

エネルギー科学研究科
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文

題目： バーチャル空間における
 顔表情の動的合成に関する研究

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 楊 大昭

提出年月日： 平成12年2月7日(月)

論文要旨

題目：バーチャル空間における顔表情の動的合成に関する研究

吉川榮和研究室, 楊 大昭

要旨：

コンピュータに代表される機械が社会に浸透するにつれて、人間と機械とのインタフェース、すなわちヒューマンマシンインタフェースが重要視されるようになってきた。本研究では、人間と機械の接点となるインタフェースに人間らしい感情的機能を組み込もうとする新しいヒューマンマシンインタフェースである「アフェクティブインタフェース」の実現に向けた基礎研究として、人間の感情を反映する顔表情の変化を計算機上で合成し、リアルタイムに動画像として表示する動的顔表情合成手法を提案し、実際に顔表情合成システムを試作することを目的として研究を進めた。

本論文では、はじめに、表情合成に関する従来手法を展望し、その特徴、長所、短所を整理したのち、その中で特にアフェクティブインタフェースの出力チャンネルとして適切である筋肉モデル法について述べている。

次に、感情の分類法、表情記述法 FACS(Facial Action Coding System)、表情筋などの感情や表情に関する従来の知見をまとめ、それらを基礎とした動的顔表情合成手法を提案している。提案する動的顔表情合成手法は、(1)感情から顔の3領域における基本表情の組み合わせを決定し、(2)その組み合わせから各表情筋の収縮・弛緩を決定する。そして、(3)表情筋の収縮・弛緩によって引き起こされる顔表面の変形を計算して、(4)それをコンピュータグラフィックスとして提示する、という4段階から構成される。

そして、提案した動的顔表情合成手法に基づいて、実際に試作した表情合成システムの詳細を説明している。試作したシステムには、中立を含めた35種類の感情を入力することが可能であり、それらの表情の表出過程を動画像として表示することができる。

その後、試作した表情合成システムにより自然な表情を表出させるために、各表情表出時の表情筋の収縮率および顎の回転角度の代表値、およびその時間変化を決定するための3つの被験者実験について述べている。実験1では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値を求めた。実験2では、実験1で求めた代表値により合成した顔表情がよく感情を表すかどうかを評価した。実験3では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化、すなわち時間変化パターンと表情表示時間の上限値、下限値、代表値を求めた。

さらに、実験により求めた表情筋の収縮率と顎の回転角度を表情合成システムの筋肉データベースに登録し、表情合成システムの動作を確認するための実験について述べている。実験では、童話をシナリオとしてその内容をコンピュータの合成音声で朗読するとともに、あらかじめシナリオに沿って作成しておいた感情の入力からその表情を動画像として、リアルタイムで表示できることを確認した。

最後に、結論として本研究を総括し今後の課題を挙げている。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 研究の背景	3
2.1.1 アフェクティブインタフェース	3
2.1.2 アフェクティブインタフェースにおける顔表情の利用	4
2.2 従来研究の展望	5
2.3 研究の目的	8
第 3 章 表情合成の手法	11
3.1 表情に関する心理学的知見	11
3.1.1 感情の分類法	11
3.1.2 基本 6 表情	13
3.1.3 顔の 3 領域と複雑な表情	15
3.1.4 表情記述法 FACS と AU	17
3.2 表情筋	17
3.2.1 表情筋の位置と機能	17
3.2.2 AU と表情筋の関連	19
3.3 表情合成手法	21
3.3.1 表情合成手法の概略	21
3.3.2 感情 - 表情変換部	24
3.3.3 瞬目タイミング生成部	24
3.3.4 AU/筋肉運動生成部	27
3.3.5 筋肉モデルシミュレーション部	28
3.3.6 グラフィックエンジン	38
3.4 まとめ	39
第 4 章 表情合成システム (eCOM) の構成	40

4.1	eCOMのハードウェア構成	40
4.2	eCOMのソフトウェア構成	41
4.2.1	感情の入力方法	43
4.2.2	感情 - 表情変換サブシステム	44
4.2.3	瞬目タイミング生成サブシステム	45
4.2.4	AU/筋肉運動生成サブシステム	46
4.2.5	筋肉モデルシミュレーションサブシステム	47
4.2.6	グラフィックエンジン	52
第 5 章	表情筋の収縮率とその時間変化の決定	53
5.1	実験 1: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の決定	53
5.1.1	実験の目的	53
5.1.2	実験方法	53
5.1.3	実験結果	56
5.1.4	実験結果の考察	57
5.2	実験 2: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の評価	67
5.2.1	実験目的	67
5.2.2	実験の方法	67
5.2.3	実験の結果	71
5.2.4	実験結果の考察	72
5.3	表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化の決定	73
5.3.1	実験の目的	74
5.3.2	実験の方法	74
5.3.3	実験の結果	80
5.3.4	実験結果の考察	88
5.4	まとめ	92
第 6 章	eCOMの動作確認実験	93
6.1	実験の目的	93
6.2	実験方法	93
6.2.1	実験時のシステム構成	93
6.3	実験の結果と考察	94

第 7 章 結論	98
謝 辞	101
参 考 文 献	102

目 次

2.1	アフェクティブインタフェースの構成	4
2.2	内挿法による顔表情の合成例	5
2.3	パラメータ法による顔表情の合成例	6
2.4	Performance Driven 法による顔表情の合成例	6
2.5	筋肉モデルによる顔表情の合成例	7
2.6	疑似筋肉モデル法による顔表情の合成例	8
3.1	混合感情	12
3.2	基本 6 表情の例 ^[14]	13
3.3	顔の 3 つの領域	15
3.4	主な表情筋	19
3.5	表情合成手法の処理の流れ	23
3.6	自発性瞬目の発生モデル	25
3.7	電位変動 ΔX の確率密度関数	26
3.8	瞬目間隔ごとに瞬目トリガを出力する手順	27
3.9	AU/筋肉運動生成部での処理	28
3.10	顔表情合成に用いる 3 次元ポリゴンモデル	30
3.11	線形筋モデルの種類とその配置	31
3.12	線形筋モデルの概念図	31
3.13	線形筋の収縮による皮膚表面の変形の様子	33
3.14	本研究で用いる括約筋モデルの種類とその配置	34
3.15	括約筋モデルの概念図	35
3.16	括約筋の収縮による皮膚表面の変形の様子	36
3.17	顎の回転の様子	37
3.18	顎の回転による皮膚表面の点の回転角度 α	37
3.19	顎の回転により影響を受ける皮膚表面の範囲	38
4.1	eCOM のハードウェア構成	40

4.2	表情合成プログラムの処理の流れ	42
4.3	感情入力用インタフェース	43
4.4	感情入力ファイルの例	44
4.5	感情 - 表情変換サブシステムの処理の流れ	44
4.6	瞬目タイミング生成サブシステムの処理の流れ	45
4.7	AU/筋肉運動生成サブシステムの処理	46
4.8	筋肉モデルシミュレーションサブシステム	47
4.9	線形筋の配置	48
4.10	大頬骨筋の影響範囲	49
4.11	括約筋の配置	51
5.1	表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験のシステム構成	54
5.2	表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験の画面構成	55
5.3	表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験の手順	56
5.4	「喜び」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	58
5.5	「驚き」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	58
5.6	「悲しみ」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	59
5.7	「恐怖」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	59
5.8	「嫌悪」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	60
5.9	「怒り」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	60
5.10	筋肉収縮率が極端に大きい「驚き」の顔の合成例	61
5.11	「喜び」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	63
5.12	「驚き」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	63
5.13	「悲しみ」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	64
5.14	「恐怖」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	64
5.15	「嫌悪」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	65
5.16	「怒り」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)	65
5.17	実験 1 で決定した代表値を利用して合成した基本表情画像	66
5.18	表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値を評価する実験の画面構成	68
5.19	表情筋の収縮率と顎の回転角度の評価実験の手順	70
5.20	パラメータセットごとの平均評価点	71
5.21	評価点が低い「喜び」と「驚き」の表情	72

5.22 表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験における画面構成	75
5.23 表情筋収縮率・顎の回転角度の 5 つの時間変化パターン (dk/dt と t の関係)	76
5.24 表情筋の収縮率・顎の回転角度の 5 つの時間変化パターン (k と t の関係)	77
5.25 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験の手順	77
5.26 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験の詳細	79
5.27 中立から喜びの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	81
5.28 中立から驚きの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	81
5.29 中立から悲しみの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	82
5.30 中立から恐怖の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	82
5.31 中立から嫌悪の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	83
5.32 中立から怒りの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	83
5.33 喜びから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	84
5.34 驚きから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	84
5.35 悲しみから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	85
5.36 恐怖から中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	85
5.37 嫌悪から中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	86
5.38 怒りから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値	86
6.1 動作確認実験に用いるシステムの構成	94
6.2 童話の内容に応じた感情入力ファイルと表情画像	95
6.3 童話の内容に応じた感情入力ファイルと表情画像 (続き)	96

表 目 次

2.1	5つの表情合成手法の比較表	9
3.1	基本6表情を表出する際の顔器官の特徴的な動作	14
3.2	顔の3領域での基本表情の組み合わせによって表現される感情	16
3.3	Action Unit とその表情動作	18
3.4	基本6表情を表す AU の組み合わせ	19
3.5	主な表情筋	20
3.6	主な表情筋の配置と機能	20
3.7	AU と表情筋の関連	21
3.8	顔上部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋	29
3.9	顔中央部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋	29
3.10	顔下部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋	29
4.1	各線形筋の影響範囲	50
4.2	各線形筋モデルの影響範囲を表すパラメータの設定値	50
5.1	基本表情を合成する際の各表情筋の収縮率と顎の回転角度	62
5.2	「悲しみ」の表情におけるパラメータセット	69
5.3	表情筋収縮率と顎の回転角度の代表値を評価する実験に用いた評価基準	71
5.4	実験3のアンケート内容	78
5.5	アンケート番号1の回答	80
5.6	アンケート番号2の回答	87
5.7	アンケート番号3の回答	87
5.8	アンケート番号4の回答	87
5.9	中立から基本表情が表出される場合の表情表出時間	91
5.10	基本表情から中立の表情が表出される場合の表情表出時間	91

第 1 章 序論

例えば、以下のシナリオを想像してみよう。

子どもが鉄の釘をコンセントに突っ込もうとし、隣にいた母親がそれを見て子どもを止めようとした。ここで2人の母親の対応を想定する。ひとりには驚きや恐怖に満ちた顔で、「危ない！触らないで！」と大声で叫んだ。もうひとりには冷静に「このようなことをしちゃだめですよ。感電して死んでしまうよ。」と説明した。一体、子どもはどちらの母親から受けた印象が強かったであろうか。おそらく驚きや恐怖の表情をした母親の対応の方が「お母さんがとても怖がっていた。釘をコンセントに挿してはいけない。」という印象をより強く受けたであろう。

人間は、感情を表出する言葉や態度に相手の気持ちを直感的に悟る。先の例では、冷静な説明よりも、自分の感情をそのまま表現する方が、「釘をコンセントに挿すのは危険だ」という母親のメッセージが確実に子どもに伝わり、子どもの記憶に長く印象が残る。人間同士のコミュニケーションは、このような感情の表現と認識によってスムーズに行われる場合が多く見られる。

人間と機械との接点のインタフェースでも、人間らしい感情を表現して、コミュニケーションに活用することが考えられる。ヒューマンインタフェースでの感情処理のあり方によっては、人間とのコミュニケーションをより円滑にでき、人間と機械との親和性が飛躍的に高まると期待される。

人間と機械との接点のインターフェースに、人間らしい感情的機能を積極的に組み込み、人間と機械との高次協調・高次機能発現をはかろうという「アフェクティブインタフェース」の研究が最近ヒューマンインタフェースの分野で芽生えてきた。このアフェクティブインタフェースの研究で、Affective Computing(コンピュータによる感情処理)が注目されている。そこでは、以下の3つが課題となっている。

1. 感情をモデル化して計算する。
2. コンピュータが人間の感情を読み取る。
3. コンピュータが人間らしい感情を表現する。

本研究では、特に、3.のコンピュータが人間らしい感情を表現することに関して、感情を最もよく表す顔表情に着目し、コンピュータグラフィックスによる顔表情の合成を研究の対象とする。すなわち、表情を利用することで、ヒューマンインタフェースで人間らしい感情情報を伝える手段を確立することを目指す。

本研究では、リアルタイムに顔表情を合成し、動画像として表示する動的顔表情合成手法を提案し、実際に動的顔表情合成システムを試作して、その動作を確認することを目的として研究を進めた。ここでは、人間が相手の動的な表情変化を読み取り、相手の感情について多くの情報を得ていることを考え、表情の表出過程や持続時間などを考慮した動的な表情変化に着目した。

以下、本論文の構成を述べる。

まず、第2章では、研究の背景として感情を扱うアフェクティブインタフェースについて述べた後、本研究に関連する従来の表情合成手法を展望し、それらを背景とした本研究の目的を示す。

次に、第3章では、心理学分野における感情と表情に関する知見、および顔表情を引き起こす表情筋の運動についてまとめ、本研究で提案する動的表情合成手法を説明する。

そして、第4章では、第3章で述べた動的表情合成手法に基づいて試作した表情合成システムの詳細について説明する。

さらに、第5章では、人間にとって自然に見える顔表情を合成するために行った主観評価実験の詳細について述べる。

第6章では、試作した表情合成システムの動作確認実験について述べる。

最後に、第7章で本論文のまとめと今後の課題を挙げる。

第 2 章 研究の背景と目的

本章では、人間と機械との接点となるヒューマンインタフェースの研究分野において、人間の認知活動だけでなく感情をも扱うアフェクティブインタフェースの概念、および感情を伝えるための顔表情の利用の有効性を述べた後、顔表情合成に関する従来の研究について触れ、それらを背景とした本研究の目的を述べる。

2.1 研究の背景

2.1.1 アフェクティブインタフェース

人間の脳の活動は、理性的な思考活動だけでなく感情を併せ持っている。従来、人間の認知能力は理性と深く関係していると考えられてきた。しかし、近年の研究では、意思決定、理解力、学習などの認知活動において、感情が非常に重要な役割を果たしていることがわかってきた^[1]。すなわち、人間の行動は、理性的な思考だけではなく、喜怒哀楽といった感情により駆動され、さらに、その行動のパターンにも感情が大きく影響する。これは、人間同士のコミュニケーションにおいても感情が人間の行動を決定する大きな要因となっていることから明らかであろう。そのため、ヒューマンインタフェースの分野においても、感情を扱うアフェクティブインタフェースの概念が導入され、その実現や応用に向けた研究が盛んになってきている。アフェクティブインタフェースは、M.I.T. メディアラボの R.Picard により提唱された Affective Computing^[1] の概念をヒューマンインタフェースに応用したものである。すなわち、アフェクティブインタフェースは、人間と機械の接点となるインタフェースに、人間らしい感情的機能を組み込もうとする新しいヒューマンインタフェースの総称であり、人間の感情を推定したり人間的な感情を表現させる仕組みを機械に組み込んで、より人間に適合するインタフェースを実現しようとするものである。ヒューマンインタフェースに感情を扱う能力を持たせる方法として、(1) コンピュータで人間の感情を読み、それに則した処理を行い、そして、(2) コンピュータが人間らしい感情をインタフェースに提示させる。すなわち、Affective Computing を行うことで、コンピュータを介する人間と人間とのコミュニケーション、コンピュータを介する人間と機械とのコミュニケーショ

ンで、より高次の協調、高次の機能発現が期待される。

図 2.1 にアフェクティブインタフェースの構成例を示す。図のように、アフェクティブインタフェースはコンピュータ側から人間に感情として情報を伝える出力チャンネルと、コンピュータが人間の感情を認識・推定する入力チャンネルから構成される。出力チャンネルでは、コンピュータが提示すべき情報を感情として生成し、顔表情やジェスチャなどの「見えるシグナル」として提示する。一方、入力チャンネルでは、「見えるシグナル」に加え、皮膚電位や脳波などの「見えないシグナル」をも計測することが可能であり、これらのシグナルから人間の感情を推定する。

2.1.2 アフェクティブインタフェースにおける顔表情の利用

人間の顔の表情は、感情を直接表現する。人間同士の対話においては、人々は古来から相手の表情を読み取り、そこから相手の感情などの内面状態を推定することにより、円滑なコミュニケーションを図っている。感情を扱うアフェクティブインタフェースにおいても、顔表情は「見えるシグナル」として非常に重要である。アフェクティブインタフェースに顔表情を利用する際には、図 2.1 に示した情報の伝達される方向から、

- 出力チャンネルでは、表情合成によるコンピュータから人間への感情の提示
- 入力チャンネルでは、コンピュータの表情認識による人間の感情の推定

という2通りがある。本研究室では、これまで後者の入力チャンネルとしての動的表情認識法の研究を行ってきた^[2]。本研究では前者の出力チャンネルとしての動的顔表情合成を研究対象とする。

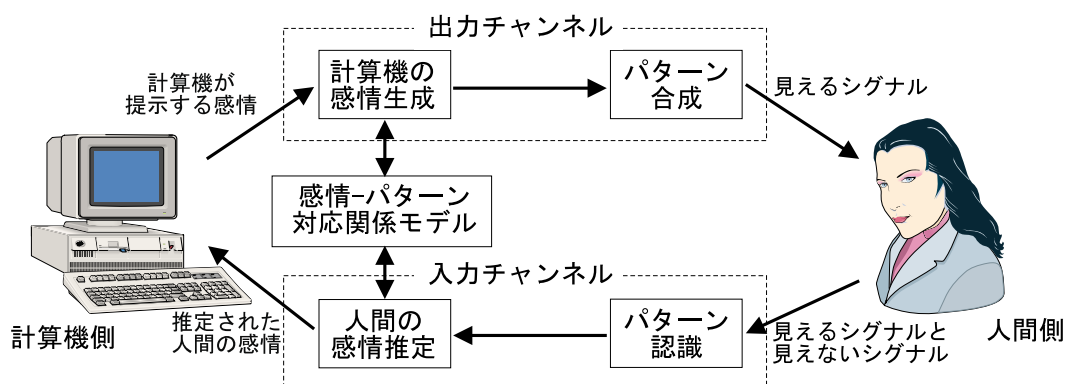


図 2.1: アフェクティブインタフェースの構成

次節では、本研究に関連する研究のレビューとして、これまで表情合成の分野で行われてきた研究についてまとめる。

2.2 従来研究の展望

表情合成とは、表情の表出による顔の変形をコンピュータグラフィックスなどの手段で人間に見える形として表現することである。この分野では、主に、(1) 内挿法、(2) パラメータ法、(3) Performance Driven 法、(4) 筋肉モデル法、および (5) 擬似筋肉法、の 5 つの基本手法がある [3]。以下では、それぞれの方法の特徴、長所、短所について説明する。

(1) 内挿法 [4]

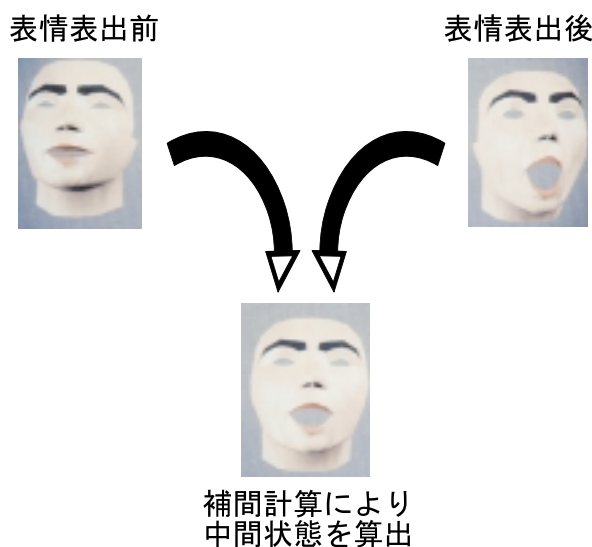


図 2.2: 内挿法による顔表情の合成例

Frederic I. Parke によって提案された手法である。図 2.2 に示すように、この手法では、表情が表出される前と表出された後の顔形状データを用意し、この 2 つの状態から、その間の顔の状態を補間計算により求める。その長所は、表情の表出過程を補間計算で求めることができ、その間の表情を用意する必要がないこと、そして計算アルゴリズムが簡単であり、リアルタイムで表示できることである。一方、その短所として、あらかじめ用意した表情画像の表出過程を算出する手法であり、種々の感情を表出するためには、その表情に応じた顔表情を用意しておかなければならないこと、および補間計算により表情の表出過程を合成するので、表出過程を自然に見せるのが難しいことが挙げられる。

(2) パラメータ法^[5]



図 2.3: パラメータ法による顔表情の合成例

顎の横幅、鼻の長さ、鼻の横幅のような顔の構造に関する情報、および眉毛の位置や顎の回転角度のような表情による顔の変形に関する情報をパラメータとして扱い、パラメータを変化させることにより異なる顔表情を合成する。図 2.3 にパラメータ法の例を示す。この手法の長所は、パラメータを変えるだけで様々な表情を表現でき、感情との関連づけも可能であること、そして、アルゴリズムが簡単で、リアルタイムに表示できることである。一方、その短所としては、人間の実際の顔の構造や表情表出メカニズムと無関係にパラメータを人為的に決定するため、表情を自然に見せるのが難しいこと、そして、パラメータを変化させることによって顔を合成しているので、表出過程を合成するためにはパラメータの時間変化を設定する必要があることが挙げられる。

(3) Performance Driven 法^{[6][7]}

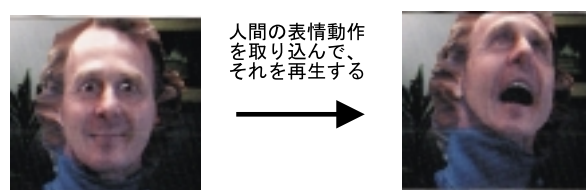


図 2.4: Performance Driven 法による顔表情の合成例

人間の顔表情の変化をモーションキャプチャでコンピュータに取り込み、取り込んだデータをもとに顔表情を合成する。図 2.4 に Performance Driven 法の例を示す。

この手法の長所は、実際の人間の顔表情データを取り込んでいるので、もっとも「本物らしい」顔表情を作り出すことができること、顔表情の表出過程のデータを取り込めば、それを再生することで表情表出過程を合成できること、また、特別な計算を必要としないので、リアルタイムに合成できることである。しかし、その短所は取り込

んだデータの量が膨大になること、および取り込んでいない表情を合成することができないことである。

(4) 筋肉モデル法^{[8][9][10][11]}

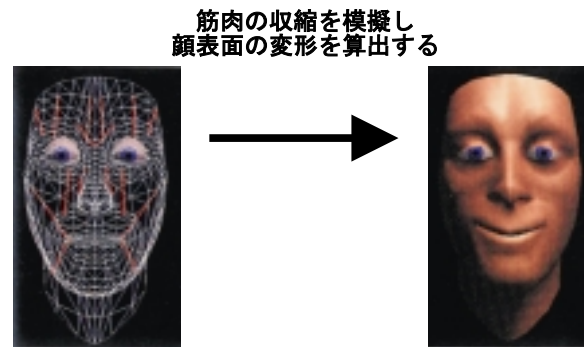


図 2.5: 筋肉モデルによる顔表情の合成例

人間の表情は、表情筋と呼ばれる顔の筋肉の収縮による皮下組織や皮膚表面の変形として現れることに注目し、筋肉の収縮をシミュレーションして、顔表面の変形を算出することによって表情変化を合成する。図 2.5 に筋肉モデル法の例を示す。

筋肉モデル法の長所は、あらかじめ様々な表情に関する顔の形状データを用意する必要がないこと、および人間の顔の解剖学的な構造をシミュレーションしているため、リアルな表情が表現できることである。一方、その短所としては、表情表出過程を合成するためには表情筋の収縮率の時間変化が必要であること、そして、シミュレーションのアルゴリズムによっては計算量が多くなり、表情の表出過程をリアルタイムで合成できない場合があることが挙げられる。

(5) 擬似筋肉モデル法^[12]

「口を開ける」、「瞬きする」などの約 30 表情動作、および異なる顔表情が現れる際にこれらの表情動作の表出する順番を定義し、顔がゴムのような弾性物質でできていると考え、これらの表情動作を定義した順番に表出して、引き起こす顔の変形を算出する。その例を図 2.6 に示す。

この手法の長所は、数種類の表情動作を組み合わせで複雑な表情を合成することが可能であり、あらかじめ表情に関する顔の形状データを用意する必要がないことである。反面、この手法の短所としては、経験に基づく手法であり、自然な表情合成が困難であることと、同じ表情を表す表情動作の組み合わせでも、あらかじめ定義された順番で表出しなければ、異なる表情になってしまうことが挙げられる。

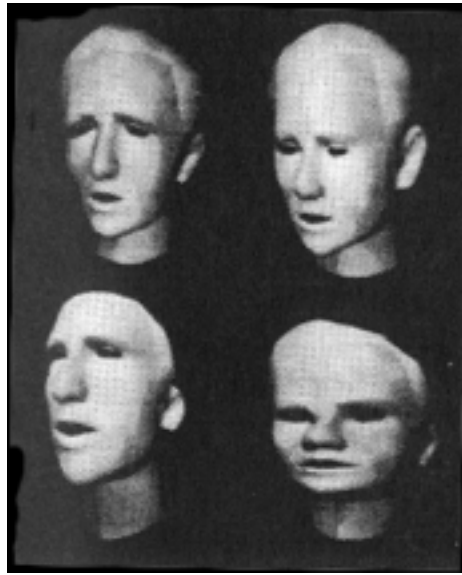


図 2.6: 疑似筋肉モデル法による顔表情の合成例

2.3 研究の目的

本研究では、人間と機械との接点となるヒューマンインタフェースにおいて、感情要因を扱うアフェクティブインタフェースを実現するための基礎研究として、感情を直接表現する顔の表情に着目し、コンピュータからの出力チャンネルとして顔表情の表出過程をリアルタイムに合成して表示する手法を提案することを目的とする。

顔表情合成に関しては、前節で述べたように、様々な手法が提案されている。本研究において、顔表情の合成をヒューマンインタフェースに活用するためには、以下の点を考慮しなければならない。

1. 表情表出過程の提示

人間同士のコミュニケーションにおいて、人間は相手の表情を動的にとらえており、時間とともに微妙に変化していく表情の流れから相手の内面状態を読み取っている。そのため、ヒューマンインタフェースに利用する際にも、表情表出後の顔の状態だけではなく、表情が表出する過程の速度変化や持続時間も非常に重要な要素である。

2. リアルタイム性

コンピュータが提示すべき情報を感情として即座に人間に伝えるためには、リアルタイムに表情を合成できることが必要である。その際には、上記の表情表出過

程も高速に合成し動画として表示しなければならない。

3. 感情と関連付けやすい表情の合成

顔表情をヒューマンインタフェースに利用する目的は、表情そのものの提示ではなく、表情によってコンピュータが本当に伝えたい情報を直感的に人間に伝えることである。そのためには、「眉毛を上げる」や「口を開ける」といった顔の変形だけを合成するのではなく、感情と関連付けやすい表情を合成することが重要である。

4. 自然な表情の合成

表情により感情を正確に伝えるためには、合成する表情が自然なものでなければならない。ここで「自然な」表情とは、実際の人間にある感情が生じたときに不随意的に表出される表情である。驚きなどの感情は、表情動作を誇張することによって、より分かりやすく伝えることも可能ではあるが、意図的に誇張されて表出された表情や、実際の人間では物理的に表出不可能な表情では、伝えたい感情以外の情報も併せて伝達されてしまう可能性があり、アフェクティブインタフェースの出力チャンネルとしては不適當である。

このような観点から、2.2 節で述べた 5 つの合成手法を比較すると表 2.1 のようになる。表では、○が適している、×が適していない、 がどちらともいえない、ことを表す。

表 2.1: 5 つの表情合成手法の比較表

表情合成手法	感情との対応付け	自然さ	表出過程の提示	リアルタイム性
(1) 内挿法	×			○
(2) パラメータ法				○
(3) Performance Driven 法	×	○	○	○
(4) 筋肉モデル法	○	○		
(5) 擬似筋肉モデル法	×	×		○

表 2.1 より、代表的な 5 つの表情合成手法のうち、筋肉モデル法が最も適していると考えられる。ただし、筋肉モデル法により表情の表出過程を合成するためには、表情が自然に見えるような表情筋の収縮量やその時間変化を決めなければならない。そこ

で本研究では、コンピュータの感情を人間に伝えるために、筋肉モデルの手法による顔表情合成をアフェクティブインタフェースの出力チャンネルに活用することを目指し、具体的に以下の2つを研究課題とする。

- 筋肉モデル法による動的表情合成システムを試作する。
- 筋肉モデル法を用いる際の問題点である表情筋の収縮量と収縮速度を決定する。

第 3 章 表情合成の手法

本章では、まず、心理学の分野における人間の表情、および感情と表情の関連に関する知見を述べ、次に、人間の顔表情を作り出す表情筋の概要を説明する。そして、これらの知見に基づき、人間の顔表情をコンピュータグラフィックスとして表現するための「表情筋モデル」を用いた顔表情合成手法について説明する。なお、「表情」と「感情」という言葉は日常でも広い意味で用いられることが多いため混同されやすい。本研究では、「感情」が心的過程であるのに対して、「表情」は単に外見的なものであるとする。すなわち、「表情」とは「感情」によって引き起こされる顔面の形状変化であると考える。

3.1 表情に関する心理学的知見

心理学の分野では、古くから表情および感情に関する様々な研究が行われており、本研究で用いる表情合成手法ではその成果を積極的に活用する。本節では、まず、表情に関する心理学分野での知見についてまとめる。

3.1.1 感情の分類法

ここでは、表情に関連の深い感情の分類法について述べる。

以前から、人間の感情をいくつかのカテゴリに分類する試みが行われ、分類の方法や観点によっていくつか異なる分類法がある。代表的な分類法を以下に挙げる。

- 感情から引き起こされた表情の形態的な特性をもとに分類していく手法。例えば Russell と Bullock は多次元尺度構成法により表情の形態の類似性を基に、感情が「退屈、眠り、満足、嬉しさ、興奮、驚き、恐れ、怒り、嫌悪、悲しみ」に分類されるとしている^[13]。
- 快・不快、注意・覚醒度などのいくつかの感情認知次元を仮定して、感情カテゴリをその相空間に位置づけようとする手法^[13]。
- 感情を「驚き (surprise)、恐怖 (fear)、嫌悪 (disgust)、怒り (anger)、喜び (happiness)、悲しみ (sadness)」の基本 6 感情と呼ばれる 6 つのカテゴリに分類する手

法^[14]。各基本感情を表す顔表情は基本表情と呼ばれる。この分類法は現在感情に関する研究でもっともよく用いられている。

- 基本感情の組み合わせである混合感情として分類する方法。実際の感情が生起する場合には、基本感情が単一で生起することは少なく、むしろいくつかの基本感情が混ざり合って、混合感情として現れる。例えば図 3.1 に示すように、感情を 32 種類へ分類する方法が Plutchik により提案されている^[15]。この分類法では、円の中心部に位置する 8 つの基本感情の組み合わせが混合感情となる。まず、基本感情の一つ外側の円環上にあるのが、隣接する基本感情同士を混ぜ合わせた感情であり、第一次混合感情という。例えば、「恐れ」と「驚き」を混合すると「畏怖」となる。次に二番目の円環上にあるのが、一つ離れた基本感情同士の混合感情、第二次混合感情である。例えば、「恐れ」と「悲しみ」の組み合わせは「絶望」である。同様に、第三次混合感情、すなわち二つ離れた基本感情同士の混合が、一番外側の円環上に示されている。

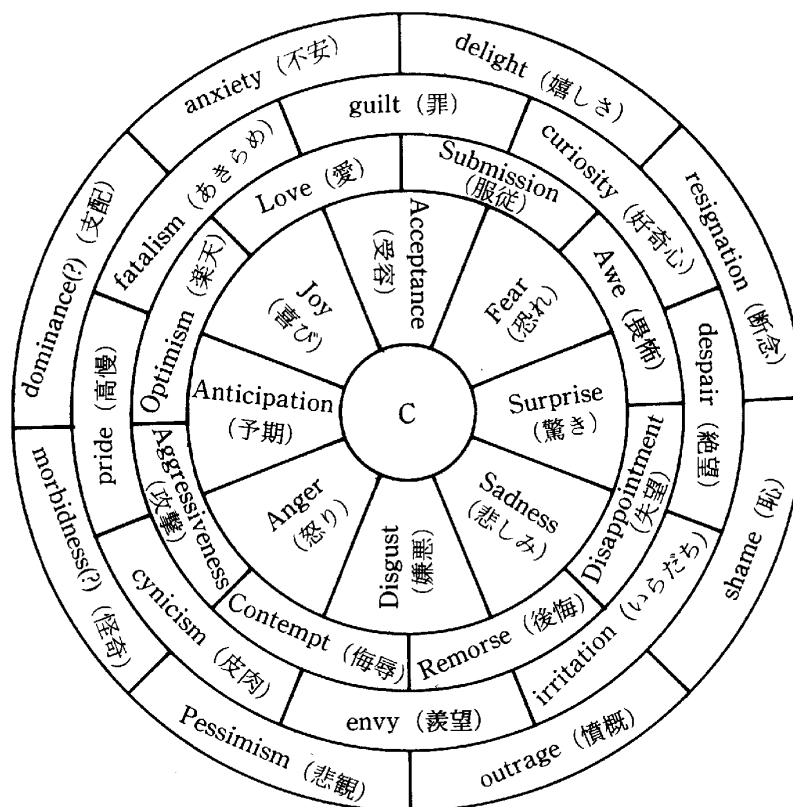


図 3.1: 混合感情

アフェクティブインタフェースの出力チャンネルとしての表情合成では、提示する表情が様々な感情を表せればよいが、本研究では、動的な表情の合成法に重点をおいているため、感情の分類については、上記のうち、最も基本的な分類法である基本6感情への分類法を用いることとする。

3.1.2 基本6表情

基本6表情は、前項で述べた基本6感情、すなわち「驚き (surprise)、恐怖 (fear)、嫌悪 (disgust)、怒り (anger)、喜び (happiness)、悲しみ (sadness)」の6つの感情により引き起こされる表情であり、表情に関連する研究において最も広く用いられている表情の分類法である。基本6表情は人種や文化、性別などに関係なく、ほぼ万国共通であると言われている^[14]。各表情にはそれぞれに特徴的な表情動作が存在し、それによって各表情を識別することができる。表3.1にこれらの特徴的な動作をまとめ、図3.2に基本6表情の例を示す^[14]。

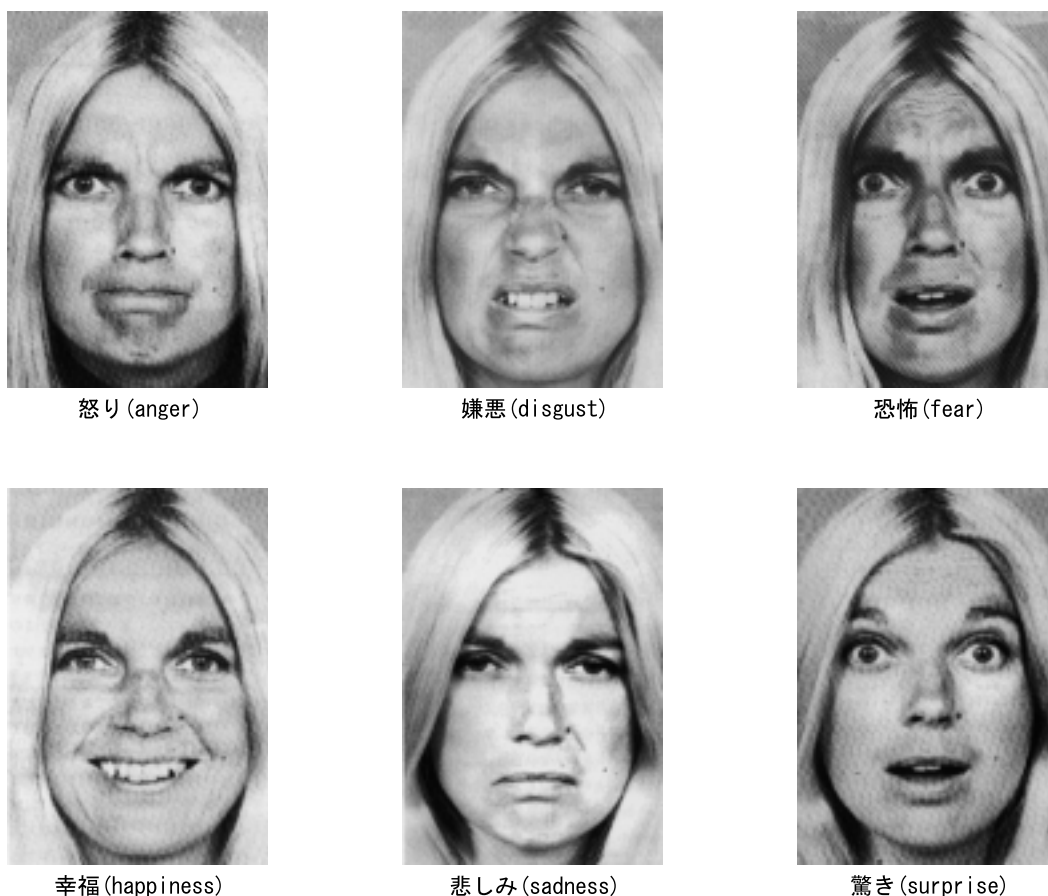


図 3.2: 基本6表情の例^[14]

表 3.1: 基本 6 表情を表出する際の顔器官の特徴的な動作

表情	顔器官	特徴的な動作
驚き	眉	眉が湾曲し全体が引き上げられる。そのため、眉の下の皮膚が引っ張られ、目立つようになる。
	額	水平の皺が現れることがある。
	目	目が大きく見開かれる。上瞼が引き上げられ、下瞼が弛緩する。白目が虹彩の上にも現れる。
	鼻	-
	頬	-
	口	顎が下方に下がり口が開く。唇と歯が引き離されるが、口は緊張しておらず、押し広げられてもいない。
恐怖	眉	全体が引き上げられ、眉の内側が引き寄せられる。
	額	額に水平の皺ができるが、額全体を横切る形にはなっていない。
	目	上瞼が持ち上げられ、白目があらわになる。下瞼が緊張しぴんと張っている。
	鼻	-
	頬	-
	口	口が開き、唇が僅かに緊張し後方に引かれるか、あるいは押し上げられて後ろに引かれる。
嫌悪	眉	-
	額	-
	目	眉が下がり、目の開きぐらゐが狭くなる。下瞼に皺ができ、瞼は押し上げられるがぴんと張ってはいない。
	鼻	鼻の付け根には皺が寄る。
	頬	持ち上げられる。
	口	-
怒り	眉	眉が下がり、内側に引き寄せられる。眉間に皺ができる。
	額	-
	目	上瞼が下がり、下瞼が緊張する。下瞼がやや持ち上がる場合がある。目は見開いて凝視し、出目のように見える。
	鼻	-
	頬	-
	口	唇はその端が真っ直ぐか下がった形でしっかりと押しつけられるように結ばれている、あるいは大声で叫んでいるときのように、四角い形の緊張した開口をしている。
喜び	眉	-
	額	-
	目	目の下や目尻に皺ができる。
	鼻	-
	頬	-
	口	唇の両端が後ろへ引かれ、多少上がっている。
悲しみ	眉	眉の内側の両端が引き上げられる。
	額	-
	目	下瞼の内側の端がやや持ち上げられる。
	鼻	-
	頬	-
	口	唇の両端が下がる。

3.1.3 顔の3領域と複雑な表情

顔表情は、表情筋と呼ばれる顔の筋肉の弛緩・収縮により、皮下組織や皮膚表面の変形として表出される。表情筋の弛緩や収縮により変形される部分によって、顔は互いに独立した動作が可能な以下の3つの領域に分割することができる。

- 上部：眉と額
- 中央部：目と鼻の付け根
- 下部：口と頬



図 3.3: 顔の3つの領域

また、これらの3領域に表出する基本表情の組み合わせによって、複雑な感情を表す表情や感情の隠蔽を示す表情を表すことができる。例えば、図3.3に示すように、顔の上部と中央部が「驚き」の表情を、顔の下部が「喜び」の表情を示しているときに、それは「嬉しさを伴った驚き」の感情を表している。表3.2に顔の3領域に表出している基本表情の組み合わせで表現される感情をまとめる。

表 3.2: 顔の 3 領域での基本表情の組み合わせによって表現される感情

顔の領域			感情
上部	中央部	下部	
驚き	驚き	驚き	驚き
驚き	中立	中立	疑問
中立	驚き	中立	興味
中立	中立	驚き	惚け
驚き	驚き	中立	疑問と驚き
中立	驚き	驚き	仰天
驚き	中立	驚き	麻痺
恐怖	恐怖	恐怖	恐怖
恐怖	中立	中立	心配
中立	恐怖	中立	抑制された恐怖
驚き	恐怖	恐怖	驚きと恐怖 (恐怖強)
驚き	驚き	恐怖	驚きと恐怖 (驚き強)
恐怖	恐怖	驚き	怯え
嫌悪	嫌悪	嫌悪	嫌悪
中立	中立	嫌悪	軽蔑
驚き	嫌悪	嫌悪	不信
怒り	怒り	怒り	怒り
怒り	中立	中立	抑制された怒り
怒り	嫌悪	嫌悪	怒りと嫌悪
怒り	怒り	驚き	厭きれる
怒り	怒り	恐怖	当惑
中立	喜び	喜び	喜び
驚き	驚き	喜び	喜びと驚き
中立	喜び	嫌悪	傲慢
中立	喜び	怒り	隠された怒り
中立	喜び	恐怖	隠された恐怖
悲しみ	悲しみ	悲しみ	悲しみ
悲しみ	悲しみ	中立	弱い悲しみ
悲しみ	中立	中立	抑制された悲しみ
悲しみ	悲しみ	恐怖	悲しみと恐怖
怒り	怒り	悲しみ	悲しみと怒り
悲しみ	悲しみ	怒り	決断
悲しみ	悲しみ	嫌悪	悲しみと嫌悪
悲しみ	悲しみ	驚き	隠された悲しみ

3.1.4 表情記述法 FACS と AU

表情記述法 FACS(Facial Action Coding System)^[16] は Ekman らによって提案された表情記述法である。表情に関連する研究において広く利用されている。FACS では、表情を AU(Action Unit) と呼ばれる解剖学的に独立し、かつ視覚的に識別可能な表情動作の最小単位によって表情を記述する。AU は表 3.3 に示すように、合計 58 個ある。これら AU の組み合わせにより人間のあらゆる表情が記述可能であると言われている。例えば、「喜び」の表情は、AU6(頬を持ち上げる)と AU12(唇端を引っ張り上げる)の組み合わせで表すことができる。表 3.4-(A) に Ekman らの研究による基本 6 表情を表す AU の組み合わせを示す^[16]。しかし、近年、Gosselin らは Ekman らが提案した組み合わせを検証するため、6 人の役者が表出した基本表情を観察して、表 3.4-(B) に示す基本 6 表情を表す AU の組み合わせを提案している^[17]。

Gosselin の研究では、被験者として役者を採用しており、役者とは感情を伝えるために、顔表情を自然に表出するプロであり、Gosselin の実験結果がより自然な表情表出を反映していると考え、本研究では、基本表情と AU との関連について、Gosselin の実験結果を採用する。

3.2 表情筋

表情変化は、顔面皮膚下にある表情筋、および口の開閉を行う咀嚼筋と呼ばれる筋肉の収縮・弛緩により引き起こされる顔面形状変化である。すなわち、この表情筋や咀嚼筋の収縮・弛緩が複雑に組み合わさって、表情が形成される。本研究は、2.3 節で述べたように、この表情筋をモデル化し、計算機上で模擬することによって顔面皮膚の形状を変化させて表情を表出させる表情筋モデルによる表情合成手法に基づいており、以下、本節では、まず、人間の表情を形成するための主な表情筋の種類について説明した後、前節で説明した AU と表情筋との関連を述べる。

3.2.1 表情筋の位置と機能

人間の顔面皮膚下には、図 3.4 に示すように、表情を形成するための 12 種類の主な表情筋がある。表 3.5 は、前述の顔の 3 領域に影響を与える表情筋を領域ごとに分類したものである。また、表 3.6 にこれらの表情筋の配置とその機能をまとめる。

表 3.3: Action Unit とその表情動作

番号	動 作	番号	動 作
1	眉の内側を上げる	31	歯を食いしばる
2	眉の外側を上げる	32	唇を噛む
4	眉を下げる	33	息を吹きかける
5	上瞼を上げる	34	頬を息で膨らます
6	頬を持ち上げる	35	頬を吸い込む
7	瞼を緊張させる	36	舌で頬や唇を膨らます
8	唇どうしを接近させる	37	舌で唇をなめる
9	鼻に皺を寄せる	38	鼻孔を開く
10	上唇を上げる	39	鼻孔を狭める
11	鼻唇溝を深める	41	瞼を力なく下げる
12	唇端を引張り上げる	42	薄目
13	唇端を鋭く上げて頬を膨らます	43	瞼を閉じる
14	えくぼを作る	44	細目
15	唇端を下げる	45	まばたく
16	下唇を下げる	46	ウインクする
17	下顎を上げる	51	左を向く
18	唇をすぼめる	52	右を向く
19	舌を見せる	53	頭を上げる
20	唇を横に引張る	54	頭を下げる
21	首を緊張させる	55	頭を左へ傾ける
22	唇を突き出す	56	頭を右へ傾ける
23	唇を固く閉じる	57	下顎を前へ出す
24	唇を押さえつける	58	下顎を後へ引く
25	顎を下げずに唇を開く	61	左を見る
26	顎を下げて唇を開く	62	右を見る
27	口を大きく開く	63	上を見る
28	唇をかむ (吸い込む)	64	下を見る
29	下顎を突き出す	65	斜視
30	下顎を横へずらす	66	内斜視

注:表中には欠番があるため、合計 58 種類となる

表 3.4: 基本 6 表情を表す AU の組み合わせ

(A) Ekman の定義

表情	AU の組み合わせ
驚き	1, 2, 5, 26
恐怖	1, 2, 4, 5, 20, 26
嫌悪	4, 9, 10
怒り	4, 5, 7, 10, 23
喜び	6, 12
悲しみ	1, 4, 15

(B) Gosselin の実験結果

表情	AU の組み合わせ
驚き	1, 2, 5, 26
恐怖	4, 5, 7, 26
嫌悪	4, 5, 9, 10, 12, 26
怒り	4, 5, 16, 20, 23, 26
喜び	6, 12, 26
悲しみ	1, 4, 7, 15, 26

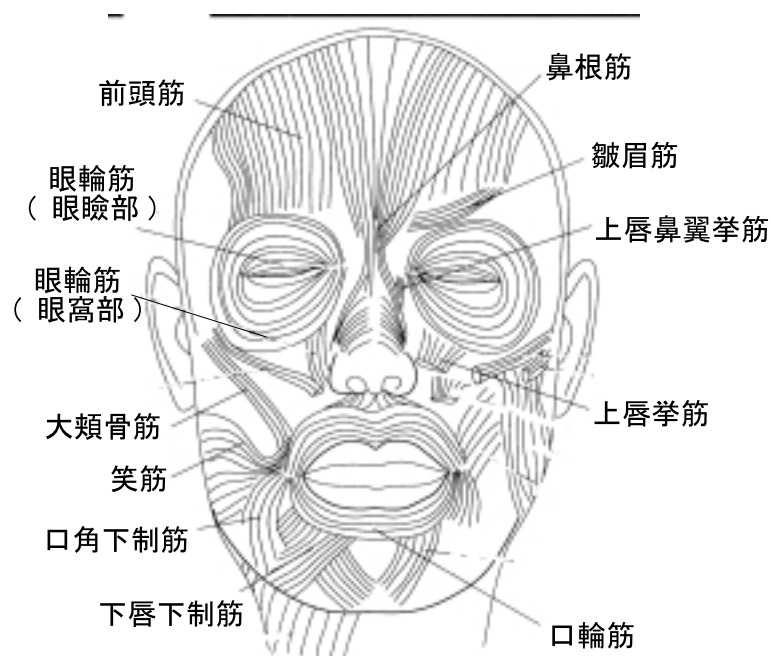


図 3.4: 主な表情筋

3.2.2 AU と表情筋の関連

前項で示した表 3.6 の各表情筋の配置と機能を、3.1.4 項で述べた AU に対応させると表 3.7 のようになる。表 3.7 では、AU19(舌を見せる)のように基本表情に直接関係がないものや表情筋の収縮・弛緩に無関係なものは記載していない。基本 6 表情と AU の関係を示した表 3.4、および AU と表情筋の関連を示す表 3.7 を用いることにより、基本 6 表情がどのような表情筋の弛緩・収縮により引き起こされているかが分かる。

表 3.5: 主な表情筋

顔の領域	表情筋
上部	前頭筋
	鼻根筋
	皺眉筋
中央部	眼輪筋 (眼瞼部)
	眼輪筋 (眼窩部)
下部	大頬骨筋
	上唇挙筋
	上唇鼻翼挙筋
	口輪筋
	笑筋
	口角下制筋
	下唇下制筋

表 3.6: 主な表情筋の配置と機能

表情筋	配置	機能
前頭筋	眉部と眉間から頭頂の皮下まで	眉をつり上げる
鼻根筋	鼻骨下部から眉間まで	眉の内側を下方に引き下げる
皺眉筋	眼窩上縁の内側から眉の内側まで	眉を内側と下方に引張り、ひそめる
眼輪筋 (眼窩部)	眼窩の周りを取り巻く	目をしっかり閉じる
眼輪筋 (眼瞼部)	眼窩の内側、眼瞼にある	瞬目運動
大頬骨筋	頬骨から口角まで	口角を後方かつ上方へ引張る
上唇挙筋	眼窩下縁から上唇の皮膚まで	上口唇を引き上げる
上唇鼻翼挙筋	眼窩下縁から鼻翼の皮膚まで	鼻翼を引き上げ、外鼻孔を拡大させる
口輪筋	口の周りを取り巻く	口の縮小
笑筋	頬骨弓から口角まで	口角を後に引く
口角下制筋	下顎部の下縁から口角まで	口角を下方へ引く
下唇下制筋	下顎の外側面から口唇の皮膚まで	下唇を引き下げる

表 3.7: AU と表情筋の関連

AU	AU を引き起こす表情筋
1 眉の内側を上げる	前頭筋
2 眉の外側を上げる	前頭筋
4 眉を下げる	皺眉筋、鼻根筋
5 上瞼を上げる	眼輪筋 (上眼瞼部)
6 頬を持ち上げる	眼輪筋 (眼窩部)
7 瞼を緊張させる	眼輪筋 (下眼瞼部)
9 鼻に皺を寄せる	上唇鼻翼挙筋
10 上唇を上げる	上唇挙筋
12 唇端を引張り上げる	大頬骨筋
15 唇端を下げる	口角下制筋
16 下唇を下げる	下唇下制筋
20 唇を横に引張る	笑筋
23 唇を固く閉じる	口輪筋
26 顎を下げて唇を開く	咀嚼筋*)

*) 厳密には咀嚼筋は表情筋ではないが、表情表出に重要な役割を果たす。

以上、3.1 節と本節では、表情に関する心理学的知見、表情の表出の解剖学的知見を説明し、表情を記述する FACS に基づく基本 6 表情の AU と表情筋との関連について述べた。次節では、これらの知見に基づいた筋肉モデルによる表情合成手法について述べる。

3.3 表情合成手法

本節では、感情を入力としてそれをコンピュータグラフィックスにより 3 次元の顔モデルの表情として表出するための表情合成手法について述べる。

3.3.1 表情合成手法の概略

感情を表現するための表情をコンピュータグラフィックスとして合成する過程は次の 4 つの段階に分けることができる。

1. 感情から顔の3領域における基本表情の組み合わせを決定する。
2. 顔の3領域における基本表情の組み合わせから各表情筋の収縮・弛緩を決定する。
3. 表情筋の収縮・弛緩によって引き起こされる顔表面の変形を計算する。
4. 顔表面の変形をコンピュータグラフィックスとして提示する。

本研究で用いる顔表情合成手法は、このそれぞれの段階に対応する4つの部分に、瞬目を生成する部分を加えて、以下の5つの部分より構成される。なお、瞬目は表情とはあまり関係はなさそうに見えるが、実際に表情を合成すると、全く瞬目がないと非常に不自然に見えてしまう。そこで、本研究では、瞬目タイミングをモデル化した従来の研究^[19]の成果を利用して瞬目を合成させることとした。なお、瞬目タイミングの生成については、3.3.3項で説明する。

1. 感情 - 表情変換部
2. 瞬目タイミング生成部
3. AU/筋肉運動生成部
4. 筋肉モデルシミュレーション部
5. グラフィックエンジン

この各部より構成される表情合成手法の処理の流れを図3.5に示す。

まず、表情として表出させる感情が感情 - 表情変換部と瞬目タイミング生成部に入力される。感情 - 表情変換部では、感情と表情の対応関係に基づき、入力された感情を表現するために必要な顔3領域のそれぞれに表出される基本表情に変換される。また、瞬目タイミング生成部では、入力された感情が中立であれば、瞬目が発生する瞬目間隔を生成し、後述のAU/筋肉運動生成部に瞬目を発生させるトリガをかける。AU/筋肉運動生成部では、感情 - 表情変換部と瞬目タイミング生成部からの入力に基づき、表情および瞬目をAUの組み合わせに変換し、さらに、収縮させる表情筋およびその収縮量と収縮の時間変化を決定する。筋肉モデルシミュレーション部では、表情筋の収縮および顎の回転をシミュレーションし、3次元ポリゴンモデルで表されている顔表面モデルの変形量を計算する。最後に、グラフィックエンジンで、顔表面モデルを3次元コンピュータグラフィックスとして表示する。

以下では、それぞれの部分の詳細を説明する。

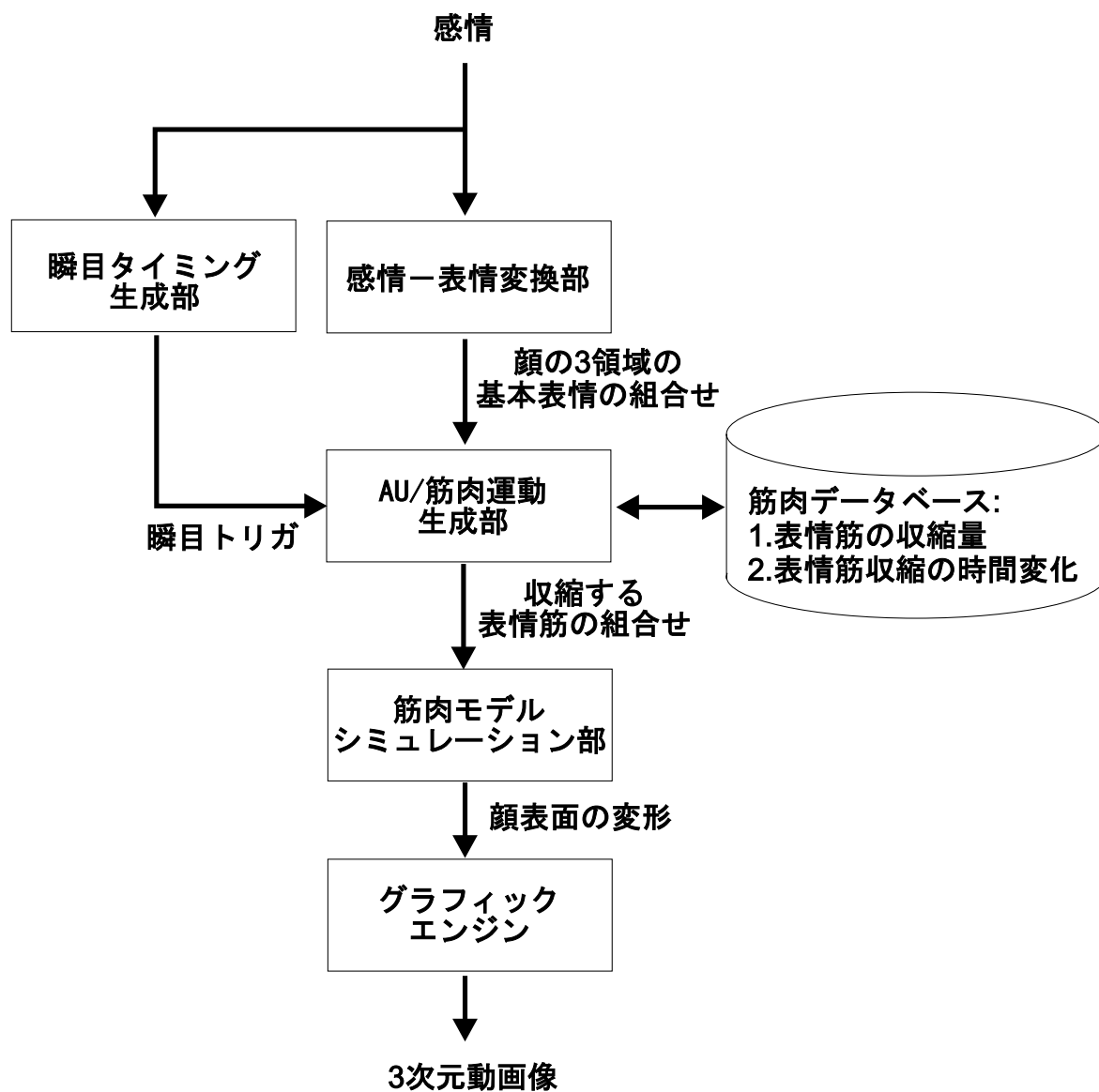


図 3.5: 表情合成手法の処理の流れ

3.3.2 感情 - 表情変換部

感情 - 表情変換部では、表 3.2 に基づき、入力された感情を顔の 3 領域の基本表情にリアルタイムで変換する^[14]。例えば、入力された感情が「軽蔑」の時には、顔の上部の表情が「中立」、中央部が「中立」、下部が「嫌悪」となる。ここでは、入力できる感情を表 3.2 に示したもの、および中立の計 35 種類に限定し、また、各感情の強さも考慮していない。

3.3.3 瞬目タイミング生成部

前述のように、コンピュータグラフィックスで作成した顔をより自然に見せるためには、瞬目の合成は非常に重要であると考えられる。本研究では、瞬目を模擬することによって、顔表情のリアリティが向上すると考え、コンピュータグラフィックスとして顔を合成する際に瞬目も併せて表示する。人間は、普段、毎分数回から数十回の瞬き(瞬目)をしている。瞬目は、その機能の観点から以下のように分類できる^[18]。

- 随意性瞬目 人間の意志により発生する瞬目で、ものをよく見るために目をパチパチしたり、人に何らかの合図を送るために行う。
- 不随意性瞬目 随意にコントロールできない瞬目である。さらに、強い光のような外からの刺激によって引き起こされる反射性瞬目と、誘発刺激がないにも関わらず発生する自発性瞬目に分けられる。普段の生活の際には、自発性瞬目が瞬目の大部分を占める。

本研究では、上記のうち自発性瞬目に着目し、その発生タイミングを模擬することで、コンピュータグラフィックスとして顔表情を合成する際の瞬目を実現する。自発性瞬目の発生原因は角膜の乾燥や塵埃、涙液の涙道への流出抵抗などがあるが、その原因は一定ではなく、またも等間隔に発生するわけではない。そのため、瞬目を自然な形で表現するためには、瞬目を自然に見えるように適切なタイミングで発生させなければならない。なお、ここでは、主として瞬目の発生タイミングのみを対象としている。閉眼開始から閉眼終了までの時間(閉眼時間)は 0.05 ~ 0.3 秒程度と言われており^[18]、本研究では、顔画像表示時の瞬目の閉眼時間を 0.2 秒の一定時間としている。

瞬目の発生タイミングについては、星野らがそれを数理モデルで表現する研究がなされており^[19]、本研究ではその成果を利用することにした。星野らによると、瞬目の発生はドリフトを持つ 1 次元ブラウン運動、すなわち Wiener 過程の一定閾値への初通

過関数によりモデル化できるとしている^[19]。ここでは、まず仮想的な電位である瞬目誘発電位を仮定する。そして、図 3.6 に示すように、瞬目誘発電位 X が 0 から出発し、ある一定時間間隔 Δt ごとに ΔX だけ変化するとする。 X がある閾値 S に達した時点で瞬目が発生すると同時に瞬目誘発電位 X が 0 にリセットされ、この過程を繰り返す。すなわち、 X_i を時刻 i における瞬目誘発電位とすると、

$$\begin{aligned}
 & \text{if } X_i < S \\
 & \quad X_{i+1} = X_i + \Delta X \\
 & \text{if } X_i \geq S \\
 & \quad X_{i+1} = 0; \text{瞬目発生} \\
 & \quad \text{ただし、}\Delta X = (\nu, \sigma^2)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

となる。ここで、電位変動 ΔX の確率密度関数は、図 3.7 に示すように平均値 ν 、分散 σ^2 で表されるガウス分布であり、平均値 ν をドリフトという。

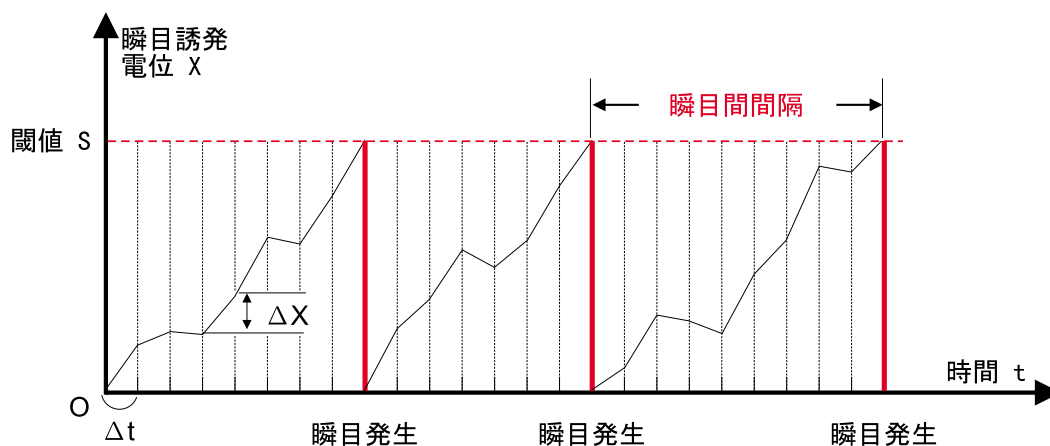


図 3.6: 自発性瞬目の発生モデル

ここで、閾値 S 、ドリフト ν および分散 σ^2 の 3 つのパラメータを以下のように変数変換する。

$$\begin{aligned}
 \mu &= \frac{S}{\nu} \\
 \lambda &= \left(\frac{S}{\sigma} \right)^2
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

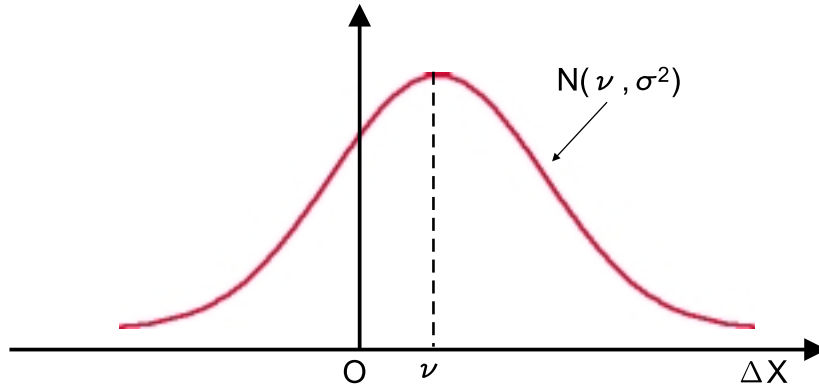


図 3.7: 電位変動 ΔX の確率密度関数

すると、電位変動 ΔX のドリフト ν および分散 σ^2 は下の式によって求めることができる。

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{S}{\mu} \\ \sigma^2 &= \frac{S^2}{\lambda}\end{aligned}\tag{3.3}$$

μ は瞬目間隔の平均値であり、実験的に求めることが可能である。また、 λ は瞬目間隔の分布から推定可能である。本研究では、星野らの実験^[19]に基づき、 $\mu=4.0$ 、 $\lambda=13.94$ を用い、単位時間ごとに発生させるガウス分布の電位変動 ΔX を以下のようなパラメータにより求める。

$$\begin{aligned}\nu &= \frac{S}{4.0} \\ \sigma^2 &= \frac{S^2}{13.94}\end{aligned}\tag{3.4}$$

このように、 ν 、 σ は閾値 S の定数倍で表すことができる。ここで、 $Y_i = X_i/S$ 、 $\Delta Y = \Delta X/S$ として 3.1 式全体を S で割ると、

$$\begin{aligned}if \quad Y_i < 1 \\ Y_{i+1} &= Y_i + \Delta Y \\ if \quad Y_i \geq 1 \\ Y_{i+1} &= 0; \text{瞬目発生}\end{aligned}\tag{3.5}$$

これで、

$$\Delta Y = \frac{\Delta X}{S} = \frac{N\left(\frac{S}{4.0}, \frac{S^2}{13.94}\right)}{S} = N\left(\frac{1}{4.0}, \frac{1}{13.94}\right)\tag{3.6}$$

となり、瞬目間隔は閾値 S に依存せずに計算することが可能である。

このようにして求めたガウス分布の電位変動 ΔX (または、 ΔY) を用いて、図 3.8 に示す手順に従って、瞬目トリガを発生させる。

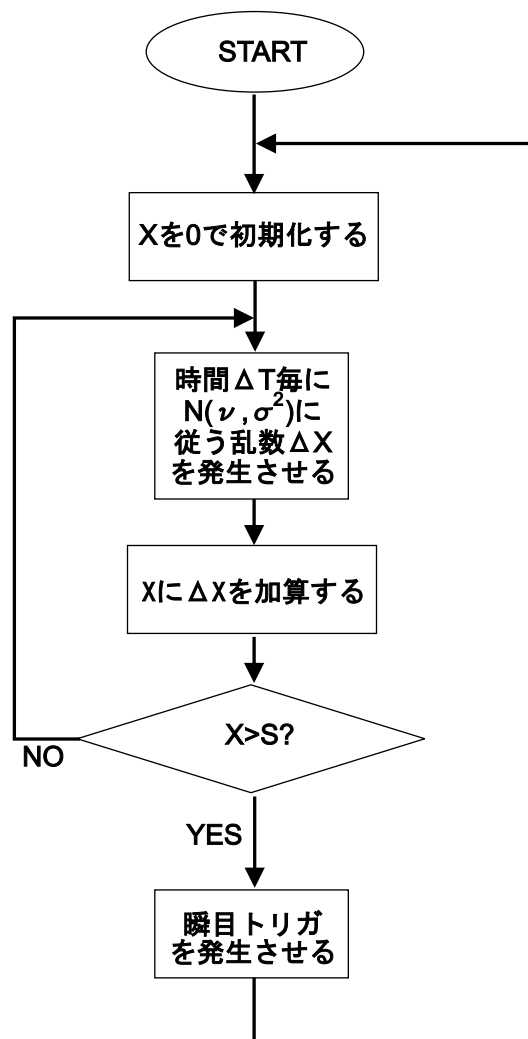


図 3.8: 瞬目間隔ごとに瞬目トリガを出力する手順

3.3.4 AU/筋肉運動生成部

AU/筋肉運動生成部の処理の流れを図 3.9 に示す。ここでは、感情 - 表情変換部から出力される顔の 3 領域での表情、および瞬目タイミング生成部から出力される瞬目トリガに基づき、合成すべき顔表情や瞬目を表現する AU の組み合わせを生成し、さらに、これらの AU を表出するための表情筋の種類とその収縮・弛緩の量と時間変化を決定する。

瞬目タイミング生成部から瞬目トリガが入力された場合には、まず、瞬目を表す AU45

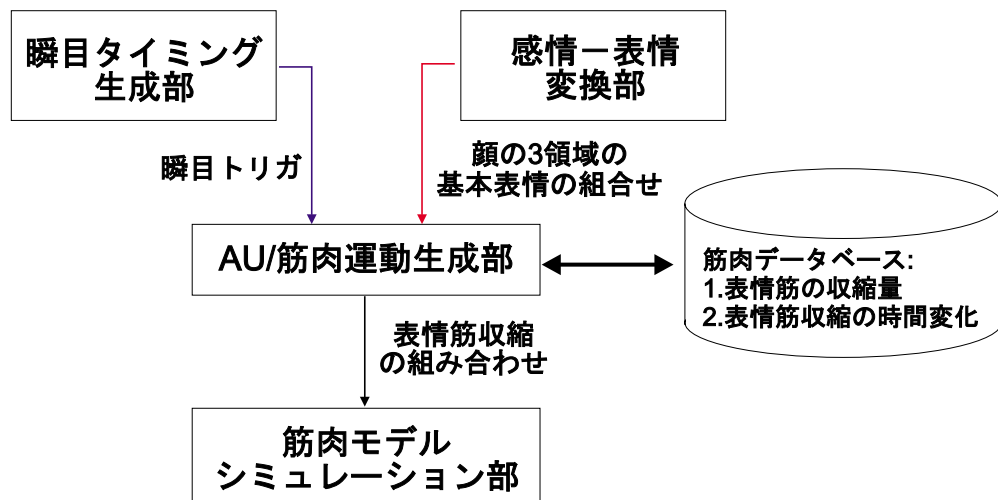


図 3.9: AU/筋肉運動生成部での処理

に変換され、次に AU45 を表出するための筋肉である眼輪筋（上瞼部）の収縮という表情筋運動指令に変換される。瞬目に関する眼輪筋（上瞼部）の収縮率とその時間はそれぞれ、2.9、80ms（閉眼時）、120ms（開眼時）である。

一方、感情 - 表情変換部から出力される顔の 3 領域での表情の情報も同様に、まず表 3.4-(B) に基づいて、それらに対応する AU の組み合わせを生成し、次に表 3.7 に示した対応関係に従って、生成されたそれぞれの AU に対応する表情筋とその収縮・弛緩を決定する。この基本表情 - AU - 表情筋の関係を表 3.8 から表 3.10 にまとめる。

さらに、AU/筋肉運動生成部では、各基本表情が表出される際に収縮・弛緩を行う表情筋の収縮量および収縮時間変化に関するデータを格納する筋肉データベースを参照し、表情筋の収縮量と収縮時間変化を決定する。なお、筋肉データベースに格納するデータは主観評価実験によって決定するが、その詳細は第 5 章に譲る。

3.3.5 筋肉モデルシミュレーション部

筋肉モデルシミュレーション部では、AU/筋肉運動生成部で生成された表情筋の収縮・弛緩に関する情報と後述の数値モデルに基づき、筋肉の収縮と顎の開閉によって引き起こされる顔表面皮膚の変形をシミュレーションする。

まず、本研究で表情合成に用いる顔モデルを説明する。図 3.10 に顔表面の 3 次元ポリゴンモデルを示す。このモデルは、ポリゴンと呼ばれる 882 の三角形から構成されており、その幾何データは、ポリゴンの 3 つの頂点の 3 次元座標である。

表 3.8: 顔上部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋

AU		1 眉の内側を上げる	2 眉の外側を上げる	4 眉を下げる
表情筋		前頭筋 (内側)	前頭筋 (中央、外側)	皺眉筋、鼻根筋
基本表情	喜び	-	-	-
	驚き	○	○	-
	恐怖	-	-	○
	悲しみ	○	-	○
	嫌悪	-	-	○
	怒り	-	-	○

表 3.9: 顔中央部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋

AU		5 上瞼を上げる	6 頬を持ち上げる	7 瞼を緊張させる
表情筋		眼輪筋 (上眼瞼部)	眼輪筋 (眼窩部)	眼輪筋 (下眼瞼部)
基本表情	喜び	-	○	-
	驚き	○	-	-
	恐怖	○	-	○
	悲しみ	-	-	○
	嫌悪	○	-	○
	怒り	○	-	-

表 3.10: 顔下部に表出する基本表情を表す AU およびその動きを引き起こす表情筋

AU		9 鼻に皺寄せ る	10 上唇 を上げる	12 唇端 を引張り 上げる	15 唇端を 下げる	16 下唇 を下げる	20 唇を横 に引張る	23 唇を固 く閉じる	26 顎を 下げて唇 を開く
表情筋		上唇鼻翼挙筋	上唇挙筋	大頬骨筋	口角下制筋	下唇下制	笑筋	口輪筋	顎の回転
基本表情	喜び	-	-	○	-	-	-	-	○
	驚き	-	-	-	-	-	-	-	○
	恐怖	-	-	-	-	-	-	-	○
	悲しみ	-	-	-	○	-	-	-	○
	嫌悪	○	○	-	-	-	-	-	○
	怒り	-	-	-	-	○	○	○	○



図 3.10: 顔表情合成に用いる 3 次元ポリゴンモデル

次に、表情表出時における顔表面の 3 次元ポリゴンモデルの変形を計算するための数理モデルについて説明する。

表情筋は、線形筋と括約筋に分けることができる。本研究では、Waters によって提案された筋肉モデル法^[8]を用い、その収縮や弛緩によって引き起こされる皮膚表面の移動を模擬することによって、3 次元ポリゴンモデルで示された皮膚表面のポリゴン頂点の移動方向や移動量を算出する。また、表情筋ではないが、表情を表出するための重要な要素である口の開閉によって引き起こされる下顎部皮膚表面の移動も顎の回転モデルにより算出する。以下、それぞれのモデルとシミュレーション手法の詳細を説明する。

線形筋モデル

線形筋とは、一方の端が骨に付着し、もう一端が皮膚に付着している線状の筋肉のことである。実際には、筋肉と骨、筋肉と皮膚とは複数の接点で付着しているが、線形筋モデルでは簡略化のためそれぞれ 1 点で付着しているとしてモデル化する。すなわち、線形筋は骨との接点が固定されており、その収縮や弛緩によって皮膚との接点が移動し、それに影響されて周囲の皮膚表面が移動する。図 3.11 に本研究で用いる線形筋モデルの種類とその配置を示す。このうち、前頭筋は、多数の線形筋が並んだシート状の筋肉であるが、本研究では、図に示したように、左右それぞれ、内側、中央、外側の 3 本の線形筋でモデル化する。

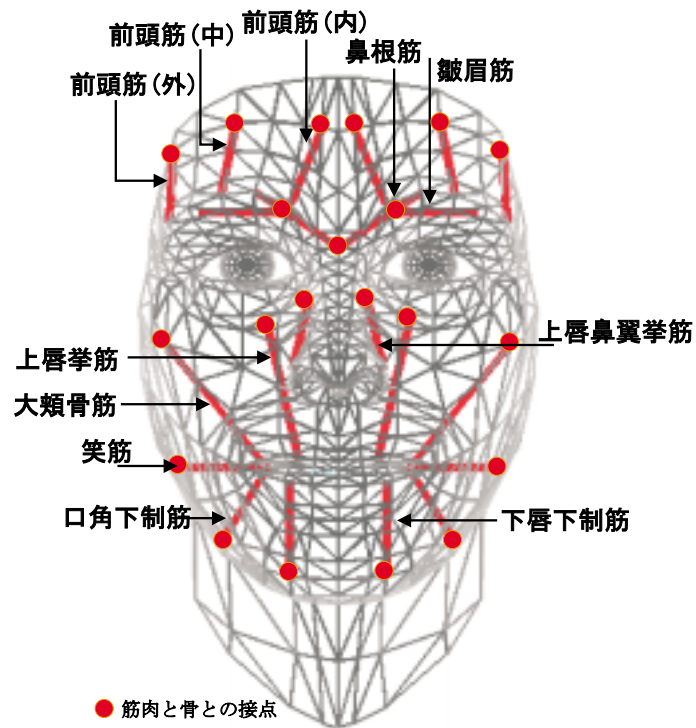


図 3.11: 線形筋モデルの種類とその配置

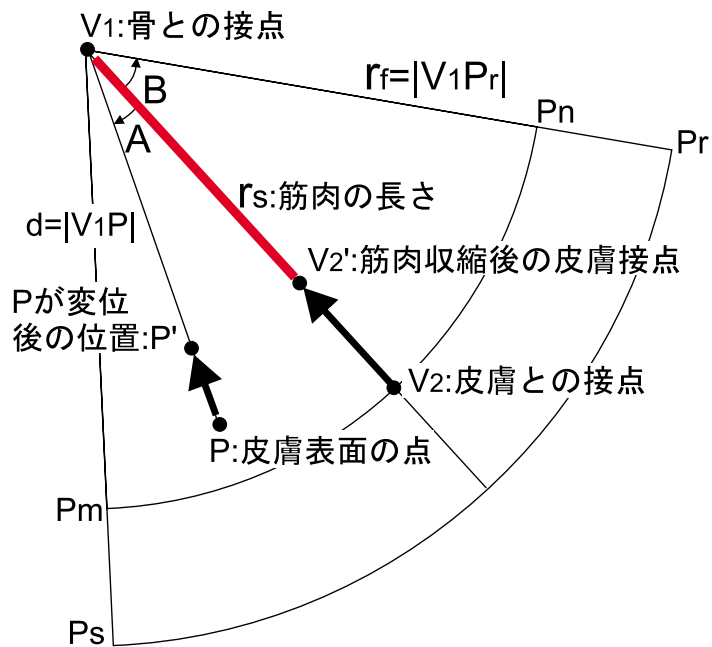


図 3.12: 線形筋モデルの概念図

図 3.12 に線形筋モデルの概念図を示す。図中、 $\overrightarrow{V_1V_2}$ は線形筋を示す。また、図中の記号の意味は以下の通りである。

- V_1 : 筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ と骨との接点。この接点は筋肉の収縮に影響されず、位置が固定されている。
- V_2 : 筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ と皮膚との接点。この接点は筋肉の弛緩や収縮の影響を受けて変位する。例えば、図中では、筋肉の収縮によって接点 V_2 が V'_2 に変位する様子を示している。
- r_s : 収縮前の筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ の標準的な長さ $|\overrightarrow{V_1V_2}|$ 。
- B : 筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ の収縮によって影響を受ける範囲は、骨との接点 V_1 を中心とした扇形 $V_1P_rP_s$ である。 B は $\overrightarrow{V_1V_2}$ を中心とした扇形 $V_1P_rP_s$ の中心角の $1/2$ である。
- r_f : 筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ の収縮によって影響を受ける範囲を表す扇形 $V_1P_rP_s$ の半径。

なお、 V_1 、 V_2 、 r_s 、 B 、 r_f は各筋肉に固有のパラメータである。

いま、筋肉 $\overrightarrow{V_1V_2}$ が収縮して $\overrightarrow{V_1V'_2}$ になった際に、その影響を受ける範囲である扇形 $V_1P_rP_s$ 上のある点 P が V_1 に向かって P' まで変位したとする。線形筋モデルにより皮膚表面の動きを模擬するとは、筋肉が収縮したときの P' の位置を求めることである。

このモデルでは、 P' の位置を以下の原則に従って求める。なお、ここで、 d は P と V_1 との距離、 A は $\overrightarrow{V_1P}$ と $\overrightarrow{V_1V_2}$ 間の角度である。

- 扇形 $V_1P_rP_s$ 外の点は、その筋肉の収縮による影響を受けない。
- 角度 A が 0 の時、 P から P' への変位量が最大で、 A の増加に伴い変位量が減少し、 $A \geq B$ で変位量が 0 となる。
- $|\overrightarrow{V_1P}| = |\overrightarrow{V_1V_2}|$ の時に変位量が最大となり、 $|\overrightarrow{V_1P}|$ が $|\overrightarrow{V_1V_2}|$ より小さくなる、あるいは大きくなるにつれ変位量が減少し、 $|\overrightarrow{V_1V_2}| = 0$ あるいは $|\overrightarrow{V_1V_2}| = r_f$ の時に変位量が 0 になる。

具体的には、筋肉収縮後の P の位置 P' は、以下の式で求める。

$$\overrightarrow{V_1P'} = \overrightarrow{V_1P} - akr \frac{\overrightarrow{V_1P}}{|\overrightarrow{V_1P}|} = \left(1 - \frac{akr}{|\overrightarrow{V_1P}|}\right) \overrightarrow{V_1P} \quad (3.7)$$

ここで、

$$a = \cos \left(\frac{A}{B} \times \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$r = \begin{cases} \cos \left\{ \left(1 - \frac{|\overrightarrow{V_1 P}|}{r_s} \right) \times \frac{\pi}{2} \right\} (P \in V_1 P_n P_m) \\ \cos \left(\frac{|\overrightarrow{V_1 P}| - r_s}{r_f - r_s} \times \frac{\pi}{2} \right) (P \in P_n P_r P_s P_m) \end{cases} \quad (3.9)$$

である。なお、パラメータ k は、筋肉の収縮率であり、

$$k = \frac{|\overrightarrow{V_2 V_2'}|}{|\overrightarrow{V_1 V_2}|} \quad (3.10)$$

以上のように、線形筋 $\overrightarrow{V_1 V_2}$ の収縮によって、皮膚表面の任意の点の変位を求めることができる。線形筋の収縮による皮膚表面の変形例を図 3.13 に示す。

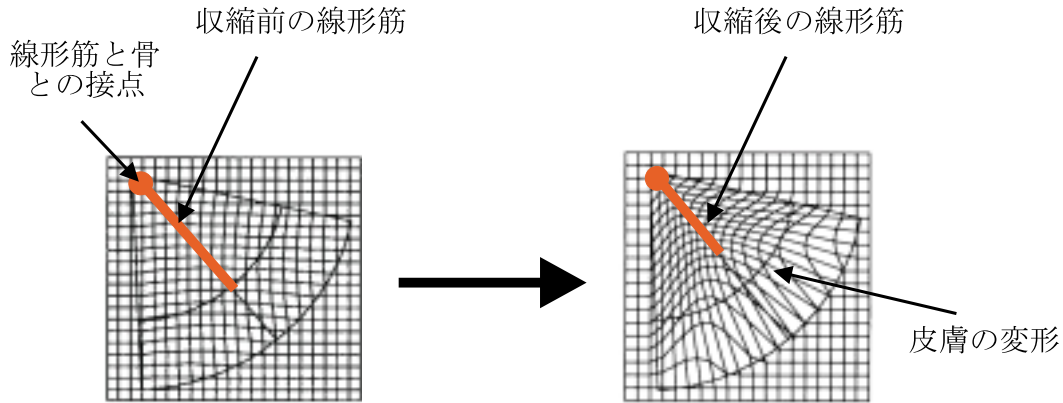


図 3.13: 線形筋の収縮による皮膚表面の変形の様子

なお、以上で説明した線形筋モデルは、筋肉と皮膚表面が同一平面にあるとして説明したが、実際には、筋肉と皮膚表面は同一平面上にあるわけではない。筋肉と皮膚表面が同一平面上にないときは、3次元で考えなければならない。すなわち、上記の説明のうち、筋肉の影響範囲は扇形ではなく、中心角 B 、半径 r_f の球体の一部として考える。

この線形筋モデルにより皮膚表面の動きを算出するためには、筋肉自体のパラメータである V_1 、 V_2 、 r_s 、 B 、 r_f だけでなく、表情の表出過程を自然に見せるための収縮率 k とその時間変化を求める必要がある。従来の研究では、このモデルを使用して様々

な表情を合成することに主眼がおかれており、表情を自然に見せるための筋肉の収縮率やその時間変化は作成者の主観により定められていた。本研究でも、この収縮率とその時間変化を被験者による主観評価実験により求めることで、より自然な表情表出の実現を目指す。この詳細は5章で述べる。

括約筋モデル

括約筋は皮膚との接点を持たない環状の筋肉であり、その収縮や弛緩によってその周囲の皮膚表面が移動する。図 3.14 に本研究で用いる括約筋モデルの種類とその配置を示す。このうち、眼輪筋(眼窩部)は、半楕円形である。括約筋のシミュレーション方法は線形筋の場合と異なる。本研究では、Waters が提案したように、括約筋を楕円としてモデル化し、その収縮によって筋肉の周辺の皮膚の変位を求める。

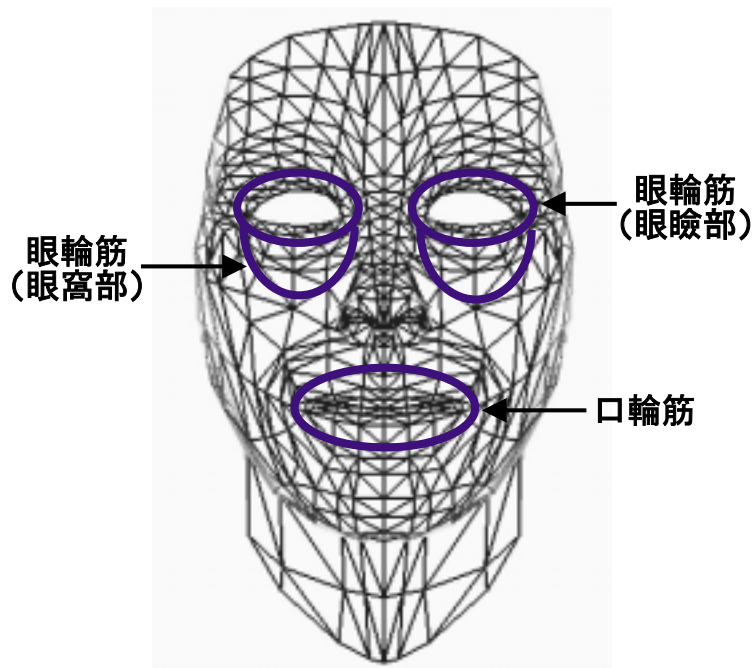


図 3.14: 本研究で用いる括約筋モデルの種類とその配置

図 3.15 に括約筋モデルの概念図を示す。括約筋は、中心が O 、長軸が $2l_x$ 、短軸が $2l_y$ の楕円形としてモデル化する。筋肉の収縮によりこの楕円形が O を中心として、長軸・短軸ともに同じ割合で縮小する。なお、中心位置 O 、長軸 $2l_x$ 、短軸 $2l_y$ は筋肉自体のパラメータである。

このモデルでは、括約筋の収縮による皮膚表面の変位量を以下の原則に従って求める。

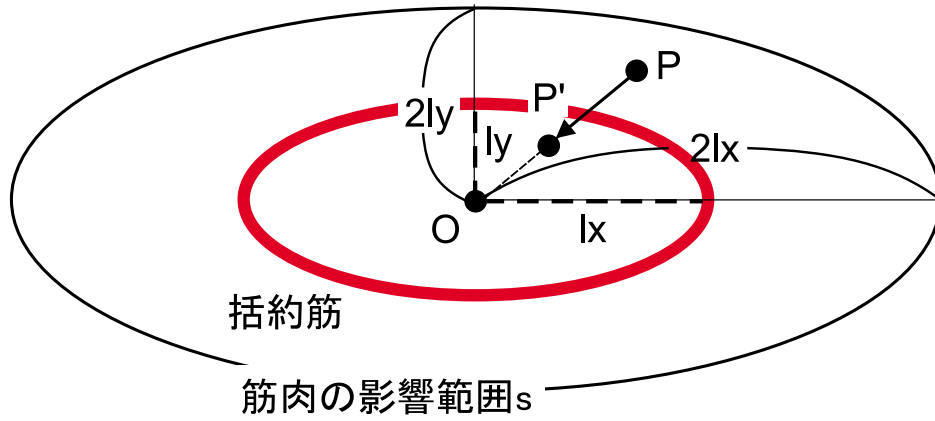


図 3.15: 括約筋モデルの概念図

- 中心 O 、長軸 $2l_x$ 、短軸 $2l_y$ の楕円形で表される括約筋は、その収縮により、中心 O 、長軸 $2(1-k)l_x$ 、短軸 $2(1-k)l_y$ の楕円形となる。ここで、 k は筋肉の収縮率である。
- 括約筋の収縮によって皮膚表面が変位する範囲は、中心が O 、長軸が $4l_x$ 、短軸が $4l_y$ の楕円内であり、その範囲外は影響を受けない。
- 範囲内の皮膚上にある任意の点 P は、括約筋の収縮により、 O に向かって変位する。

具体的には、以下の式によって筋肉収縮後の点 P の位置 P' を求める。

$$\overrightarrow{OP'} = \overrightarrow{OP} - 2 \cdot k \cdot f \cdot \frac{\overrightarrow{OP}}{|\overrightarrow{OP}|} \quad (3.11)$$

ここで、 P の位置を $P(P_x, P_y)$ とすると、 f は、

$$f = 1 - \sqrt{\left(\frac{P_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{P_y}{l_y}\right)^2} \quad (3.12)$$

である。また、 k は括約筋の収縮率を表すパラメータである。

以上のように、括約筋の収縮によって、皮膚表面の任意の点の変位を求めることができる。括約筋の収縮による皮膚表面の変形例を図 3.16 に示す。

なお、以上で説明した括約筋モデルは、筋肉と皮膚表面が同一平面にあるとして説明したが、実際には、筋肉と皮膚表面は同一平面上にあるわけではない。筋肉と皮膚表面が同一平面上にないときは、線形筋モデルと同様に 3 次元で考えなければならない。

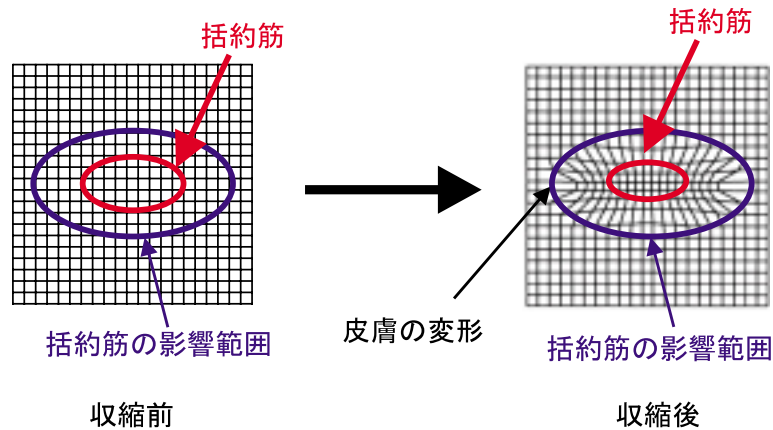


図 3.16: 括約筋の収縮による皮膚表面の変形の様子

い。すなわち、上記の説明のうち、皮膚表面上の点 P を括約筋がある平面上に射影して考える。そして射影した平面上で筋肉の収縮による移動量を考え、その移動量と同じだけ皮膚表面上の点 P を移動させる。

前述の線形筋モデルと同様に、筋肉の収縮率 k とその時間変化を主観評価実験により決定する。この実験の詳細は第 5 章で述べる。

顎の回転モデル

表 3.10 からわかるように口の開閉はすべての基本表情で表出されており、表情を合成する際に重要な役割をはたす。しかし、口の開閉は、表情筋の収縮による顔表面皮膚の変位ではないので、前述のような筋肉モデルを用いた線形筋や括約筋をシミュレーションする方法では、それによる皮膚表面の移動を合成できない。そこで、図 3.17 に示すように、下顎骨がその最上点を支点として回転することで口が開閉するという点に着目し、2.2 項で紹介したパラメータ法を用いて皮膚表面の動きを模擬する。具体的な方法を以下に示す。

下顎骨は、その最上点を中心にその全体が回転するが、顎の外側の皮膚全体が下顎骨と同じように回転移動すると口の開閉が不自然に見える。顎先の皮膚は下顎骨の回転と同じように移動するが、下顎骨自体が筋肉や皮下脂肪に覆われているため、頬の部分はあまり移動しない。そこで、図 3.18 に示すように、下顎骨の回転角が θ であるとき、顎の中心線上の皮膚の回転移動角度を θ 、口の両端の皮膚の回転移動角を $\theta/3$ 、下顎の両端の皮膚の回転移動角度を 0 とする。このようにすれば、下顎骨の回転による口の開閉が自然に見えるとされている^[20]。具体的には、下顎骨の回転角度 θ 、およ

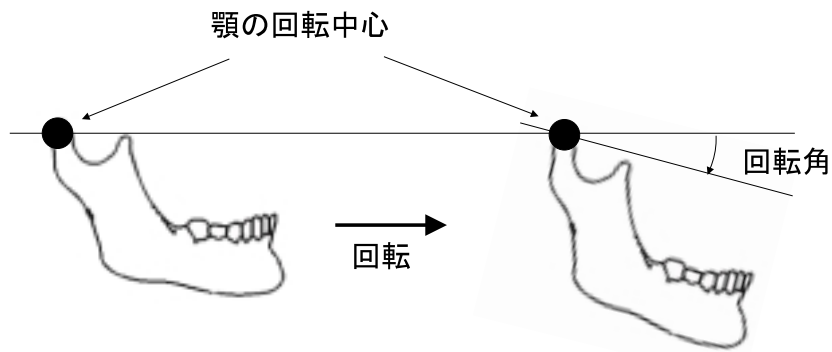


図 3.17: 顎の回転の様子

び中心線と皮膚上の点との距離 d により、以下の式でその皮膚上の点の回転移動角度 α 決定する。

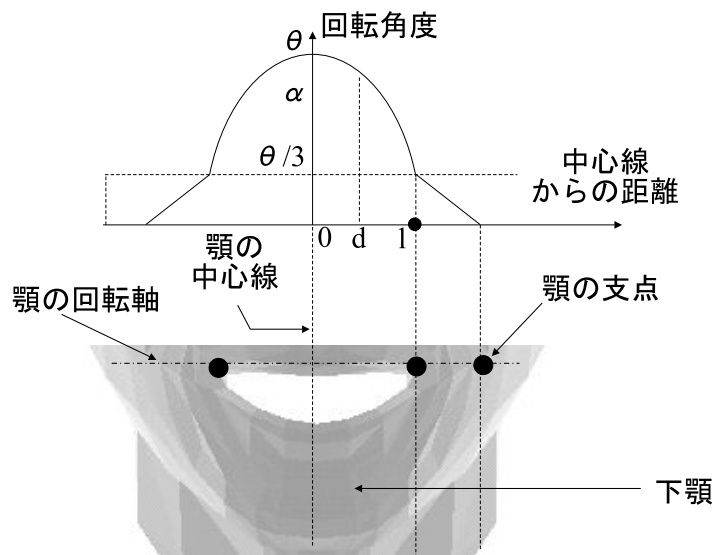


図 3.18: 顎の回転による皮膚表面の点の回転角度 α

$$\alpha = \begin{cases} \theta \cdot \sqrt{1 - \frac{8d^2}{9l^2}} & (0 \leq d < l) \\ \frac{(d - L) \cdot \theta}{3 \cdot (l - L)} & (l \leq d \leq L) \end{cases} \quad (3.13)$$

なお、下顎骨の回転による顔面皮膚表面の影響範囲は、口の開閉に伴う皮膚表面の動きを考え、図 3.19 に示すように口の両端から左右の耳の下部への線分より下の顔面部分とする。

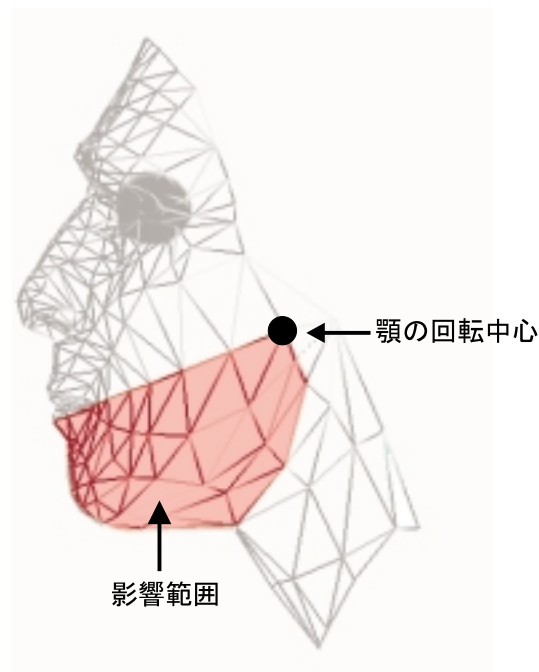


図 3.19: 顎の回転により影響を受ける皮膚表面の範囲

上記のモデルにより自然な顔表情を合成するためには、下顎骨の回転角度とその時間変化を決める必要があり、本研究では、線形筋モデルや括約筋モデルと同様に、被験者による主観評価実験により決定する。実験の詳細は5章で述べる。

以上で述べた線形筋モデル、括約筋モデル、顎の回転モデルにより、表情筋の収縮や口の開閉に伴う3次元ポリゴンモデルの各頂点の移動量を計算する。また、複数の筋肉や顎の回転から影響を受ける頂点は、それぞれの移動量を加算したものを移動量とする。

3.3.6 グラフィックエンジン

グラフィックエンジンは、筋肉モデルシミュレーション部で算出したポリゴンモデルの頂点の座標変化を実際にコンピュータグラフィックスとして表示する。動的顔表情合成のグラフィックエンジンとして必要な仕様は以下のものである。

- 3次元ポリゴンモデルを表示する機能を有すること。
- 視点位置の変更機能を有すること。
- ポリゴンモデルの移動、回転、拡大、縮小を行う機能を有すること。

- テクスチャ(ポリゴンモデルに画像イメージを貼り付ける)機能を有すること。
- 顔の3次元ポリゴンモデルを毎秒20フレーム以上の描画速度で表示できること。

現在では、上記の仕様を満たすグラフィックエンジンは一般に市販されており、本研究の表情合成に利用することが可能である。

3.4 まとめ

以上、本章では、基本6表情や表情記述法 FACS など感情や表情に関する心理学的知見と表情筋の弛緩・収縮という生理学的現象を利用して、感情を表現するための表情合成手法を述べた。入力された感情から表情をコンピュータグラフィックスとして表現する際には、まず(1)入力された感情に応じて顔の3領域の基本表情を生成し、次に(2)基本表情からどの表情筋を弛緩・収縮させるかを決める。また、同時に(3)入力された感情が中立の場合には、自然に見せるための自発性瞬目のタイミングを生成する。そして(4)筋肉モデルあるいは口の開閉モデルにより、3次元ポリゴンモデルとして表現される顔表面の変形を計算する。最後に(5)グラフィックエンジンにより顔表面の変形を動画像として表示する。

次章では、本章で述べた表情合成手法を実現するための表情合成システムについて述べる。

第 4 章 表情合成システム (eCOM) の構成

本章では、第3章で述べた顔表情合成手法に基づいて試作した、expression COMposer (eCOM) と呼ぶ、リアルタイム表情合成システムについて述べる。

4.1 eCOMのハードウェア構成

図 4.1 に eCOM のハードウェア構成を示す。eCOM は以下のハードウェアにより構成されている。

- グラフィックワークステーション OCTANE MXE R10000/250MHz (SGI 社製)
- 21 インチディスプレイ (SGI 社製)
- キーボード、マウス

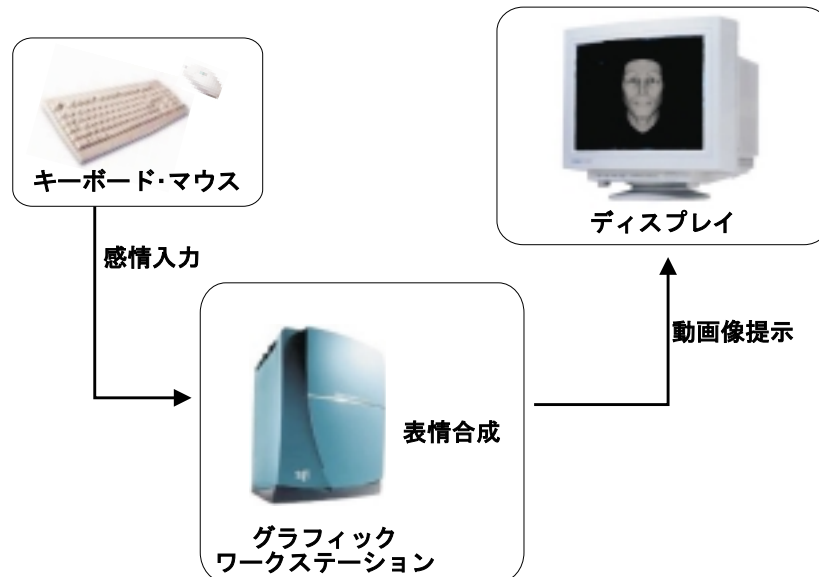


図 4.1: eCOM のハードウェア構成

グラフィックワークステーションには、3次元動画像を高速に生成することが可能な専用グラフィックボードが装備されている。生成された顔表情の動画像は、ディスプレイに表示される。また、キーボードやマウスはeCOMへの感情入力に用いる。

4.2 eCOMのソフトウェア構成

eCOM は以下のソフトウェアから構成されている。

- 本研究で試作したリアルタイム表情合成プログラム
- 3次元グラフィックスライブラリ OpenGL

リアルタイム表情合成プログラムは3.3節で述べた表情合成手法のグラフィックエンジン以外の各部に対応した次の4つのサブシステムからなる。

1. 感情 - 表情変換サブシステム
2. 瞬目タイミング生成サブシステム
3. AU/筋肉運動生成サブシステム
4. 筋肉モデルシミュレーションサブシステム

図4.2にリアルタイム表情合成プログラムの処理の流れを示し、各サブシステムでの処理の概要を説明する。

まず、キーボードやマウスにより顔表情として表示する感情を感情 - 表情変換サブシステムと瞬目タイミング生成サブシステムに入力する。感情 - 表情変換サブシステムでは、感情と表情の対応関係に基づき、入力された感情を表現するための顔3領域のそれぞれに表出される基本表情に変換する。

また、瞬目タイミング生成サブシステムでは、入力された感情が中立であれば、瞬目が発生する瞬目間隔を生成し、生成した時間間隔でAU/筋肉運動生成サブシステムに瞬目を発生させるためのトリガをかける。

AU/筋肉運動生成サブシステムでは、感情 - 表情変換サブシステムと瞬目タイミング生成サブシステムからの入力に基づき、表情および瞬目をAUの組み合わせに変換し、さらに、収縮させる表情筋、およびその収縮量と収縮の時間変化を決定する。

筋肉モデルシミュレーションサブシステムでは、表情筋の収縮および顎の回転をシミュレーションし、3次元ポリゴンモデルで表されている顔表面モデルの変形量を計算する。最後に、グラフィックエンジンであるOpenGLおよびグラフィックボードを用いて、顔表面モデルを3次元コンピュータグラフィックスの動画像として表示する。

以下では、まず、eCOMにおける感情の入力方法について説明した後、それぞれのサブシステムにおける処理の詳細を述べる。

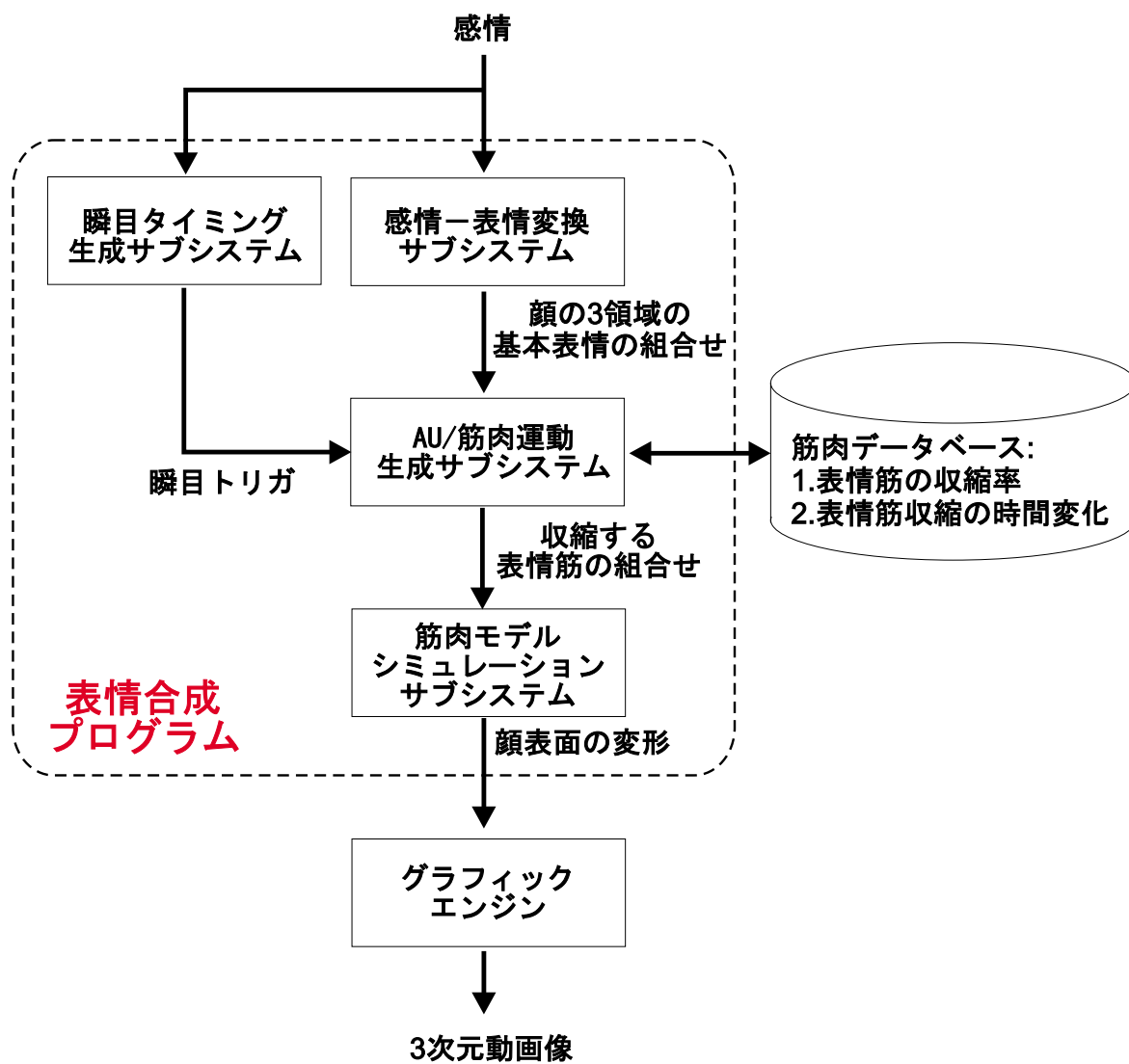


図 4.2: 表情合成プログラムの処理の流れ

4.2.1 感情の入力方法

eCOM が顔表情として表現できる感情は、表 3.2 に示した 34 種の感情と「中立」の合計 35 種類である。ただし、eCOM では感情の種類のみを対象とし、その強さを表現することはできない。

アフェクティブインタフェースとして eCOM を利用するためには、コンピュータが生成する感情を入力できる機構が必要であるが、本研究では、eCOM を単独のシステムとして試作するため、eCOM への感情入力機構を独立に付加した。具体的には、以下の 2 つの方法による。

- GUI(Graphical User Interface) による入力
- ファイルからの入力

GUI入力

GUI 入力は図 4.3 に示す感情入力用インタフェースを用いる方法である。図中の 3:感情リストから顔表情として表示させたい感情をマウスクリックにより 1 つ選択し、さらに、2:表出速度選択ボタンをマウスクリックにより、表情表出速度を速い、普通、遅いのうちから 1 つ選択し、1:入力ボタンを押すことで選択した感情が入力される。この入力方法では、ユーザの選択に従って随時表情を表出させることができる。なお、この表情表出速度は、各感情によってあらかじめ設定されており、その設定方法については、第 5 章で述べる。

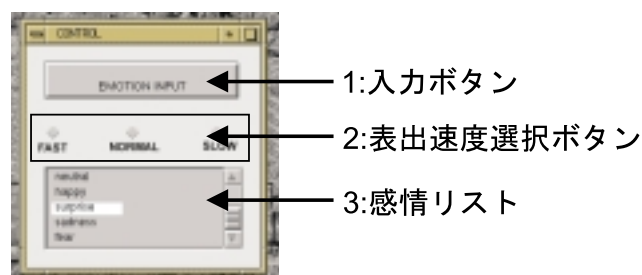


図 4.3: 感情入力用インタフェース

ファイルからの入力

ファイルから表示する感情を入力する場合は、図 4.4 に示す例のように、各行に

「感情 感情持続時間 (秒単位) 表出速度」

の形式で記述したファイルを読み込む。ファイルは、先頭から順に読み込まれ、順に3次元ポリゴンの顔モデルの表情として表出される。なお、表出速度は、1～3の数字であり、1:速い、2:普通、3:遅いのいずれかを記述する。ファイルからの感情入力方法は、例えば、あらかじめ製作したシナリオに沿って顔表情を合成する場合に利用する。

驚き	0.6	1
恐怖	1.2	1
中立	10.0	3
驚き	0.6	1
喜び	3.0	2
.		

図 4.4: 感情入力ファイルの例

4.2.2 感情 - 表情変換サブシステム

図 4.5 に感情 - 表情変換サブシステムの処理の流れを示す。

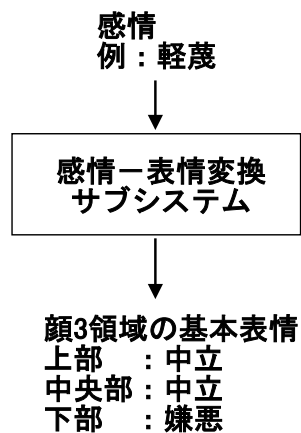


図 4.5: 感情 - 表情変換サブシステムの処理の流れ

感情 - 表情変換サブシステムでは、表 3.2 に基づき、入力された感情を顔の 3 領域の基本表情に変換する。例えば、入力された感情が「軽蔑」の場合には、顔の上部の表情が「中立」、中央部が「中立」、下部が「嫌悪」となる。この変換はリアルタイムで実行される。

4.2.3 瞬目タイミング生成サブシステム

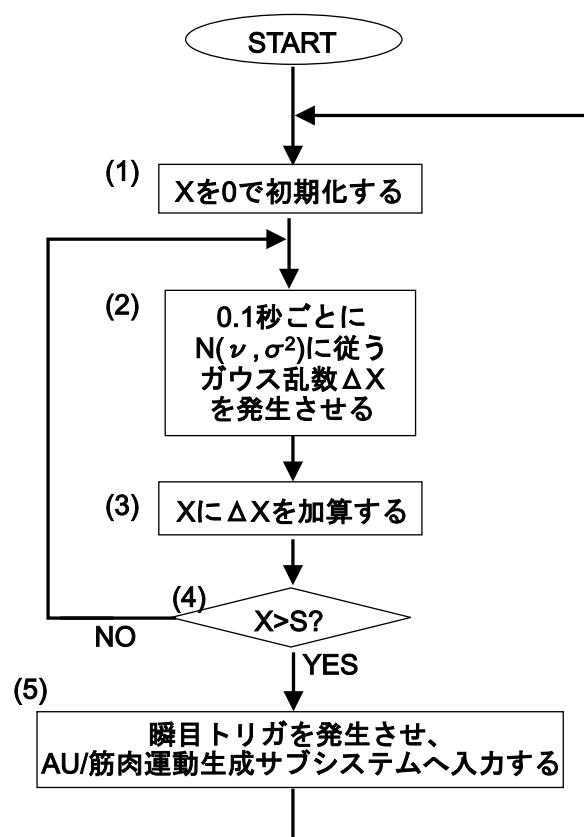


図 4.6: 瞬目タイミング生成サブシステムの処理の流れ

図 4.6 に瞬目タイミング生成サブシステムの処理の流れを示す。

瞬目タイミング生成サブシステムでは、3.3.3 項で述べたように、感情入力が中立である場合に、星野らが提案した数理モデル^[19]を利用して、自発性瞬目の発生タイミングを模擬し、瞬目を発生させるトリガを AU/筋肉運動生成サブシステムへ入力する。まず、(1) 仮想的な瞬目誘発電位 X を 0 に初期化し、(2) 0.1 秒ごとに $N(\nu, \sigma^2)$ のガウス分布に従う乱数 ΔX を発生させる。そして、(3) X に ΔX を加算し、(4) X がある閾値 S を越えれば (5) 瞬目トリガを発生させ、(1) に戻る。 X が S を越えないときは (2) に戻

り、さらに乱数 ΔX を発生させる。

なお、 $N(\nu, \sigma^2)$ のガウス分布に従う乱数は乱数は Box-Muller 法^[21] により発生させる。具体的には、0～1 までの一様乱数 u_1 、 u_2 を発生させ、以下の式により ΔX を求める。

$$\Delta X = \nu + \sigma \cos 2\pi u_1 \sqrt{-2 \ln u_2} \quad (4.1)$$

4.2.4 AU/筋肉運動生成サブシステム

図 4.7 に AU/筋肉運動生成サブシステムの処理の流れを示す。

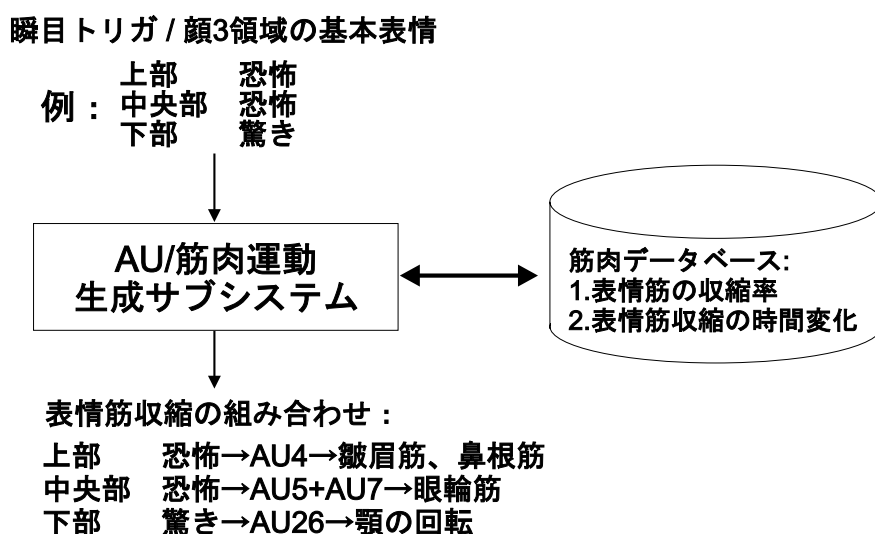


図 4.7: AU/筋肉運動生成サブシステムの処理

AU/筋肉運動生成サブシステムは、瞬目タイミング生成部からの瞬目トリガ、および感情 - 表情変換サブシステムからの顔の 3 領域それぞれの基本表情を入力とする。

瞬目タイミング生成サブシステムから瞬目トリガが入力された場合には、まず、瞬目を表す AU45 に変換され、次に AU45 を表出するための筋肉である眼輪筋 (上瞼部) の収縮という表情筋運動指令に変換される。

一方、感情 - 表情変換サブシステムから顔の 3 領域の基本表情が入力された場合、表 3.8 から 3.10 に示した基本表情 - AU - 表情筋の関係に基づき、収縮・弛緩を行う表情筋を決定する。

この際には、収縮・弛緩を行う表情筋の収縮量および収縮時間変化に関するデータが格納される筋肉データベースを参照し、表情筋の収縮量と収縮時間変化を決定する。収縮量と収縮時間変化に関するデータは被験者による主観評価実験によってあらかじめ設定しておく。なお、実験の詳細は第 5 章で述べる。

4.2.5 筋肉モデルシミュレーションサブシステム

筋肉モデルシミュレーションサブシステムは図 4.8 に示すように、線形筋モデル、括約筋モデル、および顎の回転モデルの 3 つのモデルのシミュレーションから構成される。線形筋モデルと括約筋モデルは表情筋の収縮・弛緩、そして顎の回転モデルは口の開閉を模擬し、これらの動きによって引き起こされる顔皮膚表面の変形を計算する。

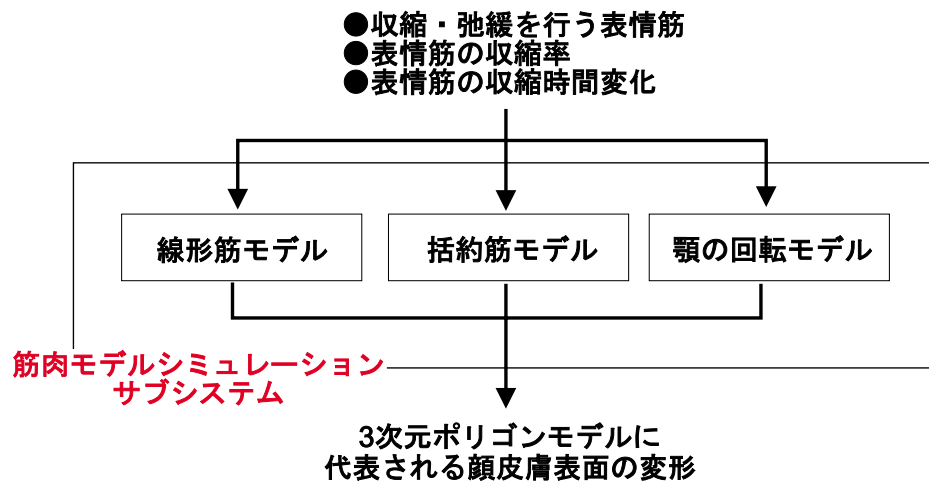


図 4.8: 筋肉モデルシミュレーションサブシステム

3.3.5 項では、Waters らが提案した線形筋モデル、括約筋モデル、顎の回転モデルについて説明したが、以下では、筋肉モデルシミュレーションサブシステムとして各モデルを実装する方法について述べる。

線形筋モデル

3.3.5 項で説明した方法では、線形筋モデルによる顔表面の変形を実際に計算するためには、以下のパラメータが必要である。

まず、それぞれの線形筋自体のパラメータとして、

- (1) 筋肉と骨との接点 V_1 の位置
- (2) 筋肉と皮膚との接点 V_2 の位置
- (3) 筋肉の影響範囲を表す角度 B
- (4) 筋肉の影響範囲を表す距離 r_f

がある。

また、線形筋を弛緩・収縮させて、顔表面の変形を計算する際には、

(5) 筋肉の最大収縮率 k の値

(6) 筋肉の収縮率 k の時間変化

が必要である。

ここで、(5)、(6)については、AU/筋肉運動生成サブシステムから与えられる。ここでは、(1)～(4)の線形筋自体のパラメータの設定方法について説明する。

通常、これらのパラメータを決める方法として、筋肉モデルを外科手術に活用する医学分野では、CT(Computer Tomography)やMRI(Magnetic Resonance Imaging)などによる実測データに基づくものが多い^[11]。しかし、このような手法では、正確な解剖学的データが得られる反面、その正確なデータをモデルに反映しようとする1つの線形筋を多数の線形筋モデルの束として扱うことになり、リアルタイムでの表情合成が困難になる。そこで、本研究では、図4.9に示すように、表情筋の配置図と顔表面の3次元ポリゴンモデルとを比較して、(1)筋肉と骨との接点 V_1 の位置、(2)筋肉と皮膚との接点 V_2 の位置を決定する。3次元ポリゴンモデル上で(1)筋肉と骨との接点 V_1 の位置を求める際には、皮膚表面から骨までの距離、すなわち皮膚や皮下組織の厚さ

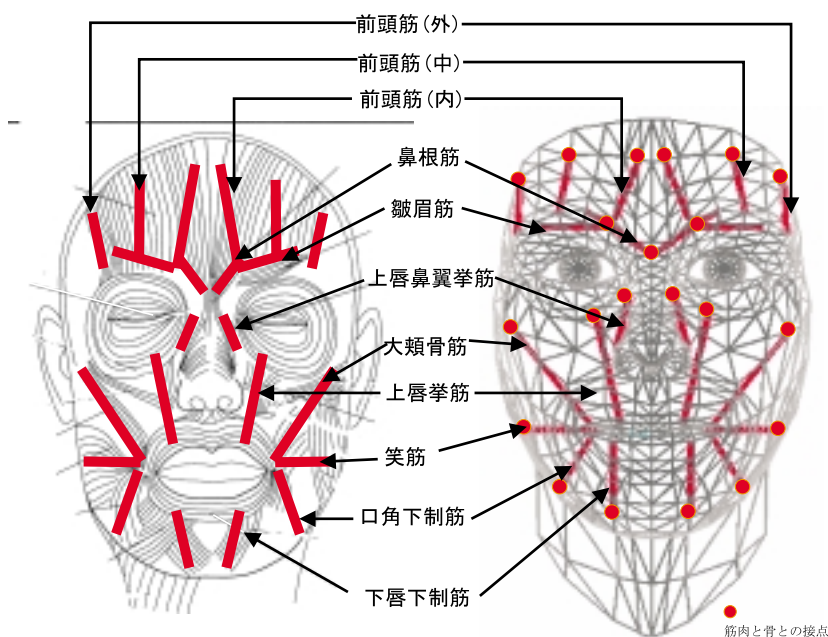


図 4.9: 線形筋の配置

を考慮する必要がある。しかし、ここでは、皮膚や皮下組織が十分薄いとしてその厚さを無視している。また、(2) 筋肉と皮膚との接点 V_2 の位置も同様に、皮膚表面にあるとする。

一方、3.3.5 項で述べたように、線形筋の影響範囲は線形筋 $\overrightarrow{V_1V_2}$ を中心とする球体の一部で表される。(3) 筋肉の影響範囲を表す角度 B は球体の一部の中心角の $1/2$ 、(4) 筋肉の影響範囲を表す距離 r_f は、球体の半径である。ここでは、表 4.1 に示すように、実際の人間の各線形筋がどの範囲の皮膚に影響を与えるかを考慮して、各線形筋の B と r_f を設定した。

例えば、大頬骨筋は口角を引き上げるが、鼻翼までは影響を及ぼさない。そのため、皮膚表面では、図 4.10 に示すような扇形がその影響範囲となり、 $B=25^\circ$ 、 $r_f=1.4$ と設定する。このようにして設定した (3) 筋肉の影響範囲を表す角度 B と (4) 筋肉の影響範囲を表す距離 r_f を表 4.2 に示す。

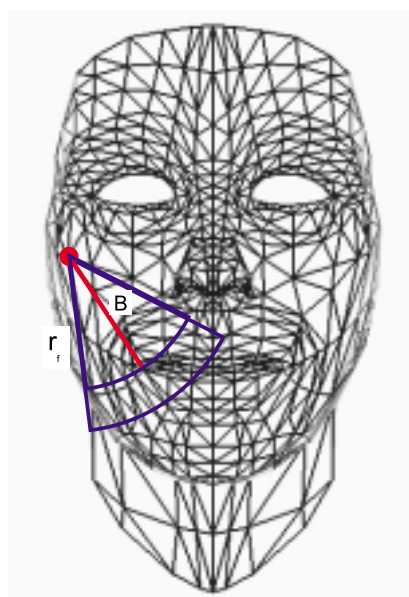


図 4.10: 大頬骨筋の影響範囲

括約筋モデル

3.3.5 項で説明した方法では、括約筋モデルによる顔表面の変形を実際に計算するためには、以下のパラメータが必要である。

まず、それぞれの括約筋自体のパラメータとして、

- (1) 括約筋の中心位置 O

表 4.1: 各線形筋の影響範囲

線形筋	影響範囲
前頭筋	眉毛全体に影響を及ぼすが、瞼には影響を及ぼさない
皺眉筋	眉毛の一番外側まで影響を及ぼすが、瞼には影響を及ぼさない
鼻根筋	眉毛の内側から中央まで影響を及ぼすが、外側には影響を及ぼさない
上唇鼻翼挙筋	鼻翼を引き上げるが、唇は引き上げない
上唇挙筋	上唇全体を引き上げるが、下唇までは影響を及ぼさない
大頬骨筋	口角を引き上げるが、鼻翼までは影響を及ぼさない
口角下制筋	口角を引き下げるが、下唇全体を引き下げることはない
下唇下制筋	下唇全体を引き下げるが、上唇まで影響を及ぼさない
笑筋	口を横に引っ張るが、鼻翼まで影響を及ぼさない

表 4.2: 各線形筋モデルの影響範囲を表すパラメータの設定値

線形筋	角度 $B(^{\circ})$	距離 r_f (筋肉の長さの倍数)
前頭筋	35	1.5
皺眉筋	35	2.0
鼻根筋	35	2.0
上唇鼻翼挙筋	45	1.5
上唇挙筋	45	1.4
大頬骨筋	25	1.4
口角下制筋	35	1.5
下唇下制筋	50	1.3
笑筋	23	1.3

(2) 括約筋の長軸 $2l_x$

(3) 括約筋の短軸 $2l_y$

がある。

また、線形筋モデルの場合と同様に、括約筋を弛緩・収縮させて顔表面の変形を計算する際には、

(4) 筋肉の最大収縮率 k の値

(5) 筋肉の収縮率 k の時間変化

が必要である。

(4)、(5)については、AU/筋肉運動生成サブシステムから与えられる。また、(1)～(3)の括約筋自体のパラメータの設定も線形筋モデルの場合と同様に、図 4.11 のように表情筋の配置図と顔表面の3次元ポリゴンモデルとを比較して、(1)括約筋の中心位置、(2)括約筋の長軸 $2l_x$ 、(3)括約筋の短軸 $2l_y$ を決定する。なお、括約筋の影響範囲は、3.3.5 項で述べたように、長軸 $4l_x$ 、短軸 $4l_y$ の楕円である。

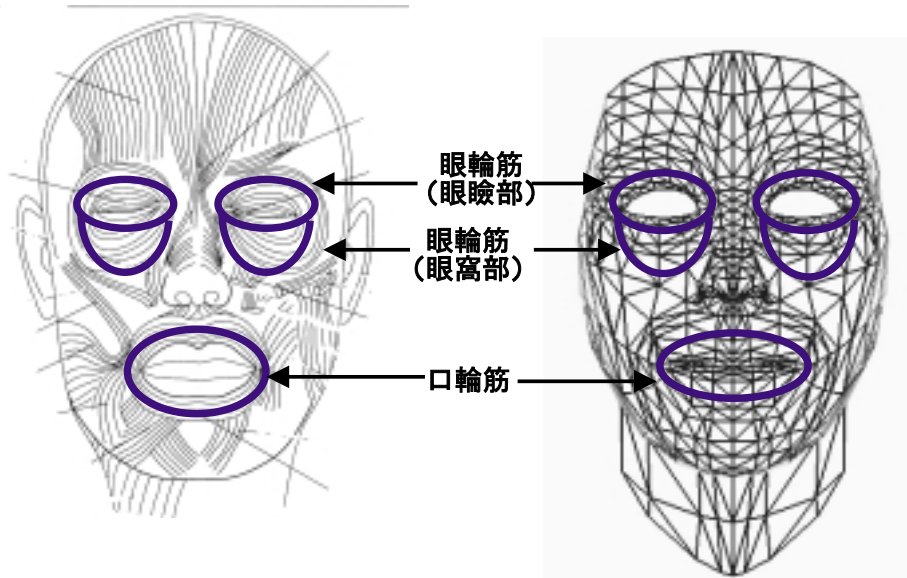


図 4.11: 括約筋の配置

顎の回転モデル

顎の回転モデルでは、まず、その影響を受ける皮膚表面の範囲内の各ポリゴン頂点について、3.3.5 項の 3.13 式により、その回転角度 α を算出する。そして、耳の下にあ

る下顎骨の左右の最上部を通る直線を中心として、ポリゴン頂点を α だけ回転移動させる。

なお、下顎骨の回転による顔面皮膚表面の影響範囲は、3.3.5 項で述べたように、図 3.19 に示すような口の両端から左右の耳の下部への線分より下の顔面部分である。

なお、3.3.5 項でも述べたように、複数の筋肉や顎の回転から影響を受けるポリゴン頂点は、それぞれの移動量を加算したものを移動量とする。

4.2.6 グラフィックエンジン

最後に、筋肉モデルシミュレーションサブシステムで算出された 3 次元ポリゴンモデルの頂点の変位をコンピュータグラフィックスとして表示するために、3 次元グラフィックライブラリである OpenGL、およびグラフィックボードをグラフィックエンジンとして利用する。その理由は以下の通りである。

1. OpenGL には 3.3.6 項で述べたような、顔表情合成のために必要な機能を備えている。
2. OpenGL の描画命令をハードウェアで実行する各種のグラフィックアクセラレータが利用でき、リアルタイム表情合成のための描画速度の向上が期待できる。
3. OpenGL はコンピュータグラフィックスの作成に広く使われている 3 次元グラフィックスライブラリであり、様々なプラットフォームで動作している実績がある。OpenGL を利用して構築した eCOM は、そのプラットフォームに依存せず、異なるコンピュータシステムで動作可能である。

実際には、eCOM では、グラフィックワークステーション OCTANE の OpenGL ライブラリと OCTANE に装備されている高速 3 次元画像処理ハードウェアを用いている。

第 5 章 表情筋の収縮率とその時間変化の決定

3 章で述べたように、自然な顔表情の表出過程を合成するためには、その表情ごと、あるいは表情筋ごとに、その収縮率と時間変化を設定しなくてはならない。本研究では、収縮率とその時間変化を被験者による主観評価実験により決定する。具体的には、以下の 3 つの実験を行う。

実験 1 表情筋の収縮率と顎の回転角度の決定

実験 2 表情筋の収縮率と顎の回転角度の評価

実験 3 表情筋の収縮の時間変化と顎の回転の時間変化の決定

以下では、それぞれの実験について、その目的、方法、結果を述べる。

5.1 実験 1: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の決定

第 4 章で述べたように、AU/筋肉運動生成サブシステムが参照する筋肉データベースには、表情ごと、あるいは表情筋ごとにその収縮率と顎の回転角度が格納される。本節では、これらのデータを決定するための主観評価実験の目的、方法、および結果を述べる。

5.1.1 実験の目的

本実験では、自然な表情を合成するために、各基本表情を表出する際の各表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定することを目的とする。具体的には、複数の被験者を対象に、表情が自然に見えるための表情筋の収縮率や顎の回転角度の値を決めてもらい、その代表的な値を求める。

5.1.2 実験方法

実験時のシステム構成

被験者実験時のシステム構成を図 5.1 に示す。実験で用いるシステムは、前章で述べたように SGI 社製 OCTANE グラフィックワークステーション上に構築されており、

図 5.2 にその画面構成を示す。画面は図中の 1:コントロール部と 2:表情表示部から構成される。1:コントロール部はウィンドウタイプの GUI(Graphical User Interface) を用いており、ウィンドウ下部にあるボタンで基本 6 表情のうちの 1 つを選択し、その表情における各表情筋の収縮率や顎の回転角度をスライダーにより設定することができる。ここでは、表 3.8 から 3.10 に従い、その表情を表出するために無関係の表情筋の収縮率は変更できないようになっている。例えば、「喜び」の表情の場合には、大頬骨筋の収縮率、眼輪筋(眼窩部)の収縮率、顎の回転角度のみが変更でき、その他の筋肉の収縮率は変更できない。収縮率や顎の回転角度を設定した後、ウィンドウ最下部の“SHOW” ボタンをクリックすることで、その表情を 2:表情表示部に表示できる。また、“RESET” ボタンをクリックすると、表示されている顔ポリゴンモデルの表情が中立にもどる。2:表情表示部は、縦約 17cm(600 ピクセル)、横約 15cm(550 ピクセル) のウィンドウであり、顔ポリゴンモデルが表示される。ここでは、マウスをドラッグすることで表示されている顔ポリゴンモデルを上下左右に回転させることができ、任意の方向から顔ポリゴンモデルを観察することができる。

実験手順

実験の手順の概略を図 5.3 に示し、以下で説明する。



図 5.1: 表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験のシステム構成

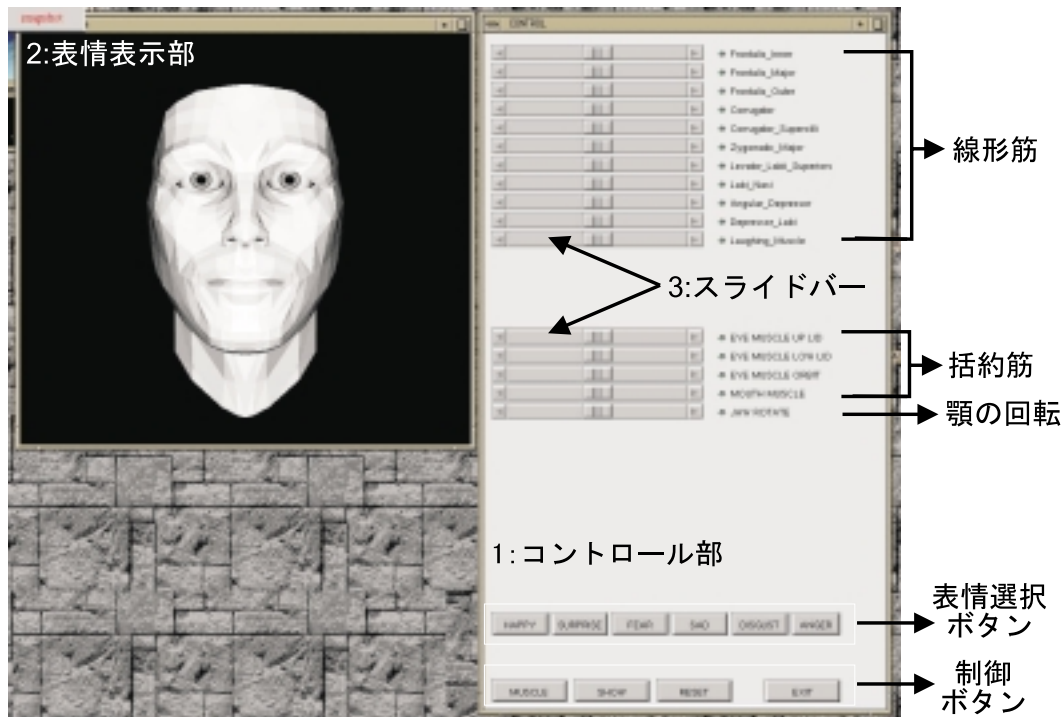


図 5.2: 表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験の画面構成

- (1) まず、被験者に実験の概要を説明し、次いで顔ポリゴンモデルにおける各表情筋の位置、その収縮による顔表情の変化、口の開閉等を説明する。さらに、実験で用いるシステムを事前に使用してもらい、その操作法に習熟してもらう。
- (2) 次に、被験者に基本 6 表情の各表情ごとに表情筋の収縮率と顎の回転角度をコントロール部のスライダーで調整し、自然に見える表情を作成してもらう。具体的には以下の (3) ~ (6) を各表情ごとに繰り返す。
- (3) コントロール部のスライダーで各表情筋の収縮率や顎の回転角度を変更する。
- (4) “SHOW” ボタンをクリックし、設定した表情筋の収縮率と顎の回転角度により合成した顔ポリゴンモデルを表示させる。
- (5) 表示された顔ポリゴンモデルを正面からだけでなく様々な角度から観察し、自然な表情に見えるかどうか判断する。十分に自然な表情に見えないときは (3) に戻り、さらに各表情筋の収縮率や顎の回転角度を変更する。
- (6) 被験者が十分自然に見える表情を作成したと判断した時点で、そのときの各表情筋の収縮率と顎の回転角度を記録する。

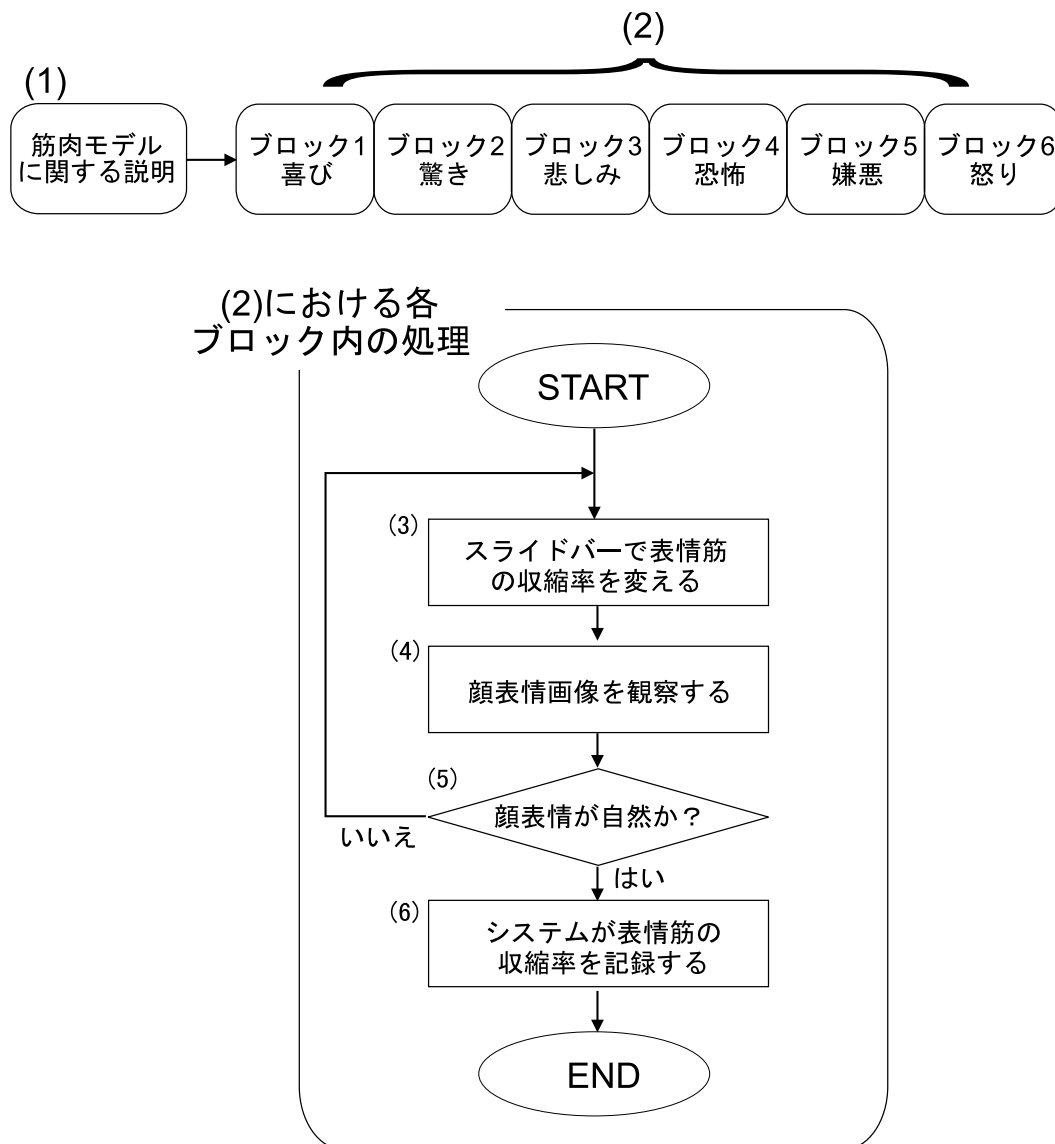


図 5.3: 表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験の手順

被験者

被験者は 20 代の男性 8 名および女性 1 名の計 9 名であり、その全員が日常から GUI ベースのコンピュータを使用しており、マウス操作に習熟している。

5.1.3 実験結果

実験の結果を図 5.4～5.9 に示す。図中のグラフは、横軸が表情筋の種類あるいは顎の回転を表し、縦軸が表情筋の収縮率 (グラフ左縦軸) あるいは顎の回転角度 (グラフ右縦軸) を表している。グラフ中には各表情ごとに各被験者が設定した表情筋の収縮率と

顎の回転角度を×印でプロットしており、その右側に平均値とその平均値からの標準偏差をエラーバーにより示している。エラーバーの右の数値は、平均値 ($\overline{m}_k$) と標準偏差 (σ_k) を表している。表情筋の収縮率が負の値の場合は、その筋肉が弛緩していることを示す。また、顎の回転は顎先が下方方向に動く場合が正の値としている。なお、実験結果の詳細は付録 A に譲る。

各表情における表情筋の収縮率の平均値 $\overline{m}_k^{EM}$ と標準偏差 σ_k^{EM} は以下の式により計算する。ただし、式中、 E は基本表情 (E =喜び、驚き、悲しみ、恐怖、嫌悪、怒り) を、 i は被験者 ($1 \leq i \leq 9$) を、 k_i^{EM} は表情筋の収縮率あるいは顎の回転角度を表す。

$$\begin{aligned}\overline{m}_k^{EM} &= \frac{\sum_{i=1}^9 k_i^{EM}}{9} \\ \sigma_k^{EM} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (k_i^{EM})^2 - (\sum_{i=1}^9 k_i^{EM})^2}{9 \times 8}}\end{aligned}\tag{5.1}$$

5.1.4 実験結果の考察

図 5.4～5.9 からわかるように、本実験で得られた表情筋の収縮率や顎の回転角度の値は、被験者によってばらつきが大きい。被験者には、実験前の説明の際に「漫画のように表情を誇張せず、人間として自然に見える」顔表情を作成するように指示していたが、実際には、被験者によっては、漫画的に誇張した表情を作成する傾向があったためである。

例えば、「驚き」の感情を表す顔表情の特徴的動作は以下のものである。

AU1+AU2 眉が湾曲し全体が引き上げられる。

AU5 目が大きく見開かれる。

AU26 顎が下方に下がり口が開き、唇と歯が離れる。

ある被験者は「驚き」の表情として図 5.10 のような顔ポリゴンモデルを作成している。このような顔は、確かに「驚き」の顔を表しているように見えるが、その一方、実際の人間では、驚いたときに図 5.10 ほど大きく目を見開いたり口を開いたりすることはありません。さらに、このような漫画的に誇張した顔は、漫画的であるがため見ている者に笑いを誘発したり誤解を招いたりすることも考えられ、提示したい表情を確実に伝えることは難しい。そのため、被験者実験で得られた表情筋の収縮率や顎の回転角度を単純に平均して各表情における代表値を求めるのではなく、以下

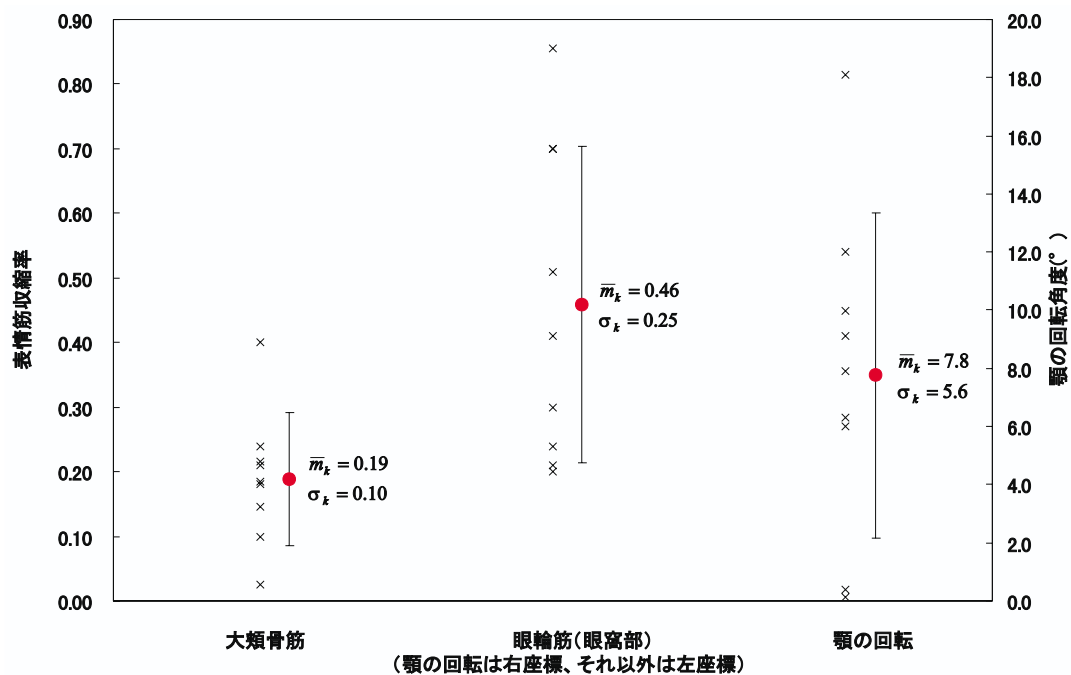


図 5.4: 「喜び」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

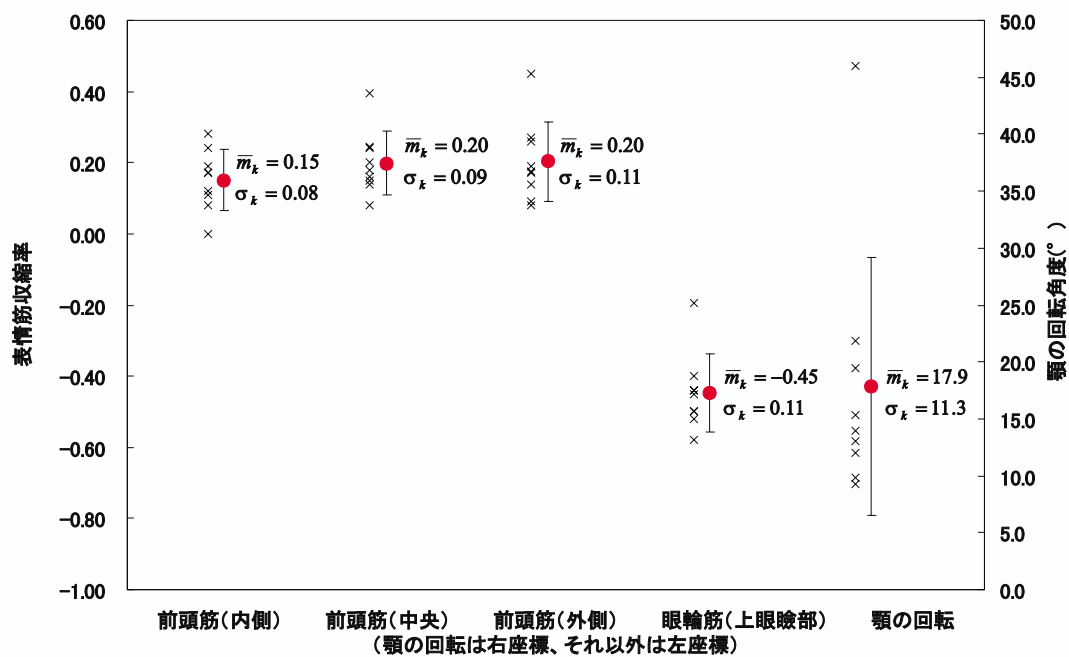


図 5.5: 「驚き」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

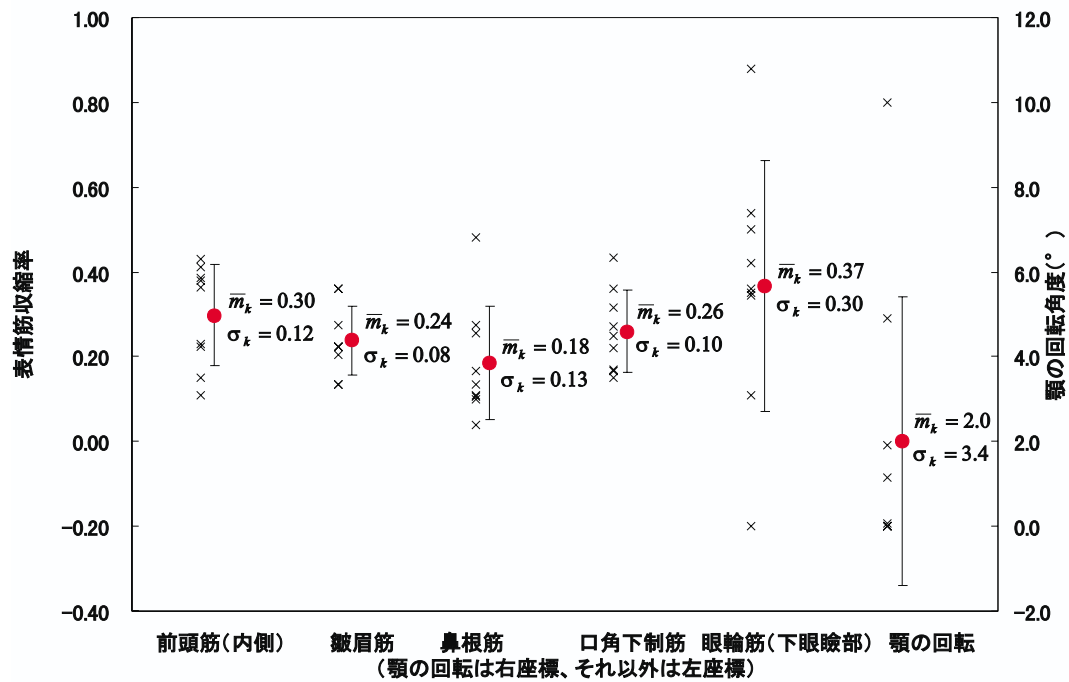


図 5.6: 「悲しみ」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

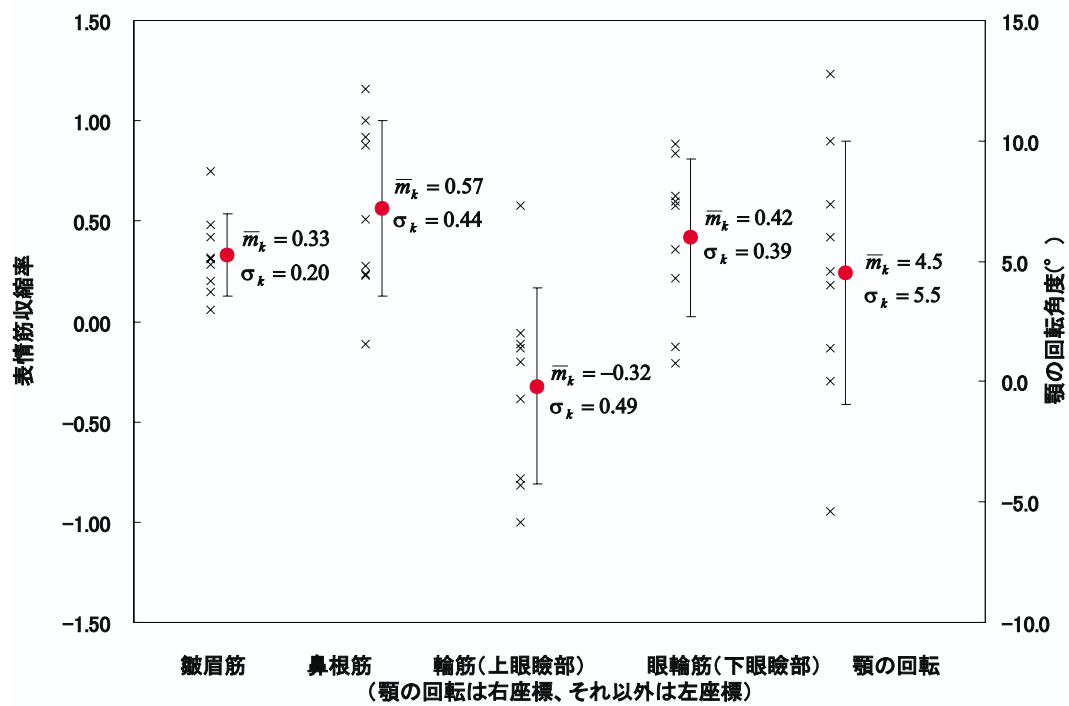


図 5.7: 「恐怖」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

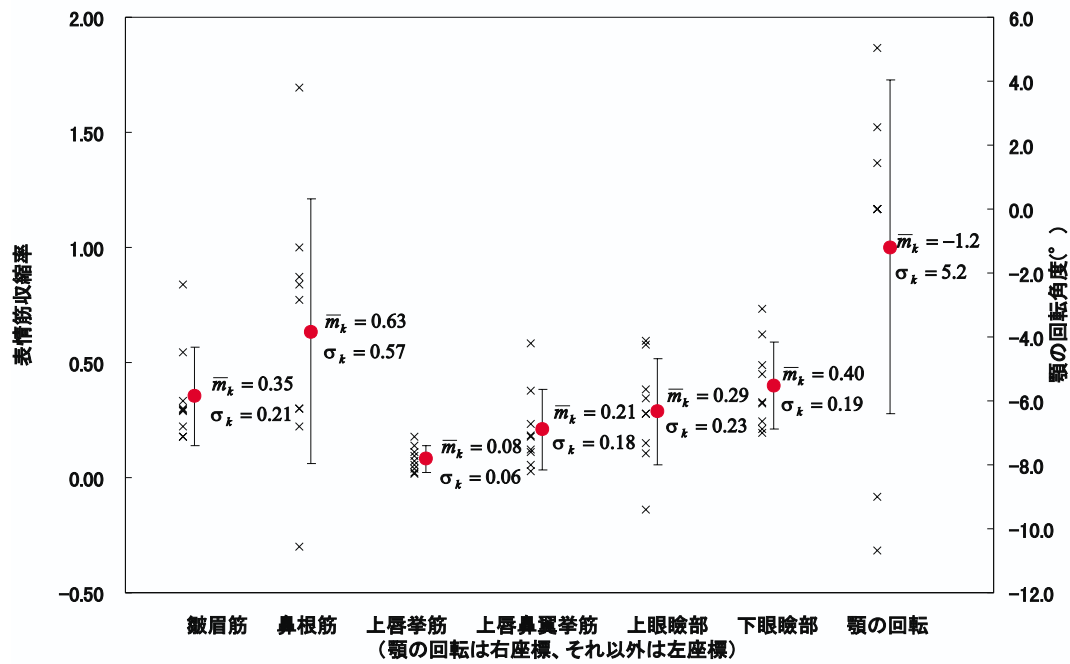


図 5.8: 「嫌悪」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

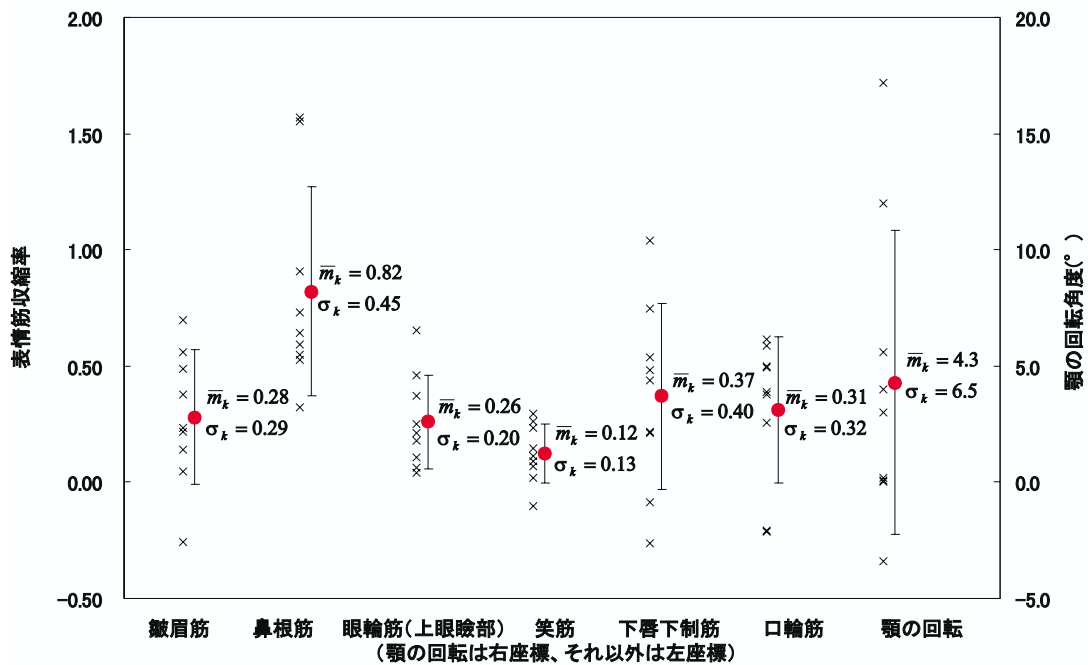


図 5.9: 「怒り」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

の手順により誇張された表情の表情筋の収縮率や顎の回転角度を省いてから、それぞれの代表値を算出する。

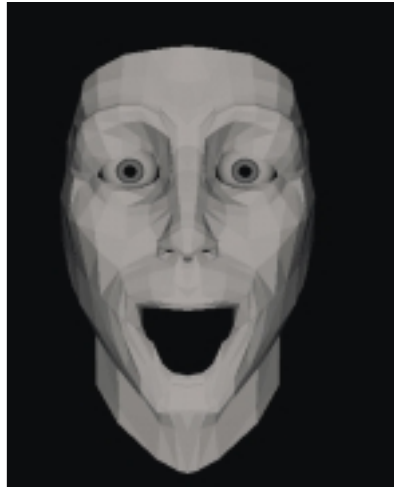


図 5.10: 筋肉収縮率が極端に大きい「驚き」の顔の合成例

1. 5.1 式により各表情における各表情筋の収縮率と顎の回転角度の平均値 $\overline{m}_k^{EM}$ と標準偏差 σ_k^{EM} を求める。
2. 平均値 $\overline{m}_k^{EM}$ を中心として $\pm \sigma_k^{EM}$ 内に入っている値のみを有効値とする。すなわち、 $\overline{m}_k^{EM} - \sigma_k^{EM} \leq k_i^{EM} \leq \overline{m}_k^{EM} + \sigma_k^{EM}$ の条件を満たす k_i^{EM} のみを有効値として採用し、それ以外を省く。
3. 2. で採用した値の平均値を計算し、各表情における各表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値とする。

誇張された表情の表情筋の収縮率や顎の回転角度は、自然な表情のものに比べて極端に大きかったり小さかったりする。上記の手順 2 では、実験で得られた k_i^{EM} の平均値と標準偏差を用いて、極端な値を省いている。

上記の手順により有効値として採用された表情筋の収縮率と顎の回転角度 k_i^{EM} 、およびその平均値、標準偏差を図 5.11 ~ 5.16 に示す。図からもわかるように極端に大きいあるいは小さい値が省かれており、誇張された表情の影響を受けていない代表値を算出できていることがわかる。例えば、図 5.7 は、被験者実験から得られた「恐怖」の表情の各表情筋の収縮率と顎の回転角度であるが、誇張された表情があるために、極

端に離れた値があり、被験者によるばらつきが大きい。しかし、図 5.14 に示すように、前述の手法で極端に離れた値を省いた後は、ばらつきが小さくなっているのがわかる。

本研究では、このようにして求めた各表情を表す表情筋の収縮率と顎の回転角度を、その表情を合成する際の代表値として用いる。表 5.1 に得られた代表値を示し、図 5.17 に代表値により合成した顔表情を示す。

表 5.1: 基本表情を合成する際の各表情筋の収縮率と顎の回転角度

顔領域	表情筋	喜び	驚き	恐怖	悲しみ	嫌悪	怒り
上部	前頭筋 (外側)		0.17				
	前頭筋 (中央)		0.19				
	前頭筋 (内側)		0.14		0.29		
	皺眉筋			0.33	0.22	0.29	0.26
	鼻根筋			0.58	0.14	0.51	0.61
中央部	眼輪筋 (上眼瞼部)		-0.48	-0.18		0.26	0.36
	眼輪筋 (眼窩部)	0.31					
	眼輪筋 (下眼瞼部)			0.65	0.38	0.43	
下部	上唇鼻翼挙筋					0.19	
	上唇挙筋					0.08	
	大頬骨筋	0.19					
	口角下制筋				0.28		
	下唇下制筋						0.23
	笑筋						0.13
	口輪筋						0.46
	顎の回転 (°)	8.1	14.4	3.9	0.6	0.7	3.5

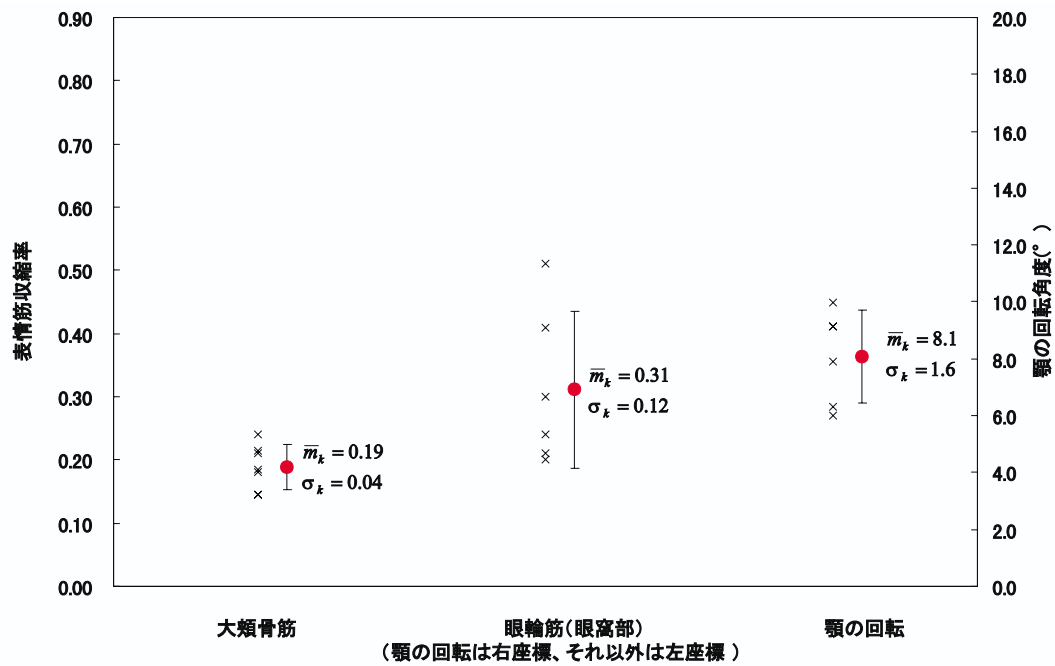


図 5.11: 「喜び」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)

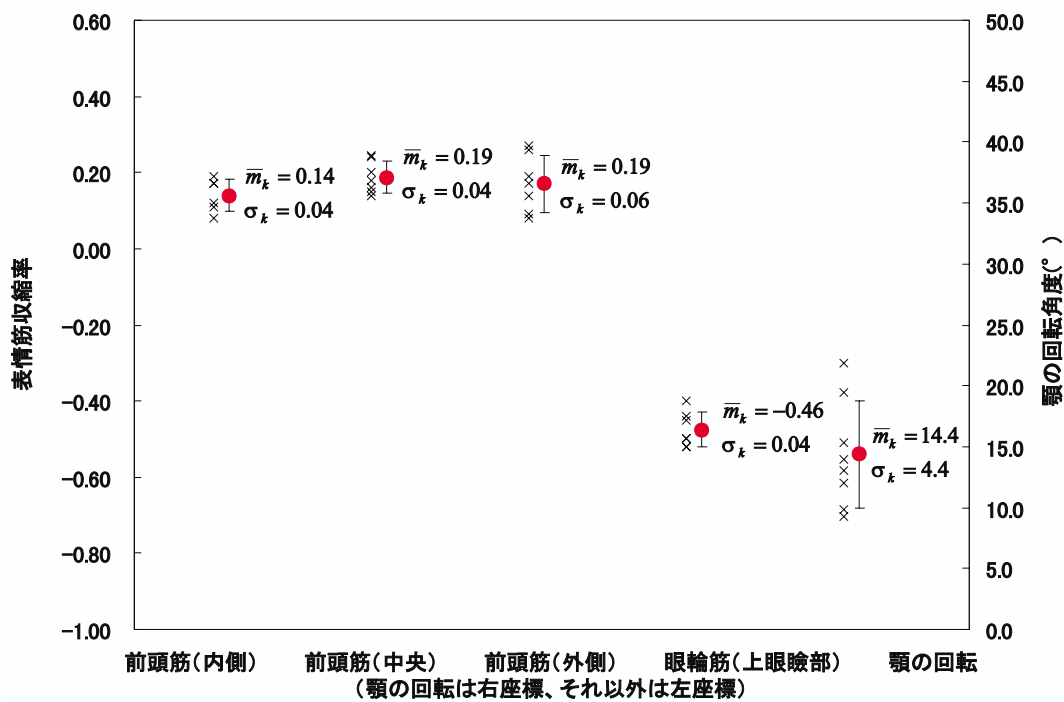


図 5.12: 「驚き」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)

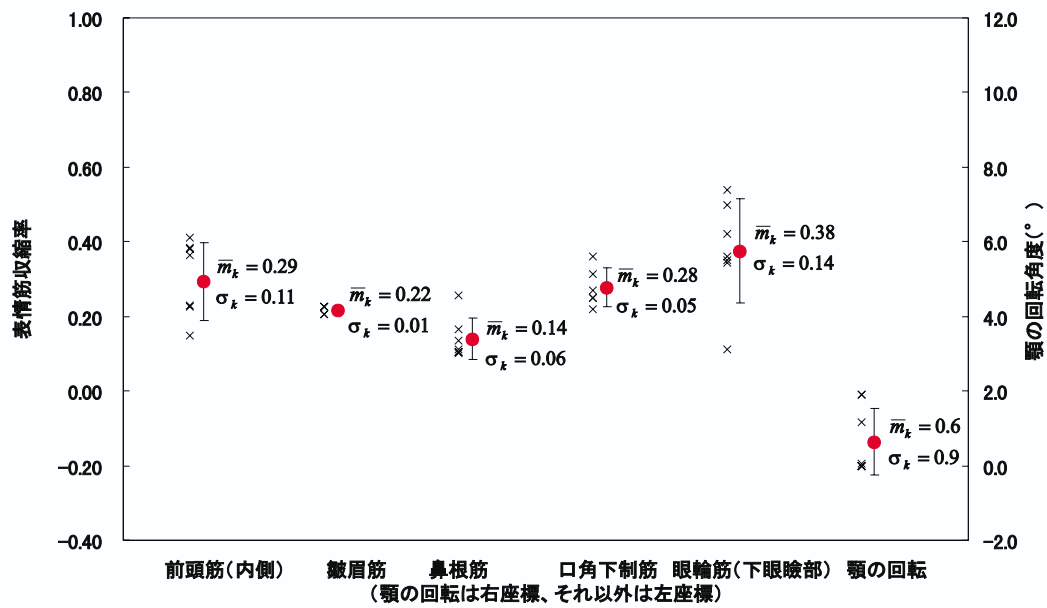


図 5.13: 「悲しみ」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)

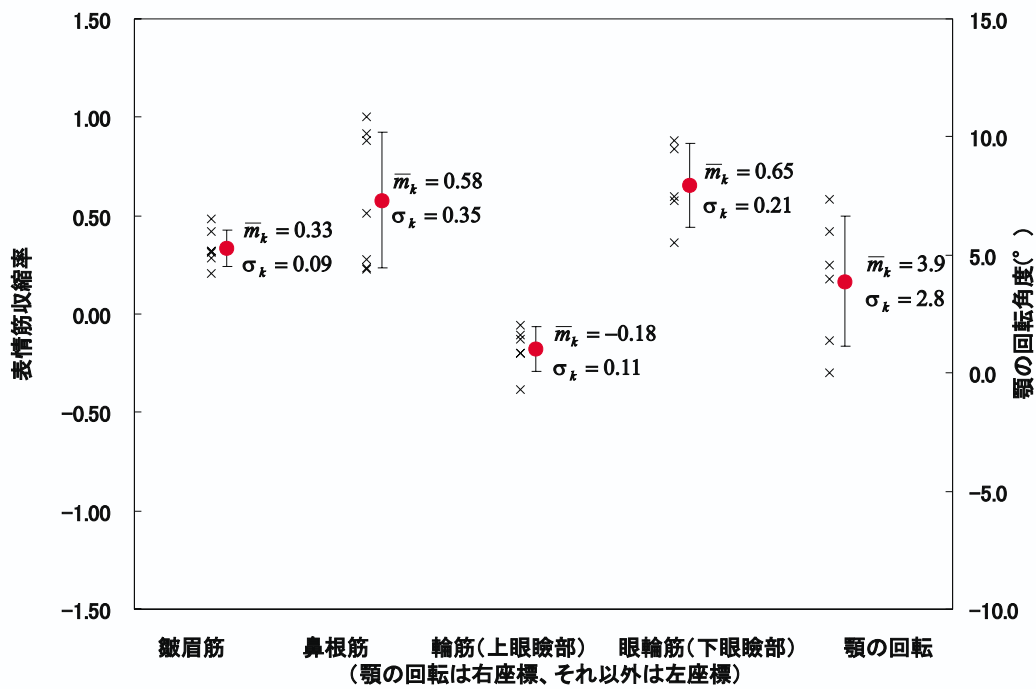


図 5.14: 「恐怖」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)

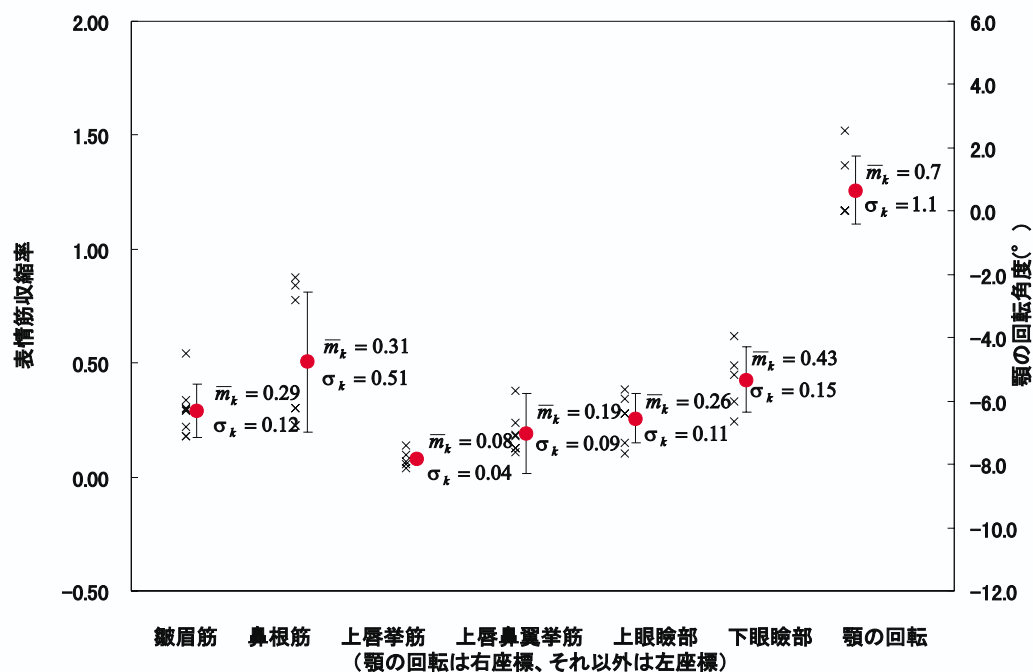


図 5.15: 「嫌悪」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)

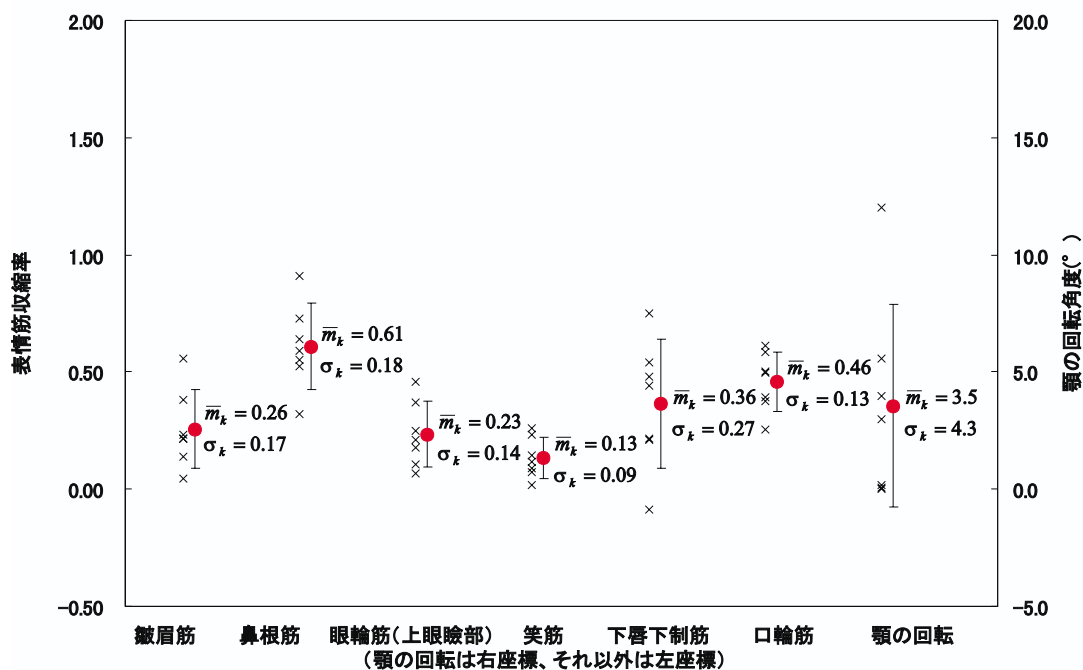
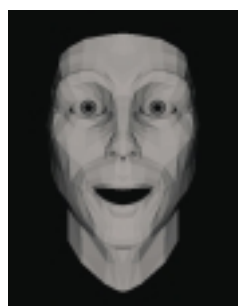


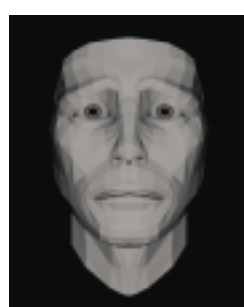
図 5.16: 「怒り」の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度 (処理後)



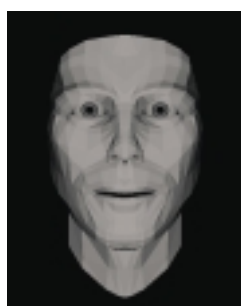
喜び



驚き



悲しみ



恐怖



嫌悪



怒り

図 5.17: 実験 1 で決定した代表値を利用して合成した基本表情画像

5.2 実験 2: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の評価

実験 1 では筋肉モデルシミュレーションサブシステムが参照する筋肉データベースに格納する、表情ごとあるいは表情筋ごとの収縮率および顎の回転角度の代表値を求めた。本節では、これらの代表値を利用して合成した顔表情が自然に見えるかどうかを評価するための実験について、その目的、方法、および結果を述べる。

5.2.1 実験目的

本実験では、実験 1 で求めた各表情筋の収縮率および顎の回転角度の代表値を利用して合成した顔表情が自然に見えるかどうかを評価することを目的とする。具体的には、実験 1 で求めた表情筋の収縮率および顎の回転角度の代表値 (以下、代表値) を用いて合成した顔表情画像、および実験 1 の被験者 i ($1 \leq i \leq 9$) が設定した表情筋収縮と顎の回転角度の数値 (以下、被験者設定値 i) を用いて合成した顔表情画像を、複数の被験者に採点してもらい、その点数を比較する。

5.2.2 実験の方法

実験時のシステム構成

本実験の用いるシステムの構成を図 5.1 に示す。実験 2 に用いるシステムは、実験 1 と同様に SGI 社製 OCTANE グラフィックワークステーション上で構築されており、図 5.18 にその画面構成を示す。画面は図中の 1: 表情表示部と 2: コントロール部から構成されている。

実験 1 と同様に、2: コントロール部はウィンドウタイプの GUI を用いている。ウィンドウ部にある 3: 表情選択ボタンで基本 6 表情のうちの 1 つを選択することができる。さらに、4: パラメータセット選択ボタンで 1~6 の番号を選択する。パラメータセットとは、基本 6 表情の代表値、あるいは被験者 i の被験者設定値 i のことであり、この実験では、「悲しみ」の表情に関して表 5.2 に示す 6 種類のパラメータセットを事前に用意している。例えば、表情選択ボタン “SAD” をクリックした後に、パラメータセット選択ボタン「1」をクリックすれば、実験 1 で被験者 4 が決定した被験者設定値 4 を用いて「悲しみ」の顔表情を合成する。6 種類のパラメータセットは、各表情ごとに、代表値およびランダムに選択した 5 つの被験者設定値 i を用意しており、パラメータ番号との対応関係も各表情ごとにランダムに設定している。すなわち、例えば、「悲しみ」

のパラメータセット1は、実験1で被験者4が決定した被験者設定値4であるが、「喜び」のパラメータセット1は必ずしも被験者設定値4ではない。なお、基本6表情のそれぞれについてのパラメータセットは、実験2の被験者に知らされていない。

表情およびパラメータセットを選択した後に“SHOW”ボタンをクリックすることで、選択したパラメータセットを用いて合成した基本表情を1:表情表示部に表示することができる。また、“RESET”ボタンをクリックすると表示されている顔ポリゴンモデルの表情が中立にもどる。1:表情表示部は、縦約17cm(600ピクセル)、横約15cm(550ピクセル)のウィンドウであり、顔ポリゴンモデルが表示される。ここでは、マウスをドラッグすることで表示されている顔ポリゴンモデルを回転させることができ、任意の方向から顔ポリゴンモデルを観察することができる。

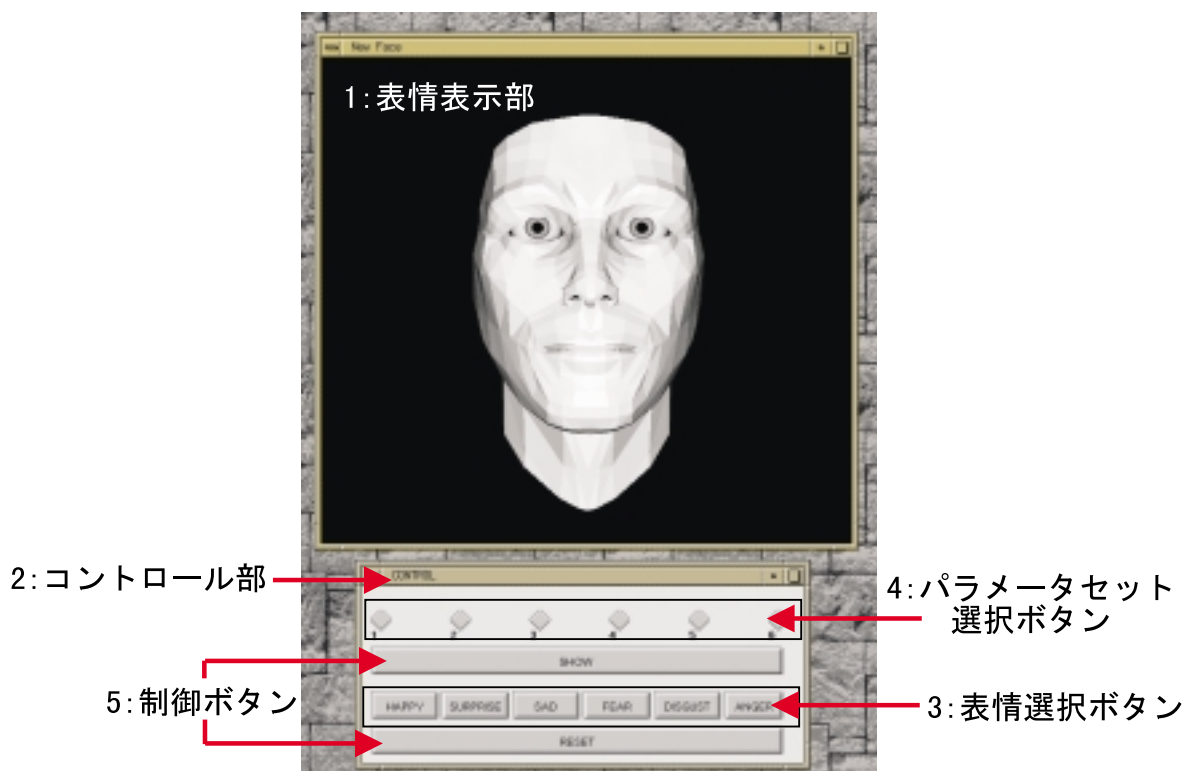


図 5.18: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値を評価する実験の画面構成

実験手順

実験手順の概略を図 5.19 に示し、以下で説明する。

- (1) まず、被験者に対して、基本6表情のそれぞれについて、6種類のパラメータセットによる顔表情画像を観察し、表情の自然さや感情を表しているかどうかを基準

表 5.2: 「悲しみ」の表情におけるパラメータセット

パラメータセット番号	用意したパラメータセット
1	被験者設定値 4
2	被験者設定値 1
3	代表値
4	被験者設定値 6
5	被験者設定値 3
6	被験者設定値 8

被験者設定値 i は、実験 1 で被験者 i が設定した各表情筋の収縮率および顎の回転角度。

代表値は、実験 1 で求めた各表情筋の収縮率および顎の回転角度の代表値。

に 0～5 の 6 段階で評価してもらう旨を説明する。被験者には、6 種類のパラメータセットが、実験 1 で求めた代表値とランダムに選択した 5 つの被験者設定値 i であることを知らせない。次いで、実験で用いるシステムを事前に使用してもらい、その操作法に習熟してもらう。

- (2) 次に、被験者に基本 6 表情の各表情ごとに、6 種類のパラメータセットによる顔表情画像を採点してもらう。具体的には以下の (3)～(6) を各表情ごとに繰り返す。
- (3) コントロール部の表情選択ボタンをクリックし、観察する基本表情を選択する。
- (4) コントロール部のパラメータセット選択ボタンから 1 つのパラメータセットを選択する。
- (5) “SHOW” ボタンをクリックし、選択したパラメータセットにより合成した顔ポリゴンモデルを表示させる。
- (6) 表示された顔ポリゴンモデルを正面からだけでなく様々な角度から観察し、表 5.3 に示す採点基準に従って評価する。
- (7) すべての基本表情についてすべてのパラメータセットにより合成した顔表情の評価が終わるまで (3)～(6) を繰り返す。

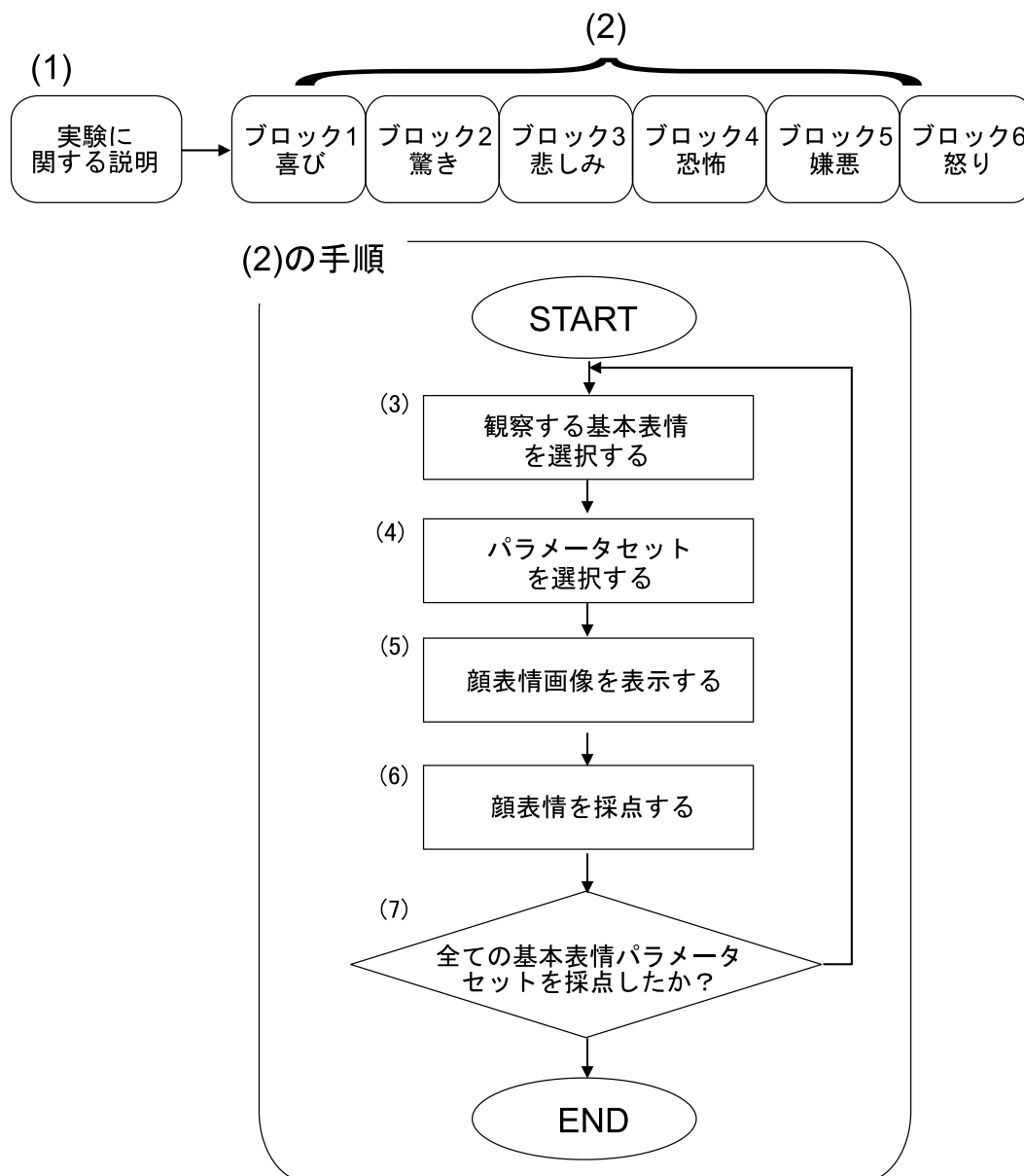


図 5.19: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の評価実験の手順

被験者

被験者は20代の男性13名および女性2名の計15名であり、その全員が日常からGUIベースのコンピュータを使用しており、マウス操作に習熟している。

表 5.3: 表情筋収縮率と顎の回転角度の代表値を評価する実験に用いた評価基準

評価点	評価基準
5	顔表情画像は感情を良く表現できている
4	顔表情画像は感情をまあまあ表現できている
3	言われてみると顔表情画像は感情を表現できている
2	どちらかと言うと、顔表情画像は感情を表現できていない
1	顔表情画像から感情を全く感じ取れない
0	実際の人間にはできない誇張した顔表情画像で不自然に感じる

5.2.3 実験の結果

実験の結果を図 5.20 に示す。図中のグラフは、縦軸が評価点の平均、横軸が基本 6 表情を表し、パラメータセットごとの被験者 15 名が評価した評価点の平均をプロットしている。図中の●印は、代表値による顔表情を表示した際の 15 名の被験者の評価点の平均である。また、×印は、代表値以外のパラメータセット (すなわち被験者設定値) による顔表情を表示した際の 15 名の被験者の評価点をパラメータセットごとに平均した値を示す。

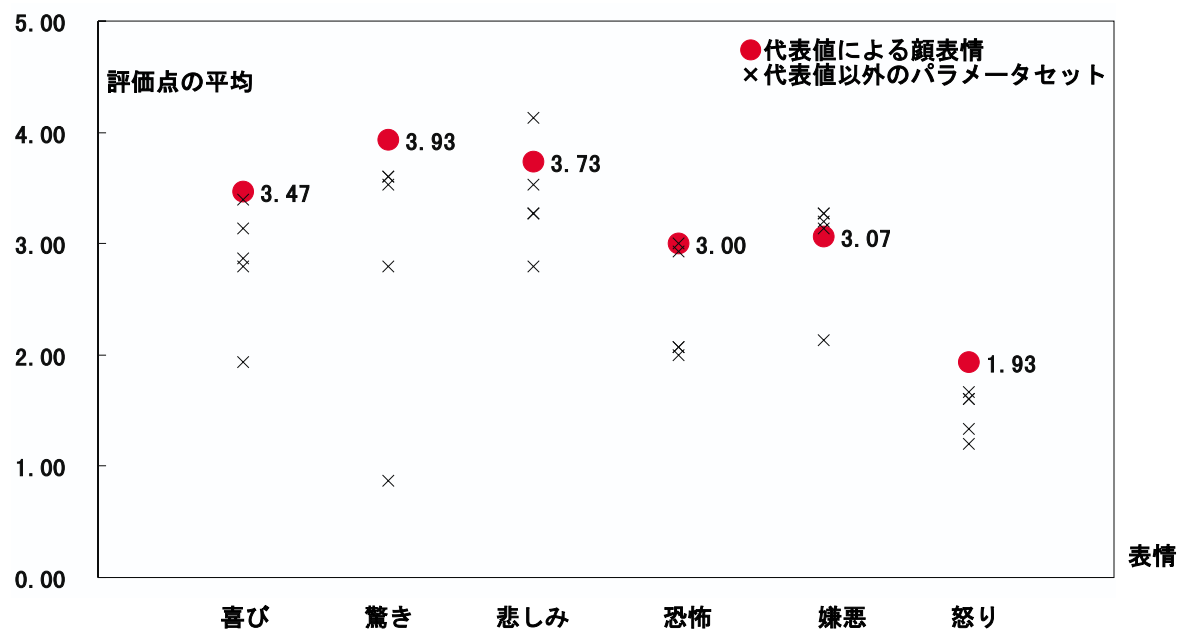


図 5.20: パラメータセットごとの平均評価点

5.2.4 実験結果の考察

図 5.20 からわかるように、各表情における代表値の評価点は被験者設定値の評価点と同程度、あるいは高くなっており、実験 1 で求めた代表値が妥当であることを示している。ここで、評価点 3 の評価基準は「言われてみると顔表情画像は感情を表現できている」であり、これを越えるかどうかの評価の目安となる。各表情について代表値の評価点を見てみると、(1) 評価点が 3 を越える表情 (喜び、驚き、悲しみ)、(2) 評価点が 3 程度の表情 (恐怖、嫌悪)、(3) 評価点が 3 を下回る表情 (怒り)、の 3 つの異なる特徴がみられた。以下では、このそれぞれについて考察する。

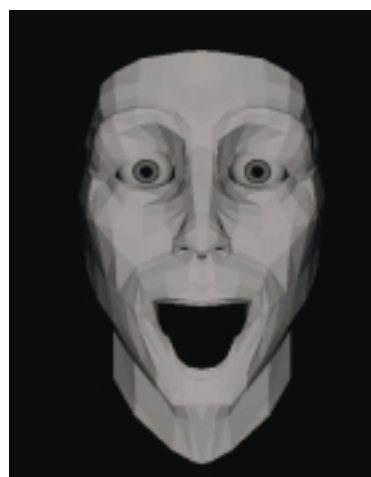
(1) 評価点が 3 を越える表情 (喜び、驚き、悲しみ)

この 3 種類の表情の合成については、代表値の評価点が高く、感情をよく表す自然な表情が合成ができていると考えられる。

被験者設定値の評価点を見てみると、「喜び」と「驚き」について、評価が著しく低い被験者設定値があることがわかる。これらの被験者設定値により合成した顔表情を図 5.21 に示す。これらの顔表情は、表情筋の収縮率が大きく、そのため漫画的で誇張された表情である。実験 2 の結果では、これらの顔表情が低い評価点であり、このような誇張した表情は不自然に見えるという結果の裏付けになった。



(a) 喜び



(b) 驚き

図 5.21: 評価点が低い「喜び」と「驚き」の表情

(2) 評価点が3程度の表情 (恐怖、嫌悪)

この2種類の顔表情合成について、代表値により作成した顔表情の評価点は3点程度、「言われてみると、顔表情画像は感情を表現できている」である。その原因を以下のように分析する。

人間は社会生活において、自分の表情をどのように示したらよいかということを左右する文化的な表示規則がある。人は「男の子は怖がったりしない」や、「女の子は人前で怒った顔をしない」といった文化的な表示規則を学習し、その規則が指示する顔の表情を制御する。特に、恐怖、嫌悪、そして怒りなどのネガティブな表情を抑制したり、あるいは笑いなどのほかの表情でごまかしたりする。そのため、人間は相手の内面状態を捉えるために、顔表情からの情報だけでなく、ジェスチャや話し声の高さなどの情報をも収集し、総合的に判断を下している。

本実験は、表情だけを手がかりとして、感情を判断してもらう実験であり、顔表情以外の情報を提示していない。実験2の被験者は実際の社会生活で得られる情報よりも、少ない手がかりで感情を判断せざるを得ない。これが恐怖と嫌悪の表情が低い点数しか得られなかった原因であると考えられる。顔表情をアフェクティブインタフェースに活用する際には、この点を考慮して、特にネガティブの感情を提示する際には、顔表情とともに、他の感情シグナルも提供することが必要であろう。

(3) 評価点が3を下回る表情 (怒り)

怒りの表情については、代表値により合成した顔表情が2点以下の評価点であり、「不自然」という結果になった。また、他の被験者の設定値により合成した表情の評価点も低い。この原因は、恐怖や嫌悪の顔表情と同じく、怒りの表情は社会生活においては、「表出しない方がいい」とされる表情の1つであるためと考えられる。しかし、恐怖や嫌悪との相違点は、怒りの表情が表出される際には、通常攻撃を伴う場合が多く、社会生活を円滑に送るためには、恐怖と嫌悪の顔表情以上に、表出しないように抑制されていると考えられる。さらに、怒りの表情は、特徴的動作が少なく、人間にとって認識が困難なことも原因として考えられる。

5.3 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化の決定

実験1では、自然な表情を合成するために、顔表情が表出したあとの状態の筋肉収縮率と顎の回転角度を決定した。しかし、人間の表情は一瞬で表出されるものではな

く、時間の推移に伴って徐々に表出される。人間同士のコミュニケーションでは、この表出の過程も重要であり、例えば、その表出速度により感情の強さ等を判断していることがある。そのため、ヒューマンインタフェースに顔表情合成を活用するためには、表情表出の過程も合成することが重要である。本節では、AU/筋肉運動生成サブシステムが参照する筋肉データベースに格納される表情ごとの筋肉収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定するための主観評価実験の目的、方法、および結果を述べる。

5.3.1 実験の目的

本実験では、自然な表情合成を行うために、基本 6 表情および中立の計 7 種類の顔表情が表出される際の各表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定することを目的とする。具体的には、複数の被験者を対象に、表情が表出される際の以下の 2 つの値を決めてもらい、その代表的な値を求める。

- 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化パターン (以下、時間変化パターン)
- 表情表出に要する時間 (以下、表情表出時間)

本実験では、基本 6 表情が表出される場合、中立の表情から基本表情が表出されるまでの過程を対象に、表情表出の時間変化パターンと表情表出時間を調べる。一方、中立の表情が表出される場合、その時間変化は直前の感情と密接な関連があると考え、基本 6 表情のそれぞれから中立の表情に変わる際の時間変化パターンと表情表出時間を調べる。

5.3.2 実験の方法

実験時のシステム構成

実験時のシステム構成を図 5.1 に示す。本実験で用いるシステムは、実験 1,2 と同様に SGI 社製 OCTANE グラフィックワークステーション上に構築されており、図 5.22 にその画面構成を示す。画面は図中の 1:表情表示部、2A:基本 6 表情表出制御部、および 2B:中立表情表出制御部から構成されている。

2A:基本 6 表情表出制御部では、まずウィンドウに配置した 3:表情選択ボタンで表出する表情を選択し、次に 4:表情表出時間スライダーで表情表出時間を設定し、最後に 5 つの 5:時間変化パターン選択ボタンの 1 つをクリックすることで、設定した時間変化パターンと表情表出時間に従って、中立の顔表情から基本表情が表出されるま

での動画像を 1:表情表示部に表示させることができる。4:表情表出時間スライダーでは、表情表出時間を 0.04 秒～5 秒の範囲のうち 0.04 秒単位で設定することができる。また、“RESET” ボタンをクリックすると、表示されている顔ポリゴンモデルの表情が中立にもどる。2B:中立表情表出制御部では、基本的に 2A:基本 6 表情表出制御部と同様の操作が可能であるが、1:表情表示部に表示されるの表情は、選択した基本表情から中立に変化する動画像である。1:表情表示部は、縦約 17cm(600 ピクセル)、横約 15cm(550 ピクセル)のウィンドウであり、顔ポリゴンモデルが表示される。ここでは、マウスをドラッグすることで表示されている顔ポリゴンモデルを回転させることができ、任意の方向から顔ポリゴンモデルを観察することができる。



図 5.22: 表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験における画面構成

時間変化パターン

表情表出の時間変化パターンについては、中立の状態から基本表情が表出されるまで、あるいは基本表情から中立の状態になるまでの表情筋収縮率および顎の回転角度の速度と時間との関連から、以下の5つのパターンを用意した。

- I 筋肉収縮率・顎の回転角度の速度が一定である
- II 筋肉収縮率・顎の回転角度の速度が単調増加する
- III 筋肉収縮率・顎の回転角度の速度が単調減少する
- IV 筋肉収縮率・顎の回転角度の速度単調増加し、表情表出時間の途中で単調減少に転ずる
- V 筋肉収縮率・顎の回転角度の速度単調減少し、表情表出時間の途中で単調増加に転ずる

これらの時間変化パターンを図 5.23 および図 5.24 に示す。図 5.23 は表情筋収縮率と顎の回転角度の速度 dk/dt と時間 t との関係を示している。一方、図 5.24 では、左図 (A) は中立の表情から基本表情が表出されるまでの k と時間 t の関係、右図 (B) は基本表情から中立の表情になるまでの k と時間 t の関係を示している。

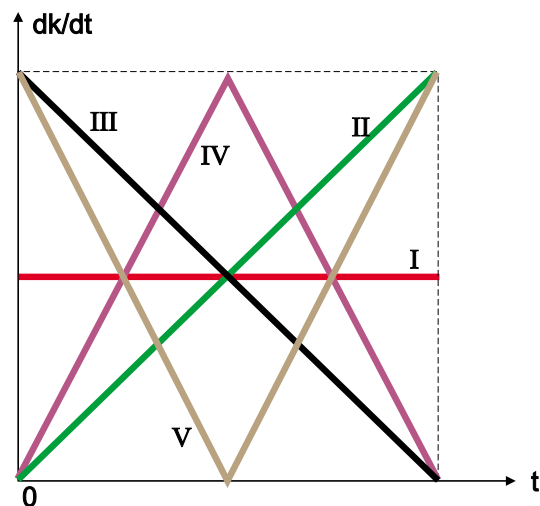


図 5.23: 表情筋収縮率・顎の回転角度の5つの時間変化パターン (dk/dt と t の関係)

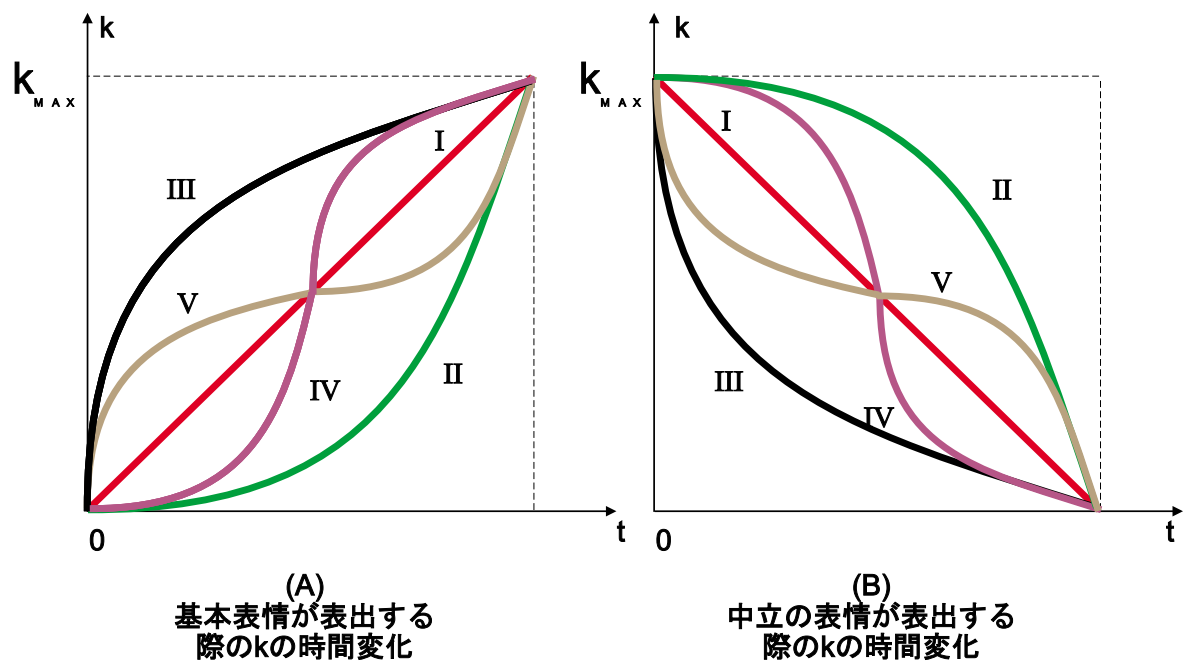


図 5.24: 表情筋の収縮率・顎の回転角度の 5 つの時間変化パターン (k と t の関係)

表情表出時間

一方、表情表出時間については、最適な時間というものがあるわけではなく、各表情ごとにその表出過程が自然に見える時間範囲があると考えられる。そこで、実験では、被験者に表情の表出が自然に見える上限値と下限値を決めてもらうこととする。

実験の手順

実験の手順の概略を図 5.25 に示し、以下で説明する。

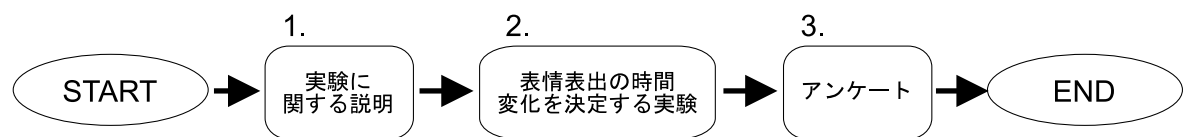


図 5.25: 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験の手順

1. まず、被験者に実験の概要を説明する。ここでは、被験者に 5 種類の異なる時間変化パターンがあることだけを知らせ、それぞれのパターンの詳細については説明しない。さらに、実験で用いるシステムを事前に使用してもらい、その操作法に習熟してもらう。

2. 被験者に実験システムを操作してもらい、表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化パターンと表情表出時間の上限値・下限値を決めてもらう。
3. 表 5.4 に示すアンケートに答えてもらう。

表 5.4: 実験 3 のアンケート内容

アンケート番号	質 問 内 容
1	中立から基本表情が表出される場合、表出のパターンの違いにより、感じる感情に違いがあるか。あれば、どのような違いを感じるか。
2	中立から基本表情が表出される場合、同じ表出パターンで、表情表出時間の違いにより、感じる感情に違いがあるか。あれば、どのような違いを感じるか。
3	基本表情から中立の表情が表出される場合、表出のパターンの違いにより、感じる感情に違いがあるか。あれば、どのような違いを感じるか。
4	基本表情から中立の表情が表出される場合、同じ表出パターンでも、表情表出時間の違いにより、感じる感情に違いがあるか。あれば、どのような違いを感じるか。

上記の 2. の詳細な手順を図 5.26 に示す。

- (1) 表情選択ボタンをクリックし、表出する基本表情を選択する。表出するのが中立の表情の場合は、表情変化前の表情を選択する。
- (2) 表情表出時間設定スライダーで表情表出時間を最小値に設定する。
- (3) 時間変化パターン選択ボタンをクリックし、5 種類の時間変化パターンから 1 つを選択し、表情表示部に表示される顔表情変化の動画像を観察する。
- (4) 顔表情の表出が自然に見えるかどうかを判断する。自然に見えなければ、表情表出時間設定スライダーで表情表出時間を増やし、(3)、(4) を繰り返す。

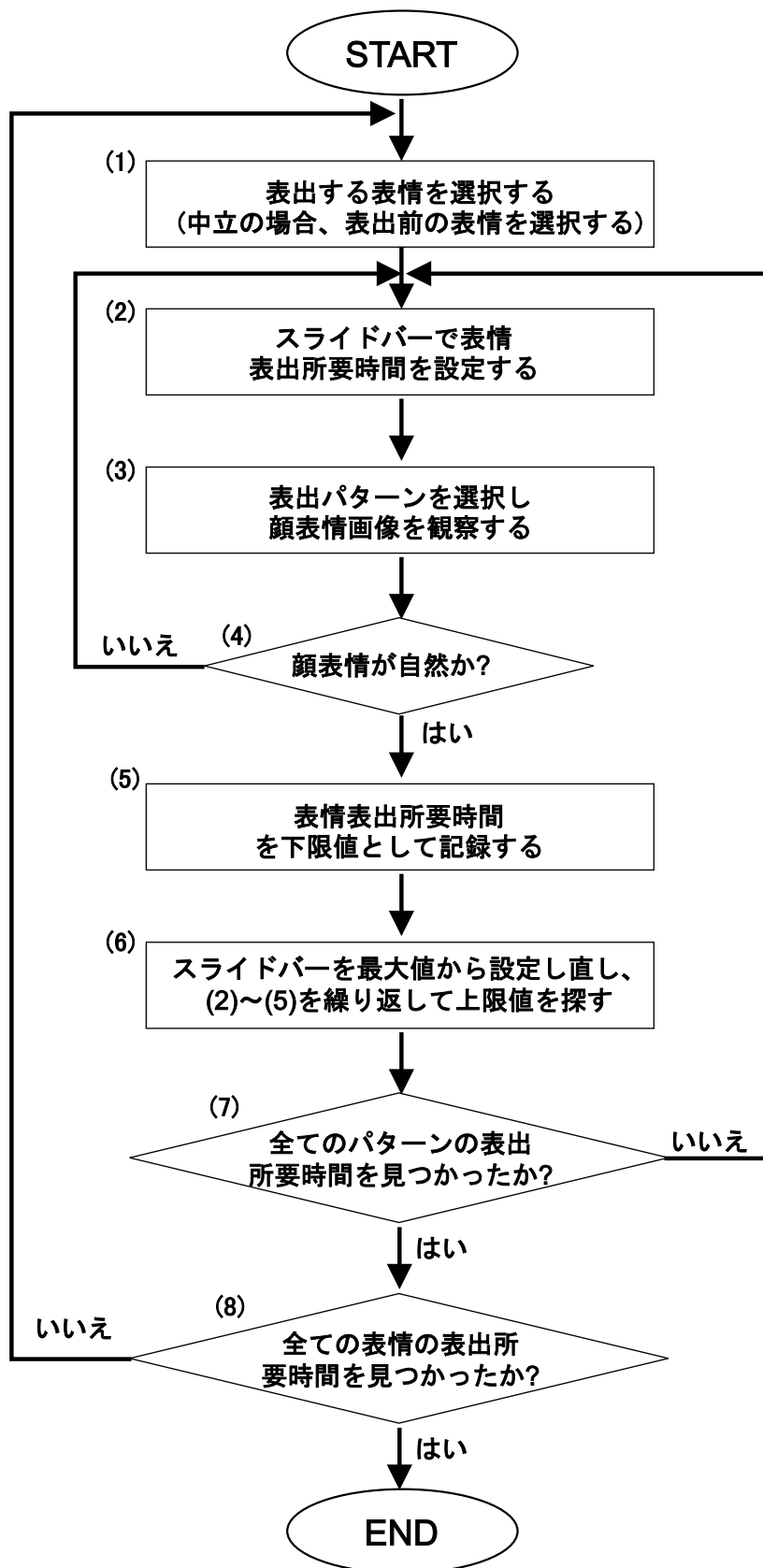


図 5.26: 表情筋収縮率と顎の回転角度の時間変化を決定する実験の詳細

- (5) (4) で顔表情の表出が自然に見えると判断した時点で、そのときの表情表出時間を下限値として記録する。いかなる表情表出時間でも顔表情の表出が自然に見えないときは、その時間変化パターンについて「不自然」として記録する。
- (6) 表情表出の所要時間を最大値に設定し直し、(3)～(5)と同様の手順で表情表出時間の上限値を求める。この際、(4)において表情表出時間は順に減らしていく。
- (7) (2)～(6)を繰り返し、すべての時間変化パターンについて表情表出時間の下限値と上限値を求める。
- (8) 上記の(2)～(7)を、中立から基本6表情へ、また基本6表情から中立への表情変化について、計12回繰り返し、それぞれについて、各時間変化パターンにおける表出所要時間の上限値と下限値を求める。

被験者

被験者は20代の男子学生5名であり、その全員が日常からGUIベースのコンピュータを使用しており、マウス操作に習熟している。

5.3.3 実験の結果

図5.27～図5.38に各表情の表出における各時間変化パターンで、各被験者が答えた表情表出時間の上限値と下限値を示す。このうち、図5.27～図5.32は中立から基本6表情が表出される場合の結果で、図5.33～図5.38は基本6表情から中立の表情が表出される場合の結果である。図では、自然に見える表情表出時間の下限値から上限値までを太線で示している。また、0.04～5秒までのいかなる表情表出時間においても表情表出が自然に見えなかった時間変化パターンについては、太線を記載していない。

また、表5.5～表5.8にアンケートの結果を示す。

表 5.5: アンケート番号1の回答

回答	人数
特に感じない	3
パターンが異なれば表出所要時間の上限値と下限値が変わる。	2
パターンVに違和感を感じるが、表出所要時間を長くすれば、違和感が減る。	1

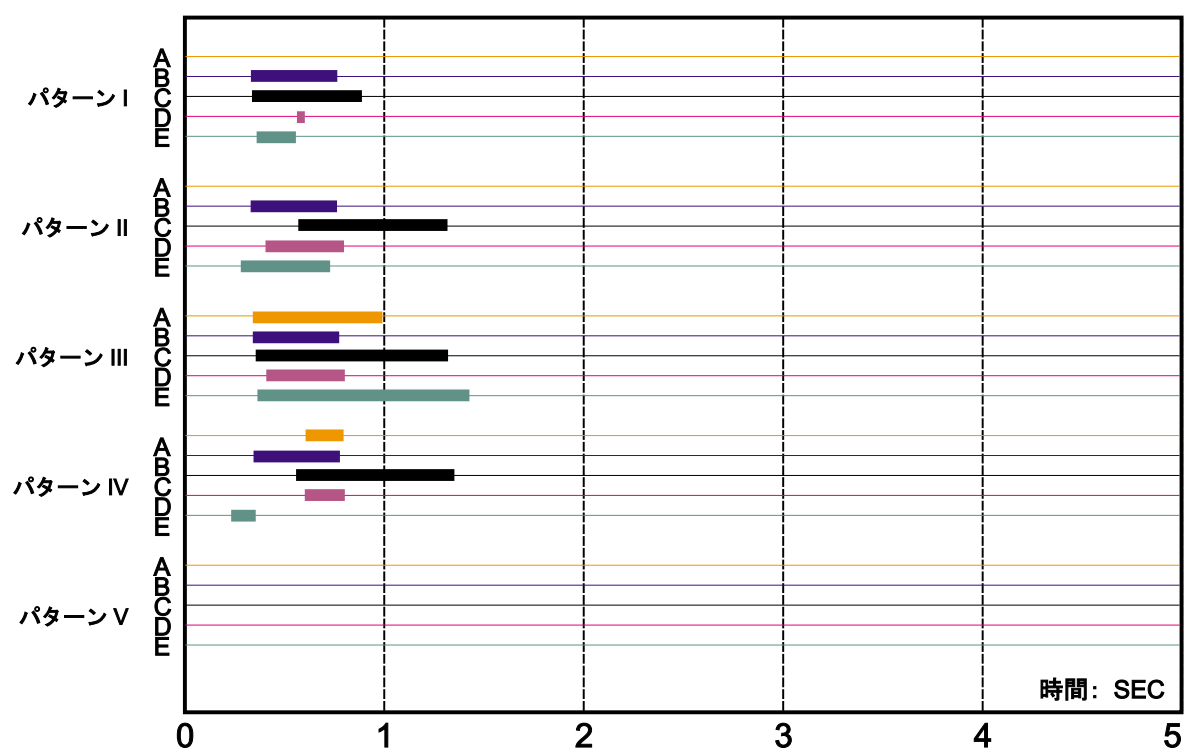


図 5.27: 中立から喜びの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

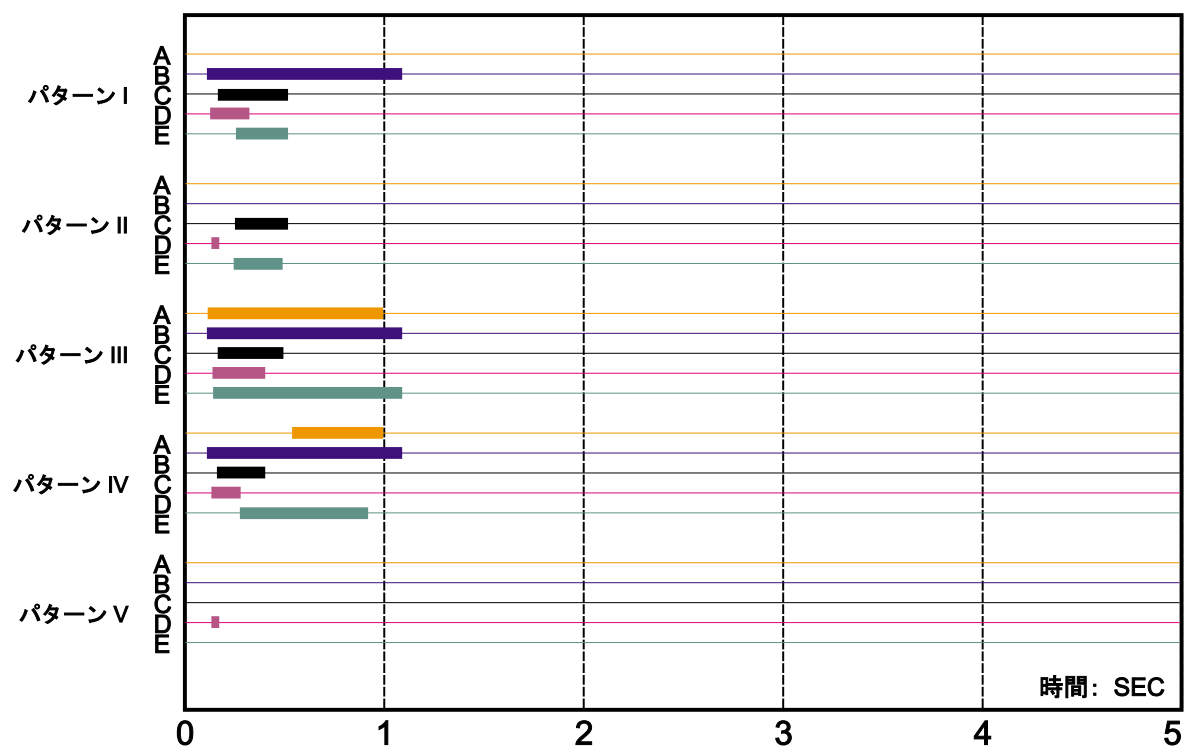


図 5.28: 中立から驚きの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

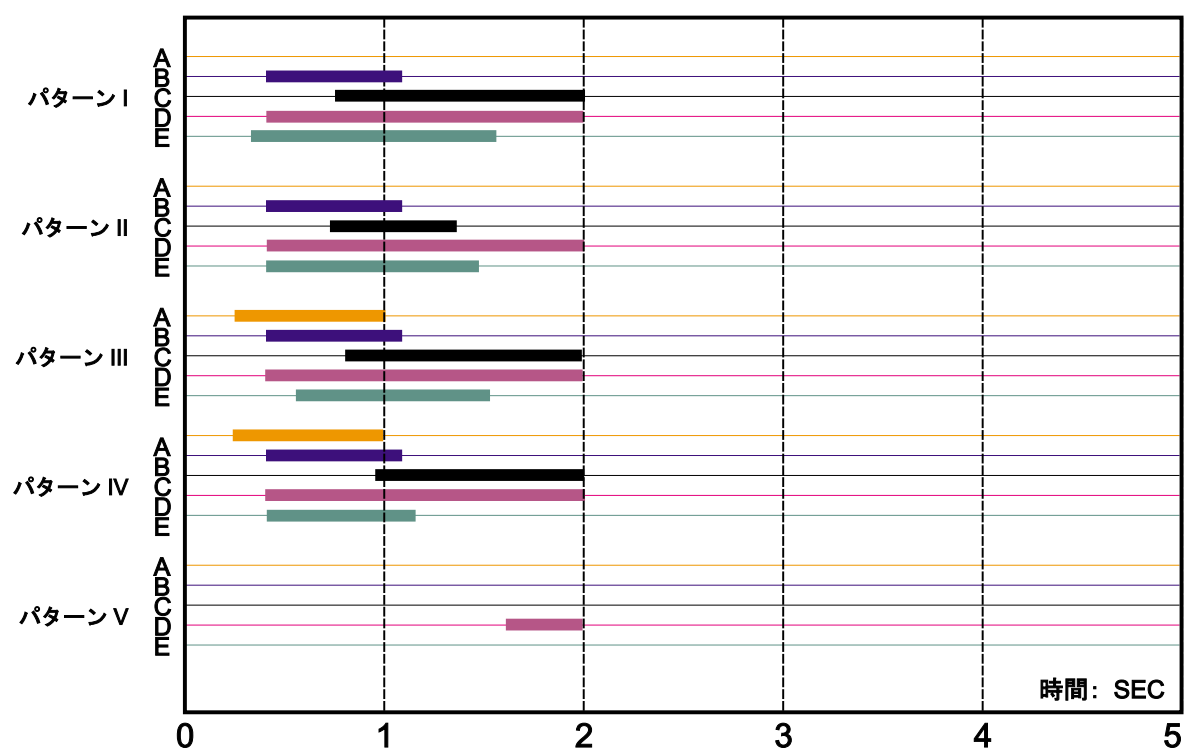


図 5.29: 中立から悲しみの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

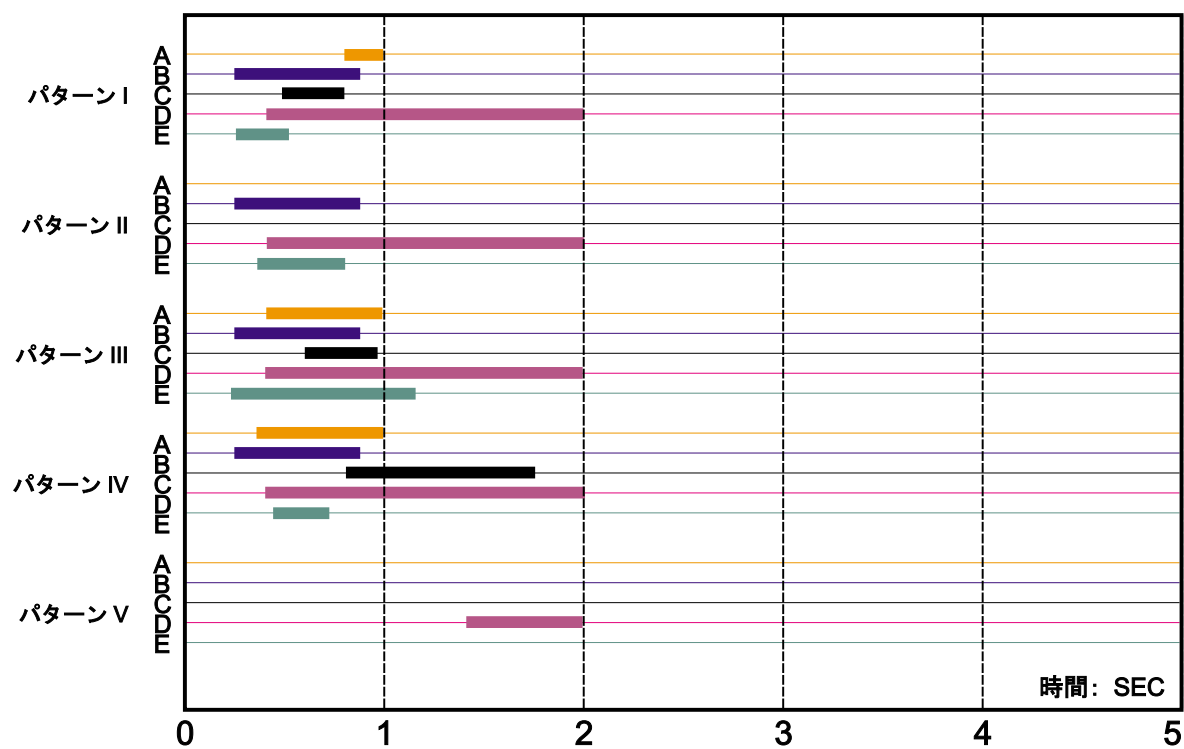


図 5.30: 中立から恐怖の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

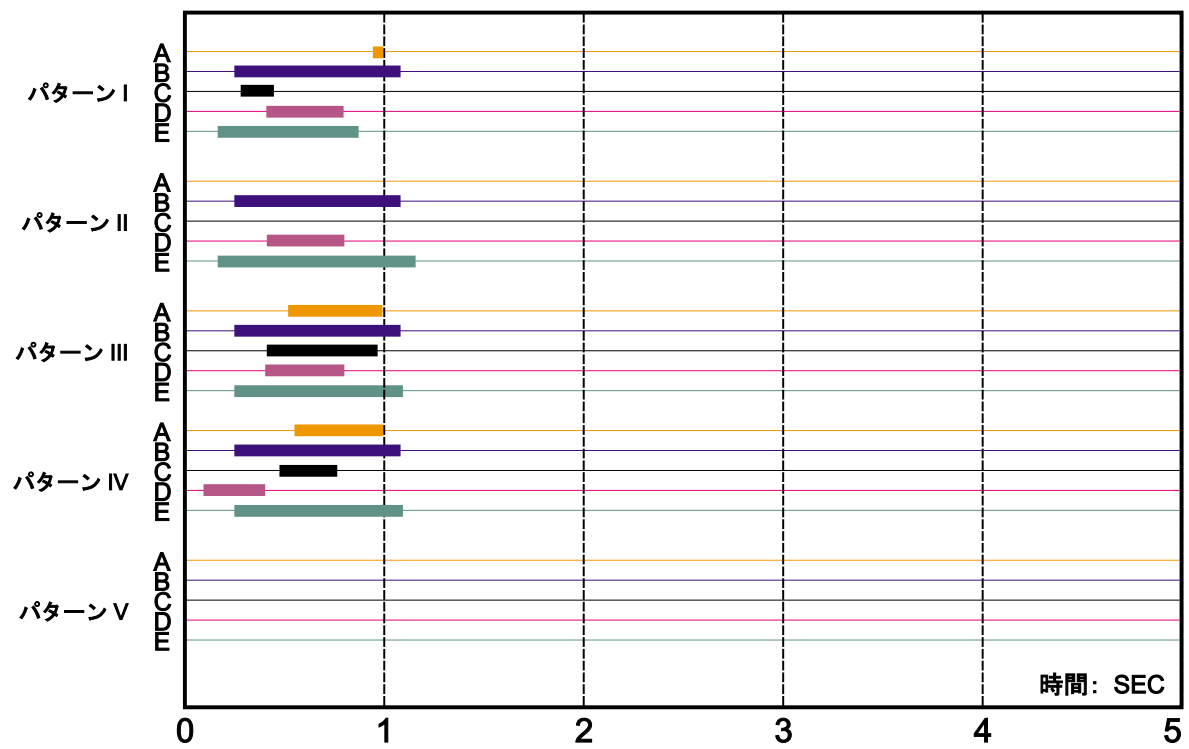


図 5.31: 中立から嫌悪の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

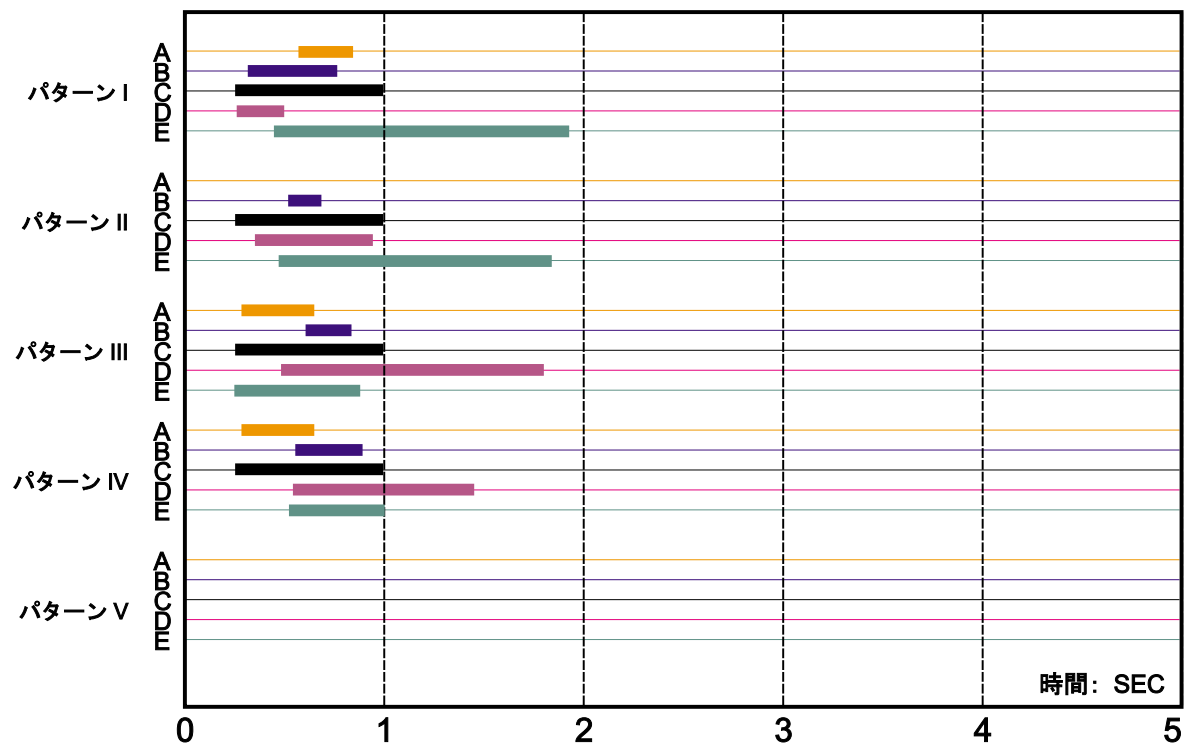


図 5.32: 中立から怒りの表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

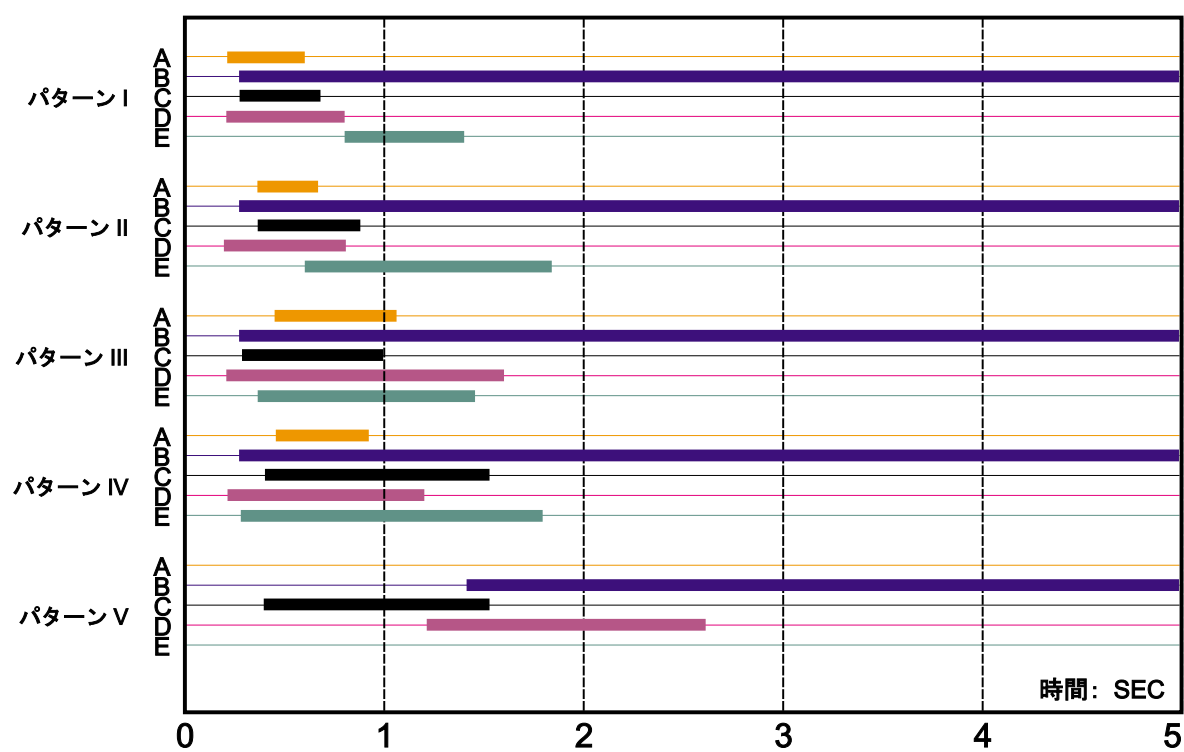


図 5.33: 喜びから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

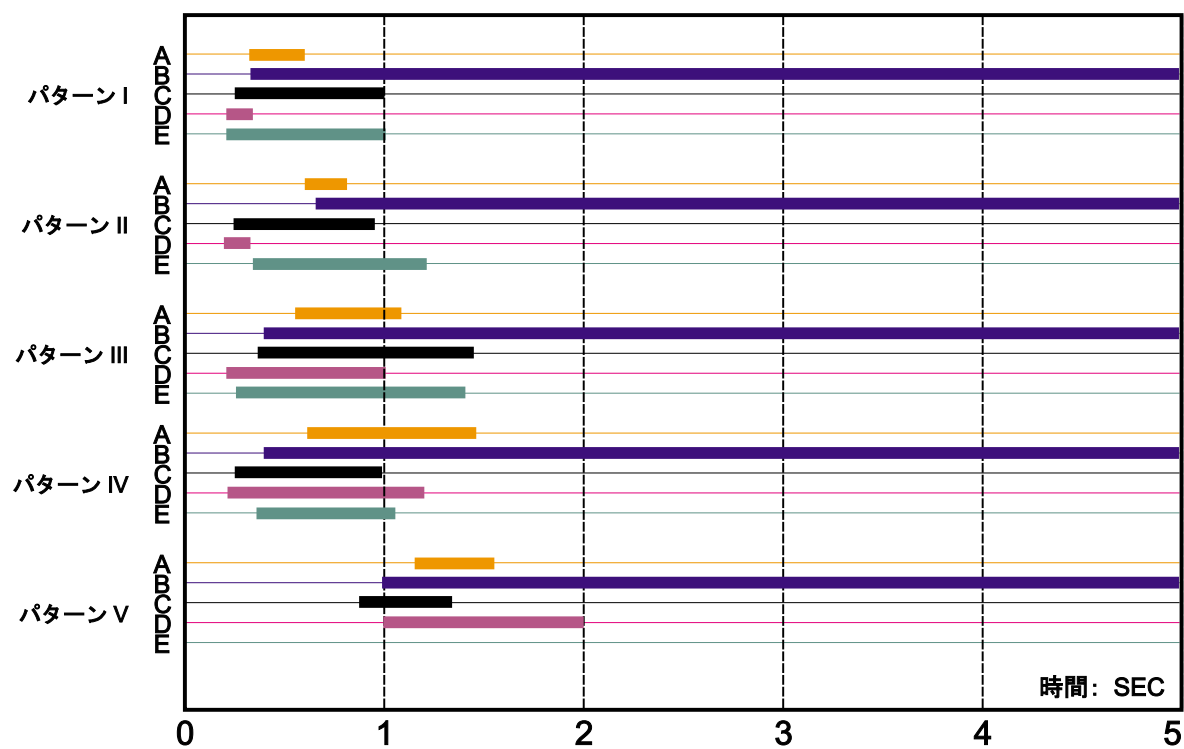


図 5.34: 驚きから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

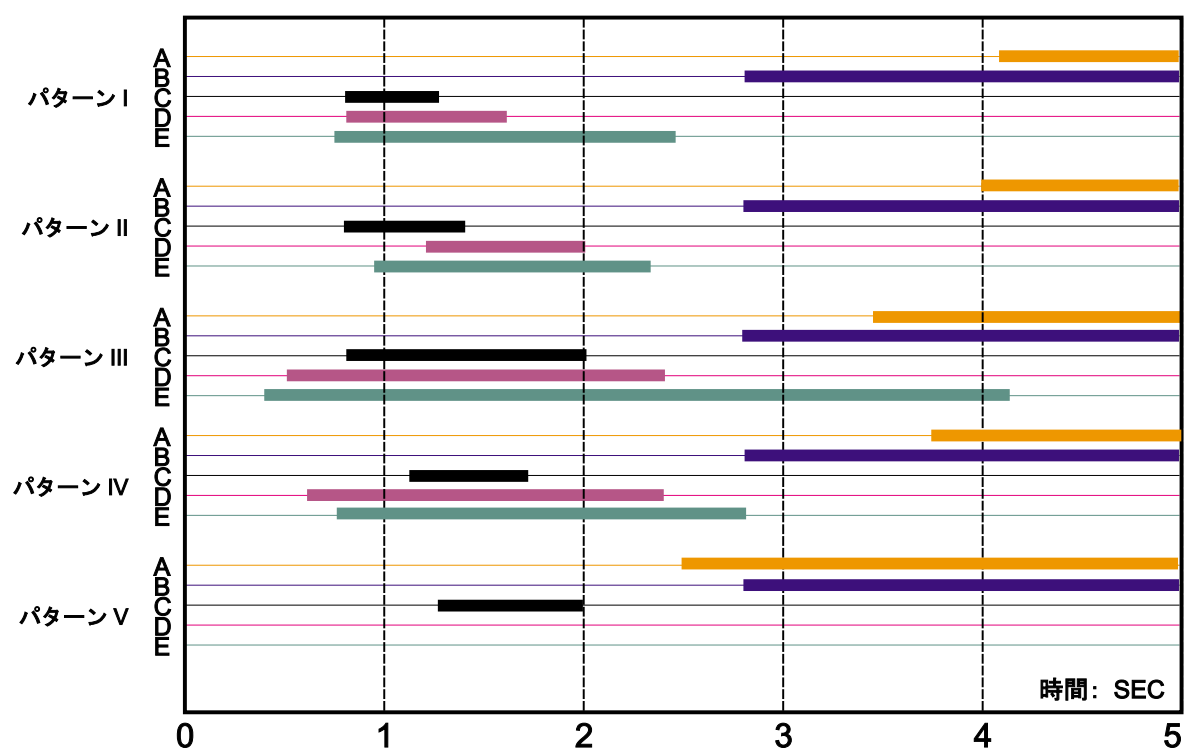


図 5.35: 悲しみから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

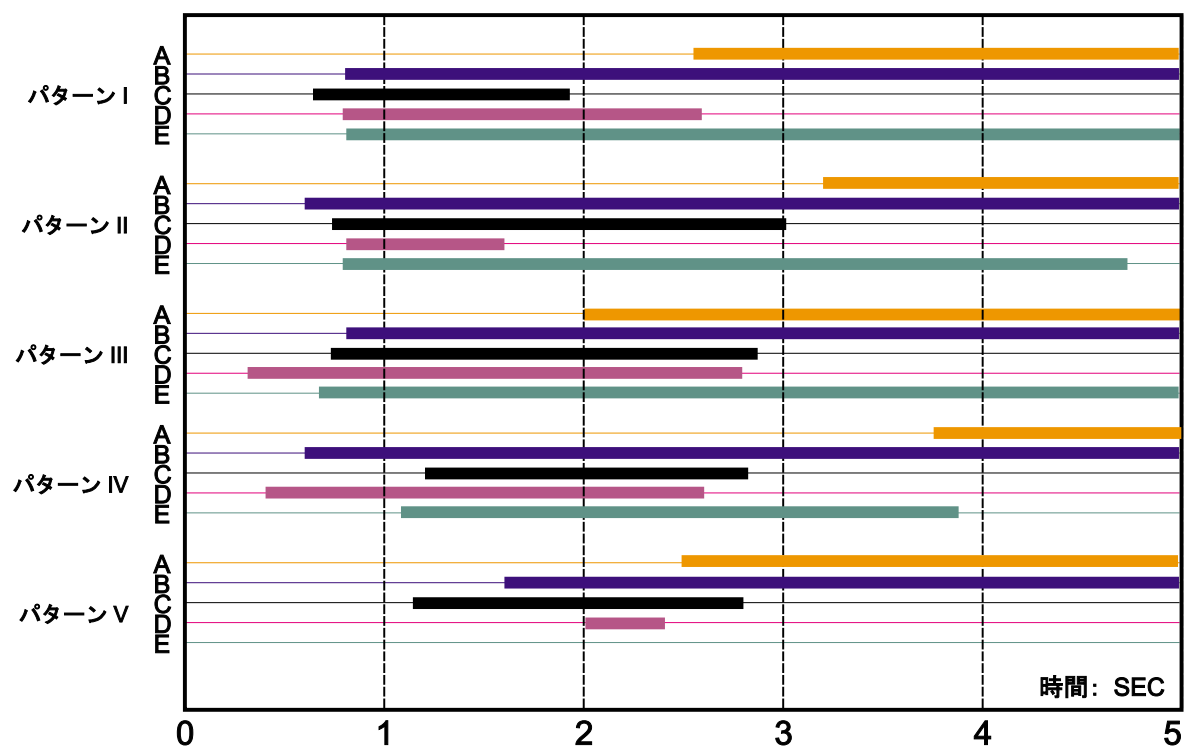


図 5.36: 恐怖から中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

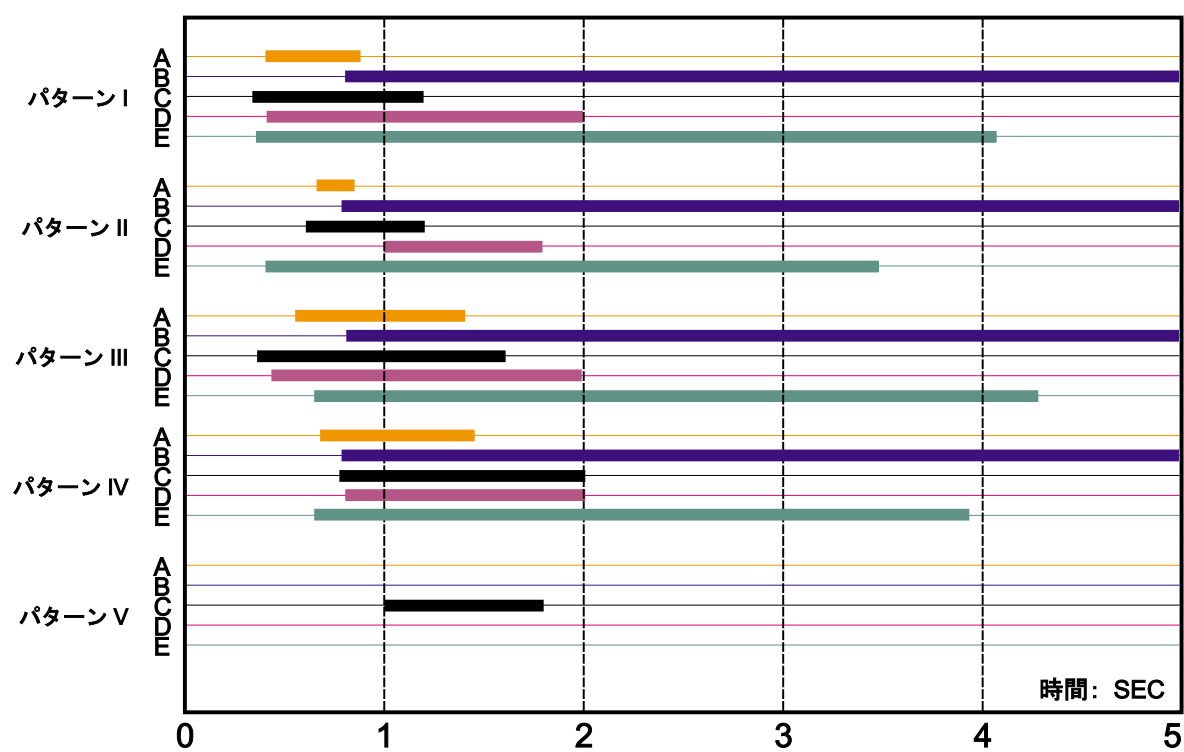


図 5.37: 嫌悪から中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

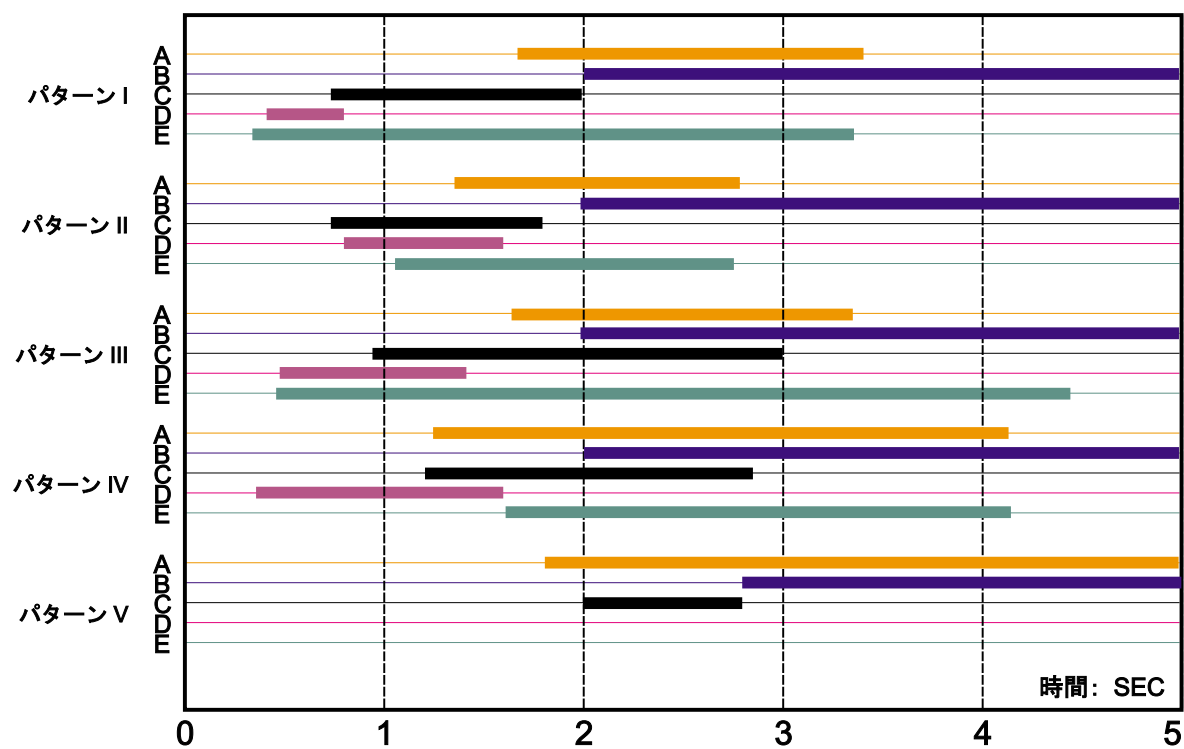


図 5.38: 怒りから中立の表情が表出する際の所要時間の上限値と下限値

表 5.6: アンケート番号 2 の回答

回答	人数
特に感じない	1
驚きの表情を提示したときには、所要時間が長ければ驚きの感情ではなく、「納得」あるいは「疑問」に感じる。	2
驚きの表情を提示したときには、所要時間が長くなると顔表情が不自然に見える。	4
驚き以外の表情について、表出所要時間が短ければ、何らかの突然の出来事で感情が誘起されるように感じるが、表出所要時間が長ければ、本を読んだり、昔のことを思い出したりして、ゆっくりと生成される感情のように感じる。	4

表 5.7: アンケート番号 3 の回答

回答	人数
基本 6 表情から中立の表情になる際には、表出所要時間が短い場合は、パターン III に従った動きが最も自然に見える。	3
パターン V について、悲しみ、恐怖、嫌悪、怒りの表情から中立の表情を表出する際、速度が遅ければ動きが止まる時間があり、いかにも感情が弱まって消えていく感じがするので、自然に見える。	3
どんな感情でも、パターン V が一瞬に止まるので不自然に感じる。	1

表 5.8: アンケート番号 4 の回答

回答	人数
中立の表情を提示した場合、中立の表情の表出速度から、その直前の顔表情が表している感情が消失する速度を感じる。	5

5.3.4 実験結果の考察

実験の結果およびアンケートの結果から、動的顔表情を合成するためには、表情筋の収縮率と顎の回転角度についてどのような時間変化パターンと表情表出時間を利用すべきかを決定する。

時間変化パターンについて

実験の結果より、中立の表情から基本 6 表情が表出される場合は、パターン I,II,V が不自然に見えるという被験者がいた。一方、基本表情から中立の表情が表出される場合は、パターン V が不自然に見えるという被験者がいた。このパターン V は、表情が中立に戻る際にその速度が途中で 0 になるものであり、アンケート結果から、「顔表情が停止する段階があるから自然」と「停止する段階があるから不自然」と逆の結果が出ている。

一方、中立の表情から基本 6 表情が表出される場合、および基本表情から中立の表情が表出される場合において、すべての被験者が不自然とは感じなかったパターンは、パターン III と IV であった。パターン III は、表情表出時の表情筋の収縮率と顎の回転角度の速度が単調増加のものであり、パターン IV は、速度が単調増加し中間時点で単調減少に転じるものである。本研究では、このうち計算の容易さから、パターン III を時間変化パターンの代表として採用する。

表情表出時間について

ここでは、各表情についてその表情の表出が自然に見える表情表出時間の範囲(上限値と下限値)および代表値を決定する。

本実験では、上記のように、実験の結果から表情表出時の時間変化パターンとしてパターン III を採用した。そこで、表情表出時間の範囲(上限値と下限値)および代表値を決定する際には、実験結果のうちパターン III のものを用いることとした。以下では、まず、各表情について表情表出時間の上限値と下限値を決定し、その後、この 2 つの値を用いて代表値を決定する。

表情表出時間の上限値と下限値は、各表情により、また各被験者により異なる結果が得られている。また、中立から基本 6 表情に変化する場合と基本 6 表情から中立に変化する場合では、異なる傾向が見られた。この傾向を以下のように分析し、表情表出時間のを決定する。

まず、中立から基本 6 表情に変化する場合、各被験者が決定した表情表出時間には多少のばらつきがあるものの、ある程度一定の範囲内に集中している。そこで、半数以上の被験者が自然に感じる上限値と下限値を求める。この実験では被験者が 5 人であるため、半数以上の被験者が自然に感じる上限値や下限値は、各被験者の上限値と下限値を大きい順に並べたときに中間になる値である。例えば、パターン III における中立から喜びの表情への表情表出時間の上限値は、被験者 A ~ E の順に、(1.00 秒, 0.76 秒, 1.32 秒, 0.80 秒, 1.44 秒) である。これを大きい順に並べると、(1.44 秒, 1.32 秒, 1.00 秒, 0.80 秒, 0.76 秒) となる。これらの値は表情表出時間の上限値であるので、表情表出時間の 3 番目の値である 1.00 秒の時の表情表出を自然と感じる被験者は、被験者 A(1.00 秒)、被験者 C(1.32 秒)、被験者 E の 3 名であり、1.00 秒は半数以上の被験者が自然と感じる値である。このようにして、各表情ごとの表情表出時間の上限値と下限値を求める。

一方、基本 6 表情から中立に変化した場合、変化前の表情によって被験者が決定した表情表出時間に大きなばらつきがある。そこで、その傾向により、以下のように表情表出時間を決定する。

(1) 喜び、驚き

喜びと驚きの表情から中立に変化する場合には、被験者 B が決定した上限値が他の被験者と比べて非常に大きい。これは、被験者 B の中立の表情表出時間に関する感覚が大多数の被験者と比べて異なっていると考えられる。そこで、この被験者 B の影響を排除するため、喜びと驚きの表情から中立に変化する表情表出時間の上限値や下限値を求める際には、中立から基本 6 表情に変化するときと同じ処理方法を利用する。

(2) 恐怖、嫌悪

恐怖と嫌悪の表情から中立に変化する場合の表情表出時間の下限値には、被験者による大きな違いが見られなかった。しかし、被験者らが決定した表情表出の上限値は明らかに 2 つのグループに分かれた。例えば、恐怖の表情から中立に変化する場合には、被験者 C と D が決定した上限値は 3 秒以下であるのに対して、被験者 A、B、E が決定した上限値は 5 秒である。また、嫌悪の表情から中立に変化する場合には、被験者 B と E が決定した上限値が 3 秒以上であるのに対し、他の被験者が決定した上限値は 2 秒以下である。そこで、この 2 つの表情から中立に変化した場合、下限値は今までに述べた中間値を取る方法を利用するが、上限値については、グループ 1 とグルー

プ2の2つに分け、グループ1は上限値の小さいグループの平均、グループ2は上限値の大きいグループの平均を上限値とする。

(3) 悲しみ

悲しみの表情から中立に変化する場合には、表情表出時間の上限値と下限値とも、恐怖や嫌悪の表情から中立に変化した時の上限値と同じように、2つのグループに分かれる。そこで、同じ傾向を示した被験者 C、D、E が決定した表情表出所要時間をグループ1、別の傾向を示した被験者 A、B が決定した表情表出時間をグループ2として、それぞれの平均を取り、上限値と下限値とする。

(4) 怒り

怒りの表情から中立に変化する場合には、各被験者が決定した表出所要時間には大きなばらつきがあり、何らかの傾向を見出すことができなかった。このことは、5.2.4項で分析したように、顔表情のみを利用して怒りの感情を表現するのは困難であることの裏付けの1つであると考えられる。ここでは特に傾向が見つけられなかったので、怒りの表情から中立に変化する場合、各被験者が決定した表情表出所要時間の上限値と下限値の中間値を取り、表情合成に用いる上限値と下限値に用いることとする。

次に、表情表出時間の上限値と下限値からその代表値を求める方法について説明する。ここで、代表値は上限値と下限値の中間の値をとることとするが、人が感じる中間値をとるために、単純に加算平均を計算するのではなく、対数平均を代表値とする。すなわち、スティーブンスの法則によれば、人間は速さや明るさといった外部からの刺激とその刺激に対する感覚の強度とは単純に比例関係にあるわけではなく、その対数同士が比例関係にある^[22]。そこで、表情表出時間の代表値 T_{type} は、上限値 T_{max} と下限値 T_{min} から次式により計算する。

$$T_{type} = \exp \left(\frac{\ln T_{max} + \ln T_{min}}{2} \right) \quad (5.2)$$

以上の方法により求めた、中立の表情から基本表情が表出される場合の表情表出時間の上限値、下限値、代表値を表5.9に示し、基本表情から中立の表情が表出される場合の表情表出時間を表5.10に示す。

また、複雑な感情を表す顔表情を合成する際には、顔の上部、中央部および下部のそれぞれに、異なる基本表情が表出される。この時の表情表出時間は、顔の各部分に表出される基本表情の表出時間のうち最も長いものに合わせる。

表 5.9: 中立から基本表情が表出される場合の表情表出時間

表情	上限値 (秒)	代表値 (秒)	下限値 (秒)
喜び	1.00	0.60	0.36
驚き	1.00	0.40	0.16
怒り	0.88	0.50	0.28
悲しみ	1.52	0.78	0.40
恐怖	1.00	0.63	0.40
嫌悪	1.00	0.63	0.40

表 5.10: 基本表情から中立の表情が表出される場合の表情表出時間

表情	上限値 (秒)	代表値 (秒)	下限値 (秒)
喜び	1.44	0.63	0.28
驚き	1.40	0.71	0.36
怒り	3.00	1.70	0.96
悲しみ (グループ 1)	2.84	1.31	0.60
悲しみ (グループ 2)	5.00	3.95	3.12
恐怖 (グループ 1)	2.84	1.43	0.72
恐怖 (グループ 2)	5.00	1.90	0.72
嫌悪 (グループ 1)	1.68	0.97	0.56
嫌悪 (グループ 2)	4.68	1.62	0.56

5.4 まとめ

本章では、自然な表情合成を行うために、表情筋の収縮率と顎の回転角度、およびその時間変化を決定するための被験者による主観評価実験の方法と結果について述べた。

まず、実験 1 では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値を求めた。具体的には、各基本 6 表情において表情筋の収縮率と顎の回転角度を変化させ、被験者が最も自然でその表情をよく表していると思う表情筋の収縮率と顎の回転角度を決めてもらった。そのうち、各表情筋の収縮率と顎の回転角度について、平均値から標準偏差以上離れた値を無効として省き、残った有効な値の平均値を代表値とした。

次に、実験 2 では、実験 1 で求めた代表値により合成した顔表情がよく感情を表すかどうかを評価した。具体的には、実験 1 で求めた代表値により合成した顔表情と 5 種類の被験者設定値により合成した顔表情を比較してもらい、代表値により合成した顔表情が自然に見えることを確認した。また、同時に、顔表情だけを利用して、恐怖、嫌悪、怒りの感情を表現することは難しいこともわかった。

最後に、実験 3 では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化、すなわち時間変化パターンと表情表示時間の上限値、下限値、代表値を求めた。具体的には、5 種類の時間変化パターンを用意し、各被験者に中立から基本 6 表情を表出する過程を提示して、それぞれの時間変化パターンについて表情表出時間の上限値と下限値を決めてもらった。実験の結果から、表情の表出が自然に見えるパターン III(筋肉の収縮率の速度が単調増加)を代表値として選択した。また、パターン III について、被験者の半数以上が自然と感じる表情表出時間の上限値と下限値を決定した。さらに、代表値として上限値と下限値の対数平均を求めた。

以上、本章では、AU/筋肉運動生成サブシステムが参照する表情データベースとして、表情筋の収縮率と顎の回転角度、およびその時間変化を決定した。次章では、本章で求めた表情データベースを用いた動的表情合成システムの動作確認について述べる。

第 6 章 eCOM の動作確認実験

本章では、第 5 章の実験で求めた表情筋の収縮率と顎の回転角度を eCOM の筋肉データベースに登録し、eCOM の動作を確認するための実験の目的、方法、および結果を述べる。

6.1 実験の目的

本実験は、第 4 章で試作した表情合成システム eCOM が感情入力ファイルに従って動作するかを確認すること、および表情合成速度を評価することを目的とする。

6.2 実験方法

本実験では、童話「やまんばの木」^[23] をシナリオとして、その登場人物が感情を表す場面に合わせて感情入力ファイルを作成し、童話を音声で再生しながら、eCOM により感情入力ファイルに従って合成した表情を表示させる。以下では、実験のシステム構成と実験手順について述べる。

6.2.1 実験時のシステム構成

eCOM の動作確認実験のシステム構成を図 6.1 に示す。パソコンで動作する東芝音声合成システムにより童話を合成音声で朗読し、そのタイミングに合わせて、グラフィックワークステーションで合成された表情をディスプレイに表示する。

実験手順

動作確認実験の手順は以下に示す。

1. まず、「やまんばの木」から感情を表す場面を探し、表 3.2 に示した、表情合成システムが表現可能な感情として記録する。
2. 「やまんばの木」をテキストとしてパソコンに入力し、音声合成システムを利用してそのテキストを合成音声で再生する。

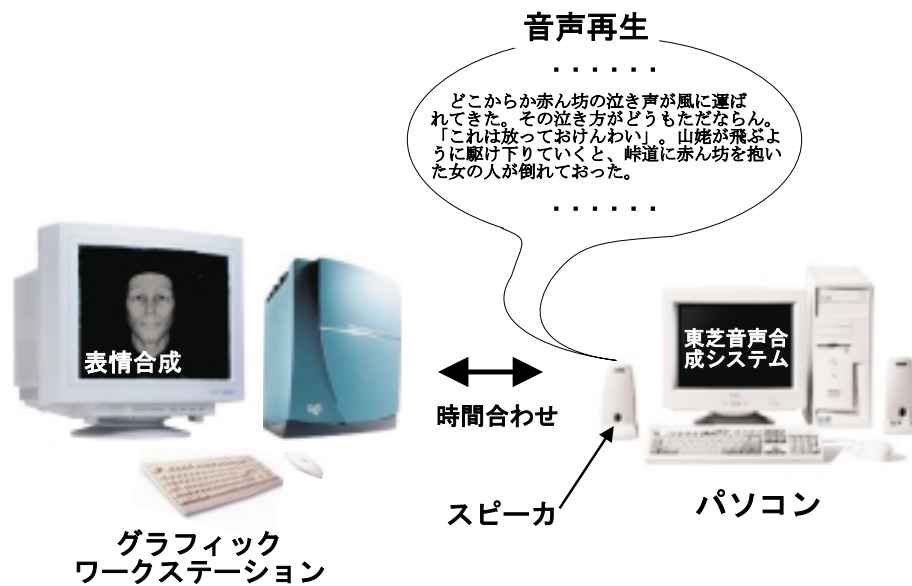


図 6.1: 動作確認実験に用いるシステムの構成

3. 音声の再生時間に合わせて感情持続時間と表情表出速度を決める。
4. 1. で記録した感情、および 3. で設定した感情持続時間と表情表出速度から感情入力ファイルを作成する。
5. 「やまんばの木」のテキストの再生開始にタイミングを合わせて、感情入力ファイルによる表情合成を開始する。ここでは、合成した顔動画は縦約 17cm(600 ピクセル)、横約 15cm(550 ピクセル)である。
6. 表情合成時のフレームレートを計測する。

6.3 実験の結果と考察

図 6.2、図 6.3 に童話の一部をもとに表情を合成した例を示す。図中の左側は、合成音声により再生された童話のテキストである。この例では、童話の内容を音声合成システムにより再生するのに要した時間は 63 秒であった。図の中央の列は、童話の内容に基づく感情入力ファイルの内容を示す。この感情入力ファイルのフォーマットは 4.2.1 項で述べた入力ファイルフォーマットに従っている。図中の右側には、eCOM に入力された感情入力ファイルに従って合成された表情を示す。これらは、各感情を表す表情を表出した後の画像であり、実際にはその表出過程も動画像として表示されている。

音声再生

昔、山姥山の山奥に、山姥が住んでおった。今年でいくつになるのか、山姥は、もう年など覚えておらん。ある日の夕暮れ時のこと。機織りを終えた山姥が、「どれ、晩飯でもつくろうかい」と、囲炉裏に鍋をかけていると、どこからか赤ん坊の泣き声が風に運ばれてきた。

その泣き方がどうもただならん。

「これは放っておけんわい」山姥が飛ぶように駆け下りていくと、

峠道に赤ん坊を抱いた女の人が倒れておった。

感情入力ファイル

感情名	持続時間	表出速度
中立	30	1
心配	3	1
決断	5	1
疑問と驚き	2	1

表情合成



図 6.2: 童話の内容に応じた感情入力ファイルと表情画像

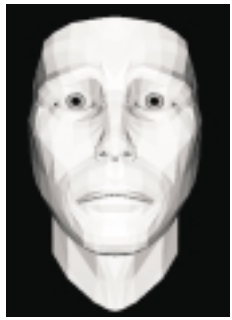
音声再生	感情入力 ファイル	表情合成
そのまわりを恐ろしい狼が取り囲んで、牙をむいておる。	感情名 持続時間 表出速度	
「こら、あっちへ行つとれ！」	驚きと恐怖 3 1	
山姥は、杖を振り上げて狼を追ひ払うと、女の人を抱き起こした。ひどい熱だ。とても助かりそうにない。	怒りと嫌悪 3 1	
「この子をよろしくお頼みします」女の方は息を引き取ってしまった。	心配 10 1	
	悲しみ 7 1	

図 6.3: 童話の内容に応じた感情入力ファイルと表情画像 (続き)

これらの図からもわかるように、実験では、システムの設計通りに、童話のテキスト再生に合わせてあらかじめ設定した感情入力ファイル記述されている感情名、感情持続時間、および表情表出速度に従い表情を合成することが可能である、また、中立の表情表出時に自発性瞬目が発生していることを確認した。さらに、表情合成を行う際のフレームレートは25フレーム/秒であり、十分滑らかな動画像として表示できることを確認した。ヒューマンインタフェースに利用可能と考えられる。

最後に、研究室の数名の男子学生に、童話を音声で再生しながら、顔表情合成の経過を観察してもらい、その感想を聞いた。以下のような感想が寄せられた。

1. とても面白かった。
2. 恐ろしいほどよく動く。
3. 中立の顔表情が表出されている際に、瞬きがあるので、リアルであった。
4. 怒りなどの感情は、童話の音声再生がなければ、理解できなかったと思われる。童話の音声再生を伴わせることで、その表情から感情が伝わってきた。
5. 1分間に顔表情が7回も変化して、おかしい。
6. 視線の移動がなく、見つめられている感じがして、不自然に感じた。

これらの感想から、以下のことが分かる。

1. 表情を自然に見せるためには、瞬目の生成が有効である。
2. 顔表情だけでは伝わらなかった怒りの感情も、文脈など、顔表情以外の手がかりがあれば、十分伝えることが可能である。
3. 顔表情を合成する際に、自然な表情を見せるためには、視線の変化をも合成し、一点に凝視しないようにすることも重要である。

また、本研究では感情の生成は研究の対象となっていないので、動作確認実験では、童話の内容に応じて登場人物の感情を探し出し、その持続時間と表出速度を設定して感情入力ファイルを作成した。eCOMは、アフェクティブインタフェースの出力チャンネルの基礎研究として試作したが、将来、テキストから自動的に感情入力ファイルを生成できれば、表情画像付きの童話読み上げや電子メール読み上げに応用することも可能である。

第 7 章 結論

本研究では、人間と機械の接点となるインタフェースに人間らしい感情的機能を組み込もうとする、新しいヒューマンインタフェース「アフェクティブインタフェース」の実現に向けた基礎研究として、感情からリアルタイムに顔表情を合成し動画像として表示する動的顔表情合成手法を提案し、実際に動的顔表情合成システム expression COMposer (eCOM) を試作してその動作を確認した。

まず、表情合成に関する従来手法を展望し、その特徴、長所、短所を整理して、アフェクティブインタフェースの出力として適切である筋肉モデル法を基本的方法として選択した。筋肉モデル法は、人間の表情が表情筋の収縮による皮下組織や皮膚表面の変形として現れることに注目し、表情筋の収縮をシミュレーションして顔表面の変形を算出することによって表情変化を合成する手法である。

次に、感情の分類法、表情記述法 FACS、表情筋などの感情や表情に関する従来の知見を展望し、それらを基礎とした動的顔表情合成手法を提案した。提案した動的顔表情合成手法は、(1) 感情から顔の 3 領域における基本表情の組み合わせを決定し、(2) その組み合わせから各表情筋の収縮・弛緩を決定する。そして、(3) 表情筋の収縮・弛緩によって引き起こされる顔表面の変形を計算して、(4) それをコンピュータグラフィックスとして提示する、という 4 段階から構成される。また、中立の表情の際には顔画像を自然に見せるための瞬目も併せて合成する。(3) の段階では、表情筋を線形筋と括約筋に分類し、それぞれについて Waters が提案した線形筋モデルと括約筋モデルを用いて顔表面の変形を計算する。また、口の開閉については顎の回転モデルにより下顎近辺の皮膚表面の変形を計算する。

そして、提案した動的顔表情合成手法に基づいて、実際に表情合成システム eCOM を試作した。eCOM には、中立を含めた 35 種類の感情を入力することが可能であり、それらの表情の表出過程を動画像として表示することができる。

さらに、試作した表情合成システム eCOM により自然な表情を表出させるために、各表情表出時の表情筋の収縮率および顎の回転角度の代表値、およびその時間変化を 3 つの被験者実験により決定した。実験 1 では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の代表値を求めた。具体的には、各基本 6 表情において表情筋の収縮率と顎の回転角度を変化させ、被験者が最も自然でその表情をよく表していると思う表情筋

の収縮率と顎の回転角度を決めてもらった。そのうち、各表情筋の収縮率と顎の回転角度について、平均値から標準偏差以上離れた値を無効として省き、残った有効な値の平均値を代表値とした。実験 2 では、実験 1 で求めた代表値により合成した顔表情がよく感情を表すかどうかを評価した。具体的には、実験 1 で求めた代表値により合成した顔表情と実験 1 での 5 種類の被験者設定値により合成した顔表情を比較してもらい、代表値により合成した顔表情が自然に見えることを確認した。ただし、怒りの表情の合成は難しいことがわかった。実験 3 では、各表情における表情筋の収縮率と顎の回転角度の時間変化、すなわち時間変化パターンと表情表示時間の上限値、下限値、代表値を求めた。具体的には、5 種類の時間変化パターンを用意し、各被験者に中立から基本 6 表情を表出する過程を提示して、それぞれの時間変化パターンについて表情表出時間の上限値と下限値を決めてもらった。実験の結果から、表情の表出が自然に見えるパターンとして筋肉の収縮率の速度が単調増加するものを選択した。また、この時間変化パターンについて、被験者の半数以上が自然と感じる表情表出時間の上限値と下限値を決定し、さらにその代表値として上限値と下限値の対数平均を求めた。

最後に、実験により求めた表情筋の収縮率と顎の回転角度を eCOM の筋肉データベースに登録し、eCOM の動作確認実験を行った。実験では、「やまんばの木」という童話をシナリオとして、その内容をコンピュータの合成音声で朗読するとともに、あらかじめシナリオに沿って作成した感情を入力として、その表情を動画像としてリアルタイムで表示できることを確認した。また、実験での顔表情表示時のフレームレートは 25 フレーム / 秒であった。

以上、本研究では、アフェクティブインタフェースの出力チャンネルとして、感情から顔表情をリアルタイムで合成する手法を提案し、実際に表情合成システム eCOM を試作した。この研究により以下のことがわかった。

- 提案した動的顔表情合成手法は、アフェクティブインタフェースの出力チャンネルとして利用可能である。
- 表情筋の収縮率と顎の回転角度、およびその時間変化は、被験者による主観評価実験により求めることができる。
- 怒りの感情を伝えるためには、顔表情だけではなく、音声などの他の情報と組み合わせる利用することが有効である。
- 同じ表情を表示しても、その表出速度により感じ方が異なる。

- 瞬目は表示している顔画像を自然に見せるのに有効である。

また、今後の発展としては、以下の課題が考えられる。

- 感情の強さを表情として表現する方法の検討
- 視線の動きを合成する方法の検討

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究のあるべき方向性から論文の構成まで、あらゆる面において、時には優しく、時には厳しく、細やかで熱意溢れるご指導頂きました吉川榮和教授に深甚なる感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、研究の方向から手法まで直接ご指導を頂き、また、執筆にあたって、廃寝忘食に論文作成に助力頂き、救いの手を差し伸べて下さいました下田宏助教授に心より感謝を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、いつもご助言を頂きました博士課程学生のWu Wei氏、石井裕剛氏、小澤尚久氏に、深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、貴重な時間を割いて頂き、評価実験に参加して頂きました長松隆助手、博士課程学生の大林史明氏、修士課程学生の市口誠道氏、青竹雄介氏、山本専氏、岩田大司氏、小牧大輔氏、笹井寿郎氏、米田賀一氏、大坂融弘氏、伊藤京子氏、沖陽三氏、学部学生の社領一将氏、松崎剛士氏、安井崇博氏、秘書の石井令乃奈氏に深く感謝いたします。

最後に、研究を進めるにあたり、研究室での快適な研究生活を送るために、胃袋の面で大変お世話頂いた谷友美秘書、藤岡美紀秘書、ならびに、長い夜を共に過ごして下さいました吉川研究室の皆様に、深く感謝致します。

参考文献

- [1] Rosalind W. Picard : Affective Computing, The MIT Press (1997)
- [2] 國弘威 : 動的表情認識による感情推定手法に関する基礎研究, 京都大学大学院エネルギー科学研究科修士論文 (1999)
- [3] Frederic I. Parke : Techniques for facial animation, New Trends in Animation and Visualization, pp. 229-241 (1991)
- [4] Frederic I. Parke : Computer generated animation of faces, Master's thesis, University of Utah, Salt Lake City, UT (1972)
- [5] Frederic I. Parke : Parameterized Models for Facial Animation, IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 61-68 (1982)
- [6] P. Bergeron and P. Lachapelle : Controlling facial expressions and body movements, Advanced Computer Animation, SIGGRAPH '85 Tutorials, Volume 2, pp. 61-79 (1985)
- [7] W. Welsh, S. Searby, and J. Waite : Nodel-base image coding, British Telecom Technology Journal, Volume 8, Number 3, pp 94-106 (1990)
- [8] K. Waters : A Muscle Model for Animating Three-Dimensional Facial Expression, Computer Graphics, SIGGRAPH '87, Volume 21, Number 4, pp. 17-24 (1987)
- [9] 内藤剛人, 竹内彰一, 所真理雄 : 表情設計支援のための筋肉エディタ, 日本ソフトウェア科学会第 10 会大会, pp. 85-88 (1993)
- [10] Y. Lee, D. Terzopoulos, and K. Waters : Realistic Modeling for Facial Animation, Computer Graphics Proceedings, SIGGRAPH '95, pp. 55-62 (1995)
- [11] R. M. Koch, M. H. Gross, F. R. Carls : Simulating Facial Surgery Using Finite Element Models, Conference Proceedings, SIGGRAPH '96, pp. 421-428 (1996)

- [12] N. Magnenat-Thalmann, 他 : Abstract muscle actions procedures for human face animation, Visual Computer, Volume 3, Number 5, pp. 290-297 (1988)
- [13] Russell and Bullock : Multidimensional scaling of emotinal facial expressions: Similarity from preschoolers to adults, Journal of Personality and Social Psychology, 48, pp.1290-1298 (1985)
- [14] Ekman and Friesen 著, 工藤訳編 : 表情分析入門, 誠信書房 (1987)
- [15] 福井 : 感情の心理学, 川島書店 (1990)
- [16] Ekman and Friesen : The Facial Action Coding System, Consulting Psychologists Press (1978)
- [17] Pierre Gosseline, Gilles Kirouac and Francois Y. Dore : Components and Recognition of Facial Expression in the Communication of Emotion by Actors, What the Face Reveals, Oxford University Press, pp. 243-267 (1997)
- [18] 田多英興 他 : 瞬きの心理学, 北大路書房 (1991)
- [19] 星野聖 : Wiener 過程の初通過時間と自発性瞬目, 第 12 回ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集, pp. 643-648 (1996)
- [20] Frederic I. Parke and Keith Waters : Computer Facial Animation, A K Peters Ltd. (1996)
- [21] 平林雅英 : C 言語による最新プログラム事典 (第 1 巻), 技術評論社 (1992)
- [22] 大山正 編 : 実験心理学, 東京大学出版会 (1984)
- [23] 木暮正夫 : やまんばの木, 佼成出版社 (1989)

付 録 目 次

付録 A 表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験 (実験 1) の結果	付録 A-1
---------------------------------------	--------

付 録 表 目 次

A.1	喜びの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-1
A.2	驚きの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-1
A.3	悲しみの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-2
A.4	恐怖の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-2
A.5	嫌悪の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-3
A.6	怒りの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度	付録 A-3

付録 A 表情筋の収縮率と顎の回転角度を決定する実験 (実験 1) の結果

実験 1 で各被験者が決定した表情筋の収縮率と顎の回転角度を表 A.1 ~ 表 A.6 に示す。

表 A.1: 喜びの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9 人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
大頬骨筋	0.10	0.18	0.19	0.24	0.22	0.40	0.21	0.14	0.03
眼輪筋 眼窩部	0.30	0.24	0.70	0.20	0.70	0.21	0.41	0.51	0.86
顎の回転 (°)	12.0	10.0	6.0	6.3	7.9	0.4	9.1	0.1	18.1

表 A.2: 驚きの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9 人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
前頭筋 内側	0.08	0.11	0.24	0.17	0.00	0.19	0.28	0.12	0.17
前頭筋 中央	0.08	0.18	0.24	0.16	0.14	0.40	0.25	0.20	0.15
前頭筋 外側	0.08	0.19	0.26	0.17	0.09	0.45	0.27	0.14	0.17
眼輪筋 上眼瞼部	-0.44	-0.50	-0.58	-0.50	-0.45	-0.52	-0.40	-0.19	-0.44
顎の回転 (°)	19.5	12.0	46.0	15.4	9.3	13.0	21.9	9.9	14.0

表 A.3: 悲しみの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
前頭筋 内側	0.15	0.43	0.23	0.37	0.11	0.38	0.41	0.22	0.38
皺眉筋	0.22	0.14	0.22	0.22	0.28	0.20	0.36	0.14	0.36
鼻根筋	0.04	0.14	0.28	0.10	0.17	0.11	0.25	0.10	0.48
口角下制筋	0.27	0.22	0.17	0.44	0.31	0.36	0.15	0.17	0.25
眼輪筋 下眼瞼部	0.35	0.54	-0.20	0.50	0.88	0.34	0.42	0.36	0.11
顎の回転 (°)	0.0	0.0	0.0	1.2	4.9	0.0	0.1	1.9	10.0

表 A.4: 恐怖の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
皺眉筋	0.28	0.15	0.75	0.20	0.48	0.42	0.06	0.31	0.32
鼻根筋	0.23	0.51	0.88	-0.12	0.92	1.15	1.00	0.23	0.28
眼輪筋 上眼瞼部	-0.11	-0.38	-0.13	-0.82	-0.78	-0.20	0.58	-0.06	-1.00
眼輪筋 下眼瞼部	0.36	0.60	-0.21	0.84	0.57	0.88	-0.13	0.22	0.63
顎の回転 (°)	12.8	4.0	0.0	-5.4	4.6	6.0	1.4	7.4	10.0

表 A.5: 嫌悪の表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
皺眉筋	0.18	0.30	0.84	0.18	0.29	0.22	0.29	0.55	0.34
鼻根筋	0.30	0.30	1.00	0.77	0.84	-0.30	1.70	0.88	0.22
上唇挙筋	0.09	0.07	0.02	0.14	0.01	0.18	0.05	0.04	0.11
上唇鼻翼挙筋	0.03	0.18	0.58	0.23	0.19	0.38	0.05	0.11	0.13
眼輪筋 上眼瞼部	0.15	0.10	0.58	-0.14	0.34	0.60	0.28	0.28	0.38
眼輪筋 下眼瞼部	0.49	0.33	0.62	0.45	0.74	0.32	0.21	0.19	0.25
顎の回転 (°)	5.0	0.0	0.0	-10.7	2.6	-9.0	0.0	1.4	0.0

表 A.6: 怒りの表情を表現する表情筋の収縮率と顎の回転角度

表情筋	9人の被験者 (A ~ I) が決定した 表情筋の収縮率と顎の回転角度								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
皺眉筋	0.38	0.14	0.49	0.23	-0.25	0.05	0.22	0.69	0.56
鼻根筋	0.32	0.55	0.52	0.91	0.59	1.55	1.57	0.73	0.64
眼輪筋 上眼瞼部	0.18	0.10	0.06	0.21	0.46	0.65	0.25	0.04	0.37
笑筋	0.09	0.14	-0.10	0.29	0.23	0.12	0.02	0.07	0.26
下唇下制筋	0.48	0.22	0.75	-0.26	-0.09	1.04	0.21	0.54	0.44
口輪筋	0.58	0.50	0.25	-0.21	-0.22	0.62	0.39	0.50	0.38
顎の回転 (°)	5.6	4.0	0.0	-3.4	17.2	3.0	0.1	0.2	12.0