原著論文（実践論文）

マーカーレス動作分析システムを用いた客観的評価は体幹回旋動作の観察的評価と適合する

Objective evaluation using markerless motion capture system is compatible with observational assessment in trunk rotation exercise

諏訪部　和也 [(1), (2), (3)]・大津　卓也 [(2)]
Kazuya Suwabe，Takuya Otsu

Abstract

Gymnastics is widely popular as an exercise for health promotion and physical fitness improvement, particularly among older adults. Providing feedback to practitioners on movement quality and posture can enhance the benefits of gymnastics on physical and mental health. However, objective evaluation methods have not yet been developed. We aimed to gain insight into developing a practical evaluation system applicable to gymnastics practice settings using a markerless motion capture system. Twenty-four community-dwelling older adults performed a trunk rotation (twisting) exercise. We explored the kinematic parameters that predict observational assessments by exercise instructors related to trunk twisting, vertical trunk posture, and muscle relaxation involving minimal muscle tension. The results demonstrated that the explored kinematic parameters could accurately predict the observational assessment of trunk twisting and muscle relaxation. These findings can boost motivation for gymnastics practice and support physical and mental health promotion through the development of a motion capture-based evaluation and feedback system.

Keywords: markerless motion capture system, trunk twisting, posture, observational assessment

1．緒言

健康づくりや体力向上を目指す運動（エクササイズ）としての体操は，日本で広く親しまれている．スポーツ庁が実施する「スポーツの実施状況等に関する世論調査」によると，調査が開始された 2016 年以降，体操はウォーキングに次いで実践者の多い運動・スポーツ種目として毎年上位に位置している．特に，70 代女性の体操の実施率は 26.5％であり（スポーツ庁，2023），高齢者にとって身近な運動のひとつであると言える．

体操は，動き方や姿勢の違いによって運動強度や筋発揮，柔軟性などの体力要素に対する効果に差が生じる（石井ら，2014；岡，1986）．そのため，心身の健康に対してより効果的な体操実践のためには，実践者が自らの動きに注意を向け，理解し，改善する必要があるが，特に

（1）流通経済大学スポーツ健康科学部　Faculty of Health and Sport Sciences, Ryutsu Keizai University
（2）筑波大学体育系　Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba
（3）筑波大学サイバニクス研究センター　Center for Cybernics Research, University of Tsukuba

初心者にとってこれは容易ではない．例えば，体幹の回旋動作（体をねじる運動）を例にとると，自ら体幹がどの程度捻れているかを把握することは難しい．また，自分ではまっすぐに立ち，鉛直軸を中心に回旋しているつもりでも，背中が丸まっていたり重心が後ろに偏っていたりすることは珍しいことではない．さらに，過度な「力み」は全身的・律動的な動きを妨げる要因になり得るが，「力み」を自覚し克服することは難しい課題である（木塚，2008）．より良い体操の実践には，動きに関する適切な指導が有効であるが（山崎・板垣，1990），現状では評価基準やフィードバック方法は指導者の力量に委ねられていることに加え，集団指導においてはきめ細かな個別指導は困難である．さらに，日常的な実践においては，指導者によるフィードバックを得ることは難しい．これらの問題に対し，当山（2021, p.35）はラジオ体操の動作評価尺度を開発したが，「評価に時間を要してしまうことや専門性が高い動作評価観点であることは実際の指導現場で活かすためのツールとしては課題が残る」としており，誰もが簡便に活用できる評価・フィードバックシステムの開発が望まれる．

ヒトや物体の動きをデジタル化するモーションキャプチャ技術は，近年飛躍的に発達している．スポーツバイオメカニクス研究における動作分析法のゴールドスタンダードは，VICON に代表される光学式モーションキャプチャであるが，体表面の基準点に反射マーカーを貼付するため時間的・身体的な制約が大きいこと，複数台の高額なカメラが必要なことなどから体操の実践現場での活用は難しかった．これに対し，安価なカメラで身体にマーカーを貼付することなく測定可能なマーカーレス・モーションキャプチャは，現場に応用可能な技術として注目されている（Mündermann et al., 2006; Corazza et al., 2006）．例えば，マーカーレス・モーションキャプチャを用いて歩行や走行，スクワット動作の二次元動作解析を行った研究では，光学式モーションキャプチャシステム（VICON）との比較から矢状面での関節可動域において妥当性が確認されている（Ota et al., 2020; Ota et al., 2021）．歩行や垂直跳び，ボール投げを対象にカメラ５台による三次元解析を行った研究では，全試行の 80％で光学式モーションキャプチャシステムとの誤差 30mm 以下の精度で測定できることが報告されている（Nakano et al., 2020）．これらの技術は既にリハビリテーションの現場や健康科学で応用されている一方（春名ら，2019; Sandau et al., 2014），スポーツ場面での活用には課題も指摘されている（Seethapathi et al., 2019）．特に，体操のような三次元的な動きでは測定精度に限界があり，体幹の回旋のような水平面での運動を前後左右方向からの撮影のみで捉えることは難しい（石本ら，2019）．

本研究では，既に妥当性が確認され実用化が進んでいる二次元的な動きではなく，体操で多く用いられる三次元的な動きを分析対象とし，体幹の回旋動作を題材とした．体幹回旋動作は，体操における代表的な運動であり，「体をねじる運動」としてラジオ体操でも取り入れられている（当山，2021）．体幹部の動的及び静的なストレッチングは，心身の健康に有益であることが示されている．例えば，大きなボール（G ボール）を用いて体幹の回旋を含む体幹部のストレッチングを 30 分間行うと，いわゆる「血管年齢」の指標である頚動脈－大腿動脈間脈波伝播速度（cfPWV）が一過性に低下し，心血管機能改善への効果が示唆されている（Ikebe et al., 2022）．また，体幹の回旋動作を含む「スローエアロビック®」を 10 分間実践することにより，体幹部の柔軟性だけでなく，気分や認知機能を高める効果が報告されている（征矢，2018; Hyodo et al., 2021; Hyodo et al., 2019; 諏訪部，2023）．光学式モーションキャプチャ（VICON）を用いて体操の体幹回旋動作のバイオメカニクス的分析を行った研究報告では，様々な条件での検討から体幹のねじれ角度の増大に適した指導法についての示唆が得られた一方，単にねじれ角度だけでなく，軸ブレやふらつき，脱力などの質的な面からの検討の必要性も指摘された（山崎・板垣，1990）．

本研究は，より良い体操実践を支援するマーカーレスモーションキャプチャを用いた体操動作の評価・フィードバックシステムの開発につながる基礎的な知見を得るため，体幹の回旋動作を題材に，体幹のねじれ，体幹が鉛直に近い姿勢，過度な力みがないこと（脱力）の三つの観点について，体操指導者による観察的評価と動作指標の適合性を検証することを目的とした．

２．方法

２－１．研究対象者

地域のコミュニティセンターにて定期的（月２回）に実施する体操教室に参加する地域在住の高齢者 24 名（男性 6 名，女性 18 名）を対象とした．平均年齢は 71.8 ± 5.7（62 − 84）歳であった．教室への参加歴は，すべての対象者において6ヶ月程度であった．一般社団法人体育・スポーツ・健康学会の研究倫理要領を遵守し，研究対象者には事前に，研究目的で映像及びデータを利用する場合があること，その際には匿名化した上でデータを分析し個人が特定されない形で結果を公表すること，研究への協力は任意であり協力しなかった場合にも一切の不利益が生じないことを口頭及び書面で説明し，同意書の提出をもって同意を得た．

２－２．運動課題

左右の重心移動を伴う体幹回旋動作を運動課題とした．左右一往復の回旋を 1 周期とし，これを連続して繰り返し行わせた．両腕は体幹回旋に合わせて肩よりも低い位置で回旋させ，回旋側の踵を上げることとした（図 1）．鉛直軸を中心に体を回転すること，腕はリラックスして無駄な力を入れずに行うことを練習の際に注意点として伝えた．研究対象者は体操教室において本運動課題を十分に練習し，規定のテンポに合わせて回旋動作を行えることを確認した上で撮影を行った．撮影時には見本は提示せず，注意点の教示も行わなかった．90 拍 / 分のテンポのドラム音に合わせて，4 拍で回旋 1 周期のテンポで約 20 秒間行わせた．

２－３．動画撮影及び分析

撮影では，2 台のカメラ（Logitech HD Pro Webcam BRIO C 1000eR）をカメラ角度 90 度，カメラと立ち位置の距離 2.5 m に設置した（図 2A）．対象者の全身が写るように撮影範囲を設定した．Open Broadcaster Software（OBS）を用いて 2 台のカメラ画像を一つの画像として録画し，時系列を揃えた．その後，動画編集ソフトウエア Final Cut pro を用いて 2 台のカメラの動画をそれぞれ別の二つのファイルに分割し，動画分析に用いた．なお，フレームレートは 24fps であり，動作が安定して行われた 300 フレーム（12.5 秒間）を分析区間とした．

骨格点の 3 次元座標の推定には，VisionPose（ネクストシステム社）を用いた．このシステムは，画像情報から全身の骨格上の座標点全 30 点をマーカーレスで推定可能であり，立位での膝関節角度において再現性と妥当性が確認されている（等々力ら，2023）．本研究では，2 台のカメラから 3 次元で座標点を推定した（図 2B）．

ねじれの動作指標として，両肩を結んだ線と両股関節を結んだ線の回旋角度の差（ねじれ角度）を算出した．各周期の回旋角度の極大値（左回旋時）及び極小値（右回旋時）の差（極大値 − 極小値）を 1 周期のねじれ角度として算出し，分析区間の平均値を算出した（図 3A）．この値が大きいことは，体幹部（肩から骨盤）が大きくねじれていることを示す．

姿勢の動作指標として，両肩の中点と両股関節の中点を結んだ線と鉛直軸が 3 次元的になす角度（たおれ角度）を算出し，分析区間全体の平均値を算出した（図 3B）．この値が大きいこ

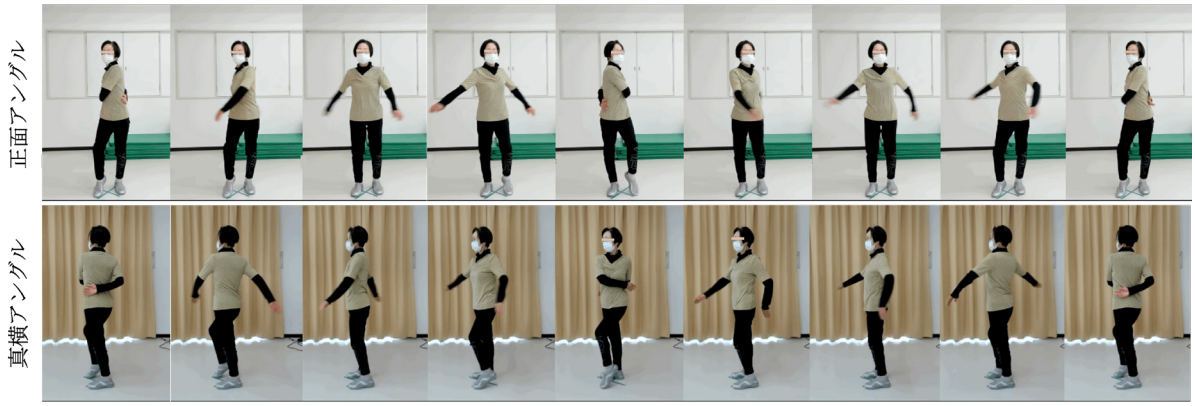

図 1　運動課題（体幹の回旋動作）

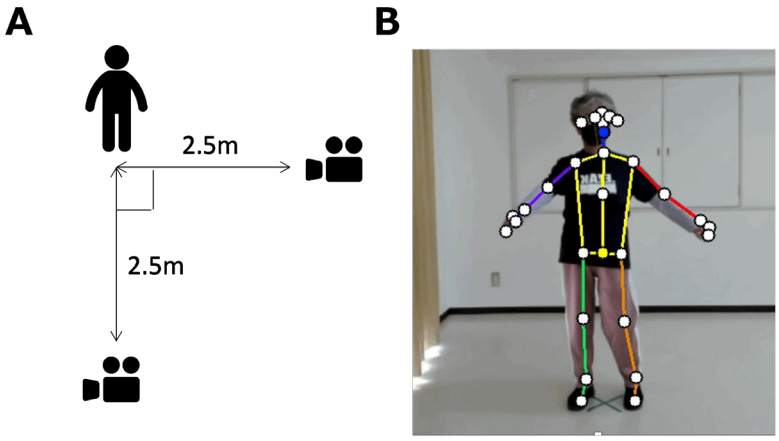

図２　A）撮影カメラの配置，B）3D 解析の例

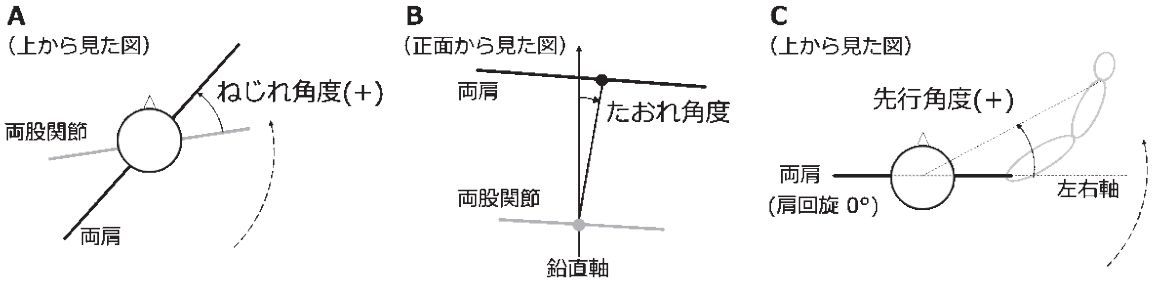

図３　動作指標の図解．A）ねじれ角度，B）たおれ角度，C）先行角度

とは，体幹の長軸が鉛直軸から外れていること，すなわちまっすぐな姿勢からの逸脱の程度が大きいことを示す．

脱力の動作指標について，回旋中の回旋方向と反側の手（遅れてくる手）の位置に着目した．脱力して実施できている場合，肩と手首が同時，あるいは肩よりも手首が遅れて進行方向に回旋し，逆に肩や腕に過度な「力み」がある場合，肩よりも手首が先行して進行方向に回旋すると考えられた．そこで，反時計回り回旋時における両肩回旋角度の絶対値が最小時点（正面を向いた時点）での右手首と両肩中点を結んだ線分が左右軸となす角度（先行角度）の平均値を算出した（図 3C）．この値が大きいこと（正であること）は手の回旋が肩の回旋よりも先行していること，この値が小さい（負であること）は手の回旋が肩の回旋よりも遅れていることを示す．

なお，外れ値の処理や欠損値の補完などの処理は行わなかった．

２－４．運動指導者による評価

評価者は，５年以上の体操指導歴を有する体操指導の専門家５名とした．評価者は，２台のカメラによる動画（正面アングル・真横アングル）を同時に視聴した．ねじれ，姿勢，脱力の三つの観点について，「体幹部（肩から骨盤）をしっかりと捻ることができている」，「まっすぐに立ち，鉛直軸を中心に回旋できている」，「無駄な力が入らずリラックスして動けている」の各項目を設定し，1：「全く当てはまらない」から 5：「よく当てはまる」の５段階でそれぞれ評価した．評価者には１から５までを幅広く使って評価するように指示した．評価者内信頼性検討のため，評価は別日に２回実施した．

２－５．統計解析

当山（2021）を参考に，評価者内及び評価者間信頼性の検討には，κ 係数及び信頼性係数（Cronbach's α）をそれぞれ用いた．

まず，同一評価者が別日に２回実施した評価に対する評価者内信頼性を検討するため，２値の一致度を表す κ 係数（重み付け κ）を三つの観点それぞれについて算出し，0.6（Substantial）以上の高い信頼性が得られた評価者の値をその後の分析に用いた．続いて，評価者内信頼性

が認められた評価得点の評価者間信頼性を検討するため，信頼性係数（Cronbach's α）を算出し，0.8 以上を高い信頼性の基準とした．その後，各評価者の平均値を算出し，評価得点とした．

指導者による評価に対する動作指標の適合度を評価するため，評価得点を独立変数，画像分析から得られた各動作指標を従属変数として回帰分析を行い，回帰係数及び決定係数（R^2）を算出した．統計解析には，SPSS（ver.26）を用い，有意水準は 5%とした．

３．結果

３－１．評価得点の信頼性検証

評価者内及び評価者間の信頼性を検証した結果を表 1 に示す．まず，同一評価者が別日に 2 回実施した評価者内信頼性について，ねじれでは，5 名の評価者のうち κ 係数が 0.6 未満の評価者が 2 名認められた．したがって，評価者 C と評価者 E を除外した 3 名の得点を評価者内信頼性が担保された評価得点としてその後の分析に用いた．姿勢では，5 名中 1 名の評価者で κ 係数が 0.6 未満であった．したがって，評価者 E を除外した 4 名の得点を評価者内信頼性が担保された評価得点としてその後の分析に用いた．脱力では，κ 係数が 0.6 未満の者は認められなかった．したがって，評価者 5 名の得点を評価者内信頼性が担保された評価得点としてその後の分析に用いた．

次に，評価者内信頼性が認められた評価者の 2 回分の平均値を算出し，評価者間の信頼性を確認したところ，ねじれ，姿勢，脱力のいずれにおいても，α 係数は 0.8 以上であり，高い信頼性が確認された．したがって，ねじれでは評価者 A，B，D の 3 名，姿勢では評価者 A，B，C，D の 4 名，脱力では A，B，C，D，E の 5 名の得点の平均値をそれぞれ評価得点として用いた．

３－２．評価得点に対する動作指標の適合度の検討

各評価得点に対する動作指標の適合度を回帰分析により検討した．ねじれでは，回帰係数は 13.02 で有意であった（$p < 0.05$）．決定係数は $R^2 = 0.52$ であり，良い精度であった（図 4A）．姿勢では，回帰係数は -1.17 で有意であった（$p < 0.05$）．決定係数は $R^2 = 0.36$ であり，精度の高い結果は得られなかった（図 4B）．脱力では，回帰係数は 9.00 で有意であった（$p < 0.05$）．決定係数は $R^2 = 0.51$ であり，良い精度であった（図 4C）．

４．考察

本研究は，日常生活における体操実践の場で活用できる動作の評価・フィードバックシステムの開発を念頭に，体操指導者の観察的評価とマーカーレスモーションキャプチャの動作指標の適合性を検証することを目的とした．体幹の回旋動作を題材に，体幹のねじれ，体幹が鉛直に近い姿勢，過度な力みがないこと（脱力）の三つの観点から検討した結果，ねじれと脱力については，動作指標から指導者による観察的評価を精度良く予測することができた．この知見は，客観的な評価指標として，日常生活における体操実践や体操コーチングに役立てることができる．

表 1　評価者内及び評価者間信頼性

			ひねり	姿勢	脱力
評価者内信頼性	**κ 係数（重み付け κ）**	評価者A	0.71	0.80	0.88
		評価者B	0.63	0.66	0.74
		評価者C	0.59	0.69	0.78
		評価者D	0.91	0.88	0.92
		評価者E	0.52	0.49	0.79
評価者間信頼性	**信頼性係数（Cronbach's α）**		0.91	0.92	0.96

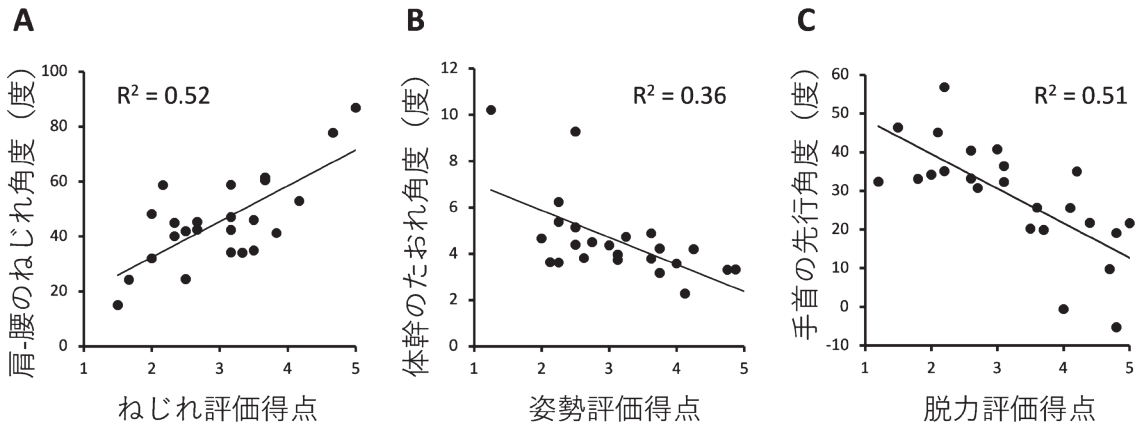

図 4　回帰分析の結果．A）ねじれ，B）姿勢，C）脱力

本研究では，三つの観点から動きの評価法を検討した．一つ目の観点は，体幹回旋動作の主なねらいである，体幹部をねじることができているかであった．両肩と両股関節の各回旋角度の差として算出したねじれ角度は，指導者による「体幹部（肩から骨盤）をしっかりと捻ることができている」の評価得点とよく適合していた．本研究で得られたねじれ角度の平均値は約 45 度であり，これは大学生などを対象に光学式モーションキャプチャ（VICON）を用いて行われた先行研究の結果と比べて小さかった（山崎・板垣 1990）．これには，対象者の年代の違いに加え，実施条件の違いが影響していると考えられる．本研究は回旋側の踵を上げ，規定のテンポで実施させたのに対し，山崎・板垣（1990）は回旋と反側の踵を上げ，「ねじるリズムは被験者のやりやすいように任意で」行わせたため，より大きくねじることができたと考えられる．

二つ目の観点は，体幹が鉛直に近い姿勢で実施できているかという観点である．体幹の回旋は，重心を通る鉛直軸を中心に肩や腕が水平面で回旋する運動であり，これをスムーズに実施するためには，体の長軸が鉛直方向にまっすぐな直立姿勢が必要となる．本研究では，「まっすぐに立ち，鉛直軸を中心に回旋できている」の観察的評価に対し，両肩と両股関節の各中点を結んだ線の鉛直軸に対する角度（たおれ角度）を動作指標として算出し，適合度を検討した．その結果，評価得点が高い者ほど体幹のたおれ角度が小さい（鉛直に近い）関係性が確認されたが，ねじれや脱力に比べて予測精度の高い結果は得られなかった．この要因には，本研究で用いた動作指標では，微細な変位や急な変位を熟練の体操指導者ほどの精度で検出できなかった可能性が考えられる．

三つ目の観点は，無駄な力が入らずリラックスして動けているかという観点である．体幹回旋では，過度な力みは効率的でスムーズな動きを妨げるだけでなく，体幹の回旋を制限する要因になり得る．また，滝沢・板垣（1992）は，「過度な緊張がなく身体各部位が鉛直に配列されていること」を正しい姿勢としており，良い姿勢を保つためにも過度な筋緊張を取り除くことが重要と考えられる．体幹回旋において，肩や腕の過度な「力み」がある場合，肩の回旋よりも腕の回旋が先行すると考えられるため，本研究では「力み」が大きいと評される者ほど肩よりも手首が先に進行方向に回旋すると仮説を立て，回旋方向と反側の手（遅れてくる手）の位置に着目した．そして，体幹が正面を向いた時点での手首の回旋角度（先行角度）と「無駄な力が入らずリラックスして動けている」の評価得点との関係を検討した．その結果，評価得点が低い人では先行角度が大きいこと，すなわち手が肩に先行して回旋していることがわかり，評価得点に対する予測精度も高かった．本研究では，脱力の評価において着目するポイントの具体的な指示を行っていないため，各評価者がどのような点に着目して評価したかは不明であるが，体幹の回旋に対する相対的な腕の回旋動態は，脱力を評価する際の着眼点として重要かもしれない．

本研究にはいくつかの限界点がある．まず，本研究はマーカーレスモーションキャプチャによる動作評価の現場への応用可能性を検討

することを目的としたため，VICON などの光学式モーションキャプチャとの比較からデータの妥当性の検討は行われなかった．体幹の回旋動作のような水平面での運動を少ないカメラ台数で捉えることは難しいことが指摘されており（石本ら，2019），本システムでも 3 次元座標の推定には一定程度の誤差が生じていたと考えられる．しかしながら，推定誤差が評価対象の変位を大きく下回る範囲であれば，現場での有用性が期待できる（春名ら，2019）．本システムにおいても，体幹のねじれや手首の先行のような大きな動きの評価には有用であり，現場への応用可能性が示された．今後，測定精度や妥当性の検証を通して，より精度の高い測定条件（対象者の衣服条件など）が見つかれば，推定精度の向上につながる可能性がある．また，今回の対象者は高齢者に限定されたため，他の対象者に適応するには注意が必要である．特に，子どもや若齢成人では可動域を含めた動作の特徴が異なる可能性があるため，新たな検討が必要と考えられる．

本研究で用いた動作分析システムは，専用カメラを必要とせず，Web カメラなど比較的安価なカメラで測定可能であり，さらにリアルタイムでの分析も可能である．本研究で指導者の観察的評価との適合性が確認された動作指標を用いることで，日常生活における実践や体操コーチングを支援するフィードバックシステムの開発が可能である．さらに，今後の画像分析技術向上によりカメラ 1 台による評価が可能となれば，より社会実装の可能性が高まる．また，近年新たに試みがなされているオンラインでの体操実践の場での活用も期待される（Hyodo et al., 2023）．今後は，フィードバックシステムの活用が動作の上達過程や運動継続率に好影響を与えることができるかを実証実験から明らかにすることで現場への実装を促すことができる．

5．結論

体操における体幹回旋動作を題材に，体幹のねじれ，体幹が鉛直に近い姿勢，過度な「力み」がないこと（脱力）の三つの観点について，体操指導者による観察的評価とマーカーレスモーションキャプチャの動作指標の適合性を検証した．その結果，姿勢については精度の高い指標は得られなかった一方，ねじれと脱力については指導者の観察的評価を精度良く予測できる動作指標を得ることができた．この知見は，日常での実践や指導現場で活用できる客観的な評価・フィードバックシステムの開発を通じて，健康に対する効果や運動継続のモチベーションを引き出す豊かな体操の実践に寄与することが期待される．

謝辞

本研究は公益財団法人スズキ財団 2021 年度研究助成を受けて実施された．

文献

Corazza, S., Mündermann, L., Chaudhari, A.M., Demattio, T.C., Cobelli, C., and Andriacchi, T.P. (2006) A markerless motion capture system to study musculoskeletal biomechanics: visual hull and simulated annealing approach. Ann. Bioomed. Eng., 34: 1019-1029, doi: 10.1007/s10439-006-9122-8.

春名弘一・昆恵介・稲垣潤・佐藤洋一郎（2019）マーカーレスモーションキャプチャによる三次元動作解析の応用例．日本義肢装具学会誌，35: 17-23, doi: 10.11267/jspo.35.17.

Hyodo, K., Kidokoro, T., Yamaguchi, D., Iida, M., Watanabe, Y., Ueno, A., Noda, T., Kawahara, K., Nishida, S., Kai, Y., and Arao, T. (2023) Feasibility, safety, enjoyment, and system usability of web-based aerobic dance exercise program in older adults: single-arm pilot study. JMIR Aging, 6: e39898.

Hyodo, K., Jindo, T., Suwabe, K., Soya, H., and Nagamatsu, T. (2019) Acute effects of light-intensity, slow-tempo aerobic dance exercise on mood and executive function in older adults. Bull. Phys. Fit. Res. Inst., 117: 8-16, doi: 10.20793/tairyokukenkyu.117.0_8.

Hyodo, K., Suwabe, K., Yamaguchi, D., Soya, H., and Arao, T. (2021) Comparison between the effects of continuous and intermittent light-intensity aerobic dance exercise on mood and executive functions in older adults. Front. Aging Neurosci. 13: 723243, doi: 10.3389/fnagi.2021.723243.

Ikebe, H., Takiuchi, S., Oi, N., Takayanagi, Y., Makino, A., Itoh, M., Matsumoto, N., Ishido, M., Nakamura, T., and Nishiwaki, M. (2022) Effects of trunk stretching using an exercise ball on central arterial stiffness and carotid arterial compliance. Eur. J. Appl. Physiol., 122: 1205-1216, doi: 10.1007/s00421-022-04912-8.

石井望務・庄司達朗・森崎貴博・室岡和樹・今野由将・江口泰正・太田雅規・大和浩（2014）心拍数から検討したラジオ体操の身体活動強度－「だらだら」と「きびきび」の違い－．産業医科大学雑誌，36: 91.

石本明生・本多信夫・足立和隆（2019）マーカーレス３次元動作計測システムの改善．人間生活工学，55: 2G3-5.
木塚朝博（2008）力の抜きどころと身体のコントロール．体育の科学，58: 43-48.
Mündermann, L., Corazza1, S., and Andriacchi, T.P. (2006) The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. J. Neuroeng. Rehabil., 3: 6, doi: 10.1186/1743-0003-3-6.
Nakano, N., Sakura, T., Ueda, K., Omura, L., Kimura, A., Iino, Y., Fukashiro, S., and Yoshioka, S. (2020) Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose with multiple video cameras. Front. Sports Act. Living, 2: 50, doi: 10.3389/fspor.2020.00050.
岡秀郎（1986）ラジオ体操第１における脚屈伸運動の筋電図的一考察－下肢二関節筋群の活動様式を中心として－．兵庫教育大学研究紀要，第３分冊，自然系教育・生活・健康系教育，7: 175-185.
Ota, M., Tateuchi, H., Hashiguchi, T., and Ichihashi, N. (2021) Verification of validity of gait analysis systems during treadmill walking and running using human pose tracking algorithm. Gait & Posture, 85: 290-297, doi: 10.1016/j.gaitpost.2021.02.006.
Ota, M., Tateuchi, H., Hashiguchi, T., Kato, T., Ogino, Y., Yamagata, M., and Ichihashi, N. (2020) Verification of reliability and validity of motion analysis systems during bilateral squat using human pose tracking algorithm. Gait & Posture, 80: 62-67, doi: 10.1016/j.gaitpost. 2020.05.027.
Sandau, M., Koblauch, H., Moeslund, T.B., Aanæs, H., Alkjær, T., and Simonsen, E.B. (2014) Markerless motion capture can provide reliable 3D gait kinematics in the sagittal and frontal plane. J. Med. Eng. Phy., 36: 1168-1175, 10.1016/j.medengphy.2014.07.007.
Seethapathi, N., Wang, S., Saluja, R., Blohm, G., and Kording, K. (2019) Movement science needs different pose tracking algorithms. arXiv, 1907.10226, doi: 10.48550/arXiv.1907.10226.
スポーツ庁（2023）令和４年度スポーツの実施状況等に関する世論調査．https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/toukei/chousa04/sports/1402342.htm（参照日：2025 年 3 月 21 日）
諏訪部和也（2023）今すぐ実践！動脈スティフネス運動プログラム．体育の科学，73: 127-132.
征矢英昭（2018）脳フィットネスを高めるスローエアロビック．NHK 出版.
滝沢かほる・板垣了平（1992）体操における姿勢教育について．日本体育学会大会号，43B (0), 695.
等々力賢輔・甲斐義浩・寺尾純・西尾匠史・望月晴貴・村田伸（2023）マーカーレスモーションキャプチャを用いた膝関節姿勢推定の再現性と妥当性の検証．ヘルスプロモーション理学療法研究，13: 7-11, doi: 10.9759/hppt.13.7.
当山倫子（2021）ラジオ体操第１動作評価尺度の開発．体操研究，15: 12-35.
山崎綾子・板垣了平（1990）体操におけるねじりに関する研究．スポーツ方法学研究，6: 71-79, doi: 10.24776/jcoaching.6.1_71.