

1 Review

2

3 論文表題 Title

4 Anatomy 2.0: 人間拡張時代における解剖学の役割

5 Anatomia Nova: The Evolution and Prospects of Anatomy in the Era of Human Augmentation Technology - An
6 Integrative Review of Structure, Function, and Ethics

7

8 短縮表題 Abbreviated Title

9 Anatomia Nova: 人間拡張時代の解剖学

10 Anatomia Nova: Anatomy in the Age of Human Augmentation

11

12 著者名 Authors

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

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

15

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

18 ² Master's Program of Frontier Medical Sciences, Degree Program of Comprehensive Human Sciences,
19 Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki
20 305-8577, Japan

21 ³ PhD Program of Neurosciences, Degree Program of Comprehensive Human Sciences, Graduate School of
22 Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

23 ⁴ College of Medicine, School of Medicine and Health Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai,
24 Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

25 ⁵ College of Biology, School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai,
26 Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

27

28

29

30 *** Corresponding author**

31 Tetsuya Sasaki

32 Laboratory of Anatomy and Neuroscience, Department of Biomedical Sciences, Institute of Medicine, University of
33 Tsukuba.

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

35 Tel.: +81 29 853 8333

36 Fax: +81 29 853 8333

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

38

39

1 要旨

2 医学の伝統的な目標は疾病の治療と健康の回復であったが、近年、人間の能力を健常者の標準を超えて拡張する技術が急速に発展している。この「人間拡張」は、治療を目的とした従来の医療とは異なり、健全な身体的・認知的機能をさらに強化することを目指している。例えば、義肢技術は失われた四肢の機能を回復させるだけでなく、健全な肢体以上の力や精密さを実現しつつある。同様に、脳-コンピューターインターフェース(BCI)は、神経疾患患者のコミュニケーション支援から、健常者の認知能力増強へとその応用範囲を拡大している。このような人間拡張技術の発展には、神経系の微細構造と機能に関する詳細な解剖学的理解が不可欠である。本総説は、人間拡張技術の主要領域について、その基盤となる神経解剖学的知見を中心に考察する。BCIの開発には、大脳皮質の層構造や機能局在の理解が重要である。特に、運動野や体性感覚野の構造理解は、運動制御やフィードバックシステムの開発に直接寄与する。神経調節技術では、GABA 作動性介在ニューロンの分布と接続パターンの理解が、皮質の興奮性・抑制性バランスの制御に重要である。感覚器官の拡張技術では、各感覚器の微細構造と機能の理解が基盤となる。視覚系では網膜の層構造や視覚野の階層的構造、聴覚系では蝸牛の微細構造や聴覚伝導路、体性感覚系では皮膚の層構造と感覚受容器の分布の理解が、それぞれの拡張技術の開発に不可欠である。さらに、皮質-皮質下回路や長距離投射経路の解剖学的理解は、より精密な神経調節技術の開発につながる。例えば、前頭前野-基底核-視床回路の理解は、高次認知機能の制御に関わる技術開発に寄与する。これらの技術の発展は、神経科学、工学、材料科学など多分野の知見の統合によって実現されている。人間拡張技術と神経解剖学は密接に関連しており、今後もその関係性は深化すると予想される。特に、ナノスケールでの神経解剖学的知見は、より精密で効果的な人間拡張技術の開発につながる可能性がある。シナプスの微細構造や神経伝達物質受容体の分布に関する詳細な理解は、より自然な BCI の開発や、より効果的な神経調節技術の設計に寄与すると考えられる。また、神経回路の可塑性メカニズムの解明は、長期的に安定した人間拡張技術の実現に不可欠である。倫理的・社会的な課題に注意を払いつつ、これらの技術の開発と利用を通じて、ヒトの潜在能力を引き出し、その幸福を向上させることが期待される。

23

24 Abstract

25 Recent technological advances have expanded the scope of medical interventions from treating diseases to enhancing human capabilities beyond normal levels. This field of "human augmentation" aims to enhance physical and cognitive functions in healthy individuals. The development of these technologies relies heavily on a detailed understanding of neuroanatomy. This review focuses on the neuroanatomical foundations underlying key areas of human augmentation technology. Brain-computer interfaces (BCIs) require thorough knowledge of cortical layer structure and functional localization, particularly in motor and somatosensory cortices. Neuromodulation technologies depend on understanding GABAergic interneuron distribution and connectivity for controlling cortical excitatory-inhibitory balance. Sensory augmentation technologies are based on the microstructure and function of sensory organs, including the retinal layers and visual cortices for vision, cochlear structure and auditory pathways for hearing, and skin layers and sensory receptors for touch. Understanding cortico-subcortical circuits and long-range projection pathways contributes to more precise neuromodulation techniques, such as those targeting higher cognitive functions through the prefrontal cortex-basal ganglia-thalamus circuit. The integration of insights from neuroscience, engineering, and materials science drives these developments. Future advancements in nanoscale neuroanatomy may lead to more effective augmentation technologies, such as more natural BCIs and sophisticated neuromodulation techniques. Understanding neural plasticity mechanisms is crucial for long-term stable augmentation. While these technologies promise to maximize human potential and improve quality of life, their development necessitates a comprehensive approach that considers ethical and social implications.

42

43 **Keywords:** Anatomy, Brain-Machine Interface, Cognitive Enhancement, Human Augmentation Technology,
44 Sensory Augmentation

45

1. Introduction

人間拡張技術 (Human Augmentation)は、人類の身体的、認知的、感覚的能力を人工的に強化または拡張することを目指す革新的かつ学際的な研究分野である(1,2)。この分野は、人類の古くからの夢である自己改善と能力向上の現代的な具現化と言える。古代の神話や伝説に登場する超人的能力を持つ英雄たちから、近代の義肢や眼鏡といった補助具の開発まで、人類は常に自らの限界を超えようと努力してきた。しかし、21世紀に入り、テクノロジーの急速な発展により、かつては空想科学小説の世界でしかなかったような人間能力の拡張が、現実のものとなりつつある。

人間拡張技術の概念は、1960年代に提唱されたサイボーグ理論にその起源を見ることができる。当時、宇宙開発の文脈で、1960年代のサイボーグ理論の起源は、主に Manfred E. Clynes と Nathan S. Kline の研究に遡る。彼らは1960年に“Cyborgs and Space”というタイトルの論文を発表した(3,4)。この論文は、宇宙飛行における人間の生理的課題に対処するための革新的なアプローチを提案したものである。彼らは、宇宙環境の過酷な条件(無重力、放射線、極端な温度変化など)に対して、人間の身体を技術的に適応させる必要性を論じ、ヒトの生物学的システムと技術的システムを融合させた「サイバネティック・オーガニズム (Cybernetic Organism)」、略して「サイボーグ (cyborg)」という概念を提唱した。この概念の具体的な例として、彼らは 1) 薬物投与システム:宇宙飛行士の生理状態を常時モニタリングし、必要に応じて自動的に薬物を投与する埋め込み型デバイス、2) 心拍調整器:重力の変化に対応して心臓の機能を調整する装置、3) 人工肺:宇宙船内の大気に適応するための呼吸補助システム、4) 体温調節装置:極端な温度変化に対応するための体温制御システム、5) 知覚変換器:宇宙環境での新たな刺激を人間が理解可能な形に変換するデバイス、などを提案した。

これらの提案は、単に宇宙飛行士を保護するだけでなく、ヒトの能力を積極的に拡張し、宇宙環境に適応させることを目指しており、後の人間拡張技術の発展に大きな影響を与えた。彼らの考えは、単に環境に適応するだけでなく、技術を用いて人間の能力を積極的に拡張するという現代の人間拡張技術の基本的な考え方の基礎を作った。また、この研究は科学技術の分野だけでなく、哲学や文学、芸術にも大きな影響を与え、ヒトと技術の関係性に関する新たな議論を喚起した。

現代の人間拡張技術は、単に環境適応のためだけではなく、ヒトの能力そのものを飛躍的に向上させることを目指している。この分野は、神経科学、解剖学、工学、情報科学、材料科学、そして倫理学など、多岐にわたる学問領域の知見が必要であり、特に、解剖学的知見は人間拡張技術の発展において重要な役割を果たす。人体の構造と機能に関する詳細な理解なくして、効果的かつ安全な拡張技術の開発は不可能である。

解剖学と人間拡張技術は、相補的・相乗的な関係がある。解剖学的知識は拡張技術の設計と実装の基礎となる一方で、新たな拡張技術の開発は解剖学研究に新しい視点と方法論をもたらす。例えば、脳-コンピュータインターフェース (Brain-Computer-Interface: BCI) の開発は、大脳皮質の微細構造と機能に関する我々の理解を大きく前進させた。同時に、高解像度の機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) やオプトジェネティクスなどの新技術は、生きた脳の構造と機能をこれまでになく詳細に観察することを可能にし、解剖学研

1 究に革命をもたらしている(5,6)。

2 現在、人間拡張技術は急速に発展しており、その影響は医療、教育、労働、エンターテインメントなど、社会
3 のあらゆる側面に及びつつある。神経補綴技術は、四肢麻痺患者の運動機能を回復させ、感覚器官の損
4 傷を補うことを可能にしつつある。認知増強技術は、学習障害を持つ人々の支援や、健常者の能力向上に
5 応用されている。さらに、拡張現実 (AR) や仮想現実 (VR) 技術は、我々の知覚と相互作用の方法を根本か
6 ら変えつつある。

7 これらの技術の発展は同時に、重要な倫理的、社会的、法的問題を提起している。ヒトの本質とは何か、
8 拡張された能力をどこまで「自然」と見なすべきか、技術へのアクセスの公平性をどのように確保するか、プ
9 ライバシーと個人の自律性をどのように保護するかなど、多くの課題が存在する。

10 本総説では、人間拡張技術の主要領域について、特に解剖学的観点から詳細に解説する。BCI、神経
11 調節技術、筋骨格系の拡張、感覚器官の拡張、そして認知機能の拡張について、それぞれの基盤となる解
12 剖学的・生理学的知見を中心に論じる。さらに、これらの技術開発が解剖学研究にもたらす新たな視点や手
13 法について考察する。さらに、これらの技術がもたらす倫理的問題について、解剖学的視点からの考察を加
14 える。人間拡張技術と解剖学の融合は、人類の可能性を大きく広げると同時に、我々の「身体」と「心」に対
15 する理解を根本から変える可能性を秘めている。この分野の発展に、解剖学がこれまで以上に重要な役割
16 を果たすことが期待される。

17

18 2. 人間拡張技術 (Human Augmentation)の概要

19 ヒトの能力拡張 (Human Augmentation) は、テクノロジーや科学技術を用いて、人間の認知的・身体的な
20 能力を向上させることを指す概念である。身体的能力の拡張は、人間の肉体的なパフォーマンスを向上させ
21 る技術である。たとえば、義肢、外骨格 (exoskeleton)、人工臓器などが含まれる。これにより、身体機能の喪
22 失や欠損を補完するだけでなく、健康な個体の身体能力をさらに向上させることも可能である。失った四肢
23 を代替する義肢は、近年の技術の進歩により、より自然な動きや感覚を提供することができるようになってい
24 る (7)。産業現場やリハビリで使われる外骨格は、重量物の持ち上げや移動、身体の補助を目的とし、筋力
25 の増強や持久力の向上を実現する技術である (8)。

26 認知的な能力を拡張する技術は、脳の働きを強化し、学習、記憶、問題解決能力、創造性を向上させる
27 ことを目指すものである (2,9)。この分野では、ニューロテクノロジーや AI が重要な役割を果たしている。ブ
28 レイン・コンピュータ・インターフェース (BCI) は、ヒトの脳とコンピュータを直接接続する技術であり、これによ
29 り脳波を使ってデバイスを制御したり、脳活動を増強したりすることが可能である。身体障害者のコミュニケー
30 ションにおいて、脳の神経活動から思考を読み出す「ブレイン・デコーディング」と、知覚を神経活動に変換
31 する「ブレイン・エンコーディング」の研究がすすめられている。AI 支援は、AI や機械学習を用いたツールを
32 活用し、複雑な問題の解決や知識の蓄積を補助し、ヒトの認知的負担を軽減するものである。

33 感覚を強化する技術も発展しており、ヒトが通常感覚器では得られない情報を取得可能になる。ナイト
34 ビジョンゴーグルや拡張現実 (AR) デバイス、嗅覚センサーなどがその例である (10)。ナイトビジョンは、目に

1 見えない赤外線を感知し、夜間でも視覚的情報を得られる技術である。AR/VR 技術は、拡張現実や仮想現
2 実を用いて、実際の視覚情報にデジタル情報を重ね合わせることで、感覚の拡張を可能にする技術である。

3 生物学的能力の拡張は、遺伝子工学やバイオテクノロジーを利用し、ヒトの生物学的な限界を超える能力
4 を開発することも試みられている。これは、遺伝子編集技術や幹細胞技術、アンチエイジング技術などが関
5 与する分野である。CRISPR などの遺伝子編集技術により、特定の遺伝子を改変し、病気の治療や予防に
6 使われるだけでなく、将来的には能力拡張の一環として応用される可能性がある。老化を遅らせたり、若返り
7 を図る技術も生物学的能力拡張の一環である。

8 人間拡張と解剖学に関する知見は、特にウェアラブルロボティクスやバイオメカニクスの分野で多く見られ
9 る。これらの分野は、人体の機能と構造に関する解剖学的な知識を応用し、技術を用いて人間の身体的お
10 よび機能的能力を拡張することを目的としている。

11

12 3. 脳-コンピューターインターフェース (BCI)と神経解剖学

13 3.1. 大脳皮質層構造と BCI

14 BCI の開発は、大脳新皮質の微細構造と機能に関する詳細な解剖学的理解に基づいている。大脳新皮
15 質は 6 層構造を持つ。BCI の開発と特に関連が深いと考えられるのは、以下の層である。第 III 層(外錐体
16 細胞層)は、他の皮質領域への投射ニューロンが多く存在し、皮質間の情報統合に重要な役割を果たす。
17 この層からの信号は、高次認知機能に関連する BCI の開発に重要である。第 V 層(内錐体細胞層):主に
18 皮質下構造への投射ニューロンが存在し、運動指令の出力に重要な役割を果たす。この層からの信号の読
19 み取りは、運動制御 BCI の核心となる。第 VI 層(多形細胞層):視床へのフィードバック投射が多く、感覚情
20 報の処理に重要である。この層の活動の調節は、感覚フィードバック BCI の開発に不可欠である。これらの
21 層構造の理解は、BCI 電極の最適な配置位置の決定や、得られた信号の解釈に直接的に寄与する。

22 3. 2. 大脳皮質領野と BCI

23 大脳皮質の機能局在は、脳の特定の領域が特定の機能や処理を担当するという概念である(11,12)。この
24 理解は、現代の脳科学と人間拡張技術の基礎となっている。これらの機能局在の理解は、脳-コンピューター
25 ーインターフェース(BCI)や神経調節技術など、多くの人間拡張技術の開発に直接的に応用されている。
26 例えば、運動野からの信号を読み取ることで、義肢やコンピューターカーソルの制御が可能になる。また、視
27 覚野や聴覚野の刺激により、感覚フィードバックを提供する技術が開発されている。現代の神経科学では、
28 これらの機能局在を単純な「一対一」の対応関係として捉えるのではなく、複雑な神経ネットワークの一部と
29 して理解することが重要だと認識されている。各領野は他の領野・領域と密接に連携し、複雑な情報処理を
30 行っている。この複雑性の理解は、より高度で自然な人間拡張技術の開発につながると期待されている。例
31 えば、複数の脳領域からの信号を統合することで、より直感的な BCI の制御が可能になるかもしれない。ま
32 た、神経可塑性の理解に基づいて、脳の再組織化を促進する技術の開発も進んでいる。大脳皮質の機能
33 局在の理解は、BCI 開発に重要である。運動野 (ブロードマン領野 4)は一次運動野であり、体部位局在
34 (ホムンクルス)の詳細なマッピングは、運動意図の正確な読み取りと、それに基づく義肢やコンピューターカ

1 ソルの制御に不可欠である。体性感覚野(ブロードマン領野 1, 2, 3a, 3b)は、触覚や固有感覚の処理に
2 関与する領野の構造理解は、感覚フィードバック BCI の開発に重要である。前頭前皮質(ブロードマン領野
3 9,10,11,12 など)は、高次認知機能に関与するこの領域の構造と機能の理解は、思考や意思決定を支援す
4 る BCI の開発に関与する。

5 3.3. 皮質下構造と BCI

6 皮質下構造は、大脳皮質の下に位置する脳の構造群を指し、多様な機能を担う。これらの構造は、感覚
7 情報の処理、運動制御、情動、記憶、学習など、重要な役割を果たしている(13-15)。皮質下構造の解剖
8 学的理解も、BCI の高度化に重要である。基底核は、運動の開始と制御に関与するこの構造の理解は、より
9 スムーズな運動制御 BCI の開発に寄与する。視床は、感覚情報の中継と統合に関与する視床の構造理解
10 は、多感覚統合 BCI の開発に不可欠である。

11 12 4. 神経調節技術と神経解剖学

13 神経調節技術 (Neuromodulation)は、神経系の活動を人為的に制御または変調することで、脳機能を
14 最適化または増強する手法である (16)。この分野は急速に発展しており、医療から認知増強まで幅広い
15 応用が期待されている。神経調節技術の効果的な適用には、神経系の微細構造と機能に関する詳細な解
16 剖学的理解が不可欠である (17,18)。

17 4.1. 大脳皮質の微細構造と神経調節

18 非侵襲的脳刺激技術である経頭蓋磁気刺激 (TMS)や経頭蓋直流電気刺激 (tDCS)の効果は、大脳皮
19 質の微細構造、特に錐体細胞の樹状突起の配置に大きく依存している。錐体細胞は大脳皮質の主要な出
20 力ニューロンであり、特徴的な三角形の細胞体と、頂端樹状突起および基底樹状突起を持つ複雑な構造を
21 有している (19,20)。これらの樹状突起の三次元的配置は、TMS や tDCS が生成する電場との相互作用に
22 重要な役割を果たしている。電場が樹状突起の長軸に平行な場合に最大の効果が得られ、垂直な場合に
23 効果が最小になるという特性は、刺激の効果を決定する重要な要因となっている (21)。

24 大脳皮質の6層構造における錐体細胞の配置や樹状突起の広がり方の違い、さらには脳回と脳溝による
25 複雑な皮質形状は、刺激効果の空間的分布に大きな影響を与えている (22)。この複雑な解剖学的構造の
26 理解は、より効果的な刺激プロトコルの開発に直接寄与している。例えば、特定の脳領域の錐体細胞の主
27 要な配向に合わせて TMS コイルや tDCS 電極の位置と角度を調整することで、刺激効果を最大化できる
28 (23)。また、電流の強度、方向、頻度を標的とする脳領域の樹状突起の配向に合わせて最適化することや、
29 複数の方向から刺激を与える多方向刺激技術の開発も進んでいる (24)。

30 最近の研究では、高解像度 MRI と詳細な電場モデリングを組み合わせることで、個々の錐体細胞レベル
31 での刺激効果を予測しようという試みが行われている(25,26)。これにより、個々の被験者の脳構造に基づい
32 た個別化された刺激プロトコルの設計が可能になり、より精密で効果的な刺激効果が期待されている。詳細
33 な解剖学的理解に基づく非侵襲的脳刺激技術の最適化は、神経科学研究や神経精神医学的治療の効果
34 を大きく向上させる可能性がある。

1 GABA 作動性介在ニューロンは、大脳皮質の神経回路において抑制性の制御を担う重要な要素である
2 (27)。これらのニューロンの分布と接続パターンの理解は、神経調節技術を用いた皮質の興奮性・抑制性バ
3 ランスの制御において極めて重要な役割を果たしている。GABA 作動性介在ニューロンは、大脳皮質全体
4 に分布しているが、その密度や種類は層や領域によって異なっている。主な種類としては、バスケット細胞、
5 シャンデリア細胞、マルティノッティ細胞、ダブルブーケ細胞などが挙げられる (28)。これらの介在ニューロ
6 ンは、それぞれ特徴的な形態と接続パターンを持ち、皮質の情報処理に多様な影響を与える。介在ニュー
7 ロン同士の相互接続や、錐体細胞との相互作用により、皮質の興奮性・抑制性のバランスが動的に調整さ
8 れている。このバランスは、正常な脳機能の維持に不可欠であり、その破綻は様々な神経精神疾患と関連し
9 ていることが知られている (29)。

10 神経調節技術、特に経頭蓋磁気刺激 (TMS) や経頭蓋直流電気刺激 (tDCS) などの非侵襲的脳刺激技
11 術は、この皮質の興奮性・抑制性バランスに影響を与える可能性がある。例えば、TMS の反復刺激は、
12 GABA 作動性介在ニューロンの活動を修飾し、皮質の興奮性を変化させることが示唆されている (30)。
13 GABA 作動性介在ニューロンの分布と接続パターンの詳細な理解は、より精密な神経調節技術の開発につ
14 ながる。最近の研究では、オプトジェネティクスなどの技術を用いて、特定のサブタイプの GABA 作動性介
15 在ニューロンを選択的に操作することが可能になっている (31)。このような技術の発展は、将来的により精
16 密な神経調節技術の開発につながるであろう。神経調節技術による皮質の興奮性・抑制性バランスの制御
17 は、様々な神経精神疾患の治療や認知機能の増強に応用できる可能性がある。

18 4.2 神経伝達物質系と神経調節

19 シナプスの微細構造: 化学シナプスにおける神経伝達物質の放出、受容、再取り込みのプロセスの理解
20 は、薬理的な神経調節アプローチの基礎となる。各種神経伝達物質受容体 (グルタミン酸受容体、GABA
21 受容体など) の脳内分布マップは、特定の認知機能や行動を標的とした神経調節技術の開発に直接的に
22 寄与する。

23 4.3 神経回路と神経調節

24 皮質-皮質下回路、特に前頭前野-基底核-視床回路は、高次認知機能や行動制御に重要な役割を果
25 たす。この回路は、前頭前野から基底核への投射、基底核から視床への投射、そして視床から前頭前野へ
26 の投射という閉ループを形成している (32)。この回路の解剖学的理解は、様々な神経精神疾患の病態理
27 解や治療法の開発に貢献している。パーキンソン病の治療に用いられる深部脳刺激 (DBS) は、この回路の
28 理解に基づいて開発された技術である。淡蒼球内節や視床下核などの基底核の特定の部位を電気刺激す
29 ることで、運動症状の改善が得られる (33)。さらに、前頭前野-基底核-視床回路の異常はうつ病や強迫性
30 障害などの精神疾患とも関連していることが示唆されており、これらの疾患に対する新たな神経調節技術の
31 開発が進められている。

32 より精密な神経調節技術の開発には、この回路内の特定の経路や細胞タイプを標的とした刺激が重要と
33 なる。オプトジェネティクスを用いた研究では、前頭前野から線条体への特定の投射経路を選択的に操作

1 することで、特定の行動を制御できることが示されている (34)。このような知見は、将来的により精密で副作用の少ない神経調節技術の開発につながる可能性がある。

3 一方、長距離投射経路、特に脳幹の神経核からの広範囲な投射系は、全脳レベルでの神経調節に重要な役割を果たしている。縫線核からのセロトニン作動性投射や青斑核からのノルアドレナリン作動性投射は、その代表的な例である。縫線核は中脳と橋の境界に位置し、そこから発するセロトニン作動性ニューロンは、4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1041 1042 1043 1044 1045 1046 1047 1048 1049 1050 1051 1052 1053 1054 1055 1056 1057 1058 1059 1060 1061 1062 1063 1064 1065 1066 1067 1068 1069 1070 1071 1072 1073 1074 1075 1076 1077 1078 1079 1080 1081 1082 1083 1084 1085 1086 1087 1088 1089 1090 1091 1092 1093 1094 1095 1096 1097 1098 1099 1100 1101 1102 1103 1104 1105 1106 1107 1108 1109 1110 1111 1112 1113 1114 1115 1116 1117 1118 1119 1120 1121 1122 1123 1124 1125 1126 1127 1128 1129 1130 1131 1132 1133 1134 1135 1136 1137 1138 1139 1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151 1152 1153 1154 1155 1156 1157 1158 1159 1160 1161 1162 1163 1164 1165 1166 1167 1168 1169 1170 1171 1172 1173 1174 1175 1176 1177 1178 1179 1180 1181 1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190 1191 1192 1193 1194 1195 1196 1197 1198 1199 1200 1201 1202 1203 1204 1205 1206 1207 1208 1209 1210 1211 1212 1213 1214 1215 1216 1217 1218 1219 1220 1221 1222 1223 1224 1225 1226 1227 1228 1229 1230 1231 1232 1233 1234 1235 1236 1237 1238 1239 1240 1241 1242 1243 1244 1245 1246 1247 1248 1249 1250 1251 1252 1253 1254 1255 1256 1257 1258 1259 1260 1261 1262 1263 1264 1265 1266 1267 1268 1269 1270 1271 1272 1273 1274 1275 1276 1277 1278 1279 1280 1281 1282 1283 1284 1285 1286 1287 1288 1289 1290 1291 1292 1293 1294 1295 1296 1297 1298 1299 1300 1301 1302 1303 1304 1305 1306 1307 1308 1309 1310 1311 1312 1313 1314 1315 1316 1317 1318 1319 1320 1321 1322 1323 1324 1325 1326 1327 1328 1329 1330 1331 1332 1333 1334 1335 1336 1337 1338 1339 1340 1341 1342 1343 1344 1345 1346 1347 1348 1349 1350 1351 1352 1353 1354 1355 1356 1357 1358 1359 1360 1361 1362 1363 1364 1365 1366 1367 1368 1369 1370 1371 1372 1373 1374 1375 1376 1377 1378 1379 1380 1381 1382 1383 1384 1385 1386 1387 1388 1389 1390 1391 1392 1393 1394 1395 1396 1397 1398 1399 1400 1401 1402 1403 1404 1405 1406 1407 1408 1409 1410 1411 1412 1413 1414 1415 1416 1417 1418 1419 1420 1421 1422 1423 1424 1425 1426 1427 1428 1429 1430 1431 1432 1433 1434 1435 1436 1437 1438 1439 1440 1441 1442 1443 1444 1445 1446 1447 1448 1449 1450 1451 1452 1453 1454 1455 1456 1457 1458 1459 1460 1461 1462 1463 1464 1465 1466 1467 1468 1469 1470 1471 1472 1473 1474 1475 1476 1477 1478 1479 1480 1481 1482 1483 1484 1485 1486 1487 1488 1489 1490 1491 1492 1493 1494 1495 1496 1497 1498 1499 1500 1501 1502 1503 1504 1505 1506 1507 1508 1509 1510 1511 1512 1513 1514 1515 1516 1517 1518 1519 1520 1521 1522 1523 1524 1525 1526 1527 1528 1529 1530 1531 1532 1533 1534 1535 1536 1537 1538 1539 1540 1541 1542 1543 1544 1545 1546 1547 1548 1549 1550 1551 1552 1553 1554 1555 1556 1557 1558 1559 1560 1561 1562 1563 1564 1565 1566 1567 1568 1569 1570 1571 1572 1573 1574 1575 1576 1577 1578 1579 1580 1581 1582 1583 1584 1585 1586 1587 1588 1589 1590 1591 1592 1593 1594 1595 1596 1597 1598 1599 1600 1601 1602 1603 1604 1605 1606 1607 1608 1609 1610 1611 1612 1613 1614 1615 1616 1617 1618 1619 1620 1621 1622 1623 1624 1625 1626 1627 1628 1629 1630 1631 1632 1633 1634 1635 1636 1637 1638 1639 1640 1641 1642 1643 1644 1645 1646 1647 1648 1649 1650 1651 1652 1653 1654 1655 1656 1657 1658 1659 1660 1661 1662 1663 1664 1665 1666 1667 1668 1669 1670 1671 1672 1673 1674 1675 1676 1677 1678 1679 1680 1681 1682 1683 1684 1685 1686 1687 1688 1689 1690 1691 1692 1693 1694 1695 1696 1697 1698 1699 1700 1701 1702 1703 1704 1705 1706 1707 1708 1709 1710 1711 1712 1713 1714 1715 1716 1717 1718 1719 1720 1721 1722 1723 1724 1725 1726 1727 1728 1729 1730 1731 1732 1733 1734 1735 1736 1737 1738 1739 1740 1741 1742 1743 1744 1745 1746 1747 1748 1749 1750 1751 1752 1753 1754 1755 1756 1757 1758 1759 1760 1761 1762 1763 1764 1765 1766 1767 1768 1769 1770 1771 1772 1773 1774 1775 1776 1777 1778 1779 1780 1781 1782 1783 1784 1785 1786 1787 1788 1789 1790 1791 1792 1793 1794 1795 1796 1797 1798 1799 1800 1801 1802 1803 1804 1805 1806 1807 1808 1809 1810 1811 1812 1813 1814 1815 1816 1817 1818 1819 1820 1821 1822 1823 1824 1825 1826 1827 1828 1829 1830 1831 1832 1833 1834 1835 1836 1837 1838 1839 1840 1841 1842 1843 1844 1845 1846 1847 1848 1849 1850 1851 1852 1853 1854 1855 1856 1857 1858 1859 1860 1861 1862 1863 1864 1865 1866 1867 1868 1869 1870 1871 1872 1873 1874 1875 1876 1877 1878 1879 1880 1881 1882 1883 1884 1885 1886 1887 1888 1889 1890 1891 1892 1893 1894 1895 1896 1897 1898 1899 1900 1901 1902 1903 1904 1905 1906 1907 1908 1909 1910 1911 1912 1913 1914 1915 1916 1917 1918 1919 1920 1921 1922 1923 1924 1925 1926 1927 1928 1929 1930 1931 1932 1933 1934 1935 1936 1937 1938 1939 1940 1941 1942 1943 1944 1945 1946 1947 1948 1949 1950 1951 1952 1953 1954 1955 1956 1957 1958 1959 1960 1961 1962 1963 1964 1965 1966 1967 1968 1969 1970 1971 1972 1973 1974 1975 1976 1977 1978 1979 1980 1981 1982 1983 1984 1985 1986 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030 2031 2032 2033 2034 2035 2036 2037 2038 2039 2040 2041 2042 2043 2044 2045 2046 2047 2048 2049 2050 2051 2052 2053 2054 2055 2056 2057 2058 2059 2060 2061 2062 2063 2064 2065 2066 2067 2068 2069 2070 2071 2072 2073 2074 2075 2076 2077 2078 2079 2080 2081 2082 2083 2084 2085 2086 2087 2088 2089 2090 2091 2092 2093 2094 2095 2096 2097 2098 2099 2100 2101 2102 2103 2104 2105 2106 2107 2108 2109 2110 2111 2112 2113 2114 2115 2116 2117 2118 2119 2120 2121 2122 2123 2124 2125 2126 2127 2128 2129 2130 2131 2132 2133 2134 2135 2136 2137 2138 2139 2140 2141 2142 2143 2144 2145 2146 2147 2148 2149 2150 2151 2152 2153 2154 2155 2156 2157 2158 2159 2160 2161 2162 2163 2164 2165 2166 2167 2168 2169 2170 2171 2172 2173 2174 2175 2176 2177 2178 2179 2180 2181 2182 2183 2184 2185 2186 2187 2188 2189 2190 2191 2192 2193 2194 2195 2196 2197 2198 2199 2200 2201 2202 2203 2204 2205 2206 2207 2208 2209 2210 2211 2212 2213 2214 2215 2216 2217 2218 2219 2220 2221 2222 2223 2224 2225 2226 2227 2228 2229 2230 2231 2232 2233 2234 2235 2236 2237 2238 2239 2240 2241 2242 2243 2244 2245 2246 2247 2248 2249 2250 2251 2252 2253 2254 2255 2256 2257 2258 2259 2260 2261 2262 2263 2264 2265 2266 2267 2268 2269 2270 2271 2272 2273 2274 2275 2276 2277 2278 2279 2280 2281 2282 2283 2284 2285 2286 2287 2288 2289 2290 2291 2292 2293 2294 2295 2296 2297 2298 2299 2300 2301 2302 2303 2304 2305 2306 2307 2308 2309 2310 2311 2312 2313 2314 2315 2316 2317 2318 2319 2320 2321 2322 2323 2324 2325 2326 2327 2328 2329 2330 2331 2332 2333 2334 2335 2336 2337 2338 2339 2340 2341 2342 2343 2344 2345 2346 2347 2348 2349 2350 2351 2352 2353 2354 2355 2356 2357 2358 2359 2360 2361 2362 2363 2364 2365 2366 2367 2368 2369 2370 2371 2372 2373 2374 2375 2376 2377 2378 2379 2380 2381 2382 2383 2384 2385 2386 2387 2388 2389 2390 2391 2392 2393 2394 2395 2396 2397 2398 2399 2400 2401 2402 2403 2404 2405 2406 2407 2408 2409 2410 2411 2412 2413 2414 2415 2416 2417 2418 2419 2420 2421 2422 2423 2424 2425 2426 2427 2428 2429 2430 2431 2432 2433 2434 2435 2436 2437 2438 2439 2440 2441 2442 2443 2444 2445 2446 2447 2448 2449 2450 2451 2452 2453 2454 2455 2456 2457 2458 2459 2460 2461 2462 2463 2464 2465 2466 2467 2468 2469 2470 2471 2472 2473 2474 2475 2476 2477 2478 2479 2480 2481 2482 2483 2484 2485 2486 2487 2488 2489 2490 2491 2492 2493 2494 2495 2496 2497 2498 2499 2500 2501 2502 2503 2504 2505 2506 2507 2508 2509 2510 2511 2512 2513 2514 2515 2516 2517 2518 2519 2520 2521 2522 2523 2524 2525 2526 2527 2528 2529 2530 2531 2532 2533 2534 2535 2536 2537 2538 2539 2540 2541 2542 2543 2544 2545 2546 2547 2548 2549 2550 2551 2552 2553 2554 2555 2556 2557 2558 2559 2560 2561 2562 2563 2564 2565 2566 2567 2568 2569 2570 2571 2572 2573 2574 2575 2576 2577 2578 2579 2580 2581 2582 2583 2584 2585 2586 2587 2588 2589 2590 2591 2592 2593 2594 2595 2596 2597 2598 2599 2600 2601 2602 2603 2604 2605 2606 2607 2608 2609 2610 2611 2612 2613 2614 2615 2616 2617 2618 2619 2620 2621 2622 2623 2624 2625 2626 2627 2628 2629 2630 2631 2632 2633 2634 2635 2636 2637 2638 2639 2640 2641 2642 2643 2644 2645 2646 2647 2648 2649 2650 2651 2652 2653 2654 2655 2656 2657 2658 2659 2660 26

1 運動制御を実現する義肢の開発が可能となる (46)。これらの解剖学的知識を総合的に応用することで、ヒト
2 の自然な動きにより近い、高度な筋骨格系の拡張技術が実現可能となる (47)。このような技術は、単に失わ
3 れた機能の回復だけでなく、ヒトの運動能力の拡張にもつながる可能性を秘めており、医療、スポーツ、労働
4 など幅広い分野での応用が期待される (48)。同時に、これらの技術開発には、生体力学、材料科学、制御
5 工学など多岐にわたる分野の知識の統合が必要であり、学際的なアプローチが不可欠である (49)。

6

7 **6. 感覚器官の拡張と感覚器解剖学**

8 感覚器官の拡張技術は、各感覚器の微細構造と機能の詳細な解剖学的理解に基づいて発展している。この
9 分野は、ヒトの知覚能力を拡張し、あるいは失われた感覚機能を回復させることを目指している。視覚、聴覚、触
10 覚、嗅覚、味覚といった各感覚モダリティにおいて、その基盤となる解剖学的構造と生理学的メカニズムの理解が、
11 革新的な技術開発の鍵となっている (50)。

12 **6.1. 視覚系の構造と視覚拡張**

13 網膜の視細胞層、双極細胞層、神経節細胞層などの構造と機能の理解は、高性能な人工網膜の開発に直
14 接的に寄与する (51)。外側膝状体の層構造、マグノ細胞層とパルボ細胞層の機能的差異の理解は、異な
15 る視覚情報処理経路を標的とした視覚拡張技術の開発につながる。大脳皮質視覚野の階層的構造、V1、
16 V2, V3, V4, MT などの視覚領野の機能分化の理解は、より高度な視覚情報処理を可能にする視覚拡張技
17 術の開発に重要である。

18 **6.2. 聴覚系の構造と聴覚拡張**

19 蝸牛の微細構造、コルチ器官や有毛細胞の構造と機能の理解は、より精密な人工内耳の開発に不可欠で
20 ある。聴覚伝導路(蝸牛神経核、上オリーブ核、下丘、内側膝状体)の構造と機能の理解は、より自然な音声
21 認識と音源定位を可能にする聴覚拡張技術の開発に寄与する (52)。

22 **6.3. 体性感覚系の構造と触覚拡張**

23 表皮、真皮、皮下組織の構造と、各組織に存在する感覚受容器(マイスナー小体、パチニ小体など)の分布
24 の理解は、高感度な人工皮膚の開発に寄与する。脊髄後根神経節と後索-内側毛帯路:触覚情報の伝導
25 経路の解剖学的理解は、より自然な触覚フィードバックシステムの開発につながる (53)。

26

27 これらの感覚器の解剖学的理解は、単に既存の感覚を回復または増強するだけでなく、全く新しい感覚
28 モダリティを創出する可能性も開いている。例えば、磁気感覚や赤外線視覚など、通常のヒトには備わって
29 いない感覚を人工的に付加する試みがなされている (53,54)。感覚器官の拡張技術の発展には、神経科学、
30 生体工学、材料科学、情報工学など多岐にわたる分野の知識の統合が必要である。特に、感覚情報の中
31 枢処理メカニズムや神経可塑性に関する理解が深まることで、より効果的で自然な感覚拡張技術の開発が
32 可能となっている (55)。感覚器官の拡張技術は、医療分野での応用(例:感覚障害の治療)だけでなく、バ
33 ーチャルリアリティや拡張現実技術との融合により、人間の知覚体験を根本的に変革する可能性を秘めて

1 いる。これらの技術の進歩は、ヒトの認知能力や環境との相互作用の方法を大きく変える可能性があり、哲
2 学的、倫理的な問いも提起する (56)。

3

4 7. 認知機能拡張と高次脳機能の解剖学

5 認知機能の拡張技術開発は、高次脳機能に関与する脳領域の構造と機能の解剖学的理解を基盤として
6 いる。この分野では、前頭前野、海馬、大脳基底核などの主要な脳領域の詳細な解剖学的知見が、革新的
7 な技術開発の鍵となっている。

8 背外側前頭前野 (DLPFC) は、ワーキングメモリーに関与し、その層構造と神経回路の理解は記憶増強
9 技術の開発に直接的に寄与する (57)。経頭蓋磁気刺激 (TMS) や経頭蓋直流電気刺激 (tDCS) を用いた
10 DLPFC の非侵襲的刺激は、ワーキングメモリーの一時的な向上をもたらすことが示されている (58)。一方、
11 眼窩前頭皮質 (OFPFC) は意思決定と報酬処理に関与しており、この領域の構造理解は、意思決定支援シ
12 ステムの開発に貢献する (59)。

13 海馬とその関連領域は、記憶形成において中心的な役割を果たしている。海馬の構造、特に歯状回、
14 CA3、CA1 の構造と機能の理解は、長期記憶形成を促進する技術の開発に直接的に関連している (60)。内
15 嗅皮質と海馬傍回の構造、およびこれらの領域と海馬との連携の理解は、エピソード記憶の増強技術の開
16 発につながっている (61)。これらの知見に基づいた電気刺激技術や薬理学的アプローチが、記憶機能の
17 増強を目指して研究されている。

18 大脳基底核は、行動制御と意思決定に重要な役割を果たしている (62)。線条体、淡蒼球、黒質などの核
19 の相互接続の理解は、意思決定や行動制御を支援する技術の開発に不可欠である (63)。特に、ドーパミン
20 作動性経路、例えば腹側被蓋野から側坐核への投射など、報酬系の解剖学的理解は、動機付けや学習を
21 促進する技術の開発に寄与している (64)。これらの知見は、報酬ベースの学習アルゴリズムを用いた脳-コ
22 ンピューターインターフェース (BCI) の開発などに応用されている。

23 高次脳機能の解剖学的理解に基づく認知機能拡張技術は、医療分野での応用 (例: 認知症やうつ病の
24 治療) だけでなく、健常者の認知能力向上にも潜在的な応用可能性がある。tDCS を用いた背外側前頭前
25 野 (DLPFC) の刺激によるワーキングメモリーの増強は、学習効率や複雑な問題解決能力の改善につな
26 がる可能性がある (58)。また、tACS やニューロフィードバック技術を用いた特定の脳波パターンの誘導や強
27 化により、注意力と集中力を高めることが期待されている (65,66)。右側頭葉への tDCS 刺激や前頭前野の
28 活動調整が、創造的思考や発散的思考を促進し (67,68)、前頭前野への刺激が複雑な意思決定プロセス
29 を改善しうることを示されている (69)。また、感情処理に関わる脳領域への刺激により、その調節能力を向
30 上させる可能性も示唆されている (70)。これらの技術は、学習、職業パフォーマンス、創造性、ストレス管理
31 など、多くの分野で応用が期待されるが、個人差、長期的効果、倫理的問題 (公平性、安全性、個人のアイ
32 デンティティへの影響など) についても慎重に考慮する必要がある (71,72)。

33

34 8. 解剖学研究への人間拡張技術の影響

1 人間拡張技術の発展は、解剖学研究に新たな視点と手法をもたらしている。高解像度の機能的磁気共
2 鳴画像法 (fMRI) や二光子顕微鏡を用いた *in vivo* イメージング技術の進歩により、生きた状態での脳の微
3 細構造と機能の観察が可能になっている (73)。これらの技術は、従来の解剖学的手法では得られなかった
4 動的な構造-機能連関の理解を促進している。ナノスケールのセンサーやアクチュエーターの開発により、
5 単一細胞レベルでの構造と機能の解析が可能になりつつある (74)。これらの技術は、神経細胞やグリア細
6 胞の微細構造や、シナプス間隙での分子動態の理解を深める。

7 人工知能 (AI) を用いた解剖学的データ解析も進展を見せている。大規模な解剖学的データセットの解析
8 に AI を応用することで、これまで見落とされていた構造的パターンや機能的連関の発見が期待される。特
9 に、Connectomics (神経結合の包括的マッピング) の分野では、AI による画像解析が重要な役割を果たして
10 いる (75)。バーチャルリアリティ (VR) とオーグメンテッドリアリティ (AR) 技術も解剖学研究と教育に革新をも
11 たらしている。VR や AR 技術を用いた三次元解剖学モデルの構築により、複雑な解剖学的構造の理解と教
12 育が促進されている (76)。これらの技術は、特に神経系や血管系など、複雑な 3 次元構造を持つ系の理解
13 に有用である。

14 オプトジェネティクス技術は解剖学研究に新たな次元をもたらしている。光感受性イオンチャンネルを特定
15 の神経細胞に導入し、光刺激によって活動を制御するこの技術は、特定の神経回路の機能的解剖を可能
16 にしている (77)。これにより、解剖学的構造と機能の直接的な因果関係の解明が進んでいる。これらの革新
17 的技術の統合により、解剖学研究はより動的で機能的な理解を深めることが可能となり、人体の構造と機能
18 に関する我々の知見を大きく拡張している (78)。

19

20 9. 倫理的考察と解剖学的視点

21 人間拡張技術の発展に伴う倫理的問題を考察する上で、解剖学的視点は重要である。神経可塑性の解
22 剖学的基盤、特にシナプスの形成・消失や軸索の伸長・退縮などの理解は、人間拡張技術が個人のアイデ
23 ンティティに与える影響を考察する上で重要である (79)。記憶増強技術が海馬の構造を変化させる場合、
24 それが個人の自己認識にどのような影響を与えるかを慎重に検討する必要がある。神経可塑性と個人のアイ
25 デンティティの関係性は、人間拡張技術の倫理的評価において中心的な課題である。筋骨格系や内臓の
26 解剖学的構造の理解は、身体拡張技術の安全性と倫理性を評価する上で不可欠である (80)。例として、筋
27 肉増強技術やウェアラブルロボティクスが骨格や関節に与える負荷を正確に評価するためには、運動器系
28 の詳細な解剖学的知識が必要となる。感覚拡張技術が個人の知覚世界にもたらす変化を予測し、その倫
29 理的影響を考察するためには、既存の感覚系の解剖学的構造との統合過程を詳細に検討する必要がある
30 (56)。例えば、赤外線視覚を付加する技術が、既存の視覚系の解剖学的構造とどのように統合されるかを考
31 慮することで、この技術が個人の知覚体験や現実認識に与える影響をより正確に予測し、評価することがで
32 きるであろう。

33

34 10. 将来の展望: 解剖学と人間拡張技術の融合

1 解剖学と人間拡張技術の融合は、多様な展開が期待される。ナノテクノロジーの進歩により、「ナノスケール解剖学」が発展しつつあり、細胞内小器官や分子レベルでの解剖学的研究が可能となっている(74)。シナプス小胞の動態解析による神経伝達物質の放出メカニズムの詳細な理解は、より精密な神経調節技術の開発につながりうる。また、イオンチャネルの分布マッピングにより、より効果的な電気刺激プロトコルの開発が期待される。さらに、細胞骨格の動的構造解析は、より自然な人工筋肉や神経インターフェースの開発を促進するだろう。

7 従来の静的な解剖学から、時間軸が組み込まれた 4 次元的な解剖学的「4D 解剖学」が盛んに行われている (78)。神経回路の可塑的変化の時系列追跡は、より効果的な認知機能拡張技術の開発につながる。筋骨格系の動的適応過程の詳細な理解は、より高度な外骨格や義肢の開発を可能にする。また、新たな感覚入力に対する脳の適応過程の時間的追跡は、より自然な感覚拡張技術の開発を促進するだろう。

11 個人間の解剖学的差異を詳細に理解し、それに基づいて人間拡張技術をカスタマイズする（個別化解剖学）の重要性が増している (81)。脳構造の個人差マッピングは、より効果的な個別化 BCI の開発を可能にする。筋骨格系の個人差解析は、より適合性の高い外骨格や義肢の設計につながる。さらに、感覚系の感度分布の個人差の理解は、より効果的な個別化感覚拡張技術の開発に寄与するだろう。

15 最後に、「計算解剖学」の発展も重要である。大規模データと機械学習技術を活用した計算解剖学は、人間拡張技術に新たな可能性をもたらす (82)。大規模脳コネクトームの解析は、より効率的な神経調節技術の開発を、筋骨格系のシミュレーションモデルの構築は、外骨格や義肢の最適設計を促進する。また、感覚情報処理の計算モデルの構築は、より高度な感覚拡張技術の開発につながるだろう。これらの新しい解剖学的アプローチの統合により、人間拡張技術はより精密で効果的なものとなり、個人の能力をより適切に拡張することが可能になると期待される。

21

22 9. 結論

23 人間拡張技術の発展は、解剖学的知見の深化と密接に関連している。BCI、神経調節技術、筋骨格系の
24 拡張、感覚器官の拡張、そして認知機能の拡張のいずれにおいても、詳細な解剖学的理解が技術開発の
25 基盤となっている。同時に、これらの技術の発展は、解剖学研究に新たな視点と手法をもたらしている。*in*
26 *vivo* イメージング技術やナノテクノロジーの応用、AI を用いたデータ解析、VR・AR 技術の活用など、人間
27 拡張技術の発展は解剖学研究の新たな地平を切り開いている。今後、人間拡張技術と解剖学研究はさらに
28 密接に関連し、相互に発展していくと予想される。この過程で、解剖学者の役割はますます重要になる。人
29 体の構造と機能に関する詳細な知識を持ち、同時に、ヒトの能力と可能性の新たな側面を見抜く力を有する
30 解剖学者が求められる。また、これらの技術の発展に伴い、「人間とは何か」「正常とは何か」といった根本的
31 な問いに対する我々の理解も変化していく可能性がある。解剖学者は、この変化の最前線に立ち、科学的
32 知見に基づいて議論をリードしていく責任がある。解剖学的視点は、技術の安全性評価だけでなく、個人の
33 アイデンティティや知覚世界の変容など、より広範な倫理的問題を考察する上でも重要な役割を果たす。人
34 間拡張技術の責任ある開発と利用を通じて、我々は人類の潜在能力を最大限に引き出し、同時に人間の

- 1 尊厳と多様性を尊重する未来を築くことが求められる。解剖学、神経科学、エンジニア、倫理学など、多分
- 2 野の専門家の緊密な協力が不可欠である。人間拡張技術と解剖学の融合は、人類の新たな進化の段階を
- 3 開く鍵となるであろう。
- 4

1 参考文献

- 2
- 3 1. Steinert S, Friedrich O. Wired emotions: Ethical issues of affective brain-computer interfaces. *Sci Eng*
- 4 *Ethics*. 2020 Feb;26(1):351–67.
- 5 2. Cinel C, Valeriani D, Poli R. Neurotechnologies for human cognitive augmentation: Current state of the
- 6 art and future prospects. *Front Hum Neurosci*. 2019 Jan 31;13:13.
- 7 3. Shaw DB. Streets for cyborgs. *Space Cult*. 2015 Aug;18(3):230–42.
- 8 4. Kumar D. Evolution and terraformation in mars using cyborgs. In: *AIAA SPACE 2009 Conference &*
- 9 *Exposition* [Internet]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2009.
- 10 Available from: <http://dx.doi.org/10.2514/6.2009-6576>
- 11 5. Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, Glynn P. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of
- 12 rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med*. 1990 Apr;14(1):68–78.
- 13 6. Smith K. Brain imaging: fMRI 2.0. *Nature*. 2012 Apr 4;484(7392):24–6.
- 14 7. Human Augmentation: Past, Present, and Future. *Human Augmentation: Past, Present, and Future*
- 15 *International Journal of Environmental Research and Public Health*.
- 16 8. Uehara A, Sankai Y. Basic study on cybernic interface for amyotrophic lateral sclerosis patients to perform
- 17 daily living tasks by transiting seamlessly between cyberspace and physical space. In: *2024 IEEE/SICE*
- 18 *International Symposium on System Integration (SII)* [Internet]. IEEE; 2024. Available from:
- 19 <http://dx.doi.org/10.1109/sii58957.2024.10417447>
- 20 9. Dresler M, Sandberg A, Ohla K, Bublitz C, Trenado C, Mroczko-Wąsowicz A, et al. Non-pharmacological
- 21 cognitive enhancement. *Neuropharmacology*. 2013 Jan;64:529–43.
- 22 10. Kristjánsson Á, Moldoveanu A, Jóhannesson ÓI, Balan O, Spagnol S, Valgeirsdóttir VV, et al. Designing
- 23 sensory-substitution devices: Principles, pitfalls and potential1. *Restor Neurol Neurosci*. 2016 Sep
- 24 21;34(5):769–87.
- 25 11. Judaš M, Cepanec M, Sedmak G. Brodmann’s map of the human cerebral cortex — or Brodmann’s maps?
- 26 *Transl Neurosci*. 2012 Mar 1;3(1):67–74.
- 27 12. Zilles K. Brodmann: a pioneer of human brain mapping-his impact on concepts of cortical organization.
- 28 *Brain*. 2018 Nov 1;141(11):3262–78.
- 29 13. Hikosaka O, Nakamura K, Nakahara H. Basal ganglia orient eyes to reward. *J Neurophysiol*. 2006
- 30 Feb;95(2):567–84.
- 31 14. Heimer L, Van Hoesen GW, Trimble M, Zahm DS. *Anatomy of Neuropsychiatry: The New Anatomy of*
- 32 *the Basal Forebrain and Its Implications for Neuropsychiatric Illness*. Academic Press; 2007.
- 33 15. Grillner S, Robertson B. The basal ganglia over 500 million years. *Curr Biol*. 2016 Oct;26(20):R1088–100.
- 34 16. Lozano AM, Lipsman N, Bergman H, Brown P, Chabardes S, Chang JW, et al. Deep brain stimulation:
- 35 current challenges and future directions. *Nat Rev Neurol*. 2019 Mar;15(3):148–60.
- 36 17. Ienca M, Andorno R. Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology. *Life Sci*
- 37 *Soc Policy* [Internet]. 2017 Dec;13(1). Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40504-017-0050-1>
- 38 18. Dayan E, Censor N, Buch ER, Sandrini M, Cohen LG. Noninvasive brain stimulation: from physiology to
- 39 network dynamics and back. *Nat Neurosci*. 2013 Jul;16(7):838–44.
- 40 19. Spruston N, Johnston D. Out of control in the dendrites. *Nat Neurosci*. Springer Science and Business
- 41 Media LLC; 2008 Jul;11(7):733–4.
- 42 20. Spruston N. Neuroscience: strength in numbers. *Nature*. Springer Science and Business Media LLC; 2008
- 43 Mar 27;452(7186):420–1.
- 44 21. Radman T, Ramos RL, Brumberg JC, Bikson M. Role of cortical cell type and morphology in subthreshold
- 45 and suprathreshold uniform electric field stimulation in vitro. *Brain Stimul*. 2009 Oct;2(4):215–28, 228.e1-
- 46 3.
- 47 22. Opitz A, Windhoff M, Heidemann RM, Turner R, Thielscher A. How the brain tissue shapes the electric
- 48 field induced by transcranial magnetic stimulation. *Neuroimage*. 2011 Oct 1;58(3):849–59.
- 49 23. Thielscher A, Opitz A, Windhoff M. Impact of the gyral geometry on the electric field induced by

- 1 transcranial magnetic stimulation. *Neuroimage*. 2011 Jan 1;54(1):234–43.
- 2 24. Alekseichuk I, Falchier AY, Linn G, Xu T, Milham MP, Schroeder CE, et al. Electric field dynamics in the
3 brain during multi-electrode transcranial electric stimulation. *Nat Commun*. 2019 Jun 12;10(1):2573.
- 4 25. Huang Y, Liu AA, Lafon B, Friedman D, Dayan M, Wang X, et al. Correction: Measurements and models
5 of electric fields in the in vivo human brain during transcranial electric stimulation. *Elife* [Internet]. 2018
6 Feb 15;7. Available from: <http://dx.doi.org/10.7554/eLife.35178>
- 7 26. Huang Y, Liu AA, Lafon B, Friedman D, Dayan M, Wang X, et al. Measurements and models of electric
8 fields in the in vivo human brain during transcranial electric stimulation. *Elife* [Internet]. 2017 Feb 7;6.
9 Available from: <http://dx.doi.org/10.7554/elife.18834>
- 10 27. Kubota Y, Kondo S, Nomura M, Hatada S, Yamaguchi N, Mohamed AA, et al. Functional effects of distinct
11 innervation styles of pyramidal cells by fast spiking cortical interneurons. *Elife* [Internet]. 2015 Jul 4;4.
12 Available from: <http://dx.doi.org/10.7554/eLife.07919>
- 13 28. Markram H, Toledo-Rodriguez M, Wang Y, Gupta A, Silberberg G, Wu C. Interneurons of the neocortical
14 inhibitory system. *Nat Rev Neurosci*. 2004 Oct;5(10):793–807.
- 15 29. Yizhar O, Fenno LE, Prigge M, Schneider F, Davidson TJ, O’Shea DJ, et al. Neocortical
16 excitation/inhibition balance in information processing and social dysfunction. *Nature*. 2011 Jul
17 27;477(7363):171–8.
- 18 30. Barker AT, Jalinous R, Freeston IL. Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*.
19 1985 May;325(8437):1106–7.
- 20 31. Cardin JA, Carlén M, Meletis K, Knoblich U, Zhang F, Deisseroth K, et al. Driving fast-spiking cells
21 induces gamma rhythm and controls sensory responses. *Nature*. 2009 Jun 4;459(7247):663–7.
- 22 32. Alexander G. Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex.
23 *Annu Rev Neurosci*. 1986 Jan 1;9(1):357–81.
- 24 33. Lozano AM, Lipsman N. Probing and regulating dysfunctional circuits using deep brain stimulation.
25 *Neuron*. 2013 Feb 6;77(3):406–24.
- 26 34. Ahmari SE, Spellman T, Douglass NL, Kheirbek MA, Simpson HB, Deisseroth K, et al. Repeated cortico-
27 striatal stimulation generates persistent OCD-like behavior. *Science*. 2013 Jun 7;340(6137):1234–9.
- 28 35. Hornung J-P. The human raphe nuclei and the serotonergic system. *J Chem Neuroanat*. 2003
29 Dec;26(4):331–43.
- 30 36. Sara SJ, Bouret S. Orienting and reorienting: the locus coeruleus mediates cognition through arousal.
31 *Neuron*. 2012 Oct 4;76(1):130–41.
- 32 37. Roth BL. DREADDs for neuroscientists. *Neuron*. 2016 Feb 17;89(4):683–94.
- 33 38. Herr H. Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *J Neuroeng*
34 *Rehabil*. 2009 Jun 18;6(1):21.
- 35 39. Pons JL. *Wearable Robots*. 1st ed. Nashville, TN: John Wiley & Sons; 2008. 358 p.
- 36 40. Dollar AM, Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: Challenges and state-of-the-art.
37 *IEEE Trans Robot*. 2008 Feb;24(1):144–58.
- 38 41. Perry JC, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design. *IEEE ASME Trans Mechatron*. 2007
39 Aug;12(4):408–17.
- 40 42. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*.
- 41 43. Zajac FE. Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor
42 control. *Crit Rev Biomed Eng*. 1989;17(4):359–411.
- 43 44. Prochazka A, Yakovenko S. Predictive and reactive tuning of the locomotor CPG. *Integr Comp Biol*. 2007
44 Oct;47(4):474–81.
- 45 45. Farina D, Jiang N, Rehbaum H, Holobar A, Graitmann B, Dietl H, et al. The extraction of neural information
46 from the surface EMG for the control of upper-limb prostheses: emerging avenues and challenges. *IEEE*
47 *Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2014 Jul;22(4):797–809.
- 48 46. Kuiken TA, Li G, Lock BA, Lipschutz RD, Miller LA, Stubblefield KA, et al. Targeted muscle
49 reinnervation for real-time myoelectric control of multifunction artificial arms. *JAMA*. 2009 Feb

- 1 11;301(6):619–28.
- 2 47. Tagliamonte NL, Sergi F, Carpino G, Accoto D, Guglielmelli E. Design of a variable impedance differential
3 actuator for wearable robotics applications. In: 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent
4 Robots and Systems [Internet]. IEEE; 2010. Available from: <http://dx.doi.org/10.1109/iros.2010.5649982>
- 5 48. Reinkensmeyer DJ, Boninger ML. Technologies and combination therapies for enhancing movement
6 training for people with a disability. *J Neuroeng Rehabil*. 2012 Mar 30;9(1):17.
- 7 49. Zhao H, O'Brien K, Li S, Shepherd RF. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable
8 optical waveguides. *Sci Robot*. 2016 Dec 6;1(1):eaai7529.
- 9 50. Merabet LB, Pascual-Leone A. Neural reorganization following sensory loss: the opportunity of change.
10 *Nat Rev Neurosci*. 2010 Jan;11(1):44–52.
- 11 51. Weiland JD, Humayun MS. Retinal prosthesis. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2014 May;61(5):1412–24.
- 12 52. Wilson BS, Dorman MF. Cochlear implants: a remarkable past and a brilliant future. *Hear Res*. 2008
13 Aug;242(1–2):3–21.
- 14 53. Beyond sensory substitution-learning the sixth sense. *Journal of Neural Engineering*.
- 15 54. Maidenbaum S, Abboud S, Amedi A. Sensory substitution: closing the gap between basic research and
16 widespread practical visual rehabilitation. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014 Apr;41:3–15.
- 17 55. Bach-y-Rita P, W Kercel S. Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends Cogn Sci*. 2003
18 Dec;7(12):541–6.
- 19 56. Clark A. *Natural-born cyborgs*. New York, NY: Oxford University Press; 2004. 240 p.
- 20 57. D'Esposito M, Postle BR. The cognitive neuroscience of working memory. *Annu Rev Psychol*. 2015 Jan
21 3;66(1):115–42.
- 22 58. Brunoni AR, Vanderhasselt M-A. Working memory improvement with non-invasive brain stimulation of
23 the dorsolateral prefrontal cortex: a systematic review and meta-analysis. *Brain Cogn*. 2014 Apr;86:1–9.
- 24 59. Rolls ET. The orbitofrontal cortex and emotion in health and disease, including depression.
25 *Neuropsychologia*. 2019 May;128:14–43.
- 26 60. Bartsch T, Wulff P. The hippocampus in aging and disease: From plasticity to vulnerability. *Neuroscience*.
27 2015 Nov 19;309:1–16.
- 28 61. Ranganath C, Ritchey M. Two cortical systems for memory-guided behaviour. *Nat Rev Neurosci*. 2012
29 Oct;13(10):713–26.
- 30 62. Hikosaka O, Kim HF, Amita H, Yasuda M, Isoda M, Tachibana Y, et al. Direct and indirect pathways for
31 choosing objects and actions. *Eur J Neurosci*. 2019 Mar;49(5):637–45.
- 32 63. Haber SN. Corticostriatal circuitry. *Dialogues Clin Neurosci*. 2016 Mar;18(1):7–21.
- 33 64. Schultz W. Dopamine reward prediction error coding. *Dialogues Clin Neurosci*. 2016 Mar;18(1):23–32.
- 34 65. Helfrich RF, Schneider TR, Rach S, Trautmann-Lengsfeld SA, Engel AK, Herrmann CS. Entrainment of
35 brain oscillations by transcranial alternating current stimulation. *Curr Biol*. 2014 Feb 3;24(3):333–9.
- 36 66. Ros T, Enriquez-Geppert S, Zotev V, Young KD, Wood G, Whitfield-Gabrieli S, et al. Consensus on the
37 reporting and experimental design of clinical and cognitive-behavioural neurofeedback studies (CRED-nf
38 checklist). *Brain*. 2020 Jun 1;143(6):1674–85.
- 39 67. Chi RP, Snyder AW. Brain stimulation enables the solution of an inherently difficult problem. *Neurosci*
40 *Lett*. 2012 May 2;515(2):121–4.
- 41 68. Zmigrod S, Colzato LS, Hommel B. Stimulating creativity: Modulation of convergent and divergent
42 thinking by transcranial direct current stimulation (tDCS). *Creat Res J*. 2015 Oct 2;27(4):353–60.
- 43 69. Fecteau S, Knoch D, Fregni F, Sultani N, Boggio P, Pascual-Leone A. Diminishing risk-taking behavior by
44 modulating activity in the prefrontal cortex: a direct current stimulation study. *J Neurosci*. 2007 Nov
45 14;27(46):12500–5.
- 46 70. Pessoa L. A network model of the emotional brain. *Trends Cogn Sci*. 2017 May;21(5):357–71.
- 47 71. Farah MJ, Smith ME, Ilieva I, Hamilton RH. Cognitive enhancement. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci*.
48 2014 Jan;5(1):95–103.
- 49 72. Farah MJ. NEUROSCIENCE. The unknowns of cognitive enhancement. *Science*. 2015 Oct

- 1 23;350(6259):379–80.
- 2 73. Craddock RC, Jbabdi S, Yan C-G, Vogelstein JT, Castellanos FX, Di Martino A, et al. Imaging human
3 connectomes at the macroscale. *Nat Methods*. 2013 Jun;10(6):524–39.
- 4 74. Alivisatos AP, Andrews AM, Boyden ES, Chun M, Church GM, Deisseroth K, et al. Nanotools for
5 neuroscience and brain activity mapping. *ACS Nano*. 2013 Mar 26;7(3):1850–66.
- 6 75. Helmstaedter M. Cellular-resolution connectomics: challenges of dense neural circuit reconstruction. *Nat*
7 *Methods*. 2013 Jun;10(6):501–7.
- 8 76. Moro C, Štromberga Z, Raikos A, Stirling A. The effectiveness of virtual and augmented reality in health
9 sciences and medical anatomy. *Anat Sci Educ*. 2017 Nov;10(6):549–59.
- 10 77. Deisseroth K. Optogenetics: 10 years of microbial opsins in neuroscience. *Nat Neurosci*. 2015
11 Sep;18(9):1213–25.
- 12 78. Toga AW, Thompson PM, Mori S, Amunts K, Zilles K. Towards multimodal atlases of the human brain.
13 *Nat Rev Neurosci*. 2006 Dec;7(12):952–66.
- 14 79. Pascual-Leone A, Freitas C, Oberman L, Horvath JC, Halko M, Eldaief M, et al. Characterizing brain
15 cortical plasticity and network dynamics across the age-span in health and disease with TMS-EEG and
16 TMS-fMRI. *Brain Topogr*. 2011 Oct;24(3–4):302–15.
- 17 80. Herr H, Dennis RG. A swimming robot actuated by living muscle tissue. *J Neuroeng Rehabil*. 2004 Oct
18 28;1(1):6.
- 19 81. Egan MF, Kojima M, Callicott JH, Goldberg TE, Kolachana BS, Bertolino A, et al. The BDNF val66met
20 polymorphism affects activity-dependent secretion of BDNF and human memory and hippocampal
21 function. *Cell*. 2003 Jan 24;112(2):257–69.
- 22 82. Amunts K, Hawrylycz MJ, Van Essen DC, Van Horn JD, Harel N, Poline J-B, et al. Interoperable atlases
23 of the human brain. *Neuroimage*. 2014 Oct 1;99:525–32.