

博士論文

円筒鏡を用いた物体の全周形状計測

浦西 友樹

2008年3月17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。

浦西 友樹

審査委員：

千原 國宏 教授 (主審査委員)

横矢 直和 教授 (副審査委員)

眞鍋 佳嗣 准教授 (副審査委員)

山澤 一誠 准教授 (副審査委員)

円筒鏡を用いた物体の全周形状計測*

浦西 友樹

内容梗概

本論文では、単純なシステム構成で物体の全周形状を計測するための、カメラと円筒鏡を用いたステレオ視による形状計測システムについて述べる。計測対象となる物体は円筒鏡内に設置され、魚眼レンズが装着されたカメラで撮影される。この撮影画像は、カメラから直接観測される像と、円筒鏡の内部で反射してカメラに入射した像の両方を含むため、物体の任意の一点を複数視点から同時に観測していることと等しく、ステレオ視の原理に基づいて対象の形状を計測できるという特徴を持つ。また提案システムは、ステレオ視の際に必要な対応点探索処理において、対応点の存在する範囲を直線上に限定できることから、計算量および誤検出の削減が期待される。本論文では、レンズの歪みや位置ずれなどが存在しない理想的な画像をシミュレーションによって作成し、形状が既知の仮想物体を計測したうえで、真の形状と計測結果を比較することにより、提案手法の計測精度を調査した結果について述べる。また、プロトタイプシステムを製作し、実測画像を用いての実物体の三次元形状計測を試みた結果を示す。

本論文は7章構成である。まず、第1章で研究背景および研究目的について述べる。第2章で物体の三次元全周形状計測にかかわる先行研究についてまとめる。第3章で提案する三次元形状計測システムの構成を説明し、第4章で、提案システムで用いるステレオ計測のための対応点探索アルゴリズムについて述べる。第5章では提案システムを用いた物体の三次元形状計測実験の結果を記し、第6章で実験結果に対し考察を行う。最後に、第7章で結論を述べる。

*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-DD0561201, 2008年3月17日.

キーワード

三次元形状計測, 受動的形状計測, 円筒鏡, 魚眼レンズ, 反射屈折ステレオ視

Whole Shape Measurement Using a Cylindrical Mirror*

Yuki Uranishi

Abstract

This paper proposes a system for measuring a whole shape of an object easily. Whole three-dimensional models are applicable for digital archiving of relics, virtual museums and on-line shoppings. In addition to this, whole three-dimensional shape measurement and model reconstruction would have a wide area of potential applications by end users. In those cases, it is highly desirable that a whole shape of the object is easily measured in a single shot. The proposed system consists of a camera and a cylinder whose inside is coated by a silver reflective layer. A target object is placed inside the cylinder and an image is captured by the camera from right above. The captured image includes sets of points that are observed from multiple viewpoints: one is observed directly, and others are observed via the mirror. Therefore, the whole shape of the object can be measured using stereo vision in a single shot. An actual experimental situation was simulated and the three-dimensional shape of the target object was measured using the simulated image. In addition, a prototype system was implemented and the shape of the real objects were measured. The results have demonstrated that the proposed method is effective for measuring the whole three-dimensional shape, and a shape of an object is measured by simple structured system.

*Doctoral Dissertation, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DD0561201, March 17, 2008.

Keywords:

Three-dimensional measurement, Passive measurement, Cylindrical mirror, Fish-eye lens, Catadioptric stereo

目次

1	序論	1
1.1	計測に基づく三次元全周モデルの取得	1
1.2	動きのある物体の全周形状計測	3
1.3	“Easy 3D Scanner”	4
1.4	本研究の目的	4
1.5	本論文の構成	5
2	三次元全周形状計測	7
2.1	能動的形状計測手法を用いた全周形状計測	8
2.2	受動的形状計測手法を用いた全周形状計測	8
2.2.1	視体積交差法	8
2.2.2	Space Carving	10
2.2.3	ステレオ視による全周形状計測	10
2.3	光学機器によるカメラの置き換え	11
2.3.1	単眼カメラと平面鏡を用いた視体積交差法	11
2.3.2	反射屈折ステレオ視系	12
2.3.3	回転体状の鏡の使用による機器構成の簡単化	13
3	円筒鏡を用いた全周形状計測システム	15
3.1	システム構成	16
3.2	撮影画像	16
3.3	仮想カメラ位置の推定およびステレオ視	19
3.3.1	光線角の決定	19
3.3.2	カメラ位置の推定	19

4	対応点探索アルゴリズム	23
4.1	局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索	24
4.1.1	撮影画像の極座標展開	24
4.1.2	探索対象領域のサイズの正規化	26
4.1.3	探索対象領域の限定	26
4.1.4	SSD 値の計算	28
4.2	動的計画法を用いた対応点探索	28
4.2.1	撮影画像の極座標展開	29
4.2.2	動的計画法による対応点の決定	30
5	形状計測実験	33
5.1	シミュレーション画像を用いた形状計測実験	33
5.1.1	シミュレーション環境	33
5.1.2	局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索手法 を用いた実験	34
5.1.3	動的計画法による対応点探索手法を用いた実験	43
5.2	実測画像を用いた形状計測実験	45
5.2.1	局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索手法 を用いた実験	45
5.2.2	動的計画法による対応点探索手法を用いた実験	53
6	考察	55
6.1	対応点探索手法に関する考察	55
6.1.1	物体表面のテクスチャによる対応点探索精度の変化	55
6.1.2	像の歪みや局所領域の決定手法による対応点探索精度の変化	57
6.2	面の法線方向による反射像の歪み	61
6.3	提案システムの計測に適した物体の大きさ	62
6.4	提案システムでの計測に適した物体の表面特性	64
6.5	実測における計測誤差	65
7	結論	67

目次

謝辭	69
參考文獻	71
研究業績	75

目 次

2.1	視体積交差法	9
2.2	マルチカメラステレオ視のための撮影環境の一例	11
2.3	単眼カメラと平面鏡を用いた視体積交差法の例	12
2.4	反射屈折ステレオ視系の構成例	13
2.5	Kuthirummalらによる，回転体状の鏡を用いた多視点画像の撮影	14
3.1	システム概要図	16
3.2	提案システムにより撮影される画像(シミュレーション)	17
3.3	中心からずらして置いた円錐を撮影した画像(シミュレーション)	18
3.4	提案システムにおける光線の反射	18
3.5	レンズの射影特性と撮影画像の関係	20
3.6	仮想カメラ位置の推定	21
4.1	極座標展開後の撮影画像	25
4.2	提案システムにおける探索対象領域	29
4.3	円錐を撮影した画像の一例(シミュレーション)	30
4.4	極座標展開画像における探索対象領域	31
4.5	動的計画法の際に用いられるグラフの例	31
5.1	提案システムによる円錐の撮影画像(シミュレーション)	35
5.2	シミュレーション画像を用いた円錐の形状計測実験結果(その1)	35
5.3	シミュレーション画像を用いた円錐の形状計測実験結果(その2)	36
5.4	円錐の中心からの距離と高さの関係	36
5.5	提案システムによる四角錐の撮影画像(シミュレーション)	37
5.6	四角錐の形状計測実験結果(窓サイズ 5×5 [pixels])	38

目 次

5.7	四角錐の形状計測実験結果 (窓サイズ 20×20 [pixels])	38
5.8	三角錐の形状計測実験結果	39
5.9	本実験での対象物体	40
5.10	提案システムによる傘型物体の撮影画像 (シミュレーション)	41
5.11	シミュレーション画像を用いた傘型物体の形状計測実験結果	41
5.12	傘型物体の中心からの距離と高さの関係	42
5.13	シミュレーション画像による円錐の計測実験結果	43
5.14	円錐の中心からの距離と高さの関係	44
5.15	シミュレーション画像による三角錐の計測実験結果	44
5.16	計測環境	46
5.17	計測対象として用いた実物体 (円錐)	47
5.18	撮影画像 (実測, 図 5.17 の円錐を撮影)	48
5.19	実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 1)	49
5.20	実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 2)	49
5.21	円錐の中心からの距離と高さの関係	50
5.22	計測対象とした物体	51
5.23	撮影画像 (実測, 図 5.22 の玩具を撮影)	52
5.24	実測画像を用いた玩具の形状計測実験結果	52
5.25	試作システムにより円錐を撮影した画像	53
5.26	試作システムを用いた円錐の形状計測結果	54
5.27	動的計画法による玩具の形状計測実験結果	54
6.1	注目したライン	57
6.2	真の形状と計測結果の距離	58
6.3	像の歪みによる領域の不一致	59
6.4	極座標展開後の四角錐の撮影画像	60
6.5	面の法線方向による反射像の歪み	62
6.6	提案システムにより計測可能な円柱の大きさ (側面図)	63

表 目 次

5.1 使用した計算機環境	34
-------------------------	----

I've seen things you people wouldn't believe. Attack ships on fire off the shoulder of Orion. I watched C-beams glitter in the dark near the Tannhauser gate. All those moments will be lost in time, like tears in rain.

—*Ridley Scott, "Blade Runner", 1982*

第1章

序論

物体の三次元形状を計測し、計算機上に三次元モデルを構築するシステムは、写真に代表される二次元の記録媒体に比べ、より多くの情報を保存できるという特徴をもつ。三次元形状のうち、とくに物体を全方向から計測して得られた形状を全周形状という。このような全周形状から構築される三次元モデルは、自由な視点から見回すことができるため、固定された視点からの閲覧に限られる写真よりも閲覧性に優れている。得られた三次元モデルは、バーチャル博物館 [1] や、考古遺物のデジタル保存および閲覧 [2] などの学術用途や、工業製品のプロトタイプングなどの産業用途として、多くの応用例が考えられる。また、インターネットオークションへの出品の際にサンプルとして提示したり、生物図鑑などへの応用も可能となる [3] など、エンドユーザによる利用も考えられる。本章では、物体の三次元全周形状を計測する手法と、得られた三次元モデルの応用について説明し、さらに本研究で提案するシステムについて述べる。

1.1 計測に基づく三次元全周モデルの取得

現在、インターネット上などで閲覧できる三次元モデルは、工業製品のサンプルなど、モデリング用のソフトウェアなどを用いて作成されたものが代表的である。これらの手法による三次元モデルの作成は、専門的な知識や多大な労力を要する。またこれらの手法は、製品の設計図などをもとにモデルを作成しており、物体の実際の形状を直接計測してモデル化を行わないため、考古遺物のデジタル保存など、実物体に忠実にモデル化して保存することが求められる用途には適し

ていない。

物体の三次元形状を計測してモデル化するための手法は，物体に対し能動的に働きかけて形状を計測する手法と，物体を撮影したカメラ画像から受動的に形状を得る手法に大別される．まず能動的計測とは，光などに代表される電磁波を計測対象物に照射し，それらの反射の様子をもとに物体の三次元形状を計測する手法である．代表的な手法として，レーザ光を物体に照射してから，物体に光が反射して計測機器に戻るまでの時間をもとに，物体と計測機器の距離を計算する Time-of-Flight（飛行時間）法 [4] や，レーザ光とカメラにより三角測量を行い，物体の奥行きを計測するアクティブステレオ法 [5]，空間的に規則的なパターンをもつ光を物体に投影し，カメラから見たパターンの形状の変化をもとに物体の形状を計測するパターン光投影法 [6] などが挙げられる．これらの能動的計測手法は，三次元形状を高密度な点群として計測可能であり，高精細なモデルを得られる利点をもつ．しかしながら，能動的計測により物体の全周形状を計測するには，ターンテーブルなどを併用したり，計測機器そのものを動かすことによって，全方向から電磁波を照射する必要がある．

一方，受動的計測手法の代表的な手法として，ステレオ視の原理に基づく三次元形状計測 [7] がある．これは，物体を複数の視点から撮影した多視点画像から，同一の点を撮影したと考えられる対応点を探索し，三角測量の原理に基づいて物体の三次元形状を計測する手法である．しかし，正しい対応点を探索するために，画像中の対応点が各視点で同一の色となることが求められることから，多視点画像を撮影する際，レンズの特性やガンマ値，および分光感度特性などのカメラパラメータの補正や，撮影の同期がカメラ間で必要となる．物体の全周形状を一度に計測するには，物体表面のすべての点が複数のカメラから観測できるようにカメラを配置しなければならず，カメラの台数が増加する．そのため，全周形状計測の際に，カメラ間でのパラメータ補正が非常に煩雑となる．この問題を解決するために，カメラ1台と鏡を用いて，一回の撮影で多視点画像を得る反射屈折ステレオ視系 [8] が提案されている．反射屈折ステレオ視系は，1台のカメラでステレオ視を行うため，上で述べたカメラパラメータの補正や，撮影の同期が不要となる．その一方で，物体の全周形状を一度に計測するには，通常のステレオ視

と同様に、物体を取り囲むように鏡を配置する必要がある。このとき、鏡の映り込みに伴うカメラ位置推定の複雑化を避けることは、従来手法に基づく構成では非常に困難である。また、受動的計測手法の一つである視体積交差法 [9] は、複数の視点から物体を撮影し、それぞれの視体積の共通部分を物体の三次元形状とする手法である。視体積交差法は物体の輪郭情報のみを用いて形状を計測するため、物体の輪郭情報が正しく得られれば、求められるモデルは照明などの変化に対して頑健である。一方で、この手法は理論的に物体の凸閉包しか得られないため、物体表面に存在する窪みなどを再現できない。

1.2 動きのある物体の全周形状計測

これまでに述べた手法を用いて物体の全周形状を計測するためには、二通りの手順が考えられる：複数の視点から物体の部分形状を計測し、最後にこれらの部分形状を統合して物体の全周形状とする手順と、全方向から一度に物体を計測し、一回の計測動作で全周形状を計測する手順である。

Time-of-Flight 法、レーザレンジファインダやパターン光投影法などの能動的手法は、全方位から一斉に電磁波を相互干渉なく照射することが極めて困難である。このため、能動的手法を用いた全周形状の取得手順として、複数の視点から物体の部分形状を計測し、最後にこれらの部分形状を統合して物体の全周形状とする手順が一般的に用いられる [10] [11]。この手法は、静止物体に対しては精度の良い計測が可能となるため、遺物計測など、高い精度が要求される静止物体の計測に適している。しかしながら、能動的手法を用いて動きのある物体の全周形状を計測するためには、物体を静止させた状態で計測する必要があるため、ペットなど、動きのある物体の全周形状計測には適さない。

一方、ステレオ視の原理に基づく手法や視体積交差法などの受動的手法は、物体を取り囲むようにカメラや鏡などの計測機器を配置し、物体の全周形状を一回の動作で計測できる。この手法を用いることで、動きのある物体の全周形状計測が可能となる。しかしながら、物体の全周形状を一回の動作で計測するために、物体を取り囲むようにカメラや光学機器を配置すると、鏡の相互の映り込みを回

避したり，エピポーラ線により対応点の存在範囲を拘束することは，従来手法に基づく構成では極めて困難となる．

1.3 “Easy 3D Scanner”

これまでに述べたとおり，物体の実際の形状を計測してモデル化するためには，現状では，レーザレンジファインダや多数のカメラなどの大掛かりな計測機器が必要である．これらの機器に基づくシステムは計測プロセスも複雑であり，多数の物体を計測してモデル化するには効率が悪い．また，これらの計測機器は一般に高価であり，システムの構築に多くの費用がかかる上，計測に専門的な技術や知識を要する．ゆえに，冒頭で述べたような，インターネットオークションへの出品の際に三次元モデルを提示したり，ペットの成長を三次元モデルとして記録したりするなどの個人向け用途を想定する場合，これらの手法をそのままエンドユーザが用いることは難しい．

エンドユーザが簡便に扱え，かつ前述の用途に適用するには，計測システムは

- 安価になり得る単純なシステム構成
- 機器の配置や調整など，エンドユーザによる前処理の省力化または排除
- 民生用のデジタルカメラやイメージスキャナのような，単純な計測手順

といった要件を満たすことが望ましい．

1.4 本研究の目的

本研究では，単純なシステム構成で物体の全周形状を計測するため，カメラと円筒鏡を用いたステレオ視による形状計測システムを提案する．本手法は内部が鏡面となっている円筒に計測対象を入れ，カメラで計測対象を上から撮影することで，簡便に多視点画像が得られ，ステレオ視の原理に基づいて対象の形状を計測できるという特徴を持つ．本論文では，レンズの歪みや位置ずれなどが存在しない理想的な画像をシミュレーションによって作成し，形状が既知の仮想物体を

計測したうえで、真の形状と計測結果を比較することにより、提案手法の計測精度を調査する。また、プロトタイプシステムを製作し、実測画像を用いての実物体の三次元形状計測を試みる。

1.5 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。まず、第2章で物体の三次元全周形状計測にかかわる先行研究について述べる。第3章で提案する三次元形状計測システムの構成を説明し、第4章で、提案システムで用いるステレオ計測のための対応点探索アルゴリズムについて述べる。第5章では提案システムを用いた物体の三次元形状計測実験の結果を記し、第6章で実験結果に対し考察を行う。最後に、第7章で結論を述べる。

第2章

三次元全周形状計測

物体の三次元全周形状を計測し，計算機上に三次元モデルとして再構築する技術は，バーチャル博物館 [1] や考古遺物のデジタル化保存 [2] などの学術用途，工業製品のプロトタイピング [12] [13] などの産業用途，さらに，インターネットオークションにおけるサンプルや生物の三次元モデル化 [3] など，様々な応用が考えられる．このとき，大量の対象物体の形状を効率よく計測するため，また，エンドユーザも簡単に物体の形状を計測できるためには，計測機器の構成および計測手順が簡単である全周形状計測手法が望まれる．また，フィールドワークなど野外での使用や，動かさない物体の全周形状を計測するためには，機器は可搬性があることが望ましい．

物体の三次元形状を計測する手法は数多く提案されており，これらは能動的形状計測と受動的形状計測に分類できる．能動的形状計測は，計測対象の物体に対して能動的に電磁波を照射し，物体に反射した電磁波の様子から三次元形状を推定する手法である．物体に対して照射する電磁波として，レーザ光 [4] や空間的に規則的なパターンをもつ光 [6] などが挙げられる．一方，受動的形状計測とは，計測対象物をカメラで撮影した画像から，受動的に物体の形状を計測する手法である．受動的形状計測の代表的手法として，物体を撮影した画像から物体の輪郭を検出し，得られた輪郭を物体の形状とする Shape from Silhouette [14]，物体表面の一点を複数の視点から撮影し，三角測量の原理に基づき，視点と物体の距離を計測するステレオ視 [7] などが挙げられる．

本章では，これらの計測手法を物体の全周形状計測に適用する際に起こる問題点や，必要となる処理について述べる．また，全周形状計測手法の先行研究につ

いて説明する。

2.1 能動的形状計測手法を用いた全周形状計測

能動的形状計測手法を用いて物体の全周形状を計測するには、物体の全ての面に電磁波を照射するために、ターンテーブルなどを用いて物体を回転させるか、あるいは計測機器そのものを移動させる必要があり、物体の全周形状を得るには複雑な手順が必要となる。また、複数の方向から同時に電磁波を照射すると電磁波同士が干渉し、物体の形状を計測することが難しい。そのため、様々な方向から計測された部分的な形状を得たあと、部分形状を統合して全周形状を得る処理が必要となる。

人体の全周形状を計測するために、パターン光を全方向から一斉に照射し、観測されたパターンを解析することで、人体の全周形状を計測する手法も提案されている [15]。しかしながらこの手法は、パターン光を全方向から照射する装置が必要となるため、機器構成が複雑となり、可搬性に劣る。

2.2 受動的形状計測手法を用いた全周形状計測

能動的形状計測手法と同じく、受動的形状計測手法である Shape from Silhouette やステレオ視についても、全周形状を計測するには、ターンテーブルによる物体の回転や計測機器の移動が必要である。しかし受動的な手法においては、能動的な手法のような電磁波の相互干渉が発生しないため、複数の計測機器を物体周囲に配置し、同期させることによる物体の全周形状計測は、能動的な手法を用いる場合よりも容易となる。本節では、受動的な手法を用いた全周形状計測に関する先行研究について述べる。

2.2.1 視体積交差法

視体積交差法とは、複数の視点から物体を撮影し、それぞれの視体積の共通部分（視覚包: Visual Hull）を物体の全周形状とする手法である [9] [16]。4台のカ

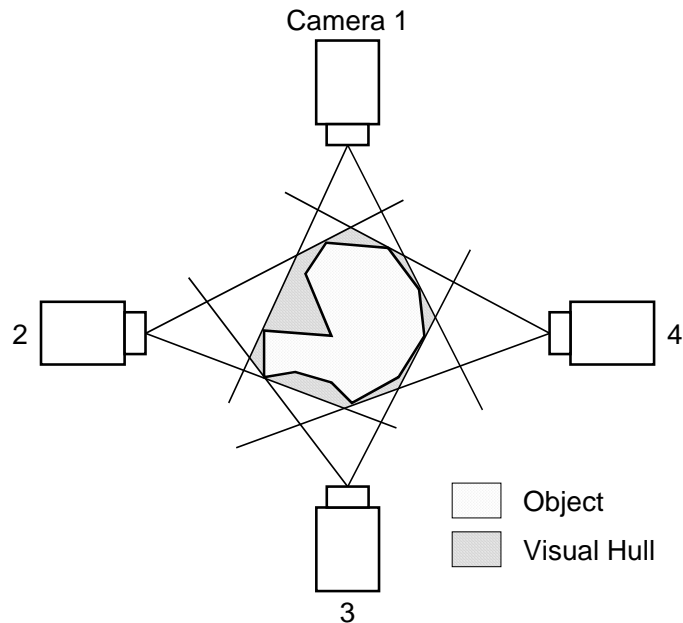


図 2.1 視体積交差法

メラによる視体積交差法の例を図 2.1 に示す．ただし，図 2.1 は二次元での模式図である．このとき得られる Visual Hull は，物体の真の形状を必ず包含するという性質を持つ．

視体積交差法は物体の全周形状を高速に得られるため，実時間での三次元形状計測に適している [17]．また，Shape from Silhouette と同様に，撮影画像中の物体の輪郭を用いて全周形状を取得するため，ステレオ視系に比べ，物体表面の色や照明の変動などに対して頑健である．しかしながら，視体積交差法の計測精度を向上させ，計測範囲を拡大するには，カメラの台数を増やす必要がある．一方，単眼カメラでの視体積交差法による全周形状計測手法として，不殿らにより提案された，物体周辺に配置されたマーカより各フレームにおけるカメラの位置姿勢を推定し，単眼カメラで撮影された動画からの視体積交差法による全周形状計測を支援する手法 [18] がある．

2.2.2 Space Carving

Space Carving [19] は、複数視点から見た対象物体の光学的整合性を元に、全ての視線から矛盾しない最小の形状を求めることで、物体の全周形状とする手法である。まず、対象物体を複数視点から撮影したとき、物体表面上のある点はすべての角度から同じ色に見えることを仮定する。撮影画像中の前景を空間中に存在するボクセル集合の表面に逆投影したとき、あるボクセルが、すべてのカメラから見て同色でなければ、そのボクセルは削除される。最終的に削除されるボクセルが存在しなくなるまで、逆射影および光学的整合性に基づくボクセルの削除を繰り返す。

Space Carving により得られる三次元形状は、前述の Visual Hull と同様、理論的には真の形状を必ず包含し、かつ Visual Hull より常に真の形状に近づくという特徴をもつ。また Space Carving は、計測結果が凸閉包となる視体積交差法では理論的に再現不可能な、物体表面の窪みや穴を再現できる。一方、Space Carving において、あらゆる視点から見た物体表面の色が同一であるためには、対象物体表面は拡散反射表面でなければならない。

2.2.3 ステレオ視による全周形状計測

ステレオ視を用いて物体の全周形状を同時に計測するためには、全ての点が複数のカメラから同時に観測されなければならない。この問題を解決すべく、図 2.2 に示すような多数のカメラアレイを用いてシーンを三次元化する手法 [20] が提案されているが、カメラ台数の増加はシステムの複雑化やコストの増大を招く。また、物体の一点を複数の視点から撮影した画像（多視点画像）を撮影する際、レンズの形状やガンマ値、および分光感度特性などのカメラパラメータがすべてのカメラで一致するように補正しなければならない。さらに、すべての画像を同期して撮影する必要がある。



図 2.2 マルチカメラステレオ視のための撮影環境の一例

2.3 光学機器によるカメラの置き換え

これまでに述べたとおり，物体の全周形状計測はカメラ台数や撮影回数の増加を伴い，システムの複雑化や可搬性の低下を招く．そこで，一部のカメラを鏡やプリズムなどの光学機器で置き換え，光学機器により反射，あるいは屈折した像をカメラに入射させることで，カメラ台数は少ないまま，計測範囲を拡大する手法が提案されている．これらの手法により得られる画像は，一枚のカメラ画像内に複数の視点や，広い範囲の像を含むために，多数のカメラを使用する手法と比べ，計測分解能が低くなる．しかし，用いるカメラが一台になれば，カメラ間でのパラメータ調整や同期が不要になるなど，光学機器の使用により，機器構成や計測手順の単純化が期待される．

カメラを中心としたシーンの観察（Inside-Out）においては，ミラーとカメラを併用した全方位カメラ [21] が広く用いられており，さらに，2 台の全方位カメラで撮影された画像から，全周囲のシーンの距離を計測する手法 [22] なども提案されている．本節では，物体の全周方向からの形状計測（Outside-In）について，光学機器とカメラを併用した手法を説明する．

2.3.1 単眼カメラと平面鏡を用いた視体積交差法

前述のように，視体積交差法は撮影画像中の物体の輪郭を用いて全周形状を取得するため，ステレオ視系に比べ，物体表面の色や照明の変動などに対して頑健

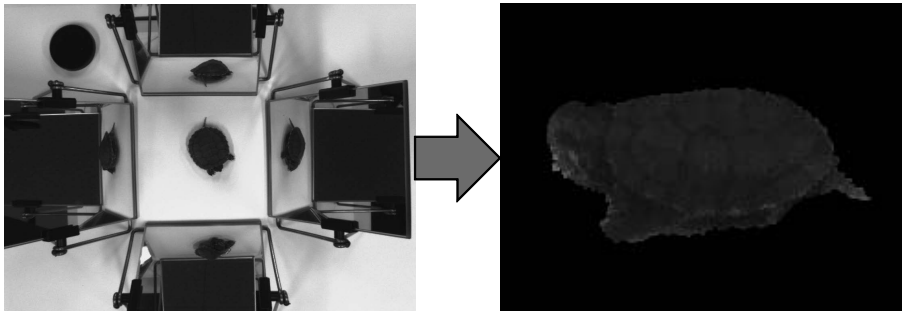


図 2.3 単眼カメラと平面鏡を用いた視体積交差法の例

である．一方，視体積交差法の計測精度を向上させ，計測範囲を拡大するには，カメラの台数，あるいは撮影回数を増やす必要があり，システム構成や計測手順が複雑化する．この問題を解決するため，単眼カメラと平面鏡の組合せによる視体積交差法が提案されている [3] [23]．このうち，沢らの手法を図 2.3 に示す．

2.3.2 反射屈折ステレオ視系

反射屈折ステレオ視系 (Catadioptric Stereo) は，物体表面の同じ一点を始点として異なる軌道を進む複数の光を，光学機器を用いることで単一のカメラに入射させ，複数視点からカメラで観測した像と等価な画像を撮影することで，1 台のカメラでステレオ視を実現するシステムである．反射屈折ステレオ視系に属する手法として，物体と，物体の像が反射するように配置された鏡を同時に撮影することで，ステレオ視を実現した手法 [8] [24] [25] [26] や，プリズム [27] や透明板 [28] を用いて光を屈折させることで，視差のある画像を得る手法などが提案されている．図 2.4(a) に，鏡を用いたシステム構成と撮影画像の一例を示す．また，透明板による反射屈折ステレオ視の例を図 2.4(b) に示す．

反射屈折ステレオ視は，1 台のカメラで視差のある画像が得られるため，カメラパラメータの補正処理が不要となり，かつ各視点の像が同期して撮影される利点をもつ．また，エピポーラ線が走査線上と同一になるようにカメラや鏡を配置することで，複数のカメラを用いたステレオ視系と同様に，対応点の存在する範囲を限定することが可能となる [24] ．

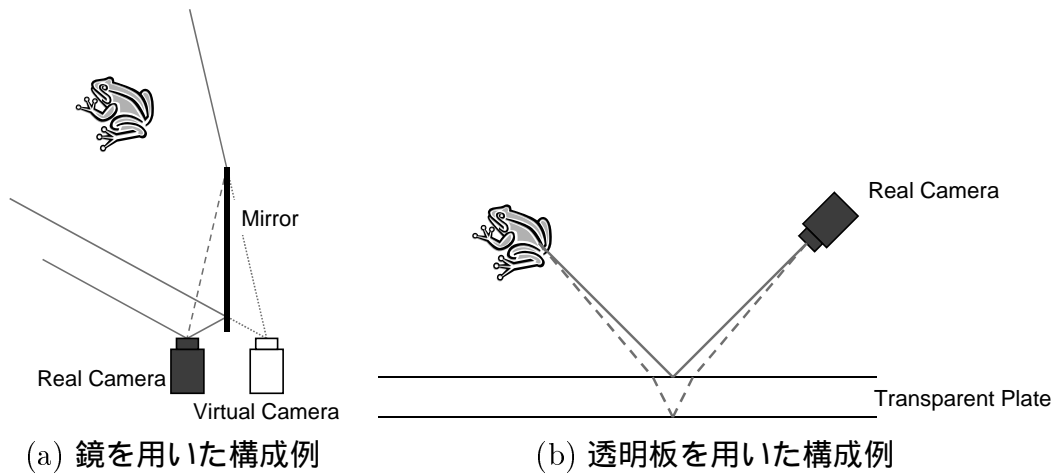


図 2.4 反射屈折ステレオ視系の構成例

2.3.3 回転体状の鏡の使用による機器構成の簡単化

これまでに述べたような、平面鏡によるカメラの置き換えによる形状計測は、仮想カメラの位置姿勢を決定するために、カメラキャリブレーションなどの前処理が必要となる。このような前処理を省力化するため、円錐や円筒状の鏡をカメラのレンズ前に取り付け、1台のカメラで多視点画像を撮影することで、物体の反射特性やテクスチャ、また加えて形状も計測できることがKuthirummalらにより示されている [29]。この手法の機器構成を図 2.5 に示す。

平面鏡を物体の周囲を取り囲むように配置した撮像系と同様に、円筒あるいは円錐鏡内に物体を入れ、カメラで撮影することを考える。このとき、計測対象物体の大きさは最大でも鏡に入るサイズに制限されるものの、あらかじめカメラと鏡を固定することで、機器を設置するごとのキャリブレーションは不要となる。また、カメラと鏡が固定されていることから可搬性に優れている。

これらより、回転体状の鏡と単眼カメラの併用による全周形状計測手法は、大量の対象物体の効率の良い全周形状計測、また、計測機器の構成および計測手順が簡単である全周形状計測を実現できると考えられる。本研究では、円筒鏡と単眼カメラの組合せによる物体の全周形状計測システムを提案および試作する。以降の章では、提案システムの詳細について述べる。

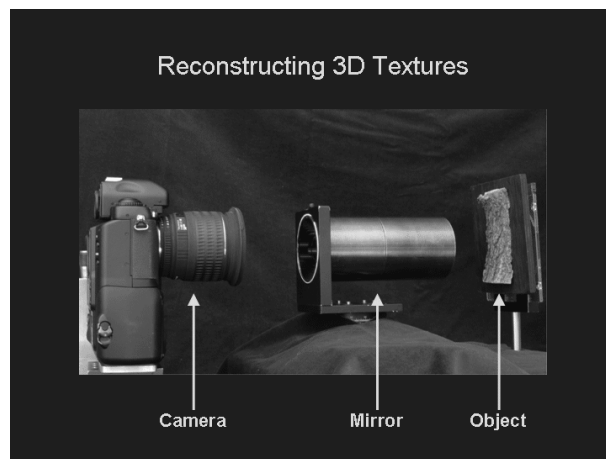


図 2.5 Kuthirummalらによる，回転体状の鏡を用いた多視点画像の撮影

第3章

円筒鏡を用いた全周形状計測システム

これまでに述べたように，計算機上に構築された物体の全周形状モデルは様々な分野に応用可能であり，多くの形状計測手法が提案されている．しかしながら，従来の三次元形状計測手法を用いて物体の全周形状計測を試みると，システム構成や撮影プロセスの多重化および複雑化が発生する．そのため，システム構成の単純化を目的として，鏡やプリズムなどによる反射像や屈折像を用いて，1台のカメラで物体の三次元形状を計測する反射屈折ステレオ視系が提案されているが，反射屈折ステレオ視系の従来手法に基づく物体の全周形状計測手法は，鏡による不規則な写り込みの発生や対応点探索範囲の拡大により，正しい全周形状を得ることが困難である．

そこで本研究では，カメラと円筒鏡を用いた反射屈折ステレオ視による形状計測システムを提案する [30] [31]．提案するシステムは，円筒鏡を用いて物体の反射像を観測することで，対応点の存在する範囲を大幅に限定しながら，1台のカメラで物体の全周形状を計測できる．また，提案システムによって撮影された画像は映り込みが規則的に発生し，鏡に複数回反射した高次の反射像も計測に利用できる．本章では，提案システムの構成や，提案システムにより撮影される画像の特徴について述べる．また，反射屈折ステレオ視を行う際に必要となる，仮想カメラの位置推定について説明する．

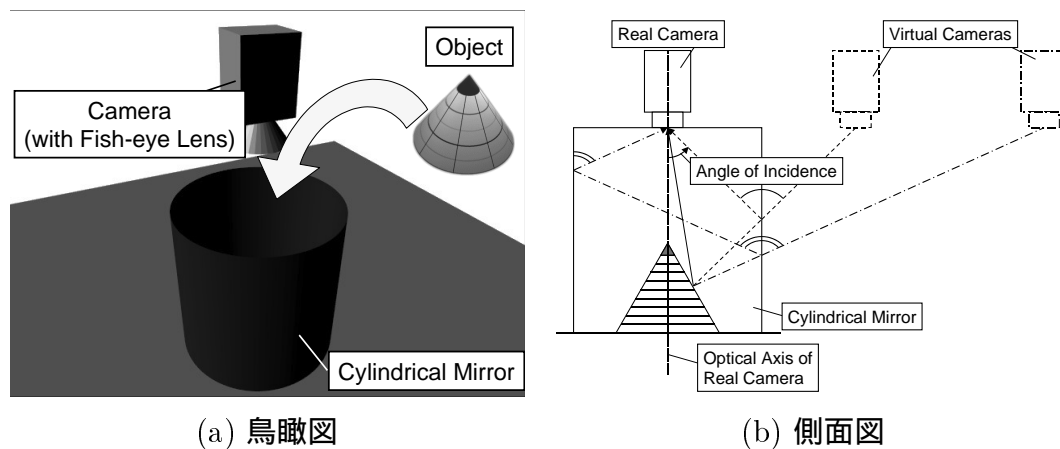


図 3.1 システム概要図

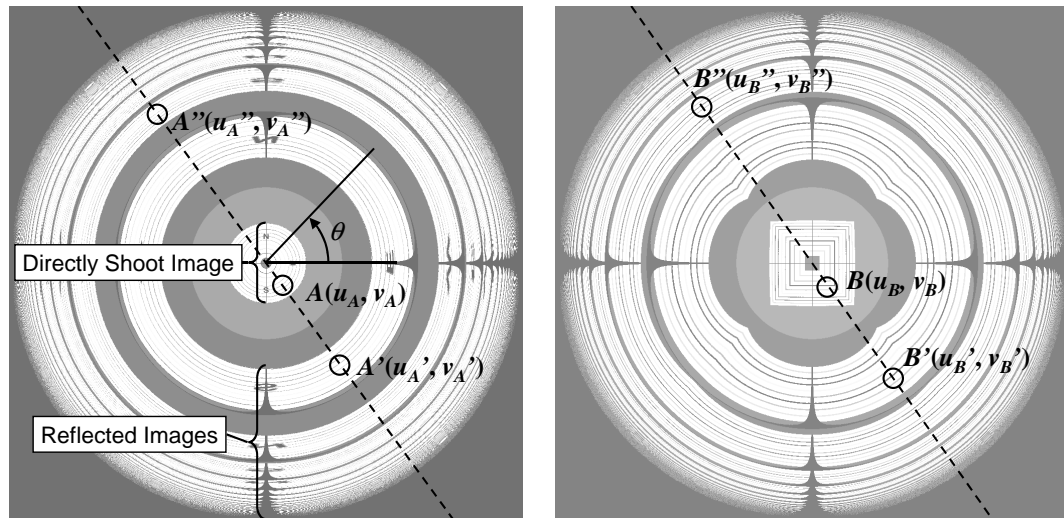
3.1 システム構成

提案する三次元形状計測システムは、内側が鏡面となっている円筒鏡と、魚眼レンズを装着したカメラから構成される。カメラは円筒鏡の上部中心に、レンズの光軸が円筒の中心軸と一致するように鉛直下向きに設置されている。図 3.1(a) にシステムの鳥瞰図を示す。また、システムの側面図および光線の反射の様子を図 3.1(b) に示す。円筒鏡の内部に物体を置き、カメラで物体を撮影すると、カメラから直接見える像と、円筒鏡の内部で反射した像を一度に観測できる。これは図 3.1(b) に示すように、実カメラと仮想カメラを用いて、物体上のある一点を複数の視点から同時に観測することに等しい。

3.2 撮影画像

提案システムにより得られる画像の一例を図 3.2 に示す。なお、この図は仮想物体を撮影したシミュレーション画像であり、(a) は円錐、(b) は四角錐を対象物体としている。

図 3.2(a) に示すように、提案システムを用いると、画像の中心にカメラから直接見える像、その周囲に円筒鏡に反射した像が存在する画像が得られる。また反射像は、画像中心から反射回数の少ない順に、同心円状に並ぶ。ここで、カメ



(a) 対象物体を円錐とする場合

(b) 対象物体を四角錐とする場合

図 3.2 提案システムにより撮影される画像 (シミュレーション)

ラの光軸と円筒鏡の中心軸が一致するようにシステムを設置したとき、図 3.2(a) における点 $A(u_A, v_A)$ 、 $A'(u'_A, v'_A)$ および $A''(u''_A, v''_A)$ や、同図 (b) の点 $B(u_B, v_B)$ 、 $B'(u'_B, v'_B)$ および $B''(u''_B, v''_B)$ のような対応点の組は、画像中心を通る直線上に必ず存在する。これは対象物体の位置や形状に依存しない性質であり、図 3.3 に示すように、対象物体を中心からずらして置いた場合も、対応点の組 $C(u_C, v_C)$ 、 $C'(u'_C, v'_C)$ および $C''(u''_C, v''_C)$ は同一の直線上に存在する。この理由を図 3.4 を用いて説明する。

図 3.4 は、物体の一点から鏡に 2 回反射してカメラに入射する光線の軌跡の一例を示している。カメラの光軸と円筒鏡の中心軸が一致しているとき、ある光線がカメラに入射するためには、光線は円筒鏡の中心軸を通らなければならない。システムを上から見たとき、円筒の中心軸を挟んで向き合う円筒鏡の 2 点の接線は、図 3.4 に示すように常に平行である。ゆえに、円筒の中心を通る光線は常に、平行な接線をもつ鏡面に対して、上から見て垂直に入射する。同一の点を始点とする光線は、必ず同一の直線上に存在するため、仮想カメラのエピポーラ線は円筒の中心を通る直線となる。例えば、図 3.2(a) の点 A からカメラに入射する光線は、画像中心と点 A を結ぶ破線上だけを移動する。このため、撮影画像中に存在

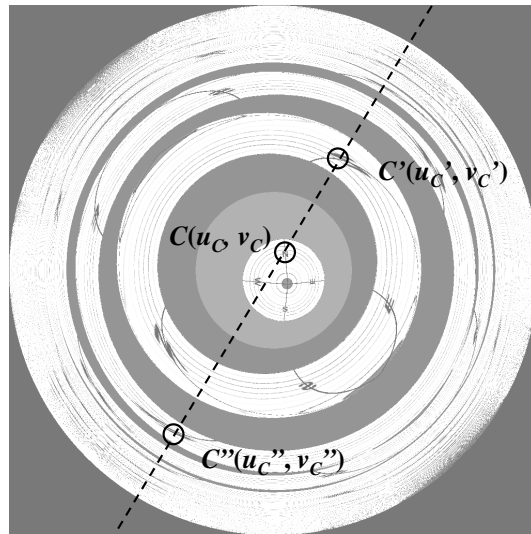


図 3.3 中心からずらして置いた円錐を撮影した画像 (シミュレーション)

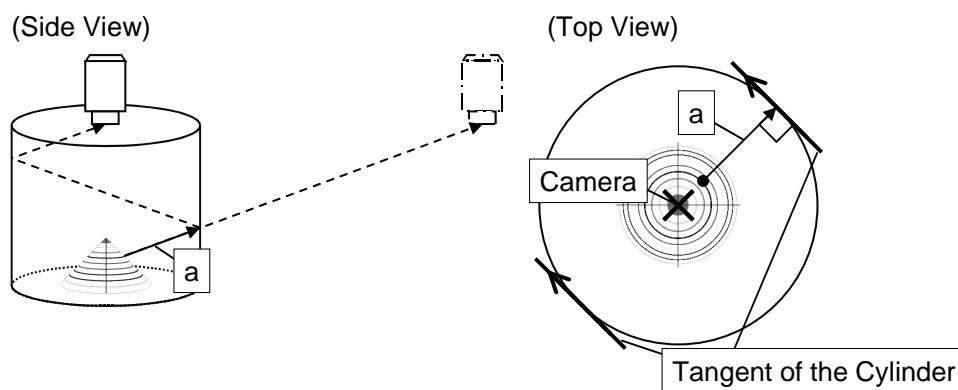


図 3.4 提案システムにおける光線の反射

する対応点の組の探索範囲を画像中心を通る直線上に限定でき、計算量の削減や、対応点の誤検出の減少が期待できる。

3.3 仮想カメラ位置の推定およびステレオ視

物体のある一点の距離をステレオ視により計測するには，点から各カメラに入射する光線の角度と，各カメラの三次元位置が必要である．以下，各パラメータの推定方法について述べる．

3.3.1 光線角の決定

魚眼レンズは，レンズに入射する光線が光軸と成す角 ϕ と，光線が射影された画像平面における画像中心からの距離 d の関係を

$$d = f \cdot g(\phi) \quad (3.1)$$

のように表せる．ここで，角 ϕ と画像中心からの距離 d の関係を図 3.5 に示す．なお， f は焦点距離である．この関数 $g(\phi)$ を魚眼レンズの射影特性と呼び，

$$d = f\phi \quad (3.2)$$

$$d = f \sin \phi \quad (3.3)$$

$$d = 2f \tan \frac{\phi}{2} \quad (3.4)$$

などの特性をもつレンズがある．

以上より，魚眼レンズの射影特性が既知であれば，撮影画像における注目点の画像中心からの距離によって，カメラに入射する光線の角度を決定できる．

3.3.2 カメラ位置の推定

鏡に n 回反射した像を撮影した仮想カメラの，実空間における位置 $C_{\text{virt}}^n = (x_{\text{virt}}^n, y_{\text{virt}}^n, z_{\text{virt}}^n)$ は，実カメラが $C_{\text{real}} = (x_{\text{real}}, y_{\text{real}}, z_{\text{real}}) = (0, y_{\text{real}}, 0)$ に存在し，かつ $y_{\text{real}} = y_{\text{virt}}^n$ であると仮定するとき，撮影画像の図 3.2(a) に示す角 θ ，および

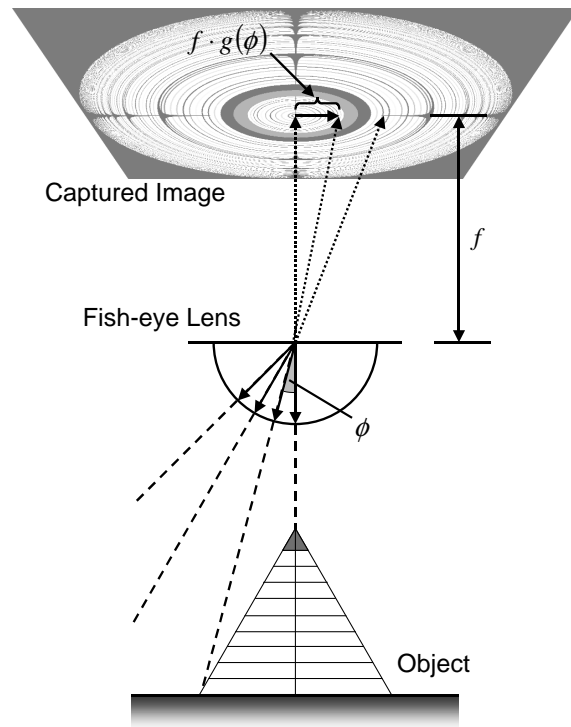


図 3.5 レンズの射影特性と撮影画像の関係

鏡の半径 R より

$$x_{\text{virt}}^n = 2nR \cos \theta \quad (3.5)$$

$$y_{\text{virt}}^n = y_{\text{real}} \quad (3.6)$$

$$z_{\text{virt}}^n = 2nR \sin \theta \quad (3.7)$$

となる．仮想カメラの位置関係を図 3.6 に示す．

図 3.6 に示すように，鏡に n 回反射した像を撮影した仮想カメラはすべて，円筒鏡の中心軸を中心とする半径 $2nR$ の同心円上に存在する．

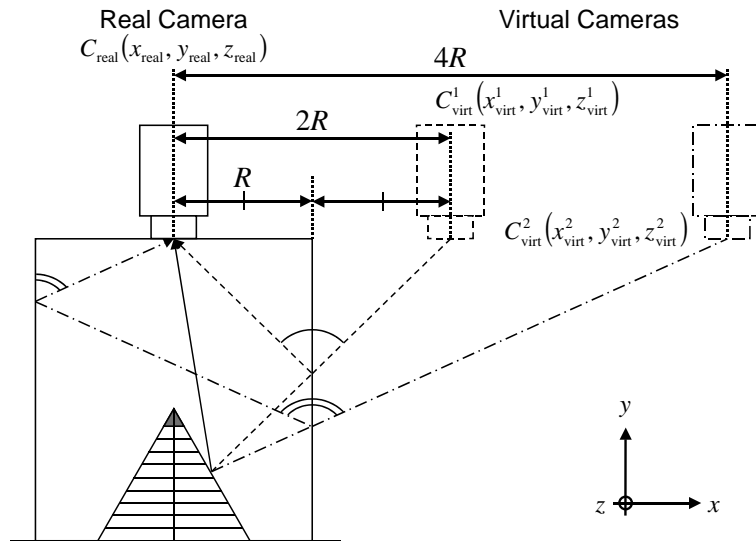


図 3.6 仮想カメラ位置の推定

第4章

対応点探索アルゴリズム

提案システムにより撮影される画像は、複数の視点から物体上の同一の点を観測した像を含む。この画像からステレオ視によって物体の形状を計測するには、撮影画像中の対応点を探索する処理が必要である。観測された像の対応点関係を得られれば、前章で述べた特性により、各点を観測した仮想カメラの位置と視線の方向を推定できるため、ステレオ視を用いて点の奥行きを推定できる。

その一方で、提案システムにより撮影された画像は、半径方向に非線形の歪みを含んでいるため、単純なパターンマッチングに基づく手法では、対応点を精度良く探索することは難しい。撮影画像の歪みは、物体面の法線方向および光線のカメラへの入射角に依存する。とくに物体面の法線方向は計測時には未知のパラメータであり、撮影画像の歪みを解析的に補正することは不可能である。そのため、撮影画像中の対応点を精度良く探索するためには、画像の非線形の歪みに対して頑健な対応点探索を導入することが望ましい。

本研究では、非線形の歪みをもつ撮影画像から対応点関係を求める方法として、画像からある点を中心とする小領域を複数切り出し、これらの領域間の類似性を調べ、最も類似した領域の中心点同士を対応点とする、テンプレートマッチングと呼ばれる手法と、局所的に歪みをもつデータの組から対応関係を求める手法として音声認識などで広く用いられる動的計画法を用い、撮影画像中の対応点の探索を試みた。本章では、これらの手法を用いた対応点探索アルゴリズムについて述べる。

4.1 局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索

局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索アルゴリズムの概略を以下に示す：まず，処理の簡単化のために撮影画像を極座標展開する．次に，極座標展開された撮影画像から，ある一点を中心とする小領域を探索元領域として切り出し，探索元領域に最も類似していると考えられる領域を探索する．本システムでは，2つの領域の間でSSD (Sum of Squared Difference: 差の二乗和) を計算し，SSDの値が小さいほど，互いの領域が類似していると考ええる．ただし，円筒鏡面で反射してカメラに入射した像は，半径方向に歪みを含んでいる．ゆえに，領域間の類似性を求める際には，反射像の歪みが考慮されていることが望ましい．しかしながら反射像の歪みの大きさは，未知のパラメータである物体面の法線方向に依存するため，歪みを解析的に補正することが不可能である．そこで本システムでは，従来のテンプレートマッチング手法である探索領域の移動に加え，類似性を調べる反射像を半径方向について動的に拡大縮小させながらSSDの値を計算し，最も類似している領域の中心点の組を対応点の組とする．本章では，対応点探索アルゴリズムにおけるそれぞれの手順について詳しく述べる．

4.1.1 撮影画像の極座標展開

まず，SSDの計算を単純化するための前処理として，撮影画像を極座標展開する．図3.2(b)に示す画像を極座標展開した結果の例を図4.1に示す．3.2節で述べたとおり，本システムで撮影された画像において，対応点の組は画像中心を通る同一直線上に必ず存在する．ゆえに，撮影された画像を，縦軸を画像中心からの距離，横軸を角度とする極座標画像に展開することで，画像中のある一点に対応する点を探索する際の範囲は，図4.1に示す破線の領域内に限定される．

極座標展開前の画像における座標値を (u, v) ，極座標展開後の座標値を (t, w) と

4.1. 局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索

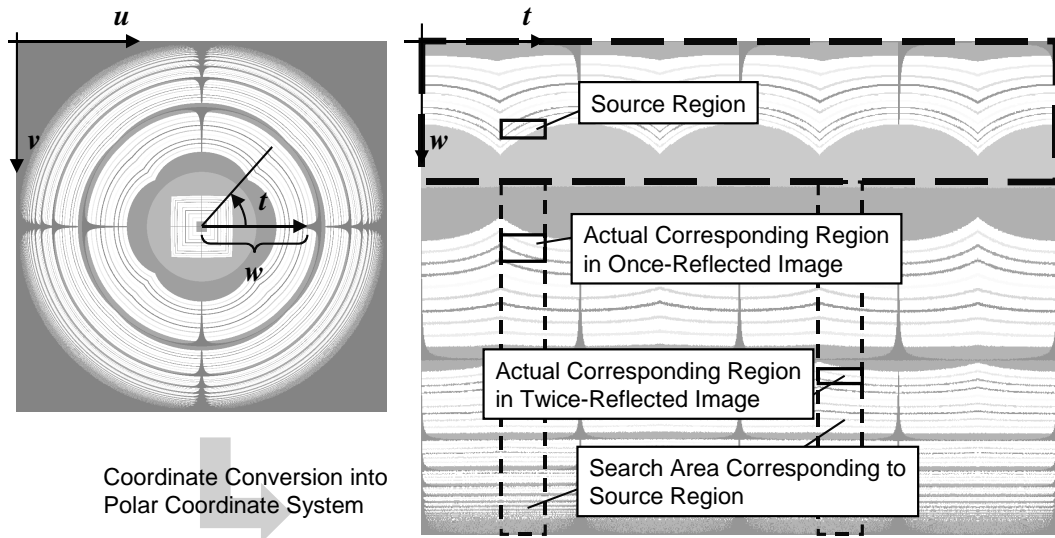


図 4.1 極座標展開後の撮影画像

すると、変換における画素値の対応関係は

$$t = \frac{\arctan \frac{v}{u}}{2\pi} \cdot T \quad (4.1)$$

$$w = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\frac{U}{2}} \cdot W \quad (4.2)$$

となる。なお、 t および w は整数値であり、小数点以下の値は切り捨てる。ここで、 U は極座標展開前の画像における u および v 軸方向の画素数、 T, W はそれぞれ、極座標展開後の画像における t, w 軸方向の画素数を表す。極座標展開前の画像は、画像の中心に円筒の中心軸が存在するように撮影されている。また、極座標展開前の画像において、条件

$$\frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{\frac{U}{2}} \leq 1 \quad (4.3)$$

を満たさない座標値 (u, v) については、上記の変換の対象としない。

4.1.2 探索対象領域のサイズの正規化

前章で述べたように，撮影画像における反射像の w 軸方向の大きさは，光線の入射角と物体面の法線方向に依存して変化する．例えば図 4.1 では，物体像が鏡に 2 回反射してカメラに入射した像の w 軸方向の大きさは，1 回反射してカメラに入射した像よりも小さい．しかし，計測段階において物体面の法線方向は未知であるため， w 軸方向への像の大きさの変化を解析的に補正することは不可能である．そこで本システムでは，類似性を調べたい局所領域を w 軸方向について動的に拡大縮小させながら，SSD の値を計算する．ここで，SSD 値を計算するには，探索の際に基準となる領域（以下 Source）と評価対象の領域（以下 Target）の大きさが同一でなければならない．一般に，光線の入射角度や物体面の法線方向による像の大きさの変化は非線形だが，局所領域内の微小な像の歪みは，線形な拡大縮小で近似しても誤差は小さいと考え，本システムでは処理の簡単化のため，線形補間によって局所領域を拡大または縮小する．また，各画素の色は RGB 表色系で表現される．正規化後の領域内の点 (t, w) における R, G, および B それぞれの輝度値 $l_i(t, w)$ ($i = r, g, b$) は，正規化前の点の輝度値 o_i ($i = r, g, b$) と，Source を 1.0 としたときの Target のスケール s を用いて

$$w_{\text{int}} \equiv \text{trunc} \left(\frac{w}{s} \right) \quad (4.4)$$

$$\Delta \equiv \frac{w}{s} - w_{\text{int}} \quad (4.5)$$

$$l_i(t, w) = (1 - \Delta)o_i(t, w_{\text{int}}) + \Delta o_i(t, w_{\text{int}} + 1) \quad (4.6)$$

$$(i = r, g, b)$$

のように求められる．ここで， $\text{trunc}(x)$ は x の小数点以下を切り捨てる関数である．

4.1.3 探索対象領域の限定

提案システムで撮影した画像の n 次反射像において，点 (t_s, w_s) を中心とする領域 Source に対応する領域 Target は，オクルージョンが発生しない場合，像の

空間的な連続性は鏡に反射しても保たれることから，式

$$w_g^n \equiv \left(1 - \frac{w_S - w_{\min}^S}{(w_{\max}^S - w_{\min}^S)}\right) \cdot (w_{\max}^n - w_{\min}^n) + w_{\min}^n \quad (4.7)$$

で求められる点 (t, w_g^n) の近傍に存在すると仮定する．ここで， w_{\min}^n と w_{\max}^n はそれぞれ， n 回目の反射像が存在する上端値と下端値を示し， w_{\min}^S と w_{\max}^S は，Source が存在する上端値と下端値を表す．

式 (4.7) で求めた点 w_g^n は，Source に対応する Target の位置を線形比をもとに推定している．前述のとおり，反射像の w 軸方向への歪みは一般に非線形であるが，非線形の歪みを線形比で近似した際の誤差は，局所的にみると小さい．そこで，点 (t_S, w_S) を中心とする領域 Source に対応する領域を探索する際，探索対象となる w 軸方向の範囲を， w_g^n を中心とする一定の範囲内に限定することで，探索領域の削減をはかる．

中心を点 (t_S, w_S) とする領域 Source に対応する Target を n 次の反射像から探索するとき，探索の中心点とする w の範囲の上端 $w_{g\min}^n$ および下端 $w_{g\max}^n$ を，それぞれ

$$w_{g\min}^n \equiv \left(1 - \frac{w_S - w_{\min}^S}{(w_{\max}^S - w_{\min}^S)} - a\right) \cdot (w_{\max}^n - w_{\min}^n) + w_{\min}^n \quad (4.8)$$

$$w_{g\max}^n \equiv \left(1 - \frac{w_S - w_{\min}^S}{(w_{\max}^S - w_{\min}^S)} + a\right) \cdot (w_{\max}^n - w_{\min}^n) + w_{\min}^n \quad (4.9)$$

とする．また，鏡に反射した像を Source 領域とする際は， $w_{g\min}^n$ および $w_{g\max}^n$ をそれぞれ

$$w_{g\min}^n \equiv \left(\frac{w_S - w_{\min}^S}{(w_{\max}^S - w_{\min}^S)} - a\right) \cdot (w_{\max}^n - w_{\min}^n) + w_{\min}^n \quad (4.10)$$

$$w_{g\max}^n \equiv \left(\frac{w_S - w_{\min}^S}{(w_{\max}^S - w_{\min}^S)} + a\right) \cdot (w_{\max}^n - w_{\min}^n) + w_{\min}^n \quad (4.11)$$

とする． a は探索範囲の広さを表す定数であり，値が大きいほど探索範囲は広くなる．

4.1.4 SSD 値の計算

Source と線形補間によって正規化された Target の類似度を評価するため，本システムでは評価量として，Source と Target 領域間の SSD 値を用いる．この Source 領域 S と Target 領域 T の間の SSD 値 d_{ST} は，以下の式により求められる．

$$\begin{aligned}
 d_{ST}(t, w) = \sum_{t, w} \{ & (l_r^S(t, w) - l_r^T(t, w))^2 \\
 & + (l_g^S(t, w) - l_g^T(t, w))^2 \\
 & + (l_b^S(t, w) - l_b^T(t, w))^2 \} \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

なお， $l_i^S(t, w)$ および $l_i^T(t, w)$ ($i = r, g, b$) はそれぞれ Source と Target における各画素の輝度である．また， $l_i^S(t, w)$ および $l_i^T(t, w)$ ($i = r, g, b$) がとりうる値の範囲はそれぞれ $0 \leq l_i^S(t, w) \leq 255$ ， $0 \leq l_i^T(t, w) \leq 255$ である．

ここで，ある Source に対応する Target を探索する流れについて，図 4.2 を用いて説明する．図 4.2 は，カメラから直接観測された像を Source の全体集合 S_{all} とした例を表している． S_{all} から任意の窓サイズで切り出された Source 領域 S_a ($S_a \subseteq S_{\text{all}}$) に対応する探索候補領域は，4.1.1 節で述べた理論に基づき，図中破線で示された領域に限定できる．また，Source に対応する Target は，4.1.3 節で述べた局所領域内に存在すると考えられる．探索候補領域内で窓サイズを変化させながら領域を切り出し， S_a との SSD 値を計算する．そして，最小の SSD 値をもつ領域 T_a を S_a に対応する領域として選択し，それぞれの中心点をステレオ視の際に用いる対応点の組とする．同様に， S_{all} に含まれるすべての画素について対応点を探索する．

4.2 動的計画法を用いた対応点探索

本節では，動的計画法 (Dynamic Programming) [32] を用いた対応点探索アルゴリズムについて述べる．動的計画法とは，ある問題を複数の部分問題に分割して解く手法であり，部分的に非線形な歪みをもつデータ系列の対応関係を求めるために適した手法として，とくに音声認識などに用いられる [33]．本研究では，

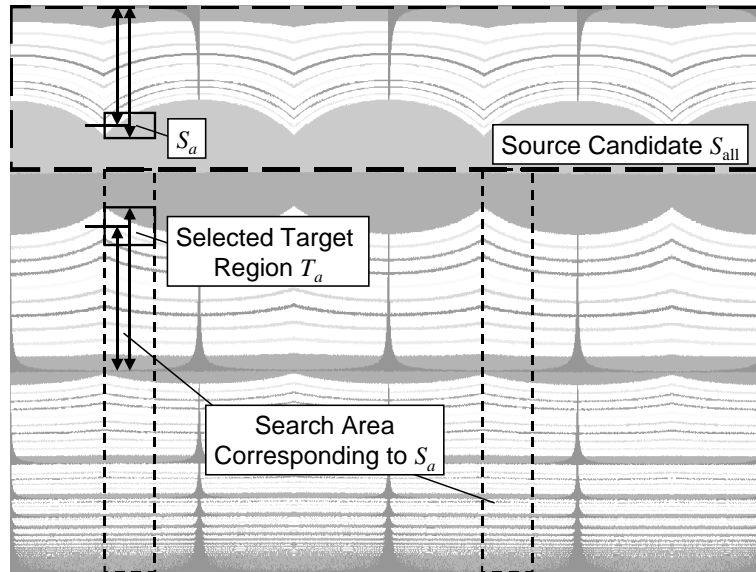


図 4.2 提案システムにおける探索対象領域

この動的計画法を対応点探索に用いることで、歪みをもつ撮影画像中の対応点を正しく探索することを試みる。

4.2.1 撮影画像の極座標展開

まず、探索対象領域の取得を単純化するため、テンプレートマッチングによる手法と同様に、撮影画像を極座標展開する。極座標展開後の撮影画像における t および w 軸はそれぞれ、極座標展開前の撮影画像における水平からの角度および中心からの距離に対応する。3.2 節で述べた性質から、ある領域 Source に対応する領域の存在する範囲は、極座標展開された画像において Source と同じ t の値を持つ領域と、 t 軸方向に π だけ進んだ領域に限定できる。そこで、これらの領域を反射回数ごとに分割し、かつ円筒底面が観測されたと考えられる領域を除去することで、探索対象候補領域 Target を得る。図 4.3 に示す撮影画像を極座標展開し、領域 Source および Target を抽出する一例を図 4.4 に示す。このとき、Source と Target に含まれる任意の画素の w 軸方向についての座標値は、それぞれ w_{src} および w_{tgt} と定義する。

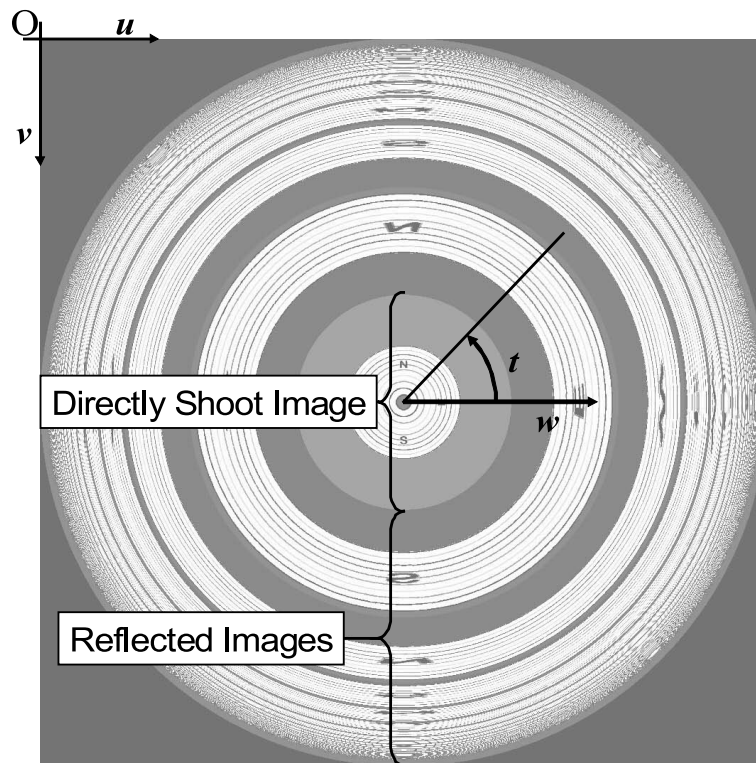


図 4.3 円錐を撮影した画像の一例 (シミュレーション)

4.2.2 動的計画法による対応点の決定

動的計画法を用いて対応点を探索するため、まず、領域 Source および Target の各画素をそれぞれ横軸および縦軸とするグラフを作成する。作成されたグラフ、および動的計画法における対応点探索の一例を図 4.5 に示す。

このとき、グラフ上のすべての矢印には移動コストが与えられる。本研究では、それぞれの矢印がもつコストとして、各画素の RGB 色空間における幾何学的距離を用いる。ここで、ノード $(w_{\text{src}}, w_{\text{tgt}})$ に入射する矢印がもつコスト $C(w_{\text{src}}, w_{\text{tgt}})$

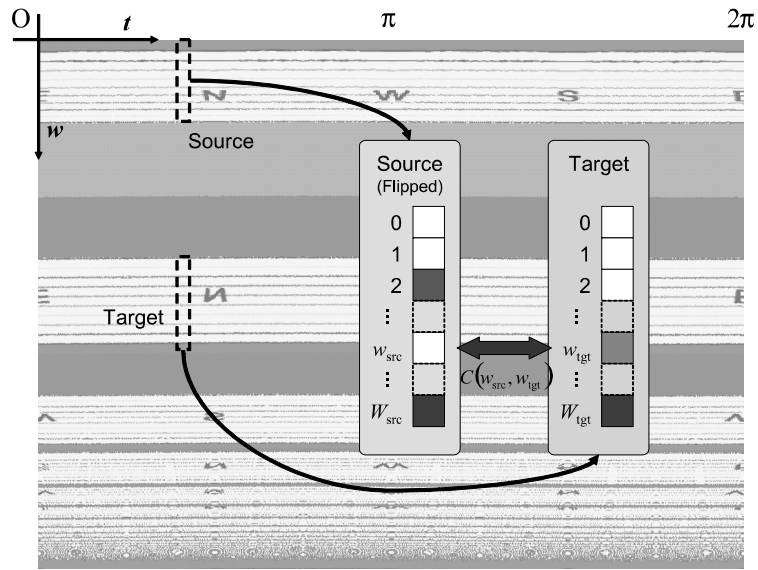


図 4.4 極座標展開画像における探索対象領域

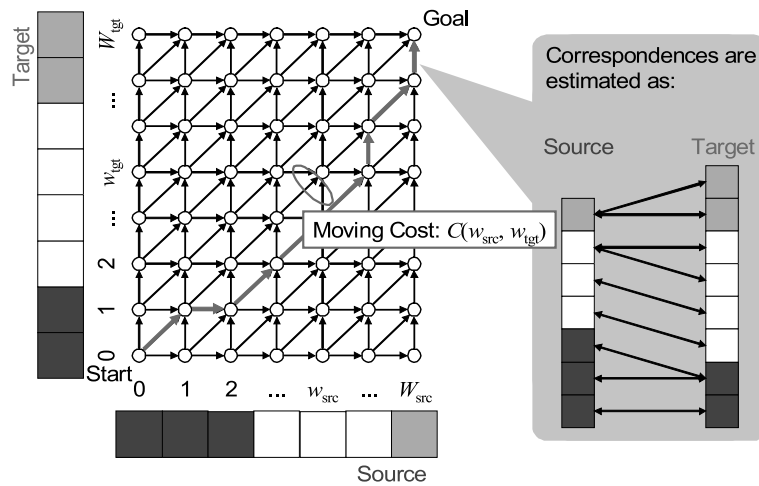


図 4.5 動的計画法の際に用いられるグラフの例

を

$$\begin{aligned}
 C(w_{src}, w_{tgt}) = & \left[\{i_r(t, w_{src}) - i_r(t, w_{tgt})\}^2 \right. \\
 & + \{i_g(t, w_{src}) - i_g(t, w_{tgt})\}^2 \\
 & \left. + \{i_b(t, w_{src}) - i_b(t, w_{tgt})\}^2 \right]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

第4章 対応点探索アルゴリズム

と定義する．ここで， $i_r(t, w)$ ， $i_g(t, w)$ および $i_b(t, w)$ はそれぞれ，撮影画像の (t, w) における RGB 輝度値を表す．Start から Goal を結ぶ経路のうち，コストの総和が最小となる経路を動的計画法を用いて求め，得られた経路を Source と Target における各画素の対応関係とする．なお，オクルージョンが発生しない限り，反射回数の異なる像の間でも空間的な連続性は保たれ，像の部分的な反転などは起こらない．ゆえに図 4.5 において，移動方向を右あるいは上方向に限定できる．例えば図 4.5 では，太矢印の経路がコスト最小の経路として選択され，経路から対応点関係が同図に示すように求められる．

第5章

形状計測実験

提案システムにより，正しく物体の三次元形状を計測できるか確認するため，三次元形状計測実験を行った．本章では，理想的なシミュレーション環境において仮想物体を撮影したシミュレーション画像と，プロトタイプシステムにより実物体を撮影した実測画像から，物体の三次元形状を計測した実験結果を示す．また次章では，それぞれの実験結果をもとに，計測精度や誤計測の原因について考察する．

5.1 シミュレーション画像を用いた形状計測実験

レンズの歪みや，レンズの光軸と円筒鏡の中心軸の不一致などが存在しない理想的な環境下で，提案手法を用いて物体の三次元形状を計測できるか確認するため，シミュレーション画像からの仮想物体の三次元形状計測実験を行った．本節では，シミュレーション環境およびシミュレーション画像を用いた実験結果について述べる．

5.1.1 シミュレーション環境

本実験では，計測対象物体として，最も単純な形状である円錐，実空間における y 軸まわりの回転体でない四角錐，さらに，カメラから直接観測できない部分が存在する傘がある物体を用いた．これらの物体を，円筒鏡の中心軸と物体の重心が一致するように設置した．また，円筒鏡の直径および高さを $102.4[\text{mm}]$ とし

表 5.1 使用した計算機環境

CPU	Intel(R) Pentium(R) 4 3.0 [GHz]
メインメモリ	1.0[GByte]
OS	Microsoft Windows XP Professional Service Pack 2
開発言語	Microsoft Visual C++

た．カメラは撮影位置が円筒鏡の上端と同じ高さであり，かつ光軸と円筒鏡の中心が一致するように設置した．カメラに装着する魚眼レンズは，画像中心からの距離 d とレンズに入射する光線が光軸と成す角 ϕ の関係が $d = f\phi$ で表される等距離射影レンズである．生成された画像と極座標展開後の画像のサイズは 1024×1024 [pixels] である．各画素の色はRGB 表色系で表され，各色の輝度値は0 から 255 までの 256 階調とした．また，使用した計算機環境を表 5.1 に示す．

5.1.2 局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索手法を用いた実験

円錐を対象とした形状計測実験

まず，提案システムの計測精度について検証するため，円錐を対象物体とした場合の，提案システムによる三次元形状計測結果を示す．円錐の底面の直径は 51.2 [mm]，高さは 25.6 [mm] であり，円錐表面は情景画像をテクスチャとして持つ．図 5.1 に，提案システムにより撮影されたシミュレーション画像を示す．

本実験における SSD の窓サイズは 5×5 [pixels] である．式 (4.4) におけるスケール s を 0.5 から 2.0 まで 0.1 ずつ変化させ，カメラで直接観測された像および円筒鏡に 1 回反射した像を用いてステレオ計測を行った．提案システムによる円錐の形状計測結果を図 5.2 および図 5.3 に示す．また，図 5.4 は，提案システムにより計測された円錐の形状を，横軸を画像中心からの距離，縦軸を高さとする散布図に示したものである．図中の実線は，円錐の中心からの距離と真の高さの関係を表している．なお，対応点探索に要した処理時間は，表 5.1 に示した環境下で 851 [sec] であった．

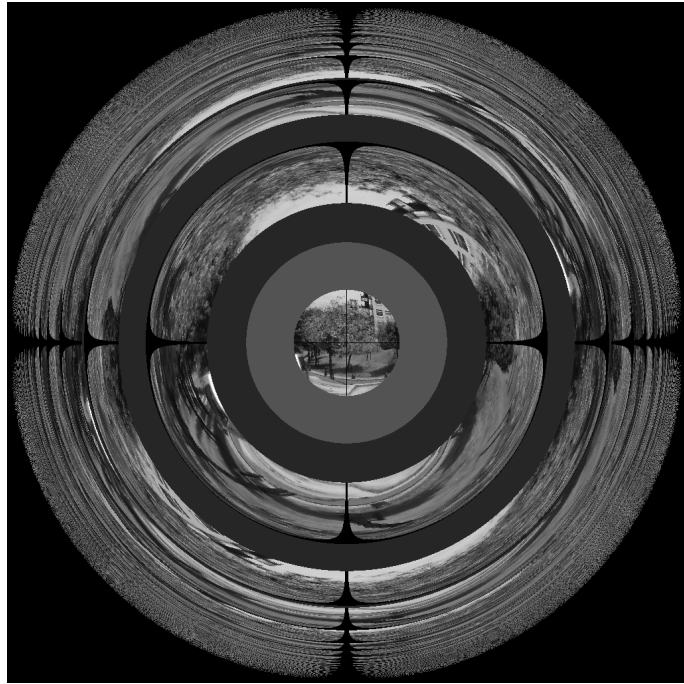
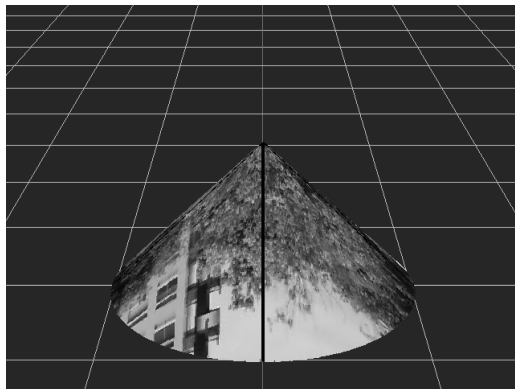
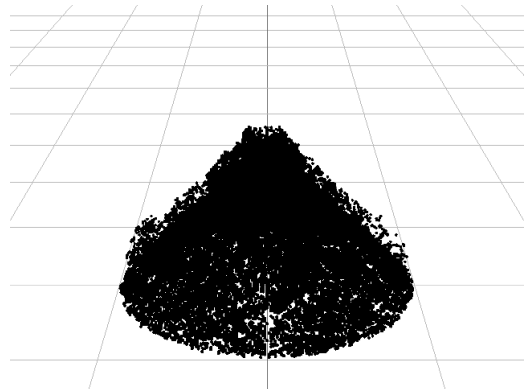


図 5.1 提案システムによる円錐の撮影画像 (シミュレーション)

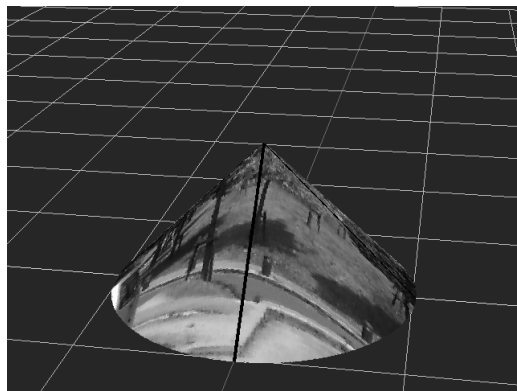


(a) 円錐の真の形状

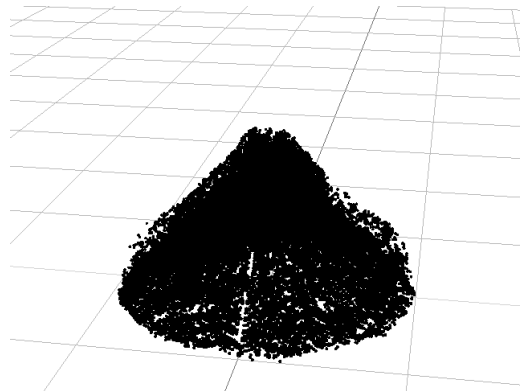


(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.2 シミュレーション画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 1)



(a) 円錐の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.3 シミュレーション画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 2)

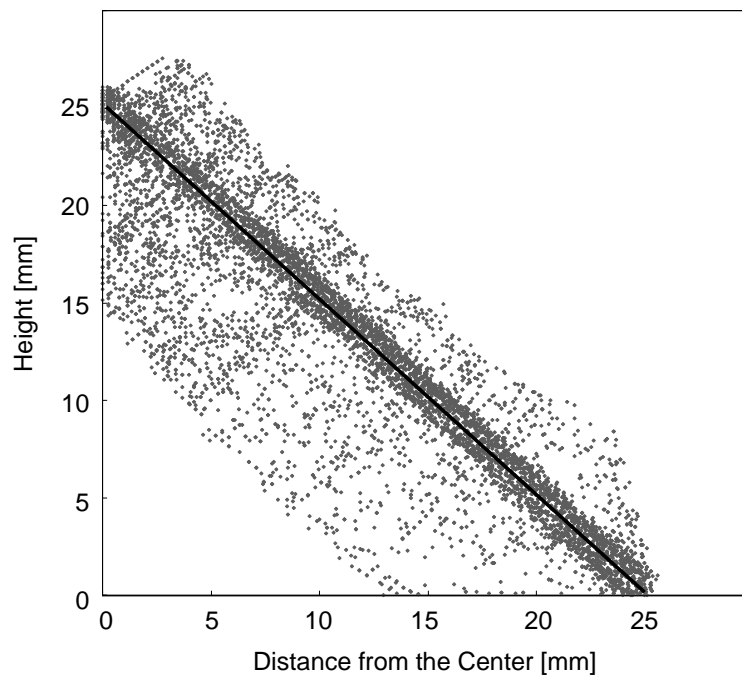


図 5.4 円錐の中心からの距離と高さの関係

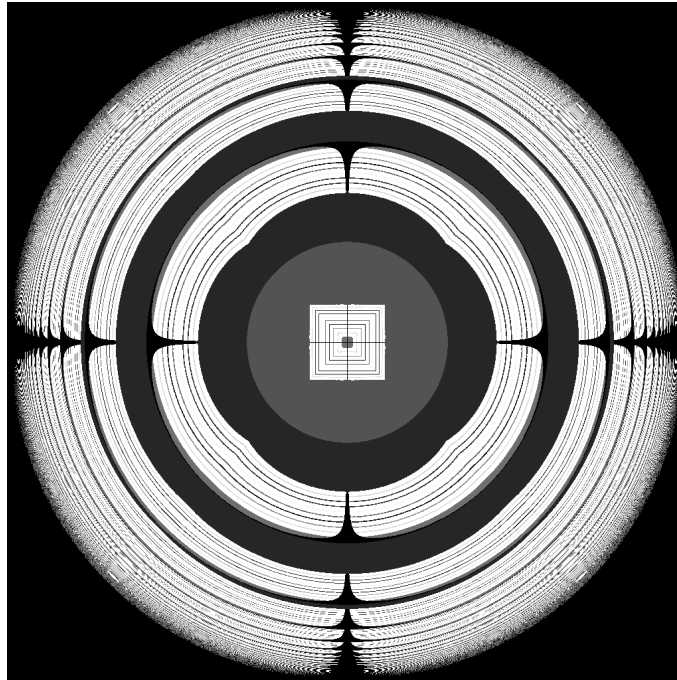
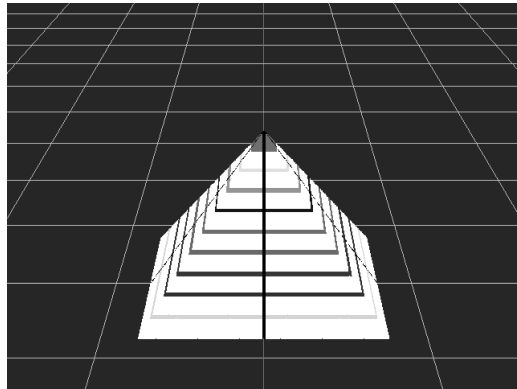


図 5.5 提案システムによる四角錐の撮影画像(シミュレーション)

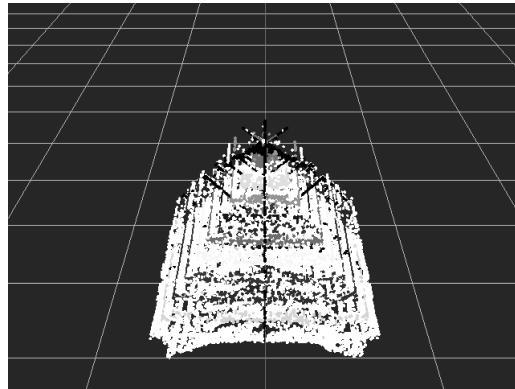
四角錐を対象とした形状計測実験

次に，窓サイズが対応点探索に及ぼす変化を調べるため，対象物体を四角錐として計測実験を行った．対象物体は図 5.6(a) および図 5.7(a) に示された四角錐である．底面は一辺 36.2[mm] の正方形であり，高さは 25.6[mm] である．四角錐の表面には，高さの 10% ごとに異なる色で等高線が描かれている．提案システムにより撮影された画像を図 5.5 に示す．また，スケール s は円錐の計測実験と同じく，0.5 から 2.0 まで 0.1 ずつ増加させた．

窓サイズを 5×5 [pixels] としたときの，提案システムによる四角錐の形状計測結果を図 5.6 に示す．また，窓サイズを 20×20 [pixels] としたときの形状計測結果を図 5.7 に示す．なお，四角錐は実環境における y 軸（高さ軸）に関する回転体ではないため，図 5.4 に示したような散布図は省略する．対応点探索に要した処理時間は，表 5.1 に示した環境下で，窓サイズを 5×5 [pixels] としたとき 707[sec]，同じく， 20×20 [pixels] としたとき 9870[sec] であった．

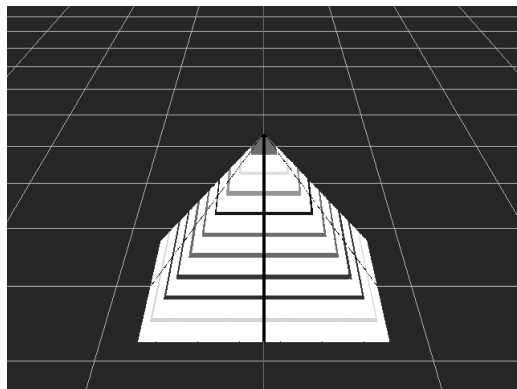


(a) 四角錐の真の形状

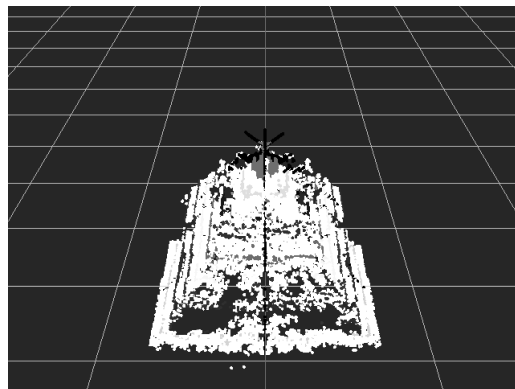


(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.6 四角錐の形状計測実験結果 (窓サイズ 5×5 [pixels])



(a) 四角錐の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.7 四角錐の形状計測実験結果 (窓サイズ 20×20 [pixels])

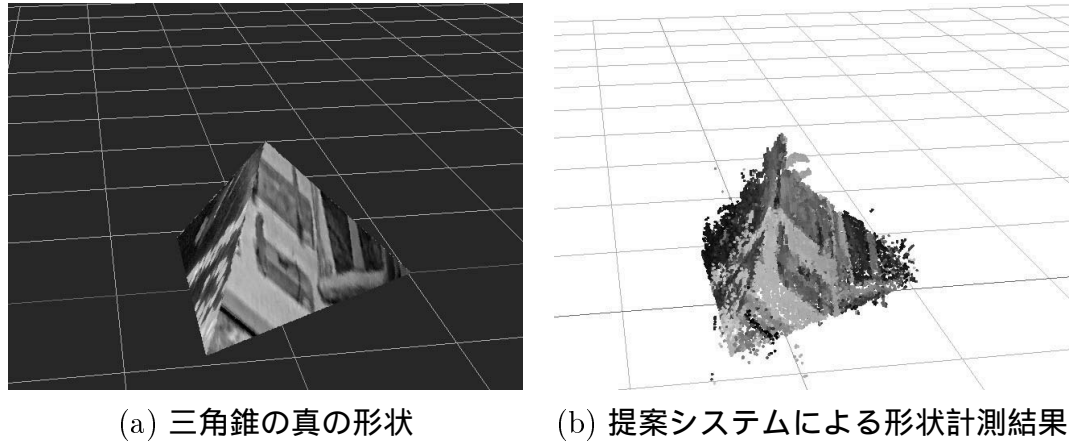


図 5.8 三角錐の形状計測実験結果

三角錐を対象とした形状計測実験

円筒鏡の中心に重心が一致しない場合に物体の形状を計測できるか確かめるため、三角錐の計測実験を行った。三角錐底面の1辺の長さは44.4[mm]、高さは25.6[mm]であり、表面にはテクスチャとして情景画像が与えられている。また三角錐は、円筒鏡の中心から45.3[mm]の距離に重心が存在するように配置された。図5.8に提案システムによる形状計測結果を示す。

傘がある物体を対象とした形状計測実験

カメラで直接観測できない部分が存在する物体でも、円筒鏡による反射像を用いて形状を計測可能であるか確かめるため、傘がある物体の形状計測を試みた。

対象物体は円柱と円錐を上下に組み合わせた形状である。円柱部分の直径と高さはそれぞれ38.4[mm]および19.2[mm]、円錐部分の底面直径は48.0[mm]、高さは19.2[mm]であり、物体全体の高さは38.4[mm]である。また、円錐と円柱の表面は、それぞれ異なる情景画像をテクスチャとして持つ。図5.9(a)に物体の鳥瞰図を、また同図(b)に側面から見た模式図を示す。

図5.9に示した物体を提案システムで撮影すると、図5.10に示す画像が得られた。図5.10に示すように、物体の円柱部分は円錐の影となり、カメラで直接観測

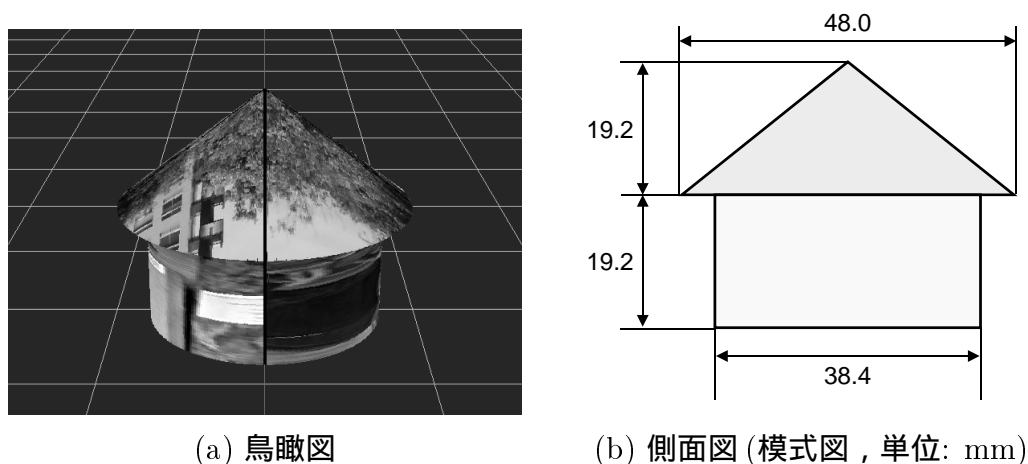


図 5.9 本実験での対象物体

できない．しかしながら円柱表面は，円筒鏡に1回および2回反射した像でそれぞれ観測されており，これらの反射像を用いることで形状計測が可能である．

図 5.10 に示す画像を用い，提案システムによって物体の形状を計測した結果を図 5.11 に示す．本実験において，SSD の窓サイズは 5×5 [pixels] とし，式 (4.4) におけるスケール s を 0.5 から 2.0 まで 0.1 ずつ変化させた．なお，円錐表面はカメラに直接観測された像と円筒鏡面で1回反射した像によるステレオ視，円柱表面は，円筒鏡面で1回反射した像と2回反射した像によるステレオ視の結果を用いている．また図 5.12 は，図 5.4 と同様に，提案システムにより計測された物体の形状を，横軸を画像中心からの距離，縦軸を高さとする散布図に示したものである．図中の実線は物体の真の形状を表している．対応点探索には，表 5.1 に示した環境下で 1206[sec] を要した．

図 5.11 および図 5.12 から，カメラから直接観測できない部分を含む物体に関しても，一回の撮影で全周形状を計測できていることがわかる．しかしながら，カメラから直接観測できない円柱部分について，真の形状に対する計測結果のばらつきが大きいことが見て取れる．

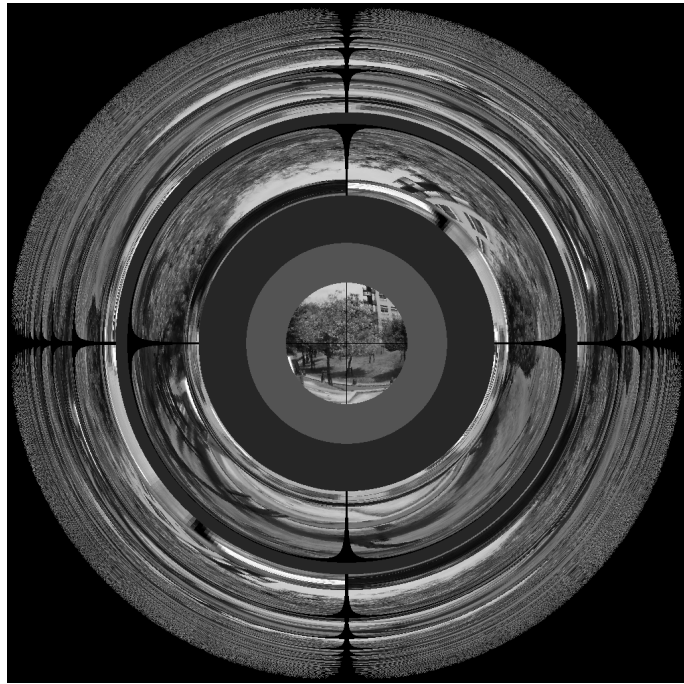
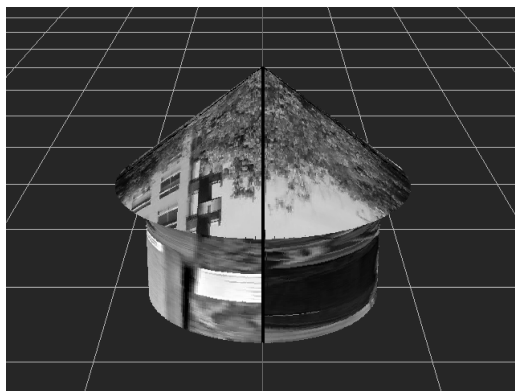
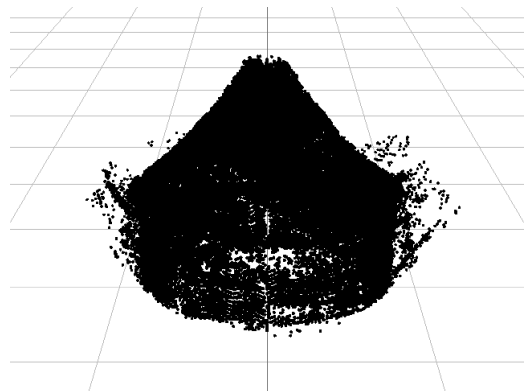


図 5.10 提案システムによる傘型物体の撮影画像 (シミュレーション)



(a) 物体の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.11 シミュレーション画像を用いた傘型物体の形状計測実験結果

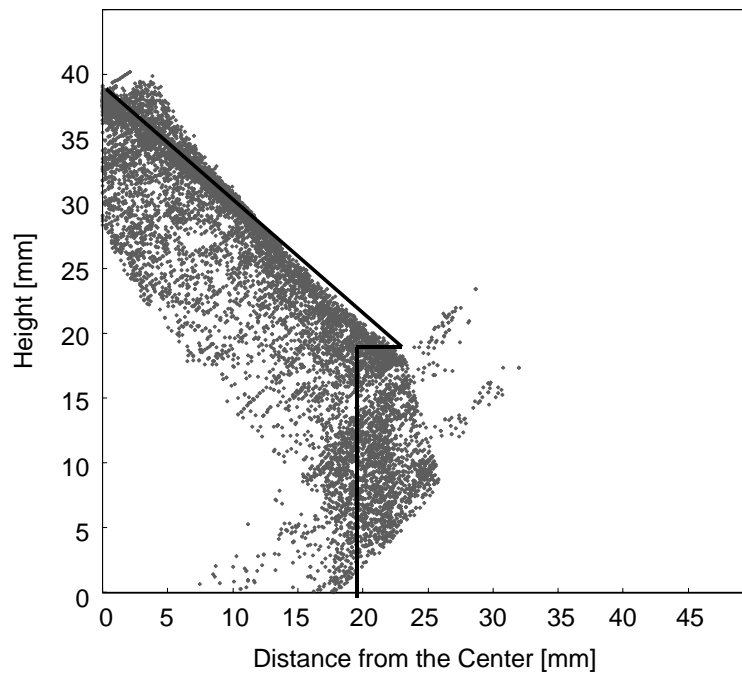


図 5.12 傘型物体の中心からの距離と高さの関係

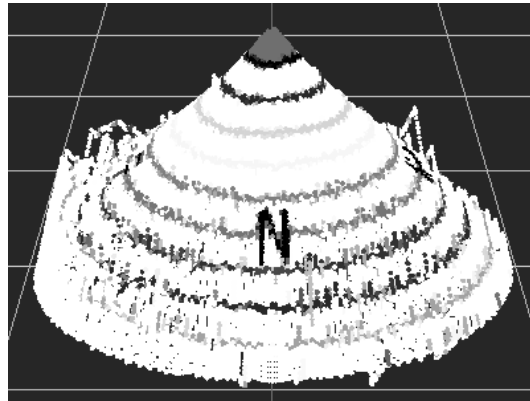


図 5.13 シミュレーション画像による円錐の計測実験結果

5.1.3 動的計画法による対応点探索手法を用いた実験

円錐を対象とした形状計測実験

図 5.13 に、シミュレーション画像を用い、円錐の形状を計測した結果を示す。円錐の底面直径は 51.2[mm]、高さは 25.6[mm] であり、表面には高さの 10%ごとに異なる色で等高線が描かれている。図 5.13 は円錐の計測結果、図 5.14 は横軸を円錐の中心軸からの距離、縦軸を高さとし、計測結果をプロットした散布図である。提案システムによる計測誤差の絶対値の平均は 0.66[mm]、分散は 0.04[mm]であった。また、円錐の高さが 12.8[mm] 以上の部分における平均誤差は 0.67[mm]、分散は 0.03[mm] であり、高さ 12.8[mm] 未満の部分における平均誤差は 0.65[mm]、分散は 0.04[mm] であった。

三角錐を対象とした形状計測実験

同様に、三角錐の形状計測結果を図 5.15 に示す。三角錐の底面は一辺の長さ 44.4[mm] の正三角形、高さは 25.6[mm] であり、表面には円錐と同様に、高さの 10%ごとに異なる色で等高線が描かれている。三角錐は中心軸が円筒中心軸から 45.3[mm] の距離となるように設置された。上記の条件で生成されたシミュレーション画像は図 3.2(b) となる。図 5.15(a) に三角錐の真の形状を、(b) に提案シス

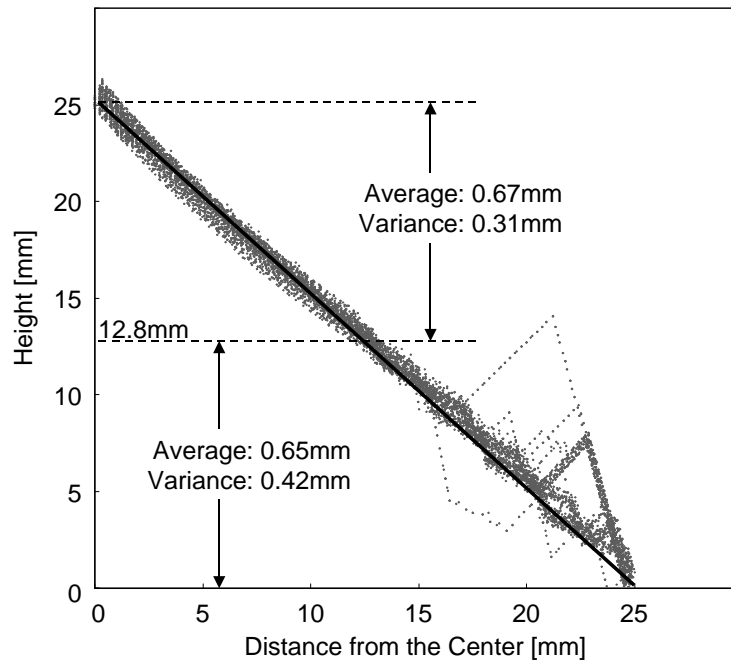
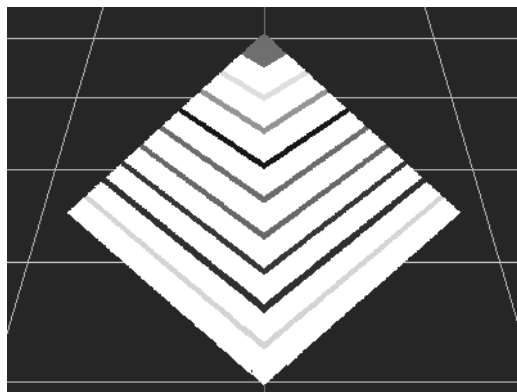
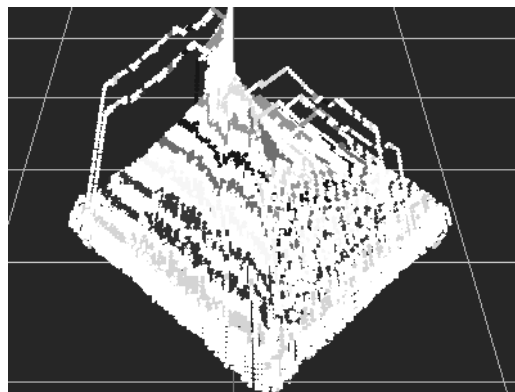


図 5.14 円錐の中心からの距離と高さの関係



(a) 三角錐の真の形状



(b) 計測結果

図 5.15 シミュレーション画像による三角錐の計測実験結果

テムによる測定結果を示す。

5.2 実測画像を用いた形状計測実験

次に、提案システムのプロトタイプを製作し、提案システムを用いて実物体の形状を計測できるか確認するための実験を行った。本節では、実測画像を用い、円錐と玩具の形状計測を試みた結果を示す。

5.2.1 局所領域のテンプレートマッチングによる対応点探索手法を用いた実験

円錐を対象とした形状計測実験

はじめに、円錐を対象物体とした形状計測実験について述べる。本実験では、カメラはOpteon社製 Depict D1E を用い、 1392×1040 [pixels] で撮影された画像から、 1024×1024 [pixels] の画像を切り出して使用した。また、光源としてリングライトを用い、カメラの周囲から物体へ光を投射した。円筒鏡の内径は 90 [mm]、高さは 100 [mm]である。計測環境を図 5.16 に示す。また、使用した計算機環境は表 5.1 のとおりである。

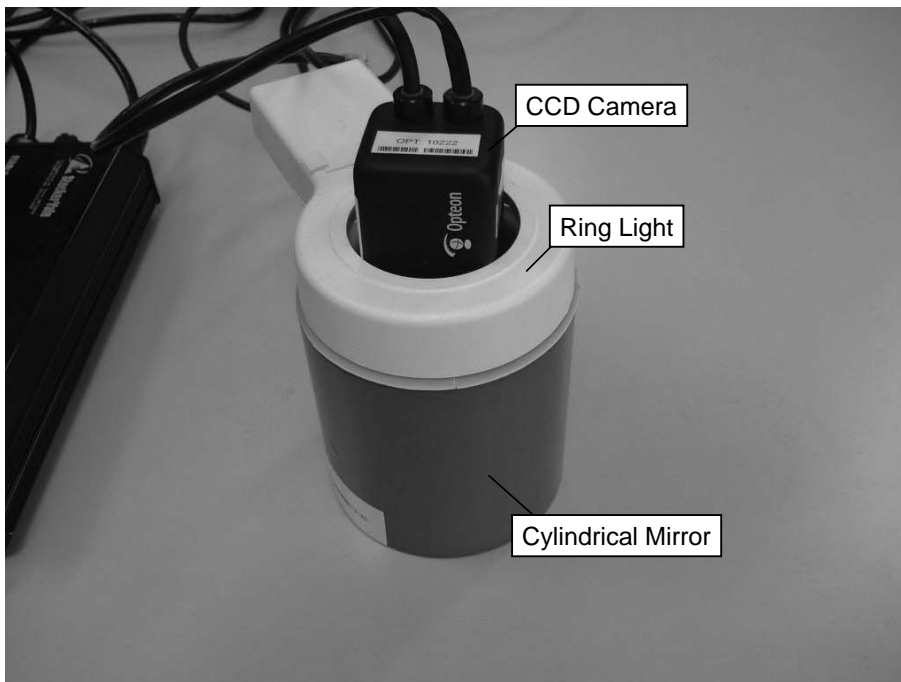


図 5.16 計測環境

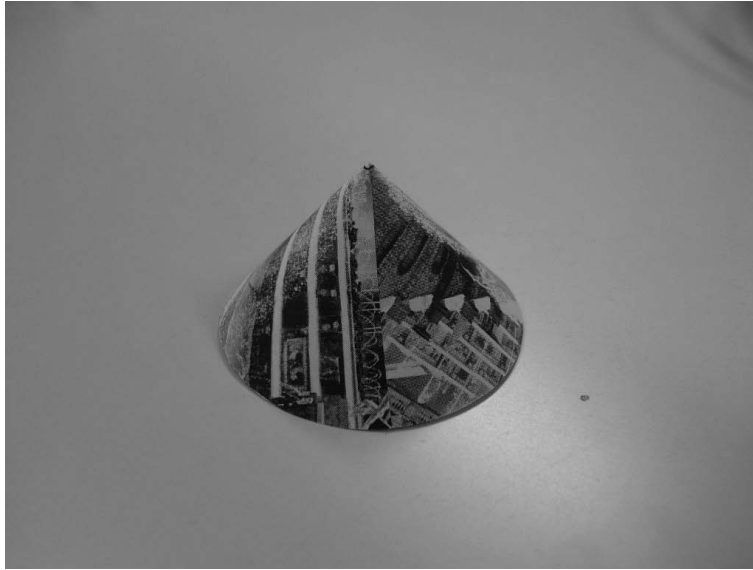


図 5.17 計測対象として用いた実物体 (円錐)

ただし，本実験で用いたカメラはグレースケール画像のみ得られるため，式 (4.12) における $l_i^S(t, w)$ および $l_i^T(t, w)$ ($i = r, g, b$) について

$$l_i^S(t, w) = l_{\text{gray}}^S(t, w) \quad (5.1)$$

$$l_i^T(t, w) = l_{\text{gray}}^T(t, w) \quad (5.2)$$

とする．ここで $l_{\text{gray}}^S(t, w)$ および $l_{\text{gray}}^T(t, w)$ はそれぞれ，Source および Target において，カメラから得られた撮影画像の明度値である．また，取り得る値の範囲は $0 \leq l_{\text{gray}}^S(t, w) \leq 255$ ， $0 \leq l_{\text{gray}}^T(t, w) \leq 255$ である．

本実験では計測対象として，図 5.17 に示す円錐を用いた．底面の直径は 56[mm]，高さは 34[mm] であり，円錐表面はグレースケールの情景画像をテクスチャとして持つ．

図 5.17 に示す円錐を提案システムで撮影すると，図 5.18 に示す撮影画像が得られる．本実験では，この画像から円錐の形状計測を試みた．

本実験における SSD の窓サイズは 5×5 [pixels] とした．また，式 (4.4) におけるスケール s を 0.5 から 2.0 まで 0.1 ずつ変化させ，カメラで直接観測された像と

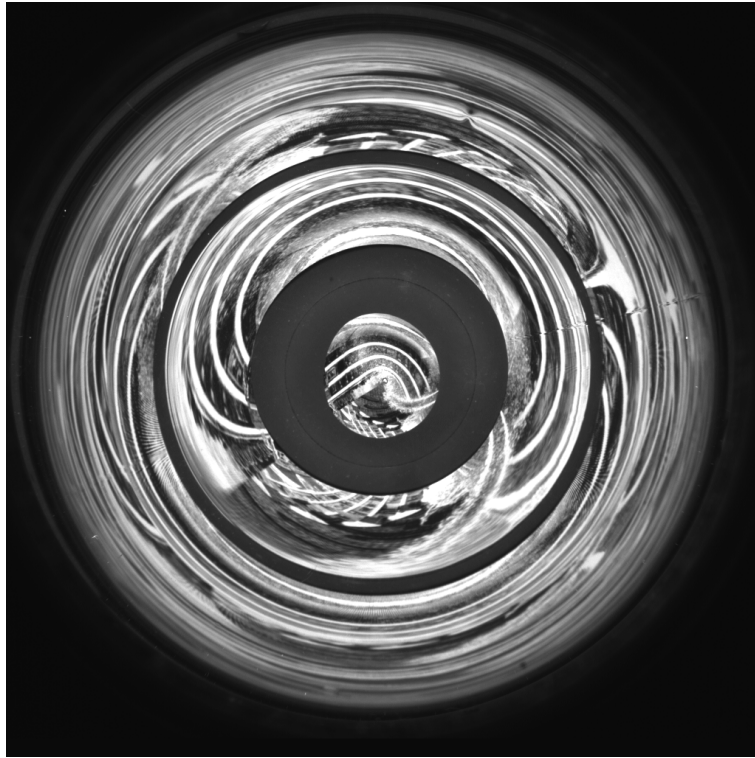
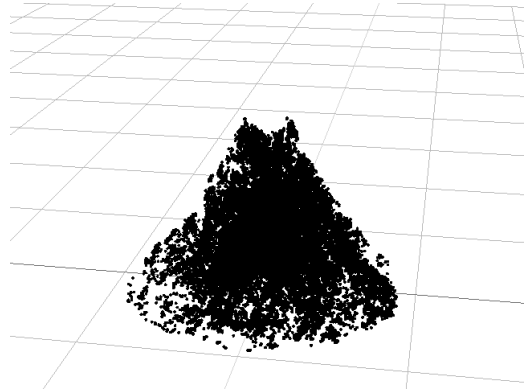


図 5.18 撮影画像 (実測, 図 5.17 の円錐を撮影)

円筒鏡に 1 回反射した像を用いて, ステレオ視により形状を計測した. 提案システムによる円錐の形状計測結果を図 5.19 および図 5.20 に示す. また, 提案システムにより計測された円錐の形状を, 横軸を画像中心からの距離, 縦軸を高さとする散布図にしたものを図 5.21 に示す. なお, 対応点探索に要した処理時間は, 表 5.1 に示した環境下で 1562[sec] であった.



(a) 円錐の真の形状

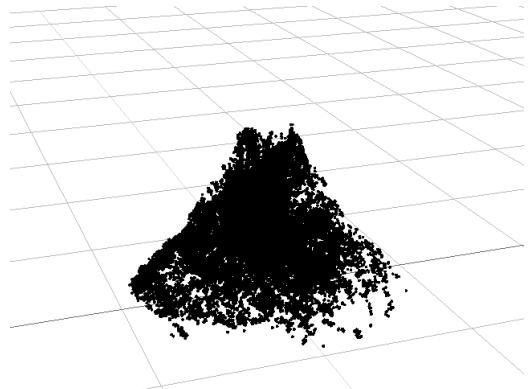


(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.19 実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 1)



(a) 円錐の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.20 実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 2)

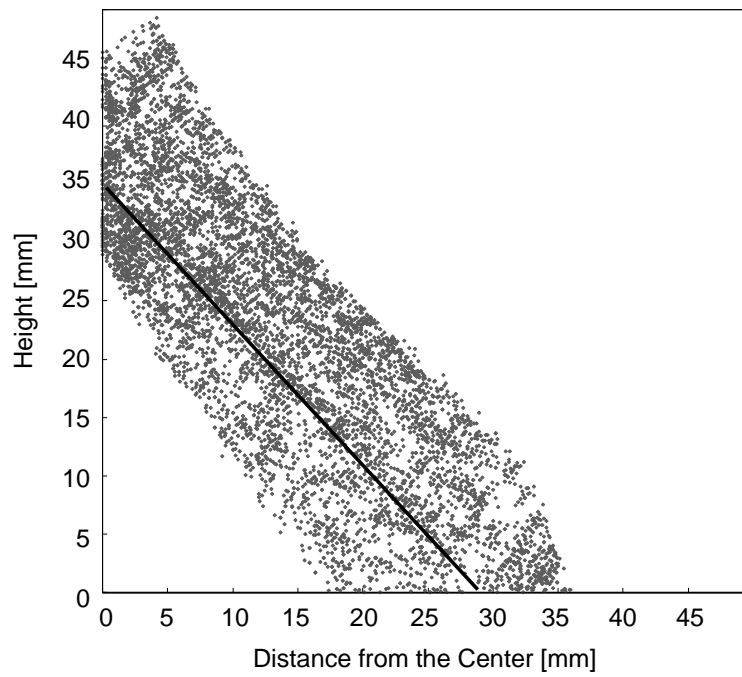


図 5.21 円錐の中心からの距離と高さの関係

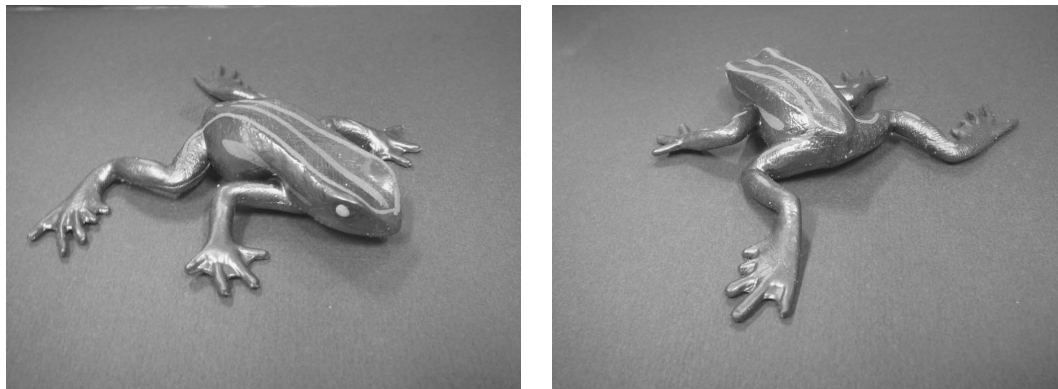


図 5.22 計測対象とした物体

玩具を対象とした形状計測実験

次に，玩具を計測対象とした実験結果を示す．本実験では物体の大きさに合わせ，内径 194[mm]，高さ 200[mm] の円筒鏡を用いた．カメラは imi tech 社製 Pearl IMC-20FT を用い， 1600×1200 [pixels] で撮影された画像から， 1024×1024 [pixels] の画像を切り出して使用した．魚眼レンズの射影特性は，実測画像よりテーブルを作成した．本実験で使用したカメラはカラー画像を撮影できるため，式 (5.1) に示すグレースケール変換は行わないものとした．また，光源としてリングライトを用い，カメラの周囲から物体へ光を投射した．

本実験では計測対象として，図 5.17 に示す蛙形の玩具を用いた．玩具を上から撮影した際，玩具に外接する矩形の辺の長さはそれぞれ 130[mm] および 100[mm] である．図 5.22 に示す対象物体を撮影した画像を図 5.23 に示す．

本実験で用いた極座標変換後の画像サイズは 4096×512 [pixels]，本実験における SSD の窓サイズは 5×5 [pixels] とした．また，式 (4.4) におけるスケール s を 0.5 から 2.0 まで 0.1 ずつ変化させ，カメラで直接観測された像と円筒鏡に 1 回反射した像を用いて，ステレオ視により形状を計測した．提案システムによる玩具の形状計測結果を図 5.24 に示す．また，対応点探索に要した処理時間は 336[sec] であった．

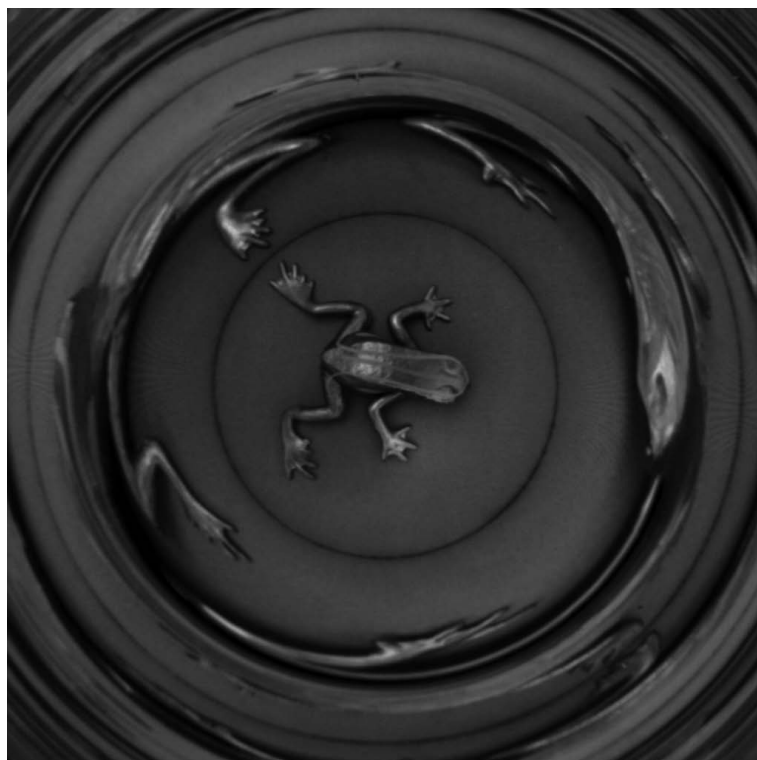
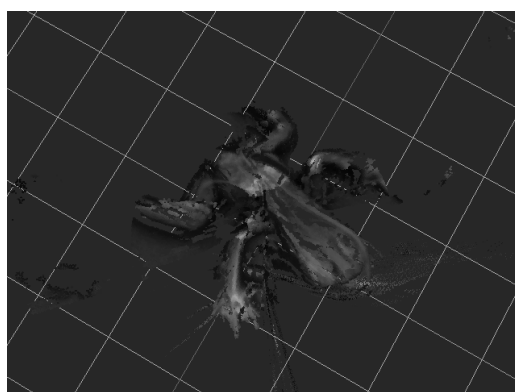


図 5.23 撮影画像 (実測, 図 5.22 の玩具を撮影)



(a) 物体の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.24 実測画像を用いた玩具の形状計測実験結果

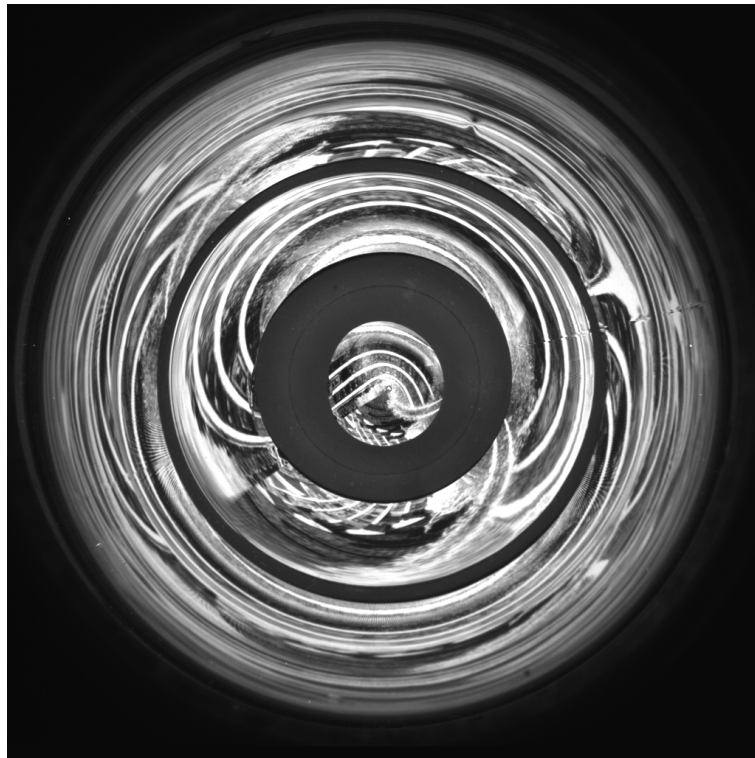


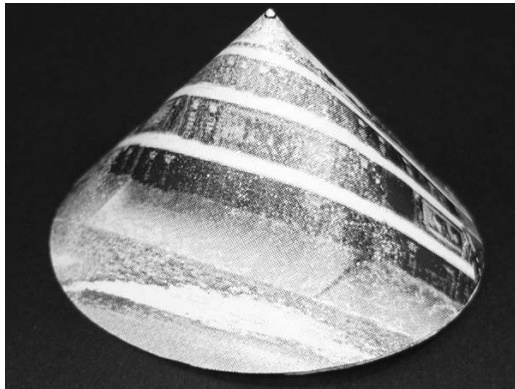
図 5.25 試作システムにより円錐を撮影した画像

5.2.2 動的計画法による対応点探索手法を用いた実験

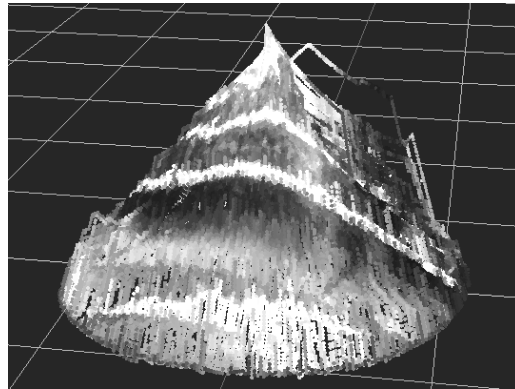
円錐を対象とした形状計測実験

計測環境は 5.2.1 節における円錐の計測実験と同様である．試作システムを用いて円錐を撮影した画像を図 5.25 に示す．

図 5.26 は，実物体である円錐の形状を試作システムにより計測した結果である．円錐の底面直径は 56[mm]，高さは 34[mm] であり，円錐表面には情景画像がテクスチャとして与えられている．図 5.26(a) は計測対象とした円錐の真の形状，同図 (b) は提案システムにより計測された円錐の形状である．試作システムによる計測誤差の絶対値の平均は 3.71[mm]，分散は 8.32[mm] であった．



(a) 対象物体

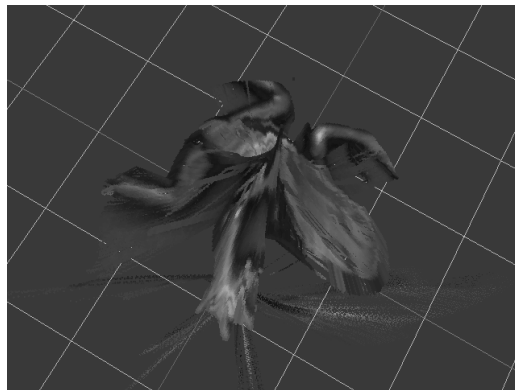


(b) 計測結果

図 5.26 試作システムを用いた円錐の形状計測結果



(a) 物体の真の形状



(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.27 動的計画法による玩具の形状計測実験結果

玩具を対象とした形状計測実験

最後に、図 5.22 に示す玩具について、動的計測法による対応点探索手法を用いた計測実験を行った。撮影条件および撮影画像は、5.2.1 節における玩具の計測実験と同様である。提案システムによる玩具の形状計測結果を図 5.24 に示す。また、対応点探索に要した処理時間は 275[sec] であった。

第6章

考察

前章では，提案システムを用いて，仮想物体を撮影したシミュレーション画像，およびプロトタイプシステムにより実物体を撮影した実測画像から，物体の形状を計測する実験を行った．本章では，前章で得られた実験結果をもとに，提案システムにより計測できる物体の形状や範囲，および計測精度について考察する．

6.1 対応点探索手法に関する考察

本節では，パターンマッチングによる手法および動的計画法による手法を用いた計測結果から，二つの手法がそれぞれ適する物体の特性について述べる．

6.1.1 物体表面のテクスチャによる対応点探索精度の変化

パターンマッチングによる手法を用いた，5.1.2 節に示す円錐の形状計測実験で，樹木のテクスチャの部分において計測誤差が大きくなることがあった．提案システムの計測精度は，物体表面のテクスチャに影響される．本節では，5.1.2 節の計測結果をもとに，提案システムで用いている対応点探索アルゴリズムが物体表面のテクスチャから受ける影響について議論する．

本節での誤差の検証方法を以下に示す．まず，図 5.1 に示す撮影画像を極座標展開し， $t = 0, 20, 40, \dots$ のように，20[pixels] ごとに w 軸方向に伸びるライン 52 本を得る．なお， t における 20[pixels] の間隔は，極座標展開前の画像における水平からの角度に換算すると，およそ 0.123[radians] の角度差となる．次に，取得

した各ライン上の点について，カメラで直接観測された像の座標値から解析的に求められる円錐の真の三次元位置と，提案システムにより計測された三次元位置のユークリッド距離

$$e(t, w) = \{(x_m(t, w) - x_a(t, w))^2 + (y_m(t, w) - y_a(t, w))^2 + (z_m(t, w) - z_a(t, w))^2\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.1)$$

を計算した．ここで $x_m(t, w)$ は，極座標展開後の撮影画像における画素 (t, w) の，実空間における x 座標値を提案システムによって計測した値であり， $x_a(t, w)$ は， (t, w) の画素の実空間における x 座標値を解析的に求めた真値である．また， y ， z も同様である．

図 6.1 に記した特徴的な 3 ラインの誤差および 52 ラインの平均誤差を図 6.2 に示す．横軸は各ライン上での画像中心からの距離 w [pixels] を表し， w の値が大きくなるほど画像中心および円錐の中心から離れる．なお，横軸の最大値はカメラから見たときの円錐の縁に相当する．また，縦軸は真の三次元位置と計測された位置のユークリッド距離 $e(t, w)$ (単位 mm) である．

図 6.1 に示したライン a は，全域にわたって樹木のテクスチャが周期的に繰り返されている．図 6.2(a) をみると，ライン a 全域に 10[mm] 程度の誤差が発生していることがわかる．またライン c についても，樹木の幹が数本横切っている部分について，図 6.2(c) に示すように 10[mm] 以上の計測誤差が発生している．一方，周期的なテクスチャがほぼ存在しないライン b については，図 6.2(b) からわかるように，計測誤差は 1[mm] 前後にとどまっている．また図 6.2(d) は，平均しておよそ 2 ~ 3[mm] の計測誤差が全域で発生しているが，標準偏差の値が大きいことを示している．これは同図 (a) ~ (c) から分かるとおり，各ライン上のテクスチャの種類によって誤差の値が大きく変動していることが原因と考えられる．以上より，SSD の値に基づいて対応点を探索するとき，4.1.3 節で示したように，探索対象領域が一定の範囲に限定されているにもかかわらず，対応点探索の結果は，周期的に繰り返されるテクスチャに影響を受けていることがわかる．

一方，動的計画法を用いた場合，図 5.14 に示すように，周期的に繰り返される

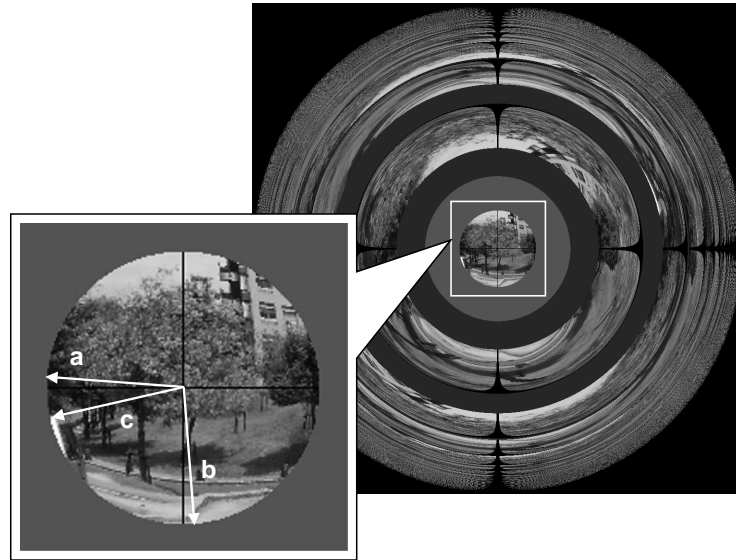


図 6.1 注目したライン

等高線状のテクスチャに対して，パターンマッチングによる手法と比較して良好な計測結果が得られた．動的計画法は探索の際，近傍領域の連続性を考慮する性質がある．ゆえに，4.4 に示す探索領域の始点と終点が正しく得られれば，周期的なテクスチャであっても，精度良く対応点を探索できる．

6.1.2 像の歪みや局所領域の決定手法による対応点探索精度の変化

パターンマッチングによる手法を用いた場合，図 5.6 および図 5.7 に示すように，局所領域を決める窓のサイズを大きくすることで，四角錐の底近くで誤計測が多く発生しており，計測精度が低下していることが分かる．この原因について以下に考察する．

図 6.3 は，像の歪みによる Source と Target の不一致の様子を示している．左側の 2 つの図は， 20×20 [pixels] の窓サイズで切り出された Source に本来対応すべき 1 回反射像中の Target 領域であり，Source の窓サイズに対するスケール s が 1.0 および 2.0 の場合を示している．このとき，スケールが 2.0 の領域は， 20×40 [pixels] の窓サイズで切り出された領域を，4.1.2 節に示した線形補間により

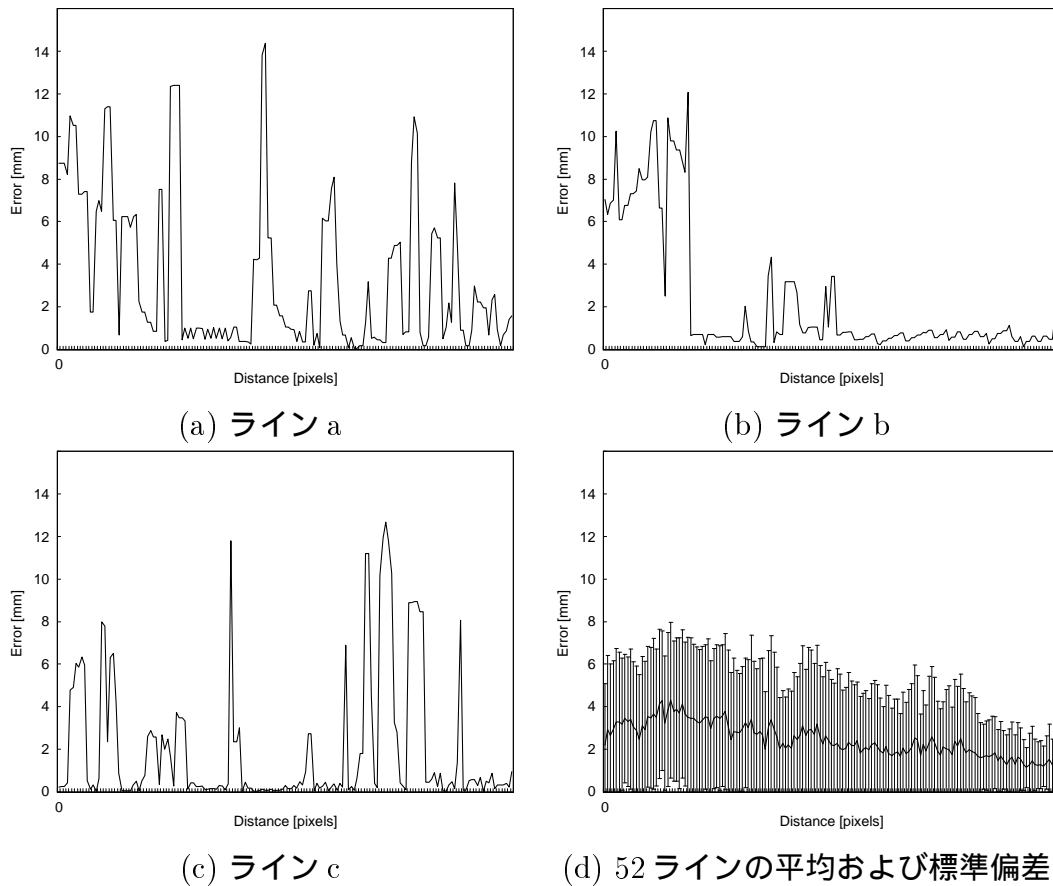


図 6.2 真の形状と計測結果の距離

20 × 20[pixels] に縮小している．また，右の 2 つの図は，それぞれのスケールによる Target と Source を重ね合わせた際に，輝度が一致しない画素を白色で表している．

図より，スケールが 1.0 の Target 領域における線のカーブの形状は，Source におけるカーブの形状と類似していることがわかる．しかしながら，Source と Target の間で線の太さが大きく異なるため，Source 領域との間の SSD 値が大きくなり，最適領域として選択されない．一方，スケールが 2.0 の Target 領域は線の太さが Source における線の太さと類似するものの，線のカーブの形状が Source と異なっているため，先ほどと同様に Source 領域との間の SSD 値が大きくなっている．レンズの特性や面の法線方向によるこれらの歪みは非線形であり，窓サ

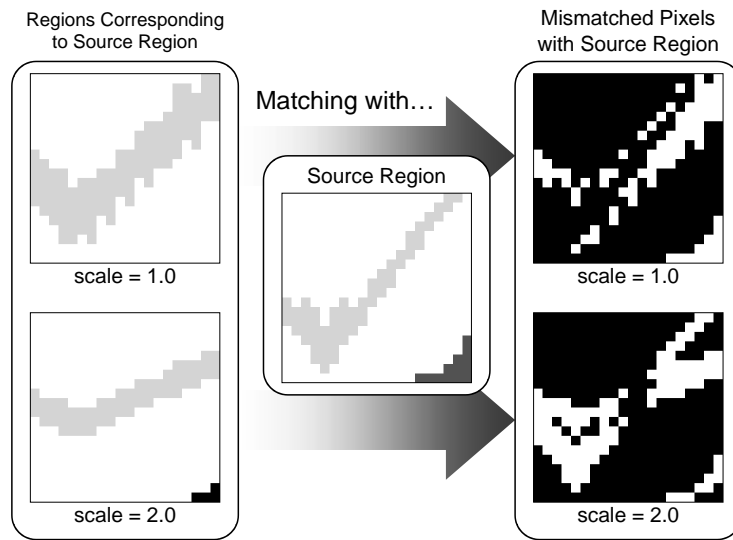


図 6.3 像の歪みによる領域の不一致

イズが大きくなると、線形補間を用いて正規化した際に歪みを吸収できないことがある。結果として、SSD による対応点探索において誤対応が多く発生した。図 5.6 および図 5.7 に示した四角錐の、極座標展開後の撮影画像を図 6.4 に示す。図 6.4 より、四角錐の底に向かうにつれて、反射像の歪みは大きくなっていることがわかる。

領域の類似性を正しく判断し、正しい対応点関係を得るためには、窓サイズは大きい方が望ましい。しかしながら窓サイズが大きくなると、上記のような歪みが発生し誤対応が増加する。その一方で、窓サイズを小さくすると、領域の局所的な特徴しか得られず、正しい対応点関係を得ることが困難になる。そのため、線形補間を用いて領域を正規化する際には、歪みの影響を最小限にとどめつつ、対応点を決めるのに十分な特徴を自動的に得るような窓サイズの決定法を導入することが望ましい。また、単純なテンプレートマッチングに代えて、画像の構造的特徴を抽出してマッチングする手法など、非線形の歪みを吸収できるような手法の導入も検討すべきである。

一方、動的計画法による対応点探索手法においては、図 3.2(a) のような、円錐下部において直接観測された像と円筒鏡に反射した像の大きさが異なる画像を入

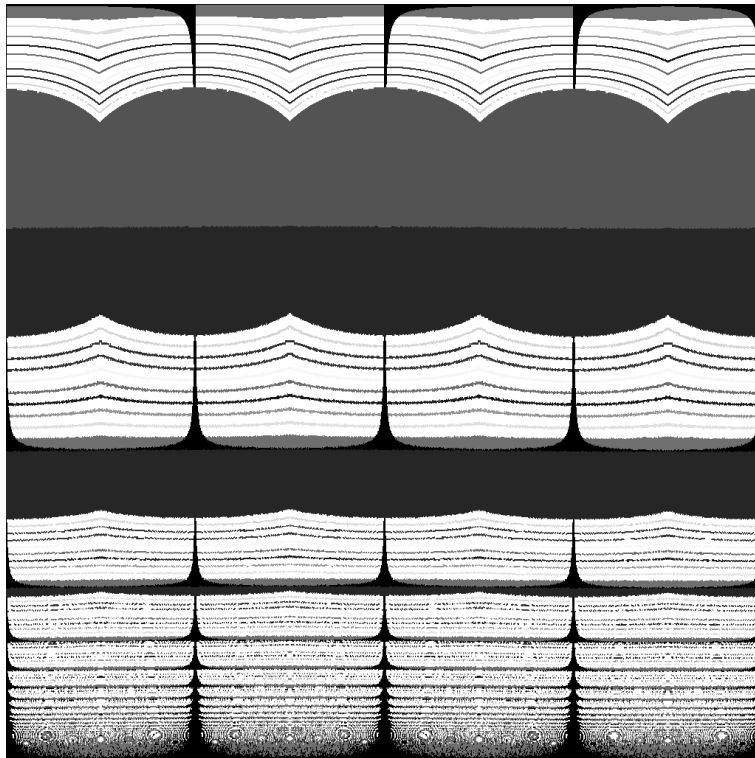


図 6.4 極座標展開後の四角錐の撮影画像

力とした際にも，図 5.14 に示すように，円錐下部において，分散は円錐上部における値より大きくなるものの，誤差の絶対値の平均は，円錐上部における誤差とほぼ変わらない値となった．これより，非線形の歪みをもつ撮影画像に対しても，動的計画法による手法により，対応点を正しく探索できることが示された．しかしながら，図 5.15 に示した三角錐の形状計測を見ると，三角錐の上部において大きな誤計測が発生していることがわかる．三角錐を中心からずらして配置した際に，極座標展開後の画像において，三角錐の上部を観測した反射像は t 軸方向に π だけ進んだ部分に現れ，残りの部分を観測した反射像は，物体を直接観測した像と同じ t の値をもつ領域に存在した．試作システムでは，直接観測された像，あるいは円筒鏡に n 回反射した像が w 軸方向に連続する領域全体を，領域 Source および Target としているため，直接観測した像において連続して現れる領域が反射像において分離されると，異なる部分を観測した領域間で対応点を探索し，結

果として誤計測となる。

ここから、実験結果より得られた知見をもとに、本提案システムにおいて考えられる対応点探索の高精度化について述べる。

パターンマッチングによる手法は近傍領域の連続性に依存しないため、動的計画法のように探索の始点と終点を決定する必要がない。しかしながら、パターンマッチングによる手法は、テクスチャの周期性などに代表される表面特性や、撮影画像の歪みにより、探索精度が低下することがあった。一方、動的計画法による手法は、周期的に繰り返されるテクスチャや像の歪みに対して頑健であるが、精度良く対応点を探索するためには、対応点探索の対象となる領域の始点と終点を正しく決定する必要がある。

対応点探索を高精度化するためには、両手法の組み合わせによる対応点探索、たとえばパターンマッチングで得られる小領域間の類似度の値をもとに、入力領域の始点と終点を決定した上で、動的計画法を用いて対応点を探索する手法の導入が考えられる。また、さらなる精度向上のため、動的計画法におけるコストの総和などを信頼度に用い、信頼度の低い小区間を再計測する処理の導入が考えられる。

6.2 面の法線方向による反射像の歪み

提案システムにより撮影された画像がもつ特徴として、円筒鏡面で反射した像は、円筒の半径方向に歪みを持つことが挙げられる。5.1.2節で述べた、傘のある物体の形状計測実験においても、物体の円柱部分を観測した像は半径方向への歪みが大きく、円柱部分の計測精度が低下する傾向がみられた。図 6.5 は、提案システムにおいて反射像に生じる歪みについて、例を用いて表した図である。

図 6.5 に示された対象物体上の面 A と面 B は辺の長さが等しい。しかしながら、面 A と B それぞれについて、円筒鏡面で一回反射しカメラに入射した像 A' および B' は、像の長さが異なっていることがわかる。この像の歪みの大きさは面の法線方向と魚眼レンズの射影特性に依存して決まる。面の法線方向は計測段階では未知であるため、物体形状を計測する前に、解析的に歪みを補正すること

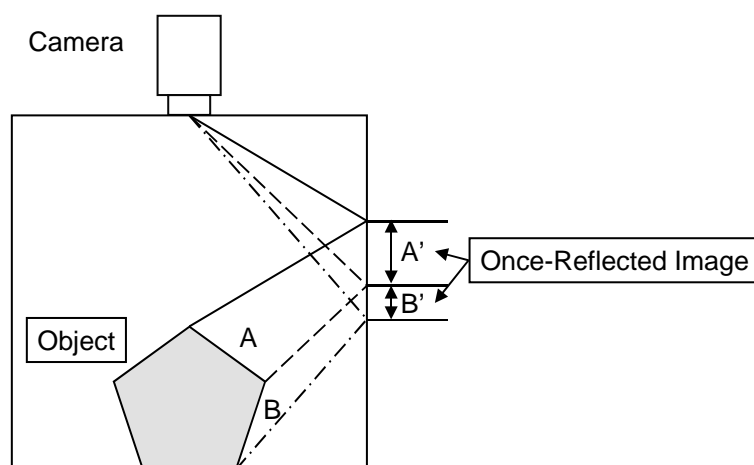


図 6.5 面の法線方向による反射像の歪み

は不可能である．提案システムでは，対応点探索の際に歪みの影響を吸収するため，線形補間によって反射像を拡大縮小させながら対応点を探索した．しかしながら，一般に反射像の歪みは非線形であるため，前節で示したように，大きな歪みについては線形補間で対応できないことがあった．歪みの補正手法としては，いったん計測された形状を調べ，面の法線方向を推定して歪みを補正したり，孤立点や理論上存在し得ない点について再処理する方法が考えられる．

6.3 提案システムの計測に適した物体の大きさ

本節では，提案システムでの計測に適していると考えられる物体の大きさについて述べる．ただし提案システムは，法線方向が鉛直下向きである面は原理的に計測できないため，物体の底面は計測対象外とする．物体のある1つの点の三次元位置を計測するには，その点が異なる2つの視点以上から観測される必要がある．すなわち，直接観測される像も含め，2つ以上の像が観測されなければならない．対象物体が錐体の場合，円筒鏡内に物体が完全に収まる大きさであれば，底面を除くすべての点において，カメラから直接観測できる像と円筒鏡面での1回反射像が常に得られるため，三次元位置が計測可能である．次に，図6.6に示した側面図のように，対象物体が底面直径 d ，高さ h の円柱である場合を考える．

このとき，円筒鏡の内径を D ，高さを H とし，円柱の中心軸を円筒鏡の中心軸に合わせて設置すると考える．

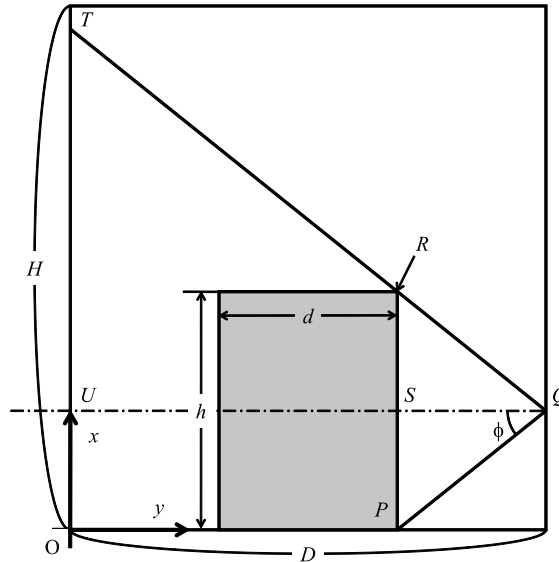


図 6.6 提案システムにより計測可能な円柱の大きさ（側面図）

円柱表面のうち側面はカメラから直接観測できないため，円柱側面の三次元位置を計測するには，円筒鏡面で反射した像が2つ以上必要である．提案システムにおいて円柱を観測する場合は，高次反射像ほど物体自身による光線の遮蔽が起こりやすく，観測が困難になるため，円柱側面が計測の三次元位置を計測するには，少なくとも1回反射像および2回反射像が観測できなければならない．円柱の側面全体について，2回反射した像がカメラで観測されるためには，少なくとも円柱底面と側面の境界を始点として円筒鏡面に一回反射し，円柱上面と側面の境界，すなわち図6.6における点 R を通過した光が再び円筒鏡面に反射したときの高さ OT が，円筒鏡の高さ H 以下でなければならない．そこで本節では，上記の条件を表す円柱の底面直径 d と高さ h の関係式を導出する．

まず，三角形 QRS と QTU が相似であるので，

$$QS : SR = QU : UT \tag{6.2}$$

$$\frac{D - d}{2} : \frac{h}{2} = D : UT \tag{6.3}$$

が成り立つ．上式を変形すると

$$UT = \frac{Dh}{D-d} \quad (6.4)$$

となる．ゆえに

$$OU + UT \leq H \quad (6.5)$$

$$\frac{h}{2} + \frac{Dh}{D-d} \leq H \quad (6.6)$$

上式を変形して，

$$h(D-d) + 2Dh \leq 2H(D-d) \quad (6.7)$$

$$h(3D-d) \leq 2H(D-d) \quad (6.8)$$

$$h \leq \frac{2H(D-d)}{3D-d} \quad (6.9)$$

なる d と h の関係式が得られる．すなわち，式 6.9 の条件を満たす d と h の組合せで表される円柱の中心軸を，円筒鏡の中心軸に一致させて設置したとき，物体底面と側面の境界の 2 回反射像および 1 回反射像が得られるため，この点の三次元位置を計測できる．今後は，より一般的な形状についても，円筒と同じような実用的計測限界のモデル化が望まれる．

6.4 提案システムでの計測に適した物体の表面特性

ここでは，提案システムでの計測に適した物体の表面特性について論じる．提案システムを用いて撮影される画像において，図 3.2 に示したように，反射像は円筒鏡全周に広がるため，視体積交差法のみを用いた物体の形状計測は困難である．このため提案手法には，ステレオ視や Space Carving など，物体表面の色情報を用いた手法を用いることが望ましい．このとき，ステレオ視や Space Carving では，異なる視点からある一点に注目した際，見える色が同一であることを前提としている．ゆえに，視線方向によって見かけの色が変わる完全鏡面反射面や透明物体の表面は，提案システムでは原理的に計測することが困難である．以上よ

り提案システムは、拡散反射表面をもつ物体の全周形状に適していると考えられる。ただし、本提案手法で用いているステレオ視の特徴として、テクスチャの存在しない物体は、画像中の対応点を正しく探索することが難しく、結果として計測が非常に困難となる点が挙げられる。また実験結果より、周期的なテクスチャを持つ物体は計測精度が低下するなど、テクスチャや反射特性など、物体の表面特性に計測精度が依存することが示された。この課題を解決するため、拡散光源に代えてパターン光を投影することで能動的にテクスチャを与え、より精度良く対応点を探索する手法の導入が考えられる。

また、蛙形の玩具の計測実験において、撮影画像における物体領域を誤って背景領域と見なしたことで、逆に背景領域が誤って物体領域に含まれたことに起因して指先部分の誤計測が発生し、結果として計測結果の指先が欠損することがあった。撮影画像における背景領域は、対象物体を設置する場所により大きく変化する。提案システムは、フィールドワークなどの持ち運び用途が想定されており、撮影画像の背景は一定でないことが想定されるため、各反射回数における反射像相互の類似性などを利用した、計測場所の変動に対し頑健な背景領域の除去手法が導入されることが望ましい。

6.5 実測における計測誤差

図 5.19, 5.20 および 5.26 に示した実測画像からの円錐の形状計測結果は、シミュレーション画像を用いた円錐の形状計測結果と比較して、真の形状に対する計測結果のばらつきが大きくなっている傾向がみられる。この原因について以下に考察する。

シミュレーション環境では存在せず、実測の際に存在し得る誤差として、

- 円筒鏡の中心軸とレンズの光軸のずれ
- 円筒鏡の断面の歪み
- 魚眼レンズの歪み

などが考えられる。これらの誤差は撮影画像の歪みを引き起こし、対応点が円筒中心を通る同一直線上以外の部分にも出現する原因となる。このような歪みを

第6章 考察

もつ撮影画像から計測を試みると、誤対応が発生しやすくなり、計測精度が低下した。

現在は、試作システムにおけるカメラの光軸と円筒鏡中心軸を正しく一致させるため、手動で軸を合わせた後で固定している。しかしながら、光軸と円筒の中心軸を完全に一致させることは困難であり、より精度良く計測するためには、撮影画像の変形による補正処理を導入することも検討課題として挙げられる。

第7章

結論

本研究では、単純なシステム構成および計測手順による物体の全周形状を計測することを目的として、カメラと円筒鏡を用いた、ステレオ視による全周形状計測システムを提案した。

生成されたシミュレーション画像を用いた実験の結果から、提案システムは物体の全周形状を一回の撮影で計測できることが示された。このとき、カメラから直接観測できない部分に関しても、円筒鏡内部で反射してカメラに入射した像同士によるステレオ視により、形状を計測できることを確認した。さらに実測系を試作し、実物体の形状計測を試みた結果、実物体の全周形状も一枚の画像により計測できることが確認された。

提案システムにより撮影された画像は、物体の法線方向に依存し、円筒の半径方向に歪みを持つ。ゆえに提案システムにおいて、ステレオ視を用いて物体の全周形状を計測するためには、歪みのある撮影画像から対応点の組を探索する必要がある。この対応点探索のため、本研究では局所領域のパターンマッチングによる手法と、動的計画法による手法を導入し、対応点探索を試みた。実験より、提案システムに導入した対応点探索手法は、歪みのある画像においても対応点を探索できることが示された。パターンマッチングによる手法については、類似したテクスチャが周期的に繰り返すなど、テクスチャ特徴が類似した領域が存在すると、誤対応を引き起こし、計測精度が低下することがあった。また、レンズ形状や物体面の法線方向に依存し、局所的な線形補間では吸収しきれない像の歪みが生じることで、誤って対応付けられる領域の組が存在した。

一方、動的計画法による手法については、パターンマッチングによる手法よりも

良好に対応点を探索できたものの、対応領域における特徴点の順序の連続性が保たれていることを前提としているため、物体自身によるオクルージョンなどにより像の連続性が失われると、正しく対応点関係を得られないという問題があった。

提案システムは、内部が鏡面となっている円筒に物体を入れ、カメラで物体を上から撮影することで、簡便に多視点画像が得られ、ステレオ視の原理に基づいて物体の全周形状を計測できる。本論で述べたように、本システムは

- 安価になり得る単純なシステム構成
- 機器の配置や調整など、エンドユーザによる前処理の省力化または排除
- 民生用のデジタルカメラやイメージスキャナのような、単純な操作手順

という要件を満たし、エンドユーザも簡便に扱える全周形状計測システムとしての利用が可能である。また、提案システムは一枚の画像から物体の全周形状を計測できる。

提案システムが物体の三次元全周形状を安価に計測および記録できる機器として普及し、より多くの情報を保存および共有できることによる新たなサービスの出現を期待し、本論の結びとする。

謝辞

本研究の遂行にあたり、主指導教官である情報科学研究科 千原國宏教授には、博士前期課程から今日に至るまでの研究指導に限らず、研究者としての生き方や心構えなど、研究者としての規範となる数え切れない御指導御鞭撻をいただきました。また、多くの海外発表や国内発表、また半年に渡る海外留学の機会を与えていただきました。ここに心から甚大な謝意を表します。副指導教官として多大なる御助言をいただきました情報科学研究科 横矢直和教授に深く感謝いたします。常日頃の研究についての丁寧な御指導、また海外発表や国内発表の場における御指導をいただきました情報科学研究科 眞鍋佳嗣准教授に厚く御礼申し上げます。また、博士論文執筆について多くの御助言、御指導をいただきました情報科学研究科 山澤一誠准教授に深謝いたします。

研究についての技術的な御助言や発表における御指導、また研究者の先輩としての御助言など、数々の大事な御言葉をいただきました。情報科学研究科 井村誠孝助教、池田聖助教、Damien Douxchamps 助教、関西大学環境都市工学部 安室喜弘准教授に感謝御礼の意を表します。また、研究および日常生活において御助言いただきました情報科学研究科 Sofiane Yous 研究員に感謝いたします。

先輩として、また先生として、ほぼすべての期間にわたって像情報処理学講座での生活を助けていただきました東京都老人総合研究所ポジトロン医学研究施設 坂田宗之氏、とくに修士論文執筆にあたり、日常の研究指導から英文添削まで多岐に渡り細やかな御指導をいただきました。放射線医学総合研究所分子イメージング研究センター 長縄美香氏、進捗報告会や発表練習において、鋭く有益な御指摘を多数いただきました株式会社アクセス・テクノロジー 増田泰氏、ミーティングなどにおいて有益な御助言をいただきました東京工業大学情報理工学研究科 Hamid Laga 助教に感謝いたします。また、大学院入学前に研究者としての基礎

謝 辞

を御指導いただきました，奈良工業高等専門学校情報工学科 松尾賢一准教授に御礼申し上げます．

像情報処理学講座における研究生生活においてあたたかい御支援をいただきました，像情報処理学講座秘書 山田真絵氏，前像情報処理学講座秘書 田畑桂子氏に御礼申し上げます．長きに渡る研究生生活を共に励まし合い過ごした像情報処理学講座の先輩方，同期や後輩の皆さんに感謝いたします．さらに，6ヶ月にわたる海外留学期間において御指導御支援いただきましたフィンランド オウル大学 Petri Pulli 教授，Peter Antoniac 氏および Seamus Hickey 氏，またフィンランドでの日常生活を常に支えていただいた Jaakko Hyry 氏および Kate Hyry 氏，大角菜穂氏，およびフィンランドでの友人の皆さんに御礼申し上げます．

最後に，今日まで筆者の最大の支えであり理解者であった両親と家族，また筆者の最大の友人である寺田真由子さんに感謝いたします．

参考文献

- [1] H. Shiaw, R. J. K. Jacob, and G. R. Crane. The 3D Vase Museum: A New Approach to Context in a Digital Library. *Proceedings of the 4th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, pp. 125–134, June 2004.
- [2] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk. The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 131–144, July 2000.
- [3] 沢小百合, 長縄美香, 増田泰, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 生体観察のための多面鏡を用いた3次元イメージング手法. 2004年映像情報メディア学会冬季大会 講演論文集 13-8 (CD-ROM), December 2004.
- [4] A. Ullrich, N. Studnicka, and J. Riegl. Long-Range High-Performance Time-of-Flight-Based 3D Imaging Sensors. *Proceedings of the First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp. 852–855, June 2002.
- [5] コニカミノルタ VIVID910.
<http://konicaminolta.jp/instruments/products/3d/vivid910/index.html>.
- [6] K. Sato and S. Inokuchi. Three-Dimensional Surface Measurement by Space Encoding Range Imaging. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 27–39, January 1985.

参考文献

- [7] R. Klette, K. Schlüns, and A. Koschan. *Computer Vision: Three-Dimensional Data from Images*. Springer-Verlag Singapore, 1998.
- [8] S. Baker and S. K. Nayar. A Theory of Catadioptric Image Formation. *Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision*, pp. 35–42, January 1998.
- [9] A. Laurentini. The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 2, pp. 150–162, February 1994.
- [10] P. J. Besl and N. D. McKay. A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, February 1992.
- [11] M. Matsumoto, M. Imura, Y. Yasumuro, Y. Manabe, and K. Chihara. Support System for Measurement of Relics based on Analysis of Point Clouds. *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia*, p. 195, November 2004.
- [12] 青井隆徳, 長橋宏, 安居院猛. 工業デザイン画から3次元モデリングのための特徴の抽出. 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 1995年, p. 246, September 1995.
- [13] 小笠原耕太郎, 小堀研一. 意匠設計のための初期曲面形状の自動生成. 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 53, No. 4, pp. 41–42, September 1996.
- [14] M. Potmesil. Generating Octree Models of 3D Objects from Their Silhouettes in a Sequence of Images. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 40, No. 1, pp. 1–29, October 1987.
- [15] 持丸正明, 河内眞紀子, 大矢高司. 人体形状の高速・隠れなし計測装置の開発. 第19回センシングフォーラム, pp. 47–52, 2002.

-
- [16] A. Laurentini. How Far 3D Shapes Can Be Understood from 2D Silhouettes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 2, pp. 188–195, February 1995.
- [17] W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S. J. Gortler, and L. McMillan. Image-Based Visual Hulls. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 369–374, July 2000.
- [18] 不殿健治, 佐藤智和, 横矢直和. ハンドヘルドビデオカメラを用いた撮影支援インタフェースを有するインタラクティブ三次元モデリングシステム. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 599–608, December 2005.
- [19] K. N. Kutulakos and S. M. Seitz. A Theory of Shape by Space Carving. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 38, No. 3, pp. 199–218, July 2000.
- [20] T. Kanade, H. Saito, and S. Vedula. The 3D Room: Digitizing Time-Varying 3D Events by Synchronized Multiple Video Streams. Technical Report CMU-RI-TR-98-34, Carnegie Mellon Robotics Institute, December 1998.
- [21] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦. 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚系 HyperOmni Vision の提案. 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J79-D-II, No. 5, pp. 698–707, May 1996.
- [22] 茶園篤, 山澤一誠, 横矢直和, 竹村治雄. HyperOmni Vision による全方位ステレオ視. 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. IE96-122, pp. 99–106, February 1997.
- [23] K. Forbes, A. Voigt, and N. Bodika. Visual Hulls from Single Uncalibrated Snapshots using Two Planar Mirrors. *Proceedings of the 15th Annual Symposium of the Pattern Recognition Association of South Africa*, November 2004.

参考文献

- [24] J. Gluckman and S. K. Nayar. Rectified Catadioptric Stereo Sensors. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2380–2387, June 2000.
- [25] S. K. Nayar. Robotic Vision System. United States Patent 4, 893, 193, August 1988.
- [26] Z.-Y. Zhang and H.-T. Tsui. 3D Reconstruction from a Single View of an Object and Its Image in a Plane Mirror. *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 1174–1176, August 1998.
- [27] D. Lee and I. Kweon. A Novel Stereo Camera System by a Biprism. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 528–541, October 2000.
- [28] 清水雅夫, 奥富正敏. 透明板に映る2重像を用いた1台のカメラによる距離計測手法. 画像の認識・理解シンポジウム2005 論文集, pp. 220–227, July 2005.
- [29] S. Kuthirummal and S. K. Nayar. Multiview Radial Catadioptric Imaging for Scene Capture. *ACM Transactions on Graphics (also Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006)*, pp. 916–923, July 2006.
- [30] Y. Manabe, Y. Uranishi, Y. Yasumuro, M. Imura, and K. Chihara. Three-Dimensional Measurement for Small Moving Object. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol. 5665, pp. 235–242, January 2005.
- [31] 浦西友樹, 長縄美香, 安室喜弘, 井村誠孝, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム. 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. 47, No. SIG10 (CVIM15), pp. 143–151, July 2006.
- [32] R. E. Bellman. *Dynamic programming*. Princeton University Press, 1957.
- [33] A. Waibeil and K.-F. Lee. *Readings in Speech Recognition*. Morgan Kaufmann, 1990.

研究業績

論文

- [1] 浦西友樹, 長縄美香, 安室喜弘, 井村誠孝, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム, 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. 47, No. SIG10 (CVIM15), pp. 143–151, July 2006. [3, 4, 5 章]

国際発表

- [1] Yoshitsugu Manabe, Yuuki Uranishi, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura and Kunihiro Chihara. Three-Dimensional Measurement for Small Moving Object, *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging (SPIE2005)*, pp. 235–242, San Jose, US, January 2005. [3 章]
- [2] Yuuki Uranishi, Mika Naganawa, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. Three-Dimensional Measurement System Using a Cylindrical Mirror, *Proceedings of the 14th Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA2005)*, pp. 399–408, Joensuu, Finland, June 2005. [3, 4 章]
- [3] Yuuki Uranishi, Mika Naganawa, Yoshihiro Yasumuro, Masataka Imura, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. Whole Shape Measurement System Using a Single Camera and a Cylindrical Mirror, *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2006)*, Vol. 4, pp. 866–869, Hong Kong, China, August 2006. [3, 4 章]

- [4] Ismail Arai, Yuuki Uranishi, Muneyuki Sakata, Kazutoshi Fujikawa, Hideki Sunahara and Kunihiro Chihara. Next Generation Library: Automatic Book Management System with Ubiquitous Sensors, *Demonstration at Fifth annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom2007)*, New York, US, March 2007.
- [5] Yuuki Uranishi, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. Method of Searching Corresponding Points for Whole Shape Measurement, *Proceedings of the 7th Finnish-Japanese Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'07)*, pp. 57–58, Tampere, Finland, August 2007. [4章]
- [6] Hiromi Tsujimura, Yuuki Uranishi, Muneyuki Sakata, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. Measurement of the Shape of Transparent Objects Using Specular Reflection, *Proceedings of the 7th Finnish-Japanese Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE'07)*, pp. 59–60, Tampere, Finland, August 2007.
- [7] Yuuki Uranishi, Muneyuki Sakata, Ismail Arai, Yoshitsugu Manabe, Hideki Sunahara and Kunihiro Chihara. Book Management System Using Various Sensor Network, *Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2008)*, Hsinchu, Taiwan, January 2008.
- [8] Hiromi Tsujimura, Yuuki Uranishi, Muneyuki Sakata, Yoshitsugu Manabe and Kunihiro Chihara. 3D Shape Measurement of Transparent Objects Using Slit-Pattern Reflection, *Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2008)*, Hsinchu, Taiwan, January 2008.

国内発表

- [1] 浦西友樹, 長縄美香, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 魚眼レンズと円筒鏡を用いた全周形状計測手法, 第49回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6C3-5, pp. 597–598, 京都, May 2005. [3章]
- [2] 浦西友樹, 長縄美香, 安室喜弘, 井村誠孝, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 円筒鏡を用

- いた 3 次元形状計測システム, 画像の認識・理解シンポジウム 2005 論文集, pp. 1152–1159, 兵庫, July 2005. [3, 4 章]
- [3] 浦西友樹, 長縄美香, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 円筒鏡を用いた全周形状計測システムのための対応点探索手法の検討, 第 50 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6W3-2, pp. 379–380, 京都, May 2006. [4 章]
- [4] 浦西友樹, 長縄美香, 安室喜弘, 井村誠孝, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 円筒鏡を用いた単眼全周形状計測システム, 画像の認識・理解シンポジウム 2006 論文集, pp. 1126–1131, 宮城, July 2006. [3, 4, 5 章]
- [5] 辻村裕美, 浦西友樹, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. 鏡面反射を用いた透明物体の形状計測手法, 第 51 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 6W3-5, pp. 491–492, 京都, May 2007.
- [6] 辻村裕美, 浦西友樹, 坂田宗之, 眞鍋佳嗣, 千原國宏. スリットパターンの映り込みを利用した透明物体の全周形状計測, 平成 19 年度情報処理学会関西支部支部大会講演論文集, pp. 39–40, 大阪, October 2007.

特許

- [1] 眞鍋佳嗣, 千原國宏, 浦西友樹. 3 次元オブジェクト計測装置, PCT/JP2005/24098. [3 章]

科学研究費

- [1] 科学研究費補助金 (特別研究員奨励費), “運動物体の全周型形状計測手法の開発”

著書

- [1] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム (著). OpenCV プログラミングブック, 毎日コミュニケーションズ, Septem-

ber 2007.

受賞

- [1] 第49回システム制御情報学会奨励賞

メディアでの紹介

- [1] 鏡面円筒体使い短時間で三次元オブジェクト計測装置, 日本経済新聞, March 2006.
- [2] 円筒鏡で物体を三次元計測, 奈良新聞, August 2007.

その他

- [1] 産学官連携ビジネスショウ in 近畿, 大阪, December 2006.
- [2] けいはんな知財ビジネスマッチングフェア, 京都, July 2007.
- [3] 未来型情報家電 × ネットトレンドシーズフォーラム, 大阪, January 2008.