

全方位物体検出のための複合球面鏡ステレオ

栗田 尚樹[†] 佐川 立昌[†] 越後 富夫[†] 八木 康史[†]

[†] 大阪大学 産業科学研究所 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 8-1

E-mail: †{knaoki,sagawa,echigo,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

あらまし 本論文では、複合球面鏡を用いてステレオ視を行い、近接物体を検出するシステムを提案する。本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、装着できる小型軽量のセンサである。各々の球面鏡にはそれぞれ観測対象が投影されるため、反射光学系を用いたステレオ視により、観測対象までの距離が計算可能である。提案手法では、まず事前に、無限遠に物体があると仮定し、物体が各々の鏡へ投影される点についての対応点の参照表を作成する。物体がセンサに十分接近すると、物体が投影される点が無限遠における対応点とは異なるため、それぞれの鏡に投影される対応点の輝度値の差を取ることによって、近接物体の検出が可能である。この手法は対応点の探索を伴わないため、実時間で近接物体の検出が可能となった。最後に開発したセンサを用いて近接物体検出の実験結果を示す。

キーワード 複合球面鏡, 反射光学ステレオ, 近接物体の検出

Compound Catadioptric Stereo Sensor for Omnidirectional Object Detection

Naoki KURITA[†], Ryusuke SAGAWA[†], Tomio ECHIGO[†], and Yasushi YAGI[†]

[†] The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, JAPAN

E-mail: †{knaoki,sagawa,echigo,yagi}@am.sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract This paper describes a novel system to detect objects close to our sensor. For real-time detection and easiness to carry, we develop a small sensor with multiple spherical mirrors. Since an object is projected on each mirror, our method computes the range by catadioptric stereo. Our method creates a lookup table of corresponding points for infinite range. If a object is close enough to the sensor, the projected points of the object are different from these corresponding points. Thus, our method can detect near objects by taking difference of intensity of the corresponding points between the images of mirrors. We show our experimental setup of our sensor and the result to detect near objects.

Key words Compound spherical mirrors, Catadioptric stereo, Detection of near objects

1. はじめに

様々な応用の場面において、接近する物体を検出することは極めて重要である。例えばロボットへの応用として、ロボットに近接する物体があれば障害物として検出し、避けることが必要である。また、防犯システムなどの応用においては、接近する物体を検出することにより、センサを壁に設置して接近する人物を検出することが考えられる。あるいは、人物の身体に装着し、背後に近づく物体を監視するといった応用も想定できる。このような応用には、広い視野を持ち、かつ小型軽量のシステムであることが必要である。

本論文ではこれらの応用のため、一定の距離よりも近くにある物体を検出できるセンサを開発した。このセンサは1台のカメラと複合球面鏡から構成され、それらを用いた反射光学ステ

レオ視により距離計測を行う。この複合球面鏡を用いて画像を取得すれば、周囲360度の視野が得られる。また鏡の大きさ約1.5cm、重さ約3gと、小型軽量化に成功したため、人間の体への装着も容易である。このセンサを用いて、実時間で一定距離よりも接近する物体を検出するため、エピソード線上の対応点探索ではなく、基準距離に対する遠近を判定する手法を提案する。

全方位ステレオ視に関してはすでにいくつかの手法が提案されている。まず、カメラを回転させることによって二つの全方位画像を取得し、全方位ステレオ視を行う手法[1],[2]が挙げられる。これらの手法では時系列画像を用いて二つの画像を取得するため、実時間での物体検出には適さない。また、全方位画像生成のために放物面あるいは双曲面鏡を利用した2台のカメラを用いた、反射光学ステレオ法[3]~[5]も提案されている。

本論文で提案するセンサを人物が装着することを考えた場合、小型軽量が必須であり、2台のカメラを用いる手法は適さない。そこで、単一のカメラによる反射光学ステレオ法 [6],[7] が考えられる。これらの手法は複数の鏡を用いて複数の仮想的な視点を生成し、仮想カメラ間のエピポラ幾何により距離を計算する方法である。Southwellら [7] は2つの曲率の異なる鏡を重ねることによって、全方位ステレオシステムを構築した。この鏡を用いたシステムは単一のカメラを用いて距離計測が可能のため、小型センサに応用できる。本論文で提案する複合球面鏡は小型であるため、距離計測の精度は基線長の長いステレオシステムに比べて低くなる。そこで形状を小さく保ちつつ、対応点計算の安定性を増すため、多数の球面鏡を用いたシステムを構築した。すなわち、狭基線長で複数基線をもつステレオシステムとなる。またこれまで、全方位画像取得のために双極面鏡の開発してきた [8] が、小型双極面鏡の製作は困難であるため、小型センサの開発を目的としている本論文では球面鏡を採用した。

以下では、2. ではセンサの構成について述べ、3. では複合球面鏡を用いた物体検出法について説明する。4. では本センサを用いた近接物体検出の実験を行い、最後に 5. で提案手法について考察する。

2. 複合球面鏡による全方位視覚センサ

提案する全方位センサは複数の球面鏡から構成される。図1はカメラと試作した鏡を設置した様子である。センサは、1つの大きな球面鏡(中央鏡)と7つの小さな球面鏡(周辺鏡)から構成されており、各々の直径は10mmと4mmとなっている(図2)。

物体からの光線は各々の鏡に当たり、反射光が画像面に投影される。図3は、取得した画像の例である。周辺鏡の中心とカメラ座標系の軸とは一致しないため、周辺鏡の画像に対して歪むことがわかる。異なる鏡に当たる物体からの光線は、物体が存在する位置で交差するため、三角測量の原理に基づいて物体までの距離を計算することができる。

しかし、三角測量に用いる基線長は、物体からの光線が各々の鏡にあたる点間の長さとなり、基線長は極めて短いことから、物体までの任意の距離を正確に計算することは難しい。そこで提案する手法では、物体が無遠慮にあるか否かを判定する。この方法は、基線長が短い場合においても適用でき、また計算コストが小さくて済む。

3. 反射光学ステレオ視による近接物体の検出

カメラ1台と複数の鏡を使って近接物体を検出する方法について述べる。[9],[10]において提案されているような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の対応点を見つけるために、複数の視差を探索する。しかし、本システムのような狭基線長のステレオでは正確に距離を計測することは困難である。そこで提案手法では、無限遠における視差のみを調べる。すなわち、物体から届く光線が平行と考えられる距離であり、2眼平行ステレオでは視差が0となる距離である。物体が近づいた場合、無限遠における対応点と、実際に物体が投影される

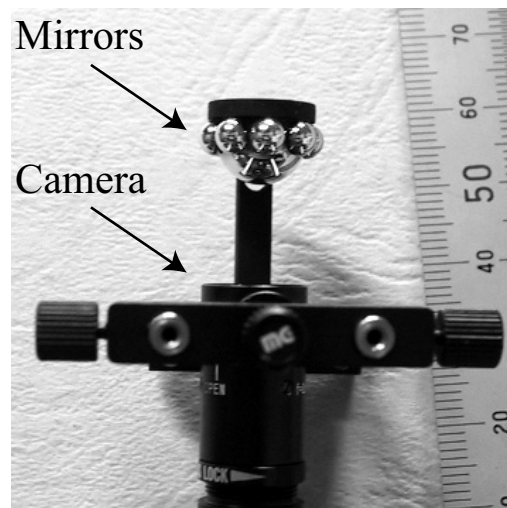


図1 複合球面鏡を用いた全方位カメラ

Fig. 1 Omnidirectional camera with compound spherical mirrors.

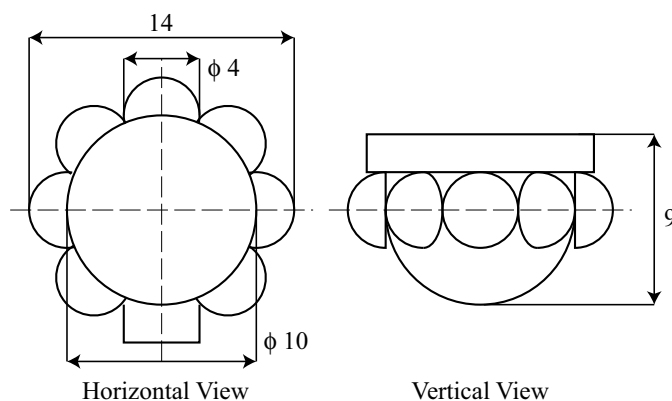


図2 複合球面鏡の構成

Fig. 2 Configuration of multiple spherical mirrors.

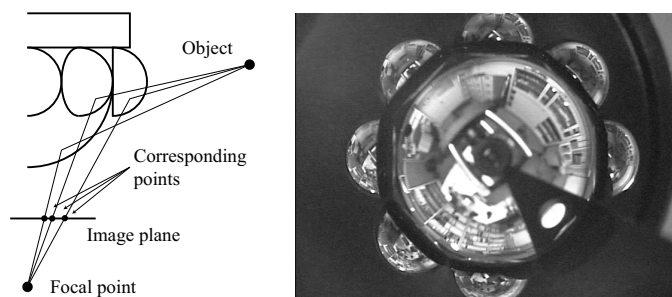


図3 センサより取得される画像例

Fig. 3 An example of image of the sensor.

位置が異なるため、対応点における画像の輝度値が異なることになる。この輝度値の差を用いて近接物体を検出する。また、複数の周辺鏡との間で比較することにより、マルチベースラインステレオ視を行い、視差検出の安定化を図る。

検出される物体の距離は基線長と画像の解像度により決定される。基線長は、鏡の形状により決定されるため固定である。そこで画像解像度を変化させることによって、判定される距離を調整する。

3.1 無限遠に対する対応点の計算

本章では物体が無限遠にある場合における各々の鏡に物体が投影される対応点の算出方法について述べる．図4は中央鏡における反射の様子を示している． O はカメラ座標系における原点， d はカメラ原点から半径 r の鏡 C の中心までの距離である．中央鏡において，物体が点 x に投影されるとき，光線は鏡の点 p に当たるので， $\angle pCO = \theta$ ， $\angle pOC = \phi$ と定義する． x は γ を使って画像座標系 $((c_x, c_y)$ は画像中心)において定義すると，

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

となり，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． $\triangle pCO$ についてみると ϕ は

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

とも表現でき，式(3)より θ を計算する． p 方向における単位ベクトルは $\vec{C}p$ なので，入射角 α は $\theta + \phi$ となる．入射角と反射角は同じ角度となるので，

$$\beta = \alpha + \theta = 2\theta + \phi. \quad (4)$$

θ, ϕ より鏡から物体へのベクトル u は，

$$(\cos \gamma \sin \beta, \sin \gamma \sin \beta, -\cos \beta) \quad (5)$$

となる．

物体が無限遠にあれば，物体から鏡への光線の向きは平行と仮定できる．図5では，周辺鏡に物体が投影される場合を示している．入射角は，ベクトル u に平行となる．原点 O から周辺鏡の中心 C' への単位ベクトル u'_0 は，

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

中央鏡と同様に，

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

より θ' を計算する．このとき， $\phi' = \beta' - 2\theta'$ ， $d' = \sqrt{d^2 + r^2}$ である．ベクトル v'_0, u に垂直な単位ベクトル w とすると， w は $v'_0 \times u$ を正規化して求められる．ベクトル v' は原点から光線が周辺鏡に当たる点 p' までのベクトルとして表現でき， $v' = (v'_x, v'_y, v'_z)$ とし，ベクトル v'_0 をベクトル w 周りに角度 ϕ' 回転させることによって計算することができる．最後に，周辺鏡へ物体が投影される点 x' は，

$$(c_x + l' \cos \gamma', c_y + l' \sin \gamma') \quad (8)$$

で，

$$l' = f \frac{\sqrt{v_x'^2 + v_y'^2}}{v_z'}, \tan \gamma' = \frac{v_y'}{v_x'} \quad (9)$$

となる．

あらかじめ対応点を計算し，参照表を作成しておき，鏡間の画像の差分を計算するときなど対応点の座標を必要とするときに，その参照表を用いる．

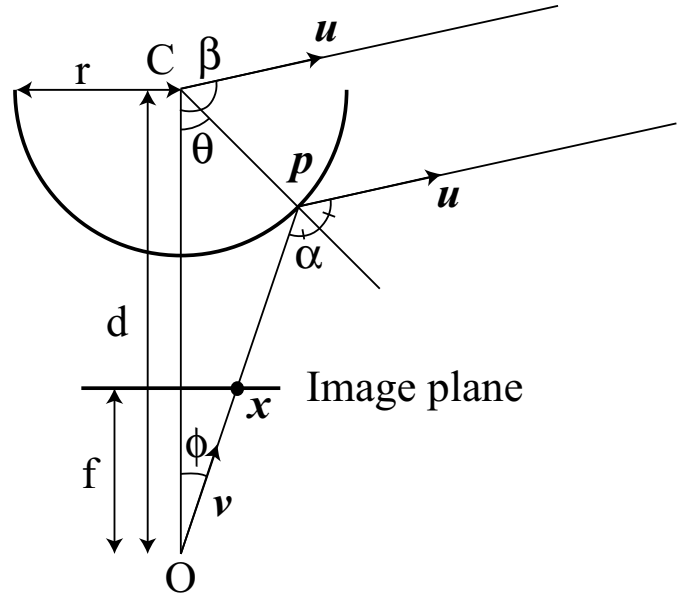


図4 中央鏡に反射した光線方向

Fig. 4 The ray direction reflected on the center mirror

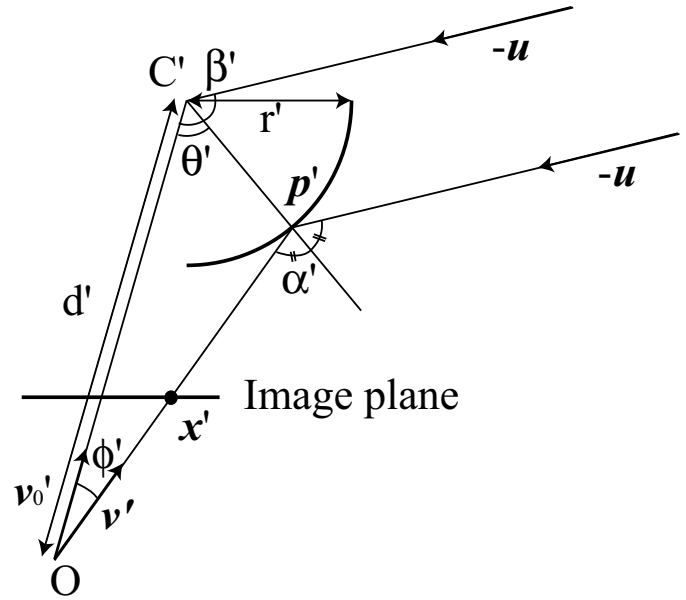


図5 周辺鏡に反射した光線方向

Fig. 5 The ray direction reflected on one of the side mirrors

3.2 近接物体の検出

物体がセンサに対して十分近くにある場合，無限遠において求めた対応点とは異なる位置へ投影される．提案手法では，各鏡の対応点において輝度値の差をとる事により物体を検出する．中央鏡の輝度値を $I(x)$ とし，周辺鏡 i における対応点の輝度値を $I_i(x)$ とする．近接する物体を検出するための基準を $E(x)$ とすると，

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_i^N |I(x) - I_i(x')|, \quad (10)$$

となる． N は，同じ物体が周辺鏡へ投影される数である．得られた $E(x)$ を2値化し，各方位角に沿って検出された画素の数

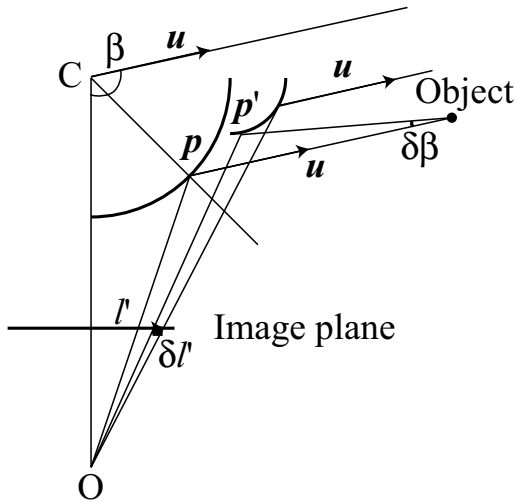


図6 物体が近距離にある場合における角度 $\delta\beta$ の違い
 Fig. 6 The difference of angle $\delta\beta$ and if an object is in finite range.

を数え、ヒストグラムを作成する。近接する物体があった場合には作成したヒストグラムを用いて、[11]で提案されているような手法を用いて人物追跡することが考えられる。

3.3 検出距離の調節

物体を検出できる距離は、無限遠から1画素分の視差が発生する距離であるといえる。このようにして、光線方向 β と投影される点の関係より計算することができる。中心と周辺鏡の画像面に物体が投影されると仮定する。図6のように物体が近接した位置にある場合、偏微分 $\frac{\partial\beta}{\partial l'}$ は式(7)から計算することができる。すなわち、物体が検出されるときを中心とある周辺鏡への入射角である。基線長を B とすると、

$$B = u \cdot (p' - p) \quad (11)$$

検出される距離 R は、

$$R = B \tan \frac{\partial\beta}{\partial l'} \quad (12)$$

となる。(12)より画像解像度を変更すると、物体を検出できる距離を調節することができ、画像解像度を元画像の半分にする、検出距離 R は B を定数と仮定し、新しい変数 $l'' = \frac{1}{2}l'$ を用いると、

$$R = \frac{1}{2}B \tan \frac{\partial\beta}{\partial l''}, \quad (13)$$

となり検出距離もまた元の半分となる。

3.4 センサの校正

対応点を計算するために、カメラの原点から中央鏡の中心までの距離 d と、焦点距離 f を知る必要がある。これらのセンサパラメータを校正するため、まず画像上の鏡の端を見付ける。図のように、画像中心から中央鏡と周辺鏡の端までの距離を各々 l_1 l_2 とすると、そのとき、角度 ϕ_1 ϕ_2 は、

$$\tan \phi_1 = \frac{l_1}{f}, \tan(\phi_1 + \phi_2) = \frac{l_2}{f}. \quad (14)$$

となる。鏡の半径をから、

$$\sin \phi_1 = \frac{r}{d}, \sin \phi_2 = \frac{r'}{\sqrt{d^2 + r^2}}. \quad (15)$$

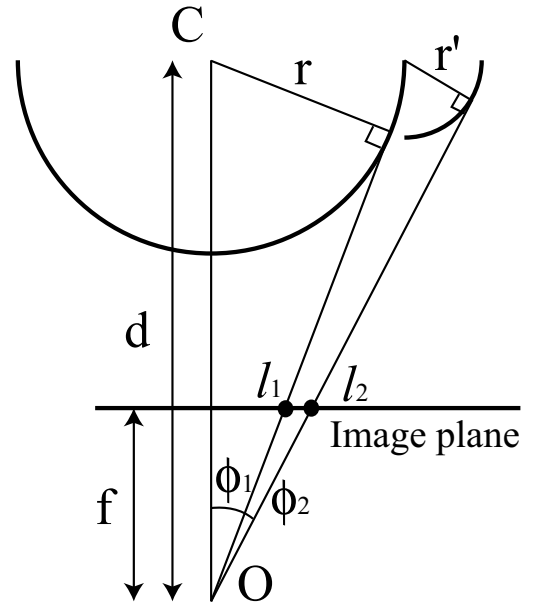


図7 センサパラメータ d と f の校正
 Fig. 7 Calibration of sensor parameters d and f

となる。だから、(15)に $\tan \phi_1$ と $\tan(\phi_1 + \phi_2)$ を代入して d について解くと、

$$\frac{\tan(\phi_1 + \phi_2)}{\tan \phi_1} = \frac{l_2}{l_1}. \quad (16)$$

となる。 ϕ_i は(15)から計算でき、焦点距離は(14)から得られる。

4. 実験

本章では、新しいセンサを用いて、センサの周りを歩いている人の検出実験を行った。図8は、結果の3つの例を示している。上段はカメラからの入力画像、中段は $E(x)$ の画像、下段は二値化画像である。(a)行は人がセンサから遠くにいるため、視差が小さく検出されないが、(b), (c)はセンサに近接しているため、視差が発生し検出されている。これらの3つの二値化画像のヒストグラムは図9で示される。この実験では、経験的に閾値を25と設定した(輝度値の幅は0-255である。)画像解像度は、640×480画素、計算時間はPentium4 3.0GHzプロセッサを用いて1フレームあたり96 msecとなった。

図10は閾値処理を行った後の各々の距離での二値化画像中から検出されるピクセル数を表している。グラフが振動するのは人の動きによるものであるが、人が遠ざかるにつれて検出されるピクセル数は減少していき、物体の検出が可能となる距離はおおよそ3.2mだと判明した。

次に、画像解像度を基画像の半分(320×240)にして同様の実験を行った。図11は $E(x)$ と二値化画像である。画像解像度が下げると小さな視差は検出されなくなるので、二値化画像中に現れるピクセル数は減る。図12は閾値処理を行った後の各々の距離での二値化画像中から検出されるピクセルの数を示す。画像解像度が減ることにより一種のローパスフィルタとして働くので、人の動きによるグラフの振動が減少するという効果が

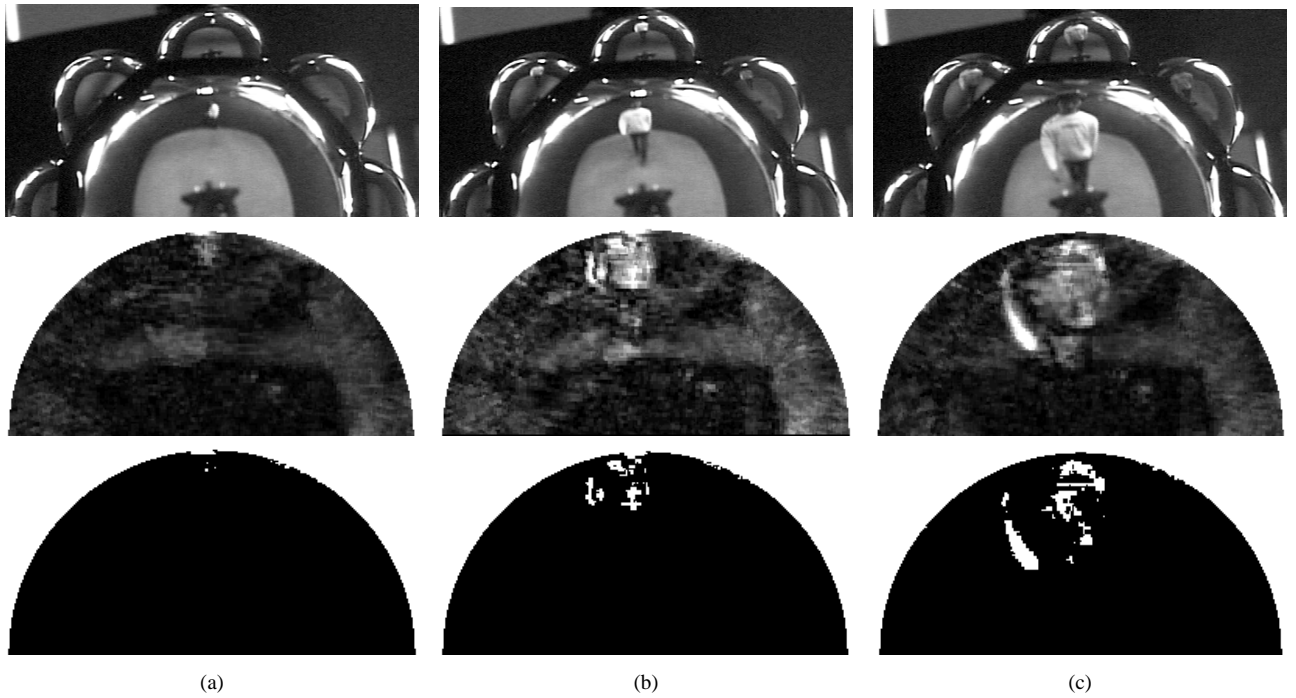


図 8 上段: カメラ画像, 中段: $E(x)$ 画像, 下段: 二値化画像 . (a) 遠方, (b) 中間, (c) 近接.

Fig. 8 Top: camera images, middle: $E(x)$ images, and bottom: binarized images. (a) far, (b) middle, and (c) near range.

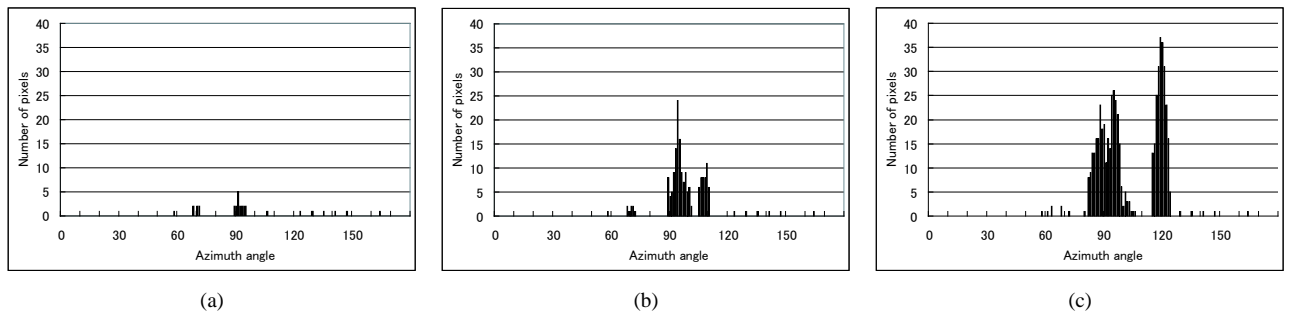


図 9 二値化画像のヒストグラム

Fig. 9 Histograms of the binarized images

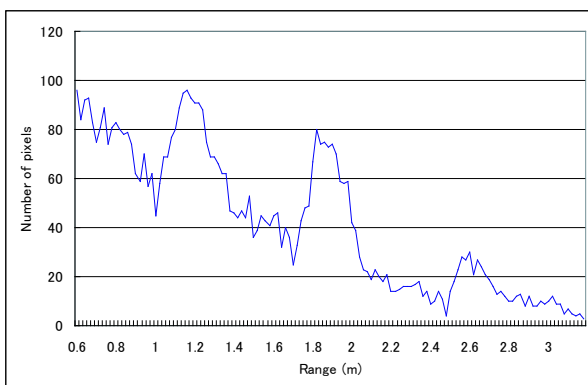


図 10 各距離で検出されるピクセルの数

Fig. 10 The number of detected pixels for each range.

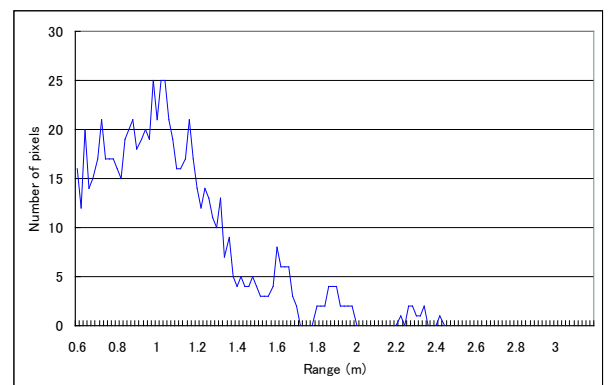


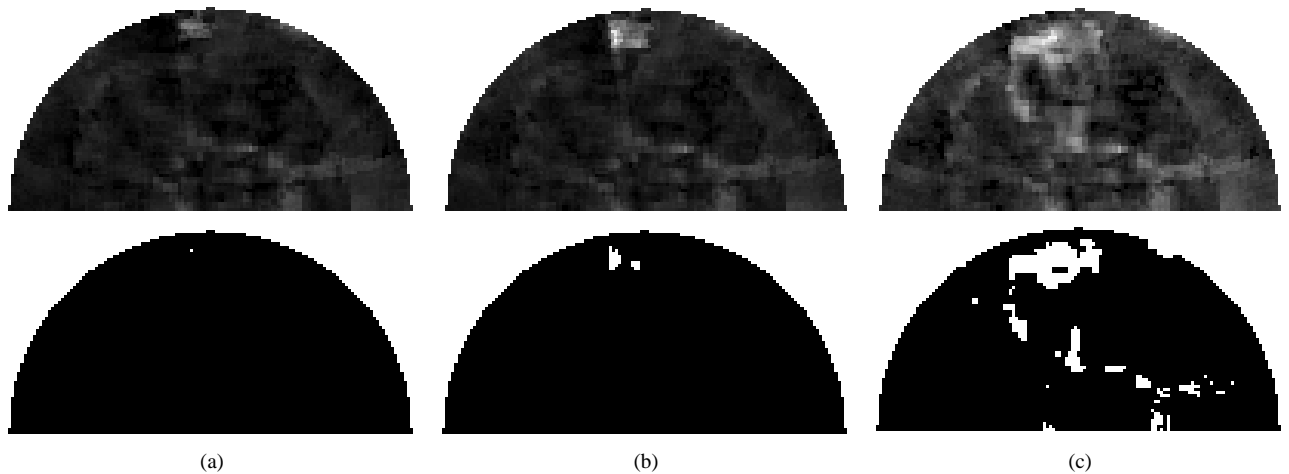
図 12 画像解像度を半分にしたときの各距離で検出されるピクセルの数

Fig. 12 The number of detected pixels for each range by using the images of half resolution.

出ている．物体の検出が可能となる距離は解像度が半分になると、およそ 1.8m に減少した．

5. おわりに

本論文では、容易に携帯、装着できる小型軽量のセンサの開



(a) (b) (c)
 図 11 画像解像度を半分にした結果．上段: $E(x)$ 画像，下段:二値化画像．(a) 遠方，(b) 中間，(c) 近接．

Fig. 11 Results of input images of half resolution. Top: $E(x)$ images, and bottom: binarized images. (a) far, (b) middle, and (c) near range.

発し，複合球面鏡を用いたステレオ視により，近接する物体を検出するシステムを提案した．対応点探索をするかわりに，無限遠における対応点の輝度値の差を取ることで，実時間で視差が発生する近接物体の検出が可能となった．本論文においては複合球面鏡を用いたが，視野の有効利用，画像の歪みの補正といった問題が残るため，反射光学ステレオに適した鏡の形状を開発することが今後の課題となる．

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生成", 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] J. Gluckman and S. Nayar: "Rectified catadioptric stereo sensors", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **24**, 2, pp. 224–236 (2002).
- [7] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala and J. Reyda: "Panoramic stereo", Proc. International Conference on Pattern Recognition, Vol. A, pp. 378–382 (1996).
- [8] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: "移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚系 hyperomni vision の提案", 電子情報通信学会論文誌 (D-II), **J79-D-II**, 5, pp. 698–707 (1996).
- [9] M. Okutomi and T. Kanade: "A multiple-baseline stereo", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **15**, 4, pp. 353–363 (1993).
- [10] O. Faugeras, B. Hots, H. Mathieu, T. Viéville, Z. Zhang, P. Fua, E. Théron, L. Moll, G. Berry, J. Vuillemin, P. Bertin and C. Proy: "Real Time Correlation-Based Stereo: Algorithm, Implementations and Applications", Technical Report N°2013, INRIA (1993).
- [11] T. Mituyosi, Y. Yagi and M. Yachida: "Real-time human feature acquisition and human tracking by omnidirectional image sensor", Proc. IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for

Intelligent Systems, pp. 258–263 (2003).