

修士論文

人との親密度を向上させる ロボットによるジェスチャミラーリング

栗田 優輝

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 加藤 博一 教授

インタラクティブメディア設計学研究室（情報科学領域）

令和2年3月12日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

栗田 優輝

審査委員：

加藤 博一 教授	(主指導教員, 情報科学領域)
小笠原 司 教授	(副指導教員, 情報科学領域)
神原 誠之 准教授	(副指導教員, 情報科学領域)
藤本 雄一郎 助教	(副指導教員, 情報科学領域)

人との親密度を向上させる ロボットによるジェスチャミラーリング*

栗田 優輝

内容梗概

ジェスチャミラーリングとは、カウンセリング等で対話者のジェスチャを模倣することで親密度を向上させる技術として利用されている。しかし、ジェスチャミラーリングは対話者に模倣していることを気づかれると、不快感を発生させる原因となることが知られている。そこで、本研究では人との親密度の向上を目的とした、対話者の模倣されていることへの気づきに依拠して、ロボットの模倣方法を変更できる適応的ジェスチャミラーリングシステムの開発を目指す。このシステムの実現のために、まず実験でロボットの「遅延」「動作量」「頻度」パラメータを変更し模倣方法を変え、人の主観による模倣度と親密度の関係を調査する。その結果、仮説通り模倣が気づかれると親密度が低下し、気づかれずに高い模倣度でミラーリングを行うと親密度が向上することが明らかになった。また、模倣に気付いた時、ロボットの意図的な模倣の検出が親密度を低下させる原因であると結果から見られた。次に、人の模倣に対する気づきを検出するために、模倣されていることに気づいた時の人の視線情報を解析した。その結果、人が模倣されていることに気づくと、そのタイミング、もしくはその前後で模倣している動作部位を注視することが示された。これらの結果から、人の視線を模倣に対する気づき検出に用いて、気づきに依拠して模倣方法を変更し、人との親密度を向上させる適応的ジェスチャミラーリングシステムの実現可能性を示した。

キーワード

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和2年3月12日.

ジェスチャミラーリング, ヒューマンロボットインタラクション, 親密度, アイト
ラッキング

Robot gesture mirroring for building intimacy with human*

Yuki Kurita

Abstract

This thesis proposes a gesture mirroring system for interaction robot. Gesture mirroring is a known technique where humans or robots mimic the gestures of an interlocutor to enhance the degree of intimacy. However, gesture mirroring, whether by humans or robots, is known to cause discomfort when they are noticed by the interlocutor. Therefore, we developed an adaptive gesture mirroring system using a robot that changes its mimicry method according to how much a human notices to improve the intimacy degree. In order to realize this system, we first investigated the relationship between the noticing of robot mimicry and the intimacy degree of the robot with interlocutor. We modified the robot mimicry degree parameters of "Delay", "Extent", and "Frequency" in subsequent experiments. As a result, the robot that performs gesture mirroring with a delay of 2 seconds was evaluated as having the highest degree of intimacy. In addition, it was found that the detection of intentional imitation leads to a decrease in intimacy. Next, in order to detect whether an interlocutor noticed mimicry, we analyzed the gaze information of the interlocutor when s/he noticed that s/he was mimicked. As a result, when the interlocutor noticed that s/he was mimicked, s/he might turn to the gesture s/he was imitating at before or after the time s/he noticed his gaze. From these results, we demonstrated the feasibility

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 12, 2020.

of an adaptive gesture mirroring system that uses human gaze to detect mimicry and changes the mimicry method according to the noticing to improve intimacy with humans.

Keywords:

Gesture mirroring, Human robot interaction, Intimacy degree, Eye tracking

目 次

1. はじめに	2
2. ミラーリングに関する従来研究と本研究の位置付け	5
2.1 人と人の親密度を向上させる同調傾向	5
2.2 人によるミラーリング	6
2.3 人がミラーリングに気づいた時の印象	7
2.4 ロボット・エージェントによるミラーリング	8
2.4.1 ロボット・エージェントによるミラーリングの効果	8
2.4.2 ロボット・エージェントによる対話者に気づかれないミラー リング方法	9
2.4.3 ロボットによるジェスチャミラーリングの位置付け	10
2.5 人による気づきと視線の関係	11
2.6 本研究の位置付け	11
3. ロボットへのジェスチャ模倣システムの実装	14
3.1 ジェスチャ模倣システムの概要	14
3.2 3次元骨格座標から関節角への変換	15
4. 気づかれにくく親密度を向上させる模倣方法の調査	19
4.1 実験概要	19
4.1.1 仮説	19
4.1.2 第三者でミラーリング評価を行う理由	20
4.1.3 実験で用いる動画	20
4.1.4 ロボットによるジェスチャミラーリングの模倣パラメータ	22
4.2 実験I	22
4.2.1 実験Iの目的	22
4.2.2 実験I方法・手順	23
4.2.3 実験Iの評価方法	24
4.2.4 実験I結果	25

4.2.5	実験Ⅰ考察	25
4.3	実験Ⅱ	27
4.3.1	実験Ⅱの目的	27
4.3.2	実験Ⅱ方法・手順	27
4.3.3	実験Ⅱの評価方法	27
4.3.4	実験Ⅱ結果	28
4.3.5	実験Ⅱ考察	33
4.4	本実験の結論	38
5.	適応的ジェスチャミラーリングシステム実装のための視線分析	39
5.1	ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価	39
5.1.1	精度評価実験の目的	39
5.1.2	ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価方法 . . .	39
5.1.3	人の視線とロボットのジェスチャの位置座標取得方法 . . .	40
5.1.4	ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価結果 . . .	41
5.2	模倣されていることに気付いた時の視線の調査実験	41
5.2.1	実験目的	41
5.2.2	実験方法	41
5.2.3	実験結果	47
5.2.4	模倣されていることに気付いた時の視線の調査実験の考察	47
5.3	適応的ジェスチャミラーリングシステムの展望	48
6.	おわりに	56
	謝辞	58
	参考文献	59
	付録	65

目 次

1	適応的ジェスチャミラーリングシステムの概要	3
2	同調傾向の種類と効果	5
3	ミラーリング現象とミラーリング技術の違い	7
4	ジェスチャ模倣システムの概要図	14
5	Kinect V2 で推定される 3 次元骨格座標	15
6	NAO の関節と回転方向	16
7	動画の作成手順	21
8	実験に使用する動画	24
9	実験 I のアンケート主観評価結果	26
10	実験 II のアンケート主観評価結果	31
11	模倣条件「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」の主観評価結果 .	33
12	「ロボットの動作は似ていると感じたか」と「人とロボットの親密 度」の散布図	35
13	「ロボットの動作のわざとらしさ」と「人とロボットの親密度」の 散布図	36
14	ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作は似て いると感じたか」と「人とロボットの親密度」の散布図	37
15	ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作のわざ とらしさ」と「人とロボットの親密度」の散布図	37
16	視線追従精度評価の実験風景	40
17	ロボットの右手のジェスチャと位置座標の時系列変化	42
18	ロボットの左手のジェスチャと視線の位置座標の時系列変化 . . .	43
19	模倣気づき時の視線調査実験風景	44
20	アフェクト・グリッド	46
21	被験者 1：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時 系列変化	50
22	被験者 2：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時 系列変化	51

23	被験者3：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	52
24	被験者4：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	53
25	被験者1：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	54
26	被験者2：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	54
27	被験者3：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	55
28	被験者4：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化	55
29	被験者1：ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化	67
30	被験者2：ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化	68
31	被験者3：ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化	69

表 目 次

1	人との親密度向上を目的としたロボット・エージェントによるミラーリングの研究	13
2	ロボット・エージェントによる相手に気づかれないミラーリング方法の研究	13
3	本システムで用いる模倣パラメータ	22
4	実験Ⅰの模倣パラメータ値	23
5	被験者の項目「ロボットを好んでいるように感じたか」に対する評価の理由	29
6	被験者の項目「人とロボットは楽しんでいるように感じたか」に対する評価の理由	29
7	実験Ⅱにおけるバーチャルロボットの模倣パラメータ値	30

8	項目 1: 「ロボットの動作は似ていたか」における各群間の p 値 . .	30
9	項目 2: 「ロボットの動作タイミングは合っていたか」における各 群間の p 値	30
10	項目 3: 「人とロボットはどれくらい親密に見えたか」における各 群間の p 値	32
11	項目 4: 「ロボットの動作はわざとらしいか」における各群間の p 値	32

1. はじめに

高齢者の増加やインターネットの普及に伴い、年齢層に関わらず日常的な発話機会の減少が社会的問題となっている。日常的な発話機会が不足すると、脳機能の低下によるうつ病や認知症の発症、生活環境の悪化による身体機能の低下を引き起こす恐れがあると考えられている。このような問題の対策として、ユーザと対話を行うロボットまたはエージェントを利用してコミュニケーションを活性化させる研究が従来から行われてきた [1][2]。神田らは、ロボットが社会的な存在として人々に受け入れられるためには、人とロボットが親密な関係になる必要があると述べている。そこで本研究では対人相互作用場面において、親密度を向上させ、ポジティブな対人印象をもたらす同調傾向に注目した。同調傾向とは、対話者の非言語行動が相手のそれと同期・類似する現象のことである [3]。また、同調傾向には表情、姿勢・ジェスチャ・音声、パラ言語など様々な要素がある。ここでの姿勢とはある時間の体の構えであり、そこに至るまでの経路は関係ない。一方ジェスチャはある姿勢に至るまでの経路のことを指す。

本研究では、姿勢・ジェスチャの同調傾向であるミラーリングに着目する。ミラーリングとは、親密な人同士の相互作用において、互いが姿勢やジェスチャを無意識に模倣する現象である [4]。加えて、見知らぬ人同士が意図的に相手の姿勢・ジェスチャを模倣した場合でも、模倣された人は模倣した人に対して好意を抱くこともわかっている [5]。ロボットやエージェントによるミラーリングに関しても、ミラーリングを行うロボット・エージェントに対する親密度向上に効果があるとされているが [6][7]、人との親密度向上に効果のあるジェスチャのミラーリングをロボットで行なった研究は少ない。また一方で、Bailenson らは、人はバーチャルエージェントに模倣されていることを気づくと不快に感じると述べている。つまり、ただ対話者の姿勢・ジェスチャを模倣するだけでは対話者との親密度を高めることはできず、対話者に模倣していることに気づかれないようなミラーリングをする必要があると言える。このような対話者に気づかれないミラーリングを実現するには、対話者の気づきを検出する必要がある。また、気づきの検出は視線の追従により求めることができるが [8]、ミラーリングに対する気づきを定量的に評価された例はない。

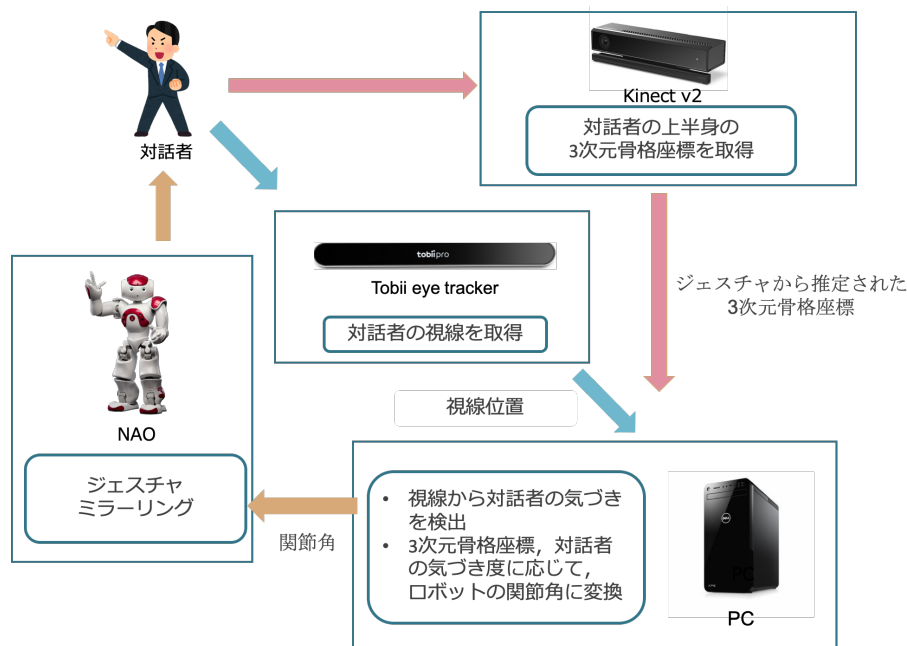


図 1 適応的ジェスチャミラーリングシステムの概要

そこで、本研究では人との親密度向上を目的とした、ロボットによる適応的ジェスチャミラーリングシステムの開発を目指す。適応的ジェスチャミラーリングシステムの概要を図1.1に示す。適応的ジェスチャミラーリングシステムとは、対話者と親密度を向上させるために、対話者のロボットが行う模倣に対する気づきを検出することで、適応的に模倣方法を変更しながらミラーリングを行うシステムである。このシステムの実現のために、まず人のジェスチャを模倣できるシステムをロボットに実装する。また、親密度を向上させつつ、模倣していることが気づかれにくいロボットの模倣方法の調査を行う。さらに、ロボットのジェスチャミラーリング時の対話者の視線計測に基づく、「気づき」検出を行い、最後にそれらの結果を踏まえた適応的ジェスチャミラーリングシステムの展望について述べる。

以下、本論文では2章で人との親密度を向上させる同調傾向、人によるミラーリングの効果、人がミラーリングに気づいた時に受ける印象、ロボットによるミラーリングの効果および、本研究の位置付けを述べる。3章では、ロボットによるジェスチャ模倣システムについて、4章では、ロボットのジェスチャミラーリングに

対する気づきと，対話者とロボットの親密度を調査する実験についてそれぞれ詳述する．さらに5章では模倣に対する気づき検出手法，また適応的ジェスチャーミラーリングシステムの実装と，本研究の全体の考察を述べた後，6章でまとめと今後の展望で締めくくる．

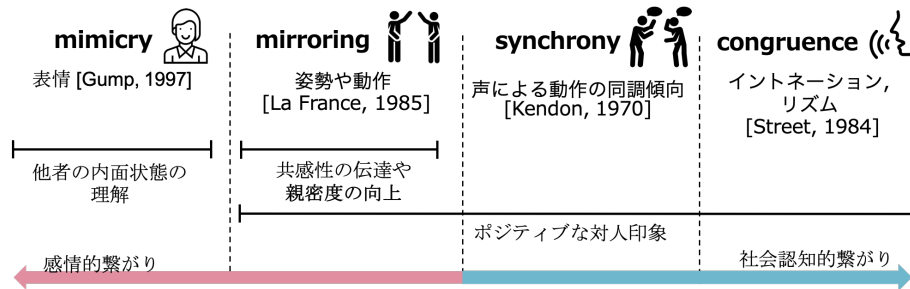


図 2 同調傾向の種類と効果

2. ミラーリングに関する従来研究と本研究の位置付け

本章では，本研究で取り上げるミラーリングに関する研究について述べる．まず，対人社会心理学の分野において，人と人の親密度向上に効果のある同調傾向について述べ，次に，同調傾向の一種である，人によるミラーリングについて，人がミラーリングに気づいた時に受ける印象についての研究について説明する．さらに，ロボット・エージェントによるミラーリングに関する研究，気づきの検出に関する研究について詳述し，最後にそれらを踏まえた本研究の位置づけを示す．

2.1 人と人の親密度を向上させる同調傾向

同調傾向とは，人と人との間でコミュニケーションが連動し，パターンが類似化していくことを指す．対人社会心理学の分野において，同調傾向は多くの研究者にとって円滑なコミュニケーションの指標としてみなされ，人との親密度を向上させることができ，ポジティブな対人印象をもたらすことが示されてきた [3]．また，同調傾向は非常に多様な形で現れる．同調傾向の種類とその効果について，図 2.1 に示す．

まず，mimicry とは対話者の顔面表情と同じ顔面表情をする同調傾向であり [9]，これはヒューマンロボットインタラクションの分野では mirroring とも呼ばれることがある．顔面筋と腺の活動の生得的な反応パターンの中枢へのフィードバックの結果として，感情が生じると考えられるため，他者の表情の模倣は他者の内

面の理解を導くと考えられている [10]. synchrony は話し手の音声の流れに同期して、話し手と聞き手の身体動作が連動して起きること、ならびに話してと聞き手の身体動作が同期することを指す [11]. また、引き込みとは音楽の共演や聴取場面や対話場面で観察される、呼吸の変化点が同期する現象である [12]. ミラーリング (mirroring) は、無意識に人が対話者の姿勢・ジェスチャを模倣することであり、多くの研究で人同士の親密度を向上させることができると示されてきた [13][14][15]. 最後に、congruence は言語のイントネーション、リズム、声質などが同調することを指す. 発話速度や反応潜時 (生体に刺激が与えられてからその刺激に対する外的に観察可能な反応が生じるまでの時間) の同調傾向を示す話者ほど、対話相手によって、能力や社会的魅力を高く評価されると述べられている [16]. これらのように、同調傾向には様々な種類があるが、本研究では特に人との親密度向上に効果があることが多く報告されているミラーリングに注目する.

2.2 人によるミラーリング

対人社会心理学の分野において、ミラーリングとは無意識に人が対話者の姿勢・ジェスチャを模倣することであり、知覚と行動の連動によるものだと考えられている [17]. 人は対話者に模倣されていることを知覚すると、模倣動作が活発になり、その動作を行う可能性が高くなる. また、ミラーリングは相互作用を行う者同士の親密度とも関係性があると考えられている. 無意識な模倣は、人同士の親密度と好意に関係しており、親密な関係であるほど模倣が増えると言われている [13][14][15]. さらに、Chartrand と Bargh は

1. 被験者の動きを模倣
2. 自然な動作 (模倣はしない)

をする対話者と被験者に 15 分間で交互に写真を説明するタスクを与え、被験者に主観評価を行なってもらう実験を行なった. その結果、被験者の姿勢やジェスチャが対話者によって意図的に反映されている場合、被験者は相互作用がより円滑に行われ、より好意的に感じるということがわかった. これらから、ミラーリングは

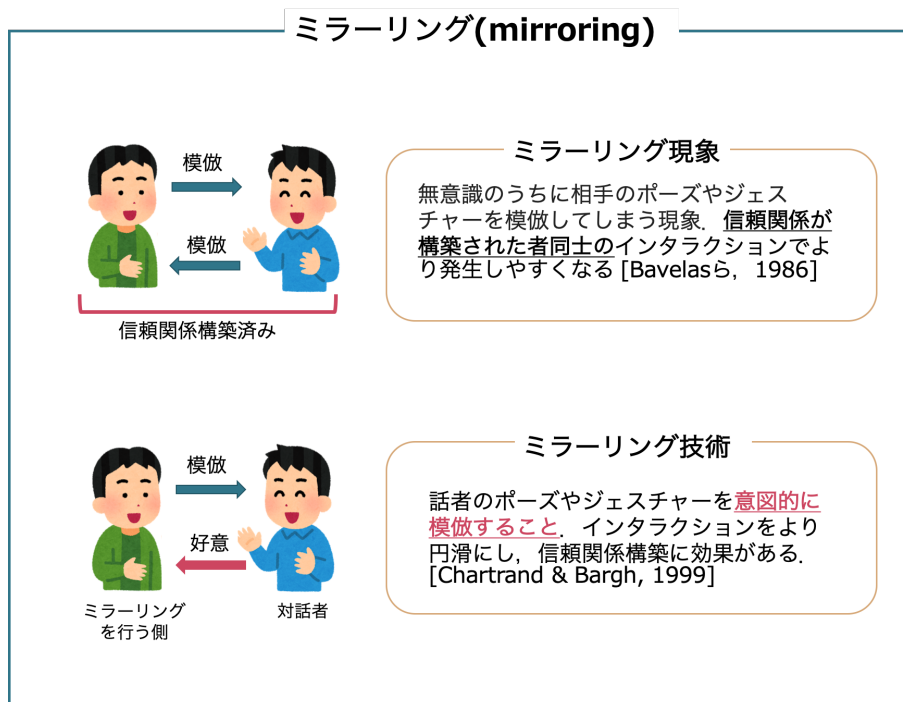


図 3 ミラーリング現象とミラーリング技術の違い

親密な関係である人同士であると、より起こりやすくなる「現象」である。それに加えて、相手と親密な関係になるためにわざと相手の姿勢・ジェスチャーを模倣する「技術」としても知られている。ミラーリング「現象」と「技術」の違いについて、図 2.2 に示す。本論文では、これ以降ミラーリングとは後者のミラーリング「技術」のことを指す。

2.3 人がミラーリングに気づいた時の印象

前節では、人によるミラーリングは相手との親密度を向上させることに有効であると述べたが、常にその有効性が保てるわけではない。その大きな要因として、対話者に模倣していることに対する「気づき」が挙げられる。ここでは、対話者がロボットの模倣に気づいた時にどのような印象を受けるのか調査した研究について、言語コミュニケーションにおいての研究も踏まえて説明する。まず、言語

コミュニケーションにおいては、対話者の言語情報、文法、語彙などを同時に模倣することで、親密度の低下に繋がることが実証されている [18]。また、対話者には、会話を模倣されることに対する閾値があり、それを越えると模倣を行う人のことを不快に感じてしまうと述べられている [19]。

非言語コミュニケーションにおいても似たような結果が見られる。Bailenson ら [7] は、VR 上で被験者とミラーリングをするエージェントに対話を行わせ、印象評価をした。その時のエージェントは

- 4 秒遅れて対話者の頭部動作の模倣
- 事前に別の人の動きを元に作られた頭部動作

をする。結果、4 秒遅れて対話者の頭部動作を模倣するエージェントの方が説得力があり、好感が持てることが判明した。また同時に、対話者は模倣していることに気づくと不快に感じたと言われている。さらに、この気づきによる不快感は、対話者がエージェントの模倣を意図的に感じることで原因だと考えられている。

よって対話者の姿勢・ジェスチャをそのまま模倣すると、対話者との親密度が下がる可能性があるため、ミラーリング時は対話者に模倣に気づかれないことが重要である。対話者に模倣を気づかれないミラーリングの方法の研究については次節で述べる。

2.4 ロボット・エージェントによるミラーリング

2.4.1 ロボット・エージェントによるミラーリングの効果

次に、人に対してのロボットやエージェントが行うミラーリングが人との親密度向上に効果があるかを検証した研究について述べる。ロボット・エージェントによるミラーリングに関する研究を表 2.1 に示す。

ロボットが人の表情や頭部動作をミラーリングして、その印象を調査した研究はいくつか行われている [20][21]。Gonsior らはロボットに人の顔の表情をミラーリングさせ、人に与える印象について調査した。相互作用中のロボットによる表情のミラーリングは、ロボットに対する共感度とタスクパフォーマンスの性能で

評価された。その結果、表情をミラーリングしたロボットは、無表情のロボットよりも高い評価を得られることが示された。一方、Riekらはロボットによる人の頭部動作のミラーリングが、人とロボットの親密度向上に効果があるかを調査したが、行なった主観評価に有意差は出なかった。しかし、彼らはサンプルサイズの小ささと実験の設定に関する他の要因が結果に影響を与えた可能性があることを認めている。また、Jamyら[22]は人がロボットのミラーリングをするよりロボットが人のミラーリングをする方が人にとって魅力的であるということを検証した。また、Bailensonら[7]はバーチャルエージェントに対話者の頭部動作を4秒遅れてミラーリングさせると、対話者に説得力がある印象を与え、好意を抱かせることができると述べている。Luisら[6]は人間の上半身の姿勢に対してロボットが行うミラーリングの効果を検討した。この実験は以下の3条件のロボットを用いて構成される。

1. ロボットは人間の姿勢を時々ミラーリングする
2. ロボットは時々事前にプログラムされたミラーリングではない動きをする
3. ロボットは静止したまま動かない

結果として、ロボットによる上半身姿勢のミラーリングが、人とロボットとの相互作用における共感を促進する重要な要因であり、親密度向上に効果的であると述べている。

以上から、ロボットが人に対して行うミラーリングにも、人が行うミラーリングと同様に親密度を向上させる効果が期待できる。

2.4.2 ロボット・エージェントによる対話者に気づかれないミラーリング方法

ロボットやエージェントは人と違い、対話者の姿勢・ジェスチャを定量的に模倣することができるため、2.2で述べたような対話者に気づかれないミラーリングの方法を調査した研究が幾らか存在する。ロボット・エージェントによるミラーリング方法の研究を表2.2に示す。

Shinohara ら [24] は人がエージェントに対して親しみを感じるのに適した頭部動作のミラーリングの頻度を調査した．この実験では，被験者に yes/no 質問をして，yes なら首を縦に，no なら首を横に振らせて，その頭部動作をミラーリングするロボットとインタラクションを行なってもらった．結果，83%の同意率が最も親しみやすいと述べられている．林ら [25] は人の頭部動作を以下の3つのパラメータを変化させてミラーリングするエージェントを用いて，話しやすい最適なパラメータ値の組み合わせを調査した．

- 遅延：人のジェスチャを検出後，エージェントがジェスチャをするまでの時間
- ゆらぎ：人の動作量とエージェントの動作量の誤差量
- 頻度：模倣を行う回数

話しやすさで最も高い評価が得られたのは，遅延 4[sec]，ゆらぎ-60～-30%，頻度 60%の値の組み合わせだという結果となった．また，Bailenson ら [23] によると，頭部を 4 秒遅れで模倣するバーチャルエージェントは模倣を行わないバーチャルエージェントより説得力があり，好意を抱かれることがわかっている．

このように，対話者に気づかれないように何秒か遅れて模倣したり，模倣する頻度を変更することで，対話者に親しみや，好意抱いてもらえと考えられる．しかし，人によって模倣されていることに気づくには能力的な差があるため，これらの研究で発見されたパラメータをそのままロボット・エージェントに用いても，模倣に気づかれる恐れがある．この問題を解決するために対話者の模倣されていることに対する気づきに依拠して，模倣方法を変更できるシステムが考えられる．

2.4.3 ロボットによるジェスチャミラーリングの位置付け

本節から，ロボットによるミラーリングが人との親密度向上に効果があるかを検証した研究は多く存在することがわかる．しかし，表 2.1 より，人のジェスチャに対するミラーリングをロボットで行なった研究は少ない．また，本研究でのジェスチャミラーリングとは，腕の動作をミラーリングすることを指す．また表 2.2

より，ミラーリングの方法においても，ジェスチャのミラーリング方法については調査されていない．また，人によるジェスチャのミラーリングは，親密度向上に効果があると言われている [5][13][14]．そのため，本研究ではロボットによるジェスチャミラーリングに焦点を当てる．

2.5 人による気づきと視線の関係

人の視線は従来から気づきの指標として見なされてきた [26]．飛田ら [27] は気づきのパターンを視線の情報から分類できる可能性を示した．阪口ら [8] は滑動性眼球運動と呼ばれる視線の追従運動を利用して，人の気づきを検出した．また，模倣に対する気づきと視線の関係を調査した研究は少なく，米津ら [28] は遠隔地にいる人の言語，及び非言語情報を代替するテレプレゼンスロボットに同調動作を行わせ，対話者に与える印象について調査した．ここでの同調動作とは，対話者の首の角度，まばたき，目線，表情を対話者に合わせることであり，表情のみ遠隔地の人と対話者をマージしたものとしている．実験で，テレプレゼンスロボットの同調動作に気づいた被験者は視点移動回数が他の被験者よりもかなり高い数値であることが報告されている．しかし，この同調動作に気付いた被験者は2人で，視点移動回数高かったのは内1人だけである．またロボットによるジェスチャといった動きの多い物体に対しては，模倣に気づいた場合と気付いていない場合で視線の追従運動に差が出やすいと考える．

以上から，本研究では視線の追従運動に注目して，人の模倣されていることに対する気づきの検出手法を考える．

2.6 本研究の位置付け

ジェスチャミラーリングは，人との親密度を向上させることができるが，模倣していることに気づかれるとその親密度が下がる恐れがある．しかし，従来研究では対話者の模倣されていることに対する気づきを測定し，親密度の低下を防ぐような取り組みは行われてこなかった．そこで，本研究では，対話者の模倣されてることの気づきを対話者の視線から測定し，その気づきから対話者との親密度

を向上させるようなロボットの模倣方法に変更する，適応的ジェスチャミラーリングシステムの開発を目指す．そのために，まず人のジェスチャを模倣できるシステムをロボットに実装する．次に，人との親密度を向上させ，模倣されてることに気づかれにくいロボットのミラーリング方法について調査する．そのために，ロボットの模倣方法を変更させ，ロボットの模倣度と，人とロボットの親密度の関係を調査する．次に，ロボットの模倣に対する対話者の気づきを検出するために，模倣されていることに気づいた時の対話者の視線情報を分析する．最後に，これらの結果を元に適応的ジェスチャミラーリングシステムの展望について述べる．

表 1 人との親密度向上を目的としたロボット・エージェントによるミラーリングの研究

研究	ミラーリングする主体	ミラーリングの対象	対話者に与える印象
Gonsior ら [20]	ロボット	表情	共感性
Riek ら [21]	ロボット	頭部動作	親密度向上に効果見られず
Bailenson ら [7]	バーチャルエージェント	頭部動作	説得力, 好意
Luis ら [6]	ロボット	上半身の姿勢	共感性, 人らしさ

表 2 ロボット・エージェントによる相手に気づかれないミラーリング方法の研究

研究	ミラーリングする主体	ミラーリングの対象	制御パラメータ
Shinohara ら [24]	ロボット	頭部動作	頻度
林ら [25]	ロボット	頭部動作	頻度・ゆらぎ・頻度
Bailenson ら [7]	バーチャルエージェント	頭部動作	遅延

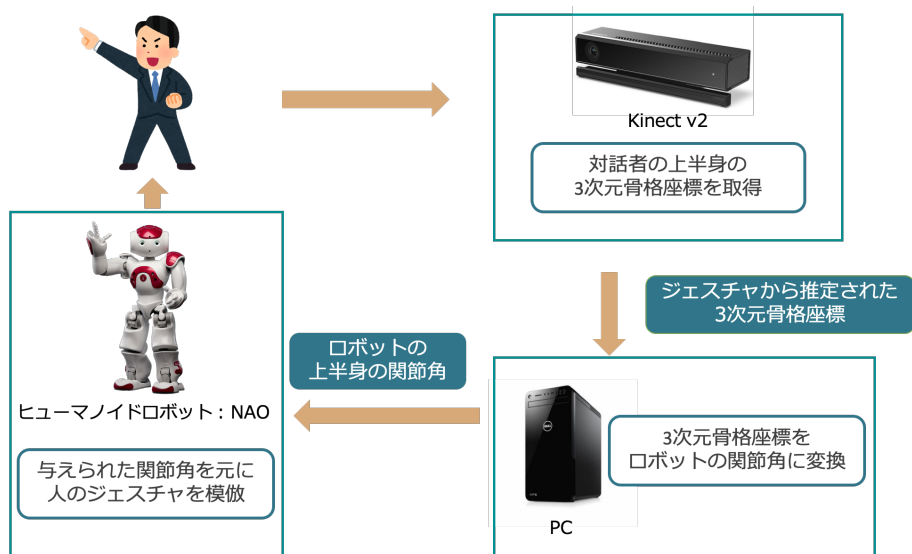


図 4 ジェスチャ模倣システムの概要図

3. ロボットへのジェスチャ模倣システムの実装

本章では、適応的ジェスチャミラーリングシステムの基盤となる、ロボットへ実装するジェスチャ模倣システムについて述べる。まずロボットによるジェスチャ模倣システムの構成を説明する。その次にジェスチャ模倣システムを実現するために、Kinect で推定された人の上半身の3次元骨格座標からヒューマノイドロボット NAO の上半身の関節角に変換する式の導出について述べる。

3.1 ジェスチャ模倣システムの概要

本研究で用いたジェスチャ模倣システムのデータフローを図 3.1 に示す。本システムは、Microsoft 社の Kinect V2[29], Aldebaran 社のヒューマノイドロボット NAO[30] で構成される。本システムでは人間の上半身のジェスチャーに対して模倣を行うため、図 3.2 における 0~12, 16 の部位の3次元座標を Kinect V2 を用いて推定する。次に推定した3次元骨格座標から NAO の関節角を求める。

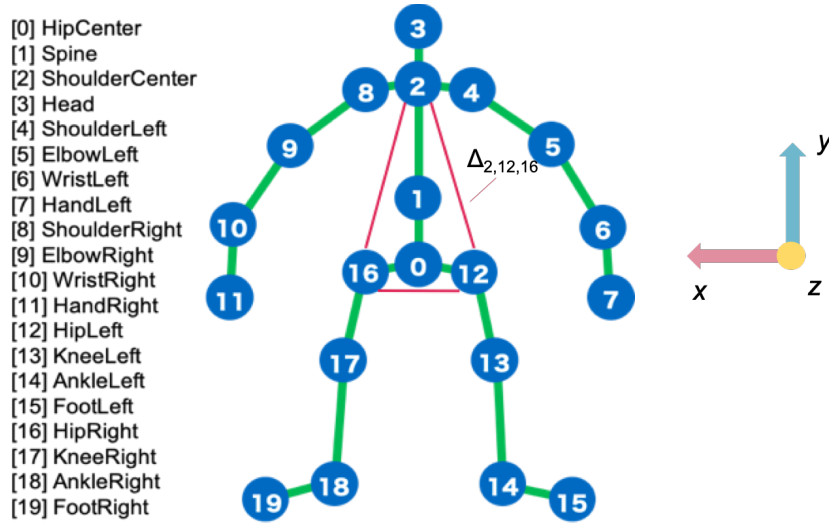


図 5 Kinect V2 で推定される 3 次元骨格座標

3.2 3 次元骨格座標から関節角への変換

Kinect によって推定された 3 次元骨格座標，または位置ベクトルは NAO に直接変換することができず，図 3.3 のような NAO の関節角に変換する必要がある．Kinect を用いて NAO に人のジェスチャの模倣をさせる手法はいくつか研究されている [31][32][33]．本研究では，従来研究で多く用いられている，比較的応答性の高い逆運動学で NAO の関節角を求める．本研究では，Yavsan[33] が Kinect から推定した 3 次元骨格座標から NAO の関節角に変換するアルゴリズムを元にジェスチャ模倣システムの実装を行なった．以下，Kinect によって推定された人の 3 次元骨格座標から NAO の関節角に変換する手法を説明する．

Kinect で推定された各 3 次元骨格座標によるベクトルは，次式によって，NAO に適したベクトルに変換される．

$$r_{s,fNAO}^{\rightarrow} = A \cdot (r_{fkinect}^{\rightarrow} - r_{s_{kinect}}^{\rightarrow}) = A \cdot (r_{s,f_{NAO}}^{\rightarrow}), \quad (1)$$

$$s, f \in \{0, 1, 2, \dots, 12, 16\} \quad (2)$$

ここでの $r_{f_{kinect}}^{\rightarrow}$ と $r_{s_{kinect}}^{\rightarrow}$ はそれぞれ Kinect 座標系のベクトル $r_{s, f_{kinect}}^{\rightarrow}$ の終点

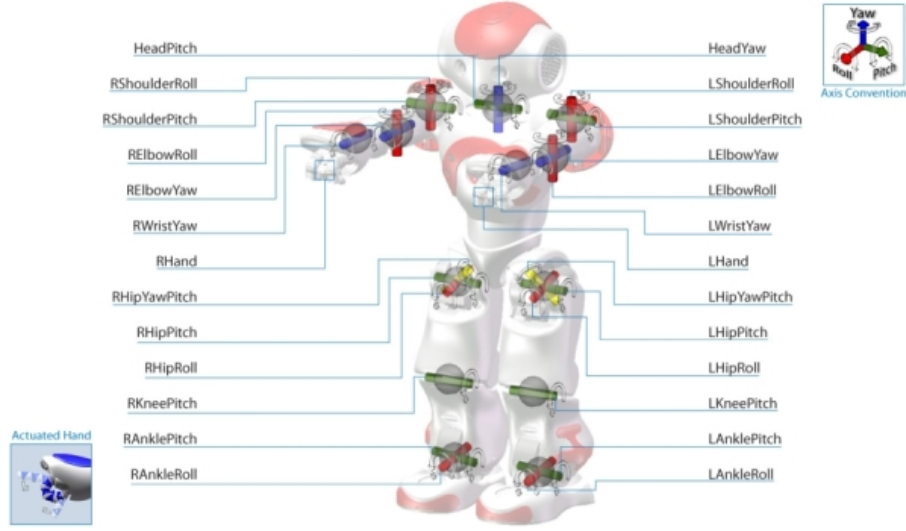


図 6 NAO の関節と回転方向

と開始点である． r_s, f_{NAO} は NAO の座標系におけるベクトルで， A は変換行列を示す．また，骨格モデルは，図 3.2 の $\Delta_{2,12,16}$ の三角形で表される．骨格モデルの x 軸は，Kinect の HipLeft(図 3.2 の 12 番), HipRight(図 3.2 の 16 番) の 3 次元骨格座標間のベクトルとして定義することができる．

$$\vec{x} = \frac{r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{12_{kinect}}^{\vec{}}}{|r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{12_{kinect}}^{\vec{}}|} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

骨格モデルの z 軸は，図 3.2 で示している三角形に直交しているため，次式のよう
にベクトルの外積で計算できる．

$$\vec{z} = \frac{(r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{12_{kinect}}^{\vec{}}) \times (r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{2_{kinect}}^{\vec{}})}{|(r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{12_{kinect}}^{\vec{}}) \times (r_{16_{kinect}}^{\vec{}} - r_{2_{kinect}}^{\vec{}})|} = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

y 軸は z と x の外積で求まる.

$$\vec{y} = \vec{z} \times \vec{x} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix} \quad (5)$$

よって変換行列 A は次のように求まる.

$$A = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

上半身の模倣を行うために, NAO の腕の関節角度を求めていく. まず右肩の関節角 (図 3.3 の RShoulderRoll, RShoulderPitch) は次式で求められる.

$$RShoulderRoll = -\left(\frac{\pi}{2} - \cos^{-1}\left(\frac{(\vec{y} \times \vec{z}) \cdot r_{8,9NAO}}{|\vec{y} \times \vec{z}| \cdot |r_{8,9NAO}|}\right)\right), \quad (7)$$

$$RShoulderPitch = -\tan^{-1}\left(\frac{r_{3right}}{r_{1right}}\right), r_{8,9NAO} = \begin{pmatrix} r_{1right} \\ r_{2right} \\ r_{3right} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

座標 $r_{1right}, r_{2right}, r_{3right}$ はそれぞれベクトル $r_{8,9NAO}$ の x 軸, y 軸, z 軸上の射影を表す. 次に右肘の関節角を考える. 右肘のロール角 (図 3.3 の RElbowRoll) は以下の式で求められる.

$$RElbowRoll = \cos^{-1}\left(\frac{r_{8,9NAO} \cdot r_{9,10NAO}}{|r_{8,9NAO}| \cdot |r_{9,10NAO}|}\right). \quad (9)$$

右肩のロール角を α ，ピッチ角を β とすると，右肘のヨー角 (図 3.3 の RElbowYaw) は以下で計算できる．

$$b_{right_{NAO}}^{\rightarrow} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \vec{z} \quad (10)$$

$$r_{right_{NAO}}^{\rightarrow} = \frac{r_{8,9_{NAO}}^{\rightarrow} \times r_{9,10_{NAO}}^{\rightarrow}}{|r_{8,9_{NAO}}^{\rightarrow} \times r_{9,10_{NAO}}^{\rightarrow}|} \quad (11)$$

$$RightElbowYaw = \left(\frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \left(\frac{b_{right_{NAO}}^{\rightarrow} \cdot r_{right_{NAO}}^{\rightarrow}}{|b_{right_{NAO}}^{\rightarrow}| \cdot |r_{right_{NAO}}^{\rightarrow}|} \right) \right). \quad (12)$$

求められた右肩，右肘の関節角の変換式は左肩，左肘にも同様に計算することができる．上記の変換式を用いて，Kinect から推定された人の上半身の 3 次元骨格座標を NAO の関節角に変換し，人のジェスチャーに対する模倣を行う．

4. 気づかれにくく親密度を向上させる模倣方法の調査

適応的ジェスチャミラーリングシステムでは，対話者の模倣されていることに対する気づきに依拠して，ジェスチャミラーリングの模倣パラメータを調整して模倣方法を変更し，模倣していることを気づかれないようにする．そのために，どのような模倣方法が対話者に気づかれにくく，親密度を向上させることができるか調査する必要がある．そこで実験では，模倣していることに気づかれずに親密度を高めるロボットのジェスチャミラーリング方法の調査を目的として，第三者によるロボットのジェスチャミラーリングに対する模倣度と人とロボットの親密度を調査する．まず実験Ⅰでは「遅延」「動作量」「頻度」のパラメータのうちどれか1つで制御されたミラーリングを行うバーチャルロボットを用意する．そして第三者に人とジェスチャミラーリングを行うバーチャルロボットが対話している動画を見て，ロボットの模倣度と動画内の人とロボットの親密度について評価してもらう．次に，実験Ⅰで最も親密度の高かった「遅延」「動作量」「頻度」の値を組み合わせたミラーリングを行うバーチャルロボットを用意する．実験Ⅱではそのバーチャルロボットを用いて，実験Ⅰ同様の流れで第三者に評価を行なってもらう．以下実験の仮説，第三者でロボットのミラーリングを評価する理由，ジェスチャミラーリングの模倣パラメータ，実験Ⅰ，実験Ⅱの詳細について述べる．

4.1 実験概要

4.1.1 仮説

2章で述べたように，模倣していることに気づかれると対話者に不快感を与えてしまう可能性があり [7]，対話者に気づかれないようなミラーリング方法が親密度向上に効果的であると考えられる．しかし，ジェスチャミラーリング時に模倣度を下げすぎても，ミラーリングによる人との親密度を向上させる効果が得られなくなってしまう．また，ここでの模倣度とは，人の主観によるロボットのジェスチャがどれだけ対話者のジェスチャと似ていたかという尺度である．よって，以下のように仮説を立てた．

H1：ロボットによるジェスチャミラーリングにおいて、模倣度が高くなり、第三者に模倣していることがはっきりと気づかれると、人とロボット間の親密度が低く評価される。

H2：ロボットによるジェスチャミラーリングにおいて、第三者に気づかれない範囲で高い模倣度でミラーリングを行なっている場合、人とロボット間の親密度が高く評価される。

4.1.2 第三者でミラーリング評価を行う理由

実験では、第三者に人とジェスチャミラーリングを行うロボットが対話している動画を見て、ロボットの模倣度と親密度を評価してもらう。このように第三者にミラーリングを評価してもらう理由として、対話者がロボットのミラーリング評価を行うと、対話者によってジェスチャの頻度などが異なることや、対話中にロボットのジェスチャにあまり集中できないなどが挙げられる。また、第三者にミラーリングをしている動画を見て、動画内の人同士や人とロボットを評価してもらう研究は以前から行われている。Bernieri[34]は第三者に人と人が対話してもらう動画をみてもらい、動画内の人がミラーリングを多く行う方が、より親密な関係であり、ポジティブな印象を受けると述べている。また、Jamy[22]のStudy2では、人とミラーリングをするロボット、ミラーリングをする人とロボット、また人と人(どちらもミラーリングをしない)が対話をしている動画を用意して、第三者に評価してもらった。結果、ロボットが人に対してミラーリングをする方を第三者は好み、魅力的であることがわかった。このように、第三者でもミラーリングによる親密度を評価することができる。さらに、第三者はミラーリングにより気づきやすく [35]、ミラーリングによる効果が出やすくなるを考える。

4.1.3 実験で用いる動画

実験で用いる、人とミラーリングを行うバーチャルロボットが対話をする動画について説明する。実験I動画の作成手順について図4.1に示す。まず、5分間で出身や趣味などの5つのトピックに対して自由に人同士で対話を行ってもらう。

また，この時対話を行なってもらった人には，いつもよりも身振り手振りを使って対話を行なってもらうように指示した．人同士の対話中に動画を撮影し，内一人の3次元骨格座標を Kinect V2 で取得した．録画した動画から，自然なジェスチャが多かった出身・趣味・好きな食べ物の3つのトピックの対話を使用する．次に使用する3通りの動画に対して，図 4.1 の右側 (Kinect V2 で3次元骨格座標を取得していない方) の人をバーチャルロボットに置き換える．この時，オープンソース3次元ロボットシミュレーターである Webot[36] でバーチャルロボットを動作させる．人同士で対話を行なった際に図 4.1 の左側の人の3次元骨格座標を取得しているため，それを 3.2 節で示した方法で NAO の関節角に変換し，バーチャルロボットの NAO にジェスチャミラーリングを行わせる．また，バーチャルロボットがジェスチャミラーリングを行う際，模倣パラメータ「遅延」「動作量」「頻度」を調整する．次節で，模倣パラメータについて詳述する．

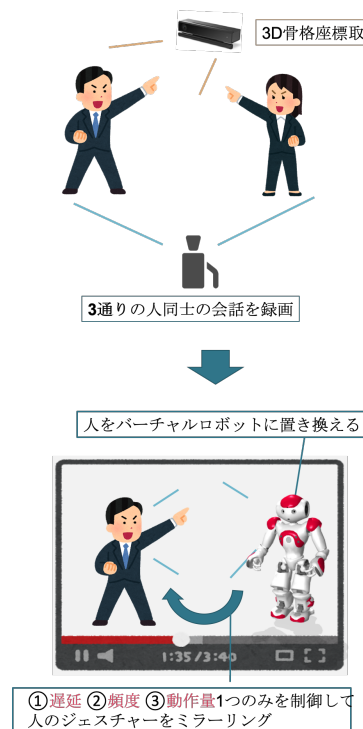


図 7 動画の作成手順

4.1.4 ロボットによるジェスチャミラーリングの模倣パラメータ

対話者に気づかれず，親密度向上に効果的なジェスチャミラーリングの模倣方法を調査するために，実験で用いる各動画でロボットの模倣パラメータを変更する．ここでの模倣パラメータとは，模倣度を調整できると想定したパラメータのことである．表 4.1 に用いる模倣パラメータとその説明について示す．

2.4 で述べたように，ミラーリング時に「遅延」「ゆらぎ」「頻度」を調整することで，対話者との信頼関係を高めることができることがわかっているため [7][24][25]，これらのパラメータを選定した．また，本研究では「ゆらぎ」を「動作量」と呼ぶ．実験ではこの模倣パラメータを変更してジェスチャミラーリングを行うロボットの模倣度と，人とロボット間の親密度の関係を調査する．

4.2 実験 I

4.2.1 実験 I の目的

実験 I では，「遅延」「動作量」「頻度」のそれぞれの模倣パラメータ 1 つのみでジェスチャミラーリングを行うロボットを用いて，模倣していることに気づかれずに親密度を高めるジェスチャミラーリング方法の調査を目的とする．また，実験 I で親密度が高く評価されたそれぞれのパラメータ値は，実験 II で用いる．

表 3 本システムで用いる模倣パラメータ

パラメータ	説明
遅延	人のジェスチャの模倣を開始するまでの時間
頻度	人のジェスチャの模倣を行う回数
動作量	人のジェスチャを模倣した時にするジェスチャの大きさ

4.2.2 実験I方法・手順

実験I方法

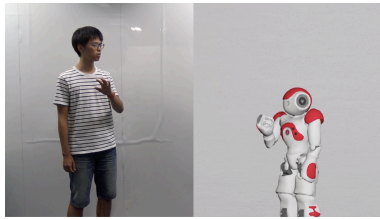
実験Iでは、20代の男性6名にWeb上で動画の視聴後にアンケート評価を行なってもらった。実際に視聴してもらった動画例を図4.2に示す。動画は4.1.2節で述べたように3つのシーン(趣味, 料理, 好きな食べ物)で構成されており, 1つのシーンに対してロボットは表4.2で示している中の1つのパラメータ値で制御されるため, 計27本ある。表4.2で示したようなパラメータ値の選定理由として, まず遅延に関しては, バーチャルエージェントが頭部動作を模倣する場合に4秒遅れて模倣した時が最も話しやすいと評価されており[25], 同じくバーチャルエージェントで頭部動作を模倣し, 4秒遅れて模倣することが模倣を認識されるのを最小限に抑えるパラメータだと言われている[23]。また, 動作量はバーチャルエージェントが頭部動作を模倣する際に30~60%が最も話しやすいと評価されており, 頻度は60%が最も話しやすいと評価されている[25]。また, 本研究は頭部動作でなく知見の少ないジェスチャ(腕の動作)のミラーリングの評価を行うため, 探索的な調査が必要だと考える。よって, 遅延パラメータは4秒を中心に2秒, 4秒, 6秒, 動作量・頻度のパラメータは50%を中心に25%, 50%, 75%とする。

実験I手順

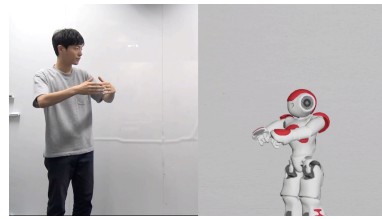
実験Iの手順としては, まず実験説明のWebページにアクセスしてもらい, 「今からバーチャルロボットと人が趣味, 出身地, 好きな食べ物に関する対話をしている動画をみてもらいます。また, 各動画を見終わった後にアンケートに答えてもらいます。全ての動画に対する評価項目は同じで, 動画は何度再生していただいても構いません。また, 実験を開始したら最後まで中断することなく続けてく

表4 実験Iの模倣パラメータ値

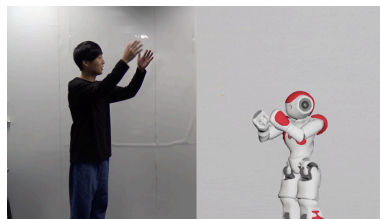
遅延 [sec]	頻度 [%]	動作量 [%]
2	75	75
4	50	50
6	25	25



[1] 趣味の話



[2] 料理の話



[3] 出身の話

図 8 実験に使用する動画

ださい」といった説明に目を通してもらう。その後、バーチャルロボットの声や動きに慣れてもらうために、実験で用いる趣味・料理・好きな食べ物それぞれのシーンにおけるバーチャルロボットと人が対話している動画を見てもらう。この慣らし用の動画ではバーチャルロボットは動画内の人のミラーリングは行わず、ランダムなアイドリングモーションを行う。また、この慣らし動画の中でバーチャルロボットのモーションが偶然動画内の人の動作と一致することはないように調整している。そして、27本(1シーン9本)のバーチャルロボットがミラーリングを行う動画を視聴し、それぞれの動画に対してアンケート評価を行なってもらった。

4.2.3 実験Ⅰの評価方法

実験Ⅰの評価項目として、

1. バーチャルロボットの動作と動画内の人の動作は似ていましたか？
2. 動画内の人はバーチャルロボットを好んでいるように感じましたか？

3. 動画内の人はバーチャルロボットとの会話を楽しんでいるように感じましたか？

を用意した．項目 1 は第三者によるバーチャルロボットの模倣度を調査するために用意した．項目 2, 3 は第三者が人同士の動画を見て，動画内の人同士における親密度を評価する際に使用されている [34]．そして，2, 3 の項目で得られた評価値の合計の平均値を親密度として利用する．また，2, 3 の項目についてはその理由についての自由記述も設けてある．

4.2.4 実験 I 結果

アンケートによる主観評価結果を図 4.3，評価項目 2 と 3 に関する被験者の自由記述を表 4.3 に示す．ここでは標本数が 30 以下で対応あり，また 3 群以上の比較となるため，検定方法は Holm 補正をした Willcoxon の符号順位検定で行なった．また有意水準は 5% とする．「動画内のバーチャルロボットの動作と人の動作は似ていると感じましたか」という項目に関しては，まず遅延パラメータを見てみると，2 秒と 6 秒，4 秒と 6 秒で有意差が認められた．次に動作量は 25%, 50%, 75% それぞれに完全有意差が認められた．頻度は 25%, 50% で有意差，25% と 75% で完全有意差が認められた．次に，「動画内の人とバーチャルロボットの親密度」に関しては，動作量 25%, 50% 間では有意差が認められなかったが，有意傾向が認められた．

4.2.5 実験 I 考察

まず図 4.3 からの考察を行う．「遅延」「動作量」「頻度」それぞれの模倣パラメータにおいて，パラメータ値を完全模倣からより異なるように調整するほど，模倣度が下がることがわかる．よって，模倣パラメータ 1 つのみで動作するロボットの場合，「遅延」「動作量」「頻度」それぞれの模倣パラメータは模倣度に影響すると言える．

次に，表 4.3, 4.4 の被験者による自由記述から考察を行う．人とロボットの親密度については動作量 25% と 50% で有意傾向が見られたのみで，有意差は得られ

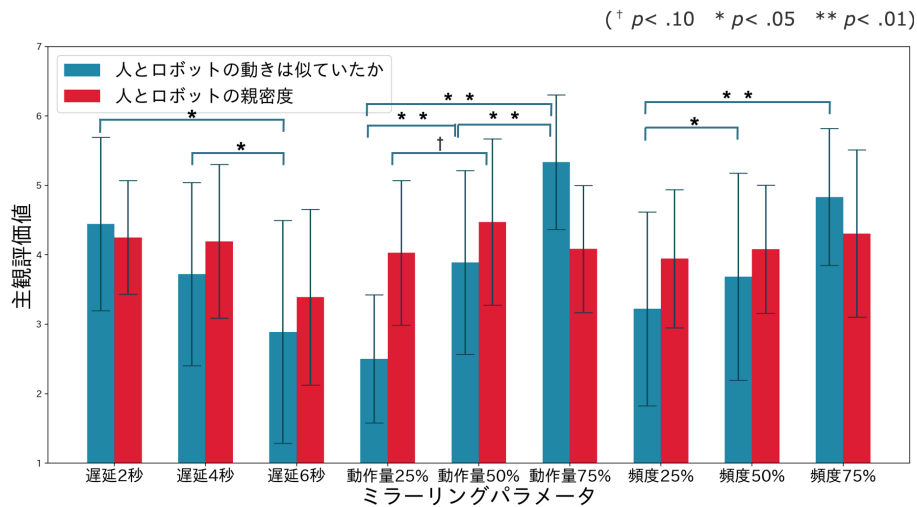


図 9 実験 I のアンケート主観評価結果

なかった。好んでいないように感じた理由・楽しんでいないように感じた理由共に、全ての動画において差がわからなかったという意見から、評価項目の内容が原因として考えられる。そのため実験 II では実験 I で項目 2, 3 を「動画内の対話者とバーチャルロボットはどのくらい親密に見えましたか？」という項目に変更する。また、サンプル数の少なさも原因の 1 つとして考えられる。一方で、好んでいないように感じた理由として「数秒遅れで真似てることがわかったため」、楽しんでるように感じた理由として「動作がさりげなくあっていたため」とある。これらは 4.2 で提示した仮説 H2 を裏付ける可能性がある。仮説を検証するため、実験 II は、実験 I で最も親密度の評価が高かった遅延 2[sec]、動作量 50%、頻度 75% の組み合わせでジェスチャミラーリングを行うロボットに対して第三者に主観評価を行ってもらう。また、評価項目を改善し、被験者数を増やした上で実験 II を行う。

4.3 実験Ⅱ

4.3.1 実験Ⅱの目的

実験Ⅱでは、実験Ⅰで最も親密度の高かった「遅延」「動作量」「頻度」のパラメータの値の組み合わせでジェスチャミラーリングを行うロボットを用いて、模倣度と親密度の関係について調査することを目的とする。

4.3.2 実験Ⅱ方法・手順

実験Ⅱでは、20代の男性18名、女性1名に実験Ⅰ同様 Web 上で動画の視聴後にアンケート評価を行なってもらった。用いる動画のシーンは実験Ⅰと同じで、異なる点はバーチャルロボットのミラーリング方法である。実験Ⅱにおけるバーチャルロボットの模倣パラメータの組み合わせのパターンを表 4.5 に示す。実験Ⅰでは「遅延」2[sec], 「動作量」50%, 「頻度」75%が最も親密度が高く評価されたため、これらのパラメータ値を元に組み合わせを行った。また、実験Ⅱの手順においては実験Ⅰと全く同様である。

4.3.3 実験Ⅱの評価方法

実験Ⅱの評価項目は

1. バーチャルロボットの動作と動画内の人の動作は似ていましたか？
2. バーチャルロボットの動作タイミングは動画内の対話者の動作タイミングに合っているように感じましたか？
3. 動画内の対話者とバーチャルロボットはどのくらい親密に見えましたか？
4. 動画内のバーチャルロボットの動作をわざとらしく感じましたか？

とする。項目1は実験Ⅰと同様で、項目2に関しては時間的側面からロボットの模倣度を評価するために設けた。また、実験Ⅰでの被験者の意見を考慮して、親密度は項目3のように直接的なものにする。さらに Bailenson ら [7] が模倣を意図

的に行っていると対話者が気づくと親密度が下がる原因になる可能性があるということを示唆している。そのため、項目4は被験者がバーチャルロボットが意図的に模倣を行ってると感じたかを調査するために設けた。

4.3.4 実験Ⅱ結果

アンケートによる主観評価結果を図4.4に示す。図4.4の横軸はアンケートの主観評価値、縦軸は模倣条件を表す。例えば(2sec, 50%, 100%)は遅延2秒、動作量50%, 頻度100%で模倣することを意味している。ここでも、実験Ⅰと同じように各項目におけるパラメータ間に対して、Holm補正をしたWillcoxonの符号順位検定を行なった。また有意水準は5%とする。各パラメータ間のp値を表4.6～4.9に示す。y有意差($p \leq 0.05$)がある場合は太字、有意傾向($p \leq 0.1$)がある場合は下線を引いてある。項目1の「ロボットの動作は似ていたか」においてはランダムモーションは全てのパラメータと有意差が出ており、完全模倣においても遅延以外のパラメータ全てと有意差が出ている。また、遅延と動作量、遅延と遅延・動作量で有意差が出ていることがわかる。項目2「ロボットの動作タイミングは合っていたか」では、完全模倣と遅延・動作量・頻度、遅延・動作量、動作量・頻度、ランダムモーションのパラメータ間で有意差が出ている。またランダムモーションと頻度においても同様である。次に項目3「人とロボットはどれくらい親密に見えたか」においては、ランダムモーションと動作量・頻度、遅延、頻度に関して有意差が出ている。最後に項目4「ロボットの動作はわざとらしいか」においては、完全模倣と遅延・動作量・頻度、遅延・動作量、動作量・頻度、遅延、動作量のパラメータ間で有意差が出ている。またランダムモーションでも遅延・動作量・頻度、遅延・動作量、動作量・頻度、遅延、動作量のパラメータ間で有意差が出ていることがわかる。以上の結果から、考察に移る。

表 5 被験者の項目「ロボットを好んでいるように感じたか」に対する評価の理由

好んでいるように感じた理由	好んでいないように感じた理由
笑っていたから	数秒遅れで真似てることがわかったため
時々言葉を復唱したりして話を聞こうとしている姿勢が見えたから	話者の映像が全く変わらないのでわからない
相手の様子を伺う、気にするような感じがした	そっくりそのままロボットが真似てて、あまり好ましくなさそうに見えた

表 6 被験者の項目「人とロボットは楽しんでいるように感じたか」に対する評価の理由

楽しんでいるように感じた理由	楽しんでいないように感じた理由
笑っていたから、声のトーンがいい感じ	会話を楽しむ、というより説明しようとしている、理解させようとしている印象だった
動作がさりげなくあっていたため	全ての動画において差がわからなかった
身振りコミュニケーションしているようにも見えたため	ペースがはやくて会話を楽しむというよりインタビューしてるようだった
ロボットに対して受け身で喋っていたので好きな話題を喋る分には楽しいのかなと思った	

表 7 実験Ⅱにおけるバーチャルロボットの模倣パラメータ値

パターン	遅延 [sec]	動作量 [%]	頻度 [%]
1	2	50	75
2	2	50	100
3	2	100	75
4	0	50	75
5	2	100	100
6	0	50	100
7	0	100	75
8(完全模倣)	0	100	100
9(ランダムモーション)	×	×	×

表 8 項目 1:「ロボットの動作は似ていたか」における各群間の p 値

	ランダム	遅×動×頻	遅×動	遅×頻	動×頻	遅延	動作量	頻度
遅×動×頻	0.0127	-	-	-	-	-	-	-
遅×動	0.0193	1.000	-	-	-	-	-	-
遅×頻	0.0065	0.7372	0.5193	-	-	-	-	-
動×頻	0.0083	0.6620	0.2760	1.000	-	-	-	-
遅延	0.0065	0.1118	0.0410	0.3799	0.5193	-	-	-
動作量	0.0065	1.000	0.7665	0.6620	0.5193	0.0475	-	-
頻度	0.0065	0.5383	0.2334	1.000	1.000	0.6620	0.3604	-
完全模倣	0.0065	0.0127	0.0127	0.0454	0.0391	0.0705	0.0109	0.0233

表 9 項目 2:「ロボットの動作タイミングは合っていたか」における各群間の p 値

	ランダム	遅×動×頻	遅×動	遅×頻	動×頻	遅延	動作量	頻度
遅×動×頻	0.177	-	-	-	-	-	-	-
遅×動	0.177	1.000	-	-	-	-	-	-
遅×頻	1.000	1.000	1.000	-	-	-	-	-
動×頻	0.245	1.000	1.000	1.000	-	-	-	-
遅延	<u>0.058</u>	1.000	1.000	0.462	1.000	-	-	-
動作量	<u>0.057</u>	0.619	0.562	0.230	0.462	1.000	-	-
頻度	0.041	1.000	1.000	0.291	1.000	1.000	1.000	-
完全模倣	0.015	0.046	0.081	0.033	0.032	0.245	0.148	0.245

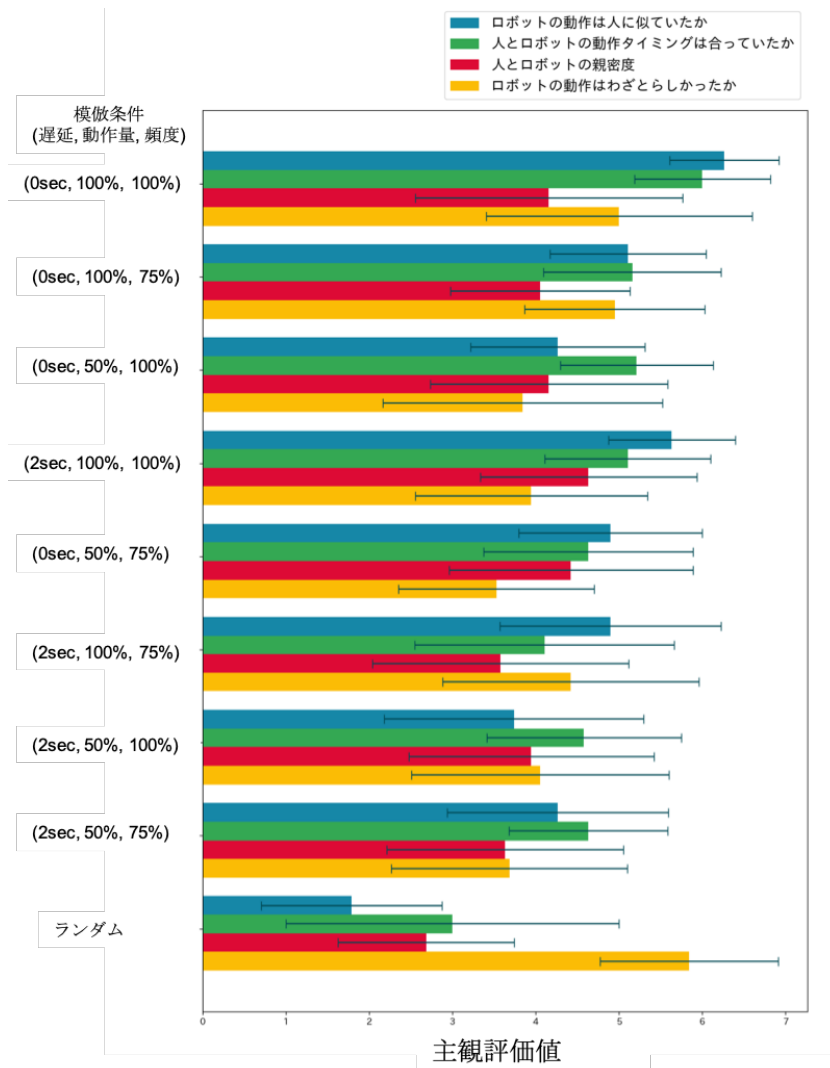


図 10 実験Ⅱのアンケート主観評価結果

表 10 項目 3: 「人とロボットはどれくらい親密に見えたか」における各群間の p 値

	ランダム	遅×動×頻	遅×動	遅×頻	動×頻	遅延	動作量	頻度
遅×動×頻	0.202	-	-	-	-	-	-	-
遅×動	0.323	1.000	-	-	-	-	-	-
遅×頻	0.873	1.000	1.000	-	-	-	-	-
動×頻	0.030	1.000	1.000	1.000	-	-	-	-
遅延	0.024	0.617	1.000	0.556	1.000	-	-	-
動作量	<u>0.089</u>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-	-
頻度	0.020	1.000	1.000	1.000	1.000	0.424	1.000	-
完全模倣	0.086	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

表 11 項目 4: 「ロボットの動作はわざとらしいか」における各群間の p 値

	ランダム	遅×動×頻	遅×動	遅×頻	動×頻	遅延	動作量	頻度
遅×動×頻	0.021	-	-	-	-	-	-	-
遅×動	0.046	1.000	-	-	-	-	-	-
遅×頻	0.240	0.204	1.000	-	-	-	-	-
動×頻	0.021	1.000	1.000	0.361	-	-	-	-
遅延	<u>0.057</u>	1.000	1.000	1.000	1.000	-	-	-
動作量	0.046	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-	-
頻度	0.487	0.914	1.000	<u>0.057</u>	0.204	0.287	0.358	-
完全模倣	1.000	0.226	1.000	1.000	0.128	1.000	1.000	1.000

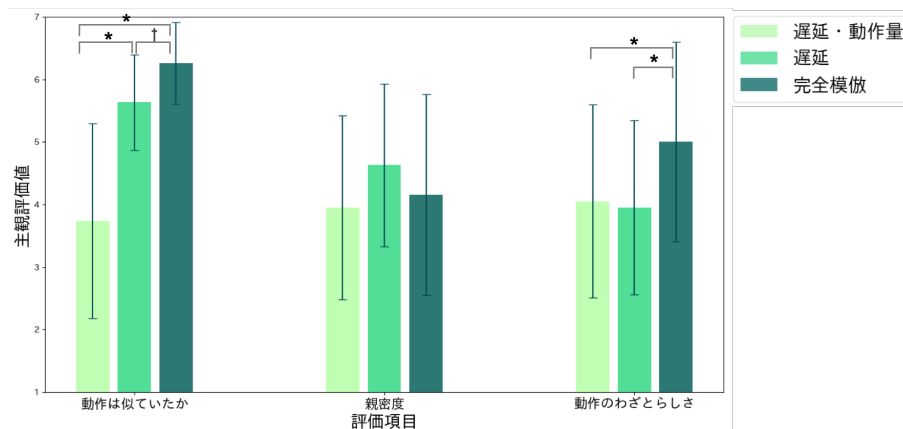


図 11 模倣条件「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」の主観評価結果

4.3.5 実験Ⅱ考察

模倣条件「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」間での比較

まず,「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」3つの模倣条件に注目して各項目毎に比較を行う. 図 4.5 に 3 模倣条件での主観評価結果を示す. 図 4.5 より,「動作が似ていたか」の項目では「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」の順で高く評価されており,「遅延・動作量」と「遅延」または「完全模倣」の間で有意差が認められ,「遅延」と「完全模倣」の間で有意傾向が認められている. よって,これらの模倣条件では,模倣パラメータを組み合わせると模倣度が下がることがわかる. また,「人とロボットの親密度」の項目では有意差は認められなかったが平均値は「遅延」条件が最も高いことがわかる. さらに,「模倣のわざとらしさ」の項目では「完全模倣」条件が最も高く評価され,他の2条件と有意差が認められている.

これらのことから,「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」の3模倣条件においては,完全に模倣すると模倣度が上がりすぎて第三者に気づかれ,「遅延」条件よりも親密度が下がる可能性があり,「わざとらしさ」の原因になることが考えられる. 次にこのことを考察するために模倣度と親密度,わざとらしさと親密度の関係性について注目する.

ジェスチャミラーリングを行うロボットの模倣度と親密度の関係

次に、項目1「ロボットの動作は似ていたか」と項目3「人とロボットの親密度」での各模倣条件における主観評価値をプロットした散布図を図4.6に示す。図4.6で最も親密度が高く評価された「遅延」条件に注目すると、「遅延」条件よりも第三者にロボットの動作が人と似ていると感じられると親密度の評価が下がることがわかる。また「遅延」条件での親密度が高く評価された自由記述を見ると、「不自然でない動きだった」「対話者の動作につられてロボット側も動作しているように見えた」といった意見がある。一方で「完全模倣」条件で親密度が低く評価された自由記述を見ると、「わざとらしい動きが多く見えたため」「同じ動きをしていたため」などの意見が多かった。これらの結果から、ちょうど「遅延」条件の場合は第三者に模倣していることがはっきりと気づかれておらず、この条件よりも模倣度が上がると模倣していることに気づかれて親密度が低下していると考えられる。よって、結果は仮説H1(模倣がはっきりと気づかれると親密度が下がる)、H2(気づかれない範囲で高い模倣度でミラーリングを行うと親密度が上がる)を支持していると言える。また、図4.6から、「ロボットの動作は人に似ていたか」でほとんど評価が変わらなかったにも関わらず、親密度が下がるパラメータが存在することがわかる(動作量・頻度と頻度、遅延・頻度または動作量と遅延・動作量・頻度)。このことについて考察するために、ロボットの動作のわざとらしさと親密度に注目する。

ロボットの動作のわざとらしさと親密度の関係

図4.6から「ロボットの動作は人に似ていたか」で評価がほとんど変わらなかったが、「ロボットと人の親密度」の項目で評価が大きく異なる模倣条件(動作量・頻度と頻度、遅延・頻度または動作量と遅延・動作量・頻度)に注目する。例えば図4.4より、「遅延・動作量」と「頻度」の模倣条件では「ロボットの動作は人に似ていたか」で評価は変わらないが、「遅延・動作量」条件の方が親密度が高く、わざとらしさの評価が低いことがわかる。このことから、ロボットの動作のわざとらしさが親密度に影響していると考え、図4.6にロボットの動作のわざとらしさを横軸に、人とロボットの親密度を縦軸にとって各主観評価値をプロットした散布図を示す。この図から、ロボットの動作がよりわざとらしいほど、親密度が

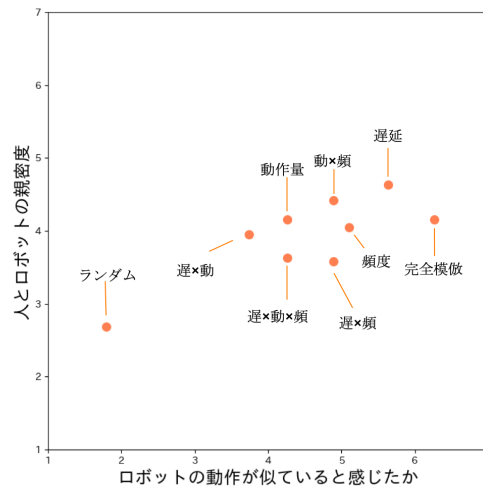


図 12 「ロボットの動作は似ていると感じたか」と「人とロボットの親密度」の散布図

下がっていることがわかる．よって，ロボットの動作のわざとらしさが親密度を低下させる原因となっていることが考えられる．

わざとらしい動作の原因

また，何がわざとらしい動作の原因となったのかを考察するために，「ロボットの動作がわざとらしく感じたか」の自由記述を検証する．模倣条件「完全模倣」「遅延」「動作量」「頻度」の理由を見ると，わざとらしく感じた理由として，「相手の動きに合わせて同じタイミングで同じ動きをしていたため」，「テンポが遅れて，同じ動きをしているため」などがあり，またわざとらしく感じなかった理由として，「同じ動きはしていたが，他にも別の動きをしていたため」などがある．これらはロボットの模倣に対するわざとらしさを述べていると考えられる．一方で，模倣条件「頻度」「遅延・頻度」「動作量・頻度」「遅延・動作量・頻度」「ランダムモーション」を見ると，わざとらしく感じた理由として，「不自然な動作が多くあったため」，「ロボットっぽいから」，「話題に合わないジェスチャが多かった」など，ロボットの動作そのものの不自然さについて言及されている．この動

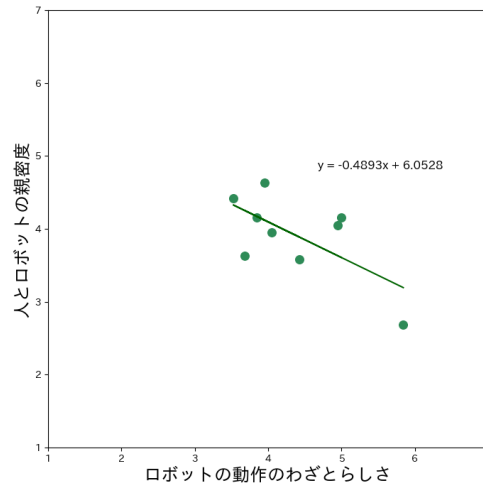


図 13 「ロボットの動作のわざとらしさ」と「人とロボットの親密度」の散布図

作の不自然さに対する意見は「ランダムモーション」または頻度を含む模倣条件で特に多く、事前に用意したモーションが原因になっていると考えられる。

そこで動作の不自然さの影響を除くために、図 4.8 に「ランダムモーション」または頻度を含む模倣条件を除いてロボットの動作が似てると感じた度合いを横軸，人とロボットの親密度を縦軸にとり各主観評価値をプロットした散布図を示す。同様に図 4.9 にロボットの動作のわざとらしさを横軸，人とロボットの親密度を縦軸にとった場合の散布図を示す。図 4.8 より，ロボットによるジェスチャミラーリングにおいては、「遅延 2 秒」の模倣条件で行う方が他の模倣条件よりも親密度が高く，完全に相手の模倣を行うと模倣に気づかれて親密度が低下する可能性があると考えられる。次に図 4.9 においても，図 4.6 同様にロボットの動作のわざとらしさが親密度の低下に影響していると思われる。これは，Bailenson ら [7] の理論と関連しており，相手が模倣を意図的に行っていることに気づくと，親密度が下がることを示している。従って，仮説 H1 の模倣にはっきりと気づかれることで親密が下がる原因として，意図的に模倣していることに対する気づきが考えられる。

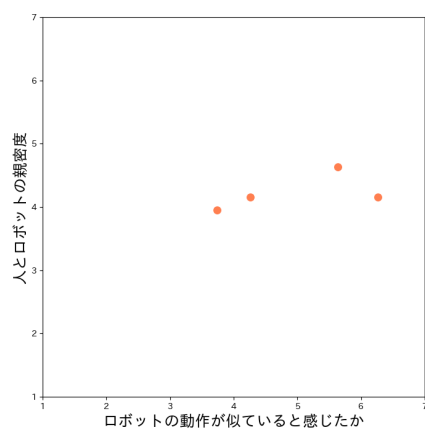


図 14 ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作は似ていると感じたか」と「人とロボットの親密度」の散布図

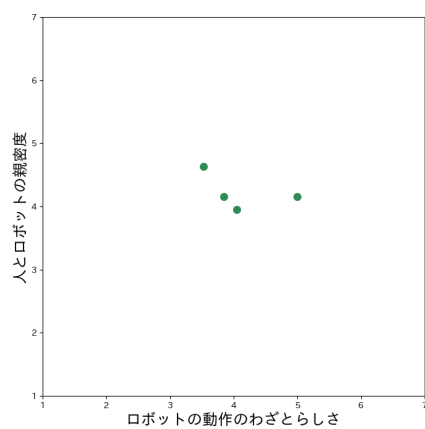


図 15 ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作のわざとらしさ」と「人とロボットの親密度」の散布図

4.4 本実験の結論

実験Ⅰでは「遅延」「動作量」「頻度」の模倣パラメータのうちどれか1つで制御されたジェスチャミラーリングを行うバーチャルロボットに対して第三者に評価を行ってもらい、最も親密度の高いパラメータ値は遅延2秒、動作量50%、頻度75%であることがわかった。次の実験Ⅱでは親密度の高かったパラメータの組み合わせの模倣条件でジェスチャミラーリングを行うロボットに対して第三者に評価を行ってもらった。結果として、完全に相手の模倣をするよりも「遅延2秒」の条件で模倣する方が親密度が高くなった。これはロボットの模倣度が高くなり、第三者にロボットが対話者の模倣をしていることを気づくことが原因だと、被験者の意見等からも確認できた。また、模倣度が「遅延2秒」の条件よりも下がると親密度が低下することが示された。このことから、実験での仮説

H1：ロボットによるジェスチャミラーリングにおいて、模倣度が高くなり、第三者に模倣していることがはっきりと気づかれると、人とロボット間の親密度が低く評価される。

H2：ロボットによるジェスチャミラーリングにおいて、第三者に気づかれない範囲で高い模倣度でミラーリングを行なっている場合、人とロボット間の親密度が高く評価される。

が支持された。また、ジェスチャミラーリング時の動作のわざとらしさが親密度を低下させる原因であり、意図的な模倣に気づくことが親密度を低下させる Bailenson ら [7] の理論を裏付ける結果を示した。

5. 適応的ジェスチャミラーリングシステム実装のための視線分析

適応的ジェスチャミラーリングシステムでは、対話者が模倣されていることに気づいた時に模倣方法を変更する。そのためには、対話者が模倣に気付いた時の特徴が必要となる。本研究では、対話者の視線が模倣に気付いた時の特徴になると考え、視線の分析を行う。まず、対話者がロボットのジェスチャを視覚的に追従した時に、Tobii Eye Tracker 4C[37]で検出された視線もジェスチャを追従できているかを確認する精度評価を行う。次に、ジェスチャミラーリングを行うロボットに対して、対話者が模倣に気付いた時の視線の特徴を分析する。最後に4章と本章で得た結果から適応的ジェスチャミラーリングの提案を行う。

5.1 ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価

5.1.1 精度評価実験の目的

人は移動する対象を正確に認識する場合は滑動性眼球運動と呼ばれる視線の追従運動が生じることが知られている。本研究では、坂口ら[8]と同様に、この視線の追従運動が模倣の気づき検出に用いることができると考える。そこで、対話者が模倣されていることに対する気づきをTobii Eye Tracker 4C[37]から測定された、ロボットのジェスチャに対する視線の追従運動によって検出する。そのために、まずジェスチャに対する視線の追従運動がTobii Eye Tracker 4Cで測定できているかの精度を評価することを目的とする。以下、視線追従精度評価の方法とその結果を述べる。

5.1.2 ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価方法

視線追従精度評価実験では、20代の男性4名に1分間アイドリングモーションを行うバーチャルロボットのジェスチャに対して視線を向けてもらった。実験風景を図16に示す。図16のように、被験者には4章で説明したWebotsで動かし

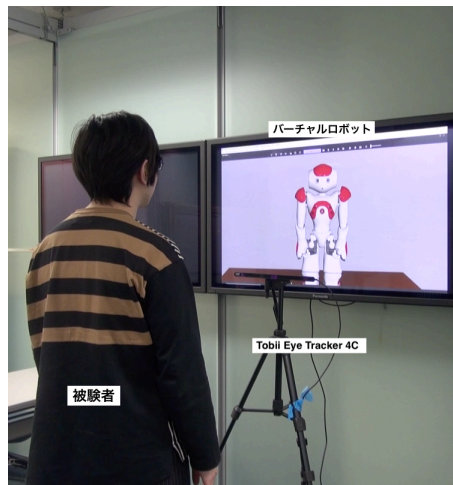


図 16 視線追従精度評価の実験風景

ているバーチャルロボット NAO の正面に立ってもらい，人とバーチャルロボットの間に Tobii Eye Tracker を設置した．Tobii Eye Tracker と人は 60cm，Tobii Eye Tracker とディスプレイは 80cm 離れている．被験者には，事前に Tobii Eye Tracker のキャリブレーションを行なってもらい，視線を測定できるようにした．その後，ロボットがこれからジェスチャを行なうため，ロボットがジェスチャを行う手を注視するようにと指示した．この時ロボットが行うジェスチャは，4.3 節で用いたものと同様に，人が行なったジェスチャを再現させる．また，ロボットがジェスチャを行う時間は 1 分間であり，前半の 30 秒は被験者に右手を，後半の 30 秒は左手を見てもらった．この時注視する手を切り替えるタイミングは，口頭で伝えた．

5.1.3 人の視線とロボットのジェスチャの位置座標取得方法

まず，人の視線は Tobii Eye Tracker で位置座標 (x, y) を測定する．Tobii Eye Tracker は使用するディスプレイのサイズに合わせて，視線の位置座標を取得することができ，今回は 1280×720 の解像度で取得している．

また，ロボットのジェスチャの位置座標は，バーチャルロボットの右手・左手の位置に青・黄緑のボールを設置することで求める．まず精度評価実験で使用し

たアイドリングモーションをバーチャルロボットに行わせ、動作が終わるまでの動画を作成する。その動画に対して各フレームでボールの重心を求め、それを右手・左手のジェスチャの位置座標とする。また、ジェスチャの位置座標も視線の解像度に合わせ 1280×720 で取得している。

5.1.4 ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価結果

被験者1名のロボットの右手・左手を見てもらった時のロボットのジェスチャと人の視線における位置座標の時系列変化を図17, 図18に示す。図17, 18のどちらにおいても、ロボットがジェスチャを行い、ジェスチャの位置座標が変化すると、それに応じて視線の座標も同じように変化していることがわかる。また、他の被験者3名のロボットのジェスチャと人の視線の位置座標の時系列変化は付録に載せる。全ての被験者において、ロボットのジェスチャに対して視線が追従できていることがわかる。よって次節で、この視線の追従動作に注目して、人が模倣されていることに気付いた時の視線の特徴を分析する。

5.2 模倣されていることに気付いた時の視線の調査実験

5.2.1 実験目的

人の模倣されていることに対する気づきの検出を目的として、ジェスチャミラーリングを行うロボットに対して、人が模倣に気付いた時の視線の特徴を追従動作に注目して調査する。以下、実験方法、実験手順、実験評価方法と実験結果、考察について述べる。

5.2.2 実験方法

実験では、20代の男性5名にバーチャルロボットと対話をしてもらい、その後模倣に対して気付いたタイミングの記入と感情の評価を行なってもらった。実験の風景を19に示す。バーチャルロボットと Tobii Eye Tracker, Tobii Eye Tracker と被験者間の距離は前節での精度評価実験と同様に 80cm, 60cm とする。バーチャ

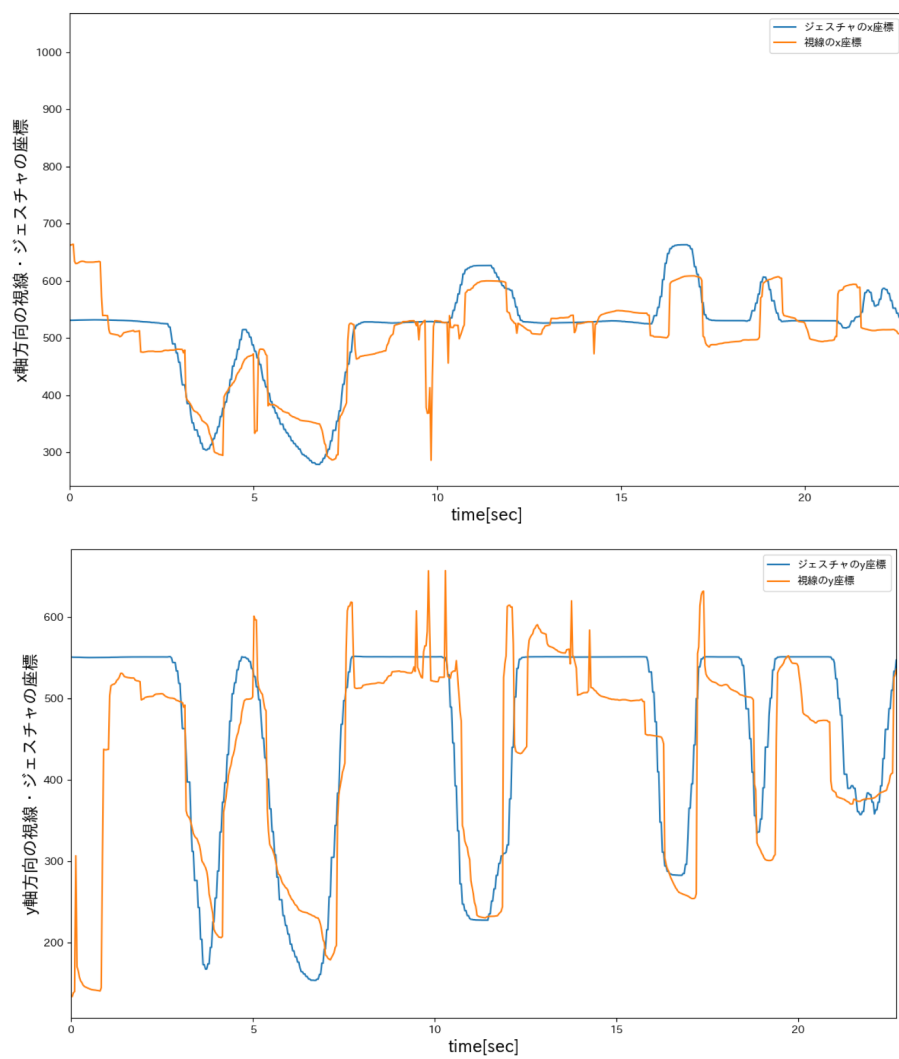


図 17 ロボットの右手のジェスチャと位置座標の時系列変化

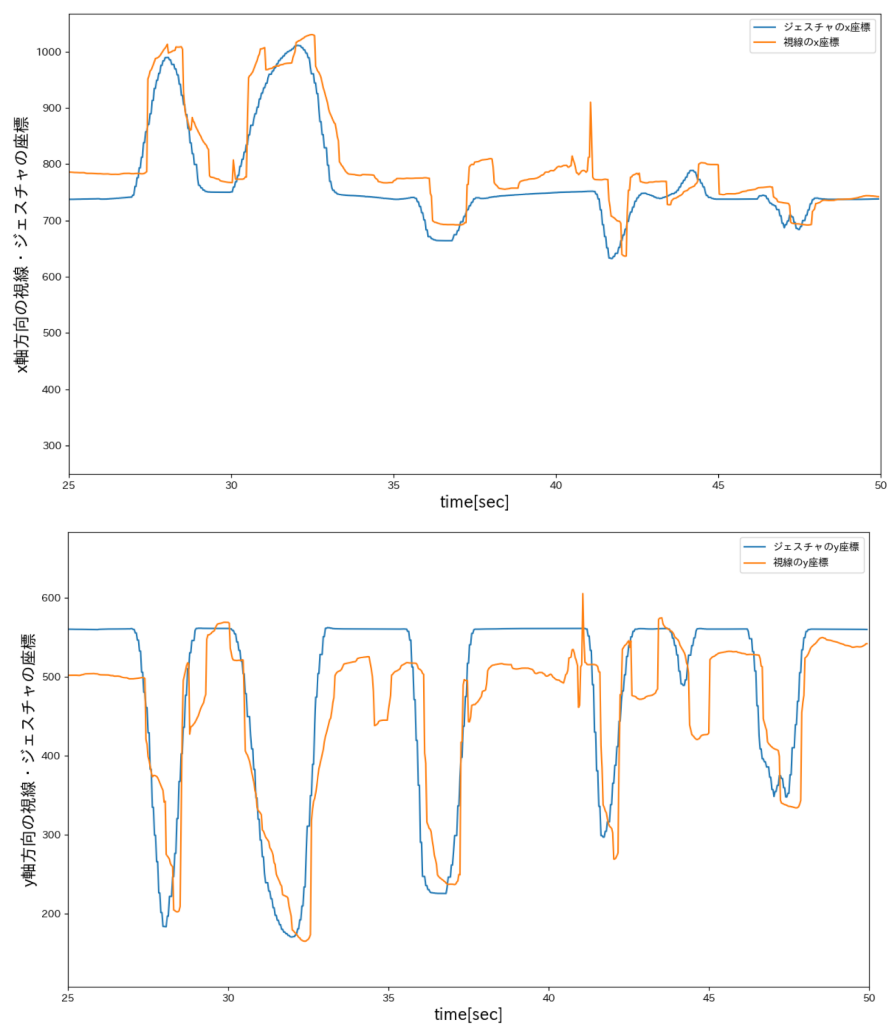


図 18 ロボットの左手のジェスチャと視線の位置座標の時系列変化

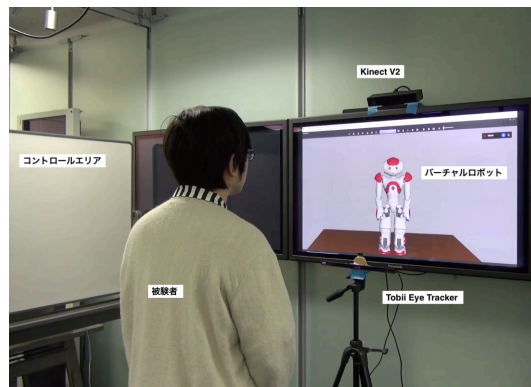


図 19 模倣気づき時の視線調査実験風景

ルロボットが映るディスプレイの上に Kinect V2 を設置し、対話中に被験者のジェスチャを取得し、3章で述べたシステムを用いて、バーチャルロボットにジェスチャミラーリングを行わせる。また、被験者の左側にはコントロールエリアを設けており、ここでロボットの発話内容・タイミングを制御する。ロボットの発話内容は対話最初の話題提供と最後の「ありがとうございます」以外は「はい」、「なるほど」などの相槌のみである。

実験手順

実験手順としては、まず被験者に今からバーチャルロボットといつもよりも身振り手振りを用いて対話を行なってもらうように指示する。またこの時被験者に「奈良先端科学技術大学院大学の正門入り口から食堂に行って、インタラクティブメディア設計学研究室までの道のりを説明してください」といったタスクを与える。次に奈良先端科学技術大学院大学のキャンパスマップを見てもらい、研究室までの道のりを考えてもらう。その後、被験者にバーチャルロボットの声・動きや道のりの説明に慣れてもらうために、与えられたタスクを1度行なってもらう。この時はロボットは事前を取得された人のジェスチャを再現しており、被験者のジェスチャミラーリングは行わない。1度慣らし用のタスクが完了した後、被験者に Tobii Eye Tracker のキャリブレーションをしてもらい、バーチャルロボットと1分ほど対話を行なってもらう。この対話中は Kinect と Tobii Eye Tracker で被験者のジェスチャと視線データを取得する。また、対話中ロボットの動作はジェスチャミラーリングと事前を取得された人のジェスチャを再現したアイドリングモーションの2つで構成される。対話時間1分のうち前半の30秒はアイドリングモーション、そこからロボットの動作は切り替えられ、ジェスチャミラーリングを行う。対話終了後、被験者には対話中に撮影していた動画(図19)を見てもらい、対話中に模倣に気付いたタイミングと気づき度、またその時の感情を評価してもらう。

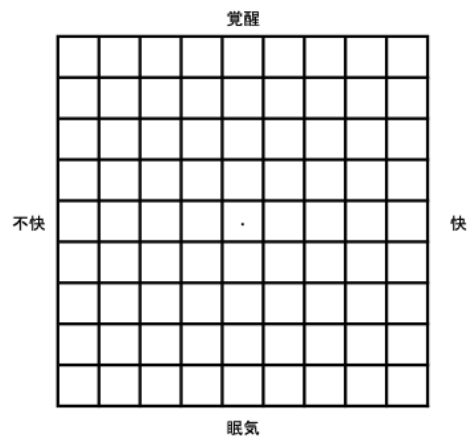


図 20 アフェクト・グリッド

実験での評価方法

被験者に、ロボットと対話をしている動画を見てもらい、対話中に模倣されていることに気付いたタイミングを秒単位で記入してもらった。さらに、その気付いたタイミングに対して対話中にどれくらいロボットが模倣していることに気付いたか、7段階のリッカード尺度で評価してもらった。また、その時感情の評価も行なってもらい、それにはアフェクト・グリッド [38] と呼ばれる感情の評価に広く用いられている評価手法を用いた。アフェクト・グリッドとは図 20 に示すように、中央が感情的に中性、つまりポジティブでもネガティブでもない平常的な日常の感情を指す。左右は快感情を表し、右に向かうほど快、対して左側は不快感情を示す。上下は覚醒の程度を表し、快不快とは独立に、どれだけ覚醒し活性化していると感じるかを示す。上に向かうほど覚醒的、対して下に向かうと眠気が強いということになる。また、右上は、エキサイト・喜びといった感情を表す。逆に左下は抑うつ、悲しみ、憂鬱の感情を表す。左上はストレス、緊張、右下は静穏、リラクセスの感情を表す。実験では、ロボットとの対話中、模倣に気付いたタイミングで、アフェクト・グリッドに最も当てはまる感情の位置に印を記入してもらった。このアフェクト・グリッドの後に自由記述を設けており、アフェクト・グリッドで記入した感情になった理由を調査した。

5.2.3 実験結果

実験では、被験者5人の内1人がディスプレイ内に視線をほとんど向けておらず、視線データが取得できていなかったため、4人分の解析を行なった。まずその4人の視線とロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化を図21, 22, 23, 24に示す。

図21, ~図24の青線はロボットの右腕, オレンジ線はロボットの左腕のx, y座標(上図がx座標, 下図がy座標)で, 緑線は被験者の視線を意味する。水色の背景はロボットの右腕, オレンジ色は左腕, ピンク色は両腕でジェスチャを行っていた箇所を示す。また, 点線は被験者が模倣されていることに気付いた箇所であり, 枠線内に気付いた箇所に対して気づき度, 快不快度, 覚醒度を示す。次にこの被験者の視線の位置とロボットの右手・左手の位置の距離の時系列変化を図25, 26, 27, 28に示す。背景は図21, ~図24と同じ意味で, 青線が視線の位置と右手, オレンジ線が視線の位置と左手との距離を表す。この距離が短ければ短いほど, 被験者は対話中にロボットの右(左)手の近くを見ているということになる。

5.2.4 模倣されていることに気付いた時の視線の調査実験の考察

以上の結果を踏まえて, 考察に移る。まず, 被験者1に注目する。図21より, 点線付近で緑線とオレンジ線が交わっていることから, この被験者がロボットの模倣に気付いたタイミングで, x, y軸方向共に視線とジェスチャの座標が一致していることがわかる。この被験者の視線とジェスチャの位置座標の時系列変化(図25)を見ると, 気付いたタイミング全てで視線と左手の距離が気づく前後よりも短くなっていることがわかる。また, この時気付いたタイミングでは全てロボットは左手でジェスチャミラーリングをしていた。よって, このことから, 被験者1は模倣されていることに気付くと, そのタイミングでロボットのジェスチャに視線を向けると言える。被験者2においても, 図26を見ると模倣に気付いたタイミングで視線と手の距離が短くなっており, 模倣されたジェスチャに対して視線を向けていると考えられる。次に被験者3に注目すると, 図27の60秒のタイミングでは模倣に気付いた時に視点と手の距離が短くなり, ロボットのジェスチャに視線を向けていると考えられるが, それ以外の模倣に気付いたタイミングでは

ジェスチャに視線が向けられていない。しかし、被験者3は模倣に気づく前にロボットのジェスチャに視線を向けていることが多く、模倣に気付くとそのジェスチャから視線を外している(20秒, 47秒, 78秒)。被験者4に関しても図28を見ると、模倣に気付いたタイミングではジェスチャに視線を向けていない。しかし、被験者4は模倣に気付いた前後のタイミング(38秒, 70秒, 92秒, 112秒)でロボットのジェスチャに対して視線を向けている。これらから、対話者はロボットの模倣に気付いた時、主に模倣に気付いたタイミング、もしくはその前後でロボットのジェスチャに対して視線を向ける傾向があると考えられる。よって、人のロボットの模倣ジェスチャに対する視線追従が、気づきを検出する特徴量の1つとして利用できる可能性が示された。

また、今回測定したアフェクト・グリッドの結果より、被験者が模倣に気づいた時の感情は視線に影響を与えていないと考えられる。アフェクト・グリッドの直後に設けていた自由記述から、感情が快になった理由として、「伝わっている気がした」。感情が不快になった理由として、「真似されていることが確実にわかったから」、「なぜ真似されているのかわからなかったから」とあった。4章で述べた通り、模倣にはっきりと気づかれると相手との親密度を下げってしまう恐れがあり、気づかれないようにミラーリングすることで親密度を向上の効果が出ると考えられる。次節では、本研究で得られた知見を元に、対話者との親密度を向上させる適応的ジェスチャミラーリングの提案を行う。

5.3 適応的ジェスチャミラーリングシステムの展望

ここでは、本研究で得た知見を元に、適応的ジェスチャミラーリングシステムの展望について述べる。適応的ジェスチャミラーリングシステムの概要は1章の図1で示した通りであり、まず3章で示したように、対話者のジェスチャからNAOにジェスチャミラーリングを行わせれるシステムを構築する。そのためには、対話者の上半身のジェスチャをKinectを用いて推定する。この時にその人の3次元骨格座標が取得できるので、それからヒューマノイドロボットNAOの関節角に変換する。これにより、ロボットは対話者のジェスチャミラーリングを行うことができる。また、対話者に気づかれずに、親密度を向上させるために、4章で最

も親密度が高く評価された遅延 2 秒を最初の模倣パラメータ値として設定する．さらに，対話者の模倣ジェスチャに対する視線を特徴量の 1 つとして，対話者の模倣に対する気づきを Tobii Eye Tracker を用いて検出する．今後は，対話者の首の傾きや，模倣ジェスチャに対する注視時間，視点の移動回数や瞬きなど，さまざまな特徴量を検討し，模倣の気づきの検出精度を上げることで，対話者との親密度を向上させる適応的ジェスチャミラーリングシステムの実現ができると考える．

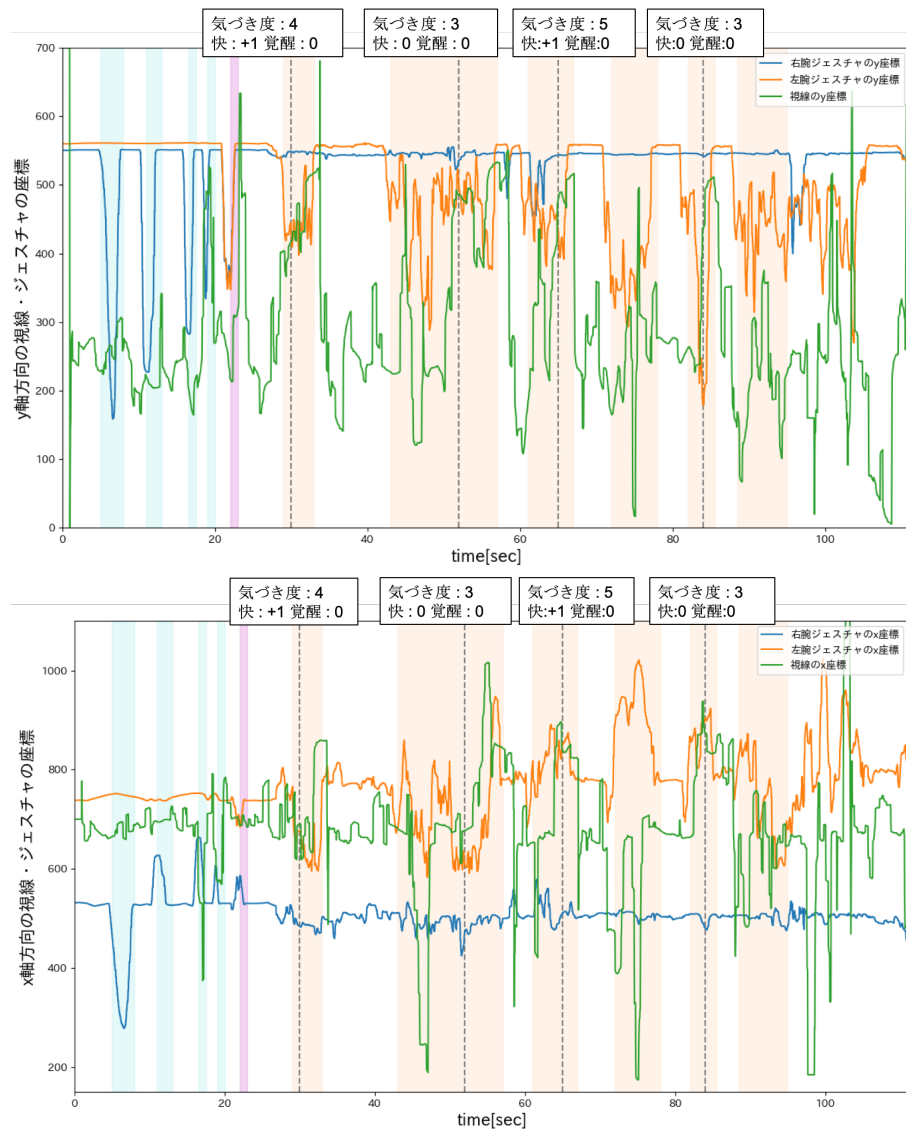


図 21 被験者 1：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

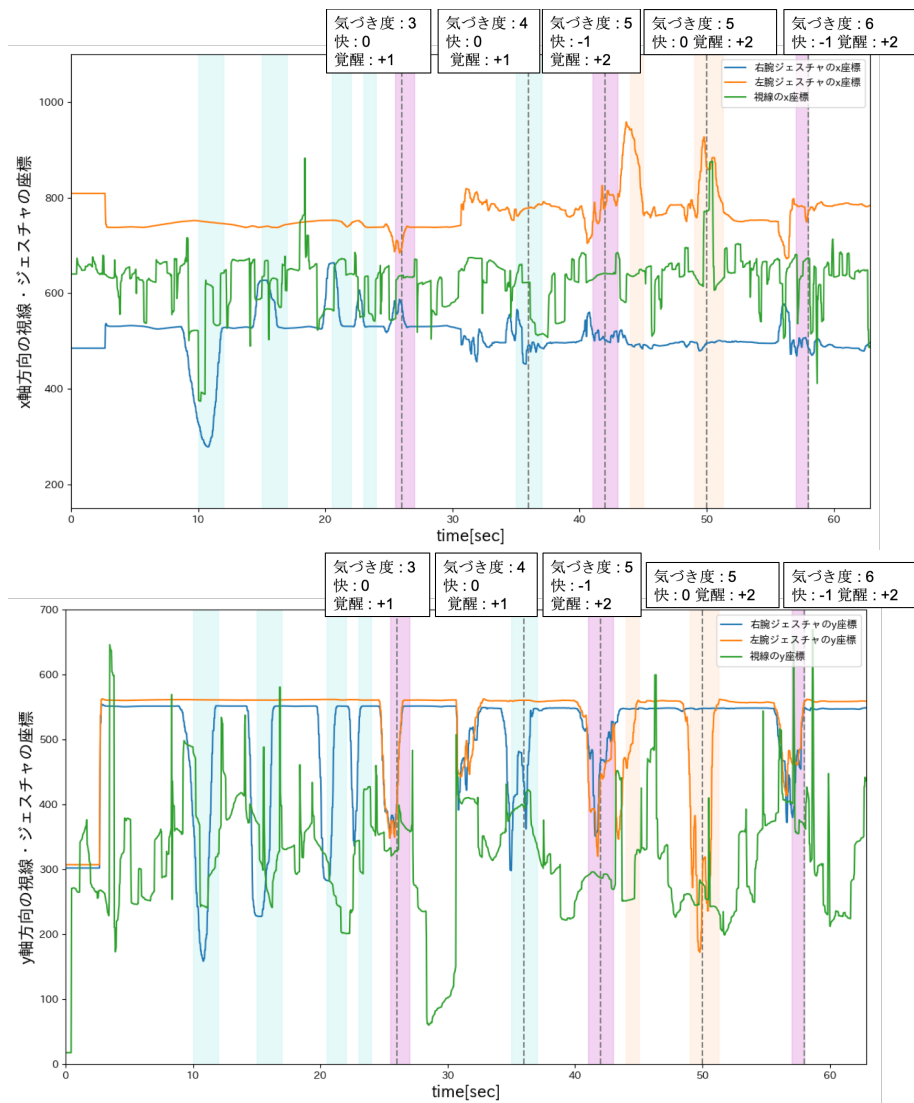


図 22 被験者 2：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

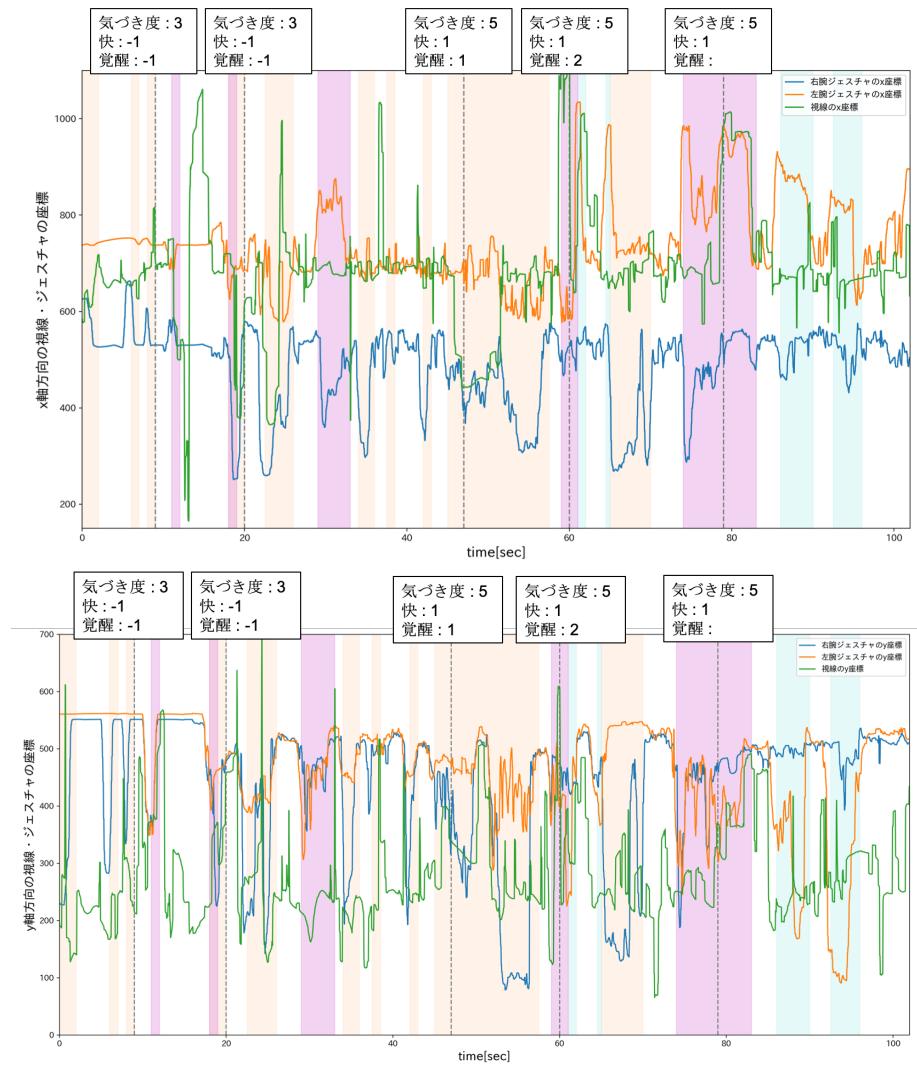


図 23 被験者 3：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

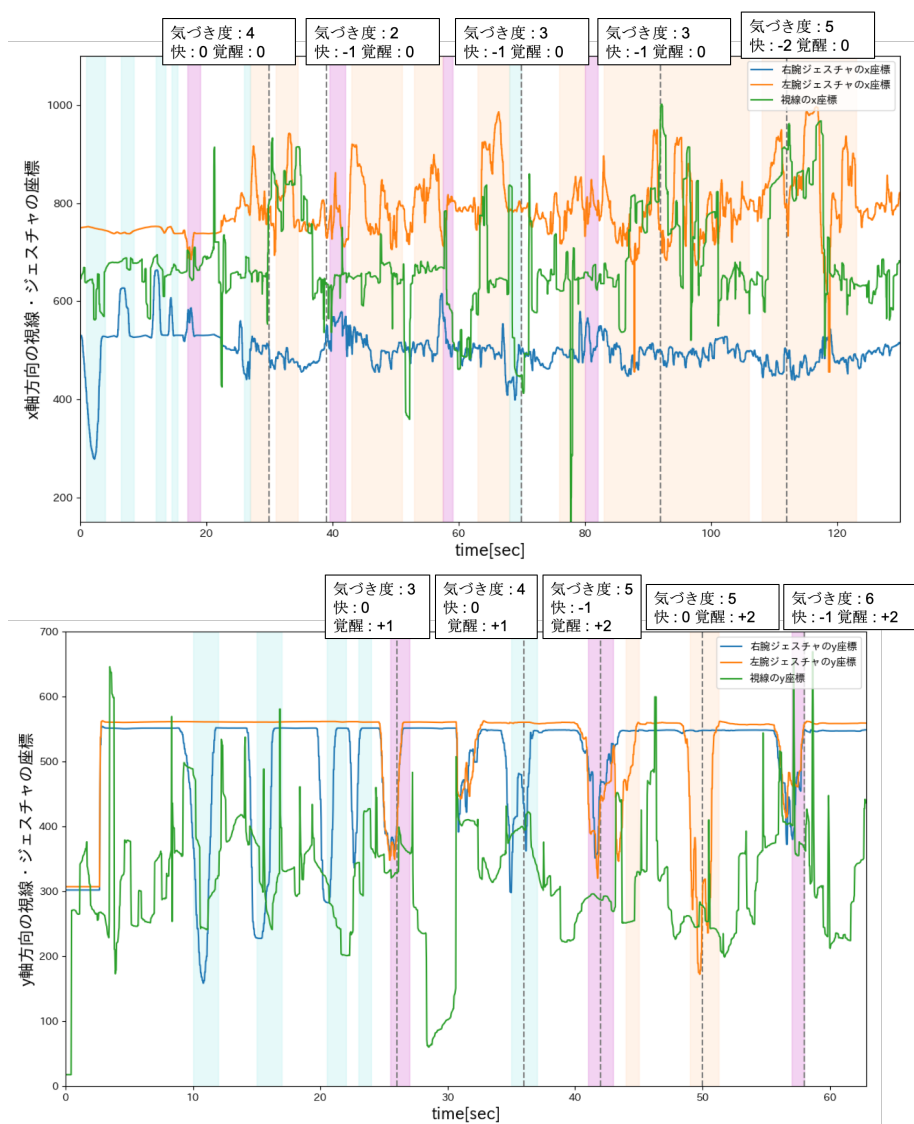


図 24 被験者 4: 視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

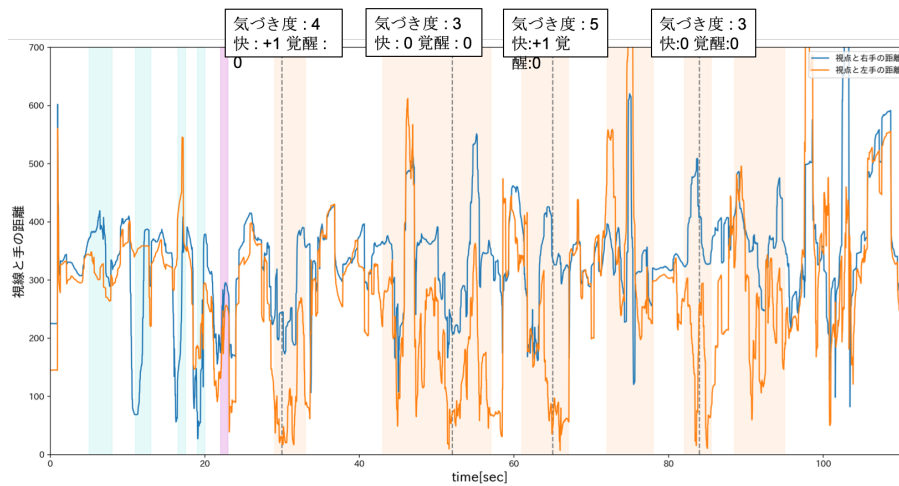


図 25 被験者 1：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

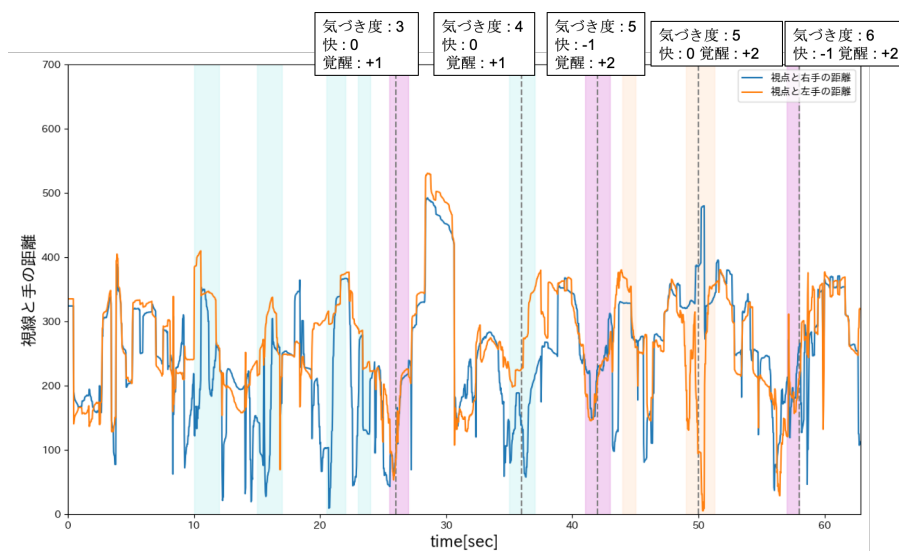


図 26 被験者 2：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

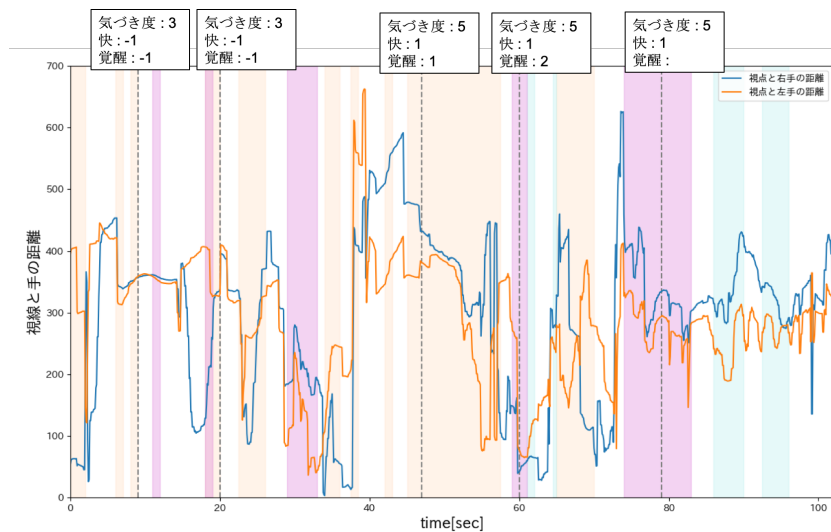


図 27 被験者 3：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

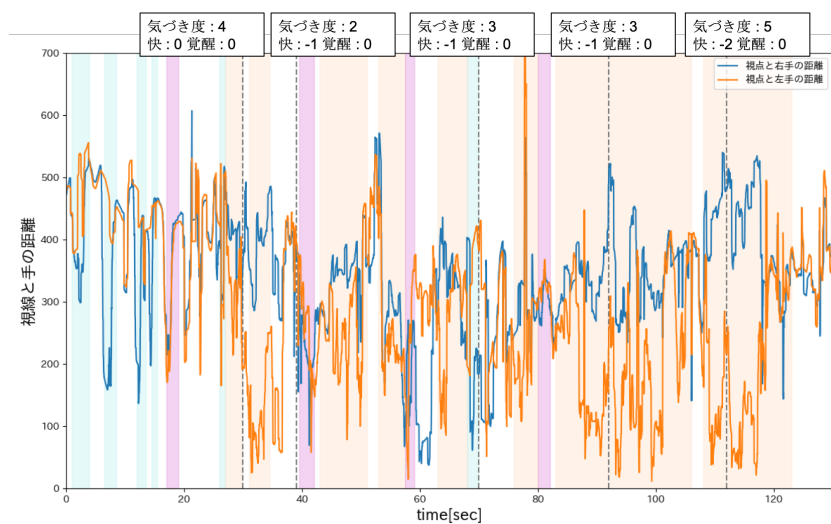


図 28 被験者 4：視線の位置座標とロボットのジェスチャの位置座標の時系列変化

6. おわりに

本研究では、人との親密度向上を目的とした、ロボットによる適応的ジェスチャミラーリングシステムの開発を目指して、ロボットへのジェスチャミラーリング実装と適応的ジェスチャミラーリングシステムに必要な要素の調査を行なった。まず、Kinect を用いて人の3次元骨格座標をヒューマノイドロボット NAO の関節角に変換するジェスチャ模倣システムを構築した。

次に、対話者の模倣されていることの気づきに依拠して、対話者との親密度を向上させるジェスチャミラーリング方法を調査することを目的として、第三者によるロボットの模倣度と人とロボットの親密度を調査した。実験Ⅰでは「遅延」「動作量」「頻度」のパラメータのうちどれか1つで制御されたジェスチャミラーリングを行うバーチャルロボットに対して、第三者に評価を行なってもらった。結果として、各パラメータで最も親密度の高い模倣パラメータ値は遅延2秒、動作量50%、頻度75%であることがわかった。実験Ⅱでは親密度の高かったパラメータ値の組み合わせでジェスチャミラーリングを行うロボットに対して第三者に評価を行なってもらった。結果は、完全に相手の模倣をするよりも「遅延2秒」の条件で模倣する方が親密度が高くなった。これはロボットの模倣度が高くなり、第三者にロボットが対話者の模倣をしていることを気づくことが原因だと、被験者の意見等からも確認できた。また、模倣度が「遅延2秒」の条件よりも下がると親密度が低下することが示された。このことから、実験の仮説(模倣にはっきりと気づかれると親密度が下がる、ちょうど気づかれない程度に高い模倣度でミラーリングを行うと親密度が上がる)が支持された。また、ジェスチャミラーリング時の動作のわざとらしさが親密度を低下させる原因であり、意図的な模倣に気づくことが親密度を低下させる Bailenson ら [7] の理論を裏付ける結果を示した。

最後に、人の模倣に対する気づきを検出するために、模倣されていることに気付いた時の人の視線情報を解析した。結果は、人が模倣されていることに気づくと、視線が気付いたタイミング、もしくはその前後で模倣しているジェスチャを向く可能性が示された。これらの結果から、人の視線を模倣に対する気づき検出に用いて、気づき度に応じて模倣方法を変更し、人との親密度を向上させる適応的ジェスチャミラーリングシステムの実現可能性を示した。今後は、より厳密に人

の模倣に対する気づきを検出するために、対話者の首の傾きや、模倣ジェスチャに対する注視時間、視点の移動回数や瞬きなど、さまざまな特徴量を検討する必要がある。また、気づきの検出方法を確立した後は、リアルタイムで模倣に対する気づきを検出し、気づかれないような模倣方法に変更するシステムを実装し、それが人との親密度を向上させるか評価する必要がある。

謝辞

本研究の全過程を通して、懇切なる御指導，御鞭撻を賜りました，奈良先端科学技術大学院大学インタラクティブメディア設計学研究室 加藤 博一教授に心より深く感謝申し上げます。また，副指導教員である，ロボティクス研究室 小笠原 司教授には，学内発表にて研究を発展させる貴重な御指摘，御助言を賜りました。深く感謝申し上げます。副指導教員である，インタラクティブメディア設計学研究室 神原 誠之准教授には，本研究のテーマ決めから，日々の研究生活やミーティングの議論，本論文の執筆など，適切で細やかな御指導を頂きました。心より感謝の意を表します。また，昨年度環境知能学研究室にて本研究に影響を与える御指導を賜りました，前環境知能学研究室 萩田 紀博教授に心より深く感謝申し上げます。本研究において，心理学分野の観点から実験設計についての的確なご助言を頂きました，京都大学こころの未来研究センター 佐藤 弥准教授には心より感謝の意を表します。奈良先端科学技術大学院大学インタラクティブメディア設計学研究室藤本 雄一郎助教授には，ミーティングでの適切な御指摘，研究での技術的な御助言を頂きました。深く感謝の意を表します。奈良先端科学技術大学院大学インタラクティブメディア設計学研究室 西村祥吾さんには，本研究のテーマ設定から実験設計の御指導，日々のミーティングでの適切な御指摘，さらには研究会や本論文の添削までして頂きました。深く感謝の意を表します。奈良先端科学技術大学院大学インタラクティブメディア設計学研究室 澤邊 太志さんには，ミーティングでの適切な御指摘，発表に関する御指導や日々の研究生活で多岐にわたりお世話になりました。深く感謝の意を表します。その他，共に研究活動を歩み，切磋琢磨したインタラクティブメディア設計学研究室の皆様 に心から感謝申し上げます。最後に，今まで大変お世話になった両親に心より感謝致します。

参考文献

- [1] 神田崇行, 佐藤留美, 才脇直樹, 石黒浩, ”対話型ロボットによる小学校での長期相互作用の試み,” ヒューマンインターフェース学会論文誌, 7, 27-37, 2005.
- [2] Shogo Nishimura, Hiromichi Kawanami, Masayuki Kanbara and Norihiro Hagita, ”TV chat robots allowing daily-use chat with a user by synchronizing TV enthusiasm,” in Groups in Human-Robot Interaction Workshop at ROMAN, IEEE, 2017.
- [3] 長岡千賀, ”対人コミュニケーションにおける非言語行動の2者相互影響に関する研究”, 対人社会心理学研究, 6, 101-112, 2006.
- [4] LaFrance, M., Broadbent, M, ”Posture sharing as a nonverbal indicator”, Group and Organizational Studies, 1, 328-333, 1976.
- [5] Chartrand, T. L., Bargh, T. L, ”The chameleon effect: The perception-behavior link and social interaction”, Journal of Personality and Social Psychology, 76, 6, 893-910, 1999.
- [6] Luis A. Fuente, Hannah Ierardi, Michael Pilling, and Nigel T. Crook, ”Influence of upper body pose mirroring in human-robot interaction”, Social Robotics Vol.9388 of Series Lecture Notes in Computer Science, 214-223, 2015.
- [7] Bailenson, J.N., Yee, N., Patel, K., & Beall, A.C., ”Detecting digital chameleons”, Computers in Human Behavior, 24, 66-87, 2008.
- [8] 阪口栄穂, 内海章, 須佐見憲史, 近藤 公久, 和田健, ”対象の動きと眼球運動の相関による気づき検知手法の検討”, 映像情報メディア技術報告, ITE Technical Report, 40, 9, 2016.
- [9] Gump, B. B., J. A. Stress, ”affiliation and emotional contagion”, Journal of Personality and Social Psychology, 72, 305-319, 1997.

- [10] Tomkins, S. S, "Emotion in the Human Face", New York, NY: Cambridge University Press, 353-395, 1982.
- [11] Condon, W. S., M. B, "Sound film analysis of normal and pathological behavior patterns.", The Journal of Nervous and Disease, 143, 338-347, 1966.
- [12] 渡辺富夫, 大久保雅史, 黒田勉, "対面コミュニケーションにおける話し手と聞き手との呼吸の引き込み現象の分析評価", 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース部 会 News and Report, 12, 31-35, 1997.
- [13] Bernieri, F. J., "Coordinated movement and rapport in teacher-student interactions.", Journal of Nonverbal Behavior, 12, 120-138, 1998.
- [14] Bavelas, J.B., Black, A., Lemery, C.R., & Mullett, J, " "I show how you feel " : Motor mimicry as a communicative act", Journal of Personality and Social Psychology, 50, 322-329, 1986.
- [15] LaFrance, M, "Nonverbal synchrony and rapport: Analysis by the cross-lag panel"
- [16] Street, Jr. R. L., Speech convergence and speech evaluation in fact-finding interviews, Human Communication Research, 11, 139-169, 1984.
- [17] Dijksterhuis, A., & Bargh, J.A. The perception-behavior expressway, "Automatic effects of social perception on social behavior", In M. Zanna (Ed.), Advances in experimental social psychology, 33, 1-40, 2001.
- [18] Giles, H, "Aspects of linguistic behavior", Accommodation theory: some new directions. In S. de Silva (Ed.), New York: University of York, 1980.
- [19] Bourhis, R. Y., Giles, H., & Lambert, W. E., Social consequences of accommodating one's style of speech: a cross-national investigation. International Journal of the Sociology of Language, 6, 5, 5-71, 1975.

- [20] Gonsior, B., Sosnowski, S., Mayer, C., Blume, J., Radig, B., Wollherr, D., Kuhlentz, K., "Improving aspects of empathy and subjective performance for HRI through mirroring facial expressions", In:IEEE RO-MAN, 350–356, 2011.
- [21] Riek LD, Paul PC, Robinson P, "When my robot smiles at me: enabling human-robot rapport via real-time head gesture mimicry", J Multimodal User Interfaces, 3, 1-2, 99–108, 2010.
- [22] J. Li, W. Ju, and C. Nass, "Observer Perception of Dominance and Mirroring Behavior in Human-Robot Relationships", In Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, 2015.
- [23] Bailenson, J., & Yee, N, "Digital chameleons: Automatic assimilation of non-verbal gestures in immersive virtual environments", Psychological Science, 16, 814–819, 2005.
- [24] Yumiko Shinohara, Katsuhiro Kubo, Momoyo Nozawa, Misa Yoshizaki, Tomomi, Takahashi, Hirofumi Hayakawa, Atsushi Hirota, Yukiko Nishizaki, and Natsuki Oka, "The Optimum Rate of Mimicry in Human-Agent Interaction. Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction", HAI '16 , 367-370, 2016.
- [25] 林義弘, 藤井叙人, 片寄晴弘, "カメレオン効果を利用したユーザが話しやすいエージェントの検討", 第 78 回全国大会講演論文集, 1, 209-210, 2016.
- [26] 大野健彦, "視線から何がわかるか - 視線測定に基づく高次認知処理の解明", 認知科学, 9, 4, 565–579, 2002.
- [27] 飛田隆広, 柳澤秀吉, 上田一貴, "視覚における期待不一致の要因分析法", 日本機械学会 第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 13-22, 2013.

- [28] 米津壮二, 大澤博隆, ”テレプレゼンスロボットにおける同調動作の効果”, 人工知能学会全国大会, 2017
- [29] Microsoft Corporation, Kinect V2, <https://developer.microsoft.com/ja-jp/windows/kinect>
- [30] JTP 日本サード・パーティ株式会社, ”NAO ヒューマノイドロボット-JTP 日本サードパーティ株式会社,” <https://www.jtp.co.jp/services/robotics/nao/>.
- [31] S. Mukherjee, D. Paramkusam and S. K. Dwivedy, ”Inverse kinematics of a NAO humanoid robot using kinect to track and imitate human motion”, 2015 International Conference on Robotics, Automation, Control and Embedded Systems (RACE), Chennai, 1-7, 2015.
- [32] Yongsheng Ou, Jianbing Hu, Zhiyang Wang. ”A Real-Time Human Imitation System Using Kinect”, in International Journal of Social Robotics, 1-14, 2015.
- [33] Yavsan, E., Ucar, A, ”Gesture imitation and recognition using Kinect sensor and extreme learning machines”, Measurement , 94, 852–861, 2016.
- [34] Bernieri, F. J., Gillis, J. S., Davis, J. M., Grahe, J. E., ”Dyad rapport and the accuracy of its judgment across situations: A lens model analysis”, Journal of Personality and Social Psychology, 71, 110-129, 1996.
- [35] Parrill, F., & Kimbara, I., ”Seeing and hearing double: The influence of mimicry in speech and gesture on observers”, Journal of Nonverbal Behavior, 30, 4, 157-166, 2006.
- [36] Cyberbotics Ltd, Webots, <https://cyberbotics.com/>
- [37] Tobii Technology K.K., [https://www.tobiipro.com/ja/landing-pages/tobii_Eye_Tracker_4C]

- [38] J.A.Russell, A.Weiss,and G.A. Mendelsohn, "Affect grid: a single-item scale of pleasure and arousal.," *Journal of personality and social psychology*, 57, 3, 493, 1989.

発表リスト

[1] 栗田優輝, 西村祥吾, 佐藤弥, Alexander Plopski, 藤本雄一郎, 神原誠之, 加藤博一, ”対話者の動作推定に基づくロボットミラーリングの影響に関する検討”, 信学技報, 119, 81, CNR2019-10, 49-53, 2019.6

付録

4 章 実験用動画の対話内容

1. 趣味の話 (ナ：NAO, 被：被験者)

ナ：こんにちは

被：こんにちは

ナ：最近、ハマっている趣味とかありますか？

被：そうですね. やっぱ, あったかくなってきたので, スポーツ

ナ：あっ, スポーツ

被：が趣味ですね

ナ：どんなスポーツをされるんですか？

被：えっと.. アルティメットってご存知ですか？

ナ：聞いたことないですね

被：アルティメットって, いわゆるフリスビーを使った競技なんですけど, サッカーコート

ナ：サッカーコート

被：を使ってやる競技で, ざっくり言うと, アメリカンフットボール

ナ：アメリカンフットボール

被：のボールをフリスビーに代えた版みたいな競技です

ナ：なるほど, ありがとうございます

2. 料理の話

ナ：こんにちは

被：こんにちは

ナ：料理とかって, 普段されますか？

被：そうですね, 普段は土曜日日曜日, 休日にやるって感じですね

ナ：なるほど, 最近のおすすめの料理は何ですか？

被：最近作ったのだと, ミョウガの肉巻き

ナ：ミョウガの肉巻き

被：っていうのを作りましたね. ちょうど, TV でやってて, 男の人なんですけど

ナ：はい

被：タレントさんが男の人でも簡単にできるよって紹介していて、今季節、ミョウガの美味しい季節らしくて

ナ：へー

被：それを肉で巻くと、すごく美味しく食べれるし栄養もあっていいっていうので、やりましたね

ナ：なるほど

3. 出身の話

ナ：こんにちは

被：こんにちは

ナ：どちらの出身なんですか？

被：僕、滋賀の方出身なんですよ

ナ：滋賀県と言えば、琵琶湖ですか？

被：そうですね、あの、日本一大きい琵琶湖

ナ：琵琶湖で、泳いだりしてます？

被：泳いだことあるんですよ

ナ：どんな感じなんですか？

被：塩がやっぱ少ないんでね。僕もともとアトピーで海が泳げなかったんですけど、琵琶湖は泳ぐのすごい好きですね。

ナ：そうなんですね。他に琵琶湖の魅力と言えば、なんかないですかね？

被：琵琶湖の魅力、やはり釣りですね

ナ：おー

被：他県から色々な人が集まってきて、釣りをすると、これがやっぱり琵琶湖の魅力の一つなんじゃないでしょうか。

5章 ロボットのジェスチャに対する視線追従精度評価の各被験者ごとの結果

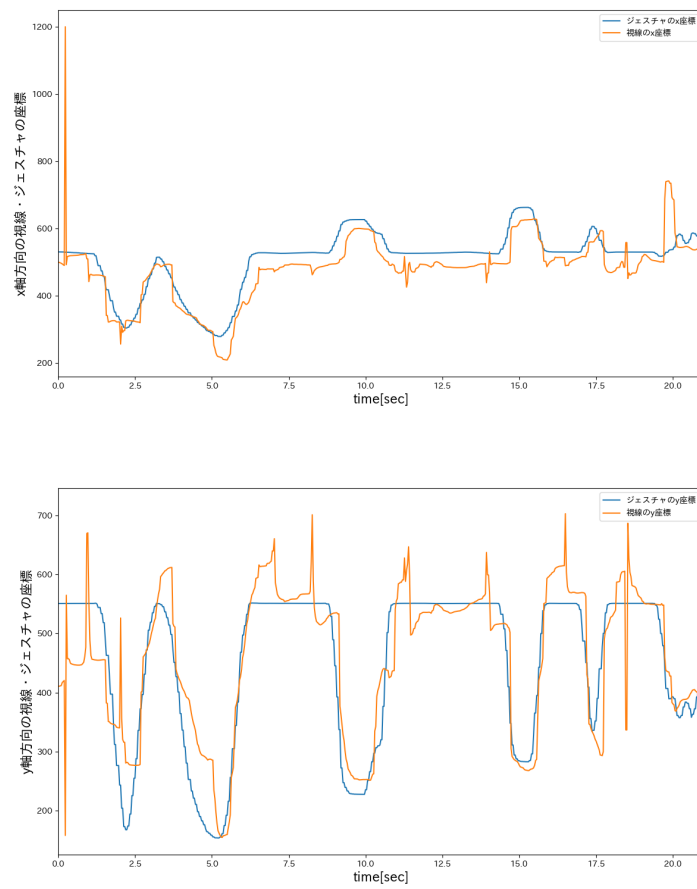


図 29 被験者 1 : ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化

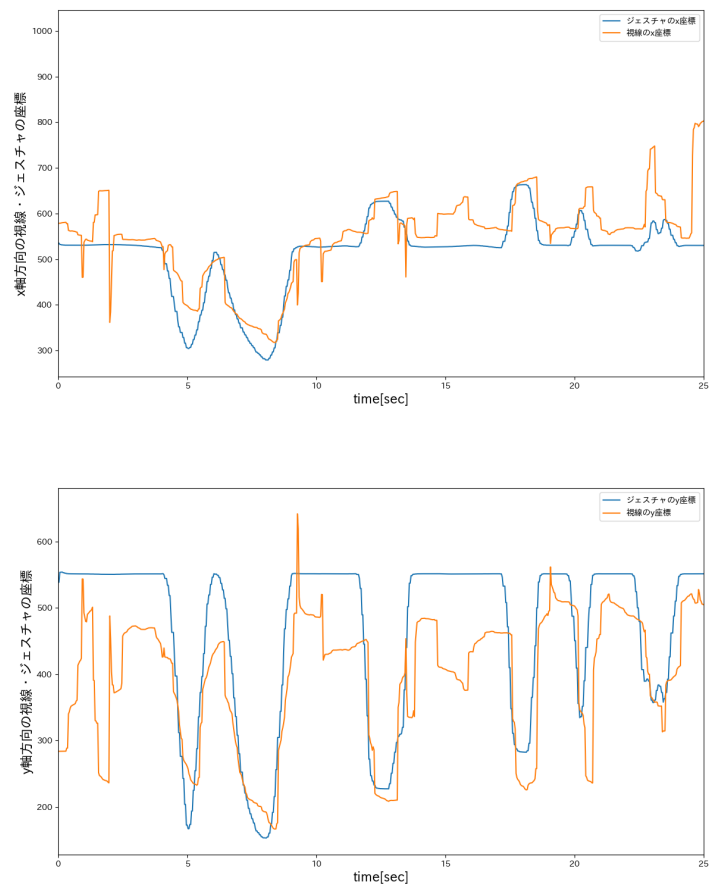


図 30 被験者 2 : ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化

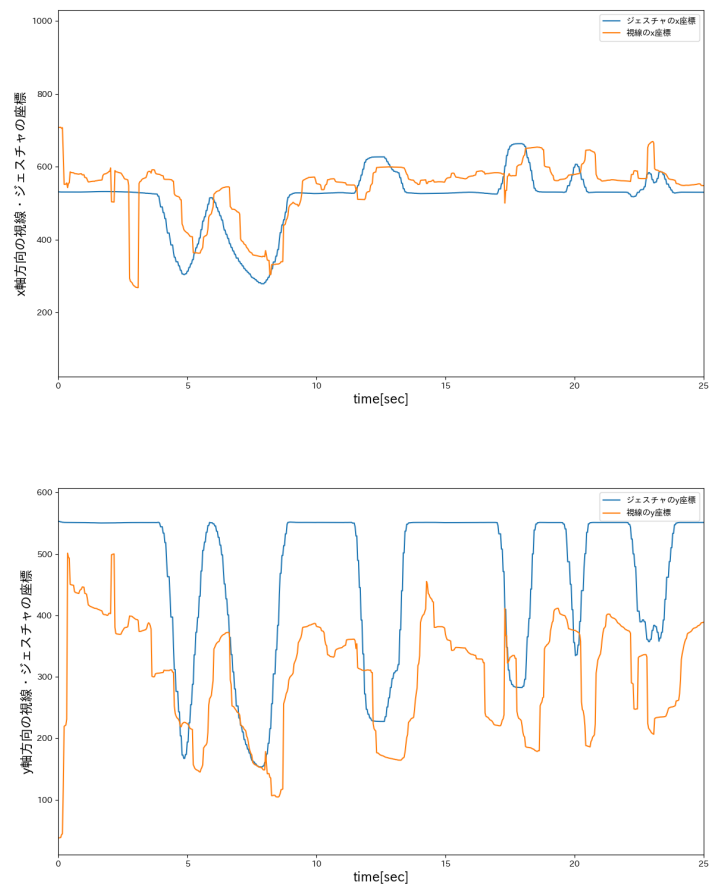


図 31 被験者 3 : ロボットのジェスチャと位置座標の時系列変化