

## 魚眼レンズと円錐鏡による円環を利用した距離測定

Distance measurement by using circle with a fish-eye lens and a conical mirror

鈴木美香†) 中田崇行† 松田弘成† 安井直彦†  
Mika Suzuki Takayuki Nakata Hironari Matsuda Tadahiko Yasui

## 1. まえがき

物体の三次元情報を非接触で計測することは幅広い分野で求められている[1]。三次元計測は、物体に光などを照射し物体の反応から位置や形状を計測する能動型計測とカメラなどの手段により位置や形状を計測する受動型計測の二つに分けることができる。能動型の例としては、レーザーを使い光を反射させ、戻ってくるまでの時間を利用するものが挙げられるが、この方法では距離画像が得られない。また、受動型では2台のカメラを用いてステレオマッチングする方法が代表的である。この方法では、カメラ間の個体差に伴うキャリブレーションが必要である。

本研究は、魚眼レンズと円錐鏡を用いて、1台のカメラで物体までの距離を求めることが目的である。魚眼レンズと円錐鏡を組み合わせたシステムで撮影した画像情報から物体までの距離を求めることができる。計測には魚眼レンズと円錐鏡を組み合わせることで画像上に現れた円環を利用する。円環とは物体の求める点がカメラの光軸上にあったときに全方位画像上に投影される円のことであり、この円の半径を求めることによって距離測定が可能である。

非接触で距離を測定するものとしてレーザーを用いるものが挙げられるがこの方法では対象物の画像情報を得ることができない。本研究では物体の距離情報を求めると同時に物体の色情報や形状を画像として把握できるので、監視システムに利用した場合、捉えた物体までの距離と形状から物体の物理的な大きさを考慮した認識が可能である。

また1台のカメラで物体の三次元情報を非接触で求めるシステムとしては、カメラと複数の鏡[2][3][4]を用いて反射した光を用いてステレオ視する方法があるが、これらは複数の鏡を相互の映りこみを回避するように配置しなくてはならないため、計測環境を整えることが難しい。

魚眼レンズと鏡を用いて距離測定を行うシステムとして円筒鏡を用いた研究[5]が挙げられる。この研究は円筒鏡の内部に数 cm 程度の計測物体を置き、物体の距離画像を作成するものである。しかしこの方法は距離を求める際に可変テンプレートマッチングを用いているため、アルゴリズムが複雑になっている。また円筒鏡を計測する物体に被せる方式であるため円筒の形状を超える大きさの物体や遠方の物体には対応していない。本研究では円錐鏡を横向きに配置することにより円錐鏡を超える大きさや距離の物体の計測を可能とした。また本研究は円環を検出するのみのアルゴリズムであり、カメラから物体までの距離が変化することで円環が一定に広がるので高速化や検出が容易である。

## 2. 測定原理

## 2.1 MoL

本研究では物体とレンズ中心までの距離を計測するシステムとして1台の魚眼カメラと円錐鏡を組み合わせた計測システム MoL (Mirror on Lens) を提案する。図1に MoL の概念図、図2に MoL の概観図を示す。ここで使用する円錐鏡とは内側が鏡面となっている円錐である。カメラと円錐鏡はカメラの光軸と円錐鏡の回転軸が一致するように配置する。MoL で撮影した画像には物体から出た光が直接入光するものと円錐鏡に反射し入光するものが現れる。そのためいくつもの視点から物体を撮影したことと同等の画像情報が得られる。

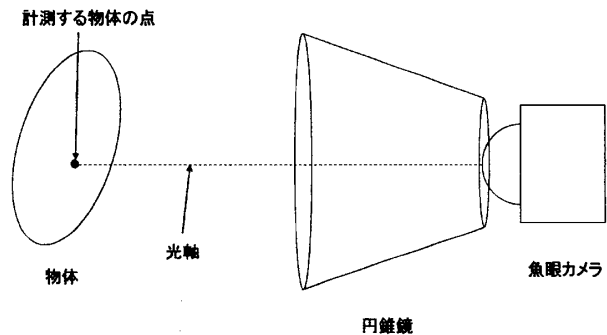


図1. MoL の概念図

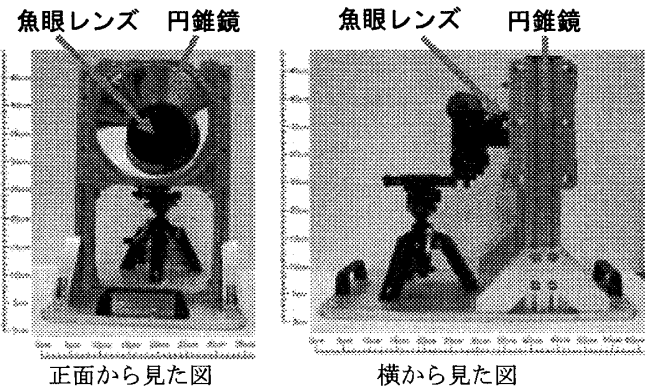


図2. MoL の外観図

## 2.2 円環の半径による距離の導出

本研究では光軸に着目して距離計測を行う。撮影した画像には光軸上にある物体の点が光軸を中心とする円環として現れる。計測物体から出た光の経路と画像上に現れる円環の概要と円環が現れた撮影画像の一例を図3、図4にそれぞれ示す。

図3から、光軸上の物体の求める一点から入った光は、直接レンズに入るものと左右の鏡面の同じ高さで反射して入るものがある。その結果、図4のように全方位画像上には円環が現れる。光軸上の物体の点から出た光の入射角が大きくなればなるほど円環の半径は大きくなり、計測する

† 富山県立大学 射水市  
Toyama Prefectural University, 5180 Kurokawa, Imizu-shi,  
939-0398 Japan  
a)E-mail: s755012@st.pu-toyama.ac.jp

物体がより近くにあることがわかる。この円環の半径を利用してカメラのレンズ中心から物体までの距離を求める。

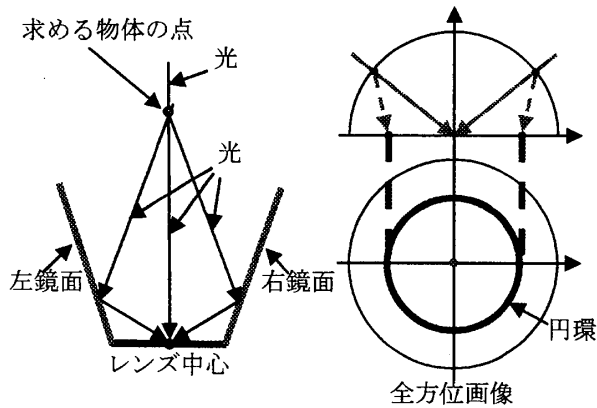


図3. 物体から出た光が通る経路と円環

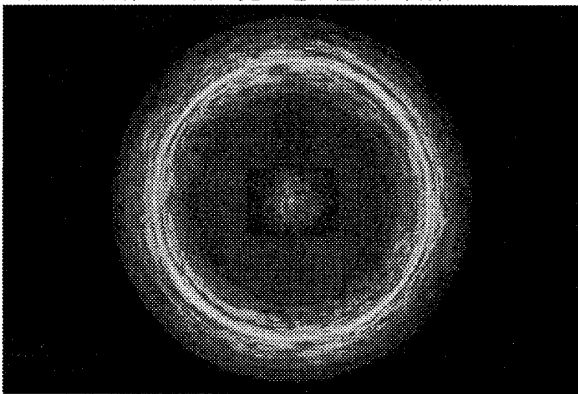


図4. MoLを使用した撮影画像(シミュレーション)

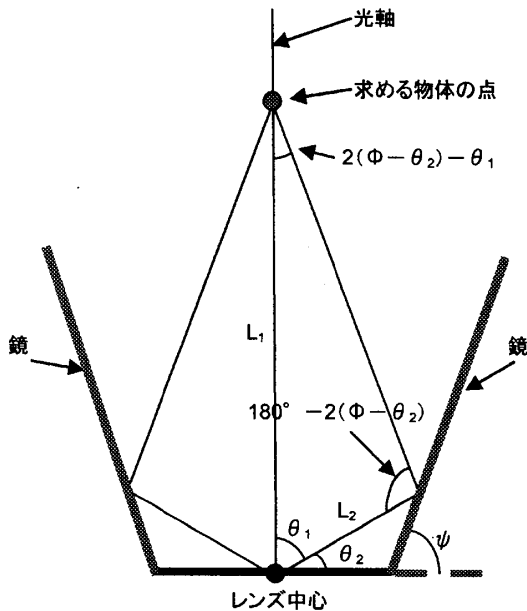


図5. 円錐鏡の断面図

円錐鏡の回転中心軸を通るように切断した断面図を図5に示す。

図5では円錐鏡の回転軸と魚眼レンズの光軸が一致しているので光の経路は回転軸に対して左右対称である。ここでは右鏡面に反射してレンズ中心に入る光と物体から直接

レンズ中心に入る光の経路を利用して、魚眼レンズから物体までの距離  $L_1$  を求める式を以下に示す。

まず、撮影した画像から得られる円環の半径を  $r$ 、全方位画像の半径を  $R$  とする。本研究で使用する魚眼レンズは等立体角射影方式であることから、式(1)に  $r$  と  $R$  を代入し、物体から出た光が右鏡面で反射したときの入射角  $\theta_1$  を求める。

$$\theta_1 = 2 \sin^{-1} \frac{r}{\sqrt{2} R} \quad \dots (1)$$

円錐鏡の断面図において円錐鏡の傾きを  $\phi$ 、 $\theta_1$  の余角を  $\theta_2$  とする。今回計測に使用した円錐鏡の傾きは  $58.8$  度である。次に正弦定理を用いて、レンズ中心から光が右鏡面に反射した地点までの距離  $L_2$  を求めると、式(2)となる。

$$L_2 = \frac{\sin \phi}{\sin(\phi - \theta_2)} \quad \dots (2)$$

さらに正弦定理を用いて  $L_1$  を求めると、式(3)となる。

$$L_1 = \frac{L_2 \sin(2(\phi - \theta_2))}{\sin(2(\phi - \theta_2) - \theta_1)} \quad \dots (3)$$

式(3)に式(1)と式(2)を代入することによりカメラのレンズ中心から物体までの距離  $L_1$  がわかる。

### 2.3 距離測定の手順

カメラのレンズ中心から物体までの距離測定は、全方位画像上に現れる円環の半径を利用すれば可能である。円環の半径を得るには全方位画像の中心から半径方向に直線を取得する。カメラの光軸上にある物体の点は全方位画像上で円環をなしているのので、中心から半径方向に引いた直線を何本か選択すると円環が形成されている部分の濃度値が等しくなる。この性質を利用して円環の半径を求める。濃度値は計測のみに使用し、人間の視覚に影響を与えるものではないので単純に得られた赤、緑、青、3色の濃度値の平均のグレースケールとする。

全方位画像上に中心から半径方向に直線を引いた図を図6に示す。

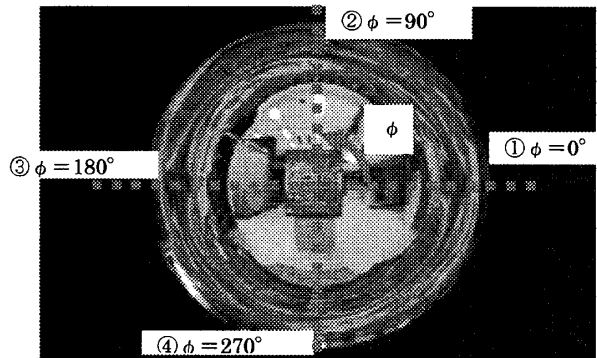


図6. 全方位画像上のエピポーラ線

図6では中心から半径方向に4本の直線を引いたものとなっている。

直線の取得にはまず、最初の直線の角度を決める必要がある。ここでは最初の直線を  $\phi=0^\circ$  とする。  $\phi$  の増分は取得するエピポーラ線の本数によって決定する。  $\phi$  が  $360^\circ$  未満なら取得するエピポーラ線の本数による増分ずつずらし、それぞれの角度のときのエピポーラ線の濃度値を格納

する。計測に使用するエピポーラ線全ての濃度値が求めたら、半径ごとに濃度値の標準偏差の和を求める。

円環が形成されている半径の濃度値ならば値のばらつきが少なく標準偏差の値が小さくなる。この値が最も小さい部分の半径が円環を形成している場所である。求めた半径を用いて、レンズ中心から物体までの距離を求める。図7に円環の半径と標準偏差の関係のグラフを示す。

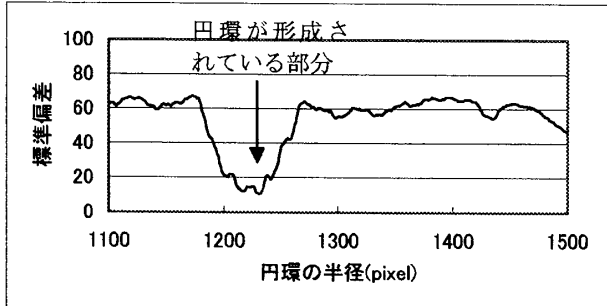


図7. 円環の半径と標準偏差の関係

図7で標準偏差が小さくなっている部分に円環が形成されている。

### 3. 距離計測実験

提案したシステムを用いて、シミュレーションおよび実験を行った。本章では理想的な環境において平面と立体の物体を撮影したシミュレーション画像と実際に装置を用いて撮影した実際の画像を用いた計測を行った。

#### 3.1 シミュレーション画像による計測

レンズ中心から 500mm~1000mm までは 100mm 間隔、1000mm~2000mm は 500mm 間隔で計測を行った。撮影する物体は平面と立体の 2 パターンとし模様はチェッカーフラグとする。計測に使用した画像を図8、図9に示す。

図8、図9から画像上に矢印で示した部分に円環ができていることがわかる。また平面を撮影したものと球を撮影したものの両方で円環に幅があることがわかる。本来、円環はカメラの光軸上にある物体の一点が円を形成するものであるが、ここでは光軸上の点の周りの他の点の色が同じであるために、円環が幅を持ち画像上に現れたと考えられる。表1にシミュレーション画像の計測結果を示す。

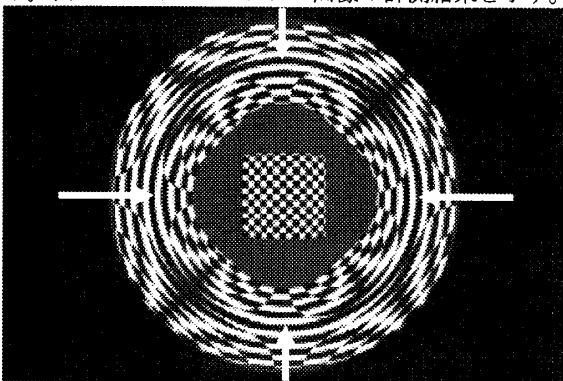


図8. 500mm先の平面のシミュレーション画像

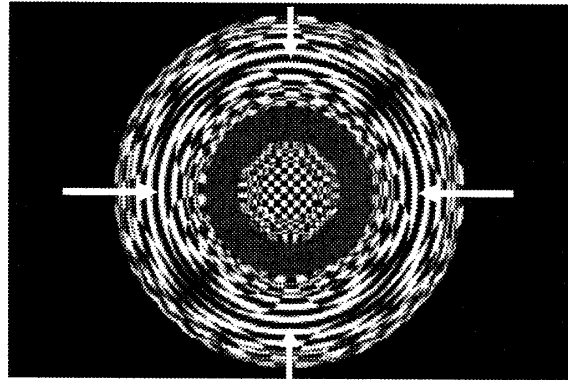


図9. 500mm先の球体のシミュレーション画像

表1. シミュレーション画像による計測結果

レンズ中心から物体までの距離 (mm)	平面計測した距離 (mm)	球体計測した距離 (mm)
500	417~600	413~600
600	501~713	496~723
700	586~817	579~830
800	665~937	665~954
900	744~1030	744~1051
1000	830~1144	830~1170

表1から、全ての距離において円環が幅を持っているため計測される距離も幅を持った値となっている。カメラの光軸上の円環の半径を正確に計測するには撮影する画像のテクスチャの細かさが影響していると考えられる。また、計測する物体の形状による計測結果の差はほとんど見られない。

#### 3.1.1 テクスチャの細かさ

カメラのレンズ中心と物体との距離を正確に計測するにはテクスチャの細かさが関係していると考えられる。そのため、チェッカーフラグのシミュレーション画像により計測を行う。シミュレーションでは 500mm 先に 400mm×400mm のチェッカーフラグを置き計測を行う。チェッカーフラグの黒の割合と計測結果は図10および表2に示す。チェッカーフラグの黒の割合が画像の中心と一致しないように 0.6 から始め、10 パターンの計測を行う。画像の中心とチェッカーフラグのテクスチャの変化が一致すると、白と黒の境界が画像の中心を通るので中心付近の色の変化が大きくなる。そのため、中心のみが円環をなすため、テクスチャの細かさにかかわらず正確な計測が可能であるため細かさを計測することに適さない。一方、チェッカーフラグの黒の割合が 0.6 から始める場合は、白と黒の境界線が中心とは一致しない。そのため中心付近の色の変化がなく円環が幅を持つ。この場合はテクスチャを細かくしていくことで中心付近の色の変化が大きくなり、円環の幅が狭くなる。そのため正確な計測が可能となる。よって、カメラの光軸上にある物体の点の色から次の色へと変化するときの距離が小さくなっていくことで幅を持たない円環の検出が可能となり、正確な距離測定が可能となる。

表2. チェッカーフラグの黒の割合と計測結果

チェッカーフラグの割合	計測結果(pixel)
0.6	1114~1258
0.3	1114~1259
0.15	1150~1223
0.075	1169~1204
0.0375	1178~1195
0.01875	1183~1190
0.009375	1185~1188
0.0046875	1187
0.00234375	1187
0.001171875	計測不可

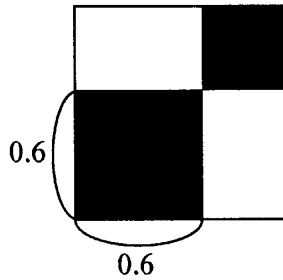


図10. チェッカーフラグの黒の割合

### 3.2 実際の画像による計測

#### 3.2.1 計測環境

計測に用いたカメラは Canon EOS-1 Ds Mark II で、得られる画像は 4992×3328pixels となる。レンズの周りに置く円錐鏡は上面の半径が 106.921mm、下面の半径が 37.75mm、高さ 114mm のものを使用した。撮影する物体はディスプレイに映し出された環境画像とする。撮影する画像を表示させるディスプレイは DELL 2001FP を使用した。ディスプレイの解像度は 1600×1200 である。

#### 3.2.2 実際の画像による計測

レンズ中心からディスプレイを 500mm~1000mm までは 100mm 間隔、1000mm~3000mm までは 500mm 間隔で離しながら撮影した。計測に使用した画像の例として 500mm 先のディスプレイに環境画像を表示させ撮影したものを図11に、計測結果を表3に示す。

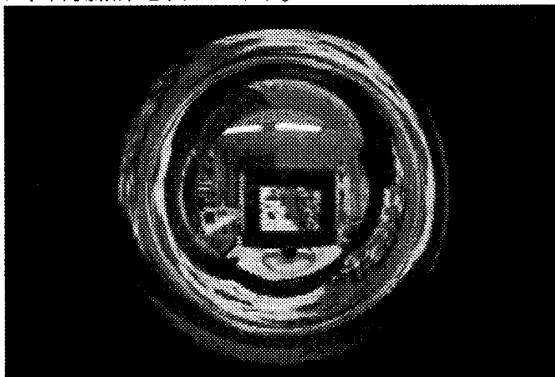


図11. 500mm 先の実際の画像

表3から全ての距離において実際にディスプレイを置いた位置よりも、計測結果が遠くに出ている。また誤差の最低は計測に用いた画像の中で最もレンズに近い 500mm のときの 22% で、最高は最もレンズから遠い 3000mm のときの 71% となっている。全ての誤差が段階的に距離が遠くなるにつれて大きくなっているわけではない。ここでは円環の半径から計算式を用いて計測を行う際に、レンズの射影方式である等立体角射影方式を用いている。この方式の式が実際に撮影される画像と一致しないことが考えられる。

表3. 実際の画像による計測結果

レンズ中心から物体までの距離(mm)	円環の半径(pixel)	計測される距離(mm)	誤差(%)
500	1223	610	22
600	1209	749	24.8
700	1199	891	27.3
800	1192	1024	28
900	1186	1172	30
1000	1182	1297	29.7
1500	1168	2044	36.3
2000	1160	3018	50.7
2500	1158	3422	36.9
3000	1153	5130	71

### 4. むすび

本研究では、魚眼レンズと円錐鏡を組み合わせることによりカメラのレンズ中心からカメラの光軸上の物体までの距離測定を行うシステムを提案した。本システムでは円錐鏡を使用しているため、近くから遠くまで物体の距離計測が可能である。また、魚眼レンズと円錐鏡を組み合わせることによってレンズ中心から物体までの距離計測が可能であることを示した。

計測誤差は 22%~71% 程度あるので今後はこの誤差をなくすようにシステムを改善していきたい。誤差の原因としては、円錐鏡の回転軸とカメラのレンズ中心がずれていることや光軸と画像中心がずれていることなどが挙げられる。また、プログラム上では円環の中心は CCD 中心と定義しているが、レンズ光軸の交点と CCD 中心はずれていることも考えられる。今後は円環を検出するアルゴリズムを検討したい。

### 参考文献

- [1]井口征士、佐藤宏介 著：“三次元画像計測” 昭晃堂(1992).
- [2]沢小百合、長縄美香、益田泰、安室善弘、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-R)(2004).
- [3]Baker, S. and Nayar, S.K : A Theory of Catadioptric Image Formation, Proc. 6th International Conference on Computer Vision, pp.35-42(1998).
- [4]Zang, 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).
- [5]浦西友樹、長縄美香、安室善弘、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, Vol.47, No.SIG 10(CVIM 15), pp.143-151