

「遠隔リハビリのための多感覚 XR-AI 技術基盤構築と 保健指導との互惠ケア連携」で目指すところ

蔵田 武志^{*1} 尾形 邦裕^{*1} 金澤 周介^{*1} 今村 由芽子^{*1}
佐藤 章博^{*1} 小木曾 里樹^{*1} 小林 吉之^{*1} 一刈 良介^{*1}
中江 悟司^{*1} 多田 充徳^{*1} 青山 朋樹^{*2} 清水 博己^{*2}
葛岡 英明^{*3} 中村 拓人^{*3} 腰原 健^{*4} 黒田 真朗^{*4}
返町 秀光^{*4} 大島 賢典^{*5}

Abstract --- The purpose of this project is to mitigate and solve issues regarding health care services such as rehabilitation and specific health guidance while alleviating spatio-temporal, economic, and cognitive constraints by establishing remote technology foundation. There are four themes in this project titled “Multimodal XR-AI (XR powered by AI) platform development for tele-habitation and reciprocal care coupling with health guidance.” In theme #1, we have been developing MR³ (Multi-Modal Mixed Reality for Remote Rehab) devices consisting of Wear and Mannequin for supporting detailed assessments of users’ physical functions and tactile interaction respectively. The central issue of theme #2 is to support intrinsic motivation for rehabilitation and exercise training through XR technologies as in virtual co-embodiment and hand redirection. In addition, we have also been investigating how to deal with 1-to-N (a small number of providers) and 0-to-N (no providers) situations. Theme #3 has aimed on establishing AI technology foundation for creating, monitoring progress of, and updating tele-rehabilitation programs mainly for the upper limb. Systems for always-on monitoring during daily life and work developed in theme #4 is expected to serve as a common foundation for various tele-healthcare services.

Keywords: Digital health, 1-to-N remote interaction, Reciprocal care (0-to-N remote interaction), Multimodal measurement and intervention

1 はじめに

本研究での主要な対象サービスであるリハビリテーションと特定保健指導を含む多くのヘルスケアサービスでは、時空間的、経済的、もしくは認知的制約に起因する諸問題が顕在化している。主だったものだけでも、コロナ禍でのサービス受容の敬遠・遠慮を含む所謂医療・介護・リハビリ難民、移動手段の不足、保険制度の制限などに伴う自己負担、利用者と提供者の数の不整合、サービスの質の格差、動機付けの不足などがあげられる(図 1)。サービスの遠隔化により、時空間的、経済的制約は緩和もしくは解消できるが、物理的インタラクションの再現、サービス利用者の日頃の心身状態の把握、

より多くの利用者に対応することになる療法士などのサービス提供者側の頭の切り替えなどの新しい課題が発

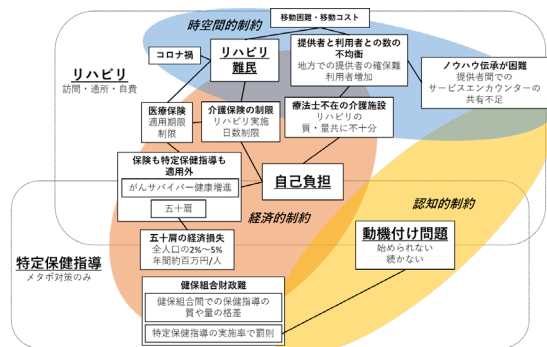


図1 社会背景

Fig.1 Social Background

*1 産業技術総合研究所 *2 京都大学 *3 東京大学
*4 セイコーエプソン株式会社 *5 株式会社エブリハ

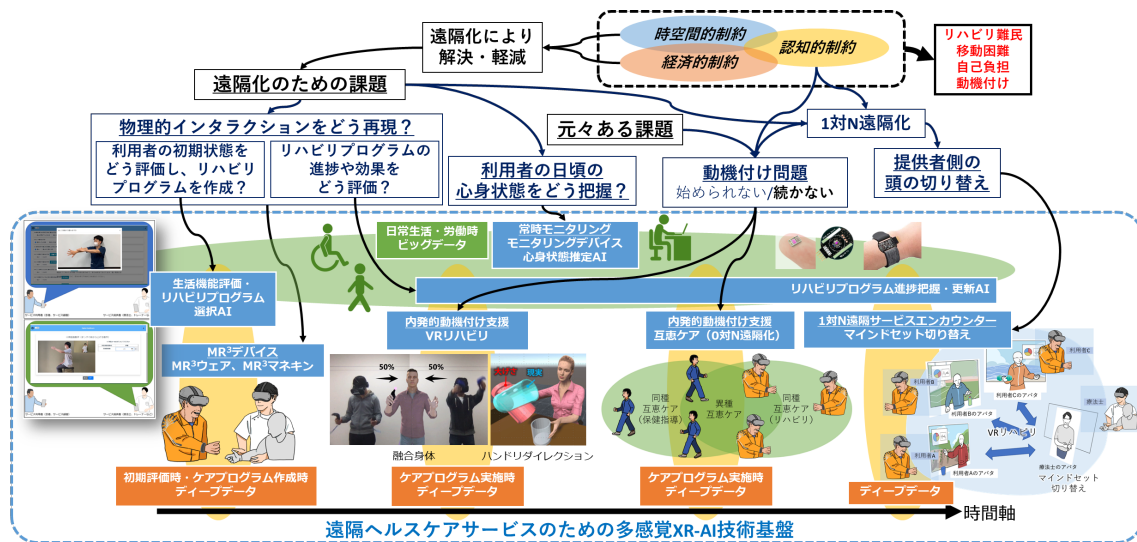


図2 取り組むべき課題とそれに対応する研究テーマ

Fig.2 Issues to be addressed and corresponding research themes

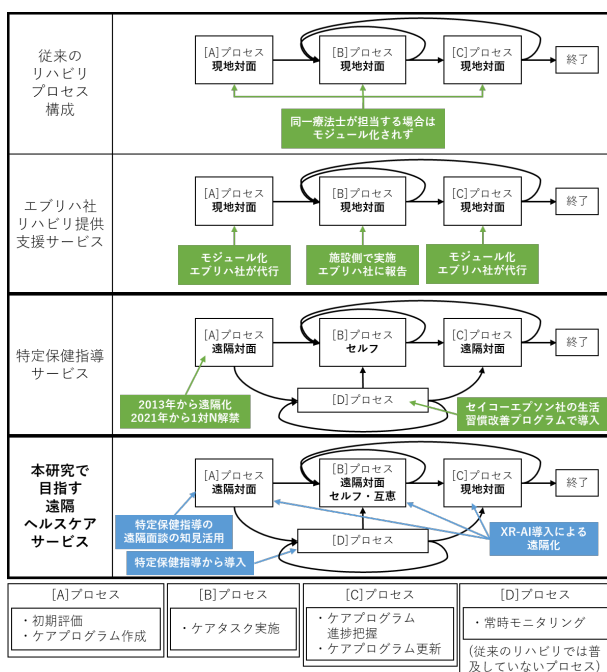


図3 サービスプロセス

Fig.3 Service process

生する。また、始められない、続かないといった動機付け問題は、遠隔化で直接解決するものではない(図 2 上)。

2 遠隔ヘルスケアサービス

2.1 サービスプロセスと遠隔化

リハビリや特定保健指導のサービスプロセスは、図 3 に示す[A]～[D]の4つに整理することができる。この各プロセスの遠隔化を実現するためのリモート技術基盤(多感覚 XR-AI(XR powered by AI, エクススレイ)技術基盤モジュール群)を構築・適用して時空間的、経済的、

並びに認知的制約を緩和することで、先に述べた問題群を効果的に解決・軽減することが、本研究の主要な目的である。なお、本研究では、上肢(肩から手まで)を主だった対象部位としている。

特定保健指導においては、利用者の利便性向上やサービスの多様化に対応するため、最も重要なサービスエンカウンター[1]である保健指導プログラム作成のための初回面談([A]プロセス)の遠隔化が 2013 年から認められており、コロナ禍の影響でその普及が加速している(参考:2021 年からは遠隔集団面談、つまり、1 対 N 遠隔化も認められた)。また、従来からサービスエンカウンターに限られ、利用者の状態把握が困難であることから、[D]プロセスも含まれることが多い。例えば、セイコーエプソン社は、腕輪型デバイスを用いた活動量・脈拍などの常時モニタリングサービスを提供しており、既に全健保組合の約 1 割にあたる 130 の健保組合で採用されている[2]。

一方、エブリハ社では、リハビリサービスの [A][C]プロセスの代行事業を展開している。これは、リハビリの [A][C]プロセスのモジュール化が可能であることを示しており、遠隔化への足掛かりになると考えられる。ただし、遠隔化により対面でのサービスエンカウンターがなくなることにより、利用者の状態把握や適切な動機付けが困難となるため、特定保健指導と同様、[D]プロセスの必要性が顕在化すると考えられる。また、対面でのリハビリでは[A][B][C]の各プロセスで物理的インタラクションを伴うが、それを遠隔で忠実に再現すべきなのか、異なるアプローチを取るべきなのかなどの検討も必要である。

2.2 遠隔リハビリと VR リハビリ

前述の[B]プロセスの遠隔化のために、本研究では、XR、特に VR を用いたリハビリや運動トレーニング(以下、

VR リハビリ)に関する研究開発を進めている。遠隔化と VR の双方を絡めたケースはまだ多くはないものの、VR リハビリそのものについては既に多くの研究が行われており[3]、事業化された事例も少なくない[4]。ISO/IEC JTC 1 では、国際標準のテーマ探索を目的としてユースケースなどの調査も行われている[5]。

脳卒中患者のリハビリに関しては、従来のリハビリと VR リハビリとの比較評価に関する調査も行われている[6]。当該調査によると、従来のリハビリと VR リハビリを比較した結果、上肢機能の向上について統計学的な差は認められておらず、胴体含めた複合的な動作を伴う ADL (Activities of Daily Living, 日常生活動作) については、VR リハビリの方が、整容動作や洗対動作などの生活に関わる上肢動作の自立度が従来と比べて少し良くなる可能性があることが報告されている。

したがって、[B]プロセスを VR により遠隔化しても、従来のリハビリと同等以上に機能する可能性があると考えられる。しかしながら、上記エビデンスは、調査規模が限られ、治療後すぐの改善に関する報告がほとんどであり、長期的な効果については未だ不明である。長期的な介入効果の実現のためには、動機付けや行動変容等の観点を取り入れた VR リハビリに関する更なる研究が必要である。

肩関節疾患に対する遠隔リハビリでの介入の先行研究[7][8]では、スマートフォンアプリを用いた体操指導管理や VR デバイスを用いた運動が行われているが、[A]プロセスの一部が対面によるものとなっており、時間的・金銭的コストの削減の効果が限られている。これは、遠隔での患者評価方法が確立されていないからである。例えば、肩関節疾患に対する遠隔の患者評価の先行研究[9]では、対象疾患が制限される、関節可動域が測定されず評価項目が不足するなどにより、患者の疾患鑑別・病期判断・身体機能などが十分に評価できないため、汎用性が十分とは言えない。

2.3 遠隔リハビリの法整備

アメリカでは遠隔リハビリの法整備は進んでおり、一部の州では、遠隔医療の提供前に遠隔地でのインフォームド・コンセント取得を義務付ける法律、遠隔リハビリとして理学療法が行われたことを特定できるように患者記録を義務付ける法律、遠隔医療をコンサルティングサービス提供のみに制限する規制、遠隔リハビリを実施している間は療法士がその州内に物理的に存在しなければならないとする規制などが設けられている[10]。

一方、日本国内ではコロナ禍が契機となり、遠隔診療がようやく認められはじめたところであり、遠隔リハビリについても少しずつ認められはじめている。例えば、介護保険領域では、「生活機能向上連携加算」(外部のリハビリ職種が介護サービス利用者の身体評価や ADL 評

価等のアセスメントを行い、機能訓練計画作成に携わることで算定できる加算)が、平成 30 年度の介護報酬改定で新設され、令和 3 年度からは、ICT を活用した動画データの共有やテレビ電話等による助言においても算定が可能となっている。つまり、[A]及び[C]プロセスの遠隔化に関して、介護保険法ですでに一部認可されていることになる。この流れに沿って、今後は国内でも積極的に法整備がなされていくことが期待される。

3 多感覚 XR-AI 技術基盤

3.1 研究テーマの概略

前述の社会背景、リハビリと特定保健指導を主要な対象とした場合のサービスプロセスの整理、それらの遠隔化、遠隔リハビリへの VR 技術の適用などの現状を踏まえ、本研究では、以下に示す研究テーマを設定している(図2下)。

1. 利用者の生活機能(運動、ADL)評価や遠隔触覚インタラクションのための MR³ デバイス(ウェア、マネキン)(3.2 節)
2. VR リハビリと互惠ケア(0 対 N 遠隔化)による内発的動機付け支援(3.3, 3.4 節)
3. 日々の心身状態推定のための常時モニタリング技術(3.5 節)
4. 生活機能評価・リハビリプログラム選択・進捗把握・更新のための AI 技術(3.6 節)
5. 1 対 N 遠隔化のためのマインドセット切り替え(3.7 節)

3.2 MR³ デバイス

MR³ デバイス(図 4)のうち、MR³ ウェアは、利用者の上肢計測、および触力覚提示を行うための着衣型装具である。高感度・低ヒステリシスといった特徴を備えた歪みセンサ群[11]を肘や肩などの計測部位に配置し、姿勢や形状の変動に関する計測技術を開発している[12]。また、Dhaiba Works(デジタルヒューマン技術のプラットフォームソフトウェア、ダイバワークス)[13]を用いたデジタルツイン環境での MR³ ウェアのセンサ配置の最適化やデータ拡張、再着脱や個人差を吸収するための転移学習の適用に関する取り組みも進めている[14][15]。

ハンガー反射現象の痙性斜頸患者などへの医療応用が進められている[16][17]。空気圧アクチュエータでハンガー反射を発生させ、力覚を提示できることもわかっていることから[18]、MR³ ウェアに空気圧アクチュエータを搭載し、VR リハビリに応用することも検討している。

MR³ マネキンは、療法士が指示したい対象部位に関して、「ここを」や「ここからこっちに」といった発話と共に触覚提示をするためのツールである。立体成形に対応した圧力分布センサの材料構成と作製プロセス[19]を

確立し、マネキン表面に圧力分布センサの実装することにより、どの部位をどの程度触っているかを計測可能とする。計測結果は MR³ ウェアに組み込まれた振動子群により遠隔の利用者への触覚提示が実現される。

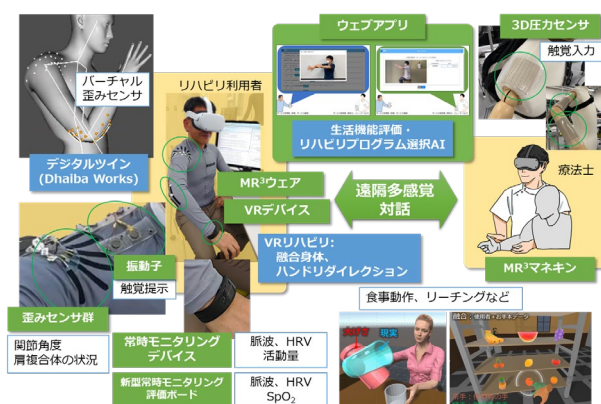


図4 MR³ デバイス(ウェア、マネキン)

Fig.4 MR³ Device (Wear, Dummy)



図5 融合身体に基づくVRリハビリのデモ

Fig.5 VR rehab demo based on virtual co-embodiment

3.3 VRリハビリ

VR リハビリは、[B]プロセスの遠隔化の有望な手段の1つであるが、同時に内発的動機付け支援の手段としても有効だと考えられる。本研究では、融合身体とハンドリダイレクションといった自己効力感増強のための各技法によって、内発的動機付け支援を試みる(図5)。

ある利用者の身体と他者(もしくは見本)の身体のそれぞれの動きを任意の割合で融合して1つのアバターの身体動作として提示する技術が融合身体技術である[20]。リーチングタスクなどにおいて、利用者の身体動作と、見本となるような療法士の身体動作の融合身体を

VR 空間内に生成することによって、利用者の行為主体感を高めつつ、見本に近い動作を観察できるようにし、利用者が獲得している身体図式[21]を徐々に更新させる。リハビリプログラムの各段階で常に達成感を得られやすいように融合身体の度合いを AI が適切に調整することで、リハビリプログラムからの離脱の予防に繋がることが期待される。

VR 空間で自身の手の運動を実際の運動に対して少しずらして表示すると、運動の軌道が変化する。この原理を応用したのがハンドリダイレクション技術である[22]。これにより利用者の運動を補正して多感覚提示することで、感覚的な整合性を担保したままタスクが成功したように知覚したり、実際よりも可動範囲が大きくなったように知覚したりする。結果として、利用者の自己効力感を向上させたり、上肢を大きく動かすことへの恐怖感を緩和したりする効果が期待できる。

3.4 互恵ケア

遠隔互恵ケアでは、療法師などの提供者不在、つまり、0 対 N 遠隔化の状況で、XR サービスエンカウンターにおけるリハビリタスクを実施し、その様子を他者と共有すると共に、他者とのインタラクションを行う(学習支援シナリオで関連した取り組みが行われている[23])。これにより、自律性、有能性、他者との関係性といった内発的動機付けの各要因を高められることが期待される[24]。さらに、リハビリ、ジョギングなどの異なるケアタスクの難易度や強度を AI で適切に変換することで、遠隔異種互恵ケア(異なるケアタスクを実施している利用者間での互恵ケア)を可能とする。これにより、互恵ケアの利用者層を多様化・拡大しやすくなるため、ネットワーク外部性の効果を得られやすくなることが想定される。

3.5 常時モニタリング

MR³ウェアは[B]プロセスで使用することを想定しており、常時は装着していない。そこで、[D]プロセスのための腕輪型常時モニタリングデバイス(図4)の開発を進めている。これは、セイコーエプソン社の特定保健指導での実事業[2]で用いているものをベースにしたもので、活動量、脈波、心拍変動(HRV)、経皮的動脈血酸素飽和度(SpO₂)などの計測とその省電力化を行う。

スマートフォンでの屋内外測位[25][26]、「気分」の経験サンプリング[27][28]、及び常時モニタリングデバイスで得られる各データ履歴から機械学習により心身状態を推定し、その結果を、[B]プロセス実施タイミングの選択、[C]プロセスでのケアタスク進捗把握に活用する。

3.6 生活機能評価・リハビリプログラム作成・進捗把握・更新

生活機能評価、その評価結果に基づくリハビリプログラム作成、さらに、リハビリの進捗把握、更新のためのウ

エプアプリと AI モジュールの開発も進めている。まず、生活機能の初期評価とリハビリプログラム作成に関するアプリを実装し、生活機能評価のための運動テスト 25 種類、リハビリプログラム 28 種類についての動画コンテンツを整備した。現状は、遠隔利用者の運動テスト映像を療法士が目視し評価を入力する仕様であるが、最終的には MR³ウェア等により自動評価する計画である。

ビッグデータがない状況でも本アプリ運用を開始でき、データが集まれば機械学習モデルを訓練できるように、本アプリの生活機能評価に関する AI モジュールを以下のように構成している。

- 専門家が構築した決定木に基づく生活機能評価
- 決定木の DNN への変換[29][30]
- アプリの利用履歴を用いた DNN の訓練
- DNN に基づく生活機能評価(今後:説明可能な AI (XAI)化[31]も計画)

3.7 サービス提供者のマインドセット切り替え

1対 N 遠隔ケアにおいて、療法士などのサービス提供者が各利用者とその状態を記録・想起することを支援するための方法論や技法を、本研究では「マインドセット切り替え」と呼んでいる。従来から環境と記録に関する様々な研究が行われている[32][33][34]。本研究では、1対 N 遠隔ケアの場合である VR 空間(遠隔サービスエンカウンター)内の景観や、自身や他者の容姿・表情に対する制御・介入を行い、認知面での頭の切り替えを促す研究を進めている。

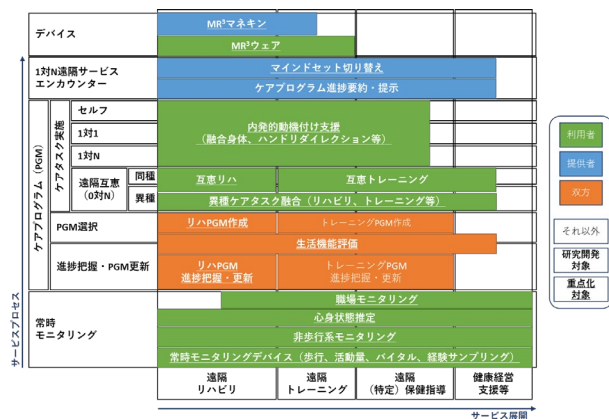


図6 多感覚 XR-AI 技術基盤モジュール群

Fig.6 Multimodal XR-AI platform modules

4 おわりに

本稿で述べた各研究テーマに関する取り組みを通じて図 6 に示すような多感覚 XR-AI 技術基盤モジュール群を構築し、最終的には、遠隔リハビリなどの個々のヘルスケアタスク場面と日常生活場面とを紡ぎ、1 対 N 遠隔ケアや互惠ケア(0 対 N 遠隔ケア)による制約フリーな

ヘルスケアサービスが広がる未来の実現に貢献することを目指している(図 7, 8)。法整備に関しては、本研究により直接的な貢献ができるわけではないが、患者・利用者の状態に関する評価方法や評価指標、安全性のガイドライン等の内容提案などでの寄与が可能であると考えられる。

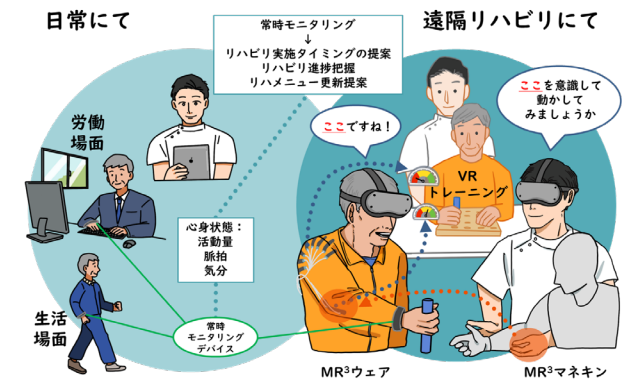


図7 遠隔 VR リハビリと常時モニタリングのイメージ

Fig.7 VR tele-rehab and always-on monitoring



図8 1対 N 遠隔ケアと遠隔互惠ケア

Fig.8 1-to-N remote care and remote reciprocal care

Fig.9

謝辞

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP21501015-0)の一環で行われているものである。

参考文献

- [1] Voorhees, C.M., et al., Service encounters, experiences and the customer journey: Defining the field and a call to expand our lens. Journal of Business Research, Vol.79, pp.269-280, 2017.
- [2] セイコーエプソン株式会社, 生活習慣改善プログラム, <https://shukan-kaizen.jp/>
- [3] Kim, W.-S., et al., Clinical Application of Virtual Reality for Upper Limb Motor Rehabilitation in Stroke: Review of Technologies and Clinical Evidence, J. Clin. Med.,

- Vo.9, No.10, 3369, 2020.
- [4] 蔵田武志, XR に基づく遠隔リハの研究・事業事例調査報告, 遠隔ヘルスケアのための多感覚 XR-AI に関するシンポジウム, 2022.
<https://unit.aist.go.jp/harc/nedo-xrai-healthcare/>
 - [5] Kurata, T., Telerehabilitation Based on XR, ISO/IEC JTC 1/AG 13 Internal Workshop for Ideas and Use Cases on VR/AR/MR Based Clinical Practice and Smart Health, ISO/IEC JTC 1/AG 13 N 59, 2021.
 - [6] Laver, KE, et al., Virtual reality for stroke rehabilitation. Cochrane Database of Systematic Reviews 2017, Issue 11. Art. No.: CD008349.
 - [7] Yeo, S.M., et al., Effectiveness of interactive augmented reality-based telerehabilitation in patients with adhesive capsulitis: protocol for a multi-center randomized controlled trial, BMC Musculoskelet Disord 22, 386, 2021.
 - [8] Russell, T.G., Physical rehabilitation using telemedicine, Journal of Telemedicine and Telecare, Vol.13, No.5, pp. 217-220, 2007.
 - [9] Steele, L., et al., Assessment and Diagnosis of Musculoskeletal Shoulder Disorders over the Internet, Int. J. Telemedicine and Applications, vol. 2012, 945745.
 - [10] Calouro, C., et al., An analysis of state telehealth laws and regulations for occupational therapy and physical therapy, Int. J. Telerehabil., Vo.6, No.1, pp.17-23, 2014.
 - [11] Kanazawa, S., Ushijima, H., Development of a Strain Sensor Matrix on Mobilized Flexible Substrate for the Imaging of Wind Pressure Distribution, Micromachine 11, 232, 2020.
 - [12] Ogata, K., et al., Basic Study of Upper Limb Movement Estimation and Function Evaluation including Shoulder Girdle by Multi-Sensing Flexible Sensor Wear, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2022. (to appear)
 - [13] Endo, Y., et al., Dhaiba: development of virtual ergonomic assessment system with human models, The 3rd International Digital Human Modeling Symposium, pp.1-8, 2014.
 - [14] Kanoga, S. et al., Semi-supervised style transfer mapping-based framework for sEMG-based pattern recognition with 1- or 2-DoF forearm motions, Biomedical Signal Processing and Control, Vol.68, 2021.
 - [15] Kanoga, S., et al., A Style Transfer Mapping and Fine-Tuning Subject Transfer Framework Using Convolutional Neural Networks for Surface Electromyogram Pattern Recognition, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp.1171-1175, 2022.
 - [16] Asahi, T., et al., The Hanger Reflex: An Inexpensive and Non-invasive Therapeutic Modality for Dystonia and Neurological Disorders, Neurologia medico-chirurgica, Vol.60, No.11, pp.525-530, 2020.
 - [17] Asahi, T., et al., Pilot Study of a Device to Induce the Hanger Reflex in Patients with Cervical Dystonia, Neurologia medico-chirurgica, Vol.58, No.5, pp.206-211, 2018.
 - [18] Kon, Y., et al., HangerOVER: Mechanism of Controlling the Hanger Reflex Using Air Balloon for HMD Embedded Haptic Display, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 609-610, 2018.
 - [19] 金澤周介, 3D デバイスの展開に向けた電子回路の非破壊成形技術, プラスチック成形加工学会第 33 回年次大会, D-203, 2022.
 - [20] Fribourg, R., et al., Virtual Co-Embodiment: Evaluation of the Sense of Agency While Sharing the Control of a Virtual Body Among Two Individuals, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.27, No.10, pp.4023-4038, 2021.
 - [21] D'Angelo, M., et al., The sense of agency shapes body schema and peripersonal space, Scientific Reports, 8(1), 13847, 2018.
 - [22] Azmandian, M., et al., Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1968-1979, 2016.
 - [23] 今田昇吾ら, VR 空間におけるセルフペース学習の継続支援: 空間内の他者が与える影響の検証, インタラクシオン 2020 論文集, pp.31-38, 2020.
 - [24] エーデンラボ株式会社, <神奈川県 ME-BYO リビングラボ> 習慣化アプリ「みんなチャレ」成果発表, <https://prtimes.jp/a/?f=d24217-20200626-1190.pdf>
 - [25] Kourogi, M., Kurata, T., Personal Positioning Based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera, ISMAR, pp.103-112, 2003.
 - [26] 小木曾里樹, 蔵田武志, 大隈隆史, "少数位置での電波強度計測値を用いる歩行者相対測位及び統合測位の補正法", HCG シンポジウム, 2021.
 - [27] Kutsuzawa, G., et al., Classification of 74 facial emoji's emotional states on the valence-arousal axes, Scientific Reports, 12(1), 398, 2022.
 - [28] Kutsuzawa, G., et al., Age Differences in the Interpretation of Facial Emojis: Classification on the Arousal-Valence Space, Frontiers in psychology, Vol.13, 915550, 2022.
 - [29] Banerjee, A., Initializing Neural Networks Using Decision Trees, Computational Learning Theory and Natural Learning Systems: Volume IV: Making Learning Systems Practical, pp.3-15, 1994.
 - [30] Humbird, K.D., Deep Neural Network Initialization With Decision Trees, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol.30, No.5, pp.1286-1295, 2019.
 - [31] Wan, A., et al., NBDT: Neural-Backed Decision Trees, arxiv.2004.00221, 2020.
 - [32] Tulving, E., Thomsom, D.M., Encoding specificity and retrieval processes in episodic memory, Psychological Review, 80(5), pp.352-373, 1973.
 - [33] Godden, D.R., Baddeley, A.D., Context-dependent memory in two natural environments: On land and underwater, British Journal of Psychology, 66(3), pp.325-331, 1975.
 - [34] Smith, S.M., et al., Environmental context and human memory, Memory & Cognition, 6(4), pp.342-353, 1978.