

博士学位論文審査要旨

2019年1月15日

論文題目： 慣性センサを用いた手指の運動計測に関する研究

学位申請者： 北野 敬祐

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

要 旨：

日常生活における作業などに対する人の三次元動作解析において、手指動作の運動計測は必要不可欠である。本論文は、計測が困難である手指運動を対象とした計測および解析を行うための手指運動計測システムを開発し、それに適した手指モデルの構築法、計測誤差補正手法を提案することで、より動作制約のない手指運動を精度良く計測、解析可能とする手法を確立することを目的としている。

本論文は全6章で構成されている。第1章では、本研究の背景および目的について述べている。第2章では、光学式モーションキャプチャによる手指計測の長所と短所を明らかにし、これらを基にした慣性センサによる手指運動計測システムの開発について述べている。第3章では、回転加速度の算出式に含まれる関節中心と慣性センサ間の位置ベクトルに着目することで、慣性センサ出力のみからの位置推定や手指のリンクモデル構築を行い、それらの有効性を示している。第4章では、センサ出力および姿勢算出時の積分誤差に対して、アラン分散によるノイズ特定を利用した出力補正手法や、手指運動に適した観測方程式を構築することで、拡張カルマンフィルタによるセンサ・フュージョンを提案し、慣性センサの計測誤差補正を行い、その有効性を示している。第5章では、構築した手指運動計測手法による手指運動計測の位置精度検証や把持判別検証により本手法の有効性を検証している。さらに、実際の手指運動を計測することにより、動作制約のない手指運動計測が可能であることを示している。第6章では、構築した手指運動計測手法について、その要旨をまとめている。これらの成果は、手指の運動を動作制約なしに精度良く計測、解析可能とする手法を確立しており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2019年1月15日

論文題目： 慣性センサを用いた手指の運動計測に関する研究

学位申請者： 北野 敬祐

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2016年3月に修了し、2016年4月に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 5308-5311, 同 2016 38th, pp. 5668-5671, 同 2018 40th, pp. 3934-3937, 設計工学 早期公開, DOI:10.14953/jjsde.2018.2815 に掲載され十分な評価を受けている。

2018年12月22日午前11時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上により、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

博 士 学 位 論 文 要 旨

論 文 題 目： 慣性センサを用いた手指の運動計測に関する研究
氏 名： 北野 敬祐

要 旨：

近年の身体計測技術、解析技術の向上により、人の運動特性に基づいた生活支援機器や、日常生活での高齢者に対する身体負荷の少ない製品の開発、住宅設備の開発や作業環境の効率化や負担軽減などを目的とした三次元動作解析による人体負荷評価が行われている。そのため、人間工学、リハビリテーション、スポーツなどの様々な領域において、身体の運動を計測および解析することの重要性は増してきている。

しかし、日常生活における動作自体は、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ものであること、そして、計測環境が、特殊環境下であることが多く、日常生活環境下における人間の形態、機能、行動を正確に計測できないことが原因である。特に、手指や腕の部分の運動計測は、日常生活動作を始め様々な作業を評価する上で必要不可欠であるが、計測対象である手指が狭い領域であることに加え、手指関節の動作可能範囲や自由度の影響で、自然な動作計測が困難である。

運動計測手法としては、最も一般的なカメラと反射マーカを用いた光学式モーションキャプチャや慣性センサを用いる方式がある。しかし、光学式のような外界センサを用いた方式では、実験環境に固定する据え置きシステムが必要であるため、計測空間の制限が大きく、装置の位置を動作ごとに設定し直す必要がある。また、光学式では、死角などの問題があり、手指を用いた作業を計測するには動作の制約が大きく、カメラ位置、計測条件だけでなく反射マーカ位置の工夫なども必要とする。しかし、マーカ位置座標が直接得られるという大きな利点を持っている。また、慣性センサ方式は、計測空間への制約は少ないが、光学式と異なり、位置情報が取得できないため、身体位置を正確に表現可能なようにセンサと身体間の関係および身体モデルをどのように構築するかといった問題も存在している。さらに、慣性センサ方式では、慣性情報の積分誤差の蓄積といった問題もあり、手指運動を計測する上では、どのような計測システムを採用した場合においても解決しなければならない問題が存在する。

そこで、本研究では、計測が困難である手指運動を対象として計測および解析を行うための手指運動計測システムの開発を目的としている。光学式モーションキャプチャの利点は、反射マーカを取り付けた箇所の絶対位置を取得できることである。そこで、親指 MP 関節リウマチのリハビリテーションは施術者が患者の関節状態に応じて、患者への施術を経験的に調整し、MP 関節可動域外へ親指を押し上げる動作であり、この動作計測を通じて、光学式の利点および欠点を明らかにする。また、このような患者と施術者の動作および施術者の押し上げに関する調整量を定量的に評価したものはない。そこで、本研究では、光学式の利点を利用し、手指の相互運動であるリハビリテーション模擬実験時の施術者および被験者の動作および関節状態を明らかにする。

しかし、光学式を用いる場合、計測対象動作が明確に設定されない一般的な手指運動に対して、動作への制約なく計測することは困難である。近年、同様の空間的制約を解決するため、MEMS 技術の発展により、小型化および低価格化が進んでいる MEMS 型慣性センサを利用した運動計測手法が歩行解析などの領域において提案されている。一般的な慣性センサによる計測において、慣性センサは、慣性情報と方位情報を計測し、姿勢情報を得る。そのため、身体運動計測では、身体形状や位置情報を、センサを取り付けた各身体部位の剛体リンクとセンサ自身の姿勢情報か

ら算出する。そのため、慣性センサと身体の相対関係は重要であり、その関係に生じる変化が計測誤差につながる。ゆえに、身体部位をどのような剛体リンク構成により表現し、センサをどう配置するかが慣性センサを利用した手指運動計測システムの開発で重要となる。

従来、慣性センサと身体の剛体リンクの関係として、センサ軸を身体の間節間の軸上に配置することでセンサ姿勢をそのまま剛体姿勢としていた。しかし、剛体リンクの長さは他の計測手法を併用する必要があった。そこで、本研究では、慣性センサ出力により、センサと身体剛体リンク間の関係だけでなく、剛体リンクの長さを含めて算出する手法を提案し、手指の剛体リンクモデルを構築する。

さらに、慣性センサには、センサ出力のノイズの問題や、角速度の積分誤差の蓄積といった問題が存在している。慣性センサのノイズの特定手法として、時間領域での周波数安定性を図るアラン分散手法が提案されており、センサ出力のランダムノイズの特定が可能である。また、ジャイロセンサにおいて、特定されたノイズパラメータを利用したノイズ低減手法も提案されている。さらに、近年の身体動作計測においては、ジャイロセンサの姿勢更新時の積分誤差の蓄積問題に対しても、他のセンサ出力情報を組み合わせて、誤差の補正を行うセンサ・フュージョンが提案されている。そこで、本研究では、手指運動に適した慣性センサの計測誤差補正手法を構築することで、精度の良い手指運動の計測を行う。

以上より、本研究の目的は、手指運動計測システムを開発し、高精度な手指運動計測および解析手法を構築することである。その目的のため、従来手法である光学式の特徴を活用した手指運動計測手法の構築や、手指運動計測用の慣性センサシステムを開発し、それに適した手指モデルの構築、計測誤差補正手法を提案することで、より動作制約のない手指の運動を精度良く計測、解析可能とする手法を構築する。

本論文は、緒論、本編 4 章および結論の全 6 章で構成されている。第 1 章では、計測困難である手指運動の計測を対象として、身体運動計測の重要性や様々な身体動作計測システムの特徴および手指運動計測に対する問題点について記した。そして、光学式を利用した手指のリハビリテーション計測と解析手法の提案および、手指運動計測用の慣性センサシステムの開発、そして、それに適した手指モデルと計測誤差補正手法を構築することで、より動作制約のない MEMS 型慣性センサによる手指の運動計測手法を構築するという本研究の目的を示した。

第 2 章では、従来方式である光学式を用いた親指の間節リウマチ症状の緩和のためのリハビリテーションの計測、解析について論じた。症状が現れる親指の MP 間節でのリハビリテーション模擬動作を計測し、被験者（健常者）親指の受動的運動および施術者の作用力、作用ベクトル、作用点を明らかにした。またそれらの度合いを定量化するため、被験者の間節状態指標を提案した。さらに、より動作制約のない手指の運動を計測するため MEMS 型慣性センサを用いた手指運動計測システムを開発した。その際、慣性センサとセンサを取り付けた位置との相対関係が重要となるため、光学式を利用した手部形状の計測を実施し、手部の剛体分割や貼付する慣性センサの個数や配置を決定した。また、開発した手指運動計測システムを用いた手指運動計測における結果についても論じた。

第 3 章では、開発した慣性センサによる手指運動計測システムの問題である手指モデルの改善手法およびその精度検証について論じた。慣性センサの加速度出力において、回転加速度の算出式内に含まれる間節中心と慣性センサ間の位置ベクトルに着目することで、手指の間節ごとの回転動作における慣性センサ出力から、慣性センサと剛体リンク間の関係性だけでなく、剛体リンクの長さを同時に算出するモデル構築手法を提案した。そして、本手法の有効性を示し、正確な手指モデルを構築した。

第 4 章では、開発した慣性センサによる手指運動計測システムに対する他の問題点である慣性センサの出力ノイズ、複数センサ間の誤差、算出姿勢の積分誤差の解決手法およびそれらの有効性検証について論じた。アラン分散によるノイズ特定とそれらを利用した各慣性センサ出力ノイ

ズの低減や、各センサ間の方位方向誤差の補正を行った。さらに、拡張カルマンフィルタを用いたセンサ・フュージョンを適用した姿勢誤差補正手法も構築した。計測対象である肘から指先までの手指モデルでは、関節が多く存在し、またリンク始点となる肘も動作するという複雑な運動形態を持つため、フィルタによる補正を効果的に行うような手指動作に適した観測方程式を構築した。そして、これらの補正手法それぞれの有効性を示し、手指動作に適用した。

第5章では、前章までに開発した手指運動計測システム、手指のモデル構築手法、各種補正手法を統合した手指運動計測手法による実際の手指運動計測、解析に関する有用性を論じた。手指運動解析のため、評価指標の一つである関節角度を正確に算出する手法を提案した。さらに、手指全体の運動に対し、提案した手指運動計測手法における手指の位置精度および相対関係の有効性を示した。そして、実際の様々な手指動作を対象とした運動計測、剛体リンクモデルによる動作再現、関節角度算出により、提案した手指運動計測手法が、動作制約のない手指運動計測を可能とすることを示した。

以上の研究結果より、計測が困難である手指を対象とした運動計測において、関節リウマチのリハビリテーションを計測し、重要な関節状態指標の算出および、動作中の受動的指動作と施術者作用力の三次元的な視覚化が可能となった。さらに、慣性センサによる手指運動計測システムと、そのシステムに適したモデル構築手法および計測誤差補正手法により、より制約のない手指の運動計測が可能となった。