

剛体の力学を用いた人体の安定度の解析

1 G-5

村松貴士[†] 幸村琢[†] 品川嘉久[†]東京大学[†]

1 はじめに

スポーツ解析システムにおいて、人体または人体のモデルから得られた情報をもとに人体の安定度を解析することは重要な課題の一つである。本稿では、人体の安定度の解析法を提案する。

まず、ステレオ画像から3次元座標表示を得た人体に対し、剛体の力学を適用することにより、両足にかかる床からの外力に対する制約を求める。その制約と、摩擦力に対する制約など基本的な制約を同時に満たしているかを調べることによって、その人体が静止できるかを判定する。また、その判定条件を用いて、人体の体勢を一つの状態と考えたときの状態空間内の安定度を調べる。そして、静止領域から非静止領域への移行あるいはその逆の移行を最急降下法を用いて実現することにより、状態空間内の静止領域と非静止領域の境界付近について解析する。その後、実際の人体の動きと状態空間内の移行の関連性を調べることにより、判定条件及び安定度の妥当性を評価する。

2 静止・非静止の判定

人体を1つの剛体とみなし、剛体のつり合いの式を用いてその人体が静止しているかどうかを判定する。具体的には以下の通りである。

床からの外力（垂直抗力+静止摩擦力）以外の外力はすべて入力し、また、関節角の状態も入力する。そして、床からの外力以外の外力 $F_i (i = 1, 2, \dots, n)$ を定数とし、左足にかかる床からの力 F_l ・右足にかかる床からの力 F_r を変数とする。それぞれの力が作用する点（重心からの相対座標）を r_i, r_l, r_r とし、つりあいの条件 $F = 0, N = 0$ を仮定してみる。すると次の式がなりたつ。

$$F_l + F_r + \sum_{i=1}^n F_i + Mg = 0$$

$$r_l \times F_l + r_r \times F_r + \sum_{i=1}^n r_i \times F_i = 0$$

この連立方程式は不定であるので、

$$F_l = \begin{pmatrix} f_{lx} \\ f_{ly} \\ f_{lz} \end{pmatrix}, F_r = \begin{pmatrix} f_{rx} \\ f_{ry} \\ f_{rz} \end{pmatrix}$$

において $f_{lz} = t$ とすると、残り5つの成分を t の1次式で表すことができる。その結果（ μ は静止摩擦係数）、

$$f_{lz} \geq 0$$

$$f_{rz} \geq 0$$

$$\sqrt{f_{lx}^2 + f_{ly}^2} \leq \mu |f_{lz}|$$

$$\sqrt{f_{rx}^2 + f_{ry}^2} \leq \mu |f_{rz}|$$

の4つの式（垂直抗力と静止摩擦力の条件）は t の不等式になる。この不等式すべてを満たす t が存在するときを静止、そうでないときを非静止とした。

3 安定度・不安定度

以上の判定方法を利用し、状態の安定度・不安定度を定義する。

安定度 静止状態で両足の座標を固定する。非静止と判定されるために重心の座標を移動させる時の、最短距離を安定度とする。

不安定度 非静止状態で片足の座標と重心の座標を固定する。静止と判定されるためにもう一方の足の座標を移動させる時の、最短距離を不安定度とする。

この安定度・不安定度はあくまで人体がその状態で速度・加速度をもっていないと仮定して求めたものである。そのため、直観的な安定度とはやや概念が異なる。

4 状態の移行

安定度関数 d_1 、不安定度関数 d_2 は関節角 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$ を変数とする関数と考えることができる。

そこで、それぞれの関数を最小化する方向へ最急降下法を用いることにより、静止状態と非静止状態の境界に到達することができると思われる。つまり、ある静止状態に対し最も近いと思われる非静止状態を求めたり、ある非静止状態に対し最も近いと思われる静止状態を求

めたりするということである。このことを用いて、静止状態から非静止状態への移行、もしくは非静止状態から静止状態への移行を実現する。

5 深さ関数の導入

さらに、固定していない方の足首が最急降下法の際に地面より低い状態に移行してしまうのを防ぐため、足首が地面に埋まっている場合にのみ定義される深さ関数 $h = A|x|$ (x は地面から足首までの深さ、 A は正の定数) を用意し、足首が埋まっている状態へは移行しないようにした。

このため、最急降下法における探索ベクトル g は次のような形になった。

$$g = \left(-\frac{\partial(d_i + h)}{\partial\theta_1} \quad -\frac{\partial(d_i + h)}{\partial\theta_2} \quad \dots \quad -\frac{\partial(d_i + h)}{\partial\theta_k} \right)$$

6 実行結果

実験は、少林寺の技をかけられている人間のステレオ画像から得られた関節角の情報を用いて行なった。なお、人間1体につき44の関節角パラメータを定義してある。静止状態から非静止状態への移行と非静止状態から静止状態への移行を1例ずつ示した。

図1の例は、静止状態と判定された状態である。この状態に対し、安定度を最小化する方向へ最急降下法を用いて、静止状態と非静止状態の境界に達したのが図2である。また図3の例は、非静止状態と判定された状態であり、不安定度を最小化する方向へ最急降下法を用いて、静止状態と非静止状態の境界に達したのが図4である。

いずれも、ある程度人体の動きに近い画像が得られた。

7 おわりに

この研究の将来課題としては次のようなものがあげられる。

第一に、時間的な前後の画像から加速度、速度などの情報を抽出し、また人体の筋力・骨格などの情報を加え、真の意味での安定度を解析することが考えられる。第二に、状態の移行を用い、人体の動きのアニメーションを力学的に生成する方向の研究も考えられる。

これらについては今後の課題としたい。

参考文献

- [1] Lining Sun. "Dynamics Model-based Human Motion Analysis and Animation". Doctor's Dissertation.
- [2] Craig, John J. "INTRODUCTION TO ROBOTICS" Addison-Wesley Publishing Company(1989).
- [3] J.Hale and H.Koçak. "Dynamics and Bifurcations" Springer-Verlag(1991).

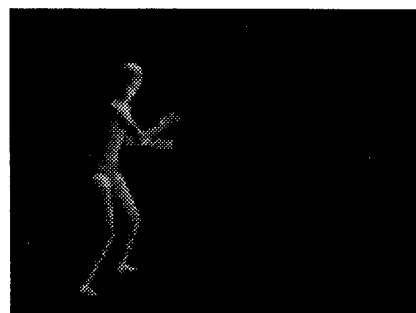


図 1: ある静止状態

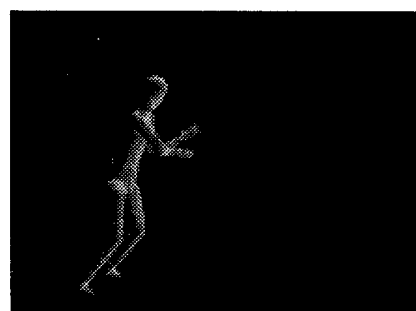


図 2: 図 1 から非静止状態へ移行させたもの



図 3: ある非静止状態

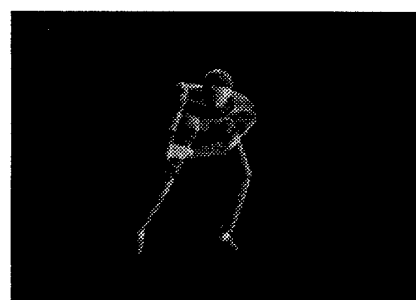


図 4: 図 3 から静止状態へ移行させたもの