

人間動作の観察に基づく全身動作を用いたバランス保持のモデル化

工藤 俊亮[†] 幸村 琢^{††} 池内 克史[†]

[†] 東京大学

^{††} 香港城市大学

E-mail: [†]{kudoh,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp, ^{††}itaku@cityu.edu.hk

あらまし 近年、力学的に正しい人型モデルの動作を生成することに対する需要が高まってきている。中でも外力の作用などの外乱に対してのバランス保持は、現実的な状況下での動作を考える上で避けることのできない課題といえる。突発的な外乱に対して、人間は腰を大きく屈める、腕をぐるぐる回す、足を踏み出すなどの大きな全身動作を自発的に用いて、きわめて質の高いバランス保持動作を実現している。我々はこれまでの研究で、人間のバランス保持動作を観察・モデル化し、様々な大きさの外乱に対して適切な全身動作を用いてバランスを保持する動作を生成する手法を提案してきた。本論文では、この手法により生成された動作を人間の動作と比較し、手法の有効性について議論した。その結果、本手法が単に人間の動作の外見上の特徴を再現できているばかりでなく、定量的な力学的特徴をも再現できていることが分かった。

キーワード バランス保持, 動作生成, モーションキャプチャ, 最適化計算

Modeling Balance Maintenance with Whole-body Motion Based on Observation of Human Motion

Shunsuke KUDOH[†], Taku KOMURA^{††}, and Katsushi IKEUCHI[†]

[†] The University of Tokyo

^{††} City University of Hong Kong

E-mail: [†]{kudoh,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp, ^{††}itaku@cityu.edu.hk

Abstract Recently, interest in generating dynamically consistent motion of human-like characters has been increasing in various areas. In particular, balance maintenance against perturbation caused by external force is an indispensable problem when we consider motion under a practical situation. Humans maintain their balance against sudden perturbation by large-scale whole-body motion, such as bending down, rotating their arms, squatting down, taking a step, and so on. We have proposed a method to generate motion of maintaining balance with an appropriate whole-body motion against various perturbation by observing the human motion and modeling it. In this paper, we compare the generated motion by the method with human motion, and discuss the validity of our method. As the result, we can see that our method represents not only apparent characteristics of human motion but also dynamics characteristics of it.

Key words Balance maintenance, motion generation, motion-capturing system, optimization

1. はじめに

近年、力学的に正しい人型モデルの動作を生成することに対する需要が高まってきている。コンピュータ・グラフィクスの分野ではリアルな三次元アニメーションへの需要の高まりから、正しい人間の動作を簡単に生成する手法の開発への取り組みがなされている。ロボティクスの分野では、ヒューマノイド・ロボットを動作させるために、厳密に力学的整合性のとれた動き

を生成することは必要不可欠なものとなっている。

人型モデルの動作生成に関する研究の中で、バランスの保持に関する研究はもっとも重要なトピックの内の1つである。2本足で体を支える人型モデルは、支持面の面積が小さく重心が高いためにバランスを崩しやすく、適切な制御手法なしでは安定的に動作することは不可能だからである。そのためロボティクスやコンピュータ・グラフィクスの分野などを中心に、バランスのとれた動きを生成する手法に関する研究が数多くなされ

てきた。

中でも外力の作用などの外乱に対してのバランス保持は、人型モデルの動作生成にとって避けることのできない課題といえる。なぜなら、外部環境とのインタラクションを上手く取り扱うことができないとしたら、生成可能な動作の幅が著しく狭められることになるからである。加えられた外乱に対して適切な動作を生成する研究としては、コンピュータ・グラフィクスの分野では尾下らの研究 [1] や Zordan らの研究 [2] などがあり、ロボティクスの分野では杉原らの研究 [3] や藤原らの研究 [4], [5] などがある。

ところで、突発的な外乱に対して最も柔軟かつ有効なバランス保持を実現しているのは、他ならぬ人間自身であると言える。実際、人間は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、足を踏み出すなどの大きな全身動作を自発的に用いて、きわめて質の高いバランス保持動作を実現している。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。

我々はこれまでの研究で、上に挙げたような人間のバランス保持動作を観察、基本的なパラメータを抽出し、これを用いて比較的単純なモデルを構築することで、様々な大きさの外乱に対して適切な全身動作を用いてバランスを保持する動作を生成する手法を提案してきた [6], [7]。そこでは、まず外乱が加えられたときの人間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に対して計測した。その結果を重心、ゼロモーメント・ポイント (ZMP) などのマクロな物理量に注目して解析・抽象化し、それに基づいてバランス保持モデルを構築した。また、踏み出した脚をばねに見立てた時のばね定数など個人差のあるパラメータも同時に抽出した。これらのモデルとパラメータを用いて最適化計算を行うことにより、人間が行うような全身動作によるバランス保持動作が生成される。この際、足を踏み出さないで踏ん張るモードと、より大きな外乱に対処するため足を踏み出すモードの 2 つのモードを用意した。

本論文では、上の手法により生成された動作を人間の動作と比較し、手法の有効性について議論する。まず生成された動作の外見的特徴を人間の動作と比較する。また定量的な評価として、足を踏み出すことなくバランスを保持できる外乱の大きさに関して、提案手法と実際の人間に外乱を加えた結果とで定量的な比較を行った。その結果、本手法が人間のバランス保持動作に見られる特徴を、外見側面のみならず力学的側面からもよく再現していることが確認された。さらに、モデルのパラメータを変化させた場合の生成される動作への影響も調べ、本手法における各種パラメータの役割についても議論した。

本論文の構成は、まず次節で我々が提案したバランス保持モデルについて概説する。続いてそのモデルに基づいて様々な外乱に対するバランス保持動作を生成し、その結果と人間の動作との比較を行う。

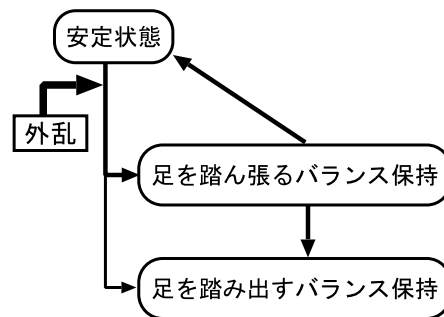


図 1 バランス制御の概略

Fig.1 Overview of the system

2. バランス保持モデル

本節では、前に提案したバランス保持モデルについて概要を述べる。より詳細な手法の説明は [6], [7] に示されている。図 1 にバランス制御全体の概略を示す。ここに示されるように、全身を用いたバランス保持は 2 つのモードから成り立っている。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である。

人型キャラクタに外乱が加えられると、通常はまず足を踏ん張るバランス保持が適用される。これは足を動かさず全身を動かしてバランスを保持するための手法である。これでも外乱を処理しきれなかった場合には、さらに足を踏み出すバランス保持が適用される。これは足を 1 歩踏み出すことによって転倒を防ぐための手法である。動作生成は時系列にそってフレーム毎にローカルに行われる。

2.1 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と考えて、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安定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。

2.1.1 人間の動作からのパラメータ抽出

本研究では、人間がバランスをとる動作を取得するために、光学式モーションキャプチャ (Vicon Motion Systems 社製) と床反力センサ (KISTLER Japan 社製) を使用した。実験として、4 人の被験者の重心付近に前方向への様々な大きさの力を加え、その動作を取得した。被験者らは外乱が小さい時には足を踏み出さずにバランスを保持し、外乱が大きくなると 1 歩踏み出すことによってバランスを保持した。足を踏み出さずにバランスを保持した場合の動作は足を踏ん張るバランス保持のモデル化に用い、足を踏み出した場合の動作は足を踏み出すバランス保持のモデル化に用いる。

足を踏ん張るバランス保持をモデル化するために、ここでは重心の動きに注目して人間の動作を観察する。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 2 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

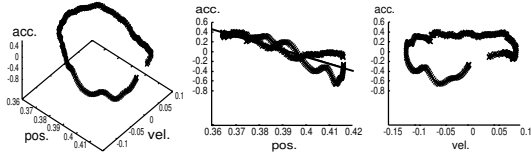


図2 水平方向の重心加速度（縦軸）と重心位置・重心速度（横軸）
Fig. 2 Position, velocity, and acceleration of the CM

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

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遠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．

$$\ddot{s}_z = k_s(s_z - s_{refz}) \quad (1)$$

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2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．

2.1.2 最適化計算による動作生成

この関係を用いて，足を踏ん張るバランス保持動作を生成する．実際には，キャラクタの全身動作は二次計画法による最適化計算によって計算される．二次計画法における変数は，関節の角加速度である．フレーム毎に動作生成する本アルゴリズムでは関節角度と角速度は初期条件として決っており，自由に変化させられるのは関節角加速度だけだからである．

全身動作を生成するために，次のような二次計画問題を立てる．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である．これ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る．

拘束条件は，以下の3つの条件を採用する．

- 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ためのものである．ここで前節で求めた重心位置と重心加速度の関係（式(1)）を用いる．

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．ZMP とは Vukobratovic らによって提唱された概念で [8], [9],

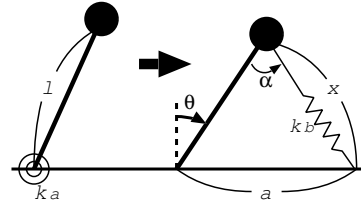


図3 足の踏み出しのモデル化（接地前と後）

Fig. 3 Modeling of stepping (before and after the foot contact)

「地面から受ける力によって発生するモーメントの水平成分が0になる点」であり，力学的に整合性のとれた動きでは，ZMP は常に足の支持面内に存在している．

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．

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すような θ 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．

2.2 足を踏み出すバランス保持

足を踏み出すバランス保持動作は，以下のように生成される．初めにキャプチャされた人間の動作から得られたパラメタに基づいて，倒立振り子モデル (IPM: Inverted Pendulum Model) を用いて重心の軌跡を決定する．続いてこの軌跡を元に逆運動学 (IK: Inverse Kinematics) 問題を解くことによって，下半身の動作を生成する．この時点ではまだ動作の動力的整合性は考慮されておらず，最後に最適化計算を用いた動作生成によって上半身の動作を決定することによって，動力的整合性のとれた全身動作を生成する．

2.2.1 IPM による踏み出しのモデル化

IPM を用いて足の踏み出しをモデル化するにあたって，図3のような2種類の状態を考えることにする．1つは遊脚が接地する前の状態で，もう1つは遊脚が接地した後の状態である．前者の状態では，支持脚の支点到回転ばね（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．後者の遊脚のばねの自然長は，遊脚が接地した瞬間の重心と接地点の長さとする．これら2つの状態での IPM の運動方程式は，次のようになる．

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

$$ml^2\ddot{\theta} = mlg \sin \theta - k_b l(x_c - x) \quad (\text{接地後}) \quad (3)$$

2.2.2 人間の動作からのパラメタ抽出

このようなモデルを考えるとき，バネ定数 k_a, k_b などの定数が必要となる．これらのパラメタは，キャプチャされた人間の

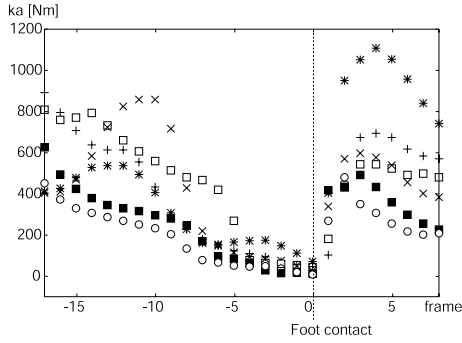


図4 モーションキャプチャを用いて得られた動きから計算した k_a
Fig. 4 Value of k_a calculated from the captured motion

動作から抽出される。

まずバネ定数 k_a について考える。 k_a の値は、キャプチャした人間の動作を式 (2) に代入することで計算することができる。ある被験者について計算された k_a の値をグラフにすると、図4のようになった。ここで、フレームレートは 30fps である。このグラフでは、0 フレーム目で遊脚が地面に接触するように、横軸の目盛を揃えてある。その手前の 6–8 フレームが遊脚を踏み出して片足支持になっている部分であり、この部分で k_a の値がひじょうに小さくなっている様子が観察できる。他の被験者についても同様の現象が観察でき、被験者ごとに k_a の値の平均と標準偏差を計算すると表6のようになった。このことから、足を踏み出している最中は k_a が 0 になるとみなせることが分かる。また接地するまでの時間はどの場合もおよそ 8 フレーム分であるから、 $t_{\text{step}} = 250\text{ms}$ であるとみなせることが分かる。

接地した瞬間の足の開き具合については、体の傾きと脚の開き具合の比 α_c/θ_c を調べると表6のようになり、この値が 1.2 にひじょうに良く収束していることが分る。

接地した足のバネ定数 k_b については、足をバネとみなす仮定が正しいとすれば、接地点から重心までの距離 x と床反力 f_g の間に次のような式が成り立つ。

$$f_g = k_b(x - x_c) \quad (4)$$

実際、キャプチャした人間の動作から得られた x と f_g をプロットすると図5のように線型な関係が見られ、上式の関係が成り立っていることが分かる。そこでこの式から k_b を求めると表6のようになる。この結果から、この値には個人差が存在することが分かる。本研究のシミュレーションでは、平均的な値として $k_b = 1500$ を用いることにする。

2.2.3 IKによる人体モデルの動作生成

前節で求めたパラメタを利用すると、式 (2)(3) から IPM の動きが計算できる。これをもとに、IK を用いて踏み出し動作を生成する。IK はまず重心について行い、続いて足先について行う。足先の軌跡については、初期姿勢として与えられる踏み出し始めの位置と、IPM によって得られる接地位置との間を B-spline 曲線で結んだものを用いた。重心位置については、支持脚の脚を支点とした重心までのリンク構造を考え、足については、腰を支点として遊脚の踵までのリンク構造を考えた(図

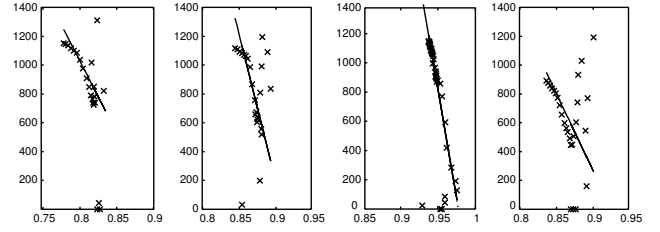


図5 x (重心と接地点の距離) と f_g (接地した足に加わる床反力) の関係: グラフ中の直線は最小二乗法により求めた回帰直線
Fig. 5 Relationship between x (distance between a foot contact point and CM) and f_g (the ground reaction force acting on the swing foot). Lines in the graphs are regression lines.

Subject	k_a		α_c/θ_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	—	—

図6 Parameters from captured data: The second, third, and fourth columns show parameters k_a , α_c/θ_c , k_b , respectively. With regard to k_b , the total is not calculated because individual variation is observed.

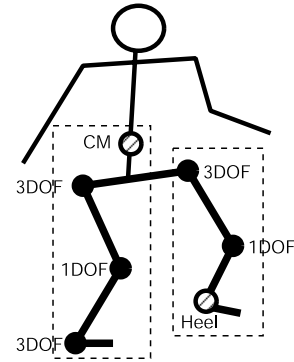


図7 IKによる姿勢生成: 始めに重心位置に対するIKを解き、続いて遊脚の踵に対するIKを解く。

Fig. 7 Generation of the posture by IK: IK for the CM is solved first, and then IK for the foot is solved.

7)。

IKの解法は以下のとおりである。解きたいIK問題に関する関節の角度を $\theta = (\theta_0, \dots, \theta_n)^T$ 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 とする。また、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 θ の関係を表すヤコビ行列は、次のように書ける。

$$J = \begin{pmatrix} z_0 \times (P - p_0) & \cdots & z_i \times (P - p_i) & \cdots \\ z_0 & \cdots & z_i & \cdots \end{pmatrix} \quad (5)$$

この行列の擬似逆行列 $J^T(JJ^T)^{-1}$ を繰り返し用いることで、

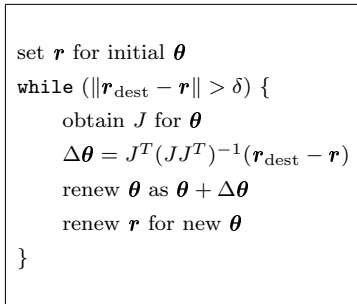


図 8 IK の解く処理の流れ
Fig. 8 Flowchart of solving IK

IPM 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。繰り返し計算の初期値には、直前のフレームの姿勢を用いる。また繰り返し計算の手順は、図 8 に示した通りに行った。

2.2.4 二次計画法による力学的に正しい動作の生成

前節では IK を用いて人型モデルの動きを求めたが、この段階では上半身の姿勢に冗長性が残っており、また力学的なバランスも考慮されていなかった。本節では、上半身に残された姿勢の冗長性に注目して、前節で求めた動きに力学的に整合性をもたせる方法について述べる。

今、下半身の関節については前節で求めたとおり動きが決定しているので、上半身の関節角加速度を変化させることによってバランスをとることを考える。すなわち「ZMP を支持足の範囲内に納めるような関節角加速度を求める」二次計画問題を考える。目的関数は足を踏ん張るバランス保持と同様に、各関節の角加速度の 2 乗和が最小になるようにすればよい。拘束条件は、下半身の動作が IK により決定しているので、ZMP が支持面内に存在するというものだけでよい。

3. 実 験

本節では、前節で述べたモデルを用いて実際にバランス保持動作を生成し、その結果と人間の動作を比較することで本手法の有効性を議論する。まず始めに外見上の特徴について比較し、続いて力学的な特徴について定量的な比較を行う。最後にモデルのパラメタが生成される動作に与える影響を吟味する。

生成された動作と人間の動作の外見上の特徴を比較したのが、図 12 から図 14 である。それぞれの表で、上段が本モデルを用いて生成した動作、下段がモーションキャプチャで取得した人間の動作、中段がその人間の動作の特徴を分かりやすく図示したものである。

図 12 は、後から 300N の力を 0.1 秒間加えた場合である。ここでは足を踏ん張るバランス保持によって、バランスが保たれている。人間の動作を観察すると、以下のような動作を行っていること。すなわち、まず力が加えられると体が前に傾いてゆくの、その運動を打ち消すために腕を前方向に回し出す。続いて膝を伸ばし背中を屈めることで、腰の位置を後に引き戻す。こうして重心を安定な位置に効果的に戻している。生成された動作を見ると、たしかにこれらの特徴が再現されていることが

分かる。

図 13 は、後から 300N の力を 0.4 秒間加えた場合である。この場合、始めは足を踏ん張るバランス保持によってバランスを保とうとするが、外乱が大き過ぎてバランスを上手く保持することができずに足を踏み出すという動作が生成される。人間の動作を観察すると、前の場合と同じように、始めは体が前に倒れてゆくのを防ぐために腕を回し、続いて背中を屈めることで腰の位置を引き戻そうとしている。しかし外乱が大き過ぎるため十分に腰の位置を引き戻すことができず、途中から足を踏み出すことで転倒を防いでいる。この場合も、生成された動作にこれらの特徴が再現されていることが見てとれる。

図 14 は、歩いている最中のキャラクタに対して後から 300N の力を 0.4 秒間加えた場合である。ここでは、バランス保持モデルを適用する際の初期姿勢および関節の初期角速度として、モーションキャプチャで取得された人間の歩行動作から得られた値を用いた。人間の動作を観察すると、歩行中に外乱が加えられると、もともと遊脚として踏み出そうとしていた足を通常の歩行に比べて大きく踏み出し転倒を防ごうとしていることが見てとれる。同時に、踏み出した足と反対側の肩と腕を前に出すことによって、左右方向のバランスをとっていることも分かる。これらの特徴は、本手法によって生成された動作にも再現されている。

以上の比較によって、人間が行う全身動作を用いたバランス保持の特徴が本手法によってうまく再現されるということが分かった。ここで重要なのは、腕を回したり腰を屈めたりといった動作そのものは、本モデルの中にあらかじめ組込まれたものではないということである。人間の動作から得られた単純な制御構造と最適化計算のみから人間の行う複雑な全身動作が最適解として再現できるということが、本手法の大きな特徴となっている。

続いて、力学的な特徴に関して比較を行う。ここでは、足を踏み出さずに対処可能な外乱の大きさを指標として、本手法で生成された動作を人間の動作と比較することにする。表 2 は、人間に加えた外乱の大きさ（力積）と、足を踏み出さずにバランスを保持できたかどうかの関係を表にしたものである。外乱は、人間の後側から加えた場合と前側から加えた場合の、2 つの場合を実験した。被験者には、できるだけ足を踏み出さずにバランスをとるように指示した。また、ストレイン・ゲージを使用して、加えた力積の大きさを正確に測定した。この表から、後側から外乱が加えられた場合は 40Ns 前後、前側から外乱が加えられた場合には 35Ns 前後が人間が足を踏み出さずにバランスを保持できる限界であると読み取れる。

ただし前側から外乱を加えた場合に、1 例だけ 44.5Ns の大きな外乱が加えられているにもかかわらず足を踏み出さずにバランスを保持できている例がみられる。これは被験者が外乱の加わる一瞬前に、重心を前に移動させる対応動作をとってしまったためである。

一方、本手法に基づくシミュレーションにおいては、加える外乱の大きさを徐々に大きくしてゆくと、外乱を後側から加えた

Trial	Impulse (Ns)	Step	Trial	Impulse (Ns)	Step
1	29.4	no step	1	29.1	no step
2	35.9	no step	2	39.0	step
3	54.7	step	3	34.0	no step
4	43.5	step	4	44.5	no step
5	38.4	no step	5	47.8	step
			6	36.7	step

表 2 外乱（後から:左表, 前から:右表）と足の踏み出しの関係
Table 2 Relationship between perturbations and stepping

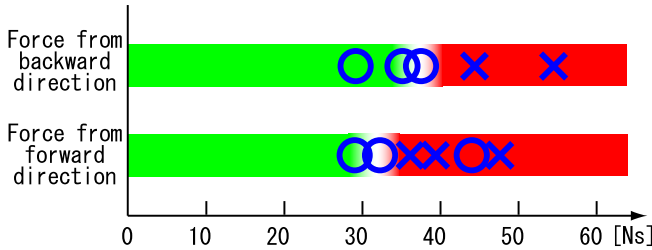


図 9 足を踏み出さずに対処可能な外乱の大きさの比較

Fig.9 Comparison of the magnitude of impulse which can be handled without stepping

場合は 35Ns 付近から解が安定して求まらなくなり, 40Ns では足を踏み出す以外の解が見付からなくなる. 外乱を前側から加えた場合には, 30Ns 付近から解が安定して求まらなくなる.

以上の関係を分かりやすく図にしたものが, 図 9 である. 上側の帯は後側から外乱を加えた場合を, 下側の帯は前側から外乱を加えた場合を表している. 横軸は, 加えた力積の大きさを表している. 緑の部分は本手法で安定して足を踏み出さない解が得られる領域, 赤の部分は足を踏み出さない解が見付からない領域である. 図中のマーク (○ および ×) は, それぞれ人間に外乱を加えた実験で足を踏み出さずにバランスを保持できた場合と, 足を踏み出してしまった場合を表している. この図をみると, 足を踏み出さずに対処可能な外乱の大きさに関しても, 本手法のモデルと人間とで一致が見られる.

最後に, 本手法で用いるパラメタについて実験を行う. 本手法で用いるパラメタのほとんど全ては, モーションキャプチャデータから抽出されたものであり, その値はできるだけ人間のものに近くなるように設定されている. しかし例外として, 二次計画法の目的関数に用いられる A_θ については, これが生成される動作に大きな影響を及ぼすパラメタであるにもかかわらず, 人間の動作から抽出されるわけではない. これまでのシミュレーションにおいて, この値は経験的に定められた値を用いていた. ここでは, このパラメタの値を変化させながら動作を生成し, このパラメタが生成される動作に及ぼす影響について吟味する.

図 10 は, 実際に A_θ の値を変化させた場合の生成された動作である. 先に述べたように, A_θ は動作生成において各関節の重み付けを行う対角行列であり, 各対角成分がそれぞれ関節の自由度に対応している. ここでは, 肩の関節に対応する対角成分の値を変化させている. 上段がこの成分の値を 1.5 とした場

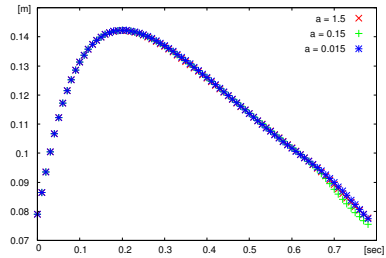


図 11 様々な A_θ のもとで生成された動作における重心の軌跡

合, 中段が 0.15 とした場合, 下段が 0.015 とした場合である. 二次計画法は目的関数の値を小さくするような変数を見付けるため, A_θ の成分の値が小さい方が対応する関節はよく動くようになる. 実際, 上段に比べて下段の方がキャラクタの肩がよく回っていることが分かる. 上段では肩を回す度合いが小さい代わりに腰を大きくかがめており, この腰の動きによってバランスを保っている. ここで重要な点は, どの場合においても「腕を回す」「腰をかがめる」といった動作の特徴は見られ, ただその特徴がどのくらい大きく表現されているかのみに異なっているということである.

次に, 上のそれぞれの場合におけるキャラクタの重心の動きを調べてみる. これをプロットしたのが, 図 11 である. 重心の軌跡は, どの場合でもほとんど変化がないことが分かる. このことは, A_θ が目的関数の中で用いられるパラメタであるのに対し, 重心の挙動は制約条件の中で規定されていることを考えると当然の帰結であるといえる. 重心の挙動が A_θ の変化の影響をほとんど受けないということは, 足を踏み出さずに耐えられる外乱の大きさなどの力学的な特徴も A_θ の変化の影響をほとんど受けないということの意味する. 実際, それぞれの場合にシミュレーションを行ってみると, 足を踏み出さずに耐えられる外乱の大きさは A_θ の影響をほとんど受けなかった.

以上のことから, A_θ の値は生成される動作にバリエーションを与える働きをするものの, 本質的な動作の特徴を変化させるものではないことが実験により確かめられた. これは本手法において人間動作の外見上および力学的な特徴がうまく再現されたのは, パラメタのチューニングを慎重に行ったためではないということである. このことを踏まえると, 本手法を用いて生成された動作と人間動作との一致の理由は, 重心の挙動と ZMP を用いた本手法の単純なモデルが現実の人間の動作をよく近似できているためと考えられる. すなわち, 大きな外乱に対してバランスを保持しようとするとき, 人間が効果的に動かせる自由度はそれほど多くはなく, それらは本手法で用いた程度の単純なモデルで十分に近似可能なのである.

4. ま と め

本論文では, 人間がしばしば行うような大きな全身動作を用いたバランス保持に注目し, その基本的なメカニズムを再現するようなモデルを提案した. また, そのモデルを用いたシミュレーションを行い様々な外乱に対処する動作を生成し, その結果を人間の動作と比較することによって, モデルの正当性の検

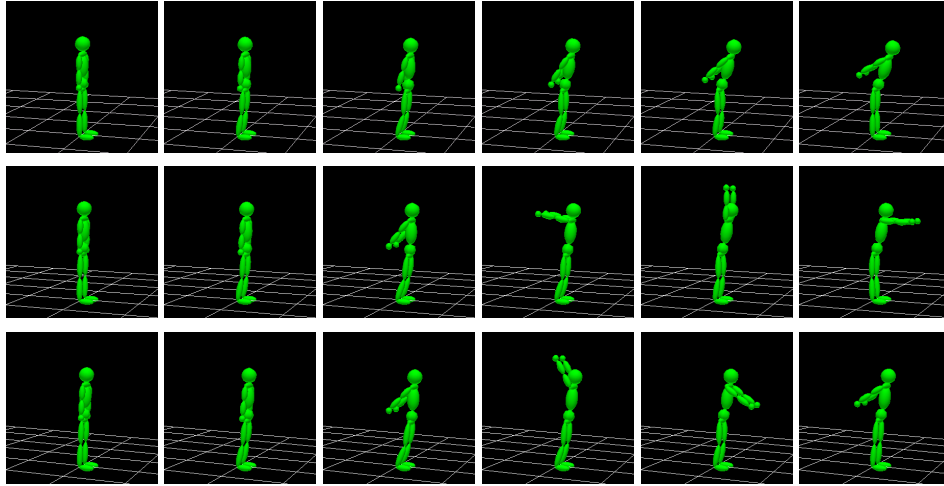


図 10 様々な A_0 のもとで生成された動作

証を行った。

本手法では、まず人間の動作をモーションキャプチャを用いて取得し、そこからマクロな物理量（重心や ZMP）に基づく単純なモデルとそれを制御しているパラメタを抽出する。全身動作を生成する時には、このモデルをもとに二次計画法による最適化計算を行い、最適解としてバランス保持動作を生成する。また、より大きな外乱に対処可能なように、「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」の 2 つのモードを用意した。

このようにして生成された動作を人間の動作と比較すると、その外見的特徴がよく一致しているだけでなく、どの程度の外乱まで足を踏み出すことなく対処可能であるかという力学的な特徴までよく一致していた。またこの一致は、モデル構築の際に適切にパラメタを調整したためではなく、このモデルの構造が実際の人間をよく近似できているためだと考えられることも分かった。

このことから、本モデルは複雑な人間のバランス保持のメカニズムをうまく抽象化できていると、これを用いると人間のバランス保持動作の特徴がうまく再現できるということが示された。

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、本研究の一部は科学技術振興機構戦略的基礎研究事業 (CREST) 高度メディア社会の生活情報技術、又他の一部は文科省科研費補助金特定領域研究 (C) 課題番号 16016218 の支援を受けて行われた。

文 献

- [1] M. Oshita and A. Makinouchi: “A dynamic motion control technique for human-like articulated figures”, *Computer Graphics Forum*, **20**, 3, pp. 192–202 (2001).
- [2] V. B. Zordan and J. K. Hodgins: “Motion capture-driven simulations that hit and react”, *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation* (2002).
- [3] T. Sugihara, Y. Nakamura and H. Inoue: “Realtime humanoid motion generation through zmp manipulation based

on inverted pendulum control”, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1404–1409 (2002).

- [4] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. H. nad Kenji Kaneko and H. Hirukawa: “The first human-size humanoid that can fall over safely and stand-up again”, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 1920–1926 (2003).
- [5] 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”, *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1077–1082 (2004).
- [6] S. Kudoh, T. Komura and K. Ikeuchi: “The dynamic postural adjustment with the quadratic programming method”, *In Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2563–2568 (2002).
- [7] S. Kudoh, T. Komura and K. Ikeuchi: “Balance maintenance by stepping for human-like characters against large perturbation”, *In Proceedings of the Tenth International Conference on VIRTUAL SYSTEMS and MULTIMEDIA*, pp. 870–879 (2004).
- [8] M. Vukobratović and D. Juricic: “Contribution to the synthesis of biped gait”, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, **16**, 1, pp. 1–6 (1969).
- [9] M. Vukobratović and J. Stepanenko: “On the stability of anthropomorphic systems”, *Mathematical Biosciences*, **15**, pp. 1–37 (1972).

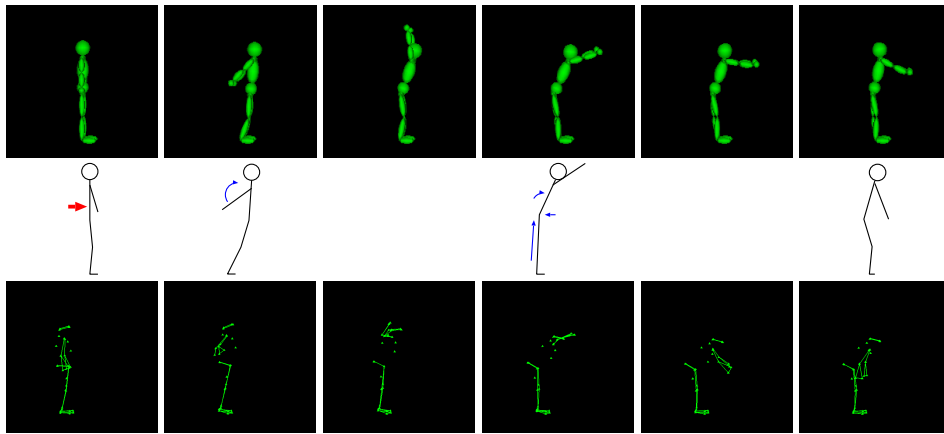


図 12 両足を動かさずにバランスをとる動作 (300N で 0.1 秒)

Fig. 12 Balance maintenance by keeping feet on the ground (300N, 0.1sec)

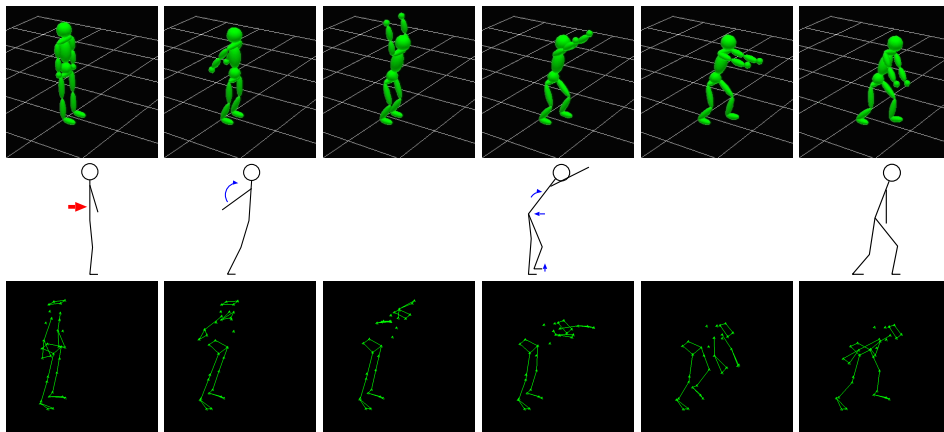


図 13 足を踏み出してバランスをとる動作 (300N で 0.4 秒)

Fig. 13 Balance maintenance by stepping (300N, 0.4sec)

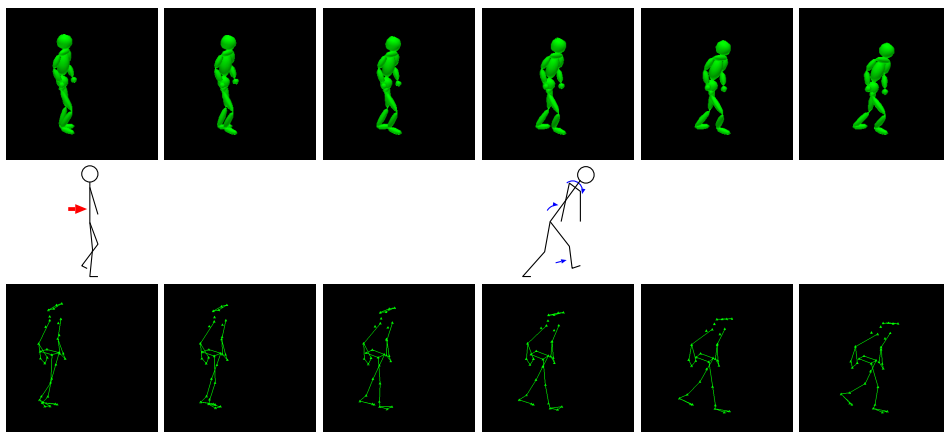


図 14 歩いている最中に加えられた外乱に対してバランスをとる動作 (300N で 0.4 秒)

Fig. 14 Balance maintenance during walking (300N, 0.4sec)