

機関番号：26402

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360109

研究課題名（和文）ウェアラブルなセンサを用いた下肢の総合運動解析システムの開発と医療分野への応用

研究課題名（英文）Development of Human Motion Analysis System for Legs Using Wearable Sensors

研究代表者

井上 喜雄（INOUE YOSHIO）

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号：50299369

研究成果の概要（和文）：歩行分析は、整形外科やリハビリテーション分野で非常に有用な技術として広く使用されているが、現状よく用いられている据え置き型の3次元動作解析装置と床反力計の組み合わせでは場所や歩数に制限があることが問題であるため、場所を選ばず、連続計測も可能なウェアラブルなセンサシステム開発のニーズは非常に大きい。本研究では、超薄型・超軽量で姿勢センサも内蔵した6軸の移動式床反力センサプレート、および、それを2個柔軟な履物に装着した履き心地のよいウェアラブル床反力センサを開発し、実験により良好な精度で計測できることを確認した。別途開発した下肢用のウェアラブルな姿勢センサとあわせて下肢の運動解析システムを構築し、従来は困難であった階段昇降などでの連続歩行などにおいても、歩行中の関節モーメントの推定に見通しが得られ、提案法の有効性が確認できた。

研究成果の概要（英文）：In clinical applications, the quantitative analysis of gait variability using kinematic and kinetic characterizations can be helpful to medical doctors in monitoring patient recovery status. A camera system and a stationary force plate can only accurately measure complete ground reaction force(GRF) and body orientations during a few steps, but data on successive gait measurements including 3D force and motion in different environments is really desired by clinical researchers and doctors. We have developed an urethra light and thin mobile force plate and a wearable GRF sensor system. Experimental results verify that the developed system can be used to measure the triaxial force with acceptable precision. Integrating developed force sensors and inertial sensors, an application trial for successive gait measurements was carried out. Results of the trial showed usefulness of the proposed system.

I

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：ウェアラブル，床反力センサ，運動センサ，歩行分析，関節モーメント

1. 研究開始当初の背景

高齢化社会の到来とともに歩行障害を有

する患者が増加しており、リハビリテーションの重要性が高まってきている。リハビリテ

ーションや整形外科分野の研究を進める上で、また医療の現場において医師が診断を行う場合や理学療法士が患者を指導する場合に、歩行中あるいはその他の運動中の下肢の関節モーメントを把握することは、非常に有用な情報となり、歩行分析としてその重要性が認識されている。また、スポーツのトレーニングなどにおいても関節モーメントは重要な情報であると位置づけられている。

現状では、図1に示すように、床反力計と3次元動作解析装置（高速カメラシステム）を用いて得られたデータに逆動力学を適用し関節モーメントを算出する方法が広く用いられているが、これらの装置は据え置き型であるため使用場所や歩数に制限がある。歩数を確保するために複数の床反力計を設置する場合もあるが、その場合には大規模なシステムとなり高価になるとともに広いスペースが必要となる。また、多数並べた床反力計の上を、片足ずつ乗せて計測する必要があることから、自然な歩行が行いにくいという問題がある。

前述の問題を解決するために床反力計、3次元動作解析装置をウェアラブルなものに置き換えることが考えられる。3次元動作解析装置については外乱の影響を受けやすいなど多くの課題はあるものの、かなりのウェアラブルセンサの研究が報告されており、実用化されたものもあるが、ウェアラブルな床反力計については実用化されているものではなく、精度と履き心地を両立させることができるセンサシステムに関する研究も報告されていない。ウェアラブルな床反力計が実用化されていないことがネックとなり、歩行分析全体のウェアラブル化が進んでいない。

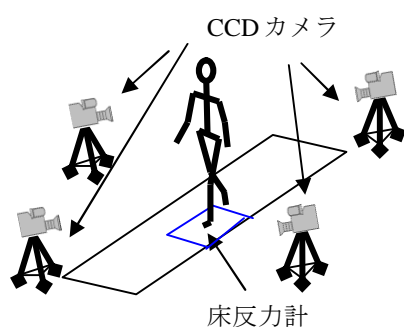


図1 従来のセンサシステム

2. 研究の目的

これまで歩行分析のウェアラブル化のネックとなっていた患者の歩容を乱さない柔軟で超軽量・超薄型の6軸床反力センサを世に先駆けて開発し、別途開発する誤差が小さく外乱の影響も受けにくい姿勢センサと組み合わせ、下肢の運動解析システムとして医療分野で十分通用するウェアラブルなセンサシステムに仕上げる。それにより、リハビリテーション技術の発展および医療現場における日常的なリハビリテーションやトレーニングの効率化に寄与し、寝たきりが少ない健全な高齢化社会の構築に貢献する。

3. 研究の方法

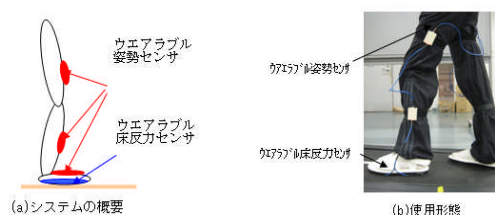


図2 下肢のウェアラブルセンサシステム

逆動力学を用いて下肢の関節モーメントを算出するためのウェアラブルなセンサシステムとして、図2のような履物と一体化し姿勢センサも内蔵したウェアラブル床反力センサと、下腿と大腿に取り付けるウェアラブル姿勢センサとをまとめた下肢のウェアラブル運動解析システムを開発することを最終的な形として考え、まず、そのための最も重要な開発項目として、これまで困難とされていた精度と履き心地を両立させる超軽量・超薄型のウェアラブル床反力センサを開発した。さらに、姿勢センサについても別途開発し、両者を組み合わせて図2のような下肢のウェアラブル運動解析システムとしてまとめた。

図3に示しているのは、履物と一体化したウェアラブルな床反力センサシステムであり、履物の裏側に本研究で試作した2個の6軸の移動式フォースプレート M3D-FP が取り付けられている。M3D-FPは超軽量・超薄型であり、図のように、履物の中央部は履物が十分変形できるようなスペースを確保することにより、精度の追求だけでなく、センサを内蔵した履物としての良好な履き心地

を確保するようにしている。

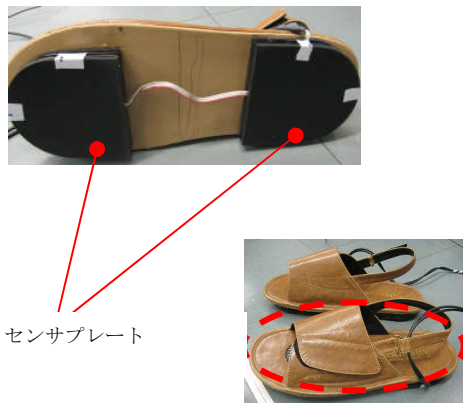
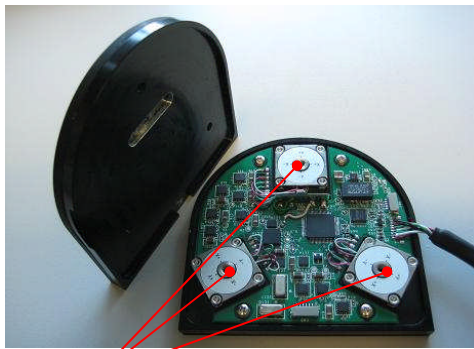


図3 ウェアラブル床反力センサ



3軸力センサ

図4 移動式フォースプレート M3D-FP

図4に試作した移動式フォースプレート M3Dの内部を示している。図のように(株)テック技販製の超薄型・小型の3軸の力センサ (USL06-H5-500N-C) 3個と3軸ジャイロセンサ, 加速度センサ (最新型には地磁気センサも内蔵) を, 金属板でサンドイッチした超薄型・超軽量の構造であり, 自身の姿勢角が測定可能な6軸で移動式フォースプレートになっている。試作した M3D-FPの寸法は82mm×88mm×9mmで, 重量は約110gである。M3D-FPに内蔵した3個の3軸の力センサは, それぞれセンサの中心で定義した局所座標系で計測した出力が得られるので, それらに信号処理を施すことにより, フォースプレートとしての局所座標系での出力が得られる。

履物の裏に取り付けられたフォースプレート上の局所座標系は, 従来法の設置式のフォースプレートで用いられている全体座標系の座標軸の方向からは傾斜している場合があり, その傾斜角は, 姿勢とともに変化する。したがって, 床反力センサに取り付けられた移動式フォースプレートの出力を逆動力学に用いるには, それぞれのフォースプレートの傾斜角が必要である。本センサシステムでは, それぞれの移動式フォースプレートに内蔵した姿勢センサにより姿勢角を計測し, その結果を用いて, 局所座標系でのフォースプレートの出力を全体座標系の座標軸と平行な方向に座標変換している。

上述のウェアラブル床反力センサに別途開発した下肢用の姿勢センサを組み合わせることにより, 図2に示したようなウェアラブルな下肢の運動解析システムを構築した。

4. 研究成果

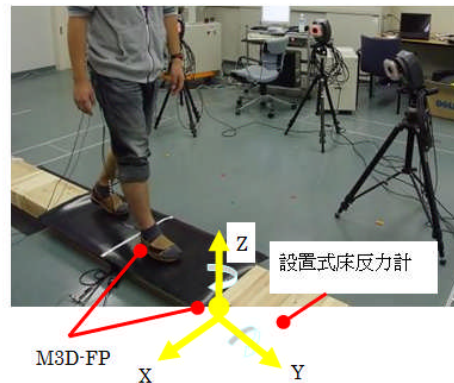
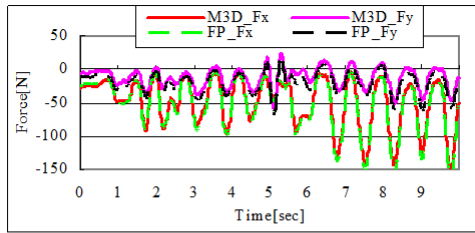
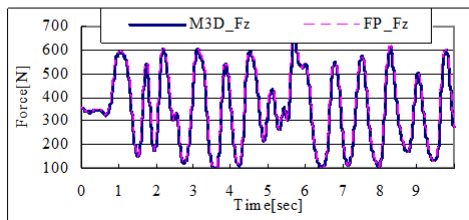


図5 M3D-FPの精度検証実験

試作した床反力計測システムの測定結果を従来法である設置式の床反力計による結果と比較するための実験を行った。図5のように, 健常な成人男性1名が試作した計測装置を装着した状態で, 設置式のフォースプレートでも同時に床反力が計測できるようにして, 2種類の実験を実施した。その一つは, ウェアラブルな床反力センサであるM3D-FPを裏面に取り付けた柔軟な履物を履いた被験者が, 設置式の床反力計上に履物を履いたほうの足を乗せ, 足をフォースプレート上に置いたままで, 足への荷重を変動させる準静的な実験であり, もう一つは歩行実験(足ふみ)である。

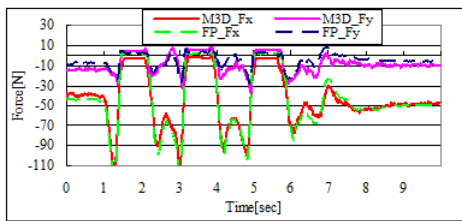


(a) X and Y - axial forces when standing on the stationary force plate

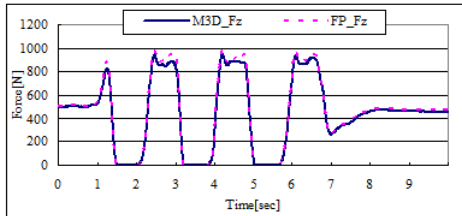


(b) Z-axial force when standing on the stationary force plate

図6 準静的実験結果



(a) 水平2方向の床反力 (X, Y 方向)



(b) 鉛直方向の床反力 (Z 方向)

図7 歩行実験結果

図6に準静的な実験の場合の提案法と従来法による実験の比較結果を示す。図6(a)に水平方向の F_x , F_y , 図6(b)に鉛直方向の F_z についての結果を示している。図5に示すように、静止座標系のZ軸は上下方向、Y軸は水平方向のうちの進行方向、X軸は水平方向で進行方向と直角方向を示す。図6より、3方向とも提案法 (M3D) による計測値は、従来法による結果 (FP) とほとんど重なっており、非常によく一致していることがわかる。

図7に歩行中の3方向の床反力について提案法および従来法による実験の比較結果を示す。図7(a)に水平方向の F_x , F_y , 図7 (b)に鉛

直方向の F_z を示しているが、図より、提案法による結果は、従来法による結果とよく一致しており、試作したウェアラブルな床反力センサが十分な精度を有することがわかった。また、被験者の感覚によれば、履き心地も非常によいことが確認できた。

柔軟でウェアラブルな床反力センサに加えて、ウェアラブルなモーションセンサ M3D-MS を開発し、両者を統合したシステム M3D で階段上昇時の計測を行った。図8に階段上昇時の下肢のスティックピクチャを示している。まだ十分な精度の検証は行っていないが、これらの結果とウェアラブル床反力センサの出力を組み合わせれば、従来法では場所の制約が存在するために困難と考えられてきた階段昇降時の連続歩行の分析などいろいろな条件での計測が行えることの見通しを得た。したがって、提案法を用いれば、従来法での問題点であった場所の制限がほぼなくなることにより、関節モーメント算出の対象や計測条件が画期的に広がることが期待できる。

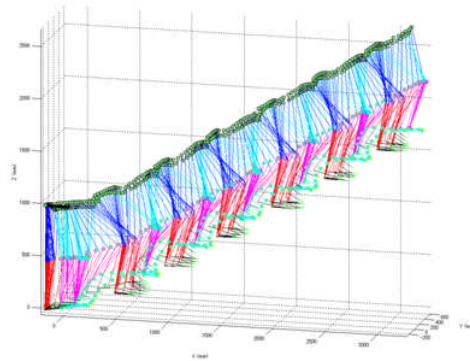


図8 階段上昇時のスティックピクチャ

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 11 件)

- (1) Kun Liu, Tao Liu, K. Shibata, Y. Inoue, Rencheng Zheng: "Novel approach to ambulatory assessment of human segmental orientation on a wearable sensor system" *Journal of Biomechanics* 42-16. 2747-2752 (2010), 1
- (2) K. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, Physical-sensor and Virtual-sensor based method for Estimation of Lower Limb Gait Posture using Accelerometers and Gyroscopes, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, Vol.5,

No.4(2010),472-483,1

(3)K.Liu, Y.Inoue, K. Shibata, Analysis of Lower Limb Segment Orientation Using Triaxial Accelerometers, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.5, No.4(2010),368-389.1

(4)T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, A Wearable Ground Reaction Force Sensor System and Its Application to the Measurement of Extrinsic Gait Variability, Sensors, Vol.10, No.1(2010),pp.10240-10255,1

(5)C.Chen, Y.Inoue, K.Shibata, Identification of a golf swing robot using computing approach, Neural Neural Computing & Applications, DOI 10.1007(2010), s00521-010-0417-1,1

(6)T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, Imitation Control for Biped Robot Using Wearable Motion Sensor, Trans. ASME, Journal of Mechanisms and Robotics, Vol.2, No.2(2010), 024501, pp1-6,1

(7)T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, A wearable force plate system for the continuous measurement of triaxial ground reaction force in biomechanical applications, Measurement Science and Technology, Vol.21, No.8(2010), 085804 (9pp),1

(8)Tao Liu, Y.Inoue, K.Shibata: "Wearable Force Plate Designed Using Pressure Sensitive Electric Conductive Rubber" Trans.JSME, Journal of System Design and Dynamics 3-3. 282-295 (2009), 1

(9)Tao Liu, Y.Inoue, K.Shibata: "A Small and Low-cost 3D Tactile Sensor for a Wearable Force Plate" IEEE Sensors Journal 9-9. 1103-1110 (2009), 1

(10)Tao Liu, Y.Inoue, K.Shibata: "Measurement of Soft Tissue Deformation to Improve the Accuracy of a Body-Mounted Motion Sensor" Trans.ASME, Journal of Medical Devices 3-3. 035001-1-6 (2009), 1

(11)R. Zheng, T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, K. Liu: "Kinetics Analysis of Ankle, Knee and Hip Joints Using a Wearable Sensor System" JSME, J. of Biomechanical Science, Engineering 33. 343-345 (2008),1

[学会発表] (計 15 件)

(1)井上喜雄, 劉濤, 芝田京子, 塩島康造, 辻内伸好, 歩行分析のためのウェアラブルな床反力・モーショセンサの開発, 臨床歩行分析研究会, (20101128),豊橋

(2)井上喜雄, 劉濤, 芝田京子, 塩島康造, 辻内伸好, 移動式フォースプレートの開発 (柔軟でウェアラブルな床反力センサ, バイオメカニズム講演会), (20101107), 浜松

(3)井上喜雄, 芝田京子, 劉濤, 塩島康造, 辻内伸好, 柔軟でウェアラブルな移動式フォ

ースプレートの開発, 日本機械学会, シンポジウム:スポーツアンドヒューマンダイナミクス 2010, (20101106), 東京

(4)T.Liu, Y.Inoue, K.Shibata, K.Shiojima, Design and Characterization of a Mobile Force Plate and Three-dimensional Motion Analysis System, IEEE SENSORS 2010 Conference, (20101103), Hawaii, USA

(5)井上喜雄, 劉濤, 芝田京子, 塩島康造, 辻内伸好, 柔軟なウェアラブル床反力センサの開発, WWLS2010, 2010年9月20日, 大阪

(6)K. Liu, K. Shibata, Y. Inoue, Ambulatory estimation of 3D lower limb gait posture in anatomical coordinate frame using wearable sensor system, ACMD2010, (20100825)日, Kyoto, Japan

(7)Kun Liu, Tao Liu, Kyoko Shibata, Yoshio Inoue, Visual and Quantitative Analysis of Lower Limb 3D Gait Posture using Accelerometers and Magnetometers, IEEE, ICMA'10, (20100808), Xi'an China

(8)T.Liu, Y.Inoue, K.Shibata, H. Hirota, K.Shiojima, A Mobile Force Plate System and Its Application to Quantitative Evaluation of Normal and Pathological Gait, IEEE/ASME, AIM2010, (20100708), Montreal, Canada

(9)Tao LIU, Yoshio INOUE, Kyoko SHIBATA: "A Wearable Force Plate System to Successively Measure Multi-axial Ground Reaction Force for Gait Analysis" 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. (20091221). Guilin, China

(10)劉濤, 井上喜雄, 芝田京子, 弘田悠将: "小型三軸力センサと姿勢センサを用いるウェアラブルな床反力計システム" 日本機械学会, 福祉工学シンポジウム 2009. (20090924). 高知

(11)陰山卓宏, 井上喜雄, 芝田京子, 劉濤, 劉坤: "人体部分別の質量同定" 日本機械学会, 福祉工学シンポジウム 2009. (20090924). 高知

(12)Chunguang Li, Tao Liu, Kyoko Shibata, Yoshio Inoue: "A Master-Slave Control System with Energy Recycling and Force Sensing for Upper Limb Rehabilitation Robots" 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. (20090716). Singapore

(13)T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata: "Design of Low-Cost Tactile Force Sensor for 3D Force Scan" IEEE Conf. on Sensors. (20081000). Italy

(14)T. Liu, H. Utsunomiya, Y. Inoue, K. Shibata: "Synchronous Imitation Control for Biped Robot Based on Wearable Human Motion Analysis System" 2008 IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS). (20080900). France

(15)T. Liu, Y. Inoue, E. Shibata: "New Method for Assessment of Gait Variability Based on Wearable Ground Reaction Force Sensor" 30th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine. (20080800). Canada

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

(1)名称: 移動型床反力計測装置

発明者: 井上喜雄ほか 5 名

権利者: 高知工科大学ほか 2 名

種類: 特許権

番号: PCT/JP2011/051944

出願年月日: 2011 年 1 月 31 日

国内外の別: 国外

(2)名称: 移動型床反力計測装置

発明者: 井上喜雄, 芝田京子, 劉禱, 辻内伸好, 瀨瀬和美, 土屋陽太郎

権利者: 高知工科大学, テック技販, 同志社大学

種類: 特許権

番号: 特願 2010-021672 号

出願年月日: 2010 年 2 月 2 日

国内外の別: 国内

(3)名称: 人体の部位別の質量および重心の

測定方法発明者: 井上喜雄, 芝田京子

権利者: 高知工科大学

種類: 特許権

番号: 特願 2008-039884 号

出願年月日: 2009 年 2 月 23 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 喜雄 (INOUE YOSHIO)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 50299369

(2)研究分担者

芝田 京子 (SHIBATA KYOKO)

高知工科大学・工学部・准教授

研究者番号: 00307117

(3)研究分担者

王 碩玉 (WANG SHUOYU)

高知工科大学・工学部・教授

研究者番号: 90250951

(4)研究分担者

谷岡 哲也 (TANIOKA TETSUYA)

徳島大学・医学部・教授

研究者番号: 90319997