

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26560299

研究課題名(和文) 慣性センサによる運動時の関節トルク・発生パワー推定法の開発と応用の新展開

研究課題名(英文) New development and application of estimation methods of joint torque and generated power using inertial sensors during movements

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)： 下肢関節トルク推定法として、最上部に外力が作用しないと仮定して床反力の計測を不要にし、かつ、慣性センサによる身体各部の角度計測から各部位の運動時の重心加速度を算出して3次元動作解析装置での計測を不要にする方法を検討した。健康被験者でのスクワット動作と起立動作の矢状面運動を対象に実験的評価を行い、提案方法の実現可能性を示した。車いす駆動時の推進数と推進周期を上肢に装着した慣性センサから推定する方法、及び、推進動作時のハンドリムへの接触と解放のタイミングの検出の実現可能性を示した。また、車いす駆動時の上肢発生パワー推定の一連の方法を構築し、実験的検証を通して解決すべき課題を確認した。

研究成果の概要(英文)： A method of estimating lower limb joint torques by using inertial sensors without ground reaction force and 3D motion measurement system were examined for squat and sit-to-stand movements in the sagittal plane. The method estimated lower limb joint torques by using segment inclination angles measured with inertial sensors and an assumption of no external force to the top segment. The proposed estimation method was shown to be feasible from results of comparison of estimated joint torques to those estimated by ground reaction force and data from 3D motion measurement system. An estimation method of the number of strokes and push cycle during wheelchair propulsion using an inertial sensor attached on the upper arm was shown to be useful. Timings of hand contact on pushrim and hand release from it was suggested to be possible with inertial sensors. An estimation method of generated power in wheelchair propulsion by users were examined and problems to be solved were confirmed.

研究分野：生体医工学

キーワード：健康 福祉 リハビリテーション 慣性センサ トルク モーメント

1. 研究開始当初の背景

歩行や屋外環境での広範囲の運動に対して、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・国外を問わず活発に行われている。しかしながら、多くの研究は、日常生活での活動量計測や上下肢の角度計測等が中心であり、従来のカメラを用いた3次元動作解析装置による運動解析で利用されてきた関節トルクや発生パワーの推定について、慣性センサでの計測による推定は実現されていない。運動機能評価における関節トルク等の利用は、下肢動作を対象に広く利用されている。

一方、近年では、車いす利用者の運動量評価や、車いす駆動時の上肢の負荷評価等に関する研究に注目が集まっており、車いすにロードセルや速度センサ等を搭載して、駆動負荷を与えた車いすエルゴメータ上での走行状態を計測する研究が行われるようになってきた。しかし、車いすの駆動と上肢の運動との関係を実環境で計測する研究はほとんど行われていない。

我々の研究グループでは、ジャイロセンサと加速度センサの情報にカルマンフィルタを組み合わせることで、下肢関節角度を安定かつ妥当な精度で計測できることを確認してきた。この方法を発展させることで、慣性センサによる関節トルクの推定や車いす駆動時の上肢運動計測が可能になると期待できるが、具体的実現方法の構築、ならびにその実験的検証が課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、慣性センサでの計測により、関節トルクや発生パワーを推定する方法を確立し、リハビリや実環境での慣性センサによる運動計測・評価の新たな可能性を切り拓くことを目的とする。慣性センサは、実環境での運動計測を簡便に行えることから、運動評価について様々な研究が行われている。しかし、従来の3次元動作解析装置を用いた方法で利用されてきた関節トルクや発生パワーの推定は実現されていない。特に、歩行解析の研究では関節トルク推定が利用されており、また近年では、車いす駆動時の上肢運動計測と負荷評価が注目されていることから、これら2つの分野への応用を対象に、これまで実現されていなかった慣性センサ情報による関節トルクや発生パワーの推定方法を提案し、その実現可能性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 下肢関節トルク推定法の開発

関節トルクを推定する従来の方法では、3次元動作解析装置により身体各部の位置座標を計測し、各部位の重心加速度を算出し、床反力計により計測した床反力と合わせて、剛体リンクモデルから導出した運動方程式により、足関節、膝関節、股関節、体幹の各トル

クを順に推定する。一方、本研究で提案する方法では、剛体リンクモデルによる運動方程式の導出は同様であるが、身体最上部に外力が作用しないと仮定することで床反力に相当する計測を不要にし、かつ、慣性センサにより身体各部の角度計測から各部位の運動時の重心加速度を算出することで3次元動作解析装置での計測を不要にする。

慣性センサによる各部位の角度計測については、ジャイロセンサ出力の積分値に対し、加速度センサ出力を用いてカルマンフィルタを適用して誤差を補正する方法を利用する。また、従来の方法、本研究で提案する方法のいずれも、運動方程式中の各部位の慣性モーメントが必要になるが、これについては、身長及び体重の情報から推定する。

最初に、本研究で提案する剛体リンクモデルによる関節トルク推定法について、角度計測方法における誤差の見積りから、提案法の実現可能性と推定精度の検討を計算機シミュレーションにより実施する。次に、健常被験者で、光学式3次元動作解析装置及び床反力計と慣性センサとで同時計測することで、提案する関節トルク推定法を実験的に検証する。計測する動作は、椅子からの立ち上がりや、スクワット運動を対象とする。関節トルクの推定では剛体リンクモデルを用いるが、広く利用されている3リンクモデルと、体幹部を複数部位に分割した4リンクモデルとがあるので、それぞれのモデルを用いる場合について、従来の方法と提案方法とで比較検討する。また、4リンクモデルによるトルク算出の場合は、計算に必要となる角度の計測法の検証も必要であるので、センサ装着位置やセンサ装着方法の違いによる計測誤差の検証を含め、実験的検討を行う。これらの実験的検討から、提案方法の実現可能性を検証する。

(2) 車いす駆動時の上肢の運動及び発生パワー推定法の開発

最初に、前述の角度計測法を応用し、車いす駆動時の上肢運動を慣性センサで計測する方法を構築する。車いすを上肢で推進させる期間の動作を平面内の運動に近似して考えるが、運動加速度が大きい場合の計測誤差が増加する可能性があるため、計測精度について検証する。

車いすを駆動する場合、肩の損傷等を防ぎ、負担を軽減するために、平地や傾斜路で異なる上肢の運動を行うことが一般的である。そこで、これらの異なる運動状況を評価するため、角度情報から評価指標を算出し、車いす駆動時の慣性センサでの上肢角度計測の実用性を健常被験者で実験的に検証する。車いす駆動時の運動計測法については、University College Londonのグループと共同で、車いすのハンドリムに加わる6軸力と車いす速度を計測可能なSmartWheelを搭載した車いすを使用し実施する。これにより、屋外等の実環境での車いす駆動評価について、構築した

計測システムの有用性を検証する。

次に、車いす駆動時の運動の評価指標を、上肢の角度から算出する方法を構築する。車いす駆動時の上肢発生パワー推定法は、車いすのハンドリムに力を印加する期間を対象にし、手背部に装着した慣性センサで加速度を計測する。ハンドリムの形状から、車いす駆動時の手の運動を平面内の円形軌道と仮定し、計測した加速度から車いす速度を算出する。上肢発生パワーは、車いす速度と駆動力との積から推定するが、駆動力についても、計測した加速度から運動方程式を用いて推定することで、慣性センサ信号のみによる推定を可能にする。この算出法について、実現可能性を実験的に検証する。

4. 研究成果

(1) 下肢関節トルク推定法の開発

最初に、被験者1名のスクワット動作を対象とし、3リンクモデルによる関節トルク推定において、ウェアラブルセンサによって計測する傾斜角度の誤差の影響を検討した。3次元動作解析装置で計測した角度に誤差を付加した際の関節トルクを推定した結果、膝関節、股関節トルクのみに着目すると、角度計測のRMSEが3deg以下であれば、本研究の方法と従来法との間の推定トルクのRMS値が0.15 Nm/kg以下となり、全ての関節トルクのRMS値が0.15 Nm/kg以下になるためには、下腿部1deg、大腿部3deg、体幹部3deg以下の角度誤差である必要があることが示された。

提案する関節トルク推定法の実験的検証を行うに際し、広く利用されている3リンクモデルでは、現在の角度計測精度では推定精度に限界が生じる可能性があることから、2種類の4リンクモデルと5リンクモデルを構成し、計4種類の剛体リンクモデルについて、従来の方法と提案する方法とで推定した関節トルクを比較検討することとした。このとき、体幹部を肋骨下端で2分割したものを4リンクAモデル、腸骨稜上縁で2分割したものを4リンクBモデルとし、両方で体幹を3分割したものを5リンクモデルとした。そのため、各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導出を行った。次に、健常被験者3名で、椅子からの立ち上がり動作、及びスクワット動作を対象とし、各々2種類の条件で、3次元動作解析装置、床反力計及び慣性センサとで同時計測を行った。

慣性センサで計測した身体部位の傾斜角度と3次元動作解析装置での計測角度との誤差は、大腿部と下腿部では、側面に装着した場合に5deg未満のRMSEであり、体幹部についても概ね5deg以下となったが、4リンクAモデルの体幹中下部と5リンクモデルの体幹中部では5degより大きくなった。3次元動作解析装置のマーカの動きとセンサの動きの差が誤差を生じていたが、慣性センサでの

計測には問題が無かったので、誤差の小さい部位のセンサを利用して関節トルク推定の検討を実施することとした。

本研究で提案する推定法と従来法とで推定した関節トルクについて、RMS値を算出した。このとき、慣性センサから角度を算出する方法としてカルマンフィルタによる誤差補正を適用すると、推定した関節トルクに振動的な誤差が生じたため、角速度の積分誤差を線形補正する方法で角度を算出することとした。推定した関節トルクの全試行について得られたRMS値の平均値を図1に示す。全関節で5リンクモデルが最も小さく、4リンクBモデルがそれに続き、全ての関節で0.1Nm/kgを下回った。4リンクAモデルは足関節と股関節で3リンクモデルを下回ったが、膝関節では3リンクモデルを上回った。

また、3次元動作解析装置で計測した傾斜角度からも、同様に身体上部から順に関節トルクを推定し、従来法と比較した(図2)。この結果では、3リンクモデル以外の全てのリンクモデルではほぼ同様の結果となり、股関節と膝関節でRMS値が0.1Nm/kgを下回った。足関節でもほぼ0.1Nm/kgとなり、3リンクモデルの結果を下回った。

以上の結果では、両方の比較でRMS値のばらつきが大きく、特に膝関節と足関節で標準偏差が大きかった。これは被験者間のばら

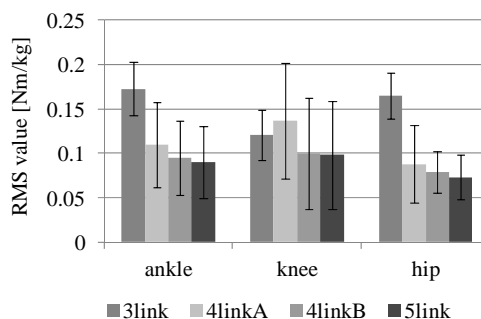


図1 本研究での方法と従来法とで推定した関節トルクのRMS値

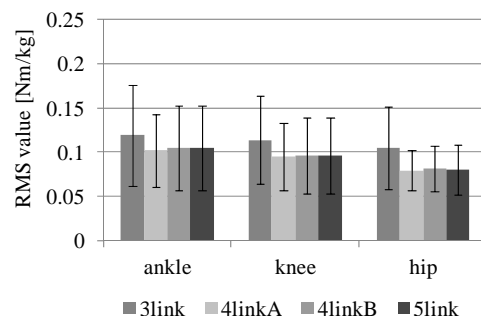


図2 3次元動作解析装置で計測した角度だけを用いる方法と従来法とで推定した関節トルクのRMS値

つきと、起立条件でばらつきが大きくなる傾向があったことが原因であった。被験者間のばらつきについては、身体部分係数に統計的平均値を使っていることから、被験者ごとの体格が平均からずれることによるモデル誤差が考えられる。

3 リンクモデル以外のモデルでは、体幹部のリンク節点についても関節トルクの導出が可能となるため、これを導出し、従来法と比較した。いずれの節点でも4リンクモデルと5リンクモデルではほぼ同様の結果となり、本研究での方法と3次元動作解析装置で計測した角度だけを用いる方法とで、従来法とのRMS値は同様の結果となった。

以上の結果から、慣性センサによる関節トルクの推定が実現可能になることを確認した。また、3リンクモデルと4リンクモデルとの推定結果の差に比べて、4リンクモデルと5リンクモデルとの差は小さかったため、より少ないセンサで計測したい場合は4リンクBモデルが使用可能になることも示唆された。

(2) 車いす駆動時の上肢の運動及び発生パワー推定法の開発

慣性センサで車いす駆動時の発生パワーを推定するためには、車いすを上肢で推進させる期間(推進期)を慣性センサで検出する必要がある。一方、車いすを駆動する場合の肩の損傷等を防ぎ、負担を軽減するためには、推進ストローク数、推進ストローク周期も影響することが示唆されている。そこで、これらのパラメータ、ならびに、推進動作期間を慣性センサで計測する方法を最初に検討した。本研究では、上腕に装着した慣性センサを用いて上腕部の姿勢ベクトルを算出し、各ストローク動作を検出する方法を検討した。これは、上腕の角度と同様の評価が可能になるとともに、肘関節位置の3次元的な動作軌跡の正規化パターンを得ることで直観的な検討が可能になると考えられたためである。

慣性センサで3次元運動中の姿勢ベクトルを計測する方法として、慣性センサで計測した信号からクォータニオンを算出し、クォータニオンから回転行列を求めて、上腕部に設定したベクトルの運動を算出する方法を構築した。このとき、計算で生じる誤差をカルマンフィルタで補正する方法を用いた。この方法について、剛体で計測精度の検証を行った結果、動作速度が速いと誤差が増大する傾向があったが、概ね5%以下の精度で位置変化を計測可能であることを確認した。

University College Londonの研究グループと共同で、実環境に近い平地や傾斜路での車いす駆動時の運動計測を実施した。計測は、健全な車いす非使用者10名で、約7m以上の平地路面と約4.8mの約6%傾斜路面(前後に水平面を設定)の走行を行い、慣性センサシステムとSmartWheelとで同時計測を行った。上腕部の姿勢ベクトルから、車いす駆動時の上肢の3次元的な運動を肘位置の正規

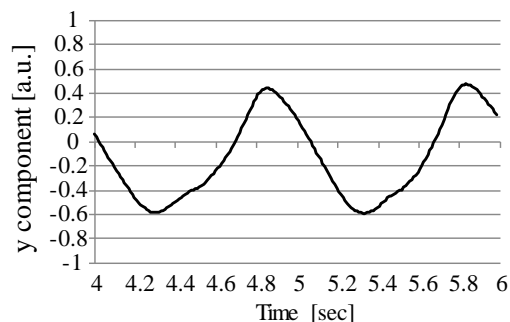


図3 慣性センサで計測した車いす駆動時の上腕部ベクトルの進行方向成分の例

化移動軌跡パターンとして解析した結果、平地と急斜路で上肢動作が異なることを定量的に計測可能であることを確認でき、また、車いす駆動時の上腕部運動は前後方向に大きく変化するパターンであることを確認した。

以上の結果から、ストローク数とストローク周期の推定方法を検討した。走行中の上腕部ベクトルの前後方向成分(図3)に着目し、閾値を設定し、上腕部の姿勢ベクトルの進行方向成分が増加して閾値を超える時刻を求め、ストローク探索開始点とした。探索開始点から時刻を戻った時の極小点をハンドリム着点(HC)とし、探索開始点から時刻を進めたときの極大点をハンドリム離手点(HR)とした。そして、HRの数を推進ストローク数、連続する2つのHR間の時間を、推進ストローク周期とする方法を提案した。

他の研究グループでは、上肢に装着した加速度センサで計測した加速度ノルムを利用する方法を検討していたことから、その方法をもとに加速度ノルムからストローク数とストローク周期を推定する方法を実装し、本研究で提案する方法と比較した。このとき、走行開始時と停止時のブレーキ動作については、動作が異なることから、それらを除いた定常走行部分について解析した。

ストローク数の推定結果は、平地走行では、本研究の提案法で誤検出が無かったが、加速度ノルムによる方法では2.5%の誤検出率であった。傾斜走行では、提案法では0.5%、加速度ノルムによる方法では2.9%の誤検出であった。しかし、加速度ノルムによる方法では、特定の被験者で15%を超える大きな推定誤差が生じる場合もあった。ストローク周期については、両方の方法で平均3%以下の誤差で推定できたが、加速度ノルムによる方法の方が、平均誤差とそのばらつきが小さい傾向があった。加速度ノルムによる方法では、低域通過フィルタの遮断周波数の設定に課題があり、また、ストローク数推定の誤検出率が大きい場合があったが、本研究での方法は、ストローク数推定を大幅に改善でき、低域通過フィルタの問題を低減できたと考えられる。

本研究で提案した方法では、HCとHRのタイミングを検出可能であることから、推進

期と回復期の期間の推定を検討した。傾斜走行では、検出時間差が平均 50ms 以下であったが、平地走行での検出時間差はさらに大きくなった。ここでの検出精度の場合について、走行中の推進期と回復期の期間の推定を行った結果、両方の期間について、平地走行で 20%以上、傾斜走行で約 15%の誤差となった。特に、平地走行での推進期の期間の誤差が約 50%と大きい結果となった。

本研究で提案した方法はストローク動作を良好に検出できたことから、本研究の提案法で検出した HC 動作の直後と HR 動作の直前のタイミングで大きな加速度が生じると仮定し、本研究の提案方法と手に装着した慣性センサで計測した加速度ノルムによる極大値検出を組み合わせて、それぞれ HC と HR として推進期と回復期の期間を算出することを試みた。その結果、平地走行の推進期の期間は約 16%とやや大きかったが大幅に改善でき、また、平地走行の回復期、傾斜走行の両方の期間については 10%未満の誤差となり、いずれも大幅に改善できた。

車いす駆動時の上肢発生パワー推定法については、University College London のグループが中心となって検討した。手に装着した慣性センサから推進期の走行速度を推定した結果、変化の傾向は類似していたが誤差が大きく、また、推定した駆動力も推進期前半での誤差が大きかった。そのため、上肢発生パワーの推定も十分な結果には至らなかった。特に、推定方法での仮定が十分に満足できない可能性があることが実験結果から考えられた。

以上の結果から、慣性センサにより、車いす駆動時の上肢運動のストローク数とストローク周期、推進期、回復期の検出が可能になることが示唆されたが、上肢による駆動時の発生パワー推定については課題が残った。しかしながら、上肢発生パワー推定の一連の方法は構築でき、また、課題も確認できたので、今後、推定法を改良することで方法の構築が進むことが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Takashi Watanabe and Jun Kodama, Feasibility Study of Inertial Sensor-based Joint Moment Estimation Method during Human Movements A Test of Multi-Link Modeling of the Trunk Segment, Proc. 9th Int. Conf. Bio-inspired Systems and Signal Processing, 査読有, 2016 年, 248-255

小玉 潤, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢関節モーメント推定における誤差原因の基礎的検討, 第 36 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, 査読無, 2015 年, 177-180

Takashi Watanabe, Yuta Teruyama, and Kento Ohashi, Comparison of Angle Measurements between Integral-based and Quaternion-based Methods Using Inertial Sensors for Gait Evaluation, Communications in Computer and Information Science, 査読無, Vol.511, 2015 年, 274-288

小林大亮, 塩谷真帆, 渡邊高志, 着床時に着目した歩行中の足部三次元動作の評価方法に関する基礎的検討, 第 35 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, 査読無, 2014 年, 153-156

Maho Shiotani, Takashi Watanabe, A Preliminary Study on Evaluation of circumduction movement during gait with Wireless Inertial Sensors, Proc. 36th Ann. Int. Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, 2014 年, 5828-5831

Maho Shiotani, and Takashi Watanabe, A Basic Study on a Method of Evaluating 3-dimensional Foot Movements in Walking, Proc. IEEE-EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics, 査読有, 2014 年, 543-546

〔学会発表〕(計 8 件)

宮崎滉大, 渡邊高志, Andrew Symonds, Catherine Holloway, Tatsuto Suzuki, 車いす推進時の上肢運動評価のための慣性センサによるストローク情報計測に関する基礎的検討, 第 55 回日本生体医工学会大会, 2016 年 4 月 27 日, 富山国際会議場(富山県・富山市)

Takashi Watanabe and Jun Kodama, Feasibility Study of Inertial Sensor-based Joint Moment Estimation Method during Human Movements A Test of Multi-Link Modeling of the Trunk Segment, 9th Int. Conf. Bio-inspired Systems and Signal Processing, 2016 年 2 月 22 日, イタリア・ローマ

小玉 潤, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢関節モーメント推定における誤差原因の基礎的検討, 第 36 回バイオメカニズム学術講演会, 2015 年 11 月 29 日, 信州大学(長野県・上田市)

M. Shiotani and T. Watanabe, A Basic Study on Measurement of 3-dimensional Foot Movements during Gait Using an Inertial Sensor, The Joint Symp. 9th Int. Symp. on Medical, Bio- and Nano-Electronics, and 6th Int. Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics,

2015年3月3日, 東北大学(宮城県・仙台市)

渡邊高志, 特別講演 障害者・高齢者の運動リハビリテーションとインターフェイス, 第40回感覚代行シンポジウム, 2014年12月9日, 産総研臨海副都心センター(東京都・江東区)

小林大亮, 塩谷真帆, 渡邊高志, 着床時に着目した歩行中の足部三次元動作の評価方法に関する基礎的検討, 第35回バイオメカニズム学術講演会, 2014年11月9日, 岡山大学(岡山県・岡山市)

Maho Shiotani, Takashi Watanabe, A Preliminary Study on Evaluation of circumduction movement during gait with Wireless Inertial Sensors, 36th Ann. Int. Conf. the IEEE Eng. Med. and Biology Soc., 2014年8月29日, アメリカ・シカゴ

Maho Shiotani, and Takashi Watanabe, A Basic Study on a Method of Evaluating 3-dimensional Foot Movements in Walking, IEEE-EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics (BHI), 2014年6月3日, スペイン・バレンシア

〔産業財産権〕

出願状況(計2件)

名称: 運動測定装置ならびに運動測定方法

発明者: 渡邊高志, 照山裕太, 塩谷真帆

権利者: 東北大学

種類:

番号: 特願 2014-101851

出願年月日: 2014年5月15日

国内外の別: 国内

名称: 運動測定装置

発明者: 渡邊高志, 塩谷真帆

権利者: 東北大学

種類:

番号: 特願 2014-170160

出願年月日: 2014年8月25日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 高志 (WATANABE, TAKASHI)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号: 90250696