

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650343

研究課題名(和文)無線型慣性センサによるモーションキャプチャシステムの開発とリハビリ応用試験

研究課題名(英文)Development of motion capture system using wireless inertial sensors and its test in application to rehabilitation

研究代表者

渡邊 高志(WATANABE, TAKASHI)

東北大学・大学院医工学研究科・教授

研究者番号：90250696

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：無線型慣性センサ，及び計測，可視化，解析のためのソフトウェアの開発を行い，モーションキャプチャシステムの基本システムを開発した．また，3次元運動の計測方法を構築し，開発したシステムとともに，健常者，及び運動機能障害者での歩行計測試験を通して有効性を確認した．さらに，この試験で明らかになった問題点に基づいて，計測方法とシステムの改良を行った．以上により，リハビリテーションにおける歩行計測とその結果の可視化，解析に関して，実応用可能なシステムになることを期待できる結果が得られた．

研究成果の概要(英文)：A prototype system of motion capture system using wireless inertial sensors was developed. Three dimensional motion measurement method was also developed and tested with the developed prototype system. Measurements of gait with healthy and motor disabled subjects showed that the developed system and the motion measurement method were useful. Furthermore, the developed system and the measurement method were modified based on problems found in the measurement tests. It was expected that the system would be applied practically to rehabilitation.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：慣性センサ 角速度 加速度 歩行 角度 リハビリ

### 1. 研究開始当初の背景

国内・国外を問わず、安価なシステムで、簡便に運動を計測する研究が、近年、盛んに行われている。これは、医療施設だけでなく、在宅リハビリテーションや高齢者の健康管理への応用を目指すものであり、ジャイロセンサや加速度センサなどを用いた運動計測に関する研究が活発に行われており、中には、Kinect (マイクロソフト社) といったゲーム用デバイスを用いた運動計測に関する研究も行われるようになってきている。しかしながら、多くの研究は、特定の関節運動や特定の指標に限定したり、日常の活動モニタリングに注目したりしており、身体運動を総合的に評価するシステムとしては、依然として、光学的動作分析システムが主流である。したがって、動作分析は、リハビリテーションの現場や在宅リハビリテーションで、実際には利用可能になっていない。

一方、我々は、リハビリテーションや健康維持のための運動機能評価への応用を目的に、ジャイロセンサと加速度センサの情報にカルマンフィルタを組み合わせることで、下肢関節角度を安定かつ妥当な精度で計測する基盤技術を開発してきた。これを、リハビリテーションや在宅での利用へ展開する場合、身体装着に関して無線型センサの優位性が一般に認識されているが、複数センサの同時計測での無線通信の安定性の問題、ならびに、計測結果の可視化が不十分であることが課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究は、運動リハビリテーション訓練時に、計測環境を限定せず、簡単に使用でき、かつ、的確な運動機能評価や訓練指示の支援を可能にするウェアラブルモーションキャプチャシステムの開発を目的とする。これは、短時間で、手間がかからずにセンサを身体に装着し、運動を計測して、結果を可視化するシステムであり、計測結果のデータベース化と管理も容易にすることが期待される。具体的には、安定な無線計測が可能な無線型慣性センサの開発、角速度や加速度の計測結果から評価指標の抽出、評価指標のグラフ化やアニメーション化等の可視化、及び、医療スタッフが使用する携帯型端末の開発を推進し、臨床で実用的使用を期待できる無線型モーションキャプチャシステムの実現とリハビリテーションでの動作解析・評価への展開を目指す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 動作の評価指標の抽出方法の開発

動作を評価する指標として、最初に、角度の計測について、ジャイロセンサ出力の積分に対して、加速度センサ出力を用いてカルマンフィルタを適用する方法を基盤とし、歩行の運動学的因子として、左右の股関節・膝関節・足関節の屈曲/伸展角度、体幹と左右の

大腿部・下腿部・足部の傾斜角度を安定した精度で適切に計測できるようにする。さらに、三次元的な動作の計測への展開を図るため、股関節の内外転角度の計測方法を検討する。また、歩行の時間・距離因子として、足部や下腿部に装着したセンサからの加速度や角速度信号から、足と床との接地や離地のタイミングを検出し、遊脚期と立脚期を識別する方法、ストライド時間やストライド長を1歩毎に計測し、歩数や歩行速度とともに評価する方法を構築する。さらに、足の三次元的な移動軌跡を計測する方法も検討する。ここでは、剛体のような理想的な計測対象での基礎実験に加え、人を被験者とした実環境での計測について、三次元動作解析装置と同時計測することで、評価指標の抽出方法を検証する。

#### (2) ウェアラブル運動計測・解析システムの開発

医療スタッフや一般の使用者が容易に操作でき、計測から可視化までの一連の作業を実施できるモーションキャプチャシステムの基本システムを開発する。

最初に、センサを体幹、両側の大腿部、下腿部、足背部の7ヶ所に装着して、下肢動作を対象とするモーションキャプチャシステムを実現するための無線型慣性センサを開発する。7個の無線型慣性センサを同時に使用して100Hz程度のサンプリング周波数で動作を計測できるようにするため、無線通信状況が悪化した場合でも計測を可能にするバッファリング機能、オフラインメモリ機能などについて検討する。これらの結果を基にセンサの基本構成を確定し、センサを製作して検証する。

次に、開発するシステムで計測から結果の可視化までを簡便に行えるソフトウェアを開発する。まず、無線型慣性センサによる計測を行うために、計測条件の設定、データ計測の開始・終了、計測データの確認、データの記録などを容易に実行可能にするインターフェイスを実装した動作計測ソフトウェアを開発する。そして、計測した関節角度や傾斜角度の情報を可視化するソフトウェアを開発する。さらに、これらの動作計測ソフトウェアと可視化ソフトウェアを統合し、開発した評価指標の抽出法のアルゴリズムを実装することで、モーションキャプチャシステムの基本システムを実現する。

#### (3) システムの臨床試験とシステムの改良

リハビリテーションに従事する医療スタッフの協力のもと、開発したシステムの実証試験を実施する。運動機能障害者を被験者とした場合に、実際の使用を想定した操作や計測、結果の提示を通して、システムの臨床応用へ向けての実用性を検証し、改良を行う。また、人の運動を慣性センサで計測するためには、センサ装着時のキャリブレーションが必要になるため、初期姿勢の計測方法とキャ

リプレーションの方法についても合わせて検討し、上記のモーションキャプチャシステムに実装する。さらに、本研究関係者以外の一般使用者によるシステムの使用についても実証試験を実施し、計測・解析時の操作性や課題について検証し、改良する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 動作の評価指標の抽出方法の開発

矢状面内の身体部位の傾斜角度及び関節角度の計測について、最初に、ジャイロセンサ出力の積分に対して、加速度センサ出力を用いてカルマンフィルタを適用する方法のパラメータ設定を検討した。剛体リンクモデルを用いて歩行を模擬した運動を計測した場合には、平均 RMSE が 2 deg 未満の十分な精度が得られ、パラメータ設定に関する指針を得た。次に、センサの身体への装着方法及び計測手順を含め、健常者の歩行計測試験により、角度の計測法の検証を行った。歩行速度を変えた場合においても、足部、下腿部、大腿部、体幹部の角度の計測誤差が平均 RMSE でほぼ 4 deg 以下になり、実用的な精度で安定な計測が可能になることを確認した。

歩行事象の検出について、1 回の計測の後に解析できるように計算方法を検討し、構築した。過去の実験結果を参考に、足部のセンサから計測された角速度から足底接地、踵離地、爪先離地を検出することとし、足部接地のタイミングは下腿部のセンサで計測した加速度から検出することとした。また、3 次元動作の角度計測へ展開するため、上述の算出方法の拡張、ならびにクォータニオン法による角度算出法の構築を行い、剛体リンクモデルの 3 次元運動計測で有効性を確認した。

ストライド長の計測方法は、まず、足部に装着したセンサから計測した角速度情報を基に足部の姿勢を算出し、回転行列を得る。計測した加速度から回転行列を用いてグローバル座標系内の運動加速度を算出する。これを積分することで速度、移動量を求める。このとき、積分区間は、上記で検出した踵離地から足底接地の開始までとし、足底接地の間は速度が 0 と仮定して補正、及び初期値設定を行った。これにより、1 ストライド毎の足部の移動を算出でき、ストライド長を得ることが可能になった。健常者で計測精度の評価を行った結果、定常歩行では、平均絶対誤差がほぼ 5% 以下になり、十分利用可能になることを確認した。また、この方法により、平面内の移動距離だけでなく、高さ方向への足の移動も算出可能になり、足の 3 次元な移動軌跡を計測可能になることを確認した。

##### (2) ウェアラブル運動計測・解析システムの開発

7 個の無線型慣性センサを同時に使用して 100Hz 程度のサンプリング周波数で下肢動作を計測するため、バッファリング機能、メモリ機能等について検討した結果、長距離無線

通信が可能な 2.4GHz 帯の無線モジュールにメモリ機能を搭載することで、計測中に無線通信が切断された場合でも容易に計測できるセンサシステムを構築できること、Bluetooth Class 1 モジュールを使用することで屋内での 30m 以上の通信距離で安定な同時計測が可能であることを実験的に確認した。これらの結果から、Bluetooth Class 1 モジュールを採用して仕様を確定し、無線型慣性センサを製作した。

計測・解析ソフトウェアについて、最初に、医療スタッフや一般の使用者が無線型慣性センサで容易に計測できるようにする計測用ソフトウェアを開発した。ここでは、携帯型端末での利用を想定し、計測条件の設定、データ計測の開始・終了、計測データの確認、データの記録などを容易に操作可能にするインターフェイスも構築した。次に、計測した関節角度や傾斜角度の情報を可視化するためのソフトウェアを開発した。角度の時間データ、下肢動作のスティックフィギュアアニメーションを表示するソフトウェアの基本構造として、計測データの読み込み部、角度データの時間グラフとスティックフィギュアアニメーションの表示部を構築した。最初は、矢状面内の角度の計測のみであったため、それに対応したグラフ表示やアニメーションとした。また、身体部位の位置座標を計測できないので、条件を設定して簡易的にアニメーション表示を可能にしたが、健常者の歩行については比較的良好に再現できた。そして、これらの計測ソフトウェア、及び計測結果の可視化ソフトウェアを統合し、計測から可視化までの一連の作業を実施できるモーションキャプチャシステムのプロトタイプシステムを構築した。

計測結果を解析するため、先に構築した歩行事象検出アルゴリズムを実装し、10m 歩行等で得られた歩行データから、1 ストライド毎の情報を抽出し、時間軸の正規化、及び情報の平均化処理を自動的に行えるようにした(図 1)。なお、この部分についてもプロトタイプモーションキャプチャシステムに実装し、一つのシステムとして実現した。健常

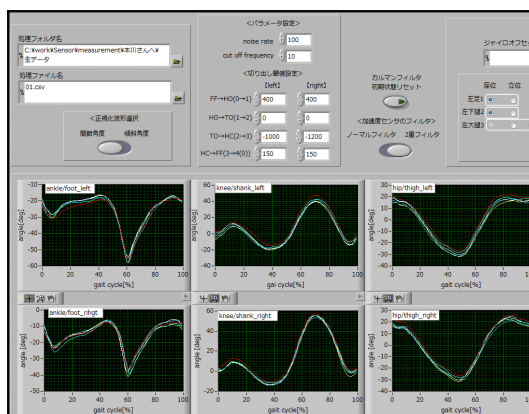


図 1 プロトタイプモーションキャプチャシステムの計測角度の自動処理部

者の歩行計測では、歩行速度が速い場合に自動処理用のパラメータ設定を変更する必要が生じたが、概ね自動処理が可能になった。これにより、角度や歩行事象の自動処理が可能になった。

### (3) システムの臨床試験とシステムの改良

開発した計測・解析ソフトウェアについて、リハビリテーションに従事する医療スタッフの協力のもと、運動機能障害者での計測による実証試験を行い、利用可能性を確認した。また、試験の中で、人の運動時の角度を慣性センサで計測する際のセンサ信号のキャリブレーションのための初期姿勢計測方法とキャリブレーションの方法についても検討し、その計測方法と処理方法を構築し、先に開発した計測ソフトウェアに実装した(図2)。

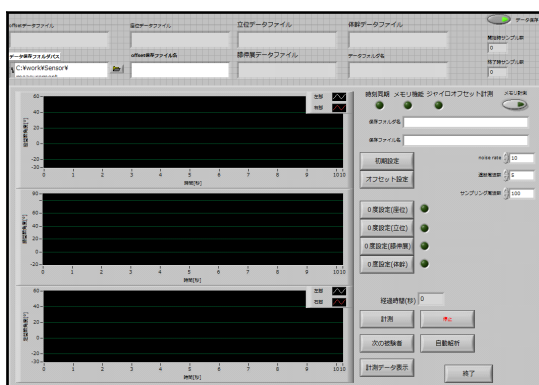


図2 開発した計測ソフトウェアの画面

また、運動機能障害者での評価試験により、健常者と大きく異なる歩行の場合、あるいは健常者の速い歩行までを含めて計測する場合に、計測精度が低下するという問題が生じることが確認された。加えて、障害者の歩行の計測結果のアニメーション表示が不自然になる場合があることも確認された。これらの問題に対し、まず、3次元的动作の計測について、先に構築した2つの角度算出法の評価を健常者による通常歩行や障害者を模擬した歩行の計測を通して行った。矢状面、前額面を想定した角度計測において、2つの方法の計測精度の検証を行った結果、矢状面内の運動については、2つの方法で同等の良好な精度で計測できること、前額面内の運動についてはクォータニオン法がより高い精度で計測可能であることを確認した。クォータニオン法では、3次元的运动について、実用が期待できる計測精度であったものの、前額面内の運動の計測精度が矢状面内の角度計測よりも低くなったので、さらなる改善が望まれた。この結果を基に、前額面内の角度も利用するようにアニメーション表示を改良した結果、障害者の歩行の計測結果のアニメーション表示が不自然になるという問題を一部改善可能であることが確認できた(図3)。

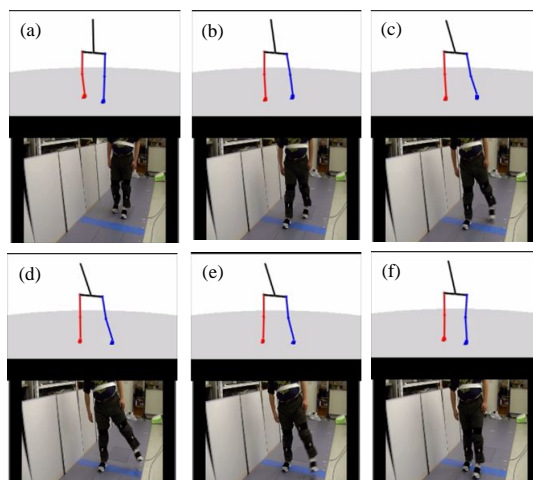


図3 矢状面と前額面の角度を用いた計測結果のアニメーション表示の例。実際の歩行と対応させて示す。

一方、健常者の歩行と大きく異なる場合や、速い歩行までを含めて計測する場合に計測精度が低下する問題に対して、カルマンフィルタによる誤差の補正強度を、推定値と観測値の差(角度差やクォータニオン差として実装)に基づいて可変にする方式を考案した。剛体モデルにより歩行を模擬した運動、健常者の通常歩行や障害者を模擬した歩行で計測精度の検証を行った結果、速い歩行に対する角度計測精度の改善に効果があり、さらに障害者の歩行計測で有効に機能することを確認した。

開発したプロトタイプシステムを用いて、初めて使用する方に説明した後、歩行計測を実施した結果、センサ装着において練習が必要であったが、十分に使用可能であることを確認した。

以上の結果から、開発したシステムがリハビリテーションにおける歩行計測とその結果の可視化、解析に実用可能になることが期待された。上記の新しい計算方法を、プロトタイプモーションキャプチャシステムに実装し、解析機能をさらに充実させることが実用に際して望まれる。

### 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13件)

Maho Shiotani, and Takashi Watanabe, A Basic Study on a Method of Evaluating 3-dimensional Foot Movements in Walking, Proc. IEEE-EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics, 査読有, 2014年, 印刷中

照山裕太, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢角度計測に関する検討 ~ 健常者での通常歩行およびぶん回し歩行による評価 ~, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.113, No.499, 2014年, 19-24



Takashi Watanabe, Kento Ohashi, Angle Measurements During 2D and 3D Movements of a Rigid Body Model of Lower Limb: Comparison between Integral-based and Quaternion-based Methods, Proc. 7th Int. Conf. Bio-inspired Systems and Signal Processing, 査読有, 2014年, 35-44

Takashi Watanabe, Jun Shibasaki, Measurement of Gait Movements of a Hemiplegic Subject with Wireless Inertial Sensor System before and after Robotic-assisted Gait Training in a Day, IFMBE Proceedings, 査読有, Volume 41, 2014年, 1730-1733

DOI: 10.1007/978-3-319-00846-2\_427

Takashi Watanabe, Shun Endo, Katsunori Murakami, Yoshimi Kumagai, and Naomi Kuge, Movement Change Induced by Voluntary Effort with Low Stimulation Intensity FES-assisted Dorsiflexion: A Case Study with a Hemiplegic Subject, Proc. the 6th Int. IEEE EMBS Conf. Neural Engineering, 査読有, 2013年, 327-330

DOI: 10.1109/NER.2013.6695938

Yuta Teruyama and Takashi Watanabe, Effectiveness of Variable-Gain Kalman Filter based on Angle Error Calculated from Acceleration Signals in Lower Limb Angle Measurement with Inertial Sensors, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 査読有, Volume 2013, 2013年, Article ID 398042

<http://dx.doi.org/10.1155/2013/398042>

Oscar David Pena Cabra, Takashi Watanabe, Experimental Evaluation of Balance Prediction Models for Sit-to-Stand Movement in the Sagittal Plane, Computational and Mathematical Methods in Medicine, 査読有, Volume 2013, 2013年, Article ID 592328

<http://dx.doi.org/10.1155/2013/592328>

Yuta Teruyama, Takashi Watanabe, A Basic Study on Variable-Gain Kalman Filter based on Angle Error Calculated from Acceleration Signals for Lower Limb Angle Measurement with Inertial Sensors, Proc. 35th Ann. Int. Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, 2013年, 3423-3426

DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610277

Yuta Karasawa, Yuta Teruyama, Takashi Watanabe, A Trial of Making Reference Gait Data for Simple Gait Evaluation System with Wireless Inertial Sensors, Proc. 35th Ann. Int. Conf. the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 査読有, 2013年, 3427-3430

DOI: 10.1109/EMBC.2013.6610278

Takashi Watanabe, Shun Endo, Katsunori Murakami, Yoshimi Kumagai, and Naomi

Kuge, A Measurement of Lower Limb Angles Using Wireless Inertial Sensors during FES Assisted Foot Drop Correction with and without Voluntary Effort, Int. J. Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, 査読有, Vol.3, No.3, 2013年, 216-220

DOI: 10.7763/IJBBB.2013.V3.199

Yuta Teruyama, Takashi Watanabe, A Validation Test of Measurement Method of Lower Limb Angles based on Kalman Filter on Different Type of Inertial Sensors, Int. J. Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, 査読有, Vol.3, No.3, 2013年, 211-215

DOI: 10.7763/IJBBB.2013.V3.198

大橋研斗, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢3次元運動の計測に関する検討 ~ 剛体リンクモデルによる評価 ~ , 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol.112, No.479, 2013年, 69-74

照山裕太, 渡邊高志, カルマンフィルタを用いた慣性センサによる下肢角度計測法の精度改善に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, 査読無, Vol. 112, No. 297, 2012年, 11-16

[学会発表](計21件)

M. Shiotani, and T. Watanabe, A Basic Study on a Method of Evaluating 3-dimensional Foot Movements in Walking, IEEE-EMBS Int. Conf. Biomedical and Health Informatics, 2014年6月3日, スペイン・バレンシア

照山裕太, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢角度計測に関する検討 ~ 健常者での通常歩行およびぶん回し歩行による評価 ~ , ME とバイオサイバネティクス研究会, 2014年3月17日, 町田

M. Shiotani, T. Watanabe, K. Murakami, Y. Kumagai, N. Kuge, A Basic Study on Evaluation of Ankle Dorsiflexion by Measurement in Sitting Position for FES-Assisted Foot Drop Correction, The Joint Symp. 8th Int. Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, and 5th Int. Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics, 2014年3月6日, 仙台

T. Watanabe, K. Ohashi, Angle Measurements During 2D and 3D Movements of a Rigid Body Model of Lower Limb: Comparison between Integral-based and Quaternion-based Methods, 7th Int. Conf. on Bio-inspired Systems and Signal Processing, 2014年3月3日, フランス・アンジェ

M. Shiotani, T. Watanabe, S. Endo, K. Murakami, Y. Kumagai, and N. Kuge, A basic Study on Evaluation of 3 dimensional foot movement for

FES-assisted foot drop correction, Innovative Research for Bionics-Abionics Intelligent Interface Symp., 2014 年 1 月 21 日, 仙台

塩谷真帆, 渡邊高志, 遠藤 駿, 村上克徳, 熊谷芳美, 久家直巳, 片麻痺者の FES による下垂足歩行矯正における足部動作 3 次元解析に関する基礎的検討, 第 34 回バイオメカニズム学術講演会 2013 年 11 月 16 日, 所沢

T. Watanabe, S. Endo, K. Murakami, Y. Kumagai, and N. Kuge, Movement Change Induced by Voluntary Effort with Low Stimulation Intensity FES-assisted Dorsiflexion: A Case Study with a Hemiplegic Subject, The 6th Int. IEEE EMBS Conf. Neural Engineering, 2013 年 11 月 6 日, アメリカ・サンディエゴ

T. Watanabe, J. Shibasaki, Measurement of Gait Movements of a Hemiplegic Subject with Wireless Inertial Sensor System before and after Robotic-assisted Gait Training in a Day, The XIII Mediterranean Conf. Med. and Biolog. Eng. and Comput., 2013 年 9 月 26 日, スペイン・セビリア

Y. Teruyama, T. Watanabe, A Basic Study on Variable-Gain Kalman Filter based on Angle Error Calculated from Acceleration Signals for Lower Limb Angle Measurement with Inertial Sensors, 35th Ann. Int. Conf. the IEEE Eng. Med. and Biology Soc., 2013 年 7 月 5 日, 大阪

Y. Karasawa, Y. Teruyama, T. Watanabe, A Trial of Making Reference Gait Data for Simple Gait Evaluation System with Wireless Inertial Sensors, 35th Ann. Int. Conf. the IEEE Eng. Med. and Biology Soc., 2013 年 7 月 5 日, 大阪

M. Shiotani, T. Watanabe, A Preliminary Study on Analyzing 3-Dimensional Foot Movements in 10 m Walking with FES-Assisted Foot Drop Correction, 35th Ann. Int. Conf. the IEEE Eng. Med. and Biology Soc., 2013 年 7 月 5 日, 大阪

T. Watanabe, Measurement and Control of Lower Limb Movements for Gait Rehabilitation of Hemiplegic Subjects, 5th Int. Conf. Bioinf. and Biomed. Tech., 2013 年 3 月 18 日, 中国・マカオ

Y. Teruyama, T. Watanabe, A Validation Test of Measurement Method of Lower Limb Angles based on Kalman Filter on Different Type of Inertial Sensors, 5th Int. Conf. Bioinf. and Biomed. Tech., 2013 年 3 月 18 日, 中国・マカオ

大橋研斗・渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢 3 次元運動の計測に関する検討 ~ 剛体リンクモデルによる評価 ~, ME とバイオサイバネティクス研究会, 2013 年 3 月 14 日, 町田

柄澤勇太, 照山裕太, 遠藤 駿, 渡邊高志, 無線型慣性センサによる簡易歩行評価システムに関する検討: 健常者の普通歩行の計測による基準データの作成, 第 33 回バイオメカニズム学術講演会 2012 年 12 月 15 日, 仙台

大橋研斗, 渡邊高志, 慣性センサを用いた下肢 3 次元運動の角度計測に関する検討: 剛体リンクモデルによる基礎的評価, 第 46 回日本生体医工学会東北支部大会, 2012 年 11 月 17 日, 仙台

照山裕太, 渡邊高志, カルマンフィルタを用いた慣性センサによる下肢角度計測法の精度改善に関する検討, ME とバイオサイバネティクス研究会, 2012 年 11 月 16 日, 仙台

芝崎 淳, 渡邊高志, 頸髄梗塞者への Hybrid Assistive Limb (HAL) を用いた歩行練習が歩容の改善を認めた一例, 第 47 回日本脊髄障害医学会, 2012 年 10 月 25 日, 静岡

T. Watanabe, H. Mori, and T. Suzuki, A Preliminary Test of Lower Limb Joint Moment Estimation Method without Ground Reaction Force using Inertial Sensors, 34th Ann. Conf. the IEEE EMBS, 2012 年 8 月 30 日, アメリカ・ボストン

K. Nitta, T. Watanabe, A Study on Wearable Sensor System for Simple Gait Evaluation in Rehabilitation: Tests of Stride Length Measurement with Neurologically Intact Subjects, 第 51 回日本生体医工学会大会, 2012 年 5 月 12 日, 博多

② Y. Teruyama, T. Watanabe, A Test of the Kalman-filtering-based Angle Measurement Method in Using Wireless and Wired Inertial Sensors, 第 51 回日本生体医工学会大会, 2012 年 5 月 10 日, 博多

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡邊 高志 (WATANABE, TAKASHI)  
東北大学・大学院医工学研究科・教授  
研究者番号: 90250696