

## 学位論文題名

## Gait Analysis using Acceleration and Gyro Sensors

(加速度と角速度センサーを用いた歩行解析に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

歩行能力の低下は、人間の行動範囲を著しく制限し、場合によっては寝たきりの原因ともなる。近年、高齢化に伴い身体機能が低下し、歩行に障害を持つ患者が急増している。そのため、リハビリテーションや臨床現場において、患者の歩行状態を診断・評価するための歩行解析手法が求められている。現在、歩行解析は複数台のカメラを用いて患者を撮影して行う画像解析手法が主流である。しかし、この方法は主に室内のカメラが撮影できる範囲でしか測定を行うことができないため、長時間・長距離の歩行には向いていない。そこで、カメラの代替として小型の加速度センサーを用いた手法が存在する。患者の体にセンサーを直接取り付けするため、長距離・長時間、屋外でも測定が可能である。

本研究では装着型の加速度センサーと角速度センサーを用いた歩行解析システムを開発した。理論上、測定された加速度を2回積分することで変位を求めることができるが、測定される加速度データにはノイズ等が含まれるため誤差が増大するという問題がある。また、測定した角速度を積分する事で部位の角度変化を算出するという方法もあるが、同様の理由で誤差が大きくなる。そこで本研究では、加速度センサーから測定される重力加速度を基にセンサーの傾斜角度を計算することにした。これを、人間の下肢の寸法と合わせることでセンサーが取り付けられている身体部位の姿勢を計算することが可能である。しかし、歩行中の加速度には重力加速度だけではなく運動加速度や外部ノイズが含まれる。そのため、歩行中のセンサーの傾斜角度を正確に測定するのは困難である。

そこで本研究では2種類の方法により、下肢部位の傾斜角度を計算する方法を提案した。1つは歩行中に測定された加速度から重力加速度のみを分離する方法である。測定された加速度にFFTによる周波数解析を行い、歩行中に発生する周波数帯の加速度信号を特定し、信号フィルターにより抽出した。この抽出した加速度の中に重力加速度が含まれると考え、波形分解と下肢姿勢計算アルゴリズムから歩行中最適な下肢姿勢を持つ重力加速度を逆計算した。もう一つの方法は、角速度から歩行中の運動加速度を推定する方法である。下肢の関節中心とセンサーが取り付けられている位置から二つの相対的な距離を導出した、この距離とセンサーに測定された角速度から歩行中の運動加速度を推定した。最後に、この運動加速度を歩行中に測定される加速度から差し引くことで重力加速度を導出した。本研究では両手法によって計算された3次元下肢姿勢をスティックフィギュアモデルにより視覚的に確認できるようにした。実験では健常者による通常歩行と障害を模した状態での歩行の測定を行い、従来のカメラ画像を用いた歩行解析との測定精度の検証も行った。本研究によ

り、装着型加速度・角速度センサーシステムは従来のカメラシステムと同等の精度で人間の歩行解析が行えることが確認された。

本論文は全6章で構成されており各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、本論文の総括的な序論として、研究の背景、目的について述べた。

第2章では、本研究で使用した実験装置の紹介及び歩行解析で使用される用語についての解説が行われた。実験装置の紹介では、本研究で開発した歩行解析用のセンサーシステムの仕様、動作原理(加速度センサーと角速度センサー)とキャリブレーション方法について述べられている。また、身体寸法の測定装置及び測定方法についても述べられている。

第3章では、歩行中の加速度から、重力加速度のみを分離し、下肢の姿勢を計算する手法を提案した。本手法により、被験者の股関節と膝関節の屈曲と伸展、膝関節の軌跡、3次元スティックフィギュアモデルを導出した。また、本手法の測定精度を評価するため、一歩行周期中の股関節と膝関節の屈曲角度をカメラによる動作解析で計算されたものと比較した。

第4章では、歩行中の加速度と角速度の組合せから、下肢の3次元姿勢を計算する手法を提案した。本手法により、股関節の屈曲・伸展と内転・外転、膝関節の屈曲・伸展、膝関節・足関節の軌跡と3次元スティックフィギュアモデルを導出した。本手法をカメラによる解析結果と比較した結果、股関節と膝関節の角度測定において高い相関が得られた。

第5章では、第4章で提案した歩行解析手法を用いて、障害を模した状態での歩行を測定した。ここでは、股関節の屈曲・伸展と内転・外転、膝関節の屈曲・伸展、膝関節・足関節の軌跡の計算を行った。本手法により、両足が健常な場合、左足又は右足の膝関節が固定されている場合において、関節角度と関節軌跡に差異が確認された。

第6章では、結論として本研究で得られた結果の総括と、今後の課題と展望についてまとめた。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 但 野 茂

副 査 教 授 小 林 幸 徳

副 査 教 授 古 川 正 志 (情報科学研究科)

学 位 論 文 題 名

## Gait Analysis using Acceleration and Gyro Sensors

(加速度と角速度センサーを用いた歩行解析に関する研究)

歩行能力の低下は、人間の活動範囲を著しく制限してしまい、場合によっては寝たきりの原因ともなる。近年、高齢化に伴い身体機能が低下し、歩行に障害を持つ患者が急増している。そのため、リハビリテーションや臨床サイトにおいて、患者の歩行状態を診断・評価するための歩行解析手法が求められている。この場合の主要な診断情報は下肢関節の移動距離と関節角である。現在、このような歩行解析には複数台の CCD カメラを用いて患者を撮影して行う画像解析手法が主流である。しかし、この方法は室内空間に固定したカメラの撮影範囲内で測定されるため、屋外歩行や比較的長時間・長距離の歩行、さらには一般的な住宅室内空間の測定には向いていない。また CCD カメラによる測定法の測定精度は期待できるものの、装置が大がかりで、高価なため診断・治療サイトで用いることは極めて難しい。そのため、小型の IC センサーによる歩行解析手法が提唱されている。これらは加速度センサーや角速度センサーを装着した歩行解析システムである。理論上、センサーで測定された加速度を2回積分することで変位を求めることができるが、測定加速度データにはノイズ等が含まれるため計算誤差が増大してしまうことが知られている。また、測定した角速度を一回積分する事で部位の角度変化を算出する方法も考えられるが、この場合も同様の理由で計算誤差が大きくなるため、実用化された装置開発までには至っていない。

以上のことにより本論文では、三次元加速度センサーと三次元角速度センサーを用いた新たな歩行解析手法を提唱している。実用化を目指した本手法は、三次元加速度センサーで測定される加速度から重力加速度成分を抽出し、その値からセンサーの傾斜角度(関節角)を計算するものである。この値からヒトの下肢の各部位の姿勢を求めることができる。しかし、歩行中の加速度には重力加速度だけではなく、運動加速度や外部ノイズが含まれる。そのため、歩行中のセンサーの傾斜角度を正確に測定するのは容易なことではない。

そこで本論文では2種類の方法を提案し、下肢部位の関節角を計算している。1つは歩行中に測定された加速度から重力加速度成分のみを分離する方法である。測定された加速度データにFFTによる周波数解析を行い、歩行中に発生する周波数帯の主要加速度信号を特定し、信号フィルターにより抽出している。この抽出した加速度の中に重力加速度が含まれると考え、波形分解と下肢姿勢計算アルゴリズムから歩行中最適な下肢姿勢を持つ重力加速度をパターンマッチングにより逆計算する方法である。

もう一つの方法は、加速度センサーと同時に角速度センサーを用いて、これらから歩行中の運動加速度を推定する方法である。関節中心とセンサー位置から相対的な距離を求め、この距離と測定角速度から歩行中の運動加速度が推定される。そして、運動加速度を測定加速度から差し引くと重力加速度が得られる。この時、加速度データに含まれるノイズは、移動平均法により除去している。

以上本論文で提案された方法によると、歩行中の3次元下肢姿勢が計算され、その結果がスティックフィギュアモデルによりアニメーション化され、視覚的に確認できる。また、診断情報として重要な被験者の股関節の屈曲・伸展角、内転・外転角、膝関節の屈曲・伸展角や各関節の横断面軌跡等、が一度の実験で測定される。実験では、健常者による通常歩行と片足障害を模した歩行の測定を行い、それぞれ特徴的な関節角度変化や関節軌跡の差異が得られている。本手法の装着型加速度・角速度センサーシステムは、従来のCCDカメラシステムによる精度検証を行い、臨床的にも十分実用可能なことを確認している。

これを要するに、著者は、加速度センサーおよび角速度センサーを用いた新たな三次元歩行解析手法を提案したものであり、これらの成果は、医療福祉工学や人間機械システムデザイン学の発展に寄与するところ大である。よって、著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。