

自閉症者では不気味の谷現象が生じない：

実験および顔の特徴量分析による検討

Uncanny Valley Effect does not Appear in Individuals with Autism:

An Investigation Through Experiments and Facial Feature Analysis

李 璐¹ 今泉 拓¹ 西川 菜月² 熊崎 博一² 植田 一博¹

Lu Li¹, Taku Imaizumi¹, Natsuki Nishikawa², Hirokazu Kumazaki², and Kazuhiro Ueda¹

¹ 東京大学

¹The University of Tokyo

² 長崎大学

² Nagasaki University

Abstract: ロボットの外見に関して主張されている所謂「不気味の谷現象」の現れ方が、自閉スペクトラム症(以下 ASD)者と定型発達(以下 TD)者とで異なるとする説がある。本研究では、その説の真偽を確かめるべく、ASD 者において不気味の谷現象がどのように現れるのか、ならびに ASD 者において不気味の谷現象の現れ方が TD 者と異なる場合にはその理由について、実験および顔画像の特徴量分析により検討した。その結果、ASD 者では、人間とロボットの見た目の曖昧さが不気味さを生じさせず、TD 者のような不気味の谷現象が見られないこと、それは両者の顔認識の方法が異なり ASD 者の方がより局所的な情報を重視するためである可能性が示唆された。

1 はじめに

1.1 TD 者における不気味の谷現象

ロボットなどの人工物の見た目がヒトに似ているが、ヒトとの類似度が完全ではない場合に、閲覧者がネガティブな印象を抱く現象は、「不気味の谷現象」として知られている[1]。不気味の谷現象を支持する実証的研究も複数存在する。例えば Mathur らの研究[2]では、182 種類の顔画像(ロボット:122 枚、ヒト:60 枚)について、ヒトとの類似度と好感度を質問紙で計測し、横軸にヒトとの類似度を縦軸に好感度をプロットした結果、不気味の谷が明確に観測された(図 1)。

不気味の谷が生じる原因として、知覚のミスマッチが不気味さを引き起こしているとする説が特に有力とされている。例えば MacDorman らは、肌のリアリティと目のリアリティをそれぞれ独立に変化させたヒトの顔モデルを用いて、知覚的に矛盾する特徴を持つ対象に対して不気味さを感じることを実験的に示した[3]。

1.2 ASD 者における不気味の谷現象

ASD は社会的コミュニケーションの困難、反復行動と狭い興味の二つの特徴に基づいて診断され、生物学的な要因に由来する発達障害である[4]。ASD の療育を行う上で特に注目を集めているのがロボットの活用である。ロボットとのインタラクションを通して、ASD 者の社交不安が低下し社会能力が向上したという報告[5]もあり、ロボットを使用した治療成果が確認されつつある。一方で、ASD 者がどのようなロボットを好むかについては研究が進んでいない。ASD 者では TD 者とは異なる形で不気味の谷現象が現れるという報告[6][7]はあるものの、現れ方は研究間で一貫性していない。Feng らの研究[6]では、ASD 者において、対象物の人間への類似度が変化しても、感じられる不気味さは変化しないことが実験的に示されている。一方で、これまでのロボットを使用した研究からは、ASD 者はシンプルなロボットに対しては好ましさを感じる一方で、人間に似ている対象物に対しては不気味さを感じるという「不気味の崖」

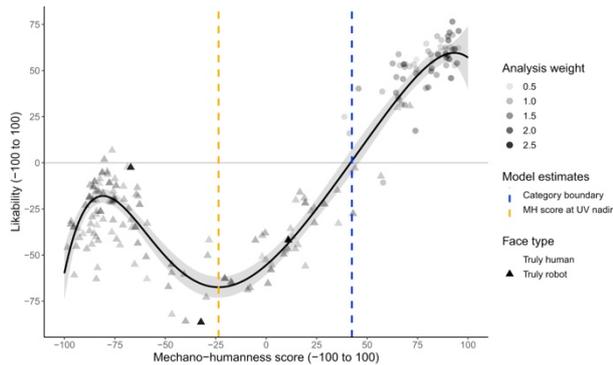


図1 実験により再現された不気味の谷[2]
縦軸は好ましさ、横軸はヒトらしさを表す。

が現れることが示唆されている[7]。

ASD者においてTD者で見られるような不気味の谷が見られない理由として、情報を意味のある全体にまとめ上げようとする動機が弱いというASD者の特性[4]ゆえに、そもそも不気味さを感じなかった可能性が考えられる。TD者では、知覚的に矛盾する特徴を持つ対象に対して不気味さを感じることを示されている(1.1節)。一方で、ASD者は顔の個々のパーツから顔のカテゴリーを判断することはできるものの、個々のパーツを統合して考えることに困難がある[8]。そのため、対象が知覚的に矛盾する特徴を持つことを認識できず、不気味さを感じなかった可能性が考えられる。本研究では、このようなASDの特性が不気味さの感覚に与える影響を、1.3節で述べる2種類の異なる統計手法を用いて抽出した画像特徴量を用いて検討する。

1.3 実験で用いた統計手法

画像特徴量の抽出に使用した2種類の統計手法は、PCA(Principal Components Analysis:主成分分析)とNMF(Non-negative Matrix Factorization:非負値行列因子分解)である。PCAは、多くの変数を持つデータから主成分を抽出する統計的分析手法であり、分析対象の全体的な特徴を学習することに優れている[9]。一方、NMFは、非負値のデータから構成される行列を、頻出パターン行列とその係数行列に分解する多変量解析の手法であり、分析対象のパーツごとの特徴を学習することに優れている[9]。

これらの手法により抽出された画像特徴量を用いて、TD者の不気味さの判断が顔の全体的な特徴に基づいて判断され、ASD者の不気味さの判断は顔のパーツごとの特徴に基づいて判断されるという仮説を検証する。仮説が正しければ、感じられる好ましさについて、TD者においてはPCAにより抽出された特徴量が、ASD者においてはNMFにより抽出され

た特徴量がより説明力が高いと予想される。

1.4 実験目的

本研究の目的は次の二点であった。

1. ASD者では不気味の谷現象がどのように現れるかを検討する。
2. ASD者とTD者とで不気味の谷現象の現れ方が異なる場合、その要因として、ASD者では、TD者に比べて全体的な特徴ではなく個々のパーツに注目している可能性を検討する。

具体的には、1.に関して、TD者の不気味の谷現象の再現に用いられたロボットおよびヒトの顔写真[2]を用いた実験により、ASD者における不気味の谷現象が、どのような形で見られるかを検討する。

2.に関しては、PCAおよびNMFによって抽出された画像特徴量を用いて、画像に対して感じられる好ましさをどの程度説明可能かを回帰分析により検討する。特に、どちらの画像特徴量がより説明力を持つかを検討する。

2 実験方法

Mathurら[2]が公開しているValidated face corpusを用いて実験を行った。Validated face corpusは209枚の顔画像から構成されていた。

TD者にはValidated face corpusに含まれている209種類の顔画像(ロボット:138枚,ヒト:71枚)に対して、感じられるヒトらしさ、好ましさ、不気味さを7件法により評価してもらった。

ASD者には、実験の負担を減らすために、Validated face corpusから、Mathurの実験結果[2]およびImaizumiらの実験結果[10]を再現するように選定された50種類の顔画像(図2)を用いて実験を実施した。選定された50種類の顔画像に対して感じられるヒトらしさ、好ましさを7件法により評価してもらった。

3 実験結果

TD者31名(Women = 10, Mean age = 22.258, SD age = 3.022), ASD者32名(Women = 2, Mean age = 23.000, SD age = 5.399)を分析対象とした。TD群, ASD群ともに絞り込まれた50枚の画像についてのヒトらしさおよび好ましさの回答データのみを使用した。

目的1のために、分析1-1では非線形回帰を行った。分析1-2では、どのような画像がTD者とASD者の不気味の谷現象の違いをもたらしているかを知るためにクラスター分析を行った。



図2 Validated face corpus から選定された画像 (50枚)

目的2のために、分析2-1では、絞り込まれた50枚の画像に対して、PCAおよびNMFを用いてそれぞれ15の基底ベクトルを抽出した。分析2-2では、TD群とASD群それぞれにおいて、感じられるヒトらしさおよび好ましさに対してPCAとNMFのどちらの決定係数の方が大きくなるか比較検討した。

3.1 分析1-1：非線形回帰分析

画像の好ましきのデータを目的変数、ヒトらしきのデータを説明変数として非線形回帰を行った。BICの結果から、TD群においては4次元のモデル ($adjusted R^2 = 0.501$), ASD群においては1次元のモデル ($adjusted R^2 = 0.181$)のあてはまりが最も良いことが示された(図3)。これらの結果から、TD群では不気味の谷に該当するものが観測されるが、ASD群ではそのような現象は見られず、主観的にヒトらしく感じられる対象ほど好ましく感じていることが読み取れる。よって、TD群とASD群では感じられる好ましさが異なると結論できる。

3.2 分析1-2：クラスター分析

TD群とASD群のデータそれぞれに対して、K-means法を用いてクラスター分析を行った。エルボー法およびシルエット法に基づき、2クラスターへ分類した結果を図4に示す。この図より、クラスター1がよりヒトに類似している一方で、クラスター2はよりロボットに類似していることが分かる。

TD群、ASD群のクラスター1とクラスター2は、それぞれ同じ画像から構成されていた。そのため、ウィルコクソンの符号付き順位検定を用いて、クラスターごとに、感じられるヒトらしさおよび好ましきについて、TD群とASD群との間で有意差があるかどうか検定した。クラスター1(ヒトに類似)において、ASD群の感じられるヒトらしさと好ましき、TD群よりも有意に低かった ($z = -4.014, p < .001$; $z = -4.015, p < .001$)。

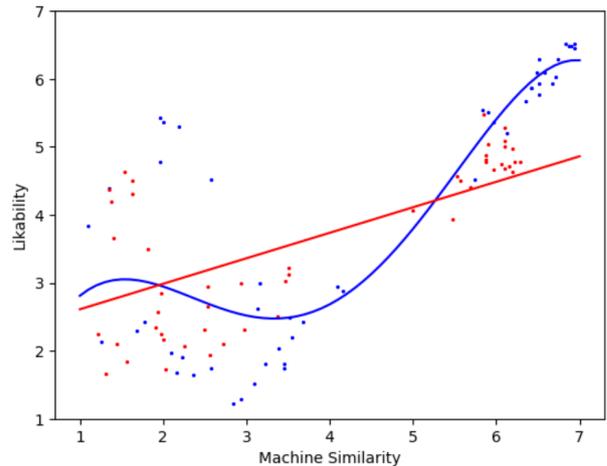


図3 感じられるヒトらしさと好ましきの関係

横軸はヒトらしき、縦軸は好ましきを表す。点は各画像の平均値を表す。青色の線および点はTD群のデータ、赤色の線および点はASD群のデータを表す。

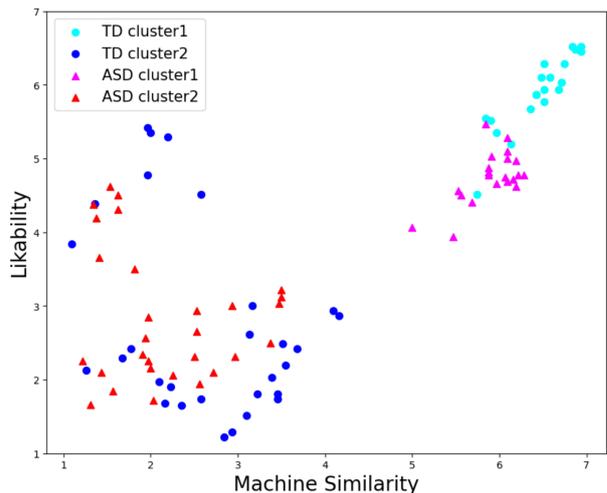


図4 2クラスターへの分類結果

横軸をヒトらしき、縦軸を好ましきとして表した。点は各画像の平均値を表す。水色およびピンク色の点はクラスター1、青色および赤色の点はクラスター2を表している。水色および青色の点はTD群の結果、ピンク色および赤色の点はASD群の結果を表している。

クラスター2(ロボットに類似)においては、ASD群の感じられるヒトらしき、TD群よりも有意に低かった ($z = -4.444, p < .001$)。一方で、感じられる好ましきに両群で差は見られなかった ($z = -0.919, p = .369$)。結果を図5に示す。この結果から、特にヒトに類似している画像がTD群とASD群の不気味の谷現象における違いを引き起こしていると考えられる。

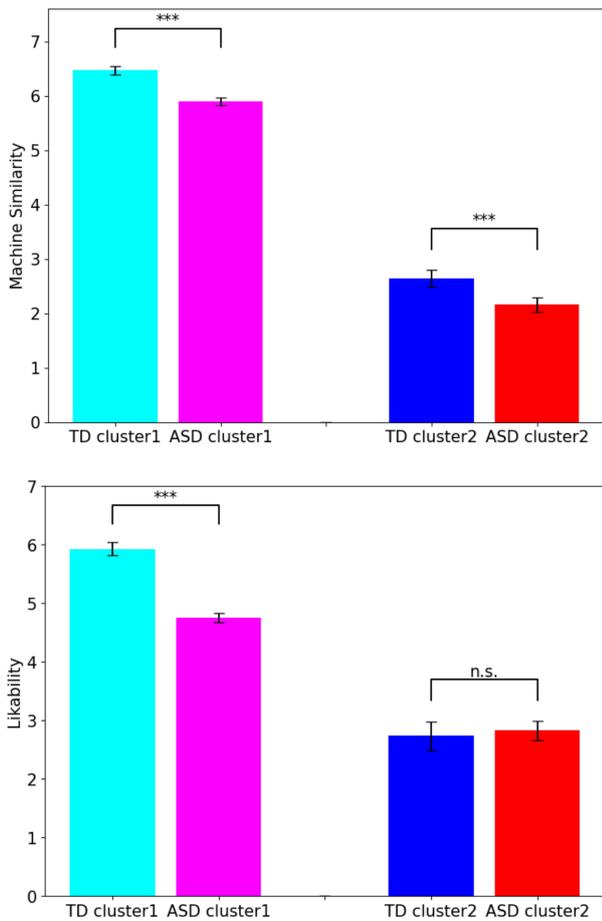


図5 クラスタの特徴および検定の結果

上図の縦軸をヒトらしさ、下図の縦軸を好ましさとして表した。水色の棒はクラスター1のTD群の平均値、ピンク色の棒はクラスター1のASD群の平均値、青色の棒はクラスター2のTD群の平均値、赤色の棒はクラスター2のASD群の平均値を表している。エラーバーは標準誤差を表す。

3.3 分析 2-1：基底ベクトルの抽出

PCA および NMF を用いて基底ベクトルの抽出を行った。PCA を用いて、累積寄与率が 0.8 以上となるように、第 1~15 主成分からなる 15 の基底ベクトルを抽出した。NMF は PCA と同じ次元数になるように 15 の基底ベクトルを抽出した。PCA および NMF を用いて抽出された基底ベクトルを可視化したものを図 6 に示す。図 6 から PCA により抽出された基底ベクトルは全体的な特徴を、NMF により抽出されたものはパーツごとの特徴をそれぞれ反映していることが見て取れる。この結果は、先行研究[9]で報告されている PCA と NMF の特徴と同一である。

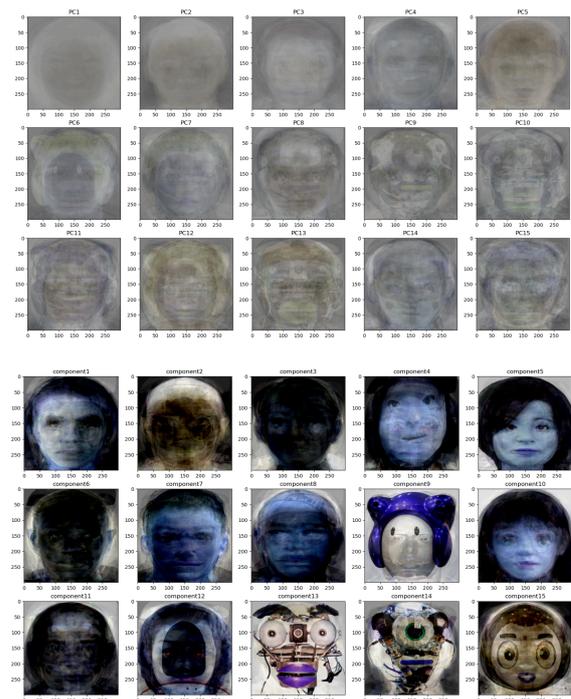


図6 PCA (上) および NMF (下) により抽出された基底ベクトルの可視化の結果

表1 ヒトらしさおよび好ましさに対する、PCA および NMF の自由度調整済み決定係数

	TD群			ASD群		
	PCA	NMF	p	PCA	NMF	p
ヒトらしさ	0.638	0.654	0.002	0.598	0.608	0.054
好ましさ	0.295	0.271	0.021	0.283	0.308	0.069

3.4 分析 2-2：決定係数の比較

TD 群と ASD 群それぞれにおいて、実験参加者の感じたヒトらしさまたは好ましさの画像ごとの平均値を従属変数、PCA または NMF による因子負荷量を独立変数として回帰分析を実施し、PCA と NMF のどちらの決定係数が大きくなるか検討した。仮説が正しいとすれば、TD 群においては PCA の決定係数が NMF よりも大きくなる一方、ASD 群においては NMF の決定係数が PCA よりも大きくなることが予想される。さらに、個人ごとのヒトらしさまたは好ましさの回答値を従属変数とした回帰分析によって得られた自由度調整済み決定係数に対して、ウィルコクソンの符号付き順位検定を行い、両群に有意差があるかどうかを検討した。

得られた自由度調整済み決定係数とウィルコクソンの符号付き順位検定の結果を表 1 に示す。感じられるヒトらしさについては、TD 群、ASD 群ともに

NMF の決定係数の方が PCA の決定係数よりも有意に大きい、または大きい傾向があった(TD 群 $z = -3.037, p < .01$; ASD 群 $z = -1.926, p < .1$)。一方、感じられる好ましさにについては、TD 群では PCA の決定係数の方が有意に大きかった($z = -2.312, p < .05$)ものの、ASD 群においては NMF の決定係数の方が大きい傾向があった ($z = -1.820, p < .1$)。

以上の分析結果より、TD 群、ASD 群ともに、部分的な特徴を重視して画像のヒトらしさを判断していることが分かった。また、TD 群は全体的な特徴を重視して画像の好ましさを判断していることが分かった。一方で、ASD 群は画像の好ましさにしても部分的な特徴を重視する傾向があることが分かった。

4 考察

4.1 ASD 者における不気味の谷現象

分析 1-1 の非線形回帰分析の結果より、TD 群では Mathur らの研究結果[2]が完全に再現され、不気味の谷が現れた。一方で、ASD 群では、ヒトらしさと好ましさと線形の関係にあった。この結果は、Feng ら[6]が主張する、ASD 者におけるフラットな形の不気味の谷現象を、ある程度支持する結果だと言える。ただし、主観的にヒトらしくなるにつれて、ASD 者でもより好ましく感じる傾向があった点が Feng ら[6]の結果と異なる。この傾向は、ASD 者が機械的なロボットよりもヒトに類似した見た目を持つアンドロイドを好むという研究結果[11]と整合的である。

また、これまでのロボットを使用した研究[7]で示唆されていた「不気味の崖」は、本論文の結果では支持されなかった。

4.2 TD 者の全体情報の統合によって知覚のミスマッチが発生する可能性

分析 2-2 の結果、TD 群が画像の好ましさを判断において部分的な特徴(NMF による画像特徴量)に比べて全体的な特徴(PCA による画像特徴量)を重視していることが示唆された。

この結果から、TD 者は顔のパーツの特徴が全体として共通していない場合、画像を好ましく感じない可能性が考えられる。これは、パーツ間で知覚のミスマッチがあることで不気味の谷が生じるという説(1.1 節)を支持している。

実際に、TD 群の好ましさを評価が低かった画像(図 7)は、ヒトらしい鼻の形をしているが首がないなど知覚的に矛盾する特徴を持っていた。

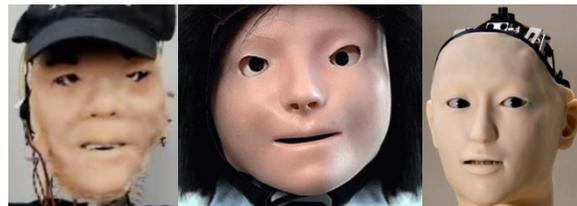


図 7 TD 群の好ましさを評価が特に低い画像

TD 群の好ましさを評価が低い 3 枚の画像を、左から好ましさを評価の平均値が低い順番に示している。

4.3 ASD 者の局所判断によって不気味さが消失する可能性

分析 2-2 では、画像のヒトらしさについては TD 群、ASD 群ともに、部分的な特徴(NMF による画像特徴量)を重視して判断していることが分かった。一方で、感じられる好ましさに関しては、TD 群では全体的な特徴(PCA による画像特徴量)を、ASD 群では部分的な特徴 (NMF による画像特徴量)を重視する傾向が明らかになった。これらの結果から、TD 者は顔のヒトらしさという形状判断と好ましさとという情動的な判断とで注目する顔特徴(局所的な情報か全体的な情報か)を切り替えていたのに対して、ASD 者はいずれでも顔パーツという局所的な情報のみを重視していたと判断できる。この違いにより、TD 群で見られるような不気味の谷現象が ASD 群では見られなかった可能性が指摘できる。

4.4 ASD の診断および療育に与える示唆

本研究の結果は ASD の診断に重要な知見をもたらすと言える。分析 1-2 のクラスター分析の結果、ヒトにより類似している顔に対して感じられるヒトらしさおよび好ましさが、TD 群よりも ASD 群で有意に低かった。その原因として、TD 者と ASD 者の顔処理に関わる脳内機序の違いが指摘されていること[12]から、本研究で得られた結果は、ASD 者特有の脳の働きを反映していると考えられる。さらに、ヒトに類似したロボットに対する感じられ方が、TD 者と ASD 者で異なるだけではなく、TD 者の親と ASD 者の親でも異なるという先行研究[13]の結果から、本研究で示されたヒトに類似した顔に対する感じられ方の違いは、遺伝する可能性が考えられる。そのため、本研究で見られたヒトに類似した顔に対する感じられ方の相違は、ASD 者の遺伝的に規定される生物学的特徴を反映する可能性が考えられる。よって、ヒトに類似した顔に対する感じられ方は ASD のスクリーニングや診断に応用可能だと考え

られる。例えば、ヒトに類似した顔に対して、より機械らしく、好ましくないと感じたときに ASD 傾向があると判断することが可能であろう。

また、本研究は ASD の療育に用いるロボットの設計指針についても有益な示唆を与える。ASD 者の療育においてロボットを使用した治療成果が確認されつつある[5]。ロボットの外見と ASD 者の療育の効果について調べた研究では、ASD 者においてロボットが主観的に機械らしく感じられるほど面接療法に対するモチベーションが向上することが報告されている[14]。しかし、ASD 者がどのようなロボットを機械らしいと感じるのかについての研究は行われていない。それに対して、本研究では TD 者と ASD 者との間で、感じられる機械らしさの点で強い相関があることも示された($r=0.973, p<.001$)。この結果は、TD 者にも機械らしく感じられるロボットが ASD 者に対する面接療法に適していることを示しており、TD 者の主観に沿って機械らしいロボットを設計して差し支えないことを示唆している。

謝辞

本研究は、JST CREST (課題番号 MJCR19A1)、および科学研究費補助金 (課題番号 22H03911, 23H04358) の支援を受けて実施された。ここに謝意を記す。

参考文献

- [1] Mori, M., MacDorman, K. F., Kageki, N.: The uncanny valley, *IEEE Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 2, pp. 98–100 (2012)
- [2] Mathur, M. B., Reichling, D. B., Lunardini, F., Geminiani, A., Antonietti, A., Ruijten, P. A., Levitan, G. A., Nave, G., Manfredi, D., Bessette-Symons, B., Szuts, A., Aczel, B.: Uncanny but not confusing: Multisite study of perceptual category confusion in the Uncanny Valley, *Computers in Human Behavior*, Vol. 103, pp. 21-30 (2020)
- [3] MacDorman, K. F., Green, R. D., Ho, C. C., Koch, C. T.: Too real for comfort? Uncanny responses to computer generated faces, *Computers in human behavior*, Vol. 25, No. 3, pp. 695-710 (2009)
- [4] Baron-Cohen, S.: Autism and Asperger Syndrome – The Facts, UK: Oxford University Press (2008)
- [5] Kaboski, J. R., Diehl, J. J., Beriont, J., Crowell, C. R., Villano, M., Wier, K., Tang, K.: Brief report: A pilot summer robotics camp to reduce social anxiety and improve social/vocational skills in adolescents with ASD, *Journal of autism and developmental disorders*, Vol. 45, pp. 3862-3869 (2015)
- [6] Feng, S., Wang, X., Wang, Q., Fang, J., Wu, Y., Yi, L., Wei, K.: The uncanny valley effect in typically developing children and its absence in children with autism spectrum disorders, *PloS one*, Vol. 13, No. 11, e0206343 (2018)
- [7] Ueyama, Y.: A Bayesian Model of the Uncanny Valley Effect for Explaining the Effects of Therapeutic Robots in Autism Spectrum Disorder, *PLOS One*, Vol. 10, No. 9, e0138642 (2015)
- [8] Deruelle, C., Rondan, C., Gepner, B., Fagot, J.: Processing of compound visual stimuli by children with autism and Asperger syndrome, *International journal of psychology*, Vol. 41, No. 2, pp. 97-106 (2006)
- [9] Lee, D. D., Seung, H. S.: Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization, *Nature*, Vol. 401, No. 6755, pp. 788-791 (1999)
- [10] Imaizumi, T., Li, L., Ueda, K.: Does Machine Learning Replicate the Uncanny Valley? An Example using FaceNet, *Proceedings of the 45th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 1944-1950 (2023)
- [11] Kumazaki, H., Warren, Z., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Miyao, M., Nakano, M., Mizushima, S., Wakita, Y., Ishiguro, H., Mimura, M., Minabe, Y., Kikuchi, M.: A pilot study for robot appearance preferences among high-functioning individuals with autism spectrum disorder: Implications for therapeutic use, *PloS one*, Vol. 12, No. 10, e0186581 (2017)
- [12] Kleinhans, N. M., Richards, T., Johnson, L. C., Weaver, K. E., Greenon, J., Dawson, G., Aylward, E.: fMRI evidence of neural abnormalities in the subcortical face processing system in ASD, *Neuroimage*, Vol. 54, No. 1, pp. 697-704 (2011)
- [13] Kumazaki, H., Warren, Z., Swanson, A., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Ishiguro, H., Sarkar, N., Minabe, Y., Kikuchi, M.: Impressions of humanness for android robot may represent an endophenotype for autism spectrum disorders, *Journal of autism and developmental disorders*, Vol. 48, pp. 632-634 (2018)
- [14] Kumazaki, H., Muramatsu, T., Yoshikawa, Y., Matsumoto, Y., Miyao, M., Ishiguro, H., Mimura, M., Minabe, Y., Kikuchi, M.: How the realism of robot is needed for individuals with autism spectrum disorders in an interview setting, *Frontiers in psychiatry*, Vol. 10, 486 (2019)