

反動零空間法に基づく人間の自発的運動における学習効果の評価

宮本康広, 小沼彰悟, 佐藤大祐, 金宮好和
東京都市大学大学院工学研究科

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

キーワード: Human balance, Learning process, Reaction null-space

1. 緒言

人間のバランス能力トレーニングに関する研究は数多く行われている．これまでに，Dynamic Joint Control ボードを用いたものや¹⁾，全身振動下におけるトレーニング²⁾，バランスボールを用いたトレーニング³⁾など，様々なものが考案されている．これらの運動は，重心の動揺面積などの最終的な結果で評価する場合が多く，その運動自体に関する評価が行われる例は少ない．運動自体に関する評価においても，観察者の主観的な部分に依存することが多く⁴⁾，より客観的な評価法が必要である．

我々は，過去の研究において宇宙ロボットなどのモデリング手法として用いられてきた，反動零空間法⁵⁾を人間のモデルに適用した．これより，人間の運動を反動動作と無反動動作に分解し，解析する手法を提案した⁶⁾．

本稿では，この提案手法を人間の学習による運動の改善に対する評価へ適用する．本手法が運動の改善の評価に対して適用可能であることを示す．

2. 理論

2.1 解析モデル

動作解析には，Fig. 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．各関節はそれぞれ，足首，膝，股関節に対応している．そして，マ

ニピュレータを備えた浮遊ベースロボットのモデリング手法⁵⁾を適用することで足部に自由度を持たせる．本モデルにおける，系全体の運動方程式を次に示す．

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

M_f	$\in \mathbb{R}^{m \times m}$: 系全体の慣性行列
M_{fs}	$\in \mathbb{R}^{m \times n}$: 足部とセグメントの 干渉慣性行列
G_f	$\in \mathbb{R}^m$: 系全体の重力項
θ	$\in \mathbb{R}^n$: 関節変位
V_f	$\in \mathbb{R}^m$: 足部の速度/角速度
F_f	$\in \mathbb{R}^m$: 足部の反力/反モーメント

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．本式の特徴は大きく二つあり，一つは足部の運動 (\dot{V}_f) について考慮できる点である．これにより，足を滑らせた場合や爪先立ちのような場合に対しても，適用が可能となる．もう一つの特徴は， $M_{fs} \ddot{\theta}$ および $\dot{M}_{fs} \dot{\theta}$ から，関節運動による足部の運動（反力）への干渉を考慮できる点である．

2.2 RNS フィルタ

人間の運動は，足部の受ける反力に注目すると反動を加える運動と無反動な運動の二種類に分けて考えることができる．ここでは，関節の冗長運動に注目し，無反動動作を抽出する手法について示す．

足部の運動 ($X_f = [x_f, z_f, \theta_0]^T$) において，Fig. 1 (b) に示すようなレールの上における運動では，レールの運動方向に関する部分が最も重要で，他の項に関しては無視して考えることができる．したがって，足部の自由度を二つ減らし $m = 1$ 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⁶⁾．

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

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

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

$P_{fs} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ($\text{rank } P_{fs} = 2$) 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．

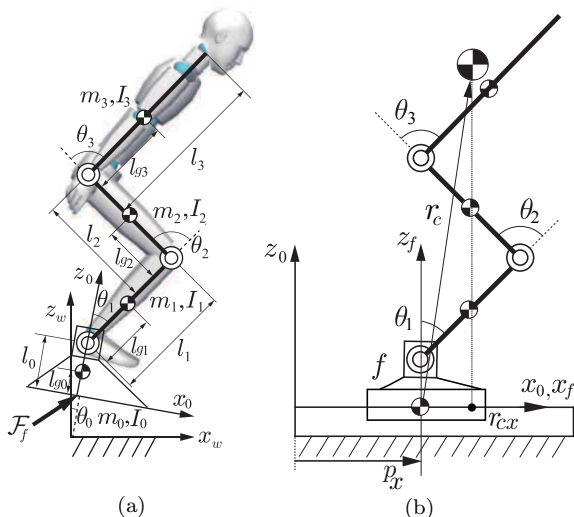


Fig. 1 Human model in sagittal plane: (a) unfixed-base in mid air and (b) on slider platform.

この系の運動量変化率 \dot{L} は次のように示される．

$$M_{fs}\ddot{\theta} + \dot{M}_{fs}\dot{\theta} + M_f\dot{\nu} + \dot{M}_f\nu = \dot{L} \quad (3)$$

右辺が零であるとき，自身の運動による反動が発生しない動作となることから，無反動動作は次のように表すことができる．

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

となる（なお，外部から力の加わらない場合を想定しているため $\dot{\nu} = 0$ としている）．この $\ddot{\theta}_{RL}$ は，動作により足部に対して反動を与えない無反動角加速度である．また，(3) は積分可能であり， $M_{fs}\dot{\theta}_{RL} + M_f\nu = 0$ となることから $\dot{\theta}_{RL}$ は算出できる．(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，余剰動作である反動の発生に関する部分に関しては，(2) より，

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

と求めることができる．

2.3 評価関数

評価関数には次の式を用いた．

$$J_i = \frac{\sum(\ddot{\theta}_{moc_i} - \ddot{\theta}_{RL_i})^2}{\sum(\ddot{\theta}_{moc_i} - \ddot{\theta}_{RL_i})^2 + \sum(\ddot{\theta}_{moc_i} - \ddot{\theta}_{resi})^2} \quad (6)$$

$i \in \{\text{ankle, knee, hip}\}$

この式は，一連の動作における平均値がその動作の評価値となることを示している．各関節において，人間の動作が反動動作に近いほどより高評価となる．

3. 実験

3.1 実験内容

本手法を用いて人間の学習による動作の変化について検証を行う．実験の方法は，摩擦の小さいレールに取り付けた板上に被験者を立たせる（Fig. 3.1 参照）．モータにより，被験者の後背部に取り付けたワイヤーに引きくことで運動量を付加する．被験者は，自身の運動により足部をできるだけ早く静止させる．被験者は 22 歳男性で慣性パラメータは参考文献⁷⁾より求めた．実験は 5 回 \times 10 セットの計 50 回行い，外力が抜けてから足部が静止するまでの運動を解析の対象として，反動動作と人間の運動との関係から動作の変化を検証する．

3.2 実験結果

Fig. 2 に実験結果を示す．最初の 5 回と最後の 5 回における評価関数の値の平均値は，Ankle: 0.346 ± 0.144 ，Knee: 0.129 ± 0.070 ，Hip: 0.067 ± 0.063 および Ankle: 0.623 ± 0.170 ，Knee: 0.294 ± 0.163 ，Hip: 0.137 ± 0.077 となった．また，それぞれの平均値について優位水準 5 % で両側検定の t 検定を行った．足首に関しては有意差が認められ ($p = 0.02 < 0.05$)，膝関節に関しては有意傾向 ($p = 0.09 < 0.1$) であった．股関節においては有意差は認められなかった ($p = 0.16 > 0.05$)．これにより，学習によって動作が反動動作に近づいていくことが確認できた．

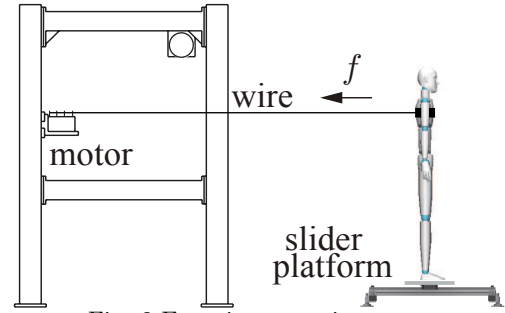


Fig. 2 Experiment environment.

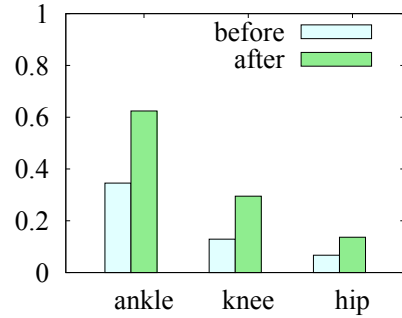


Fig. 3 Values of J before and after training.

4. 結言

反動零空間法に基づき，人間の学習による運動改善を評価する手法について示した．今後は，リハビリテーション等への応用を目指す．

参考文献

- 1) 井原，中山，関節トレーニング：“関節は高感度センサーである”，協同医書出版，1990，pp. 111–226.
- 2) 天野，三山，中田，神田，下村，前，金本，佐藤，木村，杉山，史野，“全身振動下トレーニングの健康人バランス向上効果”，スポーツ障害，vol. 15，pp.15–17，2010.
- 3) 中谷，瀬本，森井，“身体動揺に及ぼすバランスボール・トレーニングの効果”，体力科学，vol. 50，pp.643–646，2001.
- 4) 鈴木，藤澤，“ファンクショナル・リーチを用いた姿勢最適化トレーニング 2 種類の教示を提示する順序が運動学習に与える影響”，理学療法科学，vol. 28，No. 2，pp.261–268，2013.
- 5) D. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat, and M. Uchiyama, “Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 6, pp. 1011–1023, 1999.
- 6) 宮本，竹内，佐藤，金宮，“モーションキャプチャデータを用いた人間の無反動動作解析手法の提案”，ロボティクス・メカトロニクス講演会，富山，5 月，2014.
- 7) P. D. Leva, “Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov’s segment inertia parameters,” *Journal of Biomechanics*, vol. 29, no. 9, pp. 1223–1230, 1995.

著者連絡先

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1
 東京都市大学大学院
 工学研究科 機械システム工学専攻
 ロボティクライフサポート研究室
 金宮 好和
 Tel: 03-5707-0104(内線 3944)
 E-mail: nenchev@tcu.ac.jp