

NAIST-IS-MT0451018

修士論文

円筒鏡を用いた三次元形状計測システム

浦西 友樹

2005年 8月 25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
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である。

浦西 友樹

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

円筒鏡を用いた三次元形状計測システム*

浦西 友樹

内容梗概

本論文では、物体の三次元全周形状を一回の撮影で計測する、円筒鏡を用いた形状計測システムを提案する。物体の三次元形状を計測し、計算機上に三次元モデルとして復元する手法は、計算機上で自由な角度から物体の三次元モデルを閲覧でき、様々な分野への応用が考えられる。このような用途に用いるモデルは、物体の全周を計測して得られた全周モデルであることが望ましい。従来手法は、様々な位置や角度から物体の部分的な形状を計測し、最終的に統合することで物体のモデルを得ている。このとき、部分形状の統合処理において誤りが発生したり、システムの構成や計測の手順が複雑化する問題がある。また、動物など、動きがある物体の全周形状を計測することは極めて難しい。本論文で提案するシステムは、内部が鏡面の円筒とカメラを用い、ステレオの原理に基づいて三次元形状を計測する。内部が鏡面となっている円筒内に計測対象を置き、魚眼レンズを装着したカメラで対象を上から撮影することで、物体周囲のすべての方向から、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、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していることに等しく、ステレオ視を用いて、一枚の画像から点の奥行きを計算できる。本稿では、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る実測画像を用いて、実物体の三次元形状計測を試み、実験結果より、提案システムで計測可能な範囲や形状についての考察を行った。

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

* 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 修士論文, NAIST-IS-MT0451018, 2005年8月25日.

Three-Dimensional Measurement System Using a Cylindrical Mirror*

Yuuki Uranishi

Abstract

This paper proposes a three-dimensional measurement method with a simple structured system. Whole three-dimensional shape measurement and model reconstruction have a wide area of potential applications, including virtual museums and digital archiving of relics. 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.

Keywords:

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

* Master's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT0451018, August 25, 2005.

目次

第1章 序論	1
第2章 三次元全周形状計測	4
2.1. 能動的形状計測	4
2.1.1 Time-of-Flight 法	5
2.1.2 パターン光投影法	5
2.2. 受動的形状計測	5
2.2.1 Shape from Silhouette	5
2.2.2 ステレオ視による三次元形状計測	6
2.2.3 反射屈折ステレオ視系	7
2.3. 全周形状計測	8
2.3.1 全周形状計測への従来手法の適用	8
2.3.2 視体積交差法	9
第3章 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム	11
3.1. システム構成	11
3.2. 撮影画像	12
3.3. 仮想カメラ位置の推定およびステレオ視	15
3.3.1 光線角の決定	15
3.3.2 カメラ位置の推定	15
第4章 対応点探索アルゴリズム	18
4.1. 撮影画像の極座標展開	19
4.2. 探索対象領域のサイズの正規化	20
4.3. 探索対象領域の限定	21

4.4. SSD 値の計算	22
第 5 章 形状計測実験	24
5.1. シミュレーション画像を用いた形状計測実験	24
5.1.1 シミュレーション環境	24
5.1.2 円錐を対象とした形状計測実験	25
5.1.3 四角錐を対象とした形状計測実験	26
5.1.4 傘がある物体を対象とした形状計測実験	27
5.2. 実測画像を用いた形状計測実験	33
5.2.1 計測環境	33
5.2.2 円錐を対象とした形状計測実験	34
第 6 章 考察	38
6.1. 物体表面のテクスチャによる対応点探索精度の変化	38
6.2. 窓サイズの違いによる計測精度の変化	41
6.3. 面の法線方向による反射像の歪み	43
6.4. 実測における計測誤差	44
第 7 章 結論	45
謝辞	47
参考文献	48

目次

2.1	三次元形状計測の分類	4
2.2	ステレオ視による三次元形状計測	6
2.3	反射屈折ステレオ視系の構成例	8
2.4	視体積交差法	10
3.1	システム概要図	12
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)	13
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)	14
3.4	提案システムにおける光線の反射	14
3.5	レンズの射影特性と撮影画像の関係	16
3.6	仮想カメラ位置の推定	17
4.1	極座標展開後の撮影画像	19
4.2	提案システムにおける探索対象領域	23
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)	26
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)	27
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)	27
5.4	円錐の中心からの距離と高さの関係	28
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)	29
5.6	四角錐の形状計測実験結果 (窓サイズ 5×5 [pixels])	30
5.7	四角錐の形状計測実験結果 (窓サイズ 20×20 [pixels])	30
5.8	本実験での対象物体	31
5.9	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)	31
5.10	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	32

5.11 傘型物体の中心からの距離と高さの関係	32
5.12 計測環境	33
5.13 計測対象として用いた実物体 (円錐)	34
5.14 撮影画像 (実測, 図 5.13 の円錐を撮影)	35
5.15 実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 1)	36
5.16 実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 2)	36
5.17 円錐の中心からの距離と高さの関係	37
6.1 注目したライン	39
6.2 真の形状と計測結果の距離	40
6.3 像の歪みによる領域の不一致	41
6.4 極座標展開後の四角錐の撮影画像	42
6.5 面の法線方向による反射像の歪み	43

表 目 次

5.1 使用した計算機環境	25
-------------------------	----

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と比べ、より多くの情報を保存でき、仮想博物館 [1] や、考古遺物のデジタル保存 [2] など、多くの応用例が考えられる。また、計算機上に再現された三次元モデルは、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。加えて、動物の動きも記録して再現できる三次元形状計測システムがあれば、生物図鑑などへの応用も可能である [3]。

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、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、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。一方、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ことから、例えばユーザが個人的な所有物の形状を計測し、三次元モデルをインターネットなどで公開するなどの用途に用いることは難しい。上記の理由から、簡便に実物体の三次元全周形状を計測し、三次元モデルを構築するシステムが望まれる。

これまでに多くの三次元形状計測手法が提案されており、三次元形状計測は、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、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 [5] 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。しかしこれらの手法は、電磁波を照射するための機器が必要となり、システム構成が複雑になる。また、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したりすることによって、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 [6] 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、ステレオ計測において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 [7] 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。

受動的計測手法の一つである視体積交差法 [8] 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。物体の概形が高速に得られるため、視体積交差法は実時間での三次元形状計測に適している。また、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、物体の計測精度を向上するには多くの画像を必要とするため、カメラの台数や撮影回数が増えてシステムが複雑化する。また、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。

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。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形状を計測できる。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。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。

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，仮想博物館 [1] や考古遺物のデジタル化保存 [2]，また，生物の三次元モデル化 [3] など，様々な応用例が考えられる．ここで，これらの応用例に用いる三次元モデルは，物体を全方向から計測して得られた全周形状で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，図 2.1 に示すように分類できる．本章では，代表的な計測手法の特徴や，これらの手法の全周形状計測への適用について，図 2.1 に示す分類に従って述べる．

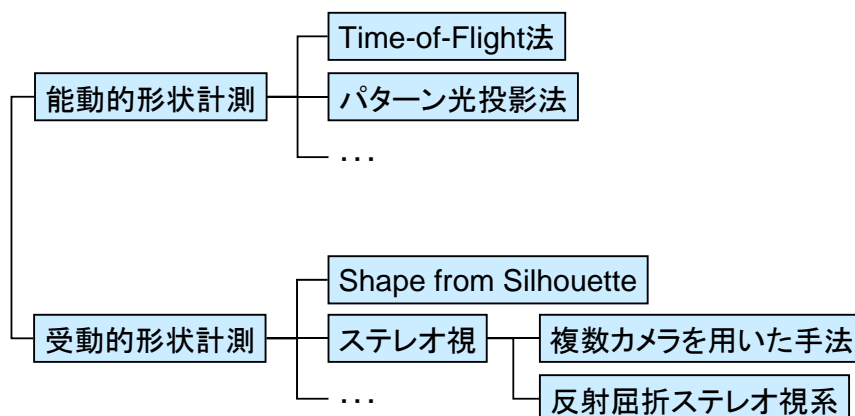


図 2.1 三次元形状計測の分類

2.1. 能動的形状計測

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 [5] などが挙げられる．以下，能動的形状計測の代表的な手法について述べる．

2.1.1 Time-of-Flight 法

Time-of-Flight（飛行時間）法は，レーザ光などの電磁波を計測対象物に照射し，電磁波が物体表面に反射して計測機器に戻るまでの時間から，物体表面までの距離を計測する手法である [4]．この手法は，実際に物体との距離を電磁波で計測するため，高精度な三次元形状を得られる利点をもつ．

2.1.2 パターン光投影法

パターン光投影法は，空間的に規則的なパターンをもつ光を物体に照射し，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手法である [5]．この手法は，一回のパターン光投影で広い範囲の形状を計測できる．

2.2. 受動的形状計測

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な手法について以下に示す．

2.2.1 Shape from Silhouette

Shape from Silhouette とは，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手法である [9]．Shape from Silhouette は撮影画像中の物体の輪郭だけを用いて三次元形状を取得するため，後述するステレオ視系に比べ，物体表面の色や照明の変動などによる影響を受けにくい．一方，Shape from Silhouette に基づいて物体の三次元全周形状を計測するには，全周から物体を撮影して輪郭情報を得なければならず，ターンテーブルなどを併用する必要がある．

2.2.2 ステレオ視による三次元形状計測

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いて、視点と物体の距離を計測する手法である [6]。ステレオ視の原理を図 2.2 に示す。なお、ここでは 2 眼によるステレオ視を用いて説明する。ステレオ視によって物体上のある点の距離を計測するには、複数の視点からの撮影画像内に存在する同一の点を撮影した画素（対応点）の組を探索する必要がある。このとき、一方の撮影画像中の一点に対応する点は、カメラからの視線を他方の撮影画像平面に射影することで得られるエピポーラ線上に存在する。また、エピポーラ線が画像の走査線上に存在するようにカメラが配置された撮像系は標準ステレオ撮像系と呼ばれる。

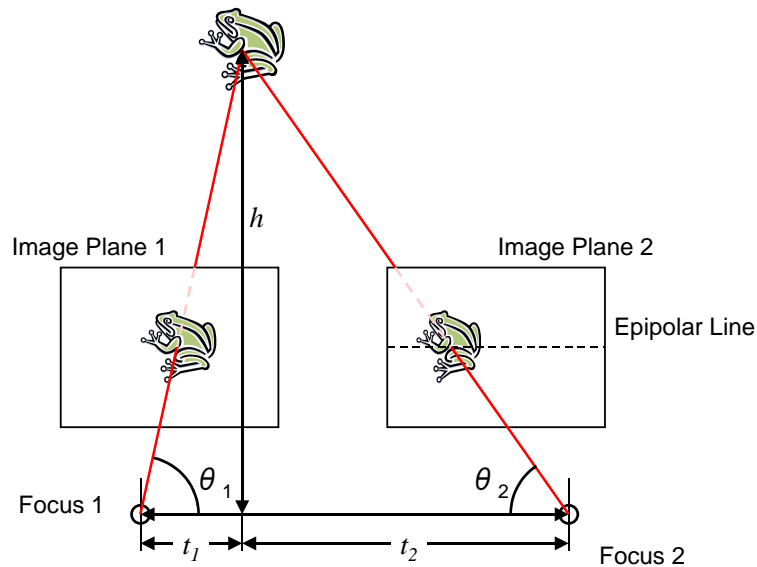


図 2.2 ステレオ視による三次元形状計測

このように対応点の組が得られると、物体上の一点から基線までの奥行き h は

$$t = t_1 + t_2 = \frac{h}{\tan \theta_1} + \frac{h}{\tan \theta_2} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{t \tan \theta_1 \tan \theta_2}{\tan \theta_1 + \tan \theta_2} \\
 &= \frac{t \sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

のように求められる．なお， t は視点間の距離（基線長）， $\theta_i (i = 1, 2)$ は基線と各視線の成す角である．

ステレオ視に基づく手法は，視体積交差法では理論上計測できない窪みなどの部分についても形状を計測できる利点をもつ．しかし，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．

2.2.3 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 [7][10][11][12] や，プリズム [13] や透明板 [14] 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 2.3(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 2.3(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 [10] ．

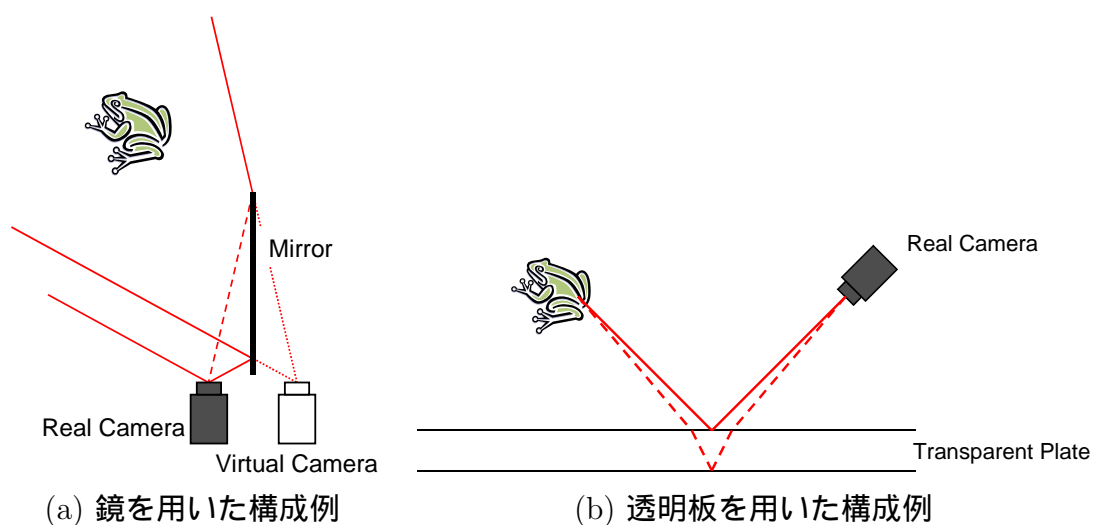


図 2.3 反射屈折ステレオ視系の構成例

2.3. 全周形状計測

本章ではこれまで，三次元形状計測の代表的な手法について説明した．本節では，これらの代表的な従来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．

2.3.1 全周形状計測への従来手法の適用

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．受動的計測手法である Shape from Silhouette についても，全周の

輪郭情報を得るには，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．

また，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，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 [15] 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．

反射屈折ステレオ視によるシステムは，前述のとおりステレオ視に必要なカメラの台数を減らすことが可能であり，様々な光学機器を用いた手法が提案されている．しかしながら，反射屈折ステレオ視により物体の全周形状を計測するには，物体を取り囲むように光学機器を配置する必要があり，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する範囲を限定したりしながら物体の全周形状を計測することは，従来手法に基づく構成では極めて困難である．

2.3.2 視体積交差法

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）を物体の三次元形状とする手法である [8][16]．4 台のカメラによる視体積交差法の例を図 2.4 に示す．ただし，図 2.4 は二次元での模式図である．

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．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，平面鏡の反射を利用した手法 [3][18] が提案されているが，カメラ配置を最適化しても，視体積交差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の形状を再現できないという問題点がある．

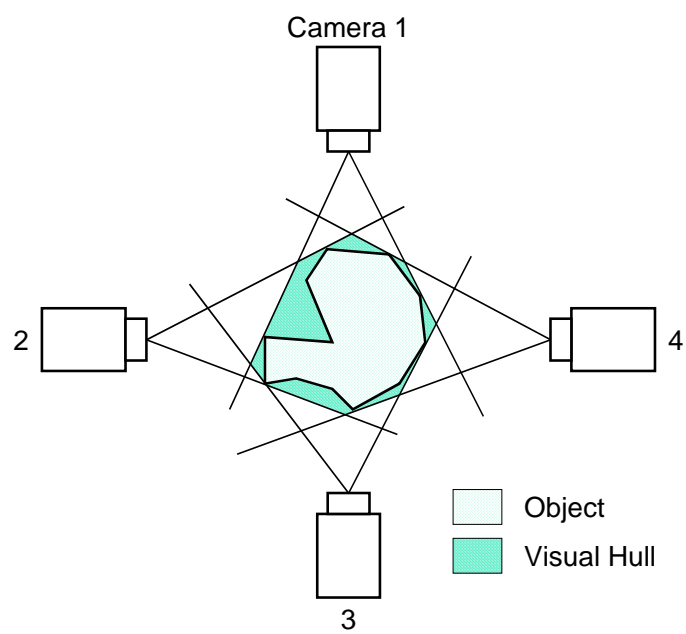


图 2.4 视体积交差法

第3章 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム

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・複雑化が発生する．一方，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 [19][20][21][22]．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，提案システムを用いることで得ら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．

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．

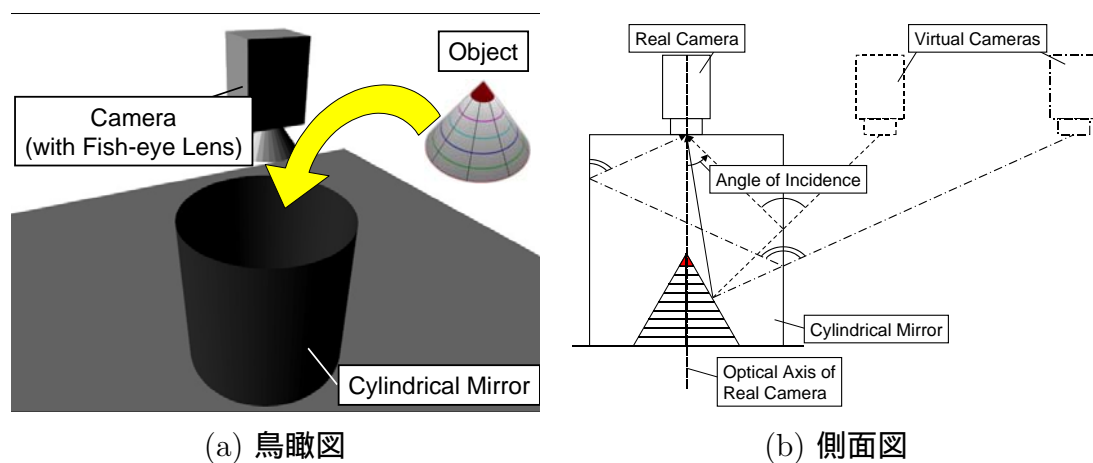


図 3.1 システム概要図

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 $B(u_B, v_B)$ ，

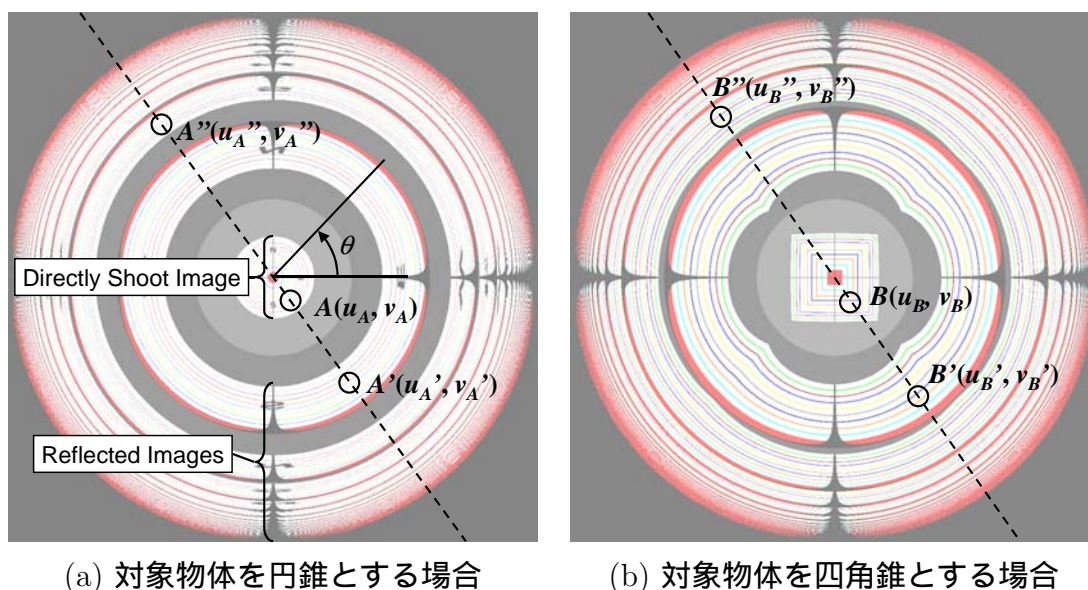


図 3.2 提案システムにより撮影される画像 (シミュレーション)

$B'(u'_B, v'_B)$ 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、

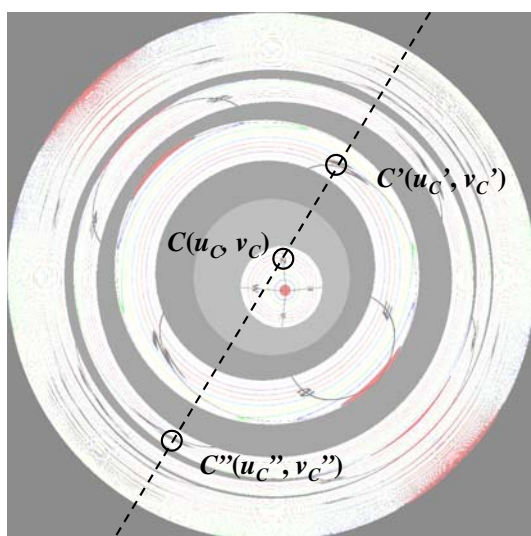


図 3.3 中心からずらして置いた円錐を撮影した画像 (シミュレーション)

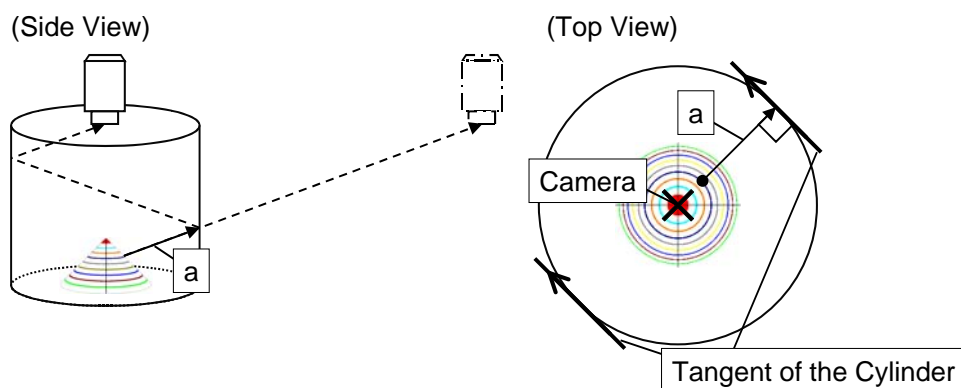


図 3.4 提案システムにおける光線の反射

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

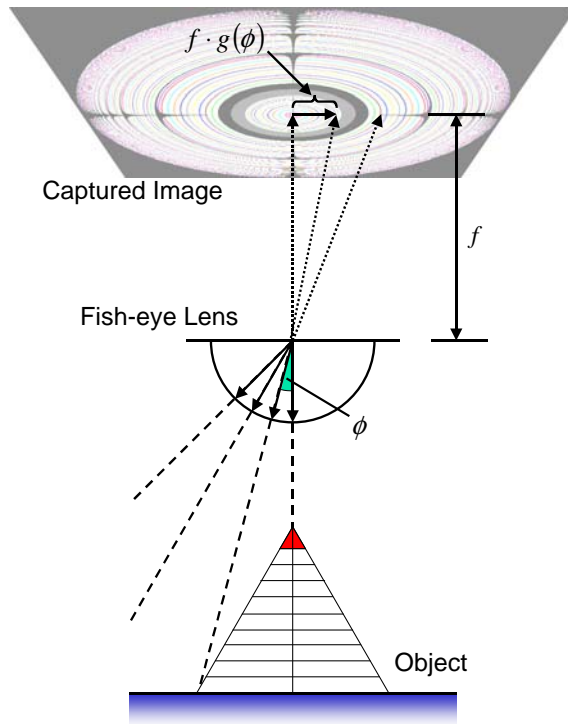


図 3.5 レンズの射影特性と撮影画像の関係

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．

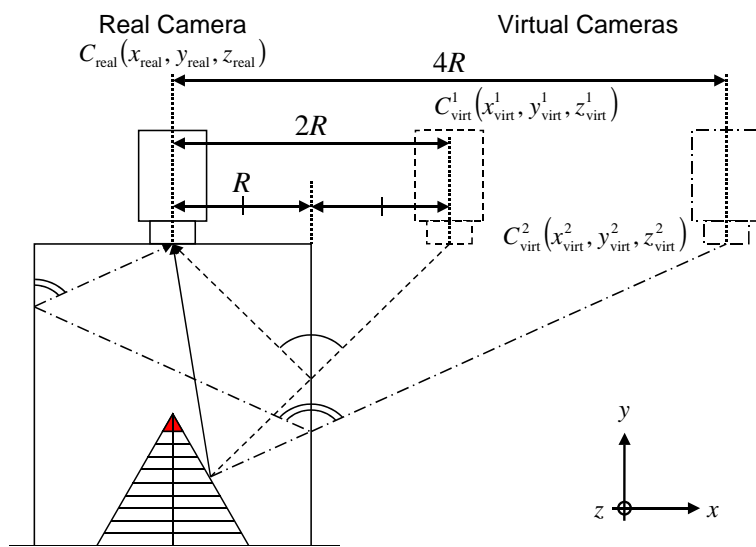


図 3.6 仮想カメラ位置の推定

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。この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が一般的に用いられる。

本システムで用い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られる。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. 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．

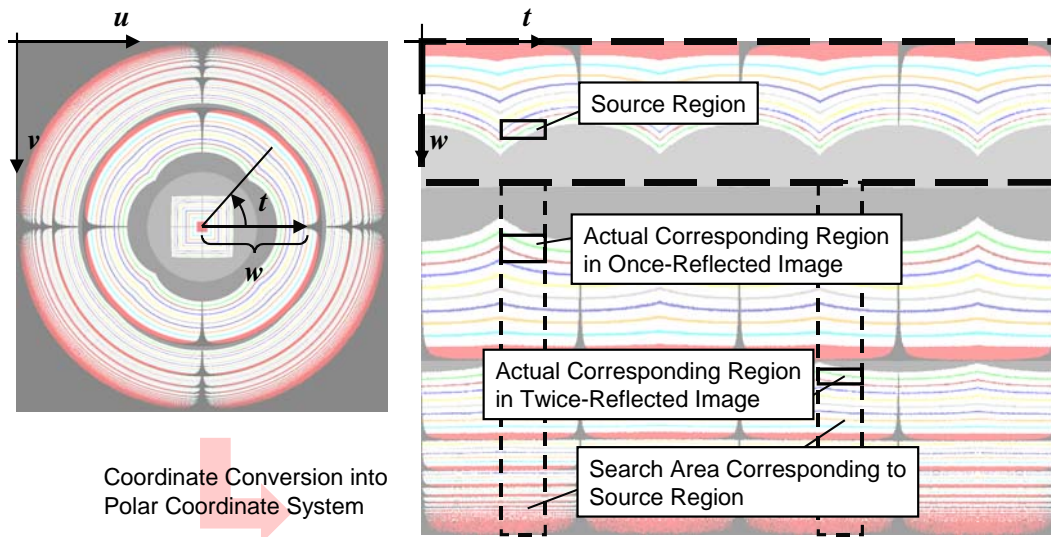


図 4.1 極座標展開後の撮影画像

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。

4.2. 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．

4.3. 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_{gmin}^n および w_{gmax}^n をそれぞれ

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

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

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．

4.4. 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．

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

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 ($S_a \subseteq S_{all}$) に対応する探索候補領域は，4.1 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，4.3 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

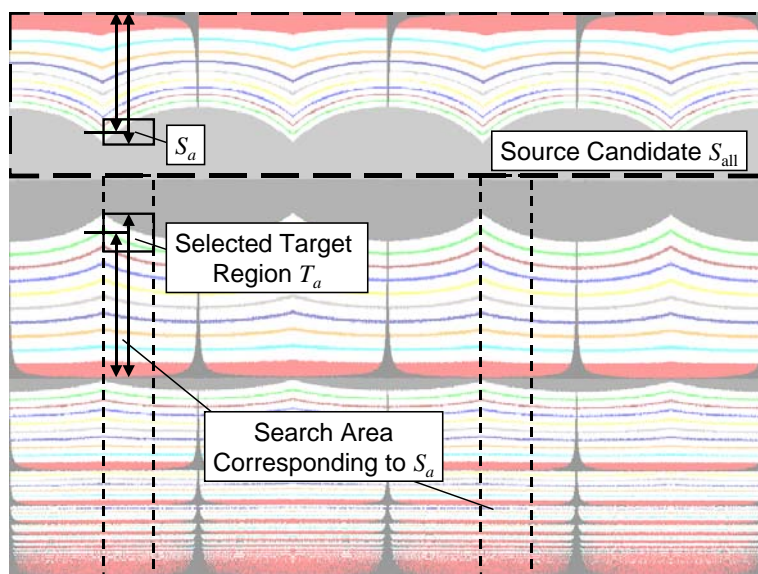


図 4.2 提案システムにおける探索対象領域

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．

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．

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++

5.1.2 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．

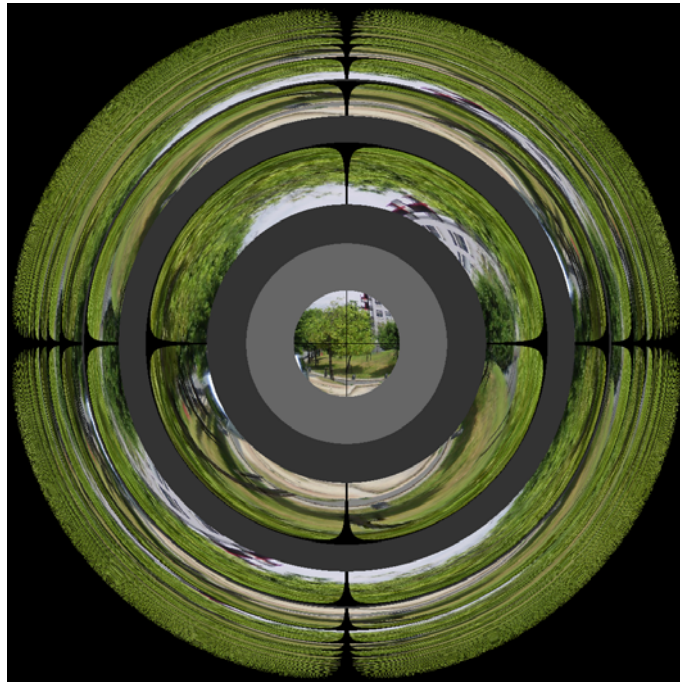
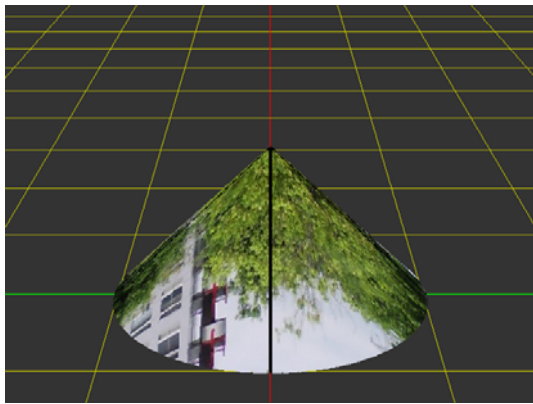


図 5.1 提案システムによる円錐の撮影画像 (シミュレーション)

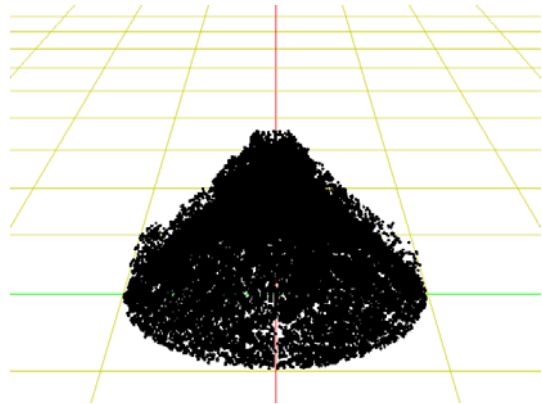
5.1.3 四角錐を対象とした形状計測実験

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]、

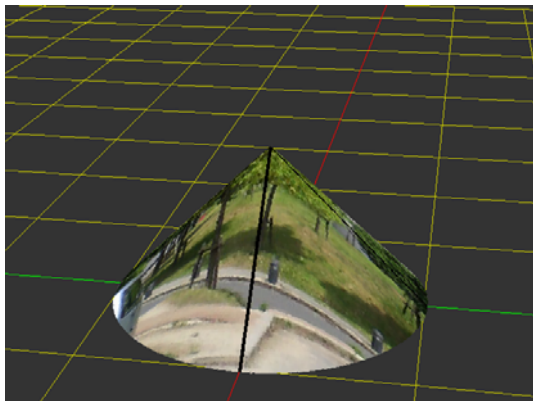


(a) 円錐の真の形状

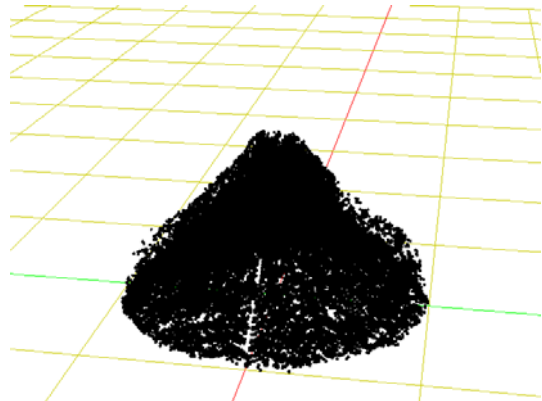


(b) 提案システムによる形状計測結果

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)

同じく、 20×20 [pixels] としたとき 9870[sec] であった。

5.1.4 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。

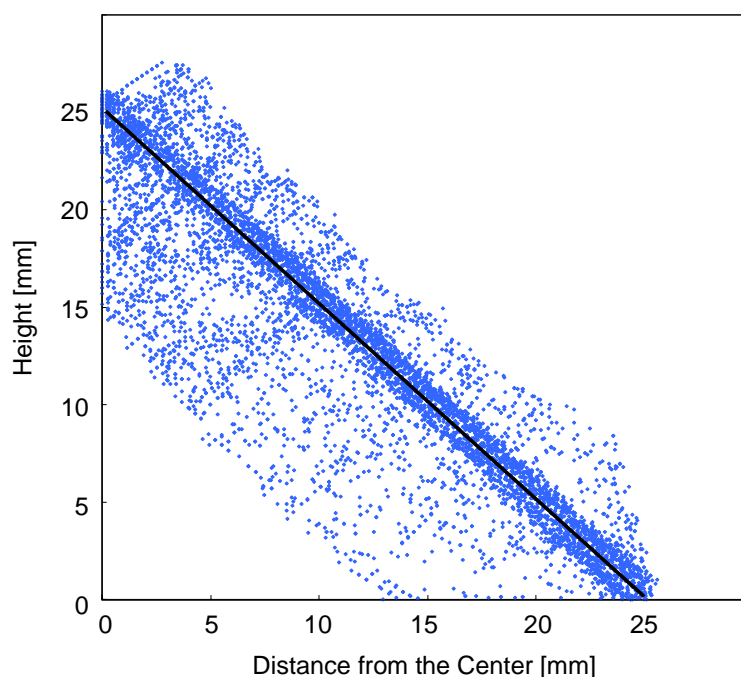


図 5.4 円錐の中心からの距離と高さの関係

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 5.8(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 5.8 に示した物体を提案システムで撮影すると，図 5.9 に示す画像が得られた．図 5.9 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 5.9 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 5.10 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

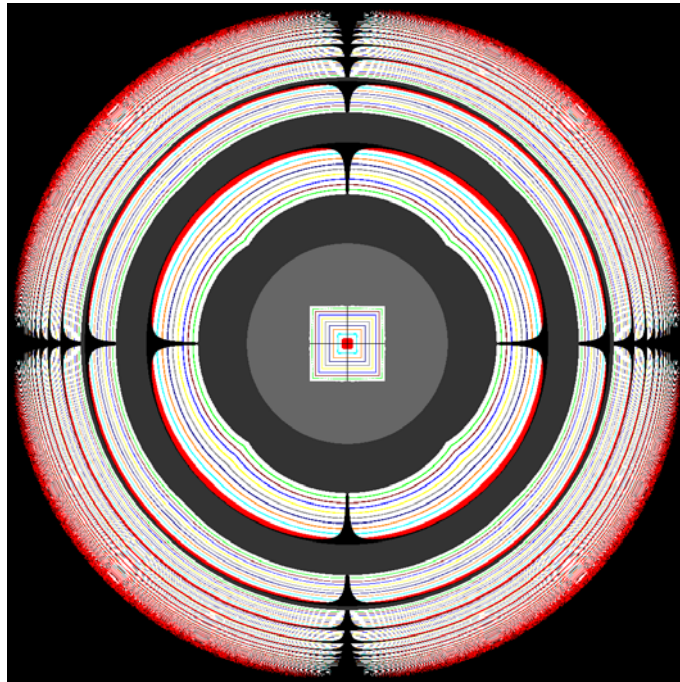
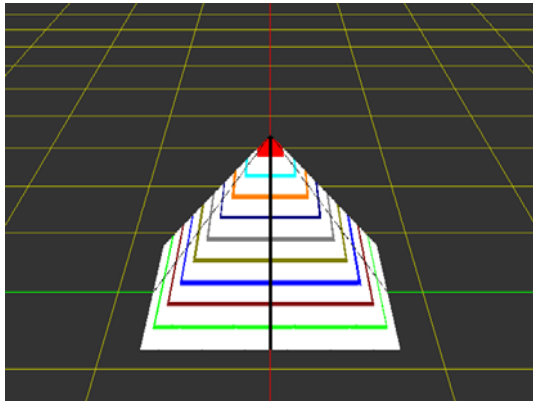


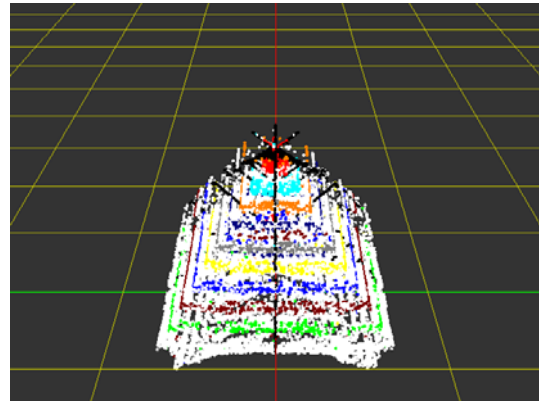
図 5.5 提案システムによる四角錐の撮影画像 (シミュレーション)

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 5.11 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 5.10 および図 5.11 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。

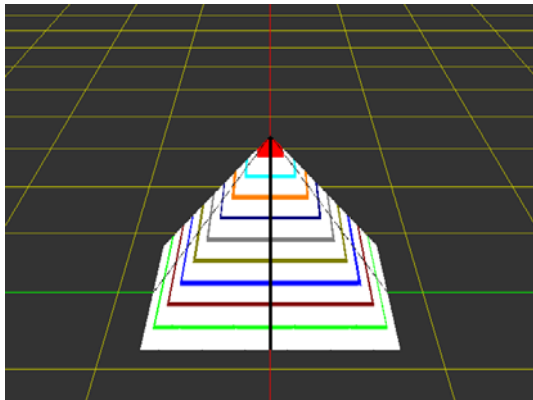


(a) 四角錐の真の形状

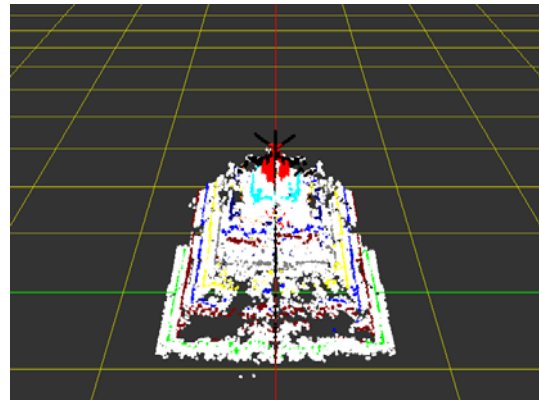


(b) 提案システムによる形状計測結果

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

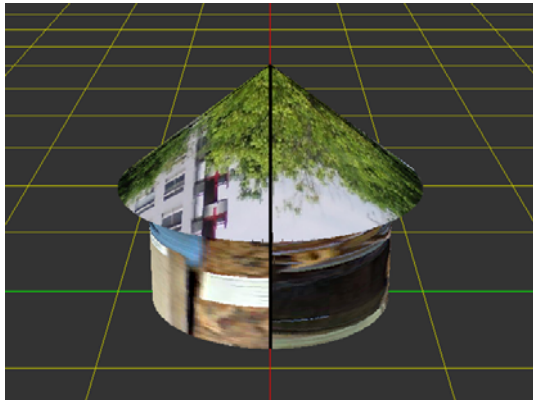


(a) 四角錐の真の形状

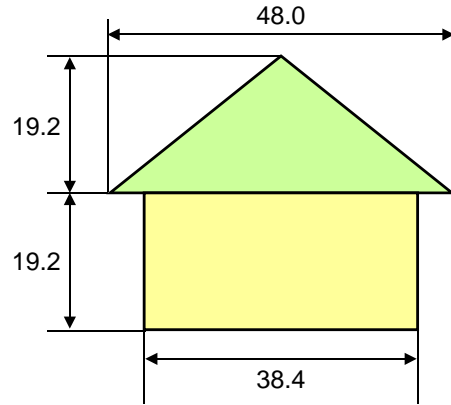


(b) 提案システムによる形状計測結果

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



(a) 鳥瞰図



(b) 側面図 (模式図, 単位: mm)

図 5.8 本実験での対象物体

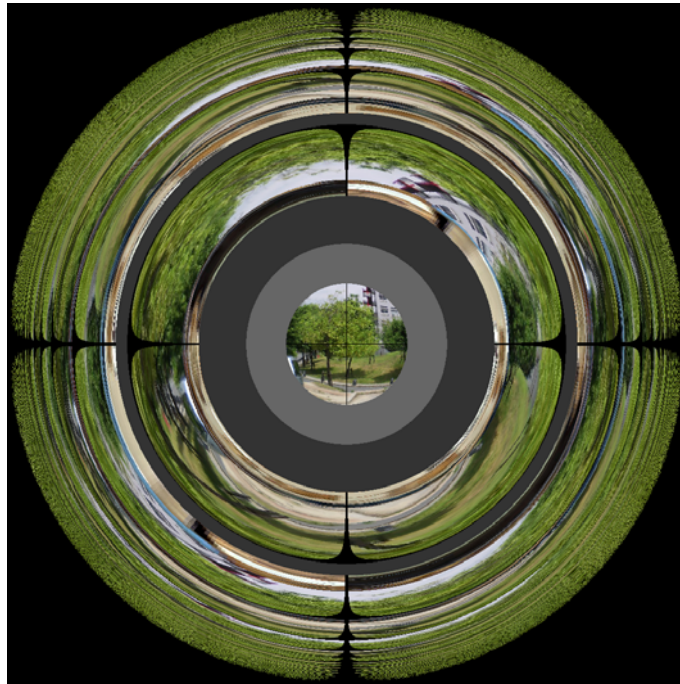


図 5.9 提案システムによる傘型物体の撮影画像 (シミュレーション)

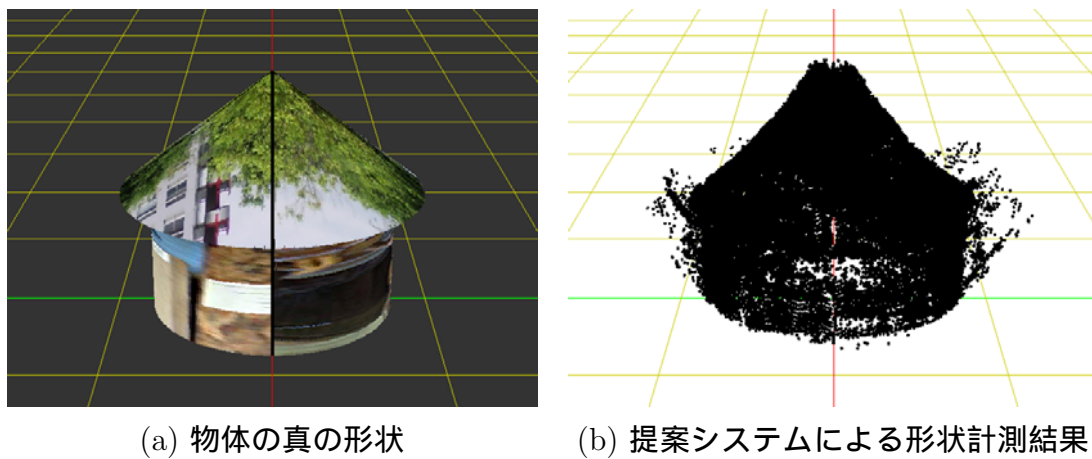


図 5.10 シミュレーション画像を用いた傘型物体の形状計測実験結果

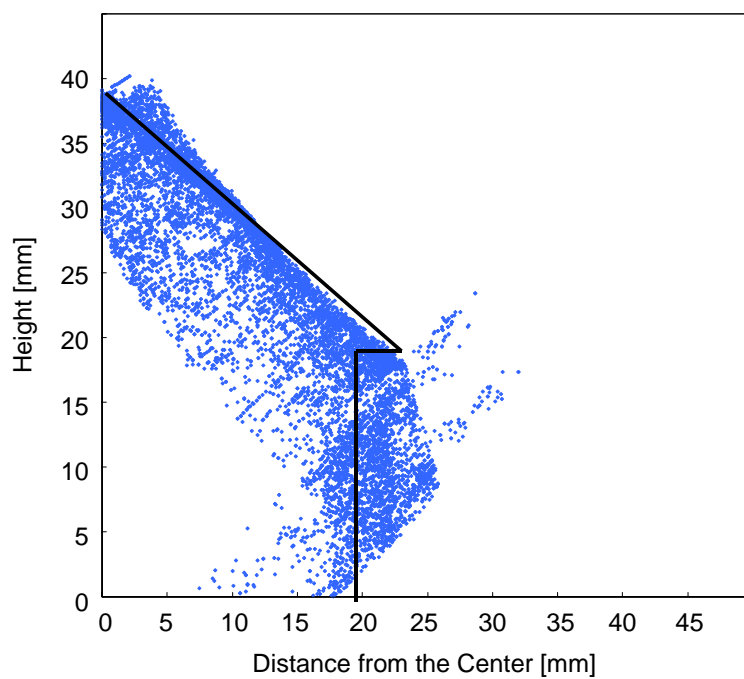


図 5.11 傘型物体の中心からの距離と高さの関係

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、実測画像を用いた形状計測実験の結果を示す。

5.2.1 計測環境

本実験では、以下の計測環境で実験を行った。カメラは Opteon 社製 Depict D1E を使い、 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 5.12 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。

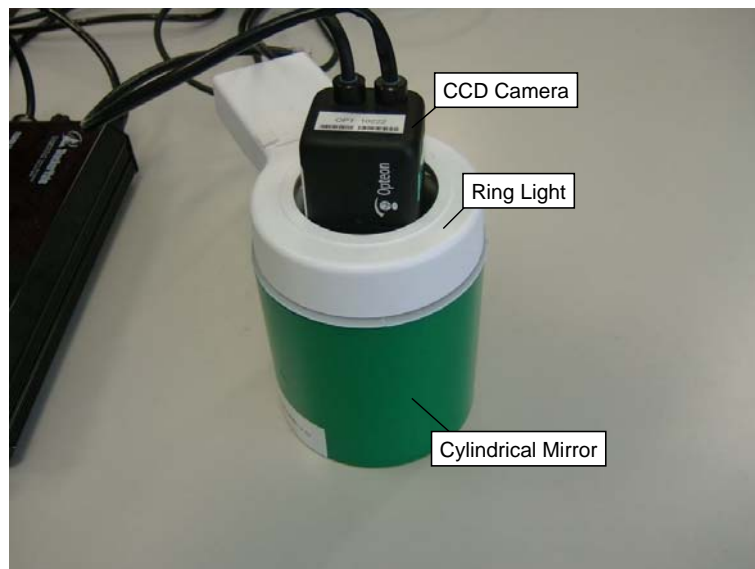


図 5.12 計測環境

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．

5.2.2 円錐を対象とした形状計測実験

本実験では計測対象として，図5.13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 5.13 計測対象として用いた実物体 (円錐)

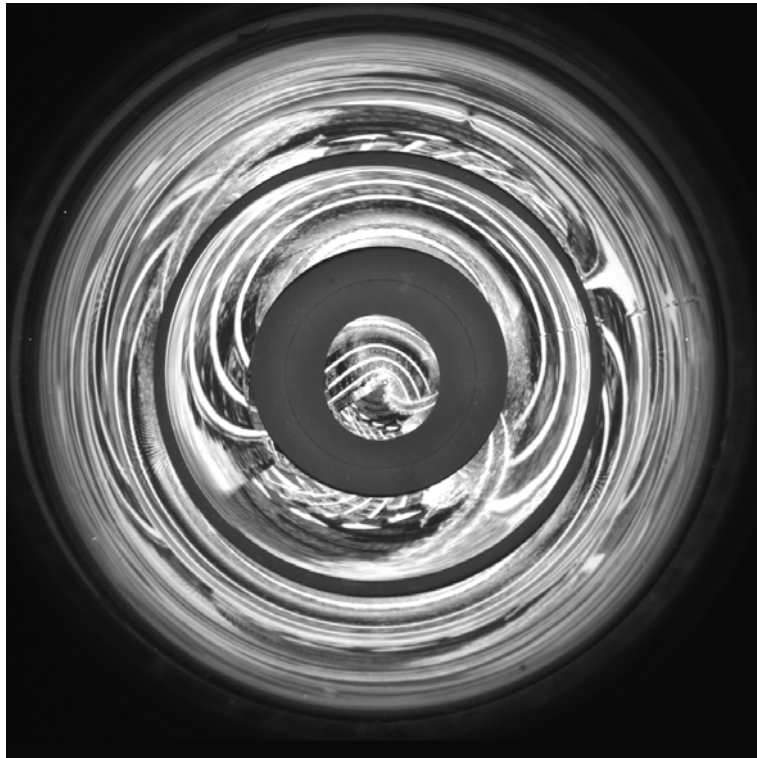


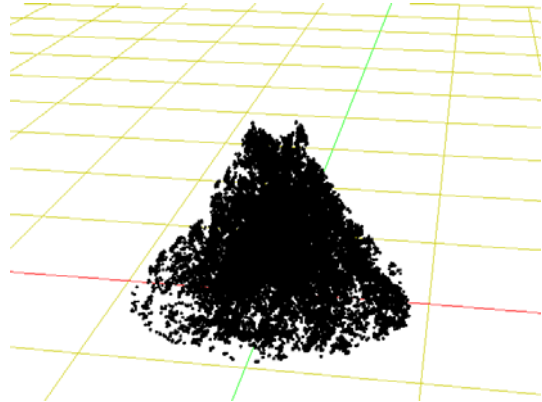
図 5.14 撮影画像 (実測, 図 5.13 の円錐を撮影)

図 5.13 に示す円錐を提案システムで撮影すると, 図 5.14 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 5.15 および図 5.16 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 5.17 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

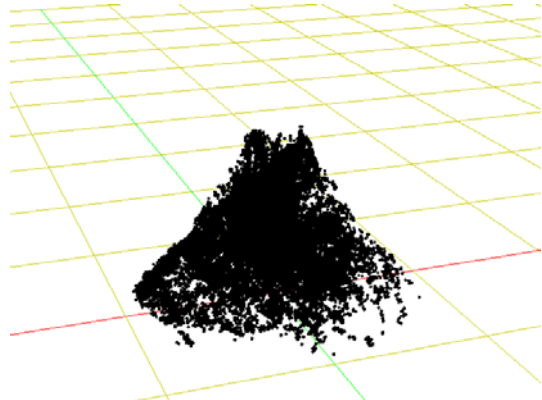


(b) 提案システムによる形状計測結果

図 5.15 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 5.16 実測画像を用いた円錐の形状計測実験結果 (その 2)

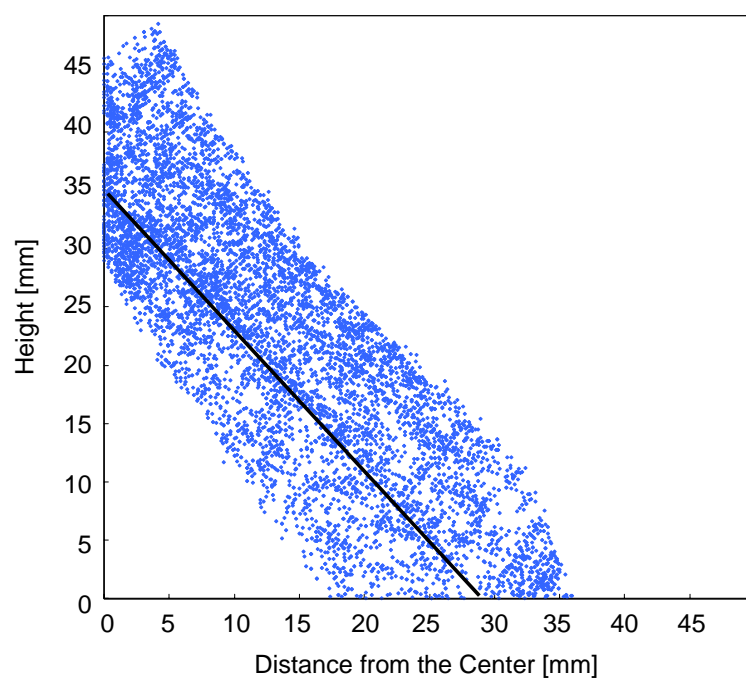


図 5.17 円錐の中心からの距離と高さの関係

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元に，提案システムにより計測できる物体の形状や範囲，また，画像を撮影する際に生じる誤差が計測精度に及ぼす影響について考察する．

6.1. 物体表面のテクスチャによる対応点探索精度の変化

5.1.2節で示した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[radian] 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

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

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．

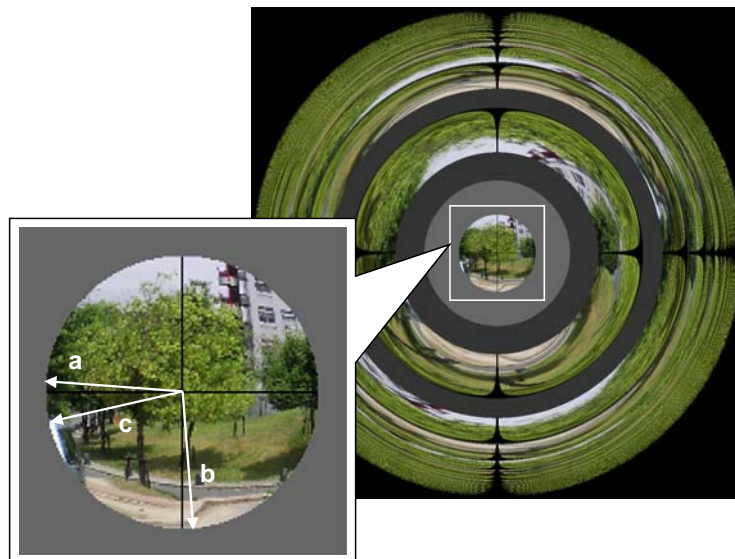


図 6.1 注目したライン

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

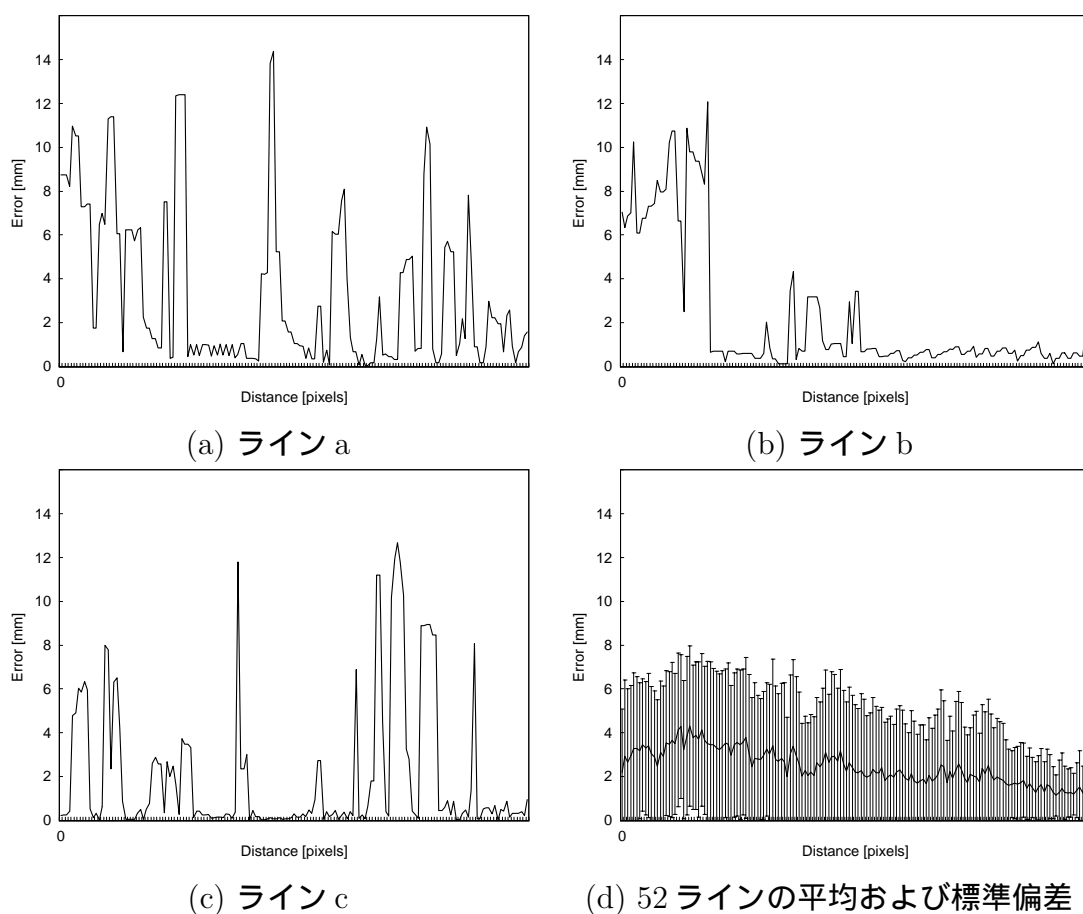


図 6.2 真の形状と計測結果の距離

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) から分かったとおり、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、4.3 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。この問題を解決するには、局所領域内の特徴だけでなく、複数の局所領域の相対的な位置関係などの大域的な情報も用いつつ、対応点を探索する手法の導入などが考えられる。

6.2. 窓サイズの違いによる計測精度の変化

5.1.3 節に示した実験結果として、図 5.6 および図 5.7 より、窓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、4.2 節に示した線形補間により 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。

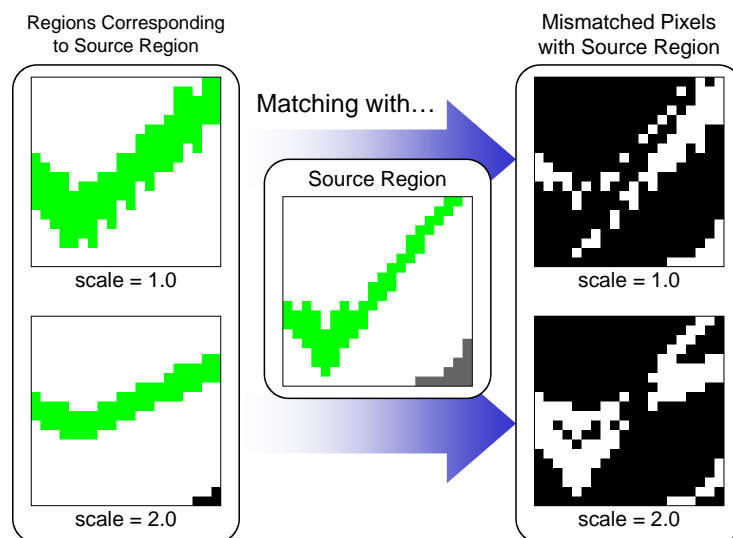


図 6.3 像の歪みによる領域の不一致

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．

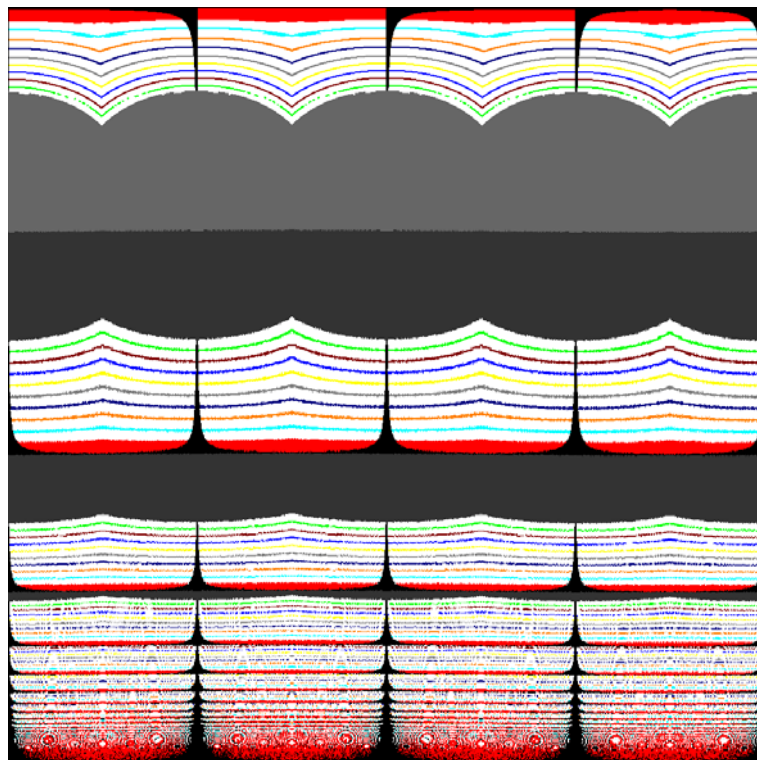


図 6.4 極座標展開後の四角錐の撮影画像

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．

6.3. 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．5.1.4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．

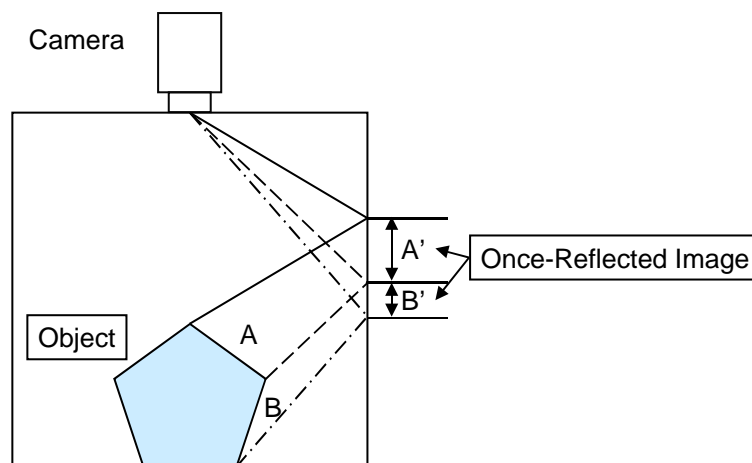


図 6.5 面の法線方向による反射像の歪み

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。

6.4. 実測における計測誤差

図 5.17 に示した実測画像からの円錐の形状計測結果は、図 5.4 に示した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、計測精度が低下する。そこで今後の課題として、実測の際に存在し得る誤差を補正するため、形状が既知の物体を撮影することなどによるキャリブレーション手法の導入が挙げられる。

第7章 結論

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の、カメラと円筒鏡を用いた三次元形状計測システムを提案した。提案システムは、円筒鏡に物体を入れ、カメラで上から物体を撮影することで、一回の撮影で物体の全方向からの多視点画像を得られ、反射屈折ステレオ視により、一枚の画像から物体の三次元全周形状を計測できる。

シミュレーション画像を用いた実験の結果として、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。また、円錐を用いた計測実験の結果、底面直径が 51.2[mm]、高さが 25.6[mm] の円錐について、計測精度は 2 ~ 3[mm] の範囲に分布した。さらに、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た像同士によるステレオ視で、形状を計測できることを確認した。また、プロトタイプシステムを構築し、実物体の形状計測を試みた結果、提案システムを用いて、実物体の全周形状を一枚の画像によって計測できることが示された。実験より、本研究で提案した三次元形状計測システムは、カメラと円筒鏡のみから成る単純なシステム構成と、画像を一枚のみ撮影する簡易な撮影プロセスで物体の全周形状を計測でき、物体の全周形状計測に有用であることが示された。

一方で、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、本システムで用いた対応点探索が誤対応を引き起こし、正確に形状を計測できないことがあった。また、レンズ形状や物体面の法線方向に由来し、線形補間では対応できない像の歪みを生じることで、誤って対応付けられた領域の組が存在した。今後はこれらの問題を解決するため、計測結果として構築されたモデルの形状を評価し、孤立点や理論的に存在し得ない点について、対応点を再び探索する手法の導入を検討している。また、レンズに基づく反射像

の非線形補正や最適な窓サイズの動的な決定手法，周期的に繰り返されるテクスチャが存在する場合にも正しく対応点を探索できる，大域的特徴量の導入が必要であると考えられる．加えて，実測画像を用いて物体の形状を計測する際には，円筒の中心軸とレンズの光軸のずれなどの誤差を補正し，計測精度の低下を防ぐ手法を用いることが望ましい．

提案システムは，システム構成や撮影プロセスの簡単さから，ユーザが個人的な所有物の形状を手軽に計測したり，多くの物体の全周形状を効率良く計測したりする用途に適しているといえる．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ため，連続的に画像を撮影すれば，動物の動きとともに全周形状を記録するといった応用も可能であると考えられる．

謝辞

本研究に取り組む場と機会を与えてくださり，研究の遂行および本論文の執筆において御指導，御鞭撻を賜りました，情報科学研究科像情報処理学講座 千原國宏教授に甚大な謝意を表します．また，副指導教官として数多くの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．日頃より研究について丁寧に御指導くださり，多くの研究発表の場を与えてくださいました情報科学研究科 眞鍋佳嗣助教授に厚く御礼申し上げます．

研究についての御助言や，技術的な御指導を数多くいただきました情報科学研究科 安室喜弘助手，井村誠孝助手に深く感謝いたします．

研究活動や講演論文執筆，また発表資料作成など，日頃から多岐に渡って細やかな御指導をいただきました情報科学研究科 長縄美香研究員，進捗報告会や発表練習の際に数多くの御指導，御助言をくださいました坂田宗之研究員，国際会議発表の際，英文資料作成に関して御助言いただきました Damien Douxchamps 研究員に，心から感謝いたします．また，研究室を越えての多大なる御助言をいただきました情報科学研究科 佐藤智和助手に深く感謝いたします．

像情報処理学講座における研究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 山田真絵さん，元像情報処理学講座秘書 川本桂子さんに御礼申し上げます．

研究にとどまらず，日常生活についても数多く助けていただきました像情報処理学講座の先輩方，同期入学としてともに刺激し合い，切磋琢磨しあった像情報処理学講座 博士前期課程 2年の皆様，研究や研究室での生活においてお手伝いしていただきました像情報処理学講座 博士前期課程 1年の皆様に感謝いたします．

最後に，今日まで僕を支え，見守ってくれた両親と家族，友人として支えてくれた松田雅孝君，染岡貴子さん，寺田真由子さんに感謝します．

参考文献

- [1] Horn-yew Shiaw, Robert J. K. Jacob, and Gregory 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] Mark Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade, and Duane 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] Andreas Ullrich, Nikolaus Studnicka, and Johannes 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] Kosuke Sato and Seiji Inokuchi. Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging. *Journal of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 27–39, January 1985.
- [6] Reinhard Klette, Karsten Schlüns, and Andreas Koschan. *Computer Vision: Three-Dimensional Data from Images*. Springer-Verlag Singapore, 1998.

- [7] Simon Baker and Shree K. Nayar. A theory of catadioptric image formation. *Proceedings of Sixth International Conference on Computer Vision*, pp. 35–42, January 1998.
- [8] Aldo 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.
- [9] Michael 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.
- [10] Joshua Gluckman and Shree K. Nayar. Rectified catadioptric stereo sensors. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2380–2387, June 2000.
- [11] Shree K. Nayar. Robotic vision system. United States Patent 4, 893, 193, August 1988.
- [12] Zhong-Ying Zhang and Hung-Tat 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.
- [13] DooHyun Lee and InSo Kweon. A novel stereo camera system by a biprism. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 5, pp. 528–541, October 2000.
- [14] 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.
- [15] Takeo Kanade, Hideo Saito, and Sundar 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.

- [16] Aldo 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] Wojciech Matusik, Chris Buehler, Ramesh Raskar, Steven J. Gortler, and Leonard McMillan. Image-based visual hulls. *Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000*, pp. 369–374, July 2000.
- [18] Keith Forbes, Anthon Voigt, and Ndimi 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.
- [19] 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*, Vol. 5665, pp. 235–242, January 2005.
- [20] 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, pp. 597–598, May 2005.
- [21] 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*, pp. 399–408, June 2005.
- [22] 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, July 2005.