

NAIST-IS-DT9761024

博士論文

運動の制約を考慮した手の 3 次元 CG モデリングに関する研究

安室 喜弘

2000年2月7日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

安室 喜弘

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
湊 小太郎 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

運動の制約を考慮した手の3次元CGモデリングに関する研究*

安室 喜弘

内容梗概

コンピュータグラフィクス (CG) の制作において、人物像の合成は重要な要素であり、その動画はキャラクターアニメーションと呼ばれ、テレビ、映画、コンピュータゲーム等、需要は非常に多い。一方、CGで人物を合成する際にリアルな形状や動作を与えることは難しい問題のひとつであり、多くの手間や経験を要する。その中でも、手は人間の体においてもっとも器用な部分であり、その形状や動作による表現が非常に豊富であるが、その表現の豊かさゆえ、モデリングも容易ではない。

本研究は人の手の姿勢・形状を忠実にCGによって再現できる手の3次元モデルを提案する。人の手が潜在的に有する特性に対し、姿勢・動作設定およびその効果的な表現方法に注目してモデリングを行う。モデルは手の姿勢を表す骨格モデルとその上を覆う皮膚モデルとによって構成される。

骨格モデルは、自然な手の姿勢を生成し数学的に記述するものである。本研究では、様々な筋の影響が釣り合った結果として手の姿勢が決定するという基本的な機構に対し、力の重ね合わせのアナロジを適用したモデリング手法を提案する。実際の人の手は、20を超える骨により骨格が構成され、また遠位・近位の様々な筋によって複雑なメカニズムを生んでおり、これを厳密に解析するのは極めて困難である。そこで、人間の手が本来持っている指の関節の間、および指と指との間の姿勢の相互関係を制約条件として定式化し、姿勢の尤もらしさを評価するポテンシャル関数を定義する。ここで、力学的な概念を採り入れることにより、ポテンシャル関数を自動的に減少させるシステムを構築し、常に不自然さのない手の姿勢を生成する。本研究ではポテンシャル関数を構成する制約として線形関数を用いて実装を行うが、線形関数以外の制約表現に対する拡張方法を検討し、提案手法の枠組みの汎用性についても述べる。また、この力学モデルの特性を決めるためのパラメータは、実際の手の動きの計測結果に基づいて決定する。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT9761024, 2000年2月7日。

皮膚モデルは、実際の手と同様に骨格の動きに応じて皮膚の外観を提示するものである。人の手の形状を忠実に反映したCG像を合成するために、レンジファインダによる実物の手の形状計測を行い、得られる形状データを皮膚モデルの初期形状として用いる。この初期姿勢と同じ姿勢を骨格モデルに対しても設定し、また位置合わせを行うことにより、形状データと骨格モデルとの統合を行う。サーフェスを生成する際には、骨格モデルの各リンクとその近傍の形状データとの関連づけを行う。この関連性によって、骨格モデルの姿勢変化に追従して皮膚モデル全体を変形させることが可能になる。本研究では、サーフェスの表現方法としてポリゴンによるものと Bézier パッチによるものを試みる。また、レンダリングには、実写のテクスチャとシェーディングとのブレンドングを用いることにより手の皮膚の色合いを違和感なく表現する。

最後に、CGアニメーションを作成することによって提案モデリング手法の有効性を示す。本研究の提案モデリング手法により、手の合成像作成に必要なパラメータ数を削減し、非常に煩雑とされる姿勢データシーケンスの作成作業を軽減することが可能となった。また、限られた手の姿勢情報を入力とする仮想空間におけるインタフェースへの応用が期待できることを示した。

キーワード

CG モデリング, 手のモデル, 力学モデル, 運動の制約, 3次元形状計測

3D Modeling for the Human Hand*

Yoshihiro Yasumuro

Abstract

Hand modeling for CG animation is usually treated separately from other parts of the body, because the hand has flexible shape and manifold functions. The scheme of realistic hand motions is a key issue to generate synthetic actors in CG animation. This paper describes a new approach to model human hand by considering its natural constraints of motion.

The proposed model consists of a skeletal model and a skin model. The skeletal model is used to describe the posture of the hand. The hand skeletal system has more than 20 pieces of bones and many kinds of muscles and tendons which connect the parts between the hand and the upper arm as well as within the hand. The dynamics of the hand motion is so complicated that it is hard to analyze the mechanisms and to model them. In this paper, an analogy of equilibrium of forces is applied in order to express summing up the effects of muscular and skeletal system. An energy function is introduced to evaluate the naturalness of the posture of the model. The natural constraints in the dynamics of the hand motion are dominated by the energy function of which the parameters are calibrated by investigating the motion of a real hand. The joints in the skeletal model have a virtual spring for each degree of freedom. The hand posture is determined by an equilibrium state of forces that are generated from inputs by users, virtual springs and the energy function.

The skin model provides the hand surface shape fleshing the skeleton with a posture created by the dynamic model. The initial surface shape is constructed based on digitized 3D shape of a real hand. The integration of the skin and skeletal model is done by adjusting the joint positions of the skeletal model in the 3D shape data set

*Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT9761024, February 7, 2000.

manually. Each segment of the shape data is combined with the nearest link of the skeletal model so that the whole shape can be deformed according to the change of skeletal posture. Polygonal model of triangle strips and Bézier patch model are applied to describe the surface. Real hand textures and smooth shading effects are blended in the rendering process to achieve both photo-realistic and geometric expression of the skin.

This model can be used to create realistic hand animations. With this model, the sequences of natural hand postures and shapes can be generated even if only a part of hand parameters are available. Reducing the number of parameters needed by the hand model, the proposed approach allows not only to decrease intricate works to design the postures and the motion data sequences for hand CG animations but also to create life-like postures and motions easily.

Keywords:

CG Modeling, Hand Model, Motion Constraints, Dynamics, Surface Modeling

目次

1	序論	1
1.1	CGとキャラクターアニメーション	1
1.2	仮想空間におけるエージェント	2
1.3	CG・仮想空間における“手”の意義	3
1.4	関連する研究・技術分野	4
1.4.1	3次元計測	4
1.4.2	形状モデリング	6
1.4.3	人物像合成のためCGモデル	9
1.4.4	手に特化したモデリング	12
1.4.5	手のサーフェスモデル	16
1.5	手を表現する上での問題点	20
1.5.1	姿勢・動きの表現における問題点	20
1.5.2	形状モデリングにおける問題点	23
1.6	本研究の目的と方針	24
1.7	本論文の構成	26
2	力学的表現による手のモデリング	27
2.1	解剖学的知見	27
2.1.1	手の骨格系	27
2.1.2	手の筋とその作用	28
2.2	提案する手のモデル — 力学的モデリングによる姿勢記述	33
3	手の骨格モデリングと自然な手の姿勢と生成	37
3.1	人間の手の骨格とそのモデリング	37
3.1.1	リンクの構成およびローカル座標系設定	37

目次

3.1.2	座標変換と各関節座標の算出	39
3.1.3	関節自由度	39
3.1.4	状態変数	40
3.2	自然な手の姿勢の表現と生成	41
3.2.1	基礎入出力方程式	41
3.2.2	自然な動きの制約	43
3.2.3	動きの制約表現の拡張	49
4	手の外観形成のためのモデリング	59
4.1	皮膚の形成および骨格モデルとの統合	59
4.1.1	手の3次元形状計測	59
4.1.2	骨格モデルと表面形状データとの関連づけ	62
4.1.3	ポリゴンによる形状表現	63
4.1.4	パラメトリック曲面による形状表現	65
4.1.5	表面の変形	74
4.1.6	テクスチャマッピング	76
4.2	CG生成	79
4.2.1	モデルの自由度について	79
4.2.2	キーフレーム補間によるCGアニメーション	80
4.2.3	動きの制約を適用したCGアニメーション	81
5	結論	87
	謝辞	89
	参考文献	91
	研究業績	99

図目次

1.1	レーザレンジファインダの構造	6
1.2	粗密のある点群データとポリゴン生成例	8
1.3	点群データと B-スプラインパッチモデル生成例	10
1.4	メタボールと B-スプラインを使った人体モデリング	11
1.5	手のタスク (grasping) を考慮した手のモデル	14
1.6	DFFD による手のモデリング—制御点配置と出力例	15
1.7	Bèzier パッチに別の幾何情報を用いてバンプマッピングした例	18
1.8	Bèzier パッチに計測幾何情報を用いてバンプマッピングした例	19
2.1	手掌部骨格図	28
2.2	前腕腹側筋：浅層・深層	29
2.3	前腕橈側筋：浅層・前腕背側筋浅層・前腕背側筋深層	30
2.4	中手筋・母指球の筋	32
2.5	モデリングのアプローチ	33
2.6	制約モデル	34
2.7	手のモデルの構成	35
2.8	手の CG 合成プロセス	36
3.1	骨格モデルの座標系設定	38
3.2	骨格モデル	40
3.3	仮想的弾性モデル	42
3.4	システムの入出力関係	43
3.5	自然な姿勢	44
3.6	指の動きのサンプリングデータ	48
3.7	カメラ配置	50
3.8	計測機器および計測環境	51

図目次

3.9	マーカのセッティング例 (示指と中指の計測時)	51
3.10	モーションキャプチャによる指動作の計測結果	54
3.11	実測角度分布と実測値からの誤差分布の例 (1)	55
3.12	自乗誤差分布の x 方向勾配と y 方向勾配の例 (1)	56
3.13	実測角度分布と実測値からの自乗誤差分布の例 (2)	57
3.14	自乗誤差分布の x 方向勾配と y 方向勾配の例 (2)	58
4.1	レーザレンジファインダ (クボタ社製 CUBIST)	60
4.2	手の複製 (石膏像)	61
4.3	3次元形状計測結果	61
4.4	骨格モデルの配置	62
4.5	形状データのセグメンテーション	63
4.6	ポリゴン頂点の生成	64
4.7	ポリゴンモデル	65
4.8	Bézier 曲面パッチとその制御点	68
4.9	データ点とパッチのパラメータとの対応づけ	69
4.10	Bézier パッチによる皮膚モデル	72
4.11	ポリゴン表現と Bézier パッチ表現によるレンダリング	73
4.12	骨格モデルの動きに対する表面の変形方法	74
4.13	ポリゴン表現と Bézier パッチ表現による変形	75
4.14	テクスチャ画像	77
4.15	シェーディングとテクスチャとのブレンドによるレンダリング	78
4.16	GUIを用いた入力アプリケーション	79
4.17	手掌形状の出力例	80
4.18	キーフレーム補間による手掌動作のアニメーション	83
4.19	動きの制約を適用した CG アニメーション (1)	84
4.20	動きの制約を適用した CG アニメーション (2)	85
4.21	アニメーションの応用例	86

表目次

3.1 各関節の基本自由度	41
3.2 内部パラメータ	47
4.1 フィッティング誤差	71

表目次

第1章

序論

本章では、本研究の背景について述べ、本研究の意義と論文の構成を示す。

1.1 CGとキャラクターアニメーション

コンピュータグラフィクス (CG:Computer Graphics) が世に誕生して 30 年以上経過した今日、日常的に“CG”という言葉を目にする機会が増えてきた。雑誌、本等の刊行物をはじめ、テレビ、映画などの数多くの媒体において、実写と見まがうばかりのリアルな CG や、実写と CG がうまく調和し融合した画像、映像が溢れており、人の目を惹き付けている。

また、パソコンをはじめとするデジタル機器がどんどん家庭に浸透、普及するに当たって、CG はより一層身近なものとなっている。インターネットを媒体としたコンテンツやテレビゲームにも多種多様な CG が盛り込まれている。特にテレビゲームにおいては、グラフィックアクセラレータなどの CG 描画機能を担うデバイスとして、一般のパソコンに用いられるものよりも遥かに性能の高いものを搭載した機種も市場を賑わせている。高精細でリアルな CG 映像は、購買者の人気を集め、ゲーム業界においては一種のデファクトスタンダードになりつつあると言える。

CG コンテンツの制作において、人物像の合成は不可欠な要素である。CG による人物像の動画生成はキャラクターアニメーションと呼ばれ、CG 制作においてホットなトピックのひとつである。

テレビ放送では、デジタル映像技術を用いた種々の視覚効果やオープニングシーン等を飾る CG アニメーションに加えて、番組中で出演者と共に画面を動き回る CG キャラクターも多く見られる。しかも、教育番組などにおいては、人間の出演者とのやり取りの中に、視聴する子供に対して重要な働き掛けを示すといった、重要な役割を担っているものもある。

CGを取り巻くひとつの大きなビジネスは何と言っても映画産業である。1999年のオスカー(アカデミー賞)では、その短編映画部門で4本の3DCGアニメーションが挙げられた[1]。同じく1999年に公開され、非常に話題を呼んだ映画のひとつである、ジョージ・ルーカス監督作品「スターウォーズ エピソード1」では実に全編の90%を越えるシーンがデジタルショットである[2]。スクリーン上では、CGで合成されたキャラクタと、俳優や被り物をした人間とが常に混在することによって、実写映像だけでは得られない架空の世界をリアルに演出し、観る者を魅了している。このような映像におけるCGキャラクタは、もはやただ単にいかにも実物に似せて作るかという問題を解決する手段にとどまらず、出演者が危険にさらされることなくスリルのある映像制作を可能にしたり、想像上の世界を見える形に具現化したりするために不可欠な存在である。すなわち、CGキャラクタならではの確固とした目的と需要が存在しているのである。

映像制作の過程において生じた要求に応じて、新たなCG生成アルゴリズムや映像合成技術が同時進行で開発されることも多く、著名な技術論文が制作グループのメンバから発表されることも少なくない。CGモデルのポリゴン数を効果的に減少させる手法であるポリゴン・リダクション[3]や、ポリゴンモデルを自動的に細分割して曲面の丸みをデザインする手法であるサブディビジョン・サーフェス[4]などがその例である。むしろ、アカデミックなフィールドの優秀な人材が、映像制作現場において即戦力のあるスタッフとして認められ、映像業界に求められているのが実情であると換言できる。しかも、研究から製品開発までの期間がますます短くなっているのも事実で、技術論文の発表と同時にその提案技術に基づいた3次元CG作成アプリケーション製品の発表や映画公開が行われる事も多く、その社会的な需要と関心の高さを反映している。

1.2 仮想空間におけるエージェント

近年のコンピュータ等の発達によって、人間の周りの機械類をより利用しやすく、より役に立つものにするのが可能になりつつある。バーチャルリアリティ(Virtual Reality)、テレグジスタンス(Tele-existance)、ヒューマン・インターフェース(Human Interface)などの研究はこの動きの代表的なものである。

バーチャルリアリティとはコンピュータにより作りだされたの仮想環境を、現実の環境であるかのように感じる体験を可能にし、またその仮想環境の世界の中で行動することを可能にする技術である。この技術を用いて、色々な情報を人間にとって理解しやすく、或いは実感できる形でユーザに提示することが可能になる。このことにより、ユーザは情報のやりとりを相互に円滑に行なうことができる。その一つの形として、ユーザに親

近感を感じさせるために、本物そっくりの仮想人間をエージェントとして仮想環境に登場させることが有効な場合がある。そのエージェントがリアルであればあるほど、ユーザは違和感なく仮想環境で行動できる。

一方、テレイグジスタンスとはバーチャルリアリティを別の観点から言い表したものと見えるが、時間、空間を隔てた環境に人間を存在させることを目的とした概念である [5]。テレイグジスタンスには、ユーザが存在する実環境と他の実環境、あるいは実環境と仮想環境、という2種類の時間的、空間的な隔たりをむすぶものが考えられる。前者は遠隔臨場感とも呼ばれ、後者はコンピュータ等によりつくり出された実在しない環境へのテレイグジスタンスと考えられる。遠隔臨場感は、人間に類似した形状、感覚機能を備えたロボットを遠隔地や人間が直接行くことのできない環境に設置し、あたかもそこに自分が存在するかのように臨場感をもって作業ができる技術である。遠隔地にいる人間どうしが、一堂に会しているかのようにお互いの意思、表情を確認しながら会議ができる臨場感通信会議システムもこの一例である [6]。ここでも仮想的な会場に出席者の人物を合成する必要がある、このようなエージェントはアバタ (avatar) と呼ばれる。チャットのようなシンプルなテキストベースの通信においても同様である。重要な点は、仮想空間において話者の動作・感情などのふるまいをリアルで有効に表現するエージェントが必要とされているということである。この種の研究における技術的課題は、限られた情報や情報伝送資源を使って、ユーザの意思を効率的にしかも忠実に仮想環境でエージェントに反映させることにある。

ヒューマンインタフェースは、人間と機械の間の情報のやりとりをいかにして効率良く、円滑に行えるかを追求する研究である。その中で、人間の動作を機械に理解させることが非常に重要な課題である。画像処理や3次元計測などの技術を用いて人間の形・表情・動作を推定、認識、理解する研究は関連研究課題の例として挙げられる。バーチャルリアリティやテレイグジスタンスのように、人間がコンピュータに積極的に働きかけ、コンピュータの作り出す世界へ入り込んでいくシステムでは、まさにコンピュータが人間の感覚を理解し、インタラクションを生成するためのヒューマンインタフェースが必要とされる。

1.3 CG・仮想空間における“手”の意義

人の手は体の中でもっとも器用な部分で、その形状や動作による表現が非常に豊富である。したがって、人間像の合成や人間の動作の認識の中で手は極めて重要な対象部分である。人間どうして話をしているか身振り手振りを交えるのは自然な状況である。また、

人間が何かに手を触れたり，手に取ってみるという行為は，人間が自分の周囲に対して行う働き掛けとして，最も自然で基本的な振る舞いの一つである．これらと同じような状況を，計算機や通信メディアを介して創り出すことを目指している技術が前述のヒューマンインタフェースであり，バーチャルリアリティである．手を使った表現や機能は，人間と人間，人間と機械とを仲介するコミュニケーションのいずれの場面においてもその役割は大きい．CG制作においても，登場するキャラクタの自然な振る舞いこそがリアリティの実現に求められており，現実の描写のみならず，映画などの架空の世界において親近感や現実感を与えるために不可欠である．このような要求に対して手の果たす役割は非常に大きいといえる．

1.4 関連する研究・技術分野

1.4.1 3次元計測

3次元動作計測

全身動作の計測 3次元CGアニメーション，特にキャラクタアニメーション制作の過程で，シーンの中の各オブジェクトの動作設定作業は質・量ともに労力を要する仕事である．数年前より，この作業時間を軽減し，リアルな動きをCG上で再現する為に，実際の物体や人物の運動を記録するモーションキャプチャ技術が普及し始めた．この技術は，実際に人間の関節部位などの体表に光学マーカあるいは磁気式センサを装着しておき，時々刻々のマーカの位置や向きを計測・解析することにより，体の動きの連続的な3次元データを獲得するものである．

また，体には磁気センサー，顔には光学マーカー，手には抵抗センサーというように，体の各部位にあわせて最適と思われる方法で全身の動作を同時に計測可能なシステムも開発されている [7]．唇の動きに音声キューをあわせた声の記録や，複数の人物を同時に計測可能であったりとマルチモーダルな要求に応える技術が提供されるようになった．

動画像の各フレームに対して画像処理を行うことによって人物の動作計測を行う研究もなされている．処理の際にマーカを用いて色を識別してトラッキングを行う手法の他，計測対象部位のテンプレート画像を予め用意してマッチングを行う手法も提案されており，歩行動作の計測に応用されている [8]．

手掌動作の計測 手の動作計測でもっとも一般的なものとしてグローブ型センサがある [5]．計測動作原理としては，センサとして光ファイバを用いる方法と力感応の素材を用

いる方法、機械式の方法が挙げられる [5]. 光ファイバを用いる方法では、グローブ上に指に沿って設けられた光ファイバ内の光の透過率が屈曲によって変化する性質を利用している。力感応の導電性素材を用いるものは、屈曲の際に手の表面における圧力変化によって生じるセンサの電導性の変化を角度変化に変換している。また、手袋の形を成さず、力感応センサを直接測定部位に装着するタイプのものも開発されている。センサとしてポテンショメータを用いるのが機械式のデバイスである。これは、手を覆うような関節構造をもったエクゾスケルトン型の外殻を手に着し関節角度を直接的に計測するものである。

手の動作・形状を自動認識するシステムの開発においても多くの先例があり、モデルベースの研究も行われている [9, 10]. これらの研究は、定量的に精度の高い計測を行うのが目的ではなく、定性的な動作理解・解析を目的とした、計算機に対するユーザインタフェースの構築を目指す立場のものであると言える。

3 次元形状計測

3次元形状計測は、大きく分けて能動型計測と受動型計測とがある [11, 12]. 能動型とは、制御された光波、電波、音波などのエネルギーを計測対象に照射することによって計測を行うものである。これに対して受動型とは、計測を目的としたエネルギーの照射を行わないものである。一般に、計測における空間分解能、距離分解能、計測時間、計算コストなど多くの点で能動型計測が優れている。これは、計測環境や対象の状況が様々であっても、積極的に制御された光などを照射しその挙動を観測することにより、安定して計測が行えることによる。

能動型計測の中でも、CADやCGモデリングの用途に適用可能な方法は、レーダ方式または、アクティブステレオ法によるレンジファインダを用いるものである。レーダ方式では、レンジファインダから発した光パルスが対象から反射して帰ってくるまでの光の飛行時間を計測する。アクティブステレオ法は、スポット光あるいはレーザー光とビデオカメラを用い、三角測量の原理で計測対象の表面形状を点の集合として計測する方法である。レーザー光を用いる装置として、平面または円筒スキャン型レーザーレンジファインダが挙げられる [11]. 図 1.1 に示すように、レーザーレンジファインダの基本構造は、照射角の変えられるミラーを搭載したレーザとビデオカメラとで構成される。レーザの位置、ビデオカメラの位置は固定されており、計測対象上でレーザを反射しているポイントのカメラ上の位置から計測対象までの距離を計測する。レーザの照射角を制御するこ

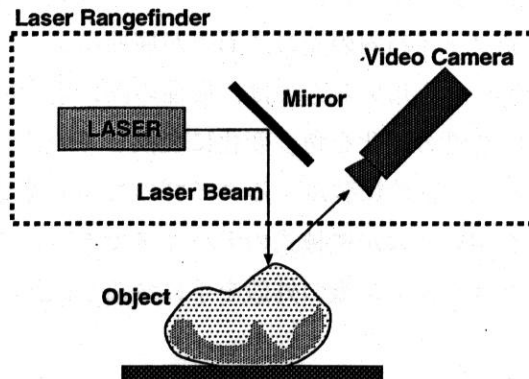


図 1.1 レーザレンジファインダの構造

とによりスキャンすることが可能であり，計測対象あるいはレンジファインダを移動させることにより面をスキャンすることが可能となる。

1.4.2 形状モデリング

形状モデリングの中でも特に CG のオブジェクトの形状を生成する方法としては，二つの代表的な方法がある．基本的な幾何学形状をもつプリミティブや自由曲面などを基に最初からデザイナーがモデラと呼ばれるソフトウェアを用いて形状を生成・編集する方法と，デジタイザによってクレイモデルや実在のオブジェクトの形状を計測したデータを基にして所望の形状を生成する方法である．本節では形状計測をベースとした形状モデリングに焦点をあて，関連技術をまとめる。

データ統合手法

モデリング対象の 3 次元全周形状計測は，オクルージョンによる計測漏れを防ぐ等の理由により，通常オブジェクトのトポロジに合わせて幾つかの部分に分けて行われる．したがって，オブジェクトの表面全体を網羅して計測するために，効率的にレンジファインダの位置や向きを変えるためのプランニングも一つの研究課題とされている [13, 14]．各部分毎に得られる計測データを統合する際に精度良く全体の形状が再現できるように，各々部分のデータは互いにオーバーラップするように計測されるのが普通である．この計測データの統合も形状モデリングには重要な技術である．最も一般的な統合手法のひとつ

つに、ICP(Iterative Closest Points) アルゴリズムがある [15]。この手法は、それぞれの部分のデータ点群がそのオーバーラップ部分において最も高い相関を持つように、回帰計算による最適化手法を用いて 3次元剛体変換パラメータを求めるものである。このような処理により、オブジェクトの各部分の形状を表す点群が精度良く統合され、オブジェクトの全周を網羅した形状データが得られる。

ポリゴン表現

3次元形状計測および計測データの統合により得られたオブジェクトの全周形状データは、単なる 3次元空間中の点の集合であり、表面情報を持たない。したがって、CGでオブジェクトを表現するためには点群データからサーフェスを生成する必要がある。このような技術の必要性は、CGモデリングのみならず、CADを用いたデザインの際に需要が高い。まず、デザイン対象物体のクレモデルやモックアップを作成し、その形状をコンピュータに取り込む。取り込んだデータをもとに、CADソフトにより編集作業を進めるのである。この方法は、単純な幾何学形状プリミティブを用いてモデリングを始めるよりも、非常に効率的である。しかし、そのためにはクレモデルの形状情報が適当な精度でコンピュータ内に再構成されることが必要である。

複数の部分形状データを統合してオブジェクト全周の形状データを得る場合、データ統合の結果、計測時のスキャンラインなどは 3次元的に何の規則性もなく配置されることになる。特にデータがオーバーラップしている部分では点群がマージされているため、全体として秩序のない点群となっているのが一般的である。このような点群データから表面情報を生成し、ポリゴンによってサーフェスモデルを作成する手法は数多く提案されているが、最も一般的な手法のひとつにエネルギー最小化の原理を用いたものがある [16](図 1.2)。

生成されたポリゴンモデルは、計測で得られた密な点群データをもとに作成されるため、モデルを形づくっているポリゴンの数が非常に多い場合がある。人の頭部などのようにオブジェクトの形状によっては、円筒型のスキャニングを行うレンジファインダを用いた形状計測が適している場合がある。この場合、形状データは、円筒座標系で得られる 1枚の距離画像として獲得される。したがって、形状データを一価関数として扱える利点があり、ドロネー網を用いて曲率に応じた効率の良いポリゴンの生成法が提案されている [17, 18]。また、一般的な全周形状データに対しても、トポロジを保存したままポリゴン数を減らしてオブジェクト全体を効率的に表現するための手法が開発されてお

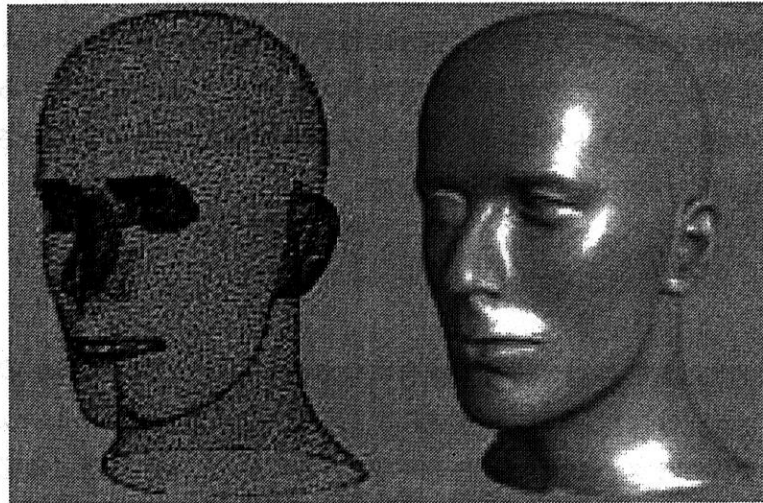


図 1.2 粗密のある点群データ (左) とポリゴン生成例 (右) [16]

り [3, 19], 既に市販されている CAD や CG モデリングソフトにもその機能は実装されているものもある。

代数的表現

オブジェクト表面を表現するために、離散的な点を連結して得られるポリゴン群ではなく、連続関数による近似表現を用いる方法がある。大別すると代数的表現と次項で述べるパラメトリックな自由曲面による表現とがある。代数的表現のうち、陽関数のような 1 価関数では複雑なトポロジに対応できず、また本質的に閉じた曲面は表現できない。したがって、CG のサーフェスマデリングでは陰関数表現が用いられる [6, 20]。

自由曲面表現

パラメトリックな自由曲面による形状デザインは、主に CAD の分野において長い歴史をもつ [21, 22, 23]。その最大のメリットは、代数的表現と比べると、座標変換を施しても、定式化が簡単であり曲面上の微分値などの計算も比較的シンプルなことである。また、コンピュータを使って対話的に形状を定義するという目的に適している。しかしながら、複雑な形状を表現するにはひとつの曲面表現式で表現することは困難である。そこで、曲面を複数の曲面要素に分けて曲面要素同士を接続することにより、一つの自由

曲面を表現することになる。この曲面要素はパッチと呼ばれる。各パッチ領域にパラメトリック曲面を内挿しパッチ同士を滑らかに接続することが、自由曲面の形状デザインにおける一つの大きな課題である。

形状計測で得られた点群データから自由曲面を用いたサーフェスモデルを生成する方法としては Levoy や Eck らの手法がある [19, 24, 25]。Levoy らの手法では、以下のようなアルゴリズムを用いている。

1. データ点群より密な三角メッシュを生成する。
2. 曲面パッチをフィッティングするための領域分割を行う。三角メッシュ群から頂点を2個ずつ手動により対話的に選び、大きめのグリッドを作成する。グリッドの各辺は B-Spline 曲線により表現する。
3. B-Spline 曲線群で表されたグリッドに体して、表面に沿ったバネの挙動をシミュレーションすることによってグリッド稜線上でフィッティングを行う。
4. グリッドの各領域について B-Spline 曲面フィッティングを行う。

パラメトリック曲面パッチを用いたモデリングにおいては、パッチを内挿するための領域メッシュをいかにして3次元のオブジェクトの表面に生成するかが問題の鍵である。このメッシュ設定を自動化したのが Eck らの手法である。Eck らの手法の特色は、密な三角メッシュを統合して大き目の基本三角メッシュを作成したあと、調和写像を用いてメッシュを2次元平面にマッピングするところにある。マッピングされたメッシュに対してドロネー網を生成し、平面上で四角領域メッシュを作り、3次元に逆写像を行う。このようにして、自動的に3次元のオブジェクト表面に四角領域メッシュ群を生成し、各領域に対して B-spline 曲面のフィッティングを行う (図 1.3)。

また、ロボットビジョンの分野においても、距離画像から物体の形を認識する目的で、レンジデータに自由曲面のフィッティングを適用した手法が提案されている [26, 27]。具体的には、B-Spline 曲面のノットを制御することにより、面の微分値が不連続な対象にも、曲面の数学的表現に変更を加えることなくフィッティングを行えるものである。対象物体の任意の形状に柔軟に対応して曲面フィッティングを行うというアプローチにおいては、形状モデリングと共通する目的がある。

1.4.3 人物像合成のため CG モデル

人物像表面、すなわち皮膚や衣服を表現するためのモデルは、姿勢に応じて柔軟に変形することのできる構造が必要である。従来の研究において CG で人間像をレンダリン

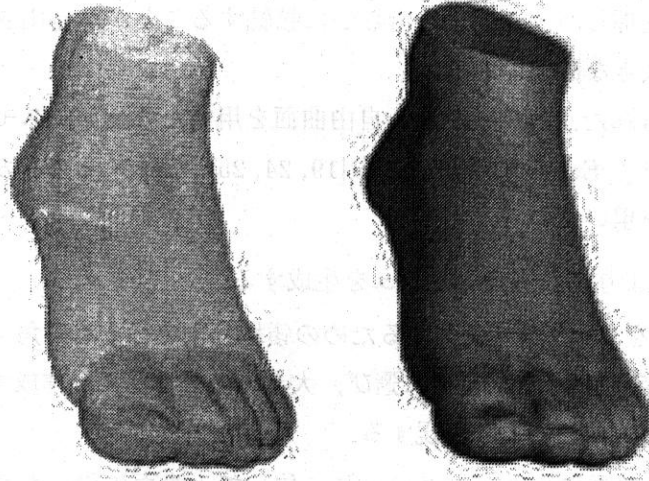


図 1.3 点群データ (左) と B-スプラインパッチモデル生成例 (右) [19]

グするために採られている方法には以下のようなものが挙げられる。

1. 各部位をパーツに分解した上でそれぞれを幾何学的なプリミティブモデルで表現する方法 [10, 29]
 2. 各部位のパーツ毎にデザインされたポリゴンモデルで表現する方法 [30, 31]
 3. 各部位のパーツをそれぞれ多項式関数で表現したモデルで表現し、関節などのパーツとパーツとの接合部分では陰関数の重ね合わせで表現する方法 [6, 20]
 4. 表面全体を適当に領域分割してパラメトリックな曲面パッチを用いて、滑らかな表面形状を生成する方法 [32, 33]
 5. メタボールを用いてスケルトンに肉付けを行い、その断面の輪郭をもとに B-スプラインなどのパラメトリック曲面で表面を表現する方法 [28, 34]
1. の方法では円筒などのオブジェクトで腕や指などを表現し、掌部は厚みのある平板で表現している。シェーディングを施せば立体感は十分にあるが、形状そのものが非常に幾何学的で実際の人間のものとは異なるのでリアリティに欠ける。
2. の方法では各部分の形状は実物らしくデザインでき、グーローシェーディングのような輝度補間を施せば滑らかなレンダリングも可能である。しかし、各部位を別々にレ

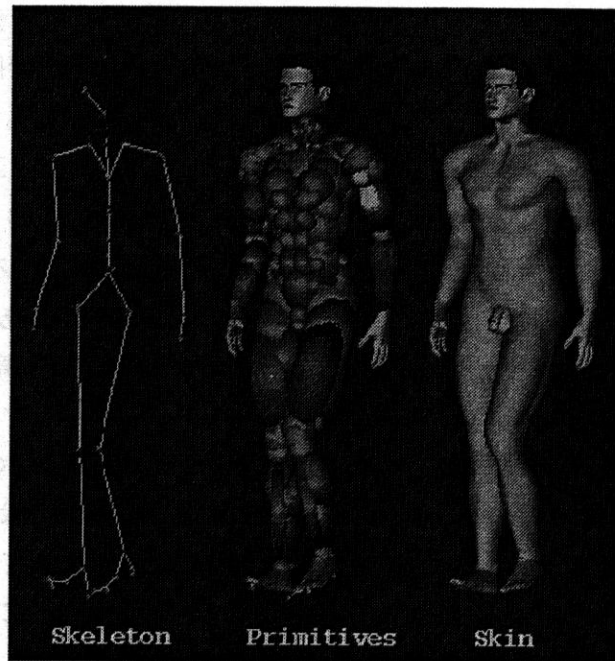


図 1.4 メタボールと B-スプラインを使った人体モデリング [28]

ンダリングをするので、その接合部分は不自然になる。また、形状はそれらしくデザインされても、1.の方法と同様に各部位が剛体のパーツであることに違いはないので、姿勢が変わった場合の柔軟な変形は表現できない。1.4.5で述べるように、オブジェクト全体を連続なポリゴンで表現し、FFD(Free Form Deformation)を用いた連続的な変形を行う手法やその拡張手法も提案されている。

3.の方法では陰関数を用いて形状を決定しているが、最終的にポリゴンで表面形状を表現している。関節部分の表現や姿勢の変化に応じた表面の変形を各パーツを関数の重ね合わせで表現しているため、滑らかさの表現やパーツとパーツの連続的な接合も可能である。しかし、細かな起伏を表現するためには関数表現には限界があり、手のように細かな形状変化をもつ部位を表現する手段としては不向きな点がある。また、関数表現とポリゴンの頂点の座標との対応をとるために探索操作を要し、形状が変化する度に多くの計算量を必要とする難点がある。

4.は曲面パッチの領域を細かくとれば細かい起伏もある程度表現できる。制御点をうまく操作してやることで姿勢の変化に対して柔軟に形状を変形させることも可能である。曲面パッチもレンダリングの際にはポリゴンに分割して表現されるが、その分割の細か

さはパラメータ空間のグリッド設定に対応しており、多くの計算を要しない。一般的にポリゴン表現が多くの頂点を必要とするのに比べ、少ない制御点で同じ面積の曲面を表現するパッチを定義できるというメリットもある。前説で述べたように、パッチ間の接続に連続性を保障するために数学的あるいはモデリングスキームに工夫が必要である。

5. で用いられるメタボールは特殊な球でモデルが構成される。メタボールの球は可変な密度場で定義され、設定された閾値に達する密度の値をもつところに表面が存在する。すなわち、メタボールの表面は、密度値が閾値に等しい点の集合であり、これは同位相面と呼ばれる。メタボールを複数近づけて配置した場合に密度場の加算・融合が起き、滑らかに連なった球状の表面を表現できるところにメタボールモデリングの威力がある。メタボールに負の密度場を設定することもでき、メタボール間で減算の効果も制御できる。したがって、メタボールの配置と閾値の設定よりかなり微妙な形状を滑らかに生成することが可能であり、人間の皮膚の滑らかな起伏の表現などに向いていると言える。骨格から筋肉の体積をメタボールで表現し、最終的にそれらを滑らかに皮膚が覆うようすを階層的に表現したモデルも用いられている [28](図 1.4)。

これらの他に、内山らは内部に骨・筋肉・脂肪層のモデルを挿入し、表面形状はレンジデータに基づいて脚部のモデリングを行い、物理シミュレーションベースで変形させる手法を提案している [35]。

1.4.4 手に特化したモデリング

人物像全体に対するモデリングやアニメーション作成手法の他に、特に手を扱うために提案されてるモデリング手法について以下に述べる。

手の運動モデル

ここでは、手のモデリングにおいて動きを記述する上で関連する諸技術について述べる。

運動学的手法 一般的に、CGによって人物のアニメーションを作成する際に、個々の関節軌道を決定し姿勢を逐次求めていく順運動学的方法によって動きをデザインすると、所望の姿勢・動作を得るためには試行錯誤的な作業が伴う。例えば、人物が手を振る動作を作成するとき、空中での指先の軌跡をデザインしたい場合を考える。胴体、肩、肘といった、手から遠い関節から順に関節を動かして操作していったのでは、思い通りの指先の軌跡を得るのは容易ではない。したがって、まず最初に指先の軌跡を設定し、そ

の軌跡を実現するための残りの関節角の軌道を求めるという逆運動学計算が必要となる。しかしながら、特に人物などの自由度の多い関節構造をもったモデルでは、運動学計算は非線形なものであり、不良設定の可能性もあるため、逆問題として解くのは容易ではない。そこで、部分的に線形化し、一般化逆行列を用いて逆運動学計算をしながら、全ての関節軌道を逐次求めていく方法が用いられ、テレビ番組に登場するキャラクタ制作等に既に実用化を見ている [33, 36]。手に特化したものとしては、手の筋骨格系の運動学的構造を考慮して指先の位置をキーとなる情報として用い、少ないパラメータ設定により自然な手の姿勢を記述するモデルが提案されている [37]。

動力学的手法 手に特有の力学的特性に基づいた解析・モデリングは、動力義手の開発研究 [38, 39] や、生体の運動制御機能の生理学的な見地による研究 [40, 41] が古くから多くなされている。これらは筋の動特性を解析するために、筋肉の張力によって発生する関節周りのトルクを皮膚表面筋電信号と関節角度の関数としてモデリングしている。この際に関節まわりの粘性・弾性を1次進み、1次遅れ系の伝達関数表現で近似し、そのゲインを筋肉の収縮力に比例したモデルで与えている。しかし、筋電信号の伝達メカニズムには非線形性があるために、数理的なモデリングが難しい。そこで、非線形写像能力のあるニューラルネットの学習を用いたモデルを構築し、皮膚表面筋電信号を用いた義手の制御を可能としている研究もなされている [42]。

人体のCGモデリングにおいては、収縮する筋肉の形状やその表面を覆う皮膚の挙動をバネ・質点系による表現で運動方程式をたて、シミュレーションを行う研究例が見られる [43]。これらは、骨格姿勢そのものは運動学的に与えられ、骨格に伴う筋肉や皮膚の形状変化を物理シミュレーションによって生成するものや、システムに力分布を与えて全体の動力学方程式を解くものがある。

キーフレームの補間手法 亀井らは、楽器演奏時の手の動作表現を合成する際に手の3次元モデルを用いている [44, 45]。楽器演奏の際に必要なコードに基づいて、基本のキーとなるフレームの手の形状を予め幾つかのパターンとして準備しておく。アニメーションはキーパターンを補間しながら生成される。その際に、形状のパラメータ(指の関節角)に対し、ペナルティ関数の値を最小化する形で拘束を課している。手の脱力状態を表す場合の指の関節角を設定しておき、脱力状態からの誤差の自乗和を小さくするというペナルティ関数の定式化を提案している。

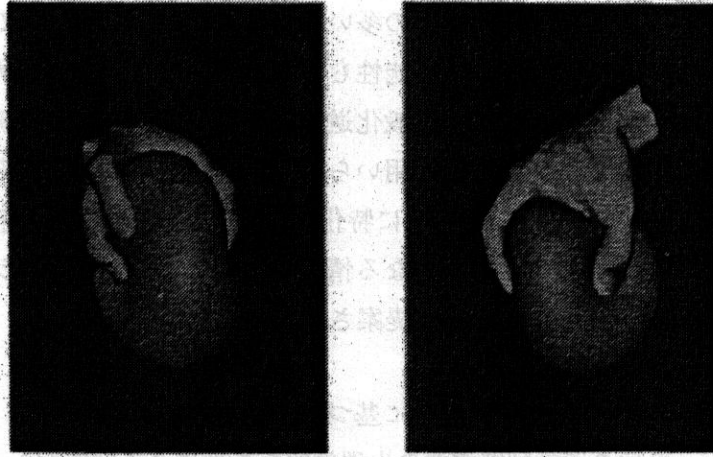


図 1.5 手のタスク (grasping) を考慮した手のモデル [46]

手のタスク・オブジェクトを考慮したモデリング 物体との接触干渉による変形，物を掴む動作の再現に特化したモデリングが提案されている [47, 46, 48, 49]. この研究は，スイス連邦工科大学 (EPFL) の The Computer Graphics Lab (LIG)[50] のグループにおいて HUMANOID プロジェクトの一部として行われ，仮想空間における合成人物 (バーチャルアクター) が物を手に取る・掴む等の振る舞いを自動的に行うシステムとして実装されている [46]. システムの特色としては，対象物体の大きさにより，2本の指でつまんだり，両手で把持したりといった挙動を自動的に選択し動作を生成することができることが挙げられる. モデルの骨格構造は順・逆動力学に基づいており，動作のリアリティを保障するために幾つかの関節の動きは拘束されている.

また，指が物体に接触する位置や方向を探索するために，マルチセンサというオブジェクトを提案している. マルチセンサとは，手の関節などの主要な個所に球体の部分領域を設定し，その各球体部分に対し外部との接触判定や，接触方向等を判定するものである. このマルチセンサを用い，物体を触ったり，把持する際の指先位置を特定する. オイラー・ラグランジュ方程式より導出される多項式により，手の初期姿勢と物体に接触する姿勢とを補間する手法を用いて，アニメーションを生成する [48]. さらに同グループでは，マルチセンサを実際の接触センサに置き換え，実世界におけるインタラクションを仮想世界に再現する研究を進めている [49].

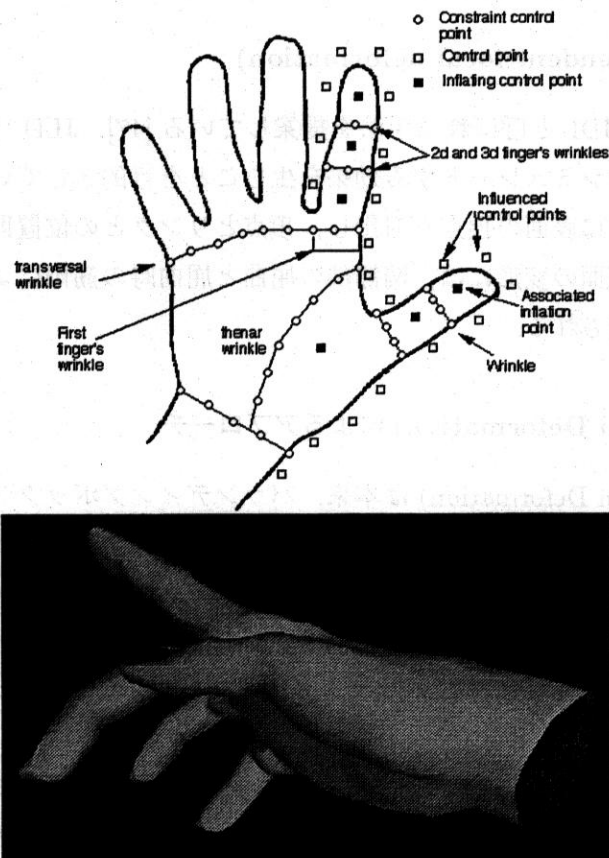


図 1.6 DFFD による手のモデリング—制御点配置 (上) と出力例 (下) [51, 52]

手話システムにおけるアニメーション生成 手の豊かな表現機能を最大限に利用するコミュニケーション方法の一つに手話がある。聴覚障害者への情報伝達手段として手話による通訳を必要とする場面は多いが、手話通訳者が不足している現状がある。実写による画像・映像では、コンテンツの編集や再利用が困難であったり不可能な場合が多いため、CGによるアニメーションを用いて手話を合成する試みがなされている [53, 54, 55, 56]。また、手話を学ぶ人に対して、教材としてCGを利用する研究もなされている。手話に熟練した人やビデオ教材などに代わり、インタラクティブにしかも手話の持つ空間的な動作を効果的に示すことが可能なツールとして期待される。

1.4.5 手のサーフェスモデル

JLD (joint-dependent local deformation)

Thalman らは JLD と呼ばれる手法を提案している [47]. JLD オペレータは関節の回転と筋肉の膨張をシミュレートする効果を生むことを目的としている. 基本的には, 関節間を結ぶリンクに表面の頂点を射影し, 頂点とリンクとの位置関係が関節角度の関数になっている. 表面の変形には, 関節部の屈曲と屈曲時の筋肉による膨らみの変化を持たせるように設定される.

FFD(Free Form Deformation) によるアプローチ

FFD(Free Form Deformation) は本来, バウンディングボックスのような制御領域をパラメトリックに表現し, 制御領域の空間を連続的に歪ませることによって領域内のオブジェクト (ポリゴン) を変形させる手法である. この手法には種々の拡張版が提案されているが, 基本的に何からの形でオブジェクトを制御領域で包含するという準備が必要であり, 変形の自由度も制御領域のパラメトリック表現の自由度によって制限されたものである.

そこで, 直接的にポリゴンメッシュを連続的に変形させる FFD の手法として, DFFD(Dirichlet FFD) が提案され, 手の CG モデルに適用されている [51, 52]. これはドロネー網を用いて表面形状をパラメトリックに表現し, ポリゴンメッシュの頂点そのものを FFD の制御点として用いる. 変形モデルは階層構造をなしており, 関節の屈曲に対して掌側は筋肉の膨らみを再現し, また大きな皺をなす部分には変形を拘束する制御点が配置されている (図 1.6).

手の CG レンダリング

テクスチャマッピング フォトリアリスティックな CG 像を合成するために非常に強力な手法として, テクスチャマッピングが挙げられる. レンダリングするオブジェクトの 3 次元座標と, テクスチャ画像の座標値との対応づけを行い, オブジェクト表面のポリゴン上の各ピクセルにテクスチャ上の画素値 (テクセル) を割り付ける手法である.

普通, マッピングするテクスチャ画像は正規化された矩形のものが用いられる. したがって, オブジェクトの 3 次元的なトポロジにうまくテクスチャ画像をタイリングさせることがテクスチャマッピングにおける一つの課題となる. Thalmann らのグループで

は、対話的に3次元オブジェクトにテクスチャをフィッティングする方法を用いて手の3次元モデルに対してテクスチャマッピングを行っている [52].

テクスチャにはオブジェクトの実写画像が用いられることが多い。CGオブジェクトの全周をレンダリングするために実対象の全周を網羅する複数の実写テクスチャを用意する必要がある。テクスチャを撮影する際、全周にわたって一様な光学的環境を用意するのは難しく、またカメラの視線方向と被写体の各部分の面の向きとの位置関係によって、画像の解像度や色合いが異なったりするのが一般的である。これらを補正し、なるべく一様な光学条件・解像度でテクスチャマッピングを行う方法も研究されている [57]。しかし、いかにうまくテクスチャマッピングを行ったとしても、オブジェクトに割り付けられる光学情報は、基本的にテクスチャ撮影時の光学環境下におけるもので、マッピングされたオブジェクトが移動、変形しても、シェーディングやハイライトなどの効果がレンダリングには反映されないという本質的な問題がある。

バンプマッピング オブジェクト表面の幾何学的な情報を視覚的に反映させるには、オブジェクト表面の法線と光源との幾何学的な関係を用いた光学計算が必要である。逆に、オブジェクト表面に法線情報を意図的に付加することにより、本来オブジェクトが持つ幾何学的トポロジに加えて、表面上に擬似的に凹凸をレンダリングすることもできる。これがバンプマッピングである。表面のザラザラした細かな質感、または高周波成分を含む繰り返しパターンや幾何学模様などは、ポリゴンを用いてモデリングすると、ポリゴン数が莫大になってしまう。このような場合にバンプマッピングを用いれば、少ないポリゴンを用いても所望の質感をレンダリングすることが可能になる [58, 59].

また、滑らかな自由曲面などの上に高周波成分をもつ凹凸パターンをマッピングすることも可能である。連続性を保障してパッチを接続することが一つの課題である自由曲面を用いたモデリングにおいても、連続的な法線分布をマッピングすることにより、視覚的に滑らかなに曲面パッチを接続することが可能である (図 1.7)。レンジデータから取得される手の皴などの実測パターンを少ないパッチで効果的に見せることも可能である (図 1.8)。

石井らは、人の肌のレンダリングにおいても、バンプマッピングを積極的に用いている [60]。人の皮膚の表面を網目状に走る溝のパターンをボロノイ分割 [61] を用いて表現し、このパターンに基づく法線情報を付加してバンプマッピングに用いる。また、石井らは皮膚表面の形状特性に加え皮膚の内部構造における光学的特性に対する基本モデルを構築し、皮膚表面の質感表現を試みている。

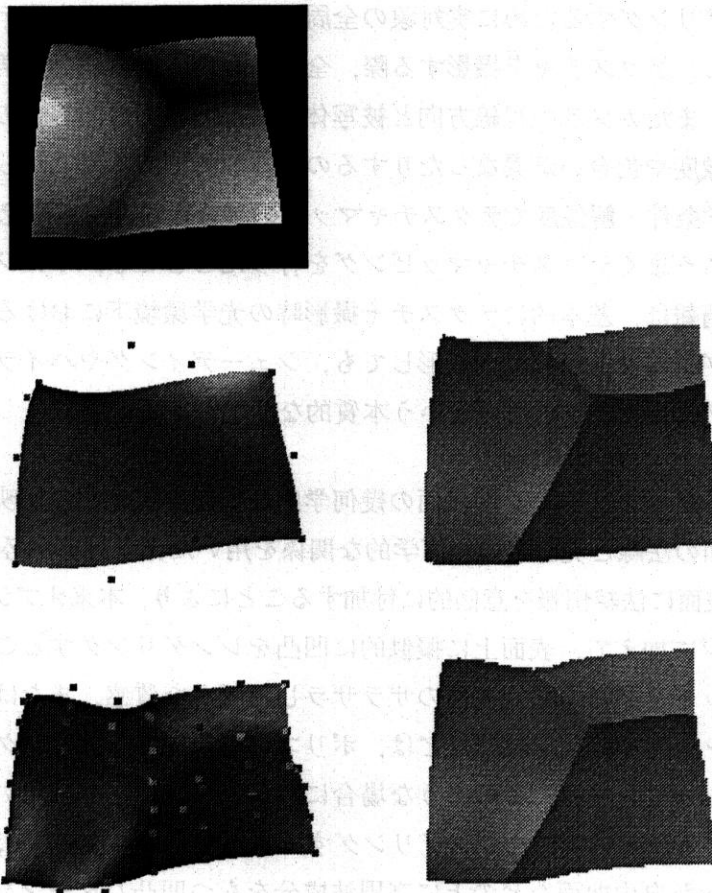


図 1.7 Bézier パッチに別の幾何情報を用いてバンプマッピングした例

上段：形状データサンプル

中段：1 枚の Bézier 曲面パッチ (左) に形状データサンプル
の法線情報をバンプマッピングしたもの (右)

下段：4 枚の Bézier 曲面パッチ (左) と形状データサンプル
の法線情報をバンプマッピングしたもの (右)

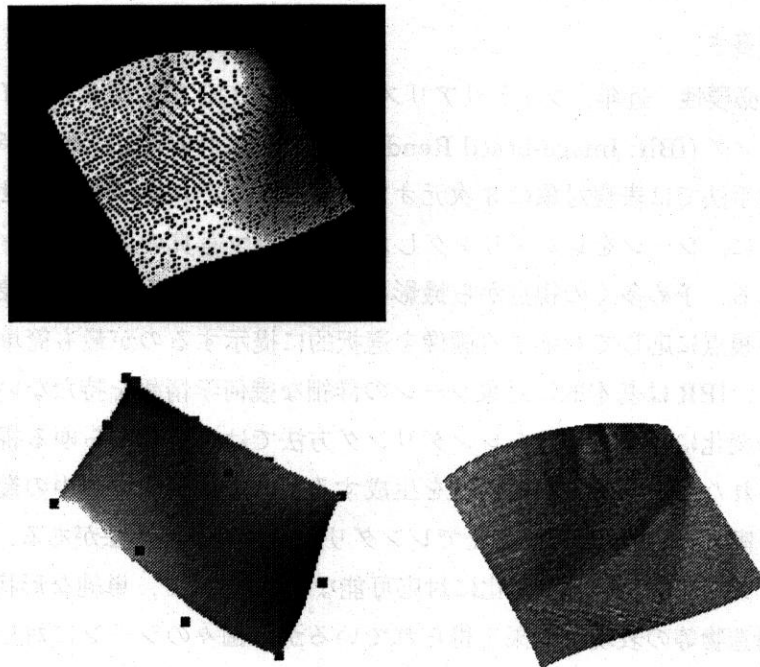


図 1.8 Bézier パッチに計測幾何情報を用いてバンプマッピングした例

上段：計測形状データ (掌の一部)

中段：Bézier 曲面パッチ (左) と計測形状データの

法線情報をバンプマッピングしたもの (右)

1.5 手を表現する上での問題点

人間の手を CG や仮想空間においてリアルに提示することの重要性と必要性、また、既存の関連研究・技術分野について述べてきた。本節では人間の手を表現する上での本質的な問題点について、姿勢・動きの表現および形状モデリングの二つの側面より述べる。

1.5.1 姿勢・動きの表現における問題点

関節自由度の多さ

モデリングの必要性 近年、フォトリアリスティックな CG 制作においてイメージベースド・レンダリング (IBR: Image-based Rendering) と呼ばれる手法の研究が盛んに行われている。この手法では表現対象の 3 次元オブジェクトモデルを予め作成せず、複数の実写画像をもとに、シーンをレンダリングしたりパノラマ写真のようなコンテンツを作成するものである。予め多くの視点から撮影されたオブジェクトの実写画像を蓄積しておき、ユーザの視点に応じて対応する画像を選択的に提示するのが最も簡単な実装方法である。しかし、IBR は基本的に対象シーンの詳細な幾何学情報を持たないため、光源や視点の位置の変化に対して柔軟なレンダリング方法ではない。あらゆる視点に対応するために蓄積された画像群から補間画像を生成する手法や、シーンの中の幾何学的情報やテクスチャ情報を推定・構築したうえでレンダリングする拡張手法がある。これらは視点やライティングなどの光学的な変化に対応可能な IBR として、単純な形状のオブジェクトや大きな構造物等の表現に効果を得られているが、個々のシーンに対して、形状、テクスチャ、光学特性を推定しマッピングを行うため、視点やシーンのコンテンツが多様に変化する場合には不向きな CG レンダリング手法である。

一方、動き回る人物像の合成のようにシーンの幾何情報の空間的・時間的変化の激しい場合には、IBR のような方法ではなく、オブジェクトに対する何らかの 3 次元モデリングが必要となる。このオブジェクトモデリングは、リアリティを追求する人物像の CG 映像制作においても、VR システムのようにユーザの振る舞いを CG で可視化するような場合においても、不可欠な要素である。そして、そのモデルに対して、関節角度などの適当なパラメータを設定することによって人物像に特定の姿勢や動きを加えるのが一般的なアプローチである。

モデルの動きパラメータ 人の手のように関節の数が多い対象では、姿勢を記述するためのパラメータは非常に多くなり、設定は大変な作業となる。しかも、アニメーション

のように時系列データを用意しなければならない場合、所望の動作をデザインしモデルに与える作業は多大な労力を伴う。映像の中で、何か物体を手にとったり動かすといったシーンや、人と人が触れ合うシーンのように、物理的な干渉を伴うシーンにおいて現実感を損なわずにモデルに動きのパターンを与えることは難しい問題であると同時にリアリティを追求する上では本質的な課題である。

一方、我々の日常生活を思い浮かべると容易に想像ができるが、手を使って何か仕事をしている場合のように意味のある能動的・機能的な動きの他に、意識することなく手を動かしている場合もある。むしろ、この無意識の動作の方が多いと言える。特に意図をもって動かそうしていないからといって、手があるひとつの姿勢に固定されてしまっているのは、いかにその姿勢が自然なものであっても、アニメーションとしてはむしろ不自然な出来映えとなってしまう。リアルな人物像を合成するには、こういった“何気ない”瞬間に対しても、やはり“何気ない”動きを与える必要があり、意識的な動作をデザインする場合と同様の労力を要するのである。

情報取得の難しさ

モーションキャプチャの問題点 1.4.1項で詳しく述べたように、映画やコンピュータゲームのキャラクタアニメーションにおいてモデルに動作を与える方法として、モーションキャプチャが強力な手法であり、既に多用されている。モーションキャプチャの装置には、磁気式、光学式など幾つかの方式があり、また規模についても、踊りや立ち回りの動作を計測できるものから、卓上サイズの計測空間を設定出来るものまで様々であるが、一般にキャリブレーション等の準備が煩雑であったり、装置設備全体が大きな空間を必要としたり、また高価であったりする。モーションキャプチャの本質的な目的は、計測により取得した動作をCGで再生するという事にある。つまり、予めシナリオの決められた所望の動作をそのままCGのキャラクタに割り付けるという目的には向いているが、割り付ける動作そのものを試行錯誤したり、編集したりする目的には不向きである。所望の動作を一度人間がほぼ完全に演じて見せる必要が生じるのである。コンピュータにより架空のキャラクタやコンテンツを合成しておきながら、生身の人間が実演する振る舞いをアフレコで与える方法がもっとも有効な方法であるというのは皮肉な状況とも言えよう。

計測によって得られる動作データは、基本的にノイズ除去等の処理や加工を必要とする。またCGキャラクタと動作計測対象の役者とは、身体や各部位のサイズが異なるので、所望の自然な動きをCGキャラクタに割り付けるためには、やはり手作業による修

第1章 序論

正が必要となる。CGキャラクターが存在する映像中の環境、衣装や持ち物、道具など、動作に直接影響する要素を考慮しなくてはならない。つまり、CGキャラクターの存在する環境を模倣して、実際に動作を演じる役者の舞台を整える必要があり、これも問題点の一つである。

マン・マシンインタフェース 映画などのキャラクターアニメーションでは、モーションキャプチャで得られるデータを加工して用いたり、さまざまなCG制作ソフトウェアを用いて、クリエイターが時間をかけてキャラクターに動きをつけて映像を作成している。これらはほぼ完全なオフラインの処理である。これに対して、VRシステム等に用いられるユーザインタフェースに求められるのはリアルタイム性である。すなわち、システムに対するユーザの働き掛けが即時に処理されて、ユーザに対して視覚提示などのフィードバックがなされなくてはならない。テレビ番組制作においては、既にモーションキャプチャによるリアルタイムの処理で、登場キャラクターに動作を振り付ける技術が実用化されている。しかし、キャラクターに振り付けを行うという用途に特化されており、マン・マシンインタフェースという意味においては汎用性は薄い。

また、キャラクターアニメーションで用いられるモーションキャプチャ技術は主に非接触式の計測方法が多いが、VRやマン・マシンインタフェースの研究・アプリケーション開発では、グローブやボディスーツのように、接触型の計測方法が多く使用されている。手に関しては、グローブ型や機械式のものが使用され、用途によっては力覚や触覚のフィードバック機能をもったデバイスも多く開発されている [62]。非接触型の計測方法では、手の指に幾つものセンサを装着するにはセンサそのものが大きすぎたり、動きの変化が激しく、マーカ等が完全に他の指などに隠されてしまうセルフオクルージョンの問題が主な理由として挙げられる。

しかし、接触型の計測デバイスも幾つか問題点が挙げられる。まず、センサとして用いられている光ファイバや力感応センサの出力特性の非線型性が強く、計測精度を保証するため工夫を要する。また、人間の手の関節自由度を全て網羅しているものは少なく、限られたセンサ入力から不足している情報を補う必要がある場合が多い。手の大きさや、関節位置などの個人差のため計測個所がずれてしまうことによって計測誤差を生じる可能性もある。計測個所の位置を個々のユーザに対して調整可能なデバイスやキャリブレーションによって個人差を吸収できるデバイスでも、その準備は一般に煩雑である。また、計測装置を装着していることによってユーザの動きが制約を受けたり、使用感が悪くなるという接触型センサの本質的が常に付随する。機械式の計測デバイスは、センサの出

力がかなり線形で扱いやすい反面、その構造上、使用の際の拘束感が特に強いのが問題点である。

1.5.2 形状モデリングにおける問題点

CG オブジェクトとして手のモデルを作成する際の問題点を次に挙げる。

形状の複雑さ

手はその構造上、様々な組織の集合体であり、硬さ、弾性、形状の異なるパーツの分布状態がその表面を形作っている。骨格、腱、筋肉、脂肪層、血管などの各組織が内部で相互に配置され、絡みあい、皮膚をそれを覆っている。ある部位では筋肉の隆起が目立ち、別の部位では骨格が皮膚を通して表面にその形を反映させている。また、皮膚表面には、比較的大きな起伏や皺から、細かな溝や穴までが隈無く表面を覆い、巨視的にも微視的にも非常に幾何学的変化に富んでいる。大域的には内部構造が、局所的には皮膚そのもののもつ幾何学的特徴が、表面形状を形成している。

手の形状を忠実に模倣するとすれば、指や掌といった各部位の表面的なオブジェクトだけでなく、内部から表面にわたる配置や構造、物理的性質に対する知識・考慮が必要となる。

形状の変化

手の指が曲がる場合の形状変化は、いわゆる一様な棒を曲げる場合や蝶番をもつ関節を曲げる変形などとは全く異なる。姿勢変化によって内部構造の配置・形状が変わるばかりか、腱や筋肉のように、弾性や硬さが変化する組織が含まれている。手の形状をさらに複雑にしているのは、姿勢によって非常に柔軟にトポロジが変化するところにある。表面の隆起や皺の生じ方は一様ではなく、骨など内部組織の外形が表面に現れたり目立たなくなったりする。この不均一な変形を表現するためには、FFD や陰関数表現による手法には表現自由度に限界がある。FFD は、空間全体をパラメトリックな表現を用いて歪ませることにより、空間内のオブジェクトを変形させる手法である。柔軟体を表現する場合のように、滑らかな変形を効果的に表現する方法だが、空間を表現するためのパラメータ表現によって変形の自由度に制約がある。1.4.5節で紹介した Thalmann らの DFFD による方法は FFD の拡張である。従来の FFD と異なる点は、対象を変形させるためのパラメトリックな空間表現を必要としないことである。直接的かつ部分的にポリゴンの頂点群を移動させてポリゴンサーフェスを変形させることができる。しかし、計算コストと表現自由度とのトレードオフ関係が存在し、あまり多くの変形自由度を設けると計算

第1章 序論

コストが増大し、CGのレンダリングスピードに影響する。また、変形自由度が多くなると、変形量などの多くのパラメータが生じるが、その設定には試行錯誤を必要とする。

計算コスト

実際の手に起きている変形のメカニズムを模倣・再現するためには、内部構造が表面におよぼす影響を考慮しなくてはならない。しかしながら、物理的な手の組織構造を忠実に模倣しシミュレーションすることは難しい問題である。このような構造をメッシュ状のバネ-質点系の挙動で近似するものが動力学的手法である。メッシュ構造の生成には、形状モデラを用いたり、メタボールや2次曲面等を使ってスケルトンに肉付けを行う方法などがある。いずれにしても、動力学的手法を用いたモデルは必然的に非線型性の高いシステムとなり、微小時間ステップにおいて線形化し繰り返し計算による演算を必要とする。またメッシュのノード数は概して多く、全体の状態変数の次元が高くなるため、計算コストが高い。したがって、多くの場合、オフラインによる計算によって各フレーム画像を蓄積した上で、それらを連続的に提示することによりアニメーションを作成することになる。また、モデルの挙動の性質を決定づけるバネの剛性やダンパの減衰などの物理パラメータを設定する方法が確立されておらずヒューリスティックを要することも問題点となっている。

また、表面のレンダリング手法も計算コストに大きく影響する。バンブマッピング皮膚の質感等のリアリティ向上に強力な手段であるが、表面上の各点について光学的反射の計算を行う必要があり、やはり基本的に計算コストが高い。また、皮膚の内部反射等を考慮したモデルは、表面上の各点をレンダリングするために必要な光強度を算出するために、さらに多くの計算コストを要する。

1.6 本研究の目的と方針

本節では、取り組む問題を明らかにし、研究の目的と方針について述べる。

対話的かつ手軽な手のCG合成

形状入力装置や動作計測装置など、用途に特化した高価な機器や大規模なシステムを用いることなく計算機上でCGキャラクタの動作生成を容易に行うことが可能になれば、労力や経費の節約が可能となる。映像制作における計画段階で、絵コンテやキーフレームを作成する場合においても、具体的なCG像を目の前にして対話的に映像を編集できるツールがあれば非常に有効である。所望の映像を具現化していく制作過程において、動

きや視点、証明効果などについてシミュレーションを踏まえて綿密な計画を予め立てることは、使用料の高価な計測機材を効率的に使用する為にも有効である。しかしながら、手のCG像合成に関しては、対話的かつ手軽に、姿勢・動作をコンピュータに入力したり、入力された姿勢・動作を編集できるツールはまだ無いと言える。

本研究では、手の姿勢の入力・編集の際に、手の動きに関する全ての情報を必要とするのではなく、限られた関節の動きを与えるだけでも常に人間らしい手の像を生成するモデルの構築を目的とする。所望の動きの設定の細かさや利用可能な手形状の情報量に応じて、何気ない無造作な動きの生成から意図のある動きのデザインや他のオブジェクトとの干渉まで、色々な用途へ適用可能な汎用性ある手のモデリングの枠組みが望まれると考える。このような枠組みの実現は、CG映像制作のみならず、コンピュータとユーザとのインタフェースという観点においても応用範囲の広い有効な技術であると考えられる。また、同じ力学表現を用いて外的な干渉や拘束の効果を導入する応用も期待できる。

提案モデリング手法 —力の重ね合わせ

本研究では、人の手が潜在的に有する基本的特性を、姿勢・動作設定およびその効果的な表現方法に注目してモデリングを行う。

人間の手の骨格は、多数の骨で形づくられており、関節部で靭帯や腱膜などによって互いに連絡している。手の骨格は多くの筋肉によって複雑に取り巻かれており、手の姿勢・動作は筋によって能動的に決定される。そして筋骨格系を血管や皮膚などの柔軟な組織が覆っている。手掌内部には関節間を結ぶ小さな筋が多数存し、局所的な動きに大きく関与している。しかし筋は手掌内を連絡するものばかりではなく、前腕や上腕から手掌内部まで到達する筋も多数ある。むしろ物体をつかんだりする際には、前腕や上腕から連絡する筋が強大な力を生む役割を果たしているという知見もある [63]。これら多数の近位・遠位の筋が複雑に入り乱れた状況では、全体のダイナミクスを解析的に追跡することは非常に困難である。

そこで本研究では、様々な筋がおよぼす力の影響が釣り合った結果、姿勢が決定するという手の筋骨格の基本的な機構を、力の重ね合わせのアナロジを用いたアプローチを提案する。手の運動姿勢の実計測を行い、その計測結果に基づき、存在し得る手の姿勢の傾向を数学的にモデリングする。存在傾向の強い関節軌道へ引き寄せる仮想的な力を加えることにより、潜在的に手がつ機構的な制約や動きの特徴を表現することができる。

生成された姿勢がリアルな手の外観として提示されるために皮膚モデルを構築する。こ

ここでは、形状計測をベースにして手の形状をモデリングし、実写によるテクスチャをマッピングすることにより、フォトリアリスティックなレンダリングを行い、手の像を合成する。

1.7 本論文の構成

本論文は以下の5章からなる。

第2章では、提案するモデリング手法の基本的アイデアとモデルの枠組みについて述べる。まず、手の筋骨格系の解剖学的知見を紹介し、力学的表現によるモデリング手法を導入について述べる。次に、モデルの基本構造を説明する。このモデルは手の構造を表す関節を持った骨格構造とその上を覆う皮膚とによって階層構造を成している。指などの関節の角度の設定によって手の基本的な姿勢を作り、手の骨格の形状と関節間の角度の情報を用いて皮膚表面の形状を決定する。最終的にテクスチャマッピングを用いて手の皮膚の質感を自然に再現する。

第3章では、手の姿勢を記述するための骨格モデルの数学的記述方法を定義し、人間の手に特化した自然な姿勢を生成する機構を構築する。姿勢生成には、人間が手を動かす時の指の関節の間および指と指との間の姿勢の相互関係を制約として採り入れる。この制約に基づいて、姿勢の尤もらしさの指標としてポテンシャル関数を定義する。ここで、力学的な概念を採り入れることにより、ポテンシャル関数を自動的に減少させるシステムを構築し、常に不自然さのない手の姿勢を生成する。本研究ではポテンシャル関数を構成する制約として線形関数を用いて実装を行うが、線形関数以外の制約表現に対する拡張方法についても検討し、提案手法の枠組みの汎用性についても述べる。

第4章では、第3章で提案した手法により生成された手の姿勢に基づき、手の表面形状全体を表現するための皮膚のモデルについて述べる。人の手の形状を忠実に反映したCG像を合成するために、レンジファインダによる実物の手の形状計測を行い、形状データに基づいて皮膚モデルを構築する。骨格モデルの各リンクとその近傍の形状データとの関連づけを行うことによって、皮膚モデル骨格モデルの姿勢変化に連動させる機構を構築することが可能になる。サーフェスの表現として、ポリゴンを用いた方法と自由曲面を用いた方法とを試みる。また、CGアニメーションを作成することによって本研究で提案したモデリング手法の有効性を示し、そのアプリケーションの可能性について考察する。

最後に、第5章で結論として本研究の総括および将来的展望を述べる。

第2章

力学的表現による手のモデリング

2.1 解剖学的知見

人間の手は、多数の骨で骨格が形づくられており、関節部で靭帯や腱膜などによって連絡している。これらは受動運動器と呼ばれる。筋や腱は関節において骨格を支持し、また運動を促すはたらきをもっており、能動運動器と呼ばれる。これら両運動器のはたらきの組合せにより、手の姿勢・動作が決定される。そして骨格や筋などの上を血管や皮膚などの柔軟な組織が覆っている [63]。

手の骨格は多くの筋肉によって複雑に取り巻かれている。その筋肉は手掌内部を連絡するものばかりではなく、前腕や上腕から到達する筋も多数ある。むしろ物体を掴んだりする際に、前腕や上腕から連絡する筋が強大な力を生む役割を果たしている。このような筋は手掌部の外部から内部へ束になって、手掌内部へ到達し、分岐し、各関節へ広がっている。筋と筋あるいは腱と腱とが交差し、また腱が腱を貫いて配置されている部分もあり、その構造は複雑である。勿論、手掌内部の関節間を結ぶ小さな筋も非常に多数存在し、局所的な動きに大きく関与している。

2.1.1 手の骨格系

手掌部の骨格は 20 を超える骨で構成されている。各骨はそれぞれ固有の形をしており、関節において骨端部の関節面と呼ばれる部分で骨と骨とが接している。関節は関節面、関節面をつくる関節体、関節包、関節腔といった各部分で構成されている。関節の可動性は、関節体、関節面の形状に密接な関係があり、実際は骨と骨が互いにずれを起こしたり、転がったりする複雑な運動によって決まる。

図 2.1 に示すように手掌部の骨格は前腕部と連絡する手根、中手、指骨の 3 つの部分から成る。手根は舟状骨、月状骨、三角骨、豆状骨、大菱形骨、小菱形骨、有頭骨、有鉤

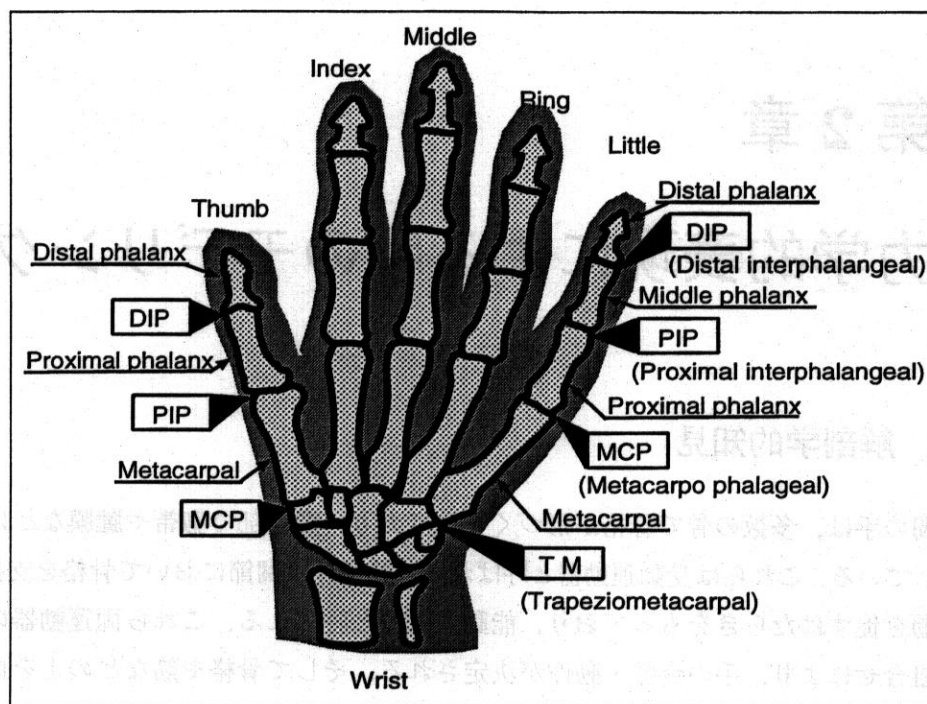


図 2.1 手掌部骨格図

骨の8つの手根骨から成る。中手は中手骨、指骨は指先へかけて基節骨、中節骨、末節骨の3つの指節骨で構成される。但し、母指の指節骨は中節骨を除く2つである [63]。

2.1.2 手の筋とその作用

手掌部の運動に関連する筋は、手掌内の短い筋のみならず、前腕の浅層・深層の筋が手掌部に到達しているものもある。以下に、手掌部に関連のある主要な筋を挙げ、その主な作用についてまとめる。

- 前腕から手掌部へ到達する筋

- 前腕の腹側筋の浅層

- * 浅指屈筋は肘の関節から腹側を通り、母指を除く4指の先端まで到達している。この筋は肘関節を屈曲するのを助けるが、手根の関節と近位の指の関節ではむしろ肘関節部よりも強力な屈筋である。

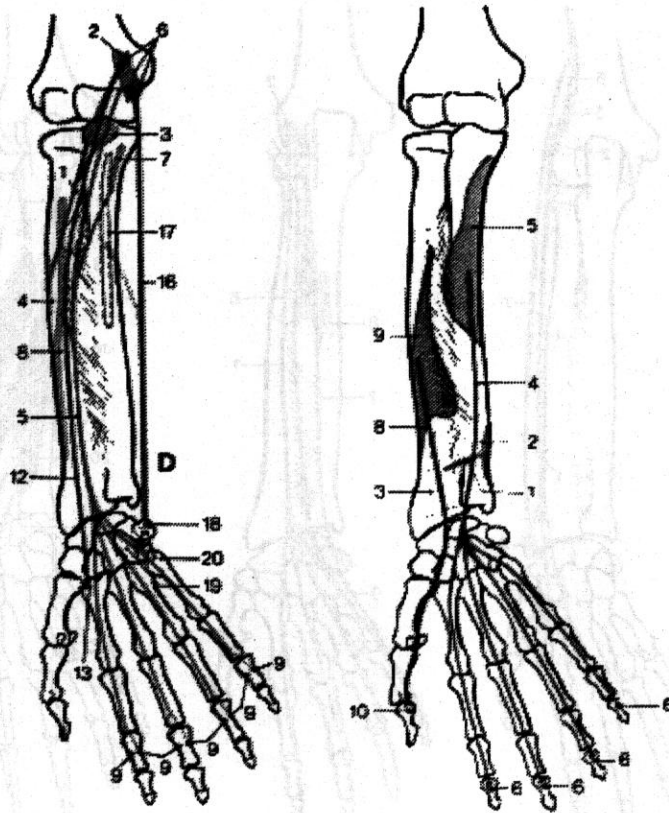


図 2.2 前腕腹側筋：浅層 (左)，深層 (右) [63]

- * 橈側手根屈筋は上腕の内側上顆と前腕屈筋の浅層に起こり，第2中手骨で終わっている．この筋も肘関節付近でははたらきが弱いが，手根の関節では掌側屈曲の場合および長橈側手根伸筋と一緒に協力的にはたらく．
- * 長掌筋は腕骨の内側上顆から起こり手掌腱膜をつくって手掌面へ放散している，この筋は手を掌側へ曲げ，手掌腱膜を緊張させるはたらきがある．

－ 前腕の腹側筋の深層

- * 深指屈筋は尺骨の掌側面がから起こり手根を通り第2～5指の末節基底まで到達する．この筋は手根・中手および指の関節を屈曲する．
- * 長母指屈筋は橈骨の前面に起こり，母指の末節骨底に達する．母指の末節に至るまでの屈筋であるが，母指を橈骨側にわずかに偏位させることも

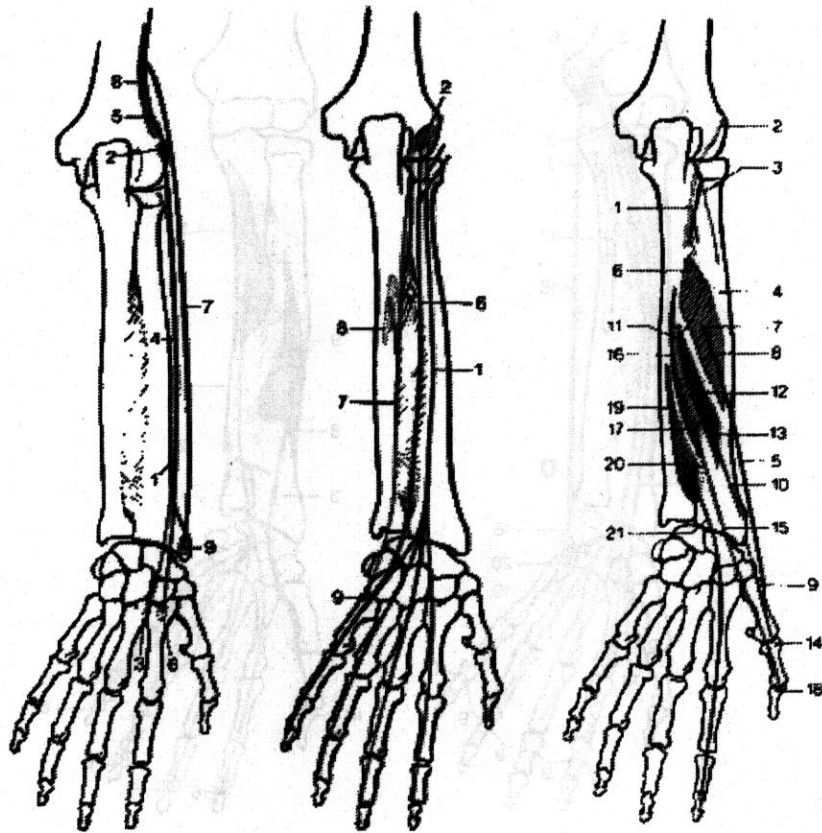


図 2.3 前腕橈側筋：浅層 (左)，前腕背側筋浅層 (中央)，前腕背側筋深層 (右) [63]

できる。

- 前腕の橈側筋 橈側手根伸筋は“手を握るのを助ける筋”といわれる。握りこぶしを作るときに、屈筋群が最大限の作用を発揮するためには手は軽度の背側屈曲状態にある必要があるためである。

- * 短橈側手根伸筋は上腕骨上顆から起こり、第3中手の骨の底に終わる。この筋は手を尺側偏位の状態から中間位へもどし、手を背側へ屈曲する。
- * 長橈側手根伸筋は上腕骨顆上稜に始まり、第2中手骨底に終わる。肘関節の弱い筋であり、また腕を曲げた状態では回内筋、腕を伸ばした状態では弱い回外筋としてはたらく。手根関節では背側屈曲、橈側偏位をおこなう。

－ 前腕の背側 (尺側) 筋の浅層

- * [総] 指伸筋は、上腕骨の外側上顆において広い面状に始まり、第2指から第5指までの指背腱膜をつくり、さらに指の季節末骨と中手指節関節の関節包に小束を送っている。この筋は指を伸ばし、扇状に開く。手根の関節では背屈のための最も強大な筋である。
- * 小指伸筋は [総] 指伸筋とともに始まり、第5指の手背腱膜に達する。この筋は第5指を伸ばし、手の背屈と尺側偏位に協力的にはたらく。
- * 尺側手根伸筋も指伸筋とともに始まり、第5中手骨底に達する。機能としては外転筋である。

－ 前腕の背側 (尺側) 筋の深層

- * 長母指外転筋は尺骨の背面に始まり、第1中手骨底に終わる。主なはたらきは母指の外転である。
- * 短母指筋は尺骨の背面に始まり、母指の基節骨底に終わる。この筋は母指を伸ばし、外転する。
- * 長母指伸筋は尺骨背面と骨間膜に始まり、手根の背面へ達する。この筋は橈骨の外側の骨稜を支点として母指を伸ばす。手根の関節ではこの筋は手を背屈し、橈側へ偏位させる。
- * 示指伸筋は [総] 指伸筋とともに始まり、腱となって指背腱膜へ入りこんで行く。この筋は示指を伸ばし手根の関節では背屈に協力的にはたらく。

● 手掌部の短い筋

－ 中手の筋

- * 掌側骨間筋は第2,4,5中手骨に対応した基節骨底に至り、短い腱となって終わる。これらの筋のもう一つの部分は指背腱膜に入り込んでいる。これらの筋は中手指節関節を曲げ、また、指背腱膜に入り込んでいる構造上、近位および遠位の指節間関節を伸ばす。これらの筋は中手骨と指節骨に対する位置関係から第3指を軸とした内転作用ももっている。したがって、第2、第4および第5指を寄せるようにはたらく。
- * 背側骨間筋は、2頭をもって、隣接する中手骨の互いに向かい合った面から起き、掌側骨間筋と同様に基節骨底に至り、もうひとつの部分は指背腱

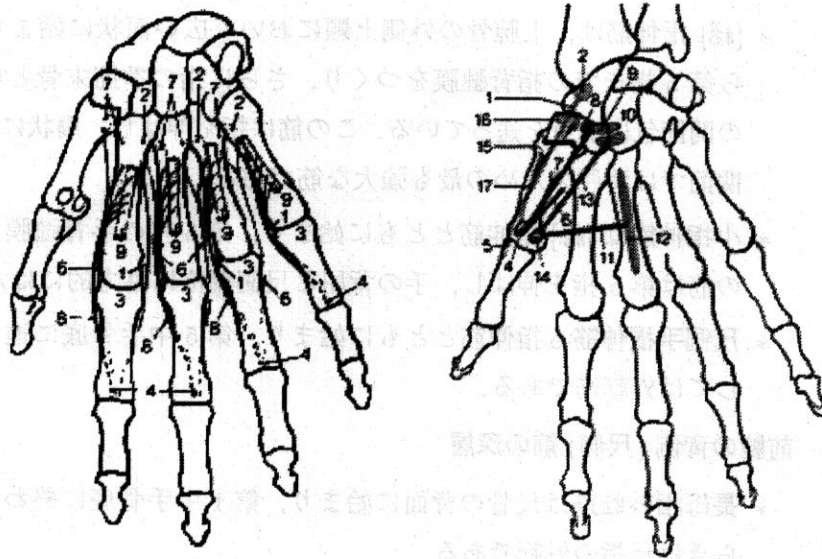


図 2.4 中手筋 (左), 母指球の筋 (右) [63]

膜に入り込んでいる。やはり同様に、中手指節関節を曲げ、節間関節を伸ばす。第3指を通る軸に関して第2, 第4, 第5指を外転するようにはたらく。

- * 虫様筋は深指屈筋の橈側面から起こり、掌側から伸筋腱膜と中手指節関節の関節苞へ至る。中手指節関節を曲げるようにはたらき、指節間関節に対しては伸ばすようにはたらく。

- 母指球

- * 短母指外転筋は手根の中の舟状骨結節と屈筋支帯から起こり母指の基節骨に終わる。この筋は母指を外転させる、
- * 短母指屈筋は手根の中の屈筋支帯および三つの骨片に始まり、母指の橈側にある種子骨に終わる。手根中手関節を曲げ、中手指節関節を曲げ、中手施設関節で母指を内転した外転したりする。
- * 母指内転筋は第3中手骨全体と近隣の手根骨から始まり、母指の中手指節関節に終わる。この筋は内転筋であり、母指を対立位にしたり、屈曲したりするとき協力的に動く。

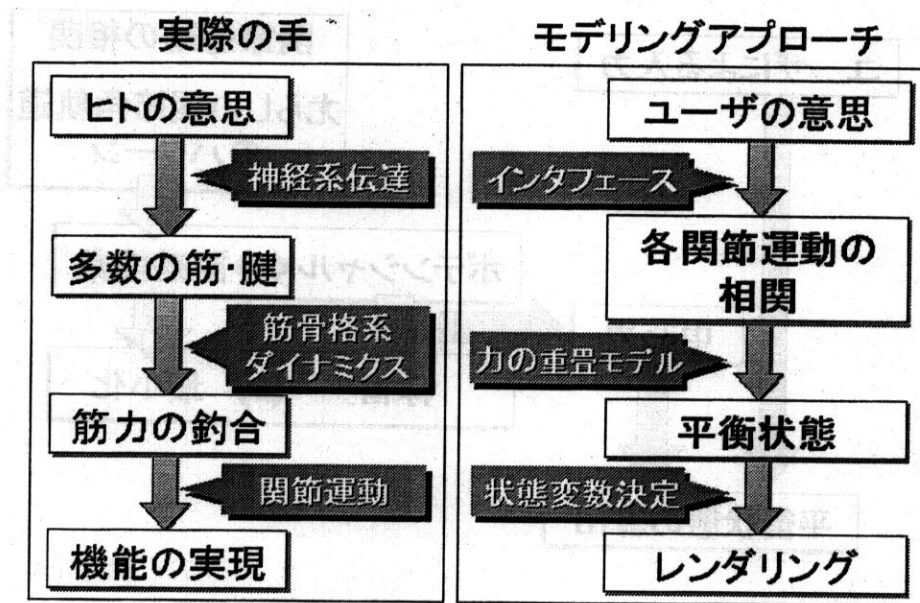


図 2.5 モデリングのアプローチ

* 母指対立筋は手根の中の大菱形骨結節と屈筋支帯に始まり，母指中手骨のの橈側縁に終わる．この筋は母指に対立位をもたらす同時に母指の内転に対しても協力的に動く．

2.2 提案する手のモデル — 力学的モデリングによる姿勢記述

前項で述べたように筋骨格系の連結関係などは，解剖学的に明らかにされ，その局所的なダイナミクスも解明されつつある [64, 65, 66, 67, 68]. 解析的にも，筋骨格系の部分的な近似モデリングやシミュレーションは可能であろう [43]. しかし，筋がその経路の各部分で複数の関節に力を加え，姿勢変化によって力の加わり方も逐次変化することを考慮すると問題は難しいものになる．しかも，非常に多くの骨が靭帯や腱・腱膜で連結され，骨格のもつ自由度も厳密には多数で複雑である．そのうえ，多数の近位・遠位の筋が複雑に入り乱れた状況では，全体のダイナミクスを解析的に追跡することは非常に困難である．

そこで本研究では，様々な筋がおよぼす力の影響が釣り合った結果，姿勢が決定されるという手の筋骨格の基本的な機構をモデリングする際に，力の重ね合わせをアナロジ

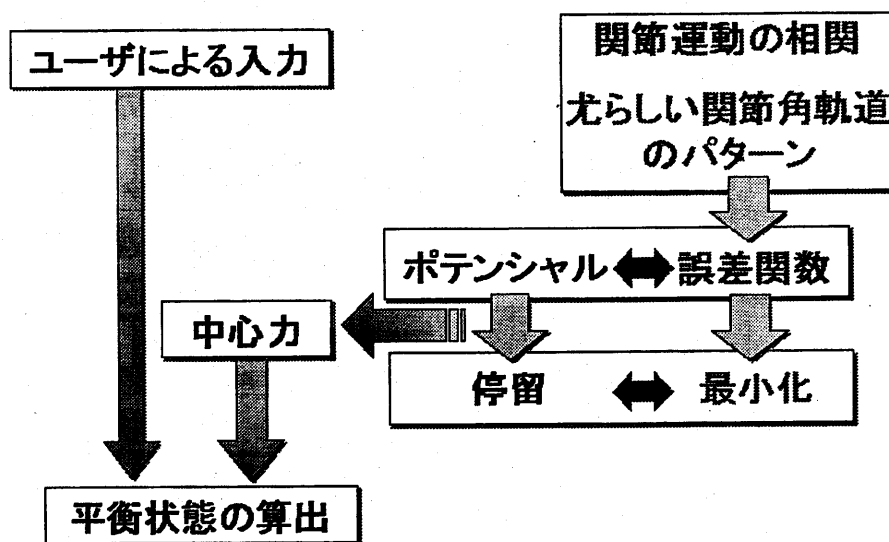


図 2.6 制約モデル

として用いる手法を提案する [69, 70, 71, 72, 73, 74](図 2.5). ここでは, 厳密に筋骨格系の幾何学的配置等をモデリングする代わりに, まず, 手の姿勢を表現するために十分な自由度を有する骨格の近似モデルを作成する. 次に, 手の姿勢の実計測を行い, 計測結果により取り得る手の姿勢の傾向を数学的にモデリングし, それらの重ね合わせの結果, 姿勢が決まるものとする. このモデリング手法により, 潜在的に手がもつ機構的な制約や動きの特徴を表現することができる. 意図的に動かしたい部位に対する入力と, 潜在的特徴による影響との平衡状態を計算することにより, 常に人間らしい手の姿勢を生成することができる考える.

姿勢の制約モデル 本論文では各関節に仮想的な弾性を設定し, 潜在的に手がもつ機構的な制約や動きの特徴によりもたらされる仮想的な力と, 実際に手を駆動するための力の重ね合わせを計算する. まず, 手に課せられる制約を二次形式の誤差関数として定式化する. この誤差関数は存在傾向の強い関節軌道からの自乗誤差であるが, これを力学的アナロジーによりポテンシャルとみなすと, このポテンシャルを停留に導くような中心力を算出し, モデルに加えれば手がもつ動きの特徴へ近づけるための仮想的な力として機能する (図 2.6). 人の手の骨格の自由度は 30 足らず存在するとされ [29], 関節をもつ

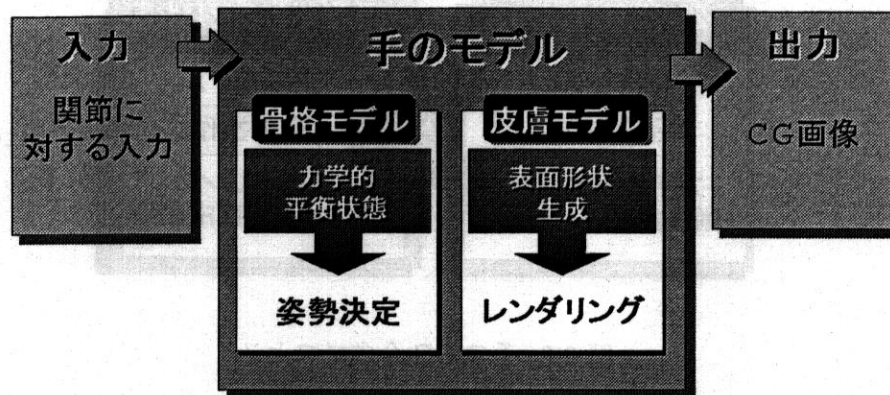


図 2.7 手のモデルの構成

たモデルとしては自由度の多い系だと言える。しかし、有限要素法を用いる方法や、バネ質点モデルなどで筋肉等を近似する物理シミュレーションを行う方法などに比べて状態を決定する変数は遥かに少ないと言える。

骨格モデル

本研究では人の手の組織構成のアナログを利用することにより、人間らしい手の形状を形成するモデルを構成する。まず、受動運動器に相当する骨格モデルを構築し、手の姿勢を数学的に表現する。骨格モデルは、剛体リンクと回転ジョイントで骨格を近似するもので、従来からよく用いられているモデルである。各関節における骨と骨とのなす角度を与え運動学の計算を行なうことによって姿勢を表現する。次に、能動運動器、すなわち筋や腱のはたらきを表現するために力学的な平衡状態を導入して骨格モデルの姿勢を決定する。そして、関節を屈曲させるための力の強さを任意の姿勢を作るためのパラメータとする。このパラメータが本システムの入力となる。以上のように骨格モデルと力学的な平衡状態を組み合わせて手の骨格姿勢を決定する処理を姿勢決定プロセスと呼ぶ。姿勢決定プロセスにより手全体の姿勢は各関節角度を要素にもつ状態変数ベクトルで表される。

皮膚モデル

筋肉や皮膚などの占めるボリュームに相当する適度な厚みをつくるために皮膚モデル

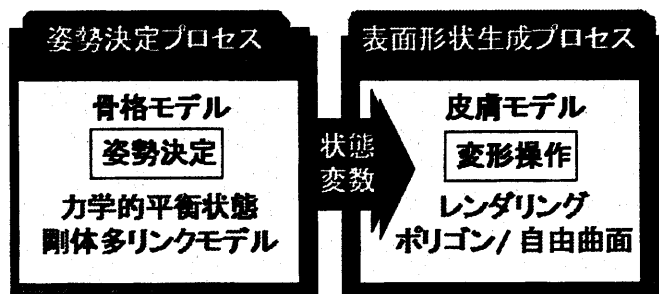


図 2.8 手の CG 合成プロセス

を構築する。本論文における皮膚のモデルは、既に述べた手の姿勢生成メカニズムの結果をリアルに肉付けして提示するものである。

本研究では皮膚を手の表面全体を覆う一枚の層状の構造をもつものとしてモデリングする。皮膚モデル自体が一つのオブジェクトであるために、幾何学的なオブジェクトを組み合わせたモデルのような不自然な接続部分は存在しない。また、皮膚モデルを構築する際に実物の手の3次元形状計測を行ない、得られたデータに基づいて皮膚表面の面情報を生成する。この皮膚モデルは表面を表す3次元空間内の点群である。これらの点データのの一つ一つは骨格モデル中のリンクとのつながりをもっている。したがって、リンクの動きに対して表面上の各点データがどのように振舞うかをモデリングできる。骨を表すリンクに対して相対的にどの位置に存在するべきかを指定して全体として皮膚が骨格の動きに追従して変形する。この皮膚モデルを用いて骨格モデルに肉づけして表面形状を生成する処理を表面形状生成プロセスと呼ぶ。姿勢決定プロセスで骨格姿勢が決定され、状態変数が姿勢決定プロセスから表面形状決定プロセスへ渡される。表面形状決定プロセスでは新たな姿勢での骨格モデルに皮膚モデルを用いて肉づけを行ない、表面形状を生成する。

レンダリングにはポリゴンによるサーフェス表現を用いるほか、空間的に連続的な変形を効率よく行うための自由曲面パッチを導入する試みについても報告する。また、実写に基づいたテクスチャマッピングを用い、フォトリアリスティックな皮膚表面を提示する。骨格姿勢の変化に対して、皮膚表面を柔軟に変化させてリアルタイムで提示することにより、提案した姿勢生成モデルの有効性を効果的に示す。

第3章

手の骨格モデリングと自然な手の姿勢と生成

3.1 人間の手の骨格とそのモデリング

本研究では骨格を骨と関節との集合として単純化し、これらを線分と節点とに置き換えることによって表現する。骨と骨との接点にあたる位置に節点を設定し、この節点においてそれぞれ関節の可動性に応じた回転自由度をもつジョイントを配置して関節のモデルとする。ジョイントとジョイントとを結ぶ線分で長さの変化しない剛体リンクを表し、骨のモデルとする。この骨格モデルを数学的に表現するために各リンクに固定のローカル座標系を設定し、ローカル座標系相互の相対的な位置関係をアフィン変換を用いて骨格姿勢を表現する。

また、手の骨格系は手首側から指先に向けて階層的な構造をなしていると考えられることができる [29]。この階層にしたがって各骨に相当するリンク間の相対的な姿勢を順次決定していくことによって手全体の姿勢が決定される。各リンクの長さは不変なので、リンク間の相対的な姿勢は互いのなす相対角によって決定される。ここでは、各リンクに固定のローカル座標系間の変換をオイラー角を用いて記述する。このオイラー角が姿勢を決定するパラメータとなる。

3.1.1 リンクの構成およびローカル座標系設定

手根は8個の手根骨の複雑な組み合わせでいくつもの関節を構成している。そして4個の靭帯群によって連絡し、互いの関節面に沿ってずれや、滑動、転倒等の運動を起こして手根全体としての変形を可能にしている [63]。この手根の変形は手首の周りに掌部

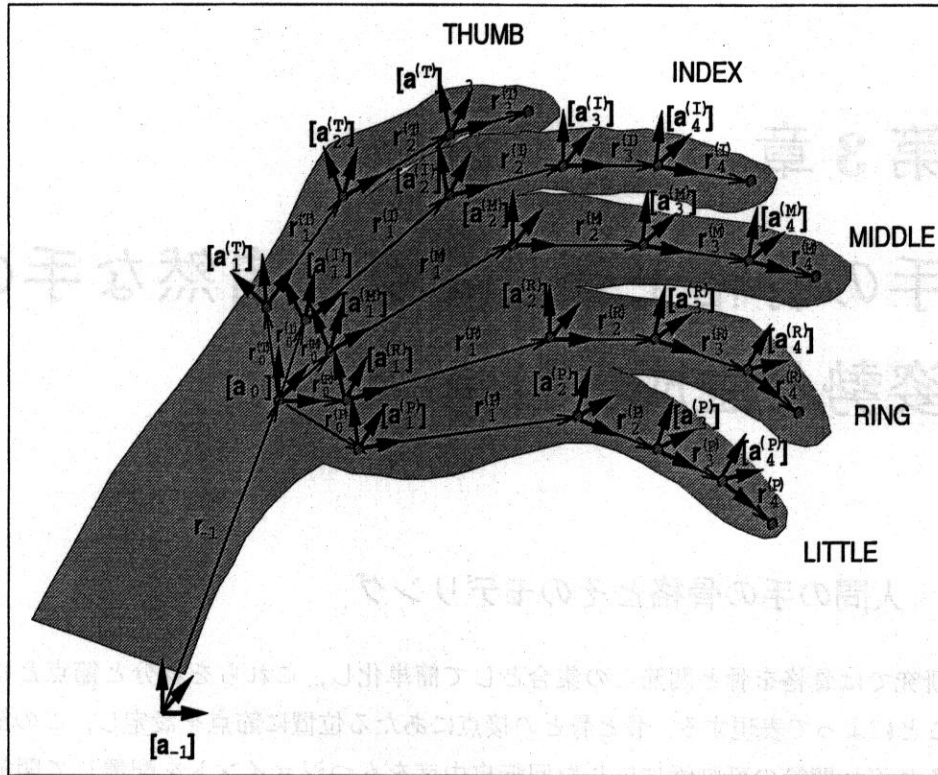


図 3.1 骨格モデルの座標系設定

を転倒運動をする場合の掌部と手首との連絡をスムーズにするものである。手根部自体が皮膚表面の変形に及ぼす影響が小さいことと、手首周りの掌部の運動は回転3自由度をもつ球関節による近似が可能であることから、手根部を一つのリンクとしてモデリングする。そして、手根部のリンクをルートとして各指の中手骨、指節骨へと木構造的にリンクを接続する形で骨格モデルを構成する。

図 3.1のようにヒトの手掌部のリンク構造を表現できる。ここではこのリンク構造を数学的に表現することを考える。まず、慣性空間に固定された座標系を考え、単位ベクトルを $a_{-1,1}, a_{-1,2}, a_{-1,3}$ と表し基本ベクトル系を次のように表す。

$$[a_{-1}]^T = [a_{-1,1} \ a_{-1,2} \ a_{-1,3}] \quad (3.1)$$

手根部に固定した座標系を $[a_0]^T$ としその原点を手首との連絡部分に設定する。同様に各リンクに対し、指 k のリンク j に固定された座標系を考える。その原点を関節 C_j^k とする。この基本ベクトル系を次のように表す。5指のインデックス k を母指から順に、T(Thumb),

I(Index), M(Middle), R(Ring), L(Little) とする.

$$[\mathbf{a}_j^{(k)}]^T = [\mathbf{a}_{j1}^{(k)} \quad \mathbf{a}_{j2}^{(k)} \quad \mathbf{a}_{j3}^{(k)}] \quad (3.2)$$

又, 各リンクについてベクトルを次のように定義する.

- \mathbf{r}_{-1} : 手根基準位置の慣性空間からの距離ベクトル (慣性座標系表現)
- $\mathbf{r}_j^{(k)}$: 指 k のリンク j の関節 $C_j^{(k)}$ から関節 $C_{j+1}^{(k)}$ への距離ベクトル ($\mathbf{a}_j^{(k)}$ リンク座標系表現)

座標変換の際は, 3-2-1 オイラー角を用いる. この座標変換は, Z 軸まわりに θ_3 , Y 軸まわりに θ_2 , X 軸まわりに θ_1 だけ回転させる変換である. これらそれぞれの座標変換行列をそれぞれ, A_1, A_2, A_3 とすると, $[\mathbf{a}_{j-1}]$ 系から $[\mathbf{a}_j]$ 系への座標変換は次のように表せる.

$$[\mathbf{a}_j]^T = A_{j,j-1} [\mathbf{a}_{j-1}]^T \quad (3.3)$$

ここで,

$$A_{j,j-1} = A_1(\theta_{j1}) A_2(\theta_{j2}) A_3(\theta_{j3}) \quad (3.4)$$

また, 各リンク座標系表現を慣性座標系表現に変換する変換行列は次のように計算できる.

$$A_{j-1}^{(k)} = \prod_{l=0}^j A_{l,l-1}^{(k)} \quad (3.5)$$

3.1.2 座標変換と各関節座標の算出

慣性空間に対して, 指 k の関節 $C_j^{(k)}$ の距離ベクトルを $\mathbf{x}_j^{(k)}$ とする. これらを慣性座標系で表現すると以下のようなになる. 但し, 指節骨の個数により母指 ($k=T$) の場合は $n=3$, それ以外の指 ($k=I, M, R, L$) の場合 $n=4$ である.

$$\mathbf{x}_1^{(k)} = \mathbf{r}_{-1} + \sum_{j=0}^n A_{j-1}^{(k)} \mathbf{r}_j^{(k)} \quad (3.6)$$

$(k = T, I, M, R, L)$

3.1.3 関節自由度

前節の定式化により, 手根の位置, 姿勢および各リンク間の相対的姿勢のパラメータ (オイラー角) を与えると各関節の位置が 3 次元空間で一意に求められる. しかし, ヒトの手を模していることから手首を除く各関節は回転自由度が 2 以下である. ここでは中

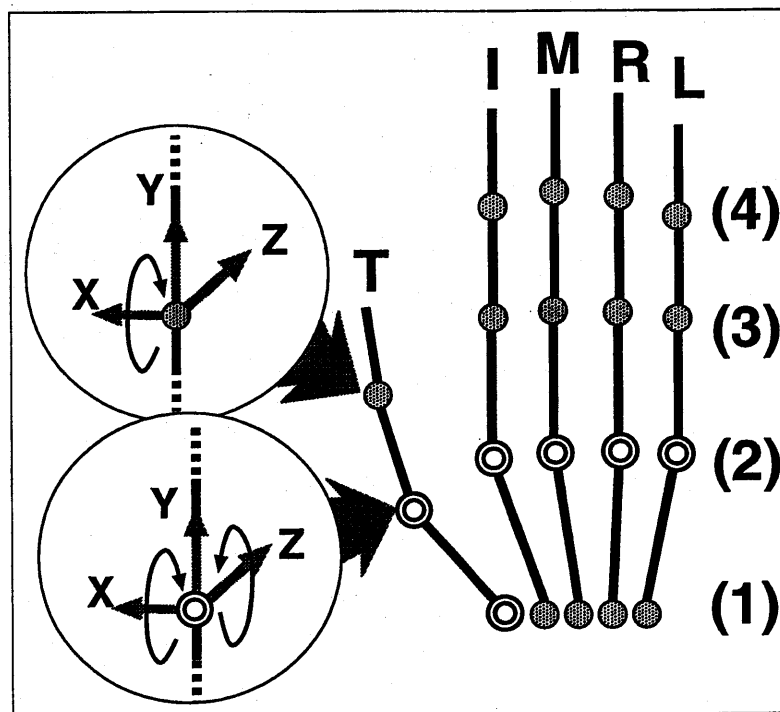


図 3.2 骨格モデル

手および指部の各リンク固定の座標系について、そのY軸をリンクの長手方向に設定する。すると各リンク一様にこのY軸周りの回転自由度はない。また、母指の末節骨、母指以外の指の末節骨、中節骨底部の関節に関しては回転自由度は1である。この回転軸とX軸とを対応させると、Z軸周りの回転自由度はない(図3.2参照)。基礎モデルの自由度は表3.1に示す通りである。従来の研究例では掌部の変形を考慮しないものが多いが、ここでは中手骨も可動としこれをもとに掌部の変形を決定する。モデル全体の自由度は手首の並進自由度を含めて33である。このモデルにより、母指と他の指先を合わせる等の、従来の手のモデルでは実現できなかった姿勢を表現できる。

3.1.4 状態変数

指 $k(k = T, I, M, R, P)$ の第 j リンク (手根部を 0 とする) の底部関節に固定されたローカル座標系を $[a_j^{(k)}]$ とする。 $[a_{j-1}^{(k)}]$ 系から $[a_j^{(k)}]$ 系への座標変換における l 軸まわり ($l = 1, 2$) の相対角を $\theta_{ji}^{(k)*}$ と表す。脱力状態における姿勢を示すときの各関節の相対角を $\bar{\theta}_{ji}^{(k)}$ とすると、システムの状態変数 $\theta_{ji}^{(k)}$ は脱力状態からの角度変位として次のように定義する。

表 3.1 各関節の基本自由度

	手根 基準点	中手骨 底部	基底骨 底部	中節骨, 末節骨 底部
個数	1	3	5	9
並進	3	-	-	-
回転	3	2	2	1
合計	6	10	10	9

$$\theta_{ji}^{(k)} = \theta_{ji}^{(k)*} - \bar{\theta}_{ji}^{(k)} \quad (3.7)$$

この状態変数を要素にもつベクトルを状態変数ベクトルとし、 θ と表す。

3.2 自然な手の姿勢の表現と生成

本研究では、手の運動を異なる姿勢のシーケンスと捉え、実在感のある姿勢を個々に提示して自然な動きを実現することを考える。そして、自然な姿勢を生成するために力学的な表現を用いる。すなわち、静的な力の釣合で手の姿勢を表現し、姿勢の変化がもたらされても釣合の状態が移行して新たな尤らしい姿勢を表現する機構を提案する。姿勢の不自然さの尺度を示す評価関数を設けこの関数をポテンシャルとしてシステムに導入する。このポテンシャルを減少させるために各関節に加えるべき力を算出し、新たな釣合の状態を決定する。また入力の一部の関節にしか与えられない場合であっても姿勢の不自然さを解消する力が自動的に導出されこの操作によってつねに自然な姿勢が保たれる。

3.2.1 基礎入出力方程式

関節の各自由度に対して、仮想的なバネを設置することを考える(図 3.3)。角度変位に伴うこの仮想的なバネの弾性力と入力との平衡状態によって各関節の状態変数は決定されるものとする。これは次式で表される。脱力状態では状態変数 θ が 0 であるため、仮想的なバネの弾性力も 0 である。

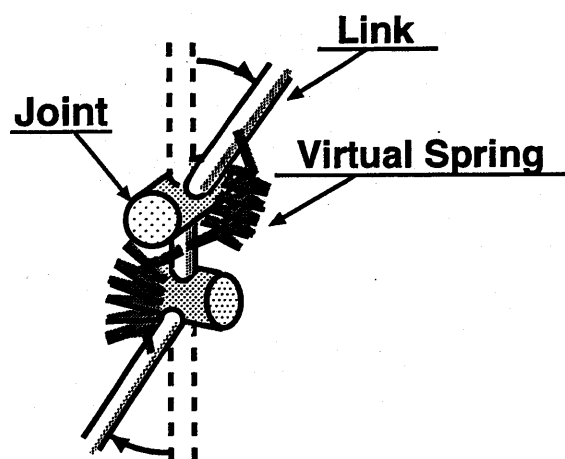


図 3.3 仮想的弾性モデル

$$K \theta = \tau \quad (3.8)$$

$$\theta = [\theta_1^T, \theta_2^T, \theta_3^T | \theta_0^I, \theta_1^I, \theta_2^I, \theta_3^I | \theta_0^M, \theta_1^M, \theta_2^M, \theta_3^M | \theta_0^R, \theta_1^R, \theta_2^R, \theta_3^R | \theta_0^P, \theta_1^P, \theta_2^P, \theta_3^P]$$

$$\tau = [\tau_0^T, \tau_1^T, \tau_2^T | \tau_0^I, \tau_1^I, \tau_2^I, \tau_3^I | \tau_0^M, \tau_1^M, \tau_2^M, \tau_3^M | \tau_0^R, \tau_1^R, \tau_2^R, \tau_3^R | \tau_0^P, \tau_1^P, \tau_2^P, \tau_3^P]$$

$$K = \text{diag}[k_0^T, k_1^T, k_2^T | k_0^I, k_1^I, k_2^I, k_3^I | k_0^M, k_1^M, k_2^M, k_3^M | k_0^R, k_1^R, k_2^R, k_3^R | k_0^P, k_1^P, k_2^P, k_3^P]$$

- θ : 状態変数ベクトル
- τ : 入力トルクベクトル
- K : バネの剛性定数行列

K は各バネの剛性定数を要素にもつ対角行列である。このパラメータを個々の関節について設定することによってその関節の剛性すなわち屈曲のし易さが設定できる。

自然な手の姿勢の拘束の数学表現

骨格モデルの全ての関節自由度に対応する関節角を与えると、(3.8)式により状態変数 θ は一意に決定し、手全体の姿勢が表現される。

本研究ではユーザが与える特定の関節への入力を指示入力とよび、またモデルが自然な姿勢を保つために自動的に生成し加える入力を内部入力とよぶ(図 3.4)。まず、指示入力によってシステムの状態変数(関節角)に変位が生じる。この変位によってポテンシャ

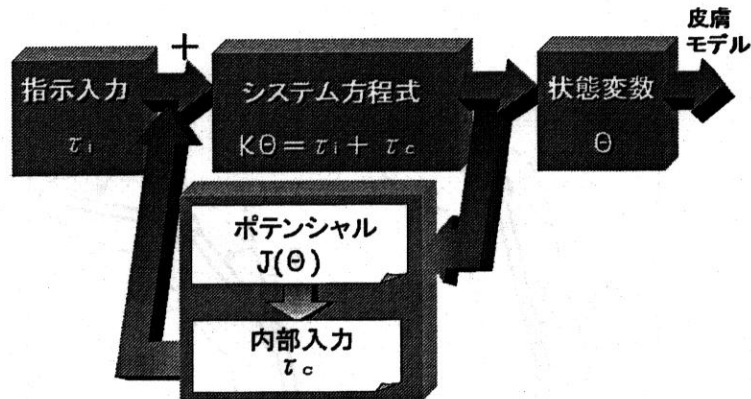


図 3.4 システムの入出力関係

ルの状態が変化し、平衡状態へ遷移するための力を生み出す。このポテンシャルの変化に伴う入力が入力である。したがって、ポテンシャルを、その平衡状態によって手の自然な姿勢が反映されるように構成すれば内部入力がつねに自然な姿勢を保つシステムとなる。システムに対する入力ベクトルは指示入力と内部入力との和で与えられるものとする ((3.9) 式)。

$$\tau = \hat{\tau} + \tau_c \quad (3.9)$$

$\hat{\tau}$: 指示入力値

τ_c : 内部入力値

3.2.2 自然な動きの制約

姿勢の不自然さ——ポテンシャル

常に手全体が自然な姿勢を保つために内部入力を生成するシステムを考える。このためにまず自然な姿勢というものを定義する。ここでは、各関節の状態変数(関節相対角)が独立に変化するものではないと考え(図 3.5)、自然な姿勢を状態変数の次のような線形関数で近似表現する。

$$\alpha \theta_1 + \beta \theta_2 + \gamma = 0 \quad (3.10)$$

α, β, γ : 定数

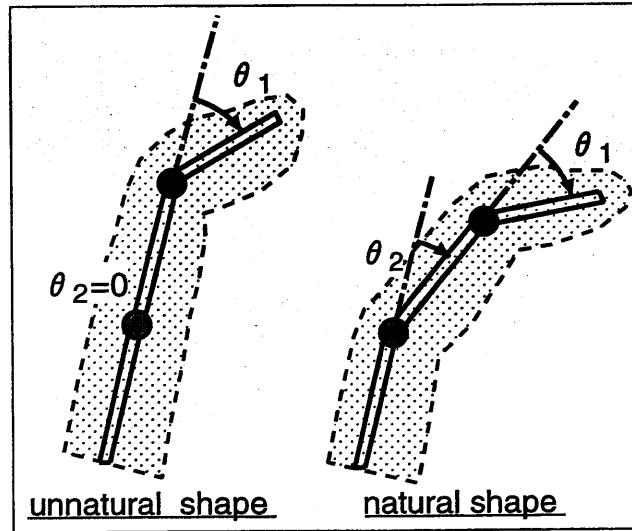


図 3.5 自然な姿勢

(3.10) 式に表現した状態を生成するような仮想的な弾性力を考える。この仮想的な弾性力が内部入力である。したがって、内部入力是一種の中心力であると設定し、内部入力のポテンシャル J_1 を次のように 2 次形式で構成する。ここで w は内部入力の強さを表す弾性係数であり、関節を自然な姿勢に拘束する強さのパラメータでもある。

$$J_1 = \frac{1}{2} w (\alpha \theta_1 + \beta \theta_2 + \gamma)^2 \quad (3.11)$$

(w : 弾性係数)

(3.11) 式に示すようにポテンシャル J_1 はシステムの状態変数 θ_1 , θ_2 の関数となっている。相関をもつ状態変数の組合せを用いてこのようなポテンシャルを設定し、それらの線形和によって手全体の内部入力のポテンシャルを構成する。手の姿勢が完全に自然なものである場合、このポテンシャルは 0 となる。このポテンシャルが大きくなるほど手の姿勢は自然な状態から遠ざかる。したがって、このポテンシャルは手の不自然さの尺度となっている。

姿勢の不自然さの解消——内部入力

個々の関節に対する内部入力はその関節の状態変数で、ポテンシャル関数の偏微分をとることによって求められる。関節角 θ_1 を補正するための内部入力は、次のように求め

られる。

$$\begin{aligned}\tau_{c1} &= -\frac{\partial J_1}{\partial \theta_1} \\ &= -w \alpha (\alpha \theta_1 + \beta \theta_2 + \gamma)\end{aligned}\quad (3.12)$$

以上のような定式化をシステム全体の状態変数について行なう。まず、自然な姿勢変位軌道を定数行列 A と定数ベクトル b を用いて次のように表現する。

$$A \theta + b = 0 \quad (3.13)$$

内部入力のポテンシャル J を行列 W を用いて次のように構成する。行列 W は、内部入力の弾性係数を成分にもつ対角行列である。

$$J = \frac{1}{2}(A \theta + b)^T W (A \theta + b) \quad (3.14)$$

したがって、自然な姿勢をとるための各関節に生じる力 (内部入力) はポテンシャル J を状態変数ベクトル θ で偏微分をとることによって次のように計算できる。

$$\begin{aligned}\tau_c &= -\frac{\partial J}{\partial \theta} \\ &= -\left\{ \left(\frac{\partial J}{\partial \theta^T} \right) + \left(\frac{\partial J}{\partial \theta} \right)^T \right\} \\ &= -A^T W (A \theta + b)\end{aligned}\quad (3.15)$$

姿勢の不自然さを解消する内部入力を導出して上での平衡状態におけるシステムの状態変数は、(3.16) 式のように、入出力方程式と入力方程式とを連立させることによって (3.17) 式のような線形方程式を解くことにより計算される。

$$\begin{cases} K \theta = \tau & \dots \text{入出力方程式} \\ \tau = \hat{\tau} - \frac{\partial J}{\partial \theta} & \dots \text{入力方程式} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned}K \theta &= \hat{\tau} - \frac{\partial J}{\partial \theta} \\ &= \hat{\tau} - A^T W (A \theta + b) \\ (K + A^T W A) \theta &= \hat{\tau} - A^T W b\end{aligned}\quad (3.17)$$

モデルの内部パラメータ決定

ポテンシャルは、手の本来の姿勢や指や関節間の相関を示すパラメータを含んでいる。自然な姿勢の関節軌道を1次関数で近似表現するための定数行列 A 、定数ベクトル b 、個々の内部入力の高さを表す弾性係数行列列 W の各要素である。これらのパラメータは、提案するモデルのパフォーマンスに大きく影響する。そこで、妥当なパラメータ設定を行うために、実際の指の動作の計測を行なう。本研究においては手全体の3次元運動を計測するのではなく、注目する関節における角度変位の相対関係に注目して計測を行なう。以下にその手順を示す。

1. 手の指の関節部の側面にマーカを貼付する。
2. 脱力状態の手の姿勢をデジタルビデオカメラで撮影し、マーカを直線で結んでできる角度を関節角度として計算を行ない、初期姿勢の状態変数とする。
3. 注目する関節の動きが観察できる位置からデジタルビデオカメラを1台用いて屈曲の様子を10~30フレームの画像に収録。数回の計測を行なう。
4. 各フレームにおいてマーカの位置をもとに関節角を算出する。
5. 相関を調べたい関節に対して関節角のデータを状態変数空間にプロットする。
6. プロットされた点群に対して最小自乗法による1次関数近似を行ない、また、得られた1次関数についてのデータの2次モーメントを算出する。
 - (a) 指の2関節間の相関を1次関数で近似
⇒定数行列 A 、定数ベクトル b を決定する。
 - (b) 近似した1次関数の周りのデータの分散(2次モーメント)
⇒相関による拘束の重みとして定弾性係数行列列 W を決定する ((3.18) 式)。

$$w_k = \frac{\sum_i^n l_i^2}{n W_{max}} \quad (3.18)$$

- l_i : データ点と近似直線とのユークリッドノルム
 n : 近似に用いたデータ数
 w_{max} : w_k の最大値

得られた関節軌道のデータとその1次関数近似表現の例を図3.6に示す。表3.2に決定された内部パラメータの値を示す。

表 3.2 内部パラメータ

状態変数 (関節角) の組合せ	A の要素	b の要素	W の要素
$\theta_2^M - \theta_2^R$	4.78	-2.01	0.40
$\theta_1^R - \theta_1^M$	0.58	0.40	0.11
$\theta_2^R - \theta_2^M$	0.68	0.36	0.50
$\theta_2^P - \theta_2^R$	1.58	0.19	1.00
$\theta_3^R - \theta_3^I$	1.55	-0.30	0.67
$\theta_2^I - \theta_3^I$	0.81	-0.12	0.84

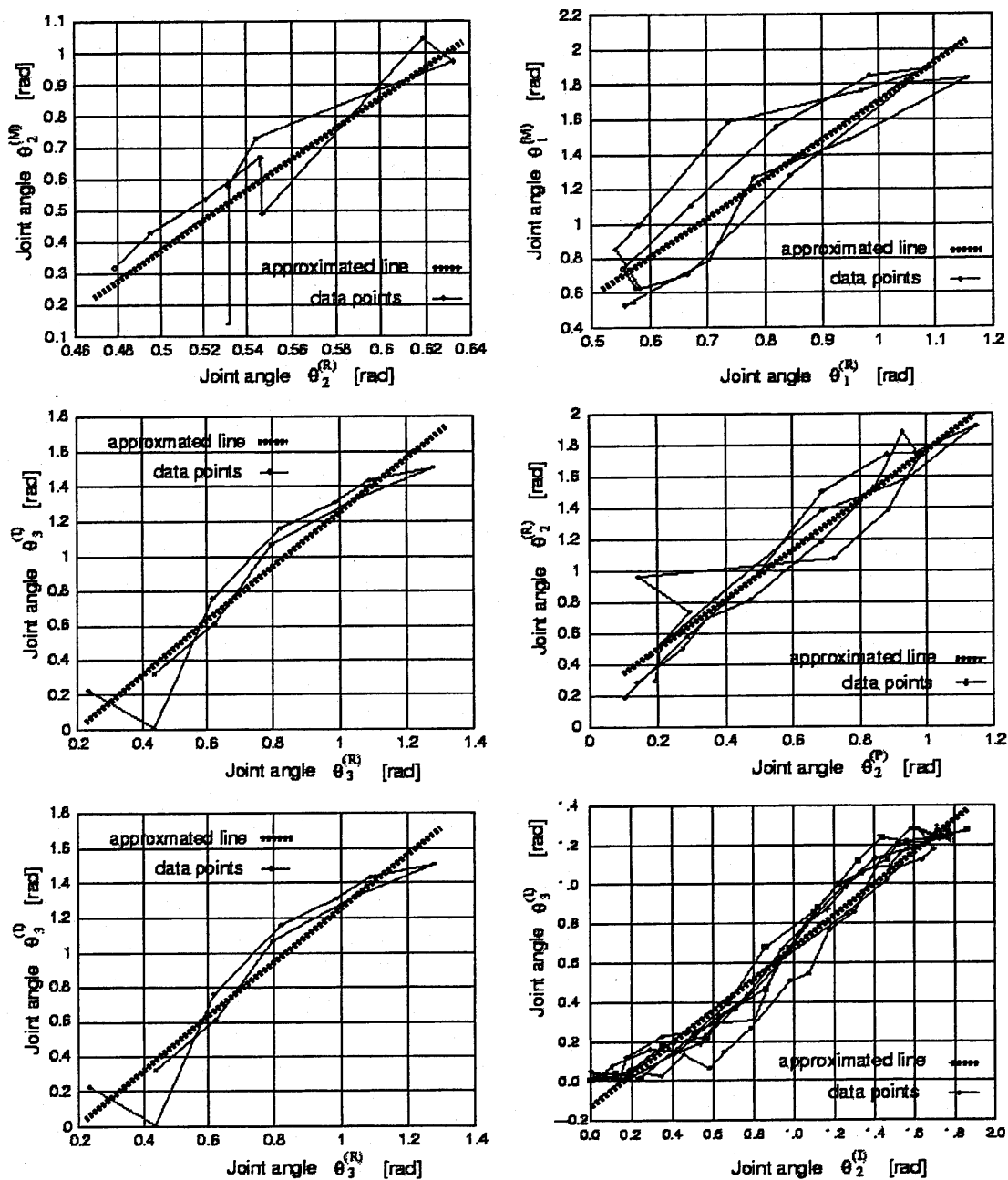


図 3.6 指の動きのサンプリングデータ

それぞれ、関節角 ($\theta_{JointNumber}^{Finger}$) の対の変化を表す。

“Finger”, “JointNumber” は骨格モデル (図 3.2) 参照。

3.2.3 動きの制約表現の拡張

尤らしい手の姿勢表現の定式化とその生成方法について述べてきた。具体的には、実際の指の動きを計測し、その関節角の変化について異なる関節間での関係を調べ、線形近似によって動きの制約を表現している。しかし、前節(3.2.2)における指の運動の計測には単眼カメラを使用したため、オクルージョンによる制約がある。そのため、測定可能な関節数や運動範囲が限られており、モデリングに利用可能なデータ数は手の動きの一部を反映するものに過ぎない。

そこで本節では、より広い範囲において指の運動計測を行うことを目的として、まず多眼の光学式モーションキャプチャを利用した指の動作計測を試みる [75]。次に、得られたデータに対して本研究のモデリングの枠組みへの適用について考察を行う。本研究で提案するモデリング手法では、人の手に特化した関節軌道の傾向をポテンシャルとして表現し、3.16式のような形で姿勢の状態を決定することが基本的な枠組みである。したがって、ポテンシャルの定義を一般化することにより、より汎用性のある制約表現への拡張が可能であると考えられる。

モーションキャプチャによる手の姿勢計測

本研究では、手のCGアニメーションのリアリティを得ることに目的をおき、手の姿勢や運動を記述するためのモデリングを計測ベースで行う。

手の骨格系が有する自由度や関節運動の解析に関する研究は、解剖学的見地から数多く行われている [64, 65, 66, 67]。X線などを用いた計測からは骨格そのものの姿勢が推定できる。しかし、これらの計測手段からは主に静的な状況での姿勢情報が得られるのみである。手の自由を拘束すること無く、十分連続的な骨格の運動として手の姿勢を計測・解析を行った例はない。

現在、CG制作等において、手の姿勢形状を計測するシステムとしては手袋型のセンサーが普及し手形状の入力デバイスとして広く使われている。デバイスのデザインの際には、解剖学的見地から手の動きの自由度のモデリングが行われている。したがって、デバイスのデザインがどの程度実際の手の機構を忠実に反映しているかが計測精度に大きく影響する。また手袋を装着した状態は常に一定ではなく、個人差も生じる。細やかな手の運動の性質を定量的に解析するための計測には不向きであると考えられる。そこで、本研究では、光学式モーションキャプチャの手法を用いることにより、手に拘束感を与えることなく目に見える手の動きを計測する。関節部など手の表面に貼付したマーカの3

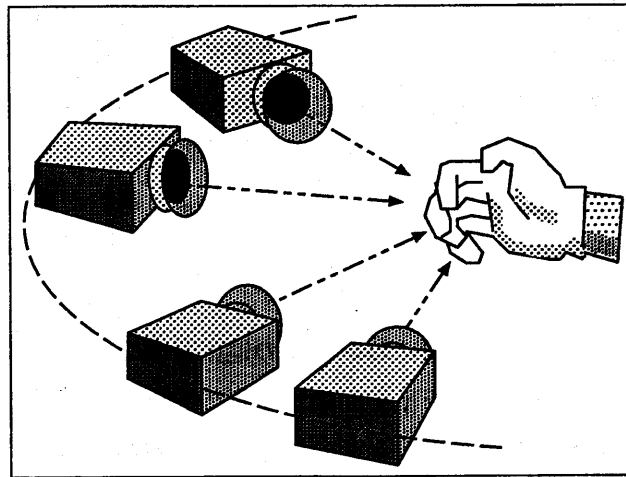


図 3.7 カメラ配置

次元空間位置を計測し，マーカの軌跡を手の動きのデータとして獲得する．計測対象に対して運動学的なモデルや仮定をおくことなく，計測部位を任意に選ぶことができ，滑らかな時系列データとして手の運動データを得ることができる．

機材およびセッティング

計測に使用したシステムは応用計測研究所製 QuickMAG である．撮像系は，3CCD カラーカメラ (プログレッシブスキャン (VGA) 方式，撮像素子:1/2 インチ CCD × 3) の 4 台構成で，各々電動ズームレンズ (焦点距離:7.5~105mm, ズーム比: 14 倍, F 値:F1.4(7.5~75mm), F1.8(105mm)) を装着している [76]．同時に 8 種類のカラーマーカを使用することができ，60Hz の周期でサンプリングが可能である．計測中にオクルージョンが無い場合は同一色のマーカでも，各々をトラッキングすることができる．指の屈曲の方向を考慮し，手の甲側と掌側とをそれぞれ最低 2 台のカメラから観測できるようにカメラを配置した (図 3.7, 3.8)．

肌の色が幾つかのマーカの色と色空間における距離が近い為，薄手の白色の手袋を装着しその上にマーカを貼付する．用いた実験環境下において計測システムが識別しやすい色を予め実験によって確認し，光沢の少ない紙に着色してカラーマーカを作成する．マーカは常に，4 台のカメラのうち最低 2 台で捕捉される必要がある．掌側の皮膚は指の屈曲の際に表面が隠蔽されてしまうので，甲側の関節にマーカを貼付する．計測シス

3.2. 自然な手の姿勢の表現と生成

テムは、予め登録されたマーカの色を識別することによりマーカを追跡する。各フレームで取得された画像中では、マーカの位置はその登録色の画素群の重心として処理される。したがって、手の関節部を少し覆うようにマーカを貼付することにより(図3.9)、カメラからのマーカの捕捉状況も安定させることができるものと考えられる。



図 3.8 計測機器および計測環境

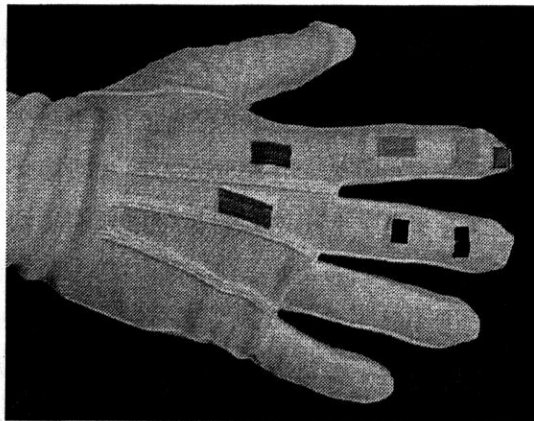


図 3.9 マーカのセッティング例 (示指と中指の計測時)

計測結果

計測システムの制約により、同時に計測できるマーカ数は最大8である。同時に5個のマーカを用いて母指の動きを計測し、8個のマーカを用いて隣り合う指の動きを計測した。60Hzのサンプリング周期で20秒間の計測を行い、1200フレームのデータを得た。高いフレームレートでの計測が可能であるため、すばやく指を動かして広範囲の運動データを得ることができた。得られたデータから、マーカを結ぶ線分の成す角を求め、各々の関節角のプロフィールを得る。この結果を図3.10に示す。いずれも、関節角を示している。関節の動きの存在傾向を表現するために、異なる二つの関節角を対にしてその角度変位平面に計測値をプロットした。この例を、図3.11、3.13の左列に示す。

関節角度対のプロット結果より、関節の運動にはかなり軌道の存在域が偏っていることが分かる。単純に存在しうる範囲を定義したとしても角度変位として有り得ない領域が広く存在し、その傾向は同じ関節でも対の関節によって異なる。そして、角度変位の存在域は非線形性の強い領域をなしてもものもあることが分かる。

提案モデリング手法の適用性に関する考察

角度変位平面にこのプロットされたデータ点は、姿勢の尤もらしさの観点ではいわば真値を示している。この平面上でデータ点から遠ざかると、関節の姿勢は、人間の手として実際には存在し得ない不自然ものになると考えられる。

このことを踏まえて、姿勢の尤もらしさを定量的に表現することを考える。まず、同じ平面上において、データプロットの存在域を包含する範囲において、各軸方向に100程度の刻みでグリッドを作成する。そして、グリッド上の各点から最近傍のデータ点までのユークリッド距離の自乗値をプロットする(図3.11、3.13それぞれ右列)。すなわち、関節角度変位平面において、存在し得る尤な姿勢からの自乗誤差分布である。データ点から離れたところでは高い値をもち、データ点付近では値がほぼ0であり、尤もらしい姿勢を示す関節角度対の一つである。したがって、この自乗誤差分布は、本論文で提案しているポテンシャル関数にそのまま相当する。ポテンシャル値の高い状態から、低い状態へ遷移させることにより、自然な姿勢を生成することができる。

本研究で提案するモデリング手法を適用するためには、そのポテンシャルの勾配を算出する方法が鍵となる。ポテンシャル面を構成する関数そのものやその勾配は解析的には計算できないが、自由曲面等による近似・補間が適用できると考えられる。また、今回自乗誤差分布を示したように、空間を量子化し、ポテンシャル面の勾配のルックアップ

テーブルを予め作成する方法も有効である。ルックアップテーブルの例を図 3.12, 3.14 に示す。これら、近似関数やルックアップテーブルを随時参照することにより、ポテンシャル値の低い状態へ姿勢を変化させる内部入力を生成することが可能となり、本提案手法を適用することができる。より広範囲な手の可動域を網羅し、多様な運動制約を実装可能であると考ええる。

本研究において提案したモデリング手法において考慮していない点としては、実際の人の手ではどの関節を能動的に動かすかによって他の関節に与える影響が異なるということが挙げられる。例えば、小指と薬指が同時に動く場合では、どちらの指のどの関節を意識的に動かすかによって互いの動きの影響が異なると考えられる。より多くのケースを設定し、データを集めた上で本提案手法で定義するポテンシャルを構成することによりこの点に対処できると考える。また、本手法では静的な釣り合いのみで各時刻の姿勢を決定しているが、このモデルが出力する姿勢のシーケンスとして生成される動きが、実際の手の動きをどれほど忠実に再現し得るかについても、今後検討すべき課題であると考ええる。

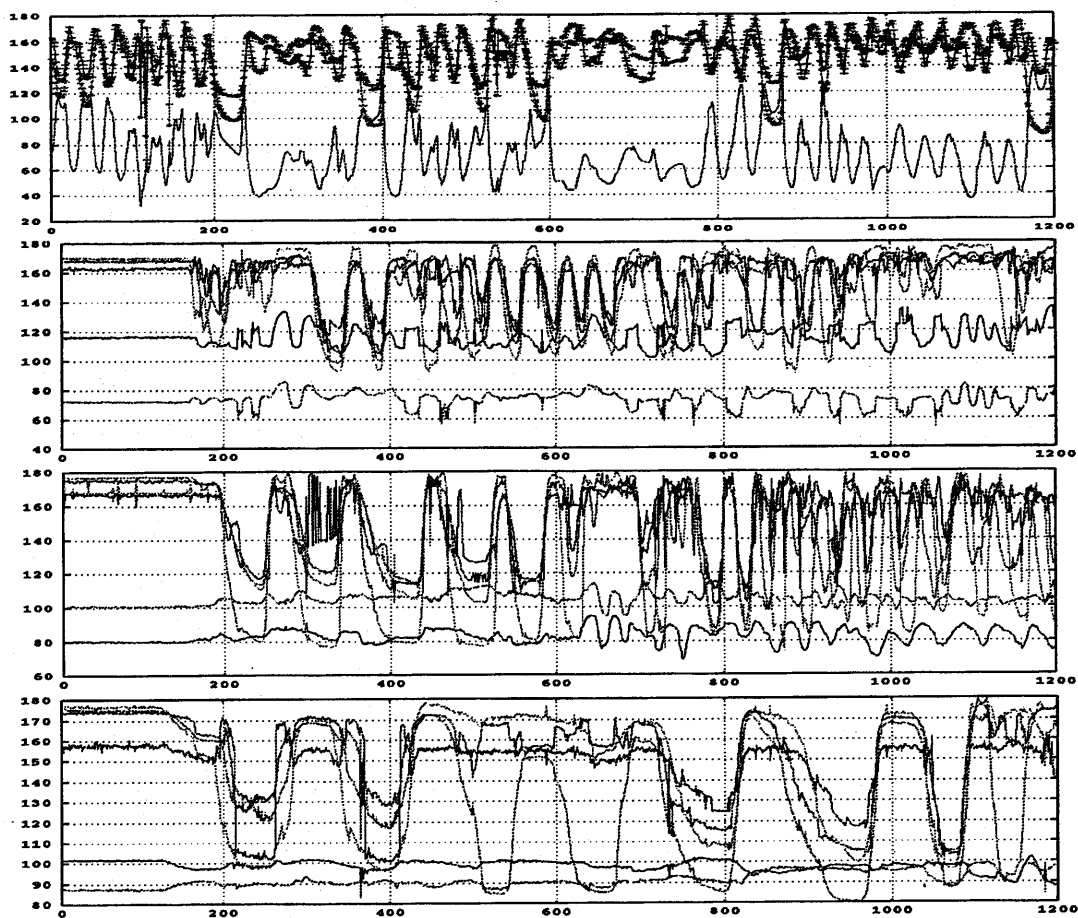


図 3.10 モーションキャプチャによる指動作の計測結果
最上段：親指の1~3 関節の角度，
2 段目から順にそれぞれ，示指と中指，中指と薬指，
薬指と小指のそれぞれ第2~4 関節の同時計測結果。
(いずれも，縦軸は角度 [deg]，横軸は計測フレーム)

3.2. 自然な手の姿勢の表現と生成

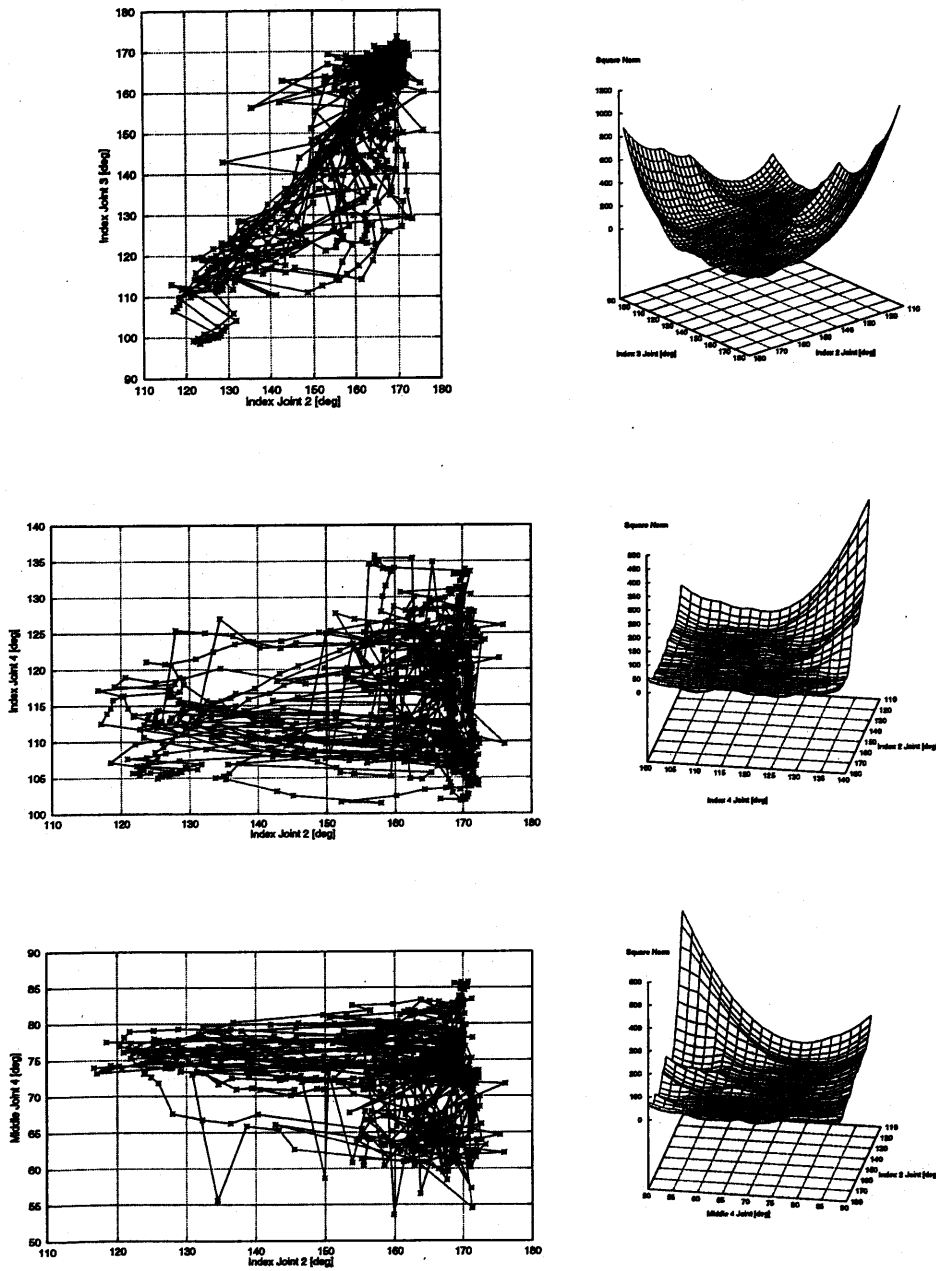


図 3.11 実測角度分布 (左列) と実測値からの自乗誤差分布 (右列) の例 (1)

上段：示指 第 2 関節-第 3 関節, 中段：示指 第 2 関節-第 4 関節

下段：示指 第 4 関節-中指第 2 関節

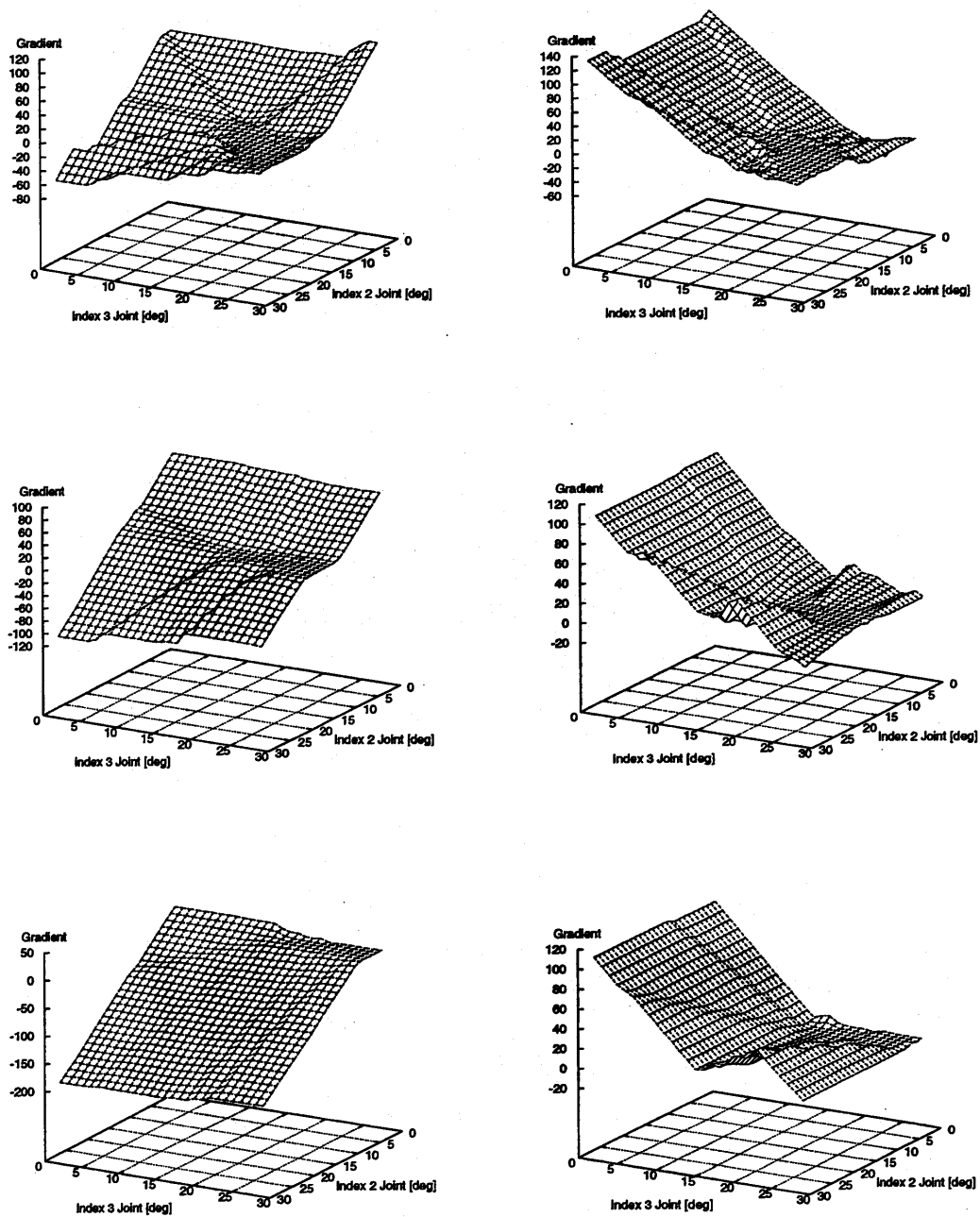


図 3.12 自乗誤差分布の x 方向勾配 (左列) と y 方向勾配 (右列) の例 (1)

上段：示指 第 2 関節-第 3 関節, 中段：示指 第 2 関節-第 4 関節

下段：示指 第 4 関節-中指第 2 関節

3.2. 自然な手の姿勢の表現と生成

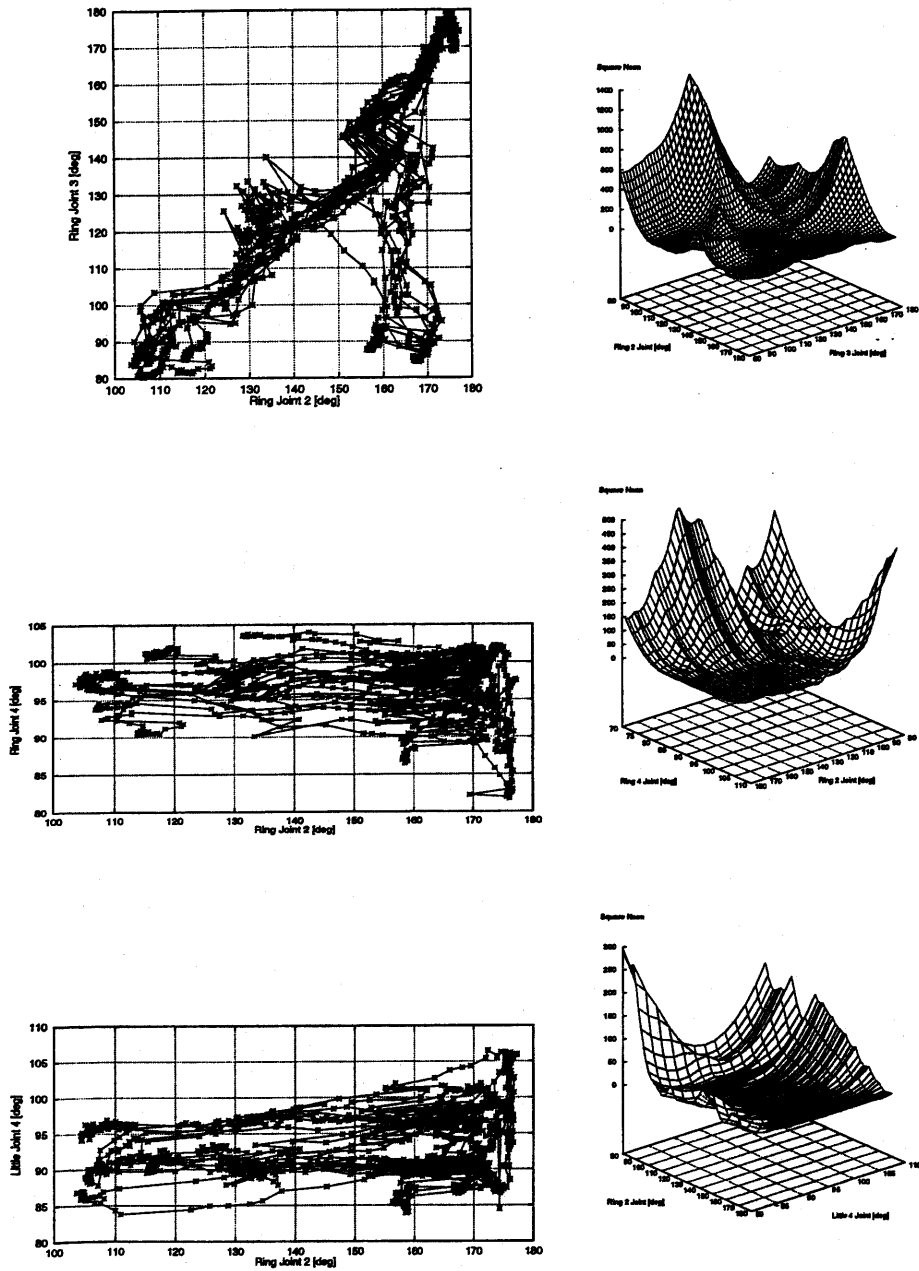


図 3.13 実測角度分布 (左列) と実測値からの自乗誤差分布 (右列) の例 (2)

上段：薬指 第 2 関節-第 3 関節，中段：薬指 第 2 関節-第 4 関節

下段：薬指 第 4 関節-小指第 2 関節

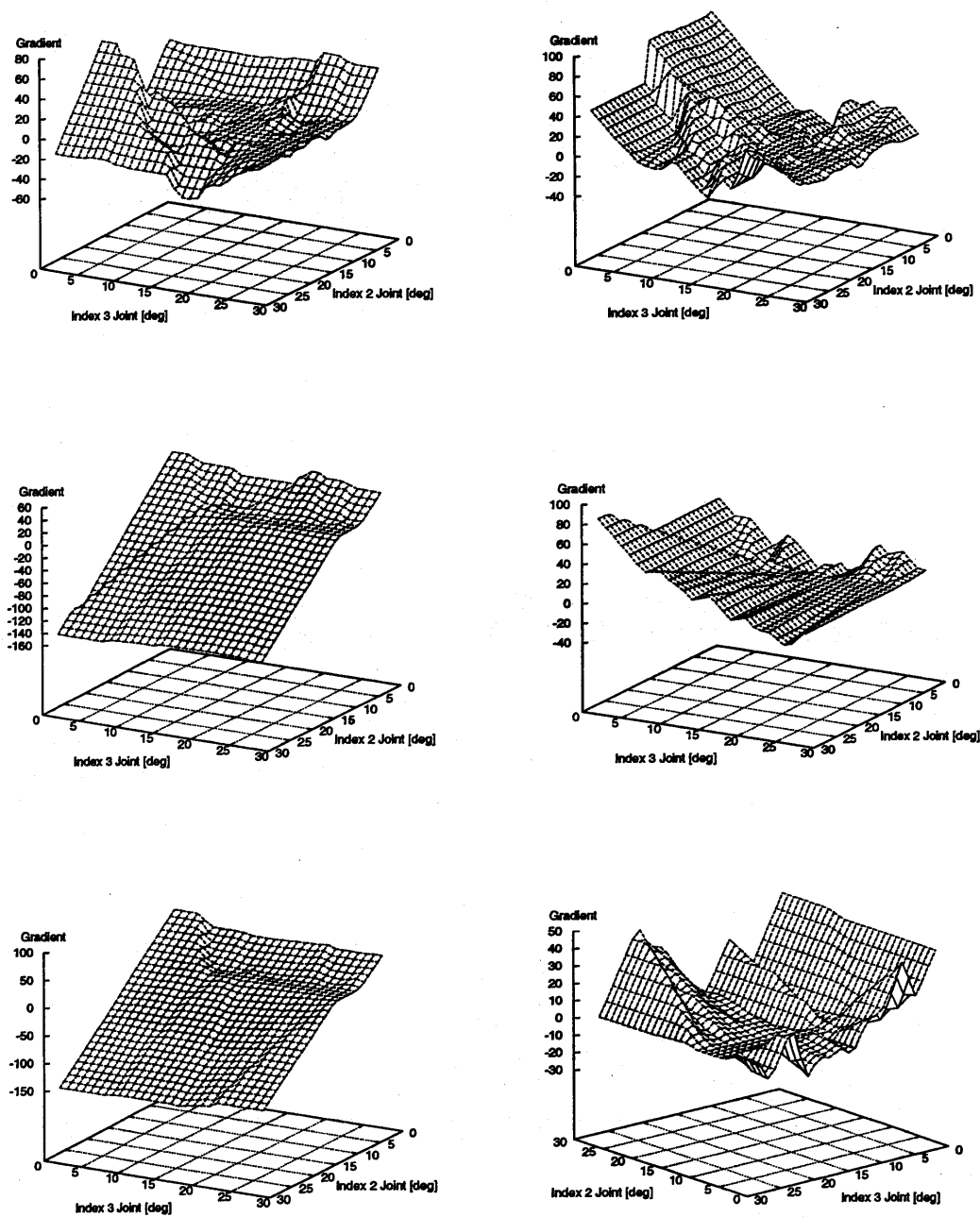


図 3.14 自乗誤差分布の x 方向勾配 (左列) と y 方向勾配 (右列) の例 (2)

上段：薬指 第 2 関節-第 3 関節, 中段：薬指 第 2 関節-第 4 関節

下段：薬指 第 4 関節-小指第 2 関節

第4章

手の外観形成のためのモデリング

4.1 皮膚の形成および骨格モデルとの統合

姿勢決定プロセスによって骨格モデルの姿勢が決定される。骨格モデルの姿勢は、3次元空間における関節の位置と関節間を結ぶ線分で表された骨の姿勢で表現されている。しかし、線分で表現される骨格モデルを提示するとリアルさに欠けるため、実際の手と同様に骨格の動きに連動する皮膚の外観を提示する必要がある。本研究では、実測の手の皮膚の表面を骨格モデルに連動させて変形させることによって任意の姿勢の手の外観をCGでリアルに合成することが可能な皮膚モデルを構築する。本研究では皮膚モデルの構築際して次の点を考慮する。

- 形状の実測データの利用 人の手の形状を忠実に反映したCG像を合成するためにレンジファインダによる実物の手の形状計測を行う。得られる形状データを皮膚モデルの初期形状として用いる。
- 骨格モデルの動きに連動した変形 本研究で提案する手法により生成される手の動きを可視化するという目的のもとに、骨格モデルの動きに連動した変形を実現する。
- 連続な表面による皮膚全体の表現 皮膚の外観を提示するためのリアリティの観点から、実物の皮膚のように連続な1枚のサーフェスを構成することが望ましい。本研究ではポリゴンによる表現とパラメトリック曲面パッチによる表現とを用いたサーフェスの生成を試みる。

4.1.1 手の3次元形状計測

本研究では、レーザレンジファインダークボタ社製CUBIST(図4.1)を用いて形状計測を行なう。計測は測定テーブル上(X-Y平面上)を512のスキャンライン(X=一定)で走

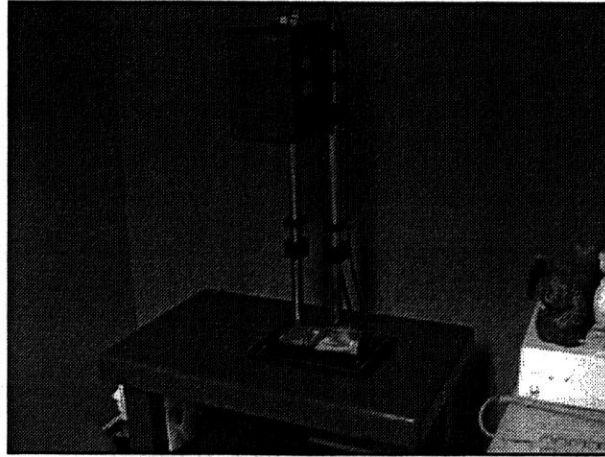


図 4.1 レーザレンジファインダ (クボタ社製 CUBIST)

査することによって行われる。各スキャンライン上に 512 のデータポイントがあり、合計 512×512 の計測点が得られる。測定範囲は、テーブル上の $250 \times 200 \times 200\text{mm}$ の空間である。また、深さ方向 (Z 方向) の分解能は 0.2mm である [77]。

計測はレンジファインダのテーブル上にオブジェクトを載せステップモータにより駆動されるテーブルの動きにしたがってスキャンが行なわれる。平面的なスキャニングによる計測方式であるため、対象物体である手の全周計測には最低 2 回の計測を要する。手を開いた姿勢の複製を用いて掌側と甲側との 2 度の計測を行なった後、二つのデータを統合することによって手の全周の距離データを作成する。1 回のスキャニングには数分を要する。その間、手が同じ姿勢を維持することは極めて困難であり、また、2 度の計測において対象物体である手の姿勢の相対的な 3 次元的位置関係が統合の際に重要である。そこで予め手の複製を石膏で作成し (図 4.2)、その複製の形状計測を行なう。掌側と甲側の 2 つの距離データ群の統合のために、どちらの計測時にも計測可能な位置にマーカとなる突起を複製に 9 個設ける。

甲側、掌側それぞれの得られたデータに対し、Z 座標に閾値を設け測定テーブルなどの背景データを取り除いた後、9 個のマーカの 3 次元座標を用いて甲側データを掌側座標系に座標変換する。最小自乗法によって、変換パラメータを決定し、各マーカ座標値の差が数パーセント以内のオーダで一致するようにデータを統合することができた。掌を計測した座標系で表現された両データを全周データとして用いる (図 4.3)。

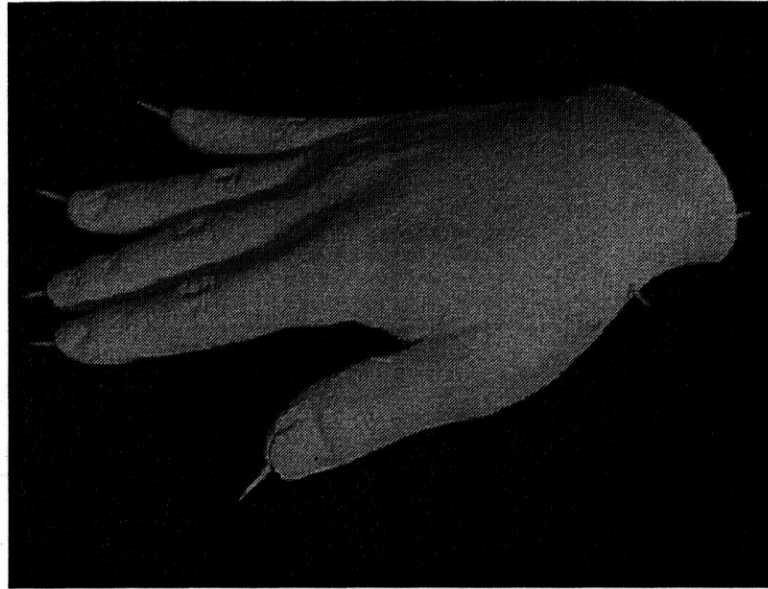


図 4.2 手の複製 (石膏像)

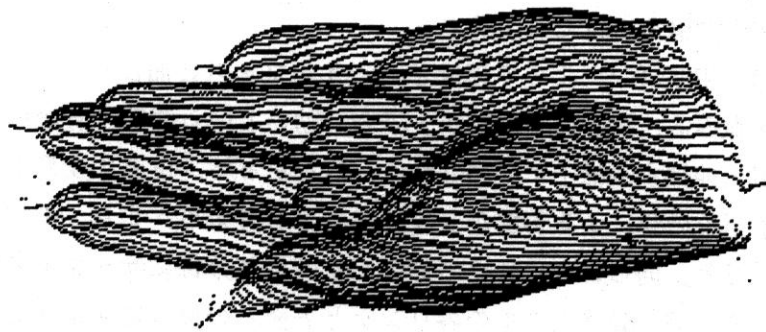


図 4.3 3次元形状計測結果

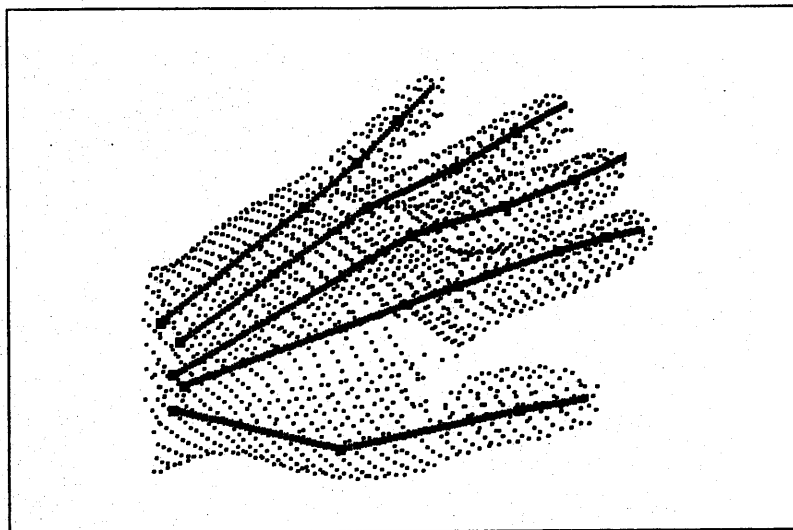


図 4.4 骨格モデルの配置

4.1.2 骨格モデルと表面形状データとの関連づけ

表面形状データのセグメンテーション

形状計測により得られた手の全周レンジデータは、それ自体は3次元空間中の離散的な点群に過ぎず、手の内部の情報は勿論、データ点間にも有機的な情報もない。まず、形状データと骨格モデルとの対応づけを行い、骨格モデルによって制御される変形を可能にする機構を構築する必要がある。次に、形状情報を保存したまま、サーフェスを生成するためのデータ構造を新たに作成する。

本研究では、ポリゴンによって構成されるサーフェスと曲面パッチによるものとの2通りの方法を試みる。実際の指を動かす場合、動いている関節や骨から近位の皮膚が強く受けて移動・伸縮する様子が観察される。したがって、皮膚に変形を加えるのは局所的にもっとも近位の骨による影響が支配的であると考えられる。また、モデルを変形させる過程を考慮すると、同じように骨格の影響を受ける部分毎にサーフェスを生成することが望ましい。そこで、骨格モデルの各リンクと表面との位置関係に注目して、表面形状の点群データのセグメンテーションを行う。セグメンテーションは以下の手順による。

1. 形状データ点群と同じ3次元空間中において、手動で関節位置を調整し骨格モデルを設置(図4.4)
2. 手全体で、骨格モデルの各リンクを横切る約50のスライス断面(計測空間におけ

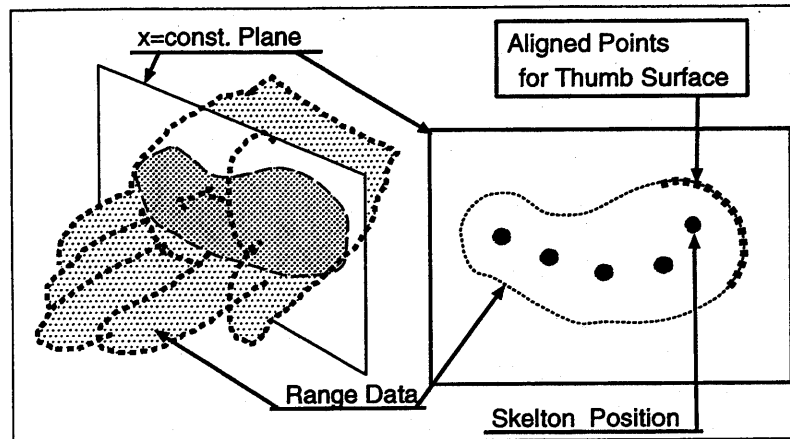


図 4.5 形状データのセグメンテーション

る $x = const.$ の平面) を設定

3. 各断面の十分近傍にある点をその断面上に投影
4. 断面上に投影された点群を最近傍の骨リンク毎に分類 (図 4.5)

形状計測による手の全周の点群データは2つの計測結果を統合したものであるため、計測時のスキャンラインは、統合のための位置合わせの際に3次的にその方向がずれている。したがって、点と点の位置関係が系統的にはなっていない。上記の2., 3. の処理により、全体で50のスライス断面上にデータが整列され、さらに4. の処理により、骨格リンクとの対応づけもなされている。結果として、等間隔に並んだスライス断面上に、骨格モデルの各リンクに対応する表面部分の点列領域が生成される。

4.1.3 ポリゴンによる形状表現

ポリゴン頂点の生成

ここでは、セグメンテーションを施された3次元の点群データから、ポリゴンサーフェスを生成する方法について述べる。

サーフェスの形成においては、隙間や、面の重複なくポリゴンが張られることが望ましい。本研究では掌側、甲側の2面に正対する方向の形状データを用いているため、手の側面部分のデータ点群の密度は低く、場所によっては非常に疎になっている個所もある。したがって、何らかの補間を必要とする。

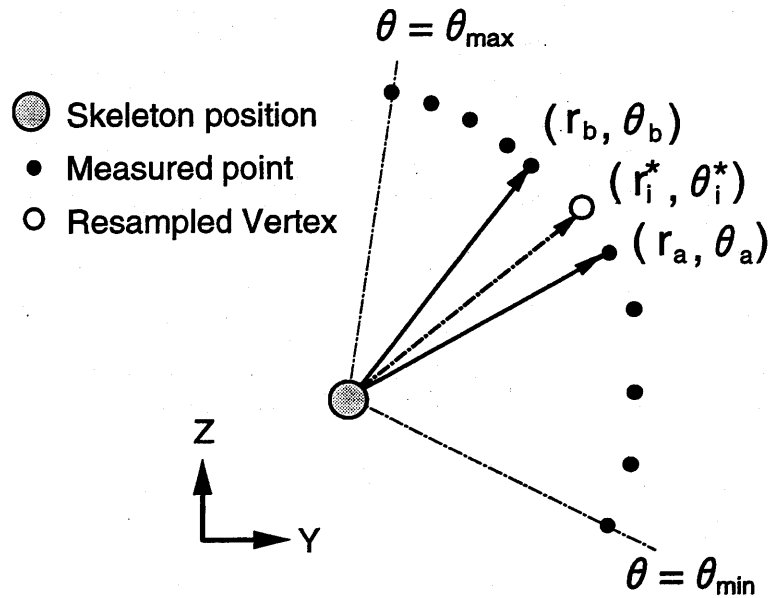


図 4.6 ポリゴン頂点の生成

また、骨格モデルの各リンクに対応して分類された各領域の点群は、スライス断面上に並んだ不規則な個数の点列で構成されている。しかし、幾つかのスライス断面にまたがる個々の部分点群領域をポリゴンによって隙間なくサーフェスを生成するには、スライス毎に決まった個数の点が列をなしていれば非常にモデリングが容易になる。

以上のことから本研究では、線形補間を用いてリサンプリングすることにより、定数個の点を含む点列を各スライス上に生成し、ポリゴンの頂点として利用する。補間は以下のように行う。図 4.6に示すように、スライス断面上で、同一のセグメントにある点の位置を骨格リンクを原点として極座標で考える。その角度が最大 (θ_{max}) の点と最小 (θ_{min}) の点の間を等間隔角度に区切り (式 4.2)、この間隔で点の補間を行う。

$$\theta_i^* = \theta_{min} + \frac{(\theta_{max} - \theta_{min})}{10} i \quad (4.1)$$

$(i = 0, 1, 2, \dots, 9)$

$$r_i^* = r_a + \frac{r_b - r_a}{\theta_b - \theta_a} (\theta_i^* - \theta_a). \quad (4.2)$$

また、セグメント内の各データ点についても角度を計算しておく。次に、隣接するデー

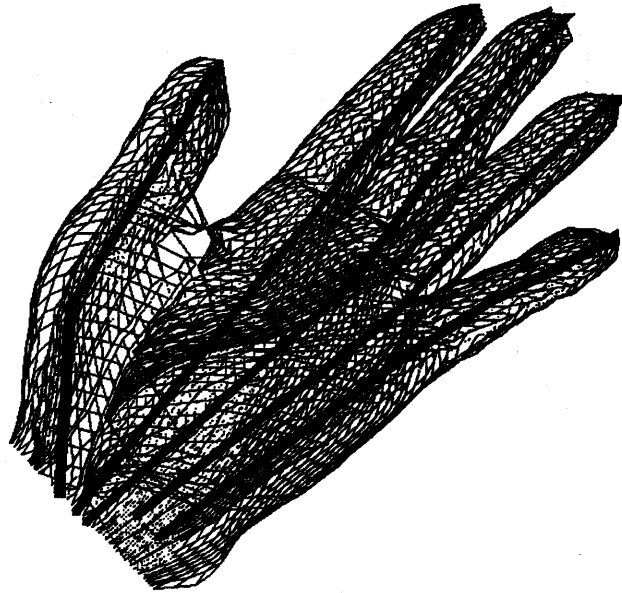


図 4.7 ポリゴンモデル
(太線は骨格モデルを示す)

タ点の径の長さ (r) と角度 (θ) との関係に対し、線形補間を行う。(4.2). 各セグメントにおいて 10 個の点を生成し、ポリゴンの頂点として用いる。このようにして断面毎に整列され、各骨格リンクへの属性を構造化された約 4000 点のポリゴン頂点データが生成される。この頂点を用いて約 8000 の三角形ポリゴンによる表面形状を表現することができる (図 4.7).

ポリゴンの頂点を生成する際に、線形補間を用いて断面内のレンジデータから一定個数の頂点を生成したが、測定対象には存在しない「しわ」のような形状を生じるノイズが観察された。これは、リサンプリングを 1 断面上のみにおいて行っているためである。したがって、隣接する断面との関係を考慮して補間・リサンプリングを行うことにより解決されると考えられる。

4.1.4 パラメトリック曲面による形状表現

ここでは、セグメンテーションを施された 3 次元の点群データから、パラメトリック曲面によってサーフェスを生成する方法について述べる。

本研究では Bézier パッチを用いてレンジデータに対するフィッティングを行ない、そ

第4章 手の外観形成のためのモデリング

の効果について検討する。パラメトリックな曲面を断片的なデータの補間や意匠設計に用いるための定式化や、最近ではレンジデータのようなかなり密な距離データに対して曲面をフィッティングさせる手法も種々研究されている ([79],[80],[81],[82]) が、本研究において Bézier パッチを用いる上で注目する利点は以下の点である。

- 滑らかな曲面の表現 Bézier パッチは、制御点と呼ばれる幾つかの3次元空間の点の位置によってその形状が定義される。たとえば双3次の Bézier 曲面パッチは16個の制御点をもつ。曲面パッチによって、形状計測で得られるレンジデータの分布をうまく表現できれば、非常に限られた個数の制御点を用いて滑らかな曲面による補間が可能になる。パッチは、結果的に曲面を分割したポリゴンによってレンダリングされるが、一度定義された曲面に対しては、そのポリゴン分割数は任意に決めることができ、その際に制御点を追加する必要もない。
- 連続的な曲面の変形 ポリゴンモデルによるサーフェスを変形させる際には、変形に関与する全ての頂点に対してその変位を与える必要がある。しかも、各頂点に滑らかな動きを与えるのは容易ではない。しかし、Bézier パッチでは、その制御点の位置を動かすことによって空間的に連続な変形をパッチ全体に与えることが可能である。これは、掌や指の腹などの部分での滑らかな起伏の変化を実現する上で効果が期待できる。

また一方、Bézier パッチを用いる上で、次のような問題点も挙げられる。

- パッチの変形自由度 曲面パッチによって、形状計測結果を表現するためには、パッチの形状がレンジデータの分布を近似し、フィットするように制御点の位置を求めなくてはならない。しかし、一つの曲面パッチで表現できる起伏の自由度は限られている。したがって、レンジデータの各領域をさらに細分化した上でパッチをフィッティングする必要がある。しかし、この処理を自動化することは容易ではない。また、手の形状を変形させる際にも各曲面パッチの自由度が重要である。初期状態ではうまくフィッティングしていても、変形させると不自然な結果となる可能性は高く、しかも予想することも難しい。
- パッチ間の連続性 レンジデータにフィッティングさせるパッチとパッチとを連続的に接続させることは曲面を用いたモデリングにおいて難しい問題の一つである。連続性を保証するために数学的に拘束を課すことも可能であるが、この拘束により

さらにそれぞれのパッチの表現自由度も拘束を受けるので、やはりレンジデータの領域分割の方法に工夫が必要である。B-Spline のように連続性を保証した曲面もあるが、手のように静的にも動的にも幾何学的なトポロジ変化の多いオブジェクトに対して、どのように曲面パッチをタイリングするかという本質的な問題の難しさは残る。

本研究では、手動によりレンジデータの領域分割を設定する。パッチ間の接続の連続性については考慮せず、各領域でのパッチによる表現の効果をポリゴンモデルと比較し考察する。

Bézier 曲面パッチ

双 3 次の Bézier 曲面パッチは次のように表され、16 個の制御点により一つの曲面が定義される (図 4.8)[21, 22].

$$Q(u, v) = \mathbf{u}^T G P G^T \mathbf{v} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{u} = [1 \quad u \quad u^2 \quad u^3]$$

$$\mathbf{v} = [1 \quad v \quad v^2 \quad v^3]$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ 1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix}$$

u, v : パラメータ ($0 \leq u, v \leq 1$)

G_u, G_v : 基底関数

P : 制御点の座標 (x, y, z)

最小自乗法を用いたフィッティング

計測点群に対して曲面パッチをフィッティングさせるには、各計測データ点に対して、 $0 \leq u, v \leq 1$ のパラメータを割り当てる必要がある。一般的自由曲面 (線) の設計では次の 3 つの方法が用いられる [21].

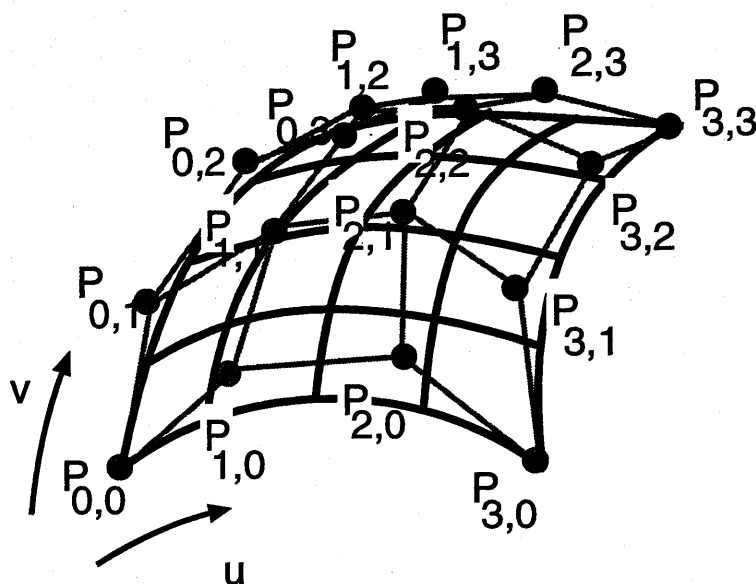


図 4.8 Bézier 曲面パッチとその制御点

1. パラメータの間隔を等しくおく.
2. 隣合う各点の距離にしたがってパラメータを定める.
3. 隣合う各点の弧長にしたがってパラメータを定める.

ここでは、2.の方法に従う。ポリゴンの頂点を生成した場合と同様にまず、近傍探索をしてスキャンライン方向 ($x = const.$) にレンジデータを整列させる。そして、掌側と甲側それぞれのレンジデータに対してスキャンライン方向に沿ってパラメータ u の値を割り当てる。各レンジデータ間のノルムを計算し、式 4.4 にしたがって決定した。パッチ領域内の各スキャンラインの間隔のノルムに基づいて v の値を割り当てる (図 4.9)。計算方法はパラメータ u と同様である。

$$\begin{aligned}
 u_0 &= 0.0 \\
 u_i &= u_{i-1} + \frac{\|Q_i - Q_{i-1}\|}{\sum_{j=1}^n \|Q_j - Q_{j-1}\|} \\
 u_{n-1} &= 1.0
 \end{aligned}$$

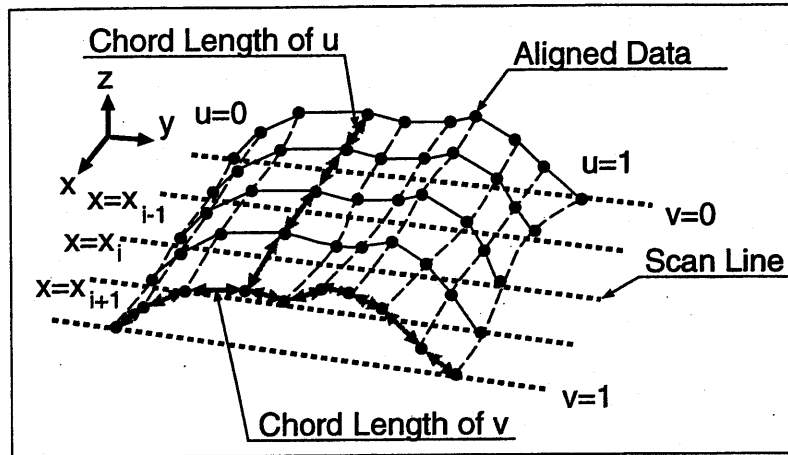


図 4.9 データ点とパッチのパラメータとの対応づけ

フィッティングプロセスは次式で計算される [79]. すなわち, 式 (4.3) について, 計測点群の座標値 Q とそのパラメータ u, v の値との対応を実現する制御点 P を求めるという, 逆問題を解くことになる. そのために, 式 (4.3) を各要素毎に展開して次のように表現し直す.

$$[S] = [A][B] \quad (4.4)$$

ここで, $[B]$ は制御点の座標, $[A]$ は割り当てられた u, v 値で計算された基底関数値, $[S]$ は点群データ点の座標を含む行列である. 制御点の個数とデータ点の個数とは一致していないのでこの式を $[B]$ について解く問題は正則ではない. したがって, 制御点の座標 $[B]$ は次のように行列 $[A]$ の一般逆行列を用いて最小自乗解として得られる.

$$[B] = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T[S] \quad (4.5)$$

得られる曲面は, 曲面に沿った距離の代わりにデータ点間の直線距離をもとに設定したパラメータ値を u, v の近似値として計算されたものがある. そのため, 最適なフィッティングとはとはいえない. すなわち, 補間されるデータ点間の曲面に沿った距離と, 各データ点に割り当てられる u, v の値の増減との対応が一致するのが理想である. 次のようにパラメータの更新を行ない, 繰り返し計算によってフィッティングの最適化を図る方法がある [79].

1. 各計測点から暫定的に求めた曲面上に垂線をおろし, その交点を求める.
2. 1. で求めた交点の u, v パラメータ値を求める.

3. 2. で求めた u, v パラメータ値を計測点に対する新たなパラメータ値として式 (4.5) の計算を行なう。

4. パラメータ値の更新量が十分小さくなるまで 1.~3. を繰り返す。

1., 2. の手順では、曲面上の点と計測点とを結ぶベクトルと、曲面上の u, v に関する接線ベクトルとの内積が 0 になるように離散化された $u-v$ 空間で降下法を用いて探索することによって交点と、パラメータ値が求められる。したがって、 u の更新は次のように計算できる。 v の更新も同様である。

$$u_i^{new} = u_i^{old} + \delta[(u_{i+1} - u_{i-1})/2], \quad (4.6)$$

$$\delta = (P_{i,j} - S(u_i, v_i)) \frac{S_u(u_i, v_i)}{|S_u(u_i, v_i)|} \quad (4.7)$$

ここで、 $S_u(u_i, v_i)$ は曲面上の u に関する偏微分を表す。

フィッティング結果

手の全周の形状データに対して、掌、甲側の表面をそれぞれ 48 の領域に手で分割し、合計 96 の Bézier パッチによりフィッティングを行った (図 4.10)。サーフェス全体は 1536 の制御点で表現されている。また、どの程度の精度でフィッティングされているかを次のようにフィッティング誤差を計算することで評価した。各パッチ内でパラメータ u, v について 100 等分し、10000 のセグメントに分割した。パッチのフィッティングに用いた各計測点から最近傍のセグメントとの距離を誤差とした。誤差計算の結果を表 4.1 に示す。手の全周についての平均が 2.9×10^{-2} [mm] である。レンジデータの深さ方向 (Z 方向) の分解能が 0.2 [mm] であるから、十分なフィッティングの精度が出ている。しかし、掌側で最大 3.6 [mm] の誤差が出ている。これは母指の付け根部分のパッチであり、非常に起伏に富んだ箇所である。このような箇所はさらに領域を分割して複数の Bézier パッチを用いて近似表現する必要がある。

ポリゴン表現と Bézier パッチ表現との比較 特徴的な部分である母指周辺について、ポリゴン表現と Bézier パッチ表現とによる皮膚モデルを図 4.13 に示す。ポリゴン表現のポリゴンの密度と Bézier パッチをレンダリングする際のポリゴン分割数を、それぞれおよそ同じにし、特徴が分かりやすいようにフラットシェーディングを用いてレンダリングしている。

表 4.1 フィッティング誤差

部位	平均誤差 [mm]	最大誤差 [mm]
掌側	3.0×10^{-2}	3.6
甲側	2.7×10^{-2}	4.3×10^{-1}

ポリゴンモデルでは、頂点を生成する際に局所的な情報のみでレンジデータを補間しリサンプリングしているため、表面の滑らかさが損なわれているのに対し、Bézierパッチモデルでは、パッチ領域に含まれるデータ全体に対してフィッティング誤差が最小となるように形状を決定しているため、自然な滑らかな曲面が提示され、計測の際のノイズの影響も軽減される(図 4.13 上段)。そして、パッチ表現のためのポリゴン分割数は、制御点の設定等とは無関係に任意に決めることができるため、表現上の滑らかさとレンダリングの計算コストとの調整が容易である。逆に、フィッティングによって詳細な形状情報が失われてしまう可能性があるが、領域を細かく分割してパッチ数を増やすことによってレンジデータの分布に忠実なモデリングも可能である。爪の周りの形状表現(図 4.13 中段)がこの一例である。しかしながら、4.1.4節でも述べたように Bézier パッチの連続性を保った接続と精度の良いフィッティングとを両立することは容易ではない。本研究ではパッチ領域の境界上のレンジデータは隣接するパッチ間で重複するように設定を行っているが、最小自乗法を用いたフィッティングの際にパッチの形状が歪み境界上に隙間ができてしまう(図 4.13 下段右)。

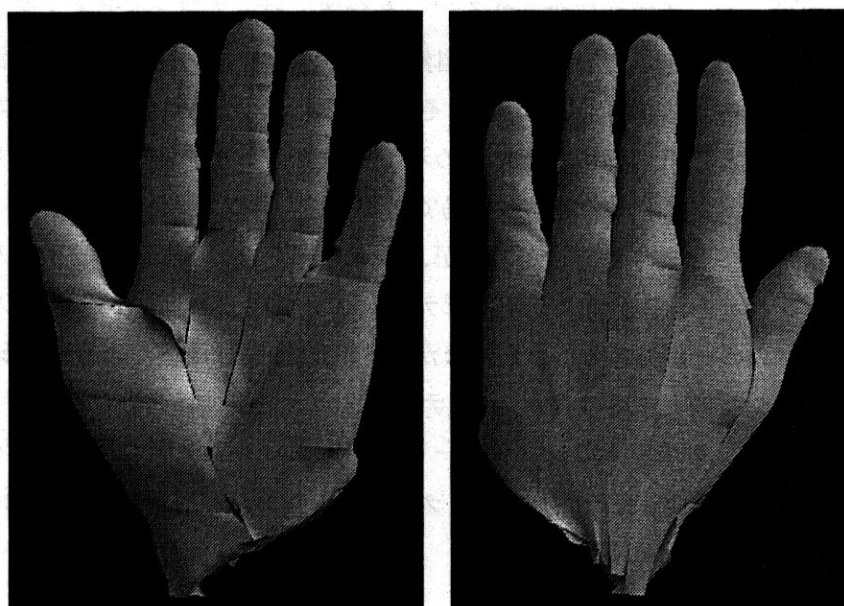


図 4.10 Bézier パッチによる皮膚モデル

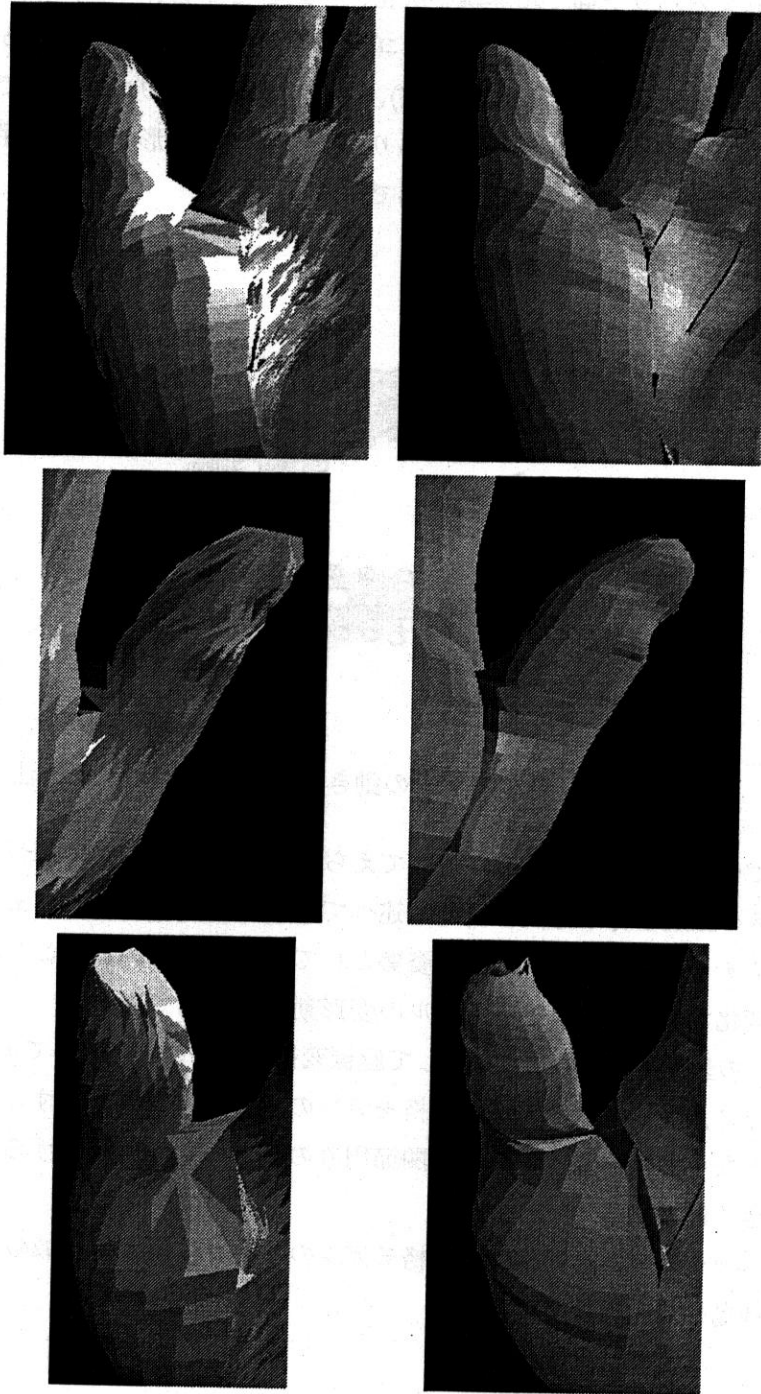


図 4.11 ポリゴン表現 (左列) と Bézier パッチ表現 (右列) によるレンダリング
(いずれもスムーズシェーディングによる.)

また、隣接するパッチ間で境界線を厳密に一致させる場合でも、例えば、T字型のような境界線の場合、各々のパッチのポリゴン分割数が境界上では異なるので小さな隙間の列を発生させてしまう(図4.13 上段右)。これに対し、ポリゴン表現では、局所的に頂点の隣接関係を定義することが可能であり、計測データの形状情報を保存しながら隙間の無い表面を生成することが比較的容易である。

4.1.5 表面の変形

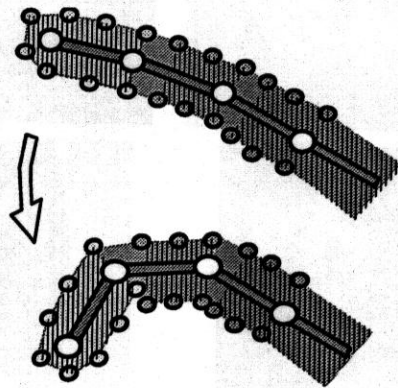


図 4.12 骨格モデルの動きに対する表面の変形方法

全節までにおいて、形状計測によってえられたレンジデータに基づいて皮膚モデルのサーフェスの生成を行う方法について述べてきた。得られたサーフェスは皮膚モデルの初期形状であり、骨格モデルは初期姿勢として配置されている。ここでは、骨格モデルが姿勢を変化させた場合の皮膚モデルの変形動作について述べる。

ポリゴンの変形は全ての頂点に対して座標変換を行うことによって実行される。図4.12に示すように、ポリゴンモデルは骨格モデルの一つのリンクに属するサーフェスがリンクと一体となって座標変換される。関節周りのポリゴンで、隣接するリンクにまたがるものが大きく伸縮する。

Bézierパッチモデルも同様に、骨格モデルのリンクに属する領域のパッチの制御点が、リンクに連動して座標変換される。

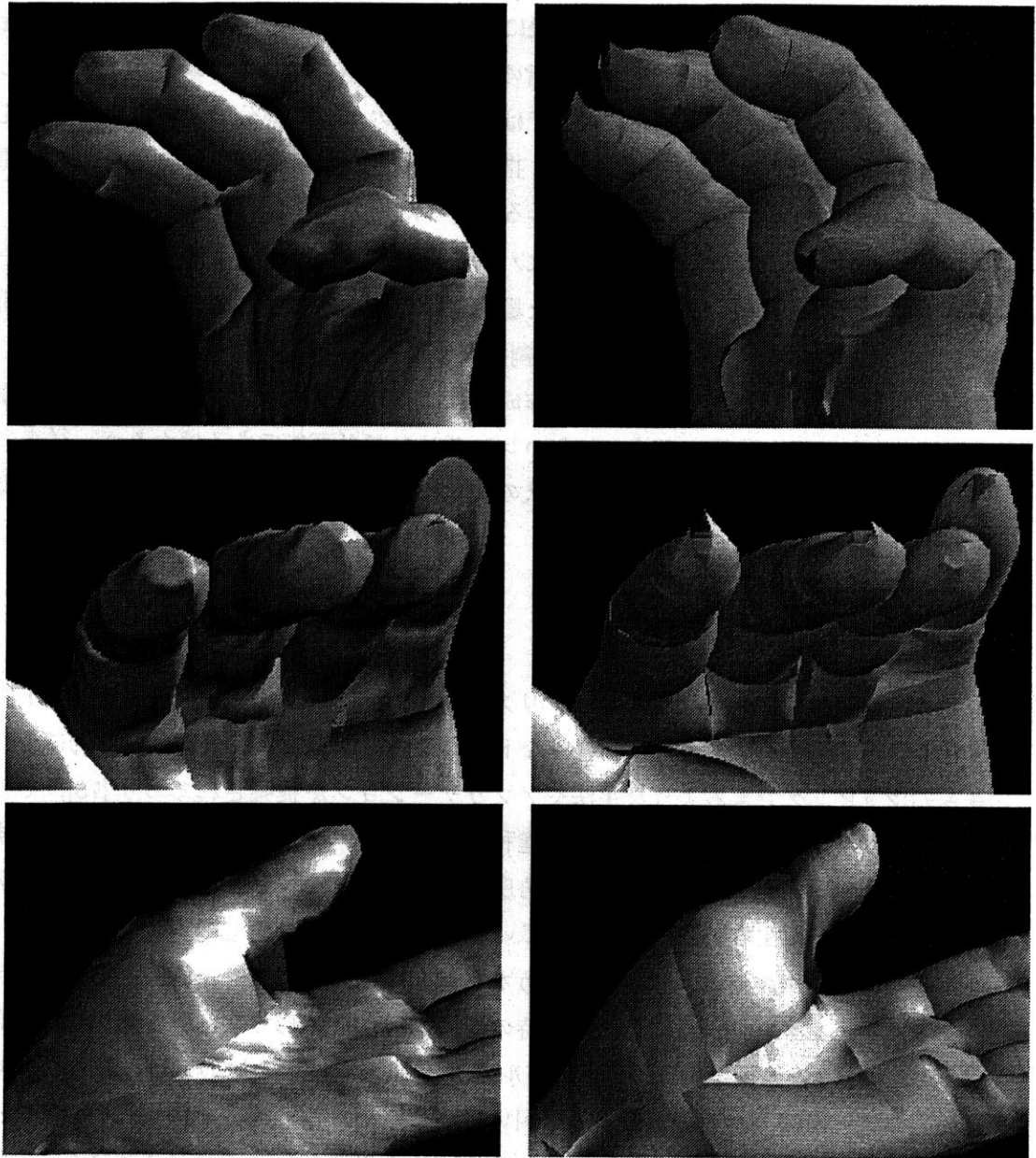


図 4.13 ポリゴン表現 (左列) と Bézier パッチ表現 (右列) による変形
(いずれもスムーズシェーディングによる。)

ポリゴン表現と Bézier パッチ表現との比較 図 4.13に、皮膚モデルの変形において特徴的な個所を、ポリゴンモデルと Bézier パッチモデルとの両方について示す。本研究では、各リンクに属するサーフェスが一律に座標変換されるため、ポリゴンモデルの指などの関節周りの屈曲側ではポリゴンが指の内部に入り込んでしまう場合がある(図 4.13 左列)[83]。一方、Bézier パッチモデルでは、パッチのエッジ部分の制御点の位置の変化が、パッチ内部の曲面形状にも影響し、指の関節の屈曲側では深い皺を生じたり、関節から離れたところでは少し膨らみを生じるといった効果が得られる(図 4.13右列)。

しかしながら、前説でも述べたようにパッチ接続の不連続性により、好ましくない個所に皺やくぼみがあり、関節を動かした場合にこれら顕著になる場合が多い。この問題点については、手動によるパッチ領域分割の調整によって解決は可能であると考えられる。最低限、隙間の生じないパッチモデルを作成すれば、接続部にバンプマッピングを積極的に用いるなど、リアリティを損なわないレンダリングが可能であるばかりか、従来のポリゴン表現では不可能な、滑らかな起伏の変化を実時間で提示できるモデリングが可能になると考えられる。

4.1.6 テクスチャマッピング

テクスチャマッピングはフォトリアリスティックなレンダリングを可能にする上で非常に有効な手法である。さらに、様々なトポロジーのオブジェクト表面に対話的にテクスチャがマッピングできるような手法やアプリケーションが提案されており [78]、その適用範囲は拡大されている。また、より違和感の少ないテクスチャ情報をマッピングするために、オブジェクトに対して様々な角度から撮影した画像をブレンドしたものをテクスチャとして利用する方法が提案されている [57]。

本研究では簡単のため、図 4.14のような掌側と甲側のテクスチャ画像を用意し、テクスチャマッピングを行った。形状計測時の手の姿勢に近い形で掌と甲の両側の画像を取得することにより、画像座標と皮膚モデルの X-Y 平面座標との対応をとることができる。また、掌側と甲側の 2 枚の画像のみを用いているため、側面部分では、両テクスチャの輝度値の差が急激な色の変化として現れるため、不自然なレンダリングとなる。これを避けるために、テクスチャ画像内の手の輪郭部付近に手作業によりボカシを入れて対処している(図 4.14)。

テクスチャマッピングによってレンダリングされるオブジェクト表面の輝度値は基本的にマッピングされるテクスチャの値そのものであり、照明や姿勢の変化などがオブジェ

4.2 CG生成

本論文

ダリリングにはポリ

4.2.1

本論文

ルおよ

近似表

の姿勢

勢決定

が表現

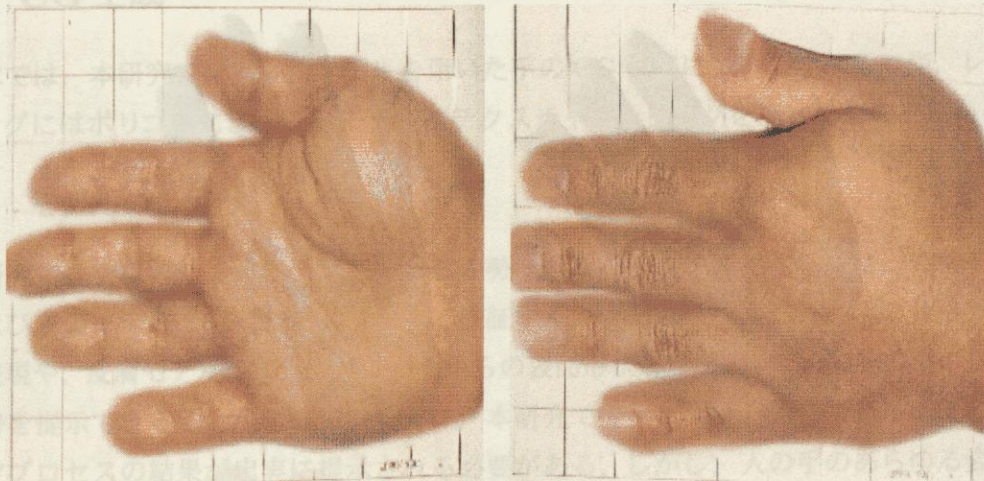


図 4.14 テクスチャ画像

クトの陰影に反映されず、むしろ実在感を損なうという問題点がある。そこで、本研究ではスムーズシェーディングによる輝度値の変化をテクスチャの輝度値とブレンドするという工夫を行う。これにより、ポリゴンで作成した皮膚モデルのもつ幾何学的情報を反映したシェーディングの効果と、実写のテクスチャによるフォトリアリスティックなレンダリング効果とを同時に期待でき、またレンダリングに際しても計算コストが大きく増加することもない。

まず、ポリゴンモデルに対しては、白のサーフェスで鏡面反射成分を弱く設定し、やはり白の環境光・照明光を設定する(図 4.15上段)。一方、手動調整により、手の実写画像の色調を強めたテクスチャをマッピングする(図 4.15中段)。今回はシェーディングとテクスチャとをおよそ 0.3 : 0.7 程度の割合でブレンドしレンダリングを行った(図 4.15下段)。皺や爪などのテクスチャとともに、元のテクスチャとは違う陰影がレンダリングされているのが分かる。

図 4.16 GUIを用いた入力アプリケーション

セグメントごとの色指定: 選択中. セグメントごとの色指定: 選択中

セグメントごとの色指定: 選択中. セグメントごとの色指定: 選択中

セグメントごとの色指定: 選択中. セグメントごとの色指定: 選択中

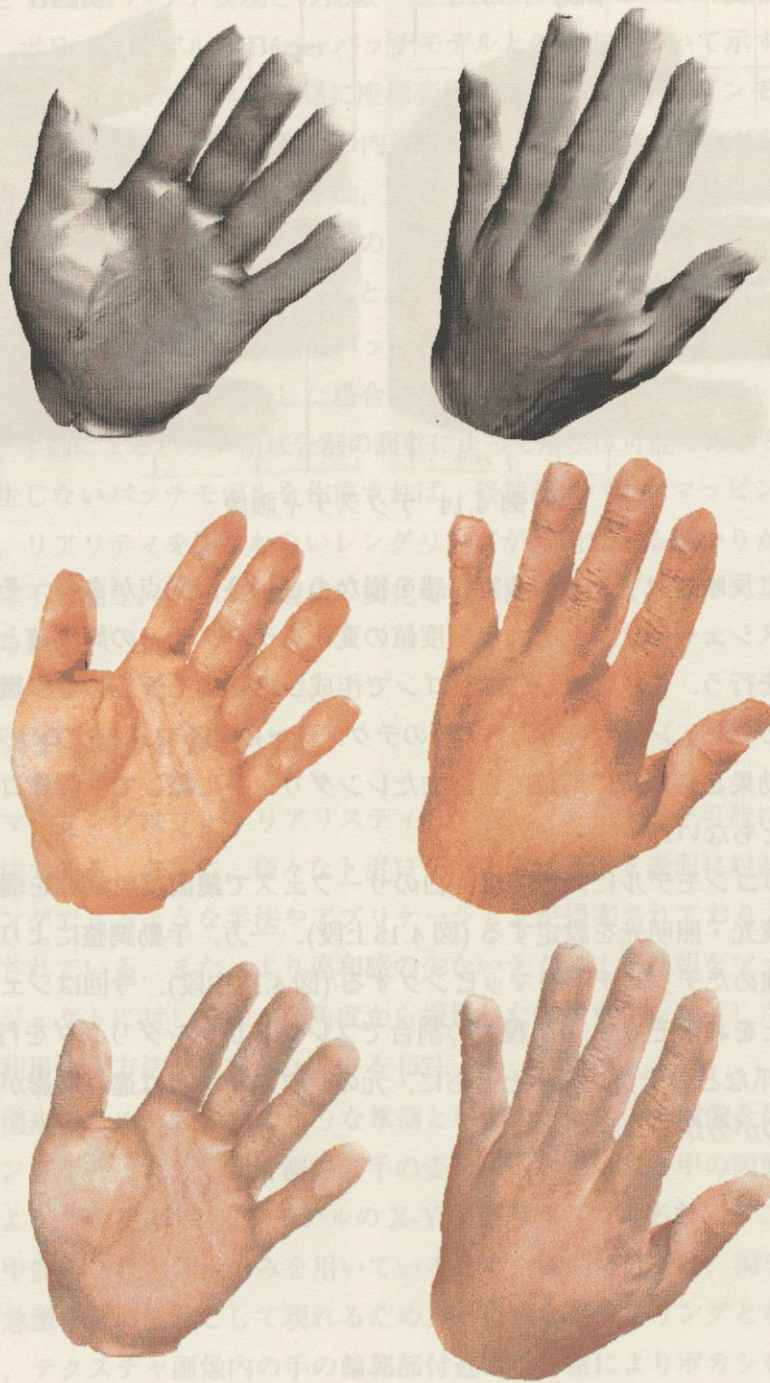


図 4.15 シェーディングとテクスチャとのブレンドによるレンダリング

上段：スムーズシェーディング 中段：テクスチャマッピング
 下段：シェーディングとテクスチャとのブレンド

4.2 CG 生成

本章では、本研究で提案したモデルを用いた手の CG 生成について述べる。尚、レンダリングにはポリゴンによる皮膚モデルにテクスチャマッピングを施したものをを用いる。

4.2.1 モデルの自由度について

本研究で提案している力学モデルによる姿勢決定プロセスを適用する前に、骨格モデルおよび皮膚モデルの表現自由度について検証する。骨格モデルにおける手の骨格系の近似表現や、皮膚モデルにおける初期状態からの表面形状の変形機能が、実物の手の任意の姿勢を提示できることが望ましい。特に、本研究で提案している力学モデルによる姿勢決定プロセスの結果が忠実に提示される必要がある。しかし、人の手のあらゆる姿勢が表現可能であるかどうかを確認することは難しい。そこで、本節では、Graphic User Interface(GUI)を用いて姿勢設定を行う実験と、キーフレーム補間によって連続的な姿勢情報を与える実験とを行い、提示される CG 像を確認する。

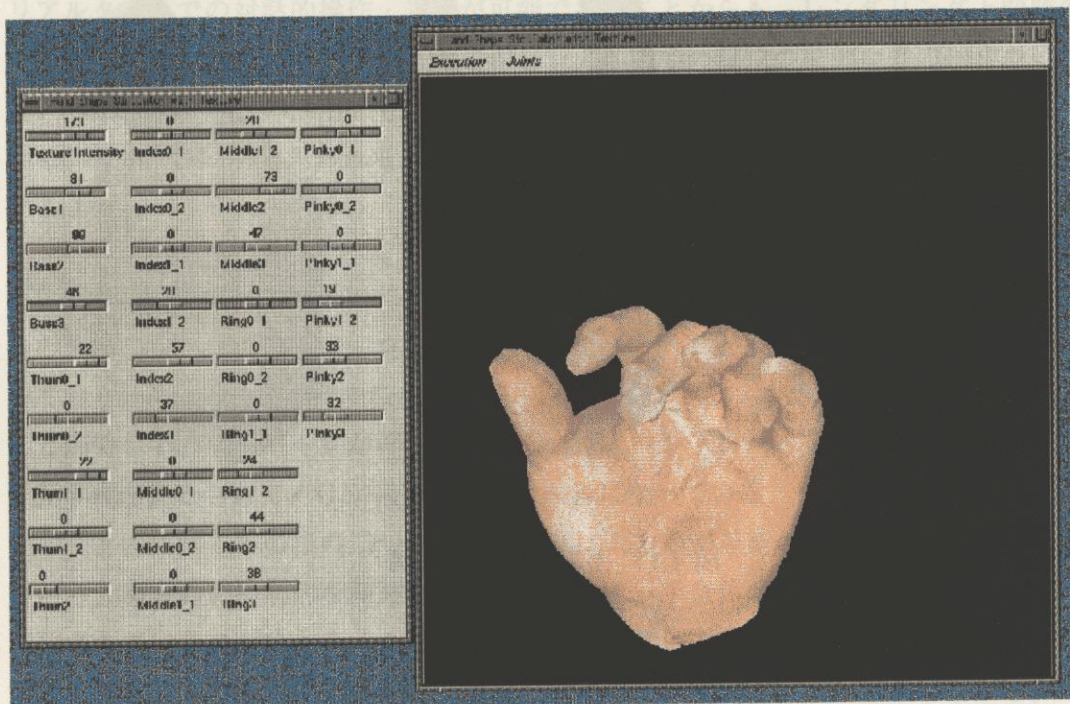


図 4.16 GUIを用いた入力アプリケーション

GUIによる入力

本研究では、図 4.16 示すような Graphic User Interface(GUI) を作成し、提示される CG 像を確認しながら対話的に操作することが可能な環境を用意した。この GUI 上には、オブジェクト全体の回転のほか、骨格モデルの全ての関節の各回転自由度に対応したスライダが設けてあり、任意の関節への入力値がマウス操作によって与えることができる。ここでは、まず関節の動きに何も制約が無い状態で、色々な手の姿勢を設定する。姿勢の設定は、各関節ひとつずつを GUI で操作して動かしながら行い、SGI O2 を用いリアルタイムで可能である。図 4.17 に、手の像の出力例を示す。いずれも、手袋型の手形状センサデバイスでは計測・入力が難しいとされている手の姿勢であり、十分な関節自由度が用意されていないと表現できない手の像の例である。どの CG 像も実物の手の姿勢・形状を認識するのに十分なリアリティを備えていると判断する。

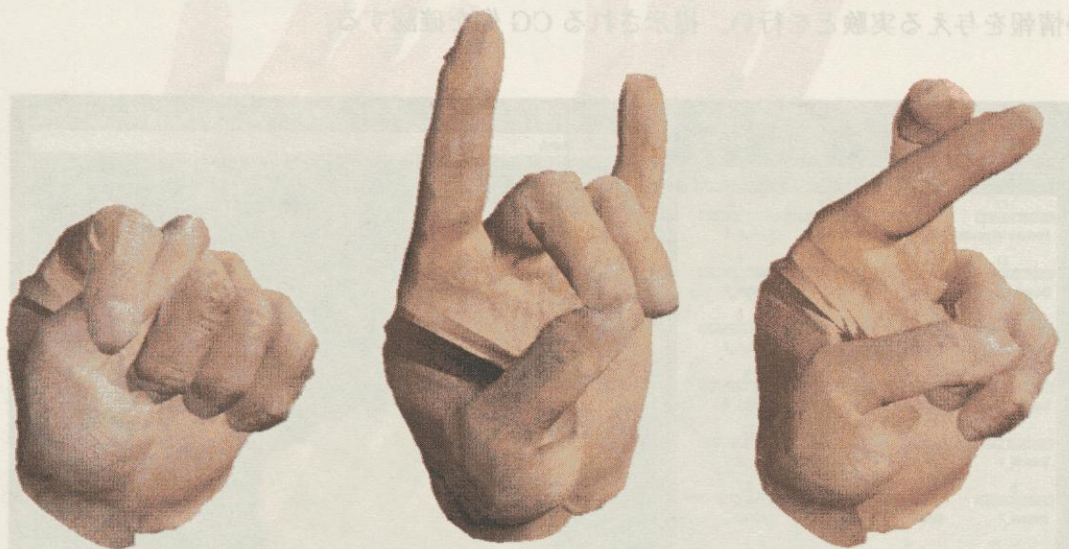


図 4.17 手掌形状の出力例

4.2.2 キーフレーム補間による CG アニメーション

ここでは、皮膚モデルの変形を評価するために関節軌道を各関節角度のプロフィールとして予め用意しアニメーションを生成する。まず、GUI を用いてキーフレームとなる手の姿勢を 3 種類作成する。全部で 29 の関節自由度全てについて、角度の値を Bézier

曲線で補間し、各フレーム間に 100 刻みずつデータを作成した。以下にその出力結果を示す(図 4.20)。1 番目(最上段左端)、9 番目(第 2 段右端)、19 番目(最下段右端)がキーフレームである。全てのフレームにおいて、特に違和感のない手の像が提示できていることが分かる。

4.2.3 動きの制約を適用した CG アニメーション

GUI を用いたアニメーション ここでは、本研究で提案する動きの制約を用いた姿勢決定プロセスを導入した CG アニメーション作成について述べる。GUI を用いて、一度に一つの関節に対して任意の値の入力を与えた場合の出力結果を図 4.20 に示す。同図において、(a) の画像列は小指の付け根の関節 L2(図 3.2 参照) に逐次入力を加えた場合であり、(b) の画像列は小指の先端の関節 L4 に逐次入力を加えた場合のアニメーションである。入力が与えられているのは、一カ所の関節のみであるが、他の指も自然に曲がり自然な姿勢が生成されている。

本研究では、約 8000 ポリゴンの皮膚モデルを用いてアニメーションを生成している。リアルタイムでの対話的操作・表示が可能であることから、レンダリング上問題のないポリゴン数であると考えられる。しかし、人体の他の部位のモデルとの統合や、他のアプリケーションとの併用を考慮した場合、計算コストの観点から、ポリゴン数の少ないモデルが好ましいと思われる。これは既存のポリゴン・リダクション手法 [3] 等を適用することにより可能である。

応用例と将来的展望 図 4.21 に、本提案手法を応用したアプリケーションの一例を示す。このアプリケーションでは、コンピュータのキーボードと CG のピアノの鍵盤とが対応しており、キーボードを押すことにより、CG の手で CG のピアノをリアルタイムで弾くことができる。キーボードが押下されるというイベントに対して、ピアノの鍵盤とそれを押す指が動かされて CG が描画される仕組みになっている。一回のイベントにおいて、手のモデルには 1 本の指の二つの関節自由度に入力値が与えられるのみである。しかしながら、機械的に局所的な関節が動くのではなく、手全体の間人らしい柔らかな動作が実現されているのが分かる。この例では、指と鍵盤との干渉等はモデリングされておらず、イベントのスイッチングにより鍵盤は幾何学的に動いている。しかしながら、コンピュータのキーボードという身近なインタフェースを用いて、限られたユーザからのインタラクションによってリアルなアニメーションを生成するという結果を得ている。本研究の提案手法の有効性を示す一例であると考えられる。

第4章 手の外観形成のためのモデリング

本研究で提案するモデルは、多くのセンサを持たない入力デバイスからのごく限られた入力情報を用いて、計算機に手の形状情報を入力するインタフェースとして応用可能であると考えられる。一例を示した通り、マウスやキーボードといった、手軽に扱えるものを入力インタフェースとして、計算機内に構築されたVR(仮想現実)空間でユーザの手のエージェントを動かしたり、仮想楽器を演奏したりと、アプリケーションは様々な形に結実し得ると考えられる。

また、人の身体に関する表現情報の圧縮という観点で、通信手段への拡張が考えられる。臨場感遠隔通信システムのように、仮想空間に会議参加者のアバタを制御・提示する際には、少ないパラメータの伝送によってリアルな話者の動作がリアルタイムで再構成されることが望ましい。本論文で提案したモデルを端末に予め設置しておくことにより、限られた関節情報を送るだけで効率よく3次元CGのリアルな表現を利用することができる。

限られた入力で人の手のモデルを制御するという点においては、義手による補綴のための技術への応用がある。手を切断した人の残存筋肉から筋電などの信号を取り出してシステムへの入力として義手を制御する技術である。本研究ではCGによるオブジェクトを対象として扱ったが、力学的表現を用いたモデリングの発展的な応用として指の協調動作を限られた入力で制御できるとすれば非常に有用であると考えられる。

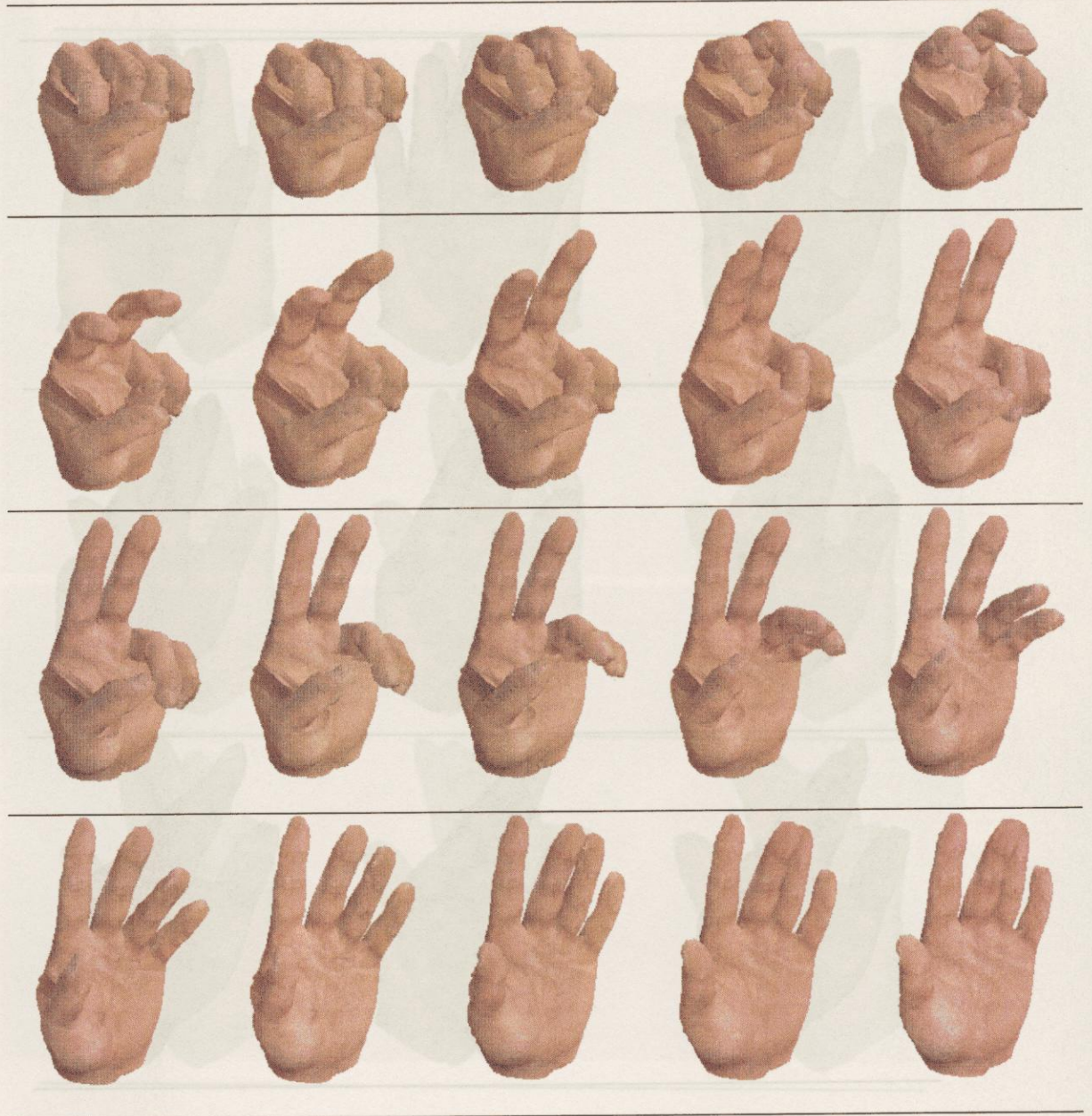


図 4.18 キーフレーム補間による手掌動作のアニメーション
(それぞれ, 上段左端, 2 段目右端, 下段右端がキーフレーム)

第4章 手の外観形成のためのモデリング

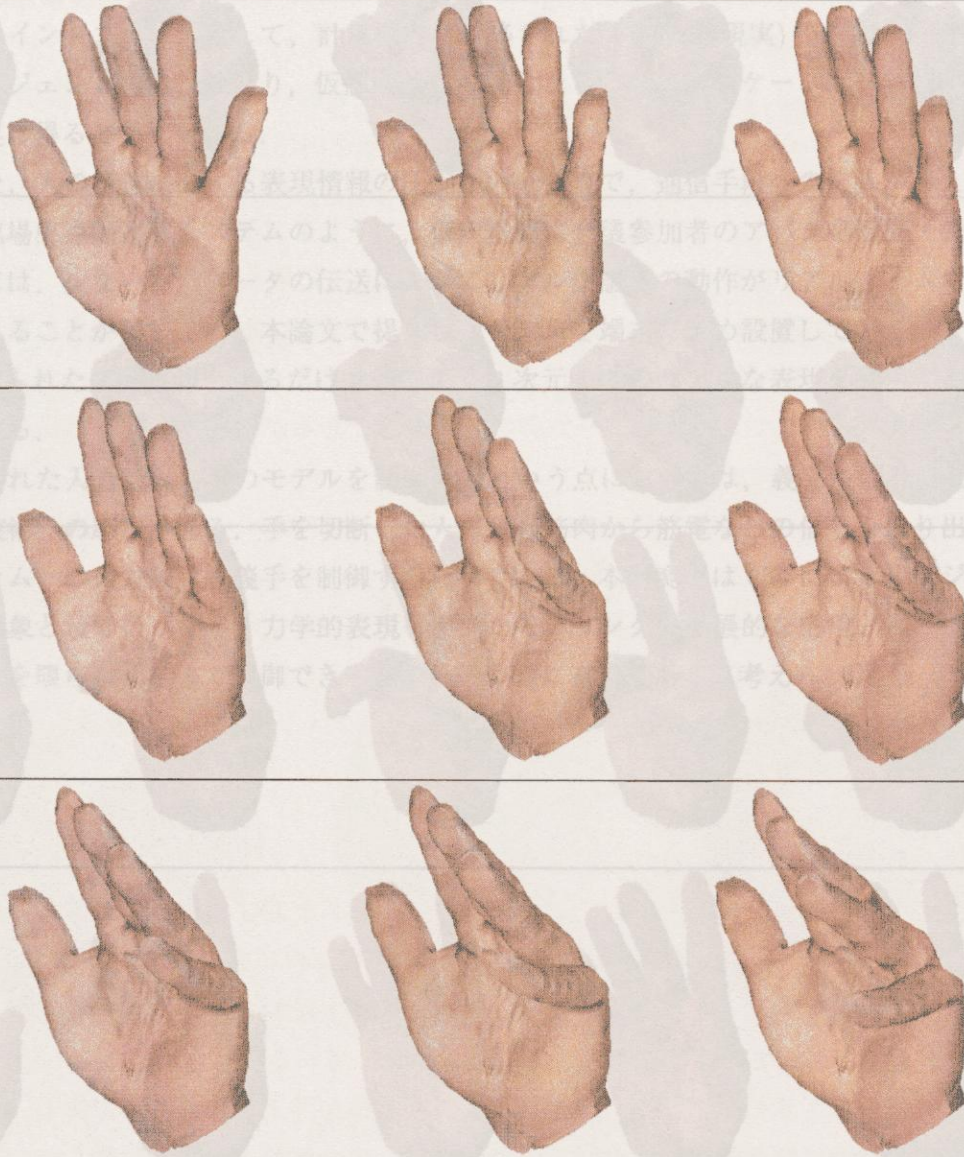


図 4.19 動きの制約を適用した CG アニメーション (1)

(小指の付け根の関節に入力を与えた場合)

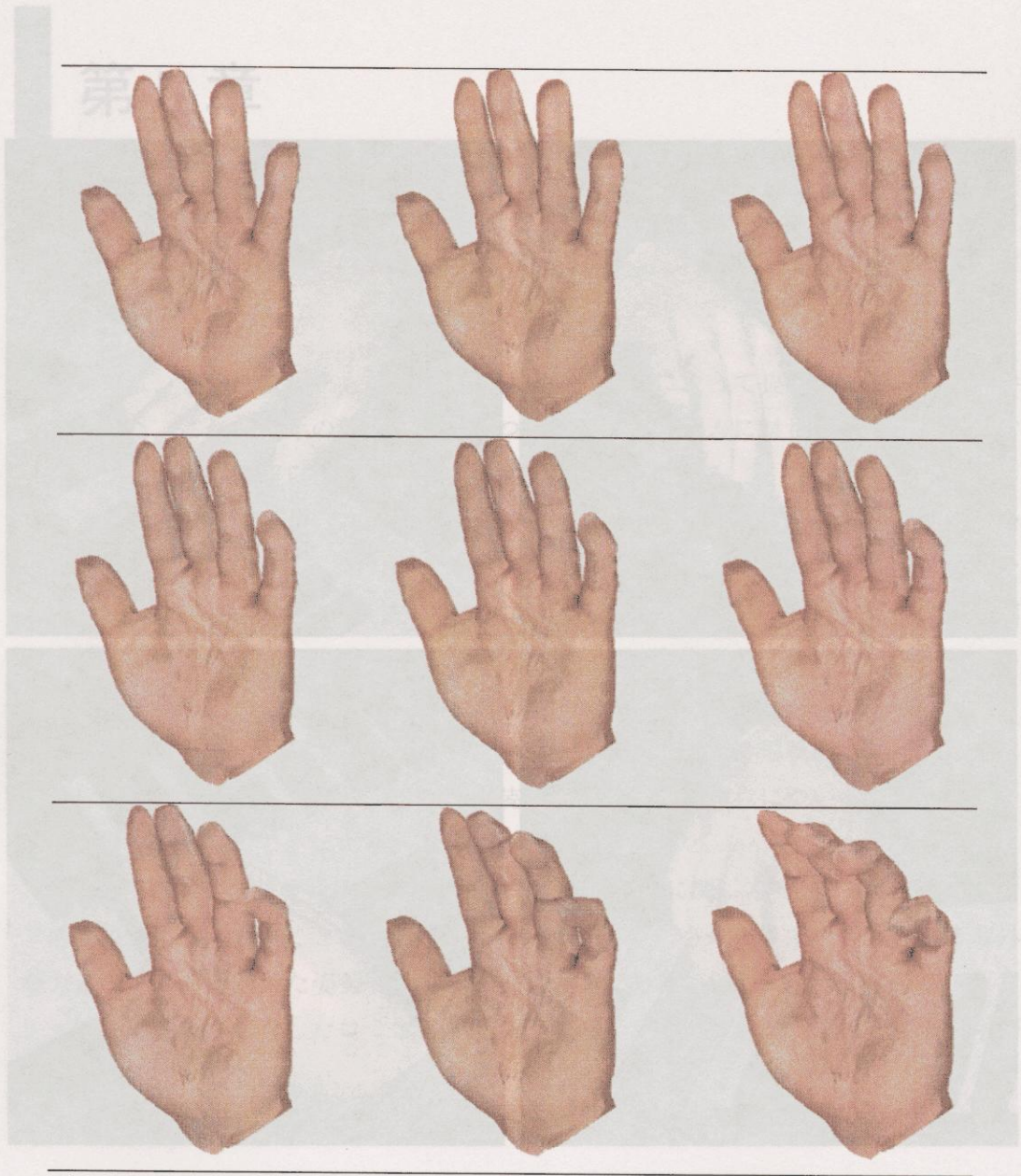


図 4.20 動きの制約を適用した CG アニメーション (2)
(小指の先端の関節に入力を与えた場合)



図 4.21 アニメーションの応用例

第5章

結論

本研究は、豊かな表現をもつ人の手をリアルなCGによって提示するモデリング手法を提案した。これは、手の筋骨格系のもつ複雑なメカニズムに対し、力の重ね合わせのアナログを用いて人間らしい手の姿勢を生成するものである。

本研究では、人の手が潜在的に有する特性を、姿勢・動作設定およびその効果的な表現方法に注目して考察し、手の動き・形状の実測に基づいて提案手法を実装した。そして、アニメーションを実際に生成することにより、提案した手法によって、対話的な簡単な操作で自然な動作をする手のCG像を合成できることを示した。実装されたモデルは特別な入力デバイス等を必要としないことから、映像作成現場におけるアニメーション作成支援に有効であるばかりでなく、コンピュータに対する手形状の入力インターフェースとして有用であると考えられる。また、実装したモデルの問題点についても考察し、その解決方針を提示することにより、本手法の汎用性を示した。

本研究で提案したモデルは手の動きの基本となる特性に関してモデリングを行ない、力学的表現を用いていることから、手で物を触ったり変形させたりする現象、つまり外的な力との干渉を考慮した姿勢表現への拡張が容易である。仮想空間での作業シミュレーションや仮想空間を介したコミュニケーションなど、多岐の用途へのさらなる応用が期待できると考える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり，終始温かい御指導，御助言を戴きました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科千原國宏教授，本論文をまとめるに際し貴重な御教示を戴きました同大学情報科学研究科横矢直和教授，湊小太郎教授に深謝致します。

本研究を遂行するにあたり，折りにふれ懇切丁寧なる御助言とご支援を賜った和歌山大学システム工学部陳謙助教授に衷心より御礼申し上げます。

また，並びに日頃より種々御意見を戴きました大城理助教授，眞鍋佳嗣助教授，土居元紀助手，黒田知宏助手，大阪大学基礎工学研究科佐藤宏介助教授，東京大学新領域創成科学研究科助教授眞溪助教授に深謝致します。

そして，多大なる御協力を頂いた像情報処理学講座の皆様，先輩諸氏，入学以来研究室の活動をよく支えて頂きました秘書の皆様我心より感謝申し上げます。

最後に，私が大学において研究するにあたり，並々ならぬ支援を頂き，また，温かく見守って下さった私の家族に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] B. Robertson: “”特別レポート・computer graphics world誌”「スター・ウォーズエピソード1/ファントム・メナス」メーカー2”, 日経CG, pp. 140-145, 1999年8月.
- [2] B. Robertson: “”情報レポート・computer graphics world誌”「スター・ウォーズエピソード1/ファントム・メナス」”, 日経CG, pp. 64-72, 1999年7月.
- [3] H. Hoppe: “Progressive meshes”, SIGGRAPH '96 Proceedings, pp. 99-108, 1996.
- [4] T. DeRose, M. Kass and T. Truong: “Subdivision Surfaces in Character Animation”, SIGGRAPH '98 Proceedings, pp. 85-94, 1998.
- [5] 舎官 日章, 廣瀬 通孝: “バーチャル・テックラボ”, 工業調査会, 1992.
- [6] K. Singh, J. Ohya and R. Parent: “Human Figure Synthesis and Animation for Virtual space Teleconferencing”, Proceedings for Virtual Reality Annual International Symposium 1995(VRAIS'95)118-126, pp. 118-126, 1995.
- [7] “Digits'n Art Sftware, LIFE course v.2.0”.
(<http://www.dnasoft.com/index2.html>).
- [8] M. Mochimal and N. Yamazaki: “The three dimensional measurement of unconstrained motion using a model-matching method”, ERGONOMICS, vol. 37, no. 3, pp. 493-510, 1994.
- [9] J. Rehg and T. Kanade: “Model-Based Tracking of Self-Occluding Articulated Objects”, Fifth International Conference on Computer Vision, pp. 612-617, 1995.
- [10] 亀田能成, 美濃導彦, 池田克夫: “シルエットを利用した手指の三次元形状推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'92), 1992年7月.

- [11] 井口征士, 佐藤宏介: “3次元画像計測”, 昭晃堂, 1990.
- [12] 谷内田正彦: “ロボットビジョン”, 昭晃堂, 1994.
- [13] H. Zha, K. Morooka, T. Hasegawa, T. Nagata: “Active modeling of 3-d objects: Planning on the next best pose(nbp) for acquiring range images”, Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 68-75, 5 1997.
- [14] R. Pito: “A registration aid”, Proceedings of International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 85-92, 5 1997.
- [15] Besl, P. J. and McCoy, N. D.: “A method for registration of 3-D shapes”, IEEE PAM, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 2 1992.
- [16] H. Hoppe: “Surface reconstruction from unorganized points”, PhD thesis, Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1994.
- [17] 山本裕之, 内山晋二, 田村秀行: “3次元形状モデリングのためのドロネー網生成法”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J78-D-II, no. 5, pp. 745-753, 1995年5月.
- [18] 内山晋二, 山本裕之, 田村秀行: “距離画像からの階層化適応型パッチ生成法”, 情報処理学会論文誌, vol. 36, no. 2, pp. 351-361, 1995年2月.
- [19] M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery, W. Stuetzle: “Multiresolution analysis of arbitrary meshes”, SIGGRAPH '95 Proceedings, pp. 173-182, 1995.
- [20] J. Bloomenthal: “Introduction to Implicit Surfaces”, MORGAN KAUFMANN PUBLISHERS, INC., 1997.
- [21] 嘉数 侑昇, 古川 正志: “CAD/CAM/CGのための形状処理工学入門”, 森北出版株式会社, 1995.
- [22] 穂坂 衛, 東 正毅, 斉藤 剛, 久志本琢也: “CAD/CAMにおける曲線曲面のモデリング”, 電気大出版局, 1996.
- [23] 鳥谷浩志, 千代倉弘明: “3次元CADの基礎と応用”, 共立出版株式会社, 1991.
- [24] V. Krishnamurthy and M. Levoy: “Fitting smooth surface to dense polygon meshes”, SIGGRAPH '96 Proceedings, pp. 313-324, 1996.

- [25] M. Eck and H. Hoppe: "Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type", SIGGRAPH '96 Proceedings, pp. 325-334, 1996.
- [26] H. Zha et al.: "Optimal estimation of surface curvatures by fitting nonuniform bicubic splines to range images", Proc of ICARCV '92, pp. CV 861 - CV 864, 1992.
- [27] Kumamaru et al.: "Estimation of surface curvature by surface recovery based on b-spine fitting with controllable knots", Proceedings of ASCC vol.2, pp. 717-720, 1994.
- [28] P. Fua, A. Gruen, R. Plaenkers, N. D'apuzzo and D. Thalmann: "Human Body Modeling and Motion Analysis From Video Sequences", Proc. International Symposium on Real Time Imaging and Dynamic Analysis, 6 1998.
- [29] J. Lee and T. Kunii: "Constraint-Based Hand Animation", Springer-Verlag, Models and Techniques in Computer Animation, Tokyo, pp. 110-127, Jan. 1993.
- [30] J. Kuch and T. Huang: "Vision Based Hand Modeling and Tracking for Virtual Teleconferencing and Tele-collaboration", Fifth International Conference on Computer Vision, pp. 666-671, 1995.
- [31] J. Hodgins, W. Wooten, D. Bronen and J. O'Brien: "Animating Human Athletes", SIGGRAPH '95 Proceedings, pp. 71-78, 1995.
- [32] K. Komatsu: "Human skin model capable of natural shape variation", The Visual Computer, vol. 3, pp. 265-271, 1988.
- [33] 福井一夫: "人体の形状モデリングとアニメーション", 「人物のモデリングと表示技術」セミナー資料, pp. 61-70, 1991年9月.
- [34] J. Wilhelms: "Animals with Anatomy", IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 22-30, May-June 1997.
- [35] 内山晋二, 加藤博一, 佐藤宏介, 井口征士: "距離画像による人体の3次元形状の計測とモデリング", コンピュータビジョン, vol. 74-3, pp. 1-9, 1991年9月.
- [36] 福井一夫: "一般逆行列による多関節構造体の動作入力システム", 情報処理学会グラフィックスとCAD, vol. 46-4, no. 21-28, 1990.

- [37] 淡路哲彦, 細谷健, 伊藤貴之, 牧野光則, 大石進一: “指の先端位置情報による手の形状モデリング”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J75-D-II, no. 11, pp. 1978-1980, 1992年11月.
- [38] 赤澤堅造, 林義昭: “筋電義手開発のための運動制御系の動特性推定”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J73-D-II, no. 2, pp. 257-265, 1990.
- [39] 吉田正樹, 奥野竜平, 赤澤堅造, 加藤和範, 松村雅史, 西原一壽: “手の運動機能を取り入れたデジタル制御方式による筋電義手の開発”, バイオメカニズム 東大出版会, vol. 12, pp. 303-311, 1994.
- [40] 小池康晴, 本多清志, 平山亮, 五味裕章, エリックツベイン: “神経回路モデルを用いた表面筋電信号をからの等尺性トルクの推定”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J76-D-II, no. 6, pp. 1270-1279, 1993.
- [41] 小池康晴, 川人光男: “神経回路モデルを用いた表面筋電信号をからの人腕の軌道生成”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, vol. J77-D-II, no. 1, pp. 193-203, 1994.
- [42] 平岩明, 内田典佳, 下原勝憲, 曾根原登: “筋電操作ハンドの制御のための皮膚表面筋電信号のニューラルネットによる認識”, 計測自動制御学会論文集, vol. 30, no. 2, pp. 216-224, 2 1994.
- [43] D. Chen and D. Zeltzer: “Pump it Up : Computer Animation of a Biomechanically Based Model of Muscle Using the Finite Element Method”, Computer Graphics, vol. 26, no. 2, pp. 89-98, 1992.
- [44] 亀井克之, 片寄晴弘, 佐藤宏介, 井口征士: “実写画像の編集と手の3次元モデルとによる人の動作アニメーションの生成 3次元cgモデルによる楽器演奏時の手の動作表現”, 画像ラボ, 46-49 1995年8月.
- [45] 亀井克之, 片寄晴弘, 佐藤宏介, 井口征士: “実写画像の編集と手の3次元モデルとによる人の動作アニメーションの生成”, 情報処理学会論文誌, vol. 36, no. 2, pp. 374-382, 1995年2月.
- [46] R. Mas and D. Thalmann: “A Hand Control and Automatic Grasping System for Synthetic Actors”, Proc. Eurographics '94, 9 1994.
- [47] M. Thalmann and D. Thalmann: “Human Body Deformation Using Joint-dependent Local Operations and Finite-Element Theory” in Making Them

- Move(N.badler, B. Barskey, D. Zeltzer eds)", pp. 243-262, Morgan Kaufmann, San Maeto Acalifornia, 1990.
- [48] Z. Hung, R. Baulk, N. Magnenat Thalmann and D. Thalmann : "A Multi-sensor Approach for Grasping and 3D Interaction", Proc. Computer Graphics International '95, Leeds, Academic Press, pp. 235-254, 1995.
- [49] S. Rezzonico, Z. Huang, R. Boulic, N. Magnenat Thalmann and D. Thalmann : "Consistent Grasping Interactions with Virtual Actors Based on the Multi-sensor Hand Model", Proc. 2nd Eurographics workshop on Virtual Environments, pp. 107-118, 1995.
- [50] "Computer Graphics Lab, EPFL". <http://ligwww.epfl.ch/>.
- [51] Moccozet L., Magnenat Thalmann N.: "Multilevel Deformation Model Applied to Hand Simulation for Virtual Actors", VSMM97, 1997.
- [52] Moccozet L., Magnenat Thalmann N: "Dirichlet Free-Form Deformations and their Application to Hand Simulation", Proceedings ComputerAnimation 97 IEEE Computer Society, pp. 93-102, 1997.
- [53] 長嶋祐二, 亀井了, 杉山善昭: "携帯情報駆動型手話アニメーションシステム", 信学技法 ET96-86, pp. 73-78, 1996.
- [54] 亀井了, 長嶋祐二: "日本手話電子化辞書におけるヒューマンインタフェースについて", 12th Symposium on Human Interface, pp. 113-118, 1996年10月.
- [55] 池田尚司, 崎山朝子, 佐川浩彦, 大木優: "三次元 cg を用いた手話アニメーション編集ツール", 画像ラボ, pp. 15-18, 1996年8月.
- [56] 竹村茂, 平川美穂子: "パソコンを使った手話学習システムの実際", 日本手話学会第22回大会, pp. 59-62, 1996.
- [57] F. Pighin, J. Hecker, D. Lischinski, R. Szeliski and D. Salesin: "Synthesizing Realistic Facial Expression from Photographs", SIGGRAPH '98 Proceedings, pp. 75-84, 1998.
- [58] 中嶋正之: "3次元CG", オーム社, 1993.
- [59] M. オローク: "3次元コンピュータ・アニメーションの原理", トッパン, 1997.
- [60] 石井智海, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: "皮膚の質感表現", 人物のモデリングと表示技術」セミナー資料, pp. 29-44, 1991年9月.

- [61] 杉原厚吉：“計算幾何学的手法と画像解析 ボロノイ図の応用を中心として”，情報処理, vol. 30, no. 9, pp. 1067-1075, 1989年9月.
- [62] S. オークスタカルニス, D. プラットナー 著, 安村 通見, 伊賀 総一郎, 織畑 涼子：“シリコン・ミラージュ 仮想現実の科学と芸術”，トッパン, 1994.
- [63] Kahle, Leonhardt, Platzer, 越智 淳三訳：“Taschenatlas der Anatomie 解剖学 アトラス”，Georg Thieme Verlag Stuttgart, 文光堂, 1986.
- [64] 柳原泰：“ヒトの手指関節運動の基礎的研究”，日整会誌, vol. 57, no. 3, pp. 293-308, 1983.
- [65] J. Agee and A. Hollister: “The longitudinal axis of rotation of the finger MP joint”, *Journal of Hand Surgery*, vol. 11, no. 5, p. 767, 1986.
- [66] J. Agee, P. Brand and D. Thompson: “The moment arms of the carpometacarpal joint of the thumb: Their laboratory determination and clinical application”, *Journal of Hand Surgery*, vol. 7, no. 4, pp. 412-413, 1982.
- [67] W. Cooney, M. Luca, E. Chao and R. Linsheid: “The kinesiology of the thumb trapezio metacarpal joint”, *The journal of Bone and Joint Surgery*, vol. 63-A, no. 1371-1381, Dec. 1981.
- [68] W. Buford, L. Myers and, A. Hollister: “3-D computer graphics simulation of thumb joint kinematics W. Buford, L. Myers, A. Hollister”, *Proceedings Annual International Conference IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Nov. 1989.
- [69] 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏：“動きの制約を用いたヒトの手の3次元形状モデリング”，第40回システム制御情報学会研究発表講演論文集, pp. 85-86, 1996年5月.
- [70] 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏：“自然な動きを実現するための手の3次元形状モデル”，第39回自動制御連合講演会（前刷），pp. 357-358, 1996年10月.
- [71] 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏：“動きの制約を用いたヒトの手の3次元形状モデリング”，画像の理解・認識シンポジウム (MIRU'96) 講演論文集 II, pp. 55-60, 1996年7月.
- [72] Y. Yasumuro, Q. Chen and K. Chihara: “3D Modeling of Human Hand with

- Motion Constraints”, International Conference on Recent Advances in 3-D, pp. 275–282, May 1997.
- [73] Y. Yasumuro, Q. Chen and K. Chihara: “Shape and Motion Modeling of the Human Hand Using Range Data”, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXII, Part 5, pp. 916–919, Jun 1998.
- [74] Y. Yasumuro, Q. Chen and K. Chihara: “Three-dimensional modeling of the human hand with motion constraints”, Image And Vision Computing, vol. 17, no. 2, pp. 149–156, Feb. 1999.
- [75] 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏: “CGアニメーションのための手の動きのモデリング”, 情報処理学会研究報告, no. 99-CG-94-4, pp. 19–23, 1999年2月.
- [76] 株式会社応用計測研究所: “QuickMAG IV ユーザーズマニュアル”.
- [77] 株式会社クボタ: “非接触三次元形状入力装置取扱説明書”.
- [78] G.Sannier, N.Magnenat-Thalmann: “A User-Friendly Texture-Fitting Methodology for Virtual Humans”, Computer Graphics International’97, 1997.
- [79] R. Pfeifle and H. Seidel: “Spherical triangular b-splines with application to data fitting”, Eurographics ’95 vol.14 No.3, 1995.
- [80] D. Rogers and N. Fog: “Constrained B-Spline curve and surface fitting”, Computer aided design, vol. 21, no. 10, 12 1989.
- [81] V. Koivunen, P. Kuosmanen and J. Astola: “Orthogonal Spline Fitting in Range Data”, ICIP’96 vol.2, pp. 385–388, 1996.
- [82] H. Qin and D. Terzopoulos: “D-NURBS:A Physics-Based Framework for Geometric Design”, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, vol. 2, no. 1, pp. 85–96, 3 1996.
- [83] 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏: “X線CT画像に基づいた手のCGモデル”, 電子情報通信学会 技術研究報告, no. EID98-145~163, pp. 109–114, 1999年2月.

参考文献

研究業績

論文

1. Yoshihiro Yasumuro, Qian Chen and Kunihiro Chihara, Three-dimensional modeling of the human hand with motion constraints, Image And Vision Computing (17)2 (1999) pp. 149-156. (1999年2月)[本論文2,3,4章に関連]

国際会議

2. Yoshihiro Yasumuro, Qian Chen and Kunihiro Chihara: "3D Modeling of Human Hand with Motion Constraints", International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, pp275-282, May 12-15, 1997, Ottawa, Canada. (1997年5月)[本論文2,3,4章に関連]
3. Yoshihiro Yasumuro, Qian Chen and Kunihiro Chihara: "Shape and Motion Modeling of the Human Hand Using Range Data", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXII, Part 5, pp.916-919, 1998. (1998年6月)[本論文2,3,4章に関連]

研究会発表

4. 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏: "動きの制約を用いたヒトの手の3次元形状モデリング", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU'96) 講演論文集 II, pp. 55-60, 1996. (1996年7月) [本論文2,3章に関連]
5. 安室喜弘, 陳謙, 千原國宏: "X線CT画像に基づいた手のCGモデル", 電子情報通信学会技術研究報告, EID98-145~163, pp.109-114, 1999 (1998年2月)[本論文4章に関連]

研究業績

6. 安室 喜弘, 陳謙, 千原國宏: “CG アニメーションのための手の動きのモデリング”, 情報処理学会研究報告, 99-CG-94-4, pp.19-23, 1999.(1999年2月) [本論文3章に関連]

全国大会等

7. 安室 喜弘, 陳謙, 千原國宏: “動きの制約を用いたヒトの手の3次元形状モデリング”, 第40回システム制御情報学会研究発表講演論文集, pp.85-86, 1996.(1996年5月)[本論文2,3章に関連]
8. 安室 喜弘, 陳謙, 千原國宏: “自然な動きを実現するための手の3次元形状モデル”, 第39回自動制御連合講演会(前刷), pp.357-358, 1996.(1996年10月)[本論文2,3章に関連]