

姿勢センサ内蔵ウェアラブル床反力センサシステムの開発

Development of wearable force plate with motion sensor

○ 井上喜雄(高知工大) 劉濤(高知工大) 芝田京子(高知工大)
塩島康造(テック技販) 足立渡(同志社大) 辻内伸好(同志社大)

Yoshio INOUE, Liu TAO and Kyoko SHIBATA, Kochi University of Technology
Kozo SHOJIMA, TECH GIHAN
Wataru ADACHI and Nobutaka TSUJIUCHI, Doshisha University

Abstract: In order to implement an unobstructed assessment of three-dimensional (3D) gait, we developed a mobile force plate and three-dimensional motion analysis system (M3D) to measure triaxial ground reaction forces (GRF) and three-dimensional orientations of feet. Calibration and test experiments were conducted to characterize the developed sensor. To test accuracy of the new measurement system, validation experiments by using reference measurements of a commercially available measurement system were performed in a gait laboratory, where a stationary force plate, a motion capture system based on high-speed cameras and a motion track system of XSENS are adopted to analyze human movements. Experiment results supported that the developed system can be used to measure triaxial GRF and orientations with an acceptable precision during successive walking gait.

Key Words: Wearable sensor, Ground reaction force, Force plate, Flexible sensor, Motion sensor

1. まえがき

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の研究を進める上で、また医療の現場において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、関節モーメントの算出は床反力計と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(以下では設置式)であるため使用場所や歩数に多くの制限があり必要な情報が得られない場合が多い。また、設置された床反力計の上を片足ずつ乗せて計測する必要があるため、自然な歩行が行いにくいという問題もある。さらに、計測可能な場所の範囲が狭いわりには、複数のカメラをいろいろな方向に設置する必要があるため、かなり広いスペースが必要であり、診察室などで計測に必要なスペースを確保することが難しく、日常的な医療行為のなかでの利用は困難で、研究で使用されているのが一般的である。

前述の問題を解決するためには床反力計、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。動作解析については、3軸のジャイロセンサ、加速度計、地磁気センサの出力に信号処理を加えたウェアラブルなモーションセンサとして市販されているものもあり、それらを応用していくことが考えられるが、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はなく、関連した装置では履物のなかに挿入して圧力分布を計測するシステムが市販されているが、定性的な圧力分布の評価には適しているものの出力の時間変化や定量的な精度が十分でないなどの問題が存在するため床反力としての精度を確保することが困難であり、また上下方向の力しか得られない。

そこで、筆者らの研究グループでは、10年余り前から履物と一体化したウェアラブルな床反力センサに関する研究を進めている。最初は、柔軟な履物に複数の圧力センサを

埋め込み、履物の柔軟さや質量を履物の元の状態と比べてほとんど変えることなく上下方向の床反力と荷重位置を推定するウェアラブルなセンサ⁽¹⁾を開発した。その結果上下方向の床反力としては十分な精度が得られ、また、履き心地もセンサを埋め込む前の履物とほとんど変わらない良好なものが得られたが、水平方向の床反力の推定ができなかった。その問題を解決するために、次に、小型の平行型の6軸のロードセルを試作し、それを履物に内蔵した6軸の床反力センサ^{(2),(3)}を開発したが、センサの剛性が非常に高かったため、6軸センサとしての精度は確保できたものの、臨床実験では、医療関係者より、「ゲタのような履き心地でありそれを着用すると歩容が乱れてしまいこのままでは使えない。被験者が日常的に使用している履物と同等の柔軟さを有することと軽量・薄型であることが必要である」との指摘を受けた。

そこで、本研究では、精度と履き心地を両立させることをねらって、まず、床反力センサシステムのキーパーツとして超薄型・超軽量型で姿勢センサも内蔵した6軸の移動式フォースプレートM3D-FPを試作した。次に、M3D-FPを2個、履物の柔軟さが確保できる場所に取り付けた履き心地がよいことと高精度であることを両立することが可能なウェアラブルな6軸の床反力センサシステムを試作した。

開発したウェアラブルな床反力センサシステムによる計測値を従来法と比較するために、床反力と姿勢角に関する基礎実験および歩行実験を行った結果、提案法による結果は従来法の結果とよく一致するとともに、良好な履き心地も確保することができたので、提案法の内容と実験結果について報告する。

2. 従来法の問題点とウェアラブルセンサのメリット

整形外科分野やリハビリテーションの分野の研究でよく用いられる歩行分析を行う場合には、逆動力学を用いた歩行者の関節モーメントの推定がよく行なわれ、非常に多くの研究に用いられているが、現状では、そのためのセンサシステムとして、図1のようなカメラシステムと床反力計の組み合わせが広く用いられている。これらは、いずれも設

置式の計測装置であることから歩数や場所の制限を大きく受ける。また、歩数がある程度確保するために複数の床反力計を用いる場合には、両足が同時に一つの床反力計を踏まないように留意しなければならない、自然な歩行を行ないにくいという問題や、非常に大掛かりでかつ高価なシステムになってしまうという問題などがある。したがって、連続的な歩行や階段昇降などでの計測が困難であり、また歩行器などをした歩行では足からの反力と機器との反力の分離が難しいと考えられる。したがって、いろいろな分野で非常に有用な情報を得ることができる計測技術ではあるものの、十分幅広い条件での計測ができていないのが現状である。もう一つの大きい問題は、必要な計測スペースの広さである。例えば、歩行の計測であれば一般的に6台程度のカメラが必要とされているが、それを多くの方向から撮影できるように設置すれば、かなり広いスペースが必要であり、日常的な医療の診療室に設置することは困難であり、診断への普及を妨げる要因の一つでもある。

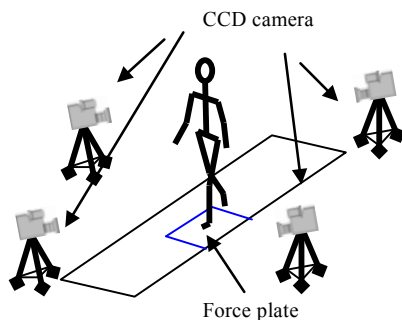


Fig.1 Conventional stationary optical motion analysis system and force plate

これらの計測装置の代わりにウェアラブルな床反力計とモーションセンサを用いれば、前述の場所や歩数の制限がなくなり、センサを意識せずに自然な歩行が可能となり、さらに、リハビリテーション支援機器など人間との力学的相互作用を有するシステムへの組み込みも容易になる。また、特別なスペースが不要であり診療室や在宅でも使用することは可能である。したがって、ウェアラブル化すれば、より広い範囲で利用されることが期待できる。

3. 試作したウェアラブルな床反力計測システムの概要

筆者らは、前述のような現状の設置式の計測システムでの問題点をすべて解消できる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床反力センサと、下腿や大腿などに取り付けるモーションセンサとをまとめた下肢の関節モーメント推定など目的としたウェアラブルセンサシステムM3Dの開発を進めているが、本報では、そのうちの姿勢センサを内蔵したウェアラブル床反力センサM3D-FPを中心に報告する。

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、左下の図のように履物の裏側に試作した2組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の右側に試作した移動式フォースプレートM3D-FPの内部を示している。(株)テック技販製の超小型の3軸の

力センサ (USL06-H5-500N-C) 3個 (4個のモデルも試作) と3軸ジャイロセンサ、加速度センサ(地磁気センサも内蔵したものも試作) を、金属製の薄板でサンドイッチした薄型の構造に内蔵しており、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おり重量は約120gである。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3個の3軸の力センサの出力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6軸の出力が得られる。

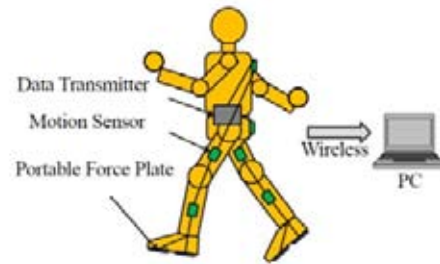


Fig.2 Wearable sensor system

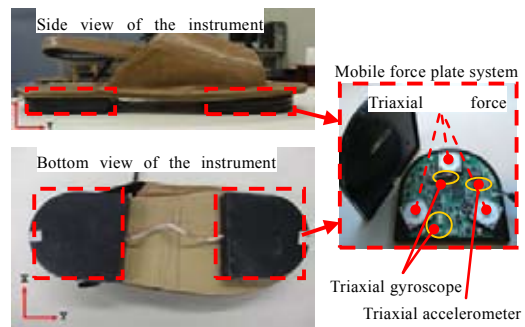


Fig. 3 A prototype of the instrument shoe

ただし、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、その傾斜角は使用者が歩行などの動作をすれば変化する。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自身の姿勢角が必要である。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センサ自身の姿勢角を計測し、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。2組のM3D-FPの結果を合成すれば、直交静止座標系における床反力が得られる。

4. 床反力およびセンサプレートの姿勢角推定のための信号処理法

M3D-FP ではセンサプレートの局所座標系での床反力を算出するとともにセンサプレートに内蔵したジャイロセンサ、加速度センサの出力にカルマンフィルタを適用して推定した姿勢角を用いて、局所座標系での反力を全体座標系へ変換している。そこで、ここでは、局所座標系での6軸

の床反力の算出法ならびに姿勢角推定法について示す。

4-1 局所座標系での床反力推定法

提案法の場合には、加重位置が図3に示した3個のロードセルの中心位置を結んでできる三角形の内側ばかりではなく、三角形の外部に加わる場合も多いことから、上下方向で負の荷重が生じることや上板の変形の影響で従来の床反力計と比べれば複雑な荷重が加わる可能性もある。そこで、M3Dでは、3個のロードセルの出力の単純加算ではなく、図4のような装置により実施したセンサプレートとしての校正を行った後のものを局所座標系での6軸の床反力とした。

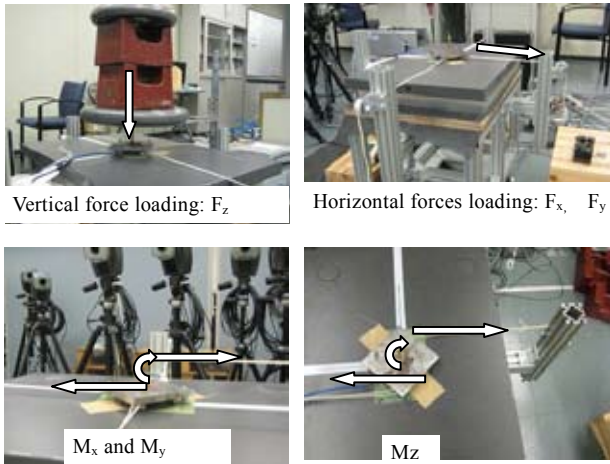


Fig. 4 Calibration experiments of the mobile force plate.

4-2 カルマンフィルタによる姿勢角の推定

前項で示したように、移動式フォースプレート M3D-FPでは、センサプレートの座標系で6軸の反力が得られるが、それを従来法である設置式の床反力計の結果と比較するためには、また、逆動力学を用いて関節モーメントを推定するためには、センサプレートの姿勢角（オイラー角）が必要である。図3に示した移動式フォースプレート M3D-FPには、その姿勢角の推定を行うために、3軸のジャイロセンサ、加速度センサを内蔵している。一般的に、このような姿勢センサでは、ジャイロセンサ、加速度センサ、地磁気センサを用いカルマンフィルタを用いて、その精度を確保しているものが多い一方、カルマンフィルタを用いない方法もあり、著者らもいろいろな信号処理を試みている⁽⁴⁾。地磁気センサは鉛直軸まわりの角度推定には有効である一方、環境の影響をうけやすいことを考慮して、ここでは使用せず、また、ジャイロのドリフトによる誤差を一部低減することだけをねらって、ジャイロと加速度計の出力に拡張カルマンフィルタおよびガウスニュートンアルゴリズムに基づいた収束法を用いて姿勢角を求めた。

5. 床反力計測システムの精度検証実験

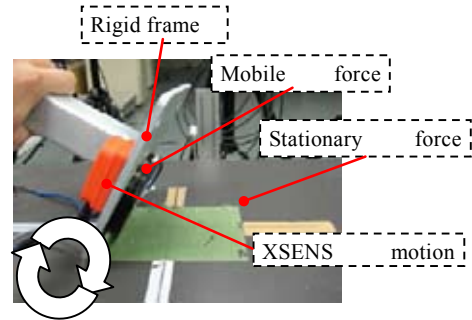
5-1 実験方法、装置および結果

提案する床反力計測システムの精度の検証実験を行った。比較用の従来法での計測は、テック技販製の設置式の床反力計TF-4060-A、赤外線を用いたNACのHi-DCamとMotion Analysis社製の処理ソフトを用いた3次元動作解析装置、XSSENS社の姿勢センサMTxを用いて実施した。

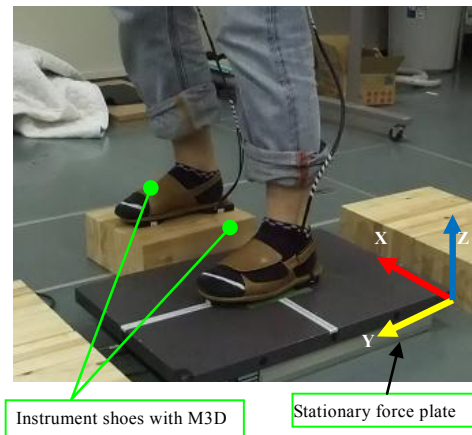
図5(a)に示しているのは、基本性能の検証用の実験装置であり、M3D-FP単体を比較的剛な板に取り付けるとともに、M3Dと同じ角度となるようにXSSENSの姿勢センサを取

り付け、板の姿勢やM3Dに加わる荷重を変化させてM3Dによる姿勢角と従来法による姿勢角を同時に計測し、M3Dによりセンサ座標で計測した床反力を計測した姿勢角を用いて静止座標系に座標変換した結果とテック技販製の設置式の床反力計での計測値の比較を行いM3D-FP単体での基本性能の確認を行った。

図5(b)に示しているのは、2組のM3D-FPを2組履物に装着した履物型のウェアラブル床反力センサシステムを用いる歩行実験用の装置であり、履物型センサを着用した被験者が設置式の床反力計の上を歩行し、各M3Dで計測したセンサ座標系での床反力の計測結果を静止座標系に変換し合成したものと従来法である設置式の床反力計置での計測値との比較を行う。



(a)Force and motion measurements



(b)GRF measurement during gait

Fig. 5 Verification experiments of the M3D.

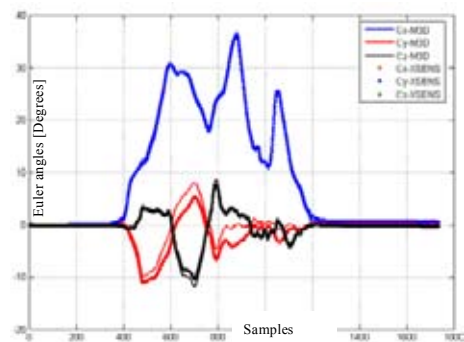


Fig.6 Triaxial Euler angles obtained from the mobile force plate (M3D)were compared with the results from the XSSENS system.

図6に示しているのは、基本性能実験における姿勢角（オイラー角）に関する比較実験の結果である。ここでのオイラー角は、Z軸、X軸、Y軸の順序で回転するように定義した。図では、細線(M3D)がM3Dの計測結果、太線(FP)が従来法の設置式のフォースプレートの結果を示しているが、3方向とも両者はよく一致していることがわかる。

図7に示しているのは、その時のセンサ座標系で計測したM3Dでの床反力を計測した姿勢角を用いて静止座標系に座標変換した後の3方向の床反力を従来法である設置式の床反力計での計測値と比較した結果である。実線が従来法、破線が提案法(M3D)の結果を示しているが、両者はよく一致しており、M3Dの基本性能である床反力および姿勢角の精度が良好であることを確認することができた。

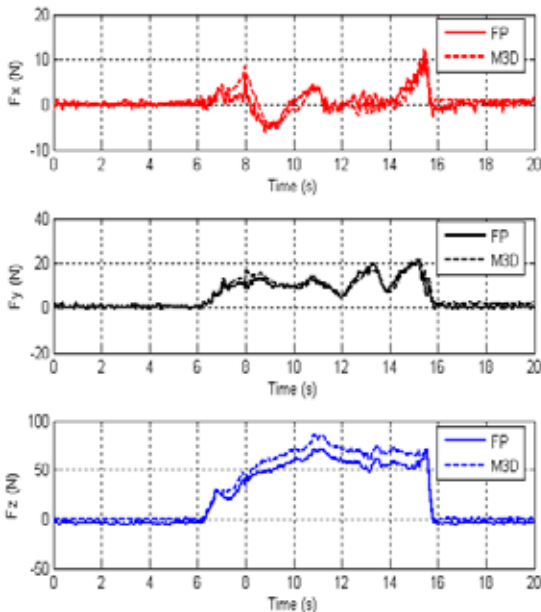


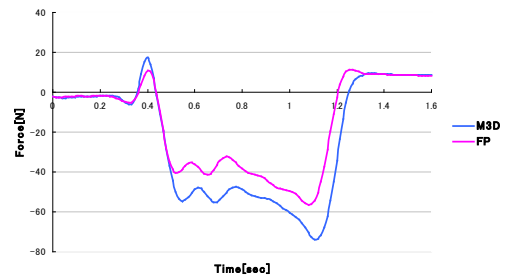
Fig.7 Comparison results of triaxial reaction force of the mobile force plate and the stationary force plate.

図8に示しているのは、歩行実験における提案法と従来法の3方向の床反力の比較結果である。図より進行方向と垂直な方向である水平x方向(図(a))では多少の誤差が見られるものの、全体的には両者は非常によく一致していることがわかる。

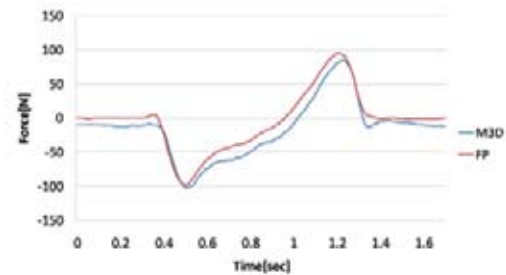
6. まとめ

従来は設置式の計測システムがよく用いられていた運動解析技術に関して、本研究では、ウェアラブル化により設置式の装置での問題点を解消することを目指して、超薄型・超軽量型で姿勢センサも内蔵した履物装着型の6軸の移動式フォースプレートM3D-FPを開発した。さらに、開発した2組のM3D-FPを履物の柔軟さが確保できる場所に取り付け、履き心地と高精度を両立させることが可能なウェアラブルな6軸の床反力センサシステムを構築した。開発した装置の基本性能検証のための基礎実験および提案したウェアラブルセンサを装着した歩行実験を行った結果、提案法は十分な精度と良好な履き心地を有することを確認した。

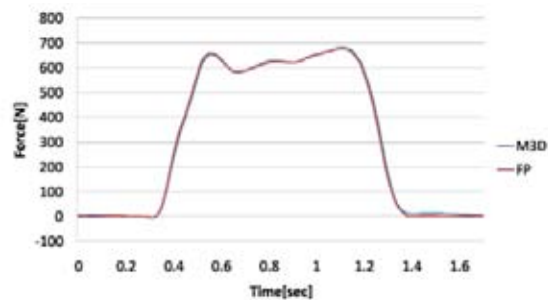
なお、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A)(課題番号:23246041)の援助を受けたことを記して謝意を表す。



(a) Horizontal component of GRF (x-axis GRF force)



(b) Horizontal component of GRF (y-axis GRF force)



(c) Vertical component of GRF.

Fig.8 Comparison results of GRF measurements of the two systems during normal walking gait.

参考文献

- (1) 井上喜雄, 松田拓也, 芝田京子, 山崎陽平, 甲斐義弘, “足底圧センサを用いた鉛直床反力と関節モーメントの推定” ジョイント・シンポジウム講演論文集, pp.57-62, 2003.
- (2) T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, “Wearable Force Sensor with Parallel Structure for Measurement of Ground-reaction Force,” Measurement 40, pp.644-653, 2007.
- (3) R. Zheng, T. Liu, Y. Inoue, K. Shibata, K. Liu, Kinetics Analysis of Ankle, Knee and Hip Joints Using a Wearable Sensor System, JSME, Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol.3, No.3, 2008, pp.343-355.
- (4) 足立渡, 辻内伸好, 小泉孝之, 塩島康造, 土屋陽太郎, 井上喜雄, 携帯型床反力計およびモーションセンサを用いた歩行解析システムの開発, 日本機械学会論文集 C 編, 78 巻 789 号(2012), p.1607-1618.
- (5) J.C.K. Chou, “Quaternion kinematic and dynamic differential equations,” IEEE Trans. Rob. Automat., 8, pp. 53-64, 1992.