原著論文

状態遷移確率に基づくマルコフ情動モデルを用いた インタラクティブ情動コミュニケーション†

前田 陽一郎*

近年、エンタテインメントロボットやパーソナルロボットのような人間と接することを目的としたロボットが増えつつある。これによりロボットには人間とコミュニケーションで情報伝達をする能力が必要になってきている。コミュニケーションを円滑に行うための媒体としては、顔の表情や身振り手振りなどのノンバーバル（非言語）コミュニケーションが多く用いられる。本研究では身体動作に着目し、ロボットと人間が情動を伴った身体動作で情報伝達を図る手法としてインタラクティブ情動コミュニケーション（Interactive Emotion Communication :IEC）を提案してきた。ここでは情動を伴った動作で双方向コミュニケーションを行い、人間の情動を増幅、抑制することでロボットの対人親和性を高めることを目標としている。これまでの研究では対人親和性を高めるために共感するだけでなく飽きられにくい情動行動反応モデルをもつことが必要であることがわかっている。本論文ではマルコフ情動モデルを用いた情動生成についての一手法を提案する。インタラクションで好印象に感じる情動反応と認識した情動の内部状態を考慮に入れた状態遷移をモデル化することができるマルコフ情動モデルを使用し、人間が好印象で興味が持続するインタラクションを行う情動生成モデルを構築する。このモデルを搭載したロボットでインタラクション実験を行い、マルコフ情動モデルを用いることによりヒューマノイドロボットの対人親和性が向上することを確認した。

キーワード：インタラクティブ情動コミュニケーション、マルコフ情動モデル、身体動作、対人親和性、ヒューマノイドロボット

1. はじめに

人間が円滑にコミュニケーションを行う際に情報伝達するためには言語だけでなく、身体動作や表情に含まれている感情や情動を認識、表現する能力が必要となる。ロボットと人間が共生する社会においては、ロボットにも人間と円滑な意思疎通を図る技術が求められている。このような人間とのコミュニケーションに関する研究は人間共生システムにおける分野で盛んに研究されており、ロボットやエージェントの人間とのコミュニケーションにおける情動に関する認識および表現を行った研究は数多く存在する。

例えば、橋本ら [1] はロボットの情動を人間の情動に同調させるインタラクション手法を提案した。佐野ら [2] はロボットと人間とのコミュニケーションにおいて情動を介したインタラクションに着目し、ポジティブなマインドを想起させるための引き込み制御方式とその学習方式を提案した。また堀尾ら [3] は強化学習と情動学習に基づいた意思決定法を提案し、コミュニケーションエージェントの協調行動を創発した。さらに加納ら [4] は恒等写像学習によりコミュニケーションロボットの表情特徴を感情空間にマッピングした。

一方、前田ら [5, 6] は身体動作に着目し、ロボットと人間が

情動を伴った身体動作で情報伝達を図る手法としてインタラクティブ情動コミュニケーション（Interactive Emotion Communication: IEC）を提案している。IEC では、人間の動作を計測し、ラバン理論を基に身体的特徴量を求め、ファジィ情動推論システムを用いて得られた基本心理尺度値をラッセルの円環モデルに適用することで情動を推定する。これまでの研究で、常に共感する動作では飽きが早く、対人親和性を高めるためには共感するだけでなく興味が持続する情動行動反応モデルをもつことが必要であることが報告されている。

しかしながら、人とロボットとのインタラクションにおいて、情動に関する画一的な反応を示すロボットを構築した研究例は多いが、外部からの影響を反映し状況に応じて変化する複雑な情動遷移を扱った研究例については、現状ではまだ少ない。例えば、喜びを示している人間に対していつも喜びを表現して共感するような反応を示すロボットを構築しても最初の印象は良いがそのうちインタラクションを行っている人間が飽きてくる。しかしながら、これまでのインタラクションの状態遷移に従って確率的に変化する情動反応を示すロボットを構築することができた場合、インタラクションがより持続しやすくなるものと考えられる。

そこで本研究では、人とロボットの情動に基づく複雑なコミュニケーションを実現するため、マルコフ情動モデル [7] を用いた情動生成についての一手法を提案する。マルコフ情動モデルはロボットの行動決定に応用した研究 [8] なども行われているが、情動数が少なく人間とのインタラクションに応用された例はない。そこで本研究では、インタラクションで表現された情動ごとに好印象に感じる情動反応と認識した情動の影響や内部状態を考慮に入れた状態遷移をモデル化することができる

† Interactive Emotion Communication Used Markovian Emotional Model Based on State Transition Probability
Yoichiro MAEDA

* 立命館大学 情報理工学部 情報理工学科
Department of Information Science and Engineering,
College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

マルコフ情動モデルを用いて、ロボットの情動反応が好印象で興味が持続するインタラクティブを行う情動生成モデルを構築する。また、このモデルを搭載したヒューマノイドロボットでインタラクティブ実験を行ったのでこの結果についても報告する。

2. マルコフ情動モデル

マルコフ情動モデル (Markovian Emotional Model: MEM) は S.C.Banik ら [7] によって提案されたマルコフモデルの一種である。Banik らはマルコフ過程に基づく確率手法として情動の移り変わりを確率的に記述できるマルコフモデルを、ロボットの内部状態や外部からの影響を考慮に入れて設定した確率で定義し、情動の遷移を行動に影響させる行動決定モデルを提案した。

マルコフモデルはある時点での事象が過去の状態に依存して決まるような現象を複数の状態を表す有限オートマトンで状態遷移と確率的な出力機能を備えたモデルとして表すことができる。マルコフモデルでは、ある過程のとき現在の状態に依存して次の状態の条件付き確率分布が決定される (マルコフ性)。時間とともに変化する確率が過去の影響を受けない性質を持つものがマルコフ過程の特性をもっている。

Banik らの 4 情動のマルコフ情動モデルはマルコフモデルを用いてロボットの現状の内部情動を求めることができる。ここでは、情動状態を発生させる割合を増加させる確率を定義している情動誘発因子 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ はそれぞれ情動状態 joy (j), anger (a), fear (f), sadness (s) に対応している。この情動誘発因子により内部状態や外部の影響を観測するたびに確率を変更できる。現在の情動状態の分布である Y_k は時刻 k における情動状態確率ベクトルである。この値が現在のロボットの各情動状態の割合を定義している。次の状態の情動状態確率ベクトルは以下の手順で求めることができる。

1. 状態 1 から状態 2 への情動遷移の事前確率 $q_{2/1}$ を設定し、式 (1) の行列 Q を決定する。これにより遷移できる情動をあらかじめ設定する。

$$Q = \begin{bmatrix} q_{j/j} & q_{j/a} & q_{j/f} & q_{j/s} \\ q_{a/j} & q_{a/a} & q_{a/f} & q_{a/s} \\ q_{f/j} & q_{f/a} & q_{f/f} & q_{f/s} \\ q_{s/j} & q_{s/a} & q_{s/f} & q_{s/s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2. ある情動状態から他の情動状態へ遷移する確率を求める。例として joy から他の情動状態への遷移確率は式 (2) で求められる。このときの状態遷移を図で表すと図 1(a) のようになる。ここでの、 $P_{2/1}$ が状態 1 から状態 2 への遷移確率で、 $q_{2/1}$ が同じく遷移確率の事前確率である。情動誘発因子により、遷移確率の事前確率を変更することで現在の遷移確率を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} P_{a/j} &= (1.0 + \beta - \alpha)q_{a/j} \\ P_{f/j} &= (1.0 + \gamma - \alpha)q_{f/j} \\ P_{s/j} &= (1.0 + \delta - \alpha)q_{s/j} \\ P_{j/j} &= 1.0 - (P_{a/j} + P_{f/j} + P_{s/j}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(a) joy からの状態遷移

(b) 4 情動の MEM

図 1 Banik らのマルコフ情動モデル (MEM)
(文献 [7] より引用)

3. このときに得られた状態遷移確率 $P_{2/1}$ から状態遷移行行列 C を求める。状態遷移行行列 C を図で表すと図 1(b) のようになる。情動状態確率ベクトル Y_k と状態遷移行行列 C から式 (3) により次の情動状態確率ベクトル Y_{k+1} を求めることができる。 y_j, y_a, y_f, y_s はそれぞれ joy, anger, fear, sadness の現在の情動割合を表している。

$$Y_{k+1} = CY_k = \begin{bmatrix} P_{j/j} & P_{j/a} & P_{j/f} & P_{j/s} \\ P_{a/j} & P_{a/a} & P_{a/f} & P_{a/s} \\ P_{f/j} & P_{f/a} & P_{f/f} & P_{f/s} \\ P_{s/j} & P_{s/a} & P_{s/f} & P_{s/s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_j \\ y_a \\ y_f \\ y_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

この手順により、情動の遷移を遷移確率としてあらかじめ設定することでロボットの情動状態の移り変わりを数学的な確率モデルで表すことができる。また内部状態や外部からの影響により遷移確率を変更することで、現在のロボットの状態から想定される情動の変化を求めることができる。

3. マルコフ情動モデルを用いた情動行動決定手法

本研究では、マルコフ情動モデルを用いてインタラクティブ情動コミュニケーション (IEC) における情動生成のモデルを構築する。これまでの IEC 研究においては、人間の情動に対してロボットが共感 (同調) するだけの単純な情動反応ではインタラクティブにおいて被験者が飽きてしまうことが報告されている。このことから飽きにくく、好印象が持続する情動反応を実現する情動モデルを作成する必要がある。そこで、本研究では Banik らが提唱したマルコフ情動モデルを用いて、状態遷移確率に基づき情動状態を変化させるロボットの情動反応モデルの生成手法を提案する。

3.1 IEC について

図 2 に前田らが提案したインタラクティブ情動コミュニケーション (IEC) の概念図を示す。この IEC はロボットが人とコミュニケーションをとる場合に必要とされる、情動認識、情動生成、情動表現の 3 つのプロセスから構成されている。IEC に関する詳細については文献 [5] を参照されたい。

図 3 に本研究で提案するマルコフ情動モデルを適用した IEC の処理の流れを示す。IEC ではまず、ロボットの視覚 (カメラ) から人間の身体動作を計測し、入力された身体動作をラバン動作解析 (舞踊における身体動作特徴を戦闘形態と陶醉形態

図2 IECの概念図

図3 マルコフ情動モデルを適用した IEC の処理フロー

の二極構造に詳細化して心理状態との関連付けを行った理論) [9] をすることで身体的特徴量を求める。得られた特徴量を図に示したファジィ情動推論システム (Fuzzy Emotion Inference System: FEIS) によって基本心理尺度値を求める。この値を、図4のラッセルの円環モデル [10] に当てはめることにより、人間の身体動作から12情動 (幸福、喜び、興奮、警戒、怒り、挫折、絶望、悲しみ、疲労、眠気、くつろぎ、満足) の情動値を求める。人間の複雑な身体動作をマクロに特徴解析するのに有効であることからラバン理論の Effort-Shape Description を、様々な感情を表す際に工学分野との親和性が高い心理学モデルであることからラッセルの円環モデルを用いている。

今までの IEC 研究では人間の情動行動のみで情動反応を決定していた。しかしながら、「感情が高揚すると情動反応へ移行し、理性の働きを低下させて身体的・生理的変化や行動をもたらす。」[11] ことが知られており、筆者らは外部からの影響だけでなくロボットの内部状態を数学的にモデル化して、両方の影響を受けて情動反応を決定する必要があると考えた。そこで本研究では、情動の遷移モデルを定義し、内部状態や外部の影響を考慮に入れて、現在の情動状態を数学的に表現できるマルコフ情動モデルを構築する。ある動作に対する情動は IEC のファジィ推論により算出されるが、人間とロボットの情動インタラクションにおいて、マルコフ情動モデルに基づく遷移確率により次状態の情動が計算される。

3.2 12 情動のマルコフ情動モデル

マルコフ情動モデルはロボットの内部状態や外部の影響により事前確率を変更させることによってコミュニケーションによる影響を情動反応決定に反映することができる。本研究における IEC のマルコフモデルの状態遷移を抽象化した状態遷移図は図5のように表される。外周に並んでいる12個の円が設定

図4 Russellの円環モデルに基づく基本12情動

図5 12 情動のマルコフ情動モデル

されている情動状態を、矢印が遷移できる方向を表している。本研究ではこの状態を情動と定義している。Banik らのマルコフ情動モデルは4情動のみを用いて行動を決定させていたが本研究では12情動を用いている。

12 情動で作成したマルコフ情動モデルにより次の情動状態確率ベクトル Y_{k+1} を式 (4) により求める。状態遷移行列 C は式 (5) のようになる。この行列は現在の状態から次の状態への遷移確率を示す。この計算により現在の遷移確率 C と各情動の分布である情動状態確率ベクトル Y_k によって次のロボットの情動状態確率ベクトル Y_{k+1} を求めることができる。ここでの情動の表記は *hap* (HAPPY), *del* (DELIGHT), *exc* (EXCITED), *ala* (ALARM), *ang* (ANGER), *fru* (FRUSTRATED), *mis* (MISERABLE), *sad* (SAD), *tir* (TIRED), *sle* (SLEEP), *rel* (RELAXED), *con* (CONTENT) とした。 Y_k のベクトルの各要素は式 (6) で表され、式 (7) のように合計が1になるロボットの各情動が発生する確率を表している。 y_{hap} はロボットが HAPPY の情動行動を選択する確率、 $P_{con/hap}$ は現在の状態 *hap* から次の状態 *con* への遷移確率を表す。

$$Y_{k+1} = CY_k \quad (4)$$

$$C = \begin{bmatrix} P_{hap/hap} & P_{hap/del} & \cdots & P_{hap/rel} & P_{hap/con} \\ P_{del/hap} & P_{del/del} & \cdots & P_{del/rel} & P_{del/con} \\ P_{exc/hap} & P_{exc/del} & \cdots & P_{exc/rel} & P_{exc/con} \\ P_{ala/hap} & P_{ala/del} & \cdots & P_{ala/rel} & P_{ala/con} \\ P_{ang/hap} & P_{ang/del} & \cdots & P_{ang/rel} & P_{ang/con} \\ P_{fru/hap} & P_{fru/del} & \cdots & P_{fru/rel} & P_{fru/con} \\ P_{mis/hap} & P_{mis/del} & \cdots & P_{mis/rel} & P_{mis/con} \\ P_{sad/hap} & P_{sad/del} & \cdots & P_{sad/rel} & P_{sad/con} \\ P_{tie/hap} & P_{tie/del} & \cdots & P_{tie/rel} & P_{tie/con} \\ P_{sle/hap} & P_{sle/del} & \cdots & P_{sle/rel} & P_{sle/con} \\ P_{rel/hap} & P_{rel/del} & \cdots & P_{rel/rel} & P_{rel/con} \\ P_{con/hap} & P_{con/del} & \cdots & P_{con/rel} & P_{con/con} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_k = [y_{hap} \ y_{del} \ \cdots \ y_{rel} \ y_{con}]^T \quad (6)$$

$$y_{hap} + y_{del} + \cdots + y_{rel} + y_{con} = 1 \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{hap/del} &= (1.0 + \alpha_1 - \alpha_2)q_{hap/del} \\ P_{exc/del} &= (1.0 + \alpha_3 - \alpha_2)q_{exc/del} \\ P_{ala/del} &= (1.0 + \beta_1 - \alpha_2)q_{ala/del} \\ P_{ang/del} &= (1.0 + \beta_2 - \alpha_2)q_{ang/del} \\ P_{fru/del} &= (1.0 + \beta_3 - \alpha_2)q_{fru/del} \\ P_{mis/del} &= (1.0 + \gamma_1 - \alpha_2)q_{mis/del} \\ P_{sad/del} &= (1.0 + \gamma_2 - \alpha_2)q_{sad/del} \\ P_{tir/del} &= (1.0 + \gamma_3 - \alpha_2)q_{tir/del} \\ P_{sle/del} &= (1.0 + \delta_1 - \alpha_2)q_{sle/del} \\ P_{rel/del} &= (1.0 + \delta_2 - \alpha_2)q_{rel/del} \\ P_{con/del} &= (1.0 + \delta_3 - \alpha_2)q_{con/del} \\ P_{del/del} &= 1.0 - (P_{hap/del} + P_{exc/del} + \cdots \\ &\quad + P_{rel/del} + P_{con/del}) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

マルコフ情動モデルでは、ロボットの内部状態や外部からの影響を考慮に入れて遷移確率を設定することでロボットの情動状態を変更できる。情動誘発因子は、この時の外部からの影響を規定するもので、例えば、DELIGHT の場合、式 (8) のようになる。情動状態 $\{hap, del, exc, ala, ang, fru, mis, sad, tir, sle, rel, con\}$ の情動誘発因子はそれぞれ $\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \delta_1, \delta_2, \delta_3\}$ と定義した。この値を変更することで遷移確率を増減させることができる。12 情動が他の情動状態に遷移する確率を計算する場合、状態遷移行列の列の合計値は常に 1 になる。一例として DELIGHT のときの状態遷移のマルコフ情動モデルを図 6 に示す。

現在のロボットの内部状態や外的影響によりマルコフ情動モデルの遷移確率を増減させる。そのため、それぞれの状態のときの遷移確率の増減する割合を決定するために情動誘発因子を設定している。この値が大きいほど対応する情動の遷移確率が他の情動より大きくなる。

3.3 情動遷移事前確率と情動誘発因子の決定

マルコフ情動モデルを用いるのに必要な初期設定は、遷移確率の事前確率と情動誘発因子である。遷移確率の事前確率はロボットがある情動を認識したときにロボットが取る情動行動の確率を設定することができる。この遷移確率の値が大きいほ

図 6 DELIGHT のときの状態遷移

ど、その情動行動を発生させやすくなる。これにより、人間の反応に近い行動をとることができる。本研究では遷移確率の事前確率は、相手がある情動の場合、自身が行動すると考える情動行動のアンケートを取り、この結果を用いて設定した。情動誘発因子は値を大きくすることで、対応する情動行動を発生させやすくなることができ、人間がある情動のときにロボットにとってほしいと考える情動のアンケートを取り、この結果を用いて設定した。これにより、ある情動のときに人間の嗜好にあった情動行動を取りやすくなる。

本研究で用いる情動遷移の事前確率と情動誘発因子を決定するため、事前調査としてアンケートを行った。アンケートは各情動について以下に関する質問と同様のものを 12 情動分作成した。

- 質問 1：自分がある情動表現をしているときにロボットにどう
いう情動表現を返されると好印象に感じますか？
質問 2：相手がある情動表現をしているときに自分はどのような
情動表現を返すと考えますか？

アンケートは研究室の男子大学生 10 名（平均年齢 22 歳）に対して実施し、12 情動分用意された前述の 2 つの質問が書かれた用紙に個人ごとに感じた情動表現を思い浮かべて 12 情動の中から相手に反応してほしい、または自分が反応すると思われる情動を選んで回答してもらった。質問および回答はすべて言語により与えられた。回答に当てはまる情動がない場合は、違和感や不快感を抱かないような情動を 1 つだけ選択してもらった。このときの回答方法は 3 段階で答えてもらい、この結果の平均値をマルコフ情動モデルの初期設定に用いた。質問 1 の結果より情動誘発因子、質問 2 の結果より遷移確率の事前確率を算出した。

本研究では人間の身体動作から情動を推定する方法に、これまでの IEC 研究で構築された FEIS を用いた。図 3 のようにマルコフ情動モデルへの入力値は FEIS の推定結果から得られた情動値とする。この入力された情動値によって事前調査で得た情動誘発因子と遷移確率の事前確率を用いて状態遷移確率 $P_{*/*}$ を求め、これを用いて次のロボットの情動状態確率ベクトル Y_k を式 (4) によって求める。この情動状態確率ベクトルの値により情動反応の割合を決定する。求めた式 (6) の各情動の発生確率の割合に応じてルーレット選択により選ばれた情動行動をロ

ボットが行う。

4. IEC 実験

前章で述べたマルコフ情動モデルを用いて決定した情動反応の有効性を検証するために、IEC 実験を行った。本研究では、人間の身体動作解析にヒューマノイドロボット NAO (Aldebaran Robotics 社製) のロボットビジョン (640×480 画素の CMOS カメラ) を、FEIS による情動推論の処理にノート PC (Inspiron 17R : DELL 社製) を用いて実験を行った。また、マルコフ情動モデルの初期設定である遷移確率の事前確率と情動誘発因子を設定するために事前調査アンケートを 12 情動分 (幸福, 喜び, 興奮, 警戒, 怒り, 挫折, 絶望, 悲しみ, 疲労, 眠気, くつろぎ, 満足) 行った。

4.1 実験方法

本実験では、マルコフ情動モデルを用いることで単純な情動を返すモデルに比べて、興味が持続する情動行動ができるかどうかを検証する。本実験における実験環境を図 7 に示す。ロボットを人間の正面に配置し、実験協力者にロボットと直接対峙してコミュニケーションをとるような環境を設定した。

実験では人間の身体的特徴量を抽出するために、頭・右手・左手・腹部それぞれに青・赤・黄・緑のカラーマーカーを装着してもらい、色認識により身体的特徴量を抽出した。カラーマーカーは図 8 のように装着し、画像の左下を原点 (0, 0) とし、しゃがむような情動表現の際に身体中心に取り付けたカラーマーカーが隠れないように配慮するため、右手先 (赤), 左手先 (黄), 頭部 (青) の 3 点の中心を重心位置 L_p とし、この場所の速度を重心移動速度 L_v とした。また右手先の加速度を L_t , 装着した 4 点のカラーマーカーに囲まれる領域面積を L_a と定義した。

図 7 IEC 実験風景

図 8 身体動作特徴量

これらの領域面積, 重心位置, 重心移動速度, 手先加速度を身体的特徴量としてファジィ推論に入力する。ファジィ推論によって得られた基本心理尺度値をラッセルの円環モデルに適用することで情動値を求め、マルコフ情動モデルに入力することでロボットの情動行動を決定する。以下では、事前調査アンケートにより決定された情動遷移の事前確率行列 Q を式 (9) に、情動誘発因子を式 (10) に示す。状態遷移行列 C は式 (8) に基づいてすべての情動で同様に算出されるので、ここでは省略する。

表 1 実験協力者が実験において想起した状況

基本情動	想起する状況	
	実験協力者 A	実験協力者 B
HAP	好きなことをしている時	欲しいものが手に入った時
DEL	勝負に勝った時	良い成績を取った時
EXC	景品が当選した時	好きなことをしている時
ALA	知らない人にあった時	怒られた時
ANG	無視をされた時	物を壊された時
FRU	難題に直面した時	失敗した時
MIS	失敗した時	裏切られた時
SAD	大切な物が壊れた時	お金をなくした時
TIR	大変な仕事を終えた時	長時間動き回った時
SLE	寝不足の時	寝不足な時
REL	外の風景を見ている時	音楽を聴いている時
CON	予想が当たっていた時	仕事が終わった時

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0.3448 & 0.3103 & 0.0691 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2858 & 0.4762 & 0.0476 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1739 & 0.3043 & 0.2609 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0455 & 0.4545 & 0.2273 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0385 & 0.2692 & 0.3847 & 0.0769 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.3043 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1364 \\ 0.0 & 0.0476 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0952 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0455 & 0.0455 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.2222 & 0.2592 & 0.0741 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.1379 & 0.1379 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0952 & 0.0952 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.087 & 0.1739 \\ 0.0909 & 0.0909 & 0.0 & 0.0 & 0.0909 & 0.0 \\ 0.0769 & 0.1538 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1739 & 0.3478 & 0.087 & 0.0 & 0.087 & 0.0 \\ 0.3182 & 0.409 & 0.0909 & 0.0455 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1905 & 0.4763 & 0.0952 & 0.0 & 0.0952 & 0.0 \\ 0.0 & 0.1053 & 0.5263 & 0.0526 & 0.3158 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.1739 & 0.4348 & 0.3913 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0455 & 0.1363 & 0.4545 & 0.2727 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0741 & 0.3704 \end{bmatrix}$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{hap} \\ y_{del} \\ y_{exe} \\ y_{ala} \\ y_{ang} \\ y_{fru} \\ y_{mis} \\ y_{sad} \\ y_{tir} \\ y_{sle} \\ y_{rel} \\ y_{con} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1.32 & 1.29 & 1.19 & 1 & 1 & 1 \\ 1.32 & 1.36 & 1.16 & 1 & 1 & 1 \\ 1.17 & 1.22 & 1.43 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1.40 & 1.20 & 1.10 \\ 1 & 1 & 1.05 & 1.25 & 1.20 & 1.10 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1.24 \\ 1 & 1.05 & 1 & 1 & 1 & 1.14 \\ 1 & 1.04 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1.04 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.04 & 1.04 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.24 & 1.22 & 1.07 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1.06 & 1.13 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1.16 \\ 1.50 & 1.50 & 1.50 & 1 & 1 & 1.17 \\ 1.10 & 1.10 & 1 & 1 & 1.10 & 1 \\ 1.20 & 1.20 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1.24 & 1.29 & 1.10 & 1 & 1.14 & 1 \\ 1.27 & 1.36 & 1.09 & 1 & 1.09 & 1 \\ 1.25 & 1.42 & 1.08 & 1 & 1.13 & 1 \\ 1 & 1.09 & 1.43 & 1.13 & 1.30 & 1 \\ 1 & 1 & 1.14 & 1.45 & 1.41 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1.17 & 1.42 & 1.29 \\ 1.50 & 1.50 & 1.50 & 1 & 1.07 & 1.37 \end{bmatrix}$$

実験協力者には事前に情動を表現しやすい状況を想定 (表 1

図9 IEC実験におけるロボットの情動行動の一例

図10 FEISのメンバーシップ関数とシングルトン

参照)してもらい、IEC実験を行っている際にその状況を想起しながら基本情動表現(H_HAP, H_DEL, H_EXC, H_ALA, H_ANG, H_FRU, H_MIS, H_SAD, H_TIR, H_SLE, H_REL, H_CON)を行ってもらった。ロボットが表す基本情動表現(R_HAP, R_DEL, R_EXC, R_ALA, R_ANG, R_FRU, R_MIS, R_SAD, R_TIR, R_SLE, R_REL, R_CON)についてはあらかじめ動作パターンを用意した。紙面の制約上、実験の際に表現するロボットの動作のうちR_DEL, R_ANG, R_SAD, R_RELのみを図9に示す。尚、ロボットの基本情動表現についてはIEC実験を行う前に被験者に何度も実演をして表現している情動を説明し、正確に伝わるよう配慮した。

本実験で用いたメンバーシップ関数とシングルトンを図10に、ファジイルールを表2に、メンバーシップ関数とシングルトンのパラメータ値を表3、表4に示す。

IEC実験の際に用いたロボットの情動反応には、実験協力者が表現している情動と同一の情動反応を発生させる「同一情動反応」と、実験協力者の情動に対してランダムな情動を返す「無作為情動反応」と、提案手法である「マルコフ情動モデル」の3種類を用意し、各12情動を初期状態とし、全36種類のIEC実験を行った。本実験ではロボットとのコミュニケーションを取っていた時間が長いほど興味が持続した反応であると考え、実験の終了を実験協力者に決定してもらった。それぞれ一

表2 FEISのファジィ情動推論ルール

		AS			AM			AL		
		PL	PM	PH	PL	PM	PH	PL	PM	PH
VS	HS	NUS	NEU	NEU	NEU	NEU	PPL	NEU	PPL	PPL
	HM	NSL	NSM	NEU	NSL	NSL	NSM	NSL	NSL	NSL
	HL	NSM	NUS	PPM	NEU	NEU	PPL	NEU	NEU	PPL
VM	HS	NUM	NUS	PAS	NEU	NEU	PPL	NEU	NSL	NSM
	HM	NSS	NEU	PAM	NSM	NSM	PAS	NSL	NSM	NSM
	HL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL
VF	HS	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL
	HM	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL
	HL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL	NUL

(Upper Label: R_x , Lower Label: R_y)

表3 実験で用いた前件部メンバーシップ関数の値

領域面積: L_a	重心位置: L_p	重心移動速度: L_v	手先加速度: L_h
$a_1 = 1500$	$p_1 = 50$	$v_1 = 20$	$h_1 = 5$
$a_2 = 3000$	$p_2 = 70$	$v_2 = 35$	$h_2 = 10$
$a_3 = 6000$	$p_3 = 90$	$v_3 = 50$	$h_3 = 20$
$a_4 = 10000$	$p_4 = 200$	$v_4 = 240$	$h_4 = 100$

表4 実験で用いた後件部シングルトンの値

快 - 不快	眠気 - 覚醒
$pu_1 = -967$	$as_1 = -967$
$pu_2 = -707$	$as_2 = -707$
$pu_3 = -259$	$as_3 = -259$
$pu_4 = 0$	$as_4 = 0$
$pu_5 = 259$	$as_5 = 259$
$pu_6 = 707$	$as_6 = 707$
$pu_7 = 967$	$as_7 = 967$

回の実験時間を最低90秒以上とし、ロボットの情動反応は15秒後に行うため一回の実験は最低でも5回のインタラクションを行った。一つの実験が終わるたびに実験協力者にはロボットの印象についてのアンケートに回答してもらった。

アンケートは、「明るい—暗い」「可愛らしい—憎らしい」「複雑な—単純な」「優しい—冷たい」「面白い—退屈な」「積極的な—消極的な」「親しい—疎遠な」「生物的な—機械的な」「好きな—嫌いな」「賢い—愚かな」「自然な—不自然な」の11項目の感性語対で実施した。アンケート結果の得点は、ポジティブと考えられる印象の得点を高くし、例えば「明るい—暗い」の場合、0（非常に暗い）～6（非常に明るい）の7段階で評価を行った。

4.2 実験結果と考察

IEC実験に協力してもらった22歳の男子大学生2名（実験協力者A,B）に対し、同一情動反応（同一）、無作為情動反応（ランダム）、マルコフ情動モデル（マルコフ）の3種類のインタラクション実験を行った。反応モデルの比較を行うためマルコフ情動モデルを用いて作成した反応モデルと他の情動反応モデル（同一情動反応、無作為情動反応）に対して印象評価を行った。

本実験ではマルコフ情動モデルの同一情動反応および無作為情動反応に対する有意差を求めるため、それぞれの被験者において、2群比較で対応あり（同一被験者）のパラメトリック検

表5 マルコフ情動モデルに対する2群t検定結果
(Bonferroni法による有意水準調整済み)

実験協力者	比較群	p 値	検定結果
A	同一	0.0758	* (10% 有意傾向)
	ランダム	0.0028	** (1% 有意)
B	同一	0.0032	** (1% 有意)
	ランダム	0.0214	* (5% 有意)

図11 アンケート結果の有意差比較

定（正規分布を仮定）であるt検定を用いて評価を行った。アンケート結果に対するマルコフ情動モデルをControl群としたとき、有意水準10%で有意傾向を有意水準5%で有意差を認めるものとして両側検定を行った。検定結果を表5に示す。各被験者で2回の検定を行っているので、Bonferroni法で有意水準をそれぞれ5%および2.5%に調整している。また、マルコフ情動モデルに対する2群同士の有意差の比較結果のグラフを図11に示す。これらのグラフの縦軸は11項目のアンケート結果の得点の平均値を示している。この結果からマルコフ情動モデルは他の2情動モデルのいずれに対しても有意差または有意傾向が見られたことから、より好印象であることが確認できた。

また参考までに、情動状態遷移の一例として、実験協力者Aの初期情動が悲しみの場合の3つの反応モデルのインタラクションの様子を図12に、各反応モデルごとのコミュニケーション時間における平均値を表6に示しておく。これらの結果から、マルコフ情動モデルのインタラクションが最も長く持続したことが確認された。また人間の初期情動がネガティブな場合、他のモデルではネガティブなまま改善されることは少ないが、マルコフ情動モデルではポジティブな方向に情動反応を遷移させる傾向をもっていることもわかった。

今回の実験はマルコフ情動モデルによって好感度が高くなることを確認するために他のモデルとの比較評価をした。実験結果より、マルコフ情動モデルを搭載し、この情動モデルによって情動反応を決定したロボットは全体的に評価が高くなることが確認された。また一番評価が高くなる情動パターンは実験協力者によって違いが見られた。これは、個人の嗜好やロボットの動作から連想される状況が実験協力者によって異なることが考えられる。両者ともに自身の情動動作に共感する動作をするロボットに良い印象を受けていたが、常に自身と同じ動作をするロボットとのインタラクション（同一情動）の時間が最も短いことから興味が持続しなかったことを確認した。

本実験で一番興味が持続したのがマルコフ情動モデルを用いた情動反応であった。これは、生物的で面白い印象を受けてい

図12 情動状態の遷移例（実験協力者A、悲しみ）

表6 IEC実験における平均コミュニケーション時間

実験協力者	反応モデル	時間 (sec)
A	同一	90
	ランダム	138
	マルコフ	149
B	同一	90
	ランダム	108
	マルコフ	139

たことや不自然に感じる情動反応が少なかったためと考えられる。ただ単純に同じ動きを返す同一情動や、ランダムに情動反応を決定する無作為情動ではロボットとインタラクションをしている印象をあまり受けにくいことからこれらは全体的に評価が低くなったと考えられる。

特に、実験協力者Bは無作為情動でインタラクションができていない印象を受けなかった場合はインタラクションの時間が短くなる傾向があった。印象評価が低くてもロボットの情動反応が一貫性がある動作をした場合はインタラクションをしている印象を受けるといった意見が得られたことから、単純に同一情動や無作為情動を返すだけでなくロボットの動作反応に何らかの関連性や傾向がある情動反応を返すことに好印象を受けるものと考えられる。

5. おわりに

筆者らは、人とロボットが情動を伴う行動によって双方向コミュニケーションを行うインタラクティブ情動コミュニケーション（IEC）の実現を目指している。本研究ではIECのプロセスのうち情動生成に注目し、マルコフ情動モデルを用いてロボットの情動状態の移り変わりを遷移モデルで表す手法を提案

した。これにより、内部状態や外部からの影響により遷移確率を変更し、複雑なロボットの情動遷移に基づくインタラクションが実現できる。

本手法を用いて、ヒューマノイドロボットと人間による IEC 実験を試み、アンケートによる印象評価を行った。他の情動反応モデルと比較検定を行うことでマルコフ情動モデルを搭載したロボットとのコミュニケーションが有意に高評価を得ることを確認した。これによりマルコフ情動モデルによるインタラクションは被験者が好印象に感じることがわかり、興味が持続しインタラクションの時間も長くなることが確認された。しかしながら、今回の実験では特定の 2 名に対してのみ印象が変化することがわかっただけであり、今後、被験者数を増やし、マルコフ情動モデルによる効果の一般性を評価する必要がある。

今後は、ロボットの一連の情動反応履歴や実験協力者の情動反応によって事前確率と情動誘発因子を自律的に修正するような状況に応じて情動遷移が変動する情動モデルの構築や、動作による情動表現だけではなく表情や声などもインタラクション情報に含めて総合的にロボットの情動を推定する実験などを行っていきたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] 山野美咲, 薄井達也, 橋本稔: “情動同調に基づく人間とロボットのインタラクション手法の提案,” HAI シンポジウム, 2D-4, 2008.
- [2] 森郷士, 佐野睦夫, 足立奈生, 高潔: “人間とロボットの情動インタラクションにおける適応的引き込み制御と学習,” 情報処理学会インタラクション 2014, pp. 232-233, 2014.
- [3] 三澤秀明, 松田充史, 堀尾恵一: “強化学習と情動学習に基づく意思決定法: 利己的な判断による協調行動の創発,” 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.24, No.1, pp. 582-591, 2012.
- [4] 後藤みの理, 加納政芳, 加藤昇平, 國立勉, 伊藤英則: “感性ロボットののための感情空間を用いた表情生成,” 人工知能学会誌, Vol.21, No.1-G, pp. 55-62, 2006.
- [5] Y. Maeda and R. Taki: “Interactive Emotion Communication Between Human and Robot,” *Int. J. of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol.7, No.5(B), pp. 2961-2970, 2011.
- [6] 滝僚平, 前田陽一郎, 高橋泰岳: “インタラクティブ情動コミュニケーションにおける自己組織化マップによる混合情動行動生成手法,” 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.24, No.5, pp. 933-943, 2012.
- [7] S. C. Banik, K. Watanabe, and K. Izumi: “Improvement of group performance of job distributed mobile robots by an emotionally biased control system,” *Artificial Life Robotics*, Vol.12, pp. 245-249, 2008.
- [8] 綿田将悟, 大林正直, 呉本亮, 小林邦和, 間普真吾: “マルコフ情動モデルを備えたロボットの行動決定法,” 電気学会論文誌 C, Vol.134, No.1, pp. 85-93, 2014.
- [9] R. Laban, 神沢和夫 (訳): 身体運動の習得, 白水社, 1985.
- [10] J. A. Russell: “A circumplex model of affect,” *J. of Personality and Social Psychology*, Vol.39, No.6, pp. 1161-1178, 1980.
- [11] 大江矩夫: 人間存在論 (前編) 言語論の革新と西洋思想批判, 白川書院, 2001.

(2018 年 2 月 27 日 受付)

(2018 年 6 月 19 日 採録)

[問い合わせ先]

〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1

立命館大学 情報理工学部 情報理工学科

前田 陽一郎

TEL: 077-561-4937

FAX: 077-561-4937

E-mail: ymaeda@fc.ritsumeit.ac.jp

著 者 紹 介

前田 陽一郎 [正会員]

1981 年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1983 年同大学院修士課程修了。同年三菱電機(株) 中央研究所入社。その後、産業システム研究所主事。1989 年から 3 年間、国際ファジィ工学研究所へ出向。1995 年より大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科助教授。1999 年から 1 年間、カナダ・ブリティッシュコロンビア大学客員研究員。2002 年福井大学工学部知能システム工学科助教授。2007 年同大学院教授。2013 年大阪工業大学工学部ロボット工学科教授。2015 年ものづくり大学技能工芸学部製造学科教授。2017 年立命館大学情報理工学部情報理工学科教授。現在に至る。博士(工学)。主として、人とロボットの双方向インタラクションに関する人間共生システム研究に従事。計測自動制御学会、日本ロボット学会、人工知能学会、日本感性工学会などの会員。

**Interactive Emotion Communication Used Markovian Emotional Model
Based on State Transition Probability**

by

Yoichiro MAEDA

Abstract:

In recent years the personal robots for the purpose of contacting with human such as the entertainment robot and nursing care robot have been increasing. By this reason, the ability to transfer some informations in the communication to human has become necessary for these robots. As the medium to communicate smoothly, it is used a lot of non-verbal (non-language) communication like facial expressions and gestures. In this research, by focusing on the body motion, we have proposed an interactive emotion communication (IEC) as a method which robot and human attempt to transfer information by the body motion with emotion. We aim to perform interactive communication by the body motion with emotion to increase the interpersonal affinity to the robot by amplifying and suppressing the human emotion. In the previous research, it has been found it is necessary to have not only sympathetic but also not bored emotional behavior response model to enhance interpersonal affinity. A method for the emotion generation using Markovian emotional model is proposed in this paper. Using the Markovian emotional model is capable of modeling the state transition that takes into account the emotional preference reactions and the internal state of recognized emotion. In this research, an emotion generation model with the interaction sustained human interest is constructed. Performing the interaction experiment by the robot equipped with this model, we confirmed that the interpersonal affinity is improved in a humanoid robot with Markovian emotional model.

Keywords: interactive emotion communication, Markovian emotional model, body motion, interpersonal affinity, humanoid robot

Contact Address: **Yoichiro MAEDA**

Department of Information Science and Engineering, College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

TEL: +81-77-561-4937

FAX: +81-77-561-4937

E-mail: ymaeda@fc.ritsume.ac.jp