

## シワを考慮した顔の表情のシミュレーション

坂東 洋介<sup>†</sup> 倉立 尚明<sup>‡</sup> 西田 友是<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京大学 <sup>‡</sup> (株)国際電気通信基礎技術研究所

CGにおいてリアルな顔のアニメーションを生成するためには、表情を作る顔の動きだけでなく、それに伴って形成されるシワを表現する必要がある。しかしこれまでの研究ではシワはあまり考慮されず、考慮されたとしてもテクスチャとして扱われることが多かった。そこで本論文では顔の幾何モデルを変形してシワを生成する手法を提案する。本手法は顔を表現したメッシュに筋肉、皮膚およびシワのパラメータを指定して変形させるものであり、シワを考慮した顔の表情を高速に生成・表示できる。加えてそれらのパラメータの設定は直感的かつ容易である。表示結果および実物の顔の形状データとの比較から、本手法によって生成されるシワが表情をよりリアルに見せるのみならず、実物のシワをよくシミュレートできることを示す。

### Simulation of Facial Expression with Wrinkles

Yosuke Bando<sup>†</sup> Takaaki Kuratate<sup>‡</sup> Tomoyuki Nishita<sup>†</sup>

<sup>†</sup> The University of Tokyo <sup>‡</sup> ATR

For generating realistic facial animation in CG, it is necessary to simulate expressive wrinkles formed due to facial movement. However, these wrinkles were not considered, or dealt with as textures in the previous works. Thus this paper proposes a method to generate wrinkles by deforming geometric models of the face. It can rapidly generate and display facial expression with wrinkles by deforming a mesh representing the face using specified parameters of muscles, skin and wrinkles. Besides, setting these parameters is intuitive and easy. Display results and comparison with the geometric data of the real face show that the wrinkles generated using the proposed method not only make facial expression more realistic-looking but also simulate the real wrinkles.

### 1 はじめに

近年、CG技術を用いて作成・表示された人間モデルが映画、CM、テレビゲームなどで頻繁に見受けられるようになり、人間をリアルに表示する必要性はますます高まってきている。これまでに筆者らは人間の肌に着目し、表面の微細なシワをシミュレートすることで手や足、腕などの表面のリアルな肌を表示する研究を行ってきた[12]。本研究はこの次の段階として、人間の顔を題材に、より振幅の大きなシワのシミュレーションを扱ったものである。

表情のリアルなシミュレーションは、モデルをより人間らしく見せるための重要な一要素である。表情を作る要素は、筋肉によって引き起こされる皮膚・皮下組織の大域的な動き(例:額の筋肉を収縮させることにより眉が上がる)と、それ

に伴う局所的な起伏の変化すなわちシワ(例:眉を上げると額にシワが寄る)の2つに分けられる。後者は表情を際立たせ、そのリアルさを増すものであるにもかかわらず、これまであまり考慮されず、また考慮されたとしてもテクスチャとして扱われることが多かった。ところが表情ジワの深さは数mmであり、顔の大きさに対して無視できるものではなく、テクスチャで扱った場合見る角度によっては問題を生じる。そこで本論文では実際に顔の幾何モデルを変形してシワを生成する手法を提案する。

本手法は顔を表現した三角形メッシュの各頂点を、筋肉、皮膚およびシワのパラメータによって定義される関数を用いて変位させるというものであり、反復計算が不要であるため高速な表情の生成・表示が可能である。パラメータの数は多

いが、直感的に意味が分かるものばかりであり、設定は容易である。本手法の生成するシワが表情をリアルに見せ、かつ実物のシワをよくシミュレートできることを、適用例によって示す。

## 2 関連研究

顔のアニメーションについての研究は盛んで、これまでも様々な手法が提案されてきた[3-10]。生成画像に表情ジワが見られる研究も数多くあるが[6-10]、大半は実物の顔の色情報をテクスチャとして取り込んで使用している[6-9]。これらは被写体の顔にあるシワが生成画像に反映されているだけであり、シワを考慮したとは言えない。また、実在しない人物を作るのにも不向きである。これに対し、Wuら[10]は筋肉によって顔モデルを変形し、その変形に応じてシワの形状を関数で表現するという手法を提案している。しかし、表示にバンプマッピングを用いているため、シワは幾何モデルに反映されない。これに対し提案法は幾何モデルを変形させてシワを表現する。本論文はこの目的に適し、かつユーザが容易に扱えるモデルを提案する。

筆者らはこれまでに手や足、腕などの肌を対象に、表面の微細なシワのシミュレーションを行っている[12]。これは顔表面の微細なシワについても適用可能であるが、表情ジワのように振幅の大きなシワには、性質が異なるため適用することができない。皮膚表面の微細なシワのシミュレーション法は他にもいくつか提案されているが[10, 11]、同様の理由で表情ジワのシミュレーションに用いることはできない。

## 3 表情生成の原理

顔の表情は、顔の筋肉すなわち表情筋が収縮することによって作られる[1]。骨格筋が骨と骨をつなぐのに対し、表情筋は頭蓋骨と皮下組織をつないでおり(図 1a)、筋肉の通る付近一帯がその影響を受けて変位する(図 1b)。しかしこのまま

では皮下組織に密度の偏りが生じるので、これを打ち消そうと表面に起伏の変化が起こる(図 1c、例：笑うと頬がふくらむ)。ここまでの 1 節で述べた顔の大域的な動きにあたる。

これに対しシワは局所的な起伏の変化である。皮膚はある程度伸張することが可能だが収縮することができない[2]。そのため、上で述べた大域的な動きによって皮膚が収縮した場合に、余った皮膚がたるんでシワが形成される(図 1d)。

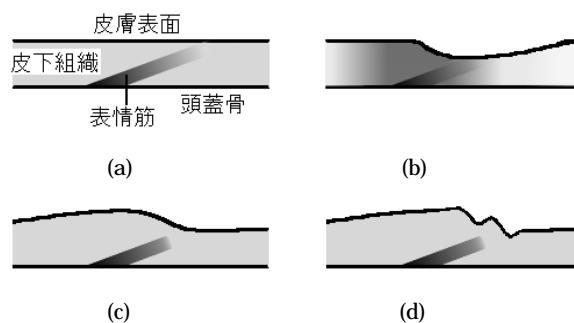


図 1：表情生成の原理

## 4 顔モデルの大域的変形法

ここでは 1 節および 3 節で述べた、顔の大域的な動きのシミュレーションについて説明する。まず、顔を表現した三角形メッシュを表情筋によって変形させる。次に皮膚の伸び率を計算し、この伸びに従って皮下組織の厚みを調整する。

### 4.1 表情筋モデル

表情筋には Waters のモデル[5]を用いる。これは顔のアニメーションに適した簡易なモデルであり、筋肉の力によるメッシュの各頂点の変位が関数によって与えられるというものである。詳細

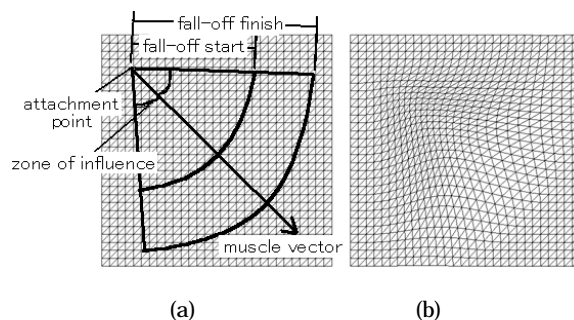


図 2：表情筋モデルと変形の例

は省略するが、いくつかのパラメータ（図 2a にそのうちの 5 つを示す）によって筋肉が定義され、これによって図 2b のように各点に変位する。

## 4.2 皮膚の伸び率

筋肉によって顔メッシュは変形し、表面すなわち皮膚が伸縮する。この伸び率を、メッシュの各頂点において、三角形の面積比を用いて計算する。初期状態でのメッシュの各三角形  $i$  の面積を  $S_i$ 、変形後の面積を  $S'_i$  とすると、面積比は  $S'_i/S_i$  である。各頂点  $j$  における伸び率  $r_j$  は、その頂点が属す三角形から、これらの面積比を平均することを得る。すなわち式(1)のように計算できる。

$$r_j = \frac{1}{|I_j|} \sum_{i \in I_j} \frac{S'_i}{S_i} \quad (1)$$

ただし  $I_j$  は頂点  $j$  が属す三角形の集合、 $|I_j|$  はその三角形の数である。伸び率が 1 のとき皮膚は伸縮しておらず、0 に近づくほど収縮、値が大きくなるほど伸張していることになる。

## 4.3 皮膚の伸びによる変位

筋肉による変位によって生じた皮膚および皮下組織の偏りを反映して、皮膚の起伏を変化させる。ここでは皮下組織に非圧縮性を仮定して、体積を保存するような変位を加える。メッシュの各頂点には皮下組織の厚さ  $h$  が与えられているものとし、近傍の微小皮膚面積  $\Delta s$  を考えると、初期状態での皮下組織の体積は  $h \cdot \Delta s$  であり、変形後の体積は厚さ  $h'$  と伸び率  $r$  を用いて  $h' \cdot r \Delta s$  と書ける。体積が一定であるためには  $h' = h/r$  でなければならないので、厚みの変化は

$$h' - h = (1/r - 1) \cdot h \quad (2)$$

として与えられる。皮膚の厚みは、筋肉による変形後の頂点における単位法線ベクトル  $\mathbf{N}$  に沿って考えるものとし、式(3)により各頂点の座標  $\mathbf{x}$  を  $\mathbf{x}'$  に変位させる。

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + (1/r - 1) \cdot h \cdot \mathbf{N} \quad (3)$$

図 2b の例に、皮下組織の厚さを 60 (メッシュの一边は 450) として起伏の変化を加えた様子を図 3 に示す。図 2b の左下から見た図である。

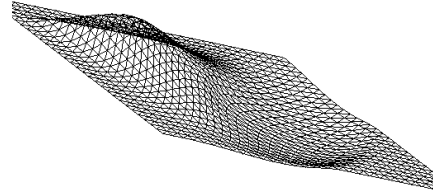


図 3：皮膚の伸びによる起伏の変化

## 5 シワの生成

ここでは 4 節で述べた顔の大域的な変形を行った後の、シワの生成法について説明する。シワの溝となる軌跡は、メッシュを平面投影もしくは円筒投影した平面上において 3 次ベジェ曲線を用いて指定する。シワが与える変位量にはシワの形状  $S$  と皮膚の収縮  $C$  の 2 要素を考え、4.3 節と同様に法線方向に変位させる。すなわち式(4)によって各頂点の座標  $\mathbf{x}$  を  $\mathbf{x}'$  に変位させる。

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + S \cdot C \cdot \mathbf{N} \quad (4)$$

### 5.1 シワの形状

シワの形状は、メッシュの各点におけるシワの溝までの距離  $d$  の関数  $S(d)$  として与える。ただしこの距離は、メッシュを投影した平面上において考え、曲線上の最も近い点との距離とする。この関数には以下のような性質が望まれる。

- シワの溝において尖った形状をとる。
- パラメータによる調節が直感的かつ容易。
- シワの溝の周辺は逆に盛り上がり、全体として体積を保存する。

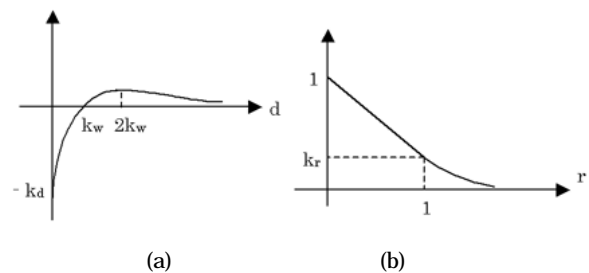


図 4：シワによる変位を決定する 2 関数

これらを満たす関数として以下を採用した。

$$S(d) = k_d(d/k_w - 1) \exp(-d/k_w) \quad (5)$$

この関数は図 4a に示すようなもので、 $k_d$  がシワの深さ、 $k_w$  がシワの幅に対応している。また、

$$\int_0^\infty S(x) dx = 0 \text{ なので体積も保存される。}$$

## 5.2 皮膚の収縮の考慮

シワは収縮した皮膚がたるんで形成されるものである。4.2 節で述べた皮膚の伸び率が 0 に近いほどシワを深くする係数をかける。初期状態で既にシワができていても扱えるようにパラメータ  $k_r$  を導入し、これを式(6)のように伸び率  $r$  の関数とする。

$$C(r) = \begin{cases} (k_r - 1) \cdot r + 1 & r \leq 1 \\ k_r \exp((1 - 1/k_r) \cdot (r - 1)) & r > 1 \end{cases} \quad (6)$$

この関数は図 4b に示すようなもので、 $[0, 1]$  の値をとり、 $r = 1$  において  $C^1$  級の連続性を持つ。初期状態で  $k_r$  の係数がかかったシワができ、皮膚が伸びるに従ってシワは薄くなっていくが、完全には消えない。 $k_r = 0$  なら  $r \geq 1$  に対して関数値は 0 であり、皮膚が収縮していないときはシワが形成されない。

図 3 の例に、さらにシワによる変位を加えた例を図 5b に示す。この場合はメッシュが平面なので、図 5a のようにメッシュ上に直接ベジェ曲線でシワの溝の軌跡を指定した。シワのパラメータは  $k_d = 70$ 、 $k_w = 50$ 、 $k_r = 0$  である。

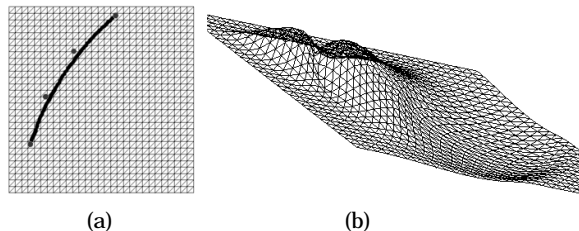


図 5 : シワによる起伏の変化

## 6 結果と考察

顔を表現した三角形メッシュへの適用結果を

示す。用いたメッシュは、無表情時の顔の形状を米国 Cyberware 社製 3030RGB/PS を用いて計測し、必要な部分のみを抽出したものであり、頂点数は 10,151、ポリゴン数は 19,905 である (図 6a)。これに 16 個の筋肉と 21 本のシワを指定した。図 6b は円筒投影したメッシュと、指定したシワの溝の軌跡である。さらに図 6c に示すグレースケール画像を用いて皮下組織の厚さを指定した。メッシュの各頂点に、円筒投影したときの座標におけるピクセルの輝度に比例した厚さを与える。ここでは黒を 0、白を 20 とした (顔の縦の長さをおよそ 500 としたときの値)。図 6c の画像は以下のようにして得る。まず投影したメッシュに合わせて、顔を額や頬などの部位に区分けする。次にそれぞれの部位を、皮下組織の厚さに応じた輝度 (例えば、額は皮下組織が薄いので低い輝度、頬は厚いので高い輝度) で塗りつぶす。最後に、厚みが連続的に変化するように、ガウシアンフィルタを施す。

図 7-10 に、この顔メッシュに 4 節で述べた大域的な変形のみを行って表情を生成した例(a)と、これに加えて 5 節で述べたシワをシミュレートする変形を行った例(b)を示す。これらの表示例から、本手法が生成するシワが表情を際立たせ、そのリアルさを増していることが分かる。肌の色については、皮膚の色素量を考慮した簡易なモデルを用いた表示と、Marschner ら [13] によって測定された肌の BRDF データ (The Cornell University Program of Computer Graphics により公開されている [14]) に基づいた表示を行っ

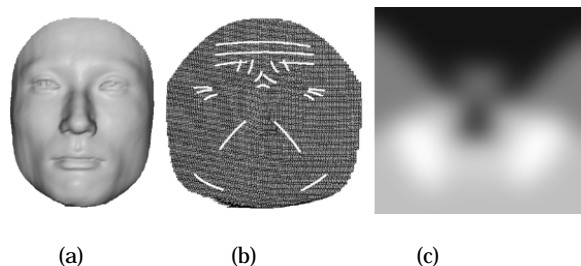
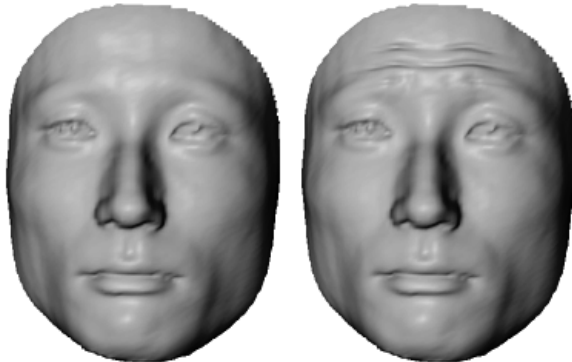


図 6 : 顔メッシュと指定したシワ、皮膚の厚さ

た[12]。筋肉に加える力を変化させてから、シワまで考慮した変形後のメッシュが表示されるまでの時間は0.16秒(6.25 fps)であった。これはリアルタイムではないが、インタラクティブに表情を生成するには十分に高速であると言える。使用したマシンはHP VISUALIZE (CPU: Pentium 1GHz、メモリ: 512MB)である。



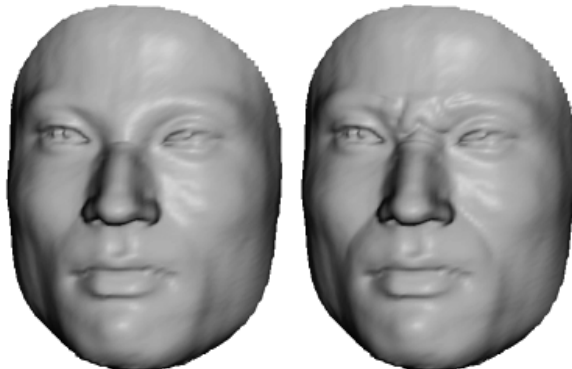
(a) (b)

図7：思案（眉を上げる）



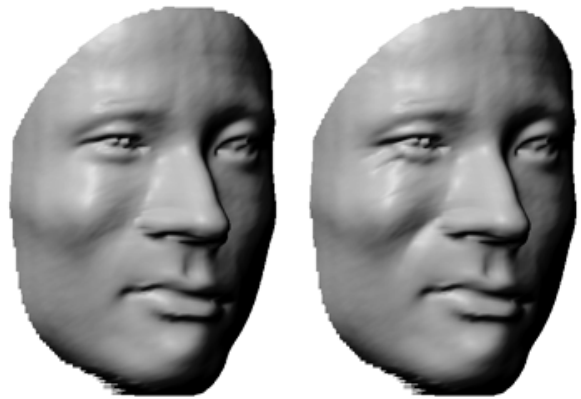
(a) (b)

図8：困惑（眉間を寄せる）



(a) (b)

図9：嫌悪（鼻を持ち上げ、眉を下げる）



(a) (b)

図10：微笑（頬を上げ、目を細くする）

また、シミュレーション結果を実物の顔と比較する実験も行った。これにはミノルタ製 VIVID 700 を用いて顔の一部を詳細に計測した形状データを使用した。無表情時の顔とシワを寄せた時の顔の形状を計測し、無表情時の顔データに本手法を適用した結果を、シワを寄せた時の顔データと比較する。2つの形状の差は、無表情時の顔メッシュの各頂点とシワを寄せた時の顔のメッシュとの奥行き方向の距離を用いて評価する。メッシュの投影法には平面投影を用いた。

図11は無表情時の額のメッシュであり、頂点数は約15,000である。これに本手法を適用して、シワを寄せた時の額(図12a)に近い形状になるような変形を加えた結果を図12bに示す。表示結果からも、生成されたシワが実物をよくシミュレートできているのが分かる。変形前の差(図11と12aの差)および変形後の差(図12aと12bの差)を輝度に対応させて示すとそれぞれ図13の(a),(b)のようになった。輝度が高いほど差が大きい。差が1mm以上の領域を白線で囲んで示してあるが、(a)ではシワの形に対応するように広がっていたこの領域が、(b)では大幅に減少していることが分かる。変形前の差が最大2.8mm、平均0.8mmであるのに対し、変形後の差は最大2.1mm、平均0.5mmであり、全体として差は

減少するが、全ての点において減少させるのは困難であった。

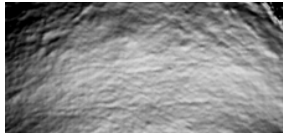
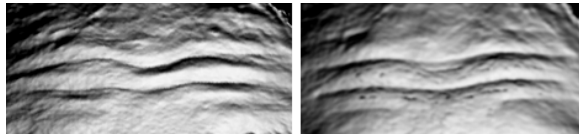
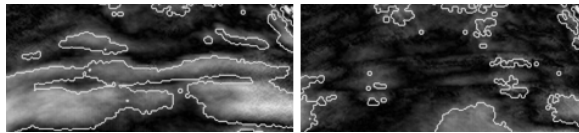


図 11：無表情時の額



(a) (b)

図 12：実物の額データとの比較



(a) (b)

図 13：変形前後における差の輝度表示

## 7 まとめ

顔を表現したメッシュの幾何形状を変形させることによって、シワを考慮した顔の表情を生成する手法を提案した。本手法はメッシュの各頂点を筋肉、皮膚およびシワのパラメータによって定義される関数を用いて変位させるというものであり、高速な表情の生成・表示が可能である上にパラメータの設定は直感的かつ容易である。表示結果から、本手法が生成するシワが表情を際立たせ、そのリアルさを増すことが示された。また、実物の顔の形状データとの比較を行い、実物のシワをよくシミュレートできることも確認した。

今後は、眼球や頭髪など顔の皮膚以外の部位も扱い、さらに筆者らの手法[12]により顔の皮膚の質感を向上させることでよりリアルな顔表情の生成を行うことである。また、アニメーションを生成するための筋肉の時間制御と、より多くの適用例の作成も課題である。

## 謝辞

本研究を行うにあたって必要な機材・環境を提

供して下さった ATR コミュニケーションダイナミクスプロジェクトの皆様方に感謝します。

## 参考文献

- [1] N. Palastanga, D. Field and R. Soames. Anatomy and Human Movement. Butterworth-Heinemann, second edition, Chapter 3, 1994.
- [2] D. A. Danielson and S. Natarajan. Tension Field Theory and the Stress in Stretched Skin. Journal of Biomechanics, Vol.8, pp.135-142, 1975.
- [3] S. Platt and N. Badler. Animating Facial Expression. Computer Graphics, Vol.15, No.3, pp.245-252, 1981.
- [4] F. Parke. Parameterized Models for Facial Animation. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.2, No.9, pp.61-68, 1982.
- [5] K. Waters. A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression. Computer Graphics, Vol.22, No.4, pp.17-24, 1987.
- [6] L. Williams. Performance-Driven Facial Animation. SIGGRAPH '90, pp.235-242, 1990.
- [7] Y. Lee, D. Terzopoulos and K. Waters. Realistic Modeling for Facial Animation. SIGGRAPH '95, pp.55-62, 1995.
- [8] B. Guenter, C. Grimm, D. Wood, H. Malvar and F. Pighin. Making Faces. SIGGRAPH '98, pp.55-66, 1998.
- [9] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski and D. H. Salesin. Synthesizing Realistic Facial Expressions from Photographs. SIGGRAPH '98, pp.75-84, 1998.
- [10] Y. Wu, P. Kalra and N. M. Thalmann. Physically-Based Wrinkle Simulation & Skin Rendering. Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation '97, pp.69-79, 1997.
- [11] 石井智海、安田孝美、横井茂樹、鳥脇純一郎「表面の微細形状に注目した皮膚の質感表現の一手法」情報処理学会論文誌, Vol.3, No.5, pp.645-654, 1991.
- [12] 坂東 洋介、西田 友是「ベクトル場に沿ったシワの生成による皮膚のシミュレーション」Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2001 予稿集, pp.7-12, 2001.
- [13] S. R. Marschner, S. H. Westin, E. P. F. Lafortune, K. E. Torrance and D. P. Greenberg. Image-Based BRDF Measurement Including Human Skin. Proc. 10th Eurographics Workshop on Rendering, pp.139-152, 1999.
- [14] <http://www.graphics.cornell.edu/online/measurements/reflectance/skin/index.html>