様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年　５月１７日現在

機関番号：１３４０１
研究種目：基盤研究(C)
研究期間：２００８年度　～　２０１０年度
課題番号：２０５００２０３
研究課題名（和文）
　人間共生システムのためのインタラクティブ情動コミュニケーションに関する研究
研究課題名（英文）
　Research on Interactive Emotion Communication for Human Symbiotic System

研究代表者
　前田　陽一郎（YOICHIRO MAEDA）
　福井大学・大学院工学研究科・教授
　研究者番号：４０２７８５８６

研究成果の概要（和文）：本研究では人とロボットが情動を伴う行動を基に双方向コミュニケーションを図る「インタラクティブ情動コミュニケーション」(IEC)の実現を目指し、人とロボットが相互に情動を伝え合うことで、ロボットに高い対人親和性を与えることが目標である。本研究により、ロボットの情動行動反応の個人嗜好分析、脳波測定による客観的情動評価、タスク負荷環境下におけるロボットの情動行動評価、ヒューマノイドロボットと人間のインタラクション実験、などさまざまな成果をあげることができた。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aim to realize the Interactive Emotion Communication (IEC), that is, the bidirectional communication with the emotional behavior between human and robot. The purpose of the research is to embed the high personal affinity to the robot by communicating own emotion mutually. We achieved the result of the individual preference analysis of emotional behavior reaction of robot, the objective emotion evaluation by brain wave measurement, the emotional behavior evaluation of robot under task load environment, and the interaction experiment of humanoid robot and human.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００８年度	3,000,000	900,000	3,900,000
２００９年度	500,000	150,000	650,000
２０１０年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総　計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：総合領域
科研費の分科・細目：情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング
キーワード：知能ロボティックス・ファジィ理論・人間共生システム

１．研究開始当初の背景

　ロボットが人間と共生する社会を実現するために、人間とスムーズに意思疎通を行う能力がロボットに要求される。このような人間とエージェントのインタラクションに関する研究は HAI(Human Agent Interaction)や HRI(Human Robot Interaction)と呼ばれ、盛んに研究されている。これらは人間に優しいシステムを構築する重要な研究分野となっている。

　最近のヒューマノイドロボットなどの研究では、顔の表情によるロボットの感情表現を行う試みも行われている。しかしながら、これらは人間の顔という特殊な部分を用いて感情を表現するために、ロボットには違和感がある上、ロボットから人間への一方向の感情表現しかできない。特に、ロボットが人間の心理状態を推測し、それに対応するよう

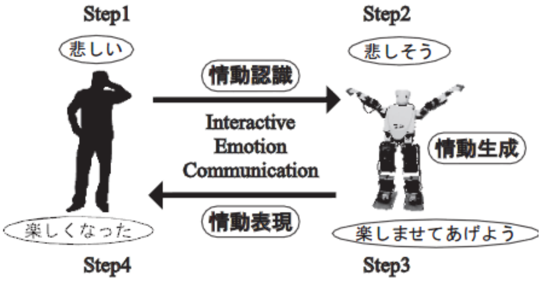

図１　IEC の概観

な行動やリアクションが取れるロボット、つまり、人間と円滑な意思疎通を行うロボットは未だに存在していないのが現状である。知能ロボットにおけるインタラクションやコミュニケーションに関する課題は数多く存在し、このような双方向コミュニケーション技術の確立は著しく遅れている。

２．研究の目的

本研究ではバーバル・コミュニケーション（言語コミュニケーション）よりも情報量が多いとされるノンバーバル・コミュニケーション（非言語コミュニケーション）に注目し、「身体動作」を取り上げる。また「感情」というのは人間の心理状態を示しているが、複雑で定義も曖昧であり、工学的に応用が難しい。そこで「感情」よりも短期間で発生し、減衰するとされる「情動」をコミュニケーションの媒体として取り上げる。そして、人とヒューマノイド型ロボットが情動を伴う行動を基に双方向コミュニケーションを図る「インタラクティブ情動コミュニケーション」(Interactive Emotion Communication: IEC)の実現（図１参照）を目指す。IEC を実現することにより、人とロボットが相互に情動を伝え合うことで、ロボットに高い対人親和性を与えることが目標である。

本研究で得られた手法をロボットに適用することにより、ロボットと人間の間で何らかの情動のやり取りや「心」によるメッセージ交換が可能な双方向の情動コミュニケーションが実現できる。また、本研究により親和性の高いロボットを構築することで、人間に“癒し”を与えることが期待できる。この技術を利用し、娯楽、福祉分野等での活躍が期待できる。

３．研究の方法

IEC を実現するためにはロボットに、人間の情動を理解する能力、自身の情動を生成する能力、および自身の情動を表現する能力が不可欠となる。そして「情動認識」、「情動生成」、「情動表現」の３つのプロセスがロボットに備わっている必要がある。これらを搭載したロボットと人間がインタラクションを図り、IEC を通じて、ロボットが人間に与える親和感や違和感を測定する実験を行った。

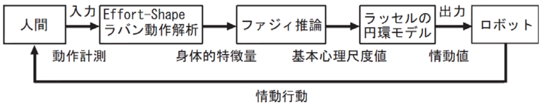

図２　FEIS アルゴリズム

このような実験により、本手法の有効性を検証することができる。実用的な人間共生システムの構築を目指して以下の大まかな段階を経て研究を進めてきた。

(Step1)ロボットの主観的情動行動学習および人間の客観的ファジィ情動推論[H20 年度]
(Step2)ロボット対人間のインタラクティブ情動コミュニケーション(IEC)　[H21 年度]
(Step3)IEC における人間の心理計測に基づく感性評価　[H22 年度]

まず「情動認識」の機能として、人間の身体動作を舞踏学において知られるラバン理論に基づいて解析を行う、ファジィ情動推論（Fuzzy Emotion Inference System: FEIS）を提案する。図 2 に FEIS のアルゴリズムを示す。FEIS では、人間の身体動作を観測し、観測データをファジィ推論にかけることによって基本心理尺度値を求め、得られた値を Russell の円環モデル(図 3 参照)という感情モデルに適用することで人間の情動を推定することが可能となる。動作の特徴点となる部位にカラーマーカーを装着し、FEIS を用いることにより、人間の情動行動が示す情動をロボットが認識できるようになる。人間とロボットが対面し、人間の現在の情動を知ることで、ロボットが情動表現を行い、人間とロボットの IEC を実現した。

次に実用的な人間共生システムを構築するためには感性評価が重要となり、ロボットが人間に与える親和感や違和感を測定する必要がある。本手法による有効性を確認するため、脳波計（本研究予算にて購入）による被験者の情動計測（客観的評価）や SD 法によるアンケート調査（主観的評価）を行った。

また本研究では実験を簡略化するために、被験者の情動とロボットの情動を、Russell の円環モデルを参考に Joy、Anger、Sadness、Relaxation の４つに限定して実験を行った。なお、今後は被験者が表現した情動を JOY-H、ANG-H、SAD-H、REL-H、ロボットが表現した情動を JOY-R、ANG-R、SAD-R、REL-R、FEIS が出力した人間の情動を JOY-F、ANG-F、SAD-F、REL-F、脳波計による感性分析の出力を JOY-E、ANG-E、SAD-E、REL-E と置く。

当初は犬型ロボットの AIBO（本研究室にて所有）を想定しており、これを使用した研究を前半では進めてきた。ペット型ロボットということもあり、人間に高い親和性を与えることができる。しかしながら、より効果的な情動伝達を行うため、後半の研究では、人間

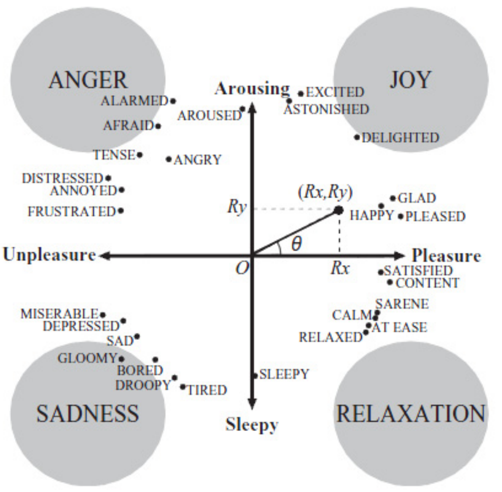

図 3　Russell の円環モデル

に近い身体構造を持つヒューマノイドロボットの Robovie-X（本研究室にて所有）を使用した実験も試みた。ヒューマノイドロボットを使用することで、情動認識に用いたラバン理論を応用することが容易になる。これによって被験者との IEC 実験も試みた。

４．研究成果

以下では本研究費補助金の研究における主な研究成果について報告する。

(1)個人嗜好分析実験

対人親和性の高いロボットを構築する上で、個人の嗜好分析が重要であると考えられる。これは個人ごとに好みのロボットの反応が異なるためである。ロボット(AIBO)の情動行動に対する個人の嗜好を検証するため、人間の情動 4 パターンとロボットの情動 4 パターンの全ての組み合わせ（合計 16 パターン）を検証対象とした印象評価実験（図 4 参照）を試みた。評価方法として、SD 法によるアンケートを使用し、印象評価に用いた形容詞対は「生物的な - 機械的な」､「面白い - 退屈な」､「やさしい - こわい」､「複雑な - 単純な」､「親しい - 疎遠な」､「意味のある - 偶然な」､「好きな - 嫌いな」の 6 対であり各 7 段階で評価をしてもらった。

4 人の被験者を対象として個人嗜好分析を行い、16 パターンの印象評価を行った。その後、2 人の被験者に限定して嗜好分析から得られたロボットの情動発生モデル（最も評価の高いモデルを有効反応モデルと呼ぶ）の評価を行う実験を試みた。ロボットの 4 つの基本情動を表現する情動行動については、あらかじめ作りこんだ 5 秒程度の情動行動を設定した。なお、誤認識がないように、被験者にはロボットの情動行動と表現している情動の対応について説明をした。

実験の結果から、被験者の好みの反応に絞

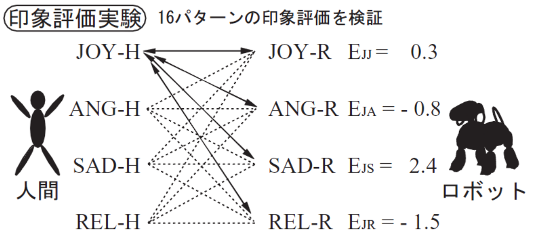

図 4　印象評価実験の構図

った有効反応モデルを構築することで、被験者により高い親和性を与えることが確認できた。嗜好を一切考慮せず、被験者の情動をそのまま返す「同一情動反応モデル」では、常に被験者に共感するような印象を与えることが確認できたが、「飽き」を考慮することで評価が下がってしまうことを、この実験により確認できた。

印象評価実験で得られた各反応の評価値が比較的良好であった以下の 4 つの情動反応モデルを構築した。

(a) 評価値が正の情動反応のみを発生
(b) 評価値が上位 2 位以内、かつ評価値が正の情動反応のみを発生
(c) 評価値が最も高い情動反応のみを発生
(d) 他人の評価値によって求められた情動反応のみを発生

(a)(b)(c)は次第に条件が厳しくなっており、(c)は人間の情動に対応するロボットの情動は、同一情動反応モデルと同じで 1 対 1 対応となっている。しかし、(c)は被験者の好みの反応であるために、同一情動反応モデルよりも高評価を得ることができた。実験の結果、被験者によって(b)もしくは(c)が有効反応モデルとなることが確認された。

しかしながら、ただ単に被験者の嗜好に合わせてロボットの情動を発生させるだけでは、インタラクションを行うという面で不自然さを与えてしまう可能性もある。今後はこのインタラクションの流れについても検討する必要がある。これについては後述するヒューマノイドロボットとのインタラクション実験で考察を行う。

(2)脳波測定による客観的評価実験

脳波計による主観的評価では、ロボットの情動行動が被験者に様々な変化を与えることを確認した。ここでは脳波による情動解析として、武者らが提案した、「感情（感性)」を工学的に計測する「感性スペクトラム分析法」(Emotion Spectrum Analysis Method : ESAM)を使用した。ESAM は人の感性を脳波計によって数値的に解析し、客観的に表現することを目標に使用されるものである。この手法では、脳波による数値解析を行うために頭皮に電極を装着して計測を行う。電極装着位置は武者らと同じように国際 10-20 法に従っ

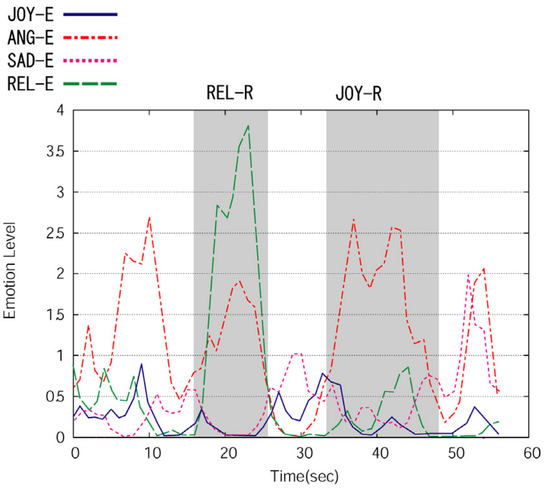

図 5　ESAM の出力(被験者不快時)

た 10 箇所の電極位置を採用した。

被験者の情動を不快情動の 1 つである ANG-H にするため、60 秒間計算問題を解いてもらった。ロボット(AIBO)はあらかじめ決められたタイミングで快情動である REL-R と JOY-R を表現し、リアルタイムで感性解析を行った。図 5 は被験者に不快を感じさせたときの ESAM の出力を示している。横軸が時間軸であり、縦軸が ESAM の出力を示しており、値が高いほど各情動を強く感じていることを示している。また灰色の網掛け部分はロボットが情動表現を行っていた時間であり、前半は REL-R を、後半は JOY-R を表現していた時間帯であることを示している。

ANG-H を感じているときにロボットに REL-R を表現させることで、被験者の情動に REL-H を誘発させることに成功した。逆にロボットが JOY-R を表現することで被験者の ANG-H を誘発させた。この実験により、ロボットと被験者のインタラクションによる被験者の情動の遷移を確認した。0 秒から 17 秒付近まで被験者が計算問題を解いているとき、ANG-E の値が強く出力されていることが確認できる。その後ロボットが REL-R を表現している時間帯も ANG-E の値が出ているが、それ以上に REL-E の値が強く出力されていることが見て取れる。REL-E の値はロボットの情動行動表現時から徐々に上がり始め、ロボットの情動行動が終わるより前に出力が下がり、そのまま情動行動が終わる頃に出力されなくなっている。

再び計算問題を始めたときには、前半で強く出力された ANG-E が抑えられ、SAD-E がやや出力される傾向にあった。次にロボットが JOY-R を表現したときには、JOY-H や REL-H を誘発することもなく、逆に ANG-H が強く出力されている。被験者の感想によると、ロボットの情動行動に不快を感じた様子もなかったが、計算問題でいらいらしている時にロボットが喜びの動作をとったため、やや怒りの感情が沸いたものと思われる。最後に計算問題を再開したときには、再び ANG-E が出力される傾向にあった。

ロボットが JOY-R を表現していたときに、ESAM の出力が ANG-E を出力したことについては、前述のように人間の心理状態によってはロボットの情動行動がマイナス方向に働く可能性を示唆しており、非常に興味深い結果が得られた。このように脳波計測でリアルタイムに感性分析を行い、被験者がロボットの情動行動から受ける影響を検証することで効果的な IEC を実現することができる。

(3)タスク負荷環境下におけるロボットの情動行動の評価

これまでの実験では、ロボットが人間に対して情動行動を示すことで、どのような情動が誘発されるのか、またどのような印象を受けるのかを検証してきた。本実験では、以上のような評価に加え、新たに人間の作業効率の観点から評価を行う。

本実験では、人間があるタスクに集中しているときに、近くにいるロボットを想定して実験環境を構築した。脳波計を装着した被験者は椅子に座って作業をし、ロボット(AIBO)は被験者の邪魔にならないように、30cm から 40cm 離した位置に配置した。また本実験ではロボットが一方的に情動表現を行うのみで、被験者のロボットによるインタラクションは考慮しない。

本実験は 2 種類の負荷の異なるタスクを考慮しているため、合計 8 回（2 種類×ロボットの基本情動 4 パターン）の実験を繰り返した。被験者に与えるタスクは 100 マス計算とし、異なる負荷には実験 A: 1 桁+1 桁(100 マス)、実験 B: 2 桁+2 桁(50 マス)を採用した。事前実験の結果、実験 A のタスクは JOY-R が多く出力され、実験 B のタスクは SAD-R が多く出力される傾向にあった。これより実験 A よりも実験 B の負荷のほうが大きいことが確認できる。

8 回の実験中で最も印象の悪かった「実験 B 中の REL-R」の時の被験者の脳波の ESAM による感性解析結果を図 6 に示す。図 5 と同様に、横軸が時間軸、縦軸が ESAM の出力値を示している。この図は計算を開始してから終了するまでの JOY-E と SAD-E の出力値のみを示しており、垂線はロボットが REL-R を表現したタイミングを示している。前半では REL-R 表現後に被験者が JOY-H を感じていることが見て取れるが、後半では SAD-E の出力が表れた。被験者はロボットが常に REL-R を表現し続ける様子から馬鹿にされている印象を受け、これが印象評価につながったと推測される。

また、それぞれのタスク実行にかかった時間を表 1 に示す。この表を見ると、実験 A で

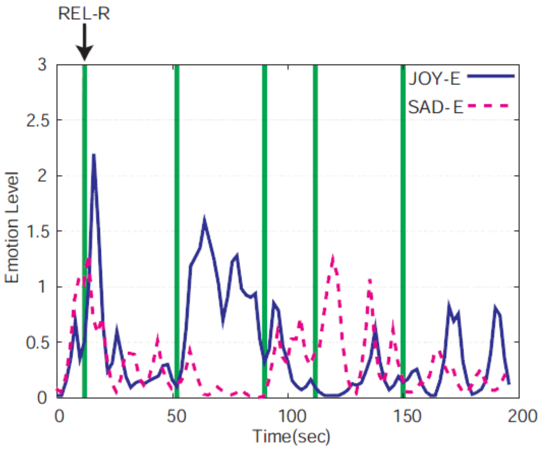

図 6　ESAM の出力（REL-R）

は ANG-R を表現したとき、実験 B では JOY-R を表現したときに最も早く処理が終わっていることが確認できる。被験者によると実験 A では ANG-R を表現されることで叱咤されていると感じ、それが作業効率向上につながったと思われる。しかし同じ ANG-R でも負荷の重い実験 B では、ただ怖いと感じただけであった。実験 B で最も効率がよかったのは JOY-R を表現されたときであったが、被験者が不快を感じているときに嬉しそうにしていることが悪印象を与え、どの組み合わせよりもネガティブな印象を持っていることが確認できる。これは非常に不愉快であったため早く終わらせようという意識が働いたものと推測される。しかし軽い負荷の実験 A では、自分が応援されていると捉えられていた。これらの結果から被験者の心の状態により、適切なロボットの情動行動が作業効率をあげる可能性が示された。しかしこれらはまだ限定された条件での実験であり、今後はさらに複雑な実験をすることにより適切なロボットの情動表現の組み合わせ、タイミング、パターンを求めていく必要がある。

表 1　タスク実行時間

	JOY-R	ANG-R	SAD-R	REL-R
(実験 A) 1 桁+1 桁	85	73	99	85
(実験 B) 2 桁+2 桁	125	142	133	195

(4) ヒューマノイドロボットと人間のインタラクション実験

これまでの実験では犬型ロボットの AIBO を使用して実験を進めてきた。ロボットの情動行動も我々があらかじめ設定した情動行動を被験者に提示した。しかし、今後より良いインタラクションを実現するためには、情動行動にも注意を払う必要がある。ヒューマノイドロボットを使用することでより人間に近い動作が可能になり、人間の舞踏学に基づくラバン理論を適切に利用して情動行動（情動表現）を生成することができる。この実験では新しく使用するヒューマノイドロボットの情動行動についても検討し、アンケートによって得られた情動行動によってインタラクション実験を試みた。

ヒューマノイドロボットとして、Vstone の Robovie-X（当研究室所有）を使用し、インタラクション実験では 4 名の被験者のデータを収集した。ここでは情動行動を決定するための要素として、ラバン理論の Door Plane と Flow Effort、Time Effort を使用した。それぞれ体全体の基本面積[s]、手の振幅[h]、手の周波数[v]とした。これら 3 つの要素からロボットの動作を生成し、それぞれ大中小の 3 パターンを用意し、合計 27 パターンを生成した。この全てのパターンを被験者 10 名に評価してもらい、その結果を数量化 I 類という統計手法で処理した。

その結果、一般的な各情動行動反応が決定された。表 2 に統計処理結果を示す。Score とはカテゴリースコアを指し、各動作項目中のパラメータが情動を表現する際の影響の大きさを示している。Range とはカテゴリースコアの最大値と最小値の差であり、各動作項目の重要度を示している。また、Score と Range の最大値に濃い網掛けを、最小値には薄い網掛けをした。

例えば表 2 より、JOY-R は[s 大 h 大 v 大]の最も激しい動きをすることで表現可能であることが確認された。JOY-R の欄に注目すると最もかけ離れた動作が SAD-R に該当することが確認できる。JOY と SAD は Russell の円環モデルでも原点対称の位置に存在する情動の組み合わせでることが分かる。また同じ原点対称である ANG-R と REL-R もほぼ正反対の動作であることが確認された。

インタラクション実験での被験者の情動の遷移を図 7 に示す。この実験では被験者の情動をオウム返しに返す「同一情動反応モデル」と Russell の円環モデル上で原点対称の情動を返す「対称情動反応モデル」の 2 種類

表 2　ロボットの情動行動に対する統計処理結果

JOY-R	Score	Range
s大	0.455556	
s中	0.077778	0.988889
s小	−0.53333	
h大	0.5	
h中	0	1
h小	−0.5	
v大	0.577778	
v中	−0.04444	1.111111
v小	−0.53333	

ANG-R	Score	Range
s大	0.055556	
s中	−0.13333	0.211111
s小	0.077778	
h大	0.5	
h中	−0.04444	0.955556
h小	−0.45556	
v大	0.811111	
v中	−0.23333	1.388889
v小	−0.57778	

SAD-R	Score	Range
s大	−0.36296	
s中	−0.14074	0.866667
s小	0.503704	
h大	−0.55185	
h中	0.048148	1.055556
h小	0.503704	
v大	−0.40741	
v中	0.059259	0.755556
v小	0.348148	

REL-R	Score	Range
s大	0.355556	
s中	−0.05556	0.655556
s小	−0.3	
h大	−0.3	
h中	0.122222	0.477778
h小	0.177778	
v大	−0.85556	
v中	−0.01111	1.722222
v小	0.866667	

を用意した。
被験者４名にはそれぞれ情動の遷移に個人差があり、全員が同じパターンのインタラクションを図ることはなかった。例えば、JOY-H を感じているときにロボットが JOY-R を表現することで、JOY-H が増幅される、または ANG-H を誘発する被験者の２種類に分かれた。しかし、被験者ごとにそれぞれ好みの反応というものがあり、それに絞って情動表現を行うことで、被験者に高い親和性を与えるロボットの構築が可能であると考えられる。
この実験結果からも被験者の情動の増幅、抑制が可能であることを確認した。本実験ではインタラクション時間を 60 秒と限定したが、被験者ごとに様々な情動の遷移が見て取れた。今後はさらに長期のインタラクションを図ることで、個人の嗜好性を分析し、より親和性の高いロボットの構築が期待できる。
本課題研究により、人とロボットのスムーズなインタラクションを実現するための基礎技術が確立されたと考える。このような研究の機会を与えていただいたことに感謝の意を表するしだいである。

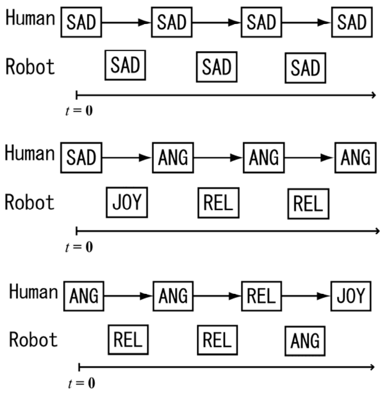

図 7　被験者の情動遷移の一例

５．主な発表論文等
（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計２件）
[1] Y. Maeda, R. Taki, “Interactive Emotion Communication between Human and Robot,” International Journal of Innovative Computing Information and Control, Vol.7, No.5(B), pp.2961-2970, 2011.
[2] 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.

〔学会発表〕（計 11 件）
[1] R. Taki, Y. Maeda and Y. Takahashi, “Effective Emotional Model of Pet-type Robot in Interactive Emotion Communication,” SCIS&ISIS2010, pp.199-200,2010.
[2] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳, “人とロボットのインタラクティブ情動コミュニケーションにおけるロボットの有効反応モデル,” 第 26 回ファジィシステムシンポジウム, pp.205-210, 2010.
[3] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳, “インタラクティブ情動コミュニケーションにおけるロボット動作の人間に与える癒し効果の解析,” 第 20 回インテリジェント・システム・シンポジウム, S2-3-2, 2010.
[4] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳, “ロボットの情動行動がタスク負荷環境下の人間に与える印象評価,” 日本知能情報ファジィ学会北信越シンポジウム, pp.30-33, 2010.
[5] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳, “ロボットの情動行動が人間に与える影響の脳波解析,” HAI シンポジウム, 3A-2, 2010.
[6] 滝僚平, 前田陽一郎, “人とロボットのインタラクティブ情動コミュニケーション,” 第 19 回インテリジェント・システム・シンポジウム, pp.1-4, 2009.
[7] 滝僚平, 前田陽一郎, “インタラクティブ情動コミュニケーションにおけるロボットの情動行動が与える心理的影響,” 日本知能情報ファジィ学会合同シンポジウム, N2-1(HSS-6-3), 2009.
[8] 本間雄仁, 前田陽一郎, “脳波情報を用いた人間の情動計測実験,” 人間共生システム研究会 第 2 回 HSS 研究会, HSS-2-4, 2008.
[9] 加藤進, 前田陽一郎, ″情動行動学習システムにおけるストレス反応表現,” 日本知能情報ファジィ学会 第 2 回 HSS 研究会, HSS-2-5, 2008.
[10] 本間雄仁, 前田陽一郎, “ファジィ情動推論システムのための人間の情動計測実験,”第 24 回ファジィシステムシンポジウム, pp.582-585, 2008.
[11] 加藤進, 前田陽一郎, “自律エージェントのためのストレス反応を有する情動行動学習システム,” 第 24 回ファジィシステムシンポジウム, pp.578-581, 2008.

６．研究組織

(1)研究代表者
前田　陽一郎（YOICHIRO MAEDA）
福井大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：４０２７８５８６
(2)連携研究者
井上　博行（HIROYUKI INOUE）
福井大学・教育地域科学部・准教授
研究者番号：１０３０３３５６