

# 反射鏡を用いた多機能イメージング

向川康博

大阪大学 産業科学研究所

## Multi-Functional Imaging System using Reflector

Yasuhiro Mukaigawa

ISIR, Osaka University

### 概要

我々が普段利用しているカメラに何らかの光学素子を組み合わせるだけで、カメラに新たな機能を与えることが可能となる。本稿では、光学素子の中でも、安価で設計の容易な反射鏡を取り上げ、カメラのレンズの前に反射鏡を置くことで、カメラに様々な機能を与えられることを紹介する。反射鏡は、その形状で、凸面鏡・凹面鏡・平面鏡に分類できる。凸面鏡とカメラを組み合わせると、1点から全方位を同時に観察できる視覚系を実現でき、周囲の状況の把握に役立つ。凹面鏡とカメラを組み合わせると、逆に全方位から1点を観察することができ、反射特性の計測に役立つ。平面鏡とカメラを組み合わせると、カメラの虚像を任意位置に配置することができ、仮想カメラを用いた撮影が可能になる。本稿では、これらの具体例を紹介するとともに、多機能イメージングの発展について考える。

## 1 はじめに

シーンから発せられた光線は、カメラのレンズもしくはピンホールで選択され、その強度が画像として記録される。我々は、人間の眼で見た情景を記録するために日常的にカメラを用いているが、同時にカメラは様々な計測装置としても利用されている。特に、カメラを単体で用いるのではなく、何らかの光学素子と組み合わせることで、様々な計測に用いることができる。

カメラと組み合わせる光学素子としては、反射鏡・プリズム・液晶・DMD・偏光板・回折格子・マイクロレンズアレイ・バンドパスフィルタなど、数え上げるときりがない。その中でも、本稿では反射鏡を取り上げる。反射鏡は比較的安価であり、取り扱いも容易であるため、コンピュータビジョン分野でも頻繁に利用されてい

る。反射鏡は、単に光線を曲げる機能しかないが、反射鏡の形状を変えることで様々な光線の曲げ方が可能となる。本稿では、凸面鏡・凹面鏡・平面鏡を例に、それらとカメラを組み合わせることで、どのような機能が実現できるかを順に紹介する。

## 2 反射鏡とカメラの組合せ

光線は鏡で反射するとその向きを変える。鏡はその表面形状によって、図1に示すように凸面鏡・凹面鏡・平面鏡に大別することができる。特に、凸面鏡と凹面鏡を配置すると、歪んだ画像を撮影することになるが、結果としてカメラの多機能化が実現できる。以下、鏡の形状ごとに具体例を紹介する。

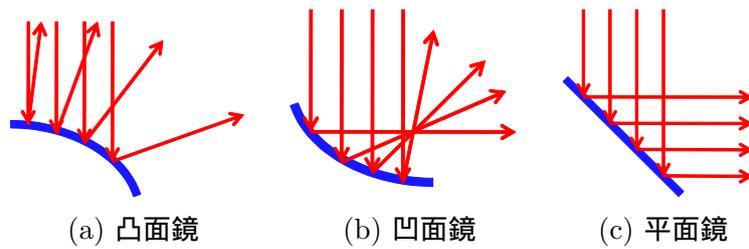


図 1: 様々な形状の反射鏡

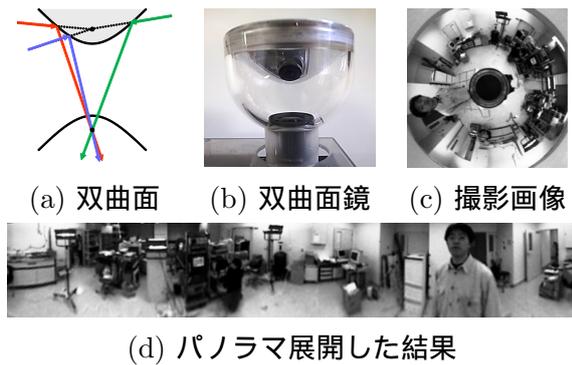


図 2: 双曲面鏡を用いた全方位撮影

## 2.1 凸面鏡

遠隔ロボットでは、周囲の状況を死角なく把握する必要があることから、全周囲 360 度を一度に撮影できる全方位視覚センサが利用される。カメラに凸面鏡を組み合わせることで、機械的な回転機構を伴わずに、全周を撮影することが可能になる。同様の機能は魚眼レンズを用いても実現できるが、残念ながら魚眼レンズは単一視点ではない、つまり、魚眼レンズで歪んだ画像は、通常の透視投影カメラの画像に変換できない。

一方、図 2 のような回転双曲面鏡を利用し、焦点位置にカメラのレンズ中心が一致するように配置すれば、単一視点を実現できる。そのため、(c) のように歪んで撮影された画像を、(d) のようなパノラマ画像にしたり、その一部を切り取って通常の透視投影カメラで撮影したように変換できる。

この全方位視覚センサの考えを発展させ、カメラに複数の凸面鏡を組み合わせることで、複数視点からの全方位映像を取得でき、かつステ

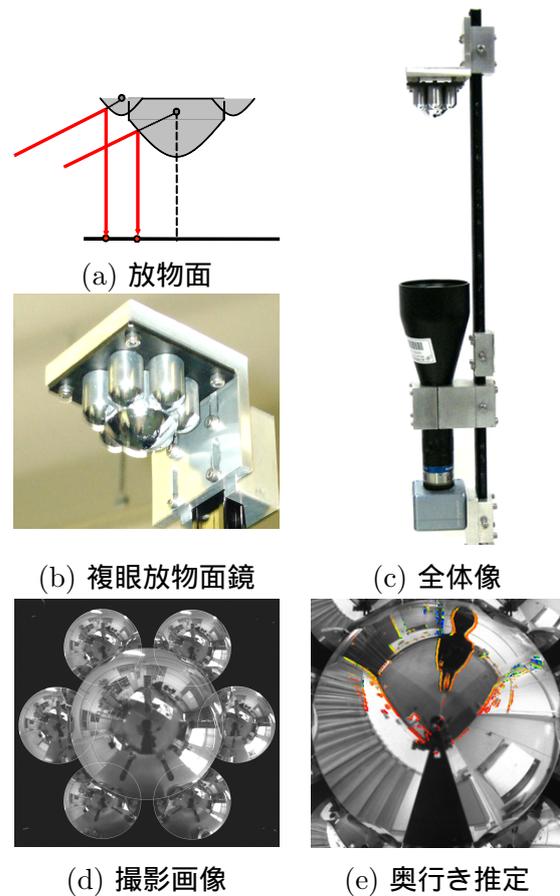


図 3: 複合放物面鏡 [1]

レオ視と同様に距離推定も可能となる。図 3 は、中央鏡の周囲に 6 個の周辺鏡を組み合わせた複眼放物面鏡である [1]。いずれも回転放物面であり、テレセントリックレンズと組み合わせることで、各鏡ごとに単一視点を実現している。各鏡ごとの視点位置が異なることから、ステレオ視の機能も持つ。中央鏡は主に全周の観測に、周辺鏡は主に距離計測に用いる。(d) は撮影画

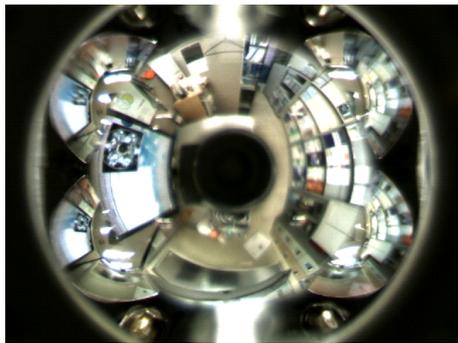
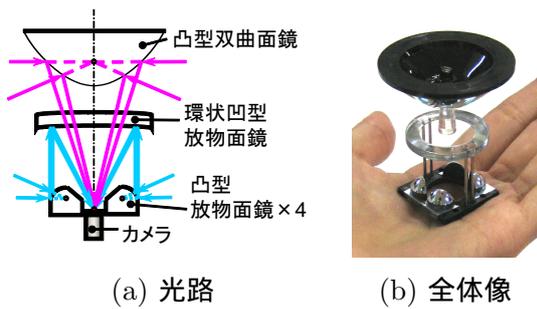


図 4: 装着型複眼全方位視覚センサ [2]

像の例であり，周辺鏡に映り込む像が鏡ごとに異なることが分かる．この視差から (e) のように奥行きを推定できる．図中では近景を暖色で，遠景を寒色で示している．

さらに，放物面と双曲面の性質をうまく組み合わせることで，テレセントリックレンズを用いずに通常のレンズを用いて，全方位撮影とステレオ視を実現できる．図 4 は，人間に装着できるように小型化した装着型複眼全方位視覚センサである [2]．我々は，この視覚センサを防犯用途やライフログのために利用している．

## 2.2 凹面鏡

前節の凸面鏡の場合には，1 点から全方位を観測した．それに対して，カメラに凹面鏡を組み合わせると，逆に全方位から 1 点を観測することができる．この機能は，物体表面の反射特性の計測に利用できる．

反射特性は物体表面の微細形状を示し，物体表面上のある 1 点を様々な方向から照明したときに，反射光がどのように分布するのかを示す情報である．反射特性計測のためには，図 5 の

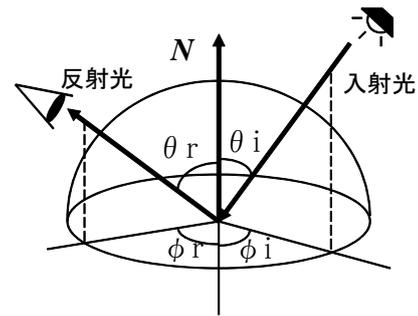
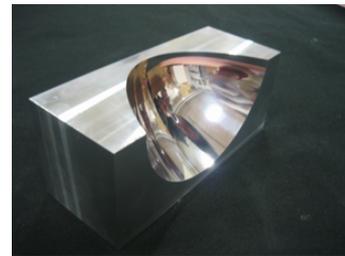
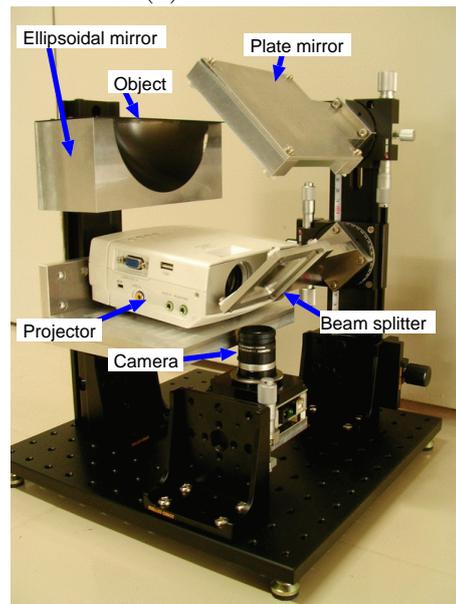


図 5: 4 つの角度で定義される反射特性



(a) 回転楕円鏡



(b) 計測装置の外観

図 7: 楕円鏡を用いた反射特性計測装置 [3]

ように，物体表面を囲む半球面上で光源とセンサをそれぞれ回転させる必要がある．これと同等の計測は，カメラに回転楕円鏡を組み合わせることで実現できる [3]．

回転楕円体は 2 つの焦点を持ち，一方の焦点

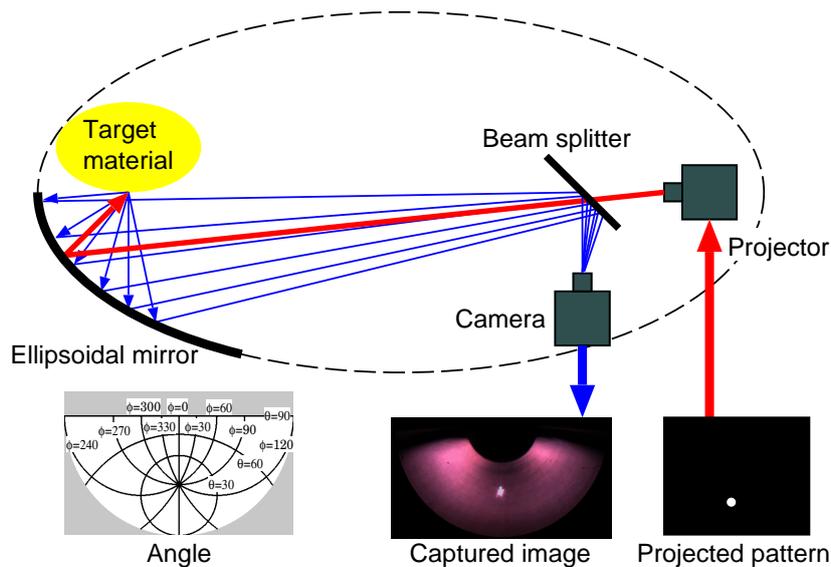


図 6: 楕円鏡を用いた反射特性計測の原理



図 8: 反射特性の F 計測と CG 応用

から出た光は楕円体表面で反射し、もう一方の焦点に到達するという性質を持つ。この特性を利用し、図 6 のように、一方の焦点に試料を配置し、他方の焦点にビームスプリッターを通してプロジェクタとカメラを配置する。プロジェクタからの投影パターン中の白画素の位置を変えることで、試料への照明の入射方向を自由に変えることが可能となる。また、試料で反射した光は、楕円鏡で反射してカメラに集まるため、全方向への反射光が 1 枚の画像として記録される。つまり、機械的な駆動系を用いることなく、あらゆる方向の入射光に対する、あらゆる方向への反射光の強度を高速に計測することが可能

となる。

図 7(a) が制作した楕円鏡であり、(b) がこの楕円鏡を組み込んだ反射特性計測装置の外観である。この計測装置を用いて、図 8(a) の硬貨の反射特性を詳細に計測した。CG への応用として、計測した反射特性を用いて竜の画像をレンダリングした結果を図 8(b) に示す。硬貨の反射特性が、竜の表面上で概ね正しく再現できていることがわかる。

### 2.3 平面鏡

前述の凸面鏡や凹面鏡とは異なり、平面鏡の場合には像は歪まない。平面鏡は均一に光線を折り返すため、仮想的に視点位置を変えることができる。つまり、複数の平面鏡からなる多面体鏡をカメラと組み合わせることで、任意の位置に多数の仮想カメラを配置することが可能となる。

複数のカメラを任意位置に配置できれば、新しい合成開口が可能となる。図 9 は、開口と被写界深度の関係を示している。レンズの開口が小さいと光量は少なくなるが、合焦する奥行き、すなわち被写界深度は深くなり、シーン全体にフォーカスが合う。一方、レンズの開口を大きくすると、光量が増えるためノイズが減少する

が、被写界深度は浅くなる。被写界深度は深ければよいのか、あるいは浅ければよいのかは、用途による。一般的な用途には、シーン全体が鮮明であることが望ましいため、被写界深度は深い方がよい。一方、アートとしての写真では、特定の被写体を際立たせるために被写界深度を浅くし、被写体以外の背景や前景をぼかすことが好まれる。計測においても、特定の奥行きのみを鮮明に撮影し、それ以外をぼかすことが望まれる場合がある。では、理論的に開口はどこまで大きくできるのであろうか。

物体表面上から見て全方向にすなわち半球状にレンズがあれば、理論的にはF値はゼロとなり、被写界深度もゼロとなる。すなわち、特定の奥行きしか合焦しない半球面状開口となり、これが理論的な限界となる。残念ながら、そのようなレンズは実在しないが、存在しないのであれば合成開口技術で作ってしまえばよい。もしも、カメラを半球面上に密に配置できれば、合成開口技術によって半球面状開口を合成できるが、実際にはコストやカメラの物理的な干渉によってそのような配置は難しい。そこで、前述のように、平面鏡で多数の仮想カメラを任意位置に配置できる技術が役立つ。

このアイデアに基づいて、図10のように、注視点とレンズ中心を焦点とする楕円体に内接する多面体鏡を設計した[4]。我々は、この形状が亀の甲羅に似ていることから、亀甲多面鏡 (turtle-back reflector) と呼んでいる。この鏡とカメラを図11のように組み合わせることで、多数の仮想カメラを半球面上に配置できる。半球面上に配置された仮想カメラの合成開口により、図9の右端のような極端に被写界深度が狭い半球面状開口を実現できる。

図12は、浅い被写界深度を実現した例である。(a)のように「ABCD」と印刷された紙の上に「EFGH」と印刷された透明なOHPシートが1mmの間隔で重ねられており、実カメラからは(b)のように撮影される。通常の被写界深度を持つ仮想カメラで撮影すると、(c)のように両文字が重なって見える。しかし、仮想カメラの合成開口では、被写界深度を極端に浅くできるため、(d),(e)のように、わずか1mmの

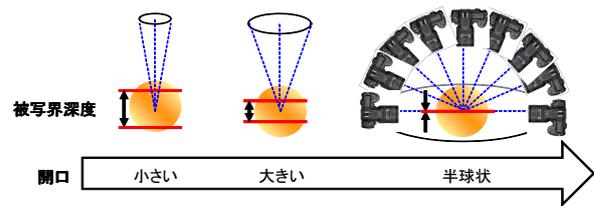


図 9: 開口と被写界深度の関係



図 10: 制作した亀甲多面鏡

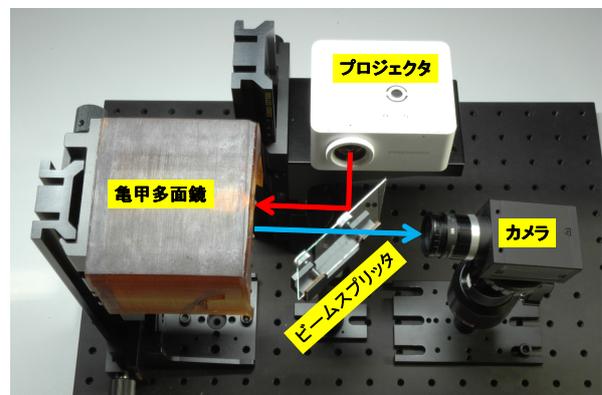


図 11: 亀甲多面鏡を用いた計測システム [4]

間隔でも、それぞれの奥行きを個別に撮影することが可能となる。

### 3 まとめ

本稿では、カメラに反射鏡を組み合わせることで、カメラを様々な計測に利用できる多機能イメージングセンサとして利用できることを示

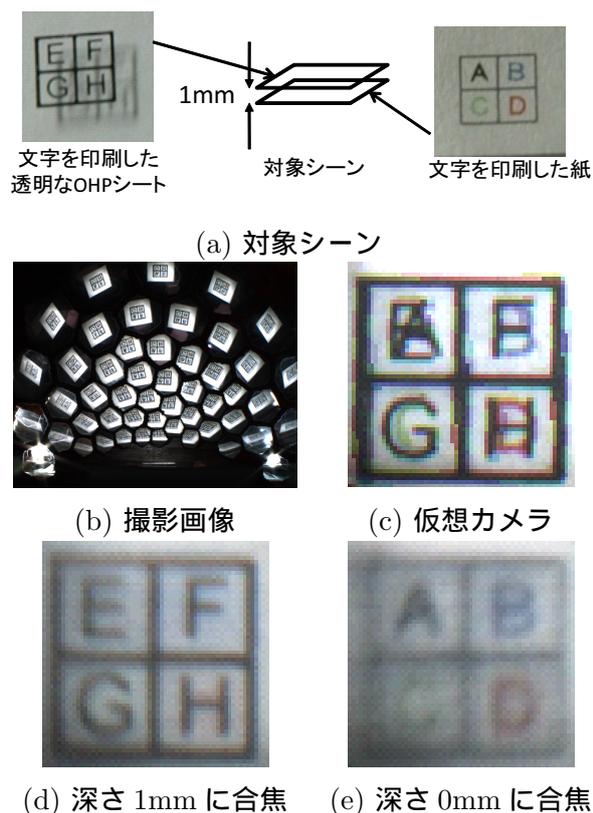


図 12: 極端に浅い被写界深度の実現

した。反射鏡として凸面鏡を用いた場合には全方位を観測できるセンサを、凹面鏡を用いた場合には反射特性計測システムを、平面鏡を用いた場合には多数の仮想カメラの合成開口による狭被写界深度撮影を実現できることを示した。

カメラはシーンの視覚情報を得るための機器として広く利用されている。NTSC方式のアナログカメラを用いて画像解析していた時代と比べると、最近のデジタルカメラは解像度・階調・S/N比・色再現性などの基本性能が大幅に向上しており、詳細な画像解析に役立っている。近年のカメラは、一般的な画像解析のためであれば、既に十分な性能を持っていると言ってよい。特に解像度については、必要以上に解像度が高くなっているとも言われている。一方で、カメラを計測機器として捉えると、より一層の進化が期待される。前述の亀甲多面鏡のように、実カメラの視野を分割して多数の仮想カメラを生成するような使い方では、実カメラの解像度はまだまだ足りない。これからもカメラの進化に

は期待しつつ、様々な光学素子との組合せを模索する必要がある。

本稿では、カメラと反射鏡の組合せによって、カメラに別の機能を与えられることを示した。一方、我々はカメラと液晶フィルタを組み合わせることでダイナミックレンジを広げたり [5]、カメラとピンホールアレイを組み合わせることで散乱光を除去できる撮影法 [6] も開発している。これらは、近年研究が活発なコンピュータショナルフォトグラフィ技術とすることが出来る。光学素子をうまく利用すると、ちょっとしたアイデアでカメラを高性能化・多機能化できることから、今後も様々な撮影技術が登場することが期待できる。今後の発展が楽しみな研究分野である。

## 参考文献

- [1] T. T. Ngo, Y. Kojima, H. Nagahara, R. Sagawa, Y. Mukaigawa, M. Yachida, Y. Yagi, "Real-time Estimation of Fast Egomotion with Feature Classification using Compound Omnidirectional Vision Sensor", IEICE Trans. on Information and Systems. Vol.E93-D, No.1, pp.152-166, 2010.
- [2] H. Azuma, Y. Mukaigawa, Y. Yagi, "Spatio-Temporal Lifelog Using a Wearable Compound Omnidirectional Sensor", Proc. OMNIVIS 2008, 2008.
- [3] Y. Mukaigawa, K. Sumino, Y. Yagi, "Rapid BRDF Measurement using an Ellipsoidal Mirror and a Projector", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, Vol.1, pp.21-32, 2009.
- [4] S. Tagawa, Y. Mukaigawa, J. Kim, R. Raskar, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Hemispherical Confocal Imaging", IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2011.
- [5] H. Mannami, R. Sagawa, Y. Mukaigawa, T. Echigo, and Y. Yagi, "Adaptive dynamic range camera with reflective liquid crystal", Journal of Visual Communication and Image Representation, Volume 18, Issue 5, pp. 359-365, 2007.
- [6] J. Kim, D. Lanman, Y. Mukaigawa, R. Raskar, "Descattering Transmission via Angular Filtering", Proc. ECCV2010, 2010.