

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11607

研究課題名（和文）高精細CGキャラクタ表現のための実時間皮膚変形計算モデルの学習

研究課題名（英文）Learning Real-time Skin Deformation Models for 3D Virtual Characters

研究代表者

向井 智彦（Mukai, Tomohiko）

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：10432296

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：高精細な変形を与える一方で長大な計算時間を要する皮膚変形計算モデルを入力として、その皮膚変形を模倣する軽量なモデルを自動構築するシステムを開発した。具体的には、仮想筋肉やデザイナーが手動構築した複合的モデルを、補助骨と呼ばれる高速演算可能な技法を用いて近似する。その際、補助骨の幾何学変換自由度を拡張する技法、ノンパラメトリックな補助骨の制御機構、および変換元となる最適な入力データを推定する技法を開発することで、従来技法よりも高品質な皮膚変形計算を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した一連の技術群は、オフライン向け映像コンテンツや蓄積されたデータ資産から実時間アプリケーション向けにデータを自動変換するシステムの実現を可能とする基盤技術である。これは、実時間CGアプリケーションにおけるキャラクタの存在感・実在感の向上につながるものであり、ひいてはVRやAR、次世代デジタルゲームのコンテンツ品質向上など、デジタル人体やデジタルクリチャーを扱う様々な分野に寄与するものと考えている。

研究成果の概要（英文）：We have developed a system that automatically constructs a lightweight mathematical model that mimics the skin deformation obtained using a heavy-weight deformation model (e.g., a virtual muscle or a complex model manually constructed by a designer). Our method enables to synthesize skin deformation with higher quality than conventional techniques based on helper bone technique, by the proposed technique for extending the geometric transformation degrees of freedom of helper bones, a nonparametric control mechanism for the helper bones, and a technique for estimating the optimal example data of skin deformations.

研究分野：コンピュータグラフィックス

キーワード：コンピュータグラフィックス キャラクタアニメーション スキンング

## 1. 研究開始当初の背景

3次元コンピューターグラフィックス(3DCG)映像作品の印象を決定づける要因として、キャラクターの造形やアニメーション表現が占める割合は非常に大きい。そのため、アニメーターが直感的かつ効率的にCGキャラクターの外観形状を編集するための操作機構は未だ重要な技術的課題である。特に、ゲームやバーチャルリアリティなどの実時間アプリケーションに必要な高速応答を保証しつつ、複雑な皮膚変形を実現する技術は未だ確立に至っていない。関連する多数の学術研究成果も報告されているが、制作現場での実用に至る技術は残念ながら少ない。これには種々の要因が挙げられるが、映像品質の問題や計算時間といった技術面の問題だけではなく、制作現場におけるワークフローやパイプラインへの組み込み等、運用面での要件を満たしていないケースが少なくない。

## 2. 研究の目的

本研究では、高精細な皮膚変形表現と実時間計算を両立させる計算モデルの確立を目指す。特に本申請では、デザイナーが所望する皮膚形状を例示することで、実時間に適した非線形皮膚変形計算モデルを学習する手法を開発する。さらに、現実には複雑な筋骨格系によって駆動される皮膚形状を、デザイナー作業と親和性の高い少数のパラメータを通じて操作するインターフェースについても研究する。その際、協働企業との密接な連携を図ることで、実践的な制作工程における可用性および安定性にも優れた、商品制作にも耐えうる高品質・低コストな皮膚変形アニメーション制作システムを構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、多くの制作現場において実用化されている、補助骨と呼ばれる技法を拡張する技術について研究した。補助骨とは、筋肉や脂肪などの軟組織の運動を仮想的な骨格の運動によって表現する技術の総称であり、また既存のシステムは平行移動と回転運動のみを扱うことが多かった。本研究では(1)スケール成分を含めるための拡張を図るとともに、デザイナーが制作した仮想筋肉リグや力学計算モデルといった重厚長大なモデルから、実時間計算向けの補助骨システムを自動構築するために、変換元モデルから最小量の学習用データを抽出することで変換コストを削減する技術を開発した。さらに、(2)補助骨の非線形な運動を模倣する数理モデルとして、従来技法で用いたパラメトリック回帰モデルの代替として、ノンパラメトリック回帰モデルの一種である動径基底関数補間法を応用した。

## 4. 研究成果

(1) スケール成分を含む補助骨運動の自動学習、および最小量の学習用データの抽出技術の開発に取り組んだ。提案システムは、変換元となる任意のスケルトンリグから二段階のサンプリングによって最小数の例示データを取得したうえで、例示ベーススキニング法を適用することで補助骨を伴うLBSリグを自動構築する。例えば、図1(a)に示すような仮想筋肉リグを変換元とするとき、まず図1(b)のように、各ジョイント回転を対象とした一様サンプリングを施して複数の例示ポーズを得る。続いて図1(c)に示すように、ジョイント回転とスキン頂点移動量の関係を定量化する2種類の幾何学的指標を最適化する少数のサンプルのみを選別したうえで、例示ベーススキニング法によってLBSリグを構築する。こうし

て二段階のサンプリングを経ることで、変換精度を保ちつつ例示データスキニングにおける計算量を削減する。そして、変換元との誤差を補填するために、相似変換成分を示す補助骨を挿入する。従来法では、スキン変形の剛体変換を推定する解析的アルゴリズムのみを用いていたが、提案法ではさらにスケーリング変換を推定するために、剛体変換推定とスケール成分の制約付き最小二乗推定を反復的に実行する交互最小二乗最適化アルゴリズムを適用する。最後に、挿入された補助骨を制御するための多項式を、例示データの主ジョイント回転に関するスパース最適化を通じて推定する。

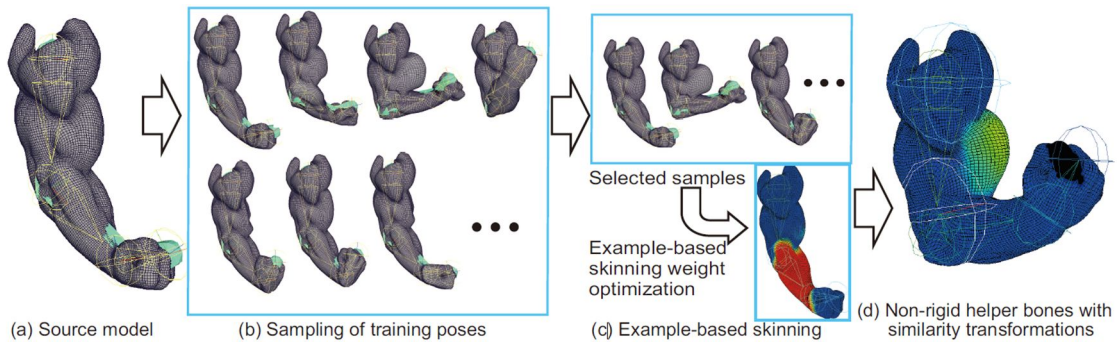


図 1：自動サンプリングを通じた非線形補助骨運動の推定

提案技術の有効性を検証のため、商用CGソフトウェアに搭載されている仮想筋肉システムを用いて構築された脚部モデルを変換した。図2に示すように、仮想筋肉の変形は仮想骨格の姿勢によって駆動され、特にひざの曲げ伸ばしによって大腿付近のスキンが大きく拡大縮小する。こうした仮想筋肉を補助骨の挙動で近似

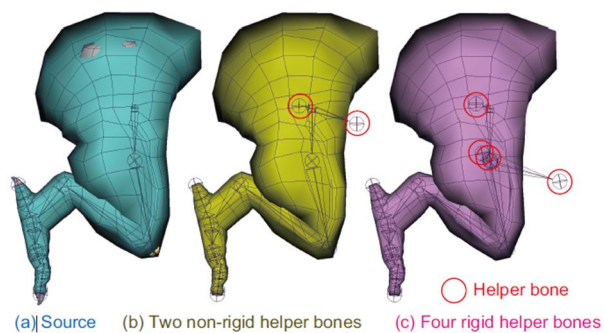


図 2：仮想筋肉リグからの変換例

する際に、従来法のように補助骨の運動成分を剛体変換に限定する場合と、スケール成分も加えた相似変換を扱う場合で比較する。その結果、剛体変換成分のみを持つ4つの補助骨を用いた変換結果に対し、スケール成分を加えた場合は2つの補助骨のみで同水準の近似制度を実現できることが確かめられた。これは、大腿部分のスキンの変形の再現にあたって、補助骨のスケール成分の導入が大きく寄与したものと考えられる。

- (2) 仮想骨格の運動に対して補助骨を頑健に連動するための機構について研究した。一般的に連動制御モデルはスクリプトプログラムや単純な多項式として記述されることが多いが、柔軟性や表現力に乏しい。そこで、少数の例示データのみをもとに計算モデルを自動推定する、動径基底関数補間法などのノンパラメトリック回帰法が実用化されつつある。しかし、開発現場においてはアドホックな応用に留まっており、一般化された連動モデルは未確立であり、また学術研究として取り組まれた先行事例はほとんどみられなかった。そこで本研究では、複数の骨運動を入力として、他の単一の補助骨を連動制御するような、プライマリ-セカンダリ型の制御数理モデルの確立を図った。

具体的には本研究では、3次元スケール・回転・平行移動変換（SRT変換）の連動制御のための、リー代数を用いた回帰モデルを開発した。提案法では、入力元-出力の対応関係を表わす複数のサンプルデータを学習することで、連動制御のためのノンパラメトリック回帰モデルを構築する。その際、SRT変換空間に対応する高次元半球上における測地距離を近似するような、リー代数にもとづくカーネル関数を導入することで、デザイナーにとっても直観的な連動制御を実現する。さらに、3次元回転における2多義性に対応するために、特定のサンプルを自動的に複製する手法を導入する。そしてランタイム計算では、リー代数の拡張空間において複数のサンプルデータのアフィン結合を計算するだけで、出力先のSRT変換を効率的に合成する。提案法は、多くのリアルタイムアプリケーションで活用されている補助骨のように、複数の関節に連動して他の独立したオブジェクトのSRT変換を決定するようなリグの構築に適している。また、比較的単純に実装できることから実用的な手法であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tomohiko Mukai	4. 巻 1
2. 論文標題 Sampling-based Rig Conversion into Non-rigid Helper Bones	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Computer Graphics and Interactive Techniques	6. 最初と最後の頁 1~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3203190	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 向井 智彦
2. 発表標題 3次元SRT変換の例示ベース連動制御
3. 学会等名 Visual Computing 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巖 亦斌, 向井 智彦
2. 発表標題 スケルトンジョイントの個別制御による顔形状バリエーション合成
3. 学会等名 Visual Computing 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 胡 博文, 向井 智彦, 安藤 大地
2. 発表標題 仮想人間との対話のための眼球運動の分析および合成
3. 学会等名 Visual Computing 2020 ポスター
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fumiya Naria, Tomohiko Mukai
2. 発表標題 Locality-Aware Skinning Decomposition Using Model-Dependent Mesh Clustering
3. 学会等名 Computer Graphics International 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 巖 亦斌, 向井 智彦, 安藤 大地
2. 発表標題 フェイシャルアニメーションの非線形制御法の研究
3. 学会等名 Visual Computing 2019 ポスター
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 向井智彦
2. 発表標題 Sampling-based Rig Conversion into Non-rigid Helper Bones
3. 学会等名 Visual Computing 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有泉静耶、向井智彦、熱田清明
2. 発表標題 例示データに基づくスキニングウェイトと自由形状変形の最適化
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山名承太郎、向井智彦、向井信彦
2. 発表標題 フェイシャルアニメーションのための例示データからの制御点配置推定法の検討
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Example-based Helper Bone Rigging  <a href="https://mukai-lab.org/projects/helper-bone-rigging/">https://mukai-lab.org/projects/helper-bone-rigging/</a>          Sampling-based Rig Conversion  <a href="https://mukai-lab.org/publications/i3d2018/">https://mukai-lab.org/publications/i3d2018/</a></p>
---

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------