

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 31 日現在

機関番号：32653

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500616

研究課題名(和文) ロボット工学とリハビリ医学の融合—超小型計測センサと歩行ロボットのリハビリ医学への応用

研究課題名(英文) Application of the ultra-miniaturized wearable motion capture system and robotics to rehabilitation medicine

研究代表者

猪飼 哲夫 (IKAI, TETSUO)

東京女子医科大学・医学部・教授

研究者番号：80151249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：超小型生体計測システムは、3軸加速度センサ・ジャイロセンサ・地磁気センサから構成され、被験者の7か所に貼付固定して研究を行った。若年健常男性10名、高齢者2名に対して、トレッドミル上での歩行、平地歩行、片麻痺模擬歩行を計測した。一部の被験者では、光学式との比較や屋外での歩行も計測した。歩行周期や関節角度変化を捉えることができ、光学式と比べて大きな差異はなかった。2足歩行ロボットの動きは人間の歩行パターンに極めて近く、腰部機能の備えることにより膝を伸ばしての歩行が可能となり、足部機構の改良により踵接地つま先離床が可能である。2足歩行ロボットによる疑似障害歩行モデルや福祉用具の評価の研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The ultra-miniaturized wearable motion capture system (IMUs, WB-4R) is comprised of 3-axis accelerometer sensor, 3-axis gyroscope and 3-axis magnetometer. Seven units were placed on both legs and lumbar spine of the subject. For 10 young men and 2 elderly men, we analyzed walking on the treadmill, level ground walking and hemiparesis sham walking. In some subjects, we compared with optical motion capture system and analyzed outdoor walking. We could detect gait phase and obtain joint angle changes. There were no difference results between the IMUs system and the optical motion capture system. The movement of biped humanoid robot (WABIAN-2R) is extremely almost a human gait pattern. By using the redundant mechanism of the pelvic motion, the robot is able to perform a stretch-knee gait, and heel-contact and toe-off motion is possible. We studied the emulation of a disabled person's gait (hemiplegic gait), and could evaluate welfare equipments quantitatively with a human motion simulator.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：超小型生体計測システム 慣性センサ 歩行解析 2足歩行ロボット 疑似障害歩行モデル

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボット工学のリハビリ・福祉領域の分野での応用の報告が散見されるようになってきた。評価機器、訓練機器、福祉機器などの開発研究が大学、企業の一部で行われている。リハビリにとって患者の機能の客観的(定量的)評価は、予後予測、施行方法の決定・変更、リハビリ効果の判定に極めて重要である。特に歩行能力の評価は日常のリハビリ医療でしばしば行われている。動作(歩行)解析の測定方法には、光学式、磁気式、機械式(慣性センサ)の3種類が存在する。その中で光学式モーションキャプチャーシステムは、姿勢計測用マーカーの正確な位置を画像処理により算出するため、高信頼性・高精度な計測が可能であり、現在広く用いられている。しかし、光学式は計測範囲に制限があり、高価であること、測定までに時間がかかるなどの問題点がある。また磁気式は計測範囲が狭く、精度も高くない。

加速度センサやジャイロセンサなどの姿勢(慣性)センサを用いた動作(歩行)解析は、今までに報告されてきたが、機器自体の大きさや精度が問題で、正確に測定することは困難なため実用的なレベルにまでは達していなかった。研究分担者の研究室ではロボット技術の研究により、超小型で高精度の姿勢センサユニットを開発してきた。このシステムは非常に小さく軽量であり、計測対象が動作する上で障害となりにくい。また、高精度のVICON モーションキャプチャーシステムと比較しても、同程度の精度が得られており、計測可能範囲や携帯性の観点からも、生体動作計測システムとして有用性があると考えられる。

(2) 研究分担者の研究室では長年にわたり2足歩行ロボットの研究を行っている。できるだけ人間の歩行に近いロボットを開発し、人体運動シミュレータとしての応用を検討している。41自由度の関節を搭載し、腰部機能を備えることにより膝を伸ばしての歩行が可能となり、足部機構の改良によりアーチ構造をもった踵接地・つま先離床が実現できた。旋回動作、不整地・軟弱路面、傾斜・段差のある路面での歩行が可能になった。このような人間に極めて近い歩行が可能な2足ロボットの研究は世界的レベルでも見当たらない。

2. 研究の目的

(1) 超小型生体計測システムを用いて、トレッドミル上での歩行を計測して解析を行い、歩行機能評価システムの構築を行う。その後平地での歩行、患者や高齢者へ計測システムを応用し、歩行評価の意義について検討する。

(2) 2足歩行ロボットの種々の障害者の疑似歩行モデルを作製する。また、歩行補助具などの福祉用具評価手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

(1) センサモジュールについて

超小型生体計測システムであるWB-4R(図1)は、3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、3軸地磁気センサから構成され、大きさは20×17×8mm、重量2.9gと小型軽量であり、市場に出回っている製品に比べかなり小さい。消費電力は150mW、角度精度は2deg以下、サンプリング周波数は200Hzである。電池を内蔵し直接無線にてPCへデータを送信する機器は存在するが、今回用いたセンサモジュールは、IMU間、central board間のデータ通信にはCAN BUSを使用し、central boardが

ら PC へは Bluetooth により無線通信にてデータを送信した。

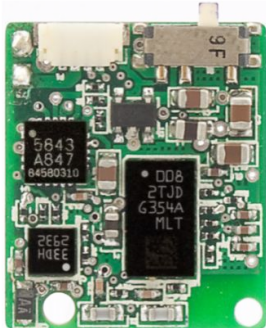


図1 センサ (WB4-R)

(2)歩行解析方法

被験者の第3腰椎、両側大腿部外側、両側下腿部外側、両側足背の7か所にサポーター、テープにて貼付固定した(図2)。背部に装着した central board より PC へ送信した。以前は計測専用のスーツを着て動作計測を行っていたが、最近はサポーターにセンサを入れるポケットを取り付け固定している。

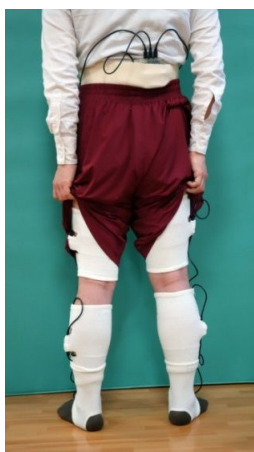


図2 センサの貼付固定位置

20、30代の健常男性10名に対して、傾斜角度が0度のトレッドミル上で、時速3km、4km、5kmの歩行速度にて各施行1分間の歩行(各3回施行)を計測した。また、6mの自由速度による平地歩行(施行5回)も計測した。一部の被験者では、光学式(赤外線カメラ:アニマ社 ローカス)との比較や屋外での歩行も計測した。70歳代の2名の高齢男性でトレッドミル上歩行(時速1km)と平地歩行を計測した。健常男性被験者の右足にプラスチック

短下肢装具を装着させ、T字杖使用による片麻痺模擬歩行を計測した。

(3)データ分析方法

WB-4R から得たデータ(センサ座標系の加速度、角速度、地磁気)に対して初めにキャリブレーションを行った。IMUの姿勢角を算出するアルゴリズムとして拡張カルマンフィルターを用いた。拡張カルマンフィルターは加速度、角速度、地磁気の計算値を利用して、地磁気の方角に基づいたIMUの姿勢角を算出するアルゴリズムである。この拡張カルマンフィルターの大きな問題として、磁場が不規則に変化続ける場合、Yaw軸周りの角度変化の算出に困難な点がある。商品化されているIMUでは、原則として磁場が一定の環境のみ計測が可能である。実際、床下配線が一般的となっている室内では、磁場が影響されている場所が多い。そこで、静的状態の際は地磁気センサを用いてYaw軸周りの角度を計測した。動的状態では、地磁気センサを用いず、角速度を積分してフィルタリングすることでYaw軸周りの姿勢角を計算した。

キャリブレーションされた加速度、角速度、地磁気から、拡張カルマンフィルターを通すとクォータニオンが算出される。クォータニオンから回転行列を算出し、絶対座標系のオイラー角(ロール角、ピッチ角、ヨー角)が求められる。計測データ全体におけるHeel Contact、Heel Off、Toe Offの時間的タイミングを検出し、1ストライド毎に計測データを分割して、各種分析を行った。IMUは各関節の間に取り付けられており、2つのIMUを用いてそれぞれのIMU間の関節角度を求めた。膝関節角度は、大腿と下腿に取り付けたIMUから求めた回転行列を掛け合わせることで算出した。足関節と股関節では、回転行列をそのまま掛け合わせるのではなく、回転行列からオイラー角を計算し、それぞれのIMUのオイラー角を用いて関節角度を求めた。

(4)2 足歩行ロボットの研究

2 足歩行ロボット(WABIAN-2R)は全長 150cm、重量 64kg で、動きは人間の歩行パターンに極めて近い(図 3)。41 自由度の関節を搭載しており、2 自由度の腰部機能を活用して、膝を伸ばしての歩行が可能となった。足部機構の改良により、踵から着地し爪先で離れる着地・離地動作が実現できた。また、人間の足部のアーチ構造を模擬した足部の開発により、足全体が接地する時に着地衝撃を吸収していることが確認できた。

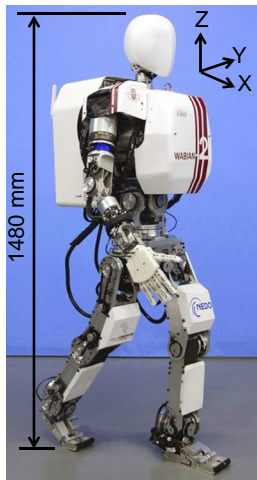


図 3 2 足歩行ロボット (WABIAN-2R)

人体運動シミュレータとしての応用として、障害者(片麻痺患者)の歩行を模擬した擬似障害歩行実験を行った。光学式モーションキャプチャーシステムにより計測した、障害者の歩行データを歩行パラメータとして使用し、擬似障害歩行パターンを生成した。人体運動シミュレータとしての応用の一例として、歩行器を用いた歩行実験を行った。人間の場合、歩行器のアームレストの高さは、通常直立姿勢時の肘の位置を目安としており、障害が重いほど低めに設定するとよいことが経験的に分かっている。2 足歩行ロボットを用い、歩行器のアームレストの高さによる違いを検討した。

4. 研究成果

(1)トレッドミル上での歩行や平地歩行にお

いて、歩行周期(立脚期、遊脚期)や下肢関節角度(股・膝・足関節)変化を捉えることができた。光学式と比べて歩行周期や角度変化に大きな差異はなかった。また、ストライド毎の絶対座標系での、足部のピッチ軸回りの角速度と角度との関係が得られた。屋外歩行でも同様に歩行解析が可能であった。屋外では地磁気の影響が少ないため、角度変化のばらつきが小さかった(図 4 左膝)。高齢者においても歩行解析は可能であり、下肢関節角度は若年者に比べ小さかった。片麻痺模擬歩行においても本システムにより歩行解析を行うことができた。模擬障害側の角度変化は小さく、特に足関節の角度変化は微小であった。障害側の足部のピッチ軸回りの角速度と角度との関係では、特異な所見が得られた。

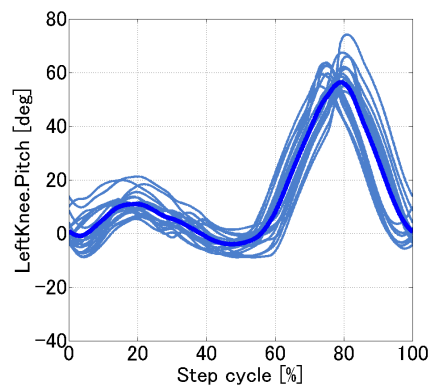


図 4 左膝の角度変化(屋外歩行)

(2)超小型生体計測システムの研究結果から、IMU による歩行解析は可能であり、健常若年者だけでなく、高齢者や模擬片麻痺患者の歩行解析にも応用できた。屋内だけでなく屋外の環境においても歩行解析は可能である。今までの歩行解析法に比べ、測定準備や装着が容易で、計測環境の制限がなく、有用な計測評価法になりえる。また、IMU で得られる歩行の評価指標も存在する。機器の価格は光学式に比べかなり安い。

歩行だけでなく他の動作解析にも使用できる。スポーツ領域での活用や、パーキンソン病、脳卒中、人工関節置換術後の患者などの

評価やリハ効果の判定、装具の検討、転倒リスクの評価に利用可能である。

問題点をあげれば、高度な光学式に比べて精度がやや劣る点、位置の決定が弱い点である。リハ評価や効果判定に、高い精度等を要求することは多いとはいえない。光学式に取って代わることはないと思うが、利用される頻度は高くなるであろう。普及するためには、IMU からの安定したデータの抽出、再現性の高い解析アルゴリズムの開発、小型で低価格の機器の製作は必要である。今後は運動学的な利用だけでなく、筋電、床反力などを併用した運動力学的なシステムの構築、リアルタイムで計測結果を自動的に解析し、患者や医療者にフィードバックできる方法の開発等を検討していきたい。

(3)生成した片麻痺擬似障害歩行パターンを用いて、2 足歩行ロボットによる歩行実験を行い、下肢の矢状面における軌道や関節角度の比較から模擬歩行実験の有効性を確認した。

2 足歩行ロボットを用いたこの実験では、足部と前腕部に取り付けられた力センサの値と、膝モータへの供給電流により計算されたモータの消費エネルギーから、アームレストの高さが下がるほど腕にかかる力が増加し、膝の負担が減少するという定量的なデータが得られた(図5)。これにより、これまで経験的に分かっていた事実を、人体運動シミュレータを用いることで定量的に評価可能であった。

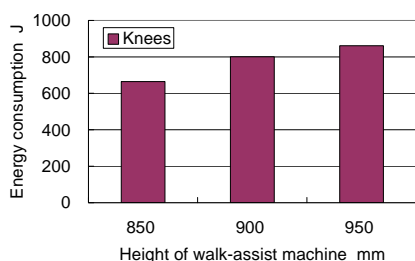


図5 歩行器の高さの違いによる膝への負担変化

(4)今後は、2 足ロボットの運動能力をさらに人間に近づけていき、様々な福祉機器の定量的評価を行っていきたい。将来的には人体運動シミュレータによる福祉用具評価手法の確立を目指す。そして、最終的には福祉・リハビリテーション分野に留まらず、様々な分野で応用可能な人体運動シミュレータを実現したいと考えている。転倒機序・予防の研究、高齢者・認知症患者への応用なども検討していきたい。

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2件)

猪飼哲夫、Zecca M、Sessa S、高西淳夫：
IMU (慣性センサ) による動作解析・臨床
リハ 査読無、23 巻、2014、1000-1005
Zecca M, Saito K, Sessa S, Bartolomeo L,
Lin Z, Cosentino S, Ishii H, Ikai T,
Takanishi A. Use of an
ultra-miniaturized IMU-based motion
capture system for objective evaluation
and assessment of walking skills. Conf
Proc IEEE Eng Med Biol Soc 2013, 査読
有, 2013, 4883-4886

[学会発表](計10件)

猪飼哲夫、高西淳夫、橋本健二：2 足歩行
ロボットのリハビリテーションへの応用。
第51回日本リハビリテーション医学会学
術集会、2014/6/6、名古屋国際会議場(名
古屋市・愛知県)

Kong W, Saito K, Lin Z, Zecca M, Sessa S,
Imitaz U, Consentino S, Bartolomeo L,
Ishii H, Ikai T, Takanishi A:
Development of a real-time IMU-based
motion capture system. 2013 IEEE
international conference of robotics
and biomimetics (ROBIO2013),
2013/12/13, Shenzhen, China

猪飼哲夫、Massimiliano Zecca、齋藤航平、Salvatore Sessa、高西淳夫、上久保毅、百瀬由佳、森真由子：超小型生体計測システムによる歩行解析 高齢者や片麻痺模擬歩行への応用 . 第 29 回日本義肢装具学会、2013/10/27、佐賀市文化会館（佐賀市・佐賀県）

Sessa S, Saito K, Zecca M, Bartolomeo L, Lin Z, Consentino S, IshiiH, Ikai T, Takanishi A : Walking assessment in the phase space by using ultra-miniaturized inertial measurement units. 2013 IEEE international conference on mechatronics and automation (ICMA2013), 2013/8/5, かがわ国際会議場(高松市・香川県)

Zecca M, Saito K, Sessa S, Bartolomeo L, Lin Z, Consentino S, IshiiH, Ikai T, Takanishi A : Use of an ultra-miniaturized IMU-based motion capture system for objective evaluation and assessment of walking skills. 35th annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society (EMBC2013), 2013/7/5, 大阪国際会議場（大阪市・大阪府）

猪飼哲夫、齋藤航平、Massimiliano Zecca, Salvatore Sessa, 高西淳夫：超小型生体計測システム（姿勢センサ）による歩行解析。第 25 回日本運動器科学会、2013/7/6、神戸国際会議場（神戸市・兵庫県）

猪飼哲夫、高西淳夫、Massimiliano Zecca、Salvatore Sessa、齋藤航平、上久保毅、百瀬由佳、森真由子：超小型生体計測システムによる歩行解析。第 50 回日本リハビリテーション医学会学術大会、2013/6/14、東京国際フォーラム（千代田区・東京都）

Saito K, Zecca M, Sessa S, Lin Z, Bartolomeo L, Cosentino S, Petersen K,

Ishii H, Ikai T, Takanishi A : Assessment of walking quality by using inertial measurement units. 1st IEEE International Conference on Innovative Engineering (ICIES2012), 2012/12/8, Alexandria, Egypt

猪飼哲夫、高西淳夫、Massimiliano Zecca, Salvatore Sessa, 齋藤航平、上久保毅、百瀬由佳、森真由子：超小型生体計測システムによる歩行解析。第 28 回日本義肢装具学会学術大会、2012/11/10、名古屋国際会議場（名古屋市・愛知県）

猪飼哲夫、上久保毅、百瀬由佳、水野真由子、高西淳夫、Zecca Massiliano：超小型生体計測システムによる歩行解析の構築に向けて。第 49 回日本リハビリテーション医学会学術集会、2012/6/1、福岡国際会議場（福岡市・福岡県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

猪飼 哲夫 (IKAI, Tetsuo)

東京女子医科大学・医学部・教授
研究者番号：80151249

(2) 研究分担者

藤江 正克 (FUJIE, Masayuki)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：20339716

高西 淳夫 (TAKANISHI, Atsuo)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：50179462

ゼッカ マッシミリアーノ (ZECCA, Massimiliano)
早稲田大学・理工学術院・准教授
研究者番号：30434377