人間拡張コンソーシアム白書

～人間拡張技術が拓く未来のシナリオ～

人間拡張コンソーシアム

2025年10月（1.0版）

Copyright © 2025 人間拡張コンソーシアム All Rights Reserved.

目次

1. はじめに 3

1.1 白書の目的と全体の構成 4

2. 用語の定義 5

3. 人間拡張の概要 6

3.1 人間拡張とは 6
3.2 ユースケース 7
3.3 アーキテクチャ 10
3.3.1 構成要素・動作例 11
3.3.2 インタフェース・データ 14
3.3.3 プラットフォーム 15
3.3.4 デバイス 16
3.3.5 クラウドアプリケーション 18
3.3.6 通信ネットワーク 19

4. デバイス 21

4.1 知覚・認知の拡張 21
4.1.1 京セラ株式会社 21
4.2 身体能力・認知の拡張 22
4.2.1 広島大学大学院 教授 栗田雄一 22
4.2.2 ミズノ株式会社 24
4.3 存在・認知の拡張 27
4.3.1 株式会社本田技術研究所 27
4.3.2 H2L 株式会社 29
4.3.3 トヨタ自動車株式会社 未来創生センター 32
4.4 部品・部素材 37
4.4.1 住友電気工業株式会社 37

5. クラウドアプリケーション 40

5.1 認知の拡張 40
5.1.1 TOPPAN 株式会社 40
5.2 身体能力・存在の拡張 42
5.2.1 H2L 株式会社 42

6. プラットフォーム（人間拡張基盤） 44

6.1 システム構成 44
6.2 機能 44
6.3 マイルストーン 46

7. 標準化 47

7.1 既存団体の取組み 47
7.2 本コンソーシアムの活動方針 49

8. ELSI 51

9. 今後の課題 52

10. おわりに 53

引用文献 54

筆者一覧 58

改版履歴 59

1. はじめに

スマートフォンやウェアラブルデバイスの普及、ロボット技術の進歩、仮想現実（VR）・拡張現実（AR）、人工知能（AI）の実用化、さらには高速かつ大容量の通信ネットワークの整備など、情報通信技術は急速に発展している。これらの変化は、私たちの日々の暮らしや仕事、そして社会全体のあり方を根本から変革しつつある。そうした潮流の中で、近年注目を集めているのが「人間拡張（Human Augmentation）」である。人間拡張とは、情報通信技術の力によって、人間が本来持つ身体、認知、知覚能力を補完・拡張したり、人間の存在を時間的・空間的な制約を超越して拡張したりすることで、より豊かで充実した生活や社会の実現を目指す概念である。

人間拡張への関心が高まっている背景には、社会的要因と技術的要因の双方がある。社会的要因としては、現代社会が、少子高齢化に伴う労働力不足、伝統技能の衰退、地方の過疎化といった課題に直面していることが挙げられる。人間拡張は、これらの社会課題に対する解決策となる可能性を秘めている。例えば、身体能力を補助・強化するパワーアシストスーツなどの装着型デバイスは、高齢者や障がいのある人々の労働参加や生活の質（QOL）の向上を支援できる。また、ロボット技術と超低遅延通信を組み合わせた遠隔操作により、専門知識や高度なスキルを持つ人材が居住地に関わらず専門性を発揮できる。さらに、熟練職人や技能者の高度な技術や暗黙知をセンサによりデータとして記録し、VR や AR で再現すれば、伝統技能を効果的に次世代へ継承できる可能性がある。このように、人間拡張は、現代社会が直面する様々な課題に対して有効な解決策となるポテンシャルを有している。

また、技術的な要因としては、AI、ロボティクス、AR や VR、5G、6G といった先端技術の飛躍的な進化が挙げられる。低遅延かつ大容量のデータ通信を可能にする5G Advanced や 6G、オール光ネットワーク（APN[1]）などの次世代通信技術は、遠隔地や仮想空間上の出来事をあたかも目の前にあるかのような臨場感で体感できるリアルタイム・インタラクションを実現するために不可欠な基盤である。AI の高度なデータ解析と学習能力は、人間の認知能力を飛躍的に拡張し、より迅速かつ正確な意思決定を支援する。また、小型化・軽量化が進む高機能センサやアクチュエータ、長時間駆動を可能にするバッテリ技術の発展は、ウェアラブルデバイスやロボットの実用化を加速させている。これら多様な技術革新により、人間拡張は抽象的な概念にとどまらず、具体的な製品やサービスとして現実に提供される段階へと移行しつつある。

こうした社会的・技術的要因を背景とした人間拡張への関心の高まりを受け、2024 年 12 月に内閣府主導の国家プロジェクトである戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期の「バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」[2]の一環として、人間拡張コンソーシアム（以下、本コンソーシアム、https://human-aug.com/）が発足した。本コンソーシアムは、人間拡張の社会実装の推進とエコシステムの拡大を通じ、社会課題の解決を目的としている。多様な産業分野の企業及び大学・研究機関で研究開発や事業開発に従事する参加者が、業界横断・産官学連携で、ユースケースの

[1] All Photonics Network
[2] https://sip3.nedo.go.jp/virtual/

創出、アプリケーション・デバイス・プラットフォームの実証および接続性検証、人間拡張技術の国際標準化、シンポジウムなどによる情報発信といった活動に取り組んでいる。

1.1 白書の目的と全体の構成

本コンソーシアムは、その設立目的である人間拡張の社会実装を加速させるため、この白書を発行した。人間拡張は、多岐にわたる技術要素から構成され、その応用範囲は医療、教育、産業、エンターテイメントなど幅広い分野に及ぶ。このように適用領域が広い概念を社会に実装するためには、社会全体が人間拡張に関して共通の理解をもつことが不可欠である。また、人間拡張がもたらす生活や社会の変化について、その便益とリスクを客観的に示しながら丁寧に対話を進めていく必要がある。本白書は、こうした理解促進と対話の一助となることを目的としている。想定読者は人間拡張による社会課題の解決に興味を持つ学生、社会人である。

本書の構成は次のとおりである。まず、2 章で用語の定義を行ったあと、3 章で人間拡張の概念を定義し、暮らしや産業にもたらす変化を、様々なユースケースを通じて示すとともに、それらを支える技術全体を俯瞰する。続いて 4 章から 6 章では、身体能力、知覚能力、認知能力、存在の拡張といった視点から、人間拡張を実現するデバイス、クラウドアプリケーション、プラットフォームなどの要素について、本コンソーシアムの会員による取組みを紹介する。さらに、7 章ではエコシステム拡大に不可欠な技術や規格の国際標準化を取り上げる。既存の国際標準化団体の取り組みに加え、本コンソーシアムにおける標準化活動の方針についても紹介する。8 章では社会的受容を実現する上で重要な倫理的・法的・社会的課題（ELSI）について論じる。最後に、今後の課題と展望を掲示する。

なお、本書はリビングドキュメントであり、コンソーシアム内での検討や他のステークホルダーとの議論結果を踏まえ、随時改訂する予定である。

2. 用語の定義

本書で用いる主な用語とその定義を表 2-1 に示す。

表 2-1 用語の定義

用語	定義
ユースケース	・ 人間拡張技術(3 章参照)によって実現され、社会課題の解決につながる一連のシナリオ。
システム	・ 互いに連携することでユースケースを実現するデバイス、プラットフォーム、アプリケーション等の組み合わせ。
ユーザ	・ システムとインタラクションする人間。 ・ ユーザには、ユースケースにより提供される便益を直接享受するエンドユーザと、システムの全体または一部を管理する管理者ユーザが含まれる。
デバイス	・ 現実世界の状況の把握(環境やモノの状態、ヒトの動作・状態のセンシング等)や、現実世界の対象への働きかけ(ロボットによる働きかけ、アクチュエータ、外骨格スーツによる人の動作のサポート等)を行う装置。
デバイスアプリケーション	・ デバイスにインストールされ、ユースケースに合わせて、デバイスの動作(センシングやアクチュエーションなど)、ユーザインタフェースを制御するソフトウェア。
SDK	・ デバイスアプリケーションに対して共通機能を提供するライブラリやアプリケーション開発のためのツール、文書などを一式まとめたもの。
クラウドアプリケーション	・ サービスやコンテンツをクラウドから提供するソフトウェア。 ・ 本書ではメタバース(3次元空間やオブジェクトやエージェント)やオンラインショッピングサイト、クラウドなどにおけるデータ収集・分析サービスを指す。
プラットフォーム	・ 複数のユースケースに共通する機能を集約し、クラウドで提供するソフトウェア。 ・ 共通機能には、認証、デバイスの管理、ユーザデータ(ボディデータや操作ログ等)の管理、デバイスが送信するセンシング・アクチュエーションデータや操作データの中継、中継時の体格・感覚の個人差吸収などが含まれる。
セッション	・ デバイス同士、またはデバイス-クラウドアプリケーションのペアまたはグループで確立され、リアルタイムなデータ送受信を行う場。 ・ 送受信されるデータにはセンシング・アクチュエーションデータや、遠隔操作の指示・応答データ等が含まれる。 ・ セッションはプラットフォームで中継される場合もある。
インタフェース	・ デバイス、プラットフォーム、クラウドアプリケーション、デバイスアプリケーション、SDK やハードウェアの間でやり取りされるメッセージ、データのフォーマットやメッセージ送受信の順序などのルールを定めたもの。 ・ デバイスアプリケーションと SDK の間のインタフェースは特に、API(Application Programing Interface)と呼ぶ。

3. 人間拡張の概要

3.1 人間拡張とは

人間拡張には、現代社会が抱える様々な課題を解決する可能性がある。このため、学術界、産業界、さらには国内外の多様なプレーヤーが研究開発やビジネス化に取り組んでいる。人間拡張には、人間が本来持つ能力を飛躍的に向上させ、従来は不可能であった活動や体験を実現する「拡張」だけでなく、病気や事故、加齢などによって困難が生じたり、失われたりした機能を補う「補完」[3]も含まれる。

今日、人間の能力や存在をどのように拡張・補完するかについて多岐にわたる検討が行われているが、概ね、「身体能力の拡張」、「知覚の拡張」、「認知の拡張」、「存在の拡張」に類型化できる（図 3-1）［1］。

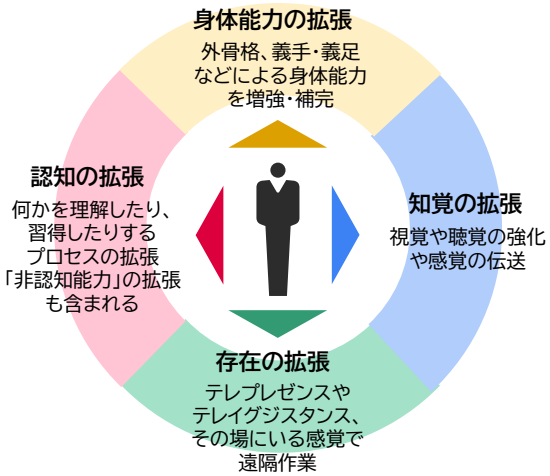


図 3-1 人間拡張の類型

- 身体能力の拡張
  筋力、運動能力、持久力などを人工的に増強することを指す。具体例としては、筋力補助のためのパワードスーツ・アシストスーツ[4]、外骨格型ロボット、義手や義足などの補装具を用いた増強がある。これらは労働人口の減少や、介護・医療現場における身体的負担の増大といった課題に対する有効な解決策となり得る。

- 知覚の拡張
  人間の五感（視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚）や、固有感覚（力覚、自己姿勢感覚など）の感度を高めたり、感覚の情報を仮想空間や遠隔地から伝送し、記録もしくは他の人やモノと共有したりすることを指す。また、視覚や聴覚を補助するデバイスを用いて、視覚や聴覚に困難のある人々の情報取得を支援し、社会参加をさらに促進することなども含まれる。

[3] 厳密には「補綴」（失われた機能を人工物で補う）だが、ここでは分かりやすさのため「補完」とした。
[4] パワードスーツ、アシストスーツはともに人が装着することで身体能力を強化、サポートする外骨格型や衣服型の装置であり、前者はモーターなどの動力源を用いて強力なアシスト力を提供するのに対し、後者は、バネやゴムなどの力学的要素や、空気圧などを利用して、比較的軽微なアシストを行う。

- 認知の拡張
  記憶力、計算能力、思考力、学習能力といった認知機能を補完・強化することを指す。さらに、目標達成に向けた忍耐力や自制力、目標を追い続ける力などの「非認知能力」[5]を拡張することで、人間が理解や習得に至るプロセスそのものを支援することなども含まれる。

- 存在の拡張
  時間や空間の制約を超えて、人間の活動範囲を仮想空間も含めて拡大させることを指す。例えば、遠隔操作型ロボットを用いて遠隔地にある物体をまるでその場にいるかのように感じながら、リアルタイムで操作すること(テレイグジスタンス)や、仮想空間上のアバターを介した他者との交流、ウェアラブル型センサによる個人の能力や経験の記録・共有などが含まれる。

3.2 ユースケース

人間拡張の各類型には多様なユースケースが存在し、幅広い社会課題の有効な解決手段となり得る。表 3-1 から表 3-4 に類型ごとのユースケースの分類と、その概要と具体例、社会課題解決にどう寄与するかを示す。

表 3-1 身体能力の拡張のユースケース

【運動の補助・身体的負荷の軽減】		
	概要	身体運動を補助したり、重いものの持ち上げや長時間の作業による身体的負担を軽減したりする。
	具体例	• パワードスーツやアシストスーツにより、建設現場や物流倉庫で、重い資材の運搬や繰り返しの身体的負担を軽減し、作業効率を向上させる。介護現場で、要介護者の抱き上げや移動を補助し、介護者の肉体的負担を大幅に減らす。 • アスリート向け義足(板バネ型)により、障がいのある人々のスポーツ参加を支援する。手足を動かすことに困難がある患者に対し、脳波や筋電位のセンシングで、ロボット義手や義足の操作を可能にする。
	社会課題の解決	**少子高齢化による労働力不足**に対し、身体能力の制約からこれまで就労が難しかった人々の就労を支援し、**多様な人材のさらなる社会参加を促進**する。また、労働災害の削減や、介護者の負担軽減にも貢献する。
【リハビリ・トレーニングの支援】		
	概要	身体機能の回復を目指すリハビリテーションや、スポーツ選手のトレーニングを支援し、効果を最大化する。
	具体例	• 脳卒中の後遺症により手足に麻痺がある患者に対して、個々の状態に応じて、難易度調整されたリハビリプログラムを提供し、アシストスーツで運動を補助して、効果的な機能回復を促す。 • モーションキャプチャーで選手の動きを精密に分析し、フォームの改善点や強化すべき筋肉部位をフィードバックする。VR環境でのシミュレーショントレーニングやアシストスーツを用いた正しい動きの指導を行う。例えば、ランニングフォームのリアルタイム解析や、ゴルフスイングの理想的な軌道との比較により、選手が自身の動きを客観的に把握し、効率的に改善できる。
	社会課題の解決	高齢化社会でのリハビリテーションの質の向上と効率化を図り、**健康寿命の延伸**に貢献する。 また、プロスポーツ選手のパフォーマンス向上や怪我の予防にも役立ち、**競技力向上に寄与**する。

[5]「①目標の達成、②他者との協働、③感情のコントロールなどに関する能力」[40]で、①忍耐力、自己抑制、目標への情熱、②社交性、敬意、思いやり、③自尊感情、楽観性、自信といった要素が含まれる。

表 3-2 知覚の拡張のユースケース

<table>
<tr><td colspan="3">【経験・感覚の共有・拡張】</td></tr>
<tr><td></td><td>概要</td><td>空間的・時間的制約を越え、他者と同じ場所にいるかのように視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚、さらには感情などの多様な感覚を共有する。また、仮想空間上の体験を視覚、聴覚だけでなく、触覚、嗅覚、味覚も含めて再現する。</td></tr>
<tr><td></td><td>具体例</td><td>【他者との経験・感覚の共有】
• 離れて暮らす家族や友人とのオンライン会話において、触覚を共有することで、握手や肩をたたきあうなど身体的な接触を伴うコミュニケーションを可能にする。
• 旅行中にリアルタイムで視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚を共有することで、他者も旅行先の魅力を深く体験できる。また、これら五感に関するデータを記録・再生することで、旅行後も臨場感を持って体験を振り返ることが可能になる。
• 演奏中のプロ音楽家や試合中のプロアスリートの視覚、聴覚、触覚を観客と共有することで、観客が1人称視点で演奏や試合を体験できる。
【仮想空間での経験・感覚の拡張】
• メタバース上での動物とのふれあいにおいて、鳥が腕にとまった感覚や犬の散歩中にリードを引っ張られる感覚を再現することで、体験価値を向上させる。
• オンラインショッピングで販売されている衣服や工芸品の手触りを手元で確認し、購入判断に役立てる。食品やワインの香り・味を、購入前に嗅覚・味覚再現デバイスで確認する。

 </td></tr>
<tr><td></td><td>社会課題の解決</td><td>地理的な隔たりによる<u>コミュニケーションの希薄化や孤立感を緩和</u>し、家族や友人との絆を深める。また、病気や身体的制約で外出困難な人々が、社会参加や様々な体験を享受できるようにし、<u>社会的包摂の促進と生活の質（QOL）向上に寄与</u>する。さらに、<u>文化交流や異文化理解の促進</u>にもつながる可能性がある。</td></tr>
<tr><td colspan="3">【感覚の強化・補完】</td></tr>
<tr><td></td><td>概要</td><td>視覚や聴覚などの感覚を鋭敏する強化や、高齢化や疾病、障がいなどにより低下した感覚の補完など、人間の知覚能力を向上させる。</td></tr>
<tr><td></td><td>具体例</td><td>【感覚の強化】
• 何かに集中しているときに、病院での呼び出し、空港でのフライト案内、電車の遅延情報など、重要な情報やアナウンスを自動選択し、聞き返すことを可能にする。
• 災害救助やセキュリティの目的で、騒音下での特定の音の強調や、遠隔地の微かな音の感知を可能にする。
• 工場での検査作業の効率化や安全性を向上させるため、視覚を拡張するデバイスを用いる。これにより、暗闇での視認性向上や、肉眼では識別困難な微細な欠陥の検知が可能となる。
【感覚の補完】
• 視覚障がい者向けのスマートグラスが、周囲の物体を認識し、音声で情報を読み上げたり、危険を知らせたりすることで、日常生活の自立を支援する。
• 聴覚障がい者向けの人工内耳や高機能補聴器により、音の知覚を可能にし、コミュニケーションの障壁を低減する。

 </td></tr>
<tr><td></td><td>社会課題の解決</td><td>高齢者や障がいのある人々の<u>社会参加を促進し、QOLを向上</u>させる。また、災害救助や警備、音響技師や地質調査員など特定の職業において、微細音の検知により作業精度の向上や早期の問題発見を支援し、<u>労働時間・工数削減にも貢献</u>する。</td></tr>
</table>

表 3-3 認知の拡張のユースケース

【熟練技術・伝統技能習得の支援】		
	概要	長年の経験と勘に基づく熟練技術や、継承困難な伝統技能の習得を支援し、その存続と発展を図る。
	具体例	• 茶道の指導者やプロの料理人、熟練工の手先の動きや視線をセンサーで計測し、それをVR/AR空間で再現する。学習者に観察・追体験させることで効率的な学習を促す。 • 楽器演奏のトレーニングにおいて、グローブ型の外骨格デバイスを装着させ、デバイスのフィードバックにより、正しい動きへの誘導や不適切な指使いの指摘を行い、短期間での上達を支援する。
	社会課題の解決	**少子高齢化による熟練技術者の減少や、後継者不足による伝統技能の途絶**といった社会課題の解決に貢献する。これにより、**産業競争力の維持・向上や、文化の継承と発展を支援**する。
【学校教育の支援】		
	概要	メタバース上に学習対象を再現することで、座学では困難な直感的な学びを可能にする。デジタルインクにより児童・生徒の学習の進捗・課題を可能にする。
	具体例	• 発電所など学習対象施設の3Dモデルをメタバース空間に忠実に構築し、生徒に施設内を探索させたり、様々な視点から観察させたりすることで、施設の仕組みを直感的に学ぶことを可能にする。 • テストや練習問題をデジタルインクによる手書き学習で取り組ませることで、デジタルインクのタイムラインログから学習時間を把握し、学習時の課題発見や指導の改善につなげる。
	社会課題の解決	児童生徒の**学習効果の向上**、特に**主体的な学びの促進**を可能にする。
【創造性の向上】		
	概要	発想力やアイデア創出を支援し、デザイン、芸術、科学研究など、多様な分野のイノベーションを加速させる。
	具体例	• アートの創作やアイデアの発想で書き留めた際の筆圧、速度、角度、描画時間、描画時の生体情報（例えば脈拍や脳波）を、デジタルペンや生体センサーで記録する。これらのデータをAIで分析することで、創作や発想に有効な関連情報を抽出可能とする。また、創作・発想のプロセスを他者と共有し、フィードバックを得ることで、さらなる創作や発想の創出につなげることを可能にする。
	社会課題の解決	**芸術や文化における新たな表現方法の創出**に貢献する。

表 3-4 存在の拡張のユースケース

<table>
<tr><td colspan="3">【スキルの共有・遠隔作業（テレイグジスタンス）】</td></tr>
<tr><td></td><td>概要</td><td>遠隔地からの専門知識・技術の活用、作業の実施を可能にする。高度なスキルや専門知識が必要な作業や、人が立ち入るのが難しい危険な場所や交通アクセスが限られる場所での/からの作業を可能にする。</td></tr>
<tr><td></td><td>具体例</td><td>【高度なスキルや専門知識が必要な作業】
• 遠隔地のエンジニアがロボットを利用して専門的な機械のメンテナンスや修理を行う。医療関係者がいない場所で、急病人に対し、医師や看護師が遠隔地からロボットで応急処置を行う。
• 遠隔地の熟練外科医が、ロボットアームやVR/ARシステムを介して、遠隔手術や、若手医師への指導を行う。
• プロの料理人や楽器演奏家、茶道の熟達者などが、遠隔からロボットを介して調理、演奏、茶道などの実演を行うことで、地域の住民にスキル体験の機会を提供する。

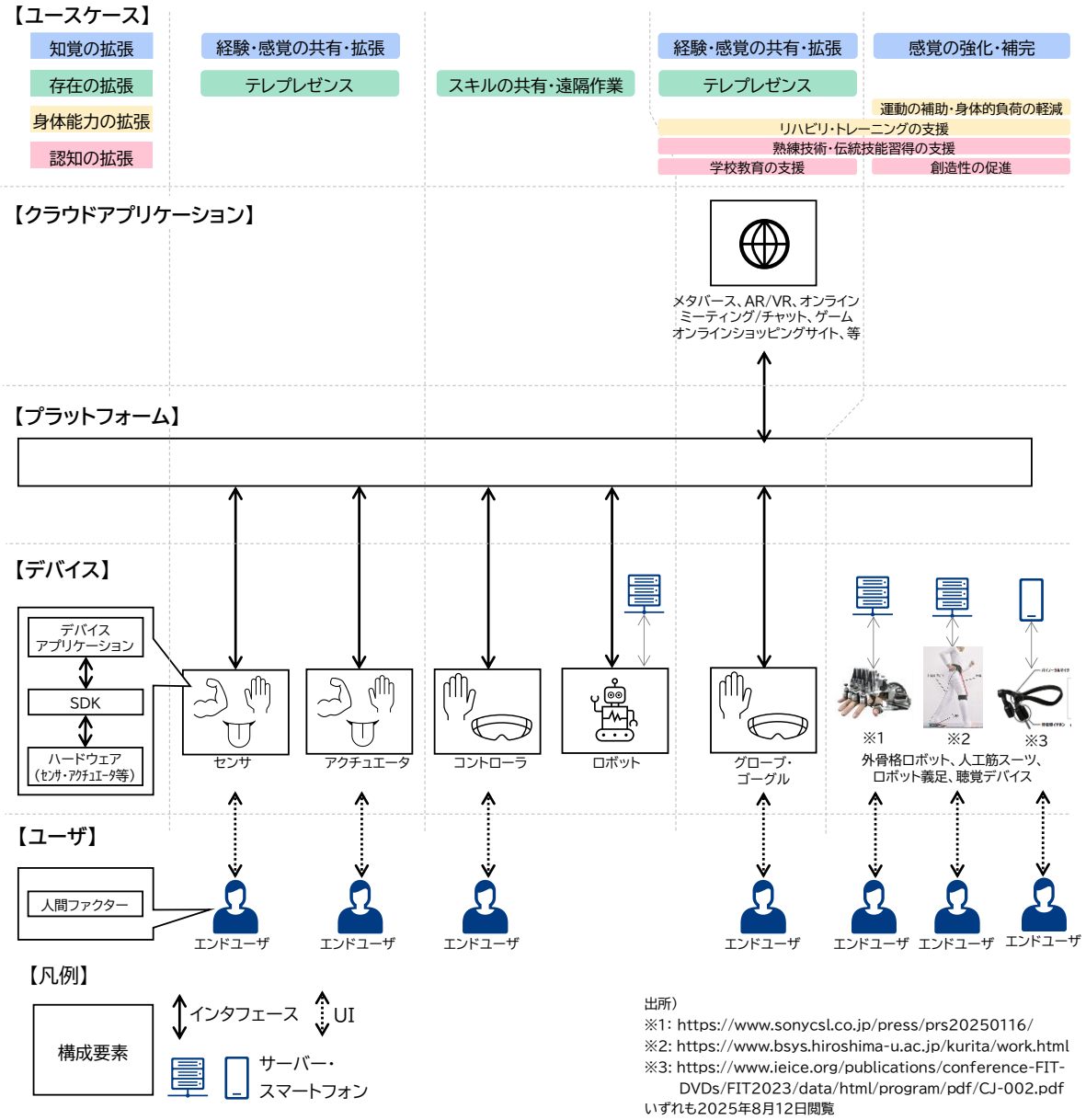
【危険な場所や交通アクセスが限られる場所での/からの作業】
• 洋上風力発電設備や海底ケーブルなどの水中での修理・メンテナンス作業や、月面等宇宙開発設備の修理・メンテナンス作業を、地上から遠隔操作で行う。
• 建設機械の操作や、工場・農場・店舗・介護施設などにおける各種作業（組み立て作業、収穫作業、接客、介護など）を、ロボットを用いて遠隔操作で行う。
 </td></tr>
<tr><td></td><td>社会課題の解決</td><td><u>熟練技術者の高齢化や地域偏在による技術継承</u>問題、特定の<u>専門知識を持つ人材不足</u>などの課題解決に寄与する。地域格差の是正や産業競争力の維持・向上にも貢献する。さらに、危険な作業における人命の安全確保や熟練技術者の減少に対する解決策にも貢献する。</td></tr>
<tr><td colspan="3">【テレプレゼンス】</td></tr>
<tr><td></td><td>概要</td><td>物理的にその場にいなくとも、遠隔地の状況をリアルタイムで知覚し、その場にいるかのように振る舞い、他者とインタラクションすることを可能にする。
※知覚の拡張における「経験・感覚の共有・拡張」と組み合わせて実施されることが想定される。</td></tr>
<tr><td></td><td>具体例</td><td>• オンライン会議や家族とのオンライン通話の臨場感・没入感を高め、遠隔地間でも対面で打合せをしているかのような環境を提供する。
 </td></tr>
<tr><td></td><td>社会課題の解決</td><td>物理的制約や社会的障壁を超えて、誰もが自由に社会参加できる機会を創出する。これにより、<u>社会的孤立の解消、多様な人々との交流促進に寄与</u>する。また、複数人による遠隔地間の協働作業を効率化する。</td></tr>
</table>

3.3 アーキテクチャ

人間拡張の多様なユースケースは、センサ、アクチュエータ、ウェアラブルデバイス、ロボット、VR/AR、通信技術など、多岐にわたる技術の融合によって実現される。本節では、人間拡張の各種ユースケースを実現する手段として、本コンソーシアムが想定する技術的なアーキテクチャと、その構成要素について解説する。

3.3.1　構成要素・動作例

本コンソーシアムが想定するアーキテクチャの全体像を図 3-2 に示す。



出所）
※1: https://www.sonycsl.co.jp/press/prs20250116/
※2: https://www.bsys.hiroshima-u.ac.jp/kurita/work.html
※3: https://www.ieice.org/publications/conference-FIT-DVDs/FIT2023/data/html/program/pdf/CJ-002.pdf
いずれも2025年8月12日閲覧

図 3-2 アーキテクチャの全体像

図に示したアーキテクチャは人間拡張の様々なユースケースに包括的に対応可能な構成を持つ。アーキテクチャの構成要素は次の通りである。

① ユースケースから便益を享受するエンドユーザ
② 複数のユースケースに共通する機能を集約したプラットフォーム
③ サイバー空間上のサービスやコンテンツを提供するクラウドアプリケーション
④ 現実世界の状況把握や働きかけを行うデバイス
⑤ 上記の要素間のインタフェース（ユーザインタフェース（UI）を含む）
⑥ デバイス、プラットフォーム、クラウドアプリケーションがデータ送受信を行う通信ネットワーク

以下では、各構成要素の典型的な動作例を示し、本アーキテクチャが人間拡張のユースケースをどのように実現するかを説明する。

(1) 動作例 1-デバイス間の単方向通信

経験・感覚の共有・拡張のユースケースとして、プロのピアニストの手指の動きを学習者に共有し、ピアノ演奏習得を支援するシナリオを想定する。本シナリオにおける各構成要素の動作例を図 3-3 及び表 3-5 に示す。本シナリオでは、プロのピアニストから学習者へ一方向に手指の動きのデータが送信される。

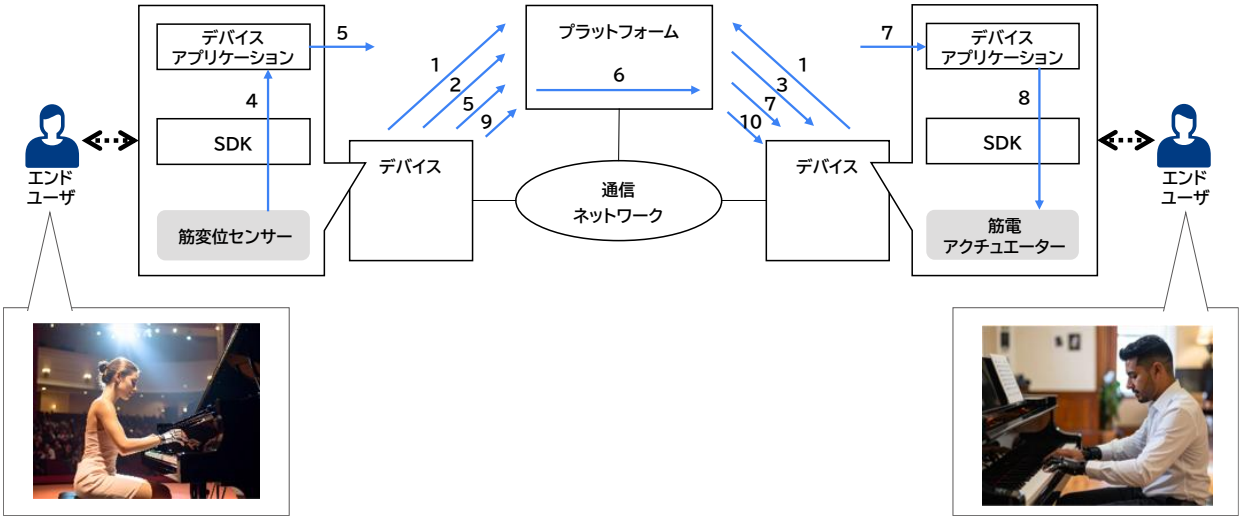


図 3-3 動作例 1 における各構成要素の動作イメージ

表 3-5 動作例 1 における動作内容

No.	動作概要	動作詳細
1	エンドユーザ・デバイスの登録	・ 事前にユーザ情報及びデバイス情報を、プラットフォームへ登録
2-3	セッションの構築	・ 演奏体験を共有する相手を指定し、プラットフォームへセッション開始を要求 ・ プラットフォームは共有相手を発見し、セッション開始要求を転送 ・ 相手側がセッション開始要求を許可することで、セッションを構築
4-5	センシングデータの読み取り、送信	・ 演奏時の筋変位のデータをセンサが読み取り、プラットフォームへ送信
6-7	アクチュエーションデータへの変換、送信	・ プラットフォームにおいて筋変位のデータを、筋電のアクチュエーションデータに変換し、相手側へ送信
8	アクチュエータの駆動	・ プラットフォームから受信したデータを用いて筋電アクチュエータを駆動
9-10	セッションの終了	・ 演奏体験の共有の終了後、セッションを終了

（2） 動作例 2-デバイス間の双方向通信

スキルの共有・遠隔作業（テレイグジスタンス）のユースケースとして、ゴーグルとグローブを装着した医療従事者が遠隔地のロボットを操作し、治療を行うシナリオを想定する。本シナリオにおける各構成要素の動作例を図 3-4 及び表 3-6 に示す。本シナリオでは、医療従事者から手指動作のデータが、ハンドロボット側から映像データがそれぞれ送信され、双方向の通信が行われる。

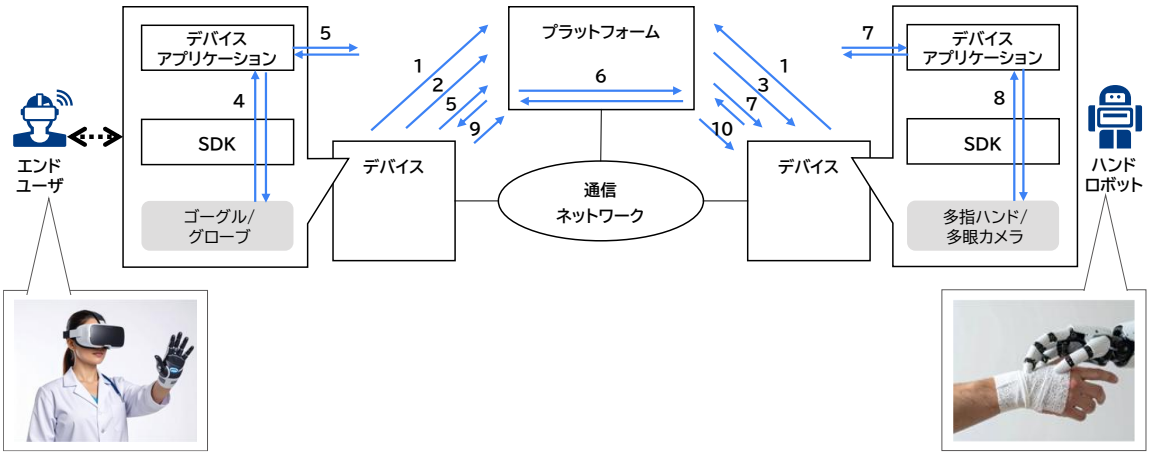


図 3-4 動作例 2 における各構成要素の動作イメージ

表 3-6 動作例 2 における動作内容

No.	動作概要	動作詳細
1	エンドユーザ・デバイスの登録	・ 事前にエンドユーザ及びデバイス（エンドユーザのゴーグル、グローブ、およびハンドロボット）の情報を、プラットフォームへ登録
2-3	セッションの構築	・ 遠隔操作するハンドロボットを指定し、プラットフォームへセッション開始を要求 ・ プラットフォームは操作対象のハンドロボットを発見し、操作権限確認後、セッション開始要求を転送 ・ ハンドロボットがセッション開始要求を受信・応答することで、セッションを構築
4-5	手指動作データの読み取り、送信 映像データの受信、再生	・ エンドユーザのグローブから手指の動作を読み取り、データをプラットフォームへ送信 ・ また、ハンドロボット搭載カメラの映像データをプラットフォームから受信し、ゴーグルで再生
6	手指動作及び映像データの中継	・ プラットフォームは、エンドユーザ、ハンドロボット間で手指動作及び映像データを中継
7-8	ハンドロボットの駆動、カメラ映像データの送信	・ プラットフォームから受信した手指の動作データからエンドユーザの意図を推定し、制御信号を生成、ハンドロボットを駆動 ・ カメラ映像データをプラットフォームへ送信
9-10	セッションの終了	・ 遠隔作業の終了後、セッションを終了

3.3.2 インタフェース・データ

各構成要素の間のインタフェース(IF)の一覧と概要を図 3-5 と表 3-7 に示す。a、b が通信ネットワークを経由する IF、c、d はいずれもデバイス内部の IF であり、それぞれ API とハードウェア(HW) IF である。なお、a、b は現状同じ機能を持つことを想定するが、将来的な拡張を見すえ、別の IF として定義した。

本アーキテクチャにおいてIFを明確に定義する理由の一つは、人間拡張の社会実装やエコシステムの拡大に IF の標準化が不可欠なためである。IF を標準化することで、異なる提供元の構成要素間で相互にデータを送受信することが可能となる。その結果、新規プレーヤーが市場に参入しやすくなったり、既存アセット(デバイスやプラットフォームなど)を新たなユースケースへ活用することが容易になったりする。本コンソーシアムにおける標準化の取組みについては、7 章で説明する。

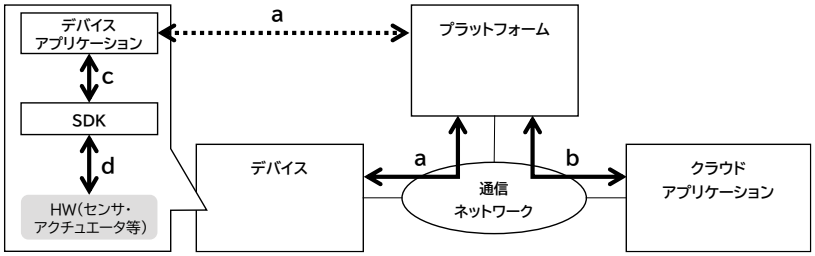


図 3-5 インタフェースの一覧

表 3-7 インタフェースの概要

場所	IF	目的	IF 上で送受信するデータ
a、b	a/b-1	エンドユーザ情報の登録・更新・削除	・ エンドユーザの属性情報(性・年代、体格など)や ID 等の認証情報
	a/b-2	デバイス、クラウドアプリケーション情報の登録・更新・削除	・ デバイス・クラウドアプリケーションの ID や能力に関する情報(送受信可能なデータのフォーマットなど)
	a/b-3	セッション管理(構築・終了)	・ エンドユーザ及びセッションを構成するデバイス・クラウドアプリケーションの ID
	a/b-4	セッションデータの送受信	・ センシング・アクチュエーションデータ※ ※ 感覚(視聴覚、味覚、嗅覚、触覚)やエンドユーザの身体動作、機器操作等に関するデータ ・ コンテンツサービス提供のためのアプリケーションデータ※ ※ 例えば、メタバース上の建物やアバター、オブジェクト等のデータ
c	c-1	ハードウェアの制御 (センサからのデータの読み取り、アクチュエータの動作指示など)	・ センシング・アクチュエーションデータ ・ ハードウェアの能力や状態に関する情報
d	d-1		

3.3.3 プラットフォーム

プラットフォームは、人間拡張の複数のユースケースで必要となる共通の機能を提供するソフトウェアである。クラウド上で運用され、ネットワークを介して、デバイスやクラウドアプリケーションに機能を提供する。図 3-6 にプラットフォームが提供する機能とインタフェースの概要を示す。

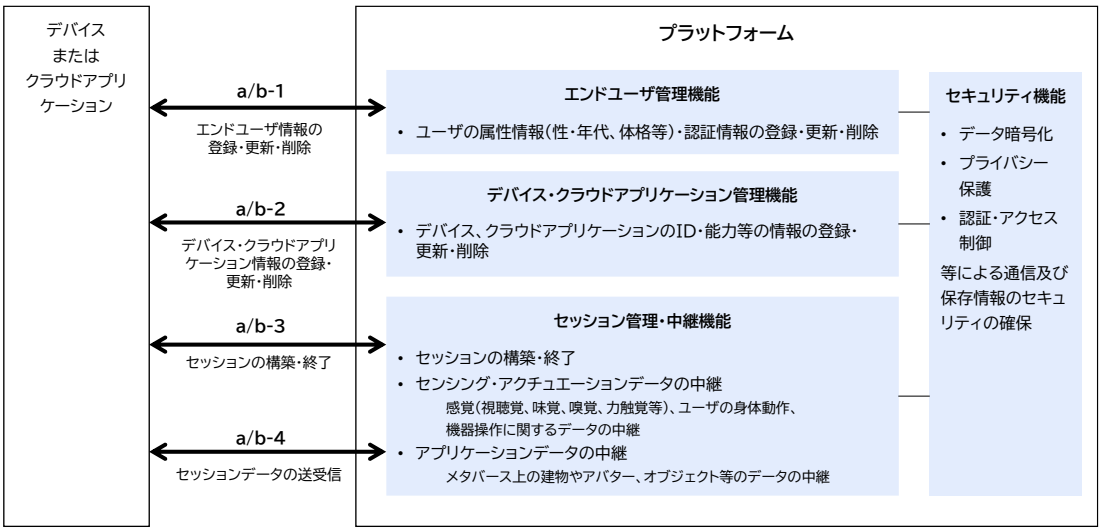


図 3-6 プラットフォームの機能・インタフェース

アーキテクチャの構成要素としてプラットフォームを設ける主な目的の一つは、サービスの開発・運用コストの低減である。図 3-6 に示したエンドユーザやデバイス、クラウドアプリケーション、セッションの管理やこれらのセキュリティ確保といった機能は、多岐にわたる人間拡張のユースケースに共通して必要となる。これらの機能をクラウド上で一元的に提供することで、各ユースケースで新たに開発・運用する必要がなくなり、関連コストを抑えることができる。

また、プラットフォームがセッションの中継を行うことで、多様なデバイスやクラウドアプリケーションの相互連携を容易に実現できるという利点もある。人間拡張で用いられるデバイスやクラウドアプリケーションは多岐にわたるため、データの送受信を行う双方が、共通のデータフォーマットや通信プロトコルをサポートしているとは限らない。例えば、ロボットの遠隔操作において、コントローラとロボットのベンダーが異なり、それぞれがベンダーの独自規格を用いるケースが想定される。このような場合でも、プラットフォームがデータ送受信を中継する過程で、送信元の形式を受信側が対応可能な形式へ変換して転送することにより、相互にデータを送受信することが可能となる。これにより、相互に連携可能なデバイスやクラウドアプリケーションの種類が拡大し、実現可能なユースケースの幅も広がる。

さらに、プラットフォームのセッション中継機能に、データフォーマットや通信プロトコルの変換を越える機能を持たせることも可能である。例えば、図 3-4 で示したロボットの遠隔操作では、可動域や動作範囲、体格や骨格が異なる人間とロボットの間でも自然な動作共有ができるよう、人間側の動作を拡大または縮小してから転送する機能が考えられる。また、味覚・嗅覚・触覚・固有感覚(例えば重量覚や抵抗覚)などの感覚を共有するユースケースでは、一人ひとりの感覚の違い(例えば、同じものを食べてもある人は他人より辛さや甘さを強く感じる)を考慮し、データを調整して再現用デバイスに転送する機能も

考えられる。このように、送受信するデバイスやそのユーザの特性を考慮したデータ変換を、プラットフォームがセッション中継時に行うことで、実現可能なユースケースの幅をさらに広げることができる。

本コンソーシアムの会員の取り組みとしては、株式会社 NTT ドコモのプラットフォーム「人間拡張基盤」が挙げられる。詳細は 6 章で説明する。

3.3.4 デバイス

人間拡張において、デバイスは大きく分けて二つの役割を主に担う。現実世界の状況を把握するセンサ機能と、現実世界に働きかけるアクチュエータ機能である。センサ機能には、環境やモノの状態、人の動作や生理的状態などを把握する機能が含まれる。アクチュエータ機能には、ロボットによる物理的作業の実行や、外骨格スーツなどの装着型デバイスによる動作支援などが含まれる。

人間拡張に用いられるデバイスは多岐にわたる。以下では人間拡張の類型ごとに、主に用いられるデバイスを例示する。

- 身体能力の拡張
  筋力や運動能力の向上を目的としたパワードスーツ・アシストスーツや外骨格ロボット、義手や義足などの装身具が挙げられる。これらのデバイスは、人間の物理的な能力を直接的に高め、重い物の持ち運びや精密な動作を可能にする。
- 知覚の拡張
  視覚の拡張では、スマートグラスや VR/AR ゴーグルなど、現実世界にデジタル情報を重ね合わせたり、仮想空間を体験させたりするデバイスが挙げられる。聴覚の拡張では、超音波マイクや指向性マイクなど、特定の音を増幅・抽出するデバイスや補聴器型のデバイスが挙げられる。触覚の拡張では、触覚フィードバックを生成するハプティックデバイスが挙げられる。これらのデバイスは、人間が直接知覚できない、または知覚が困難な情報を可視化・可聴化することで、現実世界の理解を深める。
- 認知の拡張
  脳波を測定する EEG（Electroencephalogram）センサや、視線の動きを追跡するアイトラッカーなど、人間の思考、判断、記憶といった認知の状態を把握するデバイスが挙げられる。これらのデバイスで認知状態を把握し、その情報をもとに AI やクラウドアプリケーションが適切な情報を提供することで、効率的な意思決定や学習の支援が可能となる。
- 存在の拡張
  遠隔操作型のロボットやそれを操作するコントローラ（例えば手指の動きを把握するグローブ型のデバイス）、ロボット搭載カメラの映像を確認するゴーグルなどが挙げられる。これらのデバイスは、時間や空間の制約を超えて他者とのコミュニケーションや活動を可能にする。

こうしたデバイスの研究開発には、現在様々な業界の企業や、大学等の研究機関が取り組んでおり、一部はすでに製品化され、市場に投入されている。図 3-7 に本コンソーシアムの会員が開発に取り組んでいるデバイスの一覧を示す。図では、主に対象とする人間拡張の類型および、完成品/部材・素材の

別（単体で機能するものか、他の完成品に組み込まれるものか）で分類した。完成品については、さらにデバイスアプリケーションまでを含むものと、ハードウェアのみのもので分類した。

図 3-7 に示すとおり、コンソーシアム会員のデバイスは多岐にわたる。ただし、現在の会員ではカバーされていないデバイスも存在する。例えば、認知の拡張において脳の状態把握に用いる EEG センサや、存在の拡張における遠隔医療用ロボットや遠隔操作型建設機械などの特定の目的に用いるロボット類は含まれていない。会員が取り組むデバイスの多様性が増せば、コンソーシアム内の議論が活発化し、新たなユースケースの創出やインタフェースの標準化の加速につながる。そのため、こうしたデバイスの開発や製品化に取り組む会員の加入が望まれる。

図 3-7 に示した各会員のデバイスについては 4 章で解説する。

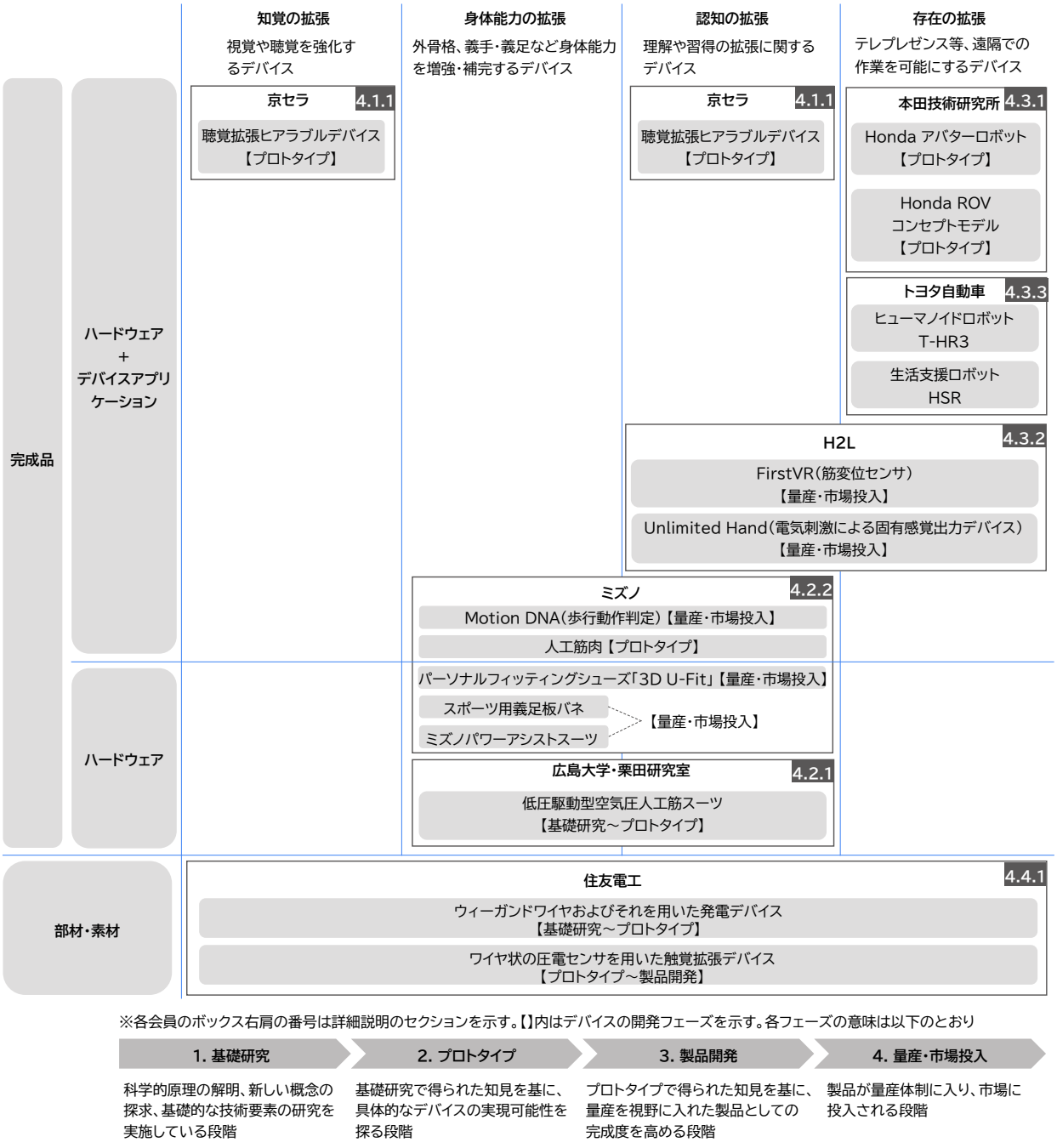


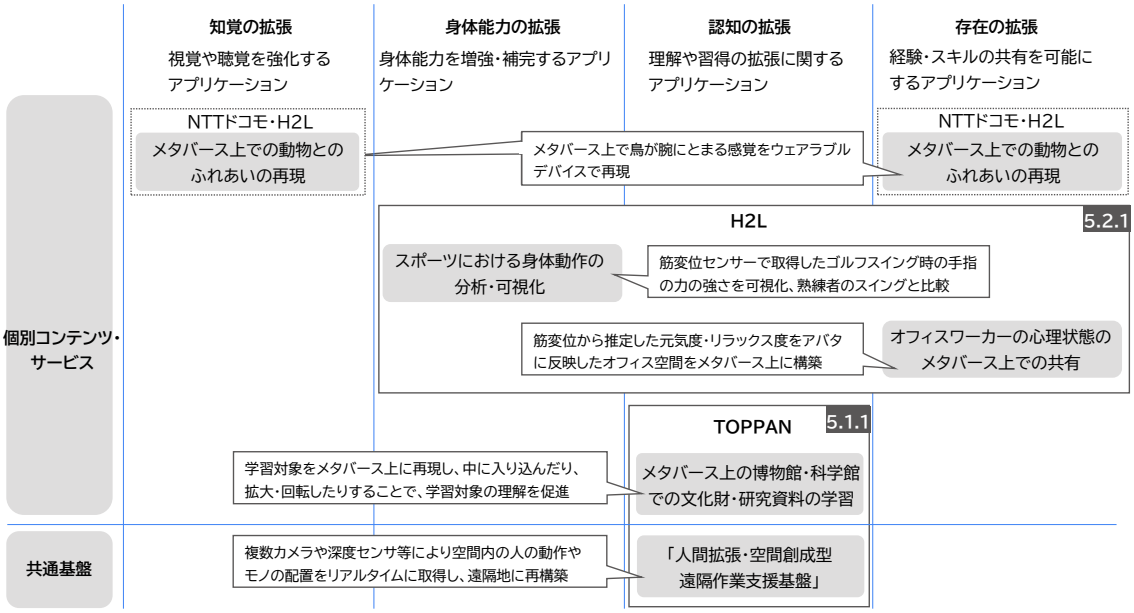
図 3-7 コンソーシアム会員のデバイス一覧

3.3.5　クラウドアプリケーション

クラウドアプリケーションは、サービスやコンテンツをクラウドから提供するソフトウェアを指す。サービスやコンテンツには、メタバースのような三次元仮想空間、オンラインショッピングサイト、データ分析・可視化サービスなどが含まれる。以下では、人間拡張の類型にそって、主に用いられるクラウドアプリケーションを説明する。

- 身体能力の拡張
  デバイスで収集した人間の身体動作に関するデータをクラウド上で分析し、改善を支援するアプリケーションが想定される。例えば、スポーツトレーニングでは、選手の動きをモーションキャプチャーシステムで解析し、理想的なフォームと比較することで、フォームの改善点や強化すべき筋肉部位を客観的にフィードバックするアプリケーションが考えられる。また、リハビリテーションでは、個人の状態に応じた難易度のリハビリプログラムをクラウド上で生成し、アシストスーツと連携させて、効果的な機能回復を促すアプリケーションが考えられる。
- 知覚・存在の拡張
  遠隔地や仮想空間上の体験を、あたかもその場で起きているかのように再現するアプリケーションが想定される。遠隔地の体験では、離れて暮らす家族や友人とのコミュニケーションで、視聴覚情報に加え、ハプティックデバイスを通じて握手や肩をたたくといった触覚情報を共有するアプリケーションが考えられる。また、旅行中の五感情報をクラウド上で記録・再生したり、メタバース上で再現したりするサービスも考えられる。
- 認知の拡張
  技能伝承や学校教育において VR/AR を活用するアプリケーションが想定される。熟練技術や伝統技能の習得支援では、指導者の動作や視線のデータをクラウド上で解析し、VR/AR 空間で再現するアプリケーションが考えられる。また、学校教育では、メタバース上に発電所や植物など学習対象の 3D モデルを再現し、中に入ったり回転・拡大縮小したりして観察することで、座学だけでは理解しにくい仕組みを直感的に学べるようにするアプリケーションも考えられる。

図 3-8 に本コンソーシアムの会員が開発に取り組んでいるクラウドアプリケーションの一覧を示す。図に示したクラウドアプリケーションは 5 章で説明する。



※各会員のボックス右肩の番号は詳細説明のセクションを示す。

図 3-8 コンソーシアム会員のクラウドアプリケーション一覧

3.3.6 通信ネットワーク

人間拡張を実現するシステムにおいて、通信ネットワークは、デバイスとクラウドアプリケーション、プラットフォームを接続し、情報を伝達する神経系のような役割を担う。通信ネットワークの性能は、システムを利用するエンドユーザの体験の品質に大きく影響する。以下では人間拡張において通信ネットワークに求められる主な要件について説明する。

- 低遅延、低ジッター
  遅延とジッター(データ受信のタイミングの揺らぎ)はエンドユーザの体験品質に加え、安全性にも影響する要素である。例えば、テレイグジスタンスにおけるロボット遠隔操作では、操作者とロボット間で制御データやセンサデータを双方向に伝送し、センサの測定値を踏まえて制御を調整するフィードバック制御を行うことがある。フィードバック制御において通信遅延は制御周期等の制御性能に大きく影響するため、ロボットの安全な動作には操作者とロボット間の End-to-End の遅延やジッターの低減が求められる。
- 複数データ通信の同期
  前述のテレイグジスタンスや、経験・感覚の共有・拡張など、視覚、聴覚、力触覚といった複数の感覚情報を連携して伝送するユースケースで重要な要件である。例えば、遠隔地のロボットを操作する際に、映像、音声、力触覚フィードバックなどの同期が取れていない場合(例えば本来同時に受信すべき映像と触覚の情報がずれて届く場合など)、円滑な操作は困難になる。経験・感覚の共有・拡張でも、同期が取れないとユーザ体験の質は低下する。また、複数のエンドユーザが共同で遠隔作業を行うケース(複数の遠隔操作ロボットが共同で重量物を移動するケースなど)では、エンドユーザ間でもデータ通信の同期が求められる。

- 通信の信頼性の保証

  パケットロス率が低く、通信が途切れないことは、システムの安定動作に不可欠である。テレイグジスタンス、特に遠隔医療や人命救助などのユースケースでは、通信の中断やデータの欠落が致命的な結果を招く可能性があるため、高い信頼性が保証されなければならない。それ以外でもロボットに制御信号が届かない場合、システムが予期せぬ動作をしたり、制御不能に陥ったりするリスクがある。こうした安全性の観点に加え、エンドユーザの体験品質の向上という観点でも、信頼性が保証された通信環境が望まれる。
- 広域な通信エリア

  広域な通信エリアの確保は、特にテレイグジスタンスやテレプレゼンスでユースケースの多様化、魅力化につながる。例えば、危険な場所や交通アクセスの限られる場所、加えて洋上や水中、宇宙、月面などでも、安定した通信を行えるようになれば、人間が直接行くことなくロボットを操作して救助活動を行ったり、インフラの点検を行ったりすることが可能となる。
- セキュリティの確保

  セキュリティは、ユースケースを問わず求められる要件である。人間拡張では人間の身体や知覚、認知に直接関わるデータを扱うため、不正アクセスやデータ漏洩は、個人のプライバシー侵害だけでなく、身体的な危害や心理的な影響にもつながる可能性がある。通信ネットワークにおけるセキュリティ向上は、システムの信頼性を確保し、エンドユーザが安心して人間拡張技術を利用するための基盤となる。

4. デバイス

4.1 知覚・認知の拡張

4.1.1 京セラ株式会社

(1) 聴覚拡張ヒアラブルデバイス

空港で仕事に集中していたら、アナウンスを聞き逃した！そんな経験はありませんか？人はたくさんの音の中から、重要と感じた音のみを選択し、注意を向けるため、無意識に音を聞き逃してしまう。この課題に対して、聴覚拡張ヒアラブルデバイスは、無意識に聞き逃してしまった音に気付かせ、聞き返すことができる。例えば、介護現場や病院など、作業中の指示や会話を聞き返したい、テレワーク中、旅客ターミナル、病院の待合室などアナウンスや呼び出しに気付きたい、外国語での会話、インスタンスメモなど後から聞き返して理解を深めたい。このような様々な用途において、もう一度聞き返せる心の余裕を届ける［2］［3］。

図 4-1 に、聴覚拡張ヒアラブルデバイスプロトタイプのデバイスおよびシステム構成を示す［4］。デバイスには骨伝導イヤホンとバイノーラルマイク※を搭載しており、AI システムには、音を一定期間録音・保持する「リングバッファ」、聞き逃したくない音を自動検知する「イベント検知」、聞き逃してしまった音を聞き返せる「リプレイ制御」、リプレイ時に雑音除去や速度調整、ビームフォーミングなどを行う「音響処理」を搭載する。

現在、世の中には音楽を聴く、人と会話する、補聴する、など様々な機能を持つイヤホン型デバイスが存在する。私たちが創造する将来は、聴覚拡張ヒアラブルデバイスを幾多のイヤホン型デバイスの基本機能として付加し、集中・記憶を助け、さらには身体の状態を把握して健康の維持・増進する機能、雑多な音から聴きたい音だけを聴くことができる機能［5］［6］など、人の身体や存在の拡張にも発展していくと考えている。

※バイノーラルマイク…2 つのマイクを人の両耳の位置に配置し、人の耳で音を聴いている状態を再現するための録音用マイク

図 4-1 聴覚拡張ヒアラブルデバイスプロトタイプ

4.2　身体能力・認知の拡張

4.2.1　広島大学大学院 教授 栗田雄一

（1） 低圧駆動型空気圧人工筋スーツ

動作支援装置は、一般にアクチュエータを搭載したアクティブタイプと、バネ要素を利用したパッシブタイプとに分けられる。アクティブタイプは、アクチュエータによって強い支援力が得られ細かな制御を行える一方で、アクチュエータを駆動させるエネルギー源（たとえばバッテリや圧縮気体タンク、コンプレッサなど）を搭載する必要があることから装置全体がかさばり重量が大きくなりがちであり、また導入・メンテナンスコストがかさむ問題がある。パッシブタイプは、安価、軽量であることが多く、機器によっては外部エネルギー供給を必要としない構造によって扱いやすく故障が少ない利点がある一方で、発生できる支援力が弱く、また伸縮性素材やバネ素材を利用すると伸長時に必ず支援力が発生してしまうことから、状況によっては運動の支援ではなく阻害となってしまう問題がある。次世代の運動支援スーツは、アクティブタイプとパッシブタイプの両者のメリットは活用し、デメリットは抑えた構成で設計される必要がある。

アクティブタイプとパッシブタイプの良いどころとりをした運動支援スーツの実現を目指して開発された、低圧駆動型の空気圧人工筋（Pneumatic Gel Muscle、以下、PGM）を利用した人工筋スーツについて紹介する。PGM は、従来のマッキベン型[6]と同様、圧力を供給すると膨張する空気圧受容部と非伸縮繊維を直交させながら筒状に編製したパンタグラフ構造の拘束部とで構成される（図 4-2）。従来のマッキベン型人工筋では、同じ全長の空気圧受容部と拘束部を組み合わせて構成されているため、空気圧受容部は径方向だけではなく全長方向にも膨張しようとし、拘束部の全長方向の収縮運動を相殺する力が発生していた上に、無加圧時には伸縮性を有さなかった。

PGM は、拘束部の全長に対して自然長の短い空気圧受容部を組み合わせることで、無加圧時でも伸縮性を有し、最伸張状態をアクチュエータの初期状態とすることで、円周方向の伸長率と全長方向の収縮率をともに低い状態で駆動させることができる、拘束部の全長方向の収縮を妨げにくい構造を実現した。さらに空気受容部を構成する素材には、ヤング率[7]の低いスチレンゲルをさらに発泡させることで高い伸縮性と柔軟性を有す素材を用いた。また発泡により空気圧受容部の表面が歪みやすくなり、拘束部のパンタグラフ構造の稼働を干渉しにくい構造となっている［7］。これらの利点を活かした応用例として、歩行支援［8］や上肢運動支援［9］（図 4-3）、テニス［10］、サッカー［11］、野球［12］などのスポーツシーンにおける動作支援やトレーニング支援［13］（図 4-4）に活用がされている。

[6] マッキベン型とは、空気圧式人工筋の代表的な構造形式のこと。ゴムチューブ、その外側を覆う編み込みスリーブから構成され、空気を注入・排出できるようになっている。
[7] ヤング率とは、外力によって材料が伸び縮みしたときの、応力とひずみの比例係数のこと。

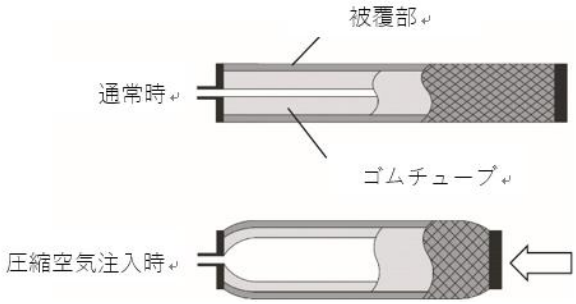


図 4-2 McKibben 型空気圧人工筋の構造

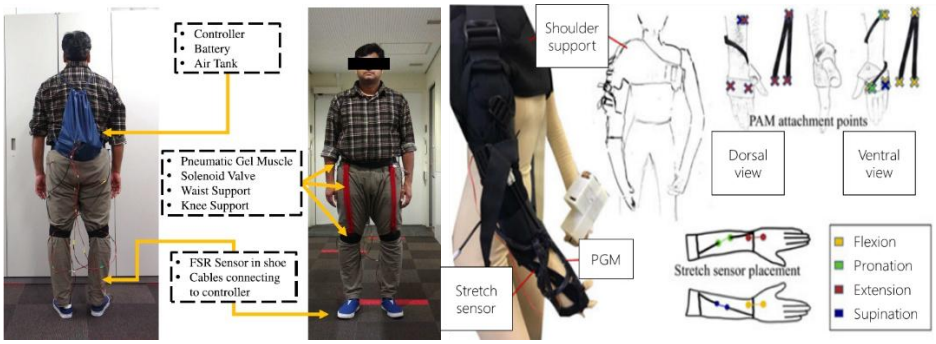


図 4-3 歩行支援(左)、上肢運動支援(右)に人工筋を活用した事例

図 4-4 スポーツにおける動作の支援に応用した例

4.2.2　ミズノ株式会社

ミズノでは、健常者だけでなく、シニアや障がい者、妊婦、子どもなど、すべての人々が自らの身体を自由自在に操って、今までできなかったことができるようになり、誰もが前向きに「やりたいこと、やろう！」と思える活気ある社会の実現を、スポーツテクノロジーと人間拡張技術の融合を通じて目指している（図 4-5）[14]。

図 4-5 ミズノにおける人間拡張技術の社会実装に向けた試み

（1）　スポーツ用義足板バネ

総合福祉機器メーカーである今仙技術研究所（岐阜県・日本）と共同で、スポーツ用義足の板バネ開発に取り組んでいる（図 4-6）[15]。スポーツ用義足の板バネは着用する選手の障がいの種類や程度、パフォーマンスによりさまざまなフィッティングが必要である。野球やゴルフなどの用具開発で長年培ってきたカーボン加工技術やその他さまざまな競技スポーツのノウハウを駆使して、パラアスリートがより高いパフォーマンスを発揮できるよう開発を行っている。

さらに、競技用板バネ製作のノウハウを活かし、初めて走る人を対象にしたエントリーモデルとして軽量で扱い易い板バネを新たに開発している。この板バネは専用のソールを装着することで、トップレベルの競技場面でも使用可能な性能を実現している。また、日常用義足からの取り換えが容易で、価格も従来のモデルと比べ安価となっている。

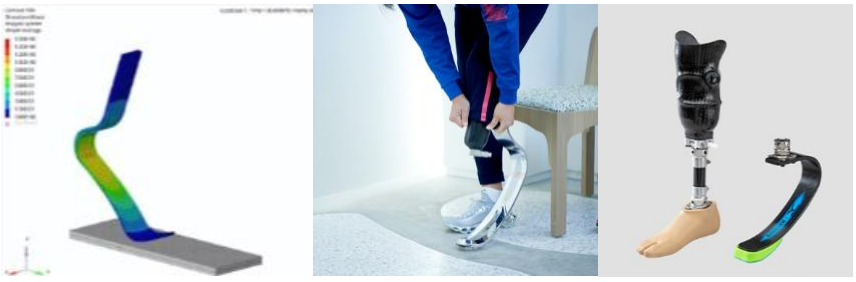


図 4-6 スポーツ用義足板バネ開発

（2）　ミズノパワーアシストスーツ

運送業や農作業の現場では、腰に負担の悩みを持ちながら働いている人が多くいる。特に低い位置にある重い物を持ち上げたり移動させたりするシーンでは、腰椎や骨盤の間に大きな力が発生し、ヘルニアや腰椎分離症の原因となることもある。よって、働く人々の毎日の作業による身体的負担を軽減す

るため、ミズノパワーアシストスーツを開発した（図 4-7）［16］。

まず、重量物の持ち上げ作業に注目し、持ち上げ動作による腰への負荷を，筋骨格シミュレーションを用いて解析した。解析結果に基づき腰への負担を約 15％程度低減させるために必要なアシスト力を同定した。さらに既存のパワーアシストスーツが使われている現場に赴き、課題とニーズの調査により、「重い」、「動きにくい」、「価格が高い」という 3 つの課題と、「農業や物流など、人の替えがききにくい現場にニーズがある」ことを把握した。

ミズノパワーアシストスーツの特長は『ラク』であることである。スーツ自体がわずか約 3.2kg と軽くてスリム、ウエアタイプで羽織るような軽やかな着用感、動力にゼンマイバネを使用した非電動メカニズムなど、毎日着用したくなるほどいつでも簡単に着用できるように仕上げたことで、毎日『ラク』を感じられる製品となっている。

図 4-7 ミズノパワーアシストスーツ

（3） Motion DNA（歩行動作の科学的な判定）

歩行速度と健康寿命には相関関係があり、歩行速度が速い人は健康寿命が長く、歩行速度が遅い人は健康寿命が短いことがわかっている［17］。一般的に歩行能力の個人差が大きくなり、要支援・要介護になる人が増える年齢は 75 歳以上といわれているが、なかには、50 歳頃から歩行能力が落ち始める人もいる。そこで、いち早く効果的な歩行能力維持対策に取り組み、より長くイキイキと生活できるよう、歩行動作を科学的に判定する基幹理論『Motion DNA』を開発した。

基幹理論『Motion DNA』は、大阪公立大学 医学部 リハビリテーション学科 岩田晃教授との共同研究から生まれた。一番の特徴は、立位姿勢から人の歩行を 4 タイプに分類した点である。タイプごとに歩き方の特徴や歩行に必要な機能と部位を知ることができる（図 4-8）［18］。

タイプと歩行能力を分析することで、効率的かつ効果的に歩行能力を鍛えるトレーニング方法を伝え、歩行能力の維持・向上をサポートするのに適した製品やサービスを提供している。

図 4-8 Motion DNA による歩行動作の判定

（4） パーソナルフィッティングシューズ「3D U-Fit」

スポーツ業界で初めて 3D プリンターで個人に合わせた専用の一体ソールを設計・製造する技術を開発した。

足幅が広い、狭い、左右でサイズが異なるなど、シューズ選びに困っている人が多くいることは知られているが、これまでの製造工程ではシューズの機能のほとんどを担うソールは個人に合わせて簡単に変えられないという技術的な制約があった。

「3D U-Fit」は、個人の足型を測定し、一体ソールをそのデータに合わせて作ることで、それぞれの足に合ったオリジナルのシューズを作ることができる。また、このソールは独自の構造を持っており、足底の荷重分散による負荷軽減や、独特のクッション感を提供することができ、従来のフィット感とは一段違う、次世代のフィット感を提供することができる（図 4-9）[19]。

図 4-9 パーソナルフィッティングシューズ「3D U-Fit」

（5） 人工筋肉

研究開発中の人工筋肉技術は、アスリートが競技でのパフォーマンスを向上させ、高齢者が健康的な活動を楽しむことで、身体能力の維持や向上に寄与するための重要な役割を果たすことを目指している。ミズノのアプローチは、特に「動的適応性」に焦点を当てており、スポーツ活動や日常生活において、身体の動きに対するタイミングと部位を考慮したアシスト力の最適化を目指している（図 4-10）。

このアプローチにより、従来のアクティブ型やパッシブ型のデバイスが抱える問題点を克服し、より自然な動作支援が実現できる。具体的には、アスリートや高齢者の筋力や動作パターンに応じて支援力を個別に調整することで、過剰な負担をかけずに日常生活やスポーツをサポート出来るようになる。

また、この人工筋肉は、軽量かつコンパクトな設計を行い、日常的な使用やスポーツシーンでの運動支援においても高い利便性を提供することが可能となる。

図 4-10 人工筋肉技術のゴルフスイングへの適用

4.3　存在・認知の拡張

4.3.1　株式会社本田技術研究所

Honda では、「時間・場所・能力の制約に縛られず、自己を拡張する」ことを目的に、アバターロボット[20] [21]や ROV(Remotely Operated Vehicle:遠隔操縦無人潜水艇) [22]を開発している。

(1)　Honda アバターロボット

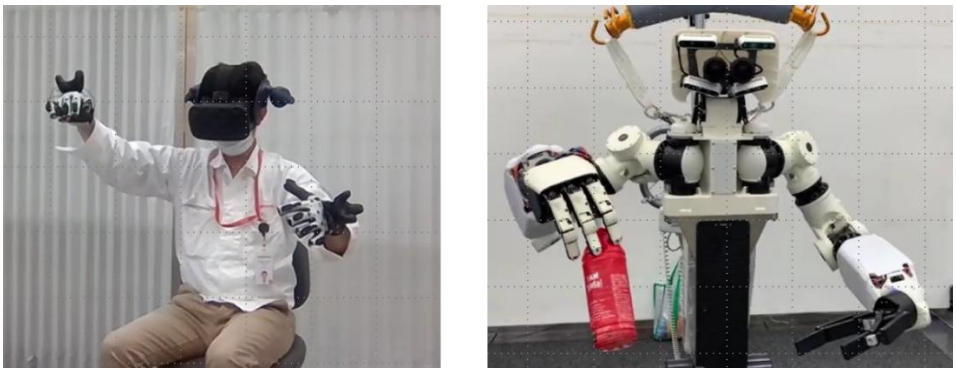


図 4-11 アバターロボット

・アバターロボットの特徴と技術

多指ハンドによる高精度な操作：Honda アバターロボットは、人間の手に近い構造を持つ多指ハンドを搭載し、メカ機構の駆動システムの工夫や緻密な制御によって、日常生活における作業の 80%を占める 12 種類の把持手形と指先力 50N を実現した。図 4-12 に示すような様々な多指ハンドによる作業を実現し、ロボットによる作業可能範囲を広げることが可能となった。

図 4-12 多指ハンドによる作業

AI サポート遠隔操縦：

HMD やセンサグローブなどの簡素な UI による遠隔操縦では、距離感や触覚が不足するため、細かな操作が難しいという問題がある。これを解決するために、AI が人の意図を読み取り、操作を助ける AI サポート遠隔操縦を開発した。例えば、操作者が物に手を近づけてそれを持とうとするとシステムが操作意図を判断し、もし操作者が大雑把な掴む動作を行ったとしても、手の位置や手形・力加減を適切に補正し、安定して把持を行うことができる。この技術によって、遠隔作業中に人とロボットが臨機応変に協調することで、容易な遠隔操縦を実現した。

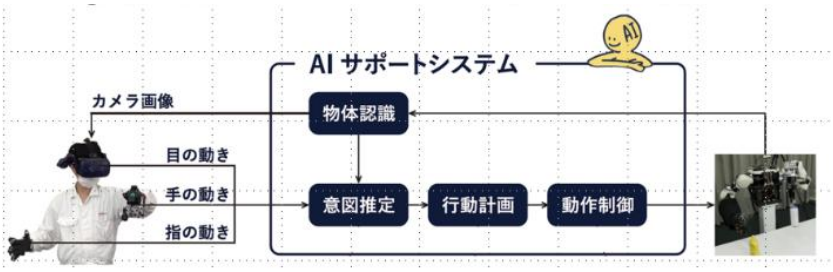


図 4-13 AI サポート遠隔操縦

・活用事例

Honda のアバターロボットは、人が創造性を発揮するための自由時間を生み出し、遠隔地や危険環境でも活動が可能である。移動を伴わずに専門性を発揮できるため、救命救急などの医療分野や、緊急性の高い機器メンテナンスへの応用が期待される。また、人が立ち入りにくい災害現場や宇宙空間などでも作業が可能であり、活用範囲は多岐にわたる。

（2） Honda ROV コンセプトモデル

図 4-14 Honda ROV システム概要

・ROV の特徴と技術

マニピュレータ・ROV 協調制御：ASIMO の「手先本体協調制御」技術を応用し「マニピュレータ・ROV 協調制御」を開発した。アーム操作に応じて機体が自動で前進・姿勢調整を行うことで、操縦性を向上させる。不感帯エリアを設け、アームがその範囲を超えると DVL(Doppler Velocity Log) と IMU(Inertial Measurement Unit)による計測情報をもとに機体が追従する。潮流下でも手先位置を安定させ、洗浄作業などの精度と効率を高める技術である。

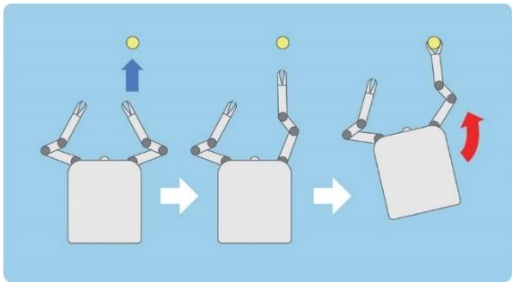


図 4-15 マニピュレータ・ROV 協業制御

浮心・重心制御機構：水中では潮流や重心移動により ROV の姿勢が常に変化するため、安定した制御が必要である。従来はスラスターで姿勢を保っていたが、応答遅れや海底の堆積物の巻き上げが課題であった。Honda は、機体上部の浮力材を前後左右に動かすことで姿勢を制御する「浮心・重心制御機構」を開発。IMU やアームの動きから重心変化を計算し、浮力材を動かして復元力を利用することで、省電力かつ高応答な姿勢制御を実現している。

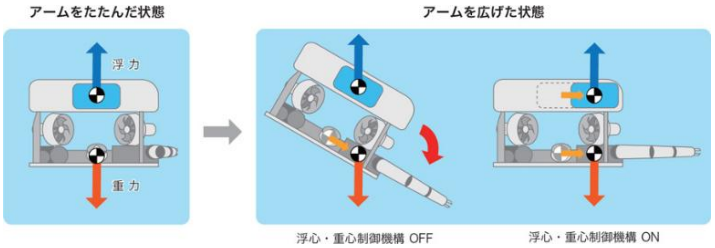


図 4-16 浮心・重心制御機構

・活用事例

ROV は、洋上風力発電のメンテナンス作業として、玉掛け用具の付け外しや海中構造物の洗浄などを行う 。これにより、潜水士の不足や深海での作業の困難さを解消し、効率的な運用が可能となる。

4.3.2　H2L 株式会社

（1）　FirstVR一筋変位センサによる固有感覚推定

概要

人間の運動制御や身体感覚の根幹をなす「固有感覚」を、H2L では光学式の筋変位センサを用いて筋肉の状態情報からリアルタイムに推定し、外部システムへ入力する技術を開発している。この筋変位センサを搭載したウェアラブルデバイス「FirstVR」（図 4-17）は、前腕や上腕の筋肉の膨らみ（筋変位）を非接触で捉え、特定の指や腕の動作における力加減や動きの強度を可視化する。

図 4-17 筋変位センサを搭載したウェアラブルデバイス「FirstVR」H2L 社製

デバイスの特徴

FirstVR に搭載された光学式筋変位センサは、光の反射で筋変位を推定するため、汗や電磁ノイズの影響を受けずに安定したセンシングを実現している（図 4-18）［23］［24］。また、加速度ジャイロや振動機構と組み合わせることで、多次元的な身体情報を収集し伝達している。

図 4-18 筋変位センサの原理と筋変位データから固有感覚の関連情報を推定する流れ

ユースケースと特徴の発揮

スポーツ体験の分析と共有（アーチェリーやゴルフなど）

熟練者と初心者の力加減の違いを、視覚的に提示しスポーツ体験を共有している。たとえば、ゴルフスイングの際に前腕の筋肉から得られる筋変位データをもとに、指ごとの力の強さを色分けされた球体で表示する（図 4-19）[25]。赤色は人差し指や中指の力、黄色は薬指や小指の力を示す。熟練者のスイングでは薬指と小指に、初心者のスイングでは人差し指や中指に、重心の偏りが見られる。こうした差異を視覚的に提示することで、運動技能の改善に向けた具体的な指導が成立する。

図 4-19 スポーツ体験の熟練者と初心者の力加減の違いを視覚的に提示する様子

（2） UnlimitedHand一電気刺激による固有感覚出力

デバイスの概要と特徴

UnlimitedHand は、H2L が開発した研究用途向けのウェアラブルデバイスであり、人間の四肢、体側、前面や背面に装着して使用する（図 4-20）。前節の光学式の筋変位センサに加え、電気刺激による固有感覚の出力機構（最大 8 チャンネル）を搭載しており、入力と出力の両方向から固有感覚を扱う構成となっている。

図 4-20 筋変位センサに加え電気刺激による固有感覚の出力機構を備えた「UnlimitedHand」H2L 社製

デバイスの特徴

UnlimitedHand は、非侵襲的な電気刺激により、筋の収縮を直接引き起こすため、機械的な拘束を排除しつつ、微細な動作の誘導が実現される（図 4-21）[26]。また、人体に適した波形制御によって、違和感を低減しつつ自然な動作の再現を可能にしている。

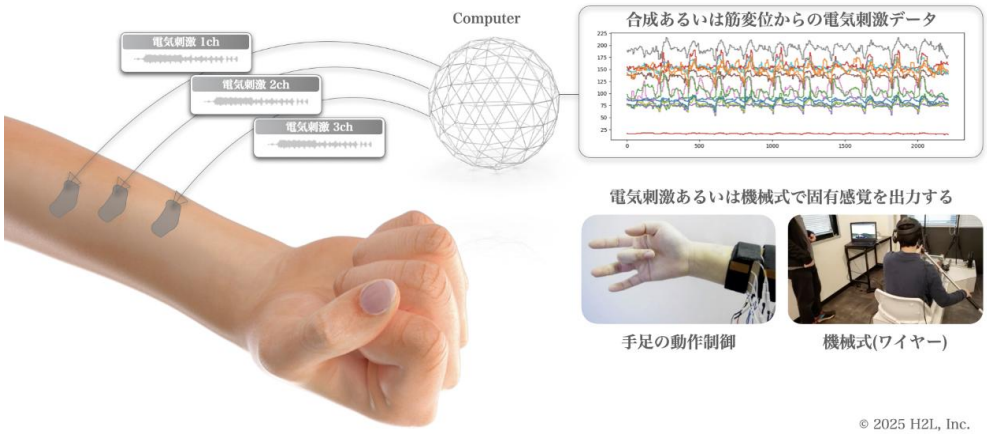


図 4-21 電気刺激による固有感覚の出力の原理と、その他の固有感覚の出力

ユースケースと特徴の発揮

「VR 空間上のカヤック体験の共有」

UnlimitedHand を装着したユーザが腕を動かすと、VR 空間上に表示されたカヤックのパドルが連動して動作し、あたかも現実の水上で漕いでいるかのような視聴覚と固有感覚の一つである抵抗覚フィードバックが得られる。このとき、パドルを水に沈めた際にかかる抵抗感や、水を押し返す重さといった感覚が、前腕や上腕への電気刺激として出力される構成となっている。

たとえば、右腕でパドルを深く漕いだ際には、上腕の三頭筋に中程度の収縮信号が送られ、次いで前腕屈筋群への強めの刺激が連動的に加えられることで、水圧に抗してパドルを引く動作の再現が行われる。逆に水からパドルを引き抜く際には、筋緊張の解除に合わせて刺激が弱まり、推進運動の終了を身体で感じ取る。これにより、ユーザの身体が「水の重さ」や「推進にかかる力」の情報を体感的に受け取り、VR 上の視聴覚情報と統合されて没入感が強化される（図 4-22）。

図 4-22 筋変位センサと電気刺激による固有感覚の出力機構による VR 空間上のカヤック体験の共有

4.3.3　トヨタ自動車株式会社 未来創生センター

トヨタ自動車未来創生センターでは、「すべての方に移動の自由を」の実現に向けて、ロボット技術を活用したパートナーロボットの研究開発を行っている。人が離れた場所から遠隔操縦ロボットを使い、今後の社会課題である労働力不足の解消や高低温環境、災害現場、人が直接行けない、または行きにくい厳しい環境での作業支援、障がい者の遠隔就労、遠隔医療や農業など、さまざまなユースケースを想定して研究開発を進めている。

(1)　生活支援ロボット HSR(Human Support Robot)

家庭内での生活支援(家事支援・介護支援)を目的に開発されたロボットである。自立動作での各種家庭内作業支援だけでなく、遠隔操作による家事や介護の支援、障がい者の方の遠隔就労の実現の為の研究開発も進めている(図 4-23) [27]。

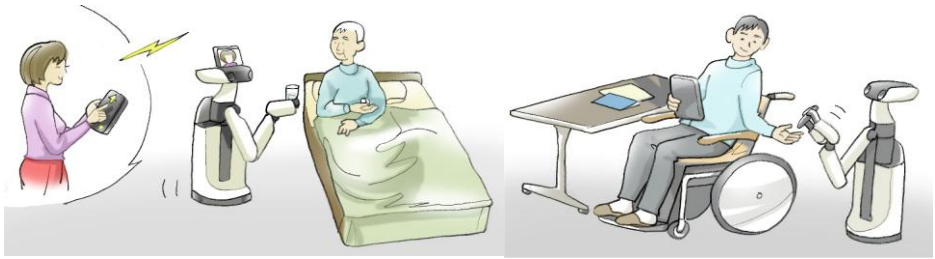


図 4-23 HSR 遠隔支援(左) ／ 介護支援(右)

■ おもてなし観戦サポート実証

障がい者の遠隔就労実現に向けた実証として、障がい者の方が遠隔地からイベント会場に車いすでご来場されたお客様に対してロボットを通じてコミュニケーションを行い、観戦のサポートや写真撮影サービスを行なう実証を行った(図 4-24) [28]。

イベント会場側と遠隔操作側は専用の閉域ネットワークで接続してセキュリティ性を確保、ロボット側には仮設のローカル無線や5G／LTE回線を活用し、低遅延かつ信頼性の高い通信を実現、安定した運用ができた(図 4-25)。

図 4-24 おもてなし観戦サポート時のようす(トヨタ自動車 未来創生センターにて、図の一部を編集)

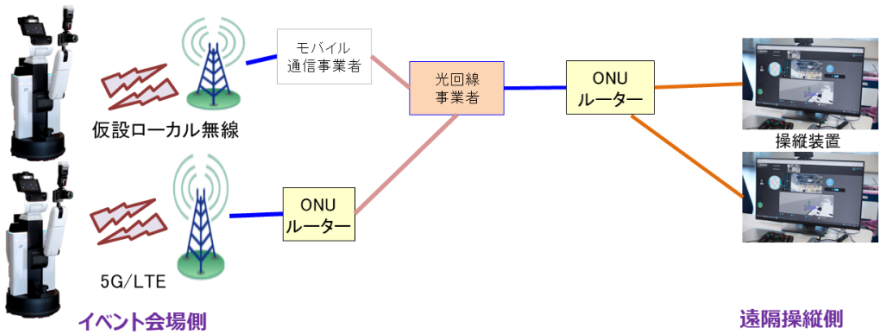


図 4-25 おもてなし観戦サポートシステム(通信システム構成)

終了後、障がい者の方からは、「期間中は夢のような時間でした。なんと言っても、私にとってはじめての接客体験でしたから。まさか私が接客する日が来るなんて、夢にも思っていませんでした。障がい者の職業選択において、事務職などのデスクワーク以外は諦めて生きてきたので、ロボットを介すことでこういう道があるなんて、驚きました」、とのコメントがあった。このようなロボットがあれば職の選択肢が限られている方にも希望を与えることができ、“場所”を超えることができ、生活支援だけでなく、雇用創出という更なる可能性を確認できた。

■ ロボット基盤モデルによる遠隔操作AIアシスト

ロボット基盤モデルとは、多様な環境で収集したロボットの動作データを学習し、多様なタスクに汎用的に対応できるロボット制御モデルのことである。大規模言語モデルが大量のテキストから学習するのに対し、ロボット基盤モデルはセンサデータや動作データを統合的に学習し、家庭や工場、医療など多様な実世界でのタスク実行を可能になる。将来の社会課題解決への貢献が期待されている。

このモデルの開発には、①大規模データ収集、②モデル学習、③検証、④追加データ収集のサイクルが必要。この大規模データの収集の為、特に遠隔操作技術の重要性が高まっている。

出来上がった基盤モデルは遠隔操作のアシストにも活用でき、ラフな遠隔操作をしてもロボットが最適な動作をさせることに活用させていく予定である［29］。

現在、基盤モデルの開発は「一般社団法人 AI ロボット協会（AIRoA）」と連携して進めている［30］。

（2） リアル感覚遠隔操縦ロボットシステム（HSR テレプレゼンスバージョン）

現在のロボット遠隔操縦システムでは、操縦者に与えられる情報が限定的であり、作業者が直接作業する際のリアルな肌感覚とは大きくかけ離れている。そこで、遠く離れた場所からロボットを介した遠隔作業でも、自らが直接作業しているようなリアルな感覚を実現し、これまで困難であったユースケースに適用できる遠隔操縦システムの実現に向けて研究開発を進めている。

リアルな感覚の実現に向けては、各種感覚（五感＋α）の伝送、臨場感・没入感の向上、低遅延化が重要と考え、これらの技術をロボットに実装し有効性を検証している（図 4-26）。

図 4-26 HSR テレプレゼンスバージョン

■ 超々低遅延映像・音声伝送システム

ロボット搭載のカメラ映像とマイク音声を操縦者に極限まで低遅延で伝送するシステムを図 4-27 に示す。ロボット側は遅延のないカメラ・マイクと超々低遅延エンコーダでデータを IP 化する。低遅延・低ジッターのミリ波帯の無線機を介して環境側無線機へ送信し、光ネットワーク回線経由で操縦装置に伝えられる。操縦装置側では超々低遅延デコーダーで元の信号に復元し、映像・音声をディスプレイ、スピーカーから出力する。現状、カメラからディスプレイまでの遅延は映像 1 フレームを大きく下まわる性能を実現。ネットワークを通しても遅れを感じない低遅延伝送が実現できた。

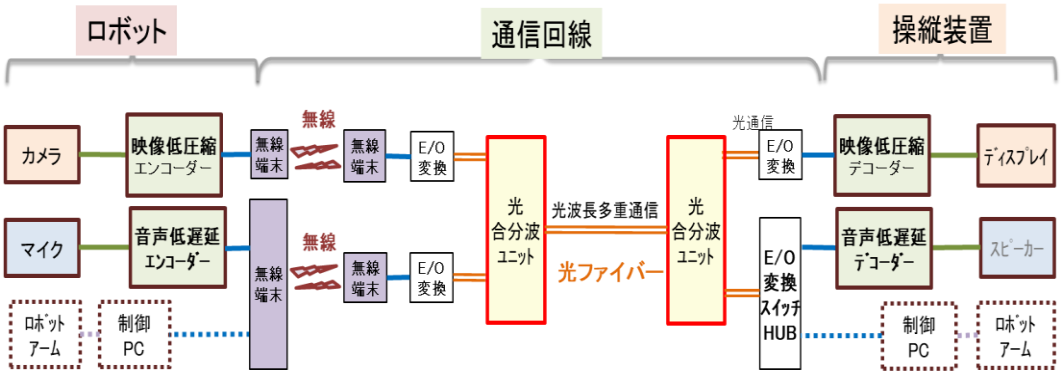


図 4-27 超低遅延 映像＆音声伝送システム

実際にディスプレイに表示したカメラ映像をループ表示させると何重にも繰り返し表示され、極めて遅れが少ないことが分かる（図4-28）。

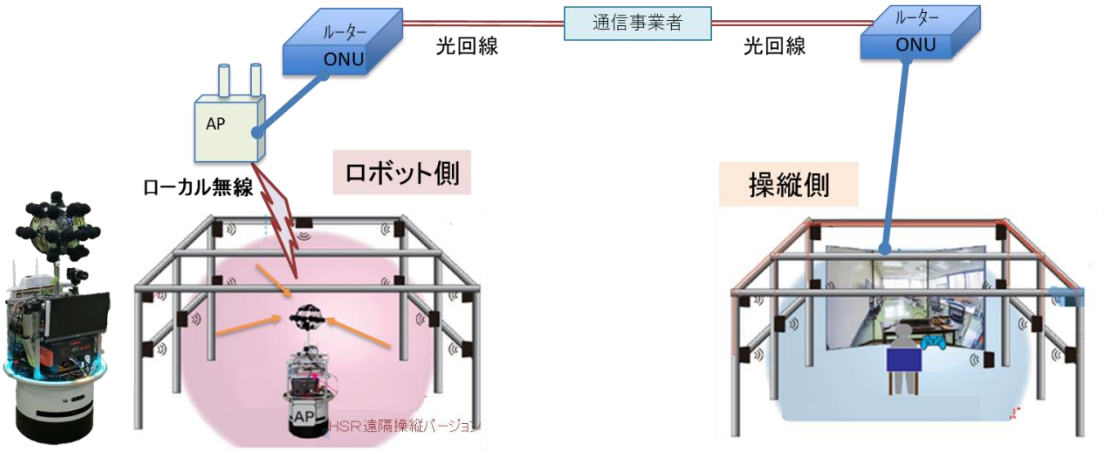
このシステムを利用すると、操縦者は映像と音声の遅延をまったく感じることなく遠隔操作が可能となる。高速で移動する物体を対象とする作業や、より精密な動作が要求されるユースケースで有効になると考えている。

ただし、現状は無線システムの遅延やジッターといった性能課題があり、次世代の無線機でさらに低遅延・低ジッター（要求値1ms以下）の性能が実現される事を期待している。

図 4-28 映像の超々低遅延伝送（カメラ映像をディスプレイに繰り返し表示）

■ 超臨場感・没入感体感システム

ロボットに搭載した超広角カメラ（180 度視野）の映像と 360 度立体音響収音マイクの音声を超低遅延で遠隔地の操縦者に伝送し、臨場感・没入感を大幅に向上させるシステムである（図 4-29）。操縦者は広視野・大画面の映像と 360 度から囲まれるイマーシブ音響により、これまでにない没入体験を得られる。これにより、まさにロボットがいる場所に操縦者が存在する感覚を実現した［31］。



本システムはミハル通信株式会社との共同開発

図 4-29 超臨場感・没入感体感型ロボット遠隔操縦システム

本システムを用いて遠隔地にあるロボットのアームを遠隔操作して、楽器を演奏したり、風船を割る操作を行ったところ、まさにその場にいる感覚を体感できた。(図 4-30、図 4-31)

このシステムは一般的な光回線を使って遠隔地間での双方向コミュニケーションも低遅延で可能であり、新しい遠隔コミュニケーションの可能性を提供できた。

図 4-30 遠隔風船割り操作

図 4-31 遠隔ウィンドチャイム演奏

■ 今後の予定

現状、リアルな操縦感覚の実現にはまだ程遠い。今後、更なる伝送可能な感覚の追加と没入感・臨場感の向上を目指し、課題の多い無線通信の性能向上と合わせて開発に取り組む予定である。

(3) ヒューマノイドロボット T-HR3 (Toyota Humanoid Robot 3)

このロボットは、操縦者がロボットにかかる外力を感じながら遠隔操縦できるシステムである(図 4-32) [32]。ロボットの各関節(図 4-33)には繊細なトルクを検知できるトルクサーボモジュール(図 4-34)が組み込まれており、検出した力を、全身を自由に操る操縦装置を通じて操縦者にリアルタイムでフィードバックする。これにより T-HR3 をあたかも自分の分身のように動かすことができ、5 指のハンドを使った繊細な作業も可能となっている。

図 4-32 ヒューマノイドロボット T-HR3

図 4-33 トルクサーボモジュール配置

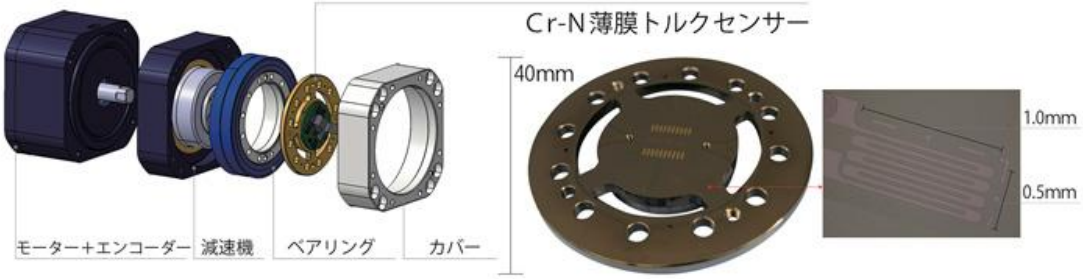


図 4-34 トルクサーボモジュール

4.4　部品・部素材

4.4.1　住友電気工業株式会社

(1)　ウィーガンドワイヤおよびそれを用いた発電デバイス

住友電気工業株式会社(以下、住友電工)は磁気をエネルギー源とする発電、特にゆっくりとした磁界変化でも発電可能なウィーガンドワイヤ方式に着目しており、その肝となる、ウィーガンドワイヤと呼ばれる磁性材料の線材を開発している。このような発電デバイスはウェアラブルおよびロボティクス向けデバイスの配線レス・バッテリレス化に貢献できると考えている。

ウィーガンドワイヤの特徴は、それに作用する磁界が変化し、ある閾値を越えたところで生じる急激な磁化反転(大バルクハウゼン効果)である。コイルの中にウィーガンドワイヤを配置することで、この磁化反転がコイルにパルス状の誘導起電力を発生させるのが発電の仕組みである。このパルス電力の大きさは磁界変化の速度にほとんど依らないことから、一般に用いられるダイナモのように低速では電力が得られにくい発電方式とは一線を画している(図 4-35)。

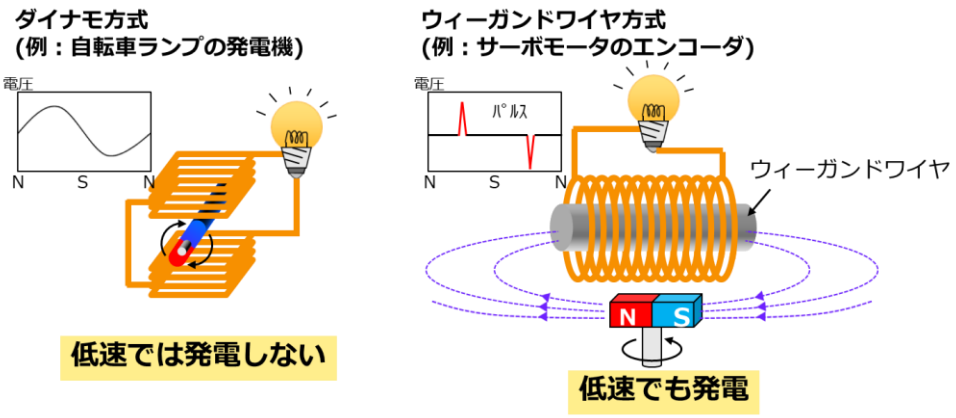


図 4-35 磁界変化による発電方式(ダイナモ方式とウィーガンドワイヤ方式)の比較

ウィーガンドワイヤ方式の発電デバイスは、住友電工の子会社である大黒電線株式会社から「MG センサ ™」として、サーボモーター用エンコーダ[8]向けに製造・販売中である(写真 4-1)。その諸元の一例は表 4-1 の通りである。エンコーダはモーターの回転を検知する機器で、MG センサ ™ はこれに内蔵される。モーターの軸に取り付けた永久磁石が軸と一緒に回転することで、MG センサ ™ にパルス電力を発生させ、これが回転情報の信号となるとともに情報書き込みの駆動電力となる(図 4-36)。これによりエンコーダが無電源下でも動作可能となり、バッテリの交換も不要となる。現在、同技術を用いたエンコーダが急速に普及している。住友電工は、ウィーガンドワイヤ開発では合金設計技術や金属組織制御のためのプロセス設計技術を駆使し、大黒電線株式会社がその高いコイル製造・組み立て技術と組み合わせることで MG センサ ™ 開発に成功し、サイズの小ささ、性能および信頼性いずれも業界トップレベルであるとのユーザ評価を得ている。

[8] モーターシャフトの回転角度や速度を検出するセンサで、正確な位置制御を行うために用いられる。

今後に向けては、適用分野拡大のため、パルス電力を無線送信に用いることを検討している。これは人間の動きなどを配線レス・バッテリレスでモニタリングするためのウェアラブルデバイスに活用できると考えており、そのために必要な大電力を得るための高出力化を目指しウィーガンドワイヤの開発を継続していく。

写真 4-1 大黒電線株式会社 MG センサ ™

表 4-1 MG センサ ™ の諸元の一例

	項目	値	条件
寸法	外形 (mm)	W11.7max × D4.3 × H4.5	
最大定格	動作周囲温度 (°C)	-30～110	
	保存温度 (°C)	-40～125	
信号特性 (周囲温度25°C)	出力電圧波高値※1 (V)	6 (最小)、7 (代表)	
	出力電圧立上時間 (μs)	50 (最大)	
	出力電圧温度係数 (%/°C)	-0.1 (代表)	
電気特性 (周囲温度25°C)	インダクタンス (mH)	7 (最小)、10 (最大)	15kHz:2V
	抵抗値 (Ω)	210 (最小)、230 (代表)、250(最大)	1mA
	抵抗温度係数 (1/°C)	0.00393	

※1：磁石回転速度≒0rpmでの保証値

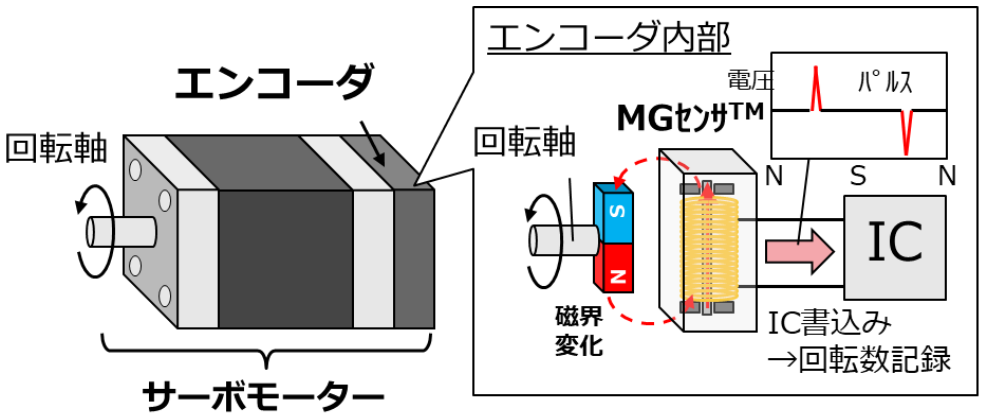


図 4-36 エンコーダ中の MG センサ ™ の役割

（2） ワイヤ状の圧電センサを用いた触覚拡張デバイス

住友電工はワイヤやケーブルを製造するメーカーである。センシング対象が、点から線や面での広範囲化がもとめられる中、取扱いや設置のしやすさも考慮し、ワイヤ状のセンサを開発している。

本製品は極細ワイヤ状の圧電センサで、触覚代替として外表面および関節等への使用を想定したデバイスであり、高い柔軟性により、取付場所の制約が小さいことを特徴とする。

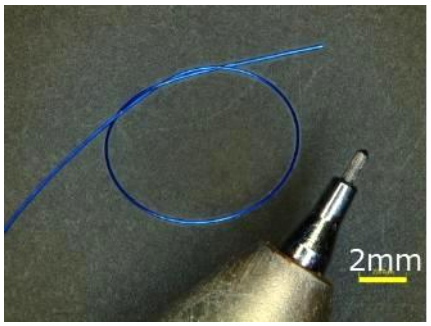


図 4-37 ワイヤセンサ/ Filasense™

引張り・曲げ・圧縮によるワイヤの形状変化により、圧電層が変形することで電圧が発生し、センシングすることができる（図 4-38）。例えば、ビジョンセンサではセンシングできない「軟らかさ」などの情報補完、小さな力で拡張デバイスを起動させるためのスイッチ、接触対象の振動等の検知、遠隔・時間を超えた感覚の記録に適用することが想定される。

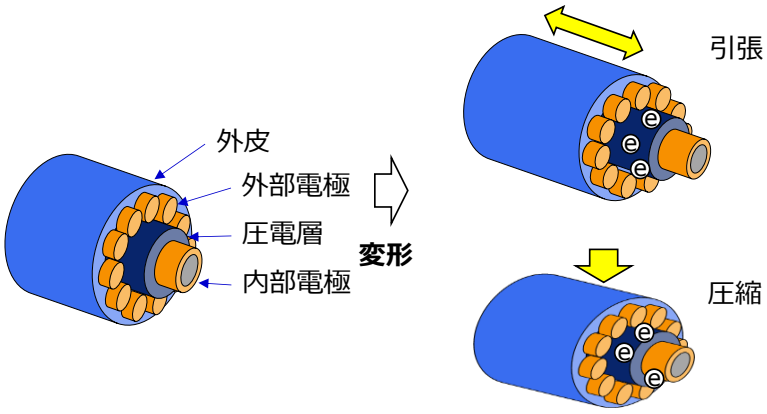


図 4-38 ワイヤ状圧電センサの検知原理

機械・装置への設置は、ワイヤ状であることで接着以外にも縫製も可能であり、例えば外皮設置が容易になる利点が考えられる。これは従来のケーブルを細くするだけでは強度が弱く、取り扱い時に断線してしまうリスクが高いが、弊社の高強度鋼線技術を活用することで、縫製糸と同程度以上の強度を有することで可能となった。

表 4-2 ワイヤセンサの標準仕様および製造範囲

	標準仕様	製造範囲	
ワイヤ径	0.13mm	0.10～0.30mm	※標準仕様以外は要相談
引張強さ	4N(0.4kgf)	2～60N	
外皮材料	PET	PET、PVC 等	
使用可能温度	0～100℃	—	

5. クラウドアプリケーション

5.1 認知の拡張

5.1.1 TOPPAN 株式会社

(1) 人間拡張・空間創成型遠隔作業支援基盤

本研究は、国立研究開発法人情報通信研究機構委託研究(採択番号:02901) [33]のもと、東京大学と TOPPAN による共同研究であり、遠隔地の三次元実空間を実時間で取得・伝送・再構築し、まるで遠隔地の現場にいるかのように、空間情報を共有することができる。現在はテレビ会議を通じた平面画像の共有が一般的であるが、将来的には、遠隔地の三次元実空間をリアルタイムで共有することができるようになり、使用者の認知の拡張に貢献できる。

空間情報は、あらかじめ計測した建造物などの静的ジオメトリ情報と、複数カメラ・深度センサによる人体や動的物体の 3D データをリアルタイム融合することで実現している。ただ、この空間情報は膨大なデータ容量となるため、Beyond5G(以降、6G)と呼ばれる 2030 年代に実用化される次世代の移動通信システムを見据えての社会実装を予定している。

このような、ICT 基盤の構築は、地方創生やテレワーク、育児と仕事の両立、ハンディキャップを超えた就労などの柔軟な働き方を支援し、災害に強い社会を実現するために重要である。

ユースケースのひとつとして、プロピアニストの演奏をさまざまな視点で体験できる技能伝承コンテンツの制作を行った。コンテンツのユーザ評価や、ICT テストベッド環境における伝送評価の結果を元にして、社会実装・普及への活動を進めている。

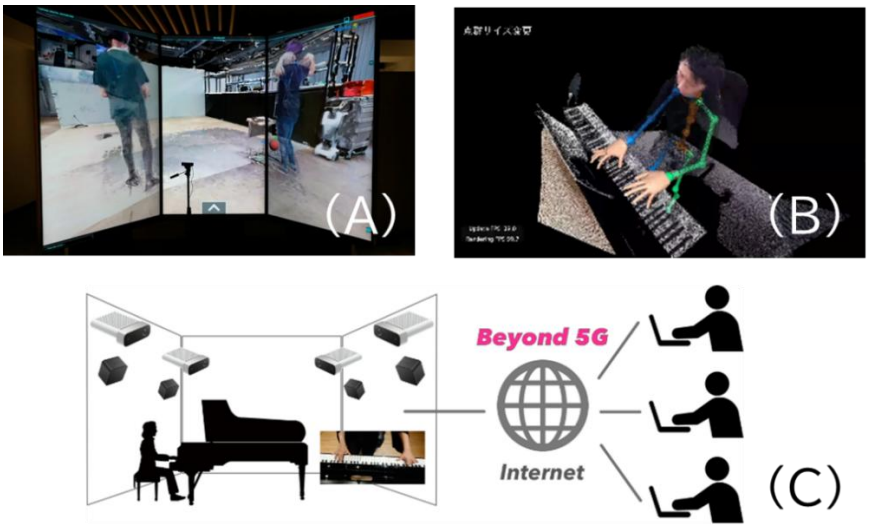


図 5-1 人間拡張・空間創成型遠隔作業支援基盤
(A) 没入型大型ディスプレイを利用した遠隔共同作業の例
(B) プロのピアニストによる演奏の技能伝承コンテンツ
(C) システム構成。空間情報は膨大なデータ量となるため、Beyond5G(6G)を見据えての利用想定

（2） メタバース上で博物館などの展示品について学べるシアター

博物館や科学館などが保有する文化財や研究資料について、メタバース上での授業形式と学芸員等との双方向コミュニケーションを通じて、学習ができるスタジアムシアターを開発。本スタジアムシアター（名称：ダ・ヴィンチスタジアム）は、進行役であるサイエンスコミュニケータと解説役の研究員が授業形式で説明を行う空間と、博物館や科学館等が保有する文化財や研究資料を、高精細映像や 3D アニメーションで忠実に再現したコンテンツ制作がセットで提供され、博物館等は本スタジアムシアターを活用して、イベントや学習会などの教育プログラムを行うことができる。

図 5-2 メタバースによるスタジアムシアター型教育システム

教育プログラム実施例としては、研究員監修のもと3DCG で再構築したイチジク内部空間に入り込み、コバチの飛行軌跡や花粉付着、オス・メスの役割、産卵シーンなどを間近に観察。コントローラを使ってコバチと同じサイズになり、イチジクとコバチの共生関係を様々な角度から間近で観察できるプログラムを制作。さらに果実断面の拡張表示や、資料や動画の表示、ディスカッションを組み合わせた学びにより、微細な生態系を体感しながら、次世代の科学コミュニケーション手法の開発に取り組んでいる。

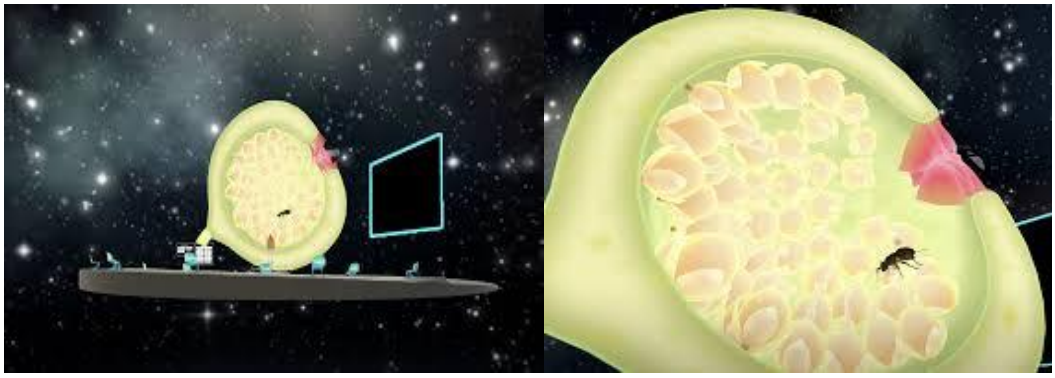


図 5-3 イチジクとコバチの共生関係を題材にした教育プログラム

5.2　身体能力・存在の拡張

5.2.1　H2L 株式会社

（1）　筋変位センサを用いた体験の分析と分析結果の視覚的伝達 —BodySharing によるスポーツの分析とフィードバック

アプリケーションの概要と特徴

このアプリケーションは、筋変位センサから得られたリアルタイムの筋変位データの分析結果を、視覚的に変換してフィードバックとして提示する。特にスポーツにおいて、従来は言語化や映像による間接的な指導に頼っていた身体感覚を、数値や視覚表現により明示化しユーザにフィードバックする（図 5-4）[25] [34]。

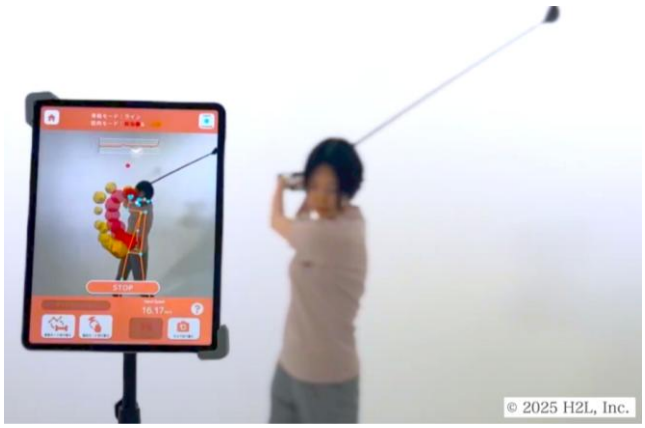


図 5-4 スポーツ体験時の固有感覚（力加減）の分析結果の「見える化」の様子

（2）　筋変位センサを用いた労働体験の分析とコミュニケーション —BodySharing for Business

アプリケーションの概要と特徴

「BodySharing for Business」は、労働現場における身体感覚と心理的状態の可視化を目的として開発された業務支援アプリケーションである。H2L が開発した筋変位センサ搭載デバイス「FirstVR」と連携し、使用者の筋肉の緊張や疲労の状態をリアルタイムで推定する。これらの生体情報をメタバース空間上のアバターに反映することで、非言語的な労働状態の共有が実現されている（図 5-5）[35]。

従来のビジネスコミュニケーションでは、労働者の疲労や緊張といった内的状態を共有する手段が限られていたため、業務量の偏在や過剰負荷の早期検知が困難であり、組織内のマネジメントやケアに遅れが生じることが多かった。

BodySharing for Business は、この課題に対して、筋変位センサによる固有感覚の計測を用いたステータス共有機能を提供する。測定された身体情報は「元気度」「リラックス度」といった抽象的なカテゴリに変換され、オフィス空間に設置されたアバターの周囲のアイコンに視覚的に反映される。

図 5-5 BodySharing for Business のアバターとメタバース空間

ユースケースと特徴の発揮

テレワークや在宅勤務の支援

リモートワークにおいて、上司が部下の業務状態を常時把握することは極めて難しい。本アプリケーションでは、業務開始時と業務終了時の測定により、ユーザの身体的負荷や精神的緊張の傾向を明示し、上司が業務量の配分を判断する材料として活用している。業務中の継続的な緊張状態が視覚的に表示されることで、適切な休憩やタスク再配分を促進する。

現場作業の管理と遠隔サポート

建設現場や工場といったフィールド業務において、工場内の作業者の業務負荷状態を本社側が確認する手段が不足していた。本アプリケーションを通じて、現場の作業者が装着した FirstVR から取得される筋変位データを基に、遠隔地にいるマネジメント層が作業者の状態を視認し、必要に応じた声かけや業務調整を実施している。

6. プラットフォーム（人間拡張基盤）

本章では株式会社NTTドコモが開発を進めるプラットフォーム、「人間拡張基盤」について説明する。

6.1 システム構成

図 6-1 のようにネットワークに接続された動作や感覚を把握する機器（センシングデバイス）で取得したデータを、同じくネットワークに接続された動作や感覚を再現する駆動機器（アクチュエーションデバイス）を通して、人やロボットなどの他者にリアルタイムに伝える際に、情報を変換する役割を実現する。人間拡張基盤の特徴は、接続する人やロボット同士の大きさや骨格などの身体データや人それぞれに異なる感覚の感度を比較し、身体データの差分を考慮して人やロボットを動かすこと、再現する動作の大きさや力あるいは感覚を拡大または縮小することである。この特徴により、大きさや骨格の異なる人やロボット同士の無理のない自然な動作の共有や、言葉で表現することが難しい他人の触った感覚や食べた味を共有することを実現する。

また、デバイスはネットワーク経由で人間拡張基盤に接続できるため、さまざまな場所で人間の身体を拡張させることが可能となる。

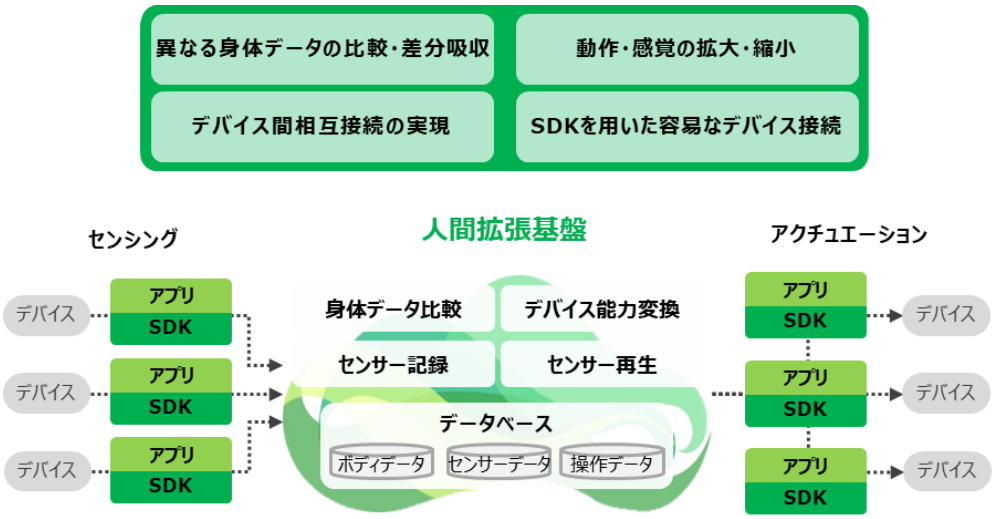


図 6-1 システム構成

6.2 機能

人間拡張基盤が 2024 年度時点で実現している機能を以下に示す。

（1） 動作共有

人やロボット同士の身体データを比較し、その差分を考慮して動作を共有する。無理のない自然な動作の共有や、大きい動作をもとにきめ細やかな動作を再現することを実現する［36］（図 6-2）。

図 6-2 動作共有

（2） 触覚共有

受け手の触覚に対する感度特性をふまえて触覚を共有する。職人しか認識できないような触覚の違いを素人が認識することや、昔に触った感覚をリアルに思い出すことや、EC サイトで洋服などの商品の手触りを感じることを実現する［37］(図 6-3)。

図 6-3 触覚共有

（3） 味覚共有

受け手の味覚に対する感度特性をふまえて味を共有する。メタバース空間のバーチャル体験と連携させたり、映画やアニメにおいて作者が伝えたい味をコンテンツに付加させたりなど、よりリッチなコンテンツ提供を実現する［38］(図 6-4)。

図 6-4 味覚共有

6.3　マイルストーン

次に今後のマイルストーンを図 6-5 に示す。図 6-5 のように、感覚や感情、最終的には自分の考えていることまで、言葉を使用することなく相手と共有することを目指している。また、現在はそれぞれの感覚を個々に共有するにとどまっているが、複数の感覚を同時に共有できる世界を実現したいと考えている。

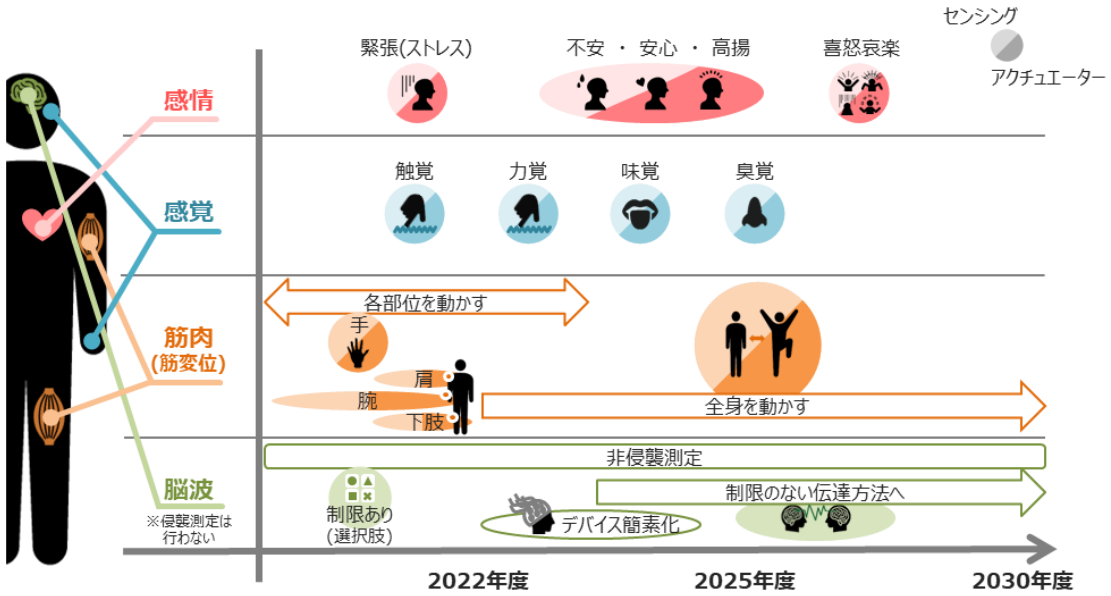


図 6-5 人間拡張基盤のマイルストーン

7. 標準化

人間拡張の社会実装を促進し、エコシステムを維持・拡大するためには、デバイス、クラウドアプリケーション、プラットフォーム及びこれらをつなぐインタフェースなどの構成要素の国際標準化が不可欠である。標準化によって、異なる国や地域、企業の製品間の相互運用性を確保され、ユーザは国・地域や企業などを意識せず、多様な選択肢から最適な製品を選択することが可能となる。また、企業にとっては、多様な地域の市場への参入障壁が低減されることになる。さらに、標準仕様に基づく開発は、研究開発コストの削減と技術革新の加速をもたらす。

人間拡張は、ハードウェア、ソフトウェア、通信プロトコル、データフォーマットなど多層にわたる技術要素で構成される。これらの要素が統一的な標準に基づいて設計・実装されることで、技術の普及と市場の拡大が実現される。さらに、国際標準化により品質と安全性の基準が明確化され、ユーザの信頼獲得と社会的受容の促進にも寄与する。

本章では、人間拡張に関する既存の国際標準化団体の取り組みを概観した上で、本コンソーシアムの活動方針を紹介する。

7.1 既存団体の取組み

図 7-1 に人間拡張に関連する標準化に取り組んでいる団体を示す。複数の団体が人間拡張に関連する標準化に取り組んでいるが、対象とする技術領域で分類すると、概ね以下の 3 種類に分けられる。

- デバイス内部の API(図中 c)やハードウェアインタフェース(図中 d)の標準化に取り組んでいる団体
  - Khoronos OpenXR グループ[9]、W3C Immersive Web Working Group(WG)[10]、IEEE Open Integration WG[11]が含まれる
- ネットワーク上でのデバイス間、デバイス－クラウドアプリケーション/プラットフォーム間の通信インタフェースやデータフォーマット(図中 a、b)の標準化に取り組んでいる団体
  - ITU-T SG21 Q8-ILE(Immersive Live Experience)[12]、ISO/IEC JTC1/SC29[13]、IETF Media Type Maintenance WG[14]が含まれる。
- ハプティクスやメタバースなどを用いたサービスで必要となる標準について、技術領域に限定せずに業界内での要求の取りまとめを行い、他団体へインプットする団体
  - Haptics Industry Forum(HIF)[15]や Metaverse Standards Forum(MSF)[16]が含まれる。

[9] https://www.khronos.org/openxr/
[10] https://www.w3.org/immersive-web/
[11] https://sagroups.ieee.org/2861/home/open-integration-working-group/
[12] https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2025-2028/21/Pages/default.aspx
[13] https://www.iso.org/committee/45316.html
[14] https://datatracker.ietf.org/wg/mediaman/about/
[15] https://hapticsif.org/
[16] https://metaverse-standards.org/

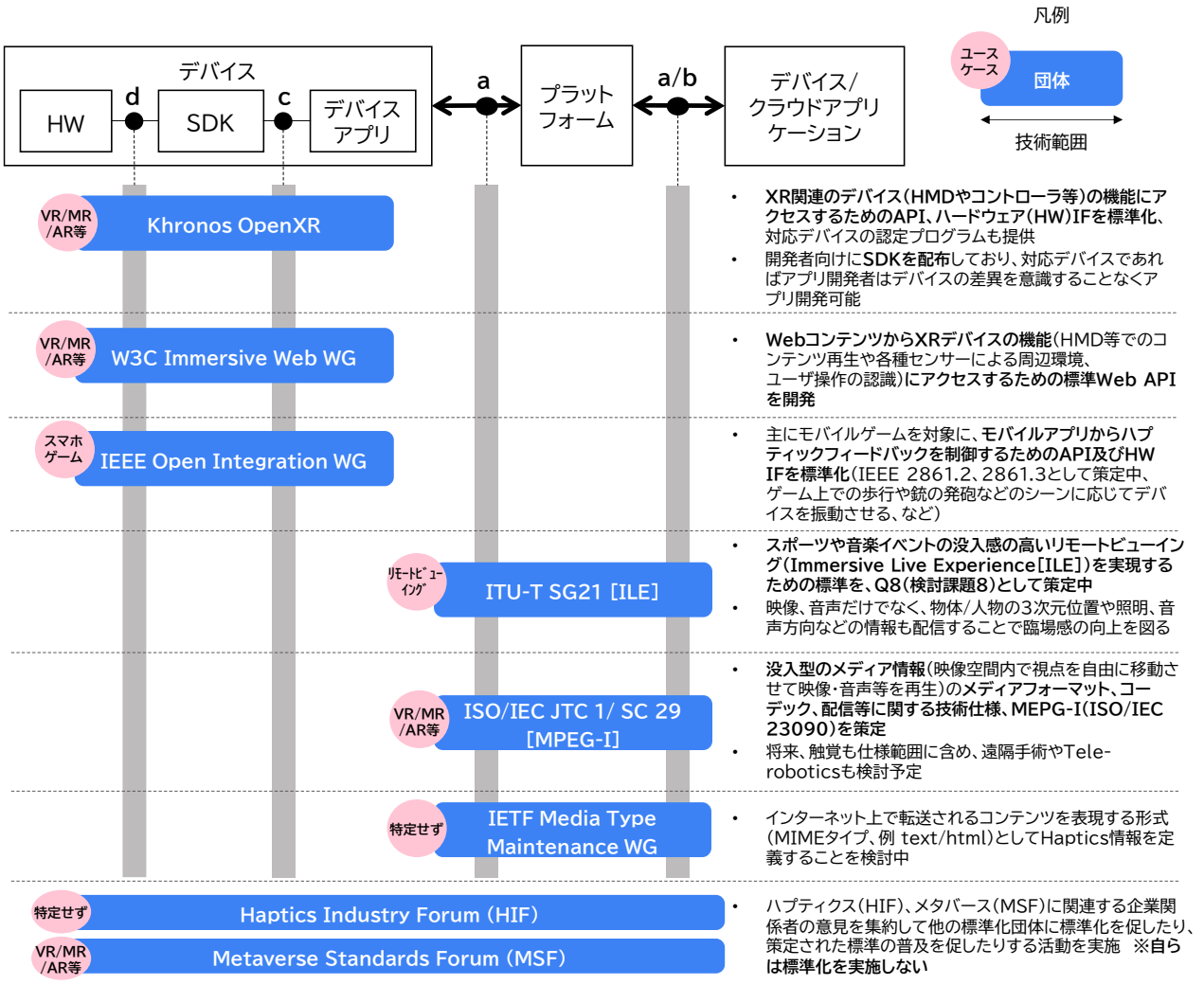


図 7-1 既存の国際標準化団体の取組みとその技術領域

また、標準仕様の策定への関わり方についても各標準化団体で異なる。図 7-2 に示すように、(I)仕様を策定せずに、ハプティクスやメタバースなど特定のサービスに関連する業界内の標準化ニーズを取りまとめたうえで、他の団体に対して標準仕様策定を働きかける団体(HIF と MSF が該当)と、(II)自ら標準仕様の策定を行う団体(その他団体が該当)に分けられる。また、図青枠で示すように標準仕様の策定から実装、市場展開までは複数のステップで構成され、これらステップのどこまで関与するかについても II の中で団体ごとに異なる。

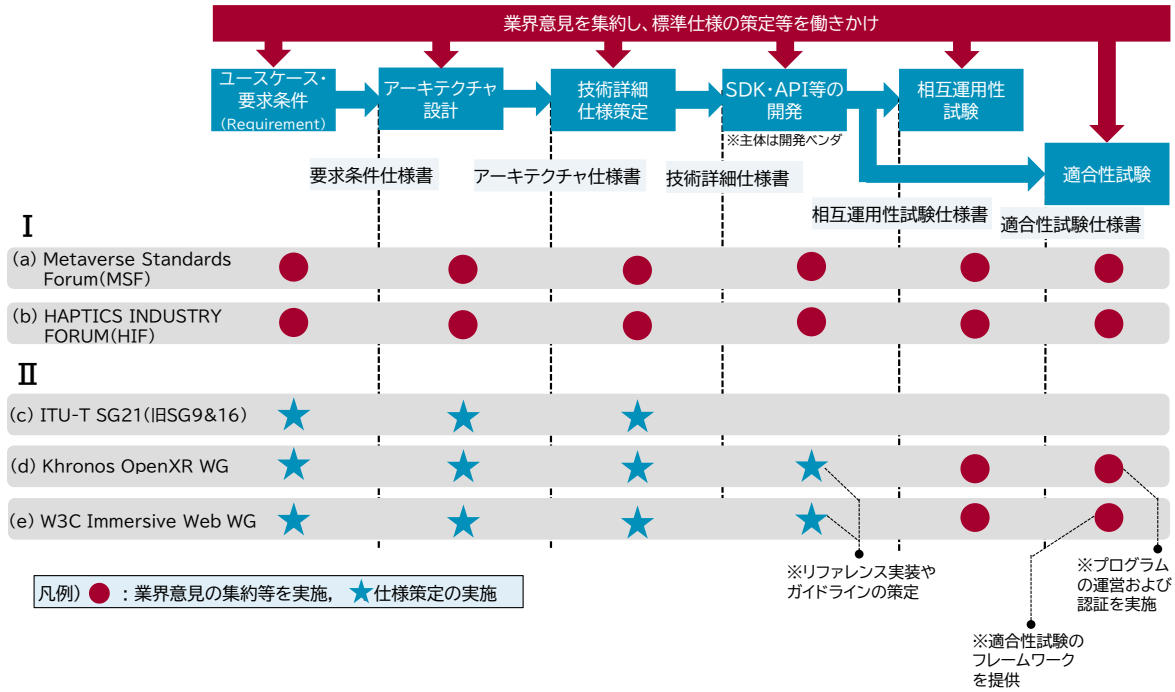


図 7-2 既存の国際標準化団体の標準仕様策定への関わり方

7.2 本コンソーシアムの活動方針

本コンソーシアムでは、想定ユースケースを実現するに当たり既存の標準仕様を極力活用しながら、足りない機能の標準化を進める方針を採っている。現在、前節で述べた国際標準化の動向を踏まえ、想定するユースケースと既存標準のギャップ分析、すなわち、想定ユースケースを実現するにあたり、既に策定済み、あるいは策定予定の標準仕様を調査し、これら既存標準に不足する機能を特定する作業を進めている。

人間拡張の4類型のうち、知覚の拡張、認知の拡張、および存在の拡張（テレイグジスタンスを除く）については、図 7-1 に示した標準化団体において関連する標準仕様の策定が行われている。特に、ITU-T SG21 Q8-ILE（Immersive Live Experience）では、本コンソーシアムが想定するユースケースを包括的にサポート可能な標準化が進められている。1 人称視点の体験を、視聴覚だけでなく、触覚、嗅覚を含む様々な感覚を含め遠隔地のユーザと共有することを想定している点、体験の共有は、コンサート（例えばコンサートホールでの楽器の演奏体験）やスポーツ観戦などに留まらず、医療、教育、遠隔作業など多様なユースケースを想定している点などが取組みの特徴として挙げられる［39］。今後、ITU-T SG21 Q8-ILE を中心に既存の標準仕様のギャップ分析を進め、不足する機能等についてコンソーシアム内でとりまとめ、コンソーシアムからの要望として ITU-T 等関連する標準化団体へインプットすることを検討する。

一方で、身体能力の拡張や、存在の拡張のテレイグジスタンスについては、現時点で関連する既存の標準化団体を特定できていない。これらの類型のユースケースをマルチベンダー環境で実現するには、ロボットを遠隔操作する際のコマンドや応答を送受信するための通信プロトコルやそのデータフォーマット、ロボットを管理するためのアーキテクチャなど、多岐にわたる標準化が必要となる。引き続き、コンソーシアム内で関連標準化団体に関する調査を行うものの、存在しないことが明らかになった場合には、コンソーシアム内での標準仕様の策定を視野に入れ、検討を進める。

8. ELSI

人間拡張技術の進展や社会への普及に伴い、プライバシーの侵害、格差の拡大、自己同一性の変容といった課題が顕在化する可能性がある。社会に受容される人間拡張技術の開発、普及のためにはこれらの倫理的、法的、社会的な課題、すなわち ELSI（Ethical, Legal and Social Issues）への対応が不可欠である。

- 格差の拡大
  人間拡張技術へのアクセスが経済力によって制限される場合、新たなデジタルデバイド、すなわち人間拡張技術による能力拡張を受けた者とそうでない者との間に、従来とは質的に異なる格差が生じるおそれがある。
- 安全性とプライバシーの侵害
  装着型デバイス（ウェアラブルデバイス）や体内埋込型デバイスの普及に伴い、サイバー攻撃による身体的被害のリスクや、生体情報を含む個人データの保護が重要な課題となる。
- アイデンティティの変化
  人間とテクノロジーの融合が進むことにより、人間性の定義や個人の自己同一性に関する根本的な問い直しが求められる可能性がある。

本コンソーシアムは、人間拡張技術の健全な発展と社会受容性の向上を目指し、ELSI に関する継続的な検討を行う。内閣府 SIP バーチャルエコノミー課題[17]で組成されているデジタルハプティクスコンソーシアム[18]やインターバース社会実装推進メタコンソーシアム[19]をはじめ、国内外の関係団体や研究機関が ELSI について行った検討結果を参考にし、人間拡張技術が社会に与える影響を多角的に捉え、技術開発と社会実装の両面において継続的な議論と検討を進める予定である。

[17] 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 3 期「バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」、https://sip3.nedo.go.jp/virtual/index.html
[18] https://www.dx-haptics.com/
[19] https://sip3.nedo.go.jp/virtual/info/20250307_01.html

9. 今後の課題

人間拡張技術の社会実装を進めるにあたっては、解決すべき課題が複数存在する。本章では、技術、法制度、社会の観点から主な課題を説明する。

まず、技術的には、多様なプレーヤーのデバイスやクラウドアプリケーション、プラットフォームの相互運用性の向上に向け、通信プロトコルやデータ形式など、インタフェースの標準化とその普及が不可欠である。7 章で述べたとおり、既存の標準化団体において、人間拡張に関連する標準仕様の策定が多岐にわたる技術領域で進められている。しかし、こうした標準仕様を「人間拡張」の文脈で俯瞰し整理する取り組みは行われていない。このため、現状では人間拡張の技術者が「標準仕様の存在を知らずに独自技術で実装進める」、「本来の趣旨とは異なる目的で既存の標準仕様を使用する」といったリスクが存在する。こうしたリスクを放置すれば、異なるベンダー間の相互運用性を阻害し、エコシステムの発展を妨げる要因になり得る。これを回避するには、人間拡張において利用可能な標準仕様を人間拡張の類型やユースケース別に整理し、技術者に広く周知する取組みが必要となるだろう。

このほか、技術的な課題としては、6G や APN に代表される超低遅延な通信技術の普及や、人間の知覚・運動機能を正確に計測するセンシング技術の高度化が挙げられる。例えば、経験・感覚を共有するユースケースでは、遅延が共有された経験・感覚への没入感に影響を与えるため、ミリ秒単位でのリアルタイム性が求められる。デバイスそのものについては、装着性、小型化、軽量化、そして長時間の利用を可能にするバッテリ技術の改善も重要な課題である。

次に、法制度的課題としては、個人データの取り扱い、プライバシー保護、知的財産権の保護などの法的枠組みの整備が挙げられる。現行制度では対応が不十分な領域も存在し、技術の進展に合わせた柔軟かつ実効性の高いルール形成が必要である。

社会的課題としては、技術の理解促進と社会的受容に向けた啓発活動の強化が挙げられる。人間拡張が広く受け入れられるためには、利点だけでなく潜在的なリスクや課題についても社会全体で議論していく必要がある。特に倫理的・法的・社会的課題（ELSI）については、格差拡大、プライバシー侵害、アイデンティティ変容などの論点を産官学および国際的枠組みなどで継続的に議論し、迅速かつ柔軟に対応していくことが求められる。さらに、専門人材の育成や既存技術者・研究者のスキル向上支援も不可欠である。

10. おわりに

本書では、人間拡張技術の全体像を整理、俯瞰するとともに、デバイス、クラウドアプリケーション、プラットフォームそれぞれについて本コンソーシアム会員の取組みを紹介した。また、人間拡張技術の標準化に関して、既存の標準化団体の取組みを整理し、本コンソーシアムにおける標準化に対する方針について説明した。さらに、人間拡張の社化実装を進める上での課題についても説明した。

本コンソーシアムは、人間拡張技術の商用化とサービス化を推進し、社会に広く普及させることで、私たちの生活や産業に具体的な価値をもたらし、新たな市場の創出に貢献していく。本書で説明したとおり、人間拡張は単なる利便性向上のためのツールではなく、私たちの暮らし、産業、社会の構造、さらには「人間」という概念そのものに変革をもたらす可能性をもっている。その変革を望ましい形で実現するためには、本コンソーシアムの活動に加え、多様な知見を持つ関係者間の協働が不可欠である。

今後も本コンソーシアムは、産官学の多様なステークホルダーとの協力を通じて知見の蓄積と共有、標準化活動の推進、社会的理解の醸成を進める。これらの取り組みを継続することで、人間拡張が安全かつ公平に普及し、持続可能な社会の発展に寄与することを目指す。

本白書を契機に、より多くの学生や社会人が人間拡張に関心を持ち、活発な議論が生まれることを期待している。人間拡張が拓く未来は、私たち一人ひとりの主体的な関与と分野を超えた「共創」によって形作られる。本白書が、その共創に向けた第一歩となることを願う。

引用文献

[1] 暦本 純一，“人間拡張が築く未来，”情報学研究: 学環: 東京大学大学院情報学環紀要，2021.

[2] 山本 絵里香，長尾 正太郎，浦上 ヤクリン，金岡 利知，“聴覚拡張ヒアラブルデバイス：ユーザ体験（UX）価値を高めるアジャイル開発，”情報処理学会インタラクション 2023，2023.

[3] Urakami, Jacqueline; Moriwaki, Akito; Nagao, Shotaro; Osumi, Kousuke; Yamamoto, Erika; Kanaoka, Toshikazu;, “Augmenting Auditory Attention and Memory to Reduce Cognitive Load in Dual Task,” Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2023.

[4] 金岡 利知，長尾 正太郎，大角 耕介，山本 絵里香，宝珠山 治，“無意識な音を意識化させるヒアラブルデバイスの提案，”情報処理学会インタラクション 2022，2022.

[5] 大原 健悟，大角 耕介，山本 絵里香，諸菱 正典，荒川 隆行，“リアルタイムに動作する方向と声の特徴を利用した目標音抽出，”情報処理学会，2024.

[6] 大角 耕介，大原 健悟，山本 恵子，山本 絵里香，諸菱 正典，荒川 隆行，“バイノーラルマイクを用いた話者及び音源到来方向のリアルタイム同時推定，”情報処理学会，2025.

[7] K. Ogawa, C. Thakur, T. Ikeda, T. Tsuji, and Y. Kurita, ”Development of a Pneumatic Artificial Muscle Driven by Low Pressure and Its Application to the Unplugged Powered Suit,” Advanced Robotics, Vol.31, Issue 21, pp.1135-1143, 2017.

[8] C. Thakur, K. Ogawa, T. Tsuji, and Y. Kurita, ”Soft Wearable Augmented Walking Suit with Pneumatic Gel Muscles and Stance Phase Detection System to Assist Gait,” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.3, Issue 4, pp.4257-4264, 2018.

[9] S. Das, C. Lowell, Y. Kishishita, K. Ogawa, T. Tsuji, and Y. Kurita, ”ForceHand glove: a wearable force-feedback glove with pneumatic artificial muscles (PAMs),” IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, Issue 3, pp.2416-2423, 2018.

[10] K. Ogawa, T. Ikeda, and Y. Kurita, ”Unplugged Powered Suit for Superhuman Tennis,” 12th France-Japan Congress, 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics, pp.355-358, 2018.

[11] W. Sakoda, T. Tsuji, and Y. Kurita, ”VR training system of step timing for baseball batter using force stimulus,” AsiaHaptics2018, D1P11, 2018.

[12] W. Sakoda and Y. Kurita, ”Coaching system of motion timing for a baseball batter using force stimulus,” Worldhaptics DM1.06, 2019.

[13] P. Ramasamy, G. Renganathan, and Y. Kurita, “Force Feedback-Based Gamification: Performance Validation of Squat Exergame Using Pneumatic Gel Muscles and Dynamic Difficulty Adjustment,” IEEE Robotics and Automation Letters, 8(10):6371 - 6378, 2023.

[14] ミズノ株式会社，”人間拡張技術の社会実装に向けた試み,” [Online]. Available: https://corp.mizuno.com/jp/articles/0067. [Accessed 12 9 2025].

[15] ミズノ株式会社，”スポーツの楽しさ･価値をより多くの人たちにスポーツ用義足板バネ開発,” [Online]. Available: https://corp.mizuno.com/jp/articles/0006. [Accessed 12 9 2025].

[16] ミズノ株式会社，”ミズノパワーアシストスーツで体への負荷を減らし、働く人を重力から解放,” [Online]. Available: https://corp.mizuno.com/jp/articles/0036. [Accessed 12 9 2025].

[17] G. A. Van Kan, Y. Rolland, S. Andrieu, J. Bauer, O. Beauchet, M. Bonnefoy, M. Cesari, L. M. Donini, S. Gillette-Guyonnet and M. Inzitari, ”Gait speed at usual pace as a predictor of adverse outcomes in community-dwelling older people an International Academy on Nutrition and Aging (IANA) Task Force,” *The Journal of nutrition, health and aging,* vol. 13, no. 10, pp. 881-889, 2009.

[18] ミズノ株式会社，”「歩く」を科学した『Motion DNA』で健康意識を高め、「いつまでも歩ける身体作り」をサポート,” [Online]. Available: https://corp.mizuno.com/jp/articles/0030. [Accessed 12 9 2025].

[19] ミズノ株式会社，”パーソナルフィッティングシューズ「3D U-Fit」の開発,” 26 11 2024. [Online]. Available: https://corp.mizuno.com/jp/news-release/2024/20241126. [Accessed 12 9 2025].

[20] T. Hasegawa, H. Waita, T. Kawakami, Y. Takemura, T. Ishikawa, Y. Kimura, C. Tanaka, K. Sugiyama , T. Yoshiike, “Powerful and dexterous multi-finger hand using dynamical pulley mechanism,” *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA),* pp. 707-713, 2022.

[21] Honda R&D, ”人に寄り添い、人の役に立つ Honda アバダーロボット,” [Online]. Available: https://global.honda/jp/RandD/activity/rdtopics/advancedtech2025/multi_finger/. [Accessed 30 8 2025].

[22] Honda, ”Honda ROV（遠隔操縦無人潜水艇）コンセプトモデル,” [Online]. Available: https://global.honda/jp/tech/Honda_ROV_Remote_Operation_Vehicle_underwater_robot/. [Accessed 30 8 2025].

[23] S. Hosono, S. Nishimura, K. Iwasaki , E. Tamaki, “Pondushand: Measure user’s weight feeling by photo sensor array around forearm,” *SIGGRAPH Asia 2019 Posters,* pp. 1-2, 2019.

[24] T. Miyake, S. Yamamoto, S. Hosono, Z. Cheng, C. Zhang, E. Tamaki and S. Sugano, ”Gait phase detection based on muscle deformation with static standing-based calibration,” *Sensors,* vol. 21, no. 4, p. 1081, 2021.

[25] S. Shimabukuro, T. Miyake and E. Tamaki, ”Time Series Analysis of Muscle Deformation During Physiotherapy Using Optical Wearable Sensors,” *Sensors,* vol. 25, no. 11, p. 3507, 2025.

[26] E. Tamaki, T. Miyaki and J. Rekimoto, ”PossessedHand: techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli,” *Proceedings of the sigchi conference on human factors in computing systems,* pp. 543-552, 2011.

[27] トヨタ自動車株式会社, ”HSR を遠隔操縦する,” 16 7 2025. [Online]. Available: https://global.toyota/jp/download/8725221. [Accessed 16 9 2025].

[28] トヨタイムズ, ”東京 2020 を支えた技術と人 第 2 回 おもてなしロボット「HSR」,” 23 3 2022. [Online]. Available: https://toyotatimes.jp/spotlights/supported_tokyo2020/057.html. [Accessed 16 9 2025].

[29] トヨタ自動車株式会社, ”ロボットと AI の融合を進め技術の革新に貢献 ～「ロボット基盤モデル」の共創研究～,” 27 3 2025. [Online]. Available: https://global.toyota/jp/mobility/frontier-research/42394378.html. [Accessed 16 9 2025].

[30] 一般社団法人 AI ロボット協会, ”一般社団法人 AI ロボット協会（AIRoA）AI×ロボット分野で、ロボットデータエコシステム構築を目指し活動を開始,” 7 3 2025. [Online]. Available: https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000001.000158322.html. [Accessed 16 9 2025].

[31] COMNEXT, ”ミハル通信とトヨタ自動車 未来創生センター トヨタ製ロボットの遠隔操縦デモを共同で実施 イマーシブ音声・映像の極低遅延伝送で操縦,” 9 2024. [Online]. Available: https://www.miharu.co.jp/information/images/2024_9_newmedia_COMNEXT.pdf. [Accessed 16 9 2025].

[32] トヨタ自動車株式会社, ”トヨタ自動車、第 3 世代のヒューマノイドロボット T-HR3 を発表,” 21 11 2017. [Online]. Available: https://global.toyota/jp/detail/19666327/. [Accessed 16 9 2025].

[33] 情報通信研究機構, ”革新的情報通信技術研究開発委託研究,” [Online]. Available: https://www.nict.go.jp/collabo/commission/B5Gsokushin/B5G_02901.html. [Accessed 30 8 2025].

[34] S. Shimabukuro, T. Miyake, T. Akamine, C. Ookubo, D. Yanagihara and E. Tamaki, ”Investigating the Relationship Between Anxiety, Depression, and Forearm Muscle Deformation in Amateur Athletes Using Time-Series Analysis,” *Frontiers in Sports and Active Living,* vol. 7, p. 1561808, 2025.

[35] H2L 株式会社, ”乃村工藝社と H2L が共同開発　感覚共有できるメタバースオフィス「BodySharing® for Business」正式リリース,” 29 6 2023. [Online]. Available: https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000045.000006831.html. [Accessed 30 8 2025].

[36] 株式会社 NTT ドコモ, ”あなたと常識を変えていく,” [Online]. Available: https://www.docomo.ne.jp/corporate/anatatodocomo/changesociety/04/. [Accessed 7 9 2025].

[37] 株式会社 NTT ドコモ, ”あなたと記憶の形を変えていく,” [Online]. Available: https://www.docomo.ne.jp/corporate/anatatodocomo/changesociety/07/. [Accessed 7 9 2025].

[38] 株式会社 NTT ドコモ, ”あなたと世界を変えていく,” [Online]. Available: https://www.docomo.ne.jp/corporate/anatatodocomo/changesociety/08/. [Accessed 7 9 2025].

[39] 長尾 慈郎, ”グローバルスタンダード最前線 ITU-T SG16 参加報告,” 21 6 2024. [Online]. Available: https://journal.ntt.co.jp/news/27077. [Accessed 10 8 2025].

[40] OECD, ”OECD Skills Studies, Skills for Social Progress, THE POWER OF SOCIAL AND EMOTINAL SKILLS,” OECD publishing, 2015.

筆者一覧

本書は以下の人間拡張コンソーシアム会員によって執筆された。

【企業・団体会員】

- H2L 株式会社
- 株式会社 NTT ドコモ
- 京セラ株式会社
- 住友電気工業株式会社
- TOPPAN 株式会社
- トヨタ自動車株式会社 未来創生センター
- 株式会社本田技術研究所
- ミズノ株式会社

【個人会員】

- 広島大学大学院先進理工系科学研究科 教授 栗田 雄一

（50 音順に記載）

改版履歴

日付	Ver.	更新内容
2025 年 10 月7日	1.0.	初版発行

※3 章の図表には、Adobe FireFly を使用して生成した画像が含まれる。これらの画像を機械学習のデータとして使うことを禁ずる。