

# 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

Proposal of the Model for the Uncanny Valley Based on the Thalamus and Amygdala

田和辻 可昌\*1      小島 一晃\*2      松居 辰則\*3  
TAWATSUJI Yoshimasa      KOJIMA Kazuaki      MATSUI Tatsunori

\*1早稲田大学 大学院人間科学研究科  
Graduate School of Human Sciences, Waseda University

\*2帝京大学 ラーニングテクノロジー開発室  
Learning Technology Laboratory, Teikyo University

\*3早稲田大学 人間科学学術院  
Faculty of Human Sciences, Waseda University

In the research field of Human-Computer Interaction, the uncanny valley is a critical issue in designing an appropriate appearance of a humanlike agent. Although human familiarity toward an agent increases as the agent gets more similar to human, it drastically decreases to the bottom of a valley when the agent is considerably similar to real human. An agent highly similar to human is first perceived as a human and subsequently as a non-human. We propose a model of how possible a conflict of these information occurs, based on the dual-pathway of emotion and the function of the amygdala. According to the model, the conflict can the most likely occur where an agent looks highly but imperfectly human.

## 1. はじめに

Human Computer Interaction の分野において、不気味の谷は重要な課題である。図 1 に示すように、ロボットやコンピュータエージェント（以下、あわせてエージェントと呼ぶ）の外見が人間に近づくにつれ人間のエージェントに対する親和度は上昇するが、人間との類似度がかなり高くなったある地点において親和度が急激に下落することがあると考えられており、これが不気味の谷である [Mori 70].

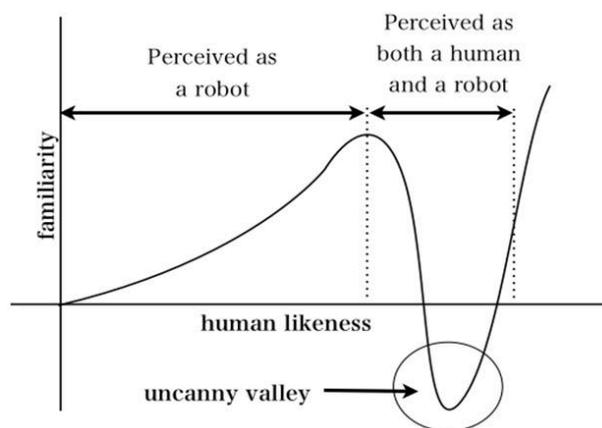


図 1: 不気味の谷の概念図

MacDorman ら [MacDorman 09] が指摘しているように、エージェントはヒトを含めた生物の進化過程の中に存在しないため、人間のエージェントに対する評価方法を人間の生態的な観点から考察することは重要である。不気味の谷を考察する上で重要な点は、エージェントの外見が人間に近づくにつ

連絡先: 田和辻可昌, 早稲田大学大学院人間科学研究科, 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15, wats-kkoreverfay@akane.waseda.jp

れ、エージェントが人間/非人間の判断が難しくなるという弁別の境界 (category boundary) に位置するようになるという点であり、人間に類似したエージェントはこのような境界をまたいでいるため、人間は特異的に反応すると考えられている [MacDorman 09]. これから、人間にはエージェントを人間として知覚する場合と非人間として知覚する場合が存在し、これらの異なる知覚過程における情報処理間に起こる不一致が不気味の谷発生の条件として大きく関与していると考えられる。田和辻ら [田和辻 12] は実在の人物や CG 描写された人間の顔画像を被験者に提示し、それらが人間であるか否かを判断させ、判断時の被験者の視線停留位置と停留時間を計測した。この結果、人間でないと判断された CG 画像と人間であると判断された人間画像の右目に対する視点停留時間の長さには、観測時間が 0~5 秒の間では有意な差がなかったが、0~10 秒、0~30 秒と時間が経過するに連れて差が現れた。これより、人間は人間に似た CG 画像を観測する際は対象から得られる人間/非人間の情報をこの順に処理していることが示唆された。

また、不気味の谷現象は人間の幼児 [Matsuda 12] やヒト以外の種であるマカクザル [Steckenfinger 09] でも発生することが実験的に示唆されており、これらは不気味の谷が言語による対象理解を必要としない可能性があること、人間特有の問題ではなく種を超えて発生しうる現象であることを表していると考えられる。森は不気味の谷を考察する上で、不気味の谷とは人間の自己防衛本能が大きく関わっており、死人や異なった種などの存在への防衛のために用意された本能的な不気味を位置づけている [Mori 70]. これらのことから、動物の種を超えて持つシステムである脳、その中でも本能に関わると考えられている、系統的に古い脳部位の働きに着目することは有用であると考えられる。

Shimada ら [Shimada 07] は不気味の谷が起こるメカニズムとして LeDoux の感情の二重経路を取り上げて不気味の谷の解釈を試みている (図 2). しかし、二重経路によるこのモデルが実際に不気味の谷の発生メカニズムに関与しているのかについては、二重経路に関係する脳部位の機能まで踏み込んだ説明はなされていない。そこで本研究では、視床からこの扁桃

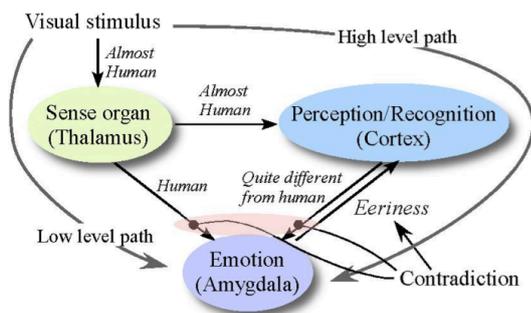


図 2: 感情の二重経路に着目した不気味の谷のモデル (文献 [Shimada 07] より引用)

体へと至る二つの神経経路（感情の二重経路）の中でも重要な部位である扁桃体の機能である刺激に対する特異性に着目し、二つの経路におけるエージェントに対する扁桃体の応答の不一致がどの程度おこるのかをモデル化する。この結果、この応答の不一致は、不気味の谷で考えられているように人間に対する類似度が極めて高い箇所で起こりうる可能性を示唆した。

## 2. 感情の二重経路説と顔知覚

LeDoux は、外界からの刺激に対する情報処理には低位経路と高位経路が重要な役割を果たすことを解剖学や神経生理学の観点から明らかにした [LeDoux 96]。一度視床において処理された情報は、図 3 に示されるように、視床から直接扁桃体へと伝播される低位経路と、感覚皮質を経由した後に扁桃体へと伝播される高位経路へと分かれる。扁桃体は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を決定づける上で重要な部位であり、情動反応を形成する際の中核を担う。人間の情動は「生物が進化の過程で獲得し、発達させてきた生存のための手段」であり「情動行動の生物学的意義は個体の生存確率を高める個体維持と種族保存」にあると考えられている [小野 12]。したがって、扁桃体では視覚から得られた情報が欲求の充足や生命の危機など本能的に価値がある (快) か価値がない (不快) かを判断し、その意味づけを問うことが出来ると考えられる。

LeDoux によると、低位経路において扁桃体に投射する視床領域のニューロンの特異性はそれほど高くなく、広範囲の刺激に反応する。これに対して、皮質から扁桃体へ送られる信号はより特異的であると言われる。つまり、低位経路によって扁桃体へと伝播される情報は高位経路に比べて粗雑で、その刺激が何であるかの具体的な弁別は出来ない。しかし、低位経路は情報粒度が荒い一方で扁桃体への情報伝播速度が高位経路に比べて非常に速く、刺激に対しての早急な対応が可能である。

これに加えて、扁桃体は顔知覚、特に表情認知においても重要な役割を果たしていることが知られている。このため、人間に類似したエージェントと対面すると、低位経路において人間の表情に対する応答を引き起こすが、その後、高位経路において知覚対象が人間の表情ではない (対象が人間でない) という情報が皮質から扁桃体に送られると考えられる。

## 3. 扁桃体において情報の不一致が起こる確率

この節では感情の二重経路において扁桃体へ情報が伝播されるにあたって、二つの情報が不一致となる確率を扁桃体の刺

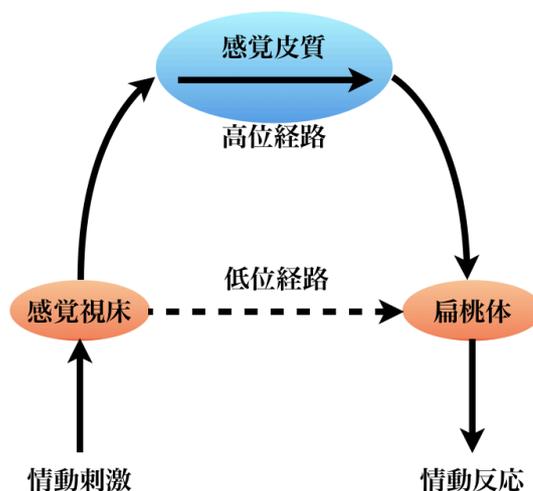


図 3: 感情の二重経路説 (文献 [LeDoux 96][Shimada 07] をもとに作成)

激に対する特異性に着目して求める。

### 3.1 不一致が起こる確率の算出

人間の知覚情報処理過程において、人間の顔を示す情報が扁桃体へと伝達された場合を考える。扁桃体は人間の表情が提示されたときに活動することから、エージェントの外見が人間に近づいた場合、扁桃体の活動が高まることが想定される。エージェントに帰属する人間に対する類似度  $s \in [0, 1]$  を横軸にとり、扁桃体が応答する確率を縦軸にとる。低位経路において視床が扁桃体へと情報を伝播するときの扁桃体の応答確率を  $\theta_1 \in [0, 1]$ 、高位経路において皮質が扁桃体へと情報を伝播するときの扁桃体の応答確率を  $\theta_2 \in [0, 1]$  とおく。これら  $\theta_i$  ( $i = 1, 2$ ) は  $s$  が与えられたときに一意に定まるから、 $\theta_i$  は  $s$  に関する関数で、 $\theta_i = \theta_i(s)$  である。ここでは、 $\theta_i$  は  $\theta_i : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  として、

$$\theta_i(s) = \exp\left(-\frac{(s - s_{\max})^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (1)$$

とおく。視床から直接扁桃体へと情報が伝播される低位経路において、扁桃体は広範囲の刺激に対して応答し、高位経路では刺激に対して特異的に応答するから  $\sigma_1^2 \gg \sigma_2^2$  と仮定できる。また、対象の類似度が完全に人間であった場合に必ず扁桃体が応答するために、関数は  $s = 1$  で最大値をとるようにしてある。 $\theta_i = \theta_i(s)$  を図 4 に表す ( $\sigma_1^2 = \frac{1}{10}, \sigma_2^2 = \frac{1}{100}$ )。

二つの経路の応答の不一致は、低位経路において扁桃体が応答したにも関わらず高位経路で応答をしなかった場合 (A) と、低位経路において応答しなかった一方で、高位経路で応答をした場合 (B) の二通りが考えられる。これらの不一致が起こる確率はそれぞれ  $\theta_2 | \theta_1$  と  $\theta_2 | \bar{\theta}_1$  と表すことが出来る。ただし、 $\bar{\theta}_i = 1 - \theta_i$  を表す。低位経路による応答と高位経路による応答はそれぞれ独立であると考えられるから、結局応答の不一致が起こる確率  $p^*$  は

$$p^* = \begin{cases} (1 - \theta_2)\theta_1 & \text{(A) の場合} \\ \theta_2(1 - \theta_1) & \text{(B) の場合} \end{cases} \quad (2)$$

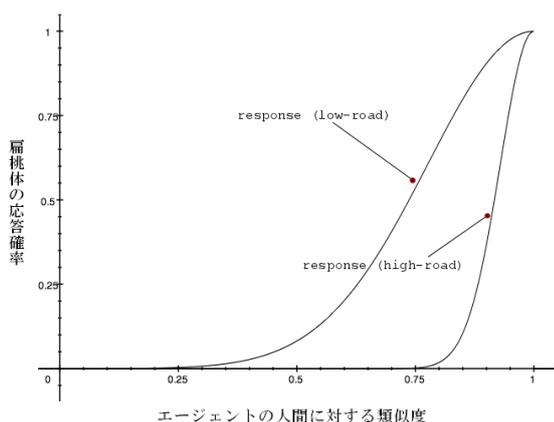


図 4: 刺激に対して扁桃体が応答する確率 (縦軸が扁桃体の応答確率, 横軸がエージェントの人間に対する類似度)

とかける。  $\theta_i$  は  $s$  の関数であって、式 (2) より  $p^*$  は  $\theta_1, \theta_2$  の関数であるから、これも  $s$  に関する関数と考えることが出来る。

### 3.2 シミュレーション

高位経路から伝播される情報の特異性の強度がこの情報の不一致の発生率に与える影響を調べるため、式 (2) において、低位経路における扁桃体の刺激に対する応答の特異性を固定 ( $\sigma_1^2 = \frac{1}{10}$ ) して、高位経路における扁桃体の刺激に対する応答の特異性  $\sigma_2^2$  を変動させたときの  $p^*$  の挙動、つまり、式 (1) と式 (2) より、  $i, j = 1, 2 (i \neq j)$  として

$$p^* = \left( 1 - \exp\left(-\frac{(s - s_{\max})^2}{2\sigma_i^2}\right) \right) \times \exp\left(-\frac{(s - s_{\max})^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (3)$$

の  $s$  に対する値の結果を図 5 に示す。

シミュレーションの結果から、高位経路において皮質から伝播される刺激に対する扁桃体の応答の特異性が高ければ高いほど、つまり、  $\sigma_2^2$  が小さければ小さいほど、(A) の場合における不一致が起こる確率はエージェントが高い類似度を有するに連れて増大し、やや類似度が高めのところでピークを迎えた後に類似度が最も高くなったところでは不一致が起こる確率は 0 となる。これに対して、(B) の場合の不一致は、  $\sigma_2^2$  が小さければ小さいほど情報の不一致度が小さい値を取ることが分かる。

## 4. 考察

### 4.1 不気味の谷の条件としての情報の不一致

視床から皮質を経ること無く直接伝播された荒い情報に対して扁桃体がエージェントの顔を人間の顔と受け取って応答した後、皮質から伝播された詳細な情報から知覚対象が人間の顔でないとして扁桃体が応答しない場合を考えると、エージェントの人間に対する類似度が高い地点において情報の不一致が起きる確率が最大値をとることが示唆された。このような情報の不一致の挙動は不気味の谷の発生メカニズムを考える上で重要な指標になると考えられる。特に重要なことは、不気味の谷はエージェントを人間として知覚処理する低位経路によるシステム応答と、エージェントを非人間として知覚処理する高位経路によるシステム応答の不一致がきっかけとなって発生す

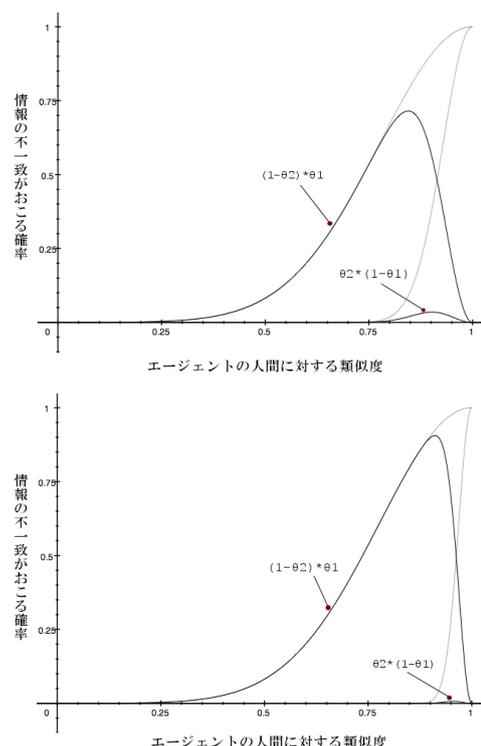


図 5: 高位経路による扁桃体の応答範囲を変化させたときの不一致の起こりやすさ (上図:  $\sigma_2^2 = \frac{1}{100}$ , 下図:  $\sigma_2^2 = \frac{1}{500}$ )

る現象であると考えられることである。このような異なる応答の不一致は、fMRI を用いた脳血流量計測による実験によっても人間に対する類似度が高いエージェントにおいて発生することが示唆されている。Chaminade ら [Chaminade 07] は被験者にドットモデルやロボットのモデル、また 3DCG 描写された人間の映像に、モーションキャプチャーによって取得したランニング動作を用いたもの (Biological) と key-framing によってアニメーション作成したもの (Artificial) をそれぞれ貼付けて被験者に提示し、それが人間の動きか人間の動きでないかを回答させ、そのときの脳血流量を fMRI を用いて計測した。この結果、エージェントの動きを人間の動きと回答する度合いはエージェントの見かけに大きく影響を受けること、また共鳴動作を司る脳部位の活動の大きさと回答に負の相関が確認された。これはエージェントの見かけと動きが不釣り合いであることに対する鋭敏性がエージェントの人間に対する類似度が高くなることを示唆している。また、Saygin ら [Saygin 12] は被験者に人間に対する類似度が低いロボット、類似度が高いロボット、人間の手を振る動作を観察してもらい、観察中の脳血流量を fMRI を用いて計測している。この結果、人間に対する類似度が高いロボットを観測しているときは、運動知覚システムを担う脳の領域の活動が、他の刺激に比べて有意に強いことが示された。Saygin らは、この結果に関して人間に対する類似度が極めて高いロボットは、人間の様な見かけから予想される動きに反して機械的な動きを行うため、この予想と実際のずれが脳部位の活動に大きく影響を与えていると考察している。

これらの情報の不一致が発生することによって、知覚された対象が何であるかに対して確定的な判断がつかない状態に陥ると考えられる。このため、一度情報の不一致が起こると、その知覚対象の理解に向けての情報処理が進むと考えられる。

## 4.2 不気味さの定義

不気味の谷の発生メカニズムを考える上で、扁桃体へ異なる経路を通じて伝播する情報間の不一致が不気味の谷発生において重要な要因になっていることを前小節で述べた。ここでは、人間がエージェントに対して抱く不気味さを定義する。一度情報の不一致が起こると、人間はこの不一致を解消するために対象から情報を得ると考えられる。これらの情報は海馬で記憶とも照合され、対象の理解を進める(図6)。これらの情報が上手く整合した場合は、対象の理解が出来たと考えられる。その一方で、得られた情報が整合しなかった場合は、対象理解が進まない状態に陥ると考えられ、この状態を不気味として定義することができる。例えば、対象から得られた情報を統合した結果、人間である、あるいは人間ではないと十分判断できる状態になればこれは対象に対して不気味さを想起しない。これとは異なり対象が人間なのか、人間でないのかといった情報の整合性が得られない場合に不気味となると考えられる。

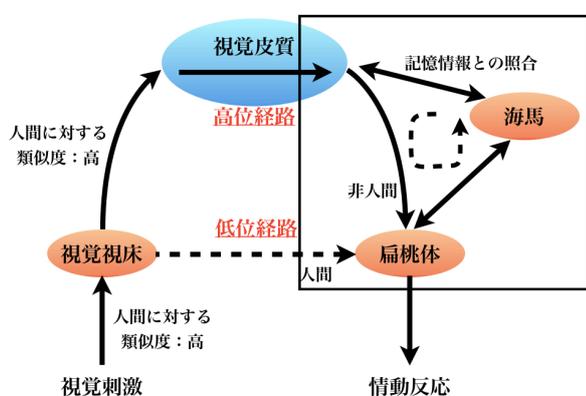


図6: 海馬における記憶照合による対象認知のモデルの概念図(文献 [LeDoux 96] をもとに作成)

## 5. まとめと今後の展望

不気味の谷の発生メカニズムを考えるにあたって、脳部位の中でも感情の二重経路において重要な位置づけにあり、外界の刺激に対して本能的な価値が決定される扁桃体の機能に着目した。扁桃体へ伝播される情報には視床から直接伝播される低位経路と、皮質を経て伝播される高位経路の二種類が存在し、前者と後者では扁桃体が応答する刺激への特異性が大きく異なる。これらを踏まえ、人間に類似したエージェントの知覚において、低位経路と高位経路で処理された情報が扁桃体へと到達するときの情報間でどれほど不一致が起こるかを調べた。この結果、人間に対する類似度が極めて高いエージェントでは、情報の不一致が起こる確率が高くなること、また、高位経路の刺激に対する応答の特異性が高くなればなるほどその不一致が起こる確率が高くなることが明らかとなった。この情報の不一致によって、人間は対象の理解を行おうとするが、この理解が達成されない状態になるときに不気味の谷が発生すると解釈された。つまり、はじめの扁桃体における二つの情報の不一致は不気味の谷を誘因する必要条件であると考えられる。

今後はこのような情報の不一致が起こった対象を人間はどのように知覚・認知するかを検討する。このとき対象知覚過程で得られる情報と記憶との照合を行うことは人間が対象を理解する上で重要な働きをすると考えられる。このため、人間の記憶

の中心を担う海馬は重要な役割を果たすと考えられる海馬の働きも考慮したモデルの構築を目指す必要がある。さらに構築されたモデルにおいての神経生理学的妥当性を検討する必要がある。

## 参考文献

- [Mori 70] Mori, M.: The Uncanny Valley, *Energy*, Vol. 7, No.4, pp. 33-35 (1970).
- [MacDorman 09] MacDorman, K. F., Green, D. R., Ho, C.C., Koch, C. T.: Too real for comfort? Uncanny responses to computer generated faces, *Computers in Human Behavior*, Vol. 25, No. 3, pp. 695-710 (2009).
- [MacDorman 09] MacDorman, K. F., Vasudevan, S. K., Ho, C., Ho, C.C.: Does Japan really have robot mania? Comparing attitudes by implicit and explicit measures, *AI & Society*, Vol. 23, No. 4, pp. 485-510 (2009).
- [田和辻 12] 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予稿集 2012年8月30日, E2-2 (2012).
- [Matsuda 12] Matsuda, Y., Okamoto, Y., Ida, M., Okanoya, K., Myowa-Yamakoshi, M.: Infants prefer the faces of strangers or mothers to morphed faces: an uncanny valley between social novelty and familiarity, *biology letters* (2012).
- [Steckenfinger 09] Steckenfinger, S. A., Asif, A. G.: Mon-key visual behavior falls into the uncanny valley, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 106, No. 43, (2009).
- [Shimada 07] Shimada, M., Minato, T., Itakura, S., Ishiguro, H.: Uncanny Valley of Androids and Its Lateral Inhibition Hypothesis, *Robot and Human interactive Communication, 2007. RO-MAN 2007. The 16th IEEE International Symposium on. IEEE* (2007).
- [LeDoux 96] LeDoux, J. J.: The Emotional Brain: The Mysterious Underpinning of Emotional Life, New York: Simon & Schuster (1996) (邦訳: エモショナル・ブレイン: 情動の脳科学, 松本 元, 川村 光毅 ほか訳, 東京大学出版, (2003)).
- [小野 12] 小野 武年: 脳科学ライブラリー 3 脳と情動 - ニューロンから行動まで -, 朝倉書店 (2012).
- [Chaminade 07] Chaminade, T., Hodgins, J., Kawato, M.: Anthropomorphism influences perception of computer-animated characters' actions, *Social cognitive and affective neuroscience*, Vol. 2, No.3, pp. 206-216, (2007).
- [Saygin 12] Saygin, A. P., Chaminade, T., Ishiguro, H., Driver, J., 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).