

博士学位論文審査要旨

2014年 1月 7日

論文題目： ウェアラブルな運動計測装置を用いた動作解析システムに関する研究

学位申請者： 足立 渡

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 小泉 孝之

副 査： 京都大学大学院工学研究科 名誉教授 土屋 和雄

要 旨：

リハビリテーション医療の重要性がより高まっている近年、計測環境に左右されることなく被験者本来の運動を計測することが求められている。本論文では実用的で小型軽量な移動式床反力計と加速度センサ、ジャイロセンサおよび地磁気センサからなるモーションセンサを統合した、ウェアラブルな運動計測装置を開発し、本計測装置に適した動力学解析手法を提案して、動作解析システムとしての妥当性の検証を行なうことを目的としている。

本論文は全6章で構成され、第1章において本研究の背景および目的について述べている。

第2章では足底荷重計測システムについて述べている。3軸力覚センサとセンサの校正方法について論じており、センサ出力を処理するアルゴリズムを提案している。そして、計測実験で得られたデータから足底に働く荷重を計測する際に含むべき領域について検証している。

第3章では、ウェアラブルな運動計測装置について述べている。計測装置は4つの移動式床反力計と6つのモーションセンサおよび1つのデータトランスミッタで構成されていることを示し、座標系の定義について論じている。また、移動式床反力計特有の、床反力および各軸まわりのモーメントの導出理論について述べており、モーションセンサにより得られたデータを用いた人の下肢姿勢の導出理論について示している。

第4章では、移動式床反力計の計測精度について述べている。移動式床反力計と設置式床反力計を同時に用いて、人の運動時における床反力を計測し、床反力および圧力中心の軌跡について検証することで、移動式床反力計の計測精度を評価している。また、両計測機器間の相対誤差を補正するための方法を提案し、誤差補正の効果について検証している。

第5章では、ウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析の手法について述べている。ウェアラブルな運動計測装置を用いて、矢状面内の足関節モーメントを算出するために直線歩行運動を対象に実験を実施し、提案手法の妥当性を評価している。

第6章では本研究において得られた知見を総括し、今後の展望について記している。

新たな動作解析システムとして、ウェアラブルな運動計測装置を開発し、その計測装置に適した動力学解析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

2014年 1月 7日

論文題目： ウェアラブルな運動計測装置を用いた動作解析システムに関する研究

学位申請者： 足立 渡

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 小泉 孝之

副 査： 京都大学大学院工学研究科 名誉教授 土屋 和雄

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2010年3月に修了した後、2010年4月に同博士課程（後期課程）に入学し、2013年3月に退学した。

本論文の主たる内容は、33rd Annual International conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society pp.4022-4025, 34th Annual International conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society pp.507-510 Journal of System Design and Dynamics Vol.6 No.5 pp.655-664, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.78 No.789 pp.1607-1616, バイオメカニクス学会誌 Vol. 36 No. 4 pp. 241-243 および同志社大学理工学研究報告 Vol.53 No. 3 PP. 127~134 (2012) に掲載されすでに十分な評価を受けている。

2013年12月19日午後1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、英語に関しては本学工学研究科博士課程（後期課程）在学中に語学試験に合格しており、また、フランス語に関しては本学工学部在籍中に単位認定されており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、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。

博士學位論文要旨

論文題目： ウエアラブルな運動計測装置を用いた動作解析システムに関する研究
氏名： 足立 渡

要 旨：

脳卒中のような疾病に起因する歩行障害に対するリハビリテーションは、患者の ADL (Activities of Daily Living) 向上と社会復帰を図るために重要である。運動機能の回復のためのリハビリテーションは、主に免許資格を必要とする医者や理学療法士の経験に基づいて行われてきた。そのため、技量について一定の保証はなされているものの、回復に対する実際の力量にはばらつきがあるものと考えられる。一方、患者側においても障害の箇所や程度は千差万別であり、定型的に患者に対応することが可能な方法は存在しない。従って、個々の患者の症状に合わせて最適なりハビリテーションを行なう必要があるが、先に述べた施術者の個々の経験により、受けられるリハビリテーションの質が左右されているのが現状である。また、日本脳卒中学会が定めるガイドラインによれば、十分なりスク管理のもとに急性期から積極的なリハビリテーションを行なうことが強く勧められており、安定的に質の高いリハビリテーションを行なえる環境が求められている。

このように、リハビリテーション医療の重要性がより高まっている近年、臨床歩行分析研究の発展により、歩行や日常生活動作などに障害のある者に対して、最新の運動解析システムを用いた機能評価やその応用が医療やリハビリテーションの分野で注目されている。さらに、施術者の個々の経験に左右されることなく、安定的に質の高いリハビリテーション医療を患者に提供するためには、客観的な指標となる数値データが必要である。例えば、歩行機能の回復を目的としたリハビリテーション中に、人が姿勢を保持したり運動したりする際、足趾は床をつかむ様にバランスをとり、足底には作用力と作用モーメントが働く。このような患者に作用するモーメントの情報を把握することは、理学療法士らがりハビリテーションの指示を与える上で非常に有益であり、立位バランスや歩行障害の評価や治療において重要な指標となる。よってパターン解析などで足底に作用する力を測定する際、押圧方向だけでなくせん断力方向も測定し、足底に作用する3分力の分布情報を測定することは非常に有益であると考えられる。

現在までに床反力を計測するための機器や手法が数多く研究、報告され、既にリハビリテーションやスポーツ工学などの分野で用いられている物もあるが、3分力の分布情報を測定することができる床反力計で現在実用化されているものは無い。また、下肢の関節モーメントは高速度カメラと床反力計からなる光学式の三次元動作解析システムにより得られたデータを基に、逆動力学の手法を用いて計算されてきた。しかし、従来の計測システムは実験施設に固定する必要があるため、計測可能な運動の種類や計測範囲などにも制限がある。また、床反力計を数多く設置する場合、広範囲におよぶ実験施設が必要となり、費用も非常に高くなるために実現可能性は低い。さらに、床面に設置された床反力計の間隔が、必ずしも全ての被験者にとって最適に配置されているとは限らない。これらの問題は全て、計測システムが計測場所に固定されていることに起因する。従って、計測環境に左右されることなく被験者本来の自由度の高い運動が計測可能な装置やシステムが求められている。すなわち、従来の施設固定型の三次元動作解析システムに代わり、被験者に計測システムを取り付けることが可能なウェアラブルな運動計測装置を提案し、運動計測における様々な制約を解消することができれば、運動機能のリハビリテーションにおいて更なる発展が見込まれる。これまでに加速度センサやジャイロセンサ等の慣性センサを搭載したウェアラブルな運動計測装置は存在するが、実用的なウェアラブル床反力計は未だ存在しない。

そこで本研究では、実用的で小型軽量な移動式床反力計の開発を行ない、移動式床反力計と加速度センサ、ジャイロセンサおよび地磁気センサからなるモーショセンサを統合したウェアラブルな運動計測装置を開発し、ウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析の手法を提案して、提案手法の妥当性を評価することを目的とする。具体的には、6×4の3軸力覚センサを配列した足底荷重計測器とセンサ素子の出力を表示・保存するソフトウェアからなる足底荷重計測システムを用いて、人が運動する際の足底と床との相互作用に注目し、接地面で足底に働く3分力の分布情報を計測する。そして、得られた3分力の分布情報を元にして、実用的で小型軽量な移動式床反力計の開発を行なう。開発した移動式床反力計の計測精度を検証するために、従来の設置式床反力計を同時に用いて、人の運動時における床反力を計測する。さらに、移動式床反力計と加速度センサ、ジャイロセンサおよび地磁気センサからなるモーショセンサを統合した、ウェアラブルな運動計測装置を用いて人の歩行運動を計測する。ウェアラブルな運動計測装置によって得られたデータを元にして歩行運動中の人の姿勢を算出し、同時に計測に用いた光学式三次元動作解析システムによって得られた人の姿勢と比較することで、開発したウェアラブルな運動計測装置の、人の姿勢に関する計測の妥当性について検証する。また、開発したウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析手法を提案する。提案する解析手法の妥当性を検証するため、直線歩行運動を対象として実験を実施する。歩行運動の計測の際にはウェアラブルな運動計測装置と同時に、既存の光学式カメラおよび設置型床反力計で構成される三次元動作解析システムにおいても計測する。解析結果として得られた足関節モーメントを歩行解析における代表的な参照データと比較し、相対誤差について検証する。

本論文は全6章で構成される。第1章では本研究の背景および目的について述べる。第2章では3軸力覚センサを用いた足底荷重の測定について述べる。第3章ではウェアラブルな運動計測装置の開発について述べる。第4章では移動式小型床反力計の計測精度の検証について述べる。第5章ではウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析の提案について述べる。最後に、第6章において研究で得られた知見をまとめる。以下、各章に関する概要を示す。

第1章において本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、足底荷重計測システムについて示した。また、本計測器に用いている3軸力覚センサ単体について示し、その校正方法について論じた。さらに、3軸力覚センサからの出力を処理するアルゴリズムを提案した。そして、足底分布荷重の計測実験を行ない、得られたデータから足底に働く荷重を計測する際に含むべき領域について検証した。

第3章では、第2章で得られた知見を元に開発したウェアラブルな運動計測装置について示した。計測装置は4つの移動式床反力計と6つのモーショセンサおよび1つのデータトランスミッタで構成されていることを示し、座標系の定義について論じた。また、移動式床反力計特有の、床反力および各軸まわりのモーメントの導出理論について示した。そして、モーショセンサにより得られたデータを用いた人の下肢姿勢の導出理論について示した。

第4章では、第3章で示したウェアラブルな運動計測装置のうち、移動式床反力計の計測精度について示した。移動式床反力計と比較検証するために設置式床反力計を同時に用いて、人の運動時における床反力を計測し、床反力データおよび床反力データを用いて算出される圧力中心の軌跡について相対誤差について検証することで、開発した移動式床反力計の計測精度を評価した。また、両計測機器間の相対誤差を補正するための方法を提案し、誤差補正の効果について検証した。

第5章では、第3章で示した導出理論を元にして、ウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析の手法について示した。ウェアラブルな運動計測装置と従来の三次元動作解析システムを同時に用いて、矢状面内の足関節モーメントを算出するために直線歩行運動を対象に実験を実施し、提案手法の妥当性を評価した。

第6章において本研究で得られた知見をまとめた。

本研究では、足底荷重計測システムを用いて、足底に生じる3分力の分布情報について検討した。足底に生じる3分力の分布情報を反映し、移動式小型床反力計とモーションセンサを組み合わせたウェアラブルな運動計測装置を開発した。また、開発したウェアラブルな運動計測装置に適した動力学解析手法を提案し、その妥当性が証明できた。