名古屋大学 博士(工学) 学位論文

学習者に共感するパートナー型教育支援ロボットに関する研究

2015年

名古屋大学 大学院工学研究科

ジメネス　フェリックス

目次

第 1 章　序論 **1**
1.1　教育支援ロボット研究の背景 1
1.2　教師型教育支援ロボット 4
1.2.1　教師として授業を行うロボット 4
1.2.2　教師をアシストするロボット 4
1.3　パートナー型教育支援ロボット 5
1.3.1　一対多のパートナー型教育支援ロボット 5
1.3.2　一対一のパートナー型教育支援ロボット 8
1.3.3　パートナー型教育支援ロボットの問題点 10
1.4　本論文の目的 11
1.5　本論文の構成 14

第 2 章　ユーザーに同調して感情を表出できる感情表出法の提案 **18**
2.1　はじめに 18
2.2　従来の感情表出法の概要と問題点 19
2.2.1　アージ・システム 19
2.2.2　アージ・システムによる感情表出法 21
2.2.3　従来の感情表出法における意思決定相 24
2.2.4　従来の感情表出法における問題点 25
2.3　Ruseell の感情円環モデルを用いた感情表出法 26
2.3.1　Russell の感情円環モデル 26
2.3.2　ユーザの感情を理解する感情表出法のための意思決定相 26
2.4　実験 27
2.4.1　Ifbot の概要 27
2.4.2　実験アプリケーションの概要 28
2.4.3　実験における検証手法 31
2.4.4　実験結果 31
2.5　考察 33

2.6 まとめ 34

第 3 章 学習者に共感を実感させる共感表出法の提案 35
3.1 はじめに 35
3.2 教育支援ロボットにおける従来の感情表出法の問題点 36
3.3 二つの感情ベクトルを用いた共感表出法 36
3.3.1 一ベクトル法 I 37
3.3.2 二ベクトル法 I 39
3.4 実験 40
3.4.1 シミュレーション実験 41
3.4.2 被験者実験 42
3.5 考察 47
3.6 まとめ 48

第 4 章 長期的な共同学習に対応できる共感表出法への改良 50
4.1 はじめに 50
4.2 二ベクトル法 I の問題点 51
4.3 感情ベクトルの大きさと角度を変動する共感表出法への改良 52
4.3.1 一ベクトル法 II 52
4.3.2 二ベクトル法 II 54
4.4 実験 55
4.4.1 方法 55
4.4.2 評価基準 57
4.4.3 結果 58
4.4.4 学習者による評価理由の例 64
4.5 考察 65
4.6 おわりに 66

第 5 章 建設的相互作用を促すロボットの行動モデルの提案 68
5.1 はじめに 68
5.2 建設的相互作用 68
5.3 建設的相互作用を促す行動モデル 70
5.4 実験 72
5.4.1 学習効果の調査 73

5.4.2 ロボットの関わり方の評価 78
5.5 考察 80
5.6 おわりに 81

第 6 章 共感表出法と行動モデルの組み合わせによる学習効果 83
6.1 はじめに 83
6.2 行動モデルと二ベクトル法 II の課題 84
6.3 本ロボットの概要 84
6.3.1 問題提示時 85
6.3.2 正誤判定時 86
6.4 実験 86
6.4.1 方法 86
6.4.2 学習システム 87
6.4.3 評価基準 88
6.4.4 結果 88
6.5 考察 91
6.6 おわりに 92

第 7 章 結論 94
7.1 本研究の成果 94
7.2 今後の展望 96

参考文献 100

研究業績 107

謝辞 111

図一覧

1.1 Human-Robot-Interaction の応用分野 3
1.2 教育支援ロボットの分類 4
1.3 教師として授業を行うロボット 5
1.4 教師をアシストするロボット 6
1.5 人同士の協調学習を促進するロボット 7
1.6 学習者に議論を促すロボット 7
1.7 人から教わるロボット 8
1.8 ロボットの三種類の賢さ 9
1.9 学習者に共感するロボットの概要 10
1.10 問題を解き合うロボット 11
1.11 共感表出法の概要 12
1.12 行動モデルの概要 14
1.13 本ロボットの位置づけ 15
1.14 本論文の構成 17

2.1 アージ・システムによる感情表出法の概要 21
2.2 Russell の感情円環モデル上での各感情座標点 26
2.3 Ifbot の外観 28
2.4 Ifbot の表情表出機構 29
2.5 シミュレーション実験環境 30
2.6 アンケート結果 32
2.7 ゴール到達時間 32
2.8 身体的負荷総量 33

3.1 一ベクトル法 I の概要 37
3.2 二ベクトル法 I の概要 38
3.3 表出感情数の推移 40
3.4 感情変化数の推移 41
3.5 SPI 学習システム 44

3.6 SD 法による印象評価 45
3.7 アンケート結果 46

4.1 一ベクトル法 II の概要 53
4.2 二ベクトル法 II の概要 54
4.3 SD 法による印象評価 57
4.4 各群の 1 回目，10 回目の学習における正解数の平均 58
4.5 各群の向上点数の平均 58
4.6 親密度の SD 法によるアンケート結果 59
4.7 共感度の SD 法によるアンケート結果 62

5.1 行動モデルの概要 69
5.2 ロボットの考える表情例 70
5.3 ロボットの話しかける表情例 70
5.4 ロボットの落胆の表情例 72
5.5 ロボットの喜びの表情例 72
5.6 エージェント化した Ifbot 73
5.7 基本情報技術者試験学習システム 74
5.8 各群の Pre，Post-test の平均点 75
5.9 各群の向上点数の平均 76
5.10 各群の応用テストの平均 77
5.11 ロボット共同群と統制群の各学習者の応用テストの点数 77
5.12 置き去り率とロボットおよびのエージェントの解答正解率 79

6.1 ロボットの行動概要 85
6.2 数学学習システム 87
6.3 各群の事前，事後テストにおける点数の平均 89
6.4 各群の向上点数の平均 90
6.5 行動モデル + 二ベクトル法 II 群と行動モデル + ランダム表出群の無視率の平均 91

7.1 表情と動作による感情表現の例 97
7.2 課題遂行者の動作概要 98
7.3 目指す学習環境 99

表一覧

2.1 アンケート項目 31

3.1 表出感情数の平均と標準偏差 42
3.2 感情変化数の平均と標準偏差 42
3.3 二元配置分散分析の結果 47
3.4 フィッシャーの PLSD 法の結果 47

4.1 初回親密度の SD 法による二元配置分散分析の結果 60
4.2 最終回親密度の SD 法による二元配置分散分析の結果 60
4.3 最終回親密度の SD 法によるフィッシャーの PLSD 法の結果 60
4.4 初回共感度の SD 法による二元配置分散分析の結果 62
4.5 最終回共感度の SD 法による二元配置分散分析の結果 63
4.6 最終回共感度の SD 法によるフィッシャーの PLSD 法の結果 63

6.1 行動モデル＋二ベクトル法 II 群と行動モデル＋ランダム表出群の無視率の標準偏差 90

第1章

序論

1.1 教育支援ロボット研究の背景

ロボット関連の技術進展より，日常的な場面で人と自然な形で関わり合えるロボットの研究が注目されている．その中でも本研究では，学校・塾などの教育現場，家庭などの自主学習の場において学習者を支援する，教育支援ロボットに注目する．近年，国内は高齢化社会になりつつある．そのため，多くの高齢者が生涯学習の一環として家庭学習をすると予想される [48]．さらには，小中高生の家庭学習の重要であると考える．これらより，教育支援ロボットは家庭学習の支援にこそ適している．このロボットの性能が上がれば，一家に一台，もしくは一人に一台の普及が期待され，教育振興に貢献できるだけでなく，産業としても大きな可能性を持つと考えている．

前述した日常的な場面で人と自然な形で関わり合えるロボットを研究する分野は，Human-Robot-Interaction (HRI) とされている [18]．HRI の応用分野を図 1.1 に示す．この応用分野では，製造，公共，福祉などで区別され，その分野で活躍できるロボットが研究開発されている．例えば，製造分野では，頭と二本の腕を持つヒューマノイドロボット NEXTAGE が開発されている [32]．従来の産業用ロボットが人に代わることを目的に開発されてきたのに対して，NEXTAGE は人と一緒に製造ラインに配置され，人と協調して作業を行う目的で開発されたロボットである．人とロボットとの協調による生産効率の向上が試みられている．福祉分野では高齢者の孤独感軽減を目的として，高齢者に世話を促す赤ん坊ロボット Babyloid [28] などが研究されている．Babyloid は赤ん坊のように泣いたり，笑ったりすることで，高齢者に世話をする気持ち誘発している．これにより，高齢者の孤独感を軽減できると期待されている．公共分野では，科学館の展示物を説明するとともに館内を案内する案内ロボット [63] などが研究されている．ロボットが展示物を説明することで，子どもたちが展示物をより利用するようになること，子どもたちの興味をロボットの周囲のモノに誘導するきっかけになることなどが報告されている [63]．生活分野では，動物のように人に癒しの効果を与えるペットロボット [50] などが研究されて

いる．ペットロボットは，犬や猫などの小動物がモデルとなっている．飼い主の呼びかけに反応を示すことや感情を表出することで，本物のペットらしさを実現する手法などが研究されている．医療分野では，内視鏡外科手術を支援するロボットなどが研究されている [16]．手術支援ロボットは，外科医の手では手術できない箇所の手術や，目では見えなった箇所の可視化といった支援を行う．これにより，効果的で安全な治療の支援を行っている．

近年の HRI の成果に,「なぜ実ロボットなのか」という問いに対する答えが示されたことが挙げられる．画面上のエージェントに対して，3 次元空間に存在するロボットの優位性が，ロボットと人との相互作用を通して検証されてきた．例えば，顧客が商品の説明をロボットから受けた場合と画面上のエージェントから受けた場合を比べると，ロボットが持つ実空間での「存在感」が顧客の体験をよりリアルなものとし，顧客は商品に対する興味をより強く持つとの研究報告 [20] がある．また，色の名前当て課題の実験において，人は画面上のエージェントよりも，実ロボットのアドバイスを受け入れる傾向がある [64]．その他,「本をゴミ箱に捨てよ」というような心理的に難易度の高いタスクにおいて，多くの被験者が実ロボットの指示に従ったのに対して，画面上のエージェントには従わなかった [3] という報告がある．これらから，人に対して支援やアドバイスなどをするにあたり，ロボットの持つ身体性が効果的に働くと期待されている．

HRI の重要な分野に教育がある．教育においてもロボットの身体性が効果を発揮すると期待され，研究が始められている [45]．教育支援ロボットとは，学校・塾などの教育現場，家庭などの自主学習の場において学習者を支援するロボットのことである．図 1.2 は教育支援ロボットの分類を示す．教育支援ロボットには，教師のような行動を行う教師型教育支援ロボットと共同学習者のような行動を行うパートナー型教育支援ロボットの二種類がある．

教師型教育支援ロボットには，教師として授業を行うロボットと，教師をアシストするロボットがある．教師型教育支援ロボットは主に海外で研究が進められている．Kwon らは教師として授業を行うロボットが人による授業を代替可能であること [27] を，You らは教師をアシストするロボットを利用して授業を行うことで，通常授業に比べて生徒の集中力を向上できること [75] を示唆する結果を得ている．

パートナー型教育支援ロボットには，一体のロボットが複数の学習者と共同学習を行う一対多のパートナー型教育支援ロボットと，一体のロボットが一人の学習者と共同学習を行う一対一のパートナー型教育支援ロボットがある．小泉らは一対多のパートナー型教育支援ロボットを複数の学習者による協調学習の補助として用いることで，学習者の学習効果を向上できること [36] を，松添・田中は学習者が一対一のパートナー型教育支援ロボットと共に学習することで，学習者の学習意欲と学習効果を向上できること [42]

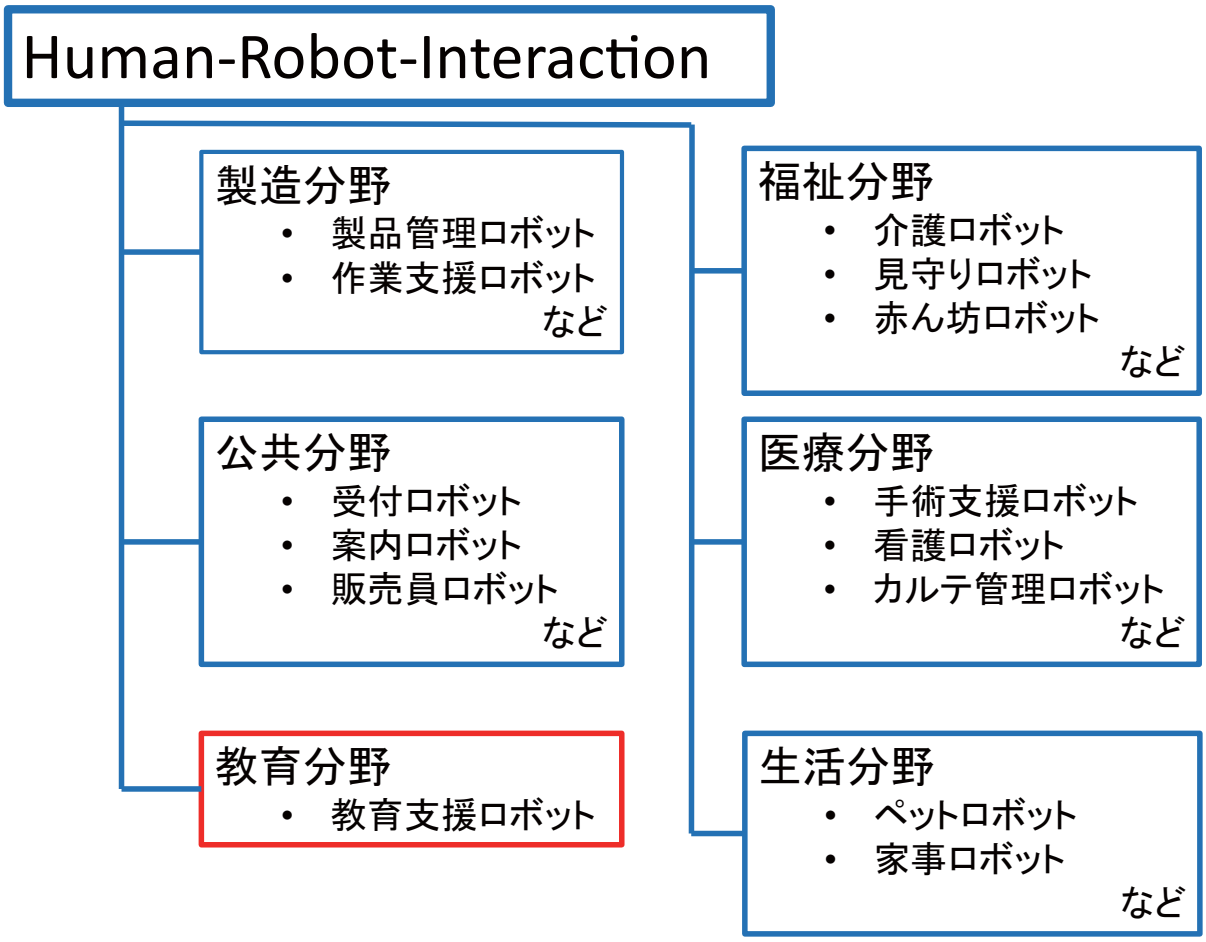


図 1.1: Human-Robot-Interaction の応用分野

を示唆する結果を得ている．

教育支援ロボットが学習者に良い影響を与える要因として，前述のようにロボットの持つ身体性が効果的に働くことが考えられる．ロボットの実空間における存在感は，学習者の五感に働きかけ，画面上のエージェントに比べて，支援やアドバイスを人に受け入れられやすくすると考えられる．

しかしながら，教育支援ロボットに関する研究は始まったばかりであり，研究事例は極めて少ない．特に，パートナー型教育支援ロボットに関する研究事例は，著者が注目して研究を開始した当初は 3 件のみであった．

超高齢化社会においては，多くの高齢者が生涯学習の一環として家庭学習をすると予想される [48]．また，小中高生の家庭学習の重要性は変わらない．パートナー型教育支援ロボットは家庭学習の支援にこそ適している．このロボットの性能が上がれば，一家に一台，もしくは一人に一台の普及が期待され，教育振興に貢献できるだけでなく，産業としても大きな可能性を持っている．そこで著者は，パートナー型教育支援ロボット

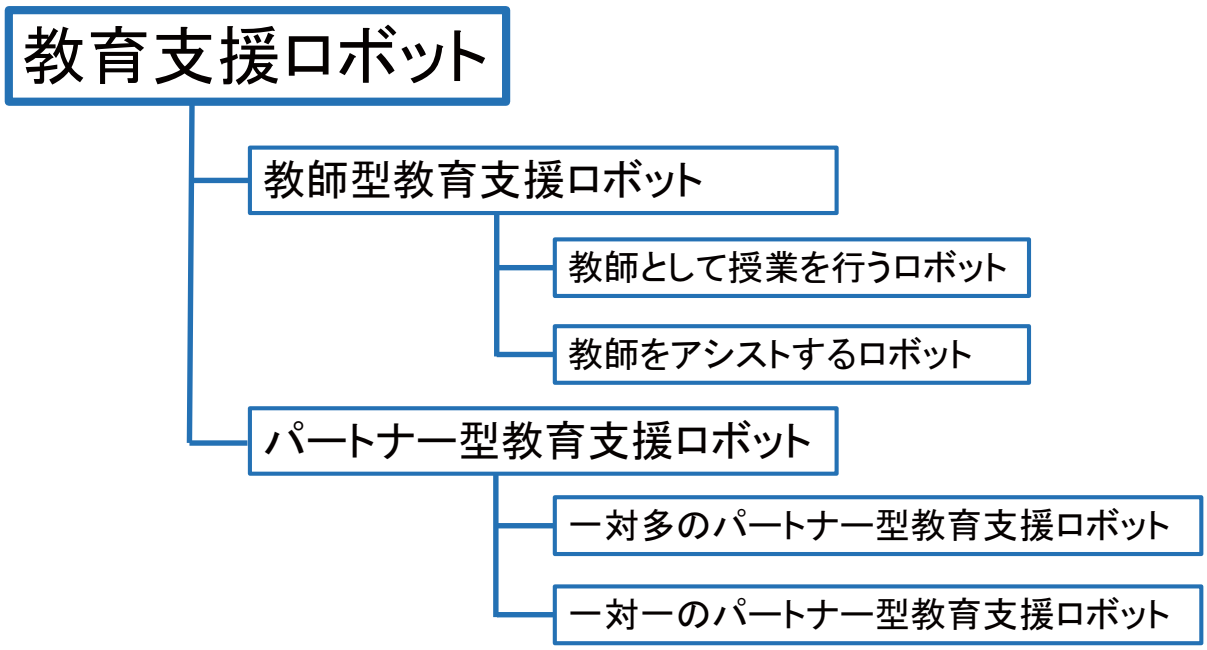


図 1.2: 教育支援ロボットの分類

に注目して研究を開始した.

1.2　教師型教育支援ロボット

1.2.1　教師として授業を行うロボット

教師として授業を行うロボットの例としては，Han らの腹部にあるモニターを用いて子どもに英語を教示する教師ロボットがある [13]．Han らのロボットは英語の教材をモニターに提示して，英単語の意味や簡単な英会話を教示する (図 1.3)．実験では，教師ロボットによる学習群，ロボットなしでモニターのみよる学習群，通常の教科書による学習群における学習効果を比較している．その結果，教師ロボットによる学習群では，他の学習群に比べて，英語学習に対する集中度と学習効果を高められることが示唆された [13].

1.2.2　教師をアシストするロボット

教師をアシストするロボットの例としては，You らのアシスタントロボット [75] がある．You らのロボットには，授業に関するデモンストレーションを行う機能が備えられており，教員の指示によってその機能が実行される (図 1.4)．実際にロボットを学校に導入してアンケート調査を行ったところ，ロボットがいない通常の授業に比べ，ロボット

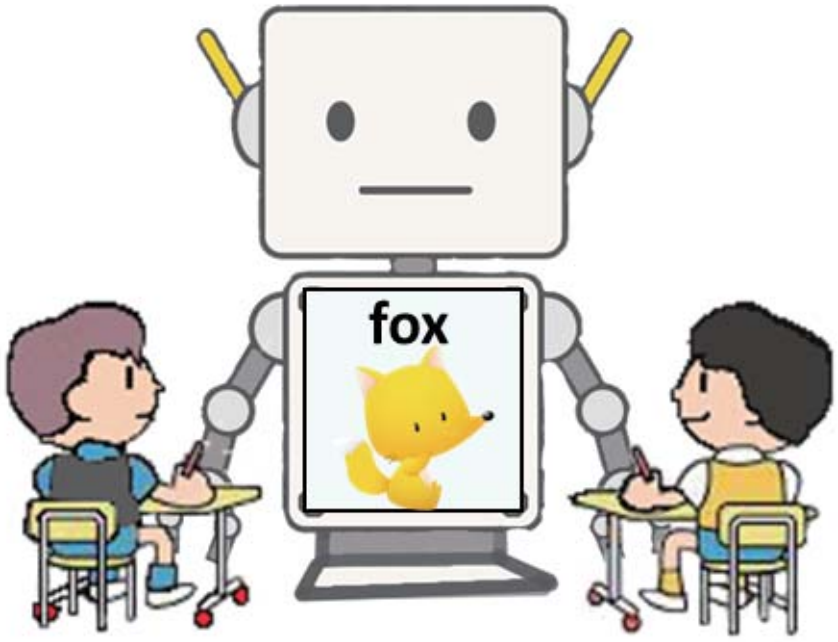


図 1.3: 教師として授業を行うロボット

が導入された授業では生徒の学習意欲を高められることが示唆された [75].

1.3 パートナー型教育支援ロボット

パートナー型教育支援ロボットの研究開発は，2011 年から始められたばかりであり，研究報告は極めて少ない．一対多のパートナー型教育支援ロボットに関する研究報告は 2 件，一対一のパートナー型教育支援ロボットに関する研究報告は 1 件のみである．本節では，それぞれのロボットの概要とその学習効果について述べる．

1.3.1 一対多のパートナー型教育支援ロボット

パートナー型教育支援ロボットは，教師型教育支援ロボットのように学習者の上の立場から学習支援を行うのではなく，学習者とほぼ同じ，もしくは同じ立場で学習支援を行う．現代社会では教員から教えられた問題がその場で解けることよりも，他者と話して問題を解き，そこからさらに次の問題や目標を見出す能力が求められている [4] [11]. このような能力の獲得を促す有効的な学習法に，人同士が共に学ぶ協調学習 [15] が挙げられる．神田らはコミュニケーションロボット Robovie を小学校に長期間導入し，子ど

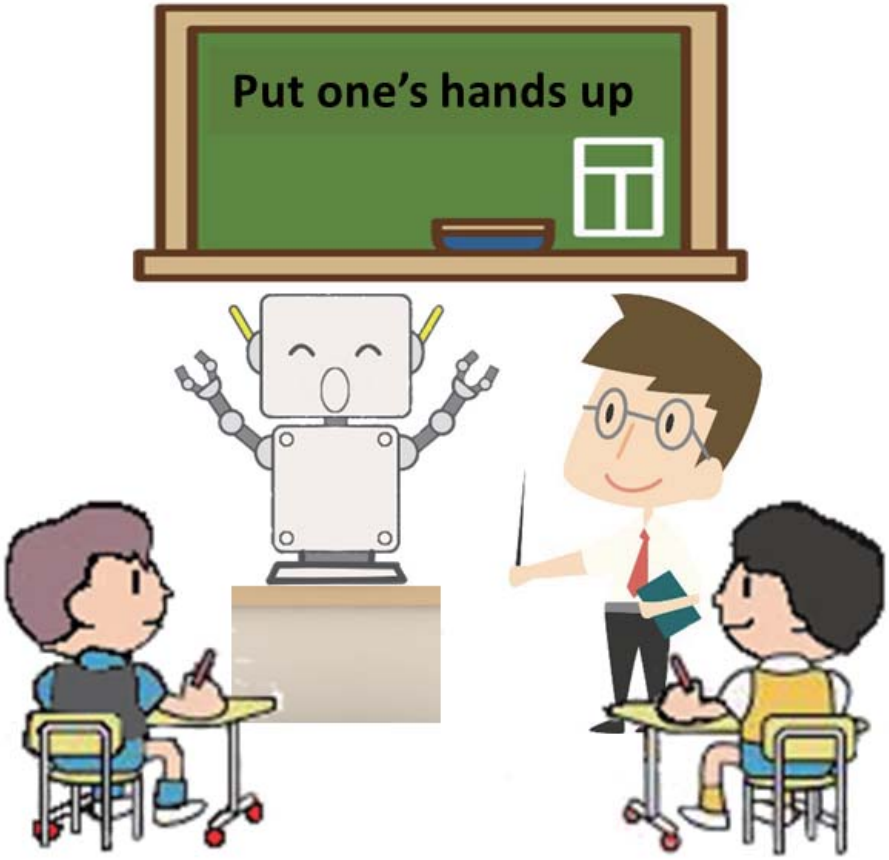


図 1.4: 教師をアシストするロボット

もとの相互作用の関係と影響を調査したところ，子どもたちは Robovie を仲間として受け入れ，積極的に関わろうとする傾向が見られることを確認した [29].

以下は，ロボットを子どもたちのパートナーとして協調学習に利用する試みである．一対多のパートナー型教育支援ロボットには，人同士の協調学習を促進するロボット [36] と，学習者に議論を促すロボット [65] がある．

人同士の協調学習を促進するロボット

小泉ら [36] は，人同士の協調学習を促進するために,「促進・支援する行動」と「子どもたちと関係性を作る行動」を備えたロボット (図 1.5) を開発した．促進・支援する行動では，子どもたちが互いを助け合うことを促したり，子どもたち自身で考案することを促したりする発話を行う．子どもたちと関係性を作る行動では，子どもたちの名前を呼んだり，自己表出したりする発話を行う．実験では，子どもたちが LEGO ブロックによる車ロボットの組み立てやその動きを制御するプログラミングを話し合いながら学ぶ協

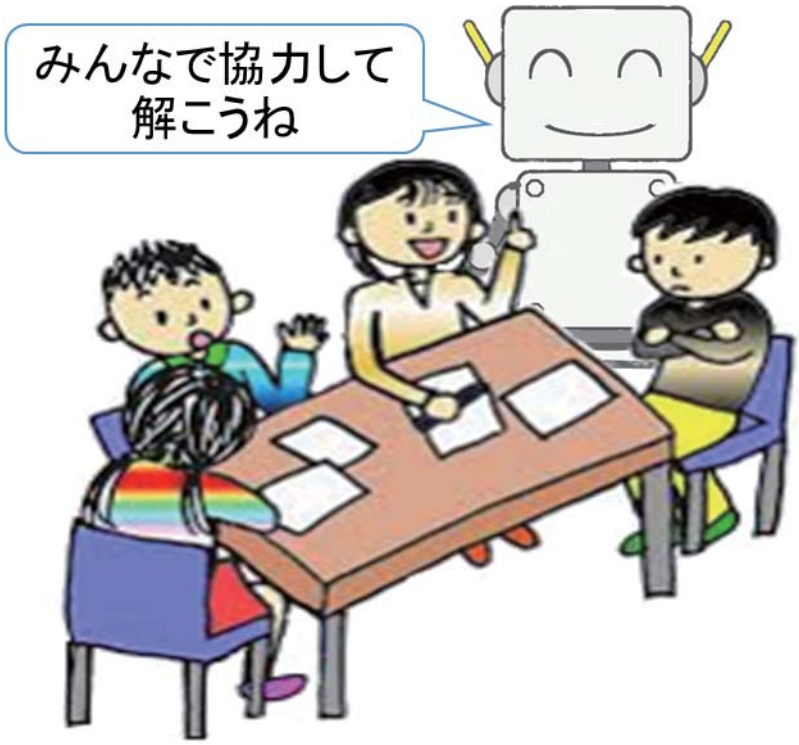


図 1.5: 人同士の協調学習を促進するロボット



図 1.6: 学習者に議論を促すロボット

調学習の状況にロボットを導入した.

その結果，ロボットは子ども同士の協調学習を促進できる可能性があることを示した. また，実験中の様子を観察すると，教室内に大人がいないにもかかわらず，ロボットと子どもたちのみで学びの場が作りあげられることがわかった．おとなしい子どもがリーダーシップを発揮するといった状況も起きており，ロボットならではの学習支援の可能性も見出された.

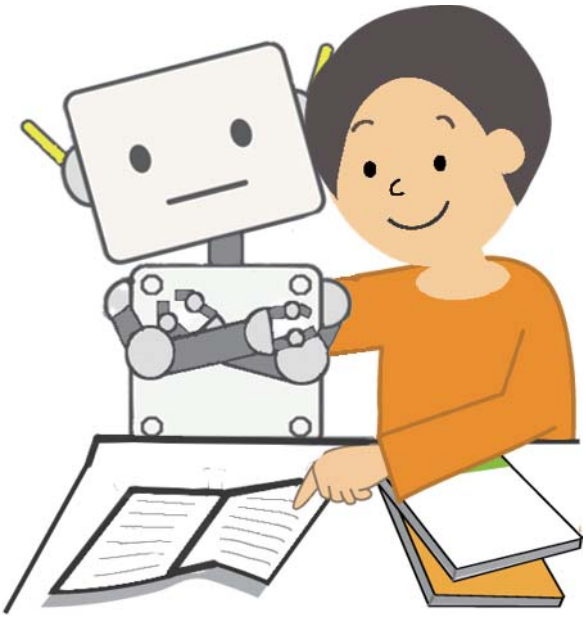


図 1.7: 人から教わるロボット

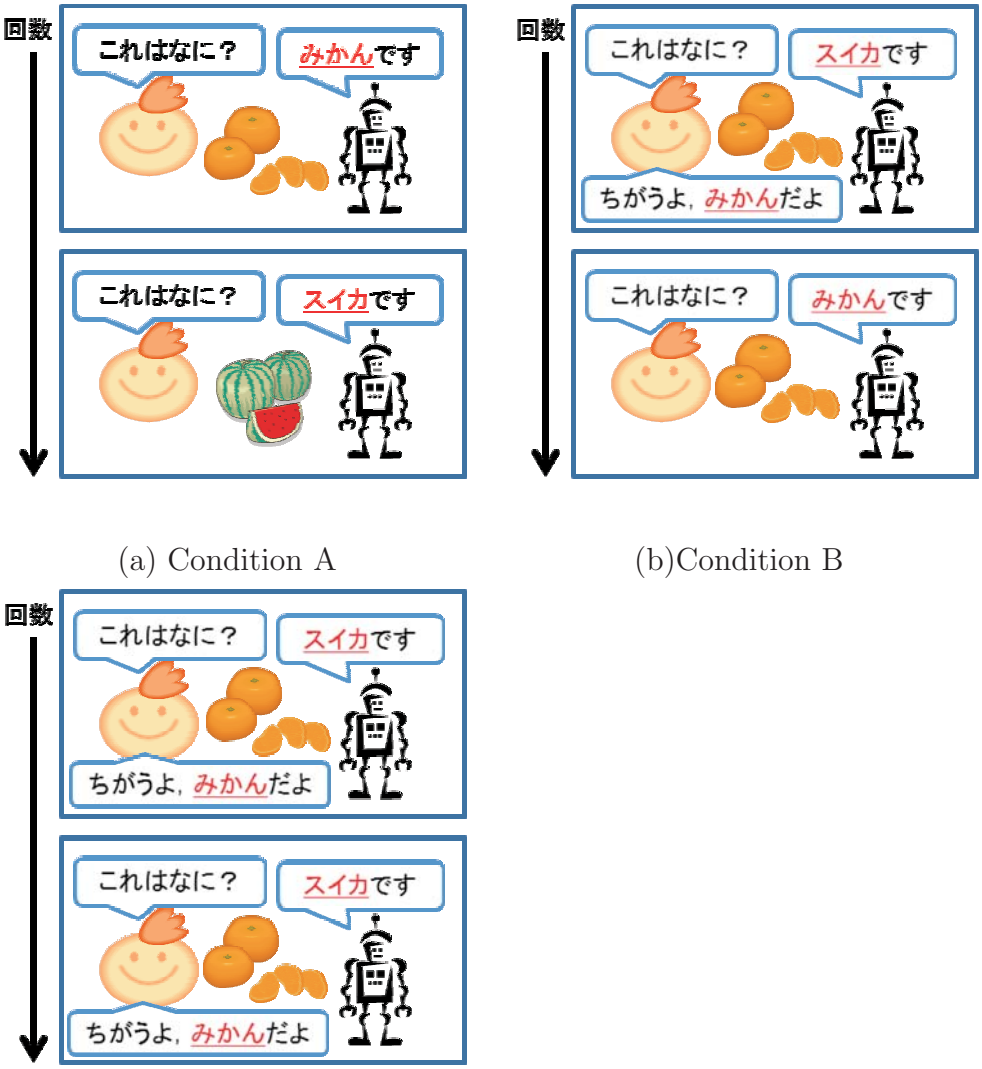
学習者に議論を促すロボット

白水ら [65] は，二人の大学生が協力して問題を解決する場面にロボットを導入し，二人の議論を促すためのロボットの会話方法を検討している．具体的には，物理の問題解決の際に人の発話を繰り返す「リボイス」という手法を開発してロボットに搭載し，実験を通してその効果を調査している．図 1.6 はリボイスを行っているロボットの様子を示す．

実験の結果，二人の大学生が協力して問題を解決する場面にリボイス機能を備えたロボットを導入することで，学習者の同士の議論を活発化させ，学習者の知識の自力構成が促されたことが示唆された．また，ロボットの遠隔操作履歴と実験中の様子を撮影したビデオを用いて，ロボットと人の相互作用の特徴を調査したところ，大学生はロボットのリボイスをヒントとして受け入れて，自力の知識構造を進める過程が起きていることが示された．

1.3.2　一対一のパートナー型教育支援ロボット

一対一のパートナー型教育支援ロボットとして，松添・田中 [42] が提唱した，学習者から教えられる立場となって共に学ぶロボット (図 1.7) がある．他者に教えることによって教えた本人が学習する学習法は，Learning by Teaching と定義されており，ロボットが問題を解く中で意図的に間違えることで学習者にロボットへの教示を促すことができ



(a) Condition A

(b)Condition B

(c) Condition C

図 1.8: ロボットの三種類の賢さ

ることが示されている [68]．松添・田中 [42] は，図形のお絵かきゲームを使用した英単語の学習において，ロボットの賢さの違いが子どもたちの学習にどのような影響を及ぼすかについて調査した．

実験では，英会話教室の子どもたちを，質問に対して全て正答する優等生タイプ (図 1.8(a)) のロボットと共に学習するグループ A，教示を受けると次回からはその質問に正答することができるようになる学習タイプ (図 1.8(b)) のロボット共に学習するグループ B，教示を与えても質問に対して誤答を繰り返す非学習タイプ (図 1.8(c)) のロボットと共に学習するグループ C に振り分け，学習効果を比較する実験が実施された．

その結果，グループ B の子どもたちが最も学習効果が向上していることを示した．こ

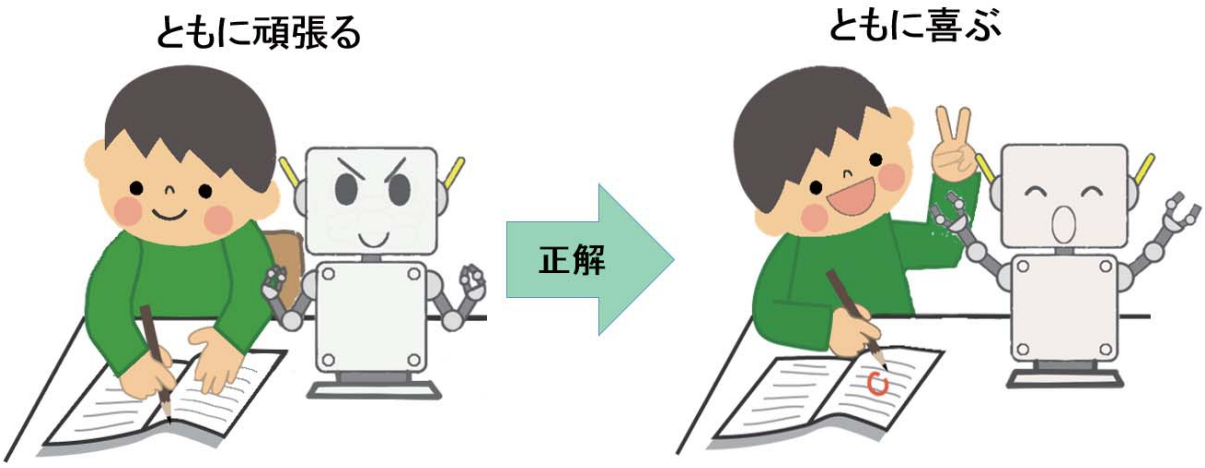


図 1.9: 学習者に共感するロボットの概要

のことから，子どもたちに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解提示が有効であり，さらにその回答に自信を持たせるためにはロボットに直接教示する機会を与えることが有効であることが示唆された．

1.3.3　パートナー型教育支援ロボットの問題点

前項までに述べたパートナー型教育支援ロボットの研究においては，長期にわたる実験はなされていなかった．しかしながら，HRI の研究事例に，人がロボットに対して飽きるという問題を示した神田ら [29] の研究報告がある．神田ら [29] はロボット Robovie を小学校に長期間導入し，子どもとの相互作用の関係と影響を調査したところ，最初，子どもたちはロボットと積極的に関わろうとする傾向が見られたが，日が経つにつれて，子どもたちとロボットとの相互作用を減少させていった．この飽きの問題は，パートナー型教育支援ロボットにも起きると考えられる．そこで本研究では，飽きを解決することを大きな課題とする．

この飽きの問題に対して，著者はロボットの感情表出法と，人とロボットの協調学習の枠組みに着目した．HRI の研究では，ロボットが感情を持つかのような表情表出や身体動作を行う感情表出法が提案されおり，自律的に心や感情を持つかのように行動し，人と身体的に相互作用するロボットは，人に楽しみや安らぎなどの精神的効果を与えることができると報告されている [1]．本研究では，ロボットの表情変化によって感情を表現する感情表出法に注目した．著者は，感情表出法を教育支援ロボットに実装するだけでは，単にロボットがその内部感情を表出するのみであり，飽きの問題は解決できないであろうと予想した．飽きを防ぐには，ロボットが学習者の気持ちに共感しているような

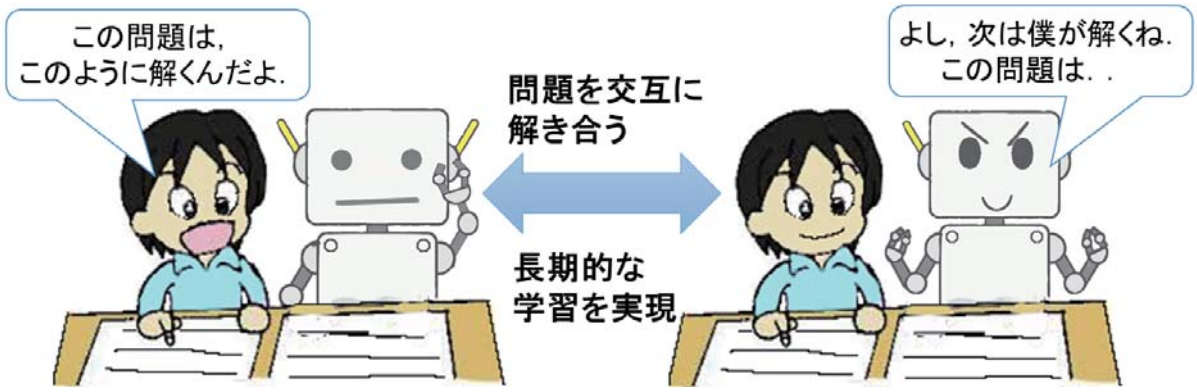


図 1.10: 問題を解き合うロボット

表情を表出することで，ロボットと共に学習していることを学習者に強く感じさせることが重要と考えた (図 1.9)．

認知科学では，学習者同士が意見を交換し，互いに協力して問題を解き合う協調学習が，学習者の学習意欲と学習効果を向上させ，長期的に学習を行うことが可能であると報告されている [40]．しかしながら，松添・田中の一対一のパートナー型教育支援ロボット [42] では，ロボットは学習者から教わる行動が主であり，ロボットから問題を解くことはほとんどない．そのため，ロボットと学習者が問題を解き合う協調学習を行えるようなロボットの行動モデルが存在しない．

著者は，ロボットと学習者による協調学習の実現のために，二人の学習者による協調学習の成立手法の一つである，建設的相互作用 [60] [40] に着目した．建設的相互作用は，二人の学習者が協力して交互に問題を解き合うことで起こる相互作用 [60] [40] であり，人とロボット間においても建設的相互作用は成立できると考える．そこでロボットが学習者と交互に問題を解き合うことで，持続的な協調学習を促せると期待する (図 1.10)．

1.4 本論文の目的

本研究では，学習者に共感を表出し，学習者と問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．そして，本ロボットが学習者に対する飽きを軽減して，学習者と交互に問題を解き合う協調学習を実現できるか検証する．本研究では，飽きを学習者がロボットの発話を無視することと，共感を学習者の問題の正誤判定に応じて，ロボットが喜びや悲しみを表出して，学習者にロボットが自分と同じ気持ちであると実感させることと定義する．この定義に基づいて，ロボットが共感していると学習者に感じさせる共感表出法と，交互に問題を解き合いながらロボットが学習者に建設的相互作用を促す

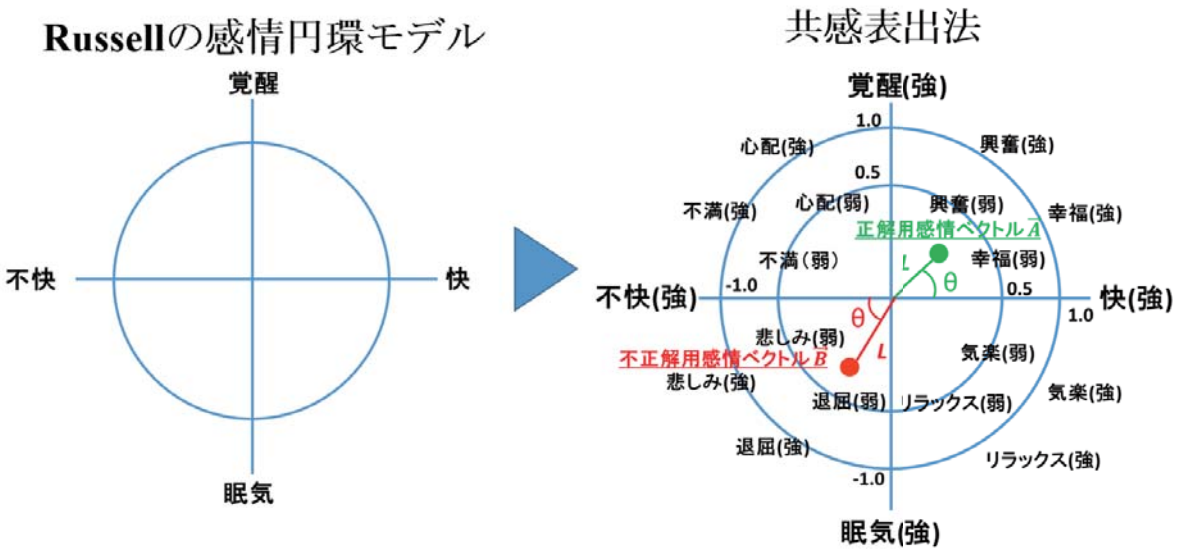


図 1.11: 共感表出法の概要

行動モデルを提案する．そして，共感表出法と行動モデルの二つをロボットに実装することで，学習者に共感して，学習者と問題を解き合いながら共に学び合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．

共感表出法は，感情表出法を基に開発する．従来の感情表出法として，自律的な環境適応行動選択システムとしての様相を持つ感情理論の一種である，アージ・システム [55] [67] を用いたロボットの感情表出法がある [1] [2]．しかしながら，この感情表出法では感情表出の過程が確定的であるため，同じ感情を繰り返し表出してしまい，ユーザはロボットの感情表出が画一的だと感じてしまうという問題がある．そこで本研究では，まずこの問題を解決するために，Russell の感情円環モデル [56] を用いて，人の徐々に変化していく感情に同調して多様な感情を表出できる感情表出法を提案する．円環モデルは，感情を，快-不快と覚醒-睡眠の 2 軸で表現される 2 次元座標空間上に写像するものである．この 2 次元空間内に感情ベクトルを配置し，これをユーザの感情変化に応じて徐々に移動させることで円環モデル上の感情に対応する表情を表出する．感情ベクトルとは，表出する感情を決定するための基準となるベクトルのことを指す．これにより，ユーザのロボットから受ける画一感を防げると考える．

次に，ユーザに同調する感情表出法を基に，正解と不正解用の二つの感情ベクトルを用いて感情を表出することで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法を提案する (図 1.11)．共感表出法では，学習者が問題に正解した場合は正解用感情ベクトルを，不正解した場合は不正解用感情ベクトルを基に表出する感情を決定する．上

述の Russel の感情円環モデルを用いた感情表出法では，表出する感情を決定するための感情ベクトルは一つであった．そのため，連続した正解に応じて喜びの感情を表出している直後の不正解に対して大いに悲しむなど，極端な感情の変化に対応することは難しい．

二つの感情ベクトルを学習者の正誤判定と所要解答時間に応じて変動させることで，学習者の学習経過に応じてロボットが異なる感情を表出できる．例えば，学習者が連続で正解した場合には，正解用感情ベクトルは内側から外側に移動していき，快側の強い感情を表出する．そして，その直後に学習者が不正解した場合には，正解用ではなく不正解用感情ベクトルが内側から外側に移動し，不快側の感情を表出する．また，学習開始の頃，問題を解くのに時間がかかり，不正解が多い場合には，不正解用の感情ベクトルが眠気側に移動し，ロボットが眠気かつ不快側の感情を表出することが多くなる．学習が進むにつれて学習者が短時間で正解することで，正解用感情ベクトルが覚醒側へ移動し，ロボットは覚醒かつ快側の感情を表出していく．上記のように感情ベクトルを正解・不正解と所要時間により個別に更新し，正誤判定に応じて感情ベクトルを切り替えて感情を表出すことで，正誤判定と所要解答時間に応じて学習者が抱くであろう悲しみや喜びの感情に対応した感情をロボットが表出できると考える．そして，ロボットが自分の気持ちに共感しているように学習者に感じさせことでロボットに対する飽きを軽減できると期待できる．

前述のように，二人の学習者による効果的な協調学習の成立手法として，建設的相互作用がある [60] [40]．建設的相互作用は，二人の学習者が同じ問題を解くとき，実際に問題を解いて解き方を提供する「課題遂行者」と，それを俯瞰して意見を聞く「モニター」に役割がわかれて，協力して問題を解き合うことで起こる．人同士の協調学習における課題遂行者の行動例として，問題を常に正しく解答するのではなく，学習の始めは誤った解答を提示し，学習が進むにつれて正しく解答できるようにする行動がある [61]．この行動は課題遂行者役の学習者が行うことで，パートナーの学習者に共に学んでいることを実感させ，学習意欲と学習効果を向上させるという研究報告がある [62]．モニターの行動例では，考え込む表情を表出ながら，パートナーの学習者に問題を解くように促して，互いの意見を交換し合う行動がある [71]．この行動をモニター役の学習者が行うことで，パートナーの学習者に自発的に問題を解くことを促すとともに，自身の理解を見直して学習効果を向上させるという研究報告がある [47]．

これらの行動はロボットでも疑似的に再現可能である．例えば，著者 [22] は，学習が進むにつれて解答の正解率が上昇する学習能力があるロボットと人が共に学ぶことで，教育学で示されている学習効果と同様な効果を促すことができると示唆する結果を得ている．また，松添・田中 [42] は,「わからない」などを発話して考え込むような表情を表出するロボットと人が共に学ぶことで，学習者に自発的に問題を解くことを促して，学習

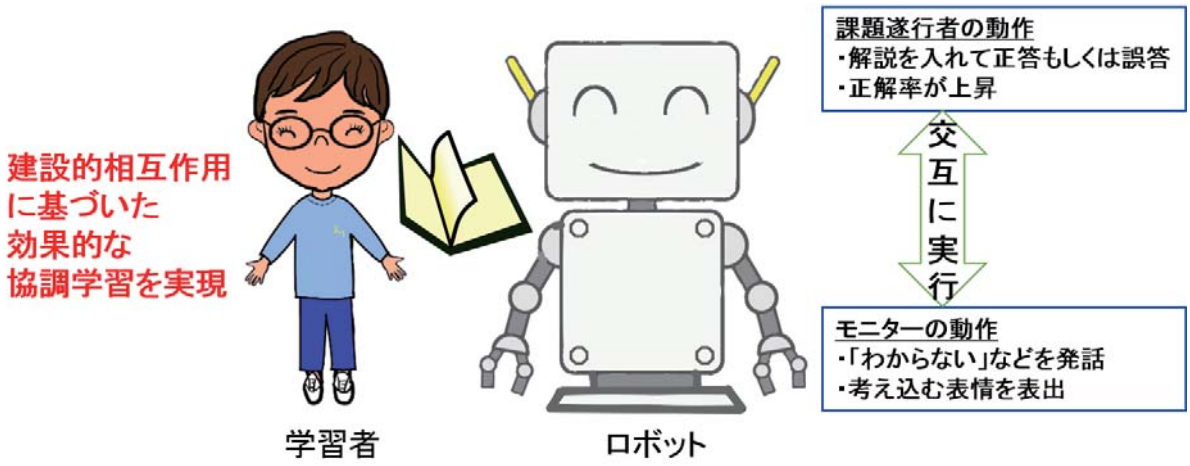


図 1.12: 行動モデルの概要

意欲を向上できると示唆する結果を得ている．そこでこれらの行動を交互に実行する行動モデル (図 1.12) を提案し，行動モデルを実装したロボットが学習者と学習することで，学習者と交互に問題を解き続ける建設的相互作用を実現でき，学習者と効果的な協調学習を行えると期待する．

そして，共感表出法と建設的相互作用を促す行動モデルの二つをロボットに実装することで，学習者に共感して，学習者と問題を解き合って共に学び合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．ロボットは，学習システムの問題が提示された時は，建設的相互作用を促す行動モデルを基に行動を，正否判定時には共感表出法を基に感情表出を行う．本研究で提案する共感表出法と建設的相互作用を促す行動モデルは従来研究になく，著者の独創である．そのため，これらを実装したロボットも，単独の学習者を対象としているが，松添・田中のロボットとは異なり，ロボット自身が主体的に問題解決に取り組み，学習者に効果的な協調学習を促す世界初のロボットである (図 1.13)．

1.5　本論文の構成

本論文の校正を図 1.14 に示す．本論文は 7 章で構成されている．第 1 章では，本研究の背景と目的を述べた．第 2-4 章では，前述した一点目の飽きの問題を解決するために取り組んだ，感情表出法および共感表出法における研究成果について述べる．第 5 章では，二点目の学習者に建設的相互作用を促すロボットの行動モデルにおける研究成果について述べる．そして，第 6 章では，共感表出法と行動モデルを組み合わせ，学習者に飽きを感じさせず，効果的に協調学習を行えるパートナーロボットに関する研究成果に

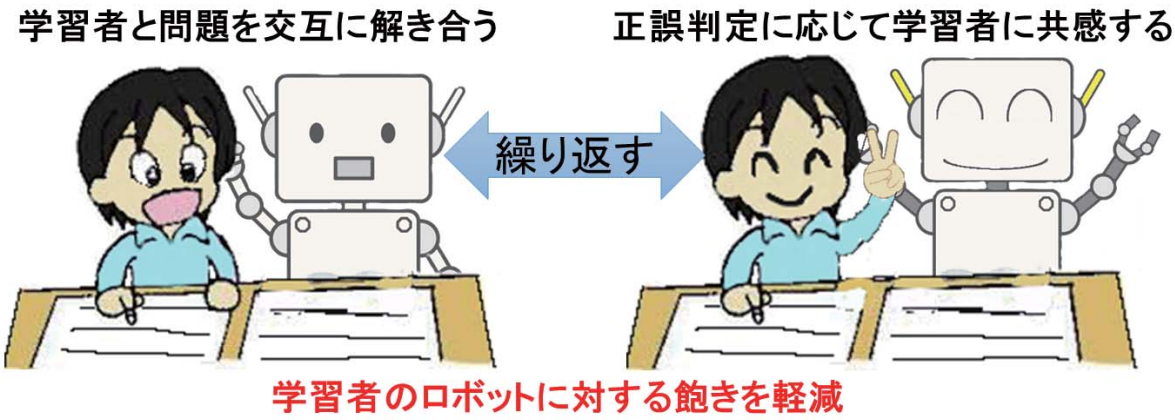


図 1.13: 本ロボットの位置づけ

ついて述べる．そして，第 7 章で，結論と今後の課題を述べる．下記にそれぞれの章における概要を記す．

第 2 章では，ユーザに同調して感情を表出できる感情表出法に対する研究成果について述べる．従来の感情表出法では，感情を決定して表出するまでの過程が確定的である．そのため，従来の感情表出法を用いたロボットとユーザが共に作業すると，ロボットはユーザとは異なる感情を表出してしまうことが多く，ユーザはロボットとの相互作用にすぐに飽きてしまう問題がある．そこで Russell の感情円環モデル [56] を用いて，ユーザに同調して感情を表出できる感情表出法を提案する．そして，被験者実験を通して本手法の有効性について検証した．

第 3 章では，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法に対する研究成果について述べる．第 2 章で提案した感情表出法をロボットに実装することで，人に近い感じでロボットの感情表出を可能とした．しかしながら，前述したように，感情表出法をロボットに実装するだけでは，単にロボットがその内部感情を表出するのみであり，飽きの問題が再び起こってしまうと考えられる．そこで学習者がロボットと共に学習していることを強く感じさせ，飽きを防止するために，第 2 章の感情表出法を基にロボットが学習者に共感しているように感情を表出する共感表出法を提案する．共感表出法は，正解用と不正解用の二つの感情ベクトルの角度を基に，問題の正誤判定に応じて学習者に共感するように感情を表出する手法である．感情ベクトルは学習者の正誤判定に応じて X 座標を，所要解答時間に応じて Y 座標を変動する．提案した共感表出法を二ベクトル法 I と呼ぶ．実験では，二ベクトル法 I を用いたロボットと大学生が共に学習する実験を実施することで，二ベクトル法 I が与える心理効果を検証した．

第 4 章では，感情ベクトルを用いた共感表出法の改良に関する研究成果について述べ

る．第 3 章で提案した共感表出法は，正解用と不正解用の二つの感情ベクトルの角度を基に感情を表出する．しかしながら，感情ベクトルの X または Y 座標が大きく変動しない限り，感情ベクトルの角度が変化しないため，同じ感情が繰り返し表出されるという問題点が起きる．そのため，長期的な共同学習においては学習者にロボットが共感していると実感させるのは，難しいと考える．そこで長期的な共同学習に対応できるために，感情ベクトルの大きさと角度を正誤判定と所要時間に応じて変動し，感情ベクトルの振幅と角度を基に多様な感情を表出できる共感表出法へと改良する．改良した共感表出法を二ベクトル法 II と呼ぶ．そして，被験者による実験を通して二ベクトル法 II の有効性を検証した．

第 5 章では，建設的相互作用を促すロボットの行動モデルに対する研究成果について述べる．前述したようにロボットと学習者による協調学習の実現のために，二人の学習者による協調学習の成立手法の一つである，建設的相互作用 [60] [40] に着目した．そこで，二人の学習者が交互に問題を解くことで起こる建設的相互作用を学習者に促し，学習者と交互に問題を解き合うロボットの行動モデルを提案する．実験では，行動モデルをロボットおよび画面上のエージェントに実装して比較実験を実施することで，行動モデルを用いたロボットとの協調学習が人同士の協調学習と同様な学習効果を与えるか検証した．

第 6 章では，第 4 章の二ベクトル法 II と第 5 章の建設的相互作用を促す行動モデルを組み合わせたことに対する研究成果について述べる．共感表出法と行動モデルを組み合わせることで，学習者に共感して，学習者と問題を解き合って共に学び合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．実験では，中学生を対象に共感表出法と行動モデルを組み合わせたロボットと共に学習する学習実験を実施することで，本ロボットの有効性を検証した．

第 7 章において本論文をまとめる．また，今後の展望について述べる．

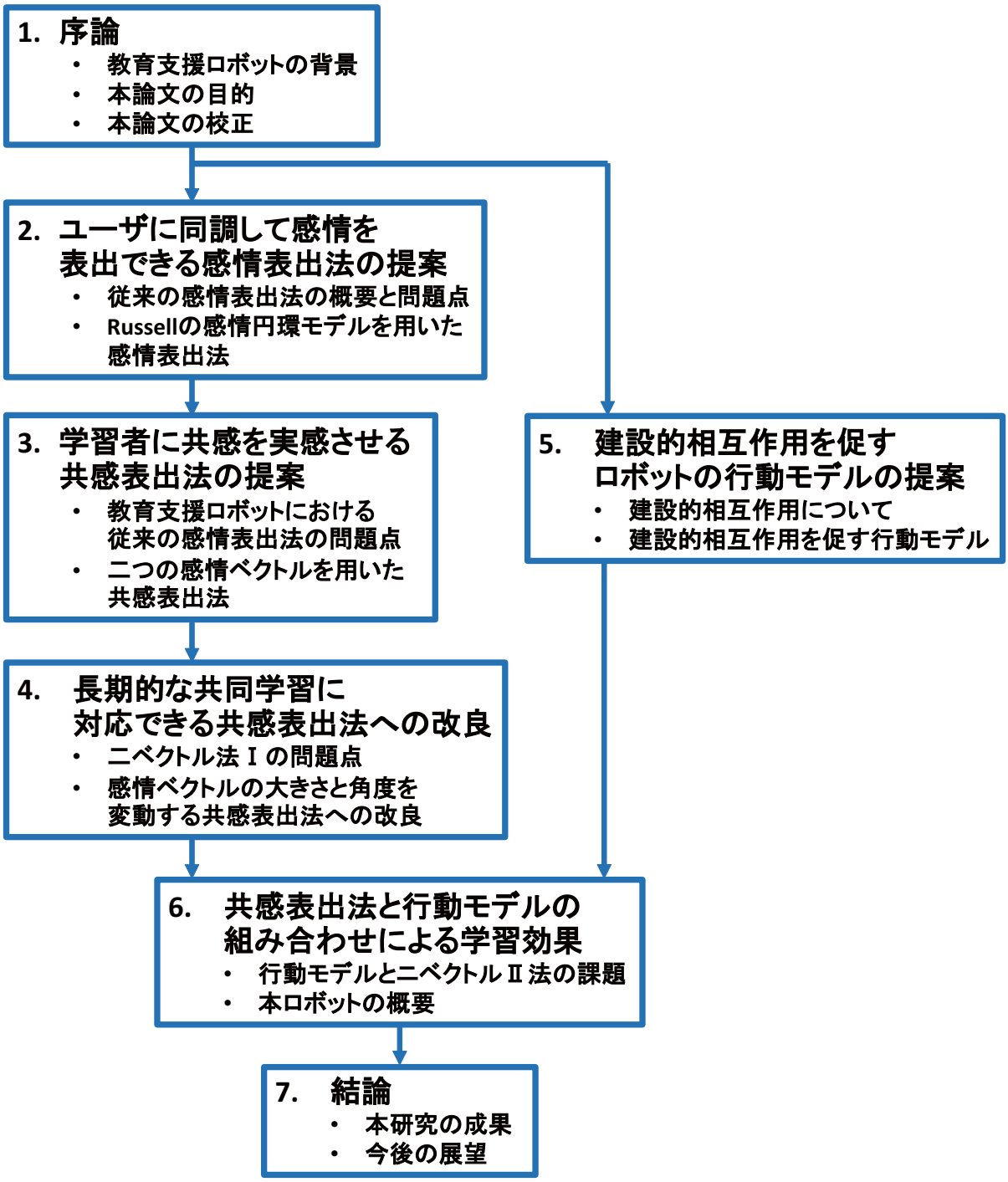

1. 序論
• 教育支援ロボットの背景
• 本論文の目的
• 本論文の校正
2. ユーザに同調して感情を表出できる感情表出法の提案
• 従来の感情表出法の概要と問題点
• Russellの感情円環モデルを用いた感情表出法
3. 学習者に共感を実感させる共感表出法の提案
• 教育支援ロボットにおける従来の感情表出法の問題点
• 二つの感情ベクトルを用いた共感表出法
5. 建設的相互作用を促すロボットの行動モデルの提案
• 建設的相互作用について
• 建設的相互作用を促す行動モデル
4. 長期的な共同学習に対応できる共感表出法への改良
• ニベクトル法Ⅰの問題点
• 感情ベクトルの大きさと角度を変動する共感表出法への改良
6. 共感表出法と行動モデルの組み合わせによる学習効果
• 行動モデルとニベクトルⅡ法の課題
• 本ロボットの概要
7. 結論
• 本研究の成果
• 今後の展望

図 1.14: 本論文の構成

第2章

ユーザーに同調して感情を表出できる感情表出法の提案

2.1　はじめに

Human-Robot-Interaction(HRI) の研究では，ロボットをより人らしくするために，ロボットが感情を持つかのように感情を表出する感情表出法が注目され，研究成果が報告されている．例えば，文献 [39] [73] では，自律的に心や感情を持つかのように行動し，人と身体的に相互作用するペットロボットを開発しており，この相互作用によって，人に楽しみや安らぎなどの精神的効果を与える可能性を示している．文献 [5] [6] では，強調された眉，目，口，耳を有したロボット Kismet の開発して，Arousal，Valence，Stance の 3 軸からなる 3 次元空間を用いて感情を表出する感情表出法を提案している．そして，感情表出法を用いたロボットはユーザーに感情を伝えやすく，相互作用がうまく行えることを示唆する結果を得ている．これらのように，感情を一種自律的な機能として用いることで，人を含めた環境とのダイナミクスから感情的に振る舞うことができるロボットのシステムを設計する手法が一般的に行われるようになってきた．また従来研究では，自律的な環境適応行動選択システムとしての様相を持つ感情理論の一種である，アージ・システム [55] [67] を応用したロボットエージェントの感情表出法を提案しており，人に与える精神的な効果について検証も行っている [1] [2]．その結果，アージ・システムによる感情表出法は，従来の感情表出法に比べて，自身の身体的・生理的な状態を多様な感情表出によって伝達し，人に楽しみや安らぎなどの正方向の精神的作用効果を与えることが明らかとなった．

しかしながら，アージ・システムを用いた感情表出法は，感情表出を行う過程すなわち行動のための意思決定が確定的であるため，ユーザに与える印象が一意に定まりやすいという問題点がある．従来研究では主に人とロボット間の会話における相互作用で評価実験が実施されいてる．人とロボット間の会話では，ロボットは人から質問に対して

返答する際に喜怒哀楽などの単純な感情を表出する．これにより，ロボットが表主する感情は少ない方が相手に違和感を与えることなく，効率良く会話が成立する．しかしながら，人はいきなり喜びや悲しみの感情を抱くことはなく，感情は徐々に変化していくものである．例えば，人が問題を解きながら学習している場合，一度，問題に正解すると学習者は喜び，続けて正解すると，喜びの気持ちはさらに強くなる．

一方で問題に正解した後に不正解した場合，いきなり悲しみの感情を抱くのではなく，平常の感情に戻ると考えられる．そのため，ロボットが人と共に学習や作業を行う場合，確定的に感情を表出するよりもロボットは人の徐々に変化していく感情に同調して多様な感情を表出することで，人はロボットの感情を読み取りやすくなり，効果的に相互作用できると考える．

そこで本章では，Russell の感情円環モデル [56] を用いて，ユーザである他者の感情表現を積極的にエージェント自身の感情と同調させる感情表出法を提案する．Russell の感情円環モデルは，感情を，快-不快と覚醒-睡眠の 2 軸で表現される，ニ次元座標空間上に写像したものであり，座標点などを基準にして感情を表出する．したがって，各感情は二次元座標上の座標点として表現されるため，それぞれの感情点間の距離を定量的尺度として用いることができる．ユーザの感情をこの空間上に写像できれば，明示的にエージェントにユーザの感情を知らせることができ，ロボットはユーザに同調して，ユーザと同じような感情を表出できると考える．

本章の構成は，次の通りである．まず，2 節において，従来の感情表出法である，アージ・システムによる感情表出法の概要と問題について概説する．次に，3 節でユーザの感情に同調して感情を表出する感情表出法を提案する．4 節において提案手法の有効性を確認するための実験結果について報告した後，5 節で考察する．最後に 6 節でまとめる．

2.2 従来の感情表出法の概要と問題点

2.2.1 アージ・システム

従来の感情概念を拡張した感情理論の一つにアージ理論がある．本理論では，高度な感情の野生合理性をもつものとし，遺伝的に与えられた基本的な枠組みによって既定された環境適応行動選択システム（心的ソフトウェア）と見立てている．感情の野生合理性とは，動物が縄張りの侵入者に対して怒りの感情を持ち，侵入者へ攻撃行動を行うといった，生存のために有効とさせる感情に対応した行動プログラムのことである [72]．また，心的ソフトウェアとは，学習・認知・記憶・意識・身体機能の生理的活性化などの心身能力を，起動された感情固有の目的に沿って制御するというものである．以上のよ

うな「目的を伴って」起動される感情を「アージ」，心的ソフトウェアを「アージ・システム」と呼ぶ [55] [67].

アージ

アージ・システムでは，感情概念をアージとムード (後述) に分割している．アージの例を示すと,「自分の宝物が他人に故意に壊された」ときなどに起こるアージは,「怒りアージ」である．このような一般的な感情概念のアージに加えて,「お腹が空いた」などのような内的信号によるものも個別の心の働きによるものと捉え,「生理的アージ」が引き起こされるとしている．このように，一般的には感情の働きによるものとは考えられないような生理的機能も，心の働きによるものとして，いわば感情的に扱うのがアージ・システムの大きな特徴である．

ムード

ムードとは，それ自体が固有の目的をもつ感情または心の働きであるアージとは対照的に，それ自体の活動目的が存在しない心の働きのことである．例えば,「喜び」や「悲しみ」の感情はムードとなる．怒りアージでは「加害者に対する加罰行動プラン」というような活動プランが必ず生成されるが，喜びや悲しみにはこのような活動プランが存在しない．つまり，喜びアージや悲しみアージは存在せず，むしろそのような働きは「誇示アージ」によるものであるとしている．一方で，ムードの役割は重要で，ムードは特定のアージを起動させやすくしたり，させにくくしたりするといった，アージ起動の活性・不活性を促す働きがある．

アージの働きの 4 相

アージ・システムには，起動相・意思決定相・行動相・事後評価相の 4 相があり，すべてのアージはこれらが段階的に順次処理されることで機能する．順に各相での処理内容を述べると，起動相では状況認知の過程を，意思決定相ではアージ起動によって発生する行動プランの決定を，行動相では決定された行動プラン実施の終始を，事後評価相では反省・学習を実行させるアージ (認知アージの一種) の起動をそれぞれ行う．

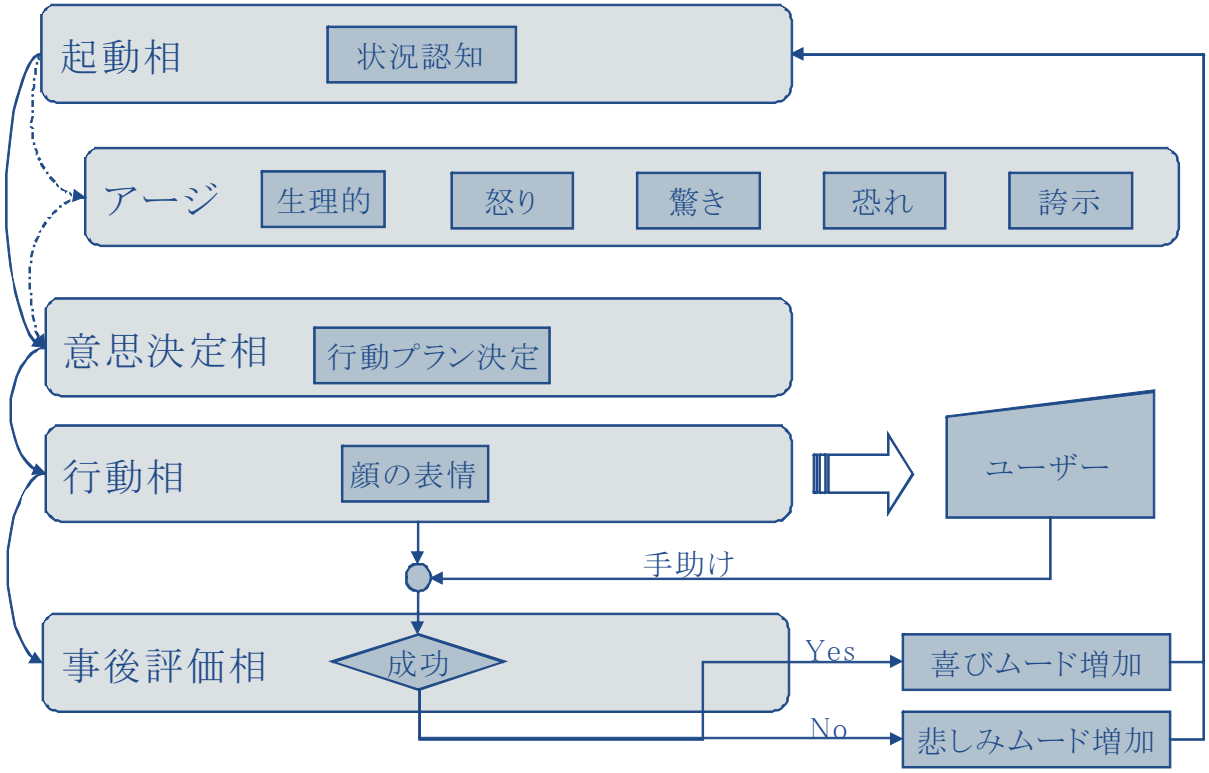


図 2.1: アージ・システムによる感情表出法の概要

2.2.2 アージ・システムによる感情表出法

概要

図 2.1 に従来手法 [1] [2] の概要を示す．従来手法では，アージの働きの 4 相に基づいて，段階順次処理をなす一連の流れを構築している．まず，起動相において，環境からの情報を認知 (状況認知) し，状況に対処するアージを起動する．つぎに，意思決定相で，起動されたアージに基づいて取り得る行動プランを選択し，具体的な行動 (表情表出など) を行う．この行動相の働きによって，エージェントの心理状態が表出され，ユーザがエージェントの変化を観察することができる．これにより，ユーザからエージェントに対して動的にアプローチすることが可能となる．また，ユーザからのアプローチによってエージェントの状況認知を変化させることができるので，これを用いて事後評価相をモデル化する．具体的には，ユーザアプローチによる変化が，エージェントにとって望ましい方向であれば喜びのムードを増加させ，望ましくなければ悲しみのムードを増加させる．以上のような一連の流れによって，エージェントが他者 (ユーザ) 依存的に感情を表出できる．次節より，各相について述べていく．

状況認知

まず，エージェントに各種アージを起動させるための起動相における状況認知の定義について述べる．エージェントの入力系を内部・外部に分割する．内部入力系として，時刻 t における自身の身体的負荷 $p(t)$ と，ある注意標的 [1] に対する好意度 $f(t)$ の二つのパラメータを考える．これらのパラメータの値は以下の式で蓄積される．

$$\mathcal{P}(t) = \alpha_p \mathcal{P}(t-1) + p(t), \tag{2.1}$$

$$\mathcal{F}(t) = \alpha_f \mathcal{F}(t-1) + f(t). \tag{2.2}$$

ただし，α_p および α_f は減衰係数であり，$0 < \alpha_p, \alpha_f < 1$ である．ここで，身体的負荷の種類は内的信号の数だけ存在することに注意されたい．たとえば，ロボットエージェントを考えると，CPU の温度が高まると起動する生理的アージや，バッテリ残量が低下すると起動する生理的アージなどが考えられる．したがって，それぞれの身体的負荷に $p(t)$ と $\mathcal{P}(t)$ を準備する必要がある．すなわち，身体的負荷パラメータは，$\mathbf{p}(t) = (p_1(t), p_2(t)...)$，$\mathbf{P}(t) = (\mathcal{P}_1(t), \mathcal{P}_2(t)...)$ (添え字は身体的負荷の識別子) といったベクトル情報となる．つぎに，外部入力系として，ユーザの有無を判断する変数 $o(t)$ を以下の式で与える．

$$o(t) = \begin{cases} 1 & (\text{ユーザあり}) \\ 0 & (\text{ユーザなし}). \end{cases} \tag{2.3}$$

以上の状況認知にしたがって，起動相の処理を決定する．

起動相

起動されるアージとして，Ekman の基本 6 感情 (怒り・驚き・恐れ・嫌悪・悲しみ・喜び) [8] を用いる．すなわち，起動相に配置されるアージのうち，一般的な感情と対応づけられるのは，怒りアージ，驚きアージ，恐れアージの三つである．喜びと悲しみは誇示アージによって表出される．また，エージェントに特有の内的因子（生理的・身体的状態変数）を扱う生理的アージは，生理状態が悪化したときに起動されると考えれば，嫌悪の表出に対応づけられる．

起動相は，各種アージが状況認知によって起動されるフェーズであるが，エージェントは時々刻々と環境入力を受信し続け，いつでもアージが起動できる状態に置かれる．以下に，各種アージの起動条件について述べる．

[1] 注意標的とは，選択の対象のことである．例えば，手ごろな枝が欲しいと思うとき，注意標的はそれに見合う対象に注意が向かう (大きすぎる枝には向かない).

(a) 生理的アージ
生理的アージは，痛み，食欲，性欲など，主として内的信号に依存して起動される活動プランである．身体的負荷 i に対応する生理的アージは，次式で起動する．

$$\mathcal{P}_i(t) > \theta_{phys}. \tag{2.4}$$

ここで，θ_{phys} は生理的アージ起動の閾値である．

(b) 怒りアージ
怒りの持つ性質については，動物の縄張り防衛行動からうかがえる．すなわち，自分の権限的縄張りが誰かに侵害されると，権限占有者は侵害者に対して怒りの感情を起動することとなる．本研究においてもこうした，いわば野生動物の原感情的機能は十分に参考にできると考えられる．そこで，怒りアージの起動条件を外部入力（ユーザ）による身体値の異常とする．

$$o(t) = 1 \ \text{ and } \ \exists i(p_i(t) > \theta_{ang}). \tag{2.5}$$

ここで，θ_{ang} は怒りアージ起動の閾値である．

(c) 驚きアージ
驚きアージの起動条件は，予想標的系から期待された入力がなかったという状況と，一般惹注意標的のうち，この期待標的系に属しない標的からの入力があった状況と考えられる．予想標的系は，設定された予想状況に見合う標的系のことを示す．なお，ある時刻のおけるすべての注意標的のことを，標的系と呼ぶ．一般惹注意標的は，生き延び関連性が高い事情に対する注意の標的のことを示す．一例では，大きな音を期待していたのに全く聞こえなかった場合などに発動するのが驚きアージである．そこで，驚きアージ起動条件を「予想範囲外の入力値，または期待外の入力系からの入力」とする．

$$\begin{aligned} &\exists i(p_i(t) - p_i(t-1)) > \theta_{sup} \ \text{ or } \ o(t) = 1 \\ &\ \text{ and } \ \exists j(\mathcal{P}_j(t) > \phi_{sup}) \ \text{ and} \\ &\exists k(p_k(t) > \rho_{sup}),\ (j \neq k). \end{aligned} \tag{2.6}$$

ここで，θ_{sup}，ϕ_{sup}，ρ_{sup} は驚きアージ起動の閾値である．

(d) 恐れアージ
恐れが起動されるような状況判断は,「ここでもし自分がなにもしなければ，自分の身に害意が及ぶ」状況と,「そこで自分の方から積極的にその危険を制御できる可能

性が極めて少ない」状況である．そこで，恐れアージ起動条件を,「危機レベルが高い状態での休息不可状況」とする．危機レベルが高い状態とは，内部入力系の蓄積 $\mathcal{P}(t)$ を用いて表現できる．また，休息不可状況とは，外部入力制御によって生理的アージの活動が抑制されるという状況である．以上より，恐れの起動は以下の式で行われる．

$$o(t) = 1 \quad \text{and} \quad \exists i(\mathcal{P}_i(t) > \theta_{fear}). \tag{2.7}$$

ここで，θ_{fear} は恐れアージ起動の閾値である．

(e) 誇示アージ
誇示アージは，自分の状態改善を社会的に認知させようという目的をもつとされている．誇示アージの起動条件は，ユーザによる手助けの成功如何による喜び・悲しみムードの増減変化を用いて次のように定める．

$$\mathcal{F}(t) < \theta_{sad} \quad \text{or} \quad \theta_{joy} < \mathcal{F}(t). \tag{2.8}$$

ここで，θ_{sad} および θ_{joy} は誇示アージ起動の閾値であり，$\theta_{sad} < \theta_{joy}$ である．なお，起動されるアージは誇示アージであるが，そのときの $\mathcal{F}(t)$ の値によって，行動プランが変わることに注意されたい．

2.2.3　従来の感情表出法における意思決定相

起動相で起動されるアージは，常に一つであるとは限らない．状況認知によっては，同時に幾つものアージが起動されることがあり得る（むしろそのような場合がほとんどである）．また，同じアージが起動された場合でも，いつも等しい行動プランが決定されるわけではない．しかしながら，多くの要因が密接に絡み合う意思決定相の実装は非常に困難である．そこで従来モデルでは，アージ別強度優先順位による決定方法を採用している．これは各種アージが本質的に備えていると思われる強度による決定であり，次式で定義される．

$$\text{驚きアージ} > \text{恐れアージ} > \text{怒りアージ} > \text{生理的アージ} > \text{誇示アージ}. \tag{2.9}$$

行動相

行動相は，意思決定相で決定された行動プランの実際の行動の終始を行うフェーズである．すなわち，意思決定相で行動プランが決定されると対応する行動が生成される．

事後評価相

事後評価相では終息したばかりのアージ活動が成功であったか，失敗であったか，また失敗の場合どこがいけなかったのかなどについて評価され，それ以後の同種のアージ活動の学習的修正を行う．そこで，事後評価相では，ユーザの手助けの成功如何を喜び・悲しみムードにフィードバックする．すわわち，ユーザの手助けが成功したときには喜びムードを，失敗したときには悲しみムードを増加させる．これを実現するには，好意度を以下のように変更すればよい．

$$f(t) = \begin{cases} 1 & (\text{手助け成功}) \\ -1 & (\text{手助け失敗}). \end{cases} \tag{2.10}$$

2.2.4 従来の感情表出法における問題点

アージ・システムによる感情表出法では，意思決定相の実装を式 (2.9) で行っているため，エージェントの感情表出が固定的となり，ユーザに与える印象が一意に定まりやすいという問題がある．そのため，アージ・システムによる感情表出法を用いたロボットが人と共に学習者や作業を行うと，ロボットはユーザとは異なる感情を表出することが多くなる．そして，ユーザはロボットに違和感を抱き，ロボットとの相互作用を行わなくなると考えられる．

ロボットがユーザに与える違和感を軽減するために，著書は赤ん坊の行動意思決定能力に注目した．赤ん坊は，最も身近な他者である母親の感情状態に同調する傾向があるとされる．Gibson と Walk によるヴィジュアルクリフと呼ばれる「視覚的断崖」の実験では，赤ん坊は，自身が置かれる状況よりも，母親の表情すなわち感情状態に同調して行動意思決定が左右されることが示されている [10]．アージ・システムによる感情表出法では，ユーザがエージェントの感情を表情から読み取ることで，インタラクションをはかっていたが，エージェントがユーザの感情を理解してはいなかった．そこで，他者依存的に感情を表出するというというエージェントにおいても，ユーザに同調して感情を表出することで，ユーザはロボットの感情を読み取りやすく，効果的に相互作用を行えると考える．

そこで Russell の感情円環モデル [56] を用いて，ユーザに同調して感情を表出することが有効であると考える．これまで，Russell の感情円環モデル [56] を用いて人の感情を推定すること [66] [38] が行われており，ユーザの感情に同調して感情を表出するモデルに活用できると考えている．本章では，ユーザ側の感情表現を積極的に考慮する機能として Russell の感情円環モデルを用いることを考え，これを感情表出法の意思決定相に導入する．

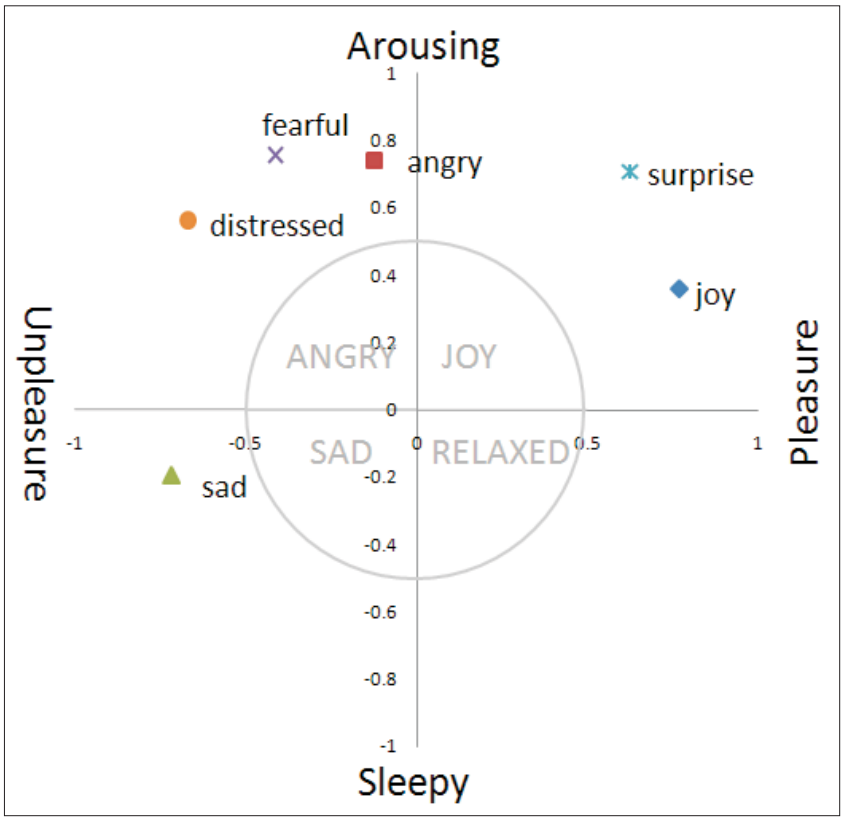


図 2.2: Russell の感情円環モデル上での各感情座標点

2.3　Ruseell の感情円環モデルを用いた感情表出法

2.3.1　Russell の感情円環モデル

本章では，ユーザの感情をエージェントが理解するスキームとして Russell の感情円環モデル [56] を利用する．本円環モデルは，感情を，快-不快と覚醒-睡眠の 2 軸で表現される 2 次元座標空間上に写像するものである．したがって，各感情は 2 次元座標上の座標点として表現されるため，それぞれの感情点間の距離を定量的尺度として用いることができる．ユーザの感情をこの空間上に写像できれば，明示的にエージェントにユーザの感情を知らせることが可能となる．

2.3.2　ユーザの感情を理解する感情表出法のための意思決定相

Russell の感情円環モデルの極座標表現において，喜びおよび悲しみの偏角をそれぞれ θ_{joy}，θ_{sad} と表記する．これらの偏角を用いれば，エージェント感情の座標点 $(r_x(t), r_y(t))^T$(直交座標表現) は，好意度の蓄積 $\mathcal{F}(t)$ を用いて，以下の様に表現できる．

$$\begin{pmatrix} r_x(t) \\ r_y(t) \end{pmatrix} = \begin{cases} \begin{pmatrix} \mathcal{F}(t)\cos\theta_{joy} \\ \mathcal{F}(t)\sin\theta_{joy} \end{pmatrix} & (\mathcal{F}(\mathrm{t}) \geq 0) \\ \begin{pmatrix} \mathcal{F}(t)\cos\theta_{sad} \\ \mathcal{F}(t)\sin\theta_{sad} \end{pmatrix} & (\mathcal{F}(\mathrm{t}) < 0) \end{cases} \tag{2.11}$$

このとき，ユーザ感情が座標点 $(u_x(t), u_y(t))^T$ で与えられたとすると，ユーザとエージェントの混合ムード $\mathbf{F}^*(t) = (r_x^*(t), r_y^*(t))^T$ は以下の様に定義できる．

$$\begin{pmatrix} r_x^*(t) \\ r_y^*(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_x(t) + u_x(t) \\ r_y(t) + u_y(t) \end{pmatrix} \tag{2.12}$$

エージェントは，意思決定相において，混合ムード $\mathbf{F}^*(t)$ に最も近いアージ $\mathcal{D}(t)$ を起動する．

$$\mathcal{D}(t) = \arg\min_{d \in D} |\mathbf{F}^*(t)\mathbf{E}(d)| \tag{2.13}$$

ただし，D は，$D = \{distressed, angry, surprise, fearfull, sad, joy\}$ なる感情の集合であり，それぞれの要素は，生理的・怒り・驚き・恐れ・誇示 (悲しみ・喜びの表出) の各アージに対応させる．また，$\mathbf{E}(d)$ は，Russell の感情円環モデル上の各感情の座標点である (図 2.2)．

2.4 実験

実験の方法および結果は，Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics(vol.17, no.3, pp.433-442, 2013) に掲載された “Psychological Effects of a Synchronously Reliant Agent on Human Beings” を引用する．提案モデルの有効性を確認するために，3 種類のエージェントを作成した．また，各エージェントとインタラクションするためのアプリケーションを用いて比較実験を行った．本実験ではエージェントのマテリアルとして Ifbot を用いた．

2.4.1 Ifbot の概要

図 2.3 に Ifbot の概観を示す．Ifbot は身長 45cm，重さ 9.5kg であり，二つの腕を有し，車輪によって移動する．図 2.4 に Ifbot の表情表出機構の概要を示す．Ifbot は表情表出のために，10 のモータおよび 101 の LED を持つ．モータは，首を 2 軸（同図 θ_{N1}, θ_{N2}），



図 2.3: Ifbot の外観

左右の目を 2 軸 (同図 $\theta_{E1}^{(L)}$，$\theta_{E2}^{(L)}$；$\theta_{E1}^{(R)}$,$\theta_{E2}^{(R)}$)，左右のまぶたを 2 軸 (同図 $\theta_{L1}^{(L)}$, $\theta_{L2}^{(L)}$；$\theta_{L1}^{(R)}$, $\theta_{L2}^{(R)}$) の方向へ動作させる．LED は，頭部 (L_H), 口部 (L_M)，目部 (L_E)，頬部 (L_C)，涙部 (L_T)，耳部に配置され，頭部 3 色 (橙，緑，赤)，口部 1 色 (橙)，目部 3 色 (緑，赤，青)，頬部 1 色 (赤)，涙部 1 色 (青)，耳部 1 色 (橙) を発色する．これらの機構により，Ifbot は表情豊かなコミュニケーションを行うことができる．

本稿では，エージェントの表情表出のために，($\theta_{E1}^{(L)}$, $\theta_{E2}^{(L)}$, $\theta_{E1}^{(R)}$, $\theta_{E2}^{(R)}$, $\theta_{L1}^{(L)}$, $\theta_{L2}^{(L)}$, $\theta_{L1}^{(R)}$, $\theta_{L2}^{(R)}$, L_M, L_T) のパラメータを用いた．

2.4.2　実験アプリケーションの概要

本稿ではインタラクション実験のために図 2.5 のようなアプリケーションを作成した．このアプリケーションは，ユーザがエージェントを手助けしながら制限時間内にゴールを目指すという人間と機械の共生作業をイメージした一種のゲームとして構成されている．同図において，エージェントの表情が表示されているウィンドウがメインウィンドウである．メインウィンドウ右部が User Activation ウィンドウ，Emotion Field ウィンドウ，下部が TASK VIEW ウィンドウである．

まず，ユーザは，User Activation ウィンドウ中の「ふつう」,「ちょっとがんばる」,「すごくがんばる」の各ボタンでエージェントの仕事量を設定する．仕事量は,「ふつう」＜

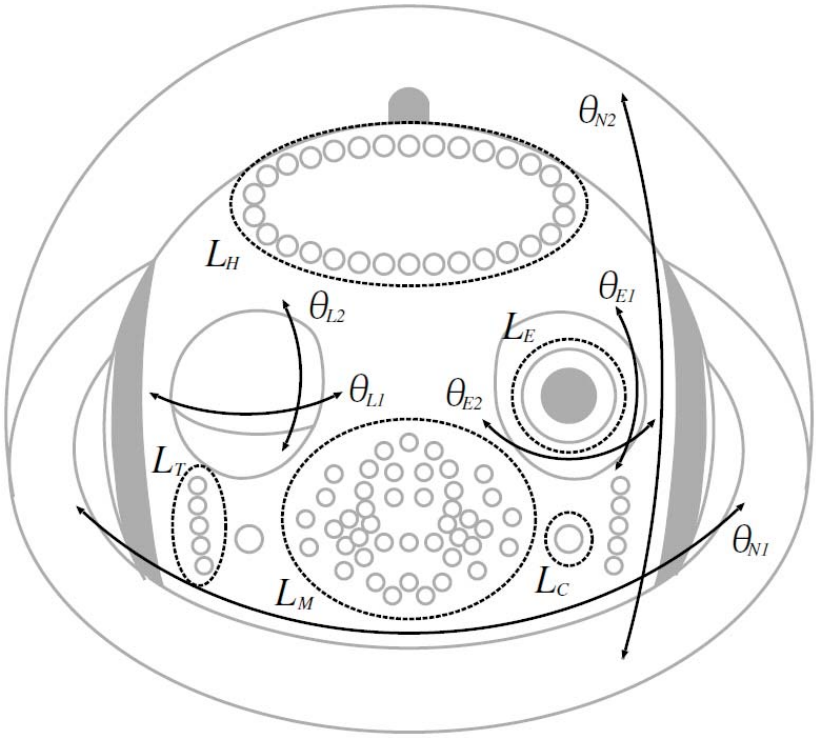


図 2.4: Ifbot の表情表出機構

「ちょっとがんばる」<「すごくがんばる」としており，仕事量が大きいほど単位時間当たりのエージェントの移動量と身体的負荷は増加する．移動量は，TASK VIEW ウィンドウに表示される．本実験では，身体負荷量を 3 種類とし，仕事量を決定するボタンを押下したときにいずれかの身体負荷がランダムに増加するものとした．したがって，ユーザはメインウィンドウに表示されるエージェントの表情からその状態を判断しなければならない．

つぎに，ユーザは，エージェントの表情を観察し，User Activation ウィンドウ中の A，B，C の各ボタンでエージェントを手助けする．この手助けによって，エージェントの状況認知が変化し，新たに生理的・怒り・恐れ・驚き・誇示の各種アージが起動される．ユーザはその変化を見ながら，エージェントの仕事量の設定とエージェントへの手助けを再び行う．

そして，Emotion Field ウィンドウにおいて，ユーザは随時，自身の感情を適当な感覚尺度で入力する．これにより，エージェントである Ifbot がユーザの感情を理解して自身の意思決定を行う．本来であれば，ユーザ感情の理解は，カメラを通した表情認識手法などを用いて感情推定システムとして組み込むべきである．しかしながら，感情理解は非常に困難な問題であるため，本稿ではこれを省略し，直接，被験者であるユーザが自身の

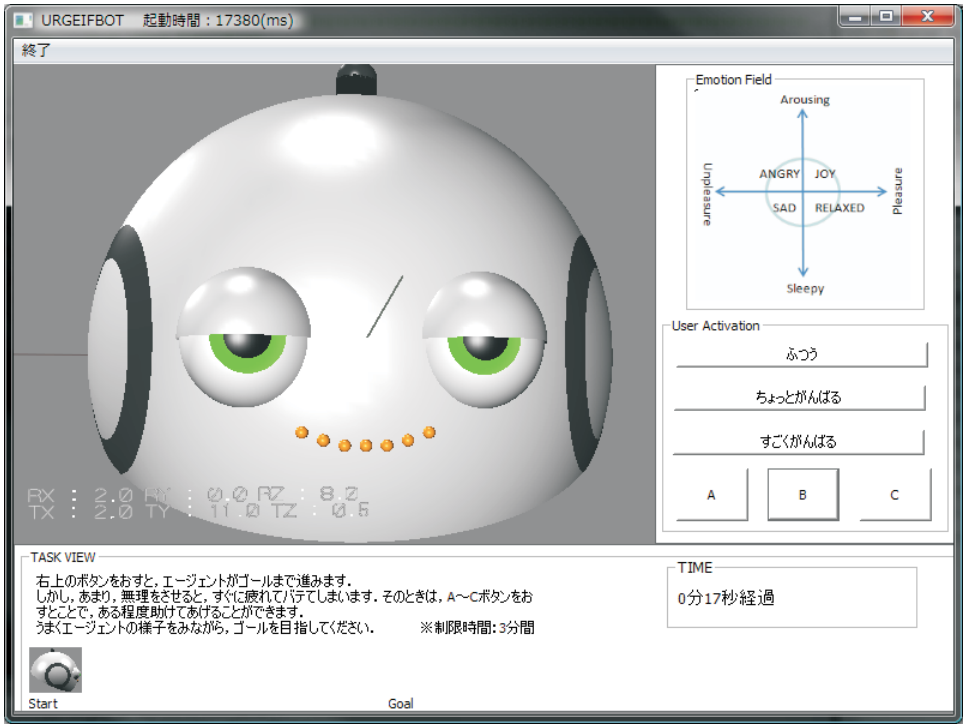


図 2.5: シミュレーション実験環境

感情状態を Emotion Field の座標上 $(-1 < x < 1, -1 < y < 1)$ で適当な感覚尺度で任意に入力するという形式をとる．具体的には，文献 [74] による Russell の感情円環モデルを怒り，喜び，悲しみ，平静の 4 つの基本情動で各象限に割り当てたモデルを利用する．すなわち，ユーザは Russell の感情円環モデル上の Arousing-Sleepy，Pleasure-Unpleasure の 2 軸と，各象限に割り当てられた基本情動ラベルを用いて自身の感情状態を指定するものとする．

この一連のインタラクションを通して，ユーザがエージェントを手助けしながらエージェントがゴールに辿り着けるよう試行する設定である．各試行の終了条件は，エージェントがゴールに辿り着くか，もしくは制限時間に達したときである．ゴール条件は，TASK VIEW ウィンドウで表示されるエージェントの横顔が，Start から Goal に辿り着いたときである．エージェントはユーザから指示される仕事量に応じて (たとえば，ふつうなら 1 歩，ちょっとがんばるなら 2 歩移動する) ゴールを目指しつつ，時々刻々と与えられる環境入力にたいして適応的な表情をメインウィンドウ内に表出する．なお，User Activation ウィンドウにおいて，A，B，C の各ボタンは一度押下すると次に押せるようになるまでに一定の時間隔がある．これはエージェントの応答時間を考慮したものである．

表 2.1: アンケート項目

気持ちのよい – 気持ちのわるい	親しい – 疎い
暖か – 冷たい	明るい – 暗い
柔らかい – 硬い	四角い – 丸い
ユーモラスな – 生真面目な	理性的な – 感情的な
複雑な – 単純な	面白い – つまらない

2.4.3 実験における検証手法

2.4.2 節で説明したアプリケーションを用いて比較検証を行った．比較検証には次の 3 種類のアプリケーション構成を用いた．

アプリケーション（A)
図 2.5 の Emotion Field におけるユーザ感情提示入力がエージェントに反映されないアプリケーションである．したがって，意思決定での表情表出はランダムパタンとなる．

アプリケーション（B)
従来モデル [1, 2] による意思決定（アージ別強度優先順位）を行うアプリケーションである．エージェントは Emotion Field におけるユーザ感情提示入力を考慮せず，式 (2.9) の順位で意思決定を行う．

アプリケーション（C)
Russell の感情円環モデルを用いた人と同調する意思決定モデルを行うアプリケーションである（提案手法）．エージェントは，ユーザからの感情提示入力を受けてユーザの感情を理解し，自身の感情状態を推移させて意思決定を行う．

実験は，大学生被験者 20 人に対して実施し，SD 法によるアンケート（表 2.1）と自由記述式でのアンケート調査を行った．

2.4.4 実験結果

図 2.6，にアンケート結果を，図 2.7 にゴール到達時間を，図 2.8 に身体的負荷総量を示す．図において，左がアプリケーション A，中央がアプリケーション B，右がアプリケーション C を示す．図 2.6 から,「気持ちのよい」,「親しい」,「暖かい」,「明るい」の評価値は，他のアプリケーションと比べてアプリケーション C(提案手法) が最も高いこ

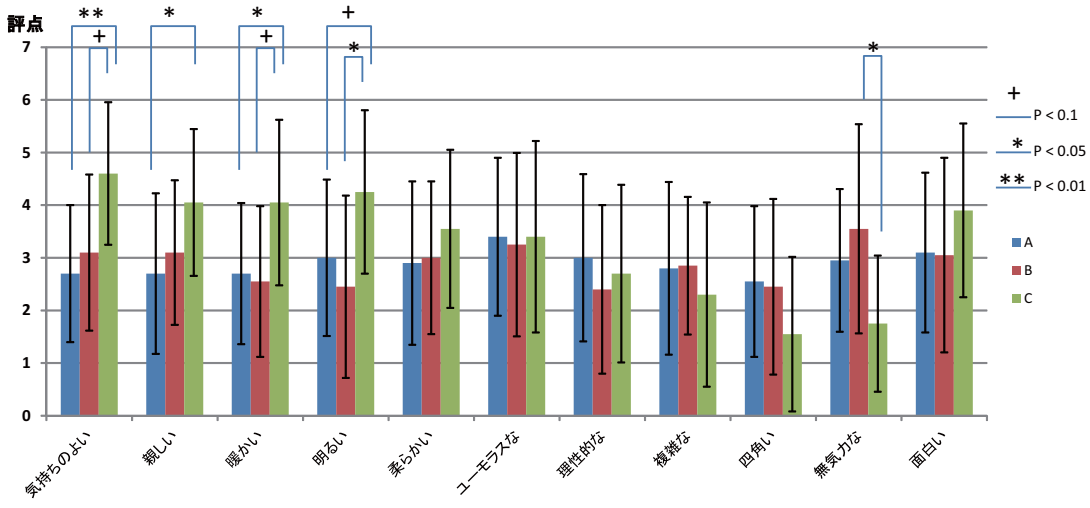


図 2.6: アンケート結果

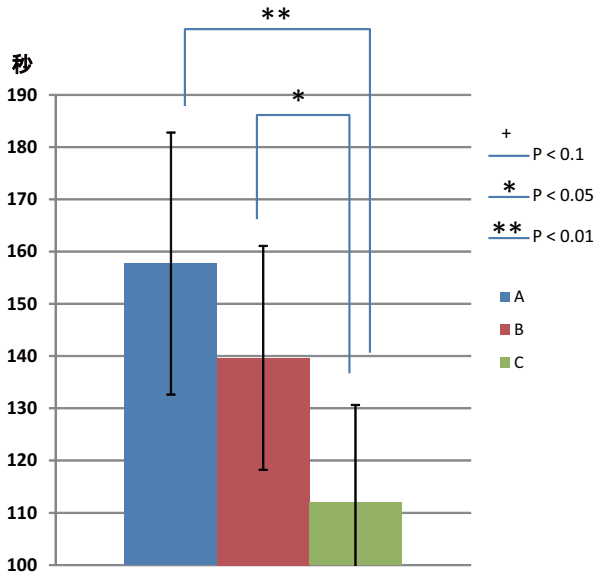


図 2.7: ゴール到達時間

とがわかる．図 2.7 から，ゴール到達時間は他のアプリケーションと比べて，アプリケーション C(提案手法) が最も低いことがわかる．図 2.8 から，身体的負荷総量は他のアプリケーションと比べて，アプリケーション C(提案手法) が最も高いことがわかる．

アンケート結果をフリードマン検定を用いて，Scheffe の対比較による多重比較で有意差検定を行った．図中,「**」「*」はそれぞれ，有意水準 1%，5% で有意となった組み合わせであり,「+」については，有意傾向（$p < .1$）が認められた組み合わせである．

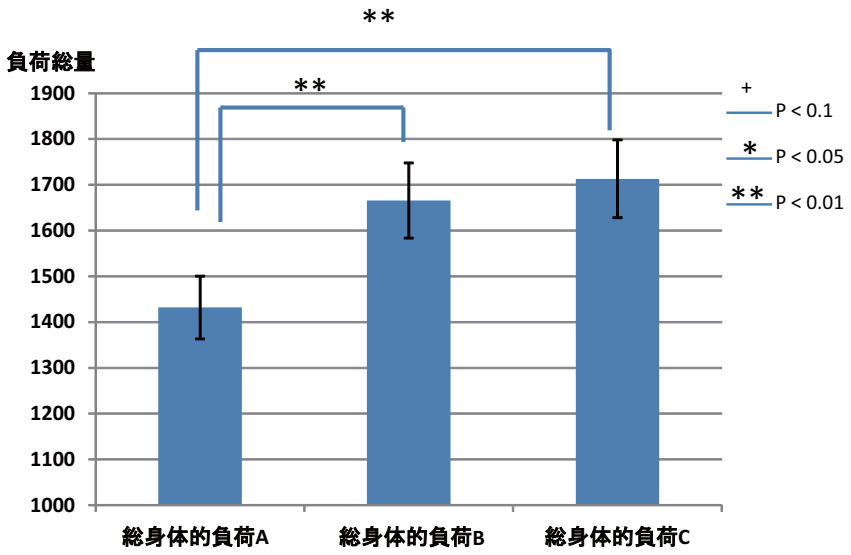


図 2.8: 身体的負荷総量

2.5 考察

まず，アプリケーション (A)（ランダム）とアプリケーション (C)（提案手法）を比較すると,「気持ちの良い」に 1% の有意差,「親しい」「暖かい」に 5% の有意差,「明るい」に有意傾向が認められた．これは，アプリケーション (C) では，ユーザの気分が積極的にエージェントの行動に反映されるためであると考えられる．たとえば，ユーザが楽しい気分であれば，エージェントもほぼ同様に楽しい気分を表出する傾向にあるので，プラス方向の精神的作用効果が得られたものと思われる．実際に，被験者は，アプリケーション (A) に対しては,「むずかしかった」,「うまく進んでくれなかった」など，ランダムの感情表出によりエージェントの状態を把握できないもどかしさを感じていたが，その一方で，(C) に対しては,「表情が豊かに感じられた」,「おもったようにすすんでくれた」といった印象を抱いていた．また，ユーザが楽しくないなどのマイナスの気分状態であっても，エージェントがその気分を共感してくれたことで，結果として「気持ちのよい」と感じられたと考えられる．

次に，アプリケーション (B)（従来手法）とアプリケーション (C) を比較すると,「無気力な」「明るい」の項目に対して有意差が,「気持ちのよい」「暖かい」「明るい」に有意傾向が認められた．アプリケーション (B) では,「疲れた表情がしっかりでていたと思う」や「疲れることが多くてもすすんでくれる気がした」などがあり，従来モデルのアージ別強度優先順位による意思決定が稼働していたことがうかがえる．しかし，その意思決定によって，エージェントが疲労するたびに生理的アージや恐れアージを起動していたこと

から「あまり笑ってくれなかった」のような回答が得られていた．このことから，疲労感が強く印象づけられて，結果として「無気力な」感じを与えてしまい，反面，表情豊かなアプリケーション（C）に「明るい」感じを与えたものと考えられる．また，アプリケーション（A）（ランダム）ほどではないにしろ，アプリケーション（C）（提案手法）との間に「気持ちの良い」「暖かい」印象に有意傾向が見られることから，アプリケーション（C）の快効果がうかがえる．

次に，ゴール到達時間に着目すると，アプリケーション (C) がもっとも有意にゴール到達時間を早めた結果となった．これは，ユーザの気分が快方向である場合には，エージェントのムードがユーザのプラスのムードに引き寄せられて，恐れが起動しづらくなり，エージェントが前に進もうとしたためであると考えられる．ここで，実験中にエージェントが受けた身体的負荷総量 (図 2.8) に注目すると，アプリケーション (B) と (C) の間には，身体的負荷に有意な差は無いという結果が得られた．

以上のことから，ユーザの感情状態に同調して自身の意思決定に影響を及ぼす他者充足的なエージェントは，ユーザに気持ちのよさや暖かみ，親しみといった効果を与えることができると考えられる．

2.6　まとめ

本章では，Russell の感情円環モデル [56] を用いて，ユーザである他者の感情表現を積極的にエージェント自身の感情と同調させる感情表出法を提案した．具体的には，Russell の感情円環モデルに写像されたユーザ感情とエージェントのムードとを結合した混合ムードを用いることにより，ロボットが表出する感情を決定することで，変化していくユーザの感情に同調することを可能とした．シミュレーション実験では，(1）ランダムによる意思決定，(2）アージ別強度優先順位による意思決定，(3）ユーザに同調する意思決定（提案手法）の 3 種類のアプリケーションで比較検証を行った．実験の結果，ユーザ感情を同調的に理解する他者充足的なエージェントは，そのインタラクションにおいて，ユーザに対して快 — 親近性の効果を高めることが明らかとなった．

これらから，従来の感情表出法の一つである，アージ・システムによる感情表出法に比べて，Russell の感情円環モデルを用いた感情表出法は，ユーザとの感情と同調しやすく，親近性を高めることができると示唆された．次節では，実際に教育支援ロボットに感情表出法を実装して，提案手法を用いたロボットが学習者に与える影響を検証していく．

第3章

学習者に共感を実感させる共感表出法の提案

3.1 はじめに

第2章において，Russellの感情円環モデルによる感情表出法を用いたロボットは，従来の感情表出法を用いたロボットに比べ，ユーザの感情に同調して感情を表出することで，ユーザに親近性を与えることができると示唆された．本章では，第2章で提案した感情表出法を基に正解と不正解用の二つの感情ベクトルを用いて感情を表出することで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法を提案する．本研究では，共感を学習者の問題の正誤判定に応じて，ロボットが喜びや悲しみを表出して，学習者にロボットが自分と同じ気持ちであると実感させることと定義する．定義した共感ができるように共感表出法では，学習者が問題に正解した場合は正解用感情ベクトルを，不正解した場合は不正解用感情ベクトルを基に表出する感情を決定する．さらに，二つの感情ベクトルは座標位置を保持しながら，学習者の正誤判定と問題の解答時間に応じて感情ベクトルのXとY座標を変動することで，学習者の学習経過に応じてロボットが異なる感情を変化できるように設定する．例えば，学習初め，学習者が問題を解くのに時間をかけ，不正解が多い場合には，不正解用感情ベクトルのY座標点が眠気側に移動し，ロボットが眠気かつ不快側の感情を表出することが多くなる．しかしながら，学習が進むにつれて学習者が短時間で正解することで，感情ベクトルのY座標点が覚醒側へ移動し，ロボットが覚醒かつ快側の感情を表出していく．これにより，ロボットが学習者の正誤判定や解答時間に応じて喜びや悲しみの感情を表出することで，学習者にロボットが自分の気持ちに共感しているように感じさせるとともに，共に学習していることを実感させ，ロボットとの共同学習において感じる飽きを軽減できると期待できる．

本章では，まず2節において従来の感情表出法を教育支援ロボットに実装した場合に起こる問題について述べる．次に，3節で学習者の気持ちに共感するように感情を表出する共感表出法について説明する．4節で実験を通して，共感表出法を用いたロボットが学習者に与える心理効果を評価する．最後に6節で考察し，7節でまとめる．

3.2　教育支援ロボットにおける従来の感情表出法の問題点

学習者と共に学ぶパートナーロボットには，学習者がロボットの動作を画一的だと感じ，ロボットとの協調学習に飽きてしまうという問題点がある．本研究では，この飽きの問題を解決するために，ロボットが学習者の気持ちに共感するように感情を表出することが有効であると考えた．しかしながら，従来の感情表出法 [1] では，表出する感情を決定するための基準となる感情ベクトルが一つしか用いられていない場合が多い．また，第 2 章で提案した Russell の感情円環モデルを用いた感情表出法も同様である．そして，第 2 章で述べたように，パズルを作るなどの共に作業を行うインタラクションでは，一つの感情ベクトルを徐々に移動させることで，ロボットが人の感情変化に追随し，ロボットが人の気持ちに同調しながら感情を表出することが可能である．しかしながら，問題を解きながら学ぶような学習の状況では，問題に正解した場合は喜び，不正解した場合は悲しむなど，極端な感情の変化に対応することは難しい．そのため，人が正解した場合でも，ロボットが悲しみの表情を表出したり，その逆が生じることで，人の気持ちに共感する感情表出を行うことが困難となる．また，人の正解／不正解に合わせて，一つの感情ベクトルを，正解した場合の感情から不正解した場合の感情へと極端に変化させることも可能であるが，正解または不正解に対する学習者の学習経過に応じた感情変化のヒストリー情報が失われ，やはりロボットの共感を実感させる感情表出を行うことが難しいことや，ロボットに対して人が飽きやすくなることが考えられる．

この問題を解決するために，学習者のポジティブな感情とネガティブな感情のそれぞれに対応する，正解と不正解用の二つの感情ベクトルを用いることが有効であると着想した．そこで前章で提案した Russell の感情円環モデルを用いた感情表出法を改良して，学習者のポジティブな感情に対応する正解用と，学習者のネガティブな感情に対応する不正解用の二つの感情ベクトルを用いて感情表出することで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法を提案する．

3.3　二つの感情ベクトルを用いた共感表出法

共感表出法は，第 2 章で用いた Russell の感情円環モデル [56] を基にした感情表出法である．本章では，第 2 章で提案した一つの感情ベクトルを基にユーザに同調するような感情表出を行う感情表出法 (一ベクトル法 I) [22] と，二点の感情ベクトルの X と Y 座標を変動して，感情ベクトルの角度を基に感情表出を行う共感表出法 (二ベクトル法 I) の二つをロボットに実装して，被験者実験を行う．それぞれの手法において，快-不快の軸は学習者の正解/不正解，覚醒-睡眠の軸は学習者の解答時間を基準とし，それぞれの基

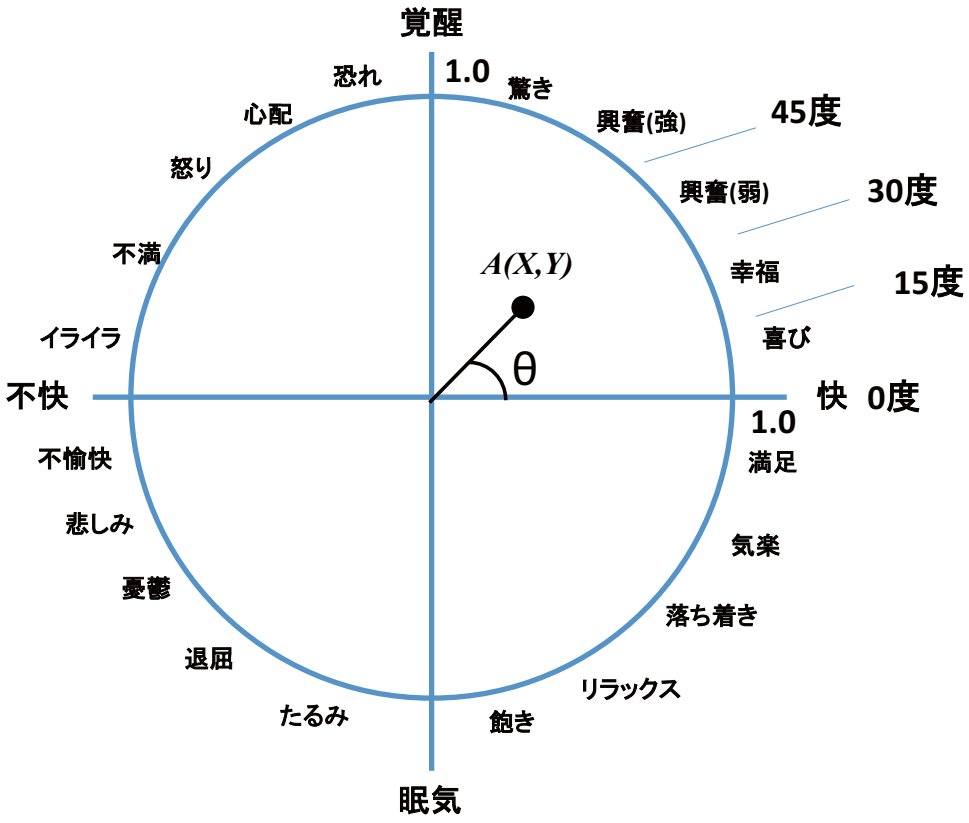


図 3.1: 一ベクトル法 I の概要

準を満たした際に感情ベクトルが 2 次元座標空間上を移動する．各軸の範囲は，ともに -1.0〜1.0 である．また，表出する感情は，感情ベクトルの角度 θ に応じて決定される．

3.3.1 一ベクトル法 I

この手法では，感情ベクトル $A(X, Y)$ を用いて，円環モデル上における感情を決定する．X は快-不快の軸，Y は覚醒-睡眠の軸に対応し，以下のように感情ベクトルが変動する．

if(学習者が問題に正解)
$X \leftarrow X + 0.2$
$else$
$X \leftarrow X - 0.2$

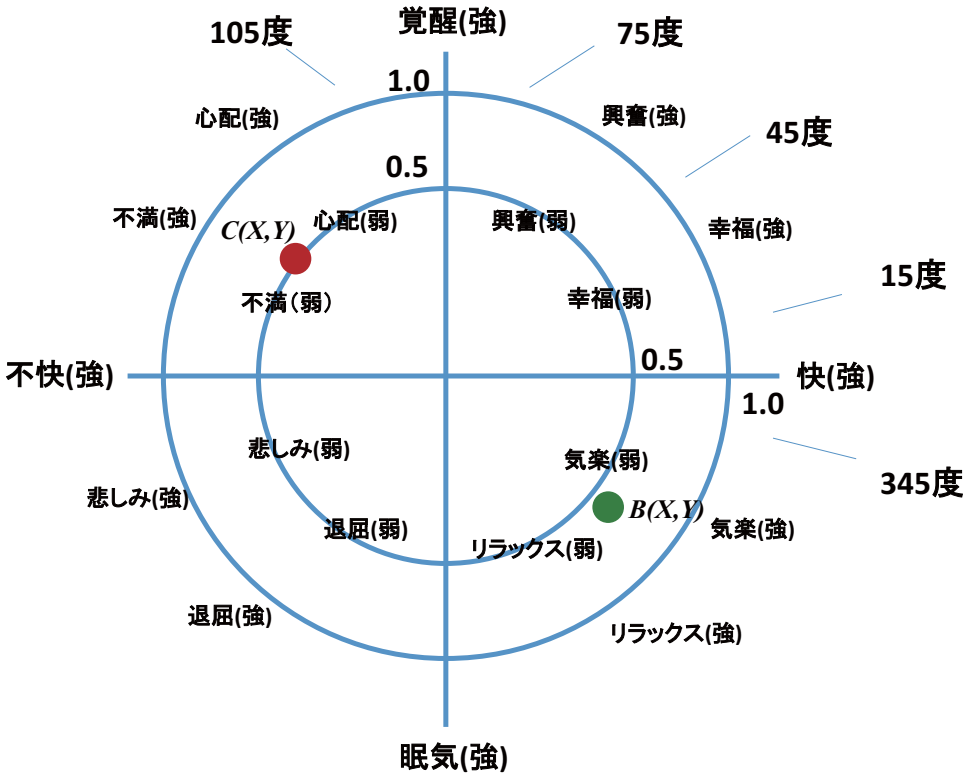


図 3.2: 二ベクトル法 I の概要

if(解答時間 $<$ 基準時間)

$Y \leftarrow Y + 0.2$

$else$

$Y \leftarrow Y - 0.2$

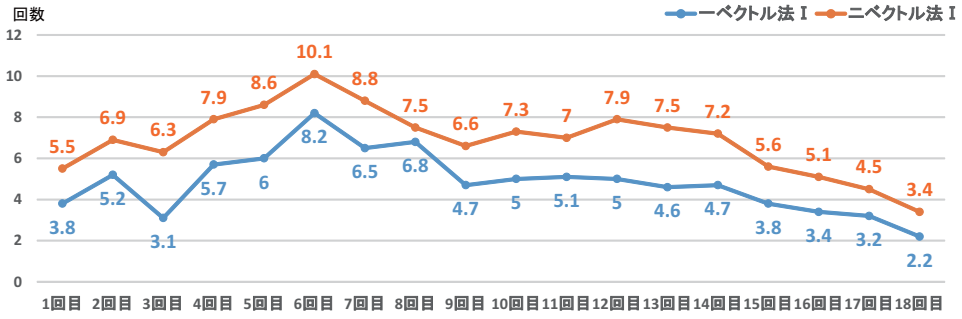
解答時間は学習者が問題を解くのに費やした時間であり，基準時間は 85.5 秒と設定した．これは，予備実験として，本学習システムにより解答を行ってもらった被験者 18 人の平均解答時間である．また，感情ベクトルの変動に用いられる座標の増減パラメータも，同じ予備実験において，感情ベクトルの移動頻度が最も高かった組み合わせを用いている．このモデルでは，図 3.1 に示されている感情の種類を使用する．各感情は 15 度間隔となっており，$A(X, Y)$ の角度 θ に応じて，対応する感情を表出する．例えば，$0 < \theta \leq 15$ の場合は「喜び」，$15 < \theta \leq 30$ の場合は「幸福」の感情が表出される．感情の種類は，24 種類である．

3.3.2 二ベクトル法 I

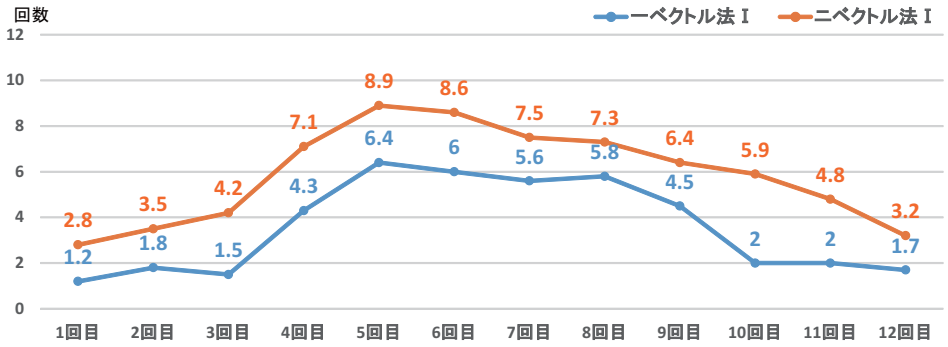
従来研究において，協調学習を行う際に，エージェントが解答の正否によって一緒に喜んだり，悲しんだりするなど，学習者に共感することで，学習者の学習意欲の向上が促されるという報告がある [41]．そこでこの手法では，正解用感情ベクトル $B(X,Y)$，不正解用感情ベクトル $C(X,Y)$ の二点を用いて円環モデル上における感情を決定する．学習者が問題に正解した場合は B を，不正解であった場合は C の座標を基準に感情を表出する．B は $0 \leq X \leq 1.0$ かつ $-1.0 \leq Y \leq 1.0$，C は $-1.0 \leq X \leq 0$ かつ $-1.0 \leq Y \leq 1.0$ の範囲内で感情ベクトルを移動する．一ベクトル法 I と同様に，X は快-不快の軸，Y は覚醒-睡眠の軸に対応し，以下のように感情ベクトルが変動する．

if(学習者が問題に正解)
  $X_B \leftarrow X_B + 0.2$
  $X_C \leftarrow X_C + 0.1$
$else$
  $X_B \leftarrow X_B - 0.1$
  $X_C \leftarrow X_C - 0.2$
if(解答時間 $<$ 基準時間)
  if(学習者が問題に正解)
    $Y_B \leftarrow Y_B + 0.2$
  $else$
    $Y_C \leftarrow Y_C + 0.2$
$else$
  if(学習者が問題に正解)
    $Y_B \leftarrow Y_B - 0.2$
  $else$
    $Y_C \leftarrow Y_C - 0.2$

一ベクトル法 I と同様に，解答時間は学習者が問題を解くのに費やした時間であり，基準時間は 85.5 秒と設定した．感情ベクトルの変動で用いるパラメータも，一ベクトル法 I と同様に設定した．また，この手法では，図 3.2 に示されている感情の種類を使用し，$B(X,Y)$，$C(X,Y)$ の角度 θ と位置に応じて，対応する感情を表出する．角度 θ で表出する感情の種類を，感情ベクトルの位置で感情の強弱を決定し，感情を表出する．具体的には，図 3.2 のように原点から半径 0.5 の円内に感情ベクトルがある場合は弱の感情を，



(a) 英単語データ



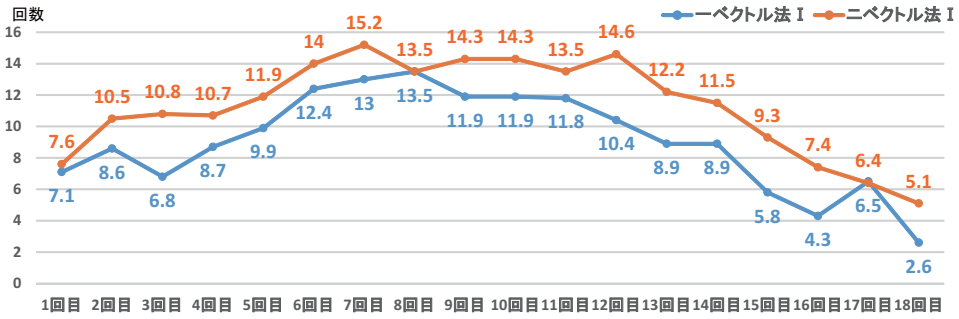
(b) 基本情報データ

図 3.3: 表出感情数の推移

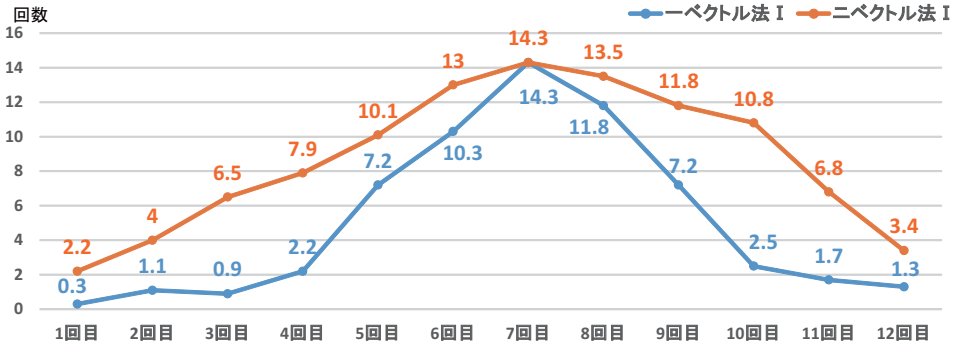
円外にある場合は強の感情を表出する．各感情は 30 度間隔となっており，$15 < \theta \leq 45$ の場合は「幸福」，$45 < \theta \leq 75$ の場合は「興奮」の感情が表出される．感情の種類は，一ベクトル法 I と同じ 24 種類 (一ベクトル法 I の「喜び」が「幸福 (弱)」に対応) であり，強の感情 12 種類，弱の種類 12 種類で構成される．

3.4　実験

実験では，シミュレーション実験と被験者実験を実施した．実験の方法および結果は，知能と情報 (vol.27, no.6, 2015) に掲載された “感情表出法を持つロボットとの共同学習で起こる心理効果” を引用する．



(a) 英単語データ



(b) 基本情報データ

図 3.4: 感情変化数の推移

3.4.1 シミュレーション実験

方法

シミュレーション実験では，従来研究における，ロボットと学習者が共に学習している際のデータをテストデータとして用い，一ベクトル法 I および二ベクトル法 I を用いたロボットがどのような感情を表出するか検討する．テストデータは，学習者がロボットと共に学習システム上で英単語を 18 回学習したデータ (英単語データ) [22] と，基本情報技術者資格試験の内容を 12 回学習したデータ (基本情報データ) [24] の二つである．各テストデータは，それぞれ 10 名の学習者が，個々に学習システム上で問題を 20 問解いた際の，正解/不正解とその解答時間で構成される．

本シミュレーションでは，上述の各テストデータを用いて，各学習回数における一ベクトル法 I および二ベクトル法 I の「表出感情数」と「感情変化数」を測定し，比較する．表出感情数は，1 回の学習 (20 問) において，各モデルで表出された感情の種類数である．また感情変化数は，1 回の学習において，表出される感情が一つ前の問題で表出された感情から変化した数である．これら二つの数字が高いほど，学習者がロボットと学習する

表 3.1: 表出感情数の平均と標準偏差

	(a) 英単語データ		(b) 基本情報データ	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
一ベクトル法 I	4.8	1.4	3.6	2.0
二ベクトル法 I	6.9	1.6	5.9	2.0

表 3.2: 感情変化数の平均と標準偏差

	(a) 英単語データ		(b) 基本情報データ	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
一ベクトル法 I	9.1	3.0	5.1	4.7
二ベクトル法 I	11.3	3.0	8.7	4.0

状況において，ロボットの画一的な感情表出を回避し，多様な感情を表出していることを表している．

結果

図 3.3(a)，図 3.4(a) に，英単語データにおける各学習回数の表出感情数と感情変化数の推移を，図 3.3(b)，図 3.4(b) に，基本情報データにおける各学習回数での表出感情数と感情変化数の推移を示す．また，表 3.1，3.2 に，各学習における表出感情数と感情変化数の平均と標準偏差を示す．図 3.3，図 3.4，および表 3.1,3.2 から，一ベクトル法 I に比べて，二ベクトル法 I の表出感情数，感情変化数はともに大きい傾向にあることがわかる．これらのことから，二ベクトル法 I における二つの特徴が共に有効に働き，学習者が二ベクトル法 I を用いたロボットと共に学習する状況において，ロボットの画一的な感情表出を回避し，多様な感情を表出できる可能性があると考えられる．

3.4.2　被験者実験

方法

学習者がロボットから受けた印象を調査するために，学習者に二ベクトル法 I によって感情を表出するロボットと共に学習してもらい，一ベクトル法 I によって感情を表出す

るロボットと共に学習した際に受けた印象，及びランダムに感情を表出するロボットと共に学習した際に受けた印象と比較する．

学習者は理系大学 3〜4 年生 18 名 (年齢：20〜22) である．また，男女比は，男性 16 名，女性 2 となっている．各学習者には，二ベクトル法 I を実装したロボット (二ベクトル法 I 群)，一ベクトル法 I を実装したロボット (一ベクトル法 I 群)，ランダムで感情を表出するロボット (ランダム表出群) と共に，学習システムの問題をそれぞれ 20 問ずつ解いてもらった．ランダム表出群におけるロボットの感情の種類は，一ベクトル法 I，二ベクトル法 I で表出される感情と同じものであり，ロボットは学習者が正解した場合は軸の右側 $(0 \leq X)$ から，不正解した場合は軸の左側 $(0 > X)$ から，それぞれランダムに感情を表出した．そのため，ランダム表出群における表出感情数と感情変化数は，正誤判定に応じて感情を表出する二ベクトル法 I と同等数であると考えられる．また，順序効果を防ぐため，3 人で構成されるグループを 6 つ作り，それぞれのグループは異なった順番でロボットと学習してもらった．

学習システム

被験者実験において，学習者とロボットが共に学習する学習システムには，就職における採用選考テストとして用いられる “Synthetic Personality Inventory 2 (SPI2)” の非言語分野を用いた．SPI2 の非言語分野は，代金の支払や損益算などの中学レベルの数学問題で構成されるため，大学生を学習者とした際に既有知識による学力差は低いと考えられる．本実験では，SPI2 の非言語分野を学習するための SPI 学習システムを開発した (図 3.5)．本システムの問題は,「2014 年度版就職活動の神様の SPI2 問題集」[17] を参考に作成した．

本システムの操作手順について説明する．まず，ログインすると，学習項目と問題数を選択する画面が現れる (図 3.5(a))．今回の学習システムでは，学習項目は「非言語」のみで構成される．学習項目の下の問題数で,「20」を選択するとランダムに選ばれた 20 問で,「100」を選択すると全問題で学習を進めることになる.「20」を選択した場合，全問題 (20 問× 5 セット) を解き終わるまで異なる問題が出題されるようになっており，学習項目内の問題を一通り行えるようにしている．学習項目と問題数を選択して「START」をクリックすると，図 3.5(b) のような学習画面が現れ，学習を始めることができる．学習者は問題を解き，選択肢から解答を選択した後,「解答」をクリックする．解答後，図 3.5(c) のように，正解または不正解が表示される．このとき，表示された問題とその解説も併せて表示される.「次の問題へ」をクリックすると次の問題の画面に遷移する.「結果」をクリックする，または全問題を解答し終わると，図 3.5(d) のように正解数が表示

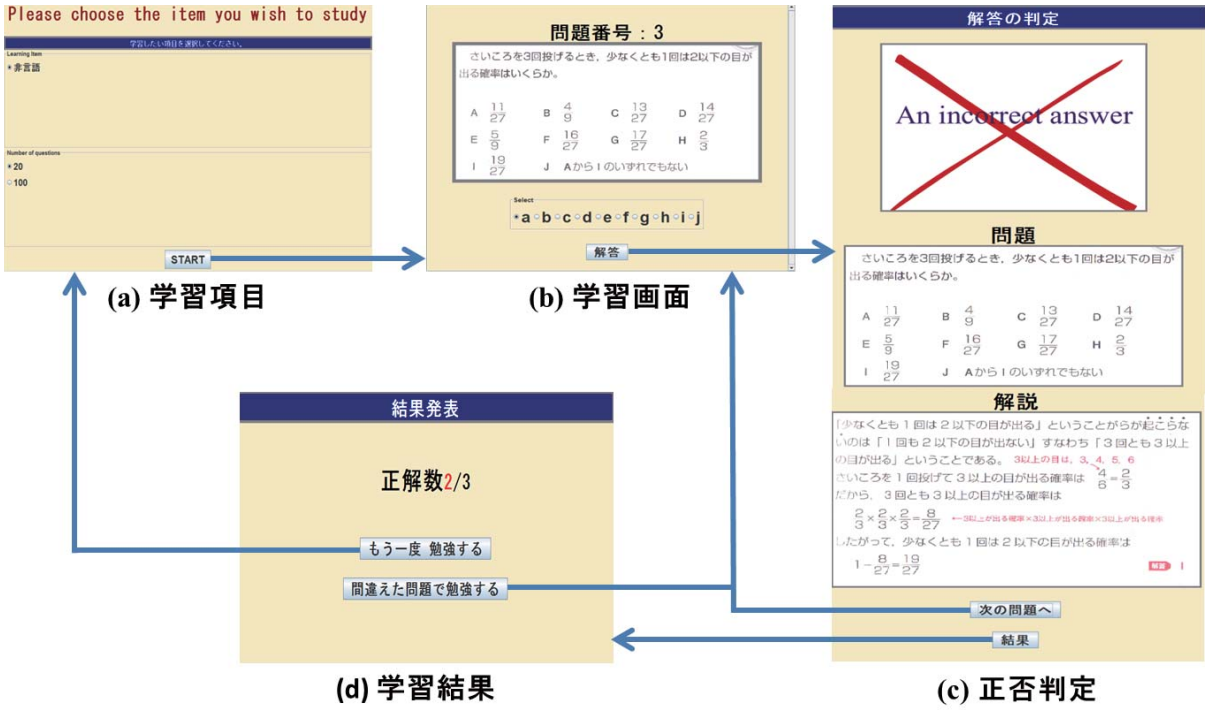


図 3.5: SPI 学習システム

される．図 3.5(d) で「間違えた問題で勉強する」を選択すると，間違えた問題で学習を行うことができる．また,「もう一度勉強する」を選択すると，学習項目の選択ページ（図 3.5(a)）に戻る．

ロボットの概要

ロボットには，第 2 章で使用した Ifbot(図 2.3) を用いた．Ifbot 内部に学習システムを実装することで，前述した学習システムと連動させることが可能となる．これにより，Ifbot と学習者はモニターに向き合って，共に問題を解いたり，考え込んだりして学習を進めることができる．

ロボットの感情表出が，学習者にどのような学習効果を与えるかを検証するため，ロボットには音声認識など，学習者の意図理解に直接的に関わるような機能は使わず，学習システムの画面に応じて動作するものとした．また，ロボットの動作は顔の表情のみであり，手や身体は作動しない．本実験で用いるロボットの表情は，従来研究 [44] [12] [26] において，被験者実験を通してロボットの表情が「喜び」や「悲しみ」などの感情と対応していると評価された表情の中から，二ベクトル法 I 上の感情と一致するものを用いている．また，ロボットには,「喜びの発話」,「悲しみの発話」を行う動作を設定し，正

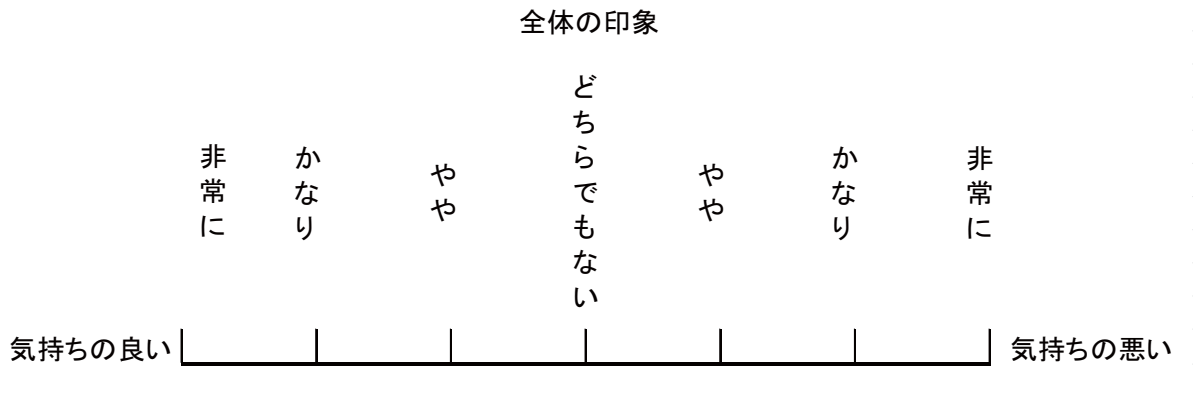


図 3.6: SD 法による印象評価

誤判定 (図 3.5(c)) が提示されたときにそれらを実行した．喜びの発話は 12 種類，悲しみの発話は 12 種類となっており，10 名の被験者による予備実験を通して，二ベクトル法 I および一ベクトル法 I における各感情に対して，発話に違和感がないと過半数以上が評価した発話を対応させた．具体的には，幸福の感情が表出されると,「すごい，正解したね.」や，悲しみの感情が表出されると「ああ，残念，間違えてしまったね.」などと発話する．他の発話例として，学習者が正解した場合,「おお，正解だ，やったね」,「すごい，正解だ，時間もそんなにかかってないね」などがあり，また，不正解した場合は,「ああ，不正解だね」,「時間かけたのに，間違えちゃったね」,「ああ，くそぉ，不正解か」などの発話がある．これらにより，学習者はロボットと共に学習していることを体感できることが期待される．

評価基準

二ベクトル法 I を用いたロボットが学習者に共感しているかどうかを直接計測するのは難しいが，学習者がロボットは自分の気持ちに共感していると実感した場合，学習者はロボットから,「親しい」や「気持ちの良い」などの好印象を受けると考える．そのため，本実験におけるロボットの印象評価には，Osgood らにより考案された，印象の定量的評価方法である SD 法を用いた [53]．SD 法は Human-Agent-Interaction において，ロボットの印象を調査するのに最も多く用いられている評価手法である．第 1 章で述べたように，感情表出法を用いた教育支援ロボットが，学習者にどのような影響を及ぼすかについては報告されていない．そのため，感情表出法を用いたロボットがユーザーに好印象を与えるという従来研究の報告と同様の効果が，教育支援ロボットにおいても生じるかどうかは不明である．そこで本実験では，第 1 章と同じ SD 法の項目を用いた．具体

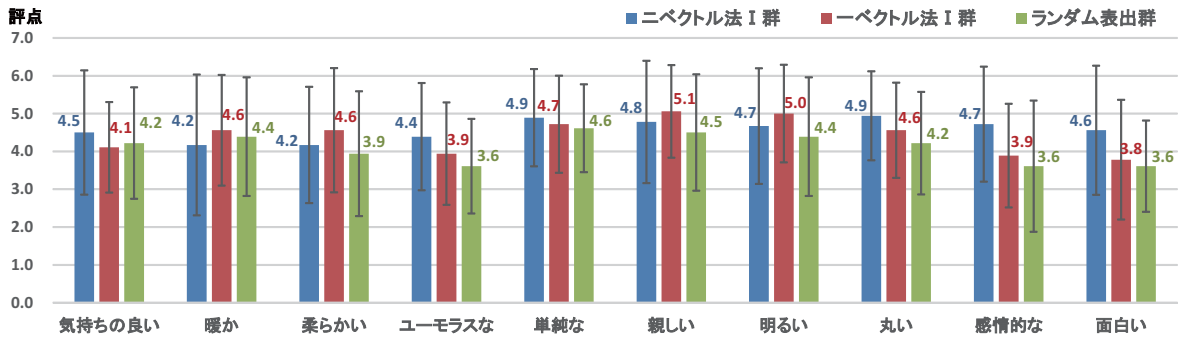


図 3.7: アンケート結果

的には,「気持ちの良い」,「暖か」,「柔らかい」,「ユーモラスな」,「単純な」,「親しい」,「明るい」,「丸い」,「感情的な」,「面白い」の 10 対の形容詞である．SD 法は，学習者の負担軽減，および学習者に実験の意図が読み取られるのを防ぐために，各群におけるロボットとの学習終了後に実施した．SD 法によるアンケート (図 4.3) では，図 4.3 の最左部にある「非常に」を 7 とし，右に 1 つ移動するにつれて −1 とする 1〜7 の評点で数値化した．検定には二元配置分散分析 [33] を実施し，下位検定にはフィッシャーの PLSD 法 [31] を適用した．有意水準は 5% とし，P 値が 0.05 以下のときに有意差を認める．

結果

図 3.7 に，SD 法によるアンケートで得られた評価値の平均値を示す．図の各形容詞において，左が二ベクトル法 I 群，中央が一ベクトル法 I 群，右がランダム表出群の平均点である．図 3.7 から,「気持ちの良い」,「ユーモラスな」,「単純な」,「丸い」,「感情的な」,「面白い」の評価値は，二ベクトル法 I 群が最も高いことがわかる．各群間の印象評価を比較するため，二元配置分散分析を行った．第一要因を，二ベクトル法 I 群，一ベクトル法 I 群，ランダム表出群，第二要因をアンケートの各項目として分析を行った．その結果を表 3.3 に示す．表 3.3 において，F は検定統計量 F 値，df は郡間の自由度 (左) と群内の自由度 (右)，$p\ value$ は P 値を示している．表 3.3 に示すように，二次交互作用および要因 2(各項目) での有意差は認められなかったが，要因 1 では有意差が認められた (有意水準 5%)．そこで群間における印象評価を比較するために，要因 1 について下位検定であるフィッシャーの PLSD 法を行った．その結果，表 3.4 に示すように，二ベクトル法 I 群とランダム表出群間において有意差が認められた．このことから，ランダム表出群である，正解/不正解のみを考慮したランダムな感情表出と比較して，二ベクトル法 I によるロボットの感情表出方法が，高い印象評価を得ていたと考えられる．

表 3.3: 二元配置分散分析の結果

	F	*df*	*p value*
A(各群)	4.58	2，510	0.023 *
B(各項目)	2.30	9，510	0.095 n.s.
A*B 交互作用	0.60	18，510	1.446 n.s.

表 3.4: フィッシャーの PLSD 法の結果

	T	*p value*
二ベクトル法 I 群*一ベクトル法 I 群	1.02	0.31 n.s.
二ベクトル法 I 群*ランダム表出群	2.94	0.00 *
一ベクトル法 I 群*ランダム表出群	1.93	0.06 n.s.

3.5 考察

前節において，二ベクトル法 I を用いたロボットと学習者が共に学習することで，ランダムに感情を表出するロボットに比べて，学習者に好印象を与える傾向があることが示唆された．好印象を与えた要因として，正解と不正解用の二点の感情ベクトルを用いてロボットが感情表出することで，学習者にロボットが共感していると感じたことが要因の一つであったと考えられる．二ベクトル法 I を用いたロボットと共に学習した学習者から,「他のロボットと比べて，感情が豊かな気がした」,「このロボットは私と同じ感情を表出していたから，気持ちが良かった」という意見があった．一方で一ベクトル法 I を用いたロボットの場合は,「私が不正解しても，ロボットは喜んでいる感情を表出するから，嫌な気分になった」,「ロボットは問題に正解した際に悲しみの表情，不正解の場合は喜びの表情を表出する時があり，とても複雑な感情をしていると思った」という意見があった．そして，ランダムに感情を表出するロボットの場合,「ロボットは同じような感情しか表出しないため，面白くなかった」という意見があった．これは，ランダムに感情を表出することで，学習者にとってはむしろ,「喜び」と「悲しみ」の 2 種類の感情表出と感じられたことを示唆している．一ベクトル法 I とは異なり，二ベクトル法 I では，正解と不正解用の二点の感情ベクトルを用いて正誤判定に応じて感情を表出する．またランダム表出群の感情表出法とは異なり，二つの感情ベクトルは学習者の正解または不正解回数や解答時間に応じて円環モデル上を移動するため，学習者の学習状況に応

じて感情を表出できる．これらのことにより，二ベクトル法 I を用いたロボットは，学習者に，感情が豊富であること，共感していることを実感させ，結果として学習者が,「気持ちの良い」,「感情的な」,「ユーモラスな」などの好印象をロボットから受けたと考えられる [73] [41].

しかしながら，二ベクトル法 I を用いたロボットと，一点の感情ベクトルを用いて感情表出する一ベクトル法 I を実装したロボットでは，学習者に与える印象評価に大きな違いは表れなかった．この原因として，感情ベクトルの角度が大きく変動しなかったことが要因と考えられる．二ベクトル法 I では，感情ベクトルの角度に応じて表出する感情を決定している．しかしながら，感情ベクトル (X, Y) は問題の正誤判定に応じて加減算で更新されるため，感情ベクトルの角度が変化しなかったと考えられる．例えば，X 座標の絶対値が大きいとき，Y 座標が大きく変化しない限り，感情ベクトルの角度は大きく変動することはない．今回，学習者は SPI の学習経験はないため，学習中の正解率は 15% であり，解答時間は 158($\pm$ 13.5) と長かった．そのため，二ベクトル法 I における感情表出は，不正解用の感情ベクトルが基準となっていた．また，解答時間も長かったため，不正解用の感情ベクトルは X 方向に -0.2, Y 方向に -0.2 されることが多くなり，角度は 45 度付近の一定の値で固定されていたと考えられる．これにより，感情表出が画一的なものになり，一点の感情ベクトルを用いて感情表出する一ベクトル法 I による感情表出と大きな違いがなかったと考えられる．

3.6　まとめ

本章では，Russell の感情円環モデルを基に正解と不正解用の二つの感情ベクトルの X と Y 座標を変動して，感情ベクトルの角度を基に感情表出を行うことで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法 (二ベクトル法 I) を提案した．そして，この手法を用いたロボットが，学習者と共に学習することによって及ぼす心理効果について検討した．二ベクトル法 I 法は，Russell の感情円環モデル上で，正解と不正解用の二点の感情ベクトルを用いて感情表出する感情表出法である．実験により，二ベクトル法 I を用いたロボットが学習者と共に学習した場合，二ベクトル法 I を用いたロボットは学習者の正誤判定と学習状況に応じて共感するような感情を表出できたため，ランダムに感情を表出するロボットと比べて，学習者に好印象を与えることを示した．しかしながら，一ベクトル法 I である，一点の感情ベクトルを用いて感情表出する感情表出法を実装したロボットと比較した場合，学習者に与える印象評価に大きな違いは表れなかった．この原因として，感情ベクトルの角度が大きくは変動せず，画一的な感情表出となってしまったことが要因と考えられる．これらより，二ベクトル法 I 法を用いたロボットは学習

者との短期的な共同学習において，学習者に共感を実感させるような感情を表出することができる．しかしながら，長期的な共同学習においては，二ベクトル法 I 法を用いたロボットは画一的な感情表出となるため，学習者に共感していると実感させるのが難しいと考える．

この解決案として，感情ベクトルの X と Y 座標ではなく感情ベクトル大きさと角度を直接的に変動させる方法が考えられる．これにより，感情ベクトルが正解/不正解や解答時間に合わせて大きく変動し，画一的な感情の表出を防げることが可能になると考えられる．次節では，感情表出過程を変更して，長期学習に使用できる共感表出法へ改良して，共感表出法による学習効果を検証する．また，ロボットの印象評価について，ロボットの表情の豊かさや，学習者との共感性，ロボットへの飽きなどに対する印象評価なども行う．

第4章

長期的な共同学習に対応できる共感表出法への改良

4.1　はじめに

第 3 章において，Russell の感情円環モデルを基に正解と不正解用の二つの感情ベクトルを用いることで感情表出して，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法を提案した．実験により，二つの感情ベクトルを用いた共感表出法を実装したロボットが学習者と共に学習した場合，二ベクトル法 I を用いたロボットは学習者の正誤判定と学習状況に応じて共感するような感情を表出できたため，ランダムに感情を表出するロボットと比べて，学習者に好印象を与えることを示した．しかしながら，一ベクトル法 I である，一点の感情ベクトルを用いて感情表出する感情表出法を実装したロボットと比較した場合，学習者に与える印象評価に大きな違いは表れなかった．この原因として，感情ベクトルの角度が大きくは変動せず，画一的な感情表出となってしまったことが要因と考えられる．これらより，二ベクトル法 I 法を用いたロボットは学習者との短期的な共同学習において，学習者に共感を実感させるような感情を表出することができる．しかしながら，長期的な共同学習においては，二ベクトル法 I 法を用いたロボットは画一的な感情表出となるため，学習者に共感していると実感させるのが難しいと考える．

本章では，長期的な共同学習において，学習者がロボットは自分の気持ちに共感しているとより強く実感できることを目指し，二つの感情ベクトルの大きさと角度を学習者の正誤判定と所要解答時間に応じて直接変動して，感情ベクトルの大きさと角度の両方を基に感情表出を行う共感表出法 (二ベクトル法 II) を提案するとともに，その手法を用いたロボットが，学習者と共に学習することによって学習者に及ぼす効果について検討する．二ベクトル法 II は，Russell の感情円環モデル [56] を基に感情表出を行う共感表出法である．二ベクトル法 II は，学習者が問題に正解した場合は正解用感情ベクトルを，不正解した場合は不正解用感情ベクトルを基に表出する感情を決定する．さらに，二つの

感情ベクトルはそれぞれのベクトル位置を保持しながら，学習者の正誤判定と問題の解答時間に応じてベクトルの大きさと角度を変動することで，第 3 章の二ベクトル法 I と同じように学習者の学習経過に応じて，ロボットが異なる感情を表出できるように設定する．

本章では，まず 2 節において第 3 章で提案した二ベクトル法 I の問題点を述べる．次に，3 節において感情ベクトルを用いて学習者に共感する感情表出を行う共感表出法について説明する．4 節で二ベクトル法 II を用いたロボットが学習者に与える心理効果および学習者を調査した実験結果を報告する．最後に 6 節で考察し，7 節でまとめる．

4.2 二ベクトル法 I の問題点

第 3 章において，Russell の感情円環モデルを基に正解と不正解用の二つの感情ベクトルの角度を用いて感情表出を行うことで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法 (二ベクトル法 I) を提案した．二ベクトル法 I では，正誤判定と所要解答時間に応じて感情ベクトルの X と Y 座標が変動する．実験により，二ベクトル法 I を用いたロボットが学習者と共に学習した場合，ランダムに感情を表出するロボットと比べて，学習者に好印象を与える傾向があることがわかった．しかしながら，第 2 章で提案した，ユーザに同調するように感情を表出する感情表出法 (一ベクトル法 I) を実装したロボットと比較した場合，学習者に与える印象評価に大きな違いは表れなかった．

この原因として，感情ベクトルの角度が大きくは変動せず，画一的な感情表出となってしまったことが要因と考えられる．二ベクトル法 I は，感情ベクトルの X 座標を学習者の正誤判定，Y 座標を学習者の解答時間に応じて変動させ，感情ベクトルの位置と角度 θ に応じて表出する感情を決めていた．しかしながら，特に X 座標の絶対値が大きいとき，Y 座標が大きく変化しない限り，感情ベクトルの “角度” は大きく変動することはない．例えば，学習者の正解率は常に低く，解答時間はと長い場合，二ベクトル法 I における感情表出は，不正解用感情ベクトルの角度が基準となる．そのため，解答時間も長かったため，不正解用感情ベクトルは X 方向に -0.2, Y 方向に -0.2 されることが多くなり，角度は 45 度付近の一定の値で固定されていたと考えられる．これにより，感情表出が画一的なものになり，一ベクトル法 I と大きな違いがなかったと考えられる．そのため，長期的な共同学習では，二ベクトル法 I 法を用いたロボットは画一的な感情表出となるため，学習者に共感していると実感させるのが難しいと考える．

この解決案として，感情ベクトルの X と Y 座標ではなく，感情ベクトルの原点からの大きさと角度を直接的に変動させる方法が考えられる．これにより，感情ベクトルが正解/不正解や解答時間に合わせて大きく変動し，画一的な感情の表出を防ぎ，長期的な共

同学習においても，学習者がロボットは自分の気持ちに共感していると実感することが可能になると考えられる．

4.3　感情ベクトルの大きさと角度を変動する共感表出法への改良

本章で提案する共感表出法 (二ベクトル法Ⅱ) は，第 2 章，第 3 章と同様に Russell の感情円環モデル [56] を基に感情を表出する手法である．本章では，第 2 章で提案した感情表出法と同様に，一つの感情ベクトルに応じて感情表出を行う一ベクトル法Ⅱと，二つの感情ベクトルを応じて感情表出を行う二ベクトル法Ⅱの二つをロボットに実装して，被験者実験を行う．第 3 章における一ベクトル法Ⅰでは，ベクトルの角度のみにより対応する感情を決意する点や，24 種類の感情を強弱なく 15 度ずつ配置している点で，次節で示す一ベクトル法Ⅱとは異なる．しかし本論文では，正解/不正解の二つの感情ベクトルを用いることで，ロボットが学習者に共感しているように感じさせることを試み，またその効果を検証するため，その他の要素を二ベクトル法Ⅱに合わせることで比較する．それぞれの手法において，感情ベクトルの原点からの大きさ L を学習者の正誤判定，角度 θ を学習者の解答時間に応じて変動させ，大きさ L と角度 θ により表出する感情を決定する．

4.3.1　一ベクトル法Ⅱ

この手法 (図 4.1) では，感情ベクトル $\vec{A}$ を用いて，円環モデル上における感情を決定する．$L\cos\theta$ は快-不快の軸，$L\sin\theta$ は覚醒-睡眠の軸に対応し，$-1.0 \leq L \leq 1.0$ かつ $-90 \leq \theta \leq 90$ の範囲内で以下のように感情ベクトルが変動する．

if(学習者が問題に正解)
　$L_{\vec{A}} \leftarrow L_{\vec{A}} + 0.2$
$else$
　$L_{\vec{A}} \leftarrow L_{\vec{A}} - 0.2$
if(解答時間 $<$ 基準時間)
　$\theta_{\vec{A}} \leftarrow \theta_{\vec{A}} + 15$
$else$
　$\theta_{\vec{A}} \leftarrow \theta_{\vec{A}} - 15$

解答時間は学習者が問題を解くのに費やした時間であり，基準時間は学習者の一回前

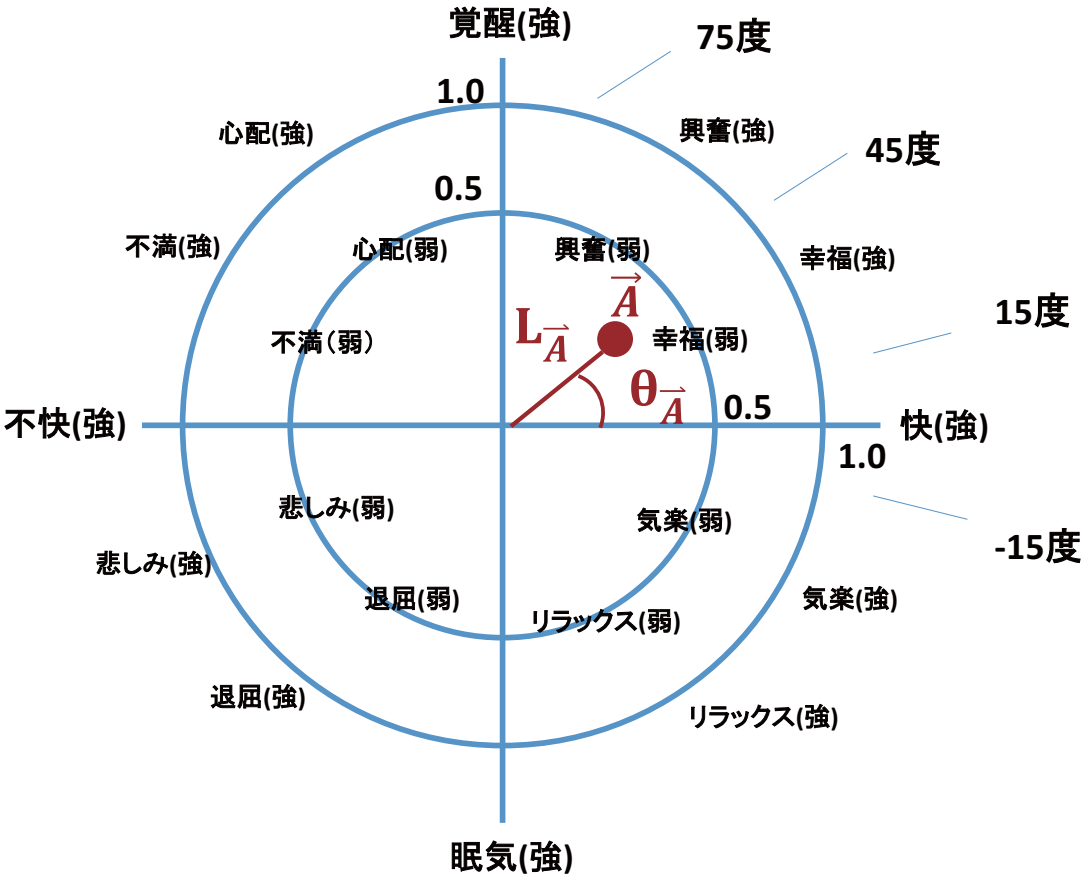


図 4.1: 一ベクトル法 II の概要

の問題における解答時間とする．ただし，1 問目の問題の場合は，基準時間を学習者の一回前の学習における平均解答時間とする．この手法では，図 3.1 に示されている，24 種類の感情を使用し，θ で表出する感情の種類を，L で感情の強弱を決定することで感情を表出する．各感情は 30 度間隔，感情の種類は強，弱それぞれ 12 種類である．例えば，図 3.1 のように，感情ベクトル $\vec{A}$ の $L_{\vec{A}}$ が $0.0 \leq L_{\vec{A}}$ かつ $15 < \theta_{\vec{A}} \leq 45$ の場合は，快側の感情「幸福」を，$L_{\vec{A}} < 0.0$ かつ $15 < \theta_{\vec{A}} \leq 45$ の場合は，不快側の感情「不満」を表出する．また，$L_{\vec{A}} \leq 0.5$ の場合は “弱” の感情を，$0.5 < L_{\vec{A}} \leq 1.0$ の場合は “強” の感情を表出する．

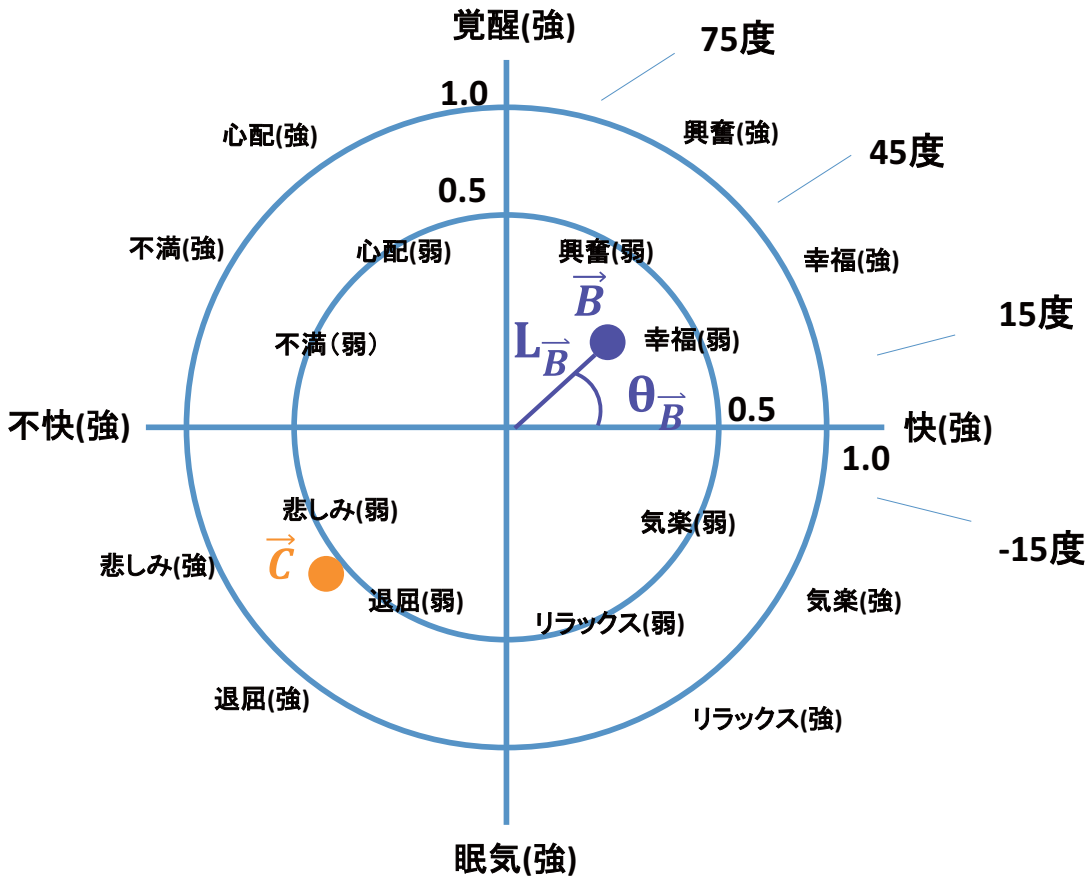


図 4.2: 二ベクトル法 II の概要

4.3.2　二ベクトル法 II

この手法 (図 4.2) では，学習者にロボットが共感していると感じさせるために，正解用感情ベクトル $\vec{B}$ と，不正解用感情ベクトル $\vec{C}$ の二つを用いて，円環モデル上における感情を決定する．学習者が問題に正解した場合は $\vec{B}$ を，不正解であった場合は $\vec{C}$ を基準に感情を表出する．$\vec{B}$ は $0 \leq L_{\vec{B}} \leq 1.0$ かつ $-90 \leq \theta_{\vec{B}} \leq 90$，$\vec{C}$ は $-1.0 \leq L_{\vec{C}} \leq 0$ かつ $-90 \leq \theta_{\vec{C}} \leq 90$ の範囲内で座標点を移動する．$L\cos\theta$ は快-不快の軸，$L\sin\theta$ は覚醒-睡眠の軸に対応し，以下のように感情ベクトルが変動する．

if(学習者が問題に正解)

$L_{\vec{B}} \leftarrow L_{\vec{B}} + 0.2$

$L_{\vec{C}} \leftarrow L_{\vec{C}} + 0.2$

$else$

$L_{\vec{B}} \leftarrow L_{\vec{B}} - 0.2$

$L_{\vec{C}} \leftarrow L_{\vec{C}} - 0.2$

if(解答時間 $<$ 基準時間)

if(学習者が問題に正解)

$\theta_{\vec{B}} \leftarrow \theta_{\vec{B}} + 15$

$else$

$\theta_{\vec{C}} \leftarrow \theta_{\vec{C}} + 15$

$else$

if(学習者が問題に正解)

$\theta_{\vec{B}} \leftarrow \theta_{\vec{B}} - 15$

$else$

$\theta_{\vec{C}} \leftarrow \theta_{\vec{C}} - 15$

一ベクトル法Ⅱと同様に，解答時間は学習者が問題を解くのに費やした時間であり，基準時間は学習者の一回前の問題における解答時間とする．ただし，1 問目の問題の場合は，基準時間を学習者の一回前の学習における平均解答時間とする．また，用いる感情の種類，および表出する感情の決定方法などは，全て一ベクトル法Ⅱと同じであるが，正誤判定に応じて，表出する感情を決定するための感情ベクトルが異なっている．

4.4 実験

実験の方法および結果は，Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research(vol.5, no.1, pp.51-57, 2015) に掲載された，“An Emotional Expression Model for Educational-Support Robots” および，IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics(2015) にに掲載された，“Learning Effect of Collaborative Learning between Human and Robot having Emotion Expression Model” を統合したものを示す．

4.4.1 方法

二ベクトル法Ⅱがもたらす学習効果を調査するために，学習者に二ベクトル法Ⅱを実装したロボットと共に学習してもらい，一ベクトル法Ⅱを実装したロボットと共に学習する学習者，およびランダムに感情を表出するロボットと共に学習する学習者と比較する．学習者は第 3 章で使用した SPI 学習システム (図 3.5) を用いてロボットと共に学習す

る．また，ロボットも第 3 章で使用した Ifbot(図 2.3) を用い，動作や発話種類は第 3 章のものと同様である．学習者は理系大学院生および大学生 15 名である．本実験では，長期的な共同学習においても二ベクトル法Ⅱを用いたロボットが学習者に共感していると実感させるかどうか調査するために，1ヵ月間という長期的な実験を実施する．そこで 15 名の学習者を，二ベクトル法Ⅱを実装したロボットと共に学習する「二ベクトル法Ⅱ群」，一ベクトル法Ⅱを実装したロボットと共に学習する「一ベクトル法Ⅱ群」，ランダムで感情を表出するロボットと共に学習する「ランダム表出群」に 5 名ずつ振り分けて，1ヵ月間，1 回 45 分の学習を週に 2〜3 回程度行う．学習は合計 10 回行われる．ランダム表出群におけるロボットの感情の種類は，一ベクトル法Ⅱ，二ベクトル法Ⅱで表出される感情と同じものであり，ロボットは学習者が正解した場合は，図 4.1，図 4.2 における軸の右側 $(0 \leq X)$ から，不正解した場合は軸の左側 $(0 > X)$ から，それぞれランダムに感情を表出する．実験手順は以下の通りである．

・1 回目の学習

学習者は，単独で学習システムを用いて学習する．この学習で学習者の事前知識を測る．

・2 回目の学習

学習者は，群に応じたロボットと共に学習システムで学習する．学習後，ロボットの印象を測るために SD 法によるアンケートを実施する．このアンケートを初回 SD 法とする．

・3〜8 回目の学習

アンケートなどは実施せず，学習者は群に応じたロボットと共に学習システムで学習する．

・9 回目の学習

2 回目の学習と同様に，ロボットとの共同学習を終えた学習者に，SD 法によるアンケートを実施する．このアンケートを最終回 SD 法とする．

・10 回目の学習

1 回目の学習と同様に，学習者は単独で学習システムを用いて学習する．この学習で実験を通して学習者が獲得した事後知識を測る．

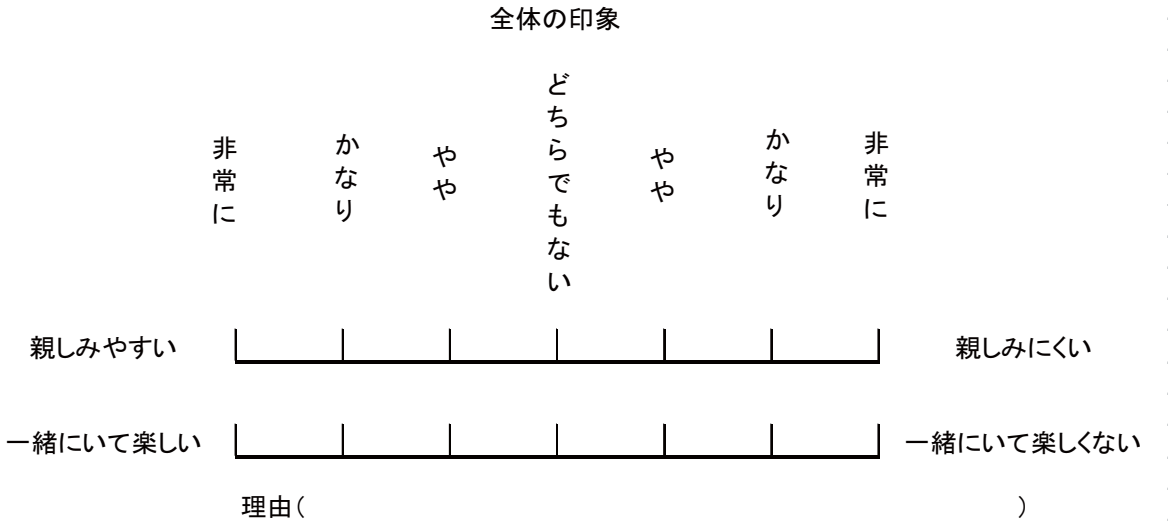


図 4.3: SD 法による印象評価

4.4.2 評価基準

各群の学習者における 1 回目の学習における正解数と 10 回目の学習における正解数の点数の差 (向上点数) で学習効果をみる．前章と同様にロボットが学習者に共感しているかどうかを直接計測するのは難しいが，学習者がロボットは自分の気持ちに共感していると実感した場合，学習者はロボットから,「親しい」や「気持ちの良い」などの好印象を受けると考える．そのため，ロボットの印象評価には，Osgood らにより考案された，印象の定量的評価方法である SD 法を用いた [53]．SD 法の項目は，親密度と共感度を測るための項目で構成されている．親密度の項目は，従来研究 [19] を参考に,「親しみやすい」,「一緒にいて楽しい」,「感じの良い」,「思いやりのある」,「感情的な」,「優しい」の 6 対の形容詞による SD 法を用いた．共感度の項目は,「私の気持ちをわかってくれる」,「私と感情の変化が似ている」,「共に喜んでくれる」,「共に悲しんでくれる」の 4 対の形容詞による SD 法を用いた．SD 法によるアンケート (図 4.3) では，図 4.3 の最左部にある「非常に」を 7 とし，右に 1 つ移動するにつれて −1 とする 1〜7 の評点で数値化した．また，学習者にはそのように評価した理由も記入してもらった．

向上点数の検定には分散分析 [21] を，SD 法のアンケート項目の検定には二元配置分散分析 [33] を，下位検定にはフィッシャーの PLSD 法 [57] をそれぞれ適用し，検定を実施した．有意水準 5% のときに有意差を認めるものとし，検定を繰り返すことで生じる多重比較の問題 [9] を防ぐために，BH 法 [14] を用いて有意水準を調整した．

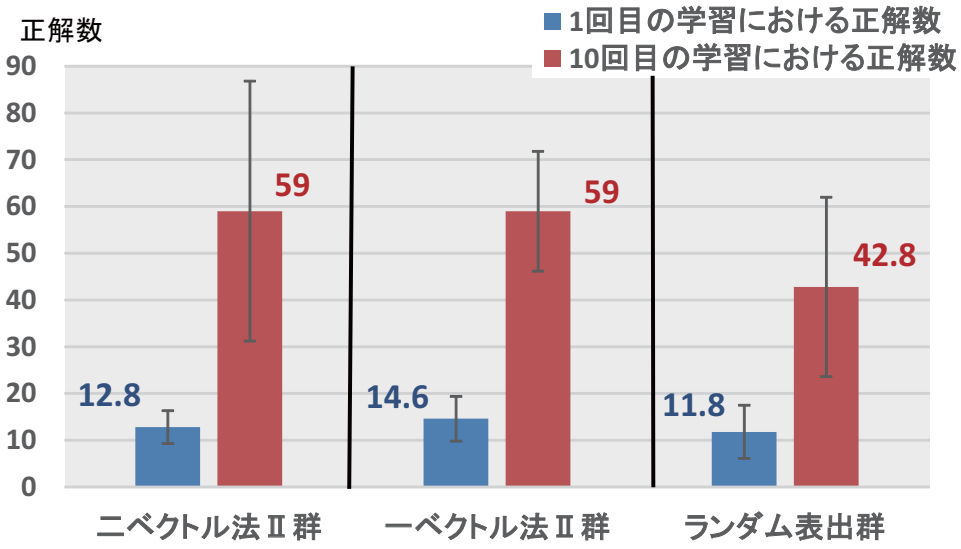


図 4.4: 各群の 1 回目，10 回目の学習における正解数の平均

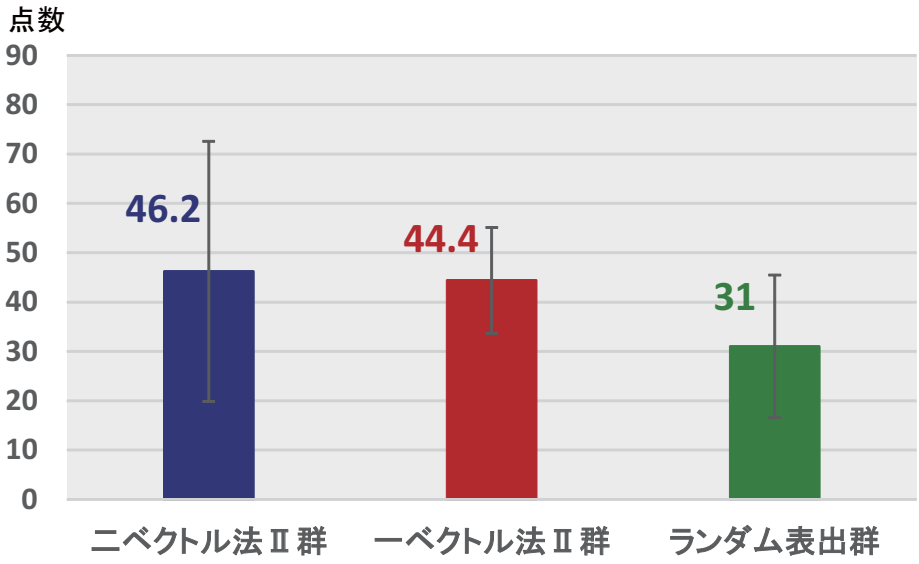
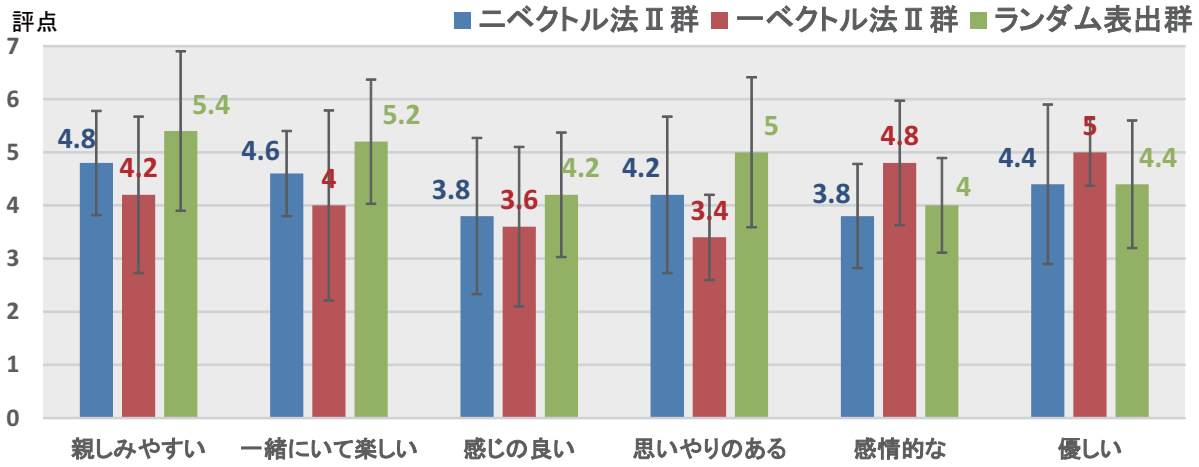


図 4.5: 各群の向上点数の平均

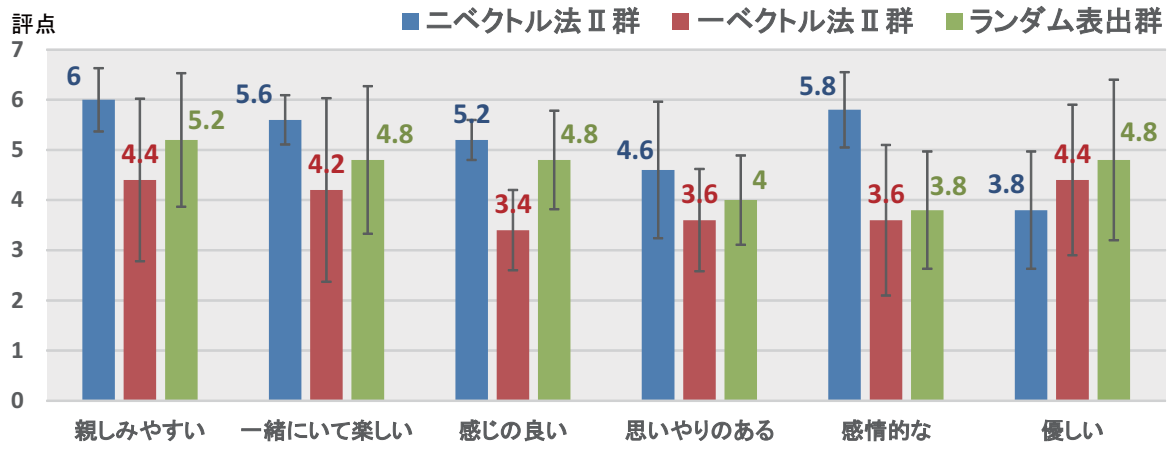
4.4.3　結果

向上点数

図 5.8 に，各群の 1 回目，10 回目の学習における正解数の平均を示す．同図において，左が二ベクトル法Ⅱ群，中央が一ベクトル法Ⅱ群，右がランダム表出群の平均点である．図 5.8 から，各群の 1 回目の学習における正解数の平均点には，大きな点数の差はないこ



初回



最終回

図 4.6: 親密度の SD 法によるアンケート結果

とがわかる．そのため，学習前の各群における学習者の学力は等質であったと考えられる．次に，各群の向上点数の平均を図 5.9 に示す．図 5.9 から，向上点数は二ベクトル法Ⅱ群が最も高く，次いで一ベクトル法Ⅱ群，ランダム表出群の順であることがわかる．各群間の学習効果を比較するため，分散分析による検定を実施した．その結果，各群間において向上点数に有意差は認められなかった $(t = 0.81, df = (2, 12), p = 0.47, n.s.)$．しかしながら，各群の向上点数の信頼区間を算出したところ，二ベクトル法Ⅱ群の 95% の信頼区間は 19.5〜72.9，一ベクトル法Ⅱ群は 33.5〜55.3，ランダム表出群は 16.4〜45.6 であり，二ベクトル法Ⅱ群の信頼区間は，他の群に比べて範囲が広いが，上限値が最も高いことがわかった．このことから，向上点数の差に有意差は認められないものの，他の群に比べて，二ベクトル法Ⅱ群の学習者は成績が向上する可能性があると考えられる．

表 4.1: 初回親密度の SD 法による二元配置分散分析の結果

	F	df	$p\ value$
A(各群)	1.22	2,72	0.58 n.s.
B(各項目)	1.29	5,72	1.28 n.s.
A*B 交互作用	0.70	10,72	1.82 n.s.

表 4.2: 最終回親密度の SD 法による二元配置分散分析の結果

	F	df	$p\ value$
A(各群)	6.24	2,72	0.00 *
B(各項目)	1.37	5,72	0.76 n.s.
A*B 交互作用	1.73	10,72	0.86 n.s.

表 4.3: 最終回親密度の SD 法によるフィッシャーの PLSD 法の結果

	T	$p\ value$
二ベクトル法Ⅱ群*一ベクトル法Ⅱ群	3.57	0.00 *
二ベクトル法Ⅱ群*ランダム表出群	1.74	0.09 n.s.
一ベクトル法Ⅱ群*ランダム表出群	1.83	0.07 n.s.

親密度の SD 法

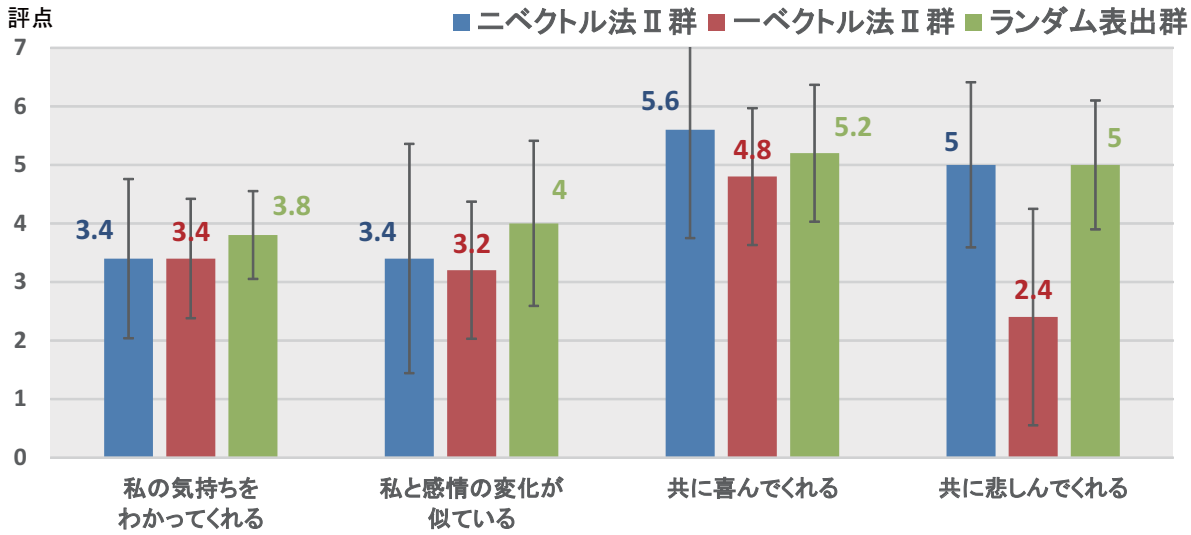
図 4.6 に，ロボットとの初回および最終回学習後に実施した，親密度の SD 法によるアンケートで得られた評価値の平均値を示す．図の各形容詞において，左が二ベクトル法 II 群，中央が一ベクトル法Ⅱ群，右がランダム表出群の平均点である．図 4.6(a) から，初回においては,「親しみやすい」,「一緒にいて楽しい」,「感じの良い」,「思いやりのある」の評価値は，ランダム表出群が最も高く，順に二ベクトル法Ⅱ群，一ベクトル法Ⅱ群であることがわかる．初回における各群間の親密度を比較するため，二元配置分散分析を行った．第一要因を，二ベクトル法Ⅱ群，一ベクトル法Ⅱ群，ランダム表出群，第二要因を，アンケートの各項目として分析を行った．その結果，表 4.1 に示すように，要因 1，要因 2，および二次交互作用すべてにおいて有意差は認められなかった．表 4.1 にお

いて，F は検定統計量 F 値，df は郡間の自由度 (左) と群内の自由度 (右)，$p\ value$ が P 値を示している．このことから，初回の共同学習においては，各群間について，学習者がロボットから受ける親密度には差がないと考えられる．

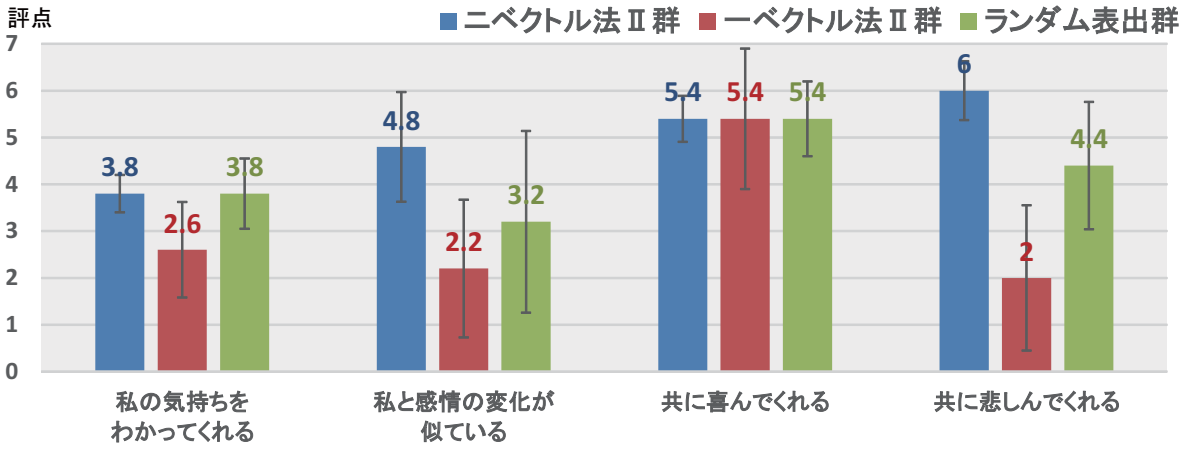
一方図 4.6(b) から，最終回においては,「親しみやすい」,「一緒にいて楽しい」,「感じの良い」,「思いやりのある」,「感情的な」の評価値は，二ベクトル法Ⅱ群が最も高いことがわかる．また，最終回の SD 法における二ベクトル法Ⅱ群の評価値 (図 4.6(b)) は，初回の SD 法 (図 4.6(a)) に比べて，全体的に向上していることがわかる．一方で，最終回の SD 法におけるランダム表出群の評価値 (図 4.6(b)) は，初回の SD 法 (図 4.6(a)) に比べて，全体的に減少している．最終回における各群間の親密度を比較するため，二元配置分散分析を行った．第一要因を，二ベクトル法Ⅱ群，一ベクトル法Ⅱ群，ランダム表出群，第二要因を，アンケートの各項目として分析を行った．その結果，表 4.2 に示すように，要因 2(各項目) および二次交互作用での有意差は認められなかったが，要因 1(各群) では有意差が認められた．そこで，群間における親密度を比較するために，要因 1(各群) について，下位検定であるフィッシャーの PLSD 法を行った．その結果，表 4.3 に示すように，二ベクトル法Ⅱ群と一ベクトル法Ⅱ群間において有意差が認められた．これらのことから，一ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法と比較して，二ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法が，高い親密度を得ていたと考えられる．また，学習が進むにつれて，二ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法は，他の群におけるロボットの感情表出方法に比べて，親密度を向上させる傾向があることがわかる．

共感度の SD 法

図 4.7 に，ロボットとの初回および最終回学習後に実施した，共感度の SD 法によるアンケートで得られた評価値の平均値を示す．図の各形容詞において，左が二ベクトル法Ⅱ群，中央が一ベクトル法Ⅱ群，右がランダム表出群の平均点である．図 4.7(a) から，初回においては,「共に喜んでくれる」の評価値は二ベクトル法Ⅱ群が,「私の気持ちをわかってくれる」,「私と感情の変化が似ている」の評価値はランダム表出群が最も高いことがわかる．初回における各群間の共感度を比較するため，二元配置分散分析を行った．第一要因を，二ベクトル法Ⅱ群，一ベクトル法Ⅱ群，ランダム表出群，第二要因を，アンケートの各項目として分析を行った．その結果，表 4.4 に示すように，要因 1，要因 2 および二次交互作用すべてにおいて有意差は認められなかった (B(各項目) の P 値が 0.03 となっているが，多重比較を考慮しているため，有意水準 5% は満たしていない)．このことから，初回の共同学習においては，各群間について，学習者がロボットから受ける共感度には差がないと考えられる．



初回



最終回

図 4.7: 共感度の SD 法によるアンケート結果

表 4.4: 初回共感度の SD 法による二元配置分散分析の結果

	F	*df*	*p value*
A(各群)	2.64	2,48	0.15 n.s.
B(各項目)	3.80	3,48	0.04 n.s.
A*B 交互作用	0.92	6,48	0.68 n.s.

表 4.5: 最終回共感度の SD 法による二元配置分散分析の結果

	F	df	$p\ value$
A(各群)	10.9	2,48	0.00 *
B(各項目)	7.63	3,48	0.00 *
A*B 交互作用	2.30	6,48	0.18 n.s.

表 4.6: 最終回共感度の SD 法によるフィッシャーの PLSD 法の結果

	T	$p\ value$
二ベクトル法Ⅱ群*一ベクトル法Ⅱ群	3.92	0.00 *
二ベクトル法Ⅱ群*ランダム表出群	1.61	0.11 n.s.
一ベクトル法Ⅱ群*ランダム表出群	2.31	0.02 n.s.

一方図 4.7(b) から，最終回においては,「私と感情の変化が似ている」,「共に悲しんでくれる」の評価値は，二ベクトル法Ⅱ群が最も高いことがわかる．また，最終回の SD 法における二ベクトル法Ⅱ群の「私と感情の変化が似ている」と「共に悲しんでくれる」の評価値 (図 4.7(b)) は，初回の SD 法 (図 4.7(a)) に比べて，大きく向上していることがわかる．一方で，最終回の SD 法におけるランダム表出群の「私の気持ちをわかってくれる」と「私と感情の変化が似ている」の評価値 (図 4.7(b)) は，初回の SD 法 (図 4.7(a)) に比べて減少していることがわかる．最終回における各群間の共感度を比較するため，二元配置分散分析を行った．第一要因を，二ベクトル法Ⅱ群，一ベクトル法Ⅱ群，ランダム表出群，第二要因を，アンケートの各項目として分析を行った．その結果，表 4.5 に示すように，二次交互作用での有意差は認められなかったが，要因 1(各群) および要因 2(各項目) では有意差が認められた．そこで，群間における親密度を比較するために，要因 1(各群) について，下位検定であるフィッシャーの PLSD 法を行った．その結果，表 4.6 に示すように，親密度と同様，二ベクトル法Ⅱ群と一ベクトル法Ⅱ群間において有意差が認められた．これらのことから，一ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法と比較して，二ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法が，高い共感度を得ていたと考えられる．また，学習が進むにつれて，二ベクトル法Ⅱによるロボットの感情表出方法は，他の群におけるロボットの感情表出方法に比べて,「私と感情の変化が似ている」や「共に悲しんでくれる」という共感性を向上させる傾向があることがわかる．

4.4.4　学習者による評価理由の例

初めに，二ベクトル法Ⅱ群の学習者がアンケートに記入した理由例を挙げる．初回親密度の SD 法によるアンケートには,「問題ごとに声をかけてくれるので，解く楽しみがある」,「早く問題を解くと，表情が変わるのが新鮮である」,「間違えたときの言葉が冷たい感じがする」といった意見が書かれていた．そして，最終回のアンケートには,「学習が進むにつれて表情が変わって，表情の種類が多く，楽しかった」,「ロボットの表情変化が楽しく，表情の種類も多く，正解したい気持ちになり，勉強が楽しいと思った」,「不正解時に，大げさに残念がってたり，言葉が冷たいので，優しいとは思えなかった」という意見が書かれていた．また，初回共感度の SD 法によるアンケートには,「問題に正解するとロボットは喜んで，間違えるとロボットは悲しい表情になってくれる」,「時間をかけて問題を解いたときはもっと大きいリアクションをして欲しい」という意見が書かれていた．そして，最終回のアンケートには,「学習が進むにつれて問題を正解するようになり，それに応じてロボットの喜びの表情変化が自分の感情に似ていると思う」,「学習が進むにつれて解答時間が短くなり，それに応じてロボットの表情と発話が自分の感情変化に似てきていると思う」,「正解ばかりしていると同じ表情しか表出しない」,「時間をかけて問題を解いたときの感情が自分とは異なることがある」という意見が書かれていた．これらのことから，二ベクトル法Ⅱ群の学習者は，学習が進むにつれてロボットの表情と発話が変化することで，ロボットから受ける親密さと共感性が増加していったと推測できる．しかしながら，二ベクトル法Ⅱを実装したロボットは，不正解時と，長時間かけて問題を解いた時のロボットの表情と発話が不適切であること，正解数が多いとロボットは画一的な感情表出になることが問題点であったと推測される．

次に，一ベクトル法Ⅱ群の学習者の理由例を挙げる．初回親密度の SD 法によるアンケートには,「問題に正解しても，ロボットは悲しんでいる表情が出てしまうことがあった」,「問題を間違えると，ロボットが喜ぶことがあり，嫌な気分となった」,「ロボットとの学習は新鮮だったが，発話や表情がおかしいと思う」という意見が書かれていた．またこれらと同様な意見が，最終回親密度，初回および最終回共感度の SD 法によるアンケートにも書かれていた．このことから，一ベクトル法Ⅱ群の学習者は，正誤判定とは不適切な感情をロボットが表出することで，親密さと共感性を感じなかったと推測される．

最後に，ランダム表出群の学習者の理由例を挙げる．初回親密度の SD 法によるアンケートには,「解答するたびに話してくれておもしろい」,「正誤判定に応じて表情がかわるのが，おもしろい」,「棒読み的な感じがする」という意見が書かれていた．そして，最終回のアンケートには,「ロボットがいた方が，にぎやかに勉強できる」,「問題を解いた後のロボットからの一声が感じが良かった」,「正解と不正解のときに表出されるロボッ

トの表情パターンが少なすぎるため，学習が進むにつれて飽きてしまう」という意見が書かれていた．また，初回共感度の SD 法によるアンケートには,「正誤判定に応じたロボットの発話内容が適切な感じがする」,「思わずロボットの発話にうなずく時が多々ある」という意見が書かれていた．そして，最終回のアンケートには,「問題に正解すると，一緒に喜んでくれるのが嬉しい」,「感情がかみ合っていないことがある」,「学習が進むにつれてロボットの感情は，自分に似ていないと感じてしまう」という意見が書かれていた．このことから，ランダム表出群の学習者は，学習初めはロボットの表情と発話から，親密さと共感性を感じているが，学習が進むにつれてロボットの表情と発話に飽きてしまい，親密さや共感性が減少していったと推測できる．

4.5 考察

二ベクトル法Ⅱを用いたロボットが，学習者と長期的に共同学習することで，一ベクトル法Ⅱを用いたロボットに比べて，学習者に親密さと共感性を与える効果があった．また，検定による有意差は認められなかったが，アンケート結果および学習者の理由から，二ベクトル法Ⅱを実装したロボットでは，ランダムに感情を表出するロボットに比べて，特に学習が進むにつれて，ロボットから受ける親密さと共感性を増加させる傾向があった．学習効果については，有意差は認められなかったが，二ベクトル法Ⅱを実装したロボットが，他の感情表出法と比較して学習効果が向上する可能性がある．

二ベクトル法Ⅱを実装したロボットが，他の手法に比べて，学習者に好印象を与える傾向があった要因として，二つの感情ベクトルを用いることで学習者に共感した点と，学習者の解答時間に応じて感情ベクトルが変動した点が有効であったと考えられる．実際，正解した場合は快側，不正解した場合は不快側の感情をランダムに表出する，ランダム表出群の学習者のアンケートにおいて,「問題に正解するとロボットは喜んで，間違えるとロボットは悲しい表情になってくれる」,「思わずロボットの発話にうなずく時が多々ある」といった，ロボットが共感していると感じている意見が書かれている．一方で，一ベクトル法Ⅱ群の学習者において,「問題を間違えると，ロボットが喜ぶことがあり，嫌な気分となった」といった，ロボットが共感していないと感じている意見が書かれている．これらが，図 4.6 と図 4.7 において，一ベクトル法Ⅱ群での親密度と共感度が低くなった原因であると考えられる．そして，二ベクトル法Ⅱでは解答時間に応じて感情ベクトルを変動したことで，ランダム表出群に比べて，学習が進むにつれての親密度と共感度の向上につながったと考えられる．学習初め，学習者は問題を解くのに時間をかけている傾向があった．そのため，二ベクトル法Ⅱ群では感情ベクトルが眠気側へ移動し，ロボットが眠気側の感情を表出することが多かった．しかしながら，学習が進むにつれて学習

者が短時間で問題を解く傾向があったため，感情ベクトルが覚醒側へ移動し，ロボットが覚醒側の感情を表出することが多くなった．これにより，学習者に，学習が進むにつれてロボットの表情変化が自分の感情に似ていることや，ロボットの表情の種類が多いことを感じさせ，親密度と共感度を向上させたと考えられる．一方で，ランダム表出群の学習者は，学習初めは，正誤判定に応じての表情変化が楽しいということを感じていたが，ロボットの表情パターンが少ないため，学習終盤ではロボットに飽きてしまったと思われる．本章で用いたロボットの表情パターン数は同じ 24 種類であり，ランダムに表出されることでむしろランダム表出群のロボットの方が，表出した表情の数では多かったと考えられるが，二ベクトル法Ⅱのように一定の規則性を持って徐々に変化していくことで，飽きさせにくくなることを示唆している．ランダム表出群については，従来研究にも報告されている，学習者がロボットとの学習を徐々に飽きるという問題 [29] が生じ，初回に比べて，最終回の親密度と共感度が減少したと考えられる．

しかしながら，二ベクトル法Ⅱ群の学習者から，学習終盤で正解数が増えていくと，ロボットが同じ表情しか表出しないことや，時間をかけて問題を解いたときの感情が自分とは異なるという意見がアンケートに書かれていた．前述のように，学習が進むにつれて解答時間が短くなっていく傾向があり，二ベクトル法Ⅱ群では感情ベクトルが覚醒側へ移動し，ロボットが覚醒側の感情を表出することが多くなっていた．そのため，学習終盤において，二ベクトル法Ⅱ群のロボットは覚醒側かつ快側と範囲が限定されて表情が表出され，ロボットが同じ表情しか表出しないと感じさせたと思われる．また，学習者によっては，学習終盤でも長時間かけて問題を解く者もいた．そのような学習者に対しては，長時間かけて問題を解いた際，覚醒などの大きいリアクションを伴う感情の表出が望ましいと考えられる．実際に，二ベクトル法Ⅱ群の学習者のアンケートにおいて，「時間をかけて問題を解いたときはもっと大きいリアクションをして欲しい」という意見が書かれていた．これらの要因が，二ベクトル法Ⅱ群の親密度，共感度および学習効果の向上の妨げとなり，ランダム表出群との有意差が認められなかったものと考えられる．

4.6　おわりに

本章では，長期的な共同学習において，学習者にロボットが共感しているとより感じさせるために，二つの感情ベクトルの大きさと角度を学習者の正誤判定と所要解答時間に応じて変動させ，感情ベクトルの大きさと角度の両方を基に感情表出を行う共感表出法 (二ベクトル法Ⅱ) を提案した．そして，二ベクトル法Ⅱを用いたロボットが，学習者と長期的に共同学習することによって及ぼす学習効果について検討した．二ベクトル法Ⅱは，Russell の感情円環モデル上で，ロボットが学習者に共感できるように，正解と不

正解用の二つの感情ベクトルを用いて感情を表出する感情表出法である．さらに，感情ベクトルの原点からの大きさと角度を，学習者の正誤判定と解答時間に応じて変動させることで，学習者の学習経過に応じて異なる感情を表出することを可能としている．実験により，二ベクトル法Ⅱを実装したロボットが，学習者と長期的に共同学習することで，一つの感情ベクトルを基に感情表出する一ベクトル法Ⅱを実装したロボット，およびランダムに感情を表出するロボットと比べて，特に学習が進むにつれて，学習者に親密さと共感性を持たせる傾向があることを示した．

これまでの実験では，ロボットは正誤判定時のみに動作していた．そのため，ロボットが無視されることはなく，学習者がロボットに対して飽きているかどうか定量的に判断することは出来なかった．第 6 章では，ロボットに二ベクトル法Ⅱだけでなく，学習者と共に問題を解き合うような行動モデルも実装して，学習者とロボットが共に学ぶ合う学習実験を実施することで，提案した二ベクトル法Ⅱが飽きの問題に対して有効であるか検証していく．

第5章

建設的相互作用を促すロボットの行動モデルの提案

5.1　はじめに

第1章で述べたように，従来のパートナーロボットの2点目の問題点として，単独の学習者と共に学び合うために，自立して行動するロボットの行動モデルがないという問題がある．この問題点を解決するため，二人の学習者による協調学習の成立メカニズムである建設的相互作用 [60] [40] を用いることが有効であると考えた．建設的相互作用とは，二人の学習者が交互に問題を解くことで起きる相互作用である．

そこで本章では，学習者に建設的相互作用を促して，学習者と交互に問題を解くことで協調学習を行うロボットの行動モデルを提案する．行動モデルは，従来研究を基に問題を解く動作と学習者の解く様子を観察する動作を交互に実行するモデルである．

本章では，まず2節にて人とロボットにおける協調学習の課題について述べる．次に3節で建設的相互について説明した後，4節で学習者に建設的相互作用を促す行動モデルについて述べる．5節で本モデルを実装したロボットによる学習効果，およびアンケートとビデオ分析を基に学習者のロボットへの関わり方について評価する．そして，6節で考察し，7節でまとめる．

5.2　建設的相互作用

二人の学習者による効果的な協調学習の成立手法として，建設的相互作用がある [60] [40]．建設的相互作用は，二人の学習者が同じ問題を解くとき，実際に問題を解いて解き方を提供する「課題遂行者」と，それを俯瞰して意見を聞く「モニター」とに役割がわかれて，やり取りするときに起こる．人同士の協調学習における課題遂行者の行動例と

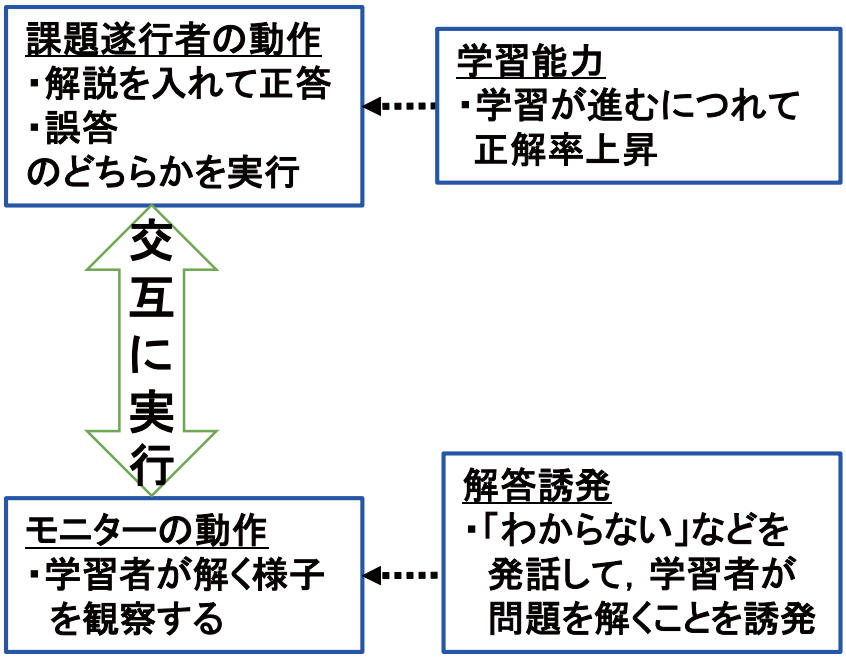
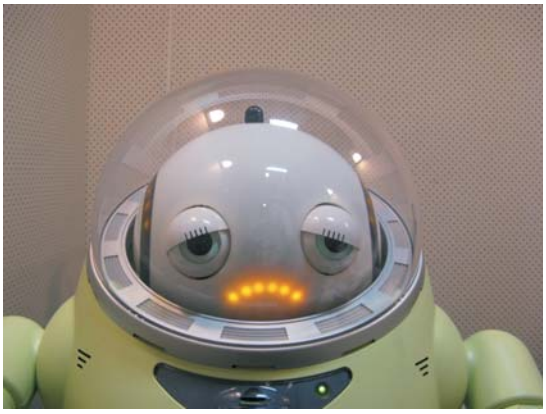


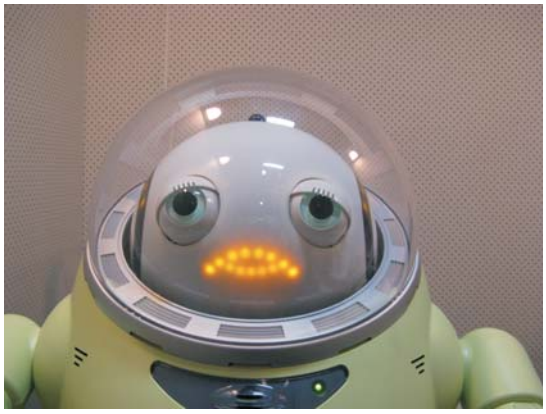
図 5.1: 行動モデルの概要

して，問題を常に正しく解答するのではなく，学習の始めは誤った解答を提示し，学習が進むにつれて正しく解答できるようにする行動がある [61]．この行動を課題遂行者役の学習者が行うことで，パートナーの学習者に共に学んでいることを実感させ，学習意欲と学習効果を向上させるという研究報告がある [62]．モニターの行動例では，考え込む表情を表出ながら，パートナーの学習者に問題を解くように促して,「この問題ってなんで，このように解くの？」などのコメントを行う行動がある [71]．この行動をモニター役の学習者が行うことで，パートナーの学習者に自発的に問題を解くことを促すとともに，自身の理解を見直して学習効果を向上させるという研究報告がある [47]．

これらの行動はロボットでも疑似的に再現可能である．例えば，著者 [22] は，学習が進むにつれて解答の正解率が上昇するロボットと人が共に学ぶことで，教育学で示されている学習効果と同様な効果を促すことができると示唆している．また，松添・田中 [42] は,「わからない」などを発話して考え込むような表情を表出するロボットと人が共に学ぶことで，学習者に自発的に問題を解くことを促して，学習意欲を向上できると示唆している．これらの行動をロボットが交互に実行することで，学習者と交互に問題を解き続ける建設的相互作用を実現でき，単独の学習者と協調学習が行えると考える．

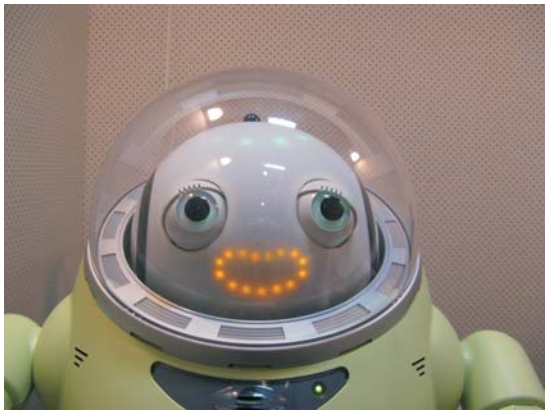


考える表情1

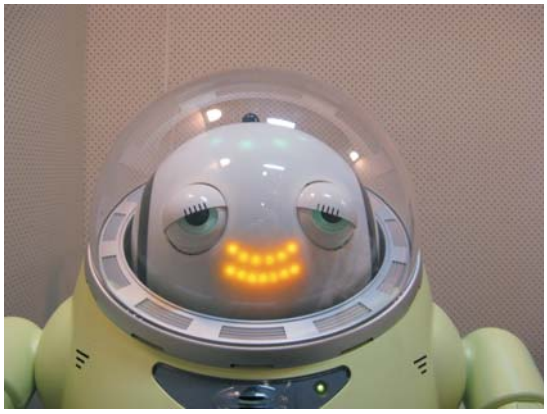


考える表情2

図 5.2: ロボットの考える表情例



話しかける表情1



話しかける表情2

図 5.3: ロボットの話しかける表情例

5.3　建設的相互作用を促す行動モデル

ロボットの行動によって学習者に建設的相互作用を促せるかを検証するため，音声認識などの直接的に意図理解に関わるような機能は使わず，学習システムの画面に応じて動作するロボットの行動モデルを考える．学習者にロボットと交互に問題を解いたり，考えたりする建設的相互作用を体感してもらうために，ロボットには問題を解く「課題遂行者の動作」と，考え込む「モニターの動作」を設定する (図 5.1)．先行研究 [22] [42] を基に課題遂行者では，学習始めは誤答するが，学習が進むにつれて正解率が上昇する動作を，モニターでは,「難しいな」や「わからない」などを発話して考え込む動作を設定する．また，本章では前章と同様に Ifbot(図 2.3) を用いて研究を進める．

(1) 課題遂行者の動作

ロボットは図 5.2 のような，首を下に傾けたり，曲げたりして考える表情を表出しながら「この問題はこのように解くんだよ」などと発話して，問題の解答方法を説明する．次に，図 5.3 のような話す表情を表出しながら,「だから，答えは○○だね」などと発話する．学習の始めは，ロボットの解答正解率は 0% となっており，必ず誤答するが，徐々に解答正解率が上昇していき，最終的には正解のみを解答するように学習能力の機能を備えている．

(2) モニターの動作

ロボットは図 5.4 のような落胆の表情を表出しながら,「僕，これは全くわかんない」，もしくは，図 5.2 のような考える表情を表出しながら,「むずかしいね」や「わからない」などと発話する．これらの発話の後に,「解き方教えてくれない？」や「解いてもらっていい？」などと発話する．落胆および考える表情は繰り返しを避けて，ランダムに表出される．また，ロボットが以前正解した問題であっても，モニターの行動を実行するタイミングであった場合は,「わからない」や「難しい」などを発話しながら落胆もしくは考える表情を表出する．

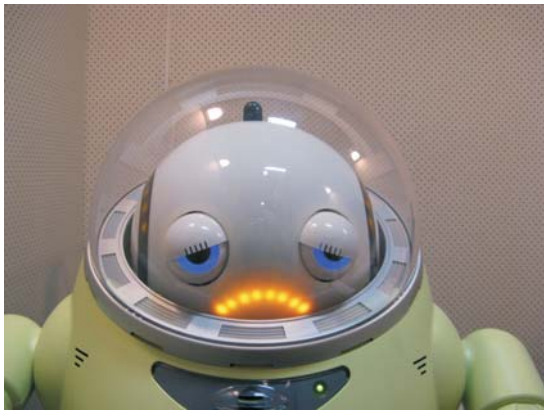
この二つの動作が学習時に行うロボットの基本動作であり，問題が提示されたときに実行される．また，学習者に建設的相互作用を促すために，ロボットは課題遂行者の動作とモニターの動作を交互に行う．これにより，建設的相互作用に基づいてロボットは学習者と協調学習が行えると考える．また，協調学習を行う際に，エージェントが解答の正否によって一緒に喜んだり，悲しんだりするなど，学習者に共感することで学習者の学習意欲の向上を促すという報告がある [41]．そこで，正誤判定が提示されたときに，正否によって「喜びの表情 (図 5.5)」または「落胆の表情 (図 5.4)」を表出しながら，その表情に対応した「やった，正解だね」などの喜びの発話,「ああ，残念」などの落胆の発話を行うことで，学習者に共感を促す動作を行う．本章では，行動モデルの有効性を確認するために，前章で提案した共感表出法は使用しない．

ロボットに実装されている表情は，従来研究 [44] [12] [26] において，被験者実験を通してロボットの表情が「喜び」や「悲しみ」などの感情と対応していると評価された表情の中から，話す表情や喜びの表情と同等なものを用いる．考える表情と話しかける表情はそれぞれ 10 種類，落胆と喜びの表情はそれぞれ 12 種類実装した．これらの表情に対して 10 名の被験者による予備実験を通して，ロボットの発話と違和感がないと過半数以上が評価した発話を対応させた．発話の種類は，表情の種類と同数作成した．

これらにより，学習者はロボットと共に学習していることを体感できることが期待される．

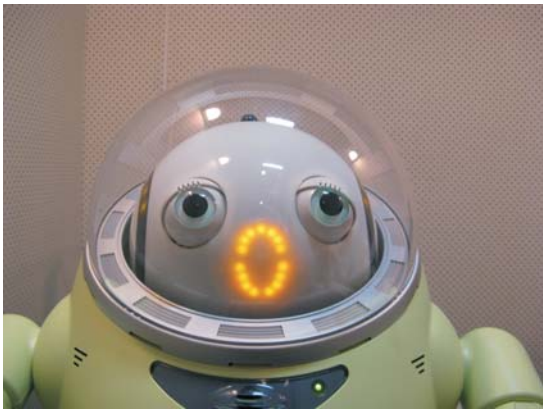


落胆の表情1

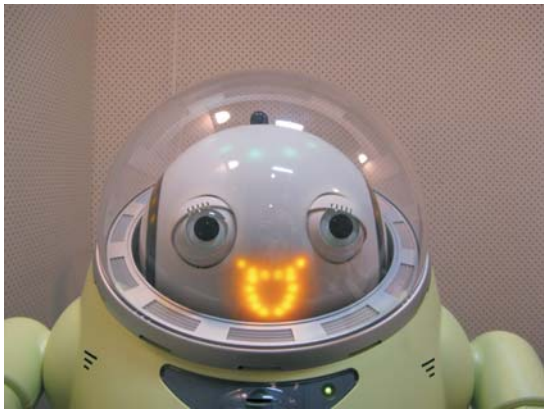


落胆の表情2

図 5.4: ロボットの落胆の表情例



喜びの表情1



喜びの表情2

図 5.5: ロボットの喜びの表情例

5.4　実験

実験では，まず，本モデルを実装したロボットと単独の学習者が共に学ぶ際の学習効果を調査する．次に，学習者のロボットへの関わり方を評価することで，学習者がロボットと交互に問題を解き合えたかを調査する．実験の方法および結果は，“IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics 2015” にて発表した，“Effect of Collaborative Learning with Robot That Prompts Constructive Interaction” を引用する．

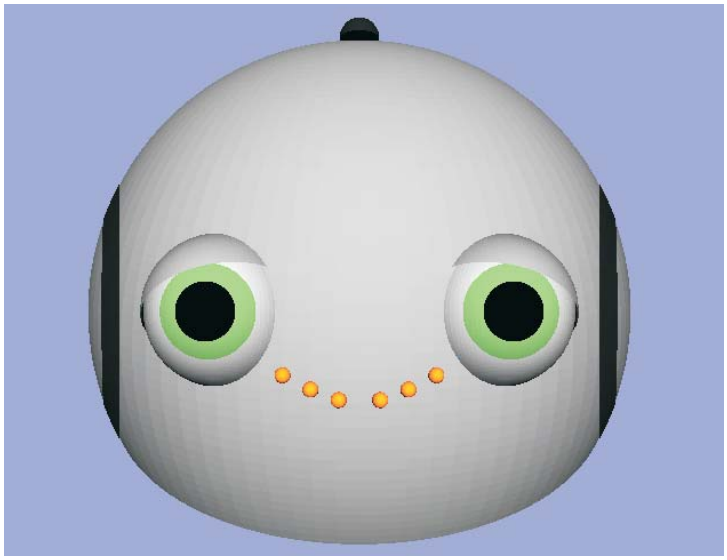


図 5.6: エージェント化した Ifbot

5.4.1 学習効果の調査

方法

学習効果を調査するために，ロボットと共に学習する学習者，画面上のエージェントと共に学習する学習者，人同士で学習する学習者間で比較する．学習内容は基本情報技術者試験の試験範囲とする．学習者は，基本情報技術者資格を有してなく，かつ今回の学習内容に関する授業を履修していない理系大学生 30 名である．また，学習者全員はロボットまたは画面上のエージェントを用いて学習した経験はない．30 名の学習者をロボットと共に学び合う「ロボット共同群」，画面上のエージェントと共に学習び合う「エージェント共同群」，二人一組となって共に学び合う「統制群」に 10 名ずつ振り分けて，1ヵ月間，1 回 40 分の学習を週に 3 回行う．学習は合計 12 回行われる．画面上のエージェントには，Ifbot の頭部をエージェント化した Ifbot(図 5.6) を用い，実機の Ifbot と同一の行動モデルを実装する．また，統制群の学習者には，交互に問題を解き合うように指示する．

学習システム

本稿では，学習内容は理系大学生を学習者として考えているため，学習の動機を与えやすいように，情報処理技術者としての知識・技能を認定している基本情報技術者試験のファイルとデータベースの分野とし，同分野を学習するための学習システム (図 5.7) を開発した．本システムの問題は,「情報処理試験.jp」[52] を参考にした．

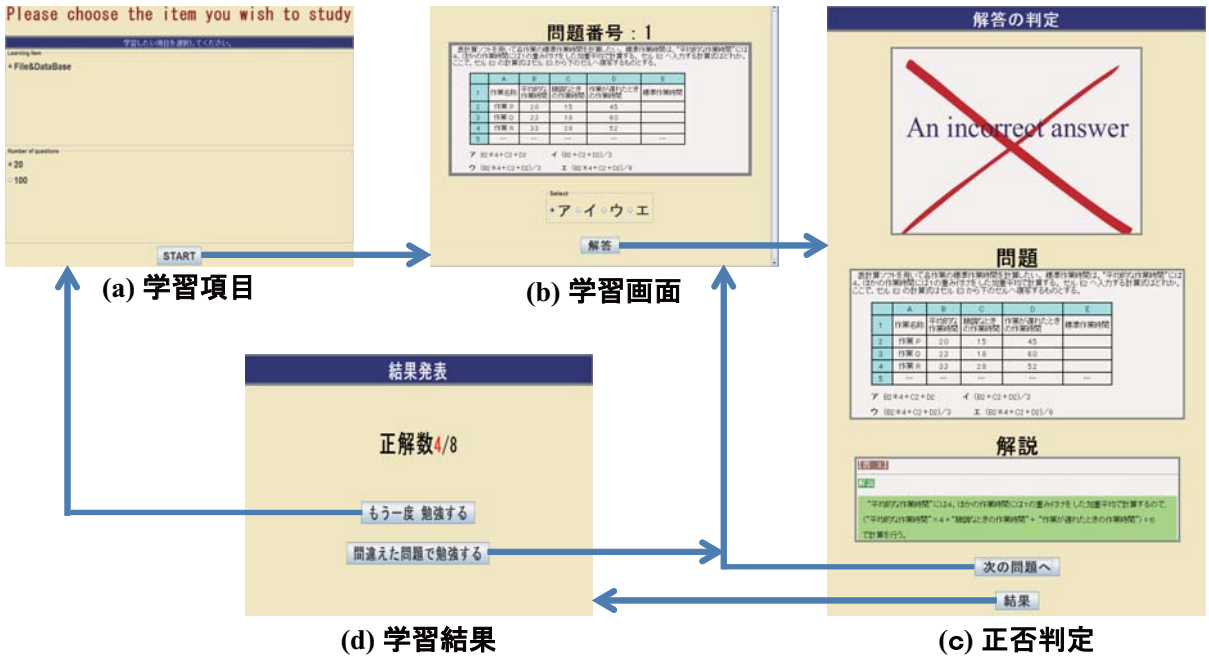


図 5.7: 基本情報技術者試験学習システム

本システムの操作手順について説明する．まず，ログインすると，学習項目と問題数を選択する画面が現れる (図 5.7(a))．今回の学習システムでは，学習項目は “File & DataBase”(ファイルとデータベース) のみである．学習項目の下の問題数で,「20」を選択するとランダムに選ばれた 20 問で,「100」を選択すると全問題で学習を進めることになる.「20」を選択した場合，全問題を解き終わるまで異なる問題が出題されるようになっており，学習項目内の問題を一通り行えるようにしている．学習項目と問題数を選択して「START」を押下すると，図 5.7(b) のような学習画面が現れ，学習を始めることができる．学習者は選択肢から解答を選択した後,「解答」を押下する．押下すると，図 5.7(c) のように，解答の正否と解説が表示される.「次の問題へ」を押下すると次の問題の画面に遷移する.「結果」を押下する，または全問題を解答し終わると，図 5.7(d) のように正解数が表示される．図 5.7(d) で「間違えた問題で勉強する」を押下すると，間違えた問題で学習を行うことができる．また,「もう一度勉強する」を押下すると，学習項目の選択ページ（図 5.7(a)）に戻る．

評価基準

学習者が行動モデルを用いたロボットまたはエージェントと共に学び合うロボット共同群とエージェント共同群が，二人一組となって共に学び合う統制群と同様な学習効果を獲得できるかどうかで行動モデルの妥当性を評価する．学習効果は，後に説明する向

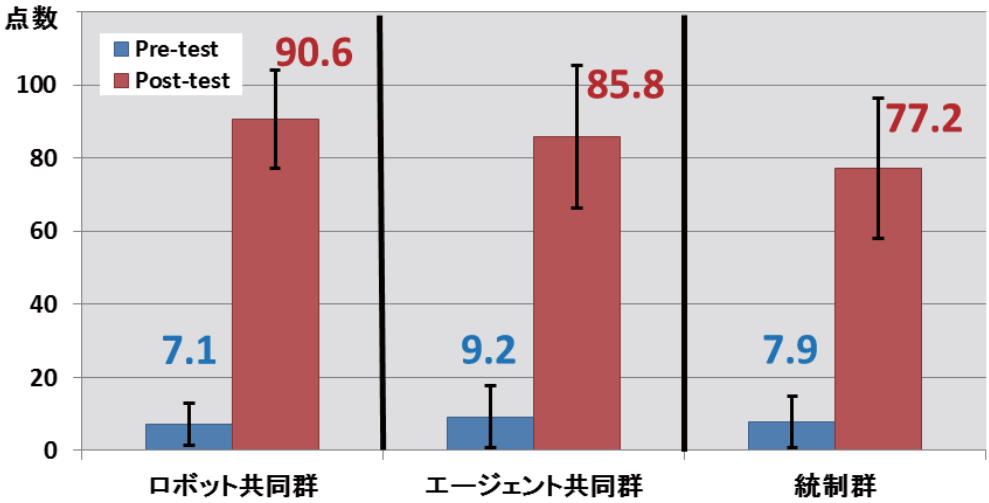


図 5.8: 各群の Pre，Post-test の平均点

上点数と応用テストの点数において評価する．

各群の学習者に Pre-test，Post-test として基本テストを受けてもらい，その点数の差 (向上点数) で学習効果を見る．出題される問題は学習システムと同様の問題であり，100 問で構成される．

また，協調学習によって学習者自らが納得して理解することは，知識の持続性，可搬性，適用性を高めるのに効果的に働き，応用力が身につくと示されている [45]．そこで，学習した内容に関する応用テストを行い，学習者の応用力を評価する．応用テストは基本テストと同一形式であるが，基本情報技術者試験の午後問題 [52] を参考に作成した．

検定には，テューキーの方法を使用する．有意水準 5% ときに有意差を，有意水準 10% のときに有意傾向を認めるものとし，検定を基本テストと応用テストに対して 1 回ずつ行うため，ボンフェローニの方法を用いて名義水準をそれぞれ $p < 0.025$，$p < 0.05$ に調整した [31] [57]．

結果

図 5.8 に各群の Pre，Post-test の平均点を示す．同図において，左がロボット共同群，中央がエージェント共同群，右が統制群の平均点である．図 5.8 から各群の Pre-test の平均には大きな点数の差はないことがわかる．そのため，学習前の各群における学習者の学力は等質であったと考える．次に各群の向上点数の平均を図 5.9 に示す．図 5.9 から向上点数はロボット共同群が最も高く，ついでエージェント共同群，統制群の順であることがわかる．各群間の学習効果を比較するため，テューキーの方法による検定を実施し

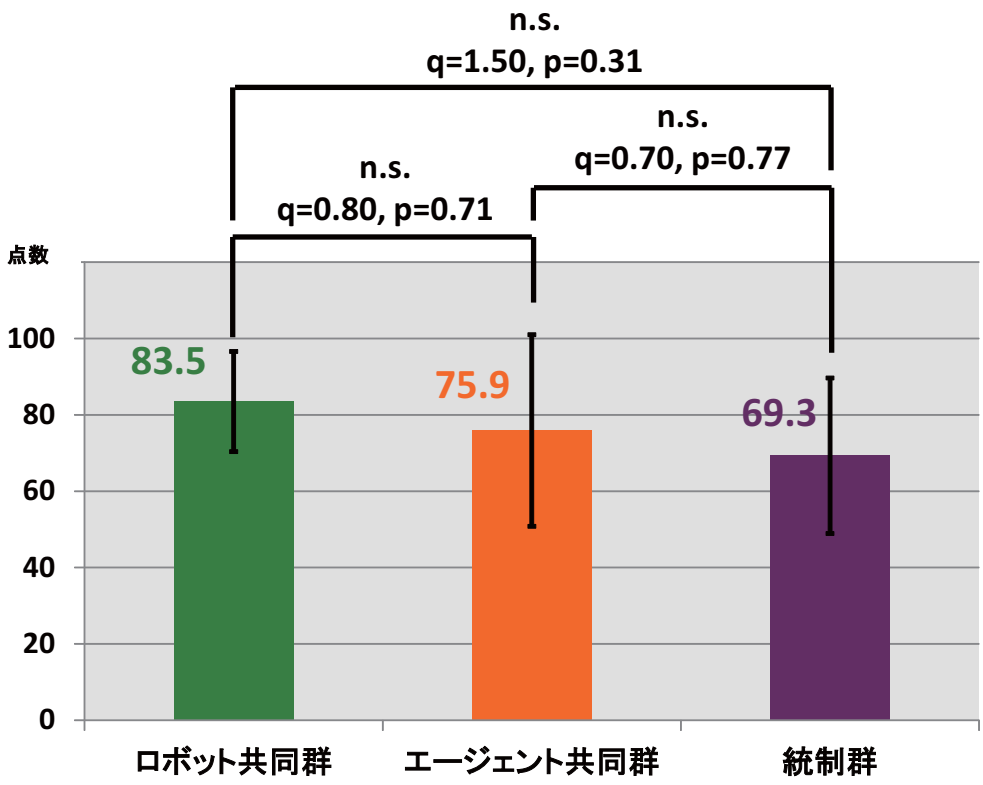


図 5.9: 各群の向上点数の平均

た．その結果，各群間において向上点数に有意差は認められなかった．

次に，各群の応用テストの点数について注目する．図 5.10 に各群の応用テストの平均点を示す．図 5.10 から統制群が最も点数が高く，ついでロボット共同群，エージェント共同群の順であることがわかる．テューキーの方法による検定を実施したところ，統制群とエージェント共同群との間に有意差が，ロボット共同群とエージェント共同群との間に有意傾向が認められた．一方で，ロボット共同群と統制群の間には有意差は認められなかった．このことから，ロボット共同群では応用力を獲得できていない学習者が数名いること，それ以外の学習者は統制群と同等の応用力を獲得できていることが推察できる．図 5.11 にロボット共同群と統制群の各学習者の応用テストの点数を示す．同図からロボット共同群の ID1 と 2 の学習者の点数はエージェント共同群の平均点よりも低いため，応用力を獲得していないと考える．

これらから，向上点数においてロボット共同群と他群間では学習効果の違いは認められなかったが，応用テストでは統制群とエージェント共同群との間に有意差が，ロボット共同群とエージェント共同群との間に有意傾向が認められたため，ロボット共同群の学習者は人同士の協調学習によって身につくような応用力を獲得できる可能性があるこ

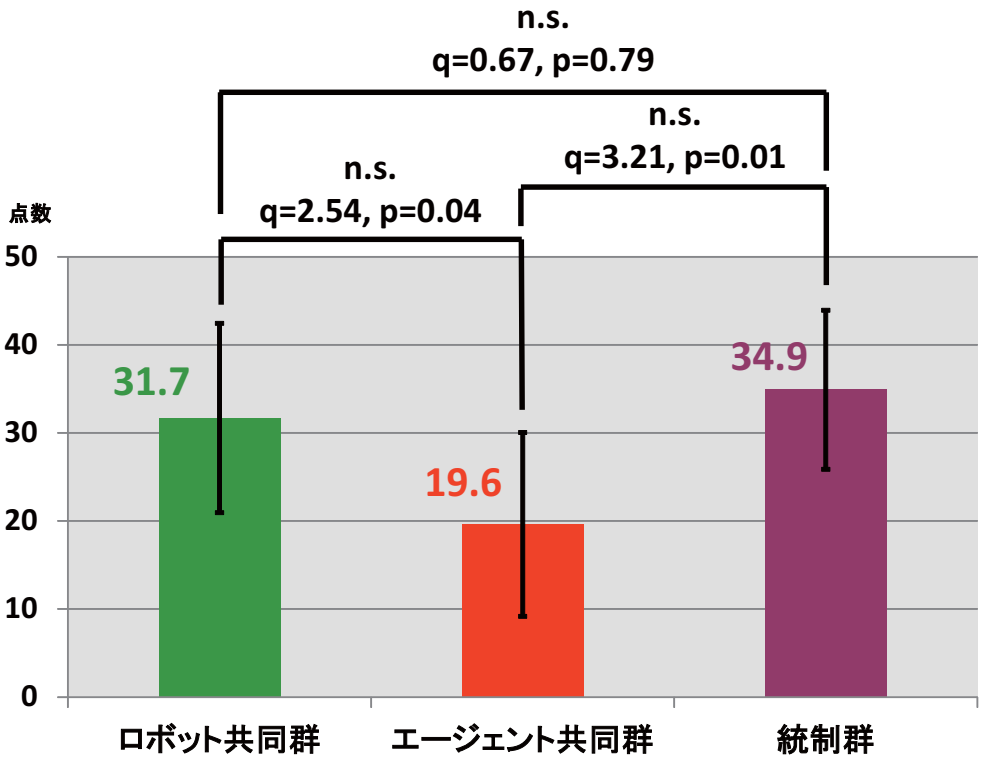


図 5.10: 各群の応用テストの平均

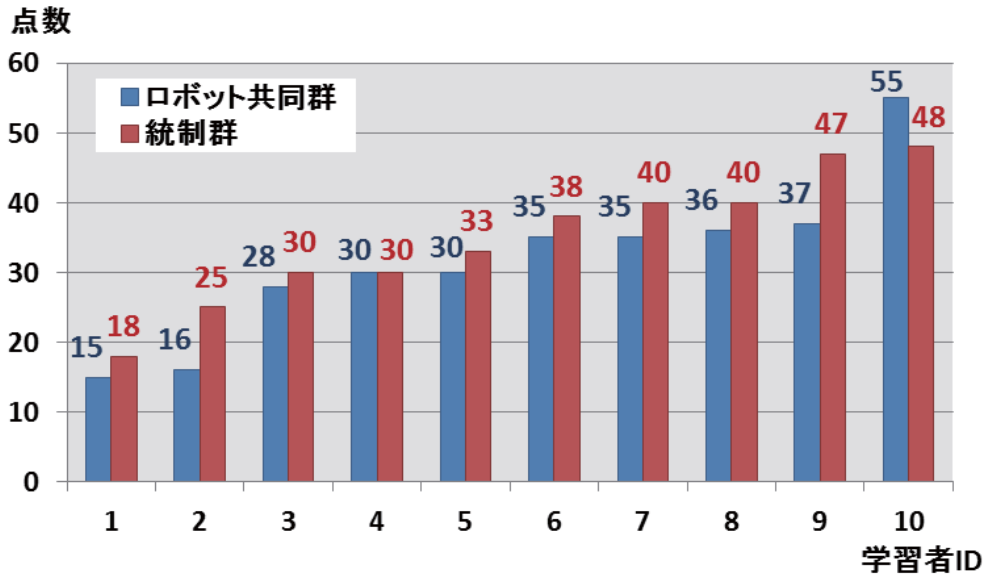


図 5.11: ロボット共同群と統制群の各学習者の応用テストの点数

とが示唆される．しかし，一部の学習者とエージェント共同群の学習者は応用テストの点数が低いことから，協調学習ができていない，すなわちロボットまたはエージェント

と交互に問題と解き合っていないと考える.

5.4.2 ロボットの関わり方の評価

方法

本モデルを実装したロボットとエージェントに対して学習者の関わり方の違いを調査するために，学習期間後，ロボット共同群とエージェント共同群の学習者全員に対して自由記述アンケートを行った．また，ロボットとエージェントによる学習効果の差の要因を調査するために，ロボット共同群とエージェント共同群の学習中の様子を撮影したビデオを分析した.

アンケート結果

まず，ロボット共同群のID3以降 (図5.11) の学習者からは,「ロボットと交互に問題を解いていたが，学習始めはロボットは間違いばかりしたため，ロボットの発話を無視していた．しかし，学習が進むにつれて賢くなっていったので，ロボットの発話や解き方に注目するようになった」,「ロボットと交互に問題を解くことが一緒に勉強している気がして，ロボットの解き方を注意深く聞いた」,「ロボットと交互に問題を解くことが楽しく感じたが，学習期間の終わりの方にはロボットにあきてきた」といった意見が書かれていた．これらから，ロボット共同群の学習者はロボットの解答正解率が上昇することで，ロボットの発話や解き方に注目するようになり，ロボットと建設的相互作用による協調学習ができたと推測できる．しかしながら，学習期間が終盤になってくるとロボットに対する興味が減少したことも推測できる．また，ロボット共同群の応用テストの点数が低いID1と2の学習者からは,「ロボットは交互に問題を解いていこうとするのに，問題を間違えてばかりで役に立たなかった」,「ロボットは間違いばかりしたため，ロボットの発話を無視していた」といった意見が書かれていた．これらから，応用力を獲得できなかった学習者は学習の始めにロボットが誤答ばかりするため，ロボットは役に立たないと感じて，ロボットと建設的相互作用による協調学習ができなかったと推測できる.

次に，エージェント共同群の学習者からは,「エージェントは問題を間違えてばかりで頼りないため，エージェントの発話を無視した」,「エージェントはヒントなどを与えてくれるものだと思ったのに，問題を間違えてばかりするので邪魔だった」「自分がイメージしていたエージェントと違い，全く協力してくれないので無視していた」といった意見が書かれていた．これらから，エージェント共同群の学習者は，学習の始めにエージェントが誤答ばかりするため，エージェントに対して頼りないや役に立たないという印象

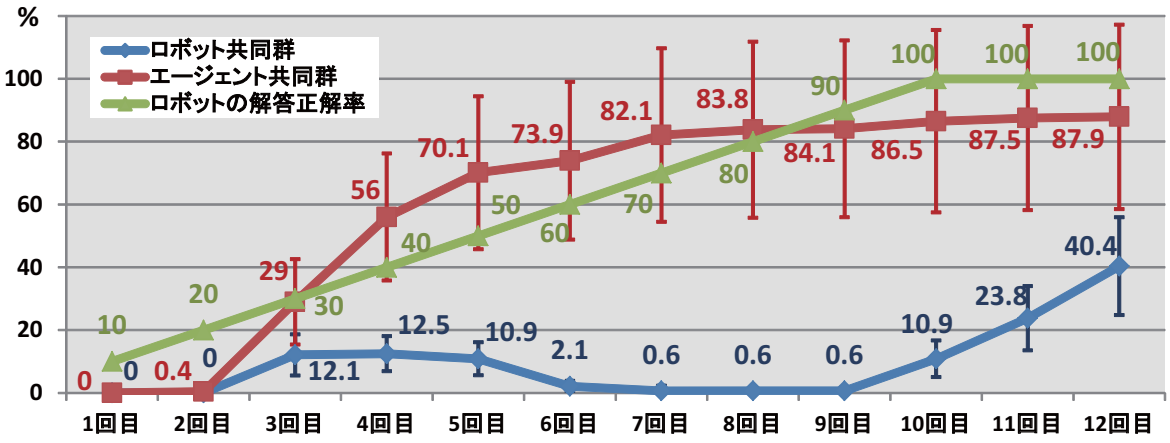


図 5.12: 置き去り率とロボットおよびのエージェントの解答正解率

を感じてしまい，エージェントを常に無視し続けたと推測できる．そのため，学習者はエージェントと建設的相互作用による協調学習ができなかったと考える．

ビデオの分析結果

前節において，ロボット共同群の学習者はロボットの発話を聞くことで協調学習を行っていたと推測できる．しかし，学習が進むにつれて，ロボットに興味が減少したことが考えられる．一方，エージェント共同群の学習者はエージェントと交互に問題を解かずに，エージェントの発話を聞くことなく，学習を進めていたことが推測できる．そこで学習中の学習者の様子を撮影したビデオを分析し，ロボット共同群の学習者と，エージェント共同群の学習者全員に対して「置き去り率」を調査することで量的な裏付けを行う．置き去り率は，一回の学習でロボットまたはエージェントが課題遂行者の動作を実行している最中に，学習者が解答操作をしてしまい，ロボットの解答を置き去りにした割合である．

図 5.12 にロボット共同群の ID3 以降の学習者と，エージェント共同群の学習者全員の置き去り率およびロボットの解答正解率の推移を示す．まず，図 5.12 のロボット共同群の置き去り率に注目する．ロボット共同群の置き去り率は 1 回目から 10 回目にかけては 15% 以下であり，ロボットを無視していないことがわかる．また，2 回目から 5 回目は上昇傾向が見られたが，6 回目から 9 回目にかけては減少していることがわかる．ここで，ロボットの解答正解率を見ると，5 回目以降は 50% 以上となっていることがわかる．これらのことから，ロボット共同群の ID3 以降の学習者は，ロボットの解答正解率が上昇する過程でロボットの発話や解き方に注目し始めたため，ロボットが問題を解く際は置

き去りにすることなく，発話を聞いていたと考える．しかしながら，ロボット共同群の置き去り率も10回目以降は増加していることがわかる．10回目以降はロボットの解答正解率が100%となっていることから，ロボットが問題を確実に正解するようになると，ロボットの発話に対する興味が減少することがわかった．

次に，エージェント共同群の置き去り率に注目する．図5.12からエージェント共同群の置き去り率は，1，2回目は0%であるが，3回目以降は置き去り率が増加していることがわかる．さらに7回目以降では置き去り率は80%以上となっており，エージェントの発話をほぼ聞いていないことがわかる．この傾向は，ロボット共同群のID1と2の学習者にもみられた．これらから，ロボット共同群のID1と2の学習者とエージェント共同群の学習者は，単独で学習を進めたと推察される．

5.5 考察

問題を交互に解こうとする行動モデルを実装したロボットと学習者が共に学ぶことで，学習者に対して賢くなっていくロボットの発話に注目することを促し，ロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習が実現できる可能性があると考える．しかしながら，一部の学習者は，学習の始めにロボットが誤答することに嫌悪感を抱いてしまい，ロボットの発話を無視するようになり，単独で学習を進めてしまう傾向が見られた．また，これと同様の現象は，画面上のエージェントにも起こることがわかった．

学習者に建設的相互作用を促すことができたのは，ロボットの持つ存在感と，学習が進むにつれてロボットの解答正解率が上昇したことが要因であると考える．学習者は，図5.12の3回目から5回目のように学習が始まった頃はロボットの発話を聞こうとしない傾向が見られた．しかし，学習が進むにつれてロボットの解答正解率が上昇していくと，5回目以降のように学習者はロボットの発話を聞こうとする傾向が見られた．これはロボットの人を引きつける存在感 [20] が影響していると考える．この存在感がもらたす影響の事例として，塩見ら [63] の研究がある．塩見らはロボット科学館における展示品の説明をロボットがしていると，子供は説明を聞いていないように見えたが，子供が興味を持つ展示品の説明を始めると，それを聞き始める傾向があることを示している．今回，同様の現象が学習者とロボットの間で起こったと考える．学習者は学習の始めはロボットの発話を無視していたのではなく，状況に応じて聞き分けをしていただけと考える．ロボットの発話に注意していた学習者は，ロボットが正解するようになっていることに気が付いたため，交互に問題を解き始めたと考える．二人の学習者が同一傾向の問題を解いている際，自分よりも他者が賢くなって問題を正解していったり，効率良く学習していると，その様子を観察しようとし，他者の解き方を学ぼうとする傾向がある [62]．こ

の傾向はロボットと人が共に学び合う状況でも起こる可能性が示されている [22]．これらのことから，本モデルを実装したロボットが学習者と共に学び合うことで，学習者に賢くなっていくロボットの発話に注目することを促し，ロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習を実現できると考える．

一方で，本モデルを実装した画面上のエージェントがロボットと同様の学習効果を得ることができなかったのは，学習者の画面上のエージェントに対するイメージが要因だと考える．現在，大学の案内を行うデジタルシステム [54] など，支援を行う画面上のエージェントが多く存在し，普段生活している上でそのような画面上のエージェントと触れ合う機会が多くなっている．そのため，学習者は画面上のエージェントと協調学習を行うとなった際，エージェントに対して手助けしてくれる存在というイメージを持っていたと考える．実際，エージェント共同群の学習者は,「エージェントはヒントなどを与えてくれるもの」や「イメージと異なっていた」という意見を述べていた．これらから，学習者はエージェントに対して学習を支援してくれる存在というイメージを持っていたにもかかわらず，エージェントが誤答ばかりしてしまうのでイメージと異なって役に立たないと感じてしまい，無視をして単独で学習を進めていったと考える．同様のことが，ロボット共同群の ID1 と 2 の学習者に対しても起きたと考える．

5.6 おわりに

建設的相互作用を促す行動モデルをロボットに実装し，被験者実験を通してロボットが単独の学習者と交互に問題を解き合い，共に学び合うという協調学習の実現可能性を検証した．本行動モデルは，建設的相互作用を促すために実際に問題を解く「課題遂行者」と，学習者の問題の解き方を観察する「モニター」としての行動を交互に行うモデルである．

実験結果より，本モデルを実装したロボットと学習者が共に学ぶことで，学習者に対して賢くなっていくロボットの発話に注目することを促し，ロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習が実現できる可能性があることが示唆された．しかしながら，ロボットの解答正解率が上昇し，動作が固定化されると，学習者はロボットに対する関心を失い，学習終盤ではロボットと交互に問題を解き合おうとしないことがわかった．また，本モデルを画面上のエージェントに活用すると，エージェントの発話を無視するようになり，単独で学習を進めてしまう傾向が見られた．

人がロボットに飽きてしまうという問題は従来研究 [?] でも起きている現象であり，解決を試みようと様々な工夫がされている．例えば，飽きる要因の一つであるロボットの行動が画一的になることを防ぐために，ロボットが感情を持つかのように感情を表出す

る感情表出法をロボットに実装して，感情的な動きをロボットに実行させることで，効果的な人とのインタラクションが行えるという研究報告がある [73]．次節では，前章で提案した共感表出モデルと行動モデルを組み合わせることで，ロボットに対する飽きを減少を防ぎ，効果的な協調学習を行えるかどうかを評価していく．また，本章では実験を理系大学生に対して実施したが，中学生や高校生など様々な年齢層に対してもロボットと交互に問題を解き合うかを検証する必要があると考える．

第6章

共感表出法と行動モデルの組み合わせによる学習効果

6.1 はじめに

第5章において建設的交互作用を促すロボットの行動モデルを提案し，その行動モデルを実装したロボットが学習者と共に学習することで，交互に問題を解くロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習が実現できることを示した．また，弟4章において二つの感情ベクトルを用いて学習者の共感するような感情表出を行う二ベクトル法Ⅱを提案し，二ベクトル法Ⅱを用いたロボットは学習者に高い親密さと共感性を与えることを示した．

本章では，弟4章の二ベクトル法Ⅱと弟5章の行動モデルを組み合わせて，学習者に共感して，学習者と問題を解き合って共に学び合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．そして，実験を通して，本ロボットが学習者のロボットに対する飽きを軽減でき，学習者と交互に問題を解き合う協調学習を行えるかどうかを検証する．本ロボットは，学習システムの問題が提示された時は，第5章の行動モデルを基にロボットが行動を，正誤判定時には第4章の二ベクトル法Ⅱを基にロボットが感情の表出を行う．

本章では，2節にて建設的相互作用を促す行動モデルと二ベクトル法Ⅱの課題について述べる．次に3節で行動モデルと二ベクトル法Ⅱを組み合わせたロボットの行動ついて説明した後，4節で被験者実験を通して，本ロボットが学習者に与える学習効果と飽きの軽減について評価する．最後に5節で考察し，第6節でまとめる．

6.2　行動モデルと二ベクトル法 II の課題

第 5 章において，学習者と交互に問題を解き合う建設的相互作用を促す行動モデルを提案した．行動モデルは，建設的相互作用を促すために実際に問題を解く「課題遂行者」の動作と，学習者の問題の解き方を観察する「モニター」の動作を交互に実行するモデルである．課題遂行者の動作には，問題を解く機能だけなく，学習者がロボットに共に学習していると実感してもらうために，学習の初めは誤答するが，学習が進むにつれて徐々に解答正解率が上昇していき，最終的には正解のみを解答するように学習能力の機能を備えている．実験結果より，行動モデルを実装したロボットと学習者が共に学ぶことで，ロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習が実現できることを示した．しかしながら，ロボットの解答正解率が上昇し，動作が固定化されると，学習者はロボットとの学習に飽きてしまい，学習終盤ではロボットと交互に問題を解き合おうとしない問題があった．

この問題を解決するために，著者は第 4 章の学習者に共感するように感情表出を行う二ベクトル法 II と行動モデルを組み合わせることで，学習者のロボットに対する飽きを軽減できると期待する．二ベクトル法 II は，Russell の感情円環モデル上で，ロボットが学習者に共感できるように，正解と不正解用の二つの感情ベクトルを用いて感情を表出する感情表出法である．実験を通して，二ベクトル法 II を用いたロボットが学習者と共に学習することで，学習者に高い親密さと共感性を与えることが示している．しかしながら，二ベクトル法 II を用いたロボットが学習者の飽きを軽減できかどうかは明確になっていない．また，第 2-5 章における実験では大学生を対象に実験を実施している．そのため，行動モデルおよび二ベクトル法 II を用いたロボットが小，中学生などの子どもと共に学習した際に，子どもに与える学習効果は明らかになっていない．

そこで本章では，建設的相互作用を促す行動モデルと学習者に共感する感情表出を行う二ベクトル法 II を組み合わせることで，学習者に共感して，学習者と問題を解き合って共に学び合うパートナー型教育支援ロボットを開発する．本ロボットが中学生と共に学習することによって及ぼす学習効果と，二ベクトル法 II によってロボットに対する飽きの軽減について検証する．

6.3　本ロボットの概要

本章で開発するロボットの行動概要は図 6.1 に示すように，問題提示時には第 5 章の行動モデルを基に課題遂行者とモニターの動作を交互に行う行動を行い，正誤判定時には第 4 章の二ベクトル法 II を基に学習者に共感する感情の表出する．以下にそれぞれの

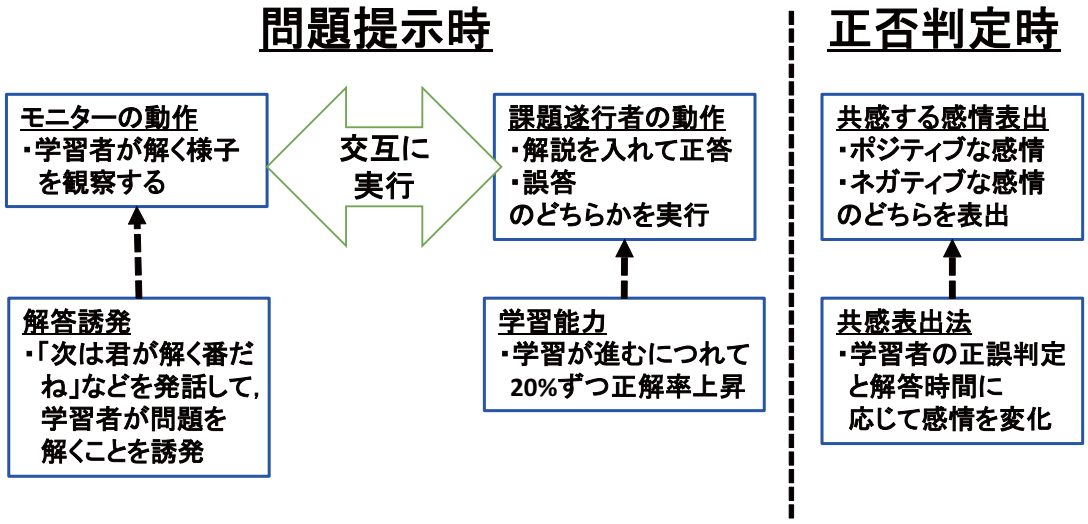


図 6.1: ロボットの行動概要

フェーズにおける具体的な行動について説明する．なお，ロボットは第 4 章および第 5 章と同様に Ifbot(図 2.3) を用いる．

6.3.1 問題提示時

ロボットには音声認識などの直接的に意図理解に関わるような機能は使わず，学習システムの画面に応じて動作する行動を設定する．そして，第 5 章の行動モデル (5.3) と同様に，学習者と交互に問題を解き合う建設的相互作用を促すために，問題を解く「課題遂行者」の動作と，学習者の解く様子を観察する「モニター」の動作を交互に実行する行動モデルを実装する．それぞれの動作の詳細は以下に記述する．

(1) 課題遂行者の動作

ロボットは図 5.2 のような，首を下に傾けたり，曲げたりして考える表情を表出しながら「僕が解く番だね，この問題はね...」などと発話して，問題の解答方法を説明する．次に，図 5.3 のような話す表情を表出しながら,「だから，答えは○○だね」などと発話する．また，学習者にロボットと共に学んでいることを実感させるために，学習の始めは，ロボットの解答正解率は 20% となっており，ほとんど誤答するが，1 回ごとの学習を終えるたびに解答正解率が 20% ずつ上昇していき，最終的には正解のみを解答するようになる学習能力を有する．

(2) モニターの動作

ロボットは，図 5.2 のような考える表情を表出しながら,「次は君が解く番だね」や

「難しいね」などと発話する．考える表情は繰り返しを避けて，ランダムに表出される．また，ロボットが以前正解した問題であっても，モニターの行動を実行するタイミングであった場合にも,「難しい」などを発話しながら考える表情を表出する．

6.3.2　正誤判定時

問題の正誤判定時に，ロボットは第 4 章の二ベクトル法 Ⅱ(4.3.2) を基に，正誤判定に応じて喜びや悲しみの感情を表出する．具体的には，学習者が問題に正解した場合は正解用感情ベクトルを，不正解した場合は不正解用感情ベクトルを基に表出する感情を決定する．さらに，二つの感情ベクトルはそれぞれのベクトル位置を保持しながら，学習者の正誤判定と問題の解答時間に応じて変動することで，第 4 章の二ベクトル法 Ⅱ と同じように学習者の学習経過に応じてロボットが異なる感情を表出できるように設定する．アルゴリズムは，第 4 章の二ベクトル法 Ⅱ(4.3.2) と同様なものを設定する．

ロボットの表情は，従来研究 [44] において，被験者実験を通してロボットの表情が「喜び」や「悲しみ」などの感情と対応していると評価された表情の中から，図 5.4 や図 5.5 のように，二ベクトル法 Ⅱ の感情と一致するものを用いている．また，ロボットには,「喜びの発話」,「悲しみの発話」を行う動作を設定し，正誤判定 (図 6.2(c)) が提示されたときにそれらを実行する．喜びの発話は 12 種類，悲しみの発話は 12 種類となっており，10 名の大学生による予備実験を通して，二ベクトル法 Ⅱ の各感情に対して，発話に違和感がないと過半数以上が評価した発話を対応させた．具体的には，幸福の感情が表出された際,「すごい，正解したね」や，悲しみの感情が表出される際,「ああ，残念，間違えてしまったね」などと発話する．

6.4　実験

6.4.1　方法

実験は，個人経営塾「KIP 進学教室」[34] にて実施した．二ベクトル法 Ⅱ と行動モデルの組み合わせによる学習効果と飽きの軽減を調査するために，学習者に二ベクトル法 Ⅱ と行動モデルの二つを用いたロボットと共に学習してもらい，第 5 章の行動モデルのみを実装したロボットと共に学習する学習者，および人同士で学習する学習者間で比較した．学習者は学習システムを用いてロボット (人) と共に学習した．学習者は中学生 32 名 (男子 14 名，女子 20 名) である．32 名の中学生を，二ベクトル法 Ⅱ と行動モデルの二つを用いたロボットと共に学習する「行動モデル + 二ベクトル法 Ⅱ 群」12 名 (男子 6 名，女子 6

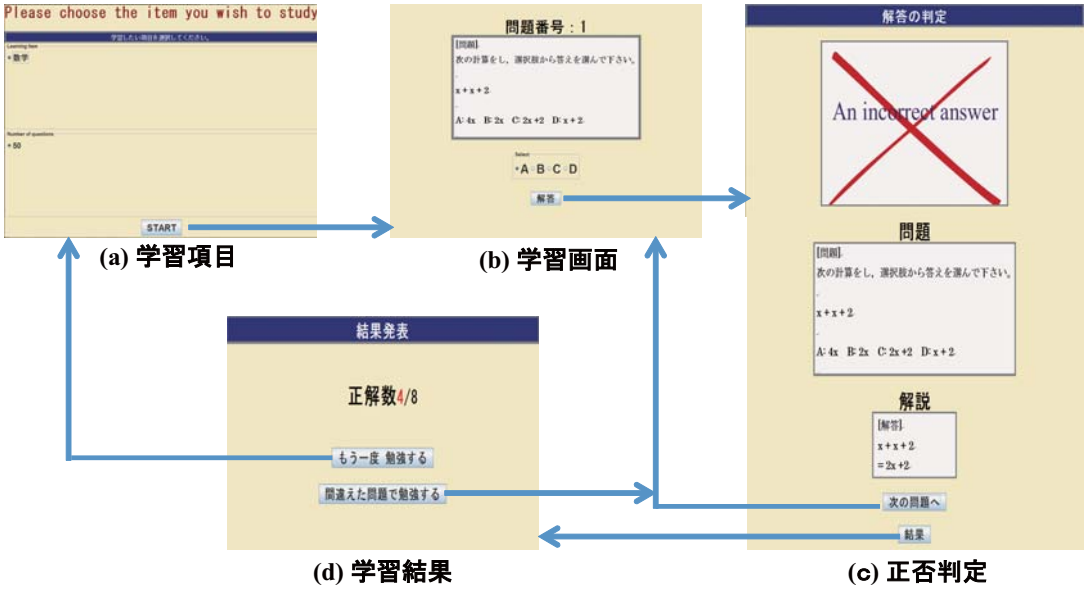


図 6.2: 数学学習システム

名)，第 5 章の行動モデルのみを実装し，ランダムに感情を表出するロボットと共に学習する「行動モデル＋ランダム表出群」12 名 (男子 4 名，女子 8 名)，二人一組となって共に学び合う「統制群」10 名 (男子 4 名，女子 6 名) にそれぞれ振り分けて，5 日間，1 回 40 分の学習を毎日行った．行動モデル＋ランダム表出群におけるロボットの感情の種類は，二ベクトル法 II で使用されている感情と同じものであり，ロボットは学習者が正解した場合は，図 4.2 における軸の右側 $(0 \leq X)$ から，不正解した場合は軸の左側 $(0 > X)$ から，それぞれランダムに感情を表出した．各群の中学生には，ロボットもしくはパートナーの学習者と学習システムで提示される問題を交互に解くように指示した．また，学習中の様子はビデオで撮影した．

6.4.2 学習システム

実験において，中学生とロボットが共に学習する学習システムには，各学年にける数学の問題を用いた．問題は,「中学・学習サイト」[70] を基に各学年における数学の問題を 50 問作成し，その問題を提示する学習システムを開発した (図 6.2).

本システムの操作手順について説明する．まず，ログインすると，学習項目と問題数を選択する画面が現れる (図 6.2(a))．今回の学習システムでは，学習項目は「数学」のみで構成される．学習項目の下の問題数において,「50」を選択する．学習項目と問題数を選択して「START」をクリックすると，図 6.2(b) のような学習画面が現れ，学習を始めることができる．学習者は問題を解き，選択肢から解答を選択した後,「解答」をクリッ

クする．解答後，図6.2(c)のように，正解または不正解が表示される．このとき，表示された問題とその解説も併せて表示される.「次の問題へ」をクリックすると次の問題の画面に遷移する.「結果」をクリックする，または全問題を解答し終わると，図6.2(d)のように正解数が表示される．図6.2(d)で「間違えた問題で勉強する」を選択すると，間違えた問題で学習を行うことができる．また,「もう一度勉強する」を選択すると，学習項目の選択ページ（図6.2(a)）に戻る．今回の実験では，学習者に「もう一度勉強する」を選択するように指示した．また，本実験における1回目の学習時，最初の問題における二ベクトル法Ⅱの基準時間は，KIP進学教室で中学生に対して授業を行っている教員の意見を参考に，240.0秒を設定した．

6.4.3 評価基準

本実験では，3つの評価基準から学習効果と飽きの軽減を評価する．1つ目は，各群の学習者に事前，事後テストを受けてもらい，その点数の差(向上点数)で学習効果をみる．出題される問題は学習システムと同様の問題であり，50問で構成される．2つ目は，実験終了後に行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群と行動モデル＋ランダム表出群の学習者全員に対して自由記述アンケートを実施し，学習を通してロボットから受けた印象を推察する．3つ目は，学習中の様子を撮影したビデオを分析することで，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群と行動モデル＋ランダム表出群の学習者の無視率を計算し，統合モデルにより飽きを軽減できたかについて評価する．無視率とは，1回の学習内でロボットが課題遂行者役の動作を実行している最中に，学習者が解答操作をしてしまい，ロボットの解答を無視した割合である．これら3つの評価基準により，統合モデルを用いたロボットが中学生の学習に与える影響を評価する．

6.4.4 結果

学習効果

図6.3に，各群の事前，事後テストにおける点数の平均を示す．図6.3において，左が行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群，中央が行動モデル＋ランダム表出群，右が統制群の平均点である．図6.3から，各群の事前テストにおける平均点には，大きな点数の差はないことがわかる．そのため，学習前の各群における学習者の学力は等質であったと考えられる．次に，各群の向上点数の平均を図6.4に示す．図6.4から，向上点数は行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群が最も高く，次いで行動モデル＋ランダム表出群，統制群の順であることがわかる．各群間の学習効果を比較するため，テューキー・クレーマーの方法[31]

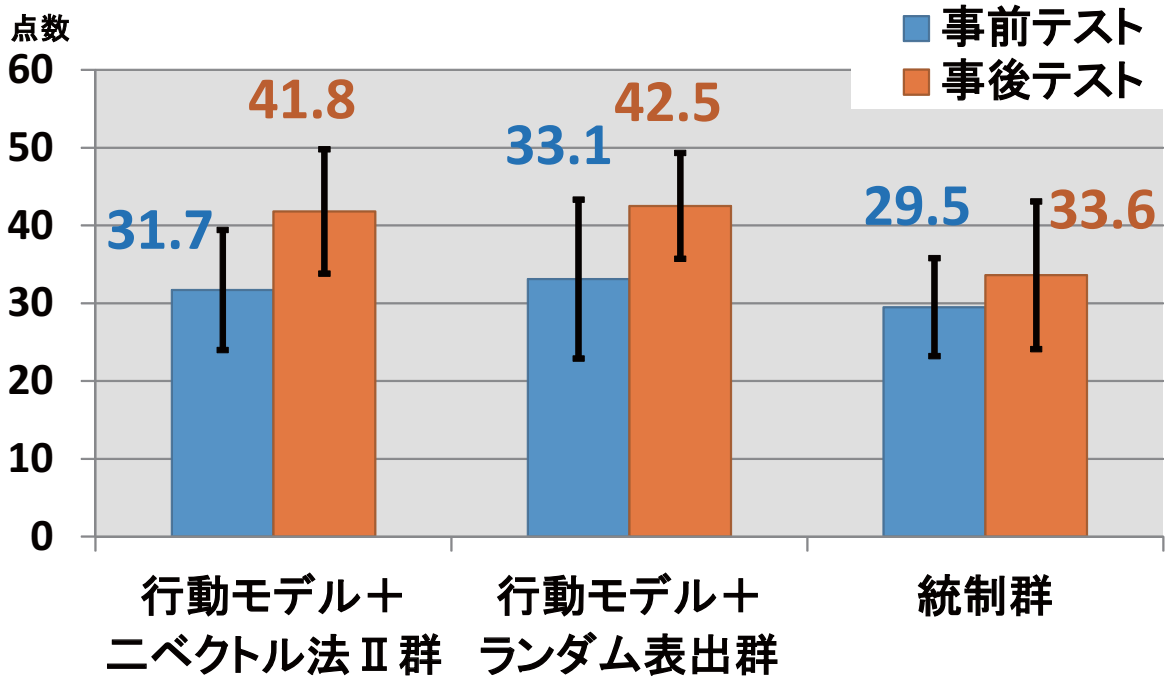


図 6.3: 各群の事前，事後テストにおける点数の平均

による検定を実施した．その結果，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群と統制群間において有意差が認められた．このことから，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群の学習者は，統制群の学習者に比べて学習効果があると考えられる．

アンケート結果

まず，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群の学習者からは，「計算を分かりやすくやってくれる，表情が豊か」，「間違えると悲しんでくれて，答えが合ってると喜んでくれる」，「毎回いろんなコメントや表情してくれて，一緒に喜んでくれるから楽しい」といった良い意見が書かれていた．一方で悪い意見として，「自分が計算が早くてもロボットは遅い」，「ロボットの声の大きさが同じでつまらない」といった意見も書かれていた．これらから，組み合わせ群の学習者は学習を通してロボットから好印象を感じていたと考えられる．しかしながら，ロボットの話し方によっては嫌悪感を抱くこともあると推察できる．

次に，行動モデル＋ランダム表出群の学習者からは，「問題の解き方を教えてくれるから優しい」，「正解したときに喜んでくれて，間違えたときに悲しんでくれる」，「1 人で問題を解く時よりもにぎやかだから，楽しい」といった良い意見が書かれていた．一方で悪い意見として，「同じような表情しかしないから，途中で飽きた」，「ロボットとは感情が似てないと思う」と意見も書かれていた．これらから，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ

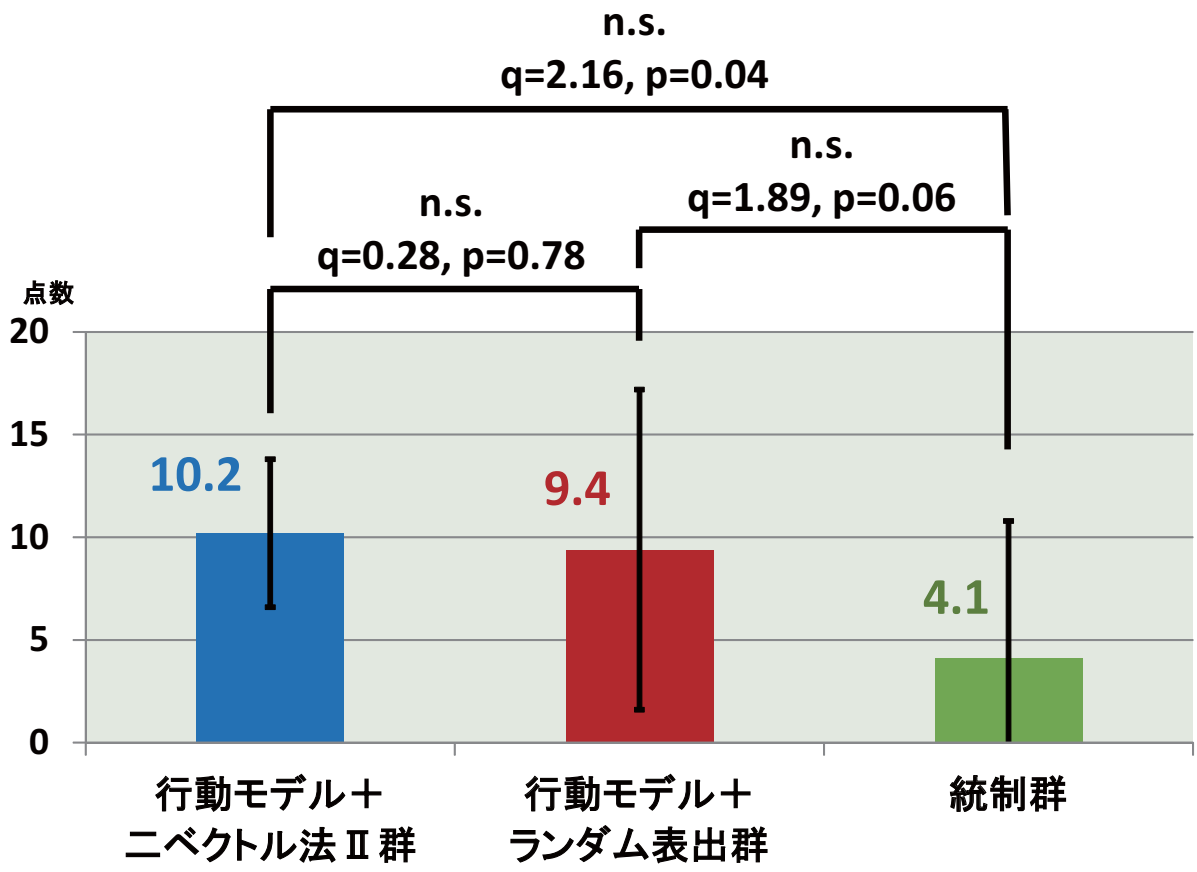


図 6.4: 各群の向上点数の平均

表 6.1: 行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群と行動モデル＋ランダム表出群の無視率の標準偏差

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群	27.9	32.7	31	34.2	38.2
行動モデル＋ランダム表出群	18.3	35.4	36.5	36.3	37

群の学習者と同様に，行動モデル＋ランダム表出群の学習者は学習を通してロボットから好印象を感じていたものの，ロボットの表情表出が画一的と感じしてしまい，学習終盤ではロボットとの学習に飽きてしまったと推察できる．

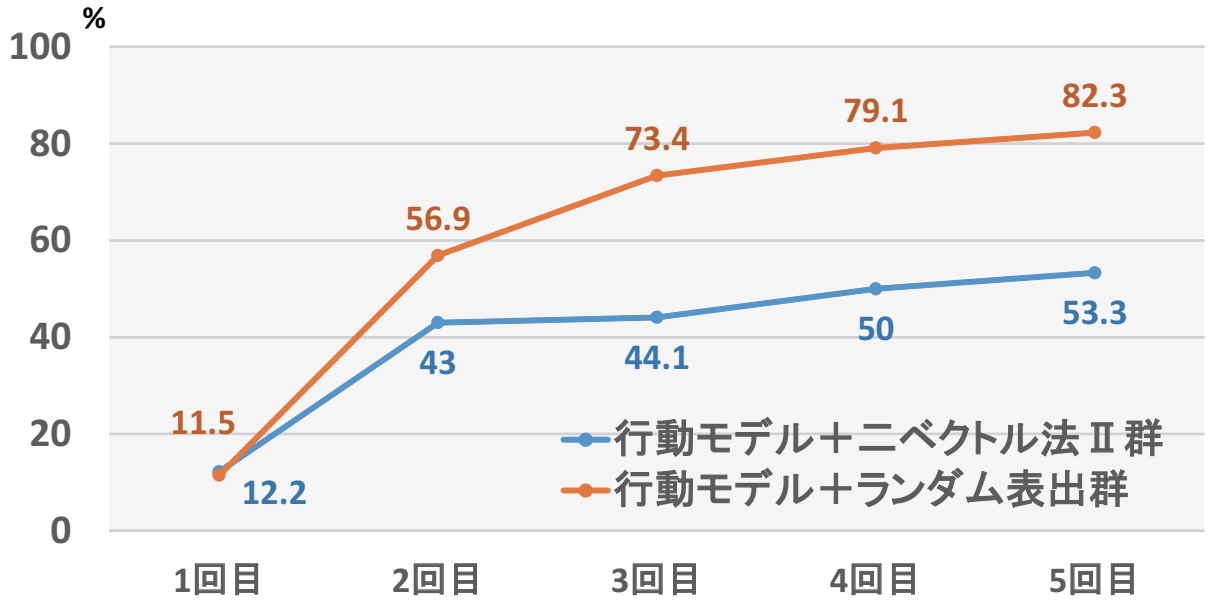


図 6.5: 行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群と行動モデル＋ランダム表出群の無視率の平均

無視率

図 6.5 に，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群の学習者と，行動モデル＋ランダム表出群の学習者全員の無視率の平均の推移を示す．また表 6.1 に，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群の学習者と，行動モデル＋ランダム表出群の学習者全員の無視率の標準偏差を示す．図 6.5 から，両群とも 1 回目の学習においては無視率が低いが，2 回目以降は無視率が上昇していることがわかる．特に行動モデル＋ランダム表出群では，3 回目の学習以降は無視率が 70% を超えており，最終回の学習では無視率が 82% となっている．このことから，行動モデル＋ランダム表出群の学習者は，学習の後半においてはロボットの発話を無視して学習を進めていたと考えられる．一方で行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群では，2 回〜4 回目での無視率が 50% 以下であり，最終回の学習においても無視率が 53% となっている．このことから，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群では行動モデル＋ランダム表出群に比べて無視率が低く，後半になっても約半分の学習者は，ロボットと交互に問題を解いていたと考えられる．

6.5 考察

学習者と問題を交互に解く行動モデルと学習者に共感する感情表出を行う二ベクトル法Ⅱの二つを用いたロボットが中学生と共に学習することで，中学生が二人一組で共に

学習する協調学習に比べて，学習効果を向上できる可能性が示唆された．また，二ベクトル法Ⅱによって感情を表出するロボットは，ランダムに感情を表出するロボットに比べて，学習者が感じるロボットへの飽きを軽減できることも示唆された．

二ベクトル法Ⅱと行動モデルの二つを用いたロボットと共に学習した中学生が，二人一組となって共に学習した中学生に比べて，学習効果が向上した要因として，ロボットが交互に問題を解こうとしたことが有効であったと考えられる．統制群の学習中の様子を撮影したビデオを分析したところ，中学生は学習初めは学習システムで学習していたが，学習が進むにつれて勉強内容以外の会話が増えてしまい，学習が進まない傾向が見られた．また，交互に問題を解こうとせず，二人のうちの一人の中学生が単独で解いてしまうことが多かった．その際，問題を解いている中学生は，パートナーの中学生に解き方を教える様子は見られなかった．一方で行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群では，ロボットが中学生と問題を交互に解こうとするため，中学生に対して学習せざるを得ない状況が起きていたと考えられる．実際に実験終了後の行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群の中学生からは,「ロボットが問題を解くから，自分も解かないといけなかった」などの意見を聞くことができた．また，ロボットは問題の解き方を説明しながら問題を解くため，中学生はロボットの発話を聞くことで，問題の解き方を学習できたと考えられる．

そして，二ベクトル法Ⅱにより，ロボットへの飽きを軽減できた要因として，学習者の解答時間に応じて感情ベクトルが変動した点が有効であったと考えられる．学習初め，学習者は問題を解くのに時間をかけている傾向があった．そのため，行動モデル＋二ベクトル法Ⅱ群では感情ベクトルが眠気側へ移動し，ロボットが眠気側の感情を表出することが多かった．しかしながら，学習が進むにつれて学習者が短時間で問題を解く傾向があったため，感情ベクトルが覚醒側へ移動し，ロボットが覚醒側の感情を表出することが多くなった．これにより，学習者に，学習が進むにつれてロボットの表情変化が自分の感情に似ていることや，ロボットの表情の種類が多いことを感じさせ，飽きを軽減できたと考えられる．一方で行動モデル＋ランダム表出群のロボットは，正解時に快側，不正解時に不快側の感情を表出していたが，学習状況に応じて感情を変動することはできなかった．そのため，中学生は同じような感情しか表出していないと感じてしまい，ロボットに対して飽きてしまったと考えられる．

6.6　おわりに

本章では，第 5 章の行動モデルと第 4 章の二ベクトル法Ⅱを組み合わせることで，学習者に共感して，交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットを開発した．そして，実験通して，本ロボットが中学生と共に学習することによって及ぼす学習効果と，

二ベクトル法Ⅱによってロボットに対する飽きの軽減について検討した．本ロボットは，問題提示時には第 5 章の行動モデルを基に課題遂行者とモニターの動作を交互に行う行動を行い，正誤判定時には第 4 章の二ベクトル法Ⅱを基に学習者に共感する感情の表出する．

実験により，二ベクトル法Ⅱと行動モデルの二つを用いたロボットが，中学生と共に学習することで，中学生が二人一組となって共に学習する協調学習に比べて，学習効果を向上できることを確認した．また，第 4 章の二ベクトル法Ⅱによって感情を表出するロボットは，ランダムに感情を表出するロボットに比べて，学習者が感じるロボットへの飽きを軽減できることも確認した．

しかしながら，二ベクトル法Ⅱと行動モデルの二つを用いたロボットと共に学習した学習者は，正解不正解時のロボットの話し方や話す速さから，ロボットに対して嫌悪感を抱くことがあることがわかった．この問題点を解決するために，オノマトペを用いた言葉かけを用いることが有効であると考えている．言葉かけとは，学習タスクを終えた生徒を教員が褒めたり，慰めるなどの言葉をかけることである [51]．オノマトペとは，物体の音の響きやその状態などを感覚的に表現したものであり，一般語彙と比べて臨場感にあふれ，鮮明な表現を可能としているという特徴がある [37]．教育学の研究では，教員がオノマトペを用いて言葉かけを行うことで，児童は教員の指示内容を明確に理解し，教員とコミュニケーションを行うようになり，親密さが向上するという報告がある [69]．著者は，このオノマトペを用いた言葉かけは教育支援ロボットに対しても有効であることを示している [25]．今後は，教育支援ロボットの発話方法に注目しながら，二ベクトル法Ⅱや行動モデルの改良を行い，人と共に学び合える教育支援ロボットの開発を目指す．

第7章

結論

7.1 本研究の成果

本研究では，学習者の学習を支援する教育支援ロボットの中でも，学習者と共に学び合うパートナー型教育支援ロボットに注目して研究を進めた．パートナーロボットには，学習者がロボットの行動を画一的と感じてしまい，学習が進むにつれてロボットとの学習に飽きてしまうことと，単独の学習者と共に学び合うためのロボットの行動モデルがないという二つの問題がある．前者の問題には，ロボットが学習者の気持ちに共感するように感情を表出すること後者の問題には，二人の学習者による協調学習の成立メカニズムであり，問題を交互に解くことで起こる建設的相互作用 [60] [40] に用いることで解決できると考えた．

そこで本研究では，学習者に共感して交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットの開発を目的として，学習者に共感するように感情表出を行う共感表出法と，学習者に建設的相互作用を促す行動モデルを開発を行った．本論文では，まずユーザに同調して感情を表出できる感情表出法を提案した後，その感情表出法をロボットが学習者の気持ちに共感するような感情を表出できる共感表出法へと改良した．次に，学習者に建設的相互作用を促し，学習者と交互に問題を解き合うロボットの行動モデルを提案した．共感表出法と建設的相互作用を促す行動モデルを組み合わせることで，学習者に共感して，交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットを開発した．そして，実験を通して本ロボットは，学習者のロボットに対する飽きを軽減し，学習者と交互に問題を解き合う協調学習を実現できることを示した．本論文は，これらの成果を第 1 章から 6 章までの 6 章構成にまとめたものである．以下に本研究で得られた成果を各章毎にまとめて述べる．

第 2 章では，Russell の感情円環モデル [56] を用いて，ユーザである他者の感情表現を積極的にエージェント自身の感情と同調させる感情表出法を提案した．具体的には，Russell の感情円環モデルに写像されたユーザ感情とエージェントのムードとを結合した

混合ムードを用いることにより，ロボットが表出する感情を決定することで，変化していくユーザの感情に同調することを可能とした．シミュレーション実験では,（1）ランダムによる感情表出を行う感情表出法,（2）アージ・システムを用いて感情表出を行う従来の感情表出法,（3）ユーザに同調して感情表出を行う感情表出法（提案手法）の 3 種類のアプリケーションで比較検証を行った．実験の結果，ユーザ感情を同調的に理解する他者充足的なエージェントは，そのインタラクションにおいて，ユーザに対して快 — 親近性の効果を高めることが明らかとなった．これらから，従来の感情表出法の一つである，アージ・システムによる感情表出法に比べて，Russell の感情円環モデルを用いた感情表出法は，ユーザとの感情と同調しやすく，親近性を高めることができると示唆された．

第 3 章では，第 2 章の感情表出法を改良して，正解と不正解用の二つの座標点を用いて感情表出を行うことで，学習者にロボットが共感していると実感させる共感表出法提案した．そして，共感表出法を用いたロボットが，学習者と共に学習することによって及ぼす心理効果について検討した．共感表出法は，Russell の感情円環モデル上で，正解と不正解用の二点の座標点を用いて感情表出する感情表出法である．具体的には，学習者が問題に正解した場合は正解用座標点を，不正解した場合は不正解用座標点の角度を基に表出する感情を決定する．さらに，二つの座標点は座標位置を保持しながら，学習者の正否判定と問題の解答時間に応じて変動することで，学習者の学習経過に応じてロボットが異なる感情を変化できるように設定する．実験により，共感表出法を用いたロボットが学習者と共に学習した場合，ランダムに感情を表出するロボットと比べて，学習者に好印象を与える傾向があることが示唆された．

第 4 章では，第 3 章の共感表出法が長期的な共同学習に対応できるために，二つの感情ベクトルを用いて学習者に共感する感情を表出する共感表出法を改良した．第 3 章の共感表出法は，座標点の X 座標を学習者の正否判定，Y 座標を学習者の解答時間に応じて変動させ，座標点の位置と角度に応じて表出する感情を決めていた．しかしながら，特に X 座標の絶対値が大きいとき，Y 座標が大きく変化しない限り，座標点の “角度” は大きく変動することはない．そのため，長期的な共同学習においては，第 3 章の共感表出法を用いたロボットは画一的な感情表出となるため，学習者に共感していると実感させるのが難しいと考えた．そこで第 4 章における共感表出法は，長期的な共同学習でも使用できるように座標点ではなく感情ベクトルを用いて，感情ベクトルの原点からの長さと角度を直接的に変動させる共感表出法へと改良した．実験により，第 4 章の共感表出法を用いたロボットが，学習者と長期的な共同学習することで，一つの感情ベクトルを基に感情表出する比較手法を実装したロボット，およびランダムに感情を表出するロボットと比べて，特に学習が進むにつれて，学習者に親密さと共感性を感じさせる傾向があることを示した．

第5章では，学習者に建設的相互作用を促して，学習者と交互に問題を解くことで協調学習を行うロボットの行動モデルを提案した．行動モデルは，問題を解く「課題遂行者」の動作と，学習者の解く様子を観察する「モニター」の動作を交互に実行するモデルである．課題遂行者の動作には，学習者にロボットが共に学習していると実感させるために，学習初めは問題に誤答するが，学習が進むにつれて正答するようになる学習能力を加えた．実験を通して，行動モデルを実装したロボットと学習者が共に学ぶことで，学習者に対して賢くなっていくロボットの発話に注目することを促し，ロボットと交互に問題を解き合う建設的相互作用に基づいた協調学習が実現できると示した．しかしながら，ロボットの解答正解率が上昇し，動作が固定化されると，学習者はロボットに飽きてしまい，学習終盤ではロボットと交互に問題を解き合おうとしないことがわかった．

第6章では，第5章の行動モデルと第4章の共感表出法をを組み合わせることで，学習者に共感して，交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットを開発した．そして，本ロボットが，中学生と共に学習することによって及ぼす学習効果と，共感表出表によってロボットに対する飽きの軽減について検討した．本ロボットは，問題提示時には第5章の行動モデルを基に課題遂行者とモニターの動作を交互に行う行動を行い，正誤判定時には第4章の共感表出法を基に学習者に共感する感情の表出を実行するモデルである．実験により，統合モデルを実装したロボットが，中学生と共に学習することで，中学生が二人一組となって共に学習する協調学習に比べて，学習効果を向上できる可能性が示唆された．また，第4章の共感表出法によって感情を表出するロボットは，ランダムに感情を表出するロボットに比べて，学習者が感じるロボットへの飽きを軽減できることを示した．

7.2 今後の展望

本研究の成果により，学習者のロボットに対する飽きを軽減して，学習者と交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットを開発することができた．しかしながら，本ロボットと共に学習した学習者は，正解不正解時のロボットの話し方や話す速さから，ロボットに対して嫌悪感を抱くことがあることがわかった．また，学習者にロボットが共感しているとより強く実感させるために，繊細な感情を表現できる共感表出法と，学習者とより効果的に学習支援を行うために行動モデルを発展させる必要があると考える．上記のことをふまえて，今後は以下の三点の課題について検討する必要があると考えられる．

(1) オノマトペを用いた言葉かけ

第6章の実験において，ロボットの話し方から，学習者はロボットに対して嫌悪感

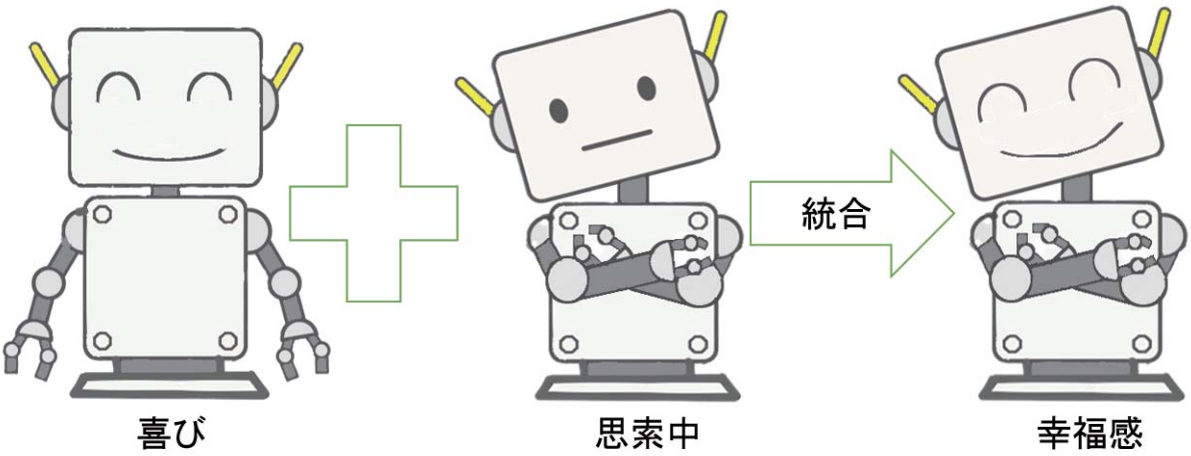


図 7.1: 表情と動作による感情表現の例

を抱くことがあることがわかった．この問題点を解決するために，オノマトペを用いた言葉かけを用いることが有効であると考えている．言葉かけとは，学習タスクを終えた生徒を教員が褒めたり，慰めるなどの言葉をかけることである [51]．オノマトペとは，物体の音の響きやその状態などを感覚的に表現したものであり，一般語彙と比べて臨場感にあふれ，鮮明な表現を可能としているという特徴がある [37]．教育学の研究では，教員がオノマトペを用いて言葉かけを行うことで，児童は教員の指示内容を明確に理解し，教員とコミュニケーションを行うようになり，親密さが向上するという報告がある [69]．そして，著者はこのオノマトペを用いた言葉かけはパートナーロボットにも有効であると感触を得ている [25]．そこで今後の展望として，オノマトペを用いた言葉かけを用いてロボットの発話方法を改良することで，学習者がロボットの話し方から感じる嫌悪感を軽減する．

(2) 表情変化と身体動作による共感表出法への発展

第 6 章の実験において，共感表出法を用いたロボットは学習者のロボットに対する飽きを軽減できることを示した．しかしながら，学習終盤では半数の学習者はロボットに対して飽きてしまい，十分に飽きを防げたとは言えない現状である．そこで学習者により共感するために，表情変化だけでなく身体動作と組み合わせて，より繊細な感情を表現可能とする共感表出法を開発する．第 4 章の共感表出法は表情変化のみによって感情を表現した．しかしながら，ロボットの身体動作は人との相互作用は効果的に促す働きがあり，身体動作によってロボットの感情を表現可能と報告されている [30] [43]．そこで著者は，身体動作と表情変化を組み合わせることで図 7.1 のように繊細な感情を表現して，学習者に共感する共感表出法を開発する．

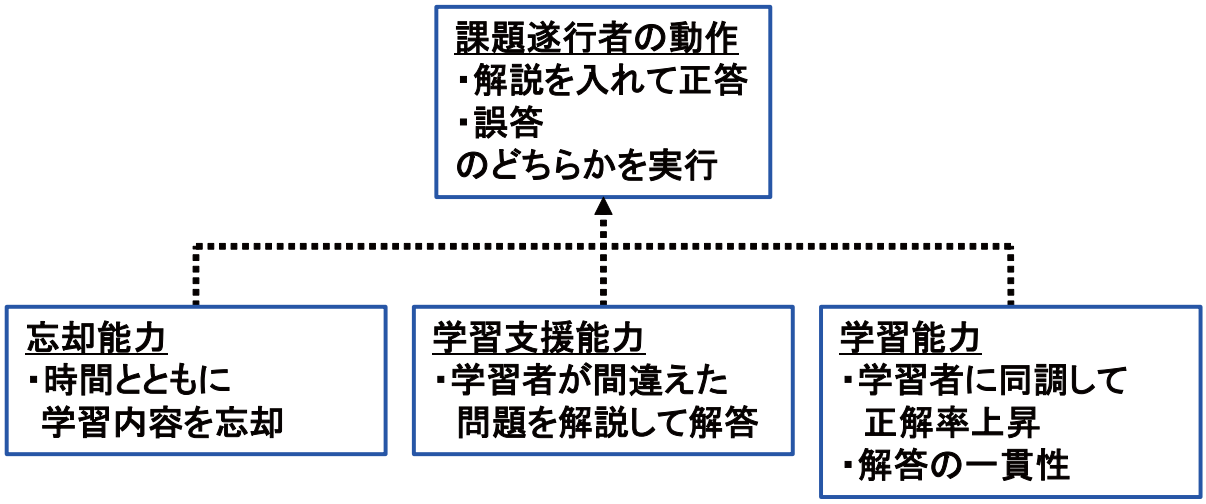


図 7.2: 課題遂行者の動作概要

(3) 学習者に同調して協調学習を行う行動モデルへの発展

第 6 章および第 5 章の行動モデルにおける課題遂行者の動作では，学習者の学習状況を考慮せずに正解率を一定に向上させたこと，正答する問題をランダムに決定したことにより，学習者に違和感を与えてしまったと考えられる．実際に第 6 章の実験において，統合モデル群の学習者から,「自分が問題に正解しても，ロボットが問題を不正解ばかりする」や「ロボットは前に正解していた問題を，間違えてたりしてた．おかしいと思う」といった意見があった．著者はロボットの違和感を軽減するために課題遂行者の動作へ，ロボットの正解率を学習者と同じように変動させる学習能力，モデリングと呼ばれる学習支援能力，ロボットに人らしさを持たせるために，学習内容を徐々に忘れる忘却能力を加える (図 7.2)．モデリングとは，二人の学習者が共に学習する際に一人の学習者が解けなかった問題をもう一方の学習者が解説しながら解く学習支援法 [7] である．これらの能力により，学習者はロボットが適切に支援してくれると実感して，親密度が高まり，学習効果が向上すると期待される．

以上のような課題に取り組んでいき，学習者の気持ちにより共感できるような感情表出を行う共感表出法と，学習者と長期的に交互に問題を解き合う行動モデルを開発して，学習者へ及ぼす学習効果をさらに向上できる，パートナー型教育支援ロボットの開発を行う必要があると考えられる．

現在，学校への情報技術の導入やロボットの教育現場への活用が始まっており，近い将来，ロボットと人が共に学び合う社会が来ると予想されている [45]．その場合，ロボットと学習者が一対一で協調学習を行う状況が起こりえる．本研究では，学習者に共感し



図 7.3: 目指す学習環境

て交互に問題を解き合うパートナー型教育支援ロボットの開発を目的として，学習者に共感するように感情表出を行う共感表出法と，学習者に建設的相互作用を促す行動モデルを開発を行った．さらに前述した課題を解決することで，パートナー型教育支援ロボットの実用性を高めることができ，人がロボットと共に学び合うという近未来の学習環境の実現に近づけられる (図 7.3)．また，実際に教育現場に導入する場合は，教員には学習者個々の学習状況の把握およびロボットへのきめ細かな行動指示が行えるシステムが必要であると考える．そのため，インターネット接続により場所や時間に制限されず，学習者個々の学習状況の把握および複数のロボットに対して個々に学習者に応じた行動の調整が行えるシステムの構築も行う予定である．

参考文献

[1] T. Ando and M. Kanoh; “Psychological effects of a self-sufficiency model based on urge system, ” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.14, No.7, pp.877–884, 2010.

[2] T. Ando and M. Kanoh; “A self-sufficiency model using urge system, ” IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp.429–434, 2010.

[3] W.A.Bainbridge, J.Hart, E.S.Kim and B.Scassellati; “The effect of presence on human-robot interaction,” IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.701-706, 2008.

[4] C.Bereiter; “Education and mind in the knowledge age,” New York: Routledge, 2002.

[5] C. Breazeal and B. Scassellati; “A context-dependent attention system for a social robot,” International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp. 1146–1151, 1999.

[6] C. Breazeal; “Emotion and sociable humanoid robots,” International Journal of Human Computer Interaction, Vol. 59, pp. 119–155, 2003.

[7] A . Collins; “Cognitive apprenticeship: The Cambridge HandbQok of the Learning Sciences,” R. Keith Sawyer(Ed.）, Cambridge University Press, pp.47-60, 2006.

[8] P. Ekman; “Unmasking the face,” Prentice-Hall, 1975.

[9] 古橋 武; 統計的検定における多重比較に関する一考察，第 53 回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集，基調講演， pp.14-23， 2014.

[10] E. J. Gibson; 知覚の発達心理学，小林 芳郎 訳，田研出版，1983.

[11] P.Griffin, B.McGaw and E.Care; “Assessment and teaching of 21st century skills,” New York: Springer-Verlag, 2012.

[12] 後藤 みの理, 加納 政芳, 加藤 昇平, 國立 勉, 伊藤 英則; 感性ロボットのための感情領域を用いた表情生成, 人工知能学会論文誌, vol.21, no.1, pp.55-62, 2006.

[13] J.Han, M.Jo, V.Jones and J.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] B. S. Holland and M. D. Copenhaver; “An improved sequentially rejective bonferroni test procedure,” Biometrics, Vol. 43, No.2, pp.417-423, 1987.

[15] C.E.Humelo-Silver, C.A.Chinn, C.Chan and A.M.O’Donnell; “The international handbook of collaborative learning (educational psychology handbook),” New York: Routledge, 2012.

[16] 橋爪 誠; 手術支援ロボットの現状と将来, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.4, pp.423-425, 2004.

[17] 品川 泰一; 2014 年度版 就職活動の神様の SPI2 問題集，(株) ユーキャン　学び出版，2012.

[18] H.Ishiguro, T.ono, M.Imai, T.Maeda, T.Kanda and R.Nakatsu; “Robovie: An interactive humanoid robot,” International Journal of Industrial Robotics, Vol.28, No.6, pp.498-503, 2001.

[19] 井上 正明，小林 利宣; 日本における SD 方による研究分野とその形容詞尺度構成の概観，教育心理学，Vol.33, No.3, pp.253-260, 1985.

[20] 石黒 浩; アンドロイドサイエンス〜人間を知るためのロボット研究〜, 毎日コミュニケーションズ, 2007.

[21] 石村 貞夫; 分散分析のはなし， 東京図書，1992.

[22] F.Jimenez， T.Ando， M.Kanoh and T.Nakamura; “Psychological effects of a synchronously reliant agent on human beings，” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics， Vol.17， No.3， pp.433-442， 2013.

[23] F. Jimenez and M. Kanoh; “Robot that can promote learning by observing in collaborative learning，” IEEE International Conference on Systems， Man and Cybernetics， 2013.

[24] F.Jimenez, M.Kanoh, T. Yoshikawa and T. Furuhashi; “Effect of collaborative learning with robot that prompts constructive interaction,” IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2014.

[25] F. Jimenez, M. Kanoh, T. Yoshikawa, T. Furuhashi and T. Nakamura; “Effect of robot utterances using onomatopoeia on collaborative learning,” Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol.4, no.2, pp.125-131, 2014.

[26] M. Kanoh, S. Iwata, S.Kato and H. Itoh; “Emotive facial expressions of sensitivity communication robot “Ifbot”,” Kansei Engineering International, Vol.5, No.3, pp.35-42, 2005.

[27] O.H. Kwon, S.Y. Koo, Y.G. Kim and D.S. Kwon; “Telepresence robot system for english tutoring,” IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, pp.152-155, 2010.

[28] 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.76-83, 2011.

[29] 神田 崇行, 平野 貴幸, ダニエル イートン, 石黒 浩; 日常生活の場で長期相互作用する人間型対話ロボット-語学教育への適用の試み-, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.5, pp.636-647, 2004.

[30] 神田 崇行, 鎌島 正幸, 今井 倫太, 小野 哲雄, 坂本 大介, 石黒 浩, 安西 祐一郎; 人間型対話ロボットのための協調的身体動作の利用, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.7, pp.898-909, 2005.

[31] 金田 行雄，笠井 理生，古橋 武; 統計・多変量解析とソフトコンピューティング 超田自由度系解析を目指して，共立出版， 2012.

[32] 経済産業省; METI Journal 経済産業ジャーナル平成 26 年 10・11 月号, Available:http://www.meti.go.jp/publication/data/newmeti_j/meti_14_10_11/book115/book.pdf.

[33] 向後 千春, 冨永 敦子; 統計学がわかる, 技術評論社, 2007.

[34] 個人経営塾 KIP 進学教室. http://www.kip-juku.com/index.html.

[35] 小林 宏; 表情豊かな顔ロボットの開発と受付システムの実現, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.6, pp.708-711, 2006.

[36] 小泉 智史, 神田 崇行, 宮下 敬宏; ソーシャルロボットを用いた協調学習実験, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.10, pp.902-906, 2011.

[37] 小松 孝徳，秋山 広美; ユーザの直感的表現を支援するオノマトペ表現システム，電子情報通信学会論文誌 A，Vol.J92-A, No.11, pp.752-763, 2009.

[38] Y. Maeda and R. Taki; Interactive Emotion Communication between Human and Robot, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 7, No. 5(B), pp.2961–2971, 2011.

[39] P. Marti, M. Bacigalupo, L. Giusti, C. Mennecozzi and T. Shibata; "Socially assistive robotics in the treatment of behavioural and psychological symptoms of dementia," IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics 2006, pp.483–488, 2006.

[40] N. Miyake; "Conceotual change through collaboration. In S. Vosniadou (Ed.)," International Handbook of research on conceptual change, pp.453-478, 2008.

[41] 中嶋 宏，森島 泰則，山田 亮太，川路 茂保，S. Brave，H. Maldonado and C. Nass; 人間-機械協調システムにおける社会的知性：心のモデルとパーソナリティによるエージェントの社会的応答について，人工知能学会論文誌，Vol.19， No.3， pp.184-196，2004.

[42] 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, pp.170-178, 2013.

[43] 増田 恵, 加藤 昇平, 伊藤 英則; ラバン理論に基づいたヒューマンフォームロボットの身体動作の動作特徴抽出 と表出感情推定, 日本感性工学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.295-303, 2011.

[44] 松井 裕紀, 加納 政芳, 加藤 昇平, 伊藤 英則; Simple Recurrent Network を用いた感性ロボットのインタラクティブ表情表出, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.3, pp.120-128, 2010.

[45] 三宅 なほみ，石黒 浩; 人とロボットの協創へ向けて, 日本ロボット学会誌，Vol.29, No.10, pp.868-870, 2011.

[46] 三宅 なほみ; 人ロボット共生学：実践的な学習研究にロボットを導入して，何ができるか, 認知科学，Vol.19, No.3, pp.292-301, 2012.

[47] 三宅 なほみ; 概念変化のための協調過程：教室で学習者同士が話し合うことの意味, 心理学評論，Vol.54，No.3，pp.328-341，2011.

[48] 文部科学省; 教育の情報化. Available: http://jouhouka.mext.go.jp/

[49] 文部科学省; 情報通信技術の活用の推進. Available: http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpab201301/detail/1339626.htm#top.

[50] 南保 英孝, 木村 春彦, 原 未來, 阿部 孝司, 田嶋 拓也; 癒し型ペットロボットの飼い主判別手法の改善, 電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）, Vol. 129, No.9, pp.1662-1668, 2009.

[51] 並木 博; 「言葉かけ」の効果の実験結果から, 児童心理, Vol.47, No.5, pp.474-477, 1993.

[52] 日本教育コンピュータ株式会社; 情報処理試験.jp,2014. Available: http://xn--n9q36mh1hnxuksz7wt.jp/p-policy.html.

[53] C.E. Osgood; “Studies on the generality of affective meaning systems，” American Psychologist， Vol.17， pp.10-28， 1962.

[54] 大浦 圭一郎, 山本 大介, 内匠 逸, 李 晃伸, 徳田 恵一; キャンパスの公共空間におけるユーザ参加型双方向音声案内デジタルサイネージシステム, 人工知能学会誌, Vol.28, No.1, pp.60-67, 2013.

[55] R. Pfeifer and C. Scheier; “Understanding intelligence,” MIT Press, 1999.

[56] J. A. Russell; “A circumplex model of affect，” Journal of Personality and Social Psychology， pp. 1161–1178， 1980.

[57] N. Salkind(Ed.); “Fisher’s LSD, ” Encyclopedia of Measurement and Statistics, Vol.1, pp.359-360, 2007.

[58] R.K.Sawyer; “The cambridge handbook of learning sciences,” Camdridge University Press, 2006.

[59] D.L.Scwartz and T.Martin; “Inventing to prepare for learning: the hidden efficiency of original student production in statistics instruction,” Cognition & Instruction, Vol.22, pp.129-184, 2004.

[60] H. Shirouzu, N. Miyake and H. Masukawa; “Cognitively active externalization for situated reflection,” Cognitive Science, Vol.26, pp.469-501, 2002.

[61] D.H. Schunk and A.R. Hanson; “Peer models: influence on children’s self-efficacy and achievement,” Journal of Educational Psychology, Vol.81, pp.155-163, 1985.

[62] D.H. Schunk; “Peer models and childern’s behavioral change.,” Review of Educational Reserch, Vol.57, pp.149-174, 1987.

[63] M.Shiomo, T.Kanda, H.Ishiguro and N.Hagita; “Interactive humanoid robots for a science museum,” IEEE Intelligent System, Vol.22, No.2, pp.25-32, 2007.

[64] K.Shinozawa, F.Naya, J.Yamato and K.Kogure; “Differences in effect of robot and screen agent recommendations on human decision-making,” International Journal of Human-Computer Studies, Vol.62, No.2, pp.267-279, 2005.

[65] 白水 始, 中原 淳 ; 人の主体的な問題解決を促すロボットの役割, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.10, pp.898-901, 2011.

[66] R. Taki, Y. Maeda and Y. Takahashi; “Personal preference analysis for emotional behavior response of autonomous robot in interactive emotion communication,” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol. 14, No. 7, pp.852–859, 2010.

[67] M. Toda; “Man, robot, and society, models and speculations,” Martinus Nijhoff Publishing, 1924.

[68] 田中 文英; 幼児教育現場におけるソーシャルロボット研究とその応用，日本ロボット学会誌，Vol.29, No.1, pp.19-22, 2011.

[69] 高野 美由紀, 有働 眞理子; 養護学校の教師発話に含まれるオノマトペの教育的効果, 特殊教育学研究, Vol.48, No.2, pp.75-84, 2010.

[70] 中学・学習サイト, 勉強法と練習問題, http://study.005net.com/.

[71] 遠山 紗矢香; 初期理解の構築支援による建設的相互作用の促進：認知科学の協調学習を例として，認知科学，Vol.20，No.2，pp.177-203，2013.

[72] 戸田 正直; 感情：人を動かしている適応プログラム, コレクション認知科学 9, 東京大学出版会, 2007.

[73] K. Wada and T. Shibata; “Robot therapy in a care house – its sociopsychological and physiological effects on the residents,” IEEE International Conference on Robotics and Automation 2006, pp.3966–3971, 2006.

[74] C. V. O. Witvliet and S. R. Vrana; “Psychophysiological responses as indices of affective dimensions,” Psychophysiology, Vol. 32, pp. 436–443, 1995.

[75] 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 th 6th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2006), pp.87-91, 2006.

研究業績

学術論文

1. **Felix Jimenez**, Teruaki Ando, Masayoshi Kanoh and Tsuyoshi Nakamura; “Psychological Effects of a Synchronously Reliant Agent on Human Beings,” Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, vol.17, no.3, pp.433-442, 2013.

2. **ジメネスフェリックス**, 加納政芳; 英単語学習システムにおける足場かけ使用による学習能力の変化, 知能と情報, vol.25, no.5, pp.880-888, 2013.

3. **Felix Jimenez**, Masayoshi Kanoh, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Tsuyoshi Nakamura; “Effect of Robot Utterances Using Onomatopoeia on Collaborative Learning,” Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol.4, no.2, pp.125-131, 2014.

4. **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Masayoshi Kanoh; “An Emotional Expression Model for Educational-Support Robots,” Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, vol.5, no.1, pp.51-57, 2015.

5. **ジメネスフェリックス**, 吉川大弘, 古橋武, 加納政芳; “感情表出モデルを持つロボットとの共同学習で起こる心理効果,” 知能と情報, vol.27, no.6, 2015.

解説論文

1. **ジメネスフェリックス**, 加納政芳; 教育現場で活用されるロボットの研究動向, 知能と情報, vol.26, no.1, pp.2-8, 2014.

国際会議

1. **Felix Jimenez** and Masayoshi Kanoh; “Interaction Between Ability and Use of Scaffold in EFL Vocabulary Learning System,” Annual Meeting of The Cognitive Science Society (COGSCI 2012), Sapporo, Japan, August 1-4, 2012.

2. **Felix Jimenez** and Masayoshi Kanoh; "Change in Learning Ability Using Scaffolding in EFL Vocabulary Learning System," International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2012), Kobe, Japan, November 20-24, 2012.

3. **Felix Jimenez**, Masayoshi Kanoh and Masato Goto; "How Do We Feel When Babyloid Starts Crying Suddenly?" Lecture Notes in Computer Science (International Conference on Human-Computer Interaction (HCII2013)), vol. 8010, pp.355-362, Las Vegas, USA, July 21-26, 2013.

4. **Felix Jimenez** and Masayoshi Kanoh; "Effect of Advances in Wisdom of Robot in Collaborative Learning," International Conference on Human-Agent Interaction (iHAI2013), Sapporo, Japan, August 7-9, 2013.

5. **Felix Jimenez** and Masayoshi Kanoh; "Robot that can Promote Learning by Observing in Collaborative Learning," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2013), in USB Memory, Manchester, UK, Octover 13-16, 2013.

6. **Felix Jimenez**, Masayoshi Kanoh, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Tsuyoshi Nakamura; "Effect of Robot Utterances Using Onomatopoeia on Collaborative Learning," IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI2014), Beijing, China, July 6-11, 2014.

7. **Felix Jimenez**, Masayoshi Kanoh, Tomohiro Yoshikawa and Takeshi Furuhashi; "Effect of Collaborative Learning with Robot That Prompts Constructive Interaction," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2014), San Diego, USA, October 5-8, 2014.

8. **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Masayoshi Kanoh; "Psychological Effects of Educational-Support Robots using an Emotional Expression Model," International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2014), Kitakyushu, Japan, December 3-6, 2014.

9. **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Masayoshi Kanoh; "A Proposal of model of Emotional Expressions for Robot Learning with human,"

2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZIEEE2015), Istanbul, Turkey, August 2-5, 2015.

10. **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Masayoshi Kanoh; "Learning Effect of Collaborative Learning between Human and Robot having Emotion Expression Model," IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2015), Hong Kong, China, October 9-12, 2015.

11. **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi, Masayoshi Kanoh and Tsuyoshi Nakamura; "Feasibility of Collaborative Learning between Robots and Children with Autism Spectrum Disorders," International Workshop on Intervention of Children with Autism Spectrum Disorders using a Humanoid Robot (ASD-HR 2015), Kanagawa, Japan, November 17-18, 2015.

受賞

1. RSNP コンテスト最優秀賞 **ジメネスフェリックス**, 加納政芳; RSNP を用いた英単語学習支援ロボットの開発, 第 30 回ロボット学会学術講演会 (第 1 回 RSNP を利用したロボットサービスコンテスト), 札幌コンベンションセンター, 9/17-20, 2012.

2. RSNP コンテスト審査員特別賞 **ジメネスフェリックス**, 加納政芳; 教育現場でのロボット活用を円滑にする教育用システム, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会 (第 2 回 RSNP を利用したロボットサービスコンテスト), 首都大学東京, 9/4-6,2013.

3. HSS Design Award インタラクティブ賞 **ジメネスフェリックス**, 加納政芳; 人・ロボット間の協調学習のための建設的相互作用モデルに基づく行動モデル, 第 2 回人間共生システムデザインコンテスト, 東京工芸大学, 3/8,9, 2014.

4. ポスターデモセッション 優秀賞 **ジメネスフェリックス**, 吉川大弘, 古橋武, 加納政芳; 感情表出モデルを用いた教育支援ロボットが及ぼす心理効果, 第 30 回ファジィ・システム・シンポジウム (FSS 2014), 高知城ホール, 9/1-3, 2014.

5. Best student presentation Award **Felix Jimenez**, Tomohiro Yoshikawa, Takeshi Furuhashi and Masayoshi Kanoh; "Psychological Effects of Educational-Support Robots using an Emotional Expression Model," International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2014), Kitakyushu, Japan, December 3-6, 2014.

6. HSS Design Award インタラクティブ賞 **ジメネスフェリックス**, 吉川大弘, 古橋武, 加納政芳; 感情表出モデルを用いた教育支援ロボットとの共同学習がもたらす学習効果, 第 3 回人間共生システムデザインコンテスト, 富山県立大学, 3/10,11, 2015.

7. ポスターデモセッション 最優秀賞 **ジメネスフェリックス**, 吉川大弘, 古橋武, 加納政芳, 中村剛士; 発達障がい児と教育支援ロボットの共同学習における教育支援効果に関する報告, 第 31 回ファジィ・システム・シンポジウム (FSS 2015), 電気通信大学, 9/2-4, 2015.

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に際し，終始並々ならぬご指導を賜りました名古屋大学 工学研究科 計算理工学専攻 教授 古橋武 先生に心より御礼申し上げます．

本論文を査読して頂くと共に，貴重なご助言を賜りました名古屋大学 工学研究科 計算理工学専攻 教授 河口信夫 先生，准教授 吉川大弘 先生ならびに中京大学 工学部 機械システム工学科 教授 加納政芳 先生，教授 橋本学 先生に心より感謝いたします．

中京大学 工学部 機械システム工学科 教授 加納政芳 先生には，筆者が中京大学在学時より終始一貫して熱心なご指導を賜りました．厚く御礼申し上げます．また，名古屋大学大学院 工学研究科 古橋研究室 秘書 東愛子 氏には，事務手続き等で多大なるご協力を頂きました．感謝の意を表します．

学生生活を共にした名古屋大学 工学研究科 計算理工学専攻 古橋研究室の諸氏，ならびに中京大学 工学部 機械システム工学科　加納研究室の諸氏とは，本研究に対する示唆に富む多くの討論をさせていただきました．心より感謝いたします．

末筆ながら，博士後期課程修了まで暖かく見守り，応援し続けてくれた両親や弟，親戚一同に対する感謝をもって，本論文の締めくくりとさせて頂きます．

本研究では，文部科学省科学研究費（特別研究員奨励費，No. 26・10532）の補助を得て遂行された．