

人物像歩行アニメーションにおける腕の動作生成方法

筒口 拳 末永 康仁 渡部 保日児 曾根原 登

NTT ヒューマンインタフェース研究所
〒238-03 神奈川県横須賀市武 1-2356

本稿は、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歩行動作生成手法に、新たに腕の運動の生成手法を適用したアニメーションシステムについて述べる。本手法では、運動学・動力学を含む複数の運動モードを重ね合わせることで腕の運動を生成し、また、動力学モードにおいては、腕部分を身体から分離した近似モデルに対して運動方程式を適用し計算を行う。本手法を用いることにより、地形変化に適用した身体の動作の影響を受けた運動や誇張された運動などの多様な表現による腕の運動を生成することができ、リアリティある歩行動作生成を高速に実現することが可能となる。

Arm swing in human walking animation

Ken Tsutsuguchi, Yasuhito Suenaga, Yasuhiko Watanabe and Noboru Sonehara

NTT Human Interface Laboratories
1-2356, Take, Yokosuka, Kanagawa 238-03 Japan

We discuss a method of creating the arm motion of a walking human. Arm swing is generated by overlapping the plural motion modes, which include kinematic and dynamic mode. In the dynamic mode, efficient calculation is accomplished by using a model in which the arm is separated from the whole body. We applied this method to our *WaveWalk* system, which features the automatic generation of walking motion adaptable to 3D modeled scenes. With this system, natural looking walking motion can be generated easily in real-time and it will be easier to create various CAD scenes or attractive animation.

1 はじめに

筆者らはコンピュータによる映像表現を追求することにより、高品質で魅力ある映像シーンを生成することを目標としている。特に人物像の運動を自動的に生成することは、映像生成、ゲーム等でのキャラクター生成、人間工学的な解析など様々な応用面で極めて重要であり、また動作生成手法においては、スピーディ（高速な計算）、ナチュラル（自然な動作生成）、フレンドリィ（容易な制御）の三要素をバランス良く満たしていることが重要である。

筆者らは、平地直線歩行を生成した Bruderlin の手法 [2] を発展させ、高低を有する地形上での人物像の直線歩行動作生成法を実現した [6]。また、複数歩にまたがる歩行動作生成と単歩の歩行動作生成とを組合せ、さらに単歩を前進歩行部分と左右への方向転換部分とに分解することにより、歩行パスに沿った左右への方向転換を実現し、任意の室内シーンでの曲線歩行の自動生成を可能とするアニメーションシステム WaveWalk を実現した [7]。

しかしながら、モデリングの過程における動力学計算の定式化において腕の運動は考慮しておらず、大腿部の運動に従属する形で運動学的に生成していた。このため、例えば地形の高低差などに対する腕の運動の微妙な変化などの動力学的な効果や誇張の表現が困難であった。

歩行動作に限定されない、腕の運動そのものに対する Goal-oriented なモデリング手法には文献 [3] や文献 [4] などがあるが、逆問題に対する定式化や計算時間などの面で困難が伴う。また、歩行動作に伴う従属的な腕の運動に関する報告は文献 [1] や文献 [8] など補間法やモーション・キャプチャーをベースとする運動学的手法が多く、動きが単調になることや入力の手間がかかること、動作のデータベースを用意しなければならないという問題点があった。

本手法では、運動学的運動や動力学的運動を含む複数の運動モードを重ね合わせることで腕の運動を表現することと、また、動力学的運動の計算において、腕を分離してモデル化し定式化することを行った。これにより、地形変化による影響を表現したり誇張表現を行う等、運動の表現方法の拡大を実現するとともに計算の効率化を行った。

本手法により、3次元仮想空間内に設定された

パスに沿った人物像の歩行動作を容易に得ることが可能となり、様々な用途に応じた歩行動作を表現することが可能となった。

2 WaveWalk

WaveWalk は任意の3次元経路に沿った人物像の歩行動作を自動的に生成し、また、ユーザ制御による映像表現の拡大と自動生成によるユーザの負担減との両立を実現したシステムである。

WaveWalk における歩行動作は、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、一歩あるいは連続する複数歩にわたる動作を制御するグローバルな歩行動作生成と単歩の動作を生成するローカルな歩行動作生成から構成される [7]。

グローバルな歩行動作は運動学的手法によって生成される。一方、ローカルな歩行動作はさらにお互いに独立な直進歩行動作、回転動作、及び腕の運動から構成され、動力学的手法と運動学的手法とを融合した手法で生成される。

本手法で用いる人物像モデルを図1に示す。ローカルな動作生成における、動力学的手法は以下の通りである: 直進歩行においては、系のラグランジアンを L 、一般化座標を $q = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \omega\}$ としてラグランジュの運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = F_q, \quad (1)$$

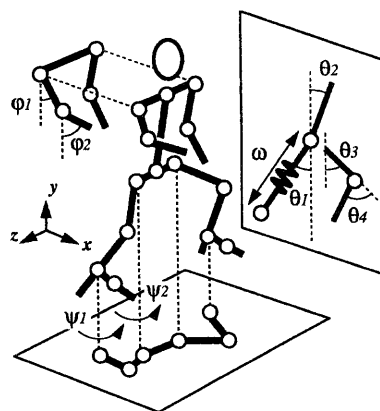


図 1: The human figure model.

を解くことにより運動を生成する。 F_q は一般化力であり、系が境界条件を満たすように反復法によって数値的に計算する [6].

また、回転動作においては変数 (ψ_1, ψ_2) を $\Psi(t) = \psi_1(t) + \psi_2(t)$ のように一変数で表し、時刻 t における回転のトルクを $N(t)$ 、角運動量を $L(t)$ とした際の運動方程式

$$N(t) = \frac{dL(t)}{dt}, \quad (2)$$

を Ψ についてを解き、適当な比率を $\psi_1(t)$ 、 $\psi_2(t)$ に対して与えてそれぞれの値を計算する [7].

3 腕の運動

腕の運動は能動的であるか受動的であるかにかかわらず本質的には体幹の回旋を抑制するための動きである。上腕角度に関しては通常の歩行では平均的に前方に約 30 度、後方に約 9 度の振りがある [5]. 即ち、片方の踵着地の瞬間を t_0 とし、両脚支持時間を t_{ds} 、 t_0 からもう片方の踵着地までの時間を t_{step} 、立脚相持続時間 t_{stance} 、遊脚相持続時間 t_{swing} とすると、図 2 に示すように

$$\begin{aligned} t_{step} &= t_{stance} - t_{ds} \\ t_{step} &= t_{swing} + t_{ds} \\ t_{cycle} &= t_{stance} + t_{swing}. \end{aligned} \quad (3)$$

の関係がある。その際、例えば右腕に着目すると、 $t_1 = t_0 + t_{ds}$ 、 $t_2 = t_0 + t_{step}$ として各時刻における境界条件は右踵着地の瞬間 (t_0^R) に後方への最大伸展となり、左足離地の瞬間 (t_1^R) にちょうど体側、左足着地の瞬間 ($t_2^R = t_0^L$) に前方への最大屈曲となる。さらに右足離地の瞬間 (t_1^L) に体側、再び右踵着地の瞬間 (t_2^L) に後方への最大伸展となる。ここで添字 R は右側を、 L は左側を示す。従って、運動学的見解からはこの境界条件間を適当な方

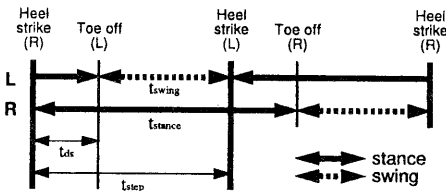


図 2: The step duration.

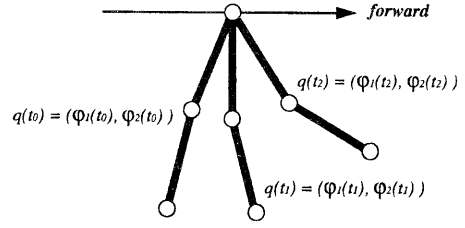


図 3: The boundary conditions.

法で補間すれば腕の運動を表現できることになるが、動作が単調になりがちである。

逆に動力学的計算の場合は足部ほどの厳密性は要求されないが、それでも境界条件を考慮して関節に加わるトルクを計算する必要があり、複雑なモデル化では計算コストがかかるという問題がある。

従って、本手法では、運動学モードと簡単な動力学モードとを重ね合わせて腕の運動を表現することによってこの問題点の解決を試みた。歩行動作のように腕の運動が付随的な場合、境界条件を厳密に満足しなくてもよいので、このような重ね合わせの結果、腕の振幅が変化したり地形変化によって運動に不規則性が生じるなど、安定な動作に意図的に擾乱を生成することになる。

3.1 運動学モード

角度を (φ_1, φ_2) を一般化座標 $q(t)$ で表し、腕モデルが後方から前方に運動するものと仮定する。境界条件を図 3 に示すように $q_0 = q(t_0)$ 、 $q_1 = q(t_1)$ 、 $q_2 = q(t_2)$ とする。境界条件に用いる角度は歩幅に応じて変更する。

様々な補間法が考えられるが、 $t = t_0, t_2$ で角速度が 0 となることから、本稿では正弦関数による角速度補間

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} A \frac{\pi(q_1 - q_0)}{2(t_1 - t_0)} \sin\left(\frac{\pi(t - t_0)}{2(t_1 - t_0)}\right) & \dots t_0 \leq t \leq t_1, \\ B \frac{\pi(q_2 - q_1)}{2(t_2 - t_1)} \sin\left(\frac{\pi(t - t_1)}{2(t_2 - t_1)}\right) & \dots t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (4)$$

を用いた。腕を後方へ振る時も同様にして導く。

3.2 動力学モード

動力学の計算においては、上腕部、下腕部を合わせた腕の部分と、肩を含む身体部分とを独立させ、計算を単純化した。即ち、肩を含み、肩の軌跡となる曲線に肩 S で接する鉛直面内に図4で示すようなモデルが存在するというモデルである。この近似では肩の自由度を1とみなし、上腕を軸とする回転や上体の回転による遠心力的効果は無視している。

図4において、上腕部、下腕部を剛体棒で近似し、質量をそれぞれ M_1 、 M_2 、長さをそれぞれ l_1 、 l_2 とする。また、力学変数として上腕部が鉛直線となす角 φ_1 と下腕部が鉛直線となす角 φ_2 とを取り、肩の位置を $S(X, Y)$ 、上腕部・下腕部に加わるトルクをそれぞれ F_1 、 F_2 で表す。この系に対するラグランジュの運動方程式を立てて $\dot{\varphi}_1$ 、 $\dot{\varphi}_2$ について解くと以下のようになる：

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = D^{-1} \begin{bmatrix} B_2 & -B_1 \\ -A_2 & A_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

となる。ここで

$$D^{-1} = \frac{1}{A_1 B_2 - B_1 A_2}, \quad (6)$$

であり、

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{l_1^2}{3}(M_1 + 3M_2), \\ B_1 &= \frac{M_1 l_1 l_2}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \\ C_1 &= -\frac{l_1}{2}(M_1 + 2M_2)(\ddot{X} \cos \varphi_1 + \ddot{Y} \sin \varphi_1) \\ &\quad - \frac{M_2 l_1 l_2}{2} \dot{\varphi}_2^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &\quad - \frac{M_1 + 2M_2}{2} g l_1 \sin \varphi_1 \\ &\quad + F_1, \end{aligned}$$

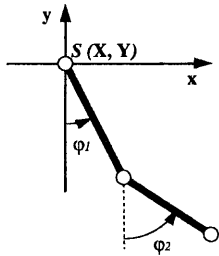


図4: The model of arm.

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{M_2 l_1 l_2}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2), \\ B_2 &= \frac{M_2 l_2^2}{3}, \\ C_2 &= -\frac{M_2 l_2}{2}(\ddot{X} \cos \varphi_2 + \ddot{Y} \sin \varphi_2) \\ &\quad + \frac{M_2 l_1 l_2}{2} \dot{\varphi}_1^2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &\quad - \frac{M_2}{2} g l_2 \sin \varphi_2 \\ &\quad + F_2, \end{aligned}$$

である。(5)式を以下のように表す：

$$\ddot{\varphi} = D^{-1} A c. \quad (7)$$

以上の式を基に、以下の数値計算を行う：

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(t_k) &= D^{-1}(t_{k-1}) A(t_{k-1}) c(t_{k-1}), \\ \dot{\varphi}(t_k) &= \dot{\varphi}(t_k) \Delta t + \dot{\varphi}(t_{k-1}), \\ \varphi(t_k) &= \varphi(t_k) \Delta t + \varphi(t_{k-1}), \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 t_k は離散化された時間変数を示し、 Δt は時間間隔を示す。拘束条件は以下のようになる：

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 < \pi, \quad (9)$$

$$\dot{\varphi}_1(t_0) = \dot{\varphi}_1(t_2) = 0. \quad (10)$$

これら一連の式からわかる通り、 φ は肩の運動 (\ddot{X} , \ddot{Y}) の影響を受ける。しかし、本手法においては、腕の運動は肩を含む身体の運動に影響を与えないものと仮定している。

3.3 合成

運動学モード、動力学モードの生成の後、これらのモードの合成を行う。即ち、正弦関数による補間(4)式、動力学による生成式(7)で生成される角度をそれぞれ $q^{kin}(t)$ 、 $q^{dyn}(t)$ とし、各時刻における角度を、 $\alpha + \beta = 1$ を満たす適当な係数 α 、 β を用いて

$$q(t) = \alpha q^{kin}(t) + \beta q^{dyn}(t), \quad (11)$$

により生成する。動力学モードでの計算過程において一般化力が未知数であるが、境界条件を考慮した運動は運動学モードにより計算されるため、一般化力の計算は脚の動作生成のような厳密性を要しない。後述の生成結果例においては、一般化力の値をゼロで近似し、動力学運動は肩の運動及び重力のみから導かれるものとした。

4 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て生成したCGアニメーション例を図5に示す。進行方向を変えながら階段を上昇している様子がわかる。本実施例図においては、(11)式の係数を $\alpha = 0.8, \beta = 0.2$ とした。あらかじめ設定されたパスに沿って、

この例では、一歩あたりのフレーム数を統一するために歩調を全て100歩/分(0.6秒/歩)としている。また、平面歩行における標準歩幅は70.0cmである。

アニメーション生成にはシリコングラフィックス社 Indigo2™ HIGH IMPACT™ (R4400, 250MHz)を用い、表示にはOpenGL™を用いた。フレームレートは60フレーム/秒(一歩あたり36フレーム)である。本実施例における一歩あたりの計算時間は平均して約0.05秒であるが、WaveWalkにおいてはある一歩の表示が終了すると、次の一歩の計算を直ちに行い、計算終了後、その一歩が終了するまで生成された歩行動作シーンを表示する。

5 考察

本稿で報告したWaveWalkは、従来のアニメーションソフトに見られるようなキーフレーミング手法と異なり、ユーザが任意の歩行パスを決定することにより、自動的にパスに沿った歩行動作を生成する。このため、ユーザは身体の動きの生成を意識することなく歩行動作シーンを得ることができ、極めて有効にアニメーション生成の効率化を実現できる。

計算時間に関しては以下のようなことがわかる：フレームレートが60フレーム/秒の場合、1フレームあたりの時間は約0.017秒であり、NTSC(30フレーム/秒)の場合は約0.033秒/フレームである。前節で示した計算時間によるとヒールストライクの瞬間に約2~3フレーム分の遅延が生じ、完全なリアルタイムというわけにはいかないが、ヒールストライクから次のヒールストライクまでは計算済みであるためリアルタイムで表示され、実用上十分な計算速度である。また、本手法では腕の運動に対し運動学、動力学の両者を計算した後合成が行わ

れるため、計算時間は(11)式における α, β の値に依存しない。

しかしながら、以下のような課題も残されている。肩の自由度は本来3であるが、第3節で述べたモデル化では1つしか考慮していない。このため、身体に巻きつくような腕の運動や上体の回転による遠心力的効果を表現生成できない。

また、本手法では腕の運動の身体に対する影響を無視しているが、現実には腕の運動が歩行動作自体に影響を及ぼすこともあることや、効率化のみならず現実性を考慮したモデル化を検討する必要がある。さらに、動力学モードにおける一般化力や、運動学モードと動力学モードの重ね合わせにおける係数 α, β と運動状態との相関関係も評価する必要がある。

6 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WaveWalkと、そこで用いた腕の動作生成方法について詳しく述べ、その実現例と有効性を示した。

本手法で用いた腕の動力学的モデルは、腕以外の身体部分の運動とを互いに独立なもののみならず、肩を支点とする2重物理振子で近似したものであり、この動力学モデルから生成される動力学運動と基本動作となる運動学的運動との重ね合わせにより腕の運動をほぼ実時間で生成した。

本システムは単に歩行動作を自動生成するのみならず、多岐にわたるユーザー制御も可能であるため、個性的な誇張表現も可能であり、魅力的な映像コンテンツの生成にとって極めて有効である。

今後は、5節で述べた課題を検討するとともに、より複雑な環境への適応や実写シーンとの融合、仮想衣服の着装シミュレーションなど、より広範囲な応用へ取り組む予定である。

謝辞

日頃御指導頂く徳永映像処理研究部長、御討論頂いた映像言語研究グループの皆様にご感謝致します。

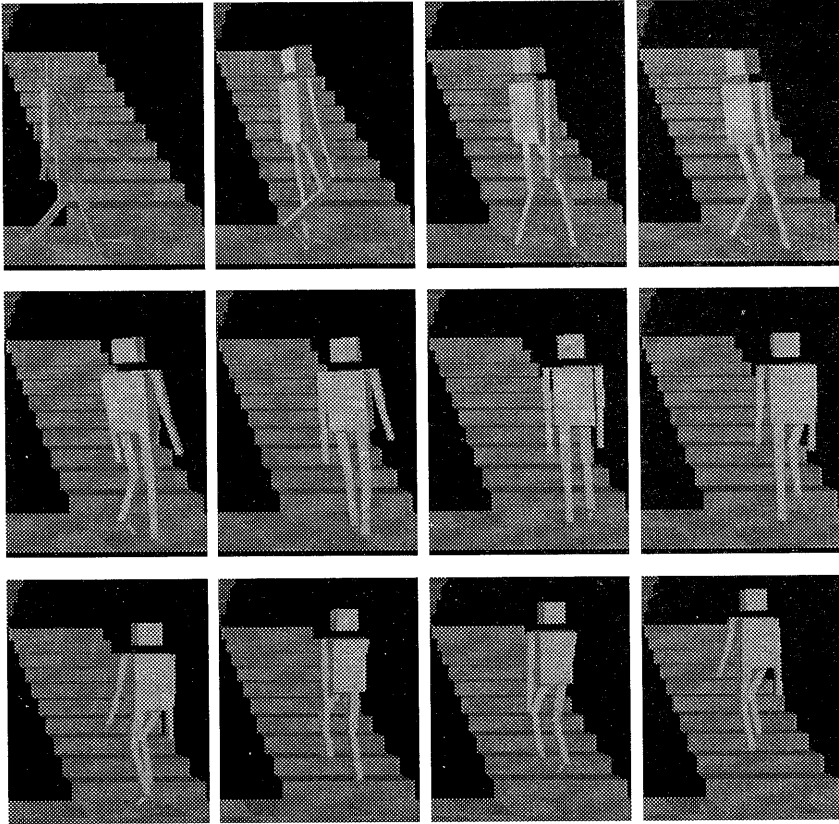


図 5: An example of generated motion of walking.

参考文献

- [1] Ronan Boulic, Nadia Magnenat-Thalmann, and Daniel Thalmann. A global human walking model with real-time kinematic personification. *The Visual Computer*, No. 6, pp. 344-358, 1990.
- [2] Armin Bruderlin and T. W. Calvert. Goal-directed, dynamic animation of human walking. *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 233-242, July 1989.
- [3] Yoshihito Koga, Koichi Kondo, James Kuffner, and Jean-Claude Latombe. Planning motions with intentions. *SIGGRAPH '94 Proceedings*, pp. 395-408, 1994.
- [4] Philip Lee, Susanna Wei, Jianmin Zhao, and Norman I. Badler. Strength guided motion. *Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 253-262, August 1990.
- [5] 中村隆一, 斎藤宏. 基礎運動学 (第4版). 医歯薬出版株式会社, 1992.
- [6] 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.
- [7] 筒口拳, 末永康仁, 渡部保日児. 室内における人物像の歩行アニメーション. *信学全大 (情報・システム2)*, pp. 419(D631), 1996.
- [8] Munetoshi Unuma, Ken Anjyo, and Ryoza Takeuchi. Fourier principles for emotion-based human figure animation. *SIGGRAPH '95 Proceedings*, pp. 91-96, 1995.