

# ヒューマノイドロボットと人間との インタラクションにおける人間計測システムの開発

## - 小型姿勢センサモジュールを用いた上半身運動計測システム -

溝口 裕 (早稲田大学大学院)

伊藤 加寿子 (早稲田大学理工学術院総合研究所)

齊藤 稔, 遠藤 信綱 (早稲田大学大学院)

Massimiliano ZECCA (早稲田大学先端科学・健康医療融合研究機構)

高信 英明 (工学院大学工学部・早稲田大学ヒューマノイド研究所)

高西 淳夫 (早稲田大学理工学術院・早稲田大学ヒューマノイド研究所)

### Development of a Bioinstrumentation System for Interaction with a Robot - Motion Capture System of Upper Body using Small Attitude Sensor Modules -

\*Yu MIZOGUCHI, Kazuko ITOH, Minoru SAITO, Nobutsuna ENDO

Massimiliano ZECCA: Waseda University

Hideaki TAKANOBU: Kogakuin University

Atsuo TAKANISHI: Waseda University

**Abstract** - We have been developing a bioinstrumentation system to measure human internal state from human motion and the physiology index during the interaction with a robot. However, the previous system has been heavy (2.5[kg]) and has restrained human motion because of the mechanical motion capture system. The system itself has affected human mental state. Therefore, new bioinstrumentation system which is lighter and does not restrain so much was developed. We realized the measurement of an attitude in the world coordinate system by improving the attitude sensor module which consists of accelerometer, magnetic sensor and rate gyro.

**Key Words:** bioinstrumentation, motion capture

#### 1. はじめに

近年, 工場内で利用される産業用ロボットとは違い, 福祉やエンターテインメントなどの, 人間との共存や共同生活を目的としたパーソナルロボット [1][2]の研究が盛んに行われている. このようなロボットは, 家庭内や公共の場など, より人間と接する機会の多い状況で利用されることになるため, これまでのロボット以上に身体的だけでなく, 心理的にも人間に悪影響を与えないようにしなくてはならない. そのためには, まずロボットと接する人間がロボットの概観や動作をどのように感じるかを知ることと, 人間がロボットをパートナーとして容易に受け入れられるよう, 人間にとって違和感のない動作を生成することが必要である. しかし, これまでロボットが人間に与える心理的影響はアンケートによる主観的な方法でしか評価されておらず, リアルタイムにロボットのどの動作がどのように人間に影響を与えたかを知る手段がなかった. さらに, 人間のような動作を生成するためには, その動作を計測しなければならないが, 既存の計測装置は高価なものや場所では計測できないものがほとんどであった. 以上の問題を解決するため, 本研究ではロボットと人間のインタラクションにおいてロボットが人間に

与える影響を客観的に計測し, 計測されたデータをロボットで再現するための安価でウェアラブルな装置を開発することを目的とした.

#### 2. ハードウェア

一般に, 人間の心理状態が変化すると, 緊張度, 情動, 意識の方向等にその影響が現れる. そしてこれらは生理指標や体の動作により間接的に計測できる. そこで我々は 2005 年度に心電・呼吸数・発汗量・脈波・血圧の相対変化および頭・腕・手部の運動を計測可能な人間計測システム WB-1R(Waseda Bioinstrumentation system No.1 Refined)を開発した. しかし, 総重量 2.5[kg]と重量感・拘束感があったため, システム自体が人間の内部状態に影響を与えてしまっていた. これは主に, 相対角統合型センシングシステムであるシリアルリンク機構の機械式モーションキャプチャに起因するものであった.

そこで, 本研究ではモーションキャプチャを重量感・拘束感の少ない, 以前とは別のシステムで実現することとした. 具体的には, 人間の身体を剛体リンクモデルと仮定し, 身体の各部位に姿勢センサを取り付ける. そして, その部位の世界座標系における姿勢を取得し, モデルの順運動学を解くことで各

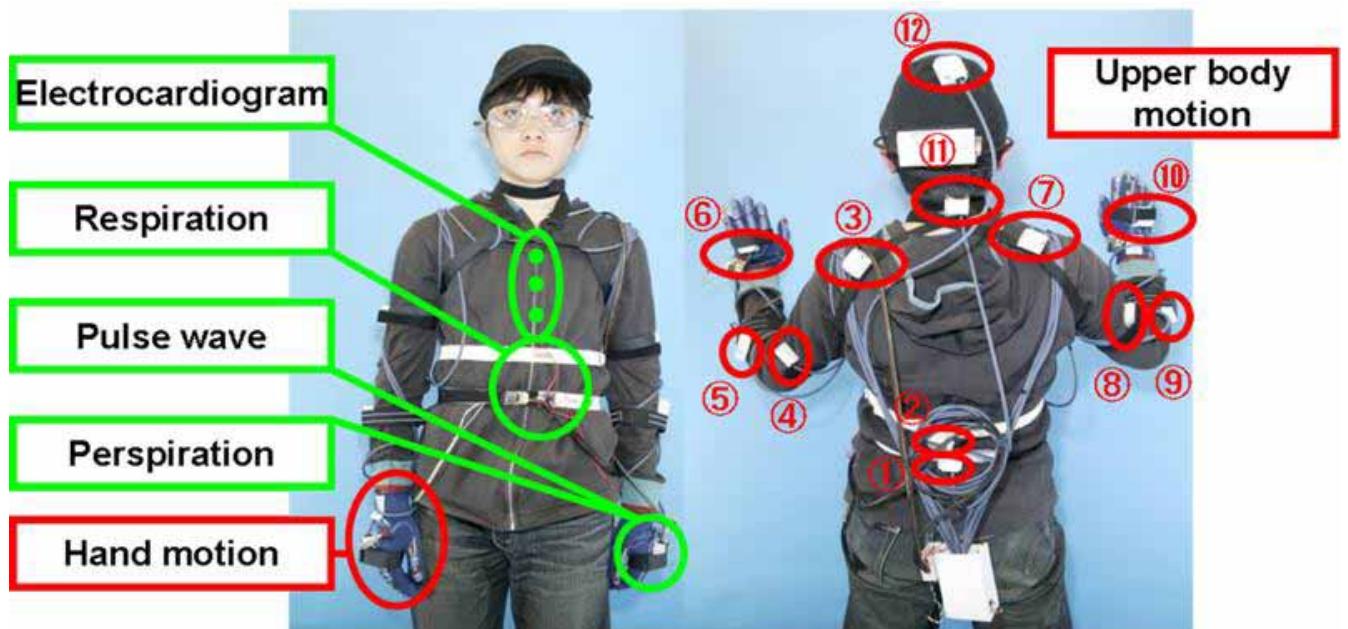
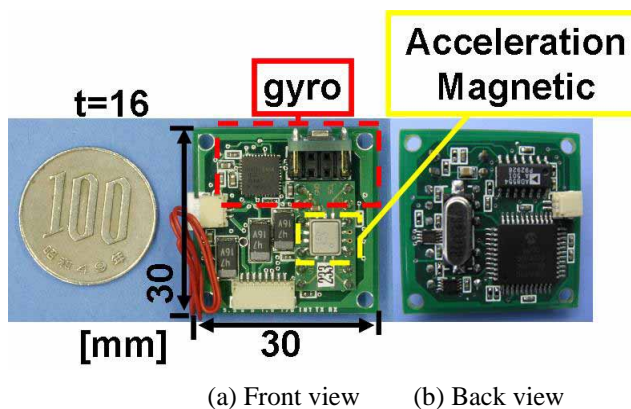


Fig.1 Bioinstrumentation system WB-2



(a) Front view (b) Back view  
Fig.2 New attitude sensor module

リンクの位置を求める，というものである．このシステムの長所は各姿勢センサ同士が独立していることである．これによってセンサの小型化，軽量化が容易となり，システム全体の重量感，拘束感を軽減することができる．また，センサを増やすだけで簡単にシステムを拡張することができる．

そこで，さらに腰部にもセンサを配置し，お辞儀など腰を含めた上半身の動作を計測可能とした．これにより，ロボットとのインタラクション時において，被験者がロボットに驚き，体をのけぞらせるという動作や，ロボットに恐怖心を抱き，一歩下がって前かがみになりながらロボットと接するという動作なども計測できる．Fig.1 に総重量 1.5[kg]となった新しい人間計測システム WB-2(Waseda Bioinstrumentation system No.2)を示す．

センサに関しては，これまで頭部動作計測に用いていた加速度センサと地磁気センサとレートジャイロを組み合わせた姿勢センサモジュールを改良し，世界座標系での姿勢を計測可能とした．Fig.2 に新しく製作した，ジャイロセンサ，加速度・地磁気センサ，マイコンからなる姿勢センサモジュールを示す．

### 3. 姿勢計測アルゴリズム

レートジャイロでは角速度が得られ，これを積分することで角度を求められるが，時間とともに積分誤差が増大してしまうという欠点がある．また，加速度センサを傾斜センサとして使用する場合，運動による慣性力の影響を受け誤差が生じるため，動的な場合は使うことができない．一方，地磁気は常に磁北方向を示すため，磁気センサによって，Yaw 角の取得が可能である．そこで，これらのセンサを組み合わせ，レートジャイロの欠点を加速度センサと磁気センサを用いて補正することにより，静的状態だけではなく，動的状態でも世界座標系における姿勢角，つまり絶対角での姿勢を取得可能とした．

計測方法は次の通りである．まず，各センサの出力を式(1)-(3)のように，座標系を Fig.3 のように定義する．ただし，ここでのセンサ出力は電圧値ではなく較正後の値，すなわち，レートジャイロの値は単位[rad/s]，加速度センサの値は $\pm 1[g]$ で正規化したもの，磁気センサの値は地磁気の磁力で正規化したものとする．

$$\mathbf{Rt} = (Rt_x, Rt_y, Rt_z)^T \quad (1)$$

$$\mathbf{Mi} = (Mi_x, Mi_y, Mi_z)^T \quad (2)$$

$$\mathbf{Acc} = (Acc_x, Acc_y, Acc_z)^T \quad (3)$$

まず，レートジャイロの出力  $\mathbf{Rt}$  より角度 $\theta_g$ を得る．この際，Fig.4 に示したアルゴリズムを用いて算出角度 $\theta_g$ に積分誤差が加算されることを防ぐ．また，加速度センサは動的な状態では重力加速度以外の加速度も検知してしまうため，出力値に LPF をかけ静的な状態の値とする必要がある．ここでは，急峻なロールオフ特性と線形位相特性を持つ CIC(Cascade Integrator Comb)フィルタを用いた．また，加速度セ

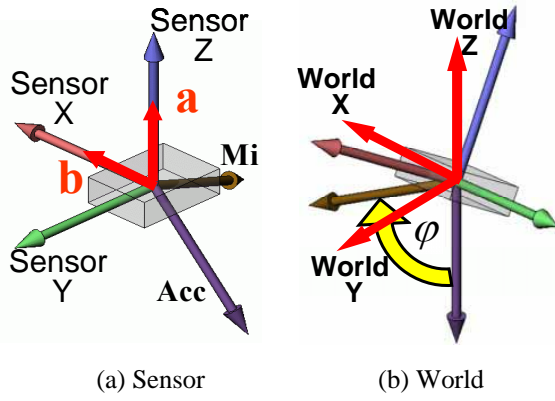


Fig.3 Coordinate system

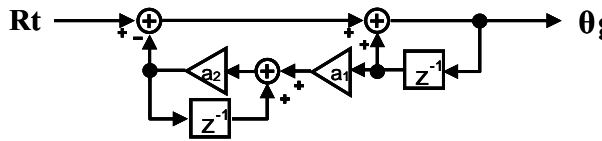


Fig.4 Calculation algorithm of attitude angle from gyro

ンサと位相をそろえるために磁気センサの出力にも同様のCICフィルタを用いた。

静的な状態では加速度センサ、磁気センサの出力は、それぞれセンサ座標系における重力方向、磁北方向を示す。そこで、それぞれの出力を世界座標系の重力方向Gと磁北方向Hに合わせるような回転行列を定義すれば、それがセンサ座標系から世界座標系への座標変換行列となる。ここで、センサモジュールの静的な姿勢( $\mathbf{a}_{static}$ ,  $\mathbf{b}_{static}$ )は以下の式によって表わされる。

$$(\mathbf{a}_{static}, \mathbf{b}_{static}) = E^{\xi\psi} \cdot (\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0) \quad (4)$$

$$E^{\xi\psi} = E^{\nu\phi} \cdot E^{\omega\theta} \quad (5)$$

$$\mathbf{G} = (0, 0, -1) \quad (6)$$

$$\mathbf{H} = (\sin \varphi, 0, -\cos \varphi) \quad (7)$$

$$\varphi = \arccos(\mathbf{Acc}' \cdot \mathbf{Mi}') \quad (8)$$

$$\theta = \arccos(\mathbf{Acc}' \cdot \mathbf{G}) \quad (9)$$

$$\omega = \mathbf{Acc}' \times \mathbf{G} \quad (10)$$

$$\phi = \arccos((E^{\omega\theta} \cdot \mathbf{Mi}') \cdot \mathbf{H}) \quad (11)$$

$$\nu = (E^{\omega\theta} \cdot \mathbf{Mi}') \times \mathbf{H} \quad (12)$$

$E^{\xi\psi}$  : センサ座標系から世界座標系への座標変換行列

$E^{\omega\theta}$  :  $\mathbf{Acc}'$  を  $\mathbf{G}$  へ回す際の回転行列

$E^{\nu\phi}$  :  $E^{\omega\theta}$  回転後の  $\mathbf{Mi}'$  を  $\mathbf{H}$  へ回す回転行列

$\mathbf{G}$  : 重力方向

$\mathbf{H}$  : 地磁気方向

$\varphi$  : 地磁気の垂直面に対する傾き

$\theta$  :  $\mathbf{Acc}'$  と  $\mathbf{G}$  の成す角

$\omega$  :  $\mathbf{Acc}'$  を  $\mathbf{G}$  へ回す際の回転軸

$\phi$  :  $E^{\omega\theta}$  回転後の  $\mathbf{Mi}'$  と  $\mathbf{H}$  の成す角

$\nu$  :  $E^{\omega\theta}$  回転後の  $\mathbf{Mi}'$  を  $\mathbf{H}$  へ回す際の回転軸

$\mathbf{Acc}'$  : フィルタ後の加速度センサ出力

$\mathbf{Mi}'$  : フィルタ後の磁気センサ出力

$(\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0)$  : センサモジュール初期姿勢

以上で求めた姿勢をレートジャイロからの姿勢角  $\theta g$  で補正する。 $\mathbf{a}_{static}$ ,  $\mathbf{b}_{static}$  はセンサ座標系における Z 軸, X 軸とそれぞれ一致しているはずである。そこで,  $(\mathbf{a}_{static}, \mathbf{b}_{static})$  を  $(\mathbf{b}_{static}, \mathbf{a}_{static} \times \mathbf{b}_{static}, \mathbf{a}_{static})$  周りに  $\theta g$  回転させれば動的な姿勢が求められる。

$$(a, b) = E^{b_{static}\theta_{g_x}} \cdot E^{a_{static} \times b_{static}\theta_{g_y}} \cdot E^{a_{static}\theta_{g_z}} \cdot (a_{static}, b_{static}) \quad (13)$$

$E^{b_{static}\theta_{g_x}}$  :  $\mathbf{b}_{static}$  軸周りに  $\theta_{g_x}$  回す回転行列

$E^{a_{static} \times b_{static}\theta_{g_y}}$  :  $\mathbf{a}_{static} \times \mathbf{b}_{static}$  軸周りに  $\theta_{g_y}$  回す回転行列

$E^{a_{static}\theta_{g_z}}$  :  $\mathbf{a}_{static}$  軸周りに  $\theta_{g_z}$  回す回転行列

以上より、高い周波数成分の角度変化はレートジャイロからの算出姿勢によって、低い周波数成分の角度変化は加速度センサ、磁気センサからの算出姿勢によって計測される。つまり、絶対姿勢は以下の式より算出される。

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = E^{iR} \cdot E^{jP} \cdot E^{kY} \cdot (\mathbf{a}_0, \mathbf{b}_0) \quad (14)$$

R : Roll 角(世界座標系 X 軸周りの回転角)

P : Pitch 角(世界座標系 Y 軸周りの回転角)

Y : Yaw 角(世界座標系 Z 軸周りの回転角)

#### 4. 評価実験

まず姿勢センサ単体の精度の評価を行った。方法としては、姿勢センサとポテンショメータを同軸上に固定し、同時計測したデータを比較するというものである。結果を Fig.5 に示す。平均誤差は 6.5[deg]、最大誤差は 14[deg]、相関値は 0.99 となった。誤差は角度データと 0.79 の相関があり、センサの感度やポテンショメータの電気的有効角度の誤差が原因であると考えられる。

次に、姿勢センサを用いた絶対角統合型のシステムである WB-2 とポテンショメータを用いた相対角統合型システムである WB-1R の比較を行った。この実験は上記装置を両方ともに床に 20 分間固定し、計測された手先位置の変動を比較した。結果を Fig.6 に示す。これから手先位置のノイズ振幅において、WB-2 は WB1-R に比べ 22[mm] から 1[mm] へと大きく減少したことがわかる。これは絶対角統合型センシングでは各剛体リンクの姿勢角に前段からの誤差の累積がないためと考えられる。

また WB-2 を用いて実際に腰部の動きを計測している様子を Fig.7 に示す。この図からお辞儀等のジェスチャが取得できていることがわかる。

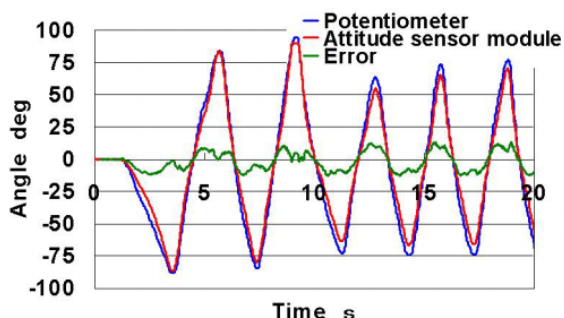


Fig.5 Comparison of attitude sensor module with potentiometer

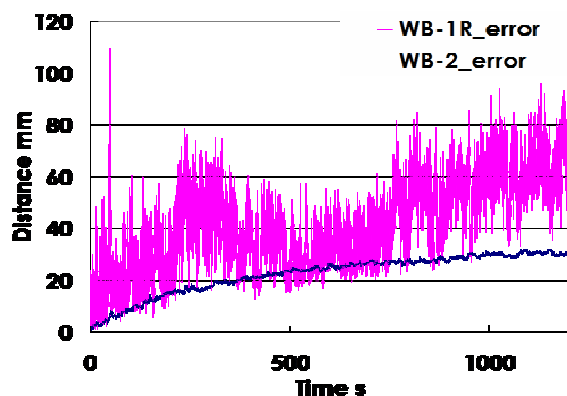


Fig.6 Comparison of WB-1R with WB-2



Fig.7 Measurement of waist motion

## 5. 結論と今後の展望

2005年度に開発したWB-1Rは、総重量2.5[kg]で、シリアルリンク機構の機械式モーションキャプチャシステムであったため、重量感・拘束感があり、システム自体が人間の内部状態に影響を与えてしまっていた。また相対角統合型センシングシステムであったため姿勢角の誤差が大きくなっていた。そこで、

頭部動作計測に用いていた加速度センサと地磁気センサとレートジャイロを組み合わせた姿勢センサモジュールを改良し、世界座標系での姿勢を計測可能とした。そして、このような姿勢センサを上半身の各関節位置に配置することにより、絶対角統合型の上半身の動作計測を可能とした。これにより、システムの軽量化・拘束感の低減・誤差の低減に成功し、総重量1.5[kg]の人間計測システムWB-2(Waseda Bioinstrumentation system No.2)を開発した。

今後は、このシステムを用いてロボットと接している人間の身体的・心理的状态を取得し、ロボットの評価を行っていく。さらに人間の労働作業の評価、ロボットの遠隔操作、ロボットのパターン生成などに応用が可能であると考えられる。

## 謝辞

本研究は早稲田大学ヒューマノイド研究所にて行われた。本研究所のヒューマノイドコンソーシアムへの参加企業に対して感謝の意を表す。また本研究はヒューマノイド国際研究所ROBOCASAにて行われた。イタリア外務省文化交流振興局の研究・振興産業応用事業に感謝する。さらに、本研究の一部は、岐阜県からの委託であるWABOT-HOUSEプロジェクトによって行われた。ここに謝意を表す。最後に、研究にご協力頂いた聖アンナ大学院大学ARTS Lab, ソリッドワークス・ジャパン(株), 早稲田大学理工学総合研究センター, 早稲田大学文学部木村裕教授に感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] Hiroyasu Miwa, et al.: "Effective Emotional Expressions with Emotion Expression Humanoid Robot WE-4RI I", Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2203-2208, 2004
- [2] Kazuko Itoh, et al.: "Behavior Model of Humanoid Robots based on Operant Conditioning", Proceedings of the 2005 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.220-225, 2005
- [3] Kazuko Itoh, et al.: "Development of a Bioinstrumentation System in the Interaction between a Human and a Robot", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2620-2625, 2006
- [4] 遠藤, 伊藤, 三輪, 今西, 齊藤, 難波, 高信, 高西, "ヒューマノイドロボットと人間とのインタラクションにおける生理指標計測システムの開発", 日本ロボット学会第24回学術講演会予稿集, 2006