

# 体幹部の鉛直軸上にモーメントが発生する際のモーションパターン解析

## Motion Pattern Analysis for Vertical Trunk Rotation due to an Unexpected Disturbance

学 小沼 彰悟 (都市大) 成田 裕貴 (都市大)  
正 佐藤 大祐 (都市大) 正 金宮 好和 (都市大)

Shogo ONUMA, Tokyo City University, onuma@rls.mse.tcu.ac.jp  
Hiroki NARITA, Tokyo City University  
Daisuke SATO, Tokyo City University  
Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

This work describes a method for motion pattern analysis of a human reacting to an unexpected force applied at one of the shoulders. From the analysis, a linear relation between the joint angles of the legs and the twist angle of the torso is derived. It is thus shown that a relatively complex motion pattern can be produced by the superposition of simpler motion patterns like pure torso twist, hip strategy and ankle strategy.

**Key Words:** Biomechanics, Human balance, Motion capture, Twist, Motion pattern

### 1 緒言

近年、人型ロボットの研究は人型の利点である親しみやすさや人間の使う道具、環境がそのまま利用できることから、ライフサポートの面への利用の期待が高まっている。人間の住環境は予期せぬ外乱が生じるため、人型ロボットが転倒してしまう可能性がある。転倒により人間への危害、及び実機の破損が生じるため必ず転倒を防がなければならない。そこで我々は、人間の姿勢維持戦略を人型ロボットに適用するため、人間に外力が作用した際の姿勢維持動作を矢状面、前額面、水平面と各平面ごとに解析することに取り組んでいる。

人間の姿勢維持戦略はバイオメカニクスの分野で多く研究されており、後方から外乱を受けた際の姿勢維持戦略である立位姿勢制御法 [1] は、Ankle strategy, Hip strategy, Step strategy の三段階の対応が存在し、与えられた外乱に応じて変化させる。我々はこの制御法をロボットの姿勢維持動作に応用し、与えられた衝撃に対して、Ankle strategy もしくは Hip strategy によるバランス制御を行った [2]。また、側面から外乱を受けた際の姿勢維持戦略を提案し、人型ロボットのバランス制御を行った [3]。

しかし、バイオメカニクス分野では捻り動作を含むモーションパターン解析は明らかにされていない。そのため、右肩に外乱を与えて体幹部の鉛直軸上にモーメントが発生する際のモーションパターン解析を行う。また、この解析結果より、人間に外乱を与えた場合のモーションパターンを人型ロボットのバランス制御の指標として提案する。

### 2 体幹部の鉛直軸外の外乱に対するモーションパターン

捻り動作を含むモーションパターンの実現のため人間の右肩に外乱を与える。それにより、鉛直軸回りにモーメントを発生させることができ、そのときのモーションパターンを解析する。

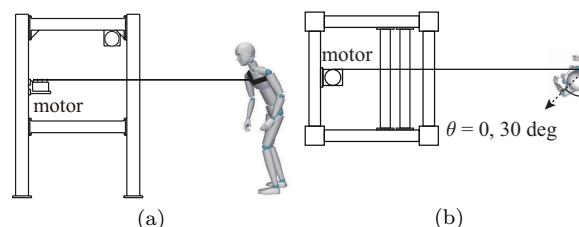


Fig.1: Experimental system: (a) Side view and (b) Top view.

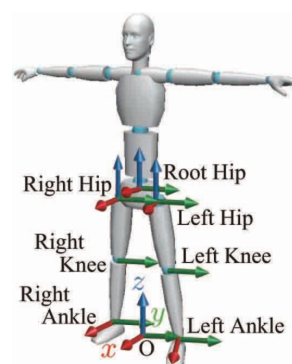


Fig.2: Coordinate frames of the motion capture model.

### 2.1 実験方法

図 1 に実験の外観図を示す。(a) が側面図、(b) が平面図である。図 1 (a) より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ーをダイレクトドライブモータを用いて巻くことにより 80 N の外乱を右肩に与えた。また、図 1 (b) より外乱を与える際は装置に対して人間が正面を向いている状態 ( $\theta = 0 \text{ deg}$ ) と時計回りに  $30 \text{ deg}$  回転 ( $\theta = 30 \text{ deg}$ ) した状態で実験する。被験者は 8 人、1 人 10 回の計測を行った。

人間の動作解析はモーションキャプチャシステム Opti-Trac [4] を用いた。図 2 にモーションキャプチャで使用している人型モデルと各関節名、座標系を示す。立位姿勢は

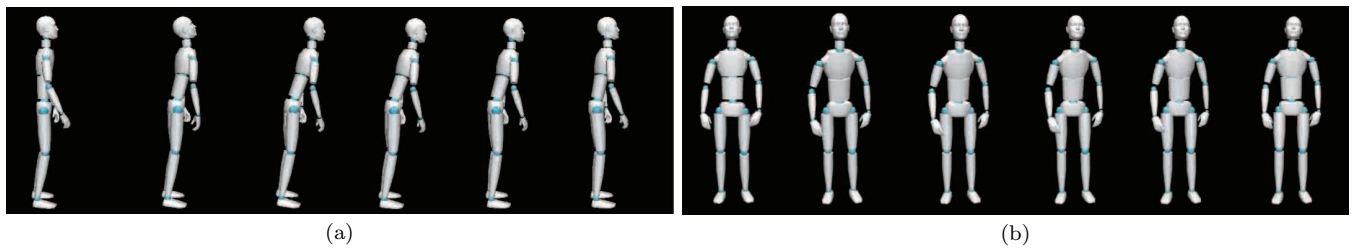


Fig.3: Snapshots with external force at 0 deg: (a) Side view and (b) Front view.

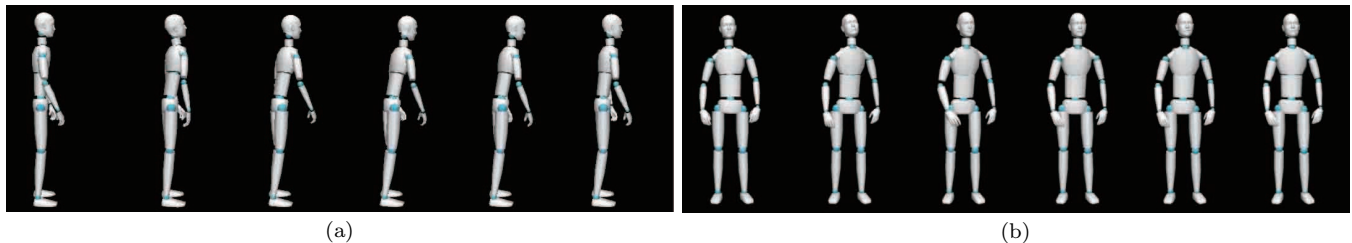


Fig.4: Snapshots with external force at 30 deg: (a) Side view and (b) Front view.

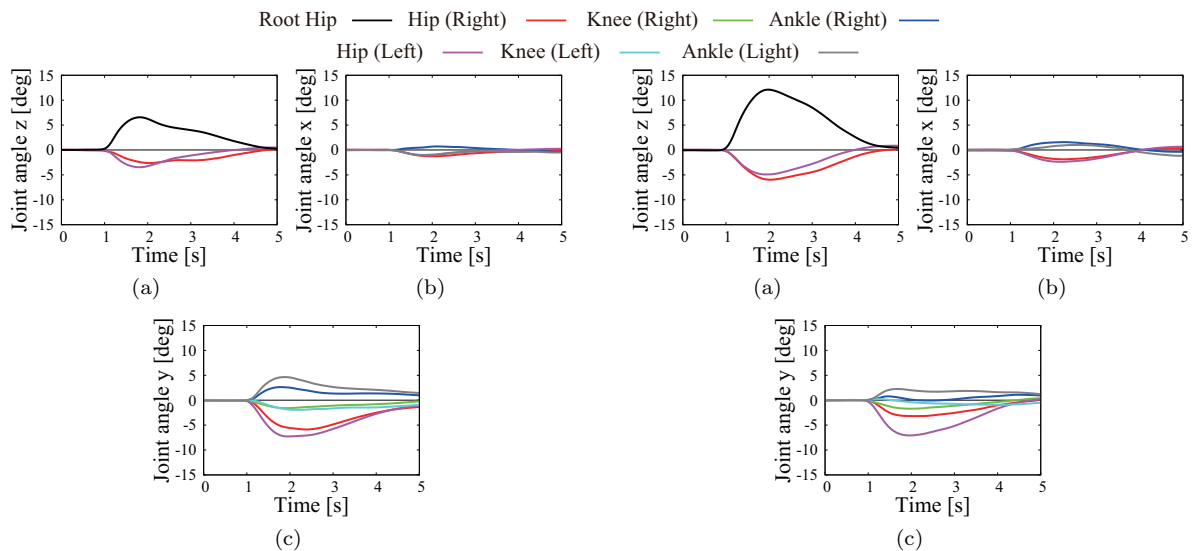


Fig.5: Applied force angle 0 deg.

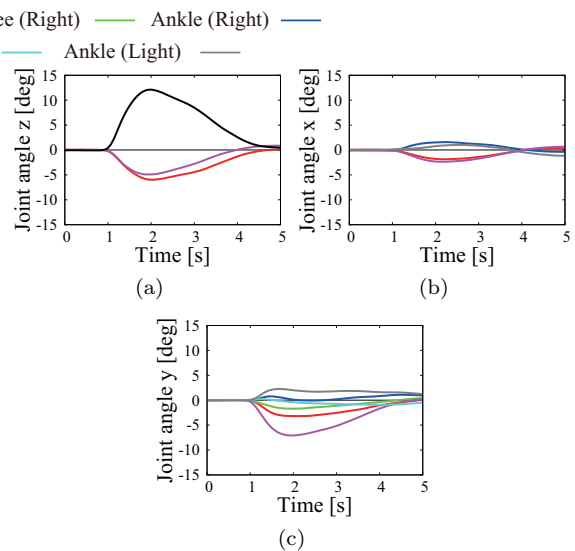


Fig.6: Applied force angle 30 deg.

図 2 の状態から両腕を下ろした姿勢とした。

## 2.2 実験結果

図 3 と図 4 の (a) に矢状面, (b) に前額面における動作のスナップショットを示す。図 5 と図 6 に全員分の各関節角度の平均値を取ったグラフを示す。その際に、外乱によって足を一步以上踏み出してしまったデータは省いている。

$\theta$  が 0 deg の場合, 図 5 (a) より左右の  $z$  軸回りの関節動作が等しく, Root Hip の関節角度より上半身の捻り動作のモーションパターンが確認できる。この姿勢維持動作を Twist strategy とする。また, 左右の  $y$  軸回りの足首と股関節が逆位相であると Hip strategy といえるため, Twist strategy と Hip strategy の組み合わせでバランスをとっていると考えられる。

$\theta$  が 30 deg の場合, 図 6 (a) から 0 deg のときより Root Hip の  $z$  軸回りの関節角度が大きくなっている。また, 図 6 (b) より左右の  $x$  軸回りの関節角度が足首と股関節共に関節が逆位相になっていることから前額面における Ankle

strategy だと考えられる。これは,  $\theta$  が 30 deg の際は外乱が矢状面方向に 69 N, 前額面方向に 40 N に分解され, 前額面方向に対しての姿勢維持動作を行っているためである。しかし, 図 6 (c) から左右の  $y$  軸回りの足首と股関節が逆位相になっているが, 左右の各関節の動作の比が大きいため Hip strategy とはいえない。このように, 捻り動作を伴うモーションパターンは各平面に分解し解析を行うことが困難である。そのため, 上半身の捻り動作が下半身に与える影響について調べる。

## 3 上半身の捻り動作による下半身の各関節への影響

そこで, 上半身の捻り動作による下半身の各関節への影響を確認するため, 立位状態から自発的な上半身の捻り動作の計測を行った。

### 3.1 実験方法

被験者は 8 人で, 図 7 のように立位状態から自発的に上半身を  $z$  軸回りに 40 deg 捻り, 立位状態に戻す動作を 15 s で 3 回行った。それを 1 セットとし, 1 人 10 セット

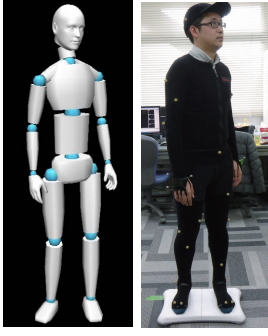


Fig.7: Voluntarily twist motion.

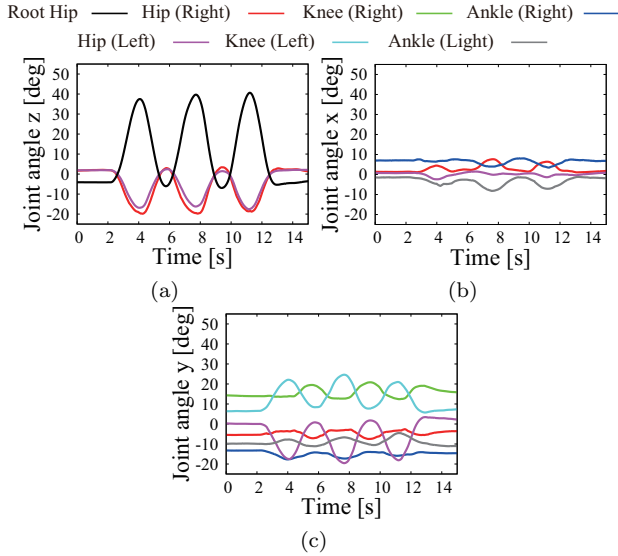


Fig.8: Result from voluntarily twist motion:  
(a)  $z$  axis, (b)  $x$  axis and (c)  $y$  axis.

行った。

### 3.2 実験結果

図 8 に上半身を捻った際の各関節の変位を示す。図 8 より上半身の捻りを行うことにより下半身の各関節が連動して動いていることがわかる。

### 3.3 最小二乗法を用いた捻り動作と各関節の関係性

図 9 は 1 人分のデータを用いた Root Hip に対する下半身の各関節の関係性を示している。図 9 より Root Hip に対する下半身の各関節の関係性を見ると直線になっていることから、その関係性は線形化できると考えられる。そこで Root Hip に対する下半身の各関節の関係性を最小二乗法を用いて求める。

上半身の捻り動作の計測結果より得られた Root Hip の  $z$  軸回りの関節角度を  $\theta_{rh}$ 、下半身の各関節角度を  $\theta_{R,L} \in \mathbb{R}^{12}$  とする。 $R$  は右、 $L$  は左の関節を意味する。最小二乗法の一次の線形近似により  $\theta_{rh}$  と線形化された下半身の各関節角度  $\theta_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$  の関係性は式 (1) で表す。 $\theta_{R,L} = \theta_{ihz}, \theta_{ihx}, \theta_{ihy}, \theta_{iky}, \theta_{iay}, \theta_{iax}$  ( $i = R, L$ ) となっており、 $h$  は Hip、 $k$  は Knee、 $a$  は Ankle を示す。 $x, y, z$  は座標軸を示す。

$$\theta_{twist} = a\theta_{rh} + b \quad (1)$$

式 (1) の  $b$  は Root Hip と下半身の各関節の関係、すなわち傾きだけを知りたいため省く。 $a$  は以下となる。 $n$  は 10

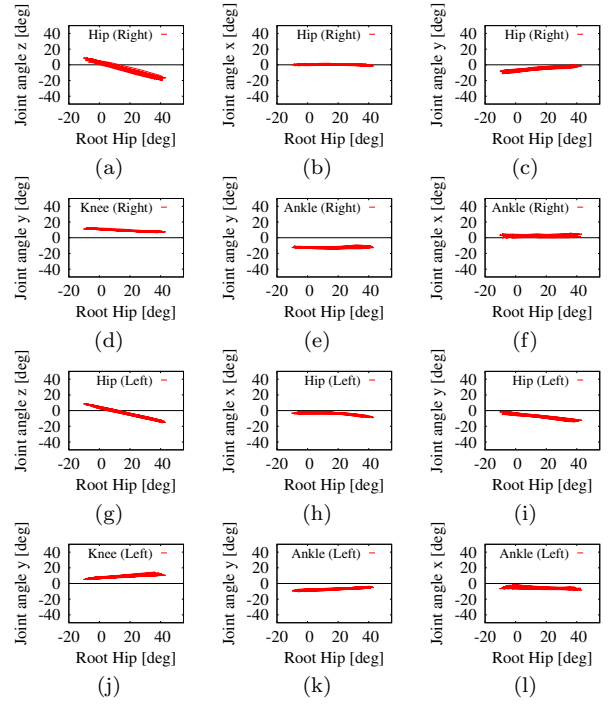


Fig.9: Result from voluntarily twist motion.

セット分の計測で取れるデータ数である。

$$a = \frac{n \sum \theta_{rh} \theta_{R,L} - \sum \theta_{rh} \sum \theta_{R,L}}{n \sum \theta_{rh}^2 - \left( \sum \theta_{rh} \right)^2} \quad (2)$$

式 (1) を用いて 10 人分のデータを平均した結果を図 10 に示す。

### 4 捻り動作を考慮したモーションパターンの解析

式 (1) より算出した  $\theta_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$  と計測した各関節角度  $\theta_{moc} \in \mathbb{R}^{12}$  から以下の式を用いて上半身の捻り動作による影響を取り除いた各関節角度  $\theta \in \mathbb{R}^{12}$  を求める。

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

上半身の捻り動作による影響を取り除いた各関節角度  $\theta \in \mathbb{R}^{12}$  を図 11 と図 12 に示す。図 11 (a) と図 12 (a) から左右の  $z$  軸回りの股関節の角度がほぼ 0 deg になっている。また、図 5 (c) と図 6 (c) のときは左右の  $y$  軸回りの股関節と足首の関節がそれぞれ等しくなかったのに対して、図 11(c) と図 12 (c) はそれぞれが等しくなっていることが確認できる。よって、上半身の捻り動作による下半身の各関節回転角度の影響は取り除くことができた。

図 11 (b) からは前額面のモーションパターンは確認できず、図 11 (c) より矢状面の Hip strategy が確認できた。図 12 (b) からは前額面の Ankle strategy を確認でき、図 12 (c) より矢状面の Hip strategy も確認できた。このことから、右肩に外乱を与えた際は水平面の Twist strategy、前額面の Ankle strategy と矢状面の Hip strategy から成り立っている。

また、立位方向が 0 deg の場合に、右肩ではなく、胸を引っ張る外乱を与えたときの結果を図 13 に示す。図 11 と

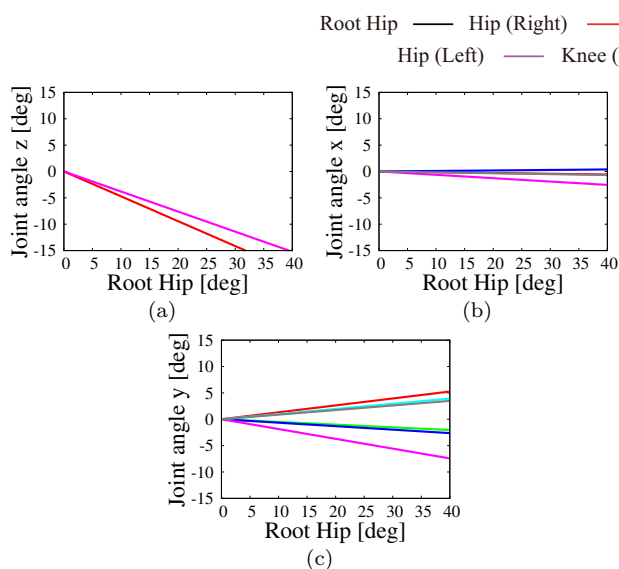


Fig.10: Joint angles using the least-squares method.

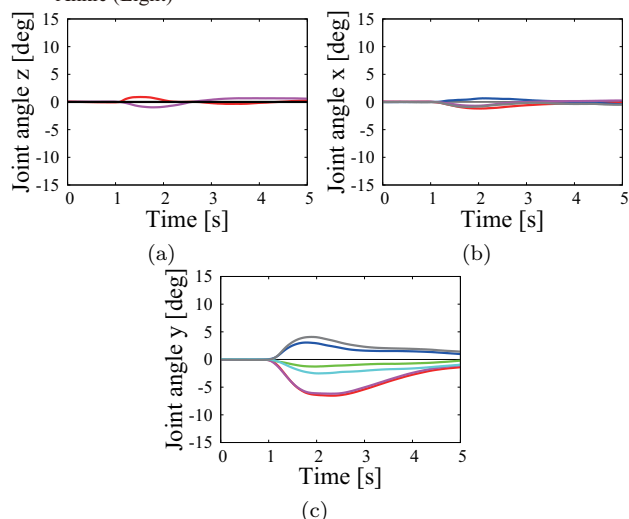


Fig.11: Joint angles after the analysis with 0 deg force.

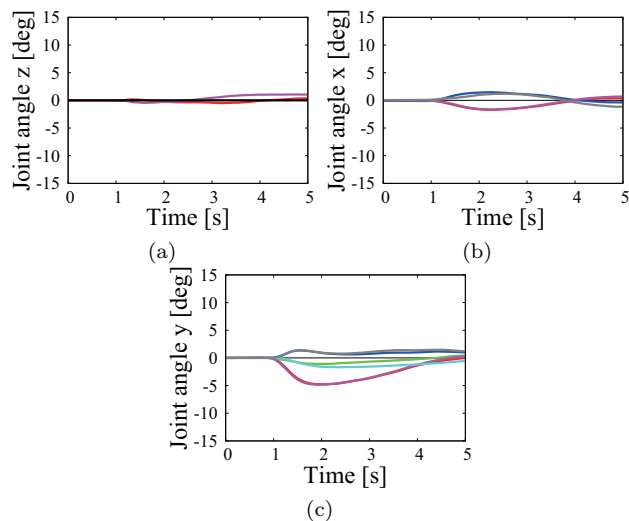


Fig.12: Joint angles after the analysis with 30 deg force.

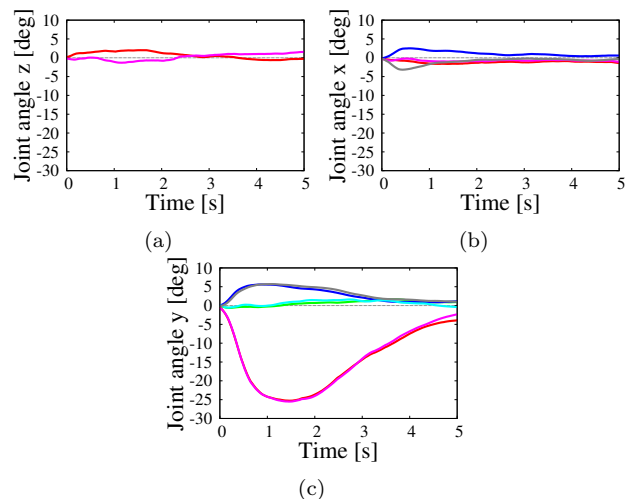


Fig.13: Hip strategy.

図 13 より，同じ外力を与えたとしても外力の与える箇所  
が胸と右肩の違いだけで姿勢維持動作が変化する．胸に外  
力を与えた場合は右肩に外力を与えたときに比べ， $y$  軸回  
りの股関節の使用率は 26 % 増加しており，胸の外乱は  $y$   
軸回りの股関節を用いて姿勢維持動作をとっていることが  
わかる．しかし，右肩に外乱を与えた場合には， $y$  軸回  
りの股関節はほとんど用いずに，上半身の捻りの動作をす  
ることにより姿勢維持動作をとっていることがわかる．

## 5 結論

本稿では，人間の右肩に外乱を与えた際の人間のモー  
ションパターンについて解析した．その結果，水平面の  
Twist strategy，前額面の Ankle strategy と矢状面の Hip  
strategy から成り立っていることがわかった．このように  
上半身の捻り動作を伴う複雑なモーションパターンは， $x$ ，  
 $y$ ， $z$  軸平面のモーションパターンの組み合わせからなるこ  
とがわかった．

立位状態で自発的に上半身の捻りを行った際，Root Hip  
に対する下半身の各関節に対する関係は線形化することが

できる．この結果は突発的な外乱を受ける場合でも用いる  
ことができた．胸に外乱を与えた場合と右肩に外乱を与  
えた場合では，各平面のモーションパターンの割合が変化す  
ることも確認できた．今後の課題は，人型ロボットにどの  
ように各平面のモーションパターンを適用していくかであ  
る．また，腰回りなど与える外乱により，各平面のモー  
ションパターンの割合の変化についても解析する必要がある．

## 文 献

- [1] A. Shumway-Cook and F. B. Horak, "Vestibular rehabil-  
itation: an exercise approach to managing symptoms of  
vestibular dysfunction," *Seminars in Hearing*, vol. 10, no. 2,  
pp. 196–209, 1989.
- [2] D. N. Nenchev and A. Nishio, "Ankle and hip strategies  
for balance recovery of a biped subjected to an impact,"  
*Robotica*, vol. 26, pp. 643–653, June 2008.
- [3] Y. Yoshida, K. Takeuchi, D. Sato and D. Nenchev, "Postu-  
ral Balance Strategies for Humanoid Robots in Response to  
Disturbances in the Frontal Plane," in *Proc. of Robotics and  
Biomimetics*, Phuket, Thailand, 2011, pp. 1825–1830.
- [4] (2014, Mar.). Optitrack - Optical Motion Capture  
Systems and Tracking Software. [Online]. Available:  
<http://www.naturalpoint.com/optitrack/>