

モーションセンサーを用いた動作提示システム Behavior Presentation System using Motion Sensor

入江 寿弘[†] 新宮 清志[†] 篠田 之孝[†]

丸茂 美恵子[‡] 川上 央[‡] 小沢 徹[‡] 三戸 勇気[‡]

Toshihiro IRIE[†] Kiyoshi SHINGU[†] Yukitaka SHINODA[†]

Mieko MARUMO[‡] Hajime KAWAKAMI[‡] Toru OZAWA[‡] and Yuki MITO[‡]

[†] 日本大学 理工学部 [†] College of Science and Technology, NIHON University

[‡] 日本大学 芸術学部 [‡] College of Art, NIHON University

E-mail: [†] irie.toshihiro@nihon-u.ac.jp

1. はじめに

モーションキャプチャ等を用いて芸術、スポーツ分野で熟練者の動作計測・記録して教育に役立てる試みが注目されている。

中でもセンサー技術の進歩により安価で持ち運び可能な慣性センサーを用いて関節角度を計測するシステムは今後広く利用されるようになって行くと考えられる。

そこで、これまでの研究の概要を紹介し、現在開発中の3DCGや実際のロボットアームなどの動きで動作提示できる動作提示システムについて報告する。

2. 研究はじめに背景

2.1 目的

本研究は、日本舞踊やスポーツをはじめ伝統的な「技」の巧拙の判断の根拠の一つとなる「腰」、すなわち身体重心の置き方や安定性について日本舞踊を中心に動作解析し、工夫を凝らしたそれらの可視化による情報技術の力を応用し、伝統芸能の一つに位置づけられる日本舞踊を今日的な視点に立って教育支援を行うシステムを構築するところに目的を置いている。

本研究の特色は、自己研鑽過程の若い日本舞踊家への教育支援システムの構築を想定し、10代・20代の被験者が必要な際には確保できるという点、日本舞踊の重要無形文化財保持者（人間国宝）クラスの日本舞踊家に協力をいただけることが強みであり、これまでに試みることに困難さを要した研究に焦点を当てることができ、かつ実験や研究を深められることである。

具体的には、舞踊教育において演者の動作がどのような成長過程を辿っているか、それら演者の経時変化の可視化、普遍的・万能的な運動の「巧みさ」とは異なり制御の機能が作動し個性を発揮する日本舞踊の「巧みさ」の特徴量を抽出すること、脚立の重心に向かう床反力で計測して基礎力学の面から身体重心について解析すること、稽古段階で行う舞踊の環境と舞台

で行う環境とのシミュレーションによるイメージ比較、稽古段階でも導入できる低価格なセンサーを用いたりリアルタイム計測システムができる3DCGの開発、そして、生徒を対象に舞踊動作のフィードバックを容易く行えるモーションキャプチャ利用の効果の検証を徹底的に行い、本研究で開発された教育支援システムを用いた学習において研究者のみならず日本舞踊家・生徒側のそれぞれから意見を聞いて、本研究の成果と課題について総括できることにある。

2.2 モーションキャプチャを用いた舞踊研究

モーションキャプチャを用いたこれまでの研究では、デジタル化された舞踊のアーカイブ化（保存と継承）、身体表現と感性情報との関係、動作と筋電図の同時計測、舞踊動作の物理的特徴量の抽出等に主眼が置かれ、優れた様々な研究成果が挙げられてきた。

立命館大学の八村らは舞踊動作の解析研究の成果として3DCG作品の制作に積極的に取り組み、国宝の能舞台を復元し、作成したモーションキャプチャで得られた能の演者の視点から見たウォークスルー・アニメーションで演能させる実験^[1]を試みた。阪田らは、日本舞踊を対象にモーションキャプチャによる動作解析と映像による評価実験を行い、伝統芸能がもつ非科学性・暗黙性による身体動作の感性情報を明らかにする研究^[2]を行ってきた。さらに、役どころの違いをどのように踊り分けているかについて下肢動作の特徴量を主成分分析した結果、各役どころを確実に踊り分けていることを明らかにした^[3]。吉村らは、日本舞踊の熟練者と非熟練者の身体動作を比較し、抽出した特徴量から定量評価の可能性を探った^[4]。

また、モーションキャプチャを用いた訓練システムの開発^{[5]~[8]}も、埼玉大学の久野、綿貫らによって活発に行われている。

今では普及し、研究者間で認知度の高いモーションキャプチャとは3次元時系列で人間の動きを計測でき

る装置で取得したデータの解析により人間の動きを客観的・定量的に把握できる。一時代前に比べ自己の身体をモーションキャプチャで計測することに抵抗感を示す人は少なくなった今日、人間とモーションキャプチャとの関係を模索することは人間探究への多くの可能性を孕んでいる。特に伝統文化（芸能）の分野で科学的な解析を応用し、我々の民族が培った文化（芸能）を追究することは、我々の民族の身体ひいては精神を堅固に未来へつなげることとなる。

2.3 研究内容

本研究では「巧みさ」の特徴量である「腰」の重心位置をモーションキャプチャで計測したデータの中からを抽出し、これを視覚的に判りやすく可視化する動作解析・可視化システム^[9]を開発し、実際に舞踊を行っている状態での床反力の計測を行った^[10]。また、教育支援のための簡易動作提示システム^[11]の開発を行ったのでその概要について述べる。

3. 日本舞踊の動作解析

3.1 可視化システム

実験には光学式モーションキャプチャシステム（Motion Analysis MAC3D System）を用いた。光学式モーションキャプチャシステムは複数の赤外線カメラを用いて反射体であるマーカーの3次元位置を測定できる。

本システムはカメラ台数が12台であり、フレーム速度が1/60s、シャッター速度が1/1000sで実験を行った。測定は図1のように舞踊家の身体に42個のマーカーを取り付け、時系列の身体部位の3次元座標を取り込む。舞踊家は日本舞踊の主要な5流派の1つである花柳流の20代の女性舞踊家（以下演者と記す）に協力を頂いた。演目は「娘道成寺」を選定し、クドキと呼ばれる部分の後半部（200s）とした。動作解析の区間は詞章「露を含みし さくらばな さわらば落ちん 風情なり」であり、クドキの中で一番動きの激しい箇所を行った。日本舞踊の専門家がこの区間を抽出した。

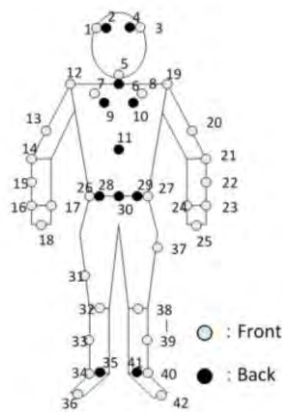
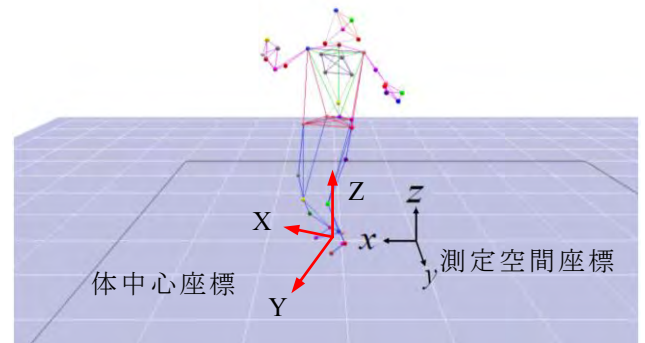


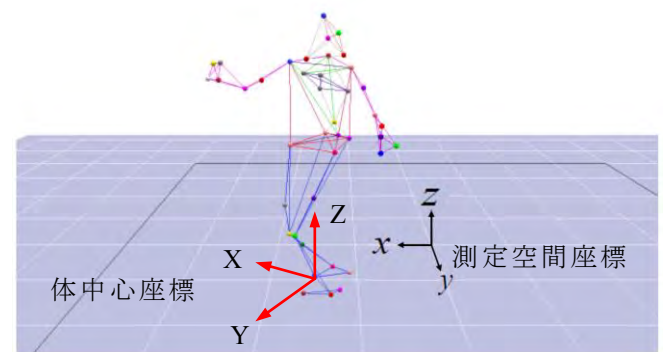
図1 マーカー取り付け位置

3.2 結果

図2はモーションキャプチャで測定した3次元表示の結果である。図(a), (b)はそれぞれ1年目及び2年目である。日本舞踊には歩行や回転動作による演者の移動があり、このような表示では舞踊動作の比較が難しい。そのため舞踊動作の比較提示できる可視化システムを構築した。



(a) 1年目のマーカー位置



(b) 2年目のマーカー位置

図2 モーションキャプチャ表示画面

可視化システムは測定空間（xyz座標）における演者の水平面の移動及び回転動作の補正を行った体中心座標系（XYZ座標）を用いた。また、演者の身体重心を算出し、表示を行った。身体重心の算出方法は、身体を14個に分割し、モーションキャプチャで取得した3次元座標と質量中心比を用いて各身体部位の重心位置を算出した。次に算出した各身体部位の重心位置と質量比を用いて身体重心を算出した。

図3は構築した可視化システムの画面である。画面の上段が1年目に測定した結果であり、下段が2年目に測定した結果である。各段は左図から体中心座標における演者の正面、右側面、上面から見た腰の水平面の表示である。赤色の○は身体重心であり、また身体重心の軌跡も表示している。右端の図は測定空間（x-y座標）における演者の腰の中心位置（マーカー26~29の平均値）の軌跡であり、その下図は膝の左右の角度

の時系列変化を表示している。また時系列変化の結果は膝の左右の関節角度，肘の左右の関節角度，身体重心の高さ，腰の方位角，肩の高さの差を選択し，表示することができる。図4に腰の中心位置のx,y座標，図5に身体重心の高さを示す。

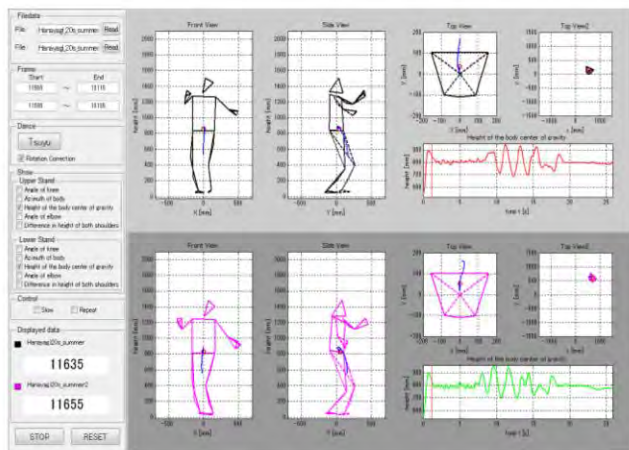
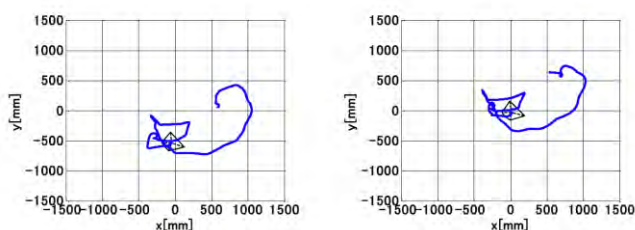


図3 可視化システム



(a) 1年目 (b) 2年目

図4 腰の中心位置の座標

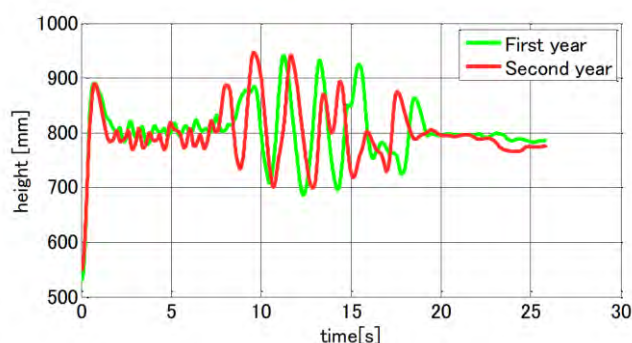


図5 身体重心の高さ位置

4. 舞踊の重心位置計測

4.1 計測動作について

本研究は，感覚的，主観的表現である“腰を入れる^①”動作について，日本舞踊における「腰」に関する特徴的な動作を抽出し，運動学的観点から考察することを目的とした。本研究では2つの実験を行い，以下の知見を得た。“腰が入った”演者は，“腰が入っていない”演者と比較して，<オスベリ^②>中の身体重心の上下方向の標準偏差が小さく，身体重心と圧力中

心のずれが小さい傾向にあった。

4.2 計測方法

被験者は，20歳代の女性実演者2名であり，それぞれを演者Aと演者Bとした。両者とも舞踊歴は20年以上であった。また，この両者は日本舞踊の専門家の評価に基づき，演者Aは“腰が入った”演者，演者Bは“腰が入っていない”演者とした。

運動課題は，日本舞踊の女踊りに用いられる動作の一つである<オスベリ>とした。<オスベリ>は足を引く舞踊動作で，各演者とも3回とした。

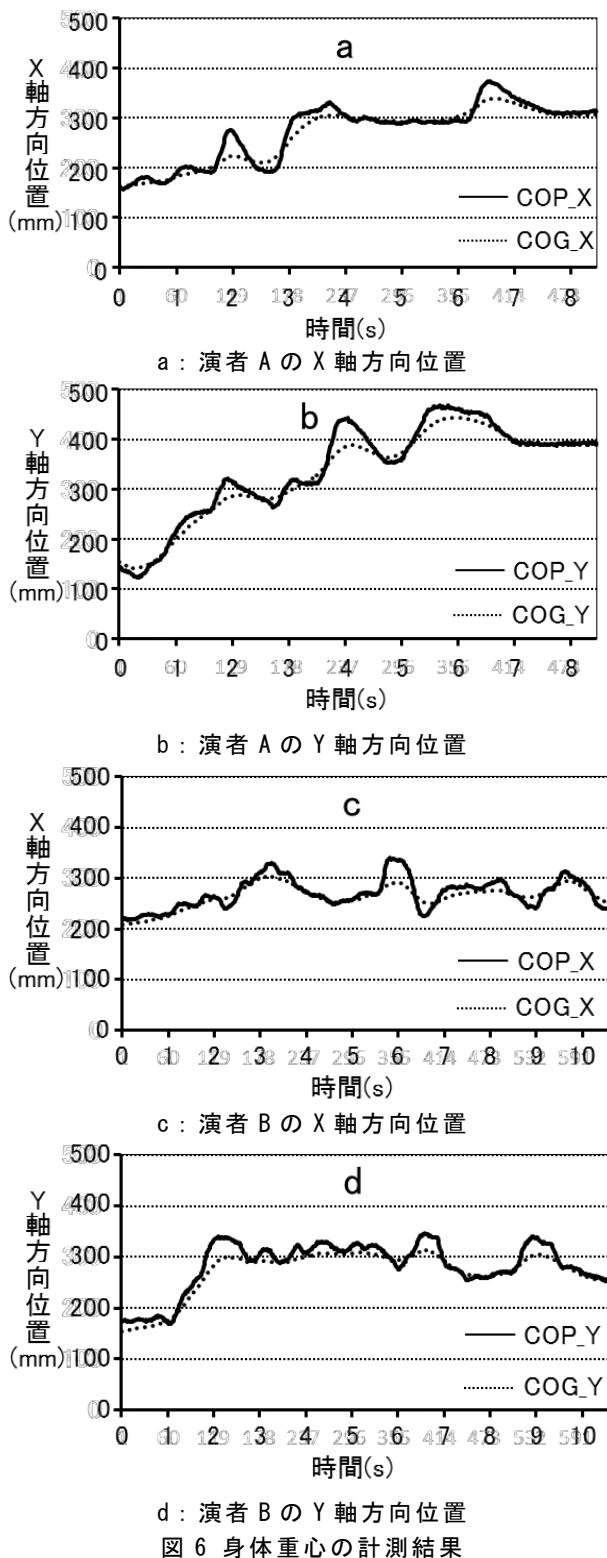
計測装置は，12台のカメラで構成された光学式のモーションキャプチャシステム(MAC 3D System, Motion Analysis, Inc 社製)を用いて，縦横各5mおよび高さ2mの範囲を記録可能範囲として設置した。なお，記録時のカメラのフレーム数は1/60秒であり，シャッタースピードは1/1000秒であった。演者は，身体に42個のマーカーを取り付け，マーカーから検出された時系列の3次元座標値を測定した。測定された身体部位の位置データより求めた，14個の身体部位(頭部，胴体，左右上腕，左右前腕，左右手，左右大腿，左右下腿，左右足)の位置データと質量中心比を用いて重心位置を算出し，次に身体各部位の重心位置と質量比を用いて身体重心を算出した。また，モーションキャプチャと同時に，床反力計(9260AA6, Kistler, Inc 社製)を用いて被験者の<オスベリ>中の圧力中心を測定した。

4.3 計測結果

演者Aおよび演者Bの測定した数値のうち，<オスベリ>中における身体重心の上下方向の標準偏差を解析対象とした。また，両被験者のモーションキャプチャから得られた身体重心と，床反力計から得られた圧力中心の変化について，ピアソンの相関係数を用いて両者の相関を検討した。

演者Aおよび演者Bの<オスベリ>中における，身体重心の上下方向の標準偏差は，演者Aは40.06mmであり，演者Bは50.76mmであった。

図6-a, b, c, dは，演者Aおよび演者Bの<オスベリ>中における，身体重心と圧力中心のX軸(左右方向)とY軸(前後方向)の時系列変化を示したものである。モーションキャプチャの座標と床反力計の座標の原点をX軸およびY軸の0とし，X軸はY軸を正面としたときの右手方向に変位すると数値が大きくなり，Y軸は同様に前方向に変位すると数値が大きくなる。演者AにおけるX軸方向の相関係数は0.970(図6-a)であり，Y軸方向の相関係数は0.986(図6-b)であった。また，演者BにおけるX軸方向の相関係数は0.891(図6-c)であり，Y軸方向の相関係数は0.961(図6-d)であった。



4.4 考察

本実験では、日本舞踊における「腰」に関する動作を考察するために、客観的に“腰が入った”または、“腰が入っていない”と評価された演者を対象として、運動中の身体重心および身体重心と圧力中心との関係を検討した。

本実験では、身体重心と圧力中心の関係について検

討し、特に両者の平面上の X 軸 (左右) 方向と Y 軸 (前後) 方向の相関について検討した。身体重心と圧力中心は、安静立位時においては、両者は同一線上にあり、かつ相互に及ぼす力 (重力および床反力) が拮抗しているため、身体は安定した状態が保持される。移動を伴う運動は、この身体重心を圧力中心からずらすことで開始するが、運動中においても安静立位時のように身体重心と圧力中心のずれが少ないほど、身体が安定した状態で運動が実行されていると考えられる。本実験では、運動中の身体重心と圧力中心の相関について検討したが、演者 A が演者 B よりも X 軸方向、Y 軸方向ともに相関係数が高かった。特に、X 軸方向の相関係数において両者の違いが顕著であった。これは、課題とした「オスベリ」という運動が前後方向への開脚運動を伴う動きであるため、両足による前後方向の支持基底面が拡大することから前後方向における身体重心の保持は比較的容易であったと考えられ、大きな差がでなかったものと考えられる。一方、左右方向においては、前後方向のように運動中に両足による支持基底面の拡大が得られないため、身体重心の保持が前後方向よりは困難な運動になることが考えられ、両者の差が顕著に表れたものと考えられる。

5. 動作提示システム

5.1 必要性について

日本舞踊やスポーツ分野など技能者の動作を具体的に画像や体験的に提示可能なシステムの実現性について検討した。光学式モーションキャプチャは計測するためには十分な計測空間が必要で、様々な現場で柔軟に対応するためには持ち運びが容易で取り扱いが簡便なシステムが理想である。そこで、近年携帯端末等に搭載され普及が進んでいる MEMS 慣性センサーや地磁気センサーを使ったモーションセンサー (姿勢角センサー) を用いて動作の計測や教育支援を目的としたシステム^[11]について検討した。慣性センサーから姿勢角を算出するためのカルマンフィルターやそれを用いた三次元 CG、ロボットによる動作提示などについて述べる。

5.2 カルマンフィルター

カルマンフィルター^[12]とは時系列フィルターの一種で、離散的な誤差を含む観測から、時々刻々と時間変化する量を推定するために用いられる。

システムの現在の観測量と 1 ステップ前の状態推定値から、現在の状態推定値と 1 ステップ先の状態予測値を与える、反復推定器である。時刻 k における真のシステムの状態は、1 ステップ前の時刻 $(k-1)$ の状態を表す。

状態方程式は、以下の式で表わされる。

$$x_k = F_k x_{k-1} + B_k u_k + \omega_k \quad (1)$$

F_k : システムの時間遷移に関する線形モデル

B_k : 制御入力 u_k に対する線形演算子

ω_k : 時間遷移に関する雑音で, 共分散行列 Q_k かつ零平均の多変数正規分布に従う

時刻 k における, 観測量 Z_k は真の状態 x_k と以下の関係になる.

$$Z_k = H_k x_k + v_k \quad (2)$$

H_k : 状態空間を観測空間に線形写像する役割を担う観測モデル

v_k : 共分散行列 R_k かつ零平均の多変数正規分布に従う雑音 (観測雑音)

カルマンフィルタは時間ステップを1つ進めるために予測と更新の2つの動作を行う. 予測では前の時刻の推定状態から, 今の時刻の推定状態を計算する. 更新では今の時刻の観測を用いて, 推定値を補正してより正確な状態を推定する. 以降, \bar{x}_{km} は時刻 m 時点での時刻 n の状態推定値を示すものとする.

カルマンフィルタのアルゴリズムを以下に示す.

$$\bar{x}_{k|k-1} = F_k \bar{x}_{k-1|k-1} + B_k u_k \quad (3)$$

$\bar{x}_{k|k-1}$: 時刻 $k-1$ を元にした時刻 k の状態推定値

$$P_{k|k-1} = F_k P_{k-1|k-1} F_k^T + Q_k \quad (4)$$

$P_{k|k-1}$: 時刻 $k-1$ を元にした時刻 k での誤差行列

$$\tilde{y}_k = z_k - H_k \bar{x}_{k|k-1} \quad (5)$$

\tilde{y}_k : 時刻 k の観測残差, innovation

$$S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k \quad (6)$$

S_k : 時刻 k の残差 (あるいは innovation) の共分散

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T S_k^{-1} \quad (7)$$

K_k : 時刻 k の最適カルマンゲイ

$$\bar{x}_{k|k} = \bar{x}_{k|k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (8)$$

$\bar{x}_{k|k}$: 時刻 k から更新された状態推定値

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} \quad (9)$$

$P_{k|k}$: 時刻 k 更新された誤差の共分散

計測した慣性センサーの値よりカルマンフィルタを用いて角度を算出する式を以下に示す.

ボードの現在の角度を運動方程式で表わすと

$$\theta_k = \theta_{k-1} + (\omega_x - bias) \cdot dt \quad (10)$$

となり, これを状態方程式で表わすと

$$\begin{pmatrix} \theta \\ bias \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta \\ bias \end{pmatrix}_{k-1} + \begin{pmatrix} dt \\ 0 \end{pmatrix} \omega_x \quad (11)$$

となる. ここで, ω_k は角速度, $bias$ は角速度センサーのバイアス, dt は微小時間である.

5.3 カルマンフィルタによる推定結果

図7, 8は慣性センサーより得た重力加速度と角速度の値より積分演算を用いて回転角度を算出したものである. また, 図9は慣性センサーの値よりカルマンフィルタを用いて角度を算出したものであり, 図10はマーカーの3次元位置情報よりモーションキャプ

チャを用いて角度を算出したものである.

結果として, モーションキャプチャの計測では角度計算の範囲を ± 90 で計算した値とほぼ位置する計測が可能であった. 角速度の積分演算による方法でも短時間であれば測定できるが長時間の計測では誤差が積分されるのでカルマンフィルタでの推定が必須と考えられる.

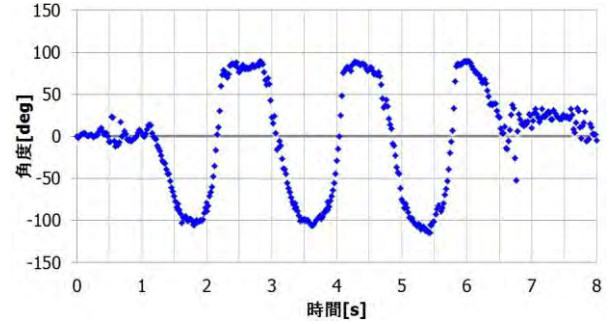


図7 重力加速度より算出したロール角度

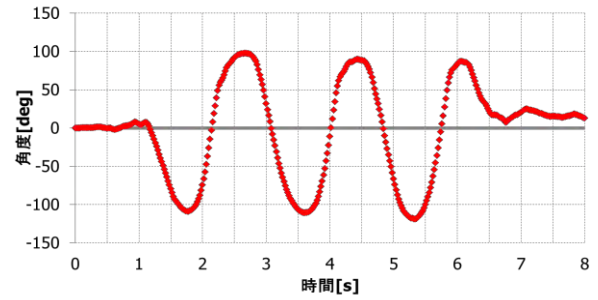


図8 角速度より算出したロール角度

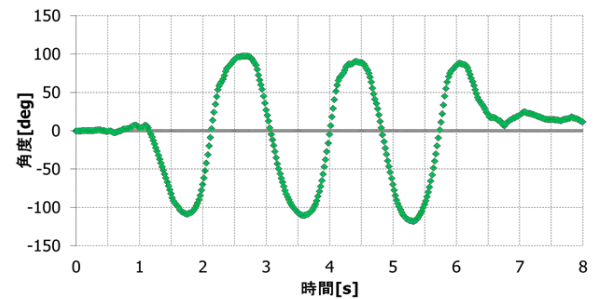


図9 カルマンフィルタを用いて算出したロール角度

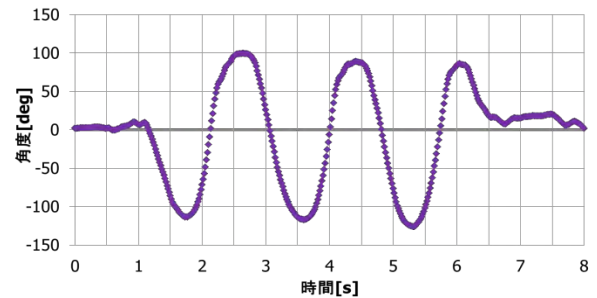


図10 マーカーの位置情報より算出したロール角度

5.4 3 DCG による動作提示システム

慣性センサーを用いるとロール角,ピッチ角については測定可能であるが,ヨー角については推定が出来ない. ヨー角を推定するために地磁気センサーを用いる必要が有る. そこで,アイチ・マイクロ・インテリジェント株式会社^[13]の AMI602 を使った慣性・地磁気計測システムを製作した. 試作した装置を図 11 に示す. データの通信にはディジインターナショナル株式会社製の ZigBee 方式の通信モジュール Xbee を用いた. 今回は通信速度の関係で1対1に対応させて通信を行った.

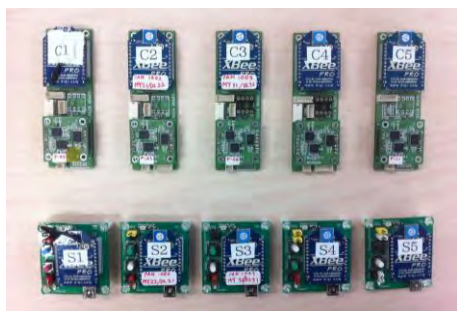


図 11 慣性・地磁気センサー

また, CG で表示させる 3 D モデルには Metasequia を用いて図 12 に示すような日本舞踊の素踊りという上演形式で用いられる着物・袴に近いデータを作成した. 演目は「供奴」を選定した.



図 12 素踊り「供奴」3DCG

それぞれのセンサーからのデータはセンサーボード上で地磁気および加速度は 12 ビット,角速度を 22bit のデジタルデータに変換してパソコン側にシリアル通信で転送する.

図 13 に示す様に,パソコン側では角センサーから受け取ったデータより Sensor Client により,ロール角,ピッチ角,ヨー角の推定を行い. Animation Server にデータを TCP/IP 通信で転送して 3 DCG の描画を行う. 図 14 にはロボットとの連携を示す.

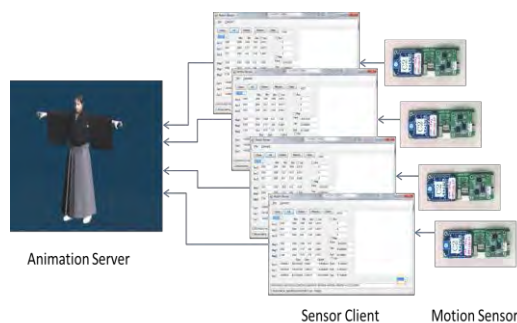


図 13 姿勢角センサーと 3 DCG との連携

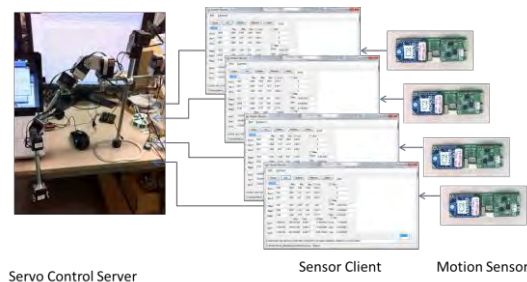


図 14 姿勢角センサーとロボットとの連携

6. まとめ

伝統芸能やスポーツなど高度な技能者の技を継承するための試みとしてモーションキャプチャを用いた計測を行い, その動作の解析や可視化を行う方法について検討を行った. 今後さらに研究を進め, 技能の伝承が必要な分野への実用化について検討する.

7. 謝辞

本研究は, 科研費(研究代表者: 丸茂美恵子, 研究課題名: 「日本舞踊を中心とした身体重心の可視化及び教育支援システムの開発と検証」, 課題番号: 23300225, 平成 23~25 年度)の助成を受けたものである.

文献

- [1] 立命館大学情報理工学部八村研究室 “能の仕舞作記述とアニメーション表示を可能にするシステム”, http://www.ai.soc.i.kyoto-u.ac.jp/culture2011/exhibition_s3_j.html, Culture and Computing 2011
- [2] 阪田真己子, 八村広三郎, 丸茂祐佳, “日本舞踊における身体動作からの感性情報の抽出ービデオ映像を用いた評価実験ー”, pp.65-72, 社団法人情報処理学会研究報告, 2003-CH-60, Oct.2003.
- [3] 阪田真己子, 丸茂美恵子, 崔雄, 八村広三郎 “日本舞踊における役どころの踊り分けー『北州』における脚づかひの定量的分析ー”, pp.235-254, 統計数理(2007)第 55 卷第 2 号文化を科学する, 2007, 統計数理研究所.
- [4] 吉村ミツ, 八村広三郎, 丸茂祐佳, “舞踊動作を表す構造変数と時空間変数の比較ー動作識別および動作者識別ー”, 社団法人情報処理学会研究報告, 2007-CVIM-157, pp.9-16, Jan.2007, 社団法人情報処理学会.
- [5] 田端聡, 久野義徳 (指導教員), “映像と振動デバイスをを用いたマルチモーダルな舞踊教示支援システム”, 埼玉大学理工学研究科情報システム, 埼玉大学修士論文, ICS-01M-315, Feb.2005, 埼玉大学.
- [6] 植田智哉, 久野義徳 (指導教員), “モーションキ

- ャプチャを用いた舞踊訓練システム”, 埼玉大学理工学研究科情報システム工学専攻修士論文, ICS-06M-404, Feb.2006, 埼玉大学.
- [7] 綿貫啓一 (プロジェクト代表者), “バーチャルリアリティ技術を用いた熟練技能伝承システムの構築および身体知の獲得に関する研究”, http://sucra.saitama-u.ac.jp/modules/xoonips/download.php/KP18A06-131.pdf?file_id=1505,
- [8] 中村明生, “舞踊簡易稽古システムの開発”, http://sucra.saitama-u.ac.jp/modules/xoonips/download.php/KP16A04-34.pdf?file_id=3182
- [9] 酒井賢人,水谷裕介,篠田之孝,三戸勇氣,渡沼玲史,小沢徹,丸茂美恵子, “モーションキャプチャを用いた日本舞踊の動作解析の可視化システムの構築”, 平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集, L67, pp.1099-1100, Nov.2012, 日本大学理工学部.
- [10] 小沢徹,丸茂美恵子,入江寿弘,篠田之孝,川上央,三戸勇氣, “日本舞踊における「腰」に関する動作の考察—スポーツ動作との比較—”, 芸術学部紀要第 59 号, pp.67-72, 2014.3.25, 日本大学芸術学部.
- [11] 小野寺貴司,栗山寛子,高村直也,青木駿介,入江寿弘,丸茂美恵子, “ベテラン技術者の技能継承支援システムに関する研究” 第 29 回ファジィシステムシンポジウム,pp.947-950,Sep.2013, 日本知能情報ファジィ学会.
- [12] Gary Bradski, Adrian Kaehler: 詳解 OpenCV, pp.327-336, 356-363, 2009, オーム社.
- [13] <http://www.aichi-mi.com/>

補足：用語説明

①<腰を入れる>

日本舞踊では身体の重心を丹田に置いて腰を安定させること. その獲得までには熟練を要する極めて根本的な姿勢である.

②<オスベリ>

揃えた足の片方を後ろに引いて戻す基礎的な舞踊動作. 左足から 3 回繰り返すのを原則とする.