

反動零空間法に基づく人間の自発的運動の解析

Reaction Null Space Based Analysis of Human Voluntary Movement

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

Yasuhiro MIYAMOTO, Tokyo City University

Shogo ONUMA, Tokyo City University

Daisuke SATO, Tokyo City University

Yoshikazu KANAMIYA, Tokyo City University

Abstract: We apply the Reaction Null Space method, developed for control of space manipulators, to a dynamics model of the human body and show its usefulness in extracting optimal balance synergies from motion capture data obtained from two voluntary movement patterns in the sagittal plane: squat and sway.

Key Words: Human Balance, Motion Capture, Reaction Null Space, Reactionless Motion

1. 緒言

人間のバランスにおける、足裏反力の重要性が指摘されており、これまでに反力と重心位置や圧力中心との関係性が示されている^(1, 2)。また、解析の際には人間を剛体リンクによりモデル化する手法がよく用いられている⁽³⁾。しかし、主に足部が自由度を持たないモデルにより解析されてきたことから、関節の運動と足部の力(運動)との間における干渉について注目されてこなかった。

本稿では、足部を非固定なモデルを用い、コンピュータを備えた浮遊ベースロボットのモデリング手法である反動零空間法⁽⁴⁾を適用する。これにより、モーションキャプチャから得た人間の運動データを、最適なバランス動作である足部への力に干渉しない運動と干渉する運動へ分解する手法を示す。そして、自発的な二種類の動作に対して本手法を適用し、それぞれの動作について解析を行う。

2. 反動零空間法に基づく動作分解手法

動作解析には、図1の人間を矢状面方向から見たモデルを用いる。人間の全身を、足、脛、腿、胴体の四つのセグメントを持つ剛体リンクとし、左右の足は一体として考え、上体部も一つの剛体として考える。本モデルにおける、系全体の運動方程式は次のように表される⁽⁴⁾。

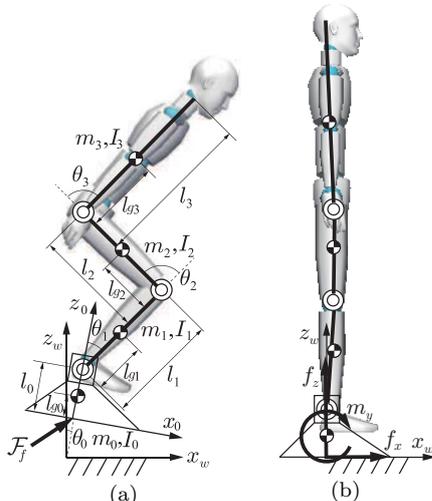


Fig. 1 Human model in sagittal plane: (a) unfixed-base in mid air and (b) foot reaction forces and moment when grounded.

$$M_f \dot{V}_f + M_{fs} \ddot{\theta} + \dot{M}_f V_f + \dot{M}_{fs} \dot{\theta} + G_f = F_f \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M_f &\in \mathbb{R}^{m \times m} && : \text{系全体の慣性行列} \\ M_{fs} &\in \mathbb{R}^{m \times n} && : \text{足部とセグメントの} \\ &&& \text{慣性干渉行列} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_f &\in \mathbb{R}^m && : \text{系全体の重力項} \\ \theta &\in \mathbb{R}^n && : \text{関節変位} \\ V_f &\in \mathbb{R}^m && : \text{足部の加速度} \\ F_f &\in \mathbb{R}^m && : \text{足部の反力/反モーメント} \end{aligned}$$

m は足部の自由度, n は関節数で、本モデルでは $m = 3$, $n = 3$ である。また、 f, s はそれぞれ“foot”, “segment”を意味している。本式の特徴は、 $M_{fs} \ddot{\theta}$ により、関節の動作の足部の運動(反力)への干渉を考慮できる点である。

足部の受ける反力 ($F_f = [f_x, f_z, m_y]^T$) において、垂直床反力である f_z は、重力の影響が強いことから運動による影響が非常に小さいと考えられる。これにより、足部の自由度を一つ減らし $m = 2$ として考える。その際には、系が冗長性を持つため、関節角加速度は次のようになる。

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_{res} + P_{fs} \ddot{\theta}_a \quad (2)$$

$$P_{fs} = (I - M_{fs}^+ M_{fs})$$

$$\ddot{\theta}_{res} = M_{fs}^+ (F_f - M_f \dot{V}_f - \dot{M}_f V_f - \dot{M}_{fs} \dot{\theta} - G_f)$$

$P_{fs} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ($\text{rank } P_{fs} = m - n$) は足部とセグメントの慣性干渉行列の零空間ベクトルであり、これを反動零空間と呼ぶこととする。また、 $\ddot{\theta}_a$ は任意の角加速度を示している。 $\ddot{\theta}_{res}$ は特殊解であり、 $\ddot{\theta}_{res} \perp P_{fs} \ddot{\theta}_a$ の関係である。つまり、 $P_{fs} \ddot{\theta}_a$ は足部の運動(反力)に干渉しない関節角加速度を示している。

ここで、足部の運動はない ($V_f = \dot{V}_f = 0$) ものとし、足部に対する重力による力/モーメントと床反力による力/モーメントが釣り合っている ($F_f = G_f$) と仮定する。このとき、式(1)より見かけ上の平衡状態では、

$$M_{fs} \ddot{\theta} + \dot{M}_{fs} \dot{\theta} = 0 \quad (3)$$

となり、関節角加速度は、

$$\ddot{\theta}_{RL} = -M_{fs}^+ \dot{M}_{fs} \dot{\theta}_{RL} + P_{fs} \ddot{\theta}_a \quad (4)$$

となる．この $\ddot{\theta}_{RL}$ は，動作により足部に対して反動を与えないことから，無反動角加速度となる．また，式 (3) は積分可能であり， $M_{fs}\ddot{\theta}_{RL} = 0$ となることから $\dot{\theta}_{RL}$ は算出できる．式 (4) の右辺第二項に，モーションキャプチャなどより得た関節角加速度データを用いることで ($\ddot{\theta}_a = \ddot{\theta}_{moc}$)，動作中の無反動動作を抽出することができる．また，反動の生じる動作（余剰動作）に関しては，式 (2) より，

$$\ddot{\theta}_{res} = \ddot{\theta}_{moc} - \ddot{\theta}_{RL} \quad (5)$$

と求めることができる．これにより，人間の動作を二つに分解することが可能となる．

3. 人間の動作解析

本項では，屈伸動作 (squat)，足首関節を中心に体を前後に振る (sway) という二種類の自発的な動作に対し，動作分解により解析を行う．被験者には，かかとおよびつま先を上げないように指示し，10 s 間に 3 回動作を行わせた．被験者は，身長 172 cm 体重 60 kg の 20 代前半男性であり，参考文献 (5) より力学パラメータを決定した．運動データの取得には，NaturalPoint 社製光学式モーションキャプチャシステム OptiTrack (6) を使用した．

3-1 Squat

この動作では，水平方向における重心の変位が小さく，足部のせん断力が小さく考えられる．また，各セグメントの回転運動が打ち消し合い，足部にかかるモーメントが非常に小さく考えられる．これより，無反動動作に近い動作になることが期待される．

解析結果を図 2 に示す．(b) から，重心や圧力中心の変位は非常に小さく，無反動動作が抽出されていることがわかる．(c) における関節の動作は，(a) における人間の動作と異なるが，重心および圧力中心の変位は実際の変位と同様の動きとなっていることが確認できる．これより，動作を分解できていることが分かる．また，この運動は無反動動作に近い運動であることも確認できる．

3-2 Sway

この動作では，水平方向において重心が大きく変位し，足部のせん断力が発生すると考えられる．また，全身が足首を中心に回転するような運動になるため，足部に大きくモーメントがかかることが予想される．したがって，余剰動作の影響が強い動作となることが予想される．

解析結果を図 3 に示す．(c) より，余剰動作はモーションキャプチャから得たデータに近いことが確認できる．

4. 結言

我々は，反動零空間法に基づき，人間の運動を無反動動作とその余剰動作に分解する手法を示した．また，実際に取得した運動データに適用し，動作の解析を行った．今後は，より実用的なりハビリテーションやスポーツ分野への応用を目指す．

参考文献

- (1) L. M. Nashner and G. McCollum, "The organization of human postural movements: A formal basis and experimental synthesis," *Behavioral and Brain Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 135–150, Feb. 1985.
- (2) K. Iqbal and Y. C. Pai, "Predicted region of stability for balance recovery: motion at the knee joint can improve termination of forward movement," *J. of Biomechanics*, vol. 33, no. 12, pp. 1619–1627, Dec. 2000.
- (3) V. Bonnet, S. Ramdani, P. Fraisse, N. Ramdani, J. Lagarde, and B. G. Bardy, "A structurally optimal control model for predicting and analyzing human postural coordination," *J. of Biomechanics*, vol. 44, no. 11, pp. 2123–2128, Jul. 2011.

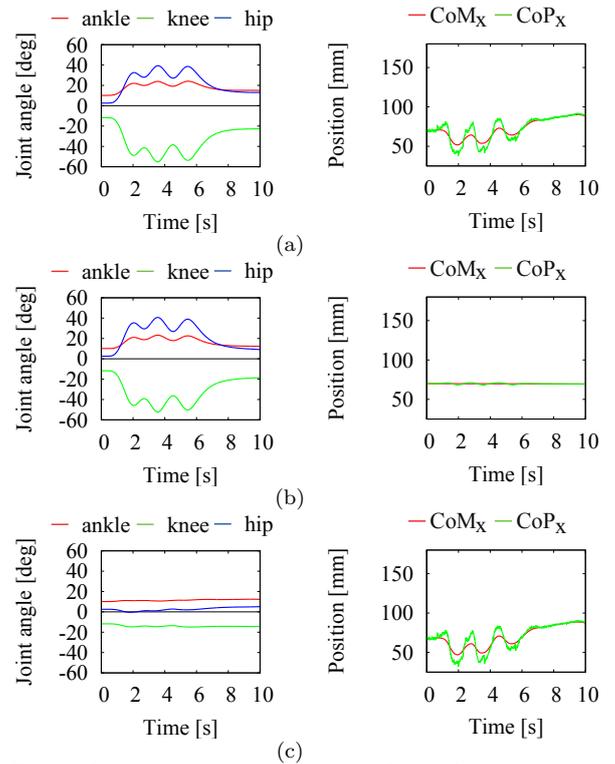


Fig. 2 Squat: (a) motion capture data, (b) reactionless and (c) residual components .

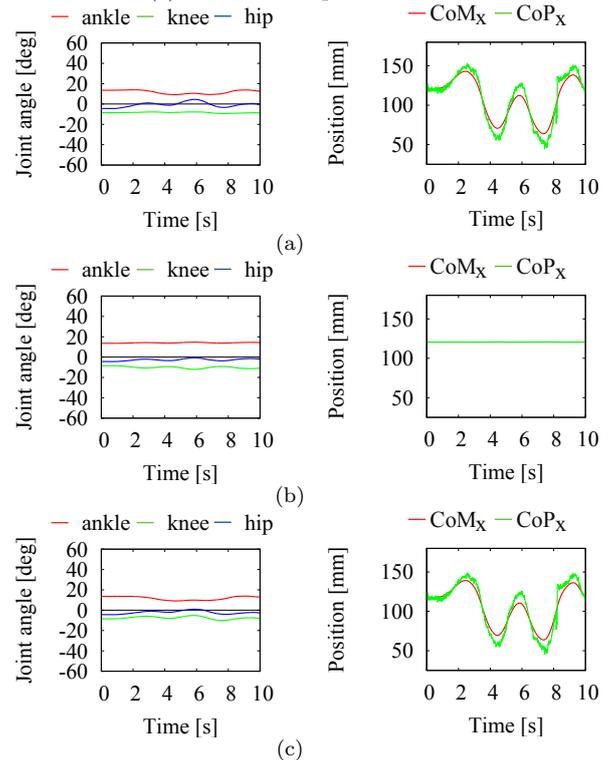


Fig. 3 Sway: (a) motion capture data, (b) reactionless and (c) residual components .

- (4) D. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat, and M. Uchiyama, "Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 1011–1023, 1999.
- (5) P. D. Leva, "Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters," *J. of Biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223–1230, 1995.
- (6) "Optitrack - optical motion capture systems and tracking software," [Online]. Available: <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>