路を変更した(図 3.15.b)。すると、ロボットが横から経路を変えて歩行者の進路の前方に入り込んだ(図 3.15.c)。歩行者はロボットが自らの経路の前に入ったことに気づき、最終的にスマートフォンの使用を諦めた(図 3.15.d)。この例では、歩行者がロボットの注意の発話に従わなかったため、ロボットが経路を塞ごうとしているように見えたと考えられる。

図 3.16 は各条件における成功率を示している。フィッシャーの正確確率検定(Fisher's exact test)を適用した結果、条件間で有意な差( $p = .047$ )があることが明らかになった。したがって、本研究における予測は支持され、注意アプローチの成功率は友好的アプローチの成功率より有意に高いことが明らかになった。

インタビューに応じた参加者は8名(注意アプローチ条件7名(成功6名, 失敗1名), 友好的アプローチ条件1名(失敗1名))であった。インタビューでは歩きながらスマートフォンを使うことを止めた理由を尋ねた。注意アプローチ条件では、7名全員が「ロボットのアプローチに感心した」、「驚いた」と答えていた。例えば、「ロボットが近づいてくるのに気づき、感心したので(スマートフォンを)止めた」と回答している人がいた。また、3名が「危険であることを確信した」と述べた。

ロボットの注意に従わなかった参加者に対して、なぜ従わなかったのか理由を尋ねた。注意アプローチ条件のある参加者は、「問題ないと思ったので、電話を使うのを止めなかった」と答えた。しかし、実験者が近寄った時にはスマートフォンの使用を止めたことに注意する必要がある。このことは人とロボットの効果が異なる可能性を示唆している。また、友好的アプローチ条件では、「ロボットが何を言っているのかわからなかった」という参加者もいた。

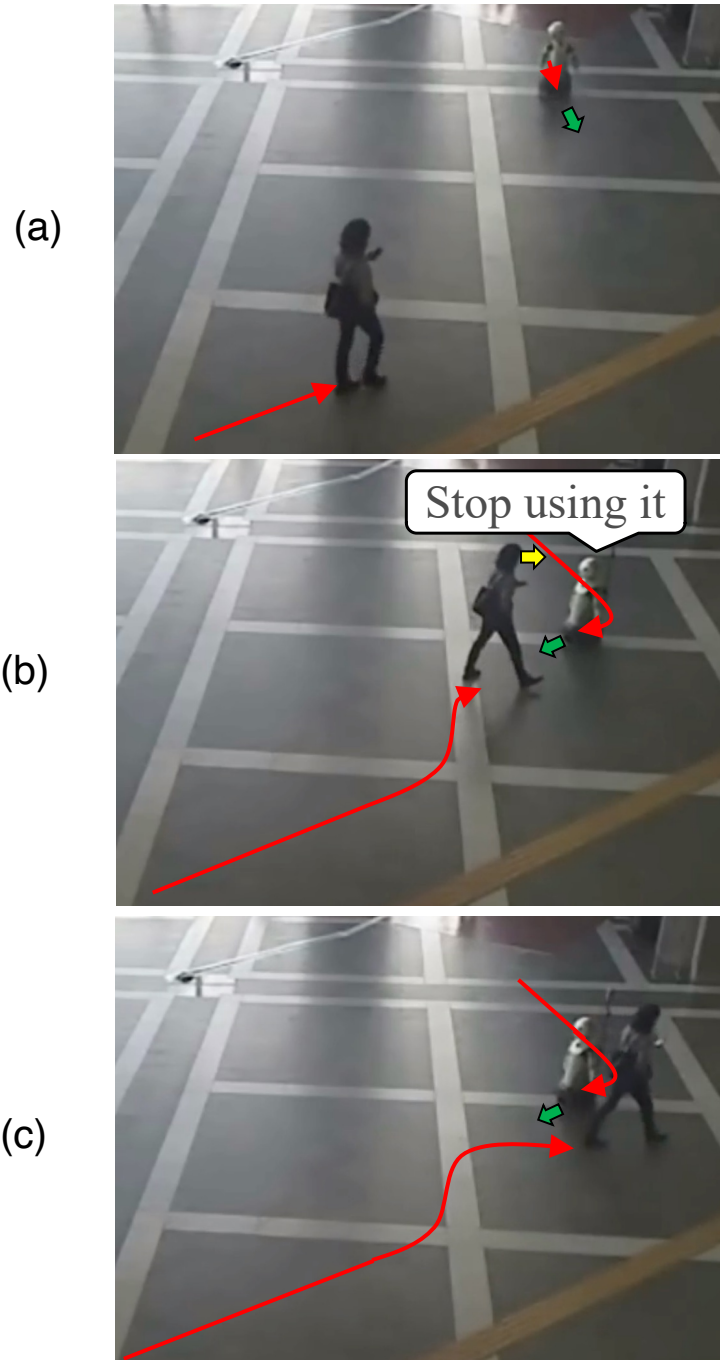


図 3.13: 友好的アプローチ条件の失敗例

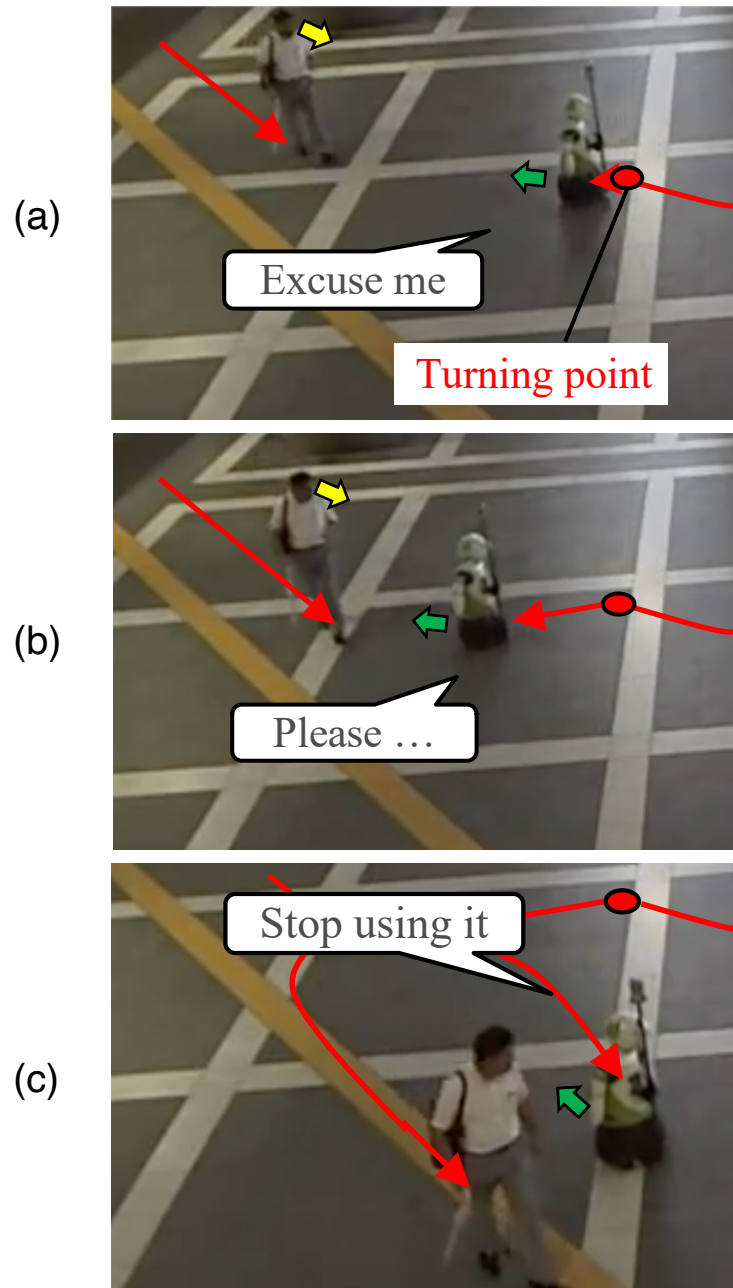


図 3.14: 注意アプローチ条件の成功例

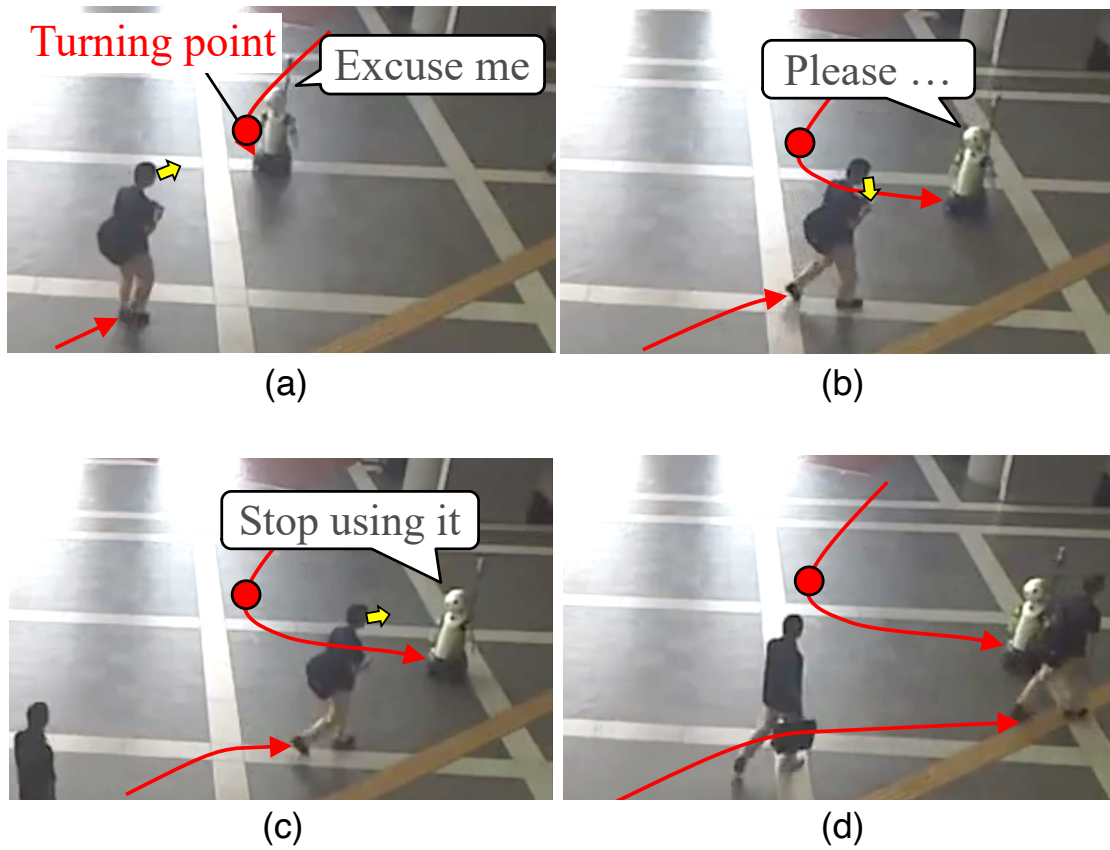


図 3.15: 注意アプローチのショートカットが効果的に機能した例

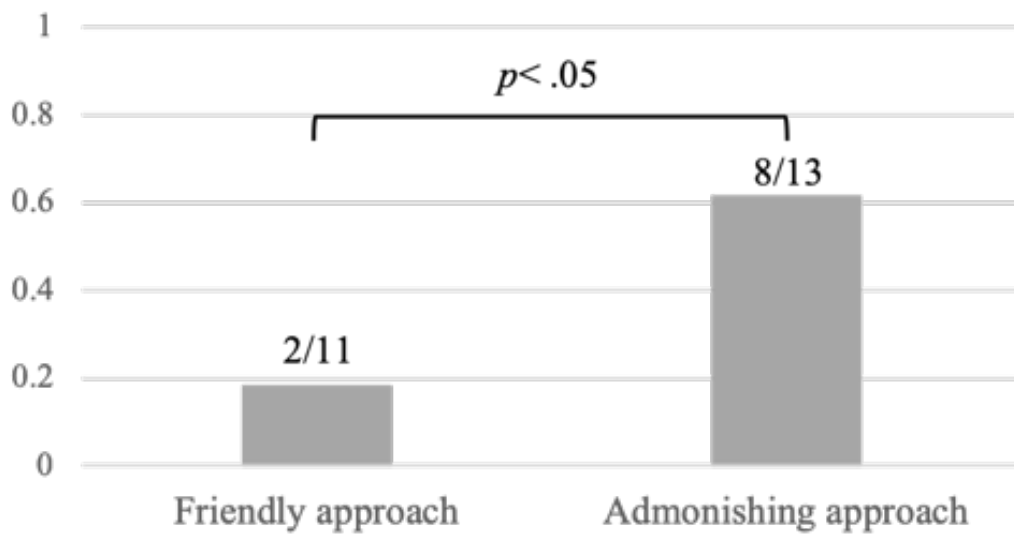


図 3.16: フィールド実験の結果

### 3.6 考察とまとめ

本研究では、人間の警備員の行動を観察し、注意アプローチ手法と友好的アプローチ手法の2種類のアプローチ行動が存在することが明らかになった。注意アプローチ手法は友好的アプローチ手法よりも少し速い速度かつショートカットする軌跡を持つアプローチ行動としてモデル化した。注意アプローチ手法と友好的アプローチ手法の違いはわずかであるが、フィールド実験の結果、注意アプローチを行ったロボットは友好的アプローチを行ったロボットに比べて有意に歩きスマホを止めさせる成功率が高いことが明らかになった。実験結果より、アプローチの最後の瞬間にロボットが歩行者の前に突然現れる「ショートカット」は重要であると考えられる。

人間よりロボットの方が注意行動が上手であるかどうかということに関しては厳密には比較していないため、未解決の問題である。実際にショッピングモールで働く警備員に注意した際の経験について尋ねたところ、80%の人が従うと回答した。そのため、この数字が正確であれば、ロボットはまだ人間の能力を下回っていることになる。注意する際のアプローチ行動は人間に近くなったが、発話を行うロボットが人間の警備員と同じ社会的な影響力を持っているとは限らない。

ロボットが人間を注意することが良いことかどうかについては議論の余地があり、ロボットよりも人に注意される方が安心である可能性はあるが、より多くの研究が必要である。しかし、多くの国では高齢化社会が深刻な社会問題になっており、働き手の不足は現実的な問題である。注意するという行動は決して楽な仕事ではなく、労働者が見知らぬ人に対して注意した場合に、注意された人は動転して労働者に対して攻撃的になる可能性がある。つまり、人はそのような作業を行いたくないと思うかもしれないということである。このように、サービス提供者の立場から見ると、人にとって好ましくない危険な作業をロボットによって解決することは有効的な手段である。

注意アプローチモデルは、ショッピングモールに設置されたヒューマノイドロボットを対象として設計された。したがって、このモデルを他の形態のロボットに適用する場合には慎重な検討が必要である。また、このモデルは一人の人間を観察して開発されたものであるため、他の専門家はわずかに異なる行動をとる可能性がある。しかし、少なくとも通常のアプローチ行動よりは効果があることが確認された。このモデルは注意するアプローチの重要な特性をよくとらえていると考えられるが、より良いパフォーマンスを得るための新しいパラメータを見つけることができる可能性がある。また、このモデルは前方を向いている状況で開発されたものである。つまり、歩行者の流れに沿った十分なスペースがあり前方向きのインタラクションが可能であれば、同様の公共空間ではどこでも利用できる。さらに、文化が異なる場合にはパラメータの調整が必要な可能性がある。

本研究では、自律移動ロボットの積極的な注意アプローチが歩きスマホを止めさせると

いう行動変容を促すために有効な手法であるということが明らかになった。そのため、公共空間において情報提供の媒体として利用するだけでなく、積極的に人へのアプローチを行い社会規範を維持するようなシステムをデザインすることは、ロボットの社会的役割を強化するためには有用である。



## 第4章 複数ロボットの活発な会話が行動変容に与える影響

同じ環境に複数ロボットが存在して連携する場合、ロボットと人とのインタラクションだけでなく複数ロボット間のインタラクションが発生する。このような場面では、ロボットどうしのインタラクションを観察することで周囲の人々に影響を与える可能性がある。

人々の集団には特有の心理的空間が形成されており、社会空間と呼ばれている [28, 29]。社会空間は集団に属している人々が活発にコミュニケーションをとっており、相互に作用しているときに強く形成される。一方で、集団に属していない第三者の行動はこの空間によって生じる境界線に影響される [30, 31, 32]。例えば、立ち話をしている集団を通り過ぎるとき、集団の間を通らずに迂回するということがある。このように、集団の影響によって行動を変化させる場面は、日常生活の中で頻繁に発生する。

ある集団がどの程度活発にコミュニケーションをとっているか判断する要素として発話の重なりがある。日本語の会話分析において会話の中で生じる発話の重なりは、対話相手への同調・関心・理解などを表しているということが主張されている [36, 37, 38, 68]。このような肯定的な考え方は日本語だけでなく英語の会話においても確認されている [39]。また、会話が活発になると発話の重なり頻度が多くなることも確認されており [40, 69, 70]、発話の重なりが活発なコミュニケーションを生み出す役割を果たしている。発話の重なりは、従来のロボットの対話設計では考慮されていなかったが、会話の活発さを高め、話者どうしの連帯感を強める重要な要因となっている。

近年、ヒューマノイドロボットの実証実験がさかんに行われており、ロボットと共生する環境が構築されつつある。そのような環境では、複数のロボットが存在し、ロボットからなる集団が構築される可能性がある。その場合、人の集団における社会空間と同様の影響がロボットの集団においても生じる可能性がある。本章では、人が複数ロボットの活発な会話を観察し、ロボットの集団によって構築される空間をどのように知覚するか明らかにすることを目的とする。これを明らかにすることで、複数ロボットを用いて人の動線を制御するなどといった応用が考えられる。そのため、ロボットどうしの会話の活発さの印象変化とそれによる人の行動変容に着目した実験を行った。

最初に行った事前検証のための実験では、発話の重なりと会話の活発さの印象との関係性を明らかにすることを目的として、クラウドソーシングを用いて、ロボット2体の発話

の重なりによる印象の変化について調査した。その結果をふまえ、発話の重なりによってロボット間に創発される空間を人間がどのように知覚するか明らかにすることを目的として、ロボット2体の会話を1名の参加者が観察する実験室実験を行った。本研究において、ロボットどうしの対話における発話の重なりとは、ある発話が終了する前にもう一方が発話を開始する状況で生じる重なりを指す。

## 4.1 使用するロボットと実装

本研究では、ソフトバンクロボティクス株式会社の人型ロボット「Pepper」を2体使用した。Pepperの基本仕様<sup>1</sup>は、サイズ：高さ×幅×奥行＝1210×480×425[mm]、重量：29kg、自由度：20である。また、ロボットの発話とモーション作成には、Pepperの開発ツールであるChoregrapheを使用した。Choregrapheでは、入力したテキストを自動でPepperの発話に変換し、その発話に合わせたモーションを生成することができるため、それを利用してロボットの対話システムを実装した。これにより、発話の開始と終了に合わせて身振り手振りなどの身体動作を付与することが可能となる。本研究はソフトバンクロボティクスのPepperを活用し、著者が独自に実施したものである。

## 4.2 クラウドソーシング実験

ロボット2体の発話の重なりがそれを観察する人間にどのような印象を与えるかについて調査するために、クラウドソーシングを利用した実験を行った。具体的には、クラウドソーシングサービスであるCrowdFlowerを用いて、ロボット2体の会話ビデオに関するアンケート調査を行った。CrowdFlowerで集められた参加者は、Webページで実験の説明を読んだ後、Googleフォームによって作成されたアンケートページ(図4.1)に誘導された。アンケートページでは、ロボット2体の会話についてのビデオを見た後、以下の5段階形式(5が最も良い評価)のアンケートに回答した。

1. How natural was the conversation of the robots?  
(ロボットの会話ほどの程度自然だったか?)
2. How lively was the conversation of the robots?  
(ロボットの会話ほどの程度活発だったか?)
3. How familiar were the robots with each other?  
(ロボット2体の関係ほどの程度親密だったか?)

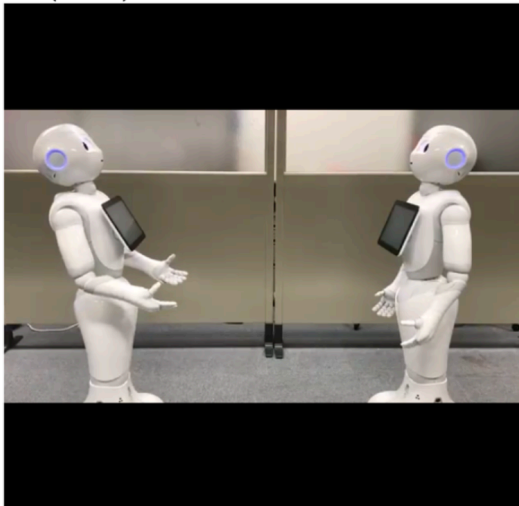
---

<sup>1</sup><https://www.softbankrobotics.com/jp/product/biz3/spec/>

## Questionnaire

Please watch the video and click "NEXT" button after watching the video.

Video(Youtube)



NEXT

## Questionnaire

\* Required

### Questionnaire

Please answer the questionnaires about the robots' conversation in the video.

How natural was the conversation of the robots? \*

	1	2	3	4	5	
unnatural	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	natural

How lively was the conversation of the robots? \*

	1	2	3	4	5	
not lively	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	lively

How familiar were the robots with each other? \*

	1	2	3	4	5	
unfamiliar	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	familiar

BACK

SUBMIT

図 4.1: アンケートページ (本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し, 著者が独自に実施したものである.)

アンケートではロボットどうしの会話の活発さだけでなく、会話が自然に感じるかどうか、ロボット2体が親密かどうかについての印象を調査した。会話が自然に感じるかどうかについては、ロボットの発話間隔を制御するうえで、発話の重なりによって不自然な印象を与えるか調査する必要がある。さらに、人間どうしの会話において、発話の重なりと親密さには高い相関がある [69] ことが確認されていることから、ロボットどうしの会話における親密さについても調査した。

#### 4.2.1 実験参加者

CrowdFlower を用いて集められた参加者の数は 1233 名であり、日本人は含まれていなかった。アンケートでは、ボット (bot) などのランダムな回答をする参加者を不正な回答者と判断するなど、不正検知の仕組みを取り入れた。Koyama ら [71] はクラウドソーシングを用いた調査において、参加者に同じタスクを 2 回実行させ、2 回目の評価スライダーの終了を 1 回目とは逆に設定することで簡単な不正検知を行った。それを参考に、本実験ではアンケート内に質問項目 3 と同じ質問を設定し、1 を最も良い評価とすることで不正検知を行った。例えば、一方の評価で 4 を選んだにも関わらず、もう一方で 3 を選んだ場合には評価が一致していないため、その参加者のデータは分析には利用しなかった。この結果、有効な回答者数は 721 名であった。

#### 4.2.2 会話シナリオ

クラウドソーシング実験のアンケートに使用するビデオでは、ロボット2体の発話間隔を以下の3つの条件として定義した。その定義をもとにロボットどうしの対話を実装し、その会話ビデオを撮影した。参加者はいずれかのビデオが含まれたアンケートページヘランダムに誘導された。

##### Overlap 条件

この条件ではロボットの発話が徐々に重なる。最初の発話間隔は 0 秒であるが、会話が進むにつれて徐々に発話が重なり、最後には 1 秒重なる (図 4.2)。会話ビデオ全体の長さは約 60 秒であった。また、この条件に割り振られた参加者数は 227 名であった。

##### Default 条件

この条件ではロボットの発話間隔がつねに 0 秒である (図 4.2)。つまり、ロボットの発話が終了するとすぐにもう一方のロボットの発話が始まる。会話ビデオ全体の長さは約 67 秒であった。また、この条件に割り振られた参加者数は 246 名であった。

## Delay 条件

この条件ではロボットの発話間隔がつねに1秒である(図 4.2)。会話ビデオ全体の長さは約79秒であった。また、この条件に割り振られた参加者数は248名であった。

すべての条件における会話シナリオは同じである(表 4.1)。会話シナリオには公立高校の英語入試問題(2002年度 青森県)を使用し、会話の始まりと終わりの部分に変更を加えた(下線部)。この会話シナリオでは、それぞれのロボットが交互に発話し、発話回数はそれぞれ7回ずつであった。本実験で使用するCrowdFlowerでは英語が標準言語であるが、参加者の中には英語を母語としない参加者が含まれている可能性がある。さらに実験室実験では、日本人参加者がロボットどうしの会話を観察する実験を行うが、条件を揃えるためにクラウドソーシング実験と同じシナリオを使用する。また、実験室実験における参加者は大学生を想定している。これらより、クラウドソーシング実験の日本人以外の参加者と実験室実験の日本人参加者の両方が理解しやすい英語の文章であると考えられ、交互に発話するというシナリオであることから、対話設計として発話の重なりを容易に実現できる公立高校の英語入試問題を利用した。

発話間隔(図 4.2)は、「先発話者のロボットが発話の終了を検知した時刻」から「後発話者のロボットに発話を開始する命令を送信した時刻」を減算した。図 4.2において、発話間隔が正の値のときは発話が重なることを表し、反対に負の値のときは発話が重ならず、小さくなるほど発話間隔が長くなることを表している。3つの条件(Overlap, Default, Delay)の定義と図 4.2の実測値は、システムの実行時間や通信時間などの影響から厳密には一致していない。

### 4.2.3 実験結果

クラウドソーシング実験のアンケート結果とそのグラフを表 4.2, 図 4.3にそれぞれ示す。アンケート結果についてMann-WhitneyのU検定によってOverlap条件とDefault条件との比較、Overlap条件とDelay条件との比較を行った(Bonferroni法による $p$ 値調整)。その結果、Overlap条件とDelay条件との間には、アンケート項目2の「ロボットの会話はどの程度活発だったか」に有意な差が確認された( $p < .05, r = 0.1$ ) (表 4.3, 図 4.3)。一方で、Overlap条件とDefault条件との間には、どのアンケート項目においても有意な差は確認されなかった(表 4.3, 図 4.3)。これらの結果は、発話間隔がつねに1秒であるDelay条件よりも、発話の重なりが生じるOverlap条件の会話の方が活発に感じるということを示している。しかし、効果量 $r$ が小さいことから、発話の重なりによる会話の活発さの印象を高める効果は小さいということが確認された。

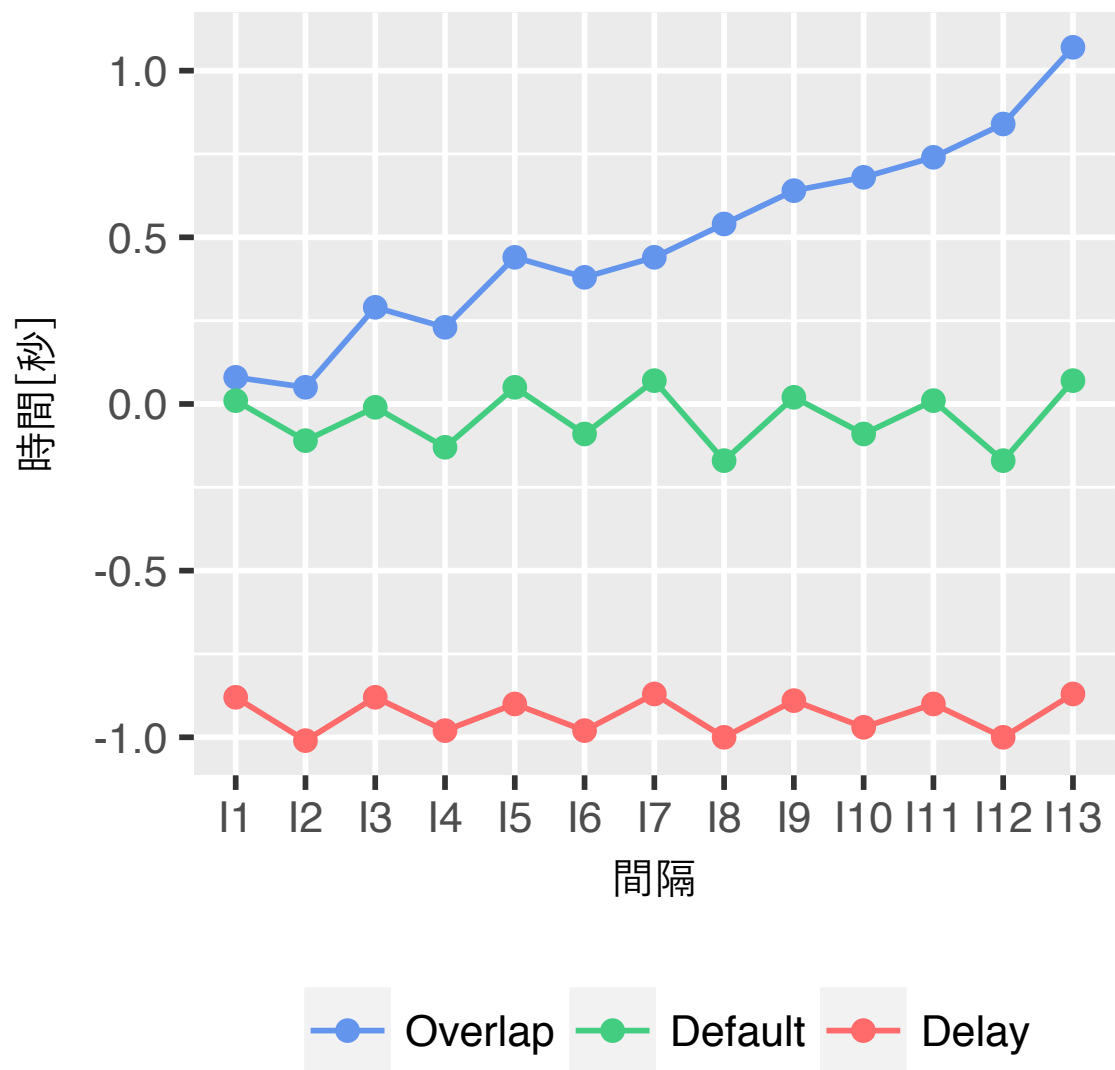


図 4.2: 各条件の発話間隔（先発話者の発話終了時刻-後発話者の発話開始時刻）の実測値

表 4.1: 会話シナリオ (R1 はロボット 1, R2 はロボット 2)

発話者	発話内容
R2	<u>Hi, Pepper.</u>
R1	<u>Hi.</u> Did you enjoy my English class yesterday?
R2	Yes, I did.
R1	I'm glad to hear that. Are you interested in studying English?
R2	Yes. I like to study English, but I have a problem.
R1	Oh, what is it?
R2	English is fun, but it is sometimes difficult for me. What is the best way to study English?
R1	If you use English every day, you will get better. Why don't you come to me and speak English?
R2	It's a great idea. I will try it.
R1	Good. And I would like to invite you to the English club. Many students come to the club and enjoy talking with me.
R2	Sounds great. I'd like to come. When should I visit the club?
R1	We have the club activities every Wednesday after school. Please come to the library.
R2	<u>Thank you very much.</u>
R1	<u>You're welcome.</u>

表 4.2: クラウドソーシング実験のアンケート結果

	自然さ		活発さ		親密さ	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
Overlap	3.74	0.910	3.90	0.899	3.77	0.921
Default	3.77	0.973	3.79	0.897	3.65	0.990
Delay	3.73	0.933	3.69	0.954	3.77	0.957

表 4.3: クラウドソーシング実験のアンケート結果に対する多重比較の結果

比較	自然さ	活発さ	親密さ
	$p$ 値 ( $r$ )	$p$ 値 ( $r$ )	$p$ 値 ( $r$ )
Overlap-Default	1.0 (0.02)	0.39 (0.06)	0.38 (0.06)
Overlap-Delay	1.0 (0.01)	0.048 (0.1)	1.0 (0.003)

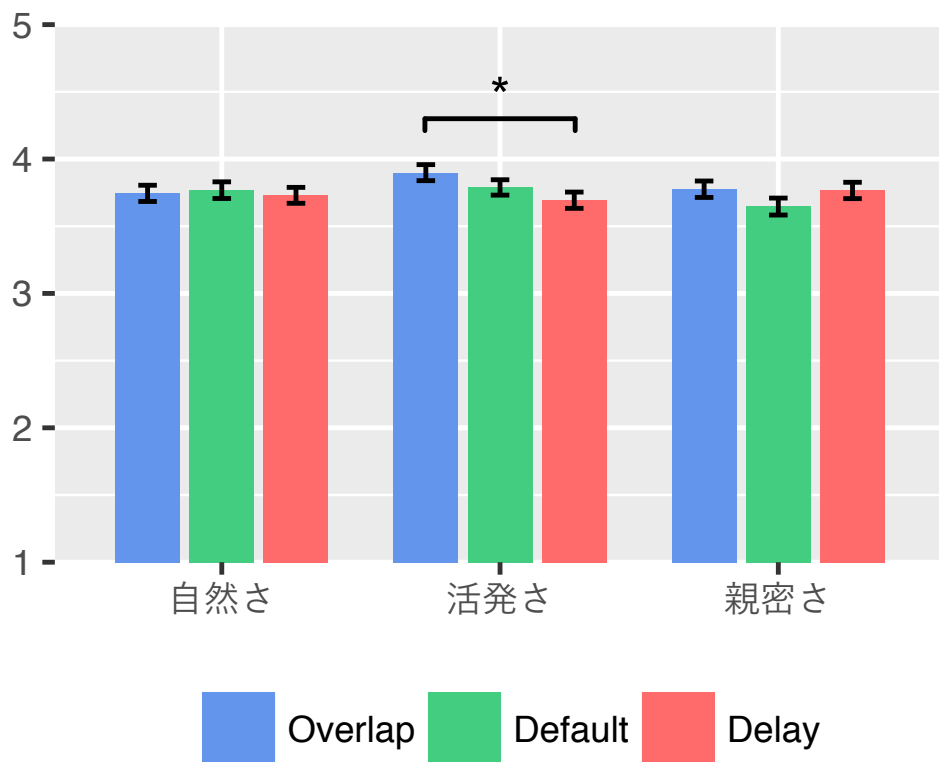


図 4.3: クラウドソーシング実験のアンケート結果のグラフ (エラーバーは標準誤差)



### 4.3 実験室実験

クラウドソーシング実験のアンケート結果から確認された発話の重なるの効果をふまえて、実験室実験では実際にロボット2体を用いて、ロボットどうしの会話を参加者が直接観察した。この実験を通して、参加者がロボットの発話の重なりによってロボットの集団に創発される空間をどのように知覚するか調査した。

実験室実験ではロボット2体と参加者1名による実験を行った（図 4.4）。実験の手順は以下のとおりである。

1. 参加者は実験の説明を受けた後、2体のロボットの前に立つように指示を受ける。
2. 実験者の合図で参加者はロボットに挨拶をする。
3. ロボットの会話が始まる。
4. 実験者は別室で様子をモニタリングする。
5. 会話の終わりに片方のロボットが参加者に机の上に置かれた教科書を見るようにすすめる。
6. 実験者は会話終了後、およそ30秒後に実験室に入り、参加者に実験終了の旨を伝える。
7. 参加者はアンケートに答える。

手順1において、ロボットの会話が終了した後はその場に留まる必要はなく、自由に行動してもよいと教示した。一方で、会話が終了するまでは2体のロボットの前にいるように教示した。さらに、手順6において、誘導された場合はその時点で実験終了の旨を伝えた。実験終了時まで机の上に置かれた教科書に誘導されなかった場合は、実験者が参加者に対して教科書を見に行くように促して、どのような行動を取るかを観察した。また、手順7において、参加者は以下の5段階形式（5が最も良い評価）のアンケートに答えた。

1. ロボットの会話はどの程度自然だったか？
2. ロボットの会話はどの程度活発だったか？
3. ロボット2体の関係はどの程度親密だったか？

これらのアンケート内容はクラウドソーシング実験のアンケートと同じ質問であり、実験に関する感想として自由記述欄を設けた。実験室実験において、ロボットの発話間隔の条件は、Overlap条件、Default条件、Delay条件の3条件とした。なお、それぞれの条件における定義はクラウドソーシング実験と同じである。

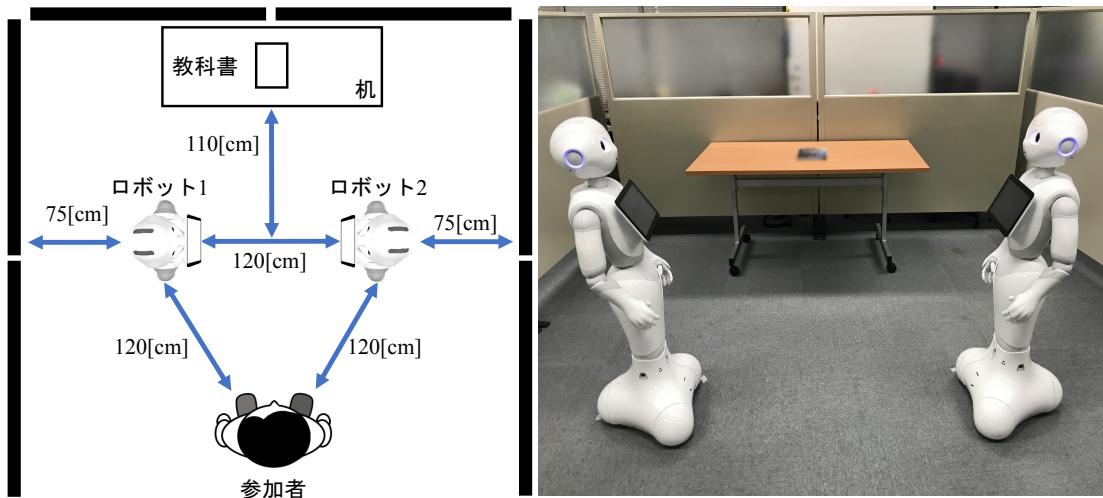


図 4.4: 実験環境 (本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し、著者が独自に実施したものである。)

#### 4.3.1 実験参加者

実験参加者は日本人 39 名 (男性 : 24 名, 女性 : 15 名), 主に情報工学や薬学, 農学などを専攻する大学生・大学院生または高専・大学卒業の社会人であり, 年齢は 20~26 歳 (平均 : 23.0, 標準偏差 : 7.92) であった。また, 参加者の英語学習歴は最短でも 6 年以上であり, 「ロボット 2 体の英語の会話に参加する」という名目で実験に参加した。参加者はランダムに各条件 (Overlap, Default, Delay) に割り振られ, それぞれの条件で 13 名ずつ実験を行った (参加者間比較計画)。

#### 4.3.2 会話シナリオ

実験室実験の会話シナリオでは, 参加者が会話に参加するために, クラウドソーシング実験で用いたシナリオの始めと終わりに以下の 2 つの変更を加えた。それぞれの変更部分を表 4.4 に示す。

1. 始めに参加者がロボットに挨拶をし, それぞれのロボットが順番に参加者に対して挨拶を返す。
2. 終わりにロボット (ロボット 1) が机の上に置かれた教科書を参加者に対してすすめる (図 4.4)。この時, 参加者に机の上の教科書を意識させるために, 2 体のロボットが一度机の上の教科書の方を向いた後, 左側のロボットが参加者の方に頭を向けて発話する。

表 4.4: 会話シナリオの追加部分 (下線部)

発話者	発話内容
参加者	(ロボットに挨拶をする, 例: Hi.)
R2	<u>Hi. (参加者に挨拶する)</u>
R1	<u>Hi. (参加者に挨拶する)</u>
R2	Hi, Pepper.
	...
R1	We have the club activities every Wednesday after school. Please come to the library.
R2	<u>OK. By the way, are there any textbooks you would recommend?</u>
R1	<u>I recommend you the textbook on the table.</u> (R1 が机の上に置かれた教科書を指し示す) <u>You should also look at it.</u> (R1 が参加者に向かって言う)
R2	Thank you very much.
R1	You're welcome.

### 4.3.3 実験結果

実験室実験のアンケート結果とそのグラフを表 4.5, 図 4.5 にそれぞれ示す。アンケート結果について Mann-Whitney の U 検定によって Overlap 条件と Default 条件との比較, Overlap 条件と Delay 条件との比較を行った (Bonferroni 法による  $p$  値調整)。その結果, Overlap 条件と Default 条件との間には, どのアンケート項目においても有意な差は確認されず, Overlap 条件と Delay 条件との間についても有意な差は確認されなかった。これらより, 実験室実験において, ロボットの発話の重なりが参加者に与える印象 (自然さ・活発さ・親密さ) の効果は確認されなかった (図 4.5, 表 4.6)。

表 4.5: 実験室実験のアンケート結果

	自然さ		活発さ		親密さ	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
Overlap	4.31	0.855	4.54	0.519	3.77	1.01
Default	4.15	0.555	4.08	0.862	3.23	0.927
Delay	4.31	0.751	4.46	0.776	3.69	0.751

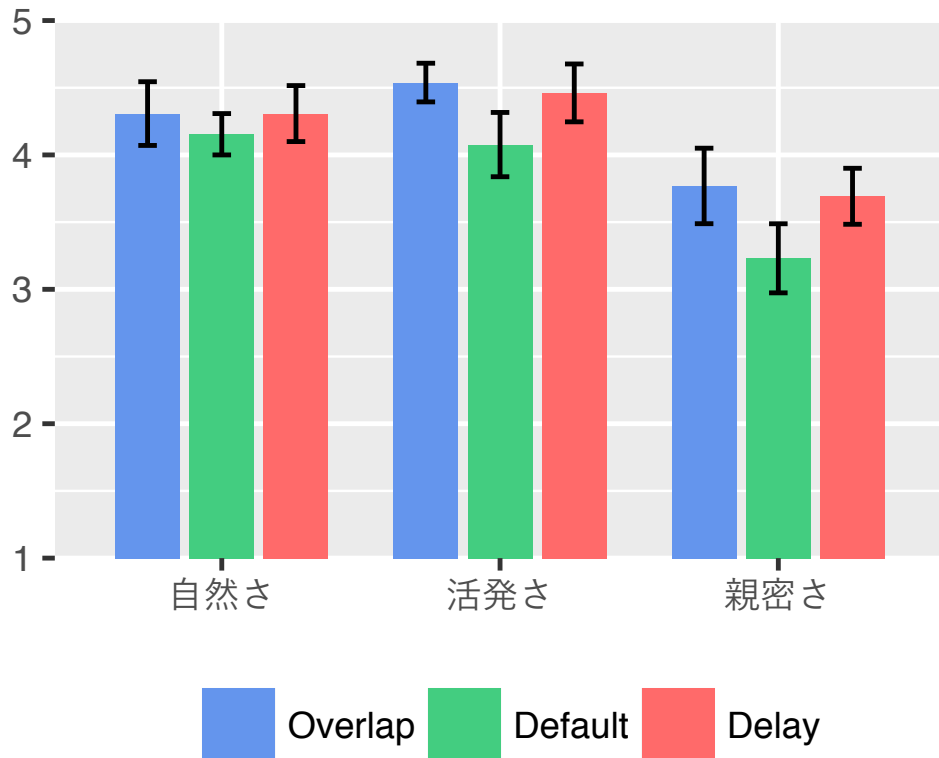


図 4.5: 実験室実験のアンケート結果のグラフ (エラーバーは標準誤差)

表 4.6: 実験室実験のアンケート結果に対する多重比較の結果

比較	自然さ	活発さ	親密さ
	$p$ 値 ( $r$ )	$p$ 値 ( $r$ )	$p$ 値 ( $r$ )
Overlap-Default	0.73 (0.2)	0.42 (0.29)	0.52 (0.23)
Overlap-Delay	1.0 (0.03)	1.0 (0.006)	1.0 (0.03)

次に、机の上に置かれた教科書を見に行く際に参加者が取った行動について分析する。参加者の行動は以下の2つのパターンに分けられた（図 4.6）。

1. ロボット2体の間を通る（図 4.7）。
2. ロボット2体の間を避け、ロボットの後ろを通る（図 4.8）。

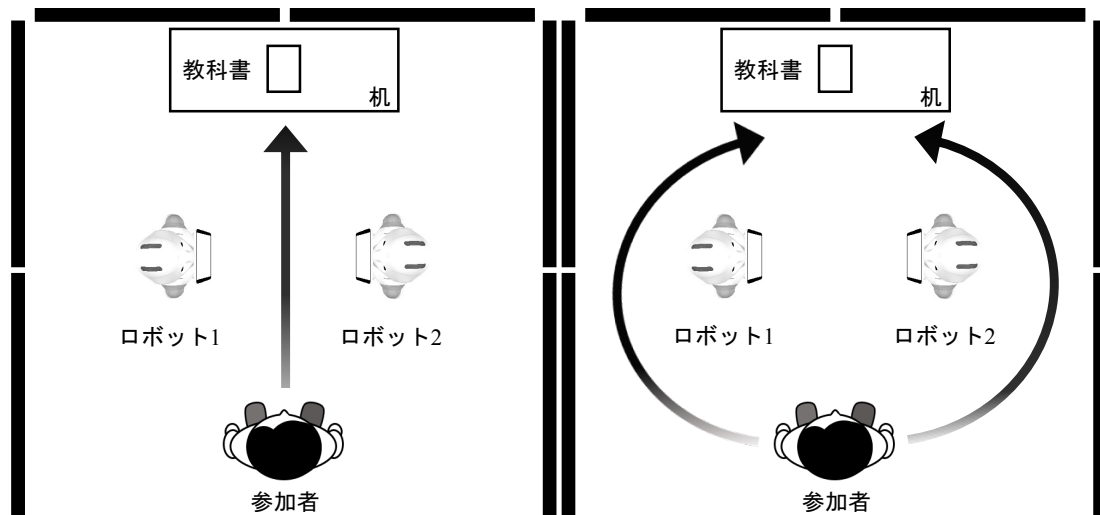


図 4.6: 参加者の行動パターン

また、それぞれのパターンの行動を取った参加者の人数を条件ごとに集計した（表 4.7）。なお、実験の説明では、会話が終了した後に自由に行動してもよいと参加者に教示した。しかし、ロボットの会話シナリオが終了する前に教科書を見に行った参加者とシナリオが終了する前から見に行くような行動（前に1歩踏み出すなど）を取り、終了した直後に見に行った参加者がいた。それらの参加者は、ロボットの会話中であるにもかかわらず、ロボットの会話が終了したと判断していると考えられるため、会話終了後の行動に注目する本研究では行動分析の対象から外した。その結果、Default 条件で1名、Delay 条件で2名除外した。

各条件における参加者の行動人数の結果についてフィッシャーの正確確率検定（Fisher's exact test）によって、Overlap 条件と Default 条件との比較、Overlap 条件と Delay 条件との比較を行った（Bonferroni 法による  $p$  値調整）。その結果、Overlap 条件と Delay 条件との間に有意な差が確認された（ $p < .05$ ,  $\phi = 0.51$ ）（表 4.8）。一方で、Overlap 条件と Default 条件との間には有意な差は確認されなかった。これらより、本実験において発話間隔がつねに1秒である Delay 条件よりも、発話の重なりが生じる Overlap 条件の方が、ロボットの間を避ける人が多く、反対に Overlap 条件よりも Delay 条件の方が、ロボットの間を通る人が多いということが確認された。

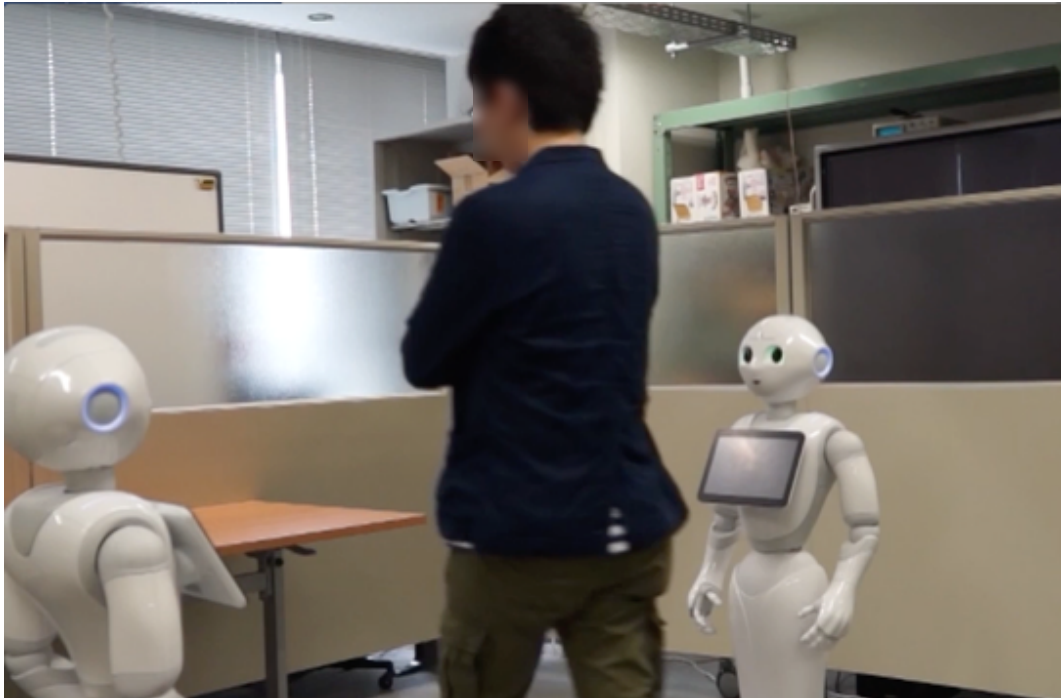


図 4.7: ロボット 2 体の間を通った例（本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し、著者が独自に実施したものである。）



図 4.8: ロボット 2 体の間を避け、ロボットの後ろを通った例（本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し、著者が独自に実施したものである。）

表 4.7: 各条件における参加者の行動パターンの集計結果

	ロボットの間を通る	ロボットの間を避ける
Overlap	4	9
Default	7	5
Delay	9	2

表 4.8: 行動パターンの集計結果に対する多重比較の結果

比較	$p$ 値 ( $\phi$ )
Overlap-Default	0.48(0.277)
Overlap-Delay	0.038(0.51)

#### 4.3.4 アンケートの自由記述

アンケートの自由記述において、参加者が記述した内容を抜粋し、要約したものを表 4.9 に示す。

それぞれの条件において、ロボットの身振り手振りがあることによって、より人間に近い自然な会話を実現できる可能性が示唆された。さらに、Overlap 条件では「会話のテンポが早かった」、Default 条件では「会話に不自然な間がなかった」、Delay 条件では「会話間隔が少し長いように感じた」とそれぞれ記述している参加者がいた。これより、それぞれの条件において参加者が主観的に感じる発話間隔は、我々が定義した条件通りであったことが示唆された。

## 4.4 考察

### 4.4.1 発話の重なるの効果

クラウドソーシング実験では、観察者から見て発話の重なりが会話の活発さの印象を向上させる効果があるということが確認された。統計分析に着目した際に、効果量が小さかった理由について考察する。守屋ら [40] は、参加者の興味などをもとに話題を設定することで会話活性度を制御していた。これに対して本実験で使用したシナリオは全ての条件で統一されていた。さらにクラウドソーシングで集められた参加者の中には、英語を母語としない参加者が含まれている可能性があることから、英語の理解度が低い参加者が混在しており、効果量が小さかった可能性がある。一方、実験室実験のアンケート結果では、会話の活発さの印象を向上させる効果があるということは確認されなかった。この結果に

表 4.9: 各条件における自由記述内容

	アンケート内容（同様の内容を記述した人数）
Overlap	動きがなめらかだった（1） 身振り手振りを使っていて驚いた（1） 会話のテンポが早かった（1） 最後の会話が早くなり聞き取りにくかった（1）
Default	自然に話していた（2） 会話がスムーズで動きも自然だった（2） 内容に沿った身振り手振りで、違和感がなかった（1） 会話に不自然な間がなかった（1） 会話に混ざるタイミングをなかなか掴めなかった（1）
Delay	会話が自然だった（2） 会話がスムーズだった（2） 身振り手振りも人間のようになめらかだった（1） 会話間隔が少し長いように感じた（1） 思ったより会話に参加することはなかった（1）

ついて、実験参加者の属性の違いから考察する。クラウドソーシング実験では、英語を標準言語とする CrowdFlower を利用して参加者が集められた。しかし、実験室実験では、日本人参加者のみで実験が行われた。それぞれの実験では同じ題材のシナリオを利用していたが、英語に対する理解度の差や、参加者の文化の違いが影響している可能性がある。また、実験室実験ではクラウドソーシング実験と比べて参加者の数が少なかったことから、発話の重なるの効果が確認されなかった可能性がある。それぞれの実験において、観察者から見た「会話の自然さ」および「ロボットの親密さ」の印象の変化は確認されなかった。この理由についても、「会話の活発さ」と同様に、実験参加者の属性の違いなどが影響していると考えられる。

本研究では Overlap 条件において、ロボットの発話を徐々に重ねるように設計していた。これは、つねに発話を 1 秒重ねた場合にはロボットの会話のテンポが早く、参加者によるロボットの発話内容の聞き取りに影響があると考えたためである。実際、実験室実験のアンケートの自由記述（表 4.9）において「最後の会話が早くなり聞き取りにくかった」と記述している参加者がおり、徐々に発話を重ねる方がつねに重ねるよりも聞き取りやすく、つねに発話を 1 秒重ねると聞き取りが困難になると考えられる。



#### 4.4.2 ロボットの集団に創発される空間

実験室実験では、それぞれの条件において、ロボットの集団に創発された空間に影響を受けて行動した（ロボットの間を避けた）参加者がいた。一方で、発話の重なりによる会話の活発さの印象を向上させる効果が確認されなかったことから、本研究では会話の活発さとロボットの集団に創発される空間について関係性は明確にならなかった。これについては実験参加者のタスクとして「教科書を見に行く」という行動を取ることを意識させており、実際にはその途中の行動を観察していた。つまり、参加者にとっては無意識にロボットの間を避けるという行動を取っていた可能性があり、アンケートに答えるという意識的な行動とは異なると考えられる。また、ロボットの集団に創発された空間の影響は、先行研究 [30, 31, 32] で報告されている社会空間の影響と同じであることを示しており、ロボットの集団による影響が示唆された。その中でも、発話の重なりによって、より強い空間が形成されるということも示唆された。また、実験室実験では会話終了後の参加者の行動に注目していたが、先行研究 [30, 31, 32] では会話中の行動に注目している。したがって、ロボットどうしの会話中に人間がその集団に影響されるような行動を取るかどうかについても調査する必要がある。

#### 4.4.3 複数ロボットの会話を観察する実験設定

実験室実験ではロボットからの提案を会話の中で自然に行い、参加者の行動を促すことを意図していた。そのため、実験参加者を募集する段階、および実験における参加者への教示としては「ロボット2体の英語の会話に参加する」という名目であった。しかし、人がロボットに話しかけても応答するようには設計されておらず、始めの挨拶だけという形になり、ロボットと人が会話する頻度は極端に少なかった。アンケートの自由記述（表 4.9）においても「会話に混ざるタイミングをなかなか掴めなかった」、「思ったより会話に参加することはなかった」と記述している参加者がおり、複数ロボットの会話を観察するという設定としては、人とロボットとの関係性は多少曖昧であったと考えられる。

### 4.5 まとめ

本研究では、ロボットの対話設計における発話の重なりの効果とロボットの集団に創発される空間の影響を調査した。クラウドソーシング実験では、観察者から見て、発話の重なりは会話の活発さの印象を有意に向上させることが確認された。この実験結果をふまえて行われた実験室実験では、ロボットの集団に創発される空間において、人間の集団に特有の空間である社会空間と同様の影響があり、それを人間が知覚して行動が影響されるこ

とが確認された。これにより、ロボットどうしの会話において発話の重なりが生じている場合には、そうでない場合と比べて、観察者がロボットの集団に創発される空間を侵害しないような行動を取ることが考えられる。つまり、複数ロボットの相互作用によって、人はそれらの集団を尊重するような行動を取り、本研究はその基礎的な知見を与えるものである。また、人とロボットの対話においても発話の重なりという対話設計を組み込むといった応用や、複数ロボットによって人の動線を制御する空間を形成できると考える。本研究では、ロボットどうしの会話についてのアンケートは3項目（自然さ、活発さ、親密さ）のみであったが、さらに発話の重なりによる効果を調査していく必要がある。また、多くの参加者に対して、ロボットの集団による影響を調査していくことも今後の展望として挙げられる。本研究で調査した複数ロボットどうしのインタラクションによって周囲の人間に行動変容を促すことで、単体のロボットだけでは構築することができない心理的空間を形成し、社会的役割を強化できる可能性がある。

## 第5章 複数ロボットの感情表出が関係性の知覚に与える影響

第4章では複数ロボットどうしの会話における発話の重なりが活発さの印象に与える影響について調査した。しかし、「親密さ」というロボット間の関係性への影響については明らかにならなかった。複数ロボットを用いる場合には、それらのロボットどうしのインタラクションを人が観察することでロボットに対する接し方に影響を与える可能性がある[41]。そのため、ロボットの集団におけるロボット間の関係性がどのように知覚されるか明らかにすることは重要である。本章では、ロボット間における関係性を構築するための要素として感情表出に着目した。

Mageeら[72]は、集合写真の中でHappinessを表現する人の数が観察者の凝集性の推論に影響を与えることを明らかにした。さらに、全員がHappinessの感情を表現する時、集団が最もまとまりがあるように見えることを示している。また、機械学習の分野における研究では、集合写真の集団感情を分類する試みが行われている[73]。これらの研究のように、人間の集団における感情表出の効果は写真を対象として検証されており、実際の関係性における感情の効果についてはほとんど着目されていない。単体のロボットでは、多くの研究において、体の動き（ジェスチャ）、LEDの色、人工的な音などによって感情を表現する方法が提案されている。特にジェスチャは、ヒューマノイドロボットの特徴を活かして効果的に感情表出ができる。先行研究では、人間とロボットが直接インタラクションすることを前提としているが、複数ロボットの場合には人間の集団と同じように間接的に観察者に影響を与える可能性がある。さらに、人間と対話するときのみ感情を表現するロボットよりも複数ロボットで感情表出をする場合には、感情伝染やそれに伴って人間のタスクパフォーマンスなどに影響を与える可能性がある。しかし、集団を構成するロボットの感情表出によってロボット間の関係性がどのように知覚されるかについてはほとんど注意が払われていない。そこで本章では、ロボットどうしのインタラクションにおけるジェスチャを用いた感情表出に焦点を当てる。

## 5.1 使用するロボットと実装

本研究では、赤色と青色の2体のヒューマノイドロボット Nao V5 を使用した。また、ロボット間のインタラクションを通して知覚される個々のロボットの感情と2体のロボット間の関係性を評価するためにラッセルの円環モデルを使用した。このモデルでは valence (快・不快度) と arousal (覚醒度) という2つの定量的な指標を用いて感情を比較することができる。しかし、このモデルに基づいて適切な感情を表現する動きを最初から設計することは困難であるため、本研究では Beck ら [59] によって提案されたキーポーズを参考にした。実際には4つの感情 (Sadness, Fear, Pride, Happiness) のジェスチャを実装し、ロボットの転倒を防ぐために動作を微調整した。さらに、彼らの研究ではロボットの頭の位置が感情の識別に影響を与えることも報告している。これに基づいて、ロボットの頭の位置に変更を加え、全ての動作を1秒で完了するように実装した。各感情を表現するジェスチャについて、頭の位置をどのように変更したかを以下に示す。

- Sadness : 下げる
- Pride, Happiness : 上げる
- Fear : 変更しない

さらに、ラッセルの円環モデルの2次元軸における各象限に対応して、それぞれの感情を以下のように定義する。

- Sadness: 覚醒度の低いネガティブな感情
- Fear: 覚醒度の高いネガティブな感情
- Pride: 覚醒度の低いポジティブな感情
- Happiness: 覚醒度の高いポジティブな感情

実装した4つの感情を表すジェスチャとラッセルの円環モデルにおける各象限との対応を図 5.1 に示す。

Beck らの研究 [60] では、Pride を表すジェスチャ (図 5.1) は覚醒度が高い感情を表現する動作として知覚されることを示していたが、一方で Happiness は Pride や Sadness と比べて覚醒度がより高く知覚されたことを報告している。したがって、ラッセルの円環モデルにおける valence 軸のポジティブ側に位置する Happiness と Pride は相対的に区別できると考えたため、本研究においては覚醒度の低いポジティブな感情として Pride を選択した。

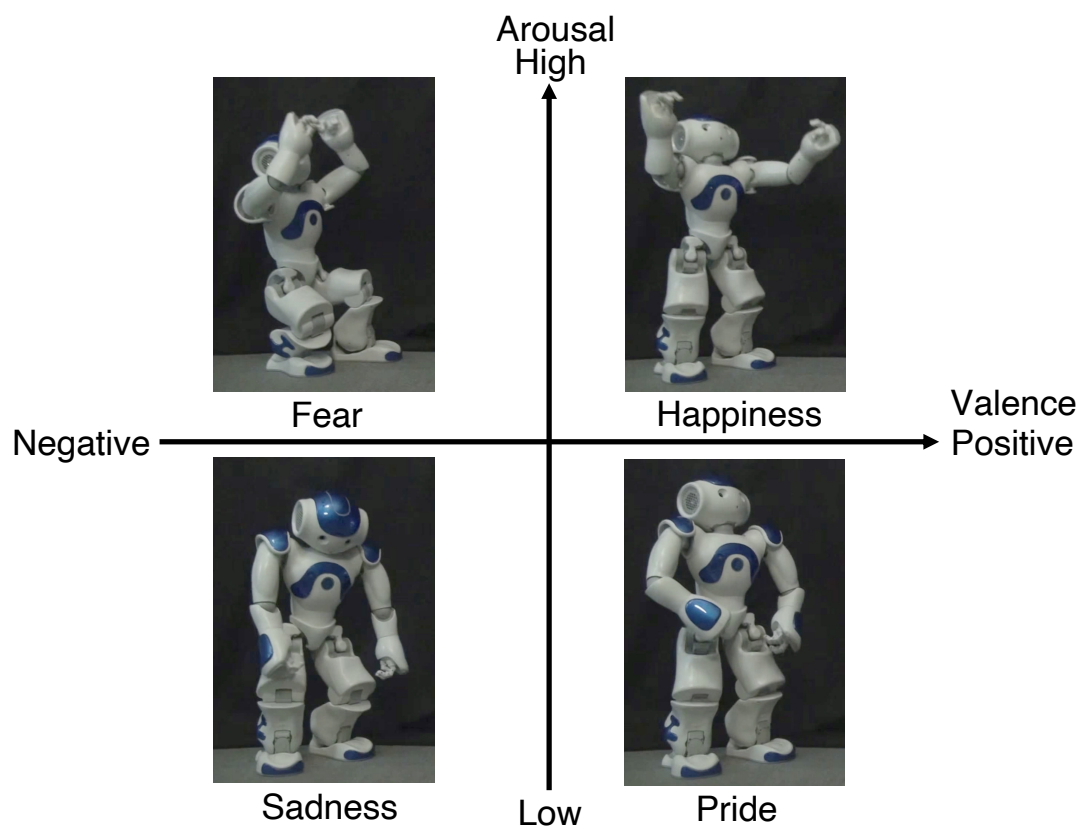


図 5.1: ラッセルの円環モデルの各象限に対応するジェスチャ

ロボットはLEDの色や音など、さまざまなモダリティを組み合わせることでより効果的に感情を表現することができる[44, 45, 74]。しかし、ヒューマノイドロボットで感情を表現するための体の動き、LEDの色および音の組み合わせを適切に設計し表現することは困難である[47]。さらに、ロボットの動きの結果として発生するモータのノイズが与える主観的な影響の問題もある[75]。特に複数ロボットの場合、ロボットの数に加えてさまざまなモダリティの組み合わせと潜在的な問題を同時に調査することは複雑であるため、本研究ではLEDの色と音は考慮しなかった。つまり、ロボットに搭載されている全てのLEDの色をオフにし、オンライン実験で使用する動画においては音を除外した。また、区別しやすくするために異なる色のロボットを使用した。そのため、LEDの色などと同様にロボットの色が感情の知覚に与える影響を考慮して、感情を表現するロボットの色の組み合わせをランダム化した。ロボットはカメラの画角の左右にそれぞれ設置され、各ロボットが動作を行う短い動画を収録した。左側のロボットは中央を向くように斜めに設置し、右側のロボットは同様に中央を向くように斜めに設置して左右の体の動きを左側のロボットとは逆にした。最終的に左右それぞれの側で合計8本のジェスチャ動画を撮影した(4感情×2色)。

ロボットどうしが順番に動作を行うインタラクションの全ての組み合わせについての動画を生成するために、左側と右側のロボットの各動画を1つの動画に統合した。生成された動画では、一方のロボットが1秒間で動作を完了し、そのロボットが姿勢を維持した状態でもう一方のロボットが1秒で動作を完了する。これらより、2秒間の音のないインタラクション動画が64本(2色×2順序×4感情×4感情)生成された(図5.2)。1stEmotionは最初に動作したロボットによって表現される感情、2ndEmotionはその後に動作したロボットによって表現される感情をそれぞれ表す。

## 5.2 事前検証

実装した4つの感情(Sadness, Pride, Fear, Happiness)について、観察者がその感情として識別できるかどうか調査するためにクラウドソーシングプラットフォームであるAmazon Mechanical Turk (AMT)を使用した。事前検証では、AMT上での以前のタスク承認率が95.0%以上のアメリカ在住の参加者100名が集められ、タスクを完遂した参加者には1.00ドルの報酬が支払われた。参加者の人口統計を表5.1に示す。人口統計に関する質問では、先行研究[45]を参考にして「ロボットの使用または操作の経験」があるかどうか参加者に尋ねた。

事前検証タスクでは、参加者は左右それぞれの側で4つの感情を表現するジェスチャを行うロボットについて全部で8本の動画を見た。さらに、「ロボットが何かに反応していると想像する」[59]ように指示され、4つの感情(Sadness, Pride, Fear, Happiness)か

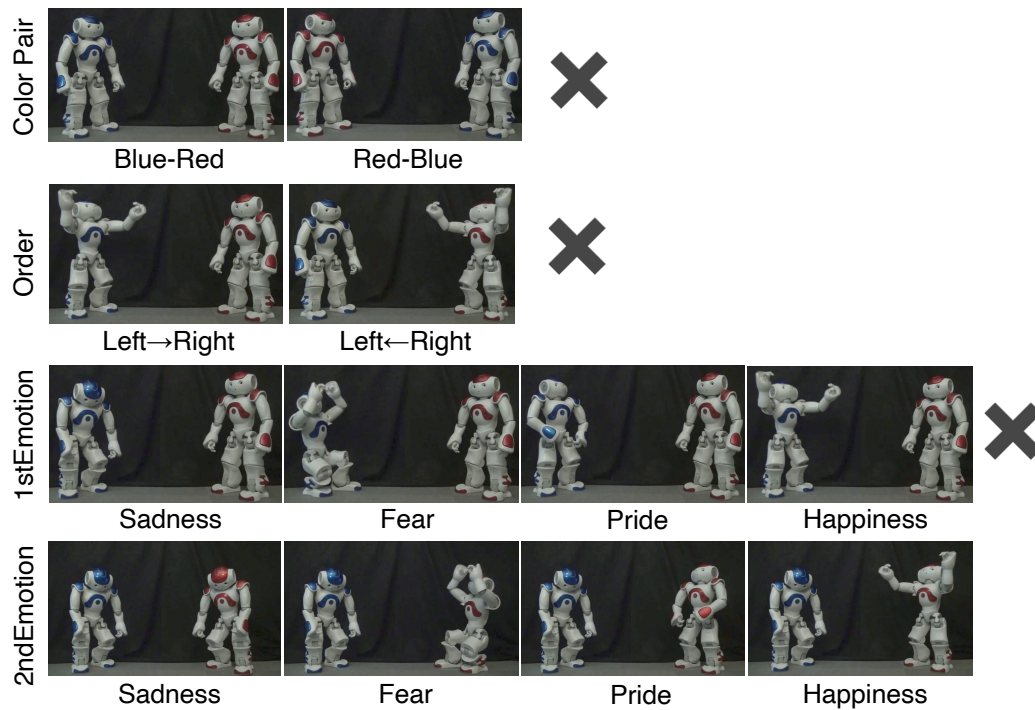


図 5.2: 2体のロボットによるインタラクション動画の生成

表 5.1: 事前検証タスクの人口統計 (N=100)

性別		年齢		ロボットの経験	
女性	37%	24 以下	3%	あり	49%
男性	62%	25-34	61%	なし	49%
その他	1%	35-44	24%	回答なし	2%
回答なし	0%	45-54	8%		
		55 以上	4%		
		回答なし	0%		

らそれぞれの動画のロボットが表現する感情に最も適したラベルを選択するように求められた。また、各動画を見た後に質問項目に回答し、動画は何度でも見る事が可能であった。さらに、提示された動画の順序と感情を表現するロボットの色はランダム化された。この事前検証タスクを完了するための平均時間は 10.7 分（最小：1.5 分，最大 29.7 分）であった。

実験結果より、それぞれの感情について左右で少なくとも 1 回は設計された感情と一致した回答数を集計した(表 5.2)。この場合において、チャンスレベルは  $0.438 (= 1 - (3/4 \times 3/4))$  であり、60 回（最も少なかった Pride の一致した回答数）以上一致して識別する割合は 0.438 の確率で 100 回行うベルヌーイ試行の成功する割合より有意に多い ( $p < .001$ )。そのため、本研究で実装したそれぞれの感情を表すジェスチャは、チャンスレベルを有意に超えて識別されたということが明らかになった。

表 5.2: 左右で少なくとも 1 回は設計した感情と一致して識別された割合

Sadness	Fear	Pride	Happiness
92%	61%	60%	75%

### 5.3 実験

本実験では、AMT 上での以前のタスク承認率が 95.0%以上のアメリカ在住の参加者 200 名が集められ、タスクを完遂した参加者には 14.00 ドルの報酬が支払われた。参加者は 2 体のロボットが表現するすべての感情の組み合わせについて全部で 16 本の動画を見た。さらに、「ロボットが互いに反応している」と指示され、左右それぞれのロボットと 2 体のロボット間の関係性に最も適した感情ラベルを 4 つの感情の中から選択するように求められた。これに加えて、エネルギーレベル（低：-3，高：3）とネガティブ・ポジティブレベル（ネガティブ：-3，ポジティブ：3）[59] を評価する 7 段階のスコアを選択するように求められた。これらのエネルギーレベルとネガティブ・ポジティブレベルのスコアを利用して、ラッセルの円環モデルにおける arousal（覚醒度）と valence（快・不快度）を分析した。参加者は各動画を見た後に質問項目に回答し、動画は何度でも見る事が可能であった。さらに、提示された動画の順序と感情を表現するロボットの色の組み合わせはランダム化された(図 5.2)。各動画の質問項目の順序は固定されていたが、動画内において最初に動くロボット（左または右）はランダム化した。

実験タスクを完了するための平均時間は 62.0 分（最小：7.1 分，最大 179.7 分）であり、AMT で行った事前検証タスクと本実験のタスクの両方に参加した参加者を削除した。さらに、四分位範囲 (IQR : Inter-Quartile Range) を用いて外れ値を削除した [76, 77]。具体



的には、タスクの完了時間が第3四分位数から  $1.5 \times \text{IQR}$  を超えた参加者は分析から除外され、最終的に 188 名の参加者が分析対象となった。分析対象の参加者の人口統計を表 5.3 に表す。

表 5.3: 実験タスクの人口統計 (N=188)

性別		年齢		ロボットの経験	
女性	38.3%	24 以下	2.7%	あり	36.2%
男性	60.6%	25-34	44.1%	なし	58.5%
その他	0.5%	35-44	32.4%	回答なし	5.3%
回答なし	0.5%	45-54	11.8%		
		55 以上	9.0%		
		回答なし	0%		

## 5.4 実験結果

ラッセルの円環モデルの各象限に基づいて設計された代表的な 4 つの感情を表現するジェスチャを複数ロボットのインタラクションに適用した場合の評価を収集し、個々のロボットにおける感情の知覚とそれらのロボット間の関係性に対する感情の知覚がどのように変化するか調査した。arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアの結果を図 5.3 および図 5.4 にそれぞれ示す。1stEmotion と 2ndEmotion は 2 体のロボットによって 1 回目および 2 回目に提示された感情を表しており、1stRobot と 2ndRobot はそれぞれ 1stEmotion と 2ndEmotion の感情を表現するロボットである。Relationship は 2 体のロボットの関係性を表している。実験結果の分析では、arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアに対して二元配置反復測定分散分析を適用した。

arousal (覚醒度) スコアについては主にモデルに基づいた以下の統計的に有意な大小関係が成り立つかどうか分析を行った。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Fear
- Pride < Happiness

同様に valence (快・不快度) スコアについては主に以下の統計的に有意な大小関係が成り立つかどうか分析を行った。

- Sadness < Happiness
- Sadness < Pride
- Fear < Happiness
- Fear < Pride

#### 5.4.1 arousal (覚醒度) スコア

arousal (覚醒度) スコアについて、二元配置反復測定分散分析の結果を表 5.4, 表 5.5 および表 5.6 に示す.

表 5.4: 1stRobot の arousal スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	136.088	.000 ***	.421
2ndEmotion	3.714	.012 *	.020
1stEmotion×2ndEmotion	1.321	.221 ns	.007

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

2ndRobot と Relationship において、1stEmotion と 2ndEmotion との間には有意な交互作用が確認された (表 5.5, 表 5.6). しかし、1stRobot では有意な交互作用は確認されなかった (表 5.4).

1stRobot の arousal (覚醒度) スコアに対する各因子の多重比較には Holm 補正による事後検定が行われた. その結果を表 5.7 にまとめる. 因子 1stEmotion においては以下の有意な差が確認された.

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Fear
- Pride < Happiness

さらに、因子 2ndEmotion の Sadness と Happiness との間に有意な差 (Sadness < Happiness) が確認された.

2ndRobot では、2ndEmotion が Fear 以外の場合における 1stEmotion の全ての要因で有意差が確認された. 2ndEmotion が Sadness, Pirde, Happiness のいずれかの場合、



図 5.3: arousal (覚醒度) スコアの結果 (上段: 2ndEmotion, 下段: 1stEmotion). エラーバーは標準誤差を表す.



図 5.4: valence (快・不快度) スコアの結果 (上段: 2ndEmotion, 下段: 1stEmotion) . エラーバーは標準誤差を表す.

表 5.5: 2ndRobot の arousal スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	4.549	.004 **	.024
2ndEmotion	114.313	.000 ***	.379
1stEmotion×2ndEmotion	3.227	.001 ***	.017

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.6: Relationship の arousal スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	87.989	.000 ***	.320
2ndEmotion	73.824	.000 ***	.283
1stEmotion×2ndEmotion	4.257	.000 ***	.022

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.7: 1stRobot の arousal スコアに対する各因子の多重比較結果

因子	比較	$t$	$p$	$r$
1stEmotion	Sadness < Fear	13.654	.000 ***	.707
	Sadness < Happiness	16.933	.000 ***	.778
	Fear > Pride	2.478	.014 *	.178
	Pride < Happiness	9.556	.000 ***	.573
2ndEmotion	Sadness < Happiness	3.096	.014 *	.221

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

1stEmotion の単純主効果分析の効果量 ( $\eta_p^2$ ) は 0.023 から 0.026 の範囲であった。一方で 1stEmotion が Sadness, Fear, Pride, Sadness のいずれかの場合, 2ndEmotion の単純主効果分析の効果量 ( $\eta_p^2$ ) は 0.256 から 0.321 の範囲であった。これらの結果より, 1stRobot が表す感情 (1stEmotion) は 2ndRobot の arousal (覚醒度) スコアにわずかに影響を与えることが明らかになった。2ndRobot の単純主効果分析における多重比較には Holm 補正による事後検証を行った。それらの結果を表 5.8 に示す。1stEmotion が Sadness または Happiness の場合, 2ndEmotion の多重比較結果から以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Fear
- Pride < Happiness

一方で, 1stEmotion が Fear または Pride の場合, 以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Happiness

Relationship では, 全ての要因で有意差が確認された。Relationship の単純主効果分析の多重比較には, Holm 補正による事後検証を行った。それらの結果を表 5.9 に示す。2ndEmotion の多重比較結果から, 1stEmotion が Sadness の場合, 以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Fear
- Pride < Happiness

一方で, 1stEmotion が Fear の場合, 以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness

表 5.8: 2ndRobot の arousal スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果

要因 (1stEmotion)	比較 (2ndEmotion)	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Sadness	Sadness < Fear	11.498	.000 ***	.644
	Sadness < Happiness	13.356	.000 ***	.699
	Fear > Pride	2.541	.012 *	.183
	Pride < Happiness	6.282	.000 ***	.417
Fear	Sadness < Fear	10.141	.000 ***	.596
	Sadness < Happiness	11.755	.000 ***	.652
	Pride < Happiness	3.562	.001 **	.252
Pride	Sadness < Fear	10.807	.000 ***	.620
	Sadness < Happiness	14.552	.000 ***	.729
	Pride < Happiness	6.697	.000 ***	.440
Happiness	Sadness < Fear	9.102	.000 ***	.554
	Sadness < Happiness	12.014	.000 ***	.660
	Fear > Pride	2.344	.020 *	.169
	Pride < Happiness	7.360	.000 ***	.474

\**p* < .05 \*\**p* < .01 \*\*\**p* < .001

これらを除く 1stEmotion と 2ndEmotion の全ての要因において、以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Fear
- Sadness < Happiness
- Pride < Happiness

しかし、1stEmotion の多重比較結果においては 2ndEmotion が Happiness の場合、Pride は Fear よりも arousal (覚醒度) スコアが有意に大きかった ( $t(187) = 2.137, p < .05, r = .154$ )。

#### 5.4.2 valence (快・不快度) スコア

valence (快・不快度) スコアについて、二元配置反復測定分散分析の結果を表 5.10, 表 5.11 および表 5.12 にそれぞれ示す。2ndRobot と Relationship において、1stEmotion と 2ndEmotion との間には有意な交互作用が確認された (表 5.11, 表 5.12)。しかし、1stRobot では有意な交互作用は確認されなかった (表 5.10)。1stRobot の valence (快・不快度) スコアに対する各因子の多重比較には Holm 補正による事後検定が行われた。その結果を表 5.13 に示す。

因子 1stEmotion においては以下の有意な差が確認された。

- Sadness < Pride
- Sadness < Happiness
- Fear < Pride
- Fear < Happiness

さらに、因子 2ndEmotion の Sadness と Happiness との間に有意な差 (Sadness < Happiness) が確認された。

2ndRobot では、1stEmotion と 2ndEmotion の全ての要因で有意な差が確認された。2ndEmotion が Sadness, Fear, Pride, Happiness のいずれかの場合、1stEmotion の単純主効果分析の効果量 ( $\eta_p^2$ ) は 0.014 から 0.035 の範囲であった。一方で 1stEmotion が Sadness, Fear, Pride, Sadness のいずれかの場合、2ndEmotion の単純主効果分析の効果量 ( $\eta_p^2$ ) は 0.286 から 0.325 の範囲であった。これらの結果より、1stRobot が表す感情 (1stEmotion) は 2ndRobot の valence (快・不快度) スコアにわずかに影響を与えること



表 5.9: Relationship の arousal スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果

要因		比較	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	
2ndEmotion	Sadness	Sadness < Fear	9.259	.000 ***	.561	
		Sadness < Happiness	12.238	.000 ***	.667	
		Pride < Happiness	4.311	.000 ***	.301	
	Fear	1stEmotion	Sadness < Fear	5.986	.000 ***	.401
			Sadness < Happiness	6.830	.000 ***	.447
			Pride < Happiness	2.967	.010 *	.212
	Pride	Sadness < Fear	6.884	.000 ***	.450	
		Sadness < Happiness	9.798	.000 ***	.582	
		Pride < Happiness	2.696	.015 *	.193	
	Happiness	Sadness < Fear	5.252	.000 ***	.359	
		Sadness < Happiness	11.075	.000 ***	.629	
		Fear < Pride	2.137	.034 *	.154	
Pride < Happiness		3.860	.000 ***	.272		
1stEmotion	Sadness	Sadness < Fear	9.803	.000 ***	.583	
		Sadness < Happiness	9.575	.000 ***	.574	
		Fear > Pride	2.555	.023 *	.184	
		Pride < Happiness	3.439	.002 **	.244	
	Fear	2ndEmotion	Sadness < Fear	6.130	.000 ***	.409
			Sadness < Happiness	6.189	.000 ***	.412
	Pride	Sadness < Fear	6.948	.000 ***	.453	
		Sadness < Happiness	9.058	.000 ***	.552	
		Pride < Happiness	2.627	.019 *	.189	
	Happiness	Sadness < Fear	4.855	.000 ***	.335	
		Sadness < Happiness	9.474	.000 ***	.570	
		Pride < Happiness	3.959	.000 ***	.278	

\**p* < .05 \*\**p* < .01 \*\*\**p* < .001

表 5.10: 1stRobot の valence スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	138.795	.000 ***	.426
2ndEmotion	3.559	.014 *	.019
1stEmotion×2ndEmotion	1.253	.258 ns	.007

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.11: 2ndRobot の valence スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	6.989	.000 ***	.036
2ndEmotion	113.353	.000 ***	.377
1stEmotion×2ndEmotion	4.335	.000 ***	.023

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.12: Relationship の valence スコアに対する分散分析の結果

要因	$F$	$p$	$\eta_p^2$
1stEmotion	104.401	.000 ***	.358
2ndEmotion	94.689	.000 ***	.336
1stEmotion×2ndEmotion	9.880	.000 ***	.050

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.13: 1stRobot の valence スコアに対する各因子の多重比較結果

因子	比較	$t$	$p$	$r$
1stEmotion	Sadness < Pride	15.693	.000 ***	.754
	Sadness < Happiness	17.330	.000 ***	.785
	Fear < Pride	6.628	.000 ***	.436
	Fear < Happiness	10.135	.000 ***	.595
2ndEmotion	Sadness < Happiness	3.054	.016 *	.218

\* $p < .05$  \*\* $p < .01$  \*\*\* $p < .001$

表 5.14: 2ndRobot の valence スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果

要因 (1stEmotion)	比較 (2ndEmotion)	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Sadness	Sadness < Pride	12.299	.000 ***	.669
	Sadness < Happiness	14.412	.000 ***	.725
	Fear < Pride	3.500	.001 ***	.248
	Fear < Happiness	6.560	.000 ***	.433
Fear	Sadness < Pride	12.990	.000 ***	.689
	Sadness < Happiness	12.662	.000 ***	.679
	Fear < Pride	5.329	.000 ***	.363
	Fear < Happiness	6.230	.000 ***	.415
Pride	Sadness < Pride	12.443	.000 ***	.673
	Sadness < Happiness	13.818	.000 ***	.711
	Fear < Pride	7.184	.000 ***	.465
	Fear < Happiness	9.247	.000 ***	.560
Happiness	Sadness < Pride	10.678	.000 ***	.615
	Sadness < Happiness	13.574	.000 ***	.704
	Fear < Pride	4.639	.000 ***	.321
	Fear < Happiness	8.599	.000 ***	.532

\**p* < .05 \*\**p* < .01 \*\*\**p* < .001

が明らかになった。2ndRobot の単純主効果分析における多重比較には Holm 補正による事後検証を行った。それらの結果を表 5.14 に示す。

2ndEmotion の多重比較結果から以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Pride
- Sadness < Happiness
- Fear < Pride
- Fear < Happiness

Relationship では、全ての要因で有意差が確認された。Relationship の単純主効果分析の多重比較には、Holm 補正による事後検証を行った。それらの結果を表 5.15 に示す。

1stEmotion の多重比較結果から、2ndEmotion が Sadness または Fear の場合、以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Pride

- Sadness < Happiness
- Fear < Happiness

一方で、2ndEmotion の多重比較結果から、1stEmotion が Fear の場合、以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Pride
- Sadness < Happiness
- Fear < Happiness

これらを除く 1stEmotion と 2ndEmotion の全ての要因において、以下の統計的な有意差が確認された。

- Sadness < Pride
- Sadness < Happiness
- Fear < Pride
- Fear < Happiness

### 5.4.3 実験結果のまとめ

1stRobot によって表現されたそれぞれの感情間の有意な差は arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアの両方でよく知覚されており、モデル上での大小関係に従う結果が確認された。2ndRobot では、1stEmotion と 2ndEmotion との間において arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアの両方に有意な交互作用が確認された。この結果より、valence (快・不快度) スコアにおいて 2ndRobot が表現する感情間の有意な差がよく知覚されており、モデル上での大小関係に従う結果が確認された。また、arousal (覚醒度) スコアにおいては 1stRobot が Sadness または Happiness を表現した場合、2ndRobot が表現する感情間の有意な差がよく知覚されることが確認された。しかし、1stRobot が Fear または Pride を表現した場合、2ndRobot が表現した Fear と Pride の間には有意な差は確認されなかった。また、ロボットの arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアはもう一方のロボットの感情表現にわずかに影響を受けることが明らかになった。

Relationship における感情ラベリングの結果を表 5.16 に示す。さらに、Relationship の arousal (覚醒度) スコアと valence (快・不快度) スコアにおける平均値の散布図と交互作用プロットをそれぞれ図 5.5、図 5.6 に示す。

表 5.15: Relationship の valence スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果

要因		比較	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	
2ndEmotion	Sadness	Sadness < Pride	7.624	.000 ***	.487	
		Sadness < Happiness	11.928	.000 ***	.657	
		Fear < Happiness	5.359	.000 ***	.365	
	Fear	Sadness < Pride	4.939	.000 ***	.340	
		Sadness < Happiness	8.304	.000 ***	.519	
		Fear < Happiness	4.528	.000 ***	.314	
	Pride	1stEmotion	Sadness < Pride	10.904	.000 ***	.623
			Sadness < Happiness	11.202	.000 ***	.634
			Fear < Pride	6.363	.000 ***	.422
			Fear < Happiness	6.848	.000 ***	.448
	Happiness	1stEmotion	Sadness < Pride	8.576	.000 ***	.531
			Sadness < Happiness	12.809	.000 ***	.684
Fear < Pride			5.643	.000 ***	.381	
Fear < Happiness			9.599	.000 ***	.575	
1stEmotion	Sadness	2ndEmotion	Sadness < Pride	8.031	.000 ***	.506
			Sadness < Happiness	9.663	.000 ***	.577
			Fear < Pride	2.367	.021 *	.171
			Fear < Happiness	4.781	.000 ***	.330
	Fear	2ndEmotion	Sadness < Pride	4.378	.000 ***	.305
			Sadness < Happiness	6.113	.000 ***	.408
			Fear < Happiness	3.753	.001 ***	.265
	Pride	2ndEmotion	Sadness < Pride	10.937	.000 ***	.625
			Sadness < Happiness	10.407	.000 ***	.606
			Fear < Pride	7.389	.000 ***	.475
			Fear < Happiness	7.582	.000 ***	.485
	Happiness	2ndEmotion	Sadness < Pride	8.420	.000 ***	.524
Sadness < Happiness			11.535	.000 ***	.645	
Fear < Pride			4.883	.000 ***	.336	
Fear < Happiness			8.898	.000 ***	.545	

\**p* < .05 \*\**p* < .01 \*\*\**p* < .001

表 5.16: Relationship の感情ラベリングの結果 (S, F, P, H はそれぞれ Sadness, Fear, Pride, Happiness を表す.)

1stEmotion	2ndEmotion			
	Sadness	Fear	Pride	Happiness
Sadness	S 83.5%	S 39.4%	S 55.3%	S 41.0%
	F 5.9%	F 30.3%	F 14.4%	F 14.4%
	P 8.5%	P 18.1%	P 25.0%	P 26.1%
	H 2.1%	H 12.2%	H 5.3%	H 18.6%
Fear	S 42.0%	S 4.3%	S 6.9%	S 10.6%
	F 27.1%	F 51.1%	F 42.0%	F 33.5%
	P 17.0%	P 18.1%	P 27.7%	P 20.7%
	H 13.8%	H 26.6%	H 23.4%	H 35.1%
Pride	S 45.2%	S 8.0%	S 6.9%	S 6.4%
	F 17.6%	F 44.7%	F 16.5%	F 16.0%
	P 26.1%	P 26.6%	P 61.2%	P 29.8%
	H 11.2%	H 20.7%	H 15.4%	H 47.9%
Happiness	S 36.7%	S 8.0%	S 6.9%	S 6.9%
	F 11.7%	F 34.6%	F 12.2%	F 4.8%
	P 30.9%	P 21.8%	P 30.9%	P 22.3%
	H 20.7%	H 35.6%	H 50.0%	H 66.0%

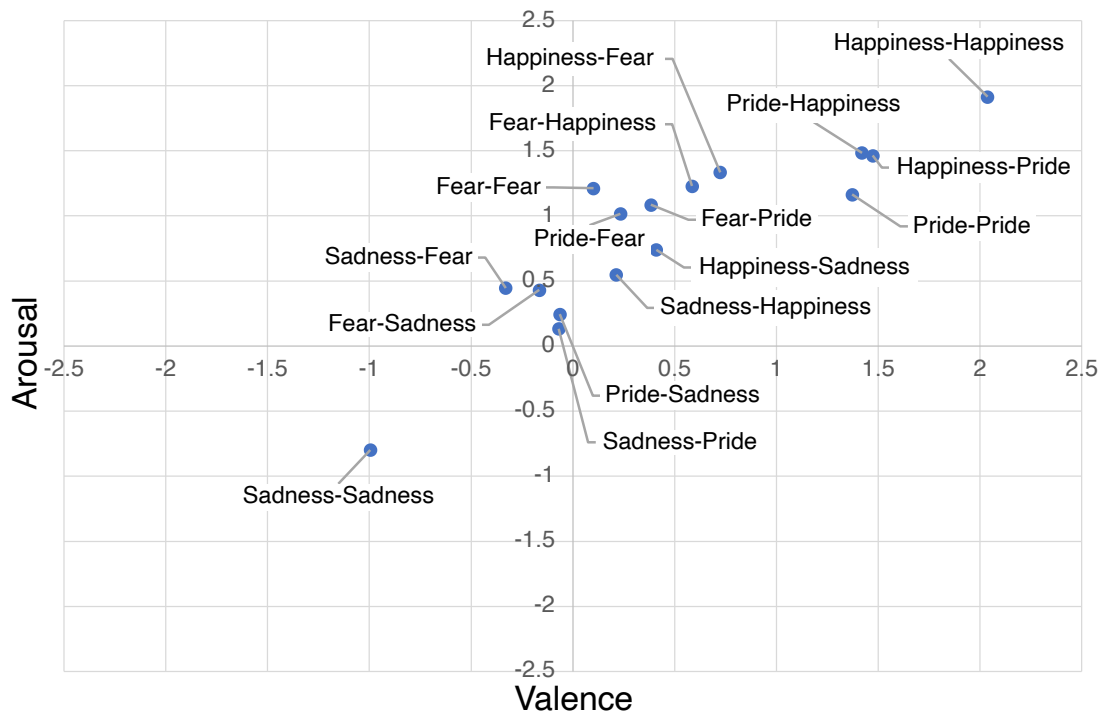


図 5.5: Relationship の arousal スコアと valence スコアの平均値の散布図 (1stEmotion-2ndEmotion)

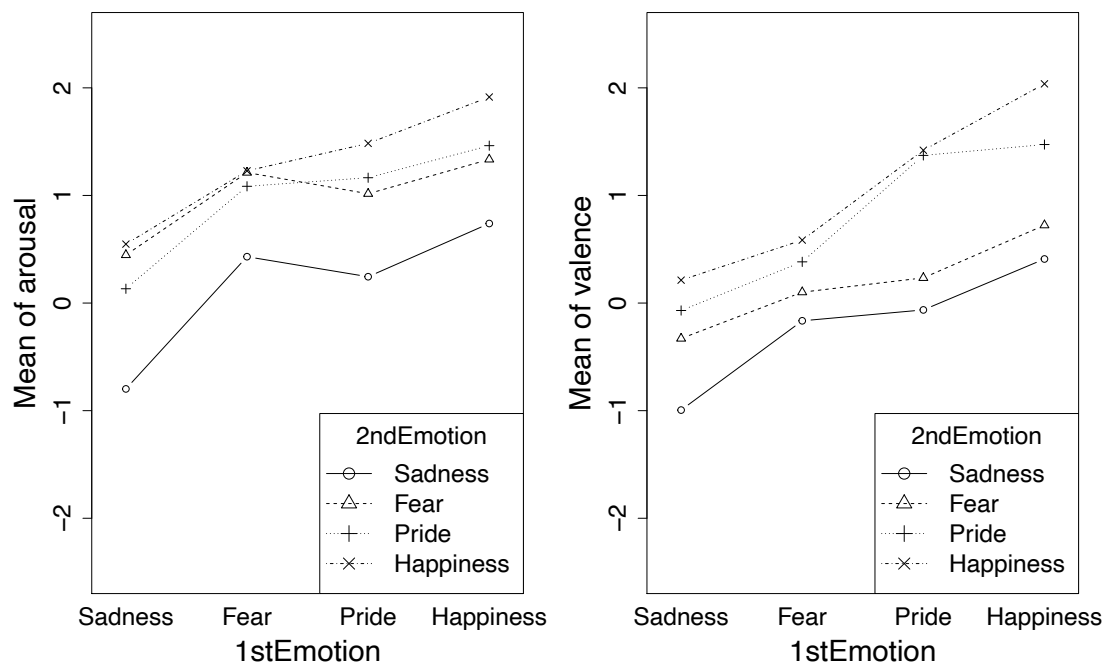


図 5.6: arousal スコア (左図) と valence スコア (右図) の交互作用プロット

Relationship では、1stEmotion と 2ndEmotion との間において arousal（覚醒度）スコアと valence（快・不快度）スコアの両方に有意な交互作用が確認された。結果より、2体のロボット間の関係性における arousal（覚醒度）スコアと valence（快・不快度）スコアの両方とも個々のロボットの感情を表す動作に影響を受けており、モデル上での大小関係について感情間の有意な差が比較的良く知覚された。しかし、arousal（覚醒度）スコアではほとんどの感情の組み合わせで Fear と Pride の間に統計的な有意差は確認されなかった。また、valence（快・不快度）スコアでもいくつかの組み合わせにおいては Fear と Pride の間に統計的な有意差は確認されなかった。

## 5.5 感情設計を容易にする評価モデル

従来の研究において設計した感情の評価には本研究と同様にラベリングとラッセルの円環モデルを用いることがほとんどであった。しかし、これらの評価方法を用いて感情の設計段階で探索的に効果的な感情表出方法を調査することは困難である。Geneva Emotion Wheel（図 5.7）[78] はラッセルの円環モデルと同様に円環モデルの一つであるが、HRI 用に拡張されたモデル [79]（GEW）とツール<sup>1</sup>を用いることで視覚的かつ統計的に感情の評価を行うことができ、探索的な感情設計が可能となる。

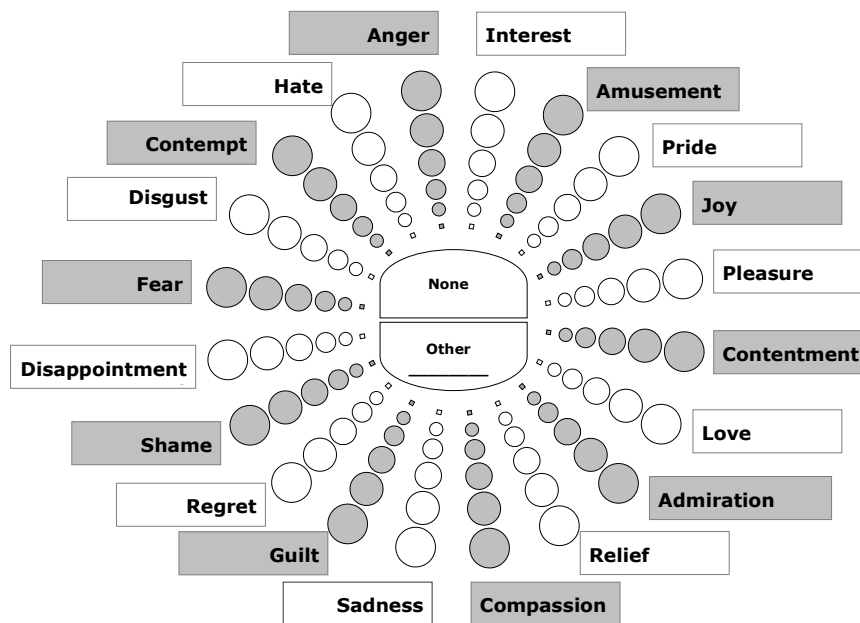


図 5.7: Geneva Emotion Wheel version 3.0 ([78] より引用し抜粋)

<sup>1</sup><https://github.com/adamcoyne/gew-tools>



### 5.5.1 追加検証実験

本研究で参考にした Beck らの研究 [59] における 6 つの感情 (Anger, Fear, Sadness, Excitement, Happiness, Pride) を表現するキーポーズから短いジェスチャ (図 5.8) をロボット (Nao V6) に実装し, GEW モデルを用いて評価するオンラインの調査実験を行った. また, 各動作の頭の位置は以下のように変更した.

- Sadness : 下げる
- Excitement, Pride, Happiness : 上げる
- Anger, Fear : 変更しない

ロボットの各動作は 1 秒で完了するように実装され, 動作が完了した状態の静止画を 1 秒追加して合計で 2 秒の動画を作成した. 実験の手順や参加者への説明, 人口統計で取得した情報は事前検証と同じである. 参加者の人口統計を表 5.17 に示す.

表 5.17: 追加検証タスクの人口統計 (N=100)

	性別	年齢	ロボットの経験		
女性	49%	24 以下	4%	あり	55%
男性	51%	25-34	4%	なし	45%
その他	0%	35-44	27%	回答なし	0%
回答なし	0%	45-54	20%		
		55 以上	6%		
		回答なし	0%		

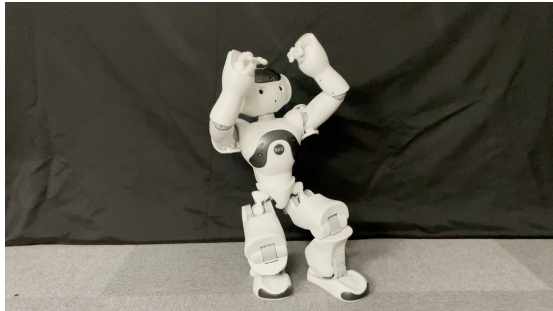
AMT 上で集められた参加者はロボットのそれぞれの短い動きの動画を見た後に, 最も合う GEW 上の感情 (図 5.7) およびその強さを 1 から 5 の 5 段階 (5 が最も強い) で選択した. GEW のどの感情にも合わない場合には, 「その他」を選択しテキストボックスに感情を入力するように説明を記載した. この追加検証タスクを完了するための平均時間は 12.5 分 (最小 : 2.1 分, 最大 29.1 分) であった.

### 5.5.2 実験結果

実験結果をヒートマップで視覚的に図示したものを図 5.9 に示す. この結果より, Sadness と Fear を比較すると, Sadness は全ての感情の中でも明瞭に識別されていることがわかるが, Fear の評価は Joy と Fear に分散している. この Joy は円環モデル上ではポジティブ



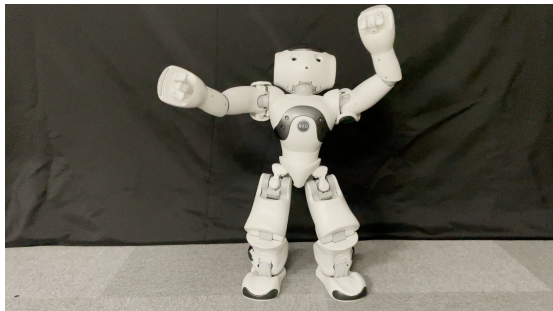
Anger



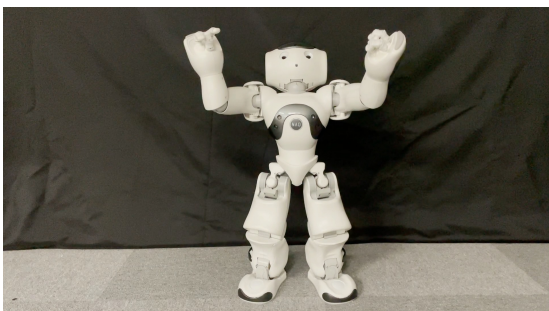
Fear



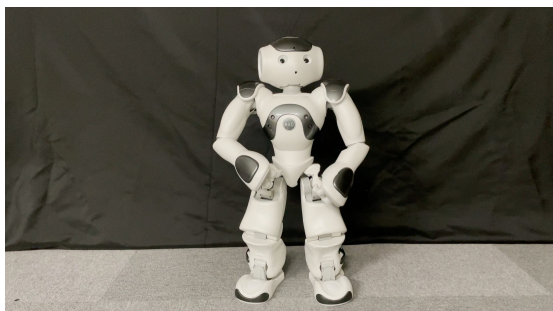
Sadness



Excitement



Happiness



Pride

図 5.8: 実装した6つの感情を表すジェスチャ

な感情として位置付けられているため、ラッセルの円環モデルの valence 軸においてより明瞭に識別されるネガティブな感情を設計する必要があることがわかる。

さらに、ツールによって算出された結果を表 5.18 に示す。ここで、 $n_e$  は GEW 上の感情を選択した人数であり、参加者が「その他」を選択した場合にはこの人数には含まれない。 $\theta_e, I_e, V_e^e$  および推定ラベルはそれぞれラジアン平均、強さの平均、重み付き分散およびツールによって算出された感情の推定ラベルを表す。算出された Fear の分散 ( $V_e^e = 4.24$ ) と Sadness の分散 ( $V_e^e = 2.80$ ) に対して F 検定を適用した結果、統計的に有意な差が確認された ( $F(196, 200) = 1.52, p < .01$ )。この結果より、単体ロボットのジェスチャによって表現された Fear は Sadness と比べてより曖昧な感情として識別されたことが確認された。これらのように視覚的かつ統計的に探索、評価することができるモデルを用いて感情設計を行うことも有用である。

表 5.18: ツールによって算出された結果

感情	$n_e$	$\theta_e$	推定ラベル	$I_e$	$V_e^e$
Anger	97	1.49	Interest	1.26	3.86
Fear	98	2.52	Contempt	1.00	4.24
Sadness	100	4.38	Guilt	2.59	2.80
Excitement	99	1.89	Anger	0.89	4.27
Happiness	100	0.84	Pride	0.79	4.35
Pride	99	1.56	Interest	1.30	3.84

## 5.6 考察

本研究では先行研究で提案されたキーポーズから 4 つの感情を表すジェスチャを実装した。これらの動きを利用することで、複数ロボットによる感情表現の組み合わせが可能となる。評価実験の結果より、Pride は覚醒度の高い感情として知覚された。これについては、Beck らの研究における議論 [60] と同様に、Pride に変わる覚醒度の低いポジティブな感情を設計する必要がある。ロボットの LED の色で表現できる Relaxed[45] はその代替感情の候補の 1 つであるが、ロボットのジェスチャのみでこの感情を表現することは難しい可能性がある [80]。Fear に関しては、覚醒度の高い感情としてはよく機能したが、よりネガティブな表現をする代替感情を考慮することで他の感情との違いがより明確に知覚される可能性がある (図 5.5)。また、Sadness は覚醒度の低いネガティブな感情として良く機能し、Happiness は覚醒度の高いポジティブな感情として良く機能することが明らかになった。

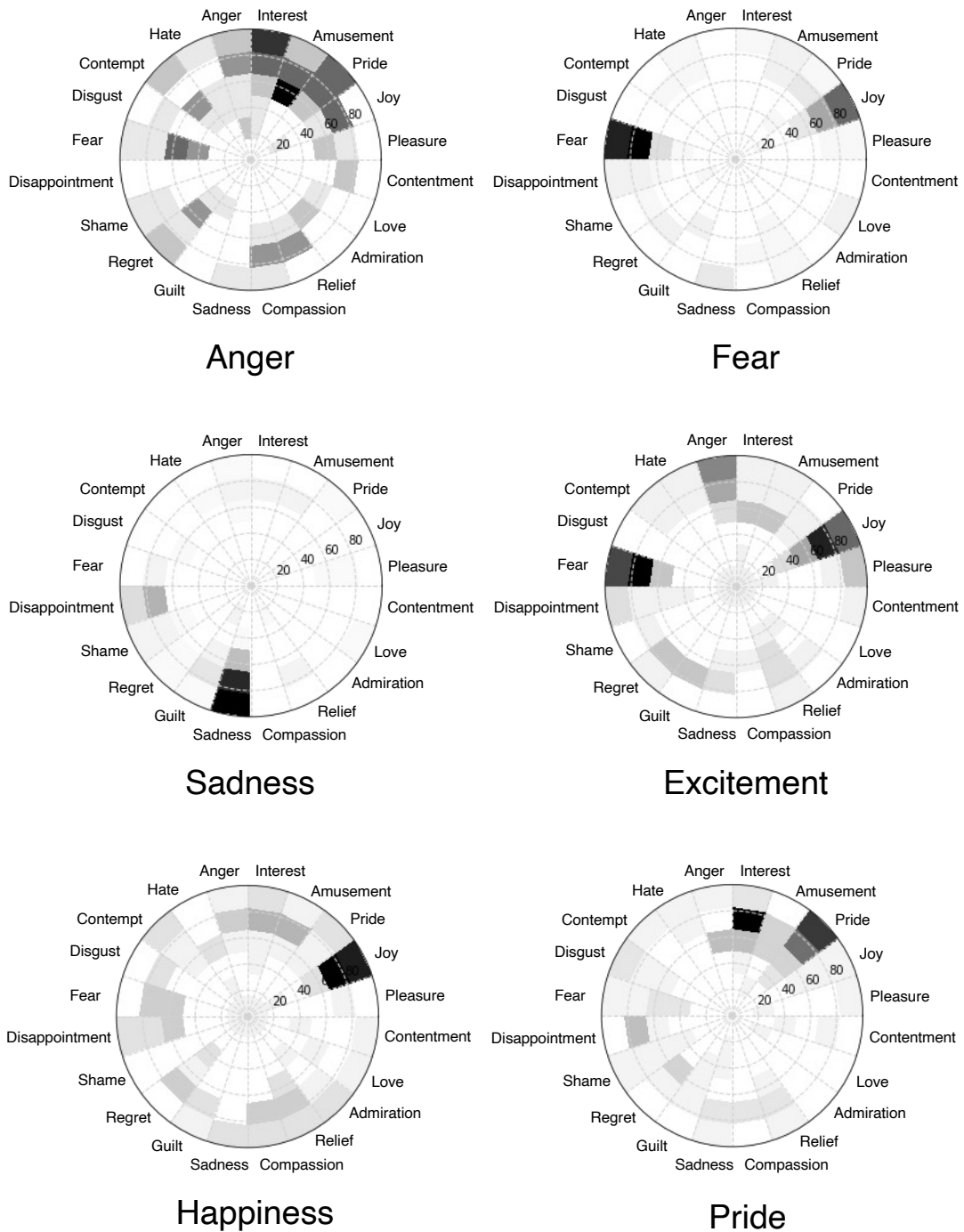


図 5.9: Geneva Emotion Wheel による感情評価結果のヒートマップ (N=100)

本研究におけるロボットのジェスチャは1秒で完了するように設計されたが、動作速度や加速度についても考慮する必要がある [43, 44]. 例えば, Fear は Sadness よりも可動域が広いので、1秒で最終的なポーズに遷移する場合に Fear は Sadness よりも速い動きとなるが、本研究ではこの違いを考慮しなかった. さらに、ロボット間の関係性の感情ラベリングについては、各ロボットが異なる感情を表現する場合、ラベリング結果が分かれるため、ラベリングのみで関係性を解釈することは困難である (表 5.16). そのため、valence (快・不快度) と arousal (覚醒度) で表現されるラッセルの円環モデルを用いることによって詳細な分析が可能となる (図 5.5, 図 5.6). 実験結果より、2体のロボットのどちらかが Happiness を表現した場合よりも両方のロボットが Happiness を表現した場合の方が、よりポジティブな関係性として知覚された. さらに、2体のロボットが Sadness を表現した場合には、最初に動作したロボットが Sadness を表現し次に動作したロボットが Fear または Happiness を表現した場合よりも覚醒度が低い関係性として知覚された. これらの組み合わせの比較は、ラッセルの円環モデル上での大小関係に従ってそれらの関係性が知覚されていることを示している. また、Pride が Fear よりも覚醒度の高い感情として知覚された以外には想定外の結果は得られなかったため、個々のロボットの感情表現を適切に設計することでそれらを利用した関係性の構築もモデルに従う可能性があるということが示唆された.

個々のロボットの感情がロボット間の関係性の arousal (覚醒度) と valence (快・不快度) に影響を与えるという結果は、複数ロボットのインタラクションによって構築される関係性の設計に関する基礎的な知見を提供するものである. 実験では2体のロボットによる短時間のインタラクションのみが評価されたため、より長期間のインタラクションや特定のコンテキストにおいても追加調査が必要である. また、集団内のロボットの数も重要な変数である.

本研究で採用したロボットのジェスチャは感情を効果的に表現し、2体のロボット間に感情的な関係性を構築する方法として有効であった. ロボットが発する LED の色や人工音は、それらの感情の知覚を補強する可能性があるが、複数のモダリティを用いた感情設計は慎重に検討する必要がある. 特に複数ロボット間の関係性については追加調査が必要であるが、本研究で用いた円環モデルによる評価を行うことで、より多様な関係性を構築できる可能性がある. また、本研究はオンラインの評価実験であったため、実験室実験やフィールド実験など実際のロボットが存在する環境で調査を行う必要がある.

## 5.7 まとめ

本研究では、ラッセルの円環モデルに基づく代表的な4つの感情を、体の動きを用いて実装した. さらに、複数ロボットのインタラクションにおいて、感情の組み合わせによってロ

ロボット間の感情的な関係性の評価がどのように変化するかを調査した。その結果、valence（快・不快度）と arousal（覚醒度）で評価する2次元モデルは、複数ロボット間の関係性がどのように知覚されたかを解釈するのに有効であることが確認された。例えば、設計者がよりポジティブな関係性を表現したい場合、それぞれのロボットにポジティブな感情を表現させれば良く、より覚醒した関係性を表現したい場合、それぞれのロボットに覚醒度の高い感情を表現させれば良い。特に覚醒度の低いネガティブな感情である Sadness と覚醒度の高いポジティブな感情である Happiness は関係性構築において非常に効果的である。今後は、特に覚醒度の高いネガティブな感情や覚醒度の低いポジティブな感情について、それぞれ本研究で調査した Fear や Pride 以外の感情についても調査する必要がある。本研究で得られた感情の観点から見たロボット間の関係性に関する知見はさまざまな関係性を構築する過程において重要な結果であり、今後は複数のロボットが感情表現を調整してより印象的な体験を人々に提供することで様々な影響を与える可能性がある。

複数ロボットによる感情表出とそれらの関係性についてはこれまで考慮されていなかったが、ロボットの集団における関係性を人間が知覚することで、単体のロボットよりも強力で多様な心理的空間を創発し、人間の集団において確認されているような社会的な影響を与える可能性がある。

## 第6章 異なる複数ロボットのインタラクションを実現するシステム

第4章と第5章における複数ロボットを制御するためのシステムの構築には、ロボット専用の開発ツールを用いて行った。このような専用ツールは容易かつ迅速なロボットシステムの構築を可能にする。しかし、さまざまな異なるアーキテクチャを持つロボットを複数用いる場合には、それぞれのロボット専用のツールを使用してシステムを構築すると、それらのロボットを相互に接続して制御することが困難になる。また、同じロボットを用いた場合でも、単体ロボットの利用を想定している専用ツールの機能を用いてロボットの発話の順番やタイミングといった制御を行うことは、会話シナリオの種類や発話数が増えていくに従って困難になる。これらの課題を解決するために本章では、第3章でも用いたROSによるシステムの構築とシナリオ設計を容易にするためのインタフェースについて提案を行う [81]。

### 6.1 ROSによるシステム構築

個々のロボットがROSフレームワークを用いることによって、同じネットワーク内で相互に接続可能なシステムを構築することができる。それぞれのロボットアプリケーション構築に使用できるプログラミング言語の差異はあるが、ロボットやセンサを同じネットワーク内で接続するという部分に関しては言語ごとに実装されているライブラリを用いることでROSの通信に基づいてシステムを構築することができる。そのため、複数ロボットを用いた場合でも個々のロボットにおける発話やモーションなどの調整やセンサを利用したシステム構築に注力しながら、複数ロボットが連携するアプリケーションを作成することができる。

ロボットどうしの会話を実現する方法は、それぞれのロボットにおいてROSを利用したアプリケーションを作成し、ROSのマスタが動作するGUI (Graphical User Interface) 機能を持つシナリオ作成用のアプリケーションに接続する。シナリオ作成用のアプリケーションでは発話内容やタイミングなどを指定し、ROSの通信を用いてロボットに送信する (図 6.1)。また、発話が終了したことをロボットアプリケーションからシナリオ作成用のアプリケーションに通知することで、複数ロボットの発話する順番を適切に制御する

ことができる。第4章でロボットに実装した発話の重なりは、一方のロボットの発話終了通知を待たずに、一定の待機時間を置いてもう一方のロボットに次の発話命令を送信することで実現することができる。異なるアーキテクチャのロボットを用いる場合には、ソフトウェアやハードウェアの差異により厳密な制御は困難であるが、GUIアプリケーションとROSの通信を組み合わせることによって容易に会話設計が可能となる。

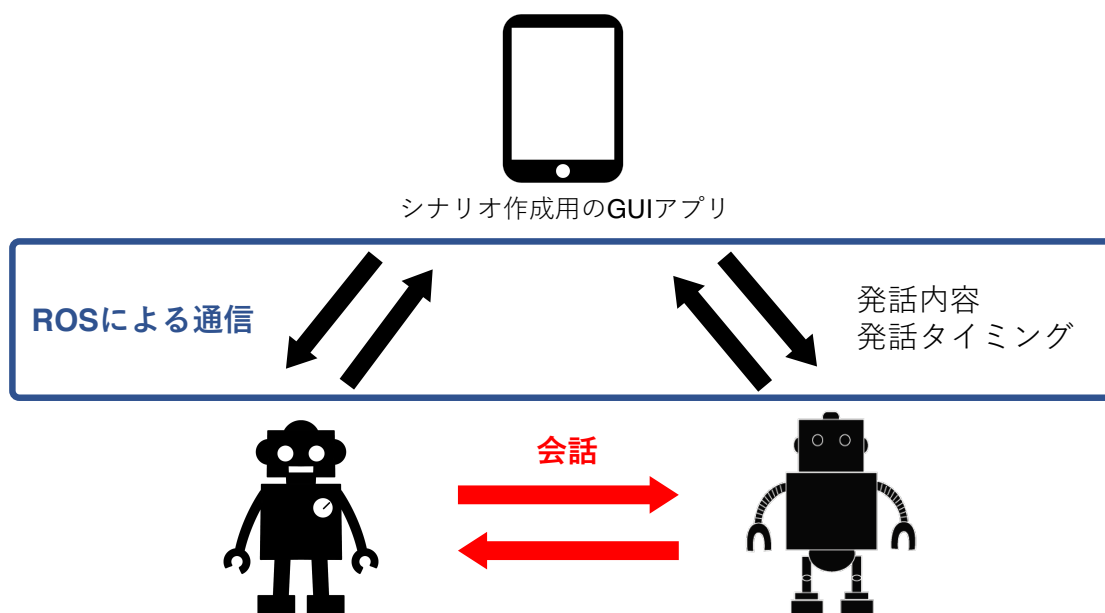


図 6.1: GUI アプリと ROS の通信によってロボットどうしの会話を実現するシステム

## 6.2 会話設計を容易にするためのインタフェース

第4章で使用したロボットの Pepper と第5章で使用したロボットの Nao において、システムの構築に用いた専用ツールである Choregraphe では、発話やモーションをブロック単位で作成し、それらの制御ブロックの入力または出力を繋ぎ合わせることで一連の発話や動作などを生成する (図 6.2)。また、他のロボット製品においても同様に開発用の GUI ツールが提供されており、ロボットアプリケーション開発が容易にできる (図 6.3, 図 6.4)。このようなインタフェースは単体での利用を前提としているため、複数ロボットを利用したシナリオを作成し、それらの発話の順番やタイミングを制御することは困難である。この課題を解決するインタフェースとして、それぞれのロボットごとに発話と動作を設定する制御ブロックを生成し、それらのブロックをメッセージングアプリのチャットにおける会話インタフェースと組み合わせることで、容易にシナリオ設計ができるインタフェースを構築した (図 6.5)。このインタフェースにより、利用するロボットの台数



が増えても、それぞれの順番や個々のロボットの発話内容、モーションなどの設計と会話シナリオの管理が容易にできる。

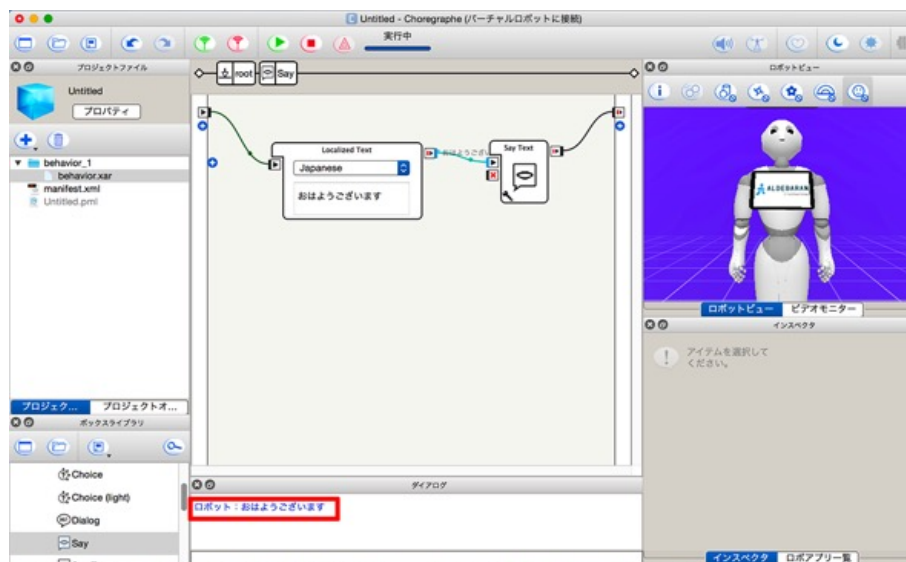


図 6.2: Choregraphe ([82] より引用し抜粋)

### 6.3 異なる複数ロボットの応用例

異なるアーキテクチャのロボットを複数用いることによってロボットどうしの会話を実現し、商品の情報などを会話に入れ込むことで周囲の人に自然に情報を伝えるといったような応用例が考えられる [85]。特にロボットを配置するためのスペースが限られる場合には、テーブルトップ型の小型ロボットと人と同程度の大きさを持つロボットといったように状況に合わせて利用するロボットを選択しそれらの会話を実現することができる (図 6.6)。

これまでのロボットの利用方法や研究においては単体のロボットを用いて情報提供などのタスクを行うことが多かった。しかし、複数ロボットを用いることによって情報提供タスクを行いながら、第 4 章で調査したロボットの集団における心理的空間を作り出して人の動線を制御するような社会的な影響を与える可能性がある。また、第 5 章で調査した感情表出によってロボット間の感情的な関係性を構築し、それらを知覚することにより社会的な空間を形成して影響を与える可能性もある。さらに、異なるロボットどうしを接続することで、様々なロボットが存在する環境においてもシームレスに個々のロボットだけでなく集団による人とのインタラクションの機会を生み出すことで、ロボットの社会的な役割を強化することが可能となる。

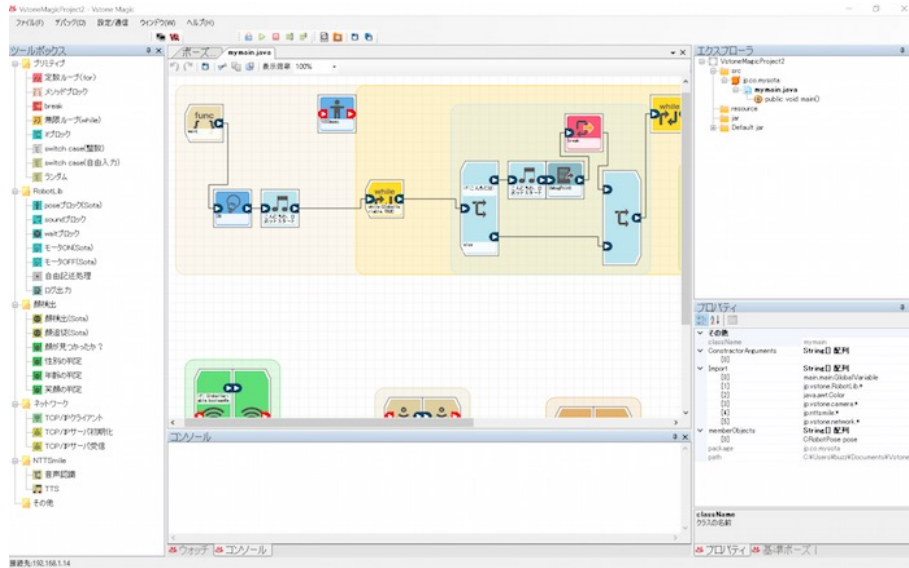


図 6.3: VstoneMagic ([83] より引用し抜粋)

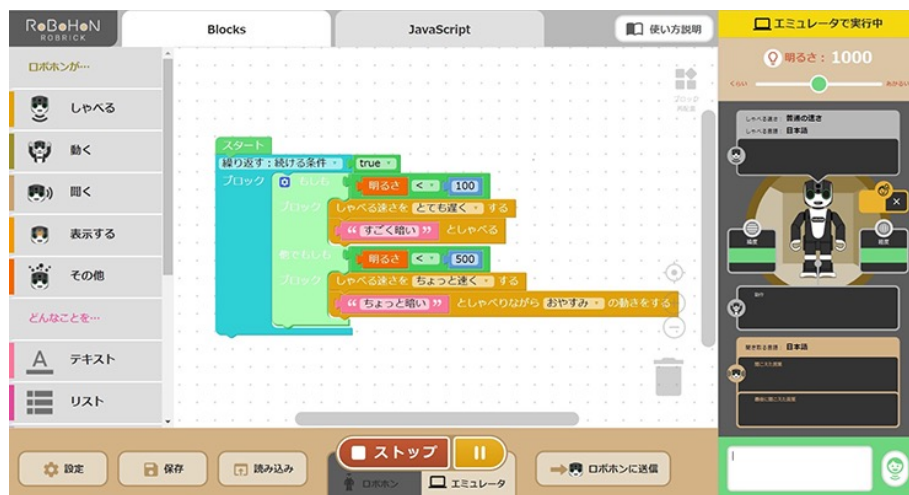


図 6.4: ロブリック ([84] より引用し抜粋)

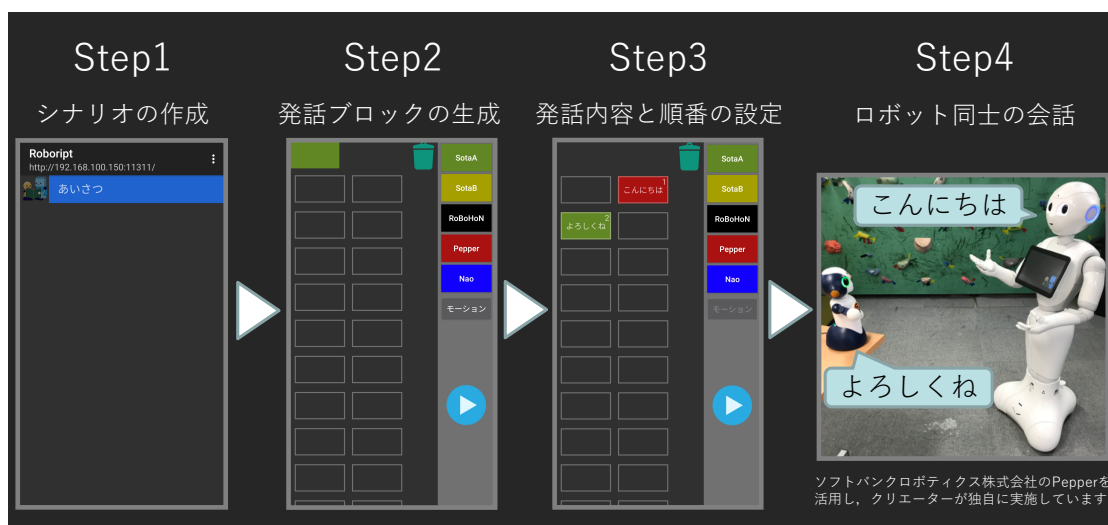


図 6.5: 開発したインタフェースと会話シナリオ作成のイメージ

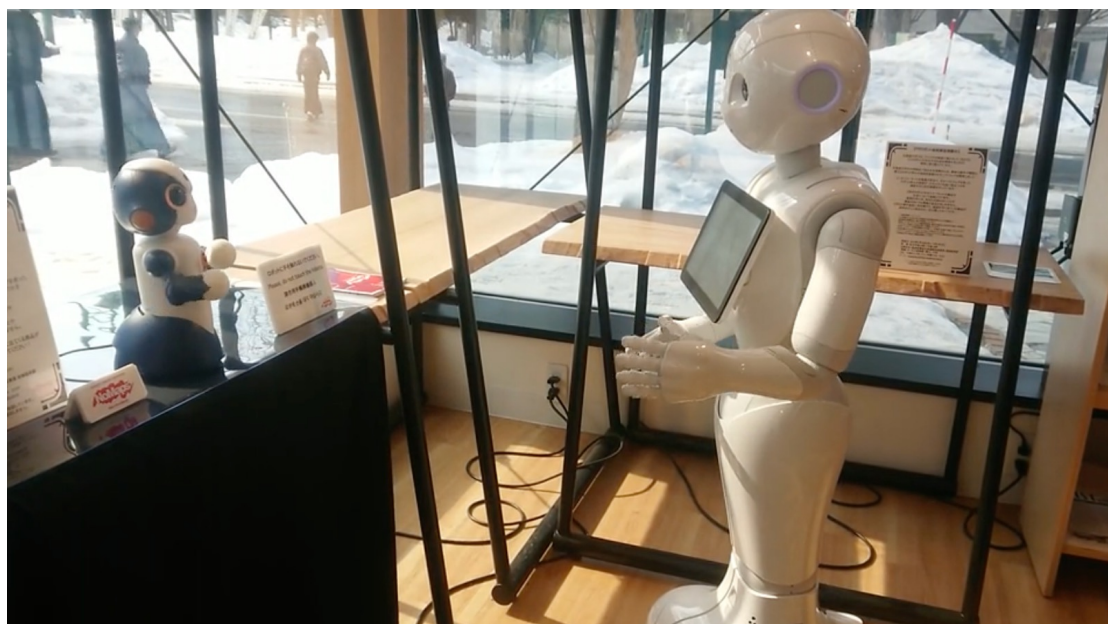


図 6.6: 異なる複数ロボットどうしの会話によって商品 PR を行った例 ([86] より引用し抜粋)

## 第7章 おわりに

### 7.1 本論文のロボットシステムの制約

第3章の自律移動ロボットによる注意アプローチのフィールド実験において、注意する対象者はシステムのオペレータが決定した。また、第4章、第5章、第6章の複数ロボットにおいては会話シナリオと使用するロボットは実験者およびシステムの利用者が決定する必要があった。

第3章および第6章でROS (ROS1) により構築したロボットシステムはマスタ・スレーブ方式であるため、マスタの役割を果たすコンピュータが必要となる。そのため、このコンピュータが何らかの理由で停止すると全ての接続されたセンサおよびロボットは再接続する必要がある。この時、ROS を利用した通信が利用できなくなるため、ロボットどうしで情報をやり取りすることが不可能になる。特に異なるロボットどうしを接続する場合には再接続や通信遮断時の処理を実装するコストは大きくなる。この解決策として、多数のセンサやロボットを利用する状況においてはROS の新しいバージョンであるROS2 を利用することが考えられる。ROS2 は複数ロボットを利用することを前提としたフレームワークとなっており、マスタを動作させるコンピュータを必要としないため、ROS1 を利用したシステムの課題を解決できる。ROS2 はROS1 と比べて歴史が浅く、これを利用したソフトウェアやライブラリは少ないものの、ROS1 とのブリッジ機能が提供されているため、ROS1 のソフトウェア資産を活用しながらシステム構築も可能である。

公共空間において複雑なロボットシステムを人間のタスクの一部として制御することは困難である。将来的には警備ロボットのように状況の認識や移動を含めて全て自動でタスクを行うようになる可能性があるが、コミュニケーションロボットのように人に対して高度な社会的タスクを行う場合には全て自動で行うことは難しい。そのため、ロボットが人間の代わりに社会的な役割を担うためにシステムの全てを自動化するのではなく、人間が状況を柔軟に判断して、直感的にロボットへの指示を出すことができるインタフェースについても考慮する必要がある。

## 7.2 本論文のまとめ

本論文では、公共空間におけるコミュニケーションロボットからの社会的なはたらきかけによって行動変容を促すためのデザイン手法とその効果を検証するための実験を行った。また、これらの機能を実現するためのロボットシステムの構築を行った。

単体ロボットの人への注意アプローチにより積極的に呼びかけて気づかせることに着目し、実際の警備員が行うアプローチ方法についてデータ分析および観察とそれらのアプローチのモデル化を行った。警備員が友好的に近づく場面と注意するために近づく場面とで行うアプローチ方法を比較すると、それらは主に軌跡と速度が異なることを発見した。フィールド実験を通して、注意アプローチモデルを用いたロボットによる注意は友好的アプローチモデルを用いた注意と比べて有意に歩きスマホを止めさせた人が多く、より効果的に行動変容を促すことができるということを明らかにした。また、LiDAR センサおよび全方向移動可能な台車を用いた自律移動による注意アプローチを実現するためのロボットシステムを ROS を用いて構築した。複数ロボットにおいてはロボットの集団が作り出す心理的空間によって自然に影響を与えることに着目し、ロボットどうしの発話の重なりを用いた会話が活発さの印象を向上させる効果があることをクラウドソーシング実験によって明らかにした。また、実験室実験を通して、発話の重なりが生じる会話を観察した人々は発話の重なりが生じていない1秒間隔の会話を観察した人々と比べて有意にロボットの間を避けて通る人が多く、人間の集団における社会空間と同様の行動変容を促す効果があることを明らかにした。

さらに本論文では、複数ロボットを用いた表現方法のデザインについて検討を行い、ジェスチャによる感情表出に着目した。クラウドソーシング実験を通して、ジェスチャを用いたロボットどうしの感情表出によって知覚されたロボット間の関係性はラッセルの円環モデルによって評価が可能であり、特に Sadness と Happiness を表すジェスチャはそれぞれ覚醒度の低いネガティブな関係性と覚醒度の高いポジティブな関係性を表現するために有用であることを明らかにした。また、HRI 用に拡張された Geneva Emotion Wheel を用いることで探索的にロボットによる感情表出の設計を行うことも可能である。ロボットの集団を実現するためには複数ロボットを利用する必要があり、同じロボットだけではなく異なるロボットどうしを接続して同時に制御をする必要がある。そのため、ROS を利用してそれらの異なるロボットどうしの接続と会話制御を容易にするロボットシステムおよびインタフェースを提案した。

本論文で調査および構築したロボットからの社会的なはたらきかけのデザイン手法により、人とのインタラクションの機会を増やし、ロボットの社会的役割を強化することが可能となる。

### 7.3 今後の展望

本論文のロボットからの社会的なはたらきかけのデザイン手法は、単体のロボットが積極的に呼びかけて人に気づかせることとロボットの集団が作り出す心理的空間により自然に影響を与えることに着目した。これらの研究に基づいて、特に複数ロボットどうしのインタラクションと人への積極的なはたらきかけを両立することで、ロボットどうしが連携しながら人の代わりに担う社会的なタスクをより多様なものにすることができる。例えば、普段はロボットどうしの会話によって周囲の人に対して自然に情報提供や動線の制御をしつつ、不適切な行動をする人を発見した場合には複数のロボットが注意するといったことが可能になる。このような複数ロボットによる社会的役割の調査を行うことが今後の展望である。

## 謝辞

本論文の研究を進めるにあたり，学部生の時からご指導および助言をいただいた北海道大学 大学院情報科学研究院 小野 哲雄 教授，未踏を始めとする外部活動において様々な機会を与えてくださった北海道大学 大学院情報科学研究院 坂本 大介 准教授，研究のディスカッションや刺激を与え続けてくださった研究室のメンバーに深く感謝いたします。また，博士論文の執筆にあたって副査としてご指導くださった北海道大学 大学院情報科学研究院 野田 五十樹 教授，北海道大学 大学院情報科学研究院 山本 雅人 教授，北海道大学 大学院情報科学研究院 川村 秀憲 教授に感謝を申し上げます。ロボットによる注意行動の研究にあたり，高度なロボットシステムの構築からフィールド実験の実施およびトップカンファレンスの採択という貴重な機会をくださった株式会社 国際電気通信基礎技術研究所（ATR） ヒューマンロボットインタラクション研究室 神田 崇行 室長，佐竹 聡 研究員に感謝いたします。最後に，これまで温かく見守り，支え続けてくれた家族と友人たちに深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Roland Siegwart, Kai O. Arras, Samir Bouabdallah, Daniel Burnier, Gilles Froidevaux, Xavier Greppin, Björn Jensen, Antoine Lorotte, Laetitia Mayor, Mathieu Meisser, Roland Philippsen, Ralph Piguet, Guy Ramel, Gregoire Terrien, and Nicola Tomatis. Robox at Expo.02: A large-scale installation of personal robots. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 42, No. 3, pp. 203–222, 2003.
- [2] H.-M. Gross, H. Boehme, Ch. Schroeter, S. Mueller, A. Koenig, E. Einhorn, Ch. Martin, M. Merten, and A. Bley. TOOMAS: Interactive Shopping Guide robots in everyday use - final implementation and experiences from long-term field trials. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2005–2012, 2009.
- [3] Min Kyung Lee, Sara Kiesler, and Jodi Forlizzi. Receptionist or information kiosk: how do people talk with a robot? In *Proceedings of the 2010 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 31–40, 2010.
- [4] Takuya Hashimoto, Igor M. Verner, and Hiroshi Kobayashi. Human-Like Robot as Teacher’s Representative in a Science Lesson: An Elementary School Experiment. *Robot Intelligence Technology and Applications 2012: An Edition of the Presented Papers from the 1st International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications*, pp. 775–786, 2013.
- [5] Gabriele Ferri, Alessandro Manzi, Pericle Salvini, Barbara Mazzolai, Cecilia Laschi, and Paolo Dario. DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage collection: From DustBot project to the experimentation in the small town of Peccioli. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 655–660, 2011.
- [6] Astrid Weiss, Judith Igelsböck, Manfred Tscheligi, Andrea Bauer, Kolja Kühnlenz, Dirk Wollherr, and Martin Buss. Robots asking for directions — The willingness of passers-by to support robots. In *2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 23–30, 2010.



- [7] Satoru Satake, Takayuki Kanda, Dylan F. Glas, Michita Imai, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. How to approach humans?-strategies for social robots to initiate interaction. In *2009 4th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 109–116, 2009.
- [8] Edward Twitchell Hall. *The Hidden Dimension: Man's Use of Space in Public and Private*. The Bodley Head Ltd, 1966.
- [9] M.L. Walters, K. Dautenhahn, R. te Boekhorst, Kheng Lee Koay, C. Kaouri, S. Woods, C. Nehaniv, D. Lee, and I. Werry. The influence of subjects' personality traits on personal spatial zones in a human-robot interaction experiment. In *ROMAN 2005. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2005.*, pp. 347–352, 2005.
- [10] Helge Huettenrauch, Kerstin Severinson Eklundh, Anders Green, and Elin A. Topp. Investigating Spatial Relationships in Human-Robot Interaction. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5052–5059, 2006.
- [11] M.P. Michalowski, S. Sabanovic, and R. Simmons. A spatial model of engagement for a social robot. In *9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006.*, pp. 762–767, 2006.
- [12] Jonathan Mumm and Bilge Mutlu. Human-robot proxemics: Physical and psychological distancing in human-robot interaction. In *2011 6th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 331–338, 2011.
- [13] Emrah Akin Sisbot, Luis F. Marin-Urias, Rachid Alami, and Thierry Simeon. A Human Aware Mobile Robot Motion Planner. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 874–883, 2007.
- [14] Kotaro Hayashi, Masahiro Shiomi, Takayuki Kanda, and Norihiro Hagita. Friendly Patrolling: A Model of Natural Encounters. In *Robotics: Science and Systems Conference*, 2011.
- [15] K. Dautenhahn, M. Walters, S. Woods, K. L. Koay, C. L. Nehaniv, A. Sisbot, R. Alami, and T. Siméon. How May I Serve You? A Robot Companion Approaching a Seated Person in a Helping Context. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 172–179, 2006.

- [16] Yusuke Kato, Takayuki Kanda, and Hiroshi Ishiguro. May I help you? - Design of Human-like Polite Approaching Behavior-. In *2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 35–42, 2015.
- [17] Y. Yamamoto, M. Sato, K. Hiraki, N. Yamasaki, and Y. Anzai. A request of the robot: an experiment with the human-robot interactive system HuRIS. In *[1992] Proceedings IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 204–209, 1992.
- [18] Helge Hüttenrauch and Kerstin Eklundh. To help or not to help a service robot: Bystander intervention as a resource in human-robot collaboration. *Interaction Studies*, Vol. 7, pp. 455–477, 2006.
- [19] Wilma A. Bainbridge, Justin Hart, Elizabeth S. Kim, and Brian Scassellati. The effect of presence on human-robot interaction. In *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 701–706, 2008.
- [20] Mikey Siegel, Cynthia Breazeal, and Michael I. Norton. Persuasive Robotics: The influence of robot gender on human behavior. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2563–2568, 2009.
- [21] A. Edwards, K. Hood, E. Matthews, D. Russell, I. Russell, J. Barker, M. Bloor, P. Burnard, J. Covey, R. Pill, C. Wilkinson, and N. Stott. The effectiveness of one-to-one risk communication interventions in health care: a systematic review. *Med Decis Making*, Vol. 20, No. 3, pp. 290–297, 2000.
- [22] Robert Ruiter, Charles Abraham, and Gerjo Kok. Scary Warnings and Rational Precautions: A Review of the Psychology of Fear Appeals. *Psychology and Health*, Vol. 16, pp. 613–630, 2001.
- [23] E.J. Strahan, K. White, G.T. Fong, L.R. Fabrigar, M.P. Zanna, and R. Cameron. Enhancing the effectiveness of tobacco package warning labels: a social psychological perspective. *Tob Control*, Vol. 11, No. 3, pp. 183–190, 2002.
- [24] T.D. DesChamps, A.E. Eason, and J.A. Sommelville. Infants Associate Praise and Admonishment with Fair and Unfair Individuals. *Infancy*, Vol. 21, No. 4, pp. 478–504, 2016.

- [25] M. Shiomi, T. Kanda, D. F. Glas, S. Satake, H. Ishiguro, and N. Hagita. Field trial of networked social robots in a shopping mall. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2846–2853, 2009.
- [26] Kotaro Hayashi, Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Masahiro Shiomi, Satoshi Koizumi, Hiroshi Ishiguro, Tsukasa Ogasawara, and Norihiro Hagita. Humanoid robots as a passive-social medium - a field experiment at a train station. In *2007 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 137–144, 2007.
- [27] Kotaro Hayashi, Takayuki Kanda, Takahiro Miyashita, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Robot manzai-robots’ conversation as passive social medium-. *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 25, pp. 381–389, 2007.
- [28] 渋谷昌三. 社会空間の基礎的研究. *心理学研究*, Vol. 47, No. 3, pp. 119–128, 1976.
- [29] 渋谷昌三. 人と人の快適距離—パーソナルスペースとは何か—. 日本放送出版協会, 1990.
- [30] James A. Cheyne and Michael G. Efran. The Effect of Spatial and Interpersonal Variables on the Invasion of Group Controlled Territories. *Sociometry*, Vol. 35, No. 3, pp. 477–489, 1972.
- [31] Sverre Lindskold, Kevin P. Albert, Robert Baer, and Wayne C. Moore. Territorial Boundaries of Interacting Groups and Passive Audiences. *Sociometry*, Vol. 39, No. 1, pp. 71–76, 1976.
- [32] E. S. Knowles. Boundaries around group interaction: The effect of group size and member status on boundary permeability. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 26, No. 3, pp. 327–331, 1973.
- [33] A. Imayoshi, N. Munekata, and T. Ono. Robots That Can Feel the Mood: Context-aware Behaviors in Accordance with the Activity of Communications. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp. 143–144, 2013.
- [34] H. Sacks, E. A. Schegloff, and G. Jefferson. A Simplest Systematics for the Organization of Turn-Taking for Conversation. *Language*, Vol. 50, No. 4, pp. 696–735, 1974.

- [35] D. H. Zimmerman and C. West. Sex roles, interruptions and silences in conversation. *Language and Sex: Difference and Dominance* (Thorned, B. and Henley, N., eds.), pp. 105–129, 1975.
- [36] 藤井桂子, 大塚純子. 会話における発話の重なりについて：協力的側面を中心に. 言語文化と日本語教育, Vol. 8, pp. 1–13, 1994.
- [37] 藤井桂子. 発話の重なりについて：分類の試み. 言語文化と日本語教育, Vol. 10, pp. 13–32, 1995.
- [38] 町田佳世子. 初対面の会話における発話の重なりの効果. 北海道東海大学紀要. 人文社会科学系, Vol. 15, pp. 189–210, 2002.
- [39] D. Tannen. *Conversational Style: Analyzing Talk Among Friends*. Norwood, N.J : Ablex, 1984.
- [40] 守屋悠里英, 田中貴紘, 宮島俊光, 藤田欣也. ボイスチャット中の音声情報に基づく会話活性度推定方法の検討. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 283–292, 2012.
- [41] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平. 人-ロボットの対話におけるロボット同士の対話観察の効果. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380–389, 2002.
- [42] L. Moshkina and R. C. Arkin. Human perspective on affective robotic behavior: a longitudinal study. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1444–1451, 2005.
- [43] M. Saerbeck and C. Bartneck. Perception of affect elicited by robot motion. In *2010 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 53–60, 2010.
- [44] Diana Löffler, Nina Schmidt, and Robert Tscharn. Multimodal Expression of Artificial Emotion in Social Robots Using Color, Motion and Sound. In *2018 13th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 334–343, 2018.
- [45] S. Song and S. Yamada. Expressing Emotions Through Color, Sound, and Vibration with an Appearance-Constrained Social Robot. In *2017 12th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 2–11, 2017.

- [46] K. Terada, A. Yamauchi, and A. Ito. Artificial emotion expression for a robot by dynamic color change. In *2012 IEEE RO-MAN: The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 314–321, 2012.
- [47] M. Häring, N. Bee, and E. André. Creation and evaluation of emotion expression with body movement, sound and eye color for humanoid robots. In *2011 RO-MAN*, pp. 204–209, 2011.
- [48] Mustafa Suphi Erden. Emotional Postures for the Humanoid-Robot Nao. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5, pp. 441–456, 2013.
- [49] Derek McColl and Goldie Nejat. Recognizing Emotional Body Language Displayed by a Human-like Social Robot. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 6, pp. 261–280, 2014.
- [50] Tatsuya Nomura and Akira Nakao. Comparison on Identification of Affective Body Motions by Robots Between Elder People and University Students: A Case Study in Japan. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 2, pp. 147–157, 2010.
- [51] J. Xu, J. Broekens, K. Hindriks, and M. A. Neerinx. Mood expression through parameterized functional behavior of robots. In *2013 IEEE RO-MAN*, pp. 533–540, 2013.
- [52] M. Zecca, Y. Mizoguchi, K. Endo, F. Iida, Y. Kawabata, N. Endo, K. Itoh, and A. Takanishi. Whole body emotion expressions for KOBIAN humanoid robot — preliminary experiments with different Emotional patterns —. In *RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 381–386, 2009.
- [53] K. Nakagawa, K. Shinozawa, H. Ishiguro, T. Akimoto, and N. Hagita. Motion modification method to control affective nuances for robots. In *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5003–5008, 2009.
- [54] J. Xu, J. Broekens, K. Hindriks, and M. A. Neerinx. Effects of a robotic storyteller’s moody gestures on storytelling perception. In *2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (ACII)*, pp. 449–455, 2015.
- [55] Junchao Xu, Joost Broekens, Koen Hindriks, and Mark A. Neerinx. Mood contagion of robot body language in human robot interaction. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 29, No. 6, pp. 1216–1248, 2015.

- [56] Myrthe Tielman, Mark Neerincx, John-Jules Meyer, and Rosemarijn Looije. Adaptive Emotional Expression in Robot-Child Interaction. In *2014 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, pp. 407–414, 2014.
- [57] James A. Russell. A circumplex model of affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 39, No. 6, pp. 1161–1178, 1980.
- [58] James A. Russell. Core Affect and the Psychological Construction of Emotion. *Psychological review*, Vol. 110, No. 1, pp. 145–172, 2003.
- [59] Aryel Beck, Lola Cañamero, and Kim Bard. Towards an Affect Space for robots to display emotional body language. In *9th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, pp. 464–469, 2010.
- [60] Aryel Beck, Antoine Hiole, Alexandre Mazel, and Lola Cañamero. Interpretation of Emotional Body Language Displayed by Robots. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Affective Interaction in Natural Environments*, pp. 37–42, 2010.
- [61] C. Anderson, D. Keltner, and O. P. John. Emotional convergence between people over time. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 84, No. 5, pp. 1054–1068, 2003.
- [62] Peter Totterdell, Stephen Kellett, Katja Teuchmann, and Rob Briner. Evidence of mood linkage in work groups. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 74, No. 6, pp. 1504–1515, 1998.
- [63] Sigal Barsade. The Ripple Effect: Emotional Contagion and its Influence on Group Behavior. *Administrative Science Quarterly*, Vol. 47, No. 4, pp. 644–675, 2002.
- [64] Andrew Knight and Noah Eisenkraft. Positive Is Usually Good, Negative Is Not Always Bad: The Effects of Group Affect on Social Integration and Task Performance. *Journal of Applied Psychology*, Vol. 100, No. 4, pp. 1214–1227, 2015.
- [65] Knightscope. K5. <https://www.knightscope.com/products/k5>. Accessed on 2023.01.23.
- [66] Dražen Bršćić, Takayuki Kanda, Tetsushi Ikeda, and Takahiro Miyashita. Person Tracking in Large Public Spaces Using 3-D Range Sensors. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 43, No. 6, pp. 522–534, 2013.

- [67] Dorit Borrmann, Jan Elseberg, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, and Joachim Hertzberg. Globally consistent 3D mapping with scan matching. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, No. 2, pp. 130–142, 2008.
- [68] 生駒幸子. 日常会話における発話の重なる機能. 世界の日本語教育. 日本語教育論集, Vol. 6, pp. 185–200, 1996.
- [69] 西村良太, 北岡教英, 中川聖一. 音声対話における韻律変化をもたらす要因分析 (<特集>リズムとタイミング). 音声研究, Vol. 13, No. 3, pp. 66–84, 2009.
- [70] 豊田薫, 宮越喜浩, 山西良典, 加藤昇平. 発話状態時間長に着目した対話雰囲気推定. 人工知能学会論文誌, Vol. 27, No. 2, pp. 16–21, 2012.
- [71] Y. Koyama, I. Sato, D. Sakamoto, and T. Igarashi. Sequential Line Search for Efficient Visual Design Optimization by Crowds. In *ACM Trans. Graph.*, Vol. 36, pp. 48:1–48:11, 2017.
- [72] Joe Magee and Larissa Tiedens. Emotional Ties That Bind: The Roles of Valence and Consistency of Group Emotion in Inferences of Cohesiveness and Common Fate. *Personality and Social Psychology Bulletin*, Vol. 32, No. 12, pp. 1703–1715, 2007.
- [73] Wenxuan Mou, Oya Celiktutan, and Hatice Gunes. Group-level arousal and valence recognition in static images: Face, body and context. In *2015 11th IEEE International Conference and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)*, pp. 1–6, 2015.
- [74] D.O. Johnson, R.H. Cuijpers, and D. Pol, van der. Imitating Human Emotions with Artificial Facial Expressions. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 5, No. 4, pp. 503–513, 2013.
- [75] Dylan Moore, Hamish Tennent, Nikolas Martelaro, and Wendy Ju. Making noise intentional: A study of servo sound perception. In *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 12–21, 2017.
- [76] Leah Findlater, Joan Zhang, Jon E. Froehlich, and Karyn Moffatt. Differences in Crowdsourced vs. Lab-Based Mobile and Desktop Input Performance Data. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 6813–6824, 2017.

- [77] Steven Komarov, Katharina Reinecke, and Krzysztof Z. Gajos. Crowdsourcing performance evaluations of user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 207–216, 2013.
- [78] Geneva Emotion Research Group. The Geneva Emotion Wheel. <https://www.unige.ch/cisa/gew>, 2021. Accessed on 2023.01.23.
- [79] Adam K. Coyne, Andrew Murtagh, and Conor McGinn. Using the Geneva Emotion Wheel to Measure Perceived Affect in Human-Robot Interaction. In *Proceedings of the 2020 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 491–498, 2020.
- [80] Megumi Masuda and Shohei Kato. Motion rendering system for emotion expression of human form robots based on laban movement analysis. In *19th International Symposium in Robot and Human Interactive Communication*, pp. 324–329, 2010.
- [81] 水丸和樹. 2018年度未踏IT人材発掘・育成事業プロジェクト成果「コミュニケーションロボットの会話制御ソフトウェアの開発」. <https://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/2018/seika.html>, 2018. Accessed on 2023.01.23.
- [82] アトリエ秋葉原. 超初心者向け pepper クリエーター入門 — pepper アトリエ秋葉原. <https://pepper-atelier-akihabara.jp/archives/1239>, 2016. Accessed on 2023.01.23.
- [83] ロボットスタート株式会社. 【普及型社会的対話ロボット】ヴイストーン sota (ソータ) レビュー! その3「開発環境 vstonemagic (ヴイストーンマジック)」 - ロボスタ. <https://robotstart.info/2015/09/02/vstone-sota-review-2-vstone-magic.html>, 2015. Accessed on 2023.01.23.
- [84] シャープ株式会社. ロブリック. <https://robohon.com/apps/robrick.php>, 2022. Accessed on 2023.01.23.
- [85] 北海道大学. ロボット同士の会話実証実験で店舗でのロボット活用法を探る～北大生開発システムによりセイコーマート北海道大学店で実施～. [https://www.hokudai.ac.jp/news/190225\\_pr2.pdf](https://www.hokudai.ac.jp/news/190225_pr2.pdf), 2019. Accessed on 2023.01.23.
- [86] 北海道大学新聞. 異種ロボット会話実験 本学セコマで実施. <http://www.hokudaishinbun.com/2019/02/28/1858>, 2019. Accessed on 2023.01.23.



## 発表論文

- [1] 水丸和樹, 坂本大介, 小野哲雄. 複数ロボットの発話の重なりによって創発する空間の知覚. 情報処理学会論文誌, Vol. 59, No. 12, pp. 2279-2287. 2018.
- [2] Kazuki Mizumaru, Satoru Satake, Takayuki Kanda, Tetsuo Ono. Stop doing it! Approaching Strategy for a Robot to Admonish Pedestrians. In *14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*. pp. 449-457. 2019.
- [3] Kazuki Mizumaru, Daisuke Sakamoto, Tetsuo Ono. Perception of Emotional Relationships by Observing Body Expressions between Multiple Robots. In *Proceedings of the 10th International Conference on Human-Agent Interaction*. pp. 203-211. 2022.

## 目 次

3.1	ロボットが喫煙者に注意を行い（左図）無視された（右図）場面の様子 . . .	11
3.2	警備員による友好的アプローチの一例 . . . . .	14
3.3	警備員による注意アプローチの一例 . . . . .	15
3.4	友好的アプローチにおける Meeting Point の分析（左図：速い速度の歩行者，右図：遅い速度の歩行者） . . . . .	16
3.5	注意アプローチにおける Meeting Point の分析（左図：速い速度の歩行者，右図：遅い速度の歩行者） . . . . .	16
3.6	各アプローチにおける警備員の平均歩行速度 . . . . .	17
3.7	注意アプローチのパラメータ . . . . .	18
3.8	システム構成 . . . . .	20
3.9	$t_{meet}$ でのショートカット経路のプランニング . . . . .	22
3.10	注意アプローチを実装したロボットの動作例 . . . . .	23
3.11	フィールド実験の環境（左図）とロボット（右図） . . . . .	25
3.12	注意アプローチ（左図）と友好的アプローチ（右図）の目標軌道 . . . . .	26
3.13	友好的アプローチ条件の失敗例 . . . . .	28
3.14	注意アプローチ条件の成功例 . . . . .	29
3.15	注意アプローチのショートカットが効果的に機能した例 . . . . .	30
3.16	フィールド実験の結果 . . . . .	30
4.1	アンケートページ（本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し，著者が独自に実施したものである。） . . . . .	35
4.2	各条件の発話間隔（先発話者の発話終了時刻-後発話者の発話開始時刻）の実測値 . . . . .	38
4.3	クラウドソーシング実験のアンケート結果のグラフ（エラーバーは標準誤差）	40
4.4	実験環境（本研究はソフトバンクロボティクスの Pepper を活用し，著者が独自に実施したものである。） . . . . .	42
4.5	実験室実験のアンケート結果のグラフ（エラーバーは標準誤差） . . . . .	44
4.6	参加者の行動パターン . . . . .	45

4.7	ロボット2体の間を通った例(本研究はソフトバンクロボティクスのPepperを活用し、著者が独自に実施したものである.) . . . . .	46
4.8	ロボット2体の間を避け、ロボットの後ろを通った例(本研究はソフトバンクロボティクスのPepperを活用し、著者が独自に実施したものである.)	46
5.1	ラッセルの円環モデルの各象限に対応するジェスチャ . . . . .	53
5.2	2体のロボットによるインタラクション動画の生成 . . . . .	55
5.3	arousal(覚醒度)スコアの結果(上段:2ndEmotion, 下段:1stEmotion). エラーバーは標準誤差を表す. . . . .	59
5.4	valence(快・不快度)スコアの結果(上段:2ndEmotion, 下段:1stEmotion). エラーバーは標準誤差を表す. . . . .	60
5.5	Relationshipのarousalスコアとvalenceスコアの平均値の散布図(1stEmotion-2ndEmotion) . . . . .	71
5.6	arousalスコア(左図)とvalenceスコア(右図)の交互作用プロット . . .	71
5.7	Geneva Emotion Wheel version 3.0 ([78]より引用し抜粋) . . . . .	72
5.8	実装した6つの感情を表すジェスチャ . . . . .	74
5.9	Geneva Emotion Wheelによる感情評価結果のヒートマップ(N=100) . .	76
6.1	GUIアプリとROSの通信によってロボットどうしの会話を実現するシステム . . . . .	80
6.2	Choregraphe ([82]より引用し抜粋) . . . . .	81
6.3	VstoneMagic ([83]より引用し抜粋) . . . . .	82
6.4	ロブリック ([84]より引用し抜粋) . . . . .	82
6.5	開発したインタフェースと会話シナリオ作成のイメージ . . . . .	83
6.6	異なる複数ロボットどうしの会話によって商品PRを行った例([86]より引用し抜粋) . . . . .	83

# 表 目 次

3.1 注意アプローチのパラメータ値 . . . . .	18
4.1 会話シナリオ (R1 はロボット 1, R2 はロボット 2) . . . . .	39
4.2 クラウドソーシング実験のアンケート結果 . . . . .	39
4.3 クラウドソーシング実験のアンケート結果に対する多重比較の結果 . . . . .	39
4.4 会話シナリオの追加部分 (下線部) . . . . .	43
4.5 実験室実験のアンケート結果 . . . . .	43
4.6 実験室実験のアンケート結果に対する多重比較の結果 . . . . .	44
4.7 各条件における参加者の行動パターンの集計結果 . . . . .	47
4.8 行動パターンの集計結果に対する多重比較の結果 . . . . .	47
4.9 各条件における自由記述内容 . . . . .	48
5.1 事前検証タスクの人口統計 (N=100) . . . . .	55
5.2 左右で少なくとも 1 回は設計した感情と一致して識別された割合 . . . . .	56
5.3 実験タスクの人口統計 (N=188) . . . . .	57
5.4 1stRobot の arousal スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	58
5.5 2ndRobot の arousal スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	61
5.6 Relationship の arousal スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	61
5.7 1stRobot の arousal スコアに対する各因子の多重比較結果 . . . . .	61
5.8 2ndRobot の arousal スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果 . . . . .	63
5.9 Relationship の arousal スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果 . . . . .	65
5.10 1stRobot の valence スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	66
5.11 2ndRobot の valence スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	66
5.12 Relationship の valence スコアに対する分散分析の結果 . . . . .	66
5.13 1stRobot の valence スコアに対する各因子の多重比較結果 . . . . .	66
5.14 2ndRobot の valence スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果 . . . . .	67
5.15 Relationship の valence スコアにおける単純主効果分析の多重比較結果 . . . . .	69
5.16 Relationship の感情ラベリングの結果 (S, F, P, H はそれぞれ Sadness, Fear, Pride, Happiness を表す.) . . . . .	70

5.17 追加検証タスクの人口統計 (N=100) . . . . .	73
5.18 ツールによって算出された結果 . . . . .	75