


在外研究員研究報告書

2019年 9月 30日 受付

所 属	理工学部		氏 名	伊藤 彰人	
職 名	准教授				
研究課題名	個々の運動能力変化を再現可能な筋骨格モデルの構築				
研究期間	2017年 9月 1日～2018年 8月 31日				
滞在期間 ・滞在地 研究調査先	滞在期間	滞 在 地	研究・調査先		
	2017年9月1日～ 2018年8月31日	アメリカ	University of California Berkeley		
研 究 費	306.6 万円		研究成果の概要	別記 4,000字程度	
発 表	題 目 名	発表学術誌名Vol. No.		発行年月日	
	著 書 名	発 行 所 名		発行年月日	
	演 題	講 演 学 会 名		講演年月日	
	Estimation of Hand Position and Posture using Inertial Sensors and its Application to Robot Teaching System	2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (IEEE ROBIO 2018)		2018年12月15日	

研究成果の概要

近年、身体計測技術、解析技術の向上により、デジタルヒューマンシミュレーションを用いて、人の運動特性に基づいた生活支援機器の開発や、日常生活での高齢者に対する身体負荷の少ない製品、住宅設備の開発などが行われている。しかし、人の複雑さゆえ、人体の構造や動きを分析し、単純化したモデルでの評価にとどまっている。デジタルヒューマン(筋骨格モデル)で詳細にコンピュータ上に人体をモデル化し、関節稼動域、最大筋力、筋力の衰え、身体障害者の麻痺具合など、個人の様々な特性を反映することができれば、これまで行うことのできなかった負荷評価や苦痛の原因究明に繋がるのが期待できる。例えば、加齢とともに衰える筋力や麻痺などの障害度を再現可能な筋骨格モデルを構築できれば、加齢、障害度により変わる身体負担の評価が可能となり、高齢者や身体障害者にも快適な日常生活空間の設計などが可能になる。

しかしながら、デジタルヒューマン(筋骨格モデル)をモデル化する以前に、日常生活の動作自体が、身近な現象であるにもかかわらず、未解明な部分が多いのが現状である。これは、現在得られているデータが医学・リハビリテーションを主としたデータが多いため、日常生活動作に即した動的データが少ないこと、そして、作業を行う手先部の運動および環境との相互作用を計測することが非常に困難であることが原因である。日常生活に限らず、筋骨格モデルを用いて運動を評価する場合、解析は、運動計測システムを用いて、各関節の変位と環境との相互作用(外力)を計測した後、身体の各節を剛体リンクモデルより近似し、運動システムにより計測したデータを基に各関節モーメントの算出する。そして、筋肉の幾何学的配置を表した筋骨格モデルにより、各関節モーメントから各筋肉の筋張力を算出する。これにより、「筋力×筋収縮速度」から消費エネルギーなども算出できる。

運動計測においては、各関節の変位、環境との相互作用(体に作用する外力)を定量的に評価する必要がある。歩行などの運動の計測の一例としては、据え置き型である複数台のカメラによるモーションキャプチャ、設置型床反力計の出力から関節モーメントを算出する 3次元動作解析装置を使用する。しかし、これらのシステムは、計測空間の制約、高コストなどの問題がある。また、日常生活は実験室の環境とは異なりマーカをモーションキャプチャシステムで十分に撮影できない問題もあり、日常生活の計測には不向きである。特に手の部分に関する環境との相互作用の定量的な評価が非常に難しい。上記の問題から、日常生活の動的データを長時間、実際の日常生活環境下で計測するシステムは、見あたらない。そこで、日常生活の動作を計測するためには計測空間の制約を受けなく、環境との相互作用を計測可能な「ウェアラブル全身運動計測システム」の

開発・改良が必要であり、その計測結果を基にした個々の運動能力変化を再現可能な筋骨格モデルの構築を目的として、研究を行った。

まず、ウェアラブル全身運動計測システムの改良を行った。これまでに、手指の運動計測システム、歩行計測システムに関しては開発を行っていたが、これらの計測システムを拡張する形での全身計測システムを開発・改良を行った。

慣性センサを用いた運動計測では、あらかじめ人の剛体リンクモデルを作成し、各リンクに対応する部位に慣性センサを装着し、計測を行う。しかし、脊柱は、頸椎、胸椎、腰椎などから構成されており、屈曲、伸展、側屈、回旋の動きは単純な剛体リンクとしては取り扱えない。また、肩関節は、肩甲骨、上腕骨、鎖骨などからなり、肩甲骨と連動して動くため、肩甲骨の動きとともに計測しなくてはならない。したがって、慣性センサを用いた上体の運動計測では、慣性センサの取り付け位置、取り付け個数など検討する必要がある。

脊柱の運動に関しては、S字曲線の変化を4つの慣性センサの計測結果より推定することとした。肩関節の運動に関しては、鎖骨が胸骨と肩甲骨を連結する事で肩構造を支持している点に注目し、鎖骨、上腕に取り付けた慣性センサにより動きを計測することとした。また、慣性センサを用いた運動計測では、姿勢算出にジャイロセンサの出力値を積分する必要があるため、積分誤差が問題となる。そこで、慣性センサの加速度、地磁気の情報を用いたセンサフュージョンにより誤差補正を行う必要がある。人の全身運動計測では、関節が多く存在するため、これまで提案されている単純な拡張カルマンフィルタによる誤差補正では不十分であった。そのため、動的加速度と地磁気の情報を用いた観測方程式を作成し、拡張カルマンフィルタを作成することで、誤差補正を行う処理プログラムを作成した。

構築したシステム、処理プログラムの精度検証のために、指先先端での3次元位置情報を光学式モーションキャプチャと比較した結果、システムの改良前に比べ、二乗平均平方根誤差は14.6mmから9.3mmに減少し、最大誤差は43.6mmから27.7mmに減少させることができた。ただし、光学式モーションキャプチャに比べると、まだまだ精度の向上が必要である。研究で用いた慣性センサは、MEMS型の非常に安価なセンサを使用している。したがって、リンク機構を作成し、基準点より順次姿勢を決定していく慣性センサの手法では、精度向上には限界がある。現在、拡張カルマンフィルタを作成し、誤差低減を図っているが、さらなる精度向上には、全身のセンサを考慮した観測方程式を作成し、フィルタ処理していく必要がある。ただし、この手法では、観測方程式の係数行列が大きくなりすぎ、計算処理がリアルタイムで終了しない問題も発生する。センサシステムの応用先を考えた場合、信号処理システムの改良は新たな課題であり、今後ロボットシステムへの適用なども含めて、検討していく必要がある。

続いて、個々の運動能力変化を再現可能な筋骨格モデルシミュレーションの構築を行った。身体運動を力学的に分析するには、身体力学系の特性を現した数理モデルを利用する必要がある。そして、分析方法としては、運動計測を前提とした逆動力学解析と身体の動きを実現する駆動力、関節角度を仮定し、運動を生成する順動力学解析がある。個々の運動能力変化を再現可能な筋骨格モデルの構築を目的とした本研究では、最終的な目的は順動力学による解析であるが、順動力学解析のみでは、筋骨格モデルの運動を安定化させることができない場合が多い。そのため、順動力学解析を行う場合であっても、ある程度の運動の目標軌道が必要となる。この目標軌道を使用し、筋骨格モデルの運動の安定化制御モデルを組み込むことにより、順運動学解析が可能になる。そこで、運動能力変化に基づく目標軌道の生成を行った。

目標軌道生成方法としては、全身運動計測システムを用いて計測した歩行時の関節角度を基に、筋力の衰えにより変化する歩行時の軌道予測シミュレーションモデルを構築した。軌道生成には、二足歩行ロボットの歩行などにも応用されている CPG (Central Pattern Generator) を用いて歩行軌道を再現し、CPG を構成する神経振動子のパラメータを変更することにより、歩行軌道を変更させることとした。実際の手順を下記に示す。

- 1) 慣性センサを用いた運動計測システムもしくは光学式モーションキャプチャシステムより歩行時の関節角度を算出する。
- 2) 得られた関節角度データより、神経振動子を用いた歩行軌道生成を行う初期パラメータを最適化計算により求める。
- 3) 得られた 1 周期分の歩行データに筋力の衰えなどを考慮した拘束条件を付加し、神経振動子のパラメータを微修正する。この際、関節トルクの算出には、剛体リンクモデルを用い、各関節トルクを算出する。計算したトルク値より、評価関数をもとめ、評価関数を満たす、神経振動子のパラメータを最適化計算により求める。目標となる筋力の衰えを満たすトルクの値ではなく、徐々に変更してくものとする。
- 4) 上記の流れを繰り返し行い、徐々に各関節発揮トルクの大きさを減少させ、運動パターンを生成する。

神経振動子のパラメータ探索には、最適化手法の一つである遺伝的アルゴリズムを用いた。遺伝的アルゴリズムでは、最適化する変数を遺伝子とみなし、その値を数パーセントの正規乱数を用いて、変異操作させ、最適値を求めている。したがって、大きく運動形態が変化するような動きを作成することはできない。そのため、本研究では、徐々に筋力が衰えると仮定し、繰り返し計算させることで、目標となる筋力低下を再現する目標軌道の生成した。

再現した軌道は、筋力の衰えにより、生じる歩行姿勢の変化である、歩幅の減

少, 歩調の減少, 歩行速度の減少などの特徴を示す軌道を生成することができた. 現在, この目標軌道を基に, 安定化メカニズムを組み込んだ筋骨格モデルの順動力学解析に取り組んでいる. しかし, 現時点では, 周期的な運動である歩行のみに適用可能な方法にとどまっている. 本研究で開発・改良したウェアラブル全身運動計測システムは様々な環境での日常動作を計測可能である. したがって, 本センサシステムを用いて日常生活の運動データを計測し, 上体などの非周期的な運動の運動機能の変化に対応するモデルの構築が不可欠であると考えられる.