

# 空中映像用二面コーナーリフレクターアレイの開発とその応用

前 川 聡

## Development and Application of the Dihedral Corner Reflector Array for Floating Images

Satoshi MAEKAWA

Dihedral corner reflector array, DCRA, is a novel imaging optics, whose function is conjugated with a plane mirror. It consists of many micromirrors and can form a mirror image of an object as a real image. In this report, the overview of the principle and some structures for fabrication are described, and some applications for HMD, volumetric display and interactive systems are introduced.

**Key words:** dihedral corner reflector array (DCRA), imaging optics, mirror image, real image, interactive system

近年、微細な離散的単位光学素子の集合からなり、光線を細かく分割することによって、幾何光学的な意味において近似的に結像させることができる光学素子が提案されている。これによれば、本来虚像であるはずの鏡映像を実像として結像させるなど、従来の結像光学素子では不可能であった結像様式が実現可能となる。このような光学素子の例としては、レトロリフレクターアレイとハーフミラーを用いたもの<sup>1)</sup>、あるいは、アフォーカルレンズアレイ<sup>2)</sup>や、二面コーナーリフレクターアレイ (dihedral corner reflector array, 以下 DCRA)<sup>3)</sup>、ルーフミラーアレイを対向させて4回反射にて結像させるものなどが提案されている<sup>4)</sup>。これらは、いずれも鏡映像すなわち面対称位置へ等倍の像を実像として結像させるため、光軸がなく、固有焦点距離をもたないなどの特徴をもち、立体像であっても歪みなく結像することが可能である。筆者らは、このうち DCRA を提案しており、その製造方法の開発や応用研究を進めている。本報告では、DCRA の原理および構造と、その応用例について述べる。

### 1. 二面コーナーリフレクターアレイ

#### 1.1 原理と構造

DCRA は、相互に垂直配置され素子面に対しても垂直な2つの反射面を単位光学系としてもち、それらが多数平面上に配列されている。単位光学系における2つの反射面に

おいては、それらにカスケードに2回反射することによって機能する。これを2面コーナーリフレクター (あるいはコーナーミラー、リバーサルミラー、ルーフミラー) として、反射面のそれぞれを  $x$  軸および  $y$  軸の正方向を向くように配置した場合の光線経路を図1に示す。

入射光ベクトルを  $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)^T$  とすると、それぞれ  $x$  軸および  $y$  軸を向いた反射面に2回反射した光線は、出射光ベクトル  $\mathbf{b} = (-a_x, -a_y, a_z)^T$  となって出ていく。 $z$  軸を向いた反射面 (すなわち  $x-y$  平面) による反射光は、 $\mathbf{c} = (a_x, a_y, -a_z)^T$  で与えられることから、DCR の出射光は  $\mathbf{b} = -\mathbf{c}$  となっていて、この反射光ベクトルを反転したものとなっている。このような機能をもつ単位光学系が多数  $x-y$  平面に存在することより、離散近似ではあるものの平面鏡と共役 (出射光ベクトルが反転) な機能をもつことになり、例えば本来鏡映像の虚像ができる入射光に対しては、DCRA によって鏡映像の実像を結像する出射光を与えることになる。

DCRA として機能するには、要は2枚の相互に垂直配置された鏡面が並んでいればよいので、実際に製作する上での具体的構造としては、さまざまな形態が考えられる。例えば、最初の報告ではニッケル薄板に多数の四角い穴を空け、穴の内壁を鏡面とすることで DCRA を形成した (図2参照)。この場合、ナノ加工により製作した四角柱が並ん

(独)情報通信研究機構 超臨場感映像研究室 (〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2) E-mail: maekawa@nict.go.jp

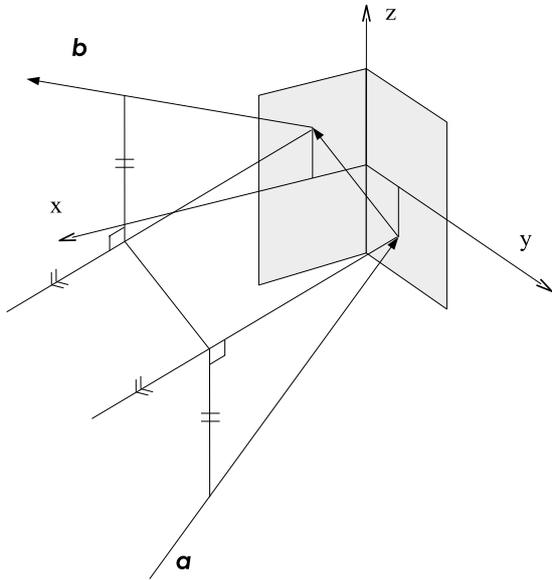


図1 二面コーナーリフレクター(DCR)における光線反射.

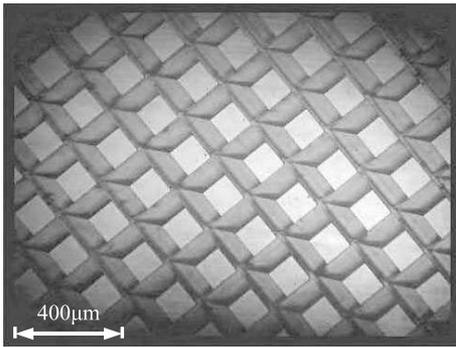


図2 ニッケル製二面コーナーリフレクターアレイ.

だマスター金型を電鍍反転し、貫通処理後にマスター金型を選択的に溶解することで作ることができるが、マスター金型から1つの光学素子しか作れないため、非常に高価なものとなる。ただし、金属から金属への転写で作成されるため、角度精度で3分程度と比較的高精度に製造可能である。

上記の電鍍金型をスタンパーとして用い、ガラスや樹脂等の透明体に転写成形したのもDCRAとして機能する。この場合、透明体四角柱の内壁において全反射が使えるため、特に反射膜を形成する必要はない。2回の転写プロセスおよび成形収縮の影響により、加工精度が落ちるのが欠点であるが、現在は樹脂射出成形による試作に成功しており、非常に安価に製造可能である(図3参照)。また、この構造の場合には光線は透明体を通過するため、入射および出射時に光線が屈折することになる。これを利用することで、反射面の素子面に対する光学的垂直性を維持しつつも、物理的形状としては、四角柱側壁を傾けることが可能

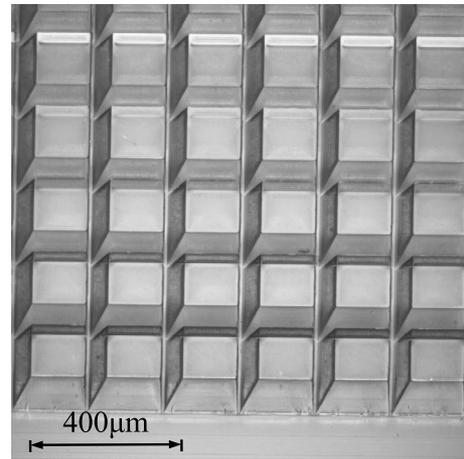


図3 樹脂製二面コーナーリフレクターアレイ.

となる<sup>5)</sup>。垂直面の存在は、転写時に離型の問題が生じやすいため、傾けることは製造の容易性を向上させることになる。ただし、屈折の効果は非線形であるため、これに伴う収差が発生し、数度以上の角度をつけることは難しい。

その他にも、例えば互いに直交する2層の平行ミラー群(スリットミラーアレイ<sup>3)</sup>)によってもDCRAが構成可能であり、直交する2反射面によるカスケード2回反射という全く同じ原理によって結像可能である<sup>6)</sup>。

## 2. 応用システム

### 2.1 ヘッドマウントディスプレイ

二面コーナーリフレクターアレイは、鏡映像の実像を結像することができる光学素子であると述べたが、より一般的には面対称変換を行う結像光学素子であるとみなせる。これにより、例えばプロジェクターの出射光を結像前にDCRAを透過させると、本来実像として結像する光線が虚像となり、プロジェクターの射出瞳が面対称位置に結像して、この結像した瞳を通して虚像が観察可能となる。木島らは、これを利用することで虚像HMDが構成できることを示唆している<sup>4)</sup>。このシステムは結像距離が長くなるため、素子の加工精度要求が高く、実用的な解像度を得ることはかなり難しい。

### 2.2 体積走査型立体空中映像ディスプレイ

体積走査型の立体ディスプレイとしては、例えばスクリーンやLED等の発光体を回転させるもの、あるいは回転ミラー等によって虚像位置を走査するものなどがあるが、これらの場合には映像の表示場所が物理的実体物によって占有されていたり、映像と観察者の間にミラーのような実体物が存在することになる。しかし、DCRAを使うことでこれらを実像として空中に結像させることができ、筆者らの研究グループではこれまでに、ミラーの回転走査によるものなどを提案している<sup>7)</sup>。

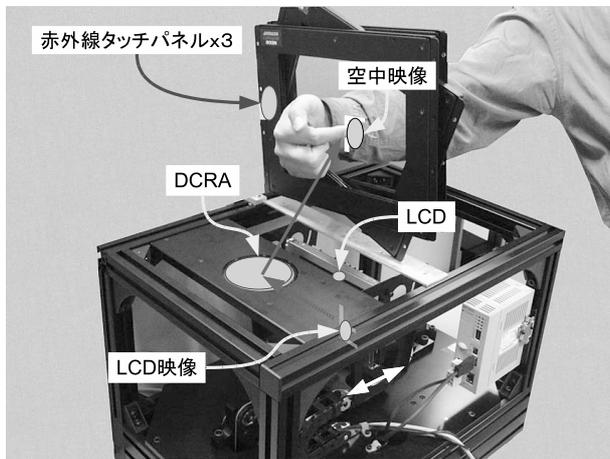


図4 背面インタラクション。

### 2.3 インタラクティブシステム

空中映像の特徴は、視覚的存在と物理的存在が切り離されており、観察者と映像の間に何も存在せず、さらに映像位置にも物理的実体物が何も存在しないことである。この特徴による効用は、映像の観察だけを行う場合には無意味であり、例えばハーフミラーによる虚像との差別化が困難となる。

したがって、空中映像を効果的に利用するためには、映像と手指等実体物による直接インタラクション、あるいは実体物と映像との融合による裸眼強化現実などが有効と考えられる。そこで筆者らは、まずガラスなし赤外線タッチパネルを用いて、簡単に手指による空中映像インタラクションができるシステムを提案した。これによれば、触覚は存在しないものの、空中映像を「触る」ことができる。このシステムを展示したところ、多くの観察者が、空中映像に対して息をふきかける、あるいは後ろ側から突くとい

う行為を自然に行うことが観察できた。そこで、レーザーによる気流センサーを用いた空中映像に対する息インタラクション<sup>8)</sup>、あるいは複数枚タッチパネルを用いて指のベクトル検出による空中映像に対する背面インタラクション<sup>9)</sup>(図4参照)、といったシステムの開発を行った。

今後は、光学素子の製造に関しては大面積化、低コスト化、高精度化を実現するための開発を行い、また新たな空中映像の利用方法の提案を目指したアプリケーション開発を行っていく。

### 文 献

- 1) I. Shanks: U. S. Patent No. 5764411 (1998).
- 2) F. Okano and J. Arai: "Optical shifter for threedimensional image by use of a gradient-index lens array," *Appl. Opt.*, **41** (2002) 4140-4147.
- 3) S. Maekawa, K. Nitta and O. Matoba: "Transmissive optical imaging device with micromirror array," *Proc. SPIE*, **6392** (2006) 63920E.
- 4) 木島竜吾, 渡邊純哉: "再帰透過性素材を用いたスクリーンレス投影式 HMD の原理", 日本バーチャルリアリティ学会第 13 回大会論文集 (2008) pp. 437-440.
- 5) S. Markon and S. Maekawa: "An improved optical device for floating displays," *Proc. of IUCS 2009* (2009) pp. 74-77.
- 6) 橋川広和: "反射型面対称結像光学素子を用いた空間映像表示装置の試作", 映像情報メディア学会技術報告, **34**, No. 12 (2010) 9-11.
- 7) D. Miyazaki, B. Hirano, Y. Maeda, K. Ohno and S. Maekawa: "Volumetric display using a roof mirror grid array," *Proc. SPIE*, **7524** (2010) 75240N.
- 8) S. Maekawa and S. Markon: "Airflow interaction with floating images," *SIGGRAPH ASIA 2009 Emerging Technologies* (2009) p. 60.
- 9) 前川 聡, S. Markon and J. Foucher: "奥行き情報を利用した空中映像とのインタラクション", 3次元画像コンファレンス 2010 (2010) pp. 105-109.

(2011年7月27日受理)