

筋肉バネモデルに基づく生体シミュレータの設計

Design of bio-simulator based on muscle spring model

松田 啓二[†] 平石 広典^{††} 溝口 文雄^{†††}

Keiji MATSUDA Hironori HIRAISHI Fumio MIZOGUCHI

[†] 東京理科大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Tokyo University of Science

j7405631@ed.noda.tus.ac.jp

^{††} 株式会社ウイズダムテック

WisdomTex Incorporated

^{†††} 東京理科大学理工学部

Department of Science and Technology, Tokyo University of Science

美容人口の増加に伴い、メンタルケア用ツールとして美容整形等、生体シミュレータの重要性が増してきている。そこで本研究では、美容を対象とした筋肉バネモデルに基づくシミュレーション手法を設計する。コンピュータグラフィックスの分野において、モデル構造の整合性を維持した変形処理が非常に高価となるが、本手法は皮膚や筋肉の性質を 3 次元バネモデルで表現した、筋肉バネモデルに基づく幾何制約から変形を制御することで処理を簡略化させる。

1 はじめに

近年、美容や健康に対する人々の関心が高まりを見せている。例えば、ダイエットや美容整形などが各種メディアで取り上げられる様になり、その傾向が益々強くなってきている。こうした美容人口の増加に伴って、美容外科や形成外科における術前インフォームド・コンセントの重要性が増してきている。これは術前の患者にシミュレーションを見せることで、術後の自身の姿を確認させ、不安や誤認識を防止する働きがある。こうしたツールには、患者の不満や新たな要求に対して柔軟に対応するための対話性と、高精度なデータを医師が容易に操作できるインタフェースが要求されてくる。

しかし、これまでの手法は上記 2 つの要求を同時に満足しないという問題がある。従来の整形シミュレータは主に 2 種類に分類され、一つが画像などの 2D データを対象とした手法となる。これは入力データの準備が容易で、操作を簡単に行なうことができるが、変換後のイメージは入力画像の方向に依存してしまう。もう一つが、3D モデルを利用した手法である。これは 3D スキャナなどで取得した 3 次元形状データを対象としているので、シミュレーション精度が高くなり、整形後のイメージは方向を変えて確認することができるが、2D 画像と比較して操作が難しいという問題がある。

本稿では、美容を対象とした筋肉バネモデルに基づく生体シミュレーション手法を設計する。本手法は、皮膚や筋肉の特性を 3 次元バネモデルで表現することで、高精度なシミュレーションを行う。筋肉バネモデルに基づく幾何制約によって変形を制御することで、操作性の向上と処理の高速化を図る。本稿では、主に顔面部のモデル化について扱っていく。

2 関連研究

生体を対象としたシミュレーション手法として、有限要素法 (FEM: Finite Element Method) とバネ質点法が代表的である。FEM[2][3] は高精度なシミュレーションを行なうことが可能であるが、バネ質点モデルと比較して処理コストが高価となる傾向がある。

バネ質点モデルによる顔シミュレーション手法として、Waters[4] が筋肉モデル法を提案した。筋肉モデルによって皮膚と骨は結合され、筋肉モデルの変形をパラメータ制御することで、顔の表情制御を可能とした。Kähler[1] らは、Waters のモデル構造を解剖学的見地から改良することで、信頼性を向上させた。豊島 [7] らは、Kähler らのモデルに脂肪モデルを加える手法を提案した。

Water のモデルから発展したこれらの研究では、パラメータ制御だけで表情や各部位の変形を操作している。本研究で対象とするような整形シミュレーション

ンには、パラメータ制御だけでは困難な状況も発生するため、より柔軟な変形制御方法を拡張機能として追加する。

3 設計方針

FEM は高精度なシミュレーションが可能であるが、バネ質点モデルと比較して処理コストが高価となる。ここでは対話的なアプリケーションを目標とするので、処理速度に優れたバネ質点モデルを採用する。

パラメータだけでは困難な場合に、マウスピッキングによるモデルの整形操作を可能にさせる。このとき、3次元アプリケーションで共通な問題となる、奥行き制御による操作の煩わしさを軽減させるために、顔シミュレーションで一般的に利用される、バネモデルの制約条件を利用する。

4 顔モデル

4.1 表情筋モデル

顔面部を表現するモデルとして、表情筋の構造に基づいたモデルを用いる [6]。表情筋とは人間の顔を構成する筋肉群の総称である。表情筋の構造を土台として利用することで、対象人物の顔形状特徴や動作特性をうまく表現する最適なモデルが形成される。

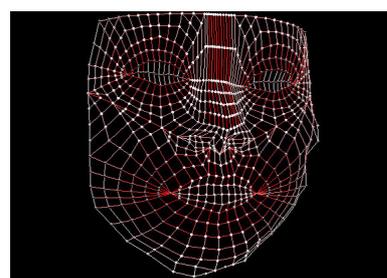
このモデルは階層的な構造となっていない為に、構造的な精度は [1][4][7] に対して劣る可能性があるが、処理速度の面では優位性がある。また、局所的な変形を筋肉モデルを含め、周囲へ伝播させることが可能であるため、マウス操作による変形制御に適したモデルといえる。

表情筋モデルは、筋肉の伸縮運動を表現するバネと、皮膚と骨との繋がりを示す質点から構成されている。ここでは図 1 に示すように、表情筋による筋力の大きさをバネ係数、骨との繋がり強度を質量として定義している。

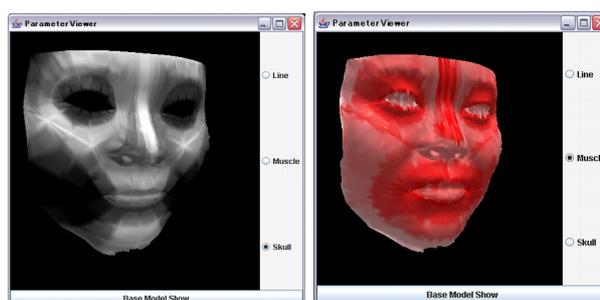
4.2 筋肉モデル

表情筋を構成する各種筋肉の制御は、Kähler[1] らの筋肉モデル法の考え方を利用する。筋肉モデル法では、収縮や弛緩といった表情筋の変形を、複数の筋肉モデルによって制御する。筋肉モデルは線形パーツの連結構造で構成され、各パーツの伸縮運動が伝播することで、筋肉モデル全体の動きが表現される。

本手法では、表情筋モデルの各リンク、質点に対して、種類を判別するラベルを付与し、表情筋モデル



(a)



(b)

(c)

図 1: (a) 顔モデル, (b) 骨モデル, (c) 表情筋モデル

のある質点に対する応力を、同じラベルの質点間で優先的に伝播処理することで同様の表現を行う。表情筋モデルは線形筋と括約筋、それぞれの特徴別にモデルが構築され、筋肉モデルの伸縮運動は、伸縮率を表すパラメータによって制御する (図 2)。

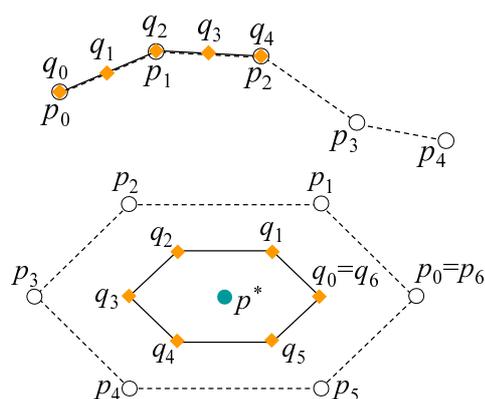


図 2: 筋肉モデルの伸縮制御 (収縮率=50%) : 線形筋モデル (上), 括約筋モデル (下)

4.3 バネ質点モデル

本研究では、河合 [5] らの手法を利用して、バネ質点モデルを構築する。

バネ質点モデルでは、複数の質点をバネとダンパー

によって接続することでモデル化する．バネとダンパーは並列に接続され，質点 i に対して働く力の総和 F_i が，以下の運動方程式により定式化される．

$$F_i = m_i g - \sum_j \left\{ k_{ij} \left(1 - \frac{L_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \right) \mathbf{r}_{ij} + D_{ij} \mathbf{v}_{ij} \right\} \quad (1)$$

ここで $k_{ij}, L_{ij}, D_{ij}, m_i, g$ は，それぞれバネ係数，バネ自然長，ダンパ係数，質量，重力加速度を示し， $\mathbf{r}_{ij}, \mathbf{v}_{ij}$ は，質点 j に対する質点 i の相対位置ベクトル，相対速度ベクトルを表す．

上記の運動方程式は，オイラー法による逐次計算で処理が進められる． ΔT 時間後の各質点の速度ベクトル \mathbf{V}_i および位置ベクトル \mathbf{R}_i は，それぞれ以下の式により求める．

$$\mathbf{V}_i(T + \Delta T) = \mathbf{V}_i(T) + \frac{\mathbf{F}_i(T)}{m_i} \Delta T \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_i(T + \Delta T) = \mathbf{R}_i(T) + \mathbf{V}_i(T) \Delta T \quad (3)$$

5 変形制御

モデルの変形操作を行うための手法について説明する．目標はラフなマウス操作による 3 次元形状の変形制御である．直感的な操作を可能にするインタフェースとして，奥行きを気にすることなく，操作を可能にさせる．

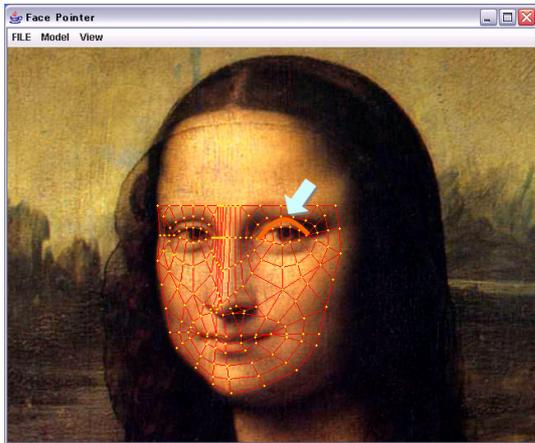


図 3: インタフェース

本研究では，マウスによる操作モードを以下の 2 系統用意する．

1. (マウス優先) マウス操作による移動先は，幾何制約によって補正され，マウス位置と重なる様に更に補正する．移動先はマウス位置と一致する．

2. (制約優先) マウス操作による移動目標は，幾何制約によって補正され，マウス位置と重ならない場合が発生する．

5.1 マウス操作の補正

基本的な考えは，マウス操作によって安定性を失った質点を，バネモデルの制約解消系を利用して，力学的に安定した位置へ収束させることにある．

5.1.1 マウス優先

この操作モードは，整形操作時に主眼を置いている．マウス優先の場合，マウス操作は対象をドラッグする働きを持つ．2D 画像を対象としたシミュレーションシステムと同系統の操作方法にした場合，奥行きの情報のみが指定できないので，視線方向に質点を移動させて，モデルの安定を図る．

手順は図 4 に示す様に，マウスによる移動後，バネ制約の視線方向成分が作用される．

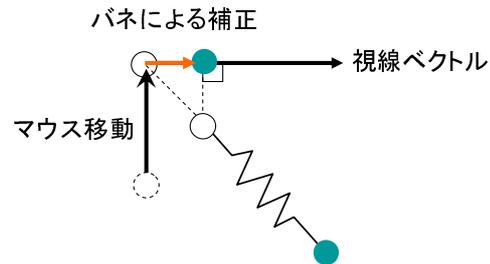


図 4: バネモデルによる質点の補正

マウス操作した質点 i ，バネ ij で向かい合う質点 j ，視線ベクトル \mathbf{v}^{view} とした場合，質点 i の座標 \mathbf{R}_i がバネ ij によって受ける補正は，以下の式で求める．

$$\mathbf{A} \leftarrow k_{ij} \left(1 - \frac{L_{ij}}{|\mathbf{r}_{ij}|} \right) \mathbf{r}_{ij} \Delta T^2 \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_p \leftarrow \frac{\mathbf{A} \cdot \mathbf{v}^{view}}{\mathbf{v}^{view} \cdot \mathbf{v}^{view}} \mathbf{v}^{view} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_i \leftarrow \mathbf{R}_i - \mathbf{A}_p \quad (6)$$

5.1.2 制約優先

この操作モードは，モデルのインタラクションを評価することに主眼を置いている．制約優先の場合，マウス操作はモデルに対する応力として作用させる．その結果，移動に対して強い制約が働き，モデルの変形前に操作が抑制される．制御に働く力には，3 次元構造による幾何制約と，バネによる変形制約がある．

本研究では、皮膚への応力が段階的に変形に消費されると仮定してモデルを構築する。皮膚のある点に対して作用された応力は、まず皮膚モデルの形状変形に利用され、残りが筋肉モデルの変形に利用される。この動作を安全に発生させるために、モデルに対して働かせる応力を、対象のモデルの種類に応じて変化させていく。

5.2 応力モデル

応力を物体に対して作用させる場合に、カーネルで離散化した応力を作用させる。こうしたアプローチは、モデルの体積保存性を擬似的に表現する際などに利用される手法であり、物体の種類に応じたカーネルを利用することで、様々な物体に適した応力を簡潔に生成する働きがある。

顔モデルを対象として考えた場合、筋肉の種類（線形筋、括約筋）と領域（骨格との距離）を考慮してカーネルを設定する。本研究では、Waters[4] の筋肉ベクトルモデルを用いて、応力による皮膚のレスポンス変化を表現する。

5.3 レスポンス関数

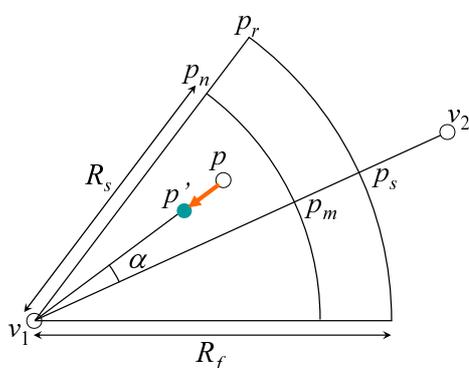


図 5: 線形筋肉モデル

Waters の提案した筋肉モデルによって、応力による皮膚のレスポンス関数を定義する。線形筋モデルによる対象の変形領域を、図 5 に示す。これは線形筋の伸縮が引き起こす、周囲の皮膚の変形を表している。線形筋を点 v_2 から点 v_1 へ向かうベクトル $\vec{v_2v_1}$ としたとき、 R_s, R_f 間で減衰が開始、終了する。領域 $(v_1p_r p_s)$ 内の任意の点 p は、ベクトル $\vec{pv_1}$ 上の頂点 p' に移動する。

$$p' = p + \cos(\alpha)kr \frac{\vec{pv_1}}{|\vec{pv_1}|} \quad (7)$$

ただし、 α はベクトル $\vec{v_1v_2}, \vec{v_1p}$ 間の角度、 $D := \|\vec{v_1 - p}\|$ 、肌の弾性係数 k 、 r は放射状の変位係数を表す。

$$r = \begin{cases} \cos(1 - \frac{D}{R_s}) & \text{for } p \in \text{領域}(v_1 p_n p_m) \\ \cos(\frac{D - R_s}{R_f - R_s}) & \text{for } p \in \text{領域}(p_n p_r p_s p_m) \end{cases} \quad (8)$$

6 まとめ

本稿では主に顔面部を中心に、美容を対象とした筋肉バネモデルに基づく生体シミュレーション手法を設計した。皮膚や筋肉の特性を 3 次元バネモデルで表現することで、高精度なシミュレーションを行う。

従来の美容シミュレーション手法では、3D データ扱う際のユーザビリティに問題があったが、本稿では、マウス操作に対して、変形対象の制約条件を作用させることで、ユーザへの負担となる整合性維持の修正作業を補完し、ユーザビリティの向上を図った。

本手法で利用する制約条件は、顔 3 次元情報を用いるシミュレーションシステムにおいて、一般的に利用されるものであり、有効性は高いと考えられる。

参考文献

- [1] Kolja Kähler, Jörg Haber, Hitoshi Yamauchi, and Hans-Peter Seidel. Head shop: Generating animated head models with anatomical structure. In *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation*, pp. 55–64. ACM SIGGRAPH, July 2002.
- [2] Rolf M. Koch, Markus H. Gross, Friedrich R. Carls, Daniel F. von Büren, George Fankhauser, and Yoav I. H. Parish. Simulating facial surgery using finite element models. In *SIGGRAPH '96: Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 421–428, New York, NY, USA, 1996. ACM Press.
- [3] E. Sifakis, A. Selle, A. Robinson-Mosher, and R. Fedkiw. Simulating speech with a physics-based facial muscle model. *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA)*, 2006.
- [4] Keith Waters. A muscle model for animating three-dimensional facial expression. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 17–24, 1987.
- [5] 河合裕文, 松宮雅俊, 竹村治雄, 横矢直和, 疎密バネモデルを用いた柔物体の仮想環境下での視覚および力覚提示手法の提案. 信学技報, Vol. 100, No. 607, pp. 71–76, January 2001.
- [6] 及川雄揮, 平石広典, 溝口文雄. コンピュータグラフィックスによる顔の老化の表現に関する研究. 情報処理学会第 66 回大会, 2004.
- [7] 豊島周, 千代倉弘明, 小林正弘. リアルタイム弾性シミュレーションを応用した人体顔面加齢シミュレーション. 第 19 回ニコグラフ論文コンテスト論文集, 2003.