

人間拡張が築く未来

The Prospect for Human Augmentation Technologies

暦本 純一*

Jun Rekimoto

1 要旨

人間の能力をテクノロジーによって自由に増強・拡張させる技術が急速に進展している。これらの技術や、背景となる人間の探求を統合的に追求する学問領域は、最近ではヒューマンオーグメンテーション (Human-Augmentation) あるいは人間拡張と呼ばれることが増えてきた。ヒューマンオーグメンテーションで想定する拡張の対象は、知的な能力に加え、身体能力や人間の存在などを包含する。通常の人間の能力をさらに強化するだけにとどまらず、障害者や高齢者の能力補綴や能力回復もヒューマンオーグメンテーションの重要な対象領域となる。関連する要素技術や研究領域には、VR (Virtual Reality)・AR (Augmented Reality)、HCI (Human-Computer Interaction)、ウェアラブルエレクトロニクス、テレプレゼンス・レイグジスタンス、サイボーグ、ロボティクス、人工知能、スポーツ科学、リハビリテーション、バイオメカニクス、補綴・義手・義足技術、ウェアラブルコンピューティング、インプラントブルコンピューティング、IoT (Internet of Things)、感覚置換、感覚クロスモダリティ、

ブレインマシンインタフェース、さらには認知科学などが含まれる。適応領域も、(共同)作業支援、遠隔コミュニケーション支援、スポーツ、トレーニング、リハビリテーション、医療、教育、エンターテインメント、メディアコンテンツなど多岐に渡る。ヒューマンオーグメンテーションは、これらの領域を横断する先端的かつ学際的な研究領域である。人が馬を高度に乗りこなしている状態の極致は「人馬一体」と呼ばれる。人間と馬との境界が曖昧になり、人間の能力と馬の能力が渾然一体となっている姿を表現している。これになぞらえると、ヒューマンオーグメンテーションの究極の姿は「人機一体」といえるだろう。技術が人間と対立するものではなく、人間の能力と自然に融合する。

その相乗効果によって、どちらか一方では得られないような性能が発揮される。ヒューマンオーグメンテーションが一般化すると、技術の使いこなし方はもとより、人間の働き方や交流の仕方も含め、社会全体の構造も変化していくだろう。本稿はこのように多面的な波及効果が期待できるヒューマンオーグメンテーション研

* 東京大学大学院情報学環・ソニーコンピュータサイエンス研究所

キーワード：ヒューマンオーグメンテーション (人間拡張)、拡張人間、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション、バーチャルリアリティ、オーグメンティッドリアリティ、テレプレゼンス

究領域について概説する。

2 人間拡張概念の歴史

「技術が人間を拡張させる」という発想は、光学顕微鏡の発明者で「フックの法則」でも知られるロバート・フック (Robert Hooke, 1635-1703) の著述に遡ることができる。顕微鏡を用いて描いたスケッチを初めて掲載したフックの著書「ミクログラフィア」には、「顕微鏡は視覚の拡張である。他の感覚器官、たとえば聴覚・嗅覚・味覚・触覚なども、将来の発明で拡張されるだろう。」という記述がある²⁶⁾。

生物学者ヤーコプ・フォン・ユクスキュル (Jakob Johann Baron von Uexküll, 1864-1944) は、それぞれの生物が知覚し作用する世界が、その生物にとっての実世界であるという環世界 (Umwelt) 説を提唱している⁴³⁾。この説によれば、すべての生物にとって共通な実世界があるのではなく、それぞれの生物の感覚と脳構造の特性に基づいて、それぞれが知覚する世界、環世界が構築される。たとえばダニは視覚・聴覚がなく嗅覚・触覚・温度感覚のみをもち、その環世界は後者の感覚にもとづいて構築されている。この発想を人間拡張に適用すると、感覚や知覚能力の拡張は、人間をとりまく環世界を変化・拡張させているとも考えることができる。

情報技術を想定した能力拡張の概念は、パネバー・ブッシュ (Vannevar Bush) が The Atlantic Monthly 誌に発表した1945年の “As we may think (われわれが考えるように)” という論文に見ることができる¹⁸⁾。ブッシュはマンハッタン計画などにも参画した研究経営の

専門家で、コンピュータが発明される以前に、情報技術の未来を予測し、それがやがては人間の思考活動を支援するものとなるだろうという構想をこの論文で著した。Memex (メモックス, MEMory EXpander の略) と呼ばれる概念上の情報処理システムが提案され、ウェアラブル・コンピュータの原型のような、頭部に搭載したカメラによる人間の体験情報記録により、ハイパーテキスト的に情報を閲覧する機構の構想が述べられている (Fig. 1)。

情報科学者のリックライダー (J.C.R. Licklider) が1960年に公表した論文 “Man-Computer Symbiosis (人間とコンピュータの共生)” は、当時すでに研究が開始されていた人工知能とは違った立場から人間と情報技術との関係について論じている³³⁾。ここで「共生 (symbiosis)」とは、「異なる種類の生命体が非常に密接に関連し共存している関係」を意味する。人間とコンピュータがそれぞれ異なる能力を発揮しながら相互作用することを想定している。

リックライダーが論文中で構想した共生関係は、現在ではわれわれが日常的に使っているパーソナルコンピュータやスマートフォンなどのインタラクティブな情報システムを予見したものだ。つまり道具としてのコンピュータという発想の源流とであった。それ自体も当時としては大変に先駆的だが、リックライダーは論文中で「共生ではない関係」の例も示してお

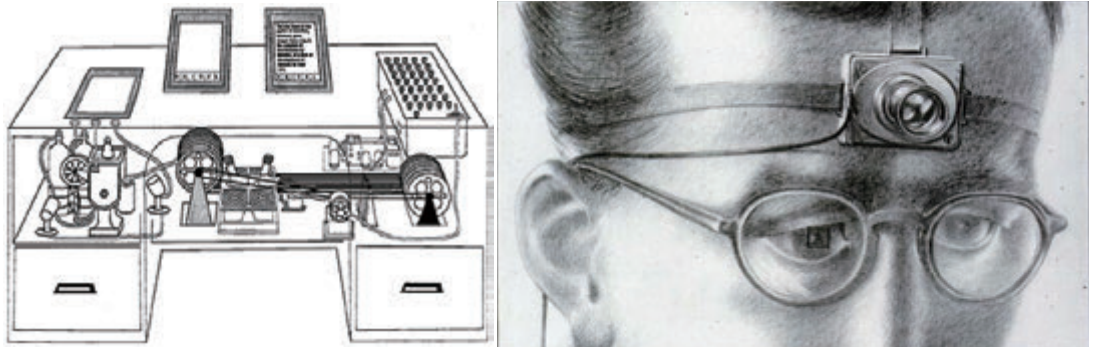


Fig. 1: Memex: ブッシュが構想した情報処理装置と頭部搭載カメラ¹⁸⁾

り、人間拡張の観点からするとこちらも興味深い。まず、「機構的に拡張された人間 (“Mechanically Extended Man”）」という概念は共生ではないとしている。例えば義足や眼鏡のようなものを意味するが、現在の意味で読み解くとまさにサイボーグにつながる技術と人間の関係だといえるだろう。リックライダーが共生でないとしているもう一つの例が、「人間によって拡張された機械 (“Humanly Extended Machines”）」である。オートメーション工場に人間がオペレータとして参加している場面などを想定し、これも人間と機械の共生関係ではないとしている。人間拡張の観点から考えると、これはテレプレゼンスロボットのようにロボットに人間の能力を付与した関係とみることができる。また、集合知によって人間から学習し性能を向上させるシステム、たとえばレコメンデーションシステムなどもこの範疇に入るかもしれない。このように、リックライダーが共生の反例としてあげている形態は、人間拡張の二つの重要な方向性を示しているともいえる。

「メディアはメッセージである」という有名な言説でも知られるカナダのメディア学者マー

シャル・マクラーハン (Marshall McLuhan) は、メディアを情報の媒介物としてだけではなく人間の拡張と考えていた。マクラーハンの主著書である「メディア論-人間拡張の諸相 (Understanding Media: the Extensions of Man)」によれば、ラジオは耳の拡張、テレビは眼の拡張となる。さらに、狭義の情報メディアにおさまらない他の技術、たとえば「家」も皮膚の拡張であり、自動車は足の拡張ととらえていた⁴²⁾。

マウスの発明や GUI (グラフィカルユーザインタフェース) の創始者として名高いコンピュータ科学者ダグラス・エンゲルバート (Douglas Engelbart) も、「人間の知能を拡張させるための概念的フレームワーク (“Augmenting Human Intellect: A conceptual framework”）」という、人間の知的拡張に関する論文を公表している²¹⁾。また、インタビューでマウスの発明について聞かれたときに、エンゲルバートは「マウスは人間の知能拡張という大きな目標のための一部品に過ぎない」と答えている。エンゲルバートが設計し、1968年のデモが後に「すべてのデモの母 (“The mother of all demos”）」

と呼ばれることとなる NLS (oN Line System) は、マウスによるグラフィカル・ユーザインタフェース、ハイパーリンクによるドキュメントのブラウジング、遠隔コミュニケーションなど、現在のパーソナルコンピューティングの元となる概念を含んでいた。情報技術を人間の知的能力を拡張ために用いようという明確な思想を見ることができる¹⁾。

マクルーハンやエンゲルバートの「拡張」は、

3 人間拡張研究の発展

人間拡張に関する研究は、90年代後半からさらに活発になってきている。1997年に、第一回のウェアラブル・コンピュータに関する国際学会 International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97) がボストンで開催された²⁾。ヘッドアップディスプレイ、腕時計型コンピュータ、人体データ伝送などの技術が研究発表され、第一次のウェアラブルコンピューティングブームをつくった。これに関連して国内でもいくつかのウェアラブル・コンピュータ関連のシンポジウムやイベントが開催された。2010年に、第一回の Augmented Human 国際学会がフランスのメジェーヴで開催され、以後毎年開催されている。Augmented Human は人間の身体的拡張やスポーツ科学なども対象領域にしている点が特徴となる³⁾。

スポーツ関係では、スイスのチューリッヒ工科大学では Cybathlon が組織された⁴⁾。Cybathlon は、義手・義足などの補綴技術や BMI (ブレインマシンインタフェース)、外骨格などによる障害者スポーツ競技ルールを設計し、実

主に人間の知的な能力に関わるものだったが、最近のオーグメンテッド・ヒューマン研究では身体能力の拡張も大きなテーマとなっている。従来のユーザインタフェースが人工物の「使いよさ」を追求する分野だとすると、オーグメンテッド・ヒューマン研究は、より総合的に、人間と一体化する技術や人間の能力そのものの向上を目指しているといえる。

際に各国からの参加チームが競い合うという技術とスポーツが融合した競技大会である。2016年に第一回大会が開催され、国内からはソニーコンピュータサイエンス研究所/Xiborgのチームが参加した。2020年にも大会開催が計画されている。2015年には、国内でも超人スポーツ協会が組織され、テクノロジーによる様々なスポーツ拡張の取り組みがなされている⁵⁾。2016年には東京大学でスポーツに関わる多彩な学問領域を集結させるために、「東京大学先端スポーツ科学研究拠点」が設置された⁶⁾。

人間拡張はインタラクション研究や科学技術戦略でも重要視されるようになってきている。国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 研究開発センターが公開した、2015年版「研究開発の俯瞰報告書」の「インタラクション」に関する項目に、「人間拡張」というキーワードが掲載されるようになった⁷⁾。2017年に示された文部科学省の戦略目標「ネットワークにつながれた環境全体とのインタラクションの高度化」においても、「インタラクションを支援す

るための、インターフェースや人間能力の拡張に関する技術開発」が達成目標の第一位として掲げられている⁸⁾。2016年にはSpringerから論文誌Augmented Human Researchが発刊された⁹⁾。論文誌IEEE Computerは2017年2月にTechnology for Human Augmentation特集を組んだ¹⁰⁾。IEEE Pervasive Computingは2018年4月にAugmenting Humans論文特集

4 SFに見られる人間拡張概念

SFやアニメ、コミックスにおいても、人間拡張に関わる多くの先駆的なアイデアが登場し、実際の技術開発を触発するなど密接な影響を与えている。源流的な価値をもつ代表的な作品には以下のようなものがある。

1948年のロバート・ハインライン(Robert A. Heinlein)のSF小説「ウォルドウ(Waldo)」では、マスター・スレーブ型のマニピュレータを介して遠隔地と接触する機器が描かれている。1980年にテレプレゼンスの概念³⁵⁾を提案するミンスキー(Marvin Minsky)は、テレプレゼンスの源流のひとつとしてこのWaldoを参照している。ハインラインは1959年のSF小説「宇宙の戦士(Starship Troopers)」において、パワースーツ型の戦闘服を提案しており、外骨格型システムの元祖と言える。「機動戦士ガンダム」から「Pacific Rim」に至るまで、後の多くのアニメーション、映画、実際の技術開発に影響を与えている。

1970年から連載があった日本の漫画「ジャンボグA(エース)」では、身体の動きをトレースし、それを増幅してロボットを操縦する様が

号を計画している¹¹⁾。さらに、2017年には東京大学に「ヒューマンオーグメンテーション学寄付講座」が設置され、2018年には産業技術総合研究所が人間拡張研究センターを開設された¹²⁾。このように、人間拡張学を学問的にも実践的にも推進しようという活動が各方面で活発化している。

描かれており、世界的にみてもテレプレゼンスアイデアの先駆的な例といえる。ほぼ同時期にジェイムズ・ティプトリーJr.(James Tiptree Jr.)が発表した作品「接続された女(“The Girl Who Was Plugged In”)」では、人間の脳がネットワーク経由でヒューマノイドに接続する世界が描かれていた。

機器との融合による能力拡大という観点では、1964年から連載が開始されている石ノ森章太郎の「サイボーグ009」が年代的にも早く「サイボーグ」という用語を普及させる大きな要因となった。鳥山明の「ドラゴンボール」に登場する「スカウター」は、単眼グラス型の装着装置で、Google Glassを含む後の多くの眼鏡型ウェアラブルコンピュータの元型となった。マイクル・クライトン(Michael Crichton)は、脳とコンピュータの直接接続をテーマにした長編「ターミナル・マン(“The Terminal Man”)」を1972年に出版しており、インプラントブルコンピューティング概念のさきがけといえるだろう。

サイバーパンクの元祖として名高い、ウィリ

アム・ギブスン (Willam Gibson) の SF 短編「クロム襲撃 (Burning Chrome)」および長編「ニューロマンサー (Neuromancer)」では、脳空間 (サイバースペース) に没入 (ジャックイン) するハッカー (ニューロマンサーでは「カウボーイ」と呼ばれている) の生態が描かれており、その斬新な世界観は多くの SF や「攻殻機動隊」などのコミック・アニメーションに影響を与えた。筆者 (暦本) の人間拡張プロジェクトでは、単純なマスタースレーブ型にとどまらないテレプレゼンス接続形態を、ニューロマンサーにちなんで JackIn と呼んでいる。ニューロマンサーには他人の感覚を伝送し追体験する「疑験 (simstim)」や、人間の姿を消してしまう特殊素材「擬態ポリカーボン (mimetic polycarbon)」など人間拡張に関わる多くの魅力的な概念が登場する。体験の拡張という観点では、ダグラス・トランブル (Douglas Trumbull) 監督による 1983 年の映画「ブレインストーム (Brainstorm)」が興味深い。この映画では、ブ

レイマシンインタフェースにもとづいて、人間の体験の完全な記録・伝達・再生が可能となった世界が描かれている。映画の中ではこの技術は、「教育や訓練に革命的な改善をもたらす」ものとされている。

1972 年に放映が開始された「プローブ操作指令 (Search)」というスパイドラマテレビシリーズでは、主人公がタイピン型のウェアラブルカメラや内耳に埋め込まれたヘッドセットを介してバックアップセンターと接続してスパイ活動を展開する¹³⁾。バックアップセンターのスタッフは主人公の状況を察知しながら遠隔サポートを行う。機器を装着しているとは知らない他の登場人物からすると、主人公自身が高い能力を持っているように感じてしまうところがストーリー上のポイントとなっている。人間の能力を、(ネットワークを介した) 他の人間や技術によって拡張する発想とみることができる。

5 人間拡張の技術領域

以上のような経緯を概観し、現在のヒューマンオーグメンテーション研究がどのような広がりがあるかを整理してみる。筆者らが運営している東京大学ヒューマンオーグメンテーション学寄付講座では、人間拡張には Fig. 2 のような四つの大きな方向性があるとしている。

身体の拡張 は、個々の人間の能力を高めるもので、外骨格のように構造的に身体能力を増強するもの、機能的電気刺激 (FES) によって筋肉を駆動するもの、義手・義足のように身体機

能を補綴するものなどが含まれる。

存在の拡張 は、テレプレゼンスやテレイグジスタンスのように、存在の限界をとりはらい、遠隔地での (共同) 作業を可能にするものが含まれる。

感覚の拡張 は、われわれの視覚や聴覚などを技術で強化する (ウェアラブルコンピューティングやオーグメンテッド・リアリティなどを含む)。視覚障害者のために、視覚情報を皮膚感覚などに置き換える感覚置換 (sensory

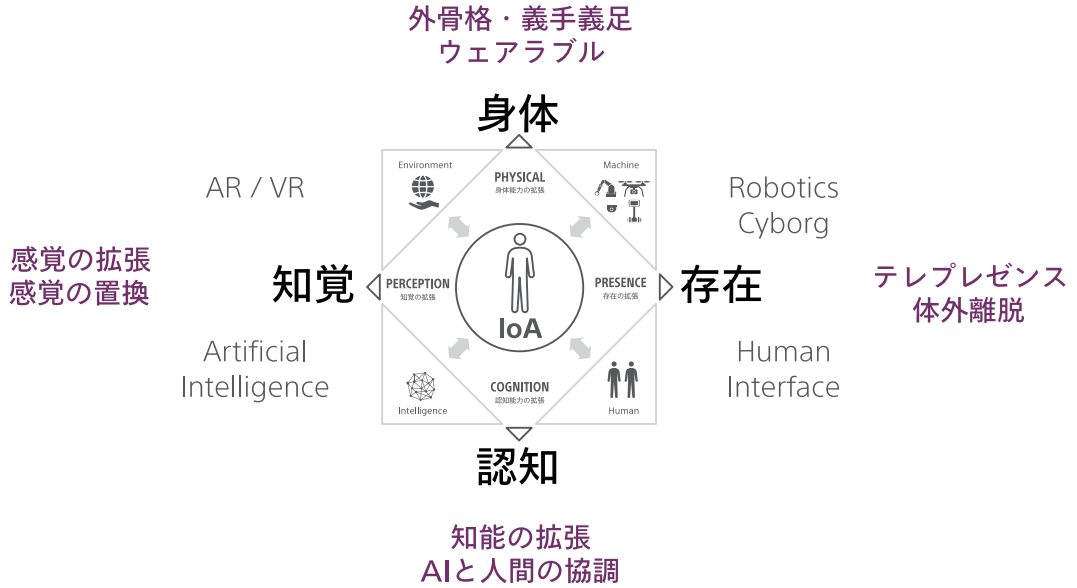


Fig. 2: 人間拡張の4要素

substitution) や、他人の感覚を伝送することも含まれる。

認知の拡張 は、われわれが何かを理解したり習得したりするプロセスそのものを拡張するものである。体外離脱視点を人工的に提供することで、スポーツなどの技能習得能力そのものを向上させる研究などがある。

いうまでもなく、これらの拡張技術は独立したものとは限らず、複合的に組み合わせること

により大きな相乗効果をうみだす。たとえば、自己を外部から見る視点をドローンなどで与えることは存在の拡張であると同時に、外部視点で技能習得能力を拡張しているという意味で認知の拡張でもある。他にも、遠隔地にいる熟練者がテレプレゼンスで練習者の身体感覚を共有し（存在の拡張，知覚の拡張），練習者の技能習得能力を向上させる（身体の拡張，認知の拡張）などが考えられる。

6 Internet of Abilities : 能力のネットワークによる人間拡張

人間拡張の実践として、筆者らは「IoA (Internet of Abilities)」と呼ぶ概念を提唱している。ネットワークを介して人々やロボットがそれぞれの「能力 (Abilities)」を結合し、相互に拡張し合う。今までにない用途の領域を切

り開こうという構想である (Fig. 3)。

ネットワークを通じて能力をやり取りできるようになれば、さまざまな応用が可能になる (Fig. 3)。例えば、体操選手や冒険家の体験を受け取り、自分では想像もできなかった感覚を

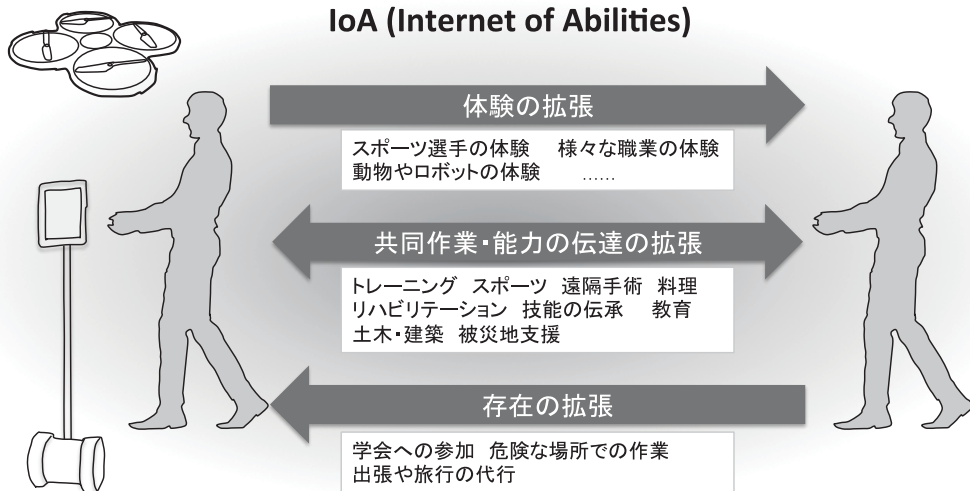


Fig. 3: IoA (Internet of Abilities) による人間能力の拡張

味わうことができる（体験の拡張）。あるいは遠隔地にいる自分の分身を通して、いながらにして旅行を楽しんだり、出張を済ませたりすることも可能だ（存在の拡張）。被災地にいる作業員と遠隔地にいる専門家が感覚を共有しながら復旧作業を進めたり、療法士の視点で自分を外から見る、あるいは療法士に自分の感覚に入り込んでもらって、リハビリの効果を高めたりもできるだろう。ベテランやプロフェッショナルの技能をデジタル化して、効率的に継承することも可能になるかもしれない（学習の拡張）。相互接続する関係は人間と機械、人間と人間、その複合型など多様な可能性がある。

空間の制約を超えて作業を行うことへの支援は多くの波及効果を生む重要な社会基盤技術である。従来、テレプレゼンスあるいはテレイグジスタンスという名称で多くの研究がなされてきた。これらの研究は、典型的にはヒューマノ

イド型のロボットを人間の「スレーブ」として位置づけ、利用者の動作を忠実に伝送再現し、ヒューマノイドに装備された画像や音響などのセンサー情報を利用者側に伝達することで、利用者があたかも遠隔地にいるような没入感と遠隔作業能力の提供を試みていた。しかし、ヒューマノイドロボットの現実世界での移動能力を人間と同等にするには多くの技術的課題があり、ロボットを人間のスレーブとすること自体がまだ完全には達成されていない。

一方、その制約を緩和して、人間とロボットはそれぞれに機能や特質が異なることを積極的に認め、単なるスレーブではなく相補的な関係を築くことがより発展性があると考えられる。その発想の延長には、人間を他の人間と接続するという、従来のテレプレゼンスでは想定していなかった構成も含まれる。

6. 1 ジャックイン

IoA の要素技術として筆者らが進めているのがジャックイン/ジャックアウトとよぶプロジェクトである。ジャックインは、元々はSF作家の William Gibson 氏が1984年に著したSF小説「Neuromancer」²³⁾で、人間が電腦空間に全感覚的に没入することを指す用語だった。筆者はこの用語を遠隔地の人間やロボット

への接続も含む概念として拡張して使っている。人間が、遠隔地のロボットや他の人間の感覚に入り込むことをジャックイン、自分から飛び出て体外離脱の視点を持つことをジャックアウトと呼ぶ (Fig. 4)。

この発想に基づいて作成したシステムの例が「Flying Head」²⁵⁾である (Fig. 5)。このシス

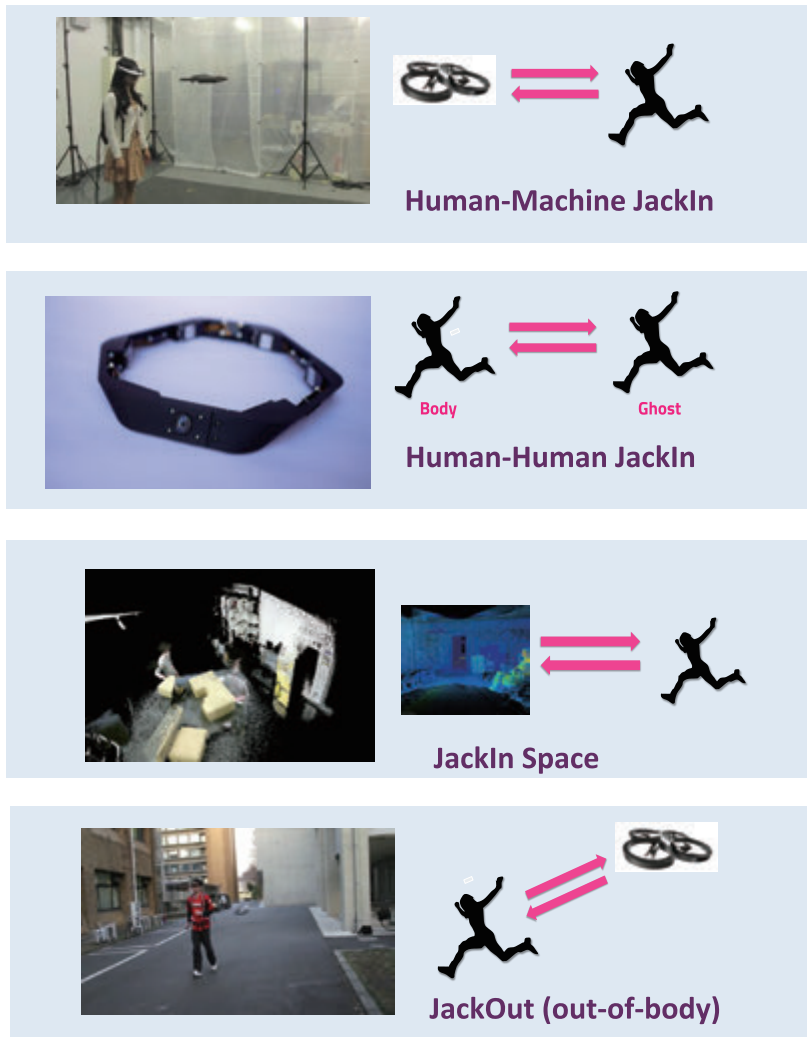


Fig. 4: JackIn の諸形態



Fig. 5: ドローンと人間を結合する：FlyingHead はドローンが搭載するカメラの映像をヘッドマウンテッドディスプレイに投影し、利用者の頭の動きに追従してドローンが動く。²⁵⁾

テムでは、人間がドローンに「ジャックイン」する。ドローンはユーザーの体や頭の動きと連動して動作し、ドローンの搭載したカメラの映像を頭部搭載型ディスプレイ（HMD）で観測する。このシステムを使用すると、ユーザーは自分がドローンの視点に、いわば乗り移っていることを次第に理解する。そして、ドローンの操作方法を身体感覚として覚えていく。

ドローンは人間とは異なる「飛翔能力」を持つので、単純に人間の動作をコピーするだけで

はない効果を生み出すことができる。一方、ドローンに完全な自律性を組み込むよりも、人間の大局的な判断能力を結合することで、より頑強に空間を認識し行動することができる。

このシステムを応用すれば、例えばユーザーの動きを何倍にも拡大して動作するドローンや、上空で活動するドローンに人を接続できる。ネットワークを介してドローンとつながることで、遠隔地に移動したり、空を飛んだりする能力を人に与えられる。

6. 2 人間と人間を接続するジャックイン

上記のジャックインの発想は、人間と人間の接続にも拡大して考えることができる。もし、人間の感覚や体験をできるだけ忠実に他人に伝送できれば、体験のネットワーク上での交換が可能になる。これを人間-人間ジャックインと呼ぶ。特別な体験をしている状況をネットワー

ク上で他人と共有したり、ある作業をしているときに、エキスパートが状況を共有して指示をしてくれるような構成を想定している。ここで、現場で作業している人をボディ、遠隔地からその体験を共有したり指示を与える人をゴーストと呼ぶ。「ゴーストがボディの体験にジャッ

クインする」という表現を使う。ゴーストが人間ではなく AI である可能性もある。

こうした用途を想定して開発したシステムが JackIn Head^{27), 37)} である。JackIn Head では、ボディは頭部周囲 360° の全天球映像を撮影で

きるカメラを頭に装着する (Fig. 6)。ゴーストは HMD や画面を介してボディの体験を共有する。その際、画像スタビライゼーション技術を利用し、全天球映像からは装着者の頭の回転による画像揺れが取り除かれる。ボディが頭を回



Fig. 6: JackIn Head: 頭部装着型全周囲画像取得による人間—人間接続^{27), 37)}

転させてもゴーストの観る映像は安定している。HMD をつけた状態で上下左右に頭を向けると、その方向の映像を見ることができる。全天球映像を利用しているため、ゴーストはボディの頭の方向に縛られずに自由に空間を見渡すことができる。

JackIn Head では、ボディとゴーストは音声

6. 3 IoA による人間拡張

このような発想を、さまざまな機能を備えるロボットや、多種多様な能力を持つ人々との間に拡張したのが IoA (Internet of Abilities) である。

IoA が想定するのは、空間の制約を超えた能力のやり取りだけではない。間にネットワークやコンピューティングを介在させることで、時間を超えた能力のやり取りも可能になる。つまり、IoA は時間や空間の制約を超えて人やロボットが能力を持ち寄ることで、現実世界の諸問題に対処する人間の能力を最大限に拡張するシステムと言える。ネットワークを介して異なる専門能力が結集すれば、一人の人間では実現

6. 4 JackIn Space: 他者へのジャックインとジャックアウト

ジャックインの発展形として、離れた場所にいる人やロボット、空間の間で視覚や聴覚の情報をやり取りすることで、共同作業を実現するシステムが JackIn Space である。

専門家が遠隔地で能力を発揮するために第一に必要なのが、その場にいる体である。遠隔地にいる専門家は、ネットワークを通じて作業の現場にいる人やロボットに乗り移る(ジャックイン)。ボディにジャックインした

により会話し、ボディに依頼してゴーストの行きたい方向に歩いてもらうといったことも可能である。遠隔地にいる人と、ともに行動をしている気分を味わえる。また、例えば体操選手の視界の映像を受け取り、大車輪などの大技をしている感覚など、通常では経験できない特殊体験を共有することができる (Fig. 6)。

がかなわなかった多様な活動や問題解決が可能になるはずだ。アリやハチなどの昆虫は、個体としての能力はさほど高くなくとも集団全体としては驚くほどの能力を発揮する。これは超個体 (superorganism) と呼ばれているが、IoA の先にあるのは人間の超個体化かもしれない。

さまざまな物体をインターネットに繋いで、そこから情報を吸い上げて活用するシステム全般が IoT (Internet of Things) だとすると、IoA は IoT の発展形態と言えるかもしれない。情報を獲得する対象や、得られた情報を基にサービスを提供する相手が人間にまで拡張されているといえる。

ゴーストが、ボディの視点を共有し、音声などによってボディに指示を出して作業するシナリオを想定している。

JackIn Space システムの特徴は、ボディから「ジャックアウト」する機能を設けたことである。ゴーストが現場の状況を的確に把握するためには、一人のボディにジャックインしたままだと不十分な場合が多い。ボディの動きに縛られて、自分の思うように現場の状態を見られな



Fig. 7: ボディの視覚をゴーストに伝達：ボディは魚眼カメラと赤外線反射マーカーが付いたヘッドセットを装着する。ボディからの一人称視点画像・距離センシングによって構築された3人称視点（自由視点）映像は、ゴーストを取り囲むように配置された3面の大画面（右）に映し出される。³⁰⁾

いからである。

これを補うには、複数のボディに自由自在にジャックインしたり、自分の意志で空間内を動き回って状況を見渡す機能が有用だ。これを提供するのがジャックアウトの機能である。ゴーストはボディを抜け出して（ジャックアウト）、現場の3次元空間内の任意の視点から周囲を観察したり、別のボディのいる位置までスムーズに視点を移動して、そのボディにジャックイン

7 存在感の拡張

ボディとしてロボットを使って、遠隔地の会議に参加したりする、いわゆるテレプレゼンスは一部が既に実用段階に入っている。最近の学会では、車輪で移動し、カメラとディスプレイを通して相手と会話ができるテレプレゼンスロボットが利用され始めている。ロボットが接続して遠隔から参加し、会場の参加者と議論した

したりできる (Fig. 7)。

ジャックアウトしたゴーストは、現場の3次元空間内の任意の点から任意の方向の映像を見ることが可能になる。これを実現するには、現場の実空間を複数の距離画像センサー（マイクロソフト Kinect v2）により実時間で取得し、三次元の点の集合（ポイントクラウド）として保持している (Fig. 8)。

り、時には発表者として演台に立つこともある。

これに対して筆者は、人間の代理人を通してテレプレゼンスを実現する手法「Chameleon Mask」³⁶⁾を開発している。例えば学会の学生ボランティアが、遠隔地からの参加者に30分ぐらい自分の体を貸すといった利用形態を想定

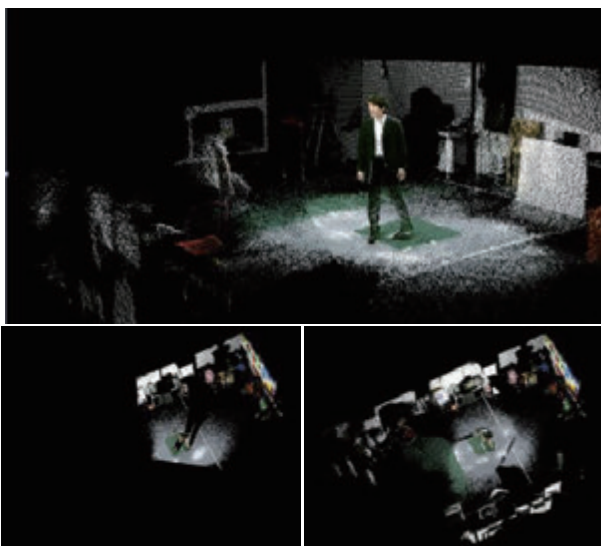


Fig. 8: 三人称視点映像をポイントクラウドで表現：ゴーストがジャックアウトした状態で見る自由視点（三人称視点）映像は，距離画像とRGB画像を同時取得して得られるポイントクラウド（点の集合）として描画される。³⁰⁾



Fig. 9: 他人に体を提供する ChameleonMask: ボディー（右）が頭部に付けたタブレット端末にゴースト（左）の顔を表示して，あたかもゴーストがその場に現れたかのように見せることができる。³⁶⁾

している。既存のテレプレゼンスロボットには段差や障害物で立ち時往生してしまうといった問題もあるが、人がボディになることでこうしたトラブルも避けられる。

試作したシステムでは、ボディが頭に装着したタブレット端末にゴーストの顔を表示して、ゴーストの存在感をアピールする (Fig. 9)。ゴーストは、ボディのカメラからの映像を受け取ったり、ボディの周囲にいる人と会話したりでき

る。加えて、ボディがかぶった HMD に表示する文字や手のジェスチャー、音声によってボディに動作を指示し、代理人として振る舞ってもらう。この HMD はタブレット端末と一体化しており、カメラの映像が表示されるため、ボディも周囲の状況がわかる。カメラの映像にゴーストの手の映像を重ねて表示できるため、たとえば「これを買って」といった指示を出すことが可能である。

8 体外離脱視点による運動感覚の拡張

運動感覚を拡張させるための工学的手法としてはどのようなものが考えられるだろうか。スポーツなどの運動制御を伴う技能を習得するためには、自己の姿勢などを正しく知覚できるようなフィードバックを補強することが重要であることが知られている^{34), 38), 39)}。世阿弥は能楽論書「花鏡」において、演者が自らの身体を離

れた客観的な視点から、自身の演技を見る意識「離見の見」をもつことが重要であると説いている。このように、自己をあたかも体外離脱したような視点から観測することが運動感覚を増強していると考えられることができる (Fig. 10)。

卓越した競技者は外部観測者によらずとも自己の姿勢を関して客観的な視点 (mental

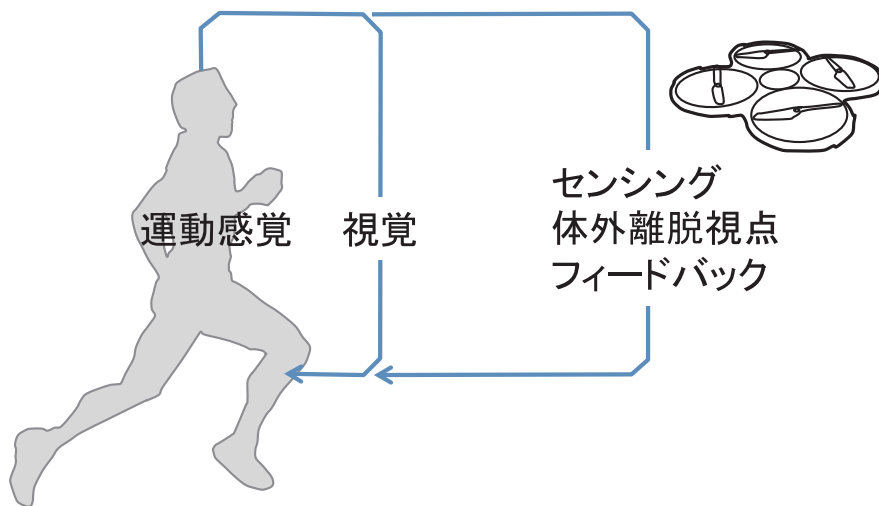


Fig. 10: 体外離脱視点の提供による運動感覚の拡張

imagery) を持つことができると言われてい
る^{20), 41)}。ただし、このような視点が獲得でき
るかどうかは競技者の能力にも依存するので、
とくに技能習得の初期段階では補助的な手段に
よる外部視点の提供が重要になる。

従来、自己を外部から観測する手段として
は、他者（コーチ）による観察と指示、鏡によ
る観察、ビデオによる記録などが用いられてい
たが、それぞれに制約があった。個人でトレ
ニングする場合はつねにコーチが観察してくれ
るとは限らないし、コーチからのフォームに関
する指示も通常は言葉に依存するので両者の間
で正確な理解が共有できないかもしれない。鏡
は正面像の観測に限定されるなど視点の制約が
ある。ビデオなどの記録技術は、競技やトレ
ニング中にリアルタイムで参照することが困難
である。

長谷川らは、スキーマの能力獲得のために、ス
キーマーにロッド（竿）を介してカメラを装着
する手法を提案している¹⁴⁾。ロッドの先端に
カメラが配されており、スキーマの姿勢を背
面上方から撮影する。この映像をゴーグルに組
み込まれたヘッドアップディスプレイ等で観測
することで、スキーマ練習中の自己の姿を体外離
脱的に確認し、修正することができる。太田ら
は、ハンマー投げのトレーニングのために、ハ
ンマーヘッドの加速度を音に変換し、練習者に

リアルタイムで提示するシステムを開発してい
る⁴⁴⁾。これは音による自己像のフィードバッ
クと考えることができる。

このように、人間の姿勢や運動などを何らか
の手段で計測し、それを本人に帰還させること
は、人間の運動感覚を工学的に拡張していると
考えることができる。

筆者らは、ドローンや水中ロボット等によ
り、より高い自由度で競技者本人を外部から観
測する「対外離脱視点」を提供する方式を開発
している。これらのロボットは競技者の周辺を
飛翔ないし航行し、競技者のフォームなどを外
部から観測する視点を提供する。競技者はその
視点の映像を頭部搭載ディスプレイや移動ディ
スプレイによって観測することで、体外離脱視
点を得ることができる。これは、上述の
mental imagery を工学的に実現していると言
うこともできる。さらに、画像解析技術の併用
で、フォーム解析の結果や画像情報からは獲得
できない情報（たとえば筋電や加速度情報）な
どを同時に観測する可能性がある。また、この
手法ではロボットの視点をコーチが共有（前節
で述べたように、ロボットにコーチがジャック
イン）することで、テレプレゼンスによる遠隔
コーチングなどあたらしいコーチング基盤技術
としての利用可能性をもっている。

8. 1 ドローンによる体外離脱視点の提供

Fig. 11 は、自律飛翔型クワッドコプター（ド
ローン）を用い、競技者本人が自身を外から観
測する手段「対外離脱視点」を取得し提供する
システム FlyingSportsAssistant である²⁸⁾。ド

ローンは競技者の周辺を飛翔ないし航行し、競
技者のフォームなどを外部から観測する視点を
提供する。競技者はその視点の映像を頭部搭載
ディスプレイ（HMD）や移動ディスプレイに



Fig. 11: ドローンによる運動時の体外離脱視点の提供
(左: ドローンによる競技者の追跡. 右: 競技者が観測する自己像) ²⁸⁾

よって観測することで、体外離脱視点を得ることができる。

利用しているドローンは4枚羽のクワッドコプターと呼ばれるタイプで、搭載されている傾斜センサーによって機体の傾きを計測し、4枚羽の駆動を制御することで飛翔中の姿勢を保つことができる。また、4枚羽の揚力のバランスを変えることで空中での移動が可能になる。ドローンにはカメラが搭載されており、カメラ映像は無線LANによって地上の制御用コンピュータに送られる。制御用コンピュータでは画像解析処理により、ドローンの前にいる人間を認識し、自動追尾する制御を行っている。競技者は小型の頭部搭載ディスプレイ（HMD）を装着し、ドローンから送信された自身の姿を

確認する。

体外離脱の効果を確認するために、ジョギングと野球の素振りという2種類のトレーニング状況で実験を行った。ジョギングでは、クワッドコプターが画像処理によってランナーを捕捉して追跡する機能を実現している（Fig. 11）。これにより、通常では困難だった移動する競技者に対する対外離脱視点の提供（走りながら自分のフォームを確認する）ことが可能になった。野球の素振りでは、ヘリコプターの視点を練習者に対して任意の場所に位置づけることができる（Fig. 12）。鏡を前にした練習では、練習者の正面の姿を見ることに限定されるが、この方式では練習者のフォームを任意視点で、かつ実時間で確認することができる。

8.2 水泳者のための体外離脱視点の提供

体外離脱視点の提供は飛翔型とどまらない。Swimoid は、水中ロボットによってスイマーに対外離脱視点を提供する（Fig. 13）⁴⁰⁾。水泳は他のスポーツを比較して姿勢の把握が特にむずかしい競技である。コーチからみても水に隠れたフォームを正しく見ることは困難である。

Swimoid は自律型水中ロボットで、泳者の身体位置を認識し、泳者に追従（伴泳）して泳ぐ機能を持っている。Swimoid の上面には防水性ディスプレイがあり、ロボットが撮影した泳者自身の姿勢を水泳中に確認することができる。さらに、画像解析などの情報技術により、



Fig. 12: 任意視点からのフォーム観測²⁸⁾

映像から泳者の身体だけを出して協調表示する機能などを提供している。フォームの解析を行い、適切な指示情報を提示するなど、鏡を越えた機能の実現も可能であろう。また、プールサイドにいるコーチがロボットに仮想的に入り込んで、水中から泳者に対してコーチングを行うことも可能である。Fig. 13 (右下) は、コーチ

が泳者のフォームを見て、手書きアノテーションでフォームへの指示を行っている例である。対外離脱視点は、競技者に自己を外から見る視点を提供するだけでなく、コーチのような競技者以外の人間が（遠隔地から）競技者のフォームを観察し、指示を与える機能をも含んで考えることができる。

8. 3 BodyCursor: 身体知の体外離脱化

上記のシステムはドローンや水中ロボットにより体外離脱視点を構築し、練習時の姿勢をリアルタイムで練習者自身が観測できるようにするものだった。この発想は広く技能獲得に適用することが可能だと考えている。その際に、目標となる体の動きと、現時点での本人の体の動きの比較が可能になり、差分を強調するなどのフィードバック提示が効果的であると予測して

いる。

BodyCursor は、この発想に基づいた身体形状の外部観測と比較を可能にするシステムである²⁴⁾。利用者はモーションキャプチャスーツを装着し、AR 重畳表示が可能な頭部搭載ディスプレイ（マイクロソフト社 HoloLens15）を被りながら練習を行う。HoloLens には自分の身体形状が骨格として表示される。また、手

本となる身体形状も同時に提示される。利用者は、両者を比較しながら自分の姿勢を修正していく。差分の領域を、視覚だけではなく触覚と

しても感じることができるよう、練習者が複数の触覚アクチュエーターを装着することを検討している。

8. 4 体外離脱視点による運動能力の拡張・発展性

体外離脱視点を提供する顕著な利点は、練習者自身が自由な視点から練習者のフォームを観察する手段を提供することにある。これは従来のコーチが担っていた外部観測者としての役割を一部代替することになるだろう。さらに、フォームはカメラから取得された映像には限定されない。たとえば、画像解析によってフォームの状態を認識し、それを映像に重畳表示したり、過去のフォームと現在のフォームとの差分を強調表示したりといった、単に視点を外に置く以上の情報提供の可能性がある。cybernetic training⁴⁴⁾のように競技者や競技器具に装着

された加速度や筋電などのセンシング情報に基づくトレーニング手法も対外離脱映像に統合して利用する可能性がある。さらに、これらの情報が記録保存されて将来の技能獲得のための資料となることも考えられる。

体外離脱視点の提供は、コーチング支援としての可能性もある。体外離脱視点を提供するロボットの映像情報をコーチも共有することで、あたかもコーチ自身がロボットの中に入り込んだかのような、テレプレゼンス型のコーチングが可能になる。とくに水泳やスキーなど、コーチが競技者のすぐ近くにいることが困難な競技

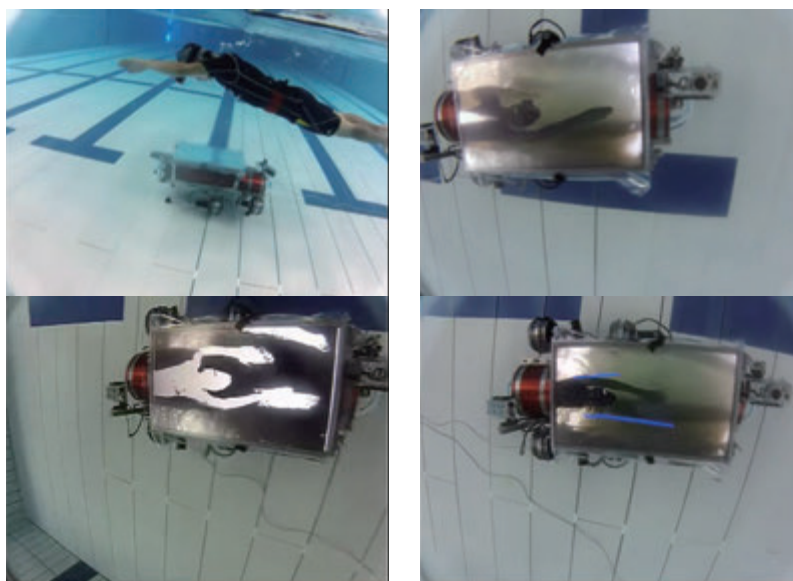


Fig. 13: 体外離脱視点の提供（水泳用伴泳ロボットの例）⁴⁰⁾

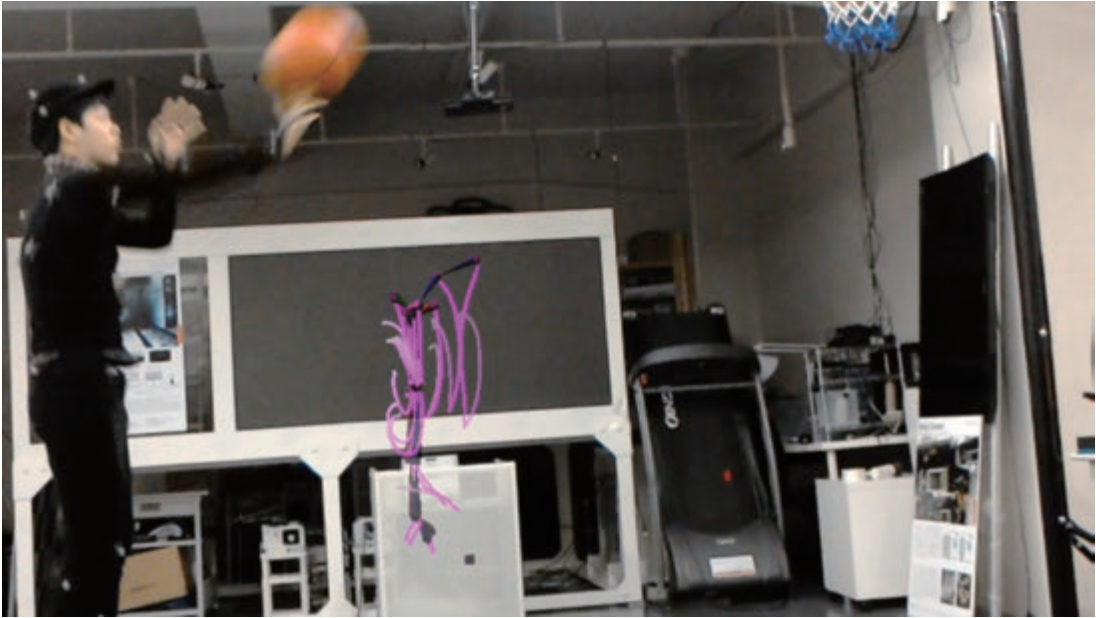


Fig. 14: BodyCursor: 身体形状のAR 重畳による体外離脱視点トレーニング²⁴⁾. 自己の姿勢を客観的に観測しながら技能練習を行うことができる.

では、ロボットの視点を共有できる利便性は高いと考える。

さらに、この考えを発展させれば、コーチは必ずしも競技者と同じ場所にいる必要はない。日本で練習している選手をヨーロッパのコーチが指導するなどの遠隔指導が可能になる。テレプレゼンス・コーチングが一般化すると、高名なコーチの指導を遠隔で仰ぐことができるなど、競技者とコーチとの地理的な隔たりを越えたスポーツトレーニングが可能になると考えている。

体外離脱視点を、そのままの状態で練習者に見せることも有益だが、単純化、変形、強調などの処理を行い、技能獲得により適した情報として提供することも有効であろう。本稿の冒頭で紹介したように、運動感覚を視覚によって誘

導することができるので、フォーム矯正などで理想からずれているフォームをより強調して視覚提示するような方法などが考えられる。

コーチと競技者がテレプレゼンス・ロボットによって接続される場合、将来的にはコーチは人間である必要はなく、一部のコーチング作業はAIに代替されるかもしれないし、両者の融合によるハイブリッドコーチングの可能性もある。Laputらは、クラウドソーシングによる画像監視サービスで、クラウドソーシング（人間）による画像監視のタスク情報を機械学習させて、徐々にコンピュータに代替させる機構を提案している³²⁾。例えば画像内の車の数を数える、というタスクをクラウドソーシングすると、大量の教師データつき画像が得られることにもなる。このデータを機械学習していくことで、ク

ラウドソーシングしている人間の能力を機械に転移させることが試されている。同様の機構により、人間のコーチングによるエキスパート

ズを徐々に機械に移行させることが可能になるかもしれない。

9 人工知能と人間拡張

ここまで述べてきた、技術により人間の能力拡張という発想と対照的に、技術が人間を代替するという考え方もある。たとえば家の掃除は「掃除の能力を増強した人間」を追求するよりも、ロボットにまかせてしまったほうが良いかもしれない。

1960年代の人工知能の勃興期から、人工知能(AI, Artificial Intelligence)と知能拡張(IA, Intelligence Amplification)あるいはIntelligence Augmentation)という論点はあった。最近の急速に発展している深層学習(deep learning)などの人工知能研究の成果により、部分的であれ人間の能力を凌駕する結果が多く報告されるようになり、人間の置換という観点での技術が再び議論されるようになってきた。2016年に、囲碁の世界的プレイヤーであるイ・セドル氏がDeep Mind社のコンピュータ囲碁システムDeep Mindに敗北したことは大きな衝撃だった。未来学者のレイ・カーツワイル(Ray Kurzweil)は、技術の進化が指数的に発展することを指摘し、2045年を「技術的特異点」(The Singularity)として、それ以降は技術の発展速度が人間には把握できなくなる段階に達するだろうと予測している³¹⁾。

人間を凌駕し置換する機械の時代は、一般に考えられているよりも早く到来するかもしれない。英オックスフォード大学のフレイとオズ

ボーンによる調査研究によれば、近い将来、ソフトウェアやロボットなどの機械に置換されると予測される職種は、総業種数の47%にのぼるという²²⁾。工場での部品の組み立てのようにロボットに置換されると予測されやすい業種も含まれるが、銀行の融資担当者など、知的に高度(だと現状では考えられている)職種も多く含まれていることが注目される。

その一方で、機械と人間のどちらが優れているか、という論点を超えた議論も活発になってきている。たとえばチェスの世界では、すでに1990年代にIBMのDeep Blueが当時のチェス世界チャンピオンであったカスパロフに勝利するという結果が出ている。当時すでに、チェスというゲームの存在意義に関わる議論があった。そのカスパロフが提案しているのが、Advanced ChessあるいはCyborg Chessと呼ばれる競技形態である¹⁶⁾。これは、人間対コンピュータではなく、人間とコンピュータからなるチームどうしがチェスの対戦をしようというリーグである。Advanced Chessの結果によると、人間とコンピュータのよい共生関係のチームは、単体のコンピュータよりも、単体の人間よりも強い。通常の将棋や囲碁の世界でも、現在では、棋士がコンピュータ将棋を利用して自己の訓練を行うことは広く行われてい

る。他の分野でも、人工知能を前提とした能力獲得や訓練は今後も発展するだろう。

2016年に策定された米国の国家科学技術会議 (National Science and Technology Council) の人工知能研究開発戦略 (The national artificial intelligence research and development strategic plan) でも、人間と AI の協調が重要視されている。戦略目標の1番目は人工知能研

9.1 Human-AI Integration

AI を自律的または分離した存在とみなすのではなく、AI を人間の一部として考えることができる。その場合、(人工) ニューラルネットワークの初期性能が完璧でない場合であっても、利用者は徐々にその性能を学び、改善することができる。

たとえば図 15 は、超音波画像を用いて、利用者の無発声音声を検出するシステム SottoVoce の例である²⁹⁾。顎の下側に取り付けら

究への長期的投資だが、2番目の重点項目として、「人間と AI の効果的な協調手段の開発 (“Develop effective methods for human-AI collaboration”）」が掲げられているのである¹⁷⁾。このような、人間と人工知能の相乗効果のメカニズムを解明することも、ヒューマンオーグメンテーションの大きな課題となるだろう。

れた超音波プローブによって取得した口腔内の情報から、利用者が声帯を振動させずに発話した発声内容を認識する。超音波画像の列から音響特徴を認識するニューラルネットワークにより発話に相当する音響特徴を推定し、それに基づいて音声を合成する。このようなシステムでは、人間の脳 (organic neural network) と、人工ニューラルネットワーク (artificial neural network) が結合して、相補的に作用する系



Fig. 15: SottoVoce: 深層学習によるサイレントスピーチシステム²⁹⁾

(Human-AI Integration) をなしていると考えられることもできる。このように、脳の機能を拡張・

補完するために人工知能を用いる技術が今後さらに発展すると考えられる。

10 応用展開

本稿で紹介してきた各種のシステムは、一部の機能から段階的に実用化されていくと考えている。「JackIn Head」で実装した、ボディの周囲360度の全地球映像を配信するサービスは比較的早期に実現可能と考えている。

映像配信のような一方方向のサービスと比べて、相手と協調しながら作業する用途は実現までの期間が少し長いかもしれない。遠隔地とつないだりハビリテーションや作業現場への指示などを含んだシステムの普及が考えられる。背景には、腕のいい療法士や現場監督の数が限られていることがある。同様に、さまざまな分野

で高い専門能力を持つ人材の数は一握りであり、希少な能力に最大限活躍してもらうために、IoAの技術が求められるだろう。

例えばハビリテーションなどの場合は、遠隔地にいる療法士が目の前の画面に登場したり、患者にジャックインして患者の目で状態を確認したり、あるいは患者自身がジャックアウトして自分の姿を外から眺めたりといった機能が役に立つ。映像や音声を核にしたIoAシステムの浸透と並行して、触覚でフィードバックを与える機能なども順次追加されていくだろう。

10.1 能力伝承の拡張

本稿で紹介してきたIoAシステムでは、基本的に能力を持つ人がリアルタイムに能力を提供することを想定している。ただし、ネットワーク上でやり取りされる能力は、本来、時間の制約を受けなくてもいいはずである。時間を超えて能力を活用するためには、人の能力を記録し、他者がそれを再現可能にする技術が必要になる。

ここで想定しているのは、主に体を動かす能力である。製造業や土木・建築、農業や飲食店などあらゆる現場での作業のコツや、多岐にわたるスポーツの動作、伝統工芸などの技能、ダンス、護身術、演劇、ボディーランゲージなどを含む。高齢化が進む日本では、これらの分野

で高度な能力を備えた熟練者が、技能を伝えることなく一線から退きつつある。こうした現状に対処するためにも、能力を伝承する技術が重要と考える。

学習などによる知識の獲得も、身体能力とみなして伝承や改善ができるだろう。例えば楽器演奏の能力を記録して他人にも伝承可能になれば、学習の効率は大きく高まり得る。教師がジャックインして観察し、指導することで、新たな指導方法を導ける可能性もある。

現在のインターネットでは、無料で提供される大規模公開オンライン講座(MOOC)など学習の機会が豊富にある。これらは一見、専門家の能力をネット経由で提供しているように見

えるが、知識を受け取る側が自分の身につけな
い限り、能力を伝達できたとは言えない。知的

10. 2 オープンアビリティ

膨大な人数のデータを確保できれば、上達への
道筋や、理想的な動き方など、人手では見つ
からなかった知見を発見できるかもしれない。
こうした知見を、視覚的な表現や触覚フィード
バックに落とし込めれば、JackIn Space のよう
なシステムで効果的なトレーニングを実現でき
る。トレーニング中の動きを AI がリアルタイムにチェックしてアドバイスしたりもできるだ
ろう。

人の動作をアシストするロボットとの連携も
考えられる。優れた動作の知見をロボットの制
御機構に組み込めば、装着者が意識せずともブ
ロ並みの動きを身につけられるだろう。チェス

11 おわりに

以上、ヒューマンオーグメンテーション学の
概要と現状について概観した。SF 作家であり
科学者でもある A.C. クラーク (A.C. Clarke)
は、著書「未来のプロファイル (Profiles of
the Future)」の中で、「人間が道具を発明した
という古い考えは真実の半面でしかなく、道具
が人間を発明した、というほうがより正確であ
ろう」と述べている¹⁹⁾。人間は技術を生み出
すと同時に、生み出した技術によって人間のあ
りかたが変化し、人間自身が再定義されてい
く。ヒューマンオーグメンテーション学は、ま

活動に関わる技能の研究は、学習の効果を促進
できると考えている。

や将棋のように、コンピュータがアシストする
球技などが想定できる。このように人間の能力
を拡張する方向で活用も、IoA やそれに接続す
る AI の有意義な応用である。

能力をデジタル化し、共有可能な形で表現で
きるようになれば、能力のオープンソース化が
進むと見ている。オープンソースソフトウェア
と同様に、能力の記録、再利用や編集が進み、
より良い能力が次々に生まれていくだろう。こ
れを我々は「オープンアビリティ」と呼んでい
る。オープンアビリティにより、優れた能力を
人類の共通財産としていくことが可能ではない
かと考えている。

さにテクノロジーによって再定義される人間像
を追求する学問領域といえるだろう。

最後に、液晶技術は人間拡張のための重要な
構成要素であることを強調しておきたい。VR
や AR で活用されている頭部搭載ディスプレイ
は視覚の拡張と密接な関係があり、液晶を始め
とするディスプレイ技術の進化にともなって性
能も向上してきた。それにとどまらず、液晶技
術の展開先としての人間拡張に大きな可能性を
感じている。

参考文献

- [1] <http://www.dougenelbart.org/firsts/dougs-1968-demo.html>.
- [2] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=4968>.
- [3] <http://www.ah2017.com>.
- [4] <http://www.cyathlon.ethz.ch>.
- [5] <http://superhuman-sports.org>.
- [6] <http://utssi.c.u-tokyo.ac.jp>.
- [7] <https://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2015-FR-04.html>.
- [8] http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/29/03/attach/1383131.htm.
- [9] <http://www.springer.com/engineering/computational+intelligence+and+complexity/journal/41133>.
- [10] <http://ieeexplore.ieee.org/document/7842855>.
- [11] <https://www.computer.org/pervasive-computing/2017/02/16/augmenting-humans-call-for-papers/>.
- [12] <https://www.facebook.com/humanaugmentation.jp>.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Search_T_V_series.
- [14] <http://haselab.net/hase/ski/ski.php>.
- [15] <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>.
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Chess.
- [17] https://www.nitrd.gov/PUBS/national_ai_rd_strategic_plan.pdf.
- [18] Vannevar Bush. As we may think. *The Atlantic Monthly*, 176 (1) :101–108, 1945.
- [19] Arthur C. Clarke. *Profiles Of The Future*. Littlehampton Book Services Ltd., 1962.
- [20] J. E. Driskell, C. Copper, and A. Moran. Does mental practice enhance performance? *Journal of Applied Psychology*, 79:481–492, 1994.
- [21] D.C. Engelbart. Augmeting human intellect: a conceptual framework. SRI, 1962.
- [22] Carl Benedikt Frey and Michael A Osborne. The future of employment: how sus-ceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, pages 254–280, 2017.
- [23] William Gibson. *Neuromancer*. Ace Science Fiction, Canada, 1984. (邦訳: ウィリアム・ギブソン著 黒丸尚訳、ニューロマンサー、ハヤカワ文庫 SF、1986) .
- [24] Natsuki Hamanishi and Jun Rekimoto. Body cursor: Supporting sports training with the out-of-body sence. In *ACM CHI 2017 workshop on A*, 2017.
- [25] Keita Higuchi and Jun Rekimoto. Flying head: A head motion synchronization mechanism for unmanned aerial vehicle control. In *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '13, pages 2029–2038, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [26] Robert Hooke. *Micrographia: or, Some physiological descriptions of minute bodies made by magnifying glasses*. J. Martyn and J. Allestry, 1665.
- [27] Shunichi Kasahara, Shohei Nagai, and Jun Rekimoto. Jackin head: Immersive visual telepresence system with omnidirectional wearable camera. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23 (3) :1222–1234, March 2017.
- [28] Tetsuro Shimada Keita Higuchi and Flying Sports Assistant: External Visual Im-agery Representation for Sports Training Jun Rekimoto. In *The 2nd International Conference on Augmented Human (AH 2011)* , pages 7:1–7:4, 2011.
- [29] Naoki Kimura, Michinari Kono, and Jun Rekimoto. Sottovoce: An ultrasound imaging-based silent speech interaction using deep neural networks. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, page 1–11, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [30] Ryohei Komiyama, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Jackin space: Designing a seamless transition between first and third person view for effective telepresence col-laborations. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, pages 14:1–14:9. ACM, 2017.
- [31] Ray Kurzweil. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology* (邦題: シングularityは近い—人類が生命を超越するとき). Viking, 2006.

- [32] Gierad Laput, Walter S. Lasecki, Jason Wiese, Robert Xiao, Jeffrey P. Bigham, and Chris Harrison. Zensors: Adaptive, rapidly deployable, human-intelligent sensor feeds. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pages 1935–1944, 2015.
- [33] J.C.R. Licklider. Man-computer symbiosis. *IRE Trans. on Human Factors in Elec-tronics*, pages 4–11, 1960.
- [34] K. A. Martin, S. E. Mortitz, and C. R. Hall. Imagery use in sport: a literature review and applied model. *The Sport Psychologist*, 13 (3) :245–268, 1999.
- [35] Marvin Minsky. Telepresence. *OMNI*, (July) :45–51, 1980.
- [36] Kana Misawa and Jun Rekimoto. Wearing another’s personality: A human-surrogate system with a telepresence face. In *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '15, pages 125–132, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [37] Shohei Nagai, Shunichi Kasahara, and Jun Rekimoto. Livesphere: Sharing the surrounding visual environment for immersive experience in remote collaboration. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pages 113–116. ACM, 2015.
- [38] Vindras Philippe and Viviani Paolo. Frames of reference and control parameters in visuomanual pointing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24 (2) :569, 1998.
- [39] Amanda M. Ryamal and Diane M. Ste-Marie. Does self-modeling affect imagery ability or vividness? *Journal of Imagery Research in Sport and Physical Activity*, 4 (1), 1999.
- [40] Yu Ukai and Jun Rekimoto. Swimoid: A swim support system using an underwater buddy robot. In *4th International Conference on Augmented Human*, pages 170–177, 2013.
- [41] Alison White and Lew Hardy. An in-depth analysis of the uses of imagery by high-level slalom canoeists and artistic gymnasts. *The Sport Psychologist*, 1998.
- [42] マーシャル・マクルーハン、栗原裕・河本仲聖訳。メディア論 - 人間拡張の諸相 (原題 : *Understanding Media: the Extensions of Man*)。みずず書房, 1987.
- [43] ヤーコブ・フォン・ユクスキュル、ゲオルグ・クリサート、日高敏隆訳。生物から見た世界。岩波文庫, 2005.
- [44] 太田憲, 梅垣浩二, and 室伏広治。小型センサを用いたハンマー投のトレーニングサイバネティック・トレーニングを目指して。 *JSEA 機関誌「スポーツ工学」第4号*, 2009.



暦本 純一 (れきもと・じゅんいち)

[専門] Human-Computer Interaction, Human Augmentation, Internet of Abilities (IoA) , Human-AI Integration
 [主たる著書・論文]
 ・暦本純一(編)「オーグメンテッド・ヒューマン」AIと人体科学の融合による人機一体、究極のIFが創る未来,2018.
 ・Jun Rekimoto, SmartSkin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces, ACM CHI 2002, pp.113-120, 2002.
 ・Jun Rekimoto, Homo Cyberneticus: The Era of Human-AI Integration, ACM UIST 2019 visions, arXiv:1911.02637, 2019
 [所属] 東京大学大学院情報学環、ソニーコンピュータサイエンス研究所
 [所属学会] ACM, 情報処理学会

The Prospect for Human Augmentation Technologies

Jun Rekimoto*

Technology for expanding human capabilities is progressing rapidly. Recently, academic areas integrally pursuing these technologies have been referred to as “Human-Augmentation” or “Augmented Human” . In addition to intellectual abilities, subjects of human-augmentation include physical abilities and existence of humans. Not only will we further strengthen our normal human capabilities, but also the ability prosthesis and ability recovery of people with disabilities and elderly are also important areas of human augmentation. Related technologies and research areas include VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality), HCI (Human-Computer Interaction), wearable electronics, telepresence · teleexistence, cyborg, robotics, artificial intelligence, sports science, rehabilitation, biomechanics, prosthesis / artificial prosthesis technologies, wearable computing, implantable computing, Internet of Things (IoT), sensory substitution, sensory cross-modality, brain-machine interface, cognitive science, and more. Its application area also covers a wide range of fields such as collaborative work support, remote communication, sports training, rehabilitation, medical, education, entertainment, and media content. Human augmentation is an advanced and highly interdisciplinary research field that crosses these areas. The extreme state of a state in which a person is riding a horse is called "the unity of rider and horse." In that state, the boundary between humans and horses becomes ambiguous, and human ability and horse's ability are all blended. Similarly, the ultimate form of human augmentation can be said to be "the unity of human and technologies". In this regard, technology is not conflicting with humans but fuses naturally with human capabilities. Due to its synergistic effect, the performance which can not be obtained by either machine or human will be exhibited. As human augmentation becomes generalized, the structure of society as a whole will change, as well as how to use technology, how people work and how to interact. This article outlines the area of human augmentation research which can expect such multifaceted ripple effect.

* The University of Tokyo & Sony Computer Science Laboratories, Inc.

Key Words : Human-augmentation, Augmented Human, Human-Computer Interaction, Virtual Reality, Augmented Reality, Telepresence