

解説

コンピュータグラフィックスのスポーツへの応用

東京大学

品川 嘉久

幸村 琢



■ スポーツとコンピュータ

スポーツに、科学的手法が導入されるようになってから久しいが、コンピュータのスポーツへの応用も近年盛んになってきている。コンピュータグラフィックス (CG) も、ハードウェア資源を多く必要とするため、スポーツへの応用は一部の先進的な研究に限られてきたが、性能向上により、野球・ゴルフを始め、実用化される例が出てきた。本稿では、コンピュータグラフィックスのスポーツ応用について、概説し、先進的な技術についても紹介する。

スポーツへのコンピュータグラフィックスの応用は、大きく分けて2つある。1つは動きの解析であり、もう1つは動きの生成である。

■ 人間の動作のコンピュータ解析

【動きの取り込み：モーションキャプチャ】

動作をコンピュータにデータとして取り込めば、それを解析したり、その結果をリターゲットしたり、見る方向を変えて表示したり、映画に用いたりできる。このモーションキャプチャには、大きく分けて2つの方法がある。

光学的方法

体の各部分の動きを、2台以上のカメラで撮影すれば、三角測量の原理でその3次元座標を計算できる。体の各部分に、何らかのマークを取り付け、その動きを、各カメラの画像から取り出す。赤外線を用いるものと、可視光を用いるものがある。

• 赤外線

マークを体と区別するため、赤外線を反射するボールを体につけ、その動きを赤外線カメラで追尾するVicon社 (<http://www.vicon.com>) のシステムが有名である。2つのマークの軌跡が交差する場合などの処理は注意を要する。

• 可視光

我々は、図-1のように、体に張り付けたマークを用いて動作をキャプチャするツールを作成して用いている。あらかじめ、測定される人のセグメント（上腕、下腕、足などの各部分）の長さを測定して、コンピュータ内に同じ大きさのモデルを構築しておく。動きを5方向（部屋の4隅、天井）から同時にビデオに撮り、マークの動きに合うよう、コンピュータ内のモデルの関節角を調整する。マークをつけていない場合でも、各画像の関節位置をマウスで指定すればよい。

光学式の欠点は、カメラの角度によっては、マークが体の陰になって見えない（遮蔽）ことである。

磁気センサを用いる方法

磁気センサ方式は、トランスミッタとレシーバの2つのユニットからなっている。トランスミッタが発生する磁場の中で、直交コイルを内蔵したレシーバを動かすと、コイルに電流が生じるので、これを計測して動きを知ることができる。例として、Polhemus社 (<http://www.polhemus.com>) のFASTRAK, STAR*TRAK 等がある。

ジュネーブ大学のMiralab (<http://www.miralab.unige.ch>) では、磁気センサ数十本を装着して、ヒンギスを模したバーチャルプレイヤとバーチャルテニスをするソフトウェアを開発した。磁気センサ方式の欠点は、センサのケーブルが邪魔になって自由な動きができず、スポーツに適用しにくいのと、自転車競技など金属が体の近くにある場合に正確に測定できないことである。



図-1 光学的モーションキャプチャツールの出力例

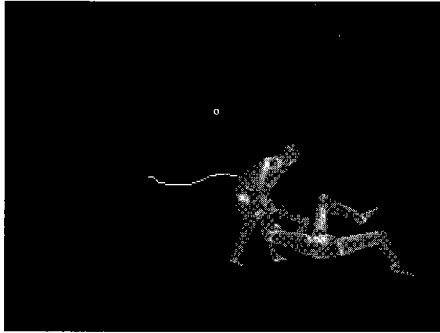


図-2 巻小手における重心の軌跡

モーションキャプチャ関連のURLのリンク集としては、たとえば、<http://www.art-magic.be/mocalink.htm>がある。

【動きの編集】

モーションキャプチャした人体の動きのデータを、快活な動きにしたり、意気消沈したデータに誇張する手法は、文献13)、1) などがある。キャプチャした動きのデータは、その人とは体の大きさが違う人体モデルで使うことができない。腕が体から離れてしまったりする。異なる大きさの人体モデルに、キャプチャしたデータと同じような動きをさせる方法を、モーションリターゲットイング (motion retargetting) という。文献4) では、元のデータと、人体モデルの動きの差を最小化するようなモデルの動きを計算させている。

【モーションデータの解析】

次に、キャプチャされた動きのデータを、解析する。たとえば、重心の移動、セグメントにかかっている力などである。

人間とロボットは共通なところが多いので、解析にはロボティクスの知識が役立つ。人間の動作は、姿勢の変化の連続である。姿勢は、各関節角の値で表される。この関節角の組をコンフィグレーション (configuration) と呼ぶ。関節角を座標軸とした空間を考えると、コンフィグレーションは、空間内の1点で表される。この空間を、コンフィグレーション空間と呼ぶ。

角度は、どこを0度にとどの方向にとるかの任意性があるが、ロボティクスで用いられるDenavit-Hartenberg表示を用いるのが一般的である。ある関節の曲がり具合を表すのに、いくつの角度が必要かをその関節の自由度と呼ぶ。たとえば手首は、2自由度の関節である。ロボティクスの基礎知識については、たとえば文献2) を参照されたい。

ロボットと人間では大きく異なる点もある。人間の関節角は、360度自由に動けるものではない。ある関節がどこまで曲げられるか、関節可動域を測定しておかないと、正しく人間の状態を計算できない。また、各々の関節角度は互いに影響し合っている。つまり、ある関節の可動域が、他の関節の角度によって変化する。この従属性の



(a)



(b)

図-3 成功例 (a) と失敗例 (b) の重心の軌跡の違い¹²⁾

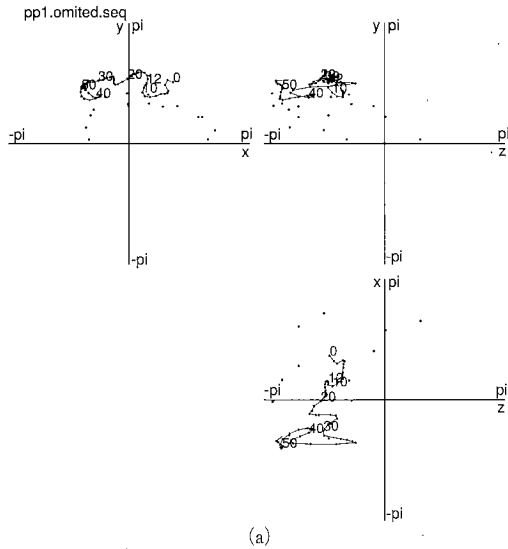
測定も動きの解析に必要なである。

図-2に少林寺拳法 (<http://www.shorinjikempo.or.jp>) の技の巻小手で投げられている人 (攻者) の重心の軌跡を計算した例を示す。重心が一度持ち上がってから、引き降ろすように投げられていることが分かる。また、タオル投げの時の攻者の重心の動きを、技の成功例と失敗例についての重心の軌跡の違いを図-3に示す。これは、切小手という技の原理を簡略化したもので、攻者にタオルを持たせ、そのタオルをうまく引っ張ることにより、攻者が前に倒れてしまう技である。普通、攻者は足を前に出して、倒れることを防げる (技の失敗)。しかし、攻者の両足を結ぶ線分に対し垂直二等分線方向にうまく引くと、攻者は足を出せず、そのまま前に倒れてしまう。この時、膝関節角と腰関節角の変化を調べると、体のバランスを回復するには、膝と腰の角度を深く曲げることはできず、前に倒れていくことが分かった¹²⁾。

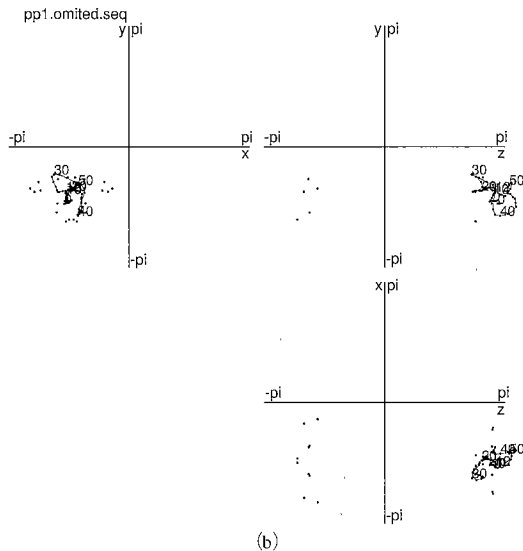
動きの解析のもう1つのトピックは、動きの比較である。2人の人間の同じような動作の、どちらが上手であるか等、スポーツでは比較が重要である。

動作は、コンフィグレーション空間内の軌道として表せる。たとえば、少林寺拳法の技の一種である小手巻返しを数回実演してもらったうち、技の成功例と失敗例について、攻者の関節の角度変化 (つまり軌道) をコンフィグレーション空間に図示したものを図-4と図-5に示す。それぞれ左膝関節と腰関節の軌跡について曲線で表示してある。曲線が通過していない黒丸は、測定によって得た関節角の限界点を示す。time = 30 (= 30/60 [sec]) 以降が、技がかかっている。

この例を解析すると、成功例に比べて、失敗例が短い間隔で振動し、可動限界との距離の変化が激しいことが分かる。また、関節角加速度を計算すると、失敗例では左膝関節角と腰関節とで反対方向に動いており、成功例

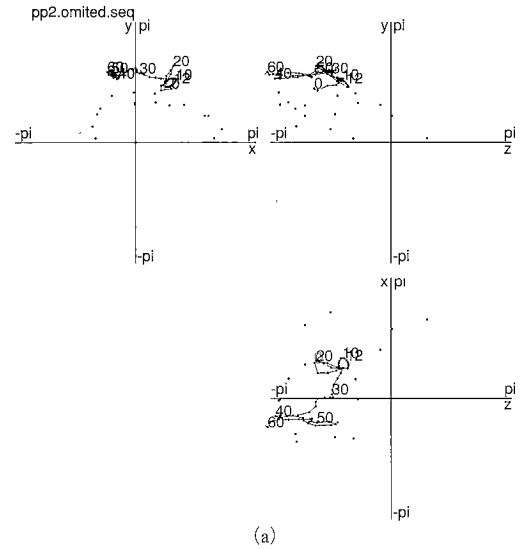


(a)

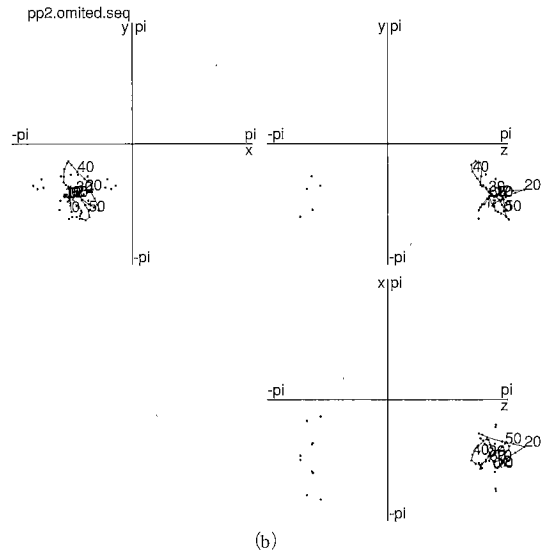


(b)

図-4 成功例における (a) 左肩関節と (b) 腰関節の
コンフィグレーション空間内のパス



(a)



(b)

図-5 失敗例における (a) 左肩関節と (b) 腰関節の
コンフィグレーション空間内のパス

では同方向であることが分かった。つまり、成功例では、相手の左肩にかかった力が、下半身に伝わっているのに対し、失敗例では腰で吸収されて、伝わっていないことが解析できる。

画像による動きの比較・解析例として、アソボウズ社 (<http://www.asobous.co.jp>) では、ゴルフのスイングのフォームを解析したり、お手本と同時再生して比べるシステムを市販している。

【力の計算】

ここまでは、動きの軌跡を解析する話だったが、次に、人体の出している力を計算する方法を述べる。有名な Newton の運動方程式 $f=ma$ のうち、モーションキャプチャのデータから加速度 a が求まる。質量 m が分かれば、力 f が求まる。これが、逆動力学 (inverse dynamics) である。Newton 方程式は、力のつり合いの方程式なので、面の抗力などを考えなければならず、解き難い。そこで、エネルギーに関する方程式に書き直した Lagrange 方程式

を用い、一般化座標を用いて運動方程式を記述することになる。

逆動力学の式を解くプログラムを書くことは難しくないが、動力学シミュレーションの汎用的なツールとして、Symbolic Dynamics 社 (<http://www.symdyn.com>) が市販している SD/FAST を使ってもよい。物体の構造を記述すれば、その物体の物理シミュレーションのためのプログラムコード (C, Fortran 等) を自動生成してくれる。

【両足で接地している場合の問題点】

人体が両足で接地している場合、地面と人体の各セグメントは閉ループを作ってしまう。つまり、方程式を解くことができない。そこで、文献 15) のような、仮説によって重心との距離に応じて両足に力を比例配分する。

【筋力の計算】

逆動力学を用いれば、ある動きをしているときに、関節にかかるトルクが分かる。つまり、関節にモータがついて

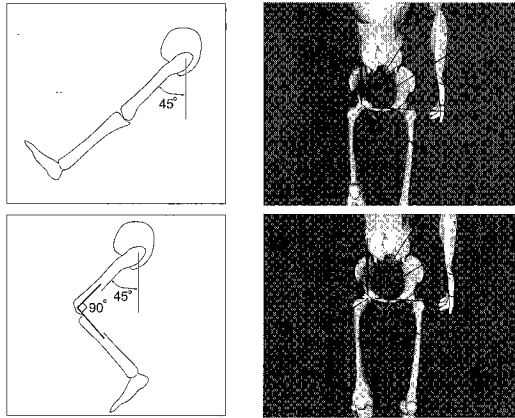


図-6 (上) 股関節が45度、膝関節が0度
(下) 股関節が45度、膝関節が90度
屈曲しているときの股関節の最大モーメントロッド⁸⁾

いるとして、そのモーメントの出すべき力が求まる。しかし、人間は、関節にモーメントがあるのではなく、骨についている筋肉がトルクを発生させる。トルクは、力と、関節の中心からの筋肉の付着点へのベクトルとの、外積である。力を計算するには、筋肉の付着点のデータが必要である。これには、Delp³⁾のデータ等が役立つ^{★1)}。このデータには足の43の筋肉の付着位置、腱の長さなどの生理学的なパラメータや関節角の可動範囲といったものが含まれている。

次に、どの筋肉がどれくらい使われるか、というのが、人間の運動の場合は重要になる。関節を動かす筋肉の数は、関節の自由度より多いため、各筋肉がどれだけの力を出しているかは一意には決まらない。これを決めるためには、文献10)などの仮説を用いる必要がある。

筋肉の活動レベルの計算

各筋肉がどれだけの力を出すかは、筋肉の太さ (PCSA; physiological cross-sectional area) によって異なり、また、どれくらい筋肉が興奮しているか (活動レベル) によっても変わる。筋肉が、ある量の力を出している時、その活動レベルを計算するには、Hillの筋肉モデル¹⁶⁾などを仮定する必要がある。Hillの3コンポーネントモデルは、1. 収縮部、2. 直列弾性部、3. 並列弾性部の3つの部分から構成される。収縮部と並列弾性部が筋繊維からなる部分を表し、直列弾性部が腱を表す。

我々は、関節を動かすとき、どの方向に動かすと、最大でどれだけの力、モーメントや加速度が出せるかをシミュレートした⁸⁾。

たとえば、図-6 (左上) のように、膝関節を伸ばしたまま、股関節を45度前方に曲げた姿勢を考える (姿勢1)。この時、股関節で発揮できる最大モーメントを、図-6 (右上) に、線分 (ロッド) を用いて表示している。線分は関節の中心から、右手系での回転軸方向に伸ばしてある。線分の長さがその軸の回りの最大モーメントの大きさを表している。図から、左方向の線分が非常に短いことが分か



図-7 足首における最大可動カロッド

る。これは、さらに前に足を出す (股関節を深く曲げる) ことが難しいことを意味するが、実際の間人でも、そのようになっていることが容易に実感できる。その原因は、膝関節を伸ばしたまま股関節を曲げた場合、大腿の後ろにあって骨盤と脛骨を結ぶハムストリングスと呼ばれる筋肉が最大限伸ばされるために弾性的な力を発揮し、股関節がさらに曲がることを妨げるためである。

次に、図-6 (左下) のように、股関節の関節角度をそのままに膝関節を90度曲げてみる (姿勢2)。最大モーメントは図-6 (右下) に示すように変化する。膝を曲げたためにハムストリングスは緩み、左方向の線分が姿勢1のときよりも長くなっているのが分かる。このため、股関節をさらに前方へ屈曲することが可能となっている。このようなシミュレーションも、筋骨格モデルを用いればできる。

図-7は、この姿勢2のときの足首における最大可動力を線分で表示してある。各筋肉がどれだけの力を出しているかを見ると、下向きの力を発揮しているときは内側広筋や外側広筋を含む筋肉群が大きな力を発揮している。また後ろ向きの力を発揮する時は大殿筋を含む筋肉群が大きな役割を果たしている。

■ 人体の動作のCGによる生成

前章では、モーションキャプチャされたデータの解析について述べたが、本章では、動作データをコンピュータで生成する方法について述べる。

人間の動作データを生成するために、各関節のトルクを各瞬間ごとにすべて記述するのは、膨大な作業を要し、自然な動作を実現することは至難の技である。そこで、各関節のトルクを自動的に決めてくれる制御系を実装することになる。

【フィードフォワードとフィードバック】

人間の脳は、2つの方法を併用しながら体を制御している⁵⁾。1つはあらかじめ決められた動きを指令する方法で、フィードフォワードと呼ばれる。他方は、感覚に基づいて、現在の姿勢を、修正する方法で、フィードバックと呼ばれる。両者がどのように使い分けられているかは、解明されていないが、大筋は次のように考えられる。

幼児が歩き始めるような、その人にとって初めての動作をするときは、フィードバックによる制御が優勢であ

★1 データは <http://isb.ri.ccf.org/isb/data/delp> から取得可能。



図-8 キック動作の反復のシミュレーション

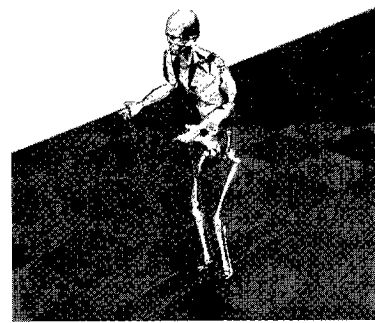


図-9 スキー動作

る。しかし、フィードバックでは素早い動作ができないので、慣れてくると、フィードフォワードによって素早い動作をするようになる。

【フィードフォワード】

フィードフォワードでは、人間は予定していた動作をする。そのコンフィグレーション空間内の軌道は、任意性がある。たとえば、コップを取ろうとするとき、腕の動かし方は、無数にある。しかし、わざと妙な取り方をするのではなく、自然に腕を伸ばしてコップを取ろうとするとき、その動きには、決まった法則があるように見える。コンフィグレーション空間内の軌道が、ある量を最適化するように決められている、という仮説は、そこに立脚している。何を最適化しているのかについても、諸説ある。

最適化を用いたアニメーション生成

最適化を用いたアニメーション生成では、動きは、ある量 J を最小にするような軌跡として計算される。たとえば、文献 11) では、各関節のトルクの自乗和

$$J = \sum_i \tau_i^2$$

を最小にするように、動作を生成した。

しかし、実際の人間では、やらないような動きが生成され得る：また人間は、一人一人筋肉が異なるので、その動きも千差万別である。そのような違いをシミュレートできないので、やはりスポーツへの応用は難しい。

人間が実際に用いている最適化の仮説として、たとえば、文献 18) では、

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_i \left(\frac{d\tau_i}{dt} \right)^2 dt \quad (1)$$

が提案されている。ここで、 J が最適化される量、 τ_i は i 番目の関節が出すトルクで、時間 t_0 に動作が始まり、 t_f に動作が終わるとする。

手の軌道については、さまざまな実験が行われているが、体全体や下半身についての実験はほとんどない。それは、体のバランス保持の問題が、からんでいて複雑だからである。下半身では、体が倒れないよう、バランスをとる

ことが重要である。

筋骨格モデルによる人間の動作の生成

我々は、体のバランスをとりながら、筋肉の活動レベルの自乗和を最適化した場合の軌道を求め、人間の歩行や立ち上がる動作、キック動作などをシミュレートした⁷⁾。さらに、筋肉の乳酸濃度の変化のモデルを用いて、反復動作による疲労の影響を筋肉ごとに可視化した。どの筋肉がどれくらい疲労したり、ダメージを受けると、動作がどう変化するかもシミュレートできる⁸⁾。図-8に、100回キック動作を繰り返して、疲労のため、体が後傾している様子を示す。

【フィードバック】

前節では、人間が予定通りの行動をとるフィードフォワード動作の生成方法について述べた。実際の人間では、常に予定通りの動作が遂行可能だとは限らない。たとえば、立ち上がろうとして、不意に前から押されたりすると、立ち上がる動作から、バランスを何とかして保とうとするフィードバック動作に切り変わる。

PD制御

制御系として、簡便なのは、PD (Proportional-Derivative) 制御である。まず、動作のキーフレームとなる姿勢をいくつかと、その姿勢での関節角や角速度を記述する。トルクは、

$$\tau_i = k_p(\phi_d - \phi) - k_v(\dot{\phi}_d - \dot{\phi})$$

で計算される。ここで、 ϕ_d と、 $\dot{\phi}_d$ は、次のキーフレームにおける角度と角速度であり、 ϕ は現時点での角度である。つまり、指定された動きとどれだけずれているかに応じてトルクを発生させるわけである。 k_p と k_v は、関節の強さを表し、gain constants と呼ばれる。文献 9)、14) では、これを歩行動作生成に、文献 17)、6) は、これを走る動作の生成に用いた。

しかし、人体の動作は、ロボットのように関節につけたモータで動いているわけではないので、スポーツのシミュレーションとして、PD制御を使うのは無理がある。

反射による制御

フィードバックを、前述したPD制御で行う方法がよく

用いられるが、前述したように、筋肉では発揮し得ない大きなトルクが発生したりするため、動きが不自然になる。そこで我々は、フィードバックも、筋肉の伸長反射（筋肉に不意に力がかかるとそれを打ち消そうとする人間の反応）により制御する方法を研究している。図-9は、この方法を用いて、スキー動作の制御をしている様子を示す。

【ビジブル・ヒューマン・プロジェクト】

実際の骨・筋肉の大きさ・形状・付着位置などを計算する上で、人体データが必要になる。これは、Visible Human Project (http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html) のCTやスライスデータが役に立つ。ここから骨のデータを取り出し、可視化するプログラムは、<http://www.crd.ge.com/esl/cgsp/projects/makevw/>に公開されている。

■ スポーツへのCGの応用事例

前章までに取り上げた以外にも、CGのさまざまな応用事例があるので、数例を挙げてみよう。MITのLeg laboratory (<http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/>) では、鉄棒動作の物理的シミュレーションを行っている。

Georgia Institute of TechnologyのHodginsらは走行動作などのアニメーションを作成している (<http://www.cc.gatech.edu/gvu/animation>)。しかし、これは、ロボットと同じPD制御によるものであり、生物学的なシミュレーションではない。

慶應義塾大学生体医工学の山崎研究室 (<http://www.yamazaki.mech.keio.ac.jp>) では、 α 運動ニューロンや歩行リズム発生器などの神経機構をモデル化して、そのパラメタを遺伝的アルゴリズムで最適化し、歩行動作を生成している。また、弓道の矢を離れた直後の体の振動を調べ、筋骨格モデル上で振動解析を行っている。

エンターテインメントに目を移すと、実際の大リーグのモーションキャプチャを用いたゲームHigh Heat Baseball 2000などが市販されている。

■ おわりに

本稿に記した事例以外にも、CGのスポーツへの応用は、たくさんの可能性が秘められている。また、モデルの精度の向上に伴い、スポーツ以外にも、エルゴノミクスや医療応用などへも応用できる。

CGを用いることの大きな利点は、得られた結果が妥当であるかが、瞬時に判断できることである。筋肉のモデルや、その制御系のモデルを作ったとしても、それが良いモデルであるかは、数値からは判断が難しい。しかし、その

モデルに基づいて生成された動作が、ぎこちなく奇妙であれば、そのモデルは誤っているか、足りない部分が多いといえる。人間の眼は、人体動作について、非常に敏感だからである。生体力学的人体動作モデルの研究においても、CGの利用の利点が広く理解されることを願ってやまない。

取り上げた項目は多岐に渡るため、それぞれの項目について、すべての手法を網羅して解説することはできず、代表的なものを挙げるにとどめた。参考文献も数を絞り込まなければならなかったため、参考文献が引用している文献も参照されたい。筆者らの研究については、<http://www.sinagawa.is.s.u-tokyo.ac.jp/~sinagawa>に、記述してあるので、そちらもご参照いただければ幸いである。

参考文献

- 1) Bruderlin, A. and Williams, L.: Motion Signal Processing, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95), 29:97-104 (1995).
- 2) Craig, J. J.: Introduction to Robotics: Manipulation and Control, Addison-Wesley (1986).
- 3) Delp, S., Loan, P., Hoy, M., Zajac, F., Fisher, S. and Rosen, J.: An Interactive Graphics-based Model of the Lower Extremity to Study Orthopaedic Surgical Procedures, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 37 (8) (Special Issue on Interactive with and Visualization of Biomedical Data) (Aug. 1990).
- 4) Gleicher, M.: Retargetting Motion to New Characters, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pp.33-42 (1998).
- 5) Gomi, H. and Kawato, M.: Equilibriumpoint Control Hypothesis Examined by Measured Arm Stiffness During Multijoint Movement, Science, 272:117-120 (1996).
- 6) Hodgins, J. K., Wooten, W. L., Brogan, D. C. and O'Brien, J. F.: Animation of Human Athletics, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95), pp.71-78 (1995).
- 7) Komura, T., Shinagawa, Y. and Kunii, T. L.: Muscle-based Feed-forward Controller of the Human Body, Computer Graphics Forum, 16 (3) : C165-C176 (1997).
- 8) Komura, T., Shinagawa, Y. and Kunii, T. L.: The Calculation and Visualization of Dynamic Ability of the Human Body, The Journal of Visualization and Computer Animation, in press.
- 9) Laszlo, J., Michiel van de Panne and Fiume, E.: Limit Cycle Control and Its Application to the Animation of Balancing and Walking, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 96), 30:155-162 (1996).
- 10) Crowninshield, R. D. and Brand, R. A.: A Physiologically Based Criterion of Muscle Force Prediction in Locomotion, Journal of Biomechanics, 14:793-800 (1981).
- 11) Rose, C., Guenter, B., Bodenheimer, B. and Cohen, M. F.: Efficient Generation of Motion Transitions Using Spacetime Constraints, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 96), 30:147-152 (1996).
- 12) Shinagawa, Y., Nakajima, J., Kunii, T. L. and Hara, K.: Capturing and Analyzing Stability of Human Body Motions Using Video Cameras, In Proc. Computer Animation '97, pp.48-57, IEEE Computer Society Press (1997).
- 13) Unuma, M., Anjyo, K. and Takeuchi, R.: Fourier Principles for Emotion-based Human Figure Animation, Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 95), 29:91-96 (1995).
- 14) Michiel van de Panne: Parameterized Gait Synthesis, IEEE Computer Graphics and Application, Mar.:40-49 (1996).
- 15) Vukobratović, M., Borovac, B., Surla, D. and Stokić, D.: Biped Locomotion, Springer-Verlag (1990).
- 16) Winters, J. M.: Hill-based Muscular Models: A Systems Engineering Perspective, In Jack M. Winters and Savio L-Y, Woo, Editors, Multiple Muscle Systems: Biomechanics and Movement Organization, Chapter 5, pp.69-93, Springer-Verlag (1990).
- 17) Wooten, W. L. and Hodgins, J. K.: Animation of Human Diving, Computer Graphics Forum, 15 (1) : 3-13 (1996).
- 18) Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R.: Formation and Control of Optimal Trajectory in Human Multijoint Arm Movement, Biological Cybernetics, 61:89-101 (1989).

(平成11年8月5日受付)