

## 歩行計測システムによる歩行の可視化と治療効果の比較 Gait measurement system for visualization and comparison of treatment effects

晒野舞<sup>(1)</sup> 小川賀代<sup>(1)</sup> 見目智紀<sup>(2)</sup> 三枝亮<sup>(3)</sup>  
Mai Sarashino Kayo Ogawa Tomoki Kenmoku Ryo Saegusa

### 1. はじめに

日本社会の高齢化は急速に進み、高齢者率は 28.8%に達している。これに伴い介護を必要とする人が増加し、健康寿命の延伸や高齢者の自立支援が重要視されている<sup>[1][2]</sup>。特に、転倒や骨折、関節疾患などの運動器障害は要支援・要介護の主要因である。日本整形外科学会の調査でも、運動器障害が原因となるケースが大半を占めていることが図 1 より分かる<sup>[3]</sup>。

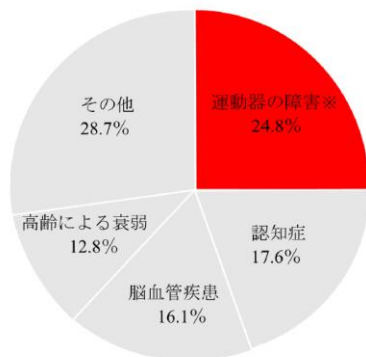


図 1: 要支援・要介護になった原因の割合<sup>[3]</sup>

運動器障害による移動機能の低下は「ロコモティブシンドローム (以下、ロコモ)」と呼ばれ、進行すると介護リスクが高まる。ロコモは平成 19 年に日本整形外科学会によって提唱されたが、高齢化が急激に進む我が国の現状において重要度が増している。ロコモ対策として、高齢者の生活機能を早期に評価し、転倒や骨折の予兆を把握する必要がある。

臨床現場ではロコモの進行評価の一つとして「Timed Up & Go Test (TUG Test)」が臨床で利用されているが、従来は主観的な評価に依存しており、定量的な判断が難しかった。

TUG Test の自動化を目指した歩行の先行研究として、「複数のセンサを利用した脚の追跡・移動軌跡」<sup>[4]</sup>や「イ

ンソール型計測装置とレーザセンサを利用した脚の追跡・床反力の測定」<sup>[5]</sup>などの研究がある。これらの手法ではカルマンフィルタにより、TUG Test を行う被験者の脚の追跡が可能である。従来の TUG Test に関連した研究においては、センサなどを利用することによる脚周りの解析を行う研究が主流になっており、骨格や姿勢など体全体のデータを利用する研究は少ない。

本研究は、医療現場での実用を目的に TUG Test の自動計測システムを開発し、歩行動作を映像化・評価する手法を提案する。対象は骨系統疾患患者で、衝撃波療法の前後に複数回 TUG Test を実施し、歩行機能の変化を定量評価する。システムは深度カメラ・測域センサ・座面センサを用い、前研究で提案した動作区分化アルゴリズムにより骨格・重心軌跡・姿勢変動を解析する。また、歩行時の隠れ領域を補完し、全周囲情報を統合した三面映像を出力することで、計測対象者自身が歩行動作を理解・評価できる仕組みを構築した。

### 2. 歩行計測システム

本研究で提案する歩行計測システムは、矢状面上に配置した測域センサ (UTM-30LX) と深度カメラ (Astra Pro) により対象者の歩行動作を計測する。測域センサは水平面上の距離を測定し、物体の 2 次元位置座標を取得する。一方、深度カメラは RGB 画像と深度画像を組み合わせることで 3 次元点群を生成し、対象物と背景を区別する。視野角は、測域センサが 270 度、深度カメラが水平 60 度・垂直 49.5 度、測定距離は 0.6~8.0m であり、実験で使用される計測範囲をカバーしている。また、椅子上に設置した試作の座面センサにより、フォトリンジスタを用いて照度変化から起立・着座のタイミングを検出する。システム構成および TUG Test の歩行経路を図 2 に示す。本研究では、一般的な TUG Test と同様の動線を用いる。

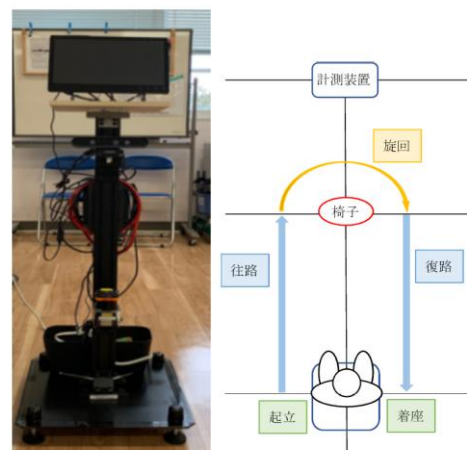


図 2: 歩行計測システム(左)  
TUG Test 歩行経路(右)

(1) 日本女子大学理学部

Faculty of Science, Japan Women's University,  
Mejirodai 2-8-1, Bunkyo, Tokyo, 112-8681, Japan

(2) 北里大学病院リハビリテーション科北里大学医学部整形外科学

Rehabilitation Department, Kitasato University Hospital,  
Department of Orthopedic Surgery, Kitasato University  
School of Medicine

Kitasato 1-15-1, Minami, Sagamihara, Kanagawa,  
252-0375, Japan

(3) 神奈川工科大学情報学部

Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of  
Technology, Shimoogino 1030, Atsugi, 243-0203, Japan

## 2.1 歩行動作の計測表示

本システムでは、計測開始時に合図を行い、動作を起立・往路・旋回・復路・着座の 5 つに区分する。その後、各要素動作に対して骨格点を検出し、可視化を行う。表示画面は図 3 に示す。図 3 の表示画面は三面図で構成され、深度カメラと測域センサからの情報を統合している。左上が前方画像、右上が深度画像、左下が前方の深度画像、右下が側面の深度画像である。上面図では中心・左右の足・最近接部が、側面図では最長部がマークされている。対象者はバウンディングボックスで囲まれ、カルマンフィルタにより追跡されるため、補助者の混入や周囲ノイズの影響を排除して計測可能である。

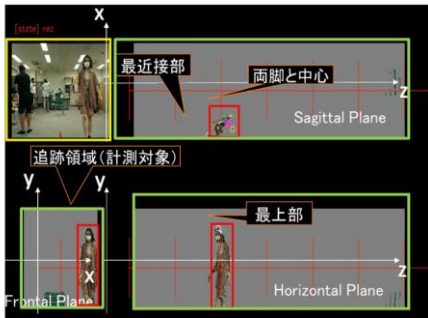


図 3: 表示画面

## 2.2 骨格点と姿勢の推定

その際に、歩行動作中の隠れ領域を補完し、可視化を行う。方法としては、対象者の全周囲情報をもとに身体部位の隠れ領域を補完し、正面・側面・上面の視点から再構成して映像として出力する。まず、骨格点の検出は、深度カメラの RGB 画像と深度画像を統合して得られる 3 次元テクスチャから行う。このテクスチャは、画素  $(i, j)$  の成分ごとに  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, r_{ij}, g_{ij}, b_{ij})$  の 6 成分を持ち、位置座標と RGB 輝度を表す。

MediaPipe を用いて画像上の骨格点の位置  $(i, j)$  を検出し、その位置に対応する成分から三次元座標  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  を取得する。これらの骨格点は、ベクトルデータ  $\{(x_s, y_s, z_s)\}_{s=1, \dots, n}$  として表現され、骨格点数は  $n=33$  である。これらの骨格点を結んで 3 次元骨格を構成し、両骨盤の中間ベクトルを用いた姿勢軌跡・骨盤軌跡の可視化を行う。式(1)より算出し、出力された図が図 4 である。ただし、 $w_s$ 、 $x_s$  は骨格点  $s$  の局所重量と位置座標を表す。

$$x_{cog} = \frac{\sum_{s=0}^n w_s x_s}{\sum_{s=0}^n w_s} \quad (1)$$

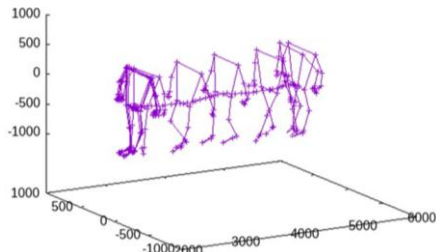


図 4: 歩行姿勢・骨盤の軌跡

また、歩行時の体の傾き角度を可視化も行った。両肩・両骨盤の骨格点の midpoint を結んだ線分の鉛直方向に対する角度  $\theta$  とし算出した。角度  $\theta$  の算出は以下の式(2)を利用した。

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{h \cdot g}{|h| \cdot |g|} \right) \quad (2)$$

図 5 では、赤線が両肩と両骨盤の midpoint を結ぶ体幹軸を示す。オレンジ棒 ( $xz$  平面) は上面から体の向きを、水色棒 ( $yz$  平面) は側面から前後動作を、黄緑棒 ( $xy$  平面) は正面から左右動作を確認できる。3 次元表示により、2 次元では困難だった傾き方向の可視化が可能となる。

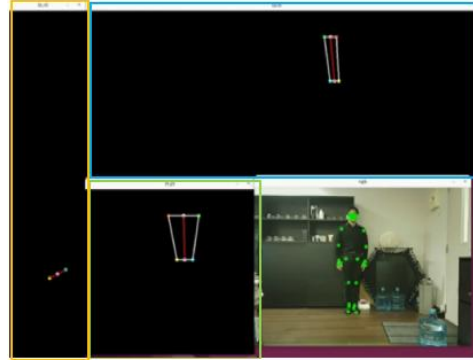


図 5: 歩行時の体の傾きの可視化

## 2.3 隠れ領域の可視化

前記のような歩行分析を行うための課題として、深度カメラの計測における隠れ領域 (オクルージョン) の問題がある。隠れ領域の存在は歩行動作の理解を妨げている。カメラ視野の制限や対象者自身の遮蔽により、全体像を一度に取得するのは困難である。本研究では、計測対象者の全周囲情報を統合し、隠れ領域を補完・再構成して正面・側面・上面の視点で映像化する。以下の手順によって可視化する。

<隠れ領域の可視化アルゴリズム>

- ・手順(1) 計測対象者の領域推定  
対象者の点群を歩行経路に沿った直方体領域内から抽出する。点群密度から対象者を特定し、最小直方体で囲む。
- ・手順(2) 計測対象者の姿勢推定  
腰高付近の点群を抽出し、2 次元分布を固有値分解して姿勢方向を推定。主成分を骨盤方向、直交する方向を前後とする。
- ・手順(3) 計測対象者の隠れ領域の補完  
骨盤方向を主軸とした楕円を体格に合わせて描画し、各時刻のフレームに重ねて隠れ領域を補完する。

## 3. アルゴリズムの検証

隠れ領域の可視化アルゴリズムを実装し、実時間での動作処理を確認した。以下に各要素図をそれぞれ示す。

図 6(a) は、計測対象者に属する点群を示す。白円は進行方向に対する点群の位置を表す。計算処理をリアルタイムに行うため、点群の密度は一律に減数されている。図 6(b) は、図 6(a) の点群の隣接関係を評価して結合した点群を表す。図 6(c)(d)(e) は、図 6(b) の点群を代表点群とし、その周辺情報を用いて 3 次元再構成した点群である。赤棒は代表

点群が占有する空間領域を示す。図 6(f)は、腰の高さより抽出された点群に関する固有値展開により得られた進行方向を緑色の線分で表す。また、進行方向に対して得られる胴回りの概形を青色の楕円で表す。なお、図 6(f)では、進行方向と胴回りを上面図に重ねて示しており、これらによって隠れ領域の概形と進行方向が可視化される。

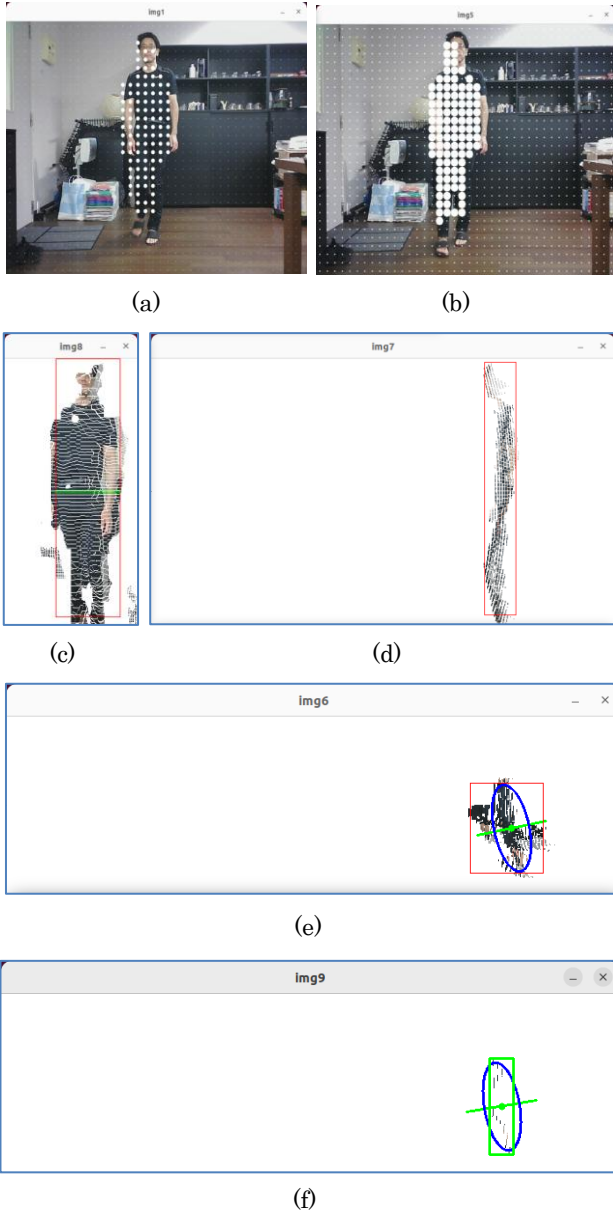


図 6: 隠れ領域の補完

## 4. 実証実験

### 4.1 被験者実験の計画

本研究では、骨系統疾患を有する被験者 1 名を対象として、提案する歩行計測システムによる実証実験を行った。被験者は医療機関において拡散型衝撃波療法を受けており、その前後における歩行機能の変化を TUG Test を通じて定量的に評価した。

実験は倫理審査委員会の承認を受けて実施された (承認番号: 20240823-05)。TUG Test の実施条件は、椅子から立ち上がり、3m 先の目印で折り返して再び着席するという標準的なものである。本システムでは、深度カメラ・測域センサ・座面センサを組み合わせ、起立から着座までの全体動作をセンサ統合により自動計測し、骨格・重心・姿勢角などを可視化・記録した。被験者には以下の 4 条件で TUG Test をそれぞれ 3 回ずつ実施してもらった。計測時実施条件を図 7 に示す。

- ・条件①: 治療前 (s03)
- ・条件②: 1 度目の治療直後 (s06)
- ・条件③: 2 度目の治療直後 (s09)
- ・条件④: 治療約 2 週間後 (s12)

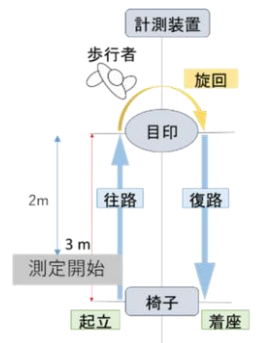
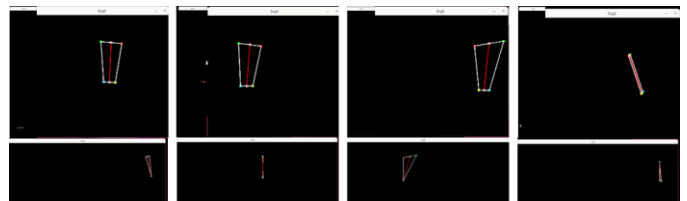


図 7: 計測時実施条件

図 8 に示す実験映像は、被験者が TUG Test を実施する様子をコマ送り形式で切り出したものである。図 8(a)は正面からの RGB 映像であり、被験者の動作全体の流れや身体の動きが視覚的に把握できる。一方、図 8(b)は深度カメラを用いて抽出された骨格情報に基づき、MediaPipe によって推定された骨格点が可視化されている。これにより、関節の動きや姿勢の変化を時間経過とともに追跡することが可能となる。動作フェーズの変化 (起立・歩行・旋回・着座) が明瞭に区別される。本システムの可視化機能により、治療前後の歩行動作を視覚的かつ客観的に比較・評価するための有効な資料となる。



(a) 実験時の正面図



(b) 実験時の骨格可視化

図 8: 条件①(s03)の実験映像コマ送りの様子

## 4.2 評価指標と結果

評価指標として、TUG Test に要した時間、および骨格データから算出される正中線の鉛直方向とのなす角度 ( $\theta$ ) を用いた。 $\theta$  は、両肩および両骨盤点の midpoint を結んだ線分の傾斜角を指し、姿勢の安定性を評価する指標である。

図 9 に TUG Test に要した平均時間、表 1 に姿勢角度  $\theta$  の平均および分散を示す。

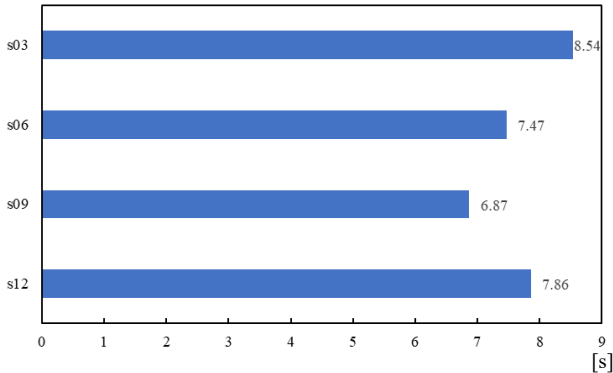


図 9: TUG Test に要した平均時間

図 9 より、治療後の条件②および③では、いずれも時間の短縮と姿勢角の安定化が確認された。特に条件③では最短時間を記録し、歩行機能の向上が顕著に示された。一方で、条件④では測定日が別日であったことや外的要因の影響により、姿勢データに大きなノイズが見られた。

表 1: 姿勢角度  $\theta$  の平均および分散

条件	①	②	③	④
ラベル	s03	s06	s09	s12
平均 [s]	21.08398	18.19969	20.81044	42.61074
偏差	23.16811	17.59002	21.19532	31.921

表 1 より、セラピー 1 回目 (条件②) および 2 回目 (条件③) の後では、歩行中の  $\theta$  の変動が小さく、安定した歩行姿勢が維持されていたことが確認できる。一方、セラピー前 (条件①) では  $\theta$  の揺れ幅がやや大きく、歩行中の前後・左右の姿勢のばらつきが見られた。また、セラピー約 2 週間後 (条件④) の計測では、ノイズの影響により明確な傾向を示さなかった。各条件間の比較から、衝撃波療法が歩行機能に与える効果が数値として表れていることが確認された。特に姿勢角度の安定性に注目すると、治療後には傾きの変動が抑えられ、歩行時の身体バランスの維持が改善されたと考えられる。これにより、被験者のふらつきや不安定な動作が軽減され、より安定した歩行が可能になったことが示唆される。また、この変化は治療直後に顕著であり、短期間での機能回復の可能性を示す貴重な知見となる。

実証実験の結果から、提案システムは単に TUG Test の計測時間を得るだけでなく、歩行中の姿勢や動作の変化を三次元的に可視化できる点で有用であると考えられる。これにより、被験者自身や医療従事者が治療効果を視覚的に把握でき、今後のリハビリ計画への応用も期待される。

## 5. まとめ

本研究は医療現場で実用可能な歩行計測システム (TUG Test) における歩行動作に関する開発として、歩行動作時の隠れ領域を補完して可視化する方法を提案し、可視化・評価を行った。計測対象者の全周囲情報から身体部位の隠れ領域の補完を行い、正面・側面・上面の視点から再構成した歩行動作を映像として出力することで、歩行動作の把握や認識が向上し、フレイルの予防対策へと繋がっていくことが期待できる。

病院及びケア施設での利用を検討していることから、骨系統疾患患者を対象に実証実験を行った。衝撃波療法の前で複数回 TUG Test を実施した。

被験者実験のため、現在、倫理申請中である。実際にリハビリを行っている方に計測対象者となっていただき、実証実験を行っていく予定である。医療従事者の協力のもと、歩行動作の可視化情報を活用するためのプロトコルを作成する必要がある。今後は医療従事者と協力して可視化の有効性を検証し、手術前後の歩行機能の評価やリハビリ評価への応用を試みる。

提案手法は理学療法への臨床応用が期待される。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、貴重なお時間を割いて実証実験にご協力いただきました被験者の方に、深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 国立社会保障人口問題研究所, 日本の将来推計人口(平成 29 年推計), pp.3.
- [2] 内閣府, 平成 30 年版高齢社会白書(全体版) 第 1 章 高齢者の状況, 第 2 節 高齢期の暮らしの動向 2. 健康福祉(2)65 歳以上の者の介護.
- [3] 一般社団法人日本運動器科学会.
- [4] 萬礼忠, et al. "複数レーザレンジセンサを用いた高精度歩行計測システム (高齢者の Timed Up and Go 試験への適用)." 日本機械学会論文集 83.855 (2017): 17-00223.
- [5] 江口僚, 萬礼忠, and 高橋正樹. "インソールとレーザレンジセンサを用いたアクセシブルな歩行解析システム." Dynamics & Design Conference 2017. 一般社団法人日本機械学会, 2017.
- [6] 弦間美咲, 小川賀代, 三枝亮, 動作区分に基づく歩行計測と転倒リスクの評価, 情報処理学会第 84 回全国大会講演論文集, 松山, 5ZM-09, 3 月 3-5 日, 2023.
- [7] 須藤陸, 中島麻耶子, 小川賀代, 三枝亮, "光学センサの統合に基づく歩行機能の計測評価." 第 85 回全国大会講演論文集 2023.1 (2023): 985-986.
- [8] 橋立博幸, 内山靖. "地域在住高齢者における応用歩行予備能の有用性と生活機能との関連." 日本老年医学会雑誌 44.3 (2007): 367-374.
- [9] Beauchet, Olivier, et al. "Timed Up and Go test and risk of falls in older adults: a systematic review." The journal of nutrition, health & aging 15 (2011): 933-938.
- [10] Greene, Barry R., et al. "Frailty status can be accurately assessed using inertial sensors and the TUG test." Age and ageing 43.3 (2014): 406-411.
- [11] Han Feng1, Wenchao Ma2, Quankai Gao, Xianwei Zheng, Nan Xue1, Huijuan Xu, Stratified Avatar Generation from Sparse Observations, CVPR 2024: 153-163
- [12] R. Saegusa. Gait Measurement System Toward Robotic Rehabilitation of Locomotive Functions, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics (SMC2023), Maui, USA, October 1-4, 2023..