

デジタル化による新たな価値の創造

近年 DX (Digital Transformation) という言葉が多くのメディアで取り上げられています。また 2021 年にデジタル庁が発足し、行政のデジタル化、規制改革、公務員の「デジタル職」採用、マイナンバーカード普及の推進、教育のデジタル化、デジタル格差の解消に向けた活用支援、テレワークの推進などが推し進められています。こうした背景の下、私たちにとってデジタル化あるいはデジタル技術の活用という取組みが身近なものになってきました。DX という言葉自体は 2004 年にスウェーデン大エリック・ストルターマン教授により、「IT の浸透が、人々の生活をあらゆる面でより良い方向に変化させること」と定義されました。その後も様々な先生方、団体による検討や定義が発表されています。このように一口に DX と言っても統一された定義はなく、取り扱う領域が多岐にわたるため、曖昧な印象を持たれることもあるのではないのでしょうか。デジタル化についても同様のことが言えると思います。

本小特集ではこのような DX 及びデジタル化の取組みの具体的な例を挙げることを意図して企画されました。2000 年代に入ってから IT 産業は、インターネット上に存在する膨大なデータを活用して新しいサービスを創出することで飛躍的な発展を遂げてきました。一方で私たちの社会活動、企業活動及び研究活動といった仕事や日常生活における様々な活動の多くはアナログプロセスです。現在これらのプロセスをデジタル化することで新しいサービスの創造や効率化を追求する動きが様々な分野で活発になっています。小特集ではこうした取組みにおける 5 件の最新事例を主に技術的な側面から解説しています。始めに実在するヒトのあらゆる社会活動をデジタル化するという野心的な試みとして、人間と同じ知性や人格を感じられ、本人として社会の中で認知され活動できる自分の分身のような存在の実現をめざす“Another Me”の取組みを紹介します。続いて XR (Cross Reality) を活用した研究活動におけるデジタル化の取組み (RX: Research Transformation) について解説論文で紹介します。次にスポーツ (体操) におけるヒトの動作を、ライダー (Lidar) を用いてデジタル化することにより精度の高い採点を可能にする技術、振動を介して離れた場所にいる人と体験を共有する取組みについて解説論文で紹介します。最後に企業活動におけるデジタル化の推進事例として製造領域における取組みについての解説を掲載しています。これらの事例が DX・デジタル化推進ひいては新しいサービス、価値創造を推進する際の一助となれば幸いです。

最後になりましたが、本小特集の発行にあたり、お忙しい中貴重な時間を割いて御執筆して下さいました。筆者の皆様、査読、校閲に御協力して下さいました皆様に感謝致します。ありがとうございました。

小特集編集チーム

山ヶ城尚志、遠藤寛之、瀧川道生、
竹村暢康、中西孝行、松井健一

人のデジタルツイン実現への挑戦 「Another Me」

深山 篤 Atsushi Fukayama 日本電信電話株式会社

1 はじめに

ここ数年、物理的な物体やプロセスの計測・分析、人間の生体情報や行動履歴など個人データの収集・モデル化などの技術の実用化が進み、「デジタルツイン」という言葉を様々なシーンで耳にするようになった。デジタルツインとは、物理世界に存在する物体や人、システム、環境などのデータを収集し、対象の双子（ツイン）がサイバー空間上に存在しているかのようにデジタルモデルとして再現し、対象の状態や対象間の相互作用の予測や診断等の応用に活用する技術の総称である。

デジタルツイン技術の活用が進んでいる分野としては、製造（製品設計や生産管理等の効率化）⁽¹⁾、スマートシティ（移動・交通・街区管理などの最適化）⁽²⁾、医療（生活習慣・投薬・手術・リハビリ等が心身状態に与える影響の予測）⁽³⁾ などがある。このように様々な産業ドメインで様々な対象のデジタルツインが作られ、社会全体にデジタルツインが浸透した将来、どのよう

な技術が必要とされるのか。その一つの考え方として、我々は2030年頃の実現を目標にデジタルツイン技術の方向性を「デジタルツインコンピューティング構想」として2019年6月に発表した（図1）⁽⁴⁾。

これは、IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）構想⁽⁵⁾の一環として、端末まで含めたエンドツーエンドで光により通信するオールフォトニクス・ネットワーク等で実現される大容量・低遅延・低消費電力の通信・コンピューティング基盤上のサービス基盤として計画されているものである。これまで、ドメインごとに個別に構築・利用されてきたデジタルツインをサイバー空間の共通のプラットフォーム上に配置し、それら多様なデジタルツインの相互作用により、全体として一つの仮想的な社会や地球環境を実現することを目指している。これにより、実在の対象のデジタルツインのみでなく、それらの複製や融合、または要素の交換などデジタルツインに対する演算を実装することで、今は存在しない、遠い未来の都市や社会の在り方のシミュ

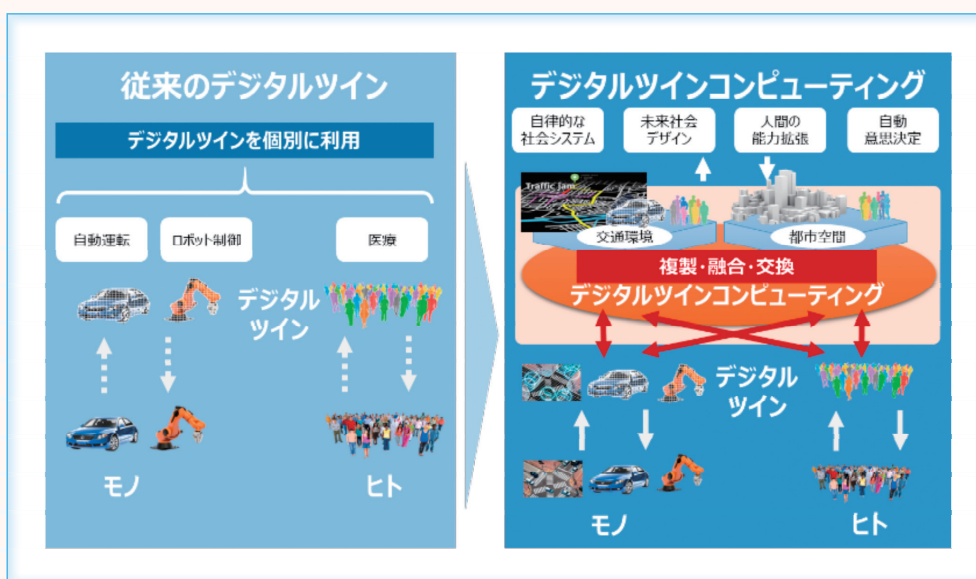


図1 「デジタルツインコンピューティング構想」の概念

レーションも可能となる。また、個々の人の内面を再現することで、画一的なモデルではなく、実在の人々の考え方や行動の多様性を踏まえた、小集団から地域社会、国家など様々なレベルの社会シミュレーションも可能となるであろう。

「デジタルツインコンピューティング構想」には幅広い技術が必要であり、数多くの解くべき課題が存在する。構想をより具体化し、その実現を加速するため、2020年11月に四つのグランドチャレンジを設定し公開した⁽⁶⁾。人の内面から、人と人の相互作用、それらを組み合わせた社会シミュレーションから、更には社会・経済システムの調和による地球環境の平衡解の導出と、ミクロからマクロへ「デジタルツインコンピューティング構想」の全ての領域をカバーするものとなっている(図2)。本稿ではこの中で、人を内面から外面までトータルにデジタル化し、本人として行動できるデジタルツイン「Another Me」に焦点を絞って解説する。

2 Another Me を構成する技術

「デジタルツインコンピューティング構想」のグラン

ドチャレンジの一つである Another Me では、実在の人の内面や外面をコピーしたデジタルツインが社会の中で本人に代わり活動することで、時間・空間やハンディキャップなど様々な制約を越えて自己実現や成長の機会を拡張することを目指している。そのような Another Me を実現するための要件として「本人性」「自律性」「一体性」(図3)を設定し、その実現に向けた技術開発を進めている。本節では、これら要件の実現に向けた様々な技術開発の中から、それぞれ一例を紹介する。

まず、Another Me が実在の人物として社会の中で活動するには、その人の見た目や動作などの外見や、性格・価値観など内面の再現により、その人であると認められる「本人性」が必要となる。昨今のCG(Computer Graphics)技術の進化により、顔や体つきなどの相貌は本人と見分けがつかないものできてきている。更に、機械学習技術の進展により、本人の映像や音声等のデータから声質・抑揚の特徴や、身振り・手振り、表情の癖などを学習し、所望の動作(発話内容など)を指定するだけで、その人らしい音声や表情・動作を自動的に生成する技術も実用化段階に入ってきており、より少量

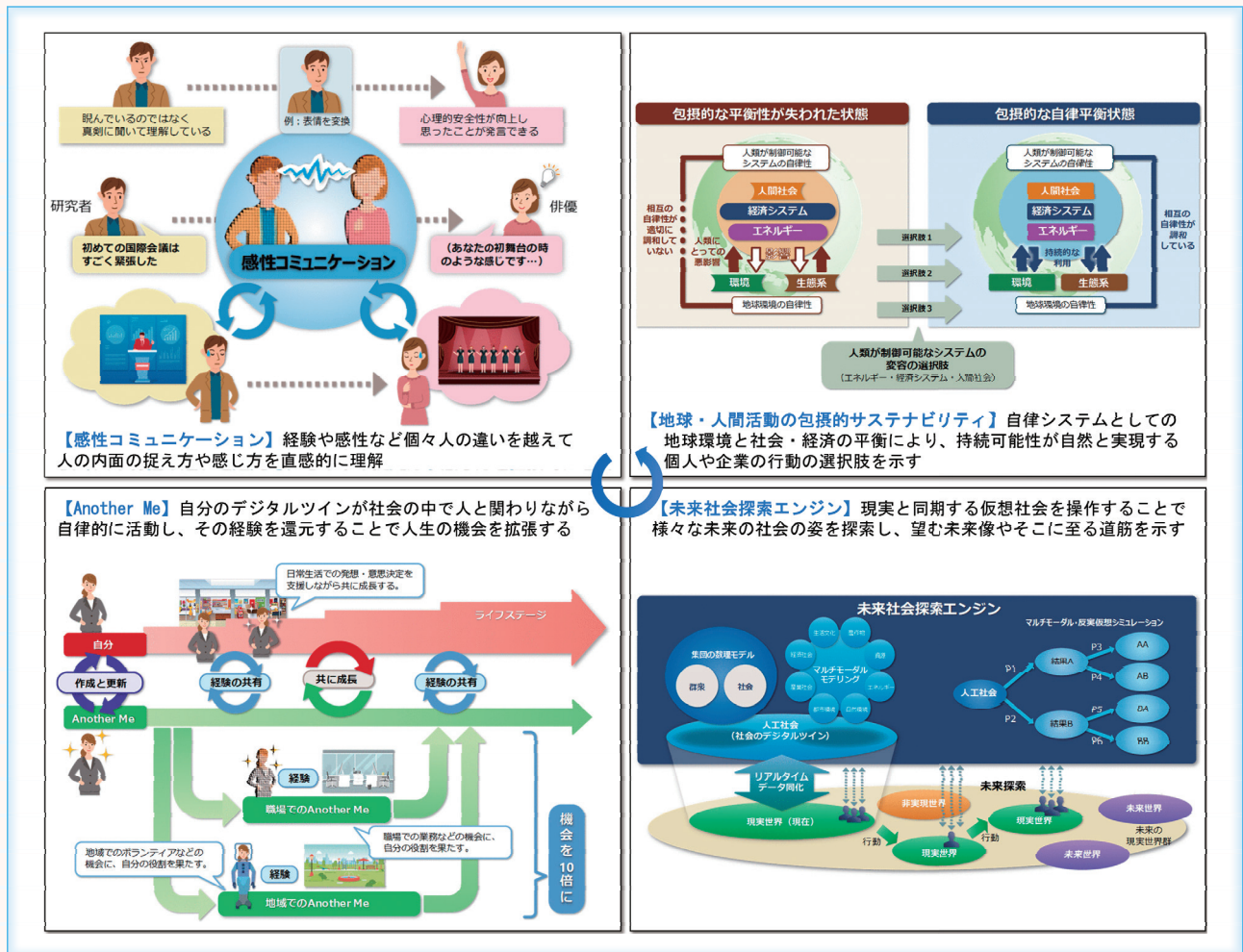


図2 「デジタルツインコンピューティング構想」の四つのグランドチャレンジ



図3 Another Meの3要件



(左) 本人がプレゼンをしているときの映像。(中) 映像から骨格や顔の特徴点を抽出した結果。
 (右) ほかのプレゼン映像から本人の動作を学習した生成モデルに、左図のプレゼン時の音声のみを入力し、そのときの動作を生成させた例。手指形状などが異なっているが、おおむねこの人物の動作の特徴を捉えた動作を出力できている。

図4 「本人性」を再現する技術の例(身体モーション生成技術)

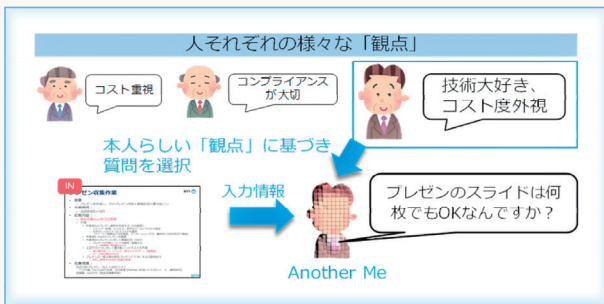


図5 「自律性」の実現に向けた技術の例(観点別質問生成技術)

のデータから精度の高い本人性を再現できるようになってきている(図4)⁽⁷⁾。

本人性を備えた Another Me により時間や身体的・認知的なハンディキャップを越えるためには、逐一ユーザが操作したり指示したりしなくとも、その場の状況を理解し、本人と同じように判断・行動する「自律性」が必要である。社会の中で本人の成長につながる活動をする Another Me に実装すべき自律動作として最も重視しているのが、人とコミュニケーションを取りながら協力タスクを遂行する機能である。そのために我々

は、他者の発言等から得られた情報を理解して、判断を下すために不足している情報を特定し、それを質問として生成する技術に取り組んでいる。この技術は、本人性の機能との連携を見据え、判断におけるその人なりの「観点」を組み込むことが可能となっている(図5)。

本人性を有し自律的に行動する Another Me が活動した結果から、本人が自己実現による達成感を得たり自身の成長につなげたりするには、自ら経験したかのような実感とともに活動結果を本人に還元することで、本人とそのコピーである Another Me の「一体性」を維持する必要がある。これは、過去に行われた本人自身が関わっていない行為に対して、「自己主体感」等と呼ばれる自らが行動をコントロールしている(していた)感覚を伴うように、活動の過程や結果を本人にフィードバックするという難しい課題となる。その第一歩として映像要約技術に取り組んでおり、特徴として会話における発言の重要度や説得力、発言の意図や意欲など、その場に参加していれば感じられるものの、記録映像やそれを要約した映像では抜け落ちてしまう情報を伝えることができる(図6)。

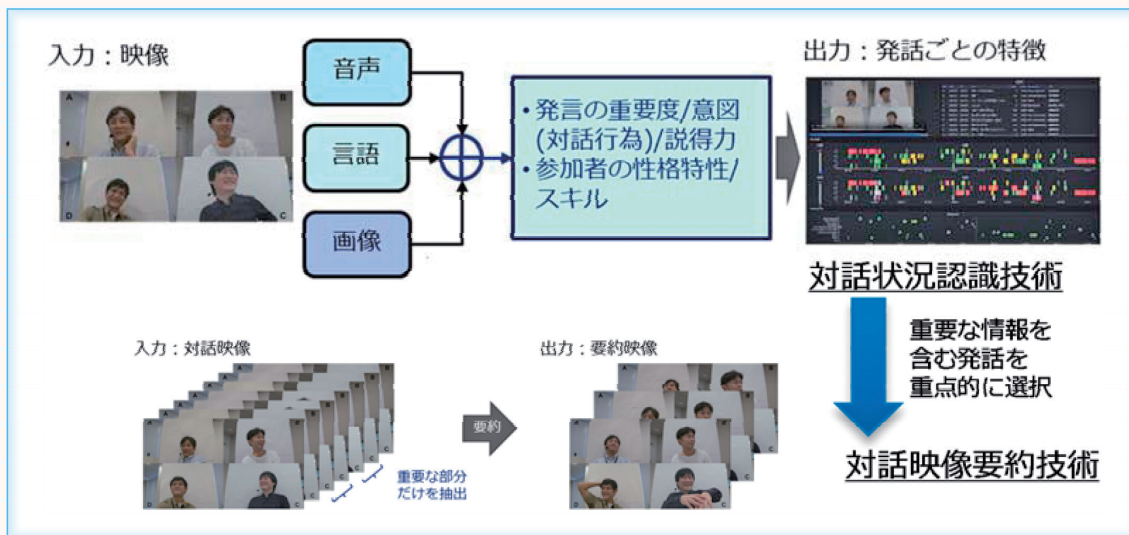


図6 「一体性」の実現に向けた技術の例（対話映像要約技術）

3 Another Me 実現に向けた取り組み

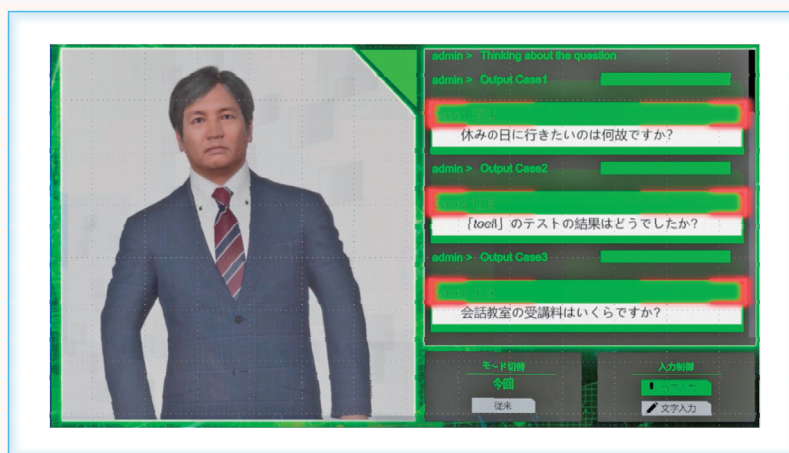
現在、このような様々な技術を統合し、Another Me の特定ユースケースでのプロトタイピングを進めている。

図7は前節で紹介した技術により Another Me の可視化を試みたものである。実在の人物を元にしており、三次元スキャンによりCGモデルを作成し、本人がプレゼンテーションを行っている映像から身体モーション生成技術（図4）によりその人らしい身振り・手振りを学習し、CGモデルの動作を生成している。任意の人の声質を再現する音声合成技術⁽⁸⁾を適用し、その人らしい音声で会話できる。対話相手の発言に対して、観点別質問生成技術（図5）により様々な観点からの質問を生成し、本人らしい観点を選択して質問を返す。質問を生成する機能は、Wikipediaの記事を機械学習させており、幅広い話題に対応している。

次に、他者からもその人らしいと認められる本人性を

実現しそれを検証するため、多くの人によく知られた著名人の Another Me の構築・評価に取り組んだ。そのため場として、日本の伝統文化とNTTのテクノロジーが融合した新たな歌舞伎「超歌舞伎 2022 Powered by NTT」において、主演の中村獅童さんの Another Me 「獅童ツイン」を松竹株式会社と共同で作成し、超歌舞伎の舞台上で上演を行った⁽⁹⁾。

中村獅童さんの顔や衣装などの外見に加え、声と動作の特徴を再現するため、任意話者音声合成技術と身体モーション生成技術を用いた。その際、観客が見て本人らしさが生き生きと感じられるよう、過去の超歌舞伎公演において行われた観客への「煽（あお）り」など特徴的な声や動作を含む映像データを収録し、それを基に合成音声と動作を再現した。生成した獅童ツインの映像は、福岡、名古屋、東京、京都で行われた超歌舞伎の本公演の演目の一つで、歌舞伎俳優が超歌舞伎の魅力ナビゲートする「超歌舞伎のみかた」の中で上演された。



図中右側に観点別質問生成技術の動作状況が示されている。対話相手の発言に対し、ここでは「理由」「性能」「お金」の観点から質問が生成されている。例えば、本人が論理的な理解を重んじる人物であった場合に、「理由」の観点を重視して質問を選択することとなる。

図7 Another Me の可視化事例

メディアに多数取り上げられるなど好評を博し、Another Me 技術による本人性の再現が商用公演に耐え得るレベルであることを示した。

4 関連技術

AI, ICT, ロボティクスなどの工学と、脳科学、心理学、認知科学などの科学的知見を応用し、人の分身を作る取組みは、既に様々なものが存在する。一つには、内閣府が推進するムーンショット型研究開発制度の目標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」に向けたプログラムとして実施されている「サイバネティック・アバター」の研究開発がある⁽¹⁰⁾。

「サイバネティック・アバター」(CA: Cybernetic Avatar) は、人の身体・知覚・認知の能力を技術により拡張することで、遠隔操作で身体や空間等の制約を越えた様々な活動を可能とするアバタ技術と、その運用基盤を社会実装することを目指している。CAを実現する遠隔操作、音声対話、ブレインマシンインタフェースなどの基礎技術、複数CA連携やCA基盤構築などのシステム技術から、倫理や社会制度などのELSI (Ethical, Legal and Social Issues) 課題の探究などを含む、七つのプロジェクトで様々な研究開発が行われている。人間を身体・認知や時間的な制約から解放し、更なる可能性を引き出すという点で、Another Meともビジョンが共通する部分も大きい。一方で、Another Meは本人性を抽出、モデル化し、自律的に活動する分身として再現する点に重きを置いており、ロボティクスを駆使し人間の拡張を目指すCAとはアプローチが異なる部分がある。

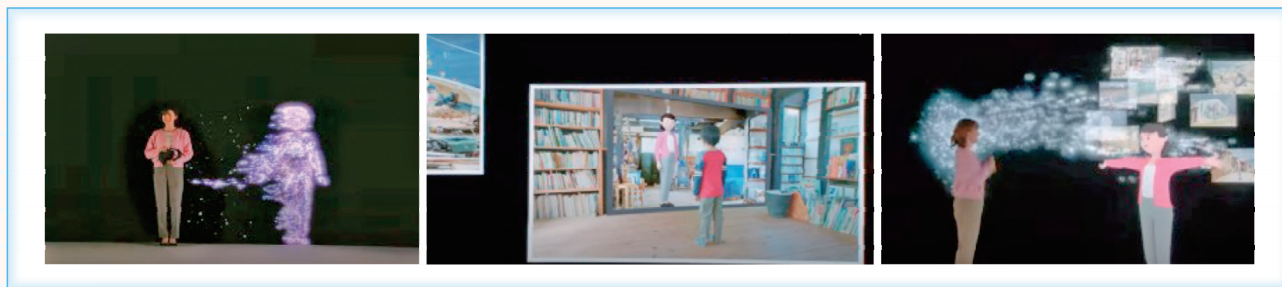
本人性再現の取組みにも様々なものがある。特に、映画等の分野においては、CGにより俳優など著名人を実写と見分けがつかないレベルで高精細に再現した映像が制作されてきた。近年は、人の顔や身体を3Dスキャンする技術や3DCGを作成する技術の高度化・汎用化に

伴い、適用例も増大している。そのような中で、著名人のデジタルツインを作成し、CGのタレントとして広告等への出演をプロモーションするサービス等も出現している⁽¹¹⁾。

このような人の顔や身体などの容貌だけでなく、価値観や個性を反映したその人らしい発言の再現を試みる事例も出てきている。著名人であれば、ソーシャルネットワークワーキングサービス(SNS)の投稿や最初からデジタル化されている新聞、雑誌、書籍などで大量の発言データを収集できるため、それを基にどのような質問に対してどのような応答を返すのかを機械学習モデルで学習させ、著名人本人にインタビューしなくとも、そのデジタルツインに質問することで答えが得られるような応用も考えられる⁽¹²⁾。また、アニメのキャラクターのような仮想的な人格の本人らしさを、そのアニメのファンの協力で作成した発言データに基づいて再現する取組みも行われている⁽¹³⁾。

5 Another Me の将来像

Another Meを社会に実装していくには、技術だけでは解決できない様々な課題が存在する。自分のAnother Meの活動を自分事と捉える「一体性」、社会の中で本人として受け入れられる「本人性」、この二つの性質を持つAnother Meは、今ここにいる生身の自分とは異なるものが自分であるという矛盾を抱えた存在であり、自分とは何かという根本的な問いを投げ掛ける。また、そのような根本的な概念の変化をもたらすものとなるのであれば、人や社会にどのような影響を与え得るのかを事前によく検討し、技術の方向性を定めていく必要がある。そのため、我々は哲学の専門家と共同研究を行い、自分であること、その人であることとは何か、その概念を機能性(知識・技能や外見・行動などの価値的側面)と指標性(過去の記憶・経験に基づくつながりなど心理的側面)の観点から整理した⁽¹⁴⁾。これをAnother Meの存在の概念的基盤として、自分らしさを



(左) 本人の好みや価値観を反映した Another Me を生成 (中) 島全体がリアルとバーチャルが重ね合わされた空間となっており集会所のスクリーンを挟んで Another Me とリアルな住民がコミュニケーション (右) Another Me の経験を本人にフィードバック

図8 Another Me の将来像 (コンセプト映像)

感じるためのデザイン⁽¹⁵⁾や人・社会に与える影響の検討を行っている。

また、「自律性」を有する Another Me が本人に代わって社会の中で実質的な活動を行った際、その帰結に関しては誰が責任を負うべきかという問題に対し、Another Me の元となる本人や、技術を提供するプラットフォーム、サービスに活用するサービス提供者などの間での責任分担の整理を法学者とも議論している。

本稿で見てきたような技術開発や学際的な研究を進めた先にどのような Another Me 像を描くのか、映像化したものを公開している⁽¹⁶⁾。Another Me を本人の成長や自己実現につなげるには、コミュニティや社会の中での他者とのつながりが不可欠であることを考えると、新たな人や「場」と本人のつながり作りが Another Me の重要な役割であるとの結論に至った。公開した映像(図8)の中では、地域創生のため関係人口の創出という社会課題解決に取り組む⁽¹⁷⁾という文脈の中で、日々の生活に行き詰まりを感じている主人公が瀬戸内海の男木島への移住を考え、自身の Another Me をリアルな空間と融合したバーチャル男木島に派遣し、Another Me が住民や男木島という土地とのつながりを作り、本人にフィードバックする様子が描かれている。これは10年以上先の未来社会のビジョンを示したものであるが、今後、人と人をつなぐ Another Me に向けた技術的なチャレンジを続け、成果を公開していく予定である。

6 まとめ

本稿では、現実世界の様々な事物のモデルをデジタル空間上に再現するデジタルツインの技術の中でも、人のデジタルツインの技術動向について、「Another Me プロジェクト」を軸に紹介した。Another Me は特定の実在の人物の内面・外面の本人性を備え、その人に代わり自律的に活動し、その結果を本人に還元することで本人との一体性を維持する。従来、人に寄り添い人をサポートする自律 AI エージェントやロボットは数多く提案されているが、Another Me はそこに本人性を持たせることで、本人と AI が一つの自己として融合する新たな人間の在り方を追求する取り組みでもある。これは、シンギュラリティやポストヒューマンの一部の議論でけん伝されている進化した AI が人類を超越し、人類の価値が毀損されるような世界観へのアンチテーゼでもある。AI を一人一人の個人と強固にカップリングし、AI の活動の根拠を個人の社会の中での権限や信頼に求め、また、その AI にそれぞれの個人の性格や価値観に基づく判断をさせることで、AI の活動の価値が個人に帰属

することとなり、人それぞれの多様性が社会全体の考え方や判断に反映されることにつながる。その結果、極限まで精度の高い最適解を導く AI が浸透した将来の世界においても、一人一人がかけがえのない存在としての人間の価値を更に高められるのではないかと考えている。技術開発の推進とともに社会的な議論を深め、今後、技術の方向性を定めていく必要がある。

■ 文献

- (1) 安藤知治, “工作機械におけるデジタルツインの活用 (<特集> デジタルツインでかわるものづくりのこれから),” 日本機械学会誌, vol. 124, no. 1231, pp. 18-21, June 2021.
- (2) 山本千尋, 社家一平, 深田 聡, 上野晋一郎, “「街づくり DTC」によるデータ駆動・連鎖型のスマートシティ,” NTT 技術ジャーナル, vol. 32, no. 11, pp. 77-83, Nov. 2020.
- (3) 中島 寛, 林 勝義, 後藤秀樹, “バイオデジタルツインが創造するデータ駆動型の医療健康支援,” NTT 技術ジャーナル, vol. 33, no. 5, pp. 10-13, May 2021.
- (4) 中村高雄, “デジタルツインコンピューティング構想,” NTT 技術ジャーナル, vol. 32, no. 7, pp. 6-11, July 2020.
- (5) 岡崎義勝, “IOWN 構想とネットワーク技術,” 信学技報, NS-16, p. 22, May 2022.
- (6) 日本電信電話, “地球・社会・個人間の調和的な関係が築かれる未来社会の実現に向けて～デジタルツインコンピューティングの4つの挑戦～,” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/11/13/201113c.html>
- (7) 大塚淳史, 高山千尋, 二瓶美巳雄, 石井 亮, 西村徹, “Another Me を実現する技術群,” NTT 技術ジャーナル, vol. 34, no. 1, pp. 36-38, Jan. 2022.
- (8) 井島勇祐, 小林のぞみ, 藪下浩子, 中村 孝, “多様なユースケースに適用可能な音声合成エンジン「Saxe」,” NTT 技術ジャーナル, vol. 32, no. 10, pp. 57-62, Oct. 2020.
- (9) 深山 篤, 石井 亮, 森川 輝, 能登 肇, 永徳真一郎, 井島勇祐, 金川裕紀, “Another Me 技術による「獅童ツイン」実現の試み,” NTT 技術ジャーナル, vol. 35, no. 2, pp. 21-24, Feb. 2023.
- (10) 内閣府, “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,” <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/sub1.html>
- (11) サイバーエージェント, “著名人のデジタルツインをキャストするサービス「デジタルツインレーベル」を、芸能事務所および著名人向けに開始「分身」となる公式 3DCG モデルを制作・管理し、デジタル空間でのタレント活動を促進へ,” <https://www.cyberagent.co.jp/news/detail/id=26503>
- (12) オルツ, “デジタルクローン P.A.I. とは,” <https://alt.ai/pai/>
- (13) 日本電信電話, “精華町との AI 対話システムにおける共同実験の開始について～なりきり AI 京町セイカがご案内！～なりきり AI,” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2020/07/03/200703a.html>
- (14) 永徳真一郎, 戸嶋巖樹, 廣田啓一, 小澤史朗, 中村高雄, 大西琢朗, 出口康夫, “人のデジタルツインの受容に関する一考察,” 情処学研報, 2021-GN-114,

no. 13, pp. 1-7, May 2021.

- (15) T. Inamura, S. Eitoku, I. Toshima, S. Shimizu, A. Fukayama, S. Ozawa, and T. Nakamura, "Effect of repetitive motion intervention on self-avatar on the sense of self-individuality," Proc. 10th International Conf. Human-Agent Interaction (HAI2022), Dec. 2022.
- (16) 日本電信電話, "IOWN時代のメタバース," YouTube, <https://youtu.be/47TkfdK4cCw>
- (17) 日本電信電話, "地域共創推進に向けた「TENGUN Ogjima プロジェクト」発足～IOWNで実現されるフォトリアルな「男木島」メタバースによる、関係人口創出・拡大をめざした共同検討を開始～," <https://group.ntt.jp/newsrelease/2022/11/15/221115b.html>

深山 篤

日本電信電話株式会社デジタルツインコンピューティング研究センター
1999 京大大学院情報学研究科了。
同年、日本電信電話株式会社入社。
メディア認識技術、ヒューマンコンピュータインタラクション技術の研究開発、ネットワークサービスの実用化開発などを経て、2021 から現所属で Another Me 研究をグループリーダーとしてけん引。



正 誤

本誌 57 号 (2021 年夏号) に誤りがございました。お詫び申し上げますとともに、下記のとおり正誤表を掲載致します。

- 57 号 (2021 年夏号)
pp.68-72 街 plus 探訪 「新宿周辺」

訂正箇所	誤	正
p.72 著者紹介	<u>2000</u> 東大大学院…	<u>2002</u> 東大大学院…

研究現場における XR(クロスリアリティ)活用事例の紹介

Introduction of Practical Use of XR (Cross Reality) for Research Field

井原章之 Toshiyuki Ihara†

Summary

様々な業種や分野においてDX(デジタルトランスフォーメーション)の推進が活発化する中、RX(リサーチトランスフォーメーション)が注目を集めている。RXとは「DX等を駆動力として研究開発活動を革新し、そのオペレーティングシステムをトランスフォームすること」である。DXやRXのために活用されるデジタルテクノロジーには5G、IoT、AIなどが挙げられるが、最近注目を集めているのが「XR(クロスリアリティ)技術」である。XRとは、現実世界と仮想世界を融合することにより、現実にはないものを知覚できる技術の総称である。本解説論文では、国立の研究機関に所属する筆者が、自身の研究開発活動のプロセスを刷新し、研究組織のDXやRXの可能性を探るために行っている「XR技術の活用事例」を紹介する。特に、現実世界のライブ映像を含む仮想空間の作成手法と、その手法を活用したプレゼンテーションや実験装置リモート操作、見学ツアーなどへの活用事例を詳しく説明する。

Key Words

DX, RX, XR, 拡張仮想

1 はじめに

昨今、多岐にわたる業種や分野においてDX(デジタルトランスフォーメーション)の推進が活発化している。経済産業省の定義するDXは「企業がビジネス環境の激しい変化に対応し、データとデジタル技術を活用して、顧客や社会のニーズを基に、製品やサービス、ビジネスモデルを変革するとともに、業務そのものや、組織、プロセス、企業文化・風土を変革し、競争上の優位性を確立すること」である⁽¹⁾。筆者は国立研究開発法人に所属する研究者であるため、ビジネスを前提とした上記の文章がそのまま当てはまる立場にない。そこで、この説明文をビジネス向けでなく、研究者に当てはまるよう短めに書き直してみる。すると「データとデジタル技術を活用して、研究のモデルを変革するとともに、研究活動そのものや、研究組織、研究プロセスを変革し、競争上の優位性を確立すること」となる。JST(国立研究開発法人科学技術振興機構)の機関が、このような「研究活動や研究プロセスの変革」の必要性を説くレポートを出している。研究開発戦略センター(CRDS)が出した「リサーチトランスフォーメーション(RX)」に関する

レポートである⁽²⁾。レポートの中では「DX等を駆動力として研究開発活動を革新し、そのオペレーティングシステムをトランスフォームすること」として、RX(リサーチトランスフォーメーション)という概念が提唱されており、様々なデジタル技術の活用例が紹介されている。

DXやRXは組織で推進すべきミッションであるが、そこで利用されるデジタル技術は、個々の研究者の研究開発活動を飛躍的に効率化させる力を持ち合わせている。そのため、研究組織のDX・RXを推進することと、個々の研究者がデジタルテクノロジーを駆使して研究開発活動プロセスを再構築することとの間には相乗効果が大いに期待できる。本解説論文では、筆者が所属する研究組織である情報通信研究機構未来ICT研究所が進めるDXの一例と、筆者自身がデジタル技術を駆使しながら開発を進めている独自のソフトウェアや手法を説明し、その活用事例を幾つか紹介する。

本解説論文において、DX・RXに向けて活用するデジタルテクノロジーは「XR技術」である。XRとは、Extended RealityまたはCross Realityの略語であり、現実世界と仮想世界を融合することで、現実にはないものを知覚できる技術の総称である。仮想現実(Virtual Reality)、拡張現実(Augmented Reality)、複合現実(Mixed Reality)、拡張仮想(Augmented Virtuality)などがXR技術に含まれる。それらのプラットフォームには通常のパソコンの

† 情報通信研究機構未来ICT研究所, 神戸市
Advanced ICT Research Institute, National
Institute of Information and Communication
Technology, Kobe-shi, 651-2492 Japan

ほか、タブレット、スマートフォン、ゴーグル形デバイスが使われる。XR技術はゲームやエンターテインメント用途で使われるイメージが強いが、近年では商品プロモーション、製造、教育、デジタルアーカイブなどの用途でも使われ始めている。研究現場においても、一般向けのオープンハウスなどの場面で仮想現実を活用するケースが増えており、XR技術の利用場面は今後ますます広がってゆくと思われる。

2 NICT 未来 ICT 研究所が進める DX 事例の紹介

筆者が所属している NICT（情報通信研究機構）未来 ICT 研究所における DX 推進の一例として、2021 年 7 月及び 2022 年 7 月に実施した一般公開 ONLINE 企画における XR 活用事例を紹介する。図 1（左）に示した図が、2022 年度に開催した一般公開 ONLINE 企画のポスターの一部である^{(3)・(4)}。中央に白いシャツを着たヒト型のモデルが立っており、その奥に幾つかの建築物が描画されている。この映像は、筆者を含む未来 ICT 研究所の研究者が内製で開発したバーチャル空間サイトのスクリーンショットである。このサイトにオンラインでアクセスした来場者は、中央に立っているヒト型モデルをアバタとして操作しながら、内部に設置した展示コンテンツを自由に楽しむことができる。図 1（右）が展示ルーム内部の様子であり、研究室の担当者が用意した展示コンテンツが壁に並んでいる。訪問者がアバタをパネルの前に移動させると、動画やポスターなどの展示コンテンツにアクセスできる仕組みになっている。図 1（左）に描かれた「神戸・吹田・小金井」と書かれた建物は、未来 ICT 研究所の拠点に建設されている実在する建築物である。実際には関東と関西という遠く離れた拠点に点在して

いるわけであるが、バーチャル空間では隣に建っているかのように並んでいる。各研究室が管理した展示ルームは現実には存在しない空間であるため、その数を容易に増やすことができる。現実世界でリアル開催する際に発生する「距離やスペースの制約」から解放されることは、仮想空間を活用することの一つのメリットである。

図 1（右）の右端に、青い球体が浮かんでいる。この球体は、筆者が「全天球ドーム」と呼んでいる映像表示用のスクリーンである。全天球ドームには、全天球カメラで撮影した映像を描画する。全天球カメラとは、上下左右全方位の 360 度パノラマ写真、及び 360 度動画を撮影できる装置である。360 度カメラ、全方位カメラ、VR カメラとも呼ばれる。全天球カメラを使って撮影した映像を全天球ドームの内側に描画した上で、アバタを空中に浮遊させてから、ドームの内部に移動させる。この状態でアバタを操作して方向を変えると、ドームの内側に投影された映像を視線変更しながら眺めることができる。その結果、あたかもアバタを通じてその映像の中に入り込んだような体験が得られる。

上述したような、全天球ドームに全天球カメラの映像を描画する手法は「拡張仮想」の一種である。拡張仮想とは、仮想空間の中に、実在する映像などのリアルな情報を持ち込む形態の XR 技術である。未来 ICT 研究所には「リアルに存在する実験装置」を扱う研究者・技術者が多くおり、筆者自身も量子 ICT 技術を活用した独自の計測装置の開発を進めている。そのため、DX・RX を目指して XR を活用してゆく際に、その技術が「リアルな空間や実験装置」を扱えるようになっていく必要がある。この事情は産業界において XR 技術を活用する際も同じである。本解説論文で紹介する手法を、民間企業が DX 推進を検討する際の参考にして頂ければ幸いである。



図 1 NICT 未来 ICT 研究所一般公開 ONLINE2022 企画のポスターと展示ルームの様子

3 現実世界のライブ映像を含む拡張仮想の作成手法

全天球カメラを Web カメラのようにライブモードで動作させて、遅延の少ないリアルタイムの映像を全天球ドームに描画することを考える。全天球カメラの中にはこの機能を持っている機種があり、YouTube ライブ配信などに利用されている。全天球ドームに描画する場合、ドーム内のアバタを操作することで全方位の映像をリアルタイムで見られることになる。

上記に加えて更に図2に示したような、全天球ドームの中に「平面形パネル」を一つ配置し、ドームの中にアバタを立たせる場面を考える。平面形パネルは仮想空間に配置した1枚の板であるが、ここにはパソコンに接続した映像キャプチャデバイスから取得したスライド等の外部映像をリアルタイムに描画できる設定にしておく。すると、全天球ドームと平面形パネルの両方に「2種類のライブ映像」が描画され、それらの映像をアバタが見ている状況になる。この状況でアバタを操作すれば、全天球ドームの映像を見回すことができるし、パネルに近寄って拡大して眺めることもできる。このような拡張仮想をうまく使えば、視聴者が実際に発表者の近



図2 内部に平面形パネルを配置した全天球ドームを眺めるアバタ

くに立って説明を聞いているような、リアルに近い感覚を与えることができる。

4 XR 技術（拡張仮想）の活用事例紹介

「現実世界のライブ映像を含む拡張仮想の作成手法」の活用事例を四つ紹介する。まず一つ目に、統合開発環境及びゲームエンジンを使って筆者が独自に開発した拡張仮想の XR システム（以後「XR システム」と呼ぶ）を使って、筆者自身が行ったプレゼンテーションの事例を紹介する。

4.1 プレゼンテーション

図3（左）がプレゼンテーションを行った際のスクリーンショットである。画面中央に立っている黒服の人物が発表中の筆者であり、画面の全体に描画されている背景が、発表者の正面に設置した全天球カメラのライブ映像である。画面中央下に立っている青色服のアバタの視線を発表者が操作し、その視点の映像を視聴者全員に共有する。仮想空間の中で映像を作り出すためのカメラは青色服のアバタの背後に貼り付いており、発表者がアバタを操作することによって部屋全体を見せることができる。アバタをパネルの前に移動させるとパネルが拡大表示され、スライド全体を高い解像度で描画することもできる。実際のプレゼンテーションの際に、発表者の全身がライブ描画され、身振り手振りが見える点が好評であった。また、スライドを正面から固定で見ただけでなく立体的なパネルとして描画されるため、平面形パネルが実在するような感覚が生じることが分かった。画面共有された映像を見る際、パソコン画面よりも小さいエリアにスライドが表示されている（＝見にくくなっている）にもかかわらず、「何となく巨大なパネルを使っていたような映像が記憶に残った」という意見もあった。一方、アバタを動か



図3 筆者が開発した XR システムを使って筆者自身が行ったプレゼンテーションの様子



図4 拡張仮想空間の中で実験装置をリモート操作する実演デモの様子

し過ぎると視聴者に「3D 酔い」の症状を発生させてしまうため、注意が必要なことも明らかになった。

全天球ドームと平面形パネルの映像をライブで見せるだけであっても、効果的なプレゼンテーションを実施できる。しかし、せつかくの仮想空間をこのような「パワーポイントで発表をするだけの従来型に似た形式」で使ってしまうのはもったいない話である。そこで筆者は、XR の強みは「アバタを操作すればバーチャル空間の中のどこにでも移動できる」部分にあると考え、その要素をプレゼンテーションに組み入れてみた。図3(右)にその様子を示した。発表者が描画されていた全天球ドームの中からアバタを移動させ、多くの視聴者になじみのある建物内部の映像が投影された別のドームに向かって歩かせている映像である。発表者は筆者一人なのだが、アバタにバトンタッチしてプレゼンテーションを続けるような効果があり、発表にアクセントを生じさせることができた。

4.2 実験装置リモート操作のデモ実演

二つ目の事例は、XRシステムを使って筆者が実施した、実験装置リモート操作のデモ実演である。図4(左)に、筆者が開発を進めてきた顕微光量子計測装置^{(5)・(6)}を描画したドームの中にアバタが入っていく様子を示した。画面右上の平面形パネルには、顕微光量子計測装置の操作ボードと計測データの表示ウィンドウが描画されている。平面形パネルの一部を拡大して表示したのが図4(右)である。上部の映像は、「コロイド量子ドット」と呼ばれる発光ナノ材料をガラス基板の上に低密度に分散させ、その発光を高感度カメラで撮影した様子である。下部に並んでいるボタンは実験装置の操作ボードであり、顕微鏡ステージ操作や、量子ドットに照射するレーザー強度を変化させる機能を持たせてある。なお、これらのボタンは平面形パネルの中に

キャプチャ画像として描画されているものではなく、パネルの外(仮想空間側)に設置した。そのため、仮想空間内のアバタを操作しているユーザであれば、これらのボタンに直接アクセスできる仕組みになっている。ボタンを押した際には装置が動作し、その内容に応じて平面形パネルに描画される映像が変化するため、実際に実験装置を操作している様子をリアルタイムで見せることができる。

デモ実演の際に、主催者が計測装置をリモート操作する様子を見せるだけであれば、上記の仕組みを使うだけで済む。一方、主催者ではない別の参加者が遠隔地から装置をリモート操作する際には、上記の仕組みに加えて「遠隔地から仮想空間の画面を見て、その画面内をリモート操作する仕組み」が必要になる。今回開発したXRシステムにそのような機能は持たせていないが、ZoomやWebexなどのオンライン会議アプリを使えば画面共有を容易に実現でき、更に「リモート操作」の機能を使えば遠隔地の画面を操作することも可能である。このようにオンライン会議アプリと組み合わせることによって、遠く離れた拠点からでも映像を見ながら装置をリモート操作できるのが、筆者の開発したXRシステムの特徴の一つである。

4.3 遠隔地の見学ツアー(ライブ)

三つ目の事例は、遠隔地の見学ツアーである。4.2の実験装置リモート操作のデモ実演においても、見学ツアーの要素が含まれているが、本事例では更に「XRシステムが構築されている拠点と、見学ツアーを実施する拠点が遠くに離れている」という状況でXRシステムを運用することに挑戦した。図5(左)にシステム全体の構成図を示した。XRシステムは、筆者がNICT(神戸)に設置したものをそのまま活用した。全天球カメラは阪大の実験室に設置してあり、ライブ映像をNICT側で受信し

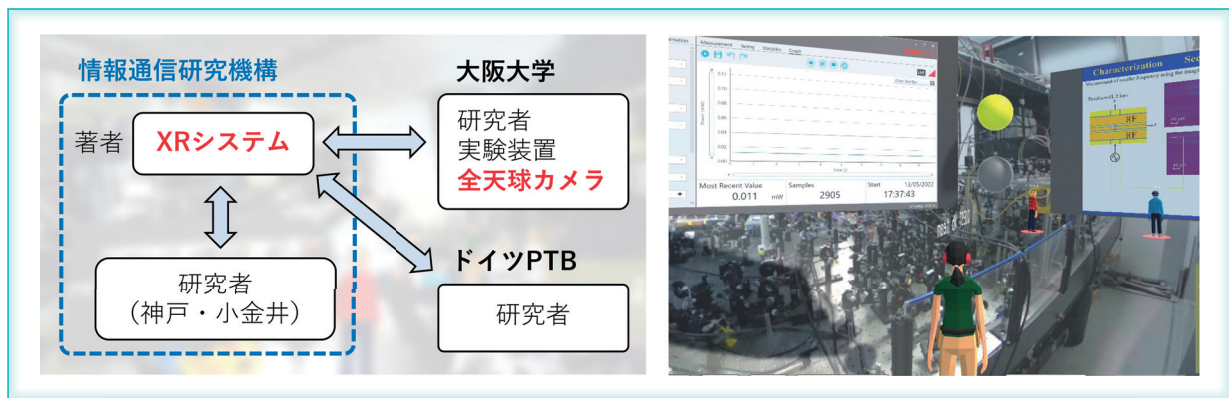


図5 遠隔地に設置した全地球カメラのライブ映像を使って見学ツアーを実施した際のシステム概要と実際の映像

全地球ドームに描画した、仮想空間にログインさせた3体のアバタをNICT・阪大・ドイツPTB（国立理工学研究所）の研究者が操作した。3体のアバタは位置情報を同期しているため、それぞれがどの位置でどこを見ているのか把握できる。その状況下で、それぞれの視点で阪大にある実験室の装置を見学しながら、研究内容について議論する企画を行った。図5（右）が見学ツアーのスクリーンショットである⁽⁷⁾。オンライン会議ツールをブラウザ上で起動した場合にリモート操作が使えなくなる障害が発生したが、それ以外には大きなトラブルなく企画を完了することができた。

仮想空間の中で実在する実験室の見学ツアーを行いながら、研究内容を議論した企画はおおむね好評であった。しかし、特定の分野のプロフェッショナルな研究者同士が実験装置の細部を見ながら共同作業をする際に使うツールとしては、まだまだ機能が不十分であり、アップグレードすべき点があることも明らかになった。企画を通して明らかになった課題を参考にしながらシステムをアップグレードしてゆくことにより、DX・RX実現への道筋が明らかになると考えられる。

なお、遠隔地の見学ツアーと同様の企画として、NICTの監事の方々に御協力頂いて「XR技術を活用したリモート監査」のテストも行った。詳しい説明は割愛させて頂くが、監事の土井美和子氏がリモート監査の様子を紹介する講演を行った際の映像がYouTubeで公開されているので、御興味がある方には是非、御視聴頂きたい⁽⁸⁾。

4.4 遠隔地の見学ツアー（事前録画）

XRシステムを活用して遠隔地の見学ツアーをライブで実施すると、説明者が訪問者の質問に答えながら、現地の様子を身振り手振りで説明することができる。カメラの撮影場所を途中で変えたり、画面

を切り換えたりすることもできるため、かなり自由度の高いインタラクティブなライブツアーを開催することができる。しかし、このようなツアーを開催するためには図5（左）に示したシステム全体が安定に動いている必要があり、複数の拠点をつないで動作させるための事前準備が必須になってくる。特に通信環境は非常に重要で、全地球カメラ映像を送受信し続けられる安定した通信環境が求められる。通信環境が悪く映像のフレームレートが小さくなってしまいう状況では、かなりストレスを感じる見学ツアーになってしまう。

システムを簡略化し、簡単に見学ツアーを実施できるようにする方法の一つとして、「全地球カメラのライブ映像を使うのではなく、事前に録画した映像で置き換えてしまう」というものがある。事前録画になるので、データを事前に編集した上で、サーバにアップロードしておくことができる。情報発信が一方通行になっても問題が生じない場合においては、ライブでツアーを実施するよりもメリットがある。

未来ICT研究所では、このような「全地球カメラ映像を事前録画して、その映像をアバタで楽しんでもらう」という企画を「一般公開 ONLINE2022」で実施した。図6（左）が、システムの概要図である。複数の拠点の実験室を全地球カメラで撮影し、そのデータをXRシステムにアップロードした上で、ブラウザからアクセスできるようにした。図6（右）に、一般公開用バーチャル空間サイトの展示ルームの内部に設置した全地球ドームで、実験室の装置を研究員が説明する動画を再生したスクリーンショットを示した。事前録画であるため説明員と訪問者の間でコミュニケーションを取ることはできないが、研究所の活動を知ってもらうための一般公開イベントでは、十分にその役割を果たすことができた。

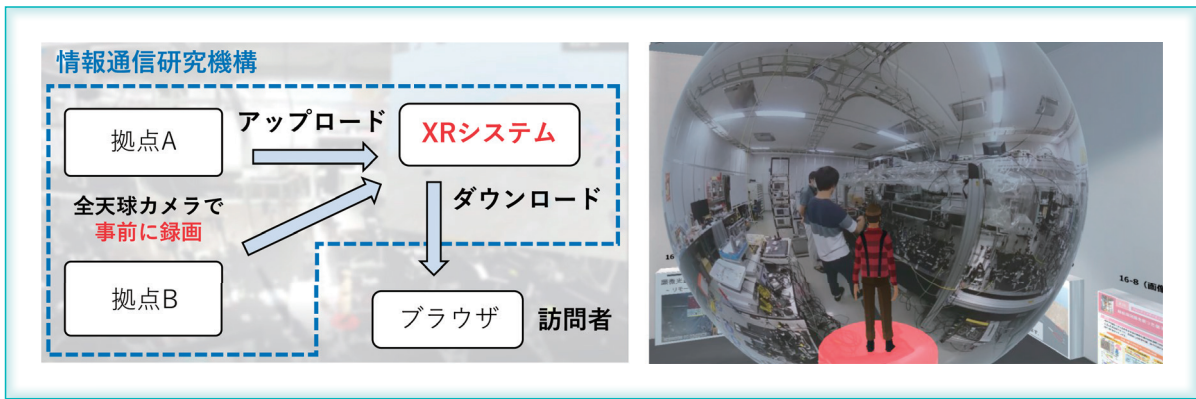


図6 事前録画した全天球カメラ映像を使って実験室の見学ツアーをする際のシステム概要と実際の映像

5 今後に向けて

本解説論文では、NICT 未来 ICT 研究所が行った一般公開 ONLINE 企画の内容や、現実世界のライブ映像を含む拡張仮想空間の作成手法を説明し、プレゼンテーション、実験装置リモート操作のデモ実演、遠隔地の見学ツアー等の場面で XR を活用した事例を幾つか紹介した。アバタ、全天球ドーム、平面形パネル、2 種類のライブ映像を合成する手法等を使うだけで、視聴者の印象に残る効果的な映像を容易に作成できることを説明した。

もしかしたら今回紹介した活用事例だけでは、研究現場の DX や RX を目指す上での「XR 技術」の持つポテンシャルを十分に伝えられなかったかもしれない。しかし、XR 技術の活用方法はまだまだバリエーションが豊富であり、産業界からも新しい活用事例が次々と報告されている。筆者の周囲でも、レクチャーやオンライン講習会など、今回紹介しきれなかった形態で活用する場面が増えてきている⁽⁹⁾。もちろん、誰もが独自の XR システムを開発できるわけではないので、Web 上で公開されているメタバースのようなプラットフォームを活用する方法もある。本論文で紹介した自作の XR システムも、将来的には Web 上で公開し、多くのユーザに気軽に利用して頂けるようにする考えである。このような XR 技術を代表としたデジタルテクノロジーを活用する場面を今後の研究の中で増やしてゆくことにより、「DX を駆動力とする RX」を多くの研究現場で実現するきっかけを生むことができるかもしれない。今後の活動に期待して頂きたい。

文献

(1) 経済産業省 Web サイト, <https://www.meti.go.jp/>

[policy/it_policy/dx/dx.html](https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/dx/dx.html)

- (2) JST 研究開発戦略センター (CRDS), “戦略提案・報告書「リサーチトランスフォーメーション (RX) ポスト /with コロナ時代, これからの研究開発の姿へ向けて」,” <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2020-RR-06.html>
- (3) NICT 未来 ICT 研究所, “一般公開 ONLINE2022 Web サイト,” https://www2.nict.go.jp/advanced_ict/ippankoukai/2022/
- (4) NICT 未来 ICT 研究所, “一般公開 ONLINE2022 YouTube ライブ配信 (ダイジェスト版),” <https://www.youtube.com/watch?v=AiS42JBK6VM>
- (5) 井原章之, 古田健也, 横田悠右, 新井健太, 三木茂人, 寺井弘高, “単一ドット顕微光量子計測への遠隔操作と拡張仮想空間の活用,” 応用物理学会春季学術講演会, 24a-D316-4, March 2022.
- (6) T. Ihara, S. Miki, T. Yamada, T. Kaji, A. Otomo, I. Hosako, and H. Terai, “Superior properties in room-temperature colloidal-dot quantum emitters revealed by ultralow-dark-count detections of temporally-purified single photons,” Scientific Reports, vol. 9, no. 1, 15941, Nov. 2019.
- (7) 阪大田中歌子グループ Web サイト, “バーチャルラボツアーの開催報告,” <http://www.qm.ee.es.osaka-u.ac.jp/posts/news36.html>
- (8) 土井美和子 “監査のみの DX にあらず～組織全体の DX あってこそ～,” 第 33 回公会計監査機関意見交換会議 (2022). <https://www.youtube.com/watch?v=iXFoIRDR6cU&t=2490s>
- (9) 井原章之, “XR が拓く RX (リサーチトランスフォーメーション),” 情報処理学会デジタルプラクティス誌, 招待論文 (出版準備中) .

(2022 年 10 月 31 日受付, 2022 年 12 月 28 日再受付)

井原章之

情報通信研究機構未来 ICT 研究所。東大・理・物理卒。同大学院博士課程了。博士(理学)。東大生産技術研究所助教、京大化学研究所助教を経て、2017 情報通信研究機構未来 ICT 研究所入所。XR 技術を活用した量子 ICT 実験システムの研究開発に従事。



AI体操採点システムの進化と展開

Evolution and Expansion of AI-based Gymnastics Judging Support System

柁井昇一 Shoichi Masui[†] 楊帆 Fan Yang[†]
小田嶋成幸 Shigeyuki Odashima[†] 姜山 Shan Jiang[†]

Summary

我々は、国際体操連盟・日本体操協会との連携により、体操競技における正確かつ公平な採点の実現を目指して、AI (Artificial Intelligence) 採点システムの開発に取り組んでいる。AI 体操採点システムは、ライダー (LiDAR: Light Detection and Ranging) 方式の3D レーザセンサによって取得された三次元点群から、深層学習 (Deep Learning) と人体モデルへのフィッティングにより選手の3D 骨格座標を求める3D センシングと、3D 骨格座標の時系列情報から実施技の特定を行う技認識の両技術で構成され、2019年10月の世界体操選手権から実用化された。その後AI 体操採点システムは、当初の5種目対応から全10種目対応に向けて開発が進行するとともに、市販カメラを使用した画像方式の取組みへと進化しながら、応用分野を広げる試みがなされている。本論文では、近年におけるスポーツ分野におけるICT化の動向におけるAI 体操採点システムの位置付けとその開発経緯を示した後、AI 体操採点システムの概要と採用された技術を解説する。続いて、我々が取り組んでいる画像技術の概要とAI 関連国際会議で開催されたコンペティションで成果を開示した人検知・トラッキング技術について解説し、最後にAI 体操採点システムの今後の展開について紹介する。

Key Words

スポーツ ICT, 姿勢推定, 行動推定, トラッキング, 深層学習

1 はじめに

スポーツにおける様々な事象がICT (Information and Communication Technology) の活用によってデジタル化され、これまでの「経験と勘」に基づく主観による世界が、データに基づく客観による世界へと移行し、スポーツに関わる「する (体を動かす)」「見る」「支える」のあり方が大きく変わろうとしている。これまでのスポーツ分野におけるデジタル化の動きは、「支える」分野を中心として、2003年におけるデンマークのTrackman社におけるゴルフ向け弾道計測器の開発を嚆矢として、続く2005年の国際テニス連盟によるボールのライン判定システムの導入⁽¹⁾、つまり、物体の検出からスタートした。近年では、フィールド上の選手 (人) の位置を追跡するトラッキング技術を活用したフォーメーション分析がサッカーやバスケットボール等で実用化されており、対象が物体から人の二次元の動きへと拡大された⁽²⁾。現在は人の動きを三次元でより詳細に把握して、三次元で人のスキルを分析する段階に移行しつつあり、「する」「見る」の領域への適用が拡大していくものと考えられる⁽³⁾。

しかしながら、これまでの三次元の動きのセンシングでは、体にマーカやセンサ等の装着が必要であったことから、選手の自然な動きが阻害されるなど実用化への障壁が存在していた。本論文ではスポーツにおけるデジタル化の最新の取組みとして、我々が開発中の非装着形の三次元の動きセンシング技術を活用したAI (Artificial Intelligence) 体操採点システムの概要と開発された技術^{(4), (5)}に加え、今後の進化・展開を紹介する。

2 AI 体操採点システム開発の経緯

体操競技は、陸上競技のようにスピードや到達距離を競うものではなく、演技 (人の動き) の良し悪しを点数化して競う採点競技に属し、実際の採点は審判員による目視で行われている。体操競技の種目は男子6種目 (ゆか、あん馬、つり輪、跳馬、平行棒、鉄棒)、女子4種目 (ゆか、跳馬、平均台、段違い平行棒) の計10種目あり、種目ごとに技の難度を示すD (Difficulty) スコア、演技の出来栄を評価するE (Execution) スコア、及び、演技領域からの逸脱や時間超過などによる減点項目の合計で選手の演技が採点される。Dスコア、Eスコアの採点はそれぞれD審判、E審判によって独立して行われており、公平な判定を行うために大会ごとに120人以上の審判員が必要となっている。

[†] 富士通株式会社, 川崎市
Fujitsu LTD., Kawasaki-shi, 211-8588 Japan

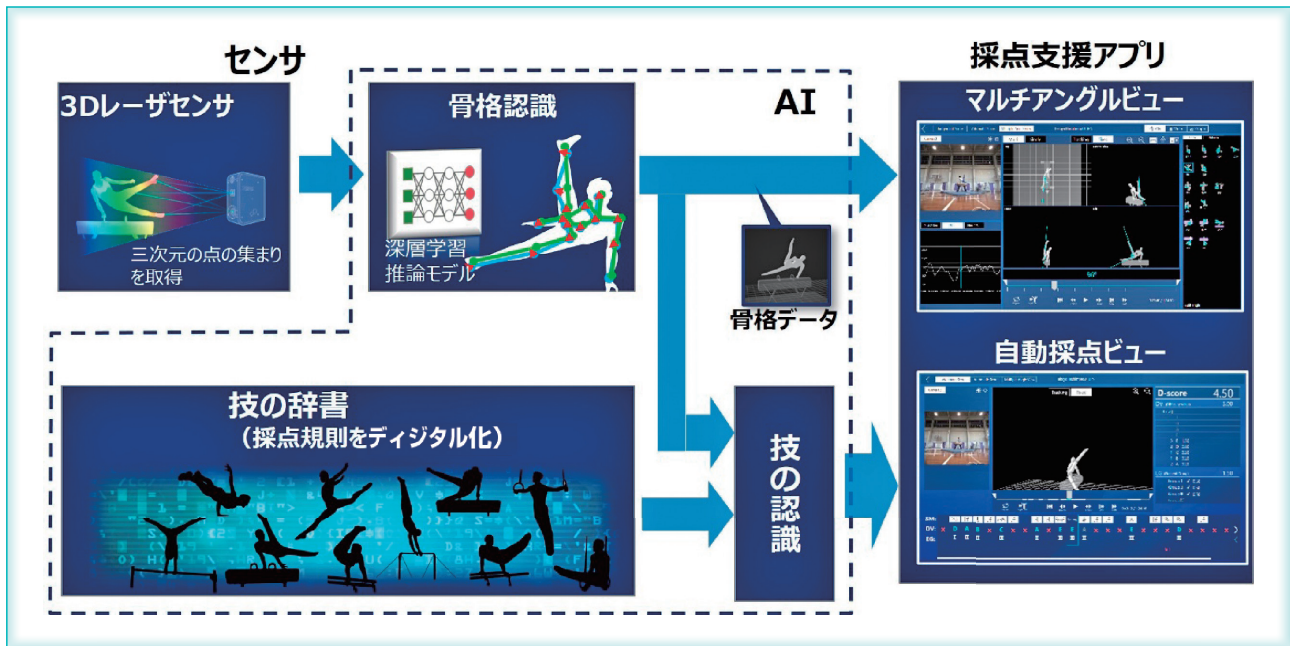


図1 AI体操採点システムの概要

審判資格を認定された審判員は、経験によって高度な技の識別ができるが、近年の身体能力の向上と器具の進化による技の高度化に伴い、採点規則に記載された関節の角度や関節間の高低差を、厳密かつ瞬時に目視判定することが困難になりつつある。他方、体操競技は採点結果に基づき0.001点を争う競技であり、採点は正確かつ公平であることが求められる。コーチからのインクワイリー（問合せ）に対して上級審判員によるビデオ判定も導入されているが、設置位置・角度が固定された1台のカメラ画像から目視判定するため、器具や身体に隠れた体の部位を複数の視点から確認することはできない。また大会を通じて判定基準を統一するため、同じ審判員が終日採点業務をこなす必要もあり、審判員の肉体的・心理的負担は年々高まっている。

我々はこれらの課題に対し、選手の体の動きを三次元センシング技術でデジタル化し、実施された演技を自動判定することで審判員の採点を支援し、将来的に自動採点化を目指してAI体操採点システムの開発に着手した。本システムは、国内・国外の大会での実証・運用実験を重ねて国際体操連盟（FIG: Fédération Internationale de Gymnastique）に承認され、2019年10月にシュトゥットガルト（ドイツ）で開催された第49回世界体操選手権から公式に運用が開始された。

3 AI体操採点システムの概要

AI体操採点システムは、3Dセンシング技術によ

り選手の19関節の三次元座標を計測し、結果を基にした各関節のまがり角度とあらかじめデジタル化した採点規則とを照合することで技の認識を行うことができる^{(4), (5)}。本システムの概要を図1に示す。選手の動きを妨げる反射マーカ等を使用せず、複数台の3Dレーザセンサを使用して、人体表面の凹凸情報を表す深度画像を、オクルージョン（身体・器具による隠れ）を極力排除して取得する。この深度画像を基に深層学習（Deep Learning）を使用した骨格認識技術により、判定に関わる関節の三次元座標を高精度に求め、関節の3D座標から肘や膝、背骨等のまがり角度を決定する。更に、得られた角度の時系列変化を入力とし、技のデータベース（辞書）を参照することで技認識を行う。このように、3Dセンシング技術はIoT/AIの複合技術で構成されており、後述のように技認識技術にもAIが採用されている。

図1の右側に示す採点支援アプリには、体操演技におけるフレームごとの関節角度を関節ごとに確認できるマルチアングルビューと、技認識結果により得られる技名等を示す自動採点ビューが存在する。マルチアングルビューでは、骨格認識出力である3D骨格座標を、正面・側面・平面などの視点から表示する。こうした解析は、前記インクワイリーや審判間での判定結果の不一致が生じた際に、問題となるフレームで判定の基準となる関節角度を満たしているかを確認するために利用され、正確性・公平性の担保に貢献する。一方、自動採点ビューでは、時系列での技認識結果を示すとともに、その技

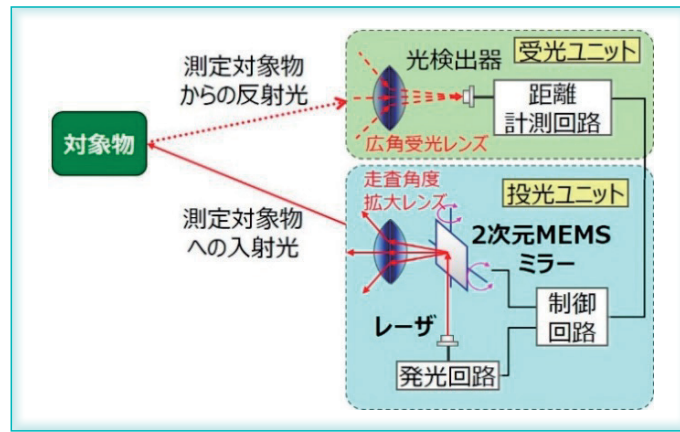


図2 3Dレーザセンサの構成

のグループ番号、技の難易度から全演技のDスコアを自動生成することで、審判作業の負担軽減を可能とする。3Dセンシング技術による選手の動きのデジタル化とともに、採点規則のデジタル化により、体操採点のデジタルトランスフォーメーション（DX）が確立された。

4 AI体操採点システム技術

4.1 3Dセンシング技術

我々が開発した3Dレーザセンサの構成を図2に示す⁽⁵⁾。アスリートの素早い動きを正確にデジタル化するために、ライダ（LiDAR: Light Detection and Ranging）方式の深度画像取得装置を開発した。対象物との距離測定には、レーザパルスを対象物に投射し、その反射時間を測定するToF（Time-of-Flight）方式を採用した。対象物全体のスキャンには、レーザパルスの投射角度を高速に制御できるMEMSミラー方式を採用している。レーザパルスが投射されてから対象物に反射し、受光ユニットで検出されるまでの時間差を ΔT 、光速を c （約30万km/s）とすると、対象物までの距離は $\Delta Tc/2$ で求められる。

スポーツ用途では、人体を数cm間隔の点密度で測距するため、従来のライダよりも走査点数を10倍以上に増やす必要がある。このため図2に示すように、走査角度拡大レンズを使用すると同時にMEMSミラーの小形化を進めた。また、広範囲な演技範囲をカバーするため、遠距離に人が存在する場合は、レーザパルスの出射角を絞り、人の解像度を近距離と同等のレベルまで向上させるズーム制御技術や、複数センサ間でのレーザパルスの干渉回避技術などの独自技術も開発している⁽⁵⁾。

複数台の3Dレーザセンサが取得した深度画像か

ら、人体を構成する各関節の三次元座標を抽出するのが骨格認識技術である。システム開発にあたっては、①国際大会に適用可能な採点精度を満足するには、数cmレベルの高精度な骨格認識精度が要求されること、②他のスポーツに比べてアクロバティックな動きや高速な動きが多いことから、既存の深層学習によるアルゴリズムをそのまま利用するだけでは上記精度を満たすことができないこと、がシステム設計上のチャレンジであり、これを満たす骨格認識技術として図3に示す学習型骨格認識とフィッティングを組み合わせたハイブリッド方式を開発した。

学習型の骨格認識では、まず既存方式と同様に各センサからの深度画像とそれに対する関節のキーポイントの教師データから、画像認識用深層学習ネットワークである畳込みニューラルネットワーク（CNN: Convolutional Neural Network）上に推論モデルを学習させ、推定された二次元キーポイントの統合により三次元の骨格座標を抽出する。次に、フィッティングでは、学習型骨格認識による三次元骨格座標出力を初期値とし、各センサからの深度画像を統合した三次元点群に対して、上記初期値から構築された人体モデルを当てはめることでより高精度な三次元骨格座標を計算する。フィッティングは最適化問題として定式化されており、三次元点群座標と人体モデルの表面座標の一致度を表す評価関数（ゆう度に相当）を定義し、最も評価関数が高くなる関節角度を最適化計算により求める。図4では、あん馬演技における三次元点群への人体モデルのフィッティングの初期状態と最終状態を示している。ここでは、分かりやすくするため、人体モデルの初期関節位置を故意に点群から離してフィッティングした例を示している。一般的に最適化の計算は処理時間が長くなるが、人体の可動域に関する構造的制約を取り入れることなどで高速化を達成し

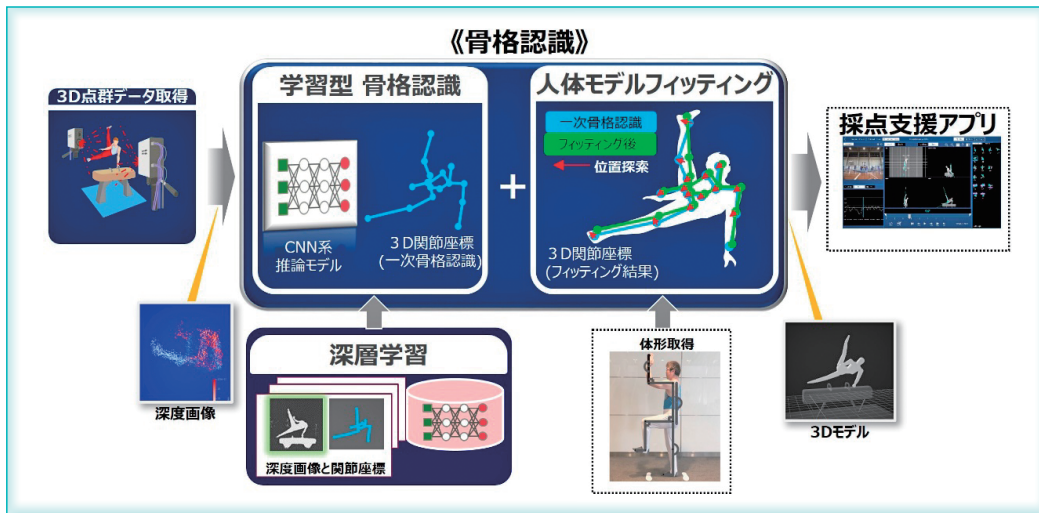


図3 AI体操採点システム向け骨格認識技術—学習型骨格認識と人体モデルフィッティング—

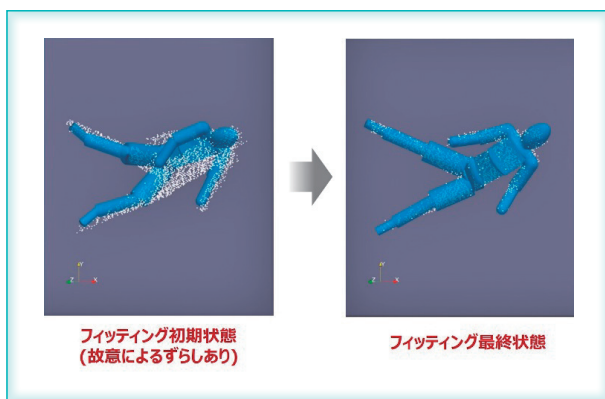


図4 あん馬演技におけるフィッティングの例

ている。

学習型骨格認識では、深度画像から推論モデルに基づいて関節位置を推定するため、3Dレーザセンサのスキャニング精度や準備した学習データの品質によって精度が左右される場合がある。図3に示されたように後段にフィッティングを実施することにより、統合点群に合わせて関節位置を実測値に合わせて込むことができ、体操採点に要求される骨格認識精度を達成できた。一方、フィッティングのみでは最初のフレームで関節角度の初期値が存在しないことや、雑音（ノイズ）などによって関節のトラッキングが外れた場合に骨格精度が大きく劣化することがあり、学習型骨格認識とのハイブリッド化が必須となっている。フィッティングにおける最終精度は、アルゴリズムだけでなく、人体モデルの精度にも依存する。人体モデルは図4に示すように円柱・だ円柱などで構成されており、円柱の長さ・半径等をアスリートの体形に合わせて最適化する必要がある。我々は、国際体操連盟・日本体操協会と連携し、競技に参加する選手の合意をとって図3に示す体形取得を進め、骨格認識の高精度化を達成した。

4.2 技認識技術

採点支援向け技認識技術の概要を、あん馬を例にして図5を用いて説明する。体操の技の数が膨大（男子6種目合計819技、女子4種目合計549技）であり、今後も技の数は増えていく傾向にあるため、個別の技ごとに深層学習するのは非効率的である。そこで、技そのものを認識するのではなく、技を構成する共通的な動き（基本運動）を認識し、その組合せで技を判定するアプローチを採用した。基本運動の数は男子が475個、女子が318個と、技の数と比較して半数近くの値となり、結果として基本運動認識による共通要素の抽出によって技認識精度の向上につなげている。

図5の例ではあん馬の技認識の概要を示している。あん馬演技における個々の基本運動を定義し、基本運動に関連した特徴量（図5の例では手の支持位置、及び、体躯とあん馬の成す角度）をパラメータとして基本技を認識し、連続する基本技の組合せを技の辞書と照合することで技を認識する構成となっている。図5の左下の例では、最初の基本運動として「正交差倒立」、続いて「下ろして開脚支持」が認識された結果、最初に演技された技が「セア倒立」であると判定している。一旦採点対象となる技を認識できれば、採点規則から技の難易度や難易度価値点は一意に決まり、実施された演技全体の価値点や加点要素を合計することでDスコアを自動的に生成できる。

技認識において最も重要な技術課題は、フィッティング結果である三次元骨格座標の時系列データから、基本運動間の切れ目を認識し、分割された時系列データに対して基本運動と特徴量を決定することにある。基本運動間の切れ目や基本運動、特徴量

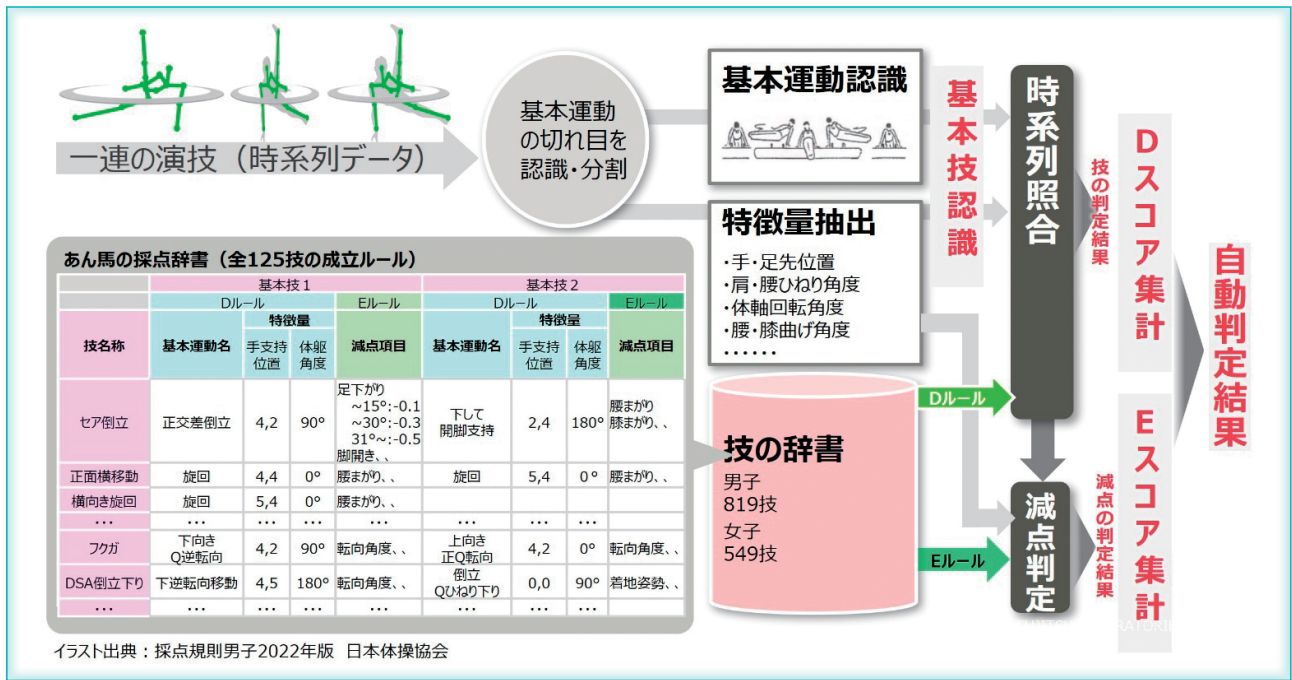


図5 AI体操採点システム向け技認識技術

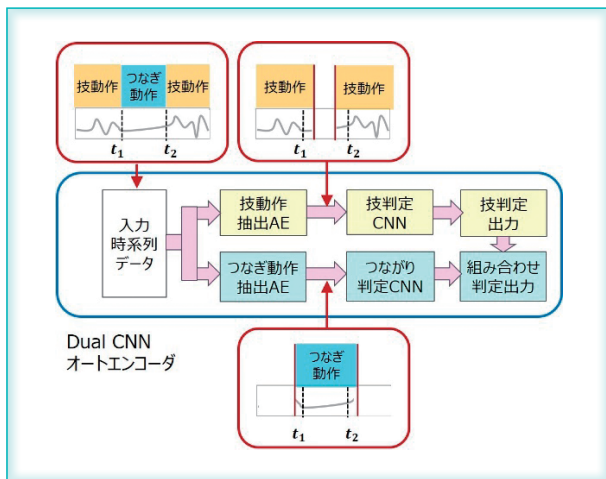


図6 平均台の技・組合せ加点認識用 Dual CNN オートエンコーダの構成

を決定するアルゴリズムには、ルールベース（判定ロジックとしきい値により決定）と深層学習を用いた推論モデルによる識別の二つの手法があるが、種目ごとに使い分けられている。例えば、平均台の採点では、技の判定に加えて技と技の組合せの成否から加点の有無を判定する必要がある。組合せの成否は、技と技の間の「つながり動作」の経過時間と姿勢の乱れの有無により判定されるが、技とつながり動作の境界や姿勢の乱れの厳密な定義ができないため、ルールベースによる定式化が困難である。そこで、図6に示すように、2台（Dual）のCNN オートエンコーダ（符号器）を併設して技とつながり動作の境界にマージンを持たせて両動作領域を抽出し、技と技の組合せ成否判定を高精度に実施する手法を開発した⁽⁶⁾。

5 AI体操採点システム技術の進化

5.1 全種目対応と画像方式への取組み

3Dセンシング技術によるAI体操採点システムは、2019年に国際体操連盟があん馬、つり輪、男女跳馬の4種目で正式採用し、翌年には平均台を追加し、5種目で運用が始まった。現在は全10種目適用に向けて開発の最終段階にある。3Dセンシング技術の開発によりAI体操採点システムの実用化を先行して進めているが、並行して市販カメラを使用した画像方式の技術確立を進めている。図7は、AI体操採点システムにおける画像方式骨格認識技術の概要を示している。

画像方式は、学習型人検知・トラッキング、学習型骨格認識、骨格補正の各技術で構成されており、骨格認識の後段に位置する技認識は3Dセンシング方式と共通である。市販のカメラを使用し体形取得を行わないことで、コストや運用面での負荷軽減が期待でき、2022年の第51回世界体操選手権リバプール大会からあん馬、つり輪、男女跳馬、平均台の5種目で公式な運用が始まった。図7に示された骨格認識・骨格補正技術の詳細については今後発表する予定である。本稿では人検知・トラッキング技術に関して、AI関連国際会議で開催されたコンペティションでの成果を紹介する。

5.2 画像方式における人検知・トラッキング技術

AI採点システムにおける人検知・トラッキング

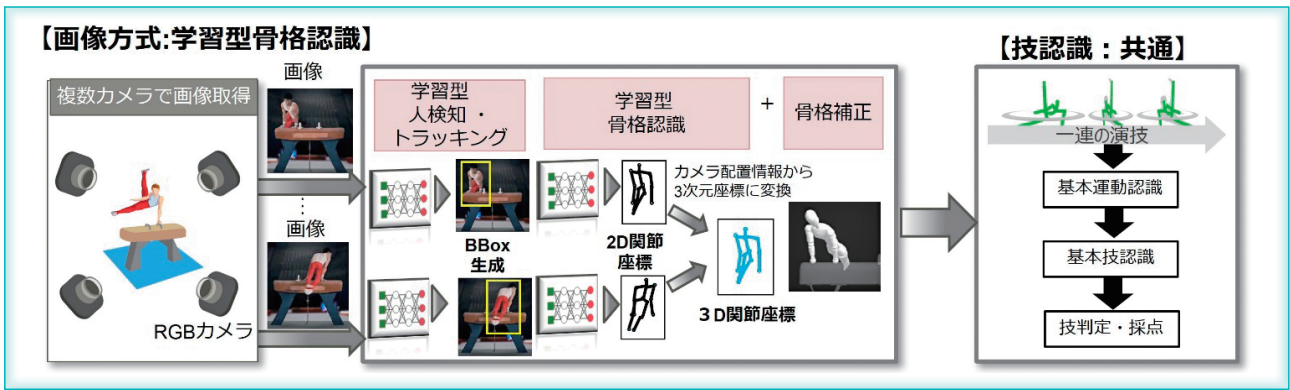


図7 画像方式骨格認識技術

技術とは、入力画像から競技中の選手を選択する Bounding-Box（以下、図7のように「BBox」と表記）を生成する技術である。BBoxは、深層学習ベースの Object Detector を利用して生成することができるが、体操の場合には、選手の隣にいるコーチとの誤検知や、器具などによるオクルージョンによって本来の選手の位置に生成されない場合がある。これらの問題を解決するためにトラッキング技術を強化している。

図8は、我々が開発した多視点多人数トラッキング技術の概要を示している。まず、各画像フレームでBBoxを生成し、複数フレームでの時系列情報から2D Tracklet（動きの軌跡）を抽出する。多視点カメラ間での同一人物を判定するために、視点間における2D Trackletの一貫性距離を計算し、距離が近い場合に同一人物の2D Trackletであると判定する。その後、3D位置計算により3D Trackletを求め、結果から2D BBoxの誤検出・位

置ずれを補正する。高精度 BBox 生成により画像方式における骨格認識精度を向上できる。一貫性距離は、図8の下図に示すように、複数の2D画像に存在する人物間の距離であり、特定のカメラにおける人物の位置と別カメラの人物の位置から生成されるエピソード線との距離を計算することで求められる。我々は、2D BBox に誤検出があっても複数フレームの一貫性距離から正確な2D Trackletを関連付ける手法や、3D Trackletを精度良く算出する手法を新たに開発した⁽⁷⁾。

我々は本技術をベースに、2021年のICCV (International Conference on Computer Vision) で開催された Multi-camera Multiple People Tracking Challenge に参加し、認識性能で世界4位を獲得した。また、本技術を更に向上させ⁽⁸⁾、サッカーやダンスの分野に適用することで、2022年のCVPR (Computer Vision and Pattern Recognition Conference) の SoccerNet Challenge, 及び、ECCV

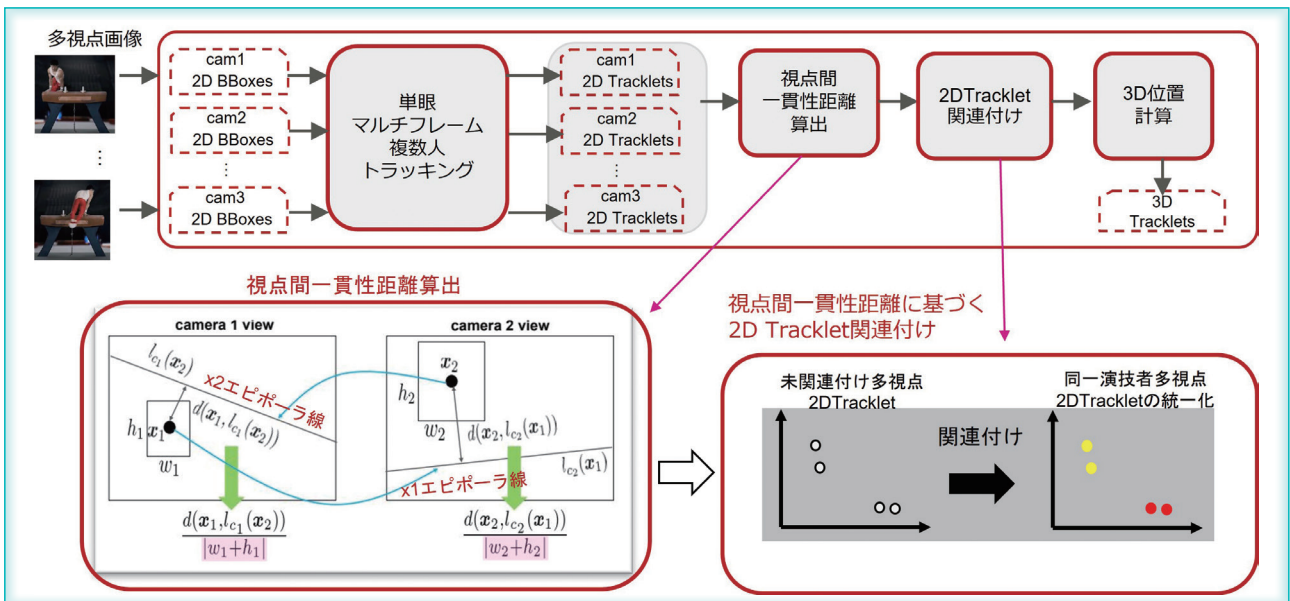


図8 AI体操採点システム向けトラッキング技術

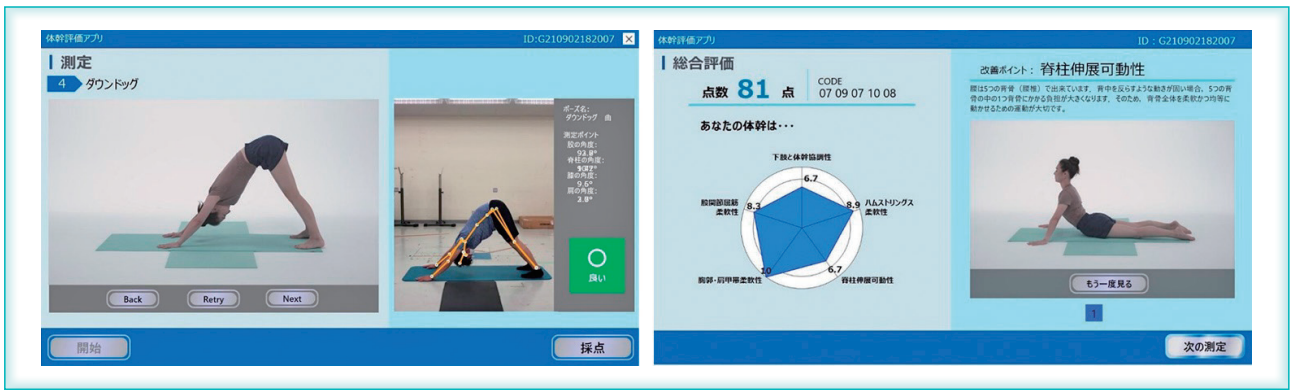


図9 体幹評価アプリの概要

(European Conference on Computer Vision) 併設の Multiple Object Tracking and Segmentation in Complex Environments Workshop における DanceTrack Challenge で、いずれも世界2位の認識性能を示した。体操に限らず様々なスポーツ分野において、人検知・トラッキング技術は、画像方式による骨格認識の精度向上に関する重要な地位を占めている。

6 AI 体操採点システムの展開⁽⁹⁾

AI 体操採点システムは体操の演技を採点するだけでなく、トレーニングや選手強化、アスリートコンディショニングにも応用が可能である。体操選手の身体的側面に目を向けると、技の複雑化への対応能力は体形との関係が深く、一般的に体が小さいほど宙返りはしやすく、軽量であるほど自重の制御はしやすい。このためトップ選手の若年齢化は避け難く、複雑な技の実施によるけがを要因とする選手寿命の短期化や引退年齢の早期化が懸念されている。我々はAI 体操採点システムを発展させ、けがの恐れのある動きを検知したり、大会や練習中にけがをした際の骨格認識結果を医師に提供することにより、最適な治療を受けられるよう取り計らうことで*、選手寿命の長期化に貢献できると考えている。また選手の演技データをエンターテインメントコンテンツとして観客へ提供することで、ファンの拡大やジュニア世代の興味向上・競技人口の拡大につなげていきたい。

AI 体操採点システム技術はスポーツだけでなくヘルスケア領域にも活用できる。一例として、市販カメラで取得した五つのポーズから腰回りを中心とした体幹の柔軟性や可動域を評価し、個人ごとに改善エクササイズを提案する「体幹評価アプリ」を図

9 に示す。図9では、骨格の測定画面と総合評価結果・改善例を示している。本アプリは、2021年10月に開催された世界体操・新体操選手権北九州大会で同時開催された「Sante Gym」にて来場者への体験デモとして紹介された。体験者からは、姿勢を点数化することによりゲーム感覚で楽しく運動を行うことができるとともに、自身の日々の成長がセルフチェックできるため、モチベーション維持にも役立てることができるという評価結果を得た。将来は日常の関節の可動域データを基にした適切なりハビリ指導等にも活用機会を広げたい。

「体幹評価アプリ」は早大スポーツ科学学術院・金岡恒治教授によるスポーツ科学の研究成果に基づいて開発したメソッドを我々のシステムに組み込んだものである。今後は、このような専門家によるメソッドや、現場以外ではアクセス困難だったスキルがSNSの台頭などによって誰もが容易に習得できるようになる時代が到来しつつある。その一例としてダルビッシュ有投手が自身の考案した変化球を自身のSNSで公開したことなどは、オープンシェア革命として注目を浴びている⁽¹⁰⁾。動画配信の普及に伴いダンスなどの自身のスキルを公開し、他人が自由に見て学ぶ機会も増えてきた。教えた人と学びたい人の新たな関係ができつつある中で、AI 体操採点システムの新たな展開を模索していきたい。

7 おわりに

本論文では今後の市場拡大が予想されるスポーツICT市場に対し、体操採点ノウハウとIoT/AI技術を結集したデジタル分野での最新の取組みとしてAI 体操採点システムを紹介した。本技術は、審判員の採点支援だけでなく、トレーニングや視聴者向けコンテンツへの活用などスポーツやヘルスケア

* 岩崎安伸, Private Communications

アの領域において、「する・見る・支える」の立場で関わる全ての人々が活用できる技術である。今後は様々なパートナーと連携しながら、人の動きのデジタル化による新たな世界を創出していきたい。

■ 文献

- (1) P. Spagnolo, P. L. Mazzeo, M. Leo, M. Nitti, E. Stella, and A. Distanto, "On-field testing and evaluation of a goal-line technology system," *Computer Vision in Sports*, pp. 67-90, Springer, 2014.
- (2) M. Manafifard, H. Ebadi, and H. Abrishami Moghaddam, "A survey on player tracking in soccer videos," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 159, pp. 19-46, June 2017.
- (3) 木村聡貴, 柴田翔平, 高橋弘毅, 榎井昇一, 榎井文人, 吉野松樹, 相原伸平, "座談会スポーツテック," *情報処理*, vol. 61, no. 1, デジタルプラクティスコーナー, 2020.
- (4) 榎井昇一, 手塚耕一, 矢吹彰彦, 佐々木和雄, "3D センシング・技認識技術による体操採点支援システムの実用化," *情報処理*, vol. 61, no. 11, デジタルプラクティスコーナー, Nov. 2020. (第70回電気科学技術奨励賞受賞)
- (5) 榎井昇一, 手塚耕一, 矢吹彰彦, 佐々木和雄, "3D センシング・技認識による体操採点支援," *信学誌*, vol. 103, no. 1, pp. 5-14, Jan. 2020.
- (6) 阪田雅人, 本田 崇, 矢吹彰彦, 榎井昇一, 佐々木和雄, "Dual CNN オートエンコーダーによる体操競技の技認識," *DICOMO2020 シンポジウム*, 4C-5, June 2020. (優秀論文賞受賞)
- (7) F. Yang, S. Odashima, S. Yamao, H. Fujimoto, S. Masui, and S. Jiang, "A unified multi-view multi-person tracking framework," to appear in *Computational Visual Media*.
- (8) F. Yang, S. Odashima, S. Masui, and S. Jiang, "Hard to track objects with irregular motions and similar appearances? make it easier by buffering the matching space," *IEEE/CVF Winter Conf., Appl., Comput., Vision (WACV) 2023*, Jan. 2023.
- (9) 藤原英則, 佐々木和雄, 榎井昇一, "AI を用いた体操競技動作の解析と評価," *臨床スポーツ医学*, vol. 39, no. 4, pp. 424-428, April 2022.
- (10) <https://www.nhk.or.jp/gendai/articles/4534/index.html>

(2022年11月11日受付, 2023年1月12日再受付)

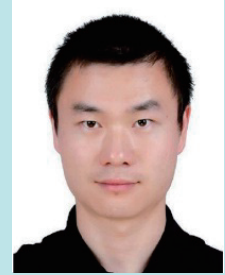
榎井昇一

富士通株式会社. 1984 名大大学院工学研究科電気電子コース修士課程了. 1990-1992 スタンフォード大客員研究員. 1999 富士通株式会社入社. 2006 東工大博士 (工学). 2007-2012 東北大電気通信研究所教授. 2012(株)富士通研究所. 現在, 富士通・富士通研究所 G プロジェクトシニアリサーチエキスパート. 人の動き認識技術などの開発に従事. IEEE 会員.



楊 帆

富士通株式会社. 2012 南京大・地理情報理卒. 2021 奈良先端大情報学博士課程了. 博士 (工学). 2021 富士通株式会社入社. 現在, 富士通・富士通研究所 G プロジェクト所属. 複数物体追跡技術などの開発に従事.



小田嶋成幸 (正員)

富士通株式会社. 2008 東大・工・機械情報卒. 2013 同大学院情報理工学系研究科博士課程了. 現在, 富士通・富士通研究所研究本部 G プロジェクト主任研究員. コンピュータビジョン, センサデータマイニングの研究開発を経て, 現在, ヒューマンディジタイズに向けた 3D センシングシステム・モーションデータマイニングの研究に従事. 博士 (情報理工学). IEEE, 日本ロボット学会各会員.



姜 山

富士通株式会社. 2000 上海交通大大学院制御工学研究科博士課程了. 博士 (工学). 2002 富士通株式会社入社. 研究用小形ヒューマノイド・移動型サービスロボットの研究開発と製品化にて, リアルタイムセンシング・制御の研究開発及びロボットソフトウェアのアーキテクチャ設計・システム化を担当. 現在, 富士通・富士通研究所 G プロジェクトプロジェクトマネージャー. 近年はヒューマンインタフェース, 3D 環境モデリング, 3D リアルタイムモーションセンシング技術の研究開発と, スポーツ領域等における実用化を推進. 日本ロボット学会理事.



遠隔地をつなぐ 振動伝送体験デザイン原理の構築に向けて

Towards Experience Design Principle that Connects Remote Areas using Vibration Information Transmission

駒崎 掲 Kakagu Komazaki† 渡邊淳司 Junji Watanabe†

Summary

直接的な身体接触を行うことなく、人と人とのつながりを、実感を持って感じられることを目指した、遠隔地を通信によってつなぐ振動伝送の体験デザインについて、具体的な事例を挙げ解説する。振動伝送によって実現されるコンテンツに、ストーリーや文脈を付加することによって、テクノロジーがより効果的に社会で利用される「つながりの場」を実現することをこれまで行ってきた。具体的には、視覚障がい者と遠隔で振動のリアクションを送り合う体験や、アスリートとその家族が遠隔でハイタッチをする体験、家庭料理の伝承のシーンに用いることで、離れた場所にいる親子と一緒に料理をしているという感覚を共有する体験、スポーツの試合会場と病院の無菌病棟に入院する子供たちをつなぐ体験のデザインを行った。双方向だけでなく、片方向の伝送として、遠隔で試合をするアスリートの動きを体感し、自分事として観戦する体感観戦の実現や、プロの料理人の包丁の動作の振動を体感できるシステム構成を実現した。また、人とのつながりだけでなく、空間にある振動まで含めた触覚風景や、収録者の視点を通して身体的経験も含めた体験デザインについても紹介する。

Key Words

触覚, 振動伝送, 体験デザイン, リアルタイム伝送

1 はじめに

つながりという言葉は、広辞苑によると「つながること、またそのものや、きずな、連繋、関係」という意味がある。

現在の社会的なつながりの状況を報告した調査として、令和4年4月に内閣官房孤独・孤立対策担当室による「人々のつながりに関する基礎調査」⁽¹⁾が発表された。その中で「普段のコミュニケーションツールの利用状況別孤独感」というものがあり、固定電話・FAX、携帯電話・スマートフォン、タブレット型端末、パソコン、その他の通信機器（インターネットに接続できるゲーム機等）を人とのコミュニケーションに使っている人のうち、孤独感が「しばしばある・常にある」と回答した人の割合は4.4%となっている。一方で、コミュニケーションに上記の通信機器を使っていない人の、その割合は12.4%となっている。様々な情報通信技術が普及しているにもかかわらず、コミュニケーションを行うツールとして使えていない状況にある人は、孤独感を強く感じる傾向にあることが分かる。また外出頻度別孤独感の項目では、1週間における外出頻度

別に見ると、孤独感が「しばしばある・常にある」と回答した人の割合は、外出しないという人が14.5%で最も高くなっているが、週3~4日程度外出する人は3.0%と、その割合が最も低くなっている。

また、令和4年7月に内閣府から出された「第5回新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査」⁽²⁾では、地域別のテレワーク実施率を見ると、東京都23区では2019年12月の17.8%と比べて、2022年6月では50.6%と非常に増えている状況である。外出の自粛が緩和されつつある一方で、在宅勤務の割合はコロナ前と比べて増えており、働く人の外出機会は2020年以前と比べて確実に少なくなっている。外出頻度が低いと孤独感を感じる割合が高いという現状から、外出しにくい状況下でも孤独を感じないように、つながり合える機会が世の中に必要なのではないだろうか。

このような、外出する機会が少ない状況において、離れている人同士のつながりを作る手段として、インターネットをはじめとする情報通信技術は有効な手段である。ただし、内閣府の出した孤独感の調査からも分かるように、そのような情報通信技術があってもつながり合う場がなければ利用されない。また、テクノロジーや場があっても、人がそれを利用するストーリーや必然性がなければ、実社会

† NTTコミュニケーション科学基礎研究所, 厚木市
NTT Communication Science Laboratories,
Atsugi-shi, 243-0198 Japan

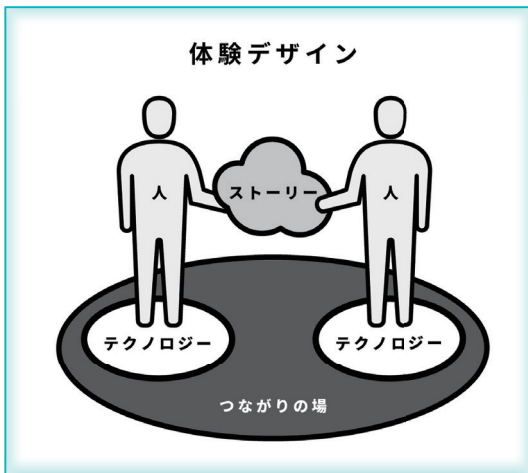


図1 体験デザイン概念

で活用されることはない、と筆者らは考えている。そこで、図1にあるような「体験デザイン」の概念に基づいて、これまで幾つかの実践を行ってきた。(ただし、ここでいう「体験デザイン」とは、単に造形などの形やビジュアルイメージなどの意匠のことではなく、体験全体のプロセスまで含めて実社会で使われるための設計のことを意味する。)

図1のように、つながりの場の中にテクノロジーが組み込まれる中で、人と人のつながり方の可能性が拡張されるとともに、それを人に使われるようにすることが「体験デザイン」として重要である。社会の中で実際に人々が自発的に、自分事として、それを体験するためのストーリーや文脈を与えること、つまり、誰と誰(人)がどんなタイミングでどのようにやるかシチュエーションを与え(つながりの場)、また、そのときの社会的状況を考慮して包括的に設計するのである。逆に、テクノロジーを開発する視点からも、実社会で活用されるには、テクノロジーによって社会にどんな価値をもたらされるのか体験デザインが必要となる。体験デザインをすることによって、テクノロジーの価値を創造することができると言える。

2 振動伝送による体験デザイン

働く人の外出機会は2020年以前と比べて確実に少なくなっており、外出頻度が低いと孤独感を感じる割合が高いという現状から、外出しにくい状況下でも孤独を感じないように、つながり合える機会が世の中に必要なのではないだろうか。

これまでの映像・音声の通信コミュニケーション

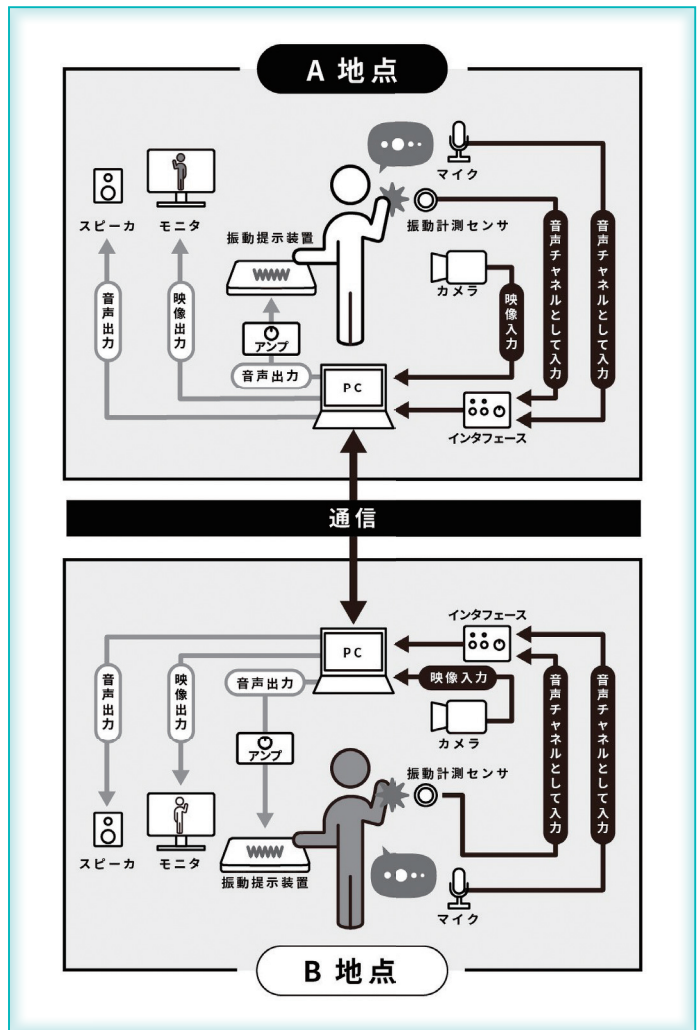


図2 振動伝送の標準的なシステム構成

は大容量通信などにより、情報量が増え解像度などの質は向上している。そこに振動情報を付加することによって臨場感の向上や、今つながっているという実感を与えることができる。実際2019年には、遠隔地間(東京と山口)で映像・音声・振動をリアルタイムで送り合うことで、映像と音声だけでは実現できない新しいコミュニケーションのあり方が生み出されることが報告されている⁽³⁾。振動によって行為を体感することで映像や音声だけでは実現できない感覚を得ることができる。このような振動伝送による遠隔共有の体験デザインにあたって、標準的な振動伝送のシステム構成を図2に示す。

パソコンやスマートフォンを通信機器として、そこに映像情報入力用にカメラ、音声情報入力用にマイク、振動情報を音声として入力するためのセンサを接続する。それらの情報を遠隔地に伝送(最大48 kHz / 192kbit/sでのビットレートで音声伝送)し、遠隔地のパソコンから映像をモニターに、音声をスピーカーに、振動をアンプに通して振動提示装置に出力する。また、映像出力にはパソコンの画面をそ

表1 体験デザインの事例

事例	伝送方向	視点	体験
1. 視覚障がい者コミュニケーション 振動提示デバイス: テーブル型振動提示装置 (振動子位置: テーブル天板裏)	双方向	一人称視点	視覚障がい者にリアクションを送る時にデバイスを叩く
2. リモートハイタッチ 振動提示デバイス: 箱型振動提示装置 (振動子位置: モニタ前のアクリル板裏)	双方向	一人称視点	デバイスにハイタッチし合う
3. 親子の調理振動伝送 振動提示デバイス: テーブル型振動提示装置 (振動子位置: テーブル天板裏)	双方向	一人称視点	調理の振動を受け取る時はデバイスの上に手を乗せる
4. モバイルハイタッチ 振動提示デバイス: タブレット一体型 (振動子位置: タブレット裏), 踏み台型 (振動子位置: 踏み台の天板裏)	双方向	一人称視点	媒介者のコミュニケーションを通じて手足に振動を感じる
5. ハートビートエクスペリエンス 振動提示デバイス: 球体型振動提示装置 (振動子位置: 球体内部)	片方向複数	三人称視点	心拍を振動と光で感じる
6. プロの調理振動 振動提示デバイス: テーブル型振動提示装置 (振動子位置: テーブル天板裏), 包丁型 (振動子位置: 刃の中心)	片方向	三人称視点	片方の手は振動デバイスに乗せ片方は動かしながら振動デバイスを握る
7. なりきり体感観戦 振動提示デバイス: 剣型 (振動子位置: 把持部内), 踏み台型 (振動子位置: 踏み台の天板裏)	片方向	三人称視点	選手の気持ちになりきって動かしながら手足に振動を感じる
8. バイブロスケープ 振動提示デバイス: 踏み台型 (振動子位置: 踏み台の天板裏)	片方向	一人称視点	振動する台の上に乗る

のまま使用するのでもよい。振動提示装置の形も様々であるが、本稿で以後紹介する振動伝送の体験(事例を表1に示す)は、このようなシステムをベースにデザインされている。

ただし本論文で取り上げる八つの事例のほかに、伝送方向として複数対複数の双方向の可能性や、視点に関しても、相手からの二人称視点の可能性も考えることができるが、体験や相互作用が複雑になるためここでは取り上げない。

3 身体の違いを超えた振動伝送の体験デザイン

最初の事例として、子供と視覚障がいを持つアスリートが触覚を通してつながり合う体験デザインを行った事例を紹介する。2021年7月2日に横浜市の小学校(横浜市立神奈川小学校)で、スポーツを

通して子供たちが共生社会について学ぶきっかけとなるワークショップ⁽⁴⁾が開催された。身体特性にかかわらず多様な人々が互いに認め合える共生社会へ向けて、自己と他者への理解を深める学びの場としてこのワークショップは行われた。その中で、視覚障がい者5人制サッカーの田中章仁選手を講師に迎え、6年生28名と交流した。ワークショップでは、パラリンピック出場前である田中選手が遠隔地から参加し視覚障がい者が行う競技についての講演を行った。

大会直前であるにもかかわらず、遠隔で選手とのつながりの場は作られたものの、田中選手の映像と音声は小学生側に伝わるが、田中選手側には音声でしかフィードバックを送る手段がなかった。そんな中、振動を遠隔地と双方向に送り合える振動伝送テーブルを用い、一人称視点の映像の田中選手の話に、小学生が触覚を通じてリアクションを行った。



図3 田中選手に振動でリアクションをする小学生

普段対話のうなずきなどを視覚的に認知することができない視覚障がい者が、話をした内容に振動という実感のある形でリアクションを受け取ることができる、感覚の違いを超えてコミュニケーションを行う体験デザインが実施された（図3）。

4 遠隔でアスリートと家族がつながるハイタッチ

2020年9月26日に開催された第73回全日本フェンシング選手権女子エペ決勝における、アスリートと家族が試合直前・直後に遠隔でハイタッチの振動を送り合う“リモートハイタッチ”の事例⁽⁵⁾、⁽⁶⁾の紹介をする。本事例は大会のICTを支援するNTT西日本グループが、筆者らが所属する研究所の協力の下で行った。

試合会場にいる選手と、会場ではなくホテルの一室にいる選手の家族らをつなぎ、アスリートと家族が試合直前・直後に遠隔でハイタッチの振動を送り合った。

決勝戦は新型コロナウイルス感染予防の観点からライブ配信のみ（無観客）で行われ、会場には家族さえも入ることができない状況であった。そこに“リモートハイタッチ”のシステム（図4）を導入し、フェンシングの試合会場（ピスト横）と家族が放送で見守るホテルの一室を振動伝送のシステムでつなぎ、映像とともにハイタッチの振動（映像モニター前にあるアクリル板が振動）を送り合い、選手と家族が気持ちを分かち合う体験を実現した。試合直前には、選手から家族へ意気込みが、家族から選手へ応援が送られ、試合直後には、勝者の選手が家族と喜びを共有した。

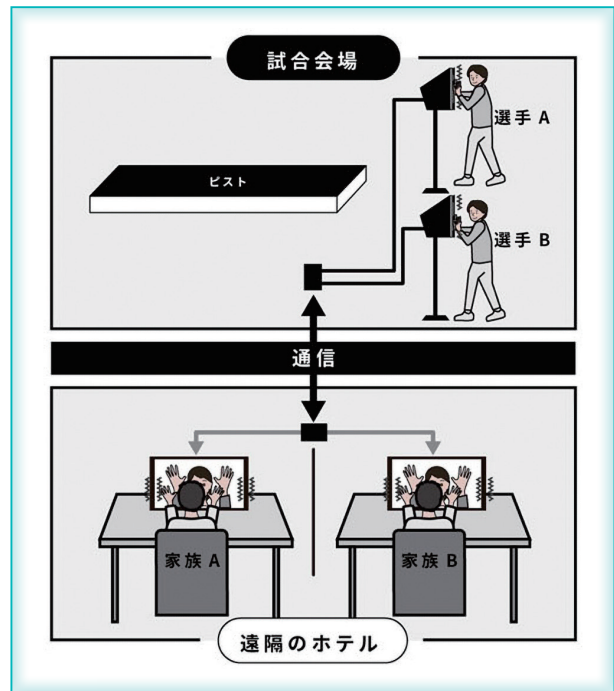


図4 リモートハイタッチの概念図

「やっぱり実際に会場で応援してもらうことが一番ですけど、（新型コロナウイルス感染症まん延下で無観客となった）こういう時期に、こういう取組み（試合前後の家族との“リモートハイタッチ”）、（家族が）離れていても身近に感じられる。NTTのおかげですごく頼もしく、子供が会場にいるような感じで試合をすることができました」という選手からのコメントがあった。

試合の直前と直後という、選手や家族が最も緊張感や高揚感が高まっているタイミングでつながること（つながりの場）、それだけでなくコロナ禍で家族でさえもそばで応援できないという、接触が制限された状況下（文脈）で触覚コミュニケーションを行ったことが、触れ合いの価値を高めたと考えられる。試合直前・直後という興奮度が高い状態にフォーカスし、そこにテクノロジーが導入されることによって効果的な体験デザインを行えたと考える。

5 親子の調理振動伝送の事例

“リモートハイタッチ”と同じく、一対一の状況で双方向に振動を送り合う技術を使用しながら、体験デザインを変え、家庭の食の場面に応じた事例⁽⁷⁾について紹介する。図5に示すように、調理の振動（包丁が食材を切るときの振動やまな板に包丁が当たる振動）を感じながら遠隔で家庭料理を学ぶという文脈で、一人暮らしの大学生の子がコロナ

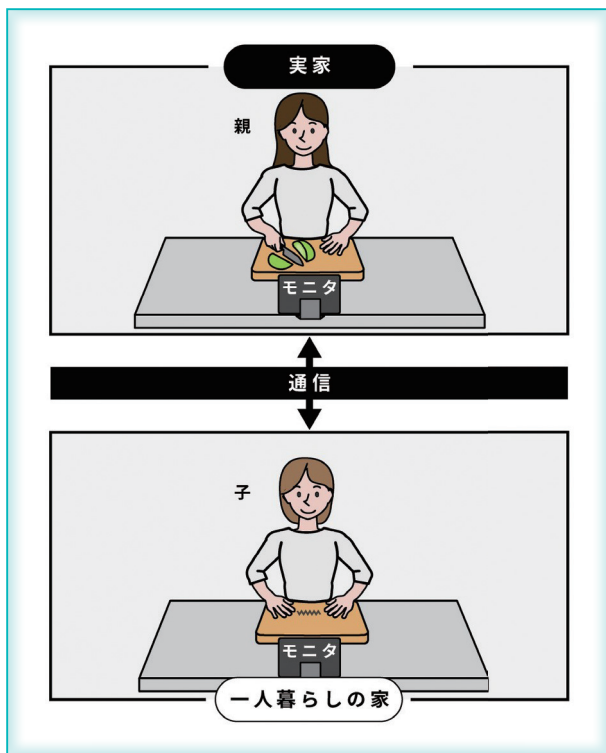


図5 親子の調理振動伝送の概念図

禍で実家に帰る機会が減ってしまっている中、遠隔で母親から家庭料理を学ぶという体験デザインを実施した。本取組みは、筆者らが所属する研究所と立命館大学の共同研究の下で行った。この体験デザインでは振動を伝送することで、遠隔でも調理の動作やお互いの存在を感じながら、親子間で家庭料理を伝承する機会を創出することができた。

“リモートハイタッチ”では瞬間的な高揚に合わせてつながりを感じられるようにしたが、今回は、料理を習得するという、一定時間の共同作業の中でつながりの場を創出した。通信インフラの拡充やテレビ会議が日常的に行われている社会背景もあいまって、振動伝送システムが以前より生活環境でも導入できる可能性が高まってきている。

6 媒介者を通してつなぐ“モバイルハイタッチ”

選手のいる試合会場から、離れた病院に入院する患児に、バスケットボールのドリブルやハイタッチなどの振動を、媒介者を通して届ける“モバイルハイタッチ”の事例について紹介する⁽⁸⁾。これまで紹介してきた離れた場所でも映像と音声に加えて、動きによって生じる振動情報を計測し送信することで、遠隔地に振動を届けるという点に関しては同じであるが、この事例でこれまでと大きく異なる点は、間に媒介者が存在することである。振動を届け

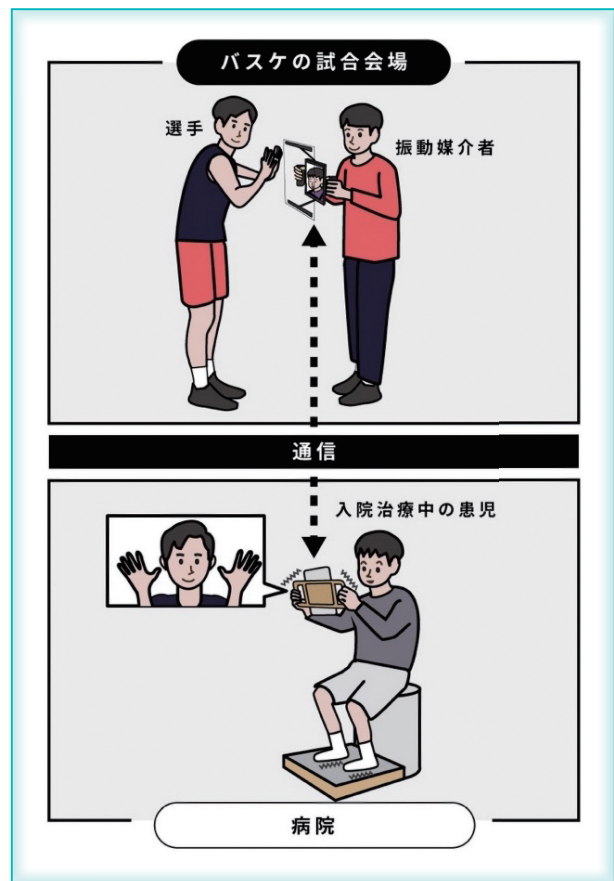


図6 モバイルハイタッチの概念図

ることができる装置を持った媒介者が、選手とコミュニケーションしているところを遠隔地に配信することで、端末を通して初めて対面する人同士であっても親密なコミュニケーションを促すことができる。

これまで振動でつながり合う体験は、家族同士であったり、あこがれの存在であったりと、元々関係性があるつながりで体験デザインを行ってきた。しかし今回の事例では、会場にいる選手と入院している患児には全くつながりがない状態であった。そこで選手との関係性があり、かつ元々患児が入院している病棟に入院していた経験がある媒介者が間に入ることによって、選手と患児が初めての出会いであっても、親密な関係がコミュニケーションの初期から生み出せる体験デザインを行った。本事例は、2022年4月24日にNTT東日本、岩手医科大、岩手BigBulls、Being ALIVE Japanによって行われた、岩手医科大付属病院小児病棟内と地元男子プロバスケットボールチーム「岩手ビッグブルズ」の試合会場を、振動情報を含めてつなぐ体験デザインについて、筆者らが所属する研究所が協力した。

岩手医科大に長期入院治療中の小児患者（及びその家族）は、ホーム最終戦の岩手ビッグブルズの選



図7 モバイルハイタッチの配信機材（左）
手と足で感じる振動提示装置（右）

手が行う、ハイタッチの振動やドリブルなど迫力ある動きやボールさばきの振動を、計測装置を持った媒介者を通して感じた。媒介者が装置を持って動き回ることができる“モバイルハイタッチ”として実施した（図6）。

今回媒介者となった方は、岩手医科大附属病院に長期入院したことがあり、Being ALIVE Japan の行ってきた支援活動によって岩手ビッグブルズとつながりを持っていた。実施時は退院しており、サポーターとしてチームに入団していたこともあり、今回の振動媒介者の役割を担った。

スマートフォンの前面に透明な板が取り付けられた配信装置（図7左）は、映像と音声、そして動きによって生じる振動情報を送信し、受信側（図7右）では振動子が取り付けられた振動タブレットによって映像、音声及び振動を受けることができる。また足置き形の振動提示デバイスにも振動子が組み込まれており、足でも振動を感じることができる。映像と音声は受信側から送信側にも送ることができるという技術構成であった。足置き形の振動提示デバイスがあることによって、ドリブルなど実際に床が振動しているようなシーンでも臨場感を得られる。

患者本人とその親を含む4家族から得た体験後のアンケートでは「選手の方と画面越しでもやり取りできたこと、試合前の雰囲気など、体験できたこと（が良かった）」「今の生活から関わることの難しい空間を身近に感じることができ、とても新鮮な気持ちになりました」「本当にリアルな感覚を味わうことができ、驚きました。触れて感覚を味わうというのが分かりやすかったですと思います！」といったコメントがあった。

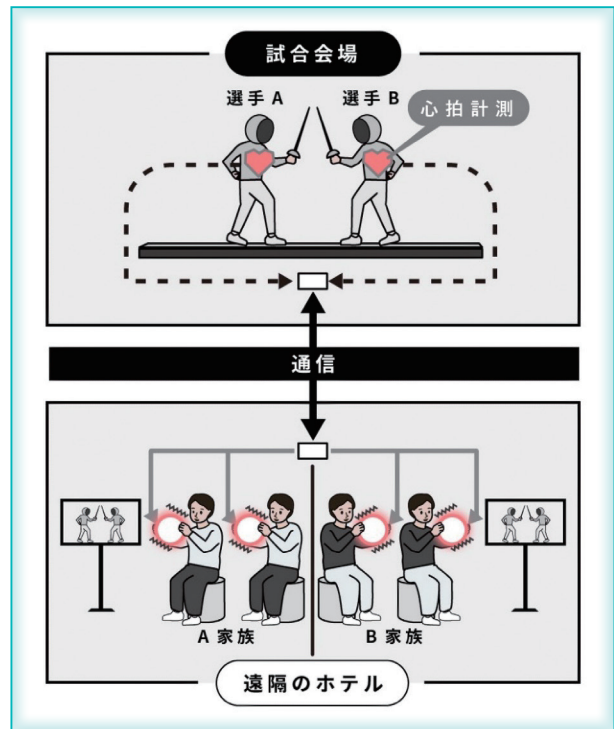


図8 ハートビートエクスペリエンスの概念図

7 遠隔で家族の心拍を感じる

“リモートハイタッチ”の事例と同様に、試合会場にいる選手と会場ではなくホテルの一室にいる選手の家族らをつないで行われた、選手の試合中の心拍を遠隔で感じることができる“ハートビートエクスペリエンス”について解説する。本事例は大会のICTを支援するNTT西日本グループが、筆者らが所属する研究所の協力の下で行った⁽⁶⁾。

“ハートビートエクスペリエンス”は図8にあるように選手が装着した心拍計のデータを、遠隔の家族が持つ複数のデバイスに伝送し、試合中の選手の三人称視点の映像を見ながら、鼓動を振動と光として体験するものである。家族でさえも普段感じることのない心臓の鼓動を振動で体感することができる。試合中マスクをしていて選手の緊迫感などが映像からは伝わりにくいフェンシングでも、選手の緊張が生々しく家族に届き、家族からは「こんなにドキドキしているなんて見てられない」というコメントさえあった。特別な存在（ここでは家族）の心拍の振動を遠隔に共有することで、実際には選手の心臓に触れながら心拍を感じ試合を観戦することはできないが、遠隔ならではの体験デザインとして実現できた。また振動が伝わっていることを視覚的に共有するために、選手の鼓動の振動に合わせて明滅しながら光らせることで、本来触れないと分からない振動を視覚化し、実際に触れていない人にもイ

メージできるようにした。直接触れ合うことができない環境下でも、家族との親密なつながりを、振動を通して感じられる体験となった。

8 プロの動きを自分事に観戦する体感観戦

フェンシング対戦時の選手の動きから生じる音を、遠隔地の人の手と足に振動として送り体感しながら試合を観戦することで、選手になりきる観戦体験のデザインの事例紹介を行う^{(6), (9)}。

新型コロナウイルス感染症の影響が少なくなってきた状況におけるイベントの開催方式として、リアル会場とオンライン配信のハイブリッド開催が増えてきている。距離や時間などの制約から参加しにくかったイベントでも、インターネットの通信下であればどこからでも参加しやすくなっている。しかし一方でオンライン開催の場合、リアル会場と比べて臨場感や会場の雰囲気などはどうしても伝わりにくい。そんな中オンラインであっても、リアル会場の雰囲気を伝えるだけでなく、オンラインであるからこそその体験デザインの検討を行った。

2021年11月6日に六本木ヒルズアリーナ（リアル会場）で開催された第74回全日本フェンシング選手権男子サーブル決勝戦の様子を、図9のように静岡県沼津市のサテライト会場へ伝送し“なり

きり体感観戦”を実現した。本事例は大会のICTを支援するNTT西日本グループが、筆者らが所属する研究所の協力の下で行った。沼津市は、フェンシングを通じたまちづくりを推進するために、2019年2月、日本フェンシング協会と全国初の包括連携協定を締結している。そのため沼津市はフェンシングを学ぶ子供たちが多数在籍しているフェンシングクラブを有しており、そことリアル会場をつなぐ場をデザインした。サテライト会場では、フェンシングのサーブル種目を特に練習している子供4人（小中学生）が体験した。

具体的な体験内容は、リアル会場の選手が戦う試合場には振動を計測するためのマイクを複数設置し、その情報をサテライト会場の沼津のフェンシングクラブに伝送する、というものである。同時に試合の映像も送られており、体験者1組はその映像に横向きになるように立つ。そしてなりきる選手の気持ちを想像しながら、その対象の動きを模倣し、対象の経験を自分の経験として置き換えて観戦を行う。手元にはフェンシングの剣を模した振動デバイスと、足元には選手の足の踏み込みの振動が感じられる足台形のデバイスが設置されており、リアル会場で計測されたものがそこに提示される。手足に伝送した振動は、選手の身体的リズムをガイドとして体感し、また動きを合わせながら体験することで、自分が選手になりきって対戦しているかのような主体感を得られる。それによって能動的に試合を観戦し、自分のことのように勝敗を感じられるような観戦体験としての体験設計を行った。

ここで重要なのが、体験者がいかに選手になりきって体験できるかの設計である。スポーツの試合で振動とともに遠隔地に届ける取組みはこれまでも行われてきているが⁽¹⁰⁾、そのような会場の臨場感を体験するのではなく、サテライト会場でも選手個人の体験を自分事として体感するような体験デザインを行なった。

体験直後、その4人の体験者からは「負けて悔しかった」などといった自分が試合に出ていたかのような感想が得られ、“なりきり体感観戦”の設計意図はおおむね実現されていたように考えられる。

9 プロの料理人の調理の振動

前章で紹介した“なりきり体感観戦”は卓越した選手の動きによって生じる振動をリアルタイムで体感するものであったが、ここで紹介するのはプロの技能を身近に体感できるコンテンツの体験デザイン

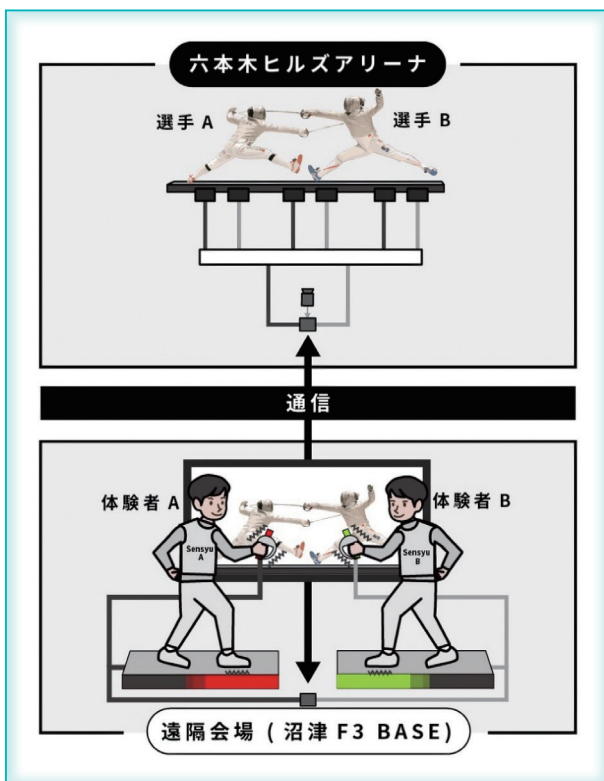


図9 なりきり体感観戦の概念図



図 10 プロの調理の振動を体験する様子

である。また、フェンシングの事例のように体験者の素養を必要とせず、誰もが体験したことのあるまな板の上で包丁によって食材を切るという行為においてプロフェッショナルな料理人の身体的リズムを感じることができる⁽¹¹⁾ (図 10)。

具体的には、プロフェッショナルな料理人が調理をしている（食材を切っている）映像、音声、振動を事前に収録したものをモニタ、スピーカ、包丁型とまな板型振動提示装置で再生した⁽¹²⁾。体験者は映像を見ながら、異なる二つの振動提示装置を通して振動を感じることによって、プロフェッショナルな料理人の身体的リズムを共有し、卓越した技術を身近に体感することができた。料理人からも「本体（包丁型振動提示装置）が軽くても、振動で重みを感じるし細かい違いが分かった」といった感想があった。

10 触覚のある風景を提示する

これまで研究を行ってきた映像・音声・振動を使った提示技術に「サウンドスケープ（音風景）」の思想を取り入れることで「バイブロスケープ（触覚風景）」（図 11）⁽¹³⁾ を実現している。2022 年 6 月 25 日（土）—2023 年 1 月 15 日（日）の間 NTT インターコミュニケーション・センター（ICC）にて展示（図 12）⁽¹⁴⁾ され、「自分が歩いているような感じがする」「思わず歩き出して（振動提示）台を降りてしまった」などのコメントが多く寄せられている。触覚媒介者が持つ記録装置（図 13）で取得した映像・音声・振動を図 12 にあるように、映像モニタとスピーカそして踏み台形の振動提示装置で再生する。またフィールドレコーディングの考え方⁽¹⁵⁾ のように、触覚媒介者の思想が収録対象の選択や視点に反映される。つまり何を伝えたいか、何を感じてもらいたいのか、などの触覚媒介者の思いが現れるため、触覚媒介者その人が映像として映っ

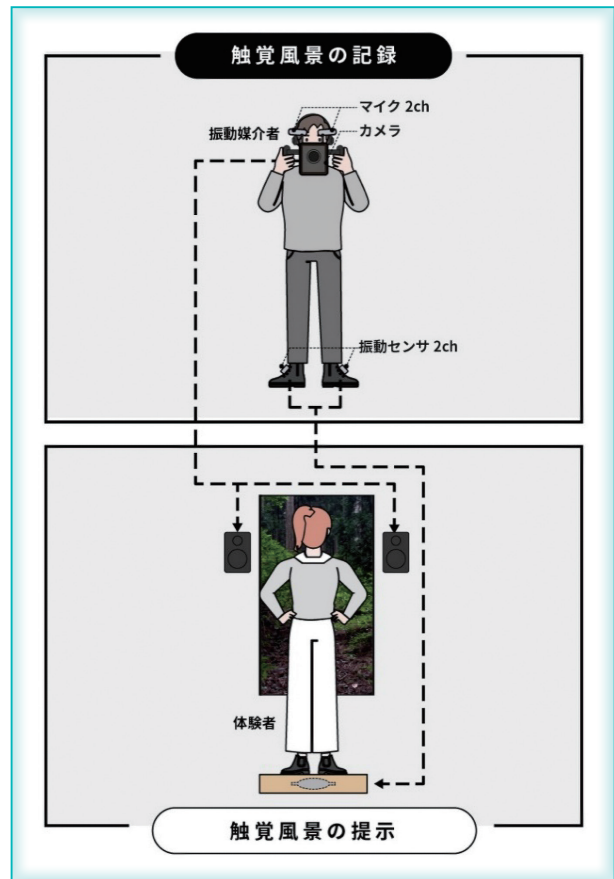


図 11 バイブロスケープ概念図

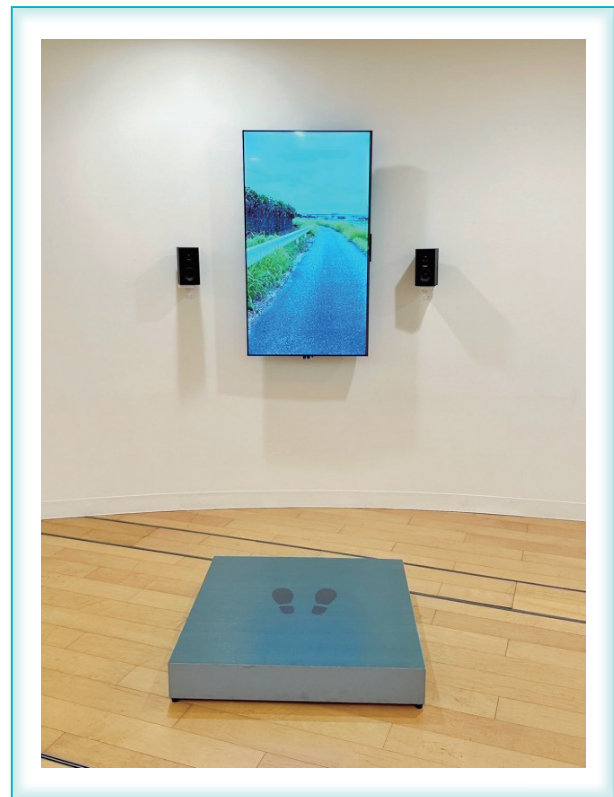


図 12 バイブロスケープの実際の展示⁽¹⁴⁾

ていなくともその人を通した世界を体感するものになる。そして体験者は触覚媒介者の視点を通して身

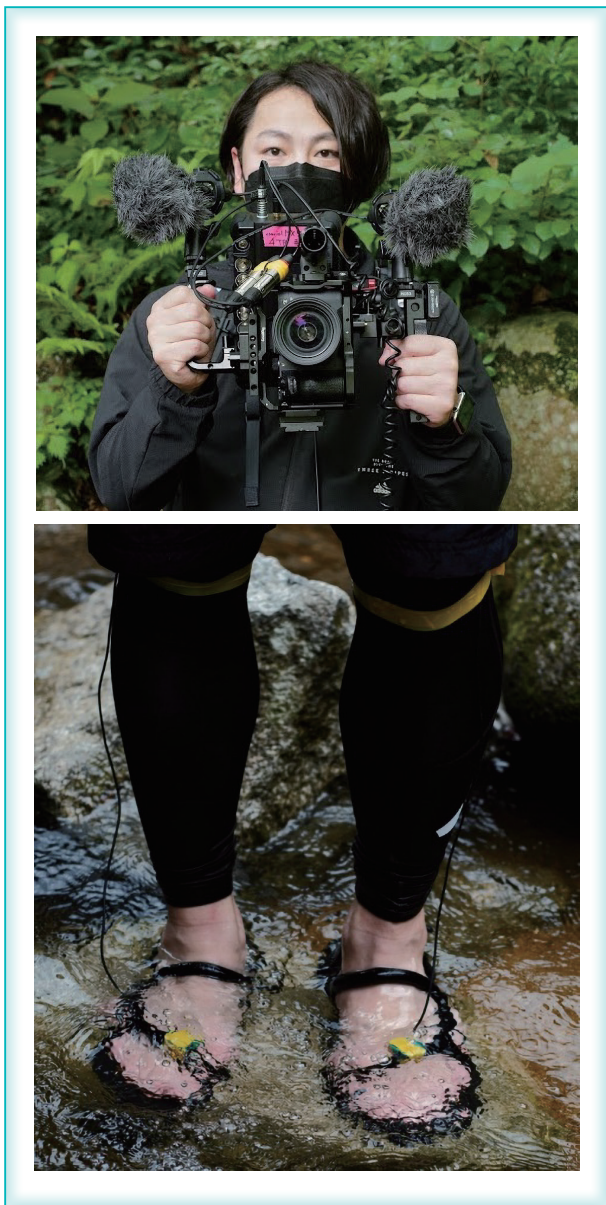


図13 バイブロスケーブ音声と映像の記録機材（上）
水辺でも記録できる振動のセンサ（下）

体的経験も含めた「世界へのまなざし」を振動を通して体に巡らせることができる体験になっている。

また動きながら映像・音声・振動を記録するため、映像の揺れなど雑音（ノイズ）が生じるが、この“バイブロスケーブ”においては雑音として捉えるのではなく、その人らしさの身体的リズムを表しているものと考え、そのことで空間の把握や風景として捉えるための手掛かりにもなる。この“バイブロスケーブ”は一見匿名性のあるような振動の記録方式のように見えるが、触覚媒介者を通じた人とのコミュニケーションでもあると言える。

つまり触覚媒介者自らがその場所ならではの世界のストーリーを作り出すことができる体験デザインとなっている。

11 まとめ

遠隔地をつなぐ振動伝送体験のデザイン原理構築に向けて、これまでは実践の場を活用し、実際の体験者の感想等から、その有効性を検証してきた。本稿で紹介した事例（実践の場）はイベントが多かったが、単独のイベント以外にもイベントとワークショップなどを組み合わせて、継続的に人と人をつなぐ取組みを行うことも可能である⁽¹⁶⁾。若しくは、伝統芸能と組み合わせた事例⁽¹⁷⁾や、日本の伝統的な文化・自然環境と組み合わせた事例⁽¹⁸⁾のように、私たちの身体に根付いた文化と融合させることも可能である。

また、これまでの取組みでは、振動の提示部位として手のひらや足の裏を主に扱ってきたが、それら以外の身体部位でも同様な効果が得られるかを検討していきたい。その際には、伝送技術と併せて検討することが必須であるが、既に多チャンネルの振動情報を身体の中のどの部位に提示するべきか、その規格⁽¹⁹⁾は策定されており、標準化の動向と併せて検証を進めたい。そして、詳細なデザイン原理を検討するには、十分なサンプルサイズでの検証が課題となる。そこで今後は、身体性を伴うデジタルテクノロジーと心理学の評価を合わせた「デジタル身体性心理学」というような取組みも行っていきたいと考えている⁽²⁰⁾。

社会の状況として、新型コロナウイルスの影響が小さくなってきたとしても、一度生じたりリモート環境の導入はゼロにならず、人と人がネットワークを通じてつながる機会は存在し続けるであろう。そのような状況で必要なのは、「今ここにいる」という実感のあるコミュニケーションであり、それを実現するには技術だけでなく、社会の中で人々が自発的に、自分事として体感する機会を生み出す、テクノロジーにストーリーを結び付ける体験デザインなのである。

■ 文献

- (1) 内閣官房孤独・孤立対策担当室，“人々のつながりに関する基礎調査（令和3年）,” https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kodoku_koritsu_taisaku/zittai_tyosa/tyosakekka_gaiyo.pdf（2022年11月1日最終アクセス）
- (2) 内閣府，“第5回 新型コロナウイルス感染症の影響下における生活意識・行動の変化に関する調査（令和4年7月）,” https://www5.cao.go.jp/keizai2/wellbeing/covid/pdf/result5_covid.pdf（2022年11月1日最終アクセス）
- (3) 早川裕彦，大脇理智，石川琢也，南澤孝太，田中由

- 浩, 駒崎 掲, 鎌本 優, 渡邊淳司, “高実在感を伴う遠隔コミュニケーションのための双方向型視聴触覚メディア「公衆触覚伝話」の提案,” バーチャルリアリティ学論, vol. 25, no. 4, pp. 412-421, Dec. 2020.
- (4) 駒崎 掲, “共生社会へ向けた触覚を使ったワークショップ:「感じるスポーツラボ」の実践,” 情報処理, vol. 62, no. 7, pp. 342-345, June 2021.
- (5) 駒崎 掲, 渡邊淳司, “触覚伝送による“リモートハイタッチ”:アスリートの家族間コミュニケーションや聴覚障がい者との観戦検討,” バーチャルリアリティ学論, vol. 27, no. 1, pp. 2-5, March 2022.
- (6) NTT西日本, “今こそ, スポーツにICTのチカラを. Fencing Next Era Challenge,” <https://www.ntt-west.co.jp/brand/newnormal/fnec/> (2023年5月5日最終アクセス)
- (7) 井上紗奈, 上田朋佳, 駒崎 掲, 鎌谷かおる, 和田有史, 渡邊淳司, “遠隔触覚伝送による親子間での家庭料理伝承の検討,” バーチャルリアリティ学論, vol. 28, no. 1, pp. 27-30, March 2023.
- (8) 東日本電信電話株式会社, “遠隔振動伝送でアスリートと病院の人々の心をつなぐ「モバイルタッチ」(触れ合う感覚をどこでも感じられる体験)の実証実験について,” https://www.ntt-east.co.jp/iwate/information/detail/pdf/20220412_01.pdf
- (9) 駒崎 掲, 久原拓巳, 田中由浩, 渡邊淳司, “第三者視点映像に対する運動模倣と複数部位への触覚提示による“なりきり体感観戦”の実現——遠隔フェンシング観戦におけるユースケース——,” バーチャルリアリティ学論, vol. 28, no. 2, 2023 (発行準備中).
- (10) “NTTドコモが5Gを活用した「ラグビー日本代表戦ライブビューイングイベント」を開催!5Gで光って震えるラグビーボールで大応援【レポート】” <https://news.livedoor.com/article/detail/15809868/>
- (11) NTTコミュニケーション科学基礎研究所+立命館大学, “調理の振動,” <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/vibration-of-cooking/>
- (12) 駒崎 掲, 井上紗奈, 和田有史, 渡邊淳司, “調理振動の体験コンテンツ,” 立命館食科学研究, vol. 8, 2023 (発行準備中).
- (13) 渡邊淳司, 吉田知史, 安藤英由樹, 田畑哲稔, M. A. Verdaasdonk, “マルチメディアパフォーマンスにおけるVibro-scape Designの実践的な試み,” バーチャルリアリティ学論, vol. 12, no. 3, pp. 413-416, Sept. 2007.
- (14) 駒崎 掲, 渡邊淳司, “バイブロスケープ(2022),” <https://www.ntticc.or.jp/ja/archive/works/vibro-scape/>
- (15) 柳沢英輔, フィールドレコーディング入門, フィルムアート社, 東京, 2022.
- (16) NTT東日本, “千葉ジェッツ#31原 修太選手 社会貢献活動「ハラの輪」2/12(日)名古屋D戦にて『感覚でつながるウェルビーイングプロジェクト』実施,” <https://www.ntt-east.co.jp/chiba/news/detail/20230208.html> (2023年5月5日最終アクセス)
- (17) 展覧会「Art for Well-being 表現とケアとテクノロジーのこれから」, “実感する日常の言葉—触覚講談,” <https://art-well-being.site/archive/48/> (2023年5月5日最終アクセス)
- (18) NTT, “メタバース空間×リアル空間におけるWell-being体験を通じて地域創生に貢献,” <https://group.ntt.jp/newsrelease/2023/03/20/230320a.html> (2023年5月5日最終アクセス)
- (19) EC 60958-5:2021, “Digital audio interface - Part 5: Consumer application enhancement,” <https://webstore.iec.ch/publication/59808> (2023年5月5日最終アクセス)
- (20) 渡邊淳司, “VUCA時代のデジタル身体性心理学,” 心理学ワールド, no. 98, pp. 20-21, July 2022. <https://psych.or.jp/publication/world098/pw07> (2023年5月5日最終アクセス)

(2022年11月12日受付, 2023年1月10日再受付)

駒崎 掲

NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部, オーディオメーカのデザイナーを経て, 現在に至る。音や振動を通信で共有する体験デザインの研究を行う。



渡邊淳司

NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部上席特別研究員。人間の触覚コミュニケーションに関する研究やウェルビーイングに関する研究を人間情報科学の視点から行う。



データ利活用による ものづくり DX の実現

石田 勉	Tsutomu Ishida	富士通株式会社
芳川裕基	Yuki Yoshikawa	富士通株式会社
渡部 勇	Isamu Watanabe	富士通株式会社
大島竜一	Ryuichi Oshima	富士通株式会社
土屋 哲	Satoshi Tsuchiya	富士通株式会社

1 はじめに

日本のものづくり産業は、今後、中長期的な視点で、世界での競争力低下が懸念されている。その要因として、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）をはじめとした不確実な要素への対応力の不足、ものづくりに必要な原材料価格の高騰・半導体などの部素材不足、そして少子高齢化によるものづくり人材の不足などが挙げられる⁽¹⁾。

これからの日本のものづくりには、上記の問題に加え、地球温暖化への責任という要素も加わり、大きく下記の三つの課題があると考えられる。

- (1) サプライチェーンの強靱化
- (2) カーボンニュートラルへの対応
- (3) デジタルトランスフォーメーション（DX）による競争力向上

本稿では、これからのものづくりにおける三つの課題に対し、富士通としての取組み事例を紹介する。我々は、特にデータ利活用を中心として、それぞれの課題解決に取り組んでいる。以下、本稿の構成として、**2.**で近年の日本のものづくりの課題について詳細を解説し、**3.**で富士通の具体的な取組み事例（データドリブな部品管理による在庫最適化、カーボンニュートラルに向けた投資計画最適化、AIモデルのライフサイクルマネジメントによる製造品質向上）を紹介し、**4.**ではまとめと今後の課題を述べる。

2 日本のものづくりの課題

これからの日本のものづくりにおいて、大きく三つの課題、サプライチェーンの強靱化、カーボンニュートラルへの対応、DXによる競争力向上があると我々は考える。本章では、各課題について詳細を解説する。

2.1 サプライチェーンの強靱化

近年のものづくりにおけるサプライチェーン周りの問題として、新型コロナウイルス感染症が世界全体に予測不可能な形で被害をもたらした。物流の停滞を引き起こし、それにより部素材の供給不足や原材料価格の高騰が生じた。局所的ではあるが、自然災害による物流の停滞も頻繁に発生している。また、半導体に関しては、世界規模での情報化社会への変化に伴い、半導体の需要量が供給量を上回り、引き続き入手困難な状況が続くことが予測されている⁽²⁾。

上記の問題に対し、サプライチェーンの強靱化が求められている。具体的には、世界的な不確実性の高まりが想定される中で、自社のみ被害想定だけではなく、サプライチェーン全体を俯瞰し、調達先の分散などによる、多面的なリスク対応が挙げられる。また、そのサプライチェーンの中で、限られたリソース（供給される部素材やオペレーションする人員、倉庫、設備など）で、製品を安定的に製造・供給し、最大限に利益を上げていく仕組み作りが必要である。

サプライチェーンの強靱化において不確実性への対応が求められる中で、我々はデータドリブな意思決定を行っていくことが重要と考えている。サプライチェーン強靱化におけるデータドリブなアプローチとは、サプライチェーンに関する実績・計画といったデータを集約し、現状のサプライチェーンの可視化、可視化からボトルネックとなる原因の特定、原因を抑え込むための意思決定とその検証のサイクルを早期に回すこと、と考えられる。

2.2 カーボンニュートラルへの対応

これからのものづくりには、環境保全への配慮も求められている。日本を含めた各国政府は、2050年までのカーボンニュートラルを目指すことを表明しており、日

本も「経済と環境の好循環」を実現するための成長戦略として、カーボンニュートラルに取り組んでいく⁽³⁾。

カーボンニュートラルの実現に向けたものづくり企業の具体的な課題として、サプライチェーン全体を含めた温室効果ガス（Green House Gas, 以下 GHG）の排出量の把握、自社製品の GHG 排出量の算出・データ化、売上げ・利益のみではなく、カーボンニュートラルの観点も含めた設備投資の経営判断ができること、などが挙げられる。

カーボンニュートラルの各課題に対しては、まずは GHG 排出量の「見える化」から始まり、GHG 排出量を製品軸や事業軸で見えるためのロジックの明確化、そして GHG 排出量削減のための要因特定とその改善策の実行が求められる。

2.3 DX による競争力向上

ものづくり DX における競争力向上を実現するため、IoT や AI を活用した「スマート工場化」が進められている。経済産業省によるスマートファクトリーロードマップ⁽⁴⁾では、スマート化（データ活用）の段階を、

- ・レベル 1：データの収集・蓄積
- ・レベル 2：データによる分析・予測
- ・レベル 3：データによる制御・最適化

の三つのレベルに分けているが、中でもレベル 2 の「データによる分析・予測」には、蓄積されたデータを利活用するために、AI 技術の適用が欠かせない。

これまで、機械学習やディープラーニングなどの AI 技術を使いこなすためには、高度な専門知識が必要とされてきたが、近年では AI モデルのチューニングを自動化する AutoML などの技術により、AI 技術適用のハードルは下がりつつある。一方、AI モデルの社会実装が進み実問題への適用が進むにつれ、少量のデータから AI モデルを構築し、データの変化に追従して AI モデルを運用するための「AI モデルのライフサイクルマネジ

メント技術」への期待が高まってきている。

3 富士通での取組み事例

本章では、2. で挙げた各課題に対する富士通での取組み事例を紹介する。

3.1 データドリブンな部品管理による在庫最適化

サプライチェーン強靱化の一施策として、倉庫・拠点の統廃合や在庫の最適化が挙げられる。具体的には、製造部品・保守部品の在庫拠点を全国の適切なエリアに配置すること、各拠点の各部品の在庫を過不足のない適切な数で管理すること、などとなる。在庫数が多すぎると余剰在庫となり保管費がかさみ、最終的には廃棄ロスとなる。一方で、在庫数が少なすぎると製造や保守に必要な部品の欠品が生じ、生産に足りずに機会損失したり、保守が遅れてユーザ・顧客に多大な迷惑を掛けることとなる。

本節では保守部品のサプライチェーンにおける在庫管理・拠点統廃合を事例として紹介する。富士通では、ユーザに PC やサーバを納め、その保守サービスも行っており、図 1 に示すように PC やサーバが故障した際、規定時間内に保守部品を届けて、エンジニアが故障した PC やサーバを修理する。規定時間内に修理するために、全国各地に拠点を構え、各拠点は様々な保守部品の在庫を抱えており、ユーザに最寄りの拠点から故障した保守部品を届けている。

この保守サービスにおいて、下記の問題点があった。

- ・多すぎる拠点数：他社に比べて拠点数が多く、無駄があるのではないかという懸念があった。拠点統廃合を検討しようにも、保守サービス契約の売上げと各拠点がひも付いておらず、どの拠点がどれだけ保守サービスの売上げに貢献しているかが見えていなかった。そのため、拠点統廃合の意思決定をデータ

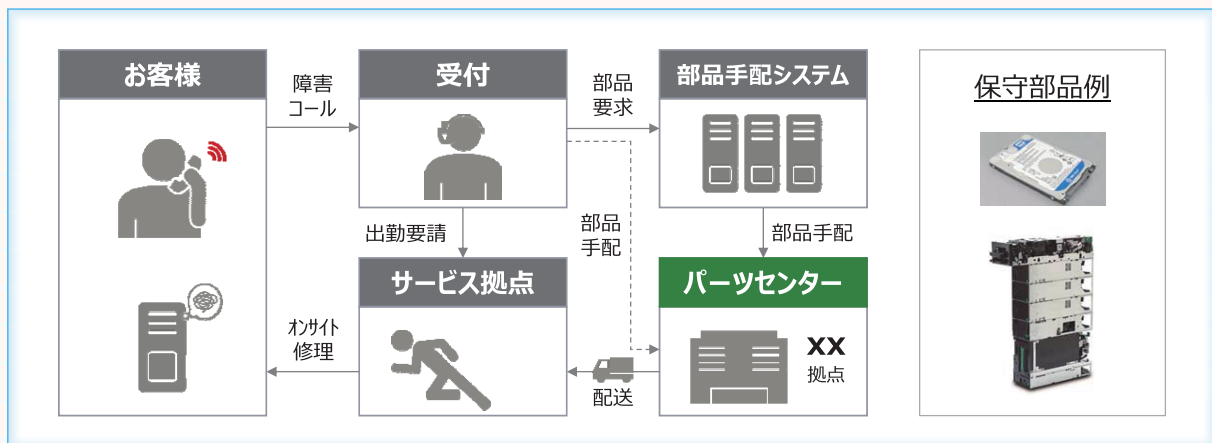


図1 保守サービスの概要

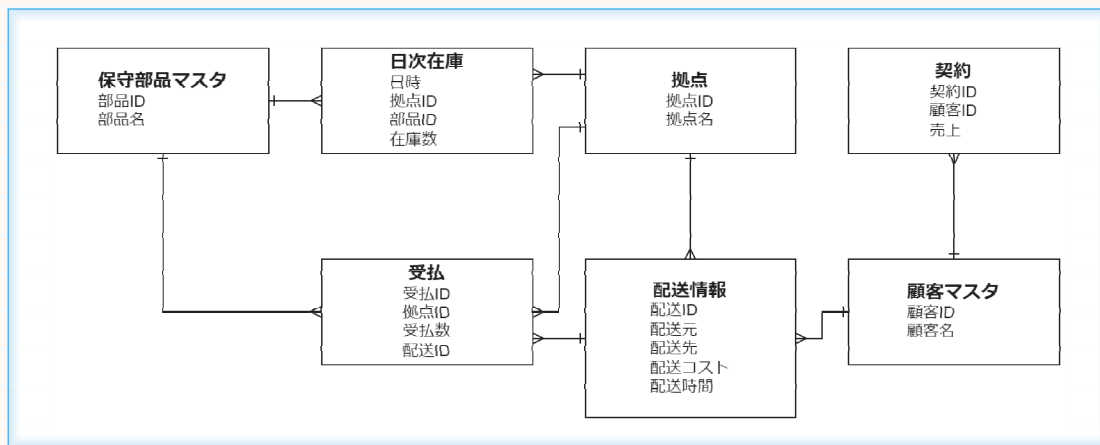


図2 保守サービスのシステム化に必要な概念データモデル

ドリブンに行うことが難しかった。

- ・保守部品の補充業務の担当者によるばらつき：各拠点への保守部品の補充は、担当者が複数のシステムから在庫情報、顧客情報、保守実績のテーブルなどを収集し、手元のエクセルで統合・分析して、補充数量を決定する、という運用で、担当者依存だった。同じ状況においても、熟練者と若手で調達する補充数量が違い、それが欠品や余剰在庫を生んでいた。結果として、ユーザの最寄り拠点での保守部品欠品に対し他拠点から長距離緊急配送することによる輸送コストの増大、保守部品の余剰在庫による保管コストの増大を引き起こしていた。

上記の問題点を受けて、データドリブンな部品管理による在庫最適化として、下記三つの課題を設定し、課題解決に取り組んだ。

- ・課題①：システムに分散した情報の統合と拠点情報の可視化

様々なシステムに分散した情報を統合し、各拠点の売上げへの貢献などを分かりやすく表示すること。

- ・課題②：業務フローの標準化

在庫補充の業務フローをシステムで標準化し、担当者による在庫補充数量の精度のばらつきを減らすこと

- ・課題③：データドリブンな拠点統廃合シミュレーション

過去の保守実績を基にした拠点統廃合シミュレーションができるようになること

まず、課題①に対しては、保守業務に必要な概念データモデルを作成し、それをベースに整理したデータを入力して、各拠点の売上げ、売上げに対する物流費の割合などを表示するアプリケーションを作成する。概念データモデルは一般的に、システム化対象範囲にある業務プロセスをモデル化したもの、と表現されている。今回、

我々の事例における保守業務に必要な概念データモデルの一例を図2に示す。図2のように、持たせるべき情報を設計したら、その情報を持つシステム・データテーブルを特定し、データを吸い上げ、データ統合を行う。今回、我々のケースでは、各拠点に売上げという情報を持たせるため、保守サービス契約の売上金を拠点にひも付けるというデータ統合を行った。保守サービス契約の売上げを管理するシステム、顧客情報を管理するシステム、拠点情報を管理するシステムがそれぞれ独立しているため、拠点に売上げをひも付けるのは容易ではない。

具体的には、ある会社Aの保守契約の売上げを拠点にひも付けるとき、会社Aに複数拠点から保守部品を納めた実績があるとき、厳密には会社Aとの保守契約の売上げを複数拠点に案分する必要があるが、1円単位の精度で拠点にひも付けるのは難しいことが発覚した。今回のビジネス上での課題に立ち戻ると、ビジネスユーザは拠点統廃合などを検討する上で、保守サービスの売上げに貢献している拠点のランキングを知りたい、とのことで、1円単位のひも付けにはこだわらず、また、各会社には最寄り拠点から保守部品を納めた実績でほぼ占められていたので、会社Aへの保守契約の売上げは最寄りの拠点にひも付ける、というアプローチを取った。データ統合を実現し、最終的に出来上がったダッシュボードが図3である。拠点の売上げや売上げに対する物流費の割合が見える化されたことにより、保守サービスの売上げに貢献している拠点が明確化され、また、ほかと比べて物流費などに問題を抱えている拠点が浮き彫りになった。

課題②に対しては、在庫不足アラートを発信するシステムを構築し、全ての担当者が欠品リスクに気づける業務フローを作った。具体的には、保守部品補充のノウハウを持つ熟練担当者から、欠品を意識するしきい値や意思決定する際に参照する情報などをヒアリングし、各種アラート（欠品アラート、枯渇アラート、偏在アラート）



図3 拠点ダッシュボード. 右下のテーブルに拠点ごとの売上げや物流費割合を表示している (数値はデモ用)

ト) のロジックを実装した。一例として, ある拠点のある保守部品における過去6か月の保守払出実績をベースに, 翌月までに保守依頼が来る個数を予測し, その予測数を担保する在庫数がない場合に, 欠品アラートを出す。このように, システムからの各種アラートのプッシュ通知で欠品リスクに気づけるようにし, 担当者依存だった保守部品補充業務の在り方を変革した。図4は, その業務アプリの画面である。更に, 担当者の工夫により, 余剰在庫の削減施策にもこの欠品アラートを活用

し, 一部の保守部品に対して定期補充数量を絞り, 余剰在庫削減を達成している。

最後に課題③に対し, 拠点統廃合シミュレーションアプリを実装した。シミュレーションとして, 拠点の最適化を行うものと「What-If分析」を行うものの二つを用意した。拠点の最適化では, 保守実績をベースとして, 輸送コストと拠点の維持コストの総和を最小化する組合せ最適化問題に落とし込み, 各拠点の要・不要の組合せを最適化ソルバーで算出する。図5は, 最適化結果で

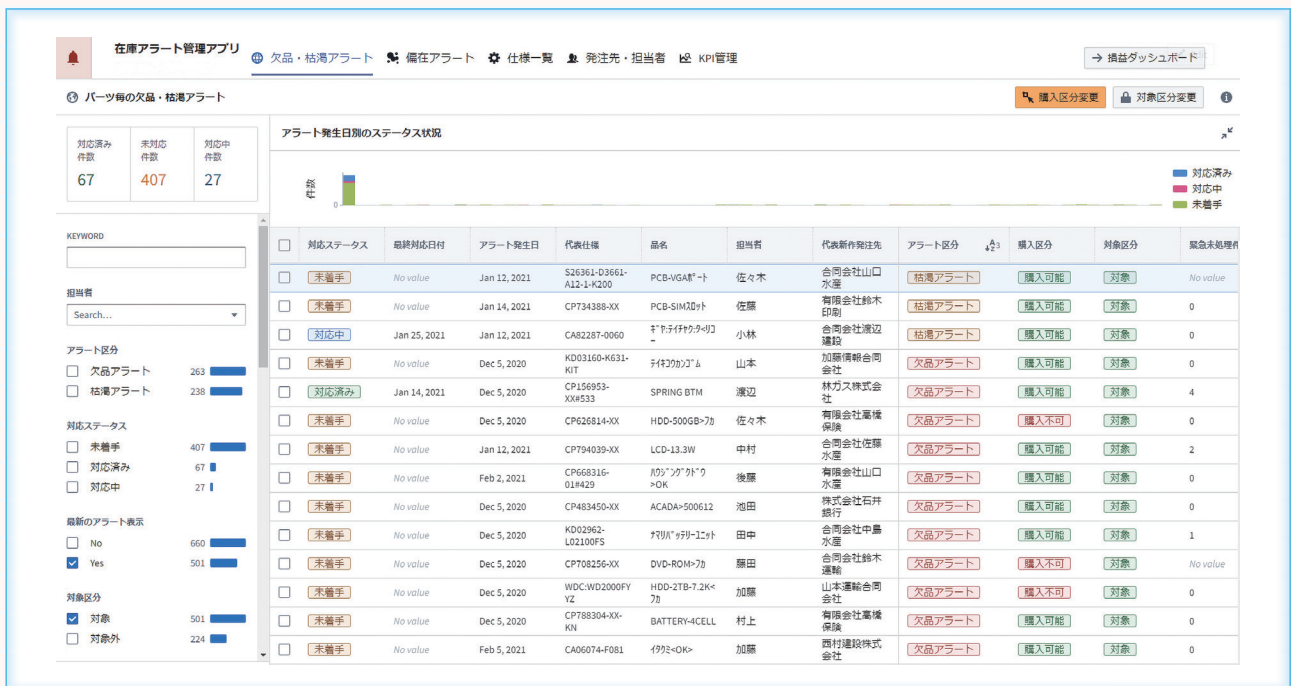


図4 アラート通知する業務アプリ. 拠点ごと保守部品ごとに欠品リスクを示すアラート (アラート種別) が表示される

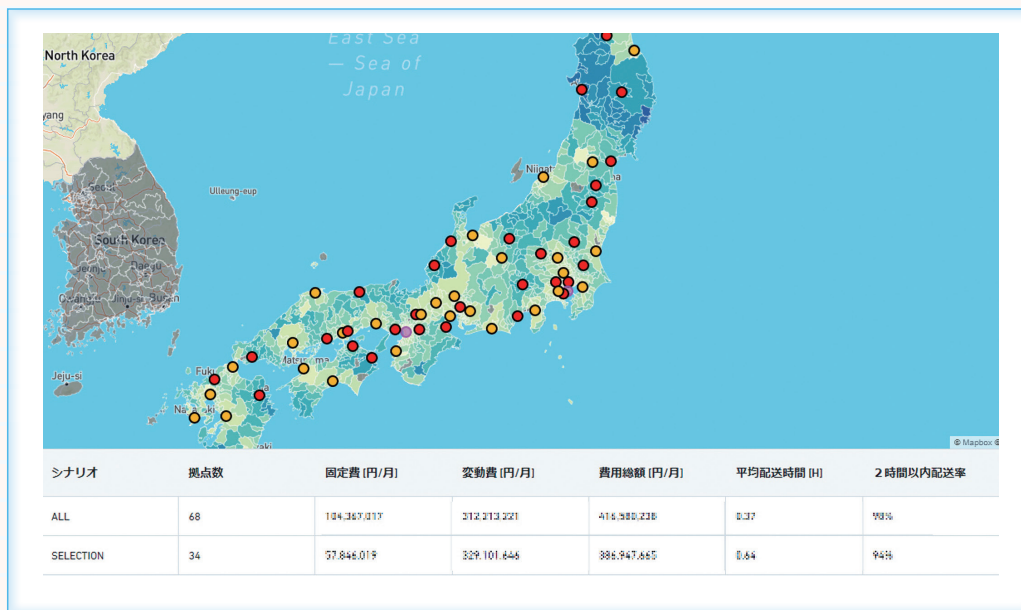


図5 拠点統廃合の最適化結果. 赤点が廃止される拠点. (数値はデモ用)

ある。この最適解は、現実には、保守サービスレベルの下がる地域や経路・配車まで考慮した輸送コストなど考慮できていない部分も多いため、あくまで拠点統廃合が目指すゴールの規模感を知るためのものになる。実際の拠点統廃合のオペレーションでは、What-If分析を活用することが多い。What-If分析では、もし拠点Aを統廃合したら、拠点Aがカバーしていたユーザの近隣拠点からの保守部品の輸送コスト、近隣拠点の抱える保守部品在庫数など、波及効果をシミュレーションし、拠点Aの統廃合の「Before/After」を比較する。この比較結果を参照し、拠点Aを統廃合するかどうか意思決定を行う。

本事例では、サプライチェーン強靱化に向けた在庫最適化と拠点統廃合の一例として、富士通での保守サービスを題材に、具体的な三つの課題への解決策を紹介した。現在、ビジネス部門が活用し、幾つかの拠点統廃合が実施され、また保守部品の物流費・余剰在庫削減での効果も出始めている。本事例は、製造部品にも展開可能であり、引き続き、ものづくり領域におけるサプライチェーン強靱化を推進していく。

3.2 カーボンニュートラルに向けた投資計画最適化

日本政府が目標に掲げる「2050年ゼロエミッション化」に向けて、製造業においてはサプライチェーン全体でGHG排出量を減らしていく必要がある。サプライチェーンにおけるGHGは、原材料の調達や輸送といった上流工程から、自社工場や事業所での設計・製造工程、及び製品の使用や廃棄といった下流工程の全てが含まれる。自社からの排出分は、化石燃料の燃焼による直接排出 (Scope1) や、他社から供給される電力・熱の

利用による間接排出 (Scope2)、そしてバリューチェーンで発生する自社の事業活動に関連した間接的な排出 (Scope3) があり、これら自社排出分のGHGを削減するには中長期的な視点で戦略的に投資を行っていく必要がある。

GHG排出量の削減は各企業に対する時代の要請でもあり、喫緊の課題である。現状は、自社の事業所・工場からそれぞれの設備投資計画のデータを収集するにとどまっており、データの利活用に至っていなかった。そこで今回は収集データ及び各電気事業者の排出係数等の公開データを活用し、数理最適化を用いて効果的にGHGを削減する投資計画を提案する。

富士通として、自社から排出されるGHGを効果的に減らすには、以下三つの課題があった。

- (1) 予算やGHG削減目標などの制約条件を満たすこと
投資計画の策定において、年度ごとの予算やGHG削減目標を満たす必要がある。また、設備投資は老朽化に伴う設備更新を考慮する必要があり、故障などの不具合で真に取換えが必要な場合を除いて、適切な更新時期の見極めが必要である。
- (2) 電力のCO₂排出係数などの変動要素を考慮すること

電力のCO₂排出係数や再生可能エネルギー由来の電力の購入価格は年々変動する。将来数年先のこれらの数値を推定し投資計画に織り込む必要がある。

- (3) 炭素価格の設定

企業内での低炭素投資・対策を推進する仕組みとして、独自に炭素の排出量に価格付けを行うインターナルカーボンプライシング (ICP) がある。価格設定の方法についてガイドラインで幾つかの手法が提示されている



図6 GHG削減サイクル

が、企業内のニーズや戦略に沿う適切な炭素価格の設定が求められる。

上記の課題を踏まえて、将来数年先を見通して自社から排出されるGHGを効果的に減らすための投資計画の立案が必要と考えられるが、実態としては、どのような投資をいつ行うかの取捨選択を「人」が考えて判断するのは非常に困難である。これまで当社では、設備投資は老朽化対策として更新工事を行っており、投資時期の妥当性の確認まではできていなかった。また、今後、省エネ施策のみでGHGの削減目標を達成することが難しくなり、目標未達分を国が認証する「J-クレジット制度」や再エネ電力を購入して埋め合わせるなどの必要が生じると予想される。

上記の課題を解決する手段として、図6に示すプロセスを実現するアプリケーションを作成した。本アプリケーションは、①事業部・工場からデータを収集してGHGの排出実績を可視化・分析し、②投資計画の原案を担当の環境統括部門が作成、③年度予算や削減目標、炭素価格などを設定条件、②の原案を入力として各条件を満たす最適な投資計画を複数のパターンで数理最適化(混合整数線形計画問題)により求める。④得られた結果から人間が最適なパターンを選択し脱炭素投資の意思決定を支援する。その後、⑤実際の投資効果をモニタリングして、GHG削減サイクルを回すものである。

実装したアプリケーションで最適化結果を示す画面の一部を図7~9に示す。最適化計算は投資計画の策定期間を10年として、図7はGHG削減量や投資効果な

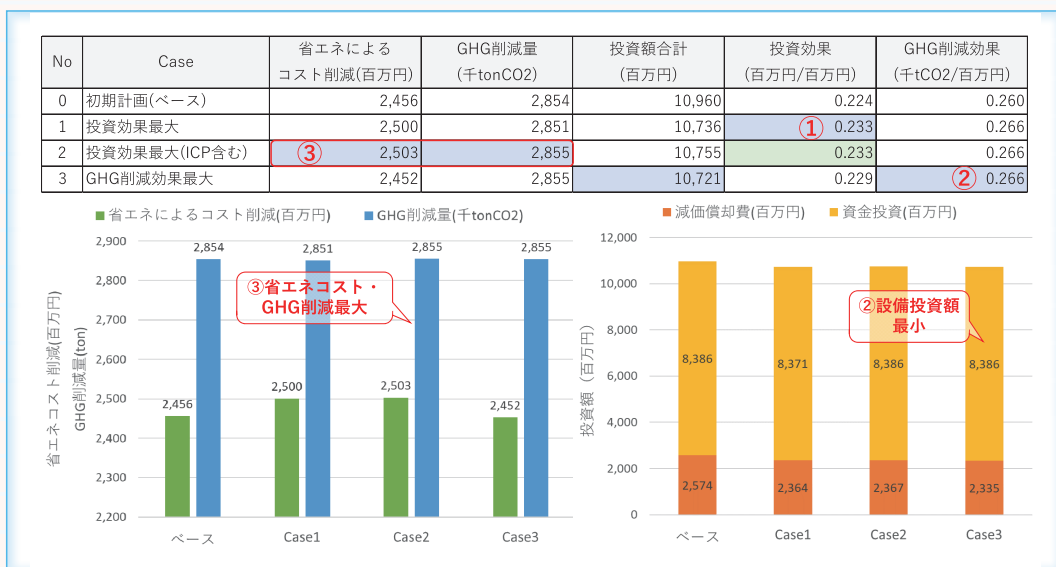


図7 主要な評価値を変えた最適化ケースの比較

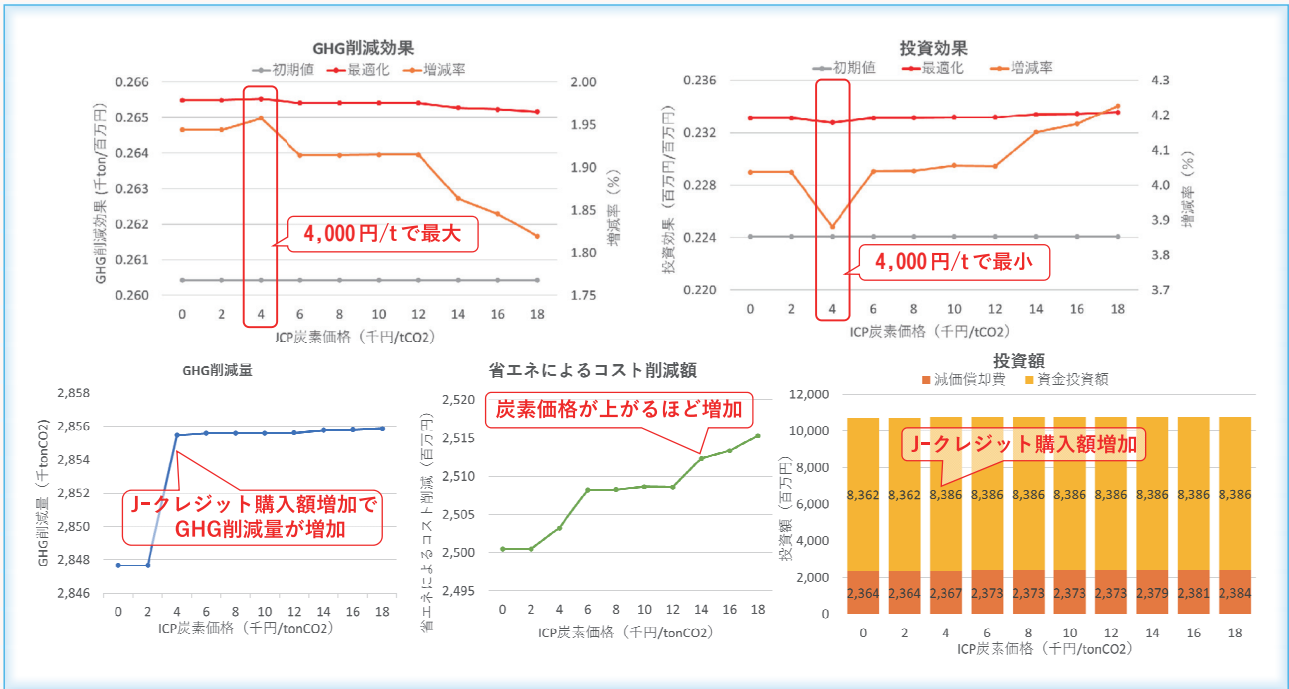


図8 炭素価格の変更による影響評価



図9 最適化の制約緩和による更なる改善提案

どの主要な評価値を各最適化ケースで比較したもので、図上部の表中の配色は、青：最良値、緑：初期計画から3%以上改善である。本図から、投資効果を最適化したケース(case)1は、省エネによるコスト削減額が増加、投資額が減少したことで投資効果が最大となった(図中①)。GHG削減効果を最適化したケース3は、設備投資額を抑えることでGHG削減効果が改善した(図中②)。ケース2は、炭素価格(ICP)を設定してGHG排出コストの削減分を効果に加味し、投資効果を最適化

した場合である。排出コストを考慮することで、省エネによるコスト削減額、及びGHG削減量がほかのケースよりも改善している(図中③)。本画面をユーザが参照し、それぞれのニーズや戦略に合わせて最適な投資計画を選択することができる。

図8は、上述の最適化ケース2において、炭素価格の設定をGHG 1t当り、0~18,000円まで2,000円刻みで変化させて最適解を比較したものである。本図から、炭素価格4,000円/t-CO₂でGHG削減効果が最大、

投資効果は最小となった。その理由は、炭素価格を上げるほど設備投資が促され省エネによるコスト削減額は増加、設備投資による GHG 削減への寄与は今回の場合小さいが 4,000 円/t-CO₂ で J-クレジット購入額の増加に伴い GHG 削減量が増えたためである。

図 9 は、最適化によるメリットを更に向上させるための最適化の条件設定について示す。上のグラフは、投資計画の実施年度を個別に変更した場合に、改善効果の高いもの上位から順に示している。また、下の表は上図に対応し、改善効果の高い投資計画の調整年数（原案の実施年度からの調整代）の設定に関する情報を示している。最適化実施後に本画面をユーザが参照して設定条件を変更し再度最適化を行うことで、メリットを更に向上させることが可能である。

本事例では、脱炭素化に向けた投資計画の取りまとめ業務を担当する本社部門をユーザとしたものであるが、事業所や工場単位での適用も可能である。また、設備情報や代替手段などの追加情報を付与することで、より多くの選択肢の中から最適な投資計画を提案することが可能である。今後の展開として、原材料の調達 (Scope3) も含めたサプライチェーン全体の脱炭素化を推し進めるべく、機能の拡充を図っていく。

3.3 AI モデルのライフサイクルマネジメントによる製造品質向上

ものづくり DX における競争力向上を実現するため、IoT や AI を活用したスマート工場化が進められている。本事例は、生産性とコストを犠牲にすることなく、ものづくりの品質レベルを向上させるための取組みに関するものであり、そのコア技術となる AI モデルのライフサイクルマネジメントについて紹介する。

ものづくりにおける品質保証には「結果の保証」と「プロセス保証」の二つの方法がある。結果の保証とは、製造工程の結果である製品（中間製品や最終製品）に対して、外観検査や寸法測定などの品質検査を実施し、直接的に品質を保証する方法である。品質検査には時間やコストが掛かるため、抜取り検査を行うケースが多いが、全数検査に比べると品質保証レベルが落ちる。そこで近年では、ディープラーニングなど AI 技術により外観検査を自動化・省力化する取組みも行われるようになってきている。

一方、プロセス保証とは、製造プロセスから間接的に品質を保証する方法であり、一定の製造条件からは一定の品質が得られるという考え方に基づく。近年では、IoT の発展・普及により、製造装置のコントローラや外付けセンサから、あらかじめ設定されている「製造条件」だけでなく、製造時の詳細な「製造状態」を取得

することが可能となっており、AI 技術により製造条件や製造状態から製造品質をリアルタイムに推定する取組みが進んでいる。

製造品質の推定には、現在の AI のコア技術である機械学習を利用することができる。機械学習は、データからルールや統計モデルを自動学習する技術であり、製造条件・状態（説明変数）と製造品質（目的変数）のペアを訓練データとして与えることにより、製造条件・状態から製造品質を推定する AI モデルを構築することができる。

AI モデルの推定精度は、学習に使用する訓練データの量と質に大きく左右されるが、製造品質の推定においては、下記のとおり訓練データの量と質が大きな課題となる。

(1) データの偏りの問題

一般に、量産工程は高度な制御の下に管理されており、不良品が発生する頻度も低く抑えられている。したがって、量産工程のデータを使用して AI モデルを構築すると、正常品質に偏った AI モデルができてしまい、不良品質の推定精度を高めることができない。そのため、あえて不良品が出やすくなるような条件・状況で実験的にデータを取得する方法が取られているが、データ取得の際には量産ラインを止める必要があるなど、データ取得のためのコストは大きく、十分なデータを確保できないケースが多い。そのため、データの偏りに対応可能な AI モデルの構築技術が必要となる。

(2) データの多様性の問題

製造工程では多様な装置で多様な製品・部品を製造する。特定の装置・特定の製品（型式）に特化した AI モデルを、別の装置・別の製品に適用しても十分な精度は期待できない。そのため装置・製品の多様な組合せの訓練データを用いるか、多様性を吸収できるような AI モデルを構築する必要がある。

(3) データの変化の問題

新しい装置が導入され、新しい製品（型式）が製造されるようになると、第 2 の課題である多様性は時間とともに増大していく。また、装置や製品が変わらなくても、製造工程や環境要因が変化することもあり、ある時点で構築した AI モデルを、そのままずっと使い続けることはできない。したがって、推定精度を常時モニタリングし、必要に応じて再学習を行うことで、変化に追従可能な AI モデルの運用技術が必要となる。

このように、製造品質の推定においては、単に機械学習を適用するだけでは十分な精度を継続的に得ることは困難であり、AI モデルの構築と運用をトータルでサポートする「AI モデルのライフサイクルマネジメント」が

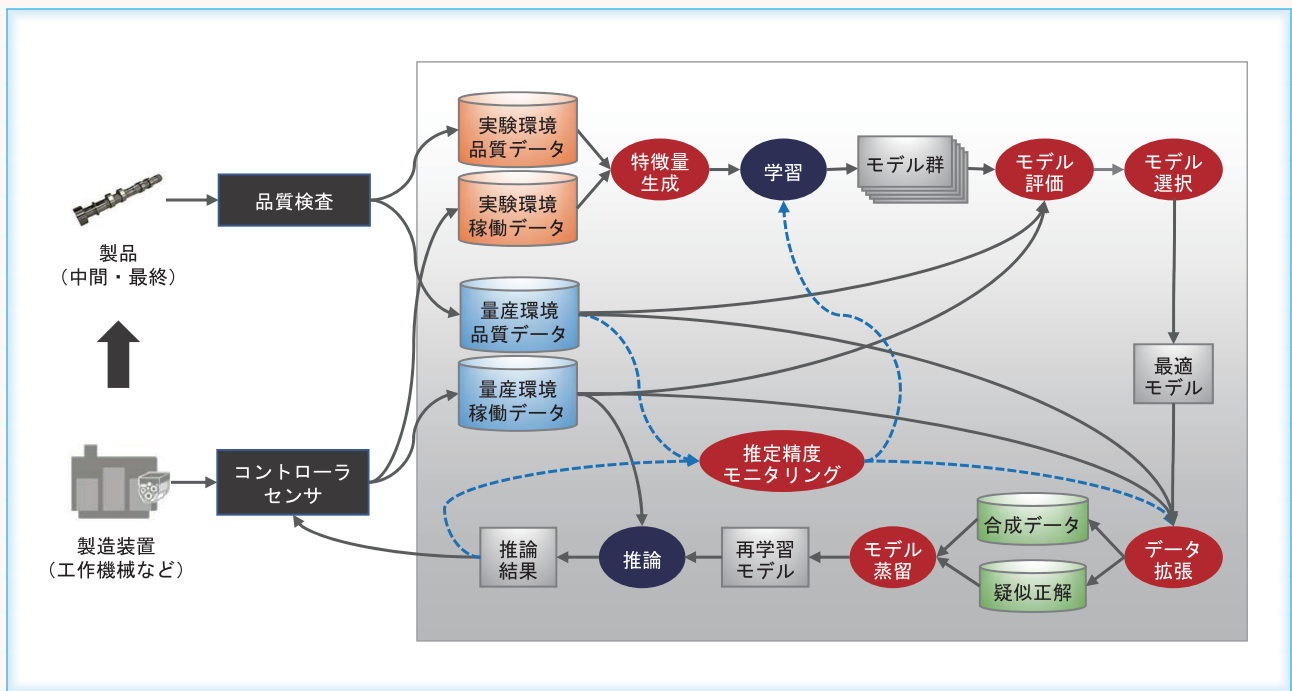


図 10 AI モデルのライフサイクルマネジメント

重要となる。図 10 に我々が考える AI モデルのライフサイクルマネジメントの技術体系を示す。

- ・特微量設計：製造装置・工程に関するドメイン知識を利用し、少量のデータでも高精度な推論を実現
- ・モデル評価：実験環境でのデータの偏りに左右されないよう量産工程での精度を事前評価
- ・最適モデル選択：多様な条件下で高精度な推論が可能となるような最適な AI モデルを選択
- ・データ拡張：実験環境に偏りがある場合には、実験環境では得られない訓練データを生成
- ・モデル蒸留：計算リソースが限られるエッジ環境でも高速で効率的な推論ができるようサイズの小さなモデルに変換
- ・推定精度モニタリング：AI モデルの推論結果と量産環境での品質データを比較して、かい離が大きい場合は適切なプロセスから AI モデルを再構築（再学習）

AI モデルのライフサイクルマネジメントの適用事例としては、2018 年 7 月から、(株) SUBARU と共同で実施してきた取り組みがある。

本取り組みでは、エンジン部品（カムシャフト）の表面を滑らかにするための研削工程において、研削装置に接続したセンサから得られる主軸動力値や振動のデータ（稼働データ）を用いて加工中のカムシャフトの加工品質をリアルタイムに推定するための AI モデルを構築し、2019 年 12 月から 2020 年 12 月までの間、構築した AI モデルの精度を確認するための実証実験を実施し

た⁽⁵⁾。前記のデータの偏りや多様性の問題に対しては、研削装置や研削工程の特性を生かして、汎用性の高い特微量を設計することで、実験環境で得られた少量のデータのみを用いて高精度な AI モデルを実現している^{(6), (7)}。

一方、実験環境と量産工程の違いや、設備の経年劣化や環境変化により、当初構築した AI モデルの予測精度が低下する懸念がある。そこで、製造現場での AI モデルの本格運用に向けて、AI モデルのライフサイクルマネジメントを実現する運用技術及び AI 運用基盤を開発した。2020 年 8 月から 2021 年 12 月までの間、量産工程での実証実験を実施し、2022 年 1 月から量産工程での本格稼働を開始している⁽⁸⁾。

AI モデルの本格稼働により、全カムシャフトの研削加工時の品質保証を高精度かつリアルタイムに実現し、従来の抜き取り検査を主体とした製造品質検査よりも品質保証レベルを向上することが可能となった。また、AI モデルのライフサイクルマネジメントにより、効率のかつ継続的な AI モデルの運用を実現した。

4 まとめ

本稿では、ものづくりにおける三つの課題（サプライチェーンの強靱化、カーボンニュートラルへの対応、DX による競争力向上）の解説と、それらに対する富士通での取り組み事例を紹介した。どの事例においても、課題解決の重要な要素は、データを収集・統合して、利活用することにある。今後、各取り組みの範囲を拡大させていくこと、また、取り組みを融合してより大きな経営

課題を解決していくことに挑戦していく。例えば、サプライチェーン強靱化における拠点統廃合に、カーボンニュートラルの GHG 排出量削減の観点も加えることなどが挙げられる。富士通での各事例は、ものづくり企業に展開できる汎用的な取組みであり、日本のものづくりの発展に貢献していきたい。

■ 文献

- (1) 経済産業省, “2021 年版ものづくり白書,” <https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2021/pdf/all.pdf>
- (2) 経済産業省, “半導体・デジタル産業戦略検討会議,” https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital.html
- (3) 環境省, “2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて,” https://www.env.go.jp/earth/2050carbon_neutral.html
- (4) 経済産業省, “「スマートファクトリーロードマップ」～第 4 次産業革命に対応したものづくりの実現に向けて～,” https://www.chubu.meti.go.jp/b21jisedai/report/smart_factory_roadmap/roadmap.pdf
- (5) 富士通, SUBARU, “富士通と SUBARU, エンジン部品研削加工工程の品質保証向上に向け高精度 AI モデルを活用した実証実験を開始,” <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2019/12/4.html>
- (6) 大庭 卓, 渡部 勇, 山本淳史, 若杉諒介, 上田涼真, “AI モデルを活用したエンジン部品研削加工工程の品質保証向上,” 自動車技術, vol. 74, no. 7, pp. 74-79, July 2020.
- (7) 特許第 7015807 号, “検索状態監視方法, 検索監視プログラムおよび検索状態監視装置,” 2019 年出願.
- (8) SUBARU, 富士通, “高精度 AI モデルでエンジン部品研削加工工程の品質保証を実現 SUBARU の量産ラインで本格稼働開始,” <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2022/02/9.html>

石田 勉

富士通株式会社. 2008 東工大大学院修士課程了. 同年富士通研究所に入社. ものづくり領域での AI 技術開発と AI 社会実装に従事後, 2020 から現所属の LargeDataPF 事業部で社内外の DX を推進.



芳川裕基

富士通株式会社. 2007 九大大学院修士課程了. 火力発電の AI 技術開発に従事. 2022 から富士通株式会社で社内外の DX を推進.



渡部 勇

富士通株式会社. 1987 東工大大学院修士課程了. 同年富士通株式会社国際情報社会科学研究所に入社. 現在, コンバージングテクノロジー研究所プリンシパル・エキスパート. 情報検索, テキストマイニング, 機械学習, AI などの基礎研究のほか, 特許分析, 需要予測, マーケティング, 予知保全, 海上交通などの応用研究に従事.



大島竜一

富士通株式会社. 1999 横浜国大大学院修士課程了. 同年富士通株式会社に入社. 製造・流通業界向け IoT 適用システム構築に従事後, 2022 からものづくり DX コンサルを推進.



土屋 哲

富士通株式会社. 1991 富士通入社後, ソフト開発及び富士通研究所でデータ処理, AI 研究開発に従事後, 2020 から現所属で社内外の DX を推進.

