

幼児教育支援のための
ケア・レシーバー型ロボットの行動設計に関する研究

松添 静子

システム情報工学研究科
筑波大学

2014年3月

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本論文の背景	1
1.2	本論文の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第 2 章	ケア・レシーバー型ロボット (Care-Receiving Robot: CRR)	7
2.1	関連研究	7
2.2	幼児教育支援のための CRR	8
2.3	フィールド実験のための CRR 実装	10
2.3.1	遠隔操作システムの実装	11
2.3.2	学習ゲームに特化した自律型ロボットの実装	13
第 3 章	CRR の失敗行動の有無が幼児の英単語学習に与える効果	17
3.1	研究目的	17
3.2	関連研究との位置付け	18
3.3	実験方法	19
3.3.1	実験タスク	19
3.3.2	実験フィールド・参加者	20
3.3.3	実験デザイン	21
3.3.4	実験手順	21
3.4	実験結果	23
3.4.1	事後テストの結果	23
3.4.2	自由時間における実験参加者の行動分析結果	25
3.4.3	保護者へのインタビュー調査結果	27
3.5	考察	29

3.5.1	幼児教育支援 CRR の実現可能性	29
3.5.2	本実験における制約	30
3.6	まとめ	31
第 4 章	CRR の失敗行動頻度の違いが幼児の英単語学習に与える効果	33
4.1	研究目的	33
4.2	関連研究との位置付け	35
4.3	実験方法	36
4.3.1	実験タスク	36
4.3.2	実験フィールド・参加者	36
4.3.3	実験準備	37
4.3.4	実験デザイン	39
4.3.5	実験手順	40
4.4	実験結果	43
4.4.1	事後テストの結果	43
4.4.2	実験参加者とロボットのインタラクション分析	45
4.5	考察	47
4.5.1	学習促進効果の検証について	47
4.5.2	学習に関連した興味誘引について	48
4.5.3	英単語学習に効果的な失敗行動頻度	50
4.5.4	本実験における制約	51
4.6	まとめ	53
第 5 章	幼児の集団活動における CRR の教育効果の検証	55
5.1	研究目的	55
5.2	関連研究との位置付け	56
5.3	実験方法	56
5.3.1	実験準備	56
5.3.2	実験デザイン	58
5.3.3	実験手順	59
5.4	実験結果	61
5.4.1	事前・事後テストの結果	61
5.4.2	実験参加者とロボットのインタラクション分析	63
5.5	考察	65

5.6	まとめ	66
第 6 章	CRR の行動設計のための複数ロボット同時比較による進歩的開発手法	67
6.1	研究目的	67
6.2	関連研究との位置付け	68
6.3	2 台ロボットの同時比較による進歩的開発手法	69
6.4	実験方法	72
6.4.1	実験フィールド・参加者	72
6.4.2	実験準備	72
6.4.3	実験手順	73
6.5	実験結果	74
6.5.1	探索フェーズにおいて観察されたロボットの効果的な行動	74
6.5.2	追加行動による学習ゲームへの興味の誘引	77
6.5.3	追加行動による英単語学習効果	84
6.5.4	CRR を進歩的に開発できたのか	86
6.6	考察	91
6.7	まとめ	92
第 7 章	結論	93
7.1	ケア・レシーバー型ロボットの行動設計	95
7.1.1	CRR による幼児教育支援の実現可能性	95
7.1.2	幼児の自発的なケア行動を効果的に誘引するロボットの弱さ 演出行動	96
7.1.3	効率的な CRR の行動設計・開発手法の実現およびそのための 実験手法	97
7.1.4	CRR が導入可能な環境や条件に関する事例の収集	98
7.2	本論文による波及効果と展望	99
	謝辞	101
	参考文献	103
	研究業績一覧	108

目次

1.1	本論文の構成	5
2.1	CRR を用いた幼児の学習支援の概念図	9
2.2	NAO (Aldebaran Robotics)	10
2.3	動作ライブラリからの選択実行による遠隔操作	12
2.4	マスタースレーブ方式によるロボットの遠隔操作	13
2.5	Naomark の例	14
2.6	博識なロボットにおける自律システムの構成	14
2.7	間違うロボットにおける自律システムの構成	15
2.8	追加行動を実装した自律型ロボットのシステム構成	15
3.1	実験に使用した CRR 機体と道具 (左から drink, sweep, play, brush に対応)	19
3.2	左: 絵柄カード, 右: スペルカード	19
3.3	実験の行われた子ども向け英会話教室	20
3.4	本実験での単一プロトコル設計	21
3.5	実験シナリオの流れ	23
3.6	実験の様子 (左: ジェスチャーゲーム, 右: 自由時間)	24
3.7	事後テストの平均正答率 (実験直後と 1 ヶ月後に実施)	24
3.8	子どもの自発的教示の有無に注目した事後テストの平均正答率の比 較 (実験直後のみ)	25
3.9	3 種類の教示行動の発生頻度	26
4.1	本研究で用いる 3 種類のロボット	34
4.2	実験を実施した子ども向け英会話教室 (室内面積: 約 $25m^2$)	36

4.3	(左) 実験で用いたロボットとお絵かきゲームに用いた道具一式, (右) ホワイトボード, 水性マーカー, イレイサー	37
4.4	直接教示の様子: 子どもがロボットの手を取り直接動かすことで “square” の描き方を教示している.	38
4.5	(左) 図形の形をしたカード, (右) 図形が描かれている長方形のカー ド.	38
4.6	各 Condition におけるロボットと実験参加者の行動系列	39
4.7	実験の流れ: 括弧内には各段階での所要時間の目安	40
4.8	二周からなるお絵かきゲームの流れ	41
4.9	(左) お絵かきゲームの様子, (右) 自由時間の様子.	43
4.10	事後テストの平均正答率	44
4.11	質問 2 における平均回答所要時間	44
4.12	自由時間におけるインタラクション発生回数 (平均値) の比較	46
4.13	自由時間内のレッスンと関連したインタラクションの発生割合の比較	47
4.14	自由時間におけるインタラクション頻度の時間遷移	49
4.15	実験参加者のロボットへの自発的教示行動の割合	50
5.1	実験を実施した幼稚園の教室	57
5.2	使用した動物イラストカード.	58
5.3	実験の流れ: 括弧内には各段階での所要時間の目安	60
5.4	(左) 事前テストの様子, (右) 動物ジェスチャーゲームの様子	60
5.5	博識なロボットに割り当てた動物名称の英単語群における事前・事 後テスト平均正答率 (条件 1)	61
5.6	間違えるロボットに割り当てた動物名称の英単語群における事前・事 後テスト平均正答率 (条件 2)	62
5.7	学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合	64
5.8	各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化	64
6.1	2 台のロボットの同時比較による進歩的開発手法	71
6.2	本章にて実施した進歩的開発の大まかな流れ	74
6.3	WOZ-CRR による子どもの学習ゲームへの興味誘引の成功例 (困惑 動作)	75
6.4	WOZ-CRR による子どもの学習ゲームへの興味誘引の成功例 (後退 動作)	76

6.5	WOZ-CRRによる子どもの学習ゲームへの興味誘引の失敗例（起立や歩行を伴う動作）	76
6.6	ロボット周囲の子どもの人数の算出例	77
6.7	各ロボットの行動によるロボット周囲の子ども人数の比較（1回目検証フェーズ）	79
6.8	ゲームの基本動作によるロボット周囲の子ども人数の比較（2回目検証フェーズ）	80
6.9	各ロボットの追加行動によるロボット周囲の子ども人数の比較（2回目検証フェーズ）	81
6.10	追加行動経験と子どもたちによるロボットへの自発的な働きかけ回数との関係性（回帰分析結果）	83
6.11	事後テストにおける正答率増減の平均（それぞれ2日目のみの結果を抜粋）	84
6.12	追加行動経験と事後テストにおける正答率増減の関係性（回帰分析結果）	85
6.13	CRRの改良段階に伴う各ロボットが誘発した子どもたちの自発的な働きかけ比率の遷移	87
6.14	学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合（1回目検証フェーズ）	87
6.15	各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化（1回目検証フェーズ）	88
6.16	学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合（2回目検証フェーズ）	89
6.17	各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化（2回目検証フェーズ）	89
6.18	ロボットが子どもたちに完全に無視されていた累積時間の比較	90

表目次

2.1	NAO の主な技術仕様	10
3.1	3 種類の教示行動発生頻度と実験直後の事後テスト平均正答率との 関係性：分散分析表（一般化線形モデル, L.R.: Likelihood Ratio） .	27
3.2	保護者へのインタビュー調査結果（Yes/No 選択形式）	28
3.3	実験直後の事後テスト正答率との関係性：分散分析表（一般化線形 モデル, L.R.: Likelihood Ratio）	28
3.4	約 1 ヶ月後の事後テスト正答率との関係性：分散分析表（一般化線 形モデル, L.R.: Likelihood Ratio）	28

第 1 章

序論

1.1 本論文の背景

近年，子どもたちの学びの質や学習意欲の向上，教育現場の効率的な運営等の実現を目的として，様々な情報通信技術（ICT: Information and Communication Technology）が教育環境に導入され始めている．実際に現場への導入が実現している技術の例としては，電子黒板やプロジェクター等の ICT 機器やデジタル教科書などのコンテンツ活用などが挙げられる．また，国のプロジェクトの一環として実証校の指定を受けた小学校・中学校・特別支援学校に，上記のような機器や学習支援ソフトウェアの導入や無線 LAN 環境の整備，全児童生徒へのノート PC やタブレット端末等の配布などの ICT 環境を構築し，教育分野における ICT の利活用の推進を目的とした実証研究も盛んに行われている [1, 2].

また，学習者に対して他者を表現可能なエージェント技術を教育支援に応用する試みも広がりつつある．代表的なものとしては，教育支援用の仮想エージェント [3, 4, 5, 6] や人間型ロボット [7, 8, 9, 10] 等の導入事例があり，それぞれの有用性についても報告がなされている．語学教育の場面では，古くから言葉と身体動作を関連づけることが言語の習得に有効であるということが知られており [11]，全身反応教授法 [12] のように物理世界における学習者と他者の身体動作を通じたやりとりを取り入れた指導法はこれまで広く現場で実践されてきている．言語教育学分野では，生ま

れてから 10 歳前後までを感受期や言語形成期と呼び、この時期では「体験的に言語を習得する能力」が発揮されるため、見る・聞く・体を動かすといった自身の五感から得る刺激によって言語などの知識を蓄積できると考えられている。一方、この言語形成期を過ぎると体験的に言語を習得する能力は失われていき、大人になると逆に「論理的に言語を習得する能力」が上がっていくと言われている。このように子どもと大人では学習を司る脳機能が大きく違うことから、実際の英会話教室でも双方に対して全く異なる指導法を実践している。そのため、エージェント技術を用いたコンテンツについても十分に教育支援に貢献可能であると考えられる。特に物理世界で多様な身体動作に基づくやりとりを提供可能なロボット技術は、幼児教育場面での支援に有効なメディアとして期待される。

教育支援ロボットの研究に関しては、これまで人間の教師の役割を想定した教師型ロボットの試みが多くなされてきた。神田らは、人間型ロボット Robovie を小学校に長期間導入し、子どもたちの英語学習に与える効果やロボットへの興味の変化について調査している [7]。Han らは、子どもたちの英語学習に対する集中度や達成度について、ロボットを利用した学習支援手法 (r-Learning) と既存の e-Learning や本・オーディオテープを用いた手法との間で比較調査し、その中ではロボットの利用が効果的であると報告している [8, 13]。You らは、教師のアシスタントとしてデモンストラクションロボットを小学校へ導入した例を報告しており、実施後のアンケート調査から、ロボットを導入した授業に対して比較的良い評価が得られたとしている [9]。Saerbeck らはロボットの social supportive behavior の有無が子どもたちの学習の効率化にどのように影響するのか調査し、この枠組みを適用したロボットがテストの成績や学習意欲の向上において効果的であると報告している [14]。これら一連の教育支援ロボットは、人間の教師のように、ある意味で子どもたちよりも上位の立場を担っている存在であるといえる。

その一方で、子どもたちとより対等な立場のロボットを用いた教育支援の研究も行われ始めている。教師型ロボットの場合、子どもたち側からロボットに対して質問することはできるが、ロボット側から問題を出題したり何かを教えたりというように、大抵のインタラクションは得てしてロボット側からの一方的なものになりがちである。これに対して、子どもたちと対等な立場のロボットでは、子どもたちはロボットに対して何かを質問するだけでなく、そのロボットに対して教えることも可能となりインタラクションの幅が大きく広がる。このような利点から、意図的にロボットの弱さを子どもに対して演出し、自発的なロボットへの働きかけを誘発することで教育支援を行う事を目的としたケア・レシーバー型ロボット (CRR: Care-Receiving

Robot) が Tanaka らによって提案されている [15, 16]. CRR は, 意図的に間違っただ行動をするよう設計することで子どもたちからの自然な教示行動が誘発されると考えられている. そして, 他者への教示による学習 (Learning by Teaching [17]) が促進され, 結果的に子どもたち自身の学習が深まるのではないかと期待されている. また, 教師型ロボットと比較して, ロボット倫理 [18] 上の問題が少ないことも主張されている. Ghosh らの子ども英会話教室でのフィールド実験より, 問題を常に正解するよう設計されたロボットと比較して, 意図的に間違っただ行動をするよう設計されたロボットには子どものロボットに対する働きかけが多く発生することが確認されている [19]. この研究から, CRR は子どもたちの自発的・能動的な学習参加を促す効果が高いことが考えられる. しかし, その自発的な学習参加が何らかの英語を身に着けることに繋がったのかについては検証されていない. さらには, CRR が子どもたちからの働きかけを受けるために取るべき行動の指針についても, 『ロボットの弱さを演出する行動』というように漠然としているため, 幼児教育支援を目的とした CRR を実際に開発するには行動設計の指針を明確にすることが重要である.

1.2 本論文の目的

CRR は教師型ロボットと比較して子どもたちの自発性を誘引しやすく, 双方向の活発なやり取りが期待される. しかしながら, 幼児教育支援のためのケア・レシーバー型ロボットを実装するために必要となる具体的なロボットの行動設計指針に関する知見はほとんど明らかにされていない. そこで本論文では以下の4点について明らかにし, 幼児教育支援のための CRR の行動設計に関する知見を深め, これまで明確に存在しなかった指針の具現化の先駆けとすることを目的とする.

- CRR による幼児教育支援の実現可能性
- 幼児の自発的なケア行動を効果的に誘引するロボットの弱さ演出行動
- 効率的な CRR の行動設計・開発手法の実現およびそのための実験手法
- CRR が導入可能な環境や条件に関する事例の収集

子どもは, 自身と他者の間に能力や置かれている状況のギャップがあり, かつ自身の立ち位置が上位であると認識した場合, そのギャップを埋めるために他者に対して自発的に働きかける性質があると言われている [20]. 他者をロボットに置き換えて実施された研究においても同様の報告がなされている [21, 22, 23, 24]. しかしながら,

ロボットの効果で引き出された子どもたちの自発的な働きかけによって、知識の習得・定着が促進されるかどうかに関しては、未だ明らかとされていない。

また、CRRのようにロボットの機能の低さを敢えて前面に押し出すことに注目した概念は比較的新しい。そのため、子どもたちの自発的な働きかけを誘発するためにどのような行動が効果的なのか検証した研究は少なく、関連する具体的な知見も非常に少ない。

さらには、ロボットの弱さを演出しうる行動は無数に存在するため、これらの網羅的な仮説検証は現実的な方法ではない。そのため、効率的にCRRの行動設計のために重要な知見を見出すための実験方法についても検討する必要がある。

そして、実際の教育現場での支援を実現させるためには、CRRによって対応可能な年齢帯やクラス編成（一度に対応可能な人数等）、CRRを使ってどのような学習コンテンツが運用可能なのかについても調査する必要がある。可能な限り多くの知見を明らかにすることで、より現場指向性の高いCRR開発のための指針となることが期待される。

本論文では、これらの点について知見を深めるため実際の教育現場でのCRR導入実験を行う。また、実際に幼児教育に携わっている教師の方々の意見なども参考にして得られた知見をまとめることで、これまで曖昧だったCRRの行動設計指針を明確にしていくことを目指す。本論文の成果はCRRによる幼児教育支援の実現、さらにはパーソナルロボットの普及に向けた起爆剤となることが期待される。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。初めに本研究で扱うケア・レシーバー型ロボット（CRR: Care-Receiving Robot）について述べ、1.2にて掲げた目的を達成するために行った4つの実験とその結果得られた知見について説明する。そして最後に、本論文を通して明らかとなった幼児教育支援のためのCRRの行動設計指針について知見をまとめる。図1.1に本論文の構成図を示す。

2章では、ケア・レシーバー型ロボット（CRR: Care-Receiving Robot）の概念について、工学分野だけでなく教育心理学や教育学の分野における従来研究を取り上げながら説明し、幼児教育支援の文脈でCRRをいかに定義するかについて述べる。そして、以降の章における実験にて使用したCRRについて説明する。

3章では、意図的な失敗行動（間違った回答）をするよう設計されたCRRを子ども

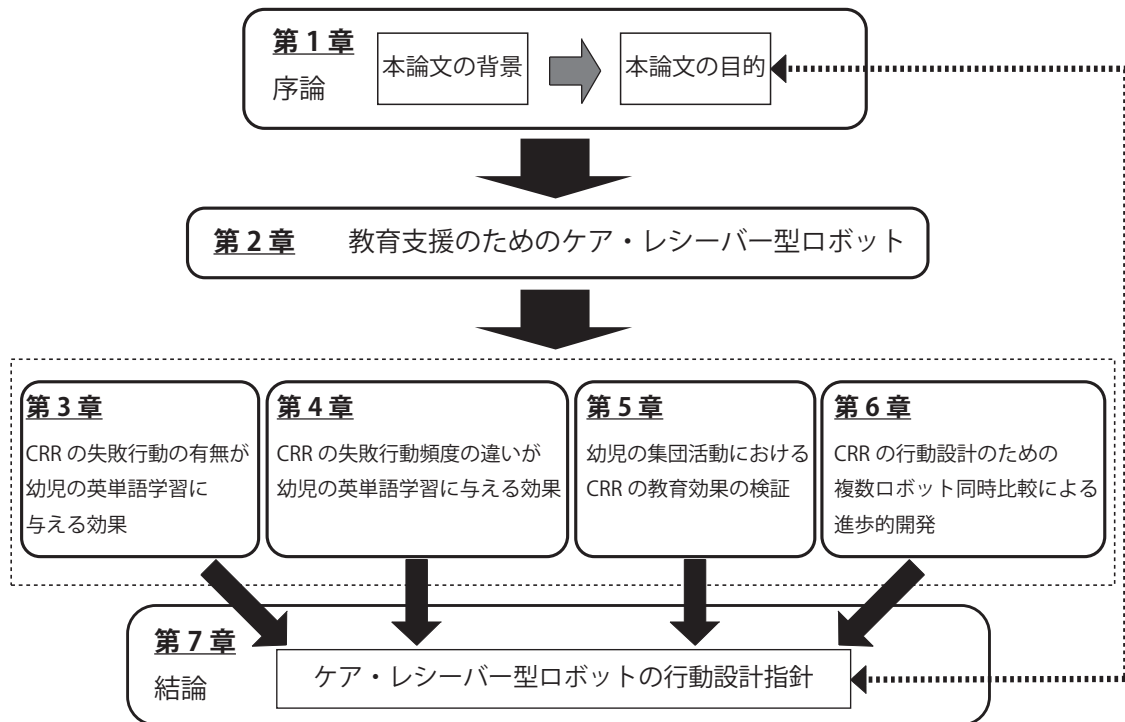


図 1.1 本論文の構成

も英会話教室に導入し、子どもたちの英単語学習に対する効果の有無を調査した実験について述べる。

4章では、3章で英単語学習効果が確認されたCRRの意図的な失敗行動の頻度に注目し、この違いが幼児の英単語学習や学習意欲の維持などに与える影響を調査した。

5章では、CRRが導入される実験環境を教育対象が幼児1名の場面(3章および4章)から幼稚園での集団活動場面へ発展させ、ここまでの成果と同様の教育効果が得られるか否かについて検証した。

6章では、意図的な失敗行動以外の幼児教育支援に効果的なCRRの行動を明らかにするために、仕様の異なる2台のロボットの同時比較による進歩的開発手法を提案する。そして、この手法の実現可能性を検証するために行った実験について述べる。

最後に7章では、本論文の目的として掲げた幼児教育支援のためのCRRの行動設計指針に関して、本研究で得られた成果についてまとめる。

第2章

ケア・レシーバー型ロボット (Care-Receiving Robot: CRR)

2.1 関連研究

Tanaka らは小型ヒューマノイドロボット QRIO を実際の保育所内の一教室へ導入し、長期フィールド観察実験を実施している [25, 26, 27, 28]. その成果として、子どもたちはロボットに対してケア行動を盛んに行うと報告されている [28]. ここでのケア行動の例として、ロボットが床に寝ようとする時毛布を掛けてあげる行為やロボットが転倒した時にその起き上がりを助ける行為が挙げられている. Tanaka らはこれらの経験をもとに CRR の概念を提案している [15, 16].

教育心理学などの分野では、このような他人を助ける行動や他人に対して積極的な態度を示す行動（いずれも外からの報酬を期待しない）を向社会的行動と定義しており、他者への状況的・感情的な共感がこれらの行動を誘引している可能性についても報告されている [29]. 森下らは、実験者である大学生が包帯を巻き痛がる演技をしながら部屋の片づけている様子を子どもに提示し、子どもたちから自発的な援助行動が発生するかどうか調査している [30]. また、幼児の教示行動（向社会的行動のひとつとされている）は、他者の知識が自身よりも少ないと感じる（知識の差分を感知する）ことで、他者の知識を補おうと試みる意図的な行為であるとされている [20]. 赤木ら

は、1歳児であっても、他者が問題解決困難な状況であると認識することで積極的な他者への教示行動を生起可能であると報告している [31]。これらの研究事例から、学習の文脈においても CRR が意図的に間違っただけを示すことで「ロボットは子どもたちより知識が少ない（知能レベルの側面で不完全である）」と認識してもらうことができ、幼児のロボットへの積極的な教示行動を誘発できると考えられている。実際に Ghosh らによって、ロボットが意図的に間違えることで子どものケア行動や教示行動が誘発されることが確認されている [19]。しかしながら、CRR に子どもの学習を促進する効果があるのか、どのような学習課題やクラス編成において教育効果を発揮するのかについては検証されていない。また、子どもの向社会的行動を引き出すために、ロボットは具体的にどのように振る舞うことが効果的なのかについても明確な指標が無く、効率的に CRR を開発するために有効な手法についての知見も少ない。

一方、教育学分野では、Martin によって Learning by Teaching（他者への教示による学習）という概念が提唱されており、peer tutoring[32] や The jigsaw classroom[33] など効率的で質の良い学習活動を実現するために幅広く研究されている。このような学習者の能動的アプローチの有効活用は CRR にとっても重要なポイントのひとつである。なお、仮想エージェントの研究分野においても、teachable agent という教育支援用コンピュータエージェントへ応用されている [3, 34]。

2.2 幼児教育支援のための CRR

文部科学省によって告示されている幼稚園教育要領によると、幼児教育では、言葉などの知識の習得だけでなく、他者との関わり合い方や周囲の環境に対して興味関心を持ち自発的に関わろうとする力を養うことについても重点課題として挙げられている [35]。また、これらの能力を伸ばすことは道徳や情操教育とも密接に関係していると考えられる。このことから本論文では、以下の2点を CRR によって支援する幼児教育の大きな柱として設定する。

- 子どもたちの言葉などの知識習得を促進する
- 子どもたちによる他者や環境への自発的・積極的な働きかけを引き出す

前節でも紹介したように、仮想エージェントの分野では teachable agent に関する研究がなされているが、これらのエージェントは学習者から教示行動のみを受けることを目的としている（Learning by Teaching による言葉などの知識習得は十分期

待される)。しかし、上記の2点を支援するには、教示行動のみではなく、他者に働きかける行動(例:積極的に話しかける,困っている友達を助ける,間違いを指摘する)全般を子どもたちから自然に引き出すことについても教育的価値があると考えている。本論文では、以降この子どもたちによる「自発的なロボットに対する働きかけ(向社会的行動全般)」をケア行動(Care-taking behaviors)と呼ぶこととする。そして、本論文におけるCRRは、このケア行動を子どもたちから受ける(引き出す)ことによって幼児教育支援を実現する。

図2.1にCRRの幼児教育現場での導入例を示す。ここではまず、大人の教師(保護者)が教育トピック(例:挨拶の仕方)を決め、次に子どもに対して「このロボットに挨拶の仕方を教えてあげてね」というように指示を出す。過去の研究から、子どもたちはロボットに対してケア行動を盛んに行うと報告されており、幼児教育の現場においても子どもたちはロボットへ積極的にケア行動を行うものと仮説を立てた。また、ロボットが子どもたちよりも何らかの能力が低い存在であることや、何らかの手助けが必要な状況下にあることを示すよう振る舞うことで、より積極的なケア行動を引き出せると考えられる。そして、このロボットに対するケア行動を通じて、結果的に子どもたちの同教育課題(挨拶の仕方)に対する習熟性が高まることが期待される。

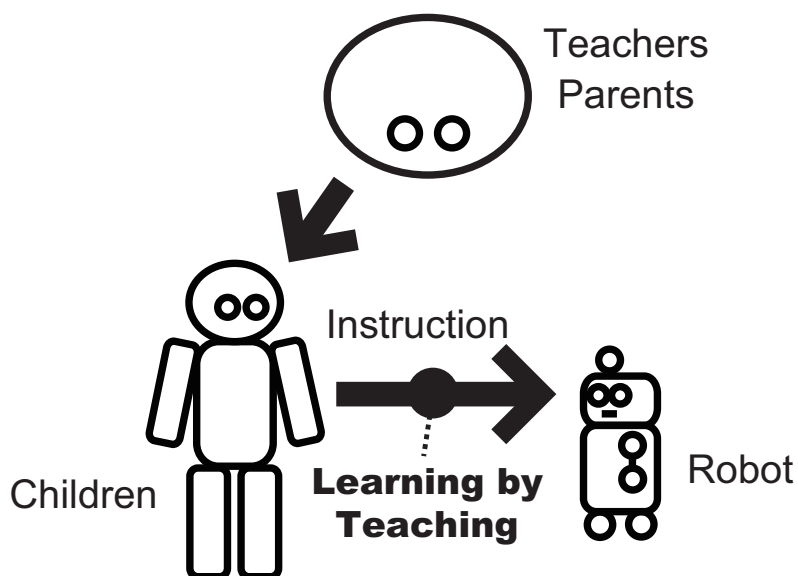


図 2.1 CRR を用いた幼児の学習支援の概念図

CRR のもうひとつの背景にロボット倫理の議論がある [18]。教師の役割を代替するロボットのように CRR とは対称的な Care-giver 型ロボットは、人間の教師や養育者をそのまま代替するものと解釈されうる面において、倫理的な問題点を数多く指摘されている。これに対して本研究で扱う CRR は、教師や養育者が介在することを前提としており、通常の活動や授業の中で使用する支援ツールのひとつとして位置づけている。また、人形遊び等に近い子どもたちのごく自然な世話欲を活かすものであるため、社会的なコンセンサスが比較的得られやすいものと予想される。

2.3 フィールド実験のための CRR 実装

以降に述べる実験では、CRR 機体として Aldebaran Robotics 社の NAO を用いた [36] (図 2.2)。3 章および 4 章では、遠隔操作によって実験時におけるロボットの行動を実現した。5 章では、学習ゲームに特化した自律機能を実装し実験に用いた。そして 6 章では、教育効果のある CRR の行動を効率的に探索するために遠隔操作ロボットとの同時使用を試みた。なお、遠隔操作やコマンドを送信する PC と NAO 間の通信には Wi-Fi によるローカルネットワークを実験環境内に構築して使用している。



図 2.2 NAO (Aldebaran Robotics)

表 2.1 NAO の主な技術仕様

身長	57.3cm
重量	5.2kg
自由度	25
バッテリー稼働時間	60 分 (活発動作時) 90 分 (通常動作時)
カメラ	CMOS イメージセンサ× 2
オーディオ	スピーカ× 2, マイク× 4
主な搭載センサ	赤外線, ソナー, 接触センサ
接続	Ethernet, Wi-Fi

2.3.1 遠隔操作システムの実装

ロボットを人間の生活環境で稼働させる場合，ロボット周囲の環境認識技術は大変重要である．しかし，技術的には未だ実環境での使用に耐えうるレベルまでには到達しておらず，特に子どものように行動の予測が難しい対象に対応した環境認識システムを確立するには多くのコストを要すると考えられる．3章および4章では，CRRの概念自体が実際の教育現場で実現可能なのかを調査することを重視している．そこで，不完全なシステムを自律型システムであるかのようにユーザに示す手法である Wizard of Oz 法 [37, 38] を用いてロボットの遠隔操作を行った．ロボット自身による周囲の環境認識技術を人間のオペレータによる遠隔操作で代替することで，様々なデータが取得可能となる．また，6章では幼児教育に対して効果的な弱さを演出するロボット行動を探索するための手段として，Wizard of Oz 法を採用している．本論文では，フィールド実験のために2種類のNAO遠隔操作システムを実装した．それぞれのシステム構成について，以下に説明する．

■動作ライブラリからの選択実行による遠隔操作 本論文にてロボットの遠隔操作を伴う実験では，各実験のシナリオに合わせて必要な動作プログラムを事前に用意しておき，状況に応じて適宜選択しながらロボットを遠隔操作する方法を用いた．事前に用意した動作プログラムの例を以下に示す．

- 挨拶やコミュニケーションに関する動作・発話（手を振る，Hello，OK）
- 歩行動作，着座動作，物体の把持動作（手の開閉）
- 学習ゲームに関する動作（正解動作，誤答動作，落胆動作）

実際に実験に導入した動作選択実行型の遠隔操作システムの概要を図 2.3 に示す．

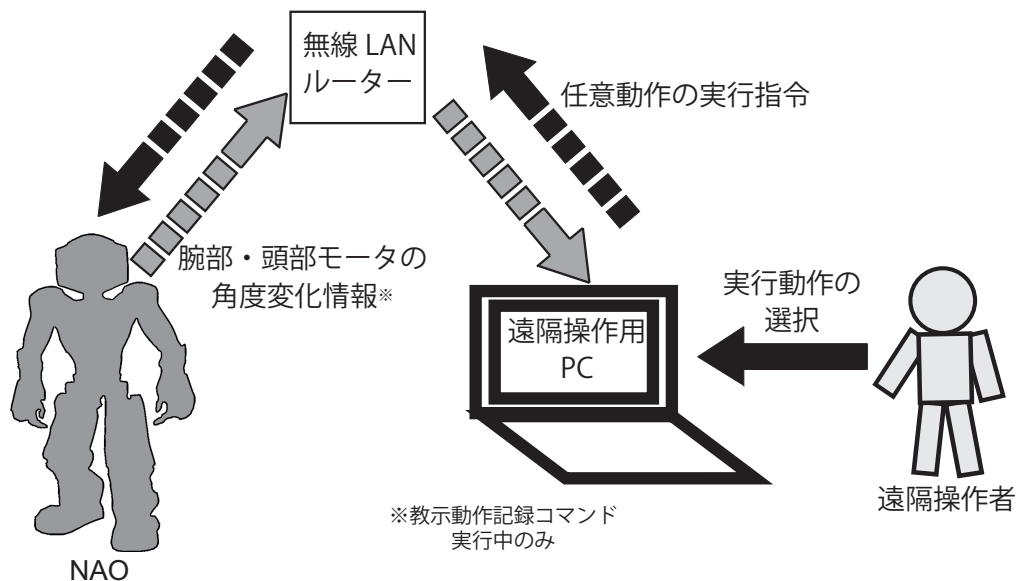


図 2.3 動作ライブラリからの選択実行による遠隔操作

■マスタースレーブ方式によるロボットの遠隔操作 6章では，可能な限り多彩なロボットの身体動作を提示するためにマスタースレーブ方式による遠隔操作システムを導入した。

図 2.4 に実際に使用したマスタースレーブ方式遠隔操作の概要を示す．ここでは，同型のロボットをマスター機として使用して，頭部と上腕の姿勢を遠隔操作した．そのため，遠隔操作 PC が取得したマスター側の関節角度情報をそのままスレーブ側の動作指令として送信するといった大変シンプルなシステム構成で実装されており，図 2.4 内の ① から ⑤ の流れを繰り返しながら，ほぼリアルタイムな遠隔操作が実現している．なお，下半身の動作については，全身のバランスを考慮したマスタースレーブ制御が困難であったため，ここでは対象外としている．

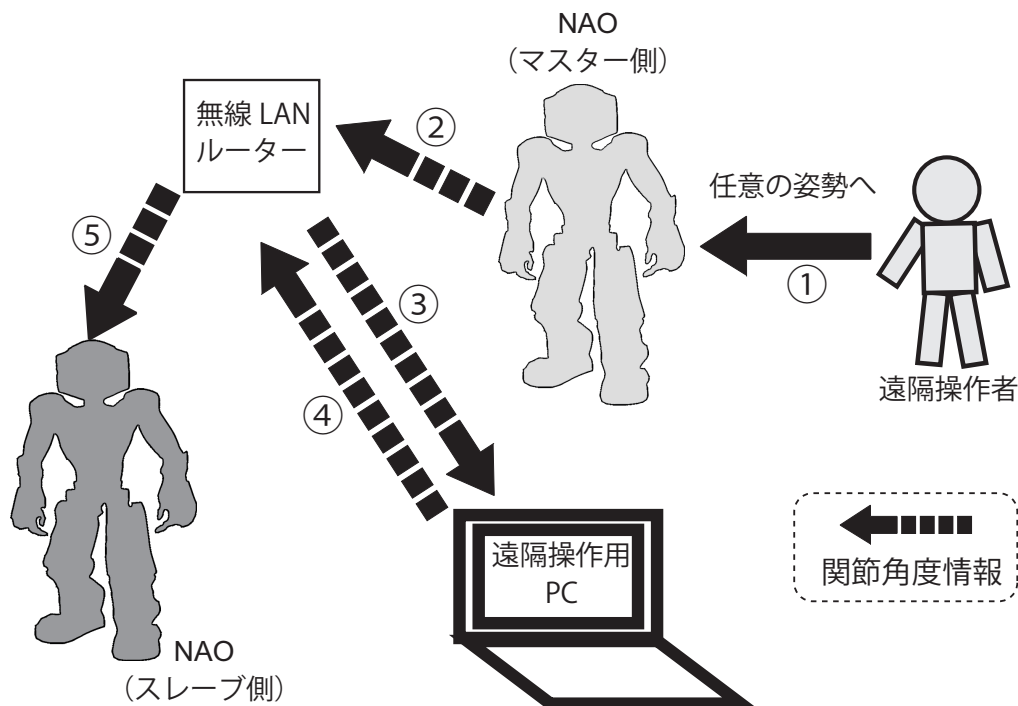


図 2.4 マスタースレーブ方式によるロボットの遠隔操作

2.3.2 学習ゲームに特化した自律型ロボットの実装

5 章および 6 章では動物のジェスチャーゲームの自律化を実現するために、動物イラストカードの認識機能を実装した。また、各動物ジェスチャー動作の特徴的な関節角度変化をもとに、実験参加者による直接教示の成否判別機能も実装した。実験者によって動物ジェスチャーゲームプログラムが実行されると、ロボットは実験参加者から提示されるカードや直接教示内容に応じて自律的に行動する。

以下に、実装した 2 つの自律機能について述べる。

■動物カードの自動認識 Aldebaran Robotics 社が NAO のシステム開発用に提供している Naomark という回転・スケール不変なマーカ [39] を用いて任意の動物カードの自動認識を実現した。ゲームで使用するカードには、動物の絵柄と任意の Naomark を 1 つずつ同一紙面内に印刷している。Naomark は図 2.5 に例を示すよ

うに，各マークに対して固有の ID が割り当てられている．NAO 機体のカメラの映像から検出されたマークの ID がロボットのシステム内で動物に割り当てられている ID であれば，該当する動物のジェスチャーを再生する．



図 2.5 Naomark の例

■直接教示成否の自動判別 動物ジェスチャーが正しく教示されたかどうかを自動判別する機能を実装した．この機能を容易に実装するため，ジェスチャーの上腕部の各関節角度の変化が特徴的であることを考慮して，rabbit, alligator, sea gull, elephant, giraffe, stag beetle をこのゲームに用いる動物ジェスチャーとした．動物ごとに関節角度変化の閾値を設定し成否判別に用いている．実際のジェスチャーゲーム内では，現在ターゲットの動物と一致するかの否かの二者択一で判別している．

5 章では自律型の博識なロボット（図 2.6）と間違えるロボット（図 2.7）を使用した．6 章では，図 2.7 に示す動物ジェスチャーゲームに必要最低限な機能を搭載した自律型ロボットをベースとし，進歩的開発の過程で発見された弱さ演出行動を，図 2.8 に示すように追加することで新たな自律型 CRR の開発を行った．

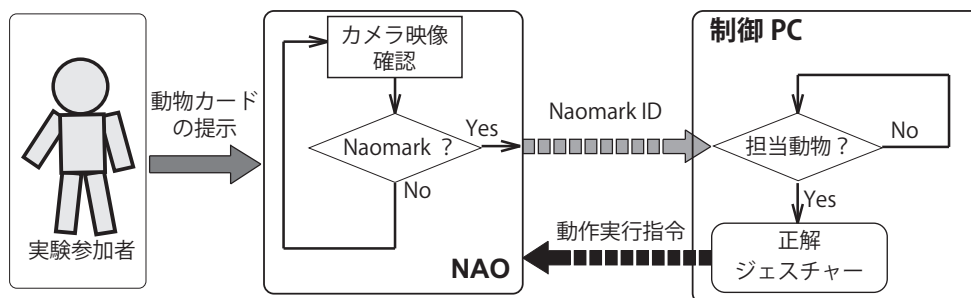


図 2.6 博識なロボットにおける自律システムの構成

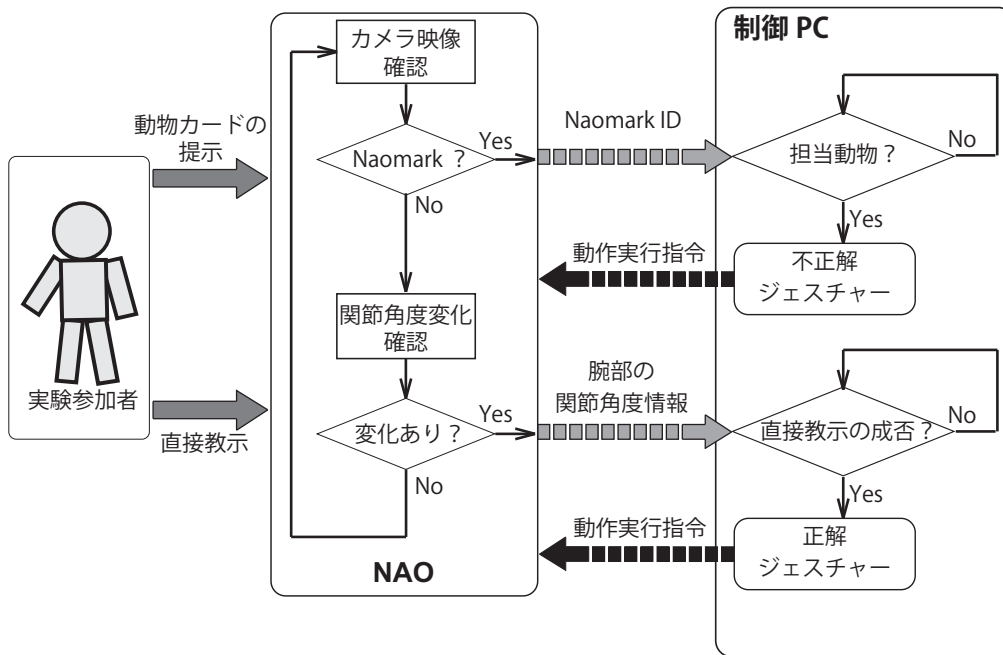


図 2.7 間違えるロボットにおける自律システムの構成

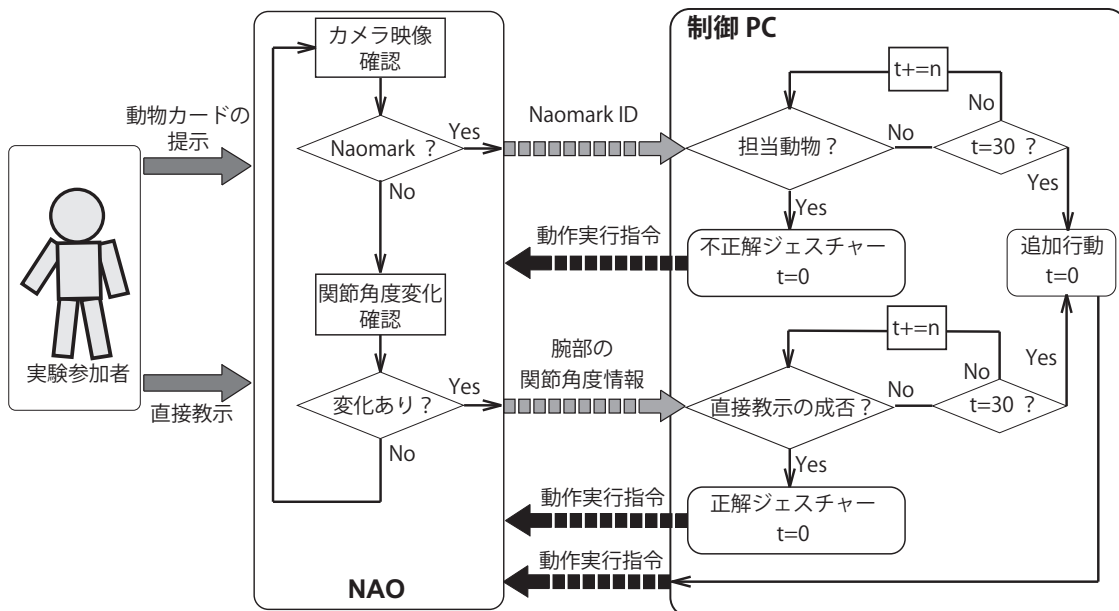


図 2.8 追加行動を実装した自律型ロボットのシステム構成

第3章

CRR の失敗行動の有無が 幼児の英単語学習に与える効果

3.1 研究目的

先述したように，CRR は幼児教育支援に大きく寄与することが期待される．しかしながら，これまで実際に CRR が幼児教育支援に有効かつ実現可能なのかについては言及されておらず，CRR による幼児教育支援を実現するために，まずはこの点についての知見を得る必要がある．

2章では，ロボットの弱さ・不完全さを演出する行動が子どもの自然なケア行動を誘発する可能性について，先行研究等を事例として挙げ言及した．このロボットの弱さを演出する行動のひとつとして，間違った内容を主張したり，提示された問題に対して誤答したりといった失敗行動が挙げられる．これまでに CRR の意図的な失敗行動が幼児のケア行動を誘発することについては確認されている [19]．しかし，この研究では英会話教室でのフィールド実験における子どもたちのケア行動頻度の観察のみに留まっており，子どもたちの英単語学習にどれくらい貢献したのかについては検証されていない．そこで本章では，CRR の失敗行動が実際の幼児英語教育の文脈において実装可能，かつ英単語学習に対して有効性があるか（子どもたちの自発的な教示による学習（Learning by Teaching）を促進するか）を確かめることを目的とした．

3.2 関連研究との位置付け

本論文で扱っている CRR と同様に、ロボットの弱さや不完全さに着目し設計されたロボットとして、SONY のペット型エンターテインメントロボット AIBO[21] や Muu[22, 23] などが挙げられる。AIBO は、たとえユーザの指示や働きかけに対して意図しない反応をしたとしても、ユーザが「この子は恥ずかしがり屋なのね」と解釈し、逆に AIBO に対して興味を持ち世話することに繋がるというコンセプトのもと開発されている。Muu はロボットが人とコミュニケーションをとる上で必要最低限の機能だけを搭載（ミニマルデザイン）することで、できないことは他者に助けをもらい、社会的な関係性を引き出すことを狙いとしている。実際に子どもとの積み木遊びの文脈では、Muu 自身は手が無いので積み上げることができないが、子どもに助けをもらいながら自発的なインタラクションを引き出している。また同様の着想から、自分では一切ゴミを拾えないゴミ箱ロボット（移動のための車輪はあるがアームなどは無い）が開発されている [24]。

一方、ヒューマノイドロボットによる子どもの自発的なケア行動に関する研究としては、Tanaka らによる QRIO を用いた保育園での長期フィールド実験に関する報告が挙げられる [28]。ここでは、ロボットが他のおもちゃと比較して乳幼児（2 歳未満）の自発的なケア行動を誘発することが確認された。インタラクションの例としては、バッテリー残量が残りわずかとなったロボットが床の上に寝ようとする子どもたちが毛布を掛けようとする場面や、転倒してしまったロボットの起き上がりを子どもたちが助けようとする様子が観察されている。この研究では、明確な学習タスクが設定された文脈ではなかったため、2.2 述べたような子どもたちの Learning by Teaching の実現との間にはギャップが大きい。Ghosh らは 3～5 歳児を対象として子ども英会話教室での実際のレッスンを模したフィールド実験を行っており、常に間違い続けるロボットによって教示行動も含む多くのケア行動が誘発されることを確認している [19]。しかし、ここではレッスンで扱った英単語等を参加者が習得できたかどうかについては検証されていないため、この点について明らかにする必要がある。

3.3 実験方法

3.3.1 実験タスク

実験タスクには、英語動詞学習を目的とした道具を使ったジェスチャーゲームを採用した。本章のジェスチャーゲームで使用した道具を図 3.1 に示す。また、動詞の内容を示す絵柄カード（図 3.2（左））とスペルカード（図 3.2（右））を用いた。また、予め用意された一連の動作や発話行動に加えて、実験参加者がロボットに手取り足取り動作を教示（以後、直接教示と呼ぶ）した場合、この間の各関節角の動きを記録して、後にその動作を正確に再現する機能が用意された。このゲームを通して英語動詞を覚えることができたかについては、絵柄カードとスペルカードを用いたかるたゲームを行い、その正答率で評価した。



図 3.1 実験に使用した CRR 機体と道具（左から drink, sweep, play, brush に対応）



図 3.2 左：絵柄カード，右：スペルカード

3.3.2 実験フィールド・参加者

つくば市の大型ショッピングモール内にある子ども向け英会話教室にて実験を行った(図 3.3)。教室は広さが約 $25m^2$ で、通常のレッスンが行われているそのままの部屋を用いた。実験の様子は教室内に設置した 2 台のビデオカメラで録画され分析に用いられた。実験参加者として、同教室に通う 17 名(3~6 歳, 男児: 5 名, 女児: 12 名)に協力して頂いた。また、この実験は実験参加者の安全確保等の観点において筑波大学研究倫理委員会にて実験計画の承認を経ており、実験参加者の保護者への事前説明と書面同意を得たうえで実施した。実験者には、教室内でのシナリオ進行と安全確保を担う教師役の実験者 1, 別室にてモニタリングしながらロボットの遠隔操作を担当する実験者 2 を配置した。



図 3.3 実験の行われた子ども向け英会話教室

ロボット機体は、Aldebaran Robotics 社製の NAO を使用した。実験は Wizard of Oz 法の枠組で行われ、ロボットの行動は別室の実験者 2 により遠隔操作された。

実験者 2 は、教室内に配置されたモニターカメラ・マイク (LifeSize Passport) および、通常レッスン時には保護者の観覧に用いられる窓からの様子をもとに教室内のロボットを遠隔操作した。また、これらとは別に 2 台のビデオカメラで実験の様子が録画され、分析に用いられた。

3.3.3 実験デザイン

フィールド実験では、実験の実施を妨げかねない様々な限界が生じる。今回の実験環境では、募集できる参加人数に限りがあった。また、それに関連して任意の男女比へ調整することも困難であった。さらに、ロボットとのインタラクション経験についても完全に統制することが困難であったため、本章の実験では、統制条件と対象条件を同時に実施する単一プロトコル設計を採用した(図 3.4)。すべての実験参加者に対して同一のプロトコルを実施することで、少ない実験参加者数でも 2 条件の比較実験を実施することができた。

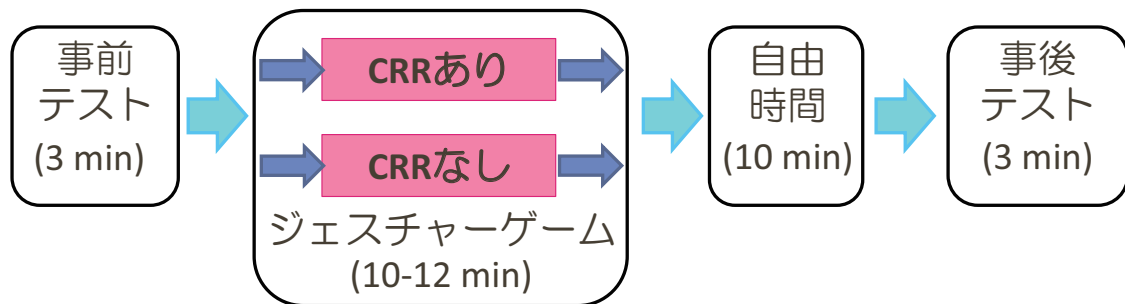


図 3.4 本実験での単一プロトコル設計

3.3.4 実験手順

実験時間は、実験参加者 1 名 (1 セッション) につき 30 分程度とした。実験シナリオの流れを図 3.5 に示す。以降、各ステップの詳細と実験参加者の保護者に対して行ったインタビュー調査について説明する。

■事前テスト 事前テストでは、参加者の未知英語動詞を同定するために、実際の教室で行われているカードゲームを参考にして設計された英語でのかるた遊び形式のゲームを実施した。実験参加者は実験者 1 と共に教室に入り、事前にランダムに選択し並べておいた 6 枚の絵柄カードを使って、英語でかるた遊びに似たゲームを行う。動詞の内容を示す絵柄カードを図 3.2 (左) のように用意しておき、実験者 1 がスペルカードを見せながらその単語を発声し、ペアとなる絵柄カードを取るよう

加者に促す。正解ペアを1回で取れば正解とし、4回ミスするまでこのゲームを行う。以後、ここで同定された4つの動詞を用いて実験を継続する。

■**道具を用いた動詞ジェスチャーゲーム** 図3.6（左）にジェスチャーゲームの様子を示す。事前テスト終了後、実験者1は別室に待機していたロボットと事前テストで同定した4単語に該当する道具を教室中央に配置した（図3.1）。事前テストで同定した4単語は、事前にCRR導入あり／なしの2条件に無作為に分配しておく。ジェスチャーゲームでは実験者1は教師役となり、事前テストで同定した4単語に対応する道具とスペルカードを使って以下のようにゲームを進める。

- (1) 実験者はスペルカードの中から1枚をランダムに選択し実験参加者に見せながら「Show us how to <動詞名>。」と問い、道具を使った動作を促す。
- (2) 正解を答えられなかった場合は実験者1が道具を伴って正解動作を実験参加者に見せ、教示する。ここで、CRR導入なし単語の場合は次の単語のために(1)へ戻る。
- (3) CRR導入あり単語の場合は、引き続きNAOに対しても同様の質問を行う。ここでNAOは必ず誤り動作をするように遠隔操作される。その後、実験者1によってNAOは誤りを指摘され、NAOが「Teach me」と発話した後に実験者1はNAOの手をとって直接該当動作を教える(Direct-teaching)。この際、NAOの両腕と首関節のモータは自由に動かせるようになっており、教示中の関節角度変化を記録して、動作の再生に備えることができる。2周目では、実験者1は実験参加者にもNAOへの教示を促す。
- (4) 実験者1は再度NAOに正解動作の提示を促し、NAOは(3)で記録した正解動作を再生して1つの単語のゲームが終わる。この流れで4単語それぞれのゲームを2回ずつ行う。

■**自由時間** ジェスチャーゲーム終了後、実験参加者は10分間、CRRと自由に遊べるようにする。この間、実験者1は教室の隅で本を読み、実験参加者へ関心を向けないふりをしながら安全への注意を払い続ける。自由時間内では、NAOは手にした道具に対して誤った動作を行い、実験参加者の直接教示を促す。図3.6（右）に自由時間の様子を示す。

■事後テスト 自由時間終了後，事前テストと同様の方法でインタビュー形式のテストを再度行う．また，実験参加から約1ヶ月後（3～5週間）にも再度同様のテストを実施した．

■保護者へのインタビュー調査 1ヶ月後に行った Post-test の後に，実験参加者の保護者に対して下記項目からなる参加者の普段の様子等に関するインタビュー調査を行った．

- Q1: お子様には兄弟／姉妹がいますか？
- Q2: 自宅でペットを飼っていますか？
- Q3: これまでにロボットと遊んだ経験がありますか？
- Q4: 自宅等で，玩具や年下の兄弟等に対して教示行動を行うことがありますか？
- Q5: 実験参加後，何か気付いたお子様の変化等がありますか？

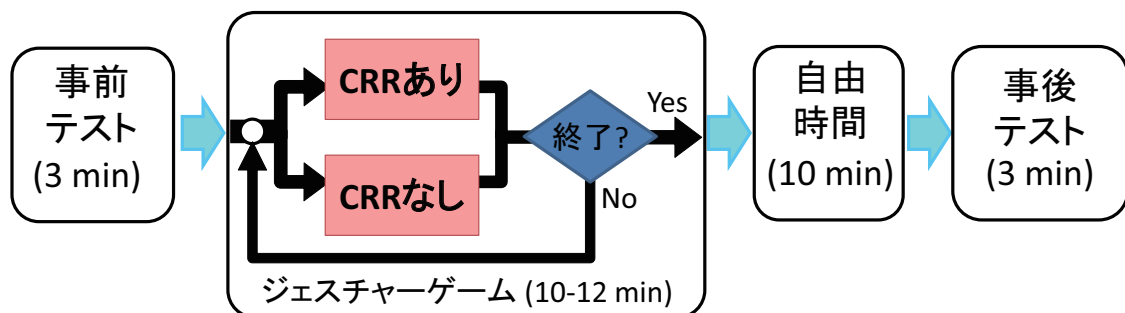


図 3.5 実験シナリオの流れ

3.4 実験結果

3.4.1 事後テストの結果

図 3.7 に事後テストの平均正答率を示す．なお，英単語学習時間の差異による影響を考慮し，本実験に複数回参加した4名の1ヶ月後事後テストの結果は除外している．CRR 導入あり／なし間の平均正答率に対して Wilcoxon の符号付き順位検定を行っ



図 3.6 実験の様子（左：ジェスチャーゲーム，右：自由時間）

たところ，導入あり単語の平均正答率は，実験直後 ($Z = -2.266, N = 17, p < 0.05$) および 1 ヶ月後 ($Z = -2.377, N = 13, p < 0.05$) のいずれにおいても有意に高いことが確認された．また，1 ヶ月後の事後テスト結果では，CRR 導入あり／なし共に平均正答率が上昇していた．

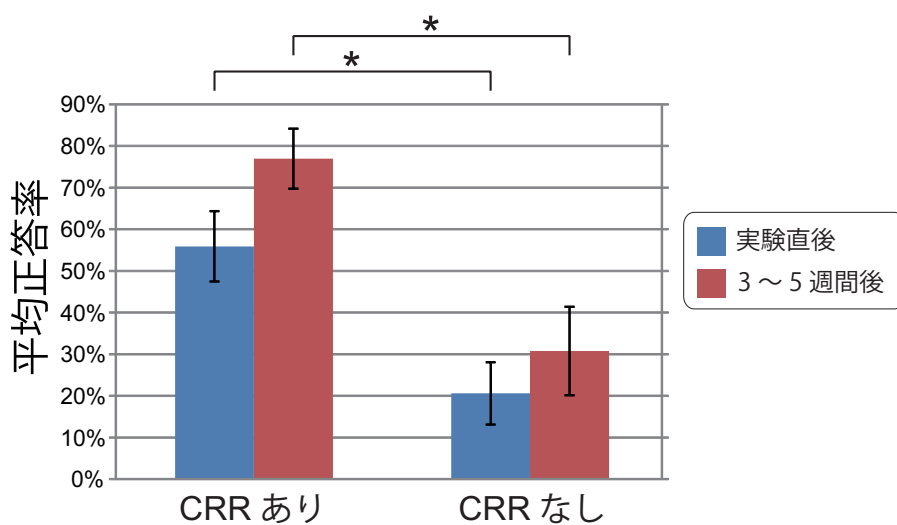


図 3.7 事後テストの平均正答率（実験直後と 1 ヶ月後に実施）

図 3.8 には，自由時間における子どもからの教示が行われた単語と行われなかった単語の間で事後テストの平均正答率を比較した結果を示す．教示行動あり／な

し間の平均正答率に対して Wilcoxon の順位和検定を行ったところ，自由時間に子どもからの教示が行われた単語群の平均正答率が有意に高いことが確認された ($Z = -3.148, N = 32, p < 0.01$).

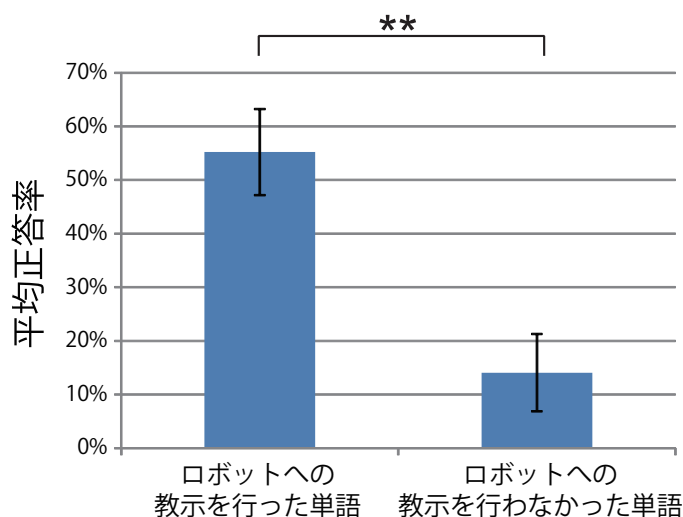


図 3.8 子どもの自発的教示の有無に注目した事後テストの平均正答率の比較（実験直後のみ）

3.4.2 自由時間における実験参加者の行動分析結果

子どもたちが実際に行った教示形態について調査するために，自由時間時のビデオ映像を用いてビデオコーディングを行った．ビデオコーディングは行動分析の汎用ソフトウェアである ELAN を用いて本論文の第一著者によって行われた．同時に，ビデオコーディングの信頼性を確認するために外部から 3 名の学生にも分析を行ってもらい一緻度を確認した ($\kappa = 0.70$).

実験者 1 はジェスチャーゲームで Direct-teaching による教示指示のみを行っていたにも関わらず，実際には実験参加者の子どもたちからは様々な形態の教示が CRR に対してなされた．それらは大別して以下の 3 種類に分類できる．

■Direct-teaching 実験参加者が，NAO の手や腕をとって直接動かすことで該当動作を教示するもの．NAO が道具を持たず子どもが道具を持ち NAO に直接働きかける（例：歯ブラシを NAO の口に当てる）教示行動も含める．

■**Gesturing** 実験参加者が、自らの身体動作でNAOに正解動作を教示するもの。例えば、子どもが自身の手を自身の口元に近づける動作（飲むジェスチャー）をNAOの目前でしてみせる行動などが相当する。

■**Verbal-teaching** 実験参加者による音声発話で該当動作を教示するもの。例えば「飲むんだよ」といった声掛けが相当する。

図 3.9 に、それぞれの教示行動の発生頻度を示す。Direct-teaching は 1 回当たりの所要時間が長いため、累積時間での頻度差は度数よりも大きなものとなっている。また、Direct-teaching については、ジェスチャーゲームにて教師役が明示していたこともあり最も多く発生していた。その他の形態の教示行動は Direct-teaching に比べて発生頻度は少なかったが、教師役は一切例示していないにもかかわらず、これらは子どもたちによって自発的に発生されていた。

次に、この発生頻度と実験直後の事後テスト平均正答率の関係性を分散分析により調査した。結果を表 3.1 に示す。ここでは、累積時間と累積回数の両方において、Direct teaching との間に有意な関連性がみられた。ただし、ここでの結果は 3.5 で述べるように慎重に解釈する必要がある。

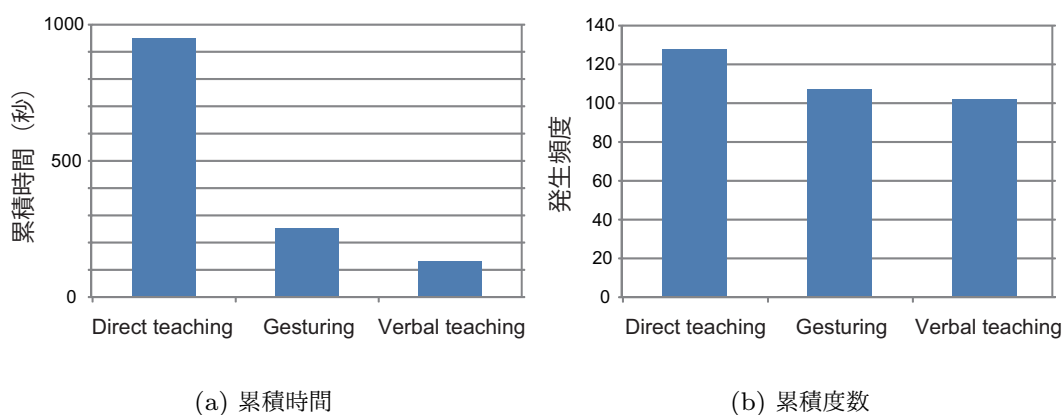


図 3.9 3 種類の教示行動の発生頻度

表 3.1 3 種類の教示行動発生頻度と実験直後の事後テスト平均正答率との関係性：分散分析表（一般化線形モデル, L.R.: Likelihood Ratio)

Source (Frequency)	df	L.R. χ^2	<i>P</i>
Direct teaching	1	32.3	< 0.001
Gesturing	1	1.4	<i>n.s.</i>
Verbal teaching	1	0.3	<i>n.s.</i>
Source (Accumulated time)	df	L.R. χ^2	<i>P</i>
Direct teaching	1	24.8	< 0.001
Gesturing	1	0.3	<i>n.s.</i>
Verbal teaching	1	1.2	<i>n.s.</i>

また、実験にご協力いただいた英会話教室の教師の方から、普段はなかなか積極的にレッスンに関われない子どもであってもロボットに対しては自発的に関わりを持っていたことに大変感動したというご感想を頂いた。これは、従来の教材で自発性を引き出しにくい子どもに対する CRR の有効性を示す貴重な事例であると考えられる。

3.4.3 保護者へのインタビュー調査結果

保護者へのインタビュー調査の結果、17 名中 10 名に兄弟もしくは姉妹がいて、4 名が犬を飼っていることが判明した (Q1, 2)。7 名の参加者は以前博物館などでロボットと関わった経験があった (Q3)。そして 14 名の参加者において、実験以前に別の場面における教示行動があるとの回答を得た (Q4)。Q4 の結果からは、前述した教育心理学分野などの知見にもあるように、幼児は自身との能力の差を認識した対象に対して教示行動（ケア行動）を自発的に行う傾向にあることが伺える。また、表 3.3 に示すように、分散分析の結果、Q1～Q4 と実験直後の事後テスト平均正答率の間に有意な相関がみられた。約 1 ヶ月後の事後テスト平均正答率との間には、Q3 と Q4 において有意な相関がみられた (表 3.4)。

さらに Q5（実験参加後、何か気付いたお子様の変化等がありますか？）に関連して、実験時に遊んだ道具を自宅等で見つけた際に、行動のリハーサルを行ったり、保護者に該当する英単語名を確認してきたりなどの変化が見られたとの回答が多く確認された。このことが 1 ヶ月後事後テストの正答率上昇に寄与した可能性がある。

表 3.2 保護者へのインタビュー調査結果 (Yes/No 選択形式)

質問	はい	いいえ
Q1: お子様には兄弟／姉妹がいますか？	10名	7名
Q2: 自宅でペットを飼っていますか？	4名	13名
Q3: これまでにロボットと遊んだ経験がありますか？	7名	10名
Q4: 自宅等で、玩具や年下の兄弟等に対して 教示行動を行うことがありますか？	14名	3名

表 3.3 実験直後の事後テスト正答率との関係性：分散分析表（一般化線形モデル, L.R.: Likelihood Ratio)

質問	df	L.R. χ^2	<i>P</i>
Q1	1	9.39	< 0.01
Q2	1	22.11	< 0.001
Q3	1	4.75	< 0.05
Q4	1	35.73	< 0.001

表 3.4 約 1 ヶ月後の事後テスト正答率との関係性：分散分析表（一般化線形モデル, L.R.: Likelihood Ratio)

質問	df	L.R. χ^2	<i>P</i>
Q1	1	1.90	<i>n.s.</i>
Q2	1	0.042	<i>n.s.</i>
Q3	1	18.61	< 0.001
Q4	1	25.06	< 0.001

3.5 考察

3.5.1 幼児教育支援 CRR の実現可能性

まず、本実験は、人間の教師によるレッスンに対する CRR の優位性を示そうとしたものでは決して無いことに留意する必要がある。実験では教師役の取りうる行動には実験統制上の制限があり、また、どの実験参加者に対しても一意に固定されたシナリオを厳密に実行していた。実際には、経験を積んだ人間の教師は生徒個々人の性格やその日の状況に応じ、柔軟かつリアルタイムに行動を変えている。この点を踏まえた上で、CRR は人間の教師を代替するものではないが、人間の教師のための教室における支援ツールのひとつとしての有用性には期待が持てるものと思われる。通常、子どもたちの興味や集中力をレッスンに向けることは、時に現場の教師たちにとって労苦を要するものであるが、CRR をうまく利用することによって、教師たちはより効果的かつ負担も少ないようにレッスンを構成できる可能性がある。

保護者へのインタビュー調査において、多くの実験参加者が、実験後に（NAO が居なくても）自宅その他で英語動詞のリハーサルを行っていたという報告は、我々にとっても非常に勇気付けられるものであった。残念ながら今回統計的な裏付けは取れていないが、おそらくこうした一連のリハーサル活動が要因のひとつとなって、1ヶ月後 Post-test の結果が向上したものと思われる。また、保護者へのインタビュー調査より、普段の生活においても子どもが保護者に英単語を質問するようになったという回答が得られた点から、CRR によって英語に対する興味・関心をより引き立てることに繋がったと考えている。同時に、「自分から質問してくる」という自発性も促されたと思われる。実験時の様子からも、普段のレッスンでは積極的に参加できない子どもがロボットに対しては自発的に関わりを持つことができていたという事例も確認されているため、従来の教材では引き出すことが困難な子どもの自発性を CRR が誘引できていたのではないかと考えられる。CRR の重要な基本概念は、子どもたちの「自発的な」学習を促進するものであることから、これらのエピソードは同概念が実際に機能していることを示す重要な根拠のひとつと考えている。

3.5.2 本実験における制約

本実験には、幾つかの制約 (Limitation) があることを認識しておく必要がある。まず、実験フィールドの性質上、募集できる実験参加者数には限界があり、また、男女比などの統制にも限界がある。関連して、18名の総参加者のうち10名は、以前、予備実験や準備イベントなど何かしらの形でNAOと関わった経験があるため、いわゆるNAOとのインタラクション経験を完全に統制することも困難であった。今回の実験計画が、多条件比較ではなく、単一プロトコル設計 (全ての参加者に対して同一のプロトコルを用いる) となっているのはこれらの制約が元となっている。いずれにせよ、本実験結果の一般性については、こうした条件を認識した上で判断する必要がある。

また、本章の実験結果からは、実際に子どもたちの英単語学習を促進した要因の可能性として様々なものが考えられる。例えば、本章で着目した Learning by Teaching が当初の想定通り効果的に作用し、子どもがロボットへ教える行為が子どもたちの英単語学習強化に影響した、そしてロボットの間違える行為がこの現象を引き起こす根源であったと考察することもできるが、単純に「ロボットと遊んだ」という経験 (ロボットそのものの新規性) が英単語習得の強化に影響した可能性もある。今回採用した実験デザインでは、これらの要因について各々分離して検証することが困難であったため、子どもたちの学習効果がなぜ得られたのかについて厳密な知見を得ることができておらず、これはフィールド実験を行う上で回避が非常に困難な制約のひとつとして挙げられる。

さて、本実験で用いた CRR の最大の弱点は、CRR 自身に学習機能が無いことである。今回の CRR は、Direct-teaching を受けた直後は教えられた動作を再生できるが、即座に忘却してしまい、その後質問を受けると再び誤り行動を出力するよう遠隔操作されていた。予備実験結果にも一部その傾向がみられるが、この制限が、子どもたちをがっかりさせてしまい (教えても覚えないので)、セッション後半のインタラクション数減少につながっていた可能性がある。また、本実験は当初 Direct-teaching を念頭に置いた設計がなされていたため、他の形態の教示行動に対する CRR の反応には制限が多くあった。これらの反省を踏まえて、現在、(1) 適切な CRR の学習ダイナミクスの同定と実装、(2) 効果的な CRR への教示方法の同定とそれに対する CRR の設計を行う必要がある。

3.6 まとめ

本章では、実際に子ども向け英会話教室にて CRR を実装し、英語動詞学習の文脈における CRR 導入効果の検証を行った。これまでに、ロボットの弱さを演出する行動が幼児のケア行動を誘発することについては様々な報告がなされているが、子どもたちの英単語学習子どもたちの言語などの知識習得に対してどれくらい貢献できるかについては検証されていなかった。そこで、このロボットの弱さを演出する行動の中でも、間違った内容の主張や提示された問題に対して誤答するといった失敗行動に注目し、この行動を有する CRR が子どもたちの英単語学習に対して有効性があるか（子どもたちの自発的な教示による学習（Learning by Teaching）を促進するかどうか）を調査した。

実験の結果、CRR は子どもたちの自発的な Learning by Teaching の誘発が可能で、事後テストの正答率向上にも寄与できることがわかった。このことから、ケア行動の誘発だけでなく、子どもたちが英単語を自身の知識として習得することに対して CRR が効果的である可能性を示唆することができた。また、自由時間における子どもたちの行動を観察した結果から、本実験で注目した直接教示（Direct-teaching）以外にも Gesturing や Verbal-teaching といった教示形態（教師役は一切例示していない）が子どもたちによって自発的に行われていた。この結果は、今後の CRR 設計において有用な知見であると思われる。

第 4 章

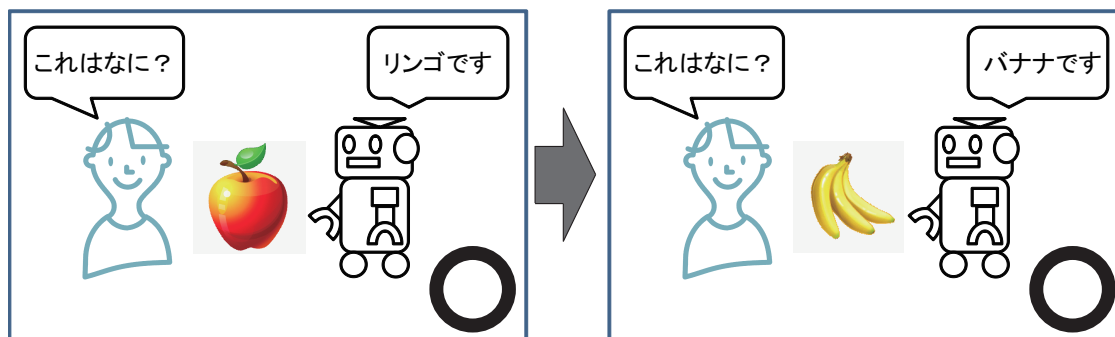
CRR の失敗行動頻度の違いが 幼児の英単語学習に与える効果

4.1 研究目的

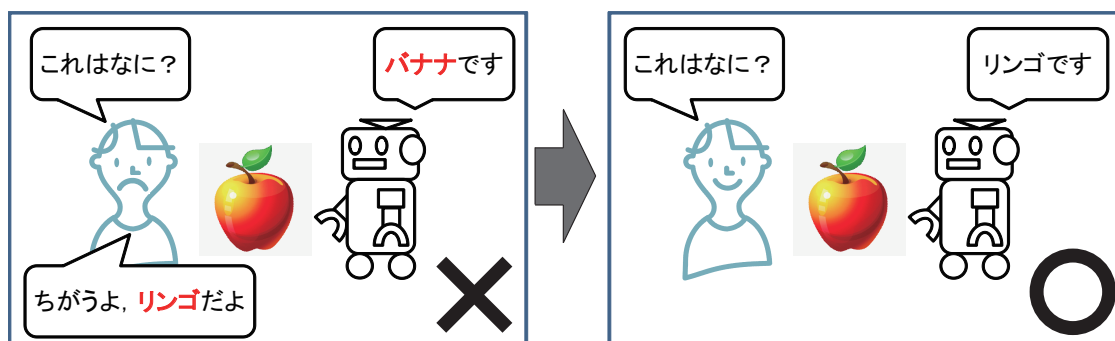
3 章では CRR の意図的な失敗行動による幼児の英単語学習効果を確認した。この失敗行動頻度の違いによって、子どもとの間に起き得るインタラクションの質や量にも影響を及ぼすことが想定され、教育支援ロボットの導入効果にも大きく関わると予想される。しかしこれまでこうした要因が具体的に子どもの学習にどのような影響を与えるかについては調査されていなかった。そこで本実験では図形のお絵かきゲームを題材として、CRR の失敗行動頻度の違いが子どもの英単語学習にどのような影響を与えるのか調査することを目的とした。本章では、CRR の失敗行動頻度の違いによって表現される特徴を『ロボットの賢さ』として捉え、3 種類の CRR を実装して実験を行った。図 4.1 に各ロボットの特徴を物の名前当てゲーム場面を例に図示する。

また、教育支援ロボットには、学習促進効果が高く、学習に関連した興味を誘引できることが求められているため、以下の 2 点について検証した。

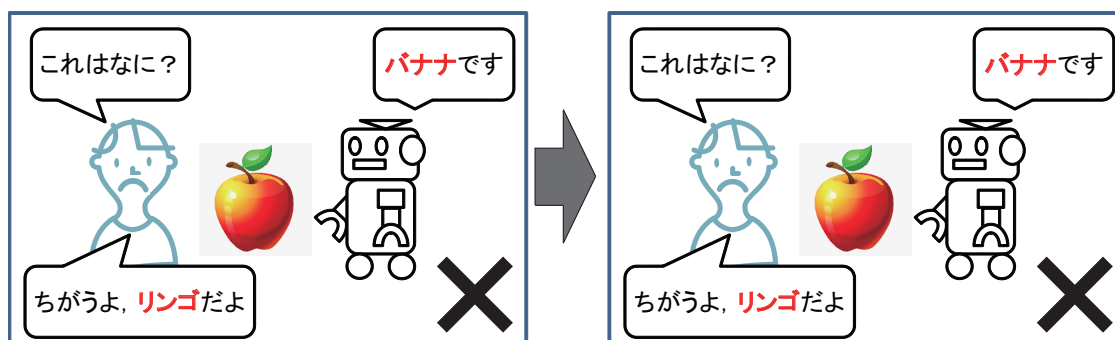
- 図形名称の未知英単語を子どもはどの程度覚えたか（英単語学習効果の検証）
- ゲームに関連するロボットへの働きかけがどの程度自発的に発生したか（学習に関連した興味誘引）



(a) 博識なロボット (Condition A)



(b) 一度教わると覚えるロボット (Condition B)



(c) 何回教えても覚えないロボット (Condition C)

図 4.1 本研究で用いる 3 種類のロボット

4.2 関連研究との位置付け

子どもたちと対等な立場のロボットの中でも、様々な種類のロボットを考えることができる。その中でも本研究では、以下に述べる『ロボットの賢さ』というポイントに着目する。実際、子どもたち同士の中でも優等生タイプや怠け者タイプなど様々な特性を有した仲間たちが居るように、ここではロボットについても幾つかの異なる特性を設計することを考えてみる。具体的には、教師の提示する如何なる質問にも正答する博識なロボット、最初は正答できないが子どもたちからの教示を受けて学習することで正答できる賢さを有したロボット、何度教えても学習できず誤答し続けるロボット、といった賢さの度合いが異なる3種類のロボットを考える。こうした特性の違いは子どもたちとの間に起き得るインタラクションの質や量にもかなりの違いを及ぼすことが想定され、教育支援ロボットとしての導入効果にも大きく関わるものと予想される。Saerbeckらの研究によって、チューターロボットによる子どもの学習支援では、ノンバーバルな反応や子どもに対して共感を示すなどやり取り (social supportive behavior) を交えることができるロボットの方が淡々と教示するのみのロボットよりも、子どもたちのテストの成績や学習意欲の向上において効果的であることが確認されている [14]。Kandaらの研究 [40] においても、ロボットの行動パターンを変化させていくことによって、対話ベースのインタラクションを通して子どもたちの興味・関心を引きつけることに成功している。しかしながら、これまでこうした要因 (ロボットの賢さの違い) が具体的に子どもたちの学習にどのような影響を与えるかについては調査されていなかった。

また、高齢者福祉へのロボット応用のひとつとして、高齢者と生活の中で世話されることを目的とした赤ちゃんのようになにもできないロボットである Babyloid の開発や、高齢者福祉施設にこのロボットを導入した実験なども行われている [41, 42, 43]。この研究のように高齢者のメンタルケアを目的としてロボットを用いる場合、世話欲を引き出すためにひたすら何もできない状態をアピールすることは有効な設計指針のひとつであると考えられる。しかし、幼児の教育支援においても同様のアプローチが適切であるかどうかについては、改めて検証する必要があると考えられる。

そこで本研究では、子ども英会話教室における図形のお絵かきゲームを題材としたフィールド実験により、ロボットの賢さの違いに注目し、この特徴が周囲の子どもたちの学習に及ぼす影響について調査する。

4.3 実験方法

4.3.1 実験タスク

図形名称を表す英単語を学習対象とした，図形のお絵かきゲームを用いた（詳細な手順については 4.3.5 参照）．早期教育においては，子どもたちが楽しみながら学習を行えることが重要であり，実際の子ども英会話教室においてもお絵かきゲームのような hands-on practice 型の（手を動かして参加できる）活動が用いられることが多く，本実験においても採用することにした．

4.3.2 実験フィールド・参加者

実験は，つくば市の大型ショッピングモール内にある（株）こども英会話のミネルヴァ・イーアスつくばプラザ教室にて実施した．実験を行った教室の様子を図 4.2 に示す．実験は子どもたちがリラックスできるよう極力通常レッスンの雰囲気を保つ形で行われた．



図 4.2 実験を実施した子ども向け英会話教室（室内面積：約 25m²）

実験参加者は同教室に通う4～8歳、合計19名の子どもたち（男児：8名、女児：11名、平均年齢：5.8歳）であり、筑波大学研究倫理委員会における実験計画の承認を経て、実験参加者の保護者への事前説明と書面同意を得た後に行われた。

実験には2名の実験者（実験を熟知した大学院生および大学生）が参加した。実験者1は、教師役としてお絵かきゲームに介在し、実験中の安全監督者としての役割も同時に担った。実験者1については全ての実験セッションに共通して同一の大学院生が担当した。実験者2は、別室にてロボットの遠隔操作を担当した。

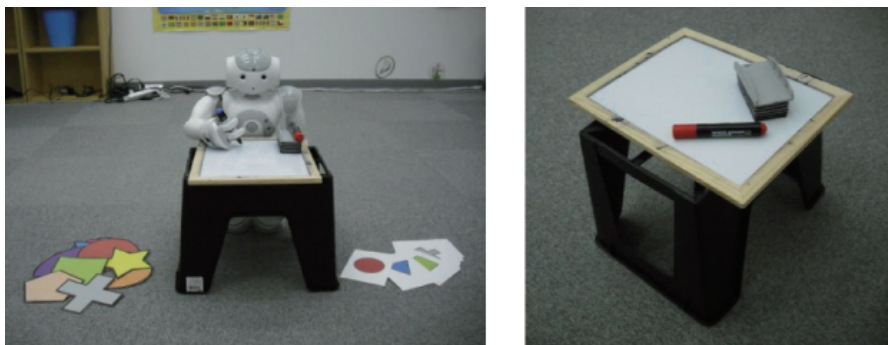


図 4.3 （左）実験で用いたロボットとお絵かきゲームに用いた道具一式，（右）ホワイトボード，水性マーカー，イレイサー

4.3.3 実験準備

ロボット機体は、Aldebaran Robotics 社製の NAO を用いた（図 4.3（左））。実験は Wizard of Oz 法の枠組で行われ、ロボットの行動は別室の実験者 2 により遠隔操作された。予め用意された一連の動作や発話行動に加えて、実験参加者がロボットに手取り足取り動作を教示（以後、直接教示と呼ぶ）した場合、この間の各関節角の動きを記録して、後にその動作を正確に再現する機能が用意された。図 4.4 にこの直接教示が行われている場面の例を示す。

遠隔操作においてはモニタリング環境が重要であるため、ハイビジョンのビデオ会議システム（LifeSize）を導入し、教室内の対角俯瞰位置にカメラを 2 台、卓上にズームカメラを 1 台設置し、マイクロフォンは床上に設置した。これらとは別に、2 台のビデオカメラで実験の様子が録画され、分析に用いられた。

お絵かきゲームで使用した道具を図 4.3 に示す。図 4.3（右）に示すホワイトボー

ド類一式については市販品を用いた。安定した描画を可能にするためにホワイトボードは台に固定された。また、図 4.5 に示すような 2 セットのカードが用いられた。いずれも写真左上より circle, triangle, square, pentagon, cross, oval, heart, sector, crescent, star を表す。これらはそれぞれ同一の図形を表すものであるが、遠隔操作時のモニター上での認識しやすさを踏まえて、図 4.5 (左) のようなカードも用いられた。

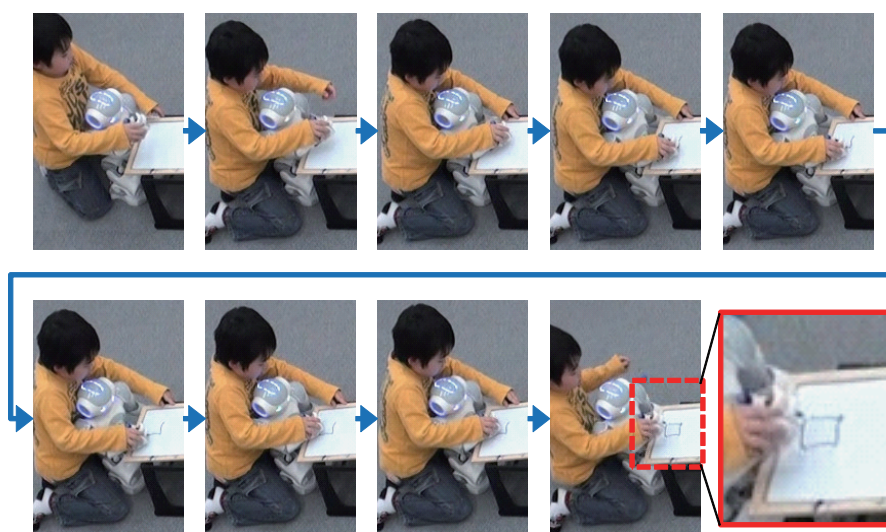


図 4.4 直接教示の様子：子どもがロボットの手を取り直接動かすことで“square”の描き方を教示している。

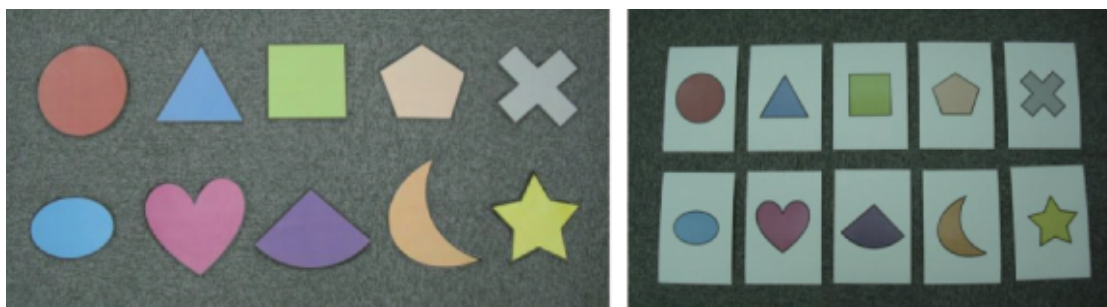


図 4.5 (左) 図形の形をしたカード, (右) 図形が描かれている長方形のカード。

4.3.4 実験デザイン

本実験では、以下に示す 3 条件から成る参加者間配置デザイン（between participants design）が採用された。

Condition A：博識なロボット 教師や実験参加者から特定の図形の描画を要求された場合、全て最初から正しく描くことができる。

Condition B：一度教わると覚えるロボット 実験開始時には如何なる図形も描くことができないが、直接教示により特定の図形の描き方を一度でも教わると、次からはその図形を描くことができるようになる。

Condition C：誤答し続けるロボット 終始、要求された図形を正しく描けない。

図 4.6 に、実験中のロボットと参加者の行動系列を示す。実験参加者は、ロボットが正解図形を描いている場合はその行動の観察のみを行い、間違っただけの図形を描いた場合のみロボットに対して直接教示を行った。各条件の統制として、お絵かきゲーム中におけるロボットの描画実演回数を 1 単語あたり 4 回と固定した。各実験参加者はこの中のいずれか 1 条件のみの実験に参加できるものとし、年齢や性別、過去にロボットと遊んだ経験の有無などの要因を考慮して、極力偏りが無いよう配置された。

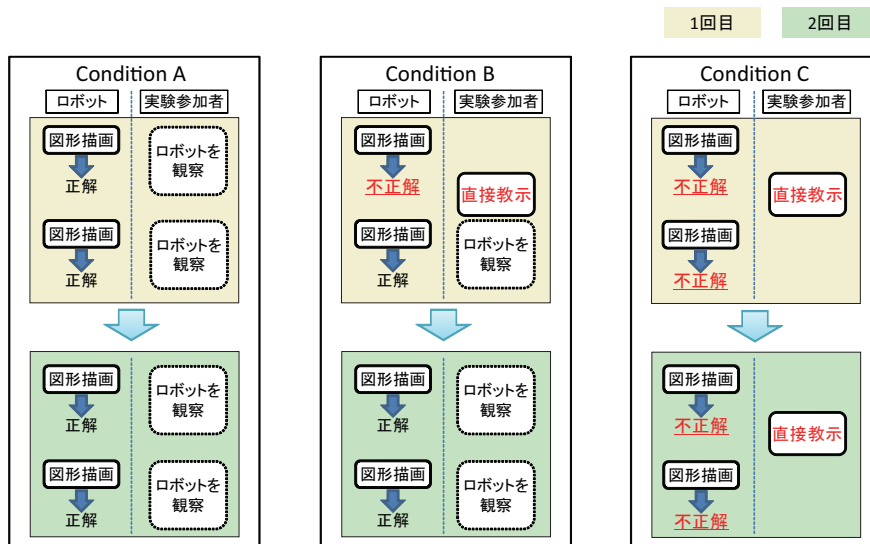


図 4.6 各 Condition におけるロボットと実験参加者の行動系列

4.3.5 実験手順

図 4.7 に全体の実験の流れを示す。全体の所要時間としては 40～50 分程度であった。以下、各段階の内容について順を追って説明する。

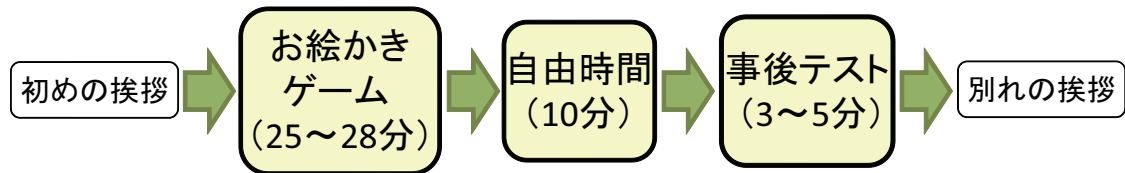


図 4.7 実験の流れ：括弧内には各段階での所要時間の目安

■初めの挨拶 1 名の実験参加者が実験者 1 と共に入室する。実験者 2 はその様子を確認しながら遠隔操作を開始する。ロボットは「Hello, I am NAO.」「Nice to meet you.」といった発話をし、お互いに挨拶をする。

■お絵かきゲーム お絵かきゲーム（図 4.9（左））は二周の流れで構成された。この流れの概要を図 4.8 に示す。

本実験では、実験参加者が予め知らなかった英語図形名称をゲーム終了後にどの程度覚えられたかを調査することによって学習促進効果を測る。そのため、一周目では実験参加者の未知図形英単語（英語名称を知らない図形）の同定を目的とする。この手順を以下に示す。なお、実験時間内に子どもたちが学習可能な未知英単語数の限界を考慮し、同定する単語数は 3 つとした。

- (1) 実験者 1 が実験参加者に対して「Can you draw a < 図形の英語名称 >?」と質問する。
- (2) 実験参加者が正しく描けた場合は (1) に戻る。実験参加者がホワイトボード上に誤った図形を描いたり正解が不明だったりした場合、以降ゲームでの学習対象としてこの図形を採用し、次の手順へ進む。
- (3) 実験者 1 がロボットに対して (1) と同様の質問をする。
- (4) ロボットは設定された条件に応じた行動をとる。Condition A の場合、ロボットはまず「Yes」と応答し、続いて正解の図形をホワイトボード上に描き、(6)

- へ進む。Condition B もしくは Condition C の場合、やはり「Yes」と応答するが、質問の図形とは全く無関係な図形を描画し、(5)へ進む。この際、実験者1は実験参加者にロボットが誤った図形を描画したことを伝える。
- (5) 間違いを指摘されたロボットは「Teach me!」と発話し、実験者1は実験参加者にロボットへ該当図形の正しい描き方を教えるよう促す。
 - (6) 実験者1がロボットに対して再度同じ図形を描くように促す。続いて Condition A もしくは Condition B の場合は、「OK」と応答した後に正解の図形を描く。Condition C の場合は、「OK」と応答しながらもやはり無関係な図形を描画する。この際も(4)と同様に、実験者1は実験参加者にロボットが誤った図形を描画したことを伝える。
 - (7) 実験参加者が正解できなかった図形が3つ同定できていない場合は(1)へ戻る。同定できていたら二週目へ進む。

二週目は、一周目で同定した図形を用いたやり取りを、同様の手順で再度繰り返す。ここでは、実験者1は自らの質問に対する実験参加者の正誤とは無関係にロボットへの質問に進んだ。

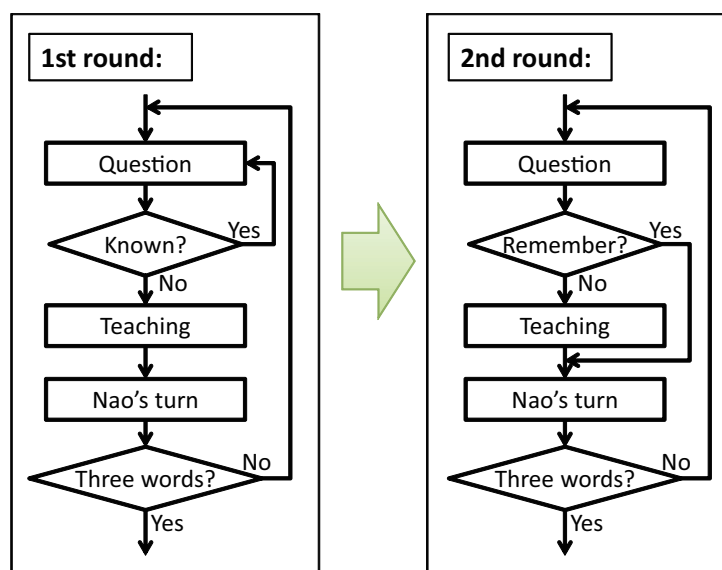


図 4.8 二周からなるお絵かきゲームの流れ

■自由時間 お絵かきゲーム終了後、実験参加者にロボットと自由に遊んでもらうために10分間の自由時間を設けた。図4.9(右)に自由時間の様子を示す。実験者1は図4.5(左)に示すカードのうち、お絵かきゲームで使用しなかった図形の中からランダムに6枚を選択し、そのうち3枚をロボットの周りに並べ、残りを実験参加者に手渡した。その上で実験参加者にロボットと自由に遊ぶよう伝え、自身は本を読むなどして無関心を振る舞いながら安全監督者として室内に滞在した。自由時間におけるロボットの行動は、お絵かきゲーム時の条件を継続した。

■事後テスト 最後に、本レッスンを通してどの程度図形の英単語を覚えることができたかについて調査するために、お絵かきゲームで使用した3つの図形を対象とした質問形式の事後テストを実施した。実験参加者の年齢帯に幅があるため、以下の二段階の質問を準備した。

まずは「Can you draw a <図形の英単語>?」と実験中と同様の質問(質問1)を行い、事前に用意しておいた解答用紙に図形を記入してもらった。描画図形の正誤判断は実験に介在していない10名の大学生・大学院生によって行われた。各人にはすべての実験参加者の答案を採点してもらい、その平均得点を各実験参加者の質問1の成績(正答率)とした。続いて実験者1は図4.5(右)のカードを正解が含まれた状態でランダムに選択し、実験参加者の目前に並べた上で「Can you pick up a <図形の英単語>?」という質問(質問2)を行い、正しいカードを当てられるか調べた。質問2は、図形を正しく描くことはできないが、その図形の英語名称は答えることができる、というケースのために用意した。

■別れの挨拶 最後に、実験参加者はロボットと挨拶を交わし、実験者1と共に教室を退室した時点で実験終了とした。

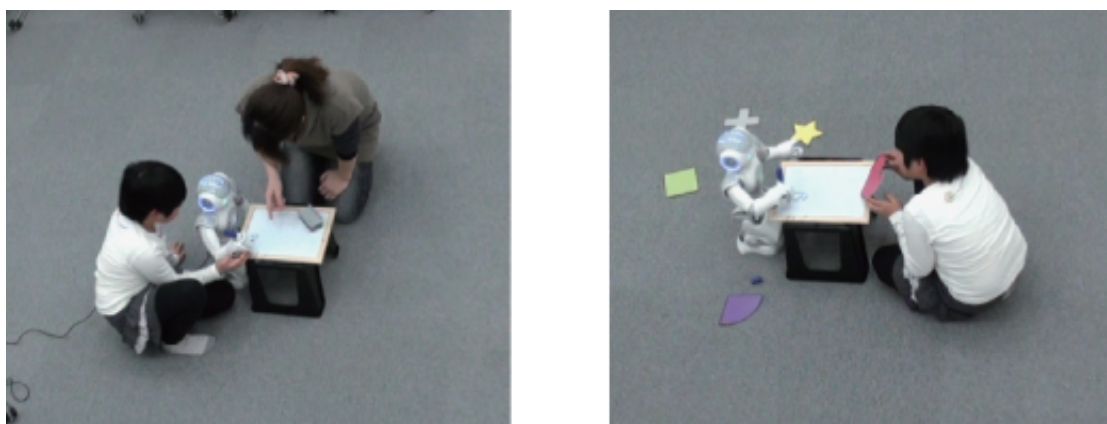


図 4.9 (左) お絵かきゲームの様子, (右) 自由時間の様子.

4.4 実験結果

4.4.1 事後テストの結果

図 4.10 にテスト 1, テスト 2 に対する実験参加者の平均正答率を示す. 事後テストにおいて全体的に Condition A・B の平均正答率が Condition C より高い傾向にあった. Wilcoxon の順位和検定では, テスト 1 の Condition A-C 間に有意差 ($Z(13) = -2.051, p < 0.05$), Condition B-C 間に有意傾向 ($Z(12) = -1.712, p = 0.08$) が確認された.

この結果からは Condition A と Condition B の間に差は無いように思われたが, テスト 2 において, 質問直後から回答までに要する時間 (実験参加者が正解と思うカードに触れるまでの所要時間) を分析してみたところ, 図 4.11 に示すように, Condition A の所要時間に比べて, 他の所要時間は短い傾向にあった. 平均正答率と同様に検定を行ったところ, Condition A-B 間に有意差 ($Z(39) = -1.747, p < 0.05$), Condition A-C 間に有意傾向 ($Z(39) = -1.352, p = 0.09$) が確認された. なお, テスト 1 については描画行動の習熟に個人差が大きく, 平均時間で有意差を確認することはできなかった.

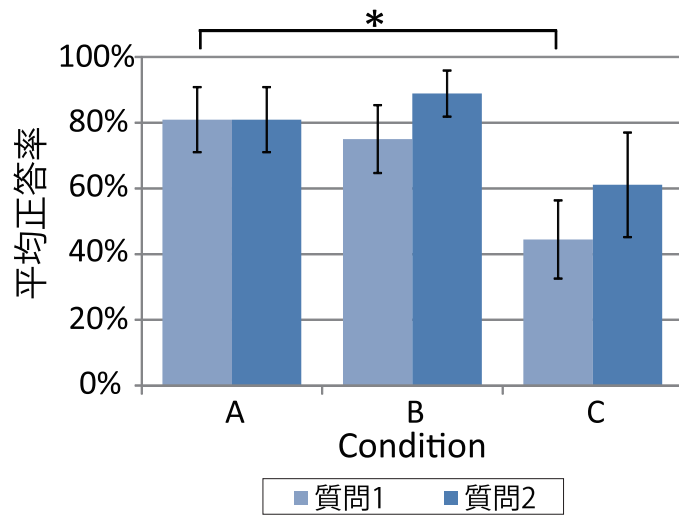


図 4.10 事後テストの平均正答率

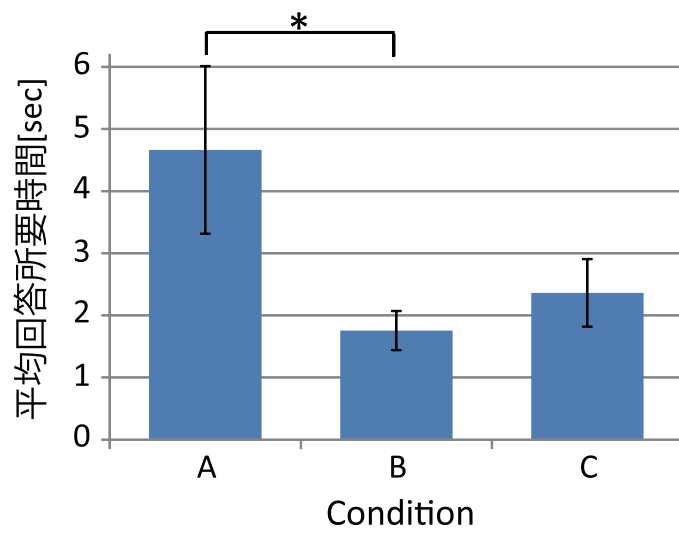


図 4.11 質問 2 における平均回答所要時間

4.4.2 実験参加者とロボットのインタラクション分析

実験時に撮影されたビデオデータを用いて、実験参加者の行動分析を行った。ロボット導入時のインタラクション内容に関する調査は重要な意味を持つ。そこで、具体的にはレッスンと関連するインタラクションがどの程度発生していたのかについて、ゲーム終了後の自由時間に着目して分析した。

分析ではまず、レッスンに関連するインタラクションをビデオコーディングにより抽出した。コーディング規範はお絵かきゲームと関連する実験参加者のロボットへの行動と定義され、具体的には、実験参加者がロボットに図形の描き方を教えたり、ロボットが描いた図形の正誤についてコメントしたりするといった行動、ロボットに図形を描かせるために図形カードを見せる行動などが含まれた。また、ここでのインタラクションは双方向なものだけでなく、ロボットからの反応を得られなかった実験参加者からの一方的なものも含み、言語的なものと非言語的なものの両方を対象としている。なお、言語的インタラクションと非言語的インタラクションが同時に発生していた場合（例：「OK.」と言いながら首を縦に振る）は、各インタラクションを独立に考え、重複して計数することとした。ビデオコーディングは行動分析の汎用ソフトウェアである ELAN を用いて本論文の第一著者によって行われた。同時に、ビデオコーディングの信頼性を確認するために外部から 2 名の大学生にも分析を行ってもらい一致度を確認した ($\kappa = 0.85$)。続いて、ビデオコーディングの結果を用いてレッスンに関連するインタラクションとそれ以外のインタラクションの発生回数や割合を算出し、条件間で比較を行った。

図 4.12 にインタラクションの平均発生回数の結果を示す。Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション、Others はそれ以外を示す。各条件間に有意差は認められなかった。条件内にて Lesson-relevant と Others の平均値を比較した結果、Condition B と Condition C において有意差が認められた (Condition B : $Z(6) = -2.207$, $p < 0.05$, Condition C : $Z(6) = -2.201$, $p < 0.05$)。ここで重要な意味を持つ、レッスンと関係のあるインタラクションについては、Condition B において最も回数が多く発生していた。ただしデータの分散が比較的大きく、各条件間で統計的有意差を認めるには至らなかった。

続いて、図 4.13 にレッスンと関連したインタラクションの発生割合の比較結果を示す。Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション、Others はそれ以外

を示す。各条件間の比率の差について χ^2 検定を行った結果、それぞれ Condition A–B 間 ($\chi^2(1) = 16.392, p < 0.001$) と Condition A–C 間 ($\chi^2(1) = 10.889, p < 0.001$) で有意差が認められ、実験参加者がロボットに対して教示する機会がある条件 (Condition B・C) において、レッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが判明した。

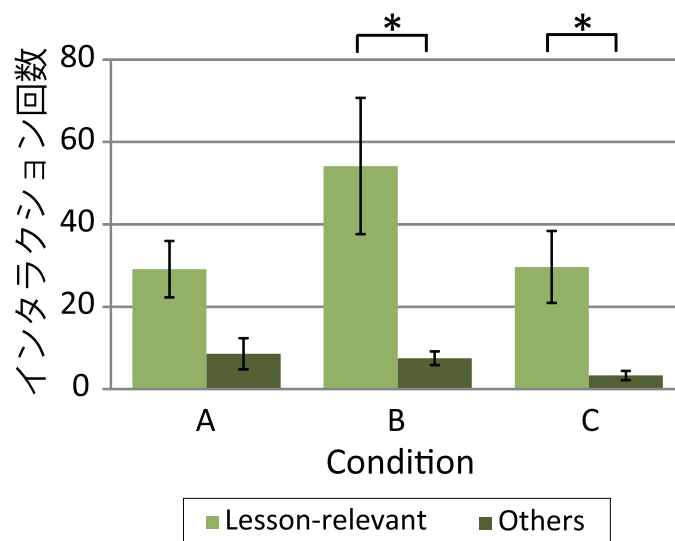


図 4.12 自由時間におけるインタラクション発生回数（平均値）の比較

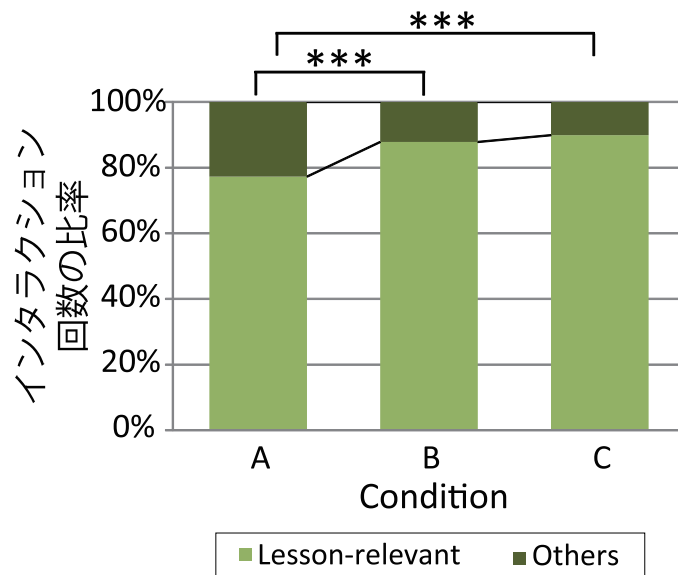


図 4.13 自由時間内のレッスンと関連したインタラクションの発生割合の比較

4.5 考察

4.5.1 学習促進効果の検証について

4.4.1 に記したように、事後テストの結果（図 4.10）からは、全ての該当条件間では統計的有意差は認められなかったものの、Condition A（博識なロボット）や Condition B（学習能力のあるロボット）の平均正答率が Condition C（誤答し続けるロボット）と比べて高い傾向にあることが判明した。その一方で、平均回答所要時間の観点（図 4.11）では、Condition B・C における所要時間が Condition A よりも短い傾向にあることが分かった。実際、Condition B・C における回答時には、実験参加者はより自信をもって（即座に）回答する傾向が見受けられた。

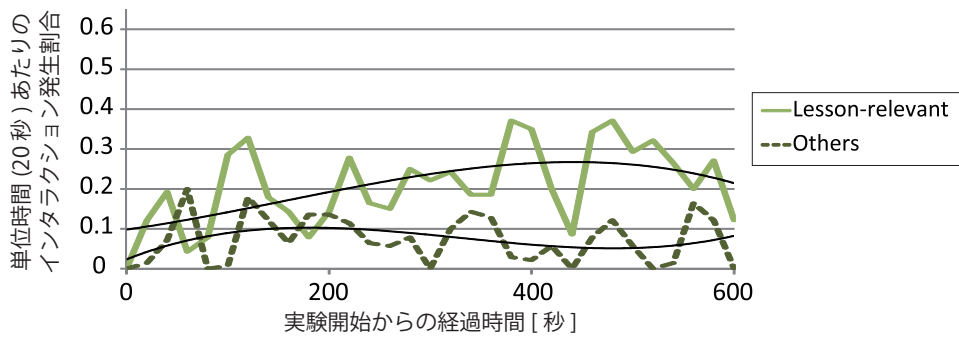
この結果は次のように解釈することができると思われる。まず、Condition A・B における共通点の中で Condition C に存在しない要素は、ロボットによる正答提示である。従って、ロボットによる正答提示の機会が、実験参加者の英単語学習に繋がった可能性がある。次に、Condition B・C における共通点の中で Condition

A に存在しない要素は、ロボットの誤答（実験参加者からの直接教示の機会）である。従って、実験参加者にロボットへの直接教示の機会を与えることは、実験参加者にその問題の回答に際して自信を持たせることに繋がった可能性がある。ただし、Condition C のロボットは全く正答を提示しないため、教示した図形と該当する英単語を一致させることに寄与できず、Condition C の平均正答率の低下に繋がった可能性がある。以上をまとめると、子どもたちに図形名称の英単語を効果的に学習してもらうためにはロボットからの正答提示が有効であり、また、回答に際して自信を持たせるためには直接教示の機会を与えることが有効である可能性が示唆された。

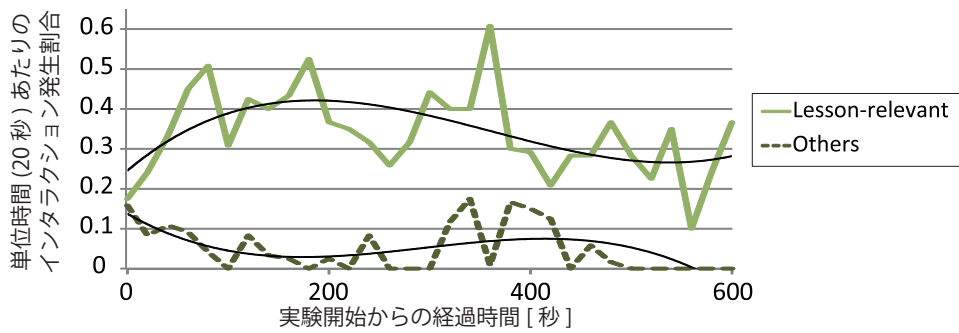
4.5.2 学習に関連した興味誘引について

4.4.2 にて述べたインタラクション分析の結果から、Condition B・C においてレッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが分かった。この結果は、実験参加者にロボットへの直接教示の機会を与えることによって、より強く学習内容への興味を誘引していた可能性を示している。

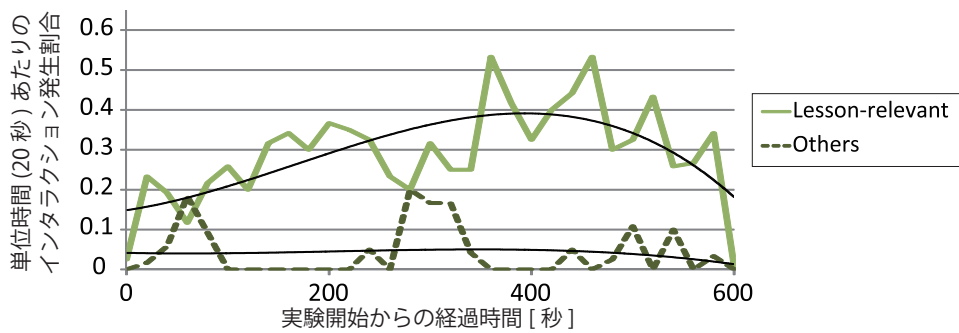
学習に関連した興味誘引、とくに持続性という観点についてさらに考察を深めるために、次に述べる追加分析を実施した。ここでは、レッスンに関連するインタラクションとそれ以外のインタラクションの発生頻度の時間遷移を観察してみることにした。Condition ごとに実験参加者の時間遷移データを平均し、得られた遷移の様子を図 4.14 に示す。縦軸は単位時間（20 秒）あたりにインタラクションが発生していた時間の割合、横軸は経過時間（秒）。Lesson-relevant はレッスンと関係のあるインタラクション、Others はそれ以外を示す。なお、各グラフの近似曲線（3 次多項式）を黒線にて表示している。グラフから見て取れるように、Condition A ではレッスンに関連したインタラクションの割合はやはり全般に低い傾向にあり、それ以外のインタラクションとの発生頻度の差は比較的小さいものとなっている。実際、Condition A については、一通り図形を使ってロボットと遊び終わると、飽きてしまったように見受けられた実験参加者も複数確認された。これに対して Condition B では、レッスンに関連したインタラクションの発生頻度が前半から高く、減衰傾向も Condition C と比較して小さい。Condition C については中～後半に発生頻度が上昇し、最後急速に減衰する傾向が見られた。実際、Condition C については何回教示してもロボットが一向に描き方を習得しないため、自由時間の後半ではがっかりしてしまう実験参加者も見受けられた。



(a) Condition A (実験参加者 7 名の平均)



(b) Condition B (実験参加者 6 名の平均)



(c) Condition C (実験参加者 6 名の平均)

図 4.14 自由時間におけるインタラクション頻度の時間遷移

また、実験参加者からロボットへの教示行動、特にロボットからの依頼（「Teach me!」という呼びかけ）を待たずして実験参加者が自発的に教示を行った回数を調査した。図 4.15 に示すように、Condition B において Condition C よりも有意に高い割合で自発的教示行動が発生していたことが判明した ($\chi^2(1) = 4.041, p < 0.05$)。自発的行動はロボットからの依頼なしに発生した教示、Others はそれ以外の教示を示す。なお、Condition A についてはロボットからの教示依頼が行われていないため分析対象からは除外している。4.4.2 の結果では Condition B・C において共にレッスンに関連するインタラクションが高い割合で発生していたことが示されたが、その中でも自発的な教示行動の誘引という観点に絞ってみると、Condition B のほうがより効果的であった可能性が示唆された。

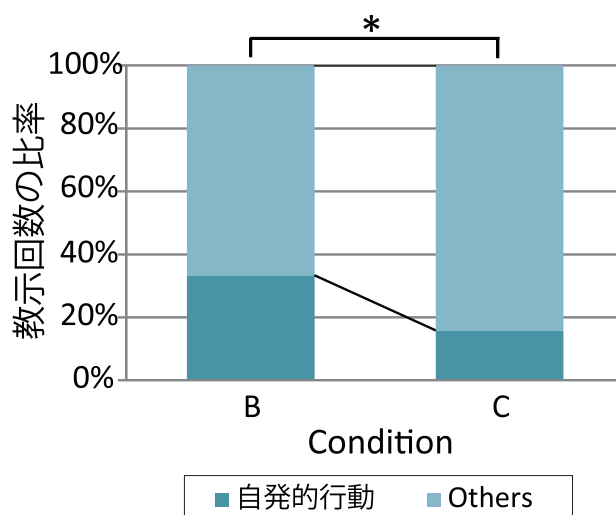


図 4.15 実験参加者のロボットへの自発的教示行動の割合

4.5.3 英単語学習に効果的な失敗行動頻度

これまで述べた考察から、本章にて失敗行動頻度（ロボットの賢さ）の違いによって設定した 3 種類のロボットの内、Condition B：一度教わると覚えるロボットが最も英単語学習に効果的であったと考えられる。つまり、正答提示と直接教示の双方による利点をバランス良く含んだ CRR の行動設計、すなわち適度なロボットの賢さに留意することが重要であると思われる。

ここで注目したいのが、Condition C：誤答し続けるロボットにて大きな効果が見られなかったという点である。もし、Learning by Teaching が学習促進効果を与える最も大きい要因であれば、間違える回数が多い Condition C では子どもによる教示も他のロボットに比べ多く発生し、その分学習が深まることが予想される。また、単純に失敗行動のようなロボットの弱さが子どもたちの自発性を誘引するのであれば、Condition C において自発的なインタラクションが最も多くなるはずである。

なぜこのような予想とは異なる結果が得られたのか考察してみると、Learning by Teaching のみでなく別の要因も影響していた可能性が考えられる。フィールド実験では実験条件の厳密な統制が困難なため、今回の実験結果から具体的に影響していた要因について十分に議論することは難しい。そのためあくまでも仮説だが、その要因の候補のひとつとして考えられるのが、子どもたちが教示を行った結果、これまで誤答していたロボットが正しい回答ができるようになる（成長する）その過程を観察できたことである。具体的には、まず、この観察から“自身の教示によってロボットが成長できた”と認識することによって、それが子どもたちがとった教示行動に対する正の報酬となったと思われる。そして、その報酬を受け取ることでケア行動（本章では、その中の教示行動）に対する意欲を維持できたと考えられる。そして結果的には、Learning by Teaching などの経験も含めた英単語の学習効果を加速させることに繋がった可能性がある。

本章の実験では3つの賢さレベルという大まかに分解能にて検証を行ったため、最適な失敗行動頻度を導き出すまでには至っていない。この点については、今後さらに踏み込んで探求すべき課題のひとつとして挙げさせていただく。その際には、前述したような、幼児が『自身の行動によるロボットの成長』を観察できることが与える教育効果についても検証することが要求されるであろう。

4.5.4 本実験における制約

本実験は、条件の厳密な制御が時として困難な現実フィールドで行われたものであり、様々な制約が存在する。

まず、今回の実験参加者は4歳～8歳にわたる幅広い年齢帯の子どもたちを対象にしており、各条件間で偏りの生じないよう最大限努力した参加者間配置を行ったものの、結果は全般に分散値が比較的大きなものとなっている。今回の実験では、実施フィールド上の制約から、実験参加者の母集団が予め最大20名程度と予想されてい

たため、年齢帯にまで条件を分割した実験を設計することは困難であった。実験内容やタスク自体については、この年齢帯すべての参加者に行えるものが選ばれており、年齢に応じた極端な得手不得手は見られなかった。ただし、各年齢に応じた具体的な詳細な知見については、本実験のデザインからは定量的に議論することが難しいものとなっている。

また、本実験では、実験の計画段階において、実際に子どもたちがゲーム中のどの場面で学習していくか（学習機会）を完全に予測することが困難であったため、全ての要因を統制できていなかった可能性がある。具体的には、ロボットからの正答提示による学習促進効果（Condition A にて Condition B と同等の高い平均正答率が得られた）が想定できていなかったため、本実験ではロボットの正答提示を含めた学習機会回数を制御できていなかった。ロボットへの直接教示に加えて、ロボットによる正答提示も実験参加者が学習し得る機会であるとみなした場合、Condition A・B では一つの図形あたり 4 回の学習機会があった。これに対して Condition C では 2 回しか学習機会が無かったことになり、この点において Condition C は不利であった可能性がある。

最後に、今回は各実験参加者が実験へ参加できる回数を 1 回と定めていたため、長期的な導入効果については不明であることも挙げておく。

4.6 まとめ

本章では、子どもたちと対等な立場のロボットを用いた教育支援の中で、ロボットの賢さの違いが子どもたちの学習に及ぼす影響について調査した。賢さの違うロボットの具体例として、博識なロボット、学習能力のあるロボット、誤答し続けるロボットの3種類に着目し、子ども英会話教室において図形のお絵かきゲームを用いたフィールド実験を行った。

実験から、図形名称の英単語の学習にはロボットによる正答提示が有効であること、そして子どもたちの学習への興味や自発性を誘引し、自らの回答にも自信を持たせるためにはロボットへの直接教示が有効であることが判明した。この結果は、子どもたちと対等な立場のロボットを用いた教育支援においては、正答提示と直接教示の双方による利点をバランス良く含んだロボットおよびインタラクションの設計、すなわち適度なロボットの賢さが重要であることを示唆している。

しかしながら、3つの賢さレベルにおける大まかに分解能における検証にとどまったため、最適な失敗行動頻度を導き出すまでには至っていない。そのため、ロボットが学習するために必要な教示回数に焦点を当てるなどして知見を深めることが今後の課題として挙げられる。

第 5 章

幼児の集団活動における CRR の教育効果の検証

5.1 研究目的

これまでの研究では，クラス編成が幼児 1 名の場面を想定して CRR を導入した実験を行ってきた。しかしながら，実際の幼児教育場面では幼稚園などのように集団の幼児を対象としたロボットの使用場面も想定される。また，これまでは遠隔操作型ロボットを用いて実験を行ってきたが，将来的には継続的な使用が可能な自律型ロボットとして実現する必要がある。そこでこれまでの実験環境を以下のように拡張した。

- 複数の幼児がいる集団活動にロボットを導入する。
- ロボットの行動は自律機能によって実現する。
- 参加者は同様の実験に 4 日間参加する（1 日に 1 回実施）。

本実験では，このような環境設定において自律型 CRR による効果的な教育支援が実現可能かどうか明らかにすることを目的とする。なお，参加者にはグループごとに英単語学習を目的としたゲームにロボットと一緒に 4 日間参加してもらい，自律型 CRR が幼児の集団活動においても教育効果があるか否かについて検証した。

5.2 関連研究との位置付け

ロボットが不特定多数の人間と関わりうる環境にてロボットを導入した実証実験は、ショッピングモール [44] や駅構内 [45] など様々なフィールドで試みられている。教育現場においても多人数環境に教師・チューター型ロボットを導入したフィールド実験が行われている。Youらは学校での通常の授業形態にアシスタントロボットを導入して実証実験を行っている [9]。対して Kandaらは、小学校での自由時間に子どもたちがロボットと自由にインタラクションを行えるような環境で長期間の実証実験を行っている [40]。子どもと対等な立場のロボットに関する多人数環境での研究事例としては、ゴミ箱ロボットを公共施設内に導入し、不特定多数の子ども達がロボットに対してとる行動を観察した研究がある [24]。また、Ghoshらは子ども英会話教室にて同時に複数名の子どもを対象として CRR によるケア行動の誘発効果について調査している [19]。

いずれの研究事例についても、不特定多数の子どもがインタラクションの対象となっており、その実験環境の複雑さから技術的な側面からも完全自律のシステムを導入することは大変難しいため、遠隔操作ロボットを使用することで実験が実施されている。将来的に実用化を目指す場合には、ロボットの自律化は重要な要件であると考えられるが、多人数環境における不特定多数のユーザとのインタラクションを想定した自律型ロボットの実証実験はあまり実施されていない。

5.3 実験方法

5.3.1 実験準備

実験タスクとして、動物英語名称の学習を目的とした動物ジェスチャーゲームを採用した。実験参加者は動物イラストカードをロボットに見せることで、任意の動物ジェスチャーの実演を依頼することができる。そして、ロボットが実演依頼した動物と異なるジェスチャーを行った場合は、ロボットの両腕を直接手で動かすことで正しいジェスチャーを教示可能である（直接教示）。ゲームの対象となる動物は、rabbit, alligator, sea gull, elephant, giraffe, stag beetle の6種類とした。

ロボットは Aldebaran Robotics 社の NAO を用いた。条件によって挙動の異なる

ロボットを1台ずつ（合計2台）用意し、1回の実施につき2台のロボットを同時に導入した。今回は動物のジェスチャーゲームの自律化を実現するために、回転・スケール不変なマーカ（Aldebaran Robotics 社提供）を伴った動物イラストカード（図5.2：写真左上より rabbit, alligator, sea gull, elephant, giraffe, stag beetle）の認識機能を実装した。また、各動物ジェスチャー動作の特徴的な関節角度変化を基に、実験参加者による動物ジェスチャー直接教示の成否判別機能も実装した。実験者によって動物ジェスチャーゲームプログラムが実行されると、ロボットは実験参加者から提示されるカードや直接教示内容に応じて自律的に行動する。

本実験は、つくば市内の幼稚園にて実施した。図5.1に実験を行った教室の様子を示す。実験の様子は2台のビデオカメラを用いて録画し、分析に用いた。実験参加者は、同幼稚園の年長クラス15名（男児：5名、女児：10名）に協力して頂いた。事前の予備実験より2台のロボットで対応可能な人数を検討した結果、実験参加者全体を7～8名の2グループに分けることとした。各グループに対して4日間実験を行った。なお、この実験は筑波大学研究倫理委員会にて承認を得ており、保護者の方々への事前説明後、書面で同意を頂いた方のみを対象に実施した。実験者については、2名の大学院生および大学生が参加し、ロボットの自律プログラムの実行や安全監督・ゲーム進行の役割を分担した。



図 5.1 実験を実施した幼稚園の教室

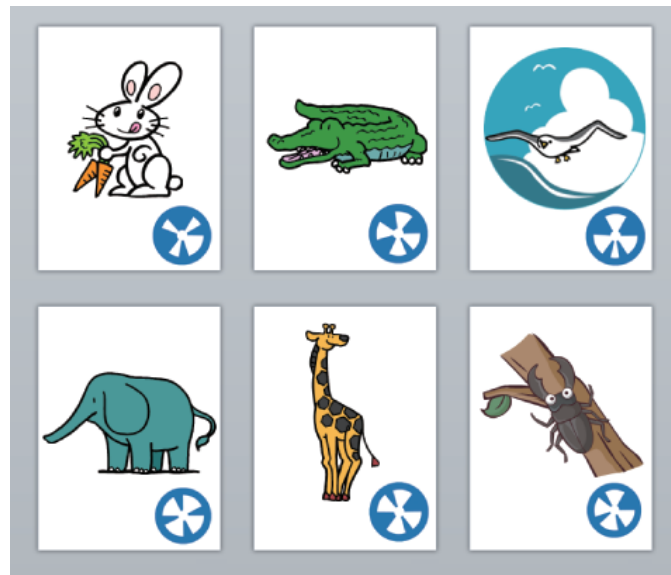


図 5.2 使用した動物イラストカード。

5.3.2 実験デザイン

以下に示す 2 条件のロボット両方を教室内に配置し、全ての実験参加者が両条件のロボットとの遊びが経験できるデザインを採用した。なお、実験参加者には 4 日間を通して「遊びたいロボットと自由に遊んでよい」と伝え、実験中の行動は各々の自主性に任せた。

条件 1：博識なロボット 提示されたカードの動物ジェスチャーを終始正しく実演することができる。

条件 2：間違えるロボット 提示されたカードの動物ジェスチャーを正しく実演できない。正しいジェスチャーを直接教示されることによって、直後 1 回だけ正しく実演することができる（その後すぐに忘れてしまう）。

この実験デザインでは、すべての実験参加者に対する各ロボットとの遊び経験の厳密な統制は困難であるが、この経験量の偏りも踏まえて英単語学習の促進効果を検証することとした。また実験初日については、実験参加者が各ロボットの特徴を把握し

自身が遊びたい方を選択しやすくするため、全員が両方のロボットを経験できるように実験者側が配慮した。

各ロボットには認識可能な動物カードを無作為に3種類ずつ割り当てた。割り当てた英単語は4日間固定し（グループ間でのカウンタバランスは考慮している）、実験の前後に実施するテストの結果を比較することで、どちらのロボットが英単語の学習に効果的であったか検証を行った。本実験では、英単語の難易度をネイティブスピーカーの使用頻度によって定義した『標準語彙水準 SVL12000』を参考にして、各ロボットに割り当てた英単語の難易度が偏らないよう考慮している。

5.3.3 実験手順

図 5.3 に示す手順で、同時に実験参加者 7~8 名に対して実験を実施した。全体の所要時間としては 40~50 分程度であった。以下、各段階の内容について順を追って説明する。

■事前テスト 事前テストでは、実験参加者 1 名ずつに対して、リスニング形式の動物かるたゲーム（動物英語名称のネイティブ発音を 2 回聞き、該当すると思う動物カードを選択）を実施した。実験参加者の目前には常に 8 枚のカードを並べ、前述した 6 種類の動物を無作為の順番で出題した。図 5.4（左）に事前テストの様子を示す。

■ゲーム説明 ゲーム説明では、ゲームで使用する動物のジェスチャーを日本語で確認し、動物カードの見せ方やロボットへのジェスチャー直接教示方法について説明した。

■動物ジェスチャーゲーム 動物ジェスチャーゲームでは、実験参加者主導で動物ジェスチャーゲームをして遊ぶよう声をかけ、実験者は 2 名とも安全監督者となる。安全監督者は、子どもたちがロボットへのカード提示に難航していた場合、一時的に介入して補助可能とした。また、1 日目のみ、適切な直接教示が出来ていない場合の一時的な補助を許容した。図 5.4（右）に動物ジェスチャーゲームの様子を示す。

■事後テスト 事後テストでは、事前テストと同様の方法でどれくらい動物名称の英単語を覚えたか確認した。

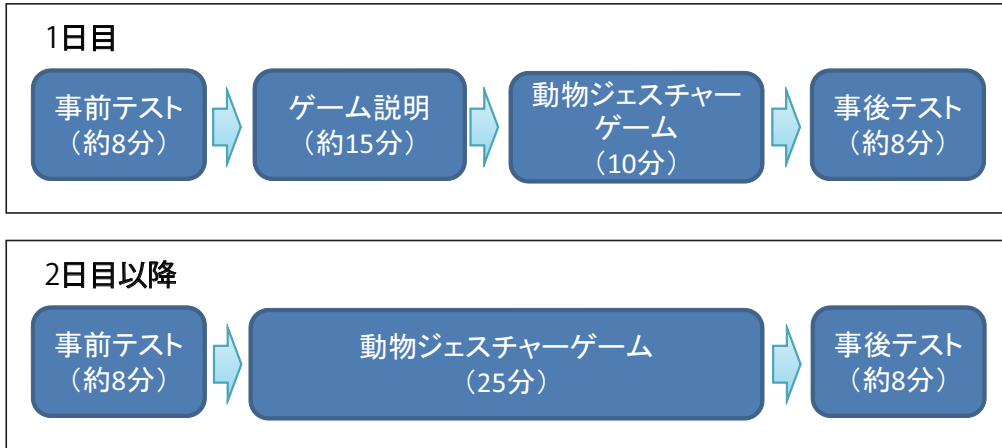


図 5.3 実験の流れ：括弧内には各段階での所要時間の目安



図 5.4 (左) 事前テストの様子, (右) 動物ジェスチャーゲームの様子

5.4 実験結果

5.4.1 事前・事後テストの結果

図 5.5 および図 5.6 に 4 日間の事前・事後テストの平均正答率の結果を示す。なお、病欠などの理由から実験データに欠損が生じた 3 名の実験参加者については分析の対象から除外した。条件 2 には 1~3 日目にかけて平均正答率の上昇傾向が顕著に見られた。1~3 日目の事前テスト-事後テスト間に有意差と有意傾向 (1 日目: $Z(12) = -2.625$, $p < 0.01$, 2 日目: $Z(12) = -1.823$, $p = 0.0625$, 3 日目: $Z(12) = -1.933$, $p < 0.05$) が確認された。一方、条件 1 では、1 日目事後テスト-2 日目事前テストの間に平均正答率の大きな上昇が見られたが、条件 2 に比べ全体の上昇傾向は弱い。これらの結果に対して Wilcoxon の符号付順位検定を行った結果、条件 1 では、1 日目の事後テスト-2 日目の事前テスト間のみに有意差 ($Z(12) = -2.754$, $p < 0.01$) が確認された。

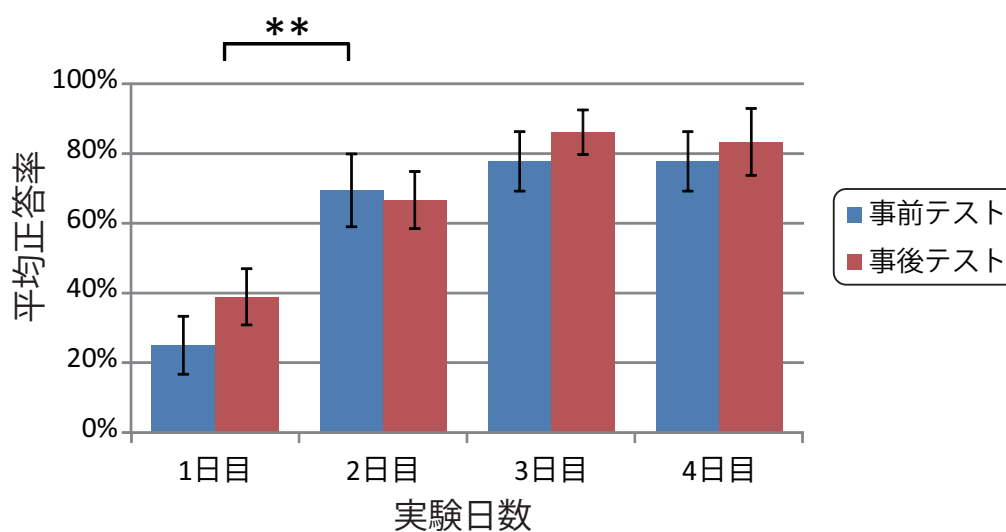


図 5.5 博識なロボットに割り当てた動物名称の英単語群における事前・事後テスト平均正答率 (条件 1)

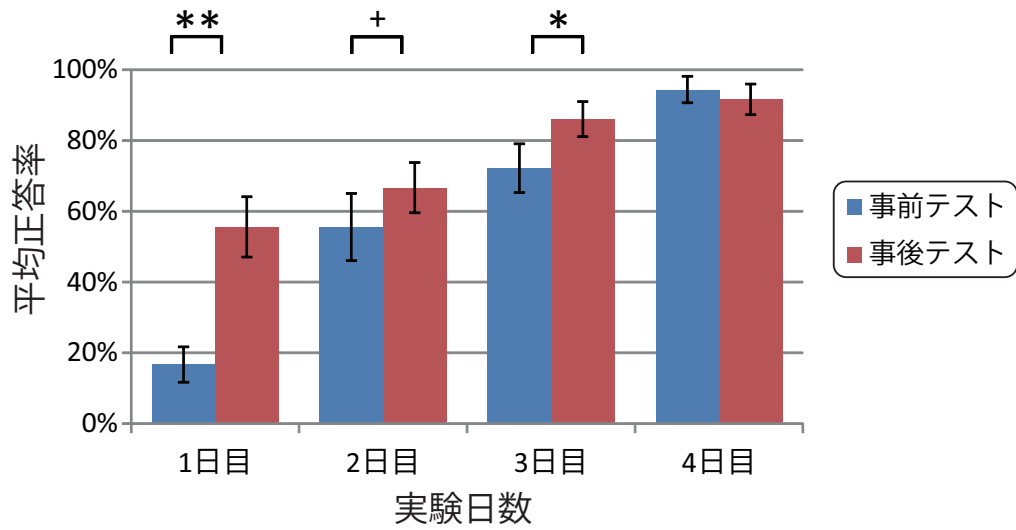


図 5.6 間違っロボットに割り当てた動物名称の英単語群における事前・事後テスト平均正答率 (条件 2)

5.4.2 実験参加者とロボットのインタラクション分析

ロボットとの学習ゲームへの興味・関心の誘引については、ロボットに向けて発生したゲームに関連する幼児からの働きかけの比率について調査した。まず、ビデオコーディングによって、子どもたちがロボットに対して行った働きかけを次の2種類に分類した。動物カードの提示や直接教示などのように動物ジェスチャーゲームを行う上で十分に関連していると判断される行動は、ゲームに関連する幼児からの働きかけと定義した。一方、その他の働きかけは、むやみにNAOの頭部を叩く行為や帽子を被せるといった動物ジェスチャーゲームには一切関連しないと判断される行動とした。ビデオコーディングは行動分析の汎用ソフトウェアであるELANを用いて、第三者の学生3名によって行われた。同時にビデオコーディングの信頼性を確認するため、この3名において一致度を確認したところ0.91という数値が得られた。

CRRと博識なロボットの間で比較した結果、全日程においてCRRに対する比率が高かった(図5.7)。CRRと博識なロボットの間で χ^2 検定を行ったところ、全日程において有意差が確認された(1日目: $\chi^2(1) = 11.767$, $p < 0.001$, 2日目: $\chi^2(1) = 59.898$, $p < 0.001$, 3日目: $\chi^2(1) = 76.735$, $p < 0.001$, 4日目: $\chi^2(1) = 63.865$, $p < 0.001$)。また、図5.8に示すように、博識なロボットにおける学習ゲームに関連する働きかけは4日間を通して減少傾向であったことに対して、間違うロボットにおいては2日目で一度大きく減少するものの多くの学習ゲームに関連する働きかけを誘引していたことが確認された。

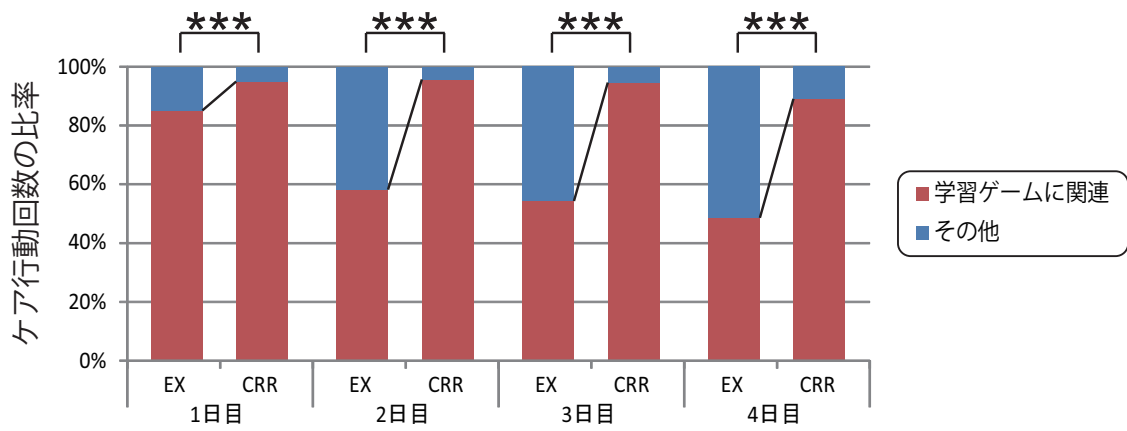


図 5.7 学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合

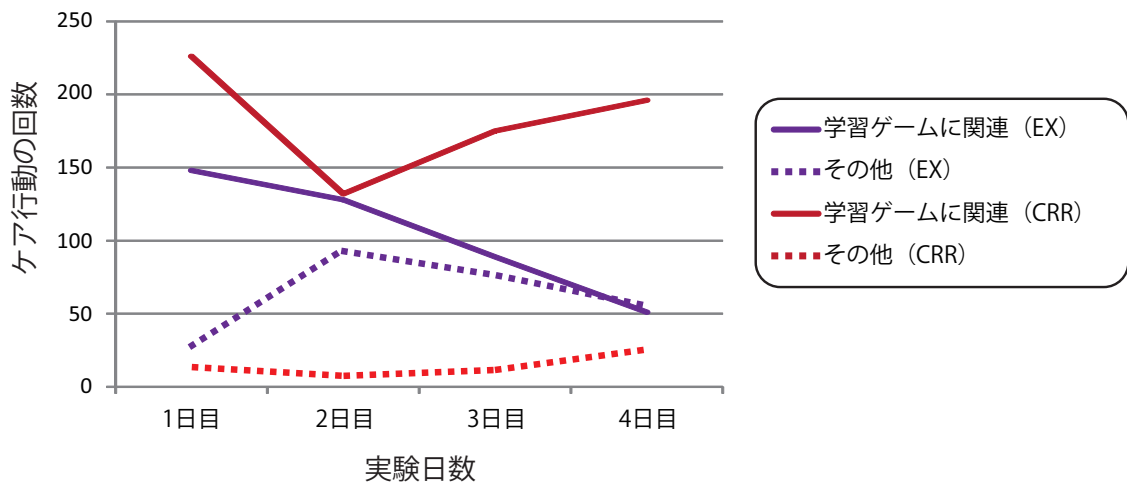


図 5.8 各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化

5.5 考察

5.4.1 の結果より、条件 2 において平均正答率の上昇傾向が強いことがわかった。また、5.4.2 においては、条件 2 に対して子どもたちによるロボットへの学習ゲームに関連したインタラクションが多く発生していたことが確認された。このことから、複数の子どもたちを対象とした場合でも、CRR が英単語の定着効果や子どもたちの自発的な学習ゲームへの参加を促したと考えられる。

一方で、条件 1 における 1 日目事後テストと 2 日目事前テスト間の平均正答率の上昇は予想外の結果であった。該当するテストの英単語別正答率を比較したところ、条件 1 の英単語群中で低難易度のものの正答率向上が特に顕著であった。5.3.2 に記したように、本実験での英単語の難易度はネイティブスピーカーの使用頻度（頻度が高ければ難易度は低い）に基づいている。この指標における低難易度の英単語は、子どもたちの日常生活においても耳にする機会が多いことが予想される。そのため、ロボットとゲームに参加していない時であっても、ロボットと遊んだ経験が英単語を定着させた可能性がある。

しかし、このような例外を除けば、4 日間同じ動物を題材としジェスチャーゲームで遊んでいるにもかかわらず、条件 1 ではゲーム後に定着する英単語が条件 2 と比較して少なかった。また、前のテストでは覚えていた英単語を正答できなくなるといった事例も多く見られた。このことから、正解ジェスチャーのみを実演する博識なロボットは、CRR に比べて英単語の定着効果が低いと考えられる。これらの結果から、縦断的な視点からも CRR が英単語定着の促進に効果的であることが示唆される。

集団活動のように複数の子どもたちで経験を共有可能な環境では、以下に示すような特有の教育効果もあったと考えられる。実際の子どもたちの行動として、実験初期において、集団のなかでは自発的・積極的にになりづらい子どもは自発的に遊ぶことが少ない傾向であったが、実験日数を経るにつれ集団内であっても自分からロボットに関わることができるようになった事例がいくつか観察された。可能性のひとつとして、他の友達が遊んでいる様子を観察することで、緊張がほぐれたり状況が理解できたりしたことからのような変化が生まれたことが推測される。また、「まだ（カードの提示など）やってない人いる？」と周囲に働きかけることで、積極的に CRR との経験を集団全体で共有しようと試みる子どもも数人見受けられた。このような点も、平均正答率の向上やゲームへの積極参加を促進した要因であったと考えられる。

本実験の制約として、以下の点が挙げられる。今回の実験では、より現実的な環境での CRR 実現可能性を検証するため、子どもたちが各々のロボットと遊ぶ回数などのロボット経験を統制していない。そのため、実際にどのような要因が結果に影響していたのか、今回報告した結果のみで議論することは難しい。また、グループの特性の違い（例：性格、人間関係）などといった別の要因が実験結果に影響を及ぼしている可能性もあるため、実験時の子どもたちの行動内容についても詳細に分析し、平均正答率との関係性を精査する必要がある。

5.6 まとめ

本実験では、より現実的な環境における CRR の実現可能性を明らかにすることを目的として、ロボットに動物の自律機能を実装し、幼稚園の実際の教室にて複数の子どもたちを対象とした実証実験を行った。実験結果より、複数人を対象とした場合でも、子どもたちが直接教示経験可能な CRR が英単語の定着に効果的であることが確認された。また、今回は 4 日間連続して同様の実験を行い、縦断的視点からも CRR の連続使用が英単語定着の促進に効果的であることが確認された。これらのことより、教育現場における自律型 CRR 実用化の可能性を見出すことができたと考えられる。

第 6 章

CRR の行動設計のための 複数ロボット同時比較による 進歩的開発手法

6.1 研究目的

これまでの成果より，自身の弱さを演出する CRR の行動が教育支援に役立つことが示されつつある．CRR を教育現場での実用化に耐えうるよう開発していくための次の段階として，具体的にはどのようにして CRR 自身の弱さを演出することが効果的なのかさらに明らかにする必要がある．しかし，ロボットにおいて実現され得る行動は，弱さを演出するための要因に限定しても無数に存在するため，実験室などの統制環境における網羅的な検証は困難である．加えて，実験参加者の確保や協力して頂く幼稚園や小学校等との間でのスケジュール調整（実験可能日の確保）などフィールド実験ならではの問題点が多く存在する．よって，フィールドでの十分な知見の探索や実証実験を行うための環境を潤沢に準備することは困難である．

そこで本章では，これらの問題点に対処し，CRR の行動設計に必要な知見の探索や CRR 自体の開発を効率的に進めるための実験手法を確立することを目的とする．具体的には，次の特徴を有する進歩的開発法を用いることで効果的なロボットの弱さ演

出行動を探索・実装し，教育効果の高い CRR を効率的に開発することを目指す．

- Wizard of Oz 法を用いたロボットデザインに関する知見の探索
- 異なる特徴を持つ 2 台のロボットの同時比較
- 知見の探索と検証を繰り返し実施しながらロボット仕様の改良・拡張を促進

Wizard of Oz 法を用いた探索型実験は，近年ではロボットやエージェントなどにおいて幅広く行われている [28]．しかし，性質の異なるロボット 2 台を同時に用いて探索や検証を行う研究はこれまでにあまり見られない．この方法によって，WOZ 型ロボットの遠隔操作者の主観だけでなく，2 台のロボットに対する子どもの行動の違いを客観的に観察することによってロボットの行動設計に関する知見を得ることが可能となる．また，子どもたちは「遊びたいロボットで遊ぶ」という単純な選択が可能となり，より自然な行動データからの検証が期待される．

6.2 関連研究との位置付け

本章で提案する進歩的開発の特徴のひとつである Wizard of Oz 法とは，開発中の対話システムの挙動をシミュレートするための手法である [37, 38, 46]．この手法では，人間 (Wizard) が背後でシステムの挙動を遠隔操作していても，対峙するユーザに対しては「このシステムは完全に自律的に作動する」と説明する．このことによって，そのシステムが自律的に作動しているようにユーザに対して見せかけ，開発途中のシステムであっても完成したシステムを想定したデータを取得することが可能である．近年では，仮想エージェントやロボットの実装が不十分な機能を補助・シミュレーションするために用いられている例も多い [47]．ちなみに，本論文の 3 章および 4 章の実験では，上記のような目的で Wizard of Oz 法を使用している．また，不完全な対話システムをシミュレートする目的だけでなく，自然言語処理分野において対話コーパスの構築や対話エージェントを実装するための情報収集に導入している事例もある [48]．さらに岡本らの研究では，Wizard of Oz 法による対話事例収集を学習過程の中に組み込むことで対話エージェントを構築する枠組みを提案している [49]．

従来，Wizard of Oz 法は仮説検証型の評価実験のために用いられており，基本的には仮説発見型の手法ではない．しかし，[28] などのように，事前に明確な仮説を設定するのではなく，ロボット開発に重要な潜在的仮説を探索するために Wizard of Oz 法を導入している研究も行われつつある．また大澤らは，Wizard of Oz 法ヘテレ

プレゼンス技術を組み合わせることによって、エージェントのインタラクション戦略を発見的に探索するための没入型発見法を提案し評価実験を行っている [50]

学習科学や教育工学などの分野では、実際の教育現場に考案された教授法やシステム等を導入し、その介入効果を検証するデザイン実験アプローチという手法も盛んに行われている [51, 52, 53]。この手法では、実践の中でシステム等の設計を絶えず見直して修正を繰り返し、より現実的で洗練された学習環境の形成を目指す。同時に、その過程の中でそれらの設計に関する新たな理論的知見の産出を目指している。

Alac らは教室内に 2 台のロボットを同時に導入し、これらのロボットに対して子どもたちがどのような行動を示すのか調査している [54]。しかし、この研究はあくまでも 2 台のロボットが同時に存在する特殊な環境において、子どもたちがロボットに対してどのような体のむけ方をするのか、どのようなジェスチャーをするのかといった社会学的な知見を得るために行われた実験であり、ロボットの開発手法を確立するために用いられた例はこれまでに見られない。

6.3 2 台ロボットの同時比較による進歩的開発手法

6.1 でも述べたように、本研究で用いる自律型ロボットの進歩的開発において重要なポイントは以下の通りである。

1. Wizard of Oz 法を用いたロボットデザインに関する知見の探索
2. 異なる特徴を持つ 2 台のロボットの同時比較
3. 知見の探索と検証を繰り返し実施しながらロボット仕様の改良・拡張を促進

前節において紹介したように、本来 Wizard of Oz 法は仮説検証型の実験に用いられることが多いが、本章ではロボットの行動空間を効率的に探索するための手法として導入する。WOZ-CRR は、オペレータの主観・状況判断に基づき遠隔操作される。オペレータは、実験環境内の状況を別室で観察しながら、WOZ-CRR が子どもたちを最も引き付け、かつ学習ゲームに集中させるために様々な遠隔操作を試みる。すなわち、人間の状況判断能力やコミュニケーション戦略を活用することで、オペレータが遠隔操作可能な CRR (WOZ-CRR) は最も理想的なパフォーマンスを実現するものと仮定し効果的なロボット行動の探索を行う。

ロボットの 2 台同時比較を用いる利点として、オペレータの主観に加え、子どもたちの両ロボットに対する行動の違いを比較することで、効果的なロボットの弱さを

客観的に考察可能である点が挙げられる。そして、オペレータ自身も同じ教室内に導入している自律型 CRR よりも子どもたちを引き付けるという明確な目標が設定できるため、WOZ-CRR を 1 台のみ導入しての探索に比べて効率的になることが期待される。一方、実験参加者側としても、普段の教室内の自由遊びにおいて遊びたいおもちゃを選択するのと同様に「遊びたいロボットで遊ぶ」という単純な選択が可能となり、より自然な行動データからの検証が期待される。また、2 台のロボット間での実験結果の比較ができるため、ロボットの新規性による効果とロボットの追加行動による効果を切り離した検証がしやすくなると思われる。

提案する進歩的開発では、探索フェーズと検証フェーズを明確に分けて設定している。本研究における『進歩』とは、探索フェーズと検証フェーズを繰り返す中での段階的な CRR の行動設計に関する知見の発見とそれに基づくロボット仕様の改良・拡張のことである。また、各フェーズを 1 週間前後の期間実施し、繰り返していく方法を採用した。実際の教室環境では、実験に参加する子どもたちの個人差やグループ全体が持つ特徴によって、子どもたちのロボットへの接し方と言うのは大きく変容することが予測される。また、実験参加者の特性だけでなく、教室内に常設されているおもちゃや実験を実施する時間帯にも大きく影響される可能性があり、1 回の探索によってすべての重要な知見（効果的なロボットの行動）の解明は困難であると考えられる。そこで、フィールド実験におけるスケジューリング問題の解決策のひとつとして、一度の探索フェーズで多くの知見を発見することを意図的に敢えて断念し、数個レベルの知見が発見できればよいという姿勢のもと、1 回の探索フェーズとして 1 週間前後の短い期間を設定する。そして、この短期間の探索フェーズを複数回に凝縮して繰り返すことで、限られた実験スケジュールにおける知見探索の効率化実現を目指す。この手法を採用することで、ロボットの改良・拡張に繋がるその時々にはしか得られない重要な知見を多く顕在化できると考えており、このような過程における発見も本研究における重要な進歩のひとつであると位置づけている。

2台ロボットの同時比較による自律型ロボットの進歩的開発手法を図6.1に示す。まず、1回目の探索フェーズでは多人数子ども環境に必要最低限の機能を搭載した自律型ロボット Auto-1 とオペレータによって遠隔操作される WOZ ロボットを同時に導入し、子どもたちには自由に遊んでもらう。この1回目検証フェーズにて得られた知見をもとに弱さ演出行動を追加した自律型ロボット Auto-2 を実装する。そして、1回目検証フェーズとして Auto-1 と Auto-2 を同時に教室内へ導入し実験を行う。なお、ロボットに対する慣れや飽きなどが実験結果に与える影響を軽減するため、探索フェーズとは異なる実験参加者に対して実施する。ここで、Auto-2 に追加実装した弱さ演出行動の有効性が確認された場合、2回目の実験へと進む。

次に、2回目探索フェーズでは、Auto-2 が WOZ ロボットを用いて弱さ演出行動を探索する際の基準となる。そして1回目と同様に発見された知見をもとに新たな行動を追加した自律型ロボット Auto-3 を実装し、Auto-2 と Auto-3 による検証フェーズを行う。

以降も、同様の手順を WOZ ロボットとのパフォーマンスの差が無くなるまで繰り返すことで、理論的には教育現場での使用に耐えうる CRR の開発が実現される。

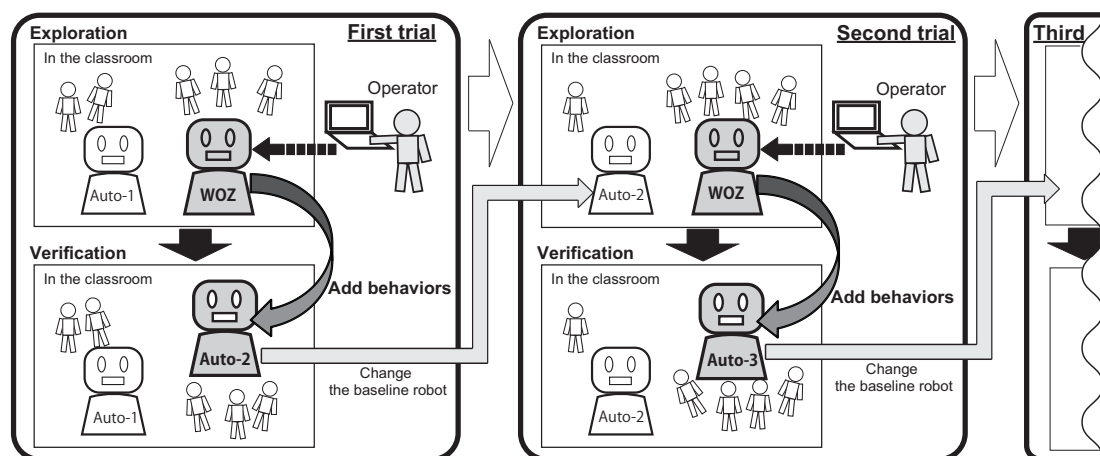


図 6.1 2 台のロボットの同時比較による進歩的開発手法

6.4 実験方法

6.4.1 実験フィールド・参加者

5章と同様につくば市内の幼稚園にご協力頂き、幼児の集団活動の場面にて実験を行った。実験の様子は2台のビデオカメラを用いて録画し、分析に用いた。参加者は4～6歳の園児54名で、1回の実験につき6～9名が同時にロボットとのゲームに参加した。なお、この実験は筑波大学研究倫理委員会にて実験参加者の安全確保等の観点において実験計画の承認を経ており、参加者の保護者への事前説明と書面同意を得たうえで実施した。

実験者については、探索フェーズでは1名の実験者（全日程固定）がロボットの遠隔操作を担当し、2～3名の大学院生および大学生がロボットの自律プログラムの実行や安全監督・ゲーム進行の役割を分担した。検証フェーズでは、遠隔操作の役割が不要のため、それ以外の役割を2～4名の大学院生および大学生で分担している。本章の実験では、これまでの実験と比較して上腕部と頭部については多様な動作が可能で、オペレータによる自由歩行機能も搭載している。そのため、これまで以上に実験時の不測の事態は起きやすくなると想定し、子どもたちの安全監督担当者は基本的にこれまでの人員から1名以上増員し強化することとした。

6.4.2 実験準備

5章の実験環境にCRRの遠隔操作システムを追加して実験を行った。遠隔操作システムは3章及び4章で使用した作り込み動作の逐次再生による遠隔操作と並行して、CRRとの同一機体を用いたマスタースレーブ方式の遠隔操作も行った。マスタースレーブ方式による遠隔操作システムは、探索フェーズ中に動作の柔軟な試行錯誤を可能とするために実装した。今回は上半身の制御のみに特化しているが、ロボットの身体動作に関する探索空間の拡大には寄与できるものと考えている。

6.4.3 実験手順

実験タスクは5章と同様に動物ジェスチャーゲームを採用し、ゲームの前後には子どもたちの動物英単語の習得度を調査するために事前・事後テストを行った。参加者には同様のゲームに4日間連続して参加してもらう内容とした。なお、各フェーズにおける詳細な実験手順は5.3.3と同様の流れで行った。

図6.2に本章にて実施した進歩的開発のための実験の全体の流れを示す。前述したとおり、本研究で提案する進歩的開発は1回の実験が探索フェーズと検証フェーズで構成されており、今回はこの流れで計2回繰り返し実験を行った。1回目探索フェーズでは、動物ジェスチャーゲームの基本機能のみを実装した自律型CRR (Auto-CRR-v1) と基本機能以外にもオペレータが遠隔操作可能なWOZ-CRRを教室環境内に導入する。そして、オペレータの主観や参加者のAuto-CRR-v1とWOZ-CRRに対する行動の違いなどから[追加行動1]を考察する。その後の検証フェーズでは、[追加行動1]を実装したAuto-CRR-v2とAuto-CRR-v1を同時に導入し、この追加機能の有効性を検証する。2回目では、Auto-CRR-v2を基に1回目と同様に追加機能の探索とAuto-CRR-v3の有効性検証を行う。このAuto-CRR-v3における[追加行動2]での赤字部分は、2回目の探索フェーズの結果に基づき[追加行動1]より改良・拡張された内容で、本研究における『進歩』の部分に相当する。

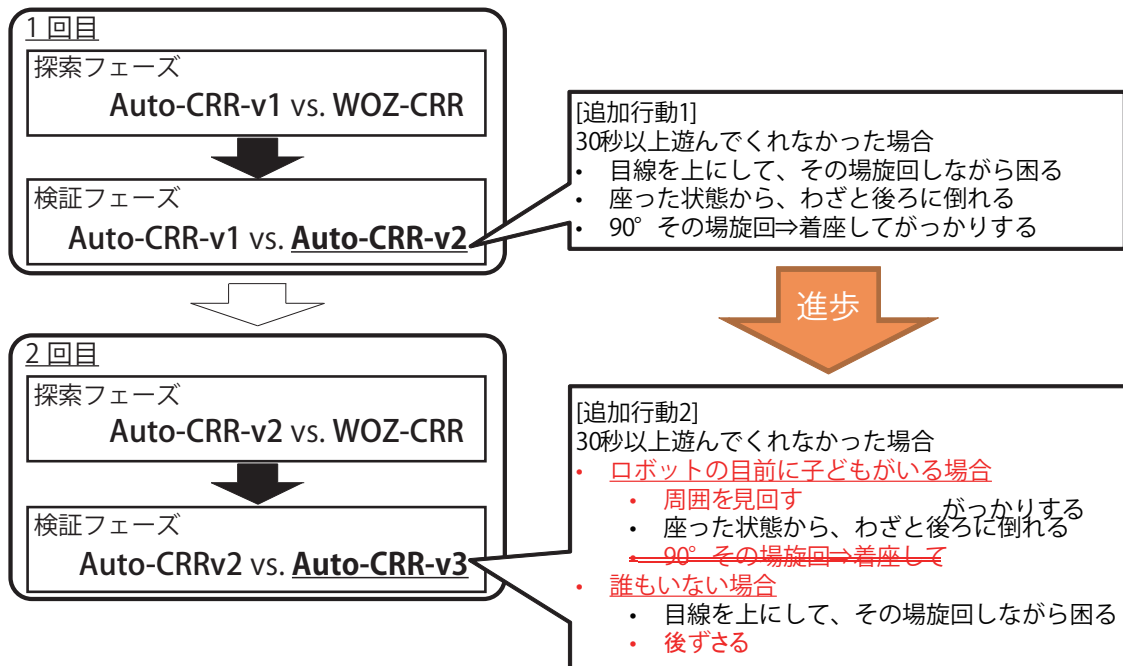


図 6.2 本章にて実施した進歩的開発の大まかな流れ

6.5 実験結果

6.5.1 探索フェーズにおいて観察されたロボットの効果的な行動

まず、探索フェーズで発見された効果的なロボットの行動について述べる。1回目の探索フェーズでは、実際にオペレータが意図して行った困惑動作や落胆動作のほかにも、歩行動作中に意図せず転倒してしまった際に、ロボットへの関心が低下していた子どもたちが周囲に集まってくるという事例が観察された。図 6.3 に遠隔操作成功例として、困惑動作の様子を示す。以上のことから、[追加行動 1]として意図的な転倒動作を加えることとした。また、困惑動作と落胆動作については、2回目の探索フェーズにて新たな知見が加わり修正されるため、以降本文中では、困惑動作 1 および落胆動作 1 と表記する。



図 6.3 WOZ-CRR による子どもの学習ゲームへの興味誘引の成功例（困惑動作）

2 回目の探索フェーズでは、後退動作に対して子どもたちが集まりカードゲームを再開してくれる傾向が見られたため、[追加行動 2] として実装した。図 6.4 に観察された様子の一例を示す。各写真の左側に置かれたロボットが WOZ-CRR，右側が Auto-CRR-v2 である。WOZ-CRR が後ずさりを始めると、Auto-CRR-v2 とジェスチャーゲームをしていた子どもたちも WOZ-CRR の周囲に集まる様子が観察された（この後、学習ゲームが再開された）。一方、子どもたちの興味をロボットへ引きつけるために多くの歩行動作を試したが、前進や旋回動作は子どもたちが離れて行ってしまい、場の雰囲気は盛り上がる反面、学習ゲームに興味を引きつけるには逆効果であることがわかった。図 6.5 にその様子の一例を示す。各写真の左側に置かれたロボットが WOZ-CRR，右側が Auto-CRR-v2 である。WOZ-CRR がその場で立ち上がり旋回した際、子どもたちは動物ジェスチャーゲームを中断し、一斉に WOZ-CRR から離れる行動が観察された。場の雰囲気は盛り上がったが学習ゲームに集中して取り組ませることができなかった。そのため立ち上がる動作が含まれるに困惑動作 1 に関しては、周囲に子どもがいないときに実行されるよう変更した（困惑動作 2）。また、落胆動作 1 については、困惑動作との違いが子どもたちに上手く認識されないことがあったため、首をうなだれる動作のみとした（落胆動作 2）。



図 6.4 WOZ-CRR による子どもの学習ゲームへの興味誘引の成功例（後退動作）



図 6.5 WOZ-CRR による子どもの学習ゲームへの興味誘引の失敗例（起立や歩行を伴う動作）

6.5.2 追加行動による学習ゲームへの興味の誘引

検証フェーズにおける追加行動の効果に関して、図 6.7 および図 6.9 にロボットの行動種類ごとにロボットと遊んでいた子どもの人数（ロボット周囲の子どもの人数）変化の平均を示す。

ロボット周囲の子どもの人数は、ビデオコーディング（自由時間の様子のビデオを再生しながら同時に数値タグを変化させながら記録するソフトウェアを自作）によって算出した。ロボット周囲の人数として計上するための基本条件是、手などを使ってロボットに接触可能な位置にいることとした。この条件に基づくロボット周囲の子どもの人数の算出例を図 6.6 に示す。なお、例外もいくつか定義されている。直接手に触れることが不可能な状態であってもロボットに対して十分に注意が向いていると判断でき、図 6.6(b) のように 1 つの群として包含可能な場合は、基本条件に該当しない場合でも周囲人数として計上する。逆に基本条件を満たしていても、体幹が明らかにロボットに向いていない場合や一切ロボットに対して注意を向けていないと判断される場合は例外として計上しない。ビデオコーディングは第三者の学生 3 名によって行われ、この 3 名においてビデオコーディングの信頼性を確認するため一致度を確認したところ 0.96 であった。

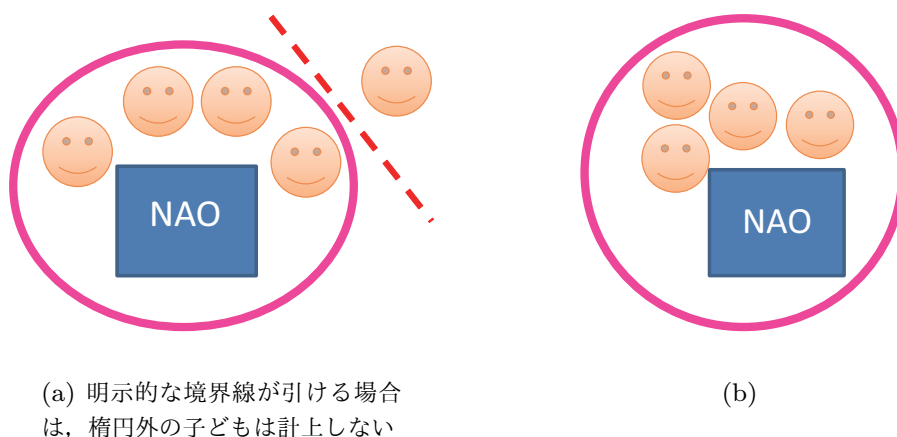
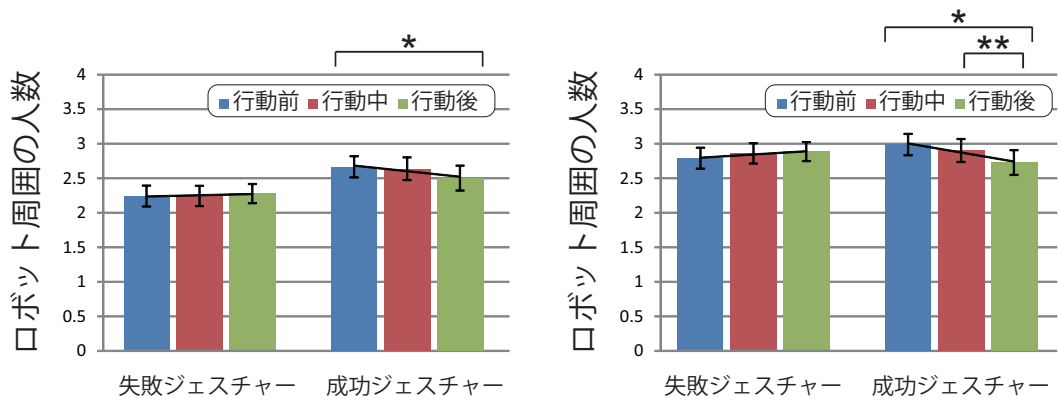


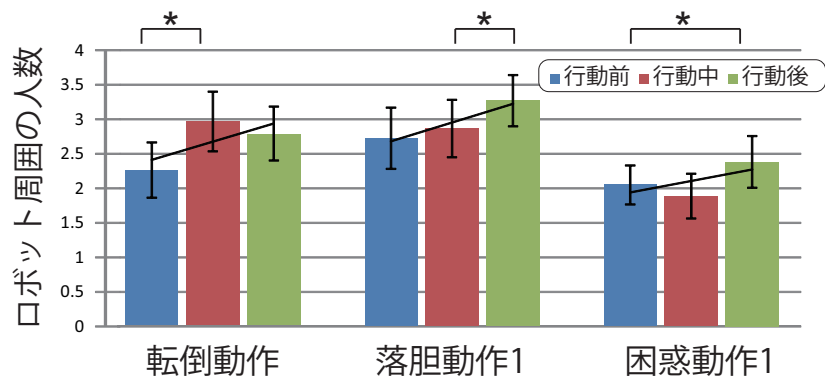
図 6.6 ロボット周囲の子どもの人数の算出例（いずれも 4 名の場合）

検証フェーズ1回目・2回目ともに、ゲーム基本行動に比べ追加行動におけるロボット周囲の子どもの人数の変化が大きい傾向にあることが確認された。Wilcoxonの符号付き順位検定を行ったところ、1回目検証フェーズでは、転倒動作の行動前と行動中 ($Z(16) = -2.499, p < 0.05$), 困惑動作1の行動中と行動後 ($Z(12) = -2.551, p < 0.05$), 落胆動作1の行動前後 ($Z(16) = -2.401, p < 0.05$) において有意差が確認された。また、ジェスチャーゲームにおける基本動作である成功ジェスチャーに関しては、Auto-CRR-v1 (行動前-後: $Z(64) = -2.023, p < 0.05$), Auto-CRR-v2 (行動前-後: $Z(68) = -3.019, p < 0.01$, 行動中-後: $Z(68) = -2.505, p < 0.05$) ともに行動後に向けて周囲の人数が減少する傾向が見られた。



(a) ゲームの基本動作 (Auto-CRR-v1)

(b) ゲームの基本動作 (Auto-CRR-v2)



(c) 追加行動 (Auto-CRR-v2)

図 6.7 各ロボットの行動によるロボット周囲の子ども人数の比較 (1 回目検証フェーズ)

2回目検証フェーズでは、後退動作の行動前後と行動中 ($Z(15) = -2.521, p < 0.05$) と行動後 ($Z(12) = -2.100, p < 0.05$) に有意差が確認された。1回目検証フェーズで実装した追加行動によるロボット周囲の子ども人数の平均について Auto-CRR-v2 と Auto- この結果から、進歩的開発法によって探索・実装した追加行動がロボットとの英単語学習ゲームへの積極参加を促進することができたと考えられる。CRR-v3 間で比較した結果、いずれのロボットにおいても有意な人数変化は見られなかったが、Auto-CRR-v3 が周囲に多くの子どもたちを集めていることが確認された。

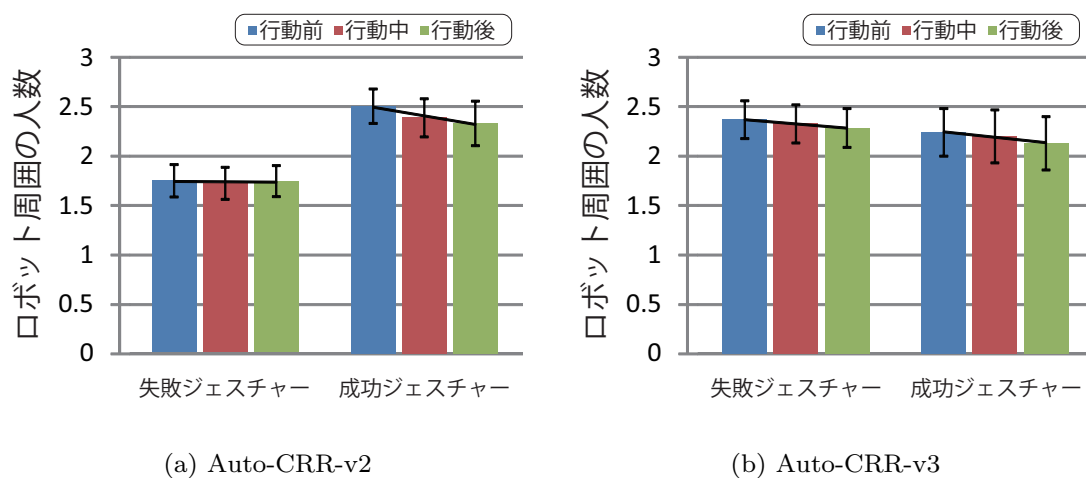
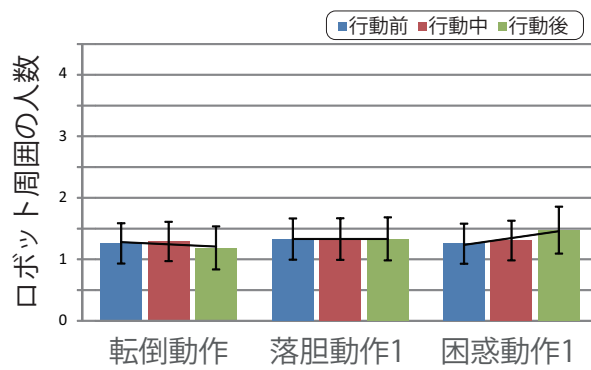
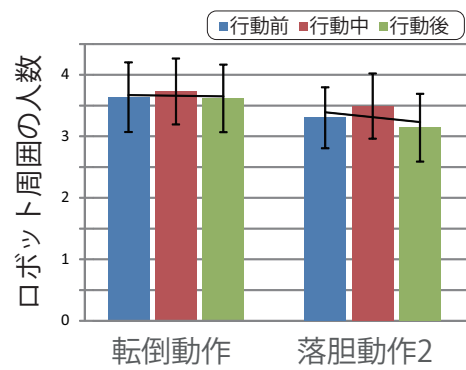


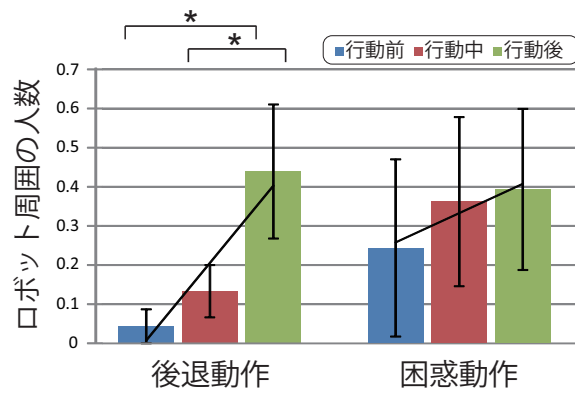
図 6.8 ゲームの基本動作によるロボット周囲の子ども人数の比較 (2回目検証フェーズ)



(a) 追加行動 (Auto-CRR-v2)



(b) 追加行動 (Auto-CRR-v3)



(c) 追加行動 (Auto-CRR-v3)

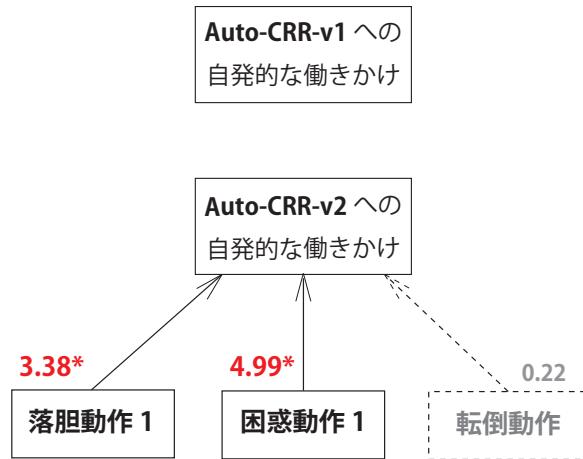
図 6.9 各ロボットの追加行動によるロボット周囲の子ども人数の比較 (2 回目検証フェーズ)

検証フェーズごとに、子どもたちが経験した追加行動回数と自発的に発生した子どもたちからロボットへの働きかけ回数の中で回帰分析を行った。結果を図 6.10 に示す。それぞれの追加行動に添って表記された数値は該当する追加行動に対する回帰係数である。なお、回帰分析の結果、回帰係数に有意性が無かった追加行動は破線にて教示している。

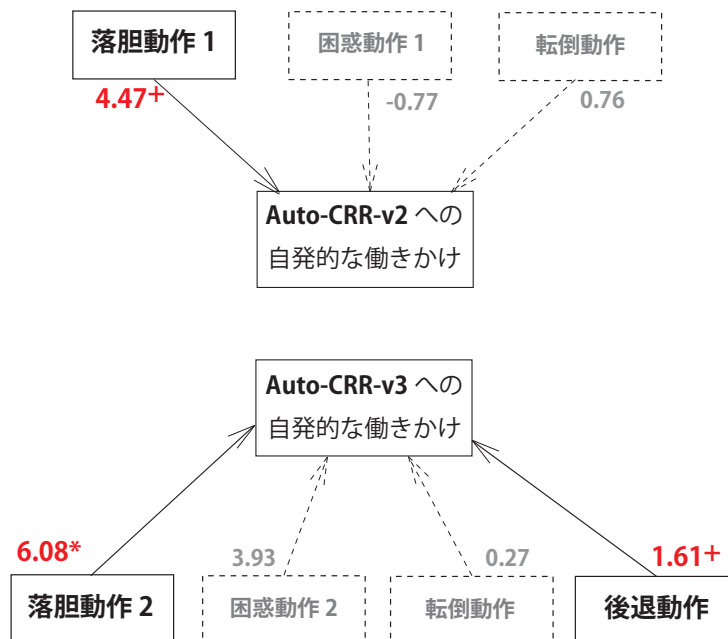
1 回目の検証フェーズでは、落胆動作 1 と困惑動作 1 が子どもたちによる Auto-CRR-v2 への自発的な働きかけの誘引に影響を与えている可能性が確認された ($F(3.42) = 7.064, p < 0.001$)。

2 回目の検証フェーズでは、Auto-CRR-v2 に対して落胆動作 1 が自発的な働きかけの誘引に影響を与えている可能性がある ($F(3.44) = 3.892, p < 0.05$)。一方、Auto-CRR-v3 では回帰結果の有意性はやや低いが、落胆動作 2 と後退動作が自発的な働きかけの誘引に影響している可能性が見られた ($F(4.42) = 2.166, p < 0.1$)。

(追加行動が無いため回帰分析結果なし)



(a) 1 回目検証フェーズ (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)



(b) 2 回目検証フェーズ (* : $p < 0.05$, + : $p < 0.1$)

図 6.10 追加行動経験と子どもたちによるロボットへの自発的な働きかけ回数の関係性 (回帰分析結果)

6.5.3 追加行動による英単語学習効果

英単語の学習効果については、日数が経過するにつれて飽和する傾向にあったが、図 6.11 に示すように、追加行動を実装したロボットにおいて 2 日目の平均正答数の上昇が大きい傾向にあることが確認された。このことから、子どもたちに英単語を定着させる効果についても可能性を示すことができたと思われる。

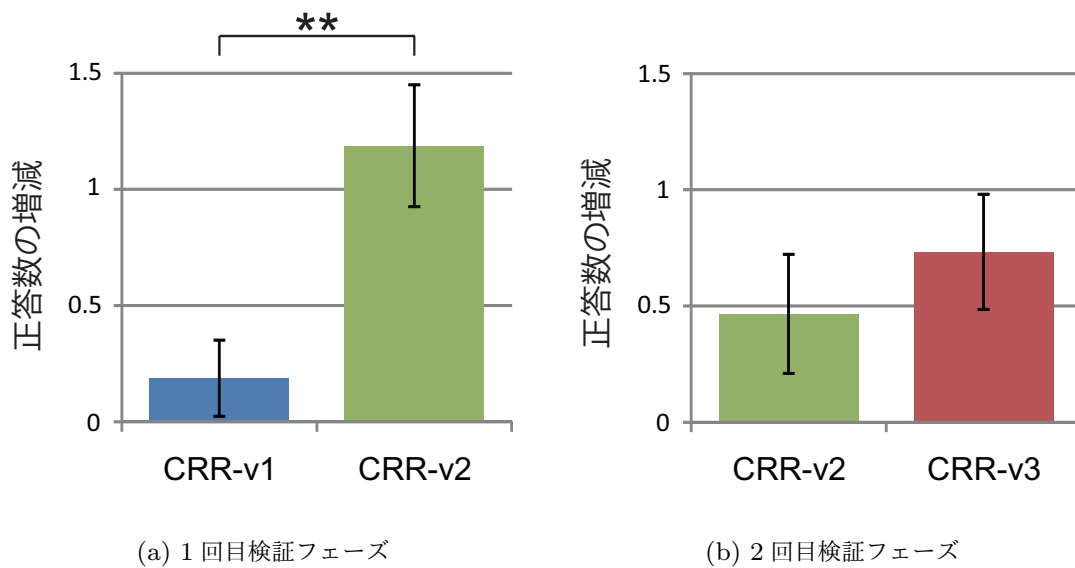
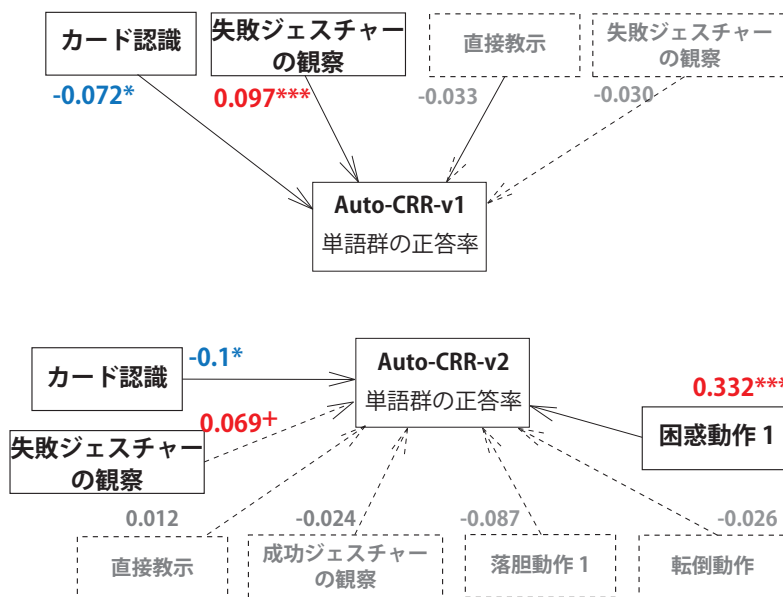
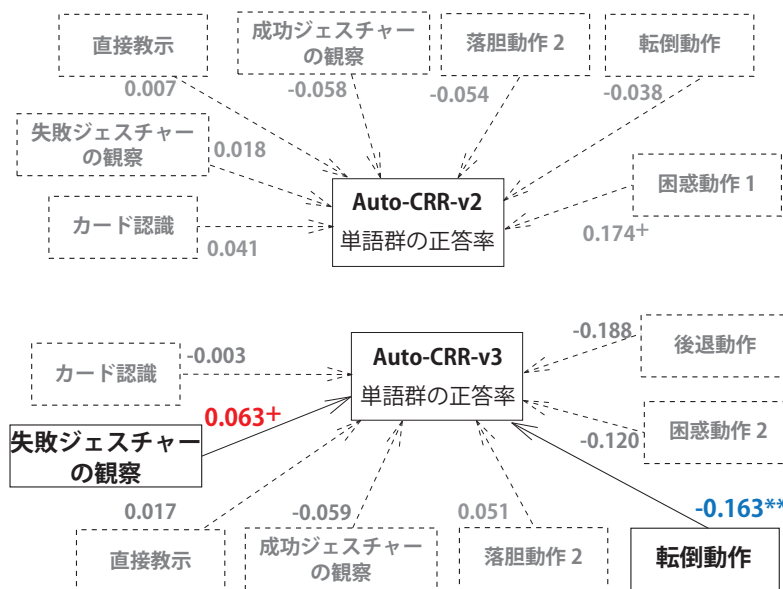


図 6.11 事後テストにおける正答率増減の平均（それぞれ 2 日目のみの結果を抜粋）

また、ロボットの行動種類ごとのインタラクション経験回数と事後テストにおける正答率増減との間で回帰分析を行った。図 6.12 に検証フェーズごとの結果を示す。ここでも、それぞれの基本動作と追加行動に添って表記された数値は該当する行動に対する回帰係数であり、回帰分析の結果、回帰係数に有意性が無かった行動については破線で表示している。



(a) 1回目検証フェーズ (***: $p < 0.001$, *: $p < 0.05$, +: $p < 0.1$)



(b) 2回目検証フェーズ (**: $p < 0.01$, +: $p < 0.1$)

図 6.12 追加行動経験と事後テストにおける正答率増減の関係性 (回帰分析結果)

1 回目の検証フェーズでは、失敗ジェスチャーの観察が事後テスト成績向上に影響を与えている可能性が確認された (Auto-CRR-v1 単語群 : $F(4.238) = 6.848$, $p < 0.001$, Auto-CRR-v2 単語群 : $F(7.236) = 3.949$, $p < 0.001$). 逆に、カード認識のインタラクション経験は事後テスト成績を下げる影響があった可能性が確認された. Auto-CRR-v2 単語群については、困惑動作 1 が失敗ジェスチャーの観察よりも大きな影響を事後テストの成績向上に与えていた可能性がある.

2 回目の検証フェーズでは、Auto-CRR-v3 単語群において失敗ジェスチャーの観察による成績向上に関して有意傾向が確認されたが、転倒動作によって事後テスト成績が下がった可能性があることがわかった ($F(8.231) = 3.503$, $p < 0.001$). なお、Auto-CRR-v2 単語群の正答率に関しては有意な回帰式が導出できなかった ($F(7.232) = 1.038$, $p = 0.40$).

6.5.4 CRR を進歩的に開発できたのか

本手法の有効性 (CRR を進歩的に開発することができたのか) について述べる. まず、各検証フェーズのビデオ映像に対してビデオコーディングを行い、子どもたちがロボットに対して行った働きかけを、学習ゲームに関連する働きかけとそれ以外の働きかけの 2 種類に分類した. なお、5.4.2 と同様のコーディング規範を利用した. 分析結果を集計した結果、図 6.13 に示すように、各ロボットが参加者より受けたゲームに関連する働きかけの比率が右肩上がりに推移していることがわかった.

1 回目検証フェーズにおける、学習ゲームに関連する働きかけがロボットへ働きかけ全体に対して占めた割合を日数ごとにまとめた結果を図 6.14 に示す. 各ロボット間の比率の差について χ^2 検定を行った結果、3 日目以外では、追加行動を実装した Auto-CRR-v2 において有意に高い割合で学習ゲームに関連する働きかけが誘発されていることがわかった (1 日目 : $\chi^2(1) = 11.167$, $p < 0.001$, 2 日目 : $\chi^2(1) = 9.572$, $p < 0.01$, 4 日目 : $\chi^2(1) = 14.509$, $p < 0.001$). また、図 6.15 に 1 日目から 4 日目にかけて、各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ総数の変化を学習ゲームに関連するものとそれ以外に分けて示す. 学習ゲームに関する働きかけ回数については、全体的に減衰傾向にあるが、終始 Auto-CRR-v2 に対して多く発生していることがわかった.

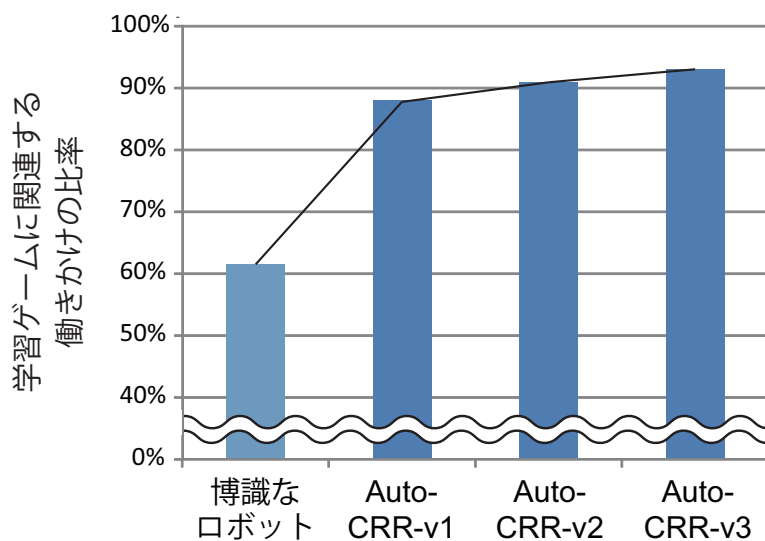


図 6.13 CRR の改良段階に伴う各ロボットが誘発した子どもたちの自発的な働きかけ比率の遷移

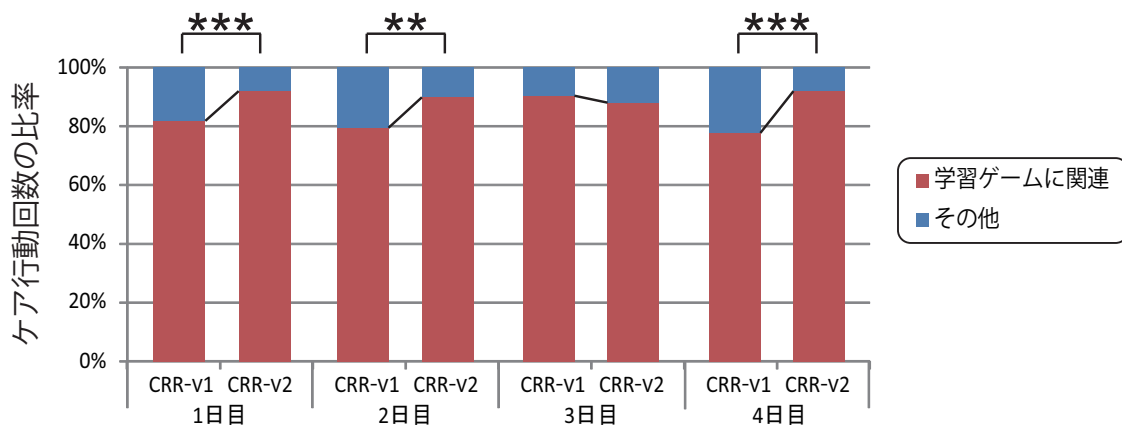


図 6.14 学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合 (1 回目検証フェーズ)

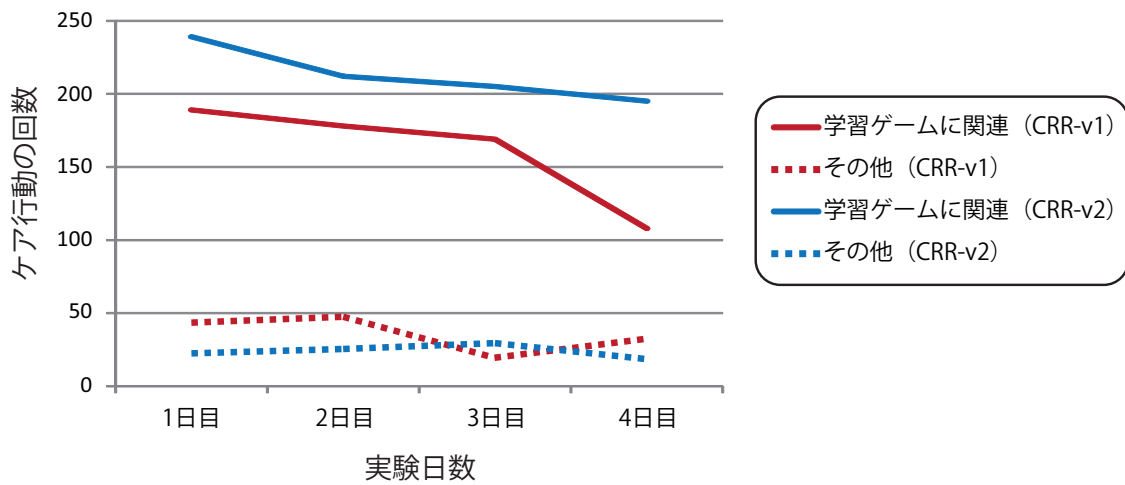


図 6.15 各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化 (1 回目検証フェーズ)

2 回目検証フェーズにおける，学習ゲームに関連する働きかけがロボットへ働きかけ全体に対して占めた割合を日数ごとにまとめた結果を図 6.16 に示す．各ロボット間の比率の差について χ^2 検定を行った結果，3 日目のみ追加行動を実装した Auto-CRR-v3 において有意に高い割合で学習ゲームに関連する働きかけが誘発されていることがわかった ($\chi^2(1) = 4.592, p < 0.05$)．図 6.17 に 1 日目から 4 日目にかけて，各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ総数の変化を学習ゲームに関連するものとそれ以外に分けて示す．学習ゲームに関する働きかけ回数については，Auto-CRR-v2 に関しては常に減少する傾向にあった．一方，Auto-CRR-v3 では 2 日目に増加しており，Auto-CRR-v2 に比べて多くの学習ゲームに関連する働きかけが発生していた．

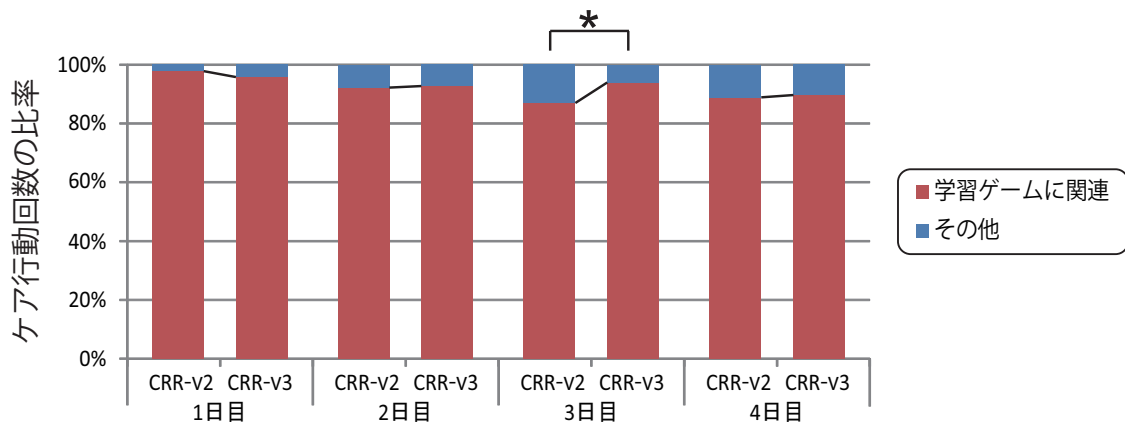


図 6.16 学習ゲームに関連するロボットへの働きかけが占める割合 (2 回目検証フェーズ)

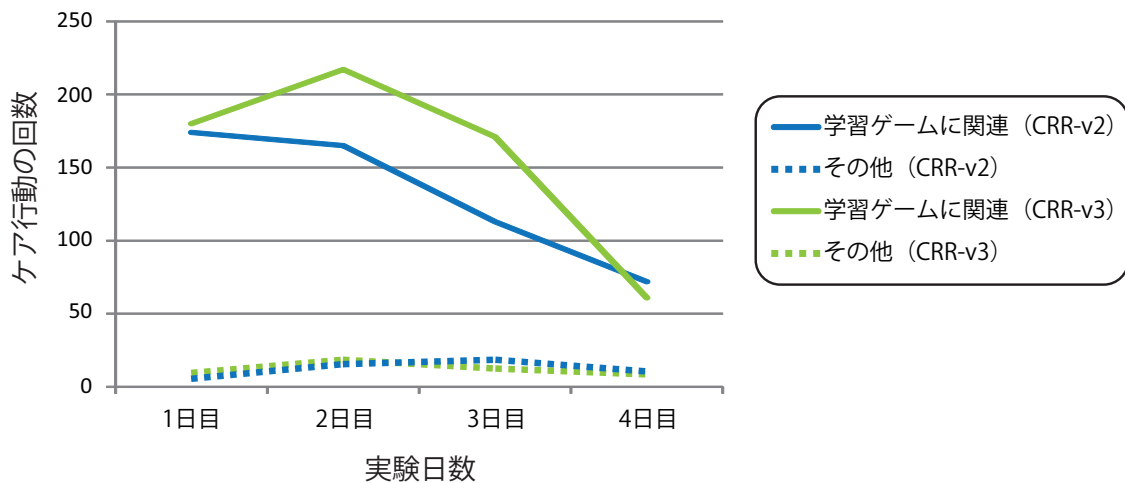


図 6.17 各ロボットに対して自発的に発生した働きかけ回数の変化 (2 回目検証フェーズ)

次に、図 6.18 にロボットが子どもたちに完全に無視されていた累積時間について比較した結果を示す。ここでは、6.5.2 に示したコーディング規範によってロボットの周囲にいる子どもの人数が 0 名となった場合、ロボットが子どもたちに完全に無視されている状態であると定義した。いずれにおいても、追加行動を実装し改良を施し

た CRR の方が完全に無視されていた累積時間数が少ない傾向にあった。各ロボット間の平均累積時間の差について Wilcoxon の符号付き順位検定を行った結果、1 回目検証フェーズでは有意差 ($Z(6) = -2.201, p < 0.05$), 2 回目検証フェーズでは有意傾向 ($Z(6) = -1.572, p < 0.1$) がそれぞれ確認された。

図 6.11 にて述べたように、英単語学習効果の観点からも、常に改良の加わった CRR の担当単語群において平均正答数の上昇傾向が強かったことから、本手法によって CRR の行動設計が進歩的に行うことができたと考えられる。

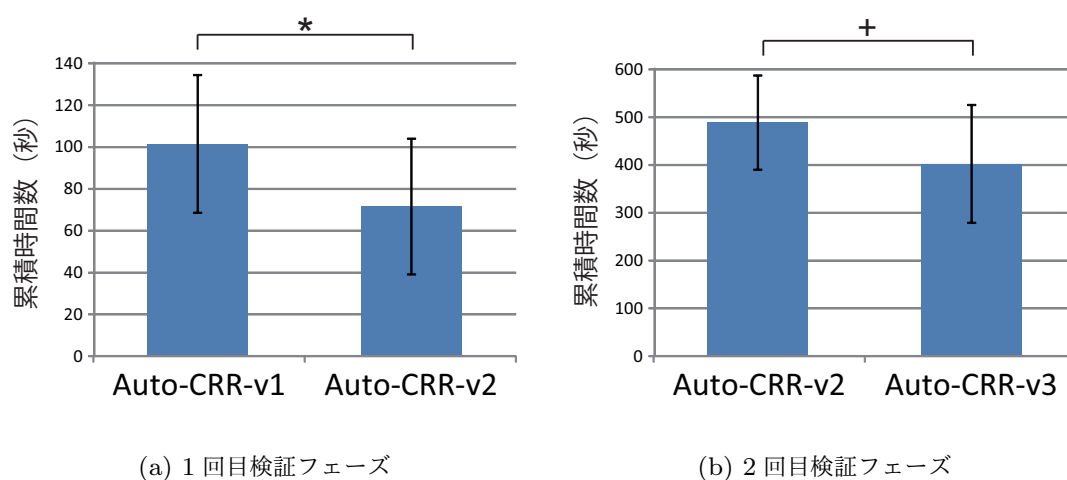


図 6.18 ロボットが子どもたちに完全に無視されていた累積時間の比較

6.6 考察

本章で提案した2台のロボットの同時比較を用いた進歩的開発によって2回の探索フェーズを実施した結果、4つの弱さを演出する行動が発見された。さらに、発見した行動を自律型CRRに実装し教育効果の検証を行った結果、それぞれの行動には子どもたちのロボットないし学習ゲームへの興味・関心を引き付ける効果があり、自発的なロボットへの働きかけを誘引する効果があることが確認することができた。英単語の学習効果については、追加行動が実装されたCRRにおいて効果がありそうであるという程度での検証は行えたが、この手法を通してCRRが提示する行動は複雑になり、実験環境自体も対象が多人数であるなど様々な要因を含んでいたため、厳密に何が子どもたちの学習を助けたのかについて明確な知見を得ることは困難であった。また、本章ではすべてのロボットが意図的な誤答をするよう設計し、Learning by Teachingによる学習効果を想定していたため、事後テスト結果において各ロボット間での差は生じにくくなっていたと思われる。しかしながら、事後テストの成績と子どもたちが経験したロボットの行動について回帰分析を行った結果、一部で追加行動による影響が確認されたため、CRRの意図的な誤答行動と併せて他の弱さ演出行動を導入することで学習効果のさらなる向上することも可能であると思われる。

本手法によるCRR開発の進歩性についても、学習効果に関しては、同様な制約から統計的に強い結果は得られなかったが、幼児の自発的な行動の誘引や学習ゲームへの興味・関心を引き付ける点については確認することができた。また、本章で述べた実験の成果は合計32日間の実施によって得られた。実際に幼稚園でロボットを稼働させたのは1時間程度である。そのため、実質的には約32時間という比較的短い期間で多くの行動やルールを発見できロボットの実装と検証を行えた点は、提案手法の効率性を示す事例の一つとして意義深いものであると考えられる。

5章と同様に、実際の幼稚園環境にて可能な限り幼児の行動を制限しないことを考慮して実験したため、参加者各々のロボットと遊ぶ回数などは統制できていない。そのため、結果の厳密性（比較している条件の独立性や参加者の特性などとの依存関係など）について脆弱であることは否定できない。しかしながら、本研究ではより多くの効果的な弱さを演出するCRRの行動を明らかとし、よりよいCRRの効率的な開発を重視しているため、この点に関しては大変有用な成果が得られたと考えている。

また、今回の実験では他の開発手法との比較は行っていないため、提案した進歩的

開発が CRR の行動設計を進めるにあたってより適した手法であるという主張が難しいことは否定できない。この点が手法の有効性や妥当性を論じるためには重要であることは留意しなければならないが、新たな枠組みでの実験手法をフィールドにて実践したことによって見識を広げることには貢献できたと考えている。

6.7 まとめ

本章では、2 台のロボットの同時比較による進歩的开发を用いて幼児教育支援のための CRR の行動設計が可能かどうかを検証するためのフィールド実験を行った。なお、5 章と同様に幼児の集団活動を実験環境とし、子どもたちには 4 日間ロボットと共に動物ジェスチャーゲームに参加してもらった。提案手法によって、困惑動作、転倒動作、落胆動作、後退動作といった 4 つの効果的なロボットの行動を発見することができた。そして、これらの動作がロボットや学習ゲームに対して興味を引きつけることに役立っていたことが示唆された。さらに、CRR の行動を追加するにつれて子どもたちがロボットとの学習ゲームに参加する割合が増加していることから、この手法による CRR の進歩性についても確認できたと考えている。これらの結果から、提案する進歩的开发によって教育効果の高い自律型 CRR の行動設計の実現可能性を示すことができたと考えられる。

第7章

結論

本論文では、幼児教育支援のための CRR 実装に必要なロボットの行動設計指針について明らかにすることを目的として、以下に示す4つのフィールド実験を実際の幼児教育現場にて実施した。

3章では、意図的な失敗行動が設計された CRR を子ども向け英会話教室に導入し、CRR による幼児の英単語学習効果について調査した。実験タスクには、英語動詞学習を目的とした道具を用いたジェスチャーゲームを採用した。実験結果より、CRR の意図的な失敗行動によって子どもの自発的な教示行動が誘発され、幼児の英語動詞学習の促進に効果的であることが確認された。

4章では、3章の成果を発展させ CRR の失敗行動頻度（ロボットの賢さ）の違いに着目し、この行動のレベルが幼児の英単語学習に与える効果について検証した。実験タスクには、図形の英語名称の学習を目的とした図形のお絵かきゲームを用いた。実験結果より、失敗行動のみではなくロボットによる正答行動もバランスよく提示可能な CRR が、幼児の英単語学習において効果的であることが示された。

5章では、CRR が導入される実験環境を教育対象が幼児1名の場面から幼稚園での集団活動場面へ発展させ、これまでの成果と同様の教育効果を得られるか否かについて検証した。実験タスクとして、動物の英語名称学習のための動物ジェスチャーゲームを採用し、このゲームに特化した自律型ロボットを実装した。実験結果より、常に正答行動しか示さない博識なロボットに比べて、自律型 CRR が動物の英単語の

定着に効果的であることが確認された。また、子どもたちの学習ゲームに対する興味・関心をより多く引き付けることが判明した。

6章では、幼児教育支援に効果的な弱さや不完全さを有するロボットの行動に関する知見をさらに明らかにするために、仕様の異なる2台のロボットの同時比較による進歩的開発手法を用いて効果的なロボットの行動の探索・実装を行った。開発の過程において困惑動作や後ずさり動作など5種類の行動を発見し、これらの教育効果について確認した。また、本手法によってCRRの進歩的に開発できたことが示された。

7.1 ケア・レシーバー型ロボットの行動設計

本論文の主たる成果として、以下に示すような幼児教育支援のための CRR の行動設計指針を明らかにすることができた。

- 幼児教育支援に効果的なロボットの弱さ行動は、能力的な弱さと精神的な弱さのいずれかのカテゴリに分類される可能性が高い。但し、このような特徴を持つ弱さ行動であっても、最適な弱さの程度を見極めた上で行動設計する必要がある（十分な検討をせず、ひたすら弱さを演出する行動（例：常に間違い続ける）を設計すると逆効果になる危険性あり）。
- 以下の特徴を有する実験手法によって、幼稚園の集団活動などの多人数環境においても効率的な CRR の行動設計・開発が実現可能である。
 - － 2 台のロボットの同時比較
 - － 進歩的開発による知見の探索と CRR の実装

以降、本節では、この幼児教育支援のための CRR 行動設計指針に関して、これまで説明した実験の成果を 1 章の冒頭（1.2 本論文の目的）で掲げた 4 項目に沿ってまとめる。

7.1.1 CRR による幼児教育支援の実現可能性

本論文全体を通して、英単語学習の場面において CRR を実際の教室に導入し、英単語の学習効果および子どもたちの自発的な働きかけを引き出す効果があるのかどうかについて検証した。

まず、英単語の学習効果については、弱さ演出行動の中でも、意図的に間違える行動が特に効果的である可能性を示すことができた。これは、Learning by Teaching による影響が顕著に出ているものと考えられる。しかしながら、4 章では常に間違い続ける CRR による英単語学習効果は他のロボットに比べ明らかに劣っていることがわかった。当初、この CRR は子どもたちの教示を多く誘発するであろうと予想されていたが、ただ単に教えるだけでは効果が発揮されないことがわかった。さらに、常に正解を提示し続けるロボットにおいて学習効果が確認されたことから、ロボットの正解動作を観察することも英単語学習において影響を与えていたことが考えられる。ま

た、定量的な評価はできていないが、5章および6章における多人数環境での検証においても、他者がロボットと遊ぶ様子を観察することによる学習が発生していた可能性が考えられる。

子どもたちの自発的な働きかけの誘発に関しては、意図的な間違い動作をはじめとする自らの弱さを演出する行動を実装したロボットにおいて多くの自発的行動を引き出すことが改めて確認された。また、子どもの性格等によって頻度の差はあったが、どの子どもたちもロボットの弱さ演出行動に対して自発的な働きかけが発生していた。特に、普段のレッスンには積極的に参加することができない子どもたち（例：内向的な性格の子ども）であっても、自発的にロボットと関わろうとする様子が観察されており、既存の教材などではなかなか自発性を促すことが困難な子どもたちにおいて、CRRがより効果的に活用できたと考えられている。このことについて現場の教師からは、今後実際に教育支援ツールとして導入していくうえで大変意義深い、という意見を頂くことができた。しかし、次節でも触れるが4章の実験結果から常にロボットが弱さを演出し続けることに関しては、子どもたちの参加意欲を下げってしまう危険性があるため、行動設計をする際には発生頻度など十分考慮する必要がある。

7.1.2 幼児の自発的なケア行動を効果的に誘引するロボットの弱さ演出行動

従来研究より、失敗行動の一例として意図的に誤答するロボットが子どもたちの自発的なケア行動を誘発することについては確認されていたが、本論文ではさらに後述する点を明らかとした。

まず、4章では失敗行動の頻度の違いによるロボットの賢さに注目した。その結果から、終始ロボットが間違い続ける行動は子どもたちの自発的な行動を一時的に引き出すことには役立ったが、学習ゲームへの意欲を持続する効果は期待できないことがわかった。7.1.1で述べた内容とも合わせると、CRRの行動設計では向こう見ずにひたすらロボットの弱さを演出すればいいというわけではなく、最適な弱さの程度をバランスよく検討する必要があるという知見が得られた。また4.5.3でも考察したように、子どもたちが自身のケア行動によってロボットが弱さを克服し成長する過程を観察することによって、英単語学習支援を実現していた可能性がある。この点について掘り下げたり、6章にて提案した進歩的開発によって全く異なる観点における知見探索を行ったりすることで、本論文では深く追求できなかった最適な弱さの程度を実現

する行動設計指針へ繋げることも可能であると思われる。

そして6章では、2台のロボットを同時に幼稚園の教室へ導入し、Wizard of Oz法を適用したCRRによる探索から新たに4つの弱さを演出する行動（困惑動作、転倒動作、落胆動作、後退動作）を発見した。発見された4つの動作と実際にフィールドにてロボットの遠隔操作をしながら探索する過程において、このロボットの弱さを演出する行動は以下のような2種類に分類されると考えられる。

- 能力的な弱さを演出する行動：誤答行動、転倒動作
- 精神的な弱さを演出する行動：困惑動作、落胆動作、後退動作

7.1.3 効率的なCRRの行動設計・開発手法の実現およびそのための実験手法

5章では、幼稚園の集団活動のような多人数環境にて、CRRの教育効果を検証する実験を行った。現場でのロボットの実用化を進めるためには、想定される使用環境に限りなく近い環境で実証実験を行うことが重要である。もちろん、小規模の学習塾などでは子ども1名を対象とした授業形態も存在するが、実際には幼稚園や学校での集団活動や、多人数に対して単一の内容の授業を行うケースの方が圧倒的に多いと考えられる。また、ロボット自体の導入にかかるコストを考えた場合、子ども1名に対して1台のロボットを支給するのは現実的ではないため、多人数の子ども環境に少数ロボットを導入した環境でも実証実験をするべきである。しかし、このような実験に既存の比較実験を用いると、十分な検証をするためには参加者の確保やフィールドとのスケジュール調整が困難となりやすい。そこで、既存のおもちゃと同様に、比較実験を行いたいロボットを2台とも同一の教室に導入する方法によって上記で問題としているコストの軽減を試みた。また、この方法を取ることで、子どもたちが普段から遊びたいおもちゃを選択することと同様に、より子どもたちの興味・関心を引き付けるロボットはどちらなのかを評価することを目指した。

6章では、教育効果のあるロボット行動の探索を効率的に行うために、2台のロボットを多人数環境に導入し同時に比較する手法による実験を行った。また、5章と同様に発見した知見を実装したロボットとの検証と合わせて複数回繰り返すことで、CRRを進歩的に開発することができたと考えられる。

各章ともに、他手法との比較をした上で効率性について検証はできていないが、い

いずれも有意な検証結果を複数報告できていることから、有用な実験手法の一つとして挙げる価値は十分にあると考えられる。

7.1.4 CRR が導入可能な環境や条件に関する事例の収集

本論文では、以下のような3つのCRRを用いた学習ゲームについて現場での実証実験を行うことができた。

道具を用いた英語動詞のジェスチャーゲーム 英語動詞を学習する目的で実施した。

最初、CRRは把持している道具とは対応しない動詞のジェスチャーを意図的に実演するが、子どもによって正しいジェスチャーを直接教示してもらくと、ロボットは把持している道具と対応した正しいジェスチャーを実演可能となる。

図形のお絵かきゲーム 主に図形の英語名称を学習する目的で実施した。ゲーム内容

の計画にあたってアドバイスを頂いた英会話教室の先生によると、このゲームは子どもたちにとっては図形を描く練習にもなっていると考えられる。最初、CRRは描画を依頼された図形を正しく描画できないが、子どもからペンを持っている腕を直接動かしてもらいながら正しい図形の描画を教えてもらくと、ロボットは正しく描けるようになる。

動物ジェスチャーゲーム 動物の英語名称を学習する目的で実施した。CRRは提示

された動物カードに応じてジェスチャーを実演しようとする。最初、CRRは提示されたものとは異なる動物のジェスチャーを実演するが、子どもによって正しい動物ジェスチャーを直接教示してもらうことで正しいジェスチャーを実演可能となる。

いずれのゲームにおいても、Learning by Teachingを促進する手段としてロボットへの直接教示が可能なコンテンツを考案し、それぞれ学習効果が期待できることが判明した。また各実験には、3~8歳の子どもたちが参加し、この年齢帯において上記のようなCRRによる教育支援コンテンツが提供可能であることがわかった。また、子どもたちのパーソナリティの観点からまとめると、既存の教材や授業方法などでは自発性を引き出すことが困難な子どもたち（例：内向的性格、集中力が持続しにくい子ども等）において、CRRによって自然な自発的行動を誘引する効果がより発揮されると考えられる。もちろん既に自発性を備えた子どもたちに対しても、より強固な興味関心を与えることや、Learning by Teachingのように既知である知識等の強化

という点では貢献可能であろう。

対応可能なクラス編成についても、子ども1名対ロボット1台を想定した授業形態だけでなく、幼稚園での集団活動のような多人数の子どもたちがいる環境においても教育効果が確認されたことから導入可能であることが示唆された。現場の視点からも、少ない台数のロボットで大勢の子どもたちに対応することが可能であれば、現場の教師にとって大変助けになるというご意見を頂いた。

7.2 本論文による波及効果と展望

CRRは子どもの世話欲といった自発的な動機を上手く活かそうとする特徴があることから、従来の教師やチューターの役割をするロボットと比較して、社会的コンセンサスを得やすいのではと考えられる。今後の展望として、本論文にて示したCRRの行動設計指針を足掛かりとして、CRRの製品化や新たな応用場面の開拓を進め、日常生活におけるソーシャルロボット普及の起爆剤となることを期待している。

幼児教育支援のためのCRRの製品化・市場の開拓が実現すれば、家庭教育、保育、学校での授業などの場面で養育者や教師の支援が可能となる。実際に期待される効果として、言語など新しい知識の効率的な習得に貢献できることが挙げられる。学習活動において無理なく子どもたちの学習意欲を促進することができれば、保育や授業における教師の負担軽減に十分役立つと思われる。なかでも既存の教材や指導法において自発性の誘引が困難な子どもたちにおいても効果が見られたことから、新たな教育支援ツールのひとつとして貢献し得ると考えている。さらには、何かを学ぶという場面だけではなく、子ども自身の普段の生活におけるソーシャルスキルとして自発性・積極性を育てることに繋がると思われる。また、既存のおもちゃや教材と比較して、CRRは他者（CRRや友達）との関わり合いを多く経験させることで社会性を身に着ける効果があると思われる。ロボットと関わり合った経験から得るものはもちろんのことだが、その経験が友達・先生・親などとのコミュニケーションのきっかけ作りにも役立つと考えられる。

一方、CRRの製品化を実現するために解決すべき課題についてもしっかりと認識しておく必要がある。CRRの具体的な行動設計のために必要な知見がこれまでほとんどなかったのに対し、今回、複数の知見を新たに示すことができた。しかし、フィールドには多くの潜在的な知見があると予想される。また、ロボットの形態や技術仕様には依存しない汎用的な行動設計であることが望ましい。これらの点を踏まえ

て、引き続き、CRRの行動設計については検討・改良を進めて行く必要がある。

そして、子どもたちの性格などの違い（例：積極性の高い子ども、内向的な子ども、集中力が持続しにくい子ども等）によっても、CRRの持つ弱さ特性が有効な場合やそうでない場合、もしくは、ある性格の子どもたちには別の概念との複合的な行動設計によってより効果的なCRRを実現できる可能性も考えられる。このような子どもたちのパーソナリティの観点に注目した行動設計指針を確立できれば、より多くの子どもたちに対して、より深く教育支援可能なCRRが実用化できると考えている。また、その他の教育課題（算数、道徳教育など）に対してもCRRが適用可能なのかどうか調査することも、実用範囲を広げるために重要な課題である。実際に実験時のCRR運用の様子を見て頂いた現場教師の方からは、英語教育にとどまらず様々なコンテンツへの応用が期待されるといった意見を頂いている。そして、ロボットというツールにおける限界（可能な動作など）があるため、現状のロボットシステムが上手く活用できるかと問われると厳しいという意見も頂いた。今後は、一般の方々にとっての運用しやすさにも注目した研究も必要である。

謝辞

はじめに、この学位論文をまとめるにあたりご指導くださいました、筑波大学システム情報系教授 葛岡英明先生には厚く御礼申し上げます。そして本研究を進めるにあたり、時に厳しく時に優しく、懇切丁寧にご指導いただきました、東京大学大学院 情報理工学系研究科特任准教授 田中文英先生には心から感謝いたします。先生方には、突然他大学よりこの筑波大学システム情報工学研究科の博士後期課程へ進学したいと申し出てきた私を快く受け入れて頂きました。そしてご指導いただいたこの3年間、博士後期課程の学生として身に着けるべき、研究計画立案をはじめとした様々な研究活動のノウハウを多く学ぶことができました。重ねて感謝申し上げます。

さらには、大変お忙し中、副指導教員として多くのご助言を頂きました、筑波大学システム情報系教授 中内靖先生、筑波大学システム情報系准教授 鈴木健嗣先生には御礼申し上げます。そして、学位論文の執筆にあたり貴重なご助言を頂きました、筑波大学システム情報系教授 坪内孝司先生には感謝申し上げます。

また、本研究は、JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ、科研費(23680020)、および文部科学省グローバル COE プログラム「サイバニクス：人・機械・情報系の融合複合」といった多くの支援の受け行うことができました。この場を借りて、関係各所の皆さまに感謝申し上げます。

そして実験の実施に際しては、株式会社子ども英会話のミネルヴァ、つくば市立桜幼稚園、つくば市立東幼稚園、およびつくば市立大穂幼稚園の皆さまの絶大なるご支援・ご協力を頂きました。誠にありがとうございました。実験に参加して頂いた子どもたちや参加にご賛同いただいた保護者の皆様にも深く感謝いたします。山あり谷ありの研究生生活において、実験とはいえ、子どもたちがロボットと楽しそうに遊んでいる様子に触れる度に心が癒され、私は何度も救われました。そして、この子どもたちのために、より楽しみながら様々なことを学ぶことができるロボット実現に向

けて頑張らなくてとはと、多くの研究活力を奮い立たせることができました。また、研究室メンバーであった高橋利光君、田沢奈緒さんには、研究に関する議論や実験の手伝いに付き合ってもらい、日々の研究活動を支えて頂きました。その他にも葛岡研究室、森田研究室の皆様など多くの学生の方々が実験スタッフの仕事や膨大なビデオデータの分析に力を貸してくださいました。皆様のお力添え無くして、本研究を進めることはできませんでした。改めて御礼申し上げます。

私は、博士後期課程を過ごした筑波大学だけでなく、佐世保工業高等専門学校、信州大学、奈良先端科学技術大学院大学という様々な学校で学生時代を過ごし、多くの先生方や先輩・同期・後輩と出会い、「研究とは何ぞや」ということをたくさん学ばせて頂きました。今の私があるのも、様々な場所で得ることができた数えきれないほどの経験があるからです。この場を借りて、お世話になったすべての方に感謝します。

最後に、私の学生生活を長きに渡って温かく見守ってくれた父 孝行、母 信子をはじめとする家族・親戚の方々に深く感謝致します。特に、幼稚園教員の経験を持つ母や現役の小学校教員である叔母からは、私が研究に行き詰った際に実務経験者ならではの貴重な助言をたくさん頂きました。そして父や叔父には、学位取得に向かって邁進する中で心が折れそうな時など、ここぞという時に困難に立ち向かう力をたくさん頂きました。また専門分野や職種こそ違いますが、技術者として働く父は幼少の頃から私の憧れであり、人生の目標です。これからはそんな父の背中に追いつけるよう、そしてお世話になった皆様にご恩返しができるよう研究者として頑張っていきたいと思えます。

参考文献

- [1] 総務省. フューチャースクール推進事業. http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/kyouiku_joho-ka/future_school.html.
- [2] 文部科学省. 学びのイノベーション事業.
- [3] Sean Brophy, Gautam Biswas, Thomas Katzlberger, John Bransford, and Daniel Schwartz. Teachable agents: Combining insights from learning theory and computer science. In *In S. P. Lajoie and M. Vivet (Eds.), Artificial Intelligence in Education*, pp. 21–28, 1999.
- [4] J.-E. R. Lee, C. Nass, S. B. Brave, Y. Morishima, H. Nakajima, and R. Yamada. The case for caring colearners: The effects of a computer-mediated colearner agent on trust and learning. *Journal of Communication*, Vol. 57, No. 2, pp. 183–204, 2007.
- [5] Yuh-Ming Cheng and Peng-Fei Chen. Autonomous pedagogical agents to e-learning in elementary school. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Vol. 3, No. 4, pp. 378–380, 2012.
- [6] Zhi-Hong Chen, Chao Po-Yao, Ming-Chieh Hsu, and Teng Chin-Hung. Level up, my-pet: The effects of level-up mechanism of educational agents on student learning. *Journal of Educational Technology and Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 111–121, 2013.
- [7] T. Kanda, T. Hirano, D. Eaton, and H. Ishiguro. Interactive robots as social partners and peer tutors for children: a field trial. *Human-Computer Interaction*, Vol. 19, No. 1, pp. 61–84, 2004.
- [8] Jeonghye Han, Miheon Jo, Sungju Park, and Sungho Kim. The educational use of home robots for children. In *Proc. of the 2005 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-*

- MAN 2005*), pp. 378–385, 2005.
- [9] Z.-J. You, C.-Y. Shen, C.-W. Chang, B.-J. Liu, and G.-D. Chen. A robot as a teaching assistant in an english class. In *Proc. of the 6th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2006)*, pp. 87–91, 2006.
 - [10] Sangseok Yun, Jongju Shin, Daijin Kim, Chang Gu Kim, Munsang Kim, and Mun-Taek Choi. Engkey: Tele-education robot. In *Proceedings of the Third International Conference on Social Robotics, ICSR’11*, pp. 142–152, 2011.
 - [11] H. E. Palmer and D. Parmer. *English Through Actions*. Kaitakusha, 1925.
 - [12] J. J. Asher. The total physical response approach to second language learning. *The Modern Language Journal*, Vol. 53, No. 1, pp. 3–17, 1969.
 - [13] Jeonghye Han, Miheon Jo, Vicki Jones, and Jun H. Jo. Comparative study on the educational use of home robots for children. *Journal of Information Processing Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 159–168, 2008.
 - [14] Martin Saerbeck, Tom Schut, Christoph Bartneck, and Maddy D. Janse. Expressive robots in education: Varying the degree of social supportive behavior of a robotic tutor. In *Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems (CHI 2010)*, pp. 1613–1622, 2010.
 - [15] F. Tanaka and T. Kimura. The use of robots in early education: a scenario based on ethical consideration. In *Proc. of the 18th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2009)*, pp. 558–560, 2009.
 - [16] F. Tanaka and T. Kimura. Care-receiving robot as a tool of teachers in child education. *Interaction Studies*, Vol. 11, No. 2, pp. 263–268, 2010.
 - [17] J. Martin. Lernen durch lehren (ldl). <http://www.ldl.de/>.
 - [18] N. E. Sharkey. The ethical frontiers of robotics. *Science*, Vol. 322, No. 5909, pp. 1800–1801, 2008.
 - [19] M. Ghosh and F. Tanaka. The impact of different competence levels of care-receiving robot on children. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 2409–2415, 2011.
 - [20] Margalit Ziv and Douglas Frye. Children’s understanding of teaching: the role of knowledge and belief. *Cognitive Development*, Vol. 19, No. 4, pp. 457–477, 2004.
 - [21] Sony. Aibo. <http://en.wikipedia.org/wiki/AIBO>.

- [22] M. Okada, S. Sakamoto, and N. Suzuki. Muu : Artificial creatures as an embodied interface. *SIGGRAPH 2000, the Emerging Technologies : Point of Departure*, p. 91, 2000.
- [23] 岡田美智男, 松本信義, 塩瀬隆之, 藤井洋之, 李銘義, 三嶋博之. ロボットとのコミュニケーションにおけるミニマルデザイン. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 7, No. 2, pp. 189–197, may 2005.
- [24] Yuto Yamaji, Taisuke Miyake, Yuta Yoshiike, P. Ravindra S. De Silva, and Michio Okada. Stb: Intentional stance grounded child-dependent robot. In *Proceedings of the Second International Conference on Social Robotics, ICSR'10*, pp. 71–80. Springer-Verlag, 2010.
- [25] Javier R. Movellan, Fumihide Tanaka, Bret Fortenberry, and Kazuki Aisaka. The rubi project: Origins, principles and first steps. In *In Proceedings of the International Conference on Development and Learning (ICDL05)*, pp. 80–86, 2005.
- [26] Fumihide Tanaka, Bret Fortenberry, Kazuki Aisaka, and Javier R. Movellan. Developing dance interaction between qrio and toddlers in a classroom environment: Plans for the first steps. In *Proc. of the 14th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2005)*, pp. 223–228, 2005.
- [27] Fumihide Tanaka, Javier R. Movellan, Bret Fortenberry, and Kazuki Aisaka. Daily hri evaluation at a classroom environment: Reports from dance interaction experiments. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-robot Interaction, HRI '06*, pp. 3–9, 2006.
- [28] F. Tanaka, A. Cicourel, and J. R. Movellan. Socialization between toddlers and robots at an early childhood education center. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.(PNAS)*, Vol. 104, No. 46, pp. 17954–17958, 2007.
- [29] Paul Mussen and Nancy Eisenberg-Berg. *Roots of caring, sharing, and helping: The development of pro-social behavior in children*. WH Freeman, 1977.
- [30] 森下正康. 幼児の共感性が援助行動のモデリングにおよぼす効果. *教育心理学研究*, Vol. 38, No. 2, pp. 174–181, 1990.
- [31] 赤木和重. 1歳児は教えることができるか：他者の問題解決困難場面における積極的教示行為の生起. *発達心理学研究*, Vol. 15, No. 3, pp. 366–375, 2004.
- [32] R. Roscoe and M. Chi. Understanding tutor learning: Knowledge-building

- and knowledgetelling in peer tutors' explanations and questions. *Review of Educational Research*, Vol. 77, No. 4, pp. 534–574, 2007.
- [33] E. Aronson. The jigsaw classroom. retrieved march 21, 2000. <http://www.jigsaw.org>.
- [34] Gautam Biswas, Krittaya Leelawong, Daniel Schwartz, Nancy Vye, and The Teachable Agents Group at Vanderbilt. Learning by teaching: A new agent paradigm for educational software. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*, Vol. 19, No. 3-4, pp. 363–392, 2005.
- [35] 文部科学省. 幼稚園教育要領. http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/you/.
- [36] Aldebaran Robotics. Nao, 2008. [http://en.wikipedia.org/wiki/Nao_\(robot\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Nao_(robot)).
- [37] J. F. Kelley. An empirical methodology for writing user-friendly natural language computer applications. In *Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '83, pp. 193–196, 1983.
- [38] J. F. Kelley. An iterative design methodology for user-friendly natural language office information applications. *ACM Transactions on Office Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 26–41, 1984.
- [39] Aldebaran Robotics. Allandmarkdetection. <https://community.aldebaran-robotics.com/doc/1-14/naoqi/vision/allandmarkdetection.html>.
- [40] T. Kanda, R. Sato, N. Saiwaki, and H. Ishiguro. A two-month field trial in an elementary school for long-term human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 23, No. 5, pp. 962–971, 2007.
- [41] 加納政芳, 清水太郎. なにもできないロボット babyloid の開発. *日本ロボット学会誌*, Vol. 29, No. 3, pp. 298–305, 2011.
- [42] Y. Furuta, M. Kanoh, T. Shimizu, M. Shimizu, and T. Nakamura. Subjective evaluation of use of babyloid for doll therapy. In *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2012 IEEE International Conference on*, pp. 1–4, 2012.
- [43] Felix Jimenez, Masayoshi Kanoh, and Masato Goto. How do we feel when babyloid starts crying suddenly? In *Proceedings of the 7th International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction: User and Context Diversity - Volume 2*, UAHCI'13, pp. 355–362, 2013.
- [44] 宮下善太, 神田崇行, 塩見昌裕, 石黒浩, 萩田紀博. 顧客と顔見知りになるショッ

- ピングモール案内ロボット. 日本ロボット学会誌, Vol. 26, No. 7, pp. 821–832, 2008.
- [45] Masahiro Shiomi, Daisuke Sakamoto, Takayuki Kanda, Carlos Toshinori Ishi, Hiroshi Ishiguro, and Norihiro Hagita. Field trial of a networked robot at a train station. *International Journal of Social Robotics*, Vol. 3, No. 1, pp. 27–40, 2011.
- [46] Norman M. Fraser and G. Nigel Gilbert. Simulating speech systems. *Computer Speech and Language*, Vol. 5, No. 1, pp. 81–99, 1991.
- [47] D. Maulsby, S. Greenberg, and R. Mander. Prototyping an intelligent agent through wizard of oz. In *In Proceedings of International conference on Human Factors in Computing Systems (INTERCHI-93)*, pp. 277–284, 1993.
- [48] Kallirroi Georgila, Maria Wolters, Johanna D. Moore, and Robert H. Logie. The match corpus: a corpus of older and younger users’ interactions with spoken dialogue systems. *Language Resources and Evaluation*, Vol. 44, No. 3, pp. 221–261, 2010.
- [49] 岡本昌之, 山中信敏. Wizard of oz 法を用いた対話型 web エージェントの構築. 人工知能学会論文誌 = Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence : AI, Vol. 17, pp. 293–300, 2002.
- [50] 大澤博隆, 今井倫太. エージェントのインタラクション戦略探索のための没入型発見法. 人工知能学会論文誌, Vol. 28, No. 2, pp. 160–169, 2013.
- [51] A.L. Brown. Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of the Learning Sciences*, Vol. 2, No. 2, pp. 141–178, 1992.
- [52] 三宅なほみ, 白水始. 学習科学とテクノロジー. 放送大学教育振興会, 2003.
- [53] 大島純. 最近の学習研究の方法論とその成果. 教育システム情報学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 157–167, 2004.
- [54] Morana Alac, Javier Movellan, and Fumihide Tanaka. When a robot is social: Spatial arrangements and multimodal semiotic engagement in the practice of social robotics. *Social Studies of Science*, Vol. 41, No. 6, pp. 893–926, 2011.

研究業績一覧

査読付き学術論文

1. 松添静子, 田中文英, 教育支援ロボットの賢さの違いが子どもの英単語学習に及ぼす影響, 人工知能学会論文誌, Vol.28, No.2, 2013, pp.170-178. (論文第4章に対応)
2. 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, 2012, pp.78-95. (論文第3章に対応)

査読付き国際会議

1. **Shizuko Matsuzoe**, Hideaki Kuzuoka and Fumihide Tanaka, Progressive Development of an Autonomous Robot for Children through Parallel Comparison of Two Robots, Proceedings of the 2014 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI 2014), Late-Breaking Reports (LBR), Germany, Mar, 2014, in press. (論文第6章に対応)
2. **Shizuko Matsuzoe** and Fumihide Tanaka, How Smartly Should Robots Behave? : Comparative Investigation on the Learning Ability of a Care-Receiving Robot, Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2012), France, Sep, 2012, pp.339-344. (論文第4章に対応)

査読なし国内会議

1. 松添静子, 葛岡英明, 田中文英, WoZ 型との同時比較による自律ケア・レシーバー型ロボットの進歩的開発, 第31回ロボット学会学術講演会, 2013年9月. (論文第6章に対応)
2. 松添静子, 田中文英, ケア・レシーバー型ロボットによる集団の子どもたちを対象とした英単語学習支援, 2013年度人工知能学会全国大会(第26回), 2013年6月. (論文第5章に対応)

3. 松添静子, 田中文英, 子どもと対等な立場のロボットを用いた教育支援: ロボットの賢さの違いが子どもの英単語学習に与える影響, 第30回ロボット学会学術講演会, 2012年9月. (論文第4章に対応)
4. 松添静子, 田中文英, ケア・レシーバー型ロボットへの直接教示による幼児の英語動詞学習効果の検証, HAI シンポジウム 2011, 2011年12月. (論文第3章に対応)