

## 全身を用いたバランス保持動作のモデル化とその生成

工藤 俊亮<sup>†</sup> 幸村 琢<sup>††</sup> 池内 克史<sup>†</sup>

Modeling and Generating Whole Body Motion of Balance Maintenance

Shunsuke KUDOH<sup>†</sup>, Taku KOMURA<sup>††</sup>, and Katsushi IKEUCHI<sup>†</sup>

あらまし 近年、多くの分野で力学的に正しい人型モデルの動作を生成する研究がなされている。その中で、バランス保持に関するものは最も基本的かつ重要な研究の1つといえる。本論文では人間が突発的な強い外乱に対して行うバランス保持動作をモデル化し、それに基づいてバランス保持動作を生成する手法について述べる。本手法では、バランス保持動作を「足を踏ん張ってバランスをとる動作」と「足を踏み出して転倒を防ぐ動作」に分けてモデル化する。その際モーションキャプチャなどを用いて取得した人間のバランス保持動作と比較することによってモデルの正当性を検証し、また動作生成に用いるパラメタの決定を行った。動作生成では二次計画法による最適化計算を用い、効率的なバランス保持動作を最適解として生成する。この手法により、腰を曲げたり腕を振り回したりしながらバランスをとるといったような、人間にしばしば見られる全身動作が生成できた。

キーワード バランス保持 モーションキャプチャ 動作生成

### 1. ま え が き

近年、多くの分野で力学的に正しい人型モデルの動作を生成する研究がなされている。その中で、バランス保持に関するものは最も基本的かつ重要な研究の1つといえる。たとえばコンピュータ・グラフィクスの分野においては、力学的に正しい動作を行うリアルなキャラクターアニメーションへの需要が高まっており、グローバルなフィルタリングや [2], [3], 力学的な保存量に注目した拘束条件 [5], [8] などを用いて力学的に正しい動作を生成する手法が多く提案されている。またロボティクスの分野においては近年ヒューマノイド・ロボットに関する研究が盛んであり、これらの研究においてはバランス制御は本質的に重要な問題であるため多くの研究者によってさまざまな手法が提案されている [6], [9], [10]。これらの手法の多くは、あらかじめ与えられた目標動作や目標姿勢にできるだけ近いバランスのとれた動作を生成するための手法である。

しかし大きな予期せぬ外乱が加えられた場合などは、目標動作にとらわれない自発的な動作によって外

乱に対処する必要が生じる。そのような手法として、zordanらはPD制御を用いて外部からの衝撃への対応動作を生成する手法を提案した [7]。しかしこの手法では足を地面に固定させたまま動かさないなどの制約があり、大きな外乱に対処するのは難しい面があった。また藤原らは強い衝撃に対して、ヒューマノイド・ロボットが安全に転倒し、その後再び起き上がるという手法を提案した [11]。この手法を用いれば大きな外乱にも対処可能であるが、転倒せずにバランスが保持できるならばその方が望ましい。

ところで人間自身のバランス保持について考えてみると、突発的な外乱に対して、腰を大きく屈める、腕をぐるぐる回す、しゃがみ込む、足を踏み出すなどの大きな全身動作を自発的に用いて極めて質の高いバランス保持動作を実現していることが分かる。ところが人型モデルのバランス保持に関する研究において、これらの「人間らしい」バランス制御の手法はほとんど取り上げられてこなかった。

本論文では、上に挙げたような自発的な全身動作によるバランス保持動作の生成について述べる。まずこれらの動作を倒立振り子などの比較的単純な物理モデルを用いて表現する。このモデルを作る際、実際に人間が外乱を加えたときのバランス保持動作をモーションキャプチャやフォースプレートを用いて複数の被験者

<sup>†</sup> 東京大学

The University of Tokyo

<sup>††</sup> 香港城市大学

City University of Hong Kong

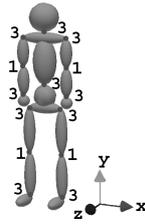


図 1 人型モデル  
Fig. 1 Human-like model

に対して計測し，それを解析した結果を利用する．そしてこのモデルに対して，重心位置，ゼロモーメント・ポイント (ZMP) などのグローバルな物理量に注目した最適化計算を行い，最適解としてバランス保持動作を生成する．本手法を用いると，足を踏ん張りながらバランスをとる動作として，腕をぐるぐる回す動作や腰をか屈める動作などの人間にもよく見られる動作が最適解として生成される．

## 2. バランス保持モデルの概要

本システムで用いる人型モデルは，図 1 に示すようなものである．このモデルは 15 個の剛体からなるリンク構造を持ち，自由度は全部で 34 自由度ある．3 自由度の関節は球関節として実装されている．

本論文で提案するバランス保持動作モデルは，大きく 2 つに分かれている．すなわち「足を踏ん張るバランス保持 (balance maintenance by keeping the feet on the ground)」と「足を踏み出すバランス保持 (balance maintenance by stepping)」であり，どちらも最適化計算を用いたバランス保持のモデルである．前者では，モデルの重心位置が速やかに目標位置に戻るために最適な動作が生成される．モデルの姿勢そのものを直接制御するわけではないため，「姿勢そのものは一時的に目標姿勢から遠ざかるが，速やかなバランス回復に有効な動作」を生成することが可能になる．後者は，片足を踏み出すことによって転倒を防止する手法である．動作生成においては，倒立振り子モデルを用いて重心の軌跡を決定した後，逆運動学計算と最適化計算によって全身動作を生成する．

これらのモデルの関係は，図 2 に示されたとおりである．安定姿勢にあるモデルは，PD 制御により安定姿勢を維持している．ここでは，各関節に与えるトルク  $\tau$  を次のような式で決定する．

$$\tau = k_p(\theta - \theta_{\text{ref}}) + k_d(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{\text{ref}}) \quad (1)$$

2

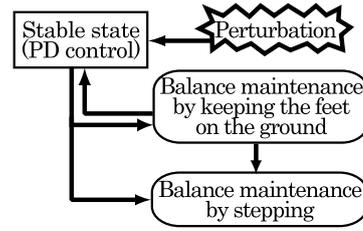


図 2 システムの概要  
Fig. 2 Overview of the system

ただし， $\theta$  は関節角度， $\theta_{\text{ref}}$  は目標関節角度， $k_p, k_d (< 0)$  は定数である．小さな外乱程度であれば，これによってバランスを保つことも可能である．外乱が大きかった場合には足を踏ん張るバランス保持に切り替わる．ここでは両足を地面に固定したまま動かさずに，全身動作を用いてバランスをとろうとする．それでもバランスが保持できなかった場合は，足を踏み出すことによって転倒を防止する．あるいは足を踏ん張ってバランスを保持する部分を飛ばして，外乱が加わるとすぐに足を踏み出してバランスをとるように設定することも可能である．それぞれの手法の詳細については，以降の節で順に述べることにする．

## 3. 人型モデルのパラメタ

本手法では，バランス保持の生成に二次計画法による最適化計算を用いる．変数は最適化したい関節の角加速度  $\ddot{\theta}$  である．これは本手法ではフレーム毎にローカルに動作を生成してゆくため，各フレームで関節角度，関節角速度はあらかじめ初期値として決まっており，自由に決定できるのは関節角加速度だけであるからである．一般に二次計画法では，目的関数は変数の 2 次式で，拘束条件は変数の 1 次式で記述しなければならない．本手法では，目的関数や拘束条件の中で重心加速度，ZMP などの物理量を扱う．それにはこれらの物理量が，変数  $\ddot{\theta}$  の 1 次式で書ける必要がある．以下にこれらが  $\ddot{\theta}$  の 1 次式で書けることを示す．

まず重心加速度について考える．モデルの重心位置は  $\theta$  の関数であるから，これを  $s(\theta)$  と書くことにすると，重心加速度は次のように関節角加速度の線型な式として書ける．

$$\ddot{s} = \sum_i \frac{\partial s}{\partial \theta_i} \ddot{\theta}_i + \sum_{i,j} \frac{\partial^2 s}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \dot{\theta}_i \dot{\theta}_j \quad (2)$$

よって重心加速度は  $\ddot{\theta}$  の 1 次式で書けることが分かる．

次に ZMP について考える．ZMP とは「地面から受ける力が 1 点  $p$  にかかっているとみなせる点」であるから，これを式で書くと以下ようになる．

$$\mathbf{n} = (\mathbf{p} - \mathbf{s}) \times \mathbf{N} \quad (3)$$

ただし， $\mathbf{p}$  は ZMP， $\mathbf{n}$  はモデルの重心の回りに発生しているモーメント， $\mathbf{s}$  は重心の位置， $\mathbf{N}$  は地面から受ける力の総和を表す．重力加速度を  $g$  とすると，運動方程式より  $\mathbf{N} = m(\ddot{\mathbf{s}} - g)$  だから， $\mathbf{p} = (p_x, 0, p_z)^T$  として式 (3) を解くと，

$$p_x = \frac{n_z + s_x m(\ddot{s}_y - g_y) - s_y m \ddot{s}_x}{m(\ddot{s}_y - g_y)} \quad (4)$$

$$p_z = -\frac{n_x - s_z m(\ddot{s}_y - g_y) + s_y m \ddot{s}_z}{m(\ddot{s}_y - g_y)} \quad (5)$$

となる．上で見たように，重心位置の加速度  $\ddot{\mathbf{s}}$  は  $\ddot{\theta}$  の 1 次式をして書くことができる．また重心の回りで定義されたモデルの全角運動量は  $\theta$  と  $\dot{\theta}$  の関数であるから，それを  $l(\theta, \dot{\theta})$  と書くことにすると，重心の回りに発生しているモーメント  $\mathbf{n}$  は以下の式のようになる．

$$\mathbf{n} = \dot{l} = \sum_i \frac{\partial l}{\partial \dot{\theta}_i} \ddot{\theta}_i + \sum_i \frac{\partial l}{\partial \theta_i} \dot{\theta}_i \quad (6)$$

よって重心の回りに発生しているモーメント  $\mathbf{n}$  も， $\ddot{\theta}$  の 1 次式で書けることが分かる．以上のことから，式 (4)，(5) の分子・分母はそれぞれ角加速度  $\ddot{\theta}$  の線型な式として書けることが分かる．これを，定数  $c_*$ ， $d_*$  を用いて次のように書くことにする．

$$p_x = \frac{c_x^T \ddot{\theta} + d_x}{c_c^T \ddot{\theta} + d_c}, \quad p_z = \frac{c_z^T \ddot{\theta} + d_z}{c_c^T \ddot{\theta} + d_c} \quad (7)$$

この式の係数は，以下のような方法で決定する．重心位置の加速度  $\ddot{\mathbf{s}}$  と重心の回りに発生しているモーメント  $\mathbf{n}$  は，モデルの各関節の角度，角速度，角加速度が決まれば動力学計算により求めることができる．

$$\ddot{\mathbf{s}} = \ddot{\mathbf{s}}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}), \quad \mathbf{n} = \mathbf{n}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) \quad (8)$$

ここで角度，角速度に関してはフレームごとに値が決まっているのでその値を代入し，角加速度に関しては次のようなただ 1 つの要素だけが 1 であるような  $\ddot{\theta}^i$  を順に代入してゆく．

$$\ddot{\theta}^i = (0, \dots, 0, \overset{i\text{-th}}{\underset{\vee}{1}}, 0, \dots) \quad (9)$$

すると  $\ddot{\mathbf{s}}$  や  $\mathbf{n}$  を 1 次式として書いたときの係数が次々と決定されてゆくから，それを代入することによって，式 (7) の係数も決定することができる．

#### 4. 人間動作の計測

本研究では，提案したモデルが人間の動きにどれだけ近いかを見るために，実際に人間の動作を計測した．計測に際しては，光学式モーションキャプチャ・システム (Vicon 社製) と床反力センサ (KISTLER Japan 社製) を用いた．前者は被験者の体の各部に貼り付けたマーカの三次元座標を取得するもので，これにより被験者の姿勢や重心位置などを求めることができる．後者は被験者が床から受ける反力の大きさと方向を取得するもので，ZMP や外力が加わっていないときの重心加速度などを求めることができる．

実験は 4 人の被験者に対して行ない，それぞれ重心付近に後から前に向かって大小様々な大きさの外乱を加えた．バランスの取りかたは，足を踏み出さずにバランスをとれるならばそうしても良いし，あるいは足を踏み出したければ踏み出して良いとして被験者にとって最も自然な動きをするように指示した．各被験者ごとに 10 回から 20 回の試行を行なった．

#### 5. 足を踏ん張るバランス保持

足を踏ん張るバランス保持は，足を地面に固定したまま動かさずにバランスを回復するための手法である．ここでは体の重心位置を速やかに安定位置に戻すことを考えて，動作が生成される．その際，姿勢そのものは考慮しないため，「一時的に姿勢そのものは目標とする直立姿勢から遠ざかるものの，バランスの回復には有効な動作」を生成することが可能になっている．

実際には，この手法は二次計画法による最適化計算によって実現されている．その目的関数は，各関節の角加速度の二乗和が最小になることと，重心加速度の垂直方向成分が大きな値であることである．式で書くと次のとおり．

$$\min w_1 \ddot{\theta}^T C_\theta \ddot{\theta} + w_2 \ddot{s}_y \quad (10)$$

ここで  $w_1$ ， $w_2$ ， $C_\theta$  は重み付けの係数である．第 1 項はできるだけ少ない力しか使わずに済むように動作生成するためのものであり，第 2 項はしゃがみ込んでしまわないようにするためのものである．

拘束条件は，以下の 3 つの条件から成り立っている．

- 重心加速度が適切な値である
- ZMP が足の支持面内に収まっている
- できるだけ左右対象に近い動きをする

第 1 の条件は，重心位置をより早く適切な位置に戻す

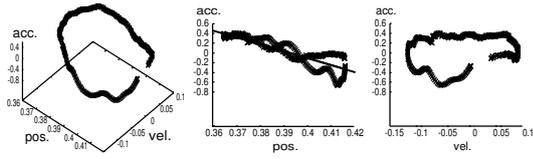


図3 水平方向の重心加速度（縦軸）と重心位置・重心速度（横軸）の関係  
Fig.3 Relationship between position, velocity, and acceleration of the CM

ためのものである．実際に人間のバランス保持動作をモーションキャプチャで取得したデータを見ると，水平方向の重心位置と重心速度，重心加速度の関係は，図3のようになっている．これをみると，重心加速度は重心位置と線型な関係にあり，重心速度とはあまり相関がないことが分かる．このグラフから読み取れる重心加速度と重心位置の関係は，重心が安定位置よりも速ざかれば遠ざかるほど大きな加速度で戻ろうとするというもので，次のように式で書くことができる．

$$\ddot{s}_z = k_s(s_z - s_{refz}) \quad (11)$$

ただし  $s$  は重心位置を表し， $s_{refz}$  は重心の目標位置の  $z$  座標を表す．ここで  $k_s$  は図3中央のグラフの傾きであるから，これを調べると表1のようになる．被験者1と4に関しては，外乱に対してほとんどの場合に足を踏み出すことによってバランスをとっており有意な数のデータが得られなかったため，全体の値を計算するときには除外してある．この結果から， $k_s$  の値は人によらずおよそ  $-11.6$  であるとみなせることが分かる．また垂直方向の重心加速度に関しては，モデルが空中に飛び上がらないための条件として次のような拘束を与える．

$$\ddot{s}_y > g_y \quad (12)$$

ただし  $g_y$  は重力加速度の鉛直成分である．前節で示したとおり  $\ddot{s}$  は  $\ddot{\theta}$  の1次式で書けるので，式(11)，(12)は  $\ddot{\theta}$  の1次式として表現することができる．

第2の条件は，動的バランスを保証するためのものである．足による支持面の領域  $D$  を  $N_b$  本の直線によって次のように記述することにする．

$$D = \{\alpha_i x_i + \beta_i z_i > 0 \mid i = 1, \dots, N_b\} \quad (13)$$

すると  $ZMP(p_x, 0, p_z)$  が支持面内にあるという条件は，

$$\alpha_i p_x + \beta_i p_z > 0 \quad (14)$$

Subject	$k_s$	
	avg	std
1	(-14.2)	—
2	-11.8	1.42
3	(-21.9)	—
4	-11.2	0.47
total	-11.6	1.16

表1 重心加速度と重心位置の関係を表す係数  $k_s$  の値  
Table 1 Coefficient  $k_s$  which determines relation between position and acceleration of the CM

と書けるが，これに式(7)を代入すると

$$(\alpha_i c_x + \beta_i c_z + \gamma_i c_c)^T \ddot{\theta} + (\alpha_i d_x + \beta_i d_z + \gamma_i d_c) < 0 \quad (15)$$

となり，「ZMPが支持面内に存在する」という条件が  $\ddot{\theta}$  の1次式で書けることが分かる．

第3の条件は，体の yaw 軸回転の動きを抑制して解の収束を安定にするためのものである．実際に人間においてもバランス保持において yaw 軸回転の動きは最小限に押えられており，この条件を加えることは本手法の目的に沿ったものであるといえる．この条件は，以下のようにして実現する．

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_{right} > \ddot{\theta}_{left} & (\theta_{right} < \theta_{left}) \\ \ddot{\theta}_{right} < \ddot{\theta}_{left} & (\theta_{right} > \theta_{left}) \end{cases} \quad (16)$$

ここで  $\theta_{right}, \theta_{left}$  は，それぞれ左右の膝と足首の関節を表している．

ところで，外乱が大きいと上の二次計画問題が解けない，すなわち拘束条件を満たすような  $\ddot{\theta}$  が見付からないことがある．この場合は，足を踏ん張る方法ではバランスが保持できないということなので，次節で述べる足を踏み出すバランス保持に処理を切り替える．

## 6. 足を踏み出す場合のバランス保持

足を踏み出す動作は，3段階の処理によって生成される．まず倒立振子に基づくモデルによって重心の軌跡を決定し，続いて逆運動学問題を解くことによって下半身の動きを決定し，最後に動的バランスを考慮しながら全身の動作を決定する．

### 6.1 重心軌跡の決定

足の踏み出しについて，図4のようなモデルを考える．左は足を踏み出してから遊脚が接地するまでの間のモデルであり，右は遊脚が接地した後の状態を表すモデルである．前者の状態では，支持脚の支点到に回転

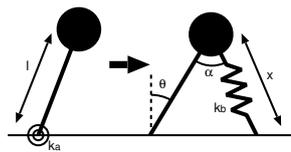


図 4 足の踏み出しのモデル化 (接地前と後)

Fig. 4 Modeling of stepping (before and after the foot contact)

ばね (ばね定数  $k_a$ ) を考える . これにより倒れそうになる体を支えようとする力を発生させられる . 後者の状態では , 遊脚をばね (ばね定数  $k_b$ ) とみなすようにする . これにより接地時の衝撃をやわらかく吸収しつつ重心を支えられるようになる . このときの接地点と重心の距離を  $x$  , 脚が開いている角度を  $\alpha$  と表す . なお後者の状態において , 遊脚のばねの自然長 ( $x_c$ ) は遊脚が接地した瞬間の重心と接地点の長さとする .

このようなモデルにより動作を生成するために ,  $k_a$  ,  $k_b$  ,  $x_c$  などのいくつかのパラメタの値を決めておく必要がある . そこで以下のようにモーションキャプチャによって取得された動作を元にして , 上記のモデルが現実をよく表していることを確認しつつ , 必要なパラメタの値を決定した .

まず  $k_a$  について調べると , 片足支持の状態では倒立振り子モデルの運動方程式は以下ようになる .

$$ml^2\ddot{\theta} = mlg \sin \theta - k_a \theta \quad (17)$$

この式に基いて実際の人間の動きから  $k_a$  を計算すると , 表 2 のようになった . ここで得られた  $k_a$  の値はひじょうに小さいため , 実際には  $k_a = 0$  と見做すことができる .

次に  $x_c$  について調べると , 遊脚が接地したときの足の開き具合  $\alpha_c$  とその時の倒立振り子の傾き  $\theta_c$  から

$$x_c = \frac{\cos \theta_c}{\cos(\theta_c - \alpha_c)} l \quad (18)$$

と書けるから ,  $\alpha_c$  と  $\theta_c$  の関係が分かれば  $x_c$  が計算できる . そこでこれを調べると表 2 のようになり ,  $\alpha_c/\theta_c$  の値が被験者によらずに一定値 1.20 に収束していることが分かる .

また  $k_b$  の値について調べると , 遊脚の接地点とモデルの重心との距離  $x$  と , 接地した足にかかる床反力  $f_g$  の関係は ,

$$f_g = k_b(x - x_c) \quad (19)$$

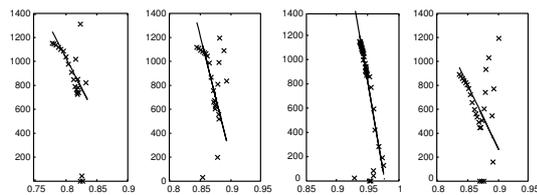


図 5 各被験者の接地点から重心までの距離 (横軸) と , 接地した足にかかる床反力 (縦軸) のプロット

Fig. 5 Distance between a foot contact point and the CM (the horizontal axis) and the ground reaction (the vertical axis)

Subject	$k_a$		$\alpha_c/\theta_c$		$k_b$	
	avg	std	avg	std	avg	std
1	79.9	184.4	1.29	0.215	25100	5400
2	101.8	273.6	1.07	0.221	17900	7000
3	-83.5	560.7	1.30	0.167	12700	4200
4	-96.6	264.9	1.16	0.300	13500	4300
total	15.8	356.3	1.20	0.256	—	—

表 2 実測データから得られたパラメタ (平均と標準偏差)

Table 2 Parameters from captured data

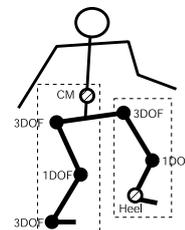


図 6 逆運動学による下半身の姿勢生成

Fig. 6 Generation of a posture of the lower body by IK

と線型な関係として表せる . 実際の人間の動きにおける  $x$  ,  $f_g$  はモーションキャプチャとフォースプレートから得られるので , この 2 つの値をプロットすると図 5 のように確かに線型な関係が見てとれる .  $k_b$  はその傾きであるから , それを計算すると表 2 のようになる . この結果を見ると ,  $k_b$  の値は特定の被験者について見るとほぼ同じ値に収束しているが , その値は被験者ごとに個人差があることが分かる .

## 6.2 逆運動学による下半身の動作生成

本節では , 前節で得られた重心の動きを元にして , 逆運動学を用いて下半身の踏み出し動作を生成する処理について述べる . 逆運動学はまず重心について行い , 続いて足先 (踵) について行う . 前者においては支持脚の足を支点とした重心までのリンク構造を考え , 後者においては腰を支点として遊脚の足首までのリンク構造を考えた (図 6) .

逆運動学の解法は以下のとおりである．解きたい逆運動学問題に関係する関節の角度を  $\theta = (\theta_0, \dots, \theta_n)^T$  とする．3自由度の関節については，オイラー角を用いて角度を表すこととする．各自由度ごとの各関節の位置と回転軸の向きは  $p_i, z_i$  とし，リンクの終端（重心または遊脚の踵）の位置と角度を  $r = (P^T \Omega^T)^T$  とする．このベクトルは，位置3自由度・角度3自由度で6次元のベクトルとなる．このとき， $r$  と  $\theta$  の関係を表すヤコビ行列は，次のように書ける．

$$J = \begin{pmatrix} z_0 \times (P - p_0) & \cdots & z_i \times (P - p_i) & \cdots \\ z_0 & \cdots & z_i & \cdots \end{pmatrix} \quad (20)$$

逆運動学問題は，ヤコビ行列を用いた反復計算により解かれる．まず直前のフレームの姿勢を初期姿勢として，リンクの終端位置と目標とするリンクの終端位置とのずれ  $\Delta r$  を計算する．ずれの絶対値  $\|\Delta r\|$  が閾値より大きかった場合，ヤコビ行列の擬似逆行列  $J^T(JJ^T)^{-1}$  を用いて

$$\Delta \theta = J^T(JJ^T)^{-1} \Delta r \quad (21)$$

を計算し，この  $\Delta \theta$  をモデルの関節角度に加える．こうして得られた新たな姿勢について再び  $\Delta r$  を計算し，ずれが大きければ擬似逆行列を用いて  $\Delta \theta$  を求めてモデルの関節角度に加える．これを繰り返すことにより逆運動学問題が解かれ，倒立振子の重心位置と足先位置を満すような人体モデルの姿勢が得られる．

### 6.3 二次計画法による全身動作の生成

ここまでで下半身の姿勢は決定したが，上半身の姿勢に関してはいまだ冗長性が残っている．そこで最後にこの冗長性に注目して，力学的整合性を満した全身動作を生成する．この動作生成には二次計画法を用いる．変数は上半身の関節の角加速度  $\ddot{\theta}_{\text{upper}}$  である．3自由度の関節にはオイラー角を用いる．二次計画法問題の目的関数は，

$$\min \ddot{\theta}_{\text{upper}}^T C_{\text{upper}} \ddot{\theta}_{\text{upper}}, \quad (22)$$

とする．ここで  $C_{\text{upper}}$  は重み付けのための定数である．この目的関数は，足を踏ん張ってバランスを保持する場合の二次計画法問題と同じく，できるだけ少ない力しか使わずにバランスを保持する動作を生成するためのものである．拘束条件は，

- ZMP が支持面内にあること

だけである．この条件によって動的バランスが確保される．この条件が変数  $\ddot{\theta}_{\text{upper}}$  に関する線型な式として書けることは，足を踏ん張るバランス保持の場合で示したとおりである．

## 7. 実験

前節までで述べたアルゴリズムに基づいて，コンピュータ上でシミュレーションを行った．計算はタイムステップを 0.01 秒として行った．また人間の反応速度を考慮して，力が加わり始めてから 0.2 秒後からアルゴリズムの適用を開始した．図 7-10 は，力が加わり始めてからの 0.08 秒ごとのモデルの様子を示したものである．図中で棒として示してあるのは，踏み出し動作生成に用いた倒立振子の様子である．

図 7 は，モデルの重心付近に後から 300N の力を 0.1 秒間だけ加えた場合である．ここでは足を踏ん張るアルゴリズムが用いられており，腕を回しながら全体のバランスをとることで，足を動かさずにバランスを保持することに成功している．

図 8 は，加える力は前とまったく同じだが，足を踏ん張るアルゴリズムを用いずに，PD 制御からそのまま足の踏み出しアルゴリズムに移行させた場合である．このように足を踏み出すタイミングを変化させることによって，少しの外乱でも足を踏み出すことで全体として小さな動きでバランスを回復させたり，逆にできるだけ足の位置を動かさないことを優先してバランスをとらせたりと，状況に応じて様々なバランス回復動作を作り出すことが可能になる．

図 9 は，力を加える方向を変えた場合である．ここでは前から 200N の力を 0.1 秒間加えている．後から力を加えた場合と同じように腕を回しながらバランスを保持する動作が生成されるが，腕を回す方向は逆向きになっている．

図 10 は，モデルの重心付近に後から 300N の力を 0.4 秒間加えた時の結果である．初めのうちは足を踏ん張るバランス保持によって腕を回しながらバランスを保とうとしているが，外乱が大きいためそれではバランスを保つことができなくなり，途中から足を踏み出すバランス保持に移行している様子が観察できる．

## 8. まとめ

本論文では，人型モデルに加えられた大きな外乱に対して，全身動作による適切なバランス保持動作を生成する手法について提案した．本手法では人間のバラ

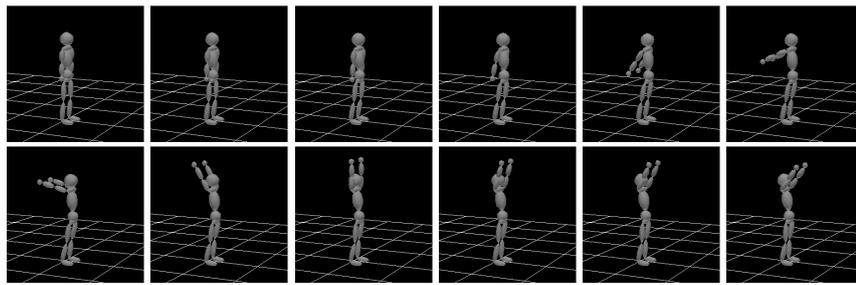


図 7 足を踏ん張ってバランスをとる動作 (後から 300N の力を 0.1 秒間)  
Fig. 7 Balance maintenance by keeping legs (300N, 0.1sec)

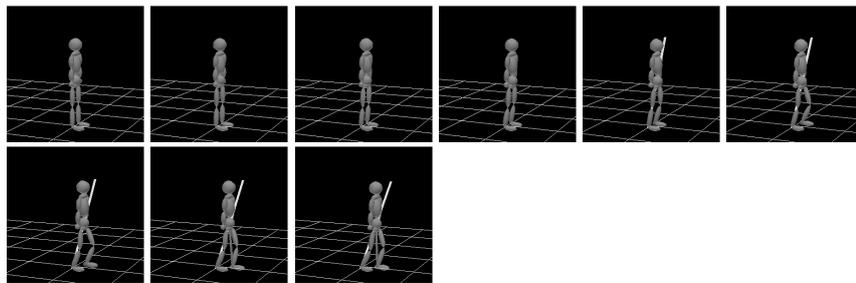


図 8 足を踏み出して転倒を防ぐ動作 (後から 300N の力を 0.1 秒間)  
Fig. 8 Balance maintenance by stepping (300N, 0.1sec)

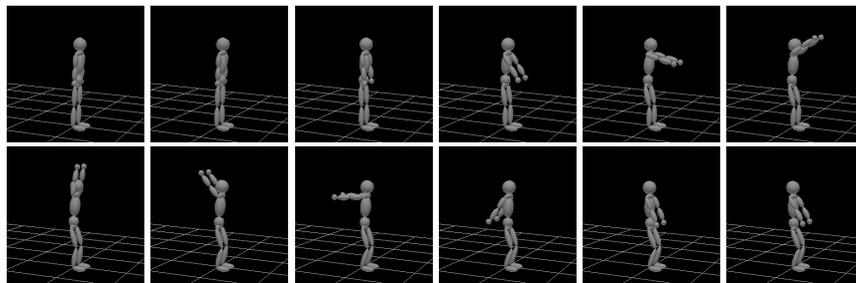


図 9 足を踏ん張ってバランスをとる動作 (前から 200N の力を 0.1 秒間)  
Fig. 9 Balance maintenance by keeping legs (300N, 0.1sec)

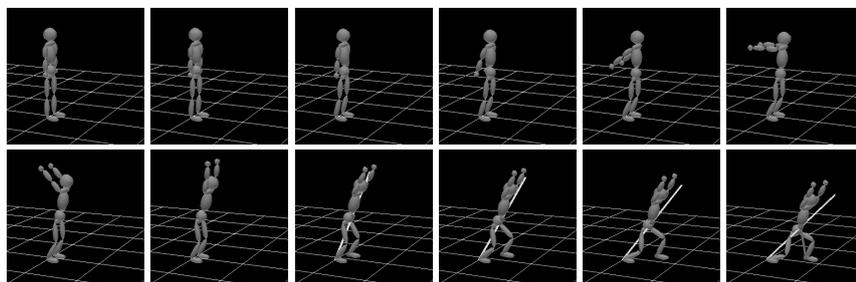


図 10 初めは足を踏ん張ってバランスをとろうとするが、最終的には耐え切れずに足を踏み出す動作 (後から 300N の力を 0.4 秒間)  
Fig. 10 First, the method by keeping legs is used, but finally the method by stepping is used because of too large perturbation. (300N, 0.4sec)

ンス保持動作を「足を踏ん張るバランス保持」と「足を踏み出すバランス保持」に分けてそれぞれモデル化した。前者では重心位置を適切に制御することを主眼とした最適化計算によってモデル化し、後者では倒立振り子によって重心や足先の軌跡の概略を決定したあと、逆運動学や二次計画法を用いて最適な関節角加速度を計算することによってモデル化した。この際、実際に人間がバランスを保とうとする動作をモーションキャプチャで取得し、それを元にモデルの正当性を検証し、また動作生成に用いるパラメタの抽出も行なった。

謝辞

モーションキャプチャおよび床反力センサの使用にあたっては、会津大学の施設を利用させていただいた。深く感謝する。なお本研究は、独立行政法人科学技術振興機構・池内 CREST プロジェクトの補助を受けている。

## 文 献

- [1] M. Vukobratovic, B. Borovac, D. Surla, and D. Stokic, "Scientific Fundamentals of Robotics 7. Biped Locomotion: Dynamics Stability, Control and Application", SpringerVerlag, New York, 1990.
- [2] S. Tak, O.-Y. Song, and H.-S. Ko, "Motion Balance Filtering", Computer Graphics Forum, 19(3):435-446, 2000.
- [3] K. Yamane and Y. Nakamura, "Dynamics Filter — Concept and Implementation of On-Line Motion Generator for Human Figures", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, U.S.A., April 2000, pp.688-695.
- [4] S. Kudoh, T. Komura, and K. Ikeuchi, "The Dynamic Postural Adjustment with the Quadratic Programming Method" Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2563-2568, 2002
- [5] C. K. Liu and Z. Popvić, "Synthesis of Complex Dynamic Character Motion from Simple Animations", ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH02), 21(3):408-416, 2002
- [6] K. Nishiwaki, S. Kagami, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Online Generation of Humanoid Walking Motion based on a Fast Generation Method of Motion Pattern that Follows Desired ZMP", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2684-2689, 2002
- [7] V. B. Zordan and J. K. Hodgins, "Motion capture-driven simulations that hit and react", ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, 2002.
- [8] A. C. Fang and N. S. Pollard, "Efficient Synthesis of Valid Human Motion", ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH03), 22(3):417-426, 2003
- [9] R. Kurazume, T. Hasegawa, and K. Yoneda, "The Sway Compensation Trajectory for a Biped Robot", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.925-931, 2003
- [10] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Resolved Momentum Control: Humanoid Motion Planning based on the Linear and Angular Momentum", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1644-1650, 2003
- [11] K. Fujiwara, F. Kanehiro, K. Saito, S. Kajita, K. Harada, and H. Hirukawa "Falling Motion Control of a Humanoid Robot Trained by Virtual Supplementary Tests," Proc. of IEEE Intel. Conf. on Robotics and Automation, pp.1077-1082, 2004

(平成 xx 年 xx 月 xx 日受付)

### 工藤 俊亮

2000 年東京大学理学部卒業，2002 年東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻修士課程修了．2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科 博士課程終了．博士（情報理工学）．人間の動き表現の研究に従事．

### 幸村 琢

2000 年東京大学理学系研究科情報科学専攻修了．理学博士．2000 年理化学研究所基礎科学特別研究員．2002 年より現在まで City University of Hong Kong, Department of Computer Engineering and Information Technology, Assistant Professor．人体動作解析，人体動作アニメーション生成，バイオメカニクス，CG の研究に従事．IEEE，ACM 各会員．

### 池内 克史（正員）

1973 年京都大学工学部機械工学科卒業．1978 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了．MIT 人工知能研究所，電総研，CMU 計算機科学科を経て，1996 年より東京大学生産技術研究所教授．2000 年より東京大学大学院情報学環教授兼任．人間の視覚機能，明るさ解析，物体認識，人間行動観察学習ロボット，高度交通システムなどの研究に従事．工学博士．D.Marr 賞（ICCV:1990 年），IEEE 優秀論文賞（CVPR:1991 年），最多引用論文賞（AI Journal:1992 年）Fu 記念優秀論文賞（IEEE Trans. R&A，1998 年）等受賞．IEEE Distinguished Lecturer（SPS 2000 - 2001，CS 2004 - 2006），IEEE Fellow．

**Abstract** Recently, many studies of generating dynamically consistent motion of human-like models have been made in several areas. A study of balance maintenance is one of the most important topics in these areas. In this paper, we describe how to model motion of balance maintenance by humans against sudden and large perturbation, along with a method for generating balance maintenance motion by a human-like model. A motion capturing system and force plates are used to obtain human motion, and the motion is used to confirm the proposed model and to determine parameters of the model for generating motion.

**Key words** balance maintenance, motion capture, motion generation