



応  
専

# モーションキャプチャデータの高度利用

## 一人の動きの編集から即応的生成へ

向井 智彦

(株) スクウェア・エニックス

栗山 繁

豊橋技術科学大学

### 計測データ+プロシージャル

情報処理分野において、高度センシング技術と大規模データの利活用技術は近年大きな発展を遂げたが、人物アニメーションの技術も例に漏れず、リアルな動きの制作には大量の計測データを利用する技術が盛んに開発されてきた。

当初は医療分野の歩容計測等の目的で開発されたモーションキャプチャ装置は、リアルな動きの制作が求められたCG映画においてその後利用が拡大した。その装置で計測されたデータ（以後、MoCapデータ）を対象とした研究の変遷を表-1にまとめた。前世紀は装置も高価であり、認識精度不足からデータの後処理にも多大な労力が必要とされたので、希少価値のあるデータを編集して再利用する技術<sup>1)</sup>が開発された。今世紀になり装置の価格と後処理のコストが低下し、さらに無償で利用可能なデータベース<sup>☆1</sup>も普及したことにより、大量データの利用技術が研究対象となった。

さらに最近に至っては、実時間性が要求されるビデオゲーム等に用いるために、計測データから即応的に動きを生成する技術に重点が移っている。この技術は入力操作や仮想環境の情報に基づき、大量に蓄えられたMoCapデータから適切な断片を実時間

で選択して変形・補間する手段を提供する。これらはMoCapデータ群から新たなデータを手続的に即時生成するので、「プロシージャル技術」と総称されている。

また、最近のビデオゲームのハードウェア装置では動作入力用の新たなコントローラが普及しているが、カメラや慣性センサ等のデバイスで計測される動きははまだ精度が低いので、精度の高いMoCapデータと連動させる技術が活発に開発されている。本稿ではこれらもプロシージャルな技術として、併せて紹介する。

### プロシージャル技術の動向

#### ■ 即応的生成への展開

人の生身の動きを容易に再現できるモーションキャプチャの技術は、説得力のあるリアルな動きの再生表示が要求されるビデオゲームや行動シミュレー

技術潮流	対象技術	計算法
単体データの編集時代 (~2000年)	動作変形・遷移 階層的編集 時空間制約 環境/体格差の補正	スプライン フーリエ解析 逐次二次計画法 逆運動学
大量データの利用時代 (2000年~2005年)	運動制御同定 モーショングラフ 動力学的最適化 制約付き動作補間	状態空間モデル 動作類似度評価 特異値分解 線形回帰分析
プロシージャルな活用時代 (2005年~)	データ駆動型制御 動作行動計画 低次元操作空間写像 データ圧縮/検索	フィードバック/ フォワード制御 強化学習 ベイズ推定 非線形回帰分析

表-1 MoCapデータ編集技術の変遷

☆1 CMUの提供するデータベース (<http://mocap.cs.cmu.edu/>) が世界的に有名で数多くの研究で利用されている。ほかにもドイツや筆者の研究室でも公開されている (<http://www.mpi-inf.mpg.de/resources/HDM05/>, <http://tomolow.val.cs.tut.ac.jp/>)。

ションの分野においてさらなる発展が期待されている。たとえば、スポーツゲームでは有名なアスリートの動きをCGキャラクターで忠実に再現すれば、プレイヤーのゲーム体験を高められる。しかしながら、MoCap データは現実の撮影環境の中で計測された演技者の動作データであるため、CGで構築される仮想的な環境との設定が異なる場合、データを未加工のまま用いると明らかに不自然な結果となる。たとえば、斜面を昇降するようなシーンに平地の歩行データを適用すると、足が斜面を貫通したり空中に浮いたりするなどの不具合を生じる。一方、大量のシーンで構成されるロールプレイングゲーム等において、環境条件の変化に対応した動きのMoCapデータをすべて用意することは、制作コストの面から考えて現実的ではない。現実の撮影環境とCG仮想環境の位置的な相違や、演技者とCGキャラクター間の体格の相違等を補正する技術は、オフラインでの処理に関しては表-1に示すようにすでに多くが提案されているが、これを実時間で即応的に計算する技術が求められている。

## ■ クリップデータ遷移手法の限界

ビデオゲームにおけるアニメーション制作では、意味ある単位で短時間に区切られたMoCapデータ(以後、クリップ)を多数用意し、ユーザの操作やシーンに応じて切り替えながら再生する方式が広く用いられている。通常は、あるクリップから他のクリップに動きを切り替える際には、不自然な動きを抑止するために類似した姿勢や動きを有するクリップ間でのみ切り替え(遷移)を許可し、その遷移可能性の関係はアニメーショングラフと呼ばれる有向グラフ構造で表現される。すなわち、クリップ間での遷移の開始/終了点を端点とした有向枝でグラフが構築され、アクションゲームでは図-1のようなグラフとなる。したがって、ユーザの操作に応じて逐次的に遷移経路を決定して一連のアニメーションが対話的に生成される。さらに、段差や斜面などの地形変化に応じたクリップを追加することで、環境に適応するアニメーションを自動生成できる。

アニメーショングラフはデザイナーのような非技術者でも直観的に編集できることから、多くのゲームエンジンやミドルウェアで採用されているが、利用に際していくつかの技術的課題が残されている。まず、現実的に制作できるクリップの数は、制作期間や予算によって大きく制限される。そのため、アニメーションの品質を保証しつつ、用いるクリップ数を、その遷移可能性を試行錯誤的に確認しながら最小限に抑える編集作業が要求される。また、目標のクリップに至る複数の遷移経路の中から最適なものを選択するルールの実装には熟練を要する。たとえば、図-1では歩行から攻撃への遷移には最短経路だけでなく停止を経由する経路等もあり得るが、実際の制作現場では経路選択の際の条件分岐の構造やパラメータを手動で調整している。ゆえに、環境条件や動作の自然さなどを考慮した最適経路を自動的かつ直観的に設計できる機構の開発が求められている。

以上に述べてきたように、環境条件と操作入力に応じてクリップを切り替えながら動作再生する従来手法は、無数のクリップが用意できる理想的条件では十分に機能するのだが、実際の制作現場では一定の妥協が必要とされている。その結果、プログラム

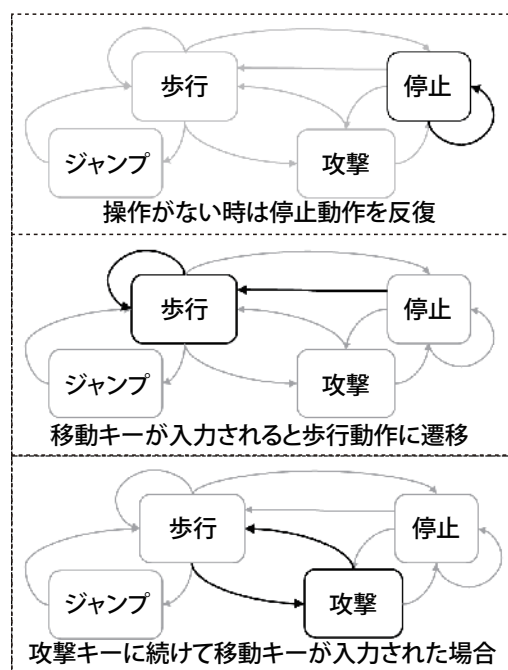


図-1 アニメーショングラフを用いた動作生成

によって少数のデータから新たなクリップを自動的に変形・合成する、プロシージャルな技術への注目が高まっている。以降の節では、計測データを数値処理的に変形・合成する手法と、動力的シミュレーションを導入する手法、および操作入力との連携手法等について紹介する。

### ■ 統計処理に基づく即応生成

現在普及している MoCap データの編集技術は、幾何学的な変形や信号処理の技術を導入した手法が主流である。しかし、計測データの自然さを損なわないように加工を施すにはアドホックな処理や操作を加える必要があり、その作業の肥大化や複雑化が制作コストの上昇原因となっている。

そこで近年では、機械学習分野の技術を応用して複数の MoCap データを統計処理する手法が開発されている。代表例として、ノンパラメトリック回帰法を用いて複数の MoCap データを補間し、新しい中間的な動きを生成する技術が提案されている。この補間法は、動作の特徴を表す少数の制御パラメータを通じてアニメーションを実時間生成できる。たとえば、速度や進行方向が異なる少数の歩行クリップを補間することで、指定された速度と進行方向を満足する新しい歩行クリップを自動生成できる。回

帰法として動径基底関数やガウス過程回帰法などが応用されており、筆者らも空間統計学で提案されたクリギング法を導入して補間精度を向上する技術<sup>2)</sup>を開発した(図-2)。この例では、パンチの手先位置を操作パラメータとしてサンプルデータを補間している。さらに、最近では動作補間とアニメーショングラフの統合も試みられている。これは、グラフのノードに相当する固定クリップを補間法により動的に変化させて、動きのバリエーションを増やす方法である。

また、ベイズ統計学を応用することで、MoCap データの統計的な性質を保ちながらデータの次元数を削減する技術が開発されている。すなわち、人の総関節自由度と同数の変量の時系列データである MoCap データを事後分布とみなし、適切な尤度関数を定義した上でベイズ理論に基づいて低次元の事前分布を推定する。たとえば、図-3は60次元以上の MoCap データを、主成分分析法(PCA)で2次元空間に写像した結果であり、剣の振り下ろしと振り上げの2つのモーションを同時に写像した結果、見目の似た姿勢が近辺に配置されるような2次元曲線が得られる。ゆえに、これを遷移動作の対話的な編集操作にも利用できる。そのほかにも、ガウス過程モデル<sup>3)</sup>などのさまざまな確率統計モデルが応用されており、MoCap データの圧縮をはじめ、類似姿勢やクリップの高速検索、任意の制約条件を満たすデータの合成、およびクリップ間の遷移の最適化等、幅広い用途に活用され始めている。

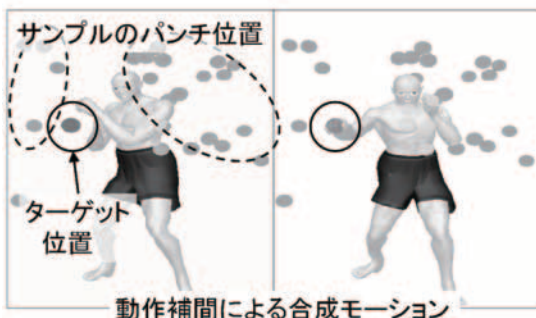


図-2 空間統計学を利用した動作補間

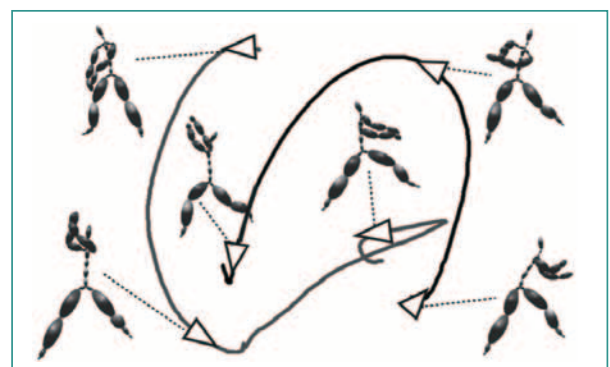


図-3 次元数削減の例



### ■ 動力学的な処理との融合

CGアニメーションでは、人体をヒューマノイドロボットのような剛体リンク構造でモデル化し、その運動を物理法則に基づきシミュレーションする技術が古くから研究されてきた。これまでは人体の受動的な挙動を動力学計算により生成する手法<sup>☆2</sup>に焦点が当てられてきたが、近年では能動的な振舞いの再現が注目されている。特に、MoCap データを参照しながら物理法則に基づいてモーションを合成する技術が盛んに提案されており、これらは所持物の質量や地形が変化した際の人物の動きを簡便にシミュレーションする。この動力学的アプローチは、主にフィードバック制御理論に基づいて関節の駆動トルクを操作する方法と、MoCap データに加える変形量を最適化する方法に大別される。

前者は図-4 (a) に示すように、MoCap データを制御目標として与え、PD 制御法などに基づいて関

節回転を駆動するトルクを計算する機構と、図-4 (b) のように MoCap データから逆動力学計算で推定される関節トルクを追従する機構が提案されている。両者とも可能な限り制御目標に追従しつつ、外乱として与えられた環境変化を反映した動きをフィードバック制御によって合成している<sup>4)</sup>。これらのアプローチは計算プログラムが比較的単純で高速に計算できる一方、制御方法に応じて適切な MoCap データを選択する必要がある。この問題の解決策として、近年では PD 制御のフィードバックゲインをロバスト制御理論に基づいて実時間に最適化する方法や、追従対象となる MoCap データを自動選択して最適化する技術等が提案されている。

一方、図-4 (c) の手順では MoCap データに加える幾何学的な編集を、動力学的な評価指標に基づいて最適化する。まず、関節の回転角波形を振幅や位相の変調により変形し、次に全身のバランスや運動エネルギー最小性などの力学的な指標を用いて変形結果を評価する。そして、より高い評価が得られるように変形量を更新する処理を反復し、外力や環境の変化に適応する動きを動力学的に最適化する。この反復処理には多大な計算量が必要とされるが、CPU の性能向上やアルゴリズムの改良等により、即応的な実時間処理が得られるようになるであろう。

### ■ ユーザ操作との連携

格闘技やスポーツ系のビデオゲームにおいて、人物の動きはもっぱら手指の操作によって制御されていたが、Wiimote コントローラによって腕全体の動きを入力操作に利用できるようになり、XBox コントローラの Kinect によって全身の動きによる操作までが可能となった<sup>☆3</sup>。この技術は身体にマーカを貼る必要がないので、動きを手軽に計測できる反面、解像度の不足により計測精度は低く、正面から捉えられる動きしか認識できない。しかしこれらの欠点

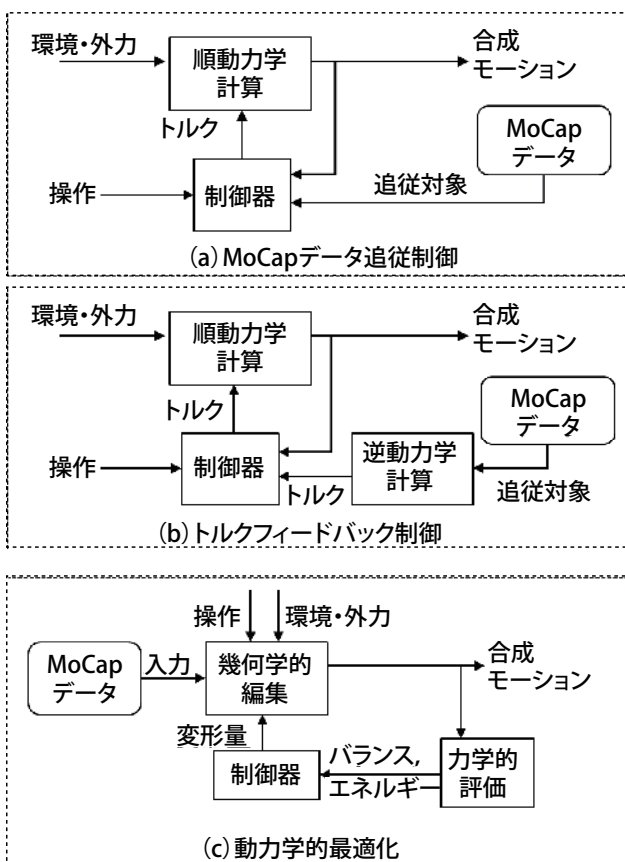


図-4 モーションキャプチャデータを用いた動力学シミュレーションの制御

☆2 筋力の生成を伴わない人形のような動きを生成するので、ラグドール・シミュレーションと呼ばれている。

☆3 昨年より、この Kinect を用いてモーションキャプチャが行えるソフトウェアも無料で利用できるようになった (<http://www.drf.co.jp/liveanimation/>)。

は、動作やジェスチャを大まかに認識できればよい。ビデオゲームにおいては、通常は問題にはならない。ただし、プレイヤーの動きを模倣してCGキャラクターを高品質に動かしたい場合には、**精度の低い計測信号と連動させて MoCap データを即応的に再生する必要**がある。

ゲーム用のコントローラから入力される信号は時空間での精度が低いだけでなく、データの次元数や計測される特徴量が異なるので、その相違を吸収する中間的な表現が必要となる。簡単なアプローチとしては、CGキャラクターを多様かつ大量の学習用 MoCap データで動かし、仮想的な環境でコントローラを使用した場合のセンサ信号をシミュレーションによって得る。そして、その信号を各 MoCap データに対するインデックスとして登録し、実物のコントローラの信号と最も類似するデータを検索すれば対応する MoCap データが得られる。また、入力信号の分布空間から MoCap データで得られる姿勢状態の分布空間への写像を学習する手法も提案されている。このとき実時間での検索が必要となるので、探索空間の次数や複雑度を削減するために局所線形モデルやKD-木、および効率的な最近傍探索を用いた手法等が提案されている。

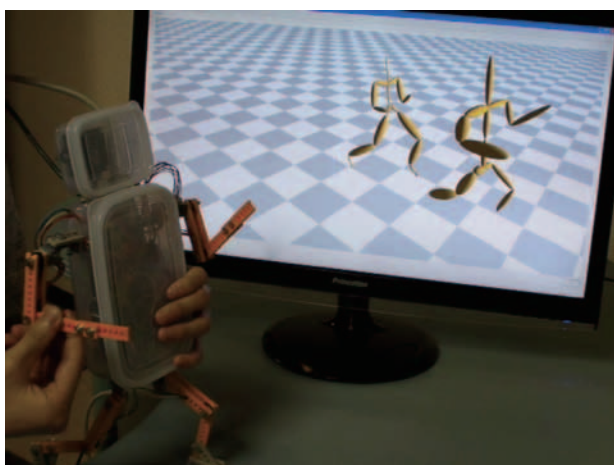
一方、身体動作の入力操作に関する新たな技術展開として、分身型のコントローラが開発されてい

る。たとえば、人形コントローラ (図-5 (a)) を用いて MoCap データを検索する手法や、人間の実際の関節可動域を考慮して反力を発生するロボット (図-5 (b)) を用いて姿勢を直観的に入力するコントローラが開発されている<sup>☆4</sup>。ただし、自分で生身の体を動かすような精度と複雑度でCGキャラクターを実時間操作するのは、これらのコントローラを用いても実際にはいまだに難しいと思われる。しかし、人形やロボット自体への親近感や魅力を活かすことにより、動きの操作手段に新たな価値を付加できる可能性がある。さらに今後は、ビデオゲームの実装環境として急激に普及しているスマートフォンに特化した動作の入力操作も、さまざまな方式が開発されるであろう。

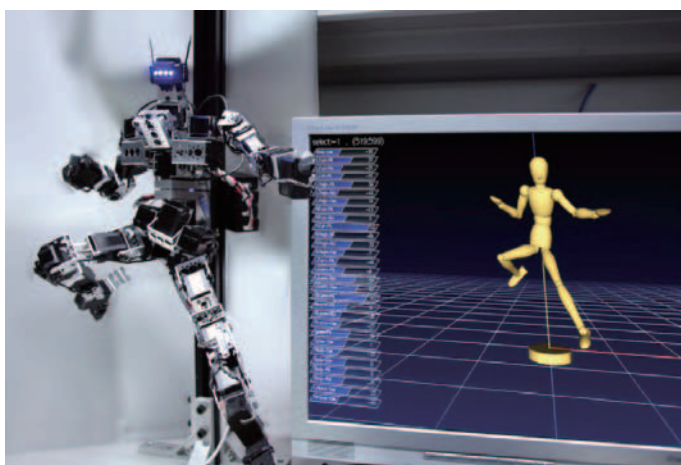
## 真の能動制御は実現するか?

### ■ ロボットから CG への壁

ロボット技術者だけでなく CG アニメーション技術者も「能動的制御の完全な自動化」の実現が共通の最終目標であるように思われる。前章で紹介したように、能動的な動きの自動生成に技術目標が移行しつつあるが、自動制御といっても実際には MoCap データを用いて動きを駆動しているのが現状である。この方式では所詮、生成動作は使用するデータの挙動を多少変化させる程度にとどまり、新



(a) 人形コントローラによる MoCap データ検索  
(画像資料提供: 大阪大学 中澤篤志講師)



(b) ロボットコントローラによる姿勢入力  
(画像資料提供: JST ERATO 五十嵐プロジェクト)

図-5 分身型の姿勢・動作入力コントローラ

☆4 ほかに製品化の事例もある (<http://quma.jp/jp/quma/>)。

たな拳動までは生成できない。さらに、CG 映像コンテンツの観点からは、現在のロボットの制御モデルでは解決が困難な以下の問題が、能動制御の自動化への大きな壁として立ちはだかっている。

### 【超安定化問題】

ビデオゲーム等の娯楽目的で用いる場合には、現実世界ではあり得ない異常な動力学的条件や反応が演出のために課せられる場合も考慮しなければならない。実際に、物理法則に忠実に計算された動きは、大きな外力が加えられる状況でなければ迫力に欠く退屈なものとなる。ゆえに、**物理法則を超えた安定化制御の方法**が必要となる。

### 【昆虫化問題】

身体を単純な剛体リンク構造としてモデル化する動力学制御では、人特有の柔軟さや重量感を有する動きを生成するのが困難である。つまり、昆虫のような軽量な外骨格生物の動きしか生成できないので、人の実際の骨・筋・腱の構造や体脂肪等の柔軟要素に基づく動力学計算を、**要所において取り込む必要がある**<sup>☆5</sup>。しかし一方では、人体モデルの精密化は前述した安定化のための計算コストも増大させることを留意する必要がある。

## ■ 脳神経科学か？ 認知心理学か？

昨年、IEEE の雑誌 CG&A で組まれた物理ベース・キャラクターアニメーションの特集号<sup>5)</sup>の冒頭記事でも触れられていたが、能動的動作を全自動で生成するのが難しいのは、我々の脳が発する運動指令を簡単にはモデル化（プログラム化）できないからである。現在の脳神経科学の分野で研究対象となっているのは部位の限定的な動作（たとえば、歩行や腕の振り等）であり、格闘や舞踊などの複雑でダイナミックな動きや、感情伝達のための微妙なニュアンスを含む動きを生成するための脳の運動指令は対象とされていない。これらの運動指令を計算機構に組み入れるために、脳神経科学においても今後に解明すべき点は多いであろう。

☆5 詳細な人体筋骨格モデルの動力学シミュレーションには OpenSim というフリーソフトが利用できる (<http://simbios.stanford.edu>)。

一方、たとえ緻密な筋骨格モデルを用いて膨大な量の動力学計算で自然な動きをシミュレーションできたとしても、その結果得られる動きの品質の向上を人間自身が見分けられなければ意味がない。CG の場合には特に、「**見た目の自然さや印象が同じであれば、計算コストは少ないほど良い**」という共通の価値観が存在する。その観点に立つと「人の動きに対する認知感度」の解明も工学的には重要な課題である。認知心理学の分野では、移動点群から人間らしい動きを見分ける実験等が行われてきたが、計算で生成された人工的な動きと計測で得られた実際の動きを分別する認知機構の解明にまで踏み込む必要がある。つまり、**人体構造の精緻化の程度は、動作認知感度に依拠して設計されるべき**であろう<sup>☆6</sup>。これからの CG アニメーション技術の研究開発者は、これら人を対象とした先端科学分野で得られた知見を、工学的な観点から巧みに取り入れていくべきであろう。

### 参考文献

- 1) Gleicher M. : Comparing Constraint-Based Motion Editing Methods, Graphical Models, Vol.63, No.2, pp.107-134 (2001).
- 2) Mukai, T. and Kuriyama, S. : Geostatistical Motion Interpolation, ACM Trans. Graph., Vol.24, No.3, pp.1062-1070 (2005).
- 3) Grochow, K., et al. : Style-Based Inverse Kinematics, ACM Trans. Graph., Vol.23, No.3, pp.522-531 (2004).
- 4) Yin, K., Loken, K. and van de Panne, M. : SIMBICON : Simple Biped Locomotion Control, ACM Trans. Graph., Vol.26, No.3, Article 105 (2007).
- 5) Hertzmann, A. and Zordan, V. : Physics-Based Characters, IEEE CG&A, Vol.31, No.4, pp.20-21 (2011).
- 6) 栗山 繁 : 視覚認知に基づく人間の動きの可視化用モデル、計測と制御, Vol.45, No.12, pp.1024-1029 (2006).

(2012年2月17日受付)

向井 智彦 (正会員) [tmki@acm.org](mailto:tmki@acm.org)

2006年豊橋技術科学大学院博士後期課程修了。同年同大助教。2009年(株)スクウェア・エニックス。コンピュータグラフィックス、ヒューマノイドアニメーションに関する研究開発に従事。

栗山 繁 (正会員) [sk@tut.jp](mailto:sk@tut.jp)

1987年大阪大学大学院修士課程修了。博士(工学)。1988年日本IBM東京基礎研究所。1994年広島市立大学助教授。1998年豊橋技術科学大学助教授。2005年同教授および2009年まで産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターチーム長(兼務)。

☆6 CG アニメーションの基礎的な認知モデルに関する研究の紹介は、少々古い拙稿ではあるが筆者の過去の解説記事<sup>6)</sup>も参考にしていたければ幸いである。