

早稲田大学審査学位論文
博士（人間科学）

ヒト型エージェントに対する否定的感情表出過程を表現する定性的脳機能モデルの構築
Qualitative Brain Function Model Explaining the Mechanism of Negative Emotion towards Humanlike Agent

2020年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科
田和辻 可昌
TAWATSUJI, Yoshimasa

研究指導担当教員：松居 辰則 教授

目次

第 I 部 序論	1
第 1 章 研究の背景	2
1.1 人間の他者認知	2
1.2 不気味の谷現象	6
第 2 章 研究の目的と手法	10
2.1 知の実現に対する構成論的アプローチ	10
2.2 否定的感情形成プロセスを説明する脳機能モデル	13
2.3 モデル化の観点	14
2.4 定性的な神経系モデルの重要性	15
第 3 章 本論文の論点と構成	16
第 II 部 顔の静的情報に対する神経系情報処理	19
第 4 章 顔の生物性判断における視線遷移	20
4.1 実験目的	20
4.2 実験手順	21
4.3 分析	21
4.4 結果	23
4.5 考察	25
4.6 人間に似たエージェントに対する二段階の情報処理	26
4.7 課題と限界	27
第 5 章 顔認知における否定的情動形成モデル	28
5.1 モデルの定性的記述	30
5.2 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	36
5.3 総合考察	41

5.4 独自性と限界	42
第 III 部 顔の動的情報に対する神経系情報処理	45
第 6 章 表情動作の典型性が人間の印象に与える影響	46
6.1 人型教師エージェント	46
6.2 本稿での論点と対象	47
6.3 関連研究	48
6.4 実験 1 : エージェント選定	49
6.5 実験 2 : 表情動作速度の非典型性が印象に与える影響	51
6.6 総合考察	55
第 7 章 表情認知における否定的情動形成モデル	58
7.1 表情認知過程を説明するモデル	58
7.2 シミュレーション	63
7.3 考察	65
7.4 課題と限界	66
第 IV 部 脳機能モデルの統一的記述体系	69
第 8 章 脳機能モデルを体系的に記述するための観点の提供	70
8.1 オントロジーによる脳機能の知識体系化の試み	70
8.2 ロール概念に基づく神経細胞群の構造オントロジーの構築	72
8.3 神経系におけるロール概念	73
8.4 デバイスとしての神経細胞群	77
8.5 否定的感情形成メカニズムの体系的記述に向けて	79
8.6 小括と課題	80
第 V 部 結論	81
第 9 章 総括	82
9.1 まとめ	82
9.2 本研究の限界と今後の課題	83

	iii
謝辭	85
參考文獻	87
研究業績	98

目次

1.1	心の理論を捉える二つの枠組みと第三の説明可能性 [94]	3
1.2	不気味の谷の概念図 ([63] を参考に作成)	6
3.1	本論文の構成	17
4.1	実験で用いた刺激顔画像	22
4.2	分析対象となる目鼻口の定義 (各色枠で囲まれた個所が右目, 左目, 鼻, 口を表す領域)	22
4.3	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)	23
4.4	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	25
5.1	本研究で提案する否定的情動反応形成モデル	29
5.2	視床 (Thalamus) と大脳皮質 (Cortex) との接続を表した模式図	32
5.3	STELLA において構築した本研究のモデル	33
5.4	(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	34
5.5	各パラメータの定性的関係	38
5.6	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 $c=0.02$)	39
6.1	選定実験で用いられた CG 人物 12 種類	49
6.2	選定実験で選定された CG 人物画像	51
6.3	図 3 各表情動作に対する「違和感」と「表情速度の適度」に関するプロット (左) と「快-不快」と「表情速度の適度」に関するプロット (右)	54

6.4	各エージェントに対する「違和感」の評価項目に関する SS 分析（上）と結果のパターンを簡易化したもの（下）。上部に向かうほど，評定点が低い（違和感がある）ことを表している。実線矢印は同表情内の順序関連，波線矢印は同速度条件での異なる表情間の順序関連を表す。また，F: Fast, M: Medium, S: Slow をそれぞれ表す。	57
7.1	本研究で構築した定性的モデル。ただし，attention は本研究では実装されていない。	62
7.2	Stella architect において実装されたモデル：モデルは6つのセクションからなり，エージェントの表情動作に対する快-不快評価の時間的変化がシミュレーションされる。	63
7.3	典型的な表情動作を行うエージェント（図上部）と非典型的な表情動作を行うエージェント（図下部）	65
7.4	比較機構が稼働していない場合の valence の時間的変化（下部が機能的に内部モデルを用いない場合）	65
8.1	各研究の位置づけの概念図。機能オントロジーの階層性は來村ら [45] を参考とした。	72
8.2	活性伝播オントロジー	75
8.3	衝動性眼球運動における活性伝播オントロジー	76

表目次

1.1 David Marr の三つの水準 [14]	3
2.1 脳の構造に関するモデルの記述対象と記述方法	14
6.1 実装された表情動作速度. 実際の実装にあたっては小数点第一位で四捨五入. (単位: frame)	52
8.1 神経系におけるデバイスの概念	77
8.2 衝動性眼球運動を実現する神経系におけるデバイス	78

第I部

序論

第1章 研究の背景

人間が社会的営みを行う上での知的機能の中でも、他者認知は重要な役割を果たしている。特に、他者が自身と同種であると判別すること（i.e. 同種認識）あるいは他存在を同種であると帰属させること（i.e. 擬人化）は、相対するインタラクションの相手の「意図」を理解する上で欠かせない機能である。一方、他者の感情を理解することもまた意図理解を円滑にするうえで必要不可欠である。本研究において対象とする他者認知とは「同種認識（擬人化作用も含む）を踏まえて、インタラクションを取る他個体の意図・感情など内的状態の推定」であると定義する。本節では、初めに人間の同種認識や擬人化に関する研究、および感情（とりわけ表情）に関する研究を俯瞰的に論じる。

1.1 人間の他者認知

1.1.1 心の理論

人間は相互に言語的・非言語的なコミュニケーションを取りながら社会生活を営んでいる。このような社会的動物としてみたヒト（ホモサピエンス）において、他者認知機能が重要な役割を果たしていることは言うまでもない。他者認知の中でも、特にコミュニケーションをとる相手を同種と判別あるいは同種であるかのように帰属させて認知することは社会的相互作用を考えるうえでも重要であると考えられる。なぜならば、他存在が自身と同種であるという認識をもつと考えることで、様々な共通の認知的枠組みを自他で共有していると考えることができ、他者理解の円滑化が促されると考えられるからである。他個体の行動の意図を理解することは「心の理論」（ToM: Theory of Mind）[81]として様々な分野から研究が進められてきた。特に、これまで「心の理論」に関する研究では理論説とシミュレーション説の二つの立場から説明が試みられてきた[94]。理論説は、自然科学の理論同様、「心」に関する経験的な理論（的知識）を獲得し、活用することで他者の意図を理解するものである。また、シミュレーション説は、信念や欲求から行動が実行されると考え、他者の信念や欲求を仮想的にもつことで仮想的な意図を形成し、行動の予測を行うことができると考えるものである。鈴木[94]は更にこれらの枠組みは「心の理論」を実現するメカニズムを（体系的に記述可能な）命題的知識が組み込

まれたものとしてみなしているとしたうえで、これらとは別に、実際のメカニズムという観点からパターン認識による「心の理論」の説明可能性の考え方も提供している。図 1.1 に、「心の理論」に関する主要な説明の枠組みを記す。

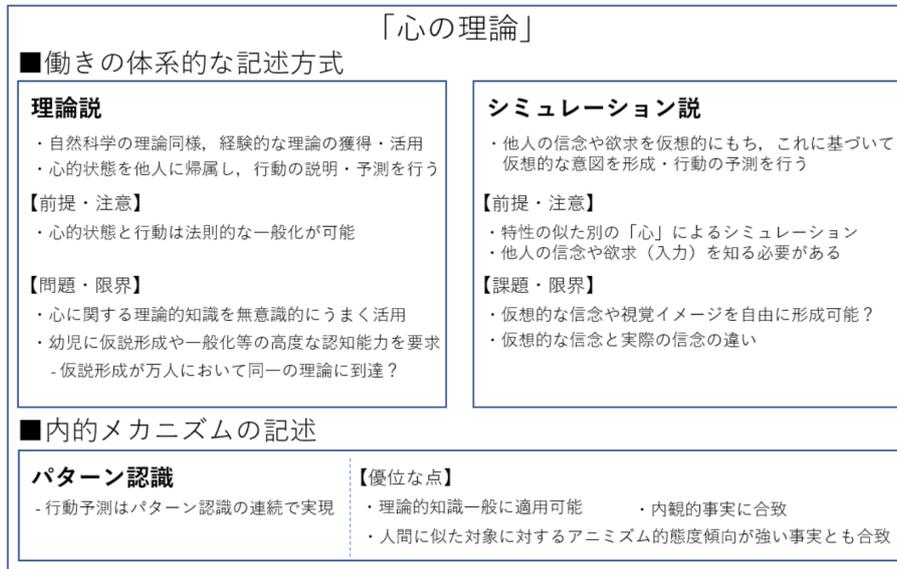


図 1.1: 心の理論を捉える二つの枠組みと第三の説明可能性 [94]

これら三つの考え方は、「心の理論」を有する存在、言い換えれば「他者の意図を理解する」主体である人間を情報処理システムとして捉え、「計算理論の三水準」から見直すことでお互いの関係を理解しやすくするものと考えられる。計算理論の三水準は、表 1.1 に挙げるように、「計算」「表現とアルゴリズム」「実装」の三つの水準からシステムを捉え、それらを統合的に理解することがシステムの本質的な理解につながるというものである [14]。このような観点から見れば、「心の理論」における理論説やシミュレーション説は「表現とアルゴリズム」の水準における議論であり、鈴木が提案するパターン認識 [94] は「計算理論」の水準における議論であると考えられる。

表 1.1: David Marr の三つの水準 [14]

水準	内容
計算	どのような計算を解いているか
表現とアルゴリズム	どのようなアルゴリズムで解いているか
実装	実際にどのような存在が計算を実現しているか

近年の神経科学的知見は更に「心の理論」の神経科学的基盤、すなわち、表 1.1 における

「実装」の水準に関する知見を提供しつつある。Frith は、「心の理論」における Mentalizing に必要な能力として、(1) 生物と非生物を区別する能力¹、(2) 他個体の視線を追跡し注意を共有する能力、(3) 目的指向の行動を表現する能力、(4) 自他の行動を区別する能力を挙げている [20]。この中で、上側頭溝 (Superior Temporal Sulcus) が生物的な動作に関与している点を指摘し、Mentalizing における神経基盤として重要であると述べている [20]。さらに、ミラーニューロン (Mirror Neuron) は他者の目的指向の行動を理解するうえで重要な役割を担っており、特に「心の理論」のシミュレーション説を支持するものであると考えられている [23]。これらの知見から近年では、他者認知において自己と他者は同一の身体モデルを共有しているという考え方が提案されている [65]。

1.1.2 典型的な顔の獲得と顔による意図推定

実際に他者の意図や感情を推定するとき、人間はどのような情報に注目しているのだろうか。様々な情報の中でも、顔や表情は人間にとって非常に重要な情報源であり、人間は他者の様々な意図や感情を表情から読み取ることができる。

まず、発達心理学的観点から見れば、乳児の段階から顔に対する選好性があることが指摘されている。例えば、Simon ら [90] によれば、乳児は bottom-heavy な情報よりも top-heavy な情報に対して選好性を持つことが実験的に示唆されている。さらに、生後一か月程度の乳児においては「顔」の形態的特徴として重要な両目と口を正しく配置した顔に対する選好性が高い [37] ことから、三点 (両目、口元) の適切な配置は人間にとって重要な情報であることが示唆される。一方で、顔認知は成長とともに熟達化すると考えられており、発達段階に合わせて特定の種における顔識別力の特化 (狭窄化: perceptual narrowing) が見られることも実験的に示唆されている [76] ([41] はこの点以外にも重要な文献をいくつか紹介している)。以上のことから、人間は発達の段階を経て、まず基本的な性質である顔の特徴 (パターン) 抽出機能によって様々な顔パターンを検出し、典型的な「顔」を学習によって獲得していくものと考えられる。

一方、顔情報に基づいた意図・感情推定においては、顔の動的側面、すなわち表情が重要な役割を果たす。表情は基本感情に分けられ [19]、これまで心理学的な観点から研究が進められてきた。また近年では、人間における顔・表情認知を実現する神経基盤も明らかになりつつある [28][75]、また、表情における基本感情の認知は文化には非依存であり、人間にとって広く共有された認知機能であることが示唆されている [19]。

¹Frith ら [20] らの論文において「生物」は animate という用語を用いて表現されている。

1.1.3 エージェントに対する意図推定

他個体の意図を推定するという事は、生物的な人間に対してのみ適用される能力ではないことも示唆される。近年、科学技術の進展に伴い、コンピュータシステム（コンピュータ上に実装されるアバターを含む）やロボットなどの「エージェント」が社会に広く浸透しつつある。歴史的に見れば、かつてこれらのエージェントと呼ばれる存在（特にロボット）は人間の道具としての位置づけが強く、生産性向上などの人間の円滑なタスク遂行を実現する上で物理的補助の役割を担うとされていた。一方、2000年代初頭に入るとAIBO（Sony）やパロ（産業技術総合研究所）の台頭に見られるように、人間の心的支援を行うロボットの開発が進められてきた。近年では、エージェントを人間社会の中に組み込んだ系を考え、人間から社会的な応答を誘発するシステムの振る舞い（「エージェントシー」[71]）を含めた人間とエージェントとの相互作用を研究する分野として、**Human Agent Interaction** の分野が台頭した [117]。このような中で、「心の理論」の枠組みにあるような「他個体においても意図や信念があり、それらに基づいて行動する」という考えは、**Human Agent Interaction** の分野においても重要な視点を提供している。Nass と Reeves が示す **Media Equation**[83] は、このような人間の他者認知の機能をエージェントへ（無意識的に）適用可能であることを示唆しているといえる。すなわち、ヒトではない他個体であるエージェントを人間は社会的な他者として位置づけ（i.e. 擬人化）、それらは意図や信念に基づいて行動すると考えることが可能である（ref. 大澤 [72] では擬人化と心の理論についてより詳細に議論している）。

このような擬人化において身体や表情を外的に与えることは、エージェントの意図の推定をより円滑に促す働きを持つ。人間同士の会話コミュニケーションに見られるように、エージェントとの「会話」においても身体や表情が重要であることは以前より指摘されている [10]。このため、人間にとってコミュニケーションの可読性が高くなるという点において、エージェントに対して擬人化を促すような設計を行うことは極めて重要であると考えられる。近年では、人間の外見に酷似させたアンドロイドを用いて、人間のコミュニケーションの本質を明らかにすることを志向したアンドロイド・サイエンス [34] もみられる。

1.2 不気味の谷現象

1.2.1 現象背景

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、合わせて単にエージェント）と人間の共生の在り方を考えるうえで、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感情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」[63]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1.2（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[63]。

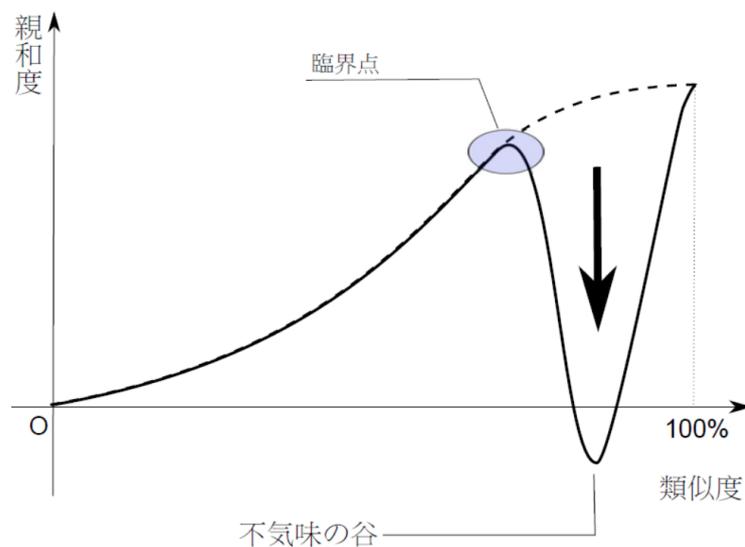


図 1.2: 不気味の谷の概念図 ([63] を参考に作成)

1.2.2 不気味の谷現象理解に取り組む意義

これまで多くの研究が、不気味の谷現象の理解を目指して多角的なアプローチで取り組まれてきた。この取り組みの意義は大きく二つの視点で与えることができる。一つ目の意義は、図 1.2 に見られるように、谷を超えることで高い親和度をエージェントが得られるという点である。このような高い親和度を得ることができれば、より人間とエージェントとが共生する社会を実現することができると考えられる。ところが、この谷を超えることの困難さは森 [63] の提唱に始まり、数々のメディアによって共有されてきた。そこで、不気味の谷を克服することを目指すのではなく、むしろ、いかに谷の手前で最大限の親和度を目指すべきであるとも指摘される [63]。このためにも、親和度が落ちる直前の「臨界点」にあたる個所と、その下落の要因を明確化する必要がある。

もう一つ目の意義は、不気味の谷現象の理解を通して、人間が有する同種認識の機能を理解することができるという点である。言い換えれば、ヒトがヒトとそうでないものをどのようにして見分けているのか、ひいてはヒトはヒトをどのように認識しているのか、ヒトとは何かという根源的な問いに対して貢献することができる [27]。石黒は、アンドロイドを人間に近づけていく中で、「不気味の谷をどのように超えるか、越えたならばなぜ超えられたかを理解することが、人間とロボットの相互作用、さらには、人間のコミュニケーションの原理に迫ることにつながる」(p.10) と述べている [34]。このように、不気味の谷現象を基点として、ヒトがどのようにしてヒトとそうでないものを弁別しているのか、つまり、ヒトの同種弁別の機能を解明する一助となるといえる。このような観点を強調するため、以降本稿で考えるヒト型指向のエージェントを特に「ヒト型エージェント」と呼ぶ。

まとめると、不気味の谷現象を理解する意義は、大きく二点存在するといえる。一点目は、人間と円滑なコミュニケーションをとることができる親和性が高いエージェントを構築するという社会的意義である。二点目は、ヒトがいかにしてほかの同種個体を認識しているかについて理解を進めることができるという学術的意義である。

1.2.3 多様な分野からのアプローチ

不気味の谷に関する研究はこれまで多数報告されてきた。体系的なレビューについては、Kätsyri ら [39] に詳しい。主に不気味の谷に関する研究は、ヒト型エージェントの外見に着目した研究が見られる。例えば、目の形 [88] や、肌のテクスチャなどの形態的特徴 [54]、また、人間の目に対する感受性と不気味さの関係性に関する研究 [87] がある。そのほかには、動作を伴うヒト型エージェントを対象とした研究 [11][86]、視聴覚のマルチ

モーダルに関する研究 [60], 表情表出における顔の上半分が不気味さに与える影響を調べた研究 [108] があげられる. さらに, 人間の情報処理を計算モデルで構築し, このうえで不気味の谷を解釈する計算論的アプローチ [62][89] も数少ないが見受けられる. これに加え, 幼児の認知機能に着目した研究も見受けられる. 幼児の例では母親と母親ではない女性, 両者をモーフィングした画像に対する幼児の視覚選好性を調べたもの [57] や, 発達段階に合わせてヒト型エージェントをどのように知覚するようになるかを実験的に検討する発達心理学的アプローチ [89] がある. これらに加えて, Lewkowicz らは, 生後 6,8,10,12 か月の幼児に人間の顔, ヒト型エージェントの顔, 形態的に目が大きな人型エージェントの顔を見せ, 発達段階と不気味の谷との関連性を調査した [53]. また, 人間以外の種 (e.g. マカクザル) で不気味の谷が見受けられるかを検証する比較行動学的アプローチ [92] によって, 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ことが示唆されている.

不気味の谷現象に関する説明パラダイム

それでは, これらの研究から得られた結果について, 統一的に説明する枠組みは存在するだろうか. 不気味の谷を説明するうえで, 知覚的齟齬 (perceptual mismatch) とカテゴリー曖昧性 (categorical ambiguity) の枠組み [39], あるいは予測誤差 (prediction error) [86] の枠組みが重要である. まず, (知覚) 心理学によって提唱された知覚的齟齬・カテゴリー曖昧性と不気味の谷の関連性について述べる. これらは言い換えると, ヒトのカテゴリー知覚の特質から, カテゴリーがあいまいな刺激に対して否定的な評価がなされるというものである. Cheetham らによると, 人はヒト型エージェントに対して, 「人間」と「非人間」に関するカテゴリー知覚を行っていることが示唆されている [12]. このため, 「人間」と「非人間」のカテゴリーの境界 (Category Boundary) においては, 各カテゴリーのいずれに帰属させるかという知覚過程において競合が起こると考えられる. この結果, ヒト型エージェントに対する評価を否定的なものにする, と考えられている [118].

これに対して予測誤差の枠組みは, Saygin らによって提唱された [86]. 一般的にヒトの脳は外界に対して predictive coding (予測) を常に行っている. したがって, うまく予測ができなかった刺激に対して脳の活動は強く活性化されると考えられる. このことから人間のような外見をもつアンドロイドは, 人のような動作を行うであろうというヒトの予測に反して機械的な動作を生成することから予測誤差が発生する [86].

動作を伴わない外見的特徴に関する研究

森の示した不気味の谷グラフ（図 1.2）に対して、類似度を如何に定義するかは重要な課題である。多くは（一方の端点を特定の CG エージェントやロボット、もう一方の端点を特定の人物とした）モーフィング画像を用いて刺激を作成し、刺激の段階的な変化を類似度として定義している。このように作成された一連の刺激に対する知覚心理学的実験から、人はヒト型エージェントに対して、「人間」と「非人間」に関するカテゴリー知覚を行っていることが示唆されている [12].

計算論的アプローチに基づく不気味の谷

これまでに紹介した心理学的実験をもとにしたアプローチに対して、人間の認知的情報処理をモデル化することで、不気味さがどのように表出されるかを説明するアプローチもみられる。一つは神経系の機能である側抑制に着目したモデル [89] であり、もう一つは知覚心理学における知覚のマグネット効果（perceptual magnet effect）に着目したモデル [62] である。人間の認知情報処理の各段階には側抑制の機能があると考えられている。この考えを用いて、人間に対する類似度が高い刺激、言い換えれば、類似度が最大となる個所の近傍における刺激に対して応答感度は抑制されやすくなることが考察された [89]。このような応答感度の抑制は情報処理が高次になるにつれて顕著になる。これらの段階的な側抑制を重ねていくと不気味の谷のグラフが得られる。一方で、知覚のマグネット効果の説明モデルを用いた研究については、先に見た知覚的齟齬に当てはまるモデルである。ここでは、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、それらによって生じた知覚のひずみが不気味さを生起させると考えられている。

1.2.4 本研究で対象とする「不気味の谷」の範囲

不気味の谷の大きな特徴として、人間に酷似したヒト型エージェントに対する否定的感情が形成されること、また、横軸に類似度を取り、縦軸に親和度をとったときに、親和度が「谷」の様相を示すことにある（図 1.2 参照）。この谷の様相を示すことについてみれば、Hanson らが指摘するように必ずしも「谷」として現象が確認されるとは限らないことがある [27]。どのように類似度を取るかは難しい課題であり、本研究では谷の様相の説明を行うことは対象としない。したがって、本研究では、不気味の谷の中でも「人間に酷似したヒト型エージェントに対して否定的感情がどのように形成されるか」という点に焦点を当てる。

第2章 研究の目的と手法

認知科学および人工知能の分野では、「作ることによる理解」(Analysis-by-synthesis)によるアプローチで人間の知の理解を進めてきた。その目指すところはやがて機能的観点による説明にとどまらず、知を実現する構造、すなわち神経科学的観点との接合を図ることで、人間の知を実現する構造-機能の体系的理解まで焦点があてられるようになった。本節では、このような人間の知に対する理解の歴史的背景の概観を示し、本研究がどのような立場で人間の知をモデル化するかについて説明する。この上で、説明の対象として否定的情動の形成メカニズムを対象とすることについて述べる。

2.1 知の実現に対する構成論的アプローチ

2.1.1 記号情報処理と並列分散処理

人間の「心」を理解することは多くの研究領域にとって重要な課題であり、興味の対象である。「心」に対する研究領域は今や心理学だけにとどまらず、情報科学、工学、神経科学などの多領域に渡り、学際的観点から「心」に関する現象を捉える動きにある。特に、20世紀後半での技術的革新、特にコンピュータ（計算機）の実現によって、人間の知を「計算」の観点、すなわち「心」のメカニズムを計算過程と考えることで、コンピュータによって「心」が表現可能であるという仮定は、情報科学的観点から「心」のメカニズムを理解するという可能性を生み出したといえる。この「心」の計算可能性を発端として、「作ることにより理解する」(Analysis-by-Synthesis) [112] という構成論的アプローチが台頭した。構成論的アプローチを考えるうえで重要なことは、対象である「心」の計算可能性、すなわちシミュレーションを通してトップダウン的に与えたモデルの振る舞いを検証することで、「心」の情報処理メカニズムを「模倣的に」近似することができることにある [91]。このように人間の「心」の情報処理をモデル化し、形式的記述によってコンピュータに実装可能な形で表現したものは認知アーキテクチャ (Cognitive Architecture) と呼ばれている。認知アーキテクチャにおいて最も初期の段階は人間の「心」の情報処理のうちでも推論や記憶などを研究対象とし、言語化あるいは記号化されたシンボル操作

の観点でアーキテクチャの構築を行ってきた¹。やがてこのようなシンボル操作に対して、より神経系の構造に着目した並列分散的な表現（PDP：Parallel Distributed Processing）で情報処理を記述する立場からの認知アーキテクチャが勃興した [22]。計算機科学者から見ればそれまでのシンボルを扱う（直列的な）情報処理の限界に対するブレイクスルーであったこと、神経科学者から見ればその生理学的観点の重要性を踏まえていることから、一つの重要なパラダイムシフトでもあったと考えられる [22]。このような中で、現在では様々な認知アーキテクチャが提案されている（例えば、ACT-R[4]、Psi[17]、MicroPsi[7] など）。

2.1.2 認知機能のモジュール化

先に見たように、人間の「心」を情報科学的観点から理解する試みでは、「心」の情報処理を計算可能な表現で記述することを目指してきた。このように人間の「心」を構成論的に構築する上で、「心」がいくつかのモジュールによって構成されているとする Fodor の考え方 [21] は重要である。Fodor の指摘する機能モジュールの仮定は、様々な認知機能をそのまま扱うのではなく、個別化されたモジュールを対象とした研究を行うというアプローチを実現したといえる。この仮定を受けて、人間の認知機能を、記憶、推論のように分化し、それらを個別の知的情報処理としてモデル化が進められた。一方で、このアプローチでは各機能を全体の認知機能から単離化したことから、人間の知的情報処理全体がどのように成り立っているか、という新たに大きな課題を生成するに至ったといえる（並列分散処理であるニューラルネットワークにおいて [5] による指摘があるが、これはニューラルネットワーク以外のモジュール化された認知アーキテクチャ全般に成り立つ課題であると考えられる）。このことを受けて、現在の認知アーキテクチャの構築においては、様々な認知機能を統一的に整理することが主要な課題であるといえる。

2.1.3 生理学的妥当性を有した認知アーキテクチャ

人間の知的情報処理は現象としてそこで起こっているが、必ず構造としての脳（と身体との協調 [13]）によって実現されている。このことから、人間の知的情報処理を理解するためには、その構造的観点である神経科学的妥当性を保証することは重要である。近年では、fMRI（functional Magnetic Resonance Imaging）や PET（Positron Emission Tomography）などの非侵襲的な脳機能イメージング法の技術の進展により、認知タスク時における脳活

¹しばしば知的情報処理はこのシンボルの意味での「心」の情報処理を指す意味で用いられる。

動の計測が容易となり、認知機能と神経系との対応に対する理解が飛躍的に進んでいる。また、2015年には雑誌 *Neuron* において「Cognitive Architecture」と題する特集号が組まれる [15] など、認知アーキテクチャと神経基盤との対応関係に関する理解に対して期待が高まっている。従来の認知科学や人工知能における「作ることによる理解」(Analysis-by-synthesis) では機能と振る舞いを如何に人間のそれに近づけることができるか、すなわち人間の知的情報処理の機能的近似 (模倣 [91]) に焦点が当てられていた。これに対して、神経科学的・生理学的妥当性を有した認知アーキテクチャの実現は、Reverse-engineering 的手法として、機能がどのように神経系で実現されているか、という構造の観点を提供する [15] ものである。

2.1.4 感情に関する構成論的アプローチ

これまでの節でも見た通り、人間の知的情報処理を情報科学的観点から明らかにしようとする試みにおいて、人間の「心」のメカニズムとして推論や記憶などが研究の対象とされてきた。しかし、人間の「心」においては、このような推論や記憶などの宣言的知識に基づく論理の世界以外にも、感情や情動などの「感性」と呼ばれる機能が存在する。かつて感情はとりわけ心理学の分野を中心として議論がなされることが多く、辻 [111] の指摘するように「環境や個人によって異なって感じる主観的情報」であること、「言語での記述が困難」であること、「最終的な評価はヒトに依存」していること、「感性」の定義の困難性などの理由から自然科学の分野では扱うことが難しいとされてきた。しかし、論理的な営みだけではなく、感情などの感性の側面は人間が生存する上で機能的に重要な役割を果たしていると考えられ、感性に関する情報処理も理解して初めて人間の「知」を理解することが可能になるものと考えられる。認知科学や人工知能における Analysis-by-synthesis の考え方を受け、日本では感性情報処理として人間の「感性」に対する自然科学的理解を進める動きが起こった [111]。ただし、このときの感性情報処理は、井口 [33] も指摘するように「より人間的な機能をもつシステムを実現する方法論の確立」を目的としており、人間の感性の内的メカニズムを解き明かすことではないと考えられていた。日本国外においては、Picard が、感情をコンピュータにも“実装”することで、より豊かな人間の支援や、コンピュータ自身の意思決定の強化に対する貢献もなされると考え、人間の感情を“理解”するコンピュータの実現の重要性を説いている (Affective computing[79])。一方で、論理的な側面である推論や記憶とは異なり、感性的側面である感情については未だに明らかでないことが多く、人間の感情を形成するメカニズムを理解することは重要な課題である。

2.1.5 認知アーキテクチャの限界と課題

人間の認知機能をいくつかのモジュールに分解することで、人間の認知機能と脳の構造とを接合・解釈する認知アーキテクチャにおいて、取り組まなければならない課題が二つあると考えられる。

一点目は、トップダウンに（モジュールが果たす）機能を与えることは、構造的観点を一度考察から外しており、構造はそのような機能を果たす存在として解釈的に定義しなおされているという課題である。つまり、実際の神経系が「どのように」その機能を実現しているかについての視点ははじめ想定されていない。このため、実在する神経系の構造と接合する際に乖離が起こる可能性がある。この課題は、トップダウンだけでなくボトムアップに構造が「どのように」その機能を実現しているかという観点から対象を捉えなおす必要があることを要請する。すなわち、「何が」「どのように」振舞うことで全体の機能を実現しているのかという記述が求められる。したがって、機能を部分機能に分解することで、それらの部分機能がどのように達成されることで全体として認知機能が達成されるのかという視点が必要である。

二点目は、各モジュールや部分機能の設定方法における視点に関する課題である。このような脳機能をモジュール・部分機能に分割するというアプローチでは、各モジュールなどの設定方法は想定する（認知的）タスクや機能分解の在り方などにおいて研究者の視点に大きく依存している。このため、認知アーキテクチャ（およびアーキテクチャに基づいた脳機能モデル）におけるモジュールは、研究者にとっても異なった定義がなされているのが現状であり [106]、言い換えれば、設定されたモジュールや部分機能は研究者にとって独自性が高く、アーキテクチャやモデル間で各モジュールが比較・参照可能な形で記述されていないと考えられる。したがって、各モジュールがどのような観点で記述されているのかについての統一的な視点を提供することは、多くの神経系の機能と構造を捉える枠組みを横断的かつ体系的に整理・明示化することにつながり、各アーキテクチャやモデルに関する知識の共有と参照を可能にすると考えられる。

2.2 否定的感情形成プロセスを説明する脳機能モデル

本研究では、ヒト型エージェントに対する人間の否定的感情の形成プロセスを説明する脳機能モデルを提案することを目的とする。人間の高次認知処理を実現するメカニズムを原理的に理解するためには、それを実現する構造的基盤である神経系を踏まえたモデル化が欠かせない。本研究で具体的に対象とする情報処理プロセスは二点ある。一点

目は、人間の顔静止画における顔認知処理プロセスおよび、そこから誘発される否定的な感情形成プロセスである。二点目は、人間の表情動作に対する表情認知処理プロセスおよび、そこから誘発される否定的な感情形成プロセスである。これらは互いに、人間の他者認知において重要な役割を担う「顔」の情報に基づく情報処理プロセスである。

2.3 モデル化の観点

人間の認知機能を理解する上で、脳の構造（神経系）とその系の挙動と機能の間の結合は重要な課題である。神経系の構造には階層性があり、イオンチャネルの開閉といったミクロな視点から大脳皮質や皮質下間の大規模なネットワークを捉えたマクロな視点まで、様々な研究が進められている [77]。このような脳の構造とそれらの構造に基づいたモデルの記述対象およびその記述方法について概観したものを表 2.1 に示す。

表 2.1: 脳の構造に関するモデルの記述対象と記述方法

脳の構造 [77]	記述対象	モデルの記述方法
全脳 (Whole-Brain Networks)	認知機能	認知的な機能モデル・計算モデル
システム (Systems)	各細胞集団の機能	(e.g. Artificial neural network, グラフ理論の数理)
マップ (Maps)		
回路 (Circuits)	各ニューロンの結合関係	⇕ 生理実験に基づく微分方程式
ニューロン (Neurons)	膜電位の応答強度	
シナプス (Synapses)	イオンの放出量	
分子 (Molecules)	ホルモン分子の放出機序	(e.g. Izhikevich model [35], Hodgkin-Huxley Model [31]) 定性的表現

2.3.1 定量的な神経系モデルの限界

神経回路に対する研究は盛んに行われており、ネットワーク構造の観点から各脳部位が有する機能について検討する試みもなされている [78]。一方で、神経回路の情報は電子回路とは異なり、その構造に関する知識は定性的な記述にとどまっており、定量的な理解が十分になされていないと考えられる。伊佐 [32] は、従来の神経回路の実験的研究は「操作性のなさ」と「定量性のなさ」に問題があるとし、操作性の問題については光遺伝学の台頭による問題解消への期待がされること、定量性の問題については解剖学的構造とその機能の全貌を知ることが問題解消において重要であるとしている。確かに定量的な理解へのアプローチは神経系のメカニズムの理解を進めるうえでは極めて重要であり、神経細胞間の振る舞いに関する定量的な関係を理解することで、得られた知見は

シミュレーションを通じた系全体の大域的な挙動の把握へと応用されることが期待される。一方で、神経系における各神経細胞間の定量的な関係は、系全体の伝播の在り方を複雑化し、どの神経細胞がどの神経細胞を活性化させ、それが系全体にどのような影響を与えたかという因果関係を理解することが困難になるものと考えられる。例えば、非常にミクロな視点のモデル（イオンチャネルの開閉に関するモデル）から系全体の振る舞いを解析することは膨大な多元連立微分方程式を解く必要があり、もはや解くことすら困難になると考えられる。また、ややマクロな視点に目を移したとしても、定量的な連立微分方程式を解くという過程においては、系の因果的作用に対する理解との間には乖離が存在する。これは、定量的な関係で記述された連立微分方程式などの数理モデルが、因果関係を陽に記述していないという問題 [67] に起因する。つまり、確かに定量的な微分方程式によって系全体のシミュレーションを行うことは重要であるが、それでも、大規模な定量的シミュレーション結果に対する解析困難性と解釈困難性の観点から、大規模な定量的モデリングには限界があると考えられる。

2.4 定性的な神経系モデルの重要性

これまでに取り上げた課題に対して、知識情報科学的立場に立てば、(1) 神経生理学者や解剖学者が培ってきた大規模な知見を統一的な観点で記述・整理し、(2) 人間・コンピュータ双方にとって可読・参照可能な形で表現すること、また(3) (不完全であっても) 体系化された情報をもとに神経系がどのように振舞うかを人間のナイーブな思考の在り方を参考にして推論を行うことは重要なアプローチになると考えられる。そこで本研究は、人工知能研究において特にオントロジーおよびその方法論の一つである定性推論 [97] を採用し、特定の神経回路における構造と振る舞い、および構造が神経回路において果たす役割について体系的に整理する枠組みについて検討する。また、各研究者が独自の視点でモジュールを定義してきた現状に対して、モジュールの定義に関する統一的な視点を提供することが重要であり、構築した各脳機能モデルは、機能に関する知識の再利用性と統一性の観点から整理される必要があり、拡張デバイスオントロジー [45] の枠組みで脳機能を体系的に整理することが重要になると考えられる。したがって、本枠組みによる記述に則ることで、多くの神経科学的知見に矛盾なく、認知機能の実現を達成する構造の割り当てが可能となることが期待される。

第3章 本論文の論点と構成

本論文は、図 3.1 に示す通り全五部で構成される。第 I 部の序論に続き、第 II 部ではヒト型エージェントの顔静止画に対する人間の知覚情報処理、およびその特異性を説明するための脳機能モデルの構築を試みる。続く第 III 部ではヒト型エージェントの顔動画、すなわち表情動作に対する人間の知覚情報処理、および表情認知を表現する脳機能モデルの構築を試みる。これらを受けて第 IV 部では、構築する脳機能を体系的に整理するためのアプローチとしてオントロジーに着目し、脳機能モデルをどのように位置づけるかについて述べたうえで、これまでに構築した神経系の構造オントロジーについて議論する。最後に、第 V 部の結論では、構築した脳機能モデルの成果を総括し、各対象領域における貢献と課題について述べる。

第 II 部の第四章では、ヒト型エージェントの顔静止画に対する人間の知覚情報処理に関して視線計測を用いた実験を行ったので、この成果について述べる。実験の結論として、ヒト型エージェントに対する人間の情報処理プロセスは二段階のプロセスがあることが示唆された。続く第五章では、この二段階の情報処理プロセスを説明するための脳の機能モデルを構築し、「不気味さ」に関わると考えられる否定的な情動形成がどのようなものかについて説明を行う。

第 III 部では、まず第六章において、ヒト型エージェントにおける表情表出速度の典型性が人間のエージェントに対する印象にどのような影響を与えるかについて心理学的実験を行った。実験の結果、(1) エージェントの外見に対する評価に依存して、表情ごとに表出速度が印象に与える影響が異なること、(2) 表出速度が典型的速度よりも遅い場合は否定的な印象を抱くことが明らかとなった。続く第七章において、表情速度の非典型性に関する情報処理を実現する脳機能モデルを構築し、表出速度の非典型性が否定的な印象を形成する過程について説明を行う。

第 IV 部では、第 II 部および第 III 部で構築した脳機能モデルを体系的な枠組みの中で位置づけるために、デバイスオントロジーという観点で脳を捉える必要性について述べる。

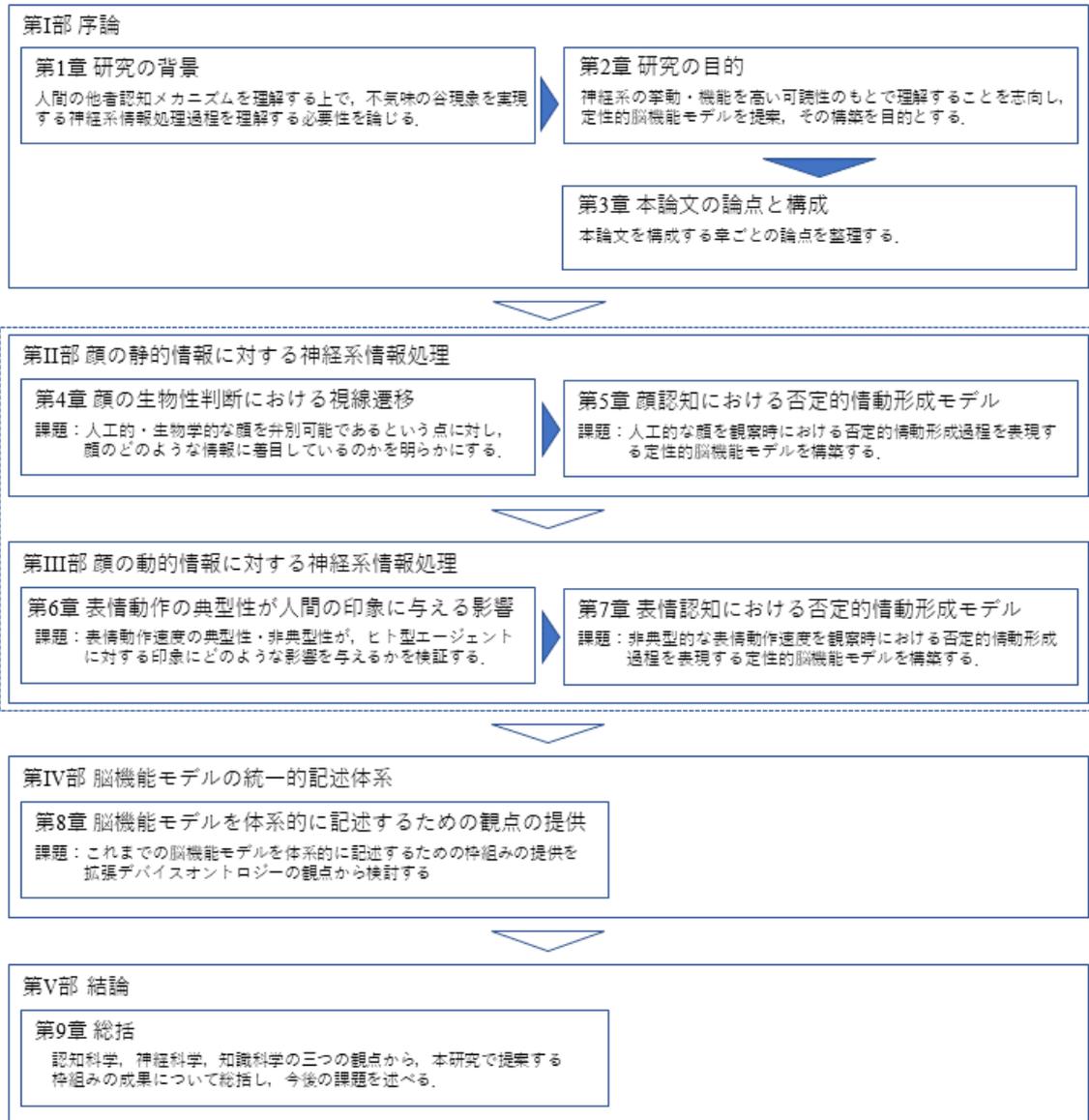


図 3.1: 本論文の構成

第II部

顔の静的情報に対する神経系情報処理

第4章 顔の生物性判断における視線遷移

本研究の目的は、ヒト型エージェントの静止画に対する人間の顔情報処理の特異性を明らかにすることである。まず、ヒトに類似した外見を有するエージェントと人間の顔画像を用いて、自由観察中の実験参加者の視線を計測した。この結果、人間でないと判断されたヒト型エージェントの右目に対する停留時間は、人間を観察している際の右目の停留時間と比較して、定性的に増加することが示唆された。本結果はヒト型エージェントに対しては、人間の顔を観察しているときと同等の処理と、それに続く人型エージェント特有の顔情報処理の二段階の情報処理がなされることを示唆しているものと考えられる。尚、本章および次章は田和辻ら [98] の内容を記したものである。

4.1 実験目的

本章では、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 [59]。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 [120] 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）に対す視線停留頻度をインタラクションの時間全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みられるかを、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。したがって、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。

4.2 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4.1に示す。それぞれ、(a)人形、(b)CG描写された男性、(c)女性のヒト型アンドロイド、(d)CGで作成された女性、(e)人間の男性である¹。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。予め被験者には各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、画像が人間であると思ったら「○」、人間でないと考えたなら「×」を、手元に用意した用紙に記入するよう指示した。回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対して、(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জ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。

4.3 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[120]。そこで、これらを特徴部位として各々に対する視線停留時間を導出し、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(ナックイメージテクノロジー製)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

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/moeez/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 4.1: 実験で用いた刺激顔画像

の停留時間の合計で定めた。例として図 4.2 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。

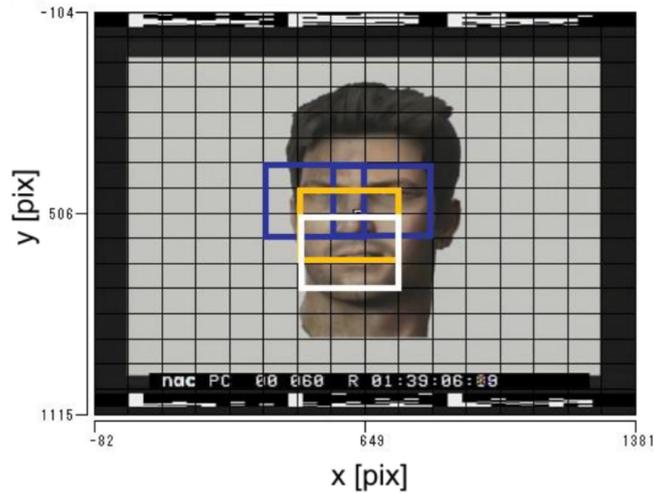


図 4.2: 分析対象となる目鼻口の定義（各色枠で囲まれた個所が右目，左目，鼻，口を表す領域）

4.4 結果

4.4.1 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 4.3（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 4.1 (b)）が 19.1%，アンドロイド（図 4.1 (c)）が 19.1%，人形の画像（図 4.1 (a)）が 28.6%，CG 画像 1（図 4.1 (d)）が 90.5%，人間（図 4.1 (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」、全ての被験者が「人間」として判断した人間画像を「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もつ 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。

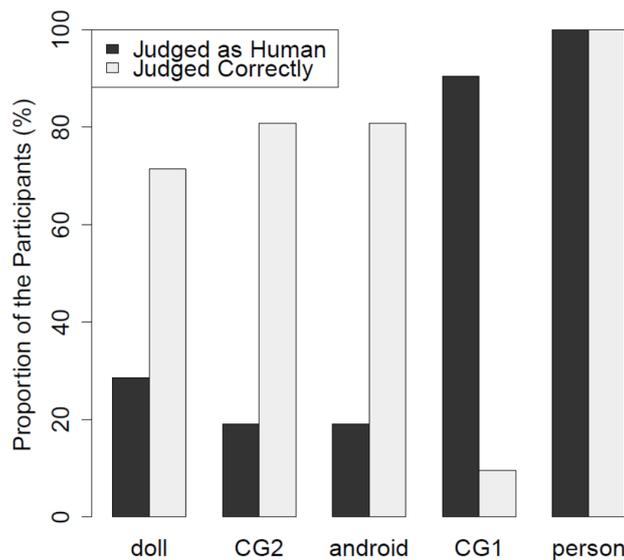


図 4.3: 各画像に対して人間であると判断した人物の割合（黒）と正答した人物の割合（白）

4.4.2 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 ($t(22) = 0.00, p = 1.00$).

4.4.3 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 4.4 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, 口に関して有意差及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及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 ($t(12) = 2.05, p = .062$).

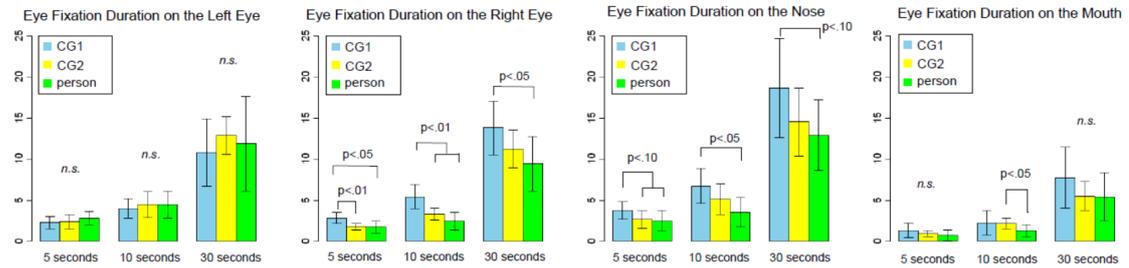


図 4.4: 観測開始から 5 秒, 10 秒, 30 秒間の被験者の左目, 右目, 鼻, 口に対する視線停留時間 (秒) の平均

4.5 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」であると判断している. 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, 人間への類似度を変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 [12]. 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数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着目すると, 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したがって, 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 [59] 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」観察時とは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[107]。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、という考察している。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したが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察されたことから、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。

4.6 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）近くの場合はアバター（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[12]。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荒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[12]。この点から考えると、人間やCG画像2に関しては、人間／非人間であると想起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ため、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られ始めた。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。

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り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とが示唆された。

4.7 課題と限界

本研究で比較された二つの CG 顔画像には男女の顔が用いられている。今回の実験においては主観的に各顔画像の類似度を定義しているが、より客観的に類似度を定義する場合はエージェントの顔における性別と人間らしさの関係における等価性を十分に検討する必要があると考えられる。CG の顔の性差に関する研究として、Tinwell ら [109] は、女性の CG と男性の CG の表情動作において顔上半分の動作を欠如させたときに、(1) 男女ともに欠如させていない場合と比較して不気味に感じられること、(2) 女性の CG および女性の顔（動作）よりも、男性の CG および男性の顔（動作）の方が不気味に感じられることがあると報告している。この研究における性差による影響は CG 顔による運動（表情動作）を対象としているため、顔の静止状態に対する評価に対して直接関係性を論じることはできないが、CG における性差が人間の顔・表情認知に影響を与える可能性は無視できない。この課題は、エージェントにおける類似度をどのように定義するかに関する重要な課題である。不気味の谷の研究においては、類似度（人間らしさ）や不気味さに一貫した定義がなく [39][100]、このことから、与えられた刺激が妥当性のある刺激となっているか、得られた結果がどこまで一般化可能かについての議論が困難である。類似度や不気味さの定義、あるいは各研究における各用語の使われ方について今後はより詳細な議論あるいは体系的な整理が必要であると考えられる。

第5章 顔認知における否定的情動形成モデル

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 [62] 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。この上で、ヒト型エージェントの「顔」に対する否定的感情の形成プロセスを説明する脳機能モデルを構築し、シミュレーションで得られた結果について述べる。

5.0.1 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枢を担っている。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 [70]、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經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經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 [52]。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 [89]。

5.0.2 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。

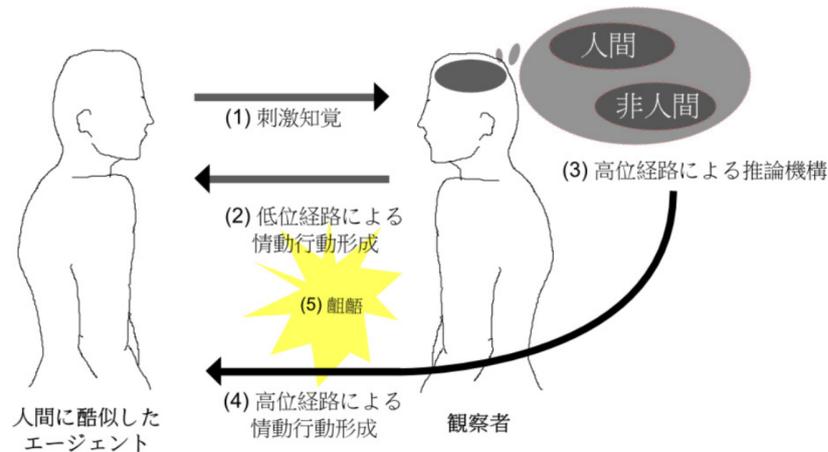


図 5.1: 本研究で提案する否定的情動反応形成モデル

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 [26]。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 5.1 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。

5.0.3 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（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、報酬系に大きくかかわる脳部位である線条体 [114] 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 [114]。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。

5.1 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。

5.1.1 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 [52]．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 [70]．さらに，扁桃体は，顔，特に表情に反応すること [70]，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 [66] 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 [114] 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．

$$\frac{dV}{dt} = (\kappa - V)V \quad (5.1)$$

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した．また，対象の目を見る時，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，

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}a(X_j) &= \sum_{i \in \{1, \dots, n\}} \omega_{ij} \text{sign}(a(X_i) - \theta_i) \\ &\quad - \sum_{k \in \{1, \dots, n\}} \omega_{jk} \text{sign}(a(X_j) - \theta_j) \end{aligned} \quad (5.2)$$

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ら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 STELLA¹を用いた。このシミュレータでは、stock と呼ばれる変数に対して、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 の値の時系列的変化（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。

5.2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。

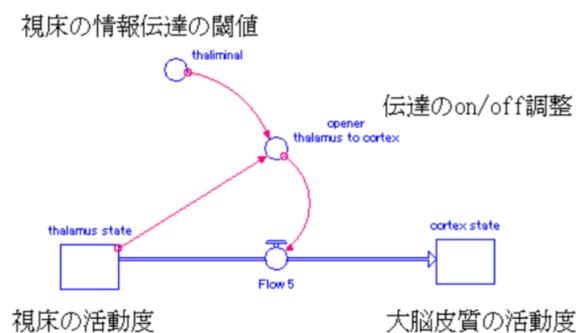


図 5.2: 視床 (Thalamus) と大脳皮質 (Cortex) との接続を表した模式図

構築したモデル全体の概要を 5.3 に示す。大きく Evaluation とした評価機能の機構と、それ以外の Connection とした各脳部位の接続記述からなるモデルである。また、入力と

¹isee systems: STELLA[®], Systems Thinking for Education and Research <http://www.iseesystems.com/software/education/StellaSoftware.aspx>

してエージェントの目の形態的特徴（強膜の広さ [46] と目の大きさ [88]）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．

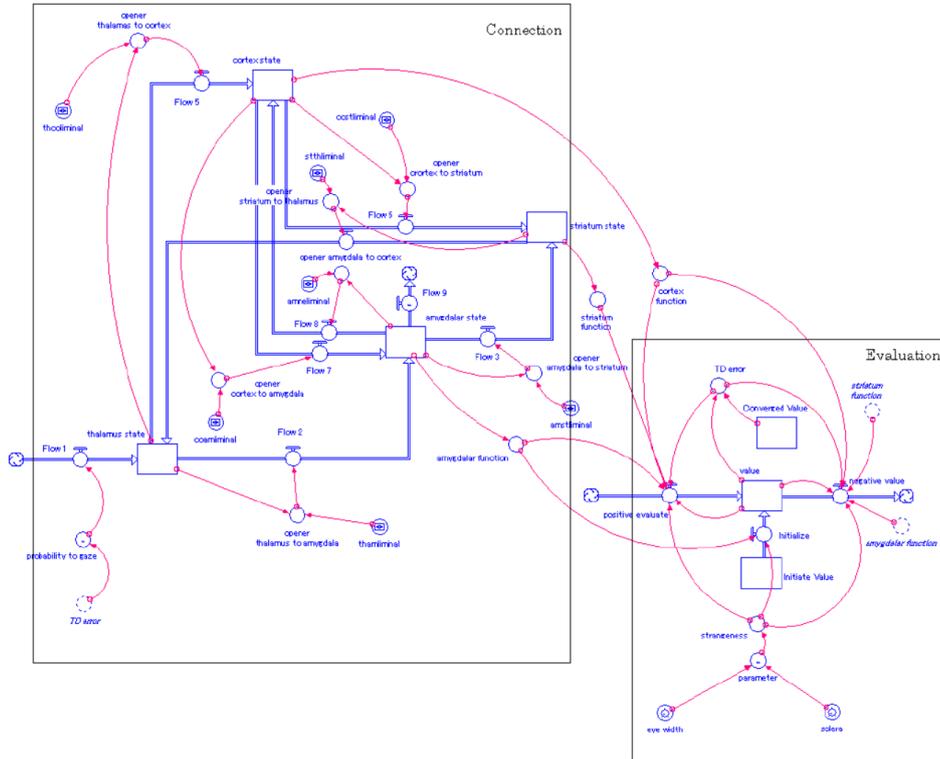


図 5.3: STELLA において構築した本研究のモデル

5.1.2 対象に対する評価値の時系列的変化

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関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関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，それらの具体的な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

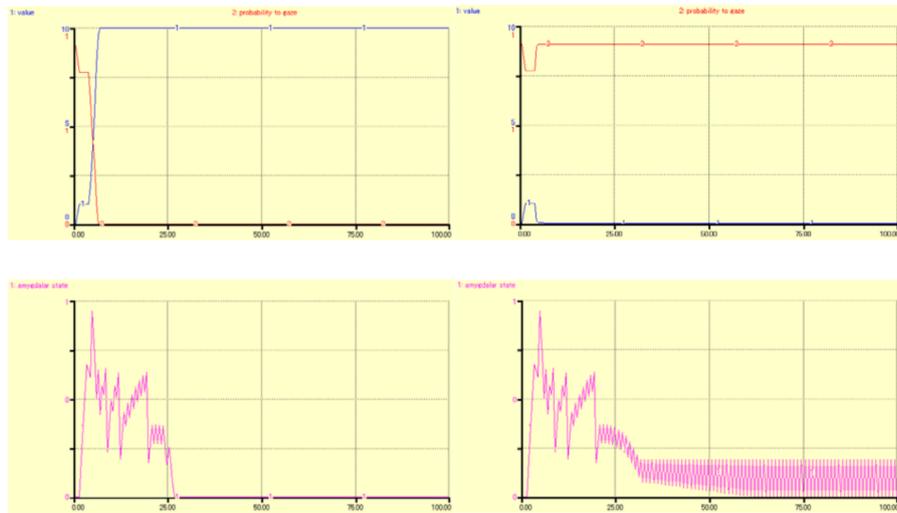


図 5.4: (上図) 人間の目 (左) および人間の目と異なる構造のものを観測中の評価と対象を見るという行為の選択確率の時系列的变化. (下図) 人間の目 (左) および人間の目と異なる構造のものを観測中の扁桃体の活動度の時系列的变化

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 $k - V$ の時系列的变化が 5.4 (左) として、扁桃体の活動度の時系列的变化が 5.4 (右) として得られた。5.4 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。

5.1.3 考察と課題

5.1.2 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、5.4（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。5.4（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 5.4（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表している。このとき、5.4（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 [59]。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、積極的に他者を知ら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ると考えられる。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。

5.2 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。

5.2.1 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。

$$P_{gaze}(X = \lambda) \equiv \frac{abn(\lambda)}{\sum_{k \in \Lambda} abn(k)} \quad (5.3)$$

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。

$$\Delta P_{gaze}(X = \lambda) = \begin{cases} -c & \text{視線が向けられていた場合} \\ c/3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.4)$$

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。

5.2.2 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5.5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 $\text{abn}(t)$ とする関数である。すなわち、 $\text{abn}(t)$ 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 $\text{abn}(\hat{\lambda})$ 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 [70](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 [66]。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 [70] 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、各单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(5.4)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。

$$V(t) = -abn. + (1 - abn.) \quad (5.5)$$

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とができる。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。

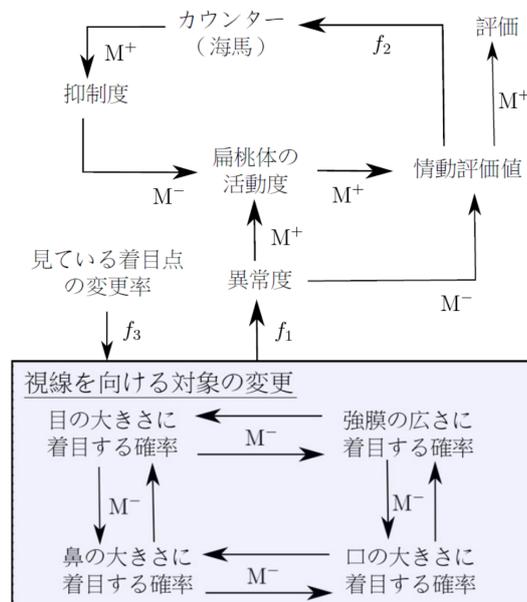


図 5.5: 各パラメータの定性的関係

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 [44]、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 [69] ことは重要な知見である。一方で、背外側前頭皮質 [69] や内側前頭皮質 [52](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。

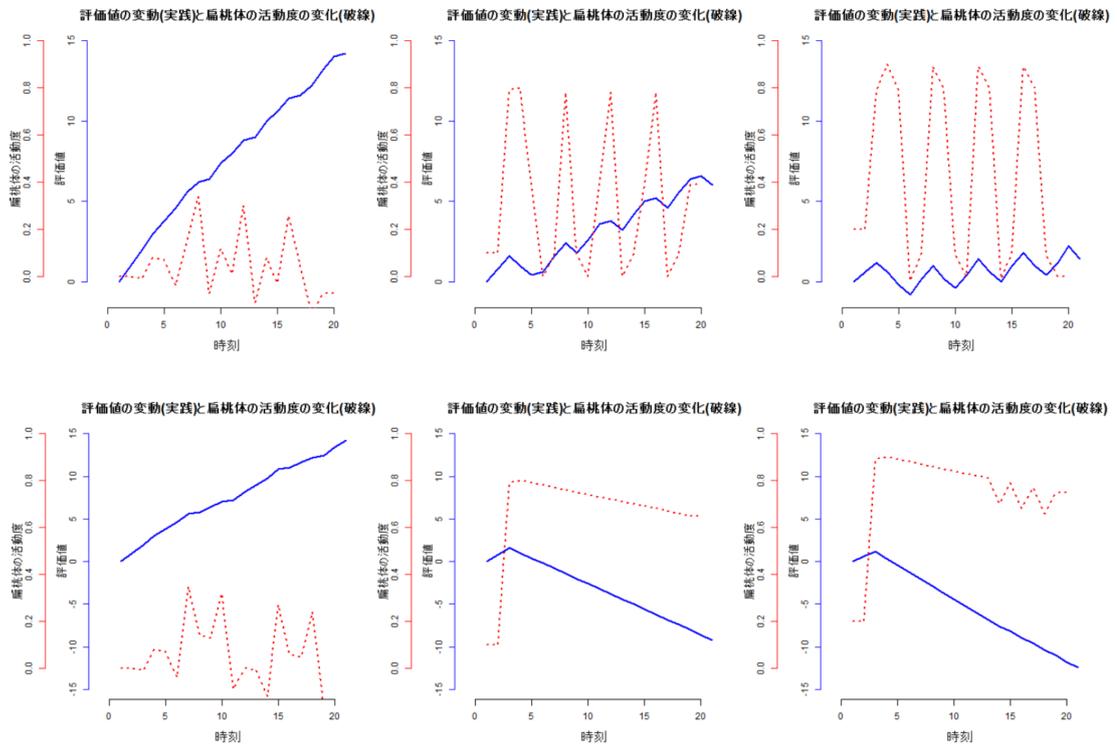


図 5.6: 時系列に対する評価値の変動(実線)と扁桃体の活動度の変動(破線) (左図: $ey_1=0.2, ey_2=0.4$, 中央図: $ey_1=0.8, ey_2=0.4$, 右図: $ey_1=0.8, ey_2=0.9$, 上段: 着目点の変更率 $c=0.2$, 下段: 着目点の変更率 $c=0.02$)

5.2.3 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 R²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。

²The R Project for Statistical Computing: <http://www.r-project.org/index.html>

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5.6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か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か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。

5.2.4 考察

5.2.3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[59]からも、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、異常度の大きい個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

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。

5.3 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。

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[86]。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はできないが、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じ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。

5.4 独自性と限界

本研究のモデルと関連して、松本ら[58]のサル側頭葉の顔細胞ダイナミクスのモデルと比較することで本研究の独自性について述べる。松本らは神経科学的な構造、すなわち、サル側頭葉の顔細胞のダイナミクスという観点から一つのモジュールの機能（サルの個体分類）を創発的に説明している。これに対して本研究では、認知科学的観点から対象の評価を担当する扁桃核や期待報酬を決定する大脳皮質など、各機能モジュールに対応する脳部位の割り当てとそれらの相互作用という観点から機能全体（人間か人間でないかに応じた視線遷移）を説明している。この点から見れば、本研究では、神経系の広範囲にわたって機能をモジュールに分割して、それらの神経伝播の中で不気味の谷に関わる現象の記述を試みているという点で、認知科学的な立場から機能モジュールへの分解と脳機能の対応を広範囲の神経系に渡って試みている点で独自性があると考えられる。

一方で、本アプローチの限界として、例えば扁桃核を否定的情動評価の機能を有する

モジュールとして仮定をおいているが、扁桃核は否定的情動評価だけでなく、報酬予測に関しても重要な働きをもつことが指摘されている [105]. 扁桃核がどのような機能を有するかについては今後さらなる検討が必要である. また、これらのモジュールの中で実際に神経系がどのようにして計算を実行しているのか、についてはブラックボックス化されている. したがって、より詳細の構造と振る舞い、すなわちどのようなモジュール内の構造がモジュールの機能を実現しているのか、については本モデルでは議論することができないという限界がある. また、今回のシミュレーションの結果、「不気味さ」に関する評価の様相 (i.e. 評価の振動) が得られたが、このシミュレーション結果を導く構造は様々あると考えられる. 今後はこの構造のうちの一部をモデル上で破壊し、そのシミュレーションでの挙動を観察、臨床的知見との整合性を考察することで、モデルの妥当性検証が必要になると考えられる.

第III部

顔の動的情報に対する神経系情報処理

第6章 表情動作の典型性が人間の印象に与える影響

本研究の目的は、ヒト型エージェントの顔の動的側面である表情動作の典型性が観察者の印象に与える影響を明らかにするものである。具体的には、人間の一般的な表情表出速度で実装された表情（典型動作）と典型動作速度から逸脱させた非典型的な表情動作速度で実装された表情を実験参加者に観察させた。この結果、(1) 外見で否定的な印象を与えるヒト型エージェントの笑顔動作は表出速度を速めると否定的な印象を形成させること、(2) 表出速度を遅くすると笑顔・怒り顔に依存せず否定的な印象を観察者に与えることが明らかとなった。尚、本章は田和辻ら [102] の内容を記したものである。

6.1 人型教師エージェント

教育・学習支援に関する研究において、ロボットやCGアバターを教育エージェントとして用いることに対する期待は益々広がりを見せている [43][56]。特に近年では、学習者が抱く学習パートナーへの心理的抵抗感を低減させるという観点から、ロボットを適応的支援における学習パートナーとして導入する試みもなされている [1]。学習パートナーとして教育エージェントを考えると、その外見や振る舞いが学習者に与える心的影響は極めて大きく、事前のデザイン指針の決定は重要な課題となる。ロボットは一度作成をしてしまうとデザインの変更を行うことが難しい。これに対し、CGアバターは特にその外見やその動作生成における自由度の観点から見て試作案の製作コストが低く、また、学習者に合わせ学習エージェントの様態を変更することが可能である。これらの点から、多様な教育エージェントの外見や振る舞い（例えば、人間への高い類似度を有した外見および表情生成など）を検討する必要がある場合にはCGアバターを用いることが有効な手段となる。

近年CG技術の進展により、CG描写された教育エージェントをヒトの外見に似せて作成することが比較的容易になっている（本研究ではこのようなエージェントを特にヒト型教育エージェント（Humanlike Pedagogical Agent: HPA）と呼ぶ）。ヒトの外見にリアルに近づけたエージェントを用いることによって、エージェントの振る舞いを学習者

はより直感的に認知できるという利点がある。また、漫画風に描写された HPA と比較して、リアルに描写された HPA のほうが教育における学習効果が高いことも示唆されており [6]、今後はよりリアルな外見を有した HPA の利用が想定される。また、このような HPA と学習者とのコミュニケーションにおいて、HPA の非言語情報、中でも表情表現は重要な役割を果たす [36]。このとき、表情表現の設計においては、設計者が意図したとおり学習者に表情表現が伝わるようにすることが極めて重要である。例えば、何か課題が解けないでいる学習者を励まそうと笑顔を提示したとしても、それが嘲笑の表現として受け取られてしまうと問題である。また、嘲笑ではなくとも、意図 (e.g. 学習者を励まそうとしている) が読み取れない表情、あるいは気味の悪い表情を表現してしまう可能性があり、結果的に学習者の学習意欲の向上を阻害する可能性がある [95]。

外見が人間に酷似する際に生じる否定的感情は「不気味の谷」[63][64]として知られ、HPA の製作を検討するうえで重要な課題である。一方、表情様態の中でも、表情の動的側面は表情認知において重要な役割を果たしている。特に、表情の動的側面には、Direction, Quality, Speed が重要な要素であることが指摘されており [50]、これらを適切にエージェントに実装する必要がある。中でも、Speed は「不気味の谷」現象 (7) とも密接に関係する要素の一つであり、その実装には注意が必要である。例えば、人間と同数の人工表情筋によって制御されたヒト型ロボットにおいて、「笑顔」の表出速度を半分にしてしまうと、気味の悪い表情になることは経験的にも示唆されている [63][64]。このような不気味の谷による HPA に対する否定的感情を回避するためには、HPA に実装する表情動作速度が HPA の印象に与える影響を明確にする必要がある。

ヒト型エージェントの動作に対する否定的な感情 (i.e. 不気味さ) に関して、その生起メカニズムは明らかでないことが多い。一方で、近年の脳機能計測に基づく実験から、「予測誤差」に基づく説明の枠組みが注目されている [86]。極めて人間に酷似した外見を持つアンドロイドは、その外見から生物的な身体動作を行うことを観察者に予測させる。一方で、実際のアンドロイドは機械的な身体動作を行うので、この予測動作と知覚動作の間に齟齬が起こる。「予測誤差」による説明の枠組みとは、この齟齬が不気味さを誘発するというものである。この枠組みに則るとき、身体動作だけでなく、表情動作に対する否定的な感情が形成されるメカニズムについても同様の議論ができると考えられる。

6.2 本稿での論点と対象

本研究では、ヒト型エージェントの表情動作速度の典型性・非典型性が観察者の印象に与える影響について実験的に検討する。具体的には、予測誤差の観点に基づき、表情動

作速度が典型的な表情動作速度から逸脱すれば、ヒト型エージェントに対する否定的な感情の強度が上昇する、特に、表情動作速度が遅くなることで、社会的な意図が読みにくい、気味の悪い表情になると仮説を立て、この仮説を心理学的手法によって検証する。

ヒト型エージェントの表情に着目し、不気味の谷との関連性を検証した研究はこれまでも広く行われてきている [55][108]。既往研究では、静止画を用いた表情の誇張表現の程度を検討したもの [55]、動的側面における形態的様相に着目しているもの（表情表出において顔上半分を変化させないことによる心理的影響の分析） [108] が見られる。一方で、表情ダイナミクスを構成する一要因である表情動作速度がヒト型エージェントに対する印象形成（特に、否定的な印象形成）にどのような影響を与えているかといった研究は数少ないながら行われている [73] もの、表情動作速度と社会的意図に対する認知に関する関係は明らかになっていない。表情動作速度の変化と社会的意図との関係性、表情動作速度がヒト型エージェントの否定的印象形成にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることは、HPA を初めとしてヒト型エージェントの表情設計を検討するうえで重要な指針となると考えられる。特に、表情動作速度がわずかな違いによって、同じ表情動作であっても、HPA が伝達可能な社会的意図にどのような変化が得られるのかを明らかにすることは、HPA の設計指針を検討するうえで大きく寄与するものと考えられる。

2 節では、本研究に関連する表情動作速度に関する研究を取り上げる。3 節では、本研究で用いるエージェントの選定実験、4 節では 3 節で得られたエージェントに表情動作（典型的な表情動作速度と非典型的な表情動作速度）を付与し、これらの表情に対する印象評価を行った実験とその結果について述べる。5 節では、3 節、4 節で得られた実験結果を踏まえた総合考察を行い、この上で、ヒト型エージェントの表情動作速度の典型性と非典型性に対する印象について考察する。なお、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の審査・承認を得て実施された。

6.3 関連研究

人間の表情認知に関する研究は、主に人間の顔写真を用いて進められてきた。人間は極めて早い段階で表情の認識が可能であることが示唆されている [18]。一方で、表情動作完了までに要する時間によって、人間の表情認知は多様な影響を受けることが知られている。蒲池らは、表情の表出速度が人間の表情認知に与える影響を実験的に検証し、人間の表情表出には表情毎に適した速度が存在し、速度が異なると別の表情と誤認識されることがあることを指摘している [40]。

また、Kätsyri らは、実際の人間の顔だけでなく CG 描写された顔に対する表情認知に

においても、動的情報が重要であることを指摘している [38]. CG 描写された笑顔においては、本心からの笑顔か偽の笑顔かの判断が速度によってどのような影響を受けるか検証した実験では、笑顔は表出からピークに達するまでに要する時間が長ければ長いほど、またピークが維持される時間が短ければ短いほど本心からの笑顔であると評価されることが明らかにされている [49].

6.4 実験1：エージェント選定

6.4.1 刺激

エージェントの表情動作速度を制御するために、CG 作成ソフトウェア Poser 11 (<http://www.e-frontier.co.jp/>) を用いた. 本刺激選定においては、このソフトウェアにプリインストールされている CG 描写されている人物を用いた.

まず、第1段階の実験者による選定として、レンダリングを行った際に、(1) 眼が全体的に白く黒目が見られない、(2) エイリアンなど非人間の形態をしている、(3) 子どもの CG 人物を評価対象から除外した. この結果 12 種類の CG 人物が選定された. 第2段階の選定実験では、これらの 12 種類の CG 人物から 2 種類を取り出して 1 組とした計 132 組を実験刺激として用いた. なお、実験参加者に対する刺激提示では、先行研究 [12] における顔画像提示の方法を参考に、顔部分のみを切り抜いて提示した. 本研究で用いた刺激 12 種類を図 6.1 に示す.



図 6.1: 選定実験で用いられた CG 人物 12 種類

6.4.2 実験手順

まず、実験の手順に関する説明が実験者からなされた。具体的には、(1)2枚の顔画像が同時に提示される、(2)「回答をお願いします」の文字が現れたら、「違和感があると感じたのはどちらか」「親和感があると感じたのはどちらか」の2点について提示された顔の組に対して速やかに回答を求める教示を行った。親和感は、森によって導入された不気味の谷を捉える際の人間のエージェントに対する心理的評価の軸であり(7)、違和感とは「不気味さ」「人間らしさ」と並んで不気味の谷を捉える際に導入されるエージェントの評価観点の一つである(e.g. Hoら[30])。本実験では、これらの定義を実験参加者に伝えず、各自の解釈として判断してもらった。さらに、各顔刺激の組の直前に「+」を提示し、提示中は視線を「+」の中央に固定するように求めた。

本実験で用いない顔刺激を2枚用意し、それらの左右を入れ替えた2組の刺激をテスト刺激として施行した。このテスト刺激を与えた後、本実験を施行した。

6.4.3 結果

実験には早稲田大学学部生10名が参加した。「違和感」「親和感」それぞれに関して、各実験参加者が顔の組のうちどちらの顔を選択したかについて、選択行列を作成し、選択確率に対する標準正規分布の累積確率密度関数の逆関数の値を求めた。尚、選択確率が0あるいは1、すなわち、どの顔と組になっても必ず選択されない、あるいは必ず選択される顔刺激に関しては、選択確率に対する上記の逆関数の出力値は $-\infty, \infty$ となるため、その後の尺度得点を計算することができない。そこで、ここでは近似的に選択確率0は選択確率0.0001で、選択確率1は選択確率0.9999で選択されたものとして近似的に計算した。

各尺度評定値の結果、違和感が低い顔としては、女性の黒人のCG画像アリシア($z = -1.3024$)、男性のCG画像であるディエゴ($z = -0.8390$)が選択された。また、違和感の高い顔としては、女性のCG画像であるイズミ($z = 1.8987$)、女性のCG画像であるシドニー($z = 1.5024$)である。親和感が低い顔としては、違和感が高い顔であると評定されているシドニー($z = -1.1312$)とイズミ($z = -0.9734$)が挙げられる。また、親和感が高い顔は、アリシア($z = 1.4060$)、マリア($z = 0.4629$)であった。また、違和感と親和感の間には強い負の相関(相関係数: -0.8786)があることが認められた。得られた実験結果から、高い違和感を抱かせるCG顔画像は低い親和感を観察者に抱かせていることが示唆された。特に高い親和感および低い違和感を与えるCG人物は黒人女性のアリシア、低い親和感および高い違和感を与えるCG人物は東洋系女性のイズミで

あった。以上から、親和感の高い顔として上位の2つ（アリシアとマリア）、低い顔として下位2つ（シドニーとイズミ）、違和感の高い顔として上位2つ（シドニーとイズミ）、低い顔として下位2つ（アリシアとディエゴ）を選択した。

6.5 実験 2：表情動作速度の非典型性が印象に与える影響

6.5.1 刺激

3節で選定されたCG画像から、親和感が高く違和感が低い評価を得られた顔（Positive群）と親和感が低く違和感が高い評価を得られた顔（Negative群）を本実験で用いる。図6.2に選定された5種類のCG画像を示す。これらのエージェントに典型的な表情動作速度・非典型的な表情動作速度で表出される表情を付与する。高速度カメラを用いた測定では、自発的な喜びには表出に724ms、自発的な嫌悪には表出に836msかかることが明らかになっている[116]。そこで、30fpsで動画像を作成するため、フレーム換算で幸福は21.72frame（≒22frame）、嫌悪は25.08（≒25frame）に設定した。さらに、これらを典型的な速度として、Fast条件とSlow条件を非典型的な速度として定義した。具体的には、蒲池ら[40]の研究で用いられていた表情の変化速度と表情認知に関する研究で得られていたFast, Medium, Slow条件間の速度比率（表6.1）を用いて決定した。

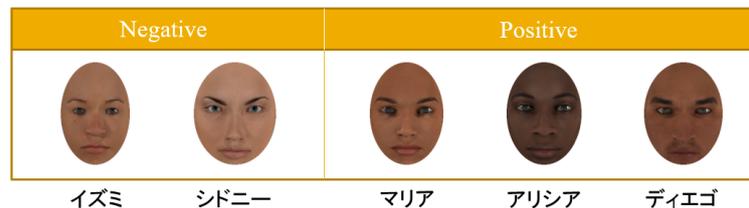


図 6.2: 選定実験で選定されたCG人物画像

Poser 11によりCGエージェントの表情動作を作成した。表情動作刺激は、実験1によって得られた各CGエージェント（5条件）、表情動作速度（3条件）、表出する感情（2条件）の計30種類を作成した。さらに提示する際の各表情動作について、表情が表出されていない真顔の表情映像（1秒30frame）、各速度条件に応じた表情表出映像、さらに完了した表情映像（1秒30frame）の一連からなる映像を1つの表情表現刺激として作成した。さらに、Medium条件との比較を行うために、Medium条件-Fast条件（M-F条件）、あるいは、Medium条件-Slow条件（M-S条件）を一つのセットにして、刺激を提示した。すなわち、実験参加者は、一つのエージェントに対して、1回のFast条件およびSlow条件

表 6.1: 実装された表情動作速度. 実際の実装にあたっては小数点第一位で四捨五入.(単位: frame)

	Fast 条件	Medium 条件	Slow 条件
蒲池ら [40](30fps)	6	26	101
幸福	5.01	21.72	84.37
嫌悪	5.79	25.08	97.43

と, それぞれの直前に示される 2 回の Medium 条件を観察することになる. これらの映像は, 映像編集ソフトウェアである Filmora (<https://filmora.wondershare.jp/>) を用いて作成した. 各表情動作速度における顔のパーツの形態的あるいは連携的動作の様態の統一に留意した. このため, 表情作成にあたっては, 表情動作の始点 (真顔) と終点 (表出が完了した笑顔あるいは嫌悪表情) を設定し, モーフィングを行うことで作成した.

6.5.2 実験手順

実験参加者は, (1) 提示される刺激は CG 描写された顔による表情動作であること, (2) 提示される表情は「幸福」か「嫌悪」の表情のいずれが提示されるかについて提示前に告知されること, (3) 提示された表情に対して, 4 つの評価項目 (「違和感」「快-不快」「表情強度」「速度の適度」) を各 7 段階で評価することが説明された. なお, 「快-不快」項目の評価にあたっては, 表情表出者の「快-不快」の程度を回答するのではなく, 表情を受けてどの程度「快-不快」を感じたかを回答するよう求めた. 回答では深く考えずに各評価項目に対して, 該当すると考えられる選択肢を直観的に選択するように求めた. 実験では, 本実験前のテスト, 本実験の 2 つのパートからなる. テスト試行では, 本実験で用いない CG エージェントを 1 体選定し, 「幸福」「嫌悪」の 2 つの表情動作について速度 Medium 条件で作成した表情動作映像が用いられた.

6.5.3 結果

Medium 条件に対する評価一貫性

実験には早稲田大学学生 14 名が参加した. まず, 実験で取得された各刺激に対する印象評価得点の分布が正規分布に従うかどうか, シャピロ=ウィルク検定を実施したとこ

ろ、全 160 項目（印象評価観点 4 種類× CG エージェント 5 種類×表情動作速度 4 種類×表出感情 2 種類）に対する 14 名の評定の組のうち、帰無仮説が棄却されたものは半数以上の 82 項目（51.25 %）であった。このことから、以降の分析では正規性を仮定しない統計的手法を用いる必要がある。次に、2つの Medium 条件の評価値の間に差があるのかを、ウィルコクソンの順位和検定を用いて検証した。この結果、エージェント「ディエゴ」の「幸福」表情に対する「違和感」の値においてのみ 5 % 水準を下回る有意差 ($p=.01486$; $.05$) が確認された。これ以外の評価項目に対しては、一貫した評定を Medium 条件間で行われていると考えることができる。

Fast 条件、Medium 条件と Slow 条件における「違和感」／「快-不快」と「表情動作速度の適度」に関する印象評価得点の分布を図に示す。この結果から、Medium 条件で提示される表情（図中四角）は 5 種類を除いて違和感もなく（平均評定値が 4 以上）、表情動作速度が適切であると評価される傾向にあることがわかる。これに対して、Slow 条件（図中ひし形）ではすべての表情動作に違和感と不快感があり（平均評定値が 4 以下）、表情動作速度も適切でないという評価がなされた。また、Fast 条件（図中丸）において幸福表情を提示した場合は、嫌悪表情を提示する場合と比較して、違和感に関する評価がネガティブであることが図から伺える。また、幸福表情（図中白塗）よりも嫌悪表情（図中黒塗）を違和感があると評価する傾向はすべての速度条件において共通してみられる。

図 6.3 下のプロットから、嫌悪表情は表情動作速度に依存せず不快感があると評価されている傾向がある（評定値が 4 以下）ことが分かる。この点から、嫌悪表情を提示されることで、実験参加者は不快な評価（negative）を CG 人物に抱くことが示唆される。これに対して、幸福表情（図中白塗）は必ずしも快の評価（positive）となる傾向があるとは限らない。実際、評定値が 4 以下のものが幸福表情 20 条件中 12 件見られた。

より詳細に分析を行う上で分散分析や t 検定などの統計的手法を用いたアプローチが有効であるが、本実験で得られたデータは正規性が保証されていない。そこで、各実験参加者がどちらの条件よりどちらの条件のほうを高く評価したか、という順序の關係に着目した分析、SS 分析（Semantic Structure 分析：意味構造分析）の手法を採用する。

意味構造分析

意味構造分析（SS 分析）法は、「項目の評定値の大小關係に基づき項目間の順序關係を求め、全項目の階層構造グラフを構築」し、「それをもとに、個々の項目や項目群の意味を解析する方法」である [96]。この方法では、各評定者における評定値の大小關係に着目していることから、データの正規性を保証しなくても問題がないという利点がある。

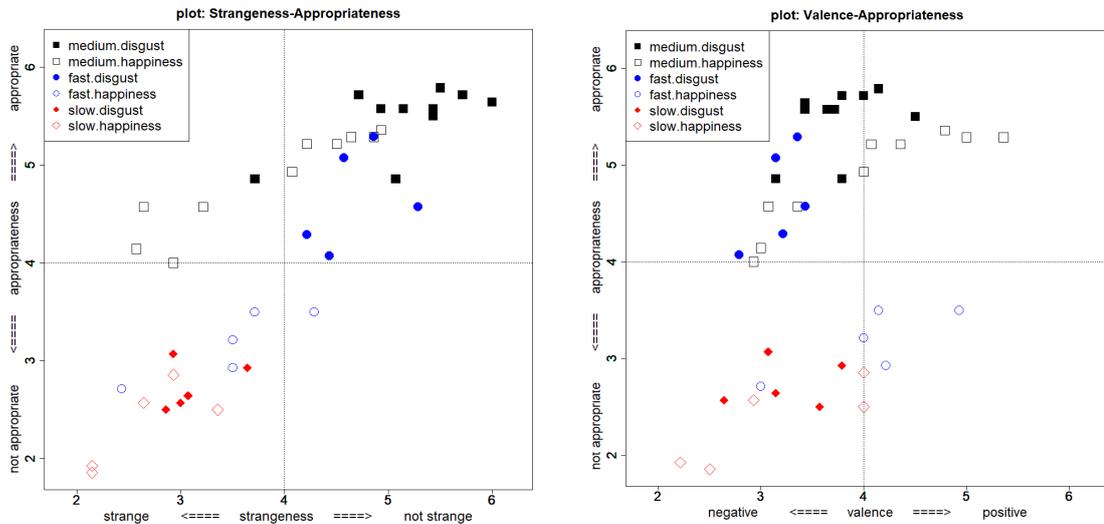


図 6.3: 図 3 各表情動作に対する「違和感」と「表情速度の適度」に関するプロット (左) と「快-不快」と「表情速度の適度」に関するプロット (右)

前節の分析から、Slow 条件および Fast 条件には、違和感がある傾向があると示唆された。そこでこの点を詳細に検討するために、違和感に関して SS 分析を行った。エージェントごとに、各速度条件を比較してどちらのほうが違和感の評価が高いか、に関して SS 分析を行った結果を次のページに示す (図 6.4(上))。例えば、左上のグラフの Alicia_DF は、エージェント「アリシア」の嫌悪 (Disgust) 表情の Fast 条件に対する「違和感」評定値の平均点を示している。なお、図内の各点におけるラベルは、各エージェント名、表出する表情 (Disgust / Happiness) および速度条件 (Slow / Medium1 / Medium2 / Fast) を表しており、たとえば Alicia_DF であれば、エージェント Alicia の速度条件 Fast における嫌悪表情を示す。このグラフは、グラフ上部に行くにしたがって評定値が下がることを表しており、違和感が高くなることを示している。また、Alicia_DF から Alicia_DS に向かって矢印が伸びているが、これは 2 つの項目間に順序関連があることを示している。すなわち、Alicia_DF と比較して、Alicia_DS のほうに低い評定値を付けた人が多いことを示している。このような順序性を抽出して示したものが図 6.4(下) のグラフである。このグラフでは、厳密な評定値を反映せず、どちらの速度条件がどの速度条件よりも高く (あるいは低く) つけられているか、という観点で整理されている。尚、ディエゴに関しては、Medium 条件間で評定平均値に有意差が見られたことから、2 つの Medium 条件を区別している (先に提示された Medium を Medium1、後に提示された Medium を Medium2 とする)。これらの結果からみると、Fast 条件や Medium 条件と比較して、Slow

条件における違和感が高く評定される傾向にあることが分かる。一方で、図 6.4 下の波線部は、同速度条件における表情間の順序関連を示している。この結果から、嫌悪表情と比較して幸福表情に対して高い違和感を抱かれたエージェントが **Medium** 条件間では 5 体中 5 体、**Fast** 条件間では 5 対中 3 体であった。この 3 体のうち 2 体は選定実験において、否定的な評価のなされたイズミとシドニーであった。一方で、同速度条件内で嫌悪表情に対して高い違和感を抱かれたエージェントは確認されなかった。

考察

low 条件において幸福表情・嫌悪表情ともに違和感および不快感が高くなるといった結果が得られた。一方、**Fast** 条件に関しては必ずしも違和感や不快感を抱かせるわけではなく、とりわけ速い表出速度の幸福表情において違和感を想起させるといった表情固有の影響の受け方が示唆された。蒲池らの先行実験によると、表情の提示時間が遅いと、実験参加者は「何かがあって満足している」といった文脈を読み取っていたことが報告されている [40]。本実験においても実験参加者から実験後簡単なアンケートを行ったところ、「表情動作速度が遅い場合は幸福で笑っているというよりも意図があって笑っているように見える」といった回答が見られた。このことから、CG で作成されたエージェントが表情を作る場合であっても人間が表情を作る場合であっても受け手は遅く表情が提示されるとそこから背後の文脈を読み取ろうとすることが分かる。一方で、この「意図があって笑っている」という点が実験参加者に不快感を与えている可能性が示唆される。笑いには、(受け手にとって) 快の笑い、不快の笑い(嘲笑など)、社交的な笑いが存在するが、幸福の表情動作条件においては、表情動作を遅くすることによって嘲笑の意味を持った笑いを形成している可能性が示唆される。

6.6 総合考察

6.6.1 非典型動作における幸福認知の特異性

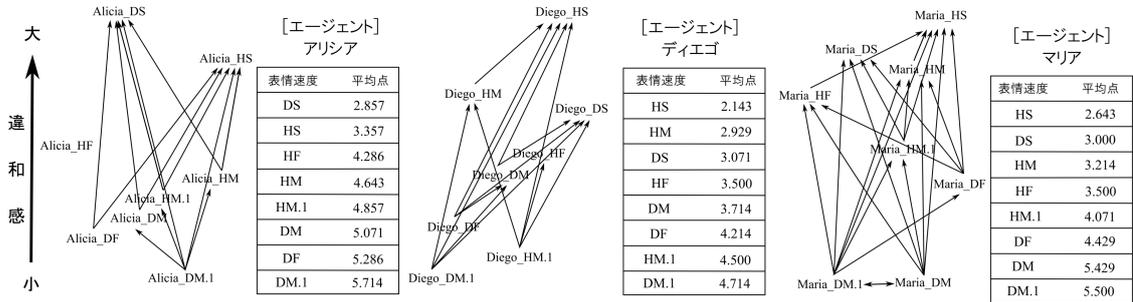
人間の顔同様 [40][85]、CG で作成された顔であっても表情動作速度に大きく影響を受け、非典型的な表情動作速度、中でも **Slow** 条件は、**Medium** 条件および **Fast** 条件と比較して違和感や不快感を抱かせる傾向にあることが分かった。また、顔の形態において否定的な評価を受けた CG 人物において、幸福表情が速く表出されると否定的な印象(違和感)を与えることが示唆された。この点に関して、予測誤差の観点から見れば、**Medium** から両条件とも速度に関して逸脱しているという点では、顔の形態的観点に依存して、表出速度

による心的影響に表情間で非対称性があることは興味深い結果である。また、KrumhuberらのCGの顔を用いた実験によって、笑顔の on-set, off-set の時間が長くなる、あるいはピーク表情の持続時間が短くなるほど、笑顔の信憑性が増加することが知られている [49] が、本結果は速度が速くても遅くても、笑顔については否定的な印象（違和感）を形成する可能性があることが分かる。つまり、HPA に幸福表情を実装する際、特に、外見から否定的な印象を与えるエージェントに対しては、表出速度は速すぎても遅すぎても高い違和感を与える要因となる。

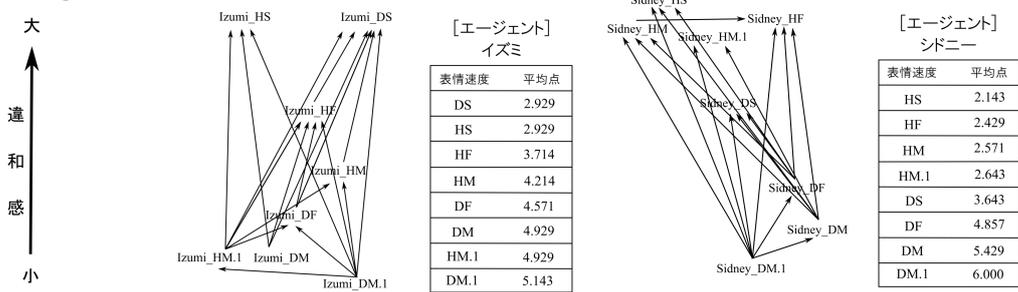
6.6.2 表情による社会的意図の伝達可能性

4.4 節でも触れた通り、遅い速度による笑顔表情動作に対して、人間はその表情の背後にある「意図」を読み取ろうとする働きがある。この結果は人間の顔を用いた先行研究の結果 [40] と同様であり、表情動作速度のわずかな違いから相手の意図を推察するという人間の特質がヒト型エージェントの表情に対しても起こることを示唆している。本実験からはエージェントが表現できる意図の範囲は自明ではないが、人間の社会的意図を読み取る特性 [43][83] を利用することで、HPA の表情によって社会的意図を学習者に伝達可能であることが期待される。対人での協調学習において、学習パートナーからのフィードバックは常に言語を介して行われるとは限らず、表情などの非言語情報を用いることがある。例えば、学習者のタスクに対する取り組みがよかったとき、学習パートナーは「今の取り組みはよかったよ」という意図で笑顔をフィードバックに用いることがある。このような学習パートナーの振る舞いを学習エージェントに実装する際、本結果は、学習者がその振る舞いの社会的意図を読み取ることができる可能性を示唆している。

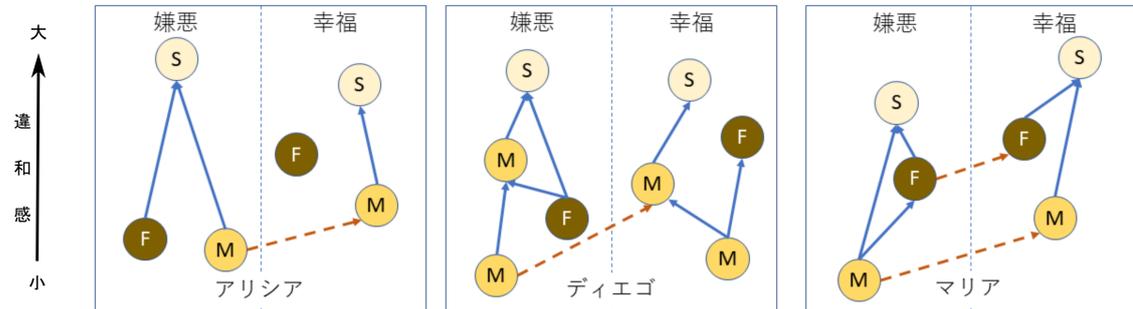
■Positive評価を受けたCG人物



■Negative評価を受けたCG人物



■Positive評価を受けたCG人物



■Negative評価を受けたCG人物

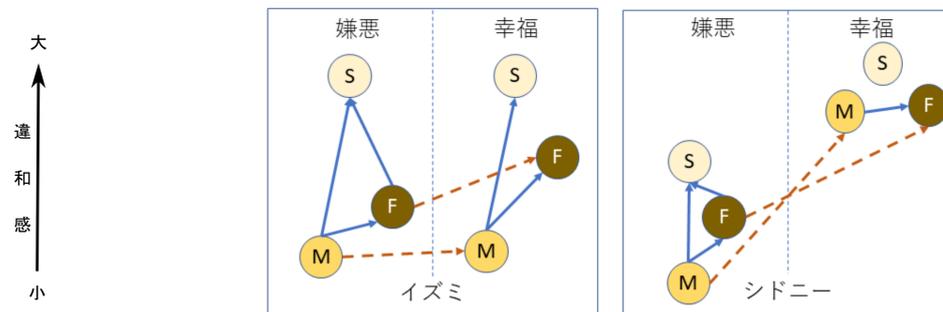


図 6.4: 各エージェントに対する「違和感」の評価項目に関する SS 分析（上）と結果のパターンを簡易化したもの（下）。上部に向かうほど、評定点が低い（違和感がある）ことを表している。実線矢印は同表情内の順序関連、波線矢印は同速度条件での異なる表情間の順序関連を表す。また、F: Fast, M: Medium, S: Slow をそれぞれ表す。

第7章 表情認知における否定的情動形成モデル

本研究では、前節に関連して、ヒト型エージェントの表情動作による否定的感情形成過程を説明する脳機能モデルを提案する。特に、典型的な表情動作を行うヒト型エージェントと、非典型的な表情動作を行うヒト型エージェントに対するヒトの快-不快といった情動評価がどのように変化するかを検討するため、提案モデルの実装を試みる。まず、われわれがこれまで構築したモデルについて紹介する。次に第7.3節では、構築したモデルをシミュレーション環境において実装し、そのシミュレーションの結果について述べる。第7.4節では、このシミュレーションの結果に関して考察を行い、最後に今後の課題と展望について述べる。尚、本章は田和辻ら [99][101] の内容に基づいている。

7.1 表情認知過程を説明するモデル

7.1.1 従来モデルの概要と説明限界

5章で見た通り、これまで我々は、ヒトがヒト型エージェントの顔を見た際に得られる以上の度合いに基づいて、ヒトのエージェントに対する視線と情動状態（ポジティブ／ネガティブ）の変化過程を表現するモデルを脳科学の知見をもとに構築してきた [98]。本節では、まずこれまでのモデルにおける説明限界について述べる。

人間がヒト型エージェントを観察した際に生じる否定的評価に対して、感情の二重経路 [52] による情動情報処理の結果、齟齬が生起されると考えてきた (図 5.1)。このモデルでは、人間がヒト型エージェントを観察する際に二つの情動情報処理がなされると考えた。まず一つの情報処理系は、迅速で雑多な情報処理によって、ヒト型エージェントを「人間」と判断する系である。もう一つの情報処理系は、これにやや遅れた詳細な情報処理でヒト型エージェントを「非人間」と判断する系である。この二つの系によって導かれる判断結果の齟齬が否定的な情動形成に関わるというものである。このモデルは従来研究の「期待との不一致」(i.e. 予測誤差) の枠組みを説明できるモデルであると考えられる。

この上で、我々はヒト型エージェント観察時のヒトの情動状態が時間的にどのように遷移していくかについて脳科学の知見をもとにモデル化を試みた。具体的には、以下の仮定に基づいてモデル化を行っている。ヒト型エージェントには人間に比べて形態的な異常があり、知覚された情報は扁桃体の機能によって、その異常に基づく情動評価が行われる。前者は、言い換えると、形態的な異常が少なければ少ないほど「人間」、形態的な異常が多ければ多いほど「非人間」であることを表す。また、異常に基づく情動評価は、異常の大きさに対して反比例的に決定される。つまり、エージェントに対する情動評価を $V(t)$ 、異常の大きさを $abn.$ (ただし、 $0 \leq abn. \leq 1$) で与えると、

$$V(t) = -abn. + (1 - abn.) \quad (7.1)$$

で決定される (本式は式 (5.5) と同様)。

これまでのモデルでは、ヒト型エージェントの目鼻口にそれぞれ形態的な異常が予め与えられている。それらを逐次観察することによって異常を検出し、上記式 (7.1) にしたがって情動評価がなされる。この情動評価は逐次の情動反応と考え、それらの和算 $\sum_{t \in T} V(t)$ をヒト型エージェントに対する認知的評価として求めた。

従来モデルでは形態的な異常の度合いを予め定めており、人間がどのようにして異常を検出しているのかについては考慮されていない。特に、表情動作における異常検知を考えた場合は、この異常がどのように計算され、情動評価に影響を与えるのかについて検討する必要がある。そこで、次節ではヒト型エージェントが行う表情動作に対する異常検知をより詳細にモデル化することを目指す。

7.1.2 表情動作予測と異常検知に関する大脳-小脳モデル

本節では、これまでのモデルを表情認知に適用できることはじめに述べる。その上で (1) 表情動作系列の予測、(2) 予測動作と実際に知覚した動作との間に生じる齟齬を計算するモデルを提案する。このモデル化にあたり、まず、ヒトがどのように表情動作を生成しているかという点について、脳科学の知見に基づき大脳と小脳の連関という観点から述べる。次に、この表情動作生成に関するモデルを用いることで、ヒトは知覚した初期の表情動作から期待される他者の表情動作を計算できることについて述べる。

表情認知への従来モデルの適用可能性

ヒトの顔・表情認知においては二つの情報処理系が存在していることが示唆されている [110][75]。一つ目は、顔刺激に関する低空間周波数成分をもとに雑多かつ迅速に処理

される系であり、これは皮質下経路を通り扁桃体へと伝達される。この系によって顔の全体知覚および表情認知がなされる。これに対して、もうひとつの系は先ほどの情報処理に比べると遅く、皮質経路を経て扁桃体へと伝達される情報処理系である。こちらでは顔刺激に関する高空間周波数成分をもとに顔の形態的否特徴などが処理される。これらの二つの系は従来モデルの感情の二重経路と対応すると考えられ、従来モデルを顔・表情認知に適用できることが示唆される。

表情動作における小脳の役割

これまで小脳は運動動作、特に手足の運動などの随意運動を制御する上で重要な役割を担っていることが指摘されてきた [42]。一方で、人間の表情生成に対しても小脳が関わっていることが近年示唆されている。Ahmed らによると、情動調節障害において大脳-橋小脳経路が極めて重要な役割を果たしていると考えられ、大脳から与えられるムードや社会的状況に沿った適切な（表情生成などの）情動反応を行うように、小脳が情動反応表出の調整を行っているという仮説を立てている [3]。また、表情は表情筋によって構成されているが、これらの表情筋は顔面神経（第 VII 脳神経）によって支配されており、その顔面神経核は「橋の尾側レベルで三叉神経運動核の尾側に位置し」（p.1007）ている [119]。したがって、小脳は、大脳から送られる感情状態や状況に適切と考えられる表情筋動作系列を決定し、橋（脳幹）にそれらを実行させていると考えられる。これを受けて感情から表情がどのように生成されるかに関してモデル化を行う。まず大脳皮質では感情状態 $E.S.$ (= Emotional State) と状況 S が決定され、 $X = (E.S., S)$ が出力される。小脳ではこの出力に対して適切と考えられる表情筋動作系列 $m(t)$ を決定する。ただし、 $m(t)$ は各表情筋 $m_i (i = 1, 2, \dots)$ の時刻 t における定性的状態を表す。これらの動作系列は橋を通して表情筋へと伝達され、表情が生成され则认为。すなわち、表情動作生成に至っては、(1) 感情状態と状況に関する情報 X の決定（大脳皮質）、(2) 大脳からの情報 X に即した小脳による適切な表情動作系列の決定、(3) 橋による表情動作の実行の三段階からなる。

他者の表情動作系列の予測

次に、他者の表情動作の予測がどのように行われるかについて述べる。まず、前小節で見た表情動作生成の流れにおける第二段階、小脳による適切な表情動作系列の決定は、小脳における内部モデルによって決定され则认为。川人 [42] によると、ヒトの「速くて滑らかな多関節運動」を実現するにあたって、「中枢神経系の中に制御対象の内部

モデルが存在し」ているとされる (p.117). これまでの議論から表情生成にあたっても小脳の関与が示唆されているから、表情動作生成においてもその制御のための内部モデルの存在が示唆される。

この表情動作系列の初期値 $\mathbf{m}(0)$ が観察されると、この観測値と内部モデルを用いることで、その表情動作の予測ができると考えられる。ただし、ここで用いる内部モデルは他者が有する内部モデルではなく、あくまで観察者がもつ内部モデルを用いると考えた。

まず、知覚された初期表情動作 $\mathbf{m}(0)$ に対して迅速な情報処理がなされ、感情状態 $E.S.*$ が推定される。さらに、ここで状況 S は他者と共有されているから、他者における大脳皮質からの入力 $X* = (E.S.*, S)$ が推定される。ここから $X*$ および $\mathbf{m}(0)$ に沿った表情動作系列 $\mathbf{m}*(t)$ が推定される。

予測動作と知覚動作間の誤差計算

次にこの予測動作と知覚動作間の誤差計算について述べる。初期動作に対して内部モデルを通して予測される動作系列 $\mathbf{m}*(t)$ と逐次知覚される動作系列 $\mathbf{m}(t)$ の間で乖離度を求めることで生成された表情動作系列の異常度 $abn.$ が計算されると考えられる。つまり、

$$abn. = M^+(\|\mathbf{m}*(t) - \mathbf{m}(t)\| - \theta) \quad (7.2)$$

ただし、ここで $\|\mathbf{x}\|$ は \mathbf{x} のノルムを表す。また、 θ は誤差を異常とみなすかどうかを判別する閾値であり、 $y = M^+(x)$ は x と y の間に定性的な単調増加関係があることを表す。

表情認知における快-不快と覚醒の次元

心理学的な立場から、人間の表情知覚過程において、快-不快 (Valence) と覚醒 (Arousal) からなる感情の次元が重要な役割を果たしていることが示唆されている [115]。近年ではこれら次元の神経基盤に関する調査も進んでいる [25][80]。山田によると、表情知覚プロセスにおいては、表情を構成する要素 (目や口) の傾斜性や開示性によって、快-不快と覚醒の程度が決まり、その組み合わせに基づき表情による感情が知覚されるとしている [115]。つまり、表情から感情が知覚されるためには、快-不快と覚醒の次元が重要な役割を果たしていると考えられる。以上から、表情の形態的特徴が変化することによって、快-不快および覚醒の程度が変化すると考えられる。

7.1.3 構築した定性的モデル

構築した定性的モデルを図7.1に示す。以下、各変数の定性的関係性について述べる。このモデルでは Agent が表出した表情筋の変化を入力としている。皺眉筋 (corrugator supercilii) の変化は眉のつり上がりに変化 (怒り顔) を与え、大頬骨筋 (zygomatic major muscle) の変化は口角のつり上がりに変化 (笑い顔) を与える。また、眉のつり上がりは否定的な評価の増大、口角のつり上がりは肯定的な評価の増大に影響を与える。眉と口角のつり上がり、および肯定的評価と否定的評価の増大が同時に検知されると、Internal model によって、次の時刻の眉と口角の状態が計算される。つまり、眉と口角のつり上がりの増大が予測される。この予測された眉と口角のつり上がりの状態と、実際に知覚された眉と口角のつり上がりが比較され、それぞれ齟齬があるか (brow error, cheek error) が計算される。この齟齬が大きければ、否定的な評価が増大する。また、否定的な評価が増大すると、肯定的な評価が減少する。

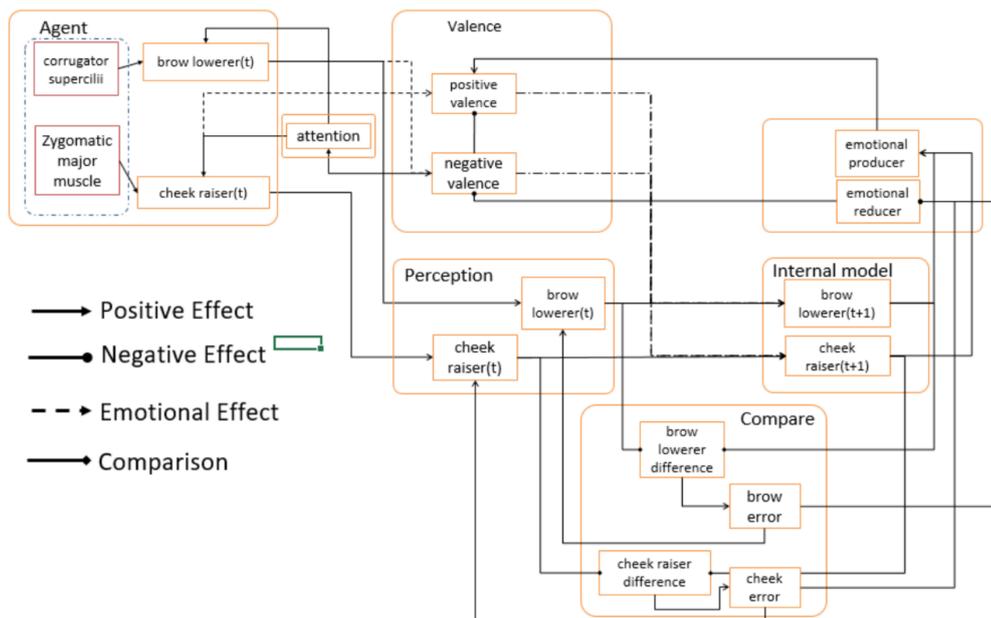


図7.1: 本研究で構築した定性的モデル。ただし、attention は本研究では実装されていない。

7.2 シミュレーション

本節では前節で示した定性モデルの実装について述べ、その上でシミュレーションの結果について述べる。

7.2.1 実装したモデル

図 7.2 に実装したモデルを表す。実装には、isee systems の「Stella Architect」¹を用いた。本システムは次の 6 つのセクションから構成されている。1. Agent, 2. Arousal dimension, 3. Valence dimension, 4. Visual perception, 5. Internal model, 6. Comparison. Agent のセクションでは、エージェントの表情動作を表現しており、このセクションがモデルの入力にあたる。入力のパラメータは、大頬骨筋の変化（口角のつり上がり）があるか ($zyg \in \{0, 1\}$)、その速度はどの程度であるか ($zyg\ speed \in [0, 2]$: ただし、 $zyg\ speed = 1$ は典型的なヒトの表出速度) である。Visual perception では、Agent のセクションで行われた変化がそのまま再現される形となっており、視覚野における情報処理に対応している。

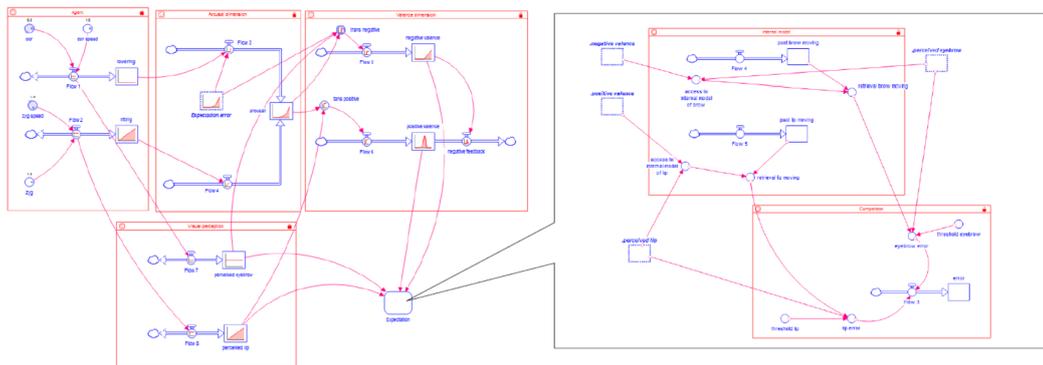


図 7.2: Stella architect において実装されたモデル：モデルは 6 つのセクションからなり、エージェントの表情動作に対する快-不快評価の時間的変化がシミュレーションされる。

Arousal dimension と Valence dimension では、覚醒と快-不快の程度が定義されている。覚醒の程度は表出された口角のつり上がりの程度と、予測とのずれの大きさに定性的に比例する。また、快-不快の程度はそれぞれ独立の神経基盤（扁桃体を中心とした辺縁系と、報酬系）によって成立していると考えた。この点に関しては、Galanter の文献 [24] において、快-不快の程度は覚醒度に依存して独立に作用し、覚醒度とそれぞれの快-不快の程度の関係は、正規分布の累積確率密度関数に従う (Berlyne の理論) ということが説明

¹<http://www.iseesystems.com/store/products/stella-architect.aspx>

されている。さらに、不快の評価が増加すると、解の評価が減少するという定性的関係を想定した。

Internal model では、自身が経験的に自身の動作で学習した表情動作（これを以降典型的な表情動作と呼ぶ）を蓄える機構である。本モデルにおいては、ad hoc に典型的な表情動作を実装している。このセクションでは、表情動作の動きが知覚され、感情状態が抽出された際にアクセスされ、予測的に動きが計算される。これは小脳の機能として与えている。最後に Comparison では、先の典型的な表情動作である Internal model からの予測動作と、知覚している動作との比較がなされ、その動作の齟齬が設定された閾値を超えると Error を齟齬の程度に比例して出力する。

7.2.2 結果

次にシミュレーションの結果について述べる。ここでは、笑顔動作の典型性を、動作表出の速度に関するパラメータ (zyg speed) で表現した。

笑顔動作の典型性による快-不快の変化

構築したモデルにおいて、典型的な笑顔動作を示した場合 (zyg speed = 1) と非典型的な笑顔動作を示した場合 (zyg speed = 1.5) で、各エージェントの表情動作に対する arousal と valence (positive and negative) の定性的時間変化を示す (図 7.3)。横軸は時間 (Step Time) を表し、実線は arousal の推移を、点線は positive valence、一点鎖線は negative valence の推移をそれぞれ示している。この結果、時間が経過するに従い、典型的な表情動作を示すエージェントでは positive valence が上昇することが示された。一方、negative valence は時間が経過しても変化しないことが合わせて示された。典型的な表情動作に対して、非典型的な表情動作を示すエージェントでは、ある時刻までは positive valence が上昇するが、その時点を境に negative valence も上昇することが示された。さらに、negative valence の上昇に合わせて、arousal も著しく上昇することがこのシミュレーションの結果から読み取ることができる。この negative valence がどの程度の時間的段階で増加するかは、Comparison のセクションに含まれる、異常とするための閾値に依存している。この閾値が小さければ小さいほど、わずかな違いでも誤差が検出され、negative valence は早い段階で増加する。

典型的動作が獲得されていない状態での快-不快の変化

次に、モデル上で予測機能を含む比較機構を稼働させない場合、快-不快がどのように変化するかを検討する。この検討は、モデル上の小脳を機能的に除去する試み、あるいは内部モデルを獲得していない状態で、非典型的な表情動作に対する快-不快がどのように変化するかを検討することに対応する。

図 7.4 は非典型的な表情動作を行うエージェントに対して、比較機構を稼働させない場合に valence がどのように変化するかを示している。図の上部は非典型的な表情動作を行うエージェントに対して、ある時刻において negative valence が増加することが示唆されたが、比較機構を稼働させない場合には negative valence が増加しないことが示された。

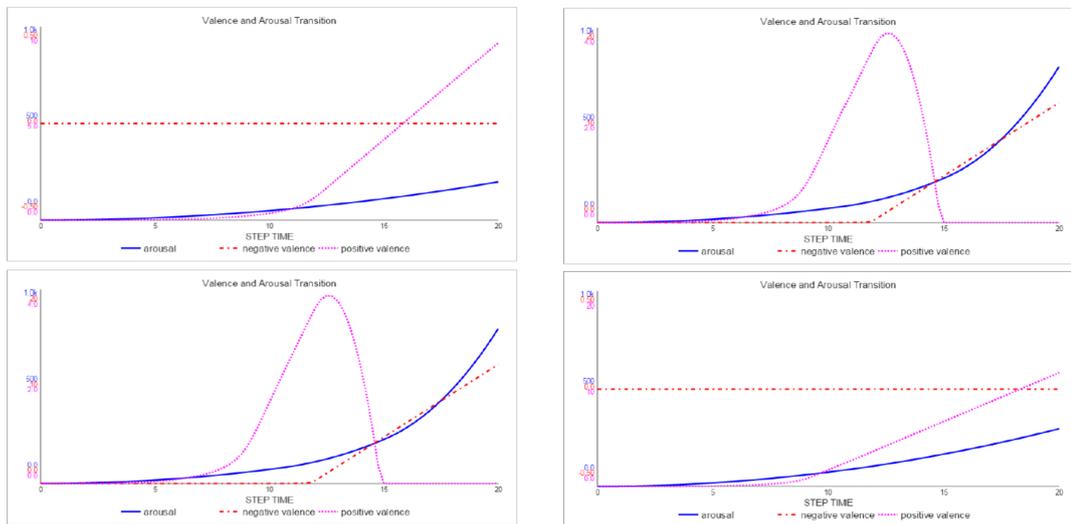


図 7.3: 典型的な表情動作を行うエージェント (図上部) と非典型的な表情動作を行うエージェント (図下部)
 図 7.4: 比較機構が稼働していない場合の valence の時間的変化 (下部が機能的に内部モデルを用いない場合)

7.3 考察

本研究ではヒト型エージェントが表出する笑顔を認知する過程を表現する脳機能モデルを構築し、次の点を検証した。すなわち、学習された典型的な笑顔動作から逸脱した非典型的な動作を提示されると、否定的な感情が生起されるかどうかを検証した。まず、典型的／非典型的な動作の比較では、非典型的な動作において否定的な評価がなされることが明らかになった。シミュレーションの結果から、典型的な動作から逸脱した（表

出速度が速い) 笑顔動作に対しては、始め快評価がなされるが、その動きが典型的な動作速度から逸脱されていることが検出され、不快評価へとつながる。これは、動作の非典型性をどの程度許容するか(異常として検出しないか)に依存している。一方で、典型的動作が獲得されていない状態を表現するために、比較機構を用いない場合のシミュレーションを行った。この結果、比較機構が稼働していない場合は、動作が知覚されてその動きが評価されるだけであるために齟齬が起きず不快評価は表出されないということが示唆された。

Lewkowicz は、幼児期における顔学習によって不気味の谷が副産物として形成されることを考案している [53]。この点に対して本モデルによるシミュレーションから、以下の二点はその要因として示唆された。一点目は幼児期の早い段階では、非典型性に対する許容が高い、言い換えれば否定的な評価に結び付く誤差の範囲が広くないという点である。この立場に立つと、ある時期を境に非典型性に対する許容が何らかの形で狭まっていき、わずかな違いが否定的な評価に結び付くという機構が形成されることを示唆している。もう一点目は、幼児期の早い段階ではそもそも比較機構を用いずに受動的に知覚しているという点である。この立場に立つと、ある時期までは幼児は自身が持つ内部モデルを用いずに、ただ知覚した表情動作が肯定的な動きをしているのかどうかを分指揮していることを示唆している。

7.4 課題と限界

処理のタイムラグ(各モジュールの処理に要する時間および各モジュールの作用順序など)を捉えるための時間概念は定性的にモデルを記述する上で重要な課題である。ところが、本研究で用いた定性シミュレータでは、各モジュールの計算は定量的に(微分方程式の表現で)記述されており、また処理に要する時間は検討されていない。このため、今後はモジュール化された小脳における計算処理に要する時間と大脳皮質における計算処理に要する時間がどれほど異なるかを検討する必要がある。具体的な研究の方向性としては、視覚野の各段階に至るまでの潜時に関する文献 [16] などの各神経系と処理に関わる時間的観点に関する文献を調査した上で、仮説的に各モジュールでの処理に要する時間をトップダウンに与える方略が考えられる。また、定性シミュレーションにおける時間の取り扱いについても検討が必要である。一般的にはモジュールの処理時間を時定数という形で与えられる定量シミュレーションと異なり、定性シミュレーションでは、系における定性微分値が変化する時点までを一つの時区間としてみなすため時間は暗黙的に捨象される。このため、定量シミュレーションが背後で動作しながら定量的変化を

定性的変化の根拠にすることで，定性表現における時間の取り扱いが可能になると考えられる。

第IV部

脳機能モデルの統一的記述体系

第8章 脳機能モデルを体系的に記述するための観点の提供

これまでに構築してきた脳機能モデルは、各現象に依存して定義された固有の機能表現を有する脳部位を接合することによって構築されてきた。このような脳機能モデルは確かに各現象を記述する上では説明性があるとしても、その表現方法について一貫性がなく、知識の再利用性に限界がある。この問題は、様々な現象を説明するための統一的な神経系の機能モデルを構築する上で、さらに各機能を位置づけるためのよりメタな体系が必要であることを示唆している。そこで、本章では拡張デバイスオントロジー [45] に着目し、神経科学的知見による構造と機能の捉え方（活性伝播による機能実現）に関するオントロジーを構築した。具体的には比較的構造とその機能が明確な衝動性眼球運動を実現する神経系を対象とした。この結果、活性伝播による機能の捉え方はデバイスオントロジーの枠組みから捉えなおす必要があることが示唆された。尚、本章は田和辻ら [103][104] の内容を踏まえて再検討したものである。

8.1 オントロジーによる脳機能の知識体系化の試み

これまで第II部および第III部では、脳の機能モデルを構築することで、顔表情認知過程におけるヒト型エージェントに対する否定的感情の形成プロセスを説明してきた。ところが、これらの機能は各現象を説明するためにアドホックに定義されており、各神経細胞群における機能の与え方については議論の余地がある。來村ら [45] は人工物における機能を記述するにあたり、(特に、領域横断的に共有できるための枠組みの必要性という観点から) 機能概念の明示と機能的知識の体系的記述の必要性を指摘し、対象を捉える際の視点としてデバイスオントロジーと、装置の機能を表す概念を提供する機能概念オントロジーの構築を試みている。機能ありきとしてみた神経系と、構造ありきとしてみたときの神経系は、お互いの立場における「構造」と「機能」に対する捉え方は必ずしも合意されたものではないと考えられる。そこで、このようなデバイスオントロジーの立場から神経系の構造と機能を捉えることによって、領域横断的に「脳機能-振る舞い-神経系の構造」の関係を明瞭的に捉えられるようになると期待される。

拡張デバイスオントロジーは、装置、対象物、導管、媒体、振る舞いという概念からなる [45]。装置はあるシステムにおける部品であり、対象物の属性値を変化させる（e.g.B1の振る舞い）という役割を担っている。変化させられた対象物は、導管を通じて別の装置へと伝播される。このとき、伝播は媒体を通じて行われるとされる。振る舞いは、B0からB3までの4つの振る舞いが存在するが、デバイスオントロジーが対象とするのはB1の振る舞いと呼ばれる「入力時の属性値の値と出力時の属性値の値の変化」である [45]。

8.1.1 生物器官としての脳機能

來村らが述べる機能概念はまず前提として、人工物に対する機能を表現する一般的な機能概念 [45] であることに注意が必要である。機能は、ある目標のもとで振る舞いを解釈した結果 [84] であると考えられ、Mizoguchi[61]によると、目標にはI-goals, すなわち（設計者によって）意図されて与えられた目標と、NI-goals, すなわち意図されてはいないがあたかも意図があるように解釈される目標があることが指摘されている。また、特に後者は、システムの観点から解釈的に系全体の目標が与えられ、その目標のもとに生物器官に機能を割りあてられているように見なすことができるとしている。また重要な点として、このような生物器官は本質的な機能（Intrinsic function）として、系全体にとって有益になるような全体機能の部分機能を達成するように振舞うとしている [61]。以上から、神経系全体が達成する機能全体から見て、その機能を実現するための部分機能が定義でき、解釈的に生物器官である脳の各部分（脳部位）にも機能を明示的に与えることが可能であると考えられる。尚、本研究では脳の可塑性は考慮に入れず、システムの意味での目的が変化しない「静止時間」における脳を対象とする。

8.1.2 機能的知識・オントロジーの階層性

來村ら [45] によれば、機能的知識を表現するためのオントロジーには、1) トップレベルオントロジー、2) 因果オントロジー・物理世界オントロジー、3) 拡張デバイスオントロジーといった階層的な関係から対象となる機能モデルを捉える枠組みが存在しているとしている。本研究もこの枠組みに則り、物理世界にあるシステムとして脳を捉えることで、デバイスオントロジーの観点から脳機能を体系的に整理することが重要であると考えられる。図 8.1 に、機能オントロジーの枠組みに則り、第 II 部・第 III 部で構築したモデルの体系的な位置づけを行うための枠組みの概念図を示す。

本章では、神経系の構造と機能を捉える枠組みを検討する目的で構築した神経科学者による神経系の構造的知見に基づく脳構造オントロジーについて説明する。具体的には、

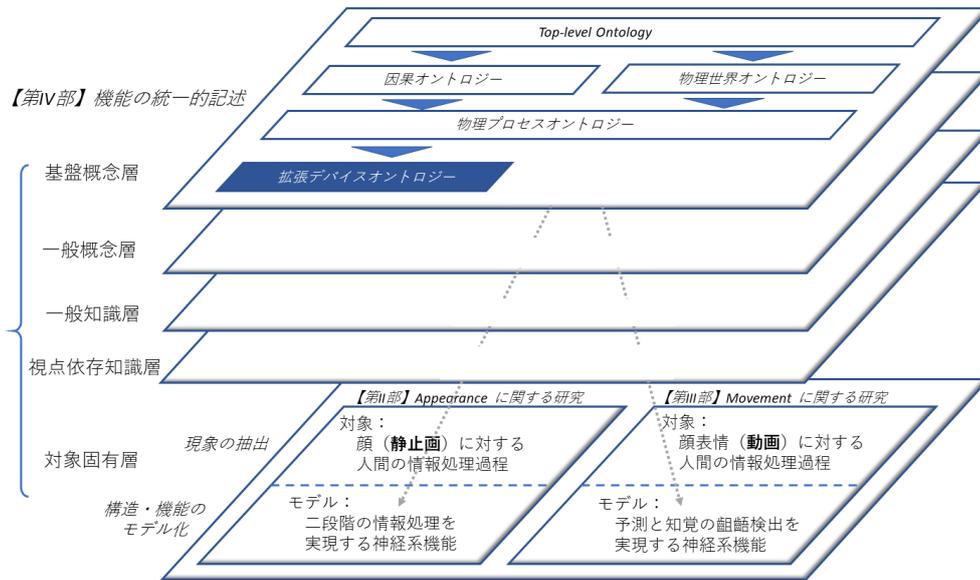


図 8.1: 各研究の位置づけの概念図. 機能オントロジーの階層性は来村ら [45] を参考とした.

比較的構造とその機能が明確な衝動性眼球運動を対象として、神経系の構造と構造上で実現される活性伝播を体系的にまとめた.

8.2 ロール概念に基づく神経細胞群の構造オントロジーの構築

これまで神経系オントロジーでは、神経科学におけるデータ採取の方法が異なることや、細胞の各神経細胞の分類観点が整理されていなかったという点に対し、どのような神経細胞から脳の各領域が構成されているかを体系的に整理することが試みられている [51]. 一方で、神経回路においては、各脳領域が活性や非活性の状態を取ることによって他の領域に影響を与えることで (活性伝播)、複雑な機能を実現している. 神経回路の構造 (どのような神経細胞群がどのような関係で接続されているか) から、そこに属する神経細胞群がどのような振る舞いを行うのか、またその振る舞いは一つの機能を実現するうえでどのような役割を果たしているのか、という観点は、神経回路の構造と機能とを紐づけるうえで重要であると考えられる. そこで本研究では、まず、神経細胞群が活性伝播において果たす役割をロール概念に基づいて整理することを試みる. 次に、神経細胞群をデバイスとして見たとき、デバイスオントロジー的観点から見て、神経細胞群がどのようなデバイスとして記述されるかについて述べる.

8.3 神経系におけるロール概念

8.3.1 神経細胞群と活性伝播

神経系を細胞単位の粒度で見ると、各神経細胞は、他の神経細胞に対して軸索を伸ばし、樹状突起との間にできるシナプス間隙に伝達物質を放出すること（i.e. 投射）で情報を伝達している。皮質下において、神経細胞群は構造的・機能的に似通った投射を持つものがローカルに集まっているものがあり、これらは神経核と呼ばれている [82]。一方で、神経細胞がシート状に並んで層構造をなしているものがあり、これらは皮質と呼ばれている。

これらの細胞集団は機能的な観点で見れば、一つの構造上のプリミティブとしてみることができる。例えば、神経科学の知見において、扁桃体の基底核から前帯状回皮質に投射がある [2] という場合、これは扁桃体の基底核を構成する一つの神経細胞から全帯状回皮質の特定の層にある神経細胞へ投射があることを代表して述べていると考えられる。そこで、これらの機能的・構造的な同型な神経細胞の集まりを表現するために、本研究ではこれを神経細胞群と呼ぶ。

各神経細胞は、伝達物質の性質などからシナプス後ニューロンを活性化させるか非活性化させるかによって、興奮性か抑制成果の二種類に分類することができる。例えば、錐体細胞は興奮性の神経細胞であり、GABA 作動性の神経細胞は抑制性の神経細胞であることが一般的に知られる。神経細胞群に含まれる各神経細胞は機能的に同型であることから、興奮性抑制性という意味では共通していると考えられ、したがって、特定の神経細胞群は興奮性あるいは抑制性のいずれかの性質を有する。まとめると、神経細胞群はある特定の別の神経細胞群と接続することで、接続された神経細胞群を活性化・非活性化させる役割を担うといえる。

8.3.2 活性伝播におけるロール概念

神経回路において各神経細胞群が果たす役割を考えるうえで、ロール概念の整理は極めて有効である。ロール概念は、あるものが特定のコンテキストのもとで果たす役割を捉えて概念化したものである [48]。例えば、古崎らの例を借りれば、「妻としての役割」や「看護婦としての役割」がこれに該当する。一方、「人間」や「男性」など他の概念に依存されずに定義されるものは「基本概念」として呼ばれる。また、「妻」や「看護婦」などは基本概念が「ロール概念」で定義された役割を担った状態として概念化されたものであり、「ロールホルダー」と呼ばれる [48]。

8.3.3 神経系ロール概念の整理

前節で見た通り、ある機能を実現する上で（当該の神経回路における）各神経細胞群は、他の神経細胞群と接続することで接続された神経細胞群を活性化・非活性化させる役割を担う。このことから、「活性化作用素としての役割」と「非活性化作用素としての役割」という二つのロール概念が、神経細胞群には存在することが考えられる。この活性化と非活性化は投射関係が成立、すなわち、投射ロールを担う神経細胞群と被投射ロールを担う神経細胞群が存在したうえで、活性化作用素ロールあるいは非活性化作用素ロールを担うことで成立する。このロール概念を担うことができるのは、基本概念としての神経細胞群であると同時に、二つの神経細胞群間において定義される投射関係のうち、投射する神経細胞群（投射主体）である神経細胞群である。被投射主体である神経細胞群は、このロール概念によって活性化あるいは非活性化される対象として定義される。

以上をまとめると、特定のコンテキスト、つまり、二つの神経細胞群間に投射関係があり、投射主体である神経細胞群が活性状態にある場合において、投射主体である神経細胞群が「ロールホルダー」である「活性化作用素」「非活性化作用素」としての役割を担った状態になることができる。この様子をオントロジーで記述したものを図 8.2 に示す。なおオントロジーの記述にあたっては、法造 [48]¹を用いた。

より具体的な神経回路を考える場合は、神経細胞群を具体的に与えること、つまりインスタンス化することであると考えられる。比較的仕組みがよく知られている衝動性眼球運動を例に挙げて考える。実際に、衝動性眼球運動に関与する神経回路の各構造とその挙動及び役割は次のように説明されている [29]。

眼球運動（サッケード）に関係する大脳基底核のニューロン機構は、直列的な2つの抑制性結合からなっている。黒質から上丘への抑制は持続的にはたらいていて、サッケードの発現をひとまず抑えておく。尾状核から黒質への抑制はふだんははたらかない。しかし、尾状核が大脳皮質からの記憶や予測に関係する信号を受けて活動すると、それによって黒質が抑制されて、上丘のサッケード機構を準備 OK の状態にする。

この事例においては、神経細胞群は「黒質」「尾状核」「上丘」「大脳皮質」で与えられる。ただし、ここで与えられている「大脳皮質」はこの説明粒度においては一つの神経細胞群であるが、別の文脈が与えられると神経細胞群の定義を満たさない可能性があることは十分に検討されるべきである。具体化された神経細胞群に対して、衝動性眼球運動の活性伝播に関するオントロジーは図 8.3 のように表現される。このように、活性伝播・非

¹http://www.hozo.jp/index_jp.html

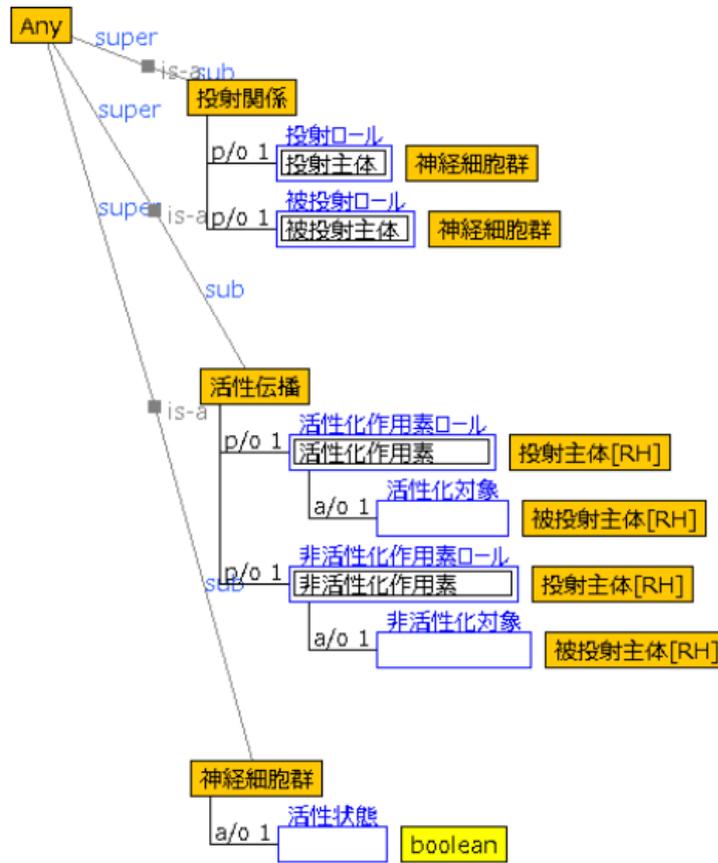


図 8.2: 活性伝播オントロジー

活性伝播の役割の観点から、衝動性眼球運動に参与する神経細胞群およびその役割を整理することができる。

8.3.4 挙動における役割と機能

前節では活性伝播というコンテキストにおいて、各神経細胞群が果たす役割について述べた。このコンテキストの中では、各神経細胞群は「活性化させる」「非活性化させる」という役割を有する。これらの役割は、先の衝動性眼球運動においては、上丘によるサッケードを発現するための大脳基底核（黒質・尾状核）のゲート機構 [29] についての機能を説明している。つまり、神経細胞群の特定の活性・非活性（挙動）の連鎖と、ゲート機構の特定の機能とが紐づけられることになる。

一方で、各神経細胞群を装置としてみたとき、このような他の神経細胞群を活性化・非活性化させることは B3 的振る舞いに該当する。B3 的振る舞いとは、装置などの対象物

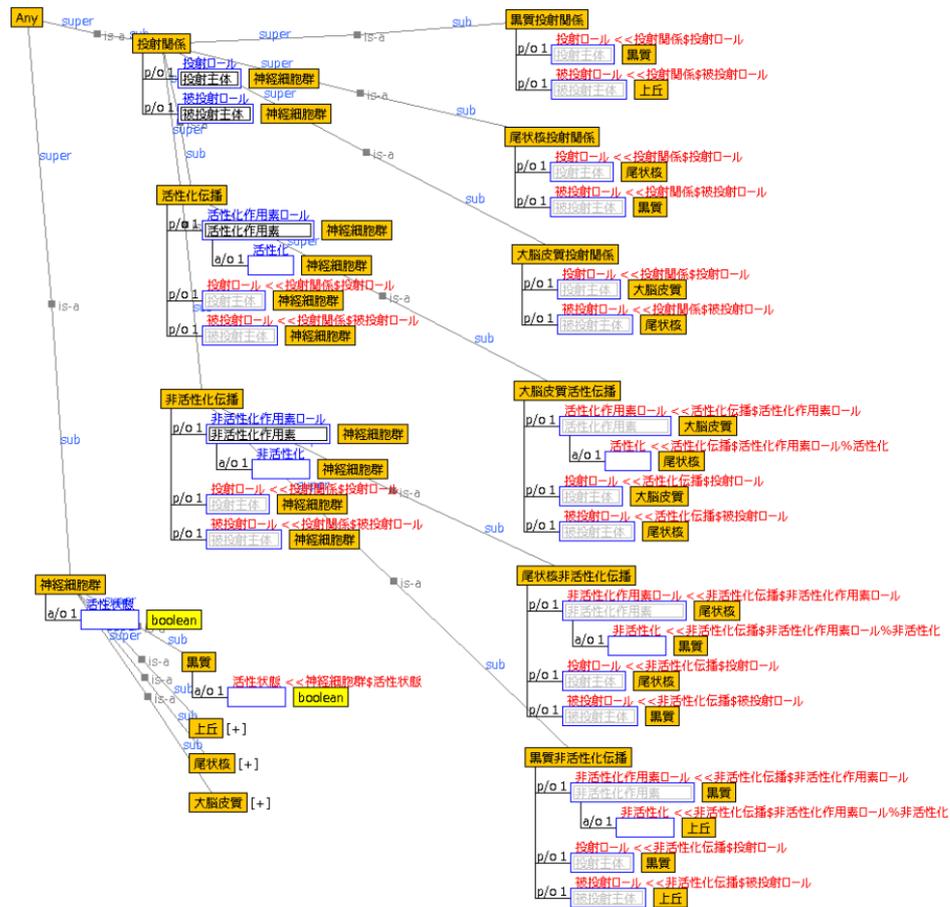


図 8.3: 衝動性眼球運動における活性伝播オントロジー

に働きかける主体が同じレベルの別の主体に働きかけることであり、接続されている装置から別の装置への作用を概念化する際のオントロジーを装置間作用オントロジーと呼び、デバイスオントロジーと区別している [45]. この意味では、神経科学的な説明でなされる別の神経細胞群を活性化非活性化させる作用として神経細胞群にロール概念を付与する見方はデバイスオントロジーとは異なる観点での対象の捉え方になっていることが指摘できる。

8.4 デバイスとしての神経細胞群

8.4.1 神経系におけるデバイス

來村ら [45] によれば、機能的知識を表現するためのオントロジーには、1) トップレベルオントロジー、2) 因果オントロジー・物理世界オントロジー、3) 拡張デバイスオントロジーといった階層的な関係から対象となる機能モデルを捉える枠組みが存在しているとしている。本研究もこの枠組みに則り、物理世界にあるシステムとして脳を捉えることで、デバイスオントロジーの観点から脳機能を体系的に整理することが重要であると考えている。そこで、対象となる神経系を構成するデバイスに分割し、分割されたデバイスが有する振る舞い (i.e.B1 的振る舞い) を整理する。

デバイスオントロジーにおいて、デバイス (装置) は媒体を介してある対象物の属性を別の属性へと変化させるものとして捉えられる。神経系においては、神経活動に伴う電気信号をその強度や発火頻度などの表現を介して様々な情報を伝播している。このことから、神経系においてデバイスとは、電気信号のパターンや発火頻度 (媒体) を介して、情報 (対象物) の表現系 (属性) を別の表現系へと変化させる神経細胞の集まり、と捉えることができる。デバイスとなることができるのは、着目する系において同型の結合様式をもつまとまりとして考えられる神経細胞群であり、これらは着目した系において個別的に定義される。以上を整理したものとして、表 8.1 に神経系におけるデバイスの概念を示す。このことから、脳機能モデルを構築する際においては、各部分機能を達成するデバイスがそれぞれどの神経細胞群であり、その神経細胞群が、どのような情報の表現系からどのような情報の表現系に変換する役割 (振る舞い) をもつのかについて記述されるべきである。

表 8.1: 神経系におけるデバイスの概念

デバイス	神経細胞群
対象物	情報 (属性: 情報の表現系)
媒体	電気信号 (のパターンや発火頻度)
振る舞い	情報表現の変換

8.4.2 衝動性眼球運動を実現するデバイス

本節では、デバイスオントロジーの観点に立ち、比較的神経科学的構造及びその機能が明らかな衝動性眼球運動 (SEM: Saccadic Eye Movements) を考察の対象とする。本節

表 8.2: 衝動性眼球運動を実現する神経系におけるデバイス

デバイス #	含まれる神経系	振る舞い
D_1	視覚野	視覚情報（視野領域全体）から視覚情報（目標領域）へ変換する
D_2	頭頂連合野	視覚情報（目標領域）から運動情報（注視点からの最短経路）へ変換
D_3	上丘	運動情報（注視点からの最短経路）から動作情報（眼筋動作実行）へ変換
D_4	前頭葉眼領域	記憶情報から動作情報（眼筋動作実行）へ変換
D_5	大脳基底核	動作情報（動作実行）から動作情報（動作終了）へ変換

の目的は、どのような観点でみれば構造的観点と機能的観点を取り入れた知識記述が可能であるかを試みることである。

SEM を実現する機能と構造

機能的に見れば、衝動性眼球運動を実現する部分機能は、「 f_1 ：（視野領域における）目標領域の決定」「 f_2 ：（眼球の）運動計画の構築」「 f_3 ：（眼球の）運動コマンドの構築」の三つからなる。明らかなように、運動する主体が「眼球」であることから例えば四肢運動との区別が行われる。この点において、必要となる機能的観点から見れば運動する主体が異なるだけで、「動く」という行為に至るまでに必要な機能には眼球運動も四肢運動も違いはないと考えられる。このように四肢運動と眼球運動の差異は、運動する主体にあり、機能的観点だけで見れば、四肢運動と眼球運動は運動という点で多くを共有しており、これらを区別するのは、運動主体をどこがどのように動かすかという構造的基盤に依存している。また、先の機能だけで見れば、衝動性眼球運動はそのほかの眼球運動、例えば滑動性追従性眼球運動と区別されない。これらを区別するのはやはりそれを実現する構造であり、どの構造がどのような部分機能を持つのか、それらがどのように達成されることで全体としての機能が実現されるのか、を区別して記述する必要があると考えられる。

衝動性眼球運動は、「随意的に注視点を変える運動のため指標を必要とせず運動中の視覚が低下する」[93] 性質をもつ。眼球運動は、大脳皮質由来の下行性の信号が上丘に至ることによって随意的な運動が実現されているが、普段は大脳基底核における尾状核および黒質毛様体の連携によって抑制性の信号が上丘に送られており、不要な眼球運動が起こらないように制御されている [29][93]。また、この運動の起点となるのは、網膜における対象（目標領域）であり、これは上丘および前頭葉眼領域によって処理される [93]。したがって、四肢運動と眼球運動を区別するのは構造的観点から見て、前頭葉眼領域の関与が重要であることが指摘される。このことから、先に挙げた三つの部分機能に加えて、「 f_4 ：記憶情報による動作の開始」「 f_5 ：動作の中止」の二つの部分機能を必要とする

ことが分かる。

デバイスの定義と SEM の実現

デバイスオンロジーの観点から系を捉える際はデバイスの振る舞いは B1 的振る舞いと呼ばれ、全てこの表現型デバイスの振る舞いを記述する。先の節に見た通り、衝動性眼球運動は $f_1 \sim f_3$ の 3 つの部分機能からなる。これらの部分機能はそれぞれ B1 的振る舞いから見直せば、 D_1 「視覚情報（視野領域全体）から視覚情報（目標領域）へ変換する」 D_2 「視覚情報（目標領域）から運動情報（注視点からの最短経路）へ変換する」 D_3 「運動情報（注視点からの最短経路）から動作情報（眼筋動作実行）へ変換する」 D_4 「記憶情報から動作情報（眼筋動作実行）へ変換する」 D_5 「動作情報（動作実行）から動作情報（動作終了）へ変換」と記述することができる。表 8.2 に本研究で設定した衝動性眼球運動を実現するデバイスを示す。これらのデバイスがそれぞれ順番に作用することによって衝動性眼球運動が実現される。たとえば、 D_1, D_2, D_3, D_4 がそれぞれ振る舞いを実行することによって衝動性眼球運動が達成され、 D_5 の振る舞いが実現されているとき、眼球運動は抑制されていると考えられる。

8.5 否定的感情形成メカニズムの体系的記述に向けて

前節でみた通り、与えられた機能（e.g. 衝動性眼球運動）がどのようなメカニズムで実現されているかについて、まず、目標となる機能を、その機能を達成するために必要な部分機能へ分解し、それらの部分機能を達成するデバイスとして構造（i.e. 神経細胞群）を割りあてることで記述を行った。このとき、デバイスは電気信号を媒体としてある「情報」を別の「情報」へと変換する神経細胞群として与えることで、一貫したデバイスによる知識記述を行うことが可能となる。前節で挙げた衝動性眼球運動は、その達成に関与する機能および構造が、これまでの神経科学的知見によって詳細に明らかになっているが、不気味の谷における否定的感情形成メカニズムに関しても一貫した知識記述の観点を提供することが期待される。第 II 部や第 III 部で構築した脳機能モデルにおいて、それぞれ想定された各脳部位、つまり神経細胞群は、全体の機能（i.e. ある顔特徴部位に視線を向ける、表出速度の異なる表情に対して否定的評価がなされる）において、部分機能を担っているものと考えられる。特に、扁桃体による生物学的重要性の判断・顔検出 [70] や、経験獲得的に得られた動作（i.e. 典型的動作）からの逸脱検出（ref.[86]）は、ともにヒト型エージェントに対する否定的な感情形成を説明する上では重要な部分機能で

あるが、これらは、いずれもヒト個体にとって重要な情報を検出しているという点では似通った機能である。このためには両者の重要性がどのような意味で同じなのか、あるいは異なるのか、といった「重要性」検出の意味の相違を検討し、相違がある場合は各「重要性」検出を担う神経細胞群が本質的に異なるのかどうかについても検討する必要があると考えられる。ひいては、「感情は価値判断システムである」[74]とする考えにおいても「価値」にはそもそもどういったものがあるのか、という機能分解を行うことにも対応づくものと考えられる。本節で検討したデバイスオントロロジー的見方[45]に基づく神経細胞群の定義は、この足掛かりとなる記述の観点を提供したと考えられる。

8.6 小括と課題

本節では、神経系における振る舞いである構造的知識と活性伝播に関する知識の整理を行った。また、拡張デバイスオントロロジーに基づいて、認知機能を、それを実現する部分機能へ分解し、分解した部分機能を有するデバイスという観点から整理し統一的に記述する体系について述べた。デバイスオントロロジーにおけるB1的振る舞いに着目することで、特定の神経細胞群を、電気信号における発火頻度やパターンを通して情報が伝達され、神経細胞群内で情報のある表現系から別の表現系に変換するデバイスであるとみなしていることを明示した。これによって、各デバイスがどのような情報表現からどのような情報表現に変換しているかとみなしているのかを明示することが必要であることが指摘された。また、具体的なドメインとして衝動性眼球運動を例に挙げ、衝動性眼球運動に関わる構造的知識と活性伝播に関する知識をオントロロジーを用いて記述した。さらに、衝動性眼球運動を実現するために必要な部分機能を考察し、デバイスオントロロジーの観点から各デバイスの振る舞いをB1的振る舞いによって記述した。この結果、5つの部分機能とその対応する神経基盤について整理を行った。

今後の課題として、機能に対する部分機能の分割の妥当性について詳細に吟味する必要がある。この部分機能の分割の妥当性を吟味することを通して、第II部、第III部で構築した否定的感情形成メカニズムに関与する脳機能モデルをデバイスオントロロジーの観点から記述することが期待される。また、各認知アーキテクチャやそれに基づいたモデルが、本記述体系によって整理することが可能かを検討する必要がある。特に第4章、第5章を本章で提示した枠組みで体系的に整理するかについて検討する必要がある。さらに、本記述体系においては動作の実行に要する時間を考慮に入れていない。系全体の振る舞いを推論する場合は、どのデバイスがどの順に作用するのかは各デバイスがどれくらいの時間で作用するのかに関する記述が今後重要な課題となる。

第 V 部

結論

第9章 総括

9.1 まとめ

本研究ではヒト型エージェントに対する否定的感情形成過程を説明する脳機能モデルの構築を志向し、(研究1)ヒト型エージェントの「顔」静止画および(研究2)動画である表情動作を対象とした(知覚)心理学的実験による現象の抽出と、現象を説明する脳機能モデルの構築を行った。さらに、これらの脳機能モデルを統一的な体系から理解することを志向して、デバイスオントロジーの枠組みから脳機能モデルの体系的な位置づけを行う必要性について言及した。また、この一環として、(研究3)神経科学的知識に基づく構造と振る舞いに関する知識記述に関するオントロジーを構築した。

第II部では、ヒト型エージェントの顔画像に対する知覚情報処理の特異性を視線計測を通して抽出することを試みた。この結果、ヒト型エージェントに対して人間は二段階の情報処理を行っていることが示唆された。具体的には、非常に雑多な知覚情報処理によって、ヒト型エージェントに対して人間を観察するときと同等の処理を行う処理と、精密な知覚情報処理によって、ヒト型エージェントを人間ではないとして判断し情報処理をする二段階のプロセスからなると考えた[12][89]。このような情報処理を実現する神経系のモデルとして、扁桃体、海馬、大脳皮質、線条体の機能に基づく定性的脳機能モデルの構築を行った。シミュレーションの結果、ヒト型エージェントの形態的異常度が高くなると、否定的な感情が形成され、視線もヒト型エージェントに対して固定されることが示唆された。この点を踏まえ、より視線遷移の枠組みも含めた定性的脳機能モデルを構築した。本モデルは、情動評価(扁桃体)と情動評価の一貫性評価(海馬)、対象に対する評価(大脳皮質)を機能としてもつ機能的結合からなる。シミュレーションの結果、形態的異常が顔に広く分布するエージェントにおいて、視線の変更率が高い場合は、対象に対する評価が振動することが示唆された。これは、対象に対する快-不快の評価が一意に定まらない状態であり、不気味さの様相を表現していると考えられた。

続く第III部では、ヒト型エージェントの顔動作、すなわち表情動作に着目し、表情の表出速度における典型性・非典型性が人間の印象に対して与える影響について検討した。この結果、外見によって否定的な印象を与えるエージェントは、表出速度が典型的速度

よりも速い笑顔において観察者に否定的な印象を与えることが示唆された。また、笑顔・怒り顔に関わらず、表出速度が遅い場合は否定的な印象を観察者に与えることが示唆された。さらに、このような遅い動作を行うエージェントに対して、人間は社会的な意図を汲み取ろうとする働きがあることが示唆された。表情表出速度の非典型性が否定的な印象を与えるという点について、予測誤差 [86] の観点から小脳によって予測された動作と知覚された動作が比較され、お互いに齟齬がある場合に否定的な感情が形成されると考え、これらを表現する定性的脳機能モデルを構築した。シミュレーションの結果、典型的な動作を予測する小脳機構に対して、知覚動作が非典型的な速度で表出されると齟齬が検出され、否定的な評価が増加することが示唆された。

第 IV 部では、これまでに構築した定性的脳機能モデルを体系的に位置づけるために、拡張デバイスオントロジー [45] の観点から脳機能モデルを記述する枠組みについて述べた。この上で、神経科学的観点から構造の活性伝播を捉える枠組みに関するオントロジーを、衝動性眼球運動に関する神経系を対象に構築した。この結果、神経科学的知識に基づく活性伝播、すなわちある神経細胞群が別の神経細胞群を活性化・抑制化させる作用として系を捉えることはデバイスオントロジーの観点とは異なる観点で系を捉えていることが示された。これを受けて、衝動性眼球運動を例として、デバイスオントロジーにおける B1 的振る舞いの観点から、神経細胞群を電気信号を媒体としてある「情報」から別の「情報」へと変換するデバイスとして定義した。これによって、機能 (i.e. 衝動性眼球運動) を、この機能を達成するための部分機能に分割し、その部分機能を達成するデバイスとして神経細胞群を捉えることを行った。この結果から、第 II 部および第 III 部で構築した否定的感情形成メカニズムに関わる各機能とその構造を体系的に記述する足掛かりができたと考えられる。

9.2 本研究の限界と今後の課題

第 II 部で得られた顔知覚に関する定性的脳機能モデルは、顔認知に特化した情報処理モデルには至っていない。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必要があると考えられる。また、用意した顔画像の刺激に関して、刺激の性差が結果に影響を与えた可能性がある。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。

第 III 部においては、表情認知は、顔の表情動作速度だけでなく、表情の形態的側面の影響を受けることが指摘されている [47][39]。今後は、顔の形態的側面が表情動作速度に与える影響をより詳細に検討する必要があると考えられる。また、表情動作を遅く提

示す場合においては、人間はその背後にある意図を読み取ろうとすることが示唆された。これは HPA の表情設計を考えるうえで重要な人間の認知特性であり、遅い速度で表情の提示を行うことで効果的な社会的意図を伝達できる可能性があることも併せて示唆している。今後はこの遅い速度において、否定的な印象を形成する点と効果的な意図の伝達が可能である点の境界がどこにあるのかについて詳細に検討する必要がある。さらに、本実験において採用された心理尺度としての違和感や親和感についてより詳細な定義が必要であると考えられる [39]。これらの用語は日常的な語句であることから、本実験における違和感や親和感に関して、実験参加者間で同様の観点で評価しているとは限らない。ところが、これらの用語は不気味の谷において重要な軸であることから、これらの用語の統一的な観点を整備することは今後 HPA の表情動作に対する否定的な感情と不気味の谷との関係を考察する上でも重要な課題となると考えられる。

第 II 部および第 III 部で構築した定性的脳機能モデルは、第 IV 部で指摘した通り、機能モデルに関する記述観点が統一されていない。今後は脳機能を統一的観点から記述するための拡張デバイスオントロジーの応用と記述方式の検討が期待される。また、一方で、このような記述方式が与えられたとしても、拡張デバイスオントロジーが与えるのは知識の体系的記述、概念の提供 [45] であり、このことから、体系的に記述された「構造-振る舞い-機能」に関する知識が与えられたとき、与えられた系への摂動に対して、系がどのように振る舞い、また機能が誘発されるのかについては別途推論機構が必要であることを要請する。今後はこのような知識を活用する推論機構の構築も期待される。

謝辞

本論文は、筆者が早稲田大学大学院人間科学研究科人間科学専攻修士課程および博士後期課程における研究成果をまとめたものです。日頃よりご指導を賜りました早稲田大学人間科学学術院 松居辰則 教授に心より感謝申し上げます。学士課程から博士後期課程にわたり、研究活動だけでなく研究・教育者として持つべき哲学を含め、あらゆる面において温かく、時に厳しく大変熱心なご指導を賜りました。ここに、重ねて感謝し厚く御礼申し上げます。また、早稲田大学人間科学学術院 齋藤美穂 教授、早稲田大学人間科学学術院 菊池英明 教授、玉川大学 工学研究科 大森隆司 教授には、本論文の副査として論文へのご助言をいただくとともに、日頃より議論の機会を頂きとても丁寧にご指導を賜りました。ここに深く御礼申し上げます。本論文を構成するにあたり、これまで多くの分野の諸先生方に幾度も議論の機会を頂戴し、数多くのご助言とご指導を賜りました。特に、神経科学的知見につきましては早稲田大学リサーチイノベーションセンター 枝川義邦 教授にお時間を頂き何度も議論をさせていただき、数多くのご助言を賜りました。定性的脳機能モデルについては、NPO 法人全脳アーキテクチャ・イニシアティブ代表 山川宏 様をはじめとする多くの先生方に学会や研究会で貴重なご助言を頂きました。あらためて感謝申し上げます。

筆者が研究室に配属されたときに早稲田大学人間科学学術院助教でいらっしゃいました現帝京大学ラーニングテクノロジー開発室 小島一晃 講師、博士後期課程の先輩でいらっしゃいました現埼玉大学理工学研究科 村松慶一 助教には、多くの厳しい議論を通して研究することの大変さや面白さを教えていただきました。また、学部時代に博士後期課程でいらっしゃいました山内千尋氏、堀口祐樹氏には卒業後にも研究の議論や研究室での様子など日常的な相談に乗っていただきました。卒業後も変わらずに集まり研究に関する議論をしてくれた同期の荒井浩己氏、奥園哲行氏、加えて、本研究に関して脳に興味を以て熱心に、時には徹夜で議論に付き合ってくれた近藤将氏、佐藤透真氏、中村遥佳氏、古澤嘉久氏をはじめとする研究室の皆様にもこの場をお借りして感謝申し上げます。

本研究の一部は、科学研究費基盤研究 (C) (一般) (課題番号: 18K11584) 「神経科学の知見による教授戦略モデルに基づく学習支援エージェントの設計基盤の開発」の助成を受けました。記して感謝いたします。

最後に、本研究の遂行と論文の執筆を陰ながら温かく見守ってくれた家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] 足立 祥啓, 柏原 昭博: 英文読み合いを実現する学習パートナーロボット, HAI シンポジウム, P8 (2017)
- [2] Aggleton, J.P. and saunders, R.C.: The amygdala: What's happened in the last decade?, In Aggleton, J.P. (ed.) *The Amygdala: A Functional Analysis - Second edition*, Oxford Press (2000)
- [3] Ahmed, A. and Simmons, Z.: Pseudobulbar affect: Prevalence and management, *Therapeutics and Clinical Risk Management*, Vol. 2013, No. 9, pp.483-489 (2013)
- [4] Anderson, J.R., Bothell, D., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C. and Qin, Y.: An integrated theory of the mind, *Psychological Review*, Vol. 111, No. 4, pp.1036–1060 (2004)
- [5] 安西 祐一郎: 認知科学とニューラルネットワーク, 計測と制御, Vol. 30, No. 4, pp.315–320 (1991)
- [6] Baylor, A.L. and Kim, Y.: Pedagogical agent design: The impact of agent realism, gender, ethnicity, and instructional role, In: Lester, J.C., Vicari, R.M., Paraguaçu, F. (eds) *Intelligent Tutoring System, ITS 2004. Lecture Note in Computer Science*, Vol. 3220, Springer:Berlin, Heidelberg (2004)
- [7] Bach, J.: *Principles of Synthetic Intelligence: Psi: An Architecture of Motivated Cognition*, Oxford University Press (2009)
- [8] Bach, J.: Modeling motivation and the emergence of affect in a cognitive agent, In. Wang, P. and Goertzel, B. (eds): *Theoretical Foundations of Artificial General Intelligence*, pp. 241–262 (2012)
- [9] Baumann, O. and Mattingley, J.B.: Functional topography of primary emotion processing in the human cerebellum, *Neuroimage*, Vol. 61, No. 4, pp.805–811 (2012)
- [10] Cassell, J., Bickmore: Embodied conversational agents: Representation and intelligence in user interface, *AI magazine*, Vol. 22, No. 4, pp.67–84 (2001)

- [11] Chaminade, T., Hodgins, J. and Kawato, M.: Anthropomorphism influences perception of computer-animated characters' actions, *Social cognitive and affective neuroscience*, Vol. 2, No. 3, pp.206–212 (2007)
- [12] 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)
- [13] アントニオ・R・ダマシオ (田中三彦 訳) : 感じる脳 情動と感情の脳科学: よみがえるスピノザ, ダイヤモンド社 (2005)
- [14] デビッド・マー (乾敏郎, 安藤広志 訳) : ビジョン : 資格の計算理論と脳内表現, 産業図書 (1987)
- [15] Dehaene, S., Dudai, Y. and Konen, C.: Cognitive architecture, *Neuron*, Vol. 88, No. 1, pp.1 (2015)
- [16] DiCarlo, J.J., Zoccolan, D. and Rust, N.C.: How does the brain solves visual object recognition, *Neuron*, Vol. 73, No. 3, pp.415–434 (2012)
- [17] Dörner, D. and Güss, C.D.: PSI: A computational architecture of cognition, motivation, and emotion, *Review of General Psychology*, Vol. 17, No. 3, pp.297-317 (2013)
- [18] Edwards, K.: The face of time: Temporal cues in facial expressions of emotion, *Psychological Sciences*, Vol. 9, No. 4, pp.270-276 (1998)
- [19] P・エクマン, W・J・フリーゼン (工藤力 訳編) : 表情分析入門 – 表情に隠された意味を探る –, 誠信書房 (2012)
- [20] Frith, C.D. and Frith, U.: Interacting minds: A biological basis, *Science*, Vol. 286, No. 5445, pp.1692–1695 (1999)
- [21] ジェリー・A・フォーダー (伊藤笏康, 信原幸弘 訳) : 精神のモジュール形式–人工知能と心の哲学–, 産業図書 (1985)
- [22] Fodor, J.A., Pylyshyn, Z.W.: Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis, *Cognition*, Vol. 28, pp.3–71 (1988)
- [23] Gallese, V. and Goldman, A.: Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 2, No. 12, pp.493–501 (1998)

- [24] Galanter, P.: Computational aesthetic evaluation: Past and future, *Computers in Creativity*, pp.255-293 (2012)
- [25] Gerber, A.J., Posner, J., Gorman, D., Colibazzi, T., Yu, S., Wang, Z., Kangralu, A., Zhu, H., Russell, J. and Peterson, B.S.: An affective circumplex model of neural systems subserving valence, arousal. & cognitive overlaying during the appraisal of emotional faces, *Neuropsychologia*, Vol. 46, No. 8, pp.2129–2139 (2008)
- [26] 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)
- [27] Hanson, D., Olney, A., Pereira, I.A. and Zielke, M.: Upending the uncanny valley, *Proceedings of the national conference on artificial intelligence*, Vol. 20, No. 4, Menlo Park, CA; Cambridge, MA; London; AAAI Press (2005)
- [28] Haxby, J.V., Hoffman, E.A. and Gobbini, M.I.: The distributed human neural system for face perception, *Trends in Cognitive Science*, Vol. 4, No. 6, pp.223–233 (2000)
- [29] 彦坂 興秀: 随意運動における大脳基底核の役割, 順天堂医学, Vol. 41, No. 2, pp.186–194 (1995)
- [30] Ho, C.C., MacDorman, K.F., Pramono, Z.D.: Human emotion and the uncanny valley: A GLM, MDS, and isomap analysis of robot video ratings, *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE international conference on Human robot interaction*, pp.169–176 (2008)
- [31] Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F.: A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *Journal of Physiology*, Vol. 117, No. 4, pp.500-544 (1952)
- [32] 伊佐 正: 「神経回路学」の時代, 日本神経回路学会誌, Vol. 20, No. 3, pp.97–99 (2013)
- [33] 井口 征士: 感性情報処理が目指すもの, 情報処理, Vol. 35, No. 9, pp.792–798 (1994)
- [34] 石黒 浩: アンドロイドサイエンス, システム制御情報学会誌, Vol. 49, No. 2, pp.47–52 (2005)
- [35] Izhikevich, E.M.: Simple model of spiking neurons, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 14, No. 6, pp.1569–1572 (2003)

- [36] Johnson, L.W., Rickel, J.W. and Lester, J.C.: Animated pedagogical agents: Face-to-face interaction in interactive learning environments, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 11, pp.47–78 (2000)
- [37] Johnson, M.H., Dziurawiec, S., Ellis, H. and Morton, J.: Newborns' preferential tracking of face-like stimuli and its subsequent decline, *Cognition*, Vol. 40, pp.1–19 (1991)
- [38] Kätsyri, J. and Sams, M.: The effect of dynamics on identifying basic emotions from synthetic and natural faces, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 66, No. 4, pp.233–242 (2008)
- [39] Kätsyri, J., Förger, K., Mäkäriäinen, M. and Takala, T.: A review of empirical evidence on different uncanny valley hypotheses: Support for perceptual mismatch as one road to the valley of eeriness. *Frontiers in psychology*, Vol. 6, pp.390–406 (2015)
- [40] 蒲池 みゆき, 吉川 左紀子, 赤松 茂: 変化速度は表情認知に影響するか?: 表情刺激を用いた顔表情認知の時間特性の解明, 電子情報通信学会技術報告 HCS, Vol. 98, No. 311, pp.17–24 (1998)
- [41] 川合 伸幸: 顔認識の熟達化に関する最近の研究の紹介, 認知科学, Vol. 14, No. 2, pp.217–222 (2007)
- [42] 川人 光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- [43] Kim, Y. and Baylor, A.L.: Research-based design of pedagogical agent roles: A review, progress, and recommendations, *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, Vol. 26, No. 1, pp.160–169 (2016)
- [44] 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)
- [45] 來村 徳信, 溝口 理一郎: オントロジー工学に基づく機能的知識体系化の枠組み, 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No. 1, pp.61–72 (2002)
- [46] 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)

- [47] 小森 政嗣: 自発的な表情はどのような動作から構成されるのか: 形態測定学的アプローチ, *基礎心理学研究*, Vol. 34, No. 1, pp.167-172 (2015)
- [48] 古崎 晃司, 來村 徳信, 溝口 理一郎: 「ロール」および「関係」に関する基礎的考察に基づくオントロジー記述環境の開発, *人工知能学会論文誌*, Vol. 17, No. 3, pp.196-208 (2002)
- [49] Krumhuber, E. and Kappas, A.: Moving smiles: The role of dynamic components for the perception of the genuineness of smiles, *Journal of Nonverbal Behavior*, Vol. 29, No. 1, pp.3-24 (2005)
- [50] Krumhuber, E.G., Kappas, A. and Manstead, A.S.R.: Effects of dynamic aspects of facial expression: A review, *Emotion Review*, Vol. 5, No. 1, pp.41-46 (2013)
- [51] Larson, S.D. and Martone, M.E.: Ontologies for neurosciences: What are they and what are they good for?. *frontiers in Neuroscience*, Vol. 3, No. 1, pp.60-67 (2009)
- [52] LeDoux, J.: エモーショナル・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)
- [53] Lewkowicz, D.J. and Ghanzanfar, A.A.: The development of the uncanny valley in infants, *Developmental Psychology*, Vol. 54, No. 2, pp.124-132 (2012)
- [54] MacDorman, K. F., Green, R. D., Ho, C.C. and 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)
- [55] Mäkäräinen, M., K[ä]tsyri, J. and Takala, T.: Exaggerating facial expressions: A way to intensify emotion or a way to the uncanny valley?, *Cognitive Computing*, Vol. 6, pp.708-721 (2014)
- [56] 松田 昇: 学習科学における教育エージェントの動向, *教育システム情報学会誌*, Vol. 35, No. 1, pp.13-20 (2018)
- [57] Matsuda, Y., Okamoto, Y., Ida, M., Okanoya, K. and Myowa-Yamakoshi, M.: Infants prefer the faces of strangers or mothers to morphed faces: An uncanny valley between social novelty and familiarity, *Biology letters*, Vol. 8, No. 5, pp.725-728 (2012)

- [58] 松本 有央, 岡田 真人, 木本 智幸, 銅谷 賢治, 菅生 康子, 山根 茂, 河野 憲二: サル側頭葉の顔細胞の集団ダイナミクス: MDS による解析と連想記憶回路によるモデル化, 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, Vol. 99, No. 686, pp.69–76 (2000)
- [59] 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)
- [60] Mitchell, W.J., Szerszen, K.A., Lu, A.S., Schermehorn, P.W., Scheutz and M., MacDorman, K.F.: A mismatch in the human realism of face and voice produces an uncanny valley, *i-Perception*, Vol. 2, pp.10–12 (2011)
- [61] Mizoguchi, R. and Kitamura, Y.: A functional ontology of artifacts, *The Monist*, Vol. 92, No. 3, pp.387–402 (2009)
- [62] 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)
- [63] 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)
- [64] Mori, M. translated by MacDorman, K.F. and Kageki, N.: The uncanny valley, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp.98–100 (2012)
- [65] 村田 哲: 脳の中にある身体, 開一夫, 長谷川寿一編: ソーシャルブレインズ: 自己と他者を認知する脳, 東京大学出版会 (2009)
- [66] 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)
- [67] 西田 豊明: 定性推論の諸相, 朝倉書店 (1993)
- [68] 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)
- [69] 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)

- [70] 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)
- [71] 大澤 博隆; ヒューマンエージェントインタラクションから見る人工物・人工システムのエージェント性, 日本ロボット学会誌, Vol. 31, No. 9, pp.868–873 (2013)
- [72] 大澤 博隆: 人工知能はどのように擬人化されるべきなのか?: ヒトの擬人化傾向に関わる知見と応用, 人工知能学会誌, Vol. 29, No. 2, pp.182–189 (2014)
- [73] 大島 康, 森 大毅, 中村 真: 表情の変化速度がアバターの感情表出の自然性に与える影響, HAI シンポジウム 2008, 1E-3 (2008)
- [74] 大森 隆司: 試論: 人はなぜ感情をもつのか: 行動決定における感情の計算論的役割, 人工知能学会誌, Vol. 31, No. 5, pp.710–714 (2016)
- [75] Palermo, R. and Rhodes, G.: Are you always on my mind? A review of how face perception and attention interact, *Neuropsychologia*, Vol. 45, pp.75–92 (2007)
- [76] Pascalis, O., de Haan, M. and Nelson, C.A.: Is face processing species-specific during the first year of life?, *Science*, Vol. 296, No.5571, pp.1321–1323 (2002)
- [77] Peterson, S.E. and Sporns, O.: Brain networks and cognitive architectures, *Neuron*, Vol. 88, No. 1, pp.207–219 (2015)
- [78] Pessoa, L.: Understanding brain networks and brain organization, *Physics of Life Reviews*, Vol. 11, No. 3, pp.400-435 (2014)
- [79] Picard, R.W.: Affective computing, *M.I.T. Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report*, No.321 (1995)
- [80] Posner, J., Russell, J. and Peterson, B.S.: The circumplex model of affect: An integrative approach to affective neuroscience, cognitive development, and psychopathology, *Development and psychopathology*, Vol. 17, No. 3, pp.715–734 (2005)
- [81] Premack, D. and Woodruff, G.: Does the chimpanzee have a theory of mind?, *The Behavioral and Brain Sciences*, Vol. 1, No. 4, pp.515–526 (1978)
- [82] Purves. D., Augustine, G.J., Fitzpatrick, D., Hall, W.C., LaMantia, A. and White, L.E. (eds): *Neuroscience - Fifth edition*, Sinauer Associates Inc., Sunderland, Massachusetts, U.S.A. (2011)

- [83] Reeves, B. and Nass, C.: The media equation: How people treat computers, television, and new media like real people and places. Cambridge University Press (1996)
- [84] 笹島 宗彦, 來村 徳信, 池田 満, 溝口 理一郎: 機能と振る舞いのオントロジーに基づく機能モデル表現言語 FBRL の開発, 人工知能学会誌, Vol. 11, No. 3, pp.420–431 (1995)
- [85] Sato, W. and Yoshikawa, S.: The dynamic aspects of emotional facial expressions, *Cognition and Emotion*, Vol. 18, No. 5, pp.701–710 (2004)
- [86] 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)
- [87] Schein, C., Gray, K.: The eyes are the window to the uncanny valley: Mind perception, autism and missing souls. *Interaction Studies*, Vol. 16, No. 2, pp.173–179 (2015)
- [88] 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)
- [89] 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)
- [90] Simon, F., Valenza, E., Cassia, V.M., Turati, C. and Umiltá, C.: Newborns' preference for up-down assymmetrical configurations, *Developmental Science*, Vol. 5, No. 4, pp.427–434 (2002)
- [91] ハーバート・A・サイモン (稲葉元吉, 吉原英樹, 稲葉洋平訳) : システムの科学 第3版, パーソナルメディア (2010)
- [92] Steckenfinger, S. A. and 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)
- [93] 須藤 和昌: 眼球運動の神経学的背景, バイオフィールドバック研究, Vol. 24, pp.45–49 (1997)
- [94] 鈴木 貴之: 「心の理論」とは何か, 科学哲学, Vol. 35, No. 2, pp.83–94 (2002)

- [95] 田川 聖治, 広永 美喜也, 阿部 孝司: 表情アニメーション付きプログラミング教育支援システムの開発とアンケート調査による評価, 情報教育シンポジウム 2012 論文集, pp.9-14 (2012)
- [96] 竹谷 誠: 評定尺度データの意味構造分析法, 行動計量学, Vol. 14, No. 2, pp.10-17 (1987)
- [97] 田中 博: 定性推論とオントロジー: 定性推論の基礎的原理, In. 淵 一博 (監修) 定性推論, 共立出版 (1989)
- [98] 田和辻 可昌, 村松 慶一, 松居 辰則: 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, 人工知能学会論文誌, Vol. 30, No. 5, pp. 626-638 (2015)
- [99] 田和辻可昌, 近藤佑亮, 松居辰則: 人型エージェントによる不気味な笑顔表出に対する小脳の内部モデルを用いた異常検知メカニズムの記述の試み, 第 1 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-001-007 (2015)
- [100] 田和辻可昌, 松居辰則: 脳機能から見た人型エージェントに対する否定的感情生起プロセス, 人工知能学会誌, Vol. 31, No. 5, pp. 656-663 (2016)
- [101] 田和辻可昌, 松居辰則: 人型エージェントの表情動作に対する否定的情動評価プロセスを表現する定性的脳機能モデルの提案, 第 4 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-004-007 (2016)
- [102] 田和辻可昌, 松居辰則: ヒト型エージェントの表情動作速度の非典型性が表情認知に与える影響に関する実験的検討, 教育システム情報学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 251-257 (2019)
- [103] 田和辻可昌, 松居辰則: 表情認知において神経細胞群が果たすロール概念の整理と構造的知見に基づいた機能推論方法の検討, 第 12 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-012-08 (2019)
- [104] 田和辻可昌, 中村遥佳, 松居辰則: 拡張デバイスオントロジーに基づいた定性的脳機能モデルの記述体系の構築の試み, 第 13 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-013-08 (2019)
- [105] Terada, S., Takahashi, S. and Sakurai, Y.: Oscillatory interaction between amygdala and hippocampus coordinates behavioral modulation based on reward expectation, *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, Vol. 7, No. 177 (2013)

- [106] 寺尾 敦: 認知アーキテクチャ理論による脳の構造と機能の解明, 電子情報通信学会誌, Vol. 98, No. 12, pp.1083–1090 (2015)
- [107] 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)
- [108] Tinwell, A., Grimshaw, M., Nabi, D.A. and Williams, A.: Facial Expression of emotion and perception of the uncanny valley in virtual characters, *Computers in Human Behavior*, Vol. 27, pp.741–749 (2011)
- [109] Tinwell, A., Nabi, D.A. and Charlton, J.P.: Perception of psychopathy and the Uncanny Valley in virtual characters, *Computers in Human Behavior*, Vol.29, pp.1617–1625 (2013)
- [110] 飛松 省三: 事象関連電位を用いた顔認知機構の解明, *Brain and Nerve*, Vol. 64, No. 7, pp.717–726 (2012)
- [111] 辻 三郎: 感性情報処理, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7, pp.916–919 (1999)
- [112] 辻井潤一, 安西祐一郎: 認知科学選書：機械の知 人間の知, 東京大学出版会 (1988)
- [113] Urgen, B. A., Li, A. X., Berka, C., Kutas, M., Ishiguro, H., Saygin, A. P.: Predictive Coding and the Uncanny Valley hypothesis: Evidence from electrical brain activity. *Cognition: A Bridge between Robotics and Interaction*. pp.15–21 (2015)
- [114] 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)
- [115] 山田 寛: 顔面表情の知覚的判断仮定に関する説明モデル, *心理学評論*, Vol. 43, No. 2, pp.245–255 (2000)
- [116] 山田 寛, 内田 英子, 四倉 達夫, 森島 繁生, 鉄谷 信二, 赤松 茂: 高速度カメラで捉えた自発表情と演技表情の動的変化, 電子情報通信学会技術研究報告 HCS, Vol. 100, No. 712, pp.27–34 (2001)
- [117] 山田 誠二: HAI 研究のオリジナリティ, *人工知能学会誌*, Vol. 24, No. 6, pp.810–817 (2009)

- [118] Yamada, Y., Kawabe, T. and Ihaya, K.: Categorization difficulty is associated with negative evaluation in the “uncanny valley” phenomenon, *Japanese Psychological Research*, Vol. 55, No. 1, pp.20–32 (2012)
- [119] 山尾 幸広, 芝田 純也, 宇佐美 清英, 松本 理器編訳: 脳幹の感覚機能, 運動機能, 反射機能. In. *カンデル神経科学 Fifth Editoin*, メディカル・サイエンス・インターナショナル, pp.999-1015 (2014)
- [120] 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)

研究業績

- 学術雑誌 (査読有り)

- 1) 田和辻可昌, 松居辰則: ヒト型エージェントの表情動作速度の非典型性が表情認知に与える影響に関する実験的検討, 教育システム情報学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 251–257 (2019)
- 2) 金今直子, 大山直子, 田和辻可昌, 松居辰則: 意味構造分析を用いた統合失調症患者の顔映像に対する医療従事者の病状評価構造の形式化, 日本感性工学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 381–391 (2018)
- 3) 高松美也子, 田和辻可昌, 松居辰則: 視覚に依存した形式的情報を音声言語に置換する音訳の間(ま)の評価, 日本感性工学会論文誌, Vol. 17, No. 1, pp. 89–98 (2018)
- 4) 宮原佐智子, 田和辻可昌, 松居辰則: 校歌の歌詞から感じる「なつかしさ」の生起モデルの構築, Vol. 16, No. 1, pp. 109–119 (2017)
- 5) 高松美也子, 田和辻可昌, 松居辰則: 音訳者が文章構造を表現するために挿入する句読点の「間(ま)」の構造的特徴, 日本感性工学会論文誌, Vol. 15, No. 1, pp. 85–95 (2016)
- 6) 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 脳の機能的結合に関する定性表現を用いたヒト型エージェントに対する情動状態記述の試み, 人工知能学会論文誌, Vol. 30, No. 5, pp. 628–638 (2015)

- 学術雑誌 (査読なし)

- 1) 田和辻可昌, 松居辰則: 脳機能から見た人型エージェントに対する否定的感情生起プロセス, 人工知能学会誌, Vol. 31, No. 5, pp. 656–663 (2016)

- 国際会議 (査読有り)

- 1) Tatsunori MATSUI, Yoshimasa TAWATSUJI, Siyuan FANG and Tatsuro UNO: Conceptualization of IMS that Estimates Learners' Mental States from Learners' Physiological Information Using Deep Neural Network Algorithm, In Coy A., Hayashi

- Y., Chang M. (eds) *Intelligent Tutoring Systems. ITS 2019. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11528, Springer:Cham (2019)
- 2) Yoshimasa TAWATSUJI, Tatsuro UNO, Siyuan FANG and Tatsunori MATSUI: Real-time Estimation of Learners' Mental States from Learners' Physiological Information Using Deep Learning, In *Proceedings of the 26th International Conference on Computers in Education*, pp. 107-109 (2018)
 - 3) Siyuan FANG, Yoshimasa TAWATSUJI and Tatsunori MATSUI: Experimental Evidence for the Existence of Noisy Colors Effect in Modern Japanese Culture, In *The 25th Congress of the International Association of Empirical Aesthetics*, (2018)
 - 4) Yoshimasa TAWATSUJI, Tatsuro UNO, Keita OKAZAKI, Siyuan FANG and Tatsunori MATSUI: Extraction of Relationships between Learners' Physiological Information and Learners' Mental States by Machine Learning, In *Proceedings of the 25th International Conference on Computers in Education (ICCE2017)*, pp. 56–61 (2017)
 - 5) Yoshimasa TAWATSUJI, Yuki YASUDA and Tatsunori MATSUI: Construction of Recommender System based on Cognitive Model for “Self-Reflection”, In *Proceedings of the 5th International Conference on Human Agent Interaction (HAI2017)*, Poster-II, pp. 517–522 (2012)
 - 6) Yoshimasa TAWATSUJI and Tatsunori MATSUI: Proposal for Primitives Representing Brain Function of Facial Expression Recognition, In *Proceedings of the 24th International Conference on Computers in Education (ICCE2016)*, pp. 94–95 (2016)
 - 7) Yoshimasa TAWATSUJI and Tatsunori MATSUI: Qualitative Model for Neuro-functional Mechanism Inducing Human Error Detection to Humanlike Agents based on Cortico-Cerebellar Function, In *Proceedings of Poster' Extended Abstract on HCI International(HCI2016)*, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 618, pp. 194–200 (2016)
 - 8) Yoshimasa TAWATSUJI, Yuki IIZUKA and Tatsunori MATSUI: An Experimental Study on the Effect of Repeated Exposure of Facial Caricature on Memory Representation of a Model's Face, In *Proceedings of the 17th International Conference on Human Computer Interaction (HCI2015)*, *Lecture Note in Computer Science*, Vol. 9171, pp. 514–524 (2015)
 - 9) Yoshimasa TAWATSUJI, Keiichi MURAMATSU and Tatsunori MATSUI: Proposal

for the Model of Occurrence of Negative Response toward Humanlike Agent Based on Brain Function by Qualitative Reasoning, In *Proceedings of the 16th International Conference on Human Computer Interaction (HCI2014), Lecture Note in Computer Science*, Vol. 8511, pp. 768–778 (2014)

- 10) Yoshimasa TAWATSUJI, Keiichi MURAMATSU, Kazuaki KOJIMA and Tatsunori MATSUI: Explanation for Human Sensitive Response to a Humanlike Agent Focusing on Amygdalar Function, In *Proceedings of the 1st International Conference on Human-Agent Interaction (HAI2013)*, II-p20 (2013)
 - 11) Yoshimasa TAWATSUJI, Kazuaki KOJIMA and Tatsunori MATSUI: Experimental Study Toward Modeling of the Uncanny Valley Based on Eye Movements on Human/Non-human Faces, In *Proceedings of the 15th International Conference on Human Computer Interaction (HCI2013), Lecture Note in Computer Science*, Vol. 8007, pp. 398–407 (2013)
- 国際会議 (査読なし)
 - 1) Yoshimasa TAWATSUJI, Tatsuro UNO, Keita OKAZAKI, Siyuan FANG, Tatsunori MATSUI: Formalization of relationships between learners' physiological information and learners' mental states by deep neural network, *The 1st International Conference on Learning Analytics Summer Institute Asia (LASI-Asia)*, (2017)
 - 国内学会・研究会 (査読無し)
 - 1) 古澤嘉久, 田和辻可昌, 松居辰則: 時系列情報を考慮したオンデマンド授業視聴時の学習者の心的状態推定モデルの提案, 第 87 回先進的学習科学と工学研究会 (2019)
 - 2) 志村友, 田和辻可昌, 松居辰則: 学習支援ロボットの表情と身体動作が学習者に付与する「安心感」に関する実験的検討, 第 87 回先進的学習科学と工学研究会 (2019)
 - 3) 田和辻可昌, 中村遥佳, 松居辰則: 拡張デバイスオンロジーに基づいた定性的脳機能モデルの記述体系の構築の試み, 第 13 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-013-08 (2019)
 - 4) 古澤嘉久, 田和辻可昌, 松居辰則: 学習者の心的状態を推定する機械学習器の解釈可能性を志向した分析的アプローチの提案, 第 44 回教育システム情報学会全国大会, A5-3 (2019)

- 5) 大崎理乃, 田和辻可昌, 長谷川理: 2018 年度教育システム情報学会学生研究発表会 (関東地区) におけるグループワークによる人材育成 – 産学連携をテーマとした越境的学習の取り組み –, 第 44 回教育システム情報学会全国大会, P1-11 (2019)
- 6) 方思源, 田和辻可昌, 松居辰則: Relationships Between Prototypicality and Preference in Different Painting Styles, 第 36 回日本認知科学学会大会, P1-2 (2019)
- 7) 中村遥佳, 田和辻可昌, 松居辰則: 脳機能モデルによるマインドフルネス時の感情制御メカニズムの説明, 第 29 回日本神経回路学会全国大会, OS3-28, pp.26-27 (2019)
- 8) 田和辻可昌, 松居辰則: 表情認知において神経細胞群が果たすロール概念の整理と構造的知見に基づいた機能推論方法の検討, 第 12 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-012-08 (2019)
- 9) 古澤嘉久, 田和辻可昌, 松居辰則: Homographic Adaptation に基づく Grad-CAM の平滑化手法の提案, 第 22 回画像の認識・理解シンポジウム, PS2-15 (2019)
- 10) 古澤嘉久, 田和辻可昌, 松居辰則: 学習者の心的状態推定モデルが獲得した潜在的分類観点と判断根拠抽出の試み, 第 86 回先進的学習科学と工学研究会, B901-1, pp.1-5 (2019)
- 11) 中村遥佳, 方思源, 田和辻可昌, 松居辰則: 評価理論に基づくマインドフルネス瞑想を起点とするポジティブ再評価誘発メカニズムに関する脳機能モデルの構築, 第 33 回人工知能学会全国大会, 4C2-J-1-04 (2019)
- 12) 古澤嘉久, 田和辻可昌, 松居辰則: 解釈可能性をもたらすヒートマップの変化に着目した過剰学習が CNN にもたらす影響の検討, 第 33 回人工知能学会全国大会, 2Q3-J-2-01 (2019)
- 13) 田和辻可昌, 古澤嘉久, 松居辰則: 多因子モデルに基づく学習者の心的状態推定モデルの性能評価の試み, 2019 年度教育システム情報学会研究会, 2-4 (2019)
- 14) 伊東天晴, 田和辻可昌, 松居辰則: 定性推論に基づいた神経系の挙動解析を実現するプラットフォームの構築, 第 14 回日本感性工学会春季大会, 1F03 (2019)
- 15) 乙メ佑太朗, 田和辻可昌, 松居辰則: 姿勢遷移モデルに基づいた話しの会話意欲を誘発する擬人化エージェントの構築, 第 14 回日本感性工学会春季大会, 1F02 (2019)
- 16) 下田香織, 田和辻可昌, 松居辰則: 教授学習過程における道德観の伝達感評価尺度の構築 – 自己開示の有無による対話の伝達感の相違の実験的検討 –, 2018 年度 JSiSE 学会学生研究発表会, A09 (2019)

- 17) 章毓イ, 田和辻可昌, 松居辰則: 視線計測を用いた学習者の集中力の変化の検出と Robot による集中力回復の試み, 2018 年度教育システム情報学会学生研究発表会, A05 (2019)
- 18) 田和辻可昌, 山元翔, 米谷雄介, 林佑樹: 第 26 回 教育・学習支援システム若手の会 報告, 第 85 回先進的学習科学と工学研究会, SIG-ALST-B803-16, pp.80-85 (2019)
- 19) 田和辻可昌, 松居辰則: 細胞群間の神経情報伝播における表現プリミティブの検討, 第 85 回先進的学習科学と工学研究会, SIG-ALST-B803-11, pp.59-62, A05 (2019)
- 20) 近藤将, 田和辻可昌, 松居辰則: アストロサイトのはたらきを導入した連想記憶モデルにおける想起過程の分析, 信学技報: NC 研究会, Vol. 118, No. 322, pp.17-21 (2018)
- 21) 金今直子, 大山直子, 上原仁実, 田和辻可昌, 松居辰則: ヒューマノイドロボットによる病状伝達が統合失調症患者の病状自己評価に与える影響の実験的検討, 第 7 回日本精神科医学会学術大会, S6-4 (2018)
- 22) 松居辰則, 田和辻可昌: 深層ニューラルネットワークを用いた学習者の生体情報からの心的状態推定モデルにおける中間層の可視化の試み, 電子情報通信学会技術研究報告; 教育工学, Vol. 118, No. 214, pp.31-36 (2018)
- 23) 田和辻可昌, 松居辰則: ヒト型エージェントの表情動作速度の非典型性が表情認知に与える影響に関する実験的検討, 第 43 回教育システム情報学会全国大会, D6-1 (2018)
- 24) 千賀理江, 金今直子, 四方庸子, 田和辻可昌, 松居辰則: デザインにおける「間」と高級感表出との関係に関する定量的分析, 第 20 回日本感性工学会全国大会, A57 (2018)
- 25) 佐藤真一, 岡崎桂太, 金今直子, 四方庸子, 田和辻可昌, 松居辰則: 移動中における屋外広告の背景色に対する印象の実験的検討, 第 20 回日本感性工学会全国大会, E3 (2018)
- 26) 宇野達朗, 田和辻可昌, 松居辰則: 機械学習を用いた生体情報からの学習者の心的状態のリアルタイム推定と学習支援の試み, 第 43 回教育システム情報学会全国大会, SP-1 (2018)
- 27) 佐藤透真, 田和辻可昌, 松居辰則: 身体性を伴う直観的行動選択に関する脳の構造モデルの構築, 第 20 回日本感性工学会全国大会, P-25 (2018)

- 28) 柳澤寛光, 田和辻可昌, 松居辰則: メタ記憶モニタリングによる納得感の創発モデルの構築, 第 20 回日本感性工学会全国大会, D26 (2018)
- 29) 志村友, 田和辻可昌, 松居辰則: エージェントとのインタラクションによる安心感の付与とそのメカニズムの心理モデルの構築, 第 20 回日本感性工学会全国大会, D23 (2018)
- 30) 田和辻可昌, 宇野達朗, 松居辰則: 感情減衰現象に着目した生体情報に基づく心的状態推定の試み, 第 83 回先進的学習科学と工学研究会, SIG-ALST-B507-08, pp.44-49 (2018)
- 31) 松居辰則, 宇野達朗, 田和辻可昌: 心的状態の時間遅れと持続モデルを考慮した生体情報からの学習者の心的状態推定の試み, 第 32 回人工知能学会全国大会, 4H1-OS-9a-05 (2018)
- 32) 田和辻可昌, 松居辰則: 定性ニューロンを用いた衝動性眼球運動を支える神経基盤の構造記述と挙動解析, 第 32 回人工知能学会全国大会, 2B4-03 (2018)
- 33) 大川悠翔, 田和辻可昌, 松居辰則: Twitter を用いたトランプ氏の発言による投資家の感情変化と為替変動の関係性の定量的分析, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而立の会×志学の会合同企画 若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-16 (2018)
- 34) 串本健介, 田和辻可昌, 松居辰則: 人-ロボット間における「意図の共感」を誘引するロボットの身体表現抽出の試み, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而立の会×志学の会合同企画 若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-15 (2018)
- 35) 柳澤寛光, 田和辻可昌, 松居辰則: TOT(Tip of the Tongue) 状態解消に向けた推移に関する認知モデルの構築, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而立の会×志学の会合同企画 若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-14 (2018)
- 36) 保戸田健人, 田和辻可昌, 松居辰則: Deep Learning による色と形の組み合わせに対する審美的評価過程の解析の試み, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而立の会×志学の会合同企画 若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-13 (2018)
- 37) 服部和南, 田和辻可昌, 松居辰則: ユーザの感情推定に基づくセラピーミュージック提供に向けた基盤データベースの構築, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而立の会×志学の会合同企画 若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-12 (2018)
- 38) 志村友, 田和辻可昌, 松居辰則: エージェントのインタラクションによる安心感の付与とそのメカニズムの心理モデルの構築, 第 13 回日本感性工学会春季大会「而

- 立の会×志学の会合同企画「若手研究者×学生交流研究発表会」, WP2-11 (2018)
- 39) 金今直子, 大山直子, 田和辻可昌, 松居辰則: 意味構造分析を用いた統合失調症患者の顔映像に対する医療従事者の病状評価構造の形式化, 第13回日本感性工学会春季大会, TG3-4 (2018)
- 40) 田和辻可昌, 松居辰則: 脳の構造的知識に基づいた新奇刺激に対する衝動性眼球運動を実現する神経ネットワークの挙動推論, 第8回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-008-004 (2018)
- 41) 瀧井夏, 田和辻可昌, 松居辰則: 中高生を対象とした生涯学習志向性尺度の作成とその実践的利用, 2017年度JSiSE学生研究発表会, B06 (2018)
- 42) 宇野達朗, 田和辻可昌, 松居辰則: 機械学習を用いた生体情報からの学習者の心的状態のリアルタイム推定と学習支援の試み, 2017年度JSiSE学生研究発表会, B05 (2018)
- 43) 金今直子, 大山直子, 上原仁実, 田和辻可昌, 松居辰則: 統合失調症患者の病状理解促進を目指した病状伝達ロボット導入の有効性に関する実験的検討, HAI シンポジウム 2017, G-1 (2017)
- 44) 宮原佐智子, 田和辻可昌, 松居辰則: 校歌における曲想イメージ評価のための印象語の選定, 第19回日本感性工学会全国大会, E76 (2017)
- 45) 萩原愛, 田和辻可昌, 松居辰則: 即応型擬人化エージェントの外見と動作がユーザ印象に与える影響, 第19回日本感性工学会全国大会, E72 (2017)
- 46) 金今直子, 大山直子, 田和辻可昌, 松居辰則: 意味構造分析を用いた統合失調症患者の顔映像に対する医療従事者の病状評価構造の形式化, 第19回日本感性工学会全国大会, E71 (2017)
- 47) 神谷宏, 田和辻可昌, 松居辰則: 自然に対する畏敬の念の伝承に関するモデルの検討, 第19回日本感性工学会全国大会, C44 (2017)
- 48) 記伊実香, 田和辻可昌, 松居辰則: 画像のタイトル生成時の人工物と自然物に対する概念参照の相違点に関する実験的検討, 第19回日本感性工学会全国大会, C42 (2017)
- 49) 高松美也子, 田和辻可昌, 松居辰則: 視覚に依存した形式的情報を音声言語に置換する音訳の間(ま)の評価, 第19回日本感性工学会全国大会, D41 (2017)
- 50) 田和辻可昌, 松居辰則: 表情表現の不均一性を起因とした予測誤差検出過程を表現する定性的脳機能モデルの提案, 第42回教育システム情報学会全国大会, I2-11

(2017)

- 51) 松居辰則, 宇野達朗, 岡崎桂太, 田和辻可昌: 機械学習を用いた学習者の生体情報からの心的状態推定の試み, 第42回教育システム情報学会全国大会, C4-2 (2017)
- 52) 松居辰則, 宇野達朗, 田和辻可昌: 心的状態の持続モデルを考慮した生体情報からの学習者の心的状態推定の試み, 第80回先進的学習科学と工学研究会, B507-08, pp.44-49 (2017)
- 53) 松居辰則, 岡崎桂太, 田和辻可昌: 学習者の多面的情報を用いた心的状態の推定の試み, 電子情報通信学会技術研究報告; 教育工学, Vol.117, No.119, pp.45-50 (2017)
- 54) 田和辻可昌, 松居辰則: 時間概念を考慮した表情認知に係る脳機能の定性的記述に関する枠組みの提案, 第31回人工知能学会全国大会, 3K1-OS-06a-3 (2017)
- 55) 松居辰則, 田和辻可昌: 機械学習を用いた学習者の生体情報と心的状態の関係性抽出の試み, 第31回人工知能学会全国大会, 1F2-OS-26b-2 (2017)
- 56) 安田有希, 田和辻可昌, 松居辰則: メタ認知的活動に着目した反省モデルを有した食事推薦エージェントの有効性の検証, 第31回人工知能学会全国大会, 1F1-OS-26a-5 (2017)
- 57) 萩原愛, 田和辻可昌, 松居辰則: 即応型擬人化エージェントの外見と動作がユーザ印象に与える影響, 教育システム情報学会2017年度第1回研究会, A3-1 (2017)
- 58) 田和辻可昌, 宇野達朗, 岡崎桂太, 松居辰則: 機械学習を用いた学習者の生体情報からの心的状態推定の試み, 第1回学習分析学会研究会, 5 (2017)
- 59) 奥村和生, 方思源, 田和辻可昌, 松居辰則: 自閉スペクトラム症の物体認識特性を表現する定性的脳機能モデルの構築 – ナボン図形 (Navon figure) の認識を題材として –, 第12回日本感性工学会春季大会, 2C-16 (2017)
- 60) 田和辻可昌, 松居辰則: 発達段階に伴う顔モデルの形成と不気味の谷, 第12回日本感性工学会春季大会, 1B-14 (2017)
- 61) 安田有希, 田和辻可昌, 松居辰則: “反省”モデルに基づく情報推薦エージェントアーキテクチャの構築, 第79回先進的学習科学と工学研究会@函館, B506-5, pp.23-28 (2017)
- 62) 近藤将, 方思源, 田和辻可昌, 松居辰則: ポジティブな気分が生起する過程の心理モデルの提案, 2016年度JSiSE学生研究発表会, A04 (2017)
- 63) 田和辻可昌, 松居辰則: 人型エージェントによる表情表現の不均一性が観察者の心的評価に与える影響, 2016年度JSiSE学生研究発表会, A05 (2017)

- 64) 田和辻可昌, 松居辰則: 人型エージェントの表情動作に対する否定的情動評価プロセスを表現する定性的脳機能モデルの提案, 第4回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-004-007 (2016)
- 65) 萩原愛, 田和辻可昌, 松居辰則: 「適応ギャップ」の擬人化エージェントへの否定的印象に与える影響に関する実験的検討, HAI シンポジウム 2016, 47 (2016)
- 66) 安田有希, 田和辻可昌, 松居辰則: 失敗を利用した情報推薦エージェントの実現に向けた“反省”モデルの構築, HAI シンポジウム 2016, 18 (2016)
- 67) 宮原佐智子, 田和辻可昌, 松居辰則: 校歌の歌詞から感じる「なつかしさ」の生起モデルの構築, 第18回日本感性工学会全国大会, D56 (2016)
- 68) 記伊実香, 田和辻可昌, 松居辰則: 画像のタイトル生成にみられる印象と言語表現の近似化特徴に関する実験的検討, 第18回日本感性工学会全国大会, G52 (2016)
- 69) 神谷宏, 田和辻可昌, 松居辰則: 自然に対する畏敬の念の生起メカニズムに関するモデル構築, 第18回日本感性工学会全国大会, G35 (2016)
- 70) 金今直子, 大山直子, 田和辻可昌, 松居辰則: 統合失調症患者の顔映像情報に対する病状評価構造の形式化, 第18回日本感性工学会全国大会, E35 (2016)
- 71) 村松慶一, 内藤慧, 田和辻可昌, 松居辰則: 感情状態に関するコミュニケーションに向けた振動の感性評価, 第18回日本感性工学会全国大会, A32 (2016)
- 72) 三保美紀, 田和辻可昌, 松居辰則: 透過型ディスプレイによるテクスチャ画像に対する印象変化の構造分析, 第18回日本感性工学会全国大会, E15 (2016)
- 73) 田和辻可昌, 松居辰則: 表情認知過程の定性的記述に向けた脳機能における表現プリミティブの検討, 第41回教育システム情報学会全国大会, H1-2 (2016)
- 74) 安田有希, 田和辻可昌, 松居辰則: “反省”モデルに基づく情報推薦エージェントアーキテクチャの提案, 第41回教育システム情報学会全国大会, I1-25 (2016)
- 75) 竹花和真, 田和辻可昌, 岡崎桂太, 松居辰則: インタラクションに関する多面的データを用いた教師の意図と学習者の心的状態の関係の分析, 第41回教育システム情報学会全国大会, I1-19 (2016)
- 76) 田和辻可昌, 松居辰則: 大脳小脳の機能に基づいた人型エージェントの表情動作に対する異常検知を表す定性微分方程式の構築, 第30回人工知能学会全国大会, 2E4-OS-12a-2 (2016)
- 77) 村松慶一, 田和辻可昌, 田中英一郎, 綿貫啓一, 松居辰則: UI設計のための人と人型エージェントの顔色に対する嗜好の比較, 日本色彩学会第47回全国大会, P27

(2016)

- 78) 田和辻可昌, 松居辰則: 表情の動きに関する内部モデルを用いた人型エージェントの表情表出に対する異常検知メカニズムの定式化, 第 11 回日本感性工学会春季大会, P-41 (2016)
- 79) 金今直子, 大山直子, 田和辻可昌, 松居辰則: 統合失調症患者の顔映像に対する病状評価の形式化の試み, 第 11 回日本感性工学会春季大会, G13-2 (2016)
- 80) 萩原愛, 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 動作の滑らかさに着目した擬人化エージェントの最適な外見と動作に関する実験的検討, 第 11 回日本感性工学会春季大会, G3-5 (2016)
- 81) 田和辻可昌, 松居辰則: 大脳小脳連関に着目した人型エージェントの表情動作に対する異常検知過程を説明する定性的計算モデルの提案, 第 76 回先進的学習科学と工学研究会, B503-01, pp.1-6 (2016)
- 82) 田和辻可昌, 近藤佑亮, 松居辰則: 人型エージェントによる不気味な笑顔表出に対する小脳の内部モデルを用いた異常検知メカニズムの記述の試み, 第 1 回汎用人工知能研究会, SIG-AGI-001-007 (2015)
- 83) 高松美也子, 田和辻可昌, 松居辰則: 音訳者が文章構造を表現するために挿入する句読点の「間(ま)」の構造的特徴, 第 17 回日本感性工学会大会, A55 (2015)
- 84) 宮原佐智子, 田和辻可昌, 松居辰則: 人が感じるなつかしさを定量的分析 -校歌の役割と感情(なつかしさ)に与える影響について-, 第 17 回日本感性工学会大会, A55 (2015)
- 85) 竹花和真, 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 学習時における学習者の生体情報と心的状態の関係の形式化の試み, 第 74 回先進的学習科学と工学研究会, B501-7, pp.34-39 (2015)
- 86) 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 生理指標に着目した擬人化エージェントの顔画像提示時間の違いが情動反応に与える影響, 第 29 回人工知能学会全国大会, 3D4-3 (2015)
- 87) 桶原葵, 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 人が表出する特徴的キューのエージェントへの応用に対する考察, 第 29 回人工知能学会全国大会, 3D3-3 (2015)
- 88) 藤野直輝, 小島一晃, 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: テーマパーク来場者に対する満足度向上に向けた混雑情報提供法の検討, 第 29 回人工知能学会全国大会, 1D2-4 (2015)

- 89) 桶原葵, 田和辻可昌, 松居辰則: 感情表現のオントロジーに基づいた人-ロボット間の共感誘因モデルの構築 – ロボットに適応可能な人からの共感誘因動作の実験的検討 –, 第 73 回先進的学習科学と工学研究会, B403-8, pp.40-45 (2015)
- 90) 竹花和真, 田和辻可昌, 松居辰則: 学習に関わる多面的情報の統合的分析手法の検討, 第 73 回先進的学習科学と工学研究会, B403-13, pp.67-70 (2015)
- 91) 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 定性表現を用いた人型エージェントの目の形態的特徴が人間の情動状態に与える影響の理論的検討, 第 71 回先進的学習科学と工学研究会, B401-4, pp.17-22 (2014)
- 92) 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 脳機能の定性的記述を用いた人型エージェントに対する情動評価の時系列的変化モデルの提案, 第 28 回人工知能学会全国大会, 1E3-1 (2014)
- 93) 田和辻可昌, 村松慶一, 松居辰則: 脳機能の定性表現による人型エージェントに対する否定的情動反応形成モデルの提案, 第 70 回先進的学習科学と工学研究会, B303-10, pp.49-54 (2014)
- 94) 田和辻可昌, 村松慶一, 小島一晃, 松居辰則: 扁桃体と海馬の機能に着目した人型エージェントにおける不気味さ誘発のモデル化, 第 15 回日本感性工学会大会, D-32 (2013)
- 95) 田和辻可昌, 村松慶一, 小島一晃, 松居辰則: 感情の二重経路と海馬に着目した不気味の谷発生メカニズムのモデル化の試み, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, No. 185, HCS2013-40, pp. 39-44 (2013)
- 96) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: Perceptual Magnet Effect と感情の二重経路説の統合による不気味の谷発生メカニズムモデルの提案, 第 68 回先進的学習科学と工学研究会 (2013)
- 97) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 視床と扁桃体の機能に着目した不気味の谷発生メカニズムのモデル化の試み, 第 27 回日本人工知能学会全国大会 2F1-2 (2013)
- 98) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 感情の二重経路における脳機能に着目した不気味の谷発生メカニズムのモデル化の試み, 第 67 回人工知能学会先進的学習科学と工学研究会 (2013)
- 99) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 感情の二重経路における扁桃体に着目した不気味の谷発生メカニズムのモデル化の試み, 日本感性工学会「志学の会」×「而立の会」合同開催若手による研究交流会, 26 (2013)

- 100) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: エージェントに対する情報の変化が人間らしさに与える影響, 2011 年度 JSiSE 学生研究発表会, pp.28-29 (2012)
- 101) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 擬人化エージェントに対する事前情報が対象の印象評価に与える影響, 第 26 回人工知能学会全国大会, 1L2-R-7-7 (2012)
- 102) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 注視点分析を利用したエージェントの人間/非人間判断方法の実験的検討, 第 37 回教育システム情報学会全国大会, TI-2, pp.320-321 (2012)
- 103) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 「顔」に対する視線停留時間の差に着目したエージェントの人間/非人間判断方法の実験的検討, 第 14 回日本感性工学会大会, E2-2, (2012)
- 104) 田和辻可昌, 小島一晃, 松居辰則: 感情の二重経路説に基づく不気味の谷発生メカニズムのモデル化の試み, 第 66 回先進的学習科学と工学研究会, pp.43-46 (2012)