

全方位物体検出のための複合球面鏡ステレオ Compound Catadioptric Stereo Sensor for Omnidirectional Object Detection

栗田 尚樹[†] 佐川 立昌[†] 越後 富夫[†] 八木 康史[†]
Naoki KURITA Ryusuke SAGAWA Tomio ECHIGO Yasushi YAGI

1. はじめに

ロボットが接近する障害物を避けたり、または、防犯システムにおいて、センサに接近する人物を監視するには、センサに近接する物体の検出することは極めて重要である。これらの問題を解決する方法として、一定の距離よりも近くにある物体を検出する全方位センサを開発した。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。このセンサは人物の身体に装着することを想定し、小型軽量である必要があるため複合球面鏡の大きさは約1.5cmとした。また、実時間で一定距離よりも接近する物体を検出するため、エピポーラ線上の対応点を探す代わりに、基準距離に対する遠近を判定する手法を提案する。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[1]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。全方位ステレオ視はすでにいくつかの手法が提案されている。本論文で提案するセンサは人物が装着すること想定しており、単一のカメラによる反射光学ステレオ法[2, 3]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ーラ幾何により距離を計算する方法である。この方法は小型センサに適していると考えられる。そこで本論文では単一カメラを用いて反射光学ステレオ視を行う小型の複合球面鏡を開発した。

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、周辺鏡の画像は中央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、物体が無限遠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。

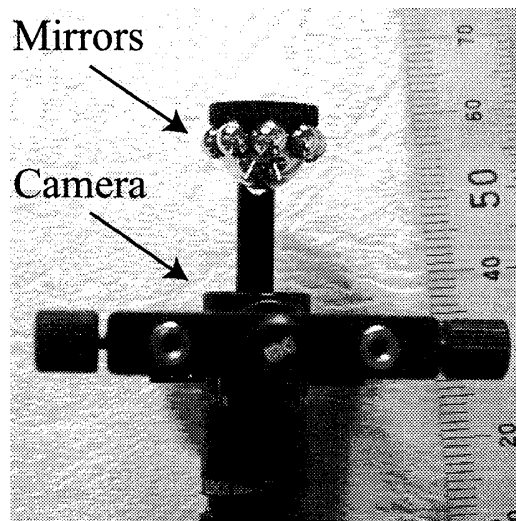


図1: 複合球面鏡を用いた全方位カメラ

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。[4, 5]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、複数の視差を探索していくが、提案する手法では、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。

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、

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

[†]大阪大学 産業科学研究所

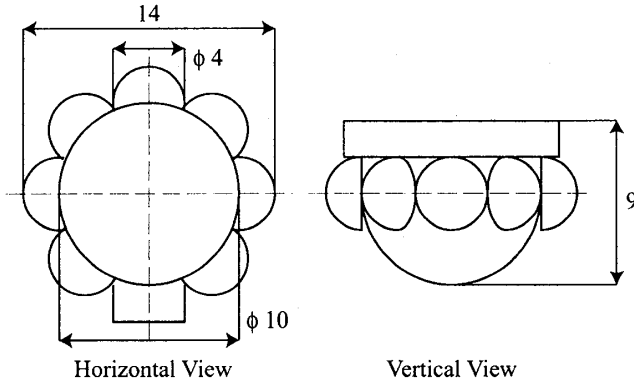


図2: 複合球面鏡の構成

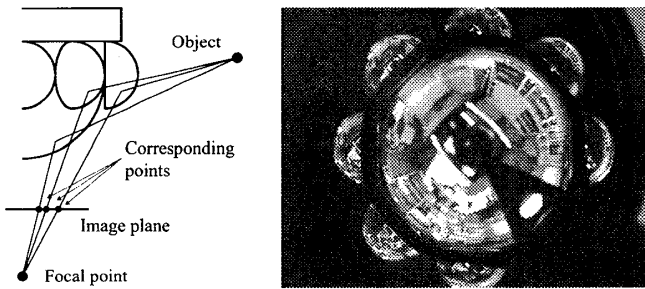


図3: センサより取得される画像例

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 $\vec{Cp}$ 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、

$$\cos \beta' = -u \cdot v_0. \quad (6)$$

中央鏡と同様に、

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

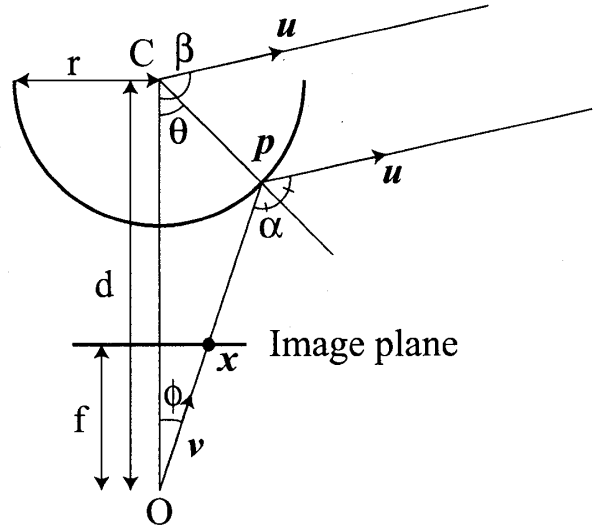


図4: 中央鏡に反射した光線方向

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、

$$l' = f \frac{\sqrt{v'^2_x + v'^2_y}}{v'_z}, \tan \gamma' = \frac{v'_y}{v'_x} \quad (9)$$

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。

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、[6]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。

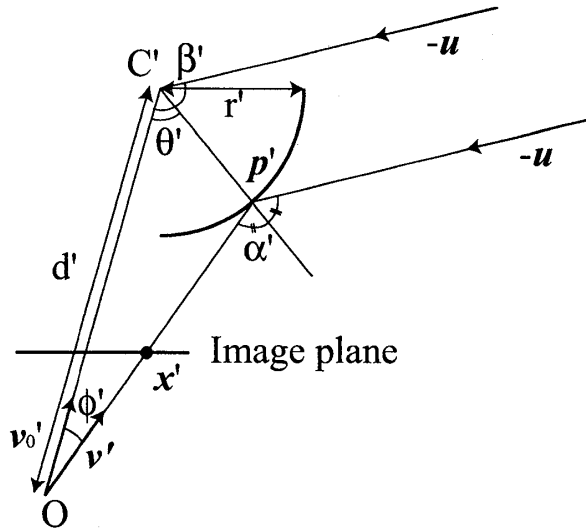
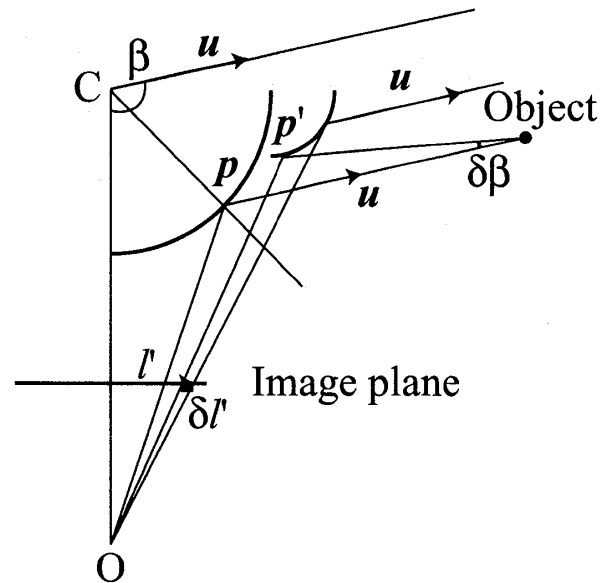


図5: 周辺鏡に反射した光線方向

図6: 物体が近距離にある場合における角度 $\delta\beta$ の違い

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、物体が検出されときの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と、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。

4. 実験

本章では、開発したセンサを用いて、センサの周りを歩いている人の検出実験を行った。図7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8で示される。この実験では、経験的に閾値

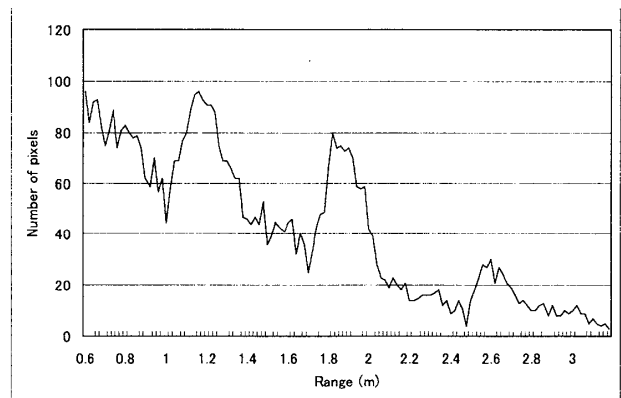


図9: 各距離で検出されるピクセルの数

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9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。

5. おわりに

本論文では、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手法を提案した。容易に携帯、装着できるように、小型軽量のセンサの開発を行った。提案手法では、無限遠での対応点を計算しておき、物体がセンサに十分に近づいた場合には、物体の投影される点是对応点から異なるため、対応点探索をするかわりに、

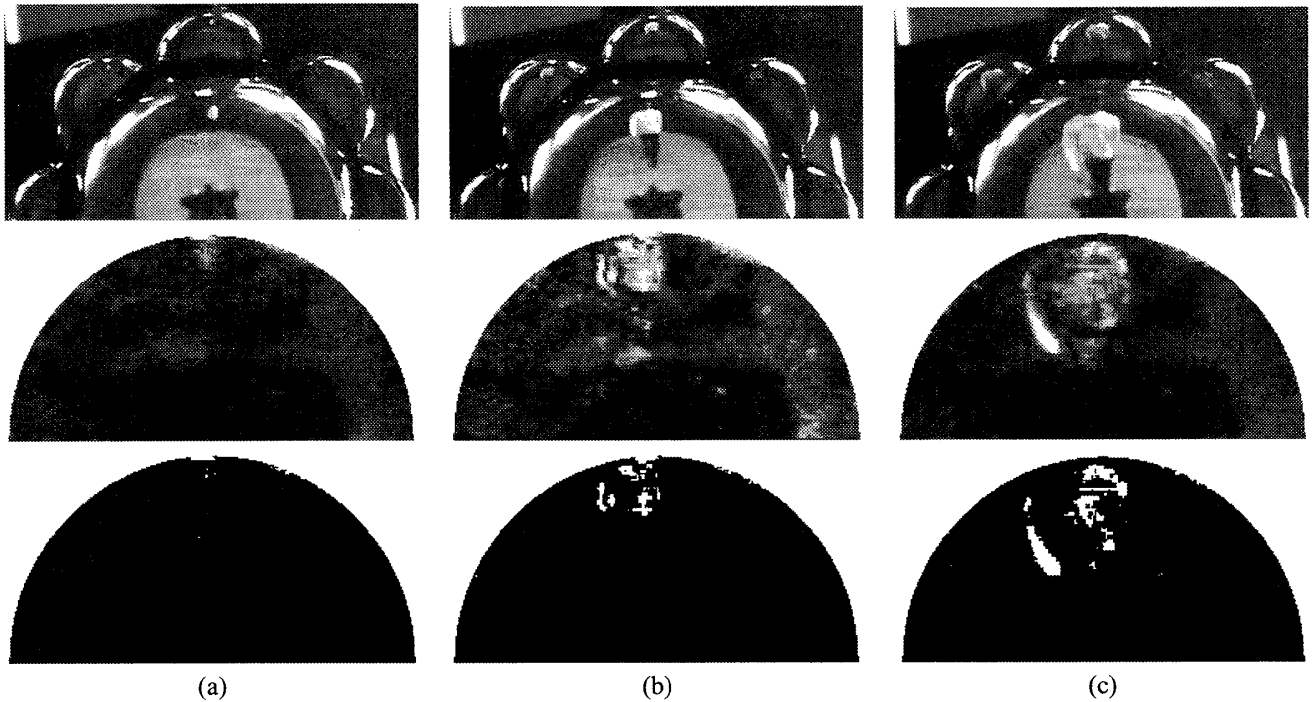


図7: 上段: カメラ画像, 中段: $E(x)$ 画像, 下段: 二値化画像. (a) 遠方, (b) 中間, (c) 近接.

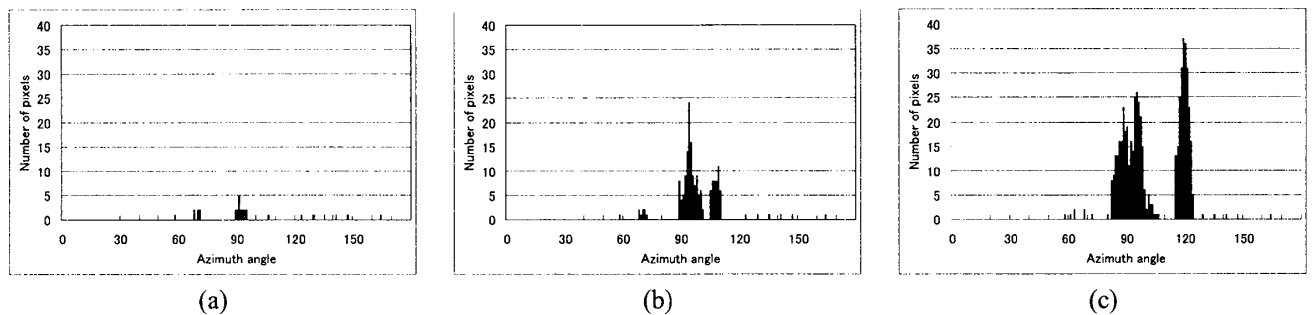


図8: 二値化画像のヒストグラム

無限遠における対応点の輝度値の差を取ることで、実時間で近接する物体の検出が可能である。本論文においては複合球面鏡を用いたが、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。

参考文献

- [1] 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).
- [2] J. Gluckman and S. Nayar: “Rectified catadioptric stereo sensors”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **24**, 2, pp. 224–236 (2002).
- [3] D. Southwell, A. Basu, M. Fiala and J. Reyda: “Panoramic stereo”, Proc. International Conference on Pattern Recognition, Vol. A, pp. 378–382 (1996).
- [4] M. Okutomi and T. Kanade: “A multiple-baseline stereo”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, **15**, 4, pp. 353–363 (1993).
- [5] 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).
- [6] 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).