

子どもの心的状態と性格を考慮した
遊び相手ロボットの設計原理

阿部 香澄

電気通信大学大学院情報理工学研究科
博士（工学）の学位申請論文

2015年9月

子どもの心的状態と性格を考慮した
遊び相手ロボットの設計原理

博士論文審査委員会

主査	長井	隆行	教授
委員	金子	正秀	教授
委員	田中	一男	教授
委員	横井	浩史	教授
委員	内田	雅文	准教授

著作權所有者

阿部 香澄

2015

Design Principles of a Robotic Playmate Considering a Child's Mental State and Personality

Kasumi Abe

Abstract

The burden of childcare on mothers with young children is increasing. This stems from the trend toward the nuclear family and reduced community relations in Japan. This has caused the problem where many mothers have to do both housework and childcare at home by themselves. Many mothers have no alternative but to show their children television and DVDs as they do housework despite the negative effect on children's development from long hours of watching television. Effective childcare support to alleviate this domestic childcare problem does not yet exist. In order to help solve this problem, the ultimate goal of this study is the development of robotic playmates to play with a child at home. Such robots can befriend children and play with them for periods of about 30 min by using toys and their body while the parent does housework. The present study considered the design principles for such a robotic playmate that would play with a preschool child at home as childcare support for nuclear families.

The robotic playmate should be able to encourage the child's development. Thus, in this study the robot was designed for physical play with children by using toys and its own body. Furthermore, it should be able to establish and maintain this play. There are two problems that the robotic playmate needs to resolve to do this.

First, the robot should be able to keep playing for a long time and over the long-term on a one-on-one basis. However, many existing robots targeted towards children are not aimed towards play but towards education, play therapy, and communication with several children. Thus, long-term interaction is proposed

to build friendliness through interaction between the child and robot, where the robot will determine its action according to the child's mental state. Second, the robotic playmate should be able to play flexibly with any child. However, more introverted children seem unable to play with such robots, and it is difficult to establish good relationships between these robots and children. Therefore, an action selection system is proposed that depends on the child's personality. As a first step, this study explored the existence of an effective play strategy for increasing the friendliness of a shy child.

This paper discusses the methodology for robotic playmates that can play with a child according to the child's mental state and personality. The robot should build friendliness so that it can play with any child for a long time. A constructive approach is presented with implementation using an actual robotic playmate and analysis. First, section 1 describes the background of this study, related work, and the aim of this study. Section 2 elaborates upon the requirements and factors to establish play in order to clarify the problem. Section 3 discusses the concept of the robot to encouraging a child's development. Section 4 discusses the first problem of the robot playing long-term and proposes the solution of an action decision model. Section 5 discusses the second problem of the robot being able to play with any child and the investigation into effective actions considering the child's personality. Section 6 proposes a practical robotic playmate based on the results presented in the previous sections. Section 7 concludes this paper.

子どもの心的状態と性格を考慮した 遊び相手ロボットの設計原理

阿部 香澄

概要

核家族化，少子化，地域のつながりの希薄化などを背景に，乳幼児を持つ母親の育児負担が増大している．多くの子育て世帯は核家族のため祖父母からの日常的な支援を受けられず，保育施設などの社会的育児支援も，昼間だけ，週1日だけなどと限定的にしか受けられないため，多くの家庭内では，母親が一人で育児と家事を同時にこなさなければならない状況にある．現在，家事の間の子守りの代替となっているのはテレビやDVDである．長時間のテレビ視聴は子どもの発達への悪影響が指摘されているが，気軽に利用できる手立てが他になく，母親は家事と育児を両立させるためにテレビに頼らざるを得ない．このように，家庭内での育児支援の欠如と，それにとまなう子どもの発達の問題が存在しているが，それを解決する有効な育児支援策は未だ存在しない．そこでこの問題を解決する一助として，本研究では，家庭内で子どもの相手をする遊び相手ロボットを提案する．30分ほどの間ロボットが子どもの興味を引きつけ遊んでいてくれるなら，母親の家事の時間を確保でき，育児ストレスの軽減が期待できる．本研究の最終的なゴールは，未就学児をもつ核家族の育児支援を目的とした，家庭内で子どもと遊ぶロボットの実現であり，本論文ではこの遊び相手ロボット実現のための方法論について議論する．

遊び相手ロボットに対する基本的な要求は，子どもの発達を促す遊びができることである．遊びは子どもの発達の鍵であり，おもちゃや身体を使った幅広い遊びを行なうことで心身の発達が促される．長時間視聴されているテレビに代わり，子どもの身体的な活動を誘発させるために，おもちゃや身体を使った標準的な遊びを幅広く行えるロボットのデザインを行う必要がある．そしてさらに遊び相手ロボットに重要なのは，発達を促す遊びができるだけでなく，そのような遊びを

子どもと成立させられることである。遊びの成立に対する課題は、課題1“長く遊び続けられること”と課題2“どんな子どもとも遊べること”の二つある。

一つ目の課題は、子どもと1対1で長時間かつ長期的に継続して遊べることである。従来の子どもを相手としたロボットは、教育や遊戯療法などを目的としており、遊びの継続は考えられていない。本研究では遊びの継続が次のように成り立つと考える。長時間の遊びは、ロボットが様々な遊びや働きかけで子どもの興味を引きつけることで成立し、長期的な遊びは、子どもの気持ちを考慮した適切な振る舞いをロボットが行い、それを受けた子どもがロボットに好意的な関心をもつことで成立する。本研究では、この子どもの興味に関する問題を“興味度”の軸、好意的な関心を“友好感”の軸と定義する。遊びの継続には、子どもの興味度と友好感を維持する人間類似の行動決定モデルが必要であると考え、本研究では、子どもの心的状態を推定しながら行動を決定する仕組みを構築する。

二つ目の課題は、ロボットがどんな子どもとも柔軟に遊べることである。従来の対人ロボットは、対話が容易な相手とのコミュニケーションのみ検討してきているが、育児支援を目的とした本ロボットは、保育者がどんな子どもとも遊びを成立させるように、誰とでも柔軟に遊べるのが望ましい。そこで本研究では従来焦点が当てられてこなかった関係構築がより困難な相手に着目し、子どもの性格に応じた行動選択の仕組みが必要であると提案する。本論文ではその仕組みを実現する第一歩として、初対面の人との関係構築が困難な人見知り性格に焦点を当て、人見知りの子どもと良好な関係を築くための有効な行動を探る。

以上のように本論文では、子どもの心的状態と性格を考慮した行動決定によって友好感を創出し、どんな子どもとも長く遊べる遊び相手ロボットを実現するための設計原理を、実際の遊び相手ロボットの開発と検証を経た構成論的手法により明らかにする。本論文では、第1章にて研究背景である現代の育児問題を概説し、対子どもロボットの関連研究と比較しながら本研究の位置づけと目的を述べる。第2章では、提案する遊び相手ロボットに求められる要求仕様と子どもとの遊びを成立させる因子について議論し、実現に向けた課題を明確にする。第3章では、子どもの発達を促すことを踏まえた遊び相手ロボットの構想について述べる。第4章では課題1“長く遊び続けられること”について論じ、その解決手法とし

てのロボットの行動決定モデルを提案し，モデルの有効性を検証する．第5章では課題2“どんな子どもとも遊べること”について論じ，その解決手法として性格を考慮した仕組みを提案し，その有効性を検証する．第6章では，これまでの研究結果を踏まえ，現時点で実社会に役立つ実用的な遊び相手ロボットを示す．最後に第7章で本論文の内容をまとめる．

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の目的	1
1.2	研究の背景	2
1.2.1	家庭内育児支援の欠如	2
1.2.2	子どもの発達	3
1.3	対子どもロボットの関連研究と本研究の位置づけ	4
1.4	本論文の構成	8
第2章	遊び相手ロボットの課題と遊びの成立因子	9
2.1	遊び相手ロボット実現への課題	9
2.1.1	課題1：長く遊び続けられること	10
2.1.2	課題2：どんな子どもとも遊べること	11
2.2	子どもとロボットの遊びをとらえる軸	12
2.2.1	興味度と友好感	12
2.2.2	性格と友好感	15
2.2.3	遊びの成立と興味度，友好感，性格の関係	16
第3章	遊び相手ロボットの概要と設計方針	18
3.1	子どもの発達を促す遊びができるロボット実現への方策	18
3.2	身体性を基盤とした幅広い遊びで子どもの発達を促すロボットの構想	18
3.3	遊び相手ロボットの設計方針	19
3.3.1	長く遊び続けるために	20
3.3.2	どんな子どもとも遊ぶために	21
3.3.3	実用的な遊び相手ロボット	21

第4章	子どもの心的状態の推定に基づいた行動決定による友好感の創出	23
4.1	はじめに	23
4.2	遊び相手ロボットシステムの概要	24
4.2.1	ロボットプラットフォーム	24
4.2.2	遊びのライブラリ	25
4.3	他者の心的状態推定に基づく行動決定	27
4.3.1	他者の意図推定と行動戦略	27
4.3.2	遊び場面でのロボットと子どもの行動戦略パターン	28
4.4	実装のための行動決定モデル	30
4.4.1	遊びの観察	30
4.4.2	子どもとの遊びのモデル化	31
4.4.3	子どもの心的状態遷移に基づく行動決定モデル	32
4.4.4	心的状態（興味度）の推定	36
4.5	行動決定モデルの検証実験	39
4.5.1	実験方法	39
4.5.2	子どもの心的状態の推定	41
4.5.3	子どもの振る舞いの記録	41
4.5.4	保育者による子どもの状態の評価	41
4.5.5	実験結果	42
4.6	おわりに	49
第5章	人見知りの子どもとの友好感創出に向けた遊び行動の分析	51
5.1	はじめに	51
5.2	関係構築の難しい子どもと遊ぶために	52
5.2.1	内向的性格の子ども	52
5.2.2	性格に応じた行動選択	53
5.3	親近感を高める遊び行動	55
5.3.1	親和的遊び行動	55
5.3.2	不安緩和遊び行動	55
5.3.3	実験で用意する遊び行動	57

5.4	遊び相手ロボットシステム	59
5.4.1	遠隔操作ロボットを使った遊び行動の分析	59
5.4.2	実験で用いる遊び相手ロボット	59
5.4.3	ロボットプラットフォーム	59
5.4.4	遠隔操作システム	60
5.4.5	遊びの操作	60
5.5	1対1の遊び実験	61
5.5.1	実験条件	61
5.5.2	実験のプロトコル	62
5.5.3	性格検査とアンケート	62
5.5.4	データの記録	64
5.5.5	映像からの子どもとロボットの客観指標の算出	65
5.6	実験結果	66
5.6.1	親近感の評価指標	67
5.6.2	人見知りと親近感の関係	69
5.6.3	親近感の変化	70
5.6.4	親近感に影響した遊び行動の分析	71
5.7	考察	72
5.7.1	遊び行動の分類から見た効果	72
5.8	おわりに	75
第6章	実用的な子育て支援ロボット	77
6.1	はじめに	77
6.2	実用化の問題点	77
6.3	テレ保育ロボット ChiCaRo	79
6.3.1	テレ保育ロボットの位置づけ	79
6.3.2	テレ保育ロボット ChiCaRo	80
6.3.3	要求事項	80
6.3.4	デザイン	81
6.3.5	身体的コミュニケーション	82

6.3.6	主要機能	83
6.4	半自動子ども追跡	84
6.4.1	子ども追跡の問題	84
6.4.2	半自動子ども追跡を検証する予備実験	86
6.4.3	半自動子ども追跡の実装	90
6.4.4	色センサとサーモセンサの統合	91
6.5	システムの試用実験	91
6.5.1	試用実験の結果と考察	92
6.6	まとめ	94
第7章 結論		95
参考文献		99
発表実績		107
謝辞		114

目次

1.1	遊び相手ロボット実現の方針	7
2.1	遊びの成立と興味度, 友好感, 性格の関係	17
3.1	提案する遊び相手ロボットの構想	19
3.2	遊び相手システムの概要	19
3.3	性格に応じた行動選択の仕組み	22
4.1	子どもとロボットの遊びの例: (a) カードゲーム, (b) お絵かき, (c) 絵本読み, (d) (e) 積み木.	25
4.2	子ども一ロボット間における行動戦略: (a) 子どももロボットもレベル0, (b) 子どもはレベル0でロボットはレベル1, (c) 子どもはレベル1でロボットはレベル0*か2.	29
4.3	保育者と子どもの遊びの観察	30
4.4	子どもの遊びのモデル: 子どもの心的状態遷移と保育者の行動戦略	32
4.5	ロボット実装のための遊びにおける子どもの心的状態遷移モデル	33
4.6	顔追跡と笑顔度推定の結果の例: 四角形は検出した顔の領域, バーが顔向きのロール角, ドットが顔向きのピッチ・ヨー角を表す. 下の数値は笑顔度を表す.	37
4.7	予備実験における6歳男児の心的状態の推定結果: 実線は基準興味度, 点線は5点平滑化した推定興味度.	38
4.8	遊び状況にのみ基づく行動決定モデル	40
4.9	実験の様子: 遊び相手ロボット (左), 実験部屋の上からの映像 (中央), ロボットと遊ぶ子ども (右).	40
4.10	基準値での3状態における笑顔度の発生分布 (正規分布で近似)	44

4.11 アンケート得点の平均値：エラーバーは標準偏差. Q1～Q13の詳細は表 4.2 を参照.	45
4.12 4名の結果：(a)～(d)は基準興味度. (e)～(h)は子どもがロボットを見ている頻度および机を見ている頻度のそれぞれの移動平均. (a)(e)は心的状態遷移モデル条件の女兒, (b)(f)は状況モデル条件の女兒, (c)(g)は心的状態遷移モデル条件の男児, (d)(h)は状況モデル条件の男児. (i)は4名の視線の500秒間ずつのエントロピー.	46
5.1 実験環境 (a)LiPRO (b) 操作者 (c) 遊び部屋 (d) 遊び部屋の俯瞰映像	61
5.2 客観指標の例（親近感あり・人見知り）：上はロボットー子ども間距離，真ん中は笑顔度，下は遊び（○×ゲームとかくれんぼ）. 赤線は10秒間の平均値を表す.	67
5.3 P7親近感得点およびP21人見知り得点別の子ども人数の内訳	69
5.4 終助詞「ね」の実験での発話例	74
5.5 親近感を高める遊び行動の戦略	75
6.1 テレ保育ロボットのシステム構成図	80
6.2 3D CAD 図 (ChiCaRo の内部構成)	82
6.3 ロボット外観と各センサの位置	83
6.4 実験中の様子：(a) ロボット部屋の様子 (b) 操作画面 (c) 操作部屋の様子	86
6.5 4条件ごとのアンケート平均得点	89
6.6 4条件ごとのストレス値 (LF/HF 値) の平均得点	90
6.7 子供追跡実験の様子（上は提案するロボット，下は一般的なビデオチャットシステム.）	91
6.8 同じおもちゃを取りに行ったときの様子 (a) ロボット条件 (b) ビデオチャット条件	93

表 目 次

4.1	アンケートの例	41
4.2	ロボットや実験に対する子どもの印象評価のアンケート	42
4.3	推定興味度と基準興味度の相関	43
4.4	基準興味度と推定興味度の一致度（上段は3状態，下段は2状態）	44
5.1	用意した遊び行動の詳細と分類	57
5.2	子どもに対するアンケート	63
5.3	保護者に対するアンケート	64
5.4	操作者（保育者）に対するアンケート	65
5.5	アンケート P7 親近感得点との相関 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, 無印: 有意でない)	68
5.6	人見知り群における P7 親近感得点と子どもの振る舞いに関する客観指標との相関係数 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, 無印: 有意でない)	70
5.7	遊び行動と P7 親近感得点の相関 (*: $p < 0.05$, †: $p < 0.1$, 無印: 有意でない): C = 会話 (なし), M = 移動, R = じゃんけん, Q = ○×ゲーム, D = サイコロ遊び, S = 歌, H = かくれんぼ, Name = 名前の発話, Ne = 終助詞「ね」の発話.	71
6.1	アンケート項目	88
6.2	試用実験の結果	92

第1章 序論

1.1 研究の目的

核家族化，少子化，地域のつながりの希薄化を背景に，日本の子育て家庭を取り巻く環境には様々な問題が生じている．中でも，母親の育児負担の増大は深刻な問題の一つである．従来の日本では育児は親戚ぐるみ，地域ぐるみで行われていたが，現代の日本では，6歳未満の子どもをもつ家庭の8割が核家族となった [1]．祖父母から日常的に育児を手伝ってもらうことは一般的ではなくなり，地域のつながりも希薄になった．育児を社会全体でサポートするために，保育施設の拡充や企業による両立支援など，社会的な育児支援は整いつつある．しかし，「家事や育児は主に母親の役割」という意識が根強くあるため，夫婦の育児分業や，夫が気兼ねなく早退できる職場の雰囲気等が欧米のようには広がっておらず，家庭内では，育児の負担が依然として母親一人に偏りがちである．

多くの家庭では，母親が一人で育児と家事を同時にこなさなければならない状況にある．現在，家事の間の子守りの代替となっているのはテレビやDVDである．長時間のテレビ視聴は子どもの発達への悪影響が指摘されているが，気軽に利用できる手立てが他になく，母親は家事と育児を両立させるためにテレビに頼らざるを得ない．家庭内での育児支援の欠如と，それにとまなう子どもの発達の問題に対し，有効な解決策は存在していない．

本研究では，そういった育児問題の解決の一助として，家庭内で子どもの相手をする遊び相手ロボットを提案する．30分ほどの間ロボットが子どもの興味を引きつけ遊んでいてくれば，母親は家事や自分の時間を確保することができ，育児の負担を減らせる．本研究の最終的なゴールは，未就学児をもつ核家族の育児支援を目的とした家庭内で子どもと遊ぶロボットの実現であり，本論文では，こ

の遊び相手ロボット実現のための方法論について議論する。遊び相手ロボットを実現するための課題の明確化，およびその課題を解決するためにロボットに実装する行動決定モデルの提案と検証を，本論文の目的とする。

1.2 研究の背景

1.2.1 家庭内育児支援の欠如

母親の育児ストレスが問題視されてきた一方で，この問題に有効な支援策も明らかにされてきた。例えば，父親の育児参加や祖父母からの育児サポートは，母親の育児不安や子どもの成長に良い影響を与えるとして推奨され [2,3]，近年では，共働き世帯の増加にともない祖父母の育児サポートも増えてきている [4]。他にも，友人や専門家からのソーシャルサポートは，母親の孤独感の予防・軽減に有効であることがわかっている [2]。さらには子育て支援センターなどの社会的育児支援についても，より良い支援のあり方が議論され，まだ不十分ではあるが整いつつある [5]。

しかし，そういった育児支援は昼間だけ，週 1 日だけなどと限定的なものである。その結果，多くの家庭には，母親が一人で育児も家事もこなさなければならないという問題が取り残されている。子どもが泣いたり，後追いをしたりすれば，母親は食事を作ることも，ゆっくりトイレに行くこともままならない。特に平日の朝や夕方外出の準備や夕飯の支度で多忙な時間帯だが，外部からの支援は得られにくい。祖父母には孫育てへの参加意向をもつ人も多いが，近居や同居など条件が整わなければ頻繁な支援は難しく，融通の利くベビーシッターは高額で，短時間・気軽に使えるわけではない。

家事で手が空けられないが，子どもを見てくれる人もいない。現在，そんなときの子守りの代替策となっているのは，テレビや DVD であり，7 割以上の母親が「家事などで手が離せないときの子守りのため」に幼児にテレビを見せている [6]。2004 年に日本小児科学会は“乳幼児のテレビ・ビデオ視聴は危険です”という題の提言を出しており，文献 [7] では 2 時間以上の視聴による言語発達の遅れが指摘されている。しかし，2010 年になっても幼児の 6 割以上が一日あたりにテレビを 2

時間以上、多くは朝と夕方に視聴している [8]。つまり、母親が一人で家事をしながら子どもも見なければならない状況において、現状では有効な子育て支援が存在しないのである。

このように家庭内における育児支援が欠如している現状に対し、その一つの解決策として、本研究では家庭内で子どもの相手をする遊び相手ロボットを提案する。具体的には、母親が家事などをする30分ほどの間、子どもの興味を引きつけ遊んでいてくれるロボットである。ロボットが遊んでくれれば、さっと朝食を作ったり、夕方に息抜きの時間を持ったりと、母親は少しの間子どもから手を離すことができる。母親が病気ของときには、退屈した子どもの相手をしてもらうことも可能だ。子どもの遊び相手をするという行為は、母親が父親に強く期待する育児行動のひとつであり、父親が子どもの遊び相手をするほど母親の育児不安が低いという報告もあるほど重要な育児支援である [9]。子どもの遊び相手ができるロボットが実現すれば、有効な家庭内の育児支援策となることが期待できる。

1.2.2 子どもの発達

母親の育児支援だけでなく、子どもの育ちという側面においても、遊び相手ロボットは有効な可能性を秘めている。遊びは子どもの発達の鍵であり、幅広い遊びを経験することが、子どもの心身の発達には重要である。発達への悪影響が懸念される長時間のテレビ視聴に代わり、親の手が空かないときにロボットが子どもの遊び相手を引き受け、様々な遊びをすれば、子どもに心身の発達を促す良い刺激を与えることができると思う。また近年の子どもは、少子化によって一緒に遊ぶ友達や兄弟姉妹が減り、代わりに母親と遊ぶ機会が増えている。平日に幼児が遊ぶ相手は、現在では友達や兄弟姉妹を抜いて、母親が最も多い [8]。母親とばかり遊ぶのではなく、様々な相手と関わり社会性を身につけていくことも子どもにとっては必要である。遊び相手ロボットが様々な遊びを提案して子どもと一緒に遊ぶなら、子どもの社会性や身体性、認知能力のバランスの良い発達を促すことも可能になると考える。

以上のように、子どもと遊ぶロボットは、親の手がどうしても空かないときに、テレビのように短時間かつ気軽に子どもを見てくれ、なおかつ子どもの心身の発

達にも良い、有効な育児支援策となることが期待できる。こうした背景のもと、本研究では、未就学児をもつ核家族の育児支援のため、家庭内で子どもと遊ぶロボットの実現を最終的なゴールとする。

1.3 対子どもロボットの関連研究と本研究の位置づけ

現在、子どもを相手としたロボットの研究は様々に行われている。例えば、遊ぶという行為に焦点を当てたロボットの研究では、子どもの積み木遊びの様子から遊びの基本動作を抽出して、ロボットによる遊びの認識を実現している [10,11]。ロボットが子どもの遊び相手になるためには、そもそも子どもと実際に遊ぶ機能を有する必要がある。本研究でもロボットにいくつかの遊びを実装する。ただし本研究で目指すのは、ロボットによるおもちゃの操作や、単に子どもと遊べるロボットの実現ではない。本研究は子どもとの遊びを介したインタラクションに主眼を置くものである。

本研究で目指しているのは、子どもにとっての遊び友達のような存在のロボットである。ロボット自体が癒しや子ども同士の遊び道具となるスタンスもあるが [12,13]、本研究では子どもが友達としてのロボットと遊具を使って遊ぶことを重視する。子どもにとって遊びは心身の発達を促す重要な学びの場であり、友達と一緒に遊ぶことで、あるいは友達と道具を使って遊ぶことで、気遣い・公平、創造性、自己表出といった能力が発達するという [14]。ロボットはただ子どもの興味を引く存在ではなく、ロボット自体が遊びに主体的に参加する。そして子どもはロボットにポジティブな感情をもち、ロボットと一緒に身体やおもちゃを使って活動的に遊びながら、心身を発達させていく。これが、本研究の理想とする遊び相手ロボットの姿である。そのため本研究では、おもちゃや身体を使った遊び（身体的コミュニケーション）ができる遊び相手ロボットの構想（プラットフォームや機能）を提案する。遊び相手ロボットがおもちゃや身体を使って子どもの身体的な遊びを誘発させ、認知発達や社会性を促進するような幅広い遊びを可能とすることを目指す。

ただ、ロボットがこのような発達を促す遊びができる機能をもつだけでは不十

1.3. 対子どもロボットの関連研究と本研究の位置づけ

分である。本研究で目指すのは、幼児をもつ母親が家事などをする30分程の間、子どもと遊んでいられるロボットであり、より重要なのは、その遊びを子どもと成立させることである。

遊び相手ロボットが子どもと遊びを成立させるためには、まず、一人の子どもと長い時間遊び通せる必要がある。本ロボットに求められる課題の一つ目は子どもと“長く遊び続けられること”と定義する。しかし、こうしたロボットの報告は少ない。子どもとのインタラクションに焦点をあてたロボットには、例えば、自閉症児の遊戯療法を目的としたロボット [12, 15–17] や、ロボットの関わりによって子どもの学習を促進させる教育用ロボット [18] などがある。遊戯療法や教育を目的としたロボットでは、ロボット自体が癒しや遊ぶ（学ぶ）ための道具となっており、長い時間子どもの興味を引き続けることは難しいと推測する。また子どもからの関わりを引き出すロボットが提案されているが [19]、このロボットと子どもの交流時間は1分以内であり、遊びを持続させることには着目していない。そこで本研究では、長い時間遊ぶためには、ロボットが様々な遊びや働きかけによって子どもの興味を引きつけることが重要であるという考えのもと、ロボットの身体性も考慮した幅広い遊びのライブラリの充実をもって、この問題に対応することとする。チェス [20] や英単語学習用のお絵かきゲーム [18] など特定の遊びができるロボットは多いが、多数の遊び機能を搭載したロボットはほとんどない。本研究では、遊び相手ロボットが子どもの興味を引き付け、広く子どもの発達を促すという2つの目的から、幅広い遊びができる機能を搭載する。

長時間の遊びの継続だけでなく、長期的に継続して遊べることも、遊び相手ロボットに対する重要な要求である。ロボットが家事の間に子どもを引きつける手段となるためには、子どもがロボットと数日間だけ関わるのではなく、継続して遊び続けることが望ましい。従来、ロボットと子どもとの長期的なインタラクションの継続を目指す研究は存在するが、家庭での幼児の遊び相手に応用できるものはほとんどない。例えば、1対1で子どもとチェスをするロボットの研究では、状況に応じて発言を決定する共感モデルを提案し、長期的な遊び継続の効果を示している [20]。しかし対象としている子どもが小学生（8～9歳）であることと、チェスというルール性の高い特定の遊び状況に限定していることから、幼児の遊び相

1.3. 対子どもロボットの関連研究と本研究の位置づけ

手として応用することは難しい。また、集団の子どもを相手にしたロボットの長期的なやりとりの報告 [21,22] は存在するが、ロボットがそれぞれの子どもに合わせて行動しているわけではなく、様々な性格をもった個々の子どもと1対1で長時間あるいは長期的に遊び通せるとは限らない。そこで、本研究では子どもと1対1で長期的に遊び続けることができるロボットの実現を目指す。長期的な遊びの継続のためには、ロボットが子どもの気持ちを考慮しながら適切に振る舞い、そのやりとりを通して、子どもにロボットへの親近感といった良好な感情を抱かせることが重要であると、本研究では考える。そこで、子どもの気持ちを推定しながら行動を決定する仕組み（モデル）をもつ遊び相手ロボットを提案する。

さらに本研究では、どんな子どもとも遊べる柔軟なロボットの実現を目指す。保育者は子どもの遊びの状態に応じて働きかけを変え、遊びを成立させるのが難しい子どもでも遊びを成立させるという [23]。多少の性格の相性はあってもどんな子どもとも遊ぶのが保育のプロである。育児支援サービスを目的とした遊び相手ロボットも、保育者のように誰とでも遊べるのが望ましい。しかし、笑顔や口数の少ない子どもを打ち解けさせて遊ぶのは、人間の大人でもなかなか難しいことである。そのため、ロボットに消極的なこのような相手に対し、遊び相手ロボットに限らず現在の多くの対人口ロボットは配慮をしていない。例えば小学校でのロボットの長期的なインタラクションの実験では、ロボットと子どもが2か月間交流し友好的な関係を築いている [22]。その中で“ロボットと友達になることができそう”だとはじめに思っていた子どもはより長くコミュニケーションできると述べているが、そう思っていなかった子どもへの対応方法は検討していない。他にも、対話ロボットが道行く人の動きから対話が始まりそうな相手を見積もるという対話の開始方法の提案はあるが [24]、ロボットとインタラクションの意図がない者への積極的なアプローチは検討されていない。このように、従来の人-ロボットインタラクションに関する研究では、対話がもともと容易な相手とのコミュニケーションしか検討しておらず、ロボットに対して消極的な相手を考慮しているものはほとんどない。そこで本研究ではこのように従来焦点が当てられてこなかった関係構築がより困難な相手に着目し、相手の性格を考慮しながら行動を決定することで、そのような相手にロボットが対応することを考える。本ロボットに求

1.3. 対子どもロボットの関連研究と本研究の位置づけ

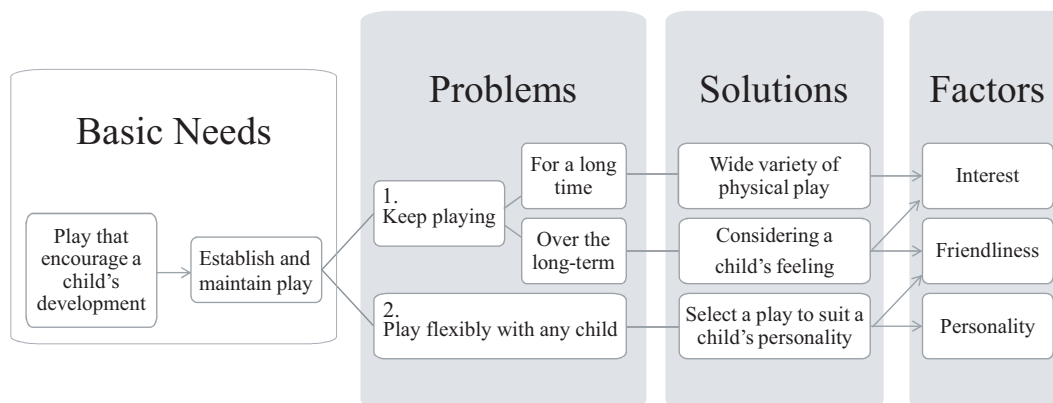


図 1.1: 遊び相手ロボット実現の方針

められる二つ目の課題は“どんな子どもとも遊べること”とする。

また、本研究では前述の研究結果を応用した実用的な遊び相手ロボットのあり方についても議論する。実際の家庭でロボットが使われることを考えたとき、安全性等を考慮して、小型の遠隔操作型ロボットが実用的であると考えられる。しかし、子どもの興味を引き続け、どんな子どもとも遊びを成立させることは、誰にでも容易にできることではない。ロボットを遠隔操作する人が子どもとの遊びを苦手としている場合もあり、人が操作したからといって必ずしも子どもと仲良く遊べるとは限らない。そこで、本研究で提案するモデルを応用し、遠隔操作者にどんな子どもとも長く遊べるよう最適な遊び行動を提案することが有効だと考える。本研究では、そのような実用的遊び相手ロボットの構想を提案する。

ここまで述べた遊び相手ロボット実現のための課題と解決策を、図 1.1 にまとめる。遊び相手ロボットの基本的要求は、子どもの発達を促す遊びができ、それを成立させられることである。子どもと遊びを成立させるためには、長時間かつ長期的に遊べることと、どんな子どもとも遊べることが課題であり、それぞれに対して、身体性を考慮した幅広い遊びのライブラリの充実、子どもの気持ちを考慮しながら遊ぶ仕組み（モデル）、子どもの性格に合った遊びを選ぶ仕組み、によって対応する。

以上のように本論文では、子どもの心的過程や性格についてのモデルをもって子どもに合わせて行動し、身体やおもちゃを使い、長時間かつ長期的に子どもと

遊べる，親和的遊び相手ロボットの設計の方法論について議論する。

1.4 本論文の構成

本論文では，第1章にて研究背景である現代の育児問題を概説し，対子どもロボットの関連研究と比較しながら本研究の位置づけと目的を述べる。第2章で，提案する遊び相手ロボットに求められる要求仕様と子どもとの遊びを成立させる因子について議論し，実現に向けた課題を明確にする。第3章では，子どもの発達を促すことを踏まえた遊び相手ロボットの構想について述べる。第4章では課題1“長く遊び続けられること”について論じ，その解決手法としてのロボットの行動決定モデルを提案し，モデルの有効性を検証する。第5章では課題2“どんな子どもとも遊べること”について論じ，その解決手法として性格を考慮した仕組みを提案し，その有効性を検証する。第6章では，これまでの研究結果を踏まえ，現時点で実社会に役立つ実用的な遊び相手ロボットについて述べる。最後に第7章で本論文の内容をまとめる。

第2章 遊び相手ロボットの課題と遊びの成立因子

2.1 遊び相手ロボット実現への課題

本研究の最終的なゴールは、幼児を育てる核家族世帯の育児支援を目的とした、家庭内で子どもと遊べるロボットの実現である。具体的には、母親が家事などをする30分ほどの間、子どもの興味を引きつけ遊んでいてくれるロボットである。本節ではこの遊び相手ロボットに求められる課題を明確にする。

遊び相手ロボットに対する基本的な要求は、子どもの発達を促す遊びができることである。遊びは子どもの発達の鍵であり、おもちゃや身体を使った幅広い遊びを行なうことで心身の発達が促される。長時間視聴されているテレビに代わり、子どもの身体的な活動を誘発させるためには、おもちゃや身体を使った標準的な遊びを幅広く行えるようにロボットを設計する必要がある。

さらに重要な要求事項は、遊び相手ロボットが発達を促す遊びができる機能を備えるだけでなく、そのような遊びを子どもと成立させられることである。本研究では、遊び相手ロボットが子どもと遊びを成立させるために考えるべき問題として、以下の2つの課題を検討する。

1. 長く遊び続けられること。
2. どんな子どもとも遊べること。

なお、遊びには様々な学術的定義がなされているが、本研究では「かくれんぼ」「じゃんけん」といった、幼児期の子どもがよく行い、一般的に名称が知られている活動を遊びと呼ぶこととする。

2.1.1 課題 1：長く遊び続けられること

遊び相手ロボットへ求められる重要な要求の一つは、子どもと長く遊び続けられることである。この“長く遊ぶ”という要求は二つの問題に分割できる。それは 30 分といった単位の（1）長時間の遊びの持続と、数か月といった単位の（2）長期的な遊びの継続である。

長時間の遊びの持続

長時間の遊びの持続という課題は、母親が家事をする間子どもが母親の方に泣きつきに行かないためにロボットに課されるものである。ロボットが子どもの気を引き続ける時間としては、食事の支度といった家事ができる 30 分程度が適切だと考える。一般的に幼児が集中できる時間は短く、長時間遊び通すためには、子どもが遊びやロボットに対する興味を持続できるかどうかが鍵となる。つまり、様々な遊びや働きかけによって子どもの関心を引き出して維持し、飽きさせないことが重要である。実際、人間の大人が子どもの遊び相手をする際は、適宜会話などの働きかけをしたり、異なる遊びへ移行したりと、刺激を与えることによって子どもの遊びへの関心を引き続けようと試みる。こうした子どもの興味に関する問題を、本論文では“興味度”の軸とよぶ。長時間の遊びの持続は、子どもの興味度を維持するという問題に置き換えることができる。と考える。

長期的な遊びの継続

育児支援を目的としたロボットとして、子どもと長期に渡って遊びを継続することもまた重要である。しかしロボットと子どもの長期的な遊びの継続は、前述の興味度だけでは困難である。子どもが飽きない程度の十分な数の遊びを用意したとしても、遊びの新規性だけでロボットと子どもの長期的な関係を維持することは難しい。淡々と遊びを遂行するロボットは、手足のついたゲーム機と違わない。子どもの興味を長時間維持する実績のあるコンピュータゲームを考えたとき、それは社会性を高めるような質の高い遊びの提供という筆者の目標とは異なる。これは従来の遊び相手ロボットの設計における本質的な課題であろう。そこ

で本論文では、主体的な存在としてのロボットが子どもと長く遊び続けるためには、子どもとロボットの関係性を評価する必要があると考える。子どもの相手をすすめる際に大人は、単に異なる遊びへの移行や働きかけによって刺激を与えるだけでなく、表情や振る舞いから子どもの心の状態を推定して効果的な行動を選択する。このやりとりを通して、子どもは遊びへの興味を維持すると同時に、相手への友好的な印象をもつことで遊びの心的姿勢を継続させる。本論文では、この過程で子どもがもつであろう相手への好意的な関心を、“友好感 (friendliness)” と呼ぶ。ロボットに友好感をもつということは、ロボットをある種のエージェント (行為主体性) をもつ遊び相手として認めることであり、「ロボットと友達になった」、「ロボットとまた遊びたい」といった対生命的な認識につながる。友好感は、長期的視点から、道具としてのロボットに飽きることなく、相手として一緒に遊べるかどうかを規定する重要な要素であると考えられる。友好感をいかに高めるかが、長期的な遊びの継続を実現する鍵になると本研究では想定する。

2.1.2 課題 2：どんな子どもとも遊べること

保育者はどんな子どもとも遊びを成立させる。多少の相性があっても、多様な性格の子どもと遊び、等しく育児支援サービスを提供するのが保育のプロである。育児支援を目的とした本ロボットも、保育者と同様、コミュニケーション相手を選ばず、誰とでも柔軟に遊べるのが望ましい。幼児教育の現場では子どもの多様性を認め、一人一人に応じることが目指されている [25]。このような教育・保育の観点からも、従来の対人口ロボットのように、ロボットとコミュニケーションをとりやすい子どもだけを対象にすることは好ましくない。

しかし、笑顔や口数の少ない子どもを打ち解けさせて遊ぶのは、人間の大人にとっても容易なことではない。内向的な子どもはなかなか打ち解けないといったように、大人と子どもが初対面で遊ぶ場合に子どもが楽しんで遊べるかどうかは、子どもの個人差に因るところが大きい。一方、保育者は子どもの遊びの状態に応じて働きかけを変え、遊びを成立させるのが難しい子どもでも遊びを成立させるという [23]。子どもの状態に応じて働きかけを選択するのであれば、課題 1 “長く遊び続けられること” で考えたのと同じく、“子どもの心の状態を推定して効果

的な行動をとる”ことを行えば良いように思える。しかし実際はこれだけでは不十分であり、事実、課題1の解決策の検証で子どもと遊んだロボットは、3割の子どもと遊び通すことができなかった。このロボットには個々の子どもに柔軟に対応できる仕組みとして、刻々と変わる子どもの心的状態（興味や飽きの度合い）を推定しながら行動を決定する仕組みを用意した。しかしその3割の子どもは、飽きてしまったというわけではなく、恥ずかしい・怖いと言って遊びを中断したり、ロボットに近づけなかったりした。そこから浮き彫りになったのは、モデルが個人差に対応できていなかったという問題である。例えば“盛大にほめる”という行動が社交的な子どもの心的状態を“嬉しい”に変化させる効果があったとしても、内気な子どもには効果が薄かったり、逆に身構えさせてしまったりといったことが起きているのではないか。そういったことが続けば、子どもは遊ぶために必要な最低限の友好感をも相手に抱くことができず、1回の遊びも耐えられないと想像する。プロの保育者はこのような行動と性格のバイアス効果の対応関係（モデル）を多く熟知しているため、様々な子どもと遊びを成立させられるのではないか。本研究ではこのように、性格が行動の価値を変える変調器となっており、同じ行動でも個々の性格によって心的状態への効果が異なると考える。ロボットがどんな子どもとも遊びを成立させるためには、多様な子どもの性格とそこから生じる心的状態変化の特性を把握し、その上で最適な行動を選択していくことが必要だと考える。特に、子どもからロボットへの友好感といったポジティブな感情を引き出す行動を選ぶことができれば、内気な子どもであっても、最終的には良好な関係を築いて長期的に遊べる可能性がある。様々な子どもと遊びを成立させるには、子どもの性格を考慮した上で友好感を維持する方法の模索が課題である。

2.2 子どもとロボットの遊びをとらえる軸

2.2.1 興味度と友好感

前節で述べたように、遊び相手ロボットが子どもとできるだけ長く遊び続けるためには、興味度と友好度という2つの概念を考慮しなければならない。ここでは子どもとロボットの遊びをこれらの2軸をとらえることの妥当性について考察

する。それと同時に、興味度と友好感が何であるか、どのような影響をもたらすかについて掘り下げて考える。

Leaversらは、保育における遊びの質をとらえる軸として幼児の“夢中度”と“安心度”という尺度を考案している [26]。安心度は“子どもの安心感や居場所感”，夢中度は“子どもの遊びへの集中や没頭”であり，遊びの質を評価する上でこの2つの観点を探ることが大切であるという。Leaversらの尺度は2者間の遊びを評価するものではないが，没頭度は本研究の興味度，安心感は友好感に相当すると考えられる。Leaversらによれば夢中度が高いとき，子どもは遊びにのめり込み，満足度も高くなるという。つまり，子どもの興味度（夢中度）の観点から遊びの質を考えたとき，子どもが単に遊びに興味をもっていればいいのではなく，満足感を得られるほど深く遊びに集中することが大切である。このことから，ロボットが次々と新しい遊びや働きかけをするだけでは質の高い遊びを提供できないことが推測できる。質の高い遊びを提供するためには，子どもの心的状態（遊びへの興味）を押し量り，例えば集中を妨害しないといった様に，心的状態に応じてロボットが適切に行動を選択することが重要である。

また高橋らは，子どもとロボットの関係を新奇性と親近性という2つの軸でとらえることを提案している [27]。新奇性と親近性は，発達心理学において子どもの関心を惹きつける要因として知られ，新奇性のある対象とは珍しい対象，親近性は慣れ親しんで愛着や安心を感じる対象を指すという。新奇性は繰り返し接触することで短期的に減衰してしまうため，新奇性だけでは子どもはロボットを珍しいモノと捉え，最初は積極的にアプローチするがすぐに飽きてしまい，何らかの人格的な行動をする他者としての適切な関係を築くことはできない。一方で親近性は繰り返し接触することで強化され，長期的に持続するため，親近性に強く影響される子どもは，最初はロボットを“正体不明の他者”と見て近寄ってこないが，他者が自分と遊んでくれる存在であることを時間をかけて理解した後は，継続的に関わりを持ちはじめ，触れ合う時間が終わった時点ではロボットからの友達になってほしいという願いに反応した（友達になれた）。遊び相手という観点では興味度は新奇性，友好感は親近性に対応し，興味度は新奇性と同様に短期的に移り変わる性質をもった指標，友好感は親近性と同様に長期的に蓄積する性

質をもった指標であると考えられる。さらに高橋らは、ロボットに対する興味の質の変化（新奇性なのか親近性なのか）を距離と顔方向で定量化できる可能性を示唆している。この結果は極めて興味深いのが、高橋らはこれらを分離して子どもの興味を定量化することに主眼を置き、いかに子どものロボットに対する親近性（友好感）を高めるかについては検討していない。

ここまで考えると、子どもと長く遊び続けることは一見簡単なように見えて実はコミュニケーションの本質を含む難しい問題であることがわかる。本研究では、子どもの心的状態を押し量った行動による友好感の創出および維持が、ロボットと子どもの遊び成立や継続の鍵になると考える。

長期的なインタラクションの継続や親近感の創出を目的として、心的状態の推定に基づく行動決定を検討する研究は、近年いくつか行われている。例えば滝らは、ロボットに人間の情動を推定させ、人間の情動と同一または対称な Joy, Anger, Sadness, Relaxation を基本とする混合情動を表現させることで、ロボットの対人親和性が高くなったと報告している [28]。Leite らは、ロボットが子どもと長期的に継続してチェスをするために、子どもの表情や顔向きから認識した子どもの感情とゲーム状況に応じて発言や動きを決定する共感モデルを提案した [20]。このモデルを適用した結果、子どもによる社会的存在感、没頭度、社会的支援の評価が 5 週間維持されたことを示している。他にも心的状態の推定方法として身体の姿勢や動きからの没頭度の推定 [29] などがある。やはりロボットと人との長期的なインタラクションを目指すとき、心的状態推定や親近性の創出はその鍵になるのだと推測する。しかしこれらは全て幼児を対象としているわけではなく、これらと同様の手法で小さな子どもと遊び続けるのは難しい。幼児との遊びにおいて、相手の友好感を高める要因については、従来十分な議論があるわけではない。

幼児との遊び場面における友好感とは何か。心理学的には Familiarity は“熟知性（対象への馴染みの度合い）”とされる。しかし遊び相手としての適切さと、相手をよく知っていることはやや異なる。子どもから見た遊び相手とは、共に何かをすると自分が楽しくなる他者、あるいは自分を楽しくさせようとする姿勢を持つ他者と仮定する。経験的に子どもは遊んでくれる友達や大人が友好感をもって共に遊ぶに足る他者であることを知っている。子どもは、遊びの前あるいは初期に、

他者が友好感をもって共に遊ぶべき対象であるかどうかを他者の行動から評定する。そして遊びの相手であると判断した場合には、遊ぶ行動の姿勢をもって相手に対峙するようになると考えられる。それは同時に、高橋らの親近性で指摘されているような長期的持続の性質あるいは蓄積の性質をもつ、「またその相手と遊びたい」という長期的な遊び継続への心的姿勢にもつながるはずである。また、相手が遊ぶべき対象であるかどうか評定するために子どもが用いている指標は、他者の心的姿勢を表わしつつ観測可能な表情、発話、姿勢、行為などであると考えられる。友好感とは、子どもがこれらの指標からロボットを自身の知っている遊び相手（例えば保育者）と同類であると認識することで発生し、子どもの遊びへの積極的な心の姿勢を作り出すと考える。その認識を生み出すためには、子どもの友好感を維持する子どもの心的状態推定に基づく行動決定、それも現実の遊び相手の行動をある程度再現する行動決定モデルが必要である。

2.2.2 性格と友好感

子どもの心的状態推定に基づくロボットの行動決定が遊びの継続に重要である一方で、どんな子どもに対しても遊びを成立させるには、さらに性格という観点を考慮に加えなければならない。高橋らは子どものロボットに対するとらえ方の違いとして新奇性と親近性の度合いを指摘しているが、その度合いの差があった子ども間でロボット側の条件に何も変化は加えていない [27]。新奇性と親近性の強さの違いを生み出した要因は、子ども側のとらえ方の特性、すなわち性格によるものと考えられる。この結果が示すのは、子ども側の性格によってもロボットとの関係性が変化するということである。遊びを成立および継続させるための親近感（友好感）の創出には、子どもの性格もまた重要な因子となる。

保育者が遊びの成立を援助する事例においても、子どもの性格の重要性がわかる。飯島は、遊びの成立が難しい子への保育者の援助として、次のような事例を挙げている。自分の要求を言葉で伝えることに難しさをもつために、他児とのやりとりが希薄な子どもに対して、保育者はその子どもに紙飛行機を飛ばすことを提案し、他児と一緒に紙飛行機を飛ばして遊ばせることに成功した [23]。この例のように、保育者は即時的な心的状態推定からの行動判断だけでなく、子どもの

性格を把握した上で援助を行っている。その子どもがなぜ他児との遊びが希薄なのかを、即時的な子どもの振る舞いから得られる情報（すなわちその瞬間瞬間の心的状態）だけで判断することは難しい。子どもの普段からの特性や性格を知り、それに合わせた行動を選択しなければ、この事例のような遊びは成り立たないと推測する。

保育者が子どもの性格をどのくらいの細かさで分類し、どのくらいの数の行動決定モデルを持って行動しているかは、今後の調査によって明らかにする必要がある。ただ脳科学の知見によれば、人間は他者を、外向的かそうでないか、同調性が高いかそうでないかの $2 \times 2 = 4$ パターンでとらえているという [30]。そのため、子どもの性格を外向性や同調性によって 4 カテゴリー程度に分類することは、遊びを成立させる戦略を考える際にも現実的ではないかと筆者は考える。この 4 カテゴリーに基づいて考えるならば、従来の人対ロボットインタラクションで交流が成立したのは外向性あるいは同調性が高い人々であり、交流が難しかったのは、外向性や同調性の低い人々だったのではないかと推測する。本研究で焦点を当てるのは、このような内向的、低同調性といった関係構築の困難な性格の人といかに友好感を高めるか、という問題である。

2.2.3 遊びの成立と興味度、友好感、性格の関係

以上で述べたように、興味度と友好感と性格は、ロボットと子どもの遊びの成立因子であると考えている。その関係性を図 2.1 にまとめる。まず、図 2.1 (a) で興味度と友好感と遊びの成立との関係を説明する。子どもの興味度（縦軸）は短期的に移り変わる性質をもっており、興味度が高ければその後もロボットとの遊びが持続し、興味度が低ければ短時間で遊びが終了する。ただし、これは子どもがロボットに対して一定以上の友好感（横軸）を抱いていた場合に限定される。友好感が低いという状況は、子どもがロボットと一緒に遊べるだけの最低限の友好感を抱けていない状態であり、遊び自体が成立しない。反対に、子どもに高い友好感を抱かせることができれば、30 分の遊びが終わった後でも、また次回もロボットと遊びたいと思ってもらえ、長期的に遊びを継続することができる。これは、友好感が長期的に蓄積する性質をもつためである。さらに、子どもの個々の性格が、

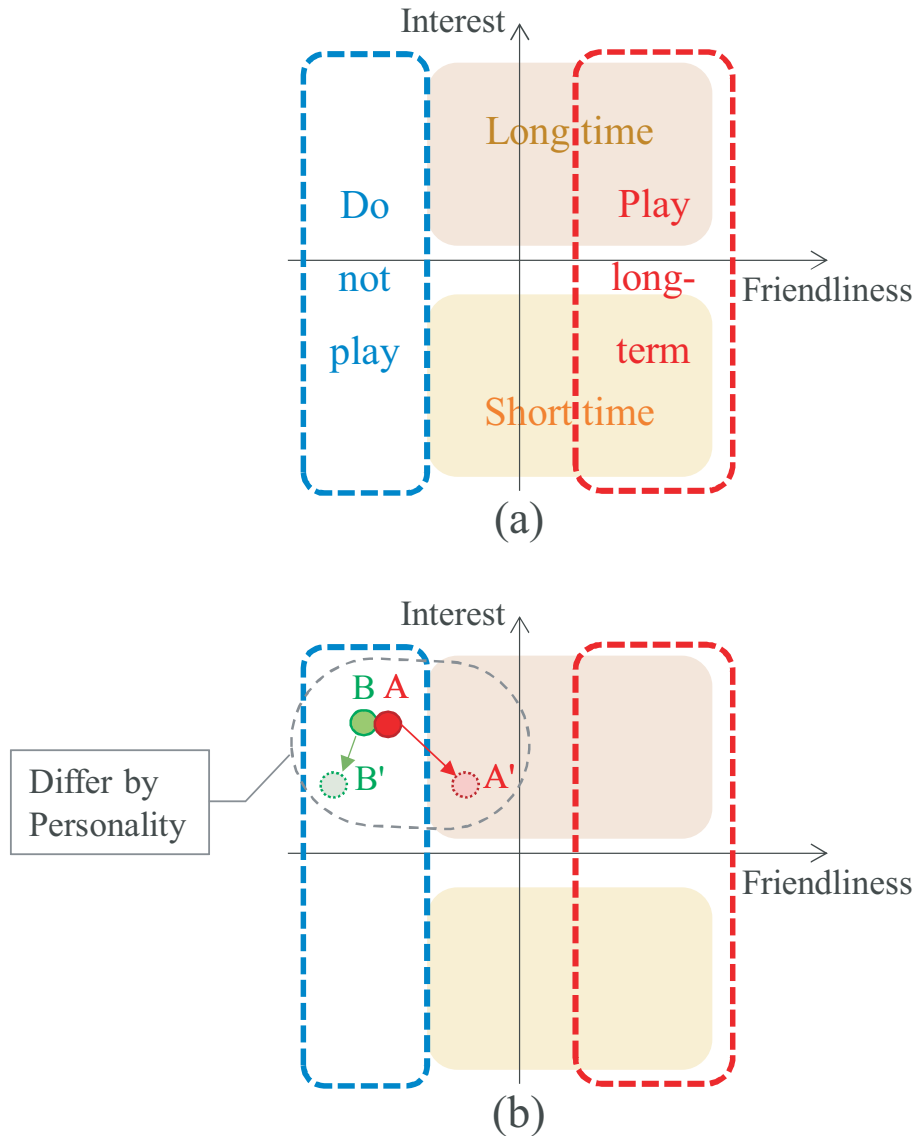


図 2.1: 遊びの成立と興味度，友好感，性格の関係

友好感の変化の違いを生じさせる。例えば，異なった性格をもった子ども A と子ども B の初期状態が図 2.1 (b) の A および B であったとする。二人の子どもに，ロボットが一定時間ある同じ遊びを続けたとき，興味度は二人とも同じように下がる（飽きる）が，友好感に関しては，A は上がり，B は下がるといったことが起きる（図 2.1 (b) の A' および B'）。

第3章 遊び相手ロボットの概要と設計方針

3.1 子どもの発達を促す遊びができるロボット実現への方策

2章で、遊び相手ロボットに対する基本的要求は子どもの発達を促す遊びができることだと述べた。遊びは子どもの発達の鍵である。Brownらの分類によれば、遊びの基本パターンは“Body and movement play”（例：手遊びやかくれんぼ）や“Object play”（例：積み木）など7つあり、この全てが子どもの発達に重要であるという [31]。また、岩崎らの調査によれば、遊びのバランスがとれていることは、自制力がある、温和であるといった子どもの精神的安定と相関があることがわかっている [32]。そこで本研究では、遊び相手ロボットが子どもに幅広い遊びを経験させることで、バランスの良い子どもの発達が促せると考えた。また、友達と一緒におもちゃや身体を使って遊ぶことは、子どもの社会性や創造性の発達を促進するといわれている [14]。そこで遊び相手ロボットは、子どもと一緒に様々な遊びを行い、子どもの身体的な活動を誘発させる、おもちゃや身体を使った標準的な幅広い遊びができるように設計されるべきだと考えた。

3.2 身体性を基盤とした幅広い遊びで子どもの発達を促すロボットの構想

ロボットはそれ自体が遊びの道具となるのではなく、図3.1に示すように、おもちゃや身体を使った複数の遊びや行動を切り替えながら、インタラクティブに遊

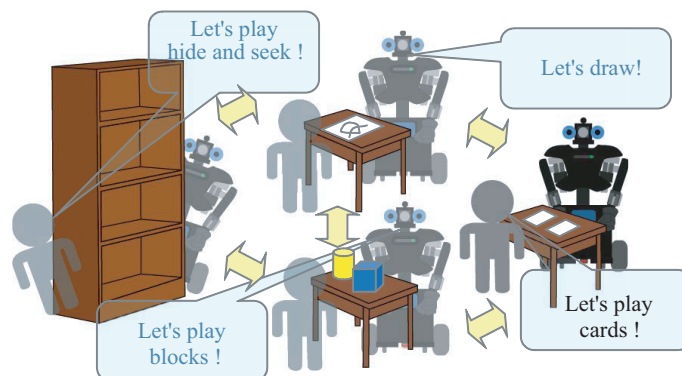


図 3.1: 提案する遊び相手ロボットの構想

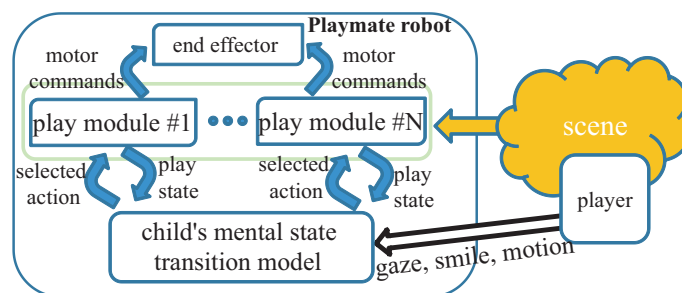


図 3.2: 遊び相手システムの概要

ぶ。ロボットには遊びごとのモジュールを実装しておき、遊びを替える際にはその遊びモジュールを切り替える。遊びの種類は屋内遊びを基本とするが、座って行う遊びだけでなく、かくれんぼや手遊びなどの子どもの身体的活動を促す遊びも用意すべきである。ロボットにはそのような身体的遊びができる体、手、移動機構といった身体機構を搭載する。子どもが幅広く遊びを経験するために、ロボットが行える遊びには Brown の遊びのパターン [31] をできるだけ網羅するようなバランスのとれた多数の遊びを用意する [33]。

3.3 遊び相手ロボットの設計方針

提案する遊び相手システムの対象年齢は、5歳以上とする。Parten の社会的遊びの発達段階で見ると、子どもが他者と意図的に一緒に遊ぶ“協同遊び”が多く観察

されるのは5,6歳頃である [34]. その前段階の“平行遊び”では, 他者のそばで同様の遊びをしても一緒には遊ばない. 並行遊びの段階にある子どもとの遊びでは, 協同遊びをする子どもとは異なるインタラクションデザインが必要である. 例えば, ロボット自身が一人で遊ぶ機能を備えたり, 友だちとしてではなく養育者や保育者のような存在として振る舞う必要がある. 本研究では, 子どもと一緒に遊ぶことで発達を促すことを目指しているため, 本論文での遊び相手ロボットの対象年齢は協同遊びがみられる5歳以上と設定する.

3.3.1 長く遊び続けるために

30分といった長時間遊びを持続させるには, 様々な働きかけで子どもの関心を引き続ける必要がある. ロボットは, 幅広い身体的遊びのライブラリをもち, それを切り替えることで子どもの興味度を維持し, 長時間遊び続ける. 一方, 数か月といった長期的な遊びの継続には, 子どもの気持ちを思いやった行動をとり, そのやりとりを通して子どもにロボットへの友好感をもたせることが必要だと考える. 子どもの相手のエキスパートである保育者は, 遊びの過程で子どもの集中・飽きといった心的状態を推定し, 子どもの興味を維持する働きかけを行なっている (これは後の第4章の保育者の観察によって明らかになる). 子どもはそれを知っていて, そのように振る舞う他者は共に遊ぶべき相手と認識して友好感を高め, 協調的な遊びの姿勢と行動を継続していく. このような遊び相手同士の心的過程の相互作用があつてこそ, 長期的な遊びが成立すると仮定する. そこでロボットには, このような保育者の行動を模擬した, 子どもの心的状態を考慮した行動決定の仕組みを搭載する. 図3.2に示すように, システムは子どもの心的状態に合わせて, 遊びモジュールの切り替えや, ほめる・競うといった行動戦略を選択する. 行動戦略を決める因子となる子どもの心的状態 (例えば飽きなど) は, 子どもの視線, 笑顔, 動きなどから推定する.

以上のように, 本論文では, 子どもと長く遊ぶという課題を解決するにあたり, 興味度と友好感の二つの軸を意識し, 前者についてはロボットの身体性も考慮した幅広い遊びのライブラリの充実で, 後者については保育者の対子ども行動のモデルを構築して子どもに友好感を持たせる方式の開発で, 対応していく. ロボッ

ト技術としてはどちらもチャレンジであるが、とくに後者については目的とする機能が実現したことを確認する子どもの行動指標の探索を目指して予備的な遊び実験を行い、友好度の指標となりうるロボット—子どもの相互作用の指標の候補を示すこととする。子どもはロボットからの働きかけをうけて遊び相手にふさわしいという友好感を持ち、結果としてロボットと子どもの友好的な遊びが長期的に成立する。このような過程が実現可能であるか試みることで、さらにそのための子どもの友好感の変化を評価する指標を開拓することが本論文の第 4 章の目的である。

3.3.2 どんな子どもとも遊ぶために

どんな子どもとも遊べるよう、本ロボットシステムは性格に応じた行動選択をする。子どもの性格とそこから生じる心的状態変化の特性を把握し、その上で最適な行動を選択する。特に本研究では従来焦点が当てられてこなかった関係構築がより困難な相手の性格に着目し、友好感といったポジティブな感情を子どもから引き出す行動を選択することで、関係構築の難しい子どもとも最終的には良好な関係を築き、長期的に遊べると考える。内向的な子どもの親近感を上げるのに有効な遊び行動を既知としたとき、ロボットは子どもが内向的であるかを推定し(図 3.3 a)、その性格に適した有効な行動をとることで子どもの親近感を上げ(図 3.3 b)、内向的な子どもと良好な関係を築く。ロボットに対して消極的な性格をもつ子どもとの遊びの成立に効果的な行動を探ることが、本論文の第 5 章の目的である。

3.3.3 実用的な遊び相手ロボット

上記の自律の遊び相手ロボットの研究で得られた知見をもとに、現時点で実現可能な実用的な子育て支援ロボットのあり方についても本論文では考えたい。実際の家庭でロボットが使われることを考えた場合、より多くの種類の遊びができることや、人間に近い身体性をもったロボットと身体を使って遊べることよりも、安全性が第一に重要となる。安全性を考慮すれば、小型の遠隔操作型ロボットが

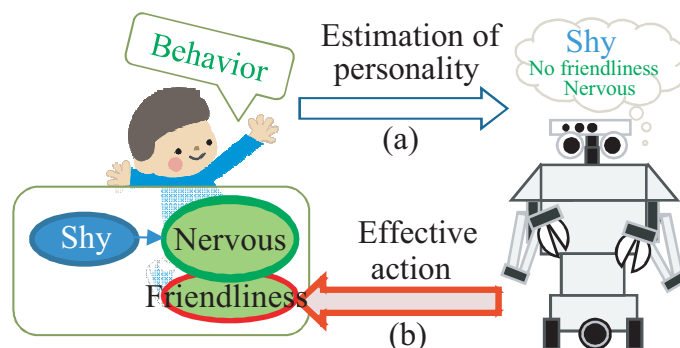


図 3.3: 性格に応じた行動選択の仕組み

実際の家庭に適した遊び相手ロボットであると考えられる。ただし、人が操作すれば必ず子どもと仲良くできるというわけでもない。ロボットを遠隔操作する人が子どもとの遊びを苦手としている場合もあり、前節までで述べたようなどんな子どもとも長く遊ぶための仕組みが、遠隔操作型の場合にも有用である。実用的な子育て支援ロボットについては、第6章で詳しく述べる。

第4章 子どもの心的状態の推定に基づいた行動決定による友好感の創出

4.1 はじめに

本章では、課題1：“長く遊び続けられること”に焦点を当てて、その解決策を議論する。本研究で提案する子どもと長く遊び続けられる遊び相手ロボット実現の方法論は、次の基本概念に基づく。“子どもはロボットからの働きかけをうけて遊び相手にふさわしいという友好感を持ち、結果としてロボットと子どもの友好的な遊びが長期的に成立する”。本章の目的は、このような過程が実現可能であるか試みることで、さらにそのための子どもの友好感の変化を評価する指標を開拓することである。それらが可能であれば、身体性を生かしておもちゃや身体を使って子どもと長く遊びつつ、その子の社会性まで評価できる、レベルの高い社会的能力を持つ遊び相手ロボットへの道が開けると考える。

そこで本研究では、ロボットが子どもと長く遊ぶために、子どもの遊びへの興味度とロボットへの友好感を維持する人間類似の行動決定モデルが必要であると提案する。そのような行動決定モデルの実現には、相手の心的状態の推定と推定結果に基づく行動決定、それも現実の保育者と子どもの遊び観察に基づいて現実の遊び相手の行動をある程度再現できる行動決定のモデルが必要と考える。本章ではまず、保育者と子どもの遊びを観察し、子どもの心的状態の変化に基づいた保育者の行動戦略を表現する“子どもの心的状態遷移モデル”を構築した。この提案モデルを実装したロボットは、保育者の行動戦略を模擬した子どもの心的状態推定に基づく行動をとることができる。次に、提案モデルを実装したロボットと、

遊びの状況のみに基づいて行動決定する状況モデルを実装したロボットを用意し、子どもの遊び実験を実施した。本章ではこの実験の結果を通して、提案モデルのロボットと遊んだ方が状況モデルのロボットと遊んだ場合より子どもの友好感が良好に保たれることを検証し、さらにその友好感が現れる行動指標を開拓した結果を報告する。

本章は以下、次のように構成されている。まず4.2節で、提案する遊び相手ロボットシステムのハードウェアと機能について述べる。4.3節では、他者モデルを参照しながら行動探索・決定する行動決定の概念について述べ、4.4節で、これに基づいた子どもと長く遊び続けるためのロボットの行動決定手法を提案する。具体的には、保育者と子どもの遊び観察を基に、ロボットに実装可能な行動決定モデルの検討と構築を行う。そして4.5節では、実際に実装した遊び相手ロボットと子どもとの遊びの試行から得られた、子どもの友好感を評価する指標について議論し、最後に4.6節で本章をまとめる。

4.2 遊び相手ロボットシステムの概要

4.2.1 ロボットプラットフォーム

本章の実験ではロボットプラットフォームとして“DiGORO”を使用する(図4.1)。DiGOROは、家庭内で家事などを行うことを目的として作られた家庭用サービスロボットである。6自由度の双腕アームと1自由度の腰、3本指のハンドを有し、その身体性を生かして、身体やおもちゃを使った高度な遊びが実現できる。頭部にCCDカメラと赤外線TOFカメラを搭載し[35]、人物や物体のオンライン学習と認識ができる[36]。ベースは全方位台車であり、オンラインSLAMにより屋内環境を自由に移動できる。

DiGOROには、RoboCup@Homeで規定されている全てのタスク[37]がすでに実装されている。これらのタスクはロボットの家庭でのサービスを前提としたもので、指定された物体を把持してユーザに手渡すタスクや、店で買い物をするタスクなどがある。これらのタスクの機能要素を再利用することで、技術的に難しい遊びでも比較的容易に実装できる。例えば「かくれんぼ」遊びの実装では、DiGORO

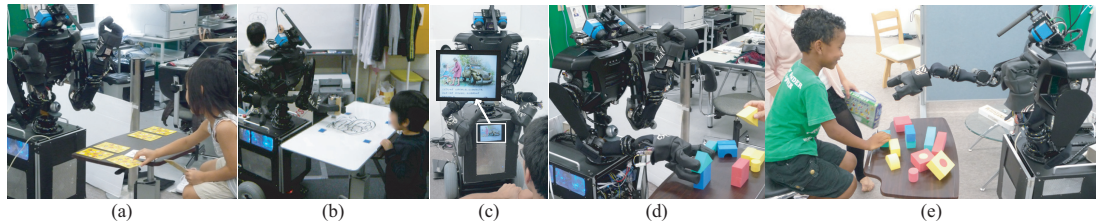


図 4.1: 子どもとロボットの遊びの例：(a) カードゲーム, (b) お絵かき, (c) 絵本読み, (d) (e) 積み木.

にすでに実装されている RoboCup@Home の who is who? タスクから, SLAM による室内の地図作成, 自律移動, 顔・上半身検出を利用した人の検出, 個人認証の機能を再利用できる. これに遊びに必要な機能を少し加えれば, かくれんぼの鬼を実装することが可能である.

4.2.2 遊びのライブラリ

遊び相手ロボットには, 子どもの発達に重要といわれる遊びをモジュールとして実装することを考える [33]. Brown らによれば, 遊びの基本要素は (1) Attunement play : 遊びの基本となるアイコンタクトなど, (2) Body and movement play : 手遊びやかくれんぼなど, (3) Object play : 積み木など, (4) Social play : 会話など, (5) Imaginative and pretend play : ごっこ遊びなど, (6) Storytelling-Narrative play : 絵本の読み聞かせなど, (7) Transformative-Integrative and creative play : 遊びの発展, の 7 つであり, この全てが子どもの発達に重要であるという [31]. 遊び相手ロボットには, これらの 7 要素を網羅するよう, 10 種類の遊びモジュールの搭載を想定する. 10 種類の遊びは, (1) 対話, (2) カードゲーム, (3) お絵描き [38], (4) じゃんけん, (5) 絵本読み, (6) かくれんぼ, (7) 手遊び, (8) 積み木, (9) ごっこ遊び, (10) 新しい遊びの学習, である. 今回ロボットには, 対話, カードゲーム, お絵描き, じゃんけん, 絵本読み, 積み木, を実装した. ただし, 実験時間やモジュールの動作の安定性を考慮して, 実際の実験ではカードゲームとじゃんけんのみ使用した.

カードゲームとしては, トランプの神経衰弱を実装した. 図 4.1 (a) は実際に

ロボットと女兒が遊んでいる様子である。このモジュールは、トランプの認識から選択まで全自動で行うことができる。めくるカードをロボットが選ぶ際、勝つためにカードを選ぶこともできるが、大人が子どもに対して手加減をするように、意図的に間違えることもできる。ただ、現状のロボットハンドではテーブル上のカードを掴むことは難しいため、ロボットは動かしたいカードを指差し、相手または補助者がそのカードを裏返す。

じゃんけんでは、ロボットが音声合成の発話と同時に、あらかじめ関節角度で定義したグー・チョキ・パーの手の形をランダムに出す。ロボットが「最初はグー。じゃん、けん」と掛け声を発話することで、子どもがロボットにタイミングを合わせて手を出す。またこのモジュールでは通常速度のじゃんけんの他に、子どもが好む高速じゃんけんをすることもできる。

絵本読みでは、ロボットの下半身にあるディスプレイまたはハンドに持った iPad に、あらかじめ登録した絵本の画面を1ページずつ表示しながら、本文を読み上げる(図4.1(c))。現段階ではロボットが一方向的に絵本を読むだけだが、将来的には、子どもと交互に読むなどインタラクティブな遊びにすることを考えている。

積み木については現状では、ロボットがブロックを把持して他のブロックの上に乗せることで、事前に定義した家などの簡単な形状を作ることができる(図4.1(d)(e))。ブロックの認識には色情報を用い、奥行情報からその姿勢を認識する。ロボットは、子どもとインタラクティブに積み木を組み立てることはできないが、予備実験では子どもはロボットに車の作り方を教えようとするなど、盛んにインタラクションを行おうとしていた。現状ではこの働きかけにロボットが適切に回答できないため、この遊び自体はあまり長くは続かない。しかし子どもの働きかけを活かして子どもがロボットに教える状況を作るとは、遊びの質の向上につながると期待される。

かくれんぼやごっこ遊び、新しい遊びの学習については、現状では実装されていないが、例えばかくれんぼの鬼であれば、前述の RoboCup@Home のタスクを流用することで実装できよう。また、文献 [39] では遊びの創発について議論しており、将来的にはこうした手法の応用も必要であろう。

これらの遊びは対象と想定した6歳児にとっては標準的な遊びである。調査に

よると遊びのバランスが取れていることは安定した発達と相関があるとされている [32]. 遊びロボットの設計方針として, このような普通の遊びをロボット-子どもの協調的な遊び場面として実現して, 子どもにバランスよく遊ぶよう働きかけて共に遊ぶことを目標とする. この10種類で子どもの興味度を継続的に保てるかどうかは長期的な実験観察により初めて明らかになることだが, 少なくとも興味度の軸を意識したデザインといえる. 一方で, 友好感の軸を意識してそれを高める, あるいは継続的に保つには, 単に子どもと共に遊びを実行するだけでは難しく, このことはこれまでの遊びロボットの研究が示している. それに対する方策を次節で議論する.

4.3 他者の心的状態推定に基づく行動決定

4.3.1 他者の意図推定と行動戦略

ロボットが子どもの心的状態に応じて行動決定することで, 子どもがロボットを自身が知っている友好度の高い存在, すなわち保育者と同等の遊び相手の存在と認め, それが継続した遊びに通じるというのが本研究で提案する方法論の基本概念である. その鍵となるのが, 子どもの心的状態に応じて保育者のように振る舞う行動決定モデルである. 本研究では, このモデルを構築するにあたり, まず人間における意図推定に基づく行動決定モデルを参照する. そしてこれを, ロボットと子どもの遊び場面に適用することを考える.

横山らは, 協調課題における人間の行動決定過程をモデル化し, 以下のように述べている [40]. 人が他者とやりとりをする際, 他者の意図推定とそれに基づく行動選択を行っている. 特定の行動にはその裏に何か達成したい意図 (具体的なタスクにおいては目的) がある. その目的の達成のため人は, 各瞬間に自分の取りうる行動の効果を他者についての知識とその瞬間の他者の状態に基づき予測し, 自分の行動を決定する. しかし, 他者の意図は直接には観測できず, 他者の置かれている状況とその振る舞いから推定できるのみである. その際に人間は, 自己を他者の状況に置いたときに行うであろう自分の行動から, 他者の意図を推定す

る。横山らは、他者意図の推定に基づく行動決定戦略を、意図推定の深さから次のように定式化している。

人が日常生活で行う行動決定の戦略には、受動的戦略と能動的戦略の2種類ある。自己が推定した他者意図に合わせて行動を決める受動的な行動決定と、他者に自己の意図を推定させて自分にとって望ましい意図や行動を能動的に誘導する方策である。

受動的戦略の典型的な処理は、他者の行動から自己がその意図を推定し、それに合わせて自己行動を決定する。この行動決定過程を、“レベル1の戦略”とよぶ。ここでレベルとは、他者の意図を推定する深さを表している。他に「自分は他者からどう推定されているか」というように、他者の自分にかかわる推定まで一段深く推定する、“レベル2の戦略”もある。

一方の能動的戦略は、自己の意図を明示的に他者に見せて他者の意図に影響を与え、結果的に他者の意図を誘導する。この戦略には相手意図の推定が含まれず、これを“レベル0*の戦略”とよぶ。また、他者の意図推定は行なわず、ただ自己の目標に向かって突き進む戦略もあり、これを“レベル0の戦略”とよぶ。

横山らはこのモデルの妥当性を計算機によるモデルシミュレーションで示している。しかし現実の遊び場面にそれがどのように適用できるか、ということは未解明である。

4.3.2 遊び場面でのロボットと子どもの行動戦略パターン

横山のモデルを、遊び場面におけるロボットと子どもの行動決定に適用したものを図4.2に示す。図4.2(a)では、ロボットも子どももレベル0、すなわち、相手のことは考えず、自分が勝つこと・目標を達成することを目指して、お互い遊びの状況だけを見て行動を選択している。この状態は、遊びロボットとしては望ましいものではない。遊び相手として相手を楽しませようとする場合、ロボットは図4.2(b)のように子どもの様子を観察し、遊びの状況と子どもの振り舞いからその意図(心的状態)を推測し、さらに自身のとりうる行動の効果を予測して、最も効果的な行動を決定するのが妥当な戦略であろう。これは、レベル1の行動戦略であり、遊び場面の多くの時間はこの状況が続くと考えられる。

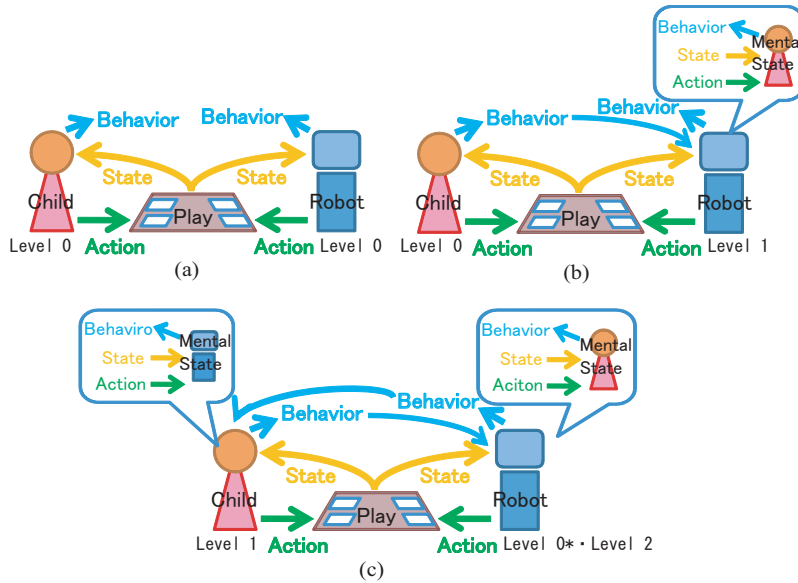


図 4.2: 子ども一ロボット間における行動戦略 : (a) 子どももロボットもレベル0, (b) 子どもはレベル0でロボットはレベル1, (c) 子どもはレベル1でロボットはレベル0*か2.

しかし、それ以外の状況もある。例えば、子どもが褒められることを期待して大人の様子をうかがうという状況では、子どもはレベル1の戦略に移行していると考えられる。子どもがレベル1に移行したとき、ロボットはそれに対応してレベル0*、あるいはレベル2の戦略をとる必要がある（図4.2 (c)）。レベル0*の戦略とは、大人が自分の意図を明示的に子どもに見せ、子どもの心的状態を誘導しようとする行動で、褒める行為などがこれに該当すると考えられる。

このようにロボットと子どもの遊びには、他者意図に基づく行動決定について複数のパターンが動的に発生すると考えられる。このパターンに応じて適切に振る舞うことが、友好感の軸において重要である。問題は、どのタイミングでどの戦略をとるか、さらに具体的にどのような子どもモデルをどのように運用するのか、ということになる。次節では、具体的にこの問題を考える。



図 4.3: 保育者と子どもの遊びの観察

4.4 実装のための行動決定モデル

4.4.1 遊びの観察

前節での行動決定に関する概念モデルの議論を受け、本節では実際のロボット上に実装するために行動決定モデルを具体化していく。

心的状態を推定して子どもと長く遊び続ける行動決定モデルを考えるには、観測すべき子どもの振る舞いと、それに基づき選択される行動を決める必要がある。そこで、保育の専門家である保育者と子どもが遊ぶ様子を観察する実験を行った [41]。

経験豊富な保育者に子どもを飽きさせないよう一定時間遊んでもらい、その様子を映像に記録した。子どもは幼稚園年長（6歳）の男女各2名で、観察を行う部屋に1人ずつ入室して保育者（幼稚園教諭、女）と1対1で30分間遊んだ。保護者も同室していたが、何もせず子どもから見えない仕切りの反対側に座っていた。遊びは、絵本の読み聞かせ、トランプの神経衰弱、積み木などから適宜保育者が選択した（図4.3）。実験後に、記録した映像を見ながら保育者にインタビューを行い、子どもの何をどのタイミングで見たかなど、各場面における行動戦略について聞いた。

4.4.2 子どもとの遊びのモデル化

保育者へのインタビューと子どもの様子の観察から、遊んでいる間の子どもの心的状態の変化を図4.4のようにモデル化した。「緊張 (Nervous)」「慣れ (Familiar)」「楽しい (Enjoy)」などは、遊び中の子どもの心的状態である。各状態からの出力は、その状態にあるときに子どもに見られた特徴的な振る舞いで、入力はその状態において保育者がとった行動である。

保育者の行動は、「楽しい (Enjoy)」「飽きている (Boring)」といった遊びへの子どもの興味の度合に応じて変化していた。例えば、子どもが飽きてきたときには、保育者がカードをめくる前に子どもを焦らすことがあったが、子どもが楽しんでいるときには、集中を妨げないように、焦らすことはしなかった。また、子どもがカードをめくった後、保育者は主に「残念！」などと反応を返すが、何も言わずにすぐに次の遊び行動へ移ることもあり、なるべく同じ行動の反復を避けていたと推測される。そして子どもが新しい刺激を受けても興味を取り戻しそうにない傾向を見せると、新たな遊びを提案し、他の遊びに移行していた。

基本的に、子どもの行動はレベル0に基づき、対する保育者はレベル1の戦略で子どもに対応していたと考えられる。しかし、状況によっては両者の関係が図4.2(c)のようにレベル1対レベル0*となる。例えば神経衰弱で子どもが勝った場面では、褒めてもらうことを期待して子どもが自ら保育者を見やり、その直後、保育者が子どもを褒めるという状況が観察された。このように子どもが受動的（相手の働きかけを待つ状態）になる場面では、子どもの行動はレベル1に変化し、保育者がレベル0*の戦略で対応していた。こうしたレベルの変化は、基本的にゲーム状況の変化と共に起きており、今回のシナリオでは子どもの行動戦略レベルを直接的に推定する必要はないことが示唆された。

4.3節の行動戦略の概念モデルにおける意図（あるいはタスクにおける目的）と、子どもの遊びのモデルにおける心的状態は、どちらも各瞬間の入出力関係を指定する隠れ変数である。横山 [40] の協調課題では意図（目的）が隠れ変数として適切であったが、子どもの遊び相手をするというタスクでは適切な変数は心的状態である。

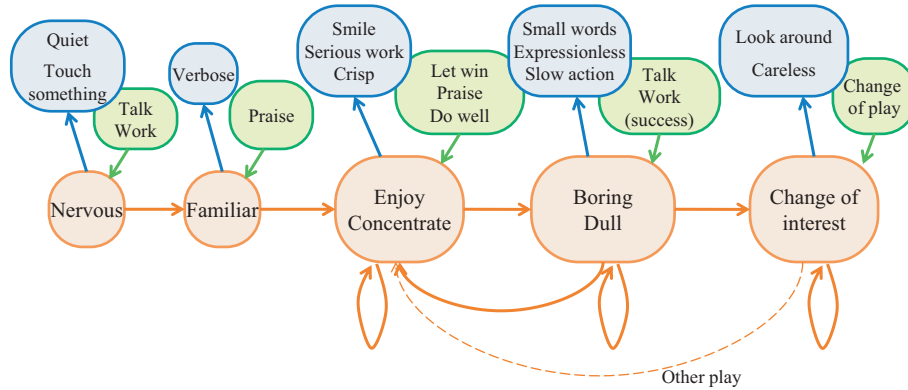


図 4.4: 子どもの遊びのモデル：子どもの心的状態遷移と保育者の行動戦略

4.4.3 子どもの心的状態遷移に基づく行動決定モデル

図 4.4 の保育者の行動決定モデルをロボットに実装可能な形に単純化し，図 4.5 に示すモデルを構築した．本来，子どもの心的状態変化とロボットの行動決定はそれぞれ別の個体のモデルであり，さらにはレベル 1 とレベル 0* の戦略は両者の相互作用として別にモデル化されているものである．しかしそれでは扱いが複雑になるので，ここでは「遊び相手」というタスクに限定して，子どもの心的状態の変化とロボットの行動戦略を統合した行動決定モデルとした．このモデルによって，ロボットがとる行動に応じて子どもの心的状態が次の時刻にどう変わるかが予測できる．ロボットはこれを規範として，子どもの興味を持続させるような行動を選択する．このような子どもの興味を持続させようとする行動は，遊びの状況によって変化する子どもの行動レベルに応じた働きかけを行う保育者と類似した振る舞いを実現しており，結果として子どものロボットに対する友好感を維持することになると考える．

子どもの心的状態

図 4.5 の $S_0 \sim S_3$ は子どもの心的状態であり，図 4.4 での「楽しい」などの状態と対応する．図 4.4 における初期の「緊張」から「慣れ」への状態遷移は，遊びの最初にだけ起こり，十分慣れた状態を図 4.5 の初期状態 S_0 とすれば，以降の子どもの状態は遊びへの興味の度合いを表す状態 S_1, S_2, S_3 の間を遷移する．そこで，

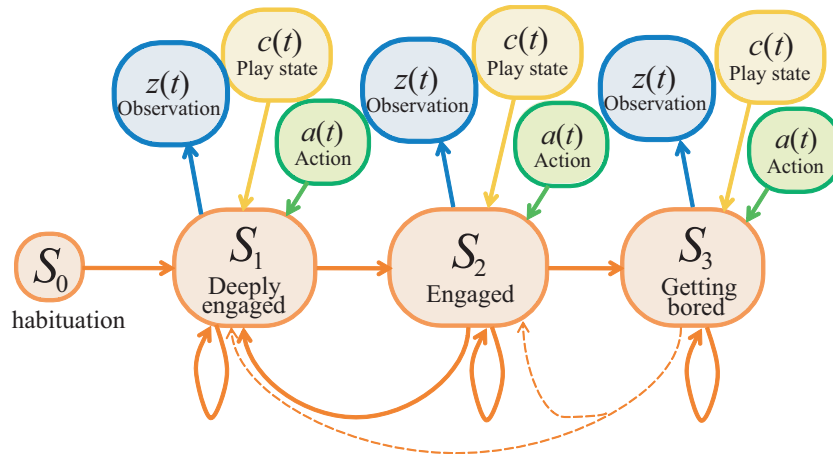


図 4.5: ロボット実装のための遊びにおける子どもの心的状態遷移モデル

子どもの心的状態として「興味度 (Degree of interest:DOI)」を定義し、 $S_1 \sim S_3$ の状態は興味度の高低，すなわち「とても興味あり (Deeply engaged)」，「興味あり (Engaged)」，「興味なし (Getting bored)」に対応させる。

観測

図 4.5 における観測 $z(t)$ は，心的状態を推定するための子どもの振る舞いの観測指標であり，視線，笑顔度，動き，凝視度の4つを用いる．詳細は心的状態の推定方法と共に後述する．

遊び状況

図 4.4 の保育者の行動は，例えばわざと負けるという行動が勝ち負けのある遊びでのみ実行可能といったように，遊びの状況に依存している．そこで，ロボットに搭載する心的状態遷移モデルには遊び状況 $c(t)$ を設ける．遊び状況 $c(t)$ は，遊びの種類・遊びの場面・成功失敗といった遊びの状況を表す．ロボットの行動決定は遊びの状況に依存するため，遊び状況 $c(t)$ は行動選択時に参照される．遊びの種類とは，じゃんけん，トランプなど，そのときに行われている遊びである．遊びの場面は，今回検討している遊びに限定すれば，子どものターンなど子どもが

能動的に動く「能動的場面」、ロボットのターンなどの子どもが受け身な「受動的場面」、勝敗を判定する合間や待ち時間などの「待機場面」の3種類となる。成功失敗とは、勝敗のあるじゃんけんなどの遊びでは勝ち負けを表し、お絵描きで描いた絵を当てるときなどは当たったか否かを表す。成功失敗は「成功」「失敗」「なし」の3通りとする。遊び状況 $c(t)$ は以上の遊びの種類、遊びの場面、成功失敗の組み合わせによって決まり、そのパターン数は最大で遊びの種類 \times 3(場面数) \times 3(成功失敗) 通り存在する。遊びによっては、存在しない場面、成功失敗のない場面もあり、実際にはこれより少なくなる。

行動

行動 $a(t)$ はロボットの行動で、図4.4での保育者の行動に相当する。行動は、(1) わざと間違える：レベル1, (2) 相手への反応：レベル0*, (3) ロボット自身の反応：レベル0*, (4) じらす：レベル1, (5) 変速：レベル1, (6) 何もしない（ゲーム行動を続行）：レベル1, (7) 遊びを切り替える：レベル1, (8) 同じ遊びをする：レベル1, の8種類を用意する。相手への反応とは、「すごいね」「残念だったね」など、相手の行動に対して言葉かけを行うものである。ロボット自身の反応とは、「やった!」「悔しい」など、ロボットの意思や感情を表す行動である。(2) と (3) は共に「相手に働きかける行動」で、褒める行為などを含んだレベル0*の行動群になる。それ以外は「遊びに影響を与える行動」で、レベル1である。ロボットは、そのときの子どもの状況とゲームの状況に応じて、上記(1)～(8)から1つを選択する。その行動記述はここでは抽象的であるが、実際には各遊びモジュールに(1)～(8)それぞれに遊びに応じた具体的な行動セットを用意する。例えば(5)変速は、じゃんけんでは高速で行うじゃんけんとなり、トランプの神経衰弱では勢いよくカードを指さす行動になる。また、(2)と(3)の発話内容は、「やった!」「ラッキー」など意味が同様に言い回しの異なる言葉を多数用意する。これは、同じ発話の反復を避けるためであるが、このような候補の複数ある行動が選択された場合は、その中からランダムに1つ選択することで単調さを回避する。

さらに、ロボットが取り得る行動は、そのときの遊びの状況により変化する。神経衰弱の子どものターンを例にとると、ロボットはカードをめくる順番ではない

ので、(1) わざと間違える、や (4) じらす、は選択できず、(2) 相手への反応、(3) ロボット自身の反応、(6) 何もしない、のいずれかを実行する。そこで、状況 $c(t)$ に応じてとれる行動のセットを事前に決めておく。結果としてロボットは、遊び状況 $c(t)$ が切り替わるごとに、可能な行動セットの中から1つの行動を選択して実行する。

4.4.2節で述べたように、保育者の戦略は子どもの戦略のレベルに合わせて切り替えられており、ロボットの戦略も子どもの戦略レベルに合わせて切り替える必要がある。子どものレベルが0のときは、ロボットの行動戦略はレベル1で、子どものレベルが1の場合は、ロボットはレベル0*の行動をとる。子どものレベルの切り替えは遊びの状況に依存しているため、ロボットの行動レベルは実際には遊び状況に応じて切り替える。そこでロボットの行動セットは、遊びの状況に応じてレベル1か0*になるよう設計した。具体例を挙げると、子どもがレベル1になるのは神経衰弱が終わった場面で、その状況でのロボットの行動セットには (2) 相手への反応：レベル0*、(3) ロボット自身の反応：レベル0*、(6) 何もしない、の3つの行動が含まれている。

また子どもの興味度に応じて適切な行動を選択するため、行動ごとに、 $S_1 \sim S_3$ の各状態での子どもの心的状態の遷移確率 $p(S_k|S_n, a_n, c)$ を設定する。

ロボットの行動選択

ロボットの実際の行動選択は、子どもの観測、心的状態の推定、遊び状況とその状況での行動セットの決定、 S_1 か S_2 に遷移する確率の高い行動の選択という順序で行われる。まず、子どもの観測 $z(t)$ から心的状態 S_n を推定する。遊び状況 $c(t)$ の判定からそのときの行動セットが決まり、その中から、心的状態が次の時刻に S_1 か S_2 に遷移する確率の高い行動を一つ選択する。以降、遊び状況 $c(t)$ が切り替わるごとにこれを繰り返す。

$$a_i(t) = \underset{a_i}{\operatorname{argmax}} p(S_n(t+1)|S_m(t), a(c(t))), \text{ただし } S_n = \{S_1, S_2\} \quad (4.1)$$

図4.5のモデルは、パラメータとして遷移確率 $p(S_k|S_n, a_n, c)$ をもつ。パラメー

タ数は、8(状態遷移の数) × 遊び状況 $c(t)$ の数 × 8(行動 $a(t)$ の数) である。これらのパラメータは、遊び観察実験のビデオにおける子どもの状態や遊びの状況などをラベル付けし、各状態遷移をカウントすることで計算した。ただし、今回の観察実験のビデオだけではデータ数が十分ではなく、設定できないパラメータも多く存在したため、そうした場合は設計者が保育者の行動を想像しながら手動で設定した。

ロボットの行動では同じような行動を反復しないようにした。保育者が行動の反復を避けていたという事実から、ある行動の効力は実行される度に減少し、時間の経過と共に元の状態に回復するとした。本研究ではこの効力の変化を、各状態間の遷移確率の変化として表現する。この遷移確率の変化値は行動ごとにあらかじめ定め、これを頻度影響 $freq(a)$ (今回の実験では $0 \leq freq(a) \leq 0.3$) とする。例えば、子どもの状態が S_2 で行動 $a_0(t)$ を実行する場合、現在の状態から良い状態 (S_1)、または同じ状態 (S_2) に遷移する確率 $p(S_1|S_2, a_0, c)$, $p(S_2|S_2, a_0, c)$ をそれぞれ $freq(a_0)/2$ で減少させ、現状態より悪くなる S_3 への遷移確率 $p(S_3|S_2, a_0, c)$ を $freq(a_0)$ 増加させる。すなわち以下の式のようになる。

$$p(S_1|S_2, a_0, c) = p(S_1|S_2, a_0, c) - freq(a_0)/2 \quad (4.2)$$

$$p(S_2|S_2, a_0, c) = p(S_2|S_2, a_0, c) - freq(a_0)/2 \quad (4.3)$$

$$p(S_3|S_2, a_0, c) = p(S_3|S_2, a_0, c) + freq(a_0) \quad (4.4)$$

$$\sum_{K=1}^3 p(S_k|S_2, a_0, c) = 1 \quad (4.5)$$

そして、この確率変化は時間経過と共に線形に回復するとした。今回の実験では回復値を 0.002/秒とした。

4.4.4 心的状態（興味度）の推定

子どもの心的状態 $S_1 \sim S_3$ の推定は、視線、笑顔度、動き、凝視度の4つの特徴量を用いて行う。この指標は、保育者と子どもの遊び観察 [41] および従来研究から子どもの心的状態推定に用いる特徴量の候補を挙げ、ロボットと子どもの遊び

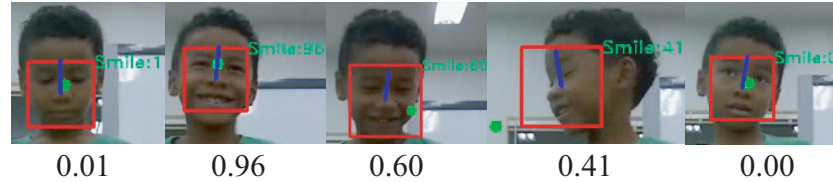


図 4.6: 顔追跡と笑顔度推定の結果の例：四角形は検出した顔の領域，バーが顔向きのロール角，ドットが顔向きのピッチ・ヨー角を表す．下の数値は笑顔度を表す．

の予備実験 [33] を行って心的状態を推定し，特徴量として適切と判断したものを採用した． $S_1 \sim S_3$ の各状態で各指標が発生する出力確率 $p(*|S_n)$ を計算し，それらを掛け合わせた尤度が最も高い状態をそのときの心的状態とする．つまり，視線 $d(t)$ ，笑顔 $s(t)$ ，動き $m(t)$ ，凝視度 $g(t)$ が得られたとき，状態が S_n である尤度 $L_n(t)$ は，

$$L_n(t) = p(d(t)|S_n)p(s(t)|S_n)p(m(t)|S_n)p(g(t)|S_n) \quad (4.6)$$

となり，状態 S_n は $L_n(t)$ が最大となる状態とする．

$$S_n(t) = \operatorname{argmax}_{S_n} L_n(t) \quad (4.7)$$

視線 $d(t)$ は，一定時間内に子どもの顔がロボットまたは遊びの対象領域に向いている程度とし，次式で計算する．

$$d(t) = \sum_{k=t}^{t+\ell-1} h(k)/\ell \quad (4.8)$$

ここで $h(t) \in \{0, 1\}$ は時刻 t における顔向きであり，子どもがロボットまたは遊びの対象領域に向いているときに 1 をとり，それ以外の場合 0 となる． ℓ は興味度を推定するフレームの長さ（時間）とする．顔向きの推定にはオムロン OKAO Vision による 3D 頭部姿勢推定に基づく顔トラッキングを用いる [42]．笑顔度 $s(t)$ は，オムロン OKAO Vision による表情が笑顔である尤度から算出する [43]． $s(t)$ は興味度推定フレーム内の笑顔尤度の平均で，0 から 1 の値をとる．図 4.6 に顔の追跡と笑顔度の検出例を示す．動き $m(t)$ には，前後フレーム間での顔の中心座標の移動

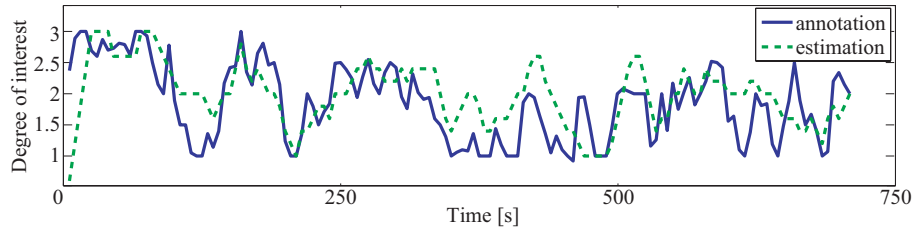


図 4.7: 予備実験における 6 歳男児の心的状態の推定結果：実線は基準興味度，点線は 5 点平滑化した推定興味度。

距離を目の幅で正規化した値を用いる。 $m(t)$ も興味度推定フレーム内の平均で，0 から 1 の範囲の値をとる。凝視度 $g(t)$ は，領域内を真顔で動かずじっと見ているとき高くなる値で，視線 $d(t)$ と笑顔度 $s(t)$ ，動き $m(t)$ を用いて次式で定義する。

$$g(t) = \sqrt[3]{d(t) \times (1 - s(t)) \times (1 - m(t))} \quad (4.9)$$

興味度推定フレームの長さは 5 秒とした。

予備実験において，以下の手順で推定に必要なパラメータを算出した。まず子どもがロボットと対話しているか遊んでいるときの正面からの映像を記録した。子どもの心的状態を興味度（子どもがロボットまたは遊びに興味を持っている程度）として，実験者 2 名が映像を見ながら連続的に評価し，ビデオに各状態 $S_1 \sim S_3$ のラベルを付けた。ラベル付けされた映像の 5 秒ごとに各指標を計算し，各状態での指標の発生頻度を求めて正規分布で近似し，正規分布のパラメータ（平均 $\mu(S_n, z)$ ，分散 $\sigma(S_n, z)^2$ ）を算出した。この正規分布の確率密度関数（相対尤度）を，各指標が各状態から出力される確率 $p(*|S_n)$ とした。

図 4.7 は，予備実験の 6 歳児 1 名における，実験者が評価した基準興味度と，求めたパラメータを使って推定した推定興味度（5 点平滑化）である。これらの相関係数は 0.59 であり，推定性能が良いことが分かる。なお，図 4.7 のデータは学習データには含まれていない。

4.5 行動決定モデルの検証実験

ロボットが子どもの心的状態推定に応じて行動決定することで、子どもがロボットに長期的な遊び継続につながる友好感を抱く、と本研究では考える。これを検証するために、(1) 提案する子どもの心的状態に基づく行動決定モデルでの友好感の変化の検証、(2) 友好感を測る指標の開拓、を目的として実験を行った。

4.5.1 実験方法

提案した子どもの心的状態推定に基づく行動決定モデルを、4.2節で述べたロボット上を実装し、友好感を評価する指標を探る実験を行った。実験では、子どもが椅子に座ってロボットとテーブルを挟んで対面し、ロボットと遊んだ。実験に参加した子どもは、同一の幼稚園に通う4~6歳の6名（男3、女3、平均5.5歳）である。

提案モデルの有効性を検証するために、比較対象として、子どもの心的状態を考慮せずに遊びの状況のみから行動を選択するモデルを用意した。このモデルを状況モデルとよぶ。状況モデルは図4.8のように子どもの振る舞いは観察せず、遊びの状況 $c(t)$ ごとに定めた行動セットの中から、ランダムに一つの行動を実行する。

$$a_i(t) = \operatorname{argmax}_{a_i} p(S_1 | S_1, a(c(t))) \quad (4.10)$$

すなわち、ロボットがとれる行動の種類も、行動の実行タイミングも提案モデル（式4.1）と同じであるが、子どもの心的状態を考慮しない点のみが異なる。状況モデルは提案モデルと構造は同じであり、提案モデルのパラメータが減少したものと等価である。

子ども6名中3名に対してはロボットの行動選択に心的状態遷移モデルを適用し、残りの3名にはロボットの行動選択に状況モデルを使用した。この2条件での子どもの振る舞いを観察して、提案モデルの有効性を検証する指標を探索することが本実験の目的である。

実験室はブロックや人形を使って幼稚園のような装飾を施し、ロボットは図4.9のように、キャラクターの着ぐるみで装飾した。実験は、子どもが入室してから、

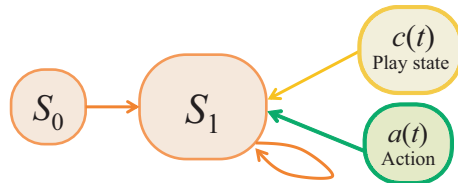


図 4.8: 遊び状況にのみ基づく行動決定モデル

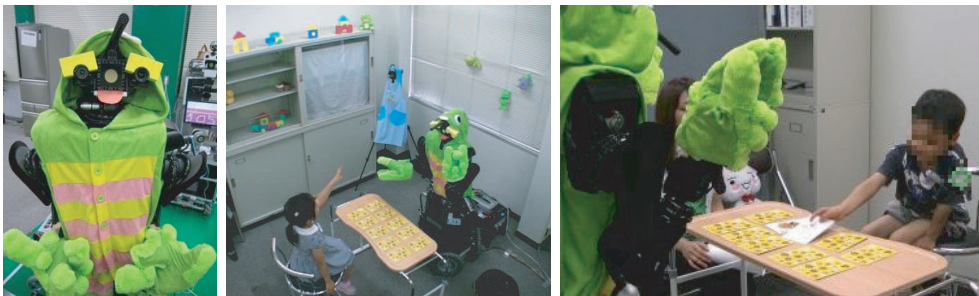


図 4.9: 実験の様子：遊び相手ロボット（左），実験部屋の上からの映像（中央），ロボットと遊ぶ子ども（右）。

慣らし（5分），遊び（～25分），退室という流れで行い，実験時間は一人あたり最長30分とした．慣らしでは，遠隔操作によるロボットとの会話と顔画像登録のための簡単な遊びを行った．実験は，おもちゃを使うトランプの神経衰弱と，身体を使うじゃんけんを，状況に応じて切り替えた．対話中など，テーブルや手先を見る必要のない時は，ロボットは顔追跡でアイコンタクトを行った．行動選択はロボットが行動指標に基づいて自律的に行い，その行動を実行するタイミングの決定のみオペレータが遠隔操作した．トランプとじゃんけんの二条件で実験したのは，これらが移動せずに遊べること，また予備実験においてこれらの遊びが安定して行えたためである．子どもの負担を考慮した30分という時間内ではあまり多くの遊びを行うことができず，子どもごとに遊びの種類に大きな差が出ないように二つのみを切り替えることとした．今回の実験は，長時間遊べることの実証ではなく，心的状態遷移モデルを使うことで子どもとロボットの遊びにおける関係性を示す指標を検討することが主目的であるため，このこと自体は大きな問題ではない．

表 4.1: アンケートの例
子どもは一般的なロボットについて
嫌い 1 2 3 4 5 好き

4.5.2 子どもの心的状態の推定

実験の間、ロボットに取り付けたカメラで子どもの正面からの顔映像を取得し、5秒ごとに子どもの心的状態（興味度）を推定した。心的状態遷移モデル条件では、この興味度の推定結果をロボットの行動決定に使用した。

後に述べる教員による子どもの状態評価と、推定した心的状態を比較するために、「とても興味あり」の S_1 に2, 「興味あり」の S_2 に1, 「興味なし」の S_3 に0を割り当て、0~3の数値で推定結果を出力することとした。これを推定興味度とよぶ。

4.5.3 子どもの振る舞いの記録

子どもがロボットと遊んでいる際の振る舞いを事後に解析するために、3台のビデオカメラを使ってその様子を記録した。また、ロボットの処理に使用しているカメラ以外に、子どもの正面からの映像を取得できる位置に小型のカメラを設置して子どもの様子を記録した。

4.5.4 保育者による子どもの状態の評価

実験後、子どもを正面から撮った映像を見せながら、保育者3名（幼稚園教員、男1, 女2）に子どもの心的状態を評価してもらった。保育者は全員、多くの子どもの保育経験があり、実験に参加した子どもについても事前に良く知っていた。子どもの状態は、子どもがロボットまたは遊びに興味を持っている程度（興味度）として、「興味がない」、「やや興味がない」、「普通」、「やや興味がある」、「興味がある」の5段階で、映像を見ながら連続的に評価してもらった。「興味がない」から「興味がある」をそれぞれ0~4の離散値に変換し、3名の評価を5秒ごとに平均し、それを子どもの心的状態評価の基準（基準興味度）とした。また、各子どもについて

表 4.2: ロボットや実験に対する子どもの印象評価のアンケート

項目 ID	質問項目
Q1	一般的なロボットに（興味がない／興味がある）
Q2	一般的なロボットを（好き／嫌い）
Q3	今回の調査によって一般的なロボットに（興味が無くなった／興味が増した）
Q4	今回の調査によって一般的なロボットを（嫌いになった／好きになった）
Q5	調査で使ったロボットを（嫌い／好き）
Q6	調査で使ったロボットは（怖い／親しみやすい）
Q7	調査で使ったロボットは（かっこ悪い／かっこいい）
Q8	調査で使ったロボットは（小さい／大きい）
Q9	今回の調査について（つまらなかった／楽しかった）
Q10	ロボットと遊ぶ前は（機嫌が悪かった／機嫌が良かった）
Q11	ロボットと遊んだ後は（機嫌が悪くなった／機嫌が良くなった）
Q12	またロボットと（遊びたくない／遊びたい）
Q13	ロボットをどのように扱っていたか（機械として／人として）

の評価直後に、その子どもの心的状態についてのアンケートに回答してもらった。アンケートは、ロボットや実験に関する質問 13 項目と子どもの性格に関する質問 10 項目の計 23 項目用意した。各アンケートは主に表 4.1 に示すような 5 段階評価とした。アンケートのロボットや実験に関する質問 13 項目を表 4.2 に示す。アンケートは子どもの印象を直接測ったものではなく、保育者が子どもとロボットのやり取りを見て感じた主観的な評価である。しかし、アンケートを実施した保育者は全員が普段から実験に参加した子どもと接しており、性格や普段の振る舞いを熟知している。その点で、この評価は信憑性の高いものであると考える。

4.5.5 実験結果

6 名の子どものうち、4 名（心的状態遷移モデル条件 2 名、状況モデル条件 2 名）は設定した 30 分の実験時間の最後まで遊び、2 名（心的状態遷移モデル条件 1 名、状況モデル条件 1 名）は途中で遊びの続行を拒んだため中断した。2 名の遊びの継

表 4.3: 推定興味度と基準興味度の相関

子ども ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6
相関係数	0.22	0.21	0.12	0.01	0.52	0.53
基準興味度の最小値	0.59	0.91	2.00	2.00	1.41	0.67

続時間はそれぞれ3分と12分であった。遊びを続行できなかった理由は、1名は自分が座っている椅子の高さとロボットを怖がっていたことが挙げられる。もう1名は、アンケートに回答した保育者によると、初対面の人に対し相手がどう出るか、どういう人かを試すタイプであり、ロボットにも相手を試す行動（机を揺らす、自分の怪我を見せるなど）をとったのだという。こうした想定外の行為に対してロボットに実装したモデルでは反応を返せず、この子とは遊びが成立しなかった。

この2名はロボットと遊びを成立するための最低限の友好感を築けなかった例であり、それには性格が強く影響していると推測する。ただし、ロボットとの関係構築が困難な性格の子どもへの対応は次章で議論することとし、本章ではロボットの行動の違いによる子どもの友好感の変化について調べたい。そのため本実験の友好感の解析は、ロボットと30分遊び通せた4名について行うこととする。

興味度の推定

推定した興味度を5点で平滑化して、子どもごとに基準興味度との相関係数を計算した。その結果は表4.3のようになり、全ての子ども ($n = 6$ 人) に関して有意な正の相関がみられた ($p < 0.05$, two-sided, sign test)。これより、推定興味度がある程度は有効であると判断した。しかし表4.3の相関係数（上段）と基準興味度の最小値（下段）をみると、最小値が2以上の子どもの相関係数が低い。すなわち、子どもの「興味がある」状態の推定の精度が低いと考えられる。そこで、基準興味度を均等に3分割して3値に変換し、それぞれを S_1 , S_2 , S_3 状態とみなし、各状態に分類されたそれぞれの映像部分の笑顔度や顔向きなどを確認した。その結果、図4.10の笑顔度の発生分布のように、 S_1 と S_2 では分布に大きな差が見られないことが判明した。すなわち、モデルで考えた3状態のうち、 S_1 と S_2 は実際の観測値の差異が小さく、今回使用した特徴量だけでは判別が困難であった。実

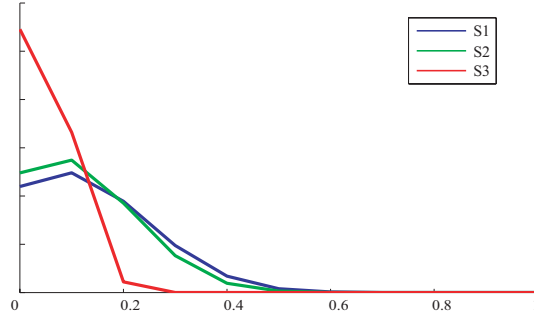


図 4.10: 基準値での3状態における笑顔度の発生分布（正規分布で近似）

表 4.4: 基準興味度と推定興味度の一致度（上段は3状態，下段は2状態）

子ども ID	C1	C2	C3	C4	C5	C6	All except C5
一致度（3状態）	0.44	0.47	0.43	0.23	0.07	0.39	0.39
一致度（2状態）	0.59	0.69	0.86	0.61	0.27	0.66	0.68

際のところ， S_1 の「とても興味あり」と S_2 の「興味あり」は，共に子どもが遊びに興味を持っていて，ロボットの行動セットも共に興味がある中で相手をより楽しませようとする働きかけである．つまり，この2状態の分離はそれほど重要ではなく，飽きて興味がなくなった S_3 状態との区別が遊びの維持にとって重要であると考えられる．

そこで， S_1 と S_2 を合わせ S'_1 とし，「興味あり」の S'_1 と「興味なし」の S_3 の2状態で子どもの状態推定がどの程度できているかを検証した．さきほどの3値に変換した基準興味度と推定興味度とが，全時間で一致する割合（一致度）を求めると，C5以外の子どもの平均で約4割（チャンスレベル33%）であったが， S_1 と S_2 を合わせて同様に一致度を求めると，約7割（チャンスレベル50%）であった（図4.4）．基準興味度と推定興味度について，独立性の検定を行ったところ正方向に強い有意差が認められた（ $\chi^2 = 6.70$, $p < 0.01$, chi-square test, $N = 5$ children except C5）．これは興味度の推定が完全なランダムと比べ有効であることを示している．しかし，推定精度が十分であるとはいえない．実験中に子どもが飽きる状態があまり現れなかったことに加え，予備実験のデータよりも S_1 と S_2 の観測値の差異が小さかったことが原因として挙げられる．しかし，相関係数0.5の子ど

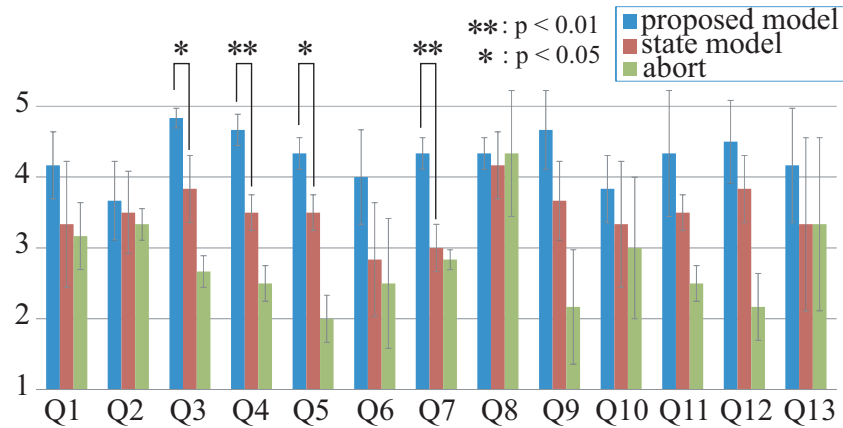


図 4.11: アンケート得点の平均値：エラーバーは標準偏差。Q1～Q13の詳細は表 4.2を参照。

ももいることと予備実験の結果でも 0.5 程度だったことを考えると、子どもの個人差に対応できなかったことも推定精度を下げる大きな原因であると思われる。今後実験を継続しデータを増やして、性格も考慮したモデルの構築とそのパラメータを学習することで、推定精度を改善していくことができると考える。また、状態推定に、より有効な特徴量を見出すことも必要である。

心的状態遷移モデル条件と状況モデル条件の比較

提案モデルと状況モデルの2条件間での友好感の差を検証する。心的状態遷移モデル条件で最後まで遊んだ2名、状況モデル条件で遊んだ2名、遊びを中断した2名の3グループにおける保育者によるアンケートの各項目の平均得点を図 4.11 に示す。エラーバーは標準偏差を表している。心的状態遷移モデル条件と状況モデル条件のグループの平均値の差について Student の t 検定を適用したところ、有意差が質問項目 Q3 ($p = 0.017 < 0.05$), Q4 ($p = 0.004 < 0.01$), Q5 ($p = 0.022 < 0.05$), Q7 ($p = 0.003 < 0.01$) に認められた。Q3～Q5 は、今回の調査で使ったロボットが好きかといった、今回のロボットとの遊びの経験が影響する質問項目である。これに対し、一般的なロボットに興味があるか (Q2) といった、一般的なロボットに対する質問項目では、心的状態遷移モデル条件と状況モデル条件の間で差が認められなかった。これらの事実は、心的状態遷移モデルを適用して遊んだ方が、子

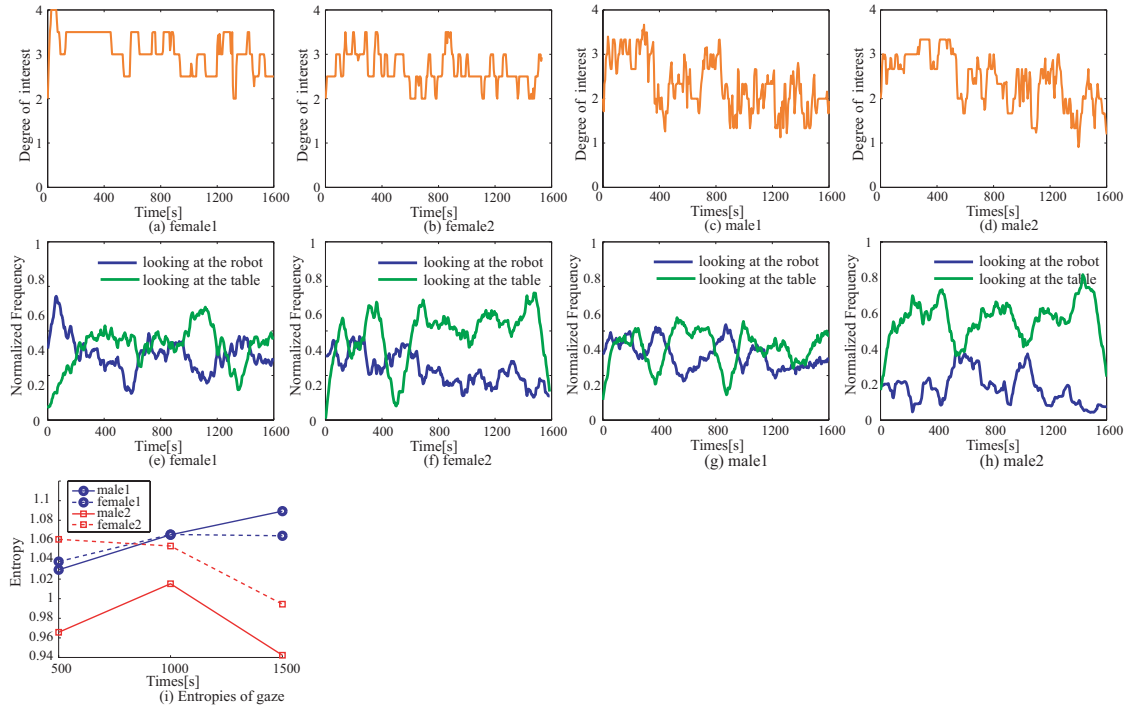


図 4.12: 4名の結果 : (a) ~ (d) は基準興味度. (e) ~ (h) は子どもがロボットを見ている頻度および机を見ている頻度のそれぞれの移動平均. (a) (e) は心的状態遷移モデル条件の女兒, (b) (f) は状況モデル条件の女兒, (c) (g) は心的状態遷移モデル条件の男児, (d) (h) は状況モデル条件の男児. (i) は4名の視線の500秒間ずつのエントロピー.

どもの本ロボットに対する印象が良くなっていることを示唆している. アンケートのQ9「実験が楽しかったか」とQ12「またロボットと遊びたいか」の平均得点が, 心的状態遷移モデルを適用した場合の方が高くなっていることも考えると, 心的状態遷移モデルと状況モデルとで, 子どものロボットへの友好感に差が出たのではないかと推測する.

そこで, 実験条件間の友好感の差を客観的に確認するため, 記録した子どもの振る舞いを解析し, ロボットと子どもの関係性の評価を試みた. 図4.12 (a), (b), (c), (d) は保育者評価による基準興味度の推移, 図4.12 (e), (f), (g), (h) は子どもがロボットを見ている頻度と机を見ている頻度それぞれの2分間の移動平均を表す. (a), (e) は心的状態遷移モデル条件で遊んだ女兒1名, (b), (f) は状況

モデル条件で遊んだ女児1名, (c), (g) は心的状態遷移モデル条件で遊んだ男児1名, (d), (h) は状況モデル条件で遊んだ男児1名の結果である。基準興味度を女児同士, 男児同士で比べると心的状態遷移モデル条件と状況モデル条件とで類似した遷移をしており, 男女の違いはあるものの, 条件間でどちらかが特に飽きているという傾向はなく, どの子どもも同様に遊びを楽しんでいたと推測できる。

しかし, 子どもがロボットを見ている頻度, 机を見ている頻度を見ると, 心的状態遷移モデル条件の子どもはロボットと机を同程度で見ているのに対し(女児平均: 机 54%, ロボット 46%, 男児平均: 机 55%, ロボット 45%), 状況モデル条件の子どもはロボットをあまり見ていない(女児平均: 机 62%, ロボット 38%, 男児平均: 机 75%, ロボット 25%)。ロボットと机を見る視線の割合を使って500秒間ずつエントロピーを計算してみると(図4.12 (i)), 状況モデルの2名が実験後半にエントロピーが低く, 机ばかり見てロボットをあまり見ていないことが確認できる。また, 視線の中で特に注目すべきは, 図4.12 (e) の650秒, 1300秒, および(f) の500秒付近である。これらは神経衰弱が終わった瞬間とその前後の場面であり, このときロボットを見る頻度と机を見る頻度が逆転している。ここに特徴があるように思われる。

レベル1の戦略では, 相手の意図を推定するために相手を観測する必要がある。事前に行った保育者と子どもの遊び観察では, 子どもが何かを成し遂げた後に, 褒められること, あるいは次の働きかけを期待して, 保育者の反応を見るために子どもが自ら保育者を見る行動が観察された。子どもが相手を友好的な心的存在として意識している場合, 子どもはランプに没頭している状態が終わるとレベル1の行動に移り, ロボットの反応を観察するためにこのようにロボットの顔を見ると思われる。ところが, 状況モデル条件での図4.12 (f) では1050秒で神経衰弱が終わっているにもかかわらず, ロボットを見る頻度はさほど上がっていない。状況モデル条件の場合, 子どもは遊びの間にロボットの意図を確かめようとしなくなり, 子どもが受動的になる場面においても探索戦略がレベル1に移行せず, したがってロボットを見る頻度が増えなかったと推測される。男児の神経衰弱が終了した場目(図4.12 (g) の300秒, 1300秒, および(h) の500秒, 1000秒付近)においても, 状況モデル条件の子どもの方が後半にロボットを見る頻度が机を見

る頻度を上回らないという同様の傾向が見られた。

考察

大坊 [44] によれば、人間同士のコミュニケーションでは、関心や好意を持つものに対して視線量が多くなるという。また、擬人化エージェントの視線でも、凝視量が中程度の時に「親密な」「友人になりたい」などの印象が最も高くなるという報告がある [45]。これらのことから、本実験でのロボット対子どものインタラクションにおいても、視線の量は友好的な印象に関わりがあると考えられる。状況モデル条件と比べて心的状態遷移モデル条件の子どもがロボットへ多く視線を向けたということは、心的状態遷移モデル条件の子どもがロボットにより友好的な印象を持っていたことを示唆する。これは子どもをよく知る保育者によるアンケートの結果とも一致する。

今回の実験では各条件の子どもは2名と少なく、有意な結果ではない。しかし、仮にこの行動（視線）の違いがより一般的にみられるなら、遊びの特定の状況（今回はトランプの終了時に相手の反応を待つタイミング）において、子どもが相手に対して持っている友好感を表す行動指標ということになる。これがどれほど適切なものか、より洗練された実験で再現性の確認と発生条件の明確化がなされるべきであろう。

特に、心的状態遷移モデルのどのような行動が子どものロボットへの友好的な印象を持たせたのかは、今後の対人口ロボットの設計原理として重要である。本研究では、ロボットが保育者の行動をまねることで子どもの心にある保育者モデルにマッチして、結果としてロボットを遊び相手として受け入れた子どもの遊びの姿勢を引き出す、という仮説に基づき今回の実験をデザインした。しかし状況に応じて人間と類似した行動を選ぶことが、本当に人間のように子どもへの効果を考えて行動することを十分にシミュレートしているのか、明らかではない。これはコミュニケーションの本質に迫る問いであるが、現状ではこの問いに答えることはできない。

4.6 おわりに

本章では、身体性を生かして子どもと遊ぶ、遊び相手ロボットの構成原理を提案し、それに基づきロボットを実装して、評価基準の仮説を得た。そして、遊び相手ロボットは子どもと長く遊び続けられることが重要であり、そのために子どもの遊びへの興味度とロボットへの友好感を維持する人間類似の行動決定モデルが必要であると提案した。そのような行動決定モデルの実現には、相手の心的状態の推定と推定結果に基づく行動決定、それも現実の保育者と子どもの遊び観察に基づいて現実の遊び相手の行動をある程度再現できる行動決定のモデルが必要と考えた。それを実装したロボットと子どもの遊び実験で、心的状態遷移モデルを適用したロボットで遊んだ場合の方が子どもの友好感が良好に保たれ、それが現れる行動指標が示唆された。

本章での主張は、子どもと遊ぶロボットにおいては、子どもを飽きさせないためのロボットの複雑さによる興味度だけでなく、筆者が友好感とよぶ子どもとロボットの良好な関係性もまた必要だということである。友好感とは子どもがロボットを自身の知っている遊び相手と同類であると認識することで発生し、遊び行動に積極的な心の姿勢を作り出す。その認識を生み出すものが、子どもが持っている他者についての知識である。本章で実現したのは、この子どもの知識をモデル化した状態遷移と個々の処理・動作要素であり、その知識の適切な運用が子どもに友好感を伴う遊びの姿勢を誘起したものと考えられる。このような心的過程の相互作用は子どもの社会性の発達に重要であろう。

本章で示した、ロボットと子どもの遊びの事例は数が少ないながらも、興味度と友好感の関係を示す指標も示唆した。事例が少なく、より精密な実験による検証の必要はあるが、本研究の成果としたい。

現状での課題は、子どもの真の心的状態の評価である。心的状態の評価は客観的な計測が困難であり、成人の事後報告の手法も使えず、今回は子どもを知る経験豊富な幼稚園教員の評価を基準値とした。しかしこれとて主観報告であって客観性の確保には継続的な研究が必要である。これも対人口ボットの研究にロボット工学以外の人間科学の研究が必要な事例であり、対人口ボット研究の難しさを示している。この他にも、ごっこ遊びの実現や新しい遊びの学習・発見には対人

ロボットに関わる興味深い課題が多く含まれており，今後はこうした問題にも取り組みたい。

第5章 人見知りの子どもとの友好感 創出に向けた遊び行動の分析

5.1 はじめに

本章では課題2“どんな子どもとも遊べること”を解決する方法について議論する。本遊び相手ロボットは育児支援を目的としたロボットであり、保育者のようにどんな子どもとも遊びを成立させることが望ましい。しかし笑顔や口数が少なく、なかなか近寄って来ない子どもと遊ぶのは人間の大人でも難しく、従来の人-ロボットインタラクションではこのようなロボットに消極的な相手は考慮されてこなかった。実際、前の4章で実現したロボットも、初対面の3割の子どもと遊び通すことができなかった。

そこで本研究では従来焦点が当てられてこなかった関係構築がより困難な相手に着目し、ロボットの対応方法を考える。本章の目的は、ロボットに消極的な性格をもつ子どもとの遊びを成立させるために、そのような子どもとの友好感を創出できる方法の糸口を探ることである。関係構築が困難な相手への対応は、子ども相手ロボットに限られた問題ではない。発達障害者やニーズの高い高齢者を対象としたロボットにも同様に発生する問題であり、コミュニケーションの本質に踏み込んだ本研究の成果は広く対人口ロボットに寄与すると考える。

本章ではまず、ロボットとの良好な関係構築が容易でない子どもへの対応方法を議論し、その方策として、子どもの性格に応じた行動選択の仕組みを考えた。この仕組みを実現する第一歩として、本章では“人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する”という仮説を検証することとした。まず筆者はロボットが子どもに対して親密な態度を示しやすい“親和的遊び行動”と、不安が強くても遊べる“不安緩和遊び行動”を定義し、遊び行動を分類した。そして保育者

が遠隔操作するロボットと5~6歳児との遊び実験を行った。本章では、これらの遊び行動と親近感の関係を調べることで、“親和的遊び行動”と“不安緩和遊び行動”の両方の要素をもつ遊び行動が人見知りの子どもに有効であることが示唆された結果を報告する。

5.2 関係構築の難しい子どもと遊ぶために

保育者は即時的な子どもの振る舞いから得られる情報だけで次にとる行動を判断しているのではなく、子どもの性格を把握した上で遊びを成立させる援助を行っている [23]。ロボットがどんな子どもとも遊びを成立させるためには、2章で議論したように、子どもの性格に着目する必要がある。本研究では、性格が行動の価値を変える変調器となっており、同じ行動でも個々の性格によって心的状態への効果が異なると考える。例えば“盛大にほめる”という行動が、社交的な子どもの心的状態を“嬉しい”に変化させる効果があったとしても、内気な子どもには効果が薄かったり、逆に身構えさせてしまったりといったことが起きている。そしてプロの保育者はこのような行動と性格のバイアス効果の対応関係（モデル）を多く熟知しているため、様々な子どもと遊びを成立させられると考える。ロボットがどんな子どもとも遊びを成立させるためには、関係構築が難しい子どもの性格とそこから生じる心的状態変化の特性を把握し、その上で最適な行動を選択していくことが必要である。

5.2.1 内向的性格の子ども

関係構築が難しい性格はいくつか考えられるが、本章ではロボットが初対面の子どもと遊ぶ場面を考え、初対面での遊びの成立が難しいと想定される内向的性格に焦点をあてて議論を進める。

初対面での交流において内向的な子どもがなかなか打ち解けにくいのは、外向型の幼児よりも内向型の幼児の恐怖心が強い傾向にあること [46] が一因ではないかと考える。内向的な子どもには、強い恐怖心や緊張を取り除き、ロボットと遊べるまでの関係性を構築することが実は重要であったのではないかと考える。

さらに内向的な子どもは表現が控えめで、外向的な子どもに比べて、もっている要求や心的状態を把握しづらい。太田は、内向的な子どもについて、保育者の視点から次のように述べている。“教師が幼児の特徴をつかんで援助するとき、外向的なはっきりした行動を示す子は教師としても要求を受け入れてやるような援助がしやすいが、内向的で表情や言葉が少なく自己主張の弱い幼児は、現在、集団生活の中でどのような要求や不安をもっているか、その洞察ははなはだ困難である [47]”。内向的な子どもへの対応はその意図（心的状態）の推定という点で困難であり、4章で実現したような、子どもの心的状態の推定にのみ基づく行動決定では対応が難しいといえる。

5.2.2 性格に応じた行動選択

それでは内向的な子どもとはどんな遊びも難しいのかといえば、そうではない。清水によると集団に入りにくい内向的な幼児が積木を好むという [48]。また飯島の報告では、自分の要求を言葉で伝えることが難しいために他児とのやりとりが希薄な子どもに対して、保育者がその子どもに紙飛行機飛ばしを提案することで他児との遊びを成立させている [23]。このような性格に合った遊びを選べば、ロボットが内向的な子どもとも遊べるのではないか。さらにその遊びを通して、子どもからロボットへの親近感といったポジティブな感情を引き出せれば、良好な関係を築き、長期的に遊べる可能性もある。ここでいう良好な関係とは、関係構築が難しい子どもなりにロボットへ友好感をもった状態であり、“子どもがロボットからの働きかけをおおかた受け入れ、遊びが成立し、ロボットに対するポジティブな感情（親近感）をもつ”状態とする。親近感をもてれば「友達になりたい」「また遊びたい」といった思いが生まれ、次回の遊びの継続へつなぐと考える。もし内向的な子どもの親近感を上げるのに有効な遊び行動があると仮定すると、ロボットは子どもが内向的であるかを推定し、その性格に適した有効な行動をとることで子どもの親近感を上げ、内向的な子どもとも良好な関係を築けると推測する。

性格に応じた行動決定の重要性は、内向的な子どもとの初対面での関係構築に限った話ではない。例えば怖がりの子どもには安心感をもたせる遊び行動をとったり、集中力が続かない子どもには短時間で楽しめる遊びを行ったり、性格とそれ

が影響する心的状態または関係性を考慮して行動することで、ロボットが多様な子どもと長く遊ぶことができると考える。多様な性格に応じた行動決定モデルを構築すること、これは本研究の今後の重要な課題であり、ひいては対人ロボット全体のコミュニケーションにおける本質的課題であるといえる。

以上のように、本研究では関係構築が困難な子どもにロボットが対応する方法として、ロボットが子どもの性格や関係性に着目した上で行動を選択するという仕組みを考える。

本章では、ロボットと子どもが初対面で交流しなければならないという状況を踏まえ、内向的性格の中でも人見知り性格に注目する。内向的性格についてまとめた藤岡の報告によれば、内向的性格には動機（例：一人好き）や本人が感じる不安などで多様性があり、その一種である人見知り（shyness）は、不慣れな対人的状況での抑制¹を示す傾向である [49]。初対面では人見知り性格の有無に遊びの成立が左右されると推測する。ただし、人に対する抑制がロボットに対しても見られるかどうかは明らかでなく、本研究を通して確かめる必要がある。人見知りでも遊ぶことができ、かつ親近感を上げられる有効な遊びがわかれば、前述の仕組みによってロボットが人見知りに対応できると考える。そこで本章では、人見知りの子どもの親近感を良くするために有効な遊び行動があるかどうかを解明したい。性格に応じた行動決定の仕組みを実現するためには、ロボットが人見知り性格を推定する手法も確立しなければならないが、これは今後の課題とし、本論文では扱わないこととする。以上を踏まえ、本章では次の仮説を検証する。

仮説1：人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する。

仮説を検証するために、保育者が遠隔操作するロボットと子どもの遊び実験を行う。実験では、遊び行動や子どもの振る舞いといった客観データ、子どもの性格検査、そしてロボットに対する子どもの印象評価のためのアンケートといった主観データを記録する。それらのデータを解析し、

- 人見知り性格が親近感に及ぼす影響の有無

¹慣れない状況における気質的な不安や警戒が現れた行動

- 人見知り性格のあり・なし別に親近感に影響を及ぼした遊び行動

を分析して、仮説の検証を試みる。この仮説が正しければ、そしてその特性が明らかになれば、人見知りの子どもとも良好な関係を築ける柔軟な遊び相手ロボットの実現に向けて、大きく前進すると考える。

5.3 親近感を高める遊び行動

本節では、人見知りの親近感を高める有効な遊び行動とは何かについて議論する。以降、遊びの最中に行われる行動と遊びをまとめて遊び行動と呼ぶ。

5.3.1 親和的遊び行動

まず子ども全般の親近感を高めるために有効な遊び行動とは、ロボットが子どもに対して親密な態度を示しやすい遊び行動であると本研究では推測し、これを親和的遊び行動と定義する。相手の名前を呼んだり、相手の良く知っている内容に関する知識を披露したり、「あなたを知ってるよ」、「あなたに興味があるよ」という風に、相手にこちらの親密な態度を示すことが、相手からロボットへの親近感につながると考える。例えば、子どもの名前を呼ぶこと、着ている服や親など子どもに深く関係する内容について会話をすること、子どもが通う幼稚園に関するクイズ、物の受け渡し遊び、ボディタッチ、などが親和的遊び行動に相当すると想定する。しかし人見知り性格を加味した場合、これらの親和的遊び行動の全てが親近感をもたせられるわけではない。対人不安が大きい人見知りの子どもにただ積極的に近づこうとすれば、かえって不安をあおり、逆効果になる可能性もある。

5.3.2 不安緩和遊び行動

人見知り

一般的に人見知りとは、乳児が知らない人へ示す回避反応のことであるが、乳児期以降の子どもが見知らぬ人に対して恥ずかしがったり嫌うことも人見知りと

よばれる。人見知り行動の原因は、乳児においても学童期においても、相手に近づきたい心理と怖いから離れたい心理の葛藤状態であると報告されている [50]。つまり人見知りの子どもは相手に大きな不安を抱いていると同時に、本当は強くコミュニケーションを望んでいるのである。したがって、人見知りの子どもと遊ぶ場合には、この対人不安を気にしなくても済むか、あるいは取り除いて遊べるのが大切なのではないかと考える。

不安緩和遊び行動

子どもが受動的あるいはあまり意識しなくてもできる遊び行動は、対人不安の強い状態でも遊ぶことができると推測する。このような遊び行動を、不安緩和遊び行動と定義する。例えば絵本の読み聞かせ、何度も経験のあるじゃんけん、無意識に重ねるだけでも形ができる積み木などである。あるいは能動的に動く必要があっても、安心感を得ていればできる遊び行動もあると考える。例えば物を握る行為は緊張した子どもの心の支えになる可能性があり、いつもと違う場所に行った子どもが木の枝や小石を握りしめて心の安定を図るといった例が、西垣らによって報告されている [51]。積み木、ボール遊び、旗揚げなどは、物を握ることによって不安が緩和でき、対人不安があっても遊べる可能性が高い。実際に積み木に関しては、清水が内向的な子どもが他の活動よりも抵抗を感じずにできる遊びだと述べている [52]。

人見知りの子どもの親近感を高められる遊び行動とは、親和的遊び行動のうち不安緩和遊び行動の要件を満たす遊び行動であると推測する。よって人見知りに有効な遊び行動に関して本章では次の仮説を立てる。

仮説2：人見知りに有効な遊び行動は、親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動である。

表 5.1: 用意した遊び行動の詳細と分類

遊び行動	親和的遊び行動	不安緩和遊び行動	行われる内容
じゃんけん	×	○	操作者が選択したグー・チョキ・パーの手の形をロボットが出し、子どもとじゃんけんをする。
○×ゲーム	○	○	ロボットが問題文を出し、子どもが手に持った○×の札を挙げて回答する。ロボットも○×札で正解を示す。
サイコロ遊び	×	○	ロボットと子どもがそれぞれサイコロを投げ、出目の大きさ比べや、出目の足し算をする。
歌	×	○	勇気100%・大きな栗・幼稚園園歌をロボットが単独で歌ったり、子どもと一緒に歌う。
カニ歩き	×	×	左右のハンドをハサミに見せかけ、カニの姿勢をとったまま横向きに移動して、子どもと一緒にカニ歩きをしたり、カニ歩きで競争したりする。
ジェスチャー	△	×	ロボットが右アームを左右に振る・前後に振る・捻るといった動きをする。例えば子どもに手を振ったりできる。
手つなぎ	○	○	ロボットが差し出した右ハンドを子どもが引き、子どもに先導される形でロボットが自動的についていく。
あっち向いてホイ	×	×	じゃんけんを行い、勝った側が指で上下左右の好きな方向を指定し、その方向が負けた側の顔の向きと一致したら、勝った側の勝利となる。
プレゼント渡し	—	—	ロボットが子どもにカゴを差し出し、カゴの中に入った消しゴム人形をプレゼントする。
かくれんぼ	○	○	ロボットが鬼役となって隠れた子どもを探したり、反対にロボットが隠れて子どもを探してもらったりする。室内に隠れ場所となる障害物を2箇所設置する。
かけっこ	×	×	発話でスタートの合図を出し、移動して子どもと走る速さを競う。
会話	○	×	特定の遊びを行っていないときに話をする。(例:自己紹介, 幼稚園に関する話題など。)
名前の発話	○	—	子どもの名前を発話する。(例:「○○ちゃんの番だよ。」)
「ね」の発話	○	—	終助詞の「ね」をつけて発話する。(例:「遊んでね。」)

5.3.3 実験で用意する遊び行動

本章では、人見知りの子どもに有効な遊び行動が存在するという仮説1、そしてその遊び行動が親和的遊び行動かつ不安緩和遊び行動であるという仮説2を、保育者が操作するロボットと子どもの遊び実験によって検証する。

実験で用意する遊び行動は、表5.1の通りである。各遊び行動は、半自動化されてロボットに搭載されている。ロボットシステムの詳細は5.4節で述べる。搭載す

る遊び行動の選定は、保育者への事前の聞き取りと実装可能性の検討（技術的に可能か、ロボットとのインタラクションが明らかに不自然でないか）をもとに行った。プレゼント渡しは、ロボットが実験参加のお礼をして遊びの終了を知らせる目的で用意した（5.5.2節 実験プロトコル参照）。そのため遊び行動の分類からは除外する。

今回の実験で準備する遊び行動のうち、親和的遊び行動に相当するものは、表5.1の2列目に示すように○×ゲーム、ジェスチャー、かくれんぼなどである。○×ゲームでは、子どもが通う幼稚園に関する出題をすることで親密な態度が表出できると考える。バイバイと手を振るといったジェスチャーの一部の行為は、親密さを表現できる可能性がある。かくれんぼは、大人の視点からすると捕食・非捕食の競争的な遊び行動であるが、子どもにとっては“相手に見つけてもらえる”、“相手の自分に対する興味を確認できる”協調的な遊び行動として捉えられている可能性があり [32]、これも親和的遊び行動だと考える。ロボットが名前を呼ぶ行為は、塩見らの行った科学館におけるロボットと来館者のコミュニケーション実験でも、好意的に受け入れられている [53]。終助詞「ね」は、Maynardによると、聞き手に対する話し手の親しみの態度を表す機能をもつという [54]。

不安緩和遊び行動の分類は、表5.1の3列目に示した通りである。○×ゲームやサイコロ遊び、プレゼント渡しなどでは、物を持つことにより緊張が緩和すると考える。歌はロボットが単独で歌うとき受動的に遊べる。手をつなぐことは幼児同士の場合“手をつないであげる”ことではなく“手をつないでもらう”ことを意味し、安心感や安定感への嗜好性をもっていると報告されている [55]。ロボットを物体・おもちゃとして捉えない限り、手つなぎで安心感が得られるのではないかと推測する。かくれんぼでは子どもが隠れている間に不安を落ち着かせられると考える。子どもの名前の発話、終助詞「ね」の発話はごく短時間であるため、不安緩和の要素は規定できないと考え、分類からは除外する。

5.4 遊び相手ロボットシステム

5.4.1 遠隔操作ロボットを使った遊び行動の分析

人見知りの子どもに有効な遊び行動を探るための方法として、本研究では、保育者が遠隔操作するロボットを使った実験を行う。ただし注意したいのは、本研究の将来の目標は自律で遊べるロボットの実現であり、遠隔操作ロボットでの実験はそのための方法論であるということだ。保育者が子どもと遊びを成立させるノウハウのうち、ロボットの身体的な制限の中で実現可能なものを効率よく得たい。よって本論文では遠隔操作ロボットを用い、ロボットの身体的制限の中で有効な遊び行動を探る。

5.4.2 実験で用いる遊び相手ロボット

ここからは実験で使用する遊び相手ロボットの概要と遠隔操作システムについて述べる。

本研究で目指す遊び相手ロボットは、家庭内での子どもの相手を目的としている。そこで、実験ではロボットが子どもと1対1で遊ぶことを想定する。

5.4.3 ロボットプラットフォーム

本章では、筆者の所属する研究グループで開発したロボット LiPRO [56] を用いる (図 5.1 a)。LiPRO は身長が可変だが、本論文では子どもとの身長差を考慮し、床から頭頂部までおよそ 105cm に設定した。上半身には 7 自由度のアーム 2 つと 2 自由度の首、1 自由度の腰、そして下半身には全方位台車がある。頭部にはウェブカメラと、RGB カメラおよび深度センサで構成される Kinect を搭載する。台車にはマイクが設置されており、子どもの声やロボットの周囲の音声を拾う。台車前部にはレーザーレンジファインダー (LRF) を搭載しており、これによって前方角度 270 度以内の物体との距離を測定し、SLAM による自己位置推定、障害物回避を行う。

4章で用いたロボットプラットフォーム DiGORO と比べ、LiPRO は重い物を持つことはできないが、背が低い。それによって子どものロボットへの親和性が向上し、安全性も高くなって部屋を動き回る遊びが実現可能となった。

5.4.4 遠隔操作システム

遠隔操作インタフェースを装着した操作者の様子を、図 5.1 b に示す。

ロボットの頭の向きを操作するため、操作者は頭部にヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着する。HMD の画面には、ロボット頭部に搭載したカメラからの映像と、後述する遊びモジュールを操作するための選択肢が表示される。操作者は自身の頭部を動かすことで、ロボットの頭部に同じ動作をさせることができ、直感的に視界を制御できる。

ロボットに発話をさせるために、操作者は頭部に装着したヘッドセットマイクに向かって発話する。操作者の発話は音声認識され、その結果から合成音声が生産されてロボットより出力される。音声認識を介することで、抑揚といった現システムで再現困難な情報が意図せず含まれることを避けている。また、間違った音声認識結果の発話を聞いた子どもがロボットに不信感をもつことを防ぐため、遠隔操作者の傍にいる発話補助者が音声認識結果のフィルタリングを行う。発話補助者は PC 上に表示される音声認識結果を判別し、状況に相応しいものであれば発話ボタンを押して音声認識結果をロボットから発話させる。

ロボットの移動は、ゲームパッド上のジョイスティックで行う。ロボットの前進後退はジョイスティックの上下、回転移動は左右で操作する。

5.4.5 遊びの操作

本システムには複数の遊びモジュールが搭載されており、操作者はゲームパッドでその遊びモジュールを選択する。各遊びは半自動化されており、簡単な操作だけで子どもと遊ぶことができる。

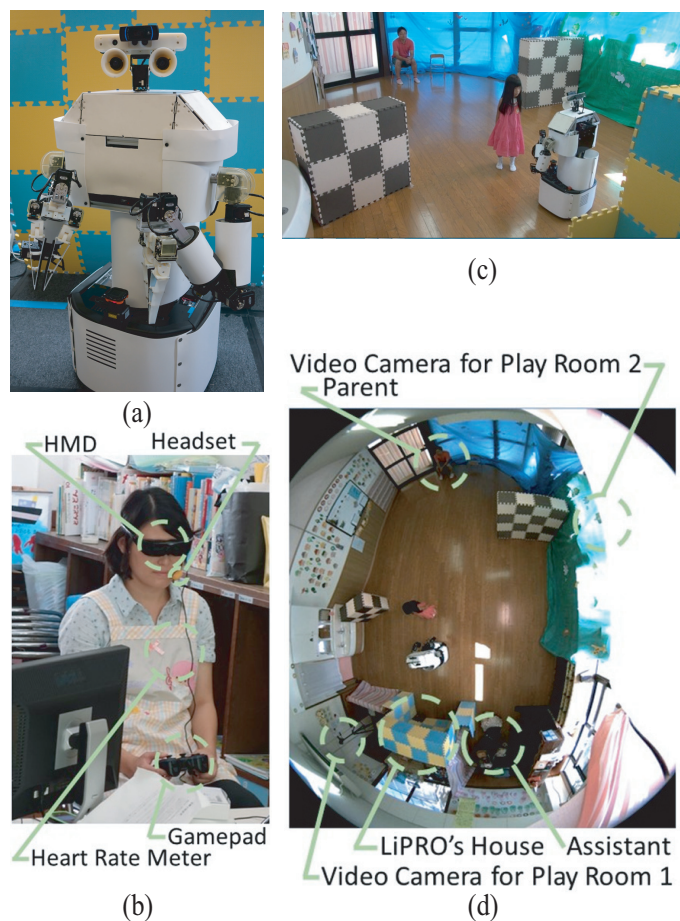


図 5.1: 実験環境 (a)LiPRO (b) 操作者 (c) 遊び部屋 (d) 遊び部屋の俯瞰映像

5.5 1対1の遊び実験

5.5.1 実験条件

子どもは5~6歳の39名(平均年齢5歳9か月, $SD = 5.0$ か月, 男25名, 女14名)を対象とした。ロボットの操作を担当する保育者は勤務年数約10年の幼稚園教諭4名(平均36歳, すべて女性)とした。また, 子どもに同伴する保護者に, 実験時の印象評価や子どもの性格検査を依頼した。実験は子どもが普段通う幼稚園にて, 12日間, 1日あたり2~4名の子どもに対して行った。保育者は1日あたり1人もしくは2人が遠隔操作を担当した。操作者となる保育者には事前に計5~6時

間のロボット操作練習を行った。また、ロボットと子どもが初対面であることを想定し、保育者には子どもの名前と性別のみを事前情報として与えた。操作者は幼稚園でその子どもの担任を経験していない保育者が担当し、事前に子どものことを知っていた場合でもその子どもを知らないという体で接した。

5.5.2 実験のプロトコル

まず、子どもと保護者は到着後、待機部屋にて待機した。保護者はその間、子どもの性格検査に回答した。次にアシスタントが子どもと保護者を遊び部屋（図5.1 c, d）まで誘導し、この3人が同時に遊び部屋に入室した。保護者は入り口近くの椅子に座った。保護者には、子どもとロボットのコミュニケーションになるべく関わらないで欲しいこと、交流後にアンケートに答えてもらうことを伝えた上で同席してもらった。交流開始時、ロボットは部屋奥のロボットの家に入っており、子どもにはロボットの見える好きな位置に行ってもらうようにアシスタントから促した。その後保育者がロボットを遠隔操作して、自由に子どもと遊んだ。ロボットが遠隔操作されていることは子どもには伝えず、操作者はロボットが自律で動いているかのように操作した。交流時間は1人約30分とした。最後に子どもが退室する際には、操作者はプレゼント渡しモジュールを実行し、子どもに消しゴムを手渡した。交流中にロボットがとる行動は、最後のプレゼント渡し以外は操作者に一任した。遊びが終了した後、アシスタントは子どもと保護者を待機部屋まで案内した。待機部屋では子どもと保護者それぞれにアンケートを実施し、操作を担当した保育者にもアンケートを実施して、全行程終了とした。

交流中に行った遊び行動は表5.1の通りであり、本実験の目的は、これらが行われた量と人見知りの子どもの親近感との関連を調べることにある。ただし退出時に全員に行ったプレゼント渡しは、解析には使用しないこととする。

5.5.3 性格検査とアンケート

交流前に保護者に対して、TS式幼児・児童性格診断検査と小学生用主要5因子性格検査を実施した。TS式幼児・児童性格診断検査は就学前の子どもや小学生を

適用範囲とした，養育者による他者評価形式の性格検査である．検査項目は，顕示性・神経質・情緒不安・自制力・依存性・退行性・攻撃性・社会性・家庭適応・学校適応・体質的安定の11項目である．それぞれの項目は値が低いほど精神的に不安定で何らかの配慮が必要とされている．小学生用主要5因子性格検査は，基本的な性格の次元といわれる5つの直交因子（外向性，協調性，良識性，情緒安定性，知的好奇心）と問題攻撃性を評価する．この検査は本来，小学生を適用範囲とした検査であるが，TS式幼児・児童性格診断検査に外向，内向の計測指標がなく，幼児を対象とした検査が少ないことと，この検査による両親の他者評定と児童の自己評定の相関が高い [57] ことから，子どものこととして回答してもらう形で保護者に実施した．

交流後，ロボットに対する子どもの印象評価のために，(1) 子ども，(2) 実験に同席した保護者，(3) ロボットを操作した保育者，にアンケートを実施した．各質問項目は基本的に5段階評価とした．子どもへのアンケート（表5.2）は，ロボットの印象に関する質問から成り，実施に際しては質問の分かりやすい紙を用意し，そこにスタンプを押す形で答えてもらうなど，子どもが回答しやすいように最大限の注意を払った．保護者へのアンケート（表5.3）は，子どもとロボットのやり取りを見て感じた子どもの印象を問う質問と，子どもの普段の様子に関する質問から成る．保育者へのアンケート（表5.4）は，ロボットを通したやりとりで感じた子どもの印象を問う質問から成る．

表 5.2: 子どもに対するアンケート

ID	質問項目
C1	リプロは本当の人間みたいだと思う
C2	リプロは怖いと思う
C3	リプロとお友達になりたいと思う
C4	リプロは心があると思う
C5	リプロともう一回遊びたいと思う

表 5.3: 保護者に対するアンケート

ID	質問項目
P1	調査前の機嫌はよかった
P2	調査中の機嫌はよかった
P3	調査後の機嫌はよかった
P4	調査前は緊張していた
P5	調査中は緊張していた
P6	調査終了時、調査が終わることがわかってほっとしたように見えた
P7	ロボットに親近感を持っているように見えた
P8	ロボットは、人間が裏で操作しているとわかっているように見えた
P9	できるだけロボットに関わりたくない、または近づきたくないように見えた
P10	自分から積極的にロボットに関わろうとしていた
P11	調査に使用したロボットを怖いと思っていた
P12	調査に使用したロボットに好感を持っていた
P13	ロボットに対して興味を持っているように見えた
P14	保護者の方からみてロボットはお子様の遊び相手をうまくできていた
P15	調査に使用したロボットをどのような存在だと思っているように見えたか、イメージに近いものを選択してください（複数回答可）
P16	普段からキャラクターに人格があるとみなしている
P17	着ぐるみなどを怖がることが多い
P18	ロボット（今回調査に使用したもの以外）が好き、または興味がある
P19	周囲に甘えることはよくある
P20	いつもと違う状況だと緊張しやすい方である
P21	人見知りはあまりしない方である
P22	年下の世話をしたがることはよくある
P23	好奇心は強い方である
P24	興味を持ったものにはすぐに触れようとしたり、自分から近づいたりすることがある

5.5.4 データの記録

実験中は5.4節で述べた遠隔操作システムにより、ロボットの動作データおよび環境データを記録した。記録したデータは、ロボットが発話した文字情報、実行された遊びモジュールの情報、ロボット頭部カメラからのRGB画像、距離画像である。また、遊び部屋と操作部屋に設置した4台のビデオカメラによる映像も記録した。

表 5.4: 操作者（保育者）に対するアンケート

ID	質問項目
O1	部屋に入ってきたときは緊張しているように見えた
O2	調査中は緊張しているように見えた
O3	調査終了時に、調査が終わることがわかってほっとしたように見えた
O4	部屋に入ってきたときは機嫌がよさそうに見えた
O5	調査中は機嫌がよさそうだった
O6	調査終了時は機嫌がよさそうだった
O7	ロボットに対して興味を持っているように見えた
O8	ロボットに好感を持っていた
O9	ロボットは、人間が裏で操作しているとわかっているように見えた
O10	自分から積極的にロボットに関わろうとしていた
O11	ロボットを怖がっていた
O12	できるだけロボットに関わりたくない、または近付きたくないように見えた
O13	ロボットに親近感を持っているように見えた
O14	調査に使用したロボットをどのような存在だと思っているように見えたか。イメージに近いものを選択してください（複数回答可）

5.5.5 映像からの子どもとロボットの客観指標の算出

子どもがロボットに親近感をもったかどうかは、ロボットと子どもの間の距離、および子どもの笑顔度に現れると考える。そこで、子どもからロボットへの親近感の程度を客観的に捉えるために、子どもとロボットの距離および子どもの笑顔度を求めた。本章では、子どもが装置を装着せず自由に遊べ、かつ大掛かりな装置を必要としない画像解析による計測を採用した。今回の実験では遊びの最中に移動するため、定点カメラで子どもの顔の映像を常に記録することが難しい。そこで、ロボット視点からの画像を用いた。客観指標は、画像を実験後に処理し、時系列データとして算出した。

子どもとロボットの距離（以下 DIST） ロボットの視界にあたる Kinect の RGB 画像から子どもの顔を検出し、距離情報と照らし合わせることで、ロボットから子どもの顔までの距離を求めた。

子どもの笑顔度（以下 C_SMILE） 子どもが笑顔である度合いを 0~100 で表す。Kinect の RGB 画像から OKAO Vision を用いて算出した。

ただし、使えるのはロボットの視点からの画像のみであり、常に対象とする子どもの顔を観測できるわけではない。

5.6 実験結果

子ども 39 名のうち全員が交流中に遊びを中断することなくロボットと遊ぶことができた。しかしアンケートと記録データが全て有効だったのは 31 名であった。以降、この 31 名について解析する。

本実験の目的は、仮説 1：人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する、および仮説 2：人見知りに有効な遊び行動は、親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動である、の検証である。解析は以下の手順で行った。

1. 子どものロボットへの親近感を評価するために、保護者が回答したアンケートの P7“ロボットに親近感を持っているように見えた”という親近感得点を取り上げ、その信頼性を客観指標および他のアンケート項目との関係から検証した。
2. 人見知り性格がロボットへの親近感に影響しているかどうかを、保護者が回答したアンケートの P21“人見知りはあまりしない方である”という人見知り得点、および P7 親近感得点別に人数を計数して確かめた。
3. 人見知りの子どもの中で親近感をもった／もたなかったの差が、遊びを通して生じたものであるかどうかを、10 分ごとの客観指標の変化によって確認した。
4. P7 親近感得点と行われた遊び行動の関係から、人見知りの子どもの親近感に影響した遊び行動を探した。

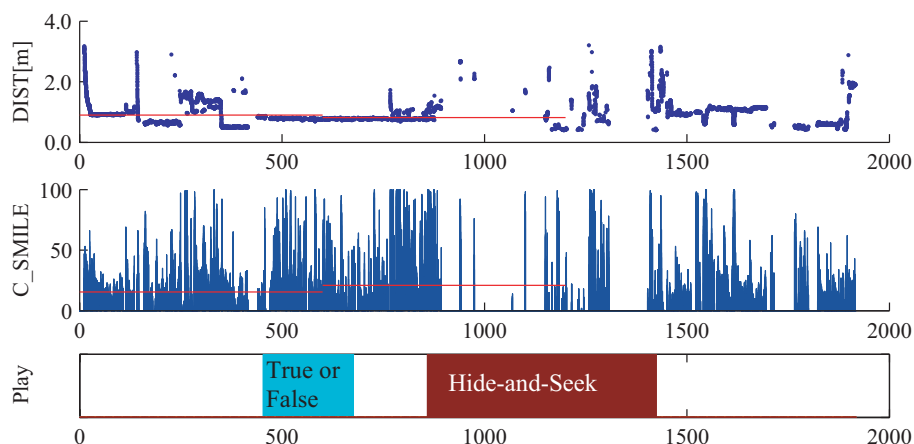


図 5.2: 客観指標の例（親近感あり・人見知り）：上はロボットー子ども間距離，真ん中は笑顔度，下は遊び（○×ゲームとかくれんぼ）．赤線は 10 秒間の平均値を表す．

5.6.1 親近感の評価指標

まず P7 親近感得点が子どもからロボットへの親近感の評価指標として妥当であるかを確認する．

P7 親近感得点と，各アンケート得点および客観指標とのピアソンの積率相関を求め， t 値に変換して有意水準 5%（相関係数の境界値 ± 0.355 ）と 1%（相関係数の境界値 ± 0.456 ）で無相関検定を行った．有意な相関のあった項目とそれに関連する項目は表 5.5 に示す通りである．

P7 親近感得点との相関は次のようになった．まず客観指標において，ロボットー子ども間距離 DIST の平均とは有意な負の相関（ $p = 0.001 < 0.01$ ）がみられ，親近感が高いほど子どもがロボットに近づいていることがわかる．笑顔度 C_SMILE とは有意な正の相関（ $p = 0.03 < 0.05$ ）がみられ，親近感が高いほど子どもが笑顔であることがわかる．図 5.2 に得られた客観指標の例を示す．

保育者のアンケートでは，P7 親近感得点の高得点な子どもがロボットに対してポジティブな印象をもつことで一致している．子どものアンケートでは，C3“お友達になりたい”と有意な正の相関（ $p = 0.002 < 0.01$ ），C5“もう一回遊びたい”と有意な正の相関（ $p = 0.020 < 0.05$ ）がみられ，子ども自身に尋ねた印象評価にお

表 5.5: アンケート P7 親近感得点との相関 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, 無印: 有意でない)

データ	項目	相関係数
客観指標	DIST 平均	-0.577 **
	C_SMILE 平均	0.391 *
保育者 アンケート	O4 部屋に入ってきたときは機嫌がよさそうに見えた	0.237
	O5 調査中は機嫌がよさそうだった	0.390 *
	O2 調査中は緊張しているように見えた	-0.292
	O4 調査終了時に、調査が終わることがわかってほっとしたように見えた	-0.506 **
	O8 ロボットに好感を持っていた	0.622 **
	O11 ロボットを怖がっていた	-0.538 **
子ども アンケート	C3 リプロとお友達になりたいと思う	0.524 **
	C5 リプロともう一回遊びたいと思う	0.417 *
保護者 アンケート	P1 調査前の機嫌はよかった	0.041
	P2 調査中の機嫌はよかった	0.539 **
	P3 調査後の機嫌はよかった	0.394 *
	P4 調査前は緊張していた	-0.250
	P5 調査中は緊張していた	-0.401 *
	P6 調査終了時、調査が終わることがわかってほっとしたように見えた	-0.478 **
	P7 ロボットに親近感を持っているように見えた	1.000
	P9 できるだけロボットに関わりたくない、または近づきたくないように見えた	-0.575 **
	P10 自分から積極的にロボットに関わろうとしていた	0.717 **
	P11 調査に使用したロボットを怖いと思っていた	-0.690 **
	P12 調査に使用したロボットに好感を持っていた	0.681 **
	P13 ロボットに対して興味を持っているように見えた	0.433 *
	P20 いつもと違う状況だと緊張しやすい方である	-0.507 **
	P21 人見知りはあまりしない方である	0.645 **
P24 興味を持ったものにはすぐに触れようとしたり、自分から近づいたりすることがある	0.514 **	
性格検査	TS 式 顕示性	-0.445 *
	TS 式 攻撃性	-0.425 *
	小学生用主要 5 因子 外向性	0.428 *

いても、保護者の P7 親近感得点が高い子どもほど良い評価となっている。保護者のアンケートでは、P7 親近感得点の高い子どもがロボットに対してポジティブな

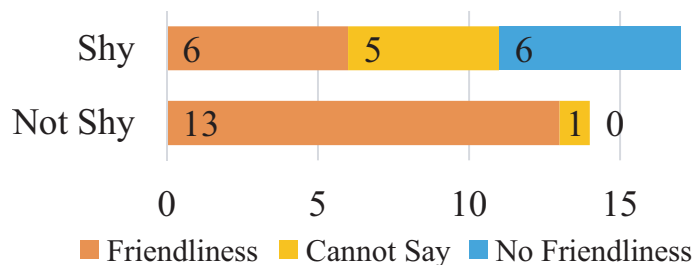


図 5.3: P7 親近感得点および P21 人見知り得点別の子ども人数の内訳

印象をもつことで一致している。

以上の結果は、P7 親近感得点の信頼性を保証していると考えられる。よってこれ以降、P7 親近感得点を子どものロボットへの親近感の評価指標に用い、解析を進める。

5.6.2 人見知りと親近感の関係

ここでは親近感の人見知り性格に影響しているかどうかを検証する。

表 5.5 より P7 親近感得点は P21 人見知り得点と有意な正の相関 ($p = 0.0001 < 0.01$) がみられ、人見知り性格が子どもからロボットへの親近感に影響していることが確認できた。さらに詳しく両者の関係を見るため、人見知りする子どもの人数と、ロボットに親近感をもった子どもの人数を確認する。

P21 人見知り得点の結果より、31 名のうち人見知りしない子ども (P21 人見知り得点 4, 5, 以下非人見知り群) は 14 名、人見知りする子ども (P21 得点 1~3, 以下人見知り群) は 17 名であった。また親近感をもった子ども (P7 親近感得点 4, 5) は 19 名 (内、非人見知り群 13 名、人見知り群 6 名)、もたなかった子ども (P7 得点 1, 2) は 6 名 (内、非人見知り群 0 名、人見知り群 6 名)、どちらともいえない (P7 得点 3) は 6 名 (内、非人見知り群 1 名、人見知り群 5 名) であった (図 5.3)。つまり、人見知りしない子どもであればほぼ全員がロボットに親近感を持ち、そして逆に、親近感をもたなかった子どもは、全員が人見知りであった。この結果が示すのは、人見知りへの対応がいかに困難かということである。人見知りは本来ロボットではなく人に対する反応である。子どもがロボットを人と同じように捉えていたどうかは、P15“調査に使用したロボットをどのような存在だと

表 5.6: 人見知り群における P7 親近感得点と子どもの振る舞いに関する客観指標との相関係数 (**: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$, 無印: 有意でない)

時間	DIST	C.SMILE
0~10	-0.584 *	0.088
10~20	-0.729 **	0.628 **
20~30	-0.536 *	0.663 **

思っているように見えたか”で人見知り群 17 名中 12 名が“よくわからない、または今まで出会ったことがない存在”と回答していることから、断定できない。しかし少なくとも人見知りの性格はロボットとのコミュニケーションにおいても影響するといえる。

5.6.3 親近感の変化

親近感に対する性格の影響は大きいですが、人見知りの子どもにのみ着目すると、17 名中 6 名つまり人見知りの 1/3 は親近感をもったことがわかる。この人見知り群の親近感の差が遊びの中で生じたものかどうかを検証する。

まず人見知り群の中で P7 親近感得点と性格検査の各得点の間の相関を求めたところ、いずれも有意な相関はみられなかった。つまり人見知り群の中で子どもが親近感をもてたか否かは性格に因らなかったことがわかる。次に 10 分間区切りの子どもごとの距離 DIST と笑顔度 C.SMILE の平均を求め、P7 親近感得点との積率相関を求めた (表 5.6)。その結果、笑顔度では交流開始直後の 10 分間では親近感と笑顔度に相関がみられないのに対し、これ以降の 10 分ごとでは有意な正の相関 ($p = 0.007 < 0.01$, $p = 0.004 < 0.01$) がみられた。距離に関しては、全時間帯で有意な負の相関 ($p = 0.014 < 0.05$, $p = 0.001 < 0.01$, $p = 0.027 < 0.05$) がみられるものの、0~10 分よりも 10~20 分で相関の度合いが強くなっていた。よって、親近感は最初大きな違いはなく、交流開始から 20 分の変化していったものだと考えられる。

表 5.7: 遊び行動と P7 親近感得点の相関 (*: $p < 0.05$, †: $p < 0.1$, 無印: 有意でない): C = 会話 (なし), M = 移動, R = じゃんけん, Q = ○×ゲーム, D = サイコロ遊び, S = 歌, H = かくれんぼ, Name = 名前の発話, Ne = 終助詞「ね」の発話.

time	play actions	S			Non-S	
		r	p		r	p
0~10	C	0.118	0.653		0.597	0.024 *
	M	-0.030	0.908		-0.259	0.371
	R	-0.115	0.660		0.034	0.909
	Q	0.568	0.017	*	0.093	0.752
	D	0.016	0.952		-0.237	0.414
	S	-0.455	0.066	†	-0.162	0.579
	H	-0.379	0.133		0.033	0.910
10~20	C	-0.327	0.200		-0.130	0.657
	M	-0.247	0.340		-0.107	0.715
	R	0.353	0.165		0.214	0.463
	Q	-0.413	0.099	†	0.575	0.032 *
	D	-0.098	0.709		-0.075	0.800
	S	0.100	0.702		0.072	0.807
	H	0.492	0.045	*	-0.255	0.379
0~15	Name	0.419	0.087	†	-0.117	0.664
	Ne	0.459	0.083	†	-0.505	0.070 †

5.6.4 親近感に影響した遊び行動の分析

人見知り群において、最終的な親近感と交流中に各遊び行動が行われていた量との関連を検討する。そのために、表 5.1 のじゃんけんから会話まで（プレゼント渡しを除く）の 11 種の遊び行動が実行されていた時間を数え上げ、各遊び行動が行われていた時間を算出した。名前の発話、終助詞「ね」の発話に関しては、それらをロボットが発話した回数を、発話ログから計数した。交流 0~10 分, 10~20 分における遊び時間と P7 親近感得点との積率相関を求めたところ, 0~10 分で ○×ゲームに有意な正の相関 ($p = 0.017 < 0.05$), 10~20 分でかくれんぼに有意な正の相関 ($p = 0.045 < 0.05$) がみられた。また, 0~10 分で歌に有意傾向

の負の相関 ($p = 0.066 < 0.1$) , 10~20分で○×ゲームに有意傾向の負の相関 ($p = 0.099 < 0.1$) がみられた。それ以外の遊び行動は、最終的な親近感への影響は確認されなかった。

発話回数に関しては、交流時間0~15分の範囲で同様にP7親近感得点との積率相関を求めたところ、子どもの名前の発話、終助詞「ね」の発話ともに有意傾向の正の相関 ($p = 0.094 < 0.1$, $p = 0.064 < 0.1$) がみられた。

これらの結果を表5.7中央列に示す。なおほとんど行われなかった遊び行動は表5.7から除いた。

また比較のために、非人見知り群においても同様に遊び時間・発話回数との積率相関を求めた。ただし今回の非人見知り群では親近感がない子どもはいなかったため、P7親近感得点の値は3~5の範囲となっている。結果、0~10分で実行モジュールなし(会話)に有意な正の相関 ($p = 0.024 < 0.05$) , 10~20分で○×ゲームに有意な正の相関 ($p = 0.032 < 0.05$) , 0~10分で終助詞「ね」の発話に有意な負の相関 ($p = 0.032 < 0.05$) , 0~15分で「ね」の発話に有意傾向の負の相関 ($p = 0.065 < 0.1$) がみられた(表5.7右列)。

人見知り群の結果で有意あるいは有意傾向の相関がみられた遊び行動は、非人見知り群のものとは異なることがわかる。

5.7 考察

5.7.1 遊び行動の分類から見た効果

本章の実験は、ロボットとの関係構築が容易でない子どもに対応できる仕組みを実現する第一歩として、仮説1:人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する、仮説2:人見知りに有効な遊び行動は、親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動である、を検証する目的で行った。保育者が遠隔操作するロボットと子どもが遊ぶ実験を行った結果、0~10分の○×ゲームと10~20分のかくれんぼを多く行った人見知りの子どもほど、ロボットへの親近感が高まることが示された。また0~10分の歌、10~20分の○×ゲームは逆効果の傾向がみられた。さらに0~15分間の終助詞「ね」をつけた発話、0~15分

間の子どもの名前の発話は、有効な傾向があることが示された。したがって仮説1の、“人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動の存在”は立証されたといえる。

仮説2では、人見知りの親近感を上げるのは親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動だと考えた。本実験で行った遊び行動では、○×ゲーム、手つなぎ、かくれんぼがこれに相当する。手つなぎは交流中ほとんど行わなかったことから、その影響は確認できなかった。しかし、○×ゲームとかくれんぼは、これらを多く行った人見知りの子どもほど親近感が高まる結果を得た。これらの遊び行動は不安緩和要素によって人見知りの子どもでも遊ぶことができ、かつ親和的要素によって親近感を高めることができたのではないかと推測する。○×ゲームは10~20分では親近感に対し逆効果の傾向がみられたが、これは○×ゲームを交流の中盤に行うのではなく、最初に行うのが良いことを表していると考えられる。実際○×ゲームは問題数が8問と限られていたため、中盤に行われた場合は序盤では実施されず、序盤で行った場合には中盤では実施されなかった。○×ゲームは初期段階で行って早く安心感を与え、その後他の遊びに移行することが良いということではないかと推測する。またかくれんぼは0~10分では効果が確認できなかったが、その理由として、交流初期では子どもが部屋の状況を把握しきれていなかったことが挙げられる。実際、交流初期にかくれんぼをすると、子どもが戸惑う様子が観察された。以上の結果より、人見知りに有効な遊び行動は親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動であるという仮説2は、立証されたと考えられる。

親和的遊び行動である名前の発話と「ね」の発話は人見知りに有効であった。これらの発話は短時間であり、不安緩和要素は規定できないと考えた。しかし実際には、名前と「ね」はそれ単体ではなく、他の遊び行動が行われている最中に発話された。一緒に行われた遊び行動は会話に限らず、○×ゲームやサイコロ遊びといった不安緩和遊び行動も多かった。このような同時に行われていた遊びの不安緩和効果が働き、発話の親和的効果が表れたのではないかと推測する。実際の発話の例を図5.4に示す。

0~10分の歌は、有意傾向ではあるが、親近感を低くするという結果が出ている。

(○×ゲームの最中にて) 「○○くんすごいね。」 「○○くん幼稚園の事詳しいね。」 「全問正解だね。」
--

図 5.4: 終助詞「ね」の実験での発話例

これはロボットシステムの問題である可能性が高い。ロボットの歌の出力と通常の発話には異なるソフトウェアを使用しており、それぞれの声と同じではなかったため、子どもに不信感を抱かせたのではないかと推察する。実際ロボットが歌いだすと、不審な顔をする子どもや、スピーカーを探そうとする子どもが存在した。

終助詞「ね」は人見知りの子どもには有効だったが、一方の人見知りしない子どもに対しては逆効果であった。音声合成で発話される「ね」の韻律は必ずしも自然ではなかったため、人見知りほど緊張せず余裕があった子どもには、「ね」が多用されるとその違和感が気になったのかもしれない。

非人見知り群では、0~10分で実行モジュールなし（会話）が多いほど親近感が高まっている。会話は人見知りでない子どもの親しみを増加させるが、逆に人見知りの子どもには影響していない。本章の遊び行動の分類では、会話は親和的遊び行動であるが、不安緩和遊び行動ではない。親和的遊び行動は子ども全般に対して親近感を高め、そのうち不安緩和遊び行動であるものだけが人見知りに有効だと筆者は予測したが、会話が非人見知りにのみ効果があったという結果は、これを支持するものと考えられる。つまり、性格の違いによって異なる有効なアプローチが存在することを示唆している。初対面の子どもと遊ぶとき、まずは会話で仲良くなろうというのが一般的に想像しやすい方策であるが、この方法は人見知りでない子どもだけに適している可能性がある。清水が内向的な幼児について“ほめことばよりも、実際に簡単でおもしろい積木遊びをさせる方が効果的な子どものいることを知らされた [52]”と述べているように、人見知りには無理に会話で仲良くなろうとせず、不安の強い状態でもできる遊び行動をしながら親密な態度を示す方が、心の距離を縮め、親しくなれるということではないか。4章の子どもとロボットの遊び実験では、子どもをロボットに慣れさせる目的で、子どもとロボットの交流の最初に5分程度の会話を設けていた。しかしこの方法が実は人見知り

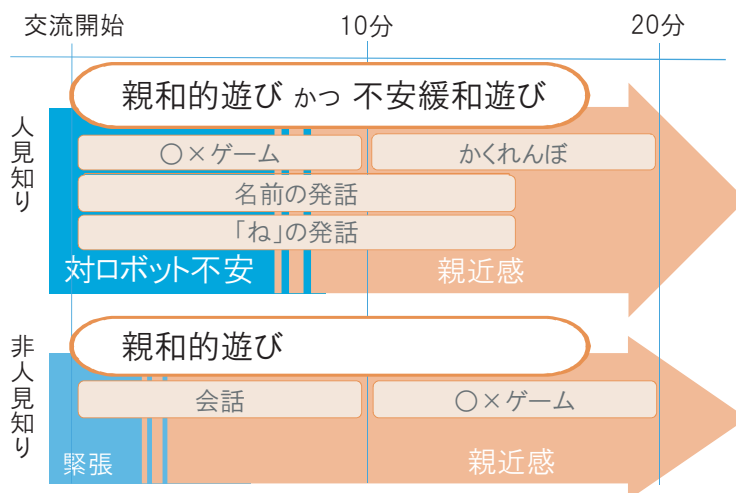


図 5.5: 親近感を高める遊び行動の戦略

しない子どもにだけ有効に働き、人見知りの子どもには慣らしの役目になっていなかったことが示唆される。どんな子どもとも遊べるロボットを実現するにあたり、今回得られた知見は非常に有用である。

以上の結果をまとめ、人見知りの子どものロボットへの親近感を高めるために有効だと思われる遊び行動の戦略を図5.5に示す。

5.8 おわりに

本章では、遊び相手ロボットが友好的な関係を築きにくい性格の子どもと良好な関係を構築するための方法について検討し、その方策として子どもの性格に応じてロボットが行動選択する仕組みを考えた。この仕組みを実現するための第一歩として、本章では人見知りの子どもに焦点を当て、人見知りの子どもの親近感を高めるために有効な遊び行動を探った。保育者が遠隔操作するロボットと5~6歳児との遊び実験を行った結果、人見知り性格がロボットへの親近感に影響すること、そして“人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する”こと、さらに“人見知りに有効な遊び行動は、親和的遊び行動と不安緩和遊び行動の両方の要素をもつ遊び行動である”ことを確認した。本実験の結果は、人見知りには人見知りに合った対応方法があるということを示唆している。一般に子

どもに接する際には、まずは会話をして仲良くなっていくという方策が想像しやすいが、人見知りの子どもにそれは適さない。不安の強い状態でもできる遊び行動をしながら親密な態度を示すことが、人見知りの子どもと仲良くなるためのアプローチであろう。

本章の成果を将来子どもの性格の違いに対応する自律の遊び相手ロボットを実現させる一助としたい。今後は、有効な行動の解析を“ほめる”といった遊び行動の中に含まれる詳細なレベルにおいても行いたい。さらに今回明らかになった行動戦略を実行するためには、遊びながらロボットが子どもの人見知りを推定できる必要があり、これを今後の課題としたい。

第6章 実用的な子育て支援ロボット

6.1 はじめに

前章までで、子どもの心的状態と性格を考慮した行動決定によって友好感を創出し、どんな子どもとも長く遊べる自律の遊び相手ロボットを実現するための方法論について議論した。その議論を通してわかるように、子どもと自律ロボットの遊びを真に成立させることは、コミュニケーションの本質を含む難しい課題である。実用的なレベルでの自律の遊び相手ロボットを実現するには、技術面、安全面、コスト面などまだ多くの課題を解決する必要がある。しかし、家庭内での有効な育児支援の実現は急務である。そこで、本研究で得られた知見をもとに、現時点で実現可能な実用的な遊び相手ロボットのあり方について考えたい。

6.2 実用化の問題点

本節ではまず、遊び相手ロボットを実用化する際の壁と、その対応策を整理する。

1. **安全性とサイズ**: 4章と5章で使用したロボットプラットフォームは、身長が5歳児の子どもと同じか高く、多自由度の腕や腰を有するヒューマノイドロボットである。トランプや積み木などは、このようなヒューマノイドロボットだからこそできる遊びであり、子どもの発達を促す遊びを網羅的に行えるという観点からはそのサイズがメリットであった。しかし、実際の家庭での使用を考えたとき、子どもとロボットの遊びの場面を常に大人が監視できるわけではない。ロボット転倒による怪我、可動部への巻き込みなど、危険源が多いため、このようなロボットでは安全を保証することができない。実用化にあたっては、倒れても問題ない小さなサイズ、軽量の本体、安全性を確

保した機構など、安全を重視してロボットを設計する必要がある。ただしロボットを介して子どもが身体的コミュニケーションをできることは非常に重要であるため、安全性を重視しつつ、同時に身体的コミュニケーションができる機構を残した設計が必要である。

2. 完全自律の難しさ：現状の心的状態推定および性格推定の精度はまだ実用化できるほど十分に高くない。また、行動を実行するタイミングの決定は人間が行っており、これを自律化するためには、子どもの音声認識やロボットの周辺環境の自動認識など、さらに高度な技術が必要である。今の段階では、ロボットが適切なタイミングで行動決定し、完全自律で子どもと遊ぶことは難しい。現段階の実用的な遊び相手ロボットとしては遠隔操作型が適切だと考える。ただし、人が遠隔操作する遠隔操作型になっても本研究で議論してきたモデルが完全に不要になるわけではない。ロボットの操作者が子どもとの遊びを苦手としている場合もあり、人が操作したからといって必ずしも子どもと仲良く遊び続けられるとは限らないからである。例えば、祖父は祖母よりも孫と長く遊ぶのが苦手である [58]。子どもとの遊びを成立、維持できなければ、育児支援としての役割を果たせない。そこで、本研究で提案してきたモデルを遠隔操作型の場合でも活用する。ロボットはモデルによって子どもの心的状態の推定と性格の傾向から最適な遊び行動を算出できるため、操作者にその瞬間瞬間で最適な遊び行動を提案することができる。システムに提案された遊びを行えば、操作者が保育の専門家でなかったり、子どもとの遊びが不慣れであったりしても、子どもと友好感を創出して長く遊べると期待できる。

ここで問題となるのは、誰がロボットを遠隔操作するかということである。保育者は子どもとの遊びに長けているが、ただでさえ保育者不足が叫ばれている現状で保育者を頼ることは難しい。筆者が操作者として適任だと考えたのは、子どもの祖父母である。祖父母の 9 割が孫とのコミュニケーションの機会を増やしたいと考えており、6 割が自身の娘、息子世帯を助けるために孫育てに参加したい意向をもっている [59]。遠隔操作型の遊び相手ロボットを介せば、住む場所が遠くても、体力的に遊ぶのが難しくても、祖父母が孫

の遊び相手および育児支援をすることができる。

以上を踏まえ本章では、実用的な遊び相手ロボットとして、ビデオチャットを基本とした小型のテレプレゼンスロボット（遠隔操作型ロボット）を提案する。本章ではこれをテレ保育ロボットと呼ぶこととする。テレ保育ロボットは、例えば親が家事などで手が離せない間、遠隔地の祖父母が孫を見ているといった用途を想定する。このような目的に使用できる既存のロボットはないため、本章ではテレ保育ロボットのプロトタイプをハードウェアから開発することを目指す。

6.3 テレ保育ロボット ChiCaRo

6.3.1 テレ保育ロボットの位置づけ

現存する子どもを対象としたロボットには、教育支援ロボット（例：韓国の Kibot, ケアレスリーバー型ロボット [18]）やコミュニケーションロボット（例：PaPeRo [60]）がある。これらのロボットの制御方法は主に自律型や、操作者が操作していることを明示しない遠隔操作型である。そのため祖父母が孫とコミュニケーションを楽しみながら面倒を見るといった用途には向かない。操作者と対話者のコミュニケーションが行える遠隔操作型のロボットには、近年開発が盛んなテレプレゼンスロボット（例：Beam+, VGo）がある。しかしその用途は主に遠隔会議といったビジネスを考えられており、機構・デザイン・機能ともに家庭内で幼児の相手をするには適さない。子どもを対象としたテレプレゼンスロボットもわずかに存在する。例えば、田中らは3歳以上の子どもがテレプレゼンスロボットを操作するための操作システムを提案している [61]。このシステムは、システムを介した英語教師とのレッスンや他の子どもとの対話において、コミュニケーションを促進する効果をあげている。

一方本研究で扱うのは、育児支援を目的として幼児とコミュニケーションするための遠隔操作型移動ロボット（テレプレゼンスロボット）である。このような育児支援を目的としたシステムに相当するものは存在せず、これをテレ保育ロボット ChiCaRo（Child Care Robot：チカロ）と命名する。

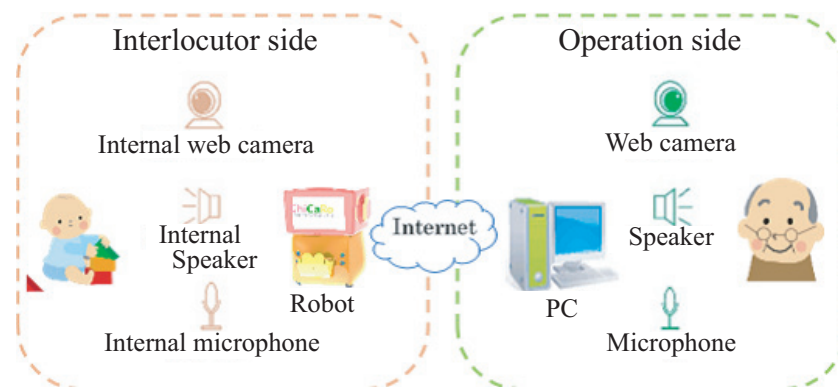


図 6.1: テレ保育ロボットのシステム構成図

6.3.2 テレ保育ロボット ChiCaRo

ChiCaRo は、操作者が遠隔地にいながら実物のおもちゃなどを使って子どもと身体的に遊ぶことを目的とした遠隔育児支援ロボットである。本ロボットを介して祖父母が孫と遊ぶことで、母親は家事や自分の時間を確保できてストレスを減らせ、祖父母もまた遠くに住む孫とのコミュニケーションの機会を増やせる。子どもの育ちの観点からも、母親が家事をする間にテレビを見ているより、ロボットを介して祖父母と遊び、様々な発達を促す遊びをする方が望ましい。ChiCaRo が実現すれば核家族が抱える育児の問題解決の一助となり、祖父母と孫をつなぐホットラインになることが期待できる。ChiCaRo が社会に与えるインパクトは大きいと筆者は考えている。

ChiCaRo は 0～6 歳の乳幼児を対象とする。祖父母は 50～60 代を想定する。ChiCaRo は子どものいる部屋に置かれ、ChiCaRo のシステムはインターネットを介して遠隔地にいる操作者の操作端末（PC やタブレット）につながっている。操作者はこの操作端末を使って、ビデオチャットをしながらロボットを操作して子どもと遊ぶ（図 6.1）。

6.3.3 要求事項

ChiCaRo は乳幼児や祖父母が使うことを想定しているため、安全性や機能など、従来のテレプレゼンスロボットに対するものとは異なる要求がある。乳幼児が対

面するロボット側の設計には、(1) 安全性 (2) 身体的に遊べること (3) 祖父母とのコミュニケーションツールであること、が求められる。また祖父母が使うという観点では、(1) 操作性 (2) 孫と一緒に遊んでいるような感覚を得られること、が大切である。ChiCaRo のデザインは、これらの要求事項を踏まえて行う必要がある。

6.3.4 デザイン

前節の要求事項を踏まえ、ChiCaRo の設計について述べる [62]。外装や機構の設計では、子どもの安全性を考慮してロボットの小型・軽量化と、安全な機械設計が重要である。ロボットの機械部分への要求仕様は、子どもを対象としたロボット PaPeRo の機構の安全方策に倣い、次のようにする [63]。(1) 機構は基本的に指などの巻き込み、引き込み、挟み込みが起きない構造であること。(2) 筐体は曲面を基調とし、先端部、エッジ部はすべて丸みを帯びた曲面とすること。(3) 可動部の隙間はすべて 3mm 以下とすること。

安全性は第一に重要であるが、同時に他の制約条件も考えなければならない。まず、幼児が身体的に遊べることが大切である。安全対策の要求仕様を踏まえた上で、ChiCaRo には図 6.2 に示すように、上下に動くヘッドとスライドして開閉するハンド、そして移動機構を搭載する。ヘッドの動作は 2 個のデジタルサーボモータ、ハンドの動作は 1 個の小型のデジタルサーボモータを使って制御する。安全性の考慮と、サーボモータの損傷を防ぐために、ハンドのサーボモータは動作中のみ通電させる。移動は 2 個の個別に動作する駆動輪と 1 個のキャスターで行う。また、幼児に操作者の存在感を大きく感じさせるため、ビデオチャットの際に操作者の顔がロボットに大きく映るよう、7 インチの液晶モニタを搭載した大きな頭部を設置する。そして、子どもがロボットと同じ目線で遊べるよう、ロボットの高さは子どもが座った時の平均的な高さよりやや低く設計する。子どもの安全性も考慮して、ChiCaRo のサイズは高さ 350mm、幅 270mm、重さを 3kg 以内に収める。

ChiCaRo の外観は、ユーザである子どもや祖父母が親しみやすいよう、丸みを帯びさせ、頭を大きくすることでかわいらしくする。ただし、ChiCaRo はあくまでも祖父母とのコミュニケーションの媒介であるため、あまり強いキャラクター性を持たないように考慮する。

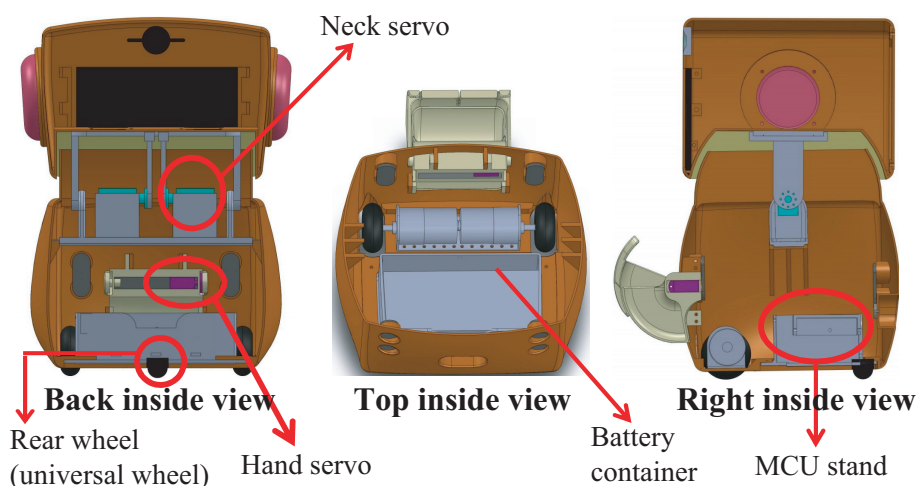


図 6.2: 3D CAD 図 (ChiCaRo の内部構成)

6.3.5 身体的コミュニケーション

一般に、単純なビデオチャットで30分間子どもの興味を引き続けたり、親しみをもってもらうのは難しい。そこでChiCaRoでは身体や実物のおもちゃを使った身体的コミュニケーション（遊び）ができることとする。これまでの研究から、ロボット対子どもの身体的な遊びの有効性が明らかになっている。例えば、保育者がロボットを遠隔操作して幼稚園児と対面すると30分間遊び続けることができ（5章）、また、ロボットと手をつなぐと子どもの緊張が和らぐことが分かった [64]。これらは操作者が操作していることを明示しない遠隔操作型ロボットの話ではあるが、テレプレゼンスロボットでの遊びにおいても同様な効果が期待できると考えている。

そこで本研究では、ChiCaRoのボディの前面にハンドを搭載する。ハンドは物を包んだような形をしており、スライドして開閉する。このハンドは機構部の安全面を考慮しているため非常に単純である。しかし子どもたちはそれをロボットの手であるとみなし、子どもの豊かな想像力で、様々な身体的遊びのきっかけにしてくれると推測する。また、今後はChiCaRoに身体的な遊びをサポートする機能（絵本の読み聞かせや物の受け渡しなど）を実装していく予定である。

このように本ロボットは子どもとの身体的コミュニケーション機能を重視して

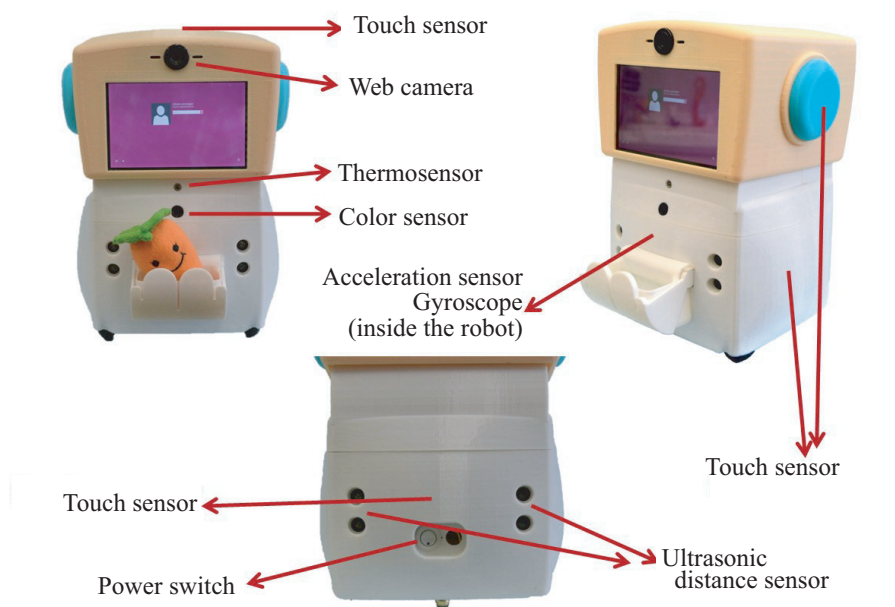


図 6.3: ロボット外観と各センサの位置

いるため、タッチセンサ、距離センサ、加速度センサ、カメラ、人感センサなど複数のセンサ類を搭載する必要がある。本ロボットの外観と、搭載する各センサの位置を図 6.3 に示す。ロボットコントロールシステムは、PC の演算能力とマイコンの応答性の長所を組み合わせた、小型 PC (Windows8) とマイコン (Arduino) の二層構造とする。上層部の小型 PC ではビデオチャットや遠隔操作処理を行い、マイコンではセンサ処理や安全判断、センサフュージョン手法を用いた子ども追跡を実行する。ビデオチャットソフトには Skype を用い、遠隔操作のソフトウェアは筆者の研究グループで独自開発した DiGOROnet と呼ばれるミドルウェア上に実装する。

6.3.6 主要機能

ChiCaRo の主要機能は、次の 4 つである。

ビデオチャット： ロボット本体と操作端末それぞれのディスプレイ、マイク、スピーカで、映像と音声のやりとりをする。

安全機能： 距離・加速度・温度情報を用いてロボットの動作環境の安全性を判断する。例えば、子どもがロボットに接触してタッチセンサが有効になったり、傾斜に乗り上げて傾きを検知したりすると、ロボットの移動が止まる。

遠隔移動操作： ロボットの前進と左右回転を、操作者が手動で操作できる。安全性を考慮し、後退はあえて操作不可とする。

遊び提案機能： これは今後実装予定の機能である。4, 5章で実現したモデルを使えば、子どもの心的状態および性格から、その瞬間に行うと子どもの友好感を創出し長く遊び続けるための効果的な行動を算出することができる。それを操作画面に表示し、操作者に最適な行動を選んでもらうことによって、子どもとの遊びに不慣れな人でも上手く遊ぶことができると考える。

半自動子ども追跡： ロボットが自動的に子どもの方向を向き続ける。本章ではこの機能の実現方法の検討も目的としている。詳細は次節で述べる。

6.4 半自動子ども追跡

6.4.1 子ども追跡の問題

テレ保育ロボットに対する重要な要求の一つは、操作性である。幼児はビデオチャットの画面の前に長い間留まることはできず、カメラの視界からよく消えてしまう。そこで ChiCaRo には、操作者が自由にロボットを移動操作できる機能を備える。そうすることで、部屋の中を自由に動き回る子どもを祖父母がカメラの視界に捉え続けることができる。しかし、動き回る子どもについていくという複雑な操作を、ビデオチャットの限られたカメラ視界で行うのは容易ではない。子どもと会話したり遊んだりしつつ、さらにロボットの移動操作までやることは、高齢者にとって困難である。ロボットの本来の目的である孫との遊びを楽しんでもらうためには、ロボットの遠隔操作に伴う操作者の負担を減らす必要がある。これは単にインタフェースの問題ではなく、特に移動をどこまで操作させるかを考える必要がある。例えば、人追跡機能などの自動ナビゲーション（例：Beam+, iRobot社の Ava）の搭載は、操作者の負担軽減に効果的だと想像する。

しかし、この直感的な利点とは裏腹に、完全自動の人追跡には二つの問題がある。一つは、子どものように激しく不規則に動き回る対象を完全に追跡することが難しいことが挙げられる。二つ目は、自動で動くよりも、手動で操作させた方が、操作者の感じるその場にいるような感覚（社会的テレプレゼンス）が高くなるという問題である [65]。つまり、祖父母は孫と遊びたいという思いでロボットを使っているのに、ロボットを自分で全く操作しないと孫と一緒に遊んでいるような感覚を満足に得られない可能性がある、ということである。テレ保育ロボットのインタフェースを設計する際には、操作のしやすさだけでなく、操作者が感じる社会的テレプレゼンスも考慮する必要がある。そこで、この相反する二つの重要な要素を共に考慮するために、本研究では自動操縦と手動操作の中間を取る半自動操作を考える。

ここで、人間の大人が幼児と遊ぶ場面を考えてみる。大人は座るかしゃがんだ状態で、基本的には身体の向きだけを変えて子どもの方向を追い、子どもが遠く離れるなど必要が生じたときだけ移動を行うことが多い。そこで本研究では、ロボットの移動を回転と前進に分けて考え、ロボットが自動で回転方向の動作を制御して可能な限り子どもの方向を捉え、操作者は必要に応じてロボットを前進操作するという半自動子ども追跡を考える。この半自動子ども追跡を、遠隔地から子どもと遊ぶ目的の人追跡機能として提案する。

既存研究によれば、操作者に予測可能な移動によって運動視差が発生すると、社会的テレプレゼンスが強化されるという [65]。これに基づけば、提案手法である半自動子ども追跡（自動回転—手動前進）は、前進操作によって予測可能な運動視差を発生するため、社会的テレプレゼンスを得られると予測できる。また操作性に関して、同文献におけるロボットの操作しやすさに関するアンケートでは、前後移動操作の方が回転操作よりやや難しいという傾向はあったが、有意差が認められるほどではなかった。既存研究では回転と前進を分けた自動動作と手動操作の比較は行っていないが、もし自動回転—手動前進が操作者へあまり負担をかけず、同時に一緒に遊んでいるような感覚を損なわないことが確かめられれば、提案する半自動子ども追跡が ChiCaRo への搭載に適しているといえる。

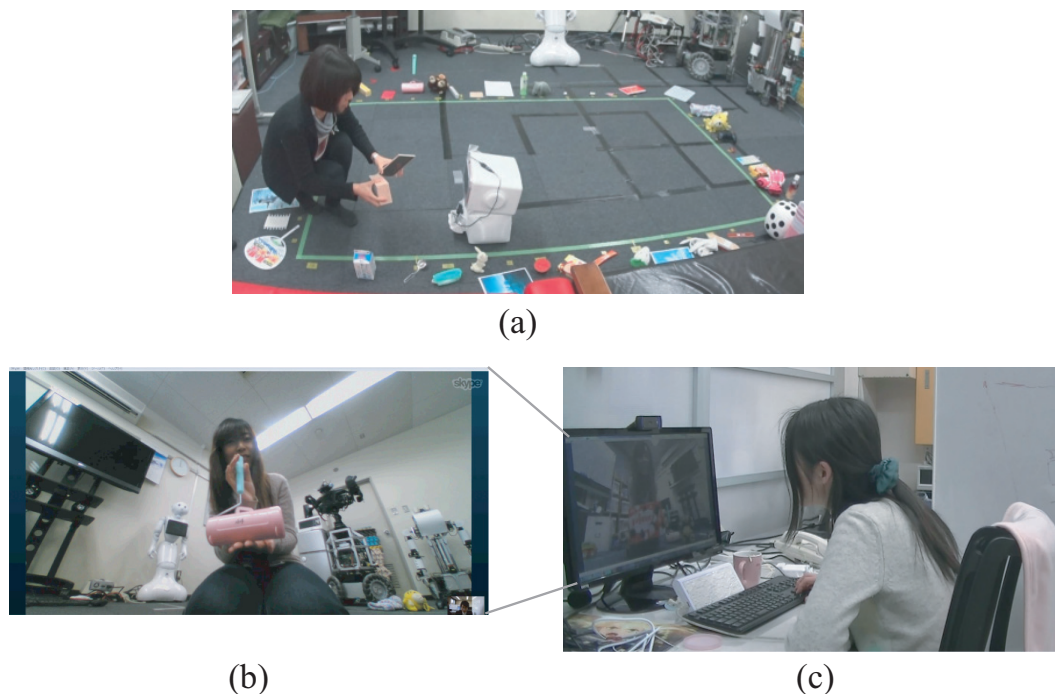


図 6.4: 実験中の様子：(a) ロボット部屋の様子 (b) 操作画面 (c) 操作部屋の様子

6.4.2 半自動子ども追跡を検証する予備実験

そこで、提案方法の有効性を検証するために予備実験を行った。予備実験では、全自動、手動回転—自動前進、自動回転—手動前進（提案手法）、全手動、の4条件を用意し、4条件を同一の実験参加者にランダムな順番で実施する被験者内計画によって、社会的テレプレゼンス（一緒にいるような感覚）と操作性を比較した。ロボットの自動動作は、ロボットが自律で動いているかのように実験者が裏で操作する Wizard of OZ 法（WoZ）を用いて実現した。

タスク

本実験のタスクとして、操作者が ChiCaRo を使って子どもを追いかけてながら遊ぶ場面を再現するために、次の連想ゲームを実施した。実験参加者は操作部屋から ChiCaRo を遠隔操作して、別室のロボット部屋にいる対話者についていった。

対話者（実験者）は床に置かれた道具の中から 1 つの物体を選んで移動し、その物体をロボットの映像越しに参加者に見せた（図 6.4 (a)）。これを計 3 回繰り返して、3 つのものを見終わったら、参加者が 3 つの物体から連想されるキーワードを答えた。例えば「くま，象，トラ」のぬいぐるみを見せた場合の正答例は「動物」「動物園」であった。

実験環境

実験では 2 つの部屋（操作部屋とロボット部屋）を使用した。操作部屋には操作者（参加者）と説明者役の実験者が、ロボット部屋には対話者役の実験者と WoZ 法でロボットの操作を行う操作補助者が待機した。参加者は、PC のモニタを見ながら、キーボードの矢印キーを押して ChiCaRo を操作した（図 6.4 (b) (c)）。ロボットの回転速度は $30^\circ/\text{秒}$ で、直進スピードは $0.4\text{m}/\text{秒}$ であった。心拍を測るために参加者に myBeat ウェアブル心拍センサ (WHS-1) を装着した。ロボットに搭載したカメラには水平視野角 120° 、垂直視野角約 75° 、解像度 1920×1080 の Web カメラ (BSW20KM11BK) を用いた。

実験条件

ロボットの操作者には、大学生 10 名（男 7，女 3）が参加した。実験は、各参加者が 4 つの操作条件をランダムな順番で経験する被験者内計画で行った。参加者は以下の各条件につき連想ゲームを 2 回ずつ行った。

1. 全手動 (M) : 参加者はロボットの回転と前進移動を自由に操作した。
2. 手動回転—自動前進 (M_R) : 参加者はロボットの回転のみ操作した。操作補助者が参加者の操作に合わせて適切なタイミングで前進操作を行った。具体的には、ロボットが対話者の正面に向いており、なおかつ 70cm 以上離れているときに操作補助者が前進操作を行った。この距離はアイコンタクトを伴わないときのパーソナルスペースに相当する [66]。一般的なビデオチャットシステムと同様に ChiCaRo システムでもアイコンタクトは発生しなかった。

表 6.1: アンケート項目

項目 ID	内容
Q1 _q	音声と映像に時間ずれがなかった。
Q2 _s	同じ部屋の中で実際に会話している感じがした。
Q3 _s	同じ部屋の中で実際に相手を眺めている感じがした。
Q4 _s	同じ部屋の中で実際に相手に眺められている感じがした。
Q5 _s	相手の存在感を感じた。
Q6 _o	ロボットを簡単に操作することができた。

3. 自動回転—手動前進 (A_R): 参加者はロボットの前進のみ操作した。操作補助者が参加者の操作に合わせて適切なタイミングで回転操作を行った。具体的には、ロボットが対話者の正面に向いておらず、なおかつ操作者が前進操作を行っていないときに操作補助者が回転操作を行った。
4. 全自動 (A): ロボット部屋にいる操作補助者が回転と前進を操作し、参加者は何も操作する必要がなかった。

なお、実験終了後のアンケートによって、条件 M_R, A_R, A で参加者は全員ロボットが自動的に移動していたと思い込んでいたことを確認した。

検証方法

参加者は 1 つの条件を実施するたびに操作性 (Q6_o)、社会的テレプレゼンス (Q2_s~Q5_s)、ビデオチャットの質 (Q1_q) に関する 9 段階評価 (得点 1~9) のアンケートに回答した。ただし、操作性に関する質問は、操作者が操作を行う条件 M, M_R, A_R でのみ実施した。質問項目は表 6.1 に示す通りである。また、各条件で実験参加者にかかる操作ストレスを客観的に確認する指標として、ストレスに相関があるといわれる LF/HF 値を心拍から算出した。

結果

各条件でのアンケートの平均得点を図 6.5 に示す。エラーバーは標準偏差を表す。

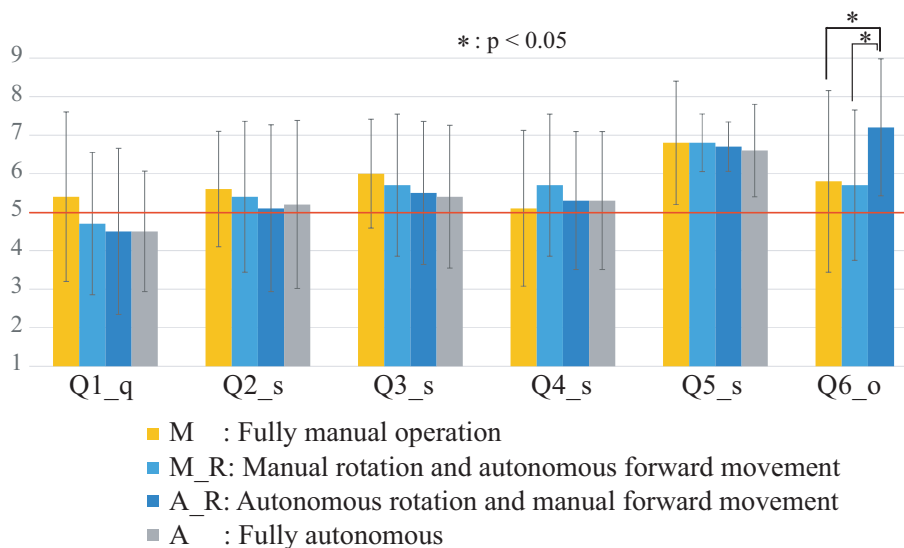


図 6.5: 4 条件ごとのアンケート平均得点

社会的テレプレゼンスに関する 4 項目 (Q2_s~Q5_s) は、全てアンケート得点の標準値である 5 を上回り、全ての条件間において有意差が見られなかった (paired t-test)。操作性に関する質問項目 (Q6_o) では、提案手法の条件 A_R の得点が他の条件より有意に高くなった ($p < 0.05$, paired t-test)。

またストレス指標である LF/HF 値は、図 6.6 に示すように、条件 A_R (自動回転—手動前進) が条件 M (全手動) より有意に低く ($p < 0.05$, paired t-test)、条件 M_R (手動回転—自動前進) では低くなるという有意傾向が見られた ($p < 0.1$)。これらの結果は、主観評価であるアンケートの操作性の結果を支持している。また、条件 A_R と条件 M (全自動) の間には有意差は見られなかった。以上の結果から、提案方法は社会的テレプレゼンスを損なわず、全自動追跡と同程度に操作の負担を操作者に与えないことが示唆された。

考察

実験の結果、提案手法である自動回転—手動前進は、社会的テレプレゼンスを損なわず、なおかつ操作者のストレスも自動操作と同程度に低いということがわかった。

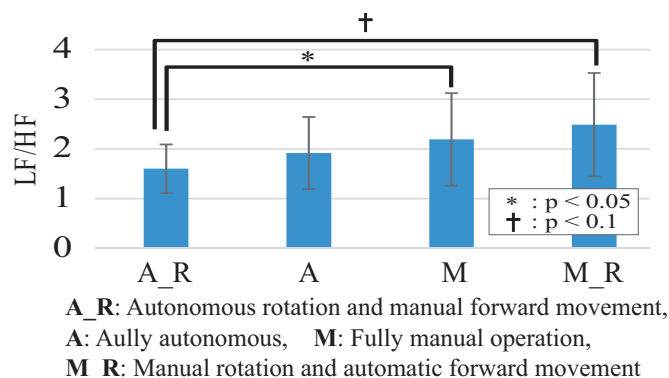


図 6.6: 4 条件ごとのストレス値 (LF/HF 値) の平均得点

今回の実験では、ビデオチャットの質が全条件で安定しておらず、ビデオチャットの質を改善すれば、各条件の間の社会的テレプレゼンスの有意差が出る可能性も考えられる。ただ、ビデオチャットの質の改善によって社会的テレプレゼンスの評価が低くなることは考えにくく、今回、提案手法（条件 A_R）の社会的テレプレゼンスが標準値の 5 を上回っているため、提案方法が社会的テレプレゼンスを損なわないという結果に支障はないと考える。

よって予備実験の結果から、提案方法が操作性と社会的テレプレゼンスを共に考慮したテレ保育ロボットの人追跡方法として適していることが確認できた。

6.4.3 半自動子ども追跡の実装

予備実験によって有効性が確かめられた半自動子ども追跡（ロボットが自動で回転することで子どもの方向のみ追跡し、前進を操作者が手動で行う）を実装する。高速色検出センサ Pixy (CMUcam5) と低解像度熱源センサを用い、これらの情報を統合して子どもの高速追跡を実現する。このようなモダリティの異なる複数の感覚器からの情報を統合し、それぞれの感覚情報の欠陥を相互に補完するなどして高度な認識機能を実現する技術をセンサフュージョンという。色センサの検出は 60fps と高速だが、誤認識が多い。サーモセンサは低速ではあるが、人体やストーブなどの熱源を検知できる。そこで 2 つのセンサ情報を統合することで、高速で、ある程度の精度をもつ人追跡が実現できると考える。

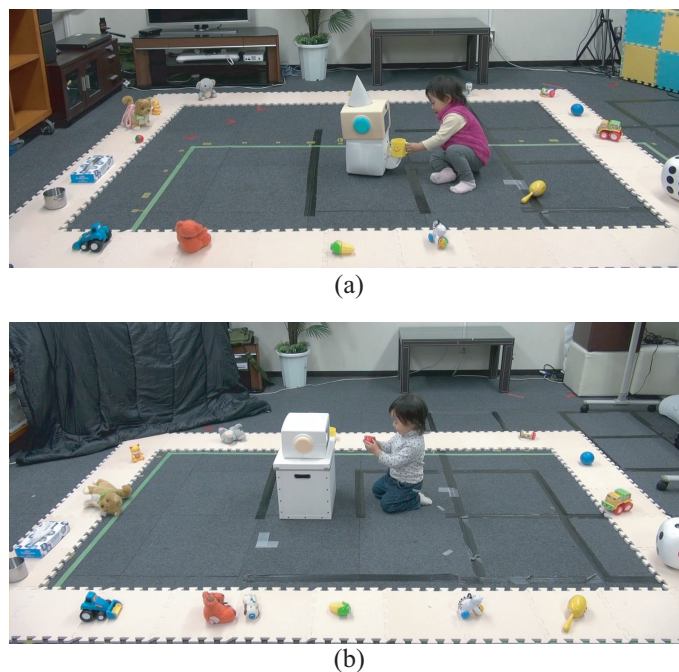


図 6.7: 子供追跡実験の様子（上は提案するロボット，下は一般的なビデオチャットシステム。）

6.4.4 色センサとサーモセンサの統合

ロボットはあらかじめ追跡対象の色（服など）と温度を登録する。まずロボットは色センサからの情報を用いて対象色の領域を見つけ、その領域の温度をサーモセンサからの情報を用いて登録した体温と比較する。そして、登録温度と近い温度の領域を一つ追跡対象として選び、色情報を用いて追跡する。

上記のアルゴリズムを ChiCaRo に実装し、温度を変えた同色の 2 個のボールを使って動作確認をしたところ、実装したアルゴリズムが正しく機能していることが確かめられた。

6.5 システムの試用実験

最後に、半自動子ども追跡機能をロボットに実装し、テレ保育ロボットの試用実験を行った。この実験の目的は、実際の子どもでの半自動子ども追跡の有効性

表 6.2: 試用実験の結果

	ロボット	ビデオチャット
遊び継続時間 [秒]	297	190
子どもが画面に映った割合	0.79	0.54

の確認と、全体の ChiCaRo システムが遊びの継続時間におよぼす影響を評価することである。実験には 1 名の 2 歳女兒とその母親が参加した。母親は ChiCaRo を離れた場所から操作し、子どもとビデオチャットをしながら物取りゲームで遊んだ。物取りゲームでは、子どもの周りに置かれた物体の中からいくつかを母親が選び、子どもに取ってきてくれるよう頼んだ。これは、6.4.1 節の予備実験タスクの応用である。この実験では 2 つの条件を用意し、各条件を別の日に行った。まず 1 日目は半自動子ども追跡が実装された ChiCaRo を用い、これをロボット条件と呼ぶ (図 6.7 (a))。2 日目は ChiCaRo のボディを箱に置き換えたものを使用し、これをビデオチャット条件と呼ぶ (図 6.7 (b))。これらの条件間の違いは、(1) 子どもの追跡有無、(2) 下半身が手のついたボディか単純な箱か、である。ロボットのボディの代わりとして箱を用いた理由は、子どもがビデオチャットシステムを ChiCaRo と同様に動くものだと予想してしまうのを防ぐためである。同時に、ビデオチャットシステムと ChiCaRo の存在感 (大きさ) の違いによる影響を排除するためでもある。遊びは、子どもが実験場から出てしまうか、遊びを終わらせたがるまで続けた。

6.5.1 試用実験の結果と考察

表 6.2 に、各条件での遊び継続時間と、その遊び時間中に子どもが操作画面に映った割合を示す。ロボット条件において、ChiCaRo に搭載されたカメラは子どもを約 80% の高い割合で捉えた。ロボット条件で母親はほとんど ChiCaRo の操作を行っていなかったため、ChiCaRo はほぼ常に半自動子ども追跡手法によって回転していた。これらの結果は、素早くそして不規則に動く実際の子どもに対して半自動子ども追跡が有用であることを示唆する。ただ、ロボット条件で 20% は子どもを見失っており、半自動子ども追跡が時々失敗したことがわかる。その理由

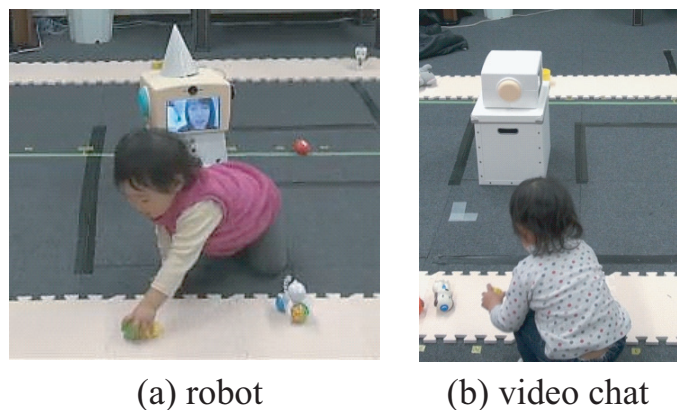


図 6.8: 同じおもちゃを取りに行ったときの様子 (a) ロボット条件 (b) ビデオチャット条件

として、子どもがロボットの背後に回りこむとき、予想していたよりもロボットに接近して通り抜けたことが挙げられる。半自動子ども追跡の精度向上は今後の課題である。

子どもはビデオチャットを使ったときよりも ChiCaRo を使ったときの方が長く遊べた。その要因は2つ考えられる。一つは追跡の有無である。例えば図6.8は両条件で子どもが同じ場所に置かれた同じおもちゃを取ろうとしている様子だが、ロボット条件ではロボットに搭載されたカメラが子どもの方を向いており、母親は子どもが何かを取りにいつていることが認識できる。しかしビデオチャット条件ではカメラで子どもを捉えられておらず、母親は子どもが何をしているのかを確認できない。このようにビデオチャット条件では、母親が子どもの様子をあまり知ることができないために子どもへの反応の質が劣り、その結果遊びが長続きしなかったのではないかと推測する。

また、ロボット条件で遊びが長続きしたもう一つの要因として、ロボットの身体性の影響が挙げられる。特にロボットのハンドは有効であった。図6.7 (a)のように、子どもは数回おもちゃをロボットのハンドに乗せたり入れたりして、それが遊びを発展させるきっかけとなった。一方、ビデオチャット条件では、子どもはおもちゃをシステムの頭上に一度乗せただけであった。この結果から、幼児との遊びの継続には子どもを追跡できることだけでなく、身体的コミュニケーション

ンも重要であることが示唆される。

今回は実験参加者の数が少なく今後の追加実験は必須である。しかし、身体性をもち、子どもを回転方向のみ自動追跡する ChiCaRo システムが、遠隔地からの子どもとの遊びに有効である可能性は、この試用実験によって示すことができたと考える。

6.6 まとめ

本章では、現状で実現可能な実用的な遊び相手ロボットのあり方を議論し、そのような実用的ロボットとして、遠隔地から祖父母が幼児と遊ぶためのテレ保育ロボット “ChiCaRo” のプロトタイプを実現した。第一に、テレ保育ロボットに対する要求を議論し、それを踏まえてロボットをデザインした。第二に、子どもの追跡方法として、操作者に社会的テレプレゼンスを与えつつ操作のストレスをかけにくい半自動子ども追跡を提案した。最後に 2 歳児との試用実験を行った結果、ChiCaRo を使う方がビデオチャットシステムを使うよりも子どもと長く遊べ、ChiCaRo システムが遠隔地からの子どもとの遊びに有効である可能性が示唆された。

今後は、ChiCaRo を使ってさらに遊びを長続きできるように、遊びをサポートする機能を充実させ、複数の幼児と祖父母に ChiCaRo を使ってもらい、テレ保育ロボットの育児支援の有効性を確かめていきたい。

第7章 結論

本論文では、核家族世帯の育児支援を目的とした子どもと遊べるロボットの実現を最終的な目標に掲げ、子どもの心的状態と性格を考慮した行動決定によって友好感を創出し、どんな子どもとも長く遊べる遊び相手ロボットを実現するための方法論について議論した。

1章では、本研究の背景となる家庭内育児支援の欠如と子どもの発達の問題などについて概説し、対子どもロボットの従来研究と比較しながら本研究の遊び相手ロボット実現による利点を述べた。

2章では、遊び相手ロボットに対する課題と、子どもとの遊びを成立させる因子について議論し、設計の際に考えるべき課題を明確化した。遊び相手ロボットの設計にあたって考えるべき課題は、“長く遊び続けられること”、“どんな子どもとも遊べること”の2つであり、子どもとロボットの遊びをとらえる際の軸は“興味度”、“友好感”、“性格”の3つが重要であると述べた。

3章では、遊び相手ロボットの設計方針について述べた。まず、遊び相手ロボットへの基本要件である子どもの発達を促すことを踏まえ、おもちゃや身体を使った幅広い遊びができる遊び相手ロボットの構想について述べた。さらに、課題1と2それぞれに対する解決方針の概要を含めた、遊び相手ロボット全体の設計方針について説明した。

4章では、課題1“長く遊び続けられること”の解決策について検討した。子どもと長く遊び続けるには、子どもの遊びへの興味度とロボットへの友好感を維持する人間類似の行動決定モデルが必要であると、本研究では提案した。そのような行動決定モデルの実現には、相手の心的状態の推定と推定結果に基づく行動決定、それも現実の保育者と子どもの遊び観察に基づいて現実の遊び相手の行動をある程度再現できる行動決定のモデルが必要と考えた。保育者と子どもの遊びの行動

観察の結果、保育者は子どもの興味の度合いに応じて行動を変えていることがわかった。そこで4章では、子どもの心的状態（興味度）の変化に基づいて保育者の行動戦略を模擬して実行する心的状態遷移モデルを構築した。それを実装したロボットと子どもの遊び実験で、心的状態遷移モデルを適用したロボットと遊んだ場合の方が子どもの友好感が良好に保たれ、それが現れる行動指標が示唆された。

5章では、課題2“どんな子どもとも遊べること”の解決策について検討した。ロボットがどんな子どもとも遊ぶための鍵として、本研究では子どもの性格が重要であると考えた。本研究の仮説は、性格は行動の価値を変える変調器の役割をしており、同じ遊び行動（会話、かくれんぼなど）であっても、性格によってその遊び行動が子どものロボットへの印象に与える影響が変化する、というものである。そのため、ロボットとの良好な関係構築が容易でない子どもへ対応するためには、子どもの性格に応じた行動選択の仕組みが必要であると考えた。5章ではその仕組みを実現する第一歩として、“人見知り”に焦点を当て、人見知りの子どもがロボットに親近感をもつ有効な遊び行動を探した。まず筆者はロボットが子どもに対して親密な態度を示しやすい“親和的遊び行動”と、不安が強くても遊べる“不安緩和遊び行動”を定義し、遊び行動を分類した。そして保育者が遠隔操作するロボットと5～6歳児との遊び実験を行い、これらの遊び行動と親近感の関係を調べた。その結果、“人見知りの子どもが親近感をもつために有効な遊び行動が存在する”こと、そして“親和的遊び行動”と“不安緩和遊び行動”の両方の要素をもつ遊び行動が、人見知りの子どもに有効であることが示唆される結果を得た。

6章では、これまでに得られた知見を生かし、現状で実現可能な実用的な遊び相手ロボットを提案した。自律の遊び相手ロボットを実用化するまでには、安全面や技術面で多くの課題が残る。特に安全性を考えれば、小型の遠隔操作型ロボットが実用的だと考えた。しかし、子どもの興味を引き続け、どんな子どもとも遊びを成立させることは、誰でも容易にできるわけではない。そこで、本研究でこれまでに提案したモデルを利用し、操作者にどんな子どもとも長く遊べる最適な遊び行動を知らせるという方法が有用だと考えた。そのような実用的な遊び相手ロボットの構想を提案し、プロトタイプを開発した。

以上の結果から、子どもとロボットの遊びの成立を規定する要素に“興味度”、“

友好感”，“性格”の3つが支配的であることが明らかになった。ロボットと子どもの遊びを成立させるためには，子どもに友好感を抱かせることが重要であり，そのために，子どもの心的状態や性格を考慮した行動をとる必要があるというのが，本論文の主張である。今後，本論文で独立に扱ってきた心的状態に基づく戦略と性格に基づく戦略を統合し，子どもの心的状態と性格をともに考慮した統合行動決定モデルを構築すれば，多様な性格の子どもに柔軟に対応し，友好的な関係を築いて長時間かつ長期的に遊べるロボットが実現できると考える。このように子どもの相手をしてくれるロボットは，家庭内だけでなく，保育者不足が叫ばれる保育施設での活用も見込まれる。ロボットが人間の代わりになるべきとは思わないが，家庭でも保育施設においても人手が不足しているのが現状であり，子どもがテレビ漬けになったり，養育者や保育者が多大な育児負担から子どもに優しく接する余裕がなくなってしまうといった問題を避けるために，このような遊び相手ロボットが一つの解決策として検討され，活用されるべきである。

統合行動決定モデルの構築の過程では，保育者の遊び戦略や子どもの性格パターン，心的過程といった子どもの遊びに関する知見を，構成論的に解明することも期待できる。遊び場面における子どもの認知過程や振る舞いの報告は，これまで事例観察によるものがほとんどで，子どもと遊ぶというスキルは数値的に議論されてこなかった。遊び相手行為をモデル化することは，保育者などの専門家が経験的に得ていた子どもと遊ぶメソッドが数値的に可視化され，一般の人やシステムでもそのメソッドを理解あるいは実行できるようになるということである。これらの知見が積み上がれば，保育者養成システムや，子どもの性格と遊びを自動で記録して養育者や保育者に情報提供するシステムの実現などへも応用できると考えられる。

ただし，心的状態と性格を共に考慮した統合行動決定モデルの構築には，数百人規模の子どもの遊びデータが必要である。そこで，このデータを収集する現実的な方法として，まず実用的な育児支援ロボット ChiCaRo を一般家庭に普及させ，そのロボットを介してやりとりされる大量の子どもの遊びデータを収集し，上記の統合行動決定モデルの研究に還元していくことを考えている。実用的な ChiCaRo を開発することによって，研究を加速させることができる。それと同時に，研究

によって構築した統合行動決定モデルや推定システムを、再び ChiCaRo の開発に反映させていくことでより ChiCaRo の性能を上げることができる。このように統合行動決定モデル構築と ChiCaRo 開発を同時に進めることで、研究推進と実社会への還元というポジティブスパイラルを生み出していきたい。

参考文献

- [1] 総務省統計局. 日本の統計 2014, 2014. 2-9 家族類型別一般世帯数.
- [2] 馬場千恵, 村山洋史, 田口敦子, 村嶋幸代. 乳児を持つ母親の孤独感と社会との関連について家族や友達とのソーシャルネットワークとソーシャルサポート. 日本公衆衛生雑誌, Vol. 60, No. 12, pp. 727-737, 2013.
- [3] 八重樫牧子, 江草安彦, 李永喜, 小河孝則, 渡邊貴子. 祖父母の子育て参加が母親の子育てに与える影響. 川崎医療福祉学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 233-245, 2003.
- [4] 中見仁美, 桂田恵美子, 石暁玲. 幼君子育て期における家族からのサポートの重要性. 園田学園女子大学論文集, Vol. 46, pp. 227-239, 2012.
- [5] 寺田恭子. 親子の主体性育成を目的とする子育て支援に関する一考察－「親子の関係性」に着目して－. プール学院大学研究紀要, Vol. 52, pp. 163-175, 2012.
- [6] 田中洋一. 幼児教育におけるメディア. 仁愛女子短期大学研究紀要, Vol. 44, , 2011.
- [7] 加納亜紀, 高橋香代, 片岡直樹. テレビ・ビデオの長時間視聴が幼児の言語発達に及ぼす影響. 日本小児科学会雑誌, Vol. 108, No. 11, pp. 1391-1397, 2004.
- [8] ベネッセ次世代育成研究所. 第4回 幼児の生活アンケート・国内調査 報告書. 2010.
- [9] 岡本絹子. 親子クラブに属する母親の育児状況と育児不安. 川崎医療福祉学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 325-332, 2003.

-
- [10] Ayanna M Howard, Hae Won Park, and Charles C Kemp. Extracting play primitives for a robot playmate by sequencing low-level motion behaviors. In *Proceedings of The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 360–365, 2008.
- [11] Hae Won Park and Ayanna M Howard. Understanding a child’s play for robot interaction by sequencing play primitives using hidden markov models. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*, pp. 170–177, 2010.
- [12] Hideki Kozima, Marek P Michalowski, and Cocoro Nakagawa. Keepon: A playful robot for research, therapy, and entertainment. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 1, No. 1, pp. 3–18, 2009.
- [13] Kazuyoshi Wada, Takanori Shibata, Takashi Asada, and Toshimitsu Musha. Robot therapy for prevention of dementia at home -results of preliminary experiment. *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 19, No. 6, pp. 691–697, 2007.
- [14] 姜信善, 滝川裕子. 子どもの遊びと自立性・自己像との関連について: 遊び種類・遊び能力を中心に. 富山大学人間発達科学部紀要, Vol. 6, No. 2, pp. 1–14, 2012.
- [15] Joshua Wainer, Kerstin Dautenhahn, Ben Robins, and Farshid Amirabdollahian. A pilot study with a novel setup for collaborative play of the humanoid robot kaspar with children with autism. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 6, No. 1, pp. 45–65, 2014.
- [16] Alexander JB Trevor, Hae Won Park, Ayanna M Howard, and Charles C Kemp. Playing with toys: Towards autonomous robot manipulation for therapeutic play. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2139–2145, 2009.

-
- [17] Kerstin Dautenhahn, Iain Werry, John Rae, Paul Dickerson, Penny Stribling, and Bernard Ogden. Robotic playmates: Analysing interactive competencies of children with autism playing with a mobile robot. In *Socially Intelligent Agents - Creating Relationships with Computers and Robots*, pp. 117–124. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [18] Fumihide Tanaka and Shizuko Matsuzoe. Children teach a care-receiving robot to promote their learning: Field experiments in a classroom for vocabulary learning. *Journal of Human-Robot Interaction*, Vol. 1, No. 1, pp. 78–95, 2012.
- [19] 三宅泰亮, 山地雄士, 大島直樹, デシルバラビンドラ, 岡田美智男. Sociable Trash Box : 子どもたちはゴミ箱ロボットとどのように関わるのかフィールドにおける調査結果とその考察. 人工知能学会論文誌, Vol. 28, No. 2, pp. 197–209, 2013.
- [20] Iolanda Leite, Ginevra Castellano, André Pereira, Carlos Martinho, and Ana Paiva. Empathic robots for long-term interaction. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 6, pp. 329–341, 2014.
- [21] Fumihide Tanaka, Aaron Cicourel, and Javier R Movellan. Socialization between toddlers and robots at an early childhood education center. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 104, No. 46, pp. 17954–17958, 2007.
- [22] 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誌, Vol. 7, No. 1, pp. 27–37, 2005.
- [23] 飯島典子. 「気になる」子どもの遊びの成立を促す保育者の働きかけ. 東北大学大学院教育学研究科研究年報, Vol. 57, No. 1, pp. 327–338, 2008.
- [24] 佐竹聡, 神田崇行, Dylan F. Glas, 今井倫太, 石黒浩, 萩田紀博. 対話ロボットの人間へのアプローチ方法 : 対話ロボットの対話開始に対する戦略. 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 327–337, 2010.

-
- [25] 伊東明彦, 高柳恭子, 岩渕千鶴子, 五十嵐市郎, 前原由紀, 稲川知美, 高根沢仲友, 星野さやか. 気になる子と保育—多様性に応じる教育の在り方—. 宇都宮大学教育学部 教育実践総合センター紀要, Vol. 32, pp. 303–310, 2009.
- [26] Ferre Laevers, Mieke Daems, Griet De Bruyckere, Bart Declercq, Julia Moons, Kristien Silkens, Gerlinde Snoeck, and Monique Van Kessel. *Well-being and Involvement in Care. A process-oriented Self-evaluation Instrument for. Care Settings. Sics(Ziko)*. Kind & Gezin and Research Centre for Experientel Education, 2005.
- [27] 高橋英之, 宮崎美智子, 岡田浩之, 大森隆司. 「新奇性」と「親近性」の軸から子どもとロボットの関係性を捉える. HAI シンポジウム 2011, pp. I-2B-2, 2011.
- [28] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳. インタラクティブ情動コミュニケーションにおける自己組織化マップによる混合情動行動生成手法. 知能と情報, Vol. 24, No. 5, pp. 933–943, 2012.
- [29] Jyotirmay Sanghvi, Ginevra Castellano, Iolanda Leite, André Pereira, Peter W McOwan, and Ana Paiva. Automatic analysis of affective postures and body motion to detect engagement with a game companion. In *Human-Robot Interaction (HRI), 2011 6th ACM/IEEE International Conference on*, pp. 305–311. IEEE, 2011.
- [30] Demis Hassabis, R Nathan Spreng, Andrei A Rusu, Clifford A Robbins, Raymond A Mar, and Daniel L Schacter. Imagine all the people: How the brain creates and uses personality models to predict behavior. *Cerebral Cortex*, Vol. 24, pp. 1979–1987, 2014.
- [31] Stuart L Brown and Christopher Vaughan. *Play: How It Shapes the Brain, Opens the Imagination, and Invigorates the Soul*. Avery, 2009.

-
- [32] 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 大森隆司. 遊びロボットによる子どもの性格傾向の推定に関する研究. 日本感性工学会論文誌, Vol. 12, No. 1, pp. 219–227, 2013.
- [33] 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司. 子供や高齢者の遊び相手をする Playmate robot の実現と課題. 電気学会計測研究会 (資料), pp. IM-10-081, 2010.
- [34] 大原重洋, 廣田栄子, 鈴木朋美. インクルーシブ環境 (幼児教育・保育施設) における聴覚障害児の社会的遊びとコミュニケーション状況および, 関連要因の検討. *AUDIOLOGY JAPAN*, Vol. 54, No. 3, pp. 230–238, 2011.
- [35] M.Attamimi, A.Mizutani, T.Nakamura, T.Nagai, K.Funakoshi, and M.Nakano. Real-time 3d visual sensor for robust object recognition. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2010)*, pp. 4560–4565, 2010.
- [36] M.Attamimi, A.Mizutani, T.Nakamura, K.Sugiura, T.Nagai, N.Iwahashi, H.Okada, and T.Omori. Learning novel objects using out-of-vocabulary word segmentation and object extraction for home assistant robots. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2010)*, pp. 745–750, 2010.
- [37] RoboCup@Home league committee 2010. Robocup@home rules & regulations version: 2010. <http://www.robocupathome.org/rules>, 2010. [Online; accessed 26-May-2015].
- [38] ペレスダニエル, カリナルビー, 長井隆行. 画像検索を利用したお絵かきロボットの實現. 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 3B3–04, 2010.
- [39] 栗山貴嗣, 國吉康夫. やりとり遊びにおける応答予測と馴化・脱馴化を通じたルール共創モデル. 第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp. 3S2–02, 2009.

-
- [40] 横山絢美, 大森隆司. 協調課題における意図推定に基づく行動決定過程のモデル的解析. 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J92-A, No. 11, pp. 734–742, 2009.
- [41] 横山絢美, 阿部香澄, 長井隆行, 大森隆司. 子供と遊ぶ: 飽きやすい相手の意欲を維持するメタ戦略のモデル化. 第25回人工知能学会全国大会, pp. 2D1–OS5a–1, 2011.
- [42] 木下航一, 小西嘉典, 勞世広, 川出雅人. 3dモデル高速フィッティングによる顔特徴点検出・頭部姿勢推定. 第11回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), Vol. 4, No. 2008, pp. 1325–1329, 2008.
- [43] 小西嘉典, 木下航一, 勞世広, 川出雅人. リアルタイム笑顔度推定. インタラクシオン2008 (情報処理学会), Vol. 4, No. 2008, pp. 47–48, 2008.
- [44] 大坊郁夫. しぐさのコミュニケーション—人は親しみをどう伝えあうか. サイエンス社, 1998.
- [45] 深山篤, 大野健彦, 武川直樹, 澤木美奈子, 萩田紀博. 擬人化エージェントの視線による印象操作. インタラクシオン2002 (情報処理学会), pp. 93–100, 2002.
- [46] 黒田実郎. 幼児の恐怖: その原因と除去. 幼児の教育, Vol. 68, No. 10, pp. 36–43, 1969.
- [47] 太田一栄. 幼児の友だち関係と教育: 日々の保育にふれて. 幼児の教育, Vol. 67, No. 4, pp. 57–71, 1968.
- [48] 清水エミ子. 積木遊びにおける幼児集団の比較. 幼児の教育, Vol. 57, No. 9, pp. 49–50, 1958.
- [49] 藤岡久美子. 友達と遊ばない子どもの発達: 幼児期児童期の引っ込み思案・非社会性研究の動向. 山形大学紀要 (教育科学), Vol. 15, No. 4, pp. 9–23, 2013.

-
- [50] Yoshi-Taka Matsuda, Kazuo Okanoya, and Masako Myowa-Yamakoshi. Shyness in early infancy: Approach-avoidance conflicts in temperament and hypersensitivity to eyes during initial gazes to faces. *PloS one*, Vol. 8, No. 6, p. e65476, 2013.
- [51] 西垣吉之, 山田陽子, 馬場佑真, 西垣直子. 子どもにとっての『もの』の持つ意味について. 中部学院大学・中部学院大学短期大学部研究紀要, No. 10, pp. 85–87, 2009.
- [52] 清水エミ子. 積木遊びにおける幼児集団の研究から. 幼児の教育, Vol. 58, No. 10, pp. 27–31, 1959.
- [53] 塩見昌裕, 神田崇行, イートンダニエル, 石黒浩, 萩田紀博. RFID タグを用いたコミュニケーションロボットによる科学館での展示案内. 日本ロボット学会誌, Vol. 24, No. 4, pp. 489–496, 2006.
- [54] Senko K Maynard. *An introduction to Japanese grammar and communication strategies [Revised Edition]*, pp. 99–100. Japan times, 2009.
- [55] 柴田直峰. 幼児どうしが手をつなぐ行動についての一考察. 立命館文學, No. 599, pp. 38–46, 2007.
- [56] 丸山恭平, 中村友昭, 長井隆行. 低コストな家庭用ヒューマノイドロボットの開発:ロボカップ@ホームから記号創発研究まで. 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp. 3H2–2, 2012.
- [57] 村上宣寛. 小学生用主要5因子性格検査 (LittleBigFive2) の妥当性. 日本パーソナリティ心理学会大会 (発表論文集), pp. P1–14. 日本パーソナリティ心理学会大会, 2010.
- [58] 公文教育研究会コミュニティサイト「ミーテ」. Web アンケート「祖父母と絵本」, 2012. <https://mi-te.kumon.ne.jp/contents/article/8-783/>.
- [59] 博報堂 エルダーナレッジ開発新しい大人文化研究所. 新大人研レポート XVI いま高齢社会は“新しい大人社会”へと大きく変化 その9「孫に甘いお年

- 寄りから、新しい大人世代は“孫友”へ」, Mar. 2014. http://www.h-hope.net/knowledge/hope_report/report16/report16.pdf.
- [60] Junichi Osada, Shinichi Ohnaka, and Miki Sato. The scenario and design process of childcare robot, papero. In *Proceedings of the 2006 ACM SIGCHI international conference on Advances in computer entertainment technology*, pp. 80–87. ACM, 2006.
- [61] Fumihide Tanaka, Toshimitsu Takahashi, Shizuko Matsuzoe, Nao Tazawa, and Masahiko Morita. Telepresence robot helps children in communicating with teachers who speak a different language. In *Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-robot Interaction*, pp. 399–406, 2014.
- [62] 裴雅超. 乳幼児のためのテレ保育ロボット ChiCaRo の設計. Master’s thesis, 電気通信大学, 2015.
- [63] 西沢俊広, 木下和樹, 高野陽介, 藤田善弘, 油田信一. 家庭用ロボットの事故発生リスク低減を目的とする取り扱い方法確認対話システム. 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 5, pp. 544–551, 2012.
- [64] Chie Hieida, Kasumi Abe, Muhammad Attamimi, Takayuki Shimotomai, Takayuki Nagai, and Takashi Omori. Physical embodied communication between robots and children: An approach for relationship building by holding hands. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3291–3298, 2014.
- [65] 村上友樹, 中西英之, 野上大輔, 石黒浩. ロボット搭載カメラの移動がテレプレゼンスに与える影響. 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 1, pp. 54–62, 2010.
- [66] 遠山孝司, 小塩真司, 内田敏夫, 西口利文. パーソナルスペースに影響を及ぼす要因の検討: 身長, アイコンタクト, 向性に注目して. 人文学部研究論集, Vol. 16, pp. 115–128, 2006.

発表実績

査読付関連論文

学術論文

- (1) 阿部香澄, 岩崎安希子, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “子供と遊ぶロボット: 心的状態の推定に基づいた行動決定モデルの適用”, 日本ロボット学会誌, Vol.31, No.3, pp.263–274, 2013. (4章の内容に関連)
- (2) 阿部香澄, 日永田智絵, アッタミミムハンマド, 長井隆行, 岩崎安希子, 下斗米貴之, 大森隆司, 岡夏樹, “人見知りの子どもとロボットの良好な関係構築に向けた遊び行動の分析”, 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.12, pp.2524–2536, 2014. (5章の内容に関連)

査読付参考論文

学術論文

- (1) 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 大森隆司, “遊びロボットによる子どもの性格傾向の推定に関する研究”, 日本感性工学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.219–227, 2013.
- (2) アッタミミムハンマド, ファドリルムハンマド, 阿部香澄, 中村友昭, 船越孝太郎, 長井隆行, “多層マルチモーダル LDA を用いた人の動きと物体の統合概念の形成”, 日本ロボット学会誌, Vol.32, No.8, pp.753–764, 2014.

国際会議プロシーディングス

- (1) Kasumi Abe, Akiko Iwasaki, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Ayami Yokoyama, Takayuki Shimotomai, Hiroyuki Okada, and Takashi Omori, “Playmate Robots That Can Act According to Child’s Mental State,” Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), pp.4660–4667, Oct.2012.
- (2) Takashi Omori, Ayami Yokoyama, Kasumi Abe, Takayuki Nagai, “Cognitive Modeling of Human-Robot Interaction Estimating Other’s Internal State,” Advances in Cognitive Neurodynamics (III), pp.443–452, 2013.
- (3) Takayuki Shimotomai, Kasumi Abe, Ayami Yokoyama, Takayuki Nagai, Takashi Omori, “Estimation of Children’s Interest Dynamics While Communicating with Robots,” Advances in Cognitive Neurodynamics (III), pp.599–606, 2013.
- (4) Akiko Iwasaki, Takayuki Shimotomai, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Takashi Omori, “Using Robots to Estimate Children’s Personalities,” Proceedings of International Symposium of Affective Engineering (ISAE 2013), 1C-2, Mar.2013.
- (5) Muhammad Fadlil, Keisuke Ikeda, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, “Integrated Concept of Objects and Human Motions Based on Multi-layered Multimodal LDA,” Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), pp.2256–2263, Nov.2013.
- (6) Muhammad Attamimi, Kasumi Abe, Akiko Iwasaki, Takayuki Nagai, Takayuki Shimotomai, and Takashi Omori, “Robots That Can Play with Children: What Makes a Robot Be a Friend,” 20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2013), Vol.8226, pp.377–386, Nov.2013.
- (7) Chie Hieida, Kasumi Abe, Muhammad Attamimi, Takayuki Shimotomai, Takayuki Nagai, and Takashi Omori, “Physical Embodied Communication

between Robots and Children: An Approach for Relationship Building by Holding Hands,” Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), pp.3291–3298, Sep.2014.

- (8) Muhammad Attamimi, Muhammad Fadlil, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Kotaro Funakoshi, and Takayuki Nagai, “Integration of Various Concepts and Grounding of Word Meanings Using Multi-layered Multimodal LDA for Sentence Generation,” Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), pp.2194–2201, Sep.2014.
- (9) Kasumi Abe, Chie Hieida, Muhammad Attamimi, Takayuki Nagai, Takayuki Shimotomai, Takashi Omori, and Natsuki Oka, “Toward Playmate Robots that can Play with Children Considering Personality,” Proceedings of The Second International Conference on Human-Agent Interaction (iHAI 2014), pp.165–168, Oct.2014.
- (10) Takayuki Nagai, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Natsuki Oka, and Takashi Omori, “Probabilistic Modeling of Mental Models of Others,” Proceedings of 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015), Aug.2015. (発表予定)
- (11) Takashi Omori, Takayuki Shimotomai, Kasumi Abe, and Takayuki Nagai, “Model of Strategic Behavior for Interaction That Guide Others Internal State,” Proceedings of 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2015), Aug.2015. (発表予定)

査読なし国内学会

- (1) 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “子供や高齢者の遊び相手をする Playmate robot の実現と課題”, 電気学会計測研究会 (資料), pp.53–58, IM-10-081, Dec.2010.

- (2) 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “子供や高齢者と遊ぶロボット実現のための基礎的検討”, 2011年電子情報通信学会総合大会, D-12-46, Mar.2011.
- (3) 横山絢美, 阿部香澄, 長井隆行, 大森隆司, “子供と遊ぶ: 飽きやすい相手の意欲を維持するメタ戦略のモデル化”, 人工知能学会全国大会 (第25回), 2D1-OS5a-1, Jun.2011.
- (4) 横山絢美, 大森隆司, 阿部香澄, 長井隆行, “他者の状態推定に基づく対人インタラクシオンロボットの行動戦略”, 2011年度日本認知科学会第28回大会 (発表論文集), P2-17, pp.468-471, Sep.2011.
- (5) 阿部香澄, 岩崎安希子, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “推定した子供の状態に基づいて行動を選択する遊び相手ロボット”, 第29回日本ロボット学会学術講演会, 3N2-3, Sep.2011.
- (6) 下斗米貴之, 阿部香澄, 岩崎安希子, 長井隆行, 大森隆司, “ロボットとの遊びにおける興味度推定”, 第13回日本感性工学会大会, F24, Sep.2011.
- (7) 阿部香澄, 岩崎安希子, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “子供と遊ぶロボット: 他者の状態推定に基づく行動決定モデルの適用”, HAI シンポジウム 2011, I-2B-3, Dec.2011.
- (8) 岩崎安希子, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 下斗米貴之, 大森隆司, “子供が好む遊びの傾向を推定する遊び相手ロボット実現のための基礎的検討”, 電気学会研究会, IM-11-060, Dec.2011.
- (9) 阿部香澄, 岩崎安希子, 中村友昭, 長井隆行, 横山絢美, 下斗米貴之, 岡田浩之, 大森隆司, “子供の内部状態を推定しながら遊ぶ Playmate Robot の実現”, 情報処理学会 第74回全国大会, 1D-5, Mar.2012.
- (10) 阿部香澄, 岩崎安希子, 横山絢美, 下斗米貴之, 中村友昭, 長井隆行, 岡田浩之, 大森隆司, “子供と遊べるロボットとは?: 心的状態推定と保育士の行動戦略に

- 基づく行動決定モデルの適用”, 日本赤ちゃん学会第12回学術集会 ポスター発表, P-43, Jun.2012.
- (11) Si Chen, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Hongsheng He, Shuzhi Sam Ge, “Engagement Estimation Using Gaussian Mixture Engagement Models for a Playmate Robot”, 第30回日本ロボット学会学術講演会, 2D3-5, Sep.2012.
- (12) 池田圭佑, 阿部香澄, 中村友昭, 荒木孝弥, 長井隆行, “多層マルチモーダル LDA に基づく物体と動作の統合モデル”, 電気学会計測研究会, IM-12-071, Dec.2012.
- (13) 藤岡直幹, 阿部香澄, 中村友昭, 荒木孝弥, 丸山恭平, 長井隆行, “遊び相手ロボット実現のためのヒューマノイドロボット遠隔操作インターフェース”, 電気学会計測研究会, IM-12-073, Dec.2012.
- (14) 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 大森隆司, “遊びロボットによる子供の性格推定に関する基礎的研究”, 2012年度日本認知科学会第29回大会(発表論文集), P1-10, pp.224-233, Dec.2012.
- (15) 下斗米貴之, 岩崎安希子, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, 大森隆司, “性格を読み取るロボットシステム”, 研究報告知能システム(ICS), 2013-ICS-171, No.16, pp.1-3, Mar.2013.
- (16) Muhammad Fadlil, 池田圭佑, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, “多層マルチモーダル LDA を用いた人の動きと物体の統合的概念の形成”, 人工知能学会全国大会(第27回), 2G4-OS-19a-3, Jun.2013.
- (17) 日永田智絵, 阿部香澄, 長井隆行, 下斗米貴之, 大森隆司, “ロボット子ども間の関係構築における手つなぎの影響”, HAI シンポジウム 2013, S-3, pp.206-213, Dec.2013.
- (18) 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 嶋原宏明, 安東裕司, 日永田智絵, アッタミムハンマド, 長井隆行, 大森隆司, “ロボット子供遊び戦略と生体指

- 標による評価”, 第9回 日本感性工学会 春季大会, 1B-06, Mar.2014.
- (19) 日永田智絵, 阿部香澄, 長井隆行, “ロボットと子どもの身体的コミュニケーション～手をつなぐことによる関係性の構築～”, 情報処理学会 第76回全国大会, 2S-2, Mar.2014.
- (20) ファドリルムハンマド, アッタミミムハンマド, 阿部香澄, 中村友昭, 長井隆行, “多層マルチモーダルLDAを用いた多様な概念の統合と語意の獲得”, 人工知能学会全国大会(第28回), 1I3-3, May.2014.
- (21) 阿部香澄, 日永田智絵, 嶋原宏明, 長井隆行, 下斗米貴之, 大森隆司, “子どもの性格を考慮して遊ぶロボットの実現に向けた基礎的検討”, 人工知能学会全国大会(第28回), 1E4-OS-23a-5, May.2014.
- (22) 岩崎安希子, 下斗米貴之, 阿部香澄, 長井隆行, 大森隆司, “他者を引き込んでいく戦略的インタラクションのモデル化”, 日本認知科学会第31回大会, O3-2, Sep.2014.
- (23) 嶋原宏明, アッタミミムハンマド, 阿部香澄, 長井隆行, 大森隆司, 岡夏樹, “他者モデルを有するエージェントインタラクションにおける二者関係のモデル化”, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2G2-2, Dec.2014.
- (24) 片上祐介, 阿部香澄, アッタミミムハンマド, 長井隆行, “人とロボットの対話における正直シグナルの利用”, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2G2-4, Dec.2014.
- (25) 阿部香澄, 裴雅超, 張亭芸, 日永田智絵, 長井隆行, “幼児と祖父母をつなぐテレプレゼンス子育て支援ロボット”, 人工知能学会全国大会(第29回), 3J3-OS-23-5, Jun.2015.

受賞歴

- (1) IROS 2013 Cognitive Best Paper Award Finalist : Muhammad Fadlil, Keisuke Ikeda, Kasumi Abe, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, “Integrated Concept of Objects and Human Motions Based on Multi-layered Multimodal LDA,” Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), pp.2256–2263, 2013.
- (2) HAI-2013 Outstanding Research Award : 日永田智絵, 阿部香澄, 長井隆行, 下斗米貴之, 大森隆司, “ロボット-子ども間の関係構築における手つなぎの影響”, HAI シンポジウム 2013, S-3, pp.206–213, Dec.2013.

その他

特許

- (1) 長井隆行, 中村友昭, 石井香澄, 触覚情報検出装置、及び、触覚情報検出方法, 特願 2008-210075 (出願日 2008/8/18) , 特開 2010-044028 (公開日 2010/02/25)

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始熱心なご指導を賜りました指導教員の電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 教授 長井隆行先生に，深く感謝の意を表します．研究に対する楽しく熱い議論をさせていただいたこと，育児と研究の両立を支えてくださったことなど，この博士論文の執筆まで至ることができたのはひとえに先生のおかげであり，書きつくせないほどの感謝の気持ちでいっぱいです．心よりお礼申し上げます．

また，共同で研究を進めてくださった皆様への感謝を述べたいと思います．玉川大学 工学部 教授 大森隆司先生には，研究に対するアドバイスから論文執筆における論理的な文章構成力，認知科学の視点での思考法まで，多大なご指導をいただきました．玉川大学 脳科学研究所（現在，株式会社先端力学シミュレーション研究所）下斗米貴之氏には，特に統計的解析についての多大なご助言をいただきました．玉川大学 工学部（現在，学校法人玉川学園 教諭）横山絢美氏には，認知モデルの構築から実験の実施まで多くのご協力をいただきました．長井研究室の先輩（現在，電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻 助教）である中村友昭氏には，本研究の初期からずっと，研究のアドバイスや実験実施のご協力，そして特にプログラミングに関して多くのご助言をいただきました．京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科 教授 岡夏樹先生には，研究結果の解釈に際して新たな視点をいただき，論文執筆のご指導を賜りました．さらに，想像以上に大変な子どもロボット実験を，様々な苦勞を乗り越え実施してくれた，岩崎安希子氏，ムハンマドアッタミ氏，嶋原宏明氏，藤岡直幹氏，安東裕司氏，ChiCaRoのプロトタイプを一から共に作り上げてくれた裴雅超氏，日永田智絵氏，張亭芸氏，様々な面で研究生活を支えてくれた多くの先輩，長井研究室の諸氏，友人の皆様は厚くお礼申し上げます．

そして実験を実施するに当たり多大なご協力をいただいた，玉川学園幼稚部の飯塚先生をはじめとする教員，園児，関係者の皆様，学校法人 柿の実学園 柿の実幼稚園の教員，園児，関係者の皆様，その他の多くの協力者の皆様に，心より感謝申し上げます。

最後に，精神的にも体力的にも私を支え，時には研究の議論にも付き合ってくれた夫，ChiCaRoをはじめとする様々な研究のアイデアを与えてくれ，実験にも協力してくれた娘，研究と育児の両立を支えてくれた家族に，心から感謝します。

本研究は，科研費（基盤(C) 23500240）および新学術領域研究「伝達創成機構」（第4～5章）の助成を受け実施したものです。

著者略歴

阿部 香澄 (あべ かすみ)

- 1986年12月18日 東京都に生まれる
- 2002年4月 神奈川県立神奈川総合高等学校
入学
- 2005年3月 神奈川県立神奈川総合高等学校
卒業
- 2005年4月 電気通信大学 電気通信学部
知能機械工学科 入学
- 2009年3月 電気通信大学 電気通信学部
知能機械工学科 卒業
- 2009年4月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科 電子工学専攻
博士前期課程 入学
- 2011年9月 電気通信大学大学院 電気通信学研究科 電子工学専攻
博士前期課程 修了
- 2011年10月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻
博士後期課程 入学
- 2012年10月 休学 (出産・育児)
- 2013年10月 復学
- 2015年4月 日本学術振興会特別研究員 DC2
- 2015年6月 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 知能ロボティクス研究所
エージェントインタラクションデザイン研究室 連携研究員
- 2015年9月 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 知能機械工学専攻
博士後期課程 修了予定
- ロボット学会, 人工知能学会 各学生会員