



Title	RGBDセンサを用いた片麻痺歩行特徴抽出アルゴリズムの研究およびそれに基づく身体バランス能力の自動評価システムの開発
Author(s)	安川, 淳
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96219
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名（安川 淳）	
論文題名	RGBDセンサを用いた片麻痺歩行特徴抽出アルゴリズムの研究およびそれに基づく身体バランス能力の自動評価システムの開発

論文内容の要旨

バイオメカニクス分野における歩行運動解析の研究は、17世紀後半から始まったとされ、運動学や運動力学、身体重心特性など、様々な観点で進められている。解析技術の応用例としては、正常歩行と病的歩行の判別、医学的介入やリハビリテーション実施前後の患者の歩行状態の評価、下肢可動性回復のためのロボット機器の制御、アスリートの歩行動作のコーチング、日常生活中の動作認識・分類などがあり、医学やリハビリテーションに向けた応用が期待されている。

マーカベースやInertial Measurement Unit (IMU) センサのモーションキャプチャに代表されるような装着式の計測・解析技術に比べ、画像センサを用いたマーカレスのモーションキャプチャ技術は、臨床現場での患者の身体的負担の軽減や、計測に要する準備時間の省力化などの観点から、実運用に適していると考えられている。さらに近年は距離センサが市場に安価に流通していることもあり、歩行中の全身運動を簡便に3D計測・解析できることから、同様のセンサを用いた歩行解析の研究が活発に進められている。同分野では、距離画像から人の骨格キーポイントを推定する学習済みのモデルを用いた、スケルトンベースの解析技術の研究が主流である。ただしこのような推定モデルは大量の健常者の姿勢データを用いてモデルの学習を行っているため、脳卒中後片麻痺患者のように、非対称で、かつ重症度に応じてバリエーションに富んだ病的歩行を呈する場合の歩行解析では推定精度の低さが指摘されている。他方、距離画像を直接的に解析し、歩行特徴を抽出する解析技術の研究も進められている。しかし、このような技術をベースとした歩行周期の位相分割技術や足部の位置・姿勢の推定技術がなく、また歩行解析を通して患者の身体機能を評価するシステムが提案されていない。本論文では、上記二点の課題を解決するための、距離画像を直接的に解析することにより、脳卒中後片麻痺患者の歩行特徴を抽出する歩行解析技術を提案し、同患者を評価する上で重要な身体バランス評価スコアを歩行特徴から推定するシステムを開発した。

第一の研究では、距離画像を直接的に解析することで、脳卒中後片麻痺患者の左右非対称な歩行周期を複数の位相に分割し、従来のスケルトンベースの歩行解析技術よりも高精度に歩行特徴を抽出する技術を提案した。具体的には、足を一定速度で振り出せず、左右非対称な歩行などの病的な歩行に対応できるように、動的計画法を用いた相互制約付き区分線形近似による足部の位置系列から歩行位相を分割する手法を提案した。また、立脚相の床面上につま先のエッジを累積させることでフットプリントを検出する手法を提案し、従来手法よりも明瞭にフットプリントを検出することを確認した。最後に、4つの空間的/時間的な歩行パラメータ（单脚支持時間、両脚支持時間、つま先の角度、ステップ長）について従来技術との精度比較をするために、10名の健常者の歩行と片麻痺患者を模擬した歩行の2種類の歩行パターンを用いて、検証実験を行った。その結果、提案手法は健常者歩行では従来のスケルトンベース手法と同等、また疑似片麻痺歩行では従来手法よりも空間/時間的歩行パラメータを高精度に推定できることを確認した。

第二の研究では、上記の提案手法をベースとして、脳卒中後片麻痺患者の身体バランス評価尺度であるBerg Balance Scale (BBS)スコアを推定するシステムを開発した。またこのシステムの実用性を評価するため、スコアの推定精度と解析処理速度の検証を実施した。

BBSは、指定する運動課題を患者に実施させ、その様子を臨床現場の専門家が観察し、合計56点満点で採点する評価尺度である。BBSは評価に20分もの時間がかかる点と評価者の主觀が影響する点が課題である。本研究では、属性を排した効率的なバランス能力評価実現のために、対象者の歩行計測のみで簡便かつ自動的にBBSを推定するシステムを開発した。まず1台のRGBDセンサを用いて対象者の歩行を撮影し、見守り者がいる場合は、対象者と介助者の領域を分離した。次にステップ長、つま先向き、立脚時間、歩行速度などを計23種類の特徴量を抽出した。最後にLasso回帰モデルを用いてBBSを推定した。実験では94件の脳卒中後片麻痺患者に対して専門家が評価したBBSスコアを真値とし、歩行動画を用いて提案手法で推定したBBSスコアとの誤差を評価した。BBSスコアの推定誤差は、平均絶対誤差 4.97 ± 4.31 点で、従来手法より誤差が小さく、臨床的に許容可能な誤差範囲内であることを確認した。処理時間は見守り無しパターンで 47 ± 52 s、見守り有りパターンで 62 ± 32 sであり、従来の評価時間を短縮し、提案手法の有用性を示した。

本研究では、距離画像の直接的な解析手法を用いた片麻痺歩行の解析技術を提案し、それをベースとして実際の脳卒中後片麻痺患者のバランス機能推定システムを開発した。また見守り歩行レベル相当の患者の内、専門家間で評価結果がバラツキやすい得点層に対して、提案手法が有効な精度を有していることを明らかすることで、客観的な評価の実現に貢献した。一方で想定よりもBBSスコアが低い患者データが収集されたことにより、従来報告されている特徴量のみでは、低得点層のスコアを十分な精度で推定ができなかった。低得点層患者の画像データに基づき、体幹の姿勢・運動、上肢関節の角度・可動域、歩き始めの身体重心移動に関する特徴が見られたことから、これらの特徴を含めたより包括的な手法の可能性について将来展望にて論じた。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（安川　洵）		
	(職)	氏　名
論文審査担当者	主　查	教授　八木　康史
	副　查	教授　伊野　文彦
	副　查	教授　長原　一
	副　查	教授　楳原　靖

論文審査の結果の要旨

本論文は、脳卒中患者などの片麻痺を呈する歩行に対する特徴抽出アルゴリズム、及び、それに基づく身体バランス能力の自動評価システムを提案したものである。

第一章では、バイオメカニクス分野における歩行解析や歩行特徴を概説している。また、歩行特徴の計測手法として、モーションキャプチャシステムなどの装着式の手法、及び、距離センサなどの非装着式の手法に分類して論じ、臨床現場利用における非装着式の手法の有効性を主張している。また、非装着式の手法を、画像から推定される人物姿勢系列を介して解析する手法と、画像から歩行特徴を直接抽出して解析する手法とに分類して論じ、片麻痺歩行などの病的歩行から高精度な歩行特徴を抽出するには、画像の直接解析手法が適していると主張している。そこで、本研究では、距離画像の直接解析手法による高精度な足部位置・姿勢推定、及び、歩行位相分割といった歩行特徴を抽出するアルゴリズムの開発を第一の目的としている。また、同步歩行特徴抽出アルゴリズムを活用し、脳卒中後の片麻痺患者の身体バランス機能を自動評価するシステムを開発することを第二の目的に設定している。

第二章では、距離画像を直接的に解析することで、歩行周期を複数の位相に分割し、従来のスケルトンベースの歩行解析技術よりも高精度に歩行特徴を抽出する技術を提案している。具体的には、脳卒中後片麻痺患者などの左右非対称な病的歩行に対応できるように、動的計画法を用いた相互制約付き区分線形近似により、足部の位置系列から歩行位相を分割する手法を提案している。また、立脚相のつま先のエッジを床面座標上に累積させることでフットプリントを検出する手法を提案している。10名の健常者の歩行と片麻痺患者を模擬した歩行の2種類の歩行パターンを用いた検証実験において、従来手法よりも歩行位相やフットプリントを高精度に推定できることを示した。

第三章では、脳卒中後片麻痺患者の身体バランス評価尺度であるBerg Balance Scale (BBS) スコアを推定するシステムについて述べている。具体的には、上記の歩行特徴抽出アルゴリズムに基づき、ステップ長、つま先向き、立脚時間、歩行速度など計23種類の歩行特徴を抽出し、Lasso回帰モデルによりBBSを推定する枠組みを提案している。また、臨床現場で利用するため、距離センサと計算機を組み込んだ可搬型の実システムを開発し、病院での試験運用を通じた実証実験を実施している。実験では、94件の脳卒中後片麻痺患者に対して、本システムにより推定したBBSスコアと専門家が評価したBBSスコアの真値との誤差を評価すると共に、処理時間についても評価し、提案システムの有効性を示した。

第四章では、第三章の実験において、推定誤差の大きかった患者の例を解析すると共に、BBS推定の従来研究との比較検討を行っている。また、BBS低得点層に対する推定精度改善に向けて、新たに導入すべき歩行特徴について論じている。

第五章では、本研究を総括し、今後の展望について述べている。

以上により、本論文は博士（情報科学）の学位論文として価値あるものと認める。