

## 【総説】

# 人間拡張技術が拓くスポーツトレーニング DX

持丸正明\*<sup>1</sup>

## I. はじめに

スポーツの世界にデジタル技術が数多く投入されるようになってきている。野球やゴルフであれば試合中の球速や飛距離、球の回転数に至るまで即座に計測、可視化される。サッカーやテニスでも選手の位置やフォーメーションが計測され、分析されている。これらのデジタル技術は、試合観戦を魅力的にするだけでなく、チームプレイ戦略の統計的分析にも活用されている。試合中に計測するためのデジタル技術の多くは、選手への装着を必要としない光学カメラ技術が中心であるが、ルールやレギュレーションが求められないトレーニング中であれば、ウェアラブルセンシング技術も利用可能となる。デジタル技術が公式試合のみならず日常のトレーニングに導入されることで、スポーツにおけるパフォーマンスの向上や障害リスク低減を柔軟に個人対応できるようになるだろう。これは、スポーツ用具のカスタマイズという製品型であったものが、トレーニングの状況、体調、環境に応じたカスタマイズというデジタルサービス型に移行することを意味している。このデジタルサービスによってスポーツトレーニングのプロセスが質・量ともに変化するものと考えられ、これはまさしくスポーツトレーニング DX（デジタルトランスフォーメーション）と呼ぶべきものである。加えて、このようなデジタルサービスを通じて膨大なデータが蓄積されれば、そこに新たな人工知能技術が投入され、より革新的なサービスを産み出すことに繋がるだろう。本稿では、このような背景に基づいて、人間拡張技術、大規模データの利活用技術などの動向を紹介しながら、併せて、これらの基盤となるパフォーマンスの向上や障害リスク低減に関する基礎研究の重要性を論じ、スポーツトレーニング DX を俯瞰する。

## II. 人間拡張技術

産総研・人間拡張研究センターでは、人間拡張技術を「人に寄り添い人を高める技術」と位置づけている。人に情報技術やロボット技術が寄り添うことで、人の心身機能を一時的に向上させるだけでなく、その技術の継続利用によって人本来の心身機能を恒常的に高めることを目指している。図 1 に人間拡張技術のマップを示す。拡張すべき人間機能を身体運動、感覚知覚、認知分析、コミュニケーションの 4 つの機能に大別し、拡張する方法を個々の機能を加速増強するものと、人がネットワークに接続することで機能を発揮する規模を拡大したり遠隔化するものに大別している。図には、4 つの人間機能と 2 つの拡張技術で分類される 8 つのエリアごとに相当する技術例を示している。人間拡張技術とは、このような技術群の総称と考えている。

身体運動機能を増強する技術の研究例を紹介する。これは、運動中に不必要な筋拮抗が生じないようにし、パフォーマンスの向上や障害リスク低減に役立てるものである。EMS（Electrical Muscle Stimulation）を利用すれば筋活動を増強することはできるが、EMS をオフにしても本人の脳や反射系が筋を活動させてしまえば筋はリラックスしない。ここでは、外部からの運動力学的介入により不要な筋がリラックスするように仕向ける研究を紹介する。具体的には、歩行・走行の運動を計測し、その運動に応じてトレッドミルを加減速するシステムを用い、筋の伸張反射を制御して、不要な筋拮抗を低減させている（図 2 ①）<sup>5)</sup>。一方で、この特殊なトレッドミル環境を外れると、歩行や走行は元に戻ってしまうことになる。そこで、このシステ

受付日 2023.2.28

\*1 産業技術総合研究所 人間拡張研究センター

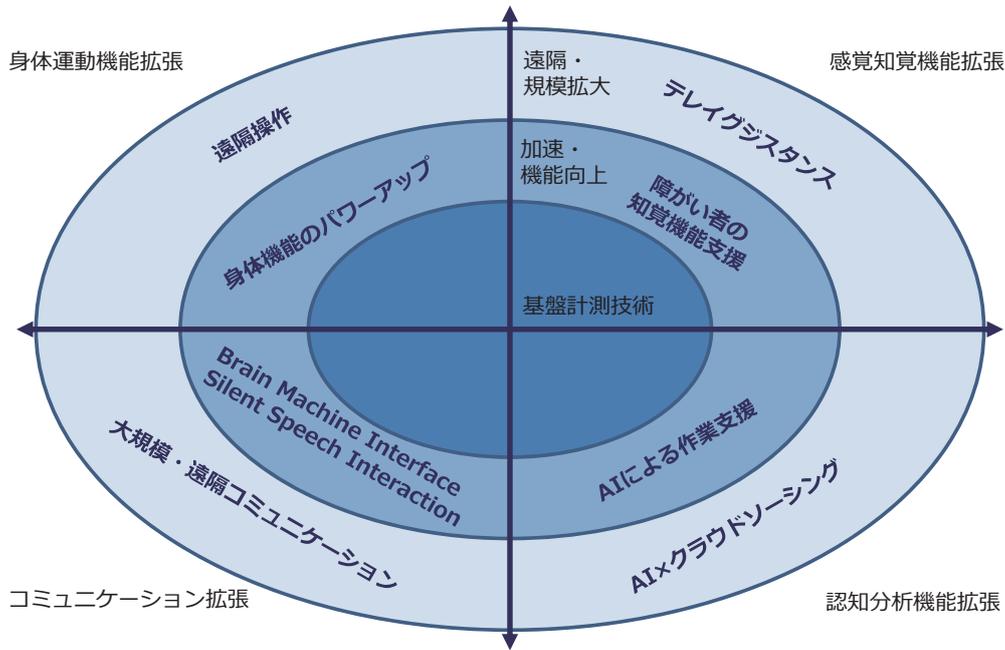


図1 人間拡張技術のマップ

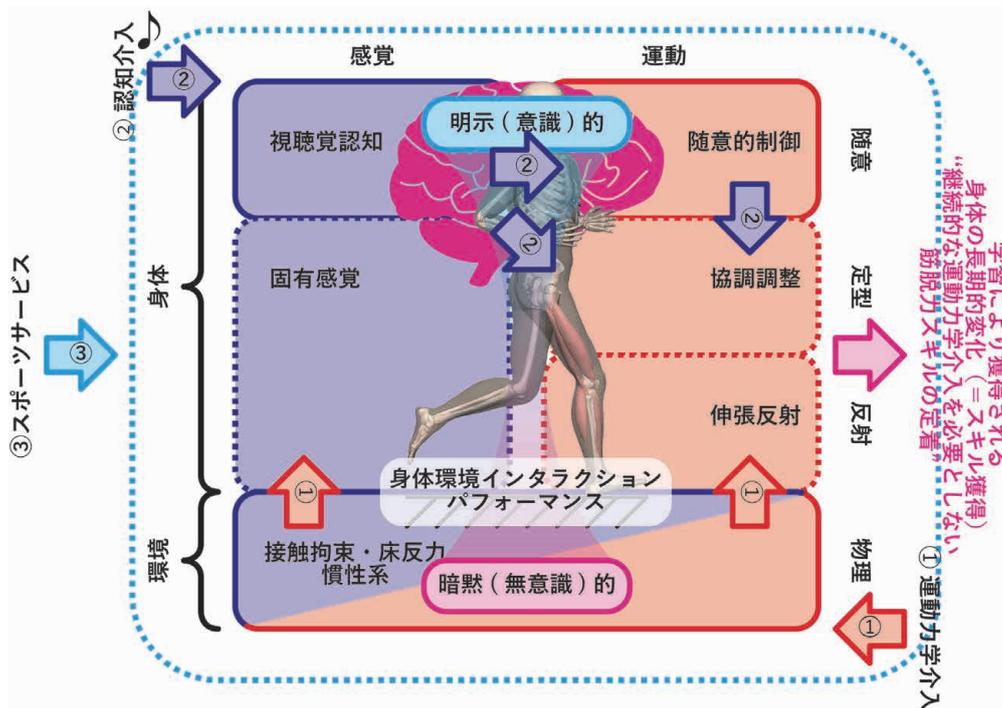


図2 筋拮抗を緩和させる DATSURYOKU システム

ムでは、利用者に筋拮抗が低減したことを明示的に可視化し、被験者自身の運動制御を変化、定着させることを狙っている。認知介入である（図2②）。システムで無意識に生じた筋拮抗の低減を、意識的に定着させるトレーニングに相当する。運動力学的介入で、一時的に筋制御能力を獲得するだけでなく、認知介入によって恒常的に能力を獲得できることを目指している。

筋拮抗の程度を常時観測するセンサの開発も併せて進めている。一般的には筋活動電位を用いるが、着衣の上から取り付けることができず日常的な常時観測には不向きであると考えた。そこで、プリンティング技

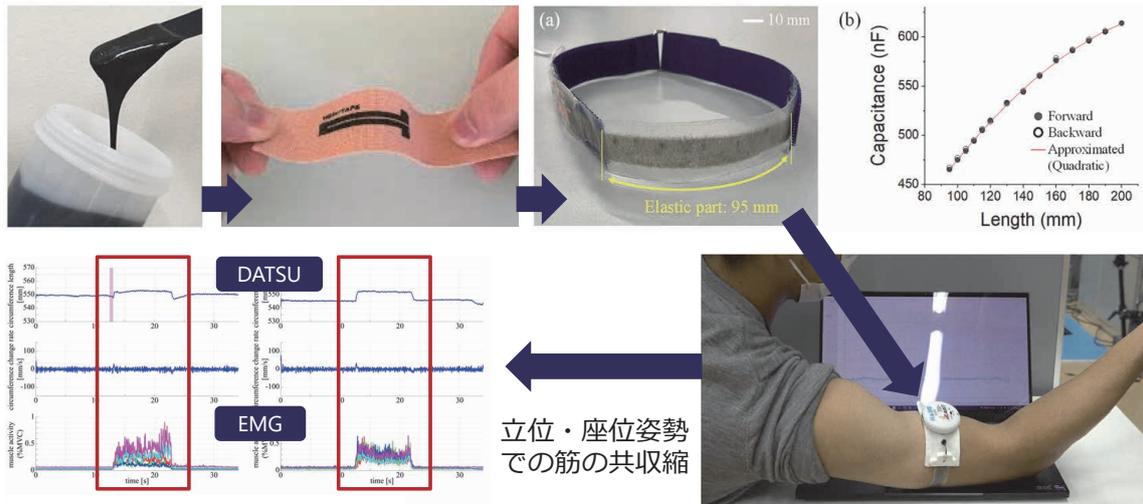


図3 プリンティング技術に基づくウェアラブル筋活動センサ

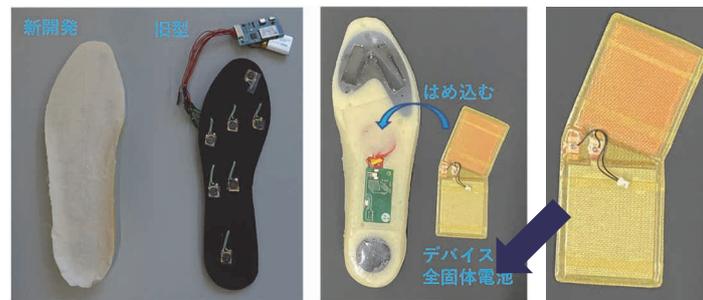


図4 薄型フレキシブル全固体電池

術によるフレキシブル・ストレッチャブルデバイスを活用した筋活動センサの開発を行った。特殊なインクをフィルムや繊維に印刷することで、歪ゲージ状の伸びセンサを構成できる技術(図3上左)をベースとし、その歪ゲージをアームバンドに取り付けて(図3上中)バンドの伸びを計測した。ヒステリシスも非常に小さく(図3上右)、このアームバンドによって筋活動による膨隆を計測できる。これが筋電計測結果と整合することを確認した(図3下左)<sup>2)</sup>。

人間拡張研究センターでは、このようなセンサによる常時観測に向けて、薄型で身につけられるフレキシブル電池の開発も進めている。図4右に示すようなリチウムイオン全固体電池が実現できており、平均電圧3.8V、440mAhを達成している。図4ではこの薄型フレキシブル電池をシューズインソール内に実装して、日常歩行中の圧力計測とリアルタイムデータ伝送を実現している<sup>3)</sup>。

### Ⅲ. 継続意志の拡張とサービス化

ウェアラブルセンシング技術や電池技術は、スポーツ用具にデジタル技術を持ち込む原動力となっている。すでに、時計型のデバイスなどが数多く開発され、加速度や心拍を計測し、そこからさまざまな指標を計算して可視化するサービスに繋がっている。ウェアラブルセンシング技術に基づくサービスは、製品であるスポーツ用具を利用者にカスタマイズするだけでなく、利用者の状況、体調、環境に応じたカスタマイズを可能とする。このようなサービスは、さまざまなスタートアップ企業によって提供されるだけでなく、従来、スポーツ用具を製造してきた企業からも提供されるようになってきている。スポーツ用具の製造販売だけでなく、スポーツ用具にデジタル技術を組み込んでサービスを組み合わせる提供するというようなビジネスの

変革を「製造業のサービス化」と呼ぶ<sup>4)</sup>。一般的に、製品販売を支えるサービス（インストール、カスタマイズ、メンテナンスなどサービス化の第1、第2段階）から、利用者の価値を高めるサービス（生活や業務価値の向上、革新などサービス化の第3、第4段階）に進むほど、サービス化による収益が大きくなる。一方で、製造業がサービス化に移行するのは、さほど容易ではない。さまざまな障壁があるが、特に、課金の形態が大きな障壁である。製品は販売時に対価を回収する。その後、利用者が製品を利用しなくても、製造者は対価を回収できる。それに対して、サービスは利用の都度、利用料として対価を分散回収する。利用者が利用を継続しないと収益が立たないのである。所有の価値ではなく、利用の価値を高め、利用を継続させるデザインが必要となる。

人間拡張は、このようなサービスにおける継続意志の拡張に貢献できると考えている。その端緒となった研究事例を紹介する。これは、筆者らが進めた「超人スポーツのための個人別環境身体ダイナミクス同定技術と身体能力拡張技術の研究」と題する科学研究費補助金（基盤研究A）の成果の一部である。超人スポーツとは、「人間の身体能力を補綴・拡張する人間拡張工学に基づき、人の身体能力を超える力を身につけ人を超越する、あるいは年齢や障害などの身体差により生じる人と人のバリアを超越する。このような超人（Superhuman）同士がテクノロジーを自在に乗りこなし、競い合う人機一体の新たなスポーツ」と位置づけられている<sup>7)</sup>。科研費研究では、学術的な視点で超人スポーツに求められる要素技術を開発し、最後にこれらを統合していくつかの超人スポーツ競技をデザイン、実証した。図5は、そのうちのひとつである「超人ペナルティキック」である。利用者の利き足には圧縮空気を用いたマキベン式の人工筋肉が取り付けられ、足関節付近に装着した加速度センサの情報を用いて腰に取り付けた圧力ポンベの電磁弁を制御し、利用者の蹴る力を増幅している。同時に、この足部加速度情報とゴールポストに取り付けられた別の加速度センサの情報からボールが飛行しゴールポストを揺らす「効果音」を合成してスピーカーで響かせる仕組みになっている。利用者は、体性感覚を通じて人工筋肉による支援を知覚するとともに、ボールの飛行に伴う効果音を知覚し、それらを総合して「自らのキック力が増強された」という超人感を感じることになる。

この超人ペナルティキックは、Entertainment Computing 2018 という国内の学術会議で体験デモ展示した。筆者らが驚いたのは、多くの参加者がこの超人ペナルティキックを一度体験した後に、また列に並んで繰り返し体験しようとしたことである。超人感の体験が、継続意志を拡張したと言えるのではないか。そこから、筆者らは図6のようなモデルを構築するに至った。図6において環境は人以外（他者も含む）を意味する。人は環境から刺激（Stimulation）を受け、それを感覚系で知覚し運動系を用いて反応（Response）



図5 超人ペナルティキック

するというモデルとして表すことができる。S-Rモデルと呼ばれ、幅広く知られているものである。これに対して、図5の超人ペナルティキックは、ボール（環境）に対して蹴るという行為（Action）から始まる。人間拡張技術でこのActionを増強した。この結果として飛行するボール（環境）の効果音も増強した。人はこの環境変化を知覚（Perception）し、自らの力で環境がどれほど変わったかという結果をもって自らの力を測り、超人感を感じると考えられる。これを新たにA-Pモデルとした。どちらも人間と環境のインタラクションを記述するモデルであり、両者は表裏の関係にある。ただ、S-Rモデルが「人は環境からの刺激に対して反応するシステムである」というような受動的なモデルであるのに対して、A-Pモデルは「人は自らの行為で環境を変えようとし、どれほど環境が変わったかの知覚で自らの力を評価するシステムである」という能動的なモデルである。そして、自らの力に対するポジティブな評価が、潜在的な動機を強化し、継続意志に繋がるのではないかと。人間拡張技術には、継続意志を拡張できる可能性があり、それがサービスビジネスにおいて重要な意味を持つと考えている。

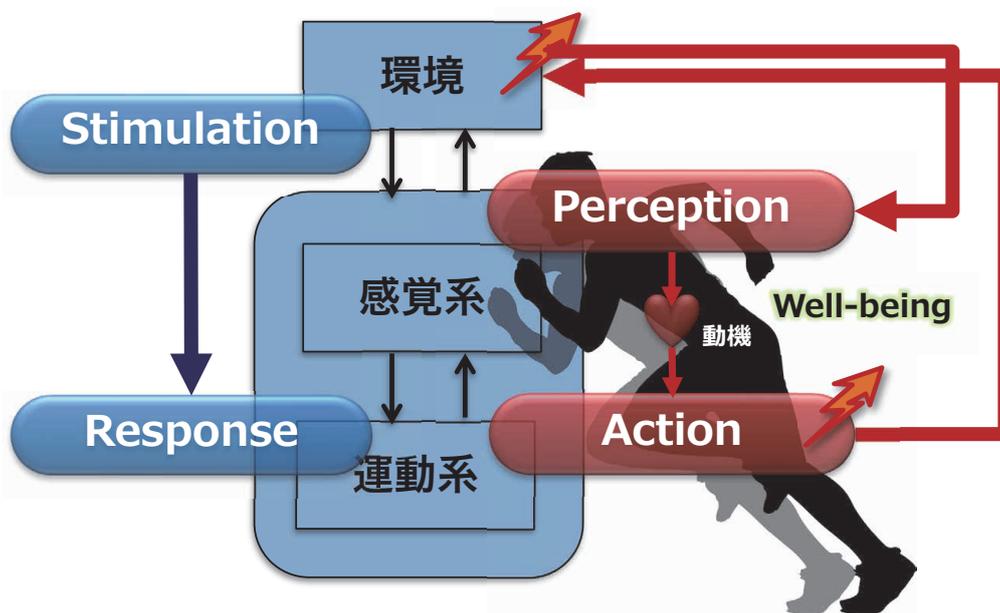


図6 S-RモデルからA-Pモデルへ

人間拡張研究センターでは、このA-Pモデルを基本概念として人間拡張技術の研究開発を進めている。そのフレームワークを図7に示す。センシングから始まり、サイバー空間に用意したデジタル身体モデルを活用してセンシングデータを即時分析し、それに応じて、人に対してリアルタイム介入するまでが一連の人間拡張技術である。介入にはDATSURYOKUシステム(図3)や超人ペナルティキック(図5)のようなロボット技術による運動力学的介入のほか、超人ペナルティキックの聴覚介入や、VR・ARを用いた介入技術などがある。人間拡張研究センターは、産総研に属する組織であるため、学術的貢献以上に産業貢献シナリオを重視している。人間拡張技術に基づくビジネスは、人間拡張技術を組み込んだパワースーツやアシストシステムを製品として提供するモデルではなく、むしろ、それらを貸与してデータを収集しながら、それらのシステムによってもたらされる生産性の向上や体験、パフォーマンスの向上に対して課金するサービスビジネスモデルになると想定している。そこで、人間拡張研究センターの研究フレームワークは、センシングから介入までの技術だけでなく、これらをサービスとしてデザインする手法まで含めた研究を含んでいる。



図7 人間拡張研究のフレームワーク

#### IV. サービスを通じたデータの蓄積と利活用技術

スポーツトレーニングにデジタル技術、人間拡張技術が導入され、日常的なトレーニングがモニタリングされ、それに応じて個人の状況や体調に対応したトレーニング支援サービスが提供されるようになれば、サービスを通じて膨大なデータが蓄積されるようになる。トップアスリートのデータだけでなく、一般の利用者がどのようにトレーニングを実施し、それによってどのような向上が起きたか、また、トレーニングの継続にどのような介入が効果的であったかというデータが蓄積されていくことになる。これらのビッグデータを機械学習等の人工知能技術で分析、モデル化することで、個人の状況や体調に応じた適切な介入方法などを、より精度良く予測、提供できるようになる。

ウェアラブルセンシング技術だけでなく、光学カメラ技術も近年の人工知能技術によって大きく変革している。OpenPose<sup>1)</sup> などのように被験者にマーカを貼り付けることなく、カメラの画像から身体の運動をリアルタイムに計測できるようになってきている。単眼カメラで身体運動を計測できるこれらの技術は魅力的である一方、必然的に奥行き精度には問題があり、身体の節長がフレームごとに変化してしまうなどの課題もある。人間拡張研究センターでは、複数台カメラを用いることで、マーカを貼り付けることなく、図8のように身体モデルをフィッティングして運動をリアルタイム計測できるマーカレスモーションキャプチャを開発している。モデルをフィッティングしていることから、運動中の節長変化は生じない。われわれは、この技術をスポーツトレーニングや医療の現場に導入し、大規模な運動データの蓄積を図っている。

大規模な運動データと最先端の人工知能技術から、多様な運動が自在に生成できるようになると考えている。近年、生成型の人工知能技術が注目されている。人工知能がフェイク画像を合成したり、質問回答文を生成したりするようになってきていることはよく知られている。画像であればその構成要素である画素を制御して、回答文であれば構成要素である単語を制御して生成している。ここでは、インターネット上に存在する大量の画像や文章が学習データとして活用されている。では、運動の構成要素は何であるか。もちろん、身



図8 マーカレスモーションキャプチャ

体モデルの関節角度が構成要素と考えることもできる。ただ、スポーツトレーニングに活用するにはさらに進んで身体筋骨格系モデルにおける筋活動、すなわち、運動神経入力そのものを構成要素として考えることができよう。人工知能の分野では、このような身体筋骨格系モデルを用いて、運動神経入力そのものを構成要素として歩行などの運動を生成する研究がホットなトピックとなっている。この分野の研究が加速するのに、大規模な運動データが必要であることは言うまでもない。サービスを通じて、運動データが蓄積、利活用されるようになれば、さまざまな運動を自在に生成できるようになり、また、その運動を支配する神経活動、筋活動も併せて生成されることになる。トレーニングによって関節特性や筋特性が変わったら運動がどう変わるか、あるいは、用具や環境が変わったら運動がどう変化するかを、人工知能でシミュレーションできるようになるのである。スポーツトレーニングのDXによってもたらされるサービスビジネスと、それに伴うデータの蓄積は、スポーツトレーニングそのものの在り方を大きく変える可能性を秘めている。

## V. サービスの品質を担保する基礎研究

トップアスリートだけでなく、一般の利用者にも広くスポーツトレーニングを実施いただき、かつ、それを継続できるようにすることは、スポーツ産業拡大の観点でも、また、国民の健康維持向上の観点でも重要なことである。ここまで述べてきたように、スポーツトレーニングがサービスとしてビジネス化するには、利用者の継続意志が重要となる。継続意志を拡張する方策としては、図6で示したA-Pモデルだけではなく、むしろゲーム性を高めることでこれを実現するゲーミフィケーションの方がより普及するものと思われる。スポーツトレーニングにゲーミフィケーションを導入する場合には、単に熱中させるだけでなく、中毒性や安全性（障害リスク）に対する一定の配慮が必要であるし、また、科学的エビデンスに基づくトレーニング介入も重要である。しかるに、スポーツトレーニングDXを基盤とするサービスの品質を管理するためには、トレーニングと中毒性、障害リスク、パフォーマンス向上に関する基礎的な研究が、今まで以上に必要となろう。特に、スポーツトレーニングDXで利用可能なデジタルデバイスのデータから、中毒性、障害リスク、パフォーマンスを評価する指標の研究が求められることになる。スポーツトレーニングにゲーミフィケーションを導入したサービスが、このような科学的エビデンスや指標に立脚しているかどうかを認証する仕組みも必要になるかも知れない。

## VI. おわりに

デジタル技術や人間拡張技術が、トップアスリートの試合だけでなく、幅広いスポーツプレイヤーのトレーニング場面に導入されることで、スポーツトレーニングが今まで以上に、状況、体調、環境に応じてカスタマイズされるようになり、科学的エビデンスに基づく障害リスク低減とパフォーマンスの向上が実現されることになる。併せて、パフォーマンス向上度の可視化などを組み合わせることで、トレーニングの継続意志をも拡張させるサービスが実現できると考えている。これは、スポーツトレーニングのプロセスを変革するものであり、まさしく DX と呼ぶべき変革と言えるだろう。これらの変革は、センシングから介入に至るまでのさまざまな要素技術開発や、中毒性、障害リスク、パフォーマンスを評価する指標の基礎研究の上に成り立つものであり、また、スポーツ用具の製品販売から、製品とデジタル技術を活用したサービスへのビジネスモデル転換も求められることになる。利用者を巻き込んだ、産学民連携での取り組みが、一層重要になるものと考えている。

## 参考文献

- 1) Cao, Z., Hidalgo, G., Simon, T., Wei, S. and Sheikh, Y. (2021) OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 43, 172-186
- 2) Murai, A., Kanazawa, S., Ayusawa, K., Washino, S., Yoshida, M. and Mochimaru, M. (2021) DATSURYOKU Sensor—A Capacitive-Sensor-Based Belt for Predicting Muscle Tension: Preliminary Results, *Sensors*, 21 (19), 6669; <https://doi.org/10.3390/s21196669>
- 3) Suzuki, M., Shibata, S., Nakajima, K., Kobayashi, Y., MEKARU, H. and USHIJIMA, H. (in press) Plantar pressure-measuring device powered by flexible all-solid-state battery. *Japanese Journal of Applied Physics*
- 4) ウラガ, コワルコウスキー, 戸谷圭子, 持丸正明 (2020) B2B のサービス化戦略 製造業のチャレンジ. 東洋経済新報社: 東京
- 5) 村井昭彦, 鷺野壮平, 持丸正明 (2021) DATSURYOKU: 身体環境インタラクションが筋活動をデザインする. *ロボティクスシンポジウム予稿集 (ロボティクスシンポジウム講演論文集)*. 26, 13-15
- 6) 特許庁. 令和元年度 特許出願技術動向調査 結果概要 スポーツ関連技術. [https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/2019\\_02.pdf](https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/2019_02.pdf) (参照日 2023 年 2 月 26 日)
- 7) 超人スポーツ協会. <https://superhuman-sports.org> (参照日 2023 年 2 月 26 日)