

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域「人間と情報環境の共生インタラクション  
基盤技術の創出と展開」  
研究課題「ソーシャル・シグナルの共有と拡張によ  
る共感的行動の支援」

## 研究終了報告書

研究期間 2019年10月～2025年03月

研究代表者: 鈴木 健嗣  
(筑波大学 システム情報系 教授)

## §1 研究実施の概要

### (1)実施概要

本プロジェクトの目的は、ソーシャル・シグナルを共有及び拡張する人間拡張技術、それに伴う神経基盤の理解、及び実証研究を通じて人々の意図伝達を拡張し、他者理解を助け、実証研究を通じて人々の共感的行動を支援することが可能であることを示すことである。

#### ・ 1) ソーシャルシグナル研究

- ・ 向社会的行動に関する行動連鎖に基づく行動特性のクラス弁別モデルを提案した。社会的インタラクションの手がかりである社会的信号とその過程に基づき、ソーシャル・シグナルを規範とした一連の行動連鎖とするモデル構築を行い、理論体系化を目指した取り組みにて成果を得た。
- ・ 全体的な笑顔と向社会的行動の関係を明らかにするため、ロボットの動作をきっかけとした笑顔と、向社会的行動を行う前の行動変容を明らかにした。

#### ・ 2) ソーシャルシグナルの共有と拡張

- ・ 表情筋活動及び脳波計測を可能とする装着型機器の高度化に向けて、新たな電極の開発に成功することで同時計測が可能な装着型機器の実現可能性を見出した。
- ・ 実際の療育場面を対象とした実証実験を実現するため、複合現実感投影に必要な映像投影・音響生成装置の試作機を構築し、基礎的な検証結果に関する成果を得るとともに、外部療育支援機関との共同研究により、実現場での計測実証実験に成功した。
- ・ 教育応用、コミュニケーション支援、ロボット介在活動等を通じて、「ソーシャル・バイオフィードバック」と名付ける一連のフィードバック効果研究を実施し、ソーシャルシグナルの共有と拡張における効果を明らかにした。

#### ・ 3) 共感的 AI の創出研究

- ・ 神経基盤の解明に向け、社会的相互作用の脳機能ネットワークを明らかにするための研究を実施した。これより、二者間の共感的な社会的相互作用における脳同期と神経基盤について明らかにすることができた。かつ、乳幼児や障害リスクをもった小児という特別な対象者についても貴重な知見を提供できた。
- ・ 母子脳活動同時計測(3ヶ月児)の解析において、脳活動同期を解析する際に母子の年齢差に由来する血流動態の異なりに対応する手法のシミュレーションに関する成果や、妊娠時期の異なる新生児群における安静時 fNIRS 測定について、早産児に神経発達症児が多く見られる理由の一つを説明する成果が得られた。
- ・ 母子相互作用(5-6ヶ月児)における相互作用実験では、ライブとオフラインによる表情計測と行動解析を実施し、その特性が明らかになるといった新たな知見を得た。

#### ・ 4) 臨床・実証研究検証

- ・ ソーシャルシグナルを活用した学習支援システムへの応用により、学習現場における情動的表情の役割および顔向けの学習効果といったソーシャルシグナルに起因する要因を解明するため、学習支援システムへの応用研究を実施した。
- ・ 現実世界のソーシャル・シグナルを収集し支援するための複合現実感生成装置(デジタリウム)の開発を行うとともに、社会性発達に遅れや偏りがある自閉症スペクトラム症(Autism Spectrum Disorder: ASD)児に対する支援方法の開発と評価を行った。
- ・ 小児らが自由に遊びや運動を行う環境において、拡張・複合現実感技術の介入による空間への情報重畳による集団行動支援(環境の構造化)による実際の教育現場における効果について検証した。
- ・ 遷延性意識障害者のためのコミュニケーション支援機器の実証を目指し、聴覚刺激や触覚刺激を与えた時の表情筋活動の変化により感情の推定を可能にした。

## (2)顕著な成果

### <優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 二者間の共感的な社会的相互作用における脳同期と神経基盤を解明

概要: これまで、主に脳波計 (EEG) が使用されていたが、脳波計では脳活動の部位を正確に同定することはできない。空間分解脳が優れた fNIRS を用いることで初めて共感性に關与する社会的相互作用の脳部位とその回路について明らかにすることができた。かつ、乳幼児や障害リスクをもった小児という特別な対象者についても貴重な知見を提供できた。

Yamamoto, E., Hirokawa, M., Nunez, E., Hakuno, Y., Sekine, K., Miyahara, S., Suzuki, K., & Minagawa, Y., Neural and physiological correlates of prosocial behavior: temporoparietal junction activity in 3-year-old children, *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1;36(9), 1977-1994, 2023. (IF=3.2)

#### 2. 実世界での社会的相互作用実験について手法の開発・深化

概要: 我々は共感的なソーシャル・シグナルの情報処理過程を検討する複数の実験を通して、様々な改善を試み新しい分析手法の提案なども行い、特に共感的な社会的相互作用を定量化する技術<sup>1)</sup>を進展させてきた。昨今の AI の発展に伴う深層学習を用いた姿勢推定のシステムや分析方法の進展もあわせ、fNIRS 以外でも活用可能な社会的相互作用の計測手法や生体信号を用いたインタラクションの実世界実験<sup>2)3)</sup>を通じ、手法を深化することができた。

1) Morimoto, S., & Minagawa, Y., Effects of hemodynamic differences on the assessment of inter-brain synchrony between adults and infants. *Frontiers in Psychology*, 13, 873796, 2022.

2) Hassan, M., Kennard, M., Yoshitake, S., Ishac, K., Takahashi, S., Kim, S., Matsui, T., Hirokawa, M., and Suzuki, K., Augmenting the Sense of Social Presence in Online Video Games Through the Sharing of Biosignals, *IEEE Access*, 12:98977-98989, 2024 (IE=3.4)

3) Ccorimanya, L., Hassan, M., Watanabe, R., Ueno, T., Hada, Y. and Suzuki, K., A Personalized 3D-Printed Hand Prosthesis for Early Intervention in Children with Congenital Below-Elbow Deficiency: User-Centered Design Case Study, *IEEE Access*, 11:50235-50251, 2023. (IF=3.4)

#### 3. ソーシャルシグナルを用いたロボットに関する基礎研究の深化

概要: ソーシャルシグナルの概念に基づき、ソーシャルロボット応用に関する研究で成果を得た。自閉スペクトラム症児を含む参加者に対し、先行する笑顔により向社会的行動が増加する<sup>1)</sup>ことを明らかにした。ここでは、笑顔、顔向け、接近行動の一連の行動連鎖の結果として高い精度で向社会的行動の予測が可能であることを示した。一方、悲しみの情動を伝達するペア型ロボット<sup>2)</sup>を開発し、ロボットにより新たな社会的信号伝達が可能であることを示す成果を得た。

1) Kim, S., Hirokawa, M., Matsuda, S., Funahashi, A., Suzuki, K., Smiles as a Signal of Prosocial Behaviors Toward the Robot in the Therapeutic Setting for Children with Autism Spectrum Disorder, *Frontiers in Robotics and AI*, 8:80, 2021 (IF=2.9)

2) Uchida, M., Eleuda, N., Hassan, M., Hirokawa, M., Suzuki, K., Paired Robotic Devices with Subtle Expression of Sadness for Enriching Social Connectedness, *Lecture Notes in Computer Science*, 14453:254-263, 2023.

### <科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

#### 1. 共感性(情動的共感, 他者理解, 向社会的性)を伴う相互作用について行動連鎖に基づく行動特性, 脳, 生理指標をクラス弁別する技術の開発

概要: 社会的インタラクションの手がかりである社会的信号とその過程に基づき人々の社会的インタラクションに対し、ソーシャル・シグナルを規範とした一連の行動連鎖とするモデル構築を行い、ソーシャルシグナルの理論体系化にて大きな成果を得た。社会的信号の連続的な依存関係についてベイジアンネットワーク(BN)モデリングを用いて弁別し、これが共感性(情動的共感, 他者理解, 向社会的性)指標と統計的に有意に関連することを明らかにした。

1) Nunez, E., Minagawa, Y., Hirokawa, M., Yamamoto, E., Hakuno, Y., and Suzuki, K., Modelling sequential dependencies in mother-child social interaction as neuronal and physiological measures of empathic tendency, *preprint*.

2) Gervain, J., Minagawa, Y., Emberson, L., & Lloyd-Fox, S., Using fNIRS to study the early developing brain: future directions and new challenges. *Neurophotonics*, 10(2), 023519, 2023.

## 2. 表情筋活動及び脳波の装着型同時計測機器の高度化と新電極開発

概要: 表情筋・脳波同時計測機器の高度化を進めた。髪の毛を避けて角質層を貫くキャンドル型電極を用いたヘッドセット型脳波計測システムを開発した<sup>1)</sup>。有毛部からの脳波計測を簡便に行い、取り付け時間は1分以内にて2時間の計測が可能である。表情筋活動計測では、笑顔に特有の表情筋活動と画像識別の比較により、画像識別の遅延が374msであることを明らかにした<sup>2)</sup>。これにより、ソーシャル・シグナル計測において表情筋および脳活動計測の優位性が示された。これらは意識障害者のコミュニケーション支援の実証を拓いた。

1) Kawana, T., Zemba, Y., Ichikawa, R. & Miki, N., Easily Attach/Detach Reattachable EEG Headset with Candle-like Microneedle Electrodes. *Micromachines*, 14, 400, 2023.

2) M. Perusquía-Hernández, F. Dollack, C. K. Tan, S. Namba, S. Ayabe-Kanamura and K. Suzuki, "Smile Action Unit detection from distal wearable Electromyography and Computer Vision," *Proc of 2021 16th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 1-8, 2021.

## 3. ソーシャルシグナルを活用した学習支援システムへの応用

概要: 学習現場における情動的表情の役割を解明するため、項目応答理論に表情を取り入れた深層学習モデル SAD-IRT を提案し、その有効性を確認した。表情を学生の状態パラメータとして導入することで、予測精度が向上し、先行モデルを上回る結果を示した。また、対面行動や発話を促進するため、学習者の空間的定位が重要であることを示し、物理空間とサイバースペースを接続する同期型ハイブリッド学習環境「ミラーキャンパス」を設計した。これにより、ソーシャルシグナルを活用した新しい学習支援システムが大きく発展した。

1) Zhou, Y., Suzuki, K. and Kumano, S., State-Aware Deep Item Response Theory using student facial features, *Frontiers in Artificial Intelligence*, 6:1324279, 2024. (IF=4.0)

2) Sawada, S., Kim, S., Hirokawa, M., and Suzuki, K., MirrorCampus: A Synchronous Hybrid Learning Environment That Supports Spatial Localization of Learners for Facilitating Discussion-Oriented Behaviors, *Multimodal Technologies and Interaction*, 8:31, 2024. (IF=2.4)

## < 代表的な論文 >

1. Xu, M., Morimoto, S., Hoshino, E., Suzuki, K., & Minagawa, Y. (2023). Two-in-one system and behavior-specific brain synchrony during goal-free cooperative creation: an analytical approach combining automated behavioral classification and the event-related generalized linear model. *Neurophotonics*, 10(1):013511. (IF=5.3)

概要: 神経基盤の解明に向け、社会的相互作用の脳機能ネットワークを明らかにするため、「fNIRS ハイパースキャンニング」と呼ばれる、2人以上の脳活動を同時に記録する研究が大きく進展した。特に、行動指標と社会的信号の印象評定に基づく社会的信号と、二者間の脳活動同期の関連性を解析した結果、片方が注視しもう片方が注視されている時に脳同期が右の側頭頭頂接合部 (TPJ) と背外側前頭前野の間で強くみられ、相互注視になるとその同期は弱まることが示された。

2. Oki, M., Akizuki, S., Bourreau, B., Takahashi, I., Aoki, Y., Yamamoto, J., and Suzuki, K., Supporting collective physical activities by interactive floor projection in a special-needs school setting, *International Journal of Child-Computer Interaction*, 32:100392, 2022. doi: 10.1016/j.ijcci.2021.100392

概要: 本論文では、複合現実感を用いた神経発達児における個人の局所的な距離と密度に応じた床面投影のフィードバックを行うアルゴリズムを提案するものである。これにより、対象者らの空間・時間構造の認知を支援することが可能であることを示した。提案手法は、様々な組織化された身体活動の支援に実装可能であることが確認された。このような複合現実感技術を神経発達児らの学習活動に実用的な形式で実装する例は国際的にも限られており、今後大空間のみならず療育現場での利活用が大きく期待される成果である。

3. Hakuno, Y., Hata, M., Naoi, N., Hoshino, E., & Minagawa, Y. (2020). Interactive live fNIRS reveals engagement of the temporoparietal junction in response to social contingency in infants. *Neuroimage*, 218, 116901. doi:<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116901>

概要:養育者の適切な社会的信号は、乳幼児の共感性といった社会性発達を促進すると言われているが、その中でも社会的随伴性は特に重要な社会的信号である。本論文は随伴性に対する発達初期の乳幼児の脳内基盤を明らかにすることを目的として、6-8 ヶ月、10-12 ヶ月乳幼児を対象に相互作用中の随伴、非随伴応答に対する脳機能活動を fNIRS 計測した。これより、成人で観察されるような右 TPJ の随伴性の脳機能が生後半年で構築されていることが示唆された。同時に現実世界での相互作用中の随伴性応答というライブ刺激に対する乳幼児の脳活動部位を捉えた、国際的にも貴重な研究となる。

## §2 研究実施体制

### (1)研究チームの体制について

#### ①「筑波大学」グループ

研究代表者: 鈴木 健嗣 (筑波大学システム情報系 教授)

研究項目

- ・ソーシャル・シグナルの共有・拡張技術と共感的行動の支援
- 1) ソーシャル・シグナルの情報処理過程の理解
- 2) ソーシャル・シグナルの共有・拡張技術
- 3) 共感的 AI 基盤による行動理解・応答システム
- 4) 臨床・実証研究での検証

#### ②「慶應義塾大学」グループ

主たる共同研究者: 皆川 泰代 (慶應義塾大学文学部 教授)

研究項目

- ・ソーシャル・シグナルの神経基盤の解明と共感的行動の支援
- 1) ソーシャル・シグナルの情報処理過程の理解
- 2) ソーシャル・シグナルの共有・拡張技術
- 3) 共感的 AI 基盤による行動理解・応答システム
- 4) 臨床・実証研究での検証

### (2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

臨床現場:

筑波大学附属病院

筑波大学附属特別支援学校

慶應義塾大学附属病院

東京医科歯科大学

産業界:

パナソニック株式会社(共同研究実施)

株式会社資生堂(共同研究実施)

株式会社 LITALICO(共同実験の実施)

国際連携:

University of Michigan, USA

ACII (International Conference on Affective Computing & Intelligent Interaction)