

NAIST-IS-DD0361209

博士論文

複数カメラ画像を用いた人体頭部の
3次元モデリングとそのシステム化に関する研究

藤村 恒太

2006年 9月 22日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報システム学専攻

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学位論文である.

藤村 恒太

審査委員: 横矢 直和 教授 (主指導教員)

木戸出 正繼 教授 (副指導教員)

千原 國宏 教授 (委員)

複数カメラ画像を用いた人体頭部の 3次元モデリングとそのシステム化に関する研究*

藤村 恒太

内容梗概

実物体の3次元情報は、映画、放送、ゲームなどの映像制作の現場で広く利用されるようになった。特に人体・顔の3次元情報は、映像制作だけでなく生体認証、美容整形、立体造形など様々な応用展開が期待されている。現在このような分野で利用されている3次元形状計測機器の多くは、カメラと光学プロジェクターを使用したアクティブステレオ法を用いている。また全周囲の3次元情報を獲得するには、複数台の3次元形状計測機器を組み合わせてシステムを実現するのが一般的である。しかし、ここで用いられているアクティブステレオ法は、スリット光やパターン光などを投影して撮影した画像に基づき計測を行うため、物体表面の材質によっては計測不能もしくはノイズが発生するなどの課題がある。また実用化においては、プロジェクターの構造が複雑になり、カメラとプロジェクターの位置・姿勢関係の維持に高精度な機器が必要となるなど機器自体が高価になることや、複数機器間の位置・姿勢のキャリブレーション及び計測データの統合に多大な労力と時間を要するなどの課題がある。そこで、本研究では、人体頭部を対象として、操作者と被写体の負担を出来るだけ軽減し、より簡便でかつ実環境で安定した3次元モデリングが可能な実物体計測手法を提案し、実用的な3次元モデリングシステムを構築することを目的とする。まず1章では、既存の実物体計測技術と、その技術を実用化したシステム例、及び人体頭部への適用における課題について概観し、本研究の位置付けと方針を明確にする。2章では、操作者と被写体の負担を出来るだけ軽減するために、複数台のデジタルカメラとスライドプロジェクターという簡易な構成で通常光とカラーパターン投影光の下で短時間撮影した2種類の画像を用いて、対象の表面材質と模様の有無に影響されないロバストな形状計測を可能にする Shape-from-

* 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻学位論文, NAIST-IS-DD0361209, 2006年9月22日.

Silhouette 法と一度の投影・撮影で計測が可能なカラーパターンを対象物体の特徴付けにのみ使用するマルチカメラアクティブステレオ法を統合したハイブリッドモデリング手法について述べる。そして、そのマルチカメラアクティブステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期条件として領域ベースステレオ処理を適用し、サブピクセルレベルでの高精度化を実現する 2 段階ステレオ処理手法を提案する。3 章では、提案手法を用いたシステム化として、人体頭部全周囲と人体顔前面部のそれぞれを対象として、短時間自動撮影、及び撮影画像のみによる全自動キャリブレーションと全自動モデリングを実現し、操作者と被写体の負担を出来るだけ軽減する 3 次元モデリングシステムの構築について述べる。そして、実際に人物をモデリングした結果を示し、提案手法の有効性を確認する。また、本システムの具体的な応用例を示し、実用面での有用性を確認する。最後に 4 章で、本研究を総括すると共に今後の展望について述べる。

キーワード

Shape-from-Silhouette 法, アクティブステレオ法, 3 次元復元, モデリングシステム, 人体頭部・顔

Human Head 3-D Modeling and Its Systems

Using Multiple Camera Images*

Kouta Fujimura

Abstract

Three-dimensional (3-D) information of real objects has been widely used in the scene of picture production in movie industry, broadcasting industry, and game industry, etc. Especially, 3-D information of human body and face is expected not only for picture production but also for a variety of applications such as biometric authentication, cosmetic surgeries, and solid forming. Most of 3-D measurement equipments are based on an active stereo method using a camera and an optical projector. Conventional systems that are able to reconstruct the 3-D information of a whole object are made up of several units of the measurement equipment. However, some problems might occur according to the material on the surface of target object because the active stereo method is based on the appearance of projected light in captured images. As for other problems in practical use, some devices of the equipment become complex and expensive. Moreover, the calibration between equipments and the registration of estimated 3-D data are very time-consuming. This thesis proposes a novel 3-D estimation method and constructs practical modeling systems to make it possible to generate a 3-D model of real human head easily and robustly. Chapter 1 gives a perspective of the study in the area of 3-D measurement and modeling systems. In Chapter 2, a hybrid modeling method, where the shape-from-silhouette technique and the active stereo technique are combined, is proposed. The method uses a number of images captured by using

* Doctoral Dissertation, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0361209, September, 22, 2006.

multiple digital cameras and two slide projectors. We also propose a novel two-stage stereo algorithm in which area based stereo is carried out with sub-pixel estimation using results of feature point based stereo. Chapter 3 describes an automatic human head modeling system as well as an automatic human face modeling system. These systems achieve a fully automatic image capturing and a fully automatic calculation of calibration and modeling only using the captured images. Experimental results of 3-D reconstruction of real human head and face are demonstrated. Also described are some practical applications of these systems. Finally, Chapter 4 summarizes the present study.

Keywords:

shape-from-silhouette method, active stereo method, 3-D reconstruction, modeling system, human head and face

目次

1.	序論	1
1.1	実物体計測技術と3次元モデリングシステム概観	3
1.1.1	受動的ステレオ法	3
1.1.2	スリット光投影アクティブステレオ法	6
1.1.3	コード化パターン光投影アクティブステレオ法	8
1.1.4	Shape-from-Silhouette法	11
1.2	本研究の位置付けと方針	13
1.3	本論文の構成	16
2.	複数カメラとスライドプロジェクターを用いた実物体計測	17
2.1	序言	17
2.2	ハイブリッドモデリング手法	18
2.2.1	アルゴリズム概要	18
2.2.2	拡張Shape-from-Silhouette法	19
2.2.3	マルチカメラアクティブステレオ法	22
2.2.4	3次元ボクセル空間での初期形状と距離画像の統合	23
2.3	マルチカメラアクティブステレオ法と2段階ステレオ処理手法	24
2.3.1	第1段：特徴点ベースステレオ処理	27
2.3.2	第2段：領域ベースステレオ処理	28
2.4	形状計測評価実験	31
2.5	結言	34
3.	人体頭部3次元モデリングのシステム化と応用展開	35
3.1	序言	35
3.2	人体頭部全周囲全自動モデリングシステムと応用展開	36
3.2.1	システム構成	36
3.2.2	カメラ位置・姿勢キャリブレーション	38
3.2.3	全自動撮影・全自動モデリング処理	40

3.2.4	ポリゴン生成.....	41
3.2.5	テクスチャ生成.....	41
3.2.6	人体頭部の3次元モデリング実験.....	42
3.2.7	人体頭部3次元モデルの応用展開.....	52
3.3	人体顔前面部全自動モデリングシステム.....	55
3.3.1	基本システム.....	55
3.3.2	基本システムによる人体顔前面部のモデリング実験.....	66
3.3.3	大規模映像アトラクション向け並列処理システム.....	69
3.3.4	2005年日本国際博覧会（愛・地球博）での実働結果.....	71
3.4	結言.....	73
4.	結論.....	75
	謝辞.....	78
	参考文献.....	79
	研究業績.....	86

目次

図 1.1	3次元計測手法の分類	2
図 1.2	ステレオ法と三角測量の原理	4
図 1.3	光切断法の基本原理	6
図 1.4	Cyberware Laboratory社 “Head and Face Color 3D Scanner”の外観	7
図 1.5	計測ユニットの光学系	8
図 1.6	コード化パターンの例	9
図 1.7	Shape-from-Silhouette法	11
図 2.1	ハイブリッドモデリングアルゴリズム	18
図 2.2	シルエット画像生成処理手順	20
図 2.3	シルエット情報のボクセル投票処理手順	21
図 2.4	ボクセル空間でのシルエット情報の投票処理の様子	21
図 2.5	パターン画像の例	22
図 2.6	距離画像の例	23
図 2.7	距離画像のボクセル空間への投票処理	24
図 2.8	特徴点ベースステレオ処理の課題	25
図 2.9	2段階ステレオ処理の流れ	26
図 2.10	3眼ステレオ処理の概要	26
図 2.11	第1段：特徴点ベースステレオ処理手順	27
図 2.12	特徴点ベースステレオ処理の概要	27
図 2.13	第2段：領域ベースステレオ処理手順	29
図 2.14	相関サブピクセル推定	30
図 2.15	基礎実験における撮影画像例	32
図 3.1	人体頭部全周囲全自動モデリングシステムの外観	37
図 3.2	人体頭部全周囲全自動モデリングシステム内部の様子	37
図 3.3	カメラとスライドプロジェクターの配置	38
図 3.4	参照物体の撮影画像例	39
図 3.5	カメラ位置・姿勢キャリブレーション処理手順	39
図 3.6	モデリング処理プログラムの初期画面	40

図 3.7	男性の撮影画像例.....	42
図 3.8	男性のモデリング結果例.....	43
図 3.9	女性の撮影画像例とモデリング結果例.....	43
図 3.10	距離画像による比較.....	44
図 3.11	最終形状の比較 (その1)	45
図 3.12	最終形状の比較 (その2)	46
図 3.13	低解像度画像使用における距離画像による比較.....	47
図 3.14	低解像度画像使用における最終形状による比較.....	48
図 3.15	2段階手法での各解像度における最終形状による比較.....	49
図 3.16	人体寸法データベースの頭部計測項目	51
図 3.17	表示ソフトウェアによる2点間直線距離の計測の様子.....	51
図 3.18	人体頭部3次元モデルの応用展開例	53
図 3.19	映像アトラクションの流れ.....	56
図 3.20	基礎実験① 髭なし顔の処理画像.....	58
図 3.21	基礎実験① 髭なし顔のモデリング結果.....	58
図 3.22	基礎実験① 髭あり顔の処理画像.....	59
図 3.23	基礎実験① 髭あり顔のモデリング結果.....	59
図 3.24	基礎実験②条件Iのモデリング結果.....	61
図 3.25	基礎実験②条件IIのモデリング結果.....	61
図 3.26	基礎実験②条件IIIのモデリング結果.....	62
図 3.27	基礎実験②条件IVのモデリング結果.....	62
図 3.28	基礎実験②条件Vのモデリング結果.....	63
図 3.29	基礎実験②条件VIのモデリング結果.....	63
図 3.30	基本システムの様子.....	65
図 3.31	基本システムの概略.....	65
図 3.32	人体顔前面部の撮影画像例.....	67
図 3.33	人体顔前面部のモデリング結果.....	67
図 3.34	人体顔前面部のモデル例	67
図 3.35	最終基本システムの概観.....	68
図 3.36	大規模映像アトラクション向け並列処理システムの構成.....	70

表目次

表 1.1	人体頭部3次元モデリングシステムに対する実物体計測技術の特性	13
表 2.1	形状計測精度の比較	33
表 3.1	モデリング時間の比較	49
表 3.2	頭部寸法計測結果の比較	50
表 3.3	3次元モデリング応用分野の主な要求仕様	52
表 3.4	基礎実験②の機器台数条件	60

1. 序論

近年、3次元コンピュータグラフィックスにおける実物体の3次元情報は、映画、放送、ゲームなどの映像制作現場で広く利用されると共に、一般ユーザにとってもより身近な存在になり、よりリアリティの高いものが求められるようになってきた。特に人体・顔の3次元情報は、映像制作だけでなく生体認証、美容整形、立体造形などの様々な応用展開が期待されている。しかし、実在する3次元物体をありのままにデジタル化することは、装置の価格、使い勝手、対象への制限などから容易ではないため、結局、モデリングソフトなどを用いて人手によって多大なコストで制作されているのが現状である。このような背景から、実物体の3次元情報を自動で獲得する計測技術やシステム化技術は、現在も広く研究・開発が進められている分野の一つである。

3次元形状計測手法は、大きく分けると接触式と非接触式の2つに分類される。図 1.1 に、主な3次元計測手法の分類を示す。接触式は、主にプローブ(probe)と呼ばれる計測機器先端部分で直接対象物に触れ、接触点の3次元座標を獲得する手法である。接触点は確実に計測可能であるが、物体全体を計測するには、多くの点を手作業で計測する必要があるため、膨大な計測時間と多大な労力が必要となる。また、長時間の静止が困難な対象の計測には不向きである。そのため小型の静止物体の形状計測や簡易な形状入力及び2点間の距離の計測などへの応用が主体となっている。

これに対し非接触式は、光、電波、及び音波などの計測のために制御されたエネルギーを照射する能動的(active)手法と、このようなエネルギーを照射しない受動的(passive)手法とに分類される [井口 90]。一般的に、能動的手法は、照射されたエネルギーの状態を観測することで計測を行うため、エネルギーを適切に制御することにより良好な観測が得られた場合には高精度な計測が可能であるが、対象物体の表面の材質によっては観測が不可能、もしくはノイズが発生するといった問題が生じる。一方、受動的手法は、能動的手法に比べると対象物体の表面の材質に影響されにくいという特徴がある。しかし、画像に写った対象物体の色彩情報や輪郭情報などの特徴に基づいて3次元情報を獲得するため、観測可能な特徴の数や精度が計測結果に影響する。

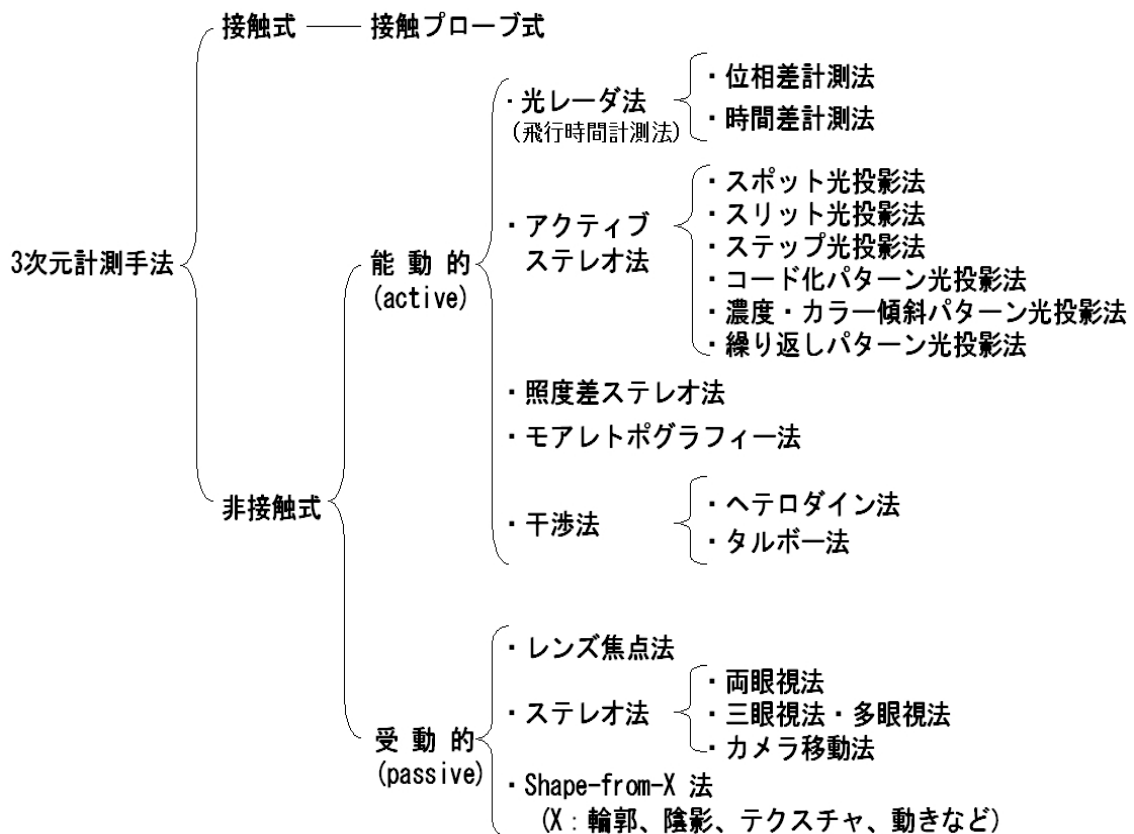


図 1.1 3次元計測手法の分類

これらの非接触式計測手法は、その実用化において各手法の特徴を生かした分野に応用展開されている。例えば、能動的手法の光レーダ法（飛行時間計測法）は、主に物体までの距離が十メートル以上の長距離の計測に、干渉法は、主にナノメートルからマイクロメートル程度の微細距離の計測に用いられている。これは、他の能動的手法が基本的に三角測量の原理に基づいているため、物体までの距離が長い場合に必要な精度を得るための光源と視点の間の距離（基線長）を十分にとることが困難であったり、微細距離を計測するには機器の小型化が困難であったりするのに対し、光レーダ法や干渉法では、光源と視点の光軸が同一であり、それぞれ長距離、微細距離の計測に適しているためである。その他の計測手法は、主に数十センチメートルから数メートル程度までの近距離の計測に用いられている。本研究では、今後、映像制作・個人認証・造形などの様々な応用展開が期待される人体・顔を中心とした近距離の物体の計測を対象としている。

以下では、近距離の計測手法の中でも実用化例の多い4つの手法(受動的ステレオ法, スリット光投影アクティブステレオ法, コード化パターン光投影アクティブステレオ法, Shape-from-Silhouette 法)について, その技術を実用化されたシステム例と共に概観し, 人体頭部と顔の自動モデリングへの適用における課題について述べる. そして, 本研究の位置付けと方針について明確にする.

1.1 実物体計測技術と3次元モデリングシステム概観

本節では, 近距離の計測手法の中でも近年実用化例の多い4つの手法について, その技術概要を実用化されたシステム例と共に示し, 人体頭部と顔の自動モデリングへの適用における課題について述べる. 4つの手法とは, カメラのみの構成で小型・軽量・安価なシステムが構築可能な受動的ステレオ法, レーザ光とカメラで構成され高精度な計測システムが実現可能なスリット光投影アクティブステレオ法, ハロゲン光とカメラで構成され人体にも安全・安心なシステムが構築可能なコード化パターン光投影アクティブステレオ法, 及び対象物体の表面の材質や照明環境に影響されない安定したシステムが構築可能な Shape-from-Silhouette 法である.

1.1.1 受動的ステレオ法

受動的ステレオ法とは, 人間の両目のように, あるがままの世界をそのまま観測する受動的な計測法の代表である [井口 90]. これは, 図 1.2(a)に示すように, 視点位置の異なるカメラで撮影された複数枚の画像を用いて, 画像に写っている物体上の1点の3次元座標を, 視点の位置とその物体上の点と各画像中に写った点の位置関係(視線)から, 三角測量の原理で計算するものである. ここで三角測量の原理とは, 図 1.2(b)に示すように, 三角形の一边の距離と2つの角度が分かれば, 他の辺の距離が求まるという原理である. つまり, 図中の A と B がカメラの視点であり, C が物体上の1点であるとすれば, A と B の距離が分かっている, A と B から C の見える方向(視線)が分かるとき, A と C, B と C のそれぞれの距離が求まるということである.

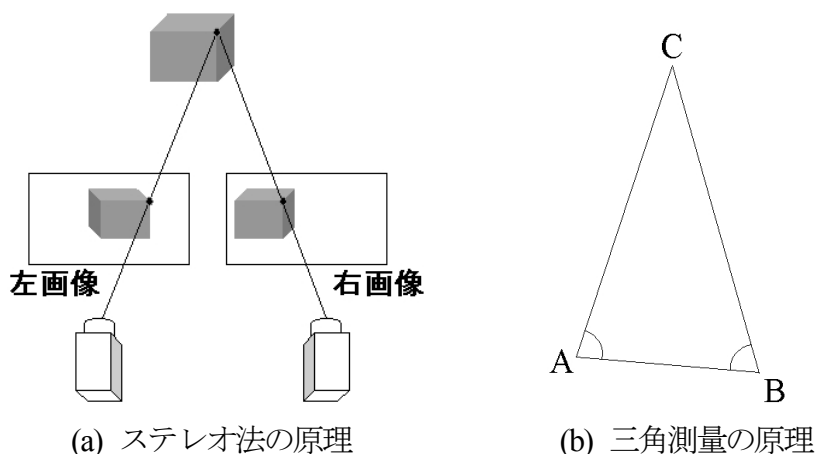


図 1.2 ステレオ法と三角測量の原理

受動的ステレオ法における計算問題は、大きく分けると以下の3つの計算問題に分けられる。

1. 複数台のカメラの位置関係を求める計算問題
2. 実際の物体が画像中でどのように写るかを求める計算問題
3. 物体上の1点が複数の撮影画像中のどこにあるかを求める計算問題

1は、3次元空間全体の座標系と、カメラの視点を原点としたカメラ座標系との関係を求める計算問題で、この関係はカメラの外部パラメータと呼ばれている。2は、3次元物体がカメラの画像にどのように写るかに関係するカメラの焦点距離や撮像素子の大きさなどを求める計算問題で、これらはカメラの内部パラメータと呼ばれている。そして3は、ある画像中の物体の1点が他の画像中のどこにあるかを求める問題で、対応点探索と呼ばれている。これら1と2は、いずれもカメラキャリブレーション(camera calibration)と呼ばれ、計算に用いる特徴点について既知の位置関係が3次元である Tsai の手法 [Tsa86]や、より簡便な手法として既知の位置関係が2次元である Zhang の手法 [Zha00] など、数多くの研究がなされている。3の対応点探索は受動的ステレオ法において最も重要な課題であり、探索の処理単位によって、特徴点ベース手法と領域ベース手法に分類される。特徴点ベース手法は、画像中で輝度が急激に変化する点（エッジやコーナーなど）を特徴点として抽出し、特徴点同士で対応点探索を行うため、領域ベース手法に比べると処理が速く、照明の変化やノイズに強いという特徴がある。また構造的特徴を

利用することで、より安定した処理が可能であるという特徴もある。しかし、特徴点単位の処理であるため計測結果がまばらにしか得られず、計測精度は特徴点の抽出精度に依存するという欠点がある。一方、領域ベース手法は、画像中の各点に対してあらかじめ設定した領域単位で類似度を計算することにより対応点探索を行うため全画素における対応が得られ、繰り返し計算のみで処理が可能のためハードウェア化に適しているという特徴がある。しかし、照明が不均一であるなどによる輝度の変化や視点の違いによる見え方の変化に弱いため、視点間の距離を長くできない。さらには計算量が膨大になるといった欠点がある [LT96]。対応点探索のアルゴリズムにおいては、近傍の対応づけの関係を最適にする動的計画法を用いた手法 [OK85]や対応点探索の計算時間を短縮する多重スケールを用いた手法 [横矢 93]など様々な手法が提案されている。さらには、3台以上のカメラを用いた3眼ステレオ法 [YKK86]やさらに多くのステレオ画像対の類似度情報を足し合わせて最も確からしい対応位置を決定するマルチベースラインステレオ法 [OK93]などが提案されている。また、高精度化を実現するために画素単位の処理に加えて1画素未満の単位で処理を行うサブピクセル推定手法 [清水 02]も提案されている。しかし、いずれも上記欠点を完全に解決するものではない。

受動的ステレオ法を実用化したシステム例としては、2台もしくは3台のカメラを固定して領域ベース手法で距離画像を実時間で取得するシステムとして、撮影した画像をソフトウェアで処理する Point Grey Research 社の”Bumblebee2”, ”Digiclops” [Poi06], 及び Videre Design 社の”Small Vision System” [Vid06], ハードウェアで処理する Focus Robotics 社の”nDepth Vision System” [Foc06], 及び Tyzx 社の”DeepSea High Speed Stereo Vision System” [WGB04]などがある。いずれも領域ベースステレオ手法を採用しているが、形状を正確に再現する精度はないため、主に人物追跡や障害物検知に応用されている。また、最近では車載用の前方立体物検知に応用された例もある [埜 05]。しかし先に述べたように、受動的ステレオ法では撮影した画像の特徴や輝度の明暗の情報を用いるため、模様のない一様な表面の物体の3次元計測は困難であるという課題がある。これを解決するために、Cognitens 社の”Optigo” [Cog06]や VX Technologies 社の”StarCam” [Vxt05]では、非一様な模様をプロジェクターで投影して撮影し、ステレオ処理を行っている。ただしこれらは、光を投影するという意味では、アクティブステレオ法に分類される。

これらのシステムを人体頭部と顔の3次元モデリングに適用する場合に、パターンを投影しないシステムでは、顔のように模様の少ない表面形状は精度が十分に得られない可能性があり、パターンを投影するシステムの方が有効であるといえる。また、人体頭

部の全周囲の3次元モデルを獲得するためには、複数台のシステムを用いるか、1台のシステムを移動して、それぞれ部分的に獲得し、後で結果を統合するという方法が考えられる。しかし、前者はシステム間の位置・姿勢関係のキャリブレーションが容易ではなく、後者はデータの取得に時間がかかるという実用上の課題がある。

1.1.2 スリット光投影アクティブステレオ法

スリット光投影アクティブステレオ法とは、図 1.3 に示すように、光源にレーザ光を使用し、レンズやミラーによりシート状に加工された光（一般的にスリット光と呼ばれる）を対象物体に照射して、その対象物体上の光の様子を光源に近接して設置したカメラで撮影することで、その画像とあらかじめ求められた光源位置、カメラ位置から三角測量の原理で距離を計測する手法である。あたかもスリット光で物体を切断するかのように見えることから、光切断法とも呼ばれている[吉澤 93]。この光切断法による物体形状計測は、受動的ステレオ法に比べると対応点探索が不要で計算の高速化が可能であると共に、光を投影した計測で対象物体の表面の模様に影響されない高信頼な計測が可能である。一方、光切断法を用いた物体全体の計測は、スリット光を移動する、もしくは物体を回転させることで複数回の投影と撮影を行うことで可能となるが、処理の回数分だけ計測時間が長くなるという問題がある。この問題を解決するために、高速駆動が可能なミラーを用いたスリット光走査の高速化 [小関 85]や撮像系として CCD カメラの代わりに位置検出素子(PSD: Position Sensitive Device)を用いた3次元座標計測の高速化 [荒木 88]が行われている。この位置検出素子は、当初その画素数が128×128画素と形状計

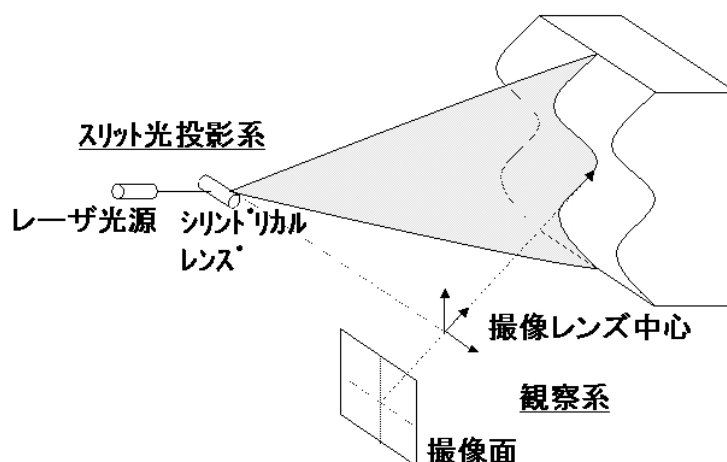


図 1.3 光切断法の基本原理

測には不十分であったが、最近では640×480画素の解像度を有する素子を用いたシステムも報告されており [大池 03], 高精度な実時間3次元動画撮影への展開が期待されている。

光切断法を実用化したシステム例としては、まず基本的なレーザスリット光と CCDカメラで構成されるコニカミノルタ社の“Vivid” [コニ 06]が挙げられる。これは1方向からの計測が可能で、主に工業用の検査やリバースエンジニアリングに用いられている。しかし、広範囲な計測や物体全周囲の計測には、複数台によるもしくは移動による複数回の計測やその計測結果の統合が必要となり、操作者の負担が増大するという問題がある。これに対して、Cyberware Laboratory 社の“Head and Face Color 3D Scanner” [Cyb99]では、図 1.4 (a)に見られるように、被写体の回りを計測ユニットが自動回転する機構を設け、実物体の全周囲自動計測が行える。また、図 1.4 (b)の計測ユニットは、図 1.5 に示すように、被写体に対して正面からレーザによってスリット光を投影し、ミラーを利用して両サイドの画像として1台のカメラで取り込むことを可能にしており、可能な限り死角を少なくしている。ただし、対象物体の大きさが比較的小さなものに限られ、物体の形状によっては上部の計測は行えないという問題がある。

本システムを人体に適用する場合には、光を吸収する頭髪部の精度が悪いことや全周囲計測に17秒という長い時間がかかってしまうことが実用上の課題である。また、人体



(a) システム全体



(b) 計測ユニット

図 1.4 Cyberware Laboratory 社 “Head and Face Color 3D Scanner”の外観

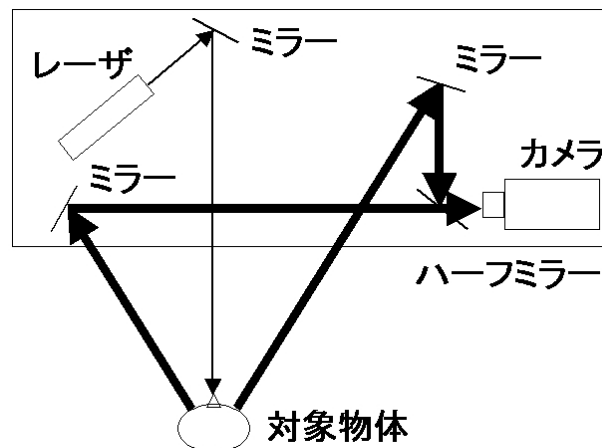
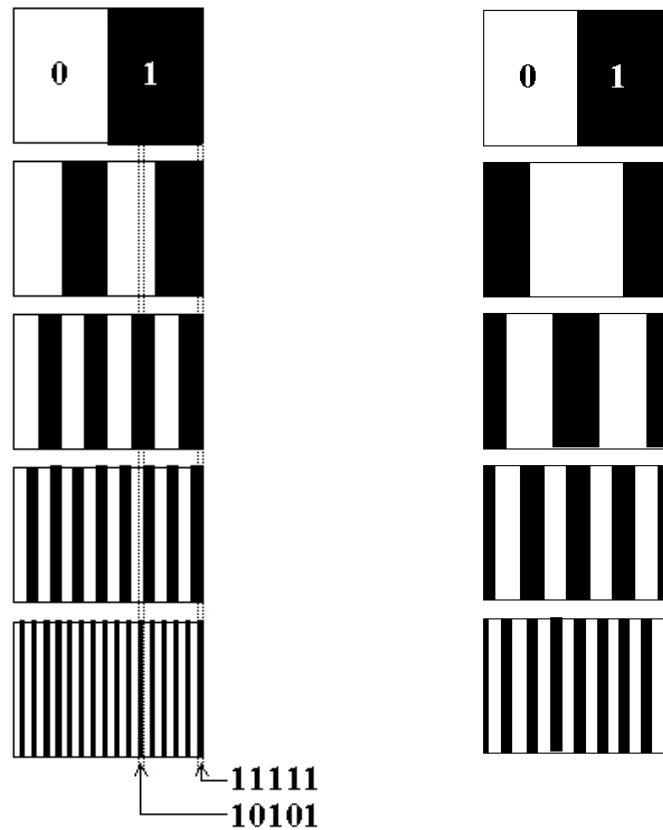


図 1.5 計測ユニットの光学系

に対する危険性はレーザの出力を抑えることで回避することができるが、心理的な不安は拭い切れないという問題がある。そして、レーザの走査機構やカメラの同期撮影機構、及びレーザとカメラの高精度な治具などが必要となり、装置が高価になることも導入時の課題として挙げられる。一方、VITRONIC 社の“VITUS” [Vit01]、浜野エンジニアリング社の“Voxelan” [浜野 06]、及び浜松ホトニクス社の“Bodyline Scanner” [浜松 06]では、光切断計測ユニット 4 台もしくは 8 台を四隅に配置したシステムを実現するなど、高速化や低価格化を目指して改良が加えられているが、計測時間が 5 秒から 15 秒と長く、色彩情報が得られないなどの課題がある。

1.1.3 コード化パターン光投影アクティブステレオ法

コード化パターン光投影アクティブステレオ法とは、1.1.2 節で述べた光切断法が、対象物体の 3 次元情報を得るために、その空間をスリット光で走査して複数回の撮影処理が必要であったのに対し、2 次元空間的に 2 進数のようなコードで符号化されたパターンを投影して、より少ない投影回数で 3 次元情報を得る方法である。コード化パターンとして一番実用化例の多いパターンは、バイナリコードパターンとグレーコードパターンである [井口 90, PS+03]。バイナリコードパターン光投影法とは、図 1.6(a)に示すように、2 値のパターンを再分割して構成される複数のパターンを次々に投影することで、各領域を 2 進数のコードで特徴付けを行い、光源と物体上のパターン境界とカメラの位置関係を特定することを可能とし、3 次元計測を容易にする計測手法である。図 1.6(b)に示したグレーコードパターンは、バイナリコードパターンを用いた場合にパターンの



(a) バイナリコードパターン (b) グレーコードパターン

図 1.6 コード化パターンの例

位置ずれや2値化の誤りで生じるコード化誤りを改善したパターンである[VM98]. これらのコード化パターンでは, 一番細かい投影パターンの分解能つまりストライプの間隔で分解能が決定される. しかし, パターンをフィルムで生成する場合でも液晶パネルで生成する場合でも, その微細化には限度がある. これに対し, コード化パターンに加えて正弦波パターンの位相シフトを導入して高精度化する手法, ラインパターン (マルチスリット) を細かくずらした複数枚のパターンを投影する手法とそのラインパターンの中心をサブピクセル精度で求める手法を組み合わせる高精度化する手法[Guh01]が提案されている. 一方, 複数のパターンを投影した複数回の撮影が必要なため, 撮影に時間がかかるという課題もある. これに対して, 現在ではパターンを高速に切り替えることが可能な液晶プロジェクターが広く利用されている. また, カラーパターン[田島 90, Sat99]や濃度傾斜変調パターン[MK+00]を用いて投影回数を削減し, 高速化する試みも

提案されている。一般的にカラーパターンを使用する場合は対象物の色に影響されるが、プリズムを通して得られる虹色のパターンを2種類のフィルターを通して撮影した2枚の白黒画像の比を用いることで、物体の色に影響されない手法を実現している[田島90]。しかしこの手法は、複雑な光学系が必要となるという課題があった。この課題を解決する手法として、虹色の縦縞パターンをHUV表色系におけるHueの位相を1/3ずつシフトさせた3つのパターンを投影して撮影した3枚のカラー画像を、逆にシフトして統合することで物体の色の影響を削除する手法[Sat99]が提案されている。しかしこれらいずれの手法も高価な液晶プロジェクターと2枚以上のパターン投影撮影が必要であることに変わりはない。これに対しては、1枚のカラーパターンを投影して2台のカメラで撮影し、ステレオ処理を行う手法[CH+97]が提案されている。しかし、対象物の色の影響問題は解決されているが、特徴点ベースステレオ処理のみを用いており、その課題が解決されていない。

コード化パターン投影法を実用化したシステム例としては、カメラ1台とプロジェクター1台の構成でバイナリコードパターンにマルチスリット走査を加えた手法を用いたJFEテクノロジー社の”TriDY”[JFE04]とInSpeck社の”3D Capturor”[InS05]、カメラ2台とプロジェクター1台で縦縞のグレーコードパターンとマルチスリット走査に横縞のマルチスリットパターン1枚を加えたBREUCKMANN社の”faceSCAN”[Bre06]、カメラ2台とプロジェクター1台で空間コード化法と位相シフト法とステレオ法を併用したGOM社の”ATOS”[Gom06]、多眼正弦波格子位相シフト法を用いて、カメラ2台とプロジェクター2台で2方向からの自動計測を実現したNEC社の”Danae”[Nec06]などが挙げられる。

これらのシステムを実物体計測に応用する際の利点は、いずれのシステムも撮影時間は1秒程度で高速であること、また人体を対象とした場合は、ハロゲン光を用いていることにより、レーザを用いるよりも人体に影響が少なく精神的な負担も少ないこと、及び頭髮の復元可能性があることが挙げられ、現在顔の入力では幅広い分野で活用されている。一方欠点としては、パターンを高速に切り替え、かつそれに同期して撮影を行うための装置が複雑で高価になること、全周囲計測を行う場合に複数台のシステムを使用する必要があり、システムがさらに高価になることや各システム間のキャリブレーションが容易ではないこと、及び計測結果の統合に手間がかかり自動化の妨げになるなど操作者の負担が増大することが挙げられる。

1.1.4 Shape-from-Silhouette 法

Shape-from-Silhouette 法（視体積交差法とも呼ばれる）とは、図 1.7 に示すように、物体全体を複数の位置からカメラで撮影し、得られた画像中の物体領域情報（シルエット情報）をカメラの位置情報に基づき 3 次元空間中に逆投影することにより、その複数の投影錐体（視体積）の重複（視体積交差）部分として、対象物体の形状を得る手法である。これは、「対象物体は、任意の視点から撮影して得られる物体の 2 次元シルエットを実空間に投影して得られる錐体の中に含まれる」というシルエット制約[Bak77]に基づいている。また、特別な光を照射することなく撮影された画像から 3 次元情報を獲得するため受動的な手法に分類され、一般的に Shape-from-X（X には、Silhouette（シルエット）もしくは Contour（輪郭）、Shading（陰影）、Texture（色彩）、Motion（動き）などがある[GW87, Hor75, Mar82, Wit81, Ull79]）と呼ばれている手法の一つである。Shape-from-Silhouette 法による 3 次元形状復元の手法の最も基本的な手法として、ボクセルベース手法がある。ボクセル（Voxel）とは、物体の存在する 3 次元空間に設定された処理空間を分割した単位立方体のことを呼ぶ。ボクセルベース手法のアルゴリズムは、ボクセルを各シルエット画像上に逆投影して、一つでもシルエット外に投影されたらそのボクセルは物体外と判定する方法と、全てのシルエット画像をボクセル空間に逆投影

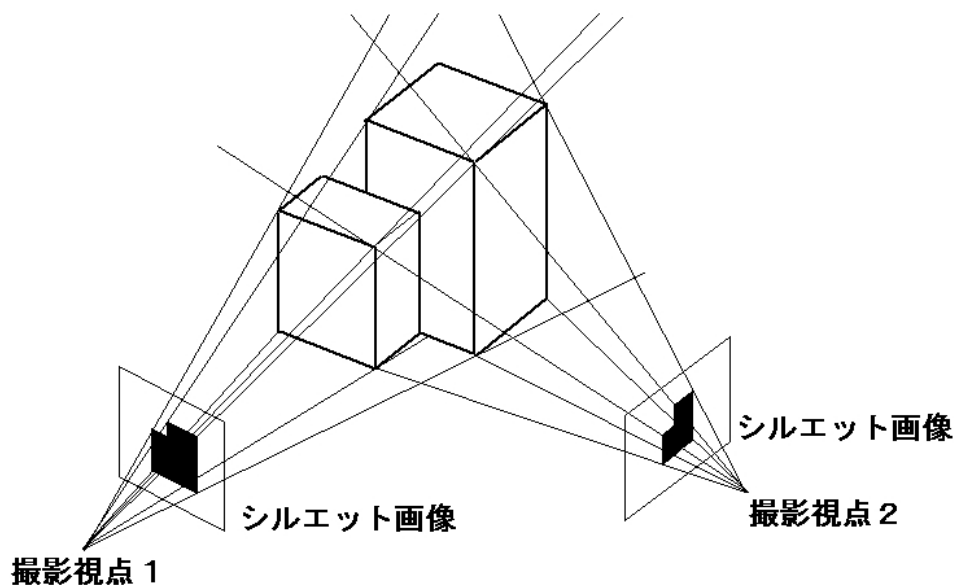


図 1.7 Shape-from-Silhouette 法

して、全てのシルエットが投影されたボクセルを物体内と判定する方法に大別される。前者は後者に比べるとより少ない記憶容量で実装可能である。後者はシルエット毎の処理が可能で並列化に向いている。この後者を利用して処理を高速化する手法[ウ 01]が提案されている。またこれとは別に、ボクセル空間を八分木表現することで、使用する記憶容量の削減と高速化を実現する手法[Sze93]も提案されている。一方、ボクセルベース手法は、処理が単純で実装し易いという利点があるが、最終的に得られる形状の分解能がボクセルの分解能に依存するという課題がある。これに対して、ボクセルベース手法において、シルエットの輪郭を投影する投影線 (Ray) がボクセルの各辺と交差する点の情報を保持することにより、ボクセルの分解能に依存しない形状復元を実現する **Marching Intersections** 法[TC+02]が提案されている。また、シルエットの輪郭を多角形で近似して、多角形の各エッジを3次元空間の3次元ポリゴンに逆投影して交点を求め、3次元ポリゴンを更新する多角形ベース手法[MBM01]も提案されている。しかし、これらはいずれも処理が複雑になるという課題がある。この他に、**Shape-from-Silhouette** 法では、シルエットの抽出誤りによる欠損があった場合に、そのまま結果に反映されるという問題があった。これに対しては、ボクセルベース手法において、シルエット内のボクセルには1を加算するボクセル投票処理を全てのシルエットと全てのボクセルについて処理した後、閾値以上の値を持つボクセルを物体内部と判定することで、多少のシルエットの抽出誤りを許容する手法[MFK99a]が提案されている。

Shape-from-Silhouette 法を実用化したシステム例としては、Scanbull 社の”Scanbook” [Sca06]、SOLISYS 社の”RealModelist” [Sol06]、Creative Dimension Software 社の”3DSOM” [Cre06]などがある。 ”Scanbook” は、1 台の CCD カメラ、パーソナルコンピュータ (Personal Computer : 以下、PC と記す) で制御可能な自動回転台、及び単一色の背景板からなり、物体を撮影後、一定角度回転させることを繰り返すことにより周囲から複数枚の画像を撮影し処理することで、全周囲の形状とテクスチャを全自動で獲得する。ただし、このシステムでは事前にカメラと回転台の相対位置・姿勢関係を算出するキャリブレーション作業が必要で、ユーザの負担となっている。これに対し、”RealModelist”では、回転台に位置・姿勢情報検出用マークを付加して、対象物体撮影時にそのマークを含んで撮影してマークを自動解析することにより、事前の位置・姿勢キャリブレーションを不要にし、ユーザの負担を軽減している。 ”3DSOM”は、回転台を使わず、撮影者が移動する、もしくは物体を置いたシートを物体と一緒に動かすことにより全周囲撮影を行うことで、安価で簡易なシステムを実現している。これもまた”RealModelist”と同様に

物体を置くシートに位置・姿勢情報検出用のマークを付加して、位置・姿勢キャリブレーションの自動化を行っている。

これらのシステムを実物体計測に応用する際の利点は、計測手法が対象物体の表面材質の影響が少ないため幅広い物体を対象とすることが可能であること、現在広く普及しているデジタルカメラが使用可能で容易に写真画質のテクスチャ情報を獲得できること、及び簡易な機器構成で実現でき操作者の負担を軽減できることが挙げられる。しかしながら、Shape-from-Silhouette 法ではシルエットの輪郭に現れない形状が再現できないという課題があり、人体頭部に適用する場合は、顔部分の再現が困難となる。また、人体全周囲を計測するために、回転台に人体を載せて回転させる場合には、撮影時間が長くなり被写体に負担がかかること、回転による人体の揺れなどで計測結果の信頼性が落ちることなどの課題もある。

1.2 本研究の位置付けと方針

人体頭部と顔の自動モデリングシステムに要求される項目を整理し、その項目について 1.1 節で述べた実物体計測技術を用いたシステムの特徴をまとめたものを表 1.1 に示す。1.1 節で述べたように、現在実用化され幅広く利用されている 3 次元形状計測装置の多くは、カメラと光学プロジェクターを使用したアクティブステレオ法を用いている。

表 1.1 人体頭部 3 次元モデリングシステムに対する実物体計測技術の特性

システム要求項目		受動的ステレオ法	スリット光投影 アクティブステレオ法	パターン光投影 アクティブステレオ法	Shape-from-Silhouette 法
再現性	形状	△	○	○	△
	色	○	△	△	◎
被写体の負担	速度	○	○	○	×
	安定性	△	△	△	○
	安全性	○	×	△	○
操作者の負担	全自動	○	○	○	◎
	全周囲	×	×	×	◎
	メンテナンス	○	△	△	○

また全周囲の3次元情報を獲得するには、複数台の3次元形状計測機器を組み合わせるシステムを実現するのが一般的である。しかし、ここで用いられているアクティブステレオ法は、スリット光やパターン光などを投影して撮影した画像に基づき計測を行うことにより、表 1.1 に示すように、形状の再現性が高く、1方向からの計測における計測時間は短い、計測専用のカメラを用いているため色の再現性に劣り、物体表面の材質によっては計測不能もしくはノイズが発生するなど安定性の面での課題や、撮影時にレーザー光を使用する場合には安全面での被写体の心理的な負担が増大するという課題がある。また、そのシステム化においては、プロジェクターの構造が複雑になり、カメラとプロジェクターの位置・姿勢関係の維持に高精度な機器が必要となることや機器自体が高価になるなどの導入時やメンテナンス時の操作者の負担が増大することや、全周囲計測の場合に複数機器間の位置・姿勢のキャリブレーション及び計測データの統合に多大な労力と時間を要するなど操作者の負担がさらに大きくなるという課題がある。受動的ステレオ法は、撮影画像のみによる処理が可能で、色の再現性、被写体の安全性、導入時やメンテナンス時の作業負担において優位であるが、対象物体の表面の様子が少ない場合に形状計測精度が十分ではなくなり、全周囲の計測はアクティブステレオ法と同様に操作者の負担が大きいという課題がある。一方、Shape-from-Silhouette法は、受動的ステレオ法と同様の優位性があり、かつアクティブステレオ法や受動的ステレオ法に比べて対象物体の表面材質の影響が少ないという特徴と全自動処理及び全周囲モデリングが容易であるという特徴がある。しかし、シルエットの輪郭に現れない形状が再現できないという課題があり、特に人体頭部に適用する場合には、顔部分の再現が困難となる。また、既存のシステムでは全周囲撮影に時間がかかり被写体の負担が増大するという課題もある。これらの特性をまとめた表 1.1 を見ると、Shape-from-Silhouette法とその他の手法はお互いの短所を長所で補う関係にあることがわかる。近年、この特徴に着目し、複数の方式を統合した手法[ZG98, MFK99b, LS01, LS+02, CBK03]が提案されている。しかし、いずれも受動的ステレオ法と組み合わされており、色彩情報が少ない人体頭部や顔への適用は依然として困難である。これに対してShape-from-Silhouette法とアクティブステレオ法を併用した手法[TSK02]も提案されているが、これはレーザースリット光を投影する手法で、システムとしては回転台を使用しており、このままでは計測に時間がかかり人体には適用できないという課題がある。

本論文では、産業上発展が期待される映像コンテンツ分野やセキュリティ分野に幅広く貢献できる人体頭部と顔を対象として、これまで課題であった操作者と被写体の両ユ

一ザの負担を出来るだけ軽減し、より簡便でかつ実環境でも安定して3次元モデリングを行うことが可能な実物体計測手法を提案し、実用的な3次元モデリングシステムを構築することを目的とする。ここで、より実用的なシステムを実現するために解決しなければならない課題は以下のようにまとめられる。

1. モデルとシステムの実用性の向上：実用的な精度と色彩のモデルの生成とその処理の安定化
2. 被写体の負担の軽減：計測に必要なデータ取得の高速化
3. 操作者の負担の軽減：データ取得から最終出力までの自動化と高速化、及びキャリブレーション作業の簡素化

そこで本論文では、対象物体の表面材質と模様の有無に影響されないロバストな形状計測を可能にする、ボクセル投票に基づく Shape-from-Silhouette 法と、一度の投影・撮影で計測が可能なカラーパターンを被写体への特徴付けにのみ使用するマルチカメラアクティブステレオ法をボクセル空間で統合するハイブリッドモデリング手法、及びそのステレオ法において特徴点ベースステレオ処理に領域ベースステレオ処理を追加した2段階ステレオ処理手法を提案し、頭髪や髭などを含む全体形状の再現と目鼻口耳などの詳細形状の再現を同時に可能にする。これにより実用的な精度の3次元モデルの生成を安定して実現する。次に、そのシステム化において、高精細な画像が取得可能な市販のデジタルカメラと人体への影響が少なく心理的な負担も少ないスライドプロジェクターを、被写体を囲むように複数台設置して PC で制御することで全自動高速撮影を実現し、色の再現性の向上と被写体と操作者の負担の軽減を図る。そして、撮影データからの3次元形状計測、ポリゴンデータ生成、及びテクスチャデータ生成による3次元モデル生成を自動化し、実用的な全自動モデリングシステムを構成する。また、ここで投影されるカラーパターンを被写体への特徴付けにのみ使用するステレオ処理アルゴリズムにより、カメラとプロジェクターの位置・姿勢キャリブレーションを不要とし、かつ高精度な治具を必要としない簡易なシステム構成を可能にする。そして、カメラ同士の位置・姿勢キャリブレーションにおいても参照物体を撮影した画像のみで自動計算を実現することで導入時やメンテナンス時の作業負担を軽減し、合わせて操作者の負担の軽減を図る。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである。2章では、ボクセル投票に基づく Shape-from-Silhouette 法とカラーパターン投影によるマルチカメラアクティブステレオ法を統合したハイブリッドモデリング手法について述べる。そして、そのステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期条件として領域ベースステレオ処理を適用し、サブピクセルレベルでの高精度化を実現する2段階ステレオ処理手法を提案する。また、形状が既知の円筒物体を対象物体とした定量的な評価実験を行い、提案手法の有効性を確認する。3章では、まず人体頭部全体をモデリング対象として、全周囲の形状とテクスチャを全自動で取得することに主眼を置いて、複数台のデジタルカメラとスライドプロジェクターで構成したシステムと全自動モデル生成のための各処理手法について述べる。また、実際に人体に適用した実験結果とその具体的な応用展開例を示し、本手法の有用性を確認する。次に、本手法とシステムの実用性が高く評価されて2005年日本国際博覧会の大規模な映像アトラクションにおける人体顔前面部の3次元入力装置として高速化と小型化に主眼を置いて構築した全自動モデリングシステムについて述べる。ここでは、その機器構成を決定するための基礎実験とその結果構築した基本システムについて述べ、実際のモデリング例を示す。また、その大規模映像アトラクションにおいて、限られた時間内に多くの来場者を処理することを目的に、複数の基本システムの同時制御を実現した並列処理システムについて述べ、その実働結果を示し、実用面での有用性を確認する。4章では、本研究を総括すると共に今後の展望について述べる。

2. 複数カメラとスライドプロジェクターを用いた実物体計測

2.1 序言

人体頭部と顔前面部を対象に、対象物体の表面材質と模様の有無の影響が少ないロバストな手法として、ボクセル投票に基づく Shape-from-Silhouette 法とカラーパターン投影によるマルチカメラアクティブステレオ法を統合したハイブリッドモデリング手法について述べる。

本章では、複数台のカメラとスライドプロジェクターを用いて短時間で撮影した2種類の画像を用いて実物体の計測を行う。まず、通常光において撮影された複数枚の画像から抽出した対象物体のシルエット情報を用いて、ボクセル投票に基づく Shape-from-Silhouette 法により、ボクセル空間で対象物体の形状をロバストに再構成し、初期形状とする。次に、カラーパターンを投影して撮影した複数枚の画像を用いて、マルチカメラアクティブステレオ法により、詳細な形状情報として距離画像を得る。この際、初期形状を再投影して得られるシルエット情報を用いて画像中の処理範囲を限定すると共に、初期形状を用いて対応点探索の範囲を限定することにより、処理の高速化と高精度化を実現する。また、そのステレオ処理において、特徴点ベースステレオ処理に領域ベースステレオ処理を追加した2段階ステレオ処理手法を適用することにより、処理のさらなる高精度化を実現する。ここでは、前段の結果を初期値にして、後段においてその対応点の近傍のみを探索範囲とすることにより、実用的な時間でより多くの正しい計測結果を得ると共に、さらに隣接点の相関値を用いた2次関数当てはめ（パラボラフィッティング）によるサブピクセル推定を導入し、全体として形状再現性向上を実現する。そして最後に、ステレオ処理で得られた複数方向からの距離画像をボクセル空間で統合し、最終形状を得る。ここでもボクセル投票に基づく処理を適用することで、多少の距離算出エラーを許容し、実用的で安定した形状計測を実現する。

2.2 ハイブリッドモデリング手法

2.2.1 アルゴリズム概要

本論文では、対象物体を複数台のカメラを用いて、まず通常光下で同時撮影を行い、続いてカラーパターン光を投影して同時撮影を行い取得した2種類の複数枚の画像を用いて、図 2.1 に示す手順で最終形状を得る。本アルゴリズムでは、まず、通常光の撮影画像から抽出したシルエット情報を用いて、ボクセル投票に基づく Shape-from-Silhouette 法（以下、拡張 Shape-from-Silhouette 法と記す）により初期形状を得る。続いて、これらの情報とカラーパターンを投影して撮影した画像を用いて、マルチカメラアクティブステレオ法により距離画像を得る。次に、得られた初期形状と複数方向からの距離画像を3次元ボクセル空間上で統合して、最終形状を得る。そして最終形状をポリゴン表現し、各ポリゴンのテクスチャ情報を通常光撮影画像に基づき生成し、3次元モデルを完成する[FME01]。以下では、拡張 Shape-from-Silhouette 法、マルチカメラアクティブステレオ法、及び3次元ボクセル空間での初期形状と距離画像の統合手法の概要を述べる。



図 2.1 ハイブリッドモデリングアルゴリズム

2.2.2 拡張 Shape-from-Silhouette 法

拡張 Shape-from-Silhouette 法では、まず通常光撮影の各画像から対象物体と背景を分離したシルエット情報を得る。次に、あらかじめ求めた各カメラのキャリブレーション情報と得られたシルエット情報に基づき、物体位置に設定された3次元ボクセル空間への投票を行い、その結果を閾値処理することにより3次元形状を獲得する[MFK99a]。以降、これを初期形状とする。この投票・閾値処理により、シルエット情報に多少のエラーがあっても形状再現精度の低下が抑えられる。

シルエット抽出処理

シルエット抽出処理としては、主に以下の3種類の手法が考えられる。

1. クロマキー手法：あらかじめ設定した領域の平均色を背景色とし、背景色に類似した色を背景として分離することで、物体のシルエットを抽出する。この手法は、物体表面に背景と類似した色が含まれないことと、背景色が単一であることを前提としている。
2. マルチクロマキー手法：1のクロマキー手法では、物体表面に背景と類似色が存在する場合に背景とみなされシルエットに穴があくため、複数の背景で撮影を行い、シルエット抽出結果の論理和を求めることで正しいシルエットを抽出する。この手法は、1の手法の物体表面に背景と類似した色が含まれないという制限を緩和しているが、1の手法と同様にシステムとして背景を用意できることが前提となっている。また、複数回の撮影が新たに必要となっている。
3. 領域ベース背景差分手法：まず、対象を撮影した画像とあらかじめ撮影した背景だけの画像との画素単位の差分処理を行う。ここでは各R,GBで差分の絶対値を求め、その最大値を差分値とする。次に、対象画像を領域分割して、各領域の差分値の平均があらかじめ設定した閾値より大きな領域をシルエット領域として抽出する。このように画素単位ではなく領域単位で処理することにより、背景と同じ色が含まれた場合にも正しいシルエットが抽出できる可能性が高くなる。この手法は、システムとして背景を用意する必要がないが、あらかじめ背景だけの画像を撮影する必要がある。

これらの手法は、処理対象の色の特徴とシステムの構成の自由度に応じて適宜選択される。本論文では、人体頭部と顔前面部を対象にするため、1のクロマキー手法を適用す

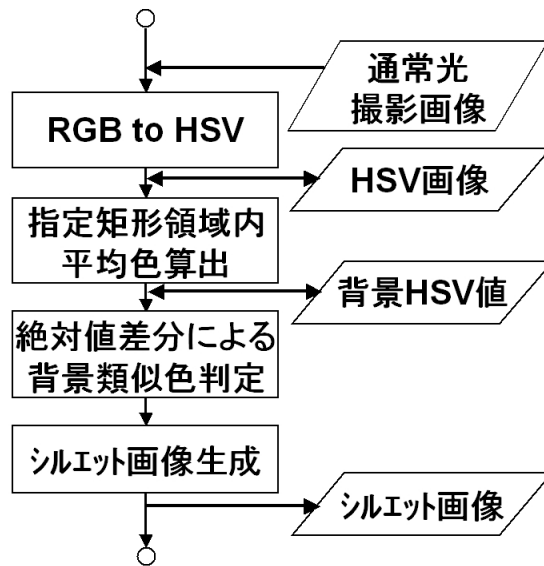


図 2.2 シルエット画像生成処理手順

る. 図 2.2 にクロマキー手法による各画像のシルエット画像生成処理の手順を示す. まず, 通常光撮影画像を RGB 色空間から HSV 色空間へ変換する[下田 04]. これを HSV 画像とする. 次に, HSV 画像中であらかじめ設定した矩形領域内で HSV の平均値を求める. これを背景の HSV 値とする. そして, HSV 画像中の各画素について, 背景の HSV 値との絶対値差分を行い, HSV 全てにおいて, あらかじめ設定した差分閾値以下の場合に, 背景画素と判定する. 最後に, シルエット抽出結果として, 物体領域が 1, 背景領域が 0 の値を持つ 2 値画像としてシルエット画像を保存する.

シルエット情報の 3 次元ボクセル空間への投票と閾値処理

対象が存在する可能性のある 3 次元空間に 3 次元ボクセル空間を設定し, シルエット抽出結果の画像とあらかじめ求められた各カメラのキャリブレーション情報から, 各ボクセルへの投票処理を以下の手順で行う. 図 2.3 に処理の流れを, 図 2.4 に処理の概念図を示す.

- ① 各ボクセルの値をゼロに初期化する.
- ② 各ボクセルの中心位置と各シルエット画像の撮影焦点位置を結ぶ直線とシルエット画像の交点の画素が物体のシルエットに含まれる場合は, そのボクセルに 1 を

加算する.

③ 全てのボクセルについて、②の処理を全てのシルエット画像に対して実行する.

以上の処理結果に対し、あらかじめ設定した閾値によりボクセル単位で2値化処理を行い、初期形状を得る.

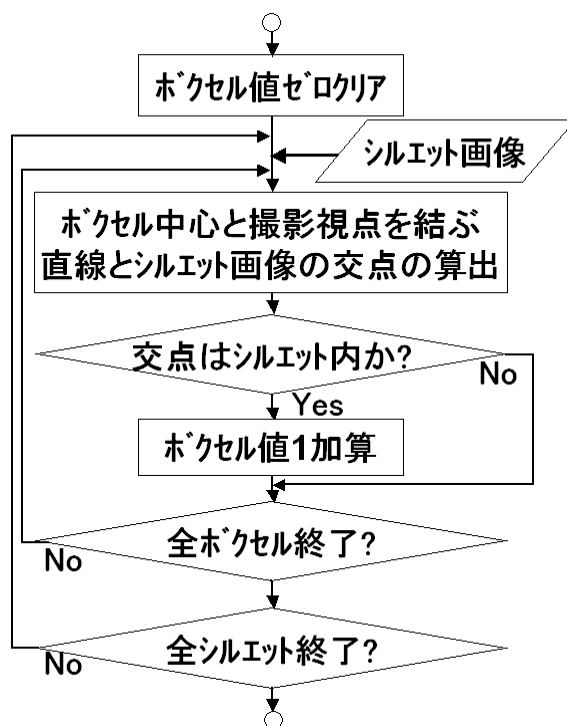


図 2.3 シルエット情報のボクセル投票処理手順

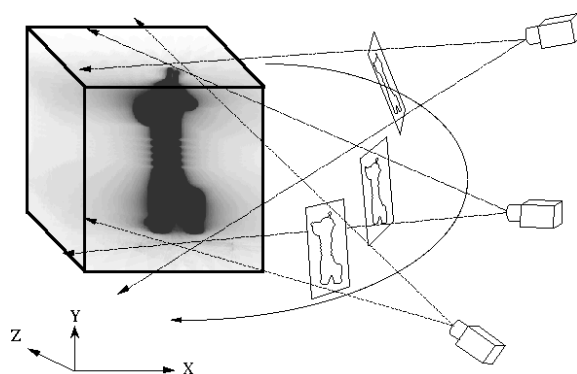


図 2.4 ボクセル空間でのシルエット情報の投票処理の様子

ここで閾値がシルエット画像枚数に等しければ、全シルエット画像を信頼することになり、シルエット画像枚数より小さい値であれば、シルエットに抜けがあっても結果に影響しなくなり、ロバスト性が高くなる。例えば背景色の写りこみなどによって対象物体のシルエットに穴が開いた場合に、そのシルエット画像枚数分小さくした閾値で閾値処理をやり直すだけで改善が可能となる。ただし、反映する情報が減ることによって全体の形状が悪化する可能性があることには注意が必要である。

2.2.3 マルチカメラアクティブステレオ法

Shape-from-Silhouette 法では、シルエットとして抽出された対象物体の輪郭情報は確実に3次元形状として反映されるため、アクティブステレオ法では再現が困難な黒髪を含む人体頭部の再現が可能となるが、人間の目、鼻の両側、口などの、シルエットの輪郭に現れない形状は再現されない。そこで、カラーパターン光を投影して複数台のカメラで撮影された画像（以下、パターン画像と記す）を用いてステレオ処理を行い、人体頭部で重要な目鼻口耳などを含む詳細な形状を獲得し、初期形状に統合する。その結果、拡張 Shape-from-Silhouette 法とアクティブステレオ法の長所を併せ持つ、黒髪を含む人体頭部全体の形状が獲得できる。パターン画像の例を図 2.5 に示す。またこの時、初期形状をパターン画像へ再投影して得られるシルエット情報を用いて画像中の処理範囲を限定すると共に、初期形状を用いて対応点探索の範囲を限定することにより、処理の高速

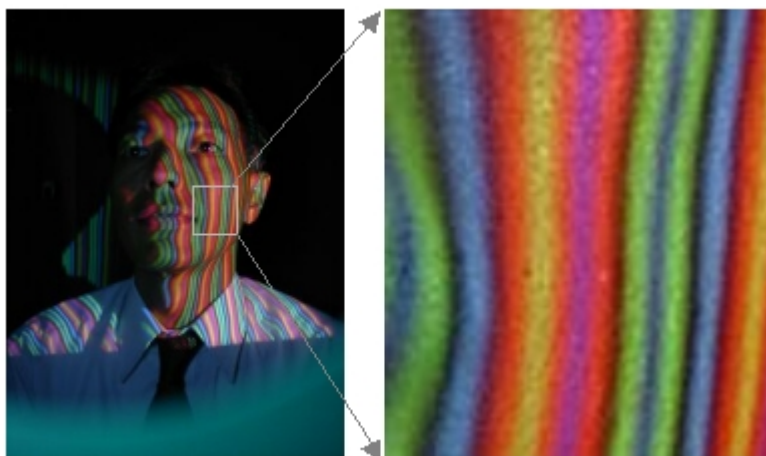


図 2.5 パターン画像の例

化と高精度化を実現する。そして、そのステレオ処理において、特徴点ベースステレオ処理に領域ベースステレオ処理を追加した2段階ステレオ処理手法を適用することにより、さらなる高精度化を実現する。この2段階ステレオ処理手法では、前段の結果を初期値にして、後段においてその対応点の近傍のみを探索範囲とすることにより、実用的な時間でより多くの正しい計測結果を得ると共に、さらに隣接点の相関値を用いた2次関数当てはめ（パラボラフィッティング）によるサブピクセル推定を導入し、全体として形状再現性向上を実現する。これについては、2.3節で詳しく述べる。

2.2.4 3次元ボクセル空間での初期形状と距離画像の統合

3次元ボクセル空間において、複数のカメラ視点で得られた距離画像を初期形状に統合し、最終形状を獲得する。図2.6に距離画像の例を示す。ここでも3次元ボクセル空間への投票方式を採用することにより、距離画像に含まれるエラーを軽減しながら、詳細形状を反映した全体形状を獲得する[FME01]。

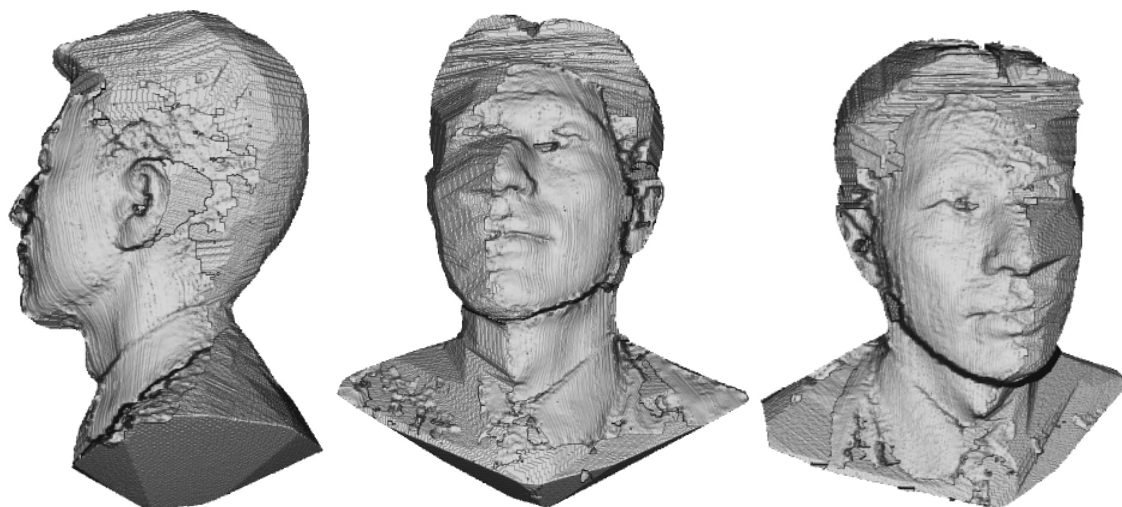


図 2.6 距離画像の例

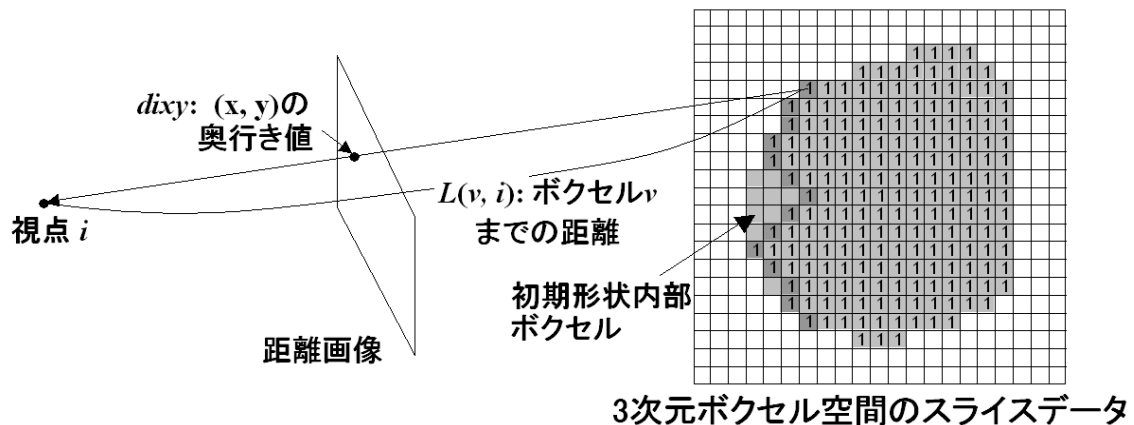


図 2.7 距離画像のボクセル空間への投票処理

図 2.7 にカメラ視点 i の距離画像をボクセル空間へ投票している様子を示す. ここで, $L(v, i)$ はボクセル v と視点 i との距離を示し, 視点 i の距離画像における座標 (x, y) の値 $dixy$ はボクセル v と視点 i を結ぶ直線と距離画像の交点 (x, y) の値 (奥行き値) を示している. 投票処理では, まず拡張 Shape-from-Silhouette 処理で得られた初期形状内部のボクセルに 1 を与える. 以降, 各カメラ視点において $L(v, i)$ が $dixy$ 以上のボクセル v に 1 を加える. この処理を 3 次元ボクセル全体に対して処理することで, 視点 i の距離画像の投票処理が終了する. そして, すべての視点の距離画像を投票処理した結果を閾値処理することにより, 最終形状を確定する. ここで閾値が視点数つまり距離画像の枚数に等しければ, 全ての視点の距離情報を信頼することになり, 視点数より小さい値であれば, エラーなどによって奥行き値が対象物体内にある場合でも, 結果への影響が少なくなり, ロバスト性が高くなる. ただし, 反映される距離情報が減るため, 形状が悪化する可能性がある. これに対しては, 視野が重複するよう視点を設定するなどの工夫が有効である.

2.3 マルチカメラアクティブステレオ法と 2 段階ステレオ処理手法

本論文では, カラーパターンを被写体への特徴付けにのみ使用し, 3 台のカメラを用いたマルチカメラステレオ法により距離情報を獲得する. 前章で述べたように, 特徴点ベースステレオ処理手法は, 特徴点同士で対応点探索を行うため, 処理が速く照明の変化やノイズに強い. しかし, 特徴点単位の処理であるため計測結果がまばらにしか得ら

れず、計測精度は特徴点の抽出精度に依存する。例えば、図 2.8 に示すように、パターン画像のエッジ点を特徴点とし、その特徴量を左右の色情報から求めた場合、画像中のノイズに影響されてエッジ抽出誤りが発生し、対応点の位置ずれや対応が得られない場合がある。また抽出されるエッジには対象物体自体のエッジも含まれており、エッジが局所的に画像の水平方向に一致する場合には対応が得られない場合がある。一方、領域ベース手法は、輝度の変化や視点の違いによる見え方の変化に弱く、計算量が膨大になるという課題がある。本節では、マルチカメラアクティブステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理で得られた結果を初期値にして、その近傍のみを探索範囲として領域ベースステレオ処理を行う 2 段階ステレオ処理手法を提案する。これにより、実用的な時間で安定してより多くの正しい計測結果を得ると共に、さらに隣接点の領域相関値を用いた 2 次関数当てはめ（パラボラフィッティング）によるサブピクセル推定を導入し、全体として形状再現性向上を実現する。図 2.9 に 2 段階ステレオ処理の流れを示す。

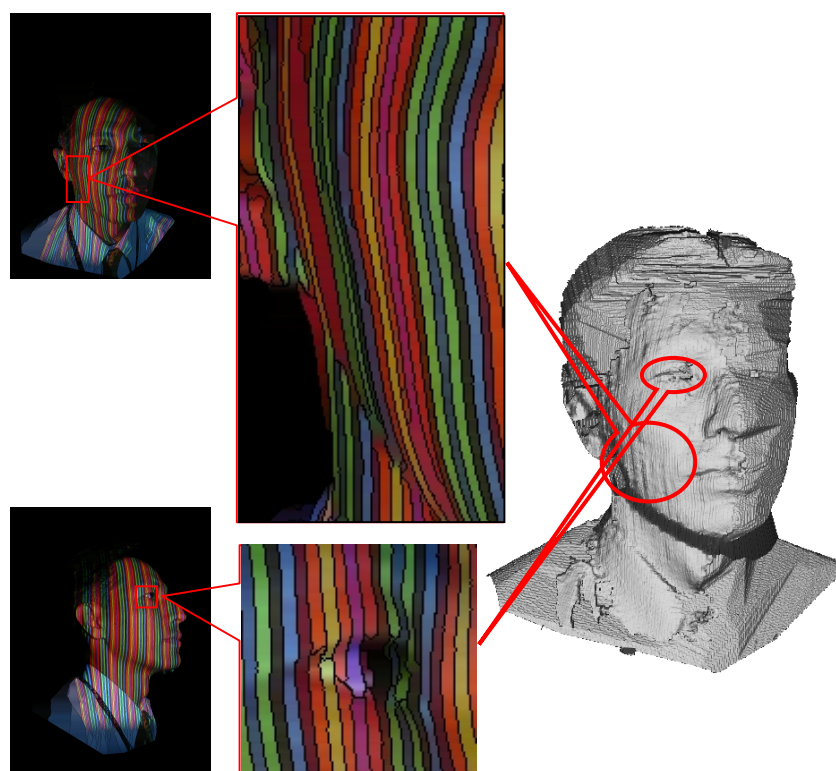


図 2.8 特徴点ベースステレオ処理の課題



図 2.9 2段階ステレオ処理の流れ

また，図 2.10 に本節で扱う 3 眼ステレオ処理の概要を示す．ここでは，ステレオ処理の基準となる画像をマスタ画像，計算に使用するペア画像をスレブ画像とし，対応の確認に使用するペア画像をチェック画像とする．

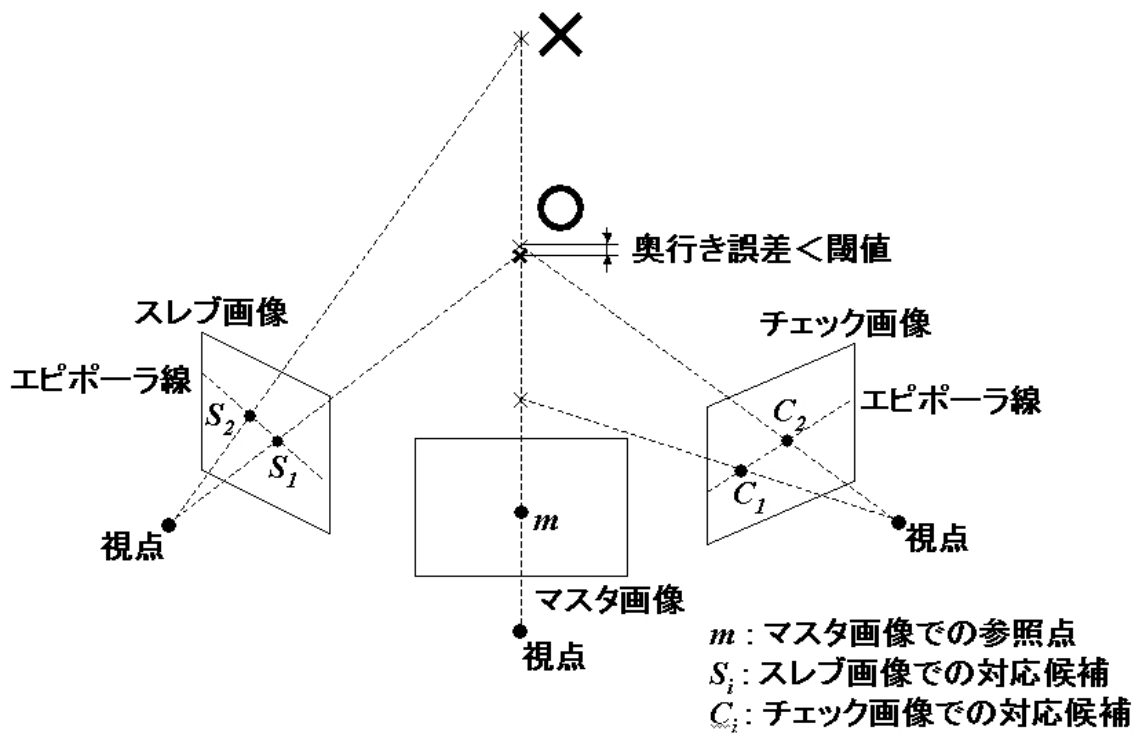


図 2.10 3眼ステレオ処理の概要

2.3.1 第1段：特徴点ベースステレオ処理

パターン画像を用いた特徴点ベースステレオ処理の手順を図 2.11 に示す。また、ステレオペアの処理の概要を図 2.12 に示す。なお、具体的な処理内容は以下の通りである。

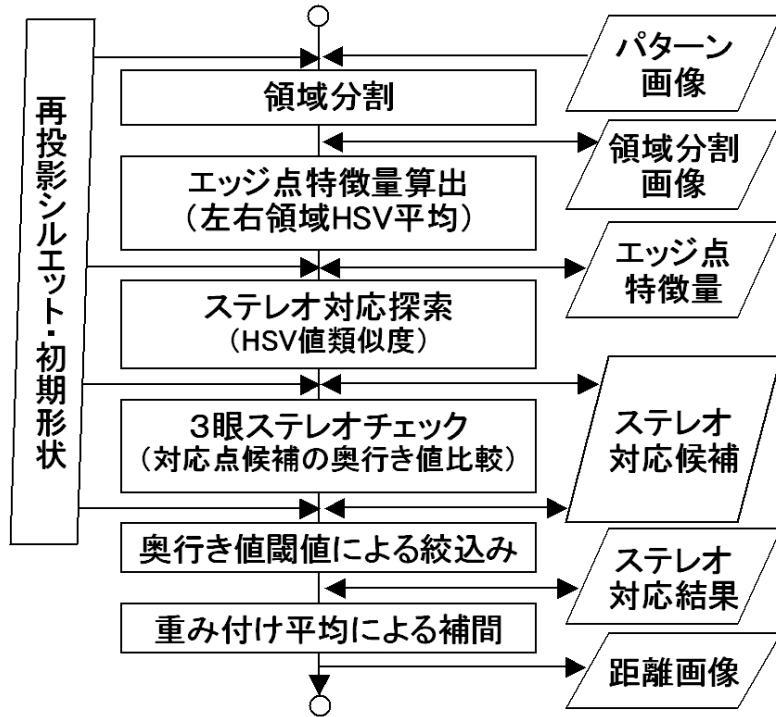


図 2.11 第1段：特徴点ベースステレオ処理手順

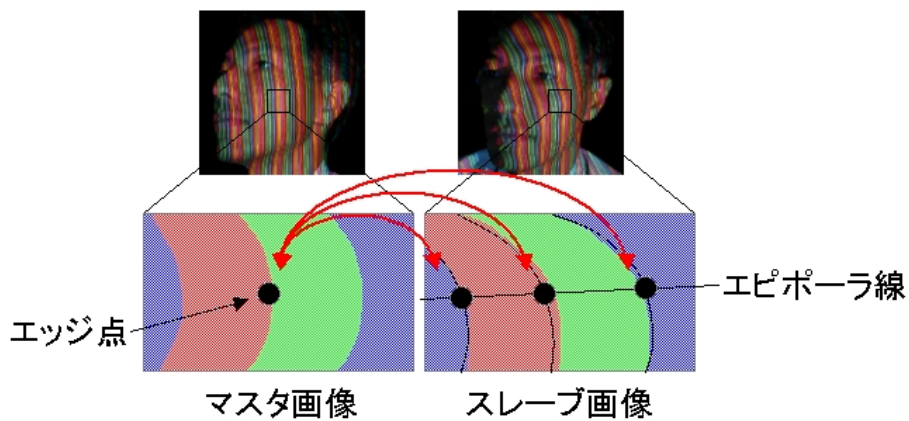


図 2.12 特徴点ベースステレオ処理の概要

- ① 初期形状をパターン画像面へ投影し、ステレオ処理用マスク画像として再投影シルエット画像を生成する。
- ② パターン画像をエッジ延長法による領域分割手法[富田 87]を用いて領域分割し、マスク画像内の領域境界エッジを抽出する。
- ③ 各エッジ上の点 (以下, エッジ点と記す) に対し, 左右のそれぞれの領域内で RGB から HSV に変換された色情報の平均値を特徴量として与える。
- ④ マスタ画像の各エッジ点に対し, スレブ画像のエピポーラ線上のエッジ点を特徴量の類似度が近い順, つまり各 HSV 値の差の総和が小さい順に並び替える。その上位の中からあらかじめ設定した個数分を対応点候補とする。同様にチェック画像においても対応点候補を算出する。
- ⑤ 各対応点候補について, 視点からの距離 (以下, 奥行き値と記す) を求める。
- ⑥ スレブ画像の各対応点候補について, チェック画像の対応点候補との奥行き値の差を求め, その差があらかじめ設定した閾値より小さい組み合わせ候補を残す。
- ⑦ スレブ画像とチェック画像それぞれの各対応点候補の中で, 対象物体の凹部の深さを基にあらかじめ設定した範囲内にある奥行き値を持つ点を候補として残す。
- ⑧ スレブ画像の対応点候補から特徴量の類似度が第 1 位の候補を選択し, その奥行き値をマスタ画像のエッジ点の奥行き値とする。ただし, 候補がない場合は, 奥行き値は与えない。
- ⑨ マスタ画像において, 対応が得られたエッジ点の奥行き値を基に, 奥行き値の計算されていない全ての画素について, 各画素を中心としてあらかじめ設定した大きさの領域内にある奥行き値を中心からの距離で重み付け平均した結果を奥行き値として与える。これを全ての画素で奥行き値が得られるまで繰り返すことで距離画像を生成する。

2.3.2 第 2 段 : 領域ベースステレオ処理

前段の特徴点ベースステレオ処理の結果を初期位置にし, その近傍を再探索する領域ベースステレオ処理を導入するにあたり, 前段で対応が得られなかったエッジ点についても, 対応が得られたエッジ点の奥行き値の補間で得られる距離画像に基づき初期位置を決定し, 計測可能点数の増加を図る。そしてこの初期位置に基づく領域ベースステレオ処理とサブピクセル推定により, 計測点の増加を含む形状再現性向上を実現する。

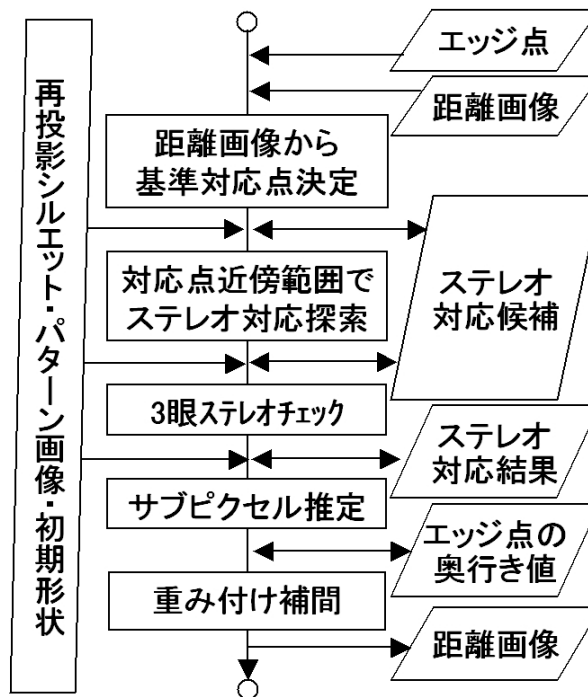


図 2.13 第2段：領域ベースステレオ処理手順

図 2.13 に領域ベースステレオ処理の手順を示す。一組のステレオペアに対する具体的な処理内容は以下の通りである。

- ① マスタ画像のエッジ点について、その奥行き値で求まる3次元点をスレブ画像へ投影した位置を基準対応点とし、その画素を初期位置とする。
- ② スレブ画像において、その初期位置を中心としたエピポーラ線上で、あらかじめ設定した範囲内の近傍点を対応点候補として、相関値を求める。相関値には、RGB色空間での正規化相互相関 (Normalized Cross Correlation : NCC)を用いる。相関値 $C(x, y)$ は、マスタ画像を M 、スレブ画像を S とし、あらかじめ設定した領域内の画素数を n 、領域内の各平均を \bar{M} 、 \bar{S} とした時、以下の式で与えられる。この相関値をRGBそれぞれで求めてその平均値をその領域対の相関値とする。なお、正規化相互相関では、相関が高いほど値が大きくなる。

$$C(x, y) = \frac{1}{n} \sum_i (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S}) \left/ \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (S_i - \bar{S})^2} \right) \right. \quad (1)$$

- ③ 得られた相関値が最大の点を対応点として求める。ただしあらかじめ設定した閾値よりも小さい場合は、対応点はなしと判定する。

以上の処理をマスタ画像－スレブ画像のステレオペアとマスタ画像－チェック画像のステレオペアについて行い、それぞれの結果から相関値の大きい方を対応点として決定する。そして最後に、得られた対応点とその対応点のエピポーラ線上で左右に隣接する点の各相関値を用いてサブピクセル推定を行い、奥行き値を決定する。サブピクセル推定では、図 2.14 に示すように対応点を i 、そのエピポーラ線上で隣接する 2 点を $i-1$ 、 $i+1$ とし、それぞれ相関値を $C(i)$ 、 $C(i-1)$ 、 $C(i+1)$ とした時、その 3 点の相関値に基づき 2 次関数を当てはめ、その対称軸位置を求めることにより相関が最大となる対応点を画素分解能以下で求める[清水 02]。この対応点を $i+d$ としたとき、 d は以下の式で与えられる。

$$d = \frac{C(i-1) - C(i+1)}{2C(i-1) - 4C(i) + 2C(i+1)} \quad (2)$$

そして最後に、エッジ点で得られた奥行き値に基づき、前処理と同様の距離による重み付け平均による補間を行い、奥行き値が密な距離画像を得る。

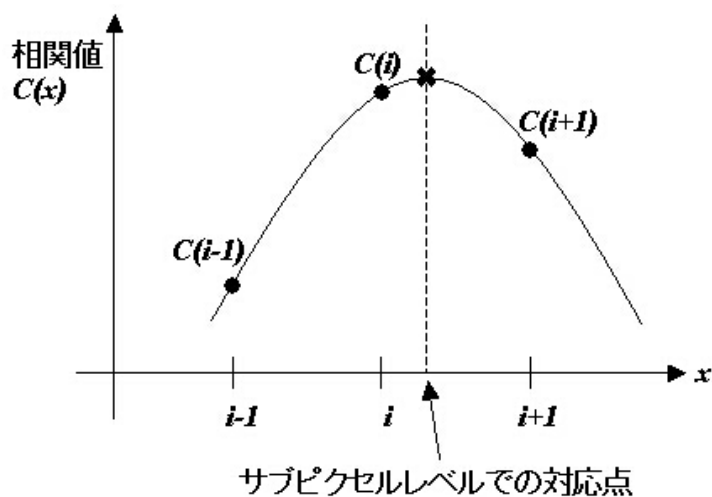


図 2.14 相関サブピクセル推定

以上のように、特徴点ベースステレオ処理におけるエッジ抽出誤りによる精度低下と特徴量抽出に起因して水平エッジで計測できない問題に対し、奥行き値補間による初期位置設定と領域ベースステレオ処理を追加することにより、誤対応を修正し、計測点数の増加を実現する。さらにサブピクセル推定を導入することにより、全体として形状再現精度の向上を実現する。

2.4 形状計測評価実験

本節では、マルチカメラアクティブステレオ法における2段階ステレオ処理手法の導入効果の定量的な評価実験として、形状が既知の円筒物体を対象物体として、次章で述べる人体頭部全周囲全自動モデリングシステムで撮影した画像を用いて、形状計測を行った結果について考察する。

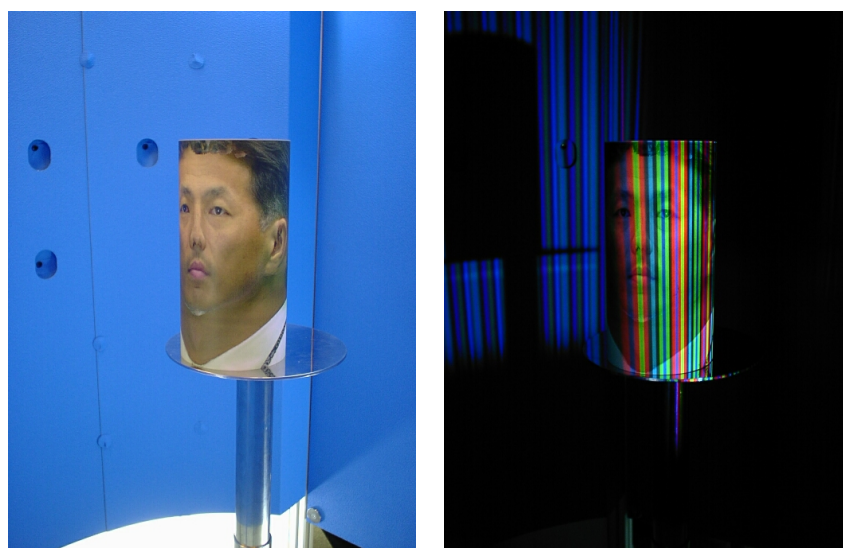
本実験では、直径 10cm、高さ 20cm の円筒物体（製作精度は 0.1%）を対象として撮影を行い、以下の3つの手法について形状計測精度と計算時間に関する比較を行った。

1. 特徴点ベース手法：初期形状に基づく特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法
2. 領域ベース手法：初期形状に基づく領域ベースステレオ処理のみを用いる手法
3. 2段階手法：初期形状に基づく特徴点ベースステレオ処理の結果を基に領域ベースステレオ処理を行う提案手法

形状計測精度の評価については、以下の手順で行った。なお、物体座標系の設定は、次章で述べる参照物体を用いたキャリブレーションによりY軸がほぼ垂直に設定されている。

- ① ほぼ垂直に置いた円筒物体を撮影し、2段階手法でモデリングした結果に対して、物体座標系でY軸に垂直な平面上で最小二乗法により円当てはめを行い、中心点を求める。
- ② ①の処理によりY軸方向に複数の中心点を求め、得られた結果から最小二乗法により直線当てはめを行い、円筒中心線を推定する。
- ③ 各手法で、ステレオペア毎に、奥行きが求まった点について、②で求めた円筒中心線からの距離（円筒の半径）を計算し、比較する。

なお、円筒には実際の条件に近づくよう人体頭部のテクスチャ情報を印刷した紙を張っている。この紙の厚さは約0.1mmである。図 2.15 にその撮影画像例を示す。ここで、2段階手法の各設定値は、実際の人体頭部全周囲モデリングと同じ設定とした。第1段の特徴点ベースステレオ処理では、3眼ステレオの奥行き差許容値は±1.5mm (±1画素のずれに相当)、初期形状からの探索奥行きは約40mm (鼻尖と頬の接線から鼻翼までの距離が3cm程度として設定) である。第2段の領域ベースステレオ処理では、領域相関計算の領域サイズは7画素×7画素 (パターンの間隔に相当)、探索範囲は±3画素 (パターンの間隔に相当)、相関値の閾値は0.8で実験を行った。また、特徴点ベース手法の各設定値は、2段階手法の第1段と同じであり、領域ベース手法の各設定値は、領域相関の探索範囲を2段階手法の第1段と同じ初期形状からの探索奥行き約40mmに相当する範囲に設定し、それ以外は2段階手法の第2段と同じとした。評価結果を表 2.1 に示す。いずれも12視点のステレオ処理の平均で求めている。この12視点の3眼ステレオの組み合わせ (マスタ, スレブ, チェック) は、図 3.3 に示すカメラ番号で、(16,18,17), (17,19,16), (18,20,19), (19,21,20), (20,18,19), (21,19,18), (22,24,25), (23,25,24), (24,22,23), (25,23,24), (26,24,27), (27,25,26) である。また、ここで使用した画像解像度は1024×1360画素で、ボクセル空間は各カメラから約570mmの距離に設定し、その解像度は1024×1360×1024、ボクセルの分解能は約0.4mmである。



(a) 通常光撮影画像

(b) パターン光投影撮影画像

図 2.15 基礎実験における撮影画像例

表 2.1 形状計測精度の比較

	平均半径(mm)	標準偏差(mm)	計測点数
特徴点ベース手法	51.09	0.37	8329
領域ベース手法	50.94	1.04	1362
2段階手法	51.08	0.42	10844
2段階手法*	51.09	0.47	11015

*サブピクセル推定なし

表 2.1 において、特徴点ベース手法との比較では、標準偏差の増加は 0.05mm で計測点数は 2515 点増加しており、計測精度を落とすことなく計測点数を約 30%増加できていることが分かる。この計測点数の増加は、より忠実な形状再現に寄与するものと考えられる。一方、計測精度に関して大きな向上が見られなかった理由としては、処理対象が円筒という単純な物体であり、パターンも直線的に投影されたため、エッジ抽出が精度良く出来たためであると考えられる。これについては、次章にて、システム全体の形状再現精度の評価になるが、より複雑な形状の物体として実際の人体頭部に適用した実験により、定性的な比較評価と定量的な評価を行う。また、サブピクセル推定の効果については、標準偏差において若干の向上はみられたが、有意な差ではなかった。これについては、サブピクセル推定誤差のキャンセル手法[清水 02]や推定の高精度化[波部 05]についての検討が必要と考えられる。

次に、領域ベース手法との比較では、標準偏差は 0.62mm 小さくなっており、計測点数に関しては 9482 点(696%)と大幅に増加し、改善効果が現れている。また、計算時間については、領域ベース手法が平均 47.7 秒であったのに対し、2段階手法は平均 10.5 秒であった。計測に使用した計算機環境は、CPU : Pentium4 2GHz, メモリー : 1GB, OS : Windows XP Professional の PC である。本手法での関連処理の探索範囲が前段の処理結果の近傍に限定されている効果が現れている。なお、システム全体として最終的に各距離画像を統合した最終形状による評価では、本手法での平均半径は 50.28mm, 標準偏差は 0.42mm であり、ボクセル分解能相当であることを示している。

以上この評価実験では、特徴点ベース手法に対しては計測点数増加による形状再現性の向上について、また領域ベース手法に対しては計測精度と計算速度の両面について、提案手法が有効であることを確認した。

2.5 結言

本章では、複数台のカメラとスライドプロジェクターを用いて短時間で撮影した2種類の画像から、人体頭部を対象に、対象物体の表面材質と模様の有無の影響が少ないロバストな形状計測を行う手法として、ボクセル投票に基づく拡張 Shape-from-Silhouette 法とカラーパターン投影によるマルチカメラアクティブステレオ法を統合したハイブリッドモデリング手法について述べた。そしてマルチカメラアクティブステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理に領域ベースステレオ処理を追加した2段階ステレオ処理手法を提案した。前段の特徴点ベースステレオ処理では、初期形状を再投影して得られるシルエット情報を用いて画像中の処理範囲を限定し、初期形状を用いて対応点探索の範囲を限定した。そして後段の領域ベースステレオ処理では、前段の結果を初期値にして、その対応点の近傍のみに探索範囲を限定した。また、前段で対応が得られなかったエッジ点の奥行き値も、対応が得られたエッジ点の奥行き値で補間して与えた。そしてさらに隣接点の相関値を用いた2次関数当てはめによるサブピクセル推定を導入し、これら全体により、実用的な時間での計測精度の向上と計測可能点数の増加を図った。

提案手法の有効性を確認するために、形状が既知の物体を対象物体として評価実験を行い、アクティブステレオ法において特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法と領域ベースステレオ処理のみを用いる手法に対する比較を行った。その結果、提案した2段階ステレオ処理手法は、特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法に対しては計測点数増加による形状再現性の向上について、また領域ベースステレオ処理のみを用いる手法に対しては計測精度と計算速度の両面について、その有効性を確認した。

しかし、特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法に対する計測精度に関する比較では、対象物体が円筒という単純な物体で、かつパターンも直線的に投影されており、エッジ抽出が精度良く出来たため有意な差が見られなかった。そこで、次章では、人体頭部と顔前面部を入力対象として本手法を適用したシステムについて述べると共に、実際の人体頭部に対する実験を行い、特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法との定性的な比較と実物体と生成されたモデルの部位寸法の実測による定量的な比較を行い、結果について考察する。

3. 人体頭部 3 次元モデリングのシステム化と応用展開

3.1 序言

前章で述べた拡張Shape-from-Silhouette法と2段階ステレオ処理手法によるマルチカメラアクティブステレオ法を併用したハイブリッドモデリング手法により、対象の表面材質と模様の有無に影響されないロバスト性の実現と実用的な時間での高精度化を実現した。本章では、本手法を実際の人体に適用するにあたり、本研究の目的である、操作者と被写体の両ユーザの負担を出来るだけ軽減し、より簡便でかつ実環境でも安定して3次元モデリングを行うことが可能なシステムの実現について述べる。本手法において計測に必要なデータは、通常光で撮影した画像とカラーパターンを投影して撮影した画像、及びこれらを撮影するカメラのキャリブレーション情報である。ここで、スライドプロジェクターによる投影パターンは被写体への特徴付けにのみ使用されるため、既存のアクティブステレオ法を実用化したシステムにおいて必要とされるカメラとプロジェクターの位置・姿勢キャリブレーションが不要で、かつ高精度な治具を必要としない簡易なシステム構成が可能となっており、操作者の負担軽減を実現している。以下では、2種類のシステムの構築について具体的な応用展開と共に述べる。一つは人体頭部の全周囲の形状とテクスチャを全自動で取得することに主眼をおいて構築したシステムで、もう一つは対象を人体顔前面部に限定し、形状とテクスチャの全自動取得において高速化と小型化に主眼をおいて構築したシステムである。

まず、前者のシステムについて、システム構成、処理手順、全自動モデル生成のための各処理手法の概要、及び実際の人体を対象とした実験結果について述べる。また、システムの応用分野とその要求仕様を整理すると共に、具体的な応用展開例として、生成された3次元モデルを用いた自動造形システムへの展開を示し、本手法の有用性について考察する。次に、後者のシステムについては、本手法とシステムの実用性が高く評価されて、2005年日本国際博覧会（愛・地球博）の大規模な映像アトラクションにおける人体顔前面部の3次元入力装置として構築した全自動モデリングシステムであり、まずシステムの要求条件を整理し、その要求条件を満たす機器構成を決定するための基礎実験とその結果構築した基本システムについて述べ、実際のモデリング例を示す。そして、

その大規模映像アトラクションにおいて、限られた時間内で多くの人を処理することを目的に、複数システムの同時制御を実現した並列処理システムについて述べ、その実働結果を示す。

3.2 人体頭部全周囲全自動モデリングシステムと応用展開

本節では、人体頭部全周囲を全自動でモデリングすることを目的に構成したシステムについて、以下の順で述べる。

1. システム構成
2. カメラ位置・姿勢キャリブレーション
3. 全自動撮影・全自動モデリング処理
4. ポリゴン生成
5. テクスチャ生成

そして、実際に人体頭部に適用したモデリング実験について述べる。実験では、特徴点ベースステレオ処理のみを用いた手法との比較と実物体と生成されたモデルの部位寸法の実測比較を行い、本手法の有効性を確認する。また、人体頭部モデルの応用分野とその要求仕様を整理し、構築したシステムの適用性について考察すると共に、具体的な応用展開例として、3次元データから加工用データを生成し、写実度が高く、全方向からの鑑賞が可能な、今までにない彫像・人形・クリスタルを自動造形するシステムへの展開について述べる。

3.2.1 システム構成

本システムは、28台のデジタルカメラ(SANYO DSC-SX560)、2台のスライドプロジェクター(CABIN CS-30)、照明装置、及び1台のPCからなる。デジタルカメラは、テクスチャ情報と Shape-from-Silhouette 法に用いるシルエット情報を取得するために通常光のもとで撮影を行う16台と、アクティブステレオ法に用いるためにパターン光を投影して撮影を行う12台である。各カメラはPCにUSBで接続されており、複数台が同時に制御される。また、スライドプロジェクターと照明装置はそれぞれRS-232CでPCに接続された専用コントローラを介して自動制御される。撮影は通常光撮影と左右のパターン光投影撮影の順で行われ、3秒以内で完了する。なお、システム内部はシルエット情

報が安定に得られるように単一色となっている。図 3.1 にシステムの外観を、図 3.2 にシステムの内部の様子を示す。また、カメラとスライドプロジェクターの配置の概略を図 3.3 に示す。



図 3.1 人体頭部全周囲全自動モデリングシステムの外観

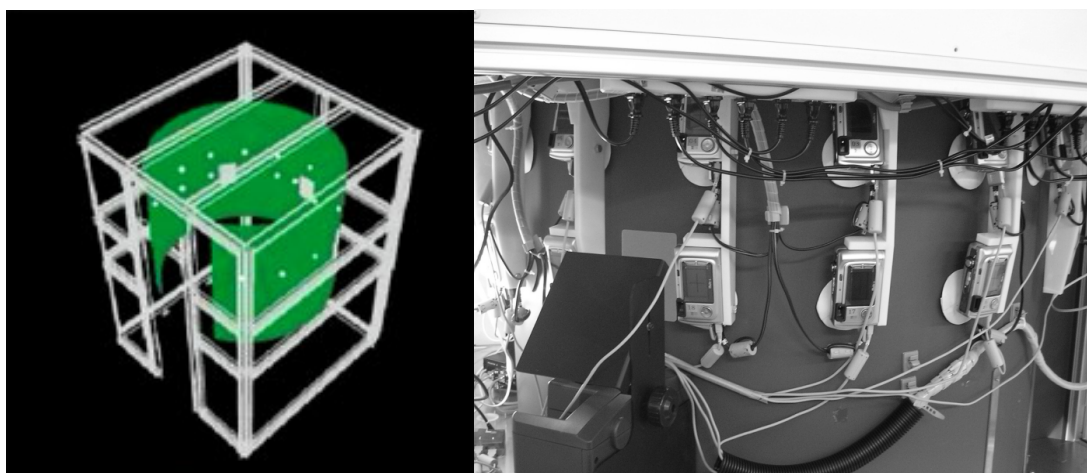


図 3.2 人体頭部全周囲全自動モデリングシステム内部の様子

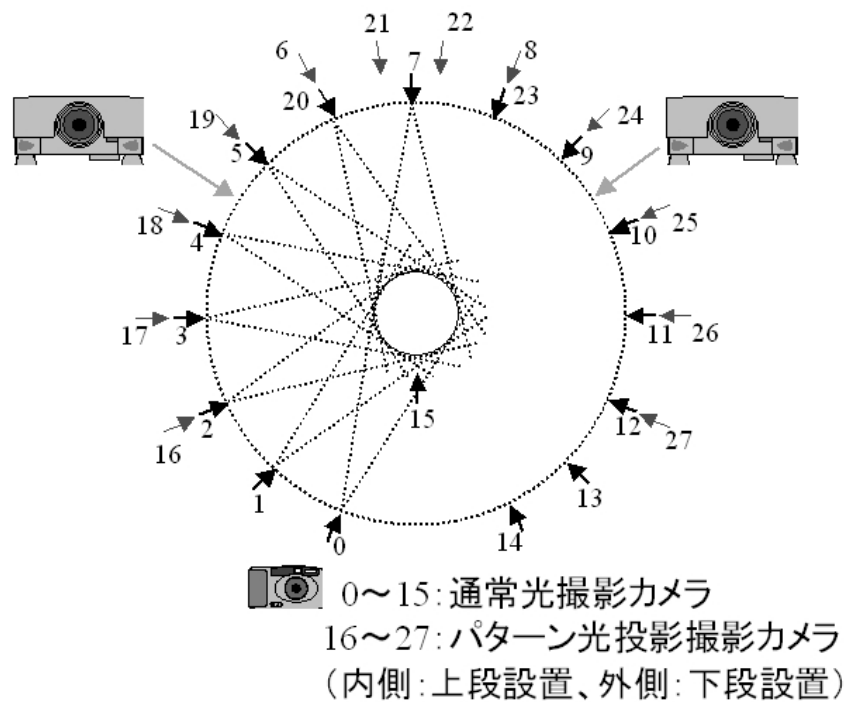


図 3.3 カメラとスライドプロジェクターの配置

3.2.2 カメラ位置・姿勢キャリブレーション

カメラ位置・姿勢キャリブレーションは、システムの設置や移設時の初期設定、システムへの接触や振動などによる異常からの回復、及び治具の緩みなどの経年劣化による異常からの回復など、必要とされる場面は多い。そのため、作業に対しては、1. 誰でも出来る簡単な作業であること、2. 作業・処理時間が短いこと、が要求される。そこで本システムでは、各カメラの位置・姿勢のキャリブレーションに、図 3.4 に示すように 6 色の円マークを不規則に配した参照物体を撮影した画像を用いて自動計算が可能な手法 [RM98] を採用し、操作者の負担の軽減を図る。キャリブレーション処理の流れを図 3.5 に示す。なお具体的には、以下のステップで計算される。

- ① 撮影画像を領域分割し、領域ごとの円らしさ、円周長、色を基準にして、円マークを抽出する。
- ② 抽出された円マークの任意の 3 つとシステムに予め登録されている同じ色に分類される参照円マーク 3 つを用いてカメラ位置・姿勢パラメータ(平行移動成分

x, y, z と回転成分 α, β, γ) を計算する. この計算をすべての円マークの組み合わせについて行い, それぞれの結果を 6 次元 Hough 空間に投票する.

- ③ Hough 空間からピーク値を抽出し, カメラ位置・姿勢パラメータを獲得する.
- ④ ③で得られたパラメータを初期値として, 参照物体上の円マークの重心を画像上に投影した位置と抽出された円マークの重心位置の誤差が最小となるように, Levenberg-Marquardt 法により非線形最小化を行う.

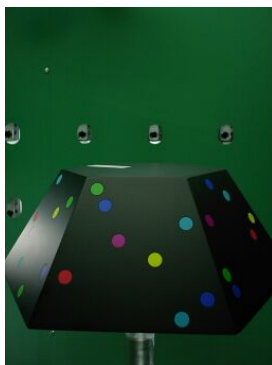


図 3.4 参照物体の撮影画像例

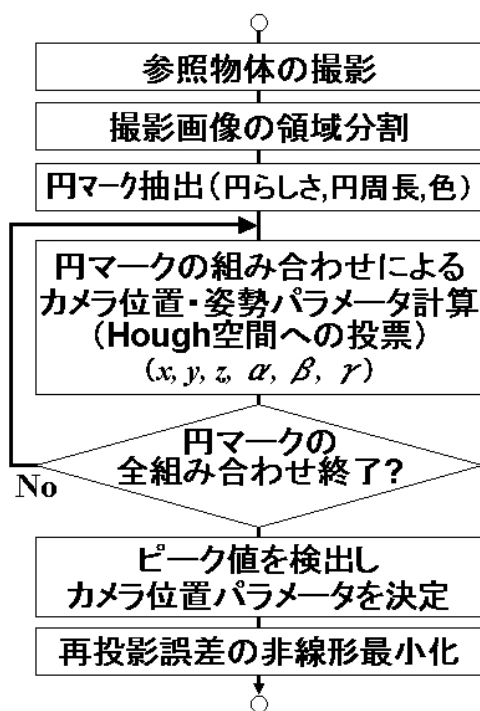


図 3.5 カメラ位置・姿勢キャリブレーション処理手順

3.2.3 全自動撮影・全自動モデリング処理

3.2.1 節で述べたように、本システムを構成する 28 台のデジタルカメラ、2 台のスライドプロジェクター、及び照明装置は、全て PC に接続されており、モデリング処理に必要な、カメラ位置・姿勢キャリブレーション用の参照物体の撮影と対象物体の撮影、撮影した画像を用いたキャリブレーション計算処理、及びモデリング計算処理は、図 3.6 に示すプログラムから自動制御可能となっている。「準備」では、デジタルカメラを通信可能な状態に自動接続し、照明とプロジェクターの制御のチェックを行う。また必要に応じて、キャリブレーション用の撮影を行う。「撮影」では、ワン・クリックで、通常光での撮影→照明消灯→左側のパターン光投影撮影→右側のパターン光投影撮影→照明点灯を 3 秒以内に全自動で実行する。「モデリング」では、サブメニューからワン・クリックで全自動計算が行われる。なお、各種修正処理に対応するため、各プロセス別の計算も可能とした。また、「メンテナンス」では、各接続機器の個別制御が可能となっている。

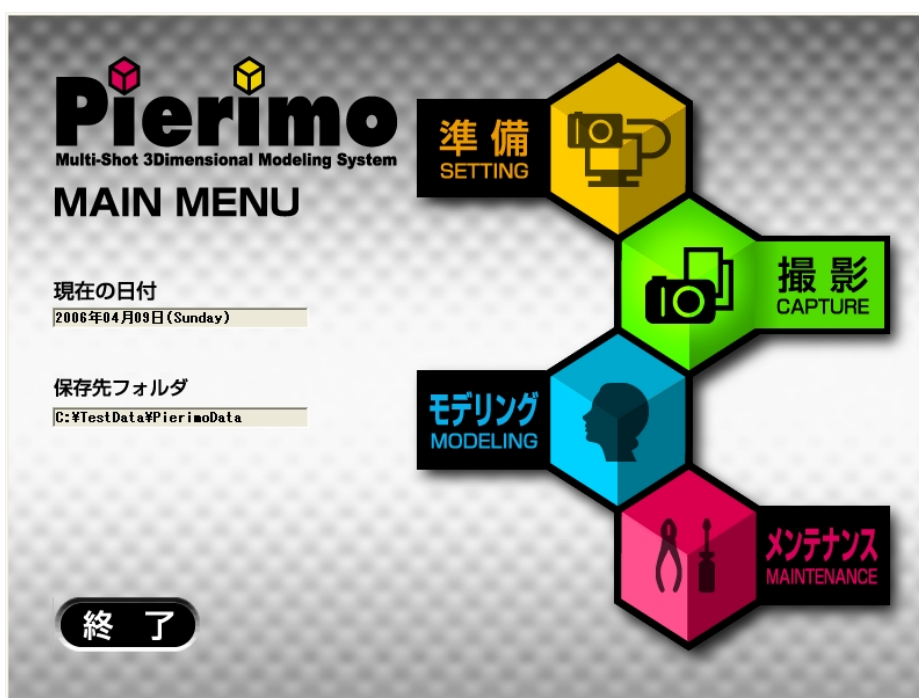


図 3.6 モデリング処理プログラムの初期画面

3.2.4 ポリゴン生成

ボクセル空間で生成された 3 次元形状を, ポリゴン(三角パッチ)を用いた表面モデルで表現する. ここでは, 表現に必要なポリゴン数を少なく抑え, かつ形状表現の精度を維持することが要求される. 本論文では, 以下に示す方法でポリゴンを生成することにより, これらの要求を満たしている[MFK99a].

- ① 物体表面を構成するボクセルの中心を頂点として隣接頂点を接続し, 初期ポリゴンを生成する.
- ② 隣接するポリゴンを統合する前後の形状の変化が小さい隣接ポリゴンを順に統合することで, ポリゴン数を目標値まで削減する.

3.2.5 テクスチャ生成

全周囲の通常光撮影画像から全ポリゴンのテクスチャ情報を以下の手順で獲得する[MFK99a].

- ① 各ポリゴンのテクスチャ情報を取得する画像(以下, 参照画像と記す)を, ポリゴンの参照画像への投影面積の大きさと, 隣接するポリゴンが参照する画像のカメラ位置の近さをあらかず評価関数を設定し, エネルギー最小化問題として解くことにより, 決定する. ここで, 各参照画像に対して撮影角度に応じて順に番号を付けることで, 参照画像のカメラの近さを番号の差で表す. そして, 各番号を i , 番号の差を $Penalty(i)$, ポリゴンの参照画像への投影面積を $Area(i)$ とした時, 評価関数は以下のように表される. k は結合係数である.

$$E = \sum_i \{Penalty(i) - k \times Area(i)\} \quad (3)$$

- ② ポリゴンを①で決定した参照画像に投影し, その投影部分の色情報をテクスチャ情報として獲得する.
- ③ 各ポリゴンのテクスチャ情報について, ①で決定した参照画像とカメラ位置の隣接する複数の画像のテクスチャ情報を用いて平均化する.
- ④ ポリゴン境界での距離重み付けスムージング処理を施し, ポリゴン境界での画像の連続性を高める.

以上により，より情報量の多い画像から情報を取得すると共に画像の連続性を高め，カメラ間の色のばらつきを吸収したテクスチャ情報が生成される．

3.2.6 人体頭部の3次元モデリング実験

人体頭部を対象とした3次元モデリングの実験として，実際の男性と女性に適用した結果を示す．いずれも使用した画像解像度は1024×1360である．また2段階ステレオ処理の設定値は2.4節の評価実験の設定値と同じである．まず，男性に適用した結果として，撮影画像例を図3.7に，3次元モデリングの結果を図3.8に示す．



図 3.7 男性の撮影画像例

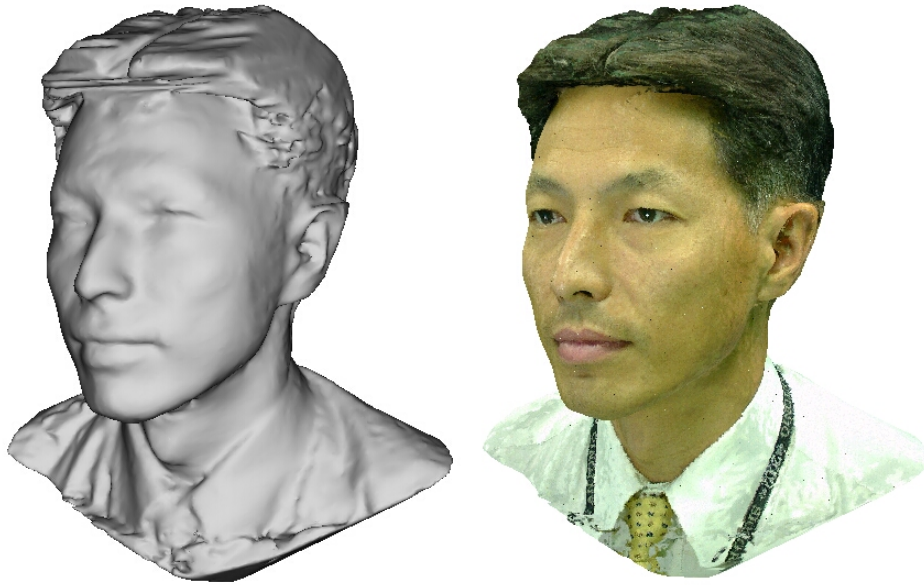


図 3.8 男性のモデリング結果例

図 3.8 は、10 万ポリゴンでモデリングした結果についてのシェーディング表示（左）とテクスチャ表示（右）のスクリーンショットである。

次に、女性に適用した例を図 3.9 に示す。図 3.9 の左の画像は、通常光撮影の画像例であり、右の画像は5 万ポリゴンのモデリング結果をワイヤーフレーム表示したスクリーンショットである。いずれも、頭髪を含む頭部全体の形状を目鼻口耳などの細部の形



図 3.9 女性の撮影画像例とモデリング結果例

状と共に良好に再現している。また、図 3.8 では、写真画質の高精細なテクスチャを全周囲で獲得できているのが分かる。

特徴点ベースステレオ処理のみの手法との形状再現性の比較

アクティブステレオ法において特徴点ベースステレオ処理のみを用いた手法（以下、特徴点ベース手法と記す）と提案する 2 段階ステレオ処理を用いた手法（以下、2 段階手法と記す）の比較として、まず、それぞれの処理結果の距離画像例を図 3.10 に示す。この結果から、特徴点ベース手法で見られた頬の縞模様などの問題が改善されているのが分かる。次に、距離画像を統合した最終形状の比較として、3 つの視点からのシェーディング表示の結果を図 3.11 に示す。使用したボクセル空間サイズは $1024 \times 1360 \times 1024$ 、その分解能は 1 ボクセルあたり約 0.4mm である。ポリゴン数は約 82 万ポリゴンであった。特徴点ベース手法の結果に見られる目、頬の不要な凹凸がなくなり、鼻と口も滑らかになり、より忠実度が増しており、本手法による形状再現性向上が視覚的に確認できる。

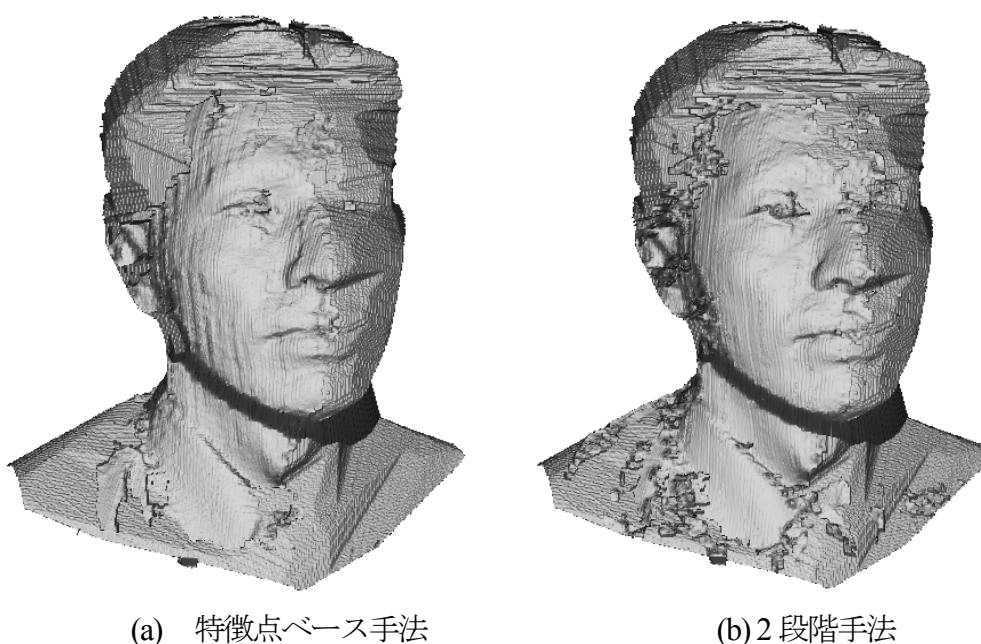


図 3.10 距離画像による比較



(a) 特徴点ベース手法



(b) 2段階手法

図 3.11 最終形状の比較 (その1)

同様に、別の撮影データで特徴点ベース手法と 2 段階手法を比較した結果を図 3.12 に示す。使用したボクセル空間サイズは $512 \times 680 \times 512$ 、その分解能は1 ボクセルあたり約0.8mmである。ポリゴン数は約90万ポリゴンであった。これらの結果からも、特に頬、額、目の部分において、本手法による形状再現性向上が視覚的に確認できる。



(a) 特徴点ベース手法

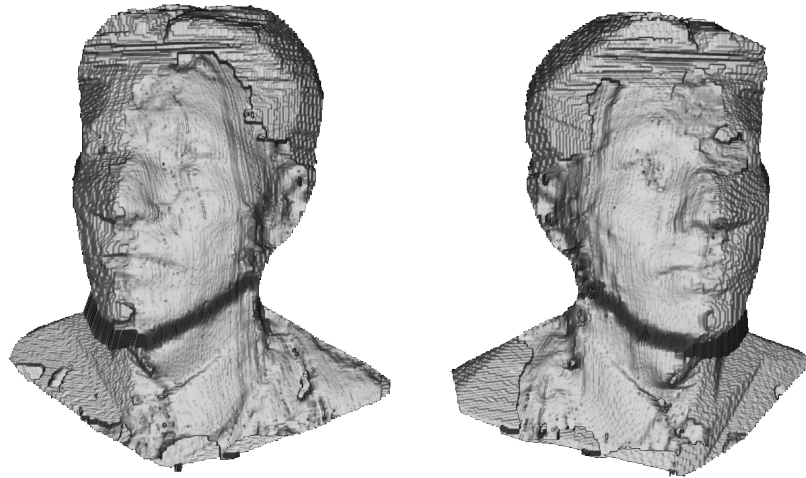


(b) 2段階手法

図 3.12 最終形状の比較 (その2)

低解像度画像使用における特徴点ベース手法との形状再現性の比較

低解像度画像を使用した場合の特徴点ベース手法との比較として、撮影画像の解像度を512×680に削減して処理した結果についての距離画像例を図 3.13 に示す。



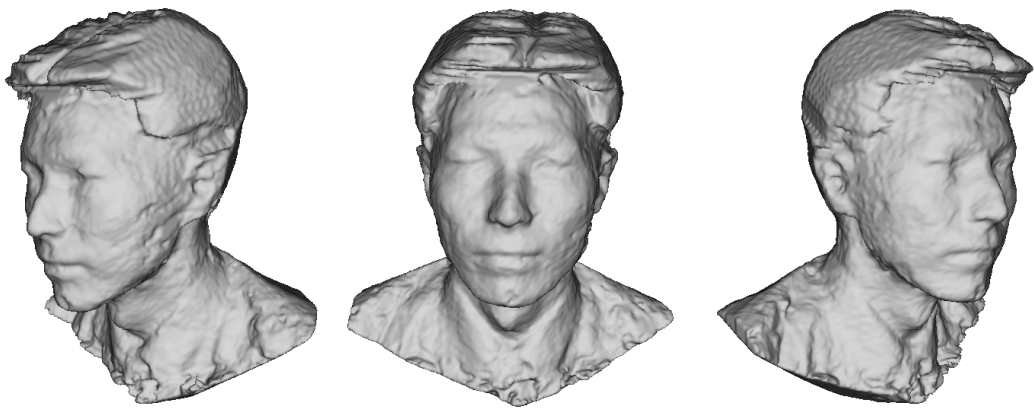
(a) 特徴点ベース手法



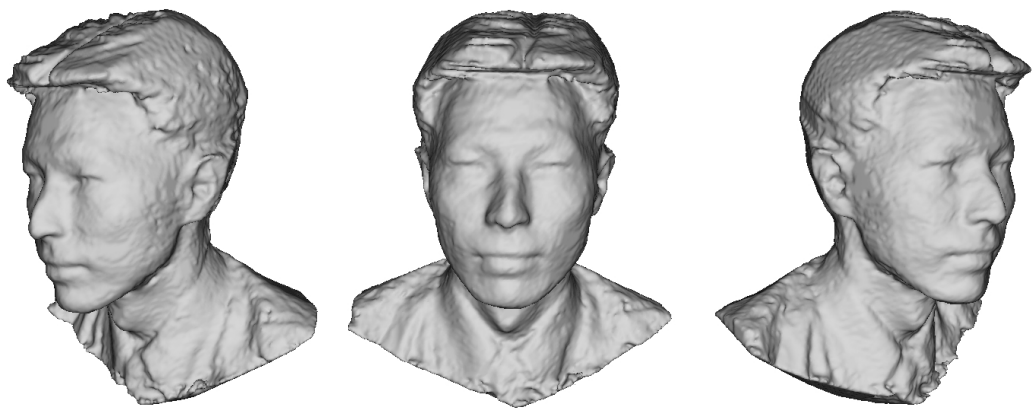
(b) 2段階手法

図 3.13 低解像度画像使用における距離画像による比較

低解像度画像使用において、特徴点ベース手法では形状がかなり悪化しているのに対し、2段階手法では、形状の悪化はほとんど見られないことが分かる。次に、これらの結果から得られる最終形状について比較した結果を図 3.14 示す。使用したボクセル空間サイズは $256 \times 340 \times 256$ 、その分解能は1ボクセルあたり約1.6mmである。ポリゴン数は、約20万ポリゴンであった。



(a) 特徴点ベース手法



(b) 2段階手法

図 3.14 低解像度画像使用における最終形状による比較

以上の結果から、特徴点ベース手法に比べて2段階手法では、画像解像度の低下による形状の崩れが少ないのが分かる。これは、高解像度に比べて低解像度ではエッジ抽出誤りの影響が大きく、特徴点ベース手法では形状再現性が悪くなるのに対し、2段階手法では、後段の領域ベースステレオ処理により誤対応が修正され、さらにサブピクセル処理されることにより形状再現性が向上していることを示している。

画像解像度とボクセル空間サイズの違いによる特徴点ベース手法との処理時間の比較

表 3.1 に、各画像解像度とボクセル空間サイズにおける、特徴点ベース手法と2段階手法の処理時間の比較を示す。時間はボクセル生成処理の時間で、括弧内はシルエット

表 3.1 モデリング時間の比較

	1	2	3
画像解像度 (画素)	1024×1360	512×680	512×680
ボクセル空間解像度	512×680×512	512×680×512	256×340×256
特徴点ベース手法 (秒)	522(1000)	274(649)	110(368)
2段階手法 (秒)	594(1072)	295(670)	133(391)



(1) 画像解像度：高
ボクセル解像度：中

(2) 画像解像度：低
ボクセル解像度：中

(3) 画像解像度：低
ボクセル解像度：低

図 3.15 2段階手法での各解像度における最終形状による比較

抽出から最終モデル出力までの総処理時間である。ステレオ処理は前章の実験と同じ組み合わせの12視点で、ポリゴン数は6万ポリゴンを指定してポリゴンリダクション処理を行っている。計測に使用した計算機環境は、CPU：Pentium4 2.6GHz、メモリー：1GB、OS：Windows XP ProfessionalのPCである。図3.15には、2段階手法での各解像度におけるモデリング結果例を示す。

以上の結果から、2段階手法により形状再現精度が大きく向上し、一方その計算コストは従来の1.2倍程度に抑えられていることが分かる。また、この形状再現性向上により画像解像度を低くしても形状の悪化が少なく、アプリケーションの要求精度によっては、低解像度画像を使用することにより高速化が実現可能であることを示している。

システムの形状再現精度の定量的評価

本システムの形状再現精度の定量的評価を行うために、図 3.7 の撮影データを用いてモデリングを行い、人体寸法データベース[河内 94]にある計測項目の中で比較的安定して計測が可能な 5 つについて実測値との比較を行った。なお、ボクセル空間解像度は $1024 \times 1360 \times 1024$ 、2 段階ステレオ処理の設定値は 3.2.6 節と同じ設定とし、モデルのポリゴン数は 30 万ポリゴンとした。図 3.16 に頭部の計測項目の説明図[河内 94]を示す。この中から、A10：内眼角幅、A12：鼻幅、A16：鼻高、A19：耳長（右）、耳長（左）について、実際の人体はノギスを用いて実測し、生成されたモデルデータは独自の表示ソフトウェアに付加した 2 点間直線距離計測機能により手動で計測を行った。表示ソフトウェアによる計測の様子を図 3.17 に示す。計測結果の比較を表 3.2 に示す。なお、手作業による計測のばらつきを吸収するために、計測はそれぞれ 5 回行い、最大値と最小値を除く 3 つの計測結果の平均を求めた。

表 3.2 に示す結果から、形状再現誤差は、絶対値の平均で約 0.5mm、最大でも 1mm 未満で得られていることがわかる。この平均誤差は、ほぼボクセル分解能に相当する。この実験結果からは、全ての箇所と同じ精度が得られるとは言えないが、2.4 節の形状計測実験の統合結果と同じであることから、パターン光投影撮影画像のエッジ点として計測可能な箇所においては、同程度の精度が得られると考えられる。一方、誤差が大きくなる可能性は、シルエットの輪郭に現れない形状部分でかつ対象物体表面の色や材質によりパターン光投影画像から特徴量が適切に得られない場合に生じると考えられる。しかし、これまでに様々な人種や性別、年齢をモデリングしてきた結果からは、そのような問題は見られていない。

表 3.2 頭部寸法計測結果の比較

	A：人体実測値（平均）	B：モデル計測値（平均）	差 (B-A)
内眼角幅 (mm)	40.2	41.1	0.9
鼻幅 (mm)	37.3	37.9	0.6
鼻高 (mm)	56.2	55.8	-0.4
耳長（右）(mm)	67.9	68.4	0.5
耳長（左）(mm)	69.3	69.6	0.3

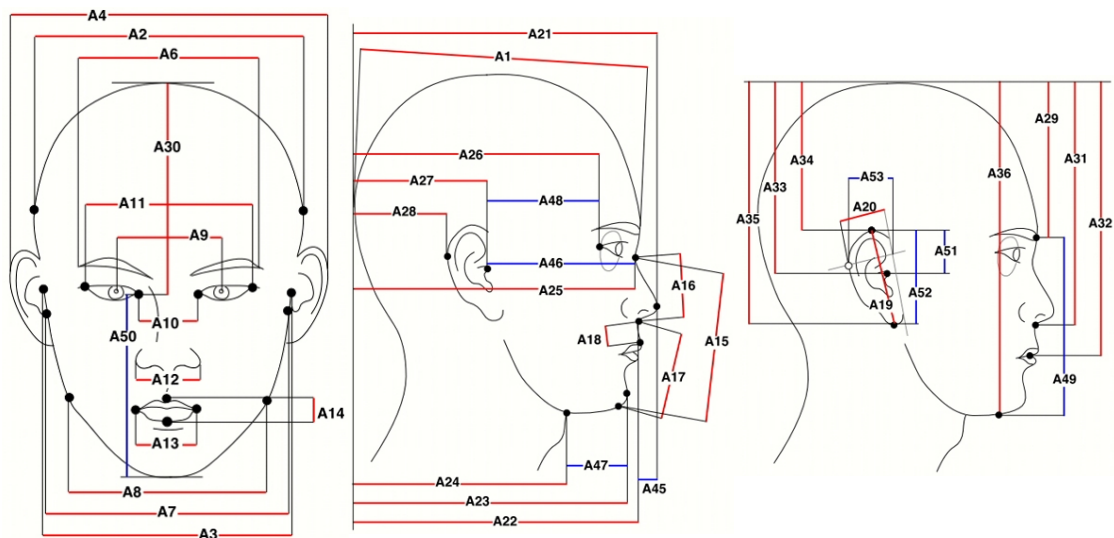


図 3.16 人体寸法データベースの頭部計測項目

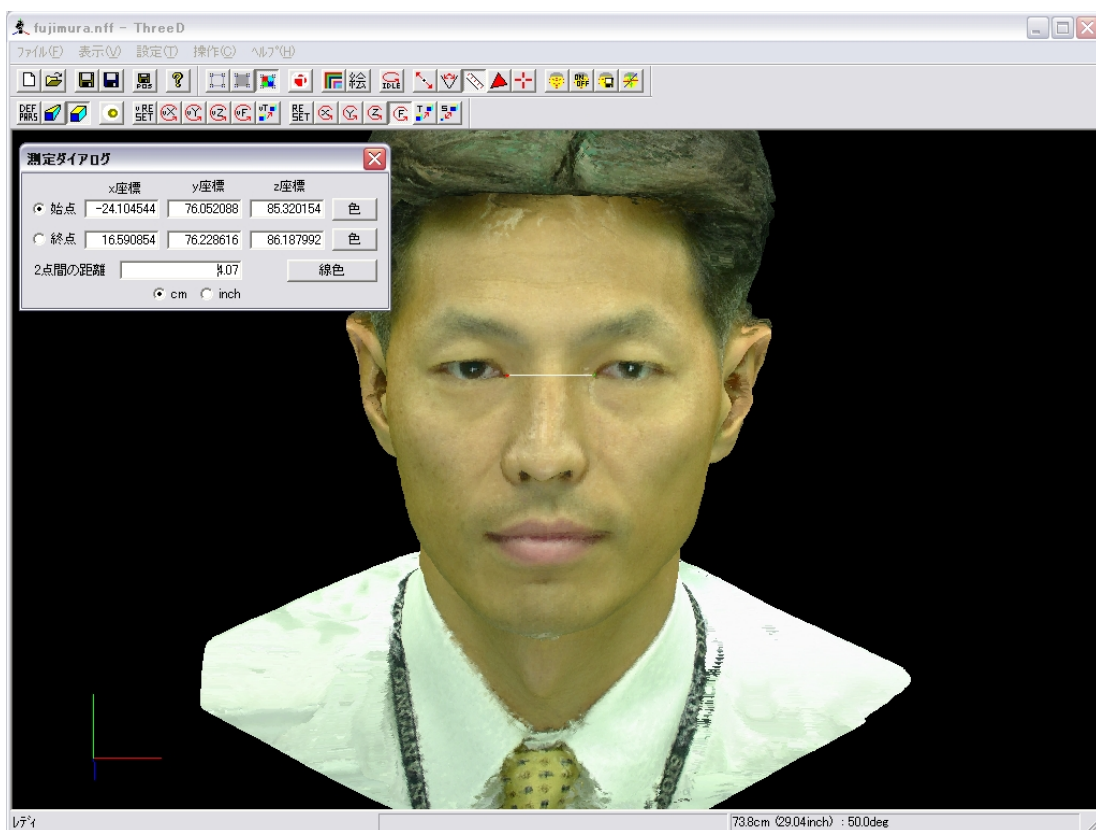


図 3.17 表示ソフトウェアによる2点間直線距離の計測の様子

3.2.7 人体頭部 3次元モデルの応用展開

人体・顔の3次元情報は、映像制作、立体造形、生体認証、美容整形などの各種シミュレーションなど様々な応用展開が期待されている。それぞれの応用分野における3次元モデリングシステムに対する主な要求仕様は表 3.3 に示すとおりである。ここで、形状再現精度が相似とあるのは、絶対精度は要求しないものである。また、参考に後工程に必要な処理時間の目安と現状で3次元モデリングシステムを使わない場合に必要な作業時間の目安を示した。

本システムは、前節までの評価結果から、モデル生成時間を約10分とした場合には、ボクセルの分解能が0.8mmとなり、この場合に得られる形状再現精度は平均誤差0.8mm, 最大でも1.6mm以内といえる。テクスチャはデジタルカメラ画質の高品質なテクスチャが得られるので、映像制作と大型人形造形については、要求仕様を満たすことが可能であるといえる。一方、小型の人形とクリスタルの立体造形については、モデル生成時間が、低解像度画像を適用して処理時間を短くしても現状では5分程度必要である。これに関しては、ポリゴン生成とテクスチャ生成の処理を後工程に適した形式に直接出力することで、処理時間3分の要求を満たすことは可能と考えられる。個人照合の要求に対しては、形状再現精度の要求をなんとか満たすレベルであるが、十分に満たすためには高解像度の画像と高分解能のボクセルを使用する必要があり、現状では処理時間の要求を満たさないため、処理の高速化が必要である。

表 3.3 3次元モデリング応用分野の主な要求仕様

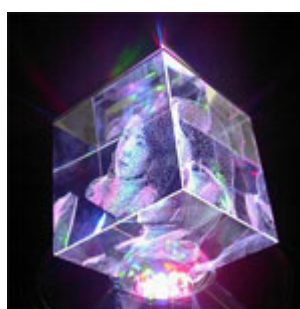
要求項目		形状再現精度	テクスチャの品質	モデル生成時間	後工程処理時間	現状作業時間
映像制作		相似	重視	10分	数十分	1週間以上
立体造形	人形 大型	相似	参照程度	10分	数時間	45日
	人形 小型	相似	重視	3分	約40分	1~2週間
	クリスタル	相似	重視	3分	十数分	2-Dで数分~
個人照合 (顔向き自由)		1mm以内	重視	10分	数分	2-Dで数分~
シミュレーション	整形	0.1mm単位	重視	3分	数分	2-Dで数分~
	メガネ	1mm以内	重視	3分	数分	2-Dで数分~
	髪・衣服	1cm以内	重視	3分	数分	2-Dで数分~

シミュレーション分野については、ヘア・衣服シミュレーションでは、形状再現精度の要求が1cm以内のため、小型立体造形と同様に低解像度画像の適用、後処理工程への最適化で対応が可能であるといえる。しかし、メガネ装着シミュレーションについては、低解像度画像を適用した場合は、形状再現精度の要求を満たさないため、高解像度画像を使用して、かつ処理の高速化が必要である。整形シミュレーションについては、形状再現精度の要求が高く、現在の手法では対応が不可能であり、他のアクティブステレオ法の併用などが必要である。なお、現在のところメガネを装着したまま撮影を行うとレンズの屈折で頭部の撮影画像に歪みが生じ、正しくモデリングができないため、メガネをはずして撮影を行っている。そこで、立体造形においては、別途用意するメガネモデルデータベースから選択して、造形用CADソフトウェア上で合成して対応している。メガネシミュレーションにおいては、卓上の3次元モデリングシステム[MFK99a, Sol06]を用いて、実際のメガネを撮影して、写実度の高いテクスチャ付きのモデルを生成し、利用することも可能である。

次に、実際に本システムを活用した応用展開の具体例を以下に示す。まずコンピュータグラフィックスアニメーションへの応用では、通常1週間以上かかる作業が1~2時間に時間短縮可能であることが確認できている[ワーク 01, ワーク 02]。一方、本システムが頭髪を含んだ頭部全体のモデルを生成可能であるという特徴を生かして、3次元データから切削加工用データを生成し、写実度の高い彫像・人形を自動造形するシステムへの展開が可能となった。図 3.18 (a)に示した彫像例は、図 3.9 に示した結果から加工した例で、左から 実物体の 1/8, 1/2, 1/4 のサイズとなっている。材料は主にケミカルウッドやセラミックボードを使用している。前節の図 3.15 で示した本手法の最終形状の例



(a) 彫像切削加工例



(b) クリスタル加工例

図 3.18 人体頭部3次元モデルの応用展開例

に見られるように、本手法では後処理をしない状態でも滑らかな形状が得られている。実際の自動造形においても、従来必要であった手作業による修正が削減され、本手法の有用性が確認された。

この他に、生成した3次元データから点群データを生成し、クリスタルをレーザで自動加工するシステムで、360度全周囲の形状とテクスチャを活用し、従来にない写実度が高く、全方向から観賞できるクリスタル製作が可能となった。図 3.18(b)にそのクリスタル加工の例を示す。表 3.3 に示すように、クリスタル加工は加工自体が数分から十数分で可能なため、高精度化よりも、撮影当日、撮影したその場で加工可能な高速な処理が重視される。本手法では、前節の図 3.15 に示したように、従来手法で高解像度画像を使用して処理した結果と同等かつクリスタル加工に十分な形状再現性を低解像度の画像を使用することでも実現が可能となった。つまり、このような応用においても本手法は有効であるといえる。

以上のように、本アルゴリズムは要求精度に応じて画像解像度を変えることにより、速度を優先した処理も可能であり、要求精度の異なる幅広い応用に簡単に対応できる汎用性と実用性を兼ね備えているといえる。

3.3 人体顔前面部全自動モデリングシステム

本手法とシステムの性能, 使い勝手, 安定性などの実用性が高く評価されて, 2005 年日本国際博覧会 (愛・地球博) 三井・東芝館の大規模な映像アトラクションにおける人体顔前面部の 3 次元入力装置として構築した全自動モデリングシステムについて述べる.

本節では, まず撮影とモデリングを行う基本システムについて, 要求条件を整理し, その要求条件を満たす機器構成を決定するための基礎実験とその結果構築した基本システムについて述べ, 実際のモデリング例を示す. 次に, 大規模映像アトラクションにおいて, 限られた時間内で多くの人を処理することを目的に, 複数台の基本システムと PC をネットワーク接続して自動制御することにより, 多人数のデータを同時に処理することを実現した並列処理システムについて述べ, その実働結果を示す.

3.3.1 基本システム

システムの要求条件

人物顔の 3 次元データの応用展開は, 成形・化粧・眼鏡などのシミュレーションや映画・CG(Computer Graphics)での合成など様々で, また実用面では, 店舗やスタジオなど限られた時間と空間での利用がほとんどであり, 小型で簡便なシステムが期待されている. このようなシステム実用化における全体的な課題としては, 以下の項目が挙げられる. これらは, 日本国際博覧会の大規模映像アトラクションにおいても同様である.

1. 人種・性別・年齢の様々な被写体を問題なく処理する
2. 長期にわたって安定した稼動を実現する
3. 操作に不慣れな操作者を前提とした処理の全自動化を実現する
4. キャリブレーションなど, 日々のメンテナンス作業の簡易化を実現する

日本国際博覧会の大規模映像アトラクションでは, 来場者の顔の 3 次元情報を自動計測し, 上映される映画の中に来場者自身を登場させることで, 映画の物語を疑似体験させることを実現する[森島 05]. 図 3.19 にアトラクションの流れを示す.

図 3.19 に示すように, 上映開始までの約 20 分間にアトラクションの定員である 240 名全員の顔を CG 化し, 映像を作り上げなければならない. 来場者は 20 名ずつのグループに分かれてプレシヨールームに誘導される. プレシヨールームでは, 5 台の 3 次元

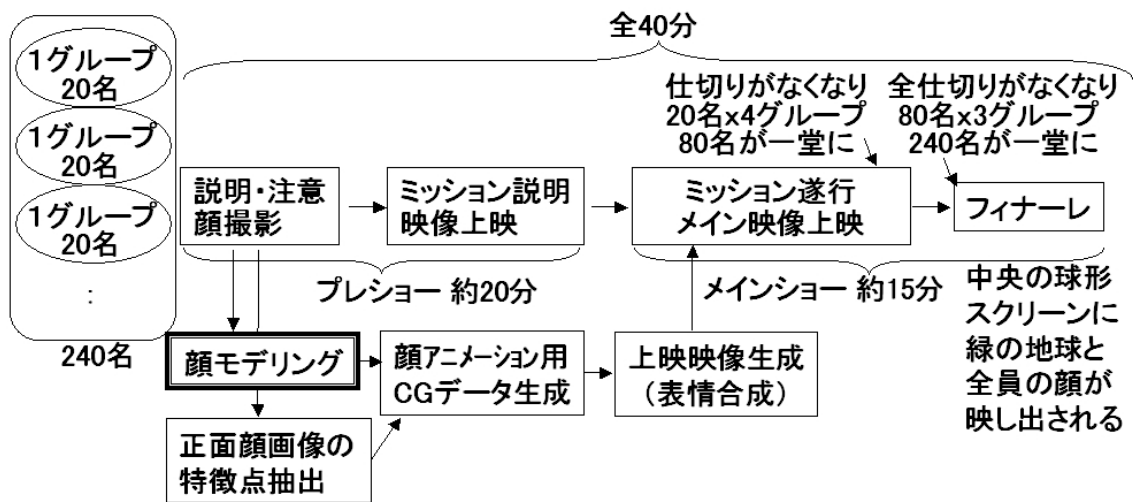


図 3.19 映像アトラクションの流れ

モデリングシステムを用いて、1 台のシステムで 4 人の顔の 3 次元情報を計測する。撮影から CG データの生成まで一人当たり約 5 分の計算になるが、実際には人の入替え、データの確認が必要となるため、処理の時間は 3 分程度となる。また、プレショールームの大きさは約 $650\text{cm} \times 360\text{cm}$ である。そこで基本システムの要求条件を以下のように設定した。

1. 撮影とデータ処理のそれぞれを自動化する
2. 顔の正面からの距離情報とテクスチャ情報を 2 分以内に生成する
3. 髭などの特徴の再現とテクスチャの品質を重視する
4. 機器構成の簡素化を図り、システムの大きさを $130\text{cm} \times 90\text{cm}$ (横×奥)以内にする

基礎実験

上記要求条件を満たすための撮影システムの構成として、カメラとパターンプロジェクターの台数とステレオ処理の基本条件を決定するために、前節で述べたシステムを用いて、基礎実験を行った。

まず基礎実験①として、前節のシステムをそのまま使用して、髭ありと髭なしの 2 種類の人を対象に実験を行い、実現可能性を検証した。次に、基礎実験②として、マネキンを入力対象として、パターンプロジェクターの台数と通常光撮影用カメラの台数、及びパターン光投影撮影用カメラの台数を決定するための実験を行い、各機器の台数を決定した。その概要を以下に示す。

基礎実験① 結果と考察

まず前節のシステムをそのまま使用し、一般的な髭なし顔と特徴的な髭あり顔の2種類の顔を対象にした実験結果を示す。実験は、前節のシステムで撮影した画像から、顔前面部に対応するカメラの画像を選択して使用した。選択した画像は、図 3.3 に示したカメラの番号で、4 番から 10 番、19 番から 24 番で、スライドプロジェクターは前節のシステム同様2台使用している。そして、通常光撮影画像の7枚全てを使う場合と中央よりの5枚を使う場合の2つの条件で比較を行った。

実験におけるモデリング処理では、通常光撮影画像から顔部分のシルエットを手作業で抽出して、以後の処理を行った。また、3眼ステレオ処理の組み合わせ（マスタ画像、スレブ画像、チェック画像）は、（21番、19番、20番）と（22番、24番、23番）とした。また、テクスチャ生成には、6番、7番、8番の通常光撮影画像を用いた。

図 3.20に実験に使用した髭なし顔の処理画像を示す。なお、画像の下の番号は、図 3.3 に示したカメラの番号に対応している。図 3.21 に髭なし顔のモデリング結果を示す。この結果から、通常光撮影画像5枚で十分な結果が得られることが分かる。次に、髭あり顔の処理画像を図 3.22 に示す。また、髭あり顔のモデリング結果を図 3.23 に示す。この結果から、髭部分の再現性についても、シルエット用画像5枚で十分な結果が得られることが分かる。

以上の結果から、前節のシステムでカメラを顔前面に対応するカメラを用いて、提案手法を適応することにより、人体顔前面部の個人の特徴を再現する3次元モデリングが可能であることが確認できた。つまり前述した要求条件の1を満たす可能性があるといえる。次に、より詳細な条件を決定するための基礎実験②について述べる。

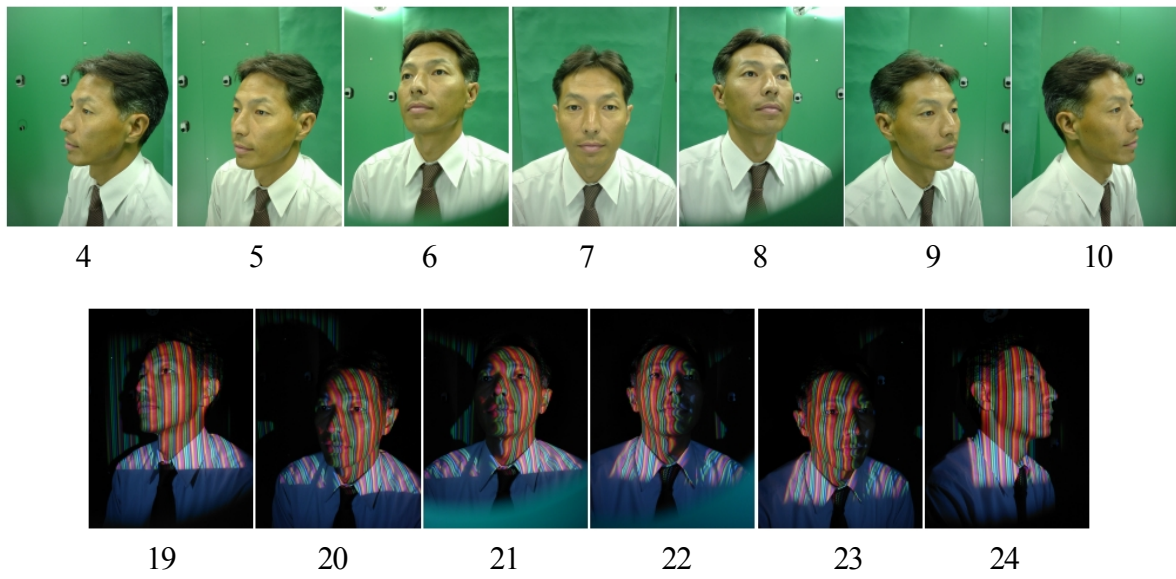
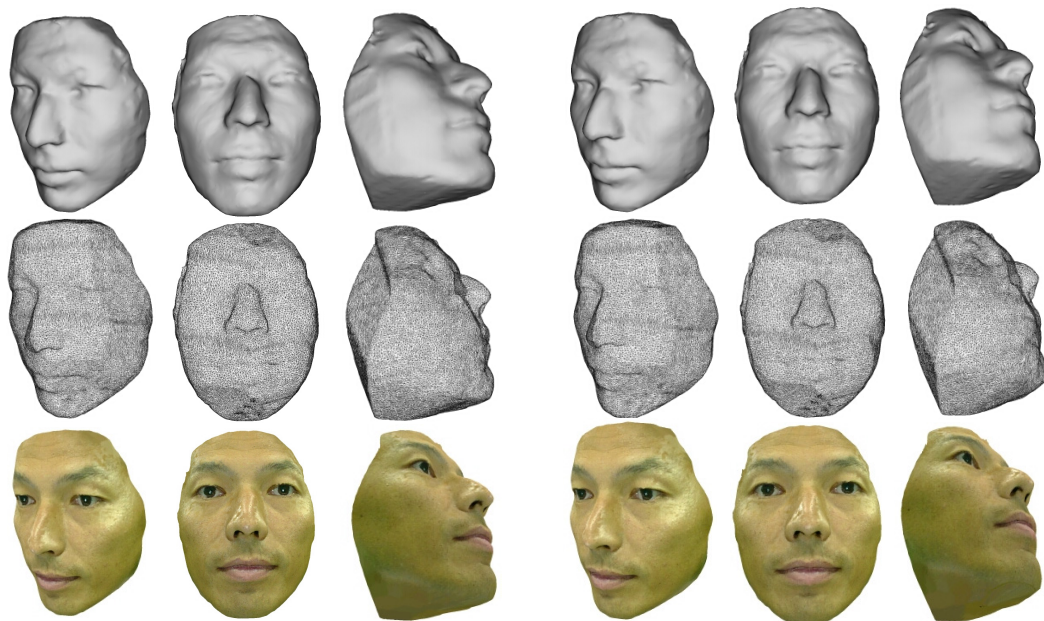


図 3.20 基礎実験① 髭なし顔の処理画像



(a) 通常光撮影画像 7 枚使用

(b) 通常光撮影画像 5 枚使用

図 3.21 基礎実験① 髭なし顔のモデリング結果

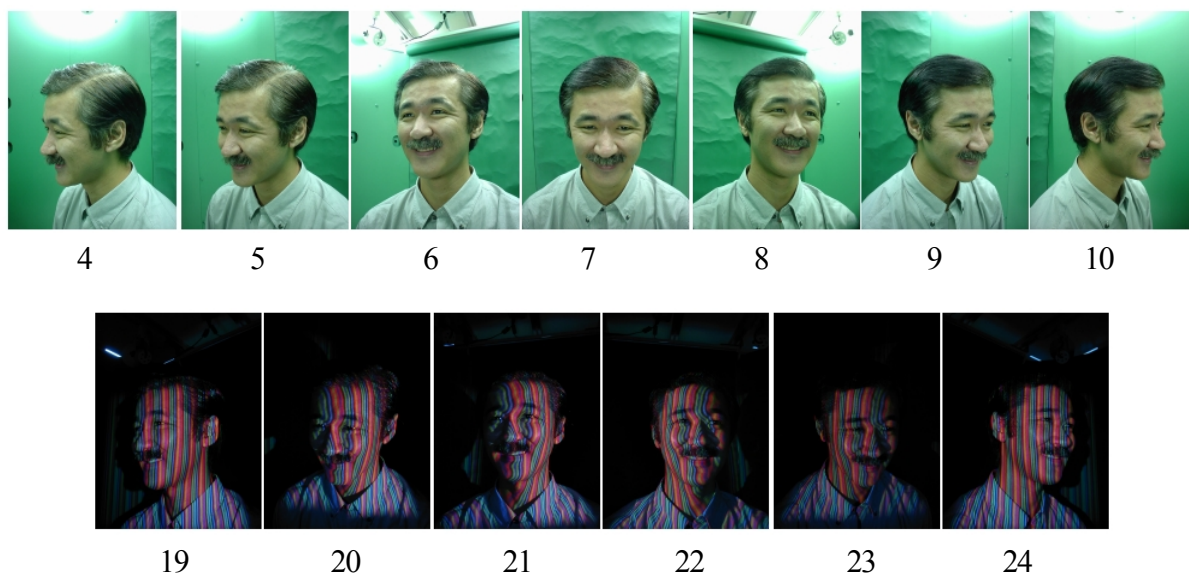
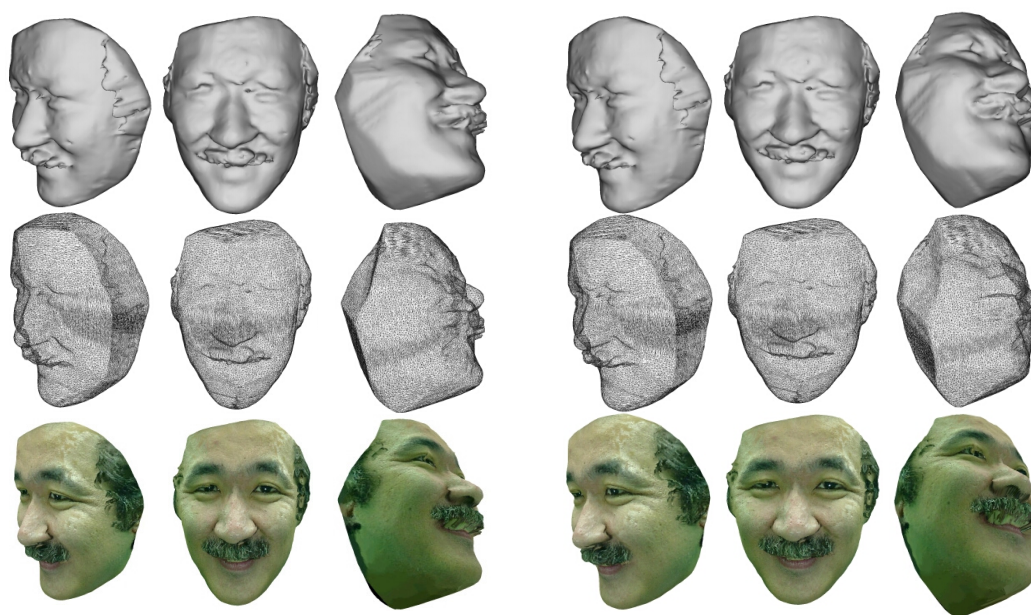


図 3.22 基礎実験① 髭あり顔の処理画像



(a) 通常光撮影画像 7 枚使用

(b) 通常光撮影画像 5 枚使用

図 3.23 基礎実験① 髭あり顔のモデリング結果

基礎実験②

処理の高速化と機器構成の簡素化には、カメラとパターンプロジェクターの台数の削減が有効である。しかし、台数削減により、最終的に得られる形状やテクスチャに悪影響が生じることが予想される。そこで、システムで使用するパターンプロジェクターの台数と通常光撮影用カメラの台数、及びパターン光投影撮影用カメラの台数を決定するために、マネキンを入力対象として、表 3.4 に示す 6 つの条件で前節のシステムを用いた比較実験を行う。なお、実際のシステムでは、機器構成のさらなる簡素化を図るため、通常光撮影とパターン光投影撮影を短時間で連続撮影可能なカメラを新たに採用し、カメラの台数を削減することを予定しているため、本実験では、カメラの配置を図 3.3 に示す配置から 6 番と 20 番、8 番と 23 番を入れ替えて、通常光撮影用カメラとパターン光投影撮影用カメラをそれぞれ水平配列とした。

基礎実験② 結果と考察

条件 I から VI による実験結果を、それぞれ図 3.24 から図 3.29 に示す。なお、ステレオ処理画像の項目の番号記述は、3 眼ステレオ処理の場合は（マスタ画像、スレブ画像、チェック画像）、2 眼ステレオ処理の場合は（マスタ画像、スレブ画像）となっている。

表 3.4 基礎実験②の機器台数条件

	プロジェクター台数	通常光撮影用カメラ台数	パターン光投影撮影用カメラ台数
条件 I	2	7	6
条件 II	2	5	6
条件 III	2	5	4
条件 IV	1	5	6
条件 V	1	5	4
条件 VI	1	5	2



図 3.24 基礎実験②条件Ⅰのモデリング結果
 プロジェクター : 2 台 (左右斜め方向から)
 シルエット処理画像 : 4,5,6,7,8,9,10,
 ステレオ処理画像 : (21,19,20),(22,24,23)
 テクスチャ処理画像 : 6,7,8



図 3.25 基礎実験②条件Ⅱのモデリング結果
 プロジェクター : 2 台 (左右斜め方向から)
 シルエット処理画像 : 4,6,7,8,10
 ステレオ処理画像 : (21,19,20),(22,24,23)
 テクスチャ処理画像 : 6,7,8



図 3.26 基礎実験②条件Ⅲのモデリング結果
 プロジェクター : 2 台 (左右斜め方向から)
 シルエット処理画像 : 4,6,7,8,10
 ステレオ処理画像 : (21,19),(22,24)
 テクスチャ処理画像 : 6,7,8



図 3.27 基礎実験②条件Ⅳのモデリング結果
 プロジェクター : 1 台 (正面方向から)
 シルエット処理画像 : 2,3,5,7,8
 ステレオ処理画像 : (18,16,17),(19,21,20)
 テクスチャ処理画像 : 2,5,8



図 3.28 基礎実験②条件Vのモデリング結果
 プロジェクター : 1台 (正面方向から)
 シルエット処理画像 : 2,3,5,7,8
 ステレオ処理画像 : (18,16),(19,21)
 テクスチャ処理画像 : 2,5,8



図 3.29 基礎実験②条件VIのモデリング結果
 プロジェクター : 1台 (正面方向から)
 シルエット処理画像 : 2,3,5,7,8
 ステレオ処理画像 : (18,19)
 テクスチャ処理画像 : 2,5,8

以上の結果から、パターンプロジェクターの台数に関しては、1台の場合では鼻の両脇の形状と頬の奥側の形状が十分得られないため、2台以上が必要であるといえる。カメラの台数に関しては、シルエット処理用に通常光撮影を行うカメラは5台でも十分であることが分かる。一方、ステレオ処理用にパターン光投影撮影を行うカメラの台数としては、左右それぞれ3台で3眼ステレオ処理を行うことが安定性の面からも望ましいことが分かる。

次に、その他のシステム要求条件である2~4について検討する。まず、システム要求条件2と3については、全体の処理時間を2分以内にしながら、テクスチャの品質を上げなければならない。ここで、処理速度を速くするためには低解像度の画像を使用すると良いが、その場合テクスチャの解像度も低下し、品質が低下してしまう。またテクスチャの生成処理において、複数枚の画像からテクスチャを合成すると処理時間がかかってしまう。そこで、これまでの基礎実験の結果も踏まえて、以下の方針でシステムを構成する。

1. テクスチャの品質確保と処理時間短縮を両立させるために、テクスチャ情報は正面撮影画像そのものとし、これに対応した距離情報を生成することで、全体モデルの生成時間の短縮を図る。
2. 左右それぞれで、パターン光投影撮影と複数の組み合わせの3眼ステレオ処理を行い、ボクセル空間での投票値の閾値を組み合わせ数-1として、エラーを許容し、安定した形状再現性の確保を図る。
3. 処理画像の解像度、ステレオ処理の組み合わせ、3次元ボクセル空間の解像度は、処理の安定性、処理時間、形状の再現性を勘案して決定する。

システム要求条件4については、まず、機器構成のさらなる簡素化を図るため、通常光撮影とパターン光投影撮影を短時間で連続撮影可能なデジタルカメラ(SANYO DSC-J2)を新たに採用し、カメラの台数を削減する。このカメラ台数の削減は、システムのコスト削減にも寄与する。またこのカメラは、前節のシステムのカメラ(SANYO DSC-SX560)の画像解像度が1360×1024であったのに対し、最大で2880×2160の画像解像度が使用可能で、形状とテクスチャの再現性の向上も期待できる。また、スライドプロジェクターには小型のCABIN CS-15を採用する。次に、システムのサイズについては、人体寸法の統計データ[河内00]を参照し、日本人の顔の大きさが、横幅が最大で18cm程度、縦が最大で26cm程度であることを確認し、上記デジタルカメラを用いた場合に

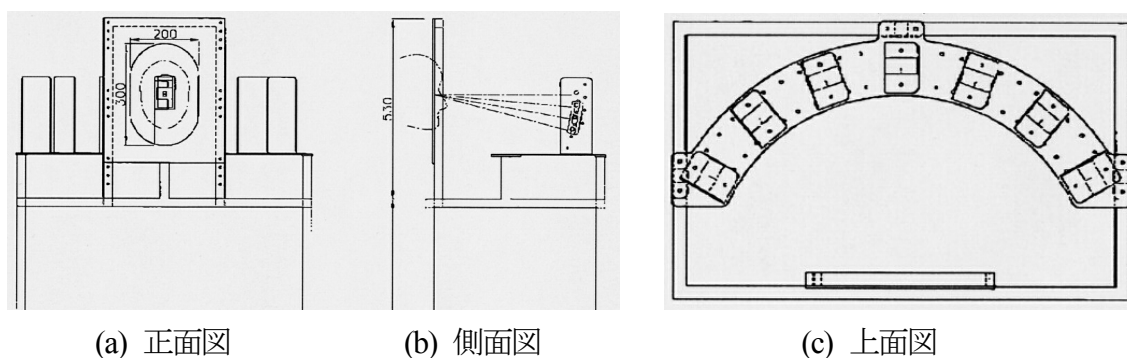
被写体から約 40cm 程度でも十分入力が可能であることを確認した。以上の方針に基づき構成した基本システムについて以下に述べる。

基本システム構成

上記方針に基づき、基本システムとして図 3.30 に示すシステムを構築した。本システムでは、人体顔前面部を中心にカメラ位置を等距離（約 45cm）で配置した。また、シルエット抽出を容易にするように単一色の背景板にあげられた穴から顔を出すよう構成した。システムの概略図を図 3.31 に示す。



図 3.30 基本システムの様子



(a) 正面図

(b) 側面図

(c) 上面図

図 3.31 基本システムの概略

基本システムの詳細は上記方針から以下のとおりに決定した。なお、下記に記したカメラ番号は、向かって左から順に1から7を付している。

1. 総カメラ台数：7台
正面通常光撮影専用カメラ：1台（カメラ番号：4）
左右通常光撮影，パターン光投影撮影兼用カメラ：6台（カメラ番号：1,2,3,5,6,7）
2. 総スライドプロジェクター台数：2台（カラーパターン：被写体に対して縦縞）
3. 総撮影枚数：13枚（通常光撮影7枚，パターン光投影撮影6枚）
（各画像解像度：1200×1600）
 - A) シルエット処理用画像：7枚（各画像解像度：600×800（撮影画像を縮小））
 - B) ステレオ処理用画像：6枚（各画像解像度：600×800（撮影画像を縮小））
 - C) テクスチャ処理用画像：1枚（画像解像度：1200×1600）
4. 3次元ボクセル空間解像度：600×400×600（横×縦×奥行き）
（1ボクセルの分解能：約0.46mm×0.9mm×0.46mm（横×縦×奥行き））
5. 拡張 Shape-from-Silhouette 処理におけるボクセル投票閾値：7（エラー許容値：0）
6. ステレオ処理視点：6視点（左右それぞれ3視点）
組み合わせ（マスタ，スレブ，チェック）：(1,3,2),(2,3,1),(3,1,2),(5,7,6),(6,5,7),(7,5,6)
距離画像ボクセル投票閾値：5（エラー許容値：1）
7. 装置サイズ：幅 約90cm × 奥行き 約60cm

3.3.2 基本システムによる人体顔前面部のモデリング実験

上記基本システムによる実際の人体顔前面部の撮影画像例を図 3.32 に，モデリング結果を図 3.33 に示す。なお，テクスチャ画像は後段の CG データ生成の仕様に合わせて画像サイズが1024×1024になるよう変換されている。本撮影画像の処理時間は120.3秒（10回計測の平均値）であった。計算に使用した PC の基本仕様は，CPU:Pentium4 3GHz，メモリー：2GB，OS：Windows XP Professional である。また，図 3.34 に，モデリング結果からポリゴンを生成し，テクスチャマッピングしたモデル例を示す。左からポリゴン表示，シェーディング表示，及びテクスチャ表示（2方向）である。写真画質のテクスチャによる写実性の高いモデルが生成できているのが分かる。これらの結果を基に，最終的に構成したシステムの概観図を図 3.35 に示す。

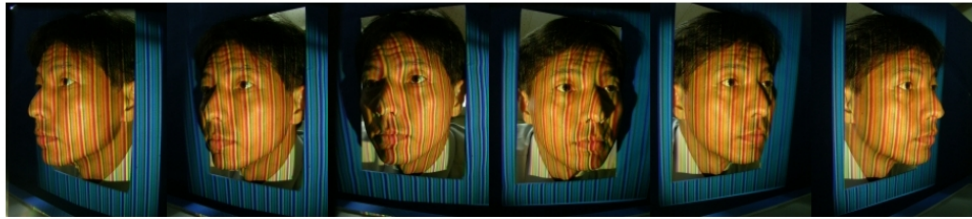
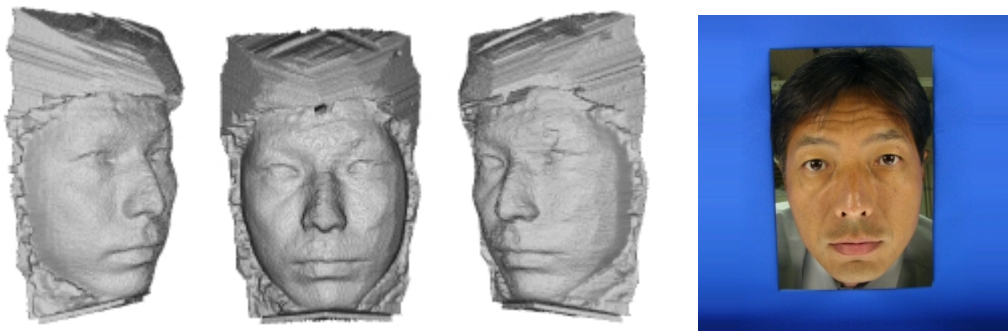


図 3.32 人体顔前面部の撮影画像例



(a) 正面距離画像の表示例

(b) テクスチャ画像

図 3.33 人体顔前面部のモデリング結果

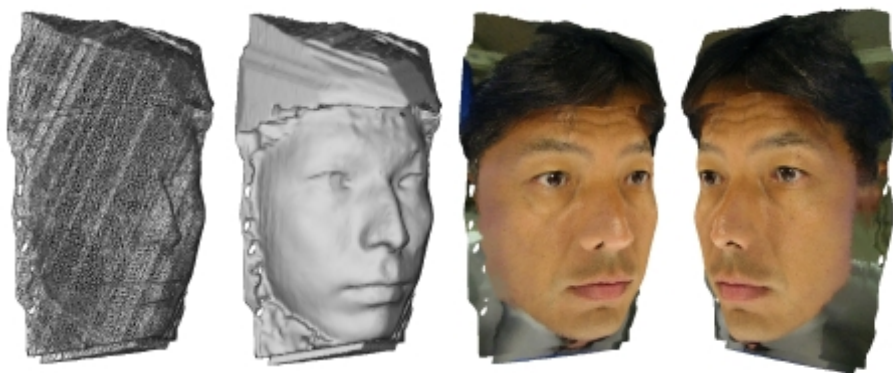


図 3.34 人体顔前面部のモデル例



(a) 最終基本システムの内部の様子



(b) 最終基本システムの外観

図 3.35 最終基本システムの概観

以上の結果から、コンパクトなデジタルカメラ7台、小型のスライドプロジェクター2台という簡素な機器構成で、床占有面積1平方メートル以内という小型の実機において、撮影時間が2秒、正面からの距離情報と写真画質の高精細なテクスチャデータの生成処理を2分で実現し、システムの要求条件を満たしていることを確認した。

3.3.3 大規模映像アトラクション向け並列処理システム

前節で、基本システムが処理時間2分を実現可能であることを示した。しかし、実際には、人の入れ替わりやデータの確認などにも時間がかかり、その時間は不確定である。そこで、限られた時間の中でできるだけ多くの人を速く処理することが要求される。本節では、基本システムと複数台のPCをネットワーク接続して、撮影後に別のPCで処理をするよう自動制御することにより、多人数を同時に処理することを実現する並列処理システムについて述べる。本システムの要求条件は以下の通りである。

システム要求条件

1. 約10分で4名の処理を完了する。(1つのプレシヨールームに5台の並列システムを設置して、20名の処理を行う。)
2. 撮影制御は、別途用意するオペレータ用PCから行い、失敗を減らすために2回の撮影を行う。
3. モデリング開始制御は、オペレータ用PCから行い、2回の撮影データのうち、オペレータが指定したデータを使用する。
4. 撮影データは、別途用意するデータサーバに保存する。
5. 出力データは、正面顔撮影画像とそれに対応した距離情報とする。なお、出力データは、CGデータ生成に用いられ、生成されたCGデータは、オペレータが確認後、データサーバに保存される。
6. 1名につき1台のPCを使用し、ネットワークに接続し、自動制御する。

以上の要求条件を満たすシステムを検討した結果、次のようなシステム構成とした。

並列処理システムの構成

図3.36に示すように、前節の基本システムを用いて、撮影制御兼モデリング用PCが1台とモデリング専用PCが3台の合計4台のPCをネットワーク接続し、以下の手順で並列処理する構成とすることで上記要求条件を満たすことを可能にした。なお、以下の

手順に示した PC の番号は、図 3.36 に示す PC の番号に対応する。また、PC の基本仕様は、CPU : Pentium4 3GHz, メモリー : 1GB, OS : Windows XP Professional である。

- ① モデリング実行 PC の番号 i を 1 に設定する。
- ② オペレータ用 PC からの撮影指示を受けて、撮影用 PC が撮影を実行し、撮影画像をデータサーバへ保存する。(2回)
- ③ オペレータ用 PC からのモデリング指示を受けて、撮影用 PC がモデリング実行 PC の番号 i を、 i に 1 を加算して 4 で割った余りの値で更新し、モデリング用 PC i にモデリング実行を指示し、モデリング用 PC i はモデリングを実行する。
- ④ 次の被写体の準備ができれば、上記手順②、③を、繰り返す。(3回)

以上のシステム構成で、撮影をしている間にモデリングが可能となり、1名分の撮影・入替え時間を2分と見積もって、4名の撮影・入替えと最後のモデリング時間の合計10分での処理完了を実現し、システムの要求条件を満たすことが可能となった。なお、5つの並列システムは、1台のオペレータ用 PC から同時制御され、1度に5名の撮影が実行され、全体で20名の処理が行われる。

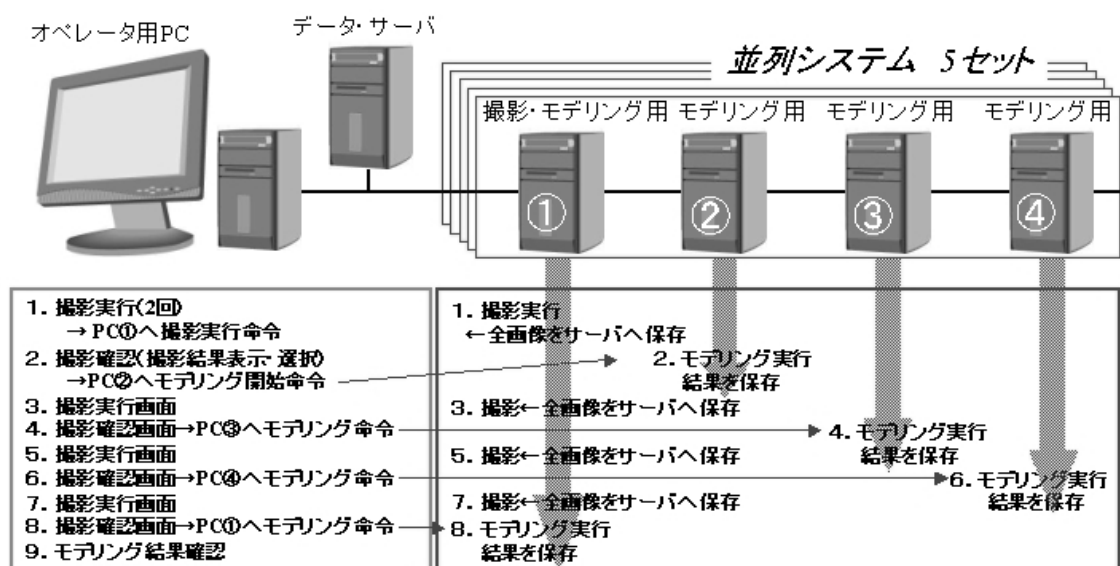


図 3.36 大規模映像アトラクション向け並列処理システムの構成

3.3.4 2005 年日本国際博覧会（愛・地球博）での実働結果

2005 年日本国際博覧会（愛・地球博，略称：愛知万博）は、「自然の叡智」をメインテーマとし、1) 宇宙，生命と情報，2) 人生の“わざ”と智恵，3) 循環型社会をサブテーマとして，2005 年 3 月 25 日～9 月 25 日（185 日間），愛知県瀬戸市の南東部，長久手町，及び豊田市の約 173ha で開催された．当初の目標入場者数は 1,500 万人で，最終公式入場者数は 2,205 万人と大幅に目標を超え，人気の高い博覧会となった．

本システムを導入した三井・東芝館は，定員である 240 名全員の顔の 3 次元情報を取得して，宇宙を駆け巡る映画に登場させ，さらに映像中で出演者として演技させることで，物語への没入間と新たな感動を与えるアトラクションである[森島 05]．アトラクションの演出としては，図 3.19 に示したように，来場者はまず 20 名のグループに分かれてプレシヨールームに誘導される．プレシヨールームに設置された 5 台の 3 次元モデリング装置で構成される並列処理システム（図 3.36）で顔の撮影を行う，その後 20 名毎に仕切られた奥の部屋に移動して出来上がった映像を鑑賞する．物語が進行すると 4 つに分割されていた部屋が 1 つになって 80 名の空間が形成され，より大きな画面で迫力のある映像を鑑賞する．そして最後に，今まで鑑賞していたスクリーンが下降してなくなり，その後ろから地球が現れ，それを囲んで 240 名全員が対面する構成になっている．ここで，本並列システムは 12 のプレシヨールームにそれぞれ 5 台が設置され，全体で 60 台の基本システムが導入され，一度に 240 名の処理が実現されている．

期間中の稼働結果については，1 日の稼働時間が 11 時間 30 分から 12 時間 30 分とされており，平均で 1 日に 36 回のショーとした場合に，開催期間全体の 185 日間で 6,660 回，約 160 万人のキャパシティがあることになる．実際に入館者総数は，1,625,897 人（1 日最大 9,523 人，1 日平均 8,791 人）を数えた．入場者が全員モデリングしたとは言えないが，ほぼ全システムが終日稼働したと言っても良い．なお，実際の出演については，生成された 3 次元データと，正面顔画像を用いて別処理で得られる特徴点抽出データから，標準顔モデルの対応付けを行い，CG 顔データが作成された後，アテンダントによって上映に耐えられるかどうかの目視確認が行われる．そこで耐えられないと判断した場合は，あらかじめ用意されているデータに差し替えられる．2005 年 9 月 1 日から 9 月 25 日までの 25 日間，902 回の上映で 21 万 6480 人分の確認結果を集計したところ，平均で 93.5%，最高 94.5%，最低でも 92.5%の確率で出現することが出来た[森島 06]．つまり，3 次元モデリングに関してはこれ以上の確率で良好なモデルが得られていたこと

になる。期間中、世界各国の様々な人種、性別、年齢の人々が来場し、本システムを導入したアトラクションを体験しており、そのなかでも高い出演確率を実現できたといえる。また、アトラクション自体は、全体でも1, 2位を争う人気アトラクションとして評価され、様々なメディアでも紹介された。

一方、実際のシステムの運用は、毎朝機器の立ち上げを行い、その時にカメラ位置・姿勢キャリブレーションを実行し、1日の終了時までは連続運転という運用で、最大の懸念材料は、観客の反応はもとより、機材、特にカメラの耐久性であった。1日に36回のショーを行うとして、1回のショーで1人2回の撮影を4名分、つまり1日に576回のシャッター、期間中に106,560回のシャッターを切ることになる。シャッターの耐久性は、一般的な一眼レフカメラで数万回から5万回程度と言われている。今回のシステムでは、一般的な使用環境とは異なり、比較的環境が一定で衝撃も少ないため、耐久性も伸びると考えられたが、念のため2回の交換を行った。結果として、撮影システムの不具合は、設置時や交換時のケーブルの接触不良以外はほとんど無いという好結果を得た。この結果は、耐久性が高い市販品を活用した柔軟なシステムを構成可能な本手法の成果ともいえる。

なお、人体顔前面部モデルの応用展開としては、この映像アトラクション以外にも、図 3.18 に示した人体頭部モデルと同様の応用分野が考えられる。例えば、造形分野では、あらかじめ作成したキャラクターに顔を合成させることで特徴的な造形物が制作可能である。また、シミュレーション分野としては、メガネや衣服シミュレーションにおいて、顔前面部だけでも簡易なシミュレーションが可能であり有用である。

3.4 結言

本章では、実際の人体頭部全周囲と人体顔前面部を対象として、前章で提案したハイブリッドモデリング手法を適用し、性能と信頼性を安価に確保可能な市販のデジタルカメラとスライドプロジェクターを活用して、操作者と被写体の両ユーザの負担を出来るだけ軽減するよう、より簡便でかつ実環境でも安定した全自動3次元モデリングが可能なシステムを構築した。またその応用展開として、彫像やクリスタルなどの自動造形と大規模な映像アトラクションへの適用例を示した。

前者のシステムにおいては、人体頭部の全周囲の形状とテクスチャを全自動で取得することに主眼をおいて構築したシステムの構成と全自動モデル生成を実現する各処理の概要について述べた。そしてまず、実際の人体頭部を対象として、特徴点ベースステレオ処理手法と前章で提案した2段階ステレオ処理手法についての比較実験を行い、提案手法による形状再現性の向上を定性的に確認した。次に、低解像度画像を利用した場合でも実用的な精度が確保できることを確認し、要求精度が厳しくない場合には、処理速度の向上が実現可能であることを示した。そして、形状再現精度に関して、人体頭部の実物体と生成されたモデルの部位寸法の実測比較を行い、平均でボクセル分解能(0.4mm)相当、最大でも1mm未満の誤差で形状が再現可能であることを確認した。実際の応用展開に関しては、応用分野の要求仕様を整理して示し、本システムの適用性を確認した。そして、具体的にシステムの特徴を生かした写実性の高い自動切削造形と自動光造形への応用例を示し、手作業の削減と全体処理時間の削減について述べ、ユーザの負担削減の効果を確認した。

後者のシステムにおいては、人体顔前面部に限定して、形状とテクスチャの全自動取得において高速化と小型化に主眼をおいて構築したシステムについて述べた。まず、基本システムの要求条件を整理し、その要求条件を満たす機器構成を決めるために前者のシステムを利用して基礎実験を行い、その結果として小型で簡便な基本システムを構築した。そして、その基本システムを実際の人体に適用し、要求仕様通りにモデリングできることを確認した。また、その応用展開として、大規模な映像アトラクションにおいて多人数の同時処理の実現を目的に、複数の基本システムと複数のPCをネットワークに接続した並列処理システムの構築について述べた。そして、実際に2005年日本国際博覧会(愛・地球博)において、60台の基本システムによる並列システムで約10分間に240人の処理を実現し、開催期間全体で185日間、約163万人に対して、大きなトラブ

ルも無く、安定した動作を実現できたことを確認した。

なお、本章の実験で使用した著者以外の顔画像の本論文への掲載については、本人に了解を得ており、そのデータは個人情報保護法の下で管理されている。また、日本国際博覧会で撮影されたデータと生成された3次元データは、個人情報保護の観点から、毎日閉館前に全て消去が行われたため、会期中の取得データによる詳細な性能評価は不可能であった[森島06]。

本章で構築したモデリングシステムでは、現在、撮影の時間が2秒から3秒かかっており、子供や高齢者のように静止が困難な対象の撮影には十分とはいえない。今後の応用展開をさらに広げるためには、1秒程度の撮影の実現が必要である。そして、応用分野の要求仕様で示したように、処理の高速化も必要である。また、全身へのモデリング対象の拡張やシステムの小型化も期待されている。一方、より忠実なモデリングには、毛髪の形状の再現性向上[YO+03, ST+04]や物体表面の反射特性の取得によるテクスチャの再現性向上が必要であるといえる。

4. 結論

本研究では、現在市販されている3次元スキャナーの多くが採用しているアクティブステレオ法の課題、特に人体頭部と顔を対象とした場合に生じる課題を解決し、操作者と被写体の両ユーザの負担を出来るだけ軽減し、より簡便にかつ実環境でも安定して3次元モデリングを行うことが可能なシステムを実現することを目標とした。そこで、対象物体の表面材質と模様の有無に影響されないロバストな手法として、拡張 Shape-from-Silhouette 法と一度の投影・撮影で計測が可能なカラーパターンを対象物体の特徴付けにのみ使用するマルチカメラアクティブステレオ法を統合したハイブリッドモデリング手法について述べ、そのステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期値として領域ベースステレオ処理をサブピクセルレベルで実行する2段階ステレオ処理手法を提案した。さらに、人体頭部と顔前面部を対象として、複数台のデジタルカメラとスライドプロジェクターを用いて短時間自動撮影及び撮影画像のみによる全自動モデリングを可能にすることで、操作者と被写体の負担を出来るだけ軽減するシステムを構築し、実験では実際の人体に適用して形状再現性の向上を確認した。また、具体的な応用展開例を示し、提案手法の有用性を確認した。特に人体顔前面部の全自動モデリングシステムについては、システムの性能、使い勝手、安定性などの実用性が高く評価されて、2005年日本国際博覧会（愛・地球博）の大規模映像アトラクションにおいて採用されたもので、1度に240名の3次元化を実現するよう構築した並列処理システムについて述べた。そして、その実働結果として開催期間中大きなトラブルも無く、安定した動作を実現できたことを示した。

2章では、複数台のカメラとスライドプロジェクターを用いて短時間で撮影した2種類の画像からロバストな形状計測を行う、拡張 Shape-from-Silhouette 法とカラーパターンを対象物体の特徴付けにのみ使用したマルチカメラアクティブステレオ法をボクセル空間で統合したハイブリッドモデリング手法について述べた。またマルチカメラアクティブステレオ法において、特徴点ベースステレオ処理に領域ベースステレオ処理を追加した2段階ステレオ処理手法を提案し、初期形状とシルエット情報に基づく処理範囲の限定、奥行き値の補間処理、及びサブピクセル処理を導入することにより、計測可能点数の増加と計測精度の向上が実現可能であることについて述べた。そして、形状が既知の

物体を対象物体として従来手法との比較実験を行い、形状再現性の向上、計測精度と計算速度に関する有効性を確認した。

3章では、実際に人体頭部全周囲と人体顔前面部を対象として、2章で提案したハイブリッドモデリング手法を適用し、性能と信頼性を安価に確保可能な市販のデジタルカメラとスライドプロジェクターを活用して、短時間撮影、全自動モデリング、安定動作を実現し、操作者と被写体の両ユーザの負担を出来るだけ軽減するよう構築した3次元モデリングシステムについて述べた。ここで、スライドプロジェクターによる投影パターンは被写体への特徴付けにのみ使用され、既存のアクティブステレオ法を実用化したシステムにおいて必要とされるカメラとプロジェクターの位置・姿勢キャリブレーションが不要で、かつ高精度な治具を必要としない簡易なシステム構成が可能となっており、また各カメラの位置・姿勢のキャリブレーションは参照物体を撮影した画像のみを用いて自動計算が可能な手法を採用し、合わせて操作者の負担軽減が実現可能であることを示した。さらに前者の人体頭部全周囲のモデリングシステムにおいては、特徴点ベースステレオ処理のみを用いる手法と2章で提案した2段階ステレオ処理手法についての比較実験を行い、形状再現性の向上と低解像度画像が利用可能になったことによる処理速度向上の実現可能性を示した。そして、形状再現精度に関して、人体頭部の実物体と生成されたモデルの部位寸法の実測比較を行い、平均でボクセル分解能(0.4mm)相当、最大でも1mm未満の誤差で形状が再現可能であることを確認した。また、システムの各応用分野への適応性を検証すると共に、具体的な応用展開として、システムの特徴を生かした写実性の高い自動造形への応用例を示し、手作業の削減や全体処理時間の削減などの有用性を確認した。後者の人体顔前面部のモデリングシステムにおいては、形状とテクスチャの全自動取得において高速化と小型化に主眼をおいて、基本システムを構築するための基礎実験とその結果構成された基本システムについて述べ、その応用展開として、大規模な映像アトラクションで多人数の同時処理を実現する並列処理システムについて述べた。そして、実際に2005年日本国際博覧会(愛・地球博)において、60台の基本システムを用いた並列システムで、約10分間に240人の処理を実現し、開催期間全体185日間で、約163万人に対して、大きなトラブルも無く、安定した動作を実現できたことを示した。

以上、既存のシステムでは実物体としてありのままの3次元化が容易ではない人体頭部全周囲・顔前面部を対象として、提案した2段階ステレオ処理手法を用いたハイブリッドモデリング手法により、頭髪や髭などを含む全体形状の再現と目鼻口耳などの詳細

形状の再現を同時に可能にし、市販のデジタルカメラとスライドプロジェクターを活用して実用的な精度と安定性を低コストで実現し、ユーザの負担を軽減するシステムを構築できることを示した。また実際にその応用展開として、精度が要求される人形造形と速度が要求されるクリスタル造形という相反する2種類の応用において、形状再現性向上による修正作業の削減と低解像度画像を使用した高速化が実現可能であることを示し、提案手法が要求精度の異なる幅広い応用に対応できる汎用性と実用性を兼ね備えていることを示した。そしてこのような性能が認められて採用された大規模映像アトラクションにおいても、185日間、約163万人に対してその安定性と性能を確認した。これらにより、今後より幅広い応用展開に適用可能であると期待できる。

本研究に残された課題としては、応用展開をさらに広げるための、人体頭部全周囲モデリングシステムの小型化と簡易化、人体全身への拡張、撮影と処理の高速化、及び実物体により忠実なモデル生成の実現が挙げられる。人体頭部全周囲モデリングシステムの小型化と簡易化は、人体顔前面部で使用した連続撮影が可能なデジタルカメラと小型プロジェクターを採用することでカメラ台数の削減と小型化が可能である。一方、人体全身への拡張を限られた空間で実現するためには、カメラ・プロジェクターを縦方向に複数段に配置する必要がある。この際にカメラの位置・姿勢キャリブレーションに用いる参照物体の一部が全てのカメラに写るよう工夫する必要がある。撮影の高速化には、動画撮影カメラの適用が考えられる。しかし、プロジェクターの同期には複雑な機械が必要となるため、簡易なシステムを構成するためには、一定時間撮影した動画の画像情報からパターンの投影を自動判別する技術が必要である。処理の高速化は、PCの処理能力の向上である程度は改善されるが、処理の並列化やハードウェア化が有効である。映像制作現場で活用されているCG応用に向けての実物体により忠実なモデルの生成には、表面テクスチャの反射特性の推定技術だけではなく、髪の毛や肌などの質感を重視した表現力と再現性向上技術が必要である。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，親切なるご指導，ご鞭撻を賜りました本学 視覚情報メディア講座 横矢 直和 教授に心より深謝致します。また，本論文をまとめるにあたり貴重なご教示を頂きました本学 知能情報処理学講座 木戸出 正繼 教授，本学 像情報処理学講座 千原 國宏 教授に厚くお礼申し上げます。

そして，論文執筆に対して丁寧なご教示，ご助言を頂きました本学 視覚情報メディア講座 山澤 一誠 助教授，神原 誠之 助手，佐藤 智和 助手，池田 聖 特任助手，浅井 俊弘氏，ならびに視覚情報メディア講座諸氏に深く感謝致します。

また，日頃から様々な面で暖かくご支援頂きました本学 視覚情報メディア講座 事務補佐員 守屋 知代 女史に心より感謝申し上げます。

本研究は，著者が三洋電機株式会社研究開発本部デジタルシステム研究所にて行ったものをまとめたものであり，研究の遂行，ならびに論文をまとめる機会を与えて頂きました研究開発本部デジタルシステム研究所 船造 康夫 所長（現在同社 AV カンパニープロジェクトテクノロジーBU リーダー），富田 義数 所長，片山 立 室長，大西 宏樹 部長，三浦 宏喜 部長，蚊野 浩 部長，北村 徹 部長（現在経営企画室コラボレーション推進部），江見 哲一 課長に深く感謝致します。

また，研究活動はもとより，論文作成にあたり，多大なご協力を頂きましたデジタルシステム研究所 松本 幸則 部長（現在同社研究開発本部経営企画室 Global R&D 推進部），大上 靖弘 課長，寺内 智哉 氏に心より感謝致します。

そして，本システムの事業化に尽力され，実験への多大なご協力と実用化に対しての率直なご助言を頂きました研究開発本部 石川 猶也 課長（現在 Corporate DNA Evolution Plan 推進本部）と実際のシステム設計，製作に尽力され，実験へも多大なご協力を頂きました有限会社アクセス 早野 治朗 氏に深く御礼申し上げます。

最後に，いつも元気と笑顔を与えてくれている息子とかげながら心の支えになってくれている妻に心から感謝致します。

参考文献

- [Bak77] H. Baker, “Three-Dimensional Modelling”, *Proc. 5th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, pp. 649-655, 1977.
- [Bre06] BREUCKMANN GMBH, “faceSCAN”, <http://www.breuckmann.com/HTML/engl/facescan.html>, 2006.
- [CBK03] K. Cheung, S. Baker, and T. Kanade, “Visual Hull Alignment and Refinement Across Time: A 3D Reconstruction Algorithm Combining Shape-from-Silhouette with Stereo”, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 375-382, 2003.
- [CH+97] C. Chen, Y. Hung, C. Chiang, and J. Wu, “Range Data Acquisition Using Color Structured Lighting and Stereo Vision”, *Image and Vision Computing*, Vol. 15, pp. 445-456, 1997.
- [Cog06] CogniTens Ltd., “Optigo”, <http://www.cognitens.com/>, 2006.
- [Cre06] Creative Dimension Software Ltd, “3DSOM”, <http://www.3dsom.com/>, 2006.
- [Cyb99] Cyberware Inc., “Head & Face Color 3D Scanner”, <http://www.cyberware.com/products/scanners/ps.html>, 1999.
- [FME01] K. Fujimura, Y. Matsumoto, and T. Emi, “Multi-camera 3D Modeling System to Digitize Human Head and Body”, *Proc. SPIE Electronic Imaging*, Vol. 4298, pp. 40-47, 2001.
- [Foc06] Focus Robotics, “nDepth Vision System”, <http://www.focusrobotics.com/products/systems.html>, 2006
- [Gom06] GOM mbH, “ATOS”, <http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/atos.html>, 2006.
- [Guh01] J. Guhring, “Dense 3-D Surface Acquisition by Structured Light Using Off-the-Shelf

- Components”, *Proc. SPIE Electronic Imaging*, Vol. 4309, pp. 220–231, 2001.
- [GW87] P. Giblin and R. Weiss, “Reconstruction of Surfaces from Profiles”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Computer Vision*, pp. 136-144, 1987.
- [Hor75] B. Horn, “Obtaining Shape from Shading Information”, *The Psychology of Computer Vision. McGraw-Hill*, pp. 115-155, 1975.
- [InS05] InSpeck Inc., “3D Capturor II”, <http://www.inspeck.com/products/3dcapturor/3dcapturor.asp>, 2005.
- [JFE04] JFE テクノリサーチ株式会社, “TriDY”, <http://www.jfe-tec.co.jp/product/tridy.html>, 2004.
- [LS01] H. Lin and M. Subbarao, “A Vision System for Fast 3D Model Reconstruction”, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 663-668, 2001.
- [LS+02] M. Li, H. Schirmacher, M. Magnor, and H. Seidel, “Combining Stereo and Visual Hull Information for On-line Reconstruction and Rendering of Dynamic Scenes”, *Proc. IEEE Workshop on Multimedia and Signal Processing*, pp. 9-12, 2002.
- [LT96] R.A. Lane and N.A. Thacker, “Stereo Vision Research: An Algorithm Survey”, <http://citeseer.ist.psu.edu/lane96stereo.html>, 1996.
- [Mar82] D. Marr, *Vision - A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information -*, W. H. Freeman and Co., 1982.
- [MBM01] W. Matusik, C. Bueler, and L. McMillan, “Polyhedral Visual Hulls for Real-time Rendering”, *Proc. 12th Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 115–126, 2001.
- [MFK99a] Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura, “CyberModeler: A Compact 3D Scanner Based on Monoscopic Camera”, *Proc. SPIE Electronic Imaging*, Vol. 3640, pp. 2-10, 1999.
- [MFK99b] Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura, “Shape-from-Silhouette/Stereo and Its

Application to 3-D Digitizer”, *Proc. 8th Int. Conf. on Discrete Geometry for Computer Imagery*, Lecture Notes in Computer Science 1568, pp. 177-188, 1999.

- [MK+00] T. Miyasaka, K. Kuroda, M. Hirose, and K. Araki, “Reconstruction of Realistic 3D Surface Model and 3D Animation from Range Images Obtained by Real Time 3D Measurement System”, *Proc. 15th LAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol 4, pp. 594-598, 2000.
- [Nec06] NEC Engineering Ltd., “Danae”, <http://www.nec-eng.com/>, 2006.
- [OK85] Y. Ohta and T. Kanade, “Stereo by Intra- and Inter- Scanline Search Using Dynamic Programming”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 7, No. 2, pp. 139-154, 1985.
- [OK93] M. Okutomi and T. Kanade, “A Multiple-Baseline Stereo”, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353-363, 1993.
- [Poi06] Point Grey Research Inc., “Bumblebee2, Digiclops”, <http://www.ptgrey.com/products/stereo.asp>, 2006.
- [PS+03] J. Pagès, J. Salvi, R. García, and C. Matabosch, “Overview of Coded Light Projection Techniques for Automatic 3D Profiling”, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp. 133-138, 2003.
- [RM98] D. Ritter and Y. Matsumoto, “3D-Surface Reconstruction with A Hand Held Video Camera”, *Proc. 10th Image and Multidimensional Signal Processing Workshop*, pp. 5-8, 1998.
- [Sat99] T. Sato, “Multispectral Pattern Projection Range Finder”, *Proc. SPIE Electronic Imaging*, Vol. 3640, pp. 28–37, 1999.
- [Sca06] ScanBull Software GmbH, “Scanbook”, <http://www.scanbull.net/>, 2006.
- [Sol06] Solisys, “RealModelist”, <http://www.solisys.co.kr/>, 2006.
- [ST+04] P. Shu, T. Terauchi, Y. Oue, and K. Fujimura, “Improved 3D Human Hair

- Representation Aided by A Fully Automatic Facial Extraction Algorithm”, 2004 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-148, 2004.
- [Sze93] R. Szelisky, “Rapid Octree Construction from Image Sequences”, *Computer Vision Graphics and Image Processing*, Vol. 58, No. 1, pp. 23-32, 1993.
- [TC+02] M. Tarini, M. Callieri, C. Montani, C. Rocchini, K. Olsson, and T. Persson, “Marching Intersections: An Efficient Approach to Shape-from-Silhouette”, *Proc. 7th Int. Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization*, pp. 283-290, 2002.
- [Tsa86] R. Y. Tsai, “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”, *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 364-374, 1986.
- [TSK02] S. Tosovic, R. Sablatnig, and M. Kampel, “On Combining Shape from Silhouette and Shape from Structured Light”, *Proc. 7th Computer Vision Winter Workshop*, pp.108-118, 2002.
- [Ull79] S. Ullman, “The Interpretation of Structure from Motion”, *Proc. the Royal Society of London*, pp. 405-426, 1979.
- [Vid06] Videre Design, “Small Vision System”, <http://www.videredesign.com/>, 2006
- [Vit01] VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH, “VITUS ahead”, <http://www.vitus.de/english/index.html>, 2001.
- [VM98] R. J. Valkenburg and A. M. McIvor, “Accurate 3D Measurement Using A Structured Light System”, *Image and Vision Computing*, Vol. 16, No. 2, pp. 99-110, 1998.
- [Vxt05] VX Technologies Inc., “StarCam FW-3”, http://www.vxtechnologies.com/starcam_fw-3.htm, 2005
- [WGB04] J. Woodfill, G. Gordon, and R. Buck, “Tyzx DeepSea High Speed Stereo Vision System”, *Proc. IEEE Workshop on Real Time 3-D Sensors and Their Use, Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 3, pp. 41-45, 2004.

- [Wit81] A. Witkin, "Recovering Surface Shape and Orientation from Texture", *Artificial Intelligence*, Vol. 7, pp. 17-45, 1981.
- [YKK86] M. Yachida, Y. Kitamura, and M. Kimachi, "Trinocular Vision : New Approach for Correspondence Problem", *Proc. 8th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp.1041-1044, 1986.
- [YO+03] E. Yim, Y. Oue, T. Terauchi, and K. Fujimura, "Improved 3D Human Head Reconstruction Aided by A Fully Automatic Facial Hair Extraction Algorithm", 2003年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-158, 2003.
- [ZG98] L. Zhou and W. Gu, "3D Model Reconstruction by Fusing Multiple Visual Cues", *Proc. 14th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, pp. 640-642, 1998.
- [Zha00] Z. Zhang, "A Flexible New Technique for Camera Calibration", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, Issue 11, pp. 1330-1334, 2000.
- [荒木 88] 荒木 和男, 田中 伸宣, 藤野 智浩, 佐藤 幸男, "高速 3 次元形状計測装置の試作", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J71-D, No. 10, pp. 2059-2068, 1988.
- [井口 90] 井口 征士, 佐藤 宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [ウ 01] ウ 小軍, 和田 俊和, 東海 彰吾, 松山 隆司, "平面間透視投影を用いた並列視体積交差法", 情報処理学会論文誌 : コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42, No. SIG 6 (CVIM 2), pp. 33-43, 2001.
- [大池 03] 大池 祐輔, 新宅 宏彰, 池田 誠, 浅田 邦博, "光切断法による高精細・実時間 3 次元撮像システム", 映像情報メディア学会誌, Vol. 57, No. 9, pp. 1149-1151, 2003.
- [小関 85] 小関 修, 中野 倫明, 山本 新, "光切断法を用いた実時間距離検出装置", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J68-D, No. 5, pp. 1141-1148, 1985.
- [河内 94] 河内 まき子, 横山 一也, 山下 樹里, 横井 孝志, 小木 元, 吉岡 松太郎, 渥美 浩章, 堀田 明裕, "設計のための人体寸法データ集", 生命工学工業技術研究所報告, 2 卷 1 号, 1994

- [河内 00] 河内 まき子, 持丸 正明, 岩澤 洋, 三谷 誠二, “日本人人体寸法データベース 1997-98”, 通商産業省工業技術院くらしと JIS センター, 2000.
- [コニ 06] コニカミノルタホールディングス株式会社, “Vivid”, <http://konicaminolta.jp/products/industrial/instrument/3d/>, 2006.
- [清水 02] 清水 雅夫, 奥富 正敏, “画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-II, No. 12, pp. 1791-1800, 2002.
- [下田 04] 下田 陽久, “HIS 変換と逆変換”, デジタル画像処理, 画像情報教育振興協会, pp. 64-68, 2004.
- [田島 90] 田島 譲二, 岩川 正人, “Rainbow Range Finder による距離画像取得”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J73-D-II, No. 3, pp. 374-382, 1990.
- [富田 87] 富田 文明, 高橋 裕信, “画像の B-Rep のためのアルゴリズム”, 情報処理学会研究報告, 87-CV-46, pp. 59-67, 1987.
- [埜 05] 埜 圭二, “前方認識システム用センシング技術”, [最新]車載用センサ/カメラ技術全集, 技術情報協会, pp. 62-72, 2005.
- [波部 05] 波部 斉, 角岡 幹篤, 鷺見 和彦, 松山 隆司, “画像の 2 次元空間構造を利用したサブピクセルマッチングの高精度化”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005)講演論文集, No. IS3-124, pp.1193-1200, 2005.
- [浜野 06] 株式会社浜野エンジニアリング, “Voxelan”, <http://www.voxelan.co.jp/>, 2006.
- [浜松 06] 浜松ホトニクス株式会社, “Bodyline Scanner”, <http://jp.hamamatsu.com/>, 2006.
- [森島 05] 森島 繁生, “フューチャーキャストシステム「三井・東芝館」”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 59, No. 4, pp. 522-524, 2005.
- [森島 06] 森島 繁生, 前島 謙宣, “愛・地球博「三井・東芝館」における新しいエンタテインメントへの挑戦 — 来場者の顔を 3Dセンシングして瞬時に映画の登場人物を生成—”, 第 12 回画像センシングシンポジウム予稿集, No. E-2, pp.333-338, 2006.

- [横矢 93] 横矢 直和, “多重スケールでの正則化によるステレオ画像からの不連続性を保存した曲面再構成”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1667-1675, 1993.
- [吉澤 93] 吉澤 徹(編), 三次元工学 1—光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ, 1993.
- [ワーク 01] ワークスコーポレーション, “多眼3次元モデリングシステム「ピエリモ」前編”, *CGWORLD*, Vol. 40, pp. 128-129, 2001
- [ワーク 02] ワークスコーポレーション, “多眼3次元モデリングシステム「ピエリモ」後編”, *CGWORLD*, Vol. 41, pp. 78-81, 2002

研究業績

学術論文誌

1. 藤村 恒太, 横矢 直和, 山本 和彦, “多重スケール画像を用いた動的輪郭モデルによる非剛体物体の輪郭追跡と動きの解析”, 電子情報通信学会論文誌 D-II 医用画像処理技術論文特集, Vol. J76-D-II, No. 2, pp. 382-390, 1993.
2. K. Fujimura, N. Yokoya, and K. Yamamoto, “Motion Tracking of Deformable Objects by Active Contour Models Using Multiscale Dynamic Programming”, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, Vol. 4 No. 4, pp. 382-391, 1993.
3. K. Fujimura, N. Yokoya, and K. Yamamoto, “Motion Analysis of Nonrigid Objects by Active Contour Models Using Multiscale Images”, *Systems and Computers in Japan*, Vol. 25, No. 2, pp. 81-91, 1994.
4. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟郎, 野口 孔明, 石川 猶也, “3D似顔絵フィギュア製作の実用化の試み”, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 43, No. SIG04 (CVIM 4), pp.85-94, 2002. (第3章に関連)
5. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟郎, 野口 孔明, 石川 猶也; “人にあわせてくれるスマートな3D似顔絵生成手法”, 芸術科学会論文誌, Vol. 2, No. 1, pp. 15-20, 2003.
6. 藤村 恒太, 大上 靖弘, 寺内 智哉, “マルチカメラを用いた人体頭部3次元モデリングシステムとその応用”, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 45, No. SIG08 (CVIM9), pp. 1-9, 2004. (第2, 3章に関連)

国際会議

1. K. Fujimura, N. Yokoya, and K. Yamamoto, “Motion Tracking of Deformable Objects Based on Energy Minimization Using Multiscale Dynamic Programming”, *Proc. 11th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR 1992)*, Vol. 1 pp. 83-86, 1992.

2. K. Fujimura, N. Yokoya, and K. Yamamoto, "Motion Analysis of Deformable Objects Using A New Active Contour Model", *Proc. 2nd Singapore Int. Conf. on Image Processing (ICIP 1992)*, pp. 493-497, 1992.
3. K. Fujimura, N. Yokoya, and K. Yamamoto, "Recognition of Echocardiographic Images by Active Contour Models", *Proc. 8th Scandinavian Conf. on Image Analysis (SCIA 1993)*, pp. 487-492, 1993.
4. Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura, "CyberModeler: A Compact 3D Scanner Based on Monoscopic Camera", *Proc. SPIE Electronic Imaging (EI 1999)*, Vol. 3640, pp. 2-10, 1999. (第3章に関連)
5. Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura, "Shape from Silhouette/Stereo and Its Application to 3D Digitizer", *Proc. 8th Int. Conf. on Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI 1999)*, Lecture Notes in Computer Science 1568, pp. 177-188, 1999.
6. K. Fujimura, Y. Matsumoto, and T. Emi, "Multi-camera 3D Modeling System to Digitize Human Head and Body", *Proc. SPIE Electronic Imaging (EI 2001)*, Vol. 4298, pp. 40-47, 2001. (第2, 3章に関連)
7. T. Fujiwara, H. Koshimizu, K. Fujimura, H. Kihara, Y. Noguchi, and N. Ishikawa, "3D Modeling System of Human Face and Full 3D Facial Caricaturing", *Proc. 3rd Int. Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001)*, pp. 385-392, 2001. (第3章に関連)
8. K. Fujimura, Y. Oue, T. Terauchi, and T. Emi, "Hand-held Camera 3D Modeling System Using Multiple Reference Panels", *Proc. SPIE Electronic Imaging (EI 2002)*, Vol. 4661, pp. 30-38, 2002. (第3章に関連)
9. T. Fujiwara, H. Koshimizu, K. Fujimura, G. Fujita, Y. Noguchi, and N. Ishikawa, "3D Face Modeling and Caricatured Figure Generation", *Proc. 8th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV2002)*, pp. 59-66, 2002. (第3章に関連)
10. T. Fujiwara, H. Koshimizu, K. Fujimura, G. Fujita, Y. Noguchi, and N. Ishikawa, "A Method for 3D Face Modeling and Caricatured Figure Generation", *Proc. Int. Conf. on Multimedia and Expo (ICME 2002)*, pp. 625-633, 2002. (第3章に関連)

11. K. Fujimura, Y. Oue, and T. Terauchi, “Improved 3D Head Reconstruction System Based on Combining Shape-from-Silhouette with Two-Stage Stereo Algorithm”, *Proc. 17th IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition (ICPR 2004)*, Vol. III, pp. 127-130, 2004. (第2, 3章に関連)
12. T. Terauchi, Y. Oue, and K. Fujimura, “A Flexible 3D Modeling System Based on Combining Shape-from-Silhouette with Light-Sectioning Algorithm”, *Proc. 5th Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2005)*, pp. 196-203, 2005.

研究会・シンポジウム

1. 藤村 恒太, 横矢 直和, 山本 和彦, “エネルギー最小化による変形可能な物体の動画像追跡”, 第22回画像工学コンファレンス論文集 pp. 45-48, 1991.
2. 藤村 恒太, 横矢 直和, 山本 和彦, “動的輪郭モデルによる超音波心臓動画像の認識”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU92-97, pp. 63-68, 1992.
3. 藤村 恒太, 横矢 直和, 山本 和彦, “多重スケール画像を用いた非剛体物体の動的輪郭追跡”, 情報処理学会研究報告, 92-CV-78, pp. 25-32, 1992.
4. 長谷川 純一, 横矢 直和, 藤村 恒太, 津雲 淳, 中谷 広正, 阿部 圭一, 石山 豊, “11th ICPR(第11回パターン認識国際会議)報告”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRU92-138, pp. 33-47, 1993.
5. 藤村 恒太, 松本 幸則, 北村 徹, “領域分割とステレオ法に基づくシルエット抽出による回転テーブルレス3次元モデリング”, 第4回知能情報メディアシンポジウム論文集, pp. 149-156, 1998.
6. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 木原 均, 野口 孔明, 石川 猶也, “顔の3Dモデル化と似顔絵生成法”, 第12回外観検査の自動化ワークショップ(VIEW2000)講演論文集, pp. 15-20, 2000.
7. 松本 幸則, 藤村 恒太, 北村 徹, “3次元自動モデリングシステム: CyberModeler”, 第50回パターン計測部会研究会, pp. 7-14, 2000. (第3章に関連)

8. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟朗, 野口 孔明, 石川 猶也, “3D顔モデル化と 3D似顔絵フィギュア製作”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2001-142, pp. 27-32, 2001. (第3章に関連)
9. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟朗, 野口 孔明, 石川 猶也, “3D似顔絵フィギュア製作の実用化の試み”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU 2002)講演論文集, Vol. I, pp. 483-488, 2002. (第3章に関連)
10. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟朗, 野口 孔明, 石川 猶也, “3D似顔絵メディアのフィギュア生成技法”, 第18回NICOGRAPH論文集, pp. 47-52, 2002. (第3章に関連)
11. 藤村 恒太, 大上 靖弘, 寺内 智哉, “マルチカメラを用いた人体頭部3次元モデリングシステムとその応用”, 情報処理学会研究報告, 2003-CVIM-139, pp. 115-122, 2003. (第2,3章に関連)
12. 大上 靖弘, 藤村 恒太, 河井 良浩, 富田 文明, “等輝度線ステレオによる顔の三次元復元”, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2003-279, pp. 139-144, 2004.

全国大会

1. 松本 幸則, 藤村 恒太, 杉本 和英, 北村 徹, “動的参照点生成によるカメラ位置計算手法とその三次元モデリングへの応用”, 情報処理学会第57回全国大会講演論文集, No. 5P-12, 1998.
2. P. Zimmermann, Y. Matsumoto, K. Fujimura, and T. Kitamura, “A Lossy Compression Method for Textures Obtained from Several Views of A 3D Object”, 1999年電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会講演論文集, No. D-12-28, 1999.
3. 寺内 智哉, 北條 三木夫, 久保 良子, 藤田 悟朗, 藤村 恒太, “カメラ二台によるシルエット法に基づく人体三次元モデリング”, 情報処理学会第63回全国大会講演論文集, No. 5R-2, 2001.
4. 藤原 孝幸, 輿水 大和, 藤村 恒太, 藤田 悟朗, 野口 孔明, 石川 猶也, “コンピュ

ータによる似顔絵フィギュア製作’, 第6回日本顔学会大会講演論文集, No. P-6-7, 2001. (第3章に関連)

5. J. Grant, 寺内 智哉, 藤村 恒太, 杉本 和英, “An Advanced 3D Voxel Data Decompression and Voxel-packing Algorithm Implemented in RealSculptorGL”, 2002年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-149, 2002.
6. E. Yim, Y. Oue, T. Terauchi, and K. Fujimura, “Improved 3D Human Head Reconstruction Aided by A Fully Automatic Facial Hair Extraction Algorithm”, 2003年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-158, 2003. (第3章に関連)
7. 藤村 恒太, 大上 靖弘, 寺内 智哉, 石川 猶也, “人体頭部 3次元モデリングシステム「ピエリモ」”, 第8回日本顔学会大会講演抄録, 日本顔学会誌, Vol. 3, No. 1, p. 184, 2003. (第2,3章に関連)
8. P. Shu, T. Terauchi, Y. Oue, and K. Fujimura, “Improved 3D Human Hair Representation Aided by A Fully Automatic Facial Extraction Algorithm”, 2004年電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. D-11-148, 2004. (第3章に関連)

解説

1. 藤村 恒太, 横矢 直和, “画像からの特徴抽出・新アルゴリズム”, 月刊オプトロニクス, No. 130, pp. 70-76, 1992.
2. 藤村 恒太, 横矢 直和, “画像からの特徴抽出・新アルゴリズム”, 先端画像テクノロジー, オプトロニクス社, pp. 70-76, 1993.
3. 福崎 勤, 李 友赫, 藤村 恒太, “デジタルカメラの写真を3次元データに”, 画像ラボ, Vol.14, No. 1, pp. 56-59, 2003.
4. 藤村 恒太, 大上 靖弘, 寺内 智哉, 江見 哲一, 福崎 勤, “デジタルカメラ画像から簡単に3次元データを生成するソフトウェア技術”, 三洋電機技報, Vol. 35, No. 1, pp. 68-74, 2003.

5. 大上 靖弘, 寺内 智哉, 藤村 恒太, “人体頭部向け多眼3次元モデリングシステム”, デジタル写真測量の理論と実践, 日本測量協会, pp. 324-327, 2004. (第3章に関連)