

1 受託研究進捗状況

(1) モーションパラメータとAIを活用した応用技術開発

戸田晴貴 福井克也 大森清博 太田智之 立川正真 開発学人 シュレスタスマン

1 はじめに

日本における65歳以上の高齢者が人口に占める割合である高齢化率は、令和6年時点で29.3%となった¹⁾。全ての人が健康で活動的な生活をより長く維持するためには、高齢者の健康寿命を延伸し要介護状態期間をできるだけ短縮する必要がある。高齢者が要介護となる要因のうち、加齢による衰弱、関節疾患や認知症¹⁾は徐々に機能低下が進行する。そのため、身体機能や認知機能の低下を早期に発見し、適切な介入を行うことで健康な状態に戻すことが重要となる。そこで我々は、Robot技術を活用した健康増進を実現する仕組みとしてRoboWELL[®]という取り組みを行ってきた。これは、評価装置を使用して身体機能や認知機能低下のリスクを測定し、継続した運動を行いながら評価の維持、改善に取り組むことで、次の評価結果を期待するポジティブな循環を促し健康維持を図る。これまで、RoboWELL[®]を活用した健康増進スキームの評価装置として、日常生活動作中の運動能力を定量的に評価できるシステム（「運動能力評価システム」：特許6535778号、「運動器作動力推定システム」：特許6873871号）や、簡便に運動機能を評価できるシステムを開発してきた。また、継続的な運動を促す目的で、RoboWELL[®]体操を開発しアプローチも行ってきた。本研究テーマでは、これまで得られたモーションパラメータ取得技術とAI技術を発展させ、リハビリテーションの現場や健康教室における効果的な介入を支援するためのシステム開発を目指す。加えて、モーションパラメータやAI技術のさらなる応用先として、コミュニケーションや機器制御に関する新たな技術開発を進める。



図1 本研究の概要

令和7年度は、単眼カメラを用いて計測したデータを用いてモデルとなる健常者のデータから逸脱すると警報を発報するフィードバックシステムを開発した。またカメラ映像を利用した応用的なシステムとして、スマートホームデバイスと連携した簡単な環境制御アプリや読唇術AIの開発を行った。さらにバーチャル・リアリティ（VR）システムを用いて高齢者の運動イメージ誤差を評価するシステムの検証を行った。以前より開発を進めていた擬似タッチパネルを用いた認知機能評価システム及びマイコンを用いて変形性膝関節症患者の歩行を計測し手術適応の有無を判定するシステムについて、特許を取得した。最後に、運動支援として提供しているRoboWELL[®]体操の広報も行ったので活用状況についても報告する。

2 カメラを用いた簡易運動評価システム

整形外科的疾患に伴う歩行障害や義足歩行は、歩行中の関節運動や荷重の偏りを生じさせる。臨床では、歩き方改善のための介入内容を決定するために観察による歩行分析が行われる。しかし、観察に基づく分析は評価者の経験に依存しやすく、解釈が主観的となる。そこで、単眼カメラを用いた撮影動画から姿勢推定AIを用いて歩行中の関節角度を推定し、健常歩行からの逸脱率を定量評価するシステムを開発した。

2.1 システムの概要

本システムは、歩行中の関節角度を姿勢推定AIの一つであるMediaPipeを用いて計測する。健常者歩行からの逸脱は、異常検知に用いられるニューラルネットワーク手法であるオートエンコーダによる再構成誤差を用いて評価する。健常歩行中の股関節角度および体幹角度の時系列データを学習データとしてオートエンコーダに入力し、角度波形を再構成するモデルを構築する。再構成された関節角度と計測された関節角度を比較し、再構成誤差が閾値を超えた場合を「健常歩行からの逸脱」として検出する。閾値は、再構成誤差の平均値 ± 2 標準偏差としている。

学習データとして当研究所の職員10名を対象に平地歩行中の正面及び側面から動画を撮影し関節角度を算出した。算出された角度を学習モデルに学習させた結果、すべての関節角度で90%以上の精度で再構成が可能であった（図2）。

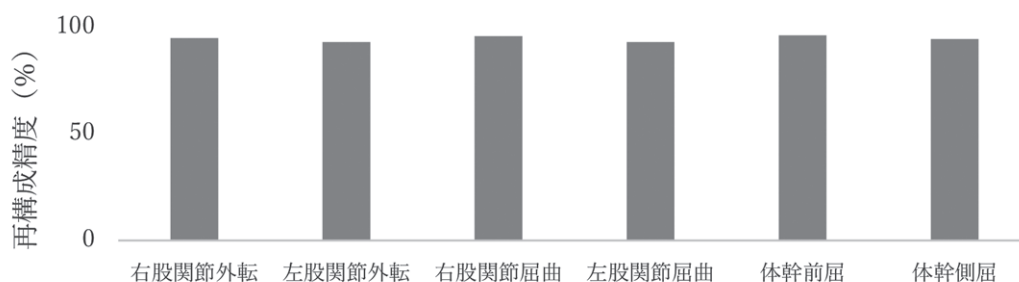


図2 オートエンコーダによる健常歩行の復元精度

2.2 活用例

歩行中の正面、側面から撮影された動画データを入力し、逸脱率を算出するWebアプリケーションを開発した（図3）。逸脱率は、動画全体のフレーム数に対する健常歩行から逸脱したと判定されたフレーム数の割合とした。また、リアルタイムにいずれかの関節角度が健常者歩行から逸脱した時点で注意マークを出力するフィードバックシステムも開発した。

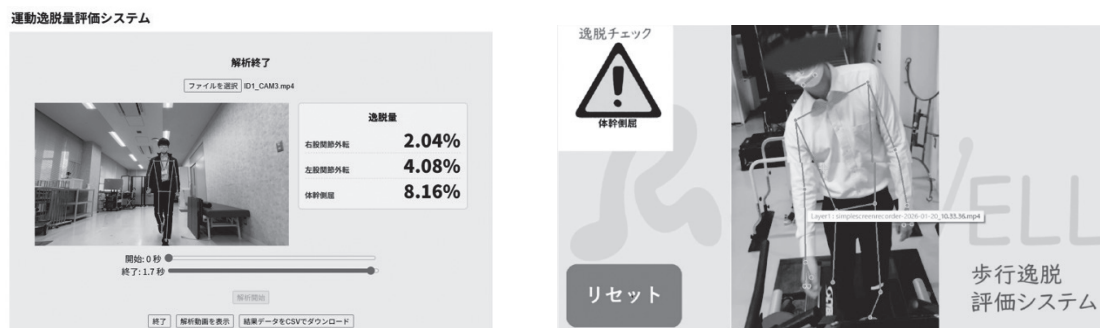


図3 運動逸脱量評価システムの計測画面

3 スマートホームデバイスと連携した簡単な環境制御アプリ

筋萎縮性側索硬化症や高位頸髄損傷等の四肢の運動機能に制限が伴う重度身体障害は、自力での家電操作や住環境の調整が難しく、結果として、日常生活において当事者・支援者双方の精神的・

身体的負担を強いることになる。これら課題に対し、従来から環境制御システム（ECS：Environmental Control Systems）が提案されている。しかしながら、専用機は高価であることに加え、操作体系が煩雑で直感性に欠ける。さらに、支援現場におけるICTリテラシーの不足や、機器の設定・運用負荷も大きな妨げとなる。近年では、安価な市販IoT機器の活用も期待されるが、設定の煩雑さが多忙な支援現場での普及を阻んでいる。そこで、iPadのカメラとApple ARKitによる顔・視線認識技術を活用し、市販のスマートホーム製品であるSwitchBotデバイスと連携させ、低コストかつ導入容易なECSアプリを開発した（図4）。



図4 環境制御システムの提案

3.1 システムの概要

図5に実際開発したECSアプリ画面のイメージを示す。本アプリは、iPadのカメラとARKitを基盤としたiOSアプリであり、顔・視線推定に基づく非接触操作を提供する。具体的には、iPadのカメラで撮影された顔の向きや視線座標を4分割した画面上のカーソル移動へと反映させる。従来製品の操作性の問題を考慮してターゲット面積を最大化したシンプルな4分割UIを設計した。決定操作には、特定の表情変化（口の開閉、瞬きなど）を決定トリガーとし、顔・視線入力特有の誤操作を最小限に抑える設計とした。アプリからの操作命令は、SwitchBot APIを介してクラウド経由で室内のハブへ送信され、赤外線やBluetoothを用いて家電を制御する。さらに、支援者向けの専用設定インターフェースを実装し、デバイス登録や連携設定を可能な限りアプリ内で完結させることで、導入に伴う心理的・時間的コストの低減を図った。今後は、重度身体障害者及びその支援者における実際の生活環境における最適な操作方法や設置負担を検証するための実証評価を実施する予定である。これらの調査を通じ、実環境において継続的に利用されるためのECSの要件を明らかにすることを目指す。



図5 ECS アプリ画面

4 読唇術AI

声帯麻痺や喉頭摘出術後などの患者は顔面機能に問題がないにもかかわらず発声をすることができない。そのような発話障害者に対するコミュニケーション支援として、会話中の口元を撮影した動画から発話内容を推定する「読唇術AI」の開発を目指す。しかし、「読唇術AI」の開発には大規模な学習データセットが必要である。既存の研究は英語圏が主流であり、日本語における大規模なデータセットが不足している。本研究では、日本語版のデータセットを構築し、健常者における日本語に対応した読唇術AIを開発した。

4.1 データセット構築

4.1.1 統制環境下における大規模コーパス「JGRID」の構築

統制環境下にて日本語の文法構造に基づいた大規模視聴覚データセット「JGRID」を構築した。日本語が母語話者の13名を対象に計11,000件の収録を行い、口の動作・音声・発話内容・音素の紐付けを含む学習データを整備した（図6a）。

4.1.2 実環境データを用いた学習データの拡張

実環境における汎化性能を検証するため、株式会社ジュピターテレコム（J:COM）の番組動画を利用し、番組中の出演者の口の動作・発話内容の紐付けした学習データセットを作成した（図6b）。



(a) 統制環境下

(b) 実環境下

図6 日本語版発話データセットの動画例

4.2 結果

それぞれのデータセットを用いて開発したAIモデルの推論精度を図7に示す。統制された環境下で収録された動画データを用いた場合、単語正解率約88%であった。撮影条件が整った環境においては、日本語読唇が可能であることが示された。一方で、実環境の動画データを用いたモデルでは、単語正解率は18%にとどまった。これは、背景雑音、照明変動、話者の不規則な頭部動作など、実環境特有のノイズ要因が認識精度に大きく影響した結果であると考えられ、実環境動画データの活用には課題があることが明らかになった。

これらの結果をもとに、JGRIDの動画データを学習させ口元の動画から発話内容を推定するアプリを試作した。また本研究成果の一部は国内学会（ライフサポート学会 第34回フロンティア講演会）で発表を行い、国際学会（ACDSA2026）にて発表予定である。今後は、確立したこの高精度モデルを実際の患者利用を想定したハードウェアへ実装し、実用的なコミュニケーション支援福祉機器としての製品化を目指す。

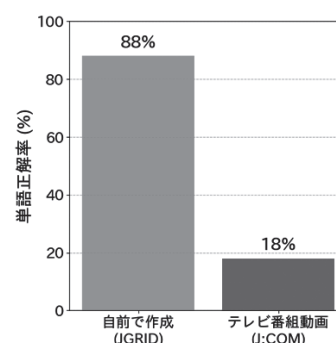


図7 読唇術 AI の推論精度

5 擬似タッチパネル上の視覚探索課題を用いた認知機能評価システム

一般的に、認知機能評価には、Mini-Mental State Examination (MMSE) や Trail Making Test (TMT) などの神経心理検査が用いられる。これら評価方法は専門職により実施する必要があるが、外来や検診で反復的に運用するには人的コストが課題となる。そこで本研究では、認知的負荷のある視覚探索課題を実施しているときの手先の運動を解析することで、手先運動の特性から認知機能を自動的に評価する手法を提案する（図8）。

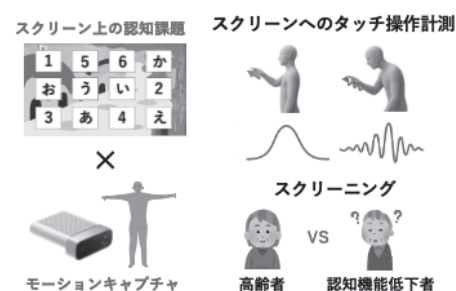


図8 認知機能評価の提案手法

5.1 システムの概要

図9に擬似タッチパネル式上肢運動計測システムの概要を示す。このシステムのパネルは、タッチセンサを搭載しておらず、乳半色の大型の亚克力板を用いている。映像はパネル背面に設置した短焦点プロジェクタで投影する。深度カメラを上部に取り付け、画面中央のユーザの両手の三次元座標を

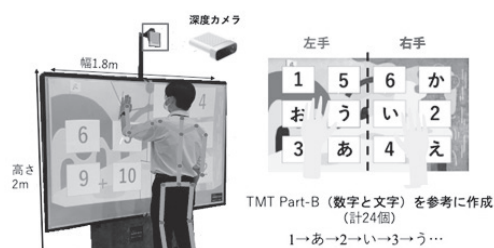


図9 計測システムと視覚探索課題

取得する。取得した座標のうち、パネル面に平行な2次元成分を画面上の手先位置(カーソル位置)として用いる。また、パネル面に垂直な成分から手の接近を判定し、アクリル板から5 cm以内に接近した場合をタッチとして扱うことで、擬似的なタッチ操作を可能にしている。本システムは大画面を用いてターゲット配置範囲を広げ、探索負荷が高まる課題環境とした。これにより、大きな視線移動や到達動作が必要となり注意配分や課題切替に伴う遂行過程の違いを捉えやすくなることを期待した。提示される認知課題は、TMT日本語版²⁾を参考に、数字とひらがなを交互に選択するものである。ターゲットの配置はランダムに提示され、画面の右半分は右手で、左半分は左手のみで実施する仕様になっている。

5.2 計測

対象は、地域在住の健常高齢者10人と神経内科クリニック通院中でMMSE の得点が27点以下³⁾の認知機能低下高齢者10人であった。課題遂行時は、正解ターゲット以外の取得を不可とし誤動作が連続する場合は口頭で修正を促した。課題遂行中の手先位置時系列座標から、速度符号変化回数、速度波形の周波数指標(平均周波数・最大周波数)、躍度指標(平均絶対躍度・最大絶対躍度)を算出した。全24試行の指標の中央値を代表値として用いた。説明変数を(i)速度符号変化回数、(ii)周波数指標、(iii)躍度指標、認知機能低下の有無を目的変数とした3種類の二項ロジスティック回帰モデルをそれぞれ構築して分類性能を評価した。

5.3 結果

3モデルのいずれにおいても、決定境界により誤分類はなく、精度・感度・特異度はいずれも100%、ROC曲線下面積(AUC)は1.00であった。図に、分類結果を示す。速度符号変化回数(図10(a))では、認知機能低下高齢者は高値に分布しており、課題遂行中の停止、切り返し、修正が増加していることが示唆された。平均周波数と最大周波数の組合せ(図10(b))では、認知機能の違いにより手先運動の揺らぎ方を反映した周波数特性が異なることが示された。躍度指標(図10(c))では、認知機能低下高齢者において最大絶対躍度が大きく、急激な速度変化を伴う運動が増加している可能性が示唆された。これらの結果から、大画面に表示された視覚探索課題中の手先運動の特性を評価することで、認知機能評価が可能であることが示された。本評価手法については、特許を取得した(特許第7770609号)。また本研究成果の一部は国内学会(INTERACTION 2026)にて発表した。

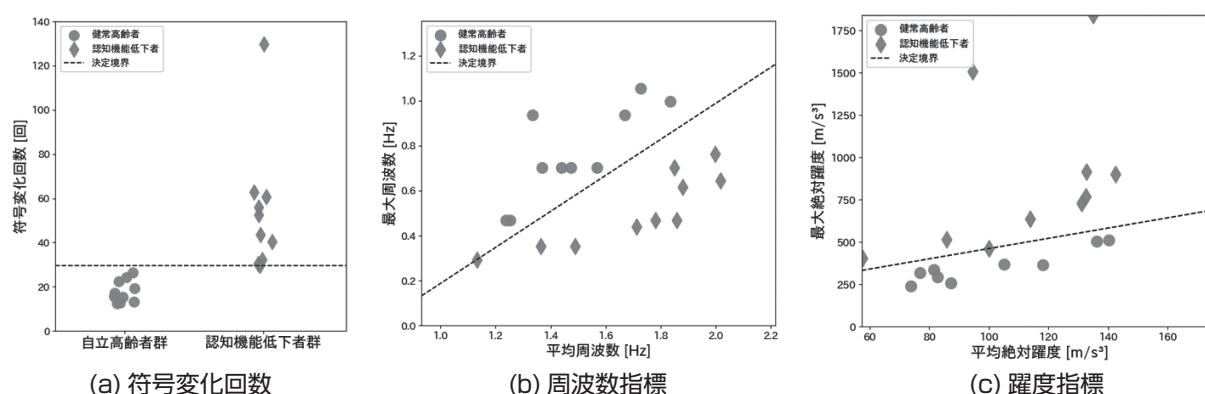


図 10 各指標の分布

6 変形性膝関節症における人工膝関節置換術リスク評価システム

近年、変形性膝関節症の有病率は増加しており、疼痛や機能制限から要介護となるリスクにつながる¹⁾。そのため、変形が重度になると人工膝関節置換術が施行される。変形性膝関節症にお

ける膝関節内反変形の増加は膝関節内反トルクと関連があり、内反トルクを指標にすることで手術適応の有無を評価できる。しかし、関節トルクの算出には光学式モーションキャプチャ(MoCap)が必要であり、日常生活場面で評価することはできない。そこで、靴に貼付した慣性計測装置(Inertial Measurement Unit; IMU)のデータから深層学習を用いて内反トルクを推定し、さらに手術適応の有無を判定できるシステムを開発した。

6.1 システムの概要

ユーザは、靴の踵部にIMUを貼付する(図11)。この状態で平地な環境で歩行をしてもらい、1歩行周期中の加速度と角速度の時系列データを取得する。得られた時系列データを入力とし、Long Short Term Memory (LSTM) という手法を用いて、膝関節内反トルクと膝関節伸展トルクの時系列データを推定する。さらに得られた時系列データからLSTM分類モデルを用いて手術適応か否か分類する。



図 11 計測場面

6.2 計測・分析

令和7年度は、このシステムの教師となるデータを取得するために、人工膝関節置換術適応患者10人と健常者4人を対象に計測を行った。計測には光学式MoCapとIMUの両方を使用した。参加者は、計測室内の直線歩行路を快適歩行速度で歩行した。その結果、人工膝関節置換術適応患者154歩行周期、健常者134歩行周期のデータを取得した。これらのデータをトレーニングデータとテストデータにランダムに分割した。このトレーニングデータを用いて、IMUから得られた加速度、角速度を入力とし、光学式MoCapにより算出した膝関節内反トルクと膝関節伸展トルクを出力とするLSTMモデルを構築した。さらにトレーニングデータの膝関節内反トルクと伸展トルクを入力とし、手術適応の有無を分類するLSTMモデルも構築した。最終的に、テストデータの加速度、角速度を用いて膝関節内反トルクと伸展トルクを推定し、推定されたトルクを用いて手術適応の有無を分類することでシステムの性能を評価した。

6.3 結果

膝関節内反トルクと伸展トルクの時系列データの平均絶対誤差は、伸展トルク10.9%、内反トルク8.9%であった(図12)。さらに推定された関節トルクを用いることで、膝関節内反トルクと膝関節伸展トルクの両方を利用すると100%の精度で手術適応の有無を評価することが可能であった(図13)。本システムは、令和7年度特許を取得した(特許7789254号)。

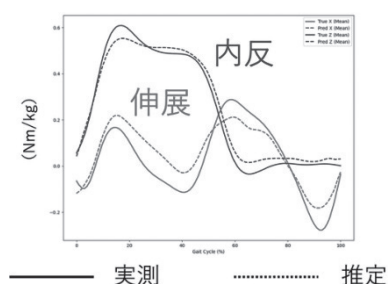


図 12 膝関節トルクの推定結果



図 13 手術適応の有無の分類結果

7 バーチャルリアリティ (VR) を用いた運動イメージ評価システム

自身では可能と思っていた運動が実際にはできていない運動イメージ誤差の増加は、高齢者において転倒リスクの増大につながる⁴⁾。日常生活では、物に手を伸ばすリーチ動作はさまざまな

方向に行く必要がある。したがって運動イメージ誤差の評価は、一方向だけでなく複数方向で実施することが重要である。そこで本研究では、VRヘッドマウントディスプレイ（VRHMD）を用いて多方向のリーチ課題における運動イメージ誤差を定量的に評価できる計測システムを開発した。

7.1 システムの概要

本システムはVRHMDのMetaQuest 3 / 3s（Meta社製）を用いて構成されており、PC不要で計測可能となっている（図14）。リーチ課題は、正面方向、右側方向、左側方向、右斜方向（45°）、左斜方向（45°）の5方向へ実施する。計測終了後、VR空間内で各方向における最大リーチ距離および予測リーチ距離を平面上の曲線として表示する。最大リーチ距離は赤色の曲線で、予測リーチ距離は青色の曲線で示し、両曲線間の距離が大きいほど運動イメージ誤差が大きいことを視覚的に確認できる。特に、赤色の曲線が青色の曲線よりも身体側に位置する場合には、参加者が自己の身体機能を過大評価していることを意味する。



図 14 計測場面

7.2 評価

40歳未満の若年者5人と65歳以上の高齢者10人を対象に実証評価を行った。年齢、過去1年間の転倒歴の聴取に加えて、本システムを用いて5方向の最大リーチ距離、運動イメージ誤差を評価した。運動イメージ誤差は最大リーチ距離から予測距離の差分とした。運動イメージ誤差が負の場合、自身の身体機能を「過大評価」、正の場合、自身の身体機能を「過小評価」していることを意味する。

7.3 結果

高齢者は転倒歴に基づき、健常高齢者4人、転倒高齢者6人に分類した。計測の結果を図15に示す。運動イメージ誤差は、転倒高齢者群では左右側方向において中央値が負の値（過大評価方向）を示した（左側方：中央値 -5.79cm 、右側方：中央値 -7.92cm ）。最大リーチ距離は、全ての方向が若年者群、高齢者群、転倒高齢者群の順で低値であった。これらの結果から、上肢の運動イメージの誤差評価については、正面方向よりも側方向でのリーチ動作において誤差が顕著に表れる可能性が示唆された。

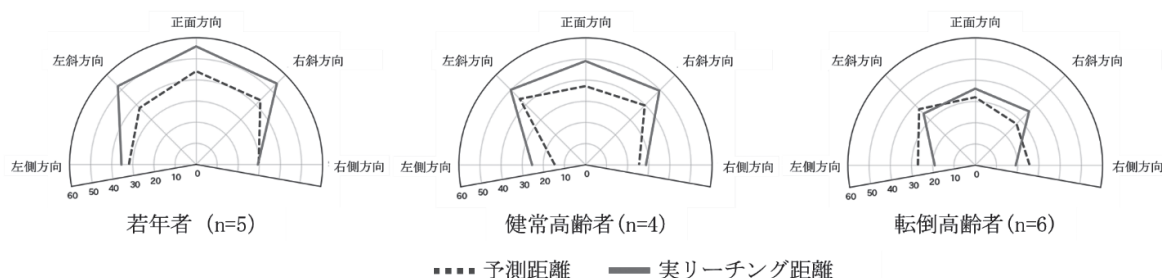


図 15 核運動方向におけるリーチング距離の予測値と実測値との関係

8 RoboWELL® 体操の普及について

これまで、当研究所で開発したRoboWELL® 体操の普及活動としてDVD、冊子ガイド、チラシを配布してきた。その結果、多くの自治体や集いの場で活用していただくことができた。さらに令和4年度より、YouTube® にて体操の動画やRoboWELL® の紹介動画を作成し公開した。表1

は令和8年3月24日時点でのYoutube® 総再生回数を示す。このうち、令和7年度は計5,808回(13.0回/日)の再生回数を得られた。視聴層を分析すると継続的に動画を繰り返している層がいることから、YouTube® を活用して継続的な運動に取り組むことに貢献している。

表1 RoboWELL® 体操のYouTube® 総再生回数(2026/3/24時点)

	通常版	短縮版	各コース	合計
再生回数(回)	5,067	13,085	897	19,049

9 おわりに

本研究テーマでは、令和7年度単眼カメラを用いた運動評価システムだけでなく、その技術を応用した簡易環境制御アプリや読唇術AIの開発を行い、健常者に対しては利用可能であることを確認した。さらにVRを用いた運動イメージ誤差評価システムについては、転倒高齢者の特徴を予備的に抽出することができた。昨年度より開発を進めていたマイコンを用いた変形性膝関節症患者の手術適応判定システムおよび擬似タッチパネルを用いた認知機能評価システムについて特許を取得することができた。RoboWELL® 体操については、積極的に広報を行い、多くの方に活用された。令和8年度は、高齢者や障害者を対象に活用できるようシステムの改良と実証を進める。本研究の一部は科研費23K11193と24K15063の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) 内閣府. 令和7年度版高齢社会白書 [Internet]. 2025. [cited 2026 Jan 20]. Available from: <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2025/html/gaiyou/index.html>
- 2) 武田千絵, 他. 縦版Trail Making Testと横版Trail Making Testにおける成績の違いについての一考察—若年健常者における縦版・横版Trail Making Test成績の比較—. 神経心理学. 2017;33 (3) : 207-215.
- 3) 杉下森弘, 他. MMSE-J (精神状態短時間検査—日本版) 原法の妥当性と信頼性. 認知神経科学. 2018;20 (2) 91-110.
- 4) 杉原敏道, 郷貴大. 高齢者の自己身体能力認知について. 日本保健科学学会誌. 2004;7 (4) : 257-261.