

博士論文

対話メディアとしての人型ロボットにおける
インタラクションデザインに関する研究

公立はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科
システム情報科学専攻

坂本 大介

2008年3月

Doctoral Thesis

A Study on Interaction Design for Humanoid Robots as a
Communication Medium

by

Daisuke SAKAMOTO

Graduate School of Systems Information Science
Future University - Hakodate
March 2008

Abstract— This thesis presents humanoid robot systems which aim to communicate with humans, which I have developed for use in investigation of human-robot interaction design.

Many studies about interactions between humans and artifacts have been conducted in the field of human-computer interaction. However, I consider that humanlike behaviors rather than other artifacts are needed for humanoid robots with humanlike appearance. This research aims to contribute to the development of a humanoid robot system which will be most adaptive interactive system to humans by investigating of interaction design between humans and robots.

There are two main research problems which need to be addressed. The first is development of a teleoperated semi-autonomous robot system which can interact with humans, and the second is the design and evaluation of interactions between humans and the robot system.

Regarding the first problem, I propose a model for a teleoperated semi-autonomous robot system to be developed as a tool for human robot interaction research. Although a wide variety of robot systems has become available, the task of natural conversation is beyond the capabilities of any of these systems. If the robot systems used in human-robot interaction research experiments are unable to effectively engage in high-level conversation with humans, the experimental results will not be able to contribute to future communication robot research. I propose a model of a robot system that addresses this problem. The key principle of this system is its partial autonomy; the operator does not directly specify all of the robot's behaviors and actions. When the robot is able to solve a problem by itself, it does so autonomously. However, modern autonomous dialogue systems have great difficulty in processing natural conversation. My system addresses this problem by delegating the conversation part of the robot's interactions to a remote operator, while handling other functions autonomously. Thus I describe this system as a "teleoperated, semi-autonomous robot system."

Next, I conducted three studies addressing the second problem, that is, the design and evaluation of human robot interaction dynamics employing my proposed robot system. This study is presented in three research areas: "embodied communication," "social attitudes" and "the robot as a telecommunication medium".

The first study was about "embodied communication," based on the principle that users will expect humanlike behavior from a robot with a humanlike appearance. In this study, I conducted an experiment to verify the effectiveness of embodied behaviors of a robot, that is, humanlike joint movements generated by exactly reproducing the body motions of a subject. The robot was remotely controlled by switching its behaviors. Experimental results confirmed that these embodied behaviors evoked emotional responses in the subjects, who felt more comfortable with the naturalness of the interactions.

Another important element of human robot interaction is the expression of "social attitudes." For this reason I conducted an experiment to verify the effect of a robot expressing different attitudes in robot-mediated communication between two humans. Experimental results confirmed that the robot's attitudes had an effect on the impressions the subjects formed of each other.

As robot systems continue to improve, humanoid robots will attain the capacity for humanlike communication in the near future. It will be possible to develop robots which mimic a person's outward appearance as well as personality and mannerisms. As described above, the influence of the robot as a medium was demonstrated in human robot interaction. We need to consider the implications of these findings for communication with highly realistic and individualized humanoid robots in the future.

Finally, I conducted experiments to investigate the effects of a humanlike android robot. An experimenter communicated with two humans through the android. This means the subjects who faced the android were communicating with a robot which had the same level of conversation ability as humans. Experimental results confirmed that users felt the presence of the experimenter

more strongly when he talked through the android than when he appeared on a video monitor in a video conference system.

These studies show the effectiveness of embodied communication in robots and the importance of the social attitudes of robots. Furthermore, the ability of robots to serve as a communication medium was demonstrated through an experiment that is with the ultimate android robot.

Thus my research has demonstrated a fundamental element of the interaction design of humanoid robots.

Keywords: Human Robot Interaction, Interaction Design, Teleoperated Semi-autonomous Robot System, Embodied Communication, Sociability of Robots, Telepresence

概要: 本論文では、人と対話することを目的とした人型ロボットシステムの開発を行い、これを用いた人と人型ロボットとの相互作用 (Human Robot Interaction) におけるインタラクションデザイン (Interaction Design) に関する研究について述べる。

これまでに、コンピュータとの対話的操作 (Human Computer Interaction) などに関する研究を通して人と人工物の相互作用に関する研究は数々行われてきた。しかし、人に近い身体を持った人型ロボットという人工物においては、これまでの人工物以上に人に近い対話が求められることが考えられる。なぜなら、人に近い外見をした人型ロボットに対して、人は人のような対話が可能であると認識してしまうためである。本研究では人と人型ロボットの対話における機構を解明することによって、最も人に適応したインタラクティブシステムとしての人型ロボットのインタラクション設計に貢献することを目的とする。

これを行うためには2つの解決すべき研究課題がある。1つは人と対話を行うことを目的としたロボットシステムの開発。もう1つは開発したロボットシステムと人とのインタラクションデザインの実装と評価を行う研究がある。これらの課題は相互に関連した研究内容を含んでいる。

筆者はまず、解決すべき一つめの研究として、半自律遠隔操作型ロボットシステムの開発に関する研究を行った。これまでに様々なロボットシステムが開発されてきたが、高度な自由対話を行うことができるロボットシステムの実現にはいまだ至っていない。しかし、人-ロボット間相互作用研究においては、ロボットの高い対話能力が必要とされる。なぜなら、不完全な対話能力を有するロボットとの対話実験の結果が、将来の研究にどの程度貢献することができるのかについて多くの疑問が残るためである。このため、本研究では高度な自由対話を行う部分を人が担当し、その他のロボット自身で行動できる部分、具体的には単純な反射や簡単な行動単位を自律的に振る舞うことで、人と自由な対話を行うことができるシステムを開発する。これにより、ロボットは高度な対話に必要な知能を人に委譲することができ、人に近い自然な対話が実現されることが期待される。本研究ではこれを半自律遠隔操作型ロボットシステムと呼ぶ。

ここで開発したシステムを用いて、2つ目の研究課題である人と人型ロボットシステムの相互作用の機構解明に関する研究を行った。本研究課題には3つの解決すべき基礎例題が含まれる。これらには、人型ロボットの身体が人とのコミュニケーションに与える影響の解明、人型ロボットの社会的態度が人間関係に与える影響の解明、人型ロボットとの対話の根源的な影響の解明という基礎例題がある。

筆者はまず、解決すべき1つめの基礎例題として、人に近い身体を持った存在であるからこそ期待される「身体性コミュニケーション」についての研究を行った。本研究では、ロボットが対話者に対して協調的、つまり、同期的な身体動作を行うことによって、どのような影響があるのかを確認するための実験を行った。本実験で用いるロボットシステムは3次元モーションキャプチャシステムから得られる人の身体動作をロボット上で再現する。これを遠隔操作によって対話の文脈に沿うように身体動作を行わせることで、人と同期的な身体動作と発話を実現する。この実験の結果、ロボットの協調的な身体動作が、対話者の感情的側面に良い影響を与えることが明らかとなった。

人とロボットの対話機構には身体動作だけでなく、その発話内容やそれに付随する「社会的態度」も重要な要素となることが考えられる。このため、次に私はロボットを含む3者対話における、ロボットの態度が与える社会的影響の解明を行うための実験を行った。本実験ではロボット1台が、被験者2人と対話する。この際、ロボットが2人の被験者に対して平等に良い印象を与える態度をとるか、1人だけに対して良い印象を与える態度をとるかによって、被験者間の印象にどのような変化が起きるかについて調べる。本実験においてもロボットは遠隔操作によって社会的態度を変化させる。この実験の結果から、ロボットの発話内容や振る舞いが人間関係の印象形成に影響を与えることが確認された。

人型ロボットの自律対話機能が進化するにつれ、いずれは人と同等の対話能力を持った人型ロボットが登場することが考えられる。さらには、ある人の外見だけではなく、人格すら同等のロボットが登場するかもしれない。上述2つの研究によって、人とロボットの対話における、ロボットの強い影響力について明らかになった。これらの研究から、将来の究極的な人型ロボットと人が対話することの意味について深く考える必要があることがわかる。

このため、次に筆者は「人型ロボットとの対話の根源的な影響の解明」を行うための研究として、人の外見に酷似した人型ロボットであるアンドロイドロボットを用いた対話実験を行った。本実験では人がアンドロイドを通して、アンドロイドの前にいる人と対話を行う。これはつまり、ロボットと対話する人にとっては、人と同等の対話能力を持ったロボットと対話することとなる。実験ではこのような人と同じ対話能力を持ったロボットとの対話は、人にとってどのような影響があるのかの解明を行った。本実験の結果から、アンドロイドロボットを通じた対話は、他のメディア、具体的には現在の遠隔コミュニケーションの手段として用いられているテレビ電話や電話よりも、存在感を有し、自然な対話を行うことができる優れたメディアであることが確認された。さらに、人に酷似したアンドロイドロボットと対話をする人にとって、他の人工物との対話のなかでも、より人同士の対話に近いものであると感じることが確認された。

以上3つの基礎研究から、人とロボットの対話におけるロボットの身体動作の影響だけではなく、ロボットの社会的態度の重要性について明らかになった。さらに、近未来の究極的な人型ロボットを想定した対話実験を通して、ロボットの対話メディアとしての影響力についても明らかとなった。

これらの結果から、本研究はロボット共存社会における人々にとっての新しい他者としての人型ロボットのインタラクションデザインの基本要素を明らかにすることができたと考えている。

キーワード： 人-ロボット間相互作用, インタラクションデザイン, 半自律遠隔操作型ロボットシステム, 身体性コミュニケーション, ロボットの社会性, 遠隔存在感メディア

目次

第1章	序論	1
1.1	本論文の目的	2
1.1.1	人型ロボットにおけるインタラクティブデザイン	2
1.1.2	構成論的手法	3
1.1.3	遠隔操作型ロボットシステム	3
1.2	システム情報科学における本研究の位置付け	4
1.3	本論文の構成	5
第2章	従来研究	7
2.1	インタラクティブシステム	7
2.1.1	コンピュータ上のインタラクティブシステム	7
2.1.2	ソフトウェアエージェントとのインタラクティブシステム	10
2.1.3	ロボットとのインタラクティブシステム	12
2.2	インタラクティブデザイン	13
2.2.1	インタラクティブの価値	14
2.2.2	ロボットとのインタラクティブデザイン	14
2.2.3	関係性のデザイン	15
2.3	身体性コミュニケーション	16
2.3.1	ロボットにおける身体動作	17
2.3.2	エンタテインメント	18
2.3.3	共創対話	18
2.4	メディアの社会性	20
2.4.1	社会心理学	20
2.4.2	社会的なエージェントに関する研究	22
2.4.3	社会的なロボットに関する研究	24
2.5	遠隔コミュニケーションメディア	25
2.5.1	これまでの対話メディアとその特性	26
2.5.2	ロボットを用いた遠隔コミュニケーション	28
2.5.3	認知的存在感と身体的存在感	28
2.6	本研究でのアプローチ	31
2.6.1	身体性インタラクティブシステム	31
2.6.2	半自律遠隔操作型ロボットシステム	32
2.6.3	人型ロボットとのインタラクティブの影響評価	32
2.7	本章のまとめ	33

第3章	半自律遠隔操作型ロボットシステム	34
3.1	半自律ロボットシステム	35
3.1.1	従来の人-ロボット間相互作用研究におけるロボットシステム	35
3.1.2	提案するモデル	35
3.2	遠隔操作システム	36
3.2.1	人型ロボットの遠隔操作	37
3.2.2	実現するシステム	37
3.2.3	遠隔操作インタフェース	38
3.3	各章でのロボットシステムの役割	38
3.3.1	身体性コミュニケーションを実現するシステム	38
3.3.2	自動的に社会的態度を変化させるシステム	38
3.3.3	アンドロイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションシステム	39
3.4	本章のまとめ	39
第4章	人と人型ロボットの身体性コミュニケーション	40
4.1	協調的身体動作をするロボットシステム	41
4.1.1	コミュニケーションロボット “Robovie II”	41
4.1.2	モーションキャプチャシステムを用いた協調動作の実現	42
4.1.3	遠隔操作による Communicative Unit 切替え	47
4.2	評価実験	47
4.2.1	実験目的	47
4.2.2	実験方法	48
4.2.3	実験の仮説と予測	50
4.2.4	実験結果	51
4.3	考察	55
4.3.1	質問紙分析についての考察	56
4.3.2	身体動作分析についての考察	56
4.4	本章のまとめ	56
第5章	人型ロボットの適切な社会的態度	58
5.1	実験目的と方法	59
5.1.1	バランス理論	59
5.1.2	実験条件	60
5.1.3	実験のシナリオ	61
5.2	実験で使用するロボットとシステム	62
5.2.1	コミュニケーションロボット “Robovie-R ver.2”	62
5.2.2	ロボットシステム	63
5.2.3	モーションキャプチャシステム	65
5.3	予備実験: ロボットとの2者対話実験	66
5.3.1	被験者	66
5.3.2	実験環境	67
5.3.3	実験手順	67

5.3.4	評価方法	68
5.3.5	実験の仮説と予測	68
5.3.6	実験結果	68
5.4	本実験: ロボットを交えた3者対話実験	72
5.4.1	被験者	72
5.4.2	実験環境	72
5.4.3	実験手順	74
5.4.4	評価方法	74
5.4.5	実験の仮説と予測	74
5.4.6	実験結果	75
5.5	考察	87
5.5.1	質問紙分析の考察	89
5.5.2	身体動作分析の考察	89
5.5.3	実験全体の考察	90
5.6	本章のまとめ	91
第6章	遠隔コミュニケーションメディアとしてのアンドロイドロボットの可能性	92
6.1	アンドロイドを用いた遠隔操作型ロボットシステム	93
6.1.1	Geminoid HI-1	93
6.1.2	Behavior Controller	94
6.1.3	遠隔操作システム	97
6.2	実験	98
6.2.1	手法	98
6.2.2	評価方法	100
6.2.3	仮説と予測	101
6.2.4	実験結果	102
6.3	考察	102
6.3.1	遠隔存在感	103
6.3.2	不気味さ	104
6.3.3	アイコンタクト	104
6.3.4	アンドロイド・サイエンス	105
6.3.5	得られた結果の一般性	105
6.4	本章のまとめ	105
第7章	総合的な議論	107
7.1	身体性インタラクティブシステムとしての人型ロボットの可能性	107
7.1.1	人型ロボットにおけるインタラクションデザイン	107
7.1.2	対話メディアとしての人型ロボットの有効性	108
7.1.3	身体的存在感の影響	109
7.2	遠隔操作型ロボットシステムを用いた対話実験の有効性	110
7.3	人型ロボットの実在感とインタラクション	111
7.3.1	人型ロボットである意味	111

7.3.2	対話可能な他者としての人型ロボット	112
7.3.3	本研究の限界と適用範囲	113
7.4	本研究の今後の方向性	114
7.4.1	空間のロボット化と観念論的ロボティクス	114
7.4.2	ソフトウェア中心のロボット工学	115
7.4.3	関係性としてのインタラクションデザイン	116
7.5	システム情報科学における本研究の意義	117
第8章	結言	119
付録A	研究業績リスト	129
付録B	ロボットの発話内容リスト	134

第1章 序論

現代社会に存在する人工物の中でも特に知的なものをロボットと呼ぶ。この中でも、人に近い身体を持ったロボットである人型ロボットは今後社会に大きく普及して行くことが予想される。なぜなら、人の認識器は人を認識するためにあり、人に近い身体を持った人工物であれば、ユーザはマニュアル無しでも使うことができると考えられるためである。この点において人型ロボットは究極のユーザ・インタフェースであり、インタラクティブシステムである。さらに、人型ロボットはこれまでの情報機器を超えた新しいメディアとして、我々の生活をより豊かにすることが可能な存在であるだろう。しかし、現在のロボット技術は依然として人と豊かな対話を行うことができない。

私はこの中でも人とロボットとのインタラクションデザイン (Interaction Design) の研究について取り組んで来た。これまでも人と機械とのインタラクションについて人とコンピュータとの対話的操作 (Human Computer Interaction) に関する研究の分野で研究が進められてきている。近年になって身体を持ったコンピュータともいえるロボットとの相互作用 (Human Robot Interaction) に関する研究も盛んに行われるようになってきた。

一般的にはロボットはまるで人間のような外見を持ったアンドロイドロボットや、人に近い身体機構を持った人型ロボットであると考えられている。しかし、ロボットはその形態や外見によらず、外界を知覚するための入力機構と、外界に働きかけるための出力機構を持っている自動機械であると言える。現在では我々の目の届かない場所で活動する特殊な形態を持つロボットも存在し、ほとんど実体を伴わないロボットも存在する。この点において、ユビキタス (Ubiquitous) やパーベイシブ (Pervasive) ・コンピューティング環境はコンピュータだけではなく、センサネットワークなどを活用し、その環境に適応したかたちでユーザと対話を行う点においてある種のロボット環境であるとも言える。このように様々な形態で存在するロボットの中でも、特に私は人に近い身体を持った人型ロボットに注目した。

人型ロボットはその身体性と外見から、人に対して人と同じような対話を行うことが可能であるかのような期待を抱かせる。しかし、人対人の対話の機構が完全に明らかになっていない現在、人型ロボットにどのような対話機構を設計・実装するべきかについての指針の多くが明らかになっていない。さらに、人型ロボットは人工物であり機械である。この機械に対して人がどのような対話を試みるかについて、また、どのような影響があるかについても多くの部分が明らかになっていない。

本研究ではロボット共存社会において、人と多くの関わりをもち、我々の社会に進出して来るであろうロボットと人との対話の機構の解明を行うことを目的とする。特に、人型ロボットの身体や、社会における人に対する態度の影響など、認知心理学的な側面における影響評価の研究を行う。さらに、人型ロボットと人の対話において、人型ロボットはどこまで人に近い対話を実現することができるのかに注目し、前述した要素を組み込んだア

アンドロイドロボットを用いた対話実験を通して、人にとって究極的に人らしい人工物との対話の実現の可能性を探る研究を行う。

1.1 本論文の目的

人とロボットとの相互作用の影響を解明する取り組みを一般的に人-ロボット間相互作用 (Human Robot Interaction) 研究と呼ぶ。これまでも人とコンピュータ上のエージェントとの相互作用を行う研究 (Human Agent Interaction) や、人とコンピュータとの対話的操作に関する研究 (Human Computer Interaction) などが行われてきている。ロボットは身体を持ったコンピュータである点において、この両者の最大の違いはその身体性にあるといえる。本論文ではこの物理的身体を持ったロボット、特に人型ロボットと人とのインタラクションデザインに関する研究を行う。これはつまり、インタラクションとはその言葉 (Inter-action) が示すように、相互の (Inter-) 行動・行為 (action) であると言える。本論文ではインタラクションを相互の行動、すなわち相互作用と考え、これの人型ロボット上での設計 (Design) と評価に関する研究を行う。

相互作用 (Interaction) は情報の交換を行う試みであると考えられるが、対話 (Dialogue, Communication) は情報を生み出す試みであると考えられる。人とコンピュータの相互作用に関する研究では主に如何にしてコンピュータに対して早的確に情報の入出力を行えるかに注目しており、現在の人とロボットの相互作用研究においてもこの傾向は有るように思われる。しかし、人と共に存在し、生活することを最終目標として開発される人型ロボットにおいては、さらに進んだ対話というものが求められる。

本論文では社会の要求に伴って我々の生活に浸透する人型ロボットと人とのインタラクションデザインとその影響評価を行うことで、人とロボットとの良い関係を築くための基礎研究を行うことを目的としている。以下に本論文で行う研究の詳細と用いる手法、考え方についてそれぞれ示す。

1.1.1 人型ロボットにおけるインタラクションデザイン

これまでに様々なロボットと人との相互作用に関する研究が行われてきている。このなかでも、本論文では人型ロボットの身体性や態度の人への影響について興味を持っている。さらには、これらの要素を統合したインタラクティブシステムとしての人型ロボットの可能性にも興味を持っている。

本論文ではまず、人型ロボットが有する身体に注目し、これを活用した身体性コミュニケーションに関する研究を行う。これにより人との身体を活用した対話の機構の解明を目指す。次に、人との対話においては身体だけではなく社会的な態度も重要な要素となりえる。このため、複数人との対話の機構の解明を目指し、これにより、ロボットの社会的メディアとしての影響の評価を行う。最後に、ロボットの多くの部分を遠隔操作し、人と同等の対話能力を有するロボットとの対話に関する研究を行う。また、この研究においては人の外見に酷似したアンドロイド・ロボットを使用する。これにより、外見も対話能力も人同様のロボットとの対話の機構の解明を目指す。これはつまり、究極的なロボットとの対話は人にどのくらい近づくか、どのような影響があるかについての評価を行うというこ

とである。

これらの研究の結果として解明されるであろう人とロボットの相互作用の影響が、これから開発されるであろう社会的なロボットのインタラクションデザインのモデルとして利用されることを目指す。

1.1.2 構成論的手法

本研究では「作ることによって理解する」手法である構成論的手法 (Constructivist approach) により研究を進める。本手法では、まず仮説を立て、実装し、それを実験的に動作させ、その結果を解析することによって事象の理解を行う。これまでの研究手法としては事象の分析を主にする還元的手法など様々なものが存在するが、本手法においては何かを構成した結果を分析することにより、事象を理解する。

構成論的手法は様々な研究者がそれぞれの意見を持っており、一概にこれが正しいというものがないように思われる。また、信頼できる理論をもとにしたモデル化を行わずに仮説を立て、実装することの危険さが暴力的であると批判されることもある。しかし、いずれにせよ人とロボットの対話はこれまでに我々が経験したことのない事象を扱っており、これまでの方法論では解明できない問題を数々含んでいることが考えられる。つまり、能動的に動作する人工物との対話は、これまでに心理学や社会心理学などで分析されてきた対人の対話機構のモデルが適用可能かすら定かではない。

構成論的手法を用いた研究は既に存在し、それらは認知発達ロボティクスなどを代表として、新しい研究領域や研究手法として認められ始めている。本論文で行う研究も構成論的手法をもとにした新たな研究領域、手法の先駆けとなることも目的とする。

1.1.3 遠隔操作型ロボットシステム

本論文で行う研究においてロボットは人と同等の対話能力があることを仮定する。なぜなら、将来的にはロボットは人と同等の対話能力を持ち得ると考えられ、この対話能力を有した上で実験を行わなければ、実世界に沿った結果が得られないためである。これはつまり、研究成果の有用性が失われることを意味する。

しかし、これまでに自律対話システム、および自律対話ロボットにおいて、人との自由対話を実現したシステムは無い。なぜなら、

- 画像認識や音声認識など、環境認識能力の不足
- 行動選択能力や移動能力など、実世界に対して正しく行動する能力の不足

という環境の認識と、環境に対する出力の両方の能力が不足しているためである。

これに対して、近年、自律対話機能を遠隔操作により人が補うかたちで人との高度対話を実現する試みが行われるようになってきた [31]。これまでの人-ロボット間相互作用研究においても、ロボットの遠隔操作を行い人との対話実験を行うことも存在した。しかし、この場合には WoZ 法 (Wizard of Oz method, OZ paradigm)[28] と呼び、自律ロボットとの対話とは別のものとして考えられてきた。しかし、前述した問題から自律対話ロボットとの対話実験が将来的に有益なものとなるとは考えにくい。これよりもむしろ、本研究

のように人と人型ロボットのインタラクションデザインに関する研究を行う上ではこの遠隔操作で人型ロボットの対話機能を補うことは非常に有益であると考えられる。この理由から本研究では、人型ロボットの対話機能を人（開発者、実験者）が担うシステムとする。このため、本研究においては対話能力を人に委譲するために、遠隔操作システムを内包したロボットシステムの実装を行う。これにより、現在の技術では困難な人との自由対話を実現する。ただし、これは自律対話システムおよび自律対話ロボットを否定する試みではなく、将来的なこれらのシステムに組み込まれるべき要素の解明を行う試みである。本研究ではこれらの研究を通して将来の自律対話ロボットに応用することができる結果を残すことを目的としている。

1.2 システム情報科学における本研究の位置付け

本研究におけるロボットは特に断りがない限り、人型ロボットを指す。しかし、本研究は人型ロボットだけに注目している訳ではない。我々を取り巻く情報機器が知能化し、目に見えるものよりも目に見えないロボット、つまり、環境に埋め込まれた情報機器が既に遍在化している。

この点において本研究は人と人工物との対話研究として考えることができる。また、この点において次世代のインタラクティブシステムのデザインに大きく貢献することができる研究となり得ると考えられる。

システム情報科学という学問分野は広くシステムというものを情報科学的に扱うことで、事象の観察や分析からその工学的な応用を行うことを目的とした学問であるといえる。本学におけるシステム情報科学の位置づけは複雑系科学や心理学から工学による応用を経て社会に役立つ研究を行うことである。本学問領域において、本研究は以下の2点を重点的に行う。

- 人と人型ロボットの対話実験を通じた、人間の認知システムの分析
- 人型ロボットという人工物の、新しいインタラクティブシステムとしての可能性の探究

これらはシステム情報科学の中心的ミッションといえる、人間の認知機構の解明と工学的応用の双方にまたがる研究である。特に、人型ロボットの実装から実験による対話の観察や分析を行い、これを次の研究にフィードバックを行うことは非常に重要であり、意義がある。また、前述した構成論的手法によって研究を進めることはシステム情報科学のミッションに合致していると考えられる。

つまり、人-ロボット間相互作用研究は工学や心理学、認知科学、脳科学などモノを作り、それを分析、評価するために様々な分野の研究者が集まる複合研究領域である。工学的にロボットシステムを実装し、それを認知心理学的な実験を通して観察、分析することで、人と人型ロボットの対話における機構を解明する。これは本学に揃った様々な分野の研究を横断的に行うことと等しく、これにより、本学において構成論的手法を用いた人-ロボット間相互作用研究を行うことは有意義である。

このなかでも、人型ロボットとの身体性コミュニケーションにおける研究は人型ロボットであるからこそ期待されるものであり、身体を活用した対話機構の解明は重要である。

また、人型ロボットが社会の一員となるためには、その社会的スキルも求められる。人間社会における人型ロボットの社会的態度の影響の解明は、複数人との対話における機構の解明にとって非常に重要であると考えられる。さらに、人型ロボットが対話メディアとしてどれほどの影響力を持つのかについての研究は人と人型ロボットの対話機構の根源的な問題であり、これを解明すること無しには人型ロボットの応用性や有用性を示すことができないため重要であると考えられる。

1.3 本論文の構成

本論文は本研究を行う背景や研究領域における立場を示す本章を含めて全8章で構成される。

第2章 従来研究

第2章では、本研究の位置づけを明確にするため、関連研究を示した上で議論を行う。特に、人と人工物との相互作用研究や、本論文で採用する手法などについての先行研究にふれ、議論を行う。

第3章 半自律遠隔操作型ロボットシステム

第3章では、本研究を行う上で必要となるロボットシステムについて述べる。本研究では人型ロボットの対話能力を人と同等であると仮定している。現在の人と人型ロボットの相互作用研究においては自律対話ロボットによる対話実験が多く行われてきている。しかし、現在の不完全な自律対話能力での研究成果では将来に貢献することが難しいと考えられる。将来的に人型ロボットは人と同等の対話能力を有し、自然に人と相互作用を行うことが可能になるであろう。この理由において本研究ではロボット自身で行動することができる部分を残しながら、高度な自由対話に必要な知能を人が担うロボットシステムの開発を行う。

第4章 人と人型ロボットの身体性コミュニケーション

第4章では、人と人型ロボットの身体性コミュニケーションについての研究について述べる。ここでは、人に近い身体を持った存在であるからこそ期待される「身体性コミュニケーション」についての研究を行い、人との対話における人型ロボットの振る舞いが対話者に与える影響の解明を試みた。この結果として人型ロボットが人と協調的な身体動作を行うことで、人に対して感情的側面に強い影響を与えることが明らかとなった。

第5章 人型ロボットの適切な社会的態度

第5章では人型ロボットの社会的態度の影響を調べる研究について述べる。人と人型ロボットの対話構造には身体動作だけでなく、その発話内容やそれに付随する「社会的態度」

も重要な要素となることが考えられる。このため、私は次に人型ロボットを含む3者対話における、ロボットの態度が与える影響の解明を試みた。この実験の結果から、ロボットの発話内容や振る舞いが人間関係の印象形成に影響を与えることが確認された。

第6章 遠隔コミュニケーションメディアとしてアンドロイドロボットの可能性

第6章ではアンドロイドロボットをメディアとした遠隔コミュニケーションシステムについて述べる。本研究では人の存在感に注目し、通信メディアとしてのアンドロイド・ロボットが人の存在感をどの程度伝達することができるかについての実験を行った。このため、実験では人に酷似したアンドロイド・ロボットを通じた対話と、他の通信メディア(電話、テレビ電話)との対話を比較した。この結果、遠隔操作したアンドロイド・ロボットを通じた対話は他のメディアよりも強い存在感を示すことができ、アンドロイド・ロボットが優れた対話メディアとなりうることを確認された。

第7章 総合的な議論

第7章では本論文で行ってきた研究について総合的な議論を行う。

第8章 結言

第8章では本論文のまとめを行う。

第2章 従来研究

本章では本稿で行う研究に関連して、これまでに行われてきた既存の研究を概観し、それらの特徴と問題点を明らかにした上で、本研究の立場を明確にする。

2.1 インタラクティブシステム

インタラクティブシステムとは、ユーザからコンピュータ、また、その逆方向であるコンピュータからユーザへの双方向のインタラクション(相互作用)を支援するシステムである[48]。この支援はユーザのアクティビティに歩調、方向を合わせて行われる。ユーザとコンピュータは一般的にはマウスやキーボード等のインタフェースを介してインタラクションを行う。このインタラクションの目的は人がコンピュータに対して命令を与えることであり、良いインタラクティブシステムとは簡単に命令を与えることができ、かつ正確に人の命令に従う結果を返すことのできるシステムであるといえる。今日、コンピュータはいわゆるデスクトップ型のコンピュータだけではなく、時計や多くの家電に組み込まれているマイクロコンピュータなどを含めると実に様々なものが存在する。このコンピュータ上で動作するソフトウェアが人とコンピュータとのインタフェースの役割を担い人とコンピュータのインタラクションを実現している。このようなインタラクティブシステムはこれまでに数限りなく開発されてきた。

現在の人とコンピュータのインタラクティブシステムは Apple 社が The Knowledge Navigator[8] で示した未来には依然として到達していないが、ハードウェア(Hardware: 物理的装置)やソフトウェア(Software)技術の発展にともない現実のものとなりつつあることも事実である。The Knowledge Navigator はソフトウェアエージェント技術を用いたインタラクティブシステムの現実的な未来観を示したものであり、人がコンピュータに対して命令するためのインタラクションとしては、2001 年宇宙の旅に登場する HAL9000 [4]と同様に理想型であるようにも思える。

本節ではインタラクティブシステムの中でも特にコンピュータ上で動作するものに注目する。特に人とコンピュータとのインタラクション研究から、コンピュータ上で動作するソフトウェアエージェントとの対話研究、さらに、身体を持ったコンピュータであるロボットとの対話研究について述べる。

2.1.1 コンピュータ上のインタラクティブシステム

コンピュータは人とのインタラクションがあってはじめてコンピュータたり得ると言っても過言ではないほど、人はコンピュータとインタラクションしている。人とコンピュータのインタラクションの基本はマウスやキーボードといったハードウェア的なインタフェー



図 2.1: 一般的なコンピュータとのインタラクション形態

スを介して行われる。人はこれらのインタフェースを通してコンピュータの基本ソフトウェアであるオペレーティング・システム (Operating System) に対して命令を与える (図 2.1)。人とコンピュータを繋ぐためのオペレーティングシステムは人と最もインタラクションしているソフトウェアであると言える。現在のオペレーティングシステムにおいて最も普及しているものは Microsoft 社の Windows シリーズである。Windows シリーズも Windows 3.1 登場前までは MS-DOS というキャラクター・ユーザ・インタフェース (Character User Interface: CUI) ベースのオペレーティング・システムであった。これは人とコンピュータのインタラクションをすべてコマンド、つまり手入力で行うインタラクションであった。現在はグラフィカルユーザインタフェース (Graphical User Interface: GUI) にもとづくインタラクションが実現され、一般ユーザであっても簡単にコンピュータを操作することができるシステムとなってきた (図 2.2)。また、コンピュータ上で特定の目的を果たすための高度な機能を統合的に提供するソフトウェアであるアプリケーションソフトウェアはこのオペレーティングシステム上に実装される。オペレーティングシステムやアプリケーションソフトウェアなどとインタラクションするための機能もインタフェースと呼ばれることがある。

コンピュータとのインタラクションを行うということは、その界面であるインタフェースを通してコンピュータに対して命令を与えるということである。そのため、人とコンピュータとのインタラクションに関する研究は主にこの二つのインタフェース、マウスやキーボードといったハードウェア的な入力装置であるインタフェースとコンピュータ上で特定の目的を果たすための機能を提供するソフトウェア的なインタフェースの二つについて行われてきている。

ハードウェア的なインタフェース

ハードウェア的な入力装置であるインタフェースはマウスやキーボードが一般的ではあるが、このほかにもジョイスティックやスイッチ、タッチパネル、マイクなど様々なインタフェースが開発されてきている。しかし、現在主流となっているマウスとキーボード以上の使い勝手を実現したインタフェースは存在しないように思われる。特に、SF 映画で

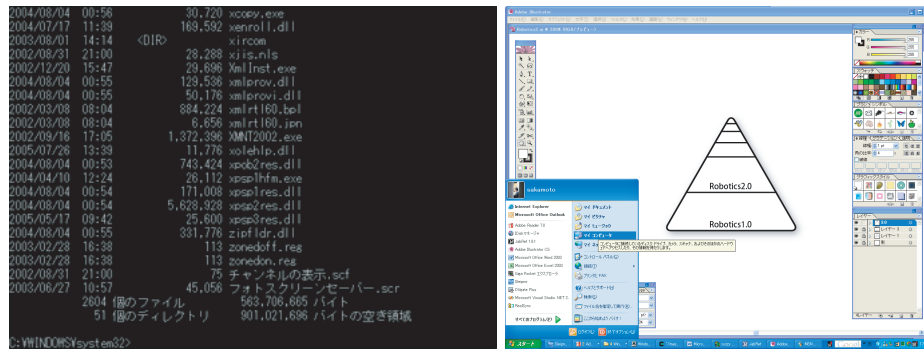


図 2.2: CUI と GUI

よく見られるマイクを使った音声による対話システムも存在するが、一般的ではない。近年になって、脳波を計測しこれをもとにコンピュータを脳から直接操作するインターフェースであるブレイン・コンピュータ・インターフェース (Brain Computer Interface: BCI) に関する研究も盛んに行われてきている [38]。

ソフトウェア的なインターフェース

ソフトウェア的なインターフェースであるコンピュータ上のソフトウェアはオペレーティングシステムからアプリケーションソフトウェアまで様々である。コンピュータにおいてインタラクティブシステムを実現しているのはこれらのソフトウェア群である。

インタラクティブシステムである以上、入力装置に加えて出力装置が必要となる。入力装置は前述したハードウェア的なインターフェースがあるが、出力装置はコンピュータディスプレイを用いるのが一般的であるが、プリンタや音による出力を行うこともある。これらの入力装置と出力装置をまとめてユーザインターフェースと呼ぶことが多い。

人とコンピュータのインタラクション研究

インターフェースを経由して人はコンピュータとインタラクションを行う。人とコンピュータのインタラクション研究は主にこの点に注目して行われている。インターネットが普及する以前のインタラクション研究は主に文書作成や表計算といった事務作業用のソフトウェアに対する入力作業の支援が主であった。インターネットが普及して以降、電子メールやインスタントメッセージングサービスに代表される遠隔コミュニケーションツールの普及や、グループウェアに代表される情報共有ツールの普及により、インターフェース研究は如何にして素早く簡単に情報を伝えることができるかに注目して研究が進められてきた。これらのインタラクションのためのインターフェースとしてのハードウェアやソフトウェアの研究は、如何に簡単に、間違いなく、コンピュータに対して命令を与えることができるかについての研究であったという点において、人とコンピュータのインタラクションの研究であったと言える。この点において、これまでのインタラクション研究は人のコンピュータに対しての命令の与え易さについての研究が主流であったといえる。また、この意味に

において、コンピュータ上のインタラクティブシステムは人の活動の支援を目的としていると言える。

近年になってインターネットの普及とともにコンピュータの利用方法が爆発的に増大した。このなかでも、情報検索システム、遠隔コミュニケーションシステムなどの人と情報、人と人のつながりを重要視したインタラクティブシステムに注目が集まってきている。さらに、リッチメディアの普及により、画像、動画、音楽などを大量に記録、再生、保存が可能になったために、これらをより使い易くするための試みが行われてきている^{1 2 3}。また、実世界指向なインタラクティブシステムとして石井らは Tangible Computing を提案した [21]。これは明示的にコンピュータに触れることなくコンピュータを操作するための概念であり、新しいコンピュータとのインタラクション形態として非常に注目されている。

このように、これまでのコンピュータは便利な機械として存在するために発展してきたといっても過言ではない。しかし、この流れが今後変わる可能性は充分にある。Apple 社が Apple I の販売を開始してから今年で 30 年が経つが、依然としてパーソナルコンピュータとの対話形態は Alan Key が提案した「Dynabook 構想 [76]」から劇的な変化はない。今後、ロボットをメディアとした新しい形のインタラクティブシステムの登場が期待される。

以下の 2 項目では、今後の人とコンピュータのインタラクション研究に大きく関係してくるであろうエージェント技術を用いたインタラクション研究と、身体を持ったコンピュータであるロボットとのインタラクション研究について述べる。

2.1.2 ソフトウェアエージェントとのインタラクション

人とコンピュータのインタラクションをよりわかりやすく、簡単にするための方法としてエージェント技術を用いることがある。エージェントとは、人の命令に対して自律的に判断し、行動することができるソフトウェアである。これらのエージェントは人に見えないところで行動するエージェントと、直接人とインタラクションを行うエージェントの二つが存在する。

人と直接対話を行うエージェントは、人にとって親しみやすくするために擬人化されているものがある。擬人化されたエージェントは人のような身体を持っており、これらを用いて顔表情や身ぶりといったノンバーバルな情報を用いて人と対話を行う。

現在の人と対話するエージェントの多くは人とコンピュータを繋ぐインタフェースとして使用される。Microsoft Agent⁴に代表されるインタフェースエージェントは人と自然言語による対話を行うことが可能である。さらに、エージェントは身ぶり、手振り、顔の表情などを用いて人と対話を行うことができる。

また、自然言語と顔表情を用いて人と対話を行うことができるエージェントとして Visual Software Agent(VSA) が提案されている [73]。VSA は音声対話インタフェースにテレビ電話のような Face-to-Face 型 (対面型) のインタラクション形態を採用したエージェントシステムである (図 2.3)。このエージェントはウェブブラウザと連動しており、自然言語を用いてウェブブラウジングが可能である。また、VSA の特徴である顔表情を活用する

¹<http://www.youtube.com/>

²<http://video.google.com/>

³<http://www.nicovideo.jp/>

⁴<http://www.microsoft.com/msagent/>

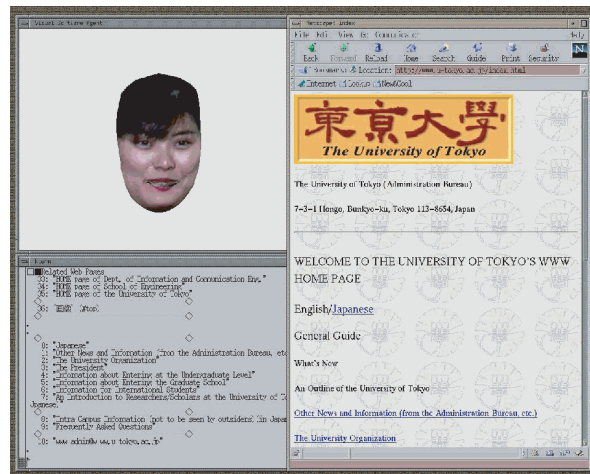


図 2.3: Visual Software Agent(VSA)

ことにより人と非言語的な対話が可能である。

このようなインタフェースエージェントは数多く開発されてきたが、現在までに人と音声による対話を行うことができるエージェントは一般的に広く普及してはいない。これは、人がコンピュータに対して命令を与えるという目的に関しては、マウスとキーボードを越えられていないためであると考えている。テキストの入力であれば、口で言うよりも、キーボードで打つほうが早いであろうし、間違いを訂正するのであれば、BackSpace キーを打つほうが早い。ソフトウェアに対してコマンドを入力するのであれば、マウスを使ってボタンをクリックするほうが確実に早いのである。さらに、このコマンドを入力するためには、非言語情報など必要ないのである。さらには、近年になってキーボードではなくテレビのリモートコントローラ (Remote Controller: リモコン) 型のインタフェースも多く利用されるようになってきた。これらの社会的ニーズがマウスやキーボードといった入力デバイスが音声よりも早く正確にコンピュータに対して命令を送ることができることを示しているであろう。

一方で、人と直接対話しないエージェントとしてネットワーク、特にウェブ上のエージェント技術が注目されてきている。e-commerce におけるエージェント技術の利用例として amazon.com が挙げられる⁵。amazon.com で用いられているエージェント技術は、その行動している様子は見る事ができない。しかし、人がウェブサイト上で行動した結果、その人の趣向に合った結果をエージェントが推薦商品として提示してくれる点において、人と明示的ではない対話を行っていると言える。

エージェント技術は知的なシステムを構築する上では非常に重要であるが、擬人化などといった対話のためのインタフェースとして使用するためには問題も多い。なぜなら、人がコンピュータに命令を送るためのインタフェースであるのであれば、言葉による対話により命令を伝えるよりも、マウスやキーボードを使用したほうが早く、正確であるためである。では、現在のインタラクティブシステムが有能な秘書よりも役に立つかという点においては疑問がある。スケジュール管理をするためには、誰かがシステムに対してスケ

⁵<http://www.amazon.com/>

ジュールを入力しなければいけないし、システムがそれ自身で電話を掛けることもできない。しかし、今後のエージェント技術の進歩によってはこれらが可能になるかもしれない。

これらの現状をまとめると、コンピュータを使用する場面は限りなく広がり、このため、インタフェースエージェントの長所・短所が明らかになりつつある。これらの理由からインタフェースエージェントはその利点を生かすことができるよう、使い分けが必要であることは明らかである。また、インタフェースエージェントは言語による対話ではなく、その背後に存在するべき技術であり、これが望まれる。

このため、人と同様の知能をもったエージェントシステムないしは、インタフェースエージェントはコンピュータとのインタラクションに重要になるであろうと考えている。

2.1.3 ロボットとのインタラクション

ロボットは身体を持ったコンピュータである点において、実世界指向インタフェースとすることができる。このロボットとのインタラクションは対象となるロボットの開発目的により異なる。人が立ち入ることができないような危険な環境で作業を行うことを目的としたロボットとのインタラクションにおいては、いかにして簡単かつ正確にロボットに対して命令を与えることができるかに注目して研究が進められてきた。一方で、人とコミュニケーションすることを目的としたロボットにおいてはロボットはいかにして人と豊かな対話を実現することができるようになるかについて研究が進められてきた。本研究では後者の研究について注目している。

近年になって人と人型ロボットの豊かな対話を実現する研究が盛んに行われるようになってきた。特に、人の対話メカニズムに注目した研究が盛んに行われてきている。Scassellatiらが開発したCogは視線による共同注意(Joint attention)に着目し、これを用いて人と豊かな対話を実現しようとした[60]。この研究では人と人型ロボットの視線に注目し、ロボットが人の視線を追跡し、人が見ている対象を人型ロボットが同時に見ることで、様々な対象を周囲の他者と共有することを示した。これにより、人と人型ロボットにおける暗黙的な情報共有を試みている。また、身体動作に注目し人と人型ロボットの関係性に注目した対話研究も行われている[53][59]。これらは、人と人型ロボットの間に人同士のような関係性を形成することで人と人型ロボットの情報伝達を促すことができるという研究である。この研究では人と人型ロボットの間で身体動作の同期現象が観察され、これが人と人、人と人型ロボットの対話にとって重要であることが示された。

一方で、人と共に生活するロボットの開発も盛んに行われてきている。NECが開発したPaPeRo[10]やSonyが開発したAIBO[83]のように日常的に人と対話することのできるロボットも開発されてきている(図2.4)。また、これらを利用した人とのインタラクションデザインに関する研究も行われるようになってきている。

今後、人型ロボット技術がさらに発展していくに従って、さらに自由度の高いロボットが開発されることが予想される。人型ロボットはその外見から人のような対話が可能であるかのような想像を人に与える。しかし、現在の人と人型ロボットの対話メカニズムは未知の部分が多く、依然として豊かな対話の実現できていないとは言えない。豊かな対話は社会的に対等な立場にあるときに、成り立つことが考えられる。このため、人とロボットが対等な立場に立って対話を行うために、ロボットの知能的、身体能力的な発展が必要とさ

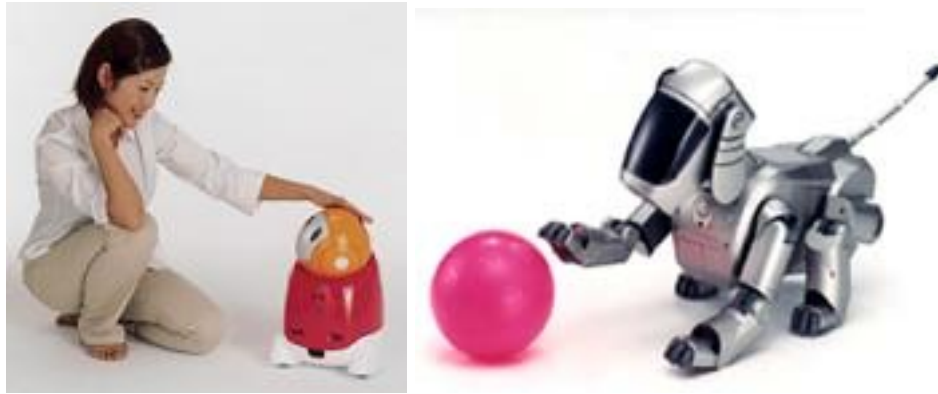


図 2.4: 左:NEC PaPeRo , 右:Sony Aibo

れると考えている .

2.2 インタラクションデザイン

20 世紀後半 , 情報機器の発達に伴って様々な製品が世に現れた . これらの製品の多くは小型コンピュータを内蔵し , このため小さな製品の中に非常に多くの機能を詰め込むことが可能となった . この代表的な存在が 1990 年代後半に普及を始めた携帯電話であろう . 我々は様々な場面で様々な機械とのインタラクションを行うことをごく自然で日常的な現象としてとらえることになった .

これらの製品とのインタラクションの機会が増えるにつれ , 多様なインタラクションの形態が提案されるようになってきた . 特に , 小さな情報機器においては , その入力方法や出力方法に様々な工夫がなされるようになった . この工夫こそが人と情報機器におけるインタラクションのデザインであるといえる . この点において , インタラクションデザイン (Interaction Design: IxD) は , 人工物やシステムのユーザーへの反応と振る舞い (インタラクション) として定義される [78] . このようにインタラクションとは , この言葉 (Interaction) が示すように相互の (Inter-) 行動・行為 (Action) であり , 振る舞い (Behavior) であると言える . 本研究では人型ロボットに注目した研究を行うが , 特に人型ロボットの行動や振る舞いの設計 (インタラクションデザイン) に関する研究を行う .

このインタラクションデザインは非常に広範囲が学問を包含している . つまり , コンピュータとのインタラクションデザインに関してはソフトウェア工学やインタフェース工学だけではなく , コンピュータの仕組みそのものを扱う計算機科学 (Computer Science) など様々な学問が関係する . さらに , 人型ロボットとのインタラクションデザインに関する研究では機械工学 , ロボット工学など工学に関する学問も関係する . また , 工業デザインやプロダクトデザインにおいては工学だけではなく , その対象となるものの質感を決定するための材料工学など様々な学問分野の知識が必要となる . インタラクションデザイン研究に関しては上述したようなモノを作る過程だけではなく , それを評価するプロセスも重要となる . これに関しては心理学 , 社会心理学 , 認知科学などが関係する . このようにインタラクションデザインの研究を行うということは , 様々な知識と学問を総動員して行う

必要があることがわかる。

本論文ではこのなかでも人型ロボットにおけるインタラクションデザインに関する研究を行う。人型ロボットにおけるインタラクションデザインはその外見から人に近い動作なり、インタラクションの設計が求められることが考えられる。しかし、人型以外のロボットにおけるインタラクションデザインはどうあるべきであろうか。また、これらのインタラクションは人とのそれ以上の価値を持ち得るのであるだろうか。

本節ではインタラクションから生まれる経験による価値が、他の人工物のインタラクションとどのように違うのかを述べたあと、様々なモダリティのロボットやスクリーンエージェントにおけるインタラクションデザイン研究に関して詳述する。

2.2.1 インタラクションの価値

第 2.1 節で詳しく述べたように、現在までにコンピュータだけではなくロボットのような実世界を扱ったインタラクティブシステムが提案されきている。これらのインタラクティブシステムは人がコンピュータやロボットを含むエージェントに対していかにして簡単かつ正確に命令を入力することができるかに注目しており、この点においてユーザインタフェースに関する研究の比重が大きかったように思える。

ユーザインタフェースに関する研究が進むなかで、インタラクションを命令を伝える行為だけではなく、この行為の豊かさを求めるようになってきた。特に、人工物とのインタラクションの結果得られるユーザエクスペリエンス (User Experience) の重要性が注目されるようになってきた。

インタラクションの価値とは、そこで得られる経験 (Experience) の豊かさであるといえる。従順な人工物というだけではインタラクションは単調であり豊かであるといえない。しかし、あまりにも命令に従わない人工物では不満ばかりが生まれるであろう。2001 年に発表された Apple 社の iPod シリーズはそのインタフェースの斬新さ、そこから生まれるインタラクションの豊かさから今や全世界の多くの人に愛される製品となった⁶。インタラクションによる新しい発見や驚き、適度な困難に豊かさが宿る。この豊かなインタラクションはその対象の機能によらず、評価を上げることができる。このインタラクションの結果として人と人工物の間に生じる関係性は言葉で表すことや評価をすることが難しいものではあるが、人の内的な主観における現象として、確実に対象物の評価を向上するものである。これは人同士の関係においても同様であろう。もしそうであるのであれば、人型ロボットに対しても適用することが可能であると考えられる。

以降ではロボットとのインタラクションデザインに関する研究について述べ、その特徴と有効性について述べる。

2.2.2 ロボットとのインタラクションデザイン

情報機器がそうであったように、ロボットないしは人型ロボットが人間社会に進出し、遍在する未来はやってくるであろう。それは一般家庭であるかもしれないし、まずは公共空間かもしれない。これはテレビや携帯電話の普及を止められなかったことと同様に、避

⁶<http://www.apple.com/itunes/>

けられないことであると考える。今後、労働者人口が減少することが予想されるなか⁷、ロボットに対する要求は増加していくことがわかる。既に情報家電などの小さなロボットが身の回りに溢れ、私たちはそれらのなかで自然に生活している。この点においてもロボットと生活をともにするロボット共存型社会はそう遠くない未来に実現されることが予想される。

大沢らは空間内に存在する日用品に目や腕をつけることで擬人化を行うことで、それらとのインタラクションが円滑になることを示した [18]。ここでのインタラクションは音声だけではなく、視線や身体動作などでありこれにより豊かな対話を実現した。このインタラクションデザインによって人はその日用品を初めて扱う場合であっても、日用品の意図を理解することができたことが示された。

人とロボット間のインタラクションだけではなく、そのインタラクションの結果がその人間関係にどのような影響があるのかを考慮したデザインが必要となる。現在でも携帯電話のような機器とのインタラクションの結果は人間社会にも大きく影響していると考えられる。しかし、人に近い身体をもち、人に近い対話を行うことのできるロボットにおいてはさらにこの影響が増加することが考えられる。このため、人型ロボットとの社会的インタラクションデザインは今後重要性を増すことが考えられる。

駒込らは人型ロボットから人に伝達した情報が人から人へも伝達されることを示した [82]。これは人と日常的に関わりあうロボットにとって非常に大きな知見であると考えられる。なぜなら、情報はそれが人から受け取ったものであれ、人工物から受け取ったものであれ、それを受け取った人にとっては重要なものであると判断されることで他者へと伝達されるためである。このように、人型ロボットのインタラクションデザインは身体動作や言語といった人が日常的に用いている手段を活用する点において、慎重に行う必要があることがわかる。また、ロボットの社会進出を実現するためにはこれらのインタラクションデザインの評価を十分に行う必要があるであろう。

2.2.3 関係性のデザイン

ロボットにおけるインタラクションデザインではその身体を有効に活用することでこれまでの対話メディアが持ち得なかった強力な影響力を発揮することができることはこれまでに述べた。ここでは、インタラクションによって形成される関係性に注目し、このデザインがインタラクションにどのような影響を与えるかについて述べる。

本来、人は対話者が人であれ人工物であれ適応する能力を持っている。また、人は目の前の対象の意図を常に読み取ろうとしている。小野らは人とスクリーンエージェントとのインタラクションによって形成された関係性が人工物を移動しても継続することを実験により確認した [52]。この実験ではインタラクションにより関係を形成するグループとしないグループ間で、被験者らが移動先の人工物の発話を読み取る姿勢が変化することが確認された。これはつまり、インタラクションの結果、形成された関係性が人工物の意図を読み取ろうとする姿勢を助長したと考えられる。また、小川らはインタラクションによって形成された関係性により、被験者が人工物に対して情動を喚起させられたために、人工物への行動が制限されることを示した [30]。さらに、寺田らは非人型ロボットの行動から意

⁷<http://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/roudou/07/>

図を推定することができることを示した [27] .

このように、人はインタラクションによって形成された関係性により何らかの人格なり、エージェンシーを人工物に対して感じることができる。この人とロボットとの関係性のデザインこそが、今後求められるものであり、本研究ではこの基礎となる研究を行うことを目的としている。

これまでに、住空間において、建築物による関係性のデザインないしはインタラクションデザインについての試みは数々行われてきている。しかし、住空間は静的なものであり、エージェントないしはロボットはそのソフトウェアの柔軟さから動的である。これはつまり、エージェントやロボットが人に対して適応することが可能であることを示している。本来、日本人は八百万の神々として日常的な人工物だけではなく自然に対しても人格なりエージェンシーを感じる能力を持っている。これを有効に活用したインタラクションデザインとこれによる人と人工物との関係性をデザインすることが今後重要となるであろうと考える。また、これにより、インタラクションに新たな価値を付加することも可能となるであろう。現在多く普及している情報機器に対して我々はエージェンシーを感じることはない。しかし、これを適切に付与することにより、豊かなインタラクションやユーザエクスペリエンスを提供することができるであろう。

人の能力を有効に活用し、かつ人工物側からも歩み寄ることで豊かなインタラクションを実現する。これこそが対話メディアとしてのロボットに求められる能力であると考えられる。

2.3 身体性コミュニケーション

人はコミュニケーションの際に発話に加え、視線や身振り手振りといったゼスチャを交えて対話を行う。ゼスチャは発話に表出しない話者の心中をうかがい知ることができるものとして、60年代以降「非言語的行動」の一種として研究されてきたため、しばしば発話とゼスチャの内容の同時性について重要視されなかった。McNeill は発話とゼスチャとの同期関係と表現内容の重なり of 理論的重要性を主張し、発話とゼスチャの統合的な分析を行い [37]、それ以降、数多くの研究が行われてきた。

身体動作において表出するゼスチャは表象的ゼスチャと呼ばれる。このゼスチャには代表的な機能が2つあり、それらは他者指向機能と自己指向機能と呼ばれている。他者指向機能はコミュニケーションにおいて情報を伝達するためのゼスチャの機能であり、聞き手の理解の補助効果がある [14]。Graham によるとゼスチャが発話が伴うと、聞き手の理解が向上するという。Goldin-Meadow は聞き手がゼスチャに含まれる情報を取り入れていることを示した [12]。また、Cassell らは聞き手が発話とゼスチャの双方から同時に情報を取り入れ、二つを統合して話を理解しようとしていることを示した [3]。これまでの身体動作の研究では、以上のようなゼスチャの他者指向機能に注目されてきた。しかし、近年では身体動作の自己指向機能の重要性が注目されてきている。ゼスチャの自己指向機能とは話者自身の記憶へアクセスするためのゼスチャであり、聞き手の見えない会話であっても、人は何らかの身体動作を行うことがそれにあたる。具体的には携帯電話で会話しているようなときにですら人はゼスチャを行うといったことが言える。藤井は両腕に棒を持たせ、両腕の自由をきかなくした被験者と、両腕を自由に動かすことができる被験者に記憶

力検査を行った結果に記憶力の差があることを確認した [39]。さらに、先天的に全盲の人であっても、特定の課題を行う場合にゼスチャを行うことが報告されている [22]。

これらゼスチャの2つの機能はそれ自身二重性を持っている。すなわち、コミュニケーションにおける他者との共有可能な身体動作である他者指向機能のゼスチャと、自己に反映し、思考に影響を与える自己指向機能のゼスチャは、環境と思考、自己と他者という2つの対立する軸上にあると考えることができる。近年、対話における対話者間の身体動作の相互の関わり合いの重要性について注目されているが、ここでは多くの場合で他者指向機能に注目されがちである。しかし、対話における自己指向機能の、話者の思考への影響が見出されてきたことにより、この二重性の平衡点を見出すことができるかもしれない。特に、ロボットという実験者が完全に制御可能な装置を用いることで、これらの研究が発展することが期待される。

本節では以下3項目にわたって身体動作を活用した対話とその効果について概観する。

2.3.1 ロボットにおける身体動作

ロボットと人が共に生活する社会で、人型ロボットに求められるものは人と適切にコミュニケーションをとることができる能力であると考えられる。人がコミュニケーションにおいて情報を伝達する中で、表情、発話、身体動作が主な重要な要素であると考えられる。これはロボットとのコミュニケーションにおいても同様であろう。ここではこのなかでも身体動作に注目する。

例えば、駅の中で働く駅員ロボットについて考えてみる。ここでは旅行者が駅構内で道に迷い、その近くを駅員ロボットが通りかかったとする。旅行者は駅員ロボットに道に迷ったのでホームまでの道順を教えて欲しいと話しかける。このとき、駅員ロボットはホームまでの道順を身振り手振りを交え案内する。旅行者が分からなければ何度も説明する必要があるかもしれないし、ホームまで付き添う必要があるかもしれない。

このとき、駅員ロボットが取るべき身体動作は、まず、旅行者の近くをとおりかかる際の身体動作である。ここでの駅員ロボットは旅行者に話しかけられやすい身体動作をしているべきである。次にとるべき身体動作は旅行者の話を聞くときの身体動作である。相手の目をしっかりと見ながら、うなづく等の身体動作をすることで、話をしっかりと聞いているような雰囲気旅行者に与えることで、旅行者の信頼を得ることにつながる。さらに、最も重要な身体動作は旅行者に道を案内する身体動作である。道順を正確に伝えるために腕を道の方向に向け、視線をその先に向ける。視線は適宜旅行者の理解度を確認するために旅行者のほうに向ける必要がある。これは本当に確認するかではなく、確認していることを旅行者に示す目的が大きい。何度説明をしても理解できないようであれば、ホームまで付き添う。このとき、ホームまで黙って案内するわけではなく、何かしらの会話をしながら案内するべきであろう。この際にも話題に則った身体動作を取るべきであると考えられる。

このように、身体動作は社会的な人型ロボットの代表的な基本機能のうちの1つであると言える。黙って立っている駅員ロボットに対して積極的に旅行者が話しかけるとは思えないし、第一、話を聞く姿勢のない駅員ロボットに対して道を聞くとは考えられない。また、道順を案内する時に身体動作を用いなければ適切な情報伝達が達成できない(詳しくは次項以降で述べる)。人同士のコミュニケーションにおける身体動作と同様の能力を持つ口

ボットは、人と自然なコミュニケーションが可能であろう。また、自然な情報伝達が可能であると考えられる。

また、我々はコミュニケーションにおいてロボットが人のような身体動作をとるべき理由の1つとして、人はロボットと対話している場合であっても、ロボットに対して人と同じように接しているため (Media equation[54])、ロボットは人と同じような身体動作をとらざるを得ないのではないかと考える。もし、ロボットが人の想像した反応と違う反応を返すと人はロボットに対して信頼をなくすだろうし、それによってコミュニケーション(情報の伝達)に障害(ノイズ)を与えてしまうのではないかと考える。これによって、次項に示す、対話者間のエントレイメントが起こらないことを示している。

2.3.2 エントレイメント

人は対話時に、対話に引き込まれるような感覚を感じることがある。これは、思わず相手と同じ方向を見たり、相手が指し示した指の先を見たり、同じような動作をしたり、目線をあわせたりといったような行為が続いたときに感じられる。これらの動作が協調的的身体動作であり、このとき起きた会話に引き込まれるような感覚がエントレイメント (Entrainment: 引き込み) が起きた状態である。対話者間の一体感が増した状態と説明できるかもしれない。

もともと対話の身体動作の同調に関しては、母子間の関係から見出されたもので [79]、これらの同調動作は無意識的に行われる。例えば、家族が食事をしながら団欒しているとき、お互いの身振りや手振り、さらには脳波などの相関を調べてみると、そこには位相関係が形成されていると言われている。また、新生児と母親の交流がエントレイメントによって支えられているという報告もある。面白いことに、身体動作のみならず呼吸や心拍、表情などの生理的な変化においても同調現象が現れる。

小野らは人型ロボットとの対話においても人と同様にエントレイメントが起き、これにより人型ロボットからの情報伝達が促進されることを示した [53]。彼らは人型ロボットが人に対して道を案内する実験において、ロボットが身体動作をせずに道を案内する条件と、ロボットが腕を使って道順を指し示しながら案内する条件について情報の伝わりやすさを比較した。この結果、ロボットが効果的に身体動作を用いて道を案内する条件のほうが、情報が伝わりやすいことが示された。また、この際、人は人型ロボットの動作に対して同調的な身体動作を行うことが観察された。これは人と人型ロボットの間にエントレイメントが生じ、これにより情報伝達が円滑になったことが考えられる。

このように、人と人型ロボットの間にエントレイメントが生じ、これが人型ロボットから人に対しての情報伝達に効果的に働くことが示されたことは、ロボット共存社会において非常に重要な知見となる。次項ではこのエントレイメントの重要性についてさらに深く述べる。

2.3.3 共創対話

電子メールや電話でのコミュニケーションにおける違和感はハードウェアとしての情報機器の限界を表しているのだろうか。なぜ対面対話では伝わるのが電子メールや電話で

は伝わりにくいと感じるのだろうか。

清水は近代文明の矛盾や現代社会の閉塞感に憂慮しながら、これらを打開するための提案を行った [17]。彼は世界を自己と対象とにまず二分してから対象を理解していく自他分離的思考法 (近代科学的方法) には大きな限界があると主張する。すなわち、この二分的な方法は、自己の内部に生成するところの働きであるために、「自己から切り離れた形で示すことができないものには」使えないということだ。例えるならば、カメラで写真を撮ろうとしている自分自身を同じカメラで自分が撮ることができない状態である。カメラの前に鏡を置くことでこの問題は解決されるが、これは「見る自分」と「見られる自分」とに二分することができるためであって、見えないもの、ところの内部に生成される働きを対象として映してくれる鏡は存在しないために、自分の内部の動きは、それ自身をうまく表現する方法を持っていない自己矛盾を含んでいることを示している。

このような自己を中心的に環境を捉える近代科学思考では、見えない世界を表現することができない。そのため、この近代科学思考の拡張が必要であると主張し、自他非分離的思考法が重要であるとした。これにより二分化された思考が引き起こした矛盾を解決しようという提案である。そのために「場」と「共創」というキーワードを基に「場のほうから自己を捉える」という禅思考を融合した新しい自他非分離的思考を提案した。

「場」とはいわゆる環境であり、「場」から自己を捉えるということは、外界から自分を見るという行為となる。これは、自己が「場」へ与えた影響を自己が観察し、評価するということである。これは自己と「場」との対話であり、対話者が存在する場合、対話者との対話の観察であり、評価であると考えることができる。この対話によって対話者間相互の関わり合いから新しい発見や創造が可能になる。これを「共創」と呼ぶ。

対話という「場」における対話者間の「共創」について小野らは、「場」に構成された「関係」こそが重要なのであり [72]、コミュニケーションによって伝達される内容は、関係と発話から「共創」されるのであると主張した。これを「共創」対話と呼ぶ。彼らは実際の人同士の会話において「共創」を実験的に確認し、この中で前項のエントレイメントが対話者間に起きていることを確認した。さらに、前項で述べたように人とロボットの対話においてもエントレイメントが起き、「共創」対話が実現されていることを示した。具体的には、人が人に道順を教わる実験を行い、その行動を分析した。この結果、教える人の身体動作が教わる人の身体動作に影響し、同調的な身体動作が起こっていることが確認された。これはエントレイメントが起き、ここで情報の伝達が行われたと考えられる。さらに、人がロボットに道を教わる実験を行い、ロボットが道を教える際に身体動作を用いた場合、人はその身体動作に同調的な身体動作を行い、さらに、身体動作を行わない場合よりも情報の伝達が促されたという結果が得られた。これは、身体動作により、人とロボットとの間に「関係」が構築され、エントレイメントが起き、情報伝達が促されたと考えることができる。

電子メールや電話においてこの「共創」対話が実現できれば、今我々が感じる違和感が解消される可能性がある。次世代インタラクシオン技術においては、この「共創」される情報によってさらに快適でスマートなインタフェースが実現されることが望まれる。

2.4 メディアの社会性

インタラクティブシステムの中でも特に今後重要となってくるであろうと考えられているものにエージェント技術がある。このエージェントとはある環境をセンサで知覚し、その環境にエフェクタを通して動作するものであると定義される [56]。また、エージェントは知覚される情報を解釈し、その場において最適であると思われる選択をする。具体的には、エージェントはユーザからの命令に対して、その命令の拒否、優先処理を実現する。さらに、ユーザからの命令が曖昧であったり不十分であったりしても解釈することができる [63]。

2.1 節で見てきたインタラクティブシステムでは、システムはユーザの命令に対して忠実に従うものとして考えられてきた。しかし、エージェントを用いたインタラクティブシステムではユーザの命令に対してその命令に従うかどうかについての判断も必要とされる。この場合、ユーザの命令に従うことも従わないこともエージェントが決定することが可能である。近年では自動車や航空機産業の発達に伴い、これらの自動化についての研究が盛んに行われるようになってきた。これらは主にヒューマンエラーによる事故の防止のための自動化であり、これによりユーザの誤操作に対して機械がそれを判断してから各操作を実行することができるようになった。人の誤操作を機械が判断して、その命令を実行するか否かを決定することができるという点において、自動車や航空機の自動化は最も盛んに研究されているエージェント技術の一つであると言える。また、ここで扱われている自動車や航空機といった機械は、それ自身の身体を持ったエージェントであると言える。

自動車や航空機といった機械は人と直接的に言語を用いた対話を行うことがないために、対話の際には社会性を求められない。しかし、コンピュータに代表されるユーザとの対話を主要な目的とするインタラクティブシステムにおいてはユーザとの対話におけるシステムの社会性は非常に重要なものとなる。さらには、社会性を考慮したインタラクションデザインは音声だけではなく、身体動作を含んだインタラクションを求められる人型ロボットにとって重要となるであろう。なぜなら、Reeves らによる「メディアの等式」において人は人工物に対して極自然に社会的に振る舞うということが示されているためである [54]。つまり、社会性のないインタラクティブシステムは、社会的に振る舞うユーザにとって好ましくない存在となってしまうためである。特に、本論文で扱うエージェントやロボットというものは(たとえ、それが仮想的なものであっても)身体を有することができ、実在としてのロボットにおいてはコンピュータ上のシステムよりもさらに社会性が求められることが考えられる。

本節では身体をもったインタラクティブシステムとしてのエージェントやロボットについての社会性の重要性について述べる。そのために、これまで人の社会性について研究されてきた学問である社会心理学について簡単に述べ、その後社会的なエージェントとロボットに関する研究について述べる。

2.4.1 社会心理学

社会心理学とは人間行動の社会的側面を研究する科学であると言われている [32]。この学問においては対人関係を理解する研究に関しても多く行われてきた。以下に大橋らの著書「対人関係の心理学」[50]に登場する対人関係研究の成果の中から、対人関係理解に関

する基礎的な項目かつ、人とロボットの対話において関連するであろう3つの項目について簡単に述べる。

対人認知

人間の行動が環境への適応の試みであるとすれば、そのためにはまずなされなくてはならないのは、適応すべき環境の特質や性状を知ることである。我々の環境は様々な内容を含んでいるが、社会生活をしていくなかで最も重要なものとして他の人々の存在がある。したがって、日常われわれが接する様々な人々、具体的にはその感情、意図、態度、属性、特性などを理解することは、彼らとどのような対人関係を成立させるかということばかりでなく、我々の生活そのものにとってもきわめて大きな意味を持っている。人々を理解するに至るこの過程は対人認知とよばれている。

対人認知の特徴の第一には、対象である他者を我々は行動の主体であるとみるところから由来する。すなわち、他者はその行動の潜在的原因であり、なんらかの効果を生じさせることを目的として、ある行動をしようとする意図をもつものとみられている。また、対人認知と事物認知が異なる点は、我々が他者を重要な点で我々と似ていると仮定しているところから生じてくる。対象である他者は我々と同様に、何かしらを認知し、感情を経験し、意図を持つ主体である。このことから、他者の行動観察からは直接引き出すことのできないその内面的過程を、われわれは自身において気づいているところから推測することができる。

社会的態度

ここで言う「態度」とは一般的に使われている「態度」のことを意味するのではなく、人がある対象(刺激)に対し、どのように理解し、どのような感情を抱いて評価し、どのように行動するかにかかわる概念である。そして、個々の要素はなんらかの方法で観察可能である。ここに、社会的態度というとき、对人的状況での社会的対象に対する態度を意味する。

態度には幾つかの基本性質がある。社会心理学における専門用語としての、構成概念としての態度では、ある対象に対する態度を問題にする。態度には普通、好意的-非好意的のような形で示されるような感情的・評価的要素がある。その程度は、極端な正・負から中庸的なものにわたっている。また、その感情には、強烈なものから、微弱なものまである。程度と強度との間には、一般に正の関係はあるけれども、必ずしも同一ではない。

態度対象には、また、個人にとって中心的な常に意識の前面に出ているものもあれば、その個人にとっては周辺的な、人から言われれば意識するにしても、平常は必ずしも意識していないような対象もある。態度対象として特に重要な意味を持つのは、心理的に中心的な対象である。そのような対象に対しては、人は情報を豊富に貯えている可能性が高い。

態度は相対的に持続的なものであり、安定性がある。そのため、行動理解の重要な鍵となる概念と考えられているのである。しかし、この態度は不変であるということではなく、個人のある対象に対する態度は、その対象との経験・学習の在り方によって、次第に形成されるものである。

また、態度は相互に関連し、依存する性質がある。例えば、ある子どもが教師に好意的態度を持てば、その教師の教える教科も好きになりやすくなることがあげられる。

社会的相互作用

社会的相互作用を、観察可能な対人行動を通しての相互影響過程として捉えると、この力動的過程の産物たるそのときどきの対人関係とは、互いに原因とも結果ともなりあっているという意味での、交互作用関係にあると言える。これはまさしく「対人関係は対人行動の鏡」であると同時に、「対人行動は対人関係の鏡」であるということが言える。これはつまり、対人行動と対人関係は社会的相互作用のつど、新しく入ってくる情報をそれまでの対人関係と照合して解釈し、必要ならばその後の対人行動や対人関係を修正していくという、仮説検証的なフィードバック過程としてのとらえ方が基底にあると言える。

応用理論

上記3項目に関する対人関係の社会心理学的基礎項目を応用した様々な理論が示されている。その中でも対人認知に関する帰属理論、社会的態度に関する認知的均衡理論(バランス理論)、認知的不協和理論、社会的相互作用に関する相互依存性理論などといった代表的な理論が存在する。これらは人における社会心理学的分析の中から誕生した理論である。つまり、人と人のインタラクション・コミュニケーションにおいて重要であると言われる理論である。それでは、この理論は人とロボットのインタラクション・コミュニケーションにおいても成立するのであろうか。また、人とロボットの間ではこれらの理論が成立しないとして、それはどういった原因によるものなのであろうか。

ロボットが社会進出していくなかで、人とロボットによる対話に社会心理学で生まれた理論がどの程度適応することができるのかを確認していくことは重要であると我々は考えている。

以下の2項目ではこれまでのコンピュータ上で実装される社会的なエージェントや実在する身体を持った社会的なロボットに関する研究について述べる。

2.4.2 社会的なエージェントに関する研究

これまでソフトウェアエージェントやモバイルエージェントなど様々なエージェント技術が提案、開発されてきている。これらの多くはコンピュータ上で実装され、仮想的な身体を持っている。この中でも社会性に注目したエージェント研究について述べる。

社会的エージェントによる複数人対話に関する研究

長尾らは自発性と協調性を持ち、複数人と社会的な対話を行うことのできるエージェントの提案を行った[45]。このエージェントは多様な顔の表情を表現でき、人の動きに注意を向けるための目と複数の人の会話を聞き取る耳を持つ(図 2.5)。

彼らは人と社会的なエージェントとのインタラクションを「複数の人と複数のエージェ



図 2.5: 長尾らによる社会的エージェント

「インタラクティブな環境での多対多のインタラクション」と定義し、以下のような特徴を持つとした。

1. 複数の主体が相互に対等にインタラクションを行う
2. 1対1の場合におけるキャッチボール的な構造的対話だけでなく、会話の参加者の発話主導権が複雑に移り変わる非構造的な会話が行われる
3. 参加者は情動的行為(特定の状況における反射的な行為)から協調的行為までを含めた広範囲でマルチモーダルな行為のバリエーションを持つ

社会的エージェントは、複数人の会話を聞き、自分の発言する機会を考え、適切で有意義な発言をすることによって、人との間に社会的な関係を築こうとする。つまり、エージェントは自分の貢献が何かを常に考えている。

コミュニケーションにおいては、さまざまな局面でさまざまな誤解が生じる可能性がある。ここでの社会的エージェントは、会話内容や話者の心的状態を考慮して、誤解の原因を検出し、適切なタイミングで適切なアドバイスを試みるというコミュニケーションモデルを持っている。

彼らの提案した社会的エージェントはインタフェースエージェントとしての側面が強く、このため社会的なインタラクションを行うことのできるエージェントとして考えることができる。しかし、実装されたエージェントは社会心理学的な背景を持たないため、そのインタラクションが本当に社会的であるかという点においては議論の余地があると考えられる。しかし、自然言語だけではなく、エージェントを擬人化した顔による表情というノンバーバルな要素を含めたエージェントと人のインタラクションを実現したエージェントとしては非常に素晴らしいシステムであると考えられる。

社会的エージェントによる対人関係の操作に関する研究

中西らはコンピュータ上で実装された Embodied Conversational Agent と人間との3者対話において Heider らのバランス理論を用いることでエージェントが人間関係に影響を与えることができるかどうかについての実験を行っている [47]。彼らが行った実験では、2人の人と1台のエージェントによる3者対話においてバランス理論を用いた対話実験を

行った。実験設定としては、人もエージェントもコンピュータ上の仮想的な空間で対話を行う。仮想的な空間では他の被験者とエージェントの顔が見えている。人とエージェントの対話には文字による対話を用いているが、人と人の対話には声による対話を用いている。この実験の結果、被験者同士の会話ができない条件ではバランス理論が成立し人間関係に影響を与えることができたが、被験者同士の会話ができる条件では人間関係に影響を与えることができないことが確認された。彼らが行った考察によれば、この原因はエージェントと被験者同士のコミュニケーションチャンネルの違いにあるとした。つまり、人同士では声による対話ができただが、エージェントとの対話では文字による対話しかできなかったため、このコミュニケーションチャンネルの太さの違いによってバランス理論が成立せず、エージェントの振る舞いが人間関係に影響を与えられなかったとしている。

彼らの行った実験では人と人の対話ができる条件においてエージェントが人同士の関係に対して影響を与えることができなかった。確かに同一の対話において文字と声との対話が混在する状況では個々の対話が別々のコミュニケーションチャンネルとして機能してしまうことで人同士の関係に影響を与えられなくなることが考えられる。しかし、このあとに続く研究で音声による対話、または文字による対話というように3者間のコミュニケーションチャンネルを一つにすることでバランス理論が成立するかどうかについてはわからない。

2.4.3 社会的なロボットに関する研究

近年になって人と対話を行うことを目的としたコミュニケーションロボットが開発されるようになってきた。これらのロボットは現在、実験室において人と人型ロボットの対話研究で利用されることが多いが、実際に社会的な場面で実験的に利用されることも多くなってきた。この中で、人と人型ロボットの対話における社会性について注目している研究について述べる。

複数話者による対話システムに関する研究

松阪らは同時に複数人を相手に対話を行うことのできる人型ロボットシステムを用いて人型ロボットを含む3者による対話実験を行い、人型ロボットの身体表現によって対話が円滑に進行することを実験的に確認した [35]。彼らの行った研究では人型ロボットの身体性に注目し対話を円滑に行うために適宜アイコンタクトを取るなどをしていった。

長期間にわたる人との対話研究

神田らは2度にわたる人と人型ロボットとの長期相互作用実験を行い、長期的な人型ロボットの活用法や人と人型ロボットの関係の形成から発展までの経過の分析を行っている [71][69]。彼らはまずロボットを実際に人間社会に参加させる試みとして、ロボットを小学校における英語教育ツールとして利用することの有効性を確かめる実験を行った。これはさらに、ロボットが長期間にわたる相互作用をどの程度達成することができるかについての実験でもあった。この実験においてロボットは児童の英語教育に対して一定の効果を与えることができたとしている。しかし、人との長期間の相互作用では現在のロボットの限

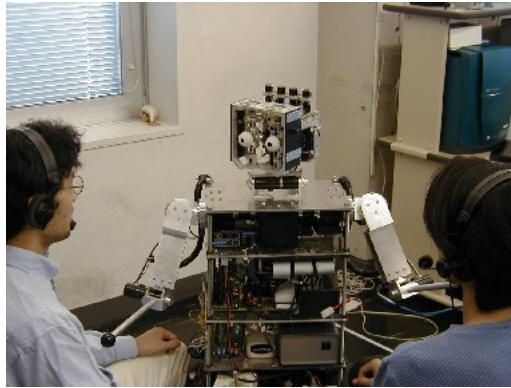


図 2.6: 松阪らのアイコンタクトを交えながら複数人と対話するロボット

界と研究課題を示した。これに続く実験として、彼らは小学校において児童たちとロボットを自由に対話させる実験を行った。この実験においては前述のロボットの対話機能を拡張し、長期間の相互作用を達成するために、児童たちがロボットに対して興味を持ち続けるような長期的な関係構築のためのメカニズムを持たせた。また、この実験においてはロボットによる児童たちの友人関係の推定も試みた。この実験の結果から、ロボットはロボットを友達とみなした一部の児童とは長期的に相互作用を続けることができ、友好的な関係を築くことができた。また、ロボットは児童の間の友人関係を安定して推定することができた。

彼らの行った実験は、ロボットの人間社会への進出に関して大きな成果を挙げたといえる。彼らが開発したロボットの相互作用のメカニズムは長期的に安定して機能し、児童と友好的な関係を築くことができた。これは彼らが開発した相互作用のメカニズムが人と友好的な関係を築くための社会心理学的なメカニズムを取り入れていたためであり、今後さらにこのメカニズムを増やしていくことで児童だけではなく、大人とも長期的な相互作用を行うことができるロボットが開発される可能性がある。

2.5 遠隔コミュニケーションメディア

これまでに様々な遠隔コミュニケーションシステムが開発されて来たが、未だ人と同等の存在感を再現することのできるシステムは存在しない。これまでの遠隔コミュニケーションメディアでは物理的な身体を伴った対話を行うことができなかった。本研究ではロボットを遠隔コミュニケーションのメディアとして用いることで、ある人の存在感を遠隔地へと伝送することができるかどうかについて興味を持つ。

本節ではこれまでの遠隔コミュニケーションシステムの歴史について概観し、これらの問題点を指摘した上で、我々が目指す遠隔コミュニケーションメディアとしてのロボットの有効性について述べる。

2.5.1 これまでの対話メディアとその特性

我々人類は長きにわたり遠隔地間でのコミュニケーションに関する研究を重ねてきた。遠くの人に何かしらの情報を送ることは、人間だけではなく生物全体の根源的欲求であるかのようにも思われる。

遠くの人に情報を伝える手段として、古くは「のろし」や「凧」などを用いたものがあつた。その後、人が実際に遠隔地間を移動することによってある人の意思を伝える手段が発達し、また、鳩を使った遠隔対話を用いていた時代もあつた。近年になってベルが発明した電話はこの遠隔地間でのコミュニケーションを加速させ、現在ではインターネットを用いた遠隔コミュニケーションシステムの開発が盛んに行われている。現代における遠隔コミュニケーションシステムはコンピュータを用いることもなく、小さなデバイスのみでインターネットさえあれば、リアルタイムの文字や音声だけでなく映像を用いて世界のどこに居てもコミュニケーションが可能である。

これらの遠隔コミュニケーションシステムは主に個人対個人を対象としたメディアであり、多人数を対象とするマス・メディア (Mass Media) と分けて考える必要がある。本研究では個人および少人数を対象としたパーソナルメディア (Personal Media) としての遠隔コミュニケーションシステムを対象とする。また、これらをターゲットとしたコミュニケーションメディアに注目する。

本節ではコミュニケーションメディアの比較に関する研究 [85] を踏まえ、これまでに我々が日常的に用いてきた遠隔コミュニケーションのメディアとその特性について各メディアを比較しながら述べる。

手紙

手紙は紙などに文字や絵で意図を記し、それを郵便等で遠隔地に送付することで遠隔コミュニケーションを行う対話メディアである。この点においてこの対話メディアは非同期的なコミュニケーションを行うメディアである。また、空間の共有することはもちろんできない。

手紙は文字という非常に情報量の少ないメディアであり、かつ、遠隔地に送付するまでに時間がかかることから現在ではあまり利用されることがなくなっている。しかし、手書きで手紙に記された文字というアナログな媒体は、その人の人格などを強く反映することができると考えられる。この点において、現在では非常に非効率的な対話メディアではあるが、文字から想起される人格を認知する過程を対話ととらえることで、このメディアは他のメディアにはない大きな情報量を扱うことができるとも考えられる。

電話

電話は音声を遠隔地間で双方向に転送することにより、音声による遠隔コミュニケーションが可能な同期的な対話メディアである。音声であるため、抑揚や発話のタイミングなど様々な要因が増える。このような非言語情報は人が対面によるコミュニケーションを行う際に用いるものである。このため、電話はこのような情報を扱うことのできる対話メディアとして現在でも多くの場面で活用されている。また、電話においても空間を共有するこ

表 2.1: 対話メディアの特性の比較

メディア	チャンネル	形態	同時性	物理空間
手紙	視覚	文字, 絵	非同時	非共有
電話	聴覚	言語, 非言語	同時	非共有
テレビ電話	聴覚, 視覚	言語, 非言語	同時	非共有
インターネット	聴覚, 視覚	文字, 言語, 非言語	同時	非共有
対面	互換	言語, 非言語	同時	共有

とはできない。

しかし、手紙のように視覚的な要素を全く扱うことができないため、相手の存在を目で確認することができない。このためこの対話メディアにおいては、視覚情報の欠如から情報伝達が難しい場面も多々存在する。

テレビ電話

テレビ電話は前述した電話の拡張として映像をも転送することにより、対話者の顔を見て遠隔コミュニケーションすることができる。この点においてこの対話メディアも同期的なコミュニケーションが可能である。しかし、空間を共有することはできない。

音声のみではなく、相手の表情も見れる。場合によっては相手の身体動作までも用いることができる。近年になって、インターネット回線の高速化や通信技術の発達に伴って高精細の映像を用いた遠隔コミュニケーションシステムが実現されてきている。これにより、ディスプレイ上に遠隔地の人物の精密な画像をほぼ等身大で投影することが可能となった⁸⁹。現在では大画面での遠隔コミュニケーションに関する研究も多くのグループで進められている。

インターネット

インターネットによる遠隔コミュニケーションにおいては、メールやチャットなどといった主に文字を扱うものや、ボイスメールや VoIP などを用いた音声対話、直接顔を見て対話することのできるテレビ電話など様々な形態が存在する。この点で、このインターネットとコンピュータを用いた遠隔コミュニケーションでは、これまでに人類が発明してきた遠隔対話手法の多くを包含しているといっても過言ではない。

近年では遠隔地間のデバイスを出力器として扱い、他者の存在感の伝達を試みる研究も進められている [21][5]。この点において、わずかだがこの対話メディアにおいては空間を共有することができるが、まだ可能性が示されている段階である。

以上をまとめると表 2.1 となる。

⁸<http://www.cisco.com/web/JP/solution/uc/telepresence/>

⁹<http://www.polycom.co.jp/products/telepresence/rpx/>

2.5.2 ロボットを用いた遠隔コミュニケーション

前項でみたように、これまでに様々な遠隔コミュニケーションメディアが開発されてきた。また、それぞれの特徴からメディアの特性についてふれ、優れている点、劣っている点について述べた。手紙は非同期的な対話メディアであるが、その保存能力に優れ、電話は同期的な対話メディアであるが記録し、それを振り返ることは難しい。インターネットとコンピュータをメディアとした対話は上述したメディアの特性のすべてを兼ね備えているようにも見える。しかし、手紙が持つ手書きの文字というアナログな要素を持ち得ず、この非言語情報の伝達は現在のインターネット技術では難しいようにも思える。

これらのメディアは同期的であれ非同期的であれ、我々はその場に適した対話メディアを選択してきた。また、これらを有効に活用し遠隔コミュニケーションを行ってきた。

しかし、これらの遠隔コミュニケーションメディアでは、やはり対面コミュニケーションが持つ真に迫った存在感は有していないと考えられる。実際に、これらの遠隔コミュニケーションにおいては、そのインタラクションの形態や情報量の問題により対話が円滑に行えない場合も多々ある。筆者は身体をもち、このため物理的存在感を有するロボットではこの存在感をもった遠隔コミュニケーションが実現すると考えている。特に、空間を共有した対話によって存在感を有する遠隔コミュニケーションが可能になると考えている。

Shortらは手紙や電話、テレビ電話など様々なメディア間での存在感比較を行った[65]。彼らは存在感を「相手が『そこ』にいると、その人が感じる程度」とした。この考えでは、人がメディアの特性をどのように認知しているかを重視する立場であり、メディアの全体的にとらえようとする。実際には対話実験後にいくつかの形容詞対による因子分析を行い、各メディアの存在感を計測した。図2.7にこの実験の結果を示す。この図から、テレビジョン(テレビ電話)条件、電話条件、手紙条件といった順で存在感が低くなっているのがわかる。また、対面とテレビジョン条件にはそれ以外のメディア以上に大きな差があることがわかる。

筆者はこの対面とテレビジョン条件の間にロボットメディアが位置することができると考えている。もしくは、ロボットは対面に匹敵する存在感を表現することができると考えている。たしかに、Shortらが行った実験での存在感の定義は曖昧性を残したものであったという批判もある[57]。しかし、身体を持ったロボットを用いることで、これまでのメディアが扱うことができなかった人の感覚、つまり触覚などを活用し、まさに対話者が目の前にいる感覚の提示を行うことが可能になるかもしれない。さらには、これらの研究の中から、人が遠隔地において人を再現するということの意味、さらには欲求とはなにかについての発見が期待される。

これまでもロボットを用いた遠隔コミュニケーション研究は行われてきているが[34][61][67][84]、存在感に注目したものは多くなかった。本研究ではロボットが有する存在感を活用した遠隔コミュニケーションシステムの開発と評価を行う。

2.5.3 認知的存在感と身体的存在感

ロボットを対話メディアとしてとらえたときに、これまでの対話メディアと比較にならないほどの可能性がある。ロボットはこれまでの対話メディアと異なり、物理空間を共有することができ、このため、これまでのメディアでは持ち得なかった「存在感」を有する

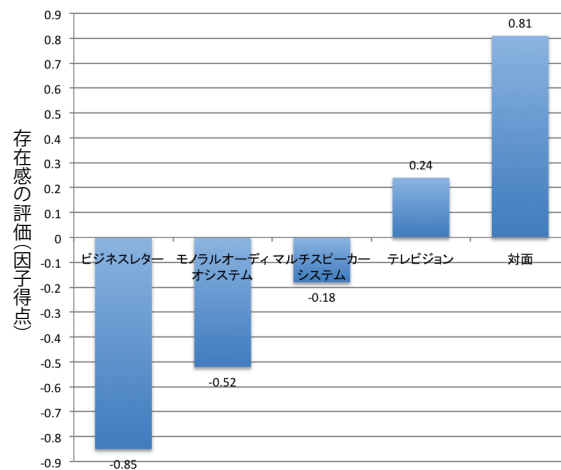


図 2.7: 存在感のメディア別評価 (Short ら, 1976)

メディアであると言える。

しかし、この存在感という概念は曖昧なものであり、そのまま使用することは難しい。そこで本論文では存在感を「認知的存在感 (Cognitive Presence)」と「身体的存在感 (Embodied Presence)」とに分けて考える。以下にその詳細について述べる。

認知的存在感

メールやチャットなどの文字だけの遠隔コミュニケーションにおいても、その言葉から対話相手の強い存在感を感じることはしばしばある。また、手紙などの筆跡から相手の感情を読み取ることで強い存在感を感じることもある。このように同期的ではなく、また空間の共有もしていない状況においても人はある人の存在感を感じることは可能である。ここで伝達されている情報は非常に限られたものであるが、逆説的に強い存在感を感じることもある。

本論文ではこれを認知的存在感と呼ぶ。認知的存在感は人が何かしらの情報に触れる際に感じられる存在感であり、触れる情報源は物でも文字でもかまわない。ここで認知される存在感は、ある人との関係性であると考えられる。伝達される情報は非常に少ないとしても、その情報に関連づけられた記憶や経験が想起されることにより認知される他者の存在感は非常に大きなものとなりうるだろう。この存在感は記憶や経験の質や大きさに比例することが考えられる。

また、たとえば文字だけでは非常に小さな情報であるが、この文字や言葉の意味から想像される意図や感情を読み解くことで強い存在感を感じることもある。この場合の存在感は言葉の強さであり、この言葉を書き記した人の想いであると考えられる。この場合は実際にその人との関係が疎であっても、その人の強い存在感を感じることもできる。この場合、情報の受け手が言葉の意味を取り違ったり、理解できなければ認知的存在感は小さいものになってしまうことが考えられる。これはつまり、認知的存在感は情報の受け手に依存することを意味する。

このように認知的存在感は、たとえ情報が小さくても、情報を受け取る人の内面に想起される情報の大きさに関係すると考えられる。

身体的存在感

対面によるコミュニケーションは同期的かつ空間を共有することができる。また、通信媒体を必要としないため、この通信による対話者に関する情報の劣化もない。このため、対面によるコミュニケーションはもっとも強い現実感を持って対話を行うことが可能である。ここでの身体的存在感は「ある人がまさに目の前にいる」ことを感じることであり、これを感じられる手段は空間内を他者の声が伝わる際に生じる空気の揺れであるかもしれないし、中空を経由する他者の体温であるかもしれない。さらには、他者との接触によるものかもしれない。他者との接触は身体に直接働きかけることができるため、最も強力に感じられる身体的存在感であると言えるであろう。

言語や身体動作による情報伝達はある程度の多くのものを計測可能であるが、空気の揺れや、空間の微妙な温度変化が身体的存在感に影響するとすると、これらの情報を計測することは非常に難しい。特に、これらの情報を受け取る度合いは個人差に大きく依存するであろうし、受け取った情報がその個人内でどのように知覚、認識されるかについては多くのものが未知であると考えられる。このように、身体動作などはある程度の計測は可能であろう。しかし、その意味をとらえることは非常に難しい。特に、ある人の内面に起こる感情などは計測することはできない。

対面によるコミュニケーションはメディア、たとえば手紙や電話などを介した場合と異なり、他者を直接感じることができる。これはつまり、情報の劣化がなく、発信された情報は受け手に対して直接影響を与えることができる。ここで、発信者からの情報は受け手には物理的に(声であれば空間の揺れがそうであるように)直接伝わる。しかし、これを受け取ることができるか否かであったり、言葉であればその意味を理解することができるかどうかは情報の受け手次第の問題であるとも言える。

このように身体的存在感とは、実際に空間を共有し、身体だけではなく空気の揺れまでを含む大きな情報であると考えられる。

存在感

「存在感」という言葉を適切に表すことは非常に難しいが、これを本研究の趣旨に沿って解釈した場合に、上述した2種類の分類が可能であろうと考える。つまり、人が物理的、身体的に感じることができる存在感と、人の内的な現象として経験、想起される存在感である。これら2つの存在感は互いに不可分であると考えられるが、それぞれの特徴もあると考えられる。つまり、身体的存在感は物理的に空間を共有し、多くの情報を直接を交換する対話のなかに存在する。認知的存在感は文字や声などの対面と比べると小さい情報であっても、その情報に含まれる意味を解釈することで、情報を受け取る人の中に生じる現象であると言える。これは身体的な存在感を経験した結果生じる関係性によることも多いと考えられる。このように、身体的存在感から認知的存在感の質が変化したり、またこの逆もあり得る。この点において、本研究ではこれら2つの存在感を大きく「存在感」と呼

ぶこととする。ただし、認知的存在感の計測、評価は現在の技術では難しい。このため、本研究では主に身体的存在感の評価を行うこととする。

ここで、一点考慮すべき事項がある。たとえば、物理的に空間を共有しても、対話などの相互作用が無ければ存在感は小さい可能性がある。また、この場合、経験される存在感の小ささから認知的な存在感へ与える影響は小さいかもしれない。これはつまり、身体的存在感は対話における相互作用も大きく関係し、この経験が認知的存在感に影響するということである。たとえ物理的に空間を共有したとしても、相互作用が無ければ人の内面に存在感は生じないであろう。

2.6 本研究でのアプローチ

ここまでは本研究に関連する研究を概観してきた。本節では本研究の手法について述べる。

2.6.1 身体性インタラクティブシステム

ロボットはその形態や外見によらず、入力機構と出力機構を持ち、これらを用いてそれ自身で情報処理を行い、外界と相互作用できる機械であると言える。この定義によればユビキタス・コンピューティング環境やパーベイシブ・コンピューティング環境もロボットと呼ぶことができ、さらには、様々な家電製品までロボットであると言える。

これらはすべて外見はどうであれ、それぞれの身体を有し、人と相互作用を行うという点において身体性インタラクティブシステム (Embodied Interactive System) と呼ぶことができる。特に、ユビキタスやパーベイシブ環境における各情報機器が協調的に動作し、空間自体が一つのシステムとして機能することができれば、それは一つの身体を持ったロボット環境であるとも言える。このような取り組みについても既に行われてきている [5]。

本論文ではこの身体を有し、人とインタラクションするシステムであるロボットを身体性インタラクティブシステムと呼ぶ。具体的には上述したような人型ロボットだけではなく、空間という身体をもつシステムなど、インタラクションメディアとして身体を有するインタラクティブシステムを身体性インタラクティブシステムと呼び、この中でも特に人型ロボットに注目する。人型ロボットはその外見が人に近いことから、人はこれらに対して人と同等の対話が可能であるかのような想像を描く。しかし、現在の人型ロボットの自律対話能力は決して高くなく、この点において人型ロボットとのインタラクションの価値を下げていると考えられる。さらには、これが多くの人とロボットの相互作用研究の障害になっていると考えられる。

本研究では人型ロボットであるからこそ実現することのできるインタラクションに注目し、この相互作用による影響評価を行う。また、これを行うための人型ロボットシステムを開発する。以降の項ではこれらについて詳述する。

2.6.2 半自律遠隔操作型ロボットシステム

第 2.1 節で述べたようにこれまでに様々なインタラクティブシステムが研究開発されてきた。この中の一つとしてロボットを含むエージェント技術があったことを述べた。第 2.2 節ではこれらのシステムとのインタラクションにおける価値や意味について述べ、人型ロボットにおけるインタラクションデザインに関する研究の重要性について述べた。

これらの研究から、人型ロボットとのインタラクションを豊かにするためには、残された多くのインタラクションに関する要素問題を明らかにすることが必要であることがわかる。しかし、現在の自律対話システムの不完全性からこれらの研究を遂行する段階には至っていない。しかし、限定的なタスクや状況においてロボットはある程度の信頼性を持って自律的動作することが可能である。

しかし、本研究、特に人-ロボット間相互作用研究においては言語による高度な対話機能が必要となる。なぜなら、将来ロボットが獲得するであろう自律対話機能を想定した実験を行わなければ、これらの将来の研究に貢献できないと考えられるためである。このため、本研究では人とロボットのインタラクションの影響評価を行うために、半自律遠隔操作型ロボットシステムの提案と開発を行う。これにより、対話実験でのインタラクションの質の向上を目指す。

これらの詳細については第 3 章において詳述する。

2.6.3 人型ロボットとのインタラクションの影響評価

人型ロボットが我々の社会に大きな影響を与えることができる強力な対話メディアであることは従来研究から明らかになってきている。しかし、人型ロボットとのインタラクションの影響は多くのものが未知であることは問題である。なぜなら、ロボットが社会に進出してから問題が表出せば、取り返しの付かない事態になりかねないと考えるためである。

このため、社会的なロボットとして必要な影響評価を行う必要がある。これを行うために本章で述べた研究と対応するかたちで 3 つの研究を行う。これらの研究では人とロボットのインタラクションにおける仮説を立て、これらを検証するためのインタラクションデザインの設計を行い、評価する。

インタラクションのデザインとその評価のプロセスは人型ロボットにとって非常に重要となる。このため、本研究では一貫してロボットの振る舞いのデザインとその評価を行う。人とロボットのインタラクションにおけるロボットの振る舞いの影響の評価を行うことにより、将来の人型ロボット開発における振る舞いの設計方針やガイドライン作成の一助となる成果を残すことを目指す。

これらの手法について以下に簡単に示す。

ロボットの身体動作の影響評価

第 2.3 節ではコミュニケーションにおける身体動作の重要性について述べた。第 4 章では、これに対応するかたちで身体性コミュニケーションに注目した相互作用に関する研究を行う。

具体的には人と同調的な身体動作を行うことができるロボットシステムを開発し、これ

との対話実験を通して人型ロボットの身体動作が人に対してどのような影響があるのかを確認する。

ロボットの社会的態度の影響評価

第2.4節ではコミュニケーションにおける社会的態度の重要性について述べた。第5章ではこれに対応するかたちで人型ロボットの社会的態度に注目した相互作用に関する研究を行う。

具体的にはロボットを含む3者対話において人に対する社会的態度を実験条件ごとに変化させることにより、人間関係にどのような影響があるのかについて確認する。

ロボットの持つ存在感の影響評価

第2.5節では遠隔コミュニケーションメディアとしてのロボットの可能性について述べた。第6章ではこれに対応するかたちで人に酷似した人型ロボットであるアンドロイドを用いた遠隔コミュニケーションに関する研究を行う。

具体的にはアンドロイドの遠隔操作システムを用いて遠隔対話を行い、このシステムが他のメディアとどのように違うのかを検証する。

2.7 本章のまとめ

本章では人とロボットの対話の構造理解に関する従来研究を概観した上で、本研究で採用する手法について述べた。具体的には、これまでに開発されてきた数々のインタラクティブシステムについて触れ、問題点を述べた上で、ロボットのインタラクティブシステムとしての可能性について述べた。このインタラクティブシステムでは人とインタラクションすることが主な目的となる。このインタラクションのデザインについても述べた。次に、人型ロボットであるからこそ期待される身体性コミュニケーションの重要性と、これの効果について述べた。また、身体性だけではなく、ロボットの対話で重要となるであろう社会性を社会心理学の視点から述べた。さらに、人の根源的欲求とも言うことができる遠隔コミュニケーションを実現するために開発されてきた技術について述べた。最後に、これらに対応するかたちで本研究のアプローチの有効性について述べた。

次章からは具体的な研究を段階を追って述べていく。

第3章 半自律遠隔操作型ロボットシステム

これまでに様々な人型ロボットが開発されてきた。Hondaが開発したASIMOに代表される二足歩行ロボットや [58] , Breazealらが開発した顔の表情を用いて感情を表すロボットなど、様々なものがある [1]。近年ではさらに、非常に人に近いロボットであるアンドロイド・ロボットも開発されるようになってきた [40]。これらの人に近いロボットはその身体を生かし、自然な人との対話を実現することができるかと期待される [75] [7] [44]。

一方でこれまでもロボットの遠隔操作に関する研究は多岐にわたり行われてきている。これらの研究成果として人が立ち入ることができない現場である宇宙開発や深海探索、被災地などで様々なロボットが活躍している。これらのロボットに求められる能力は限られた環境で完璧に動作することであった。しかし、これまでに人とコミュニケーションすることを目的としたロボットの遠隔操作に関する研究はあまり行われてきていない。本研究では人型ロボットを遠隔操作することにより、自律対話システムでは難しい高度なコミュニケーションを達成させることに注目している。このコミュニケーションというタスクはこれまでの遠隔操作型ロボットのタスクと比較したときに、非限定的かつ不確定な要素を多く含んでいることが考えられる。具体的には一般的な人間の普通の対話をロボットが行うことが求められる。これは予想しうる範囲に収まることはなく、一見ランダムにも見える。

現在の自律ロボットの人との対話能力を考えてみたときに、依然として高度な自由対話を行うことは難しい。これまでの人工知能研究においては高度な対話を実現されてきているが、これは外界から閉じた環境における対話であるためであると考えられる。人とロボットの対話のようにオープンな環境における対話においては音声認識能力、状況認識能力のいずれもが人との自由対話に耐えられるものになっていないと考えられる。しかし、これらの能力は一般的な人間が既に獲得しており、これにより人同士は豊かな対話を実現している。では、このようなコミュニケーションロボットの音声認識能力、状況認識能力を人間が担当するとどうなるか。多くの場面でロボットは急激に賢くなるであろうと考えている。我々はこれをコミュニケーションロボットの遠隔操作により実現する。これにより、自律的に動作するロボットよりも良いサービスを提供することが可能となるであろうと考えている。さらに、この成果としてロボットの安全さ、便利さを社会に広めることで、ロボットを早期に社会に普及させることができると考えている。これまでも遠隔操作されたロボットをショッピングセンターにおき、人に対して自然言語で対話した結果、これまで以上に良いサービスを提供することができたことが確認されている [31]。さらに、現在では駅のような公共性の高い現場での実証実験も行われている [15]。

本章では本研究で提案する半自律遠隔操作型ロボットシステムのモデルと、その実現方法について詳述する。

3.1 半自律ロボットシステム

これまで数十年に渡って完全自律対話システムに関する研究が行われてきたが、日常生活で満足に使用することができるシステムの実現は未だされていない。さらには、今後100年以内にこのシステムが実現する見通しも乏しいと考えられる。

一方で、ロボットに対する社会的要求が高まっている。高度高齢化社会を迎え、人だけではなく、自動機械への期待は大きい。しかし、これらの機械、特に我々がロボットと呼ぶものが社会で役に立つものになるのはまだ遠い未来のように感じられる。

本論文ではこれらの問題を解決するためにロボットの対話能力の一部を人に委譲するロボットシステムの提案を行う。本システムにおいては内部に状態を持つ。この状態にある限りロボットはその状態内で自律的に行動をすることができる。ただ、ロボット自身で解決することができない問題、具体的には人との対話におけるコンテキストの把握や、それをもとにした返答などといった高度な自由対話を人が担当する。この点において本ロボットシステムは半自律行動可能なロボットシステムであると言える。

本節ではまず、提案するロボットシステムのうち半自律ロボットシステムについて詳述する。

3.1.1 従来の人-ロボット間相互作用研究におけるロボットシステム

これまでに様々なロボットを用いた人とロボットの相互作用に関する研究が行われてきた。日本においてはASIMO[58]、QRIO[9]、Robovie[20]、ReplieeQ2[40]を代表として各研究固有のロボットが開発されてきた。これらの多くのロボットはそれ自身が持つ環境認識機構、行動選択機構、移動機構などを活用し、自律的に振る舞うことができるものであった。しかし、現状のロボットの自律行動能力はあまり高くなく、これにより、人との対話実験で行うことができるタスクには制限があった。特に、ロボットとの音声を用いた対話においては音声認識能力の不足により、被験者に対してストレスを与えてしまうことも多くあったと考えられる。

3.1.2 提案するモデル

ロボットシステムの対話能力を人に近いものとするために、本ロボットシステムでは対話能力の一部を人に委譲することとする。

Normanらは人の脳の情報処理を3つの階層に分けてモデル化した[49]。図3.1に彼らが提案したモデルを示す。モデル中の下位層から本能レベル(Visceral)、行動レベル(Behavioral)、内省レベル(Reflective)と呼ぶ。本能レベルは自動的で生来的な層であるとされる。行動レベルは日常の行動を制御する脳の機能を含む部分であるとされる。最後の内省レベルは脳の熟慮する部分であるとされる。一般に、本能レベルでの行動は反射などの危険回避などを行うような行動を司る。このレベルは意識されない。行動レベルも意識されず、このため自転車を漕ぐ動作のように潜在意識的に行うような行動を司る。内省レベルでは他の生物が有しないような過去の経験を考慮しながら行動するようなものや、創造性を発揮するレベルである。これは意識的に行うものである。

本論文で提案するシステムでは彼が提案したモデルにおいて人にとって最も知的な活動

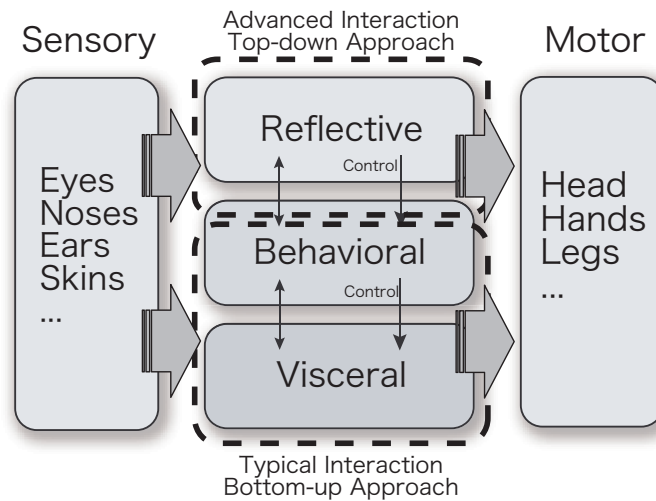


図 3.1: D. Norman による感情のモデル

である内省を行う部分を人に委譲する。また、行動に関してもロボット自身で解決することができないものも未だ多く存在する。このため、これらについてもシステムは人に委譲する。

これを実現するために、本論文で提案するロボットシステムの設計を行う。図 3.2 に提案するロボットシステムのモデルを示す。本ロボットシステムではロボット内部に状態遷移機構を持ち、外部から入力されるセンサ情報を基に状態を遷移させることで自律動作を実現している。内部状態は予め開発者により定義された状態遷移ルールに基づき遷移する。内部状態では抽象化されたロボットの行動が記述されている。具体的には予め定義された Communicative Module の実行に関するルールが記述されており、これを実行することでロボットは動作を行う。Communicative Module では連続的な行動のルールが記述されており、ロボットはこれに従って行動する。この Module では挨拶をする、ある地点に移動するなど具体的なロボットの行動が記述されている。また、ロボットは危険回避や安全のための回避行動のために Reactive Module が実装されている。これにより、状態に関係なく、回避行動を取ることが可能である。また、この際、Reactive Module は上のレイヤーの Module に対して回避行動を取った旨を知らせる。これにより、回避行動によって内部状態に沿った自律的な行動を妨げることはない。同様に、Communicative Module においても現在の状態を上のレイヤーである Internal State Module に対して伝えている。

3.2 遠隔操作システム

前節で述べた自律行動部分を遠隔操作するシステムについて述べる。本システムは遠隔操作システムを内包している。

基本的には前述した状態の切り替えを行う。また、音声対話については予めロボット上で用意した行動モジュール内に音声が入っている場合と、操作者の声を直接ロボット上で再生する場合がある。これは研究ごとに異なる。

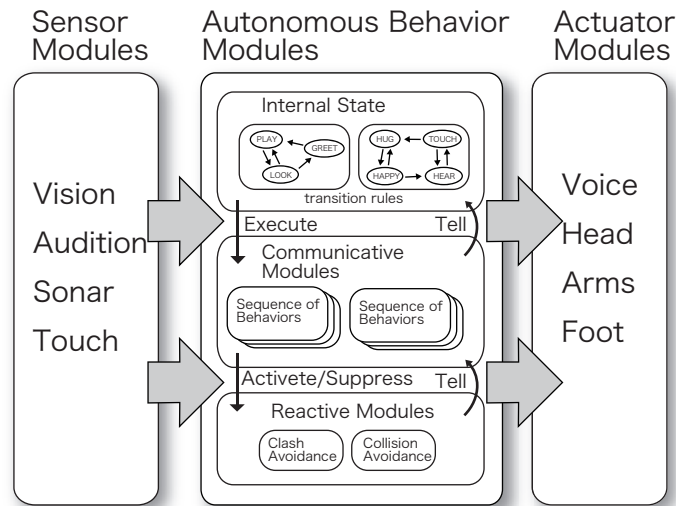


図 3.2: 提案するロボットシステムのモデル

3.2.1 人型ロボットの遠隔操作

人型ロボットと呼ばれるロボットは人のような身体を持っているという点において制御が難しいロボットである。特に、二足歩行することができるロボットなどにおいてはその制御技術が確立したのは2000年以降であり、未だ自由な歩行が可能という訳ではない。

本研究で扱うロボットは車輪式の人型ロボットであるが、これらについてもその上半身の制御には困難さが伴う。特に、人と対話することを目的としたロボットにおいては、その頭部や腕部によりそのロボットの感情表現を行うことが必要となるため、その設計や制御は二足歩行技術とは違った難しさがある。

人型ロボットは一体について10~20もの自由度を持つものが一般的である。これらのロボットに対してさらに多くの表現力を持たせるためには、それだけのアクチュエータが必要であり、その制御と遠隔操作の困難さは増大する。

3.2.2 実現するシステム

複雑な身体を有する人型ロボットを遠隔操作するために、本研究では上述したロボットの自律性を利用する。ロボット内部には様々な状態を持ち、この状態にあるうちはそのロボットはその状態で定義された行動を実行する。状態内ではセンサ情報を扱って自律的に行動する。

本システムの遠隔操作者はロボットが置かれた空間の情報をカメラやマイクなどを用いて遠隔地から常に監視する。遠隔操作者は人とロボットの対話の様子を把握し、ロボットに対して適切な振る舞いをさせるように操作する。この際、遠隔操作者はロボットのアクチュエータを直接操作するのではなく、ロボットの内部の状態を切り替えることによって操作を行う。

3.2.3 遠隔操作インタフェース

ロボットの遠隔操作には専用のインタフェースを用いる。本論文で提案するロボットシステムにおいては、遠隔操作者はロボットの状態を切り替えるのみであるため、開発するインタフェースは単純なものとなる。

しかし、今後ロボットの行動の多くを遠隔操作することになる場合、インタフェースはロボットの状態に応じて適切な状態を遠隔操作者に提示することが有効となることが考えられる。なぜなら、日常的に活動するロボットの状態数は爆発的に増大する可能性があり、これをすべて遠隔操作者が把握することが困難になると考えられるためである。

また、開発するインタフェースにおいてはロボットの動作だけではなく、ロボットからの発声についてもサポートする必要があるものもある。

3.3 各章でのロボットシステムの役割

本章で提案したシステムが次章以降で行われる研究においてどのような役割を担うのかについて述べる。本研究では主に3つのテーマにそって研究が行われるが各研究において、それぞれ別のロボットが使用される。これらのシステムと本章で提案したモデルとの関係について以下に示す。また、それぞれの具体的な実装方法や使用方法については各章で詳述する。

3.3.1 身体性コミュニケーションを実現するシステム

第四章で行う研究ではロボットの身体を活用したコミュニケーションに注目する。ここでは、ロボットが人と同期的、つまり人と同じ動作をすることにより人に対してどのような影響があるのかを検証する実験を行う。具体的には、人がロボットに対して身体を活用しながら情報提供する場面において、ロボットが適切な場面で同期的な身体動作を行う。

これを実現するために、本システムにおいては3次元モーションキャプチャシステムを用いて空間内に存在する人とロボットの身体動作の正確な情報を取得し、これに基づいてロボットが自律的に人と同期的な身体動作を行う。この際、本システムでは人の音声を認識するための機構を持たず、代わりに人がそれを担当する。また、対話のコンテキストの把握や発話、身体動作の切り替えのみを人が遠隔操作する。これにより、音声対話を行う部分を人が判断し、適切な身体動作の切り替えを行う。また、身体動作はロボット側で自律的に行うことができるシステムの実現をする。

本システムは本章で提案したモデルの高度対話能力を人に委譲し、ロボットのみで行動することができる部分はロボットのみで解決することを目的としたものである。

3.3.2 自動的に社会的態度を変化させるシステム

第五章で行う研究ではロボットの社会的態度に注目する。ここでは、人との対話においてロボットが動的に社会的態度を変化させることで、人に対してどのような影響があるのかを検証する実験を行う。具体的には、ロボット1台と2人の人との対話においてロボッ

トが意図的に両者に対する社会的態度を変化させる。

これを実現するために、本システムにおいては被験者に対して事前に行うアンケートをもとに、ロボット自身の社会的態度を自律的に選択する。ただ、本システムにおいても人の音声を認識するための機構を持たないため、対話におけるロボットの発話タイミングを人が遠隔操作する。

本システムにおいても人が高度対話能力を担当し、それ以外はロボットのみで行動することができるシステムとなっており、本章で提案するモデルに沿ったシステム実装となっている。

3.3.3 アンドロイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションシステム

第6章で行う研究では、アンドロイドロボットを人が遠隔操作し、これと対話を行うことで、人と同等の対話能力を有するロボットとの対話の影響があるのかを検証する実験を行う。

これを実現するために、本システムにおいては人がロボット上で発話を行う。また、対話のコンテキストに応じた振る舞いも人が遠隔操作で切り替えを行う。ただし、本研究で使用するアンドロイドは全身50ものアクチュエータを有する超多自由度ロボットである。このため、人がすべての動作を操作することは不可能である。この問題を解決するために、本システムではアンドロイドの動作はほぼ自律的に行うシステムとする。この自律的な部分には瞬きや呼吸など行った無意識的な動作も含まれている。

本システムにおいて人は対話のコンテキストを理解し、それに応じた振る舞いの切り替えを行う。同時に、人がロボットを通して人と対話するため、遠隔操作を行う者は音声による対話も行う。

3.4 本章のまとめ

本章では半遠隔操作型ロボットシステムと呼ばれる、ロボットが人と高度な自由対話を行うためのシステムについて述べた。本システムでは自律動作部と遠隔操作部が存在する。自律動作部は行動単位で実装されたモジュールを状態と定義し、これを遷移させることで自律的な行動を行うこととした。また、遠隔操作部ではこの状態を遠隔操作により切り替えるという遠隔操作を行う。これにより、半遠隔型遠隔操作ロボットシステムとしてモデル化し、本研究で提案するものである。

以降3章では実際に本システムを用いた研究を行うが、実際のシステムの詳細は各章で詳述する。

第4章 人と人型ロボットの身体性コミュニケーション

本章では人とロボットの対話における，身体を活用したコミュニケーションの影響について検証した実験について述べる．本章では，特にロボットの動作を人と同調的，つまり，人の動作のまねをするシステムを開発し，このロボットシステムの評価実験について述べる．

近年，様々なヒューマノイドロボットが開発される中で，人間とコンピュータとの間のインタフェースとしてのロボットの役割が注目されてきている．たとえば，ロボットの身体を活用したコミュニケーションにより，コンピュータを使うのが苦手な人も容易に情報ネットワークにアクセスする事ができる．私はロボットが人間と同様の身体を持つことの意味は特にコミュニケーションにあると考える．つまり，このような人型のロボットは将来的に人間の物理的なサポートをするのみでなくコミュニケーションの側面のサポートも行うことができる．

人間はコミュニケーションの際に音声のみでなく視線を交え，身振り手振りをかわす．これまでも人間同士の身体を用いたコミュニケーションについては，ゼスチャと発話を統合的に分析するなど [37]，多くの研究が行われてきている．このような研究のなかから，単にシンボルを身体で表すサインランゲッジ以上に，会話の際の双方の身体の動きの関わり合い (Mutual Relationship) の重要性が徐々に明らかになってきている．

たとえば，遠くのものを示すとき，人は視線と指さしの双方を使い相手の注意を引きつける．結果として，聞き手の視線も無意識のうちに話し手と同じ対象に向けられる．このようなメカニズムは共同注意機構として主に発達心理学の分野で研究が進められ [41]，近年は共同注意を行うロボットの研究も進んでいる [51]．

また，対話の際の互いの身体動作の同期に関して，古くは Condon の乳幼児研究に始まり [79]，近年は人間型ロボットを用いた研究が行われている．小野らは道案内をするロボットに適切なゼスチャを行わせると聞き手が無意識に引き込まれて，同調的な身体動作を行い，さらに言語情報の理解も促進されることを見いだした [53]．このように無意識に生じる身体動作の引き込み現象はエントレインメント (Entrainment) と呼ばれる．

このエントレインメントをロボットへ応用するアプローチは2つある．一つ目は，ヒューマンインタフェースへの利用である．渡部らの開発したロボットはうなずきなどの身体動作の同期によって，エントレインメントを引き起こし，遠隔地間の人間同士のコミュニケーションを支援する [74]．これに対して，2つ目のアプローチは自律ロボットへの応用である．本研究で用いるロボットは後者に該当し，人間に似た体を活用することで，まるで人間同士が対話しているように，ロボットと対話する人が自然で円滑な対話を行えるようにすることを目指している．このような研究アプローチの中で，神田らは自律型の人型インタ

ラクティブロボットと人との相互作用の中で視線や腕の動きの同調が主観的な評価と相関関係にあることを見いだした [25]。これらの従来研究から見いだされるように、私は互いの身体動作の関わり合いの中に、身体性コミュニケーション (Embodied Communication) の本質があると考えます。

一方で身体を用いたロボットと人間のコミュニケーションに関する研究は、主にロボットからのゼスチャの実現という視点から行われてきた。特に身体の中でも非常に効果があると考えられているのが視線である。たとえば、視線を対話相手に向けてアイコンタクトを行うことで、ロボットは自らのコミュニケーション意図を人に伝え、人間と自然に対話することが可能になる [20]。また、視線に関しては、発話者の方を見ることでグループ会話に参加するロボット [36] や音声と視覚による人物追従 [46] など多くの研究が行われた。このほか、顔の表情 [1] などの研究も行われている。しかし、これらの従来研究では相互の身体動作の関わり合いについてはあまり注目されてこなかった。

本章では、モーションキャプチャシステムと人型ロボットを用いて、このような身体性コミュニケーションにおける互いの身体動作の関わり合いの影響を見いだすことを試みる。この結果は同時に、身体性コミュニケーションを行うロボットの開発に有益な知見を得ることにつながる。具体的な方法としては、ロボットは多数の協調的な身体動作（たとえば、アイコンタクト）を実現するソフトウェアモジュールを遠隔操作により逐次切り替えながら実行する。特に、実験のタスクが話を聞く、ということから、ロボットからはサインラゲッジのようなシンボルを表すゼスチャは行わず、むしろ話し手の人間の身体動作に対して、センサ情報のみに基づいて応答的に自らの身体を動かす。この身体動作が、対話者である人に対してどのような影響があるのかを対話実験により確認する。

4.1 協調的身体動作をするロボットシステム

本節では、人とアイコンタクトや同調的な腕の動きといった協調的身体動作を半自律制御で実現するロボットのシステム構成について述べる。本システムではモーションキャプチャシステムを用い、人の身体動作を実時間で取得する。そのデータを元にロボット上で人と同じ身体動作を実現する。これにより、人の身体動作の完全な情報に基づいて、人に対して協調的な身体動作を行うロボットが実現できると考える。本節では本システムの詳細について述べる。

4.1.1 コミュニケーションロボット “Robovie II”

ここでは、協調的な身体動作を実現するためのプラットフォームであるロボット “Robovie II” の駆動機構について詳述する。まず、図 4.1 に本ロボットの概観と可動機構を示す。

本ロボットは人とのコミュニケーション機能に重点を置き擬人化しやすい外見を持つ上半身人型のヒューマノイドロボットである。人間に威圧感を与えないために人間よりもひとまわり以上小さいサイズとなるように設計され、すべての制御系を本体内に内蔵している。本ロボットの高さは 1.2 [m]、半径 0.5 [m]、重量約 40 [kg] である。本ロボットの頭部は 3 自由度の機構で人のように回転可能である。腕は 4 自由度の機構で肩に 3 自由度、ひじに 1 自由度という配置になっている (図 4.1 下)。Q,R 軸により人の肩の動きを再現し、

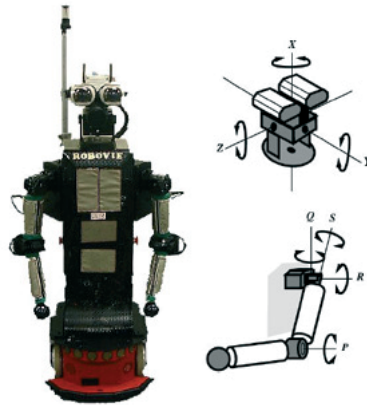


図 4.1: Robovie II の駆動機構

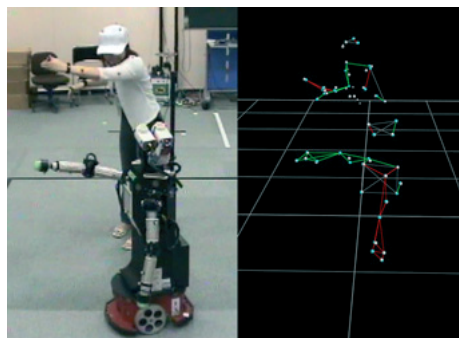


図 4.2: VICON モーションキャプチャーシステム

P,S 軸により人のひじの動きを再現する．これにより，人の基本的な身体動作の多くを再現することが可能である．また，実際にはロボットの胴体から肩の駆動部は斜めにつけられている．これは，人と抱き合うなどの動作を実現するために必須な条件であり，身体動作を実装するためにはこの条件も考慮して実装を行う．移動に際しては2輪独立駆動方式の車輪を用いており，人のように横に水平に移動することは不可能ではあるが，移動には困難はないため人とコミュニケーションをとることに問題ない．本ロボットは視覚，聴覚，触覚といった人間とのコミュニケーションに必要なセンサを持つ．頭部には立体視が可能な2台のカメラが取り付けられている．

4.1.2 モーションキャプチャシステムを用いた協調動作の実現

本研究では3次元モーションキャプチャシステムを環境型センサとして利用することで，人型ロボットにアイコンタクトや腕の動きの同調といった協調的動作をさせるロボットシステムを実現する(図4.2)．本システムのソフトウェア構成を図4.3に示す．本ソフトウェアは以下の3つのコンポーネントから構成される．

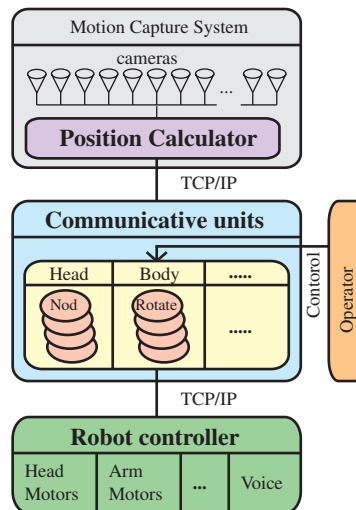


図 4.3: ソフトウェア構成

Position Calculator

Position Calculator はモーションキャプチャシステムを利用して人と人型ロボットの身体位置を計測する．このために Vicon Motion Systems 社製モーションキャプチャシステムを使用した¹．本システムは赤外線照射機能つき赤外線カメラ 12 台と赤外線を反射するマーカーから構成される．本システムは，時間分解能 120 [Hz]，空間分解能約 1 [mm] (本実験環境における値) で計測可能である．ここでは上半身のみの身体動作を行うため，人間とロボットの上半身にそれぞれ 23 点のマーカーを取り付けた．

Position Calculator はこのモーションキャプチャシステムを利用し，3次元の座標データとマーカーの名前を同時に実時間で取得する．また，取得した3次元座標データを TCP/IP による Socket 通信を用いて他の計算機へ渡すことができる．そのため，人間の身体動作に実時間で反応するロボットが実現可能である．

Communicative Unit

Communicative Unit は頭部，右腕，左腕，体の向きそれぞれに関して，人間との対話的な身体動作を実現するモジュールである．各 Communicative Unit では Position Calculator から送られる身体位置に基づき，アイコンタクトや腕の同調といった人間の身体動作に協調した動きをロボットの各部位で実現する．つまり，これらのモジュールが人と協調的な身体動作を実現する．人と対話する際には，単純な同調動作のみでなくあいづちのような動作も重要であるため，うなずきや，首をふるといった動作も実装した．表 4.1 に実装した全ての Communicative Unit を示す．また，以下におもな Communicative Unit の内容を示す．なお，以下の詳細に登場する座標系に関しては，すべてロボット内部にある基準点を原点としたローカル座標系に変換された値とする．この座標系は両肩のマーカーを通

¹<http://www.vicon.com/>

表 4.1: 実装した Communicative Unit(身体動作)

頭部	腕 (右, 左)	体の向き (台車の移動)
アイコンタクト 指先方向を見る (右, 左) うなづき 首をかしげる	腕の同調 (右, 左) 鏡像の腕の同調 (右, 左) 動きなし	正面を向く 並ぶ位置関係

表 4.2: 実装した Communicative Unit(発話)

発話
道を教えてね うん, うんうん, はい ごめん, もう一回 ゆっくりお願い ありがとう, わかったよ

る直線を x 軸との平行な直線とし, ロボットの正面を y 軸の正の方向とする座標系である.
Communicative Unit の例

アイコンタクト 相手の顔位置のほうにロボットの頭部を向ける.

人の頭部左前につけたマーカーを $LFHD_H$, 頭部右前につけたマーカーを $RFHD_H$, としたときに, $LFHD_H$ と $RFHD_H$ の中点を $CFHD_H$ とする. また, 左肩につけられたマーカーを $LSHO_H$, 右肩につけられたマーカーを $RSHO_H$ としたときに, $LSHO_H$ と $RSHO_H$ の中点を $CSHO_H$ とすると, 人の目の位置は

$$H_{eye} = (CFHD_H + CSHO_H)/3$$

で求まる. この点にロボットの頭部を向ける.

ロボットの頭部左前につけたマーカーを $LFHD_R$, 頭部右前につけたマーカーを $RFHD_R$, としたときに, $LFHD_R$ と $RFHD_R$ の中点を R_{eye} とする. これは, 本ロボットの頭部が目となるカメラであるためロボット頭部につけられたマーカーは同時に目の位置のマーカーとして扱うことができるためである. ここで, ロボットから人への視線のベクトル $v_{eyeDirectoin}$ を求める.

$$v_{eyeContact} = H_{eye} - R_{eye}$$

このベクトル成分の z 軸についての回転角 (pan) と x 軸についての回転角 ($tilt$) を求める. まず, z 軸についての回転角 pan を求める.

$$pan = \text{scalar}(v_{eyeContact}, s) - \arccos(0)$$

次に, $tilt$ を計算するために, $v_{eyeContact}$ を pan 分 z 軸回転させる.

$$R_{eyeDirection} = \text{rotate}(v_{eyeContact}, pan)$$

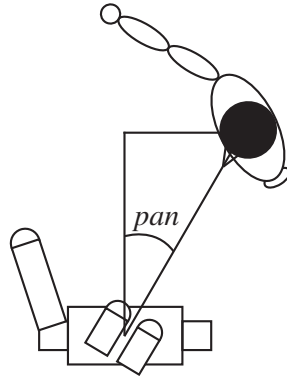


図 4.4: アイコンタクト (XY 平面図)

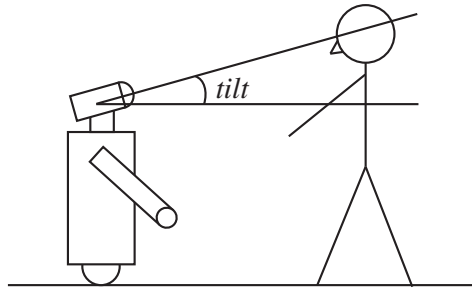


図 4.5: アイコンタクト (YZ 平面図)

$R_{eyeDirection}$ の y 座標成分は x 軸上にあるため、これにより $tilt$ を求めることができる。

$$tilt = scalar(v_{eyeDirection}, z) - arccos(0)$$

図 4.4 に x - y 平面の図を、図 4.5 に y - z 平面の図を示す。

腕の同調 人の腕の動作をロボットで再現する。左右逆の腕を再現する振る舞いもある。

人の左肩のマーカを $LSHO_H$ 、右肩のマーカを $RSHO_H$ 、左ひじのマーカを $LELB_H$ 、左手首の外側のマーカを $LWRA_H$ 、とするとひじの位置、また手首の位置を 3次元座標系で一意に決定することができる。具体的には、 $RSHO_H-LSHO_H$ がロボット座標系において x 軸と平行であり、上記アイコンタクトと同様の考え方で進める。

並ぶ位置関係 人と向かい合う、また、人に対して体を真横を向ける。

人の両肩のマーカをそれぞれ $RSHO_H, LSHO_H$ とし、ロボットの両肩のマーカをそれぞれ $RSHO_R, LSHO_R$ とすると、ロボットの両肩のマーカを通る直線に、人とロボットの肩の中心を通る直線が直交するように体を向けることで、人と向き合う振る舞いを実現することができる。まず、人とロボットの肩の中心座標を求める。

$$CSHO_H = (RSHO_H + LSHO_H)/2$$

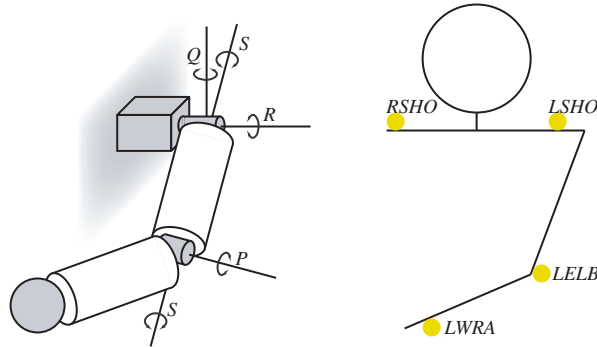


図 4.6: 腕の同調

$$CSHO_R = (RSHO_R + LSHO_R)/2$$

これから人とロボットのなすベクトルを求める．

$$v_{\text{BodyDirection}} = CSCHO_H - CSCHO_R$$

ロボットの両肩を通る直線を求める

$$r_{\text{SholderDirection}} = RSHO_R - LSHO_R$$

$v_{\text{BodyDirection}}$ と $r_{\text{SholderDirection}}$ から人と向かい合うための体の回転角を求める．

$$Face - to - Face = \text{scalar}(v_{\text{BodyDirection}}, r_{\text{SholderDirection}})$$

また，ロボットの両肩のマーカを通る直線を，人とロボットの肩の中心を通る直線が平行になるように体を向けることで，人に対して体を真横に向ける振る舞いを実現することができる．上記の $v_{\text{BodyDirection}}, r_{\text{SholderDirection}}$ から

$$Half - Face - to - Face = \text{scalar}(v_{\text{BodyDirection}}, r_{\text{SholderDirection}}) + \arccos(0)$$

この振る舞いは図 4.4 のような位置関係になる．

また，Communicative Unit によりロボットの発話内容も同時に制御する．発話内容は「うん」「うんうん」「えっと」「それで」といったあいづち要素であるもの及び，次章で述べる実験に用いる「わかったよ」である．

Robot Controller

Robot Controller は Communicative Unit からのモータ制御命令を受取り，それを基に実際のハードウェアを制御する．また，現在の関節角といったロボットの内部情報を Communicative Unit に送る．

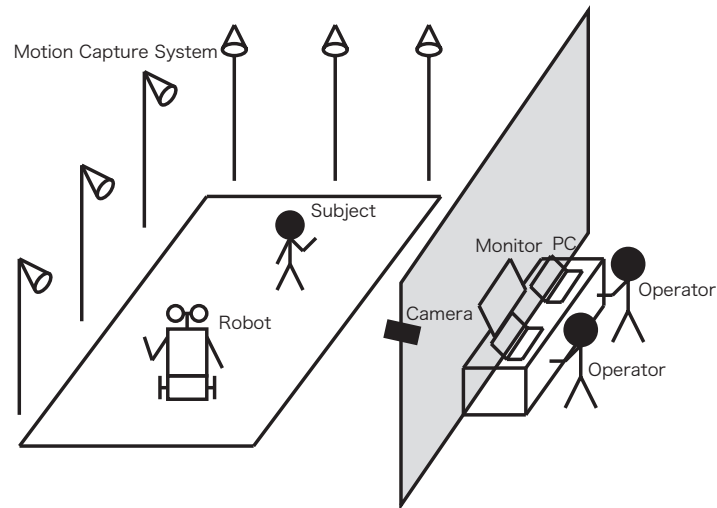


図 4.7: 遠隔操作による Communicative Unit 切替え

4.1.3 遠隔操作による Communicative Unit 切替え

図 4.7 に本システムの遠隔操作による人との対話の概要図を示す。本ロボットは半自律的に動作する。すなわち、ロボットの身体は、Communicative Unit が環境センサの情報に基づき自律的に人間の動作に応じた協調的な動き（たとえば、アイコンタクト）を行う。そして、オペレータは Communicative Unit の切替えのみを行う。また、将来的にこの切替え操作を自動化するために、オペレータの操作ログを記録している。

4.2 評価実験

本節では、協調的身体動作をすることのできるロボットと人との対話実験を行う。対話には数限りない形式が存在するが、本実験では道案内における対話をとりあげる。これは、道を案内する話し手は聞き手に対して積極的に情報を伝えようとし、聞き手は同時に積極的に話し手の情報を受け取ろうとする努力をするため、本研究で行う実験の目的に適していると考えられるためである。また、情報を表現した結果を容易に確認することができ、かつ、日常生活にもとづいた対話形式であると考えられるためである。

4.2.1 実験目的

本研究で開発した協調的身体動作をするロボットを評価するための実験を行う。本実験では対話において聞き手の協調的な身体動作が及ぼす影響について主観的評価、また客観評価として身体動作の分析によって本システムを評価する。また、主観評価に関して本研究で開発したシステムと人とを比較し、より人に近い評価を得ること、また、対話における聞き手の身体動作の重要性について検証することが本実験の目的である。

4.2.2 実験方法

本実験では、順路案内の場面における人とロボットの協調動作の重要性について調べる。具体的なタスクとしては、話し手(被験者)が聞き手(ロボット、あるいは人)に目的地までの順路を教える。ロボットはオペレータによる遠隔操作のもとで協調的身体動作を行う。この際の聞き手(特に、開発したロボット)の身体動作の話し手への影響を評価する。

実験条件

本実験では順路案内をされる聞き手に関して以下の3条件を設けた。いずれも話し手は被験者である。

H	:	他人(被験者)
Rr(reactive movement)	:	協調的身体動作をするロボット
Rn(no movement)	:	まったく動作をしないロボット

被験者

男女の大学生50名が実験に参加した(男性23名、女性27名)。各被験者はH条件とR条件(Rn条件またはRr条件)に1回ずつ参加した。H条件では、被験者は話し手または聞き手のどちらかを担当した。実験順に関してはカウンターバランスをとった(つまり、実験はH条件-R条件の順、あるいはR条件-H条件の順のいずれかで行われた)。被験者は、実験環境を訪れたことがなく、部屋の配置、順路についてはまったく知らない。また、被験者の各条件への配分はランダムに行った。

実験環境

図4.8に実験環境の概要を示す。本実験は、ATR 知能ロボティクス研究所内の実験室、廊下、ロビー、休憩所において行われた。実験を行うのは位置Aである。実験にはBとCの順路を用意し、Bの順路はS1からS4のキーポイントがあり、S3,S4に関しては大きな部屋の中のデスクに囲まれている。また、Cの順路はT1からT6まですべて廊下であり、いくつかのT字路や十字路がある。

実験手順

順路を教える被験者をAとし、順路を教わる被験者をBとする。

1. Aは人とロボットに教える順路を実験者から教示される。
2. AがB、またはロボットがいる部屋に案内される。
3. Bが「道を教えてください」、ロボットが「道を教えてね」と発話するとAが道を教え始める。

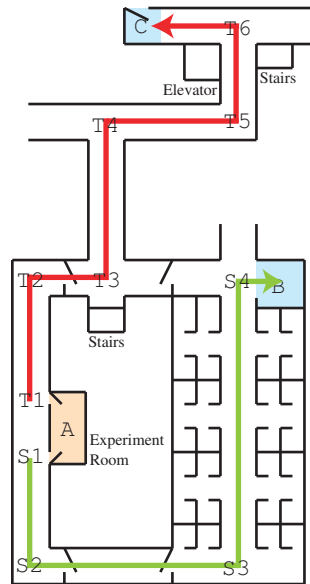


図 4.8: 実験環境

4. なにも身体動作をしないロボットの条件では、最初に発話を行ってからは、A が最後まで説明し終えるまで何も発話も身体動作も行わない。協調的な身体動作を行うロボットの条件では、A が話しやすいと思うような場所まで移動し、相手と同じような身振りをしながら、「うん」「うんうん」と相づちを打ち、説明が分かりにくい場合には「もう一度お願い」と発話し、より人らしく振舞うようにする。
5. B が「わかりました」、ロボットが「わかったよ」と発話すると実験を終了し、B が実験室から退出する。
6. 実験終了後、A は質問票に答える。

ロボットの操作

Communicative Unit の切替え規則

オペレータが Communicative unit の切替え操作を行う上での各ユニットを選択する規則を示す。

オペレータはまず初めにアイコンタクト・ユニットを選択する。次に、体の位置合わせユニットを選択し、体の向きを合わせる。被験者が腕をあげ、道を指し示すと、ロボットの腕を被験者の腕に合わせる腕の同調、または鏡像の腕の同調・ユニットを選択する。これはつまり、本システムにおいてはオペレータがロボットの腕を直接操作するのではなく、人と同じ動作をするユニットが準備されていることを示す。また、被験者の説明に合わせてうなずき・ユニットを適宜選択し、また、被験者が道を指し示した指の先を見る指先方向を見る・ユニットを適宜選択する。

実験が終了すると、腕を下ろし、被験者と正面で向き合う。このときアイコンタクト・ユニットは選択されたままとする。

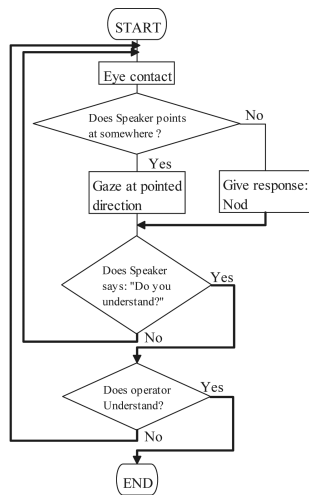


図 4.9: 頭部の切換規則

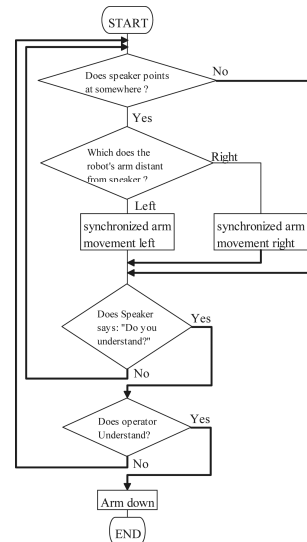


図 4.10: 腕部の切換規則

これらの切換規則をフローチャート化したものを図 4.9-4.11 に示す。

Communicative Unit の発話規則

オペレータが Communicative unit の発話操作を行う上での各発話ユニットを選択する規則を示す。

実験が始まるときに「道を教えてね」と発話し、その後、被験者の道順説明に合わせて選択される首のうなずく・ユニットに合わせて「うん」または「うんうん」と発話する。被験者が「わかる？」などと確認を求めてきた場合、「はい」と発話する。

また、道の説明がわかりにくかったり、説明が早すぎたりした場合「もう一回」「ゆっくりお願い」と発話し、再度説明を求める。このとき、話のわかりにくさはオペレータ（実験者）が判断することとする。

被験者の説明が終わると「わかったよ」と発話する。

評価方法

評価は、被験者の質問票への回答の結果と身体動作の分析の結果により行う。質問票での質問項目を表 4.3 の上段に示す。被験者はこれらの質問に 7 段階尺度で回答する。最も低い評価を 1，最も高い評価を 7 とする。

4.2.3 実験の仮説と予測

本実験では、以下の仮説に基づき予測の検証を行う。

仮説 聞き手（開発したロボット）の協調的な動作によって、話し手はより自然で円滑に道を教えることができる。

予測 被験者が全く動作しないロボット (Rn 条件) より協調的動作をするロボット (Rr 条

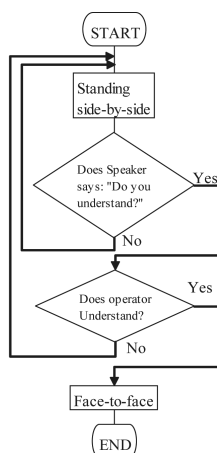


図 4.11: 体の向きの変更規則

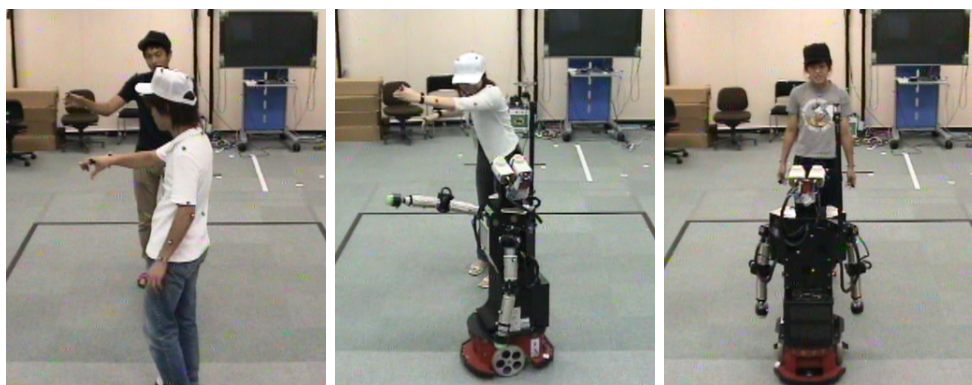


図 4.12: 実験の様子 (左から H,Rr,Rn 条件)

件) に順路を教える場合の方が、被験者の主観評価が高い。

4.2.4 実験結果

ここでは実験結果を質問紙票の分析の結果と、身体動作分析の結果に分けて述べる。

質問紙票の分析結果

本実験では、道を教えた被験者の聞き手に対する主観評価を測定するために実験終了後、質問票による回答を求めた。表 4.3 に質問票の 6 評定項目の条件ごとの平均、標準偏差、および分散分析の結果を示す。また、図 4.13 に各条件の主観評価の平均値のグラフを示す。実験器具の障害により実験ができなかった被験者のデータは分析から除いた。そのため、各実験項目の有効な被験者数は H 条件が 25 名、Rr 条件が 22 名、Rn 条件が 20 名である (H 条件は、本実験のタスクである道を教える側のみを対象としているため、4.2.2 の

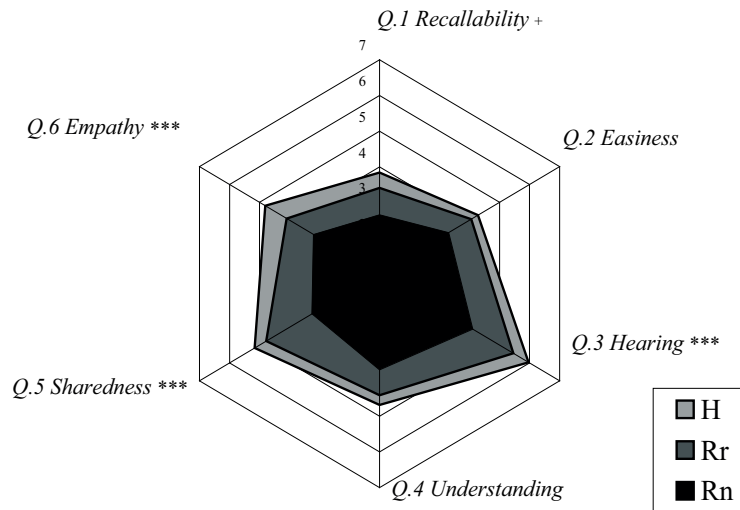


図 4.13: 主観評価の比較

実験条件で示した H 条件のみを対象としており、道を教わる側は除いてある)。

Q:1 から 6 の各項目について分散分析を行った結果、Q:3,5,6 において有意差があり、Q:1 において有意傾向が見られた。さらに、LSD 法による多重比較の結果、Q:3,5,6 において H 条件と Rn 条件、Rr 条件と Rn 条件に有意な差が確認された (Q:3 ($MSe = 1.7708, p < .05$), Q:5 ($MSe = 1.9231, p < .05$), Q:6 ($MSe = 1.8316, p < .05$))。また、Q:1 において H 条件、Rn 条件に有意な差があることが示唆された ($MSe = 3.0192, p < .05$)。

これらの結果から、全く動かないロボットに順路を教えた場合より、人や協調的身体動作をするロボットに順路を教える場合のほうが「話を聞いているように思う」「相手と情報を共有しているように感じる」「相手の気持ちが分かった気がする」といった、相手と気持ちが通じているように感じる傾向があることが分かった。これは、身体動作が相手の感情的な評価に関係することを示している。しかし、教えやすさに関して身体動作は大きな影響を与えないという結果を得た。以上の分析により、主観評価に $H > Rn, Rr > Rn$ の傾向があることを確認した。つまり、協調的身体動作をするロボットや人間は停止しているロボットよりも有意に良い印象を話し手に与えた。これにより予測は検証された。また、H 条件の主観評価の平均値を 1、Rn 条件の主観評価の平均値を 0 と標準化したときの、Rn 条件の主観評価の平均値の値は、0.73 となった。これはつまり動かないロボットよりも 73% 人の評価に近づいたことを表しており、全体として人に近い評価を得られた。これは図 4.13 の Rn 条件の値が H 条件に近いことから推察される。

身体動作の分析結果

本実験ではロボットとの対話における人の身体動作をモーションキャプチャシステムによって 3 次元情報で記録し、同時にビデオカメラで実験の様子をすべて記録していた。これらに関して分析を行った結果を述べる。

身体動作量の分析

表 4.3: 主観評価の結果

	Question: 1	Question: 2	Question: 3
質問内容	順路を思いだし やすかったか?	順路を教え やすかったか?	相手は話を 聞いていたか?
H	3.84(1.6657)	4.28(1.6129)	5.96(0.9156)
Rr	3.41(1.7231)	4.05(1.6645)	5.45(1.4687)
Rn	2.65(1.7110)	3.30(1.5199)	4.10(1.5133)
分散分析の結果 (F(2,64))	$F = 2.63$ $p = .080 (+)$	$F = 2.09$ $p = .132 (n.s.)$	$F = 11.20$ $p < .001 (**)$
多重比較の結果	$(H > Rn)$		$H, Rr > Rn$

	Question: 4	Question: 5	Question: 6
質問内容	相手は順路を 理解したか?	相手と情報を共有 したと感じたか?	相手の気持が 分かったか?
H	4.68(1.2238)	5.16(1.2225)	4.80(1.0954)
Rr	4.41(1.6695)	4.77(1.4750)	4.09(1.5048)
Rn	3.70(1.6763)	3.25(1.4098)	3.20(1.4000)
分散分析の結果 (F(2,64))	$F = 2.29$ $p = .109 (n.s.)$	$F = 11.19$ $p < .001 (**)$	$F = 7.65$ $p = .001 (**)$
多重比較の結果		$H, Rr > Rn$	$H, Rr > Rn$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

まず初めにモーションキャプチャシステムによって得られた人の身体動作の3次元情報を用いて人の身体動作量の分析を行った。この人の身体動作量は被験者の1秒間あたりの指の動作量を計測したものとした。この値をAOM(Amount of Movement)とする。これを求めるために以下の式を用いた。

$$AOM = \left(\left(\sum_{t=1}^n \sqrt{(P_{right}(t) - P_{right}(t+1))^2} + \sum_{t=1}^n \sqrt{(P_{left}(t) - P_{left}(t+1))^2} \right) / n \right) / 2 \quad (4.1)$$

ここで P_{right} , P_{left} はそれぞれの肩からの相対的な指先の3次元座標である。また、 t は秒である。これを用いてそれぞれの条件を AOM_H , AOM_{Rr} , AOM_{Rn} として分散分析を行った。

表 4.4 に各条件ごとの平均、標準偏差、および分散分析の結果を示す。この結果から各条件間に有意な差を確認することができなかった ($F(2, 63) = 0.38, p = .685$)。しかし、今回の実験では各被験者はロボットとの対話と被験者同士の対話という2つの対話を行った。これらの実験中の被験者の動きを観察した際には、個々の被験者間でH条件とRr, Rn条件間での身体動作の増減が見られた。このことからH条件における被験者の身体動作量からRr, Rn条件での身体動作量を引いたもので再度分析を試みた。これはつまり、H条件とRr, Rn条件での各被験者の身体動作量の差を見ることで、動作量の増減を確認すること

表 4.4: 各条件の指先の移動量の平均

条件	H	Rr	Rn
平均 (分散)	168.52 (104.52)	177.09 (103.04)	148.73 (105.13)
分散分析の結果 ($F(2, 63)$)	$F = 0.38, p = 0.685418(n.s.)$		

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

表 4.5: 身体動作量の分析結果

条件	H - Rr	H - Rn
平均 (分散) mm/sec	-14.20 (83.00)	84.95 (85.72)
分散分析の結果 ($F(1, 16)$)	$F = 5.52, p = .032 (*)$	

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

を試みたということである．ここで，H条件の身体動作量からRr条件の身体動作量を引いたものをH-Rr条件とし，H条件の身体動作量からRn条件の身体動作量を引いたものをH-Rn条件とする．もし，ここで得られる値が0に近ければ，H条件とRr,Rn条件間での身体動作量の変化はないことになる．しかし，この値が正の値を示せばH条件での被験者の身体動作量はRr,Rn条件よりも大きかったことが確認できる．また，この値が負の値を示せば，H条件よりもRr,Rn条件のほうが身体動作量が大きかったことが確認できる．

表 4.5 に各条件ごとの平均，標準偏差，および分散分析の結果を示す．この結果からH-Rr条件とH-Rn条件間に有意な差が確認された($F(1, 16) = 5.52, p = .032(*)$)．これにより，Rn条件での被験者の身体動作量よりもRr条件での被験者の身体動作量のほうが大きいことが確認された．さらに，H-Rr条件の結果からRr条件における被験者の身体動作量はH条件の身体動作量に近い値であったことが確認された．これにより聞き手であるロボットの協調的な身体動作が話し手である被験者の身体動作を引き出したことが示唆されたと考えられる．

ビデオ分析

次に，実験の様子を記録したビデオの分析を行った．ビデオ分析では実験の仮説を知らない観察者が3つの指標をもとに分析を行った．1つ目の指標は被験者の体の向きである．これを評価するために被験者の肩の動きを観察した．具体的には被験者の肩の動きを3つの場合に分けて評価を行った．場合分けは以下のようにになっている．

- 被験者の肩が動かなければ体の向きが変化していないと見なして0とする
- 被験者の肩のみが動いて体の向きを変化させた場合を1とする
- 被験者が肩だけではなく，足も動かしながら体の向きを変化させた場合を2とする

もう一つの指標としてゼスチャの表出を用いた．具体的には被験者のゼスチャを3つの場合に分けて評価を行った．場合分けは以下のようにになっている．

表 4.6: ビデオ分析の結果

条件	Body direction	Appearances of gesture
H	0.72 (0.78)	1.32 (0.733)
Rr	0.43 (0.58)	1.38 (0.778)
Rn	0.20 (0.40)	1.00 (0.837)
分散分析の結果 (F(2,63))	$F = 3.79, p = .028$ (*)	$F = 1.35, P = .267$ (n.s.)
多重比較の結果	$H > Rn$	

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

- 被験者の体が全く動かなかった場合は 0
- 被験者の手または指のみが動いた場合は 1
- 被験者の手が肘または肩を使って動いた場合は 2

表 4.6 にビデオ分析における各条件ごとの平均、標準偏差、および分散分析の結果を示す。分散分析の結果から体の向きの変化において条件間に有意な差が確認された ($F(2, 63) = 3.79, p = 0.28$ (*))。しかし、ゼスチャの表出に関しては条件間で有意な差は確認されなかった。LSD 法による多重比較の結果では体の向きの変化において、H 条件と Rn 条件間で有意な差が確認された ($MSe = 0.3809, p < .05$)。この結果から H 条件では Rn 条件よりも体を向きを大きく変化させていたということが確認された。具体的には $H > Rn$ という傾向があるということが確認された。この結果から体の向きの変化量に関して、Rr 条件は Rn 条件よりも大きな値を示す可能性があることが示唆される。本実験において Rr 条件よりも Rn 条件のほうがゼスチャの表出される量が多かったことについては、指先の動作量を身体動作量としていたためであると考えられる。ここでの分析の結果から、聞き手であるロボットの協調的的身体動作が、話し手である被験者の身体動作を人と人の対話と同程度の割合で引き起こしたということが言えると考えている。

4.3 考察

実験結果の分析から人がロボットと話をする場合、協調的な身体動作をすることで、より人らしく、人に対して話を聞いているように思わせることができ、また、気持ちが伝わったような感じにさせることができるという結果が得られた。これは、静止したロボットよりも協調的な身体動作を行うロボットの方が感情が伝わりやすく、感情が理解できたように感じるということである。これにより、身体動作が感情的な側面に大きく影響することが示された。

一方で、開発したロボットに関する主観的評価の結果は人間に比べると若干低い値を示した。このため、今後さらに効果的に協調動作を行うために、より多くの Communicative Unit 実装と、切替えの自動化による効率化が必要である。

これらについて質問紙分析と身体動作分析に分けて考察していく。

4.3.1 質問紙分析についての考察

質問紙の分析の結果からは身体動作が情報伝達の側面に与える影響については有意な影響が見出されなかった。しかし、Q:2,4の「教えやすかったか?」「理解したと思うか?」という質問項目の評価に有意差は確認されなかったものの、有意確率(Q:2 ($p = .132$), Q:4 ($p = .109$))の値からは無関係であるとの判断もできない。つまり、意思疎通の側面において協調的な身体動作が関係がある可能性が残されている。先行研究[53]においては協調的な身体動作が情報伝達に影響することが見出されている。

先行研究では、廊下で出会った聞き手(被験者)が話し手(ロボット)から道案内をされる方法をとった。この実験で、ロボットが効率的な身体動作をした場合に、人とロボットに協調的な身体動作が起こることを確認された。また、この協調的な身体動作によって人とロボットの間に関係が構築されるという、共創対話の中で情報伝達が起こることが示唆された。実験の様子(図4.12中央)からRr条件において共創対話が実現されていることが推察される。このような共創対話が、聞き手のロボットからの同調的な動作によって実現可能であるか、またそれが情報伝達に影響するか、といった互いの身体動作の影響の検証は、より効果的に協調動作を行うロボットを開発することによって検証が行われることが期待される。

4.3.2 身体動作分析についての考察

身体動作の分析からは、ロボットの人に対する協調的な身体動作が人の身体動作を引き起こすことが示された。具体的には、協調的な身体動作をするロボットと対話した被験者の身体動作量は人と対話する際の身体動作量に近い値が示された。

本実験では実験の記録ビデオとモーションキャプチャシステムのログにより、被験者とロボットの行動のデータを得た。これらから被験者の身体動作の影響の分析を試みた。具体的には聞き手の身体動作の多いであろう人の条件で、話し手の身体動作が多くなるであろうという予測に基づき、モーションキャプチャシステムのログから各条件間の話し手の身体動作の移動量の比較分析を行った。分析の結果、各条件間の身体動作の移動量にはほとんど差がなかった。これは、実験課題に関して質問票Q:1の思い出しやすさの評価が最大の人の条件の場合でも3.84と全体から見ても低い値であったことが目立った。これは道案内に用いた道順が難しかったのではないかと推測される。これにより、2.3節で示されたゼスチャの自己指向機能が強く働いてしまったために、動かないロボットとの対話においても多くのゼスチャが現れたのではないかと考える。今後の実験では道順の簡略化を考慮する必要があるかもしれない。しかし、実験ビデオの行動解析では各条件間になんらかの差がある可能性を否定できない。これが協調的な身体動作であるかどうかの分析を、ゼスチャの性質を見極めながら慎重に行っていく必要があると考えている。

4.4 本章のまとめ

本章では人とロボットの対話構造を解明するために、まず、ロボットの身体動作が人に対してどのような影響を与えるかどうかの実験を行った。本研究で開発したロボットシス

テムでは、モーションキャプチャシステムを環境型センサとして利用することで、人型ロボットに精密な協調的動作を行わせるシステムを実現した。本研究で行った実験では、このロボットシステムを用いて、身体性コミュニケーションにおける互いの身体動作の関わり合いの影響を見いだすことを試みた。その結果、身体動作が話者の感情的側面に大きな影響を与えることが示された。しかし、意思疎通の側面には影響を与えるかについてはいまだ明らかではない。

また、本システムではロボットは半自律遠隔制御をしていたが、神田らによってロボットを自動化する試みがされている [68]。

第5章 人型ロボットの適切な社会的態度

前章では人とロボットの身体を活用したコミュニケーションについて述べたが、実世界におけるコミュニケーションではこれ以外にも社会的な態度も重要な要素となる。ここでの社会的態度とは、他者との対話における、それ自身の意見を他者に対して表明する身体動作および態度である。人同士の対話では、人は対話を行っている他者の社会的立場などを踏まえ、適切に行動することができる。ひとたびこれを間違えると、そこで形成された関係を壊してしまう可能性もある。では、今後、人と多くの時間対話を行うことが予想される人型ロボットにおいては、このようなスキルは必要となるであろうか。本章では人型ロボットの社会的態度の影響についての対話実験について詳述する。

近年、ロボット工学の急速な発展により、様々な形態の人型ロボットが開発されるようになってきた。この流れの中で、近い将来、人と長期間にわたり相互作用し、人と共同作業しながら生活することができるような人型ロボットの実現が現実味を帯びてきた。

一方でエージェントを用いて知的なインタフェースを実現するための研究が多く行われてきている [26][80]。インタフェースとしてのエージェントは人と相互作用する必要がある。この際のエージェントの態度や振る舞いは人に直接影響を及ぼすことが考えられる。中西らは社会的エージェントが2人の人と対話を行う際に、エージェントが人に対してどのような影響を与えるかを調べる実験を行った [47]。この結果からエージェントの社会的な態度が人のエージェントに対する印象だけではなく、人同士の印象に対しても影響を与える可能性が示された。これはつまり、エージェントの社会性が人同士の人間関係にも影響を与える可能性があるということである。

物理的な身体を持ったエージェントであるロボットにおいてもその社会性が人とロボットだけではなく、人同士の関係に対しても影響を与えるかもしれない。今後、身の回りの多くの機器が自律的に判断し、行動するような知的な空間においてロボットを人と空間とのインタフェースとして活用することも考えられている [62]。このようなインタフェースとしてのロボットは常に人と相互作用を行う必要があるという点において、社会性が重要になると考えられる。このようなロボットの社会性に関する研究は、重要視されながらもこれまで多くは行われてこなかった。

人における社会性の定義については心理学者の間でも様々な意見があり、いまだ明確なものとは存在しない。その中でより一般的な定義、解釈としては「他者の存在に関心を持ち、積極的に関わろうとする姿勢、および関わるための技術」を社会性とみなそうとしている [77]。子供と大人では求められる社会性が変化するように、社会性はその人が置かれている状況や外見などの要因によって変化する可能性がある。私はロボットにおける社会性も人と同様の定義が可能であると考えている。なぜなら、人と相互作用するロボットに求められる社会性とは、人のそれと同様なものにならざるをえないからである。したがって本

論文では「ロボットの社会性」を「ロボットが他者（人）の存在に関心を持ち、積極的に関わろうとする姿勢，および関わるための技術」と定義する．

一方で，これまでの人-ロボットの相互作用に関する研究では一対一の対話が多く用いられてきた．しかし，実世界の対話では多対多の対話が主であり，最小限の社会的な対話は3者対話であると言われている．これまでもロボットを交えた3者対話に関する研究は行われてきているが，ロボットの社会性について注目してこなかった [35]．人-ロボット対話，特にロボットを含む3者以上の対話においてどのような相互作用が起こるかを把握するためには，Heider のバランス理論を用いることができる．バランス理論は2人の人と1つの対象 X の間の相互作用によって3者間の心情が均衡状態に向かう傾向があることを示した理論である [16]．ここでの対象 X は物だけではなく人でも成立する．バランス理論によれば対話者間の対人感情が変化することで，3者間の対人関係が変化する．では，この対象 X をロボットとすることでこのバランス理論は成立するであろうか．また，ロボットの振る舞いを意図的に制御することで，ロボットを含んだ3者対話における対人（ロボット）感情を制御することは可能であろうか．

また，Cartwright らは Heider のバランス理論を拡張し，グラフ理論的に拡大することが可能であることを示した [2]．これはつまり，ある集団の人間関係を3者関係の拡大で説明することが可能であるということである．具体的にはある集団の2人間の感情の変化が他の人の感情に影響を与えるということである．では，ある集団の新しい仲間としてロボットが入ってくる際の人間関係にもこの理論を適用することが可能であろうか．たとえば，ロボットはある集団を構成する人々がお互いに持っている印象に対してなんらかの影響を与えることができ，かつ，人間関係に変化を与えることができるであろうか．本章では上記の認知科学的知見と社会心理学的知見を用いてロボットの社会性が人間関係に与える影響を調べるための実験を行う．

5.1 実験目的と方法

本章で行う実験ではロボットと複数人の人との対話において，ロボットの態度を変化させることによって人間関係を操作することができるかどうかを確認することを目的としている．

実験では，人とロボットの対話においてロボットが人の意見に対して好き嫌いの態度を明確に取ることで人に対してどのような影響があるかを確認する．具体的には1台のロボットと2人の人が同時に対話を行い，ロボットの態度を条件により変化させることでこれを検証する．対話実験後に各対象に対する印象を評価する．これにより被験者同士のロボットに対する印象を知ることができる．また，これにより ①ある被験者からのロボットの印象，②別の被験者からのロボットの印象，③ある被験者からの別の被験者の印象，にどのような影響があるかを確認するとともに，バランス理論の成立したか否かを確認する．

5.1.1 バランス理論

バランス理論は別名 P-O-X モデルとも呼ばれ，自分を P，他者を O，対象を X とし，P の O に対する印象，P の X に対する印象，P からみた O の X に対する印象を正 (+) と負

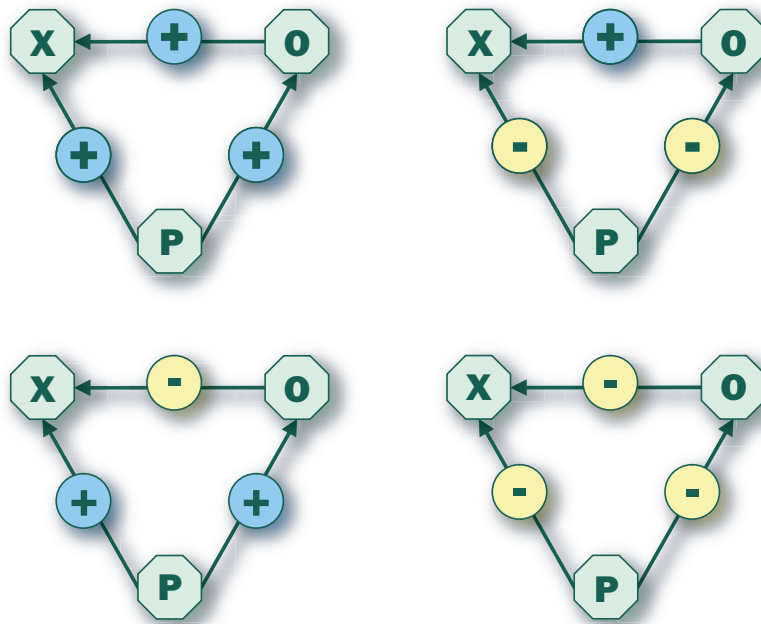


図 5.1: 均衡状態 (上), 不均衡状態 (下)

(-) の印象でラベル付けを行い, 3 つの印象の積が + となる状態である均衡状態になる傾向があることを示した理論である. ここでの正の印象とは好き, 承認, 賞賛などであり, 負の印象とは嫌い, 不承認, 拒絶などある. 図 5.1 上は均衡状態を示しており, 図 5.1 下は不均衡状態を表している. 図 5.1 左下では P が O または X に対して - の印象を抱くか, O が X に対して + の印象を持つことで均衡となる. また, 図 5.1 右下では P が O または X に対して + 印象を持つか, O が X に対して + の印象を持つことで均衡状態となる. 不均衡状態ではこれらの正と負の印象の遷移が起こることが予想される.

本研究で行う実験ではこの対象 X をロボットとし, このロボットの振る舞いを変化させることで, 他の 2 人の対話者のロボットに対する印象を制御し, これにより 2 人の対話者間の印象を制御できるかどうかを確認する. さらに, 対話者間の印象を制御することで人間関係に影響を与えることができるかどうかを確認する.

5.1.2 実験条件

三者関係における印象の変化を確認するために, ロボットの振る舞いに応じて 3 つの条件を設けた.

賛成条件

本条件下ではロボットは 2 人の被験者の意見に対して平等に賛成する.

反対条件

本条件下ではロボットは 2 人の被験者の意見に対して平等に反対する.

表 5.1: 評価グループの条件分け

印象	plus	minus
被験者からのロボットに対する印象 ①	賛成 (A), 不平等賛成 (UA)	反対 (D), 不平等反対 (UD)
他の被験者からのロボットに対する印象 ②	賛成 (A), 不平等反対 (UD)	反対 (D), 不平等賛成 (UA)
他の被験者に対する印象 ③	賛成 (A), 反対 (D)	不平等賛成 (UA), 不平等反対 (UD)

不平等条件

本条件下ではロボットは一方の被験者の意見には賛成し、もう一方の被験者の意見には反対する。

評価グループ

実験ではこれらの3条件を4つのグループに分けて評価を行う。これは被験者がロボットから賛成、反対されるグループに対応している。

1. 賛成 (Agreement (A))
2. 反対 (Disagreement (D))
3. 不平等賛成 (Unfair Agreement (UA))
4. 不平等反対 (Unfair Disagreement (UD))

賛成グループは賛成条件の被験者である。反対グループは反対条件の被験者である。不平等賛成グループは不平等条件においてロボットに賛成される被験者である。不平等反対グループは不平等条件においてロボットから反対される被験者である。

バランス理論にもとづく評価グループ

実験ではバランス理論の予測にもとづいて、評価グループを対象に対して良い評価をするであろうプラス評価グループ、対象に対して悪い評価をするであろうマイナス評価グループに分けて評価を行う。表 5.1 に具体的な振り分けを示す。また、これは本節冒頭で示した3つの対象に対する印象に対応している。図 5.2 に具体的な対象に対する方向のグラフを示す。

5.1.3 実験のシナリオ

実験ではロボットが被験者に対して質問をし、それに被験者が答えるという一問一答形式のシナリオを用いた。具体的にはロボットが「何々は好き？」と質問をし、被験者がそれに答え、それに対してロボットが対象が好きか嫌いかという態度を明確にする。ロボットとの対話前に被験者に対して物事の好悪に関する30項目のアンケートを行い、この結果をロボットとの対話に用いた。実験ではこの30項目の中からランダムに条件に合った項目を10項目抽出した。さらに、実験の条件とは異なる態度を示すための質問も2項目

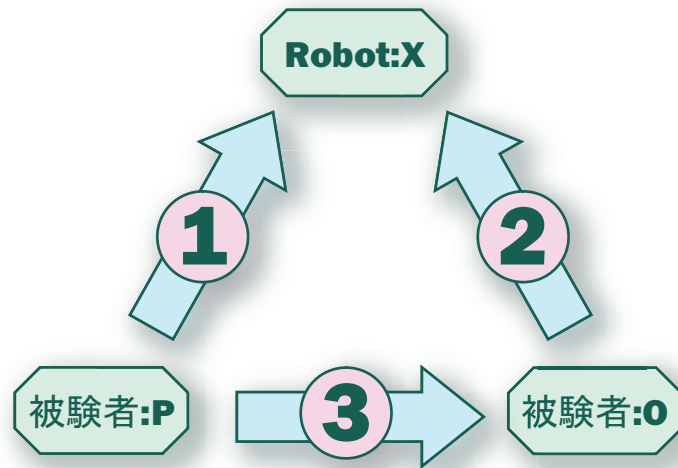


図 5.2: 3 つの対象に対する印象

抽出し、質問を全部で 12 問用意した。対話中ではこれらについてロボットが好きか嫌い
かの態度を明確にしていくが、この内 2 問に関しては実験条件に反する答えを返すことと
した。これはすべての項目に対して同様に好きか嫌いかという態度をするのではなく、あ
る程度の質問で違う態度をとるほうが実験として妥当であるという先行研究の結果 [47] か
らこの手法を採用した。

また、不平等条件に限って半分の 6 項目を終えた時点でロボットの向きを常に賛成する
被験者の方を向け、20cm 程度前進させる。この後のロボットは常にこの被験者にのみ質
問を行い、態度を示すこととした。

5.2 実験で使用するロボットとシステム

本章で行う実験で使用するロボットとそのシステムについて詳述する。本章で行う実験
では第 4 章で行った実験で使ったロボット “Robovie II” の後継機にあたる “Robovie-R
ver.2” を使用する。本研究で行う実験では社会的なロボットと人との対話実験を行うため、
この社会的な振る舞いを本ロボット上で実現するためのロボットシステムを開発した。ま
た、本実験では対話の様子をモーションキャプチャシステムを使用し、この対話における
人とロボットの身体動作を記録する。これらについて詳述する。

5.2.1 コミュニケーションロボット “Robovie-R ver.2”

本研究で行う実験で用いる人型ロボット “Robovie-R ver.2” のハードウェア構成につい
て簡潔に述べる。このロボットは 4.1.1 項で取り上げた Robovie II をもとに設計されてい
るため、基本的には同等の機能を有す。

図 5.3 左に、Robovie-R ver.2 の外観を示す。本ロボットは、人とコミュニケーションす



図 5.3: Robovie-R ver.2 の外観

るために人に類似した上半身を持つヒューマノイドロボットである。3自由度の首、片側4自由度の腕と、人が視覚・触覚・聴覚をもつようにカメラ、マイク、接触センサなどの様々なセンサを持つ。このような人に類似した身体とセンサを用いて人とのコミュニケーションに必要な様々な音声とゼスチャを交えた人と同様の対話的行動を生成することができる。また、本体上部に搭載された無線 LAN により、他のコンピュータやインターネット等にアクセスすることができる。本来 Robovie-R ver.2 は自律的に行動することが可能であるが、本システムでは無線 LAN により外部からコントロールされる。

5.2.2 ロボットシステム

本研究で行う実験に使用するロボットシステムについて詳述する。本ロボットシステムはあらかじめ意味づけされたロボット用モーションファイルを組み合わせることで自動で実験シナリオを生成するものである。本研究で行う実験ではロボットが人間関係を操作可能かどうかを検証することを目的としている。このため、実験者が恣意的にロボットを操作することで実験を操作することを不可能とするために実験シナリオの自動生成システムを開発した。また、本システムは後述する遠隔操作によりロボットの発話タイミングに限って操作することが可能である。

社会的な振る舞い

本ロボットシステムではあらかじめモーションを定義したものを再生させることでロボットを動作させている。そのため、ロボットに対して社会的な振る舞いをさせるためのモーションを作成する。

表 5.2: 用意するモーションファイル

質問		賛成条件		反対条件		不平等条件		その他	
通常	不平等	賛成	反対	賛成	反対	賛成	反対	あいさつ	曖昧な態度
30	30	3	3	3	3	2	2	2	4

用意するモーションファイル

上記を満たし、かつ本実験内容に則したモーションファイルの具体的な制作方法について述べる。モーションファイルの作成には ATR-Robotics 社のロボビメーカー¹を使用した。

ロボットモーションを全部で 82 個用意する。その内訳を表 5.2 に示す。本実験ではロボットのあいさつに始まり、その後ロボットから被験者に対して質問をし、その返答を待つてロボットの態度を示す。このため、まず“あいさつ”のモーションを用意する必要がある。次に、ロボットが質問をするため、この“質問”をアンケートで用意する項目分、計 30 パターン用意する。この質問の答えに対してロボットの態度を賛成条件における賛成と反対、また反対条件における賛成と反対の場合に分けてそれぞれについて 3 パターンずつ用意した。さらに、不平等条件ではロボットの向きを変え、常に 1 人の被験者のみと対話を行うこととなるため、これらの動作に関して質問 30 パターン、賛成と反対の態度についてそれぞれ 2 パターンずつ用意した。最後に、質問に対する答えとして“曖昧な態度”を取る必要もあるため、これらを 4 パターン用意した。

ロボットの発話内容を付録 B に示す。これは上で示したモーションファイルに対応した発話内容となっている。ロボットから発声される音声については、実験者の音声を変更したものをを用いた。実験者は男であったため、Adobe 社の Audition を用いて音声のピッチを 3 程度上げ、低音成分を大幅にカットした。

シナリオの自動生成

本研究で行う実験では実験条件に合わせてロボットの態度を変化させる。このロボットの態度を実験者がその場で変化させることは非常に困難である。なぜなら、80 を越えるファイルを実験条件に合わせて選択することは非常に困難であると考えたためである。このため、実験の内容に則したシナリオを自動生成することとした。

シナリオは実験条件に合わせて 3 種類のシナリオを生成する。以下にそれぞれのシナリオの内容を示す。

賛成シナリオ ロボットが 2 人の被験者に対して同様に賛成するシナリオ

反対シナリオ ロボットが 2 人の被験者に対して同様に反対するシナリオ

不平等シナリオ ロボットが片方の被験者にのみ賛成するシナリオ

¹<http://www.atr-robo.com/>

5.1.3 節で示したように、実験ではロボットが 12 項目の質問をし、被験者の回答に対してその態度を示すが、この内 2 項目に関しては実験条件に合わない態度を示すこととした。具体的には、賛成シナリオにおいては反対の態度を示し、反対シナリオにおいては賛成の態度を示す。また、不平等シナリオにおいては片方の被験者に賛成するのではなく両方の被験者に対して賛成することとした。さらに、質問の答えに対して条件とは反対の態度をとるだけでなく曖昧な態度を示す場合も含めた 2 つの実験条件に合わない態度をとることとした。

これらの 2 つの実験に合わない態度を 2 項目に対して組み込んだ。これはつまり、必ずしも 1 つのシナリオでこれらの 2 つの態度が組み込まれることはないということである。

遠隔操作によるロボットの半自動制御

本ロボットシステムで生成されるシナリオは被験者の態度に合わせて自動的に再生することができない。そのため、実験者が実験の様子を観察しながら遠隔操作によりシナリオを進めることとした。具体的には対話シナリオを再生するためのソフトウェアを開発し、実験者が遠隔操作インタフェース上のボタンをクリックすることでシナリオを進めることができるようにした。これはつまり、実験者はロボットの操作を行うが、ロボットの発話のタイミングしか制御できないこととなる。

ロボットの発話のタイミングをロボット自身で判断し、対話シナリオを進めるという手法も考えられるが、現在のロボットのハードウェア、ソフトウェアの仕様上これは非常に難しいことであるため、今回の実験では遠隔操作によるロボットのシナリオ遷移を行う手法を用いた。

また、遠隔操作によってロボットを操作する上で、実験者が恣意的にロボットを操作することがないように実験におけるロボットの発話タイミングに関してあらかじめルールを設定し操作した。具体的なルールを以下に示す。

1. 実験開始時に一度「挨拶ファイル」を再生する
2. 「質問ファイル」を再生する
3. 被験者の答えを待って「態度ファイル」を再生する
4. 態度ファイルを再生し終わったらすぐに 2 の「質問ファイル」を再生する
5. すべての質問が終わったら、実験の終了を表す再度の「挨拶ファイル」を再生する。

以上のルールにもとづいてロボットの操作を行う。

5.2.3 モーションキャプチャシステム

本実験では対話中の人の身体動作をモーションキャプチャシステムで記録する。本章で行う実験では 4.1.2 節で用いたシステムと同じく Vicon Motion Systems 社製のシステム²で

²<http://www.vicon.com/>

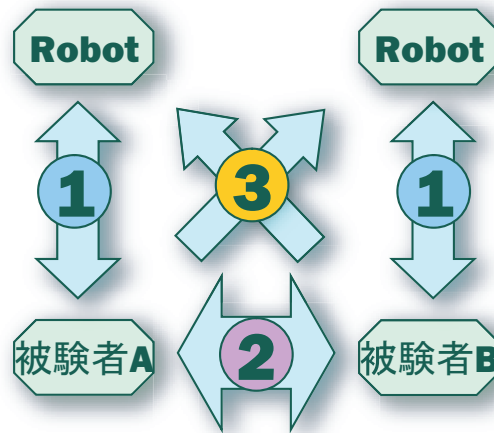


図 5.4: 2 者対話の組み合わせによるバランス理論

あるが、赤外線照射機能つき赤外線カメラを 6 台使用したシステムとなっている。本システムでの時間分解能は 120 [Hz] であり、空間分解能は約 1 [mm] で計測可能である。本実験では 2 人の人に対してそれぞれ 44 点、ロボットに対して 24 点のマーカールをつけ、これを記録する。ここで得られたデータは実験における身体動作量の分析に使用する。

5.3 予備実験: ロボットとの 2 者対話実験

予備実験では 3 者対話ではなく、人とロボットの 1 対 1 の対話を 2 人の被験者それぞれ別に対話を行う (図 5.4 の①)。両被験者がロボットと対話したあとに実験者が両被験者の前で口頭によるロボットに対する印象を聞くインタビューを行う (図 5.4 の②)。対話後のロボットの印象をお互いに知ること (図 5.4 の③)、バランス理論の成立を確認する。予備実験は質問票のみで評価を行う。このため、前述したモーションキャプチャシステムは使用しない。

予備実験ではロボットとの対話中に被験者同士が会話することができない。このため、ロボットに対する印象が良くても、悪くてもそのままの印象で安定し易い。印象が安定したところで、実験者を交えた場所で両被験者の印象をお互いに知ること意見の一致、不一致が発生する。バランス理論が成立するのであれば、意見が一致すればお互いに良い印象を持ち、意見が一致しなければお互いに悪い印象を持つことになると思われる。

このため、3 者が同時に対話を行わないため、被験者同士が自由に会話することができない予備実験では 3 者対話よりもバランス理論が成立し易いことが予想される。

5.3.1 被験者

男女の大学生 12 名が実験に参加した (男性 5 名、女性 7 名)。各被験者は日常的にロボットを扱ったことがないことを確認した。

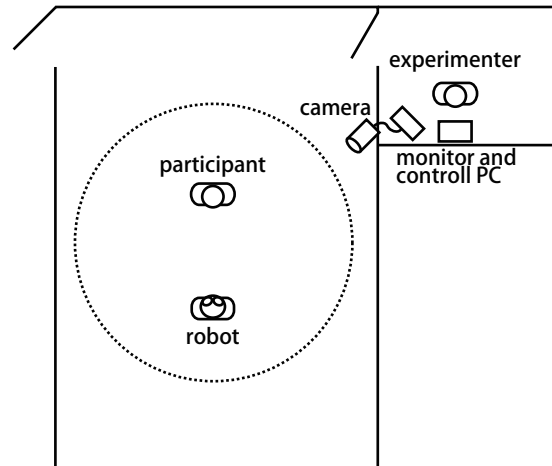


図 5.5: 予備実験の実験環境

5.3.2 実験環境

予備実験は公立はこだて未来大学内の実験室にて行う (図 5.5)。実験室内には実験を記録するためのビデオカメラが設置されている。また、実験者は被験者から見えない部屋に隠れている。

5.3.3 実験手順

具体的な実験手順を示す。

1. ロボットと対話する前に「事前アンケート」に回答する。このアンケートの内容は物事の好き嫌いに関するものである。ロボットとの対話実験ではこのアンケートの結果から被験者に対して「賛成」と「反対」の態度をとる。
2. 各被験者それぞれ別にロボットと対話実験を行う。
3. 対話実験終了後、「ロボットの印象に関するアンケート」に回答する。
4. 両被験者に対して実験者が同時に口頭でロボットの印象に関するインタビューを行う。両被験者は「ロボットの印象に関するアンケート」で回答した通りの回答を行う。これにより両被験者同士のロボットの印象を知ることができる。
5. 各被験者に対してバランス理論にもとづく印象について「質問票」に回答する。実験の評価にはこの「質問票」を用いる。

なお、ロボットとの対話実験はロボットが「こんにちは」と発話したところから、「これで質問は終わりです」と発話したところまでとする。

表 5.3: 質問項目

Question.1 意見が合う	Question.2 共感できる	Question.3 自分と似ている
Question.4 好感が持てる	Question.5 魅力的に感じる	Question.6 好き

5.3.4 評価方法

評価は、被験者の「質問票」への回答の結果により行う「質問票」での質問項目を表 5.3 に示す。これらの質問項目は被験者の各対象に対する好悪の印象に関するものである。被験者はこれを ①ある被験者からのロボットの印象、②別の被験者からのロボットの印象、③ある被験者からの別の被験者の印象、の 3 つの印象について同じ質問項目で評価する。

被験者はこれらの質問に 7 段階尺度で回答する。最も低い評価を 1、最も高い評価を 7 とする。

5.3.5 実験の仮説と予測

本実験では、以下の仮説にもとづき予測の検証を行う。

仮説 ロボットの態度によって、被験者間の印象を変化させることができる。

予測 賛成条件、反対条件における被験者間の印象評価の結果が不平等条件における被験者間の印象評価の結果よりも高くなる。これによりバランス理論が成立する。

5.3.6 実験結果

予備実験では、ロボットを交えた限定的な 3 者対話においてバランス理論が成立するかどうかを確認するために、対話実験終了後にバランス理論にもとづく印象について「質問票」での回答を求めた。実験結果の評価は 5.1.2 節で示した「バランス理論にもとづく評価グループ」每に行った。表 5.4-5.6 に質問票の 6 評定項目の条件毎の平均、標準偏差、および分散分析の結果を示す。図 5.6-5.8 に 6 評定項目の条件毎の平均値のグラフとその分散分析の結果を示す。最後にロボットとの対話実験の様子を図 5.9 に示す。

表 5.4 から被験者から見たロボットに対する印象は Q1, Q2 に関してプラス評価グループとマイナス評価グループの間に有意な差が確認された。表 5.5 から被験者から見た他の被験者のロボットの印象は Q1 に関してプラス評価グループとマイナス評価グループの間に有意な差が確認された。また、Q2 において有意傾向が見られた。最後に表 5.6 から被験者から見た他の被験者の印象に関してはすべての質問項目において有意な差は確認されなかった。

また、プラス評価グループとマイナス評価グループの平均値を示したグラフでは、概ねプラス評価グループのグラフのほうがマイナス評価グループよりも大きなグラフを示した。

表 5.4: 被験者から見たロボットの印象に関する質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.15 (1.356)	3.86 (0.99)	2.86 (0.833)
minus	2.00 (1.265)	2.20 (1.167)	1.80 (1.167)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 6.42$ $p = .030(*)$	$F = 5.86$ $p = .036(*)$	$F = 2.8$ $p = .125$

	Q4	Q5	Q6
plus	5.00 (0.756)	4.43 (1.05)	5.00 (0.926)
minus	5.20 (1.834)	5.40 (1.625)	5.60 (1.357)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 0.05$ $p = .828$	$F = 1.32$ $p = .277$	$F = 0.69$ $p = .426$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

表 5.5: 他の被験者のロボットに対する印象を推定した質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.86 (12.343)	4.58 (9.153)	3.00 (0.467)
minus	2.80 (2.366)	2.80 (1.852)	2.60 (1.12)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 5.22$ $p = .045(*)$	$F = 4.94$ $p = .050(+)$	$F = 0.41$ $p = .536$

	Q4	Q5	Q6
plus	5.72 (6.689)	5.15 (2.593)	5.72 (5.039)
minus	4.20 (1.023)	4.20 (2.366)	4.40 (1.863)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 6.54$ $p = .029$	$F = 1.1$ $p = .319$	$F = 2.7$ $p = .131$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

表 5.6: 各被験者間の印象に関する質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.00 (1.291)	5.00 (0.578)	3.84 (1.344)
minus	3.17 (1.864)	3.67 (1.796)	2.67 (0.943)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 0.67$ $p = .432$	$F = 2.5$ $p = .145$	$F = 2.53$ $p = .143$

	Q4	Q5	Q6
plus	5.50 (0.764)	5.00 (1)	5.17 (1.068)
minus	5.00 (1.291)	4.34 (1.886)	4.67 (1.248)
分散分析の結果 ($F(1,10)$)	$F = 0.55$ $p = .475$	$F = 0.48$ $p = .504$	$F = 0.46$ $p = .513$

(n.s.): 有意ではない (+): 有意傾向 (*): 有意 $p < .05$ (**): 有意 $p < .01$

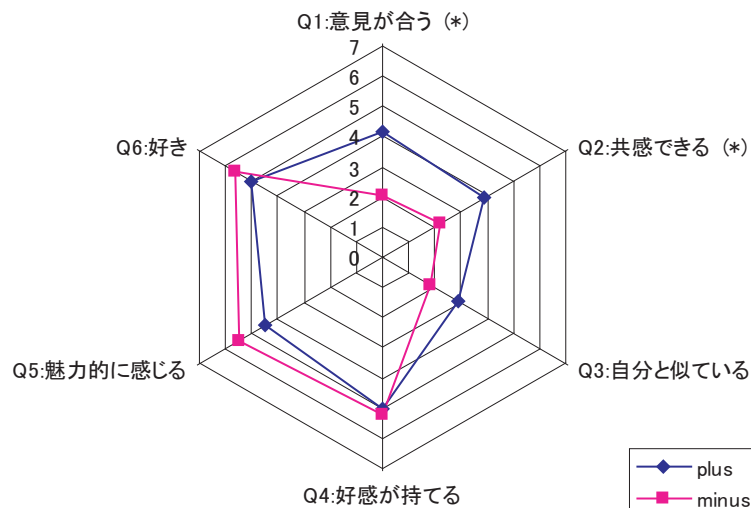


図 5.6: 被験者から見たロボットの印象のグラフ

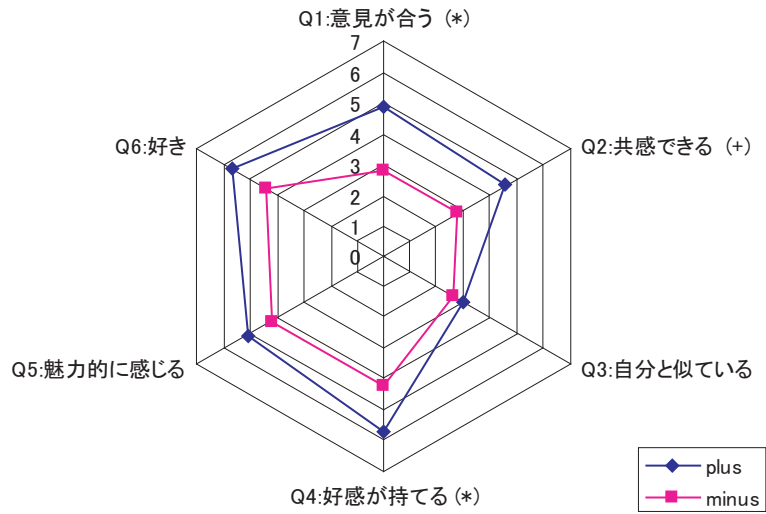


図 5.7: 被験者から見た相手の被験者のロボットに対する印象のグラフ

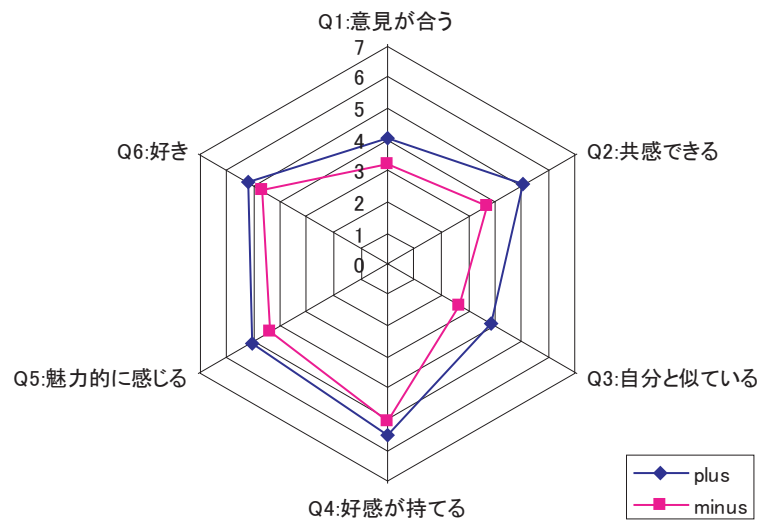


図 5.8: 被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ

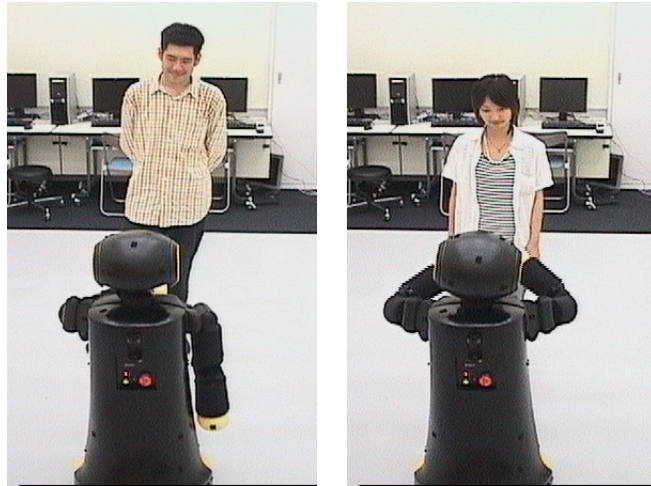


図 5.9: 対話実験の様子 (不平等条件)

しかし、被験者からみたロボットの印象のグラフでは Q4, Q5, Q6 においてプラスとマイナスが逆転していた。Q1, Q2 においては有意な差が確認されており、これら逆転していた 3 項目がロボットが好きであるとか、魅力を感じるといったように、ロボットに興味がある人にとっては高く評価するものであると考えられる。このため、これに関しても被験者数が少なかったため、このような結果が出たものと考えられる。

以上により、今回の実験では人とロボットの 2 者対話の組み合わせによるバランス理論の成立は統計的には確認できなかったが、各評価グループ毎の平均値からこれが成立する可能性が示唆されたと考えている。

5.4 本実験: ロボットを交えた 3 者対話実験

予備実験の結果をもとに本実験「3 者対話におけるバランス理論の成立に関する実験」を行う。実験目的、方法、実験条件は予備実験と同様である。

5.4.1 被験者

男女の大学生 50 名が実験に参加した (男性 47 名, 女性 3 名)。各被験者は日常的にロボットを扱ったことがないことを確認した。

5.4.2 実験環境

予備実験は公立はこだて未来大学内の実験室にて行う (図 5.11)。実験室内には実験を記録するためのビデオカメラと 3 次元的な身体動作を記録するためのモーションキャプチャシステムが設置されている。また、実験者は被験者から見えない部屋に隠れている。

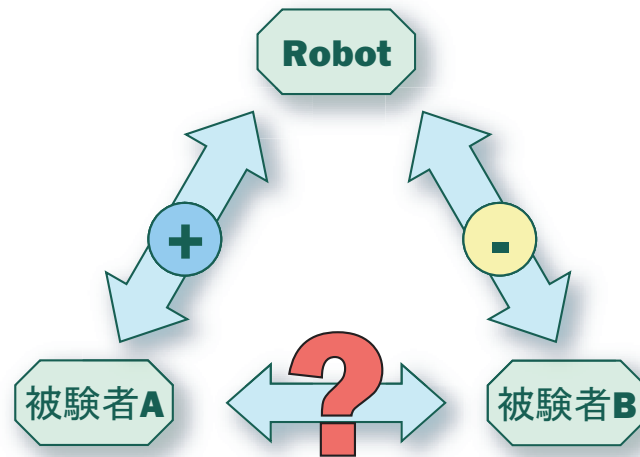


図 5.10: 3 者対話実験における実験設定

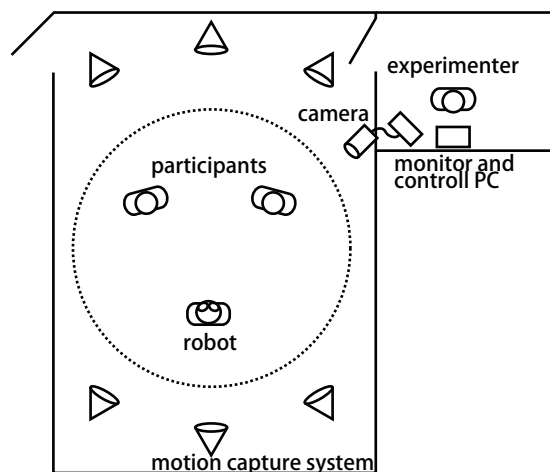


図 5.11: 本実験の実験環境

5.4.3 実験手順

具体的な実験手順を示す。対話実験を両被験者同時に行うこと以外は、基本的に予備実験と同様の手順となっている。

1. ロボットと対話する前に「事前アンケート」に回答する。このアンケートの内容は物事の好き嫌いに関するものである。ロボットとの対話実験ではこのアンケートの結果から被験者に対して「賛成」と「反対」の態度をとる。
2. 2人の被験者が同時にロボットと対話実験を行う。
3. 対話実験終了後、「ロボットの印象に関するアンケート」に回答する。
4. 両被験者に対して実験者が同時に口頭でロボットの印象に関するインタビューを行う。両被験者は「ロボットの印象に関するアンケート」で回答した通りの回答を行う。これにより両被験者同士のロボットの印象を知ることができる。
5. 各被験者に対してバランス理論にもとづく印象について「質問票」に回答する。実験の評価にはこの「質問票」を用いる。

なお、ロボットとの対話実験はロボットが「こんにちは」と発話したところから、「これで質問は終わりです」と発話したところまでとする。

5.4.4 評価方法

評価は、被験者の「質問票」への回答の結果により行う。質問票での質問項目は予備実験のものと同様である(表 5.3)。これらの質問項目は被験者の各対象に対する好悪の印象に関するものである。被験者はこれを ①ある被験者からのロボットの印象、②別の被験者からのロボットの印象、③ある被験者からの別の被験者の印象、の3つの印象について同じ質問項目で評価する。被験者はこれらの質問に5段階尺度で回答する。予備実験では7段階尺度で回答を求めたが、本実験では他の実験と被験者をシェアしており、他の実験の尺度と本実験の尺度を合わせたため5段階尺度とした。予備実験同様最も低い評価を1としたため、最も高い評価が5であることと7であることでは大きさが異なるのみであるため、予備実験と結果を比較することは可能である。

さらに本実験ではモーションキャプチャシステムで記録した被験者の身体動作についても評価対象とする。具体的には条件やロボットの振る舞いによって被験者の身体動作の変化量を評価する。

5.4.5 実験の仮説と予測

本実験では、以下の仮説にもとづき予測の検証を行う。

仮説 ロボットの態度によって、被験者間の印象を変化させることができる。さらに、人の身体動作に影響を与えることができる。

表 5.7: 被験者から見たロボットの印象に関する質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.17 (0.746)	3.30 (1.207)	3.67 (1.106)
minus	1.55 (0.783)	1.60 (0.718)	1.50 (0.723)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 129.54$ $p < .001(**)$	$F = 31.57$ $p < .001(**)$	$F = 58.06$ $p < .001(**)$
	Q4	Q5	Q6
plus	3.80 (1.04)	3.13 (0.781)	3.96 (0.889)
minus	2.50 (1.197)	2.46 (1.234)	2.91 (1.165)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 14.66$ $p < .001(**)$	$F = 4.72$ $p = .035(*)$	$F = 11.4$ $p = .002(*)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

予測 賛成条件，反対条件における被験者間の印象評価の結果が不公平条件における被験者間の印象評価の結果よりも高くなる．さらに，ロボットに賛成される被験者の身体動作と反対される被験者の身体動作量に差が現れる．

5.4.6 実験結果

本実験ではロボットを交えた三者対話においてバランス理論が成立したかを確認するための質問票分析と身体動作の動作量の分析を行う身体動作分析の2つについて分析を行う．

質問票分析

本実験では，ロボットを交えた三者対話においてバランス理論が成立するかを確認するために質問票による回答を求めた．結果は5.1.2節で示した「バランス理論にもとづく評価グループ」毎に評価を行った．また，この評価グループ分けの妥当性を検証するための分析を行った．表5.7-5.9に質問票の6評定項目の条件毎の平均，標準偏差，および分散分析の結果を示す．図5.12-5.14に6評定項目の条件毎の平均値のグラフとその分散分析の結果を示す．実験機材の障害により，実験に影響を与えてしまった4名の被験者のデータは分析から除いた．これにより，分析対象となるの被験者数は46名である．最後にロボットとの対話実験の様子を図5.15に示す．

表5.7から被験者から見たロボットに対する印象はすべての質問項目に関してプラス評価グループとマイナス評価グループの間に有意な差が確認された．表5.8から被験者から見た他の被験者のロボットの印象についてもすべての質問項目に関してプラス評価グループとマイナス評価グループの間に有意な差が確認された．さらに，表5.9から被験者から見た他の被験者の印象に関してもすべての質問項目において有意な差が確認された．

さらに評価グループ分けの妥当性を検証するために，プラスとマイナスのグループ分け

表 5.8: 他の被験者のロボットに対する印象を推定した質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.38 (0.696)	3.50 (1.259)	3.92 (1.188)
minus	1.82 (0.936)	2.14 (1.1)	1.73 (0.75)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 106.86$ $p < .001(**)$	$F = 14.54$ $p < .001(**)$	$F = 52.4$ $p < .001(**)$
	Q4	Q5	Q6
plus	3.71 (1.172)	3.38 (0.905)	3.92 (0.954)
minus	2.78 (0.997)	2.69 (1.062)	3.00 (0.905)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 8.06$ $p = .007(*)$	$F = 5.47$ $p = .024(*)$	$F = 10.65$ $p = .002(*)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

表 5.9: 各被験者間の印象に関する質問票の集計結果

	Q1	Q2	Q3
plus	4.28 (0.914)	4.19 (0.575)	4.05 (1.022)
minus	2.59 (1.382)	3.05 (1.207)	2.09 (0.954)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 22.45$ $p < .001(**)$	$F = 15.55$ $p < .001(**)$	$F = 43.41$ $p < .001(**)$
	Q4	Q5	Q6
plus	3.96 (0.768)	3.60 (0.651)	3.64 (0.772)
minus	3.38 (0.993)	3.00 (0.764)	3.13 (0.833)
分散分析の結果 ($F(1.44)$)	$F = 4.64$ $p = .037(*)$	$F = 7.56$ $p = .009(*)$	$F = 4.44$ $p = .041(*)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

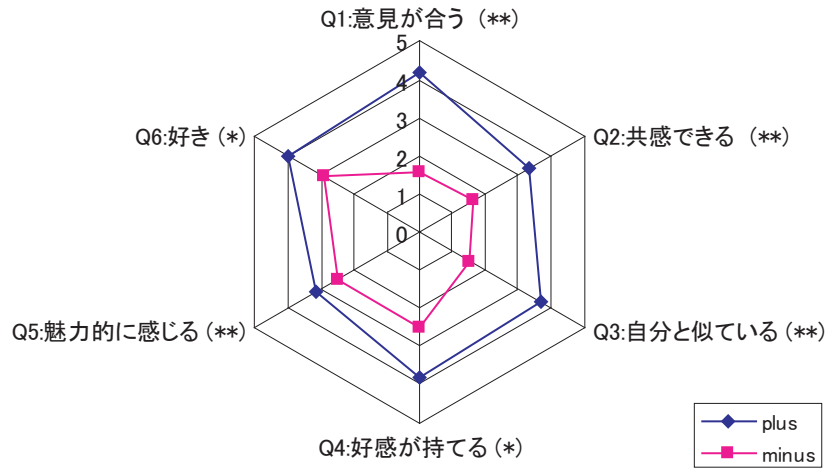


図 5.12: 被験者から見たロボットの印象のグラフ

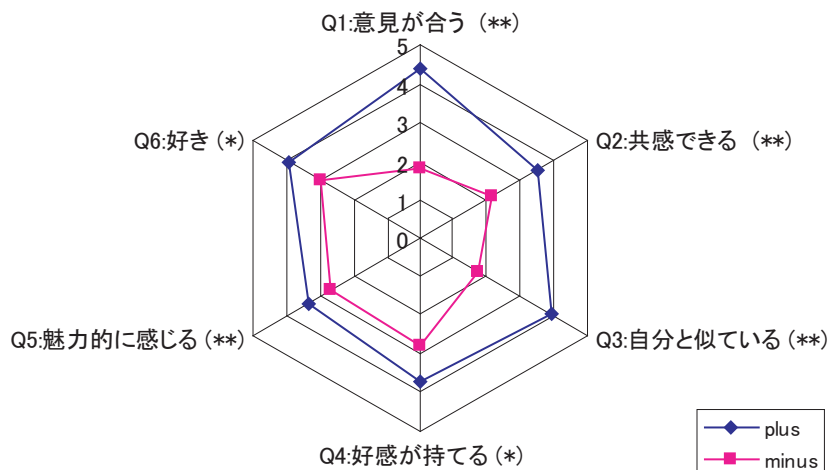


図 5.13: 被験者から見た相手の被験者のロボットに対する印象のグラフ

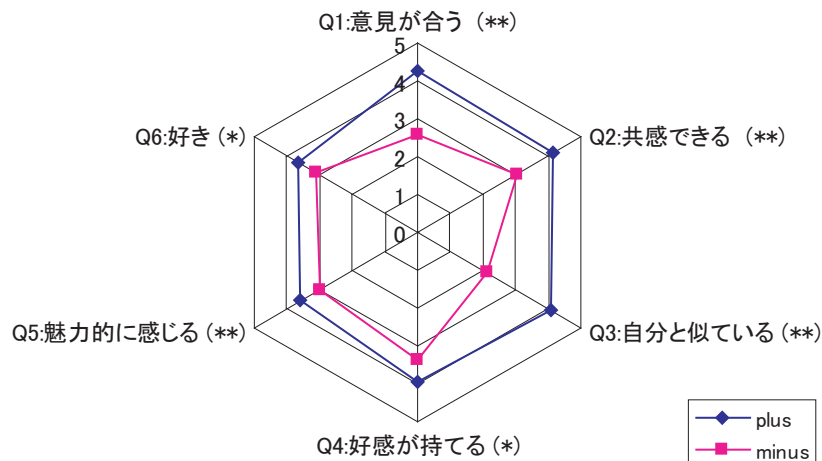


図 5.14: 被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ

を行わず、4つの評価グループ間における分散分析の結果を表 5.10 に示す。この結果においてもすべての項目において有意な差を確認した。さらに、LSD 法による多重比較の結果、Q1,Q2,Q3 において $A, D > UA, UD$ といった関係に有意な差が確認された (Q1:($MSe = 1.443, p < .05$), Q2:($MSe = 0.9242, p < .05$), Q3:($MSe = 0.8550, p < .05$))。ここでの A と D はプラスの評価グループであり、同様に UA,UD はマイナスの評価グループである。この結果からもプラスとマイナスの評価グループ間には有意な差が確認された。また、Q4 では $A > D, UA, UD$ という関係に有意な差が確認された (Q4:($MSe = 0.7200, p < .05$))。Q5 では $A, D > UD$ という関係に有意な差が確認された (Q5:($MSe = 0.5253, p < .05$))。Q6 では $A > UD$ という関係に有意な差が確認された (Q6:($MSe = 0.6526, p < .05$))。多重比較の結果が表す傾向からもプラスとマイナスという評価グループに分けられると考えている。

これによりロボットを含む 3 者対話においてロボットの振る舞い、態度が個人のロボットへの印象だけではなく、人間関係にまで影響を与えることができることを確認した。このため、人とロボットの 3 者対話においてバランス理論が成立することを確認した。

身体動作分析

本実験で使用したモーションキャプチャシステムで得られたの身体動作の分析とビデオデータの解析を行う。これらについてモーションキャプチャシステムで得られたデータは対人距離や身体動作量の分析を行う。また、ビデオ分析では人とロボットの協調的な身体動作や被験者の社会的態度などの分析を行う。さらに、その他細かな分析についても述べる。

表 5.10: 4 つの評価グループの分散分析の結果

評価グループ	Q1	Q2	Q3
同意 (A)	4.34 (0.624)	4.25 (0.596)	4.17 (0.898)
反意 (D)	4.20 (1.167)	4.10 (0.539)	3.90 (1.136)
不平等同意 (UA)	2.34 (1.028)	2.75 (1.011)	1.92 (0.641)
不平等反意 (UD)	2.84 (1.625)	3.34 (1.313)	2.25 (1.164)
分散分析の結果	$F = 8.42$	$F = 6.47$	$F = 19.79$
($F(3.42)$)	$p < .001(**)$	$p = .001(*)$	$p < .001(**)$
多重比較の結果	$A, D > UA, UD$	$A, D > UA, UD$	$A, D > UA, UD$

	Q4	Q5	Q6
同意 (A)	4.34 (0.746)	3.75 (0.722)	3.92 (0.863)
反意 (D)	3.50 (0.5)	3.40 (0.49)	3.30 (0.459)
不平等同意 (UA)	3.25 (1.011)	3.09 (0.954)	3.09 (0.954)
不平等反意 (UD)	3.50 (0.958)	2.92 (0.494)	3.17 (0.688)
分散分析の結果	$F = 4.46$	$F = 3.9$	$F = 3.1$
($F(3.42)$)	$p = .009(*)$	$p = .016(*)$	$p = .037(*)$
多重比較の結果	$A > D, UA, UD$	$A, D > UD$	$A > UD$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$



図 5.15: 対話実験の様子

モーションデータの分析 実験で使用したモーションキャプチャシステムによって得られた実験中の人とロボットの3次元身体動作の分析を行う。この分析では実験機材の障害によりデータを取得することができなかった4名だけではなく、モーションキャプチャシステムのデータが取得することができなかった2名の被験者を加えた計6名の被験者を引いた44名分のデータを分析する。分析は被験者の身体移動量と被験者とロボットの身体的距離について行う。図5.17に実験で得られたデータを可視化したものを示す。

身体移動量分析 身体移動量を単位時間における人の重心位置の移動量と定義し、この移動量を条件ごとに比較・分析を行う。

具体的には被験者の両肩に付けられたマーカーの座標を取得し、これの中心点を求める。ここで被験者の左肩の座標を $Human_{LSHO}$ 、右肩の座標を $Human_{RSHO}$ とし、求める中心点を $Human_{Midpoint}$ とすると以下の式でこれが求まる。

$$Human_{Midpoint} = (Human_{LSHO} + Human_{RSHO})/2 \quad (5.1)$$

これを1秒毎に計測し、全体の各実験における被験者の身体移動量の平均を求める。この分析はバランス理論にもとづく2つの評価グループ毎の被験者の身体移動量の平均値の評価を行う。ここではロボットに賛成される被験者をプラス評価グループ、反対される被験者をマイナス評価グループとして分析を行う。2つの評価グループ毎の身体移動量の平均、標準偏差と分散分析の結果を表5.11に示す。この分析の結果からプラスとマイナスの評価グループの身体動作量には有意な差があることが確認された。これはつまり、ロボットに賛成されることで、反対されるよりも被験者の身体動作量が増えることが確認された。

さらに詳細に分析するために4つの評価グループ毎の身体移動量の平均、標準偏差と分散分析の結果を表5.12に示す。この分析の結果から、各条件ごとの被験者の身体移動量には有意傾向が見られた。身体移動量の平均のみを見てみると、賛成グループと不平等賛成グループが他の2つのグループよりも大きな値をとっていることがわかる。しかし、有意な差が確認されなかったのは、この2つのグループの標準偏差が大きいためであると考え

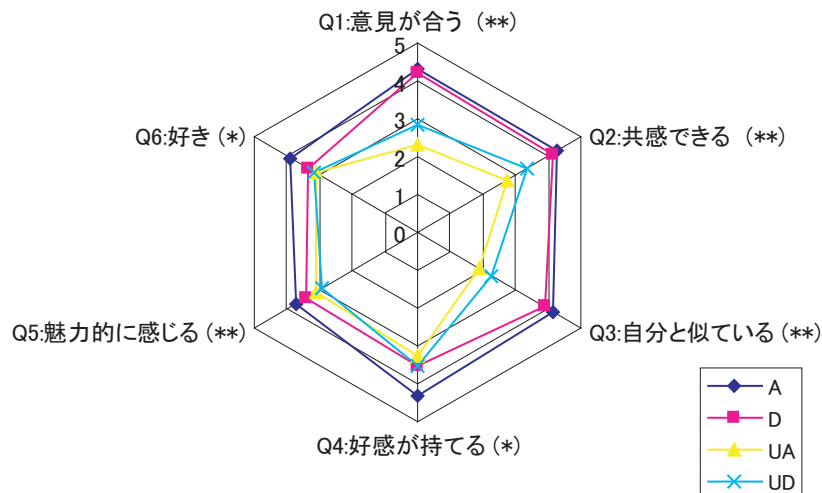


図 5.16: 4 評価グループにおける被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ

られる．これはつまり，このグループ内で身体移動量の大きい被験者と小さい被験者が存在する可能性があるということである．被験者を身体動作量毎に分類することができる可能性があると考えた．このため，ウォード法を用いたクラスター分析を行った．この結果，賛成グループにおいて図 5.18 上，不平等賛成グループにおいて図 5.18 下のツリーダイアグラムを得た．これによれば，2 つのグループにおいて，被験者を 2 つのグループに分類することができることがわかった．具体的には，賛成グループの被験者 6,7,8 とその他の被験者の平均値を比較した結果，身体移動量の大きなクラスターの平均値が $132.57mm$ となったのに対し，小さなクラスターの平均値は $24.58mm$ となった．また，不平等賛成グループについても同じく被験者 4,6 とその他の被験者の平均値を比較した結果，身体移動量の大きいクラスターの平均値は $187.17mm$ となったのに対し，小さなクラスターの平均値は $14.46mm$ となった．このため，この 2 つのグループの被験者は他の 2 グループと同じ程度に身体を動作させる被験者と，他の 2 グループよりも多く身体を移動させるクラスターに分けられた．これはつまり，被験者によってはロボットに賛成されることで身体の移動量が増えていた可能性があるということである．

以上の結果から，被験者がロボットに賛成されることで身体移動量が増えることを確認した．また，同じ評価グループ内でもさらに身体動作量の多い被験者が存在することも確認した．これはつまり，被験者によってはロボットに賛成されることで身体の動作量が増えることが示唆されることを確認した．

人とロボットの身体的距離の分析 次に実験中の被験者とロボットとの身体的距離の分析を行う．社会心理学では人と人の身体的距離を対人距離と呼び，この距離によって相手との関係を推定することができるという．以下に詳細を示す．

密接距離 0～45cm，相手の存在がはっきりととらえられ，密度の高い接触が可能

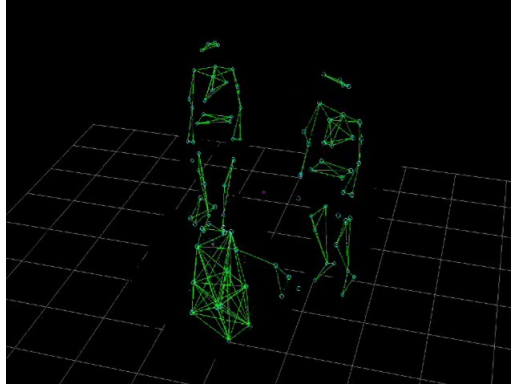


図 5.17: モーションキャプチャシステムで得られたモーションデータ

表 5.11: バランス理論にもとづく評価グループ毎の身体の移動量平均

	移動量平均 [mm]
plus	48.84 (60.892)
minus	10.53 (14.491)
分散分析の結果 ($F(1, 40)$)	$F = 6.84$ $p = .012(*)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

個体距離 45 ~ 120cm, 相手の存在を視覚にとらえることができ, 比較的容易に接触できる. 小さな防御領域

社会距離 120 ~ 360cm, 特別な努力せずには相手に接触できない

公衆距離 360cm 以上, 相手との関与度は低い. 講義や演説のような一方的なコミュニケーションとなる

ここで行う分析には前述した分析同様被験者の両肩のマーカート, 今回はロボットの両肩のマーカートを使用する. ここで式 5.1 を用いて, 人の中点 $Human_{Midpoint}$ を求める. 次に, 次式を用いてロボットの中点を求める. ここでロボットの左肩の座標を $Robot_{LSHO}$ とし, 右肩の座標を $Robot_{RSHO}$ とする. また, 求める中点を $Robot_{Midpoint}$ とする. これにより,

$$Human_{Midpoint} = (Human_{LSHO} - Human_{RSHO})/2 \quad (5.2)$$

となる. 次に, 人とロボットの距離 $Distance$ を求める. これは次式により求まる.

$$Distance = \sqrt{(Human_{Midpoint} - Robot_{Midpoint})^2} \quad (5.3)$$

対ロボット距離を計測するために, 人とロボットの両肩のマーカのそれぞれの中点を計算する. 人とロボットの中点の距離を 1 秒毎に計測し, 各被験者毎の実験における対ロボッ

表 5.12: 4 評価グループ毎の身体の移動量平均

	移動量平均 [mm]
同意	51.59 (53.937)
反意	15.09 (20.659)
不平等同意	45.87 (67.544)
不平等反意	7.23 (5.13)
分散分析の結果	$F = 2.25$
($F(3.38)$)	$p = .0981(+)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

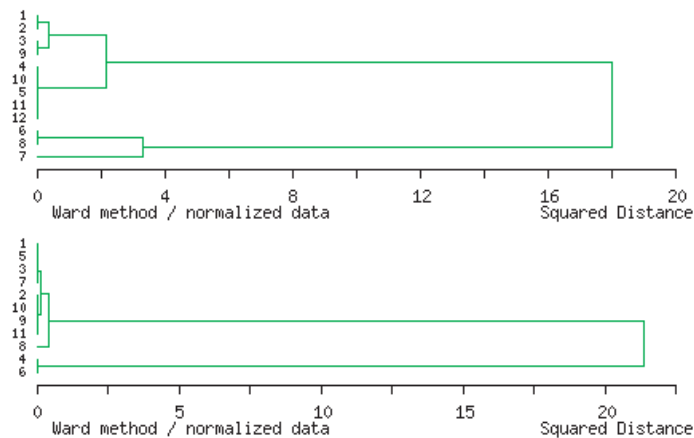


図 5.18: クラスター分析によって得られたツリーダイアグラム: (賛成グループ:上, 不平等賛成グループ:下)

ト距離の平均を求める．これを各実験について行い，バランス理論にもとづく2つの評価グループ毎の被験者とロボットの対ロボット距離を求める．ここでもロボットに賛成される被験者をプラス評価グループ，反対される被験者をマイナス評価グループとして分析を行う．表 5.13 に2つの評価グループごとの平均値，標準偏差，分散分析の結果を示す．また，同時に4つの評価グループの平均値を示す．この結果からプラスとマイナスの評価グループの対ロボット距離には有意な差が確認された．

不平等条件ではロボットは賛成する被験者のほうに $200mm$ 程度前進する．この際，ロボットは社会距離から個体距離に進入を試みるが，被験者が後ずさりするなどの行動は観察されなかった．このため，被験者はロボットの接近を許容したと考えられる．また，後述するビデオ分析では被験者からロボットに近づいた例も確認されている．この点において，不平等条件賛成グループの対ロボット距離の平均が他の平均よりも近いことはロボットが近づいたことも大きく影響しているが，被験者側から近づいたことも影響していると考えられる．後述するビデオ分析では実際に被験者がロボットに近づいた様子が観察された(図 5.19)．また，同様に賛成グループではロボットから接近することはないため，被験

表 5.13: バランス理論にもとづく評価グループ毎の対ロボット距離の平均

	移動量平均 [mm]
plus	1385.16 (145.936)
minus	1513.1 (193.885)
分散分析の結果 ($F(1, 40)$)	$F = 5.66$ $p = .022(*)$

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

表 5.14: 4 評価グループ毎の対ロボット距離の平均

	対人距離 [mm]
同意	1417.25 (145.234)
反意	1509.38 (82.405)
不平等同意	1350.17 (138.466)
不平等反意	1515.83 (244.898)
分散分析の結果 ($F(3.38)$)	$F = 2.11$ $p = .115$ (n.s.)

(n.s.): 有意ではない (+):有意傾向 (*):有意 $p < .05$ (**):有意 $p < .01$

者からロボットに近づいた可能性が示唆される。

これを確認するために、4 評価グループ毎の対ロボット距離の平均についても分析を行う。表 5.14 に 4 評価グループごとの平均値、標準偏差、分散分析の結果を示す。この結果から 4 評価グループ間に有意な差を確認することができなかった。また、賛成グループは反対・不平等反対グループよりも身体的距離が 100mm 程度近いことが分かる。これはロボットに対しての印象が良くなり、親近感が増した結果からこのような現象が起きたと考えられる。また、バランス理論にもとづく評価グループ毎の対ロボット距離の平均に有意な差が確認されたことは不平等賛成グループの被験者だけではなく賛成グループの被験者の対ロボット距離が近づいたことも要因となっていることが確認された。

以上から、バランス理論にもとづく評価グループ間で対ロボット距離に有意な差が確認された。また、これは不平等賛成グループにおけるロボットの接近だけではなく、賛成グループの被験者がロボットに接近したことが要因として考えられる。これによりロボットに賛成されることで対ロボット距離が縮まることが確認された。これはつまり被験者はロボットに賛成されることで良い印象を持つことが身体動作から確認されたと考えている。

ビデオ分析 実験中に記録したビデオの分析を行う。ビデオ分析ではロボットとの対話で表れた協調的な身体動作についてと、代表的な社会的態度について分析を行う。

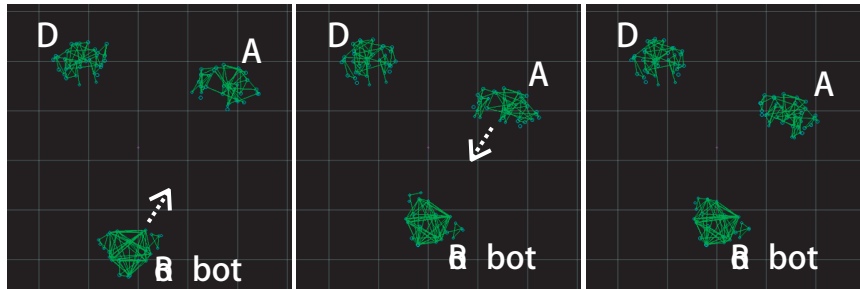


図 5.19: 不平等条件における被験者とロボットの身体的距離の変化 (左から右へ)

協調的な身体動作 ロボットとの対話において被験者がロボットの動作に同調するような動作が観察された。これは第 4 章でも議論した協調的な身体動作というものである。図 5.20 に実験で観察された協調的な身体動作を示す。

図 5.20 左の右側のロボットとの同調的な身体動作が表れた被験者は実験において非常にロボットに興味を示しているようであった。しかし、それはハードウェア的な面ではなく、ロボット自体に興味を示しているようであった。この実験条件は賛成条件であり、他の被験者とともにロボットの反応を見て笑うなど 3 者対話が非常に盛り上がっていた。このため、被験者のロボットに対する印象が良くなり、ロボットに同調した身体動作が表れた可能性がある。

また、図 5.20 右の右側の被験者は、不平等条件で賛成される被験者である。この実験での両被験者は、常に一方の意見に賛成し続けるロボットと対話しながら笑みも見せていたが、ロボットが賛成する側の被験者のほうを向き、近づいたところで、一旦会話が止まってしまった。これはいわゆる「気まずい」状態であり、この後しばらくしてから被験者の協調的な身体動作が観察された。これには 2 通りの予想が考えられる。1 つ目は協調的な身体動作をした被験者が他の被験者を無視したということである。この原因としては、他の被験者の心情を理解しようとしていない、または、感じられないということが考えられる。2 つ目は「気まずい」状態を抜け出すために、対話を盛り上げようとしてこのような動作を行ったということが考えられる。

これら 2 つの例以外にもロボットと被験者の間で協調的な身体動作が現れた。また、不平等条件では賛成される被験者が、ロボットが近づいてきた時に、ロボットのほうへ一歩近づくといい動作も確認された。これもロボットに対する協調動作の 1 つであると考えられる (図 5.19)。

被験者の社会的態度 実験においてはロボットの社会的態度に対する、被験者の様々な社会的態度を観察することができた。代表的なものについて述べる。

喜ぶ 賛成条件と不平等条件の賛成される被験者に見られた態度である。複数の被験者はロボットに意見を賛成されることに対して喜びを表現する態度を示した。図 5.21 上段左に被験者が他の被験者を無視して喜びを表現する様子を示す。この態度は不平等条件における賛成される被験者に複数観察された。

叱る 不平等条件の賛成される被験者に見られた態度である。この被験者はロボットが自



図 5.20: ロボットの身体動作に同調した被験者の身体動作

分の意見だけに賛成し、さらに、他の被験者を無視する振る舞いをしたと考え、このような行動をしたのであろうと考えられる。図 5.21 上段右に被験者がロボットの頭を軽く叩く様子を示す。この前後の被験者はロボットの態度に対して非常に困惑しているようであった。

ロボットに興味を示す 全条件の被験者に見られた態度であるが、この態度においては複数のパターンがあると考えられる。1 つは純粹にロボットに興味を示す場合である。これはただ単にロボットに興味があるのであって、特に社会的態度としての意味は無い。2 つ目は不平等条件の賛成される被験者がロボットに興味を示す態度である。これはロボットが他の被験者を無視して自分だけに質問をしていると考えたため、1. 自分だけがロボットに好かれている状況が自分は満足しているわけではないという態度を他の被験者に対して示している、2. 自分だけがロボットに好かれており、内心は非常に嬉しいと思っているが、それを表現するまいとしている、といったことが考えられる (図 5.21 中段左)。これはつまり、他の被験者との社会的な関係を悪くすることを好まないため、このような態度が表れたものと考えられる。

文句を言う 不平等条件の被験者に見られた態度である。ロボットとほとんどの項目で意見が一致しなかったため、実験に疑問を示す発言をしたものと考えられる (図 5.21 中段右)。

飽きる 不平等条件の反対される被験者に見られた態度である (図 5.21 下段左)。これは賛成される被験者とロボットのみが対話しているように感じ、この 2 者に対して自分がこの対話に参加していないという不満を表した態度であると考えられる。

困る 不平等条件の両被験者に見られた態度である。図 5.21 下段右にこの様子を示す。ロボットに賛成される被験者は対話途中まで笑顔を見せるなど、喜びを表現していたが、他の被験者の態度を見て困ったような態度を示した。これはこの被験者の他の被験者に対する社会的態度として、自分だけが楽しんでいるように見せないためにこのような態度を取ったと考えられる。

その他の分析 各条件ごとの対話時間の平均を表 5.15 に示す。これらを分散分析した結果、条件ごとの対話時間に有意な差は確認されなかった ($F(2, 18) = 1.52, p = .245$)。平均値のみに注目した結果では反対条件 > 賛成条件 > 不平等条件という傾向が確認された。また、反対条件の標準偏差が他の 2 つの条件よりも大きいことから、反対条件では対話時間に長い短いといった揺らぎがあったことが考えられる。

5.5 考察

本章ではロボットの振る舞いや態度が人に与える影響を確かめるためにバランス理論を用いた人とロボットの対話実験を行った。予備実験として 2 者対話の組み合わせによるバランス理論の成立を検証する実験を行い、本実験として 3 者対話によるバランス理論の成立を検証する実験を行った。この結果の分析から、予備実験ではバランス理論の成立が示



図 5.21: 被験者の様々な社会的態度

表 5.15: 条件ごとの対話時間平均

	同意条件	反意条件	不平等条件
対話時間の平均 (標準偏差)	183.40 (13.623)	192.92 (27.42)	175.17 (12.317)
最短対話時間	160.5417	154.8083	155.9583
最長対話時間	206.2417	231.95	207.0167

(n.s.): 有意ではない (+): 有意傾向 (*): 有意 $p < .05$ (**): 有意 $p < .01$

唆され、本実験ではバランス理論が成立したことが示された。これにより、ロボットが人間関係に影響を与えることができることを確認した。

これらについて質問紙分析の結果と身体動作分析に分けて考察していく。

5.5.1 質問紙分析の考察

質問紙分析の結果から、バランス理論の予測にもとづく他者に対する印象の形成が見られた。このことから、ロボットはその振る舞いや態度によって人とロボットの印象だけではなく、人と人の印象に対しても影響を与えることができることを確認した。これはつまり、一般的な社会的対話である多対多の対話にロボットが参加する際には、ロボットは人間関係に対して影響を与えることができるということである。

質問紙分析の項目を詳しく見ていくと、質問項目 1,2,3 に比べて 4,5,6 のほうがプラス評価グループとマイナス評価グループでは平均値が近い値を示している。これは質問項目の 1,2,3 が考えや態度の類似性についての質問であるのに対し、4,5,6 は相手の魅力についての質問であることが関係していると考えている。社会的関係を形成する際には他者との類似性や、他者の魅力が大きく関係していると言われている。このため、今回行った実験ではこの類似性と魅力についての質問を行った。この結果としては、ロボットと意見が一致した場合は類似性の項目の得点が高くなり、一致しなかった場合はこれが低くなる傾向が現れた。また、ロボットと意見が一致した場合は魅力についての項目に関しても点数が高くなることがわかった。これは意見が一致する他者に対しては類似性も魅力も増すということを確認した。逆に、意見が一致しない他者に対しては類似性も魅力も減るということを確認した。予備実験では意見が一致しないロボットに対しても魅力が高くなる傾向があることを確認したが、これは被験者がロボットという存在に興味を示したということが考えられる。これが原因となって、ロボットを魅力的に感じたということが考えられる。

社会心理学では類似性や魅力が高ければ印象が良くなり、良い関係が形成されることが知られているが、これは人同士の対話において生じる現象であった。今回の実験では人とロボットとの対話においても同様の現象が生じるということが確認された。この結果、ロボットの社会的な振る舞いや態度が、対話における複数の人の印象を操作することができたのであろうと考えている。

5.5.2 身体動作分析の考察

身体動作分析の結果から、ロボットに意見を賛成される被験者の身体動作量やロボットとの身体的な距離の変化が見られた。これは質問紙分析の結果から、類似性や魅力の増加によりロボットに対する印象が良くなったために、親近感が増したためであると考えられる。特に、人とロボットの距離に関してはロボットに賛成される被験者がロボットとの身体距離を縮める例もあり、この結果からも被験者がロボットに対して良い印象を持ったことが示唆される。

また、身体移動量の分析からもロボットに意見を賛成されることにより、これが増加する例があったことが確認された。これに関してもロボットに対する印象の変化したことを支持する結果であると考えられる。

ビデオ分析においては、被験者の社会的態度の分析を行った。この結果から、ロボットに賛成される被験者の身体動作がロボットに同調するといった協調的な身体動作が確認された。これは第4章で議論したように、被験者がロボットに対して良い印象を持っているということを示す現象であると考えている。つまり、被験者がロボットに対して興味を示しているということを示しているということが考えられる。

また、被験者の社会的態度の分析においては、実験中の被験者の様々な態度が観察された。ロボットに賛成された「喜ぶ」といった態度は現れることが予想されるが、ロボットを「叱る」、「困る」といった態度は現れるとは予想されなかった。不平等条件ではロボットはいわゆる非社会的な態度として、意見を不一致される被験者を無視するような態度を示した。この態度に対して、賛成される被験者がロボットを叱り、態度を変化させようとしたことは、ロボットを1人の社会的な対象として見なしていると言える。また、同様に自分の意見のみに賛成するロボットに対して困っているような態度を示した被験者に対しては、自分のみが賛成されることで、他の被験者との関係が悪くなることを防ぐために現れた態度であると考えられる。

特に、実験に関する「文句を言う」点においては、この被験者はロボットを社会的な対象として認知していることを表している。具体的にはこの文句は実験が終わったあと、ロボットから立ち去るさいに現れた。つまり、ロボットの目の前で文句を言ったわけではないという点において、このロボットを社会的な対象として見ていると考えている。

5.5.3 実験全体の考察

以上2つの考察により、ロボットの社会的な振る舞いによって人に対する印象や、人同士の関係に対してまで意図的に影響を与えることが可能であることを確認した。これにより、ロボットが人にとっての対話可能な他者として認知されたと考えている。なぜなら、ロボットが目の前に居る状態では、人は人同士でロボットの評価に関する会話をすることがなかったということが観察されたためである。つまり、自分の発言はロボットに対しても有効であり、このため、人の社会性を誘発したと考えている。

本章で使用したロボットは、特定の環境でしか動作することができず、とても人の社会性に匹敵するものであるとは言えないが、人の社会性を引き出すことができた。これは、インタラクティブシステムとしてのロボットが実体を伴って対話を行うためであり、この実体こそが社会性に対して重要であると考えられる。ここでの実体は、もしかすると、3次元立体映像でもかまわないかもしれない。また、ロボットの大きさについても重要であると考えられる。明らかに小さいロボットに対して人々(特に大人)が社会的に対応するかどうかについては疑問がある。Goldsteinらは人が小さなコンピュータに対しては社会性を持って対応しない可能性があることを示唆している[13]。このため、人は小さなロボットに対しても社会性をもって対話しない可能性もある。ロボットの社会性にはその外見も大きな要因があると考えられるため、これらについても調査・研究する余地があるように思われる。

また、ロボットの対話能力を高めることにより、さらに社会性を高めることができると考えている。このため、さらに高度な社会性を持ったロボットを実装し、実験室ではなく、実際に人の活動する社会においてロボットの社会性の評価をすることも重要になると考え

ている．特に，ロボットの社会的振る舞い，態度の重要性を確認するためにはこのようなフィールド実験は今後重要となってくるであろうと考えている．

5.6 本章のまとめ

本章では人とロボットの対話構造を解明するために，ロボットの社会的態度が人に与える影響を調べる実験を行った．特に本章で行った実験ではロボットの社会性が人とロボットの関係や，人間関係に対してどのような影響を与えるかを調べることを目的としていた．これを調べるためにバランス理論を用いたロボット交えた3者対話実験を行った．この結果，ロボットの社会的な態度が人のロボットに対する印象だけではなく，人同士の印象に対しても影響を与えることが確認された．具体的には，ロボットの不平等な態度により，被験者同士の印象が平等に賛成・反対されるよりも悪くなったことを確認した．また，ロボットに賛成されることで被験者の身体動作が増えることを確認した．同様に対ロボット距離が縮まることが示唆された．さらに，被験者のロボットに対する社会的な態度が，人と対話する際の態度と近いものであることも確認された．以上の結果から，ロボットの社会性が人間関係に変化を与える可能性があることが示唆された．さらに，この結果はReevesらの「メディアの等式」[54]がロボットにも適用可能であることを示す結果であると考えている．

ロボットは知能化された情報空間や環境におけるインタフェースとして人と日常的に相互作用する必要がある．この相互作用は一对一の相互作用ではなく，一对多や多対多となることが考えられる．本実験で得られた結果から，ロボットの社会性が人だけではなく，人間関係にも影響を与える可能性が示唆された．さらに，この影響は人間関係の繋がりと同じだけ広範囲に影響する可能性がある[2]．このため，現実社会において長期的かつ多数の人と相互作用するロボットにおいては，その提供するサービスの品質だけではなく，社会性の評価も同時に行うべきであると考えている．なぜなら，本章で行った実験の結果から，ロボットの社会的な振る舞いによって意図的にロボットと対話した被験者間の印象を操作することが可能であることが明らかになったためである．社会性の欠落したロボットにおいては，いかに優れたサービスを提供できる能力を持っていようとも，信頼性や有用性が疑われるインタフェースと人に認知される可能性があるであろう．日常的に相互作用するロボットというインタフェースの実現にはその社会性が重要な要素となることが本章で行った実験により明らかになったと考えている．

第6章 遠隔コミュニケーションメディアとしてのアンドロイドロボットの可能性

前章までに人型ロボットとの身体的対話機構と、社会的態度の影響について研究を行ってきた。これまでのロボットは人型ロボットではあっても、人に近い外見を有している訳ではなかった。本章では、人に近い外見を持つアンドロイド・ロボットを用いて、人型ロボットがどこまで人に近い対話を実現することができるのかについて実験を行う。

近年、人間型ロボットの研究開発が盛んに行われている。ホンダは2足歩行可能なロボットである ASIMO を開発し [58]，Breazeal らは感情を表出する顔ロボット [1] を開発した。さらに、最近になって人間に酷似した外見をもつロボットであるアンドロイドも開発されてきた [40]。これらのロボットは擬人的な身体要素をもとに人間同士が行うような自然な人-ロボット対話 (Human Robot Interaction) を可能にすると考えられる [75, 7, 44, 23]。これから登場するであろう多くのこのようなロボットは次世代インタラクション技術の中核となる可能性がある。特に人間型ロボットとのインタラクションは、人に近いインタラクション技術が求められるという点において、重要であると考えられる。

この中で私は、人型ロボット、特にアンドロイドが遠隔地間で対話するための通信メディアに利用できるのではないかと考える。これまでも電話やビデオ会議システムが通信メディアとして使われてきた。しかし、物理空間が共有できない [33]，視線があわない [43]，といった問題で「存在感」が伝達できないという問題があった。この存在感を伝達することで、これまで実現されてこなかった遠隔コミュニケーションが可能になるかもしれない。本研究で扱う「存在感」とは実世界において「まさに、ここに居る。」という強い感覚であることとする。また、「遠隔存在感」とはある遠隔地にいる人間の存在感を、同地点の人の存在感と同様に「まさに、ここに居る。」と感じられる感覚とする。さらに、この「遠隔存在感」を体現するメディアを遠隔存在感メディアと呼ぶこととする。これは第 2.5 節で議論した身体的存在感を表現するメディアであると言える。

これまでも、存在感を伝達するためにバーチャルリアリティなどの技術を利用する研究が行われてきた。石引らは遠隔地にいる人間の影を通信することでお互いの存在感の通信を試みた [55]。しかし、本研究では実体を持つロボットに注目する。これまでの研究から、実世界でのコミュニケーションにおけるロボットの優位性が明らかになってきている。Kidd らは実在するロボットとコンピュータグラフィックスによるエージェントとの比較において実世界におけるコミュニケーションにとってロボットがより適切であることを見いだした [29]。篠沢らは実世界の物体を参照するコミュニケーションにおいて、コンピュータグラフィックスによるエージェントよりもロボットのほうが適切であることを示した [64]。私は実世界における遠隔存在感に注目しているという点において、仮想的なものではなく

実在するロボットを用いた遠隔存在感の実現を試みる。

一方で、ロボットを存在感の伝達に用いる研究も既に行われている。葛岡らはロボットを遠隔操作し、ロボットの視線からロボットと対話している人間に対して操作者が何に注目しているのかを示す試みを行った [34]。関口らはクマ型のロボットを遠隔地の双方に置き、片方のロボットをユーザが動かすことで、もう片方のロボットも同時に動くシステムを開発した。彼らはこれにより遠隔地に居る他者の存在感の通信を試みた [61]。多田隈らは人型ロボットの顔に遠隔地に存在するオペレータの顔を投射し、遠隔存在感を実現する試みを行った [67]。また森田らは遠隔操作者の興味伝達を、人間型ロボットの視線などの動きにより行えることを明らかにした [84]。これらのように、これまでに様々な存在感の伝達の研究は行われてきている。しかし、これらの研究では、従来メディアに対してロボットがどの程度の優位性を持つのかは明らかにされず、ロボットを存在感の伝達に使うという可能性を実証した研究はなかった。さらに、私はアンドロイド・ロボットを用いることで、従来のロボット以上に真に迫った存在感の伝達が出来ないかに興味を持つ。

本研究ではロボット、特に人間に酷似したアンドロイド型ロボットを媒体として遠隔地にいる人間の存在感を伝達するためのシステムを開発した。具体的には、アンドロイド・ロボットを遠隔操作することで、操作する人間の存在感を伝達することを試みた。これを検証するために本システムを用いて存在感の伝達は可能であるかどうかの実験を行った。具体的には、アンドロイド、ビデオ会議、電話によって2地点間で対話を行う比較実験を行った。以下に本研究について詳述する。

6.1 アンドロイドを用いた遠隔操作型ロボットシステム

本章で行う研究では人に酷似した外見を持つロボットである Geminoid HI-1 を使用して遠隔コミュニケーションを実現するためのシステムである遠隔操作型アンドロイド・ロボットシステムを開発する。Geminoid HI-1 は現存する人間 (実際には共同研究者である大阪大学 石黒浩教授) をモデルとして開発された。本研究では遠隔コミュニケーションシステムによる存在感の伝達と、これによるコミュニケーションに注目している。このため、本ロボットシステムは遠隔操作システムとして開発された。図 6.1 にシステムの概要図を示す。

以下に Geminoid HI-1 と遠隔操作システムの詳細について詳述する。

6.1.1 Geminoid HI-1

Geminoid HI-1 は現存する人間に可能な限り近い外見を持ったロボットとして開発された (図 6.2)。本ロボットは立つことができないため、椅子に座った状態で全長約 140cm である。また、本ロボットは全身に 50 自由度の動作機構があるが、このうち 13 自由度に関しては顔面の表情に関するものであり、これにより自然な表情を実現することができる。

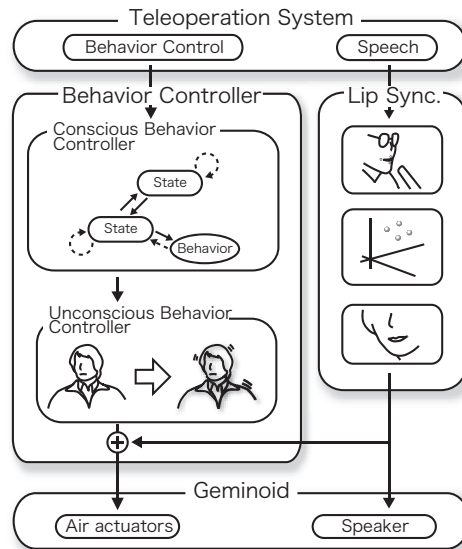


図 6.1: システム概要図

6.1.2 Behavior Controller

遠隔存在感メディアを実現するために考えられる問題は2つある。1つは「意識的な操作」の問題であり、もう1つは「無意識的な操作」の問題である。

1つめの問題である「意識的な操作」とは話す、お辞儀をする、相手を見るなど明示的に動作させるための操作である。本システムで使用する Geminoid HI-1 は全身で 50 もの自由度を持つ超多自由度ロボットである。これらを遠隔地から直接操作することは非常に困難である。このため、ロボットの操作を簡略化するために、本システムを半自動制御システムとすることにした。これによりオペレータはそれぞれの動作機構を直接操作するのではなく、行動を切り替える操作のみで大まかな操作が可能になる。

2つめの問題である「無意識的な操作」とは瞬きをする、息をする、口を動かすなどの人が明示的に行っていない動作の操作である。Geminoid HI-1 のように人に近い身体、外見を持ったロボットにおいては非常に細かな動きであっても、それを動作させなければ人はロボットに対して違和感を覚えるであろう。しかし、これらを意識的に操作することは難しい。このため、この操作を自動的に行うための機能を用意した。

この意識的な操作を行う部分を Conscious Behavior Controller として、無意識的な操作を行う部分を Unconscious Behavior Controller として分けて実装する。以下に詳細を示す。

Conscious Behavior Controller

本システムは内部に「状態 (State)」を持ち、この状態にある限りは自動的に動作する。これはつまり、システムは定義された状態内においては定義したファイルであるモーションファイルを再生し続けることでロボットを動作させ続ける。また、本システムはこのモー



図 6.2: Geminoid HI-1(右) とそのモデル(左)

ションファイルを単体でも再生することが可能である。この場合、ファイルの再生が終了し次第、元の状態に戻る。オペレータはこの状態と個別のモーションファイルを再生することでロボットの操作を行う。

ロボット内部の5つの状態

本システムでは5つの状態を定義した。オペレータはこの状態を対話の状況に応じて切り替えることでロボットを通して対話を行う。

待機状態 (Idle State):

ロボットは正面を向いているが、少しうつむき加減な姿勢を取る。時々左右を向くことがある。

話す状態 (Speaking State):

ロボットは正面を向き、視線も適切な状態をとる。時々左右を向くことがある。この状態は待機状態を活動的にしたものである。

聞く状態 (Listening State):

話す状態よりも活動的ではなく、話を聞いているようなそぶりをする。

体を右に向ける状態 (Right-looking State):

右に居る人と目を合わせるために、体を右に向ける。これは聞く状態を編集したものである。

体を左に向ける状態 (Left-looking State):

左に居る人と目を合わせるために、体を左に向ける。これは聞く状態を編集したものである。

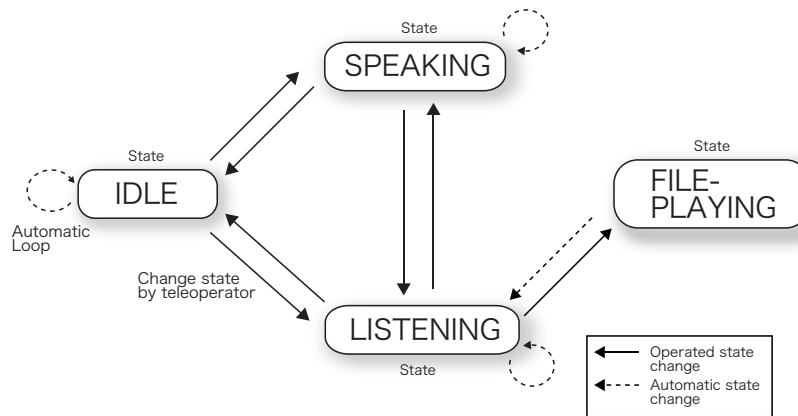


図 6.3: 状態 (State) と Behavior Control の例

状態遷移の例

ここでロボットの状態遷移の例を示す．図 6.3 は状態遷移の例として 3 つの状態と 1 つの特別な状態である FILE-PLAYING 状態を示す．FILE-PLAYING 状態はロボットが挨拶やジェスチャーなど単体のモーションファイルを再生するための状態である．Conscious Behavior Controller はオペレータから状態遷移のコマンドが来た際に，指定された状態に遷移する．特定のモーションファイルを再生するためのコマンドが来た場合には，Conscious Behavior Controller は FILE-PLAYING 状態に遷移し，指定されたファイルを再生した後，再生する前の状態に戻る．

人のような自然な動作

本ロボットの動作は，モーションファイルを作成し，実行することで実現されている．この点において，自然な動作を実現するという事は，このモーションファイルを作成する段階が非常に重要となる．また同時に，この「自然さ」という定義も重要となる．本研究で開発するロボットの動きの自然さは，このロボットの動作を見た人がモデルとなった人物らしいと感じられる動きというように定義した．

Unconscious Behavior Controller

人は無意識のうちに息をしたり，瞬きをしたり，また体を揺らしたりしている．しかし，我々はそれらを気づくことはほとんど無い．ただ，これらが無くなった際に気づくことはあるかもしれない．遠隔存在感を伝達するためにはこのような些細で繊細な動作をも伝達する必要があると考えられる．なぜなら，人らしさがそこに現れると考えられるからである．本システムではこの問題を無意識的な問題として扱い，元々定義されたモーションファイルにこのような些細で繊細な動きを上書きする．これにより，より人らしい動きをロボット上で再現する．さらに，1 つの動作の大きさなどを変化させることで自然な体の揺らぎを実現するために，ロボットに送る情報を変化させて動作させる．



図 6.4: 遠隔操作システムの全体図

6.1.3 遠隔操作システム

本システムは遠隔地にいるオペレータにより操作される。オペレータは三種類の方法でロボットの操作を行う。1つめは、前節で述べた「状態」の切り替えである。2つめは、予め用意された特別な動作を、モーションファイルの再生を行うことで操作する。3つめは、直接の発話である。オペレータが手元のマイクロフォンに向かって行った発話は直接アンドロイドから再生される。さらに、オペレータはロボットを通して対話を行うため、これらの口の動きを同期させる必要がある。そのため、モーションキャプチャシステムを用いてオペレータの口の動きを計測し、ロボット上でこれを再現することを試みた。図 6.4 に遠隔操作システムの全景を示す。

Behavior Control

本研究ではロボットの遠隔操作用に新たに通信プロトコルを開発し、これにより状態の変更やモーションファイルの再生を行う。この状態の切り替えと、独立したモーションファイルの再生の2つの操作を組み合わせることにより、複雑な動作をロボット上で実現する。

Speech and Lip Synchronization

遠隔操作システムはオペレータからの命令だけで実行される訳ではない。モーションファイルは定義された動作であるため、これらを実行時に変更するためには、その仕組みが必要となる。本システムにおいてはオペレータとロボットの口の動きを同期させることは重要であり、これによりロボットを通した自然な発話を実現できると考える。このため、モーションキャプチャシステムを用いてオペレータの口の周囲につけられた4つのマーカーの動きを計測し、これをロボット上で再現することを試みた(図 6.5)。これにより、オペレータの発話が直接ロボットから発話しているような操作を行うことが可能となった。

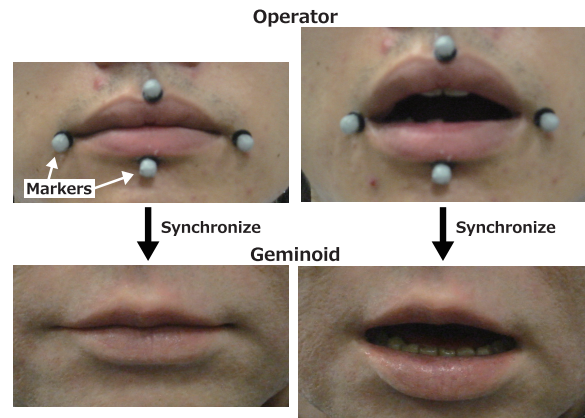


図 6.5: オペレータと Geminoid HI-1 の口の動きの同期

6.2 実験

本研究で開発した遠隔操作型アンドロイド・ロボットシステムの遠隔存在感メディアとしての有効性を確認する実験を行う。

6.2.1 手法

被験者

34名の大学生が被験者として参加した。本実験ではすべての実験を二人一組で行う。また、本実験の評価は被験者内比較で行うため、すべての被験者の組が次項に示す3つの条件のすべてを経験する。このため、実験条件の順序が偏ることのないようカウンターバランスを取った。また、被験者はランダムに振り分けられた。

実験に使用するシステムのオペレータ

本実験ではロボットのモデルとなった人間ではない人物2人が交互にオペレータとなる。彼らは議論の最初に被験者に対してテーマを与える。その後、被験者からの質問には適宜答える。また、被験者同士の会話に対して「相づち」を打つこともするが、この際、声を出して「相づち」を打つことはしないこととした。また、実験の統制を取るため、オペレータの発話はこれ以外には行わないこととした。なお、被験者をオペレータとしなかったのは、3条件すべてを同じように行うためである。

実験条件

本システムの遠隔存在感メディアとしての有効性を確認するために3つの条件を用意した。本実験ではこれまでの既存メディアよりも本研究で開発したシステムがどの程度存在感の伝達や自然な遠隔コミュニケーションを実現することができるかに注目している。こ



図 6.6: Geminoid HI-1 とビデオ会議システムを使用したオペレータとのアイコンタクトの例

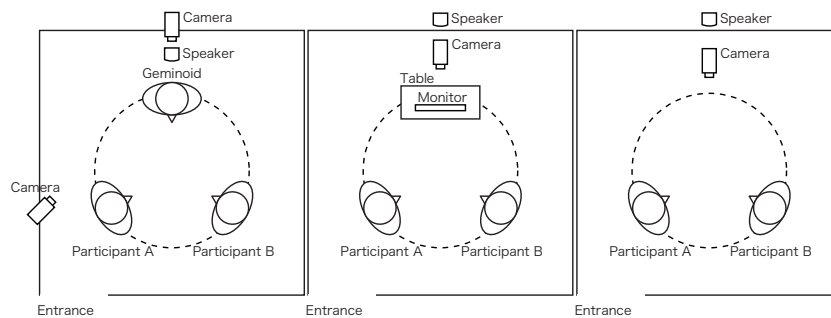


図 6.7: 実験室内の配置図 (左:G 条件, 中央:V 条件, 右:S 条件)

のため, 本研究で開発したシステムを用いる条件と, 比較条件として現在一般的に使用されている既存のメディアである電話とテレビ電話に模した条件を用意した.

G 条件 この条件ではオペレータは Geminoid HI-1 を通して二人の被験者と対話を行う. 対話ではうなずきや, 2 人の対話者を見るといった動作を主にとった (図 6.6 右).

V 条件 この条件ではオペレータはビデオ会議システムを通して 2 人の被験者と対話を行う. 対話では G 条件と同様にうなずきや, 2 人の対話者を見るといった動作を主にとる. また, オペレータは対話においては笑うや頭を動かすなどの動作は全く行わない. さらに, オペレータはビデオ会議システムを使用して対話者がオペレータと目が合ったと感じるように, 左右の視線の位置を事前に調整する (図 6.6 左).

S 条件 この条件では電話のようにスピーカーを通して声のみで 2 人の被験者と対話を行う.

実験環境

実験を行う部屋はすべて 3×3 [m] の大きさに調整した. 図 6.7 に実験を行う部屋の状態を示す. すべての条件において被験者用の椅子があらかじめ 2 つ用意されている.

実験手順

実験の手順を以下に示す。

1. 実験者が2人の被験者に対して実験の説明を行う。具体的には、「実験では議論を行い、そのテーマはもう1人の対話者から与えられること。また、対話者は遠隔地におり、目の前の対象を通して対話すること」が教示される。
2. 被験者は実験室に案内される。この際、既に実験条件ごとの準備は終了している。
3. 被験者が席についたあと、実験者ではないオペレータが被験者に対して議論のテーマを与える。この後、議論を開始する。
4. 1分経過後、また、被験者が各々の意見を言い終わったあとにオペレータが追加のテーマを与える。
5. 2分経過後、手順4のように追加のテーマが与えられる。
6. 3分経過後、また、被験者が与えられたテーマに関する意見を言い終えたあと、オペレータが「それではこれで実験は終了です。」と言い、実験者が被験者を実験室から連れ出す。
7. 被験者は質問票に答える。

以後2回の実験は2から7の手順を繰り返す。

6.2.2 評価方法

各実験終了後、被験者は質問票に答える。質問票では会話に参加した対象(メディアを通して会話に参加したオペレータ)に対する印象を7段階で評価する。この際1がもっとも低い評価となり、7がもっとも高い評価となっている。質問票の項目は以下のようにになっている。

存在感 (Presence)

メディアを通して会話した人が会話に参加していたかどうかについての度合い

人らしさ (Humanlike)

メディアを通して会話した人の外見、動きや仕草の人らしさの度合い

自然さ (Naturalness)

メディアを通して会話した人の外見、動きや仕草の自然さの度合い

不気味さ (Uncanny)

メディアを通して会話した人の外見、動きや仕草の不気味さの度合い

応答性 (Responsiveness)

メディアを通して会話した人の被験者の動きや仕草に対する反応の度合い

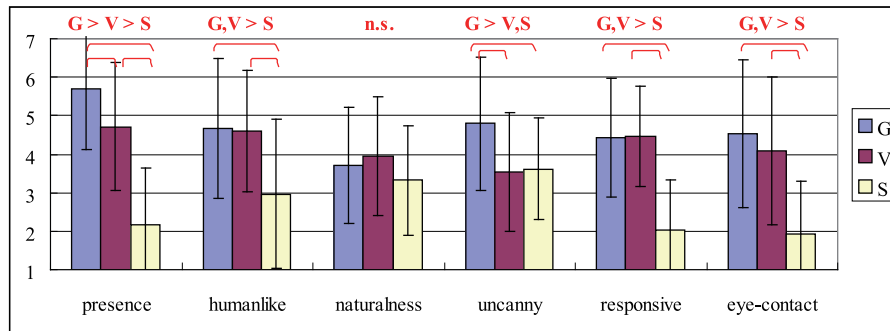


図 6.8: 各メディアに対する被験者の印象: Geminoid HI-1(G 条件), ビデオ会議システム (V 条件), スピーカ (S 条件)



図 6.9: 実験の様子: Geminoid 条件 (左), Video 条件 (右)

アイコンタクト (Eye contact)

メディアを通して会話した人が被験者と目を合わせていたかどうかについての度合い

6.2.3 仮説と予測

本実験での仮説を以下に示す。

仮説 1: G 条件は他の条件と比較して, 対話者として最も存在感のある対象であると評価される。

仮説 2: G 条件は他の条件と比較して, 対話者としてより人間らしく, 自然であると評価される。

その他: 本実験は「不気味さ」「応答性」「アイコンタクト」についても評価を行う。

また, これまではビデオ会議システムにおいてアイコンタクトの成立が難しいとされてきた。私は身体をもったアンドロイドにおいてはこの問題が解決されるのではないかと考えているため, これの検証も行う。

6.2.4 実験結果

図 6.8 に質問票の質問項目ごとの条件ごとの平均，標準偏差を含むグラフを示す．多重比較の結果について有意誤差 5% で有意差が確認された項目同士について項目ごとに棒グラフ上の括弧で示す．以下に各仮説に対する結果を示す．また，図 6.9 に実験の様子を示す．

仮説 1: 存在感

質問票の分散分析の結果から存在感 (Presence) の項目において有意な差が確認された ($F(1, 33) = 50.762, p < .001$)．また Bonferroni 法による多重比較の結果，G 条件は V 条件，S 条件よりも強く，V 条件は S 条件よりも有意に強い存在感があることが示された ($G > V, p < .001; G > S, p < .001; V > S, p < .05$)．この結果からオペレータが他の条件よりも本システムを通して強い存在感を伝達することができたと考えられる．

仮説 2: 人間らしさと自然さ

質問票の分散分析の結果から人らしさ (Humanlike) の項目において有意な差が確認された ($F(1, 33) = 10.353, p < .001$)．Bonferroni 法による多重比較の結果，G 条件は S 条件よりも，V 条件は S 条件よりも有意に人らしいと評価された ($G > S, p < .001; V > S, p = .001$)．また，自然さ (Naturalness) に関しては条件間で有意な差が確認されなかった ($F(1, 33) = 1.777, p = .177$)．この結果から本システムはビデオに映る人の姿と同程度に自然な印象を被験者に与えることができたと考えられる．

その他の項目の分析

質問票分析では上記 3 項目以外の質問項目についても分散分析を行った．具体的には不気味さ (Uncanny)，応答性 (Responsiveness)，アイコンタクト (Eye contact) についてである．この結果からこの 3 項目について条件間で有意な差が確認された ($F(1, 33) = 10.1, p < .001; F(1, 33) = 35.947, p < .001; F(1, 33) = 20.143, p < .001$)．また，不気味さに関して Bonferroni 法による多重比較を行った．この結果から G 条件は他の 2 条件よりも有意に不気味であるという評価を得た ($G > V, p = .001, G > S, p < .001$)．

また，応答性については G 条件と V 条件は S 条件よりも有意に高い評価が得られた ($G > S, p < .001; V > S, p < .001$)．同様の傾向はアイコンタクトの項目についても現れた ($G > S, p < .001; V > S, p < .001$)．アイコンタクトにおいて G 条件と V 条件に有意な差が確認されなかったが，これはオペレータに対してカメラとモニターを通して被験者と目の合う位置の調整を細かく行ったため，被験者がオペレータと目が合ったと感じやすかったことが考えられる．

6.3 考察

本実験で得られた結果について「遠隔存在感」「不気味さ」「アイコンタクト」「アンドロイド・サイエンス」「得られた結果の一般性」に分けて考察する．

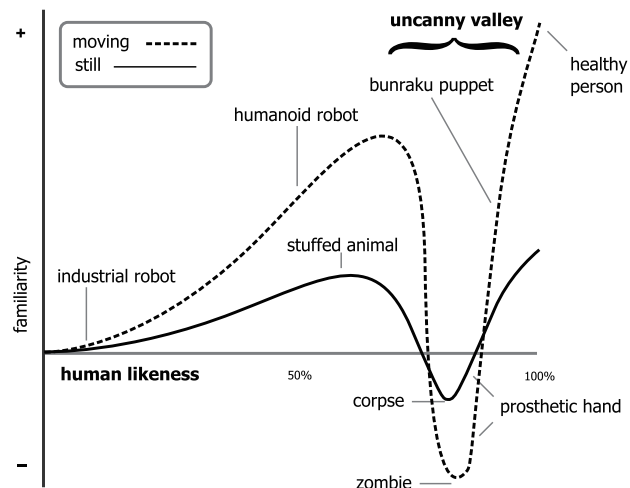


図 6.10: 森による不気味の谷 (K. F. MacDorman and T. Minato, Trans.)

6.3.1 遠隔存在感

実験の結果から他のメディアよりも Geminoid HI-1 を使用した場合のほうがより存在感のある対話が可能であるということが示唆された。これはつまり、他のメディアよりもロボット、特に Geminoid HI-1 のような人らしい外見を持ったメディアのほうが強い存在感を示すことができる可能性があるということである。これにより、本研究で開発した遠隔操作型アンドロイド・ロボットシステムは遠隔存在感メディアとして有効であることが示されたと考えている。

遠隔存在感については館らによって紹介されたテレグジスタンス (Telexistence, 遠隔臨場感, 遠隔存在感) に関する研究もある [66]。彼らの取り組みでは、ロボットなどの遠隔操作を行う者に対して、遠隔地に存在する物体の高い臨場感を与えることに注目していた。本研究では対話ロボットによる遠隔存在感の伝達に注目しており、このため、遠隔操作者の存在感をロボット上で再現することに注目していた。これまでのテレグジスタンスに関する研究は遠隔操作者が遠隔地の状況を把握することに注目していたため、本研究が目指すものとは逆方向の存在感の伝達および再現であると考えている。また、この点においても私が提案する遠隔存在感はテレプレゼンス (Telepresence) であり、人の存在感に注目しているという点で大きくことなると考えている。近年ではテレグジスタンスの分野においてもロボットを用いた相互テレグジスタンスに関する取り組みも行われてきているが [67][81], 遠隔対話の評価については注目されていない。特に、本研究では遠隔コミュニケーションにおける遠隔存在感の利用について注目している点で彼らの取り組みとは大きく異なると考えている。

6.3.2 不気味さ

本章で行った実験の結果，本システムで使用した Geminoid HI-1 と対話した被験者はビデオモニター上の人間と同様に人らしく，他のメディアと同等に自然であったと評価したにもかかわらず，同時に最も不気味であるとも評価した．理由としては，実験後の自由記述のアンケートから「人らしいのにロボットであるから不気味だと感じた．」「アンドロイドの見た目が人間なのか，ロボットなのかかわからずとても不気味だった．」など，外見に寄るところが大きい可能性がある．また「人間らしいのにロボットなのが不気味」といった記述から，外見と中身の隔たりから不気味さを感じた例もあった．さらに，アンケートではアンドロイドの動作の不気味さを指摘する記述もあったが，これも外見から想像される動作と実際の動作の隔たりから不気味さを感じた可能性がある．

このロボットの不気味さについては古くから「不気味の谷 (Uncanny Valley)」理論として知られている [42]．図 6.10 にその理論によるグラフを示す．この理論によれば，ロボットの外見が人間らしくなっていく中で親近感が増加するが，ある点から親近感が非常に低くなる．その後，さらに外見が人らしくなる過程で親近感が急激に増すような谷の形をした曲線を描く．また，この曲線はロボットの動作により増強される．これはつまり，外見に動作が加わることで人間らしさが高まるが，不気味の谷も深くなることを意味する．

本実験におけるビデオモニター上に現れたオペレータはアンドロイドのモデルとなった人物ではなかった．このため，不気味さが外見，特に見た目の違いによるものであるかどうかについて結論付けることはできない．しかし，被験者アンケートの結果からはそもそも「人に近いアンドロイド」という存在が不気味であると感じた可能性が高いことが示唆される．また，本実験ではインタラクションにおけるオペレータの動作を可能な限りアンドロイドに近づける統制をとった．この点において動作やインタラクションの差が不気味さの評価に与える影響を最小限に抑えることができたと考えている．しかし，動作を統制したことにより，人間らしさの評価が全条件において高い値とならなかった可能性がある．

いずれにせよ，本実験の結果だけでは被験者がなぜ不気味であると感じたか，何が原因でそう感じたのかについては明らかにすることはできない．現在ではまだ本アンドロイドは他のメディアよりも不気味であると評価されたが，今後，人らしさを高めながら，不気味さを軽減させることで「不気味の谷」を超えることが可能かもしれない．さらに，この「不気味の谷」の本質を把握することが可能かもしれないと考える．

また，ロボットを含めた 3 者対話において対話者がロボットに対して不気味さを感じながら対話を行うことで，ロボットが対話者間の印象に影響を与える可能性も考えられる．坂本らはロボットを含めた 3 者対話においてロボットが対話者である人間同士の印象形成に影響を与えることが可能であることを示した [6]．このため，ロボットが対話者である人間に与える心理的影響については慎重に検証を行う必要がある．この点においても，本システムで用いたロボットである Geminoid HI-1 が不気味であると評価されたことは，今後の研究にとって非常に重要であると考えている．

6.3.3 アイコンタクト

本章で行った実験のオペレータはビデオ会議システムを通じた対話において，被験者と目の合う位置を細かく調整を行ったため，V 条件での被験者のアイコンタクトの評価は仮

説よりも高い値を示した。また、アンドロイドとの対話においても同様に高い値を示した。これまでのビデオ会議システムに関する研究から、ビデオ対話においてアイコンタクトを成立させるための手法は様々提案されてきている。この点においてビデオ対話におけるアイコンタクトは何かしらの手段を用いなければならず、本実験でのビデオ会議システムを用いた条件ではオペレータの調整を行うことでこれを実現した。しかし、本実験では被験者と対話するメディアとのアイコンタクトだけに注目したため、オペレータ側からのアイコンタクトが難しいセッティングとなっていた。この点において本実験で得られた結果は被験者から見たメディアとのアイコンタクトについてのものであり、オペレータ側からのアイコンタクトについては評価していなかった。

これについては、今後、双方向対話システムとして開発を進めるなかで、アイコンタクトを含めたオペレータにとっての対話しやすい遠隔操作システムの構築が期待される。

6.3.4 アンドロイド・サイエンス

近年になってアンドロイド・サイエンス (Android Science) が注目されるようになってきた [19]。アンドロイド・サイエンスでは人のような外見を持ち、人のように振る舞うことのできるロボットを開発することで、人とは何かを解き明かそうとする試みである。本稿で開発したシステムはこのような取り組みに対して非常に有効なプラットフォームであると考えられる。また、この試みには人のインタラクションとは何かを解明することも含まれる。このため、今後このような人とロボットのインタラクション研究からロボットのメディアとしての新しい知見が多く発見されることが期待される。

6.3.5 得られた結果の一般性

本章で行った実験は Geminoid HI-1 という、現在では特殊なロボットを使用した。現時点では、このようなロボットは高価であり、まだアンドロイド・ロボットを存在感の伝達に用いることは、多くの人にとって費用対効果の点で現実的ではないだろう。しかし、本研究でアンドロイド・ロボットが新しいメディアとなる可能性を明らかにすることは、将来的にこのようなメディアを利用することが高価ではあっても有用なのか、それともあまり有用ではないのかを判断する指針となる。さらに、このように外見を人間に類似させることにより存在感の伝達が可能になるのか、という1つの遠隔存在感の伝達の限界を明らかにすることが可能になると考えられる。現時点でアンドロイド・ロボットに実装された機能はかならずしも多くなく、ゆえに本稿では第3者として会話に参加するという限られた対話場面のみをあつかった。今後は、アンドロイド・ロボットの機能拡張を行いながら、より自然な設定の中で、アンドロイド・ロボットによる存在感の伝達について研究を進めたいと考えている。

6.4 本章のまとめ

本章では人とロボットの対話構造を解明するために、適切な身体動作だけでなく、発話にともなう適切な社会的態度を統合したロボットシステムを開発した。具体的にはアン

ドroid・ロボット Geminoid HI-1 を用いた遠隔コミュニケーションシステムを開発した。本システムはロボット内部に状態を持ち、この状態においては自律的に動作する。遠隔操作者はこの状態を切り替えることにより、ロボットの動作の切り替えを行い、遠隔コミュニケーションを試みる。

このシステムを用いた実験の結果から、オペレータが Geminoid HI-1 を通して被験者と対話した際に、被験者は他の条件よりも強い存在感を感じたことが示された。同様に人らしさや自然さについてもビデオ会議システムと同程度の評価が得られた。この結果から本章で開発した遠隔操作型アンドロイドシステムは人らしい存在感を伝達することのできる遠隔存在感メディアとなり得ることが示唆された。

第7章 総合的な議論

本章では本論文でこれまでに述べた研究について全体を通した議論を行う。ここでは「身体性インタラクティブシステムとしてのロボットの可能性」「遠隔操作型ロボットシステムを用いた対話実験の有効性」「人型ロボットの実在感とインタラクション」「本研究の今後の方向性」「システム情報科学における本研究の意義」の5点について議論を行う。

7.1 身体性インタラクティブシステムとしての人型ロボットの可能性

本研究では人型ロボットを物理的身体を有するインタラクティブシステムとしてとらえ、このインタラクションデザインの設計と評価を行うことで、人型ロボットの対話メディアとしての有効性について検証を試みた。

この中でも人型ロボットが本質的に有している身体性、人との対話において重要となる社会性の2点についてまず注目し、インタラクションデザインの評価を行った。さらには、現存する人型ロボットの中でももっとも人間に近い外見を有する人型ロボットとの対話実験を通じてロボットの対話メディアとして有効性を検証した。

本研究では一貫して人と人型ロボットにおけるインタラクションデザインの設計と評価を行ってきた。ここではこれらの研究の意義について議論を行う。

7.1.1 人型ロボットにおけるインタラクションデザイン

本論文においてはインタラクションを相互の行動・行為とし、このため、人型ロボットにおけるインタラクションデザインは、その行動や行為、態度の設計を行う取り組みであると考え、この設計と評価に関する研究を行った。具体的には、まず、人型ロボットの身体性と社会性に注目したインタラクションデザインに関する研究を行った。この結果から人型ロボットの身体や態度を有効に活用することによって特定の他者だけではなく、人間関係にすら影響を与えることが確認された。ここでの人型ロボットの動作は身体性に注目した研究においては人に対して同期的であり、身体位置の調整も行うものであった。社会性に注目した研究においては、人型ロボットはその社会的態度を明確に表現するために、その腕や視線を有効に活用した動作を行った。さらには、身体位置を変化させることにより、その態度をより明確にすることをした。また、人型ロボットの対話メディアとしての影響力の強さがその身体的存在感に起因するものであると仮定し、次に人型ロボットと他のメディアとの存在感の比較実験を行った。ここでのインタラクションは対話メディアを通じた自由対話であり、これまでの研究以上に日常的な場面を扱ったものであった。

この研究における人型ロボットは自然な振る舞いを行うことに大きく注目していたため、あまり大きな身体動作を行ってはいなかったが、その意志を明確に表出するために視線を有効に活用するなどを行っていた。

これらの研究を通して人型ロボットの行為・動作の設計と対話実験を通じた評価から、本研究がインタラクションデザインに注目した研究であり、この研究の重要性を示すことができたと考えている。

また、これら3つの研究におけるインタラクションデザインは対話メディアとしての人型ロボットの最低限の要素を取り出したものであった。具体的には、本研究では身体性の本質である身体から生み出される行動であり、社会性の本質である文脈に応じた身体を用いた態度表出に注目し、これらの要素に関して人-ロボット間相互作用研究として対話実験を行った。しかし、本論文にて行ってきた研究では数値的な評価を行うことに注目しており、このため、インタラクションにおける繊細な部分については扱うことができなかった。すなわち、人と人型ロボットの対話における個人的な情動の変化や、これに伴う関係の形成の詳細については検証していなかった。この点において、心的であったり観念的であるような対話における現象に関しては考慮することができなかったと考えている。しかし、これらの要素は一般社会、特に個人間コミュニケーションにおいては重要な要素であり、これらを考慮したインタラクションデザインに関する研究は今後重要性を増すことが考えられる。このため、この研究成果のみで人型ロボットのインタラクションデザインのすべてを規定することはできない。

さらに、長期間のインタラクションにおける人と人型ロボットの関係性のデザインについては本研究で行うことができなかった。しかし、第5章で行った研究では人型ロボットの社会的態度が人間関係に影響を与えることが示されたが、これは人型ロボットとの3者対話で完結する訳ではない。つまり、ここで形成された人間関係はグラフ理論的に拡張されることが知られている [2]。また、人型ロボットが人を媒介として他の人への知識の伝達を行うことができるメディアであることも近年の研究からわかってきた [82]。

以上から、人型ロボットは人に近い影響力を持った強力な対話メディアであることがわかる。人型ロボットは社会的な要求から今世紀中には多くの場面で人と関わり合うことが求められる。このため、この人型ロボットにおけるインタラクションデザインに関する研究は今後も継続的に行うことが期待される。現在では人型ロボットのインタラクションデザインの研究はそれほど大きなコミュニティに成長していないため、今後も本研究領域の拡大が期待される。

7.1.2 対話メディアとしての人型ロボットの有効性

本論文で述べた3つの研究からは、人型ロボットの対話メディアとしての有効性が示されたと考えている。

身体性コミュニケーションに関する研究では、人型ロボットの身体を活用することにより人型ロボットが人から情報を引き出すことが可能であることが示された。これはつまり、人型ロボットの話の聞き手としてのメディアとして有効であることが示されたということである。

次に社会性に注目した研究では、人型ロボットの社会的態度を変化させることにより、

人との関係性だけでなく、人同士の関係についても影響を与えることができた。この結果から、人型ロボットは対話メディアとして非常に強力な影響力を持っていることが確認された。

最後に人型ロボットを遠隔コミュニケーションメディアとしてとらえた研究では、人型ロボットが対話メディアとして有効であることが示された。これはつまり、人型ロボットの身体を有効に活用し、かつ人がそれを制御することで、これまでの対話メディア以上に自然な対話を実現されたということである。

最後の研究では対話メディアとしてアンドロイドを用いたが、対話メディアとしての外見の影響については問題としていなかった。Goetzらは外見の親しみやすさと会話タスクの日常性の関係を、実ロボットの顔を用いて比較し、遊びタスクには親しみやすい外見が望ましい(会話タスクの継続時間が長い)ことを示した[11]。この結果から今回使用したロボットが被験者にとって親しみやすくないと感じられていた場合、実験の結果が変わっていたとも考えられる。また、神田らはHondaのASIMO[58]とATRのRobovie[24]を用いて外見の違いが人の対話行動にどのような影響があるかについて検証する実験を行った。この実験ではロボットとの対比のために人も実験対象として用意した。この実験の結果から対話対象の外見の違いは人の対話行動に大きく影響しないことが確認された[70]。また、この結果から人がロボットを会話対象としてみなせるかどうか、人の行動に結びつく可能性が示唆された。このため、本研究では外見の影響については大きな問題として扱わなかったが、今後こういった問題も扱う必要があると考えられる。

外見などを含めて明らかになっていない要素も存在するが、人型ロボットは対話メディアとして有効であるということは本研究により明らかになったと考えている。

7.1.3 身体的存在感の影響

第6章において行った研究ではアンドロイドロボットを用いて、ロボットメディアがある人の存在感を伝達することができる強力なメディアであることが確認されたが、「存在感」の定義の妥当性についても批判があるのは確かである。第6章で行った実験では、質問紙による主観評価により実験の分析を行った。しかし、ここで用いた質問紙の内容が妥当であったかどうかについての疑問は残る。また、存在感の測定方法についてさらに議論を進める必要も考えられる。

ここでの存在感は第2.5.3節で論じた「身体的存在感」に近いものであった。本論文で述べた実験ではほぼすべての被験者がロボットとは初対面であり、この点においてロボットとの関係性は希薄なものであったことが考えられる。このため、認知的存在感が形成される前の段階での対話であったことが考えられる。さらに、この認知的存在感は対話対象と直接対面していない状況において有効である可能性が高く、このため、本研究ではこれを扱わなかった。

「存在感」に注目した研究を進めるためにはこれらの分類や特徴について詳しく分析する必要がある。また、そのための実験も必要となることが考えられる。特に、人型ロボットやアンドロイドロボットを対話メディアとしたときの「存在感」の評価方法として、メディアの影響力による測定を行うことも考えられる。つまり、メディアを介した説得や合意形成といったタスクにおける意見の変化の度合いをメディアのもつ存在感の差とするこ

とも可能であると考えられる．今後このような研究を進めることが望まれる．

「まさに，そこにいる」と感じられる存在感にはこれらの観念的なものと実在的なものの両方がそろって初めて結果として得られるのであろう．しかし，これらの観測を行うことは現在の技術では難しい．特に，被験者など観測対象となる人に負担なく高度な計測を行うことのできる機器の登場が待たれる．

また，第5章で行った研究では，人型ロボットの存在感には注目していなかったが，これが強く影響したことが考えられる．つまり，先行研究においてスクリーンエージェントによる3者対話でのバランス理論が成立しなかったこと [47] を示したが，人型ロボットを用いた本研究ではこれが成立した．実験のビデオの解析では人型ロボットの前に居る被験者の発話が，人型ロボットを意識したものであり，その発話が制限された様子が観察された．これは人型ロボットの身体的存在感を意識したものであり，これが被験者の社会性を誘引したものと考えられる．

以上から，人型ロボットの持つ身体的存在感は人との対話において強く影響することが考えられる．また，本研究においてはこれらが強く影響したため，人型ロボットという対話メディアの有効性が示されたと考えている．

7.2 遠隔操作型ロボットシステムを用いた対話実験の有効性

従来行われてきた人-ロボット間相互作用研究においては多くの場合，自律対話ロボットの開発と，これを用いた対話実験という手法で研究が進められてきた．しかし，現在の自律対話ロボットの対話能力や環境認識能力の不完全さから，人と自然な対話を行うことが難しく，このため非常に制限されたタスクの実験しか行うことができなかった．このため，本研究では人型ロボットを遠隔操作することにより，対話能力を人が補うことで自律対話ロボットでは難しかった対話実験を行った．

本論文で行ってきた3つの研究においては，すべてロボットを遠隔操作することにより実験を行ってきた．過去の行われてきた研究においてはこれを Wizard Of Oz 法とよび，自律対話ロボットと分けて考えられてきたが，本論文ではこの遠隔操作を肯定することで対話者にとっての人型ロボットの対話能力を高めた．また，これにより人とのインタラクションの価値を向上されることができ，このため人との自然な対話を実現することができたと考えている．

以下に，各章で行ってきた研究における半自律遠隔操作型ロボットシステムの役割と有効性について簡単にまとめる．

第4章では人型ロボットが人から道を案内されるタスクで実験を行った．このタスクにおいて人型ロボットは人の発話を認識する必要があった．さらには，人の身体動作を認識し，適切な身体動作を選択する必要があった．これらを行うことは現在の自律対話システムでは難しく，人が操作する以上にシステムの選択結果の不確実度が高いことが考えられる．このため，実験では人型ロボットの対話機能を人が遠隔から操作することによって人との対話を実現した．この結果，人に対して適切な振る舞いを行うことができたと考えている．

第5章では人型ロボットが3者対話において好き嫌いの態度を明確にすることにより，人に対してどのような影響があるかについて確認する実験を行った．本実験においては人

型ロボットは人に対して自律的に態度を決定する。しかし、発話のタイミングなどは遠隔操作により制御された。ここで行った実験では自由な対話に近い形式での対話を行ったため、音声認識システムによる自律対話では対話を円滑に行えないためである。さらには、対話における発話の間についても社会的態度の範囲として考えられるため、これをシステムで適切に実現することは難しかったため、遠隔操作を行った。この結果、人型ロボットが人に対して適切に振る舞うことができたと考えている。

第6章では人型ロボット、特にアンドロイドロボットの対話メディアとしての有効性を確認するために、アンドロイドロボットの身体的存在感に注目した実験を行った。この実験ではアンドロイドロボットを遠隔コミュニケーションのメディアとして利用した場合の他のメディアとの存在感の違いを検証することで、対話メディアとしての有効性を検証することを試みた。この実験でアンドロイドロボットは人のような自由対話を実現する必要があり、このため、本ロボットの対話機能はすべて人が担当し、人が話をするシステムとした。ここで行った実験では人の介在なくしては成立しない実験であり、また、これにより自然な対話を実現できたという点において遠隔操作型ロボットシステムを用いなければ行うことができなかつたものであると考えている。

7.3 人型ロボットの実在感とインタラクション

ここまでに本論文で行ってきた研究に関して大まかな議論を行ってきた。ここでは人型ロボットを用いた意味と、本研究の適用可能性について述べる。

7.3.1 人型ロボットである意味

本論文で行ってきた3つの研究では常に人型ロボットを使用してきた。本論文におけるロボットの定義は第1章の最初で述べたようにロボットとはその外見によらず、入力機構と出力機構を持つ自動機械であるとした。この中でも、人に近い身体を持ったロボットは人と同じような対話が可能であるという印象を人に与える。人が人に対して話しかけるように、人が人型ロボットに対して話しかけることは、人型ではないロボットに対して話しかけることよりも容易であるだろう。人型ロボットとインタラクションを行う前までは、人にとって人型ロボットは人と同等の対話能力を有する存在であるからである。

人と密に関係するロボットの外見は人型、ないしは人酷似型であるアンドロイドであることが求められると考えられる。現在ではまだ動作や外見から人型ロボットはロボットであるととらえられるであろうが、技術が発展するに従って全く人と区別が付かない人型ロボットが登場することが考えられる。この時点に至った際には、人と日常的に関わり合いを持ち共同作業を行うロボットや、人の介護を行うロボットの外見は人型であることが自然であろう。介護をしてもらう側の人間としては機械に介護をしてもらうよりは、やはり人(ないしは、人に近い外見を持ったロボット)に介護をしてもらうことのほうが心理的な安心感につながると考えられるためである。

しかし、街のゴミを拾うようなロボットや危険区域の調査を行うロボットが人型である必要はないであろう。これはつまり、ロボットはその役割に応じた外見が必要となるということである。

本論文で行った研究では人型ロボットが人と日常的に関わり合いを持つ、ロボット共存社会へ向けた人型ロボットの動作・行為の設計と評価を行うことを目的としていた。つまり、対話ロボットに関する研究を行ってきた。この点においては本論文で行った研究におけるロボットは人型である必要があり、またこれによりロボットの応用可能性について示すことができたと考えている。これらの理由から本論文で行った研究では人型ロボットである必要があったと考えている。

7.3.2 対話可能な他者としての人型ロボット

ロボットは機械であり、モノである。しかし、我々は動くモノを見て、その意図を読み解こうとする。また、これらを見て人のようにコミュニケーションすることができるのではないかと考える。猫のようなロボットを見れば、猫であると判断できるし、完全に猫と同じ質感ではなく、猫に近いものであれば気持ち悪いと感じることもある。

身体性インタラクティブシステムとしてのロボットは身体を持ったコンピュータであると捉えられることについては先に述べた。この身体を持ったコンピュータと人はそれなりに対話を行うことができる。人に対して応答的に振る舞うこともできるし、人に対して物理的な支援を行うことも可能であろう。ただ、我々はこのような行為や期待を当たり前のようにするが、我々はどのようにコンピュータを対話を行うことができると判断しているのだろうか。つまり、人はどのようにしてモノであるロボットを対話することができる他者であると認めているのだろうか。

映画・2001年宇宙の旅に登場する宇宙船の主である HAL9000 は完全な人工知能を持った存在として描かれた。「彼」は宇宙船のすべてを司るだけではなく、乗組員とチェスをするなど、人以上の能力を持った存在である。「彼」はこれまで人工知能研究の目標であると考えられてきた。確かに HAL9000 は完全な人工知能であり、目標であるかもしれないが、疑問点も存在する。HAL9000 と乗組員は常に自然なコミュニケーションを行っているように描かれていたが、果たしてそれは本当に自然なコミュニケーションであったのだろうかという疑問である。

HAL9000 の体は宇宙船そのものである。宇宙船には人らしい対象物はなく、映画中で描かれているのは赤いランプのみである。HAL9000 の発する声は宇宙船のどこからでも聞こえるようなシステムとなっていたが、スピーカのようなデバイスに関してはなにも描かれていない。乗組員はどこからか聞こえる HAL9000 の声に対してランプに話しかけることで対話を行っているが、ランプが無い部屋においても宇宙船自体に向かって話しかけることによって対話を実現していた。

対話が可能であるということは、その対象を他者として認めていることであると言える。これは人の行為と、それに対して対象が返す結果の因果関係が成立した場合に認められるのでありとされる。これはすなわち、人と対象のインタラクション(相互行為、相互作用)が成立した場合ということができる。また、人同士であればはじめから顔を合わせた他者を対話が可能であると認知するであろう。これは経験ではなく生得的な現象であると考えられる。

本論文で行ってきた研究では人型ロボットを使用した。人型ロボットの前に立つ人はその外見から人のような対話が可能であると想像する。この点において、この人型ロボット

は対話の当初から対話可能な他者として認知されていることを示している。しかし、インタラクションの行為と結果の因果関係が人と異なる場合、また、質が低い場合においては、人は人型ロボットを対話が可能ではないと判断することもあるであろう。人に対して人型ロボットが対話可能な他者であると認知されるためには現在の自律行動技術では非常に難しい。このため本論文で行ってきた研究ではすべて人型ロボットを遠隔操作することで対話の成立を試みた。対話可能な他者であると認められるということは、その対話が不自然であってはいけないということも言える。この点において、本論文で行った研究では多くの場合、人(被験者)は人型ロボットを対話可能な他者として捉えていたと言うことができる。

7.3.3 本研究の限界と適用範囲

本研究では対話メディアとしての人型ロボットの有効性を検証する実験を行った。これにはこれまでに多くの場面で用いられてきた対話メディアであるテレビ会議や電話などとの比較実験を行った。しかし、オンスクリーンエージェントのようにコンピュータの画面上ではあっても身体を持ち、人と対話するメディアも存在する。今後バーチャルリアリティなどの技術が発展するなかで、人の目前に現実と同等の臨場感や質感を持ったエージェントを表示させることも可能となるかもしれない。

技術が発展し、バーチャルな対象であったとしても人の眼で知覚される情報が現実と全く同等の質感を持った場合、人は何を感じるであろうか。人の感覚は視覚だけに寄らないが、もし、脳に直結されたシステムが人のすべての感覚を与えうるモノであった場合、人はそれを現実として捉えるであろう。これは視覚に依存したバーチャルな対象であっても同等であると考えられる。

本論文で行ってきた研究においては、人にとって現実であると考えられる環境での対話実験を行った。この点において、技術が発展しバーチャルリアリティ技術が現実と同等の質感を人に対して提示することが可能となった段階では本研究の成果を適用可能であると考えられる。すなわち、本研究では人がその対象を現実であると思い、対話メディアであると判断した際の振る舞いについて検証を行うことができたと考えている。人にとって目前の対象が対話可能な他者であると認識された場合、人は本研究で得られた結果のように行動することが予想される。これは同時に、たとえバーチャルリアリティの世界においても、相互作用の対象が人型ロボットであると人に認知される限りは、本研究の結果が適用可能であるということである。

もちろん、バーチャルリアリティが完成するまでにはまだ多くの時間を必要とするであろう。この過程においては、やはりバーチャルな対象は現実感の不足から人にとって対話可能な他者として認知されることが難しいことが考えられる。この現実感と実在感は実際に存在するロボットが有意に大きいため、たとえば、対話メディアとしてこれら対象に関する比較実験を行った場合にはロボットのほうが有意に強いメディアであると評価されるであろうと考えられる。対話メディアとしての影響力はその実在感に影響されることが考えられるためである。

以上から、本研究の結果は人にとって現実であると信じられる対話メディアとの対話には適用可能であると考えられるが、この現実感の薄い対話メディアには適用が難しいこと

が考えられる。つまり、現実感と実在感は対話において大きな要素となり得るため、これらの乏しい対話メディアでは本研究の結果を適用することは難しいと考えられるということである。これに関しては未知の点も存在するため、強く主張することは難しいが、このような結果となることを予測している。

7.4 本研究の今後の方向性

本論文では一貫して人型ロボットを用いたインタラクションデザインに関する研究を行ってきた。この研究から物理的身体を持ち、それを有効に活用しながら、社会的に適切な振る舞いを行うことができる人型ロボットであるからこそ実現可能な対話について提案を行うことができたと考えている。ここでの研究はロボットと呼ばれる自動機械の中でも外見が人に似た人型ロボットを使用してきたが、現実にはこれ以外にも様々なロボットが存在する。さらには、今後我々の想像を超えたロボットも登場するであろう。本節ではこれらの人とインタラクションする未来のロボットと其中での人型ロボットの役割、また、このようなロボット環境でのインタラクションデザインについて議論する。

7.4.1 空間のロボット化と観念論的ロボティクス

今後、我々の生活空間はさらに電子化され、これにより空間のロボット化が進むことが予想される。携帯電話や情報家電の普及を止めることができなかつたように、空間のロボット化も止められない流れとなっていくであろう。ロボット化された空間では我々の目に見えないところで様々なロボットが活動する。我々はこれらに気づくこともなく、またこの必要もない。人の見えないところで活動するロボットは我々と直接的な対話を行うことはない。これらのロボットは確立されたロボット間の共通言語により、人と直接対話するロボットの補助を行うこととなるであろう。

ロボット化された空間ではこのように目に見えないロボットが無数に存在するものとなることが考えられる。この中で人型ロボットの役割とは、空間を代表するエージェントないしはインタフェースとして人と対話することとなる。本研究はこのような空間における人型ロボットと人との対話における基本要素の研究を行ったと言える。

ここで示したロボット化された空間はこれまでのロボット工学の延長としてあり得る未来の可能性であるといえる。しかし、現在の延長としての未来において本当に人型ロボットが生活空間に必要かという疑問も湧く。特に、一般家庭に本当に人型ロボットが必要とされることはあるのだろうかという疑問である。公共空間において多くの人と関わり合い、情報提供を行うロボットにおいては人の代わりとなる存在として重要となるであろう。特に労働力が減少することが予想される近未来では人型ロボットに対して現在でも多くの期待がある。また、このような目的として開発されたロボットによる実証実験も既に行われて来ている [15][86]。

人に対して物理的支援を行うためのロボットとして人型であることは有益であろう。しかし、これは現在使用されている人に適応した道具(食器、家具、電化製品など)を使う場合に限るとも言える。つまり、ロボットが人を支援することを前提として、生活道具をロボットに特化した場合、ロボットは人型である必要はないのかもしれない。第 7.3.1 節

で述べたように、人の精神的な面まで扱うロボットにおいては人がである必要はあるであろう。しかし、コンピュータ上のエージェントがそうであったように、人のようなインタフェースは実用としては必要とされない可能性がある。

第 7.3.2 節で述べたように、映画ではあるが宇宙船の主である HAL9000 は人型ではなくとも人と自然な対話が可能であった。また、物理的な支援も可能であった。乗組員達は自然に彼と対話し、ミッションをこなした。ここで注目したいのは乗組員にとって HAL9000 は対話を行う実体は無くとも対話可能であったということである。では、実体のない「彼」は乗組員達の中でどのように認知されていたのであろうか。筆者は「彼」の存在は乗組員達に心象されており、彼らはこのロボット像またはエージェント像を抱くことで対話の実現されていたのであろうと考える。

HAL9000 はロボット化されゆく空間との対話と非常に似ている。すなわち、明示的な対象は無くとも空間全体が「一つの実体」として扱われ、これと対話を行うという点である。このような空間では特定の機器と対話するというよりは、むしろ機器を含む全体と対話する。この空間における機器との対話は一貫性があり、これにより一つの人格を形成する。ここで、筆者は明示的な実体は伴わないが、人に心象されるロボット像やエージェント像を活用したロボット工学として観念論的ロボティクス (Idealistic Robotics) を提案する。観念論的ロボティクスで扱われるロボットは人の心までをも設計対象とするものである。この点においてソフトウェア中心のロボット工学であると言える。さらには、人の心まで設計対象とするという点においては、人とロボットとのインタラクションと、そこで形成される関係性に注目していると言える。以下 2 節ではこれについて詳述する。

7.4.2 ソフトウェア中心のロボット工学

これまでの人型ロボットに代表される対話ロボットはハードウェアの設計と実装に重きをおき、実世界で行動することが可能な段階にまで発展してきた。しかし、対話の完成度という意味では未だ多くの人の要求に応えられるものはないと考えている。

また、近年になってロボットにおけるソフトウェアの共通化の試みが始まってきたが¹、現在では、まだロボットごとに専用のソフトウェアが開発されてきている。ロボットのハードウェアとその制御システムの開発は非常に大きなコストがかかり、このため、対話などロボットの応用アプリケーションとしてのソフトウェア面での開発が置き去りにされてきた。

今後、共生型ロボットに必要とされる機能は人との豊かなインタラクションであろう。これはロボットのハードウェアだけではなく、ソフトウェアに注目するということの意味する。ロボットのハードウェアはその目的を達成するために必要な機能と外見が設計、実装されてきた。人との対話を行うことを目的とする対話ロボットにおいては、安全に対話するための機能や、人と身体的相互作用を行うために適切な機構、接触を伴う対話のためのセンサなど人を中心とした機能の設計と実装がされてきた。この点において対話ロボットのハードウェアは人の身体までも含む系として設計されてきたと言える。

筆者はロボットのソフトウェアにおいては人の心までをも考慮した設計と実装が必要と

¹Robotic Technology Component (RTC), 1.0 Beta 2 Specification, <http://doc.omg.org/ptc/2007-08-18>

なると考えている。すなわち、人とインタラクションを行うことを目的として開発されるロボットのソフトウェアにおいては、人との関係性の構築までも考慮した設計となるべきであり、これが望まれると考えているためである。特に人型ロボットのように人に酷似した身体と外見を持った存在であれば、人はこのロボットに対して人のようなインタラクションを期待するであろう。この期待に沿うインタラクションとして実装するか否かによって人との関係性は大きく変化する。このようなインタラクションの設計は、すなわち人の心までも扱っていると言えよう。

さらには、前節で述べたように、今後は人型ロボットだけではなく空間すらロボット化されることが考えられる。また、ロボット化された空間の中で活動するロボットにおいては、その空間と協調して作業することが必要とされ、さらには他のロボットとの対応の整合性についても求められることが考えられる。つまり、空間自体が一つの人格を有し、この主体としての人型ロボットであるように振る舞う必要があるということである。これは空間内にいる人にとってロボット群が統一された人格として認知され、同じプロトコルでインタラクションを行うことができれば、負荷が最も少ないと考えられるためである。

このように、人とインタラクションを行うことを目的としたロボットにおいては、今後ソフトウェアの比重がますます増して行くことが考えられる。さらに、人とのインタラクションの影響を考慮する必要があるということは、人の心をも考慮する必要があると言える。本論文で行ってきた研究においては人型ロボットのソフトウェアの開発とその評価を主に行ってきた。これによりこれらの間のインタラクションの基本的な設計方針の基礎要素の一部を明らかにすることができたと考えている。また、本研究の結果から人と人型ロボットとのインタラクションの設計に関しては人の心までも含む必要があり、これが重要であるということが示されたと考えている。

7.4.3 関係性としてのインタラクションデザイン

これまで商業的に、またコンセプトとして成功したデザインは鋭い洞察力とその実装力に支えられてきたと言える。この点において、良いデザイナーは人とモノの関係性を見抜き、ここに足りない機能を実装することができる者であると言える。また、この関係性をデザインしたモノで再現することができる者であると言える。

ロボットのインタラクションデザインにおいても人とロボットの間形成される系を観察し、ここに有効な機能を実装する必要があるであろう。特に人型ロボットであれば、人と人型ロボットの間形成される関係性を想定し、これを実際に実装することが求められる。この点においても前項で述べたように人型ロボットにおけるソフトウェアのデザインは人の心までも含まれると言える。また、これによって人にとって有益かつ適切な人型ロボットの実現をすることができると考えている。

これまでも建築の世界では人の生活を中心として設計が行われてきている。これは建築物等のモノと人とのインタラクションを想定して設計が行われてきているという点において重要である。特に、建築物内で生活する人を中心としてデザインされた関係性を有効に活用しているという点で興味深い。ロボット化される空間においても人と建築物とのインタラクションを中心としたソフトウェア中心の設計方針が必要となることは、このことから明らかである。

建築では建築物の機能の重要性だけではなく、そこで生活する人と物とのインタラクションによる関係性も重要となる。良い建築は外見美しさ、機能の充足度だけではなく、インタラクションの満足度も高い。ロボットが遍在した空間においても、これまでの建築物のデザインと同様の思想が必要となるであろう。ロボットの中で生活する人との関係性を設計すること。また、このインタラクションを実装、実行するための環境の整備が必要となることが考えられる。本研究はこのための人型ロボットにおけるインタラクションデザインの基礎的研究として貢献することができたと考えている。

また、将来的には空間内のすべてのロボットの共通言語の設計と実装が必要となるであろう。これはつまり、空間全体の統一的なインタラクションシナリオの記述環境と、実行環境が必要となるということである。今後、インタラクションデザインが体系的に整備され、これを有効に活用することで多くの空間において関係性に基づいたインタラクションデザインを容易に実装することが可能な環境の実現が求められる。これにより空間自体にロボットの実体が存在しなくとも、一つの対象として人に心象されるロボット像を用いたインタラクションの実現が期待される。

ただ、ここで心象されるロボット像は大きな認知的存在感を有する必要がある。なぜなら、第7.3.3節で議論した人にとって現実であると感じられる現象としての実在感に認知的存在感に強く関係することが考えられるためである。つまり、人にとって空間中に何かしらの対象が存在しているように感じられることが重要であり、これがインタラクションの価値を向上させることができると考えているということである。これは人と空間との関係性が強く形成されている状態で生じるものであると言えるため、この関係性を強く意識したシステムの実現が期待される。

7.5 システム情報科学における本研究の意義

本研究では対話メディアとしての人型ロボットのインタラクションデザインについて3つの要素、つまり、身体性、社会性、存在感の影響について検証した。これらの研究では、まず研究の仮説にもとづきロボットシステムの開発を行い、これを対話実験により評価するという手法をとった。これは構成論的手法と呼ばれ「まず作り、評価する」というものであった。人と人型ロボットとのインタラクションに関しては未知な要素が多く存在するため、開発と評価の繰り返しによって発展が必要な分野であると考えられる。この点において、本研究で採用した手法は有効に機能したと考えている。また、本学問領域において主として採用されるべき手法であったと考えている。

本研究では人と人型ロボットとのインタラクションにおける情報の要素を解明することで人の認知機構の一部を解明した。具体的には、人工物である人型ロボットとの対話における人型ロボットの身体的、社会的な影響に関する人の認知機構の一部を解明した。本論文で行った研究ではロボットシステムの開発と評価を行ってきたが、これは本質的には人の認知機構の解明を目指したものである。これはつまり、ロボットシステムの開発により人の認知機構の解明を試みは人を中心としたシステムの開発と評価を行うことと等価であると考えられる。人を中心としたシステムの研究は本研究領域における中心的トピックである。

特に、本研究領域においては上述したように工学、心理学、認知科学、デザインなど様々

な分野を扱い、これまでにない人間中心のシステムのデザインを行うことを目的としている。この点において、人型ロボットという新しい対話メディアのデザインの設計・開発は本研究領域で行うべき研究である。さらに、インタラクションデザイン研究は本質的に広範囲の学問分野をまたぐ、分野横断的な研究でもある。この点においても、本研究は人と人型ロボットのインタラクションデザインに関する研究の手法を提案できたという点において本学問領域に大きく貢献することができたと考えている。

第8章 結言

本章では本論文のまとめを行う。本論文では対話メディアとしてのロボットにおけるインタラクションデザインの評価に関するについて述べた。具体的には、遠隔操作を前提とした半自律遠隔操作型ロボットシステムの開発と、これを用いた対話実験による人とロボットのインタラクションによる人への影響を評価する研究を行った。以降、各章を外観し、まとめを行う。

第3章では本研究で行う研究において必要となるロボットシステムのモデルの提案を行った。これまでに様々なロボットシステムが開発されてきたが、高度な自由対話を行うことができるロボットシステムの実現にはいまだ至っていない。しかし、人-ロボット間相互作用研究においては、ロボットの高い対話能力が必要とされる。なぜなら、不完全な対話能力を有するロボットとの対話実験の結果が、将来の研究にどの程度貢献することができるのかについて多くの疑問が残るためである。このため、本研究では高度な自由対話を行う部分を人が担当し、その他のロボット自身で行動できる部分、具体的には単純な反射や簡単な行動単位を自律的に振る舞うことで、人と自由な対話を行うことができるシステムを開発した。これにより、ロボットは高度な対話に必要な知能を人に委譲することができ、人に近い自然な対話を行うことができるシステムの実現を図った。本研究ではこれを半自律遠隔操作型ロボットシステムと呼ぶ。

第4章では人に近い身体を持った存在であるからこそ期待される「身体性コミュニケーション」についての研究について述べた。本研究では、ロボットが対話者に対して協調的、つまり、同期的な身体動作を行うことによって、どのような影響があるのかを確認するための実験を行った。本実験で用いるロボットシステムは3次元モーションキャプチャシステムから得られる人の身体動作をロボット上で再現した。これを遠隔操作によって対話の文脈に沿うように身体動作を行わせることで、人と同期的な身体動作と発話を実現した。この実験の結果、ロボットの協調的な身体動作が、対話者の感情的側面に良い影響を与えることが明らかとなった。

人とロボットの対話機構には身体動作だけでなく、その発話内容やそれに付随する「社会的態度」も重要な要素となることが考えられる。このため、第5章ではロボットを含む3者対話における、ロボットの態度が与える社会的影響の解明を行うための実験を行った。本実験ではロボット1台が、被験者2人と対話する。この際、ロボットが2人の被験者に対して平等に良い印象を与える態度をとるか、1人だけに対して良い印象を与える態度をとるかによって、被験者間の印象にどのような変化が起きるかについて検証した。本実験においてもロボットは遠隔操作によって社会的態度を変化させる。この実験の結果から、ロボットの発話内容や振る舞いが人間関係の印象形成に影響を与えることが確認された。

人型ロボットの自律対話機能が進化するにつれ、いずれは人と同等の対話能力を持った人型ロボットが登場することが考えられる。さらには、ある人の外見だけではなく、人格

すら同等のロボットが登場するかもしれない。前2章の研究によって、人とロボットの対話における、ロボットの強い影響力について明らかになった。これらの研究から、将来の究極的な人型ロボットと人が対話することの意味について深く考える必要があることがわかる。

このため、第6章では「人型ロボットとの対話の根源的な影響の解明」を行うための研究として、人の外見に酷似した人型ロボットであるアンドロイドロボットを用いた対話実験を行った。本実験ではアンドロイドは完全に人に遠隔操作される。これはつまり、ロボットと対話する人にとっては、人と同等の対話能力を持ったロボットと対話することとなる。実験ではこのような人と同じ対話能力を持ったロボットとの対話は、人にとってどのような影響があるのかの解明を行った。本実験の結果から、アンドロイドロボットを通じた対話は、他のメディア、具体的には現在の遠隔コミュニケーションの手段として用いられているテレビ電話や電話よりも、存在感を有し、自然な対話を行うことができる優れたメディアであることが確認された。さらに、人に酷似したアンドロイドロボットと対話をする人にとって、他の人工物との対話のなかでも、より人同士の対話に近いものであると感ずることが確認された。

これらの研究から本研究で提案する半自律遠隔操作型ロボットシステムと、これを用いた人-ロボット間相互作用研究の有効性が示された。また、3回の対話実験からロボットの対話メディアとしての強い影響力が示されたと考えている。特に、本研究は人と共に生活することを目的としているコミュニケーションロボットにとって大きく貢献することのできる知見が含まれていると考えている。

謝辞

本研究は多くの方々のご協力のもとに成り立っています。まず、ご多忙の中、貴重なお時間を割いて丁寧親切な御指導，御鞭撻と格別のご配慮を賜りました，指導教官の公立はこだて未来大学 システム情報科学部 情報アーキテクチャ学科 小野哲雄 教授には大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

本論文の第4章と第6章の研究は株式会社 電気通信基礎技術研究所 知能ロボティクス研究所における研修生，および研修研究員時に行いました。まず，研究の機会を与えて頂いた萩田紀博，石黒浩の両博士に感謝いたします。石黒浩博士には，本論文外部審査委員としてもご足労頂き，貴重なご意見を賜りました。同研究所において大変お世話になった宮下敬宏，神田崇行の両博士に感謝いたします。また，同研究所においてともに研究を進めさせて頂いた同研究所 塩見昌裕博士，Dylan F. Glas 氏，大阪大学大学院 工学研究科 垣尾政之，田近太一，山岡史享氏に感謝いたします。

本研究の遂行に不可欠であったプログラミング技術の基礎をご指導頂きました美馬義亮，大澤英一の両博士にも深く感謝いたします。特に美馬義亮博士には独立行政法人 情報処理推進機構主催の未踏ソフトウェア創造事業をご紹介頂きました。大澤英一博士には ACM International Collegiate Programming Contest をご紹介頂き，本コンテストに参加した際にコーチをお引き受けして頂きました。どちらの経験も私の人生にとって非常に貴重なものであります。ここに深く感謝の意を表します。さらには大澤英一博士には本論文の副指導教員として大変貴重なご意見を賜りました。深く感謝いたします。

本論文とは直接的には関係がありませんが，ラムダ数学研究所の伊知地宏博士にも深く感謝いたします。伊知地宏博士は未踏ソフトウェア創造事業にて委託開発をさせて頂いている際の私のプロジェクトのプロジェクトマネージャーとして様々な面においてご助言をいただきました。研究プロジェクトを遂行する際の気持ちや姿勢などだけではなく，様々な経験をさせて頂いたことは私の人生にとって貴重な財産となっております。ここに深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり，公立はこだて未来大学 小野哲雄研究室の方々には大変お世話になりました。小川浩平，高橋和之の両氏には様々な場面で議論をさせて頂きました。深く感謝いたします。また，数々の場面でお世話になった同研究室の方々に深く感謝いたします。

本学の第一期生として入学した私は諸先生方や事務局の方々と多くのかかわり合いを持つことができ，さらには貴重なご意見を多く拝聴することができました。また，多くのチャンスを得ることができたのも第一期生としての特権であったのだらうと思っています。本学に関わる多くの方々に対して深く感謝の意を表します。

最後に，進学に理解を示して頂き，また，金銭的援助までしていただいた母をはじめとする家族，親戚に感謝の意を表しつつ，本論文の結びといたします。

参考文献

- [1] C. Breazeal and B. Scassellati. A context-dependent attention system for a social robot. *1999 International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 1254–1259, 1999.
- [2] D. Cartwright and F. Harary. Structural balance – a generalization of heider’s theory. *Psychological Review*, Vol. 33, pp. 277–293, 1956.
- [3] J. Cassell, D. McNeill, and K. E. McCullough. Speech-gesture mismatches evidence for one underlying representation of linguistic and nonlinguistic information. *Pragmatics and Cognition*, Vol. 7, No. 1, pp. 1–33, 1999.
- [4] Arthur C. Clarke. *2001 年宇宙の旅*, 1993.
- [5] 坂本大介, 小野哲雄. activeCanvas: 対話可能な絵画を生成するソフトウェア. *コンピュータソフトウェア*, Vol. 23, No. 2, pp. 101–107, 2006.
- [6] 坂本大介, 小野哲雄. ロボットの社会性 : ロボットが対話者間の印象形成に与える影響評価. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 8, No. 3, pp. 381–390, 2006.
- [7] K. Dautenhahn, M. Walters, S. Woods, KL Koay, CL Nehaniv, A. Sisbot, R. Alami, and T. Siméon. How may i serve you?: a robot companion approaching a seated person in a helping context. *ACM SIGCHI/SIGART Human-Robot Interaction*, pp. 172–179, 2006.
- [8] H. Dubberly and D. Mitch. The knowledge navigator. Video, 1987. Apple Computer, Inc.
- [9] M. Fujita, Y. Kuroki, T. Ishida, and T. Doi. A small humanoid robot sdr-4x for entertainment applications. In *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intel ligent Mechatronics (AIM2003)*, pp. 938–943, 2003.
- [10] 藤田善弘. パーソナルロボット papero の概要. In *RSJ2001*, 2001.
- [11] J. Goetz, S. Kiesler, and A. Powers. Matching robot appearance and behavior to tasks to improve human-robot cooperation. In *The 12th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication 2003 (ROMAN 2003)*, pp. 55–60. IEEE, 2003.
- [12] S. Goldin-Meadow. When gestures and words speak differently. *Current Directions in Psychological Science*, Vol. 6, No. 5, pp. 138–143, 1997.

- [13] M. Goldstein, G. Alsio, and J. Werdenhoff. The Media Equation Does Not Always Apply: People are not Polite Towards Small Computers. *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 87–96, 2002.
- [14] J. A. Graham and M. Argyle. A cross-cultural study of the communication of extra-verbal meaning by gestures. *International Journal of Psychology*, Vol. 10, No. 1, pp. 57–67, 1975.
- [15] K. Hayashi, D. Sakamoto, T. Kanda, M. Shiomi, S. Koizumi, H. Ishiguro, T. Ogasawara, and N. Hagita. Humanoid robots as a passive-social medium: a field experiment at a train station. *ACM SIGCHI/SIGART Human-Robot Interaction*, pp. 137–144, 2007.
- [16] Fritz Heider. *The Psychology of Interpersonal Relations*. John Wiley, 1958.
- [17] 清水博. 場と共創, 2000.
- [18] 大澤博隆, 今井倫太. 物体のエージェント化を行う自己呈示型情報提示手法の評価. HAI シンポジウム 2007, pp. 1D–3, 2007.
- [19] T. Hornyak, T.B. Alert, S.E. Alert, and B.S.L. Alert. Android Science. *Sci Am*, Vol. 294, No. 5, pp. 32–34, 2006.
- [20] H. Ishiguro, T. Ono, M. Imai, and T. Kanda. Development of an interactive humanoid robot ”robovie” -an interdisciplinary approach. In R. A. Jarvis and A. Zelinsky (Eds.), editors, *Robotics Research*, pp. 179–191. Springer, 2003.
- [21] H. Ishii and B. Ullmer. Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *ACM Computer Human Interaction (CHI '97)*, pp. 234–241, 1997.
- [22] J. Iverson and S. Goldin-Meadow. What’s communication got to do with it: Gesture in blind from birth children. *Developmental Psychology*, Vol. 33, pp. 453–467, 1997.
- [23] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, and T. Ono. Development and evaluation of interactive humanoid robots. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, No. 11, pp. 1839–1850, 2004.
- [24] 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平. 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット “robovie” の開発. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J85-D-I, No. 4, pp. 380–389, 2002.
- [25] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, and T. Ono. Body movement analysis of human-robot interaction. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2003)*, pp. 177–182, 2003.

- [26] N. Katashi and T. Akikazu. Speech dialogue with facial displays: Multimodal human-computer conversation. In *the 32nd Annual Meeting of the Association for Linguistics (ACL-94)*, pp. 102–109, 1994.
- [27] 寺田和憲, 社本高史, 伊藤昭. 心の理論の枠組を利用した人工物から人間への意図伝達. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 9, No. 1, pp. 23–33, 2007.
- [28] JF Kelley. An iterative design methodology for user-friendly natural language office information applications. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, Vol. 2, No. 1, pp. 26–41, 1984.
- [29] CD Kidd and C. Breazeal. Effect of a robot on user perceptions. *Intelligent Robots and Systems, 2004. (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, Vol. 4, , 2004.
- [30] 小川浩平, 小野哲雄. ITACO: メディア間を移動可能なエージェントによる遍在知の実現. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 8, No. 3, pp. 373–380, 2006.
- [31] S. Koizumi, T. Kanda, M. Shiomi, H. Ishiguro, and N. Hagita. Preliminary Field Trial for Teleoperated Communication Robots. *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on*, pp. 145–150, 2006.
- [32] 近藤貞次. *社会心理学概論*. 朝倉書店, 1668.
- [33] R.E. Kraut, S.R. Fussell, and J. Siegel. Visual information as a conversational resource in collaborative physical tasks. *Human-Computer Interaction*, Vol. 18, No. 1, pp. 13–49, 2003.
- [34] H. Kuzuoka, K. Yamazaki, A. Yamazaki, Y. Suga, and C. Heath. Dual ecologies of robot as communication media: thoughts on coordinating orientations and projectability. *Proceedings of the 2004 conference on Human factors in computing systems*, pp. 183–190, 2004.
- [35] 松坂要佐, 東條剛史, 久保田千太郎, 田宮大介, 古川賢司, 早田啓介, 中野裕一郎, 小林哲則. 複数話者による対話システム. *インタラクシオン'99 論文集, 情報処理学会シンポジウムシリーズ*, pp. 33–34, 1999.
- [36] 松坂要佐, 東條剛史, 小林哲則. グループ会話に参与する対話ロボットの構築. *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J84-D-II, No. 6, pp. 898–908, 2001.
- [37] D. McNeill. *Psycholinguistics*. Harper & Row, New York, 1987.
- [38] Serruya MD, Hatsopoulos NG, Paninski L, Fellows MR, and Donoghue JP. Brain-machine interface: Instant neural control of a movement signal. *Nature*, Vol. 416, pp. 141–142, 2002.

- [39] 藤井美保子. ジェスチャー表現に関わる聞き手の存在. 齊藤洋典, 喜多壮太郎 (編), ジェスチャー・行為・意味, pp. 80–100. 共立出版, 2002.
- [40] T. Minato, M. Shimada, H. Ishiguro, and S. Itakura. Development of an android robot for studying human-robot interaction. *Proc. of the Seventeenth International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems*, 2004.
- [41] C. Moore and Philip J. Dunham eds. *Joint Attention: Its Origins and Role in Development*. Lawrence Erlbaum Associates, 1995.
- [42] 森政弘. 不気味の谷. *Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 33–35, 1970.
- [43] O. Morikawa and T. Maesako. Hypermirror: toward pleasant-to-use video mediated communication system. *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pp. 149–158, 1998.
- [44] B. Mutlu, S. Osman, J. Forlizzi, J. Hodgins, and S. Kiesler. Perceptions of asimo: an exploration on co-operation and competition with humans and humanoid robots. *ACM SIGCHI/SIGART Human-Robot Interaction*, pp. 351–352, 2006.
- [45] K. Nagao and A. Takeuchi. Social interaction: Multimodal conversation with social agents. In *the Twelfth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, pp. 22–28. The MIT Press, 1994.
- [46] K. Nakadai, K. Hidai, H. Mizoguchi, H.G. Okuno, and H. Kitano. Real-time auditory and visual multiple-object tracking for robots. In *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 1425–1432, 2001.
- [47] H. Nakanishi, S. Nakazawa, T. Ishida, K. Takanashi, and K. Isbister. Can software agents influence human relations? - balance theory in agent-mediated communications -. In *Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2003)*, pp. 717–724, 2003.
- [48] ウィリアム M. ニューマン, マイケル G. ラミング. インタラクティブシステムデザイン. ピアソン・エデュケーション, 1999. 北島宗雄 訳.
- [49] D.A. Norman, A. Ortony, and D.M. Russell. Affect and machine design: Lessons for the development of autonomous machines. *IBM Systems Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 38–44, 2003.
- [50] 大橋正夫, 長田雅喜 (編). 対人関係の心理学. 有斐閣, 1987.
- [51] 小嶋秀樹, 高田明. 社会的相互行為への発達のアプローチ — 社会のなかで発達するロボットの可能性. *人工知能学会誌*, Vol. 16, No. 6, pp. 812–818, 2001.

- [52] Tetsuo Ono, Michita Imai, and Ryouhei Nakatsu. Reading a robot's mind: a model of utterance understanding based on the Theory of Mind Mechanism. *Advanced Robotics*, Vol. 13, No. 4, pp. 311–326, 2000.
- [53] 小野哲雄, 今井倫太, 石黒浩, 中津良平. 身体表現を用いた人とロボットの共創対話. *情報処理学会論文誌*, Vol. 42, pp. 1348–1358, 2001.
- [54] Byron Reeves and Clifford Nass. *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*. Cambridge University Press, 1996.
- [55] 石引力, 三輪敬之. 身体の影を活用した集団の共存存在コミュニケーション. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 7, No. 4, pp. 497–505, 2005.
- [56] S. Russel and P. Norvig. *エージェントアプローチ 人工知能*. 共立出版, 1997. 古川康一 監訳.
- [57] Derek Rutter. *Looking and Seeing: The Role of Visual Communication in Social Interaction*. John Wiley & Sons Inc, 9 1984.
- [58] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent asimo: System overview and integration. In *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002)*, pp. 2478–2483, 2002.
- [59] D. Sakamoto, T. Kanda, T. Ono, M. Kamashima, M. Imai, and H. Ishiguro. Cooperative embodied communication emerged by interactive humanoid robots. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 62, pp. 247–265, 2005.
- [60] B. Scassellati. *Investigating models of social development using a humanoid robot, biorobotics*. MIT Press, 2000.
- [61] D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi. Robotphone: Rui for interpersonal communication. *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 277–278, 2001.
- [62] 井上博允. *ロボット学創成, ロボットの進歩と課題*, pp. 9–48. 岩波書店, 2004.
- [63] 本位田真一. *AI 辞典 第2版, オブジェクトとエージェント*, pp. 106–107. 共立出版, 2003.
- [64] K. Shinozawa, F. Naya, J. Yamato, and K. Kogure. Differences in effect of robot and screen agent recommendations on human decision-making. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 62, No. 2, pp. 267–279, 2005.
- [65] J. Short, E. Williams, and B. Christie. *The social psychology of telecommunications*. Wiley, 1976.

- [66] S. Tachi, K. Tanie, K. Komoriya, and M. Kaneko. Tele-existence (I): Design and evaluation of a visual display with sensation of presence. *Proceedings of the 5th International Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, pp. 245–254, 1984.
- [67] R. Tadakuma, Y. Asahara, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi. Development of anthropomorphic multi-dof master-slave arm for mutual telexistence. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 11, No. 6, pp. 626–636, 2005.
- [68] 神田崇行, 鎌島正幸, 今井倫太, 小野哲雄, 坂本大介, 石黒浩, 安西祐一郎. 人間型対話ロボットのための協調的身体動作の利用. *日本ロボット学会誌*, Vol. 23, No. 7, pp. 898–909, 2005.
- [69] 神田崇行, 佐藤留美, 才脇直樹, 石黒浩. 対話型ロボットによる小学校での長期相互作用の試み. *ヒューマンインタフェース学会論文誌 (ソーシャルインタフェース特集号)*, Vol. 7, No. 1, pp. 27–37, 2005.
- [70] 神田崇行, 宮下敬宏, 長田拓, 配川有二, 石黒浩. 人口ロボット相互作用における人型ロボットの外見の影響. *日本ロボット学会誌*, Vol. 24, No. 4, pp. 497–505, 2006.
- [71] 神田崇行, 平野貴幸, ダニエルイートン, 石黒浩. 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット. *日本ロボット学会誌*, Vol. 22, No. 5, pp. 636–647, 2004.
- [72] 小野哲雄, 今井倫太, 江谷為之, 中津良平. ヒューマンロボットインタラクションにおける関係性の創出. *情報処理学会論文誌*, Vol. 41, No. 1, pp. 158–166, 2000.
- [73] Faceface 型擬人化エージェント・インタフェースの構築. 土肥 浩 and 石塚 満. *情報処理学会論文誌*, Vol. 40, No. 2, pp. 547–555, 2 1999.
- [74] 渡辺富夫, 大久保雅史, 小川浩基. 発話音声に基づく身体的インタラクションロボットシステム. *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 66, pp. 251–258, 2000.
- [75] J.G. Trafton, A.C. Schultz, D. Perznowski, M.D. Bugajska, W. Adams, N.L. Cassimatis, and D.P. Brock. Children and robots learning to play hide and seek. *ACM SIGCHI/SIGART Human-Robot Interaction*, pp. 242–249, 2006.
- [76] Wikipedia. *ダイナブック* — wikipedia,, 2006. [Online; accessed 24-1 月-2006].
- [77] Wikipedia. *社会性* — wikipedia,, 2006. [Online; accessed 14-6 月-2006].
- [78] Wikipedia. *インタラクションデザイン* — wikipedia,, 2007. [Online; accessed 11-12 月-2007].
- [79] W.S. Condon and L.W. Sander. Neonate movement is synchronized with adult speech: Interactional participation and language acquisition. *Science*, Vol. 183, pp. 99–101, 1974.

- [80] 角康之, 江谷為之, シドニーフェルス, ニコラシモネ, 小林薫, 間瀬健二. C-map: Context-aware な展示ガイドシステムの試作. 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 10, pp. 2866–2878, 1998.
- [81] 國田豊, 尾川順子, 佐久間敦士, 稲見昌彦, 前田太郎, 舘 . 没入型裸眼立体ディスプレイ TWISTER I の設計と試作. 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 5, pp. 671–677, 2001.
- [82] 駒込大輔, 鈴木道雄, 小野哲雄, 山田誠二. 「ロボット・ミーム」の構想: 人-ロボット間の相互適応による文化の学習・伝達・創出の実現. 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, Vol. 106, No. 412, pp. 7–12, 20061206.
- [83] 景山浩二. エンターテインメントロボット aibo の開発. 情報処理, Vol. 42, No. 9, pp. 33–34, 20010915.
- [84] 森田友幸, 平野靖, 梶田将司, 間瀬健二. ヒューマノイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションに関する検討. 信学技報, 第 MVE2006-47 巻, pp. 25–30, 2006.
- [85] 川浦康至. 社会心理学パースペクティブ 2 人と人を結ぶとき, コミュニケーション・メディアの効果, pp. 67–85. 誠信書房, 東京, 1990.
- [86] 村川賀彦, 十時伸. サービスロボットによる「ふるまい」の評価: 商業施設での試験運用 (実証実験, hri). 情報処理学会研究報告. ICS, [知能と複雑系], Vol. 2006, No. 131, pp. 31–36, 20061213.

付 録 A 研究業績リスト

原著論文

1. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性『情報処理学会論文誌』, Vol.48, No.12, pp. 3729–3738, (推薦論文), 2007.
2. Takayuki Kanda, Masayuki Kamasima, Michita Imai, Tetsuo Ono, Daisuke Sakamoto, Hiroshi Ishiguro and Yuichiro Anzai. 「A Humanoid Robot that Pretends to Listen to Route Guidance from a Human」『Autonomous Robots』, Springer Netherlands, Vol. 22, No. 1, pp. 87-100, 2007 .
3. 坂本大介, 小野哲雄, 「ロボットの社会性：ロボットが対話者間の印象形成に与える影響評価」『ヒューマンインタフェース学会論文誌』, ヒューマンインタフェース学会, Vol.8, No.3, pp.61–70, 2006 .
4. 小松孝徳, 鈴木昭二, 鈴木恵二, 松原仁, 小野哲雄, 坂本大介, 佐藤崇正, 内本友洋, 岡田孟, 北野勇, 棟方渚, 佐藤智則, 高橋和之, 本間正人, 長田純一, 畑雅之, 乾英雄, 「非ロボット技術者のための直感的ロボットオーサリングシステムの提案」, 『日本バーチャルリアリティ学会論文誌』, バーチャルリアリティ学会, vol.11 (2), 213-224, 2006 .
5. 坂本大介, 小野哲雄, 「activeCanvas:対話可能な絵画を生成するソフトウェア」, 『コンピュータソフトウェア』, 日本ソフトウェア科学会, Vol. 23 , No. 2 , pp.101–107, 2006 .
6. 神田崇行, 鎌島正幸, 今井倫太, 小野哲雄, 坂本大介, 石黒浩, 安西祐一郎, 「人間型対話ロボットのための協調的身体動作の利用」, 『日本ロボット学会誌』, 日本ロボット学会, Vol.23, No.7, 2005 .
7. Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Tetsuo Ono, Masayuki Kamashima, Michita Imai, and Hiroshi Ishiguro, 「Cooperative embodied communication emerged by interactive humanoid robots」, 『International Journal of Human-Computer Studies』, Elsevier, Vol. 62, pp. 247–265, 2005 .

著書 (分担執筆)

1. Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Masahiro Shiomi, Hiroshi Ishiguro, 「Semi-autonomous Humanoids and Androids Teleoperated through Computer Networks」 (to appear) .
2. 小野哲雄, 坂本大介, 「メディアとしてのロボット：身体性, 社会性そしてカップリング」, 『メディアと認知科学』(原田悦子, 金井明人編著), 新曜社.(準備中) .

解説記事

1. 塩見昌裕, 坂本大介, 神田崇行, 石井カルロス寿憲, 石黒浩, 萩田紀博, 「駅構内で日常生活を支援するコミュニケーションロボット」, 『画像ラボ』, 日本工業出版, Vol.18, No. 4, pp.23-27, 2007 .

国際会議論文

1. Masahiro Shiomi, Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Carlos Toshinori Ishi, Hiroshi Ishiguro, Norihiro Hagita, 「A Semi-autonomous Communication Robot -A Field Trial at a Train Station -」, 『ACM/IEEE 3rd Annual Conference on Human-Robot Interaction (HRI2008)』, Amsterdam, Netherlands (March 2008).
2. Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Testuo Ono, Hiroshi Ishiguro, Norihiro Hagita, 「Android as a Telecommunication medium with Human Like Presence」, 『2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2007)』, Washington D.C., USA, (March 2007) .
3. Kotaro Hayashi, Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Masahiro Shiomi, Satoshi Koizumi, Hiroshi Ishiguro, Tsukasa Ogasawara, and Norihiro Hagita, 「Humanoid robots as a passive-social medium - a field experiment at a train station -」, 『2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI2007)』, Washington, D.C., USA, (March 2007) .
4. Daisuke Sakamoto, Tetsuo Ono, 「Sociality of Robots: Do Robots Construct or Collapse Human Relations?」, 『1st Annual Conference on Human-Robot Interaction(HRI2006)』, ACM SIGCHI, 2006.
5. Komatsu, T., Suzuki, S., Suzuki, K., Ono, T., Matsubara, H., Uchimoto, T., Okada, H., Kitano, I., Sakamoto, D., Sato, T., Honma, M., Sato, T., Osada, J., Hata., M and Inui, H.. 「Reconfigurable robot with intuitive authoring system - " Dress-Up Robot " -」, 『In Proceedings of the 36th International symposium on Robotics (ISR2005)』, 2005.

6. Daisuke Sakamoto, Tetsuo Ono, 「activeCanvas: Using Ambient Displays as a Canvas for Embedded Interactive Art」, 『IFIP/IPSJ 4th International Conference on Entertainment Computing (ICEC)』, 2005.
7. Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Tetsuo Ono, Masayuki Kamashima, Michita Imai, and Hiroshi Ishiguro, 「Cooperative embodied communication emerged by interactive humanoid robots」, 『IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN2004)』, pp. 443-448. 2004.
8. Masayuki Kamasima, Takayuki Kanda, Michita Imai, Tetuo Ono, Daisuke Sakamoto, Hiroshi Ishiguro, Yuichiro Anzai, 「Embodied Cooperative Behaviors by an Autonomous Humanoid Robot」, 『IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004)』, pp.2506-2513, 2004.

その他発表論文

1. 小野哲雄, 坂本大介, 小川浩平, 駒込大輔, 「Relational Interaction Design: 関係性に基づく新たなインタラクションへ向けて」, 『情処研報』, Vol.2008, No.5, 2008-ICS-150, pp.1-7, 2008年1月.
2. 山森崇義, 坂本大介, 西尾修一, 石黒浩, 萩田紀博, 「アンドロイドとの「目が合う」条件の検証」, 『HAI シンポジウム 2007』, 日吉, 2007年12月.
3. 山森崇義, 坂本大介, 西尾修一, 石黒浩, 「アンドロイドとのアイコンタクトの成立条件の検証」, 『情報処理学会関西支部支部大会講演論文集』, pp.71-74, 2007年10月.
4. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 「アンドロイドロボットを用いた遠隔コミュニケーションシステムの開発と評価」, 『エンタテインメントコンピューティング 2007』, pp.233-236, 大阪, 2007年10月.
5. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 「遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性」, 『インタラクション 2007』, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol.2007, No.4, pp.97-104, 東京, 2007年3月.
6. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 「複数カメラ切り替えに基づくコミュニケーション・ロボットの遠隔操作インタフェース」, 『HAI シンポジウム 2006』, 東京, 2006年12月.
7. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 「遠隔操作型アンドロイド・ロボットシステムの開発と評価」, 『電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ ネットワークロボット時限研究会 H18 年度第2回研究会』, pp.21-26, NR-TG-2-11, 京都, 2006年11月.
8. 林宏太郎, 坂本大介, 神田崇行, 塩見昌裕, 小泉智史, 石黒浩, 小笠原司, 萩田紀博, 「Passive-social medium としてのロボット間協調対話 -駅におけるフィールド実験-」, 『情報処理学会関西支部 支部大会』, pp.123-126, 大阪, 2006年10月.

9. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 石黒浩, 萩田紀博, 「遠隔存在感メディアとしてのアンドロイド・ロボットの可能性」, 『情報処理学会関西支部支部大会』, 大阪, 2006年10月.
10. 坂本大介, 小野哲雄, 「ロボットの社会性: ロボットによる人間関係の構築と崩壊」, 『合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2005 (JAWS 2005)』, 研究会資料シリーズ, No. 40, pp. 485-490, 2005年11月.
11. 坂本大介, 長田純一, 佐藤崇正, 内本友洋, 北野勇, 岡田孟, 本間正人, 小松孝徳, 鈴木昭二, 鈴木恵二, 小野哲雄, 松原仁, 畑雅之, 乾英男, 「Robot Musical: ロボットの振る舞いの実装に関するデザイン手法」, 情報処理学会, 『情報処理学会シンポジウムシリーズ エンタテインメントコンピューティング 2005』, Vol. 2005, No.10, pp. 37-42, 2005年9月.
12. 坂本大介, 小野哲雄, 「activeCanvas: 対話可能な絵画を生成するソフトウェア」, 日本ソフトウェア科学会, 『日本ソフトウェア科学会第22回大会』, 2005年9月.
13. 佐藤崇正, 坂本大介, 内本友洋, 北野勇, 岡田孟, 本間正人, 小松孝徳, 鈴木昭二, 鈴木恵二, 小野哲雄, 松原仁, 畑雅之, 乾英男, 「オーサリング可能なシナリオ研究用ロボットののためのパーツコントローラの開発」, 日本ロボット学会, 『第23回日本ロボット学会学術講演会』, 2005年9月.
14. 鈴木昭二, 鈴木恵二, 松原仁, 小野哲雄, 小松孝徳, 内本友洋, 岡田孟, 北野勇, 坂本大介, 佐藤崇正, 本間正人, 畑雅之, 乾英男, 「オーサリング可能なシナリオ研究用ロボットの研究開発」, 『ROBOMECH2005』, 2005年6月.
15. 坂本大介, 小野哲雄, 「activeCanvas: 対話可能な絵画を生成するソフトウェア」, 情報処理学会, 『インタラクシオン 2005』, 2005年3月.
16. 坂本大介, 小野哲雄, 「彩られた空間: 新しい情報の景色」, 『第46回プログラミングシンポジウム』, 2005年1月.
17. 坂本大介, 「彩られた空間」, ソフトウェア科学会, 『Workshop on Interactive System and Software 2004 (WISS2004)』, 2004年12月.
18. 坂本大介, 「共感する部屋 - やわらかい情報提示システム -」, 情報処理学会, 『エンタテインメントコンピューティング 2004』, pp. 19-24, 2004年8月.
19. 坂本大介, 神田崇行, 小野哲雄, 今井倫太, 鎌島正幸, 石黒浩, 「協調的身体動作に基づく人-ロボット対話の実現」, 情報処理学会, 『情報処理学会シンポジウムシリーズ インタラクシオン 2004』, No. 5, pp. 3-10, 2004年3月.

その他

1. 坂本大介, 「インタラクシオン 2005」, 『日本バーチャルリアリティ学会誌』, Vol. 10, No. 2, pp.104, 2005.

表彰等

1. 株式会社 国際電気通信基礎技術研究所, 創立記念日表彰 優秀研究賞, 2008年3月.
2. 神戸市, 神戸ビエンナーレ 2007 ロボットメディア・アートコンペティション, 最優秀賞, 2007年11月.
3. 情報処理学会他, インタラクション 2007, ベストペーパー賞, 2007年3月.
4. ACM/IEEE, Human Robot Interaction 2007, Best Paper Award, 2007年3月.
5. 情報処理学会関西支部, 平成 18 年度 情報処理学会関西支部 学生奨励賞, 2006年10月.
6. 情報処理学会北海道支部, 平成 17 年度 電子情報通信学会北海道支部 支部長賞, 2006年3月.
7. 情報処理推進機構, 平成 16 年度 未踏ソフトウェア創造事業 採択テーマ: 「彩られた空間 - 新しい情報の景色 -」, 2004年6月
8. 公立はこだて未来大学, 平成 15 年度 公立はこだて未来大学 未来大学賞 (優秀学生賞), 2004年3月.
9. 情報処理推進機構, 平成 15 年度 未踏ソフトウェア創造事業 採択テーマ: 「共感する部屋」, 2003年6月
10. 情報処理振興事業協会, 平成 14 年度 未踏ソフトウェア創造事業ユース 採択テーマ: 「心ののぞき窓」, 2002年10月.
11. Nikkei BP, WPC EXPO 2002 テーマビジュアルコンテスト 「everywear」 優秀賞, 2002年10月.

付 録 B ロボットの発話内容リスト

第 5 章で使用するロボットが発話する内容を示す。

質問 (30 パターン)

- マンガは好きですか？
- 音楽は好きですか？
- カラオケは好きですか？
- 辛いものは好きですか？
- 甘いものは好きですか？
- 納豆は好きですか？
- 珈琲は好きですか？
- 煙草は好きですか？
- 課題は好きですか？
- サッカーは好きですか？
- バレーボールは好きですか？
- テニスは好きですか？
- ボーリングは好きですか？
- 虫は好きですか？
- 犬は好きですか？
- ネズミは好きですか？
- ギャンブルは好きですか？
- ロボットは好きですか？
- 車は好きですか？
- 飛行機は好きですか？
- 船は好きですか？
- 台風は好きですか？
- 冬は好きですか？
- 海は好きですか？
- 未来大は好きですか？
- プログラミングは好きですか？
- パソコンは好きですか？
- バスは好きですか？
- テレビゲームは好きですか？
- 占いは好きですか？

同意条件: 好き (3 パターン)

- ロボビーも好きー
- ロボビーも大好きー
- これ大好きー

同意条件: 嫌い (3 パターン)

- ロボビーも嫌いー
- ロボビーもこれ嫌いー
- これ大嫌いー

反意条件: 好き (3パターン)

- えー、これ好きー
- なんでー?これ好きー
- 本当?これ大好きー

- そうなんだあ、じゃあ

曖昧: 最後 (1パターン)

- そっかー

反意条件: 嫌い (3パターン)

- えー、これ嫌いー
- なんでー?これ嫌いー
- 本当?ロボピーはこれ大嫌いー

共通: 移動時 (1パターン)

- じゃあ

共通: 始まりの挨拶 (1パターン)

- こんにちは

曖昧: 共通 (3パターン)

- そっかー、じゃあ
- うーん、なるほど、じゃあ

共通: 終わりの挨拶 (1パターン)

- これで質問は終わりです

目 次

2.1	一般的なコンピュータとのインタラクション形態	8
2.2	CUI と GUI	9
2.3	Visual Software Agent(VSA)	11
2.4	左:NEC PaPeRo , 右:Sony Aibo	13
2.5	長尾らによる社会的エージェント	23
2.6	松阪らのアイコンタクトを交えながら複数人と対話するロボット	25
2.7	存在感のメディア別評価 (Short ら, 1976)	29
3.1	D. Norman による感情のモデル	36
3.2	提案するロボットシステムのモデル	37
4.1	Robovie II の駆動機構	42
4.2	VICON モーションキャプチャーシステム	42
4.3	ソフトウェア構成	43
4.4	アイコンタクト (XY 平面図)	45
4.5	アイコンタクト (YZ 平面図)	45
4.6	腕の同調	46
4.7	遠隔操作による Communicative Unit 切替え	47
4.8	実験環境	49
4.9	頭部の切換規則	50
4.10	腕部の切換規則	50
4.11	体の向きの切換規則	51
4.12	実験の様子 (左から H,Rr,Rn 条件)	51
4.13	主観評価の比較	52
5.1	均衡状態 (上), 不均衡状態 (下)	60
5.2	3 つの対象に対する印象	62
5.3	Robovie-R ver.2 の外観	63
5.4	2 者対話の組み合わせによるバランス理論	66
5.5	予備実験の実験環境	67
5.6	被験者から見たロボットの印象のグラフ	70
5.7	被験者から見た相手の被験者のロボットに対する印象のグラフ	71
5.8	被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ	71
5.9	対話実験の様子 (不平等条件)	72
5.10	3 者対話実験における実験設定	73

5.11	本実験の実験環境	73
5.12	被験者から見たロボットの印象のグラフ	77
5.13	被験者から見た相手の被験者のロボットに対する印象のグラフ	77
5.14	被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ	78
5.15	対話実験の様子	80
5.16	4 評価グループにおける被験者から見た相手の被験者の印象のグラフ	81
5.17	モーションキャプチャシステムで得られたモーションデータ	82
5.18	クラスター分析によって得られたツリーダイアグラム: (賛成グループ:上, 不平等賛成グループ:下)	83
5.19	不平等条件における被験者とロボットの身体的距離の変化 (左から右へ)	85
5.20	ロボットの身体動作に同調した被験者の身体動作	86
5.21	被験者の様々な社会的態度	88
6.1	システム概要図	94
6.2	Geminoid HI-1(右) とそのモデル (左)	95
6.3	状態 (State) と Behavior Control の例	96
6.4	遠隔操作システムの全体図	97
6.5	オペレータと Geminoid HI-1 の口の動きの同期	98
6.6	Geminoid HI-1 とビデオ会議システムを使用したオペレータとのアイコンタクトの例	99
6.7	実験室内の配置図 (左:G 条件, 中央:V 条件, 右:S 条件)	99
6.8	各メディアに対する被験者の印象: Geminoid HI-1(G 条件), ビデオ会議システム (V 条件), スピーカ (S 条件)	101
6.9	実験の様子: Geminoid 条件 (左), Video 条件 (右)	101
6.10	森による不気味の谷 (K. F. MacDorman and T. Minato, Trans.)	103

表 目 次

2.1	対話メディアの特性の比較	27
4.1	実装した Communicative Unit(身体動作)	44
4.2	実装した Communicative Unit(発話)	44
4.3	主観評価の結果	53
4.4	各条件の指先の移動量の平均	54
4.5	身体動作量の分析結果	54
4.6	ビデオ分析の結果	55
5.1	評価グループの条件分け	61
5.2	用意するモーションファイル	64
5.3	質問項目	68
5.4	被験者から見たロボットの印象に関する質問票の集計結果	69
5.5	他の被験者のロボットに対する印象を推定した質問票の集計結果	69
5.6	各被験者間の印象に関する質問票の集計結果	70
5.7	被験者から見たロボットの印象に関する質問票の集計結果	75
5.8	他の被験者のロボットに対する印象を推定した質問票の集計結果	76
5.9	各被験者間の印象に関する質問票の集計結果	76
5.10	4つの評価グループの分散分析の結果	79
5.11	バランス理論にもとづく評価グループ毎の身体の移動量平均	82
5.12	4評価グループ毎の身体の移動量平均	83
5.13	バランス理論にもとづく評価グループ毎の対ロボット距離の平均	84
5.14	4評価グループ毎の対ロボット距離の平均	84
5.15	条件ごとの対話時間平均	88