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応じて，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．

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

図 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.

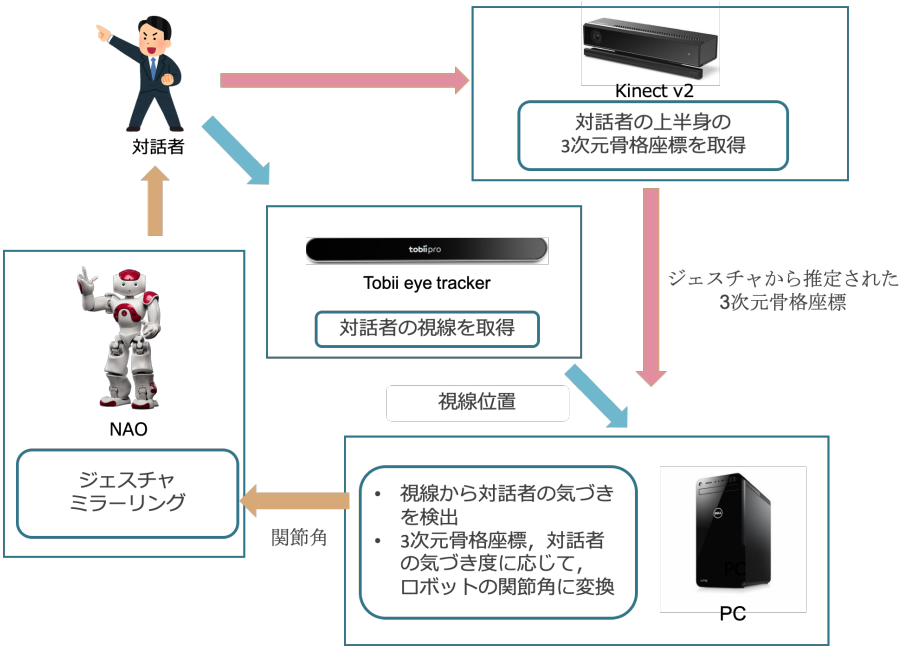

図 1　適応的ジェスチャミラーリングシステムの概要

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．

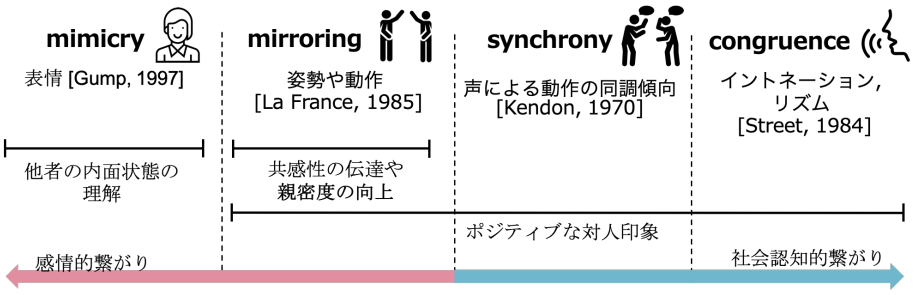

図 2　同調傾向の種類と効果

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

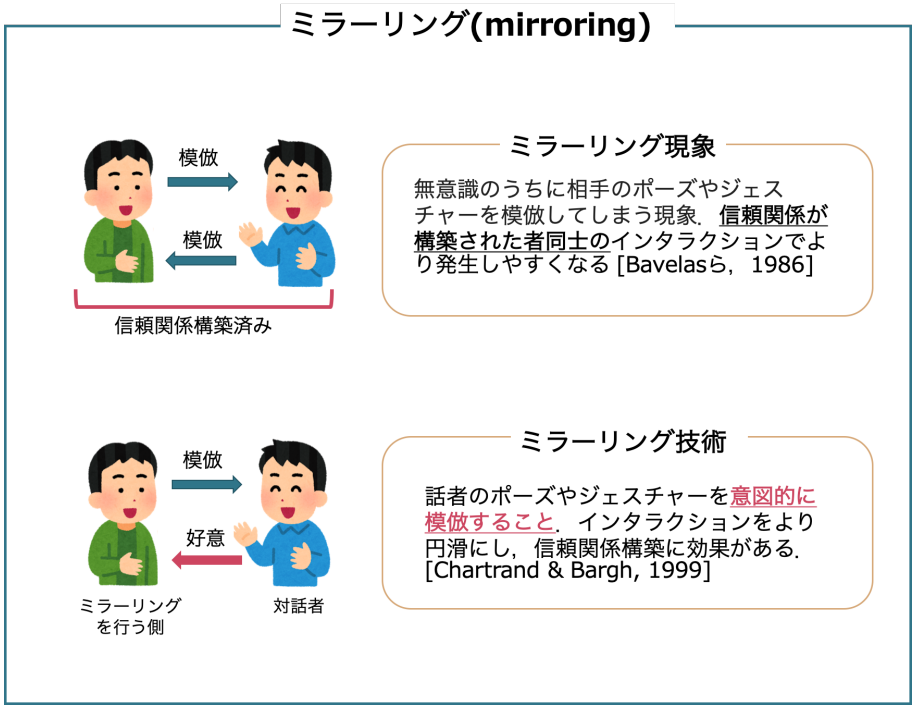

図 3　ミラーリング現象とミラーリング技術の違い

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述べられている．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が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，好意抱いてもらえると考えられる．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応じて，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

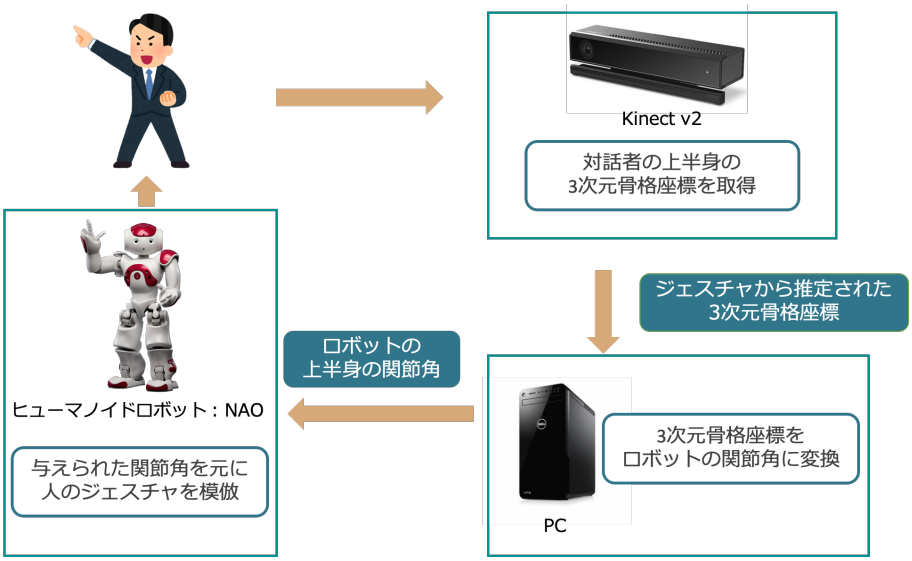

図 4　ジェスチャ模倣システムの概要図

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．

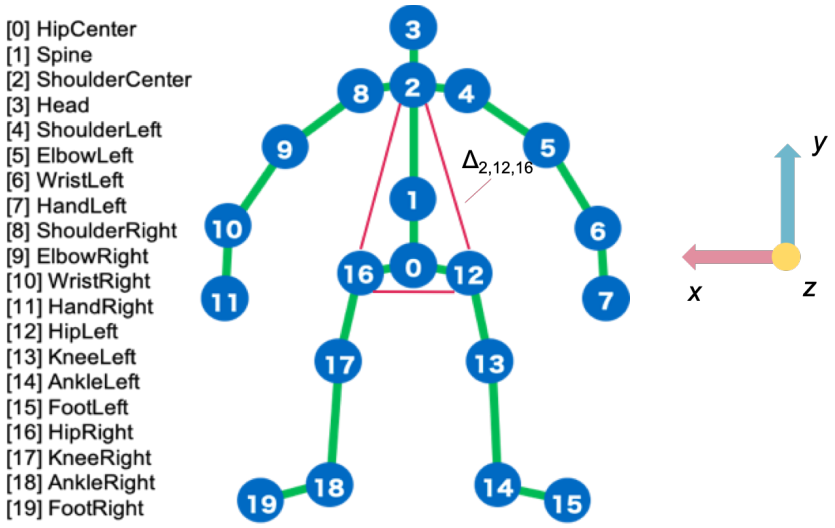

図 5　Kinect V2 で推定される 3 次元骨格座標

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．

$$r_{s;f\tilde{}_{NAO}} = A \quad (r_{f\tilde{}_{kinect}} \quad r_{s\tilde{}_{kinect}}) = A \quad (r_{s;f\tilde{}_{NAO}}); \tag{1}$$

$$s; f \ 2 \ f0; 1; 2; :::; 12; 16g \tag{2}$$

ここでの $r_{f_{kinect}}$ と $r_{s_{kinect}}$ はそれぞれ Kinect 座標系のベクトル $r_s; f_{kinect}$ の終点

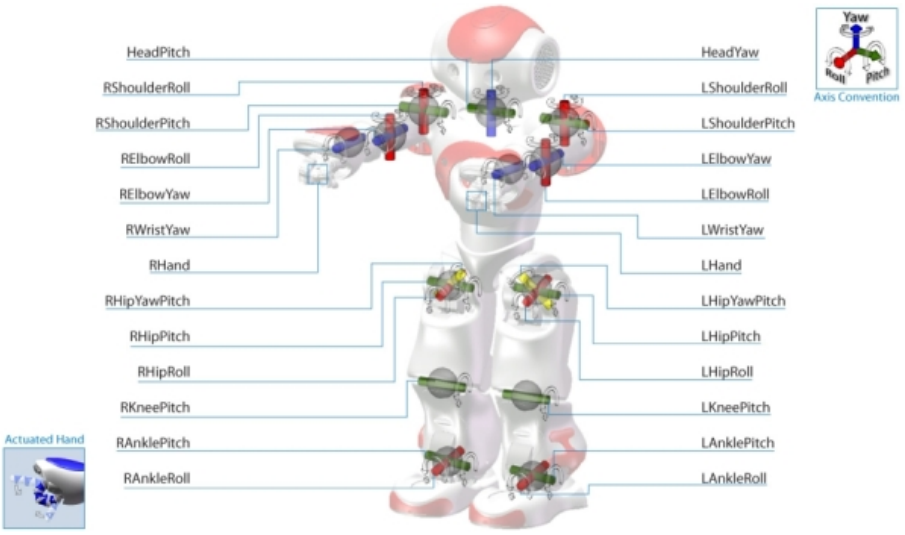

図 6　NAO の関節と回転方向

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．

$$\boldsymbol{x} = \frac{r_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{12\widetilde{kinect}}}{jr_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{12\widetilde{kinect}}j} = \begin{matrix} 0 & 1 \\ \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \end{matrix} \tag{3}$$

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．

$$\boldsymbol{z} = \frac{(r_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{12\widetilde{kinect}}) \quad (r_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{2\widetilde{kinect}})}{j(r_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{12\widetilde{kinect}}) \quad (r_{16\widetilde{kinect}} \quad r_{2\widetilde{kinect}})j} = \begin{matrix} 0 & 1 \\ \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} \end{matrix} \tag{4}$$

y 軸は z と x の外積で求まる．

$$y = z \quad x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ y_1 & \\ y_2 & \\ y_3 & \end{pmatrix} \tag{5}$$

よって変換行列 A は次のように求まる．

$$A = \begin{pmatrix} 0 & & & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & \\ y_1 & y_2 & y_3 & \\ z_1 & z_2 & z_3 & \end{pmatrix} \tag{6}$$

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．

$$RShoulderRoll = \quad (\frac{}{2} \quad \cos^{-1}(\frac{(y \quad z) \quad r_{8;9_{NAO}}}{jy \quad zj \quad jr_{8;9_{NAO}}j})); \tag{7}$$

$$RShoulderPitch = \quad \tan^{-1}(\frac{r_{3_{right}}}{r_{1_{right}}}); r_{8;9_{NAO}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ r_{1_{right}} & \\ r_{2_{right}} & \\ r_{3_{right}} & \end{pmatrix}: \tag{8}$$

座標 $r_{1_{right}}; r_{2_{right}}; r_{3_{right}}$ はそれぞれベクトル $r_{8;9_{NAO}}$ 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．

$$RElbowRoll = \cos^{-1}(\frac{r_{8;9_{NAO}} \quad r_{9;10_{NAO}}}{jr_{8;9_{NAO}}j \quad jr_{9;10_{NAO}}j}): \tag{9}$$

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．

$$b_{right}\tilde{}_{NAO} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\beta & 0 & cos\ \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} x \tag{10}$$

$$r_{right}\tilde{}_{NAO} = \frac{r_{8;9}\tilde{}_{NAO} \quad r_{9;10}\tilde{}_{NAO}}{jr_{8;9}\tilde{}_{NAO} \quad r_{9;10}\tilde{}_{NAO}j} \tag{11}$$

$$RightElbowYaw = (\frac{}{2} \quad \cos\ ^{1}(\frac{b_{right}\tilde{}_{NAO} \quad r_{right}\tilde{}_{NAO}}{jb_{right}\tilde{}_{NAO}j \quad jr_{right}\tilde{}_{NAO}j})): \tag{12}$$

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応じて，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と考える．

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 Kincect 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．

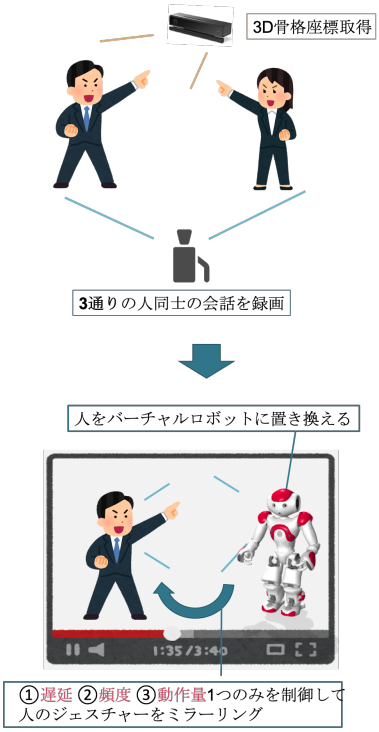

図 7　動画の作成手順

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ると感じましたか？
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 Willcoxson 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

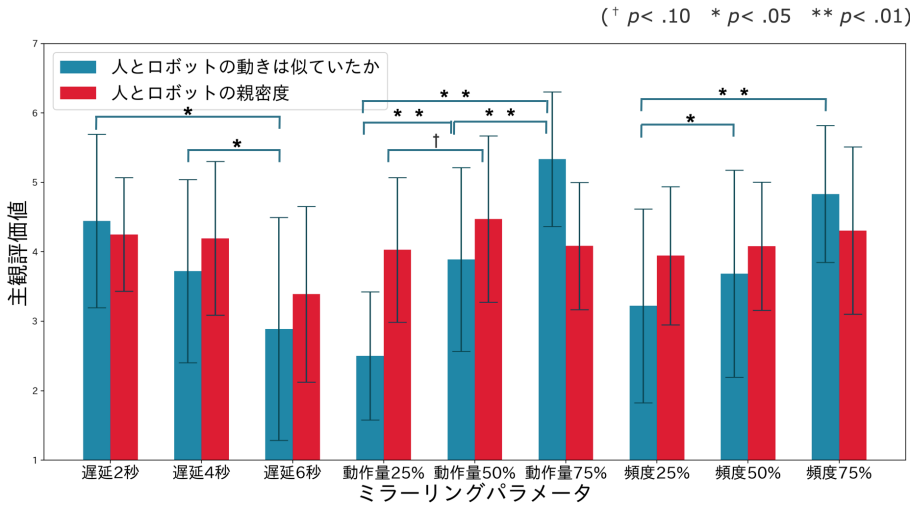

図 9 実験 I のアンケート主観評価結果

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」，楽しんでい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ると感じましたか？
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ように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 Willcoxson 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¡0.05) がある場合は太字，有意傾向 (p¡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	0.058	1.000	1.000	0.462	1.000	-	-	-
動作量	0.057	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

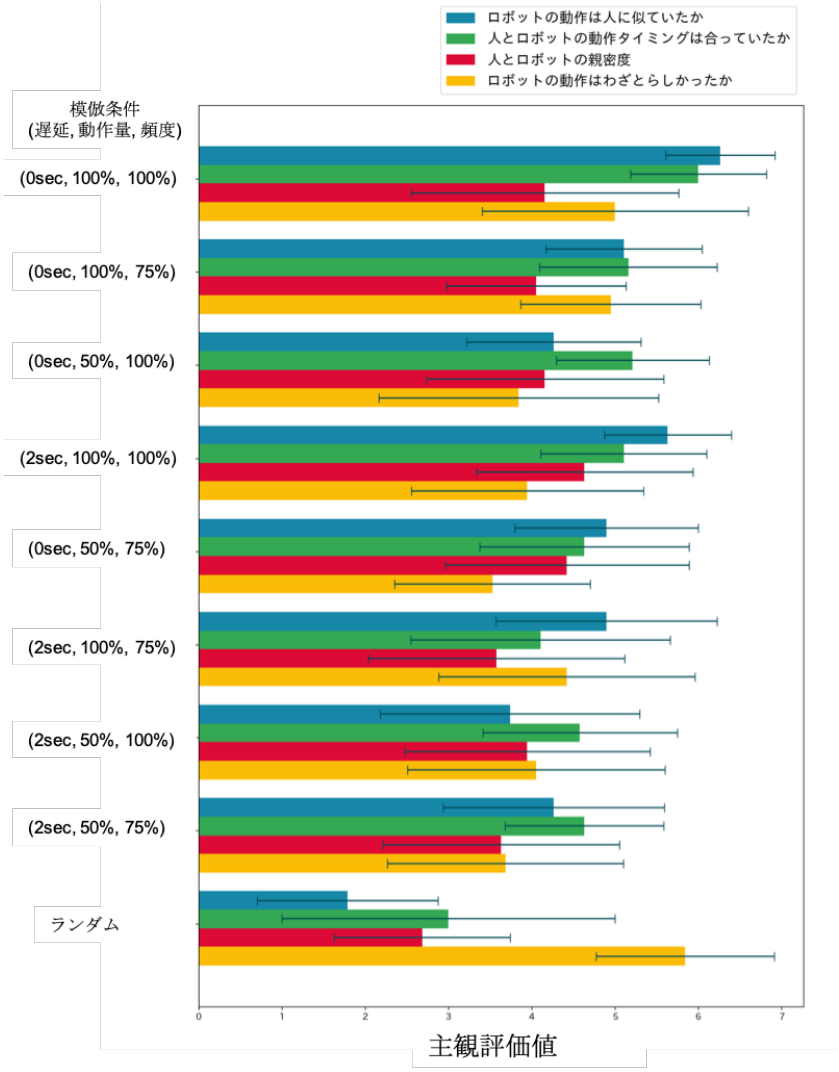

図 10　実験 II のアンケート主観評価結果

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	0.089	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	0.057	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	0.057	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

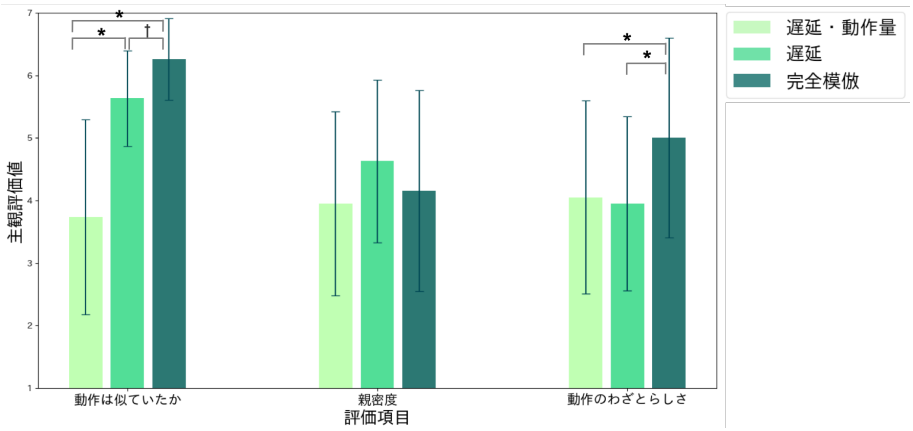

図 11　模倣条件「遅延・動作量」,「遅延」,「完全模倣」の主観評価結果

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と似ていたか」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と似ていたか」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

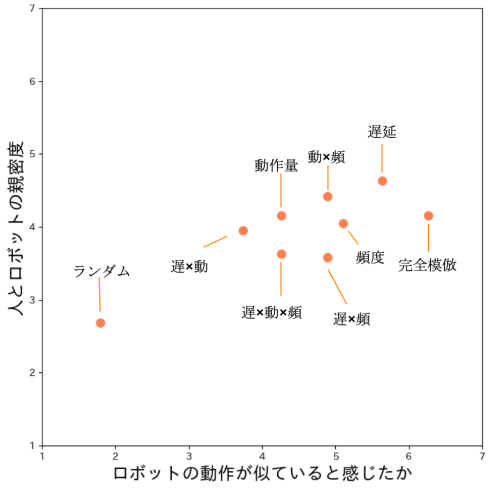

図 12　「ロボットの動作は似ていると感じたか」と「人とロボットの親密度」の散布図

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

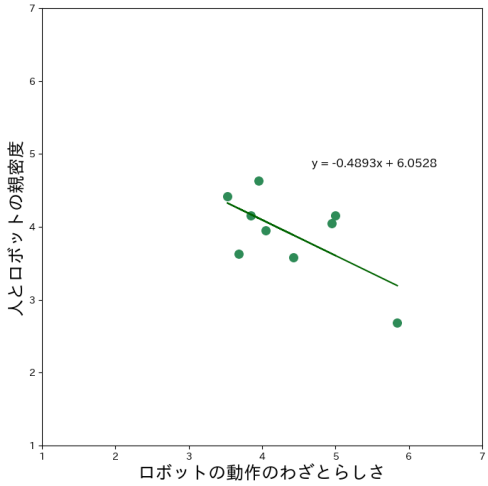

図 13 「ロボットの動作のわざとらしさ」と「人とロボットの親密度」の散布図

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見られる．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．

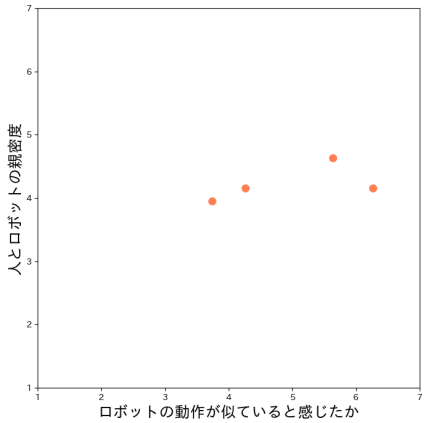

図 14　ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作は似ていると感じたか」と「人とロボットの親密度」の散布図

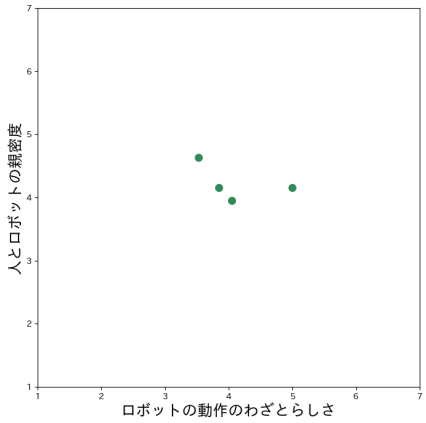

図 15　ランダム・頻度を含むパラメータを除いた「ロボットの動作のわざとらしさ」と「人とロボットの親密度」の散布図

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