

円筒鏡を用いた三次元形状計測システム

浦西 友樹[†] 長縄 美香[†] 安室 喜弘[†]
井村 誠孝[†] 眞鍋 佳嗣[†] 千原 國宏[†]

本稿では、物体の詳細な三次元形状を計測する、カメラと円筒鏡を用いた単純な構成の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、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する。これは、実カメラと仮想カメラを用いて、物体上のある1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、1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、試作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。

Three-dimensional Measurement System Using a Cylindrical Mirror

YUUKI URANISHI,[†] MIKA NAGANAWA,[†] YOSHIHIRO YASUMURO,[†]
MASATAKA IMURA,[†] YOSHITSUGU MANABE[†] and KUNIHIRO CHIHARA[†]

This paper proposes a three-dimensional measurement system with a simple structured system. The proposed system consists of a camera with a fish-eye lens 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 the other is 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.

1. はじめに

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を構築する技術は、仮想博物館¹⁾や考古遺物のデジタル保存²⁾などへの応用が考えられる。これまでに多くの三次元形状計測手法が提案されているが、その多くは、複数の距離画像を撮影した後で1枚の画像に統合することで、物体の全周形状を得ている。物体の全周形状を1回の撮影で簡便に計測できるシステムが存在すれば、動きのある物体についても形状計測が可能となり、さらに幅広い応用が期待できる。

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。能動的な形

状計測手法^{3),4)}は、一般に受動的な手法より精度良く物体の形状を計測できるが、電磁波を照射する機器が必要となり、システム構成が大型・複雑化する。

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⁵⁾がある。しかし、ステレオ視を用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。加えて、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、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、カメラと鏡などの光学機器を併用して、1回の撮影で多視点画像を得る反射屈折ステレオ視系⁶⁾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

[†] 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

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などを配置する必要がある。このとき、鏡の映り込みにともな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、カメラと鏡を用いた視体積交差法⁷⁾に基づく手法⁸⁾も提案されているが、鏡の相互の映り込みを回避するため、鏡の配置に厳しい制限を受ける。

本研究では、単純なシステム構成で物体の詳細な三次元形状を計測するため、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。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、魚眼レンズを装着したカメラで物体を上から撮影することで、1回の撮影で物体の全周の多視点画像を得られ、ステレオ視による全周形状計測が可能である。本稿では、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、システムを試作し、実測画像による実物体の三次元形状計測を試みる。

2. 関連研究

受動的形状計測手法の1つであるステレオ視は、物体の三次元形状を計測できるが、物体の全周形状を一度に計測するには、すべての点が複数のカメラから同時に観測されるようにカメラを配置しなければならず、多数のカメラが必要となり、システム構成が複雑になる。

そこで、1台のカメラで物体の三次元形状を計測するため、物体表面の同じ点を始点として、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反射屈折ステレオ視系 (Catadioptric Stereo) が提案されている。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^{6),9),10)} や、プリズム¹¹⁾ や透明板¹²⁾ を用いて光を屈折させ、視差のある画像を得る手法などがある。同様に、平面鏡の反射像を仮想カメラによる撮影像とし、視体積交差法により全周形状を計測する手法⁸⁾ が提案されている。

反射屈折ステレオ視系は1台のカメラで三次元形状を計測できるが、鏡を用いて物体の全周形状を計測するには、物体を取り囲むように鏡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範囲を限定することは、従来手法に基づく構成ではきわめて困難である。同様に、鏡を併用した視体積交差法の計測精度を向上させるには、鏡の数を増やす必要があるが、相互の映り込みを回避するために鏡の配置に制約を受けるため、鏡の数を増やすことは難しい。

3. 円筒鏡を用いた三次元形状計測システム

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、従来の三次元形状計測手法に基づく全周形状計測システムは、システム構成や撮影プロセスが多重化・複雑化する問題がある。

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。提案システムは、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、映り込みが規則的に発生するため、鏡に複数回反射した高次の反射像も計測に利用でき、直接カメラから観測できない部分も、反射像どうしを用いたステレオ視により計測できる。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1にシステムの概要を示す。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、実カメラと仮想カメラを用いて、物体上のある1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2に示す。なお、これらの図は円錐の仮想物体を撮影したシミュレーション画像である。

図2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、基本的に画像中心から反射回数の少ない順に同

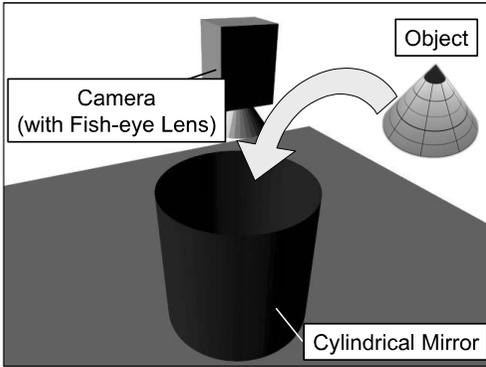


図 1 システム概要図

Fig. 1 An overview of the proposed system.

心円状に並ぶ．提案システムは，カメラの光軸と円筒鏡の中心軸が一致するようにカメラを設置することを前提としている．そのため，円筒鏡の中心軸を通してカメラに入射する光は，接線が平行となる円筒鏡面の 2 点間を反射し続ける．ゆえに，図 2 (a) における点 $A(u_A, v_A)$, $A'(u'_A, v'_A)$ および $A''(u''_A, v''_A)$ 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 2 (b) 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，カメラの光軸と円筒鏡の中心軸が一致していれば，対応点の組 $B(u_B, v_B)$, $B'(u'_B, v'_B)$ および $B''(u''_B, v''_B)$ は同一の直線上に存在する．このように，提案システムは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，計量量の削減や，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 1 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

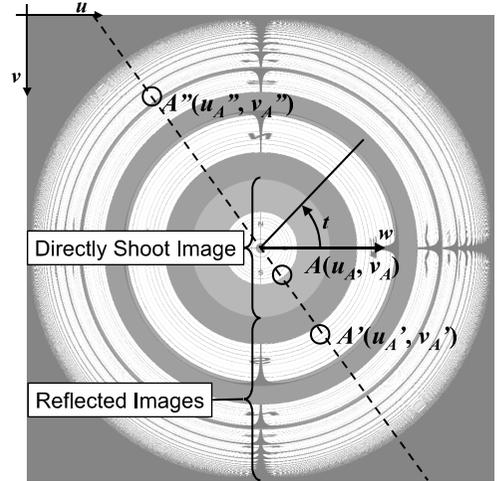
魚眼レンズは，レンズに入射する光線が光軸となす角 ϕ と，光線が射影された画像平面における画像中心からの距離 w の関係を

$$w = f \cdot g(\phi) \tag{1}$$

のように表せる． f は焦点距離であり， $g(\phi)$ は魚眼レンズの射影特性である．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から，カメラに入射する光線の角度を決定できる．

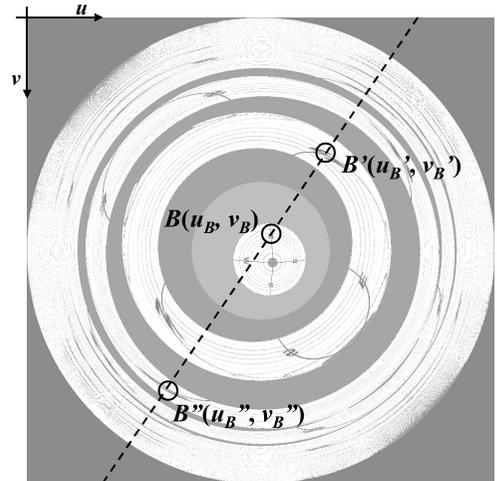
3.3.2 仮想カメラ位置の推定

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 $C^n_{virt} = (x^n_{virt}, y^n_{virt}, z^n_{virt})$ は，実カメラが $C_{real} = (x_{real}, y_{real}, z_{real}) = (0, y_{real}, 0)$ に存在



(a) 円筒中心に円錐を設置した場合

(a) Setting a circular cone on the center of the cylinder



(b) 中心からずらして設置した場合

(b) Setting a circular cone off the center of the cylinder

図 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)

Fig. 2 An image captured by the proposed system in case of setting a circular cone.

し，かつ $y_{real} = y^n_{virt}$ であると仮定するとき，撮影画像の図 2 に示す角 t および鏡の半径 R より

$$x^n_{virt} = 2nR \cos t \tag{2}$$

$$y^n_{virt} = y_{real} \tag{3}$$

$$z^n_{virt} = 2nR \sin t \tag{4}$$

となる．仮想カメラの位置関係を図 3 に示す． $x-z$ 平面について，原点对称の位置に存在する．図 3 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．

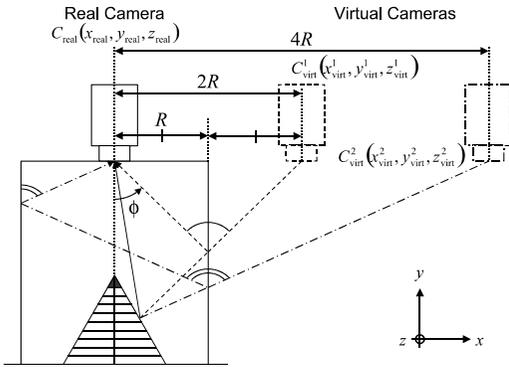


図 3 仮想カメラ位置の推定

Fig. 3 Estimating the position of virtual cameras.

4. 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。本システムでは、SSD (Sum of Squared Difference) の値を局所領域間の類似度とし、最も類似した領域の組を対応点の組とする。このとき、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ため、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、光線のカメラへの入射角に加え、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は不可能である。そこで、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 の値を計算する。

4.1 撮影画像の極座標展開

SSD の計算を単純化する前処理として、撮影画像を極座標展開する。提案システムでは、極座標展開前の画像における水平からの角度 t と画像中心からの距離 w が、極座標展開後の画像においてそれぞれ縦軸および横軸となるように展開する。図 2(a) の撮影画像を極座標展開した結果を図 4 に示す。

4.2 探索対象領域のサイズの正規化

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。たとえば図 4 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

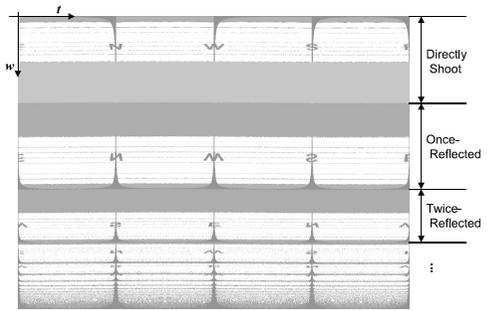


図 4 極座標展開後の撮影画像

Fig. 4 An example of the captured image in a polar coordinate system.

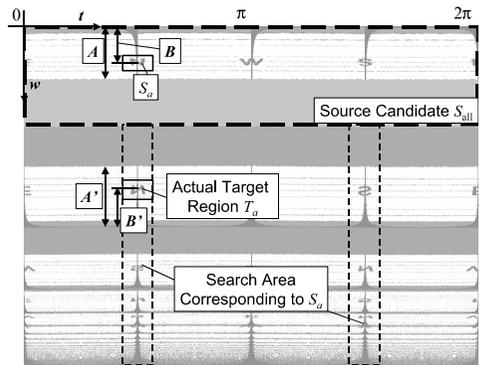


図 5 提案システムにおける探索対象領域

Fig. 5 Search areas for corresponding points.

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であると考えられるが、局所領域内での像の歪みは線形な拡大縮小で近似可能であると仮定し、線形補間によって局所領域を拡大縮小する。

4.3 探索対象領域の限定

3.2 節において述べた特性から、対応点の探索対象領域は図 5 において破線で囲まれた領域に限定できる。このとき、器型物体の内壁の場合、Source に対応する 1 回反射像は、Source から t 軸方向に π だけ進んだ位置に現れる。また、上部が水平である物体を対象とすると、物体上部のある領域に対応する 1 回反射像は、Source と同じ t の値を持つ位置と、 t 軸方向に π だけ進んだ位置に同時に現れる。このような物体についても対応点を正しく探索するため、あらゆる反射回数の像に対して、Source に対応する領域の t 軸に関する探索範囲は、図 5 に示すように、Source と同

じ t の値を持つ位置と、 t 軸方向に π だけ進んだ位置とする必要がある。なお、同一の反射回数において反射像が複数現れたときは、Source との SSD 値が最も小さい領域のみが対応点として選ばれる。

さらに、提案システムで撮影した画像の任意の反射像は、オクルージョンが発生しない場合、像の空間的な連続性が鏡に反射しても保たれる。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見ると小さい。ゆえに、図 5 に示すような、探索の際に元となる像全体の w 軸方向の長さ A に対する Source の位置 B がなす比は、探索対象領域となる反射像の w 軸方向の長さ A' と Target の位置 B' についても満たされると仮定する。対応点探索の際、探索範囲を B' 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。

5. 形状計測実験

提案システムにより、物体の三次元形状を計測できるか確認するため、実験を行った。本章では、理想的な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し、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。

5.1.1 シミュレーション環境

本実験では、円筒鏡の直径および高さは 102.4 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。また、カメラに装着する魚眼レンズは、画像中心からの距離 w とレンズに入射する光線が光軸となす角 ϕ の関係が $w = f\phi$ で表される等距離射影レンズである。生成された画像のサイズは $1,024 \times 1,024$ 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。本実験における SSD の窓サイズは 5×5 pixels である。Target の窓サイズを、 w 軸方向について 0.5 倍から 2.0 倍まで 0.1 倍ずつ変化させ、得られた Target 領域を線形補間によって 5×5 pixels に拡大または縮小した。窓サイズおよび線形補間の倍率は、予備実験により決定した値を用いた。また、カメラで直接観測され

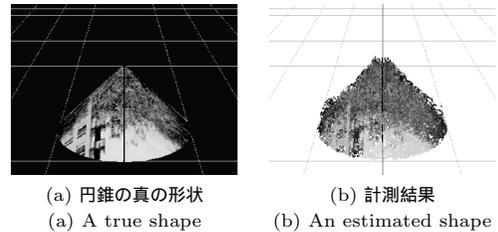


図 6 シミュレーション画像による円錐の形状計測結果
Fig. 6 An experimental result using the simulated image in case of setting the cone.

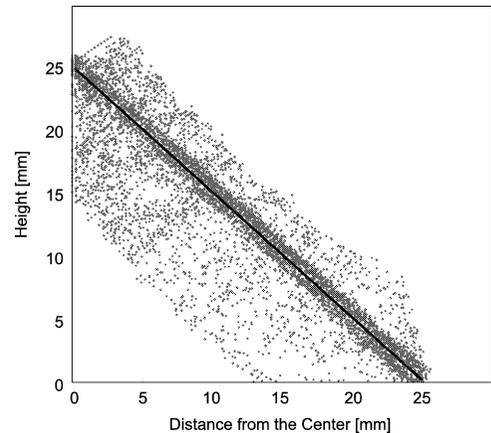


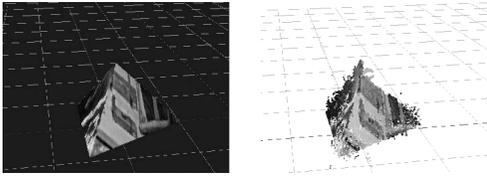
図 7 円錐の中心からの距離と高さの散布図
Fig. 7 A scatter plot of the distance from the center of the cone versus the height.

た像および円筒鏡に 1 回反射した像をステレオ視に用いた。なお本実験では、像の反射回数は目視により与えた。

5.1.2 提案システムによる形状計測の結果

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図 6 に示す。(a) は計測対象とした円錐の真の形状、(b) は提案システムによる円錐の形状計測結果である。円錐の底面の直径は 51.2 mm、高さは 25.6 mm であり、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。円錐表面は情景画像をテクスチャとして持つ。また図 7 は、提案システムにより計測された円錐上の各点を、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。提案システムによる計測結果の真の位置からの平均距離は 2.6 mm、最大距離は 15.6 mm であった。

同様に、三角錐の形状を計測した結果を図 8 に示す。三角錐底面の 1 辺の長さは 44.4 mm、高さは 25.6 mm であり、表面は情景画像をテクスチャとして持つ。また三角錐は、円筒中心から 45.3 mm の距離に重心が



(a) 三角錐の真の形状 (a) A true shape
 (b) 計測結果 (b) An estimated shape

図 8 シミュレーション画像による三角錐の形状計測結果
 Fig.8 An experimental result using the simulated image in case of setting the triangular pyramid.

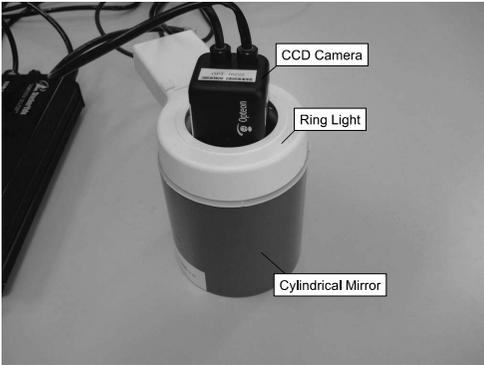


図 9 プロトタイプシステム
 Fig.9 A prototype system.

存在するように設置された。(a)は三角錐の真の形状、(b)は三角錐の形状を計測した結果である。

5.2 実測画像を用いた形状計測実験

次に、提案システムを試作し、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。

5.2.1 計測環境

カメラはOpteon社製Depict D1Eを用い、1,392×1,040 pixelsで撮影された画像から、1,024×1,024 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。なお、物体表面での鏡面反射による光源の映り込みを防ぐため、本実験では半透明(乳白色)の亚克力板をリングライト前面に装着し、拡散光源として用いた。円筒鏡の内径は90 mm、高さは100 mmである。直接観測される像における分解能は2.9 pixels/mmである。試作したシステムを図9に示す。

計測対象には円錐を用いた。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。プロトタイプシステムにより円錐を撮影した画像を図10に示す。本実験におけるSSDの窓サイズは5×5 pixelsとした。シミュレーション画像を用いた実験と同様、Targetの窓サイズを、w軸方向について0.5倍から2.0倍まで

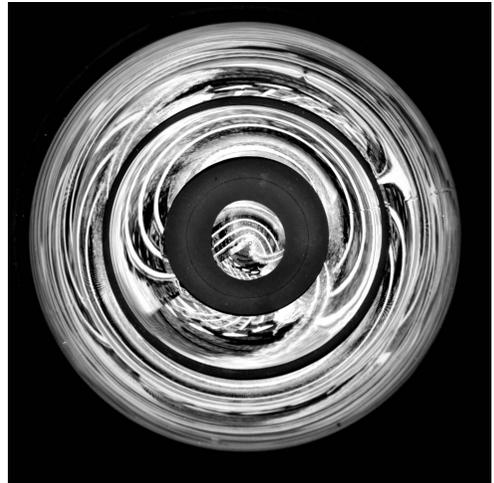
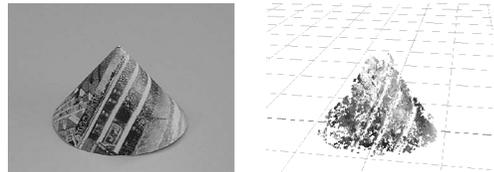


図 10 円錐を撮影した実測画像
 Fig.10 An image captured by the prototype system in case of setting the actual circular cone.



(a) 対象物体 (a) A target object
 (b) 計測結果 (b) An estimated shape

図 11 プロトタイプシステムによる形状計測結果
 Fig.11 An experimental result using the prototype system.

0.1倍ずつ変化させ、得られたTarget領域を線形補間によって拡大または縮小した。また、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、像の反射回数は目視により与えた。

5.2.2 提案システムによる形状計測の結果

提案システムによる円錐の形状計測結果を図11に示す。(a)は対象物体、(b)は提案システムによって計測された結果である。

5.3 考察

まず、本システムで用いた対応点探索手法について評価する。SSDの値を領域の類似性としている本手法では、類似したテクスチャが周期的に繰り返されている領域において、誤対応が発生し、計測精度が低下することがあった。このような周期的なテクスチャ領域において正しく対応点を探索する手法としては、物体表面のテクスチャを解析したうえでテクスチャ領域の配置を比較するなど、大域的な特徴量を併用した手法が考えられる。また、撮影画像には面の法線方向に依存する歪みが存在するが、歪みの影響をとくに強く

受けた円錐の縁の周辺では、線形補間では歪みを吸収できないことがあり、図7に示すように誤差が大きくなる傾向が見られた。画像の歪みは解析的に補正することが不可能であるため、非線形の歪みに対し頑健な対応点探索手法として、領域の構造的特徴を用いた手法の導入を検討している。

次に、実測系特有の問題について考察する。実測系では、カメラの光軸と円筒鏡の中心軸を一致させるためのキャリブレーション処理が必要となる。ここで、カメラ光軸と円筒鏡の中心軸との誤差は、位置誤差と角度誤差に分けられる。位置誤差はカメラ光軸と円筒鏡の中心軸との距離、角度誤差はカメラ光軸と円筒鏡中心軸がなす角である。これらの誤差の影響を受け、撮影画像は歪みを持つ。撮影画像に歪みが存在すると、3.2節において述べた性質が満たされず、対応点の探索範囲を画像中心を通る直線上に限定できない。歪みの大きさは誤差に比例し、誤差が大きいほど対応点の存在しうる範囲は広がる。さらに、反射像の位置ずれは円筒鏡面での反射により伝播するため、とくに複数回反射した像を用いてステレオ視を行う際、計測精度の低下を招く。本実験では、撮影画像を観察しながら実験的にカメラ位置および角度を決定した。今後は、より正確にカメラ光軸と円筒鏡の中心軸を一致させるため、本システムに適したキャリブレーションパターンによるカメラ位置決定手法の導入を検討している。このとき撮影画像は、円筒鏡の断面形状の真円度および魚眼レンズの精度による歪みを持つと考えられる。上で述べたように、撮影画像の歪みは対応点の探索範囲の限定を妨げ、計測精度の低下を招く。よって、円筒鏡および魚眼レンズの歪みは、カメラの位置を合わせる前にそれぞれ計測され、較正されていることが望ましい。

最後に、本システムで考えられる対象物体の制限について述べる。まず、物体の底部など、法線方向が鉛直下向きである面は計測できない。また、円筒鏡内部をほとんど占有する大きさの物体は、反射像のカメラへの入射を物体自身が遮るため、複数視点からの観測が困難となり、本システムに適さない。物体を複数視点から観測するために、計測対象とする物体の大きさは、円筒鏡の内部体積と比較して十分小さいことが望ましい。たとえば現在のシステム構成は、実験で用いた円錐程度の大きさを持つ物体の計測に適すると考えられる。このとき、撮影画像が持つ特徴は円筒鏡の直径および高さに依存しないため、円筒鏡を大きくすることで、より大きな物体も計測可能となる。しかしながら、円筒鏡の直径または高さを大きくすると、画素あたりの分解能が低下する問題がある。また、円筒鏡

のサイズが大きくなるに従って円筒鏡の加工精度は低下すると考えられ、先述した反射像の位置ずれを引き起こす原因となる。より大きな物体を計測するためには、円筒鏡の大型化に加えて、カメラの高解像度化や、円筒鏡の歪み補正処理の導入が必要である。

6. おわりに

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、1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、1枚の画像から物体の三次元全周形状を計測できる。応用例として、昆虫など、小さな動物体の形状計測が考えられる。シミュレーション画像、および試作システムによる撮影画像を用いた実験の結果、提案システムは物体の全周形状を1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51.2mm、高さが25.6mmの円錐について、平均計測誤差は2.6mmであった。

一方、SSDによる対応点探索手法は、像の歪みや短い周期で繰り返されるテクスチャの影響を受け、誤対応が発生することがあった。誤対応を減少させるためには、構造的特徴や大域的特徴を用いた対応点探索手法の導入を検討する必要がある。また、撮影画像における像の反射回数は、現在は目視により決定されている。この反射回数の決定を自動化する処理の導入も、今後の課題としてあげられる。さらに、提案システムは3視点以上から同一の点を撮影した画像を得られるが、現在は2眼のみによるステレオ視によって形状を計測している。そこで今後は、3眼以上のステレオ視による形状計測を用い、計測精度の向上をはかる。

謝辞 本研究で試作されたシステムに用いられた円筒鏡は、株式会社クヌギザによるものである。

参考文献

- 1) Shiaw, H., Jacob, R.J.K. and Crane, G.R.: The 3D Vase Museum: A New Approach to Context in a Digital Library, *Proc. 4th ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries*, pp.125-134 (2004).
- 2) Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J. and Fulk, D.: The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues, *Proc.*

ACM SIGGRAPH 2000, pp.131–144 (2000).

- 3) Ullrich, A., Studnicka, N. and Riegl, J.: Long-Range High-Performance Time-of-Flight-Based 3D Imaging Sensors, *Proc. 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, pp.852–855 (2002).
- 4) Sato, K. and Inokuchi, S.: Three-Dimensional Surface Measurement by Space Encoding Range Imaging, *Journal of Robotic Systems*, Vol.2, No.1, pp.27–39 (1985).
- 5) Klette, R., Schlüns, K. and Koschan, A.: *Computer Vision: Three-Dimensional Data from Images*, Springer-Verlag Singapore (1998).
- 6) Baker, S. and Nayar, S.K.: A Theory of Catadioptric Image Formation, *Proc. 6th International Conference on Computer Vision*, pp.35–42 (1998).
- 7) Laurentini, A.: The Visual Hull Concept for Silhouette-Based Image Understanding, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.2, pp.150–162 (1994).
- 8) 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) (2004).
- 9) Nayar, S.K.: Robotic Vision System, United States Patent 4,893,193 (1988).
- 10) Zhang, Z.-Y. and Tsui, H.-T.: 3D Reconstruction from a Single View of an Object and Its Image in a Plane Mirror, *Proc. International Conference on Pattern Recognition*, Vol.2, pp.1174–1176 (1998).
- 11) Lee, D. and Kweon, I.: A Novel Stereo Camera System by a Biprism, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp.528–541 (2000).
- 12) 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 (2005).

(平成 17 年 9 月 20 日受付)

(平成 18 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 佐藤 洋一)



浦西 友樹

2005年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年同研究科博士後期課程入学。現在に至る。三次元形状計測に関する研究に従事。電子情報通信学会, システム制御情報学会各会員。



長縄 美香

2004年東京大学大学院新領域創成科学研究科博士課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 21世紀 COE プログラム博士研究員。2005年同研究科特任助手。2006年日本学術振興会特別研究員 PD (東京都老人総合研究所), 現在に至る。統計的信号処理によるデータ解析に関する研究に従事。計測自動制御学会, 日本生体医工学会, 日本核医学会, IEEE 各会員。博士(科学)。



安室 喜弘 (正会員)

2000年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学大学院リサーチアソシエイト, 2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手, 現在に至る。コンピュータグラフィックス, 人工現実感に関する研究に従事。IEEE 等会員。博士(工学)。



井村 誠孝

2001年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年同研究科助手, 現在に至る。可視化および人工現実感に関する研究に従事。日本 VR 学会, ヒューマンインタフェース学会, 可視化情報学会, IEEE 等各会員。博士(工学)。



眞鍋 佳嗣 (正会員)

1995 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年同大学基礎工学部助手。1999 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教授，現在に至る。2001 年ヨエンスー大学客員研究員。質感計測・表現の研究に従事。電子情報通信学会，IEEE 等各会員。博士（工学）。



千原 國宏

1973 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。同年大阪大学基礎工学部助手。1983 年同助教授。1992 年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授，現在に至る。バーチャルリアリティの応用研究に従事。システム制御情報学会，日本エム・イー学会，IEEE 等各会員。工学博士。
