

3次元シーン内の人物像歩行動作生成システム

筒 口 拳[†] 末 永 康 仁^{†,☆}
渡 部 保 日 兎[†] 下 原 勝 憲[†]

本論文では、3次元仮想空間内に設定された任意のパスに沿った人物像の歩行動作を自動的に生成するアニメーションシステム *WorldWideWalk* (*WWWalk*) と、そこで用いられる動作生成手法について述べる。*WWWalk*では歩行動作をグローバルおよびローカルな歩行動作より構成し、グローバルな歩行動作生成において歩行パスに適応した動作表現を実現し、ローカルな歩行動作生成において一步の歩行動作を直進歩行動作と回転動作に分解してそれぞれを動力学と運動学とを融合した手法で生成している。*WWWalk*により、自動生成によるユーザの負担減とユーザ制御による映像表現の拡大との両立が可能となり、3次元環境モデルと人物像歩行動作とが融合されたリアリティあふれる映像表現が可能となった。

Human Walking Animation System in Three-dimensional Modeled Scene

KEN TSUTSUGUCHI,[†] YASUHIITO SUENAGA,^{†,☆} YASUHIKO WATANABE[†]
and KATSUNORI SHIMOHARA[†]

This paper introduces an animation system, *WorldWideWalk* (*WWWalk*), that generates the human locomotion automatically on an arbitrary path in the three dimensional (3D) modeled scene, and describes the motion generation method used in *WWWalk*. The walking motion is divided into two submotions, global and local. The global submotion connects consecutive steps harmoniously, while the local submotion produces straight forward and rotational motion, using dynamics and kinematics. *WWWalk* has achieved the consistent user control with the variety of animation, and reduced the annoying operations. The generated walking motion can be combined with the 3D virtual scene, and the users of *WWWalk* can create realistic computer animation scenes.

1. はじめに

コンピュータ・グラフィックス (CG) 技術の発達により、様々な用途向けの高品質な映像シーンが生成できるようになったが、人物像の自然な動作の生成に関しては多くの点が未解決である。特に歩行動作を自動的に生成することは、CG キャラクタの動作生成、3次元環境モデルへの人物像の融合、設計や各種シミュレーションへの適用等の応用面において、リアリティあふれる表現を可能とするためにきわめて重要である^{1),11)}。

本稿では、人物像歩行動作生成システム *World-*

WideWalk (*WWWalk*) の概要と、そこで用いている歩行動作生成手法について述べる。*WWWalk*は任意の3次元経路に沿った歩行動作を自動的に生成し、動作生成にともなうユーザの負担減と、ユーザ制御による映像表現の拡大との両立を実現したシステムである。

人物像の歩行動作生成に関しては様々な手法が提案されている。たとえば Bruderlin ら⁴⁾や Unuma ら¹²⁾は、既存の動作データを運動学的手法により合成することで新しい動作を生じる手法を報告している。これらは動作データを有効に活用でき、対話的な動作生成が可能であるが、必要な動作データはあらかじめ採取あるいは生成しなければならない。Hodgins ら⁵⁾は動力学に重点を置いて運動選手の動きを生成したが、特定の運動の生成に限られていることや計算時間の点で問題がある。

地形に適応させる歩行動作生成手法としては、Taga

[†] NTT ヒューマンインタフェース研究所
NTT Human Interface Laboratories

[☆] 現在、名古屋大学大学院工学研究科
Presently with Graduate School of Engineering, Nagoya University

ら¹⁰⁾や McKenna ら⁶⁾による自律的歩行動作の生成例が報告されているが、これらはユーザによる制御が困難である。Panne ら¹³⁾は周期的な PD (proportional and derivative) コントローラを用いた制御的な動作生成手法により高低を有する地形への適応を可能にしているが、適用範囲が鉛直面内に限られている。筒口 ら¹¹⁾は Bruderlin らの手法³⁾を発展させ、動力学と運動学とを用いた高低を有する地形上での直線歩行動作生成法を実現したが、計算が鉛直面内で実行されているため 3次元地形変化への自動的な適応が困難である。また Bezault ら²⁾や Overveld ら⁷⁾は足の位置をあらかじめ決定し、運動学的に回転させることで方向転換を実現しているが、動力学計算や細部の動作生成には重点を置いておらず、動作の自然さや制御性に欠けるという問題がある。

以上の問題点を解決し、3次元シーン内での歩行パスに沿った歩行動作の自動生成を可能とするため、筆者らは EAW モジュール¹¹⁾における動作生成手法を拡張し、以下の点を新しく導入することによって WWWalk システムを実現した：

- (1) 歩行動作をグローバル（大域的）な歩行動作とローカル（局所的）な歩行動作から構成し記述する、
- (2) グローバルな歩行動作生成において、パスの形状に沿った歩行の動作表現の制御を可能とする、
- (3) ローカルな歩行動作を直進歩行動作と回転動作に分離し、それぞれの動作生成において動力学計算と運動学計算とを融合させた手法を用いる。

以上により、高低差ある地形への適応に加えて回転動作による方向転換が可能となり、3次元でモデル化された地形に適応した歩行動作の自動生成とユーザによる制御の実現を可能にした。WWWalkを用いることにより、アニメータの負担を軽減するとともに魅力的な映像表現を可能とするばかりでなく、実写映像との融合や CAD 等による 3次元モデルとの融合による人間工学的な設計などが可能となる。

以下、WWWalkの構造および歩行動作生成について詳細に述べ、その生成結果例と有効性を示し検討を行う。

2. WorldWideWalk (WWWalk)

WWWalkは図1に示すように EAW モジュール¹¹⁾を継承した4層の階層構造を持つ。すなわち、GUI、動作制御、動作生成、レンダリングの各レベルである。

以下本稿では、ある足の踵着地から他の足の踵着地までをステップと称し、直線歩行や右あるいは左方向

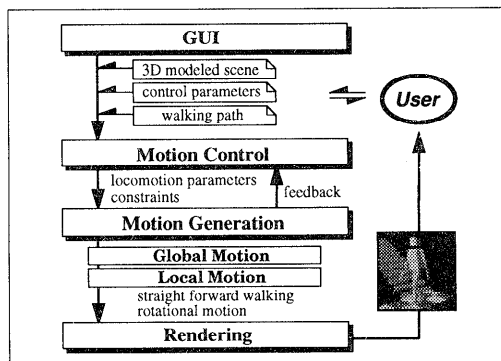


図1 WWWalkの構成

Fig. 1 The structure of WWWalk.

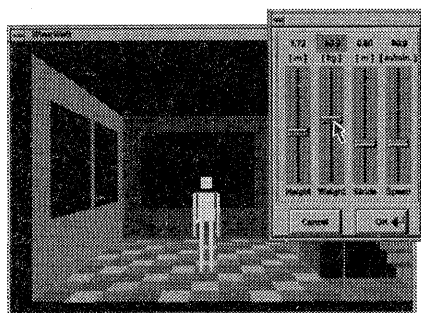


図2 パラメータ設定例

Fig. 2 An example of setting parameters.

へのカーブなどの一連の動作をモードと称する。立脚はステップを通じて地面に接している方の脚を、遊脚は他方の脚を指す。また、座標系はすべて右手系を用いる。

2.1 GUI (Graphical User Interface)

GUI レベルでは、歩行動作に関する対話的なユーザ制御を可能とする。ユーザは GUI を通じて人物像に関するパラメータや歩行パスを入力あるいは設定する。制御パラメータは人物像の身長、体重、歩行速度や標準歩幅等であり、また、動作生成レベルにおけるグローバルな歩行動作生成に必要なとされる値である。図2に制御パラメータの設定例を、図3にパス設定例を示す。

2.2 動作制御

動作制御レベルでは設定した歩行パスを一步ごとの区間に分割した後、鉛直面上と水平面上に分解して直進歩行動作ならびに回転動作生成のための拘束条件を計算する。

まず、文献11)の手法により3次元パスに対して“エリア分割”および“ステップ分割”を実行する。ここで“エリア分割”とは階段や平地、坂などのエリア

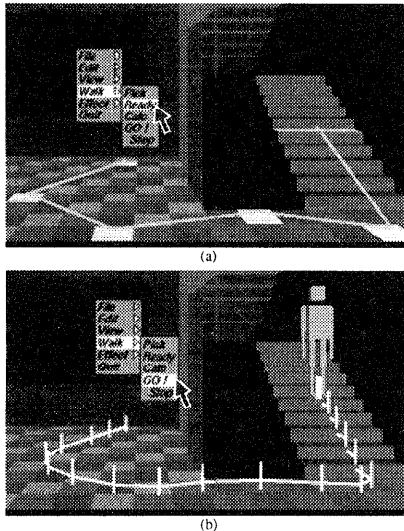


図3 歩行パス設定例; (a) パス入力, (b) ステップへの分割
 Fig. 3 An example of setting a walking path; (a) inputting a rough path, (b) division into steps.

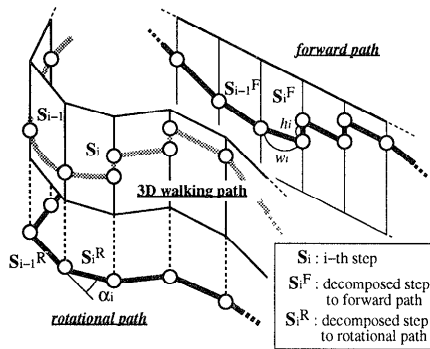


図4 歩行パスの分解
 Fig. 4 3D walking path decomposition.

への分割であり, “ステップ分割” は各エリアの適切なステップへの分割である。

図4はステップ分割後の歩行パスとその分解を示す: ステップ分割後は, “3D walking path” に示すようにステップを表す連結された線分でパスを近似する。また, 直進パス (forward path) は “3D walking path” の各ステップを1つの鉛直面上へ展開したものであり, 回転パス (rotational path) は水平面上へ正射影したものである。“3D walking path” 上の各歩行ステップ S_i はそれぞれ, 歩幅 (w_i), 歩高 (h_i) および角度 (α_i) を持つが, S_i の直進成分 S_i^F は w_i および h_i をそのまま所持し, 回転成分 S_i^R は α_i を所持する。ただし, α_i は S_i^R が一歩前のステップ S_{i-1} の回転成分 S_{i-1}^R となす角度を表す。

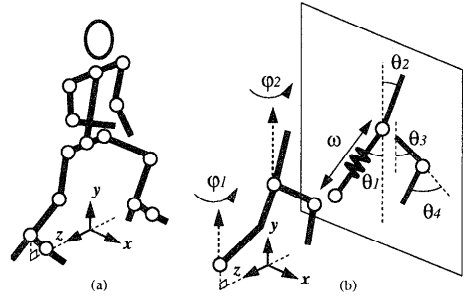


図5 人物像モデル; (a) スケルトン構造, (b) 動力学変数
 Fig. 5 The human figure model; (a) skeleton structure, (b) dynamic variables.

さらに S_i は地形的情報だけではなく歩行に関するパラメータすなわち速度 (v_i), そのステップの持続時間 (t_i^s), および左右いずれが立脚であるかという情報を持ち, これらの条件は S_i^F, S_i^R の両方に渡される。

本手法ではあるステップ S_i のローカルな歩行動作を生成するために直前のステップ S_{i-1} および直後のステップ S_{i+1} の地形情報が必要であり, また, 次節で述べるように, グローバルな歩行動作を生成するために, あるモードに属するすべてのステップに関する情報が必要であるため, ステップ分割後ただちに, すべてのステップに関してこれらの情報を計算する。

2.3 動作生成

動作生成レベルでは, グローバルな歩行動作生成とローカルな歩行動作生成を実現し, 人物像の関節角度や位置などの時系列データを出力する。

グローバルな歩行動作は, 3次元パスに沿って歩行するための階段上昇や下降, 左右への方向転換など, 1歩あるいは連続する複数歩からなる一連の動作であり, 運動学的手法により生成する。またローカルな歩行動作は1ステップの歩行動作であり, 直進歩行動作生成と回転動作生成から構成する。動力学的手法による計算の後, 運動学的な動作生成を行う。

グローバルな歩行動作, およびローカルな歩行動作に関する詳細は, 3章, 4章においてそれぞれ述べる。

2.4 レンダリング

レンダリングレベルでは動作生成レベルが出力する人物像モデルの関節角度データを用いて, 実際に歩行動作の表示を行う。本手法で用いる人物像モデルを図5(a)に, また人物像モデルを構成する位置および関節角度等のデータを表1に示す。WWWalkでは立脚足首を基準とする階層構造によって人物像を構成しており, 表1のデータに基づき図6に示すツリー状構造に従って人物像動作を生成する。

表1 人物像モデルを構成するデータ (数字は自由度)

Table 1 The data of human model & degrees of freedom.

位置	共通		立脚		遊脚	
	重心位置	3	足首位置	3	—	—
角度	頭部	3	足端部	1	足端部	1
	上部	3	足部関節	1	—	—
	骨盤	3	足首関節	3	足首関節	3
	肩骨	2	膝関節	1	膝関節	1
			股関節	3	股関節	3
			肩関節	3	肩関節	3
			肘関節	2	肘関節	2
手首関節	2	手首関節	2			

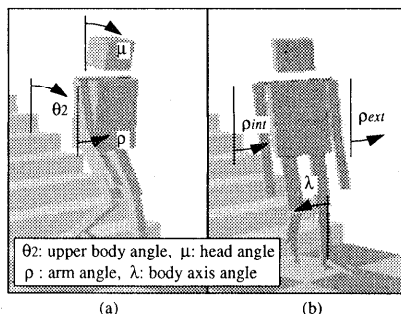


図7 グローバルな動作表現; (a) 上下, (b) 左右
Fig. 7 The global motion; (a) up & down, (b) left & right.

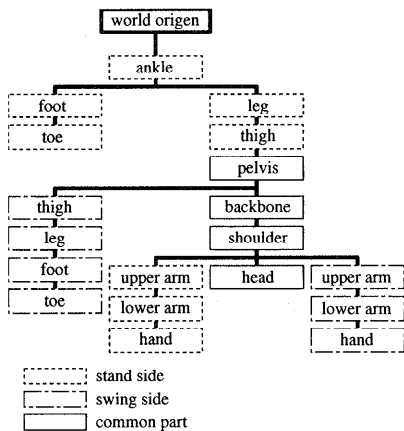


図6 人物像モデルの階層構造
Fig. 6 The structure of human model.

3. グローバルな歩行動作

動作生成レベルにおけるグローバルな歩行動作生成は、3次元経路上の人物像の歩行運動に、経路に応じた動作表現や誇張表現を加えることを目的とする。これは歩行動作を生成する際に、人物像モデルの関節角度などを曲線経路の幾何的形状を特徴づけるパラメータの関数として表すことにより実現する。具体的には人物像モデルの動力学的あるいは運動学的パラメータに対する上下方向あるいは左右方向への境界条件を計算する。

3.1 上下方向

動作制御レベルで実行したパスの分解に基づき、直進パスの変化に応じて自動的に境界条件を決定する。すなわち、図7(a)に示す上部角度 θ_2 、頭部の前後方向への傾きを示す角度 μ および上腕角度 ρ に対して初期条件および終期条件を決定し、ローカルな歩行動作生成での動力学的あるいは運動学的計算のための境界条件とする。

具体的な境界条件決定方法の一例を表2に示す。表

表2 境界条件例

Table 2 An example of the boundary conditions.

	FROM	TO		
		up	down	plane
θ_2	up	(0) → (0)	(0) → (-)	(0) → (0)
	down	(-) → (0)	(-) → (-)	(-) → (0)
	plane	(0) → (0)	(0) → (+)	(0) → (0)
μ	up	(+) → (+)	(+) → (-)	(0) → (0)
	down	(-) → (+)	(-) → (-)	(-) → (0)
	plane	(0) → (+)	(0) → (-)	(0) → (0)
ρ	up	(-) → (-)	(-) → (-)	(-) → (0)
	down	(-) → (-)	(-) → (-)	(-) → (0)
	plane	(0) → (-)	(0) → (-)	(0) → (0)

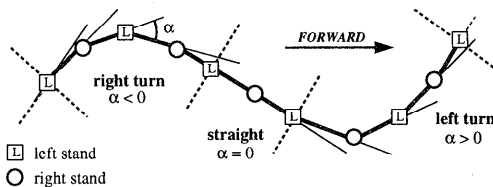


図8 回転パスによるモード分類
Fig. 8 The determination of mode by rotational path.

において、(0) はデフォルト値をそのまま使うことを、(+), (-) はそれぞれデフォルト値よりも増加または減少させることを示し、→ は初期条件から終期条件への変化を示している。また、up, down, plane はそれぞれ地形を表す。

3.2 左右方向

左右への方向転換を導入する際には、歩行動作の左右非対称性が生じる。本手法では図8で示すように、回転パス上のあるステップと直前のステップがなす角度 α の符号によりモードを判断する。すなわち $\alpha = 0$ であれば直進歩行モード、 $\alpha > 0$ であれば左への方向転換モード、 $\alpha < 0$ であれば右への方向転換モードである。これらのモードに応じて境界条件に修正を加えるパラメータは図7(b)で示す体軸の角度 λ 、回転内側上腕角度 ρ_{int} および回転外側上腕角度 ρ_{ext} である。

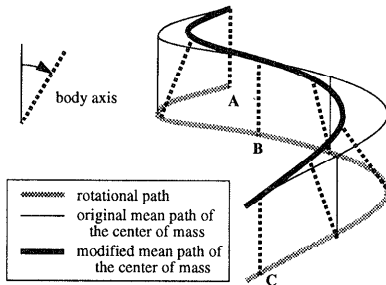


図9 回転に対する体軸の変化例

Fig. 9 An example of the change of the body axis.

直線歩行の場合、人物像の平均重心位置は歩行経路に平行であるが、本手法においては左右への方向転換をよりリアルに表現したり、あるいはユーザーによる誇張表現を可能とするため、曲線経路に対して人物像の体軸を傾け、平均重心位置が通る曲線を図9で示すように変化させる。すなわち、あるモードが a 歩目のステップ S_a を起点とする m 歩のステップ $\{S_a, S_{a+1}, \dots, S_b\}$ ($b = a + m - 1$) からなるものとし、各ステップ S_i ($i = a, a + 1, \dots, b$) の開始時刻を τ_i^0 、終了時刻を τ_i^s ($= \tau_i^0 + t_i^s$)、 τ_i^c を τ_i^0 と τ_i^s の中間時刻として、 S_i における j 番目の時刻 t_{ij} での体軸の傾き λ_{ij} を

$$\lambda_{ij} = f \Lambda_{ij} \sin \left(\pi \frac{t_{ij}}{T} \right) / \left(\sum_{k=a}^b |\alpha_k| \right), \quad (1)$$

ただし

$$\Lambda_{ij} = \begin{cases} \Lambda_{i0} + \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{\tau_i^c - \tau_{i-1}^c} t_{ij}, & (\tau_i^0 < t_{ij} < \tau_i^c), \\ \Lambda_{ic} + \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\tau_{i+1}^c - \tau_i^c} t_{ij}, & (\tau_i^c < t_{ij} < \tau_i^s), \end{cases}$$

$$T = \sum_{k=a}^b t_k^s,$$

とした。 f はユーザーによって指定される表現因子で、図7(b)のように通常の歩行のような効果を生ぜしめたいときは $f > 0$ として曲率中心の方へ体軸を傾ける。逆にアニメーションキャラクターに見られるように遠心力が加わるような効果を生ぜしめたいときは $f < 0$ とする。 Λ_{ij} は回転角 α_i の大きさによる体軸の傾きの変化を表現する因子であり、 Λ_{i0} 、 Λ_{ic} はそれぞれ t_i^0 ($= t_{i-1}^s$)、 t_i^c での Λ_{ij} の値である。さらにモード境界での値として、 $i = a$ の場合の前半部分、および $i = b$ の場合の後半部分は以下のようにした：

$$\Lambda_{aj} = \frac{\alpha_a}{\tau_a^c - \tau_a^0} t_{aj}, \quad (\tau_a^0 < t_{aj} < \tau_a^c),$$

$$\Lambda_{bj} = \Lambda_{bc} - \frac{\alpha_b}{\tau_b^c - \tau_b^s} t_{bj}, \quad (\tau_b^c < t_{bj} < \tau_b^s).$$

ρ_{int} 、 ρ_{ext} に関しては、3.2節で決定した ρ の境界条件をモードに応じて修正する。直進歩行モードの場合はそのままの値を用い、方向転換モードの場合は $|\alpha|$ の値に応じて ρ_{int} 、 ρ_{ext} の可動範囲の絶対値 $\|\rho_{int}\|$ 、 $\|\rho_{ext}\|$ をそれぞれ増減させる。すなわち、 ρ の可動幅を $\|\rho\|$ として以下のように表す：

$$\begin{aligned} \|\rho_{int}\| &= (1 - g_{int}|\alpha|) \|\rho\|, \\ \|\rho_{ext}\| &= (1 + g_{ext}|\alpha|) \|\rho\|. \end{aligned} \quad (2)$$

ただし g_{int} 、 g_{ext} はユーザーによって指定される0または正の値を持つ表現因子である。

4. ローカルな歩行動作

ローカルな歩行動作は一連の歩行動作の単位となる運動である。健常者の直線歩行に関しては臨床医学の分野でも詳細に解析されており、床反力による歩行分析などにも応用されている^{9),14)}。

本手法では、歩行動作を直進歩行動作と回転動作とに分解し、動作制御レベル、およびグローバルな動作生成により決定された境界条件等に応じてステップごとの関節角度を計算する。直進歩行動作は図4における直進パスに沿う動作であり、歩幅 w_i 、歩高 h_i を持つ S_i^F に関する歩行を生成する。回転動作は時間 t_i^s に S_i^R の持つ α_i だけの回転を生ぜしめる動作を生成する。

人物像の動力学計算モデルに対する動力学変数を図5(b)に示す。この系に対するラグランジュの運動方程式は以下の式で表される：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_r} = F_{q_r}. \quad (3)$$

ここで L は系のラグランジアンであり、 F_{q_r} は一般化力である。 q_r は図5(b)の動力学変数を表す。ただし、直進歩行動作に関する変数 ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \omega$) と、回転動作に関する変数 (φ_1, φ_2) とは独立であり、動力学計算においては互いに干渉することはないものとした。なお、後述する生成結果において、この仮定が特に不都合をもたらさないことを確認している。

式(3)の右辺はトルクあるいは力を示す非線形項であり、解析的に求めるのは困難である。したがって、トルクあるいは力の関数形 $f_r(q, t)$ を既知とし、スカラ項 A を用いて非線形項を

$$F_{q_r} = A f_r(q, t), \quad (4)$$

と近似し、ステップの終了時に関節角度が終期条件と一致するように反復計算することで A を求める^{3),11)}。

動力学計算終了後、運動学的動作生成¹¹⁾を行うことで表1に示すデータを計算する。

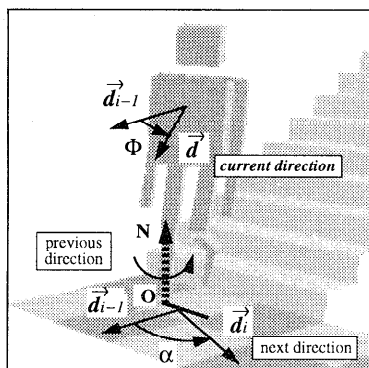


図 10 回転モデル

Fig. 10 The model of rotational motion.

4.1 直進歩行動作

直進歩行は E-KLAW 法¹¹⁾を用いるが、動力学的动作生成の際に、動作制御レベルで計算された拘束条件に加えて、3.1 節でのグローバルな動作生成における状態変化が境界条件として加わっている。

4.2 回転動作

回転動作は立脚足首位置に置いた鉛直上向きの軸まわりに立脚足首より上の身体部位および遊脚を回転させることで生成する。回転動作生成では、直進歩行動作生成から導出される骨盤や上体の回転などの要素とは独立に、純粋に方向転換に関する回転のみを扱う。

回転に関する変数は図 5 (b) に示すとおり立脚足首まわりの回転角 $\varphi_1(t)$ と立脚股関節まわりの回転角 $\varphi_2(t)$ である。 $\varphi_1(t)$ は立脚足首から立脚股関節までの回転 (立脚のねじれ) を表し、 $\varphi_2(t)$ は立脚股関節における上体および遊脚の回転を表す。

さて、図 10 に示すように現在歩行中のステップ S_i および直前のステップ S_{i-1} の回転パスにおける方向をそれぞれ \vec{d}_i 、 \vec{d}_{i-1} とし、 S_i 内の時刻 t ($0 \leq t \leq t_i^s$) において人物像の前面が向く方向の水平成分を \vec{d} とする。 \vec{d}_{i-1} と \vec{d} とのなす角度を $\Phi(t)$ とおくと、

$$\Phi(t) = \varphi_1(t) + \varphi_2(t), \quad (5)$$

と表せる。さらに、通常直進歩行における股関節回転および足首回転の可動範囲⁹⁾から得られる比を用いて $\varphi_1(t) : \varphi_2(t) \simeq 2 : 3$ と近似し、 $\Phi(t)$ に関する運動方程式を解くことで $\varphi_1(t)$ および $\varphi_2(t)$ を求める。本手法においては、図 11 に示すように回転の中心 O を立脚足首に置き、 O から一定の水平距離 δ の位置に人物像の全質量 M があり、 O のまわりに回転するものと近似した。系に加えられる外力が M の接線方向の力 $\vec{F}(t)$ のみである場合、 $\vec{F}(t)$ の大きさを $F(t)$ 、回転角を $\Phi(t)$ として式 (3) は以下のように簡略化できる：

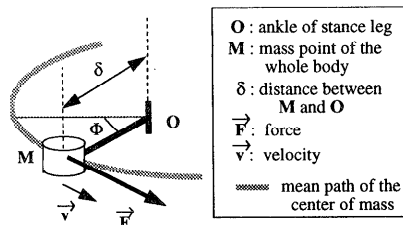


図 11 近似された動力学的回転モデル

Fig. 11 The approximated dynamic rotation model.

$$M\delta\ddot{\Phi}(t) = F(t). \quad (6)$$

実際は歩行にともない δ の大きさは変化するが、運動方程式を簡素に定式化するために一定であるものとした。したがって図 11 の OM 方向の動力学的计算を無視することになるが、後述する生成結果例によりこの近似で十分であることが確認されている。

式 (6) における歩行中の回転を生じる力 $F(t)$ は実際には体幹の回転を制御する腕の運動や立脚足への前後方向・左右方向への力などが複雑にからみあって生じるが、通常直進歩行では左右方向への力は垂直方向・前後方向に比べ小さいため^{9),14)}、回転においても前後方向への床反力の影響を最も大きく受けるものと仮定した。すなわち、前述で述べた $F(t)$ を足圧測定から得られる前後方向への床反力¹⁴⁾を近似した関数形を用いて、

$$F(t) = \begin{cases} \pm B \sin(\pi t/t^v), & (0 \leq t \leq t^v), \\ \mp B \sin\left(\pi \frac{t-t^v}{t^s-t^v}\right), & (t^v \leq t \leq t^s), \end{cases} \quad (7)$$

と表す。ただし、 t^s は考慮しているステップの持続時間であり、 t^v は鉛直面上において重心が立脚足首の真上に来た時刻を示す。 B は 0 または正の値を持つ定数で、左右どちらが立脚か、左右どちらへの方向転換かによって符号が異なる。直進歩行モードから回転モードへ変化するような場合は、直進歩行動作生成によって計算された $t=0$ における重心の前進速度 $v_x(0)$ を用いて、関係式 $v_x(0) = \delta\dot{\Phi}(0)$ により $\dot{\Phi}$ の初期値を計算する。実際の計算においては、直進歩行動作と同様に時刻 t^s において $\Phi(t^s) = \alpha$ となるように反復計算を行うことにより B の値を求める。

5. 生成結果例

本手法を 3 次元モデルとして定義された室内シーンに適用した CG アニメーション生成例を以下に示す。ハードウェアはシリコングラフィックス社 Indigo2TM HIGH IMPACTTM (R4400, 250 MHz) を用い、表示には OpenGLTM を用いた。

図 12 は平面上の曲線歩行動作生成例である。

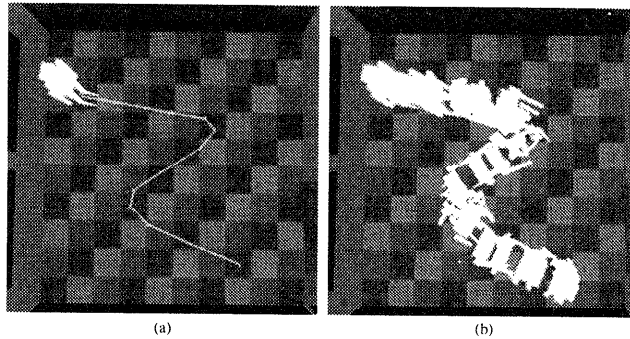


図 12 曲線歩行; (a) パス設定, (b) 歩行動作生成

Fig. 12 The curved walking; (a) setting path, (b) walking motion.

図 12(a) はパスの設定を, (b) は設定されたパスに沿った歩行動作生成を示す. 図 13 は式 (1) や式 (2) における誇張表現因子 f あるいは g_{int} , g_{ext} の GUI による設定例を示し, 図 14 は, $g = g_{int} = g_{ext} = 0.1$ として f を変化させた曲線歩行の生成例を表している. さらに, 階段を下降して右へ方向転換する歩行動作生成例 ($f = 0.1, g = 0.1$) を図 15 に示す. これらの生成例により, 地形変化および曲線パスへの適応や誇張された歩行動作生成が実現されていることが分かる.

次に, 表 3 (a) に直進歩行における平地ならびに階段上昇, 下降の動作生成に対する 1 歩あたりの平均計算時間 (秒) を示し, 表 3 (b) に平地での曲線歩行において, 回転運動に運動学のみを用いた場合の計算時間と動力学を用いた場合の計算時間をそれぞれ示す. 表 3 (a) の平地, 階段上昇, 階段下降の計算時間はそれぞれの動作を 10 歩生成させたときの計算時間を平均したものであり, 「平均」はこれらの総合平均を示す.

これらの例において, 歩調はすべて 100 歩/分とし, フレームレートを 60 フレーム/秒 (約 0.017 秒/フレーム) として 1 歩あたりのフレーム数を 36 とした. また, 平面歩行における標準歩幅は 70.0 cm とした.

6. 考 察

生成結果例で示したとおり, 一度歩行パスを決定すれば *WWWalk* は自動的にパスに沿った歩行動作を生成する. しかも, 図 13 および図 14 で示したようにユーザによる誇張表現の制御が可能である. しかし, ローカルな歩行動作が前後あわせて 3 歩の情報があれば生成できるのに対し, グローバルな歩行動作を生成するためには少なくともモードの開始から終了までのパスあるいはステップが既知でなければならないという問題がある. この問題を解決するために, たとえば人物像モデルの物理的なバランスを考慮し, ローカル

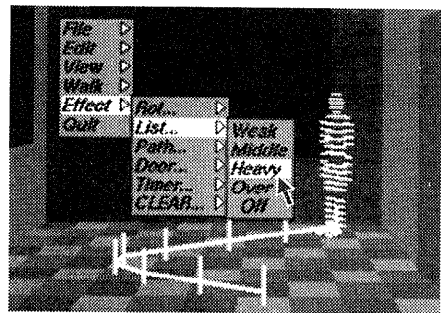


図 13 誇張表現の選択例

Fig. 13 An example of selecting exaggerated motion.

表 3 1 歩に要する平均計算時間 (単位: 秒);

(a) 直線歩行, (b) 平地曲線歩行

Table 3 The average calculation time for one step (sec.); (a) straight forward walking, (b) curved walking on the plane.

	平地	階段昇	階段降	平均
計算時間	0.0364	0.0517	0.0533	0.0471

(a)

	運動学	動力学
計算時間	0.0448	0.0515

(b)

な動作を生成する際に体軸の傾きなどを同時に計算することが考えられるが, 歩行全体に対する調和やユーザによる制御, 計算時間の短縮などを考慮し, 本手法では運動学を用いるグローバルな歩行動作生成によって動力学的計算を含むローカルな歩行動作生成を制御する手法を採用している.

計算時間に関しては, 表 3 より, 高速な計算を実現していることが確認できる. これは図 5 (b) に示すパラメータを動力学で計算し, 他の動きを運動学的に計算していることの有効性を示している. また表 3 (b) より, 回転に動力学を用いた場合の計算時間は運動学のみを用いた場合の約 1.15 倍にとどまり, 効率良く

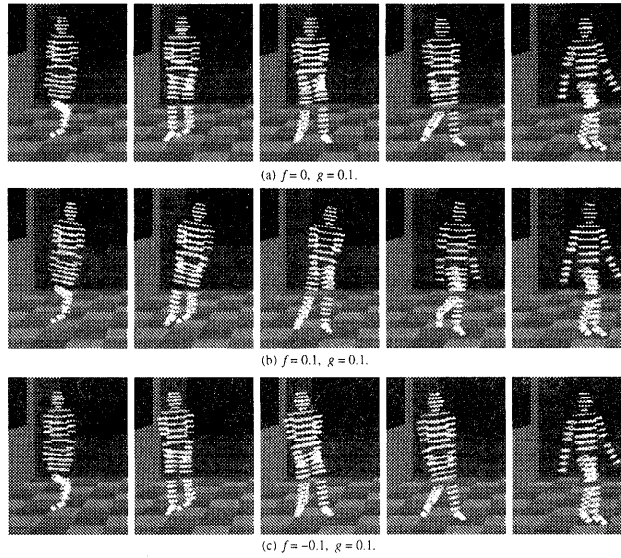


図 14 グローバルな動作生成による誇張表現

Fig. 14 The exaggerated motion by global motion generation.

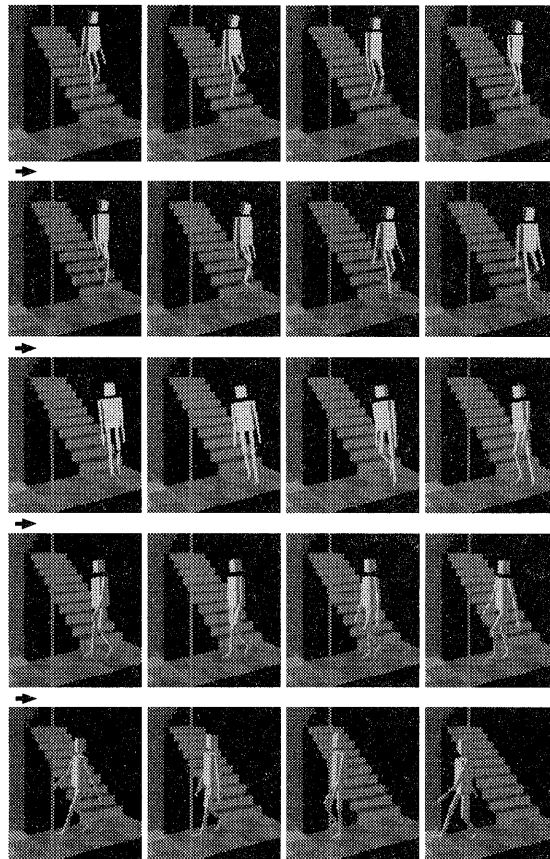


図 15 生成結果例; $f = g = 0.1$

Fig. 15 The generated walking sequence; $f = g = 0.1$.

動力学計算が行われていることが分かる。回転運動は実際には多くの要素が複雑に相互に関係しており、より自然な動作を生成するにはさらに洗練された方程式を立てる必要があるが、本手法は回転動作を1変数の運動方程式により効果的に生成できており、計算効率を考慮すると十分と思われる。これらの計算例では、運動学的計算では各フレーム間を分割せずに線形に補間しており、動力学計算は各フレーム間を5~10に時分割して行っている。WWWalkでは各ステップの終了時(踵着地の瞬間)に次の1歩の計算を実行するため、生成例のようにフレームレートを60フレーム/秒とする場合等は表3から分かる通り踵着地の瞬間に若干の遅延が生じることとなるが、実用上十分な計算速度である。

また、映像表現という観点から見た場合は文献4)や文献8)等に見られるようにユーザによる誇張表現等の制御が可能である方が望ましい。WWWalkでは、運動学的動作の可動範囲を決定したり¹¹⁾、図14で示したように3章で述べた境界条件や体軸の傾きなどを決定する表現因子等をユーザが対話的に設定して式(1)や式(2)に適用することにより誇張動作の表現が可能であり、一度生成された歩行動作に対する誇張表現に対しても現在拡張を進めているところである。しかし、ユーザの意図する誇張表現と動作の自然さとを調和させるには、これらの運動学的な誇張表現が実際の歩行動作に及ぼす影響について考慮する必要がある、今後の検討課題の1つである。

すでに述べたようにWWWalkシステムは人物像の自然な歩行動作生成を高速に実現しているが、上半身、特に腕の動きを運動方程式へ導入していない。また、障害物回避のアルゴリズムが導入されておらず、壁面などに沿った歩行や、複数の人物像の歩行動作を生成する場合に不自然な映像を生成する可能性がある。

以上の問題点を解決することにより、さらに複雑な3次元環境モデルへの人物像の融合が容易に行えるようになり、人物像を用いたウォークスルー・アニメーションや建築物プレゼンテーション、映像と人物像との合成などへの応用が可能となる。

7. おわりに

本稿では3次元仮想空間内に設定された任意のパスに沿った人物像の歩行動作を自動的に生成するアニメーションシステムWWWalkとそこで用いられる動作生成手法について詳細を述べ、その実現例と有効性を報告し、考察を行った。

WWWalkの特徴は、歩行をグローバルおよびロー

カルな動作から構成し、グローバルな歩行動作生成において歩行パスやモードに適応するように各種境界条件等を計算し、また、ローカルな歩行動作を直進歩行動作と回転動作に分解してそれぞれを動力学と運動学とを融合させて実現させていることである。

WWWalkを用いることにより、歩行動作生成の負担が減少し、3次元環境モデルと人物像との融合が可能となり、リアリティあるシーンを生成することができるようになる。また、WWWalkは歩行動作を自動生成するのみならず、誇張表現等のユーザ制御も可能であるため、映像コンテンツの生成にとってきわめて有効である。

今後は、リアルな人物像モデルの表現やより複雑な環境への適応、実写シーンとの融合など、より広範囲な応用へ取り組む予定である。

謝辞 日頃ご指導いただく徳永幸生映像処理研究部長、ご討論いただいた映像生成技術研究グループの高橋時市郎主幹研究員ならびに映像処理研究部の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) Badler, N.I., Bersky, B.A. and Zeltzer, D.: *Making Them Move: Mechanics, Control, and Animation of Articulated Figures*, Morgan Kaufmann (1991).
- 2) Bezault, L., Boulic, R., Magnenat-Thalmann, N. and Thalmann, D.: *An Interactive Tool for the Design of Human Free-walking Trajectories, Creating and Animating the Virtual World*, pp.87-104, Springer-Verlag (1992).
- 3) Bruderlin, A. and Calvert, T.W.: Goal-directed, Dynamic Animation of Human Walking, *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp.233-242 (1989).
- 4) Bruderlin, A. and Williams, L.: Motion Signal Processing, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.97-104 (1995).
- 5) Hodgins, J.K., Wooten, W.L., Brogan, D.C. and O'Brien, J.F.: Animating Human Athletics, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.71-78 (1995).
- 6) McKenna, M. and Zeltzer, D.: Dynamic Simulation of Autonomous Legged Locomotion, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.29-38 (1990).
- 7) Overveld, C.W.A.M.V. and Ko, H.: Small Steps for Mankind: Toward a Kinetically Driven Dynamic Simulation of Curved Path Walking, *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol.5, pp.143-165 (1994).
- 8) Perlin, K.: Real Time Responsive Animation

- with Personality, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.1, No.1, pp.5-15 (1995).
- 9) Rose, J. and Gamble, J.G.: *Human Walking Second Edition*, Williams & Wilkins, Baltimore (1994).
- 10) Taga, G., Yamaguchi, Y. and Shimizu, H.: Self-organized Control of Bipedal Locomotion by Neural Oscillators in Unpredictable Environment, *Biol. Cybern.*, Vol.65, pp.147-159 (1991).
- 11) 筒口 拳, 境野英朋, 渡部保日児: 地形適応型歩行動作生成手法を用いた人物の歩行アニメーション, *信学論 (D-II)*, Vol.J77, No.8, pp.1663-1670 (1994).
- 12) Unuma, M., Anjyo, K. and Takeuchi, R.: Fourier Principles for Emotion-based Human Figure Animation, *Proc. SIGGRAPH 1995*, pp.91-96 (1995).
- 13) Van de Panne, M., Fiume, E. and Vranesic, Z.G.: Control Techniques for Physically-based Animation, *EUROGRAPHICS Workshop on Animation* (1992).
- 14) 臨床歩行分析懇談会: 臨床歩行分析入門, 医歯薬出版 (1989).

(平成 8 年 3 月 7 日受付)

(平成 9 年 2 月 5 日採録)



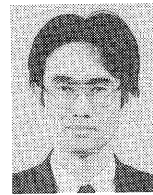
筒口 拳 (正会員)

1966 年生. 1989 年京都大学理学部卒業. 1991 年同大学院工学研究科修士課程修了. 同年 NTT ヒューマンインタフェース研究所に入社. コンピュータ・アニメーション, 映像処理の研究に従事. 現在, NTT ヒューマンインタフェース研究所研究主任. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



末永 康仁 (正会員)

1945 年生. 1968 年名古屋大学工学部電気工学科卒業. 1973 年同大学院博士課程修了. 同年電電公社 (現 NTT) 電気通信研究所に入社. 優れたインタフェース実現のための画像処理, 画像認識, 画像生成の研究に従事. 1977 年信学会学術奨励賞受賞. 1985~1986 年 MIT メディア研究所客員研究員. NTT ヒューマンインタフェース研究所研究グループリーダーおよび主幹研究員を経て 1997 年より名古屋大学大学院工学研究科教授. 電子情報通信学会会員, 工学博士.



渡部保日児

1958 年生. 1981 年新潟大学工学部情報工学科卒業. 同年電電公社 (現 NTT) 電気通信研究所入社. ファクシミリ通信, ビデオテックス通信など画像通信の研究およびコンピュータ・グラフィックス, ネットワーク・コンピューティングの研究に従事. 現在, NTT ヒューマンインタフェース研究所主幹研究員. 画像電子学会会員, 工学博士.



下原 勝憲

1952 年生. 1976 年九州大学工学部情報工学科卒業. 1978 年同大学院修士課程修了. 同年電電公社 (現 NTT) 電気通信研究所入社. 1986~1987 年 MIT メディア研究所客員研究員. 現在, ATR 人間情報通信研究所第六研究室室長および NTT ヒューマンインタフェース研究所研究グループリーダー. 脳コミュニケーションのための進化システムや創発的映像生成の研究に従事. IEEE, 電子情報通信学会, 神経回路学会, 日本 VR 学会等各会員.