

# 体幹部に鉛直軸回転が発生する外乱におけるモーションパターン解析

小沼彰悟, 宮本康広, 佐藤大祐, 金宮好和  
東京都市大学大学院工学研究科

Shogo Onuma, Yasuhiro Miyamoto, Daisuke Sato, Yoshikazu Kanamiya  
Graduate School of Engineering, Tokyo City University

キーワード: Postural balance, Out-of-plane reactive movement, Torso twist, Movement decomposition

## 1. 緒言

人間のバランス維持動作の研究では矢状面におけるバランス維持動作に焦点が当てられてきた．健康成人の直立制御において, Ankle strategy, Hip strategy, Step strategy の三つの姿勢運動戦略がある<sup>1)</sup>．

前額面の外乱に対するバランス制御に目を向けると, Winter<sup>2)</sup> らは人間が横から外乱を受けたときの反応を調べ, 姿勢戦略には Ankle strategy, Load/unload strategy, Step strategy の動作があることを述べた．

水平面における捻りの研究では日常生活やスポーツに関連した研究がなされている．日常生活では juvy<sup>3)</sup> らは捻り動作を含む荷物持ち上げ作業における身体各部位にかかる負担について動力学を考慮して解析を行った．また, スポーツでは坂田<sup>4)</sup> らは, 投球時における体幹回旋の角度と角速度の経時変化の特徴, 三次元動作解析は投球動作の繊細な動きを捉えることができると述べており, 投球時に体幹回旋が効率良くエネルギーを上肢に伝達する働きを行っていることを述べた．Okuda<sup>5)</sup> らはゴルフスイング中の体幹回旋と体重移動パターンの特徴についてプロとアマチュアのゴルファーで比較し, アマチュアゴルファーがスキルを向上させるための指標となることを示した．

しかし, 捻り動作を含む三次元バランス維持の解析は明らかにされていない．そこで, 各平面のシンプルな姿勢戦略を自発的に行い, 得られた関節角度変位を線形化し線形化モデルを導き出す．その後, 線形化モデルを用いて肩に外乱(非対称の外乱)を与えたときの関節変位を各平面の姿勢戦略へ分解し解析を行う．

## 2. 自発的な姿勢戦略の線形化

非対称の外乱で生じた複雑な姿勢戦略は各平面の単純な姿勢戦略から成り立つと考える．そこで, 下半身の12個の関節と骨盤の捻りの変化の特徴を線形性を用いて示す．これらの角度は以下となる．

$$\theta_{moc} = [\theta_{rootz} \quad \theta_{Rleg}^T \quad \theta_{Lleg}^T]^T$$

$$\theta_{jleg} = [\theta_{jh_z} \quad \theta_{jh_y} \quad \theta_{jh_x} \quad \theta_{jk_y} \quad \theta_{ja_y} \quad \theta_{ja_x}]^T$$

$j \in \{R, L\}$  は右足と左足を表している．上記のベクトルはモーションキャプチャシステム (OptiTrack FLEX V100<sup>6)</sup>) から得られる．Fig. 1 にモーションキャプチャモデルを示す． $x, y, z$  軸回りの回転をロール, ピッチ, ヨーとする．最初に, Fig. 2 に示す自発的な四つの動作を測定し, それぞれの各関節が線形の関係によつ

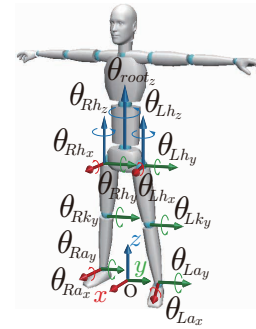


Fig. 1 Motion capture model with coordinate frames and joint angles: subscripts  $a, k$  and  $h$  stand for “ankle,” “knee” and “hip,” joint, respectively. The  $x, y$  and  $z$  sub-subscripts refer to “roll,” “pitch” and “yaw” angles, respectively.

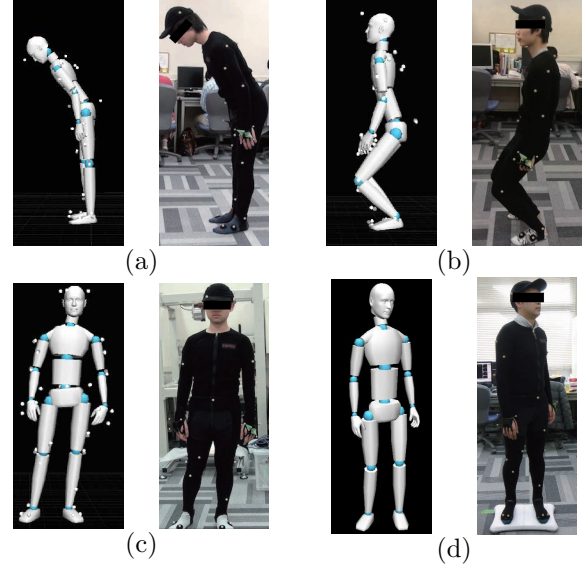


Fig. 2 Voluntary movement patterns: sagittal-plane (a) hip and (b) squat, frontal-plane (c) ankle and transverse-plane (d) torso twist.

て特徴づけられることを示す．以下に方程式を示す．四つの動作は矢状面の Hip, Squat, 前額面の Ankle, 水平面の Twist である．

$$\hat{\theta}_s = e_s \theta + \theta_o \quad (1)$$

( $\circ$ )<sub>s</sub> は各平面の単純な姿勢戦略である Hip strategy, Squat strategy, Ankle strategy, Twist strategy のうちの一つを表す． $\theta$  は特定の姿勢戦略 (hip, squat, ankle, twist) に必要な基準角度 ( $\theta_{jh_y}, \theta_{jk_y}, \theta_{ja_x}, \theta_{rootz}$ ) で

ある． $\hat{\theta}_s, e_s, \theta_o$  ( $s = \text{hip, squat, ankle, twist}$ ) は  $\theta_{moc}$  と同様十三次元ベクトルである． $\theta_o$  は初期姿勢のためのオフセット角度， $e_s$  は特定の姿勢戦略における各関節角度の関係を表すベクトルである．このベクトルは以下に示す最小二乗法の方程式を用いて求める．

$$e_s = \frac{n \sum_{i=1}^n \theta_i \theta_{s_i} - \sum_{i=1}^n \theta_i \sum_{i=1}^n \theta_{s_i}}{n \sum_{i=1}^n \theta_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \theta_i \right)^2} \quad (2)$$

$n$  はデータサンプル数， $\theta_{s_i} \in \mathbb{R}^{13}$  は  $\theta_{moc}$  と同様のベクトルである．また，基準角度は 0 に，それ以外の  $\theta_s$  内の  $\theta_{jleg}$  は各姿勢戦略ごとに以下に示す  $\theta_{js}$  に置き換わる．

### 2.1 Hip strategy (矢状面)

Hip strategy で考慮する角度は股関節と足首関節のピッチ角である．基準角度は計測結果より得られた股関節のピッチ角  $\theta \equiv \theta_{jhy}$  であり，足関節の角度のベクトルは以下に示す．

$$\theta_{jhip} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \theta_{jay} \quad 0]^T$$

また，骨盤の捻り  $\theta_{root_z}$  は無関係であるため 0 である．(1)，(2) を用いて推定値  $\hat{\theta}_{hip}$  を求める．

#### 2.1.1 実験条件

直立状態から自発的に Hip strategy 動作を行い，直立状態に戻す動作を 20 s で 3 回行い，1 人 10 回行う．被験者は 5 人の男性で年齢  $22.5 \pm 1.7$  歳，身長  $170.0 \pm 4.2$  cm，体重  $64.0 \pm 5.0$  kg (平均  $\pm$  標準偏差) である．

#### 2.1.2 実験結果

Fig. 3 (a) より股関節と足首関節の関係は線形性を持っており，(2) を用いて線形化が可能であるとわかる．Fig. 3 (b) は 5 人分のデータを平均し線形化した結果である．

### 2.2 Squat strategy (矢状面)

Squat strategy で考慮する角度は股，膝と足首関節のピッチ角である．基準角度は計測結果より得られた膝関節のピッチ角  $\theta \equiv \theta_{jky}$  であり，足関節の角度のベクトルは以下に示す．

$$\theta_{jsquat} = [0 \quad \theta_{jhy} \quad 0 \quad 0 \quad \theta_{jay} \quad 0]^T$$

また，骨盤の捻り  $\theta_{root_z}$  は無関係であるため 0 である．(1)，(2) を用いて推定値  $\hat{\theta}_{squat}$  を求める．

#### 2.2.1 実験条件

直立状態から自発的に Squat strategy 動作を行い，直立状態に戻す動作を 20 s で 3 回行い，1 人 10 回行う．被験者は 5 人の男性で年齢  $22.6 \pm 1.9$  歳，身長  $170.0 \pm 4.6$  cm，体重  $64.0 \pm 5.5$  kg (平均  $\pm$  標準偏差) である．

#### 2.2.2 実験結果

Fig. 4 (a) より膝関節と足首関節，股関節の関係は線形性を持ち，(2) を用いて線形化が可能であるとわかる．Fig. 4 (b) は 5 人分のデータを平均し線形化した結果である．

### 2.3 Ankle strategy (前額面)

Ankle strategy で考慮する角度は股関節と足首関節のヨー角である．基準角度は計測結果より得られた股関節

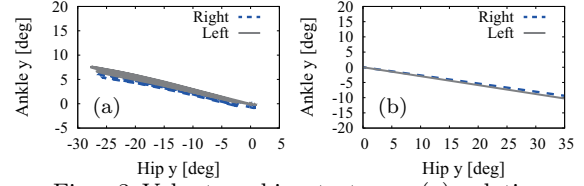


Fig. 3 Voluntary hip strategy: (a) relations between hip and ankle angles (motion capture data from one person), (b) relations between hip and ankle angles using the least-squares method (average from five persons).

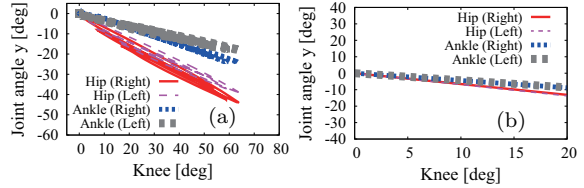


Fig. 4 Voluntary squat strategy: (a) relations between ankle/hip and knee angles (motion capture data from one person), (b) relations between ankle/hip and knee angles using the least-squares method (average from five persons).

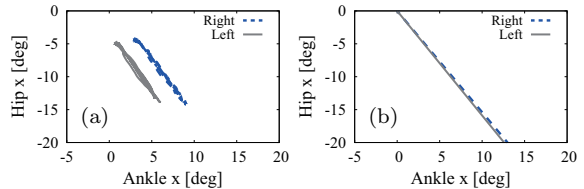


Fig. 5 Voluntary ankle strategy: (a) relations between hip and ankle angles (motion capture data from one person), (b) relations between hip and ankle angles using the least-squares method (average from two persons).

のヨー角  $\theta \equiv \theta_{jax}$  であり，足関節の角度のベクトルは以下に示す．

$$\theta_{jankle} = [0 \quad 0 \quad \theta_{jhx} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

また，骨盤の捻り  $\theta_{root_z}$  は無関係であるため，0 である．(1)，(2) を用いて推定値  $\hat{\theta}_{ankle}$  を求める．

#### 2.3.1 実験条件

直立状態から自発的に Ankle strategy 動作を行い，直立状態に戻す動作を 20 s で 3 回行い，1 人 10 セット行う．被験者は 2 人の男性で年齢  $21.5 \pm 0.5$  歳，身長  $170.0 \pm 2.0$  cm，体重  $64.0 \pm 2.0$  kg である．

#### 2.3.2 実験結果

Fig. 5 (a) より線形性を持っており，(2) を用いて線形化が可能であるとわかる．Fig. 5 (b) は 2 人分のデータを平均し線形化した結果である．

#### 2.3.3 Twist strategy (水平面)

Twist strategy で考慮する角度はすべての足関節角度である．基準角度は計測結果より得られた骨盤のロール角  $\theta \equiv \theta_{root_z}$  であり，足関節の角度のベクトルは以下に示す．

$$\theta_{jtwist} = [\theta_{jhz} \quad \theta_{jhy} \quad \theta_{jhx} \quad \theta_{jky} \quad \theta_{jay} \quad \theta_{jax}]^T$$

また，骨盤の捻り  $\theta_{root_z}$  は関係するため  $\theta_{moc}$  の  $\theta_{root_z}$  を用いる．(1)，(2) を用いて推定値  $\hat{\theta}_{twist}$  を求める．

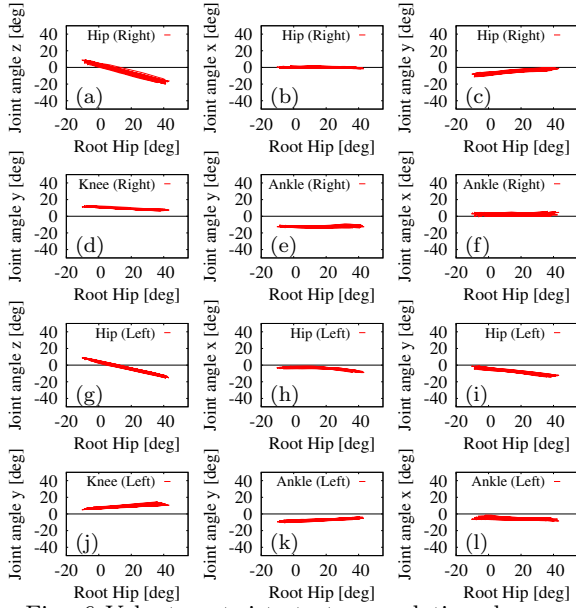


Fig. 6 Voluntary twist strategy: relations between root hip and the other joint angles (motion capture data from one person).

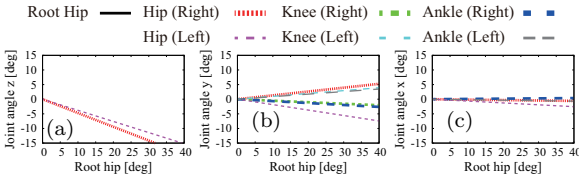


Fig. 7 Voluntary twist strategy: relations between root hip and the other joint angles using the least-squares method (average from eight persons).

### 2.3.4 実験条件

直立状態から自発的に上半身を  $z$  軸回りに 40 deg 捻り、直立状態に戻す動作を 15 s で 3 回行い、1 人 10 セット行う。被験者は 8 人の男性で年齢  $22 \pm 1.6$  歳、身長  $170 \pm 4.7$  cm、体重  $64.0 \pm 5.3$  kg である。

### 2.3.5 実験結果

Fig. 6 より線形性を持っており、(2) を用いて線形化が可能であるとわかる。Fig. 7 は線形化した結果である。

## 3. 外乱を与えた際の人間の姿勢戦略

自発的な Hip strategy, Squat strategy, Ankle strategy, Twist strategy 動作を行い、2 章で得られた各関節の線形の関係は外乱が生じた際の姿勢戦略の分析に用いることが可能か検証する。今回は右肩に外乱を与えることにより複雑な動きを含むバランス維持動作を発生させ、その際の姿勢戦略の解析を行う。

### 3.1 実験方法

Fig. 8 に実験の外観図を示す。実験方法は右肩と胸回りにベルトを巻き、ベルトに取り付けたワイヤにダイレクトドライブモータを用いて引くことで外乱を与えた。

3 種類の実験を行った。それぞれの実験に共通する条件は右肩に加わる外乱  $f$  の大きさが 84.7 N、外乱時間が 0.2 s、計測回数は 10 回である。一つ目は被験者を  $\alpha = 0$  deg 回転させた場合、二つ目は被験者を  $\alpha = 30$  deg 回転させた場合であり、それぞれ被験者は 8 人の男性で年齢  $21.7 \pm 1.7$  歳、身長  $171 \pm 5.4$  cm、体重

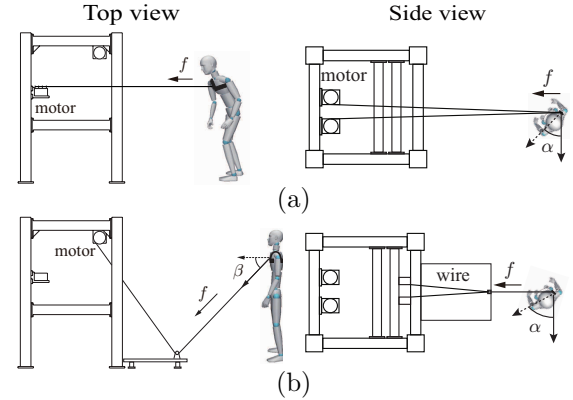


Fig. 8 Experimental setups for perturbations: (a) shoulder-central ( $\alpha = 0$ ) or shoulder-slanted ( $\alpha = 30$  deg) and (b) shoulder-slanted-and-inclined ( $\alpha = 20$  deg,  $\beta = 45$  deg).

$61.3 \pm 4.1$  kg である。三つ目は被験者を  $\alpha = 20$  deg 回転させ、ワイヤの角度を  $\beta = 45$  deg 傾けた場合であり、被験者は 1 人の男性で年齢 22 歳、身長 172 cm、体重 63 kg である。

## 3.2 解析方法と結果

### 3.2.1 右肩正面の外乱

被験者を  $\alpha = 0$  deg 回転させた場合の一つ目の実験の結果は Fig. 9 (a), (b), (c) である。Root Hip が変位しており、最初に Twist strategy を取り除いた。これを Twist フィルタと呼ぶ。

$$\theta_{resT} = \theta_{moc} - \hat{\theta}_{twist} \quad (3)$$

Twist フィルタ後の結果が Fig. 9 (d), (e), (f) である。(d) より股関節のロール角が 0 deg に近づき Twist strategy を省くことができた。(e) より股関節と足首関節のピッチ角が逆位相であることから Hip strategy であると考えられるため取り除いた。これを Hip フィルタと呼ぶ。

$$\theta_{resTH} = \theta_{resT} - \hat{\theta}_{hip} \quad (4)$$

Hip フィルタ後の結果が Fig. 9 (g) である。(g) より股関節と足首関節のピッチ角が 0 deg に近づき Hip strategy を省くことができた。

### 3.2.2 右肩斜め横方向の外乱

被験者を  $\alpha = 30$  deg 傾けた場合の二つ目の実験の結果は Fig. 10 (a), (b), (c) である。Root Hip が変位しているため、Twist フィルタを用いる。その結果が Fig. 10 (d), (e), (f) である。(e) より股関節と足首関節のピッチ角が逆位相であるため Hip フィルタを用いる。その結果が Fig. 10 (g) である。しかし、(f) は角度変位があり、股関節と足首のヨー角が逆位相であるため Ankle strategy であると考えられ取り除いた。これを Ankle フィルタと呼ぶ。

$$\theta_{resTH} = \theta_{resT} - \hat{\theta}_{ankle} \quad (5)$$

Ankle フィルタ後の結果が Fig. 10 (h) である。(h) より股関節と足首関節のヨー角が 0 deg に近づき Ankle strategy を省くことができた。



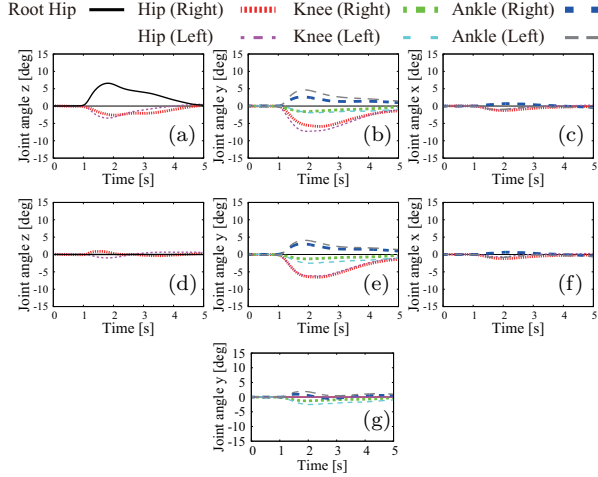


Fig. 9 Shoulder central perturbation data (average from eight persons): raw data (a), (b), (c), twist filtered data (d), (e), (f) and hip filtered data (g).

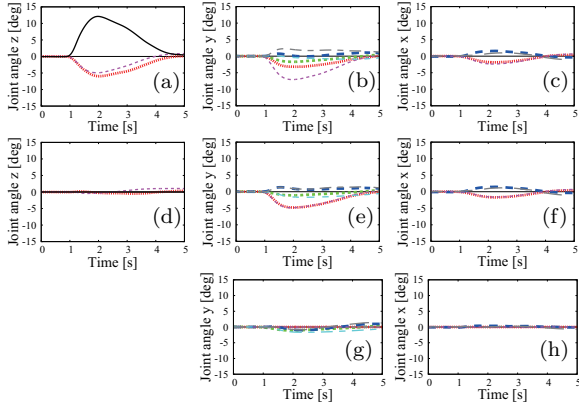


Fig. 10 Shoulder-rear slanted ( $\alpha = 30$  deg) perturbation data (average from eight persons): raw data (a), (b), (c), twist filtered data (d), (e), (f), hip filtered data (g) and ankle filtered data (h).

### 3.2.3 右肩斜め上方向の外乱

被験者を  $\alpha = 20$  deg 傾け, ワイヤーの角度を  $\beta = 45$  deg 傾けた場合の三つ目の実験の結果は Fig. 11 (a), (b), (c) である. Twist フィルタを用いた結果が Fig. 11 (d) である.

(e) より股関節と足首関節のピッチ角が逆位相, 膝関節が正方向に変位していることから Squat strategy であると考えられるため取り除いた. これを Squat フィルタと呼ぶ.

$$\theta_{resTS} = \theta_{resT} - \hat{\theta}_{squat} \quad (6)$$

Squat フィルタ後の結果が Fig. 11 (f) である. (f) より膝関節のピッチ角が 0 deg になったが, 足首関節と股関節のピッチ角が逆位相の状態である. そのため, Hip フィルタを用いる. その結果が (g) である. (f) より股関節と足首関節のピッチ角が 0 deg に近づき Squat strategy と Hip strategy を省くことができた.

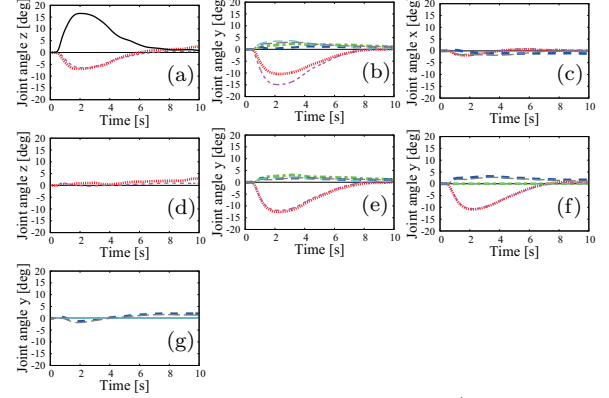


Fig. 11 Shoulder slanted and inclined ( $\alpha = 20$  deg,  $\beta = 45$  deg) perturbation data (from one person): raw data (a), (b), (c), twist filtered data (d), (e), squat filtered data (f) and hip filtered data (g).

## 4. 結言と今後の課題

2 章で求めた四つの線形モデルを用いて人間に外乱を与えたときの解析を行った. その際に 2 章で求めた四つの線形モデルと同様の特徴があることを示した. このことから, 両足が地面に着いている場合の複雑な動きのバランス維持動作は各平面のシンプルな姿勢戦略に分解できることがわかる. すなわち人間は各平面のシンプルな姿勢戦略の組み合わせでバランスをとっている.

今後は各平面のシンプルな姿勢戦略をトレーニングしバランス能力の向上につながるか検証する.

### 参考文献

- 1) D. A. Winter, "Human balance and posture control during standing and walking," *Gait & Posture*, vol. 3, no. 4, pp. 193–214, Dec. 1995.
- 2) S. Rietdyk, A. Patla, D. Winter, M. Ishac, and C. Little, "Balance recovery from medio-lateral perturbations of the upper body during standing," *J. Biomech.*, vol. 32, no. 11, pp. 1149–1158, Mar. 1999.
- 3) J. Balingit, H. Iwase, and M. Kitaoka, "Kinetic analysis of lifting load with twisted moment," *J. Jpn. Ind. Manage. Assoc.*, vol. 57, no. 2, pp. 101–111, Jun. 2006.
- 4) K. Sakata, E. Chosa, S. Watanabe, T. Sakamoto, M. Okada, W. Komaki, and N. Tajima, "Three-dimensional motion analysis of trunk rotation in baseball pitching," *Orthop. Traumatol.*, vol. 50, no. 4, pp. 1044–1047, 2001.
- 5) I. Okuda, P. Gribble, and C. Armstrong, "Trunk rotation and weight transfer patterns between skilled and low skilled golfers," *J. Sports Sci. Med.*, vol. 9, no. 1, pp. 127–133, Jan. 2010.
- 6) Natural Point Inc., "Optitrack - Optical Motion Capture Systems and Tracking Software," <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>, motionCapture, [Online; accessed 19-Sept-2014].

### 著者連絡先

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1  
 東京都大学大学院  
 工学研究科 機械システム工学専攻  
 ロボティクスライフサポート研究室  
 金宮 好和 教授  
 Tel: 03-5707-0104(内線 3943)  
 E-mail: nenchev@tcu.ac.jp