

令和元年6月10日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12948

研究課題名(和文) 慣性センサ信号に基づく3次元運動時の体重心位置軌跡の推定

研究課題名(英文) Estimation of center of mass trajectory of the body during 3D movements based on inertial sensor signals

研究代表者

渡邊 高志 (Watanabe, Takashi)

東北大学・医工学研究科・教授

研究者番号：90250696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、複数の慣性センサを用いて3次元運動時の身体の重心(体重心)位置の移動軌跡を推定する方法の開発を目的とした。最初に、体幹部・大腿部のセンサ装着位置を検討し、体幹部は上部に、大腿部は外側面に装着することに決定した。次に、足部位置と身体各部の姿勢ベクトルの算出法を検討し、それらを用いて身体リンクモデルにより姿勢を再構成して体重心位置を推定する方法を構築した。そして、構築した体重心位置軌跡推定法の実験的検証を行い、推定誤差の要因の検討を行った。この結果から、体重心位置の前後及び鉛直成分の利用可能性を確認し、体重心位置軌跡の運動評価への応用可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発を目指す体重心位置軌跡推定法により、荷重のような圧力センサ情報に類する指標が、慣性センサによる運動評価でも利用可能になると期待される。また、慣性センサを用いたシステムにより、これまで計測が困難であった運動機能障害者の運動の計測や医療施設等以外の実環境での計測が実施可能になる。これらの点が本研究の社会的意義である。一方、角度、ストライド長、歩行速度、歩行事象等、慣性センサ信号から算出可能な他の指標と組み合わせることで、光学式3次元動作解析システムに匹敵する解析機能を有する慣性センサ型3次元動作解析システムを実現するための基盤技術を構築する点に本研究の学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to developing a method to estimate movement trajectory of the center of mass (CoM) position of the body in 3D movements using inertial sensors. First, sensor attachment positions of the trunk and the thigh segments were examined, from which the upper part of the trunk and the lateral side of the thigh were determined to attach inertial sensors. Then, the calculation methods of the foot position and the segment vector of each part of the body were examined. Based on the results, the method of estimating the CoM position based on reconstructing the posture using the body link model was constructed using the foot position and the segment vectors. Finally, the constructed CoM trajectory estimation method was examined experimentally, and factors of the estimation error were discussed. The results showed that the anteroposterior and vertical components of the CoM position were useful, and the applicability to evaluation of movements of the CoM trajectory was suggested.

研究分野：生体医工学

キーワード：身体重心 慣性センサ 足部位置軌跡 姿勢ベクトル 歩行

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

身体の重心(体重心)は、バランスを含む運動状態を評価する上で有効な指標である。体重心は、光学的3次元動作解析装置を用いて身体の各部位の3次元位置を計測し、各部位の長さや質量、質量中心位置(重心比)の統計データから推定するのが一般的であるが、この方法では、リハビリテーションにおける利用は非常に困難である。一方、ジャイロセンサや加速度センサなどの慣性センサを用いたウェアラブルシステムによる運動計測に関する研究が、国内外で活発に行われている。これに関連して、簡易的な方法として、立位時の体重心位置に近い腰部に加速度センサを装着し、計測した加速度から体重心情報を取得する方法もあるが、対象動作に制約があり、運動が異なった場合の信頼性に対する課題が残る。歩行時の体重心位置軌跡は、バランス能力評価に加え、運動麻痺者の麻痺下肢への荷重の程度等も評価可能であり、機能改善を評価する上で重要な指標になるが、複数の慣性センサによる信頼性の高い推定法はほとんど研究されていない。

2. 研究の目的

本研究は、複数の慣性センサを用いて3次元運動時の身体の重心(体重心)位置の移動軌跡を推定する方法の開発を目的とする。これまで、腰部に装着した加速度センサから簡易的に体重心情報を取得する試みはあるが、様々な3次元運動に対して、慣性センサを用いた信頼性の高い体重心位置推定法に関する研究はほとんど無い。体重心位置軌跡は、麻痺下肢への荷重に関連する評価等も可能にし、リハビリテーションにおける運動評価での慣性センサの利用を飛躍的に拡大することから、慣性センサ信号による体重心位置軌跡の実用的推定法と関連技術を開発し、それらの実現可能性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 体重心位置推定法の原理的可能性の検証

本研究で検討する体重心位置推定法の概略を図1に示す。この方法では、これまでに検討してきた慣性センサ信号に基づく身体部位の姿勢ベクトル算出法、及びストライド長算出法を基本にして、足部位置と身体各部の姿勢ベクトルから身体リンクモデルにより姿勢を再構成し、体重心位置を推定する。最初に、この方法の実現可能性を検証するため、頭部・上肢・体幹を1つの部位とする3リンクモデルを使用し、体重心位置推定アルゴリズムに基づくプログラムを作成し、慣性センサによる健康者の歩行計測を実施する。3次元動作解析装置を利用すると、その装置の解析機能から体重心位置を自動算出可能であることから、3次元動作解析装置の計測値を用いて、作成したプログラムによる方法での推定結果と自動算出した結果を比較し、さらに、慣性センサの計測値から算出した体重心位置との比較を行う。また、体重心位置軌跡に関する過去の報告を調査し、文献での結果と実験で得られた結果との比較から推定結果の妥当性を確認する。これらの結果から、提案する推定法の原理について実現可能性、問題点の有無を検討する。

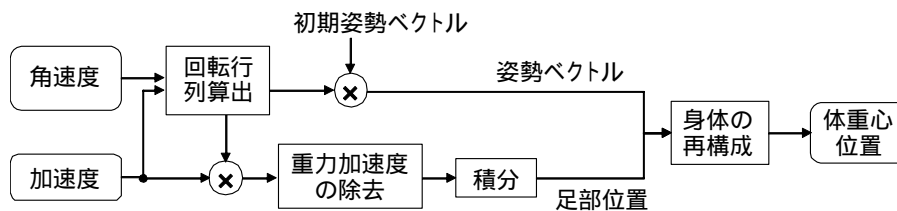


図1 本研究で検討する体重心位置推定法の概略

(2) 体幹の多関節構造の多リンクモデル化とセンサ装着位置の検討

体幹は多関節構造であることから、3次元運動に対応するためには体幹部の多リンクモデル化が必要になる可能性があるため、体幹部の多リンクモデル化の検討を行う。本研究では、体幹部を複数に分割して各部位の質量中心位置を推定し、それらを合成する方法を採用するので、日本人の体幹部の身体部分係数調査、国外での調査を参考に、体幹を肋骨下端及び腸骨稜上縁で3分割する5リンクモデル、肋骨下端で2分割する4リンクモデル、腸骨稜上縁で2分割する4リンクモデル、体幹を単一部位とする3リンクモデルの4種類を設定して検討する。これらの4種類のリンクモデルについて、3次元動作解析装置と慣性センサとの同時計測により、体重心位置推定における体幹の多リンクモデル化の効果を検討する。

また、以前に開発した慣性センサによる運動計測システムでは、使用するセンサの個数が最大7個となっていることから、最初に、このシステムを利用した計測を想定し、体幹部の計測のためのセンサ個数を1個にすることの可能性とその場合のセンサ装着位置について検討する。上記の5リンクモデルの体幹部の3か所に相当する位置にセンサを装着して計測を行い、体幹部を1つの部位として参照信号を計測し、比較を行う。加えて、体重心位置の推定精度を改善するためには、大腿部のセンサ装着位置が影響することが予備実験から示唆されたことから、大腿部の前面部と外側面にセンサを装着して同時計測することで、大腿部に装着するセンサ

の位置について検討する。

(3) 3次元運動時の体重心位置軌跡の推定法の構築

検討した体重心位置推定の原理的方法を基に、様々な3次元運動に対応可能な方法の構築を行う。本研究での方法は、足部位置と身体各部の姿勢ベクトルから身体リンクモデルにより姿勢を再構成するが、身体部位の姿勢ベクトルは両方に関係するので、最初に、3次元的な姿勢ベクトルの算出方法を構築する。これまで検討してきたクォータニオンを用いる方法を基本として、各部位の姿勢ベクトルの計測精度を検討し、問題の解決を図ることで、重心位置推定の算出に適した計測法を決定する。次に、足部3次元位置推定法を検討する。これまでに構築してきたストライド長計測法を基本とし、足部の前後、左右、上下への3次元位置変化として計測する場合の精度を検証し、問題の解決を行う。

(4) 体重心位置軌跡推定法の3次元運動における実験的検証

検討したセンサ装着位置において、構築した体重心位置の推定方法について、複数台のカメラを用いる光学式3次元動作解析装置を使用し、立位時の身体動揺動作、立位時の身体旋回動作、直線歩行時の動作の3種類の動作を慣性センサと同時計測する。この結果を解析し、構築してきた体重心位置軌跡推定法の検証を行い、問題点の改善を検討する。また、定常歩行を対象に体重心位置軌跡を推定し、その歩行運動の評価への応用可能性を検討する。これらの結果から、本研究の体重心位置推定法による推定結果の実用的な利用の可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 体重心位置推定法の原理的可能性の検証

図1に示した体重心位置推定法に基づいて、頭部・上肢・体幹を1つの部位とするリンクモデルを使用して、体重心位置推定プログラムを作成した。また、リンクモデルの身体部分係数について、日本人を対象とする報告をもとに、歩行に対応するように導出した。

次に、提案法の原理的可能性を検証するため、3次元動作解析装置と慣性センサによる歩行の同時計測を実施した。まず、3次元動作解析装置の計測値から足部位置と身体部位の姿勢ベクトルを算出し、作成したプログラムにより体重心位置軌跡を算出した。そして、3次元動作解析装置の機能を用いて自動算出した体重心位置軌跡と比較した。その結果、0.999以上の相関係数、軌跡の3成分のRMSEが0.2cm未満となり、提案方法が原理的に実現可能であることを確認した。また、歩行中の体重心位置の3軸成分の軌跡は過去の報告での結果と概ね同様であることも確認した。一方、作成したプログラムを用いて慣性センサ信号から体重心位置軌跡を算出したが、3次元動作解析装置で自動算出した結果と大きな誤差を生じた。その原因について検討し、身体部位ベクトルの推定における前額面内成分の誤差、足部位置軌跡の誤差が大きく影響したことを示唆する結果を得た。

(2) 体幹の多関節構造の多リンクモデル化とセンサ装着位置の検討

最初に、4リンクモデル、5リンクモデルによる体重心位置推定を行えるようするために、体幹部を2つに分割した際の各部の身体部分係数について、日本人を対象とする報告をもとに導出した。次に、4種類のリンクモデルの比較について、共通の基準として床反力計で計測した圧力中心点を用いて行った。所有する計測装置の制約から、起立やスクワットの動作を対象とし、矢状面内の運動に近似して解析した。体幹を3分割するモデルと腸骨稜上縁で2分割するモデルが良好な推定精度を示したが、体幹部を固定すると推定精度のモデル間の差が小さくなる傾向も確認された。

次に、体幹部と大腿部のセンサ装着位置について、3次元動作解析装置で計測した各部の姿勢ベクトルと本研究の方法で推定した姿勢ベクトルの比較を行い検討した。体幹部については、5リンクモデルの体幹部の3か所に相当する位置に装着したセンサから算出した姿勢ベクトルの各成分と、体幹を単一部位として3次元動作解析装置で計測した姿勢ベクトルの各成分の相関を求めた結果、体幹上部のセンサで 0.90 ± 0.06 、中部のセンサで 0.66 ± 0.38 、下部のセンサで 0.46 ± 0.41 となり、上部のセンサを利用すると良好な相関が得られることを確認した。体幹中部に装着したセンサでも、姿勢ベクトルの前後・上下成分の相関は上部に装着したセンサと同程度であったが、左右成分の変化を計測しにくいために相関が小さくなった。この結果から、体幹部は左右の動きを検知しやすい上部に装着するのが望ましいと考えられ、また、体幹を単一部位とした場合との相関が高い値となったことから、体幹部を1つとして体幹の上部にセンサを装着することとした。しかしながら、背筋を伸ばした姿勢、猫背のような姿勢などの姿勢の差異の影響を受けるため、静止立位時と歩行時の姿勢の変化には注意が必要であることも確認された。大腿部については、姿勢ベクトルの前後成分、鉛直成分の相関係数は、前面部、外側面部ともに平均で0.99以上となったが、左右成分については、前面部で 0.69 ± 0.14 、外側面部で 0.93 ± 0.06 となり、センサを外側面に装着することで相関係数が大きくなり、ばらつきも小さくなった。この結果から、外側面部にセンサを装着する方が、皮膚や筋の動きによる影響をある程度低減する可能性があると考えられた。以上の結果から、体幹部はセンサを上部に装着すること、大腿部はセンサを外側面部に装着することにした。下腿部については特に問題はなかったが、実験上の制約から側面に変更することとした。

(3) 3次元運動時の体重心位置軌跡の推定法の構築

慣性センサによる重心位置軌跡の推定における問題点として、身体部位の姿勢ベクトルの左右成分(前額面内成分)の誤差、足部位置軌跡の誤差が影響する可能性があったので、最初に、身体部位の姿勢ベクトルの推定精度、及び回転行列の算出方法を検証した。身体部位の姿勢ベクトルの推定方法については、以前に構築したカルマンフィルタによる誤差の補正方法を修正することで、3次元運動時にも適切に姿勢ベクトルを推定でき、精度の改善が可能であることを確認したが、長時間計測では不適切になる場合があることも確認された。通常の計測時間では支障がなかったことから、本研究では、計測に支障が生じない計測時間の範囲で試験を実施することとした。また、回転行列の算出法としてオイラー角を用いる方法とクォータニオンを用いる方法について、ストライド長推定の結果を比較し、両方法とも概ね同様の結果となったが、オイラー角を用いる場合には、その定義によっては誤差が増加する場合もあった。そのため、クォータニオンによる回転行列の算出法を採用することとした。

また、姿勢ベクトルの推定精度に関しては、センサ間の座標系の不整合が関係している可能性も確認されたので、複数センサで計測する場合の信号の校正方法について、これまでに報告された複数の方法を実用性の観点から選択し、剛体モデルを用いて同一条件で実験的に検証して、臨床的利用可能性のある方法を抽出した。そして、抽出した方法に本研究で提案する方法を加えて、歩行計測で検討を行った。その結果から有効になる可能性のある方法を決定したが、臨床的利用を考えると実用には課題が残された。そのため本研究では、同程度の校正の効果が得られる簡便な方法で計測を行うこととした。

以上の結果から、現段階で最適な方法を決定し、体重心位置軌跡の推定法を構築した。

(4) 体重心位置軌跡推定法の3次元運動における実験的検証

決定したセンサ装着位置において、立位時の身体動揺動作、立位時の身体旋回動作、直線歩行時の動作の3種類の動作を3次元動作解析装置と慣性センサにより同時計測した。計測結果から体重心位置軌跡を推定し、その精度を確認した結果、立位時身体動揺、立位時身体旋回といった足部位置が変化しない運動においては比較的高い推定精度が得られることを確認した。また、直線歩行時でも、体重心位置の鉛直成分では比較的高い推定精度が得られ、前後成分についても動作幅に対して十分に小さい誤差での推定が可能であることを確認した。直線歩行時については、体重心位置の前後成分のRMSEは 3.8 ± 2.1 cm程度であり、約3.5mの歩行による移動を考えると、動作に対する誤差は小さいと考えられた。歩行動作での相関係数は全試行で0.99以上と非常に高い値が得られた。鉛直成分は、RMSEが全試行で1.3cm以下と小さい値となり、相関係数は94.8%以上の計測試行で0.7より大きい値(0.82 ± 0.05)となった。これらの結果から、体重心の前後成分と鉛直成分については運動評価に適用可能であることが示唆された。一方、体重心位置の左右成分では誤差が大きくなった。この原因について検討するため、歩行終了時の足部位置の左右成分について、左右の足部位置の midpoint をとり、その絶対誤差を算出し、直線歩行における体重心位置軌跡の左右成分のRMSEと比較した。この結果、両者に正の相関がみられたことから、本研究で用いる体重心位置軌跡の推定法を歩行動作の左右成分の評価に適用するためには、足部位置軌跡の推定精度を向上させる必要があることが確認された。

上記の結果を受けて、健常者の直線歩行において、足部位置軌跡の誤差要因の検討を行った。初めに、センサ座標系をグローバル座標系に変換する座標変換行列に着目し、その誤差と足部位置軌跡の誤差の関係を検討した結果、足部位置軌跡の左右成分の誤差と座標変換行列の1つの成分の誤差に正の相関が認められた。さらに、その成分について、推定誤差と初期値の誤差に正の相関が認められた。この結果から、他のセンサの追加を含め、クォータニオン推定法の検討が必要であり、初期値の推定を正確に行う必要があることを確認した。次に、積分処理による加速度の計測雑音の蓄積が足部位置軌跡の推定精度に与える影響について、誤差モデルを作成し、センサの仕様をもとにして計算することで検証した。その結果、座標変換行列を正確に推定できた場合でも、足部位置軌跡には最大3cmの誤差が生じる可能性があることが示唆された。この誤差を身体重心位置の誤差に換算すると最大2.3cm程度となり、直線歩行時の体重心の左右成分の振幅の最大は10~20cm程度であることを考えると、座標変換行列に関する誤差を無くす必要があると考えられ、現状では左右成分の運動評価への応用は難しいと考察された。一方、足部位置軌跡推定に関して、足部運動区間の検出法を改善するため、ニューラルネットワークによる足部運動区間の自動検出法を検討した。この方法により足部位置軌跡の自動算出法が実現可能であることを確認するとともに、ストライド長推定では従来法よりも精度が安定する傾向があることを確認し、実用性と推定精度の改善の観点から有効になると考えられた。

以上の結果を踏まえ、体重心位置の前後及び鉛直成分の利用に着目し、健常者の直線歩行計測を行い、定常歩行区間の体重心位置軌跡を推定した結果から身体重心位置軌跡の運動評価への応用可能性を検討した。鉛直成分の振幅が速度の増加に伴い増加する傾向が全被験者でみられ、また、両脚支持期から片脚支持期にかけての体重心の鉛直成分の軌跡の形状は山型と直線型の増加に大別されることを確認し、その形状の違いには、膝関節や下腿部の使い方が関わっている可能性があることが考察された。

以上のように本研究では、慣性センサによる身体重心位置推定法を提案し、実験的検討から利用可能性を明らかにし、運動評価への応用可能性を示す結果を得た。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

Yoshitaka Nozaki, Takashi Watanabe, A Basic Study on Detection of Movement State in Stride by Artificial Neural Network for Estimating Stride Length of Hemiplegic Gait Using IMU, Proc. 41st Ann. Int. Conf. IEEE EMBS, 査読有, 2019. (in press)

武田優帆, 渡邊高志, 運動評価への応用のための慣性センサによる体重心位置軌跡推定の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vo.118, No.366, pp.1-4, 2018.

Takuma Ando and Takashi Watanabe, A Basic Test of Calibration Methods for Measurement of Three-dimensional Movements of Lower Limbs With Inertial Sensors, Proc. 2018 IEEE Life Sciences Conference, 査読有, pp.211-214, 2018. DOI: 10.1109/LSC.2018.8572202

Takashi Watanabe, Tasuku Miyazawa, and Jun Shibasaki, A Study on IMU-based Stride Length Estimation for Motor Disabled Subjects: A Comparison under Different Calculation Methods of Rotation Matrix, Proc. 2018 IEEE EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics, 査読有, pp.70-73, 2018. DOI: 10.1109/BHI.2018.8333372

Jun Kodama, Takashi Watanabe, Examination of Inertial Sensor-Based Estimation Methods of Lower Limb Joint Moments and Ground Reaction Force: Results for Squat and Sit-to-Stand Movements in the Sagittal Plane, Sensors, 査読有, Vol.16, No.8, 1209, 2016. DOI: 10.3390/s16081209

[学会発表] (計 8 件)

Yoshitaka Nozaki, Takashi Watanabe, A Basic Study on Detection of Movement State in Stride by Artificial Neural Network for Estimating Stride Length of Hemiplegic Gait Using IMU, the 41st Ann. Int. Conf. IEEE EMBS, 2019.

野崎善喬, 渡邊高志, ANN による運動区間自動検出に基づく慣性センサによるストライド長推定の基礎的検討, 第 58 回日本生体医工学会大会, 2019.

野崎善喬, 渡邊高志, 慣性センサによるストライド長計測のための ANN による運動区間推定に関する検討, 第 52 回日本生体医工学会東北支部大会, 2019.

武田優帆, 渡邊高志, 運動評価への応用のための慣性センサによる体重心位置軌跡推定の検討, ME とバイオサイバネティクス研究会, 2018.

Takuma Ando and Takashi Watanabe, A Basic Test of Calibration Methods for Measurement of Three-dimensional Movements of Lower Limbs With Inertial Sensors, the 2018 IEEE Life Sciences Conference, 2018.

武田優帆, 内藤望実, 渡邊高志, 慣性センサによる体重心位置軌跡の推定に関する基礎的検討, 第 57 回日本生体医工学会大会, 2018.

Takashi Watanabe, Tasuku Miyazawa, and Jun Shibasaki, A Study on IMU-based Stride Length Estimation for Motor Disabled Subjects: A Comparison under Different Calculation Methods of Rotation Matrix, 2018 IEEE EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics, 2018

海老原匠, 武田優帆, 渡邊高志, 慣性センサを用いた角度計測のための簡便な校正方法に関する基礎的検討, 第 50 回日本生体医工学会東北支部大会, 2017.

6 . 研究組織

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。