特集論文 「応用志向の脳科学実験」

脳の機能的結合に関する定性表現を用いた人型エージェントに対する情動状態記述の試み

Qualitative Description Representing Brain Functional Connection for Human Emotional States toward Human-like Agents

田和辻 可昌
Tawatsuji Yoshimasa

早稲田大学 大学院人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, Waseda University
wats-kkoreverfay@akane.waseda.jp

村松 慶一*0
Muramatsu Keiichi

早稲田大学 人間科学学術院
Faculty of Human Sciences, Waseda University
kei-mura@ruri.waseda.jp

松居 辰則
Matsui Tatsunori

(同 上)
matsui-t@waseda.jp

keywords: Uncanny Valley, Human Agent Interaction, Brain Functional Connection, Qualitative Description

Summary

In the research field of Human-agent interaction, the uncanny valley is the crucial issue to realize co-existence of human and artificial agents. It is referred to as the phenomenon that human can feel repulsive against the agents whose appearance is considerably humanlike. There has been just theoretical based but not verifiable model providing an explanation for how it occurs. We hypothesized that when human observes that humanlike agent, s/he perceives it as both human and non-human, and the contradiction between the perceptions causes him or her to elicit negative response against it. We conducted the experiment where the participants were asked to judge whether face of agents or a person was depicted as that of a real person, with their eye tracked and their gaze direction estimated. The results indicated that observers had two-step information processing to the agent. Above all, we proposed a model generating the human negative response against humanlike agents, taking into consideration of the function of the brain regions such as amygdala, prefrontal cortex, hippocampus, and striatum. To verify the model, the transition of the emotional value (namely, positive or negative) was simulated on the basis of a qualitative description for the model. It is suggested that the model be proposed which is verifiable with many findings in the field of neuroscience.

1. は じ め に

外的表現を有し知的に振る舞うソフトウェアエージェントや物理的身体を有するロボット(以下、合わせてエージェント)と人間の共生の在り方を考える上で、エージェントを介したインタラクションにおける人間の特性を理解することは重要である。特に、近年の映像技術や工業技術の発展に伴うエージェントの人型化において、「不気味の谷」[森 70] と呼ばれる現象が注目されている。一般的に、エージェントの外見が工業ロボットのような機械的なものよりも、手足や顔の表現が与えられ、人間の外見に近づいたものの方がエージェントに対する親和度は高いと考えられる。このことから図 1(破線)のように、横軸に人間に対するエージェントの類似度、縦軸にエージェントに対する人間の親和度をとると、両者の関係は単調増加の関係が予想される。ところが、一般的には図 1(実線)のように、人間に対する類似度が極めて高いある地

点において、急激に親和度が負の方向へと転落すると考えられている。また、さらに類似度が高くなり、人間とほとんど区別がつかなくなると、親和度が正の方向へと回復し、完全に人間との類似度が等しくなった時に高い親和度が得られると考えられている。このような類似度と親和度の描くグラフの形状から、高い類似度における急激な親和度の下落を不気味の谷と呼ぶ[森 70]。

これまで様々な分野において、不気味の谷が生起する要因を理解する試みがなされてきた。不気味の谷が生起する要因として目の形態的異常[Seyama 07] や、人の顔の CG 画像におけるテクスチャや目などの顔の部位の配置[MacDorman 09] が関わっていることが心理実験を通して示唆されてきた。これらは、谷の底にあるエージェントがどのような物理的特徴を有しているかを、各エージェントに対する心理的評価をもとに明らかにするというアプローチであると言える。

しかし、このエージェントに対する不気味さの生起という心的状態の変化が、どのような情報処理メカニズム

*0 現在は、埼玉大学大学院理工学研究科に勤務。

図1 不気味の谷の概念図（文献 [森 70] を参考に作成）

によって構成されているか、といった課題に着目した研究は少ない。一般的に、人間の心的状態の変化の様子を記述するためには、心的モデルを構築し、シミュレーションを行うことでその妥当性を確認するという構成論的アプローチが有効である。Moore は、図1のグラフの形状が、知覚心理学における「知覚のマグネット効果」の説明モデルを用いると説明できることを示した [Moore 12]。ここでは、人間に対する類似度が高いエージェントを観察する際、対象が人間であると知覚する働きと、非人間であると知覚する働きとの二つの知覚が働き、それらによって生じた知覚の歪みが不気味さを生起させると考えられている。具体的には、刺激に対して人間であると知覚（ターゲット知覚）する確率分布と、人間でないと知覚（バックグラウンド知覚）する確率分布を事前確率分布として設け、知覚された刺激が人間/非人間のいずれにカテゴリ化されるかをベイズ推定の枠組みで計算すると、不気味の谷のグラフの形状が得られるというものである。

ところが Moore のモデルは、実験を通して構築されたものではなく、既存の理論モデルを不気味の谷のグラフ形状に対する説明のために適用したものであり、以下の三点に関して追加検討の余地がある。一点目は、エージェントに対する人間のどのような情報処理がモデル化されているのかに関して明確でないという点である。二点目は、上記の情報処理がどのような機能によって実現されているのかという点である。三点目は、モデルの妥当性に関する検証可能性が十分に保証されていないという点である。これら三点を解決する方法として脳機能に着目することの意義について述べる。

森は、不気味の谷を本能的な自己防衛反応として位置付け、死人や異なった種などに対する防衛のために不気味という感覚が存在すると考えた [森 70]。また、不気味の谷に見られる否定的反応に関しては、マカクザルでも生起することが報告されており、自分の属する種に似せて作成された CG モデルに対して視線を向けようとしないう [Steckenfinger 09]。これらから、不気味の谷における否定的反応は人間固有のものではなく、種を超えて存在し、自己防衛反応に関係があることが示唆される。つま

り、種を超えて共有されている防衛本能システムが否定的反応を形成していると考えられ、このことから、系統的に古い脳部位の機能に着目することは否定的反応がいかに形成されるかを理解する上で有用であると考えられる。Shimada らは人間の知覚情報処理メカニズムのうち側抑制に着目し、人間に極めて類似したエージェントに対する人間の知覚情報処理過程をモデル化した [Shimada 07]。この結果、エージェントから知覚される人間への類似性は、極めて類似度の高いエージェントにおいて低くなることが示唆された。また、神経科学の分野において提唱されている感情の二重経路の概念を用いて、不気味さ生起に関する説明を試みている。

このように、人間の知覚情報処理メカニズムや神経科学的知見に基づくモデルが提案されているが、これまで各脳部位の機能を踏まえた不気味さ生起モデルに対してシミュレーションを通じた妥当性の検証は行われていない。そこで、本研究では不気味さ生起に関わると考えられる脳部位および脳機能を既往研究から同定し、それらをもとに不気味さ形成に関わる機能的神経網モデルを提案する。

まず、Moore のモデルが人間のどのような情報処理をモデル化しているかを実験を通して明確にした上で、脳機能という観点からモデルを再構築し、自然な形で拡張することを目指す。このモデル構築によって、不気味さという複雑な感覚がどのような情報処理過程に基づいて構成されるか、またその不気味さがどのような神経基盤によって形成されているかを明確化することが可能であると考えられる。

本論文では、まず、Moore のモデルにおける二つの知覚とその知覚の歪みの考え方に即して、次のような仮説を設けた。すなわち、「臨界点右近傍より高い類似度をもつエージェントにおいて、観察者には二つの異なる知覚過程が働き、その齟齬によって不気味の谷が生起する」という仮説である。第2章では、仮説から、対象を人間として知覚/判断する過程と非人間として知覚/判断する過程の二つの過程でどのような違いがあるかを、人間観察時と非人間観察時の被験者の視線の動きを計測することで明らかにする。この実験の結果、人間に似たエージェントにおいて人間であると知覚する過程と非人間であると知覚する過程がこの順に存在する可能性が示唆されたため、この点を踏まえて仮説を再構築する。第3章では、第2章において示唆された二つの異なる知覚過程がどのようなメカニズムによって生じているかを脳科学的見地からモデル化する。第4章、第5章では、構築したモデルを定性的表現によって記述し、人間のエージェントに対する情動状態が時系列的にどのように変化するかに関してシミュレーションを行い、その結果に関して述べる。

2. 人間 / 非人間判断時の視線の動きに関する実験

人間が人間に酷似したエージェントを観察する際、どのような知覚過程が伴うのかを実験的に検討する。Minatoらは被験者らの視線を計測することで、アンドロイドと対話中の被験者の視線の動きを、人物と対話中の場合の視線の動きと比較した [Minato 04]。この結果、他者を観察する場合と比較して、被験者はアンドロイドの目に視線を比較的長く向けることが明らかになった。しかし、この実験では予めアンドロイドが人間ではないことが了解されているため、そもそも被験者の視線の動きが一般的に他者に対して表出される視線の動き [Yarbus 67] と異なる可能性がある。また、この実験では被験者の視線から得られた情報（目鼻口に対する視線停留頻度）をインタラクションの時間すべてで圧縮して計算しており、インタラクション中の被験者が、各エージェントに対してどのような知覚処理を行っていたかが時系列的に比較されていない。そこで本実験では、明らかに人間であると判断されるエージェントに対する知覚処理と、明らかに人間ではないと判断されるエージェントに対する知覚処理においてどのような差が見られるかを、エージェントの人間 / 非人間判断中の被験者の視線情報を計測し、時系列的に分析することで明らかにする。従って、まず本章の前半で、5種類の刺激のうちから人間あるいは非人間と明らかに判断されるもの、判断が困難なものの3種類の刺激を分析対象として選定する。次に本章の後半で、それぞれに対する知覚情報処理を比較検討し、人間のエージェントに対する知覚情報処理のモデルに関して述べる。

2.1 実験手順

本実験では、PCに刺激画像を提示し、それが人間か非人間のいずれであるかを判断する課題を被験者に与えた。提示された画像を図2に示す。それぞれ、(a)人形、(b)CG描写された男性、(c)女性の人型アンドロイド、(d)CGで作成された女性、(e)人間の男性である。これらの顔画像は、図の左から右に向かうにつれて見かけの人間に対する類似度が上昇するように主観的に選択した^{*1}。予め被験者には各画像を1分間提示すること、提示されている間は画像をよく見るように教示を行った。また、各画像の提示後は「+」が中央に配置された白い画面へと切り

替わるので、この間に、画像が人間であったと思ったら「+」を、人間でないとと思ったら「×」を、手元に用意した用紙に記入するよう指示した。解答が終わると視線を「+」の中央に合わせるよう指示し、確認が取れたのちに次の画像の提示を行った。また、一部被験者には実験後にアンケートの回答を求めた。このアンケートでは、実験で提示した各画像に関して、(Q1) 人間 / 非人間判断においてどの程度判断に迷ったか（3段階の評定尺度を用いて回答；1:迷わなかった, 2:どちらでもない, 3:迷った）、(Q2) 人間 / 非人間の判断を行うにあたって、画像のどの部分に着目して画像を観察していたかを、それぞれ実験中の刺激を提示しながら口頭で回答してもらった。実験課題では、画面に提示される画像を視認できるかを確認した上で実施した。被験者の視線は、ナックイメーテックテクノロジー製のEMR-AT VOXERを使用し、利き目の注視位置を計測することで記録した。

図2 実験で用いた刺激顔画像

2.2 分析

一般的に人間は他者を観察する際、目鼻口に対して視線を多く向けることが知られている [Yarbus 67]。そこで、これらの特徴部位として各々に対する視線停留時間を算出し、画像間で停留時間の長さに差が見られるかを検証した。視線停留時間の算出には、視線データ解析用ソフトウェア dFactory（ナックイメーテックテクノロジー製）を用いた。この分析にあたってはまず、dFactoryによって、画像を提示した画面を 16×16 の小領域に分割し、各領域ごとに計測の開始からある時間までの期間における視線停留時間の合計を算出した。各画像における「左目」「右目」「鼻」「口」はそれぞれ瞳の中心、鼻頭、口の中心を含む領域とその周囲を含む9領域で定義し、各特徴点における視線停留時間は各9領域の停留時間の合計で定めた。例として図3にCG画像2において上記方法で定義された「左目」「右目」「鼻」「口」の領域を示す。この定義では特徴部位間において重複が生じる。しかし、視線計測は誤差を含んでいることが想定されるため、誤差を包括することを考慮して、重複を認めた分析を行った。また、視線停留時間を求める際の時間長を T として計測開始から5秒間 ($T = 5$)、10秒間 ($T = 10$)、30秒間 ($T = 30$) の3種類を設け、知覚処理における時系列的変化の抽出を試みた。

*1 各画像は下記 URL から取得した。.: <http://plaza.rakuten.co.jp/norikodoll/diary/200902220000/>, <http://www.giantbomb.com/profile/moez/blog/uncharted-2-too-cinematic-for-its-own-good/37574/>, <http://www.uxgroundswell.com/2010/05/a-run-in-at-the-uncanny-valley> (2012年5月13日参照), <http://josiahbancroft.blogspot.jp/2010/07/uncanny-valley-is-cayon-part-1.html> (2012年5月13日参照), <http://search.yoshimoto.co.jp/actor/prf/details.html?id=3120>

図3 分析対象となる目鼻口の定義（各色枠で囲まれた箇所が右目，左目，鼻，口を表す領域）

2.3 結果

§1 各画像に対する人間／非人間判断

本実験に参加した被験者は，大学学部学生 21 名（男性 18 名，女性 3 名）であった．図 4(黒)に，それぞれの画像に対して「人間である」と判断した人の割合を示す．具体的には，CG 画像 2(図 2(b)) が 19.1%，アンドロイド(図 2(c)) が 19.1%，人形の画像(図 2(a)) が 28.6%，CG 画像 1(図 2(d)) が 90.5%，人間(図 2(e)) が 100%，とこの順に高くなった．そこで，多くの被験者が「人間」と判断した CG 画像 1 を「人間に対して高い類似度を持つ CG 画像」，すべての被験者が「人間」として判断した人間画像を「人間」，および多くの被験者が「非人間」と判断した CG 画像 2 を「人間に対して比較的低い類似度を持つ CG 画像」として，これら三つの画像に対する被験者のデータを分析した．

§2 人間／非人間判断困惑度

アンケートに回答した 13 名の被験者の，刺激画像に対する人間／非人間判断の困惑度は以下の通りであった．人間画像では，平均 1.17 ($SD = 0.39$)，CG 画像 1 では，平均 1.83 ($SD = 0.72$)，CG 画像 2 では平均 1.17 ($SD = 0.58$)．また，困惑度に関して刺激間で差が見られるか t 検定を行ったところ，CG 画像 1 と CG 画像 2 ($t(22) = 2.57, p = .020$)，人間画像と CG 画像 1 ($t(16.955) = -2.83, p = .012$) に有意差が認められた．一方，人間画像と CG 画像 2 では有意な差が認められなかった ($t(22) = 0.00, p = 1.00$)．

§3 各特徴部位における視線停留時間

視線停留時間を分析するにあたっては，CG 画像 1 を「人間」，CG 画像 2 を「非人間」と判断した被験者 15 名分のデータを対象とした．さらに，視線データの大部分の欠損が見られる被験者 7 名分のデータを除外し，残りの 8 名を最終的な分析対象とした．また，後述するソフトウェアによる視線停留時間計算において，被験者 1 名の 10 秒間の視線停留時間に対して異常な計算結果（計算対象時間が 10 秒間であるにもかかわらず，17 秒間の視線停留があると計算された）が確認されたため，さらに 1 名を分析対象から取り除いた．したがって，7 名が

図4 各画像に対して人間であると判断した人物の割合(黒)と正答した人物の割合(白)

最終的な分析対象である．データ欠損に関しては，視線計測中に計測器が被験者の視線追跡を外してしまうなどのシステムの問題によるものが試行全体を通して多数確認されたものを分析から除外した．

図 5 に各時間長における画像ごとの左目，右目，鼻，口に対する視線停留時間の平均の推移を示す．各時間長 T において，画像間の各特徴部位に対する視線停留時間の平均に差があるかどうかを F 検定による等分散性を確かめたのち， t 検定（等分散が仮定できない場合は，Welch の t 検定）を施した．このとき，右目，鼻，口の一部に有意差が認められたため，各時間長に関して述べる．まず開始から 5 秒の段階では，右目と鼻に関して有意差および有意傾向が認められた．右目に関して，CG 画像 1 と CG 画像 2 の間 ($t(12) = 3.43, p = .005$) と，CG 画像 1 と人間の間 ($t(12) = 2.83, p = .015$) に有意差が認められた．一方，鼻に関して CG 画像 1 と CG 画像 2 の間 ($t(12) = 2.00, p = .069$) と，CG 画像 1 と人間の間 ($t(12) = 2.05, p = .062$) にそれぞれ有意傾向が認められた．次に開始から 10 秒の段階では，右目と鼻，口に関して有意差および有意傾向が認められた．右目に関して CG 画像 1 と CG 画像 2 の間 ($t(8.544) = 3.44, p = .008$) と，CG 画像 1 と人間の間 ($t(12) = 4.29, p = .001$) に有意差が認められた．また，鼻に関して CG 画像 1 と人間の間 ($t(12) = 3.02, p = .011$)，口に関して CG 画像 2 と人間の間 ($t(12) = 2.43, p = .032$) にそれぞれ有意差が認められた．最後に開始から 30 秒の段階においては，右目と鼻に関して有意差および有意傾向が認められた．右目に関して，CG 画像 1 と人間の間有意差が認められた ($t(12) = 2.50, p = .028$)．また，鼻に関して CG 画像 1 と人間の間有意傾向が認められた ($t(12) = 2.05, p = .062$)．

図5 観測開始から5秒,10秒,30秒間の被験者の左目,右目,鼻,口に対する視線停留時間(秒)の平均

2.4 考 察

分析の対象となった被験者は,CG画像1および人間を「人間」,CG画像2を「非人間」と判断している。Cheethamらは,人間の顔画像から生成したCG画像と人間の顔画像をモーフィングによって段階的に調整し,人間への類似度を变化させた顔刺激を作成した上で,それぞれが人間かアバターかを弁別させる強制二択課題を被験者に課した [Cheetham 13]。この結果,類似度の増加に対して人間であると判断する被験者の割合がロジスティック関係に増加するカテゴリ知覚の様相が確認された。本実験においても,このカテゴリ知覚の様相に近い形状を有していたことが刺激に対する人間判断率から推察される。

次に,右目に対する視線停留時間に注目すると,他の顔特徴部位と比較して刺激間で特徴的な変化が確認された。具体的には,CG画像1の右目に対する視線停留時間は,すべての時間長に対して人間の右目に対する視線停留時間よりも長くなる傾向が認められた。また,CG画像2の右目に対する視線停留時間は,観測時間が経過するに従って,人間の右目に対する視線停留時間と比較して定性的に長くなることが示唆された。ここから,間違いなく人間でないと判断された刺激は,間違いなく人間であると判断された刺激に比べて,右目に対する視線停留時間が長くなる傾向があることが考えられる。Minatoら [Minato 04] の報告において,人間と対話する場合の対象の目に対する視線停留頻度は,アンドロイドと対話する場合よりも短くなることが指摘されている。30秒の時間が経過すると人間の目に対する視線停留時間が最も短くなったことから,本実験での対話のないインタラクションにおいてもこれが再現されたと考えられる。一方で,本実験における5秒と比較的短い観察時間では,人間でないと判断されたエージェントの目に対しても「人間」観察時とほぼ同等の視線停留時間であったことから,インタラクション初期の段階においては,正しく人間/非人間の判断がつく場合は,顔知覚処理に関しては違いは見られないと考えられる。

このような右目に対する傾向,すなわち観察者から見て顔の左側に見られた傾向は,顔情報処理の観点から考察される。Thomasらは,人間が他者の顔を観察する際,

全体的に(観察者から見て)顔の左側に視線が集まること,特に,悲しい顔を観察する場合は,より顕著に顔の左側に視線が集まることを実験的に明らかにした [Thomas 14]。また,この悲しい顔における左側優位の視線停留は,右脳が否定的な情動によって賦活されるという提言と一致する,と考察している。このことを踏まえると,判断に困惑させたCG画像1は実験の早い段階で否定的な情動を被験者に与えていたことが考えられる。また,一方で,CG画像2は時間が経過するに従い右目に対する視線停留時間が定性的に長くなったこと,CG画像1の右目に対する停留時間とほとんど変わらない停留時間が観測されたことから,観察途中で否定的な情動を被験者に与えていた可能性が示唆される。

2.5 人間に似たエージェントに対する二段階の情報処理

Cheethamらは,人間のカテゴリ知覚の観点からアバター(人間の顔から作成した比較的類似度が低いCG顔刺激)知覚の場合はアバター(非人間カテゴリ)であると反応する潜時が,カテゴリの境界に位置する顔刺激を知覚する場合に比べて短いことを実験的に明らかにした [Cheetham 13]。これに加え,アバターに対する反応潜時に比べ,人間ともアバターとも区別のつかないCG画像に対する反応潜時に比較的時間がかかることから,区別のつきやすいアバターを知覚・認識する際は比較的粗い情報処理が行われているのに対し,刺激の類似度が高くなるにつれ処理時間の要する精緻な情報処理がなされているという course-to-fine 仮説を提唱した [Cheetham 13]。この点から考えると人間やCG画像2に関しては,人間/非人間であると早期の段階で判断されたと考えられる。また一方で,人間であると判断されたCG画像1に関しては,右目に対する視線停留時間が他よりも初期の段階から長いこと,精緻な情報処理がなされていたと考えられる。

また人間/非人間判断における困惑度の結果からも,人間画像とCG画像2の間には差が見られず,各々の画像の人間/非人間判断に関しては容易に判断ができたと考えられる。一方で,二つの刺激画像の右目に対する視線停留時間は,観察時間が経過すると定性的に差が見れ始めた。ここから,人間に類似したエージェントに対

して人間は二段階の情報処理を行うと考えることができる。すなわち、インタラクション初期の「人間を観察しているときと同等の処理」と、中期から後期にかけての「非人間を観察しているとき特有の処理」である。この後者の処理は、Cheetham らが提案した精緻な情報処理が必要であるという点と対応すると考えられる。

以上から、Moore のモデルから構築した仮説における二つの知覚情報処理は、この二段階の情報処理過程にあたると考えることができる。したがって、不気味の谷を説明するモデルとして、新しく次のように考えることができる。つまり、人間に似たエージェントを観察した際に、人間の知覚情報処理としては、初めは人間を観察するときと同等の処理が行われ、次に、人間とは異なる処理が行われる。この、先の処理と後の処理の情報処理の齟齬が不気味の谷を誘発する。このような齟齬が誘発される仕組みを、次章で、脳科学的知見から考察しモデルを構築する。

3. 否定的反応形成過程モデルの提案

本章では、前章の二段階の知覚情報処理過程がどのようなメカニズムによって生じているかを、脳科学的知見を踏まえて述べる。その後、Moore のモデルを脳機能の観点から再考察し、このメカニズムモデルと統合することで、自然な拡張を目指す。

3.1 扁桃体を中心とした感情の二重経路モデル

扁桃体は、大脳辺縁系に位置し、動物が感覚受容器から得た外界からの刺激の本能的な価値（以下、情動価値）を決定づける重要な部位であり、情動反応を形成する際の中核を担っている。扁桃体では視覚から得られた情報が本能的に価値がある（快）か価値がない（不快）かを判断していると考えられており [小野 12]、防衛本能システムを考える上では重要な働きをする部位であると言える。

前章の実験結果を踏まえて脳機能に着目した不気味さ誘因のモデルとして感情の二重経路に着目したモデルを考える。感情の二重経路とは、対象に対する情動評価を行う機能を有する扁桃体を中心とした情動情報処理経路であり、情動反応は大脳皮質を経由せず迅速で雑多な処理を行う経路と、これにやや遅れる形で大脳皮質を経由して詳細な処理を行う経路の二つの経路から形成されている [LeDoux 96]。この前者の情報処理経路を低位経路、後者の情報処理経路を高位経路と呼ぶ。これらの経路により、不気味の谷は低位経路において人間に酷似したエージェントを人間であると評価し、高位経路において非人間であると評価する。この評価間の齟齬を起点として不気味さが生起すると考えられる。この感情の二重経路を用いた不気味さ生起の説明モデルは、Shimada らによっても同様のモデルが提案されている [Shimada 07]。

図6 本研究で提案する否定的情動反応形成モデル

3.2 先行研究とのモデル統合

本節では、Moore モデルを脳機能モデルとして再解釈することで、前節の感情の二重経路のモデルとの統合を行い、より汎用性の高いモデルとして提案する。

まず、Moore のモデルの背景にある知覚のマグネット効果に関しては、視床・大脳皮質の機能に着目した自己組織化マップを用いたモデルがある [Guenther 02]。このモデルに対して、Moore が参考にした Feldman のモデルはベイズ推定によるモデルであり、こちらも知覚のマグネット効果を説明している。ところで、このベイズ推定と大脳皮質の間には関連性が示唆されており、従って、ベイズ推定から構築した Feldman のモデルおよび Moore のモデルは大脳皮質の機能と密接に関係していると考えられる。また、ベイズ推定において与えられる確率すなわち、事前確率は、海馬に貯蔵された記憶情報が参照される確率に相当すると考えることができる。

以上から、脳機能の観点から構築した、本研究で提案する否定的情動反応のモデルを図6に示す。人間に酷似したエージェントを観察した際、人間は低位経路による情報処理により、人間を観察した場合と同等の情動反応が起こる。この時、対象に対して注意が喚起され視線が向けられる。これに対して、高位経路による情報処理では、対象が人間ではないという情報が処理される。以上の二つの経路の齟齬がさらに知覚されることで、エージェントに対して否定的な反応が形成され、視線がより集中的に向けられると考えられる。

3.3 視線制御と報酬系

前章の視線計測実験において、人間の顔画像観測時とCG描写された人間の顔画像観測時では、それぞれの目に対する視線停留時間に特徴的な差が見られた。この点に関して、本モデルを拡張することで説明を与える。

まず、本実験において被験者は提示された刺激が人間か非人間かを判断する課題を課せられており、この課題は、初めに形成された人間/非人間の期待に沿う情報が知覚され、判断の確信度が増加することで回答ができる、と考えることができる。すなわち、人間に類似度が高いエージェントに対しては、本課題は低位経路で形成された期待されるカテゴリー（人間）に対して、それに沿う情報がいかに高位経路によって知覚されるかという枠組

みで捉えることができると考えられる．各経路における反応は情動行動として表出され，対象の目に視線を向けるという行動の促進あるいは抑制に寄与していると考えられる．以上のような視線注視行動に関しては，強化学習の枠組みで考えると説明が可能である．強化学習の機能的体系は，報酬系に大きくかわる脳部位である線条体 [Wichmann 14] を考えることで説明できる．この線条体は，扁桃体を含む大脳辺縁系からの投射 (p.971) と，大脳皮質からの投射 (p.963) を受けていることが知られている [Wichmann 14]．そこで，対象を知覚する際に辺縁系により得られる情動評価と，大脳から得られる期待値をそれぞれ受け取り，強化学習の枠組みとして，両者の差分だけ視線を向けるかどうかの情動行動が制御されると考えられる．

次章以降で，本章で提案したモデルをシミュレータ上に実装し，シミュレーションを行った結果について述べる．尚，シミュレーションは以下の二部から成り立っており，それぞれは異なる観点からシミュレータ上に実装されている．一点目は，各脳部位がどのように接続しているか，次に，それらの脳部位が活動した時に各脳機能がどのように作用するか，という観点からシミュレータ上に本モデルを実装した．二点目は，本モデルを脳部位の接続関係を陽的に記述せず，各脳部位の機能面に着目して実装した．

4. モデルの定性的記述

本章では，前章で提案したモデルに関する各脳部位の物理的 / 機能的結合を定性的に記述する．次に，刺激が入力された際に対象に対する情動評価が時系列的にどのように変化するかに関してシミュレーションを行った結果に関して述べる．

4.1 モデルにおける脳部位の物理的 / 機能的結合構造

本モデルで取り上げた脳部位は，視床，扁桃体，大脳皮質，海馬，線条体である．そこでまず，これらの脳部位の各機能を脳科学的知見を基に抽出し，それらの神経生理学的結合関係から機能の結合を試みる．次に，シミュレータを用いてこの機能的結合関係を定性的に記述する．最後に，シミュレータ上で構築されたモデルに対して入力情報を与え，得られた出力から不気味さがどのように表現されるかを考える．ただし，シミュレーションにおける重要な点として，本研究ではその具体的な定量値に着目せず，境界標 (0 や閾値) との大小関係のみを扱う．

視床は感覚器官から得られた情報の中継地点であり，得られた情報を扁桃体および感覚皮質へと伝達する [LeDoux 96]．次に，扁桃体は得られた刺激の情動評価を行い，刺激が個体にとって価値があるか (快) 価値がないか (不快) を判断する [小野 12]．さらに，扁桃体は，顔，特に表情に反応すること [小野 12]，また同じ顔の繰り返し

呈示によってその活動度が抑制されること [西条 05] が知られている．また，線条体を含めた大脳基底核は強化学習との関連性が指摘されている [Wichmann 14] ことから，期待報酬量と報酬の差分だけ行動を強化するものと考えた．

次にこれらの機能を定性的に記述・定式化する．これにあたっていくつかの仮定をおいた．まず扁桃体は，知覚した情報の情動評価値 $v(t) \in \mathbb{Q}$ ($\mathbb{Q}$ は定性値を表す) を決定し，その定性的な値に沿って情動行動を起こさせると仮定した (実際の行動は視床下部に伝達されることで生起する)．また，大脳皮質は対象に対する期待値 (報酬予測) $\kappa \in \mathbb{Q}$ を計算し，海馬は扁桃体の情動評価から計算される対象の評価値 V ($\equiv$ 情動評価値の和算) を大脳皮質が算出した期待値へと収束させるように情動評価を行うように働くと仮定した．すなわち，これは対象に対する評価値 V が時間 t に対して，以下の力学系に従うことを表す．

$$\frac{dV}{dt} = (\kappa - V)V \quad (1)$$

最後に，大脳基底核における線条体を「辺縁系から得られる評価値と大脳皮質で計算された期待値との差分の大きさに比例して，情動行動を強化する系」と仮定し， $\kappa - V$ を計算し，この値が大きいほど，対象の目を見るという情動行動が起こりやすいということを表現した．また，対象の目を見ると，観察者は視覚的に情報の入力を受けているので，このとき視床 (情報の入力部) の活動度が高まることを仮定した．

以上の機能は各脳部位の活動度が 0 以上の場合において機能するようにした．この活動度は各脳部位に関して定義され，これが閾値を超えると結合された脳部位の活動度が上昇することとした．つまり， n を本研究で用いる脳部位の数として， $i, j \in \{1, \dots, n\}$ に対して，ある脳部位 X_i における活動度を $a(X_i)$ ， $\omega_{ij} (i \neq j)$ を脳部位 X_i, X_j の接続強度， θ_i を X_i の活動閾値として，

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}a(X_j) = & \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} \omega_{ij} \text{sign}(a(X_i) - \theta_i) \\ & - \sum_{k \in \{1, \dots, n\}} \omega_{jk} \text{sign}(a(X_j) - \theta_j) \end{aligned} \quad (2)$$

とする．今回は， $\omega_{ij} = 0.3, \theta_i = 0.5$ で固定した．また，初期の情動評価値を $V(0) = 1$ ，期待評価値を $\kappa = 10$ で与えた．尚，これらパラメータは著者が数度の試行のうちから一つを選択したもので，この数値以外にも最適なパラメータが存在する可能性がある．このときの，選択の基準としては，人間の目を観察している際の扁桃体が活動後減少しているか，を中心に行った．

本モデルを記述するにあたり，シミュレータ STELLA^{*2}を用いた．このシミュレータでは，stock と呼ばれる変数に

^{*2} isee systems: STELLA®, Systems Thinking for Education and Research <http://www.iseesystems.com/software/education/StellaSoftware.aspx>

対して, inflows (単位時間の入力量) と outflows (単位時間の出力量) を定義することで, stock の値の時系列的变化 (微分方程式) を得ることができる. また, この stock 間を flow で結合することによって, 変数と変数の関係性を記述し, 系のダイナミクスが記述可能となる.

図7に視床と大脳皮質の接続を STELLA に実装した様子を表す. 各四角は視床と大脳皮質の活動度を表す. 視床の活動度が視床の情報伝達の閾値を超えると, 伝達の on/off が切り替わり, 二つの四角を結ぶ flow によって, 活動度が伝搬する. すなわち, 視床の活動度が下がり, 大脳皮質の活動度を上昇させるということを模式化している.

図7 視床 (Thalamus) と大脳皮質 (Cortex) との接続を表した模式図

構築したモデル全体の概要を図8に示す. 大きく Evaluation としての評価機能の機構と, それ以外の Connection としての各脳部位の接続記述からなるモデルである. また, 入力としてエージェントの目の形態の特徴 (強膜の広さ [Kobayashi 01] と目の大きさ [Seyama 07]) の人間の目に対する類似度を用いた. これらは0から1の値を取り, これらの積が0.5を超えると情動評価がポジティブに, 0.5を下回ると情動評価がネガティブに働くように設定した.

図8 STELLA において構築した本研究のモデル

4.2 対象に対する評価値の時系列的变化

エージェントに対する評価値, エージェントの目に視線を向ける程度, および各脳部位の活動度に関して定性

的關係に着目して記述を行い, シミュレータ上にモデルの実装を行った. 本研究では各変数の定性的關係に着目しているため, シミュレーション上定量的な値を用いているが, それらの具体的数値には意味を持たないことに留意されたい. したがって, 以後, 各変数の時系列的な増加および減少のみに着目する. 次に, 入力 (強膜の広さと目の大きさ) に対する情動状態 (ポジティブな評価あるいはネガティブな評価の二値) を評価し, 時間経過によって観察対象に対する評価値が時系列的にどのように変化するかを, シミュレーションを行うことで分析した. シミュレータにおいて入力情報を与えた際に, 評価値 V と対象を見るかどうかを選択する確率 $\kappa - V$ の時系列的变化が図9 (左) として, 扁桃体の活動度の時系列的变化が図9 (右) として得られた. 図9の上段は強膜の広さと目の大きさの積が0.5を上回る場合, すなわち, 人間の目と構造的にかなり近いと考えられる場合, 下段は積が0.5を下回り, 人間の目と構造的に異なっている場合の様子を表している. これらはそれぞれ, 人間観察時と非人間観察時に対応し, グラフはそれぞれ被験者の評価値, 対象の目を見る割合, および扁桃体の活動度の時系列的变化を表現している.

評価および脳部位の活動に関して述べる. まず, 人間の目を見ている場合であれば, ある時刻以降は一定の評価値 (期待評価値) に収束および扁桃体の活動も非活動状態 (活動度 = 0) となることが示唆された. 一方で, 人間の目と異なる構造のものを見ている場合は, 評価値は0へと収束し, 扁桃体の活動状態も不安定になる (活動度が振動する) ことが示唆された. グラフの結果から, 人間の目を観察している際は, 扁桃体はある時刻まで活動が続けられるが一定時刻を過ぎると, 非活動状態となることが示された. これに対して, 人間の目と異なる構造を持つエージェントを観察している場合は, 時間が経過しても扁桃体の活動状態は持続していることが示唆された.

4.3 考察と課題

4.2節で示したシミュレーションの結果から, 人間を観察しているときは, 対象に対する評価値が徐々に高くなっていくことが示唆された. 視線を向けるかどうかに関しては, 線条体の強化学習の仮定から, 期待値と評価値の差分が小さくなるに従い, その確率は減少する. 実際, 図9 (左上) において, 評価値 (1:value) が増加し, 一定値10 (期待値) に収束しており, 他方視線を向ける確率 (2:probability to gaze) が減少している. 図9 (左上) は入力として人間の目の形態に近いものを与えた場合であり, 人間を観察している場合に該当する. 一方で, 人間図9 (右上) は入力として人間の目の形態と異なるものを与えた場合であり, 非人間を観察している場合に該当する. このとき, 視線を向ける確率 (2:probability to gaze) は常に高い値を取っており, 人間を観察している場合と比較して, 対象に対する視線停留時間が長くなることを

図9 (上図) 人間の目 (左) および人間の目と異なる構造のものを観測中の評価と対象を見るという行為の選択確率の時系列的変化
(下図) 人間の目 (左) および人間の目と異なる構造のものを観測中の扁桃体の活動度の時系列的変化

表している。このとき、図9(右下)から扁桃体の活動度を確認すると、持続的に高い値をとっていることが分かる。これは、視線を向ける確率が高いため、入力を受け付ける視床の活動度が高まるためである。Minatoらは、アンドロイドと会話を行う場合は、他者と会話している場合に比べ、相手の目に対する視線停留頻度が多いことを実験的に明らかにし、これは人間がアンドロイドとの相互理解を試みようとしたと考察している[Minato 04]。一般的に人間は他者とコミュニケーションを取る上で、他者の目から様々な情報を読み取ることが知られている。従って、積極的に他者を知ろうと試みがある場合は他者の目に対する視線停留時間が増加し、様々な情報が処理され则认为される。以上から、視線計測実験において、CG画像2の目に対する視線停留時間が、人間の目に対する視線停留時間よりも長くなったこともこのシミュレーションの結果からも説明される。

ここで実装されたモデルでは、入力の初期値によって正の情動評価になるか負の情動評価になるかが決定的であるという課題があった。つまり、入力の目の形態的異常度が0.5以上で与えられれば正の情動評価、0.5以下で与えられれば負の情動評価となる。この入力はその後の系の挙動すべてに影響を与えることから、この箇所を適切な表現に改める必要がある。また、実際の実験では、目以外にも鼻や口などに視線が移ることが考えられるため、それらの視線移動を考慮に入れた実装を行う必要がある。そこで、次章ではこの点を解消したモデルの再実装を行い、シミュレーションの結果に関して述べる。

5. エージェントに対する視線移動を考慮したモデルの再実装

本章では、刺激の顔の特徴部位とそれぞれの特徴部位に異常度を設けて、どの部分に対して情動評価を行うか、という観点を導入することでモデルを再構築した。これによって時系列で評価の正負が異なるようにした。本章では、異常度と各脳部位の機能的特徴に関する仮説を述べ、どのようにモデルを再実装したかに関して各パラメータ

の定性的関係を述べる。

5.1 着目点における異常度と視線

着目点とは、先に述べた刺激の顔部位を表し、強膜の広さ $Ey1$ 、目の大きさ $Ey2$ 、鼻の大きさ Nos 、口の大きさ Mou からなる。ここで、これら着目点の特徴量集合を $\Lambda = \{Ey1, Ey2, Nos, Mou\}$ として与える。また、人間に酷似したエージェントの各着目点 $\lambda \in \Lambda$ に対して異常度 $abn(\lambda)$ を定義する。具体的には、強膜の広さに関する異常度 $ey1$ 、目の大きさに関する異常度 $ey2$ 、鼻の大きさに関する異常度 nos 、口の大きさに関する異常度 mou を定数として設定した。これらは、それぞれ0以上1以下の実数をとる。また、それぞれの着目点(強膜の広さ、目の大きさ、鼻の大きさ、口の大きさ)を見る確率 $P_{gaze}(X = \lambda)$ は、それぞれの異常度を各異常度の合計で割った値として以下で定義した。

$$P_{gaze}(X = \lambda) \equiv \frac{abn(\lambda)}{\sum_{k \in \Lambda} abn(k)} \quad (3)$$

この確率が最も高い着目点 λ に対して人は視線を向けて異常度を知覚すると考えた。また、この確率 $P_{gaze}(X = \lambda)$ は、以下の更新式に従って順次変更される。ただし、 c は視線遷移のしやすさを表すパラメータである。

$$\Delta P_{gaze}(X = \lambda) = \begin{cases} -c & \text{視線が向けられていた場合} \\ c/3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

この更新式は、視線が向けられていた着目点が一定の割合 c で視線を向けなくなることを表している。その他 (otherwise) を $c/3$ だけ増加させているのは、 $P_{gaze}(X = \lambda)$ が確率であり、これらの合計が1になる必要があるためである。 c が大きければ大きいほど、他の着目点に視線を向けやすいという性質を表している。

5.2 各パラメータの関係

本モデルのシミュレーションを行うにあたって、実装面では図10のような情報の流れを想定した。 M^+ は変

数間の単調増加関係を, M^- は変数間の単調減少関係を表している. また, f_1, f_2, f_3 は一方の値が定まると, ある規則に従い矢印の先の変数が定まることを示している. 各詳細に関して以下に述べる.

まず f_1 に関しては, 時刻 t において各着目点を見る確率が最大の λ を抽出し, その部位に対して定義された異常度を時刻 t の異常度 $abn(t)$ とする関数である. すなわち, $abn(t)$ は, その時刻において視線を向けられる確率が最大である着目点 $\hat{\lambda} = \arg_{\lambda} \max (P_{\text{gaze}}(X = \lambda)(t))$ に予め定義された異常度 $abn(\hat{\lambda})$ で与えられる. 次に, 扁桃体の抑制に関わる機能 f_2 に関して述べる. 一般的に扁桃体の応答は情動価値である報酬・嫌悪の程度に応じて強くなると考えられている [小野 12](p. 111) ため, 本研究では, エージェントの顔の特徴部位から異常度が高い部分を検知し, 異常度に比例して扁桃体が活動すると仮定した. 扁桃体は繰り返しの顔提示に対して活動が低下することが示唆されている [西条 05]. また, 一方で, 扁桃体と海馬は協調して記憶形成に関わっていることが知られている [小野 12] ことから, 扁桃体で形成された情動評価値は, その正負の情報が海馬へと伝達・蓄積されていくと仮定した. この仮定から, 海馬に一時的に保持された扁桃体の情動評価に関する時系列的な情報に対して, 各単位時刻の評価の定性値が直前の評価と同じであれば扁桃体の活動を抑制させるという機能によって実現されていると仮定した. そこで, 各時刻の評価が直前の評価と同じであれば「カウンター」と呼ばれる変数に 1 を加え, それが直前の評価と異なればカウンターを 0 に戻す機能を f_2 として与えた. また, カウンターの初期値は 0 とした.

最後に f_3 に関しては, 予め定数として与えられる, 見ている着目点の変更率を用いて, 各着目点を見る確率を式 (4) に則り変更させることを表す.

以上から, 本シミュレーションの全体の流れを以下に示す. エージェントの顔の特徴部位から異常度が高い部分を検知し, 異常度に比例して扁桃体が活動する. ただし, この扁桃体の活動は感情の二重経路による二つの処理に分けられ, 時間的に早い段階における雑多な情報処理による活動と, これにやや遅れる詳細な情報処理による活動に分けられる. ここで, 早い段階の処理においては, ある一定値に満たない異常度は 0 として扱われる. この一定値は感情の二重経路における低位経路の情報処理に関する雑多さを表している.

次に, 扁桃体の活動が上昇すると, 異常度 $abn.$ に反比例して, 刺激に対する情動評価値が与えられる. 従って, この評価値 V は以下の式に従う.

$$V(t) = -abn. + (1 - abn.) \quad (5)$$

ここで, $1 - abn.$ は正常度を表し, これと異常度との大小で, 情動評価の符号が決まるように設定した. また, この情動評価が和算されていくことで刺激に対する評価が

決定される. また, 一方で, 情動評価値は, その正負の情報が海馬へと蓄積されていく. この符号が連続して同じである時, カウンターが増加する. このカウンターが増加するということは, 扁桃体が刺激に対して連続して定性的に等しい評価を実行していると考えられる. このカウンターの増加に伴って扁桃体の活動を抑える抑制度が上昇され, 扁桃体の活動が減少する. しかし, 本研究では, 海馬が直接扁桃体を抑制しているとは考えず, この扁桃体を抑制する仕組みとして, 前頭前野の機能に着目する.

図 10 各パラメータの定性的関係

眼窩皮質の機能に関しては広く研究が進められており, その多くの機能が考察されてきた. 眼窩皮質は扁桃体や海馬などの情動に関連する部位と相互の連絡を持つことが知られており [Kingelbach 04], これら機能の中でも「扁桃体における情動および行動発現を制御している可能性が示唆」されている [小野 05] ことは重要な知見である. 一方で, 背外側前頭皮質 [小野 05] や内側前頭皮質 [LeDoux 96](pp.295-297) も扁桃体への抑制に関与しているとされる. 従って扁桃体の活動が上昇すると抑制度が上昇するという点に関して, この前頭前野の働きを仮説として設けた.

5.3 シミュレーション結果

前節で述べた各変数の定性的関係を, 統計処理言語および処理環境であるフリーソフトウェア R ^{*3} によって記述し, 各部位に対する異常度, 低位経路における情報処理の雑多さ, 着目点の変更率をパラメータとして変化させ, 対象に対する評価値がどのように変化するかに関してシミュレーションを行った.

なお, 本シミュレーションでは, 各部位に対する異常度のうち, 目に対する異常度のみを考え, その他の鼻の

^{*3} The R Project for Statistical Computing: <http://www.r-project.org/index.html>

大きさに関する異常度や口の大きさに関する異常度は、異常なしか、あるいは異常があっても極めて小さい値であると仮定した。そこで、鼻の大きさに関する異常度を 0.0、口の大きさに関する異常度を 0.1 として与えた。また、低位経路における情報処理の雑多さに関しては 0.7 を超えないものは異常なしとするものとして与えた。

時系列に関して対象に対する評価値の変化と、扁桃体の活動度の変化を図 11 に示す。扁桃体の活動度が振動している点に関して、まず活動度の減少に関しては情動評価の符号が一定であると、前頭前野からの抑制が起こり、扁桃体の活動が抑えられるという点に関係があると考えられる。また、その次に活動度が増加している点に関しては、再び異常度が高いところに着目点が移動することで、扁桃体の活動が増加したためであると考えられる。

次に、ey1 が ey2 が 0.7 を超えていない場合は単調に評価が増加する一方で、ey1, ey2 が 0.7 を超えると評価値が全体的に減少する傾向があることが分かる。また扁桃体の活動に関しては、ey1 が ey2 が 0.7 を超えていない場合は全体として徐々に活動が減少していく傾向にあるが、ey1, ey2 のいずれか一方が 0.7 を超えると扁桃体の活動は減少せず、活動が継続されることが示唆される。また、ey1, ey2 のいずれか一方が 0.7 を超えている場合では、観察する顔の着目点をどれくらい変更しやすいかを表す変更率が高い場合に比べ、変更率が低いときは、時間が経過するに従い、エージェントに対する評価が負の方向へと大きく変化することが示唆された。すなわち、ある着目点を継続して見やすい場合は、エージェントに対して否定的な反応を抱きやすくなることが示唆された。

5.4 考 察

5.3 節で得られた結果から、異常度の値 0.7 を境にして評価値が全体的に増加するか減少するかが決定される。この 0.7 という値は、低位経路における異常度の検出フィルタとして設定した値であるため、0.7 よりも値が高いということは、異常が低位経路の段階で検出されるということであると考えられる。つまり、低位経路における雑多な情報処理において、異常であると検出される場合は、全体として対象に対する評価が下がる。これはモデルにおいて「先に人間と同等の処理を行う」という点に関して反する条件であると言える。

この原因として考えられることは、以下の二点があげられる。一点目は、今回のモデルにおいて、目、鼻、口に関する異常度をすべて等価に扱っているという点である。本視線計測実験や、Minato らの研究 [Minato 04] から、人間はエージェントの目に対して特異的に反応することが分かる。これは、人間の目に対する反応が特異的であることを示唆しており、鼻や口とは異なった対象として扱う必要があると考えられる。

二点目は、視線の変更率が一定であるという点である。これは、着目点の変更率が小さい場合は、異常度の大き

い箇所に常に視線を向けているということを表すため、異常度が極めて高い箇所があると評価が下落し続けることにつながる。低位経路の働きによって人間はエージェントに対して人間であると期待する一方で、高位経路によって異常な目を検知することで、期待と評価の間に齟齬が発生する。この齟齬に対して、実際に人間であるのかどうかの確証を取るように、目を除く他の情報（例えば口や鼻）に視線を向け、詳細な情報処理を行うと考えられる。このような枠組みは人間の選択的注意に関わると考えられるため、この点を踏まえたモデル設計が必要になると考えられる。

また、着目点のうち、いずれかの異常度が 0.7 を超えたところから、評価の値が振動するような現象が見られた。この振動は正の方向に評価がいくか、負の方向に評価がいくかが常に競合している状態であると考えられ、これまでのシミュレーション研究の結果では見られない。

6. 総 合 考 察

得られたモデルに対して、辺縁系、海馬、大脳皮質（前頭前野）、線条体をそれぞれの機能的側面からシミュレータ上で定性的に結合した。次に、人間の顔や人間の顔を模して作成された顔を仮想的な入力として与え、出力として入力に対する評価値および扁桃体の活動度の時系列的变化を得た。この結果、人間の顔を見ている場合は、対象に対する評価が持続的に増加すること、また扁桃体の活動は見られるものの、時間が経過するに従い減少することが示唆された。一般的に、扁桃体は人の顔を見る際に賦活すること、また繰り返し提示するとその活動が減少することが知られており、これはその現象を説明していると考えられる。また、人間ではない顔を見ている場合は、評価が減少傾向（あるいは振動）にあること、また扁桃体の活動が時間的に持続されることが示唆された。このような持続的な扁桃体の活動は、他の脳部位、特に皮質や側坐核へと伝達され、全体として脳活動が持続させられると考えられる。

一方で、人間の顔の形態に極めて近いエージェントを観察している場合、人間のエージェントに対する評価が増加減少を繰り返す（振動する）ことが示唆された。これは、対象に対する心的評価が快・不快を繰り返していることを示唆しており、人間がエージェントに対して抱く不気味さの様相を表していると考えられる。すなわち、不気味さとは、人間がエージェントに対して快状態にありつつも不快状態になる要素を持つ状態として位置付けることができると考えられ、一過性の感情という枠組みで捉えるのではなく、時系列的に混雑した快／不快の評価の不安定さとして不気味さを捉えられるべきであることが示唆される。換言すれば、エージェントに対する不気味さは単なる情報の齟齬ではなく、快／不快の両状態が生起している必要があることが示唆される。

図 11 時系列に対する評価値の変動(実線)と扁桃体の活動度の変動(破線) (左図: $ey1=0.2, ey2=0.4$, 中央図: $ey1=0.8, ey2=0.4$, 右図: $ey1=0.8, ey2=0.9$, 上段: 着目点の変更率 $c=0.2$, 下段: 着目点の変更率 $c=0.02$)

これまで、fMRI を用いて、人間と非人間観察中の被験者の脳活動がどのように異なるかを調査した研究が行われてきた。Saygin らは、人間、アンドロイド、機械的なロボットのそれぞれが手を振る動作を被験者に観察させ、fMRI によって被験者の脳血流量の変化を調べた [Saygin 12]。この結果、アンドロイドが手を振っている動作を観察した場合は、人間や機械的なロボットが手を振っている動作を観察した場合に比べて、側頭葉や頭頂葉、前頭葉を含む広範囲の脳部位が活動していることが示唆された。また、人間のような外見を持つアンドロイドは典型的な機械の動きをしないであろうという予想に反し、実際のアンドロイドの動きは機械的である。Saygin らは、このエラーが不気味の谷と関係している可能性があると考えしている。Saygin らの研究では観察対象が動作を伴うため、直接本研究と照らし合わせることができないが、不気味の谷生起メカニズムに関する予見は本質的に本研究のものと同一枠組みであると考えられる。すなわち、静止画像であっても人間の外見のような顔が知覚されたときは、人間は画像に写った人型エージェントを人間であると予想する。しかし、顔の細部にわたる情報を処理することで、その予想にエラーが返される。このエラーに対する解釈の中で想起される感覚が不気味の谷であると推察される。

以上から、本研究で提案したモデルから不気味さとは、人間に酷似したエージェントに対する快情動と不快情動の混在であると予見される。今後はこの複雑な情動状態がどのようにして不気味さにつながるのかを検証することが期待される。特に知覚の歪みや齟齬が不気味につながるという点に関しては、既往研究からは明らかになっておらず、本研究から得られた知見がこの関係性に示唆

を与える可能性がある。

7. まとめと今後の課題・展望

既往研究から構築された仮説に対して、実験を行い、脳機能の観点から人間に酷似したエージェントに対する否定的な反応の生起過程をモデル化した。具体的には、理論的モデルである既存モデルを、実際の脳機能の観点から再解釈・拡張を行った。さらにモデルをシミュレータに実装し、シミュレーションを通してその挙動を考察することで、モデルの妥当性・検証可能性を考察した。このシミュレーションによって、不気味さという感覚が、快情動と不快情動の混合状態として定義されることが示唆された。

今後は、神経生理学や計算神経科学の知見をもとに本モデルを詳細化し、その妥当性の検証を行う必要がある。この点に関しては、今回のシミュレーションでは各脳部位の結合について、常に一定の結合強度であるという課題が挙げられる。加えて、今回作成したモデルは、紡錘状回などの顔認知特有の情報処理機構に関してモデル化されていない。顔は、人間が他者を認識する上で重要な要素であるため、今後より詳細なモデルを構築するにあたり、これらの脳機能に関しても言及する必要がある。

情動反応という点においては、人間に対する類似度が異なるエージェントを観察している際に、生理反応に特徴的な差異が反映される可能性が考えられる。この生理反応の差異を抽出し、本モデルの妥当性を検証することが考えられる。また、今回実験で用いた刺激は男性と女性の画像であり、これが被験者の視線に影響を与えた可能性が考えられる。Cheetham らは、人間、アバター（人

間に対する類似度が低いエージェント), 人間/非人間カテゴリーの境界に位置するエージェントに対する視線の性質に性差があるかを検証している [Cheetham 13]. 従って, 今後は画像および被験者の性別をそろえ, より詳細な検証が必要であると考えられる. さらに, 実際の各部位との接続に関する問題は既往の, また今後の膨大な神経科学の知見をもとに整合性が取れるように構築する必要があると言える. また, 本研究では不気味さは脳機能を中心として考察したが, 不気味の谷のグラフの形状から, 単調増加関数と凹関数の和として考察することも可能である. 今後は, 関数の形状の観点から不気味の谷を説明するアプローチも検討する余地があると考えられる.

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Cheetham 13] Cheetham, M., Pavlovic, I., Jordan, N., Suter, P., and Jancke, L.: Category processing and the human likeness dimension of the uncanny valley hypothesis: eye-tracking data, *Frontiers in Psychology*, Vol. 4, No. 108, pp. 1-12 (2013)
- [Guenther 02] Guenther, F. H., Bohland, J. W., カラン 明子, Callan, D. E., 正木 信夫: 音カテゴリーの学習 - ニューラルモデルとそれを支持する実験結果 -, 日本音響学会誌, Vol. 58, No. 7, pp. 441-449 (2002)
- [Kingelbach 04] Kingelbach, M. L., and Rolls, E. T.: The functional neuroanatomy of the human orbitofrontal cortex: evidence from neuroimaging and neuropsychology, *Progress in Neurobiology*, Vol. 72, No. 5, pp. 341-372 (2004)
- [Kobayashi 01] Kobayashi, H., and Kohshima, S.: Unique morphology of the human eye and its adaptive meaning: comparative studies on external morphology of the primate eye, *Journal of Human Evolution*, Vol. 2001, No. 40, pp. 419-435 (2001)
- [LeDoux 96] LeDoux, J.: エモショナル・ブレイン: 情動の脳科学 (松本 元, 川村 光毅ほか訳), 東京大学出版会 (2003): *The Emotional Brain - The Mysterious Underpinnings of Emotional Life*, Simon & Schuster Paperbacks (1996)
- [MacDorman 09] MacDorman, K. F., Green, R. D., Ho, C.C., Koch, C. T.: Too real for comfort? Uncanny responses to computer generated faces, *Computers in Human Behavior*, Vol. 25, No. 3, pp. 695-710 (2009)
- [Minato 04] Minato, T., Shimada, M., Ishiguro, H., and Itakura, S.: Development of an Android Robot for Studying Human-Robot Interaction, *Proceedings of IEA/AIE Conference 2004*, pp. 424-434 (2004)
- [Moore 12] Moore, R. K.: A Bayesian explanation of the 'Uncanny Valley' effect and related psychological phenomena, *Scientific Reports*, Vol. 864, No. 2 pp. 1-5 (2012)
- [森 70] 森 政弘: 不気味の谷, エナジー誌, Vol. 7, No. 4, pp. 33-35 (1970) <http://www.getrobo.com/> (2013 年 2 月 16 日参照)
- [西条 05] 西条 寿夫, 堀 悦郎, 田積 徹, 小野 武年: 表情認知における扁桃体の神経機構, 日本薬理学雑誌, Vol. 125, No. 2, pp. 68-70 (2005)
- [Noma 06] Noma, M., Saiwaki, N., Itakura, S., and Ishiguro, H.: Composition and Evaluation of the Humanlike Motions of an Android, *Proceedings of International Conference Humanoid Robots*, pp. 163-138 (2006)
- [小野 05] 小野 武年, 西条 寿夫: 感情と知的情報処理の仕組み, 高次脳機能研究, Vol. 25, No. 2, pp. 116-128 (2005)
- [小野 12] 小野 武年: 脳科学ライブラリー 3 脳と情動 - ニューロンから行動まで -, 朝倉書店 (2012)
- [Saygin 12] Saygin, A.P., Chaminade, T., Ishiguro, H., Driver, J., and Frith, C.: The thing that should not be: predictive coding and the uncanny valley in perceiving human and humanoid robot actions, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, Vol. 7, No. 4, pp. 413-422 (2012)
- [Seyama 07] Seyama, J., and Negayama, R. S.: The uncanny valley: Effect of realism on the impression of artificial human faces, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 16, No. 4, pp. 337-351 (2007)

- [Shimada 07] Shimada, M., Minato, T., Itakura, S., and Ishiguro, H.: Uncanny Valley of Androids and its lateral inhibition hypothesis, *Proceedings of IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp. 374-379 (2007)
- [Steckenfinger 09] Steckenfinger, S. A., Ghazanfar, A. A.: Monkey visual behavior falls into the uncanny valley, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, No. 43, pp. 18362-18366 (2009)
- [Thomas 14] Thomas, N. A., Wignall, S. J., Loetscher, T., and Nicholls, M. E.: Searching the Expressive Face: Evidence for Both the Right Hemisphere and Valence-Specific Hypotheses, *Emotion*, Vol. 14, No. 5, pp. 962-977 (2014)
- [Wichmann 14] Wichmann, T., Delong, R. M.: 大脳基底核 (南部 篤訳), In Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J. (Eds.), カンデル神経科学 Principles of Neural Science Fifth Edition (日本語版第一版), 金澤 一郎, 宮下保司 (日本語版監修), メディカル・サイエンス・インターナショナル, pp. 963-978 (2014)
- [Yarbus 67] Yarbus, A. L.: Eye movements during perception of complex objects, In Riggs, L. A. (Trans. Ed.), *Eye Movements and Vision*, (Translated by Haigb, B.), Springer US, pp. 171-211 (1967)

〔担当委員: 片上 大輔〕

2014 年 8 月 25 日 受理

著 者 紹 介

田和辻 可昌 (正会員)

2013 年早稲田大学大学院人間科学研究科修士課程修了。現在, 同大学院人間科学研究科博士後期課程に在学中。関心は不気味の谷を通じた人間の他者認知を実現する機構の記述など。日本感性工学会会員。

村松 慶一 (正会員)

2014 年早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程修了。博士 (人間科学)。日本学術振興会特別研究員 DC, 早稲田大学人間科学術院助手を経て, 現在, 埼玉大学大学院理工学研究科助教。関心は印象に関する知識記述, 心の構造の知識科学的表現など。日本感性工学会, 日本色彩学会, 教育システム情報学会, 日本機械学会各会員。

松居 辰則 (正会員)

1994 年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士 (理学)。早稲田大学理工学部助手, 東京学芸大学教育学部助手, 電気通信大学大学院情報システム学研究科助教を経て, 現在, 早稲田大学人間科学術院教授。専門分野は, 感性情報処理, 知識科学, 数理統計学, e-learning など。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本感性工学会, 教育システム情報学会, 日本テスト学会各会員。