

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246041

研究課題名(和文) 全身の運動解析のための制約のないセンサシステムの開発と応用分野への展開

研究課題名(英文) Development of a constraint-free wearable sensor system for human motion analysis and its application

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者らが開発していた人間の運動に関するウェアラブルなセンサシステムのブラッシュアップとして、慣性センサの出力から作成するスティックピクチャの精度向上、被験者個人ごとの身体各部の質量推定アルゴリズムの開発、衝撃を受ける足部の慣性センサの信号処理法の検討などを行った。次に、軽スポーツにも利用可能な高負荷対応ウェアラブル床反力センサ、手からの荷重や指の動作を計測する手袋型センサ、義足内蔵力センサなどを開発した。さらに、医療・健康分野では、歩行、義足歩行、立ち上がり訓練機へ応用し、スポーツ分野では、当該運動に関する解析理論とセンサ技術を融合させ、ゴルフ、テニスの診断システムへ応用した。

研究成果の概要(英文)：As a brush-up of the wearable sensor system for the human motion analysis which we already developed, in this research we have developed an algorithm to improve accuracy of the stick picture, an estimation method of the mass of the part of the body of the each subject and an signal processing algorithm to suppress the effect of the impulsive acceleration on the Kalman filter of the inertial sensor. Next, a new wearable floor reaction force sensor plate for the heavy load of the light sports, a gloves type sensor for measuring the behavior and load of the hand, a built-in 6-axes load cell for the prosthetic leg have been developed. Furthermore, in the medical and health fields, the developed sensor systems have been applied to walking, prosthetic limb gait, and the sit-to-stand training machine. And in the field of sports, the dynamic analysis and the developed sensor technologies have been combined and applied to the diagnosis system for the golf swing and tennis serve.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 計測工学 ウェアラブルセンサ スポーツ工学 生体工学 リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

人間の動作および外力を計測し、関節モーメントなどを推定する技術は、医療・介護、健康増進、スポーツなどの分野において重要な技術の一つに位置付けられている。研究開始当初では、図1のような据え置き型である複数のカメラによる動作解析装置と床反力計の出力から関節モーメントを推定する方法が広く用いられていた。据え置き型の場合には、例えば、歩行解析では、1,2歩しか計測できないこと、外部での計測が困難なこと、杖や歩行器による床反力との分離ができないこと、支援機器に組み込んでの使用が困難なこと、など多くの問題があり、実施したい計測が十分できていないのが状況であった。



図1 設置式のカメラおよび床反力計

これらの問題は、図2のようにセンサをウェアラブルにすれば解決することから、ウェアラブル化のニーズは非常に大きかったが、ウェアラブルな床反力センサの実用化が困難であったため、運動解析全体としてのウェアラブル化が進まず、前述の応用分野での研究の発展を妨げる要因の一つとなっていた。

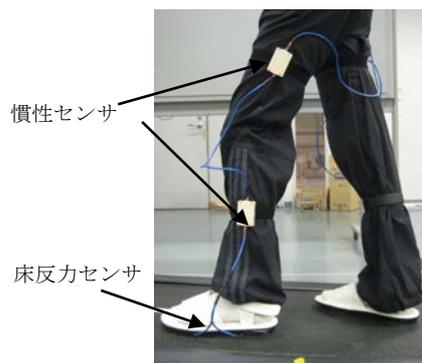


図2 ウェアラブル床反力計および慣性センサ

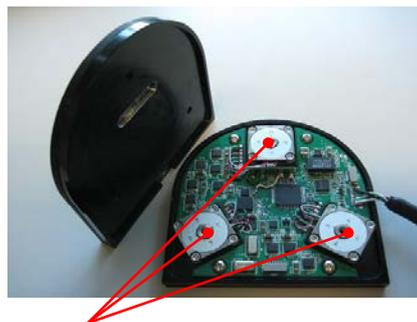
そこで、研究代表者らは、床反力計のウェアラブル化に取り組み、図3のような薄型軽量の履物装着型のウェアラブル床反力計の開発に成功し、それまでウェアラブル化のネックとなっていた問題を一つ突破すること

ができた。開発したウェアラブル床反力計を核とし、それにウェアラブルな慣性センサを組み合わせ、ウェアラブルな運動解析システムの基本部分を構築することができた。しかし、ウェアラブルなシステムとして機能を発揮し、広く用いられるようになるには、まだまだ多くの課題が残っていた。



Mobile force plate

(a) 履物に装着した超軽量・超薄型 6 軸力センサプレート



Small triaxial force sensors

(b) センサプレートの詳細

図3 ウェアラブル床反力センサの詳細

2. 研究の目的

開発に成功した上述のウェアラブルなセンサシステムの基本部分のブラッシュアップを図るとともに、周辺のセンサ技術や信号処理技術を開発し、より応用範囲の広い運動解析システムへと進化させると同時に、医療・健康、スポーツなどの重要分野で応用可能な技術へと展開し、当該分野の発展に大きく貢献できる技術開発を行うことが目的である。

3. 研究の方法

図3のウェアラブル床反力計と慣性センサを組み合わせた図4のようなウェアラブル運動解析システムの中核部分について、出力として得られる関節モーメントの精度確保のために、慣性センサ出力から作成するスティックピクチャ精度向上、統計データではなく被験者個人の身体各部の質量推定アルゴリズムの開発、衝撃を受ける足部の慣性センサの信号処理法の検討を行う。



図4 ウェアラブル運動解析システム
(床反力センサおよび慣性センサ)

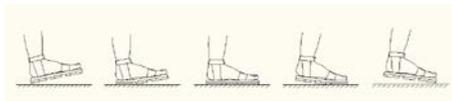
応用範囲を拡大するために、歩行専用である図3の床反力計の発展形として軽スポーツにも対応可能な高負荷用ウェアラブル床反力センサ、手からの荷重や指の動作を計測する手袋型センサ、義足内蔵センサなどを開発する。

さらに、得られたセンサシステムを医療・健康分野およびスポーツ分野へ適用する。医療健康分野では、歩行、義足歩行、立ち上がり訓練機への応用などを検討する。スポーツの場合には、ゴルフ、テニスの診断等への応用を検討する。いずれの分野においても、それぞれの運動に関連した解析理論と融合させ、付加価値の高い情報が、容易に得られる信号処理法を開発する。

4. 研究成果



(a) 履物内蔵型センサシステムの概観



(b) センサシステムの構造と変形の様子

図5 3個のセンサプレートを用いた履物内蔵型床反力計

スポーツ用の床反力センサとしては、センサプレート1個あたり(1足の履物には2個のセンサプレート)のロードセルの個数を4

個に増やすとともにプレート形状も最適化を図った結果、つま先用と踵用では異なる形状で従来の歩行用と比べて3倍程度の力に耐えられるものの設計・試作を行い、実験した結果、軽スポーツには十分耐えられることが確認できた。一方、より自然な足の変形に対応するために図3のシステムでは履物1個あたりに2個のセンサプレートを配置していたが、図5のように3個配置した履物内蔵型の床反力システムの開発も行った。

手袋型センサについては、低コストの簡便な計測方法について検討した。動作計測については電気抵抗変化を利用した曲げセンサ、力計測については、圧力センサによる簡易的な検出法について検討した。動作計測は、図5のような曲げセンサを図6のようにグローブに取り付ける簡易型について検討した。曲げセンサについては、非線形性と経年変化が無視できなかったためそれらの影響をカバーする校正法を開発し基礎実験を行った結果の角度誤差は5%程度の精度が得られることがわかった。

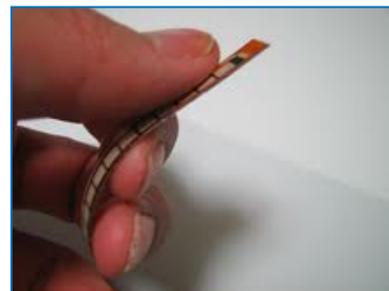


図5 電気抵抗変化を利用した曲げセンサ

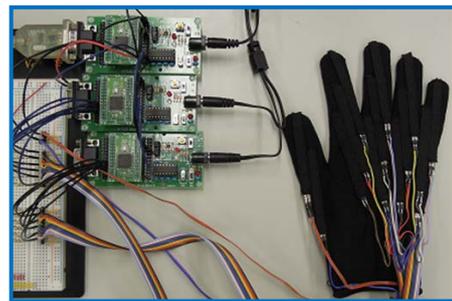


図6 曲げセンサを装着した実験用グローブ

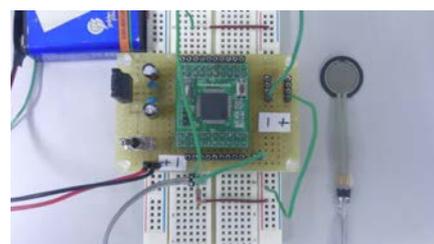


図7 圧力センサおよび信号処理装置

義足内蔵 6 軸センサについては、最適化を盛り込んだ構造設計を行い、その結果に基づいて図 8 のようなセンサを試作し、それ図 9 のように義足に組み込み歩行実験を行った。その結果、試作したセンサシステムは義足歩行の評価に有用であることが確認できた。

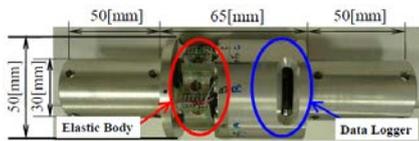


図 8 義足用 6 軸力センサ

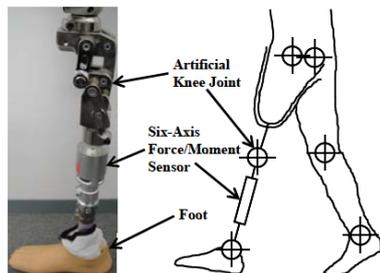


図 9 6 軸力センサを組み込んだ義足

ウェアラブル運動解析システムを用いて関節モーメントを計算する場合には、まず、慣性センサから得られた姿勢角の情報と被験者の身体各部の寸法、関節中心の位置などからスティックピクチャを作成する必要があるが、グローバル座標系での計測ではないので、誤差が生じやすい。関節モーメントを高精度で推定するには、スティックピクチャの精度も必要となるので、その精度向上のため、人間各部の長さや関節中心の位置を推定するアルゴリズムや立脚期に足底が床面に接地している状態での足底の高さは床面と一致していることを利用した校正法を開発した結果、より安定したスティックピクチャが得られるようになった。

精度よく関節モーメントを推定するには、スティックピクチャと床反力の両方の精度が必要である。図 3 に示したウェアラブル床反力センサに装着したセンサプレート自身のセンサ座標系での力の計測精度は非常に良好であったが、センサ座標系で計測された力を静止座標系に座標変換するために必要なセンサプレートの姿勢角を推定するための慣性センサのカルマンフィルタが接地時の衝撃的な加速度の影響を受けていたので、それを改善する方法についても検討し、精度が向上した。

また、逆動力学を用いて関節モーメントを推定する過程では身体各部の質量の情報が必要であるが、現状では個々の被験者の質量

を用いるのではなく、統計的なデータが用いられており、そのことが精度の低下の一因となっている。そこで、単純な動作を行った状態でのスティックピクチャと床反力計のデータに重回帰分析を適用して各部の質量を推定する方法を開発した。そのなかで、多重共線性が起こりにくい動作で推定するほうが推定精度が良好であることがわかった。

医療分野へのセンサシステムの応用としては、まず、図 10 のような起立訓練システムへの適用を行った。患者が装着したウェアラブルセンサシステムで姿勢をセンシングしながら訓練機の制御を行う方法を開発した。



図 10 起立訓練システムへのウェアラブルセンサの適用

また、近年ロコモ対策の一つとして、歩行運動が有効であることが知られているが、個人ごとに適した歩行になっているかを診断するために簡単な診断技術に対するニーズが出てきている。そこで、図のように履物に取り付けた慣性センサ 1 個の情報から歩行時の歩幅を推定する技術を開発した。加速度を 2 度積分して歩幅を計算する場合に何もしなければ積分誤差が大きくなってしまいますので、立脚期で足底が完全に接地している状態では速度が 0 という条件を用いて補正を行う方法を開発し、基礎実験および歩行実験を行った結果、歩幅の推定誤差を 0.1% 以下に抑えることができた。

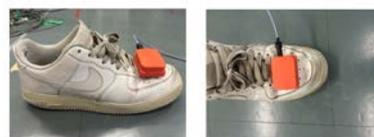


図 11 靴に取り付けた慣性センサ

スポーツ分野に関しては、ゴルフ、テニスなどへ適用を検討した。ゴルフについては、スイングに関する動力学理論とセンサ技術の融合を検討した。まず、スイングについて本質を損なわない範囲で単純化した理論解析を行い、その結果と少数の慣性センサを組

み合わせることを検討した。スイングのリリースポイントを遅らせるいわゆるレイトヒットに有効な加速パターンを明らかにし、その結果をセンサシステムを融合させ図 12 のような手首と手袋に取り付けるプレー中でも使用可能な慣性センサシステムで計測することによりスイングを診断する方法を開発した。



図 12 プレーヤに取り付けた慣性センサ

テニスなどのスポーツのスイング動作について、慣性センサ出力に対する加速度関係式を導出し、この関係式および各センサ出力を用いて最適化計算により各セグメントの初期姿勢パラメータを求め、このパラメータおよび各時刻のジャイロセンサ出力、ならびに上腕の加速度センサの出力から、上腕を含むラケット腕の動作を推定する方法について検討し、テニスサーブに適用し良好な結果を得た。

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 21 件)

- (1)Cao,E., Inoue,Y., Liu,T., Shibata,K., Estimate Muscle Forces of Ankle Joint with Wearable Sensors, JSME, Journal of Biomechanical Science and Engineering, , 査読有, Vol.6-4,2011, 299-310, DOI: 10.1299/jbse.6.299.
- (2)Liu,T., Inoue,Y., Shibata,K., Shiojima,K., Yin,J., A Novel Three-Dimensional Gait Analysis System, Advanced Materials Research, 査読有, vol.569, 352-355, 2012, DOI : 10.4028/www.scientific.net/AMR.569.352.
- (3)Liu,T., Inoue,Y., Shibata, K., Shiojima,K., A Wireless Measurement System (M3D) for Three-Dimensional Gait Analysis System, Communications in Computer and Information Science, 査読有, Vol,312, 2012, pp 166-171, DOI: 10.1007/978-3-642-32427-7_23.
- (4)Cao,E., Inoue,Y., Liu,T., Shibata,K., A Sit-to-Stand Training Robot and Its Performance Evaluation: Dynamic Analysis in Lower Limb Rehabilitation Activities, Trans. JSME, Journal

- of System Design and Dynamics, , 査読有, Vol.6-4.,2012, 466-481.
- (5)Liu,T., Inoue,Y., Shibata,K., Shiojima,K., A mobile force plate and three-dimensional motion analysis system for three-dimensional gait assessment, IEEE Sensors Journal, 査読有, Vol.12-5, 2012, 1461-1467, DOI: 10.1109/JSEN.2011.2173763).
- (6)Liu,T.,Inoue,Y.,Shibata,K., A Simplified Magnetometer Calibration Method to Improve the Accuracy of Three-dimensional Orientation Measurement, ICIC Express Letters , 査読有, Vol.6-2, 2012, pp.523-528.
- (7)Liu,K., Inoue,Y., Shibata,K., Physical sensor difference-based method and virtual sensor difference-based method for visual and quantitative estimation of lower limb 3D gait posture using accelerometers and magnetometers, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, , 査読有, Vol.15-2, 203-210, 2012. DOI: 10.1080/10255842.2010.522184.
- (8)林祐一郎・辻内伸好・小泉孝之・大島裕子・伊藤彰人・土屋陽太郎, 無拘束歩行計測が可能な義足用6軸力覚センサの開発, 日本機械学会論文集 C編, 査読有, Vol.77-784, 2011, 3427-3438, DOI: 10.1299/kikaic.77.3427.
- (9)井上喜雄, 劉涛, 足立渡, 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), バイオメカニズム学会誌, 査読有, 36 巻4号, 2012, pp.241-243.
- (10)足立渡・辻内伸好・小泉孝之・塩島康造(テック技販)・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, 査読有, 78巻789号, 2012, pp.1607-1616, DOI: 10.1299/kikaic.78.1607.
- (11) ADACHI,W., TSUJIUCHI,N., KOIZUMI,T., SHIOJIMA, K., TSUCHIYA, Y. and INOUE,Y., Development of Walking Analysis System Using by Motion Sensor with Mobile Force Plate, Journal of System Design and Dynamics, 査読有, Vol. 6, No. 5, 2012, pp.655-664, 2012, DOI: 10.1299/jsdd.6.655.
- (12) Enguo,C., Inoue,Y., Liu,T., Shibata, K., An Inverse Dynamic Approach for Quantitative Muscle Force Estimation during Human Standing-Up Process, JSME, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有, Vol.8-1. 2013, pp.63-78, DOI: 10.1299/jbse.8.63.
- (13)Yin, Z. , Ning, H. , Yin, J. , Inoue, Y. , Liu, T.A wireless MEMS-sensor module for three-dimensional gait analysis,ICIC Express Letters, 査読有, Volume 8, Issue 4, 2014, pp. 1165-1170.
- (14) Liu,T., Inoue,Y., Shibata,K., Shiojima,K., Han,M.,Triaxial joint moment estimation using a wearable three-dimensional gait analysis system,

Measurement, 査読有, Vol.47, 2014, pp.125-129, DOI: 10.1016/j.measurement.2013.08.020.
(15)李志偉, 井上喜雄, 児玉駿太, 劉濤, 芝田京子, ゴルフスイングのリリースポイントに関する動力学解析 (クラブおよび人間の諸元の影響), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.80, No.820, 2014, pp.1-18, DOI:10.1299/transjsme.2014dr0385.
(16)李志偉, 井上喜雄, 児玉駿太, 劉濤, 芝田京子, ゴルフスイングのリリースポイントに関する動力学解析 (ダウンスイングの加速パターンの影響), 日本機械学会論文集, 査読有, Vol.81, No.824, 2015, pp.1-17, DOI:10.1299/transjsme.14dr0678.
他 5 件

[学会発表] (計 44 件)

(1)T.Liu, Y.Inoue, K.Shibata, Three dimensional gait analysis system with mobile force plates and motion sensors, IEEE, URAI 2011, 2011/11/25, Incheon.
(2)E.Cao, Y.Inoue, T.Liu, K.Shibata, A sit-to-stand trainer system in lower limb rehabilitation, IEEE/ASME, AIM 2011, 2011/07/05, Budaqpest.
(3)Y.Hayashi, N.Tsujiuchi, T.Koizumi, Y.Matsuda, Y.Tsuchiya, Biomechanical Consideration Based on the Unrestrained Gait Measurement of Trans-Femoral Amputee with a Prosthetic Limb, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011/09/02, Boston.
(4) Tao Liu, Yoshio Inoue, Kyoko Shibata, Kouzou Shiojima, Three-dimensional Lower Limb Kinematic and Kinetic Analysis Based on a Wireless Sensor System, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011, Shanghai, China.
(5) Tao Liu, Yoshio Inoue, Kyoko Shibata, MEMS Sensor-based Measurement System for Three-dimensional Gait Analysis, Proceedings of the 30th Anniversary of TRANSDUCERS conference, 2011, Beijing, China.
(6)W.Adachi, N.Tsujiuchi, T.Koizumi, M.Aikawa, K.Shiojima, Y.Tsuchiya, Y.Inoue, Development of Walking Analysis System Consisting of Mobile Force Plate and Motion Sensor, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011/09/02, Boston.
(7)Enguo Cao, Yoshio Inoue, Tao Liu, Kyoko Shibata, Estimation of lower limb muscle forces during human sit-to-stand process with a rehabilitation training system, Biomedical and Health Informatics (BHI), 2012 IEEE-EMBS International Conference, 2012/01/06, Hong Kong.
(8)A.Andrieu, N.Tsujiuchi, T.Koizumi, S.Maeda, Calculation of Joint Reaction Force and Joint Moments Using by Wearable Walking Analysis System, 34th Annual International Conference of the IEEE Engineering, in Medicine and Biology Society, 2012/8/28~9/1, Sandiago, USA.

2012/08/28~09/01, Sandiago, USA.
(9) Guangyi Li, Tao Liu, Tong Li, Yoshio Inoue and Jingang Yi, Neural network-based gait assessment using measurements of a wearable sensor system, 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, , 2014/12/05-10, Bali, Indonesia.
(10)Guangyi Li, Tao Liu, Linyi Gu, Yoshio Inoue, Haojie Ning, and Meimei Han, Wearable gait analysis system for ambulatory measurement of kinematics and kinetics, 2014 IEEE Sensors, 2014/11/02-05, Valencia, Spain.
(11) Zhewi Li, Yoshio Inoue, Kyoko Shibata, Shunta Kodama, The effect of swing pattern on the release point and head speed, 7th ACMD, 2014/06/30-7/02, Pusan, Korea.
(12)小池関也, 原田悠平, 芝田京子, 井上喜雄, 慣性センサ情報に基づくスイング動作の動力学分析 (ヘッドスピード獲得メカニズムの定量化), 日本機械学会 SHD2014, 2014/10/29-31, 新潟.
他 32 件

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)
名称: 姿勢及び歩行状態推定装置
発明者: 井上喜雄, 芝田京子
権利者: 高知県立大学法人
種類: 特許
番号: 特願 2014-165763
出願年月日: 2014 年 8 月 18 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
井上喜雄 (Yoshio INOUE)
高知工科大学・工学部・教授
研究者番号: 50299369
- (2) 研究分担者
辻内伸好 (Nobutaka TSUJIUCHI)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 60257798
- (3) 研究分担者
芝田京子 (Kyoko SHIBATA)
高知工科大学・工学部・准教授
研究者番号: 00307117
- (4) 研究分担者
小池関也 (Sekiya KOIKE)
筑波大学・人間総合科学研究科・准教授
研究者番号: 50272670
- (5) 研究分担者
長谷和徳 (Kazunori HASE)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 10357775
- (6) 研究分担者
武政龍一 (Ryuichi TAKEMASA)
高知大学・医歯学系・准教授
研究者番号: 20294837