

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300035

研究課題名(和文) 三次元非剛体形状を持つ仮想エージェントの動作発現とその制御機構について

研究課題名(英文) A new mechanism for motion generation and control of virtual agent with 3D non-rigid shape

研究代表者

長橋 宏 (Nagahashi, Hiroshi)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授

研究者番号：20143084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：三次元非剛体形状を持つ物体を仮想生命体と考え、学習によって自らが新しい動作機能を獲得するモデル表現の枠組みを提案するとともに、そのシステムの構築を行った。提案したシステムでは、モデル表現の対象となる物体の物理的な弾性特性も容易に表現可能である。自律的に動作する動物の心臓や仮想的な生命体の繰り返し運動などを、その個体が持つ特性や外部環境に応じて自らの学習によって獲得できることを確認するとともに、その有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a new mechanism for generating and controlling autonomous motions of non-rigid 3D objects, and constructed its prototype system. In the proposed system, a 3D object with non-rigid shape is regarded as a virtual agent and autonomously acquires a best motion by a certain kind of unsupervised learning according to its physical properties and external environment. The system also enables to represent elastic characteristics of real materials for approximating physical phenomena.

It proved to be available for generating natural autonomous motion of non-rigid 3D objects.

研究分野：画像情報処理

キーワード：3次元エージェント ばね質点モデル パラメータ化 反応拡散系 活性因子 モデル非剛体変形 LOD表現

1. 研究開始当初の背景

ネットワーク環境や情報可視化のためのグラフィックス環境を中心とした情報ネットワーク基盤の飛躍的な発展により、その基盤に見合う高精細かつ高機能なコンテンツ制作の新しい手法の開発が求められていた。その中の1つの技術が、機械学習に基づく3次元仮想エージェントによる自律的かつ適応的な映像生成であった。しかし、このような新しい技術は、機械学習の手法やコンピュータグラフィックス、物理シミュレーション、さらに生物学等の分野横断的な知識とノウハウを必要とするものであり、組織的な研究は殆ど行われていないという状況であった。

2. 研究の目的

そこで、本課題では、これからのコンテンツ制作やその管理において、自律的に機能を獲得する3次元仮想エージェントが重要な役割を担うとの考えから、非剛体形状を持つ3次元物体における運動の発現とその自律的制御を可能とする3次元仮想エージェントのための新しい枠組みを構築することを研究目的とした。具体的には3つの課題を中心にそれぞれの目標を立てた。その目標に対する取り組み方を次に述べる。

3. 研究の方法

**課題 I)** 従来の3次元形状表現に用いられるばね質点モデル法(Mass Spring Model)は、容易に形状表現が可能であるものの、物質の物理的特性の表現は困難であり、形状変形や衝突などの物理シミュレーションには適していない。そこで、形状表現の他に物体の材質も同時に表現可能な拡張ばね質点モデル(extended Mass Spring Model; eMSM)法について検討した。同時に、様々なスケールでの表現に効率的に対応可能なモデルの適応の詳細表現法についても検討を行った。

**課題 II)** 動物の体内で自律的な動作しているものに心臓がある。心臓は、心筋と呼ばれる特殊な筋肉でできており、この筋肉の収縮によって心臓の動きが作りだされている。手や足などを動かす場合も、各種の筋によってその動作が生成される。しかし、一般的な形状を想定した3次元仮想エージェントに動作を発現させ、その動作を制御することを考えた場合、筋モデルによる制御では、逆に形状と動きに関する制約が多く、自由な形状とその動作表現には適していない。そこで本課題では、仮想エージェントの動作の発現と制御を行う基本的方法として、物体形状に依存しない汎用的な動作制御空間を導入するとともに、その空間を任意形状の物体表面と1対1に対応づけることによって、制御空間上での力分布を物体形状に写像する方法を採用した。このため、2次元の動作制御空間と3次元物体の表面形状との間の対応関係を効率的に決定する手法について検討した。また、エージェントが目標とする変形を自律的に

生成するためのメカニズムについても検討を行い、そのシステムの構築を行った。

**課題 III)** 前述の動きの自動生成を達成する上で、目標とする動きを獲得するための学習機構の構築が不可欠である。本課題では、教師無し学習と教師有り学習の2つの方法について検討を行った。教師無し学習では、最適化すべき目的関数を予め与え、その目的関数を最大化するように制御空間での力分布を学習した。一方、教師有り学習としては、3次元形状の動きを与え、その動きを再現するようにエージェントの内部状態を学習する。このタスクでは、教師データが重要な役割を果たすことから、実際の間人や動物の胸部の超音波画像から心臓などの詳細な3次元動作を再構成する方法についても検討した。

4. 研究成果

従来、CGの世界でしばしば用いられてきたばね質点モデルは、物質の性質、即ち物理的特性を表すことは考慮されていなかった。しかしながら、材質感や動的変化をより正確に表現するためには、個々の材料の物理的な弾性特性を表現できることが望ましい。そこで**課題 I)**では、従来のばね質点モデルにおけるモデルパラメータと物質の持つヤング率とポアソン比という物理量に着目し、その関係を明確にすると同時に、従来のMSMでは表現ができなかった任意のポアソン比表現を可能にする拡張ばね質点モデル法(eMSM)を新たに提案した。この手法では、従来のMSM法に新たなパラメータを1個追加するだけであり、モデル表現の柔軟さは従来のMSM法と変わらない。図1(a)(b)に、提案したeMSM法によるポアソン比の表現域を示す。同図(a)は、立方格子構造を持つeMSM法による結果であり、同図(b)はランダム構造を持つeMSM法による結果である。いずれの場合も、赤で示した理論曲線上の値を高精度に表現できていることを示している。

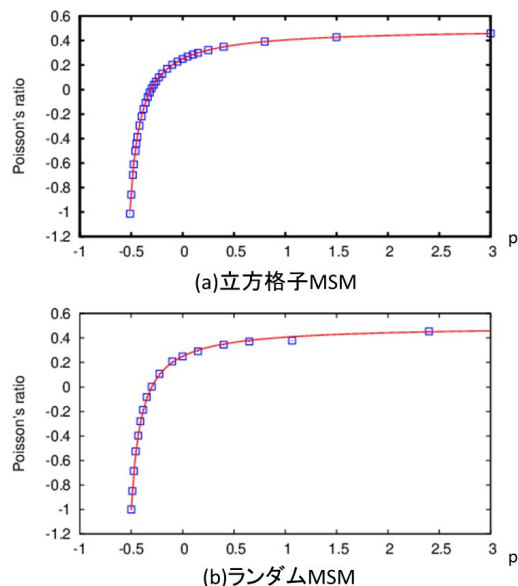


図1. eMSMにより表現されたポアソン比

一方、スケールに応じた効率的なモデル表現においては、たとえモデル表現の詳細度が変化したとしても、表現された物体の物理特性が大きく変化することは好ましくない。このような観点から、モデル表現の詳細度 (Level of Detail, LOD) という概念を導入し、例えば可視化における精細さに応じてモデル表現の LOD を選択可能にすることで、モデルを用いた各種の物理シミュレーションを小さな近似誤差の中で効率的に行うことを可能とした。特に、前述のランダム eMSM 法では、空間に配置するノードの数をランダムに選択することでノード密度を変化させ、LOD のレベルをほぼ連続的に選択することを可能とした。図 2 は、異なる LOD 表現されたモデルを、同じ面上の同一ラインから同じ力で滑らせた場合の移動後の状態 (位置) を示した例である。異なる LOD 表現のいずれのモデルとも同じ距離だけ移動しており、スケールの変化に関わらず物理的特性を保持していることが分かる。

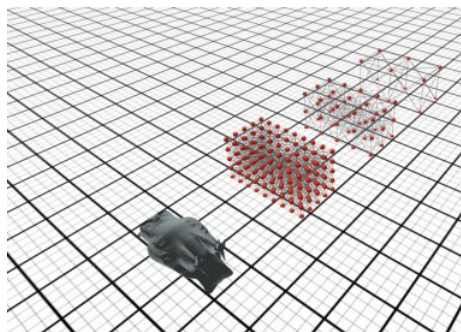


図 2. 異なる LOD 表現におけるモデルの摩擦特性

**課題 II)**で最も重要な点は、当該システムが外部からの制御信号無しに、持続的に動作する系でなければならないことである。また、発現した動作は、システム内部に保持されるパラメータに応じて発展し、システム固有の動作となることが重要である。このようなシステムを構築するために、本課題では反応拡散系に着目した。

反応拡散系は、ある空間中の物質の濃度が、局所的な化学反応と空間拡散プロセスとが相互に作用しあって時空間の中で変化する様子をモデル化したものであり、自然界における様々な現象を解明する手法の 1 つとして研究されてきている。反応拡散系は、時空間での変化を与える偏微分方程式 (PDE) で表される。代表的なモデルとしては、FitzHugh-Nagumo 方程式がある。このモデルは、生化学や生物学に現れる様々なモデルの記述に用いられていることから、本課題でも、2次元のドメインを持つ拡散系を考え、このドメイン上での FitzHugh-Nagumo 方程式における活性因子の状態関数の変化をパターン化した。そして、そのパターン形成について様々な観点から検討を行った。その結果、パターンの変化に周期性があり、拡散系のパラメータ値を変化させることで活性因子の 2 次

元パターン自体を制御可能であることを確認した。そして、2次元空間の各位置における活性因子の状態変動を物体の形状変形の原因力として物体表面に作用させるという 3次元エージェントの変形活動発生機構および変形活動制御機構について検討を行った。これらの機構を構築するためには、反応拡散系のドメインである 2次元制御空間の各点を、物体形状表面に効率的かつ高速に対応づける手法 (CG の分野では、パラメータ化と呼ばれる) が必要である。この観点から、2次元の矩形空間から 3次元の任意形状への写像を行う各種の手法について、評価実験を行った。図 3 は、楕円形状を持つ 3次元エージェントに対して、ある反応拡散系にお

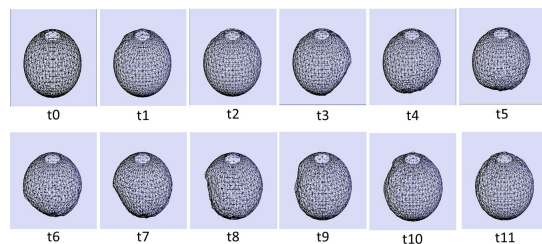


図 3. パラメータ化による動作制御因子の楕円球形への写像に基づく形状変形

る活性因子の状態変化を写像した例を示したものである。反応拡散系における活性因子の状態写像によってエージェントの形状制御を行う場合、2次元制御空間上での活性因子の状態を、できるだけ少ない歪の下で物体エージェント面上に対応づけることが重要である。本課題では、このパラメータ化についても新たな手法を提案し、様々な形状を持つ 3次元エージェントに対して活性因子の変動に対応づける新たな手法を提案し、その有効性を明らかにした。図 4 にその例を示す。2次元制御空間を市松模様で表し、この空間を異なる 2つのパラメータ化手法 (A), (B) で 3次元モデルの表面上に写像したものである。手法 (B) が写像後の歪を最小化した提案

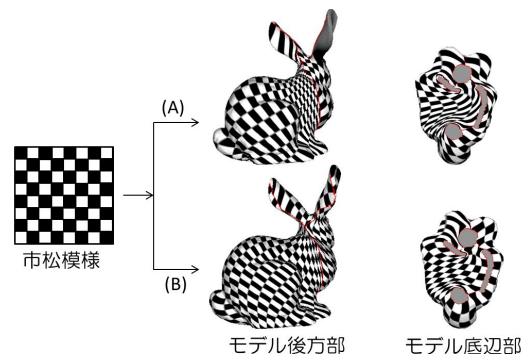


図 4. 反応拡散系のドメインと 3次元物体表面との対応関係

手法の結果を示している。同図に示されたモデルは底辺部に複数の孔を有している。

**課題 III)**では、生命体内で自律的に変形する組織や生命体自身の活動に焦点を当て、そ

これらの3次元形状およびその物理的特性に基づく自律的変形活動の発生・学習について検討を行った。学習の方法としては、教師無し学習と教師有り学習の双方について研究を行った。

非剛体3次元物体の表現に有限要素法がよく用いられる。しかし、複雑な形状表現や複数物体相互の動的協調を実時間で可視化する場合、全体のシミュレーションを有限要素法で行うことは、計算量の問題やモデル作成・修正の点で容易ではない。これらの問題を解決するために提案した表現法がeMSM(extended MSM)法である。eMSM法は、柔軟な弾性特性(ヤング率とポアソン比)を表現することが可能である。これによって、従来の枠組みの中で解剖学的特性を考慮した各種臓器や仮想的な3次元形状を持つエージェントの表現が可能となった。そして、前節で述べたパラメータ化の手法によって反応拡散系の2次元ドメイン空間上での活性因子の状態を3次元物体面上へ写像し、所望の動作を生成する作業が、いわゆる学習である。この作業にも複数のアプローチが可能であり、本研究でも2つの手法について検討を行った。

第一の手法は最も単純な方法であり、2次元ドメイン空間上の複数の制御点での活性因子の状態を物体面上に写像し、物体面上での最小2乗メッシュ法との組合せで形状変形を実現する方法である。この方法では、制御点座標をパラメータ変数として、教師無し学習である遺伝的アルゴリズムを用いて制御点座標の最適化を行った。この学習においては、物体形状の変形に伴う体積の変化率ができるだけ一定となるような目的関数を適応度関数として与えた。しかし、反応拡散系自身の制御は含まれていないため、生成された3次元形状の動きは単純で限定的なものとなった。反応拡散系の持つパラメータと制御点座標の双方を最適化する方法についても検討を行ったが、具体的な目的関数の作成が容易ではなく、目的関数の作成法が今後の研究課題として残された。

第二の方法として、実際に観測される様々な自律的運動を当該表現法でモデル化することを目的として、教師有り学習による制御空間の構築法について検討を行った。学習データとしては、人体内部の臓器を想定し、非侵襲で放射線被曝の影響を受けることの無い3次元超音波画像を利用することとした。このため、人体腹部の臓器や心臓の表面形状の3次元運動を超音波画像から獲得するための手法を新たに開発した。この方法は、物体内部での密な点群追跡を可能としたもので、人体臓器の動きを表す3次元形状変形データを作成することが可能となった。その例を示したのが図5である。追跡すべき多数の点がメッシュモデルの頂点として表されており、超音波画像中の各頂点における3次元座標の移動量を出力することができる。実験

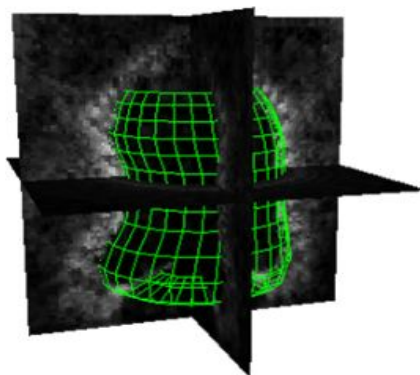


図5. 合成3次元超音波画像からの格子点群の動き獲得

では、実際の3次元超音波画像が入手できていなかったため、合成によって作成された超音波画像を使用した。この手法は、長時間にわたる安定で密な追跡が可能であり、個別の臓器形状変形データを精度よく得ることができる。そのため、医療分野での応用の可能性が期待できる。3次元形状変形学習データを用いた教師有り学習システムを現在検討中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

1) Maciej Kot, Hiroshi Nagahashi and Krzysztof Gracki, "Resolution Scaling for Mass Spring Model Simulations", IEICE TRANS. INF. & SYST., VOL.E97-D NO.8, pp.2138-2146, (2014) (査読有) DOI:10.1587/transinf.E97.D.2138

2) Walita Narkbuakaew, Hiroshi Nagahashi, Kota Aoki and Yoshiki Kubota, "Bone Segmentation in CT-Liver Images Using K-Means Clustering for 3D Rib Cage Surface-Modeling", WSEAS Transaction on Biology and Biomedicine, vol.11, no.24, pp.183-193, (2014) (査読有) <http://www.wseas.org/multimedia/journals/biology/2014/a205708-096.pdf>

3) Maciej Kot, Hiroshi Nagahashi, Piotr Szymczak, "Elastic Moduli of Simple Mass Spring Models", Visual Computer, Published online: 04, Sept., (2014) (査読有) DOI: 10.1007/s00371-014-1015-5

[学会発表](計 15件)

1) Anuwat Dechvijankit, Hiroshi Nagahashi and Kota Aoki, "A Homotopy Surface Cutting Using Paths Crossing in Geodesic Distance", 10th Int. Conf. on Computer Graphics Theory and Applications, GRAPP 2015, pp.130-137, (2015,3,14), in Berlin(Germany)

2) Maciej Kot and Hiroshi Nagahashi,

“Second Degree of Freedom of Elastic Objects: Adjustable Poisson's Ratio for Mass Spring Models”, 10th Int. Conf. on Computer Graphics Theory and Applications, GRAPP 2015, pp.138-142, (2015,3,14), in Berlin(Germany)

3) Ryo Yokoyama, Kota Aoki and Hiroshi Nagahashi, “Dense Motion Analysis and Segmentation of Ultrasound Images”, Proc. SPIE 9316, Multimodal Biomedical Imaging X, Vol.9316, 03, (2015,3,5) in San Francisco(USA)

4) 横山諒, 青木工太, 長橋宏, “三次元超音波画像における高密度な長時間動態解析”, 画像電子学会第 272 回研究会予稿, 14-02-20, pp.127-133, (2015,2,28), 和歌山大学(和歌山県和歌山市)

5) 長橋宏, “生体画像における画像特徴表現とその時空間解析について”, 第 171 回医用画像情報学会教育講演 (2015,2,7), 東京工業大学(神奈川県横浜市)

6) 横山諒, 青木工太, 長橋宏, “超音波画像における動態の長時間解析”, 第 33 回日本医用画像工学会大会予稿集 CD-ROM, OP2-2, (2014,7,25), 東京慈恵医科大学(東京都港区)

7) Maciej Kot and Hiroshi Nagahashi, “Collision Response in Mass Spring Moddel Simulations”, 電子情報通信学会技術研究報告, イメージ・メディア・クオリティ IMQ2013-82, pp.287-290, (2014,3,6), 別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

8) 横山諒, 青木工太, 長橋宏, “オプティカルフローとテクスチャ情報に基づいた超音波画像の動態解析”, 電子情報通信学会技術研究報告, イメージ・メディア・クオリティ IMQ2013-35, pp.59-64, (2014,3,6), 別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

9) 河西純, 青木工太, 長橋宏, “反応拡散系を制御空間とする 3D モデルの自律的な動作獲得”, 電子情報通信学会技術研究報告, イメージ・メディア・クオリティ IMQ2013-34, pp.297-302, (2014,3,6), 別府国際コンベンションセンター(大分県別府市)

10) Anuwat Dechvijankit, Hiroshi Nagahashi and Kota Aoki “An Optimization of Square Parameterization”, 21-th WSCG Conf. on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, F47, (2013,6,27), in Plezen(Czech Republic)

11) Maciej Kot and Hiroshi Nagahashi, “Anti-aliasing for Cubic Lattice Mass Spring Models”, NICOGRAPH International 2013, pp.101-107 (2013,6,2), 九州大学(福岡県福岡市)

12) Pichayut Peerasathien and Hiroshi Nagahashi, “Border Limited Adaptive Subdivision Based on Triangle Meshes”,

World Academy of Science, Engineering and Technology (ICCGIP2013), 73, pp.600-604, (2013,1,14), in Zurich (Switzerland)

13) Maciej Kot, Hiroshi Nagahashi and Krzysztof Gracki, “Simplification of Mass Spring Models”, Int. Conf. on Computer Graphics and Virtual Reality(CGVR'12), pp.90-96, (2012.7.17), LasVegas(USA)

14) 宮崎悠樹, 青木工太, 長橋宏, 久保田佳樹, 蓑原伸一, “逐次学習を用いた超音波画像における頑強な追跡”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, D-16-8, (2012,3,20), 岡山大学津島キャンパス(岡山県岡山市)

15) Anuwat Dechvijankit, Hiroshi Nagahashi and Kota Aoki, “Fast Way to Create Seam Boundary for Square Parameterization with Low-distortion”, Int. Conf. on Computer Graphics Theory and Application, pp.185-188, (2012,2,24) in Rome(Italy)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者 長橋 宏 (Nagahashi Hiroshi)  
(東京工業大学・像情報工学研究所・教授)  
研究者番号: 20143084

(2) 研究分担者 青木 工太 (Aoki Kota)  
(東京工業大学・像情報工学研究所・助教)  
研究者番号: 90447532

(3) 連携研究者  
( )  
研究者番号: