



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	姿勢推定人工知能の応用による動作解析の妥当性検証と臨床応用 [全文の要約]
Author(s)	井野, 拓実
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(保健科学)
Dissertation Number	甲第15813号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91767
Type	doctoral thesis
File Information	Takumi_Ino_summary.pdf



博士論文の要約

博士の専攻分野の名称：博士（保健科学）

氏名：井野 拓実

学位論文題名

姿勢推定人工知能の応用による動作解析の妥当性検証と臨床応用

【研究背景】

ヒトの運動機能評価としての動作解析は、現在まで多様な方法で実践されている。光学式三次元動作解析システムのほか、近年は機械学習を用いた映像処理が挙げられる。一方、動作の計測が簡便なビデオ映像による二次元動作解析も臨床やスポーツの現場で活用されてきた。しかしながら、これらの三次元動作解析システムや二次元動作解析では、コストや労力、専門性などの観点から、広く普及させるには限界があった。近年、情報科学技術の目覚ましい発展により、人工知能（artificial intelligence, AI）による映像データの処理能力、特徴点の判別性能が飛躍的に向上した。中でも姿勢推定 AI の登場により、映像データからヒトの運動学的特徴点を抽出することが極めて容易になった。姿勢推定 AI が動作解析に応用可能となれば、動作解析が一般に広く普及することを妨げているコスト、労力、専門性という問題が解決される可能性がある。そこで本研究は、姿勢推定 AI を用いた動作解析手法の確立とともに、計測精度を明らかにし、臨床応用の可能性を検討することを目的とし、2つの研究を実施した。なお、本研究で用いる計測精度という用語は、データ計測の際に生じる誤差と AI が映像から特徴点を抽出する際に生じる同定誤差の両方を含むものとする。

【研究 1】人工知能による動作解析の精度検証

目的：歩行分析において、姿勢推定 AI の OpenPose を用いた動作解析（AI motion analysis, AI-MA）の計測精度を、動作解析のゴールドスタンダードである三次元動作解析（3D motion analysis, 3D-MA）を基準として明らかにすることを目的とした。加えて、臨床での歩行分析のために、片側から 1 台のカメラによって両下肢の同時計測が可能か否かについても検証した。

方法：対象は、21 名の健常成人（男性 10 例、女性 11 例、年齢 20.7 ± 1.0 歳、身長 165.2 ± 10.6 cm、体重 59.6 ± 12.1 kg、BMI 21.6 ± 2.6 kg/m²）とした。なお、予備的研究において 7 例の対象者から得られた下肢キネマティクスデータを参照し、標準偏差 3° 、AI-MA と 3D-MA 間で検出可能な平均値の差を 5° と設定した際の効果量（dz）は 0.65 であった。 α エラーを 0.05、統計学的パワー値を 0.80 とした場合、対応のある t 検定モデルにおいて必要となるサンプルサイズは 21 例であった（G*Power software ver. 3.1.9.2）。以上より、本研究では 21 例を下限対象数と設定した。本研究は、北海道大学大学院保健科学研究院の倫理審査委員会の承認を得てから実施された（承認番号：19-70-1）。対象者には、計測前に本研究計画を書面および口頭で説明した後、署名による同意書を得てから計測を実施した。計測動作は定常歩行とし、3 回の成功試行を計測した時点で終了とした。AI-MA は、3D-MA と同期したハイスピード HD デジタルビデオカメラ（Bonita Video 720C, Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, England）を用いた。ビデオカメラの計測周波数は 120Hz

とした。ビデオカメラは対象者の右側に設置された。精度検定の基準とするため、3D-MA (Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, England) を同期計測した。AI-MA は、OpenPose ver. 1.7.0 により算出された推定関節中心座標を用いた。また本研究では、カメラレンズの曲率による空間座標系の歪みの影響を除外するため、ビデオ映像の歪み補正を実施した。これには Nexus 2.10 システム (Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, England) が実装する 3D overlay video 機能を用い、VICON システムによる空間校正情報によるビデオ映像の歪み補正後のデータをエクスポートした後、それらのビデオデータを用いて解析を実施した。得られた関節中心位置およびそれらの時系列による軌跡は、4 次の Butterworth low-pass filter, zero-lag によりカットオフ周波数 6Hz にて平滑化を実施した。以上から、矢状面における、股関節、膝関節、足関節の関節角度 (投影角) を算出した。基準データとしての 3D-MA は、体表に設置された光学式マーカ位置より、Plug-in-Gait マーカセットに基づき関節座標系を算出し各関節中心を推定した。なお関節座標系の設定は Winter らの方法に準じた。得られた関節中心位置およびそれらの時系列による軌跡は、4 次の Butterworth low-pass filter, zero-lag によりカットオフ周波数 6Hz にて平滑化を実施した。以上より、股関節、膝関節、足関節の屈伸および底背屈関節角度を算出した。歩行施行 3 回における下肢関節キネマティクスの再現性を確認するため、級内相関係数 (ICC) (1,3) およびその 95% 信頼区間 (95%CI) を、次に、3D-MA と比べた AI-MA の計測精度を評価するため、平均絶対誤差 (mean absolute error: MAE) およびその 95%CI を算出した。さらに、波形パターンの近似性の評価のため coefficient of multiple correlation (CMC) も算出した。CMC は 0 から 1 の値をとり、波形が一致していれば 1 に近づき、波形が一致していなければ 0 に近づく係数である。AI-MA と 3D-MA 間における MAE, CMC の比較には対応のある t 検定を用いた。統計学的有意水準は 5% 未満を有意とみなした。統計解析には IBM SPSS Statistics ver. 22.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, USA) を用いた。

結果: 3D-MA と比較した AI-MA の MAE は、足関節: 3.1° - 4.1°, 膝関節: 2.3° - 3.1°, 股関節: 2.5° - 3.5° であった。次に波形の近似性を示す CMC は、AI-MA と 3D-MA の間で 0.890 - 0.994 (very good to excellent) であった。また、カメラ側の下肢関節角度の MAE は、カメラ反対側と比べ約 1° 程度小さかった。しかしながら、両側ともに MAE は 5° 未満 (good to acceptable accuracy) かつ、CMC は 0.85 以上 (very good to excellent) であった。3D-MA における ICC (1,3) は 0.91-0.99 ($p < 0.001$) であり、歩行施行間の再現性は excellent であった。AI-MA における ICC (1,3) は左膝関節遊脚期の屈伸角度変化量を除いて、0.77-0.99 ($p < 0.001$) であり同様に excellent であった。左膝関節遊脚期の屈伸角度変化量のみ ICC (1,3) は 0.73 であり、再現性は fair to good であった。

考察: 3D-MA を基準として算出された AI-MA の MAE は両側共に 5° 未満 (good to acceptable) さらに CMC は両側共に 0.85 以上 (very good to excellent) であり、AI-MA は臨床評価として十分な計測精度を有するものと考えられた。さらに歩行分析においては、カメラ側の下肢関節角度の計測精度は、カメラ反対側と比べてわずかに優れていた。しかしながらその差は MAE で 1° 未満かつ CMC で 0.1 以下であり臨床的に意味のある差ではないと考えられた。以上より、歩行分析においては AI-MA による両側下肢の同時計測も可能であると考えられた。

【研究 2】人工知能とヒトによる動作解析の精度比較

目的: AI-MA と、従来行われてきたような人が手動で映像上の解剖学的指標を同定する動作解析 (human-based motion analysis, Human-MA) の差を、計測の妥当性が確立されている 3D-MA を基準として比較検証することを目的とした。

方法: 21 名の健常成人を対象とした (男性 10 例, 女性 11 例, 年齢 20.7 ± 1.0 歳, 身長 165.2 ± 10.6 cm, 体重 59.6 ± 12.1 kg, BMI 21.6 ± 2.6 kg/m²)。なお予備測定における 7 例の対象者のから得ら

れた下肢キネマティクスデータを参照し、標準偏差を 3° 、AI-MAと3D-MA間で検出できる平均値の差を 5° と設定した場合の効果量(dz)は0.65であった。 α エラーを0.05、統計学的パワーを0.80とした場合、対応のあるt検定モデルにおいて必要となるサンプルサイズは21例であった(G*Power software ver. 3.1.9.2)。以上より、本研究では21例を下限対象数と設定とした。本研究は北海道大学大学院保健科学研究所の倫理委員会の承認を得て実施された(承認番号:19-70-1)。すべての対象者から、測定前に書面および口頭によるインフォームドコンセントを得た後、署名による同意書を得た。計測動作は、ACL損傷のリスクスクリーニングテストでしばしば用いられる、両脚のdrop vertical jump (DVJ)課題とした。すべての対象者は、測定開始前に自身で十分なウォーミングアップを実施し、その後DVJ課題の練習を複数回実施した。AI-MAおよびHuman-MAは、3D-MAと同期したハイスピードHDデジタルビデオカメラ(Bonita Video 720C, Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, England)映像を用いて実施した。ビデオカメラの計測周波数は120Hzとした。ビデオカメラは対象者の正面、かつ30cm台と同じ高さに設置された。精度検定の基準とするため、3D-MA(Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, England)を同期計測した。AI-MAはOpenPose ver. 1.7.0によりビデオ映像から関節中心位置を算出した。Human-MAは方法に熟練した1名の評価者により、股関節、膝関節、足関節中心を映像上で視認により同定した。用いた解析ソフトはFrame-Dias V (DKH Inc., Tokyo, Japan)とした。AI-MAとHuman-MAは同じビデオ映像を用いた。ビデオ映像はレンズの曲率による歪みの影響を除くため研究1と同様の方法で歪み補正を実施した。得られた関節中心位置およびそれらの時系列による軌跡は、4次のButterworth low-pass filter, zero-lagによりカットオフ周波数6Hzにて平滑化を実施した。以上から、前額面における、膝関節内外反角度(投影角度)を算出した。データの解析区間はDVJ課題における着地期とし、以下の項目を検討した:1)接地時の膝関節外反角度、2)重心最下点における膝関節外反角度、3)接地時から重心最下点までの膝関節外反角度変化量。これらの項目は、DVJの着地パターンが異なるという先行研究に基づき、男女分けて算出した。統計解析として、3D-MAを基準としたAI-MAおよびHuman-MAのMAEを算出した。波形パターンの近似性の評価のためCMCを算出した。CMCは0から1の値をとり、波形が一致していれば1に近づき、波形が一致していなければ0に近づく係数である。2元配置分散分析(a two-way analysis of variance: 2 way - ANOVA)により、計測方法による差、性差および交互作用を検討した。AI-MAとHuman-MAの計測精度の検討には、対応のないt検定を用いMAE, CMCを比較した。統計学的有意水準は5%未満を有意とみなした。統計解析にはIBM SPSS Statistics version 22.0 (IBM Corporation, Armonk, NY, USA)を用いた。

結果: 3D-MAと比較した着地期のMAEは、AI-MAは 2.4° 、Human-MAは 3.2° であり有意差は認められなかった。また、DVJ着地における膝外反角度において、AI-MAと3D-MAの間に有意差は認められず、かつCMCは0.862 (good)と波形パターンも良好な近似性が示された。

考察: 3D-MAを基準としAI-MAとHuman-MAの計測精度を比較した。MAEおよびCMCの観点から両者は同等の計測精度である事が明らかとなった。しかしながら、AI-MAはデータ処理を自動化している点、高額な計測機器や解析ソフトが不要な点においてその利点は大きい。今後、研究者のデータ処理にかかる労力は大きく軽減され、より創造的、複雑な作業に時間をさけるようになることが期待される。

【結論】

本研究は、姿勢推定AIを応用した動作解析(AI-MA)の計測精度と臨床応用について検討した。AI-MAは動作解析のゴールドスタンダードである光学式三次元動作解析(3D-MA)と比較し

ても、十分に臨床応用可能な誤差の範囲内であることが明らかとなった。さらに、3D-MA と比較した誤差は、従来から行われてきた人による動作解析 (Human-MA) と AI-MA で同程度であった。しかしながら、AI-MA は膨大なデータ処理を自動化している点、高額な計測装置や解析ソフトウェアが不要である点を踏まえると、AI-MA の利点は大きいことが考えられた。