

大局的変形と局所的変形を用いた 顔の三次元アニメーション

新井 清志

(株)日立製作所 中央研究所

本報告では、顔のリアルタイムアニメーションのための新しい形状変形手法を提案する。顔の三次元アニメーションにおいては、顔の形状を変化させるための大局的な変形と、表情を変化させるための局所的な変形を組み合わせることができる。しかし、従来の手法では、これらを組み合わせた変形をリアルタイムで行なうことは困難であった。この問題を解決するため、本手法においては、大局的な変形と局所的な変形を組み合わせたデータの加重平均を求めることにより、三次元顔モデルの変形を行なう。本手法を用いた顔のアニメーションシステムをライブの演劇で使用した結果、顔の形状と表情のリアルタイムでの変更の本手法が有効であることが確認できた。

THREE-DIMENSIONAL FACIAL ANIMATION USING GLOBAL DEFORMATION AND LOCAL DEFORMATION

Kiyoshi Arai

Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

1-280 Higashi-Koigakubo, Kokubunji, Tokyo 185, Japan

In this paper, we propose a new deformation method for a real-time facial animation. In three-dimensional facial animations, global deformation for facial shapes, and local deformation for facial expressions are combined. In existing methods, however, it was difficult to perform the combined deformation in real time. In order to solve this problem, we deform a three-dimensional facial model by obtaining the weighted average of the data made by the combination of global deformation and local deformation. We applied the system developed using our method to the live theater, and the result shows that our method is effective for the real-time deformation changing both facial shapes and facial expressions.

1. はじめに

グラフィックワークステーション (GWS) の描画能力の向上により、従来はコマ撮りでしか制作できなかった質の高いコンピュータグラフィックス (CG) の映像を、リアルタイムで生成できるようになってきた。これに伴い、CGを用いた人物表現 [1][2]の分野においても、リアルタイムの映像生成システム [3][4]が開発されるようになってきた。

人物の中でも顔は特に重要な部分である。顔のアニメーション生成は、キーフレーム法、パラメトリック法 [5]、筋肉モデルを用いる方法 [6]によって実現されており、いずれにおいてもリアルタイムでの表情生成が可能である。キーフレーム法では、特定の顔形状に特定の表情を加えたモデルをそれぞれキーフレームとして全て入力するため、多大な工数が必要となる。パラメトリック法では、顔の形状に依存しない表情データを用いているが、複雑な表情の生成が困難である。筋肉モデルを用いた方法では、個々の顔形状に筋肉モデルを配置する作業が必要となる。

複数の顔形状を扱う場合、表情データを顔の形状と独立に表現することが重要である。そこで、個々の顔形状モデルに共通の二次元パラメータ空間を定義し、この空間上で表情データを記述する手法を提案した [7][8]。この手法では、一般化された顔形状モデルを介して、全ての顔形状表面とパラメータ空間とに1対1の対応を保証し、パラメータ空間上の同一の複雑な表情データを、様々な顔形状に適用できるようにした。

メタモルフォシス (あるいはモーフィング) と呼ばれる手法は、二次元 [9] または三次元 [10] の1つの形状を別の形状に滑らかに変化させる手法であり、効果的な映像生成に有効である。パラメータ空間を用いる上記の手法では、個々の顔形状は一般化された顔形状モデルの変形によって得るので、メタモルフォシスは容易に実現できる。さらに、表情データが顔の形状に依存しないので、メタモルフォシスの途中で表情を変化させるようなアニメーションも生成できる。しかし、変更された顔の形状に表情データを再適用する際には、顔モデル上の各々の点に対

して、ポリゴンの検索、およびポリゴン頂点を用いた線形内挿の再計算が必要なため、このアニメーションをリアルタイムで生成することは困難であった。

本報告では、二次元パラメータ空間を用いる手法 [7][8]を拡張し、メタモルフォシスと表情の変化とを同時にリアルタイムで実現する顔の三次元形状変形手法を提案する。

2. 大局的変形と局所的変形を用いた形状変形

顔の三次元アニメーションにおいて、メタモルフォシスは大局的な変形、表情の変化は局所的な変形と考えることができる。本手法では、前者のための顔の形状データを大局的変形データ、後者のための表情データを局所的変形データと呼び、この2種類のデータを用いて顔モデルの形状変形を行なう。なお、本手法で扱う顔モデルは、顔表面の形状を多面体で近似したものとする。

2.1 大局的変形データと二次元パラメータ空間

メタモルフォシスは、互いに等しいトポロジーを持つ複数の大局的変形データを用いて実現できる。大局的変形データと局所的変形データとを独立に表現するため、全ての大局的変形データに共通のパラメータ空間を定義する。パラメータ空間としては、図1に示すような二次元空間 S を用いる。大局的変形データを表す顔モデル M_i ($i=1,2,\dots$) の表面と、 S との対応関係を定義するため、一般化された顔形状モデルを一つ定め、これを M_0 とする。 M_i ($i=1,2,\dots$) は、 M_0 を変形することによって得るものとする。 M_0 に対して円柱座標系を定義し、半径成分 r 、角度成分 θ 、高さ成分 h のうち θ と h を用いて二次元に展開し、これを二次元パラメータ空間 S とする。個々の顔モデル M_i は M_0 と同じトポロジーを持つため、 M_i のポリゴンを構成する頂点は、 S 上の点と1対1に対応する。図1の M_1 上の点 P_1 および M_2 上の点 P_2 は、これらに対応する M_0 上の点の円柱座標の角度成分と高さ成分を用いて、 S 上の点 P_0 と対応する。 M_i の表面上の任意の点も、それが含まれるポリゴンの頂点に対応する S 上の点の座標の線形内挿により、 S 上の点と1対1に対応する。

なお、顔モデル表面の耳の部分等は、円柱座標系の角度成分と高さ成分に対して多価になるが、これらの部分は表情に関して重要ではないので、これらの部分に関する問題はここでは考慮しない。

2.2 パラメータ空間上の局所的変形データ

表情の変化は、 M_i の表面上の頂点に複数の移動量を与えることにより実現できる。 M_i 上の頂点移動と二次元パラメータ空間 S 上のベクトルとの1対1の対応を定義することにより、特定の顔モデル上の表情の変化を、他の任意の顔モデルに適用できるようにする。局所的変形データは S 上のベクトルにより構成される。図1の M_1 上の点 P_1 に2つの移動量 D_{11} 、 D_{12} を与えると、 S 上の点 P_0 に対してこれらに対応するベクトル D_{01} 、 D_{02} が得られ、これらがそれぞれ異なる2つの局所的変形データの要素となる。 D_{01} 、 D_{02} より、 M_2 上の点 P_2 に対してこれらに対応する移動量 D_{21} 、 D_{22} が得られる。

M_1 上の D_{11} から M_2 上の D_{21} を得る手順を示す。

(1) M_1 上の D_{11} から S 上の D_{01} を得る手順

(1a) D_{11} が指し示す P_1 の移動先を P_{11} とする。

(1b) P_{11} を円柱座標の半径方向に移動して M_1 の表面上にのせた点を P_{11}' とし、 P_{11}' が含まれる M_1 上のポリゴンを Q_{11} 、 Q_{11} に対応する S 上のポリゴンを Q_{01} とする。

(1c) Q_{11} の頂点の線形内挿によって P_{11}' を表し、これと同じ係数を用いて Q_{01} の頂点を線形内挿し、 P_{11}' に対応する S 上の点 P_{01} を求める。

(1d) 点 P_0 と P_{01} との差分から、ベクトル D_{01} の S 上での移動量成分 $\Delta \theta$ 、 Δh を得る。また、 M_1 上の点 P_1 と P_{11} を円柱座標で表した場合の半径成分の比を、 D_{01} の半径比成分 R とする。

(2) S 上の D_{01} から M_2 上の D_{21} を得る手順

(2a) D_{01} の成分 $\Delta \theta$ 、 Δh から P_{01} を求め、これを含むポリゴン Q_{01} の頂点の線形内挿で P_{01} を表す。

(2b) Q_{01} に対応する M_2 上のポリゴンを Q_{21} とし、 Q_{01} と同じ係数を用いて Q_{21} の頂点を線形内挿し、

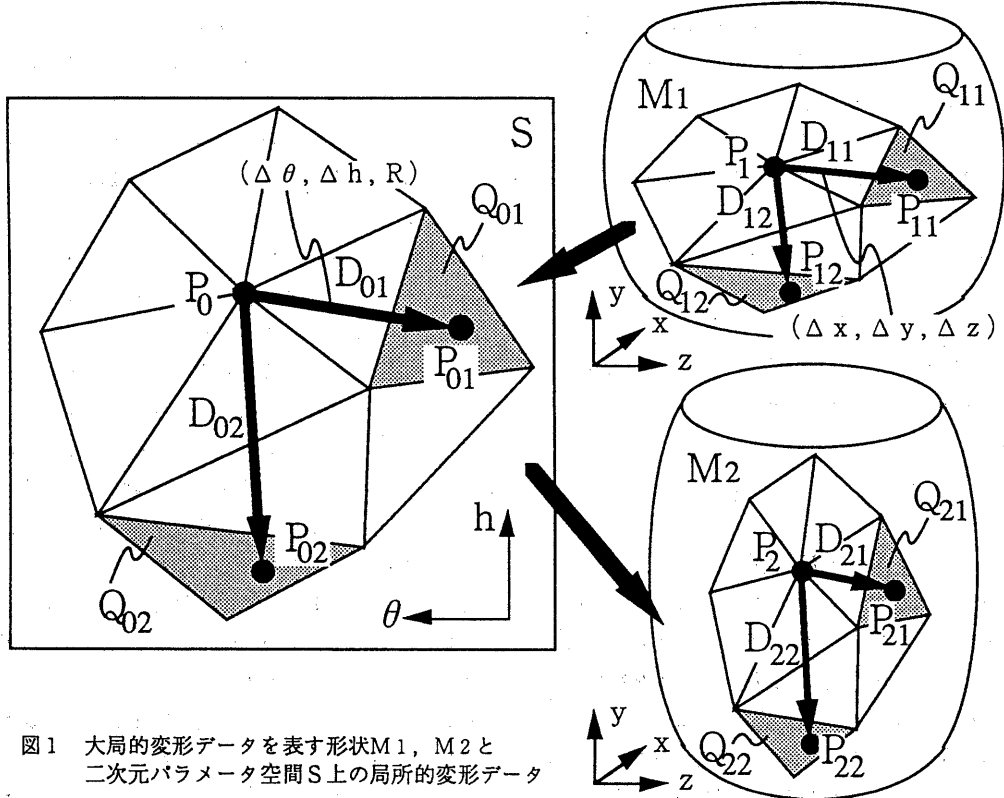


図1 大局的変形データを表す形状 M_1 、 M_2 と二次元パラメータ空間 S 上の局所的変形データ

点 P_{21}' を求める。 P_{21}' を円柱座標の半径方向に移動し、点 P_2 との円柱座標の半径成分の比を D_{01} の R と一致させたものを P_{21} とする。

(2c) 点 P_2 と P_{21} の差分が P_2 の移動量 D_{21} となる。

以上により、 M_i 上の移動量と、局所の変形データを構成する S 上のベクトルとが1対1に対応する。

2.3 制御点を用いた局所の変形データの作成

S 上のベクトルは、 S 上の全ての点に対して直接与えることが可能であるが、これは対話的な操作には適さない。そこで、局所の変形において重要な点を制御点として複数定義しておき、制御点に与えたベクトルの線形内挿によって全ての点に対するベクトルを求める。具体的には、 S 上の制御点をドロネ網で結び、制御点を頂点とする三角形で S を分割する。そして、各々の三角形に含まれる点に対するベクトルを、三角形の頂点の制御点に与えたベクトルの線形内挿によって求める[7][8]。この内挿結果の、三角形間の境界部分における連続性は C^0 級であるが、内挿の計算量が少ないため対話的な処理に適している。図2に示すように、 S 上に制御点 C_1 、 C_2 、 C_3 を置き、これらにベクトル D_{C1} 、 D_{C2} 、 D_{C3} を与えたとする。制御点 C_1 、 C_2 、 C_3 を結ぶ三角形に含まれる点 P_0 は、次式のように表せる。

$$P_0 = k_1 C_1 + k_2 C_2 + k_3 C_3$$

$$(k_1 + k_2 + k_3 = 1) \quad (\text{式1})$$

P_0 に与えるベクトル D は、式1の k_1 、 k_2 、 k_3 を次式に代入することによって得られる。

$$D = k_1 D_{C1} + k_2 D_{C2} + k_3 D_{C3} \quad (\text{式2})$$

制御点にベクトルを与えて局所の変形データに対話的に作成する作業は、任意の三次元顔モデル M_i を用いて行なう。具体的には、 S 上の制御点に対応する M_i 上の点を M_i の表面に表示し、これを対話的に動かすことによって、制御点に与えるベクトルを決定する。なお、表情の変化は、半径成分を保存した頂点の移動で近似できるので、制御点に与えるべ

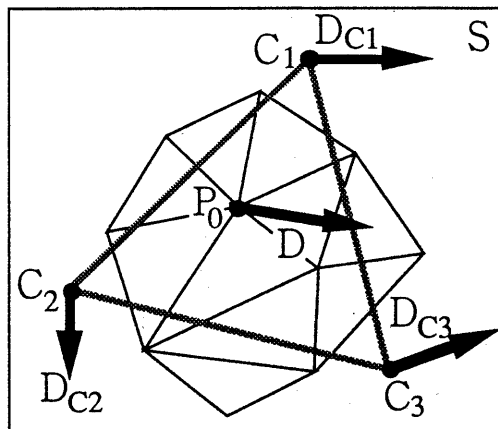


図2 S 上の制御点に与えたベクトルの線形内挿

ベクトルの成分のうち、半径比成分 R は1に固定した。

2.4 複合変形データによるアニメーション

本手法においては、顔の形状を表す1個の大局的変形データと、表情を表す1個の局所の変形データとを組み合わせ得られるデータを複合変形データと呼ぶ。複合変形データを繰り返し求めれば、メタモルフォシスと表情の変化とを同時に実行することができる。例えば、女性の顔から犬の顔へメタモルフォシスしながら、無表情から驚きへ表情を変化させる、というようなアニメーションが生成できる。しかも、局所の変形データは大局的変形データに依存しない形式で表現されているので、この表情の変化を他のメタモルフォシスと同時に実行することも可能である。ここで問題となるのは、アニメーションの各フレームにおいて複合変形データを求める組み合わせの計算を行なった場合、リアルタイムでアニメーションを生成することが難しいという点である。この問題の原因および解決方法を以下に述べる。

図1において、表情の変化を表すための S 上の点 P_0 の移動を、 P_0 に対応する M_i 上の点 P_i に正確に対応させるためには、 P_0 の移動先の位置が変わるたびに、2.2で述べた M_i 上のポリゴンの頂点の線形内挿をやり直す必要がある。また、この線形内挿の対象となるポリゴンは、 P_0 の移動とともに変わるので、 P_0 の現在の移動先がどのポリゴンに含まれるかを求め直さなければならない。これらの計算

を実行しながら P_i をリアルタイムで移動することは困難である。そこで、表情の変化を表す P_i の移動を、代表的な2つの局所の変形データから得られる移動先の間の、直線的な移動で近似する。例えば、図1の顔モデル M_1 上の点 P_1 の移動を、局所の変形データから求めた点 P_{11} と P_{12} との間の直線的な移動、すなわち P_{11} と P_{12} の加重平均の重みの変化によって表現する。また、メタモルフォシスを表すための顔モデル上の点の移動も、できるだけ少ない計算量で実行するため、表情の変化の場合と同様に、直線的な移動で表すことにする。すなわち、代表的な2つの大局的変形データを用意し、これらの加重平均の重みの変化によってメタモルフォシスを表現する。以上より、メタモルフォシスと表情の変化とを同時に実現するアニメーションは、2個の大局的変形データと2個の局所の変形データとを組み合わせた4つの複合変形データの加重平均の重みを変化させるだけで生成できるようになり、リアルタイム化が実現する。

図1では、 M_1 と M_2 が表す2個の大局的変形データが与えられており、 D_{01} と D_{02} を含む2個の局所の変形データが与えられている。これらの組み合わせにより4個の複合変形データが得られ、それぞれのデータにおける P_0 の移動先が P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 、 P_{22} である。図3に示すように、三次元顔モデルの形状変形結果における P_0 の移動先 P は、次式に示す P_{11} 、 P_{12} 、 P_{21} 、 P_{22} の加重平均によって得られる。

$$\begin{aligned}
 P &= s_1 (t_1 P_{11} + t_2 P_{12}) \\
 &+ s_2 (t_1 P_{21} + t_2 P_{22}) \\
 (s_1 + s_2 = t_1 + t_2 = 1) & \quad (式3)
 \end{aligned}$$

顔モデルを構成する全ての点の移動先は、共通の重み s_1 、 s_2 、 t_1 、 t_2 を用いて、同様に求められる。重み s_1 、 s_2 、 t_1 、 t_2 の値を変化させることにより、4個の複合変形データを足し合わせる割合が変化し、大局的な変形すなわちメタモルフォシスと、局所的な変形すなわち表情の変化を調節できる。

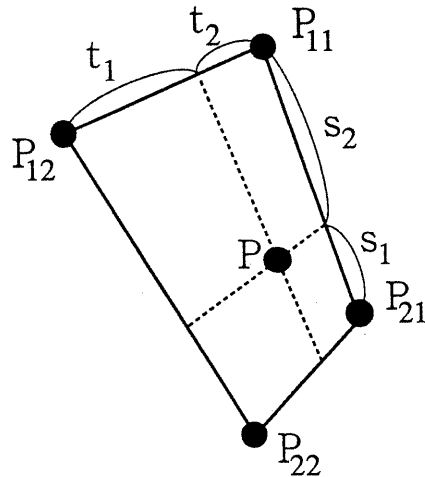


図3 加重平均による変形結果の決定

3. 顔のリアルタイムアニメーション

顔のリアルタイムアニメーションを生成する際には、代表的な顔の形状を表す複数の大局的変形データと、代表的な表情を表す複数の局所の変形データを用意しておく。そして、新たな大局的変形データまたは新たな局所の変形データを1つずつ呼びだして、加重平均される4個の複合変形データを更新する。このとき、形状変形を途切れさせず、次のデータへ連続的に移行するため、現在の2つの大局的変形データを補間したものと、呼びだされた新しい大局的変形データとを、次の加重平均のデータとする。局所の変形データについても同様の処理を行なう。

3.1 大局的変形データの更新

図4に示すように、2個の大局的変形データと2個の局所の変形データの組み合わせにより、顔モデル形状変形結果における点 P を決定する4つの複合変形データの要素 P_{ij} ($i=1,2, j=1,2$) が与えられているとする。 P_{ij} は現在の i 番目の大局的変形データと j 番目の局所の変形データを組み合わせた複合変形データの要素である。 P は式3によって決定されている。この状態から、新たな大局的変形データを1つ呼びだす際には、以下のような処理を行なう。

(1) 現在の s_1 、 s_2 を用いて次式から P_{31} 、 P_{32} を求める。

$$\begin{aligned} P_{31} &= s_1 P_{11} + s_2 P_{21}, \\ P_{32} &= s_1 P_{12} + s_2 P_{22} \end{aligned} \quad (\text{式4})$$

(2) 新たな大局的変形データと現在の第1、第2の局所的変形データの組み合わせによって得られる移動先をそれぞれ P_{41} 、 P_{42} とする。

(3) t_1 、 t_2 を現在の値とし、 s_1 に1、 s_2 に0を代入し、以降は次式によって変形の調節を続ける。

$$\begin{aligned} P &= s_1 (t_1 P_{31} + t_2 P_{32}) \\ &+ s_2 (t_1 P_{41} + t_2 P_{42}) \\ (s_1 + s_2 &= t_1 + t_2 = 1) \end{aligned} \quad (\text{式5})$$

このようにして、特定の表情と組み合わせる顔の形状を更新しながら、顔モデルの変形の調節を連続的に実行できる。

3.2 局所的変形データの更新

図5は、図4と同様の状態から、新たな局所的変形データを1つ呼びだして顔モデルの変形の調節を続行する様子を表している。このときには、以下のような処理を行なう。

(1) 現在の t_1 、 t_2 を用いて次式から P_{13} 、 P_{23}

を求める。

$$\begin{aligned} P_{13} &= t_1 P_{11} + t_2 P_{12}, \\ P_{23} &= t_1 P_{21} + t_2 P_{22} \end{aligned} \quad (\text{式6})$$

(2) 新たな局所的変形データと現在の第1、第2の大局的変形データの組み合わせによって得られる移動先をそれぞれ P_{14} 、 P_{24} とする。

(3) s_1 、 s_2 を現在の値とし、 t_1 に1、 t_2 に0を代入し、以降は次式によって変形の調節を続ける。

$$\begin{aligned} P &= s_1 (t_1 P_{13} + t_2 P_{14}) \\ &+ s_2 (t_1 P_{23} + t_2 P_{24}) \\ (s_1 + s_2 &= t_1 + t_2 = 1) \end{aligned} \quad (\text{式7})$$

このようにして、特定の顔の形状と組み合わせる表情を更新しながら、顔モデルの変形の調節を連続的に実行できる。

4. CGシアター「カ・オ・リ」への応用

本手法を用いた顔のリアルタイムアニメーションシステムを、フジテレビジョンと共同開発した[11]。

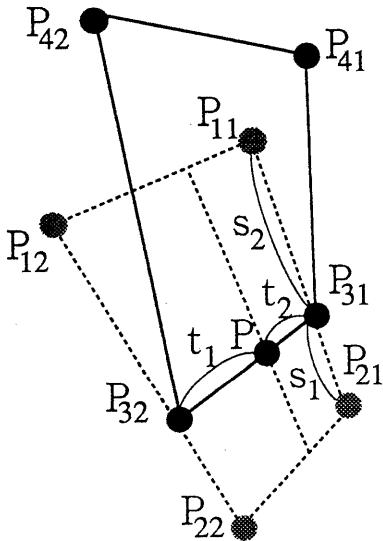


図4 大局的変形データの更新

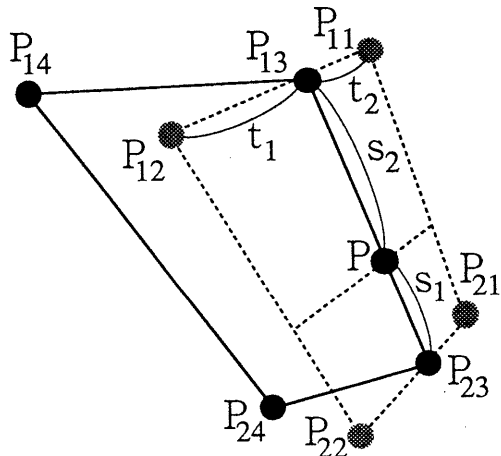


図5 局所的変形データの更新

顔のアニメーションソフトウェアの開発を日立が担当し、システムの入力部分のハードウェアとソフトウェアの開発、および顔形状と表情のデザインをフジテレビが担当した。本システムを用いて、1993年3月11日から14日までの4日間、東京・赤坂の「シアターVアカサカ」にて舞台劇「インタラクティブCGシアター「カ・オ・リ」」を上演した[12]。

4.1 CGシアターの概要

「カ・オ・リ」はフジテレビと演劇集団坂企画が共同制作した約1時間40分の舞台劇である。博覧会用のキャンペーンガールとして作られたCGキャラクター「カオリ」が画面を飛び出し、カオリを作った若いディレクターと恋に落ちる、というストーリーである。開発したシステムを用いて、カオリの顔形状と表情をリアルタイムで制御し、その結果を舞台中央のマルチスクリーン（44インチ×9面）に映し出した。画面を飛び出した部分は、カオリのモデルとなった女優が舞台上で演技した。

舞台裏では4人の操作者がダイヤルボタンボックスやジョイスティック等を用いてCGキャラクター「カオリ」を制御する情報をGWSに入力した。CGキャラクターの顔の変形計算とリアルタイムレンダリングを行なうGWSは、シリコングラフィックス社のIRIS 420/RealityEngineを用い、毎秒10～15フレームの映像を出力した。

4.2 画像生成結果

開発したシステムを用いて生成した画像の例を図6および図7に示す。図6の左の列は、上から順にカオリ、丸顔、犬の顔形状データであり、これらのトポロジーは互いに等しく、約4500個の三角形から成る。表面の針が示す点は、二次元パラメータ空間上の約100個の制御点を、各々の顔形状データ上にマッピングした位置を示し、表情データはこれらの制御点を動かすことにより作成した。図6の右の列は、カオリの顔形状データ上で作成した表情データを、上から順にカオリ、丸顔、犬の顔形状データと組み合わせて得られた複合変形データである。開発したアニメーションシステムを用いて、これらの複合変形データの加重平均の重みを変化させることに

より、例えば表情を変えながらカオリから犬へ変化する、というような演出を行なった。図7は、カオリの顔形状データとCGシアターで用いた表情データとを組み合わせ、得られた複合変形データにテクスチャマッピングを施して生成した画像である。テクスチャは女優の前後左右4方向からの顔写真を合成したもの[8]をベースにして作成した。

5. 考察

本手法を用いた顔のリアルタイムアニメーションシステムをライブの演劇で使用した結果から、以下のような課題が残されていることを認識した。

(1) 顔形状データの作成作業工数の削減

CGシアターのストーリーの都合上、カオリの顔形状をモデルとなった女優の人相にできるだけ一致させる必要があった。しかし、特定の人物によく似た顔形状をモデリングツールで作成する作業は煩雑であり、多くの工数を要した。これを解決する一つの方法としては、人物の顔の三次元形状と表面の色情報を同時に、かつ対応がとれた形で計測できる装置の利用[6][13]が考えられる。ただし、この装置で得られるデータを構成する点の数は膨大なので、少ない点であらかじめ構成した顔モデルをこのデータに整合させて用いる[14]等の処理が必要となる。

(2) CGキャラクターの操作性の向上

CGキャラクターを操作するためには、顔形状と表情に関する情報の他に、顔の向きなどのパラメータも必要であり、これらを全て入力するために4人の操作者を要した。より少ない操作者でCGキャラクターを操作するためには、人間の顔の動きを直接検出する[15]等、入力部分のさらなる改良が必要である。同時に、動作をある程度自動的に生成する手法を検討することも必要と思われる。

(3) 全身モデルを扱うCGのリアルタイム化

CGキャラクターの表現の幅と用途を広げるためには、顔だけでなく、人物の全身モデルをリアルタイムで動かす手法およびシステムが必要であり、これを実現することも今後の課題の一つである。

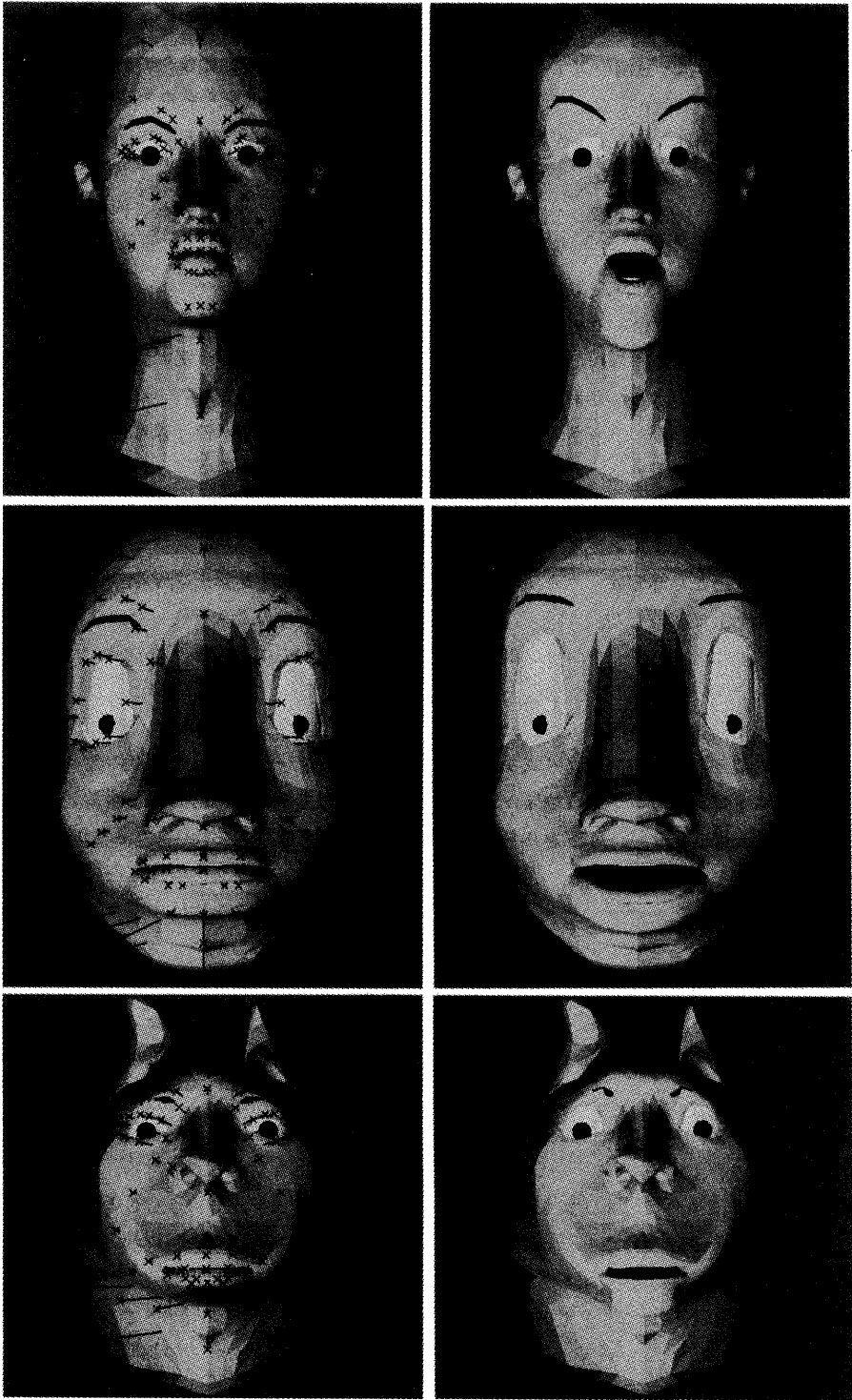


図6 CGシアターにおける顔形状データと表情データの例

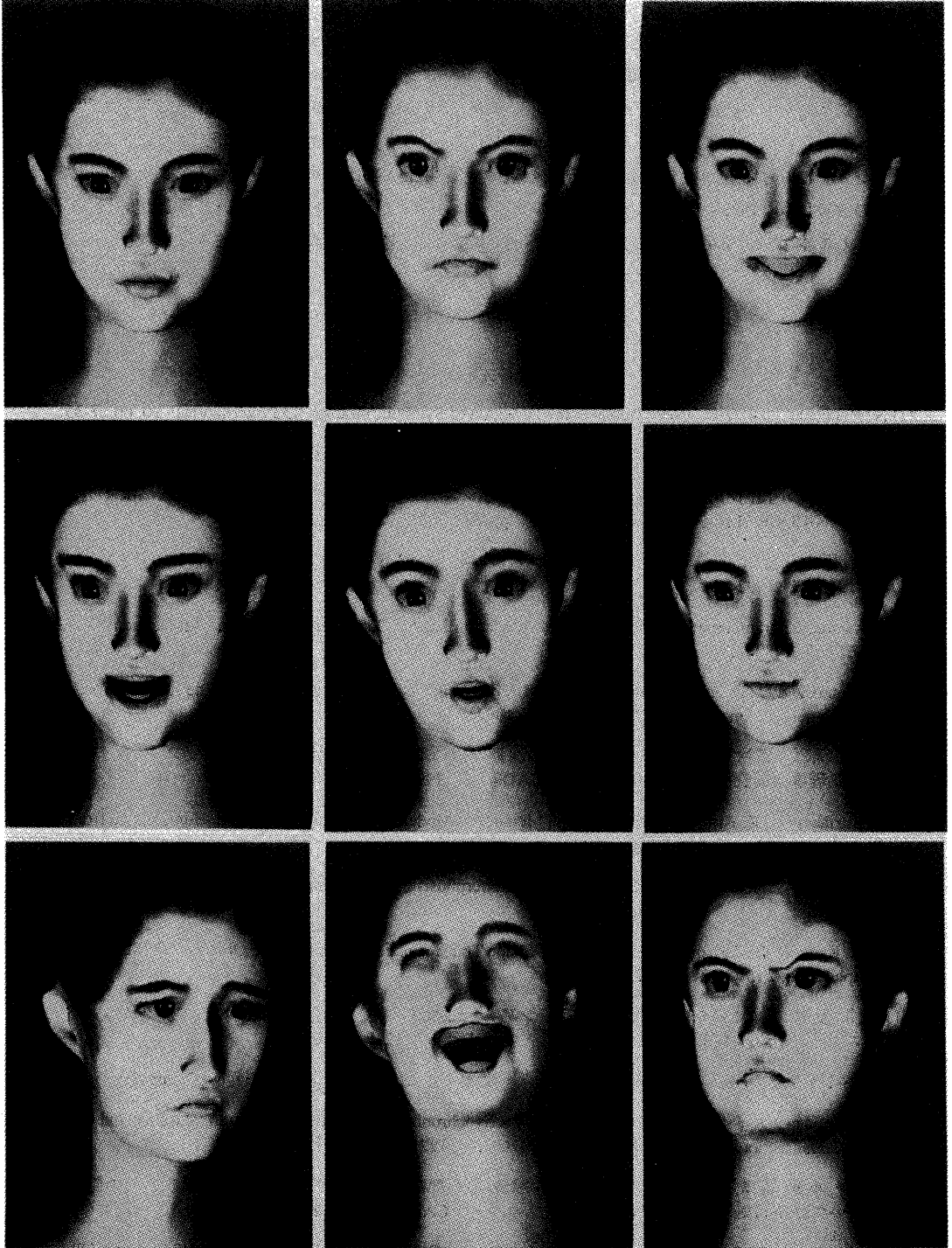


図7 CGキャラクター「カオリ」の画像生成例

6. おわりに

本報告では、メタモルフォシスと表情の変化とを同時にリアルタイムで実現できる顔の三次元形状変形手法を提案した。本手法を用いたアニメーションシステムをライブの演劇に応用し、リアルタイムアニメーションにおける有効性を確認した。今後は、本手法の改良に取り組むとともに、全身モデルの要素技術として本手法を活用する予定である。

謝辞

アニメーションシステムの共同開発を担当されたフジテレビジョン美術制作局CGセンターの坂本浩氏、伊原正徳氏、CGシアターで用いた顔形状データと表情データの作成を担当されたネバーランドの井上幸喜氏、本研究を進めるにあたり御協力を賜った日立製作所の安生健一氏、栗原恒弥氏、高月宏明氏、関本信博氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] N. Magnenat-Thalmann : New Trends in the Direction of Synthetic Actors ; CG International '90, pp.17-35.
- [2] 末永, 間瀬, 渡部 : 人間のCG表現と応用 ; テレビジョン学会誌 Vol. 46, No. 8, pp. 1012-1020 (1992) .
- [3] 上瀬, 坂本, 小滝, 長島 : リアルタイム3次元CGシステムの開発とキャラクタの生放送出演 ; 第5回NICOGRAPH論文コンテスト論文集 pp. 317-324 (1989) .
- [4] 町田, 田中, 山田 : バビュレーションシステムについて ; 第8回NICOGRAPH論文コンテスト論文集 pp. 194-202 (1992) .
- [5] F. I. Parke : Parameterized Models for Facial Animation ; IEEE Computer Graphics and Applications, 2, 9, pp. 61-68 (1982) .
- [6] K. Waters and D. Terzopoulos : Modelling and Animating Faces using Scanned Data ; The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol. 2, pp. 123-128 (1991) .
- [7] 新井, 栗原 : 二次元パラメータ空間上での線形内挿による顔の三次元アニメーション ; 情報処理学会研究報告 グラフィクスとCAD 45-5 (1990) .
- [8] T. Kurihara and K. Arai : A Transformation Method for Modeling and Animation of the Human Face from Photographs ; Computer Animation '91, pp. 45-58.
- [9] T. Beier and S. Neely : Feature-Based Image Metamorphosis ; ACM Computer Graphics, 26, 2 (SIGGRAPH '92), pp. 35-42.
- [10] J. R. Kent, W. E. Carlson, and R. E. Parent : Shape Transformation for Polyhedral Objects ; ACM Computer Graphics, 26, 2 (SIGGRAPH '92), pp. 47-54.
- [11] 新井, 安生, 坂本 : インタラクティブCGシアター「カ・オ・リ」における顔のリアルタイムアニメーション ; 情報処理学会研究報告 情報メディア 12-1 (1993) .
- [12] 坂本 : インタラクティブCGシアター「カ・オ・リ」制作記 ; 放送技術'93年6月号, pp. 70-75.
- [13] Y. Suenaga and Y. Watanabe : A Method for the Synchronized Acquisition of Cylindrical Range and Color Data ; IEICE Transactions, Vol. E 74, No. 10, pp. 3407-3416 (1991) .
- [14] 上野, 小野, 森島, 原島 : 自然な表情合成のための頭部高精細ワイヤフレームの構成とその階層的制御について ; 情報処理学会研究報告 グラフィクスとCAD 60-2 (1992) .
- [15] L. Williams : Performance-Driven Facial Animation ; ACM Computer Graphics, 24, 4 (SIGGRAPH '90), pp. 235-242.