特徴追跡に基づく超表情再生

2017 年 3 月

加藤 弘樹

特徴追跡に基づく超表情再生

加藤 弘樹

概 要

人は表情の変化により喜怒哀楽を表現することができ，表情を再現することはコンピュータを介した人のコミュニケーションの向上や映像の制作など幅広い分野で利用されている．近年では高精度な形状計測が可能となり，顔モデルを構築することでユーザの表情の変化をコンピュータ上で写実的に再現することが可能である．顔モデルとしては，口や頬などの動作単位の規定や，物理に基づくモデル化が行われているが，表情の変化を再現するためには生体組織の動特性を考えることが重要である．

本研究では，顔の表面に存在する皮膚の動特性に着目し，提案するシステムにより再現される表情が左右対称となるような皮膚の粘弾性を設定することを目的とした．現実と異なる状況での表情再生 (超表情再生) を行うために，静的な三次元形状モデル，表情変化を表現する顔追跡データ，皮膚の動特性を表現するヤング率，粘性係数などの粘弾性パラメータを用いた顔モデルを構築した．提案手法では，まず，顔追跡を用いてユーザの表情変化を表現する顔追跡データを計測した．次に，顔追跡データを利用した物理シミュレーションを行い，表情表出の再現を行った．シミュレーションでは，有限要素法を用いて形状モデルを変形させ表情の生成を行ったが，表情筋の一端が皮膚に接続していることより，顔追跡データを皮膚に接続した表情筋の変位と考え，シミュレーションにおける変位入力とした．

実際に計測した顔形状モデル，皮膚の粘弾性パラメータを用いて，計測した表情を再現できることを確認する実験を行った．実験では動作データの 7 点と約 6,000 点で構成される形状モデルを用いて開口動作における表情再生を行った．シミュレーションの結果，開口動作を入力することで口裂が開くことを確認した．また，粘弾性を変化させた場合に再生される表情の対称性が変化することを確認した．

キーワード：表情，特徴追跡，深度カメラ，皮膚，粘弾性，有限要素法，
変形シミュレーション

Hyper-expression with feature tracking

Hiroki KATO

Abstract

People can show many kinds of emotion with their facial motion. Thus, reconstructing facial expression using a computer can be used in various fields; communication via Internet and movie making. In recent years, it has become possible to measure the 3D face shape and reconstruct 3D facial models. Some facial models are based on action units (AU), the others on physical models. When it comes to reconstruction of expression, it is important to consider the dynamic characteristic of the tissue.

This study aimed to obtain proper parameters for reconstructing natural expression. In order to reconstruct facial expression in a different condition from real (hyper-expression reconstruction), the author used facial model consisting of 3D facial meshes, face tracking data, Young's modulus, and viscosity coefficient. Firstly, face tracking was used for measuring data that represented a series of expression change. Secondly, the author conducted a physics-based simulation to reconstruct user's expression. Finally, a finite element method was applied with the displacement boundary condition of the tracked movement of the edge of the mimetic muscles.

The author examined the simulated expression using facial mesh and viscoelastic parameters. In this paper, face tracking data consisting of 7 points and facial model consisting of about 6,000 nodes were used for simulation. The reconstructed expression was mouth opening. As a result of simulation, the mouth of the facial mesh was opened when user's facial movement that represented mouth opening was applied. The author confirmed that the symmetry of the expression was changed when the viscoelastic parameter was changed.

Keywords: facial expression, feature tracking, depth sensor, skin, viscoelasticity, FEM, deformation simulation

目 次

第 **1** 章　はじめに **1**

第 **2** 章　コンピュータ上の顔動作の表現 **3**

2.1 顔の構造 3

2.2 顔モデル 5

2.3 提案する表情再生手法 13

第 **3** 章　三次元物体の計測とモデル化 **14**

3.1 三次元形状計測 14

3.2 利用する計測手法 18

3.3 弾性シミュレーション 19

第 **4** 章　顔モデルの変形 **28**

4.1 システムの概要 28

4.2 形状モデルと動作データの対応 29

4.3 形状モデルの変形 33

4.4 動作評価 38

第 **5** 章　幾何変形モデルの検証 **39**

5.1 実装したシステム 39

5.2 モデルの対応 41

5.3 モデルの変形 43

5.4 考察 46

第 **6** 章　粘弾性シミュレーションの検証 **47**

6.1 実装したシステム 47

6.2 動作検証 49

6.3　パラメータ分布の評価 51

第 7 章　結論 **55**

謝辞 **56**

参考文献 **57**

業績 **62**

図 目 次

1.1 表情再現の応用例 1

2.1 顔の解剖学的構造 3
2.2 表情筋 4
2.3 顔特徴点の配置 5
2.4 CANDIDE-3 7
2.5 Blendshapes の概要 8
2.6 顔動作 9
2.7 アバタの変形 10
2.8 データベースを用いた補正 10
2.9 超弾性モデルで構築された顔モデル 11
2.10 MRI の計測データによるモデル化 12
2.11 提案する表情再生の概要 13

3.1 三角測量の概要 14
3.2 ステレオ画像法 15
3.3 スリット光投影法 16
3.4 疑似ランダムコード化パターン投影法の例 17
3.5 パターン光投影法 18
3.6 物体の変形と移動 20
3.7 ひずみ 20
3.8 変形状態 21
3.9 四面体要素 21

4.1 システムの概要 28
4.2 形状モデルと動作データの関係 29

4.3 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の関係 30
4.4 三角形のボロノイ特徴領域 30
4.5 点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と三頂点 $\{\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_2^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_3^{\mathrm{tri}}\}$ の関係 31
4.6 形状モデル変形の概要 33
4.7 P_m の変形 34

5.1 動作計測の様子 39
5.2 形状モデルの外観 41
5.3 動作データの外観 41
5.4 形状モデルと動作データの対応 42
5.5 無表情時のユーザの顔と形状モデル 43
5.6 開口時のユーザの顔と形状モデル 44
5.7 開口時モデルの外観 45
5.8 開口時モデルと変形した形状モデルの差 45

6.1 メッシュの作成に用いた形状データ 48
6.2 作成した形状モデル 48
6.3 動作確認におけるシミュレーションの条件 49
6.4 開口動作を入力したときのシミュレーション結果 50
6.5 ヤング率の分布 52
6.6 粘性係数の分布 52
6.7 シミュレーションの条件 52
6.8 各分布におけるシミュレーション結果 53
6.9 左右対称性の評価結果 53
6.10 各分布における結果の差 54

表 目 次

2.1 主な表情筋のはたらき 4
2.2 顔特徴点の例 5
2.3 Action Unit の例 6

3.1 数値解法の比較 19

5.1 形状計測装置の仕様 40
5.2 コンピュータの仕様 40
5.3 距離画像センサの仕様 40
5.4 形状モデルの詳細 40
5.5 動作データの詳細 40

6.1 シミュレーションに用いたコンピュータの仕様 47
6.2 形状モデルの詳細 48
6.3 動作検証に用いた物理パラメータ 49
6.4 評価実験に用いたヤング率 51
6.5 評価実験に用いた粘性係数 51
6.6 評価実験に用いたポアソン比及び密度 51

第1章　はじめに

人が他者とコミュニケーションを行う際には，言語の他にも身ぶりなどの体の動作により自らの意思を表現する [1]．表情の変化は顔動作により生じるが，代表的な感情の身体的表出であり，コミュニケーションにおいて重要な役割を担う．表情の中でも皮膚の変形は見た目に大きく影響するが，皮膚は頭蓋骨に付着した表情筋によって駆動され，皮膚の性状に基づいて変形が生じる．表情の再現により実現される事の例を図 1.1 に示す．人の表情を再現することは，表情の発生メカニズムの解明 [2] や術後予測のための表情シミュレーション [3]，写実的な映像の制作 [4]，仮想空間上でのコミュニケーション支援 [5,6]，人とのコミュニケーションを目的としたロボットの開発 [7] など，幅広い分野において探究される課題である．

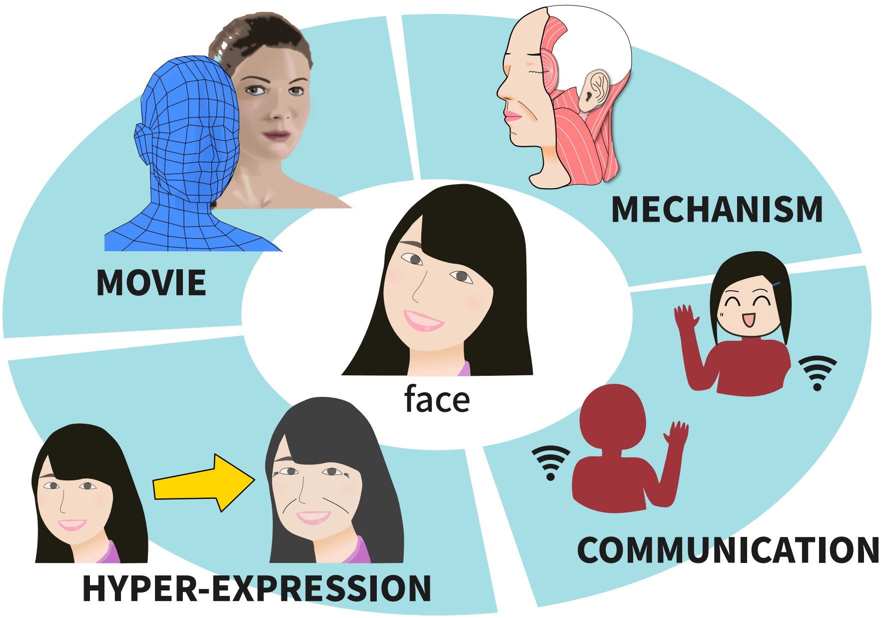


図 1.1: 表情再現の応用例

表情の再現を行う手法としては，顔の形状情報を利用して計測した表情の再現を行う手法 [8–15] と物理モデルを構築しコンピュータのみを利用して表情を生成する手法 [9, 16, 17] が挙げられる．前者はユーザの顔の動きを反映したコンピュータグラフィックス映像の制作や実時間性を重視したコミュニケーションの支援などに利用される．後者は表情の発生メカニズムの追究や術後予測など医療分野での応用を軸とした研究であり，物理モデルを利用した現実と異なる状況での表情シミュレーションが重要となる．形状情報を用いた表情の生成では，実時間での精緻な表情の生成が行われているが，現実と異なる状況での表情生成を考えることができない．一方，物理モデルを構築する手法では，多くの場合静的な表情の再生が行われており，表情を動作として扱うことができない．したがって，身体動作としての表情を考える上では，動的な表情の変化について考える必要がある．

本研究では，表情の対称性を実現する物理特性の推定を目的として，顔の形状情報，表情追跡と皮膚の物理モデルを統合した動的な表情再生モデルを提案する．提案手法では，表情追跡による顔動作計測と皮膚の粘弾性を考慮した有限要素モデルを組み合わせ，現実と異なる状況での表情再生 (超表情再生) を行う．ユーザの顔動作を表情追跡により計測することで特徴点の経時情報を取得し，有限要素モデルに入力することで顔形状の変形をシミュレーションすることで表情を再生する．提案システムの妥当性を検証するために，有限要素モデルに与える物理特性を変化させ，顔の左右の特性を非対称とした場合に表情の対称性が変化することを確認する．

第2章　コンピュータ上の顔動作の表現

本章では，顔の解剖学的構造及び顔動作の表現手法について述べる．

2.1　顔の構造

人の顔の解剖学的構造を図 2.1 に示す．表面は皮膚 (skin) で覆われ，顔には鼻唇溝 (sulcus nasolabialis) や人中 (philtrum)，オトガイ唇溝 (sulcus mentolabialis) 等の構造的特徴が存在する．恒常的なしわは筋の衰えによる筋張力の減少等の人の老化を反映する [18]．これらの顔表面の形状変化は人が個人を識別するために重要であるとされる [19]．

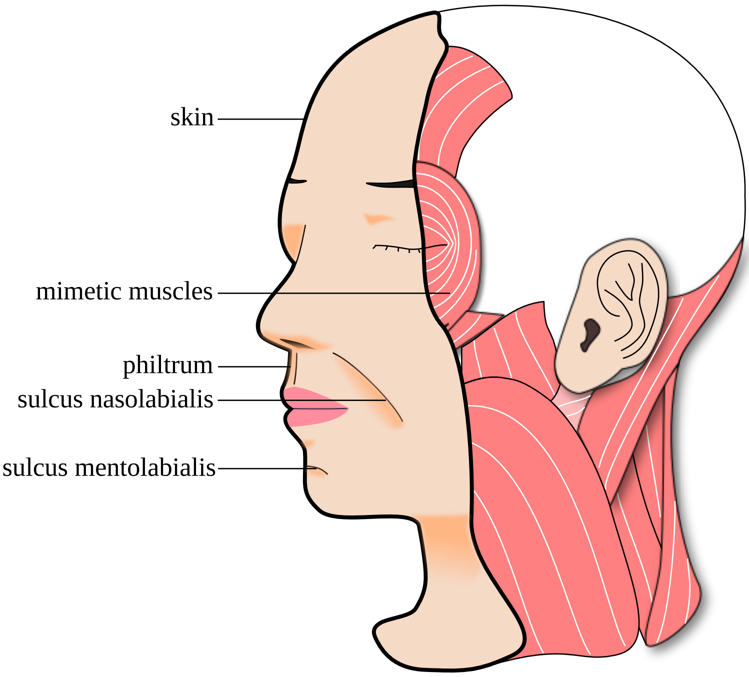


図 2.1: 顔の解剖学的構造

顔面には表情筋 (mimetic muscles) と呼ばれる皮筋が存在し，表情筋が収縮・弛緩することにより顔動作を行う [20]．表情筋は頭部，頸部に一対，目，耳，鼻の周囲

に三対，口の周囲には約十対存在し，顔面神経によって動かされる．従って，表情筋によって顔の複雑な動作が実現されている．主な表情筋のはたらきを表 2.1 に示し，各々の筋を図 2.2 に示す [21,22].

表 2.1: 主な表情筋のはたらき

筋の名称	はたらき
前頭筋 (frontalis)	眉の両側を上げる．額に横じわをつくり，驚きの感情を表出する．
皺眉筋 (corrugator)	眉の内側を下げる．眉間に縦じわをつくり，眩しさや不快感を表出する．
眼輪筋 (orbicularis oculi)	まぶたを閉じ，頬を持ち上げる．快感や笑いの感情を表出する．
鼻根筋 (procerus)	鼻のつけ根に横じわをつくる．怒りや不快感を表す．
上唇挙筋 (levator labii superior)	上唇を引き挙げ，口を開ける．
大小頬骨筋 (zygomaticus)	笑いの表情の主体となる．
頬筋 (buccinator)	息を吹き出すために必要な筋であり，満足な表情を表出する．
笑筋 (risorius)	口を横に伸ばす．
口輪筋 (orbicularis oris)	閉口や口を尖らせる．
口角下制筋 (depressor anguli oris)	口角を下げ，苦痛に耐える表情をつくる．
オトガイ筋 (mentalis)	唇を開く．
下唇下制筋 (depressor labii inferioris)	下唇を外側下方にひく．筋力が弱くなると口元からあごにかけて縦じわを生じる．

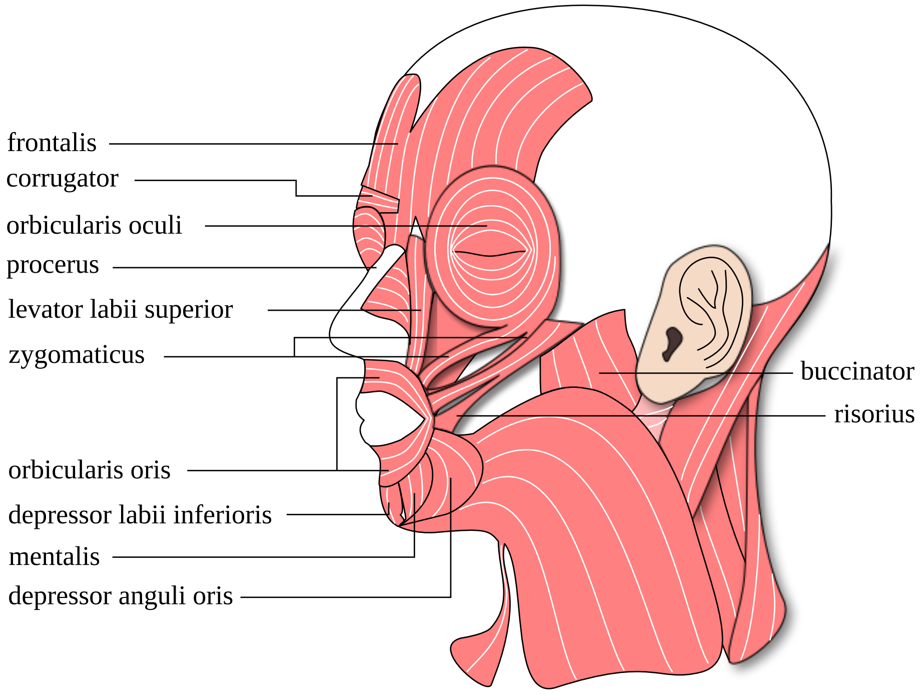


図 2.2: 表情筋

2.2　顔モデル

2.2.1　顔特徴点

顔の形状や動作を表現するために，顔の特徴点を用いる場合がある．臨床で用いられる顔特徴点の例を表 2.2 に，点の配置を図 2.3 に示す [23, 24].

表 2.2: 顔特徴点の例

点の名称	定義
glabella	最も突き出した眉の中点
exocanthion	眼裂の外側交連点
palpebrale inferius	眼瞼の自由縁内の最も低い点
pronasale	鼻尖の最も突き出た点
alare	鼻翼外側の点
crista philtri superior	人中の縁上で鼻下点と同じ高さの点
crista philtri	人中の縁の内で赤唇縁の点
cheilion	唇交連の点

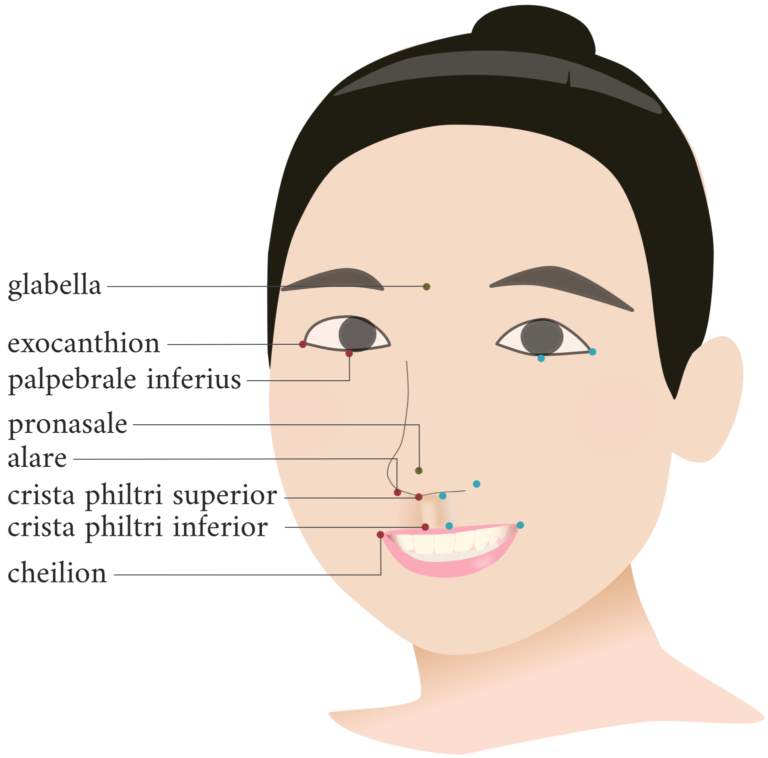


図 2.3: 顔特徴点の配置

2.2.2　表情の記述

表情を記述する方法として，Facial Action Coding System (FACS) が提案されている．FACS は顔形状の変化を Action Units (AU) と呼ばれる単位形状変化の部位毎の組み合わせにより表現する手法であり，表情を表現する際に用いられる [25]．AU の例を表 2.3 に示す．

表 2.3: Action Unit の例 [25,26]

AU	説明	関連する筋	画像例
1	眉の内側を上げる	前頭筋の内側部	
2	眉の外側を上げる	前頭筋の外側部	
4	眉の両側を下げる	皺眉筋，眉毛下制筋	
5	上瞼を上げる	上眼瞼挙筋	
6	頬を持ち上げる	眼輪筋の眼窩部	

AU は主観的な観察によって定義されているが，一つ，もしくは，複数の表情筋の動作に対応しているものが多く，任意の人の顔において AU を考えることが可能である．FACS では表情を既知の AU の和で表現することが可能であり，アバタなどの顔モデルに AU を設定することで任意の表情の生成を行うことができる．

2.2.3 モデル変形

動作を規定したサーフィスモデルを用いた手法

人の顔の三次元形状を面の集合として表現する代表的なモデルとして，CANDIDE-3が存在する [27]．CANDIDE-3 は顔動作の表現や顔追跡などで広く用いられているモデルである [28, 29]．本モデルを図 2.4 に示す．

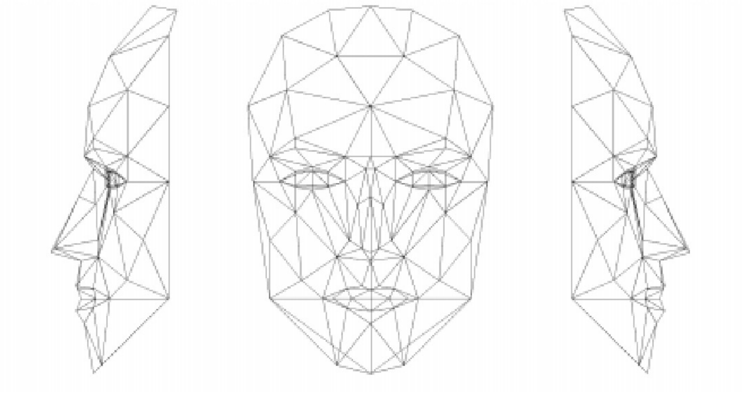


図 2.4: CANDIDE-3 [27]

CANDIDE-3 は 113 の頂点と 168 の面で構成されるサーフィスモデルであり，AU と SU(Shape Units) と呼ばれる二種のパラメータを変化させることで様々な形状や表情を表現することができる．AU は顔の動作による形状変化を表現するが，SU は頭の高さや目の幅などの個人間の顔形状の差異を表現する．本モデルは比較的解像度が低く細やかな表情を表現することはできないが，パラメータを用いて明確な表情を簡便に表現することができ，汎用的に利用することが可能である．

基底形状の組み合わせで表現する手法

顔モデルの変形を行う手法として，Blendshapes がある．Blendshapes では顔形状をベクトルで表し，ターゲット形状 (基底形状) のベクトルの線形和として表現する [30]．ターゲット形状としては，笑顔や顰め顔など様々な表情の形状が用いられる場合と，FACS に基づく形状が用いられる場合がある．Blendshapes を用いて獲得される顔形状を $\mathbf{b}$，ターゲット形状を $\mathbf{b}_k$，ターゲット形状の重み係数を μ_k とすると，$\mathbf{b}$ は式 (2.1) で表される．

$$\mathbf{b} = \sum_k \mu_k \mathbf{b}_k \tag{2.1}$$

Blendshapes では，係数 μ_k を決定することでターゲット形状を組み合わせた形状を表現することができる．Blendshapes の概要を図 2.5 に示す．

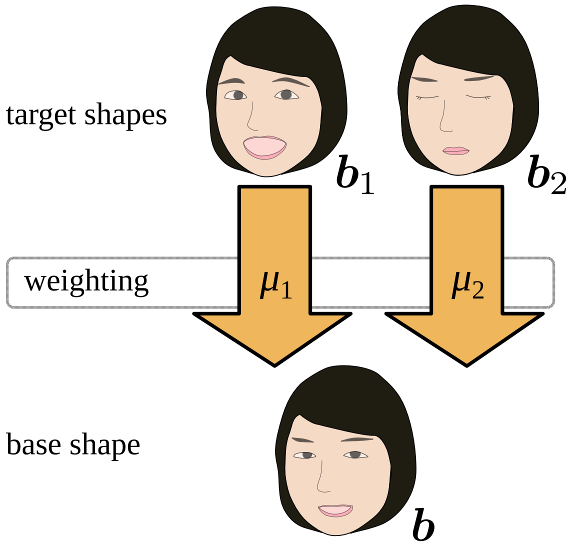


図 2.5: Blendshapes の概要

2.2.4 モデルの変形

計測データを用いた手法

Huang らはマーカベースのモーションキャプチャシステムと高精度なレーザスキャンを組み合わせることで高精度な顔の動作の獲得を行った [8]．獲得した顔動作を図 2.6 に示す．Huang らのシステムではマーカを用いた時間分解能の高い動作計測とレーザスキャンで獲得した顔形状を相補的に活用し，動作計測システムにより獲得した空間分解能の低い顔動作を用いた空間的に高解像度の顔動作の復元を行った．本システムでは非常に高精度な顔動作が獲得できるが，顔にマーカを付ける必要がある．

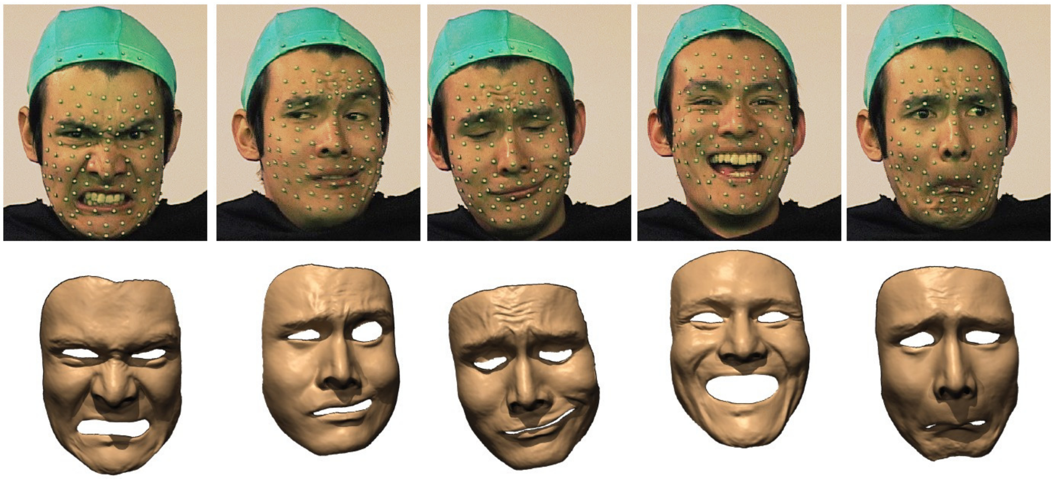


図 2.6: 顔動作 [8]

Caoらは商用のWebカメラを用いて計測した顔の画像を用いてアバタの変形を行った [31]．動作の様子を図2.7に示す．Caoらの手法では，二次元画像からユーザの三次元顔形状を復元し，ユーザ毎に用意したBlendshapesを用いることでメッシュの変形を考え，アバタの動作の生成を行っている．本システムでは一般的なカメラを用いた簡便な計測により実時間でのアバタの動作が可能であるが，事前にユーザに固有のBlendshapesを準備する必要がある．

図 2.7: アバタの変形 [31]

Bermanoらは予めユーザの顔を高精度な手法で計測することでユーザの顔のデータベースを作成し，低解像度で計測された顔動作を補正する手法を提案した [9]．Bermanoらの手法では，比較的簡便に顔モデルの動作を獲得することができるが，補正されるしわの形状が実際のユーザのしわの形状と異なる場合があり，現実的でない顔形状となることがあるといった問題がある．本システムによって補正を行った顔表情を図2.8に示す．

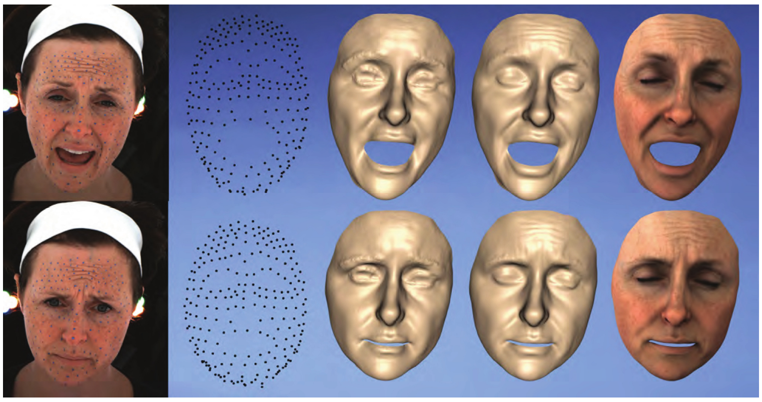
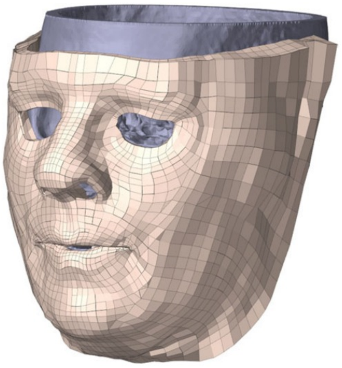


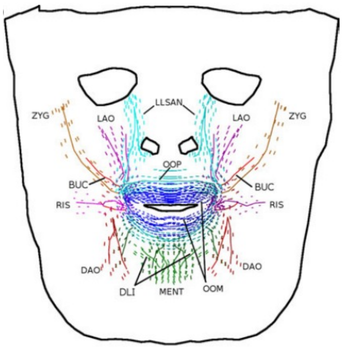
図 2.8: データベースを用いた補正 [9]

シミュレーションを用いた手法

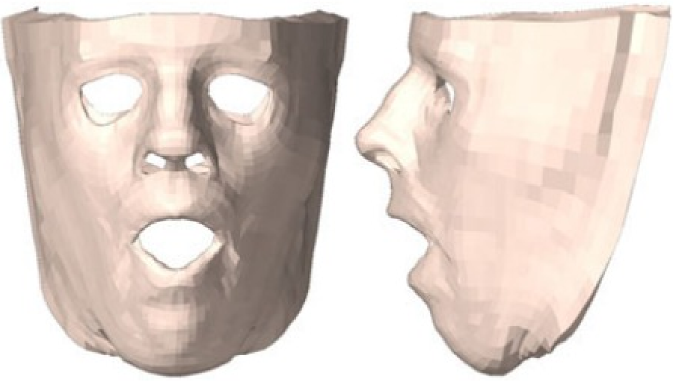
Flynn らは皮膚を直交異方性を持つ超弾性体として扱う顔モデルを提案した [32]. 超弾性体の皮膚モデルと皮下に走行する表情筋モデル及び顎筋により顔モデルを構築し，筋の駆動による表情の変化を再現した．皮膚は有限要素モデルによって表現されている．本システムで構築された顔モデル及びシミュレーション結果を図 2.9 に示す．本手法では精密な顔モデルを構築しているが，モデルが複雑でありユーザ個人のモデルの構築が煩雑であると考えられる．



(a) 顔モデル



(b) 表情筋

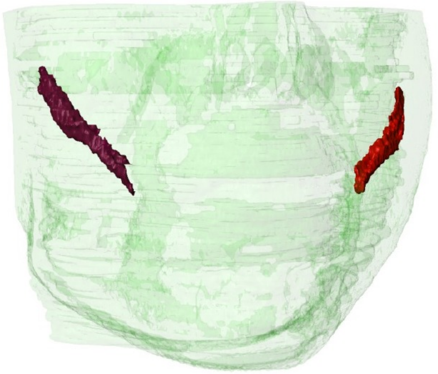


(c) シミュレーション結果

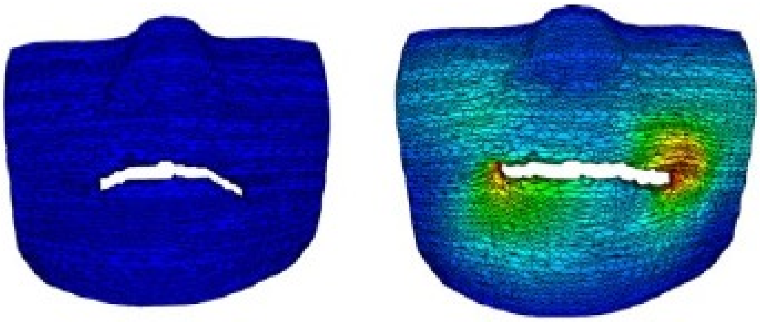
図 2.9: 超弾性モデルで構築された顔モデル [32]

Dao らは MRI で計測した断層像を利用することで，ユーザの顔を模擬したシミュレーションを行った [2]．Dao らの手法では，MRI で獲得したデータを利用しユーザの表情筋の形状を求めることでユーザ個人の正確な顔動作の模擬を行っている．本システムによってモデル化された筋と，シミュレーションによる顔の動作結果を図 2.10 に示す．本システムではユーザ個人の正確な顔動作の再現を行っているが，顔の一部の動作に限定されている．

(a) MRI 画像



(b) 筋モデル



(c) シミュレーション結果

図 2.10: MRI の計測データによるモデル化 [2]

2.3　提案する表情再生手法

モデルの変形について考える．計測データを用いる手法では，表情追跡を用いてユーザの表情再生を行うことができるが，複数の形状モデルが必要である．一方，シミュレーションを用いた手法では，単一の形状モデルを変形させることで表情再生が可能であるが，複雑な表情筋をモデル化する必要があり，ユーザの表情再生を目的とした場合，モデルの構築が困難であると考えられる．

本研究では，ユーザの皮膚の物理特性が反映可能なモデルを構築するため，表情追跡と粘弾性シミュレーションを組み合わせた顔形状モデルの変形を行う．提案する表情再生の概要を図 2.11 に示す．計測した動作データを元に物理シミュレーションを行い形状モデルを変形させることで，皮膚の物理特性を反映した表情の再生を行う．動作データと形状モデルは表現する点数が大きく異なるため，動作データを用いて形状モデルを変形させるために変形補間モデルを用い，変形情報の転送を行う．また，形状モデルの変形に皮膚の粘弾性体としての特性を考慮した粘弾性体モデルを用いることにより現実とは異なる皮膚の状態を仮定することが可能となるため，老化や手術に伴う顔面皮膚の局所的な弾性率の変化を仮定した超表情の再生が可能であると考えられる．

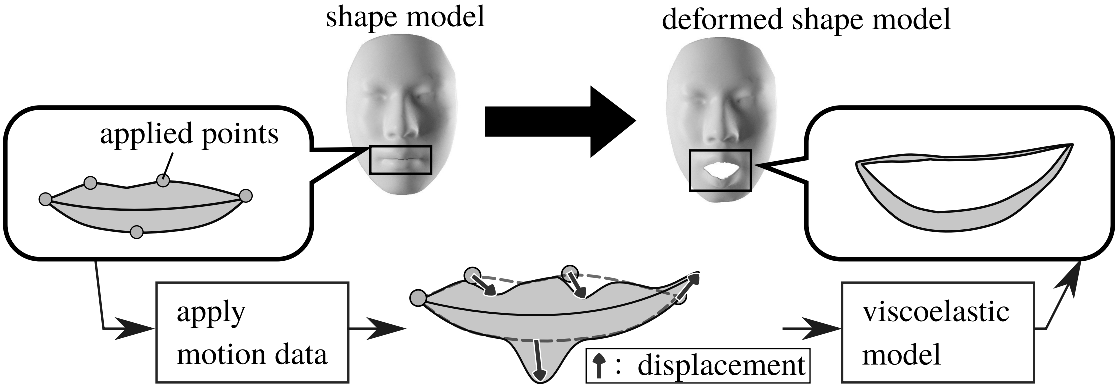


図 2.11: 提案する表情再生の概要

第3章　三次元物体の計測とモデル化

本章では，三次元形状の計測と変形手法について述べる．

3.1　三次元形状計測

本節では，一般的な三次元形状計測について，受動的手法と能動的手法に分類し説明する．

3.1.1　受動的計測

三角測量は距離が既知の二点と対象の位置で構成される三角形を利用し，計測対象までの距離を間接的に求める方法である．三角測量の概要を図 3.1 に示す．同図の位置関係の場合に，対象までの距離 s は既知の二点間の距離 s_v と角度 θ_1, θ_2 を用いて式 (3.1) となる．

$$s = s_v \cdot \frac{\tan\theta_1 \tan\theta_2}{\tan\theta_1 + \tan\theta_2} \tag{3.1}$$

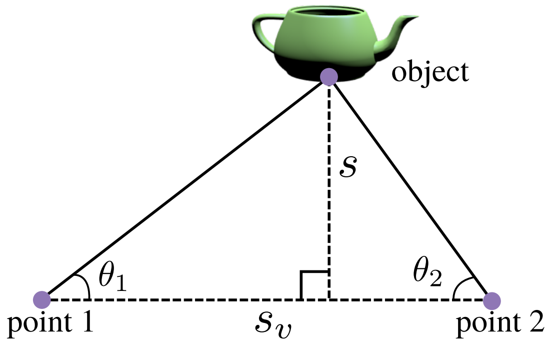
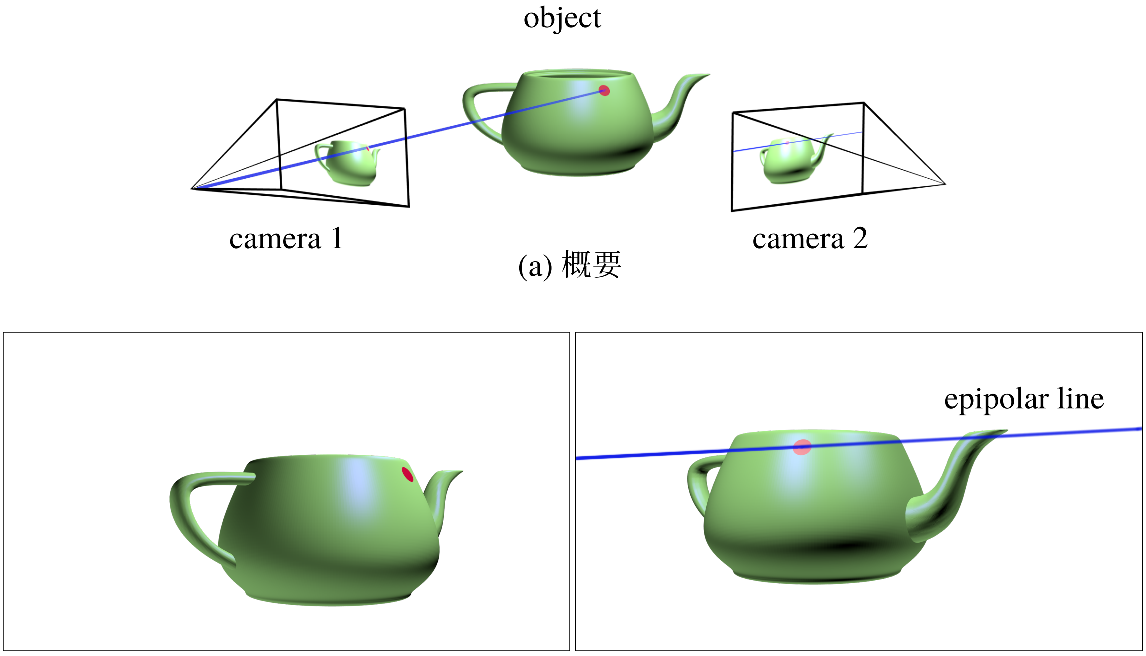


図 3.1: 三角測量の概要

ステレオ画像法は，三角測量の原理を用いた最も一般的な距離計測の方法である [33]．ステレオ画像法の概要を図 3.2 に示す. 図 3.2(a) において物体上の赤い点の注目すると，カメラ 2 の画像上における注目点の座標は，カメラ 1 の撮像面上の注目点から物体上の注目点までの線分上に拘束され，線分はエピポーラ線と呼ばれる．カメラ 2 の画像において，エピポーラ線上を走査することで注目点を求め，三角測量の原理によりカメラから点までの距離の計算を行う．ステレオ画像法では，撮影した画像より三次元形状を再構成するため，計測時間が短い等の利点が存在する．カメラの姿勢，レンズの焦点距離が既知の場合，三角測量を行うためには右の画像中に存在する点の左の画像における対応点を決定する必要がある．対応点の決定には画像中の輪郭や特徴点を用いるため，模様のない物体に対しては表面全体の三次元計測ができないという問題がある [33].



(a) 概要

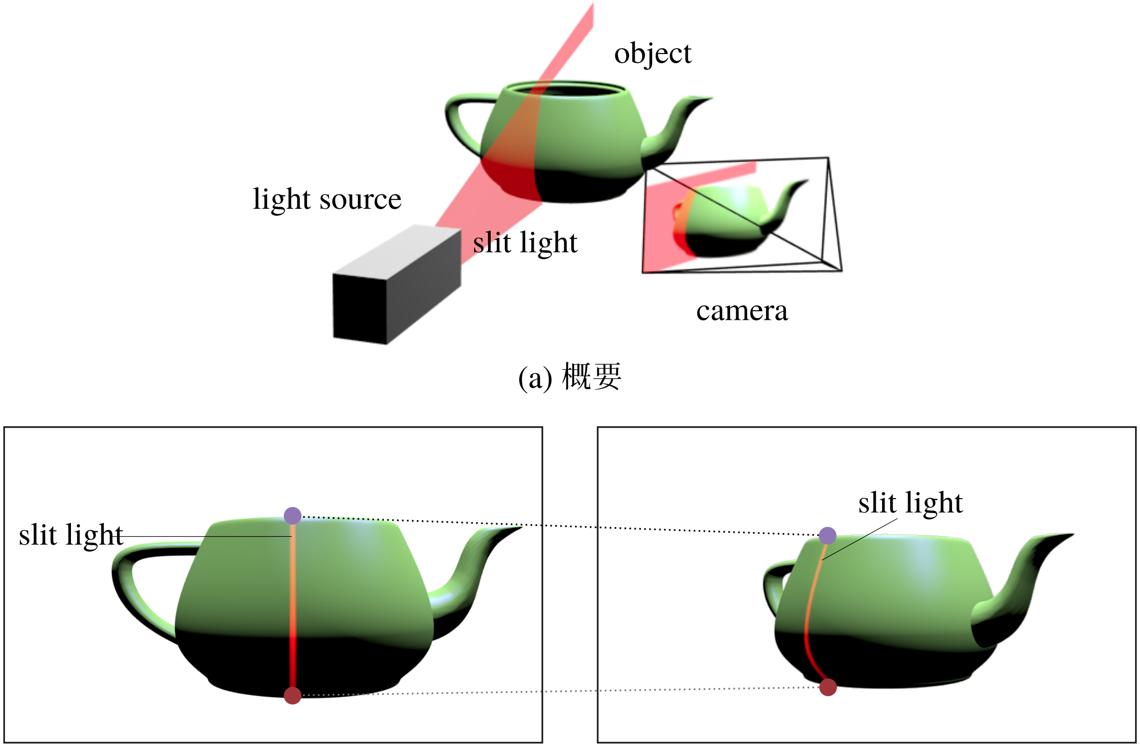
(b) カメラ 1 の画像　　(c) カメラ 2 の画像

図 3.2: ステレオ画像法

3.1.2　能動的計測

能動的な形状計測手法とは，対象に点や直線状のパターンを持つ光を投影し，レーザ光の飛行時間や投影されたパターンの歪みを計測することで物体の形状を計測する方法である．

スリット光投影法は，光を対象に投影し別の角度からカメラで撮影することによりスリットの切断線像を計測する形状計測手法である [33]．本手法の概要を図 3.3 に示す．スリット光投影法は，三角測量の原理を用いてレーザ光源とカメラの位置関係を利用することで対象までの距離を計測する．



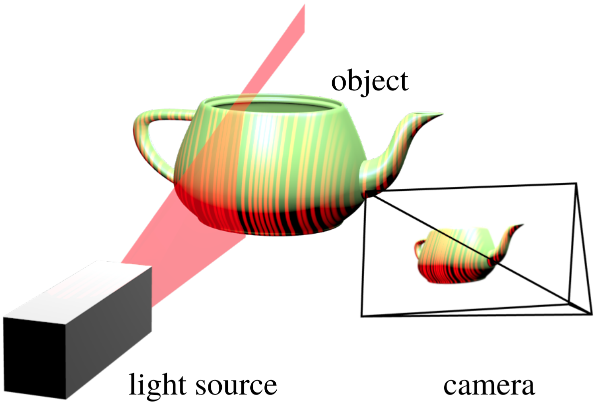
(a) 概要

(b) 光源からみた図

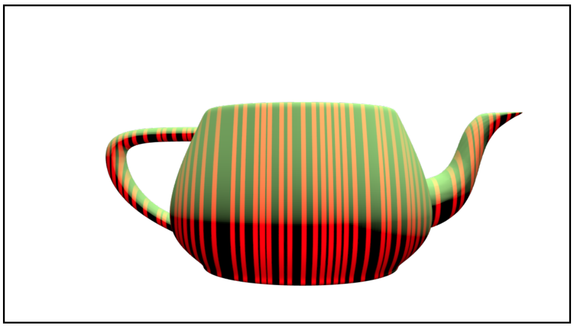
(c) カメラ画像

図 3.3: スリット光投影法

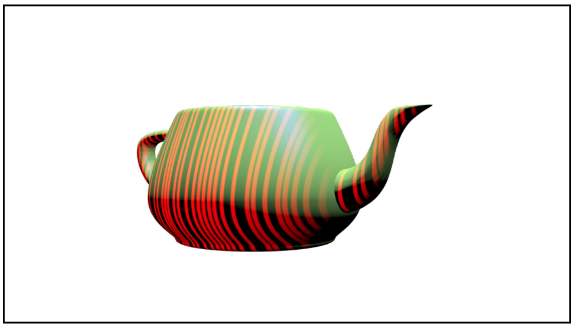
スリット光投影法では，対象全体の形状を計測するために計測領域を一次元的に走査する必要があり，解像度の画像を得るためには走査時間を長くする必要がある．この問題を解決するために，投影する光に局所的な特徴を与えて空間をコード化し，投影回数を減らす疑似ランダムコード化パターン投影法が存在する．最も簡単な手法として，複数のスリット光の間隔を不規則に変化させることで局所情報を与える方法が挙げられる．スリット光の間隔を変化させコード化する手法の概要を図 3.4 に示す．



(a) 概要



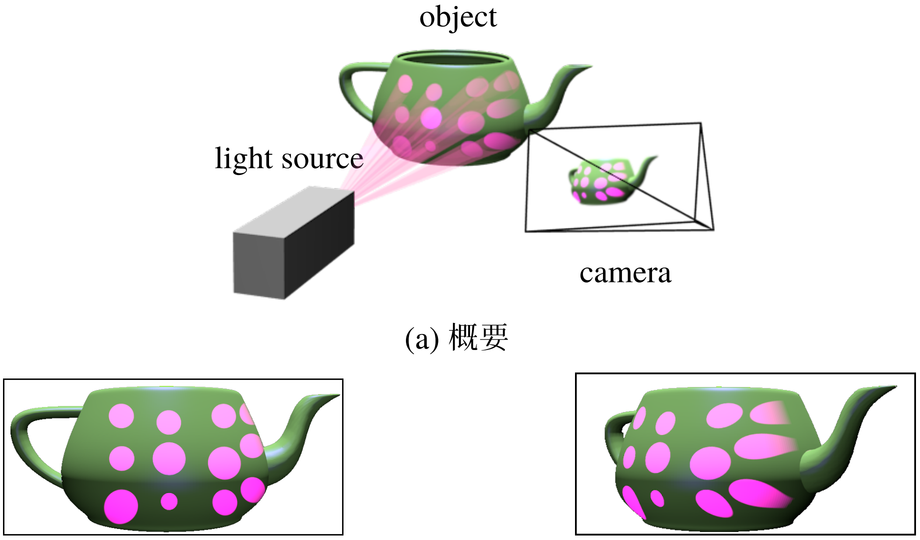
(b) 光源からみた図



(c) カメラ画像

図 3.4: 疑似ランダムコード化パターン投影法の例

スリット光の間隔を変化させるコード化では，空間を一次元的にコード化することができるが，二次元的に特徴を持つパターン光を用いることで空間コード化の効率を高めることが可能である．パターン光投影法の概要を図 3.5 に示す．パターン光投影を利用することで実時間での距離計測が可能となる [34].



(a) 概要

(b) 光源からみた図

(c) カメラ画像

図 3.5: パターン光投影法

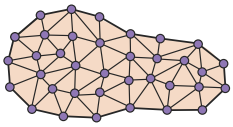
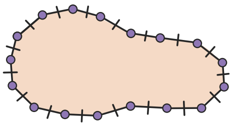
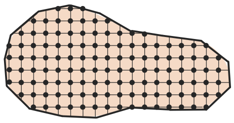
3.2　利用する計測手法

顔の形状計測に適した三次元計測手法について考える．顔の形状を計測する際には，計測時間と安全性が重要と考えられる．顔の形状を計測するためには顔を静止させる必要があるが，顔を長時間静止させることは難しいため，計測は 0.5 s 以内に終える必要がある [35]．また，三次元計測手法として一般的なレーザ光を用いた計測では，人の目に対する影響を考慮しなければならない [35]．従って，計測時間が短くレーザ光を用いないステレオ法が適していると考えられる．しかし，ステレオ法では撮影したカメラ画像より三次元形状を再構成するために時間を要し，実時間での計測を行うことができない．実時間での計測では，パターン光投影を用いた光投影法などが存在する．パターン光投影法は，ステレオ法と比較して計測精度が低く顔の詳細な形状変化を計測することは難しいが，顔の概形を計測することが可能である．従って，本研究では詳細な顔形状の計測手法としてステレオ法を用い，顔動作の計測手法としてパターン光投影法を用いる．

3.3 弾性シミュレーション

本節では，物体の特性を考慮し挙動を数値解析するシミュレーションについて説明する．数値解析を用いることで顔の現実的な挙動を計算により求めることができるため，解剖に基づいた顔モデルの変形等で広く用いられている．数値解析で主に用いられる手法の比較を表 3.1 に示す [36].

表 3.1: 数値解法の比較 [36]

	有限要素法 (FEM)	境界要素法 (BEM)	有限差分法 (FDM)
離散化法	領域内を有限要素に分割	領域境界を境界要素に分割	領域を格子で分割
分割形状			
未知数の量	多量; 節点数 × 変位成分	比較的少量; 境界節点数 × (変位成分 + 表面力成分)	多量; 格子点数 × 変位等のパラメータ
特徴	要素単位に扱うため，非線形問題・非均質材料への適用は容易	線形・均質問題を扱うことが容易で，開領域問題に適している	流体解析等で用いられることが多い

顔の特性について考えた場合，皮膚の異方性 [37] や非均質性を考慮する場合が多く，近年では有限要素法を用いたシミュレーションが広く行われている [15,38–42]. 有限要素法では，要素に分割して考えるため複雑な形状を考えることが比較的容易である．また，支配方程式を弱形式化して解くため汎用性が高く，非線形問題，生体における異方性や弾性の非均質性を考慮したモデルを構築することができる．以下では，有限要素法の基本について説明する [36, 43, 44].

ひずみ変位関係式

物体に外力を加えると力の大きさに比例した変形を生じる．物体の変形を図 3.6 に示す．変形が生じた物体において，物体内部の点の座標が変形前 (青) と変形後 (赤) で異なる場合を考えることができる．変形の前後の物体内部の各点の移動量を，点の変位 $\boldsymbol{d}$ という．三次元空間に固定された直交座標系を考えると，変位は各軸成分

に分解することができる．三つの成分を (d_x, d_y, d_z) とすると，変位 (d_x, d_y, d_z) は点の座標の関数として表現することができる．すなわち，点の座標を (x, y, z) とおくと，変位は次の式で表される．

$$d_x = d_x(x, y, z) \tag{3.2}$$

$$d_y = d_y(x, y, z) \tag{3.3}$$

$$d_z = d_z(x, y, z) \tag{3.4}$$

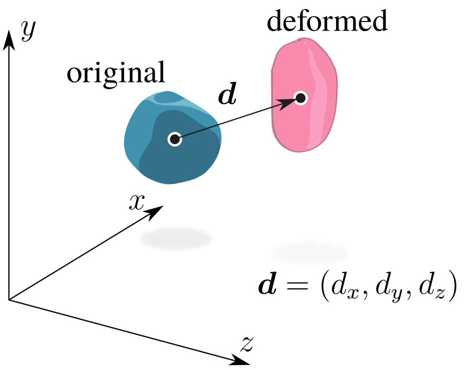


図 3.6: 物体の変形と移動

物体に外力が加わった場合の変形の程度は単位長あたりの変位量であるひずみを用いて表現することができる．ひずみは，一方向の変位に対して同じ方向の変形を表現する垂直ひずみ ε と垂直方向の変形を表現するせん断ひずみ γ に分けられる．垂直ひずみとせん断ひずみを図 3.7 に示す．

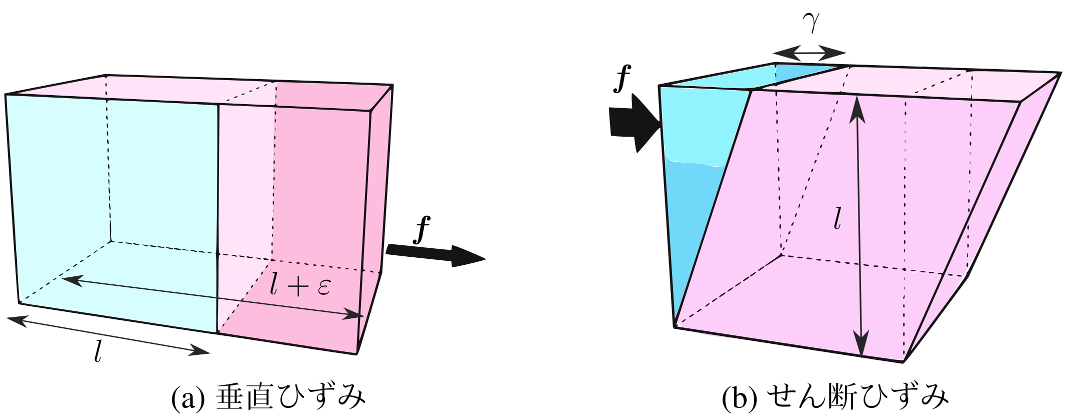
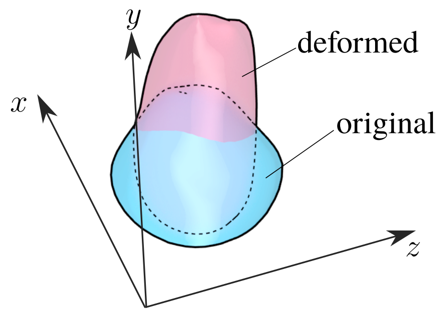
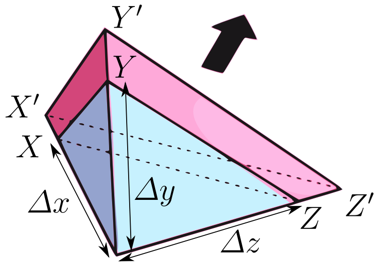


図 3.7: ひずみ

物体の微小領域の変形を例として，ひずみと変位の関係について考える．変形状態を図 3.8(a) に示す．



(a) 変形



(b) 微小区間における変形

図 3.8: 変形状態

物体内の点 X, Y, Z が変形により X', Y', Z' に移動したとすると，ひずみと変位の関係は変位を偏微分することで，次式で表される．

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial d_x}{\partial x} \\ \dfrac{\partial d_y}{\partial y} \\ \dfrac{\partial d_z}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{3.5}$$

$$\begin{Bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial d_x}{\partial y} + \dfrac{\partial d_y}{\partial x} \\ \dfrac{\partial d_y}{\partial z} + \dfrac{\partial d_z}{\partial y} \\ \dfrac{\partial d_z}{\partial x} + \dfrac{\partial d_x}{\partial z} \end{Bmatrix} \tag{3.6}$$

物体を微小領域に分割して考える．微小領域は要素と呼ばれ，三次元物体においては図 3.9 に示す四面体要素を考えることができる．要素の各頂点は節点と呼ばれる．

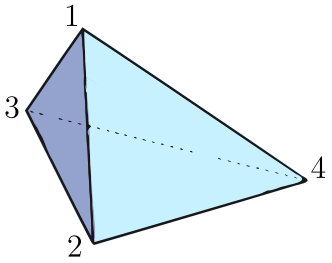


図 3.9: 四面体要素

要素内に分布する変位$\boldsymbol{d}$を仮定する. 変位$\boldsymbol{d}$は, 十二個の未知係数$\alpha_{x,j}, \alpha_{y,j}, \alpha_{z,j} (j = 1, 2, 3, 4)$ を用いて式 (3.7)-(3.9) で近似できる.

$$d_x \simeq \alpha_{x,1} + \alpha_{x,2}\, x + \alpha_{x,3}\, y + \alpha_{x,4}\, z \tag{3.7}$$

$$d_y \simeq \alpha_{y,1} + \alpha_{y,2}\, x + \alpha_{y,3}\, y + \alpha_{y,4}\, z \tag{3.8}$$

$$d_z \simeq \alpha_{z,1} + \alpha_{z,2}\, x + \alpha_{z,3}\, y + \alpha_{z,4}\, z \tag{3.9}$$

ひずみは次の式で表すことができる.

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}
&= \begin{bmatrix} \dfrac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \dfrac{\partial}{\partial z} & \dfrac{\partial}{\partial y} \\ \dfrac{\partial}{\partial z} & 0 & \dfrac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}
\begin{Bmatrix} \alpha_{x,1} + \alpha_{x,2}\, x + \alpha_{x,3}\, y + \alpha_{x,4}\, z \\ \alpha_{y,1} + \alpha_{y,2}\, x + \alpha_{y,3}\, y + \alpha_{y,4}\, z \\ \alpha_{z,1} + \alpha_{z,2}\, x + \alpha_{z,3}\, y + \alpha_{z,4}\, z \end{Bmatrix} \\
&= \begin{Bmatrix} \alpha_{x,2} \\ \alpha_{y,3} \\ \alpha_{z,4} \\ \alpha_{x,3} + \alpha_{y,2} \\ \alpha_{y,4} + \alpha_{z,3} \\ \alpha_{x,4} + \alpha_{z,2} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

節点 i の変位を $\boldsymbol{d}_i = \{d_{x,i}, d_{y,i}, d_{z,i}\}^{\mathrm{T}}$ $(i = 1, \cdots, 4)$ とすると，四面体要素の節点変位の x 成分は行列を用いて式 (3.11) で表現できる.

$$\begin{Bmatrix} d_{x,1} \\ d_{x,2} \\ d_{x,3} \\ d_{x,4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_{x,1} \\ \alpha_{x,2} \\ \alpha_{x,3} \\ \alpha_{x,4} \end{Bmatrix} \tag{3.11}$$

$$d_{x,i} \simeq \alpha_{x,1} + \alpha_{x,2}\, x_i + \alpha_{x,3}\, y_i + \alpha_{x,4}\, z_i \tag{3.12}$$

d_y，d_z についても d_x と同様である．式 (3.11) より，未知係数について解くと，式

(3.13) を得る．

$$\begin{Bmatrix} \alpha_{x,1} \\ \alpha_{x,2} \\ \alpha_{x,3} \\ \alpha_{x,4} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} d_{x,1} \\ d_{x,2} \\ d_{x,3} \\ d_{x,4} \end{Bmatrix} \tag{3.13}$$

式 (3.13) を式 (3.7) に代入すると，次の式となる．

$$d_x \simeq \begin{Bmatrix} 1 & x & y & z \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} d_{x,1} \\ d_{x,2} \\ d_{x,3} \\ d_{x,4} \end{Bmatrix} \tag{3.14}$$

$$= \begin{bmatrix} \boldsymbol{N}_1 & \boldsymbol{N}_2 & \boldsymbol{N}_3 & \boldsymbol{N}_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{x,1} \\ d_{x,2} \\ d_{x,3} \\ d_{x,4} \end{Bmatrix} \tag{3.15}$$

但し，$\boldsymbol{N}_i$ は形状関数と呼ばれ，次の性質を満たす．

$$\boldsymbol{N}_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1 & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \tag{3.16}$$

四面体要素においては，各節点の変位を用いて要素のひずみベクトル $\boldsymbol{\varepsilon}$ を以下の式で表現する．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{d} \tag{3.17}$$

B はひずみ-変位行列と呼ばれる．式 (3.17) において，$\boldsymbol{\varepsilon}, B, \boldsymbol{d}$ は式 (3.18)，(3.19)，(3.20)，(3.21)，(3.22) で表される．また，T は転置を表す．

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left\{ \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx} \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.18}$$

$$\boldsymbol{d} = \left\{ \boldsymbol{d}_1 \quad \boldsymbol{d}_2 \quad \boldsymbol{d}_3 \quad \boldsymbol{d}_4 \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.19}$$

$$\boldsymbol{d}_i = \left\{ d_{x,i} \quad d_{y,i} \quad d_{z,i} \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.20}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_1}{\partial \boldsymbol{d}_1} & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_2}{\partial \boldsymbol{d}_2} & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_3}{\partial \boldsymbol{d}_3} & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_4}{\partial \boldsymbol{d}_4} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial \boldsymbol{d}_i} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{x,i}} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{y,i}} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{z,i}} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{y,i}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{x,i}} & 0 \\ 0 & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{z,i}} & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{y,i}} \\ \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{z,i}} & 0 & \dfrac{\partial \boldsymbol{N}_i}{\partial d_{x,i}} \end{bmatrix} \tag{3.22}$$

応力ひずみ関係式

物体に外力が作用すると，物体の内部には外力に抵抗する内力が生じる．通常，内力は単位面積あたりの力として大きさとして応力を用いて表す．応力は面に垂直にはたらく垂直応力 $\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{v}}$ と，面に水平な方向にはたらくせん断応力 $\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{h}}$ に分けて考えることができる．微小変形においては外力と変形の程度が比例関係にあり，応力とひずみを用いて垂直応力-ひずみの関係は式 (3.23)，せん断応力-ひずみの関係は式 (3.24) で表される．但し，E は物体のヤング率，ν はポアソン比である．

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{v}} = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z \end{Bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \dfrac{\nu}{1-\nu} & \dfrac{\nu}{1-\nu} \\ \dfrac{\nu}{1-\nu} & 1 & \dfrac{\nu}{1-\nu} \\ \dfrac{\nu}{1-\nu} & \dfrac{\nu}{1-\nu} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} \tag{3.23}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathrm{h}} = \begin{Bmatrix} \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{Bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} \dfrac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \tag{3.24}$$

応力-ひずみ関係をひずみ-変位関係と同様に行列とベクトルを用いて表すと，式 (3.25) となる．

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{3.25}$$

$\boldsymbol{D}$ は応力-ひずみ行列と呼ばれる．但し，式 (3.25) において，$\boldsymbol{\sigma}, D$ は以下の式で表される．

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_z & \tau_{xy} & \tau_{yz} & \tau_{zx} \end{Bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3.26}$$

$$\boldsymbol{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

仮想仕事の原理

物体に外力が加わり変形したとき，外力と内力がつり合いの関係にあるとすると，つい合い方程式は仮想仕事の原理を用いて解くことができる．仮想仕事の原理では，平衡状態における物体内の微小な仮想ひずみを考え，仮想仕事による仕事の総和が0となることを利用してつり合い方程式を解く．単位体積あたりの表面力ベクトルを $\boldsymbol{\upsilon}$，仮想変位ベクトルを $\boldsymbol{d}^*$，仮想ひずみベクトルを $\boldsymbol{\varepsilon}^*$ を以下のように定義したとき，仮想仕事の原理は式 (3.31) で表される．

$$\boldsymbol{\upsilon} = \left\{ \upsilon_x \quad \upsilon_y \quad \upsilon_z \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.28}$$

$$\boldsymbol{d}^* = \left\{ d_x^* \quad d_y^* \quad d_z^* \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.29}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \left\{ \varepsilon_x^* \quad \varepsilon_y^* \quad \varepsilon_z^* \quad \tau_{xy}^* \quad \tau_{yz}^* \quad \tau_{zx}^* \right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.30}$$

$$\int \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\upsilon} \mathrm{d}S - \int \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} \mathrm{d}V = 0 \tag{3.31}$$

物体に加わる表面力と同等の仕事をする節点力を定義する．節点における要素節点力ベクトル $\boldsymbol{f}_e$ と節点変位ベクトルにおいて，式 (3.32) が成立する．

$$\int \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\upsilon} \mathrm{d}S = \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_e \tag{3.32}$$

微小領域において，応力及びひずみは一定であることから，式 (3.33) を得る．但し，V は要素の体積である．

$$\int \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} \mathrm{d}V = V \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} \tag{3.33}$$

式 (3.32)，(3.33) より，式 (3.31) は式 (3.34) となる．

$$\boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_e = V \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{\sigma} \tag{3.34}$$

式 (3.34) にひずみ変位関係式 (3.17) と応力ひずみ関係式 (3.25) を代入すると, 式 (3.35) を得る．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}} \boldsymbol{f}_e &= V (\boldsymbol{B} \boldsymbol{d}_e^*)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{B} \boldsymbol{d}_e \\ &= \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}} (V \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D} \boldsymbol{B}) \boldsymbol{d}_e \end{aligned} \tag{3.35}$$

$\boldsymbol{d}_e^*$ は任意の仮想変位ベクトルであるため，式 (3.35) が成立するためには式 (3.36) が満たされる必要がある．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}_e &= (V\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{B})\boldsymbol{d}_e \\ &= \boldsymbol{K}_e\boldsymbol{d}_e \end{aligned} \tag{3.36}$$

式 (3.36) において，K_e を要素剛性行列という．全要素において式 (3.36) をまとめることで，剛性方程式 (3.37) を得る．式 (3.37) において，K を全体剛性行列とよぶ.

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{d} \tag{3.37}$$

式 (3.37) を解くことで，弾性体の数値解析を行うことができる．

第4章　顔モデルの変形

本章では，計測した顔動作データを用いた形状モデルの変形手法について述べる．

4.1　システムの概要

提案するシステムの概要を図 4.1 に示す．本システムではユーザの顔形状，特徴追跡，皮膚の粘弾性モデルを用いてユーザの表情再生を行う．

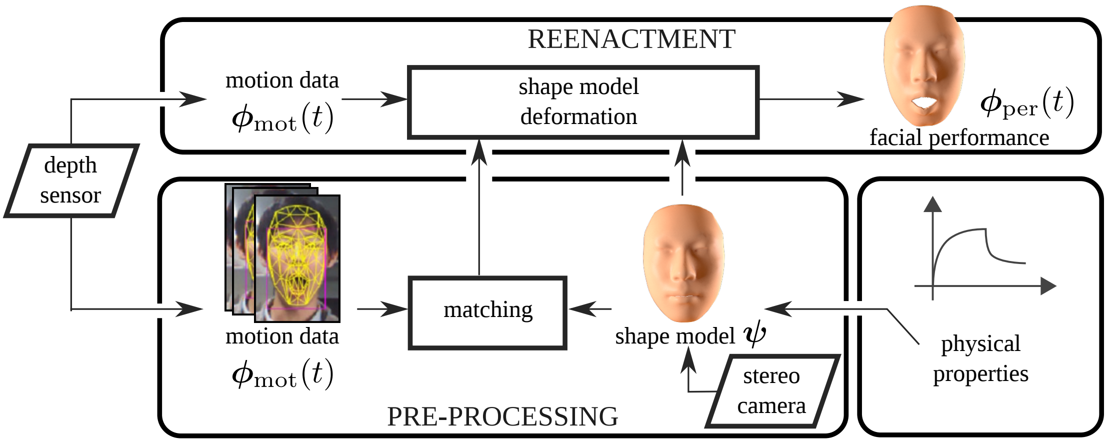


図 4.1: システムの概要

ユーザの顔形状はステレオ法によって計測された無表情時の三次元形状であり，高精細な形状モデル ψ によって表現する．パターン光投影法を用いることで実時間での三次元計測を行い，特徴追跡によってユーザの表情を獲得する．獲得した表情 ϕ_{mot} 及び再生する表情 ϕ_{per} は時間変化するため，時間 t の関数として記述できる．特徴追跡で獲得した表情の時系列データ $\phi_{mot}(t)$ を用いて顔形状 ψ を変形させることで，表情 $\phi_{per}(t)$ を再生する．獲得したユーザの表情に従い顔の一部の点を変位させ，他の点の変位は粘弾性モデルに従い決定する．以下では，動作データ $\phi_{mot}(t)$ を用いた形状モデル ψ の変形手法について述べる．

4.2　形状モデルと動作データの対応

計測した動作データ $\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{mot}}(t)$ を用いて形状モデル $\boldsymbol{\psi}$ を変形するために，形状モデルと動作データの持つサーフィスモデルの対応を決定する．形状モデルと動作データの関係を図 4.2 に示す．動作データは形状モデルと比べ少ないポリゴンで表現されるため，形状モデルの全ての点に対して対応する動作データのポリゴン面を決定する場合には動作データのポリゴン面に対して形状モデルの複数の頂点が対応関係を持つ．従って，本処理では形状モデルの全ての点に対して対応する動作データのポリゴン面を求める．以下では，形状モデルを構成する任意の一点と動作データの任意の一面の対応について考える．

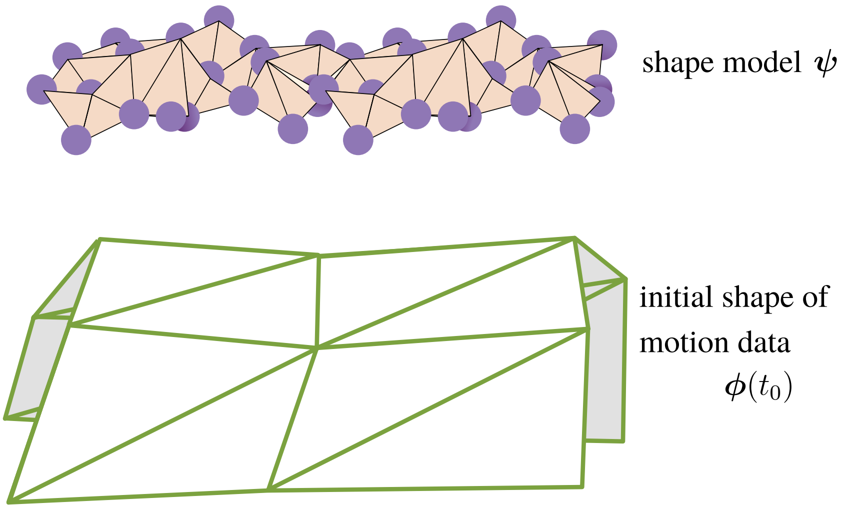


図 4.2: 形状モデルと動作データの関係

点と面の距離を考える．形状モデルを構成する任意の一点を $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ とし，動作データのポリゴン面を P_m とする．但し，m はポリゴン番号であり，動作データのポリゴン数を v_{m} として ${}^{\exists}m \in [1, v_{\mathrm{m}}]$ とする．点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と面 P_m 内のある点を結ぶ線分を考える．長さが最小となる線分を $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ とし，${}^{\forall}i \in [1, v_{\mathrm{m}}]$ を任意のポリゴンの番号として，線分 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の長さを $L(i)$ とおくと，$\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の関係は図 4.3 のようになる．但し，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ の P_m を含む面への垂線の足である．以下では，$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ を決定するため，$\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の関係について考える．

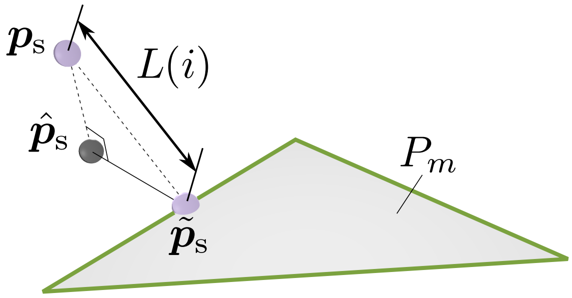


図 4.3: $\boldsymbol{p}_\mathrm{s}$ と $\tilde{\boldsymbol{p}}_\mathrm{s}$ の関係

面 P_m のボロノイ特徴領域を考える．あるポリゴンに対し，特徴として頂点，辺，面内の三つを考えると，ポリゴンの周囲に存在する点 $\hat{\boldsymbol{p}}_\mathrm{s}$ は最も近接する特徴により七種類に分類することが可能である．最も近接する特徴によって分類された各点の集合が存在する領域を特徴領域と呼び，ポリゴンの特徴で分割された周囲の空間をボロノイ特徴領域と呼ぶ [45]．三角形に対するボロノイ特徴領域を図 4.4 に示す．

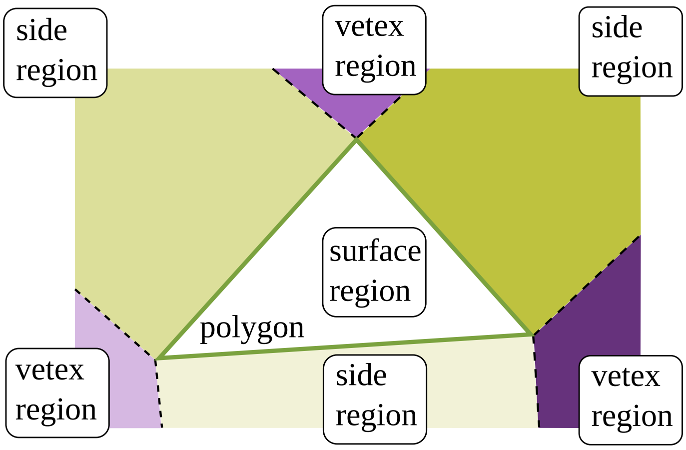


図 4.4: 三角形のボロノイ特徴領域

$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の位置は点 $\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ と P_m のボロノイ特徴領域の関係より求めることができる．P_m を構成する三頂点を $\{\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_2^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_3^{\mathrm{tri}}\}$ とすると，空間上の任意の点を含むボロノイ特徴領域は P_m の重心座標により求めることができ，重心座標は P_m の符号付き面積に対する小領域三角形 $\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}$ の符号付き面積の比によって求めることができる．点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と三頂点 $\{\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_2^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_3^{\mathrm{tri}}\}$ の関係を図 4.5 に示す．

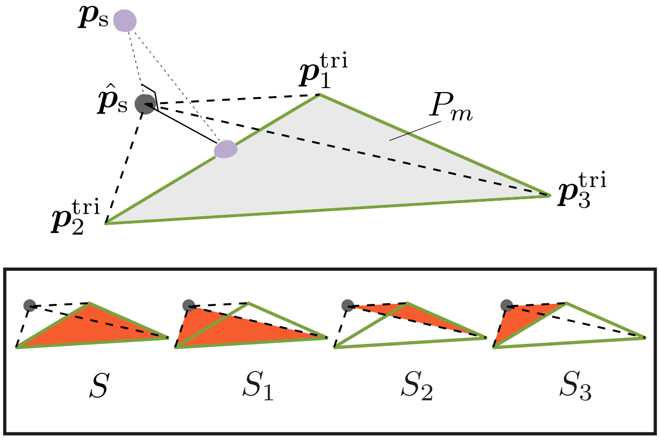


図 4.5: 点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と三頂点 $\{\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_2^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_3^{\mathrm{tri}}\}$ の関係

P_m の法線を $\boldsymbol{n}$ とすると，P_m の符号付き面積 S は式 (4.1) で定義できる．但し，$(i, j, k) \in \{(1, 2, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2)\}$ であり，面積の符号は $\boldsymbol{n}$ の向きによって決定される．

$$S = \frac{\boldsymbol{n}}{2|\boldsymbol{n}|} \cdot \left\{(\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) \times (\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}})\right\} \tag{4.1}$$

また，三角形 $\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{tri}}$ の符号付き面積 S_i は式 (4.2) で表される．

$$S_i = \frac{\boldsymbol{n}_i}{2|\boldsymbol{n}_i|} \cdot \left\{(\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}) \times (\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{tri}} - \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}})\right\} \tag{4.2}$$

但し，$\boldsymbol{n}_i$ は S_i の符号を決定するために用いられる三角形 $\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{tri}}$ の法線ベクトルであり，式 (4.3) で定義される．

$$\boldsymbol{n}_i = (\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}) \times (\boldsymbol{p}_k^{\mathrm{tri}} - \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}) \tag{4.3}$$

また，符号付き面積 S と S_i は式 (4.4) を満たす．

$$S = \sum_{i=1}^{3} S_i \tag{4.4}$$

従って，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は重心座標を用いて式 (4.5) で表される．

$$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \sum_{i=1}^{3} \frac{S_i}{S} \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}} \tag{4.5}$$

$a_i = S_i/S$ とすると，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の存在するボロノイ特徴領域は a_i に関する条件で求めることができる．$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ が頂点 $\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}$ のボロノイ特徴領域に存在する場合，a_i は式 (4.6) を満たし，$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は式 (4.7) で求めることができる．

$$a_i \geq 0 \;\; \cap \;\; a_j \leq 0 \;\; \cap \;\; a_k \leq 0 \tag{4.6}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}} \tag{4.7}$$

$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ が辺 $\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}$ のボロノイ特徴領域に存在する場合，式 (4.8) を満たす．$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は点 $\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の辺 $\boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}$ への垂直射影点と等しく，式 (4.9) で求めることができる．

$$a_i \geq 0 \;\; \cap a_j \;\; \geq 0 \;\; \cap \;\; a_k \leq 0 \tag{4.8}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}} + \frac{(\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) \cdot (\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}})}{|\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}|} (\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) \tag{4.9}$$

a_i が式 (4.10) を満たす場合，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は P_m の内部に存在し，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ と $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は等しい点である．

$$a_i \geq 0 \;\; \cap \;\; a_j \geq 0 \;\; \cap \;\; a_k \;\; \geq 0 \tag{4.10}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} \tag{4.11}$$

また，$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ と $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ は式 (4.12) を満たす．

$$\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \boldsymbol{p}_{\mathrm{s}} - \left\{ (\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) \cdot \boldsymbol{n} \right\} \boldsymbol{n} \tag{4.12}$$

以上より，$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は式 (4.13) で表される．

$$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \begin{cases} \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}} & (a_i \geq 0 \cap a_j \leq 0 \cap a_k \leq 0) \\ \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}} + \dfrac{(\hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) \cdot (\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}})}{|\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}|} (\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} - \boldsymbol{p}_i^{\mathrm{tri}}) & (a_i \geq 0 \cap a_j \geq 0 \cap a_k \leq 0) \\ \hat{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} & (a_i \geq 0 \cap a_j \geq 0 \cap a_k \geq 0) \end{cases} \tag{4.13}$$

式 (4.13) より $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ を決定することで，線分 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の長さ $L(i)$ を求めることができる．また，点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と対応する面 P_m は距離が最も近いため，m は式 (4.14) を満たす．

$$m = \mathop{\arg\min}_{i \in [1, v_{\mathrm{m}}]} L(i) \tag{4.14}$$

従って，式 (4.13)，(4.14) により形状モデルの点と動作データのポリゴン面の対応を決定する．

4.3　形状モデルの変形

本研究ではユーザの顔動作を反映させた変形を行うため，点の変位を二つのモデルを組み合わせて決定する．提案システムではユーザの顔動作を反映したモデルの変形を行うため，動作データの変形を形状データに反映する必要がある．幾何変形モデルは形状モデルの変位を対応する動作データの面の変形に基づき決定する．本補間モデルは動作データの面内に存在する形状モデルの点の変位は，面の頂点の変位の線形結合で表現できると仮定しており，形状モデルのうち，顔動作において表情筋に直動すると考えられる領域の変位を決定するために用いる．一方，形状モデルのうち顔動作において皮膚の相互作用により変形が決定されると考えられる領域では，動作データの面の変形に線形的に対応すると仮定することが難しいため，周囲の点の変位情報に基づき物理ベースモデルを利用することで変位を決定する．形状モデルに適用するモデルの決定の概要を図 4.6 に示す．以下では，幾何変形モデル及び物理ベースモデルについて詳しく記述する．

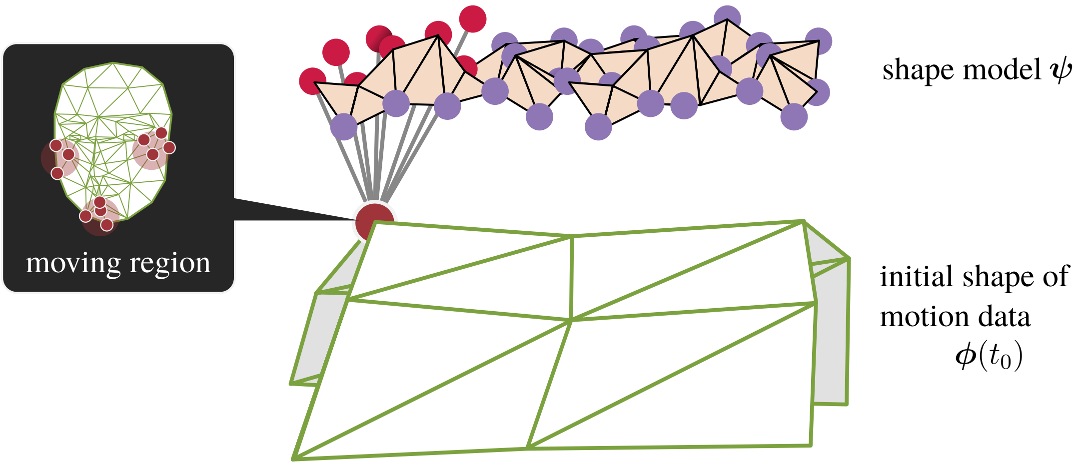
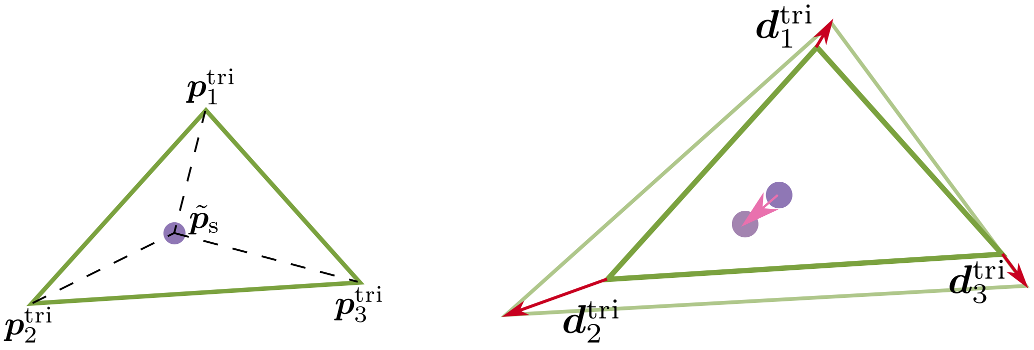


図 4.6: 形状モデル変形の概要

4.3.1　幾何変形モデル

形状モデルを構成するある点の変位は，対応する動作データのポリゴンの変形によって決定する．全ての形状モデルの点について動作データより変位を求めることで形状モデルの変形を行う．P_m の変形の概要を図 4.7 に示す．



(a) $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ と P_m の関係　　(b) 変形

図 4.7: P_m の変形

形状モデルを構成する点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ について考える．対応する動作データのポリゴンを構成する頂点 $\boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}}$ の変位ベクトルを $\boldsymbol{d}_j^{\mathrm{tri}}$ とし，$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ の変位ベクトル $\boldsymbol{d}$ を $\boldsymbol{d}_j^{\mathrm{tri}}$ の線形和として式 (4.15) で定義する．

$$\boldsymbol{d} = \sum_{j=1}^{3} a_j \boldsymbol{d}_j^{\mathrm{tri}} \tag{4.15}$$

但し，a_i は $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ を三頂点 $\{\boldsymbol{p}_1^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_2^{\mathrm{tri}}, \boldsymbol{p}_3^{\mathrm{tri}}\}$ の重心座標として表現する際の係数であり，式 (4.16) を満たす．

$$\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}} = \sum_{j=1}^{3} a_j \boldsymbol{p}_j^{\mathrm{tri}} \tag{4.16}$$

本研究では，$\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ と $\widetilde{\boldsymbol{p}}_{\mathrm{s}}$ は同様の変位を行うと仮定し，$\boldsymbol{d}$ を $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}}$ の変位として扱う．

4.3.2　物理ベース補間モデル

物理ベースモデルでは，皮膚を粘弾性体とみなし 3.3 節で述べた弾性シミュレーションに粘性の影響を加え，有限要素法により補間を行う．本モデルでは変形を行う形状モデルのうち，幾何変形モデルで表現できない領域の変形について考える．

支配方程式

d’Alembert の原理 [36] では，加速度が存在する動的問題に対して，静的な剛性方程式 (3.37) での外力項を加速度による慣性力に置き換えることができる．また，粘性抵抗が存在する場合には外力項に速度に比例する抵抗力を加えることで動的問題を考えることができる．点の変位ベクトル $\boldsymbol{d}$ を用いて，外力 $\boldsymbol{f}$ の項は次式となる．

$$\boldsymbol{f} = -\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d} - \eta\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d} \tag{4.17}$$

ρ は材料の質量密度であり，η は粘性係数である．式 (4.17) を仮想仕事の式 (3.31) に加えると，式 (4.18) を得る．

$$\int \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V - \int \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{v}\mathrm{d}S = -\int \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}}\left(\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d} + \eta\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}\right)\mathrm{d}V \tag{4.18}$$

但し，$\boldsymbol{d}^*$ は仮想変位である．式 (4.18) の右辺において，形状関数行列 $\boldsymbol{N}$ を用いて変位を節点変位 $\boldsymbol{d}_e$ に変換することで次式を得る．

$$\int \boldsymbol{d}^{*\mathrm{T}}\left(\rho\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d} + \eta\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}\right)\mathrm{d}V = \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}}\left(\rho\int \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d}_e\mathrm{d}V + \eta\int \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}_e\mathrm{d}V\right) \tag{4.19}$$

但し，形状関数行列による変位と節点変位の関係は式 (4.20) となり，四面体要素における形状関数行列は式 (4.21) の行列で表現される．

$$\boldsymbol{d} = \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\boldsymbol{d}_e \tag{4.20}$$

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{N}_1 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_2 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_3 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_4 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{N}_1 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_2 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_3 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_4 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{N}_1 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_2 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_3 & 0 & 0 & \boldsymbol{N}_4 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

式 (4.18)，式 (4.19) より外力項を右辺に移行することで次式を得る．

$$\int \boldsymbol{\varepsilon}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}\mathrm{d}V + \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}}\left(\rho\int \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d}_e\mathrm{d}V + \eta\int \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{N}\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}_e\mathrm{d}V\right) = \int \boldsymbol{d}_e^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{f}\mathrm{d}S \tag{4.22}$$

式 (3.32)，式 (3.33)，式 (3.36) を代入し，仮想変位 $\boldsymbol{d}_e^*$ を取り除くと，

$$\boldsymbol{K}_e\boldsymbol{d}_e + \boldsymbol{M}_e\frac{\mathrm{d}^2}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{d}_e + \boldsymbol{C}_e\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{d}_e = \boldsymbol{f}_e \tag{4.23}$$

但し，$\boldsymbol{M}_e$ は要素の質量行列，$\boldsymbol{C}_e$ は要素の減衰行列である．$\boldsymbol{M}_e$ は次式で定義される．

$$\boldsymbol{M}_e := \rho \int \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{N} \mathrm{d}V \tag{4.24}$$

但し，等号 := は変数の定義を表す．本研究では，ストークスの仮説に基づき次式で表される減衰行列を用いる [46].

$$\boldsymbol{C}_e = \int \boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{C'} \boldsymbol{B} \, \mathrm{d}V \tag{4.25}$$

$$\boldsymbol{C'} = \frac{\eta}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

動解析

式 (4.23) の離散化を行う．離散化の時間幅を Δt とすると，現在の時刻 t は整数 ι を用いて $t = \iota \Delta t$ となる．ニューマークの β 法を用いると，次の時刻における変位及び速度は式 (4.27)，(4.28) で表される [44].

$$\boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \approx \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t^2 \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \tag{4.27}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \approx \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t \left(1 - \Gamma \right) \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t \, \Gamma \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \tag{4.28}$$

式 (4.27) において，$\beta = \dfrac{1}{4}$ とすることで標本化周期に関して計算が無条件安定となる [44]．また，通例として $\Gamma = \dfrac{1}{2}$ が用いられるため，式 (4.27)，(4.28) は次式となる．

$$\boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \approx \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \Delta t \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \frac{1}{4} \Delta t^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \frac{1}{4} \Delta t^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \tag{4.29}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \approx \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota)} + \frac{1}{2} \Delta t \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} \tag{4.30}$$

式 (4.29)，(4.30) より，次の時刻における速度及び加速度を次の時刻の変位を用いて表すことができる．

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} = \frac{2}{\Delta t} \left(\boldsymbol{d}^{(\iota+1)} - \boldsymbol{d}^{(\iota)} \right) - \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} \tag{4.31}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota+1)} = \frac{4}{\Delta t^2} \left(\boldsymbol{d}^{(\iota+1)} - \boldsymbol{d}^{(\iota)} \right) - \frac{4}{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{d}^{(\iota)} - \frac{\partial^2}{\partial t^2} \boldsymbol{d}^{(\iota)} \tag{4.32}$$

式 (4.31)，(4.32) を式 (4.23) に代入することで，次の関係式を得る．

$$\begin{aligned}&\left(\boldsymbol{K}+\frac{4}{\Delta t^2}\boldsymbol{M}+\frac{2}{\Delta t}\boldsymbol{C}\right)\boldsymbol{d}^{(\iota+1)}\\&=\ \boldsymbol{f}^{(\iota+1)}+\left(\frac{4}{\Delta t^2}\boldsymbol{M}+\frac{2}{\Delta t}\boldsymbol{C}\right)\boldsymbol{d}^{(\iota)}+\left(\frac{4}{\Delta t}\boldsymbol{M}+\boldsymbol{C}\right)\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}^{(\iota)}+\boldsymbol{M}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d}^{(\iota)}\end{aligned} \tag{4.33}$$

式 (4.33) において未知変数 $\boldsymbol{d}^{(\iota+1)}$ の係数行列を $\boldsymbol{A}$，既知変数 $\boldsymbol{d}^{(\iota)}$，$\dfrac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}^{(\iota)}$，$\dfrac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d}^{(\iota)}$ を含む項を $\boldsymbol{q}^{(\iota)}$ とすると，次式を得る．

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{d}^{(\iota+1)}=\boldsymbol{f}^{(\iota)}+\boldsymbol{q}^{(\iota)} \tag{4.34}$$

但し，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{q}^{(\iota)}$ は次の式で定義される．

$$\boldsymbol{A}:=\boldsymbol{K}+\frac{4}{\Delta t^2}\boldsymbol{M}+\frac{2}{\Delta t}\boldsymbol{C} \tag{4.35}$$

$$\boldsymbol{q}^{(\iota)}:=\left(\frac{4}{\Delta t^2}\boldsymbol{M}+\frac{2}{\Delta t}\boldsymbol{C}\right)\boldsymbol{d}^{(\iota)}+\left(\frac{4}{\Delta t}\boldsymbol{M}+\boldsymbol{C}\right)\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{d}^{(\iota)}+\boldsymbol{M}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\boldsymbol{d}^{(\iota)} \tag{4.36}$$

物理ベースモデルでは，幾何変形モデルを適用しなかった部分における変位の決定を行うため，本モデルを考える際には幾何変形モデルにより形状モデルの一部の節点の変位は決定している．形状モデルの節点変位のうち，動作モデルとの対応及び幾何変形モデルにより既知の変位を $\boldsymbol{d}_{\mathrm{c}}$，物理ベースモデルで求める変位を $\boldsymbol{d}_{\mathrm{o}}$ とすると，式 (4.34) は次式となる．

$$\left[\begin{array}{c:c}\boldsymbol{A}_{\mathrm{cc}} & \boldsymbol{A}_{\mathrm{co}}\\ \hdashline \boldsymbol{A}_{\mathrm{oc}} & \boldsymbol{A}_{\mathrm{oo}}\end{array}\right]\left\{\begin{array}{c}\boldsymbol{d}_{\mathrm{c}}^{(\iota+1)}\\ \hdashline \boldsymbol{d}_{\mathrm{o}}^{(\iota+1)}\end{array}\right\}=\left\{\begin{array}{c}\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}^{(\iota)}\\ \hdashline \boldsymbol{f}_{\mathrm{o}}^{(\iota)}\end{array}\right\}+\left\{\begin{array}{c}\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}^{(\iota)}\\ \hdashline \boldsymbol{q}_{\mathrm{o}}^{(\iota)}\end{array}\right\} \tag{4.37}$$

但し，$\boldsymbol{A}_{\mathrm{cc}},\boldsymbol{A}_{\mathrm{co}},\boldsymbol{A}_{\mathrm{oc}},\boldsymbol{A}_{\mathrm{oo}}$ はそれぞれ $\boldsymbol{A}$ の部分行列であり，$\boldsymbol{q}_{\mathrm{c}}^{(\iota)},\boldsymbol{q}_{\mathrm{o}}^{(\iota)}$ は $\boldsymbol{q}$ の成分ベクトルである．$\boldsymbol{A}$ 及び $\boldsymbol{q}$ は ι における変位，速度及び加速度を利用しており，既知の値を持つ．本研究では，変位が未知の節点には外力がはたらかないと仮定して式 (4.37) を解く．

4.4 動作評価

顔特徴点間の距離の変化を用いて動作評価を行う．本研究では，皮膚の粘弾性変化による影響を評価するため，図 2.3 に示す各特徴点間の距離の変化を考慮した指標を用いる．本研究では表情筋の走行を考慮し，左右各々における Cheilion(ch) から Exocanthion(ex)，Palpebrale inferius(pi)，Alare(al)，Crista philtri(cphi) までの距離を用いて動作評価を行う．動作評価の手法としては，Trotman らの口唇運動評価のための指標 [47] に基づき評価関数を設定する．特徴点間距離を $r_{k,side}(t), side \in \{\mathrm{L}, \mathrm{R}\}$ とし，評価関数 ξ_{cost} を式 (4.38) で定義する．但し，k は距離を計算するために用いる特徴点のラベルであり，k は 1 から 4 の値を取り，各々 ch から ex，pi，al，cphi までの距離を表す．また，$side$ は顔の左右を表し，$r_{k,\mathrm{L}}$ は左側，$r_{k,\mathrm{R}}$ は右側における距離を表す．

$$\xi_{\mathrm{cost}}(t) = \log|\xi_{\mathrm{L}}(t) - \xi_{\mathrm{R}}(t)| \quad (t \neq t_0) \tag{4.38}$$

但し，t_0 は初期時刻であり，$\xi_{side}(t)$ は $r_k(t)$ を用いて式 (4.39) で定義する．

$$\xi_{side} = \sum_{k=1}^{4} \left\{ \frac{r_{k,side}(t)}{r_{k,side}(t_0)} - 1 \right\} \tag{4.39}$$

式 (4.38) において，ξ_{cost} の値が小さくなった場合に動作が左右対称であると考えられる．

第5章　幾何変形モデルの検証

本章では，実装したシステムを用いた形状モデルと動作データの対応付け及び幾何変形モデルを用いた形状モデルの変形の結果について述べる．

5.1　実装したシステム

形状計測装置で予め計測した形状モデル，コンピュータ，距離画像センサを用いてシステムを実装した．形状モデルは頭髪が計測されないよう頭部に帽子を装着し，眼鏡等の装飾を外した状態で計測を行った．システムは屋内で利用することを想定し，照明には蛍光灯を用いた．また，距離画像センサをユーザの正面に配置し動作データの計測を行った．実装したシステムを用いて動作を計測する様子を図 5.1 に示す．実装に用いた機器の仕様を表 5.1，表 5.2，表 5.3 に示す．

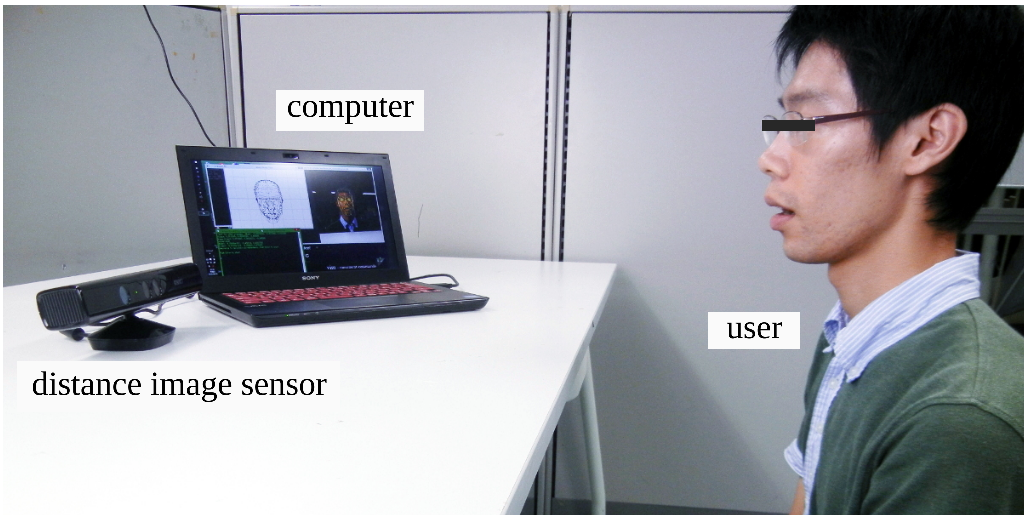


図 5.1: 動作計測の様子

表 5.1: 形状計測装置の仕様

項目名	
製品名	3dMDface System (3dMD)
描画時間 (s)	7
分解能 (mm)	0.4
距離計測方式	Stereophotogrammetry

表 5.2: コンピュータの仕様

項目名	
OS	Windows 8.1
CPU	Intel Core i5-3210M @ 2.50GHz
RAM(GB)	6.0
GPU	NVIDIA GeForce GT 640M LE

表 5.3: 距離画像センサの仕様

項目名	
製品名	Kinect for Windows (Microsoft)
最大フレームレート (fps)	30
解像度	640 × 480
距離計測方式	パターン光投影法

実験に用いた形状モデル及び動作データの詳細を表 5.4，表 5.5 に示す．動作データは距離画像センサにより提供される顔モデルの時系列データであり，顔の形状と外観を表現する統計モデルである AAM [48] を用いて RGB 画像より取得される．

表 5.4: 形状モデルの詳細

項目名	
点数 (個)	32934
面数 (個)	65384
計測機器	3dMDface System (3dMD)

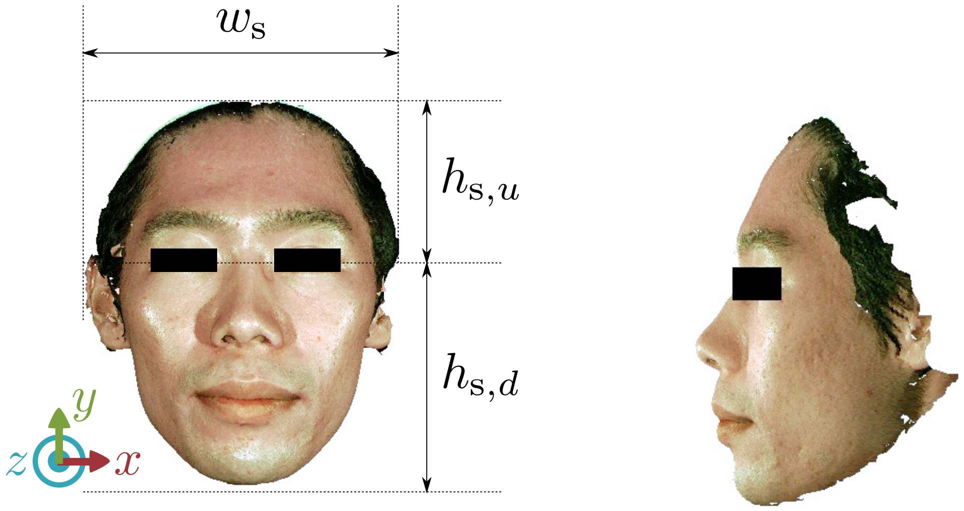
表 5.5: 動作データの詳細

項目名	
点数 (個)	121
面数 (個)	206
計測機器	Kinect (Microsoft)

5.2　モデルの対応

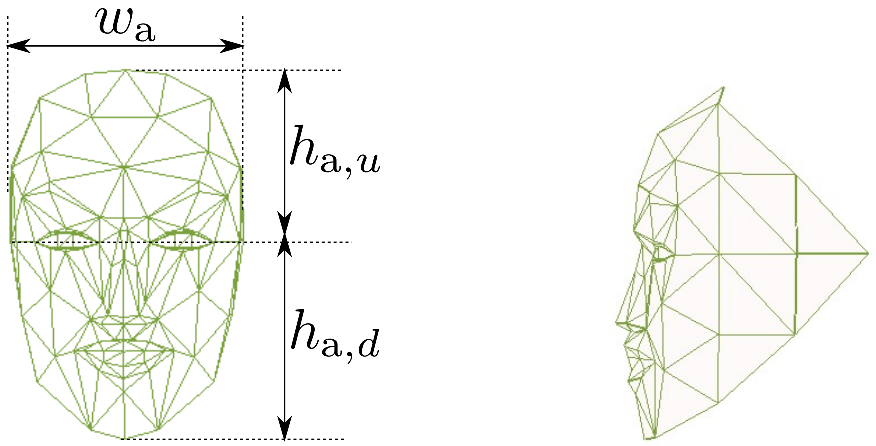
本実験で用いた形状モデルと CANDIDE-3 を基本とする顔モデルの概形を一致させるため，顔の幅及び高さで表現されるパラメータを用いて顔の正規化を行った．

実験に用いた形状モデルの外観を図 5.2，動作データを表現するサーフィスモデルの外観を図 5.3 に示す．但し，図 5.2(b) における白い領域はメッシュの欠損を表している．



(a) 正面　　(b) 側面

図 5.2: 形状モデルの外観



(a) 正面　　(b) 側面

図 5.3: 動作データの外観

形状モデルのパラメータを $w_\mathrm{s}, h_{\mathrm{s},u}, h_{\mathrm{s},d}$，動作データを表現する顔モデルのパラメー

タを $w_{\mathrm{a}}, h_{\mathrm{a},u}, h_{\mathrm{a},d}$ としたとき, 動作データのサーフィスモデルの点を $\boldsymbol{p}_{\mathrm{a}} = (p_{\mathrm{a},x}, p_{\mathrm{a},y}, p_{\mathrm{a},z})$ 及び形状モデルを構成する点 $\boldsymbol{p}_{\mathrm{s}} = (p_{\mathrm{s},x}, p_{\mathrm{s},y}, p_{\mathrm{s},z})$ は式 (5.1)，式 (5.2)，式 (5.3)，式 (5.4) を用いて変換される．但し，$y_{\mathrm{s,eye}}$ は形状モデルにおける目の y 座標を表す．

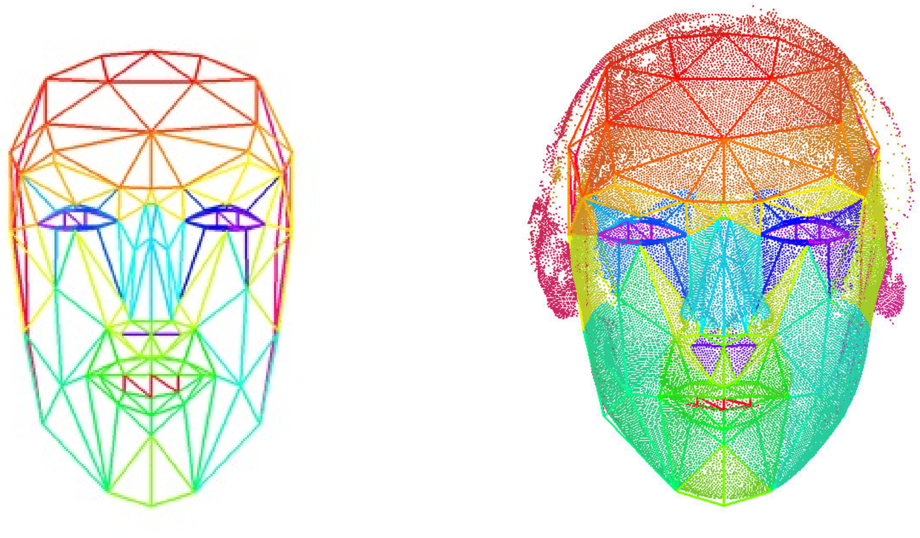
$$p'_{\mathrm{s},x} = \frac{p_{\mathrm{s},x}}{w_{\mathrm{s}}} \tag{5.1}$$

$$p'_{\mathrm{s},y} = \begin{cases} \dfrac{p_{\mathrm{s},y}}{w_{\mathrm{a}}} \dfrac{h_{\mathrm{a},u}}{h_{\mathrm{s},u}} & (\boldsymbol{p}_{\mathrm{s},y} > y_{\mathrm{s,eye}}) \\ \dfrac{p_{\mathrm{s},y}}{w_{\mathrm{a}}} \dfrac{h_{\mathrm{a},d}}{h_{\mathrm{s},d}} & (\mathrm{otherwise}) \end{cases} \tag{5.2}$$

$$p'_{\mathrm{s},z} = \frac{p_{\mathrm{s},z}}{w_{\mathrm{s}}} \tag{5.3}$$

$$\boldsymbol{p}'_{\mathrm{a}} = \frac{\boldsymbol{p}_{\mathrm{a}}}{w_{\mathrm{a}}} \tag{5.4}$$

形状モデルと動作データの対応付けの様子を図 5.4 に示す．



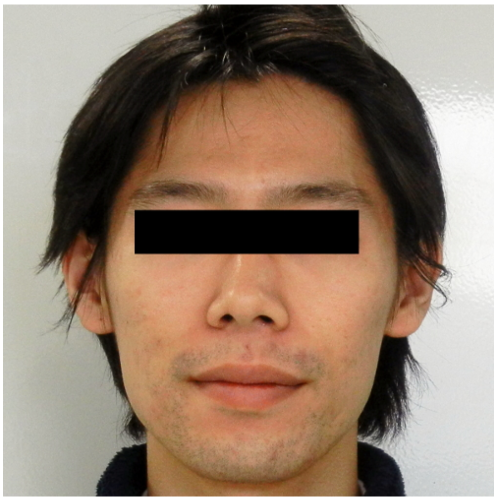
(a) 動作データの顔モデル　(b) 形状モデルと顔モデルの重畳表示

図 5.4: 形状モデルと動作データの対応

図 5.4(a) は動作データにおける顔モデルに対して，面の番号を元に色付けし表示しており，図 5.4(b) では形状モデルの頂点での表示と動作データの顔モデルを重畳して表示を行った．多くの点で想定された面と対応付けができていることが確認できた．

5.3　モデルの変形

　ユーザの開口時の動作を計測し，計測した動作データを用いて形状モデルの変形を行った．無表情時の形状モデルの様子と開口時の形状モデルの様子をそれぞれ図 5.5，図 5.6 に示す．無表情時の形状データと開口時の形状データを比較し，変位の大きさを疑似カラー表示したモデルを図 5.6(c) に示す．また，ユーザの動作計測と同時に形状データの変形を行った結果，動作計測と同様のフレームレートで変形を行うことができた．

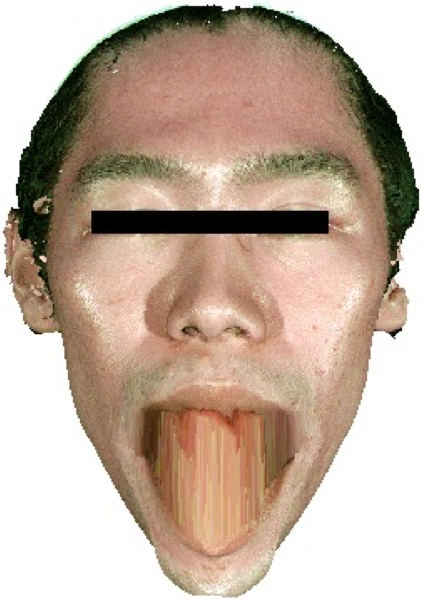


(a) ユーザの顔

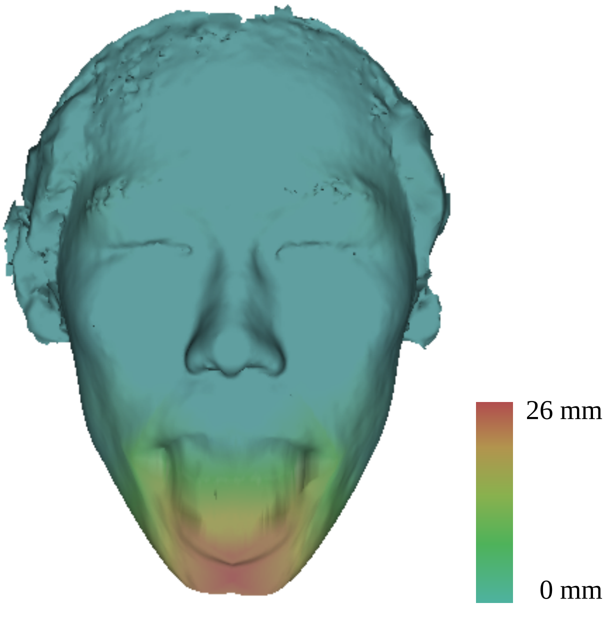
(b) 形状モデル

図 5.5: 無表情時のユーザの顔と形状モデル

(a) ユーザの顔



(b) 形状モデル



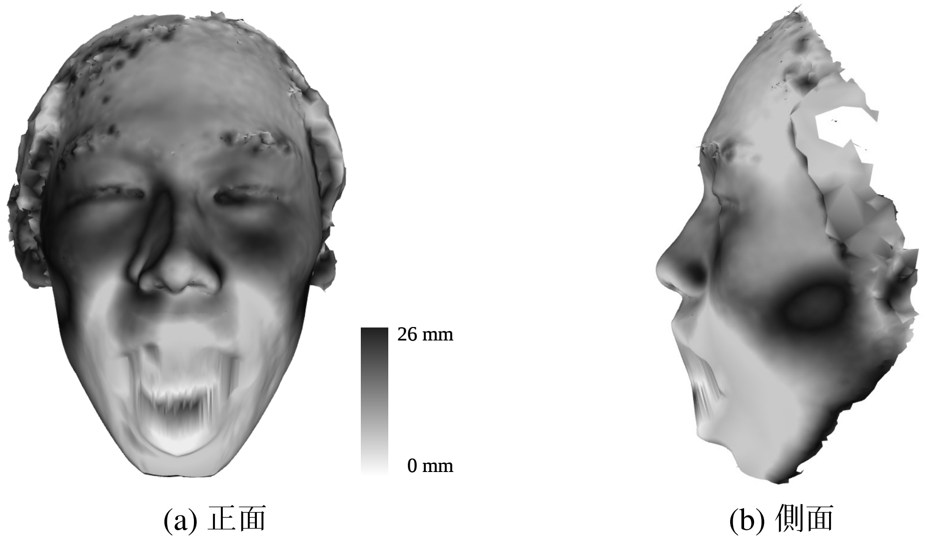
(c) 変位量で色付けした形状モデル

図 5.6: 開口時のユーザの顔と形状モデル

開口時のユーザの顔形状を高精度に計測し，変形した形状モデルと比較を行った．比較に用いた開口時の顔形状を図 5.7，開口時の顔形状と変形した形状モデルを手動で重ね合わせ，距離を計算し大きさを濃淡で表示した画像を図 5.8 に示す．但し，開口時の顔形状は実験を行う前に予め計測しており，実験ではユーザが計測時と同様の表情を表出したと仮定している．また，図 5.7 における口内の白い領域はメッシュの欠損を表している．

(a) 正面　　(b) 側面

図 5.7: 開口時モデルの外観



(a) 正面　　(b) 側面

図 5.8: 開口時モデルと変形した形状モデルの差

5.4　考察

形状モデルの変形に関する考察を行う．図 5.5，図 5.6 より，無表情時と開口時においてユーザの顔の変形に伴い形状モデルが変形できていることが確認された．しかし，開口変形を行った場合，形状モデルの顎が他の部分に比べ突出しており，実際のユーザの顔と比べ不自然な変形であると考えられる．突出した原因としては，動作データと形状モデルの顎下部の輪郭の角度が大きく異なる場合に領域の重なりが小さくなり，輪郭に不連続な変形が起こると考えられる．また，図 5.6(c) より形状モデルを変形した場合，顎が他の部分に比べ大きく変位していることが確認されたが，人が開口する際に起こる頬の変形などが表出しておらず，顔の細やかな変形が表現できていないと考えられる．

図 5.8 より，頬から額までの領域では実際の形状との差は最大で 2 mm 程度と小さく，正しく変形できていることが確認された．一方，口唇や顎の付近ではモデル間の距離が 10 mm を超え，実際の形状と大きく異なる変形となることが確認された．特に，鼻唇溝の部分を境に差が大きく増加しているが，今回顔動作計測に用いた顔モデルでは鼻唇溝の変位を細かく計測できないことによると考えられる．また，本実験では参照用の顔形状と実験で計測した顔形状が異なるため，ユーザの動作の再現性により形状に違いがあることが考えられる．

以上の結果より，本手法では開口などの変形の特徴は再現されることが確認されたが，奥行方向の変形を再現するためには補間手法の改良や高解像度での動作計測が必要であると考えられる．

第6章　粘弾性シミュレーションの検証

本章では，実装したシステムを用いた粘弾性シミュレーションの挙動を確認するための実験の結果を示す．

6.1　実装したシステム

顔の三次元形状モデル，コンピュータ，距離画像センサを用いてシステムを実装した．本実験では形状の個人差による動作への影響を少なくしシミュレーションの評価を行うため，複数人の顔の平均形状を利用した．形状モデルとして，計測によって得られたモデルより作成された平均顔メッシュを提供して頂き，メッシュの作成に用いた．平均顔メッシュには健常男性被験者百人の顔の形状データが利用されており，大阪大学 歯学部において計測が行われた．計測には表 5.1 に示す機器が用いられた．動作計測については 5 章での実験と同様に表 5.3 に示す機器を用いた．実装に用いたコンピュータの仕様を表 6.1 に示す．

表 6.1: シミュレーションに用いたコンピュータの仕様

項目名	
OS	Ubuntu 16.04 LTS
CPU	Intel Core i7-920 @ 2.67GHz
RAM(GB)	11.7
GPU	NVIDIA GeForce GTX 760/PCIe/SSE2

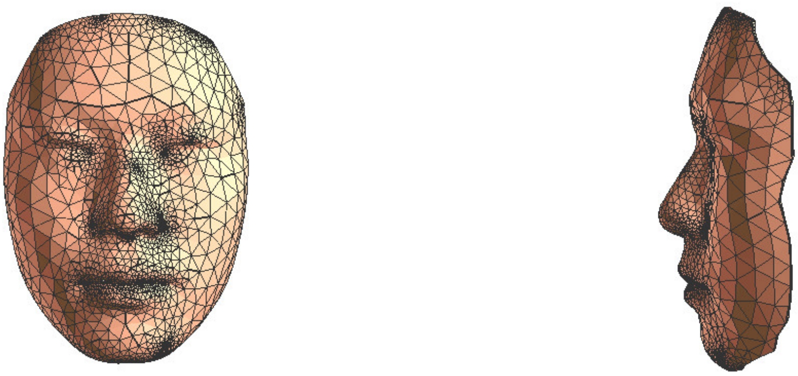
本実験では，三次元形状を表す平均顔メッシュに厚みを設定し，要素分割を行うことでシミュレーションに利用できる形式のデータを作成した．実験に用いた形状モデルの詳細を表 6.2 に示す．また，形状モデルの外観を図 6.2 に示す．動作データとしては，5 章の実験で用いたデータと同様のスペックを持つデータを用いており，詳細は表 5.5 のとおりである．

表 6.2: 形状モデルの詳細

項目名	
点数 (個)	6434
面数 (個)	20969
計測機器	3dMDface System (3dMD)

(a) 正面　(b) 側面

図 6.1: メッシュの作成に用いた形状データ



(a) 正面　(b) 側面

図 6.2: 作成した形状モデル

6.2　動作検証

6.2.1　実験内容

粘弾性シミュレーションを用いて表情が再生できることを確認する．モデル全体で一様な物理パラメータを用い，表情として開口動作を計測した動作データを入力したときの変形を確認した．本実験で使用した物理パラメータを表 6.3 に示す．本実験で用いた物理パラメータは計測により取得された数値であり，図 2.3 の cphi における計測結果である．また，シミュレーションにおいて，各節点に対し図 6.3 に示す条件を設定した．図 6.3 において，幾何変形モデルにより変位を決定する節点 (変位入力点) を赤，固定する節点 (固定点) を黄で示した．他の節点の変位については物理ベースモデルを用いて決定した．変位入力点としては，開口動作を表現するために口唇上に四点を設定した．シミュレーションにおける離散化の時間幅は 2.0×10^{-5} s とした．本実験で用いた動作時間は 2.7 s であった．

表 6.3: 動作検証に用いた物理パラメータ

項目名	値
ヤング率 (kPa)	192.4
ポアソン比 [46]	0.495
粘性係数 (Pa · s)	476.8
密度 (kg/m^3) [46]	1100

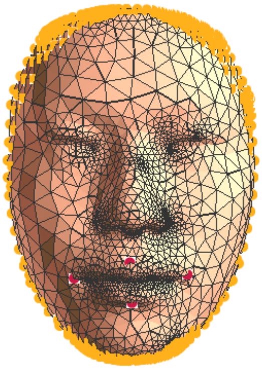
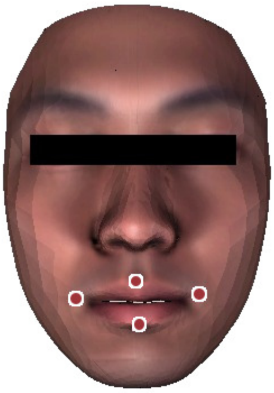


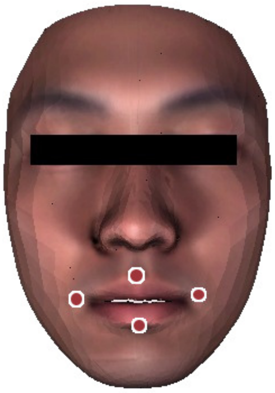
図 6.3: 動作確認におけるシミュレーションの条件

6.2.2　実験結果

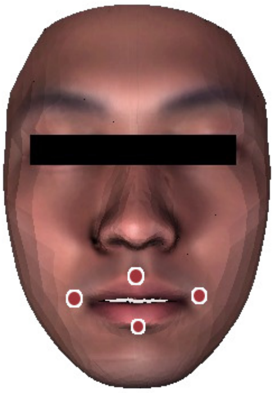
開口動作を入力したときのシミュレーションの結果を図 6.4 に示す．



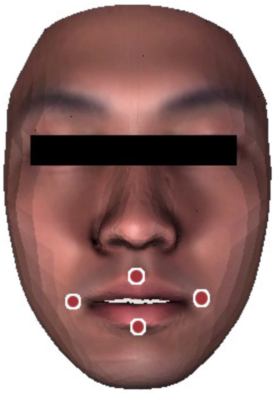
(a) t = 0 s



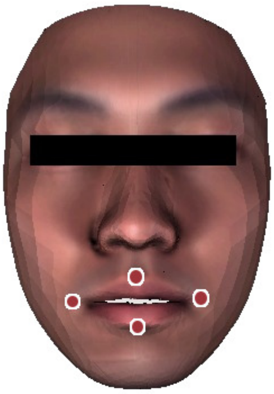
(b) t = 0.7 s



(c) t = 1.3 s



(d) t = 2.0 s



(e) t = 2.7 s

図 6.4: 開口動作を入力したときのシミュレーション結果

6.2.3　考察

図 6.4 より，シミュレーションにより口裂の開口が確認された．また，図 6.4 における赤色の点がシミュレーションにおける変位入力点であるが，入力点の変位に引きつれ口唇全体が変形していることが確認できた．変形では，入力点の移動に続く形で周囲の要素が遅れて変形しており，粘性で表される生体組織の動特性を定性的に確認した．以上より，提案手法による表情の再生が可能であることが示唆された．

6.3　パラメータ分布の評価

6.3.1　実験内容

提案システムにより表情再生に適したパラメータ分布が決定できることを確認するため，異なるパラメータ分布を有する三つのモデルを用い動作評価を行った．本実験で用いた物理パラメータを表 6.4，6.5，6.6 に示す．本実験で用いたヤング率及び粘性係数については大阪大学 歯学部において計測された値であり，各々図 2.3 における Cheek，Crista philtri superior (cphs)，Cheilion，Crista philtri inferior (cphi)，Alare の計測結果である．また，本実験では口唇における瘢痕を模擬し，左右の cphs において異なるパラメータを設定し，左側の有する値を変化させた．モデル 1 は健常状態，モデル 2 は瘢痕を仮定した．また，モデル 3 に関してはモデル 1 とモデル 2 の差を用いて健常状態に比べ粘弾性の低い状態を設定した．ポアソン比及び密度に関しては，パラメータを分布させず一様な値を用いた．シミュレーションにおける標本化周期は 1.0×10^{-3} s とした．本実験では開口動作を計測したデータを用いており，動作時間は 1.3 s であった．また，要素のヤング率，粘性係数の大きさにより色付けした形状モデルを各々図 6.5，6.6 に示す．

表 6.4: 評価実験に用いたヤング率

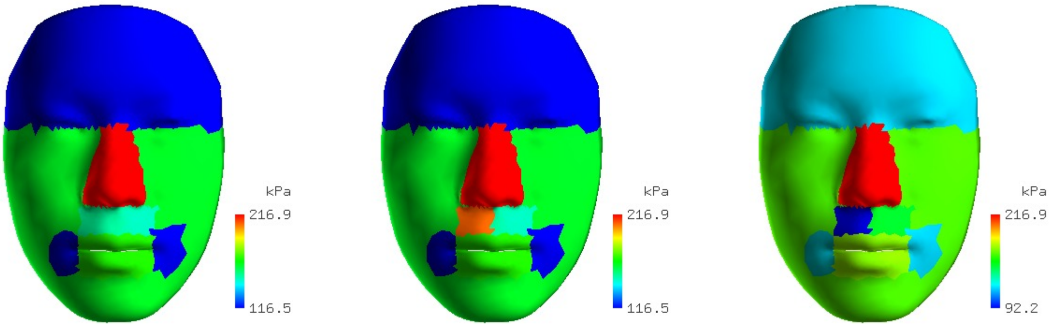
	ヤング率 (kPa)					
	Cheek	cphs(L)	cphs(R)	Cheilon	cphi	Alare
モデル 1	162.7	148.9	148.9	116.5	169.0	216.9
モデル 2	162.7	148.9	205.6	116.5	169.0	216.9
モデル 3	162.7	148.9	92.2	116.5	169.0	216.9

表 6.5: 評価実験に用いた粘性係数

	粘性係数 (Pa · s)					
	Cheek	cphs(L)	cphs(R)	Cheilon	cphi	Alare
モデル 1	430.3	408.6	408.6	362.9	453.0	434.3
モデル 2	430.3	408.6	427.8	362.9	453.0	434.3
モデル 3	430.3	408.6	389.4	362.9	453.0	434.3

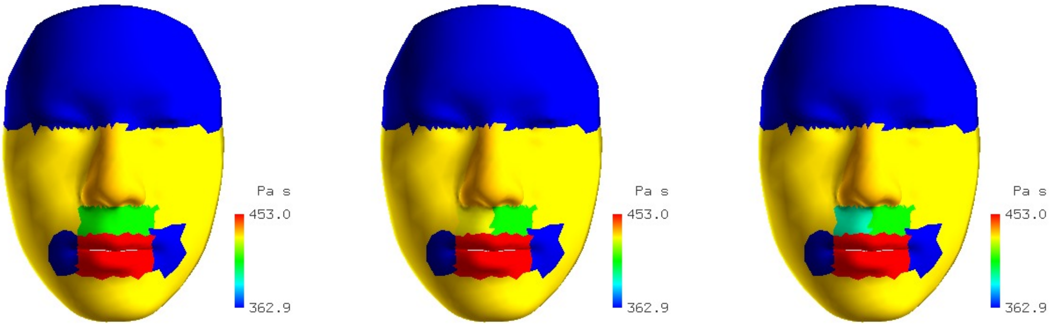
表 6.6: 評価実験に用いたポアソン比及び密度

	ポアソン比 [46]	密度 (kg/m^3) [46]
モデル 1	0.495	1100
モデル 2	0.495	1100
モデル 3	0.495	1100



(a) モデル 1　(a) モデル 2　(a) モデル 3

図 6.5: ヤング率の分布



(a) モデル 1　(a) モデル 2　(a) モデル 3

図 6.6: 粘性係数の分布

シミュレーションにおける各節点の条件を図 6.7 に示す．本実験では，口唇の動作に加え下顎の動作を表現するために顎上に三点の変位入力を設定し，固定は顔の上部のみとした．

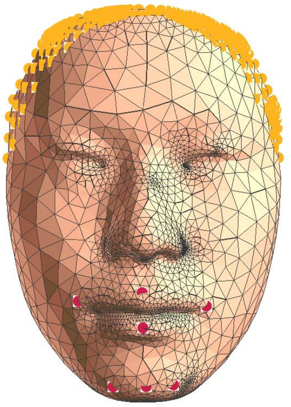
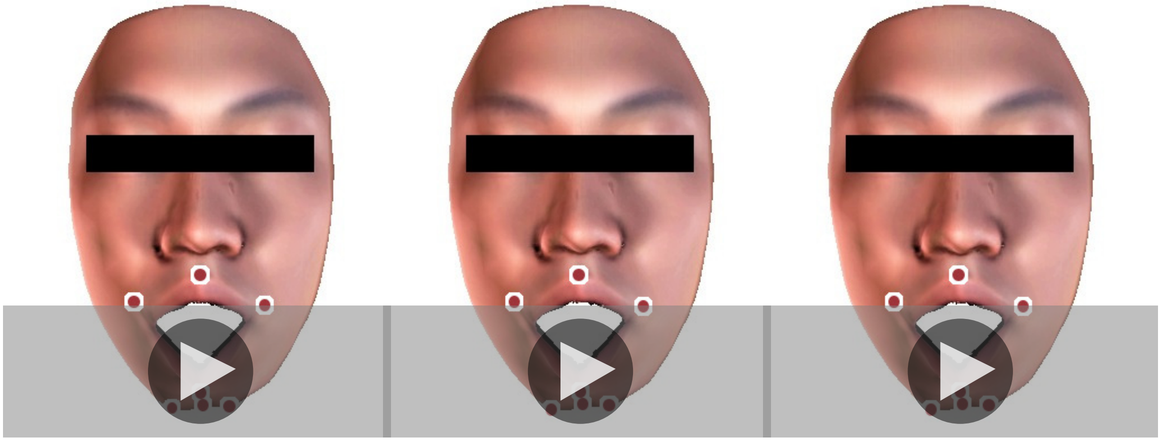


図 6.7: シミュレーションの条件

6.3.2　実験結果

各分布において $t = 1.3\,\mathrm{s}$ のシミュレーション結果を図 6.8 に，左右対称性の評価結果を図 6.9 に示す．また，モデル 1 とモデル 2，モデル 1 とモデル 3 の結果の差を図 6.10 に示す．



(a) モデル 1　(b) モデル 2　(c) モデル 3

図 6.8: 各分布におけるシミュレーション結果

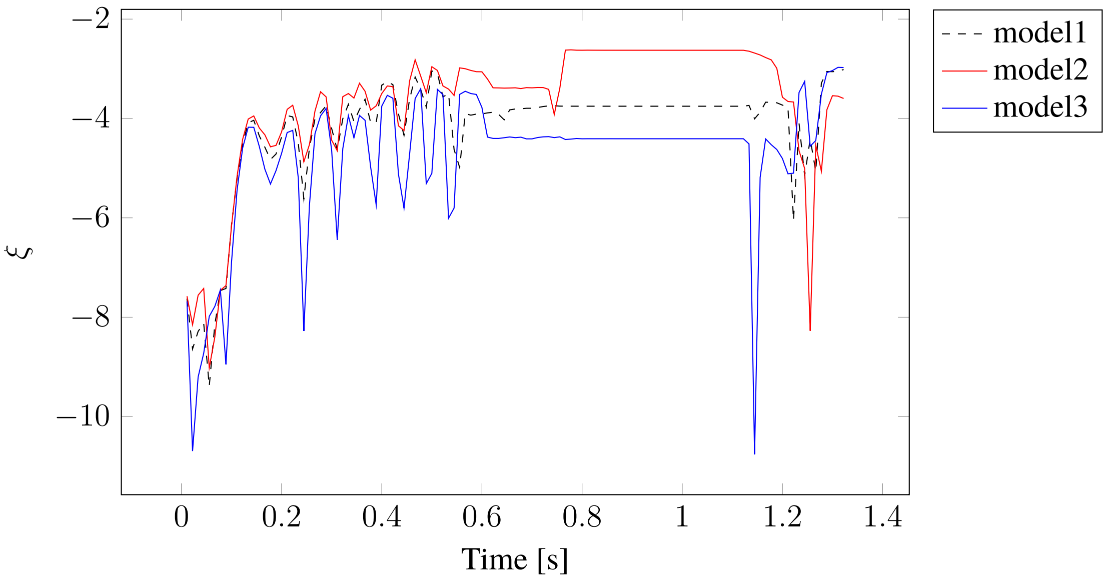
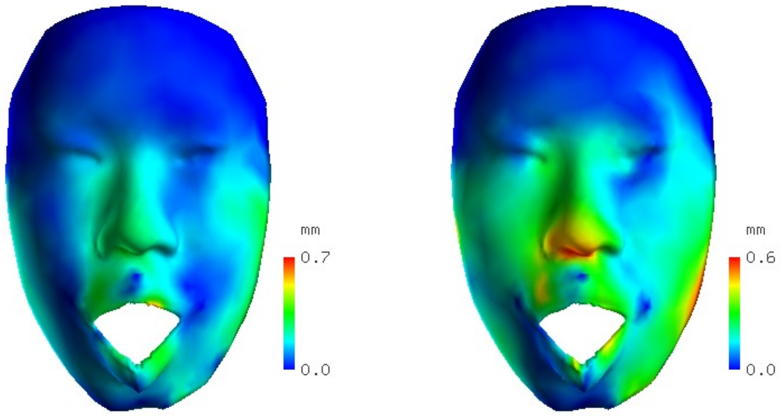


図 6.9: 左右対称性の評価結果



(a) モデル 1 とモデル 2 の差　　(b) モデル 1 とモデル 3 の差

図 6.10: 各分布における結果の差

6.3.3　考察

パラメータの違いによるシミュレーション結果の差について考察を行う．図 6.8 より，パラメータを変化させた場合において動作結果は同様となった．動作結果が同様となった原因としては，変位入力の条件設定により，粘弾性特性の変化による表情への影響が小さくなった考えられる．しかし，図 6.10 において，パラメータを変化させた口唇及び鼻の付近において形状の差が確認できた．口唇及び鼻の付近において形状に差が生じたことは，変位入力点によって口唇が上方向に押し上げられ，押し上げに伴い鼻全体が変形したことによると考えられる．また，図 6.9 より，モデル間において運動の左右対称性に差が生じることが確認され，左右対称性を実現する物理特性の推定可能性が示唆された．左右対称性に差が生じた原因については，0.2 s から 0.6 s までの振動における振幅が変化しており，粘性の変化による影響が寄与していると考えられる．

第7章　結論

本研究では，顔の形状情報，表情追跡，皮膚の物理モデルを統合した表情再生手法を提案した．提案した再生手法を用いて，距離画像センサを用いてユーザの表情追跡を行い，特徴点により構成されるメッシュと形状モデルの点の幾何的な対応を考えることにより対応付けを行った．対応付けを行った動作データと形状モデルを用いて，ユーザの表情に基づく形状モデルの変形を行った．形状モデルの変形手法として，特徴点の変位を幾何的に反映させる幾何変形モデル，及び幾何変形モデルと皮膚の粘弾性モデルを統合した粘弾性シミュレーションを提案した．幾何変形モデルでは，表情追跡に基づき実時間での形状モデルの変形を行うことができた．粘弾性シミュレーションでは，表情追跡に基づきユーザの開口動作が再生できることを確認した．さらに，皮膚の粘弾性パラメータを変化させて表情再生を行うことで，粘弾性特性の非対称性に応じて再生される表情の対称性が変化することを確認した．

謝 辞

本研究は大阪大学 大学院基礎工学研究科で行った．

大阪大学 大学院基礎工学研究科 大城理 教授には研究環境を提供して頂き，また本論文の執筆における添削や日々のゼミなど，多大な御指導を頂きました．研究以外でも工場見学などの機会を与えて頂き，研究の分野にとどまらず様々な事を教えて頂きました．厚くお礼申し上げます．大阪大学大学院基礎工学研究科 田中正夫 教授，小林洋 准教授には，本論文の副査としてご指導を頂きました．深く感謝致します．大阪大学 大学院基礎工学研究科 黒田嘉宏 准教授には，担当教員として研究テーマの相談や研究内容に関して多くの御指導を頂きました．御多忙の中親身になって相談にのって頂き, 心よりお礼申し上げます. 大阪大学 大学院基礎工学研究科 吉元俊輔 助教には，研究について沢山の御助言を頂きました．また，時には厳しく鼓舞し，励まして頂きました．深く感謝致します．シンガポール国立大学歯学部 高田健治 教授，大阪大学歯学部附属病院 矯正科 谷川千尋 講師には実験に必要な情報やデータを提供して頂いただけでなく，研究に関して多くの御助言や改善点を示して頂きました．心より御礼申し上げます．大城研究室秘書 杉浦延予氏には，研究室生活において様々な事を助けて頂き，研究活動を支えて頂きました．心より感謝致します．

大城研究室の先輩方である加藤雄樹氏，井手口裕太氏，北島利浩氏，朝野美穂氏には, 研究に関する事だけでなく, 研究生活や将来に関する大変多くの助言と励ましを頂き，深謝致します. 研究室の同期である桑谷達之氏，武村浩志氏，Nadhifa Ayunisa 氏，日夏俊氏，細田椋平氏には，めまぐるしい日常を過ごす中で本当に様々な場面で助けられました．心よりお礼申し上げます．また，常に学びを忘れない姿勢と豊かな個性で沢山の刺激をくれた後輩一同に感謝します．

最後に，いつも変わらず支えてくれた家族に感謝します．

本研究における被験者実験は，基礎工学研究科における人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (28-8) を得て行った．被験者には実験内容について説明を行い，書面にて同意を得られた場合にのみ測定を行った．また，大阪大学歯学部附属病院より提供して頂いたデータについては，大阪大学国際医工情報センター研究倫理委員会の承認 (001) を得て取得されており，提供者の許諾の元，利用した．

参考文献

[1] 岡堂哲雄. ナースのための心理学① 看護の心理学入門. 株式会社 金子書房, 東京, 1997.

[2] Tien Tuan Dao, Stephanie Dakpe, Philippe Pouletaut, Bernard Devauchelle, and Marie Christine Ho Ba Tho. Facial Mimics Simulation using MRI and Finite Element Analysis. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.*, pp. 4585–4588, 2013.

[3] Matthieu Chabanas, Vincent Luboz, and Yohan Payan. Patient specific finite element model of the face soft tissues for computer-assisted maxillofacial surger. *Medical Image Analysis*, Vol. 7, No. 2, pp. 131–151, 2003.

[4] Justus Thies, Michael Zollhöfer, Marc Stamminger, Christian Theobalt, and Matthias Nießner. Face2face: Real-time face capture and reenactment of rgb videos. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 2387–2395, 2016.

[5] Kori Inkpen and Mara Sedlins. Me and My Avatar : Exploring Users ’ Comfort with Avatars for Workplace Communication. In *Proceedings of the ACM 2011 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 383–386, 2011.

[6] Holotech Studios. FaceRig. `https://facerig.com/`. Accessed: 2016-01-12.

[7] Viktor Seib, Julian Giesen, Dominik Grüntjens, and Dietrich Paulus. Enhancing Human-Robot Interaction by a Robot Face with Facial Expressions and Synchronized Lip Movements. *21st International Conference on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*, pp. 70–77, 2013.

[8] Haoda Huang, Jinxiang Chai, Xin Tong, and Hsiang-Tao Wu. Leveraging motion capture and 3d scanning for high-fidelity facial performance acquisition. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, p. 74, 2011.

[9] Amit H Bermano, Derek Bradley, Thabo Beeler, Z Fabio, Derek Nowrouzezahrai, Ilya Baran, Olga Sorkine, Hanspeter Pfister, Robert W Sumner, Bernd Bickel, and Markus Gross. Facial Performance Enhancement using Dynamic Shape Space Analysis. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 1, No. 212, pp. 1–12, 2014.

[10] Pablo Garrido, Levi Valgaerts, Ole Rehmsen, Thorsten Thormählen, Patrick Pérez, and Christian Theobalt. Automatic face reenactment. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4217–4224, 2014.

[11] Thibaut Weise, Sofien Bouaziz, Hao Li, and Mark Pauly. Realtime performance-based facial animation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 30, No. 4, p. 1, 2011.

[12] Chen Cao, Qiming Hou, and Kun Zhou. Displaced dynamic expression regression for real-time facial tracking and animation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 33, No. 4, pp. 1–10, 2014.

[13] 山本拓人, 舩冨卓哉, 飯山将晃, 美濃導彦. 少数の制御点により直観的操作が可能な 3 次元顔形状変化モデルの構築. 情報処理学会研究報告, Vol. 2014-CG-154, No. 16, pp. 1–8, 2014.

[14] Taehoon Cho, Jin-ho Choi, Hyeon-joong Kim, and Soo-mi Choi. Emotional Avatars : Appearance Augmentation and Animation based on Facial Expression Analysis. *Applied Mathematics & Information Sciences*, Vol. 469, No. 2, pp. 461–469, 2015.

[15] Bernd Bickel, Markus Gross, Peter Kaufmann, Mélina Skouras, Bernhard Thomaszewski, Derek Bradley, Thabo Beeler, Phil Jackson, Steve Marschner, and Wojciech Matusik. Physical face cloning. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, pp. 1–10, 2012.

[16] Yu Zhang and Terence Sim. Realistic and efficient wrinkle simulation using an anatomy-based face model with adaptive refinement. In *Proceedings of Computer Graphics International Conference*, pp. 3–10, 2005.

[17] Sokyna Al-Qatawneh, Ali Mehdi, and Thamer Al Rawashdeh. 3D Modelling, Simulation and Prediction of Facial Wrinkles. pp. 317–326. Academy & Industry Research Collaboration Center (AIRCC), 2014.

[18] 藤本大三郎. 老化のしくみと寿命. 株式会社ナツメ社, 東京, 2001.

[19] Vicki Bruce. 顔の認知と情報処理. 株式会社 サイエンス, 東京, 1990. 吉川左紀子 訳.

[20] 松村譲兒. 運動・からだ図解 解剖学の基本. 株式会社マイナビ, 東京, 2013.

[21] 内田忠秋. 表情の効用. 文芸社, 東京, 2002.

[22] 越智淳三. 解剖学アトラス. 株式会社 文光堂, 東京, 1990.

[23] John B. Mulliken, Ram Burvin, and Leslie G. Farkas. Repair of Bilateral Complete Cleft Lip: Intraoperative Nasolabial Anthropometry. *Plastic and Reconstructive Surgery*, Vol. 107, No. 2, pp. 307–314, feb 2001.

[24] Mohammad. Al-Qattan, Jelena. Djordjevic, Alexei Zhurov, and Stephen Richmond. Comparison between landmark and surface-based three-dimensional analyses of facial asymmetry in adults. *European Journal of Orthodontics*, Vol. 37, No. 1, pp. 1–12, 2015.

[25] Jeffrey F Cohn. Observer-Based Measurement of Facial Expression With the Facial Action Coding System. *The handbook of emotion elicitation and assessment*, pp. 203–221, 2007.

[26] Paul Ekman and Wallace Friesen. Facial action coding system. 1977.

[27] Jörgen Ahlberg. CANDIDE-3–an updated parameterized face. Report No. LiTH-ISY-R-2326, 2001.

[28] Vinay Bettadapura. Face expression recognition and analysis: the state of the art. arXiv:1203.6722, 2012.

[29] Microsoft. Face tracking. `https://msdn.microsoft.com/en-us/library/jj130970.aspx`. Accessed: 2016-01-12.

[30] John Lewis and Ken Anjyo. Direct-manipulation blendshapes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 30, No. 4, pp. 42–50, 2010.

[31] Chen Cao, Yanlin Weng, Stephen Lin, and Kun Zhou. 3D shape regression for real-time facial animation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 4, p. 41, 2013.

[32] Cormac Flynn, Ian Stavness, John Lloyd, and Sidney Fels. A finite element model of the face including an orthotropic skin model under in vivo tension. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 571–582, 2013.

[33] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 東京, 1990.

[34] 杉浦司, 中村薫. 「Kinect for Windows SDK」実践プログラミング. 株式会社 工学社, 東京, 2013.

[35] 石山塁. 3 次元形状情報を用いた顔認識. 情報処理, Vol. 50, No. 6, pp. 540–547, 2009.

[36] 野村大次, 岩崎博. 有限要素法解析 基礎と実践 –Femap with NX Nastran(体験版)を用いて. 丸善出版株式会社, 東京, 2013.

[37] Xing Liang Xing Liang and S.a. Boppart. Biomechanical Properties of *In Vivo* Human Skin From Dynamic Optical Coherence Elastography. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 57, No. 4, pp. 953–959, 2010.

[38] Jamaluddin Mahmud, Cathy Holt, Sam Evans, Nor Fazli Adull Manan, and Mahmoud Chizari. A parametric study and simulations in quantifying human skin hyperelastic parameters. *Procedia Engineering*, Vol. 41, pp. 1580–1586, 2012.

[39] Cormac Flynn, Andrew Taberner, Poul Nielsen, and Sidney Fels. Simulating the three-dimensional deformation of in vivo facial skin. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 28, pp. 484–494, 2013.

[40] Jeffrey Bischoff, Ellen Arruda, and Karl Grosh. Finite element modeling of human skin using an isotropic, nonlinear elastic constitutive model. *Journal of biomechanics*, Vol. 33, No. 6, pp. 645–652, 2000.

[41] Mohammad Ali Nazari, Pascal Perrier, Matthieu Chabanas, and Yohan Payan. Simulation of dynamic orofacial movements using a constitutive law varying with muscle activation. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 469–482, 2010.

[42] Alice Pui-Lam Hung, Kumar Mithraratne, Mark Sagar, and Peter Hunter. Multilayer Soft Tissue Continuum Model : Towards Realistic Simulation of Facial Expressions. *Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 6, pp. 134–138, 2009.

[43] 三好俊郎. 有限要素法入門 改訂版. 株式会社 培風館, 東京, 1994.

[44] 竹内則雄, 樫山和男, 寺田賢二郎. 計算力学 (第 2 版). 森北出版株式会社, 2012.

[45] Christer Ericson. ゲームプログラミングのためのリアルタイム衝突判定. 株式会社 ボーンデジタル, 東京, 2006. 中村 達也 訳.

[46] Hani Eskandari, Septimiu E Salcudean, Robert Rohling, and Jacques Ohayon. Viscoelastic characterization of soft tissue from dynamic finite element models. *Physics in medicine and biology*, Vol. 53, No. 22, pp. 6569–6590, 2008.

[47] Carroll-Ann Trotman, Julian Faraway, Wolfgang Losken, and John van Aals. Functional Outcomes of Cleft Lip Surgery. Part II: Quantification of Nasolabial Movemen. *The Cleft Palate-Craniofacial Journa*, Vol. 44, No. 6, pp. 607–616, 2007.

[48] Iain Matthews and Simon Baker. Active appearance models revisited. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 60, No. 2, pp. 135–164, 2004.

業 績

- 国内発表

  1. 加藤弘樹, 桑谷達之, 武村浩志, Nadhifa Ayunisa, 細田椋平, 原口亮文, 井手口裕太. バーチャルパタパタ. 第 20 回バーチャルリアリティ学会大会, 東京, 2015.
  2. 加藤弘樹, 黒田嘉宏, 吉元俊輔, 大城理. 顔特徴点と顔モデルの幾何的対応に基づく顔モデル変形. 平成 27 年 電気関係学会関西連合大会, 大阪, 2015.
  3. 加藤弘樹, 黒田嘉宏, 谷川千尋, 吉元俊輔, 大城理, 高田健治. 深度センサを用いた簡易な笑顔表出運動計測. 第 40 回 日本口蓋裂学会総会・学術大会, 大阪, 2016.
  4. 加藤弘樹, 黒田嘉宏, 谷川千尋, 吉元俊輔, 大城理, 高田健治. 皮膚性状の分布を考慮した表情表出シミュレーションを目的とした有限要素解析. 第 16 回日本 VR 医学会学術大会, 大阪, 2016.

- その他

  1. 加藤弘樹. Kinect を用いた表情追跡による三次元顔モデル変形. 河原研 - 大城研合同ゼミ, 豊中, 2016.
  2. 加藤弘樹. 距離画像センサを用いた表情追跡による三次元顔モデル変形. 生体工学領域交流会, 2016.
  3. 加藤弘樹, 黒田嘉宏, 谷川千尋, 吉元俊輔, 大城理, 高田健治. 距離画像センサを用いた表情追跡による三次元顔モデルの粘弾性変形. 第 1 回 大阪大学豊中地区 研究交流会, 大阪, 2016.