

単一 RGB-D カメラと物理ベース最適化による歩行分析

フォースプレートを用いない床反力・下肢関節モーメント推定の技術的妥当性を検証

1. 発表のポイント

- ・単一の RGB-D カメラで撮影した歩行映像から 3 次元姿勢を推定し、物理法則に基づく最適化によって床反力を推定したうえで、逆動力学により下肢関節モーメントを算出する歩行分析システム「GaitForce」の技術的妥当性を検証しました。
- ・健常成人 10 名の歩行を対象として、GaitForce による推定値を、三次元動作解析装置および床反力計で測定した基準値と比較しました。なお、GaitForce による推定時には床反力計を使用していません。
- ・股関節、膝関節および足関節の矢状面関節角度では、基準システムとの波形相関が $r=0.89\sim0.94$ 、関節モーメントでは $r=0.73\sim0.95$ でした。また、床反力の前後方向と鉛直方向では比較的良好な一致が得られました。
- ・一方、床反力の左右方向は一致度が低く、股関節角度にも比較的大きな誤差が認められました。本研究は単一カメラを用いた歩行運動学・運動力学解析の技術的可能性を示すものです。現時点では、従来の実験室型歩行分析と置き換えられることを示すものではありませんが、今後、床反力計を用いずとも臨床現場で活用できる可能性があります。

2. 発表概要

埼玉県立大学 研究開発センターの久保田圭祐特任助教(筆頭著者)、同学 金村尚彦教授(責任著者)、理学療法学科 4 年生 鈴木陸氏、AcceleBody 株式会社の青木治雄氏(共同筆頭著者)と中村綾太氏の研究チームは、単一の RGB-D カメラを用いて、歩行中の三次元姿勢、床反力および下肢関節モーメントを推定する歩行分析システム「GaitForce」の技術的妥当性を検証しました。

本研究では、健常成人 10 名に通常速度で平地歩行を行ってもらい、GaitForce による推定結果を、三次元動作解析装置および床反力計による測定結果と比較しました。その結果、矢状面の下肢関節角度・関節モーメントならびに床反力の前後方向・鉛直方向について、一定の波形再現性が確認されました。一方、床反力の左右方向については精度上の課題が明らかになりました。

本研究成果は、2026 年 7 月 10 日に学術誌「Gait & Posture」に公開されています。

3. 研究内容

<研究背景>

三次元動作解析装置と床反力計を組み合わせた歩行分析では、関節の動きだけでなく、歩行中に身体へ加わる力や関節に生じるモーメントを定量的に評価できます。これらの情報は、運動障害の力学

的要因を理解し、リハビリテーションの方針や治療効果を検討するうえで重要です。

一方、従来の歩行分析には、多数の赤外線カメラ、床反力計、専用の実験室および専門的な操作技術が必要です。また、身体の解剖学的指標に反射マーカを貼付する必要があり、計測準備にも時間を要します。

近年は、映像から身体各部位の位置を推定するマーカーレス動作解析が発展しています。しかし、関節モーメントの計算には床反力が必要であるため、カメラ映像のみから運動力学的指標を算出することは容易ではありません。

そこで本研究では、機械学習による三次元姿勢推定と、身体運動が物理法則に整合するように床反力を求める物理ベース最適化を組み合わせ、単一の RGB-D カメラから床反力と下肢関節モーメントを推定する方法を検証しました。

<研究方法>

- ・ **対象者**：健康成人 10 名

男性 5 名、女性 5 名、年齢 25±3 歳

- ・ **歩行課題**：

10m の歩行路を、参加者が普段どおりの快適な速度で歩行しました。各参加者について、条件を満たした 2 試行を解析しました。

- ・ **基準となる計測装置**：

15 台のカメラからなる三次元動作解析装置と、歩行路に設置した 6 枚の床反力計を用いて、身体各部位の三次元座標と床反力を同時計測しました。

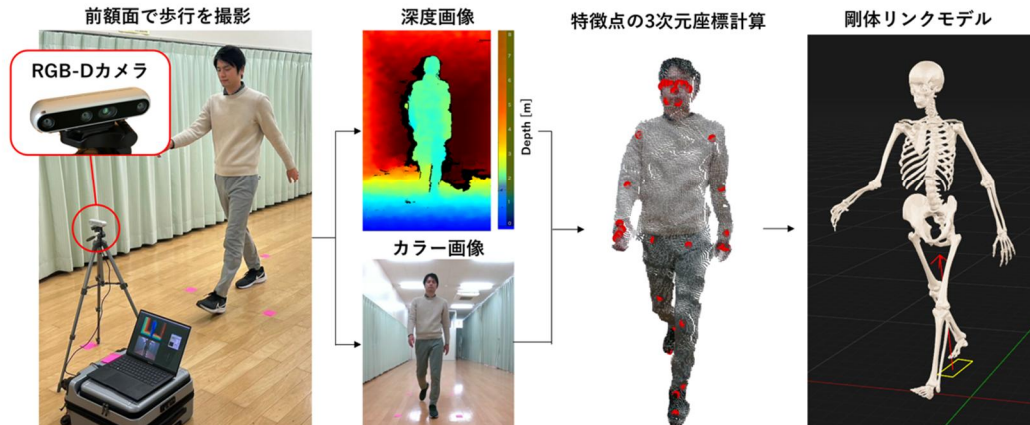
- ・ **GaitForce による計測**：

Intel RealSense D455 RGB-D カメラ 1 台を歩行路の正面に設置し、60 フレーム／秒で歩行を撮影しました。解析には、参加者がカメラから 1.5～3.5m の範囲に位置する映像を使用しました。

- ・ **三次元姿勢の推定**：

RGB 画像から深層学習モデル RTMPose を用いて身体の特徴点を検出し、深度画像を組み合わせ、各特徴点の三次元座標を再構成しました。さらに、各参加者の身体寸法に合わせた剛体リンクモデルを適用し、逆運動学によって関節角度を算出しました。

単一RGB-Dカメラで3次元動作を計測



・床反力および関節モーメントの推定：

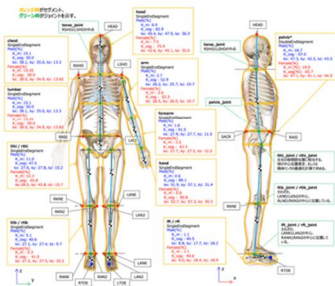
推定された身体運動と運動方程式が整合し、かつ足部が地面上で滑らないという条件を満たすよう、物理ベースの最適化によって三次元床反力を推定しました。その後、推定した床反力と関節運動を用いた逆動力学により、股関節、膝関節および足関節の関節モーメントを算出しました。

・精度評価：

右下肢の立脚期を 0～100% に正規化し、矢状面の関節角度・関節モーメントと、前後・左右・鉛直方向の床反力を比較しました。評価には、RMSE、NRMSE、Pearson の相関係数および Lin の一致相関係数を使用しました。

計測した運動と力学的に整合する床反力・関節モーメントを推定

身長・体重から力学パラメータを決定



順動力学計算を含む最適化計算

$$\min_{\lambda, \tau} \frac{1}{2} (\|\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}\|^2 + \|\mathbf{w}_\lambda \lambda\|^2 + \|\mathbf{w}_\tau \tau\|^2)$$

Subject to

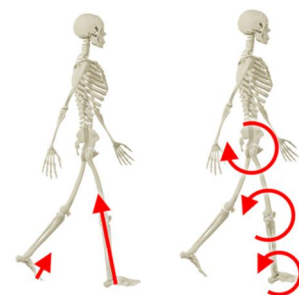
$$\mathbf{H}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{G}(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda}$$

$$0 \leq (\boldsymbol{\mu} \mathbf{n}_z - \mathbf{t}_l)^T \mathbf{f}_{left} \quad \text{for all } l$$

$$0 \leq (\boldsymbol{\mu} \mathbf{n}_z - \mathbf{t}_l)^T \mathbf{f}_{right} \quad \text{for all } l$$

$$0 \leq \mathbf{n}_z^T \mathbf{f}_{left} \quad 0 \leq \mathbf{n}_z^T \mathbf{f}_{right}$$

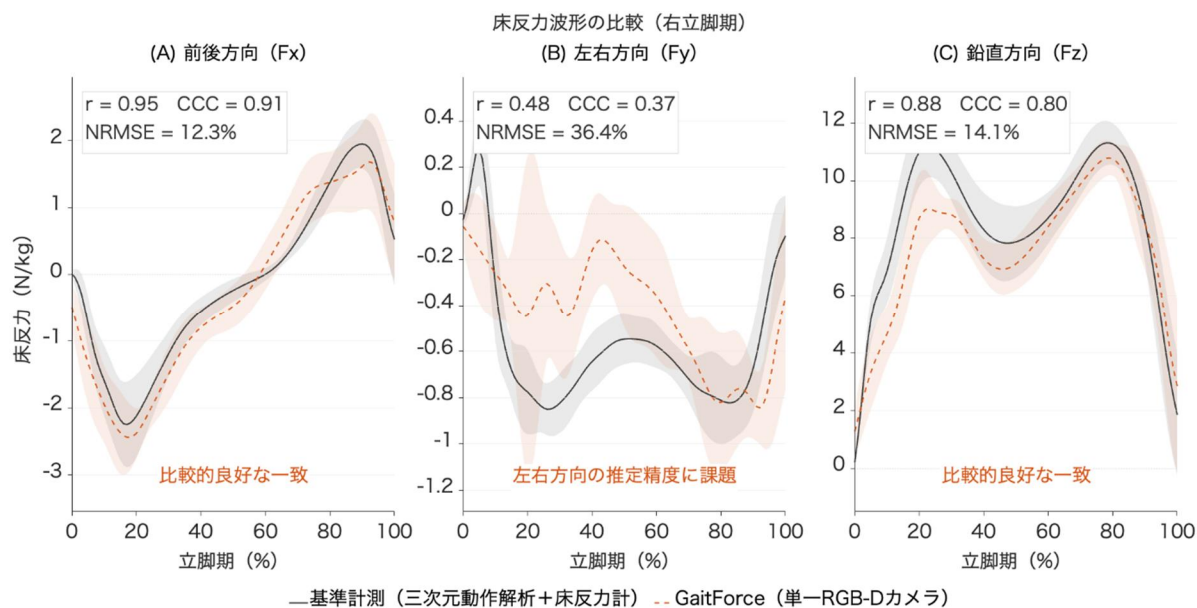
床反力・関節モーメントの推定



〈結果〉

GaitForce による推定値は、矢状面の関節角度および関節モーメントについて、基準システムと概ね類似した波形を示しました。

- ・関節角度の相関係数は、股関節 0.94、膝関節 0.91、足関節 0.89 でした。
- ・関節モーメントの相関係数は、股関節 0.89、膝関節 0.73、足関節 0.95 でした。
- ・床反力は、前後方向と鉛直方向では比較的良好な一致を示しましたが、左右方向の一致度は低い結果となりました。



〈考察（本研究が示唆すること）〉

- ・本研究により、単一の RGB-D カメラと物理ベース最適化を組み合わせることで、床反力計を使用せずに、歩行中の矢状面関節角度・関節モーメントと、一部の床反力を推定できる可能性が示されました。
- ・特に、床反力の前後方向と鉛直方向、ならびに股関節・膝関節・足関節の運動波形は、従来の三次元動作解析装置および床反力計による測定結果と概ね類似していました。これにより、将来的には、医療機関だけでなく、地域施設や在宅環境など、従来の大型計測設備を設置しにくい場所で歩行機能を評価するための基盤技術となる可能性があります。
- ・一方、左右方向の床反力は一致度が低く、股関節角度にも比較的大きな誤差が認められました。そのため、現時点では従来の実験室型歩行分析を代替できる機会は限定されます。
- ・今後は、推定精度の改善に加えて、患者、歩行速度の違い、左右非対称な歩行、方向転換や階段昇降など、より多様な条件での検証が必要です。

4. 用語解説

※1 RGB-D カメラ

通常の色画像 (RGB) と、カメラから対象物までの距離を表す深度情報 (Depth) を同時に取得できるカメラです。本研究では、RGB 画像上で検出した身体特徴点と深度情報を組み合わせ、各特徴点の三次元位置を再構成しました。

※2 床反力（Ground Reaction Force：GRF）

歩行中に足が地面を押したとき、反作用として地面から身体へ加わる力です。前後方向、左右方向および鉛直方向の成分に分けて表され、歩行中の推進、支持およびバランス制御を理解するうえで重要な指標です。

※3 物理ベース最適化・逆動力学

物理ベース最適化は、観察された身体運動が運動方程式に整合し、足部が地面上で滑らないなどの条件を満たすように、床反力や関節モーメントを推定する方法です。逆動力学は、身体各部位の運動と床反力から、関節に作用するモーメントを計算する方法です。

5. 論文情報

雑誌名：Gait & Posture

題名：Force-Plate-Free Estimation of Ground Reaction Forces and Lower-Limb Joint Moments During Gait Using a Single RGB-D Camera and Physics-Based Optimization

著者：Keisuke Kubota, Haruo Aoki, Ayato Nakamura, Riku Suzuki, Naohiko Kanemura
※Keisuke Kubota と Haruo Aoki は本研究に同等に貢献した共同筆頭著者です。

DOI：<https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2026.110285>

6. 問い合わせ先

埼玉県立大学 保健医療福祉学研究科/保健医療福祉学部 理学療法学科

教授 金村尚彦

E-mail：kanemura-naohiko@spu.ac.jp