

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 立川正真 開発学人 シュレスタスマン 大森清博 福井克也 太田智之

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5年時点で29.1%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。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。

令和6年度は、新たに単眼カメラを用いた簡易な上肢運動計測システムを開発し、妥当性評価および現場で利用可能な評価システムを開発した。さらに令和5年度より開発を進めていた、側方リーチゲームの特許出願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の高齢者計測を行った。最後に、以前より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。

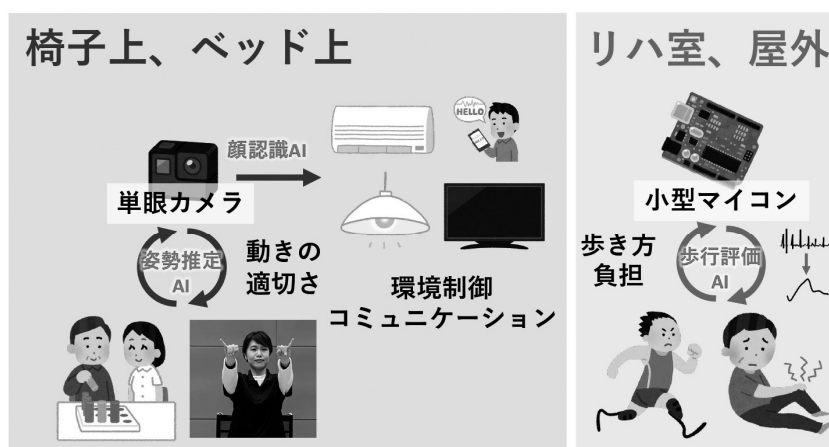


図1 本研究の概要

2 カメラを用いた簡易運動評価システムの開発

上肢動作を定量評価できる計測システムは、リハビリテーション現場に必要である。我々は単眼カメラと姿勢推定AIを用いた臨床現場でも簡易に使用可能な上肢動作計測システムを開発した。

2.1 システムの概要

本システムは、パソコン（PC）1台と単眼カメラを使用してユーザの上肢訓練場面を撮影し、

その動画を姿勢推定AIにより解析することで、3次元空間での体幹・上肢運動を定量的に計測できる(図2)。分析は、録画した動画およびリアルタイムのどちらからでも可能である。

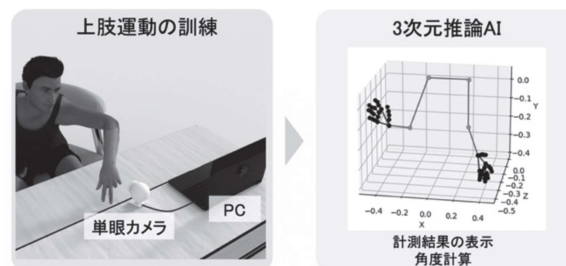


図2 上肢動作計測システム

2.1.1 妥当性評価

妥当性を検証するために、健常男性1名を対象とし、体幹側屈、肩関節内外転、肩関節回旋、肘関節屈曲、前腕回内外運動を日本整形外科学会関節可動域測定法に基づき実施した。これらの運動を本システムと光学式モーションキャプチャ(MoCap)を用いて同時に計測した。併せて、本システムにおいて上肢運動計測に対する最適なカメラ配置を明確にするために、対象者の正面(cam1)、右45度(cam2)、斜め上(cam3)、左45度(cam4)の4方向にカメラを配置し、それぞれで妥当性を評価し比較した。評価には、関節角度波形の類似性を測る相関係数と平均誤差を測る2乗平均平方根誤差(RMSE)を用いた。

2.1.2 評価結果

肩関節回旋と肘関節屈曲の運動では斜め上(cam3)が、肩外転と体幹側屈の運動では正面(cam1)と斜め上(cam3)で計測したデータの相関係数が最も高く(図3)、RMSEが最小であった(表1)。これらの結果から、どの上肢運動も特徴を捉えることは可能であるが、カメラ位置により精度よく測定できる上肢運動が異なることが明らかになり、目的とする運動に応じてカメラ位置を変更する必要性が示唆された。

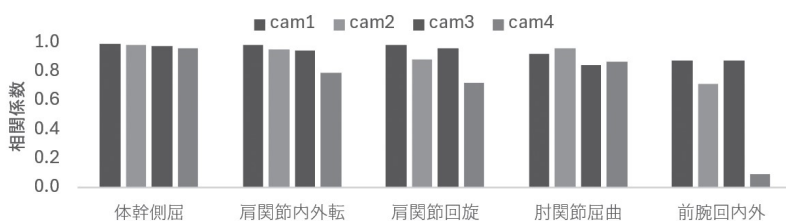


図3 相関係数の比較

表1 2乗平均平方根誤差の比較 [deg]

	cam1	cam2	cam3	cam4
体幹側屈	2.98	5.51	3.31	9.26
肩関節内外転	3.41	10.81	7.50	22.46
肩関節回旋	7.94	54.48	11.24	55.72
肘関節屈曲	20.44	13.25	29.63	22.35
前腕回内外	32.65	36.55	33.41	48.58

2.2 上肢運動逸脱度評価システム

上肢切断による義手の利用者や脳卒中による片麻痺などの上肢運動障害は、動作中の上肢の運動範囲を狭め、生活の質に大きな影響を与える。臨床現場では、介入内容を決定するために代償運動の観察による分析が行われる。しかし、観察に基づく分析は評価者の経験に依存する上、結果が主観的となる。そこで姿勢推定AIを用いて上肢運動における健常運動からの逸脱度を評価し、点数化するシステムを開発した。

2.2.1 評価方法

このシステムはあらかじめ設定した課題を実行することで、その課題を実行する際の姿勢や関節角度が基準となる健常者の姿勢や関節角度からどれだけ逸脱しているかをDynamic Time Wrappingという手法を用いて評価する。また、得られた結果を直感的に理解しやすいよう点数化を行う。点数は100点満点で提示され、100点から80点の範囲が健常動作の2標準偏差の範囲に合致す

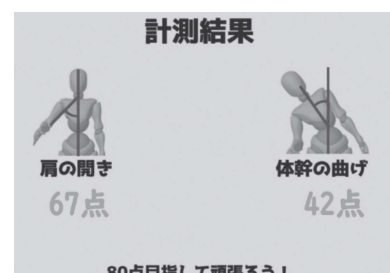


図4 結果の表示の例

るよう調整されている（図4）。つまり、点数が80点以下になると健常者運動との類似度が低くなり、逸脱度が大きくなることを示す。

2.3 RoboWELL[®] 指体操評価システム

我々は、継続的な運動を促す目的でRoboWELL[®] 体操²⁾を開発し公開してきた。その中で、体操指導員のいない集いの場や自宅では体操を指示通りに実施できているか、効果的な体操が出来ているか不明であるという問題があった。そこで、高齢者がRoboWELL[®] 体操を行う際に指示通りの体操が行えているかの可否を評価するシステムを開発した。

2.3.1 システム概要

計測課題は、RoboWELL[®] 体操の中でも難易度が高い指体操とした。本システムは、単眼カメラの搭載されたPCを用いて指体操の実施場面を動画で撮影する（図5）。得られた画像データから姿勢推定AIを用いて手指の姿勢を評価する。本システムでは、4つの指体操のパターンが行えているかを機械学習のジェスチャ分類モデルを用いて判定する。リアルタイムに計測された手指姿勢と提示されているお手本の手指姿勢との類似度を示す予測確率が一定値を超えた場合、体操が出来ていると判断する。

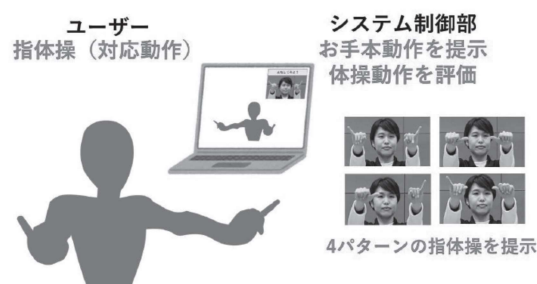


図5 指体操評価システムの概要

2.3.2 有効性検証

令和6年度は、システムの有効性検証のために、20歳代から30歳代の若年者4名と65歳以上の健常高齢者2名を対象に計測を行った（図6）。参加者は、画面に提示されたお手本と同じ指体操を行い、1分間の間に同じ体操ができた」と判定された回数と各課題におけるお手本との類似度を評価した。課題の平均達成回数は若年者が54.2回、高齢者が47.0回であり、高齢者のほうがわずかに低下した。課題達成時の予測確率は、若年者が87.3%、高齢者が83.9%であり、高齢者は予測確率が減少する傾向があった。本システムを使用することで、介護予防体操において簡便に指体操の可否を評価することができる。

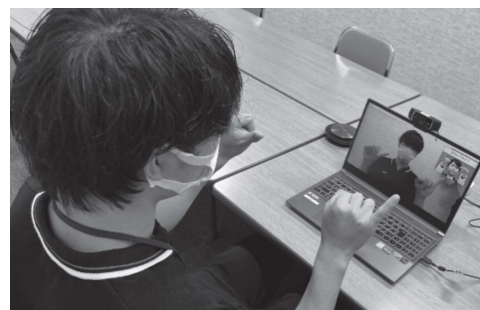


図6 計測の様子

3 側方リーチ評価システム

側方リーチ評価システムは、手を伸ばすだけで転倒リスクを簡単に評価可能なゲームシステムである。高齢者の転倒リスクやバランス能力は、前方もしくは側方へ手を伸ばすことができた最大移動距離であるリーチ距離により評価することができる。本ゲームシステムを使用することにより、単純なリーチ距離だけでなくユーザがどのような動作戦略でリーチを行なっているかも分析することが可能であり、そこからフレイルリスクを評価できるシステムを開発した。

3.1 システムの概要

図7に側方リーチゲームシステムの概要を示す。本システムは、PC、モニタ、深度カメラ（Azure Kinect DK、Microsoft社製）とこれらを取り囲む筐体で構成される。ユーザは、深度カメラから

2～3m離れて正対し少し足を開いて立つ。ユーザは、モニタのゲーム画面に映っている目標となるキャラクタに手を伸ばして取得し、その際のリーチ距離を算出する。キャラクタの表示位置は徐々に遠くなっていく。試行内での最大リーチ距離を先行研究で報告されている転倒リスクカットオフ値³⁾と比較することで転倒リスクの評価を行う。3回リーチに失敗するとゲームは終了する。結果画面では、左右それぞれの最大リーチ距離と計測中の体幹と膝関節角度を解析することで、転倒リスクを三段階で視覚的に提示するとともに、リーチにおいて体幹と膝関節の動きがそれぞれどのように使われているか提示する。



図7 側方リーチゲームシステムの概要

3.2 フレイルリスク評価

令和6年度は、令和5年度播磨町在住の高齢者を対象に計測したデータの分析を進めた。本研究では、フレイル基本チェックリストを使用し、身体機能に関わる5項目中3項目以上に該当する者をフレイルと判定した。リーチ動作中の動作戦略を評価するため、リーチ側への体幹側屈角度と膝関節屈曲角度を算出し、それぞれの角度とリーチ距離の関連を相関係数で分析した（図8）。その結果から、体幹側屈角度とリーチ距離に正の相関を示す対象者は、体幹をリーチ側に傾けることでリーチ距離を延長する戦略を取ることを示した。さらに、このグループは膝屈曲角度との関係において正の相関を示すグループと負の相関を示すグループに分けられた。体幹側屈角度と膝関節屈曲角度が両方正の相関を有していたグループは、全員が健康者であった。一方で、膝関節が負の相関を有していたグループは健康者とフレイルを有している人が混在しており、フレイルに移行しかけているグループであると判断した。体幹側屈角度とリーチ距離に負の相関を示す対象者は、体幹を逆方向に傾げることでバランスを保つ戦略を採用しており、このグループはフレイルのみで構成されていた。これの結果から、リーチ動作における体幹と膝関節の貢献を評価することで、フレイル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、令和6年度特許を出願した（特願2024-226937）。

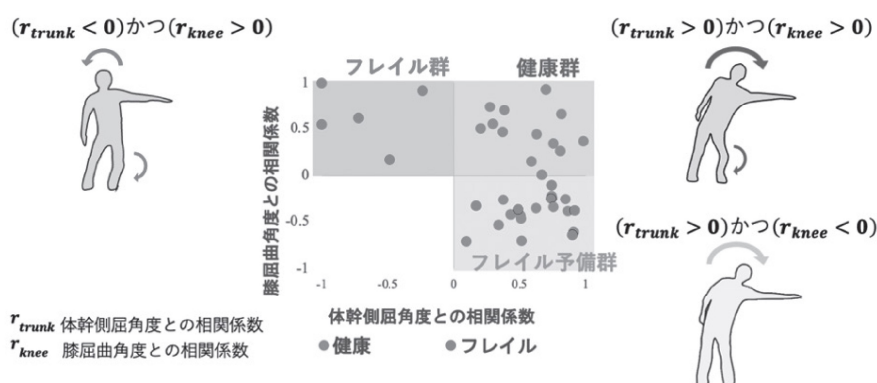


図8 リーチ距離と体幹、膝関節の相関関係を用いたフレイル評価

4 擬似タッチパネルを用いた視覚探索課題中の上肢運動計測システム

近年、日本では高齢化が進んでおり、認知症の高齢者も増加しており、それに伴い認知症の前段階である軽度認知障害（MCI：Mild Cognitive Impairment）を有する高齢者も増加している。本研究では、運動計測ができる擬似的なタッチパネル型システムを構築し、健常高齢者およびMCI高齢者の課題遂行能力に加え、上肢の協調性やバランス能力を統合的に評価することを目的としている。

4.1 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、タッチセンサは付いておらず、乳半色の大型のアクリル板を用いている。映像は、パネル背面に設置してある短焦点プロジェクタにより投影している。深度カメラを上部に取り付け、画面の中央の位置に立ったユーザの両手の3次元座標を取得する。その座標のうちパネルと並行な2次元成分を画面内で使用することにより擬似的なタッチ操作を可能にしている。令和6年度は外部での計測を行うため、補強を行い強度の向上を測った。

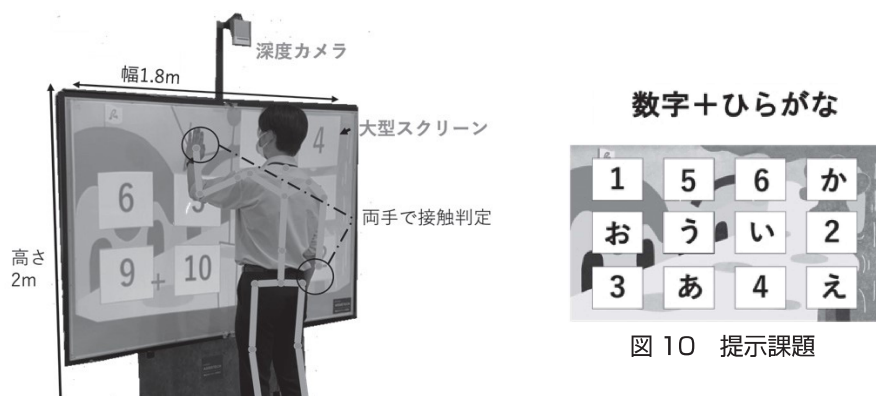


図9 擬似タッチパネル式上肢運動計測システム

4.2 計測

開発した擬似タッチパネル式上肢運動計測システムを用いて、設定した課題において加齢が所要時間に与える影響を検証するため、20代と60代以上を対象に計測を行った。計測に使用する課題は、Trail Making Test (TMT) を参考に作成した。TMTは、用紙上の数値やアルファベットを順序通りに線で結ぶ視覚探索課題であり、ワーキングメモリ、反応抑制、反応の切り替えといった複数の認知機能を評価することができる。令和5年度行った予備計測で設定した課題のうち、最も差異が確認できた数字及びひらがなを組み合わせさせた課題を用いて検証を行った4)。課題遂行中は一画面に12個の項目を提示し、すべて取得し終えた後に次の画面でさらに12個の項目を提示する、合計24個の課題形式を採用した。課題の提示手法における画面表示の例を図10に示す。

各課題の取得順序は、

1→あ→2→い→…→11→さ→12→し
とした。

課題の数字や文字の配置は、提示手法の範囲内でランダムとした。対象者間でタスクの取得方法に差が出ないように、対象者には、画面の右半分は右手で、左半分は左手で課題に触れるように指示を与えた。対象者全員が課題を視認できること、足を踏み出すことなくすべての目標に両手が到達することを確認して計測を行った。

4.3 結果

20代11名、60代5名、75歳未満4名、75歳以上6名が計測に参加した。年代ごとの所要時間の結果を図11に示す。○は各参加者の結果を示しており、◇はそれぞれの年代の平均を示す。赤い帯域は20代の平均値を中心に、その2標準偏差内に収まる範囲を示す。加齢に伴い所要時間は徐々に延長し、60代以上はほとんどの人が赤い帯域を超えた。よって、本システムの使用により高齢者の課題遂行能力の加齢変化を確認できた。今後は、認知機能評価であるMini-Mental State Examinationの得点と運動学的パラメータの関連を分析することで、認知機能の低下に関連するパラメータの抽出と解析を進める。

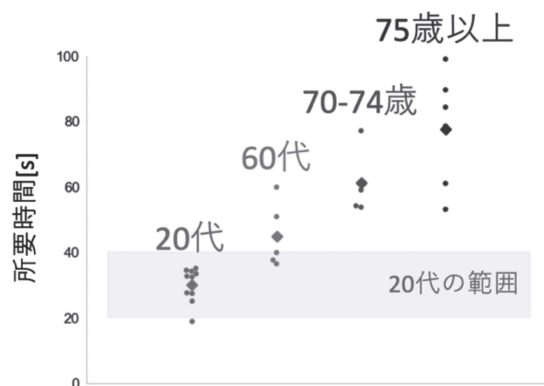


図 11 各年代の所要時間

5 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可能性がある⁵⁾。日常生活では様々な刺激が混在する中で自身の動作能力や周囲情報を適切に認識し、安全に動作を行う必要がある。そこで、VRヘッドマウントディスプレイ (VRHMD) を用いて運動イメージ誤差を評価できるシステムを開発した。

5.1 システムの概要

計測者は、VRHMDを装着しVR空間上の正面に提示される目標に対して右手をリーチングし、目標に届いたと思ったら手に持っているボタンをクリックする。ボタンをクリックした際のリーチング距離とユーザから5-70cmの範囲で提示された目標物とボタンをクリックした手の座標の誤差の2つを評価する (図12)。

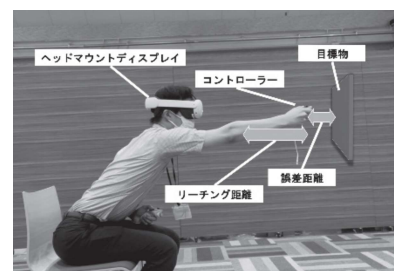


図 12 評価場面

5.2 評価

20歳代の若年者3名と65歳以上の高齢者3名が参加した。計測の結果を図17に示す。リーチング距離は若年者の平均が48.1cmに対し、高齢者が34.3cmと高齢者リーチ距離が短かった。リーチング時の目標との誤差は、若年者の平均が13.6cmに対し、高齢者が12.6cmであった。リーチング時の目標との誤差は若年者の平均が13.6cmに対し、高齢者が12.6cmであった。目標物に対する誤差が5cmを超えた距離の平均は若年者が35cmに対し、高齢者は31.7cmであり、高齢者は誤差の発生する距離が若年者と比較して短い可能性が示唆された。令和7年度、リーチング距離と目標に対する誤差から認知機能の衰えを早期に発見できるか検討を進める。

6 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3年度より、YouTube® にて体操の動画やRoboWELL® の紹介動画を公開した。表2は令和7年3月現在のYoutube® 総再生回数を示す。内、令和6年度は5,195回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再生を繰り返している層がいることから、YouTube® を活用した継続的な運動が行われていることが推測できる。

表2 RoboWELL[®] 体操のYouTube[®] 総再生回数（令和7年3月時点）

	通常版	短縮版	各コース	合計
再生回数（回）	4,721	9,079	774	14,574

7 おわりに

本研究テーマでは、令和6年度単眼カメラを用いた簡易な上肢運動計測システムを開発した。さらに令和5年度より開発を進めていた、側方リーチゲームの特許出願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の高齢者計測を行うことができた。RoboWELL[®] 体操については、積極的に広報を行い、多くの方に活用していただくことができた。

今後は、開発したシステムや計測したデータをもとに高齢者の機能低下を評価できるAI技術の開発を進める。また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ことで、高齢者や障害者の身体機能の向上や自立支援の補助を目指す。

なお、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6年度版高齢社会白書 [Internet]. 2024 [参照 2025年1月8日]. Available from: <https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/html/gaiyou/index.html>.
- 2) 兵庫県立福祉のまちづくり研究所. RoboWELL体操（ロボウェル体操）/ 福祉のまちづくり研究所 [Internet]. 2022 [参照2024年1月7日]. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=sUynUMYCO5I>
- 3) Newton RA. Validity of the multi-directional reach test: A practical measure for limits of stability in older adults. J Gerontol. 2001;56（4）:248-252.
- 4) 開発学人, 立川正真, 福井克也, 戸田晴貴. 擬似タッチパネルを用いた視覚探索課題中の上肢運動計測システムの開発. Paper presented at: 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会（SI2023）; pp3089-3091.
- 5) 白木 春菜, 平井 達也. 施設入所高齢者の座位リーチ距離の見積もり誤差. 愛知県理学療法学会誌2013;25（2）: pp.56-60.