

## 実写融合と形状変形の適応的選択による顔表情生成

田中 弘美 石澤 彰 足立 裕昭 小野 一義

立命館大学 理工学部 情報学科 コンピュータビジョン研究室

{ hiromi, akira, adachi, ono }@cv.cs.ritsumeikan.ac.jp

あらまし イメージ系の視覚情報を中心とした臨場感通信は次世代3次元画像通信として社会的に大きな期待がかけられている。顔表情は感情とテキスト(文字言語情報)から成る「メッセージ」を伝達しており、人間同士の自然で円滑なコミュニケーションの実現のために本質的な役割を果たす。本論文では、顔表情生成の主体となる眼と口唇部分の幾何構造と動きの特徴を、顔の3次元形状変化と表面の動き変化を観測した顔動画像を分析し、それぞれの部位の動きの特徴と複雑さに応じて、実写融合法あるいは形状変形法のいずれかを適応的に選択することによりライブの顔表情を実時間で再現する方法を提案する。感情伝達の主体である眼領域の動きは微妙で複雑でありながら、表情変化に伴う3次元形状変化が小さいことから、筆者らの提案による「拡張仮想感」を用いて、顔の3次元CGモデル上に表情変化を観測したライブ映像を融合することにより生成する。一方、テキスト伝達の主体となる口唇表情は、形状変化が大きく3次元モデル自体の変形が必要であるため、位相幾何学のホモトピーに基づく曲面変形法を用いて、画像分析により抽出した口輪筋の動き特徴に基づいて発話に忠実な3次元口唇形状を滑らかに効率的に生成する。臨場感通信を指向した提案手法を実装し、ライブメッセージを伝達する実時間3次元顔表情生成システム実現の可能性を明らかにする。

キーワード 臨場感通信, 3次元顔表情生成, メッセージ伝達, 拡張仮想感, 複合現実感, 曲面変形, 実写融合

## Mixed Reality-Based Approach to Live Facial Expression Generation

Hiromi T. TANAKA Akira ISHIZAWA Hiroaki ADACHI Kazuyoshi ONO

Computer Vision Laboratory, Dept. of Computer Science, Ritsumeikan University

{ hiromi, akira, adachi, ono }@cv.cs.ritsumeikan.ac.jp

**Abstract** Recent study of facial expression has been received growing attention in the fields of human interface, virtual reality and computer vision. In this paper, we propose a mixed reality based approach to live facial expression generation, which adaptively adopts the method of either projecting live video images on to a face surface or deforming the face surface, based on the motion analysis of facial expression using both range and color images. We apply the proposed method to real time generation of facial expression. Experimental results demonstrate the efficiency and robustness of the proposed method.

**Key words:** Mixed Reality, Augmented Reality, 3D Facial Expression Generation, Surface Deformation.

## 1 はじめに

マルチメディアや仮想現実技術の進展に伴い、イメージ系の視覚情報を中心とした臨場感通信は次世代3次元画像通信として社会的に大きな期待がかけられている。臨場感通信における対象の動き生成は、複数の地点の送信側と受信側で対象の3次元モデルと仮想会議空間を共有し、その変化情報を送信側で分析を行い、それぞれの受信側では認識結果に基づき、対象モデルを変形し、任意方向からの立体視画像を合成する。人間の表情を表す顔動画像を対象とした場合には、送信側では顔表情の特徴が簡潔に記述され、受信側では限られた記述から顔表情が忠実にかつ効率的に再現表示されなくてはならない。

一方、人間同士のコミュニケーションにおいて、顔(表情)が果たす役割は50%、声の調子や動作が30%、テキスト(文字言語情報)が10%程度、残りがその他であると報告がある[1]。また、心理学においては「メッセージ」はテキスト+感情と定義されており、感情のないテキストだけでは、コミュニケーションは成り立たないとされている。したがって、顔表情は感情とテキストから成る「メッセージ」を伝達しており、通信ネットワークやコンピュータを介する人間同士の自然で円滑なコミュニケーションを実現するためには、ライブの顔表情の生成は本質的な課題である。

顔表情の代表的な研究として、心理学の分野において顔表情の分類のために提案されたFACS(Facial Action Coding System)が挙げられる[2]。FACSは、顔表情筋の位置と動きの方向を顔表面に現れる変化を基に分類した運動単位(AU: Action Unit)から成り、任意の表情を生成するためには、必要なAUを選択し、その動きを定量的に指定する必要がある[4]。また、3次元形状モデルに基づく顔動画像の符号化の研究においても、眼部分と口部分の動きの両者を形状変形により再現している[3]。

しかし、顔表情を生成する眼、鼻、口、頬などの主要な顔部品を構成する表情筋構造やその動きの複雑さは均一ではなく、各部品毎に異なる特徴を持っている。特に眼表情は、複雑な感情や意志の変化情報が凝縮されており、モデルの3次元形状変形のみにより繊細で微妙な変化を実時間で再

現するには限界がある。

一方、口唇表情を表した視覚情報が音声認識に重要な役割を果たしていることが報告されている[5, 6, 7]。発話時における口形状やその動きを表した視覚情報の存在が、音声認識の精度に大きな影響を与えている。そのため、口唇表情生成においては、口唇領域の筋肉構造とその動きに基づいて、発話に忠実な3次元口唇形状を効率的に再現することが必要とされている。

そこで本論文では、顔表情生成の主体となる眼と口唇部分の幾何構造と動きの特徴を、顔の3次元形状変化と表面の動き変化を観測した顔動画像を分析し、それぞれの部位の動きの特徴と複雑さに応じて、実写融合法あるいは形状変形法のいずれかを適応的に選択することにより「ライブのメッセージ」を伝達する顔表情を実時間で再現する方法を提案する。

感情伝達の主体である眼領域の動きは微妙で複雑でありながら、表情変化に伴う3次元形状変化が小さいことから、筆者らの提案による「拡張仮想感」を用いて、顔の3次元CGモデル上に表情変化を観測した実写映像を融合し、さらに、自然で滑らかな融合を実現し、かつ、対象表面の動的な色調変化に適応するために、CGモデルの色調を実写領域の色調に自動調整することにより、ライブの眼表情を生成する[8]。すなわち、顔の3次元CGモデル上に表情変化を観測した実写映像を融合することにより、微妙でディテールに富む感情や表情と顔色の変化をライブで再現する。

テキスト伝達の主体となる口唇表情は、形状変化が大きく3次元モデル自体の変形が必要なこと、また筋肉構造とその変形の簡潔な3次元モデルが得られることからモデルベース符合化が有効である[9]。そこで、位相幾何学のホモトピーに基づく曲面変形法を用いて、画像分析により抽出した口輪筋の動き特徴に基づいて発話に忠実な3次元口唇形状を効率的に生成する。すなわち、時系列顔画像からサンプリングされた少数の口唇輪郭と、輪郭に沿って計測された3次元速度ベクトルに基づいて中間形状の生成を制御し、滑らかな3次元口唇表情を効率的に生成する。

臨場感通信を指向した提案手法を実装し、ライブメッセージを伝達する実時間3次元顔表情生成システム実現の可能性を明らかにする。

## 2 顔表情

### 2.1 表情生成における表情筋の運動

顔表情は、顔または頭の皮膚の中にある表情筋の収縮によって表れる。これらの筋が収縮すると皮膚のずれが起こり、このずれがシワと溝の形で表れ、同時に、顔の形状も大きく変形し、多彩な顔の表情を表現する。例えば、眼周辺の繊細で微妙な表情は、眼輪筋(4)の収縮により目尻のシワやが外眼角に放射状に生じたり、皺眉筋(2)によって、眉毛の皮膚を内下方へ寄せ、激しい苦悩を表わすような、縦に走る溝をつくることにより生成される。また、口唇周辺においては、輪状筋である口輪筋(11)が弱く収縮すると、口唇が互いに重なり合うことで寡黙な印象を与え、強く収縮すると、口唇が前方にずれ突出する。また、大頬骨筋(10)が収縮し口角を上外方に挙げることによって、笑いと喜びの表情を表わす。

### 2.2 動画画像解析より抽出される顔表情特徴

以上の表情筋の収縮運動による顔表面の変形と動きを、顔距離画像列を用いる3次元形状変化の計測と、顔動画画像を用いるオプティカルフロー分析に基づいて、表情変化に伴う画像特徴を抽出する。

#### 2.2.1 距離情報を用いる3次元形状変化分析

表情変化に伴う顔の3次元形状変化は、上野らによる距離情報を用いた顔領域分割[11]の報告に基づき考察した。図1に示すように、顔の動きの特徴から、顔表面を以下の4種類の領域に分割している。

1. 額・眉・目・頬の下部領域のように、皮膚表面に沿った比較的2次元的な運動をする領域(図1(a))、
2. 頬上部領域のように、皮膚表面に対して垂直な運動、膨らみや沈みをする領域(図1(b))、
3. 口唇・顎領域のように、3次元的な柔軟な運動をする領域(図1(c))、
4. ほとんど運動しない領域(図1(d))。

以上から、言語情報伝達の主体となる口唇・顎領域(図1(c))においては、発話に伴うダイナミッ

クな3次元形状変形が起こり、一方、感情伝達の主体となる額・眉・目・頬下部の領域(図1(a))においては、比較的3次元形状変化は小さく皮膚表面に沿った2次元的な特徴を持つ運動をしていることが観察される。

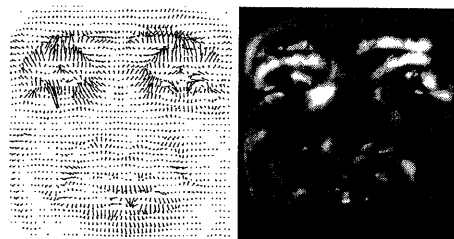


- (a) 皮膚表面での2次元的な運動をする領域
- (b) 皮膚表面に対して膨らみや沈みをする領域
- (c) 3次元的な柔軟な運動をする領域
- (d) ほとんど運動しない領域

図1: 顔表面の領域分割(上野[11] p15:図8より抜粋)

#### 2.2.2 顔動画をを用いる2次元動き変化分析

顔表情変化を観察した動画画像からオプティカルフローを計測し、2次元的な動きの特徴の複雑さを解析する。図2にオプティカルフローの計測結果とその濃淡表示を示す。以上から眼周辺領域においては2次元的・並進的運動が大きいことが確認される。



(a) Optical Flow (b) Size of Optical Flow

図2: オプティカルフロー分析

## 3 適応的選択法による表情生成

### 3.1 実写融合と形状変形の適応的選択

CG技術を用いて、対象の動的な変化を仮想空間に生成する処理は、逐次入力される特徴点の動きパラメータに従って対象の3次元CGモデルの3次元形状を変形し、その結果を透視変換を用い

て2次元平面に投影することにより画像を合成・表示している。従って、対象の3次元動的な動き変化は2次元の表面テクスチャ変化として表示されている。

3次元形状がダイナミックに変形する領域の動きを再現するためには、3次元モデルを効率的に変形させる必要がある。このような領域は、3次元形状変形による動き生成が有効である。一方、3次元形状変化が小さく表面上を滑るような2次元・並進的な動きをする領域は、固定した3次元CGモデル上に対象の2次元的变化を観測した実写映像を投影することで、対象の動きをリアルに再現することが可能である。このように実写映像を融合することにより、CGモデルの3次元形状変形と投影変換の計算過程を省き、かつリアルな動きが再現される領域を「実写有効領域(以下、REM:Region Effective for Mergingと略す)」として抽出する。従って、動画像の構造分析により計測される表面テクスチャ変化が、3次元形状変化より大きくかつ複雑な領域であるREMにおいては、実写融合により動きを再現し、3次元形状変化が大きくダイナミックな動きが現れる領域は、3次元形状変形による動き生成を行う。

### 3.2 実写有効領域の抽出

REMの候補として2.2.1に示した距離情報を用いた3次元形状変化分析から、3次元形状変化量が小さく皮膚表面に沿った2次元運動をする額・眉・目・頬下部の領域が選択され、また、2.2.2に示したオプティカルフローを用いた2次元変化分析から、2次元・並進的運動が大きい目の周辺領域が選択される。

以上の図3(a)と図3(b)に示した3次元形状変化およびテクスチャ変化の解析を基に、図3(c)に示した3次元形状変化が小さく表面上を滑るような2次元・並進的に大きな運動をしている眼領域を、顔表情生成におけるREMとして抽出する。本研究では眼領域(境界線)の対称性を考慮し、またCGワイヤフレームモデル上で対応する部分(図3(d))の設定を容易にするために手動によりREMを抽出した。

### 3.3 感情伝達のための実写融合式眼表情生成

筆者らは文献[8]において、対象の3次元CGモデル上に対象の動き変化を観測した実写ライブ映像を投影することにより実空間を仮想空間にリアルタイムで融合し、VR空間の動きのリアリティを向上させる「拡張仮想感」を提案し、感情伝達を可能にする眼表情生成法に應用している。まず、対象人物の撮影条件の違いに起因し、かつ、3.2に示した方法で抽出されたREMの融合の不自然さを知覚させる主因となるCGモデルの表面テクスチャと実写領域の色調の差異を補正する。さらに対象表面の動的な色調変化に適応するために、カラーヒストグラム分析を基にCGモデルの色調を実写領域の色調に自動調整する。以上により、対象が刻々と変化する様相をとらえたライブ情報を実時間で仮想空間に反映する自然で滑らかな融合を実現する。以下にアルゴリズムの要約を示す。

#### step1 実写映像の主な抽出

色調の差異を測定するために、実写映像のREM内の量的に支配的な色を、カラーヒストグラム分析を基に色調調整の参照色となる主色 $C_p$ として抽出する。なお、顔画像のREMの主色として肌色が抽出された。

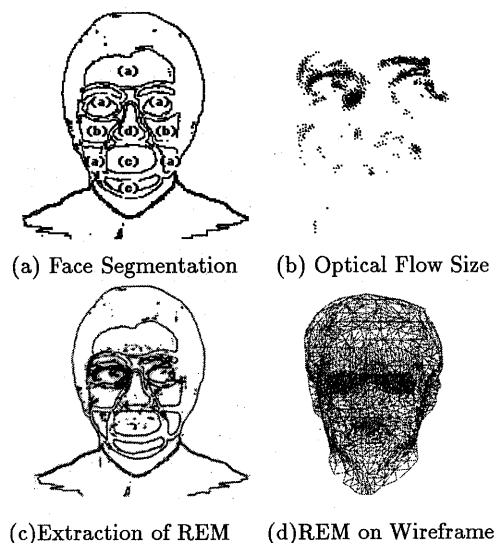


図3: 実写有効領域の抽出

step2 CG テクスチャ画像の主色抽出

あらかじめオフラインで取得した3次元CGモデルのテクスチャ画像のREMから主色 $C_{CG}$ を抽出する。

step3 CG テクスチャ画像の色調調整

3次元CGモデルのテクスチャ画像全体の色調を、主色の差異 $\Delta E (= C_p - C_{CG})$ を用いて自動調整する。

以後、時間 $\Delta t$ 間隔で自動色調調整アルゴリズムを実行し、対象表面の動的色調変化を仮想空間に反映する。図4に、主色分析による自動色調調整結果を示す。

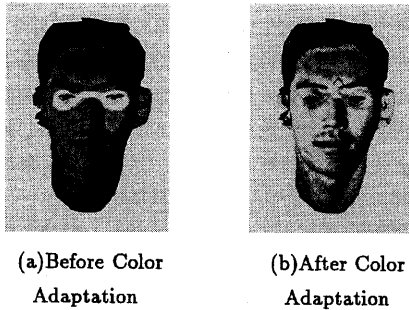


図4: 主色分析による自動色調調整結果

### 3.4 言語伝達のための形状変形式口唇表情生成

口唇表情は環状の口輪筋運動により生成されているため、口輪筋の動きを簡潔に記述しそれを忠実にかつ効率的に再現できれば口唇表情変形をリアルタイムで表示できると考えられる。そこで筆者らは、文献[9]においてホモトピー掃引法に基づく曲面変形法を用いた3次元口唇表情生成法を提案している。

位相幾何学に基づくホモトピー掃引法は、図5に示すように3次元空間曲線を中心軸とし、中心軸に直角に定義された一対の断面輪郭 $C_1, C_2$ 間を、ホモトピーに基づき連続的に変形し生成した中間輪郭 $C(u, v)$ を用いて補間することにより、一般化円筒を生成する手法として提案された[13]。そこで我々は従来のホモトピー掃引法における中心軸を、3次元空間曲線から時間軸に置き換えることにより、すなわち、3次元空間曲線に沿った2次元輪郭変形から、時間軸に沿った3次元輪郭

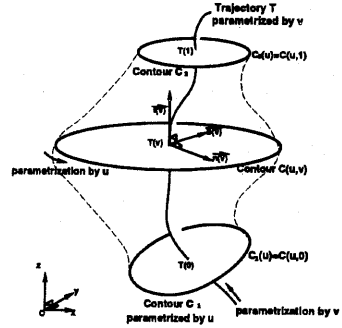


図5: ホモトピー掃引法概念

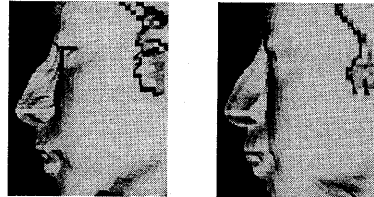
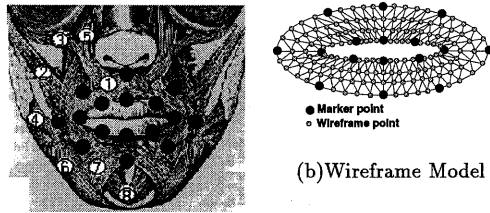


図6: ホモトピー掃引法による顔形状生成

変形へと置換することにより、時間遷移の自由曲面変形法に拡張した。さらに中間輪郭の変形制御を3次元輪郭データと輪郭上の3次元変形ベクトルを用いることにより、変形の方向と大きさを忠実にかつ効率的に再現する曲面変形・生成法へと拡張した。図6(a)は3次元計測装置を用いて計測した顔形状を、提案手法を自由曲面生成法として用いることにより、計測データの20%のデータから図6(b)に示す忠実な自由曲面形状を再現した結果を示している。

本手法の特長は、口唇表情を生成する口輪筋の幾何形状とその運動を、ホモトピー掃引法の断面輪郭形状と輪郭に沿って抽出される3次元速度ベクトルに対応させることで、同一の変形パラメータを用いて、口唇及び周辺の広領域の変形を簡潔に記述できる点にある。口輪筋の幾何構造とその運動は、図7に示す16点の特徴点により定義される口唇形状の時刻 $t$ における断面輪郭 $C_t$ とその特徴点における3次元変形速度ベクトル集合 $\{\vec{V}_i\}$ による変形パラメータ $S_p = (C_t, \{\vec{V}_i\})$ で記述し、それをホモトピー掃引法による曲面変形法を用いて効率的に口唇形状を再現表示する。図8に、ホモトピー曲面変形による口唇形状生成結果を示す。

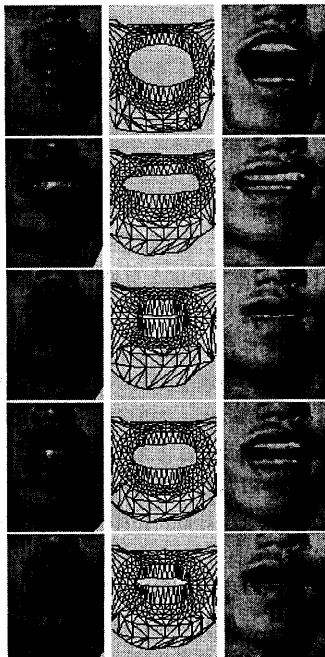


(a) 1. 口輪筋 2. 大頬骨筋 3. 小頬骨筋 4. 笑筋 5. 上唇挙筋 6. 口角下制筋 7. 下唇下制筋 8. オトガイ筋 ● マーカ位置

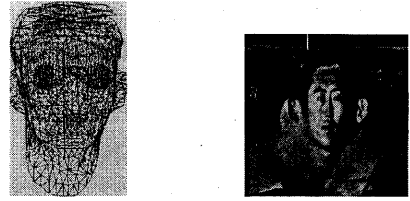
図 7: 口輪筋マーカ位置と CG モデル

以下にアルゴリズムの要約を示す.

- step1 顔動画像から口唇マーカを追跡する
- step2 マーカ追跡結果に基づき口唇運動パラメータ  $S_p$  を抽出する
- step3  $S_p$  を用いてホモトピー曲面変形により中間輪郭形状  $C(u, v)$  を補間生成する
- step4 補間結果に基づき顔のワイヤーフレームモデルの口唇領域部分を変形する
- step5 変形モデルを用いて口唇形状を表示する



(a)Original (b)Model (c)Synthesized  
図 8: ホモトピー曲面変形による口唇表情生成



(a) Surface Model (b) Color Texture Image

図 9: 3次元CGモデル

## 4 実装システム

### 4.1 システムの概要

図 10 に顔表情生成システムの概略図を示す. 図 9 に示すように, 対象人物の 3 次元顔形状を表すワイヤーフレームモデルと表面テクスチャ画像から構成される 3 次元 CG モデルを, あらかじめ送信部と受信部で共有しておく. 送信側で対象の変化情報の分析を行い, 口唇形状変形パラメータ  $S_p$ , 色調調整パラメータ  $C_p$  と REM の映像を抽出し送信する. 受信部ではその分析結果に基づき, 対象の顔モデルを変形し, テクスチャ画像の色調を調整し, REM を融合することで, 任意方向からの立体視画像を生成・提示する.

### 4.2 送信部と受信部における並列処理

図 10 に示すように, 送信部において, (1) 顔の表情を観測した実写ビデオ映像を実時間入力し, (2) 入力映像から口唇形状変形パラメータ  $S_p$  を抽出し, (3) 色調調整パラメータ  $C_p$  を抽出し, (4) 抽出パラメータと REM を送信する. 以上の 4 つのプロセスは, データの記憶領域を共有することで並列処理を行う. 送信部と受信部間の通信は, TCP/IP プロトコルを使ったプロセス間通信によって実現される.

一方, 受信部においては, (1) 受信した口唇形状変形パラメータ  $S_p$  からワイヤーフレームモデルの口唇領域部分を変形し, (2) 色調調整パラメータ  $C_p$  からテクスチャ画像の色調を調整し, さらに REM を融合することにより, (4) 顔表情を生成表示する. ここで, 形状変形部では 3 次元形状データのみを操作し, 実写融合部ではテクスチャデー

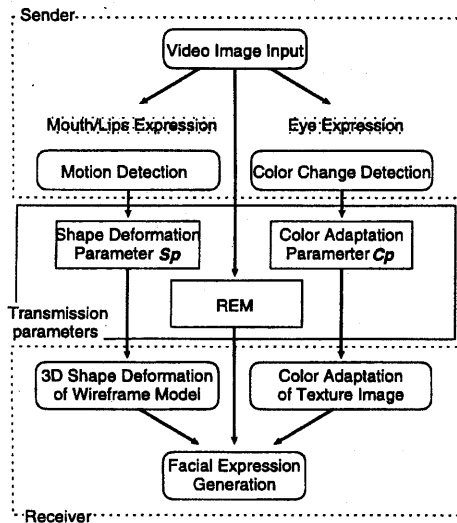
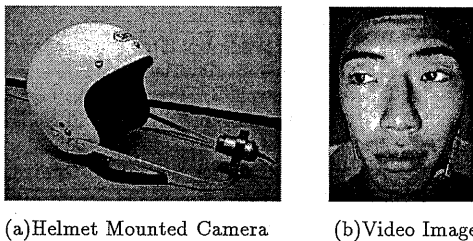


図 10: 実装システムの概要



(a)Helmet Mounted Camera (b)Video Image

図 11: カメラ搭載型ヘルメットと獲得される実写映像

タのみを操作するため、2つの処理は独立しており、非同期で並列処理することが可能である。

### 4.3 カメラ搭載型ヘルメットの試作

本研究では、対象の任意の動きに対して固定の領域の実写映像を得るために、図 11に示すように対象に固定したカメラを試作し、カメラから観測されるライブ映像を使うことで実時間で特徴対応問題を解くことを回避している。この撮影した実写映像をビデオキャプチャーボードを使用して、実時間でワークステーションに取り込む。

ここで着目すべき点は、送信側においては、送り手がヘルメットを装着するのみで、動作や視界

が制限されることがなく、また、受信側においても、送り手の装着しているヘルメットは映像に提示されない。つまり、受信側で用いる送り手の3次元CGモデルのテクスチャ顔画像は、実写領域を除いてはオフラインで撮影されたヘルメット非装着時のものである。したがって、カメラ付ヘルメットを装着する影響は送受信側とも極めて小さいと考えられる。

## 5 実験

顔の3次元CGモデル(図9)は、Cyberware社の3D Digitizerを用いて獲得した全周型距離・カラー画像(512x512)を用いて生成した。表情変化を観測したビデオ映像(図11(b))は、対象の人物が装着した試作ヘルメットに取り付けたSONY CCD-MC5(25万画素,  $f=26\text{mm}$ )CCDカメラから獲得し、ビデオキャプチャーボードを用いてSGI O2グラフィックワークステーションに実時間で入力した。受信部においても、SGI O2上で顔表情を生成・提示した。

図12に、実写融合による眼表情と形状変形による口唇表情を融合した顔表情生成結果を示す。また、表1に各並列プロセスの処理速度を示す。この結果、最終的に7FPSでの顔表情生成・提示を実現した。さらに、SGI ONYXを使用することで20FPSの顔表情生成・提示を実現できることが確認された。

表 1: 処理速度

Sender( Analyzer )	
Video Image Input	30 FPS
REM Color Change Detection	17 FPS
Mouth/Lips Motion Detection	1.2 FPS
Change Parameters Transmission	20 FPS
Receiver( Synthesizer )	
Change Parameters Input	20 FPS
Texture Color Adaptation	0.3-30 FPS
Mouth/Lips WF Deformation	15 FPS
Facial Expression Generation	7 FPS

(FPS: Frames / Second )

## 6 おわりに

本論文では、顔表情生成の主体となる眼と口唇部分の幾何構造と動きの特徴を、顔の3次元形状

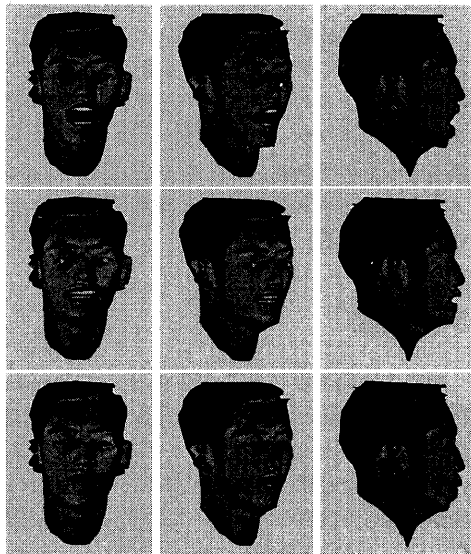


図 12: 適応的選択法による顔表情生成結果

変化と表面のカラーテクスチャ変化を観測した動画像を用いて分析し、それぞれの部位に適した方法を、実写融合法あるいは形状変形法のいずれかを適応的に選択しリアルな顔表情を実時間で再現する方法を提案した。眼領域の動きは微妙で複雑であるが、表情変化に伴う3次元形状変化が比較的小さいことから、拡張仮想感を用いて、顔の3次元CGモデル上に表情変化を観測した実写映像を融合することにより、ライブの眼表情を生成した。口唇表情は、形状変化が大きく3次元モデルの変形が必要なため、筋肉構造とその動きを記述した位相幾何学のホモトピーに基づく曲面変形法を用いて滑らかで効率的な3次元口唇表情を生成した。提案手法を実装することにより、ライブ表情を実時間で再現表示するシステム実現の可能性を明らかにし、その有効性を示した。

## 参考文献

- [1] 原 文雄, “顔ロボット,” *Newton*, pp.40-41, Feb. 1997.
- [2] 工藤 力訳, P. Ekman and W. V. Friesen 著, “表情分析入門,” 誠信書房.
- [3] 金子 正秀, 羽鳥 好律, 小池 淳, “形状変化の検出と3次元形状モデルに基づく顔動画像の符号化,

- ” *信学論 (B)*, Vol. J71-B, No.12, pp.1154-1563, Dec. 1988.
- [4] 崔 昌石, 原島 博, 武部 幹, “顔の3次元モデルを用いた顔面表情の分析,” *信学論 (D-II)*, Vol. J74-D-II, No.6, pp.766-777, Jul. 1991.
- [5] H. McGurk and J. MacDolald, “Hearing lips and seeing voices,” *Nature*, 264, pp.746-748, Dec. 1976.
- [6] 間瀬 健二, アレックス ベントランド, “オプティカルフローを用いた読唇,” *信学論 (D-II)*, Vol. T73-D-II, No.6, pp.796-803, Jul. 1990.
- [7] 松岡 清利, 古谷 忠義, 黒須 顕二, “画像処理による読唇の試み,” *計測自動制御学会論文集*, pp.67-74, Feb. 昭 61.
- [8] 小野一義, 田中弘美, “動きのリアリティを再現する拡張仮想感のための自動色調調整,” *信学論 (D-II)*, Vol. J80-D-II, No.2, pp.497-504, Feb. 1997.
- [9] H. Adachi, H. T. Tanaka, “Homotopy based surface deformation with three dimensional control vectors,” *Proc. Int. Conf. VSM96*, pp.219-224, Sept. 1996.
- [10] 越智 淳三訳, “解剖学アトラス I,” 文光堂, 東京, 1994.
- [11] 上野雅俊, 小野英大, 森島繁生, 原島 博, “自然な表情合成のための頭部高精度ファイブフレームの構成とその階層的制御について,” *信学技報*, PRU92-79, pp.9-16, Dec. 1992.
- [12] P. Milgram, D. Drascic, J. J. Grodski, “Enhancement of 3-D video displays by means of superimposed stereo-graphics,” *Proc. Human Factors Society 35th Annual Meeting*, San Francisco, pp.1457-1461, 1991
- [13] Chiew-Lan Tai, Kia-Fock Loe, and Toshiyasu L. Kunii, “Integrated Homotopy Sweep Technique for Computer-Aided Geometric Design,” *Computer Vision*, pp.583-595, Springer-Verlag, 1991.
- [14] P. Milgram, S. Zhai, D. Drascic, “Applications of augmented reality of human-robot communication,” *Proc. IROS'93*, pp.26-30, July 1993.
- [15] 田村秀行, 北村素子, “3次元仮想空間生成表示へのモデル系&非モデル系アプローチ,” *Human Interface*, Vol.9, pp.279-286, 1994.
- [16] 相澤清晴, 原島 博, 斎藤隆弘, “構造モデルを用いた画像の分析合成符合化方式,” *信学論 (B-I)*, Vol. J72-B-I, No.3, pp.200-207, March 1989.
- [17] M. Bajura, H. Fuchs, R. Ohbuchi, “Merging virtual objects with the real world,” *SIGGRAPH, Computer Graphics*, pp.203-210, July 1992.
- [18] 海老原一之, 鈴木 紀子, 大谷 淳, 岸野文郎, “臨場感通信会議のための実時間3次元表情再現,” *信学論 (A)*, Vol. J79-A, No.2, pp.527-536, 1996.
- [19] 坂口竜己, 森島繁生, 大谷 淳, 岸野文郎, “3次元計測に基づく顔表情変化の分析と合成,” *信学技報*, HC93-74, pp.61-68, Jun. 1994.