

乳児期の触覚優位性を利用した 複数感覚情報の統合による情動分化モデル

○堀井隆斗(大阪大学) 長井志江(大阪大学) 浅田稔(大阪大学)

1. はじめに

人は身体の生理的な状態や外界からの刺激を知覚し、身体の内的な変化を快／不快また驚きや怒りなどの情動として表出する。これら情動は人の行動選択を決定づける動機となり、人の知覚や学習、記憶などに密接に関係していると考えられる [1]。また社会的な環境において、情動は他者と円滑なコミュニケーションを行うための重要な要素となる [2]。多くの成人は発達過程や文化によらない共通の情動、例えば嫌悪や喜びなどの基本6情動を持っていることが知られている [3]。基本6情動は、人の乳児においても比較的早期から表出、知覚されることが知られているが、このような情動が生得的あるいは発達の獲得されるものであるか、その原理については未だに議論がなされている。

人の情動発達の1つの仮説として、情動分化説が知られている [4-6]。Bridges [4]によると、新生児が示す発達初期の情動反応は覚醒に関連する興奮であり、その後快や不快、また基本6情動に分化するとされている(図1)。しかし、これらの研究は乳児の行動を観察したものであり、脳活動やホルモン量の変化を観測したものではない。また一般に、乳児の発達初期に見られる快／不快情動は、内分泌系の変化や環境から身体への働きかけによって引き起こされることが知られているが、どのような刺激や環境の変化が情動分化に影響を与えているかは明らかでない。

そこで本研究では、人の発達初期において養育者から乳児に与えられる感覚刺激、特に触覚刺激に着目し、情動発達の1つの仮説である情動分化説 [4]を再現することのできる計算モデルの提案を行う。触覚刺激は痛みや心地よさなど、快／不快情動の変化に直接的に関連しており、乳児と養育者とのコミュニケーションにおいても全体の30[%]以上の割合を占めていることが知られている [7]。また Hertenstein [8]は親子間の触覚インタラクションと情動表出の関係性について着目し、情動発達に対する触覚刺激の重要性について指摘している。提案モデルでは、確率的ニューラルネットワークの1種である Restricted Boltzmann Machine(RBM) [9]を用いることで、触覚、聴覚、視覚のそれぞれの感覚入力を自己組織化的に抽象化し、人の触覚の生理的特徴により知覚される快／不快情報を連合学習することによって情動の分化を再現する。

2. 触覚優位性に基づく情動分化仮説

触覚は、生後間もない乳児にとって外界を知覚し、情報を得るための重要な能力である。また他の感覚器と比較して、他者と触覚を介することで直接的に情動のやり取りを行うことのできる感覚器でもある [10]。本研究では視覚や聴覚と比較し、触覚に見られるいくつ

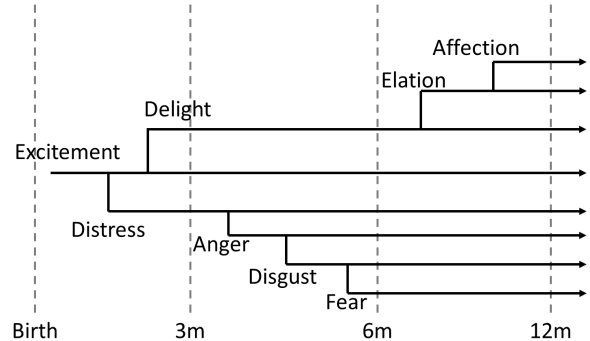


図1 Bridgesの情動分化説による情動の分化過程 ([4]を改編)

かの特徴を触覚優位性と呼び、これらの触覚優位性が乳児期における情動発達に影響を与えるという仮説を提案モデルを利用した実験によって確認する。以下に本研究で扱う2つの触覚優位性について説明する。

発達の優位性

触覚は聴覚、視覚など他の感覚器と比較して早期から発達している [11]。また、乳児期の親子間インタラクションでは触覚インタラクションが占める時間の割合が、他のモダリティと比較して多いことが知られている [7] [8]。

情動知覚優位性

触覚には撫でる刺激や侵害刺激に反応する神経線維が存在し [12] [13]、それらの線維が刺激に含まれる快／不快情動の知覚を簡便にしている。

本研究で特に重要となるのは、触覚の情動知覚優位性である。人の皮膚には、撫でなどの心地良い触覚刺激や侵害刺激にそれぞれ特異的に反応する神経線維が存在することが知られている [12]。この触覚神経線維はC線維と呼ばれており、C線維によって、触覚刺激における快／不快の知覚を簡便に行うことができる。またこの神経線維の特徴として、線維の伝達先が体性感覚野だけでなく情動の脳機能に関連する島皮質などに伝達していることが知られており [14]、人の情動発達にも大きな影響を与えていることが考えられる。

3. 触覚優位性を利用した情動分化モデル

3.1 前提条件

本研究では提案モデルの学習条件として、図2のような親子間の対面インタラクション環境を想定する。この条件下において、乳児は触覚、聴覚、視覚の3つの感覚刺激をインタラクションを通じて受け取ることが

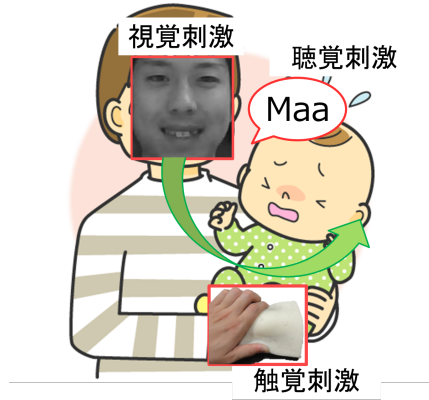


図2 本研究で想定する親子間の対面インタラクション

できる。触覚には撫でや押すなどの刺激を加えた際の触覚センサの情報、聴覚には養育者の音声刺激、視覚には養育者の表情が刺激として入力される。

3.2 提案モデル

図3に提案モデルを示す。提案モデルは感覚特徴モジュールと特徴統合モジュールの2つのモジュールからなる。それぞれのモジュールは確率的ニューラルネットワークの一種である Restricted Boltzmann Machine(RBM) [9] によって構成されている。

3.2.1 Restricted Boltzmann Machine

RBM は可視層と隠れ層からなる確率的ニューラルネットワークであり、学習データを自己組織的に抽象化することができる。可視層のノード $i(i = 1 \dots N_v)$ と隠れ層のノード $j(j = 1 \dots N_h)$ はそれぞれ結合荷重 w_{ij} によって相互に全結合されている。ただし同層ノード同士の結合は持たず、結合荷重 w_{ij} と w_{ji} は等価である。ここで v_i と h_j は可視層と隠れ層のノードの状態を表し、 $v_i \in \{0, 1\}$ と $h_j \in \{0, 1\}$ である。またそれぞれのノードは次のような式 (1) と (2) の発火確率をもつ。

$$p(h_j = 1) = \frac{1}{1 + \exp(-b_j - \sum_i v_i w_{ij})} \quad (1)$$

$$p(v_i = 1) = \frac{1}{1 + \exp(-c_i - \sum_j h_j w_{ij})} \quad (2)$$

ここで c_i , b_j は可視層と隠れ層のバイアスである。

本研究では、Contrastive Divergence 法 (CD 法) [9] を用いて RBM の学習を行う。CD 法では reconstruction と呼ばれる計算プロセスを利用して入力データによる期待値 $\langle v_i h_j \rangle_{data}$ と学習モデルによって生成されたデータに対する期待値 $\langle v_i h_j \rangle_{reco}$ を算出する。得られた期待値により結合荷重の更新式は以下になる。

$$\Delta w_{ij} = \epsilon(\langle v_i h_j \rangle_{data} - \langle v_i h_j \rangle_{reco}) \quad (3)$$

ここで ϵ は学習係数である。

3.2.2 感覚特徴モジュール

感覚特徴モジュールは触覚、聴覚、視覚それぞれの感覚から入力される情報について処理を行うモジュールであり、1層の RBM から構成される。学習は全ての

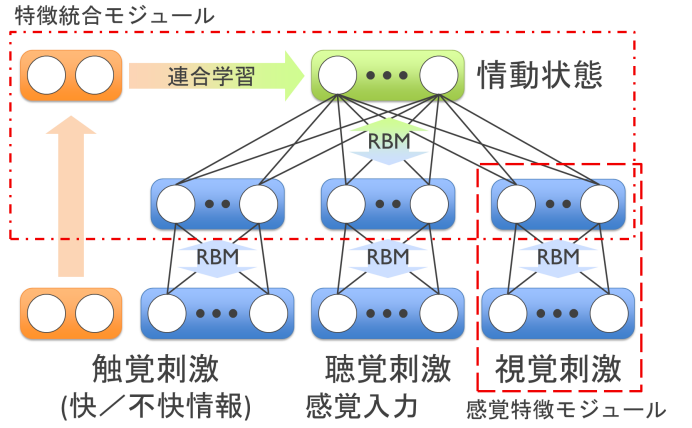


図3 触覚優位性に基づいて情動の分化を再現する計算モデル。青のネットワークはそれぞれの感覚入力を処理する感覚特徴モジュールであり、1層の RBM から構成される。上位の緑のネットワークは特徴統合モジュールと呼ばれ、1層の RBM とラベル層によって構成される。

インタラクションデータを用いて、それぞれの感覚様式に対応したモジュール毎に独立に行われる。例えば、図3の破線で囲まれた部分は視覚の感覚特徴モジュールであり、インタラクションによって与えられる養育者の顔画像がデータとして入力される。

ここで提案モデルにおける視覚、聴覚の感覚入力にフィルタリングを施す。つまり視聴覚の入力データを、曖昧なものから精緻なものに段階的に変化させることで乳児の知覚能力の発達を再現する。この際、触覚入力にはフィルタリングを行わず、発達初期から精緻な情報を入力することによって触覚の発達の優位性を再現する。また乳児は視聴覚の入力データからは直接情動状態を知覚することはできない。しかし触覚のC線維に基づく情動知覚優位性によって、触覚刺激に対応した快/不快情動ラベルが提案モデルに入力される。

3.2.3 特徴統合モジュール

特徴統合モジュールは、触覚、聴覚、視覚それぞれの感覚特徴モジュールの出力層を利用した1層の RBM と触覚優位性に基づく情動情報が入力されるラベル層から構成される。入力データは触覚、聴覚、視覚それぞれの感覚特徴モジュールの出力をインタラクション毎に統合したものである。まず、すべてのインタラクションにおける入力データに基づいて RBM の学習が行われる。次に触覚刺激に含まれる快/不快情動をラベル情報として、RBM に対して誤差逆伝播学習を行う。これにより養育者からの刺激が乳児にどのような情動変化を与えているかが学習される。

4. 実験

4.1 実験設定

提案モデルを用いて親子間の対面インタラクションを想定したシミュレーション実験を行った。本実験では触覚優位性の変化、特に情動知覚優位性の有無が情動分化過程に与える影響を調べる。提案モデルへの入力情報は親子間のインタラクションを想定し、触覚刺

表1 インタラクシオンにおける養育者からの入力刺激例

情動状態	喜び	驚き	中性	怒り	嫌悪	悲しみ	恐れ
触覚刺激 (情動ラベル)	撫でる (快)	撫でる (快)	押す (中性)	つねる (不快)	つねる (不快)	叩く (不快)	叩く (不快)
聴覚刺激	中強度・上昇ピッチ	高強度・低ピッチ	中強度・中ピッチ	高強度・低ピッチ	中強度・低ピッチ	低強度・中ピッチ	低強度・低ピッチ
視覚刺激	笑顔	驚きの表情	無表情	怒り顔	しかめ面	悲しみの表情	恐れ顔

激においては人の皮膚を模した触覚センサを用いて撫でる、つつく等の刺激、聴覚刺激は単一モーラ音の発声データ、視覚については養育者の表情を想定した顔画像とする(図2参照)。また情動知覚優位性によって知覚される情動ラベルを「快」、「中性」、「不快」の3種類とし、快情動に属する情動を「喜び」、「驚き」、不快情動に属する情動を「怒り」、「嫌悪」、「悲しみ」、「恐れ」とする。そしてこれらの情動に中性を加えた7つの情動状態を入力として扱う。本実験では、1度のインタラクシオンにおいて、感覚様式間に情動状態の矛盾はないものとする。表1に入力データセットの例を示す。また、提案モデルで利用するRBMはセンサからの生データを入力することで特徴量を自動的に抽出することが可能だが、本実験では学習を簡便にするためにそれぞれの感覚様式において予め特徴量を算出しモデルへの入力とした。ただし各感覚様式において抽出した特徴量が情動分化に重要な特徴量であることは保証しない。

4.1.1 触覚刺激

触覚インタラクシオンのデータは、本研究の仮説である触覚優位性に基づく情動分化説の検証において重要な要素となる。本実験では、乳児が知覚する触覚刺激を皮膚を模した触覚センサ[15]を用いて再現し、モデルへの入力データとして扱う。触覚センサから抽出される特徴量は、圧力、接触時間、接触領域、最大接触力、最大接触力での接触時間、センサの変位速度、周波数強度(1-60Hz, 61-100Hz, 101-200Hzの3種類)、皮膚部の振動回数であり、人の触覚受容器が知覚することのできる情報を参考に決定した[16]。またセンサに加えられる触覚刺激は、撫でる、押す、つねる、叩くの4種類であり、撫でるは快情動、つねる、叩くは不快情動、押すは中性とした。

4.1.2 聴覚刺激

聴覚刺激には養育者の情動状態を表現するような音声データを利用した。本実験では音声データ中の強度と基本周波数の変化を特徴量として利用する。音声データを10区間に分節化し、それぞれの分節から算出される20個の特徴量をモデルの入力として扱う。また移動平均フィルタを用いてフィルタリングを行い、平均区間を変化させることで知覚能力の発達の変化を再現した。モデルに入力される聴覚刺激は、基本6情動と中性を加えた7つの情動状態で構成される。

4.1.3 視覚刺激

視覚刺激には養育者の顔画像を用いる。顔画像は30×30ピクセルサイズのグレースケールである。視覚刺激では、取得した顔画像に主成分分析を行い、20個の主成分を特徴量としてモデルへの入力とする。視覚刺激においても知覚能力の発達の変化を再現するために、ガウシアンフィルタによってフィルタリングを行った。

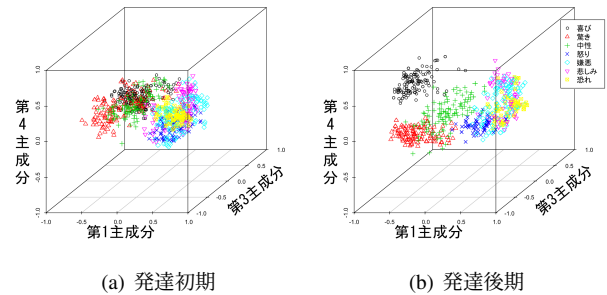


図4 提案モデルの学習結果。発達初期は視聴覚データにフィルタ処理を行い入力情報が曖昧な状態を示している。発達後期はフィルタ処理を行わずセンサからの情報をそのまま利用した状態である。

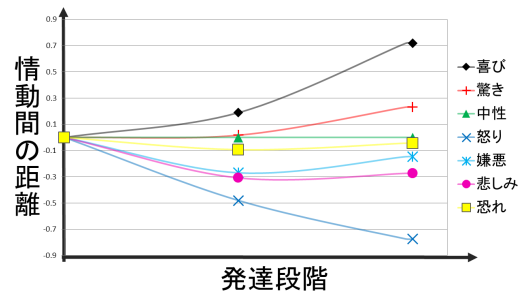


図5 視聴覚の知覚能力の発達に伴う情動の分化過程

また、聴覚刺激と同様に基本6情動と中性を加えた7つの情動状態で構成される。

4.2 触覚優位性を考慮した実験条件

まずすべての触覚優位性を考慮したモデルにおいて実験を行った。図4に特徴統合モジュールの出力に主成分分析した結果を示す。図4(a)は発達初期のモデルの出力であり、図4(b)は発達後期の出力データである。グラフ上の各点の色は入力データの情動状態に対応している。また図5に発達に伴うそれぞれの情動状態に属する出力データの重心間の距離の変化を示す。これらの結果より、発達段階が進むにつれて、特徴統合モジュールの出力データが分化し、情動のクラスターが構成されていることが分かる。また、図6(a)に図4(b)のグラフから第1主成分と第4主成分を抽出したものを示す。このグラフより、第1主成分に快／不快に関する特徴量が、第4主成分には快情動における喜びと驚きの分化を再現する特徴量が表現されていることが分かる。

4.3 情動知覚優位性の無い実験条件との比較

次に提案モデルにおいて、触覚刺激による快／不快の連合学習を行わない事で情動知覚優位性の無い状況を再現した実験を行った。図6に先ほどの実験と同様のデータセットを用いて学習を行った際の出力データを

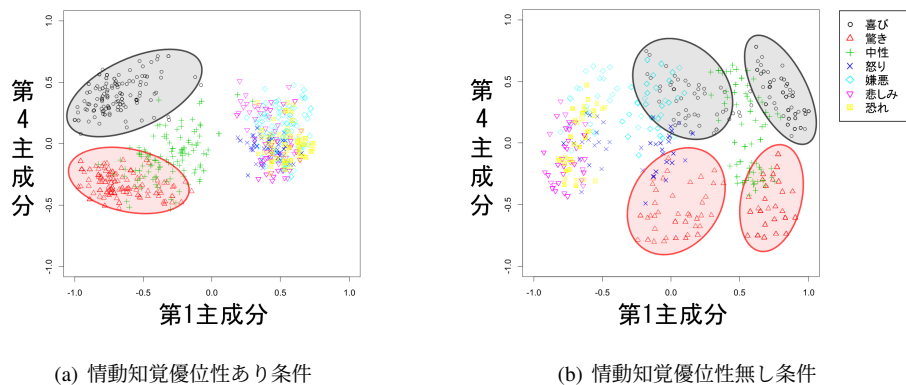


図6 情動知覚優位性の有無による学習結果の比較

示す。図6(a)は通常の提案モデルの学習結果、図6(b)は情動知覚優位性の無い状況での学習結果である。通常の提案モデルでは、出力データが触覚刺激による快／不快情動に基づいて分化し、快情動において、喜びと驚きに属するデータがそれぞれクラスターを構成していることが分かる。しかし情動知覚優位性の無いモデルでは、快／不快情動のデータが乱れて分布しており、情動のクラスターも過剰に分化していることが確認できる。

これらの実験の結果より、触覚による情動情報は、基本6情動の基底に相当する快／不快レベルにおいて情動の分化を促し、基本6情動のレベルにおいては過剰に情動が分化することを防ぐ働きを担っていると考えられる。特に情動の分化を促す働きにおいては、触覚の快／不快情報を用いることで、視聴覚の特徴空間が情動の知覚に特化した形で再構成されたと考えられる。聴覚において強度や基本周波数を特徴量として扱っているが、怒りと驚きの音声をうまく区別することができない場合が考えられる。しかし触覚の快／不快情動情報を用いて情動知覚や分化に有用な特徴量を抽出するようにネットワークの結合重みを変化させることで、怒りと驚きの情動を分化させることができる。実際に人の大脳皮質と扁桃体において、感覚情報の中から情動知覚に重要なものを選択的に抽出していることが知られている [17]。

5. 結論

本研究では親子間のインタラクションに注目し、乳児の持つ触覚優位性を利用することで情動の分化を再現することのできる計算モデルを提案した。提案モデルにおいて親子間の対面インタラクションを模したデータを用いて実験を行い、情動の分化が再現されることを示した。また触覚優位性のない条件との比較実験を行うことによって、情動知覚優位性が情動の発達の分化に影響を与えることが示唆された。

今後の課題は、先天的に痛みを感じることもない、触覚のA δ 線維とC線維が失われている無痛無汗症(CIPA)やA δ 線維のみが失われている無痛症(CIP) [18]を提案モデルにおいて再現することで、触覚C線維が情動発達に与える影響を検討することが考えられる。また今回の対面インタラクションのような受動的な知覚のみならず、乳児自身の運動経験と知覚の相互作用を考慮したモデルへの拡張が挙げられる。

謝 辞 本研究の遂行にあたり、科学研究補助金（特別推進研究：課題番号 24000012 新学術領域研究：課題番号 24119003 挑戦的萌芽研究：課題番号 24650083）の補助を受けた。

参考文献

- [1] Joseph LeDoux. The emotional brain, fear, and the amygdala. *Cellular and molecular neurobiology*, Vol. 23, No. 4-5, pp. 727–738, 2003.
- [2] A.R. Damasio. Descartes' error: Emotion, rationality and the human brain. *New York: Putnam*, p. 352, 1994.
- [3] P. Ekman. An argument for basic emotions. *Cognition & Emotion*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 169–200, 1992.
- [4] K.M.B. Bridges. A genetic theory of the emotions. *The Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, Vol. 37, pp. 514–527, 1930.
- [5] L.A. Sroufe. The coherence of individual development: Early care, attachment, and subsequent developmental issues. *American Psychologist*, Vol. 34, No. 10, pp. 834–841, 1979.
- [6] M. Lewis. The self in self-conscious emotions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 818, No. 1, pp. 119–142, 1997.
- [7] D.M. Stack and D.W. Muir. Tactile stimulation as a component of social interchange: New interpretations for the still-face effect. *British Journal of Developmental Psychology*, 1990.
- [8] Matthew J. Hertenstein. Touch: Its communicative functions in infancy. *Human Development*, Vol. 45, pp. 79–94, 2002.
- [9] G. Hinton. A practical guide to training restricted boltzmann machines. *Momentum*, Vol. 9, p. 1, 2010.
- [10] Matthew J Hertenstein, Rachel Holmes, Margaret McCullough, and Dacher Keltner. The communication of emotion via touch. *Emotion*, Vol. 9, No. 4, p. 566, 2009.
- [11] Robert M. Bradley. Fetal sensory receptors. *Physiological Reviews*, Vol. 55, No. 3, pp. 352–382, July 1975.
- [12] M. Björnsdotter, I. Morrison, and H. Olsson. Feeling good: on the role of c fiber mediated touch in interoception. *Experimental brain research*, Vol. 207, No. 3, pp. 149–155, 2010.
- [13] L. Fabrizi, R. Slater, A. Worley, J. Meek, S. Boyd, S. Olhede, and M. Fitzgerald. A shift in sensory processing that enables the developing human brain to discriminate touch from pain. *Current Biology*, 2011.
- [14] A.D. Craig. How do you feel? interoception: the sense of the physiological condition of the body. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 3, No. 8, pp. 655–666, 2002.
- [15] Y. Tada and K. Hosoda. Acquisition of multi-modal expression of slip through pick-up experiences. *Advanced Robotics*, Vol. 21, No. 5-6, pp. 601–617, 2007.
- [16] Ravinder S Dahiya, Giorgio Metta, Maurizio Valle, and Giulio Sandini. Tactile sensing—from humans to humanoids. *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 26, No. 1, pp. 1–20, 2010.
- [17] 小野武年. 脳と情動: ニューロンから行動まで (脳科学ライブラリー). 朝倉書店, 2012.
- [18] N. Danziger, K.M. Prkachin, and J.C. Willer. Is pain the price of empathy? the perception of others' pain in patients with congenital insensitivity to pain. *Brain*, Vol. 129, No. 9, pp. 2494–2507, 2006.