

複眼全方位センサの提案

小嶋 裕一郎[†] 栗田 尚樹[†], 佐川 立昌[†]
越後 富夫[†], 八木 康史[†]

本論文では、周囲 360 度の奥行き情報を一度に獲得できる全方位視覚システムとして、複眼全方位センサならびにある一定距離内に接近した物体の検知が可能な手法の提案を行う。本センサは、単一のカメラと複数の凸面鏡から構成され、容易に携帯、装着できる小型軽量のセンサである。各々の凸面鏡には各々観測対象が映し出され、それらを同時に撮像することで全方位の多視点画像を撮影することができる。接近検知手法では、この多視点画像から対応点探索を行わずに、ある一定距離以内に接近した物体を検出することができる。それらに加え本論文では、複数の凸面鏡のキャリブレーション手法の提案と、奥行き検知能力の評価を行った。

Omnidirectional Stereo with Compound Convex Mirrors

YUICHIRO KOJIMA,[†] NAOKI KURITA,[†] RYUSUKE SAGAWA,[†]
TOMIO ECHIGO[†], and YASUSHI YAGI[†]

This paper describes a portable omnidirectional stereo system, which can detect approaching close objects. The system consists of a single camera and multiple convex mirrors. The system has omnidirectional observation and portability. Since an object is projected on each mirror, the system simultaneously obtains omnidirectional images of multiple viewpoints. We propose a method of detecting near objects without finding correspondences along epipolar lines. This paper also describes a method for calibrating a multiple omnidirectional mirror sensor and we estimated the ability of detecting near objects by a simulation and experiments in the real world.

1. はじめに

凸面鏡と単一カメラからなる全方位視覚センサは、周囲 360 度シームレスな観測が同時に可能なことから、自律移動ロボット、テレプレゼンス、バーチャルリアリティ、遠隔監視などの応用分野で注目され活用されてきた¹⁾。一般に凸面鏡を用いた全方位視覚センサは、単一カメラにより映像を獲得しているため、そのままでは奥行き情報が得られない。しかし、多くの応用場面で奥行き情報は必要とされるため、全方位が観測できるだけではなく、全方位の奥行き情報が瞬時に得られれば、その利用価値は高まる。また、セキユ

リティ、自動車などの分野ではシステムの小型化が実用化における必須項目である。

凸面鏡を用いた全方位ステレオに関する研究としては、複数のカメラを用いる方式^{2),3)}と凸面鏡の工夫による方式⁴⁾⁻⁶⁾が開発されている。前者には、六角錐ミラーと 6 台のカメラからなる高精細全方位カメラシステムを上下に配置した高精細全方位ステレオシステムシステム²⁾が提案されているが、大型化することに加え、複数カメラ間のキャリブレーションという問題を持つ。そのほかにも、全方位画像生成のために放物面鏡あるいは双曲面鏡を利用した 2 台のカメラを用いたステレオ法³⁾も提案されているが、こちらもシステムの小型化に課題を残す。それに対し、後者はミラーの工夫により、単一カメラでステレオ視を実現しようとする試みで、Southwell⁴⁾は凸面鏡の内側にさらに曲率半径の小さな反射部を用意した鏡餅状の凸面鏡を用いる方式を提案した。この方式は、単一の撮像系で視差画像が獲得できることから、多眼視にありがちなカメラ間での撮像特性(ダイナミックレンジなど)の補正の必要がないという長所を持つ。また、全方位

[†] 大阪大学産業科学研究所複合知能メディア研究分野八木研究室
The Institute of Scientific and Industrial Research,
Osaka University
現在、沖電気工業株式会社
Presently with Oki Electric Industry Co., Ltd.
現在、大阪電気通信大学情報通信工学部情報工学科
Presently with Department of Engineering Informatics,
Faculty of Information and Communication Engineering,
Osaka Electro-Communication University

の実時間同時観測を小型のシステムで実現しやすいという利点もあわせ持つ。しかし、実用上は内側の凸面ミラー部分の映像が小さく、両映像に解像度差があることから、安定な対応探索ならびに視差検出が難しいという問題がある。また、結像特性から、奥行き精度向上のために上下ミラーの間隔を広げると、物体深度の関係からカメラ-凸面鏡間の間隔を広げる必要が生まれ、センサの小型化とは相反する。

そこで本論文では、センサの小型化を考慮しつつ、視差検出の安定性を高める新たな全方位ステレオとして、複数の凸面鏡を用いた複眼全方位センサを提案する⁷⁾。本センサは、狭基線長ではあるが、上下視差だけでなく様々な向きの複数基線を持つマルチベースラインステレオシステムを構成することができる。よって、上下鏡餅状の全方位ステレオに比べ、安定した視差検出が可能な小型センサが実現可能である。ただし、凸面鏡を複数用いた場合、各凸面鏡の射影像が画像中で占める割合が小さくなるため、角度分解能も低く、安定した特徴抽出ができるとは限らない。そのため、多眼視間での正確な対応付けを仮定した奥行き知覚の方法は適さない。本論文では、エピポーラ線上の対応点探索を行わずに、基準距離に対する遠近を判定する手法を提案する。本手法は、任意の一对の凸面鏡像に対し、一方の像面は遠方シーンが映されているとの仮説（無限遠仮説）のもとに他方の像面に射影変換することで、画像中での視差を発見する。実際には、画像面の解像度とミラー間の距離（基線長）により検出距離が規定される。

本論文では、2章で複眼全方位センサについて、3章で対応点探索を行わずに近接物体を検出する手法について、4章で近接物体の検出手法に必要な対応表を求める手法について、5章で提案した近接物体検出手法の性能評価方法について、6章でシミュレーションによる性能評価および実機による検出事例について述べ、7章においてまとめるとともに、今後の研究課題について述べる。

2. 複眼全方位センサ

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る。図1および図2は、試作した複眼全方位センサである。凸面鏡の形状は、各々、球面と放物面であるが、ともに1つの大きな凸面鏡（中央鏡）と6つの小さな凸面鏡（周辺鏡）から構成される。図3に球面鏡の場合のレイアウトを示す。球面鏡の場合、各々の鏡の直径が10 [mm] と4 [mm]、センサ全体の最大径1.4 [cm]、鏡の重さ約3 [g]となる。放物面鏡の場合も、中央鏡、



図1 球面鏡を用いた複眼全方位センサの外観
Fig. 1 Omnidirectional camera with compound spherical mirrors.



図2 放物面鏡を用いた複眼全方位センサの外観
Fig. 2 Omnidirectional camera with compound parabolic mirrors.

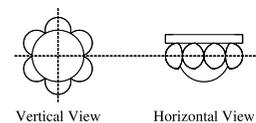


図3 複合球面鏡の形状
Fig. 3 Configuration of compound spherical mirrors.



図4 球面鏡複眼全方位センサから得られる画像例
Fig. 4 An example of an image of the compounded omnidirectional sensor with spherical mirrors.



図5 放物面鏡複眼全方位センサから得られる画像例
Fig. 5 An example of an image of the compounded omnidirectional sensor with paraboloidal mirrors.

周辺鏡の直径が各々25 [mm] と13 [mm]、センサ全体の最大径4.3 [cm] となり、ともに小型軽量である。

入力画像の一例を、各々図4、図5に示す。物体からの光線は複合凸面鏡に反射して画像面に投影されるが、各凸面鏡の位置が異なるために、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。このこと

は、視点位置の違いによる視差の発生を意味する。提案手法では、物体が無限遠にある場合と近接した場合における投影位置が異なる点を利用し、実時間での近接物体の検出を行う。

3. 無限遠拘束を用いた近接物体の検出

提案手法では、無限遠にある物体の各鏡における投影位置の対応が、物体が近接した場合の対応とは異なっていることを利用し、物体までの距離が規定値より近いかなかを判定する。すなわち、物体が十分遠くであれば、凸面鏡の位置の違いはほぼ影響せず、異なる凸面鏡の投影像に差はない。しかし、物体が近くにある場合、投影像の位置が異なるため、投影像内に輝度差が表れる。このことを利用し、異なる凸面鏡からの投影像間の差分処理を行うことで近接物体を検出する。この方法は、対応点探索の必要がないことから計算コストを削減でき、実時間処理が可能となる。

3.1 無限遠投影位置の関係

提案手法では、遠方物体は異なる凸面鏡像間で同じ位置に射影されることを前提としている。しかし、凸面鏡を用いることによる画像歪みの映像から、無限遠投影位置の関係を知る必要がある。本節では、無限遠投影位置の関係について示す。

図3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1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6に示すようになる。

図6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 までの距離であり、 u は反射点 p から物体へ向かう単位方向ベクトル、 f はカメラの焦点距離である。また、カメラから得られる二次元画像上での画像座標系を考え、この画像座標系において、画像中心は (c_x, c_y) であるとする。ただし、カメラ座標系と画像座標系の x 軸方向と y 軸方向は同じであるとする。

中央鏡に反射した光が 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。また、画像座標系において x と OC の距離は l であるとする、ある角度 γ を用いて、

$$(c_x + l \cos \gamma, c_y + l \sin \gamma) \tag{1}$$

と定義することができ、また、

$$\tan \phi = \frac{l}{f} \tag{2}$$

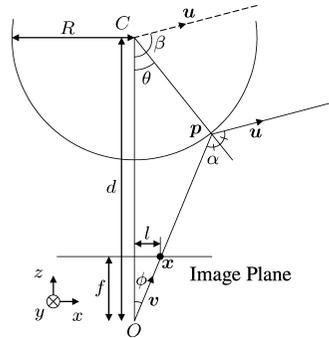


図6 無限遠に物体がある場合における中央鏡に反射する光線の軌跡
Fig.6 The ray direction reflected on the center mirror.

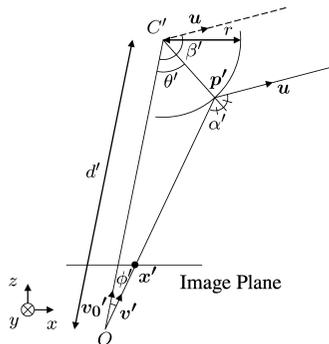


図7 無限遠に物体がある場合における周辺鏡に反射する光線の軌跡
Fig.7 The ray direction reflected on one of the side mirrors.

となる。また、 $\triangle pCO$ について考えてみると、 ϕ は、

$$\tan \phi = \frac{R \sin \theta}{d - R \cos \theta} \tag{3}$$

とも書ける。式(2)と式(3)より、 θ を求める。入射角 α は、

$$\alpha = \theta + \phi \tag{4}$$

であり、入射角と反射角は等しいので、

$$\beta = \alpha + \theta = 2\theta + \phi \tag{5}$$

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、 \vec{pO} 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7に示すようになる。

図7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 .

いま, 平行光線が入射すると考えているので, 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, 原点 O から点 p' への単位ベクトル v' 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 . いま, $v' = (v'_x, v'_y, v'_z)$ であり, 周辺鏡によって反射した光線が投影される点 x' が画像座標系において $x' = (c_x + l' \cos \gamma', c_y + l' \sin \gamma')$ と表されるとすると,

$$\begin{cases} l' = f \frac{\sqrt{v'^2_x + v'^2_y}}{v'_x} \\ \tan \gamma' = \frac{v'_y}{v'_x} \end{cases} \quad (8)$$

となる .

3.2 近接物体の検出処理

実際に複合球面鏡を用いた近接物体の検出処理の流れについて述べる . まず, 前節で述べたように, 任意の 2 鏡間の対応位置を求める . 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の差が生じる . いま, 鏡 i の点 x における輝度値を $I_i(x)$, 鏡 j の点 y における輝度値を $I_j(y)$ とする . また, 鏡 j において, 鏡 i の点 x に対応する点を x' とする . このとき, 近接物体を検出するための基準 $E(x)$ を,

$$E(x) = \sum_j^N |I_i(x) - I_j(x')| \quad (9)$$

と定める . ここで, N は物体が投影されている鏡の数である .

実際の処理の流れとしては図 8 のようになる . まず, 6 つの周辺鏡と中央鏡とを合わせた 7 つの鏡から任意の 2 鏡を選択し, 前節の原理に基づき, 一方の鏡面の画像系を他方の座標系に射影変換する . しかし, 中央鏡は周辺鏡よりも大きいので, そのまま射影変換を行うとエイリアシングが生ずる . そこで, 射影変換の前に中央鏡にローパスフィルタをかけることで周辺鏡の周波数特性に揃え, エイリアシングを抑える . そして, 射影変換前の画像と射影変換後の画像間で差分

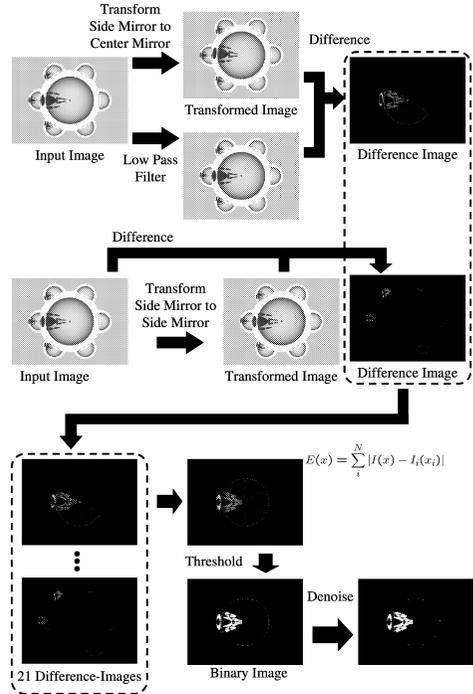


図 8 複眼全方位センサによる物体検出の流れ
Fig. 8 Flowchart of detecting near objects.

処理を行う . そして, すべての組合せに対し, 式 (9) を用いて差分結果を合成し, 適切な閾値で 2 値化, 膨張収縮処理を行い, 近接物体を検出する . なお, 鏡面間の射影変換に関しては, あらかじめ鏡の位置関係の対応を求めた表を作成し, 対応点を逐次計算するコストを省くことで処理の高速化をはかる . 対応表の作成方法に関しては, 次章で述べる .

4. カメラ校正法

提案する近接物体の検出手法では, 鏡面間の射影変換を行うため, あらかじめ無限遠物体の各鏡における射影位置を求めておく必要がある . そこで, 実際に無限遠から入射する光線を観測することによって, 鏡面間の射影位置関係を求める .

つまり, 図 9 のように, 無限遠においた光源を複眼全方位センサで観測し, 各鏡面の画像で観察される光源位置から対応関係を求める . 複眼全方位センサを回転させながらこの処理を行うことで, 画像面全体の対応表を作成する . 実際には, 図 10 のように, 放物面鏡と光源を組み合わせ作り出した平行光線を無限遠の光源の代わりに利用した .

このような光源を観測して得られた画像から対応点を抽出する際には図 11 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, 映りこんでいる背

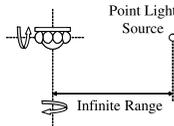


図 9 対応点の計測方法

Fig. 9 The calibration system that the sensor attached on turntables.

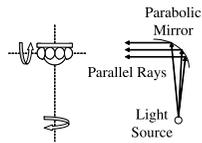


図 10 放物面鏡を用いた対応点の計測方法

Fig. 10 The calibration system using parabolic mirrors for making parallel rays.

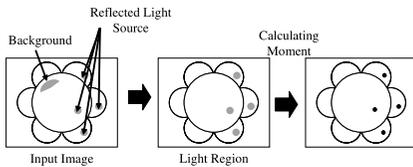


図 11 得られた画像から対応点を求める処理の流れ

Fig. 11 Flowchart for detecting corresponding points.

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している．画像中の輝度値がある値以上の領域を光源が映っている領域であると判断し，その領域の重心を対応点とした．このようにすることで，1枚の画像から1組の対応点が得られる．また，光源に対するセンサの角度を変化させることで異なる対応点を得ることができる．そこで，センサの角度を変えながら光源を観測した画像を複数用いることで，対応点の組を複数求め，対応表を作成する．

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．

5. 複眼全方位センサの奥行き検出能力評価

5.1 複眼全方位センサのシミュレーション

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る必要がある．たとえば，図 12 のように周辺鏡の数が異なる複合球面鏡や，放物面鏡を組み合わせたものなどが考えられる．

ところが，このような鏡を用いた場合の性能を評価することを考えると，理論的または実験的に計測できる距離などを求める必要がある．しかし，鏡の形状が

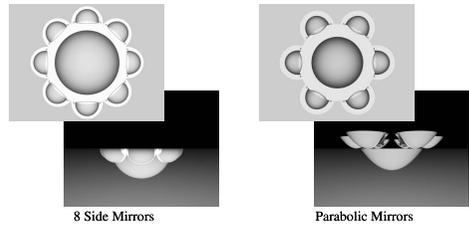


図 12 複眼全方位センサに用いる鏡の一例

Fig. 12 Examples of mirror shape for the sensor.

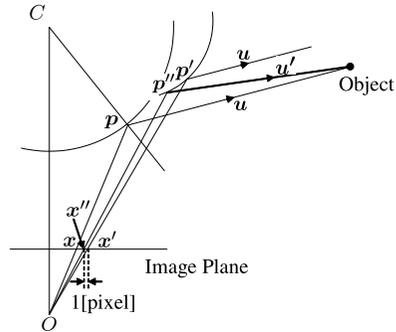


図 13 近接物体を検出できる場合の光線の軌跡

Fig. 13 Ray direction when the sensor detects objects.

複雑なため，計測できる距離の理論値を導き出すためには高次の連立方程式を解かなければならない．さらに，鏡の形状が変化した場合，そのたびに方程式を考え直す必要がある．また，実験によって求める場合には鏡を試作する必要があるため現実的ではない．そこで，レイトレーシング法によって生成された画像を用いてシミュレーションを行い，センサ性能を評価することを考える．

5.2 奥行き検出能力の評価

まず，無限遠における対応位置を 3.1 節で述べた原理に基づき求める．いま，図 13 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，単一視点系でない場合は，複合球面鏡とカメラのパラメータ，対応点が既知であったとしても 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

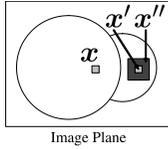


図 14 画像面上での各点の位置関係

Fig. 14 Location of the projected points on the image.

ような仮定をおくと，図 14 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．

また，基線 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，実質的な基線長は $|b| \sin \theta$ となる．

6. 実験

6.1 カメラ校正実験

4 章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 15 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，光線に平行な軸と，光線に垂直な軸の 2 つの軸に対して自由に回転させることができる．したがって，センサと平行光線のなす角を自由に変化させることができ，複数の対応点を観測することができる．本実験では，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いて画像を撮影した．この画像を図 11 に

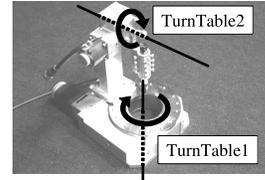


図 15 無限遠に対する対応点の計測システム

Fig. 15 The calibration system.

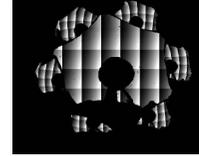


図 16 無限遠に対する対応点

Fig. 16 Measuring result of corresponding points.

示すような処理を行うことで対応点を求めた．光源としては赤色の光線を用い，背景が青色である状況で計測した．4 章で述べたように，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，8 [bit] で表された輝度値が 150 以上である領域を光源の領域とし，その領域の重心を対応点とした．このようにして求めた結果から，対応する点どうしを同じ色で表したものを図 16 に示す．これより，ターンテーブルによって隠蔽されていない点について，対応点が得られていることが分かる．

次に，提案手法で求められる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った場合と，3.1 節で述べた方法で求めた場合の対応点を比較する．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，実際の実験環境に近づけるために，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，観測画像中の光源領域は中央鏡に反射した光線は約 10 [画素]，周辺鏡に反射した光線は約 3 [画素] の領域に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，すべての対応点における誤差の RMS と分散を求めた．また，周辺鏡の端部分では，やや誤差が大きかった．これは，端部分で鏡面の傾斜が強かったためと考えられる．そこで，周辺鏡の端部分をあらかじめマスキング処理することで近接物体検出領域外とした場合の誤差の RMS と分散も同様に求めた．この結果を表 1 に示す．表 1 より，すべ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 未満であるため，4 章で

表 1 対応点の理論値との誤差

Table 1 Errors of corresponding points with/without the peripheral area of the mirrors.

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

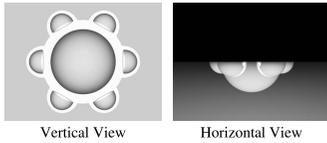


図 17 複合球面鏡の形状

Fig. 17 Configuration of compound spherical mirrors.

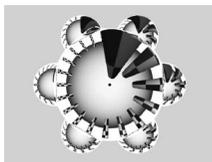


図 18 入力画像

Fig. 18 Input image used for simulation of detecting objects.

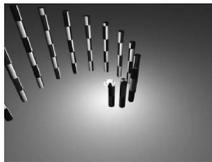


図 19 物体の配置

Fig. 19 Scene used for simulation of detecting objects.

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いえる。また、端部分を検出領域外とした場合は、RMS と分散がともに小さくなった。

6.2 シミュレーションによる近接物体の検出

レイトレーシング法によって生成した画像から、近接物体の検出処理を行う。図 17 に示したような複合球面鏡を用いた複眼全方位センサを用いるとする。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] とした。

図 18 に示す入力画像を用いて、実際に近接物体の検出処理を行う。この入力画像は複合球面鏡の周囲に半径 20 [cm] の円柱を並べたものであり、複合球面鏡の中心から各円柱までの距離は 50, 100, 150 [cm] と、50 [cm] ずつ遠ざかるようにした。また、画像の大きさは 640 × 480 [画素] とした。入力画像を異なる視点から見たものを図 19 に示す。この画像に対して近接物体を検出した際の結果を図 20 に示す。図 20 において黒色で塗りつぶされている箇所が検出された領域

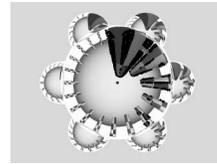


図 20 近接物体の検出結果

Fig. 20 Result of detecting.

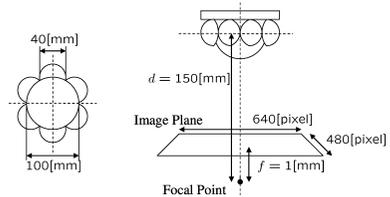


図 21 検出能力を評価した複眼全方位センサ

Fig. 21 Parameter of the sensor that calculates detectable distance.

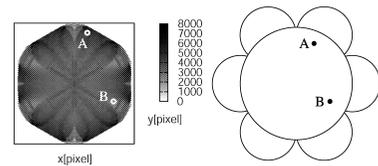


図 22 周辺鏡間の視差も利用した際の

各画素に対する検出可能な距離 [mm]

Fig. 22 Detectable distance

using parallax of side mirrors [mm].

である。これより、5 番目に近い円柱まで検出できていることが分かる。つまり、250 [cm] 以内の距離にあるものは検出できているが、300 [cm] 以上離れたものは検出できていない。ただし、ここでは物体の領域の一部でも検出された場合に近接物体の検出ができたと判断している。

6.3 検出能力の評価

図 21 に示すような複眼全方位センサを考え、これについて物体を検出できる距離を求めた。

まず、5.2 節で述べた方法で検出距離を求めた結果を図 22 に示す。これは、中央鏡の各点において検出できる距離を表示したものである。たとえば、図 22 の点 A では約 5.0 [m]、点 B では約 2.5 [m] の距離より近接した物体を検出できることを表している。この結果より、各点において約 2~5 [m] の距離よりも近接した物体を検出できることが分かる。また、検出可能距離の平均は 2.7 [m] であった。図 23 は、周辺鏡と中央鏡の間の視差のみを考慮した場合の結果である。図 22 と図 23 では、黒に近い点ほど、より遠くの物体を検出することができることを表している。したがって図 22 に示すように、すべての球面鏡の組合せを利

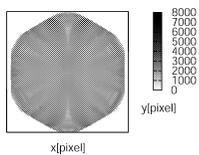


図 23 各画素に対する検出可能な距離 [mm]
Fig. 23 Detectable distance [mm].

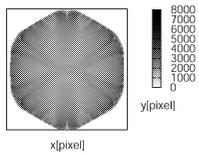


図 24 隣接した周辺鏡の視差を利用した際の
各画素に対する検出可能な距離 [mm]
Fig. 24 Detectable distance of
using adjacent side mirrors [mm].

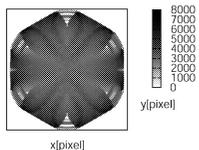


図 25 1 つ離れた位置にある周辺鏡の視差を利用した際の
各画素に対する検出可能な距離 [mm]
Fig. 25 Detectable distance of
using side mirrors every second mirror [mm].

用した方が遠くの物体まで検出できることが分かる。

ここで、どの周辺鏡の組合せが検出能力の向上に寄与しているのかを調べた。つまり、隣どうしの周辺鏡の視差のみを利用した場合と、1 つ離れた位置にある周辺鏡の視差のみを利用した場合の検出距離を求め、比較した。その結果を図 24 と図 25 に示す。この結果より、1 つ離れた位置にある周辺鏡の視差が検出能力の向上に大きく寄与していることが分かる。

また、複合球面鏡の検出能力は、どの鏡の視差を利用するかだけでなく、解像度や鏡の大きさなどにも関係していると考えられる。そこで、解像度と検出距離、鏡の大きさと検出距離の関係について調べた。ただし、鏡の大きさを変えた場合において、カメラとセンサの距離を調節することで、画像中に写る鏡の割合は変わらないようにした。また、検出距離として、すべての画素における検出距離を平均したものを利用した。解像度と検出距離の関係を図 26 に、鏡の大きさと検出距離の関係を図 27 に示す。図 26 の横軸はカメラから得られる画像の解像度を、縦軸は提案手法を用いて物体を検出できる平均距離を示している。たとえば、解像度が 640×480 の場合は平均 3.6 [m] より近くに

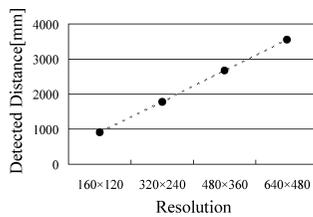


図 26 解像度と検出可能な距離の関係
Fig. 26 Relation of detectable distance and resolution.

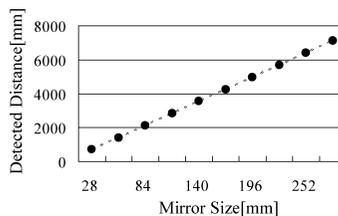


図 27 複合球面鏡の大きさと検出可能な距離の関係
Fig. 27 Relation of detectable distance and mirror size.

ある物体を検出できる。図 26 より、解像度を高くすることによって遠くの物体を検出できるようになることが分かる。また、解像度と検出距離は比例していることも分かる。

図 27 の横軸は複合球面鏡の最大径を示している。ただし、中央鏡と周辺鏡の大きさの比は変化させなかった。図 27 より、検出距離は鏡の大きさに比例することが分かる。ここで、検出距離が鏡の大きさに関係している理由としては、基線長が変化するためだと考えられる。

6.4 実環境における近接物体の検出

最後に、図 2 に示した複眼全方位センサを用い、実環境で実験を行った。各鏡の形状は放物面であり、センサ全体の最大径は 4.3 [cm]、センサから得られる画像の解像度は 640×525 [画素] である。中央鏡にかかるローパスフィルタは 3×3 の大きさとし、2 値化の閾値は 40 とした。ローパスフィルタの大きさは中央鏡と周辺鏡の大きさの比から、2 値化の閾値はカメラのノイズの大きさから決定した。また、孤立点として表れるノイズや、有用ではない検出結果の除去のために 3×3 の大きさのメディアンフィルタを用いた。

上記の条件で、立っている人物を複眼全方位センサで観測し、近接物体の検出処理を行った。このような実験を、センサから人物までの距離を 1 [m] から 5 [m] まで、 0.1 [m] おきに变化させて行った。そして、検出結果が人物の領域の一部を含んでいた場合、その距離に立っている人物を検出できたと判定した。

実験の結果、周辺鏡と中央鏡の対応のみを利用した場合、 1.7 [m] 離れた人物まで検出できた。また、すべ

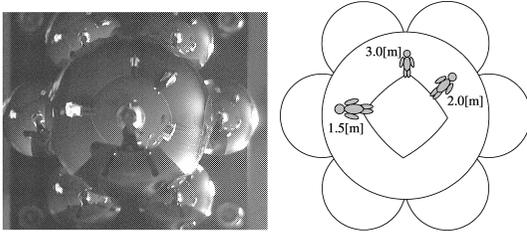


図 28 入力画像例 (1.5 [m] と 2.0 [m], 3.0 [m] の距離に立っている人物)

Fig. 28 Input image: Distance to persons are 1.5, 2.0 and 3.0 [m].

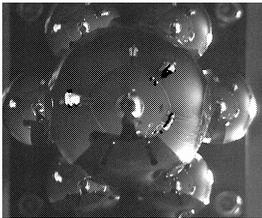


図 29 人物の検出結果

Fig. 29 Result of detecting 2 persons.

での対応を用いた場合、2.6 [m] 離れた人物まで検出できた。

図 28 は、センサから 1.5 [m] と 2.0 [m], 3.0 [m] 離れた位置に人物が立っている画像であり、これを入力画像として近接物体を検出し、検出結果を赤色で入力画像に重ね、中央鏡の部分拡大したものを図 29 に示す。これより、1.5 [m] と 2.0 [m] の距離に立っている人物の輪郭領域において差分が現れており、近接物体を検出できていることが分かる。

また、本実験では CPU が Pentium4 3.2 GHz である PC を用いた。このとき、画像の入力から近接物体の検出までに要した時間は約 72.5 [ms] であった。したがって、提案手法を用いた場合、約 13.8 [fps] の速度で近接物体を検出できる。

7. おわりに

本論文では、複眼全方位センサの提案ならびにそのカメラ校正法、さらに無限遠仮定による近接物体検出手法の提案と、そのシミュレーション実験によって奥行き検出能力を評価した。

複眼全方位センサは、複数の球面鏡と単一のカメラから構成されており、観測の全方位性を備えた小型のセンサである。無限遠仮定による近接物体検出手法は、対応点探索を行わずに物体が近いか遠いかのみを判断することができ、実時間処理が可能である。実験において、約 13.8 [fps] の速度で近接物体の検出が可能で

あり、また、2.6 [m] 離れた位置に立っている人物を検出できた。この結果より、提案手法は近接物体を実時間で検出できることが確認できた。さらに、本論文では平行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した。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広く使用することができる。今回は中心鏡と周辺鏡という構成の場合について評価したが、複眼全方位センサという点では、様々な構成が考えられる。それらに関しても、現在、シミュレーションによる評価を進めている⁸⁾。

また、今回は近接物体の検出手法について報告したが、検出距離は画像の解像度との間で比例関係にある。このことから、画像の解像度を調整し、任意の奥行き検出が可能と考えられ、現在、階層画像を用いた全方位奥行き推定手法を構築中である。

安心・安全な社会の構築において、カメラによる広域監視は重要な役割を果たす。今回提案したカメラは、我々が提案する携帯型監視システムのための全方位センシング技術である。これは、人が監視カメラを装着することで、通常環境埋め込み型の監視カメラではカバーできない、監視カメラの死角域や人の往来が少なくカメラが設置されていない場所の監視を可能にするものである。具体的には、装着者の周囲 360 度を一度に観測するセンサで、装着者の周囲数 m 程度の範囲を監視することを目的としている。今後は、画像処理も含めた携帯型のシステムの構築を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省・科学研究費補助金基盤研究 (S) 17100002 の補助を受けた。

参考文献

- 1) 八木康史, 横矢直和: 全方位ビジョン: センサ開発と応用の最新動向, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42, No.SIG 4(CVIM3), pp.1-18 (2001).
- 2) Kawanishi, T., Yamazawa, K., Iwasa, H., Takemura, H. and Yokoya, N.: Generation of High-resolution Stereo Panoramic Images by Omnidirectional Imaging Sensor Using Hexagonal Pyramidal Mirrors, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.485-489 (1998).
- 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, Vol.21, No.6, pp.690-696 (2003).

- 4) Southwell, D., Basu, A., Fiala, M. and Reyda, J.: Panoramic Stereo, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.378–382 (1996).
- 5) Basu, A. and Sahabi, H.: Analysis of Cylindrical Stereo Imaging, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.366–369 (2000).
- 6) Baldwin, J. and Basu, A.: 3D Estimation Using Panoramic Stereo, *Proc. IAPR Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.I, pp.97–100 (2000).
- 7) 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).
- 8) Mouaddib, E., Sagawa, R., Echigo, T. and Yagi, Y.: Stereo Vision with a Single Camera and Multiple Mirrors, *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.812–817 (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 横矢 直和)



小嶋裕一郎

2005 年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。現在, 大阪大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程在籍中。



栗田 尚樹

2005 年大阪大学大学院情報科学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程修了。同年沖電気工業(株)入社。



佐川 立昌(正会員)

1998 年京都大学工学部情報工科学科卒業。2000 年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程修了。2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。現在, 大阪大学産業科学研究所助手。実時間視覚処理と物体のモデリングの研究に従事。



越後 富夫(正会員)

1980 年大阪府立大学工学部電気工学科卒業。1982 年同大学大学院修士課程修了。2003 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1982 年日本アイ・ビー・エム(株)入社。同社東京基礎研究所においてロボットビジョン, 知能映像メディアの研究に従事。2003 年大阪大学客員教授。2006 年大阪電気通信大学情報通信工学部情報工学科教授。医用画像処理, 映像検索の研究に従事。電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。



八木 康史(正会員)

1983 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。1985 年同大学大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。同社産業システム研究所にてロボットビジョンの研究に従事。1990 年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。同学部システム工学科講師, 同大学院助教授を経て, 2003 年より同大学産業科学研究所教授。1995~1996 年英オックスフォード大学客員研究員, 2002 年仏ピカルディー大学招聘助教授, 全方位視覚センシング, 画像理解, 知能ロボット, 医用画像処理に関する研究に従事。1996 年度電子情報通信学会論文賞, 2003 年 ACM VRST2003 Honorable Mention Award, IEEE, 電子情報通信学会, 日本ロボット学会各会員。博士(工学)。