

左右非対称の外乱による体幹部の捻りと下半身動作の関係

Relation Between Trunk Twists and Lower Limb Movements Due to Asymmetrical Perturbation

小沼彰悟 (都市大) 宮本康広 (都市大) 佐藤大祐 (都市大) 金宮好和 (都市大)

Shogo ONUMA, Toyko City University

Yasuhiro MIYAMOTO, Toyko City University

Daisuke SATO, Toyko City University

Yoshikazu KANAMIYA, Toyko City University

Abstract: 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 shown that a complex reaction synergy can be decomposed into few simple synergies.

Key Words: Twist, Motion Pattern, Linear

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、三つの姿勢運動戦略があることが知られている⁽¹⁾。その三つの姿勢運動戦略とは Ankle strategy, Hip strategy, Step strategy である。

その一方で、前顔面の外乱に対するバランス制御に目を向けると、Winter らは人間が横から外乱を受けたときの反応を調べ、姿勢制御には Ankle strategy, Load/unload strategy, Step strategy の動作があることを述べており、中でも Ankle strategy, Load/unload strategy に焦点を当て、動作解析をした⁽²⁾。Iqbal らは人間を右脚、左脚、骨盤、背骨を単純リンクに近似したモデルを用いて、人間が安定に直立するための中枢神経の働きを数式モデルに基づいてシミュレーションを行い、制御論的議論を行った⁽³⁾。Patton らは Step 動作に注目し、Step 動作には足を開く動作となる Side step と足を交差させる動作の Cross-leg step があることを述べており、年齢によってどちらの動作を行う傾向があるのか調査を行った⁽⁴⁾。他にも年齢の違いとステップ方法の関係を調査した研究⁽⁵⁾、歩行中の横からの外乱に対する反応を調べた研究⁽⁶⁾がある。

しかし、捻り動作を含むバランス維持の解析は明らかにされていない。そこで、自発的な上半身の捻り動作における体幹部と下半身の関節角度の関係を示し、その関係が肩に外乱(左右非対称の外乱)を与えた場合においても有用性があることを述べる。

2. 上半身の捻り動作による下半身の各関節への影響

自発的な捻り動作における下半身の各関節の関係を示す。

2-1 実験方法

被験者は 8 人の男性で年齢 22 ± 1.6 歳、身長 170 ± 4.7 cm、体重 64.0 ± 5.3 kg(平均 ± 標準偏差)である。図 1 (a) 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 OptiTrack⁽⁷⁾ を用いた。図 1 (b) 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。

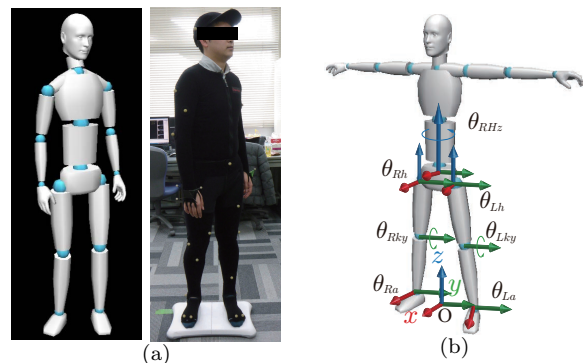


Fig. 1 (a) Voluntary twist motion, (b) coordinate frames of the motion capture model.

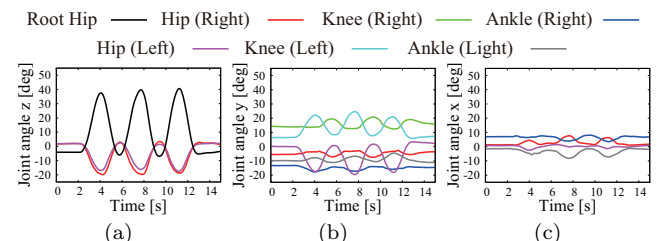


Fig. 2 Result from voluntary twist motion: (a) z axis, (b) y axis and (c) x axis.

2-2 実験結果

図 2 に上半身の捻りに対する各関節の変位を示す。上半身の捻りと共に下半身の各関節が連動して変位している。

2-3 最小二乗法を用いた捻り動作と各関節の関係性

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。以下に式を示す。

$$y = ax + b \quad (1)$$

(1) の b は誤差項でありオフセットを意味する。各関節の関係、すなわち傾きだけが必要であるため省くと、 a は以下となる。 n はデータ数である。

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y}{n \sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x \right)^2} \quad (2)$$

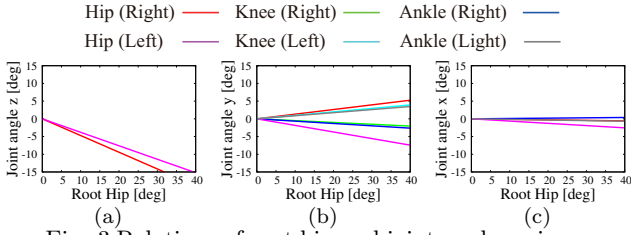


Fig. 3 Relations of root hip and joint angles using the least-squares method (average from 8 person).

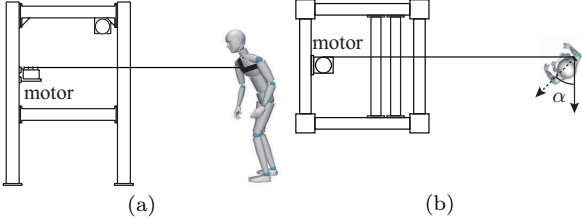


Fig. 4 Experimental system for applying a force at the shoulder: (a) side view and (b) top view.

上半身の捻り動作の計測結果より得られた θ_{RH_z} を Root Hip の z 軸回りの回転角度 $y_{twist} = [\theta_{Rhz}, \theta_{Rhx}, \theta_{Rhy}, \theta_{Rky}, \theta_{Ray}, \theta_{Rax}, \theta_{Lhz}, \theta_{Lhx}, \theta_{Lhy}, \theta_{Lky}, \theta_{Lay}, \theta_{Lax}]^T$ を下半身の各関節回転角度とする． R は右， L は左の関節， h は Hip， k は Knee， a は Ankle を示す． x, y, z は座標軸を示す．最小二乗法の一次の線形近似式 (1) と式 (2) により Root Hip の z 軸回りの角度 θ_{RH_z} とその捻り動作により影響を受けた下半身の各関節角度 $y_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$ の関係性 $a_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$ を用いて θ_{RH_z} に対する下半身の関節角度の推定値 $\hat{y}_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$ は以下となる．

$$\hat{y}_{twist} = a_{twist} \theta_{RH_z} \quad (3)$$

式 (3) を用いて 8 人分のデータを平均した結果を図 3 に示す．このように Root Hip に対する下半身の各関節の関係を線形化した．

3. 外乱における捻り動作の解析

体幹部の捻りを発生させるために人間の右肩に外乱を与える．それにより，外乱が身体中央に作用しないため，鉛直軸回りにモーメントを発生させることができ，そのときのバランス維持動作を解析する．

式 (3) より算出した $\theta_{twist} = \hat{y}_{twist} \in \mathbb{R}^{12}$ 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って生じた下半身の各関節角度を取り除いた関節角度 $\theta_{res} \in \mathbb{R}^{12}$ を求める．

$$\theta_{res} = \theta_{moc} - \theta_{twist} \quad (4)$$

3-1 実験方法

図 4 に実験の外観図を示す．(a) が側面図，(b) が平面図である．図 4 (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をダイレクトドライブモータを用いて巻くことにより外乱を与えた．そのときの右肩に加わる外乱の大きさは 84.7 N，外乱時間は 0.2 s ある．また，図 4 (b) より被験者の立位方向を変えて外乱の加わる方向の大きさを変更した．そのときの角度は $\alpha = 30 \text{ deg}$ である．被験者は 8 人の男性で年齢 21.7 ± 1.7 歳，身長 171 ± 5.4 cm，体重 61.3 ± 4.1 kg (平均 \pm 標準偏差)，1 人 10 回の計測を行った．

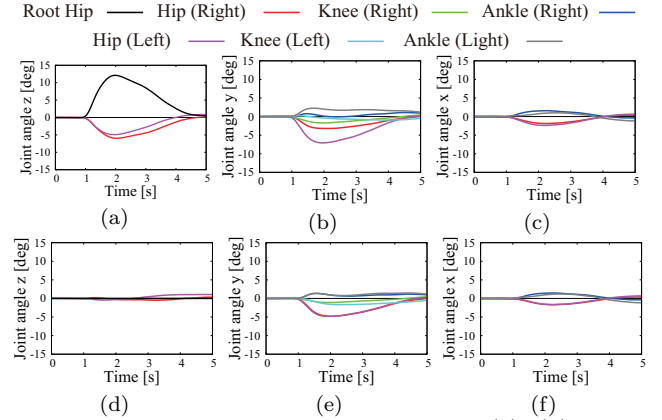


Fig. 5 Force applied with $\alpha = 30 \text{ deg}$: (a), (b), (c) raw data (average from 8 person) (d), (e), (f) joint angles after twist movement analysis.

3-2 実験結果

図 5 (a), (b), (c) に 8 人分の平均値を示す．(d), (e), (f) は式 (4) を用いた際の結果である．(d) は (a) よりも 0 deg に収束しており，上半身の捻り動作が与える下半身の各関節の影響を除くことができた．すなわち，自発的な上半身の捻り動作における下半身の各関節の関係性は外乱と同様に線形の関係で表すことができる．(b) の際はそれぞれ左右の腰関節と足首関節の変位が大きかったが，(e) よりそれぞれの変位が小さくなっている．さらに腰関節と足首関節が逆位相であることから hip strategy だと考えられる．また，(c) と (f) より腰関節と足首関節が逆位相であるため前額面の ankle strategy が含まれていると考えられる．以上のことから，今回の実験のように右肩に外乱を与えたときは水平面の上半身の捻り動作，矢状面の Hip strategy，前額面の ankle strategy の組み合わせでバランス維持が成り立っていると考えられる．

4. 結言

自発的な上半身の捻り動作が与える下半身の各関節の関係は線形であり，外乱においても同様な関係があることを示した．今後は定量的に三次元における矢状面，前額面と水平面からなるバランス維持動作の組み合わせの関係を示す．

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) K. Iqbal, H. Hemami, and S. Simon, "Stability and control of a frontal four-link biped system," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 10, pp. 1007–1018, Oct. 1993.
- (4) J. L. Patton, M. J. Hilliard, K. Martinez, M.-L. Mille, and M. W. Rogers, "A simple model of stability limits applied to sidestepping in young, elderly and elderly fallers," in *Proc. IEEE EMBS Annu. Int. Conf.*, vol. 1, pp. 3305–3308, Jan. 2006.
- (5) M.-L. Mille, M. E. Johnson, K. M. Martinez, and M. W. Rogers, "Age-dependent differences in lateral balance recovery through protective stepping," *Clin. biomech. (Bristol, Avon)*, vol. 20, no. 6, pp. 607–616, Jul. 2005.
- (6) A. L. Hof, S. M. Vermerris, and W. A. Gjaltema, "Balance responses to lateral perturbations in human treadmill walking," *J. Ext. Biol.*, vol. 213, no. Pt 15, pp. 2655–2664, Aug. 2010.
- (7) "Optitrack - optical motion capture systems and tracking software," [Online]. Available: <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>