

隠れ領域の推定に基づく歩行動作の可視化 Visualization of waking motions based on hidden region estimation

晒野舞⁽¹⁾ 小川賀代⁽¹⁾ Arnuparp Cheammarerng⁽²⁾ 三枝亮⁽³⁾
Mai SARASHINO⁽¹⁾、Kayo OGAWA⁽¹⁾、Arnuparp Cheammarerng⁽²⁾、Ryo SAEGUSA⁽³⁾

1. はじめに

日本社会の少子高齢化は急速に進行しており、高齢者率は現在、28.8%に至っている。これは総人口の14.9%を占める割合である。高齢者率は下がることなく上がり続けていることが現状である。それに伴い、介護を必要とする人が増え続けている。平成12年には、介護保険制度が施行された。また、平均寿命が伸びていることにより、介護が必要な期間も長期化している。このような状況の中で、健康寿命の延伸・高齢者の自立支援は重要な意味を持つと考えられる。^{[1][2]} 現在、要支援・要介護状態となる原因として最も高い割合を占めている項目は、転倒・骨折や関節の病気などの運動器の故障である。ここでの運動器の障害とは、骨折転倒・関節疾患・脊髄損傷の合計である。日本整形外科学会がまとめた要支援・要介護になった原因の円グラフを図1に示す。^[3]

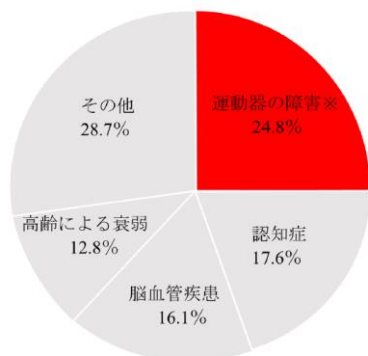


図 1: 要支援・要介護になった原因

運動器の障害によって、立ったり歩いたりするための身体能力(移動機能)が低下した状態は「ロコモティブシンドローム」(以下、ロコモ)と呼ばれる。ロコモが進行すると、介護リスクが高くなる。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。

しかし、ロコモへの対策を行うためには、高齢者の生活

(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) タマサート大学シリントーン国際工学部

Sirindhorn International Institute of Technology,
Thammasat University, Phahonyothin Rd, Tambon Khlong
Nung, Amphoe Khlong Luang, Chang Wat Pathum Thani
12120, Thailand

(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

機能を正しく評価し、早期に転倒・骨折の危険性を発見することが求められる。臨床現場ではロコモの進行評価の1つとして Timed Up& Go Test (TUG Test) が提案されている。

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」^[4]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」^[5]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。本研究では医療現場にて実用可能な歩行計測システムの開発を目的とし、TUG Test の自動計測を行い、要素動作ごとの特徴を算出し、歩行動作の状態を映像化し、計測対象者自身が評価する方法を検討する。本システムでは、深度カメラ・測域センサ・座面センサを用いて歩行機能を計測し評価する。前研究では要素動作を区分化するアルゴリズムを提案した。また、区分化された要素動作ごとに特徴を算出し、骨格検出を行い、重心軌跡や姿勢変動のパターンから歩行機能の評価を試みる。^{[6][7]} 本研究では、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する。システムとしては、計測対象者の全周囲情報から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を行い、歩行動作を映像として出力を行う。また、実際に計測対象者に再構成された自身の歩行動作の映像を提示することで、歩行動作の可視化による自身の歩行運動理解への効果について評価を行う。

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、同一の矢状面内に配置された測域センサと深度カメラを用いて計測対象者の歩行動作を計測する。測域センサ(北陽電機株式会社 UTM-30LX)では、歩行者の歩行パターンを計測を目的とし、水平面上の物体への距離を計測し、物体の2次元の位置座標の取得を行う。深度カメラ(Orbbec 社 Astra Pro)では RGB 画像と深度画像を計測し、3次元点群の位置座標とテクスチャを取得する。カメラと対象との距離を測り、距離の差から奥行きを含めた3次元画像のデータを取得することで、対象物と背景の区別がしやすくなり、顔認識や人体追跡などの精度をあげることを目的とする。測域センサの視野角は水平角 270[deg]、深度カメラの視野角は水平角 60.0[deg]、垂直角 49.5[deg]、深度の深度 0.60[m]~8.0[m]であり、本システムの計測領域は後述の実験の計測領域を内包する。計測時に用いる椅子には試作した座面センサを配置する。座面センサでは、歩行計測時、デバイスはフォトトランジスタで光の強弱を電圧に変換、マイコンの A/D コンバータで読み取ることで座面上の照度を計測し、起立と着座のタイミングを検出する。歩行計測システムと

TUG Test の歩行経路を図 2 に示す。本研究での歩行経路は、一般的な TUG Test の歩行経路に順ずるものとする。

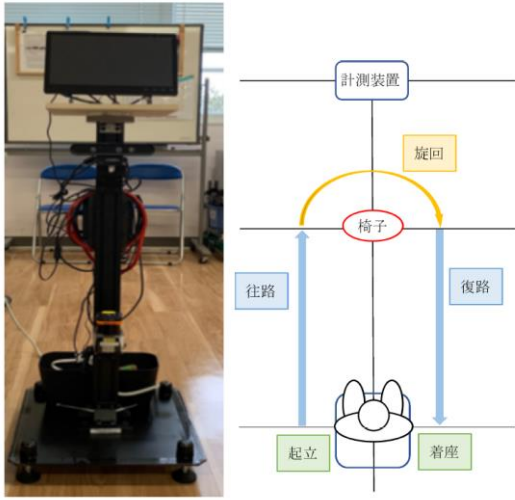


図 2: 歩行計測システム(左)
TUG Test 歩行経路(右)

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してカルマンフィルタで計測対象者の位置の追跡を開始し、計測対象者の最近接部と最上部の位置座標に基づいて歩行動作を起立・往路・旋回・復路・着座の 5 つの要素動作に区分化する。次に要素動作ごとに骨格点の検出を行い、可視化する。歩行計測システムのシステム構成と表示画面をそれぞれ図 3 と図 4 に示す。表示画面(図 4)は、三面図表示になっており、深度カメラ、測域センサから得られた情報を統合されている。表示画面の左上は計測対象者の前方画像で右上は上から見た深度画像、左下は前方の深度画像、右下は横から見た深度画像になっている。右上の上から見た深度画像では、計測対象者の中心、右足、左足、最近接部がマークされており、右下では最長部がマークされている。赤く囲われている部分が、計測システムのバウンディングボックスである。計測対象者をバウンディングボックスで囲みカルマンフィルタを用いて追跡することで、歩行補助者の除外や周囲のノイズに関係なく計測を行うことが可能となっている。

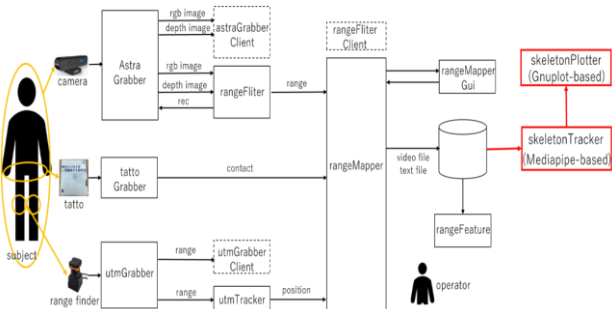


図 3: システム構成図

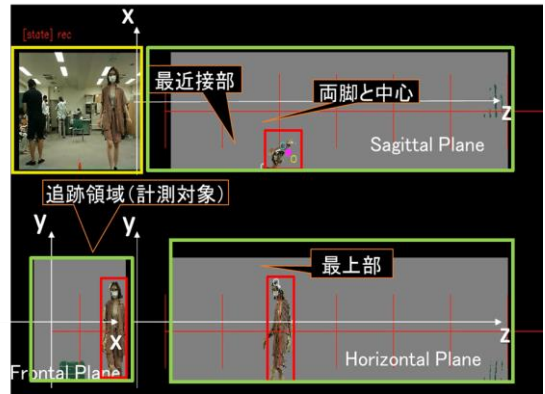


図 4: 歩行動作の表示画面

2.2 骨格点と姿勢の推定

その際に、歩行動作時に隠れ領域を補完をし、可視化する。方法として、計測対象者の全周囲情報から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を行い、歩行動作を映像として出力を行う。まず、骨格点の検出方法を示す。計測対象者の骨格は 3 次元テクスチャから検出される。3 次元テクスチャは深度カメラの RGB 画像と深度画像を統合して 3 次元直交座標に変換することで得られる 6 成分の画像データであり、画素 (i, j) の成分を $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}, r_{ij}, g_{ij}, b_{ij})$ と定義する。ただし、 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) と (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij}) はそれぞれ、画素 (i, j) にある像の 3 次元位置座標と RGB 輝度を表す。この画像データの RGB 輝度に関して、Google 社製の MediaPipe を用いて計測対象者の骨格点の画像上の位置 (i, j) を検出し、その画像上の位置の成分値から骨格点の 3 次元空間の位置座標 (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) を取得する。骨格点の位置座標は対応する骨格点番号をインデックスとするベクトルデータ $\{(x_s, y_s, z_s)\}_{s=1, \dots, n}$ として表現される。取得される骨格点数は $n = 33$ である。これらの骨格点を繋ぐことで、3 次元化を行う。前研究として、3 次元化の際に、両骨盤の中間ベクトルを利用し、歩行姿勢の軌跡・骨盤の軌跡の可視化を行った。式(1)より算出し、出力された図が図 5 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。

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

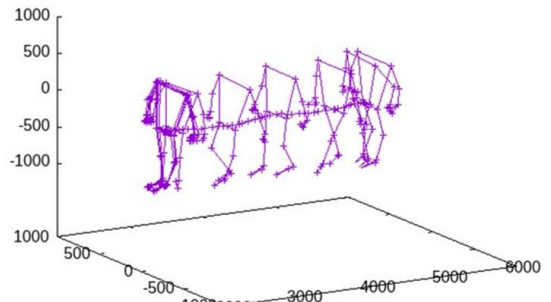


図 5: 歩行姿勢・骨盤の軌跡

また、歩行時の体の傾き角度を可視化も行った。両肩・両骨盤の骨格点の中点を結んだ線分の鉛直方向に対する角度 θ とし算出した。角度 θ 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 6 では、赤線が両肩・両骨盤の骨格点の中点を結んだ線分になっている。左のオレンジで囲まれている部分は、 xz 平面で、上からの映像で、体の向きを確かめることが可能である。右上の水色で囲まれている部分は yz 平面で、側面からの映像で前後の動きを確かめることが可能である。左の黄緑で囲まれている部分は xy 平面で、正面からの映像で左右の動きを確かめることが可能である。2次元では不可能であったが、3次元の可視化では傾きの方向も可視化が可能である。

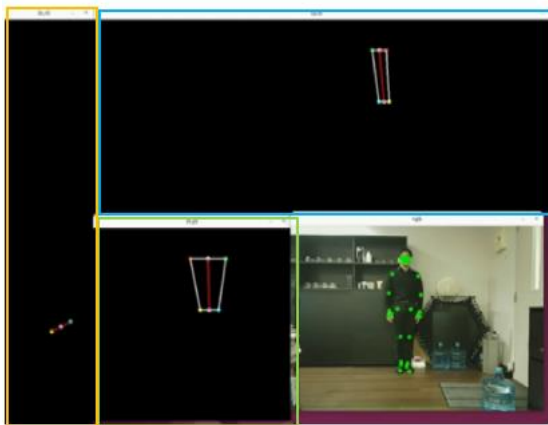


図 6: 歩行時の体の傾きの可視化

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。本稿では、身体部位の隠れ領域の補完についての方策を示す。通常、カメラの視野の制限が隠れ領域を発生させるが、仮に全方位型カメラを用いたとしても、被写体そのものが隠れ領域を発生させるため、一度に全体像を取得することはできない。このような問題の解決として、計測対象者の全周囲情報から補完していく。取得した全周囲情報を統合することで隠れ領域を補い、補完した全体像を正面・側面・上面の表画面に戻す。模式図を図 7 上図に示す。歩行者の異なる時刻のカメラ情報から、3次元ベクトルを取得できる。それらの情報を統合することで、図 7 の下図のようになる。人の周囲情報が集まっている状況になる。これらの情報を元データとして姿勢パラメータの確率分布を求め、画像上の人物の位置から3次元姿勢を推定することで隠れ領域を補完する。本稿では、隠れ領域の可視化にあたり、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
- 手順(2) 計測対象者の姿勢推定
- 手順(3) 計測対象者の隠れ領域の補完

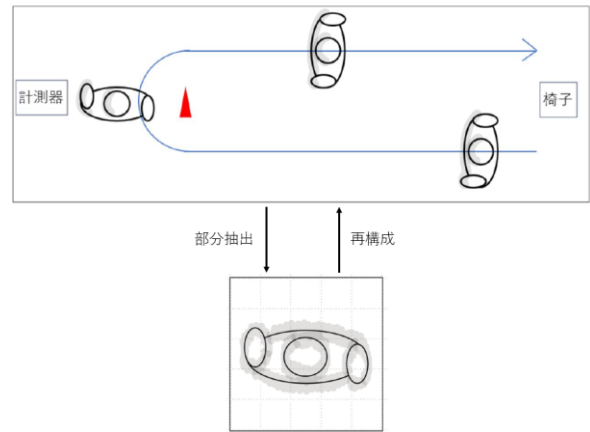


図 7: 隠れ領域の模式図

手順(1) では、簡単のために計測領域を歩行経路に沿った直方体と設定し、計測領域内を歩行する計測対象者の点群を囲む領域を推定する。往路と復路での進行方向は椅子と目印を結んだ直線と概ね平行であるため、この方向に対する奥行きを用いて点群を分離し、点数が最大の点群を計測対象者の点群とする。これらの点群を囲む最小な直方体をその時点での計測対象者の3次元領域とする。

手順(2)では、(1)で取得した3次元領域において、腰の高さ付近にある点群を抽出し、点群の空間分布から計測対象者の姿勢を推定する。高さ方向を縮退させた点群の2次元分布は、腰回りの緩やかな部分曲線を示して分布する。この分布を固有値展開し、寄与率の高い方向を骨盤方向とみなし、それと垂直な方向を計測対象者の前後方向と見なす。

手順(3)では、(2)で取得した骨盤方向を主軸とした楕円を描画する。なお、楕円の長径短径は計測対象者の体格に合わせて事前に設定する。主軸が得られた各時刻のフレームの上面図について、部分曲線の重心点、姿勢方向の補助線、重心点を中心とした楕円をそれぞれ書き出し、隠れ領域の補完とする。

3. 実験

3.1 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 8(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、点群の密度は一様に減数されている。図 8(b)は、図 8(a)の点群の隣接関係を評価して結合した点群を表す。図 8(c)(d)(e)は、図 8(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。赤枠は代表点群が占有する空間領域を示す。図 8(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 8(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。

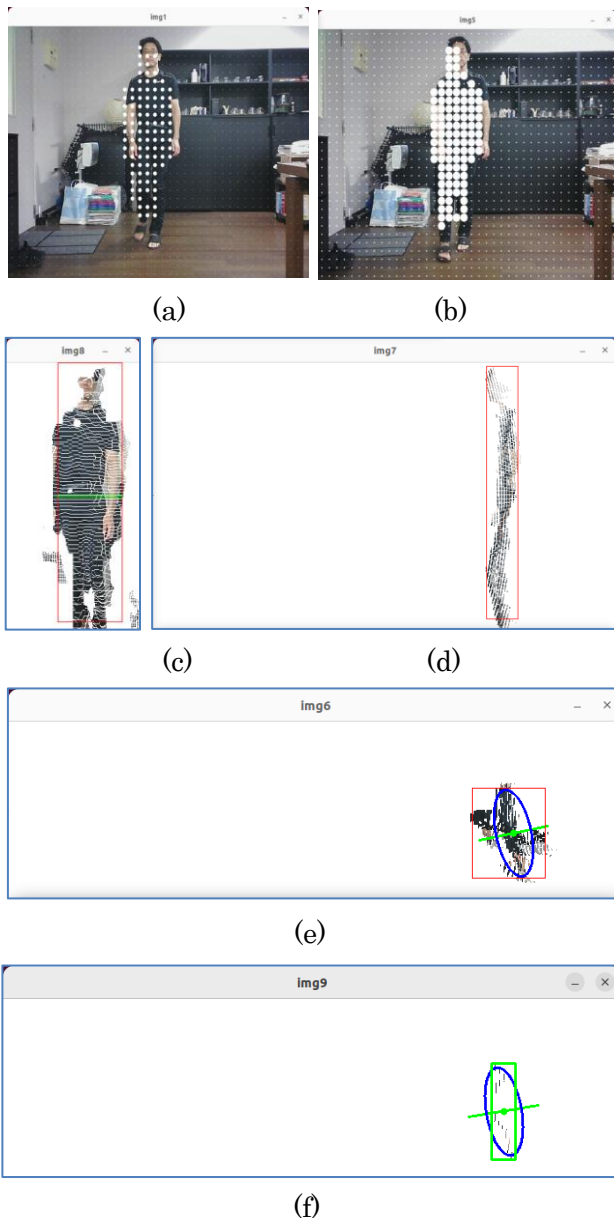


図 8: 隠れ領域の補完

3.2 被験者実験の計画

被験者実験を実施するにあたり、現在、著者の所属機関に設置されている倫理審査会で倫理審査を受けており、予備審査に合格している。倫理審査会の本審査での承認後、歩行計測被験者に対する計測実験を行う予定である。

実験は協力機関である病院の患者、または、ケア施設の高齢者を被験者とし、各被験者について TUG Test を複数回施行して計測データを採取する予定である。実験後の動作解析では、採取した計測データから動作区分アルゴリズムによって計測対象者の往路動作を抽出し、3次元骨格と重心位置を算出する。また、図 8(e)で示したように、計測対象者が占有する領域と計測対象者の姿勢を可視化する。本稿で提案する隠れ領域の補完は、計測対象者の腰回りの形状モデルによるが、今後の実験では、計測対象者の 3次

元情報を取得データから再構成し、隠れ領域を補完する予定である。これにより、空間的により把握しやすい形に歩行動作を可視化する。

4. 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、実験実証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。

謝辞

本研究の実施にあたり、北里大学の奥健志先生、倉坪亮太先生、戸田成昭先生より貴重な助言をいただきました。深く御礼を申し上げます。

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 齢化の状況, 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] 萬礼応, et al. "複数レーザー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, 萬礼応, and 高橋正樹. "インソールとレーザー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.