

2.2.5 Human Robot Interaction

(1) 研究開発領域の定義

ヒューマンロボットインタラクション研究は、物理空間・情報空間での人間の経験や表現を豊かにすることに役立つシステムを構築するための研究開発領域である。ロボティクス分野においては、人間との交流、協働、行動支援等を意図したロボットの外部認識・意思決定モデルの構築、素材や機構の開発、ユーザビリティ評価といった研究が行われている。近年は、ユーザーの分身または身体の一部と考えるなど、ロボットの捉え方を柔軟に再解釈したインタラクション研究開発が活発化しており、その対象は情報空間上のアバターの身体にも及ぶ。

(2) キーワード

HRI (Human Robot Interaction) / HCI (Human Computer Interaction)、Virtual Human、Cybernetic Avatar、テレグジスタンス / テレプレゼンス、VR (Virtual Reality) / AR (Augmented Reality)、メタバース / デジタルツイン、触覚、BMI/BCI (Brain Machine Interface / Brain Computer Interface)、人間拡張、人と機械の共生、自在化、共生インタラクション

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

ロボティクスは従来、極度の肉体的疲労を伴う作業や危険な環境での作業など、人間にとって望ましくない作業を自動化・効率化することで人間を苦役から開放することを目標にしてきた。近年はロボットの軽量化・小型化・安全性が進展し、人間の生活環境の中でもロボットが行動できるようになっている。また、ロボットを身にまとうことで身体的能力を補綴（ほてつ）・拡張し自立歩行を支援したり技能習得を促進する等、作業自動化のためのロボット開発とは異なる、人間の行動可能性を開くロボティクスへの関心が高まっている。

ロボットと人間が緊密に関わり合うことによる価値創出に欠かせないのがインタラクション研究である。機械が人間に対してコミュニケーションを図ったり支援したりするためには、ユーザーの意図や環境の状況を計測・推定し適切なタイミングとプロセスで反応する必要がある。また、人間と接触する上での安全な素材や機構を搭載したり、ユーザー側の直感的な状況理解に資するインターフェイスやフィードバックの提示方法を工夫する必要もある。このように、研究開発の要素に人間の存在が強く関連する技術開発は他のロボティクスの研究領域にない特徴であり、そこに本領域を探求する意義を見いだすことができる。

さらに、インタラクション研究を展開する上では、ロボット工学、メカトロニクス、センシング技術、ネットワーク技術、ディスプレイ技術、機械学習をはじめ、ウェアラブル技術、人間拡張工学などの人間工学・認知心理学的知見、さらに最近は眼電位・筋電位の活用や脳計測、BMI（ブレイン・マシン・インターフェイス）などの神経科学的アプローチも重要視されてきている。こういった学際性に鑑みると、本領域は分野横断的な研究開発によって生み出される新たな知見を創出するフロンティアとしても意義深い。

また、学際研究を通じて培われる新しいインタラクション技術は、やがて社会の活性化や産業の競争力強化につながると期待される。例えばロボットの身体を自らの身体のように自在に遠隔操作する研究は、身体の不調や地理的要因で社会参画が困難な人々の行動可能性を拡大しうる。また、世界各地や宇宙にあるロボットを遠隔操作していくつものオペレーションをこなすことが容易になれば、国境を問わず活躍する個人がより増えることも予想される。したがって、次世代の価値創出や競争力を下支えする基盤技術としての本領域の意義は今後ますます高まると考えられる。

[研究開発の動向]

インタラクション研究分野はHCI（ヒューマンコンピューターインタラクション / ヒューマンインターフェイス

ス)とも言われ、その初期はコンピューターやスマートフォンなどの情報機器とのインターフェイス要素技術(グラフィカルユーザーインターフェイスやインタラクションデザインなど)を主な研究開発対象としてきた。その発展の過程で、物理空間に存在するロボットをインターフェイスとした研究が興り、HRI(ヒューマンロボットインタラクション)領域が確立された。HRI領域では、作業自動化のためのロボット開発とは一線を画すアプローチが次々と提唱されている。

ロボットと人間が会話し、ふれあい、共生するための社会的要因などを対象とした共生インタラクション研究では、人と安全に関わることができるロボットの皮膚や内部メカニズム、頑健で柔軟な音声認識技術の開発、さらに欲求、意図、行動・発話の階層モデルの構築が進められている。例えば、JST ERATO「石黒共生ヒューマンロボットインタラクションプロジェクト」や新学術領域研究「人間機械共生社会を目指した対話知能システム学」が挙げられる。

他者としてのロボットではなく、人間と一体的にふるまうロボットの研究開発も進んでいる。生体電位信号をセンシングしユーザーの運動を支援するパワードスーツは、複数の企業によって製品化された。また、従来のパワードスーツとは異なり、装着者の3本目、4本目の腕や脚のように新たな身体部位として機能するようなウェアラブルロボットの概念が提唱され、MITのHarry Asadaらの研究グループ¹⁾をはじめ、日本を含めた各国で研究が進められている。近年は、ウェアラブルロボットを取り外した状態であっても身体の一部として操作できるといったアプローチも提案されている²⁾。ロボットを身体の一部としてまったり遠隔操作したりする発想は、人間と機械と情報・環境の関連づけの再考を促す潮流の一つとなっている。

人間をとりまく物理空間の情報を情報空間に取り込むIoT(Internet of Things)技術の発展、情報空間に蓄積されるビッグデータとその解析技術としての機械学習の進展は、より複雑で柔軟なインタラクション研究への道筋を開いた。例えば、JST CREST「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」領域においては、人間と機械そして環境全体を含む多様な形態を想定したインタラクション支援技術の研究開発が展開された。その中では、空中超音波による触覚提示法³⁾をはじめ、技能伝承のためのウェアラブルな力覚フィードバックシステムの開発⁴⁾、さらには脳活動計測を用いたバーチャル身体部位の操作手法の開発⁵⁾など、HRIの裾野を広げる研究が精力的に進められた。

このような展開を受けて、HRI、ロボット工学、メカトロニクス、センシング技術、ディスプレイ技術、ウェアラブル技術、人間工学などを統合的に扱う研究領域として人間拡張学(Human Augmentation)と呼ばれる新たな潮流が形作られ、盛り上がりを見せている。人間拡張学では、人間が持つ感覚や運動機能や知的処理機能を物理的・情動的に補綴・拡張・増強し、身体能力に関わらず自らやりたいことを自由自在に行う技術の確立を目指している。身体機能を直接補綴するパワード義足といった従来の研究開発に加え、テレプレゼンスやテレグジスタンスのようにロボットの遠隔操縦における情報環境への没入体験を通じて人工物と人間の機能を融合し総合的に能力を高めるアプローチなど、人間とロボットの距離がより近く、時に曖昧になるほどの新奇なインタラクション研究が展開され始めた。例えばJST さきがけ「人とインタラクションの未来」領域では、高速かつ低遅延な情報処理技術に基づく人間-機械協調⁶⁾や、バーチャルリアリティー(VR)上に構築された身体をインターフェイスとした人間拡張体験および自己認知の変容の研究⁷⁾がその一例と言える。さらにJST ERATO「稲見自在化身体プロジェクト」では、物理空間でのウェアラブルロボットおよび情報空間でのバーチャル身体の開発、それらを用いたインタラクションに対する心理・神経科学的反応の検証が一体的に推進された。そこでは、装着型のロボットを介した二人羽織のような協調作業⁸⁾や、一つのアバターを複数人で操作する共有身体⁹⁾、筋電で操る第6の指への脳の適応過程の検証¹⁰⁾といった、生得的な物理的身体にとらわれない身体観とそれらにまつわるインタラクション手法が提案されている。

すでに触れたように、HRIにおいてはハードウェアやソフトウェアの開発のみならず人間側の理解も不可欠である。特にロボット(バーチャルな身体を含む)と人間が一体的に行動することで得られる新奇なインタラクション体験の心理的・神経科学的影響について、認知神経科学領域と協働し研究する必要性が増してきた。今日では、日本はもちろん米国、英国、スイスなど各国で、人間拡張技術に伴う触覚や身体感覚に関する神

経機構の変容を解明しようとする動きが見られる。

ただし、こうした技術の進展が人間行動および社会にどのような影響をもたらすのか、社会はどのように新技術の利便性を享受しつつ制御していくべきかを検討することを研究開発の段階でおろそかにしてはならない。この点については、科学技術倫理学からの知見が参考になる¹¹⁾。

まとめると、昨今は人間・機械・環境のインタラクションのあり方はより柔軟かつ複雑になっており、HRIの領域はバーチャルな身体とのインタラクションや人間側の認知といった領域とのつながりを強めている。こういったHRI技術によって人間の行動可能性が広がる一方、その心理的・神経科学的な影響や新技術の社会的受容の議論に注意を払う必要性も高まっている。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

サイバネティック・アバター

「身代わりの身体」を意味するサイバネティック・アバター¹²⁾は、人間が自らの分身を遠隔操作する等の文脈でのHRI研究の方向性に影響を与える概念である。身代わりの身体は物理的なロボットでもよく、情報空間でのアバターでもよい。人型でもよいし他の形状の身体でもよい。単一でもよいし複数の身体でもよい。操作者はユーザー本人だけでもよいし、システムや他ユーザーが介入して協調的に行動してもよい。この概念は、遠隔作業、人間機械協調、情報空間におけるヒューマンアバターインタラクションといった領域で用いられることで、HRIのデザインの自由度を飛躍的に広げうる。研究開発においては、サイバネティック・アバターを用いた新しい行動のあり方を体験可能な形で示していくことがまず求められる。それと並行して、生来の身体とは異なる新しい身体やその機能に人間がどのように適応していくか、システムがどのように適切に支援すべきか、といった課題に挑む必要が出てくる。本概念を掲げた研究は、例えばムーンショット型研究開発制度「身体的共創を生み出すサイバネティック・アバター技術と社会基盤の開発」で精力的に進められている。また、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)で検討が始まった「人協調型ロボティクスの拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」の動向にも注目すべきであろう。

透明な介入

円滑なHRIや人間拡張を実現する上で、ユーザーの意図や行動を的確に検出・予測することは非常に重要である。近年はセンサー技術や機械学習の発展によりこれらの精度は実用に足るレベルに達している。しかしながら、ユーザーが機械に支援されていることを知覚すると、自らが行動している感覚(行為主体感)が損なわれ、機械に操られているような経験へとつながってしまう。加えて最近では、行為主体感を維持した介入がユーザーのもともとの運動能力を向上させること示唆する結果も報告されている¹³⁾。そのため、ユーザーの知覚をかいくぐってさりげなく機械や環境が支援を加える「透明な介入」¹⁴⁾の設計手法の開発が今後ますます注目を集めると考えられる。

共創と試行錯誤の場としてのメタバース

情報空間内に社会やサービスを構築するメタバースは、物理モデルや機械学習を駆使した複雑なシミュレーションや仮説検証が可能な研究開発プラットフォームとして活用されうる。MicrosoftやMetaといったビッグテックによる開発も盛んであり、HMDをはじめとした高品質なデバイスの実用化も進みつつある¹⁵⁾。HRIの開発におけるプロトタイプ制作と検証を物理空間から情報空間へ移行することができれば、情報空間上で多様なパターンのインタラクションをシミュレートし、最善の結果のみを物理的に実装するといった効率的な技術開発が可能になる。ロボット研究・開発やサービス探索・検証に与えるインパクトは、3Dプリンターやレーザーカッターなどの従来のラピッドプロトタイプングを超えると想定される。

また、メタバースを技能訓練・習得に用いるアプローチも興味深い。メタバースを用いれば重力加速度と

いった物理モデルのパラメータを技能レベルに合わせて調整でき、熟練者の動きを見本としてスロー再生することも可能である。けん玉を題材とした実験では、短時間でもスキルの上達が可能であることが示された¹⁶⁾。また、筋肉トレーニングへの応用可能性も報告されている¹⁷⁾。さらに、こういったアプローチはサイバネティック・アバターを用いた新奇な身体を使いこなすための学習プラットフォームにも応用可能であるため、次世代のHRIの研究開発および産業応用に広く用いられることが予想される。

産業応用

HRIのより具体的な産業応用の動向も特筆に値する。株式会社オリイ研究所が展開する分身ロボットカフェは、遠隔操作ロボットを介して外出困難者がカフェの店員として働けるようにするなど、テクノロジーを活用した新しい社会参画の事例を提案した。また、GITAI USA Inc. / GITAI Japan 株式会社は、宇宙空間や月に送り込んだロボット身体を地球から遠隔操作することで安全かつ効率的に宇宙産業を開拓するための実証実験を次々と成功させている。

ブレインテックの応用

脳活動信号を利用したインターフェイスであるBMIをはじめとするブレインテックには、より直感的な操作系の実用化や自覚できない身体内の状態のフィードバックといった期待が集まっている¹⁸⁾。サイバネティック・アバターの操作においてブレインテックが応用できれば、人間の行動可能性はさらに広がると考えられる。非侵襲的かつ高精度な信号検出・膨大なデータの処理手法の進展が待たれるが、BMIによるロボットアームの操作実験¹⁹⁾等、興味深い成果が報告され始めている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本国内においては、ムーンショット型研究開発制度で展開されている研究への注目が必要である。特に、目標1「2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現」¹²⁾、目標3「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」²⁰⁾、そして目標9「2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現」²¹⁾に属する研究課題には、HRI領域により学際的な広がり和社会的価値を持たせ、目標実現の糸口を形作る成果が出てくることが期待される。

産業界の動向としては、NTTドコモが人間拡張技術のプラットフォームとして名乗りを上げたことが印象的である。センシングデバイスの開発、データの最適化と物理的な運動への変換など、物理空間と情報空間を横断的に扱うようになってきたHRIを下支えする基盤的環境を整えていくことに企業が価値を見いだしていることは特筆に値する。

海外の研究開発においては、コロナ禍で動向が見えづらくなった点はあるものの、欧州で2022年に立ち上がったHuman-Robot Sensorimotor Augmentation (HARIA Project)²²⁾に注目したい。イタリアをはじめ、ドイツ、スウェーデン、オランダ、スペインの研究者らが参画するこの国際プロジェクトは、2019年頃から登場したSupernumerary Robotic LimbsやSuperLimbsといったキーワードのもと、ロボットの腕をあたかも身体の一部であるかのように自在に操るための技術の確立を目指している。加えて、認知の拡張やインタラクションに関するダグスツールセミナー²³⁾が開かれるなど、人間拡張と結びついたHRI領域が欧州でも活発化していると言えよう。

また、2022年11月にはANAの協賛によるトレイゲジスタンス技術のコンテストXPRIZE AVATAR²⁴⁾の決勝戦が行われ、1. 会話、2. 簡単なバーの上げ下げ、3. 移動、4. 重さの違うビン (2kg or 500g) を見分けて枠にはめる、5. 電動ドリルでボルトを外す、6. テクスチャの違う (つるつる or ざらざら) 石を触り分けてつかむなどのタスクが世界から選出されたチームに競われるなど、大きな注目を集めている。なお、ドイツ・ボン大学によるチームが優勝した。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域

(5) 科学技術的課題

インタラクション技術の学際性に鑑みると、今後も分野融合的にさまざまな研究者が協働し研究を推進していくことが求められる。例えば、脳計測を通じた神経信号の活用や神経機構の変容を解明しようとする場合には、脳の特性やその情報を読み出す部位や方法を熟知している認知神経科学分野の研究者との協働をますます密にする必要がある。また、機械学習分野との協働の促進も課題である。特に人間行動支援においては、人間自らの挙動と機械側からの支援をいかにシームレスに切り替えられるかが課題となっている。これは上述した「透明な介入」にとっても重要であり、この課題に対する技術的進展がなければHRIを通じた豊かな経験の創出は限定的になるだろう。

加えて、触覚を介した他者の気配の伝達あるいは他者との意図の共有が技術的にどう実現できるかも興味深い課題である。例えば人間同士が重い物を協力して運ぶ際、運搬物を介して伝わる触覚から他者が急ぎがっているのか、どこへ動こうとしているかといった意図を類推することができる。HRIにおいてこのような感覚提示を応用できれば、新たな意思疎通のアプローチが開ける。近年、物の手触りや他者とのふれあいを伝えるという文脈で目覚ましい展開を見せている触覚研究だが、協働を前提とした気配の伝達や意図の共有という点では、HRI領域が探求すべき課題はまだ残されている。

(6) その他の課題

インタラクション技術は社会的に有用かつ人間の高次の欲求を満たす技術として期待されているが、一方でその影響力の強さから使用方法を正しく規定することが重要である。例えば、HMD（ヘッドマウントディスプレイ）は、人間の目や脳への悪影響が懸念されており、装着時の眼精疲労、注意の転導、転倒の危険性なども考慮する必要がある。

また、近年は技術の革新速度が著しく向上しており、技術が確立してからルールを制定するのではなく、技術開発と同時並行でそのあり方を検討していく必要がある。さらに、技術の標準化に関しては、日本国内での認可・規制のハードルの高さ故に海外での応用が先行しているケースが多く、こちらも課題と言える。今後は新たな融合領域に対する研究開発支援を行うだけでなく、研究開発特区の策定とそこでの社会実験により、研究開発と市場開拓を促進するための政策的配慮も必要となるであろう。

新しい社会実験の場としては、メタバースやデジタルツインといった情報空間での検証も有用になると考えられる。例えば東京大学は2022年からメタバース工学部というVR等を活用した新たな一般向け教育プログラムを開始したが、従来の大学知の還元のアプローチでは思い至らなかった教育的・制度的課題が見えてくることが予期される。このような社会実験としての一面を持つ試行の数々が後のイノベーションの創出・促進につながるよう、研究開発と政策側が自主的・公的規制のあり方を適切に定めるエコシステムの構築も引き続き課題となる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	ムーンショット型研究開発制度が立ち上がり、神経科学や機械学習領域などとの学際的な協働を含むHRI研究開発が促進されている。
	応用研究・開発	○	↗	もう一つの身体としてのロボットやアバターを活用した産業展開の事例が出始めている。また、NTTドコモなどの大手企業も人間拡張を話題に始めた。さらなる展開のためには、技術移転やスタートアップへの支援が求められる。
米国	基礎研究	◎	→	依然として本領域のトップランナーである。シカゴ大学のコンピューターサイエンス研究科 ²⁵⁾ は、VRや透明な介入などのアプローチをHRIに取り込み ¹³⁾ 存在感を増している。MITでは身体拡張やインタラクション技術に関する先進的な研究が継続的に行われている ^{1), 26)} 。

	応用研究・開発	◎	→	DARPAのACEプログラムをはじめとした中心とした産学軍の連携が密接に行われている ²⁷⁾ 。XPRIZEのような高額な賞金を用意したコンテストを企画し、技術開発を活性化させる取り組みも行っている ²⁸⁾ 。また、大学などの教育機関での研究に加え、MicrosoftやMetaなどの企業での研究開発が盛んで、実用化の速度も速い ²⁴⁾ 。
欧州	基礎研究	◎	↗	欧州の合同プロジェクトであるHARIA Projectをはじめ、認知の拡張やインタラクションに関するダグスツールセミナー ¹⁵⁾ が開かれるなど、人間拡張をキーワードとしたHRI研究が活発化している。
	応用研究・開発	○	↗	WEART (触覚伝達デバイス) ²³⁾ やEXISTO (身体拡張型のウェアラブルデバイス) ²⁹⁾ など、近年のHRIの動向を反映したスタートアップが見られる。英国はドイツと共同で人間拡張に関する調査プロジェクトを発足している ³⁰⁾ 。
中国	基礎研究	○	↗	触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎研究は限定的であるが、ウェアラブル技術やVRなど HRIと関係が深い HCI 論文が増加している。
	応用研究・開発	○	↗	Pico ³¹⁾ などのVR関連企業の存在感が出てきた。ただし、オンラインゲーム規制など、政策の影響に注視が必要である。
韓国	基礎研究	△	→	ウェアラブル・VR技術などの企業を中心とした研究開発は多数進められているが、触覚や身体感覚に関する神経科学的なアプローチからの基礎的な研究は限定的である。
	応用研究・開発	○	↗	政府によるIoT・スマートカー事業への助成は、SamsungやLGを中心とした企業のウェアラブル・VR技術開発を押し上げる可能性が高い。それらがHRI領域の産業応用に波及すると予期される。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

参考文献

- 1) The d'Arbeloff Laboratory for Information Systems and Technology, "Robotics Research," Massachusetts Institute of Technology, <https://darbelofflab.mit.edu/robotics-research/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 2) Yukiko Iwasaki, et al., "Detachable Body: The Impact of Binocular Disparity and Vibrotactile Feedback in Co-Presence Tasks," *IEEE Robotics and Automation Letters* 5, no. 2 (2020) : 3477-3484., <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2977320>.
- 3) Shun Suzuki, et al., "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display," *IEEE Transactions on Haptics* 14, no. 4 (2021) : 740-749., <https://doi.org/10.1109/TOH.2021.3069976>.
- 4) Nobuhiro Takahashi, Shinichi Furuya and Hideki Koike, "Soft Exoskeleton Glove with Human Anatomical Architecture: Production of Dexterous Finger Movements and Skillful Piano Performance," *IEEE Transactions on Haptics* 13, no. 4 (2020) : 679-690., <https://doi.org/10.1109/TOH.2020.2993445>.
- 5) Takufumi Yanagisawa, et al., "BCI training to move a virtual hand reduces phantom limb pain: A randomized crossover trial," *Neurology* 95, no. 4 (2020) : e417-e426., <https://doi.org/10.1109/TOH.2020.2993445>.

- org/10.1212/WNL.0000000000009858.
- 6) Yuji Yamakawa, Yutaro Matsui and Masatoshi Ishikawa, “Development of a Real-Time Human-Robot Collaborative System Based on 1 kHz Visual Feedback Control and Its Application to a Peg-in-Hole Task,” *Sensors* 21, no. 2 (2021) : 663., <https://doi.org/10.3390/s21020663>.
 - 7) Akimi Oyanagi, et al., “Impact of Long-Term Use of an Avatar to IVBO in the Social VR,” in *Human Interface and the Management of Information. Information Presentation and Visualization*, eds. Sakae Yamamoto and Hirohiko Mori, Lecture Notes in Computer Science 12765 (Springer Cham, 2021), 322-336., https://doi.org/10.1007/978-3-030-78321-1_25.
 - 8) Mhd Yamen Saraiji, et al., “Fusion: full body surrogacy for collaborative communication,” in *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies* (New York: Association for Computing Machinery, 2018), 1-2., <https://doi.org/10.1145/3214907.3214912>.
 - 9) Takayoshi Hagiwara, et al., “Individuals Prioritize the Reach Straightness and Hand Jerk of a Shared Avatar over Their Own,” *iScience* 23, no. 12 (2020) : 101732., <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101732>.
 - 10) Kohei Umezawa, et al., “Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study,” *Scientific Reports* 12 (2022) : 2339., <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06040-x>.
 - 11) 久木田水生, 神崎宣次, 佐々木拓『ロボットからの倫理学入門』(名古屋: 名古屋大学出版会, 2017) .
 - 12) 文部科学省「ムーンショット目標1: 2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から解放された社会を実現: 研究開発構想 (令和2年2月)」内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept1.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 13) Shunichi Kasahara, et al., “Preserving Agency During Electrical Muscle Stimulation Training Speeds up Reaction Time Directly After Removing EMS,” in *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York: Association for Computing Machinery, 2021), 1-9., <https://doi.org/10.1145/3411764.3445147>.
 - 14) Hiroto Saito, et al., “Transparency in Human-Machine Mutual Action,” *Journal of Robotics and Mechatronics* 33, no. 5 (2021) : 987-1003., <https://doi.org/10.20965/jrm.2021.p0987>.
 - 15) Anton Brisinger, “META’s Augmented Reality, And The Severing Of Human Connection,” *Startups Magazine*, <https://startupsmagazine.co.uk/article-metas-augmented-reality-and-severing-human-connection>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 16) 川崎仁史, 他「けん玉できた! VR: 5分間程度のVRトレーニングによってけん玉の技の習得を支援するシステム」『エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020論文集』(一般社団法人情報処理学会, 2020), 26-32.
 - 17) Edouard Ferrand, et al., “Exploring a Dynamic Change of Muscle Perception in VR, Based on Muscle Electrical Activity and/or Joint Angle,” in *Augmented Humans Conference 2021* (New York: Association for Computing Machinery, 2021), 298-300., <https://doi.org/10.1145/3458709.3459007>.
 - 18) 間瀬英之「IT動向リサーチ: ブレインテックの概説と動向: 脳科学とテクノロジーによる金融ビジネスの未来」株式会社日本総合研究所, <https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=38453>, (2023年2月21日アクセス) .
 - 19) Christian I. Penalzoa and Shuichi Nishio, “BMI control of a third arm for multitasking,” *Science Robotics* 3, no. 20 (2018) : eaat1228., <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aat1228>.
 - 20) 文部科学省「ムーンショット目標3: 2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動

し人と共生するロボットを実現：研究開発構想（令和2年2月）」内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept3.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .

- 21) 文部科学省「ムーンショット目標9：2050年までに、こころの安らぎや活力を増大することで、精神的に豊かで躍動的な社会を実現：研究開発構想（令和3年11月）」内閣府, <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept9.pdf>, (2023年2月21日アクセス) .
- 22) European Commission, “Human-Robot Sensorimotor Augmentation - Wearable Sensorimotor Interfaces And Supernumerary Robotic Limbs For Humans With Upper-Limb Disabilities,” <https://cordis.europa.eu/project/id/101070292>, (2023年2月21日アクセス) .
- 23) Schloss Dagstuhl, “Dagstuhl Seminar 20342,” <https://www.dagstuhl.de/en/seminars/seminar-calendar/seminar-details/20342>, (2023年2月21日アクセス) .
- 24) XPRIZE, “MEET THE WINNERS,” <https://www.xprize.org/prizes/avatar>, (2023年2月21日アクセス) .
- 25) University of Chicago, “RESEARCH AREA: Human Computer Interaction,” <https://cs.uchicago.edu/research/human-computer-interaction/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 26) Massachusetts Institute of Technology, “Fluid Interfaces,” <https://www.media.mit.edu/groups/fluid-interfaces/overview/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 27) Lamar Johnson, “DARPA AI Project Focuses on ‘Human-Machine Symbiosis,’” Meri Talk, <https://www.meritalk.com/articles/darpa-ai-project-focuses-on-human-machine-symbiosis/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 28) Weart S.r.l., <https://www.weart.it/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 29) Existo S.r.l., <https://www.existo.tech/en/home-en/>, (2023年2月21日アクセス) .
- 30) UK Ministry of Defence, “Human Augmentation - Dawn of a New Paradigm: A strategic implications project, dated by May 2021,” https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/986301/Human_Augmentation_SIP_access2.pdf, (2023年2月21日アクセス) .
- 31) PICO, <https://www.picoxr.com/>, (2023年2月21日アクセス) .

2.2