

実光路長と見かけの距離の相違に基づく 曲面鏡の曲率推定

野代 史康¹ 河本 悠¹ 宮崎 大輔¹ 古川 亮¹ 馬場 雅志¹ 日浦 慎作¹

概要 :

多くの形状計測法は、入射光のうち一部が拡散反射することを前提としている。しかし、表面が滑らかに仕上げられた金属などでは全ての入射光が鏡面反射し、拡散反射成分が観測されないことがある。このような鏡面物体には周囲環境が映り込むため、従来の手法で形状を計測すると物体そのものかわりに周囲環境が計測されてしまう。そこで本論文では、光飛行時間から求めた実光路長と見かけの距離の相違に基づき、曲面鏡の曲率推定を行う手法を提案する。物体から発した光が鏡面で反射しカメラに入射するまでの実光路長が一定でも、鏡面の曲率が変化すると、鏡面中に映り込む物体の見かけの大きさや距離は変化する、これが鏡面の曲率を求める手がかりとなる。実験により、この手法に基づき凸面鏡の曲率が概ね正しく求められたことを示す。

1. はじめに

3次元形状の計測が難しい物体の1つに鏡面物体が挙げられる。この理由として、多くの形状計測法は物体表面において入射光が拡散反射することを前提にしていることが挙げられる。2色性反射物体における鏡面反射のように拡散反射でない成分が観測される物体では、拡散反射以外の成分は外乱として取り扱われることが多い。しかし、表面が滑らかに仕上げられた金属のような鏡面反射物体は全ての入射光が鏡面反射し、拡散反射成分が観測されないため、通常のステレオ法やパターン光投影法、光飛行時間測定法では正しい形状を得ることが出来ない。

鏡面物体の形状を画像から求める研究には、カメラの位置を動かす方法 [1], [2] や周囲環境を動かす方法 [3], [4] など、シーンを変化させて複数の画像を撮影する方法が多い。しかしこれらの方法では、動的に形状が変化する対象などの形状計測が不可能である。それに対し、Liuら [5] は1枚だけの画像から鏡面物体の形状を求める手法を提案した。しかしこの手法では、チェッカーパターンなど既知のパターンと姿勢を有する参照ターゲットが映り込んでいることを前提としており、周囲環境の形状や背景までの距離が未知である場合には利用できない。そこで本論文では、光飛行時間から求めた実光路長と見かけの距離の相違に基づき、曲面鏡の曲率推定を行う手法を提案する。

物体から発した光が鏡面で反射しカメラに入射するまでの距離を、本論文では実光路長と呼ぶこととする。この実光路長が一定でも、鏡面の曲率が変化すると、鏡面中に映り込む物体の見かけの大きさや距離は変化する。例えば凸面鏡は凹レンズと同様の働きを有し、平面鏡に物体が映り込んだ場合に比べ、物体の見かけの大きさはより小さくなる。また、物体の見かけの距離は実光路長にくらべ短くなる。よって実光路長と、見かけの大きさや距離が相違することになり、これが鏡面の曲率を求める手がかりとなる。

本研究では実光路長を求めるために、飛行時間測定法 (Time of Flight, ToF) に基づく距離計測デバイスを利用する [6], [7]。この手法は、装置から発した光が対象物体で反射し、再び装置まで戻ってくるまでの飛行時間を計測することにより距離を計測する。この計測法は Kinect V2 の登場以降、急速に低廉化しており、最近では Google Tango 対応デバイス用としてスマートフォンに内蔵されるほど小型化したものも登場している。この装置により得られる距離は実光路長であり、これを物体の見かけの大きさと比較することにより鏡面の曲率を推定する。

本論文では、曲面鏡の曲率推定を行う手法を提案する。物体から発した光が鏡面で反射しカメラに入射するまでの距離を、本論文では実光路長と呼ぶこととする。この実光路長が一定でも、鏡面の曲率が変化すると、鏡面中に映り込む物体の見かけの大きさや距離は変化する。例えば凸面鏡は凹レンズと同様の働きを有し、平面鏡に物体が映り込んだ場合に比べ、物体の見かけの大きさはより小さくなる。また、物体の見かけの距離は実光路長にくらべ短くなる。よって実光路長と、見かけの大きさや距離が相違することになり、これが鏡面の曲率を求める手がかりとなる。

2. 曲面鏡の性質

ここでは凸面鏡と凹面鏡における物体と像の関係について簡単に述べる。

凸面鏡における物体と像の関係を図1に示す。ここで、物体から半径 $R > 0$ の凸面鏡までの距離を d_c 、凸面鏡の

¹ 情報処理学会
IPSI, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan
^{t1} 現在、広島市立大学
Presently with Hiroshima City University

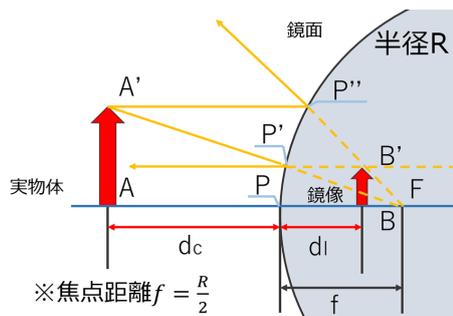


図 1 凸面鏡における物体と虚像の関係

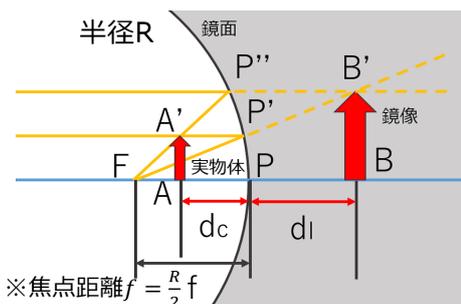


図 2 凹面鏡における物体と虚像の関係

鏡像までの見かけの距離を d_I とすると、これらの間には以下のレンズの公式が成立する。

$$\frac{1}{d_c} - \frac{1}{d_I} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

ただし、

$$f = -\frac{R}{2} \quad (2)$$

のように、凸面鏡の焦点距離は半径 R の $\frac{1}{2}$ となる。焦点距離は負であり、凹レンズと同様の働きを持つ。

つぎに、凹面鏡における物体と像の関係を図 2 に示す。先と同様に、物体から半径 $R > 0$ の凸面鏡までの距離を d_c 、凸面鏡の鏡像までの見かけの距離を d_I とすると、これらの間には以下のレンズの公式が成立する。

$$\frac{1}{d_c} - \frac{1}{d_I} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

ただし、

$$f = \frac{R}{2} \quad (4)$$

のように、凹面鏡の焦点距離も半径 R の $\frac{1}{2}$ となる。焦点距離は正であり、凸レンズと同様の働きを持つ。

また凸面鏡及び凹面鏡の倍率（物体と像の大きさの比）は

$$M = \left| \frac{d_I}{d_c} \right| \quad (5)$$

である。

以上のように凸面鏡と凹面鏡は同様に定式化されるため共通の手法により形状計測が可能であるが、本論文では以後、実験に用いた凸レンズのみについて述べることにする。

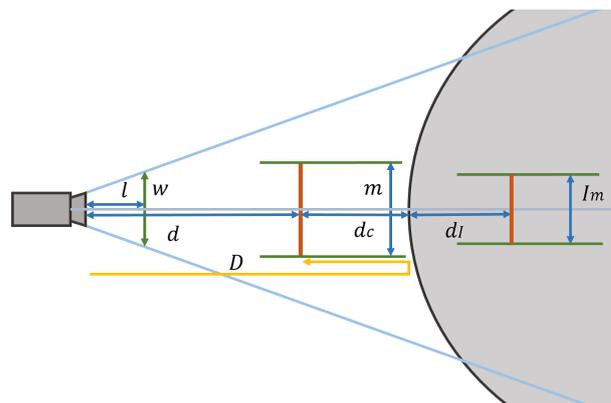


図 3 虚像と物体の大きさの関係

3. 曲面鏡の曲率推定

3.1 凸面鏡に反射した物体の見かけの大きさ

ここでは対象物体の実際の大きさと、それがカメラにより直接撮影された場合の見かけの大きさ、曲面鏡中に写った場合の見かけの大きさの関係について述べる。なお簡単のため、曲面鏡の形状は円柱であるとし、その軸は光軸と垂直に交わるものとする。

図 3 において、視点から画像平面までの距離を l 、画像平面の幅を w 、画像の幅全体のピクセル数を P_W とする。また、視錐体中にカメラからの距離 d に置かれた物体の幅を m とし、これをカメラが直接撮影したときの像の幅のピクセル数を P_m とする。

距離 d からさらに d_c 離れた箇所に半径 R の円柱鏡の表面があるとする。また、円柱鏡の表面から距離 d_I の位置に対象物体の虚像が現れ、その大きさを I_m 、それをカメラにより撮影したときの画像上のピクセル数を P'_m とする。このとき、式 (1),(2) から

$$\frac{1}{d_c} - \frac{1}{d_I} = -\frac{2}{R} \quad (6)$$

という式が得られる。また、式 (5) から物体に対する虚像の拡大率 M が得られ、対象物体の虚像の大きさが

$$I_m = m \frac{d_I}{d_c} \quad (7)$$

のように求められる。この値とカメラから虚像までの見かけの距離 $d + d_c + d_I$ の比を用いると、カメラの透視投影により

$$\frac{P'_m w}{P_W l} = \frac{m \frac{d_I}{d_c}}{(d + d_c + d_I)} \quad (8)$$

のように画像上の虚像の見かけの大きさが求められる。

3.2 曲率の算出

ToF カメラ等により得た、物体から鏡を經由しカメラまでの実光路長 (図 3) を D とする。なお図より明らかに、

$$d + 2d_c = D \quad (9)$$

である。この式を用いて式 (8) から d_c を消去すると、

$$\frac{P'_m w}{P_W l m} = \frac{1}{d + \frac{D-d}{2} + d_I} \frac{2d_I}{D-d} \quad (10)$$

となる。ここで、この式の左辺を

$$\frac{P'_m w}{P_W l m} = S \quad (11)$$

のように置き、 d_I について解くと

$$d_I = S \frac{D^2 - d^2}{4 - 2DS + 2dS} \quad (12)$$

が得られる。この式 (12) と式 (9) を式 (6) に代入して d_c, d_I を消去すると

$$\frac{2}{D-d} - \frac{4 - 2DS + 2dS}{S(D^2 - d^2)} = -\frac{2}{R} \quad (13)$$

が得られ、これを R について解くと

$$R = \frac{S D^2 - d^2}{2(1 - DS)} \quad (14)$$

が得られる。

ここで、 S を求めるための画像の幅方向のピクセル数 P_W 、画像平面の幅 w 、焦点距離 l はカメラパラメータであり、事前のカメラキャリブレーションにより求めることができる。また、物体の幅 m および物体までの距離 d は実測する方法のほか、虚像と同様に ToF カメラ等により直接計測することも出来る。これらより、虚像の幅のピクセル数 P'_m と、鏡を介した物体までの実光路長 D を ToF カメラによる計測結果から得ることで、鏡の曲率半径 R を算出できることがわかる。

4. 実験

4.1 シミュレーションによる検証

前章で述べた方法を確認するため、CG レンダリングソフトウェア POV-Ray を用いて生成した像を用いた実験を行う。

まず図 4 に示すように、画角内に赤色の平面物体、および円柱鏡を配置した CG を生成した。画像内の下方に平面物体が直接見えており、その上に一部が隠れるようにして平面物体の虚像が見えている。

また、先の条件から円柱鏡を取り除き、かわりに虚像と一致するよう式 (6)、式 (7) から距離、大きさを計算した別の平面物体を配置した CG を生成した。なお設定したパラメータは

- 画像サイズ P_W : 1920 × 1080
- 画像平面サイズ w : $\frac{4}{3}$
- 画像平面までの距離 l : 1
- 平面物体幅 m : 20
- カメラ・平面物体間距離 d : 60
- 平面物体・円柱鏡間距離 d_c : 20
- 円柱鏡半径 m : 500

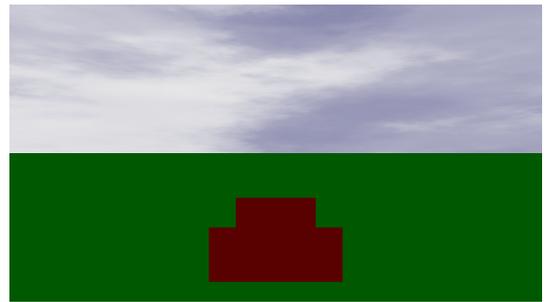


図 4 POV-Ray にて作成した平面と円柱鏡

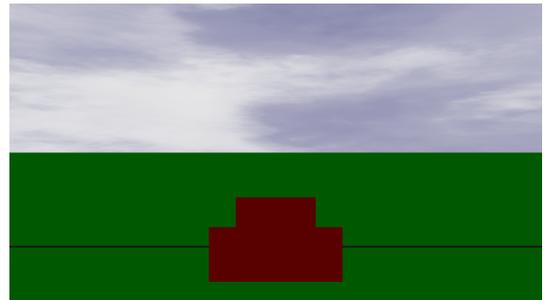


図 5 POV-Ray にて作成した平面 2 枚



図 6 2つの減算合成結果

である。

図 4 と図 5 が一致するかどうか確かめるため、これらの画像の各画素のピクセル値の差を求めた画像を図 6 に示す。図から、誤差がほとんどないことがわかる。

次に、式 (14) によって曲率を求めた。図 4 から、物体の虚像のピクセル数 $271px$ 、実光路長 100 より、

$$R = 510 \quad (15)$$

が得られた。誤差が発生した原因として、ピクセル数の丸め誤差が考えられる。

4.2 実画像実験

Kinect V2 を用いて実光路長を求め、これにより鏡の曲率を推定する実験を行った。使用した装置と鏡の仕様は以下のとおりである。

RGB カメラ

- Kinect V2 for Windows 内蔵
- 最大解像度 : 1920 × 1080
- 水平視野角 : 84.1 度



図 7 KinectV2 の RGB カメラから取得した像

- 垂直視野角：53.8 度

深度カメラ

- Kinect V2 for Windows 内蔵
- 最大解像度：512 × 424
- 深度測定範囲：500～4500mm
- 測定可能深度
- 水平視野角：70 度
- 垂直視野角：60 度

曲面鏡

- ガレージミラー (450R) ミラーサイズ 150φ
- ガレージミラー (650R) ミラーサイズ 220φ
- ガレージミラー (1000R) ミラーサイズ 300φ
- 平面鏡 ミラーサイズ 225 × 165

図 7 に示すように、ToF カメラと鏡を向かい合わせ、ToF カメラ-鏡間に平面物体を設置した。また、カメラから物体までの距離と平面物体の縦横の大きさをメジャーにより実測した。その結果は以下のとおりである。

- カメラ・物体間距離 $d = 800\text{mm}$
- 平面物体横幅 $m_w = 90\text{mm}$
- 平面物体縦幅 $m_h = 60\text{mm}$

また、カメラの画角を $\psi_v[\text{deg}]$ とすると、画像平面とカメラ・画像平面距離の比は $\frac{w}{l} = 2 \tan(\frac{\psi_v}{2})$ のように与えることができる。

カラーカメラから取得した映像 (図 7) を GUI 上に表示させ、手動で平面物体の上下左右位置を選択し、選択した座標から画像上の平面物体の大きさの縦横ピクセル数を計測した。また、同様に手動で深度を測定する箇所を選択した。クリックにより座標を入力する際の誤差を考慮し、選択したピクセル幅 $\pm 2px$ の値での計算も行った。曲率半径は、縦方向と横方向の 2 種類について求めた。

5. 結果・考察

曲面鏡の曲率半径を推定した結果を表 1 に示す。真値として、商品に記載されている数値を用いた。曲率半径 450mm では真値と大きく異なる結果が得られたが、650mm、1000mm では真値に近い値となった。450mm の鏡で正しい結果が得られなかった原因として、曲率半径の小さな鏡

表 1 曲率半径の推定結果

真値 (mm)	横測定値 (mm)	縦測定値 (mm)
450	226.2~288.7	248.3~353.7
650	460.6~593.4	539.6~791.7
1000	710.3~926.3	758.0~1143.3
平面 ($\pm\infty$)	~-27462.5 13576.5~	~-8273.0 32640.2~

では反射した赤外線が大きく広げられ、強度が小さくなることにより鏡を経由した実光路長の測定が正しく行えなかったことが挙げられる。実際に今回の場合、物体までの距離ではなく、カメラから鏡までの距離が出力されていた。

6. おわりに

本研究では、物体の見かけの大きさと、ToF カメラから得た実光路長の相違を用いて曲面鏡の曲率推定を行った。結果として、曲率半径 450mm の鏡では真値と大きく異なる結果を得たが、650mm、1000mm では真値に近い値が得られた。その原因として、曲率半径が小さい鏡では赤外線の光量が不足し、鏡を経由した物体までの距離が正しく得られなかったことが考えられる。

今後の課題として、見かけの大きさのかわりにステレオ法を用いて得た見かけの距離を用いること、より自由な曲面形状を対象とすることなどが挙げられる。

参考文献

- [1] M. Oren and S. K. Nayar, A theory of specular surface geometry, IJCV, 1997.
- [2] A. Zisserman, P. Giblin, and A. Blake, The information available to a moving observer from specularities, IVC, 1989.
- [3] T.A.Fleming,R.W.andE.H.Adelson.Specularreflections and the perception of shape. Journal of Vision, 2004.
- [4] A. C. Sankaranarayanan, A. Veeraraghavan, O. Tuzel, and A. Agrawal, Specular surface reconstruction from sparse reflection correspondences, In CVPR, 2010.
- [5] Miaomiao Liu, Richard Hartley, Mathieu Salzmann, Mirror Surface Reconstruction from a Single Image, In CVPR, 2013.
- [6] Andrea Kolb, Erhardt Barth, Reinhard Koch, Rasmus Larsen: "Time-of-Flight Cameras in Computer Graphics", Computer Graphics Forum, March 2010
- [7] Miles Hansard, Sengkyu Lee, Ouk Choi, Radu Horaud: "Time-of-Flight Cameras Principles,Methods and Applications", Springer, 2012