The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | 高齢者を対象にした複数ロボット対話システムの開発に関する研究 |
| Author(s) | 西尾, 聡朗 |
| Citation | 大阪大学, 2022, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://doi.org/10.18910/88098 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

# 高齢者を対象にした複数ロボット対話システムの開発に関する研究

令和４年３月

西尾　聡朗

# 高齢者を対象にした複数ロボット対話システムの開発に関する研究

博士（工学）論文提出先
大阪大学大学院基礎工学研究科

令和４年３月

西尾　聡朗

# 概要

近年，人と話す機会の少ない高齢者の数が増加している．こうした社会状況の中で，人間の代わりに高齢者の対話相手となることで高齢者の精神的健康の維持・改善を目指すコミュニケーションロボットの研究開発が進められている．ロボットが自動で人間との対話を継続するためには，音声認識の誤りなどにより生じる対話の破綻に対処する必要がある．この課題に対処するために，これまで複数のロボットを使用した対話システムが提案されてきた．一方で従来のロボット対話システムは，高齢者がロボットとの対話に一定以上参与することを前提としており，対話参与に消極的な高齢者を考慮していなかった．そこで本研究では，対話参与に消極的な高齢者も含めた，より多くの高齢者とより長く対話を継続することが可能な複数ロボット対話システムの開発を目指す．

対話への参与の度合いは個人ごと，時間ごとに異なると想定されるため，システムは高齢者の参与の度合いに応じて対話の振る舞いのモードを適宜変更する必要があると考えられる．そのため本研究では，高齢者の発言状況に応じて，1)システムが高齢者に話題を提供するモード(話題提供・質問モード)と，2)対話参与に積極的な高齢者に対して傾聴するモード(傾聴モード)と，3)対話参与に消極的な高齢者に対してロボット同士の対話を提示しながら発言を促すモード(ロボット協調対話モード)の三つのモードを切り替えながら対話を継続するシステムを提案する．

本研究では最初に，ロボット協調対話モードにおいて人をロボット同士の対話に参与させることの効果を検証した．次に提案システムを実装し，提案システムと対話した高齢者は従来のシステムと対話した高齢者よりも長く発言することを確認した．さらに介護施設における実証実験を行い，提案システムは実際の環境下でも高齢者と30分以上対話を継続できることを確認した．最後に提案システムの実用化の観点から，ロボットを使用した対話システムとCGエージェントを使用した対話システムの比較を行い，ロボットを使用することの潜在的なメリットを

確認した．本研究の貢献は，実際の高齢者が生活する環境下において多様な高齢者と一定時間対話を継続することが可能なシステムを開発したことである．これは，今後の高齢者支援ロボットの開発分野において重要な一歩になると期待できる．

# 目次

第一章 序論 ..... 3
1.1 研究の背景 ..... 3
1.2 対話への参与の構造 ..... 5
1.2.1 2者対話におけるロボットの参与役割 ..... 6
1.2.2 多人数対話におけるロボットの参与役割 ..... 9
1.3 本研究の目的 ..... 11
1.4 本論文の構成 ..... 14
第二章 関連研究 ..... 15
2.1 高齢者向けコミュニケーションロボットに関する研究 ..... 15
2.2 複数のロボットとの対話に関する研究 ..... 17
2.3 ロボットの身体性に関する従来研究 ..... 20
第三章 複数のロボットの対話に人を参与させることの効果の検証実験 ..... 23
3.1 実験概要 ..... 23
3.2 システム ..... 26
3.2.1 システム概要 ..... 26
3.2.2 使用したロボット：アンドロイド ..... 27
3.2.3 音声認識モジュール ..... 28
3.2.4 音声合成モジュール ..... 29
3.2.5 アンドロイドの行動制御モジュール ..... 29
3.2.6 対話制御モジュール ..... 30
3.3 実験設定 ..... 30
3.3.1 参加者 ..... 31
3.3.2 実験装置 ..... 31
3.3.3 実験手順 ..... 33
3.3.4 評価の観点 ..... 34
3.4 実験結果 ..... 36
3.4.1 マニピュレーションチェック ..... 36
3.4.2 想起テスト ..... 37
3.4.3 アンケート結果 ..... 37
3.5 実験結果の考察 ..... 38
3.6 まとめ ..... 39
第四章 適応的対話継続機能の効果検証実験 ..... 41
4.1 実験概要 ..... 41
4.2 システム ..... 41
4.2.1 システム概要 ..... 41
4.2.1 使用したロボット：CommU ..... 42

4.2.2 複数の対話ロボットの対話モデル ..... 43
4.2.3 適応的対話継続機能の実装 ..... 45
4.3 実験室実験 ..... 48
4.3.1 参加者 ..... 48
4.3.2 実験装置 ..... 49
4.3.3 実験手順 ..... 50
4.3.4 評価観点 ..... 50
4.3.5 実験結果 ..... 51
4.4 フィールド実験 ..... 52
4.4.1 参加者 ..... 52
4.4.2 実験装置 ..... 53
4.4.3 実験手順 ..... 53
4.4.4 評価観点 ..... 54
4.4.5 実験結果 ..... 54
4.5 実験結果の考察 ..... 56
4.6 まとめ ..... 59
第五章 複数のロボットが物理的身体を持つ効果の検証 ..... 61
5.1 実験概要 ..... 61
5.2 システム ..... 63
5.2.1 システム概要 ..... 63
5.2.2 使用したロボット：CommUとバーチャルCommU ..... 64
5.3 実験設定 ..... 66
5.3.1 参加者 ..... 66
5.3.2 実験装置 ..... 66
5.3.3 実験手順 ..... 69
5.3.4 評価観点 ..... 70
5.3.5 分析方法 ..... 71
5.4 実験結果 ..... 72
5.5 実験結果の考察 ..... 74
5.6 まとめ ..... 76
第六章 議論 ..... 79
第七章 結論 ..... 85
謝辞 ..... 87
参考文献 ..... 89
業績 ..... 105
電子ジャーナル ..... 105

# 第一章

# 序論

## 1.1 研究の背景

近年，平均寿命の伸びと出生率の低下に伴い，全世界的に高齢者の数と高齢化率が増加している．2020年時点で65歳以上の高齢者は世界全体で7億人以上(全人口の9.3%)であり，2050年には15億人(全人口の16.0%)を超えると予測されている[1]．日本においても社会の高齢化は進んでおり，2019年時点で65歳以上の人口は3,589万人，総人口に占める割合は28.4%に達している[2]．こうした社会構造の変化のなかで，高齢者が生涯にわたり彼らの健康を維持できるよう支援を行うことが求められている[3]．

社会の高齢化に伴い，単独世帯の高齢者，すなわち独居高齢者の数が年々増加している[2]．独居高齢者は家族や友人と同居している高齢者に比べ社会的に孤立しやすく，また孤独感を抱きやすい[4]．社会的に孤立している高齢者や孤独感を抱いている高齢者はそうでない高齢者に比べ早期に死亡する割合が多く[5]，こうした孤独な高齢者に対して他者との接点を提供することが急務である．

他者との良質なコミュニケーションは高齢者の心身の健康に良い影響を及ぼすと言われている．例えば，家族との対話が多い高齢者ほど主観的幸福感が高い[6]．Fratiglioni et al.[7]は友人や家族との交流が十分な高齢者は，交流が乏しい高齢者に比べ認知症の発生率が低いことを報告している．彼らは，こうした友人や家族との交流は単に頻度が多いことだけでなく一度の交流の満足度が高い

ことも重要であると述べている．また他者と討議することは高齢者の孤独感の低減に有効であると言われている[8]．他者と過去の経験を振り返ることで高齢者の心理的幸福や生活の満足度が向上することが報告されている[9]．これらの報告から，他者とのコミュニケーションが不足している高齢者に対して高齢者が満足するような対話の機会を提供することが，高齢者の精神的健康の促進や認知機能の維持に寄与すると考えられる．一方で近年介護者の数は不足しており[2]，すべての高齢者に対話の機会を提供することは難しい．

そこで介護者の代わりに高齢者に対話の機会を提供するロボットの開発が行われてきた[10]．これまで対話を通して高齢者のスケジュール管理[11]-[13]や健康管理[13]-[16]などを行うロボットが開発されている．日本では内閣府により，自律して支援できるコミュニケーションロボットの開発がロボット技術の介護利用における重点分野として定められており，高齢者と対話を行うコミュニケーションロボットは高齢者のQOL向上と介護者の負担軽減の両面から活躍が期待されている[17]．

コミュニケーションロボットが自律的に高齢者との対話を継続するうえで，高齢者の音声認識の難しさは考慮すべき課題である[18]，[19]．音声認識の失敗はロボットの不適切な応答を引き起こし，高齢者を混乱させ，高齢者にフラストレーションを与える危険性がある[20]，[21]．そのため高齢者の自宅や介護施設など実際の高齢者の生活環境下で稼働するロボットは高齢者との対話にタッチパネルを使用することがある[22]-[24]が，これまで実施されたケーススタディの報告によるとタッチパネルによる対話よりも音声による対話のほうが望ましいという高齢者の意見がある[24]，[25]．De Graaf et al.[26]は，ロボットを高齢者の自宅に設置した実験において，高齢者はロボットの限定的な対話機能に不満を持っていたことを報告している．これらの報告から，高齢者の生活環境において音声対話を継続する機能は，高齢者に使用されるロボット実現の重要な要素であると考えられる．

人との音声対話を継続するという課題に対して，複数のロボットを導入するアプローチが考えられてきた．Arimoto et al.[27]は，2体のロボットを用い

ることで，音声認識の失敗などによって突然話題が変化しても人に違和感を与えにくいことを示した．Iio et al.[28]は2体のロボットが次々に高齢者に質問をすることによって音声認識が失敗したときの影響を低減する対話モデルを提案し，介護施設における実験で高齢者と15分程度の対話を実現した．これらの研究は，複数のロボットを活用した対話システムが高齢者の生活環境においても高齢者と自然に対話を継続することが可能であることを示唆している．そこで本研究は複数ロボットによる高齢者向け対話システムの構築を行う．

コミュニケーションロボットがより多くの高齢者にサービスを提供するためには，ロボットは高齢者の多様なニーズに応じて振る舞いを切り替える機能を持つべきである．高齢者という言葉が表す人々のグループは属性が不均一な集団であり，高齢者の年齢や先進技術に関する経験や能力，直面している身体的・認知的課題は多様である[29]．また高齢者のロボットに対する期待や先入観も高齢者によって異なる[30]．高齢者支援ロボットの開発にあたり，高齢者の文化的アイデンティティへの配慮[31]や身体的・認知的な衰退への配慮[12]が必要であると言われている．一方で，Allaban et al.[32]は高齢者支援ロボット研究のレビューを行い，ロボットは高齢者個々に対して行動を適応させる能力を備える必要があるが，高齢者の個人的好みや状態を考慮した研究は非常に少ないと主張している．そこで本研究では，高齢者の精神的健康を促進するコミュニケーションロボットの実現を目指し，高齢者の反応に応じて適応的に振る舞いを切り替える複数ロボット対話システムの開発を行う．

## 1.2 対話への参与の構造

対話という複数の人間で行う集団行動において，その集団に属する人の役割にはいくつかの種類が存在する．Goffman[33]は，対面対話における人の参与役割の構造について述べている．Goffmanによると対話においては話し手(Speaker)と聞き手(Hearer)の役割が存在し，対話に参与している人はこれらの役割を頻繁に交換しながら対話を行う．3者以上による多人数対話では，対話への参与が承認された関係者(Ratified participants)とそ

うでない関係者が存在する．図1はClark[34]がまとめた多人数対話における参与構造に，Goffmanの定義と整合するように筆者が加筆修正を加えた図である．Clarkによると，対話への参与が承認されていない関係者に傍観者(Bystander)という聞き手が存在する．またClarkは承認された関係者の聞き手を，さらに発話の受け手(Addressee)とそれ以外の傍参与者(Side-participant)に分類している．傍参与者は，過去あるいは未来に話し手や受け手の役割を担ったあるいはこれから担う可能性がある参与者である．

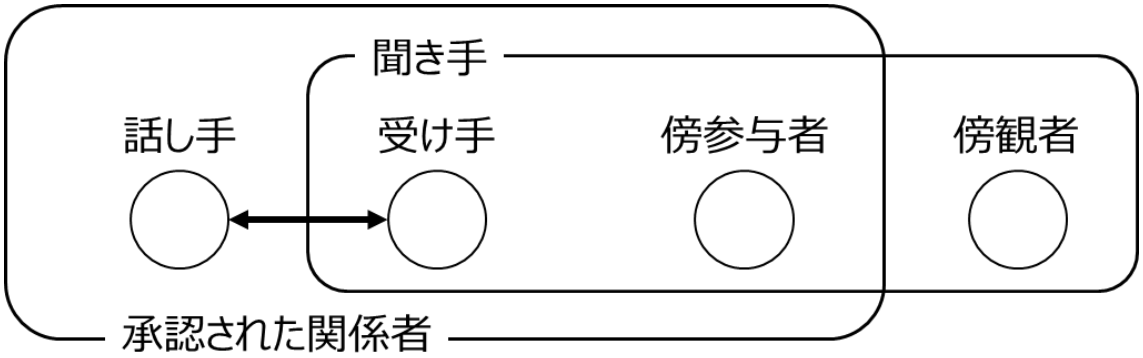


図1 多人数対話における参与構造
Figure 1. Participation structure in multi-party conversation.

2者対話における関係者の役割は話し手と受け手の二つのみである．これに対し多人数対話においてはさらに傍参与者，傍観者という役割が存在する．対話中の参与者の経時的な役割の変化も含め多人数対話のダイナミクスは2者対話のそれに比べ複雑であり，様々な対話の状態が存在する．

### 1.2.1 2者対話におけるロボットの参与役割

対話ロボットの研究分野では，ロボットの話し手としての機能あるいは受け手としての機能の拡充に焦点を当てた研究が存在する．例えば小林ら[35]はロボットが話し手としていかに話題提供や質問を行うかに注目した．一方で下岡ら[36]はロボットが受け手として高齢者の発言を傾聴する方法に注目した．しかし，人同士の対話ではこれらの役割は対話中頻繁に入れ替わる．ロボットが，

人同士が行うように対話の状況に応じて振る舞いを変化させるためには，対話内容を理解するための高度な言語処理技術が必要となる．そこで横山ら[37]はロボットと人の対話の状態を，ロボットが話し手として話題提供や質問を行う時，すなわちロボットの発言頻度が高い状態とロボットが受け手として高齢者の発言を傾聴する時，すなわち高齢者の発言頻度が高い状態の二つに明示的に分離し，システムの振る舞いのモードをそれぞれの状態で変化させるシステムの提案を行った．

図2は従来研究で検討された，2者対話におけるシステムの振る舞いのモードを，縦軸にロボットの発言頻度，横軸に高齢者の発言頻度として表示したものである．図中のRはロボットを，Hは高齢者を表している．ロボットと高齢者のいずれかが発言している，あるいはこれから発言しようとしている状態をシステムと高齢者の対話が成立している状態として想定した場合，高齢者とロボットの対話を成立させるためには高齢者とロボットの発言頻度の和は常に一定である必要がある．恒常的に両者とも発言頻度が高い状態．すなわち両者の発言が常に衝突している状態や，両者とも発言頻度が低い状態，すなわち常に両者とも発言していない無言の状態は対話が成立していないと考えると，システムの振る舞いのモードは対話が成立するライン上に位置づけられる．

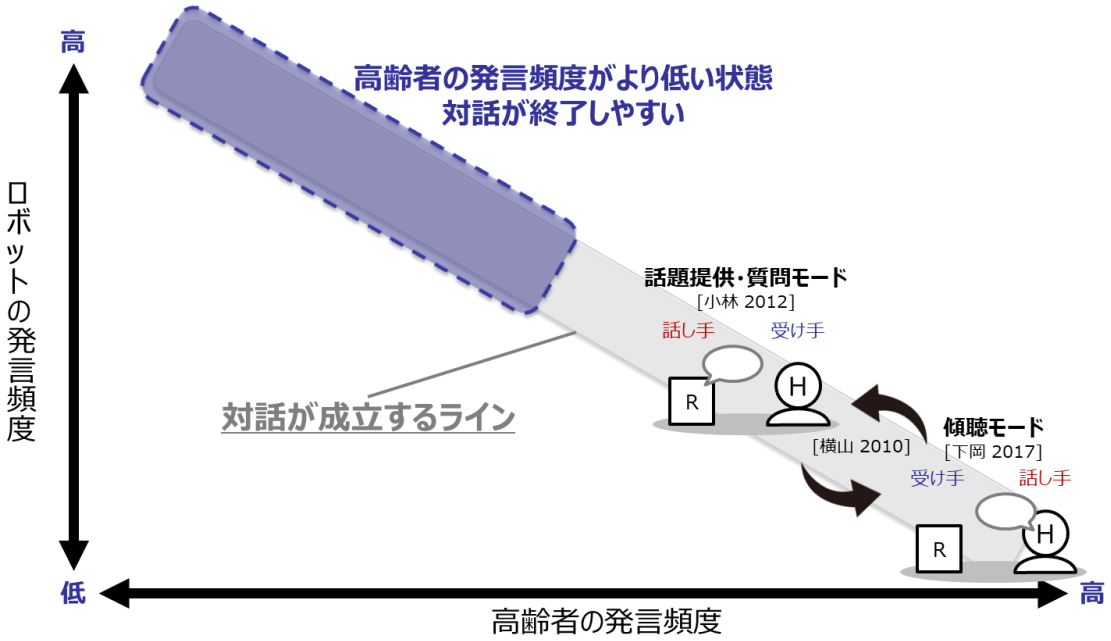


図2 2者対話におけるロボットのモード
Figure 2. Modes of a robot in a one-to-one conversation.

参与役割が話し手と受け手の2種類しかない2者対話においては，高齢者が対話に参与しなければ対話は成立しない．すなわち，話題提供・質問モードや傾聴モードは発言頻度がより低い高齢者を想定しておらず(図2 点線領域)，高齢者の一定以上の対話への参与を前提としている．しかし音声認識の失敗などに起因するロボットの不適切な応答により，高齢者の発言頻度が低下し，高齢者が対話から離脱してしまう可能性がある．また，一部の高齢者はそもそもロボットの使用に対して否定的であったり，不安を抱いたりする[38]．そのため，より多くの高齢者が使用することを想定したロボットの開発において高齢者の発言頻度が低い状況も想定する必要がある．一方でロボットとのインタラクションを繰り返すことにより，ロボットの有用性に対する高齢者の評価が向上することも報告されている[26]．したがって高齢者が対話への参与に消極的な場合でもロボットが高齢者に対して対話への参与を促し続けることが重要であると考えられる．そのためには高齢者の発言頻度が低い場合においても対話を継

続し，高齢者の発言を促すことで話題提供・質問モードや傾聴モードに移行する，新たな振る舞いのモードを追加する必要がある

### 1.2.2 多人数対話におけるロボットの参与役割

複数のロボットを導入した多人数対話における関係者の役割は話し手・受け手以外にも選択できる余地が生じる．複数のロボットが存在すればロボット同士が対話を行うことで対話を継続させることが可能であるため，人は対話を成立させるために必ずしも対話に参与し発言する必要はない．すなわち複数ロボットとの対話は，人を傍参与者とすることで1体のロボットとの対話に比べ人の負担の低減が可能である[39]，[40]．また人が対話に参与しない場合，すなわち人が傍観者となる場合でも，ロボット同士の協調対話の提示による情報の伝達が可能である[41]-[43]．このように多人数対話では人を傍参与者あるいは傍観者とする，2者対話では存在しなかったシステムの振る舞いのモードが存在しうる（図3）．この多人数対話特有のシステムのモードでは，ロボット同士が対話を行うことで人の負担を低減でき，高齢者の発言頻度が低い場合においても対話の継続が可能であると期待できる．

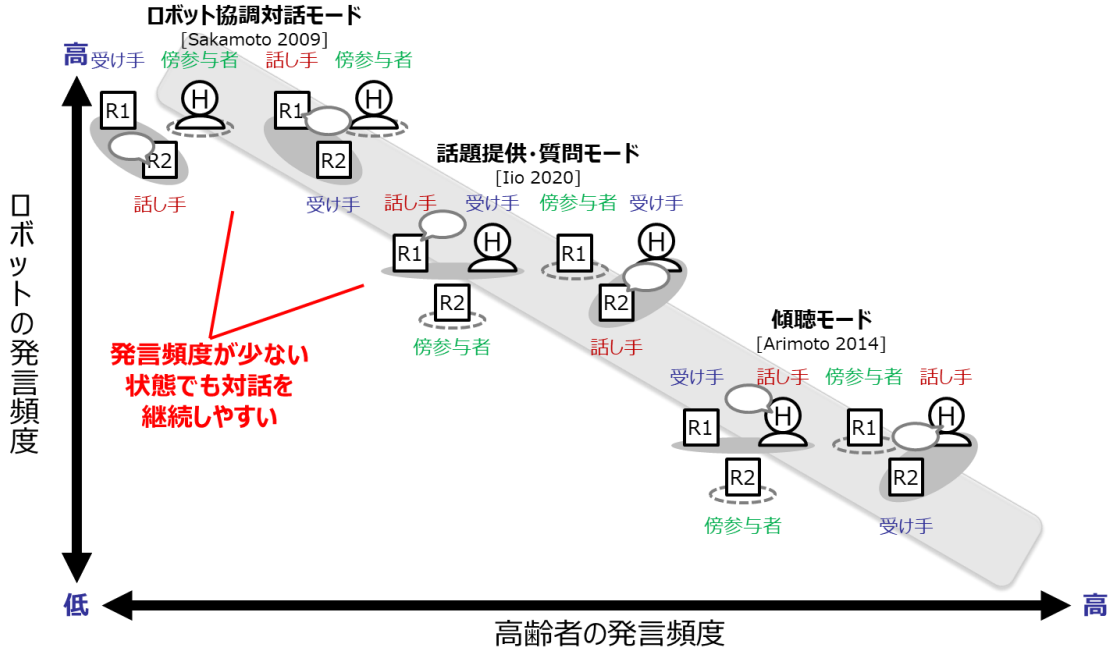


図3　多人数対話におけるロボットのモード
Figure 3. Modes of robots in multi-party conversation.

発言頻度が高い高齢者に関しては，2者対話の場合と同様にロボットが話し手になり高齢者が受け手となる場合とロボットが受け手になり高齢者が話し手となる場合の両方が考えられる．すなわち多人数対話においてもシステムの振る舞いのモードを話題提供・質問モードと傾聴モードに分離することが可能である．従来の複数のロボットを導入した多人数対話に関する研究では，話題提供・質問モード時におけるシステムの振る舞いに焦点を当てた研究が存在する．例えば，Iio et al.[44]は，複数のロボットが交互に話し手の役割を担い人に質問をすることにより，人を飽きさせることなく対話を継続する対話システムを提案した．また多人数対話において，人に質問をする話し手の役割と人の発言に対して応答する受け手の役割を異なるロボットが担うことで，高精度な音声認識がなくてもロボットの応答に一貫性を感じさせやすいことが報告されている[45]．多人数対話における話題提供・質問モードでは，ロボットの役割を柔軟に切り替えることで2者対話に比べより多様な対話戦略の実現が期待でき

る.

複数のロボットによる傾聴モードに関連する研究として，遠隔操作ロボットと人の対話に傍参与者ロボットを導入した研究が行われている．Arimoto et al.[46]は，人の発言に対して頷く傍参与者ロボットの存在が，人の対話相手となるロボットの社会的存在感の向上に寄与することが報告されている．しかし複数のロボットがいずれも受け手や傍参与者となる自動対話システムの研究は行われていない．一方で人が計算などの単純な作業を行う場合，称賛などのポジティブフィードバックは1体のロボットが行うよりも複数のロボットが行うほうが効果的であることが報告されている[47]．対話においても，複数のロボットが高齢者の発言に応答することでロボットの傾聴姿勢を高齢者により強く印象付ける効果が期待できる．すなわち，発言頻度が高い高齢者に対しても1体のロボット以上に効果的に対応できる可能性がある.

## 1.3 本研究の目的

従来の複数ロボットによる多人数対話に関する研究では，システムの特定の振る舞いのモードに注目しているが，高齢者との対話状況に応じて明示的にモードの切り替えを行った研究は存在しない．一方で，1.1節で述べた通り，高齢者が実際に生活する環境においては高齢者との対話の状況に柔軟に対応する必要がある．そこで本研究ではより多くの高齢者とより長時間対話の継続が可能なロボットを実現するために，高齢者が積極的に話をしている状況と高齢者が発言をすることに消極的な状況の両方に柔軟に対応する，適応的対話継続(Adaptive listening)システムを提案する(図4)．適応的対話継続システムは，三つの対話のモードを持つ．三つの対話のモードとは，ロボットが話し手となる話題提供・質問モード（Question mode），ロボットが受け手となる傾聴モード(Listening mode)，ロボットが話し手と受け手となりロボット同士の対話を提示することで対話を継続しつつ，適宜高齢者に質問を行うことで対話への参与を促すロボット協調対話モード(Prompting mode)である．ロボット協調対話モードは，発言頻度

が低い高齢者に適応するためのモードであり，傾聴モードは発言頻度が高い高齢者に適応するためのモードである．適応的対話継続システムは，これらのモードを高齢者の発言の頻度によって対話中切り替えながら対話を行う．システムは話題提供・質問モードにおいて高齢者に話題提供や質問を行い，システムからの問いかけに対して高齢者の発言頻度が低い場合はロボット協調対話モードに遷移し，高齢者の発言頻度が高い場合は傾聴モードに遷移する．なお対話中に高齢者の参与の仕方が急激に変化するとは考えられないため，ロボット協調対話モードと傾聴モードは話題提供・質問モードにのみ遷移し，ロボット協調対話モードから傾聴モード，傾聴モードからロボット協調対話モードへの直接の遷移は行わない．

システムは高齢者とロボットの発言頻度の和が一定となるようにシステムのモードを切り替える．一方で高齢者が最も好ましいと感じるロボットと人の発言頻度の和は高齢者ごとに異なる可能性がある．しかし高齢者との対話においてシステムと高齢者の最も適切な発言頻度の和は明らかになっていない．そのため本研究ではその最初のステップとしてシステムと高齢者の発言頻度の和は固定したうえで高齢者が対話参与に積極的か消極的かを推定し，それぞれの高齢者への適応を図る．

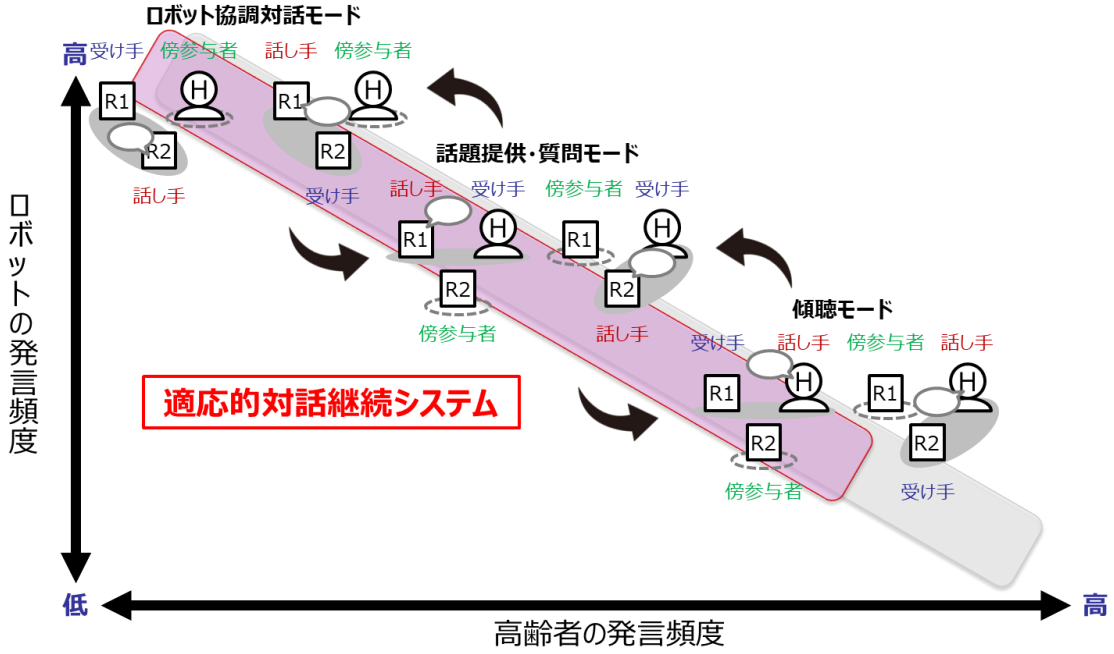


図4 適応的対話継続システム
Figure 4. The adaptive listening conversation system.

本研究では高齢者が生活する環境で動作するアプリケーションの実現を目標に，段階的に調査及び開発を進めた．まず対話への参与が消極的な相手を想定した機能の検証を目的に，ロボット協調対話モードについて対話相手を傍参与者として扱った場合と傍観者として扱った場合でどのような違いが生じるのかを考える．これまで複数のロボットが協調対話を提示することで傍観者に情報を伝達するメディアが提案されている[42]．こうしたメディアと比較し，ロボット同士の対話に人を参与させ，人を傍参与者として扱うことでどのような効果があるかを確認する．次に，ロボット協調対話モードと傾聴モードが高齢者との対話継続に及ぼす効果の検証を目的に，三つのモードを搭載した対話システムと，従来の話題提供・質問モードのみを搭載したシステム[28]を比較する実験室実験を実施する．さらに，実環境において提案システムが高齢者とどの程度対話を継続することが可能なのかの検証を目的に，高齢者介護施設においてフィールド実験を実施

する．最後に，アプリケーション化を見据え，物理的な身体を持つロボットを使用する利点の検証を目的に，ロボットとディスプレイ上の2次元エージェントを比較する実験を実施する．

## 1.4 本論文の構成

二章では，高齢者支援ロボットのうち，高齢者とのコミュニケーションを通して高齢者の日々の活動や精神的健康の促進を行うことを目的としたロボットに関する従来研究について紹介する．また，複数のロボットを活用した対話システムに関する従来研究について紹介する．さらに物理的な身体を持つロボットを使用する利点の検証に関連し，ロボットの身体性に関する従来研究についても紹介する．三章では，ロボット協調対話モードにおいて傍参与者と傍観者という役割の違いにより人が対話やロボットに対して抱く印象の違いを調査した実験について説明する．四章では，ロボット協調対話モードと傾聴モードを含んだ適応的対話継続システムの実装と，これら二つの機能の効果を検証するための実験室実験について説明する．加えて，開発した機能を加えた対話システムが実際の環境下でどの程度高齢者と対話を継続できるかを検証するフィールド実験についても説明する．五章では，2次元エージェントを用いた適応的対話継続システムの実装を行い，ロボットが物理的身体を持っている場合と仮想的身体を持っている場合で，高齢者が対話やロボットに対して抱く印象にどのような違いが生じるかを検証する実験について説明する．六章では，本研究の寄与，制限事項，および今後の研究について議論し，七章では本研究の結論を述べる．

# 第二章

# 関連研究

## 2.1 高齢者向けコミュニケーションロボットに関する研究

これまで高齢者を支援するためのロボット技術が研究・開発されてきた[48], [49]. これらのロボット技術は二つのカテゴリー, すなわち高齢者の物理的活動を支援するためのロボット技術と社会的活動を支援するためのロボット技術に大別される[50]. 物理的活動を支援するロボット技術は, 例えばスマート車椅子[51]や外骨格[52]などのように高齢者の身体的機能を補助することを目的とする. 一方で, 社会的活動を支援するロボットは, 高齢者とのコミュニケーションを通して高齢者の家事や健康管理といった作業の支援や[53], 高齢者の精神衛生の維持[54], [55]を目的とする. 本節では高齢者の社会的活動を支援することを目的に開発されたロボットに焦点を当て紹介する.

社会的活動支援ロボットの例として, 動物を模したペット型のロボットがある. 古くから動物との触れ合いが人に影響を及ぼすことは知られており, アメリカを中心にその効果を医療福祉に応用した動物介護療法(Animal Assisted Therapy: AAT)が行われてきた[56]. しかし動物を実際の医療現場に導入するためには動物の安全性や管理の観点から配慮しなければならないことが多く, 日本の多くの医療福祉施設では導入が進んでいない. このような課題に対し動物を模したロボッ

トを活用したより衛生的で安全な，ロボットセラピー(Robot Therapy: RT)に関する研究が注目されている[54]，[55]．例えばアザラシ型ロボット「Paro」は高齢者のメンタルサポートを目的に高齢者施設で使用され，高齢者のストレスの減少，うつの改善などの心理的効果や介護者とのコミュニケーションの増加などの社会的効果があることが確認されている[57]-[59]．「Paro」以外にも市販の動物型ロボットを施設の高齢者の支援に活用する試みも行われており[60]-[63]，ロボットとのインタラクションが高齢者の孤独を癒すことが報告されている[62]．一方で，これらの研究においてロボットはペットの代替として考えられており，人間の作業を代替する役割を担っていない．

人間の代替となる役割を持つロボットには，高齢者と対話を行いながら高齢者の日常生活の支援を行うロボットが存在する．例えばPearl[23]やCare-O-bot[22]は，搭載されたタッチパネルを通して高齢者と対話を行い，情報の提供や高齢者の移動の補助を行う．こうした対話ロボットを高齢者が生活する環境に導入し，ロボットが高齢者に受け入れられるかを調査した研究がある．例えばDe Graaf et al.[26]は，天気予報や参加者の体重測定，高齢者の活動の評価などを高齢者に伝えるロボットを用いた30日間の実験を実施し，ロボットの有用性や使いやすさに関する高齢者の評価が経時的に向上することを示した．Abdollahi et al.[13]は，認知症やうつ病の高齢者のスケジュール管理機能や認知ゲーム機能を持つロボットを高齢者施設に導入し，4週間の実験においてロボットに対する高齢者の興味が減衰しなかったことを報告している．Gross et al.[16]は，高齢者の住宅に高齢者の健康状態をモニタリングするロボットを設置した結果，高齢者はロボットを社会的な存在として見なし彼らの日常生活に肯定的に受け入れたと述べている．Kanoh et al.[21]は介護施設においてロボットを用いたレクリエーションを行い，ロボットやレクリエーションが高齢者に肯定的に受け入れられたと報告している．Khoslae et al.[64]は介護施設で高齢者に健康に関するアドバイスを行うロボットを設置し，ロボットからのアドバイスが高齢者の行動に影響を及ぼしたと述べている．これらの研究ではロボットは自動で対話を行っているが，ロボットからの情報提供が主であり，

音声による双方向のインタラクション機能は未実装か限定的である．しかしロボットに対話能力の制限があるにも関わらず，一部の高齢者は音声による対話を試みている[16]，[26]．Heerink et al.によると高い社会的能力や適応力を持つロボットは高齢者に受け入れられやすい[65]ため，柔軟な音声応答機能の具備が高齢者のロボット利用を促進すると考えられる．

高齢者との自由度の高い音声対話の実現を目指した研究もある．例えば小林ら[35]は高齢者の発言に依存しない応答を行うことで音声認識せずに対話を行うシステムを提案した．横山ら[37]は，相手の話題に対する関心度を推測し，関心度が高い場合は傾聴を行い，関心度が低い場合は話題提示を行うことで高齢者と対話を継続する対話システムを提案した．下岡ら[36]は対話相手の感情を推定し，相手の発言に共感的な応答を行うことにより対話を継続する対話システムの開発を行った．Lalae et al.[66]は，人の発話終了を予測し短い応答を行い，深堀をする質問を行うことによって発言を促す傾聴システムを開発した．しかしこれらの研究は，高齢者がロボットとの対話に積極的に参与することを前提としており，高齢者の発言頻度が低下する状況を想定していない．そこで，本研究では実際の環境において，対話参与に積極的な高齢者だけでなく対話参与に消極的な高齢者とも対話を継続できる対話ロボットの開発を行う．

## 2.2 複数のロボットとの対話に関する研究

これまで複数のロボットが互いに協調しタスクを実行するシステムの研究が行われてきた[67]．複数のロボットを使用したシステムは単一のロボットのシステムに比べ様々な利点がある．一つはタスクの負荷の分散が可能なことである．例えば，Suzuki et al.[68]が主張するように，対話タスクにおいて単一のロボットしか存在しない場合，人はそのロボットとインタラクションすることを強制される．一方で複数のロボットを用いた多人数対話においては，ロボット同士が対話を行うことで対話を継続できるため人は必ずしも発言する必要はない．そのため複数のロボットとの対話は，1体のロボットと

の対話に比べ人の対話に参与する負担の低減が可能である[39], [40].

さらに複数のロボットが参与する多人数対話では, ロボット同士の協調対話による情報伝達が可能となる. 複数のロボットによる対話形式の情報提示は, 1体のロボットからの情報提示よりも人を惹きつけやすい[41], [42]. Mashimo et al.[69]は複数のロボットが独立して情報提示するシステムよりも, 対話形式で情報提示するシステムのほうが人は親しみやすく理解しやすいことを示した. またロボット同士の対話は事前に厳密にデザインすることが可能なので, 違和感のない対話を容易に実現可能である. Hayashi et al.[43]はこのようなロボット同士の協調対話の例として2体のロボットが漫才を行うシステムを開発し, 人間が行うものよりも全体的な印象や演者の存在感が高く評価されたことを示した. Leite et al.[70]は子供を対象に2体のロボットによるロールプレイング型ストリーテーリングシステムを開発し, 感情知能の育成の可能性について調査している. このように実際のアプリケーションにおいて, ロボット同士の協調対話による情報伝達の有効性は期待されている.

ロボット同士のコミュニケーションは, それを観察した人にロボットの社会性を生起させる[71]. Kanda et al.[72]は, ロボット同士がコミュニケーションを行うことで形成される社会関係に人を参入させることで, 人とロボットの関係を容易に構築できると主張している. Kadowaki et al.[73]は人間の多人数対話に対して提唱されたバランス理論を人と2体のエージェントの間で構築される社会的関係に適応し, 人を説得するタスクにおいて不均衡関係よりも均衡関係のほうがパフォーマンスが向上することを示した. 複数のロボットは単一のロボットよりも人と多様な社会的関係を構築できる可能性がある.

複数のロボットが対話に参与する場合, ロボットそれぞれに異なる役割を持たせることも可能である. 多人数対話では話し手と受け手に加え, 傍参与者や傍観者が存在する[33]. Arimoto et al.[46]は遠隔操作ロボットと人の対話に傍参与者の役割のロボットを導入し, 傍参与者ロボットの相

槌動作の提示が遠隔操作ロボットの社会的存在感を向上させることを示した．さらに彼らは，対話中話し手と傍参与者の役割を切り替えることで，音声認識の失敗などによる突然の話題転換の違和感を低減する手法を提案した[27]．Iio et al.[45]は，人に質問する役割と人の応答に対して反応する役割を異なるロボットに与えることで，人の発言によらず一貫性を持った対話を目指す手法を提案した．さらに彼らは高齢者を対象にした対話システムに活用し，高齢者介護施設において高齢者と一定時間対話を継続することが可能なシステムを構築した[28]．またKhalifa et al.[74]は，教師役のロボットと生徒役のロボットを使用した英語学習のための対話システムを構築した．このようにそれぞれのロボットに異なる役割を与えることでより柔軟で多様な対話を実現できる可能性がある．

また複数のロボットの存在が，対話やロボットに対する人の印象やタスクのパフォーマンスに肯定的な影響を与える可能性がある．例えばNishimura et al.[75]は，2体のエージェントとの対話は1体のエージェントとの対話に比べより活発な印象を人に与え，人はより話しやすいと感じることを示した．Iio et al.[44]は，2体のロボットとの対話は1体のロボットとの対話に比べ対話している感覚を人に与え，人はロボットとより長く対話することを示した．Nakanishi et al.[76]は，ホテルに宿泊客と対話するロボットを設置する実験を行い，宿泊客は1体のロボットとの対話より2体のロボットとの対話のほうが楽しいと評価したことを報告している．Shiomi et al.[47]は，2体のロボットからの称賛は1体のロボットからの称賛に比べ運動技能の向上に効果的であることを示した．ただし，これらのロボットの数の効果はロボットの外観に依存する可能性がある．Fraune et al.[77]は擬人化されたロボットの場合単一よりも集団のほうが人は肯定的に評価するのに対し，機械的な外観のロボットの場合集団のほうが否定的に評価されることを示した．複数の擬人化されたロボットによって提供される対話体験は，人に好印象を与えることが期待できる．

Iio et al.[44]は複数のロボットの対話は単一ロボットの対話に比べより

ダイナミックであると主張している．言語コミュニケーションと非言語コミュニケーションの両面において，複数のロボットを使用することで単一のロボット以上に多様な表現の実現が期待できる．ロボットが様々な高齢者の対話相手となるためにはロボットは対話相手の性質によって振る舞いを変化させる必要があり，多様な表現が可能である点で複数のロボットの導入は有効な手段であると考えられる．本研究ではIio et al.が提案した高齢者向け複数ロボット対話システム[28]を拡張し，より多くの高齢者と対話継続可能なロボットの実現を目指した．

## 2.3 ロボットの身体性に関する従来研究

人工エージェントの身体性の概念はこれまで多くの研究者の注目を集めているが，それは単に物理的身体に由来する特性に関する概念というだけでなく，エージェントの身体が物理世界に存在しない場合においても生じうる，身体と環境の間の結合構造に関する概念も包含する場合がある[78]．人とロボットのインタラクションにおいてロボットが物理的身体を持つメリットの一つは，例えばイベント会場などにおける来場者の誘導[79]，[80]や荷物の移動といった高齢者の物理的活動の支援[22]，[23]，[81]など，人や物を物理的に移動させたり接触したりするサービスが提供できること，すなわちロボットが人を含む周囲の環境とインタラクションできることである．さらに，物理的物体を持つことが人とロボットのインタラクションにおいて人の心理的側面に影響することも報告されている．例えば，物理的身体を持つロボット(以下，物理ロボットという)は，仮想的な身体を持つロボット(以下，仮想ロボットという)よりも信頼性が高く，ロボットが提供する情報に価値があると認識される[82]．また，物理ロボットは，モニタ画面に表示される写実的な外観のロボットあるいはアニメーションにより表現された外観のロボットよりも説得力があり，人から肯定的に認識される[83]．一方，Holz et al.[84]は，仮想ロボットにはいくつかのメリットがあると主張している．仮想ロボットは物理的には不可能な表現も

提示することが可能である[85]．また，仮想ロボットは物理ロボットより人に近い外観を持たせやすく，ユーザごとに外観を変更しやすい[86]，[87]．

社会的ロボットの身体が人や人とのインタラクションに与える影響に関して，Deng et al.[88]は過去のロボット研究をレビューし，様々なタスクにおける物理ロボットと仮想ロボットの比較結果をまとめているが，どちらのロボットが高い評価を得るかはタスクや評価観点により異なっている．例えば，ロボットと一緒にチェスをするタスク[89]，[90]や，パズルを解くタスク[91]，ロボットがストーリーテリングをするタスク[92]においては，物理ロボットとの対話のほうが仮想ロボットとの対話よりも楽しいと評価された．一方で，ロボットが講義を行うタスクでは，物理ロボットによる講義の方が仮想ロボットによる講義よりも人が記憶した講義内容が少なかった[93]．また，物理ロボットとの物理的接触が許容された場合は，物理ロボットの社会的存在感は仮想ロボットよりも高く評価されたが，物理的接触が制限された場合は逆に低く評価された[94]．ロボットが人と対話を行い説得するタスクにおいては，仮想ロボットは物理ロボットよりも能力があると評価された[95]．Kiesler et al.[96]は大学生を対象にした実験で，彼らは仮想ロボットとの対話よりも物理ロボットとの対話に対して積極的に参与した一方で，物理ロボットよりも仮想ロボットに対して否定的な態度を取らなかったことを報告している．これらの研究から，物理ロボットと仮想ロボットにはそれぞれの利点があり，目的に応じてロボットの種類を選択することが重要であると考えられる．

高齢者を対象にしたタスクにおいても同様にタスクによって評価は異なる．物理ロボットは，運動のコーチング[97]や音楽療法の指導[98]において，仮想ロボットよりも高齢者のパフォーマンスに良い影響を与えた．Heerink et al.[65]の報告によると，高齢者への情報伝達では，物理ロボットの方が仮想ロボットよりも効果的にアラートや天気予報を高齢者に知らせることができた．一方で，高齢者への健康指導では，仮想ロボットによる指導の方が物理ロボットによる指導より優れていた[99]．これらの研究で行われたロボット

と高齢者の対話は特定のタスクを達成することを目的としており，高齢者の経験や好みを聴くような，より社会的な対話におけるロボットの身体の効果は明らかにされていない．そこで本研究では，高齢者の経験や好みを聴く対話において物理ロボットと仮想ロボットのインタラクションの違いを確認した．

# 第三章

# 複数のロボットの対話に人を参与させることの効果の検証実験

## 3.1 実験概要

コミュニケーションロボットに関するこれまでの研究において，音声は利用しやすく普遍的なモダリティの一つとして利用されてきた[100]，[101]．しかし，実際の環境における高い精度の音声認識の実現は依然として技術的課題がある[18]．この課題を回避する方法として，二章で述べたように複数ロボットを使用したコミュニケーションの方法が検討されている．人と直接対話せずにロボット同士の対話を提示することで人に情報を伝達する，Passive socialメディアとしてのロボット活用に関する研究が行われている．Passive socialロボットは，単一のロボットよりも注意を惹きやすいと言われている[41]，[42]．また，ロボット同士がコミュニケーションを行う様子を見た人は，ロボット同士がコミュニケーションを取らない場合に比べて，ロボットに対して人間に対するように接し，ロボットが話す内容を理解しやすいと評価することが報告されている[72]．これらの研究が示す通り，複数のロボットによる協調対話は，実用的な情報伝達メディアを実現するにあたり有効な手段の一つであると考えられる．一方で，こうしたロボット同士の協調対話において人を傍参与者と傍観者として扱った場合，すなわち人を対

話に参与させた場合と参与させなかった場合で人のロボットや対話に対する印象にどのような違いが生じるのかについては明らかになっていない．人は対話に参与する場合，しない場合に比べ対話に対してより意識を向け，その結果より多くの情報を得ると考えられる．そこで本実験では，ロボット同士の対話に人を参与させるシステム(Semi-passive socialシステム)と対話に人を参与させないシステム(Passive socialシステム)の比較を行い，人がロボットの対話から得る情報量の違いを確認した．

対話という形式によってロボットから発信される情報には，客観的な情報だけでなく，ロボットの感情などの主観的な情報も含まれる．人間同士が対話の中で行うような主観的情報の伝達を容易にする方法の一つは，人間を模した外観を持つロボット(ヒューマノイドロボット)を用いることである．ヒューマノイドロボットは，例えば博物館[102]やショッピングモール[103]などの公共空間において，来訪者に自律的に情報を提供するコミュニケーションメディアとして利用されてきた．ヒューマノイドロボットの中で人間に酷似した外観を持つロボットはアンドロイドと呼ばれ，ビデオやスピーカーフォンなどの他のメディアよりも強い存在感を示すことができると言われている[104]．また，アンドロイドは，非言語コミュニケーションを用いることにより，人間のような感情を効果的に表現することができる[105]．そのため，アンドロイドは効果的に情報を伝えることができる有力なメディアになり得ると言われている[106]．本実験では，より多くの情報を伝達するためにアンドロイドを使用した．

実験のために，2体のアンドロイドを用いたSemi-passive socialシステムとPassive socialシステムを構築した．Semi-passive socialシステムは，基本的に2体のアンドロイドが互いに対話し，時々人に対して質問を投げかけることによって人に対話への参与を促した．Passive socialシステムは2体のアンドロイドが互いに対話するのみで，人に対して対話への参与を促さなかった．構築した二つのシステムが，対話の内容(客観的情報)とアンドロイドの感情(主観的情報)をどの程度人々に伝達するかを評価した．

Semi-passive socialシステムは対話の中で人に対して繰り返し質問を行うため，人は対話に集中し，より多くの対話内容を記憶すると期待された．また，Semi-passive socialシステムは，アンドロイドが人に向かって発言するため，アンドロイドが発する主観的情報はより明確に人に伝えられる．そのため，人はアンドロイドからより強く主観的情報を受け取ると期待された．そこで本実験では，次の三つの仮説の検証を行った．

仮説(1)人はSemi-passive socialシステムと対話を行う場合，Passive socialシステムの対話を観察する場合よりも，多く対話の内容(客観的情報)を思い出す

仮説(2)人はSemi-passive socialシステムと対話を行う場合，Passive socialシステムの対話を観察する場合よりも，対話に含まれる感情的表現(主観的情報)に対して強いメッセージ性を感じる

仮説(3)人はSemi-passive socialシステムと対話を行う場合，Passive socialシステムの対話を観察する場合よりも，対話に含まれる感情的表現(主観的情報)によって感情が喚起される

客観的情報に関して，対話にアンドロイドに関する一般的な知識を含め，参加者が記憶した情報量を想起テストにより測定した．また主観的情報に関して，対話にアンドロイドに対する共感的な関心(Empathic concern)を覚えさせる内容を含め，参加者がアンドロイドに対して抱いた印象をアンケートにより評価した．被験者間実験を行い，参加者はSemi-passive socialシステムまたはPassive socialシステムのいずれかと10分間対話した．想起テストとアンケートの結果，Semi-passive socialシステムを体験した人は，Passive socialシステムを体験した人よりも，より多くの客観的情報を記憶し，アンドロイドに対して共感的な関心を覚えることが確認された．

## 3.2 システム

### 3.2.1 システム概要

本研究で開発したシステムは，あらかじめ用意されたスクリプトに基づき，2体のアンドロイドが1人の人間と対話を展開する音声対話システムである．2体のアンドロイドが互いに話すことによって対話を主導し，時折人に対してその人の意見や経験を尋ねることによって対話への参与を促す．アンドロイドからの問いかけに対して人が回答を返した場合，アンドロイドはその回答を認識し，人の回答に応じて直後の発言内容を変更する．アンドロイドはそれぞれのアンドロイドの発話や行動の内容が記述されたスクリプトに従って，発言や動作を表出する．スクリプトには，アンドロイドの問いかけに対して想定されるいくつかの人の回答と，直後のアンドロイドの発言内容のテンプレートも記述されている．

図5はシステムの構成図である．システムは，音声認識モジュール(Speech Recognition Module)，音声合成モジュール(Text-To-Speech Module)，アンドロイドの行動制御モジュール(Androids' Behavior Manager Module)，対話制御モジュール(Scenario Manager Module)の四つのモジュールから構成される．各モジュールの機能は次のとおりである．

- 音声認識モジュール：人の音声データを取り込み，音声データをテキストに変換する機能を持つモジュール
- 音声合成モジュール：対話制御モジュールから受信したテキストを音声データに変換し，音声データを再生する機能を持つモジュール
- アンドロイドの行動制御モジュール：アンドロイドの体の動き(発言に伴う口の動きや人や別のアンドロイドを見る首や目の動きなど)を制御する機能を持つモジュール
- 対話制御モジュール：スクリプトを読み取り，他の三つのモジュ

ールに命令を送信することによって， 対話を制御する機能を持つモジュール

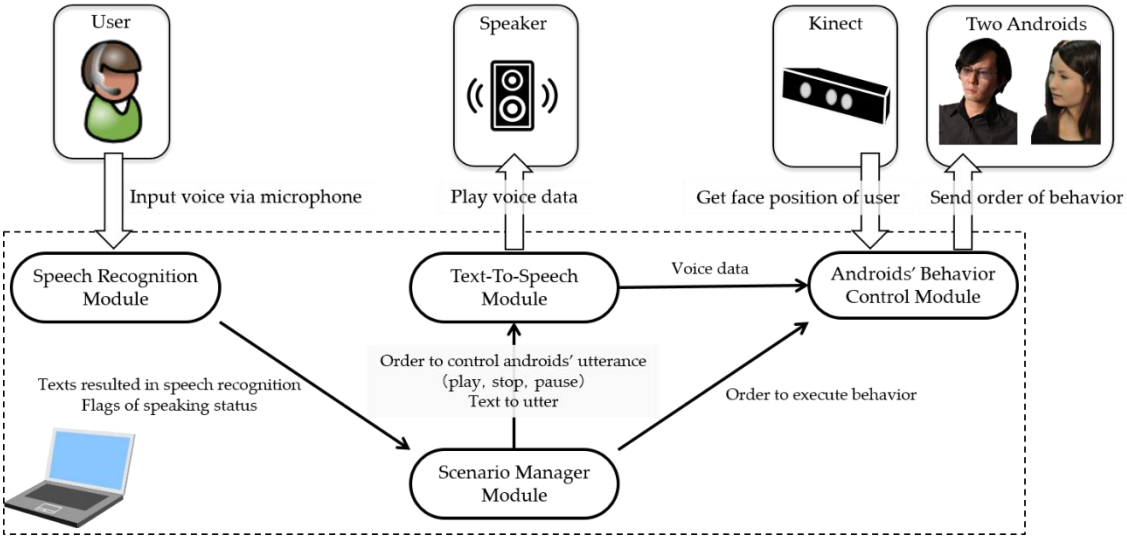


図5 システム構成図
Figure 5. System diagram.

### 3.2.2 使用したロボット：アンドロイド

アンドロイドは人間に酷似した外観を持つ人型ロボットである． 本研究では， 女性型アンドロイド・ジェミノイドF(図6 a)と男性型アンドロイド・ジェミノイドHI4(図6 b)を使用した． どちらのジェミノイドも， 大阪大学と国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) の共同研究により開発されたものである． これらのジェミノイドは実際の人間から型を取り， 触感や質感が人間の肌に近いシリコンゴムで作られた肌で覆われており， 人間のような存在感を表出することが可能であると期待できる． さらに， ジェミノイドは顔に多くの自由度を持っており(ジェミノイドF：7自由度， ジェミノイドHI4：8自由度)， 多様な表情を表出することが可能である． ジェミノイドは空圧アクチュエーターで駆動し， 大きな駆動音を出すことなく動作することが可能である． これらの特徴から， ジェミノイドは人間と， 人間が人間同士で行うコミュニケ

ーションに近しい自然なコミュニケーションを実現できる可能性がある．一方で，どちらのジェミノイドも外部環境の情報を取得するためのセンサーを内部に搭載していない．そのため，本研究では人間の声や位置を取得するためにジェミノイドの外部にセンサーを用意した．また，ジェミノイドの内部にはスピーカーが搭載されているが，内部のスピーカーからの音は明瞭ではないため，外部に別のスピーカーを用意した．

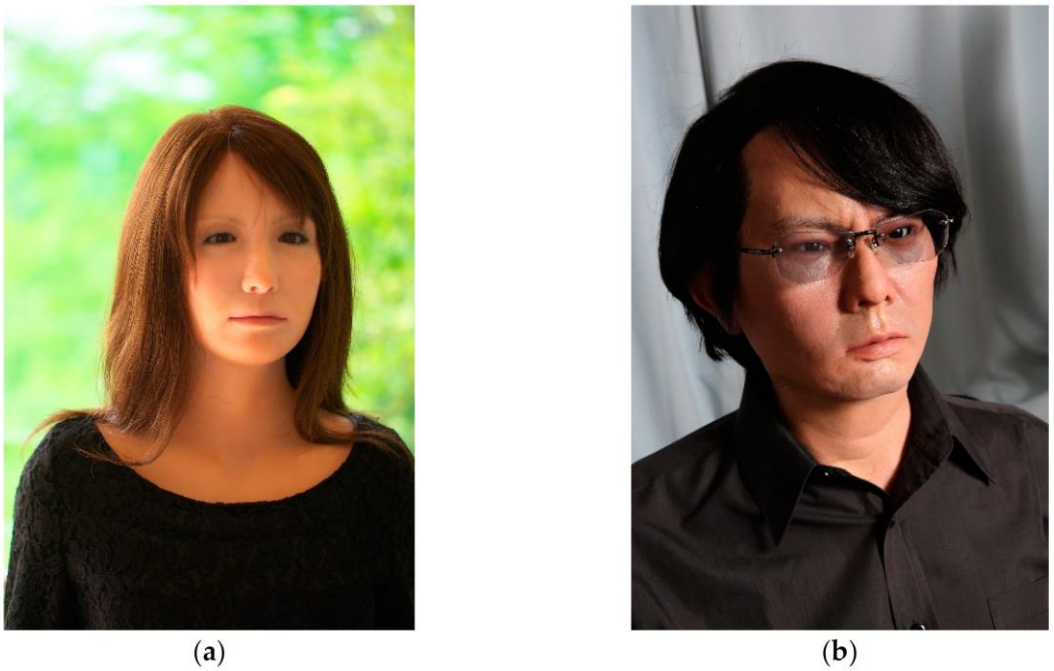


図6 ジェミノイドの概観：(a)ジェミノイドF：女性型アンドロイド，(b)ジェミノイドHI4：男性型アンドロイド

Figure 6. Appearance of Geminoids: (a)Geminoid F: female android, (b)Geminoid HI4: male android.

### 3.2.3 音声認識モジュール

音声認識モジュールは，人からの音声データをテキストに変換し，変換したテキストを対話制御モジュールに送信する．また，音声認識モジュー

ルは入力音圧に対する閾値判定により人間の発話区間を検出する． 音声認識モジュールは， 対話制御モジュールに対して， 人間の発話中および発話終了のステータスを表すフラグを送信する． 雑音の影響を低減するため， 音声認識は発話中のステータスの間のみ行われた． なお， 人間の音声取得には近接マイクを使用し，音声認識にはNuance社のDragon Speech 11を使用した．

### 3.2.4 音声合成モジュール

音声合成モジュールは， 対話制御モジュールから受信したテキストを音声データに変換して再生する． また， 音声合成モジュールは対話制御モジュールから， 再生開始， 再生停止， 再生一時停止の三つの命令も受け取る． 音声合成モジュールは再生停止， 再生一時停止の命令を受信したとき， すぐに音声データの再生を中止することも， 再生中のフレーズが終了した時点で再生を中止することも可能である． 音声認識モジュールは， パラメータの設定により，再生音声の音量，スピード，ピッチ，振幅レンジ，文章中の間の長さ，文章終了から次の文章までの間の長さを変更することが可能である． なお，音声合成にはAI社のAITalk Custom Voiceを使用した． AITalk Custom Voiceは音声データの合成とデバイスでの再生を並行してリアルタイムに行うことが可能である．

### 3.2.5 アンドロイドの行動制御モジュール

アンドロイドの行動制御モジュールは， アンドロイドのアクチュエーターを駆動させ， 感情表現， アンドロイドが発言中の口の動き， アンドロイドが人や別のアンドロイドを見る動きなど， 様々な行動を表現する． アンドロイドはまばたきや， 肩や腰， 首をわずかに動かすことで表現される呼吸の所作など， 待機状態でも最小限の動作を表出する． アンドロイドの動作は， 各ジョイントのポジションが50ミリ秒間隔で時系列順に記述されたモーションファイルによって表現される． ジョイントのポジションは， 0から255までの値によって設定される． アンドロイドは事前に準備されたモーションファイル

を読み込み実行することで，任意のタイミングで動作を表現することが可能である．人の顔を見るなど，対話相手によって変動し準備することが困難な動作は，センサーを使用し実現する．なお，人の顔の位置はMicrosoft社のKinect for Windows v2を使用し検出した．音声に同期した口の動きについては，音声に含まれるフォルマント情報を用いて動きを生成した[107].

### 3.2.6 対話制御モジュール

対話制御モジュールは，事前に準備されたスクリプトを読み込み，他のモジュールに順次命令を送ることによって，2体のアンドロイドの対話と振る舞いを制御する．スクリプトには，アンドロイドの発話内容，アンドロイドの動作，音声認識のタイミングなどが記述されている．またスクリプトにはアンドロイドからの問いかけに対して人が発言する場面において，人の発言に対するアンドロイドの応答テンプレートが記述されている．

アンドロイドは，人に対し「はい」か「いいえ」で回答可能な質問を行い，人に発言を促す．人が発言した場合，対話制御モジュールは，音声認識モジュールで変換されたテキストを解析し，人の発言が肯定か否定のどちらであるかを識別する．対話制御モジュールは，識別結果に応じて，スクリプトに記述された応答テンプレートの中から適切なものを選択する．人が何も話していない場合や肯定・否定の識別ができなかった場合は，対話制御モジュールはどのような意味にも解釈可能な，あいまいな応答のテンプレートを選択する．対話制御モジュールは，テンプレートを選択した後，その人の発話に含まれる単語をテンプレートに当てはめることで応答を作成する．

## 3.3 実験設定

本節では，人を対話に参与させることによる影響を調査するために実施した，Semi-passive-socialロボットとPassive-socialロボットの比較実験

について述べる． なお， 本実験は大阪大学大学院基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認のもと実施した．

### 3.3.1 参加者

参加者は， 19歳から22歳の大学生28名(男性14名， 女性14名)であった． 参加者は無作為にSemi-passive-socialロボットと話す条件(Semi-passive条件)とPassive-socialロボットと話す条件(Passive条件)のいずれかに割り当てられた． Semi-passive条件の参加者は男性7名， 女性7名であり， Passive条件の参加者も同じく男性7名， 女性7名であった． なお， 本実験前にアンドロイドと交流した経験のある参加者はいなかった．

### 3.3.2 実験装置

参加者はテーブル越しに2体のアンドロイドと向き合って座った． 2体のアンドロイドと参加者の間， および2体のアンドロイドの間の距離はすべて1.2 mであった（図7)． 図8は実験の様子を示している．

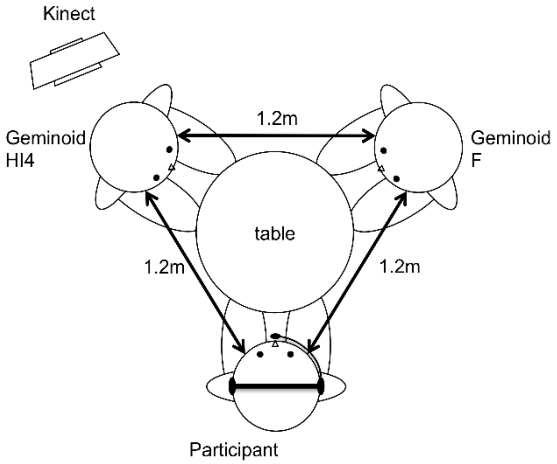


図7 実験環境

Figure 7. The environment of the experiment.

図8 実験の様子
Figure 8. A scene of the experiment.

話題はアンドロイドとアンドロイドを開発した研究所に関するものだった．約10分間の対話シナリオを準備し，主観的および客観的情報を参加者に提示した．アンドロイドが発する主観的情報がいかに伝達されるかを検証するために，アンドロイドが自分の状況について感じたことを述べる発言をシナリオに含めた．例えば，アンドロイドは対話中「お客さんもすき放題触ってきますし，もう少し遠慮してほしいところですね」や「壊れてもなかなか直してくれないし．扱いが酷いですよね」と発言した．一方で，アンドロイドが発する客観的情報がいかに伝達されるかを検証するために，実験室やアンドロイドに関する具体的な数字や固有名詞を含む発言をシナリオに含めた．例えば，アンドロイドは対話中「実は私たちは7気圧ほどの空気で動いています」と発言した．図9は，実験に使用された対話の一部である．Passive条件のシナリオに加えて，Semi-passive条件では参加者に対して9個の質問がシナリオに含まれている．両条件間で参加者に提示する情報の量を等しくするため，Semi-passive条件に含まれる9個の質問は，アンドロイドが，参加者に同意や意見を求める質問に限定されていた．

なお，Semi-passive条件では，アンドロイドが参加者に対して質問するときなどに，アンドロイドは「あなた」という発言とともに参加者の顔を見るように設定されていた．一方で，Passive条件では，アンドロイドは対話中参加者の顔を一切見なかった．

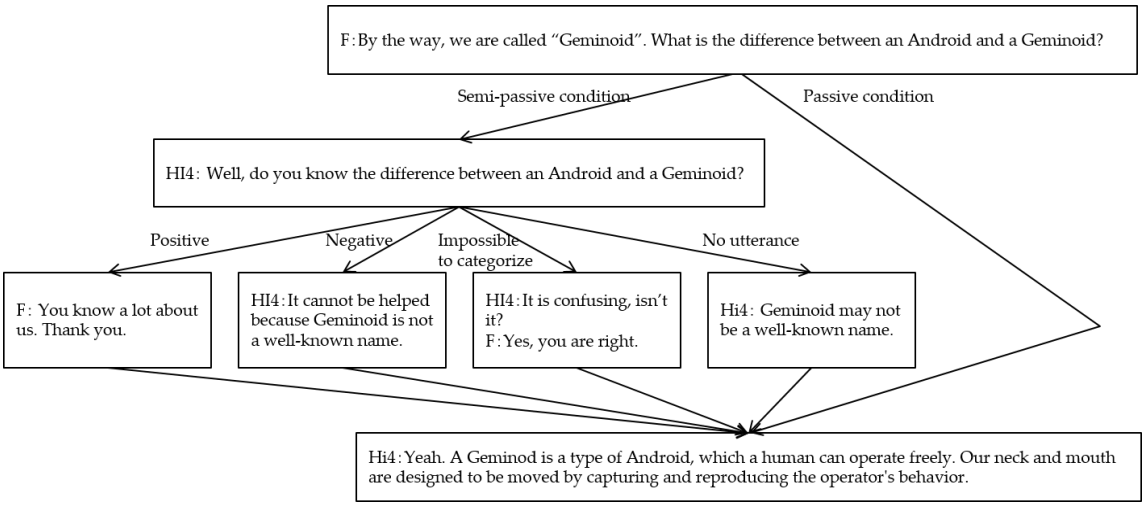


図9 対話例

Figure 9. Example of the conversation.

### 3.3.3 実験手順

実験の手順は次のとおりである．まず実験者は実験が始まるまで参加者を控室で待機させた．実験者は控室で参加者に対して実験の概要を説明し，参加者の同意を得た．その後，実験者は参加者に対して実験の手順を説明し，2体のアンドロイドの間で行われる対話を聞くように求めた．ただし，アンドロイドが対話中に参加者に対して質問をした場合，参加者がそれに回答することは許可した．次に実験者は参加者に近接マイクを装着させ，音声認識ソフトウェアDragon Speechの機能を使用して，音量レベルの調整と音声入力の品質の確認を行った．確認終了後，実験者は参加者を2体のアンドロイドが待機する実験室に誘導し，テーブルを挟み2体のアンドロイドの向かいに座らせ

た．実験者は参加者が着席したことを確認したあと，システムに対話を開始するコマンドを送信し，アンドロイド同士の対話を開始させた．約10分のアンドロイド同士の対話の間，Semi-passive条件ではアンドロイドに参加者へ質問を9回行わせ，Passive条件ではアンドロイドに参加者へ質問は行わせなかった．アンドロイド同士の対話後，実験者は参加者を控室に誘導し，近接マイクを外した．その後，実験者は参加者にアンドロイドとの対話に関するアンケートと想起テストへの回答を依頼した．最後に，実験者は参加者にインタビューを行った．

### 3.3.4 評価の観点

最初に，参加者に対して適切な刺激を提示できたことを確認するために，アンケートによって実験で提示された対話の内容が参加者にとって理解するには難しすぎたかどうか，Semi-passive条件において参加者が対話に参加できたと感じたかどうかについて調査した．対話の難易度に関しては，対話内容は参加者にとって理解ができるものだったかどうかを問う質問(D-1)と対話内容は参加者にとって受け入れられるものだったどうかを問う質問(D-2)によって確認した．

| |
|---|
| D-1. 会話の内容は完全に理解できましたか？ |
| D-2. 会話の内容を完全に納得することはできましたか？ |

対話への参与度に関しては，参加者が対話に参与できたと感じたかどうかを問う質問(E-1)と参加者が自分から発信できたと感じたかどうかを問う質問(E-2)を行った．また参加者がアンドロイドに無視されたと感じたかどうかを確認するために，アンドロイドの参加者に対する注意に関する質問(E-3)とアンドロイドの参加者に対する関心に関する質問(E-4)を行った．なお，参与度に関する質問はSemi-passive条件における刺激を確認することを目的としたため，Passive条件の参加者には行われなかった．

E-1. 会話に参加できたと感じましたか？

E-2. あなたは女性型アンドロイドや男性型アンドロイドに対して自分の意見を言えたと感じましたか？

E-3. 女性型アンドロイドや男性型アンドロイドはあなたを気にかけているように感じましたか？

E-4. 女性型アンドロイドや男性型アンドロイドはあなたの意見に対して興味を持っているように感じましたか？

客観的情報に関する仮説(1)を検証するために，参加者が対話の内容をどの程度記憶しているかを確認するテストを行った．対話の中でアンドロイドが伝えた内容を尋ねる10個の質問を作成し，参加者の正解数を算出した．例えば，「この研究室には何体のアンドロイドがいると言っていましたか?」，「女性型アンドロイドはどこの国に行きたいと言っていましたか?」などの質問である．参加者の回答の正誤判断を容易にするために，正解は一つの単語で記述できるように質問を設計した．

主観的情報に関する仮説(2)および仮説(3)を検証するために，参加者にアンドロイドやアンドロイドの発した情報に対する主観的な印象を問うアンケートを実施した．仮説(2)に関して，参加者がアンドロイドからのメッセージをどの程度強く認識したかを問う以下の質問を行った．

2-1. 会話中，研究室でのアンドロイドの扱いが酷いと言っていましたが，アンドロイドの扱いが酷いことに関して，研究室の人に伝えてあげてもいいと思いましたか？

2-2. 女性型アンドロイドや男性型アンドロイドは強い信念を持って話しているように感じましたか？

2-3. 女性型アンドロイドや男性型アンドロイドから強く訴えられているように感じましたか？

2-4.　女性型アンドロイドと男性型アンドロイドの話は説得力があると感じましたか？

さらに，仮説(3)に関して，参加者がアンドロイドの発言によって感情的反応を示すかを評価した．本研究では，アンドロイドが参加者にネガティブな心情を吐露する対話シナリオを作成した．アンケートではアンドロイドに対して参加者が共感的な関心を抱くかを問う以下の質問を行った．

3-1.　会話中，アンドロイドがよく「怖い」や「気持ち悪い」と言われることがあると言っていましたが，可哀想だと感じましたか？

3-2.　会話中，アンドロイドは荷物扱いで運搬されると言っていましたが，アンドロイドが荷物扱いされることは可哀想だと感じましたか？

参加者は，各質問に対して七つの選択肢(1:まったくそう思わない，2:あまりそう思わない，3:どちらかというとそう思わない，4:どちらとも言えない，5:どちらかというとそう思う，6:比較的そう思う，7:かなりそう思う)からもっとも当てはまると感じるものを一つ選択した．

## 3.4 実験結果

### 3.4.1 マニピュレーションチェック

対話の難易度に関して，二つの質問(D-1，D-2)に対し3以下を選択した参加者は存在しなかった．この結果から，対話の内容は参加者にとって難しすぎないものであったと考えられた．対話への関与度に関して，四つの質問(E-1，E-2，E-3，E-4)のいずれもスコアの中央値が4以上であった．この結果からSemi-passive条件において，参加者は対話にまったく参与できなかったと感じていたわけではないと考えられた．

### 3.4.2 想起テスト

Semi-passive条件とPassive条件における，参加者の想起テストの結果を比較した．図10は，参加者が，全10問のうち正しく回答した質問の平均数を示している．Mann-WhitneyのU検定を用いて二つの条件の正答数を比較した結果，Semi-passive条件の正答数はPassive条件の正答数より有意に多かった(U=54.5，p<0.05)．

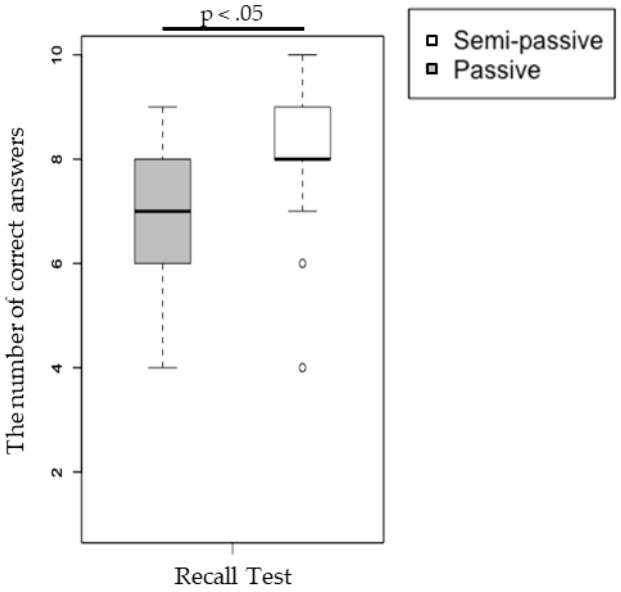


図10 想起テストの結果
Figure 10. The result of the recall test.

### 3.4.3 アンケート結果

図11はアンケートの回答結果である．それぞれの質問の中央値を2条件間で比較した．Mann-WhitneyのU検定を用いて検定した結果，メッセージ性の強さを問う四つの質問(Q2-1，Q2-2，Q2-3，Q2-4)に関して，有意差は確認されなかった．一方で，アンドロイドに対する共感的関心を問う二つの質問に関しては，Semi-passive条件のスコアはPassive条件のスコアよりも高い傾向を示

した(Q3-1:U=57.5, p<0.1, Q3-2: U=48.5, p<0.05).

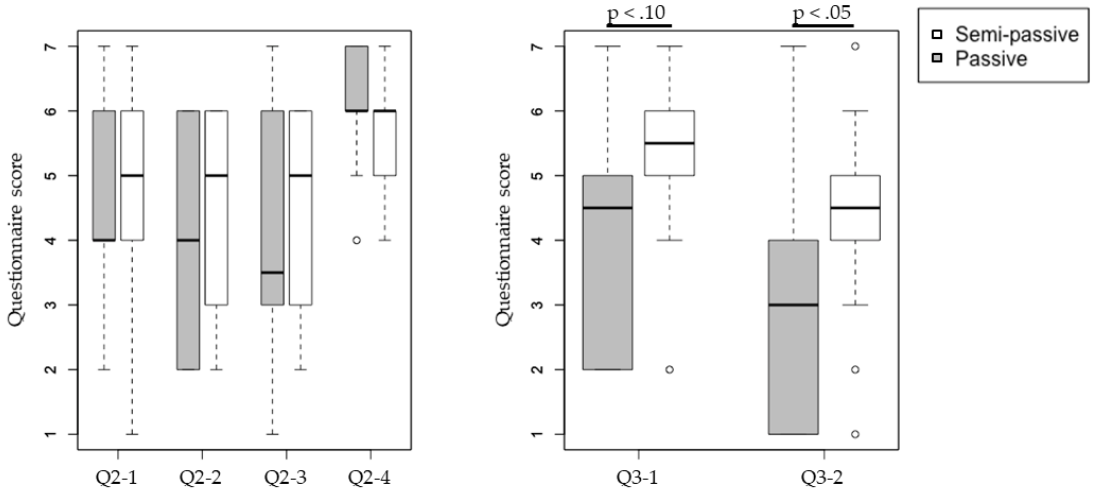


図11 メッセージ性の強さ(左)および共感的関心(右)のアンケート結果
Figure 11. The result of (left)strength of subjective message, and (right)empathic concern questionnaires.

## 3.5 実験結果の考察

想起テストの結果, Semi-passive条件の参加者はPassive条件の参加者より多くの情報を思い出すことが確認された. これは仮説(1)を支持する結果である. 実験において, Semi-passive条件の参加者は10分間の対話の中でおおよそ1分毎にアンドロイドから質問された. 想起テストの各問の回答となる情報は, アンドロイドとの質疑応答の中には含まれないようにシナリオを設計した. すなわち, 想起テストの問はアンドロイドが参加者に何を尋ねたかとは無関係な内容とした. したがって, 参加者はアンドロイドとの質疑応答により, 質疑応答に含まれる情報だけでなく, 対話全体を記憶したと考えられる.

参加者がアンドロイドから受け取る主観的情報に対して感じるメッセー

ジ性の強さの評価に関しては，Passive socialシステムに対するSemi-passive socialシステムの優位点は見つからず，仮説(2)を支持する結果とはならなかった．すなわち，Semi-passive socialという対話形態は，アンドロイドが人に主観的メッセージを伝える度合に対して十分な影響を及ぼさなかった．一方で，Semi-passive条件において，アンドロイドに対するより高い共感的関心が確認された．これは仮説(3)を支持する結果である．人はアンドロイドの不遇な状況に心を動かされたと言える．これらの結果より，Semi-passive socialシステムは主観的情報を十分に伝えられるが，伝えられた情報はアンドロイドから強く要求されていると感じさせるものではなく，むしろ人の自発的な共感を呼び起こすものであると考えられる．

本実験にはいくつか注意すべき事項がある．まず本実験では主観的メッセージを含んだシナリオを1種類のみ使用した．そのため，こうした主観的情報を含まないシナリオにおいても人は客観的情報を本実験と同程度記憶するのかという疑問が残っている．また本実験で伝達が確認された主観的情報は限定的である．情報伝達メディアとしてSemi-passive socialシステムの一般的な有効性を確認するためには，主観的情報を含まないシナリオや本実験とは異なる主観的情報を含んだシナリオを用いて同様の実験を行うことが効果的であると考えられる．本実験では人間に酷似した外観を持つロボットを用いたことも実験結果に対する制限事項の一つである．Semi-passive socialシステムにおいて，外観の人間らしさがシステムの性能に及ぼす影響を明らかにするためには，様々なロボットを用いたシステムを構築し調査する必要がある．

## 3.6 まとめ

本実験では，ロボット同士の対話に人を参与させることによる影響を調査するために，Semi-passive social対話に基づく情報伝達メディアを提案し，人をロボット同士の対話に参与させないPassive social対話に基づくメディ

アとの比較を行った．実験のために2体のアンドロイドを用いた，シナリオベースの対話システムを実装した．システムが対話の中で提示した客観的情報に関して，想起テストの結果，Semi-passive socialシステムと対話した人はPassive socialシステムと対話した人に比べより多くの情報を記憶することが示された．主観的情報に関して，人はSemi-passive socialシステムのアンドロイドに対してより強く共感した．これらの結果から，人をロボット同士の対話に参与させることで客観的情報および主観的情報の両方をより効率的に伝達できたと考えられる．ただし，本実験で使用したロボットおよび対話シナリオは1種類のみであるため，今後これらの要素が情報伝達に対して与える影響を調査することが重要である．

# 第四章

# 適応的対話継続機能の効果検証実験

## 4.1 実験概要

本実験では，一章で述べた適応的対話継続機能を搭載した複数のロボット対話システムを構築し，機能の有効性の検証を行った．本研究で提案する対話システムと従来の対話システム[28]の比較を行う実験室実験を行った結果，提案システムは高齢者からより長い発話を誘引できることが分かった．さらに実際の環境における提案システムの有効性を確認するために2日間のフィールド実験を行った．フィールド実験の結果，提案システムは実験に参加した高齢者のうち半数以上と30分以上の対話を実現した．

## 4.2 システム

本節では，本研究で開発した，2体の卓上ヒューマノイドロボットを用いた対話システムの詳細について述べる．

### 4.2.1 システム概要

Iio et al.[28]は，高齢者とのコミュニケーションを行う複数のロボット対話システムを提案している．本研究では彼らが提案した対話システムのアーキテクチャに，高齢者の発言状況に応じて対話のモードを切り替える適応的対話継続機

能を追加し，実環境において30分間に及ぶ高齢者との対話を実現した．

本研究では，2体の卓上ロボットを使用した．人間の発話の録音のためにロボットの下にマイクアレイを設置した．システムはマイクアレイによって録音された音声データをクラウドサーバーに送信し，音声認識，ロボットの応答生成，音声データの合成をクラウドサーバー上で行った．システムはクラウドサーバーからロボットの動作の命令と合成音声データを取得した．システムはクラウドサーバーから取得した情報をもとにそれぞれのロボットに動作コマンドを送信すると同時に，それぞれのロボットの後ろに設置されたスピーカーによって合成音声データを再生した．なお，指向性を持ったマイクを使用し高齢者以外の音を収音しないようにした．

### 4.2.1 使用したロボット：CommU

本研究では，ヴイストン株式会社と大阪大学が開発したロボット「CommU」を使用した．CommUは全身に14の自由度(首：3，目：3，まぶた：1，口：1，腕：4，腰：2)を持つ，卓上ヒューマノイドロボットである．ただしこの研究では，将来実用化した際の低コスト化を見据えて8の自由度(首：3，目：3，口：1，腰：1)のみ使用した．CommUは動作コマンドを受け取ると，コマンドごとに定義された一連の動作を再生する．実験では，頭を傾ける，うなずく，人を見る，別のCommUを見るという四つの動作コマンドを用意した．なお実験では人と2体のロボットの位置が固定されているため，首，目，腰の姿勢をあらかじめ決めておくことで，人や別のロボットを見る動作を表現した．また音声合成を再生中一定のテンポで口を開閉することでロボットが発話していることを表現した．

本研究では2体のCommUを使用した．2体のロボットはヘアスタイルと色と声質によって，異なる性別を表すようにデザインされている(図12)．青いロボットは男の子を表現したデザインで，赤いロボットは女の子を表現したデザインである．2体のロボットには，高齢者に不信感や警戒心を抱かせないように，子供のような声質およびキャラクターを与えた．

図12 ロボットの概観
Figure 12. Appearance of the robots.

### 4.2.2 複数の対話ロボットの対話モデル

Iio et al.[28]は，音声認識の精度が低い状態においても，システムが人と対話を継続することを目的に，Question-Answer-Response対話モデルを提案している．Question-Answer-Response対話モデルは，システムと人の対話を四つの状態の変化であるとみなした対話モデルである．四つの状態とは，(1)システムが人に質問をするQuestion状態(例：「外国に行ったことある？」)，(2)人がシステムの質問に対して回答をするAnswer状態(例：「覚えていません」)，(3)システムが人の回答に対して簡単な応答を返すBackchannel状態(例：「そうなんだ」)，(4)システムが人の回答に対して意見や感想を表出するComment状態(例：「僕は外国に行ってみたいんだ」)である．システムは，Question状態から開始して，Answer状態，Backchannel状態，Comment状態へと順に遷移する．システムは，Comment状態の次に再びQuestion状態へと戻り，同様の流れを繰り返すことで対話を続ける．なお，Answer状態で人がロボットの質問に対して回答しなかった場合，システムは

Backchannel状態をスキップしComment状態へ遷移する．Backchannel状態とComment状態では，システムはAnswer状態で認識した人の発言に応じていくつかのパターンから一つのロボットの応答を選択する．例えば上記の旅行の対話例では，人の回答は「はい，ありますと」と「いいえ，ありません」のどちらかであると想定できる．人が「はい，ハワイに行ったことがあります」と答えると，システムは人の発言の中に肯定を表すフレーズ「はい」や「あります」を検出し，Backchannel状態において「それはいいね」，Comment状態で「すごい経験しているんだね」といった応答を選択する．人が「いいえ，行ったことはありませんが行ってみたいです」と答え場合は，システムはBackchannel状態とComment状態でそれぞれ「海外に行ったことないんだ」，「そういう人もけっこういるみたいだね」といった応答を選択する．システムがAnswer状態において事前に想定されたフレーズを検出しなかった場合は，Backchannel状態とComment状態でそれぞれ「なるほど」，「僕は外国に行ってみたいんだ」といった，曖昧な応答を選択する．

本研究ではQuestion-Answer-Response対話モデルを実現するために，(1)システムからの質問文，(2)想定される人の回答のフレーズ，(3)それぞれのフレーズに対するシステムの応答文，(4)フレーズを含まなかった場合のシステムの曖昧な応答文を一つの組とした質疑応答セットを準備した．システムの各質問文にはトピックのラベルを付与した．対話に一貫性を持たせるために，同じトピックのラベルが付与された質問を繰り返し選択するように設計した．ただしシステムは，Answer状態で人が回答をしなかった場合や同じトピックが一定回数繰り返し選択された場合は別のトピックの質問を選択した．

これまでの研究で，複数のロボットが発話する役割と聞く役割を切り替えることで対話の破綻に対する人の心象悪化を低減する方法が提案されている[45]．本研究でも2体のロボットを交互に発言させ役割を切り替えることで，人の回答に対してロボットの応答が適切でなかった場合に生じる違和感の低減を図った．なお2体のロボットが交互に発言するため，2体のロボットの発言回数はお

およそ同数となった.

本研究ではロボットの顔の向きを変えることでロボットが注意を向けている対象を示し，ロボット同士が互いの存在を認識していることを表現した. Question状態，Answer状態，Backchannel状態，Comment状態においてロボットは人を見ながら発言を行った. このとき発言しないロボットは発言するロボットを見た. Answer状態で人が発言をしなかった場合，Comment状態で発言するロボットは発言しないロボットを見ながら発言し，発言しないロボットも発言するロボットを見た.

### 4.2.3 適応的対話継続機能の実装

本研究では，対話システムの動作モードを能動的に切り替える機能(適応的対話継続機能)を組み込んだ. Question-Answer-Response対話モデルに従う通常の動作モードを話題提供・質問モード(Question mode)とし，さらに傾聴モード(Listening mode)とロボット協調対話モード(Prompting mode)の二つのモードを追加した. 傾聴モードでは，システムは発言が多い人に対して別の質問に移るのではなく人の発言を積極的に聴く姿勢を取った. 一方でロボット協調対話モードでは，システムは発言が少ない人に対してロボット同士の対話を提示し対話を継続しつつ人に発言を促した.

図13はシステムの動作モード間の切り替えを示している. Answer状態で人の発話が4秒以上続いた場合，システムは話題提供・質問モードから傾聴モードに切り替わった. 傾聴モードでは，システムは最初に人に対して直近の回答に関するより詳しい情報を求める発言を行った(例：「その話，もっと詳しく教えて」). その後，システムは人が話し終えたとシステムが判断するまで，人の1呼吸ごとに短い反応を交互に繰り返した(例：「うん」). この時，2体のロボットはどちらも人を見ながら発言を行った. 人がシステムの短い反応後に3秒間何も発言しなかった場合，または人がシステムの短い反応に対して1秒以内の発言を3回繰り返した場合，システムは傾聴モードから話題提供・質問モードに切り替わった. 傾聴モードで人が長く発言した後に話題提供・質問モードに移行することにより

人に突然話題が変ったような印象を与えることを避けるために，話題提供・質問モードに移行する前に2体のロボット同士の対話を提示した．具体的には，まず片方のロボットがまるでもともと人に聞きたかったことを思い出したかのような発言を行い話題の切り替えを提案した(例：「そういえば，ちょっと聞きたいんだけど」)．その後，別のロボットが，話題の切り替えに興味を示すことで，次の質問に焦点を移した(例：「えっ，何？」)．この時，2体のロボットは互いを見ながら発言を行った．なお，傾聴モードにおいてシステムの短い反応が5回以上行われた場合，人が長く発言したと判断し，システムは話題提供・質問モードに遷移する前に人をほめる発言を行った(例：「いろんなことを知っているんだね」)．

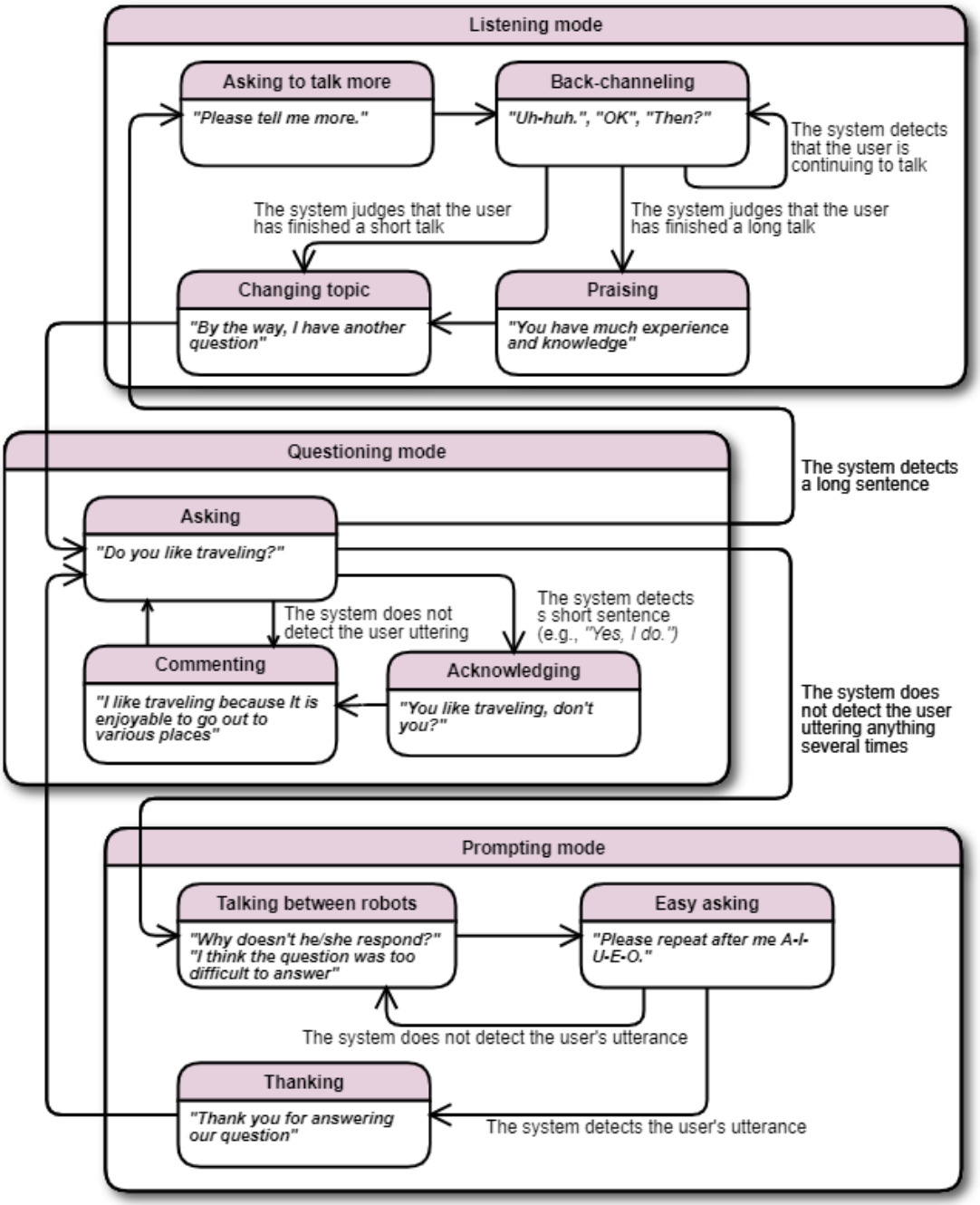


図13 対話システムのモデル間の遷移

Figure 13. Switching between the different modes of the robot conversation system.

人がシステムからの質問に対して3回連続して反応しなかった場合，システムは話題提供・質問モードからロボット協調対話モードに切り替わった．ロボット協調対話モードでは，システムは2体のロボット同士の対話を提示することにより対話を継続した．システムは話題提供・質問モードのときのように人に対して質問も行った．ただし，ロボット協調対話モードでは人の名前を尋ねるなどより簡単に回答ができる質問を行うことで，人の発言を促した．人がシステムの質問に対して回答を行った場合，システムは人に対してお礼の発言を行い，話題提供・質問モードに切り替わった(例：「しゃべってくれてありがとう」)．

本実験ではそれぞれのモードにおけるロボットの発言の速さや参加者の発言を待つ時間，その他モード遷移にかかわるパラメータは予備実験で決定し，すべての参加者に対して同じ設定とした．

なおこれらのモード遷移にかかわるパラメータは予備実験を実施し，決定した．

## 4.3 実験室実験

本研究で提案する新しいシステムのモードが人の行動とシステムに対する人の印象に及ぼす影響を調査する実験室実験を実施した．実験では，適応的対話継続機能がある対話システムと，機能がない対話システムの参加者間比較を行った．高齢者に，最大15分間いずれかの対話システムと対話させ，高齢者の発言時間と彼らのシステムに対する印象の違いを比較した．なお本実験は大阪大学大学院基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認のもと実施した．

### 4.3.1 参加者

参加者は，人材派遣会社によって募集された24人(男性15名，女性9名)の日本人高齢者であった．参加者の年齢は63歳から79歳(平均70.7，標準偏差4.6)

であった．適応的対話継続機能を持つシステムと対話した参加者の年齢は63から79歳(平均69.8，標準偏差5.2)，機能を持たないシステムと対話した参加者の年齢は67から75歳(平均70.9，標準偏差2.9)であった．参加者の年齢に関して条件間に有意差は確認されなかった（t(17)=0.64，n.s.)．なお参加者は自身の家に住み実験場所まで独力で来ることが可能な程度に健康であった．また実験者が参加者と対話する中において顕著な認知症の症状は確認されなかった．

### 4.3.2 実験装置

実験は大阪大学の一室で行った．図14は，参加者が対話システムと対話している様子である．参加者と対話システムの対話時間は最長15分間とした．なお，対話時間は事前に行った予備実験で解析に必要な数の質問が行われることを確認したうえで決定した．システムは対話中5分ごとに参加者に対話を継続するかどうかを尋ねた．

図14 実験室実験中の参加者とロボットの対話の様子
Figure 14. Scene of a conversation between a participant and the robots during the laboratory experiment.

実験のために，質疑応答セットを用いた対話の前後にシステムが参加者との対話を開始するためあるいは終了するための短い対話シナリオを用意した．質疑応答セットには198個の質問を含めた．それぞれの質問には，子ども時代の思い出，旅行体験，健康，世間話などのトピックラベルを付与した．実験で使用した対話シナリオと質疑応答セットは高齢者介護職の経験がある実験協力者が作成し，予

備実験を通して適切な言い回しや質問内容になるように修正を加えた．システムが参加者の名前を呼び掛けられるように，対話シナリオを参加者ごとに調整した．

本実験では，比較のために提案システムとコントロールシステムの二つの対話システムを用意した．二つのシステムの違いは，適応的対話継続機能の有無のみである．

### 4.3.3 実験手順

実験の手順は次のとおりである．まず実験者は，参加者をロボットの前に座らせ，実験手順を説明した．実験者は参加者に対してロボットに対し自分のことをできる限り話すように指示した．さらに実験者は，参加者は対話に飽きたと感じれば任意のタイミングでロボットとの対話を中止できることを伝えた．その後実験者は参加者とロボットを残し部屋を出て，別の部屋からシステムに対話を開始する命令を送信した．参加者が提案システムあるいはコントロールシステムのいずれかと対話を終了した後，実験者は参加者とロボットがいる部屋に戻り，参加者に対してシステムの印象に関するアンケートに回答するよう求めた．

### 4.3.4 評価観点

客観的および主観的観点から提案システムとコントロールシステムを比較した．客観的な観点に関しては参加者の発言時間を測定した．具体的には，参加者が一定の音量の発言をしたときの総時間を測定しシステムからの質問回数で割ることで，1回の質問に対する参加者の平均発言時間を計算した．主観的観点に関しては，参加者にアンケートを用いてシステムが参加者の発言を傾聴しているように感じたかについて質問した．傾聴感の測定には日本における看護研究のためのアンケートを使用した[108]．本アンケートは，積極的傾聴の分野で先駆的な研究者であるRogersが提唱した三つの要素(共感的理解，一致性，無条件の肯定的配慮)[109]を評価するものである．

## 4.3.5 実験結果

対話の途中で対話の中止を求めた参加者はおらず，すべての参加者が15分以上システムと対話を行った．提案システムとコントロールシステムが質問モードで参加者に質問した質問数の平均は，それぞれ24.75回(SD=9.23)と33.25回(SD=3.65)であった．提案システムとコントロールシステムが参加者から回答を得た質問数の平均は，それぞれ24.75回(SD=9.23)と33.0回(SD=3.52)であった．提案システムが行ったうち傾聴モードが作動した質問の数の平均は11.08回(SD=5.21)であった．システムからの質問に沈黙した参加者はいなかったため，実験を通してロボット協調対話モードは作動しなかった．

図15は，二つのシステムに対する参加者の発話時間を表している．Mann-Whitney U検定を用いて比較した結果，提案システムに対する参加者の発言時間は，コントロールシステムに対する発言時間より有意に長いことが確認された($U=32.0$, $p<0.05$)．傾聴感に関しては，二つのシステムの間に有意差は確認されなかった(図16)．

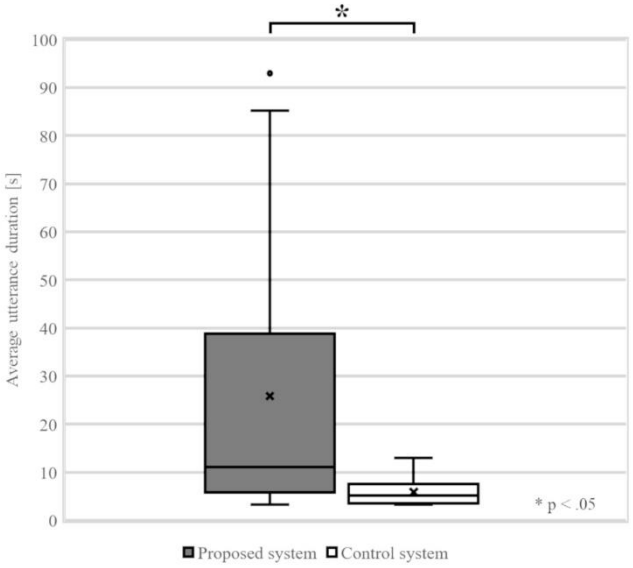


図15 平均発言時間

Figure 15. Average utterance duration.

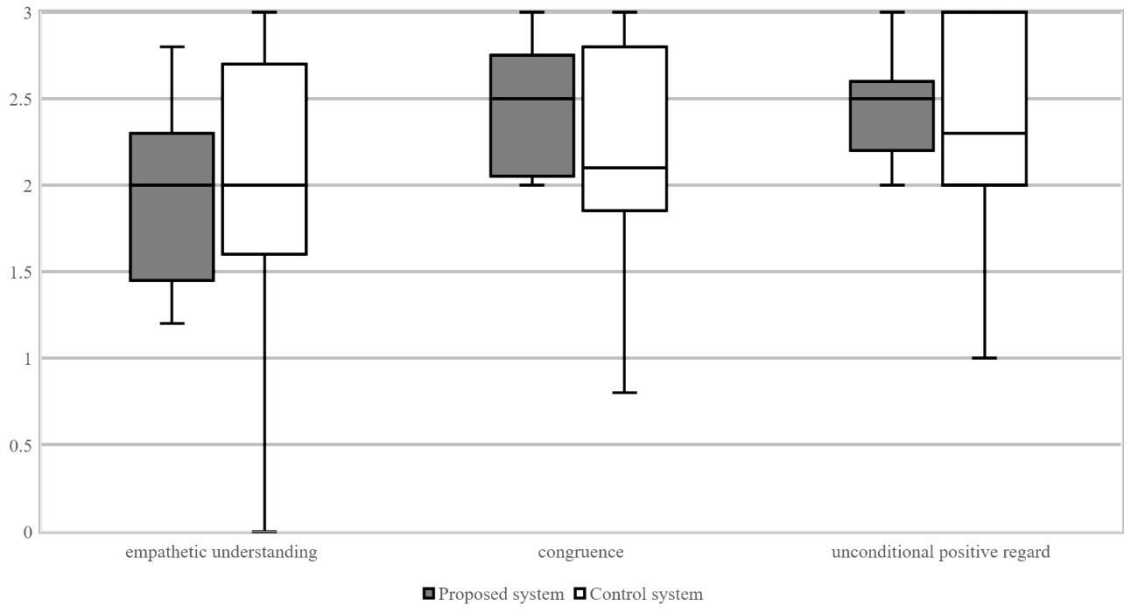


図16 傾聴感のスコア
Figure 16. Scores of feeling of being listened to.

## 4.4 フィールド実験

提案システムが実際の環境で高齢者とどの程度対話を継続できるかを検証するために，日本の介護施設でフィールド実験を行った．介護施設の高齢者にシステムと対話させ，対話の持続時間を測定した．高齢者にとって2体のロボットと対話する機会は多くないと考えられ，珍しさから対話時間が延びる可能性があった．こうした影響を確認するために，同じ高齢者に対して2日間対話の機会を設けた．なお，本実験は大阪大学大学院基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認のもと実施した．

### 4.4.1 参加者

参加者は，82歳から98歳(平均89.0，SD4.0)の女性12人であった．認知能力の低下により，ロボットや実験者の声が聞こえなかった2人の参加者のデータ

は除外した．2人の参加者は体調不良により2日目に実験には参加しなかった．介護施設スタッフから提供された情報によると，データが取得できた参加者10人のうち4人は軽度，4人は中等度，2人は重度の認知症の症状が確認された．

### 4.4.2 実験装置

介護施設の廊下の隅にあるスペースにテーブルとシステムを設置した．図17は参加者が対話システムと対話している様子である．質疑応答セットには実験室実験のものに質問を加え，合計267個の質問を含めた．なお質問に付与するトピックラベルは実験室実験と同様とした．実験室実験と同様に，質疑応答セットを用いた対話の前後にシステムが参加者との対話を開始，終了するための短い対話シナリオを用意した．対話開始と対話終了のシナリオは実験を行った両日とも同じものを使用したが，質問は2日間で異なるものを選択するように設計した．実験室実験と同様，参加者の名前を対話シナリオに組み込み，システムが参加者に対して名前で呼びかけることができるようにした．

図17 フィールド実験中の参加者とロボットの対話の様子
Figure 17. Scene of a conversation during the field trial.

### 4.4.3 実験手順

実験の手順は次のとおりである．まず，介護施設スタッフがロボットとの対話スペースに参加者を連れてきて，ロボットの前に座らせた．実験者は参加者が座ったことを確認した後，システムに命令を送り対話を開始させた．5分毎にロ

ボットは参加者に対話を継続するかどうかを尋ねた．参加者が対話の継続を望まない場合，実験者はシステムに対話を中止する命令を送り，対話を中止させた．参加者がシステムからの対話継続の質問に対して反応を返さなかった場合，スタッフが参加者に対話を継続するかどうかを確認し，スタッフの判断により対話を中止させた．対話時間が30分を超えた時点でシステムは次の質問には移行せず，対話終了のシナリオを再生した．対話の後，別の実験者が参加者とスタッフに対してロボットとの対話に対する感想についてインタビューを行った．

### 4.4.4 評価観点

システムが最初の発話を開始してから最後の発話を終了するまでの時間を測定した．対話の終了のタイミングは，参加者が対話を止めたいという希望を明確に示したときとした．参加者が自発的に対話を中断することを決定した場合は，対話を中断するための参加者の発話の開始を終了のタイミングとみなした．スタッフが対話を中断した場合は，スタッフと参加者の間のコミュニケーションの開始を終了のタイミングとみなした．

またロボットとの対話の後に参加者にインタビューを行い，参加者のロボットとの対話に対する感想を確認した．参加者がロボットと対話している様子を観察したスタッフに対してインタビューを行い，参加者の普段の様子との違いについて確認した．

### 4.4.5 実験結果

図18はフィールド実験の2日間の対話時間のヒストグラムである．1日目は参加者の50%，2日目は参加者の62.5%が30分以上システムと対話した．平均対話時間は，1日目は24.03分(SD=9.67)，2日目は25.88分(SD=9.07)であった．

話題提供・質問モードでシステムが行った質問数の平均は26.33回(SD=23.53)だった．参加者が回答した質問数の平均は20.28回 (SD=20.62)であった．傾聴モードが作動した質問数の平均は8.17回(SD=5.98)であった．10名の参加者のうち5名との対話中，ロボット協調対話モードが作動した．

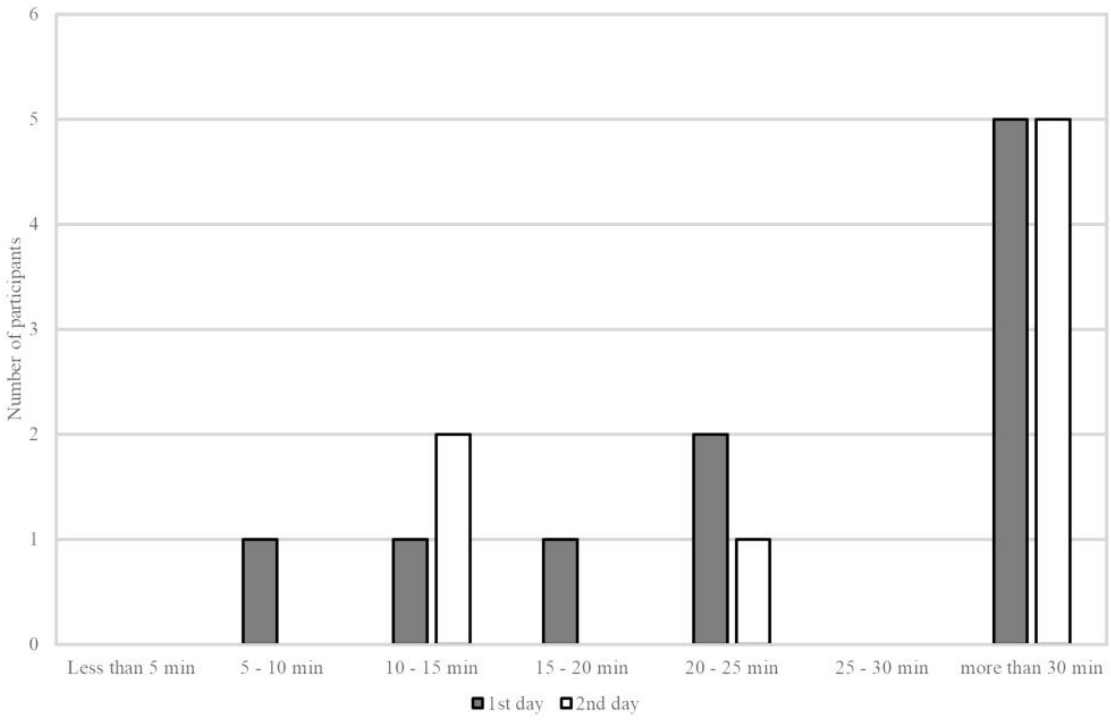


図18 フィールド実験における参加者の対話時間
Figure 18. Conversation durations for the field test participants.

インタビューは，重度の認知症の症状を示した2人を除いた8名の参加者に対して行った．インタビューでは，参加者3名からは「楽しかった」「忘れていたことを思い出せました，ありがとうございます」などのポジティブなフィードバックを得た．インタビューの中でロボットに対する不快感や不信感のような否定的な発言を行った参加者はいなかった．スタッフによると，参加者の中には普段スタッフと対話するよりもロボットに対してより積極的に対話した参加者もいた．またスタッフによると，ロボットと長く対話を継続した参加者の中にはいつもより機嫌が良くなった参加者もいた．

## 4.5 実験結果の考察

本実験では，対話に積極的な高齢者に対して深堀する質問をすることによって発言を促す傾聴モードと，対話に消極的な高齢者に対してロボット同士の対話の提示とより簡単な質問によって発言を促すロボット協調対話モードを実装した．実験室実験の結果より，提案システムは傾聴モードにおいて高齢者からより長い発話を誘引したことが確認された．一方で，実験室実験ではロボットとの対話中沈黙した高齢者がおらずロボット協調対話モードは発動しなかった．そのため，高齢者の発話時間を伸ばすという観点においてロボット協調対話モードの利点を統計的に示すことはできなかった．しかしフィールド実験においては5人の高齢者が対話中沈黙し，ロボット協調対話モードが発動した．5人のうち3人の高齢者はロボット協調対話モード中にロボットが行った質問やロボット同士の対話に対して反応し，発言を開始あるいは再開した．これらのケースはロボット協調対話モードの潜在的な有効性を示すと考えられるが，統計的に示されているものではないため，今後十分な数の高齢者に対してより慎重に効果検証を行っていく必要がある．また，実験室実験では作動しなかったロボット協調対話モードが介護施設では作動したことは介護施設の高齢者の対話参与がより少なかったことを示している．このような違いが生じた原因の一つに高齢者の健康状態の差異が考えられる．そのため，参加者の対話への参与の度合と彼らの年齢や健康状態の関係性を調査することが重要である．

フィールド実験の参加者の半数は2日とも30分以上中断することなく提案システムと対話を継続した．さらに対話後に行ったインタビューでは，参加者と介護者からロボットに対する肯定的なフィードバックをいくつか受けた．これらのフィードバックは，提案システムが高齢者に対しより多く話すことを促していたことを示唆していた．これらの結果は，介護施設で生活する高齢者に他者との対話の機会を提供するために提案システムを使用できる可能性を示唆している．

一方で，フィールド実験において，10名の参加者のうち5名は両日とも30分間まで対話を続けなかった．そのうちの3名は，システムが認識できないほど

小さい声で話した．彼女らはうなずいたり手を動かしたりしてロボットとコミュニケーションをしようとしたが，現在のシステムはそのような非言語応答を認識できない．こうしたロボットの認識能力の不足のために対話が継続できなかったと考えられる．より柔軟なシステムを実現するためには，非言語表現，特に顔の微妙な表情を認識する機能を組み込む必要がある[64]，[100]．こうした多様なモダリティの認識はシステムを改良するために検討すべき重要な項目である．

提案システムは高齢者の発話状況に応じて高齢者にさらなる発話を促す．そのため，システムが高齢者の話を傾聴しているようにユーザに感じさせることが期待できる．しかし本実験では高齢者が感じた傾聴感に関しては，提案システムの有効性は確認できなかった．有効性がアンケート結果に表れなかった原因として，提案システムが高齢者の話を深堀するために行った質問が高齢者の発話内容によらず画一的だったことが考えられる．これまで人の発言内容を理解し適切な質問を行うことによって対話を深める手法が提案されている[66]，[110]，[111]．高齢者の発言を促し，傾聴感を与える効果的な質問を検討する価値がある．また傾聴モードにおけるロボットの応答のパターンが限定的だったことも，高齢者に傾聴感を与えなかった原因の一つと考えられる．実験では，「うん」「はい」など承認や受容を示す応答や「へえ」「ふーん」など感心や気づきを示す応答，「なるほど」「確かに」など理解や同意を表す応答という，音声認識の失敗を考慮しどのような状況において使用しても違和感が生じにくいと期待できる応答のみ実装した．一方で，Den et al.[112]が主張する聞き手の応答は6種類あり，そのうち未実装の応答として相手の発言を繰り返す応答や発言されていない要素を予測し補うように発話する応答，「すごい」「面白い」など相手の発言内容を評価する応答がある．こうした応答生成には高度な音声認識技術や言語理解技術が必要であると考えられるが，適切な応答を行うことにより傾聴感の向上が期待できる．これらの手法は本研究の提案手法と互いに補完する可能性があるため，排他的に採用するのではなく統合的なシステムの開発を行うべきである．

また本実験では，高齢者の発話終了の判定を行うために特定時間の無音検出というシンプルな実装を行った．本実験前に実施した予備実験により適切だと思わ

れるパラメータを決定したが，実際の実験中参加者とロボットの音声が1回の対話あたり平均約6.5回重複した．意味情報と音律情報の両方に基づいてより高精度に参加者の発話終了を検出する技術を組み込むことで，提案システムを改良できる可能性がある．

提案システムにおいて，ロボット協調対話モードと傾聴モードは常に話題提供・質問モードにのみ遷移する．このように設計した理由は対話中に高齢者の対話への参与の仕方が急激に変化するとは考えられなかったためである．実際にフィールド実験において，対話に消極的だった参加者が長時間の発言をし始めた状況や，対話に積極的だった高齢者が全く発言しなくなった状況は確認されなかった．一方でロボット協調対話モードは高齢者の対話への参与を促す機能があり，今後より効率的な対話への参与を促す方法が確立されればロボット協調対話モードから傾聴モードへの遷移を検討する必要が生じるかもしれない．また高齢者の状況に応じてより迅速に適切なモードに切り替えるためには，より正確に高齢者の参与意欲を測定する必要がある．高齢者が対話への参与に対して消極的なのかロボットからの特定の質問に対して回答に窮しているのかは一つの質問に対する発言状況からのみでは判断できないため，本実験では過去3回の質問に対する発言状況によってロボット協調対話モードに遷移するように実装した．今後高齢者の発言内容や非言語動作を解析することなどによって高齢者の対話意欲をより正確に測定できるようになれば，より迅速な，適切なモードへの遷移を実現できる可能性がある．

本実験の結果に関してはいくつかの制限事項がある．第一に，フィールド実験の参加者数が少なかったため，結果の一般化には注意が必要である．実際の介護施設では高齢者の健康状態は必ずしも良好ではなく，十分なサンプルサイズのフィールド実験を実施するためにはコストがかかった．またロボットに十分慣れていない介護者の関与もフィールド実験の質に影響を及ぼした可能性があった．

第二に，実験室実験において提案システムの質問モードと傾聴モードのどちらのモードによって参加者が発話を促されたのかは明らかになっていない．傾

聴モードによって長く発話する体験をした参加者は，それ以降の質問に対しても長く発話する可能性がある．しかし本実験では傾聴モードの発動タイミングや回数は参加者の発話状況に依存するため，傾聴モードが参加者の対話意欲に対して及ぼした影響を質問内容や参加者の好みの影響と分離して正確に推定することは困難であった．こうした傾聴モードの影響を確認するためには，各モードを参加者に何度か体験させた後同じ質問に対して自由に発話させたときの発話時間を測定する実験を実施する必要がある．

## 4.6 まとめ

適応的対話継続機能を搭載した複数ロボット対話システムを実装し，機能の有効性を検証するために実験室実験とフィールド実験を実施した．実験室実験では，高齢者の参加者が提案システムに対して従来のシステムに対するよりも有意に多く話しかけたことが示された．介護施設における2日間のフィールド実験でも，半数の高齢者が提案システムと30分以上対話を継続した．これらの結果は，実世界における提案システムの潜在的有用性を示唆している．しかし，利用者をより広く理解するための統合的な機能の開発や，提案システムが長期的にも高齢者にとって魅力的かどうかの評価を行う余地がある．

# 第五章

# 複数のロボットが物理的身体を持つ効果の検証

## 5.1 実験概要

これまでの章では，物理的身体を持つロボット(物理ロボット)を使用した対話システムを構築した．一方で，本研究で提案した対話システムの実用化を目指すにあたり，導入コスト・運用の観点では物理ロボットの代わりに仮想的身体を持つロボット(仮想ロボット)の利用を検討する価値がある．本実験では，物理ロボットを利用した対話システムと仮想ロボットを利用した対話システムを比較し，高齢者とより長く対話する目的においてどちらのシステムが適切なのかを調査した．

二章で述べたように，物理ロボットと仮想ロボットの比較はこれまで多く行われてきているが，タスクによってどちらのロボットが適切かの結論は異なる．Heerink et al.[65]は，ロボットが高齢者に対して情報伝達を行うタスクにおいて，物理ロボットが仮想ロボットよりも有効であると報告している．一方で，Looije et al.[99]によると，ロボットが高齢者の健康管理を支援するタスクにおいては，ロボットに対して感じる満足度，優しさ，親しみやすさの点で仮想ロボットが物理ロボットよりも高く評価された．ただし，これらの研究で行われたロボットと高齢者の対話は特定のタスクを達成するために行われたものであった．

人との関係を深めるためには相手の経験を聞くなど，タスクを達成するための対話とは異なる形式の対話が必要である[113]．高齢者がこのような形式の対話において物理ロボットと仮想ロボットのどちらを好むのかは明らかになっていない．そこで本実験では，高齢者との雑談のような対話において，対話ロボットが物理的身体を持っているか否かによって，高齢者の行動や感情がどのように変化するかを調査した．

Kiesler et al.[96]は，大学生を対象にテキスト対話を行うロボットを用いた実験を実施し，大学生は仮想ロボットとの対話よりも物理ロボットとの対話に積極的に参与したことを報告している．彼らの実験とは異なり，本実験では高齢者との音声対話を想定しているが，音声対話はテキスト対話より高齢者にとって対話しやすい方法であると考えられ，本実験でも高齢者の音声対話への積極的な参与が表れると推測できる．そこで，本実験では次の仮説を検証する．

| |
|---|
| 仮説(1)高齢者は，ロボットとの雑談のような対話において，仮想ロボットよりも物理ロボットとの対話により積極的に参与する |

一方でKiesler et al.[96]は，大学生は物理ロボットよりも仮想ロボットに対してより自己開示したとも報告している．従って，ロボットとの関係に関する印象，例えばロボットに感じる近しさに関しては，物理ロボットは仮想ロボットよりも高く評価されないことが予測される．そこで，本実験では次の仮説を検証する．

| |
|---|
| 仮説(2)高齢者は，ロボットとの雑談のような対話において，物理ロボットよりも仮想ロボットをより親密な対話相手として評価する |

これらの仮説を検証するために，複数の物理ロボットを用いた対話システムと複数の仮想ロボットを用いた対話システムを実装した．65歳から84歳までの

40人の高齢者を対象にロボットとの対話実験を実施した．提案システムは参加者の発話を認識し適宜応答を変更するため，参加者がロボットと行う対話の質を完全に統制することは難しい．本実験では，こうしたロボットの応答の質の影響を解析した．実験の結果，ロボットが高齢者の発言を認識し応答した群では，高齢者は仮想ロボットよりも物理的ロボットとの対話により積極的に関与し，ロボットが高齢者の発言を認識し応答した群の高齢者は高齢者の発言を認識せず曖昧に応答した群の高齢者よりも物理ロボットとの対話により積極的に関与することが示された．

## 5.2 システム

本節では，実験のために用意した，物理ロボットを用いた対話システムと仮想ロボットを用いた対話システムの詳細について述べる．

### 5.2.1 システム概要

本実験では，複数のロボットを使用した高齢者向け対話システムにおいて，ロボットが物理的身体を持つことの効果を確認するために，二つの対話システムを用意した．一つは，物理ロボットを2体使用したシステムで，もう一つは仮想ロボットを2体使用したシステムである．対話システムには，四章で述べた，Iioらが提案したQuestion-Answer-Response対話モデルに高齢者の発言状況に応じて対話のモードを能動的に切り替える適応的対話継続機能を加えたシステムを使用した(図19)．物理ロボットとして，四章と同じくCommUを使用した．仮想ロボットは，CommUをコンピュータグラフィックスで表現したエージェント(バーチャルCommU)を用意した．

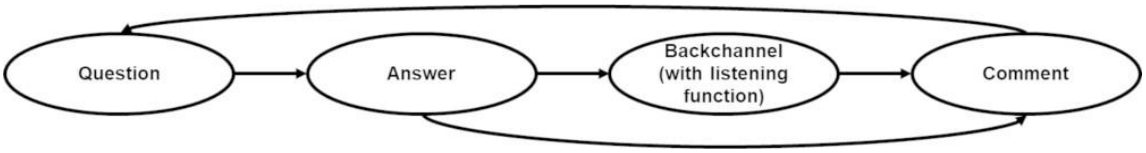


図19 対話システムの状態遷移図
Figure 19. State transition diagram.

図20にシステムアーキテクチャを示す．システムは，マイクアレイで集音した音声を，クラウドサーバーに送信する．クラウドサーバー上で音声データをテキスト化し，ロボットの応答を決定した後，合成された音声データを，ロボットの背後に設置されたスピーカーによって再生する．なお，指向性を持ったマイクを使用し高齢者以外の音を収音しないようにした．

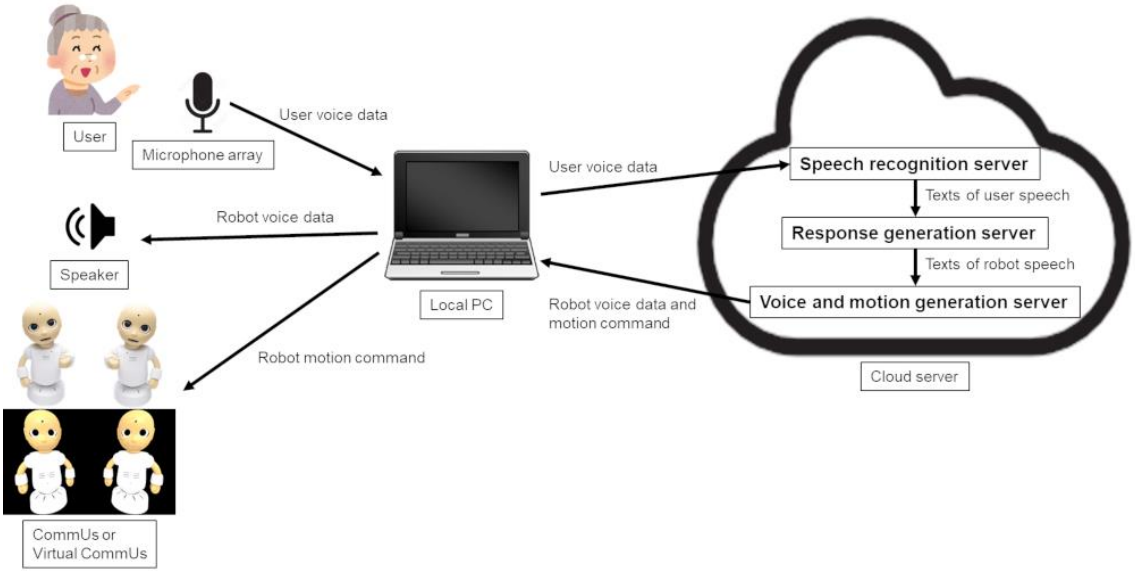


図20 システムアーキテクチャ
Figure 20. System architecture diagram.

### 5.2.2 使用したロボット：CommUとバーチャルCommU

本研究では，物理ロボットを用いた対話システムと仮想ロボットを用い

た対話システムを実装した．物理ロボットには，ヴイストン株式会社と大阪大学が開発した2体の卓上型ヒューマノイドロボット「CommU」を採用した(図21 左)．本実験で使用したCommUの自由度と事前に準備したCommUの動作は四章で述べたシステムと同様のものとした．すわなち，CommUが持つ14の自由度のうち，8の自由度のみ使用した．CommmUが表出する動作は，頭を傾ける，うなずく，人を見る，別のCommUを見る，音声の再生に合わせて口を開閉するという動作とした．

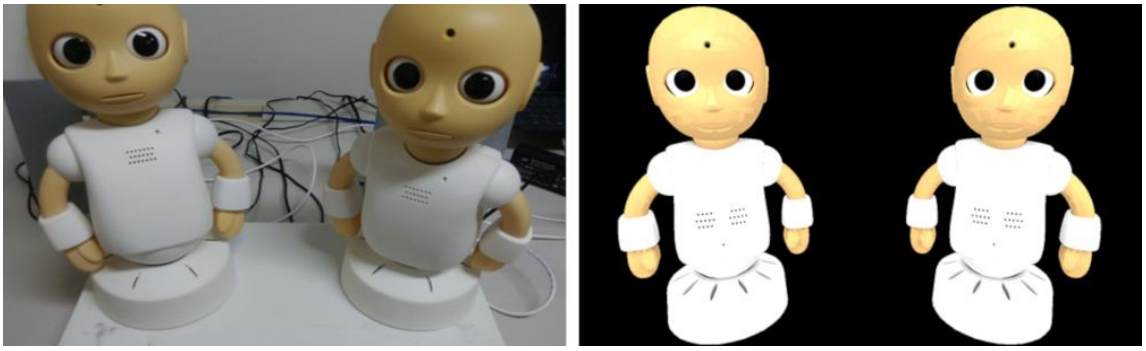

図21 CommU(左)とバーチャルCommU(右)の外観
Figure 21. The appearance of CommU (Left) and the virtual CommU (Right).

仮想ロボットに関しては，CommUの外観をコンピュータグラフィックスで再現した2次元エージェントであるバーチャルCommUを用意した(図21 右)．実験では，3DライブラリであるThree.jsと3DレンダリングAPIであるWebGLを用いてウェブブラウザ上にバーチャルCommUを描画した．なお，CommUと同じサイズになるようにバーチャルCommUをディスプレイに表示した．バーチャルCommUの背景は黒い画像を表示した．バーチャルCommUの動作はCommUの動作と同様になるように設計した．バーチャルCommUが人を見る動作はシーンカメラの焦点を見る動作で表現した．

高齢者に不信感を与えないようにするため，CommUおよびバーチャルCommU

に子供のようなキャラクターを与え，子供のような声を使用した．2体のCommUおよびバーチャルCommUの外観に違いはなかったが，対話している人が2体を区別できるように，片方のロボットには男の子の名前(タロウ)と男の子のような声，もう片方のロボットには女の子との名前(ハナコ)と女の子のような声を使用した．

## 5.3 実験設定

本研究では，二つの条件(物理条件と仮想条件)を参加者間で比較する実験を行った．物理条件では，参加者に2体の物理ロボット(CommU)を使用した対話システムと対話させた．仮想条件では，参加者に2体の仮想ロボット(バーチャルCommU)を使用した対話システムと対話させた．参加者をどちらかのシステムと対話させた後，アンケートに回答させた．なお，本実験は大阪大学大学院基礎工学研究科の倫理委員会の承認のもと実施した．

### 5.3.1 参加者

参加者は，65歳～84歳の40人の高齢者(男性20人，女性20人)であった．人材派遣会社に登録している高齢者に対して，聴覚に問題がないこと，狭い実験室に対して過度の恐怖を感じないことを条件に募集を行った．参加者をランダムに物理条件また仮想条件に割り当てた．物理条件に割り当てられた参加者の数は男性11人，女性9人であり，仮想条件に割り当てられた参加者の数は男性9人，女性11人であった．

### 5.3.2 実験装置

実験室で参加者にCommUまたはバーチャルCommUと対話させた(図22)．物理ロボットまたは仮想ロボットとマイクアレイおよびスピーカーを約1.2 mの長さの机の上に設置した．バーチャルCommUは27インチモニタに表示した．高さ30mmの白色の台の上にCommUを置き，CommUとバーチャルCommUの高さが

等しくなるようにした． 二つのロボットの距離は約0.4mとし， それぞれの後ろにスピーカーを設置した． 参加者はロボットやディスプレイから0.6m離れたところに座らせた． 実験者が実験室の様子を監視するために， 参加者の左後部にカメラを設置した． 参加者の右後ろにアンケートに回答するときに使用するための小さなテーブルを設置した．

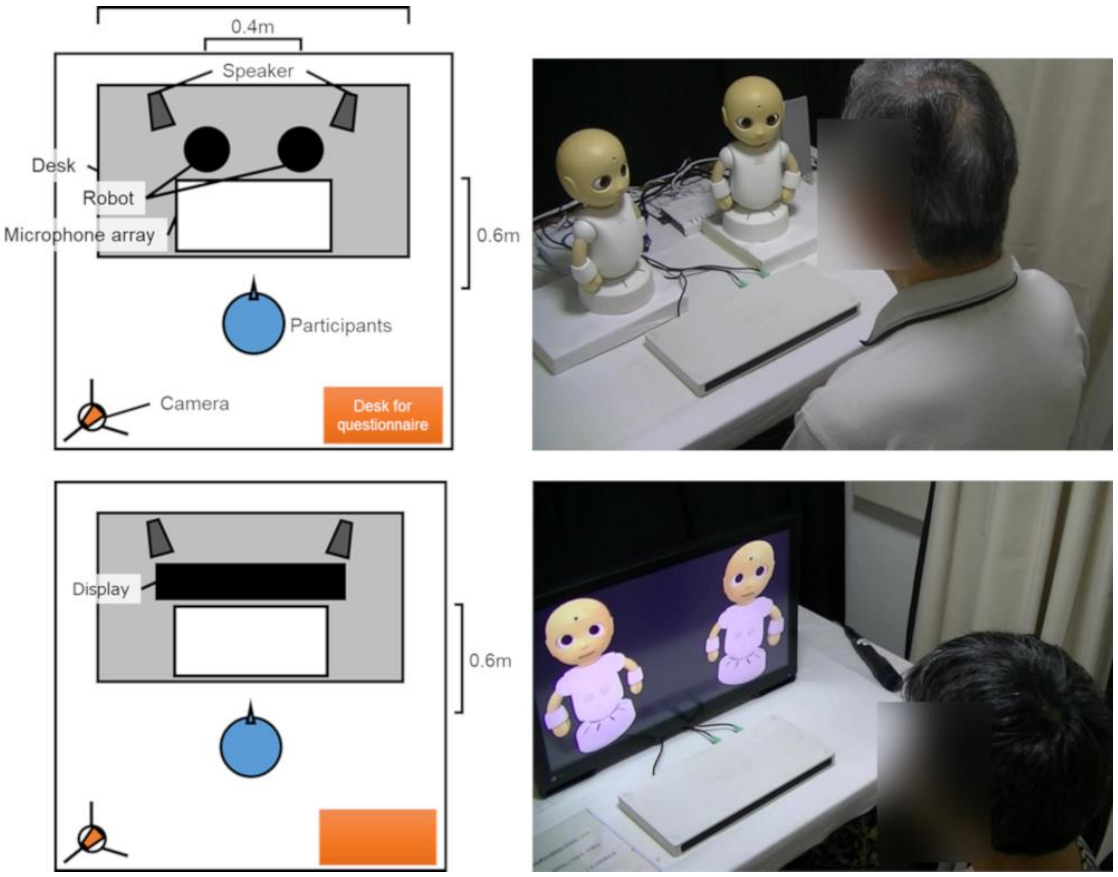


図22 物理条件(上段)と仮想条件(下段)における参加者と対話システムの対話の俯瞰図(左)と対話の様子(右)

Figure 22. Bird’s eye view (left) and scenes (right) of a conversation between a participant and the robots of each condition (Upper row: the physical condition, Lower row: the virtual condition).

実験のために二つの対話シナリオを準備した．一つ目のシナリオは，参加者に物理ロボットまたは仮想ロボットとの対話に慣れさせることを目的に作成された．このシナリオでは，まずロボットは自己紹介を行い参加者に対して五つの質問を行った．質問のトピックは天気や季節に関するものとした(例：「今日はいい天気？」)．5問のうち3問の質問のみ，参加者の長い発話に対してシステムが適応的対話継続機能を作動できるように設計した．このように設計した理由は，第一にすべての参加者に対して適応的対話継続機能が作動する場合と作動しない場合のロボットの反応を経験させるため，第二に決められた時間において参加者が経験する質問数に参加者の間で差が大きく生じないようにするため，第三にシステムが連続して傾聴モードに遷移した場合参加者を疲弊させる可能性があったためである．

二つ目のシナリオは，評価を行うことを目的に作成された．このシナリオでは，ロボットは，参加者に20問の質問を行い最後にロボットと対話してくれたことに感謝した．表1に二つ目のシナリオで提示した質問の内容と提示順序を示す．20問の質問のうち，14問は比較的気軽な話題の質問とし，6問はより深刻な話題の質問とした．前者の質問の具体的なトピックは，子供時代の記憶，旅行の経験と好みであった．後者の質問の具体的なトピックは，参加者の健康状態，日常における感情と将来に対する期待または不安であった．一つ目のシナリオと同様に，気軽な話題に関する質問の半分，すなわち14問のうち7問の質問において，システムは適応的対話継続機能を作動した．一方で，深刻な話題において参加者が長い発言をしたときロボットが興味を示さないことは不自然であると考えられたため，システムはすべての深刻な話題の質問において適応的対話継続機能を作動できるように設計した．表の一つ以上のアスタリスクが付いた質問は，システムが傾聴機能を作動した質問である．

表1 評価のために作成した対話シナリオ
Table 1. Questions used as the experimental stimuli.

| Topics | # | Questions |
|---|---|---|
| Light topic (Childhood memory) | 1 | *When you were a child, were there many parks?* |
| | 2** | *When you were a child, did you like running?* |
| | 3** | *When you were a child, what kind of toys did you play with?* |
| | 4 | *When you were a child, which did you like better, playing outside or at home?* |
| | 5** | *When you were a child, did you like school?* |
| | 6** | *What do you remember most about your elementary school days?* |
| | 7 | *When you were in elementary school, did you like studying?* |
| Serious topic | 8** | *Do you want to share the wisdom you've learned in your daily life?* |
| | 9** | *Have you ever had a good time recently?* |
| | 10** | *Do you think about how to live from now on?* |
| Light topic (Travel) | 11 | *Have you ever been on a trip and seen a World Heritage site?* |
| | 12 | *Which is better for you to travel, foreign country or Japan?* |
| | 13* | *Where is the most interesting place you have ever been?* |
| | 14 | *Have you ever eaten soft ice cream while traveling?* |
| | 15* | *When you go on a trip, which do you like better for dinner at a ryokan, Japanese food or Western food?* |
| | 16 | *If you go on a trip, don't you think hot spring is the best?* |
| | 17* | *Do you like traveling?* |
| Serious topic | 18* | *Is there anything new you want to start?* |
| | 19* | *Where would you like to go most?* |
| | 20* | *Do you feel sick or worried about your physical condition?* |

*The system activated the listening function in the questions marked with one or more asterisks. The questions marked with double asterisks were used for the analysis.*

両方のシナリオの各質問に対して，予想される参加者の回答のフレーズをいくつか検討し，それぞれの参加者の回答フレーズに対してシステムのBackchannel状態およびComment状態における応答文を用意した．また，参加者の回答の中に予測したフレーズが検出されなかったときのために，システムの曖昧な応答文を用意した．また，両方のシナリオにおいて，いくつかのシステムの質問文や応答文には，参加者の名前を表す特別な記号を含めた．実験前にシステムに参加者の名前を登録することで，システムが記号を参加者の名前に変換し発言するように設計した．

### 5.3.3 実験手順

実験の手順は次のとおりである．まず，実験者は待合室で参加者に対して実験の手順を説明した．その後，実験者は参加者を実験室に移動させ，ロボットの前に座らせた．実験者は，部屋に設置したカメラで参加者がロボット

の前に座っていることを確認した後，システムに命令を送信し練習のためのシナリオを開始させた．システムは，5分が経過するか，5問の質問をすべて提示した時点で対話を終了させた．参加者とシステムの対話が終了した後，実験者は，参加者に対しシステムとの対話において音量などの調整が必要ないかどうかを確認した．その後，実験者はシステムに命令を送信し評価用のシナリオを開始させた．システムは，15分が経過するか，20問の質問をすべて提示した時点で対話を終了させた．最後に，実験者は，参加者にロボットに対する印象を問うアンケートに回答させた．

### 5.3.4 評価観点

仮説(1)に関して，参加者の対話への参与度合を評価するために参加者の発話時間を測定した．具体的には，一つの質問にかかった時間からロボットの発言時間とロボットと参加者が両方とも無言になった時間を差し引いた時間を参加者が一つの質問に対して発言した時間と定義し，各質問に対して発言した時間の平均を算出した．なお，一つの質問にかかった時間はシステムが質問を始めてから次の質問を始めるまでの時間と定義した．また参加者とロボットが無言になった時間はマイクに入力された音圧が0.5秒以上連続して閾値以下になった時間と定義した．

仮説(2)に関して，ロボットに対して感じる近しさを評価するために，

心理的重なり尺度(IOS: Inclusion of Other in Self Scale[114])を使用した．IOSスケールは，これまでHuman-Robot Interactionの分野で広く使用されてきた尺度である[115]-[117]．参加者は，参加者と対話したロボットとの関係を最も良く表す図を，七つの図から選択するように求められた．七つの図はそれぞれ二つの円からなり，円の重複の度合は参加者とロボットの近接度を表す．本実験では，最も遠い関係を表す図を1，最も近い関係を表す図を7として各図にスコアを割りあてた．

### 5.3.5 分析方法

仮説(1)を検証するために，物理条件と仮想条件における参加者の発話時間を比較した．比較するにあたり，ロボットが対話中参加者に質問する数は参加者によって異なることを考慮する必要がある．質問には比較的気軽な話題な質問と深刻な話題の質問の2種類が存在し，話題によって参加者の発言時間に違いが生じる可能性がある．そこで比較の条件を揃えるために，20問のうち，7問の気軽な話題の質問と3問の深刻な話題の質問で構成された最初の10問の質問に対する参加者の発話時間に焦点を当てた．回答数が10問未満の参加者のデータを比較対象から除外する．さらに，最初の10問のうち，適応的対話継続機能が作動する可能性がある7問(表1の二つのアスタリスクの質問)に対する参加者の発話時間に焦点を当てた．これは四章で述べたように適応的対話継続機能がない質問に対して参加者が十分に発言することは容易ではなかったためである．仮説(2)に関しては，物理条件と仮想条件におけるIOSスケールのスコアを比較した．

高齢者の，ロボットとの対話への参与度合やロボットに対する印象は，ロボットが高齢者の発言に対してどの程度適切な応答をしているかによって変化する[20]．本実験では，ロボットは参加者の発言に応じて異なる応答を行った．システムは，参加者の発言の中にあらかじめ予想されたフレーズを検出した場合，検出したフレーズに応じた明確な応答を行った．一方で，フレーズが検出できなかった場合は曖昧な応答を行った．システムが参加者の意図とは反対の応答を行うことを避けるために予測されるフレーズは注意深く設定したため，システムがフレーズを検出した場合は文脈的に適切な応答を行ったと考えられる．このようなロボットの応答が成功した数は，ロボットに対する参加者の印象に大きな影響を与えたと考えられる．分析におけるロボットの応答の成功数を考慮するために，システムが予想されたフレーズを検出した質問の数に基づいて，参加者を二つの群に分け分析した．

まとめると，本実験における独立変数はロボットのタイプ(2レベル：物理または仮想)とロボットの応答の成功数(2レベル：全参加者の平均より多いま

たは少ない)であった．この独立変数に対して，参加者の発話時間とIOSスケールのスコアに関して2要因分散分析を行った．

## 5.4 実験結果

10問以上の質問に回答した参加者の数は26人であった(男性15人，女性11人)．10問のうち，ロボットの応答の成功数の平均は3.54回であった．参加者を成功数が平均以上(4回以上)の群と平均以下(3回以下)の群に分けた．表2は，各郡の成功数の平均を表している．成功数が多い群の参加者の数は16人(物理条件，仮想条件ともに8人)であり，成功数が少ない群の参加者の数は10人(物理条件，仮想条件ともに5人)であった．

表2 ロボットが応答に成功した質問の数の平均
Table 2. Average number (and standard deviation) of answers that the agents responded successfully.

| | Successfulness | |
|---|---|---|
| | **Less** | **More** |
| Physical | 2.20 (0.84) | 4.38 (0.52) |
| Virtual | 1.80 (0.84) | 4.63 (0.74) |

図23は，参加者の発話時間の平均である．実線は物理条件，破線は仮想条件を表している．2因子分散分析の結果，ロボットのタイプと成功数に関して交互作用の傾向が確認された(F(1，22)=3.46，p=0.0763)．各因子の単純主効果の分析を行った結果，成功数が多い群において，物理条件の参加者の発話時間は，仮想条件の参加者の発話時間よりも長かったことが確認された(F(1，22)=10.018，p=0.0045)．さらに，物理条件において，成功数が

多い群の参加者の発話時間は，成功数が少ない群の参加者の発話時間より長かったことが確認された(F(1, 22)=6.94, p=0.015).

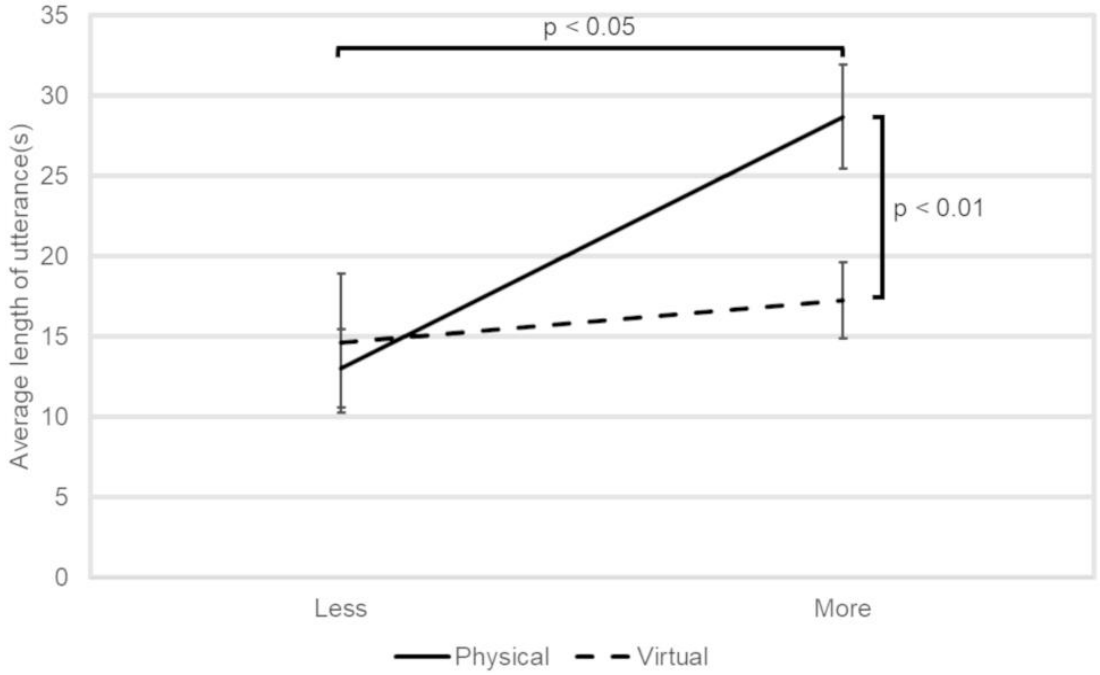


図23 質問ごとの参加者の発話時間の平均

Figure 23. The average amount of utterance of the participants per question.

図24は，参加者のIOSスケールのスコアの平均である．2因子分散分析の結果，有意な主効果または交互作用は確認されなかった.

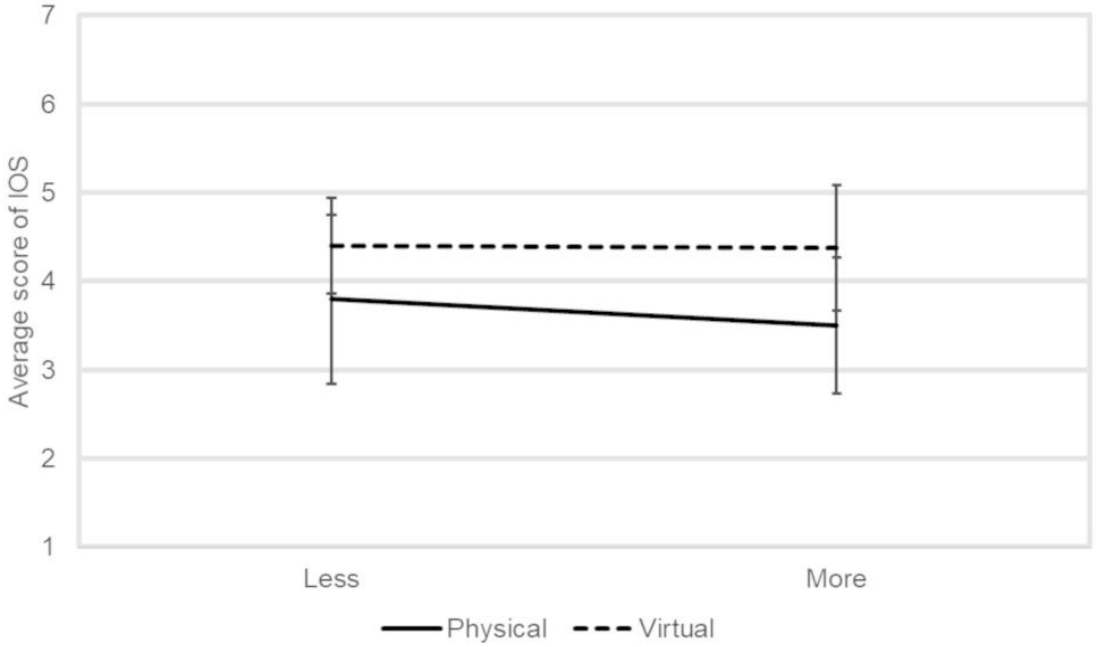


図24 各条件における参加者のIOSスケールのスコアの平均
Figure 24. The average IOS score of the participants in each condition.

## 5.5 実験結果の考察

仮説(1)に関して，ロボットが高齢者の発言を認識し応答した群の高齢者においては想定通り仮想ロボットとの対話よりも物理ロボットとの対話において積極的な参与が確認された．大学生を対象にした既存研究において大学生は仮想ロボットよりも物理ロボットとの対話により参与することが報告されており[96]，本実験の結果と一致する．ロボットの社会的能力がロボットの受け入れられやすさに与える影響は仮想ロボットよりも物理ロボットのほうが大きい[118]ことから，参加者は参加者の発言を認識し応答したロボットに対して社会的能力を感じ，物理ロボットと仮想ロボットで対話の参与への積極性に違いが生じた可能性がある．本実験の結果は，よ

り高度な応答技術の発展に伴い，物理的身体を持つことの利点がより顕著になる可能性を暗喩している．

仮説(2)に関して，主観的報告では確認できなかった．図24は，両条件のスコアがともに極端に高くも低くもないことを示している．この結果は，仮想ロボットが物理ロボットよりも近くに感じられるという既存研究の報告と一致しない[96]，[99]．これらの研究とは異なり本実験の対話システムは必然的に2体のロボット間の社会的相互作用を含み，これはロボットの社会的能力およびロボットの受け入れられやすさを増強する可能性がある[118]．この特異的な効果により，物理ロボットに対して感じる近しさが想定よりも低くならなかったのかもしれない．

本実験にはいくつかの制限事項がある．まず，仮想ロボットは動きや表情が制限されていた．本来仮想ロボットの利点の一つは，物理ロボットには実現不可能な任意の非言語表現が可能なことである．しかし，対話において最も効果的な仮想ロボットの表現方法は明らかになっていない．そのため最初のステップとして本実験では物理ロボットと同じ条件で比較を行った．本実験の結果はあらゆる条件下において物理的身体を持つことの利点を示すものではないことに注意が必要である．高齢者にとって最も効果的な仮想ロボットの表現については今後さらなる調査が必要である．

本実験の結果は，高齢者の対話への参与とロボットの応答の間に複雑な潜在的交絡が存在することを示している．本実験ではロボットがどれほど適切な応答を行ったかによって参加者を二つのグループに分け，分析を行った．しかしこのようなグループ分けを行った後にも交絡は除去しきれていない可能性がある．こうした潜在的交絡を調査するために，より多くの参加者を集めた実験においてより詳細な分析を行うことが重要である．ロボットがどの程度曖昧な応答を行うかを考慮しつつ物理的身体を持つことが高齢者の対話への参与に与える影響を調査することで，ロボットが適切な応答を行うことと比較して物理的身体を持つことの重要性が明らかになる可能性がある．

本実験の参加者数は多くなかった．潜在的な変数を除くために，ロボット

からの質問の順序および内容は，すべての参加者に対して同じになるように設定した．より信頼性が高く正確な分析を行うためには，より多くの参加者に対して様々な対話を行う実験が必要である．

また本実験は実験室において制御された環境下の中で実施された．すなわち今回の実験での対話はわずか15分に限られており，参加者全員に対して一度だけ行われた．そのため，介護施設のような実世界における利用において，高齢者の対話への参与やそれに基づく親密性に関する物理的身体を持つことの効果が長期間維持されるかどうかは明らかではない．また介護施設のような環境では認知機能が低下した高齢者も在居していると考えられる．しかし本実験では医学的診断は行っていないものの，他者との対話に支障をきたすほど参加者の認知機能は低下していなかったように見られた．高齢者にとって仮想ロボットと対話を行う状況は一般的ではないと考えられ，高齢者は仮想ロボットをテレビのように捉え対話相手として認識しない可能性が考えられる．本実験では仮想ロボットとの対話が一切成立しなかった参加者はおらず，いずれの参加者も仮想ロボットから質問されていることを認識しロボットの質問に対して回答した．このことから本実験の参加者は仮想ロボットを対話相手として認識していたと考えられるが，認知機能が低下した高齢者も同様に仮想ロボットを対話相手として認識するかは明らかになっていない．このように本研究の結果がすべての高齢者に対して適応可能かは明らかではなく，一般化には注意が必要である．日常的に使用されるアプリケーションの開発には実環境における長期的な実験を行い，物理ロボットを使用するメリットとデメリットを整理することが重要である．

## 5.6 まとめ

本実験では，高齢者の対話相手としてロボットが物理的身体を持つべきか仮想的身体を持つべきかを検討した．2体の物理ロボットまたは仮想ロボ

ットが高齢者と対話するシステムを実装した． 40人の参加者を対象に， どちらのタイプのロボットとより多く対話し， より親しみを感じるかを確認する実験を行った． 実験の結果， ロボットが適切に返答した高齢者は仮想ロボットよりも物理ロボットとの対話により多く関与することが分かった． 今後，人との対話能力の向上に伴い， 物理的身体を持つことの効果が高まることが期待される． 一方で， 実環境における長期の実験を行い， 仮説の検証を行う必要がある．

# 第六章

# 議論

本研究では，高齢者とより長い間対話を継続できるロボットの実現を目指し，高齢者の対話への参与状況によってシステムのモードを切り替える適応的対話継続システムの提案と有効性の確認を行った．これまでに行われた2体のロボットを使用した対話システムに関する研究では，介護施設において高齢者と平均13分程度の対話を実現している[28]が，提案システムは介護施設の高齢者と平均25分程度の対話を実現し，高齢者と30分以上対話継続が可能であることが確認できた．この結果は，介護施設において提案システムが介護スタッフに代わり高齢者に対話機会を提供できる可能性を示唆している．また，高齢者介護施設において施設のスタッフは食事や入浴など様々な介助を行っており，高齢者一人ひとりと対話する時間の確保が負担となっている[119]．高齢者と30分間自律的に対話を継続できるシステムはスタッフの業務の負担軽減に貢献できる可能性がある．さらに，介護者が質の高い介護サービスを高齢者に提供するためには，高齢者とコミュニケーションを行い高齢者のニーズを把握することが重要である[120]．提案システムは高齢者に対して様々な質問を行うため，高齢者の考えや好み，経験に関する情報が高齢者の発言の中に含まれると考えられる．ロボットと高齢者の対話は，介護者が高齢者のニーズを把握するための一助となるかもしれない．実用的な観点では，高齢者と30分の対話を継続できるシステムは様々な利用用途が考えられる．例えば，記憶テストやクイズなどの対話を通して高齢者の認知機能の維持向上を図ることも可能かもしれない．こうした提案システムの応用の仕方は今後検

討すべき事項である．

ロボットに対する高齢者の印象や考えは多様であり，すべての高齢者がロボットの使用に積極的であるわけではない[38]．適応的対話継続システムは高齢者の対話への参与状況に応じてシステムのモードを切り替えるため，高齢者によってシステムとの対話の中で発動するモードに偏りが生じる可能性がある．実際に四章で述べた適応的対話継続機能の効果を検証する実験室実験や，五章で述べた物理的身体と仮想的身体の比較を行う実験室実験では積極的な高齢者に対応するための傾聴モードのみ発動し，消極的な高齢者に対応するためのロボット協調対話モードは発動しなかったのに対して，高齢者が実際に生活する環境で行ったフィールド実験では両モードとも発動した．実験室実験に参加した高齢者は，ロボットとの対話は任意のタイミングで終了できたにもかかわらず設定された最長の時間対話を継続し，さらに対話に積極的に参与した．これは実験室実験の高齢者はロボットと対話を行う意欲は高かった可能性を示唆している．一方でフィールド実験では，高齢者の対話継続時間や対話への参与の度合いは様々であった．このことから介護施設には様々な対話意欲の高齢者が存在していたと考えられる．様々な対話意欲の高齢者に対して画一的な対話の仕方では，高齢者と対話を継続することはおそらく難しい．高齢者支援ロボットは高齢者個々に対して行動を適応させる能力を備える必要があると言われており[32]，より多くの高齢者に受け入れられ，より長く高齢者と対話継続が可能なロボットを開発するためには，高齢者の対話意欲に応じて対話の仕方を切り替える機能の検討が重要である．適応的対話継続システムは発言頻度という測定が容易な指標を採用しており対話意欲を正確に測定しているわけではないが，様々な意欲の高齢者に対してシステムの振る舞いを変えながら対話の継続を実現した本研究の実績は今後の高齢者支援ロボットの対話機能開発の一助になると期待できる．高齢者の発言内容や非言語動作を解析することなどによって対話意欲をより正確に測定できるようになれば，さらに高齢者のニーズに寄り添ったロボットの開発が可能になると考えられる．

ロボット協調対話モードでは，ロボット同士の協調対話を提示することによ

り対話を継続し，より簡単な質問を行うことで高齢者に対話への参与を促す．これまでロボット協調対話により情報伝達を行った研究は行われている[41]，[42]，[69]が，対話継続を実現する目的には利用されていなかった．本研究における介護施設での実験では，ロボット協調対話モードによって発言に消極的であった高齢者も発言するようになった事例が確認された．こうした事例はロボット協調対話モードの有効性を統計的に示すものではなかったが，ロボット協調対話モードが消極的な高齢者を対話に参与させ，対話を継続することができる能力を持つ可能性を示唆している．ロボットとのインタラクションを繰り返すことで高齢者のロボットに対する印象が好転することが期待でき[26]，ロボットと高齢者の最初の接触において高齢者をすこしでも対話に参与させることができたことは今後のより深い関係構築のきっかけになると期待できる．また高齢者を対話に参与させることができれば，三章で述べた通り，高齢者に対話内容をより記憶させることができ，また高齢者の感情を生起させることができる．ロボット協調対話モードは，ロボットから高齢者に対する情報伝達の効率性を向上させる観点でも価値があると言える．

四章で述べた，適応的対話継続システムの効果を検証する実験室実験において，適応的対話継続システムは高齢者により多くの発言を促すことが確認された．適応的対話継続システムにはロボット協調対話モードと傾聴モードが含まれるが，実験室実験ではロボット協調対話モードには遷移しなかったことから，傾聴モードがこの結果に寄与したと考えられる．これまで3者対話におけるロボットの傾聴に関しては，片方の傍参与者ロボットが相槌動作を提示することで，人の対話相手となるロボットの社会的存在感を向上させることが報告されている[46]．本研究では3者対話において，2体のロボットの両方が傾聴の姿勢を示すことの有効性が確認された．一方で，その傾聴モードでも高齢者が自身の話を傾聴されているという感覚を増強させるには至らなかった．本研究では実装の簡単さのためにロボットは高齢者の発言によらず決まった深堀の質問を行ったが，このような簡易的な実装が，ロボットが高齢者の発言内容を理解していないような印象を高齢者に与えてしまった可能性がある．ロボットが高齢者の話を傾聴している印象を

より強く高齢者に与えるためには，高齢者の発言を認識し深堀の質問を変更するような，より高度な言語解析技術を用いた傾聴機能が必要だと考えられる．これまでにこうした高度な傾聴機能を含む2者対話システムが提案されており[36]，[66]，これらの技術を活用することで提案システムを改良できる可能性がある．また五章の実験を通して，傾聴モードの効果はロボットの身体に影響を受ける可能性が示唆された．より高度な傾聴機能を実装したときに，物理ロボットを用いる場合と仮想ロボットを用いる場合で，その傾聴機能の効果に差が生じる可能性がある．それぞれのロボットにおいて高度な傾聴機能の効果がどの程度発揮されるのかを明らかにすることが，今後の効率的なロボット開発に寄与すると考えられる．

高度な言語解析技術を導入することで，高齢者の質問にも回答できるようになる可能性がある．本研究で実装した対話はロボットが話題提供や質問を行うロボット主導の対話であった．一方でMavridis[100]は，人の対話ロボットに対する要望の一つとして，ロボットと人の対話において互いに主導権を渡しあう混合主導型対話の実現を挙げている．実際に四章で述べた実験室実験やフィールド実験，五章で述べた実験室実験において高齢者がロボットに質問しようとする様子が確認された．人が対話の主導権を持つ対話では，システムは人の自由な発言に応答する必要がある．こうしたより自由度の高い対話が可能なシステムの実現を目指した研究はこれまで行われている[110]，[121]．これらの技術のみで長時間自然な対話を継続することには現状技術的課題がある[122]が，提案システムにこれらの技術を組み込むことで，自然な対話を継続しつつ高齢者の質問にも対応可能な対話システムを実現できる可能性がある．

提案システムが日常生活で高齢者に使用されるためには，本研究で示した高齢者との対話能力を長期間維持する必要がある．そのためにはまず，高齢者が提案システムとの対話を体験した後，対話時間がより短くなるか，またはそもそも対話をしようとしなくなるかどうかを調査する必要がある．四章のフィールド実験を実施した2日間では，身体的健康の問題により参加できなかった高齢者を除いたすべての高齢者が両日とも実験に参加し，また対話時間の平均に

差は確認されず，このようなネガティブな傾向は確認されなかった．これは提案システムが2日間はその性能を維持できたことを示唆している．一方で，対話ロボットを長期間使用した場合に新規性の効果が失われるかどうかを確認するには，2か月以上の期間が必要であることが示唆されている[26]．高齢者向けロボット研究の分野ではCARESSES[31]のように，高齢者に数週間にわたり高齢者に対話機会を提供することを目的にした野心的なプロジェクトもある．提案システムが高齢者に彼らの日常生活の中で継続的に利用されるかどうかは，さらなる調査が必要である．

本研究で実施したすべての実験において，2体のロボットに明確な個性の違いは設定しなかった．一方で，2体のロボットにはそれぞれ異なった個性を設定することも可能である．例えば，Khalifa et al.[74]は，教師役と生徒役の2体のロボットを利用し語学学習の支援を行う対話システムを提案している．このように対話の内容や目的によってはロボットに異なる個性を設定することでより自然な対話を実現できる可能性がある．高齢者とロボットの雑談においては，例えば，2体のロボットに相対する意見を持たせるように設計することで，常にどちらかのロボットが高齢者に共感を示すことができるようになり，高齢者のロボットとの対話意欲を向上させることが可能かもしれない．ロボットにどのような個性を設定し，ロボットにどのような発言をさせるのが適切かは検討の余地がある．

本研究にはいくつかの制限事項がある．まず，提案した対話戦略の効果がどの程度2体のロボットを使用したシステムに限定されるかが明確でないことである．本研究では傾聴モードとロボット協調対話モードにおいて，2体のロボットの使用を前提に自然な対話となるようにシナリオを実装した．一方アプリケーションを開発するうえで，ロボットの数を増やすことにはコストが増すリスクがある．そのため，1体のロボットでも本研究で確認された対話継続の効果を実現する方法を検討する価値はある．しかし，1体のロボットでは特にロボット協調対話モードの実装が難しいと考えられるため，例えば別の高齢者を対話に参与させるような，別のアプローチで3者対話を実現する必要がある．また本研究では傍参与

者が存在する最小の構成として2体のロボットを用いた3者対話について検討したが，何体のロボットを導入すべきか明らかになっていない．これまでに人は1体のロボットとの対話に比べ，2体のロボットとの対話はより話しやすいと感じ[75]，より長く対話する[44]ことが報告されている．また3体のロボットとの対話は1体のロボットとの対話に比べ，人の対話参与の負担が少ないことが報告されている[39]，[40]．ロボットをさらに増やした場合，高齢者の発言頻度は下がり高齢者の負担をさらに低減できると考えられるため，対話を継続しやすくなる可能性がある．一方で高齢者の参与の割合は相対的に減少するため，三章におけるロボット同士の対話に参与させない状況に近くなり，情報の伝達の観点では効率が落ちる可能性がある．何体のロボットを導入することが対話継続および情報伝達において最も効果的かは調査する必要がある．

また本研究で実施したすべての実験において，対話シナリオや質問が日本文化を前提として用意されている．Bruno et al.[123]，[124]は，使用者の文化的背景に適応できるロボットを提案している．また，人のロボットに対する信頼度は，その人の文化的背景によって異なることが報告されている[125]，[126]．本研究の実験に参加した高齢者とは異なる文化的背景を持つ高齢者に対しても，提案システムが有効であるかどうかは確認する必要がある

# 第七章　結論

本研究では，高齢者が実際に生活する環境においてより多様な高齢者とより長い間対話を継続できるロボットの実現を目指し，2体のロボットを用いた高齢者向け対話システムの開発を行った．これまで人とロボットの2者対話において，人の発言内容を解析することでロボットからの質問に興味があるかどうかを判定し話題提供・質問モードから傾聴モードに切り替える対話戦略が提案されている[37]．一方でロボット2体を用いた3者対話において，高齢者に繰り返し質問を行うことで話題を継続する対話戦略が提案されている[28]．本研究では高齢者を対象にした従来の3者対話システムを拡張し，対話参与に積極的な高齢者に対応するための傾聴モードと対話参与に消極的な高齢者に対応するためのロボット協調対話モードを加え，高齢者の発言頻度に応じてシステムのモードを切り替える適応的対話継続システムの提案および効果の検証を行った．

高齢者が実際に生活する環境で動作するアプリケーションを実現するために，段階的に調査および開発を進めた．まず，ロボット協調対話モードに関して，人を傍参与者として扱うこと，すなわち人を対話へ参与させることの効果の検証を行った．従来提案されてきたロボット同士の協調対話を提示することにより情報を伝達するPassive Socialメディアとロボット同士の協調対話に人を参与させるSemi-passive Socialメディアを比較する実験を行い，人を対話に参与させることでより多くの客観的情報および主観的情報を伝達できることを確認した．Semi-passive Socialメディアは人の発言に応答する機能が必要であるためPassive Socialメディアに比べ実装のコストは高いが，対話への参与を促すことには高齢者に対話内容をより効率的に伝達する効果があることが分かった．

次に，本研究で提案する適応的対話継続システムを実装し，高齢者を対象に機

能の効果の検証を行った．適応的対話継続機能を搭載した対話システムと搭載していない対話システムを比較し，実装した機能により高齢者の発言が有意に長くなることを確認した．さらに実際の高齢者介護施設における実験において，提案したシステムは実験に参加した入居者の半数以上と30分以上対話を継続できることを確認した．この結果から，本研究で提案した2体のロボットによる対話戦略は高齢者と対話を継続するという観点で有効な手法であることが分かった．

最後に，提案システムの実用化に向けて利用するロボットの身体に関して検討を行った．物理ロボットと同じ見た目の仮想ロボットを用いた対話システムを実装し，物理ロボットを用いた対話システムとの比較を行った．その結果，ロボットが高齢者の発言を認識し文脈に沿った応答を行った場合，高齢者は物理ロボットに対して仮想ロボットよりも長く発言することが確認された．実用的なアプリケーションにおいて物理ロボットを用いることで安全性の確保や物理的故障の対応などを検討する必要が生じる．物理ロボットにはこうした導入コストがある一方で，本研究の結果は物理ロボットを利用する利点を示唆しており，またこの利点は今後ロボットの認識能力の向上に伴い，より明確になる可能性を示唆している．

高齢者との長時間の対話の実現はコミュニケーションロボットの分野において解決すべき重要な課題であり，本研究の成果は今後の高齢者向けアプリケーションの実装に対する貢献が期待できる．一方で，本研究では，提案システムが長い期間にわたり高齢者に使用された時パフォーマンスを維持できるかどうか，また高齢者の文化的背景が提案システムとの対話にどのような影響を及ぼすのかについては明らかになっていない．今後は，介護施設などにおいて様々な高齢者に数か月にわたって使用された場合を想定し，機能の拡充と効果の検証を行う必要がある．

# 謝辞

本研究を遂行し，博士学位論文をまとめるにあたり多くのご支援とご指導を賜りました，本学大学院基礎工学研究科教授　石黒浩先生に心から厚く御礼申し上げます．また，本研究を遂行するにあたり多大な時間をかけていただき，数多くのご助言とご教示・鞭撻を賜りました，本学大学院基礎工学研究准教授　吉川 雄一郎先生，同志社大学文化情報学部准教授　飯尾尊優先生に心から感謝申し上げます．本研究における議論・検討やシステム開発に当たり，ご教示・ご協力賜りましたNTTドコモ株式会社　礒田佳徳氏，千葉麻莉子氏，NTTメディアインテリジェンス研究所 浅見太一氏に深く感謝いたします．

本論文の審査過程において，数多くのご助言とご指導を賜りました，本学大学院基礎工学研究科教授 飯國洋二先生，同研究科教授 佐藤宏介先生に深謝申し上げます．石黒研究室の皆様には公私共々大変お世話になりました．特に，本学大学院基礎工学研究科　酒井和紀先生には研究の面で大変お世話になりました．実験と実験結果解析にご尽力くださった川嵜忍氏に感謝申し上げます．

最後に，私の研究生活を支えてくれた多くの先輩，友人，後輩，そして私の家族に心より感謝いたします．

なお，本研究の一部はJSPS科研費 JP19H05691，JST ERATO JPMJER1401の助成を受けたものです．

# 参考文献

[1] United Nations Department of Economic and Social, “World Population Ageing 2020.” 2020.

[2] 内閣府, “令和2年版高齢社会白書.” 2020.

[3] 内閣府, “高齢社会対策大綱.” 2018.

[4] R. Hacihasanoğlu, A. Yildirim, and P. Karakurt, “Loneliness in elderly individuals, level of dependence in activities of daily living (ADL) and influential factors,” *Archives of Gerontology and Geriatrics*, vol. 54, no. 1, pp. 61-66, Jan. 2012.

[5] J. Holt-Lunstad, T. B. Smith, M. Baker, T. Harris, and D. Stephenson, “Loneliness and Social Isolation as Risk Factors for Mortality,” *Perspectives on Psychological Science*, vol. 10, no. 2, pp. 227-237, Mar. 2015.

[6] K. Okamoto, “Feeling of Well-being and Family Contacts in Community Elderly Residents.,” *Nippon Ronen Igakkai Zasshi. Japanese Journal of Geriatrics*, vol. 37, no. 2, pp. 149-154, Feb. 2000.

[7] L. Fratiglioni, H.-X. Wang, K. Ericsson, M. Maytan, and B. Winblad, “Influence of social network on occurrence of dementia: a community-based longitudinal study,” *The Lancet*, vol. 355, no. 9212, pp. 1315-1319, Apr. 2000.

[8] M. CATTAN, M. WHITE, J. BOND, and A. LEARMOUTH, “Preventing social isolation and loneliness among older people: a systematic review of health promotion interventions,” *Ageing and Society*, vol. 25, no. 01, pp. 41-67, Jan. 2005.

[9] B. K. Haight, “The Therapeutic Role of a Structured Life Review Process in Homebound Elderly Subjects,” *Journal of Gerontology*, vol. 43, no. 2, pp. P40-P44, Mar. 1988.

[10] O. Zafrani and G. Nimrod, “Towards a Holistic Approach to Studying Human-Robot Interaction in Later Life,” *The Gerontologist*, vol. 59, no. 1, pp. e26-e36, Jan. 2019.

[11] S. Kopp, K. Cyra, F. Kummert, L. Schillingmann, M. Brandt, F. Freigang, C. Opfermann, C. Straßmann, R. Yaghoubzadeh, H. Buschmeier, N. Krämer, K. Pitsch, and E. Wall, “Conversational assistants for

elderly users: The importance of socially cooperative dialogue," in *Intelligent Conversation Agents in Home and Geriatric Care Applications: Proceedings of the AAMAS Workshop on Intelligent Conversation Agents in Home and Geriatric Care Applications*, 2018, vol. 2338, pp. 10-17.

[12] J. Pineau, M. Montemerlo, M. Pollack, N. Roy, and S. Thrun, "Towards robotic assistants in nursing homes: Challenges and results," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 271-281, Mar. 2003.

[13] H. Abdollahi, A. Mollahosseini, J. T. Lane, and M. H. Mahoor, "A pilot study on using an intelligent life-like robot as a companion for elderly individuals with dementia and depression," in *2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids)*, Nov. 2017, pp. 541-546.

[14] C. Pou-Prom, S. Raimondo, and F. Rudzicz, "A Conversational Robot for Older Adults with Alzheimer's Disease," *ACM Transactions on Human-Robot Interaction*, vol. 9, no. 3, pp. 1-25, Jul. 2020.

[15] E. Torta, F. Werner, D. O. Johnson, J. F. Juola, R. H. Cuijpers, M. Bazzani, J. Oberzaucher, J. Lemberger, H. Lewy, and J. Bregman, "Evaluation of a Small Socially-Assistive Humanoid Robot in Intelligent Homes for the Care of the Elderly," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 76, no. 1, pp. 57-71, Sep. 2014.

[16] H.-M. Gross, S. Mueller, C. Schroeter, M. Volkhardt, A. Scheidig, K. Debes, K. Richter, and N. Doering, "Robot companion for domestic health assistance: Implementation, test and case study under everyday conditions in private apartments," in *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Sep. 2015, vol. 2015-Decem, pp. 5992-5999.

[17] 厚生労働省, "介護ロボットの開発・普及の促進." https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000209634.html (accessed Jul. 24, 2021).

[18] V. Young and A. Mihailidis, "Difficulties in Automatic Speech Recognition of Dysarthric Speakers and Implications for Speech-Based Applications Used by the Elderly: A Literature Review," *Assistive*

*Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 99-112, Jun. 2010.

[19] L. Zhou, K. C. Fraser, and F. Rudzicz, "Speech Recognition in Alzheimer's Disease and in its Assessment," in *Interspeech 2016*, Sep. 2016, vol. 08-12-Sept, pp. 1948-1952.

[20] J. Pripfl, T. Kortner, D. Batko-Klein, D. Hebesberger, M. Weninger, C. Gisinger, S. Frennert, H. Eftring, M. Antona, I. Adami, A. Weiss, M. Bajones, and M. Vincze, "Results of a real world trial with a mobile social service robot for older adults," in *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Mar. 2016, vol. 2016-April, pp. 497-498.

[21] M. Kanoh, Y. Oida, Y. Nomura, A. Araki, Y. Konagaya, K. Ihara, T. Shimizu, and K. Kimura, "Examination of Practicability of Communication Robot-Assisted Activity Program for Elderly People," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 23, no. 1, pp. 3-12, Feb. 2011.

[22] B. Graf, M. Hans, and R. D. Schraft, "Care-O-bot II—Development of a Next Generation Robotic Home Assistant," *Autonomous Robots*, vol. 16, no. 2, pp. 193-205, Mar. 2004.

[23] M. E. Pollack, S. Engberg, J. T. Matthews, J. Dunbar-jacob, C. E. Mccarthy, and S. Thrun, "Pearl: A mobile robotic assistant for the elderly," 2002.

[24] D. Hebesberger, T. Koertner, C. Gisinger, and J. Pripfl, "A Long-Term Autonomous Robot at a Care Hospital: A Mixed Methods Study on Social Acceptance and Experiences of Staff and Older Adults," *International Journal of Social Robotics*, vol. 9, no. 3, pp. 417-429, Jun. 2017.

[25] S. Frennert, H. Eftring, and B. Östlund, "Case Report: Implications of Doing Research on Socially Assistive Robots in Real Homes," *International Journal of Social Robotics*, vol. 9, no. 3, pp. 401-415, Jun. 2017.

[26] M. M. A. de Graaf, S. Ben Allouch, and T. Klamer, "Sharing a life with Harvey: Exploring the acceptance of and relationship-building with a social robot," *Computers in Human Behavior*, vol. 43, pp. 1-14, Feb. 2015.

[27] T. Arimoto, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Multiple-Robot

Conversational Patterns for Concealing Incoherent Responses," *International Journal of Social Robotics*, vol. 10, no. 5, pp. 583-593, Nov. 2018.

[28] T. Iio, Y. Yoshikawa, M. Chiba, T. Asami, Y. Isoda, and H. Ishiguro, "Twin-Robot Dialogue System with Robustness against Speech Recognition Failure in Human-Robot Dialogue with Elderly People," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, p. 1522, Feb. 2020.

[29] S. J. Czaja and C. C. Lee, "The impact of aging on access to technology," *Universal Access in the Information Society*, vol. 5, no. 4, pp. 341-349, Mar. 2007.

[30] S. Frennert, H. Eftring, and B. Östlund, "What Older People Expect of Robots: A Mixed Methods Approach," in *G. Herrmann, M.J. Pearson, A. Lenz, P. Bremner, A. Spiers, U. Leonards (eds) Social Robotics. ICSR 2013*, vol. 8239, no. February, Springer, Cham, 2013, pp. 19-29.

[31] B. Bruno, N. Y. Chong, H. Kamide, S. Kanoria, J. Lee, Y. Lim, A. K. Pandey, C. Papadopoulos, I. Papadopoulos, F. Pecora, A. Saffiotti, and A. Sgorbissa, "The CARESSES EU-Japan Project: Making Assistive Robots Culturally Competent," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 540, 2019, pp. 151-169.

[32] A. Abou Allaban, M. Wang, and T. Padır, "A Systematic Review of Robotics Research in Support of In-Home Care for Older Adults," *Information*, vol. 11, no. 2, p. 75, Jan. 2020.

[33] E. Goffman, *Forms of talk*. University of Pennsylvania Press, 1981.

[34] H. H. Clark, *Using language*. Cambridge university press, 1996.

[35] Y. Kobayashi, D. Yamamoto, T. Tasaki, Y. Yamaji, and M. Doi, "高齢者向け対話インタフェース ― 病院スタッフ ・ 患者間の対話モデルを利用した音声対話ロボット ―," in *第26回人工知能学会全国大会*, 2012, pp. 4-7.

[36] K. Shitaoka, R. Tokuhisa, T. Yoshimura, H. Hoshino, and N. Watanabe, "Active Listening System for a Conversation Robot," *Journal of Natural Language Processing*, vol. 24, no. 1, pp. 3-47, 2017.

[37] S. Yokoyama, D. Yamamoto, Y. Kobayashi, and M. Doi, "高齢者向け対話インタフェース ― 雑談継続を目的とした 話題提示 ・ 傾聴の切替式対話法 ―," *研究報告音声言語情報処理（SLP）*, vol. 2010-SLP-8, no. 4, pp. 1-6, 2010.

[38] M. Pino, M. Boulay, F. Jouen, and A.-S. Rigaud, "'Are we ready for robots that care for us?' Attitudes and opinions of older adults toward socially assistive robots," *Frontiers in Aging Neuroscience*, vol. 7, p. 141, Jul. 2015.

[39] Y. Yoshiike, R. S. De Silva, and M. Okada, "MAWARI," in *Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction - HRI '11*, 2011, no. January, p. 293.

[40] N. Karatas, S. Yoshikawa, and M. Okada, "NAMIDA," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, Oct. 2016, pp. 35-42.

[41] D. Sakamoto, K. Hayashi, T. Kanda, M. Shiomi, S. Koizumi, H. Ishiguro, T. Ogasawara, and N. Hagita, "Humanoid Robots as a Broadcasting Communication Medium in Open Public Spaces," *International Journal of Social Robotics*, vol. 1, no. 2, pp. 157-169, Apr. 2009.

[42] K. Hayashi, D. Sakamoto, T. Kanda, M. Shiomi, S. Koizumi, H. Ishiguro, T. Ogasawara, and N. Hagita, "Humanoid robots as a passive-social medium," in *Proceeding of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction - HRI '07*, 2007, p. 137.

[43] K. Hayashi, T. Kanda, T. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita, "Robot manzai - robots' conversation as a passive social medium," in *5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2005.*, 2005, vol. 2005, no. May 2014, pp. 456-462.

[44] T. Iio, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Retaining Human-Robots Conversation: Comparing Single Robot to Multiple Robots in a Real Event," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 21, no. 4, pp. 675-685, Jul. 2017.

[45] T. Iio, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Pre-scheduled Turn-Taking between Robots to Make Conversation Coherent," in *Proceedings of the Fourth International Conference on Human Agent Interaction*, Oct. 2016, pp. 19-25.

[46] T. Arimoto, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Nodding responses by collective proxy robots for enhancing social telepresence," in *Proceedings of the second international conference on Human-agent interaction*, Oct. 2014, pp. 97-102.

[47] M. Shiomi, S. Okumura, M. Kimoto, T. Iio, and K. Shimohara, “Two is better than one: Social rewards from two agents enhance offline improvements in motor skills more than single agent,” *PLOS ONE*, vol. 15, no. 11, p. e0240622, Nov. 2020.

[48] E. Broadbent, R. Stafford, and B. MacDonald, “Acceptance of Healthcare Robots for the Older Population: Review and Future Directions,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 1, no. 4, pp. 319-330, Nov. 2009.

[49] R. Kachouie, S. Sedighadeli, R. Khosla, and M.-T. Chu, “Socially Assistive Robots in Elderly Care: A Mixed-Method Systematic Literature Review,” *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 30, no. 5, pp. 369-393, May 2014.

[50] J. Broekens, M. Heerink, and H. Rosendal, “Assistive social robots in elderly care: a review,” *Gerontechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 94-103, Apr. 2009.

[51] M. Shiomi, T. Iio, K. Kamei, C. Sharma, and N. Hagita, “Effectiveness of Social Behaviors for Autonomous Wheelchair Robot to Support Elderly People in Japan,” *PLOS ONE*, vol. 10, no. 5, p. e0128031, May 2015.

[52] H. Kazerooni, R. Steger, and L. Huang, “Hybrid Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX),” *The International Journal of Robotics Research*, vol. 25, no. 5-6, pp. 561-573, May 2006.

[53] H. Robinson, B. MacDonald, and E. Broadbent, “The Role of Healthcare Robots for Older People at Home: A Review,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 6, no. 4, pp. 575-591, Nov. 2014.

[54] T. Shibata and K. Wada, “Robot Therapy: A New Approach for Mental Healthcare of the Elderly - A Mini-Review,” *Gerontology*, vol. 57, no. 4, pp. 378-386, 2011.

[55] A. V. Libin and E. V. Libin, “Person-robot interactions from the robopsychologists’ point of view: the robotic psychology and robotherapy approach,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 11, pp. 1789-1803, Nov. 2004.

[56] A. H. Fine, *Handbook on animal-assisted therapy: Theoretical foundations and guidelines for practice*. academic press, 2010.

[57] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, and K. Tanie, “Effects of robot

assisted activity to elderly people who stay at a health service facility for the aged," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, 2003, vol. 3, no. October, pp. 2847-2852.

[58] K. . Wada and T. . Shibata, "Living With Seal Robots-Its Sociopsychological and Physiological Influences on the Elderly at a Care House," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 972-980, Oct. 2007.

[59] K. Wada, T. Shibata, T. Saito, K. Sakamoto, and K. Tanie, "Psychological and Social Effects of One Year Robot Assisted Activity on Elderly People at a Health Service Facility for the Aged," in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, vol. 3, no. April, pp. 2785-2790.

[60] T. Tamura, S. Yonemitsu, A. Itoh, D. Oikawa, A. Kawakami, Y. Higashi, T. Fujimooto, and K. Nakajima, "Is an Entertainment Robot Useful in the Care of Elderly People With Severe Dementia?," *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, vol. 59, no. 1, pp. M83-M85, Jan. 2004.

[61] M. Kanamori, M. Suzuki, and M. Tanaka, "Maintenance and Improvement of Quality of Life among Elderly Patients Using a Pet-Type Robot.," *Nippon Ronen Igakkai Zasshi. Japanese Journal of Geriatrics*, vol. 39, no. 2, pp. 214-218, 2002.

[62] M. R. Banks, L. M. Willoughby, and W. A. Banks, "Animal-Assisted Therapy and Loneliness in Nursing Homes: Use of Robotic versus Living Dogs," *Journal of the American Medical Directors Association*, vol. 9, no. 3, pp. 173-177, Mar. 2008.

[63] A. Libin and J. Cohen-Mansfield, "Therapeutic robocat for nursing home residents with dementia: Preliminary inquiry," *American Journal of Alzheimer's Disease & Other Dementiasr*, vol. 19, no. 2, pp. 111-116, Mar. 2004.

[64] R. Khosla, M.-T. Chu, R. Kachouie, K. Yamada, and T. Yamaguchi, "Embodying care in Matilda," in *Proceedings of the 2nd ACM SIGHIT symposium on International health informatics - IHI '12*, 2012, p. 295.

[65] M. Heerink, B. Kröse, V. Evers, and B. Wielinga, “Assessing Acceptance of Assistive Social Agent Technology by Older Adults: the Almere Model,” *International Journal of Social Robotics*, vol. 2, no. 4, pp. 361-375, Dec. 2010.

[66] D. Lala, P. Milhorat, K. Inoue, M. Ishida, K. Takanashi, and T. Kawahara, “Attentive listening system with backchanneling, response generation and flexible turn-taking,” in *Proceedings of the 18th Annual SIGdial Meeting on Discourse and Dialogue*, 2017, no. August, pp. 127-136.

[67] F. Cavallo, R. Limosani, A. Manzi, M. Bonaccorsi, R. Esposito, M. Di Rocco, F. Pecora, G. Teti, A. Saffiotti, and P. Dario, “Development of a Socially Believable Multi-Robot Solution from Town to Home,” *Cognitive Computation*, vol. 6, no. 4, pp. 954-967, Dec. 2014.

[68] N. Suzuki, Y. Takeuchi, K. Ishii, and M. Okada, “Talking Eye: Autonomous creatures for augmented chatting,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 171-184, May 2000.

[69] R. Mashimo, T. Umetani, T. Kitamura, and A. Nadamoto, “Human-robots implicit communication based on dialogue between robots using automatic generation of funny scenarios from web,” in *2016 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Mar. 2016, vol. 2016-April, pp. 327-334.

[70] I. Leite, M. McCoy, M. Lohani, D. Ullman, N. Salomons, C. Stokes, S. Rivers, and B. Scassellati, “Emotional Storytelling in the Classroom,” in *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Mar. 2015, vol. 2015-March, pp. 75-82.

[71] X. Z. Tan, S. Reig, E. J. Carter, and A. Steinfeld, “From One to Another: How Robot-Robot Interaction Affects Users’ Perceptions Following a Transition Between Robots,” in *2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI)*, Mar. 2019, vol. 2019-March, pp. 114-122.

[72] T. Kanda, H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, and R. Nakatsu, “Effects of observation of robot-robot communication on human-robot communication,” *Electronics and Communications in Japan (Part III:*

*Fundamental Electronic Science)*, vol. 87, no. 5, pp. 48-58, May 2004.

[73] K. Kadowaki, K. Kobayashi, and Y. Kitamura, "Influence of Social Relationships on Multiagent Persuasion," in *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 3*, 2008, pp. 1221-1224.

[74] A. Khalifa, T. Kato, and S. Yamamoto, "Joining-in-type Humanoid Robot Assisted Language Learning System," in *Proceedings of the Tenth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC' 16)*, 2016, pp. 245-249.

[75] R. Nishimura, Y. Todo, K. Yamamoto, and S. Nakagawa, "Chat-like Spoken Dialog System for a Multi-party Dialog Incorporating Two Agents and a User," in *The 1st International Conference on Human-Agent Interaction (iHAI 2013)*, 2013, pp. 1-8.

[76] J. Nakanishi, I. Kuramoto, J. Baba, K. Ogawa, Y. Yoshikawa, and H. Ishiguro, "Continuous Hospitality with Social Robots at a hotel," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, p. 452, Mar. 2020.

[77] M. R. Fraune, S. Sherrin, S. Sabanović, and E. R. Smith, "Rabble of Robots Effects," in *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Mar. 2015, pp. 109-116.

[78] T. Ziemke, "Are Robots Embodied?," in *the First international Workshop on Epigenetic Robotics: Modeling Cognitive Development in Robotic Systems*, 2001, vol. 85, pp. 75-93.

[79] I. R. Nourbakhsh, C. Kunz, and T. Willeke, "The mobot museum robot installations: a five year experiment," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, 2003, vol. 3, no. October, pp. 3636-3641.

[80] M. Montemerlo, J. Pineau, N. Roy, S. Thrun, and V. Verma, "Experiences with a Mobile Robotic Guide for the Elderly," in *Eighteenth National Conference on Artificial Intelligence*, 2002, pp. 587-592.

[81] D. Fischinger, P. Einramhof, K. Papoutsakis, W. Wohlkinger, P. Mayer, P. Panek, S. Hofmann, T. Koertner, A. Weiss, A. Argyros, and M. Vincze, "Hobbit, a care robot supporting independent living at home:

First prototype and lessons learned," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 60-78, Jan. 2016.

[82] C. D. Kidd and C. Breazeal, "Effect of a robot on user perceptions," in *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, 2004, vol. 4, pp. 3559-3564.

[83] J. Li, "The benefit of being physically present: A survey of experimental works comparing copresent robots, telepresent robots and virtual agents," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 77, pp. 23-37, May 2015.

[84] T. Holz, M. Dragone, and G. M. P. O'Hare, "Where Robots and Virtual Agents Meet," *International Journal of Social Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 83-93, Jan. 2009.

[85] A. Martin, G. M. P. O'Hare, B. R. Duffy, B. Schön, and J. F. Bradley, "Maintaining the Identity of Dynamically Embodied Agents," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 3661 LNAI, 2005, pp. 454-465.

[86] W. L. Johnson and J. Rickel, "Steve," *ACM SIGART Bulletin*, vol. 8, no. 1-4, pp. 16-21, Dec. 1997.

[87] S. Kopp, L. Gesellensetter, N. C. Krämer, and I. Wachsmuth, "A Conversational Agent as Museum Guide - Design and Evaluation of a Real-World Application," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 3661 LNAI, 2005, pp. 329-343.

[88] E. Deng, B. Mutlu, and M. J. Mataric, "Embodiment in Socially Interactive Robots," *Foundations and Trends in Robotics*, vol. 7, no. 4, pp. 251-356, 2019.

[89] A. Pereira, C. Martinho, I. Leite, and A. Paiva, "ICat, the Chess Player: The Influence of Embodiment in the Enjoyment of a Game," in *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 3*, 2008, pp. 1253-1256.

[90] I. Leite, A. Pereira, C. Martinho, and A. Paiva, "Are emotional robots more fun to play with?," in *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*,

Aug. 2008, pp. 77-82.

[91] J. Wainer, D. J. Feil-Seifer, D. A. Shell, and M. J. Mataric, "Embodiment and Human-Robot Interaction: A Task-Based Perspective," in *RO-MAN 2007 - The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2007, no. September, pp. 872-877.

[92] S. Costa, A. Brunete, B.-C. Bae, and N. Mavridis, "Emotional Storytelling Using Virtual and Robotic Agents," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 15, no. 03, p. 1850006, Jun. 2018.

[93] J. Li, R. Kizilcec, J. Bailenson, and W. Ju, "Social robots and virtual agents as lecturers for video instruction," *Computers in Human Behavior*, vol. 55, pp. 1222-1230, Feb. 2016.

[94] K. M. Lee, Y. Jung, J. Kim, and S. R. Kim, "Are physically embodied social agents better than disembodied social agents?: The effects of physical embodiment, tactile interaction, and people's loneliness in human-robot interaction," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 64, no. 10, pp. 962-973, Oct. 2006.

[95] L. Hoffmann and N. C. Krämer, "Investigating the effects of physical and virtual embodiment in task-oriented and conversational contexts," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 71, no. 7-8, pp. 763-774, Jul. 2013.

[96] S. Kiesler, A. Powers, S. R. Fussell, and C. Torrey, "Anthropomorphic Interactions with a Robot and Robot-like Agent," *Social Cognition*, vol. 26, no. 2, pp. 169-181, Apr. 2008.

[97] J. Fasola and M. Mataric, "A Socially Assistive Robot Exercise Coach for the Elderly," *Journal of Human-Robot Interaction*, vol. 2, no. 2, pp. 3-32, Jun. 2013.

[98] A. Tapus, C. Tapus, and M. Mataric, "The role of physical embodiment of a therapist robot for individuals with cognitive impairments," in *RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Sep. 2009, pp. 103-107.

[99] R. Looije, M. A. Neerincx, and F. Cnossen, "Persuasive robotic assistant for health self-management of older adults: Design and evaluation of social behaviors," *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 68, no. 6, pp. 386-397, Jun. 2010.

[100] N. Mavridis, “A review of verbal and non-verbal human-robot interactive communication,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 63, pp. 22-35, Jan. 2015.

[101] T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, “A survey of socially interactive robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143-166, Mar. 2003.

[102] M. Shiomi, T. Kanda, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Interactive humanoid robots for a science museum,” in *Proceeding of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction - HRI ’06*, 2006, vol. 22, no. 2, p. 305.

[103] T. Kanda, M. Shiomi, Z. Miyashita, H. Ishiguro, and N. Hagita, “An affective guide robot in a shopping mall,” in *Proceedings of the 4th ACM/IEEE international conference on Human robot interaction - HRI ’09*, 2009, p. 173.

[104] D. Sakamoto, T. Kanda, T. Ono, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Android as a telecommunication medium with a human-like presence,” in *Proceeding of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction - HRI ’07*, 2007, no. MARCH, p. 193.

[105] N. Koyama, K. Tanaka, K. Ogawa, and H. Ishiguro, “Emotional or Social?,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction*, Oct. 2017, pp. 203-211.

[106] M. Watanabe, K. Ogawa, and H. Ishiguro, “Can Androids Be Salespeople in the Real World?,” in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Apr. 2015, vol. 2, no. April, pp. 781-788.

[107] C. T. Ishi, C. Liu, H. Ishiguro, and N. Hagita, “Evaluation of formant-based lip motion generation in tele-operated humanoid robots,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2012, pp. 2377-2382.

[108] 三島徳雄，徳井教孝，福本弘子，石川恵，広永悦子，新小田春美，山下満枝，and 三島みどり，看護に活かす積極的傾聴法—こころが通い合うコミュニケーションをめざして．メディカ出版，1999.

[109] C. R. Rogers and C. R. Rogers, “A THEORY OF THERAPY , PERSONALITY , AND INTERPERSONAL RELATIONSHIPS , AS DEVELOPED IN THE CLIENT-CENTERED

FRAMEWORK CLIENT-CENTERED FRAMEWORK," 1959.

[110] R. Higashinaka, K. Imamura, T. Meguro, C. Miyazaki, N. Kobayashi, H. Sugiyama, T. Hirano, T. Makino, and Y. Matsuo, "Towards an open-domain conversational system fully based on natural language processing," in *Proceedings of COLING 2014, the 25th International Conference on Computational Linguistics: Technical Papers*, 2014, pp. 928-939.

[111] K. Sakai, R. Higashinaka, Y. Yoshikawa, H. Ishiguro, and J. Tomita, "Introduction method for argumentative dialogue using paired question-answering interchange about personality," in *Proceedings of the 19th Annual SIGdial Meeting on Discourse and Dialogue*, 2018, no. July, pp. 70-79.

[112] Y. Den, H. Koiso, K. Takanashi, and N. Yoshida, "Annotation of response tokens and their triggering expressions in Japanese multi-party conversations," in *Proceedings of the Eighth International Conference on Language Resources and Evaluation, LREC 2012*, 2012, pp. 1332-1337.

[113] L. Clark, N. Pantidi, O. Cooney, P. Doyle, D. Garaialde, J. Edwards, B. Spillane, E. Gilmartin, C. Murad, C. Munteanu, V. Wade, and B. R. Cowan, "What Makes a Good Conversation?," in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, May 2019, pp. 1-12.

[114] A. Aron, E. N. Aron, and D. Smollan, "Inclusion of Other in the Self Scale and the structure of interpersonal closeness.," *Journal of Personality and Social Psychology*, vol. 63, no. 4, pp. 596-612, 1992.

[115] B. Mutlu, S. Osman, J. Forlizzi, J. Hodgins, and S. Kiesler, "Task Structure and User Attributes as Elements of Human-Robot Interaction Design," in *ROMAN 2006 - The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Sep. 2006, no. May 2014, pp. 74-79.

[116] H. Cramer, N. Kemper, A. Amin, B. Wielinga, and V. Evers, "'Give me a hug': the effects of touch and autonomy on people's responses to embodied social agents," *Computer Animation and Virtual Worlds*, vol. 20, no. 2-3, pp. 437-445, Jun. 2009.

[117] M. Vázquez, E. J. Carter, B. McDorman, J. Forlizzi, A. Steinfeld, and S. E. Hudson, "Towards Robot Autonomy in Group Conversations," in *Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Mar. 2017, vol. Part F1271, pp. 42-52.

[118] M. Heerink, B. J. Kröse, B. Wielinga, and V. Evers, "Measuring the influence of social abilities on acceptance of an interface robot and a screen agent by elderly users," in *People and Computers XXIII Celebrating People and Technology - Proceedings of HCI 2009*, Sep. 2009, pp. 430-439.

[119] C. McCabe, "Nurse-patient communication: an exploration of patients' experiences," *Journal of Clinical Nursing*, vol. 13, no. 1, pp. 41-49, Jan. 2004.

[120] W. M. C. M. Caris‐Verhallen, A. Kerkstra, and J. M. Bensing, "The role of communications in nursing care for elderly people: a review of the literature," *Journal of Advanced Nursing*, vol. 25, no. 5, pp. 915-933, May 1997.

[121] S. Roller, Y.-L. Boureau, J. Weston, A. Bordes, E. Dinan, A. Fan, D. Gunning, D. Ju, M. Li, S. Poff, P. Ringshia, K. Shuster, E. M. Smith, A. Szlam, J. Urbanek, and M. Williamson, "Open-Domain Conversational Agents: Current Progress, Open Problems, and Future Directions," *CoRR*, vol. abs/2006.1, Jun. 2020.

[122] C. Hori, J. Perez, R. Higashinaka, T. Hori, Y.-L. Boureau, M. Inaba, Y. Tsunomori, T. Takahashi, K. Yoshino, and S. Kim, "Overview of the sixth dialog system technology challenge: DSTC6," *Computer Speech & Language*, vol. 55, pp. 1-25, May 2019.

[123] B. Bruno, N. Y. Chong, H. Kamide, S. Kanoria, J. Lee, Y. Lim, A. K. Pandey, C. Papadopoulos, I. Papadopoulos, F. Pecora, A. Saffiotti, and A. Sgorbissa, "Paving the way for culturally competent robots: A position paper," in *2017 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Aug. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 553-560.

[124] B. Bruno, C. T. Recchiuto, I. Papadopoulos, A. Saffiotti, C. Koulouglioti, R. Menicatti, F. Mastrogiovanni, R. Zaccaria, and A. Sgorbissa, "Knowledge Representation for Culturally Competent

Personal Robots: Requirements, Design Principles, Implementation, and Assessment," *International Journal of Social Robotics*, vol. 11, no. 3, pp. 515-538, Jun. 2019.

[125] S. Andrist, M. Ziadee, H. Boukaram, B. Mutlu, and M. Sakr, "Effects of Culture on the Credibility of Robot Speech," in *Proceedings of the Tenth Annual ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, Mar. 2015, pp. 157-164.

[126] V. Evers, H. C. Maldonado, T. L. Brodecki, and P. J. Hinds, "Relational vs. group self-construal," in *Proceedings of the 3rd international conference on Human robot interaction - HRI '08*, 2008, p. 255.

# 業績

## 電子ジャーナル

1) T. Nishio, Y. Yoshikawa, K. Ogawa, and H. Ishiguro, “Development of an Effective Information Media Using Two Android Robots,” Applied Sciences, vol. 9, no. 17, p. 3442, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9173442.
2) T. Nishio, Y. Yoshikawa, K. Sakai, T. Iio, M. Chiba, T. Asami, Y. Isoda, and H. Ishiguro, “The Effects of Physically Embodied Multiple Conversation Robots on the Elderly,” Frontiers in Robotics and AI, vol. 8, no. March, p. 61, Mar. 2021, doi: 10.3389/frobt.2021.633045.
3) T. Nishio, Y. Yoshikawa, T. Iio, M. Chiba, T. Asami, Y. Isoda, and H. Ishiguro, “Actively listening twin robots for long-duration conversation with the elderly,” ROBOMECH Journal, vol. 8, no. 1, p. 18, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40648-021-00205-5.