

ミラーを用いた全方位カメラの原理と特徴

山澤 一誠

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

yamazawa@is.aist-nara.ac.jp

近年研究が盛んになりつつある全方位画像センサ（全方位カメラ）のうち、本報告ではミラーを用いた全方位画像センサについて紹介する。ミラーを用いた全方位画像センサの多くは周囲 360 度を実時間で撮影可能という特徴を備えながら、その一部は透視投影という光学特性を持つ。そのため、動的シーンを撮影することに適しており、移動ロボットの視覚、遠隔臨場感、遠隔監視などの目的に応用できる。

Principle and characteristics and omnidirectional camera with a mirror

Kazumasa Yamazawa

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

yamazawa@is.aist-nara.ac.jp

This report introduces the omnidirectional image sensors (omnidirectional camera) with a mirror in the omnidirectional image sensors, which are here with research becoming popular recently. Most of the omnidirectional image sensors with a mirror has the characteristics that it can take pictures of the surroundings 360 times at the real. And, the parts of the sensors have the optical characteristics of the perspective projection. Therefore, it is suitable for taking pictures of the dynamic scene, and it can be applied to the visual sense of the locomotive robot, telepresence a remote monitor, and so on.

1. はじめに

従来、画像センサとして標準レンズを取り付けたカメラが多く利用されてきた。標準レンズを取り付けたカメラは観測視野がレンズの画角により制限され、環境全体の情報を観測するために雲台の上にカメラを設置していた。それにたいして近年、環境全体を観測することを目的に周囲 360 度を撮影可能な全方位画像センサが提案されている。本報告ではいくつか提案されている全方位画像センサの中でもミラーを用いた全方位画像センサを中心に紹介する。

全方位画像センサを使用する目的により変化するが、全方位画像センサについて考慮すべき主な

点は以下の通りである。

- 視野角
全方位画像センサは水平方向に周囲 360 度を撮影できるが垂直方向には画角の制限があるものが多い。目的に応じて必要な画角があるかが重要となる。
- 周囲 360 度を撮影する時間
全方位画像センサには一度に周囲 360 度を撮影するものと複数回に分けて周囲 360 度を撮影するものがある。動的シーンを撮影する際には一度に周囲 360 度を撮影するものが適している。
- 透視投影の光学特性

平面透視投影画像は原理的に1枚では周囲360度の情報を収めることができない。そのため、全方位画像センサでは周囲360度の情報を複数枚の平面透視投影画像に分けるか、画像を歪めて1枚の画像に収める必要がある。このとき全方位画像センサの種類によっては1つの視点から周囲360度を撮影するという透視投影の光学特性を持たないものもある。全方位画像センサから得られた画像から幾何的構造の理解、人間への画像提示を行う場合などには透視投影の光学特性をもつものが適している。

- 解像度

全方位画像センサは1枚または複数枚の画像に周囲360度の情報を収める。そのため、センサの種類により解像度に大きな違いがある。また、画像を歪めて1枚の画像に周囲360度の情報を収める全方位画像センサでは、画像の中でも場所により解像度の違いがある。目的に応じて必要な解像度があるかが重要となる。

上に挙げた点以外にも解像度以外の画質、センサの大きさ、撮影した画像の扱いやすさなども考慮すべきである。これから全方位画像センサを紹介するにあたり、これらの考慮すべき点についてふれながら述べていく。

全方位画像センサは周囲360度の情報を複数枚の平面透視投影画像に分けるものか、画像を歪めて1枚の画像に周囲360度の情報を収めるものに分けることができる。魚眼レンズを用いた全方位画像センサ[1]と主なミラーを用いた全方位画像センサ[2][3][4][5][6][7]は後者にあたる。前者の代表的な方法には標準レンズを取り付けたカメラを回しながら撮影する方法[8][9]とカメラを複数並べる方法[10]がある。

図1のようにカメラを回す方法[8][9]は解像度に優れ、撮影する各画像の視点を同一点にすることができ、透視投影の光学特性を持たせることができる。しかし、カメラを回すため一度に周囲360

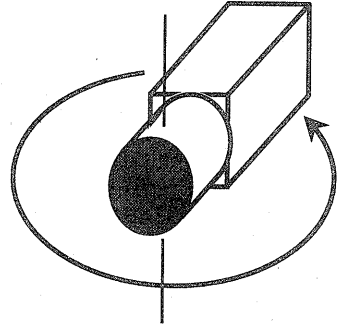


図1 カメラを回す方法

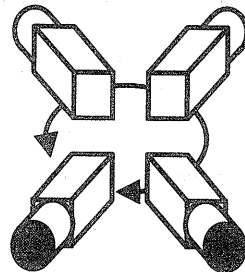


図2 カメラを並べる方法

度を撮影できず、また垂直視野角は取り付けられた標準レンズと同じである。

図2のようにカメラを複数並べる方法[10]は解像度に優れ、周囲360度を1度に撮影することが可能である。しかし、各カメラの視点がこのままでは同一でないため、透視投影の光学特性をもたず、また垂直視野角は取り付けられた標準レンズと同じである。

魚眼レンズを用いた全方位画像センサは垂直視野角が180度を超すレンズを取り付けたカメラを上に向けて設置する方法である[1]。この方法は一度に周囲360度を撮影することが可能である。しかし、1枚の画像に周囲360度の画像を収めるためカメラを回す方法などに比べて解像度が低く、また透視投影の光学特性を備えた垂直視野角が180度を超すレンズを作ることが非常に困難である。

ミラーを用いた全方位画像センサはいくつか種類がある。上で述べた全方位画像センサに対してミラーを用いた全方位画像センサの主なものは一

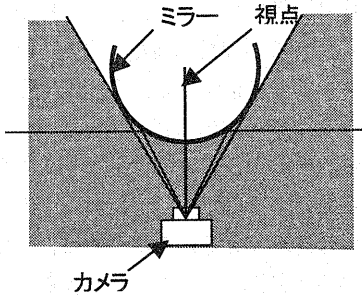


図3 球面ミラーを用いた方法

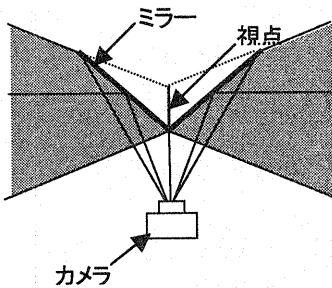


図4 円錐ミラーを用いた方法

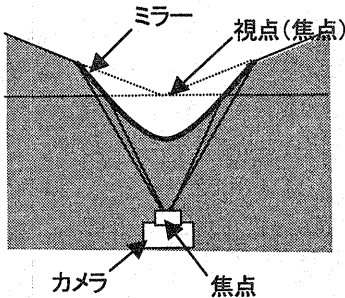
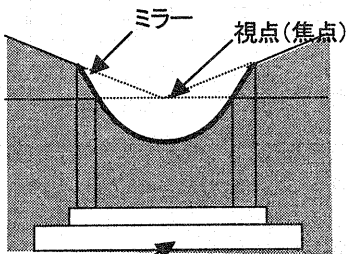


図5 双曲面ミラーを用いた方法



平行投影カメラ

図6 放物面ミラーを用いた方法

度に周囲 360 度を撮影することができ、さらにそ

の一部は透視投影の光学特性も備える。2節では基本的なミラーを用いた全方位画像センサについて紹介し、3節ではそれらの基本的なミラーを用いた全方位画像センサにさらに工夫を加えた全方位画像センサについて紹介する。

2. ミラーを用いた全方位画像センサの基本原則

ミラーを用いた全方位画像センサの基本原則にはいくつかの方法がある。以下ではその基本原則についてそれぞれ述べる。

2.1. 球面ミラーを用いた方法[2]

図3のように球面ミラーに映っている周囲の情景を下から上向きのカメラで撮影する方法である。この方法は魚眼レンズを下向きに設置したものと同様な画像が得られ、周囲 360 度を一度に撮影することが可能である。垂直視野角は球面ミラーとカメラの構成に依存するが上から足元まで広範囲を撮影することができる。しかし、カメラを回す方法などに比べて解像度が低く、カメラの像と足元を画像に多く含み側方の解像度が低い。また、透視投影の光学特性も持たない。

2.2. 円錐ミラーを用いた方法[3][4]

図4のように円錐ミラーに映っている周囲の情景を下から上向きのカメラで撮影する方法であり、周囲 360 度を一度に撮影することが可能である。垂直視野角は最大でカメラの視野角の半分となる。この方法もカメラを回す方法などに比べて解像度が低いが、球面ミラーを用いた方法より側方の解像度が高い。また、この方法も球面ミラーを用いた方法と同様に透視投影の光学特性を持たない。

2.3. 双曲面ミラーを用いた方法[5][6]

図5のように二葉双曲面ミラーに映っている周囲の情景を下から上向きのカメラで撮影する方法であり、周囲 360 度を一度に撮影することが可能である。この方法もカメラを回す方法などに比べて解像度が低いが、円錐ミラーを用いた方法と同様に側方の解像度が高く、垂直視野角はミラーとカメラの構成に依存し、足元まで撮影することができる。また、二葉双曲面ミラーは二つの焦点を持ち、上側の焦点に向かう光は全て下側の焦点に

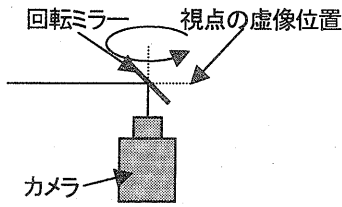


図7 ミラーを回す方法

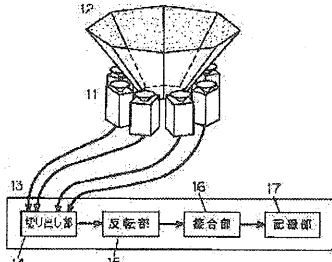


図8 角錐ミラーを用いた方法

向かって反射するという性質がある。そのため、この方法は二葉双曲面ミラーの下側の焦点にカメラの視点を置くことで透視投影の光学特性を持たせることができる。

2.4. 放物面ミラーを用いた方法[7]

図6のように放物面ミラーに映っている周囲の情景を下から上向きの平行投影カメラで撮影する方法である。この方法もカメラを回す方法などに

比べて解像度が低い、双曲面ミラーを用いた方法と同様に側方の解像度が高く、垂直視野角はミラーとカメラの構成に依存し、足元まで撮影することができる。また、放物面ミラーは一つの焦点を持ち、焦点に向かう光は全て平行光線になるという性質がある。そのため、下に設置するカメラを特殊な平行投影カメラにすることによって透視投影の光学特性を持たせることができる。

2.5. ミラーを回す手法[11]

図7のように上向きのカメラの前に回転するミラーを設置する方法である。これはカメラを回す方法とほぼ同様の特徴をもち、カメラは固定でミラーのみ回転させるために構造的に簡単になる。しかし、ミラーの回転中心とカメラの視点の虚像位置が違うため透視投影の光学特性を持たせることができない。

2.6. 角錐ミラーを用いた方法[12][13]

この方法は透視投影の光学特性をもたなかったカメラを並べる方法を改良したものである。図8の通り角錐ミラーの各側面を覗き込むようにカメラを配置し、カメラの視点の虚像位置を重ね、透視投影の光学特性を持たせている。しかし、隣合うカメラの画像間で重複する領域がないため画像のつなぎ合わせが難しい。

表1 各全方位画像センサの特徴

| | カメラを回す方法 | カメラを並べる方法 | 魚眼レンズを用いた方法 | 球面ミラーを用いた方法 | 円錐ミラーを用いた方法 | 双曲面ミラーを用いた方法 | 放物面ミラーを用いた方法 | ミラーを回す方法 | 角錐ミラーを用いた方法 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|---------------|
| 垂直視野角 | 取りつけたレンズと同じ | 取りつけたレンズと同じ | 真上から側方 | 上から足元まで広範囲 | カメラの画角の半分 | 側方から足元まで | 側方から足元まで | 取りつけたレンズと同じ | 取りつけたレンズと同じ |
| 周囲360度を撮影する時間 | カメラの回転時間 | 実時間 | 実時間 | 実時間 | 実時間 | 実時間 | 実時間 | ミラーの回転時間 | 実時間 |
| 透視投影の光学特性 | 持つ | 持たない | 持つことが困難 | 持たない | 持たない | 持つ | 持つ | 持たない | 持つ |
| 解像度 | 高い | 高い | 低い | 低い | 低いが側方中心 | 低いが側方中心 | 低いが側方中心 | 高い | 高い |
| その他 | | | | | | | 平行投影カメラが必要 | | 画像のつなぎ合わせが難しい |

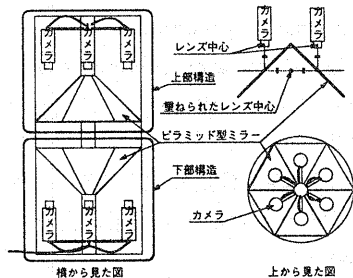


図9 角錐ミラーを用いた
全方位ステレオ

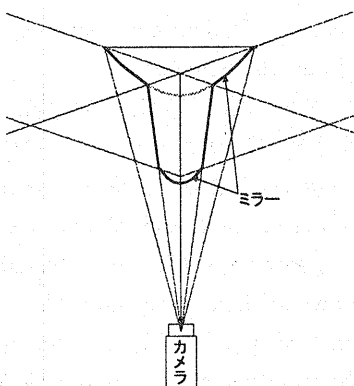


図10 大小の双曲面ミラーを用いた
全方位ステレオ

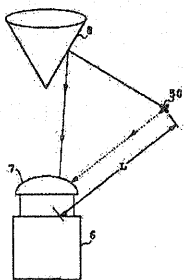


図11 回転型ミラーと魚眼レンズを用いた
全方位ステレオ

3. 工夫を加えた全方位画像センサ

本節ではミラーを用いた全方位画像センサの基本原理にさらに工夫を加えることにより、その他の特徴をもたせたものを紹介する。

3.1. 複合ミラーを用いた方法[14][15]

一般に球面ミラーなどの回転体型のミラーを用いた方法はボケなどの原因となる球面収差や非点収差などの影響を受けるため、光学系の設計には注意を要する。そのため、最適な曲率を持つ2枚のミラーを用いた反射式望遠鏡のような光学系が提案されている。この方法では回転体型のミラーを用いた方法における収差を減らすことができる。

3.2. 全方位ステレオ

ミラーを用いた全方位画像センサを組み合わせることにより周囲360度のステレオ撮影を実現したものがいくつか提案されている。

図9のように角錐ミラーを用いた全方位画像センサを上下に配置しステレオを実現した方法がある[16]。角錐ミラーを用いた方法は構造的にセンサの中心軸部分を利用しないためこの部分をもうひとつのセンサを支えるために利用したものである。

また、図10のように大小の双曲面ミラーを配置し、それを下からカメラで撮影する方法がある[17]。この方法はひとつのカメラで周囲360度のステレオを実現している。その他、図11のように魚眼レンズを取り付けたカメラと回転体型ミラーを用いた方法を組み合わせ、一方は魚眼レンズから直接、もう一方はミラーを通して周囲360度を観測する方法もある[18]。これらのひとつのカメラで周囲360度を撮影する手法の問題点は二つの視野間で解像度が極端に違う点である。

4. おわりに

以上のようにミラーを用いた全方位画像センサには様々な種類があり、それぞれに長所短所が存在する。表1にそれぞれの特徴をまとめる。どの全方位画像センサが一番よいというわけではなく、使用する目的に応じてどのセンサが適しているかを選ぶ必要があるだろう。

1つのカメラで周囲360度を一度に撮影する方法ではカメラにビデオカメラを使用すると解像度が低くなってしまうのが問題点である。だが、動的シーンでも静止画でよければ、解像度の高いデジタルカメラが使用でき、目的の解像度を得るこ

とも可能である。また、動画像においても今後ハイビジョンカメラなど解像度の高いビデオカメラを使用できるようになれば目的の解像度を得ることが可能であろう。

角錐ミラーを用いる方法も精度の高いキャリブレーションが確立されれば画像のつなぎ合わせの問題が解決される。

以上のように全方位画像センサは未だいくつかの問題点と改良の余地があり、今後これらの全方位画像センサがどのように発展するか楽しみである。

参考文献

- [1] Z. L. Cao, S. J. Oh and E. L. Hall, Dynamic Omnidirectional Vision for Mobile Robots, *J. Robotic Systems*, 3(1), pp.5-17,(1986)
- [2] J. Hong, X. Tan, B. Pinette, R. Weiss and E. M. Riseman, Image-based homing, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, 620-625, (1991)
- [3] 八木, 川戸, 円錐投影による全方位環境認識, 信学会, PRU89-46, (1989)
- [4] Y. Yagi and S. Kawato, Panorama Scene Analysis with Conic Projection, *Proc. IROS*, pp.181-187, (1990)
- [5] K. Yamazawa, Y. Yagi, M. Yachida, Omnidirectional imaging with hyperboloidal projection, *Proc. IROS*, no.2, 1029-1034, (1993)
- [6] 山澤, 八木, 谷内田, 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, 信学論 D-II, Vol.J79-D-II, No.5, 698-707, (1996)
- [7] S. K. Nayar, Catadioptric omnidirectional camera, *Proc. CVPR*, pp482-488, (1997)
- [8] Jiang Yu Zheng and Saburo Tsuji, Panoramic Representation of scenes for route understanding, *Proc. ICPR*, pp.161-167, (1990)
- [9] M. Barth and C. Barrows, A Fast Panoramic Imaging System and Intelligent Imaging Technique for Mobile Robots, *Proc. IROS*, no.2, pp.626-633, (1996)
- [10] 辻, 加藤, 環境構造変化の認知, 平成7年度科研重点知能ロボット成果報告書, 98-101, (1996)
- [11] <http://www.labs.nec.co.jp/Topics/data/r990330a/>
- [12] 吉澤, 全方位撮影装置及び全方位画像合成装置, 特開平 08-125835
- [13] V. Nalwa, Panoramic Viewing Device, US-Patent 97-946443
- [14] 竹家, 黒田, 西口, 市川, 反射型広角光学系の研究, *SICE*, 102A_3, 59-60, (1994)
- [15] P. Greguss, PAL-optic based instruments for space research and robotics, *Laser and Optoelektronik*, vol.28, pp.43-49, (1996)
- [16] T. Kawanishi, K. Yamazawa, H. Iwasa, H. Takemura and N. Yokoya, Generation of high-resolution stereo panoramic images by omnidirectional imaging sensor using hexagonal pyramidal mirrors, *Proc. ICPR*, pp.485-489, (1998)
- [17] 横矢, 山澤, 竹村, 複合双曲面ミラーを用いた全方位ステレオ画像センサ, 信学総大, P.352, (1997)
- [18] 岡, 西村, 測距型全方位視覚センサ, 特開平 10-009853