

筋骨格系モデルを用いた立位姿勢における人体の安定性の計算

4H-9

幸村 琢† 品川 嘉久†

東京大学†

1 導入

人体の動きを計算機上でシミュレートするためには力学的なモデルが不可欠である。人間の動きは骨に付着した靭帯や筋肉によって制御されるのでその動きは複雑なものとなる。このため、このような筋肉や骨格に基づくモデルを用いて、人間の動きを力学的かつ動的に制御することは困難であった。そこで本研究では人間の立位姿勢における動的な基準量として安定度という物理量を定義し、導入する。更に、人体の筋骨格モデルを用いて、様々な姿勢における安定度を算出する。安定度に注意を払うことによって、筋骨格モデルに立位姿勢を保持させたまま制御することが可能となる。また、これまでは比較的曖昧であった人体の動的な安定性を数値化することができる。

2 下半身の筋骨格系モデル

ここでは下半身に重点をおき、股関節、膝関節、足関節を持った合計16自由度のモデルを用いる。モデルは腰部、大腿部、膝部、足部の合計7部分で構成される。さらにこれらの構成部分に各足18の筋肉の1次元モデルをつなぐ。これらの筋肉が力を発揮することにより、各関節にトルクを加え、モデルを動かす。筋骨格モデルの運動方程式は

$$A(\theta)\ddot{\theta} = B(\theta)\dot{\theta}^2 + C(\theta) + DM(\theta)P^T + T(\theta, \dot{\theta})$$

となる [2]。 $(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$ は関節角度、角速度、角加速度、 $T(\theta, \dot{\theta})$ は地面から受ける力、 $C(\theta)$ は重力によるベクトル、 P^T は筋肉による力を関節回りのトルクに変換するための行列、 D は関節回りのトルクを各ボディの重心まわりのトルクに変換するための行列、 M は質量マトリックス

筋肉は Hill によるモデルを用いた (図1) [2]。また、筋肉の発揮する力に関しては

$$\frac{dP^T}{dt} = f(P^T, l^{MT}, v^{MT}, a(t)),$$

という Zajac [4] による1次微分方程式を用いた。 (P^T は筋力、 l^{MT} は筋長、 v^{MT} は筋収縮速度、 $a(t)$ は興奮度) 各筋肉の発揮する力は興奮度を変化させることによって増減出来る。また、モデルの各部のサイズ、各筋肉の付着位置は Brand et.al [3] の解剖データによる。

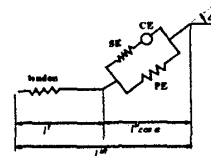


図 1: Hill による筋肉のモデル

3 コンフィグレーション空間

モデルの静的状態を表すためにコンフィグレーション空間を用いる。本研究におけるモデルは合計16の自由度をもっており、コンフィグレーション空間は16次元多様体となる。これを C_q とする。

モデルの動的状態を表すためには更に各関節の角速度を加える必要がある。また、それぞれの筋肉が発揮している力は関節角や関節角速度で一意に決まらないので、各筋肉の興奮度も考えなければいけない。関節角速度を要素とする空間を $C_{\dot{q}}$ 、筋肉の興奮度を要素とする空間を C_a とすると、モデルの動的状態を1点とする多様体空間は $C_q \times C_{\dot{q}} \times C_a$ となる。この空間を $C_{dynamic}$ と呼ぶとする。

4 コンフィグレーション空間の立位姿勢による区分

立位姿勢といっても物理的には広範囲である。片足で立っている時と、両足で立っている場合とでは、地面からの力の受け方が異なるため、安定な状態の保ち方は全く異なっている。本研究では動的な立位姿勢 $C_{dynamic}$ を物理的性質により以下のような部分集合に分けて考える。ただし、ここでは地面から足が受ける力と重力以外、外力はモデルに加わっていないとする。

S_1 : 体が静止しており、重心が両足で囲まれる領域上にある状態

S_2 : 足を踏み出さずに S_1 の領域に移動できる状態

Analyzing the Stability of a Standing Posture Using a Musculoskeletal Model

Taku Kohmura† and Yoshihisa Shinagawa†

The University of Tokyo†

- S_3 : 重心が両足で囲まれる領域上にある状態
 S_4 : 片足をあげることができる状態
 S_5 : 両足が地面についている状態
 S_{6left} : 左足が地面についている状態
 S_{6right} : 右足が地面についている状態
 S_7 : S_3 に移動可能な状態
 以上の部分集合の相関関係を図 2 に示す。

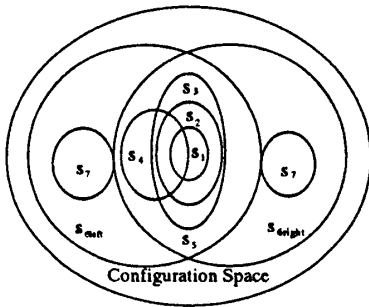


図 2: コンフィグレーション空間の安定性による分割

人体の動的な安定度を調べることは $C_{dynamic}$ において、どの点がこれらの集合に含まれるかを求めることに相当する。ここでは両足が地面についている状態について考える (図 2 の S_1, S_2 の状態)。つまり、どのような場合に人体モデルが足を踏みだりすることなく、バランスを保っていることができるかを調べる。

5 安定空間の算出

$C_{dynamic}$ におけるある点が S_1, S_2 に属しているか否かは以下のようにして決定することが出来る。

1. 人体モデルの初期状態 $(q, \dot{q}, a(t))$ を与え、人体モデルの重心の座標を算出する。
2. 両足によって、囲まれる地面の領域を凸多角形で近似する。更に 1 で求めた重心を地面に垂直に射影した点とこの凸多角形の輪郭線との符号つき最短距離を表す関数 $f(q)$ を用意する (図 3)。ただし、多角形内の距離は負とし、外側を正とする。
3. $\dot{q} = 0$ で、重心を地面に垂直に射影した点が足が地面についている領域によって生成される凸多角形に含まれる (つまり、 $f(q) < 0$) なら、初期状態は S_1 に属する。
4. $\dot{q} \neq 0$ の場合、 $f(q)$ を最小化するように $a(t)$ を制御する。動作が静止した際に $f(q) < 0$ ならば、初期状態は S_2 に属する。 $a(t)$ の制御アルゴリズムとしては勾配法、最適制御、モンテカルロ法などがある。

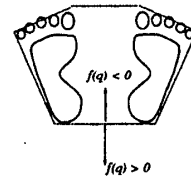


図 3: 両足がつくる凸多角形と重心の射影点との符号つき距離を表す関数 $f(q)$

6 発展

以上に述べたアルゴリズムでは人体モデルに対して外力が与えられていなかったが、外力の作用点と、方向ベクトルを運動の間一定とすれば、同様に安定性を決定することができる。人体モデルに様々な方向と大きさの外力を加えることにより、各々の姿勢がどういう方向に対して安定・不安定かを解析することができる。

7 今後の課題

課題としては以下のものが挙げられる。

- ここでは両足が地面についていたまま、バランスを保つことのみ考えており、足を踏み出すことによる安定性の確保については解析していない。今後はそのような安定性についても解析する。
- 実際に人間に対して実験を行なうことにより、安定性の検証を行なう。
- ここで求めている安定性を明解に判断することが出来るように、適切なアルゴリズムにより数値化を行なう。

参考文献

- [1] M.G.Hoy, F.E.Zajac, and M.E.Gordon. "a musculoskeletal model of the human lower extremity: The effect of muscle, tendon, and moment arm on the moment-angle relationship of musculotendon actuators at the hip, knee, and ankle". *Journal of Biomechanics*, 23(2):157-169, 1992.
- [2] M.G.Pandy, F.E.Zajac, E.Sim, and W.S.Levine. "an optimal control model for maximum-height human jumping". *J. Biomechanics*, 23(12):1185-1198, 1990.
- [3] R.A.Brand, R.D.Crowninshield, C.E. Wittstock, D.R.Pedersen, C.R.Clark, and F.M. Van Krieken. "a model of lower extremity muscular anatomy". *J. Biomech. Eng.*, 104:304-310, 1982.
- [4] F.E. Zajac. "Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control". CRC Press, 1989.