

1 Review

2

3 論文表題 Title

4 感覚処理の特異性から人間拡張技術へ: 自閉スペクトラム症における新たな支援アプローチ

5 From Sensory Quirks to Superhuman Tech: Pioneering Support Strategies for Autism Spectrum Disorder

6

7 短縮表題 Abbreviated Title

8 ASD 感覚特性と人間拡張技術

9 ASD Sensory Traits and Human Augmentation

10

11 著者名 Authors

12 中村 賢佑^{1,2}、左中 彩恵^{1,2}、樋口 浩輝^{1,2}、神谷 沙羅^{1,3}、久保 明澄^{1,4}、佐々木 哲也^{1,3,5*}

13 Kenyu Nakamura^{1,2}, Sae Sanaka^{1,2}, Koki Higuchi^{1,2}, Sara Kamiya^{1,3}, Asumi Kubo^{1,4}, Tetsuya Sasaki^{1,4,5*}

14

15 ¹ Laboratory of Anatomy and Neuroscience, Department of Biomedical Sciences, Institute of Medicine,
16 University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

17 ² College of Medicine, School of Medicine and Health Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai,
18 Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

19 ³ Master's Program of Frontier Medical Sciences, Degree Program of Comprehensive Human Sciences,
20 Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki
21 305-8577, Japan

22 ⁴ College of Biology, School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai,
23 Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

24 ⁵ PhD Program of Neurosciences, Degree Program of Comprehensive Human Sciences, Graduate School of
25 Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

26

27

28 *** Corresponding author**

29 Tetsuya Sasaki

30 Laboratory of Anatomy and Neuroscience, Department of Biomedical Sciences, Institute of Medicine,
31 University of Tsukuba.

32 D401, General Research Building, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

33 Tel.: +81 29 853 8333

34 Fax: +81 29 853 8333

35 E-mail: tsasaki@md.tsukuba.ac.jp

36

37

38

1 **要旨**

2 自閉スペクトラム症(ASD)は、社会的コミュニケーションの困難さと限定的・反復的な行動パターンを特徴とする
3 神経発達障害である。近年、ASD における感覚処理の特異性が注目を集めており、これが日常生活や社会的相
4 互作用に大きな影響を与えていることが明らかになってきた。本総説では、ASD の感覚特性とその神経科学的基
5 盤について最新の知見を概観し、人間拡張技術の応用可能性について論じる。ASD の感覚特性には、感覚過
6 敏や鈍麻、感覚統合の困難、感覚シーキング行動などがあり、これらは脳内の感覚処理回路の構造的・機能的
7 異常や神経伝達物質システムの変化と関連している。これらの特性を考慮した人間拡張技術として、感覚調整デ
8 バイス、VR を用いた感覚統合トレーニング、ニューロフィードバックシステムなどが開発されている。これらの技術
9 は、ASD の個人の感覚処理を支援し、生活の質を向上させる可能性を秘めている。今後は、個人差への対応や
10 倫理的配慮、長期的効果の検証が求められる。感覚特性の深い理解と適切に設計された人間拡張技術の融合
11 は、ASD の人々の生活向上と、よりインクルーシブな社会の実現に貢献する可能性がある。

12

13 **Abstract**

14 Autism Spectrum Disorder (ASD) is a neurodevelopmental condition characterized by challenges in social
15 communication and restricted, repetitive behaviors. Recent research has highlighted the significance of atypical
16 sensory processing in ASD, which profoundly impacts daily life and social interactions. This review explores
17 the latest findings on sensory characteristics in ASD and their neurobiological underpinnings, discussing
18 potential applications of human augmentation technologies. Sensory features in ASD include hyper- or
19 hyposensitivity, difficulties in sensory integration, and sensory-seeking behaviors. These characteristics are
20 associated with structural and functional abnormalities in sensory processing circuits and alterations in
21 neurotransmitter systems. Human augmentation technologies, such as sensory modulation devices, virtual
22 reality-based sensory integration training, and neurofeedback systems, are being developed to address these
23 unique sensory needs. These technologies hold promise in supporting sensory processing and improving the
24 quality of life for individuals with ASD. However, future research must address individual differences, ethical
25 considerations, and long-term efficacy. The integration of a deep understanding of sensory characteristics with
26 appropriately designed human augmentation technologies has the potential to enhance the lives of individuals
27 with ASD and contribute to the realization of a more inclusive society.

28

29 **Keywords:** Autism Spectrum Disorder, Human Augmentation Technology, Neuroplasticity, Sensory Integration
30 Support, Sensory Processing Characteristics

31

32

1. 序論

自閉スペクトラム症 (Autism Spectrum Disorder: ASD) は、社会的コミュニケーションの困難さと限定的・反復的な行動パターンを特徴とする神経発達障害である。アメリカ精神医学会の診断基準 (DSM-5-TR) によれば、ASD は以下の特徴を持つ: (1) 社会的コミュニケーションおよび対人的相互反応における持続的な欠陥、(2) 限定された反復的な行動様式、興味、または活動、(3) 症状は発達早期 (~3 歳) に明らかになり、(4) その症状は社会的、職業的、または他の重要な領域における現在の機能に重大な影響がある (1)。アメリカ疾病予防管理センター (CDC) は ASD の子の割合について定期的に調査をおこなっており、8 歳児の ASD は 2.76% (2023 年) と推定されている (2)。ASD は広範な症状とその重症度の幅広い変動を特徴とし、各個人で異なる表現型を示す。この多様性にもかかわらず、感覚処理の特異性は ASD の中核的な特徴の一つとして認識されており、日常生活や社会的相互作用に大きな影響を与えている (3)。

一方、人間拡張技術 (Human Augmentation Technology) とは、人間の身体的、認知的、または感覚的能力を拡張、補完、または強化することを目的とした技術的手段の総称である。これには、ウェアラブルデバイス、脳-機械インターフェース、バーチャルリアリティ (VR)、拡張現実 (AR) などの技術が含まれる。人間拡張技術は、障害のある個人の機能を補助し、生活の質を向上させる可能性を秘めており、医療、リハビリテーション、教育など様々な分野で応用が期待されている (4)。

近年、ASD における感覚処理の特異性が注目を集めており、社会的相互作用や日常生活に大きな影響を与えていることが明らかになってきた (3)。本総説では、ASD の感覚特性とその神経科学的基盤について最新の知見を概観し、これらの理解に基づいた人間拡張技術の応用可能性について論じる。特に、ASD の個人の感覚処理を支援し、日常生活や社会参加を促進するための技術的アプローチに焦点を当てる。また、これらの技術の開発と応用に伴う倫理的配慮や今後の研究課題についても検討する。ASD の感覚特性に対する深い理解と、適切に設計された人間拡張技術の組み合わせは、ASD の個人の生活の質を向上させ、より包括的な社会の実現に貢献する可能性がある。

2. ASD における感覚特性

自閉スペクトラム症 (ASD) における感覚特性は、個人の日常生活や社会的相互作用に大きな影響を与える重要な要素である。ASD の個人では、様々な感覚モダリティにおいて過敏性または鈍麻が報告されており、これは感覚変調と呼ばれる (3)。聴覚、視覚、触覚、嗅覚、味覚のいずれかまたは複数に対して、通常とは異なる反応を示すことが多い (5)。例えば、特定の音に対する極端な不快感や、特定の触感に対する強い抵抗感などが観察される。一方で、痛覚に対する鈍感さが報告されることもある。これらの感覚の過敏性と鈍麻は、同一個人内でも感覚モダリティによって異なる場合があり、また状況や環境によっても変動することが知られている (6)。この感覚処理の特異性は、ASD の診断基準の一つとして DSM-5-TR (1) に含まれており、その重要性が認識されている。

ASD の個人では、複数の感覚情報を統合して処理することに困難を示すことがあり、これは感覚統合障害または感覚処理障害と呼ばれることもある (7)。例として、視覚情報と聴覚情報を同時に処理することが難

1 しく、マルチモーダルな刺激に対して適切に反応できないことがある。この感覚統合の困難は、社会的相互
2 作用や学習場面において特に顕著になることがあり、他者の表情と声のトーンを同時に処理して感情を理
3 解することや、教室環境での複数の刺激(教師の声、視覚教材、周囲の音など)を適切に処理することに困
4 難を示す可能性がある。

5 ASD の特性をもつ人の中には、特定の感覚刺激を積極的に求める「感覚シーキング行動 (Sensory
6 Seeking Behavior, Sensory Seeking)」が観察される (8)。感覚シーキング行動には、特定の物体を繰り返し触
7 る、特定の音を好んで聴く、回転する物体を長時間見つめるなどの行動が含まれる。このような行動は、感
8 覚入力の調整や自己刺激のための方略である可能性が示唆されている。感覚シーキング行動は、しばしば
9 常同行動や反復的行動と関連付けられるが、その機能や目的は個人によって異なる可能性がある。これら
10 の行動が感覚処理の困難さに対する補償メカニズムである可能性を指摘されている (9)。

11 ASD 特性をもつ人は、全体よりも細部に注目する傾向が強いことが報告されている。これは「中心統合の
12 弱さ」または「局所処理バイアス」と呼ばれる特性である (10)。この特性は、視覚情報処理において特に顕
13 著であり、複雑な図形や場面の中から特定の詳細を素早く見つけ出す能力につながる一方で、全体的な文
14 脈や意味の理解に困難を示すことがある。この知覚特性は、ASD の個人の認知スタイルや情報処理に大き
15 な影響を与えており、学習や社会的相互作用における特徴的なパターンの背景となっていると考えられる。

16

17 3. ASD の感覚特性の神経科学的基盤

18 ASD における感覚処理の特異性は、脳内の感覚処理回路の構造的・機能的異常と関連していることが示
19 唆されている。機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) や脳波 (EEG) を用いた研究により、ASD の個人では感覚刺
20 激に対する脳活動パターンが定型発達者とは異なることが報告されている (11)。聴覚刺激に対する反応で
21 は、ASD の個人は一次聴覚野における過剰な活性化を示すことがあり、聴覚過敏性の神経基盤とされる
22 (12)。同様に、触覚刺激に対しても、体性感覚野の反応が亢進していることが報告されている (13)。

23 複数の感覚モダリティを統合する能力の障害は、感覚統合に関与する神経ネットワークの機能異常と関
24 連していることが示唆されている。特に、上側頭溝 (Superior temporal sulcus; STS) や島皮質などのマルチモ
25 ーダル統合領域における活動の低下や結合性の異常が報告されている (14)。また、視覚と聴覚の統合に
26 重要な役割を果たす上丘 (superior colliculus, SC) の機能異常も指摘されており、ASD における感覚統合の
27 困難さの一因と考えられる (15)。ASD における感覚処理の特異性は、注意ネットワークの機能異常とも関連
28 している。特に、選択的注意や注意の切り替えに関与する前頭頭頂ネットワークの機能異常が報告されてい
29 る (16)。注意ネットワークの特異性は、ASD の人々が特定の感覚刺激に過度に注意を向けたり、逆に必要
30 な刺激に注意を向けることが困難であったりする現象と関連している可能性がある。

31 ASD における感覚処理の特異性は、特定の神経伝達物質システムの異常とも関連していると考えられる。
32 特に、 γ アミノ酪酸 (GABA) 系の機能低下が、感覚過敏性や感覚統合の困難さと関連していることが示唆さ
33 れている (17)。GABA は主要な抑制性神経伝達物質であり、その機能低下は神経活動の過剰な興奮につ
34 ながり、ASD における感覚過敏性の神経化学的基盤の一つとされている。

1 ASD の個人では神経可塑性のメカニズム、特に、経験依存的な神経回路の再編成プロセスが定型発達
2 者とは異なっていると考えられている (18)。この神経可塑性の変化は、感覚経験に基づく学習や適応のプ
3 ロセスに影響を与え、特異的な感覚処理パターンの形成につながる。これらの神経科学的知見は、ASD に
4 おける感覚特性の複雑さと多様性を反映しており、個々の症例に応じた細やかな理解と支援が必要である。

6 4. 人間拡張技術の応用可能性

7 ASD の感覚特性とその神経科学的基盤に関する理解の深化は、より効果的な支援方法や介入戦略の開
8 発につながるかと期待されている。特に、人間拡張技術の応用は、ASD の個人の感覚処理を支援し、日常生
9 活や社会参加を促進する上で重要な役割を果たすと考えられる。

10 4.1 感覚調整デバイス

11 ASD の個人の感覚過敏性や感覚処理の困難さに対応するため、ウェアラブルな感覚調整デバイスの開
12 発が進められている。例えば、周囲の音環境を分析し、個人の聴覚特性に合わせて音をフィルタリングする
13 スマートイヤホンや、視覚刺激を調整するスマートグラスなどが研究されている (19)。これらのデバイスは、
14 個人の感覚プロファイルに基づいてカスタマイズされ、リアルタイムで環境からの感覚入力を最適化すること
15 が想定されている。特定の周波数帯域の音を選択的に減衰させたり、視覚的なコントラストや色彩を調整し
16 たりすることで、感覚過敏性による不快感やストレスの軽減が見込まれる。

17 4.2 バーチャルリアリティ (VR) を用いた感覚統合トレーニング

18 VR 技術を用いた感覚統合トレーニングシステムの開発も進められている。これらのシステムは、安全で制
19 御された環境下で多感覚刺激を提示し、感覚統合能力の向上を図ることを目的としている (20)。視覚刺激
20 と聴覚刺激を同時に提示し、それらの統合を必要とするタスクを繰り返し練習することで、マルチモーダルな
21 情報処理能力の向上が期待される。また、徐々に複雑さを増していくことで、段階的に感覚統合能力を向上
22 させることが可能になる。

23 4.3 ニューロフィードバックシステム

24 脳波 (EEG) や機能的近赤外分光法 (fNIRS) などの非侵襲的脳機能計測技術を用いたニューロフィード
25 バックシステム (Neurofeedback) の開発も進められている。これらのシステムは、リアルタイムで脳活動を可視
26 化し、特定の脳活動パターンを強化または抑制することを目的としている (21)。感覚統合に関与する脳領
27 域の活動を強化するトレーニングや、過剰な感覚反応を示す脳領域の活動を調整する、などが考案されて
28 いる。これらのアプローチは、ASD の個人の感覚処理能力を中枢神経レベルで調整することを目指している。

29 4.4 適応型学習環境

30 ASD の個人の感覚特性や認知スタイルに合わせて最適化された適応型学習環境の開発も進められてい
31 る。これらのシステムは、個人の感覚プロファイルや注意特性に基づいて、学習コンテンツの提示方法や難
32 易度を動的に調整することが想定される (22)。視覚情報と聴覚情報のバランスを個人に合わせて最適化し
33 たり、注意の持続時間に応じてタスクの長さを調整したりすることで、より効果的な学習体験の提供が期待さ
34 れる。

1 4.5 社会的相互作用支援システム

2 ASD の個人の感覚特性を考慮した社会的相互作用支援システムの開発も進められている。これらのシス
3 テムは、社会的場面における感覚情報の処理を支援し、より円滑なコミュニケーションを促進することを目的
4 としている (23)。会話相手の表情や声のトーンを分析し、感情状態を視覚的に提示する AR システムや、社
5 会的場面における重要な感覚情報を強調して提示するスマートグラスなどが研究されている。これらの技術
6 は、ASD の個人が社会的文脈における感覚情報を適切に処理し、解釈することを支援すると考えられる。

8 5. 倫理的配慮と今後の展望

9 人間拡張技術の ASD への応用には、大きな可能性がある一方で、重要な倫理的配慮も必要である。特
10 に、個人のプライバシーや自律性の尊重、テクノロジーへの過度の依存の回避、そして神経多様性の尊重
11 などが重要な課題となる (24)。また、これらの技術の開発と評価においては、ASD の当事者や家族の積極
12 的な参加が不可欠である。ユーザー中心設計のアプローチを採用し、ASD の個人のニーズや優先事項を
13 十分に考慮することが重要である (25)。今後の研究においては、以下のような方向性が重要になると考えら
14 れる。

15
16 **個人差の理解と個別化:** ASD の感覚特性には大きな個人差があることから、より精密な個人プロファイリン
17 グ手法の開発が必要である。機械学習や AI 技術を活用し、個人の感覚特性やその日内変動を継続的にモ
18 ニタリングし、リアルタイムで支援を最適化するシステムの開発が期待される (26)。

19 **神経可塑性の活用:** 人間拡張技術を用いた介入が、長期的に脳の機能や構造にどのような影響を与える
20 かについての研究が必要である。特に、発達期の可塑性の高い時期に適切な介入を行うことで、感覚処理
21 能力の根本的な改善につながる可能性がある (27)。

22 **複合的介入法の開発:** 人間拡張技術を従来の行動療法や薬物療法と組み合わせた統合的アプローチの
23 開発が重要である。技術的支援と人間的支援を適切に組み合わせることで、より効果的かつ持続可能な支
24 援が可能になると考えられる (28)。

25 **生態学的妥当性の高い評価:** 開発された技術の有効性を、実際の日常生活環境下で長期的に評価する
26 ことが重要である。ウェアラブルセンサーや IoT 技術を活用し、自然な環境下での行動や生理指標を継続
27 的にモニタリングする手法の開発が期待される (29)。

28 **社会システムとの統合:** 人間拡張技術を教育システムや就労支援システムと統合し、ASD の個人の社会参
29 加を包括的に支援する取り組みが必要である。特に、感覚環境のユニバーサルデザイン化や、テクノロジー
30 を活用した合理的配慮の提供などが重要となる (30)。

32 6. まとめ

33 ASD における感覚特性とその神経科学的基盤に関する理解は、近年急速に進展している (31)。感覚過
34 敏性や感覚統合の困難さ、そして特異的な注意パターンなど、ASD に特徴的な感覚処理の様式が明らか

1 になってきた。これらの特性は、脳内の感覚処理回路の構造的・機能的特異性、神経伝達物質システムの
2 変化、そして神経可塑性のメカニズムの違いなど、複雑な神経生物学的基盤を持つことが示唆されている。

3 このような科学的知見に基づいて、人間拡張技術の ASD への応用が進められている。感覚調整デバイス、
4 VR を用いた感覚統合トレーニング、ニューロフィードバックシステム、適応型学習環境、社会的相互作用支
5 援システムなど、様々な技術的アプローチが開発されている。これらの技術は、ASD の個人の感覚処理を支
6 援し、日常生活や社会参加における困難さを軽減する可能性を秘めている。これらの技術の開発と応用に
7 は、倫理的配慮と慎重な評価が不可欠である。個人のプライバシーや自律性の尊重、テクノロジーへの過
8 度の依存の回避、そして神経多様性の尊重という観点から、技術の在り方を常に問い直す必要がある。また、
9 ASD の当事者や家族の参加を得ながら、ユーザー中心の開発プロセスを進めることが求められる。

10 今後は、個人差の理解と個別化、神経可塑性の活用、複合的アプローチの開発、生態学的妥当性の高
11 い評価、そして社会システムとの統合という方向性が重要になると考えられる。これらの取り組みを通じて、
12 ASD の個人一人一人のニーズに合わせた、より効果的かつ倫理的な支援の実現が期待される。

13 ASD における感覚特性の理解と支援は、神経多様性の尊重という広い文脈の中で捉える必要がある。
14 ASD の感覚特性は「障害」としてだけでなく、ユニークな才能や創造性の源泉としても評価される (32)。人間
15 拡張技術の目的は、ASD の個人の特性を抑制することではなく、その可能性を最大限に引き出し、自己実
16 現を支援することにある。科学技術と人間性の調和を図りながら、インクルーシブな社会の実現に向けた取
17 り組みを進めていくことが重要である。

18 19 8. 謝辞

20 当研究室の研究の一部は、科学研究費補助金(19K08065, 22K07611, 19H05201)、先進医薬研究振興財団、
21 内藤記念科学振興財団、武田科学振興財団、川野小児医科学奨学財団、大樹生命厚生財団、ライフサイエンス
22 振興財団、中富健康科学振興財団、薬学研究奨励財団、三島海雲記念財団、基礎生物学研究所・共同利用研
23 究、筑波大学オープンファシリティ推進室のサポートの下で行われた。本総説の執筆にあたり、解剖学・神経科学
24 研究室のメンバーから、有意義なコメントをいただいた。この場をお借りして感謝する。

25 26 9. 利益相反声明

27 著者らは、競合する利害関係がないことを宣言する
28
29
30

References

1. Gangopadhyay M. DSM-5-TR® self-exam questions. Muskin PR, Dickerman AL, Drysdale A, Holderness CC, editors. Arlington, TX: American Psychiatric Association Publishing; 2023. 488 p.
2. Maenner MJ, Shaw KA, Bakian AV, Bilder DA, Durkin MS, Esler A, et al. Prevalence and Characteristics of Autism Spectrum Disorder Among Children Aged 8 Years - Autism and Developmental Disabilities Monitoring Network, 11 Sites, United States, 2018. *MMWR Surveill Summ.* 2021 Dec 3;70(11):1–16.
3. Baum SH, Stevenson RA, Wallace MT. Behavioral, perceptual, and neural alterations in sensory and multisensory function in autism spectrum disorder. *Prog Neurobiol.* 2015 Nov;134:140–60.
4. Bostrom N, Sandberg A. Cognitive enhancement: methods, ethics, regulatory challenges. *Sci Eng Ethics.* 2009 Sep;15(3):311–41.
5. Leekam SR, Nieto C, Libby SJ, Wing L, Gould J. Describing the sensory abnormalities of children and adults with autism. *J Autism Dev Disord.* 2007 May;37(5):894–910.
6. Ben-Sasson A, Hen L, Fluss R, Cermak SA, Engel-Yeger B, Gal E. A meta-analysis of sensory modulation symptoms in individuals with autism spectrum disorders. *J Autism Dev Disord.* 2009 Jan;39(1):1–11.
7. Iarocci G, McDonald J. Sensory integration and the perceptual experience of persons with autism. *J Autism Dev Disord.* 2006 Jan;36(1):77–90.
8. Dunn W. The impact of sensory processing abilities on the daily lives of young children and their families: A conceptual model. *Infants Young Child.* 1997 Apr;9(4):23–35.
9. Ashburner J, Ziviani J, Rodger S. Sensory processing and classroom emotional, behavioral, and educational outcomes in children with autism spectrum disorder. *Am J Occup Ther.* 2008 Sep;62(5):564–73.
10. Happé F, Frith U. The weak coherence account: detail-focused cognitive style in autism spectrum disorders. *J Autism Dev Disord.* 2006 Jan;36(1):5–25.
11. Marco EJ, Hinkley LBN, Hill SS, Nagarajan SS. Sensory processing in autism: a review of neurophysiologic findings. *Pediatr Res.* 2011 May;69(5 Pt 2):48R-54R.
12. Kujala T, Lepistö T, Näätänen R. The neural basis of aberrant speech and audition in autism spectrum disorders. *Neurosci Biobehav Rev.* 2013 May;37(4):697–704.
13. Cascio CJ, Gu C, Schauder KB, Key AP, Yoder P. Somatosensory event-related potentials and association with tactile behavioral responsiveness patterns in children with ASD. *Brain Topogr.* 2015 Nov;28(6):895–903.
14. Stevenson RA, Siemann JK, Schneider BC, Eberly HE, Woynaroski TG, Camarata SM, et al. Multisensory temporal integration in autism spectrum disorders. *J Neurosci.* 2014 Jan 15;34(3):691–7.
15. Russo N, Foxe JJ, Brandwein AB, Altschuler T, Gomes H, Molholm S. Multisensory processing in children with autism: high-density electrical mapping of auditory-somatosensory integration. *Autism Res.* 2010 Oct;3(5):253–67.
16. Keehn B, Müller R-A, Townsend J. Atypical attentional networks and the emergence of autism. *Neurosci Biobehav Rev.* 2013 Feb;37(2):164–83.
17. Robertson CE, Ratai E-M, Kanwisher N. Reduced GABAergic action in the autistic brain. *Curr Biol.* 2016 Jan 11;26(1):80–5.
18. Oberman LM, Pascual-Leone A. Hyperplasticity in Autism Spectrum Disorder confers protection from Alzheimer's disease. *Med Hypotheses.* 2014 Sep;83(3):337–42.
19. Veenstra-VanderWeele J, Blakely RD. Networking in autism: leveraging genetic, biomarker and model system findings in the search for new treatments. *Neuropsychopharmacology.* 2012 Jan;37(1):196–212.
20. Lahiri U, Bekele E, Dohrmann E, Warren Z, Sarkar N. A physiologically informed virtual reality based social communication system for individuals with autism. *J Autism Dev Disord.* 2015 Apr;45(4):919–31.
21. Coben R, Linden M, Myers TE. Neurofeedback for autistic spectrum disorder: a review of the literature. *Appl Psychophysiol Biofeedback.* 2010 Mar;35(1):83–105.
22. Grynspan O, Weiss PLT, Perez-Diaz F, Gal E. Innovative technology-based interventions for autism

- 1 spectrum disorders: a meta-analysis. *Autism*. 2014 May;18(4):346–61.
- 2 23. Bekele ET, Lahiri U, Swanson AR, Crittendon JA, Warren ZE, Sarkar N. A step towards developing
3 adaptive robot-mediated intervention architecture (ARIA) for children with autism. *IEEE Trans Neural*
4 *Syst Rehabil Eng*. 2013 Mar;21(2):289–99.
- 5 24. Rosen LD, Cheever NA, Carrier LM, editors. Are “friends” electric? Why those with an autism spectrum
6 disorder (ASD) thrive in online cultures but suffer in offline cultures.
- 7 25. Fletcher-Watson S, Pain H, Hammond S, Humphry A, McConachie H. Designing for young children with
8 autism spectrum disorder: A case study of an iPad app. *Int J Child Comput Interact*. 2016 Jan;7:1–14.
- 9 26. Jeste SS, Geschwind DH. Disentangling the heterogeneity of autism spectrum disorder through genetic
10 findings. *Nat Rev Neurol*. 2014 Feb;10(2):74–81.
- 11 27. LeBlanc JJ, Fagiolini M. Autism: a “critical period” disorder? *Neural Plast*. 2011 Aug 3;2011:921680.
- 12 28. Shic F, Goodwin M. Introduction to technologies in the daily lives of individuals with autism. *J Autism*
13 *Dev Disord*. 2015 Dec;45(12):3773–6.
- 14 29. Müller R-A, Shih P, Keehn B, Deyoe JR, Leyden KM, Shukla DK. Underconnected, but how? A survey of
15 functional connectivity MRI studies in autism spectrum disorders. *Cereb Cortex*. 2011 Oct;21(10):2233–
16 43.
- 17 30. Parsons S, Yuill N, Good J, Brosnan M. ‘Whose agenda? Who knows best? Whose voice?’ Co-creating a
18 technology research roadmap with autism stakeholders. *Disabil Soc*. 2020 Feb 7;35(2):201–34.
- 19 31. Sensory differences in autism: A review of neural and behavioral approaches. *Current Opinion in*
20 *Neurobiology*. 79.
- 21 32. Mottron L, Bzdok D. Autism spectrum heterogeneity: fact or artifact? *Mol Psychiatry*. 2020
22 Dec;25(12):3178–85.