

複眼全方位センサによる奥行き検出能力の評価

小嶋裕一郎, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史
大阪大学 産業科学研究所

あらまし 観測の全方位性と携帯性, 処理の実時間性を兼ね備えたセンサとして, 複合球面鏡を用いてステレオ視を行い, 近接物体を全方位に検出する複眼全方位センサシステムが提案されている. このシステムは複数の球面鏡と単一のカメラから構成され, 容易に携帯できる小型のセンサである. しかし, このセンサを用いて近接物体を検出するためには, 鏡の形状や位置をモデル化する必要があり, これを正確に行うことが難しいためシステムの校正は困難であった. そこで本論文では, 無限遠においた点光源を観測することによって複眼全方位センサを校正する手法を提案する. また, 複眼全方位センサの各画素における検出距離のみを考えることで, 複合球面鏡の奥行き検出能力を求めた. この結果より, 複合球面鏡の中央付近では検出できる距離が長く, 端に行くに従い検出距離が短くなることが確認された.

キーワード: 複眼全方位センサ, 複合球面鏡, カメラ校正, 奥行き検出能力

Calibration and Performance Evaluation of Omnidirectional Sensor with Compound Spherical Mirrors

Yuichiro KOJIMA, Ryusuke SAGAWA, Tomio ECHIGO, Yasushi YAGI
The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

ABSTRACT A stereo system, which consists of a single camera with multiple omnidirectional mirrors, is proposed. This system has omnidirectional observation, portability, and real-time detection of near objects. When detecting near objects, we need the information about the shape of the mirrors and location of the camera and the mirrors. However, as the accurate information is difficult to obtain, it is also difficult to create the table and accurately calibrate the system. This paper describes a method of calibration through observing the point light source at an infinite range. Another issue is to find the best shape of mirror for the system. In this paper, the system performance was calculated only at each pixel. As a result, performance of the mirror proved to become higher near its center while become lower near the edge.

Key Words: Omnidirectional sensor, Compound spherical mirrors, Calibration, Estimation of maximum measurable range

1 はじめに

近年, 犯罪防止のために多くの監視システムが街角に設置されている. ところが, 犯罪は人通りの少ない場所で発生することが多く, そのような場所では固定された監視システムよりも携帯型の監視システムの方が効率的である. このような用途に用いるためには全方位の距離計測が必要であり, カメラを回転させて二つの全方位画像を取得して全方位ステレオ視を行う手法 [1],[2] や, 2 台のカメラを用いた反射光学ステレオ法 [3] ~ [5] が提案されている. ところが, 前者の手法は時系列画像を用いるため実時間処理が必要なシステムには適しておらず, 後者の

手法は 2 台のカメラが必要となるために小型軽量であることが必要なシステムには適していない.

そこで, 携帯型監視システムなどに適したセンサとして, 複合球面鏡を用いた複眼全方位センサが提案されている [6]. このシステムは複数の球面鏡と単一のカメラから構成されており, 実時間で全方位の近接物体を検出することができる小型のセンサである. 近接物体の検出は, あらかじめ物体が無限遠にあると仮定した際に各々の鏡へ投影される点についての対応点の参照表を事前に作成しておき, それぞれの鏡に投影される対応点において, 入力画像の輝度値の差をとることによって行う. もし物体がセンサに十分接近していたならば, 物体が投影される

点が無限遠における対応点と異なるため輝度値の差が現れることになる。

しかし、無限遠における対応点の参照表を作成するためには、それぞれの球面鏡の位置と形状、カメラの位置を知る必要があり、正確な参照表の作成は困難であった。そこで、本論文では無限遠とみなせる位置においた点光源を観測することによって対応点を求める手法を提案する。これは実際に光源を観測したときに得られる画像から対応点を求めるもので、複合球面鏡以外の形状の鏡を使用した複眼全方位センサの校正にも使用することができる。

ところで、複眼全方位センサに用いられる鏡の形状は複合球面鏡に限られてはいない。つまり、複合球面鏡よりも適した形状が存在する可能性があり、これを求めることは複眼全方位センサに残されている課題である。鏡の形状による性能差を調べるために、近接物体を検出できる距離を理論的に求め、比較を行いたい。複合球面鏡のように複雑な形状をした鏡について求めることは困難である。そこで、各画素における検出距離のみを求めるといった条件の下で、複合球面鏡を用いた複眼全方位センサの奥行き検出能力を求めた。これにより、複合球面鏡におけるそれぞれの球面鏡の大きさや配置などを変えた場合に物体を検出できる距離がどのように変化するかを知ることができる。したがって、より適切な球面鏡の大きさや配置を知ることができ、複眼全方位センサの性能向上に役立つと考えられる。

2 複眼全方位センサ

2.1 構成

本節では複眼全方位センサの構成について述べる。まず、本論文で用いた複眼全方位センサの外観を図1に示す。

図1のように、複眼全方位センサは通常のカメラと複数の鏡から構成されており、鏡の形状としては、複合球面鏡という複数の球面鏡からなるものを用いた。複合球面鏡とは、中央の1つの大きな球面鏡(以下、中央鏡と呼ぶ)と周囲の6つの小さな球面鏡(以下、周辺鏡と呼ぶ)とから構成されており、その形状を図2に示す。

本論文では図2に示した形状の複合球面鏡を用いた複眼全方位センサを用いたが、複眼全方位センサに用いる鏡の形状は複合球面鏡に限られているわけ



図 1: センサの外観

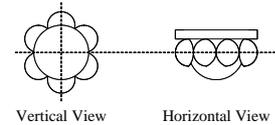


図 2: 複合球面鏡の形状

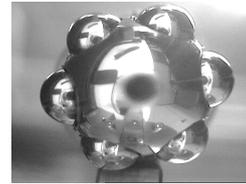


図 3: 複眼全方位センサから得られる画像例

ではない。例えば、周辺鏡の数や大きさが異なっているものや、球面鏡の代わりに放物面鏡を用いたものなどがあげられる。

2.2 複合球面鏡の射影幾何

複合球面鏡を用いた複眼全方位センサによって得られる画像は図3のようになる。物体からの光線は複合球面鏡に反射して画像面に投影されるが、各球面鏡の位置が異なっているために、それによって投影される画像の歪みも異なったものとなる。

物体から各球面鏡に向かう光線は、物体が存在する位置で交差するので三角測量の原理に基づいて距離を計測することが可能である。しかし、三角測量による距離測定では、ベースラインが長くなければ正確に距離を計測することは難しい。この場合のベースラインは、異なった球面鏡にあたった光線の点間の距離となる。今回使用した複眼全方位センサに用いられる複合球面鏡は小型なものであるため、ベースラインも極めて短いものになってしまう。そのため、小型の複眼全方位センサによって物体までの距離を正確に計測することは難しい。そこで、物体が無限遠にあるかどうかのみを判定する手法を提案しており [6]、この原理については 3.1 で述べる。

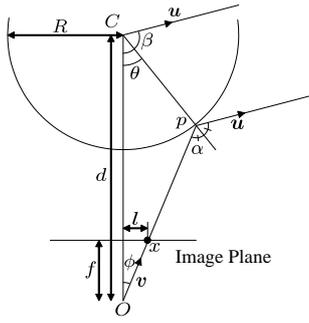


図 4: 無限遠に物体がある場合における中央鏡に反射する光線の軌跡

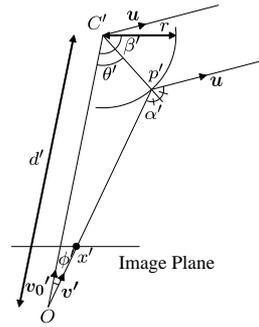


図 5: 無限遠に物体がある場合における周辺鏡に反射する光線の軌跡

3 無限遠拘束を用いた近接物体の検出

3.1 複合球面鏡による近接物体の検出原理

本節では、1台のカメラと複数の鏡を用いて近接物体を検出する方法について述べる。従来のステレオ視アルゴリズムでは、異なる距離に存在する物体によって投影される点の対応を見つけるために複数の視差を探索するものであった。しかし、本論文で用いている複眼全方位センサのようにベースラインが短い場合、従来のアルゴリズムによって正確な距離を計測することは困難である。

そこで、無限遠における視差のみを調べる手法が提案している [6]。無限遠にある物体の各鏡における投影位置の対応は、物体が近接した場合の対応とは異なっている。つまり、物体が近接した場合は無限遠での対応点における画像の輝度値が異なるものとなるので、輝度値の差から近接物体を検出することができる。

いま、図 2 のような形状の複合球面鏡を用いた複眼全方位センサにおいて、中央鏡とある周辺鏡ひとつについて考える。まず、物体が無限遠にあった場合、物体からの光線は平行光線となって各鏡に反射する。この場合、中央鏡に反射して画像面に投影される光線の軌跡は図 4 に示すようになる。

図 4 において、 O はカメラ座標系における原点、 C は中央鏡の中心、 R は中央鏡の半径、 d は O から C までの距離である。中央鏡に反射した物体が x に投影されるとき、光線は中央鏡上の点 p において反射する。ここで、 $\angle pCO = \theta$ 、 $\angle pOC = \phi$ とす

る。 x は画像中心が (c_x, c_y) である画像座標系において、 γ を用いて、

$$(c_x + l \cos \gamma, c_y + l \sin \gamma) \quad (1)$$

と定義することができ、また、

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

となる。このとき f [画素] は焦点距離である。 $\triangle pCO$ について考えてみると、 ϕ は、

$$\tan \phi = \frac{R \sin \theta}{d - R \cos \theta} \quad (3)$$

とも書ける。式 (2) と式 (3) より、 θ を求める。入射角 α は、

$$\alpha = \theta + \phi \quad (4)$$

であり、入射角と反射角は等しいので、

$$\beta = \alpha + \theta = 2\theta + \phi \quad (5)$$

となる。 \vec{OC} 、 \vec{Op} に垂直な単位ベクトルを w とすると、 w は $\vec{OC} \times \vec{Op}$ を正規化することで得られる。入射光線と平行な単位ベクトル u は、 $p\vec{O}$ を w 回りに 2α だけ回転させたものを正規化することによって得ることができる。

次に、周辺鏡に反射した光線について考える。いま、物体が無限遠にあると仮定しているので、物体から鏡へ入射する光線は平行光線であり、周辺鏡に反射して画像面に投影される光線の軌跡は図 5 に示すようになる。

図 5 において、 C' は周辺鏡の中心、 r は周辺鏡の半径、 d' は O から C' までの距離である。また、周辺鏡に反射した物体が x' に投影されるとき、光線は周辺鏡上の点 p' において反射する。

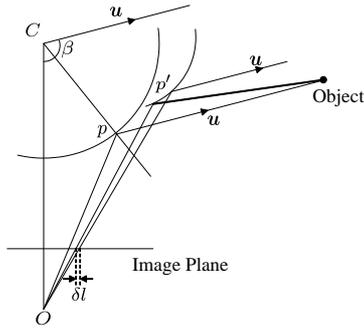


図 6: 物体の距離の違いによる投影点の違い

いま，平行光線が入射すると考えられるので，周辺鏡へ入射する光線と平行な単位ベクトルは u となる．よって，原点 O から周辺鏡の中心 C' への単位ベクトルを v'_0 とすると，

$$\cos \beta' = -u \cdot v'_0 \quad (6)$$

となる．また，中央鏡と同様に，

$$\tan \phi' = \frac{r \sin \theta'}{d' - r \cos \theta'} \quad (7)$$

より θ' を求める．このとき， $\phi' = \beta' - 2\theta'$ である． v'_0 ， u に垂直な単位ベクトルを w' とすると， w' は $v'_0 \times u$ を正規化することで得られる．また， v' は原点 O から点 p' までのベクトルとして表現でき，これは v'_0 を w' 回りに ϕ' だけ回転させることによって求めることができる．これらより，周辺鏡によって反射した光線が投影される点 x' は， $v' = (v'_x, v'_y, v'_z)$ とすると，

$$\begin{cases} (c_x + l' \cos \gamma', c_y + l' \sin \gamma') \\ \left\{ \begin{array}{l} l' = f \frac{\sqrt{v'^2_x + v'^2_y}}{v'_x} \\ \tan \gamma' = \frac{v'_y}{v'_x} \end{array} \right. \end{cases} \quad (8)$$

となる．

このようにして x に対する対応点 x' を求めることができる．これを画像上の全ての x に対してあらかじめ計算しておき，対応点の座標が必要な場合に参照できる表を作成しておく．

物体が近接している場合は，複合球面鏡に反射して画像面に投影される光線の軌跡は図 6 に示すようになる．つまり， x に対応する点 x' から δl だけ離れた位置に投影されることになり，対応点における輝度値に差が現れることになる．

3.2 近接物体の検出処理

実際に複合球面鏡を用いて近接物体の検出を行う流れについて述べる．まず，前節で述べたように，各球面鏡間の対応点を求める．物体が近接した位置にある場合は，対応点において輝度値に差が生じる．いま，ある点 x における中央鏡の輝度値を $I(x)$ ， i 番目の周辺鏡における輝度値を $I_i(x)$ とする．また， i 番目の周辺鏡において，中央鏡の点 x に対応する点を x_i とする．このとき，近接物体を検出するための基準 $E(x)$ を，

$$E(x) = \sum_i^N |I(x) - I_i(x_i)| \quad (9)$$

と定める．ここで， N は物体が投影されている周辺鏡の数である．

実際の処理の流れとしては図 7 のようになる．この例では複合球面鏡の近くに人が立っている場面をレイトラシング法によって生成したものをを用いた．まず，入力画像の周辺鏡から中央鏡の対応点へ輝度値を投影する．次に，投影した画像と，元の入力画像に低域通過フィルタをかけた画像との輝度値の差をとる．もし物体が近くにあれば，物体が映っている画素において差分が現れる．本論文では周辺鏡が 6 つある複合球面鏡を用いているので，この処理を各周辺鏡に対して行い，その結果，差分画像が 6 枚できる．これら 6 枚の画像の輝度値を式 (9) を用いて合成し，適切な閾値で 2 値化した後，膨張収縮処理を行うことでノイズを除去する．ノイズ除去を行った後の画像において，差分が現れている部分が近くにある物体が投影されているところである．この例では，近くに立っている人が検出されていることが分かる．

4 カメラ校正法

複眼全方位センサによって近接物体の検出を行う場合，無限遠における対応点を求めておく必要がある．この対応点を正確に求めるためには，複合球面鏡の位置と形状やカメラの位置が正確に分かっていなければならない．しかし，これらの位置や形状を正確にモデル化することは困難であるため，対応点を正確に求めることは難しい．

そこで，モデル化した複眼全方位センサから計算によって対応点を求めるのではなく，実際に無限遠

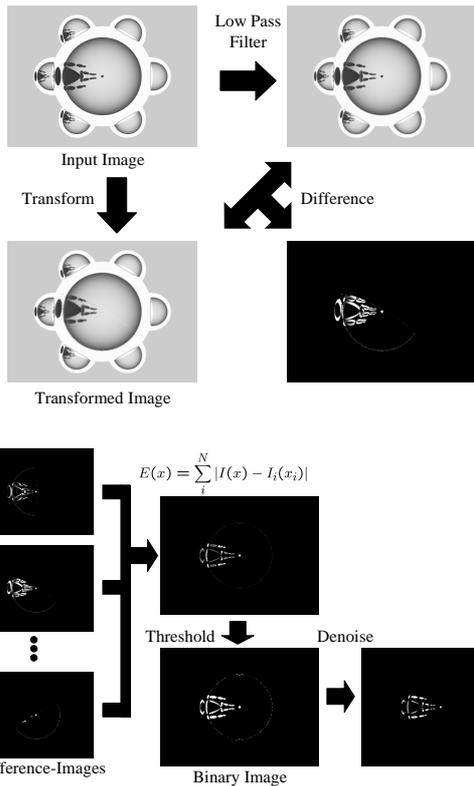


図 7: 複眼全方位センサによる物体検出の流れ

から入射する光線を観測することによって対応点を求める手法を提案する。

つまり、図 8 のように、無限遠においた点光源を複眼全方位センサで観測し、そのときに得られる画像から光源の位置を求め、これを対応点とする。このように 1 枚の画像から、あるひとつの対応を求めることができる。この処理を、複眼全方位センサを回転させながら光源を観測することによって得られる複数の画像に対して行うことで、無限遠における対応点を求める。得られた画像から対応点を抽出する際には図 9 に示すような処理を行う。ここでは、光源の色が赤であるとし、映りこんでしまっている背景画像などを除去するために画像中の赤色成分のみを取り出すという処理を行っている。また、対応点は画像中での光源の中心座標であるとする。

また、この計測方法は、どのような形状の鏡においても対応点を計測できるという利点がある。このため、複合球面鏡以外の形状の鏡を用いた複眼全方位センサの校正も行うことができる。

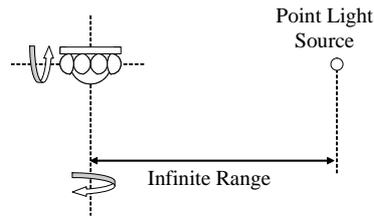


図 8: 対応点の計測方法

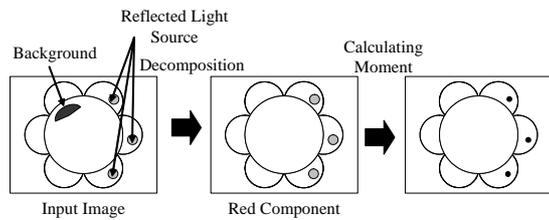


図 9: 得られた画像から対応点を求める処理の流れ

5 複眼全方位センサの奥行き検出能力評価

5.1 奥行き検出能力の評価

本論文では複合球面鏡を用いた複眼全方位センサを使用した。ところで、複眼全方位センサに用いる鏡は複合球面鏡に限られているわけではなく、センサ性能を向上させるためにも鏡の形状や配置について考えていく必要がある。そこで、まず複合球面鏡によって計測できる距離の理論値を求め、性能を評価する。また、複眼全方位センサから得られる画像の各画素の位置の違いによって、物体を検出できる距離というのは異なるはずである。ここでは、各画素の位置の違いによる性能の差についても考える。

まず、無限遠における対応点を 3.1 で述べたようにして求める。いま、図 10 に示すように、無限遠からの光線が中央鏡のある点 x と、周辺鏡のある点 x' とに反射して画像面に投影されるとする。つまり、 x と x' とが対応点であるとする。対応点から 1 画素以上離れたところに物体が投影される場合に物体を検出できるので、物体を検出できるときに画像面に投影される点は x' から 1 画素離れた点 x'' である。したがって、 x と x'' とに入射してくる光線の交点に物体が存在することになり、このときの物体までの距離を x' において物体を検出できる距離とする。

しかし、複合球面鏡とカメラのパラメータ、対応

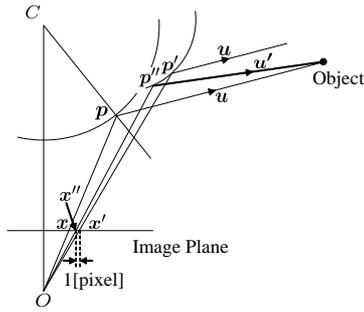


図 10: 近接物体を検出できる場合の光線の軌跡

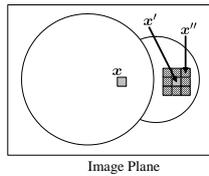


図 11: 画像面上での各点の位置関係

点が既知である場合において、 x'' を求めることは非常に困難である。そこで、 x と x' 、 x'' は画像面上で離散的な値をとる、つまり、画像面上での各画素の位置に限られると仮定する。このような仮定をおくと、図 11 に示すように、 x' の位置から 1 画素だけ離れた画素のいずれかが x'' となる。物体がある位置 X は、中央鏡上の点 p と周辺鏡上の点 p'' とに入射する光線の交点となるが、 x や x'' を求める際に離散化してしまっているため、これらの光線が交わるとは限らない。そこで、これらの光線が最も接近するときの平均値を物体の位置とする。つまり、光線の方程式が独立な媒介変数 t_1 と t_2 を用いて、

$$\begin{cases} X_1 = ut_1 + p \\ X_2 = u't_2 + p'' \end{cases} \quad (10)$$

と表せるとき、物体の位置 X は、 X_1 と X_2 が最も接近するときの X_1 と X_2 の平均値であるとする。したがって、

$$f(t_1, t_2) = |X_1 - X_2| \quad (11)$$

が最小となるとき、

$$X = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad (12)$$

として物体の位置を求め、このときの複合球面鏡の中心 C から X までの距離を検出できる距離であるとする。

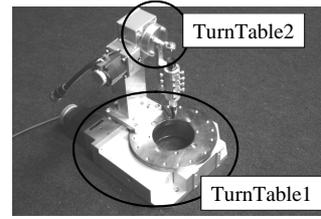


図 12: 無限遠に対する対応点の計測システム

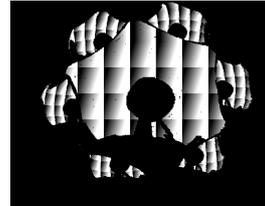


図 13: 無限遠に対する対応点

また、検出距離だけでなく、ベースラインについても考える。ベースライン b は $b = p'' - p$ と表すことができる。ただし、実際には物体からの光線と垂直な成分のみが有効となるので、物体からの光線となす角を θ とすると、実質的なベースラインの長さは $|b| \sin \theta$ となる。

6 実験

6.1 カメラ校正実験

4 で述べた無限遠における対応点の計測方法を用いて、複眼全方位センサにおける対応点を求める。実験に使用したシステムの外観を図 12 に示す。

このシステムは、複眼全方位センサが 2 台のターンテーブルに取り付けられており、2 軸方向に自由に回転させることができる。また、センサから 4[m] ほど離れた位置に電球を置き、これを無限遠にある光源として利用した。本実験に用いた複眼全方位センサによって検出できる距離は数 [m] 程度であるため、4[m] ほどの距離を無限遠とみなして問題はないと考えられる。

そして、それぞれのターンテーブルを 1° 刻みで、 360° 回転させ、それぞれの位置における画像を撮影した。この画像に図 9 に示すような処理を行うことで対応点を求める。また、電球の色は赤色であり、背景が青色である状況で計測を行ったので、4 で述

表 1: 対応点の理論値との誤差

	全ての対応点	端を除いた場合
RMS	0.745	0.633
分散	0.108	0.0403

べたように、得られた画像の赤色成分のみを取り出すことで必要な情報のみを取り出し、次に光源の中心座標を求め、これを対応点とした。このようにして求めた結果から、対応する点同士を同じ色で表したものを図 13 に示す。図 13 より、どの球面鏡についても色の変化が滑らかであることが分かる。

次に、求められた対応点の精度を調べるために、シミュレーションで同様の実験を行い、3.1 で述べた方法で求めた対応点と比較する。ただし、中央鏡の半径を 50[mm]、周辺鏡の半径を 20[mm] とし、画像のサイズは 640 × 480[画素]、光源からは平行光線が照射されているとした。ただし、複合球面鏡において光線は完全鏡面方向以外にも反射するようなパラメータを設定し、中央鏡に反射したものは約 10[画素]、周辺鏡に反射したものは約 3[画素] 投影されるようにした。そのため、画像中の光源の中心を求める際に誤差が生じる。このような条件で対応点を求めた場合において、全ての対応点における誤差の RMS と分散を求めた。また、特に球面鏡の端部分においてのみ誤差が大きかったので、この部分を除いた場合においても同様に求めた。この結果を表 1 に示す。表 1 より、全ての対応点についての誤差を考えた場合においても RMS は 1 未満であることが分かる。したがって、4 で述べた対応点の計測方法によって、対応点を正しく求められたと言える。また、球面鏡の端部分を除いた場合は RMS、分散ともに小さくなる。よって、端部分では誤差が大きいため、精度よく物体の検出を行うことは難しいと考えられる。

6.2 検出能力の評価

図 14 に示すような複眼全方位センサを考え、これについて 5.1 で述べた方法で物体を検出できる距離とベースラインの長さを求める。

求めた検出距離とベースラインを図 15 と図 16 に示す。ただし、各周辺鏡の違いによる差があまりなかったため、あるひとつの周辺鏡に対してのみの結果を示している。

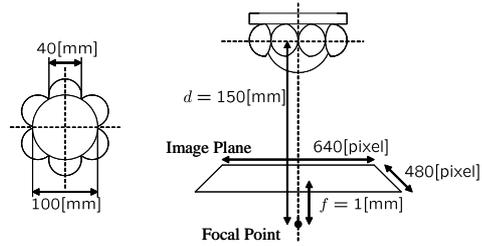


図 14: 検出能力を評価した複眼全方位センサ

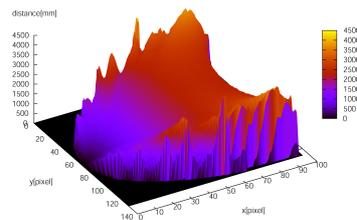


図 15: 各画素に対する検出可能な距離

また、図 15 と図 16 について、周辺鏡の中心を通る断面におけるグラフを図 17 と図 18 に示す。

図 15 より、検出距離の最大値は約 4[m] であり、このときの位置は $y = 0, 140$ かつ $x = 100$ 付近、つまり周辺鏡と中央鏡が接している付近で最も遠くまで物体を検出できる。また、図 17 より、周辺鏡の中心に近いほど検出できる距離が長くなり、ほぼ中央では約 2.5[m] の距離にある物体を検出できることが分かる。そして、図 18 より、ベースラインも周辺鏡の中心に近いほど長くなる。つまり、ベースラインが長いほど検出できる距離も長くなっている。

実際に複合球面鏡を用いて近接物体を検出する際には、カメラが映りこんでしまうために中央付近を物体検出に使用することはできない。また、6.1 で述べたように、周辺鏡の端の部分は誤差が大きいためと考えられる。つまり、中央付近と端の部分を除くと、検出できる距離は 1 ~ 2.5[m] 程度だと考えられる。特に周辺鏡の端では検出できる距離が短くなっており、同様にベースラインも短くなっている。したがって、周辺鏡の端においてもベースラインが短くならないような形状にすることで、周辺鏡の端も有効に活用できるのではないかと考えられる。逆に、検出距離が短い部分を使用しないこととし、その部分を削り取ってしまうことで、検出能力を大きく落とすことなく小型軽量化することができると考えられる。

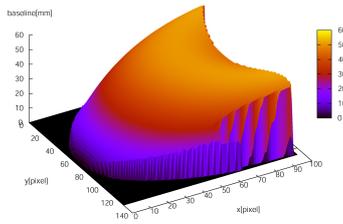


図 16: 各画素に対するベースラインの長さ

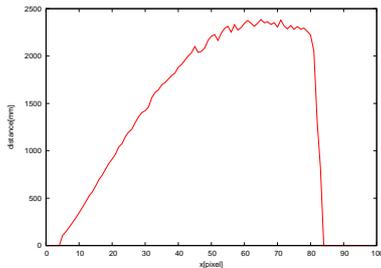


図 17: $y = 65$ における検出可能な距離の断面図

7 おわりに

本論文では、複眼全方位センサに用いる複合球面鏡とカメラの校正法を提案し、複合球面鏡によって物体を検出できる距離の理論値を導いた。

複眼全方位センサに用いた複合球面鏡は、球面鏡を組み合わせたものであり、各球面鏡の位置や形状を正確にモデル化することが困難であった。そこで、3では実際に無限遠とみなせる距離においた点光源を観測することにより、実験的に無限遠に対する対応点を求める手法を提案した。この手法は複合球面鏡だけでなく、どのように複雑な形状の鏡を用いた場合においても有効である。

また、各画素における検出距離のみについて考えることで、検出距離の理論値を求めた。その結果、周辺鏡の中央に近い部分ほど遠距離まで検出でき、端に近づくとも検出できる距離が特に短くなることが分かった。つまり、検出したい物体が複合球面鏡の中央付近に映るようにセンサを配置することで、より遠距離にある物体を検出できるようになると考えられる。また、検出できる距離が短い部分を削ることで、センサを小型軽量化することも有効であると考えられる。球面鏡の端を削ったとしても、カメラとの距離を調整することにより画像面上での鏡の大きさに変化がないようにすることで、検出能力の低下は起こらない。逆に、画像中で検出能力の高い部

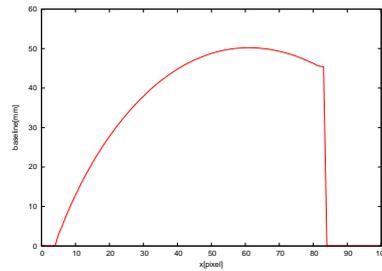


図 18: $y = 65$ におけるベースラインの長さの断面図

分の割合が増えることになるので、センサの小型軽量化だけでなく検出能力の向上が期待できる。

参考文献

- [1] H.Ishiguro, M.Yamamoto and S.Tsuji: “Omni-directional stereo”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14,2,pp.257–262, 1992.
- [2] S.Peleg and M.Ben-Ezra: “Stereo panorama with a single camera”, Proc.IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Ft.Collins, Colorado, pp.395–401, 1999.
- [3] 根岸善朗, 三浦純, 白井良明: “全方位ステレオとレーザレンジファインダの統合による移動ロボットの地図作成”, 日本ロボット学会誌, 21, 6, pp.690–696, 2003.
- [4] J.Gluckman and S.Nayar: “Real-time omnidirectional and panoramic stereo”, Proc.of Image Understanding Workshop, 1998.
- [5] 茶園篤, 山澤一誠, 横矢直和, 竹村治雄: “全方位ステレオ視による3次元情報の獲得”, 映像情報メディア学会誌, 51, 10, pp.1745–1753, 1997.
- [6] 栗田尚樹, 佐川立昌, 越後富夫, 八木康史: “全方位物体検出のための複合球面鏡ステレオ”, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2004), pp.362–367, 2004.