

ミラーレス・ミラー：物体が通り抜ける鏡

大川 達也^{†1,a)}

概要：鏡を扱うファンタジー作品では、しばしば自分の手などの物体が鏡の面を通り抜けて進むという描写がみられる。本稿の目的は、このような体験が可能な鏡を実現することである。実物体を伴わない仮想の鏡を提示できる光学系は既に知られており鏡の通り抜け自体は実現しているが、そのままでは通り抜ける物体と鏡との位置関係が把握しづらく、通り抜けた感覚に欠けていた。本稿では、鏡を通り抜ける感覚をより強く与えるような実装を提案する。具体的には、鏡との位置関係がよく見えるよう空間を区切って照らす照明を行い、仮想鏡の反射率が高くなるよう光学系を設計する。提案システムを実装・展示し、自分の手が通り抜ける感覚を体験できること、新しい体験が社会に受け入れられることを確認した。

1. はじめに

鏡は虚像を映し、あたかも鏡の向こう側に空間が広がっているように見える。このとき鏡は、いわゆる鏡の中の世界と現実の世界を隔てる境界として存在していることになる。この捉え方は古来より様々なファンタジー作品で登場しており、作品中ではこれら2つの世界を物体が行き来する様子として、鏡にぶつかるべき物体がそのまま鏡を通り抜けるという描写がしばしばみられる。本稿の目的は、この通常の鏡では起こり得ない物体の通り抜けるを目の前で自分の手で体験できるような鏡の開発である。

物体の通り抜けができる鏡を本稿では「仮想鏡」と呼ぶことにする。つまり仮想鏡とは、その面には物体がないにもかかわらず光を入射すると鏡のように反射光が得られるような面のことである。仮想鏡の具体的な構造としては、通常の鏡と再帰透過光学系を組み合わせた光学系 [1] が前田によって提案されており、鏡の通り抜け自体は実現されている。

光学系で実現した仮想鏡に共通する課題として、物体が仮想鏡を通り抜ける際には見え方が複雑になり、仮想鏡との位置関係が把握しづらくなる。これにより単に仮想鏡を実装しただけでは、鏡を通り抜けているという感覚は生まれていなかった。

そこで本稿では通り抜ける感覚を重視し、通り抜ける物体と仮想鏡の位置関係が見えるような照明を提案する。また仮想鏡がよく見えるように反射率が高くなる光学系の配置を検討し実装した。図1に実装した仮想鏡システムに手

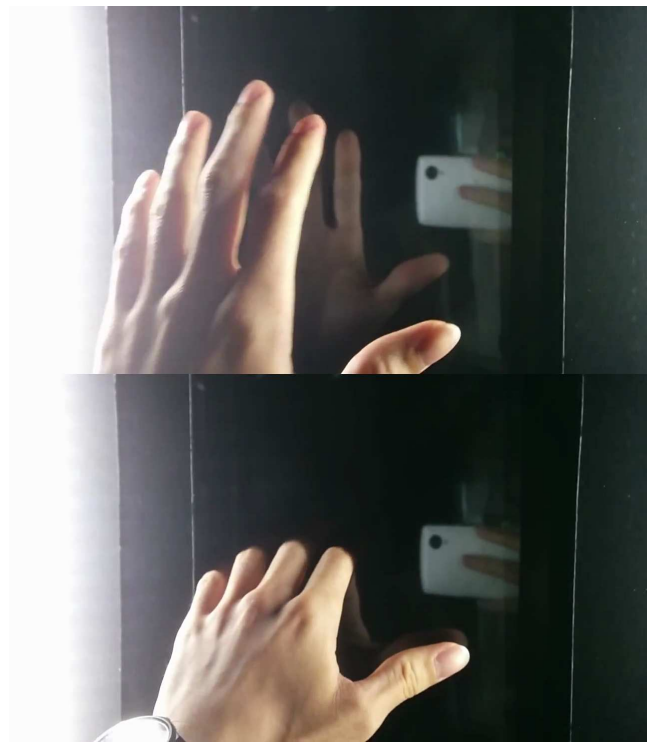


図1 実装した仮想鏡システムでの体験の様子。

Fig. 1 Experience on the implemented virtual mirror system.

を入れて体験する様子を示す。

2. 関連研究

2.1 鏡の中の世界への通り抜け

物体ではなく映像が鏡を通り抜けることで鏡の中の世界とのインタラクションを実現する手法として“through the looking glass” [2] が挙げられる。この作品では普通の鏡と特殊なディスプレイを直交させて置くことで鏡の手前と鏡

^{†1} 現在、東京大学
Presently with The University of Tokyo
^{a)} okawa@nae-lab.org

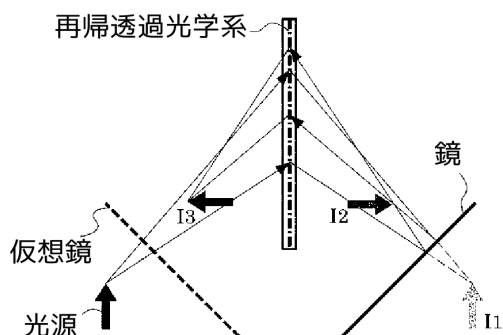


図 2 前川 [1] による仮想鏡の原理.

Fig. 2 Principle of the virtual mirror by Maekawa [1].

の中に異なる映像を提示できるようになり、画面内の映像が鏡を通り抜けて鏡の中と外のディスプレイを行き来することを可能にした。

鏡の中の世界を模擬することで通り抜けを実現する手法として、部屋の壁に鏡に偽装した穴をあけ、その向こうに面対称な部屋をもう 1 つ設けた構成がトリックアート作品として各地に見られる。この手法では実物体の通り抜けは実現されるが、鏡としての機能である反射光が無く、手を差し伸べても映らないことで鏡ではないと見破られてしまう。これに対し仮想鏡においては、自分の顔はもちろん、鏡を通り抜ける最中の物体も鏡に映り続けるという特徴がある。

2.2 空中像光学系

鏡に映る像は正しい位置に立体的に見える必要がある。カメラで撮ってディスプレイに表示するような電子的な方法ではこのような光線再現は難しく、本稿では扱わない。

仮想鏡に物体を近づけたとき映る像は実在する光学素子より手前の空中に位置しており、空中像である。つまり仮想鏡は空中像を表示する能力をもっており、既存の空中像技術が応用できる。

空中像を結像する光学系のひとつである再帰透過光学系は、入射した光線を基準面に関して面対称な方向へ曲げて透過させる再帰透過 [3] という性質を持った光学系であり、光源と面対称な位置に実像を結ぶ。再帰透過光学系には Aerial Imaging Plate(AIP) [4], DCRA 構造を持つパーティミラー [5] などが存在する。本システムでは入手が容易な AIP を用いた。

前川 [1] の提案した通常の鏡と再帰透過光学系を組み合わせることで仮想鏡を作る原理を図 2 に示す。このとき仮想鏡が形成される位置は、再帰透過光学系に対して鏡と面対称な位置である。物体から出た光線は再帰透過光学系を通ると面対称な位置に実像を結ぼうとする。この光線は途中で鏡で折り返され、そこから鏡に対して鏡像の位置に実像が結ばれる。これが再び再帰透過光学系を通り、再帰透

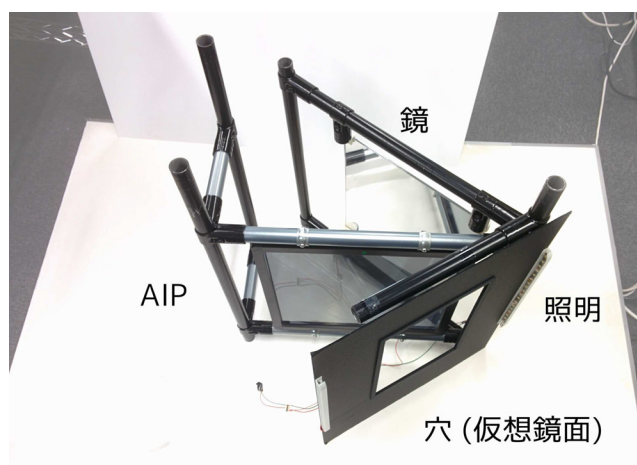


図 3 提案システムの構造.

Fig. 3 Structure of the proposed system.

過光学系に関して面対称な位置に実像を結ぶ。以上の 3 回の鏡像変換を行った結果は仮想鏡での鏡像変換 1 回と等価であり、仮想鏡が映す実像の位置は通常の鏡の虚像と同じであることが示される。

なお、この光学系による仮想鏡は、仮想鏡の法線に近い向きからの入射光にのみ有効に機能する。斜めから入射すると、入射光や反射光が再帰透過光学系に当たらなかったり、再帰透過が起こりにくい向きで再帰透過光学系に入射するためである。

3. 提案システムと実装

提案システムを実装した様子を図 3 に示す。

3.1 照明設計

本稿では、鏡を通り抜けている最中の物体と鏡の位置関係が見やすい照明をすることで、通り抜けの感覚を強化することを提案する。具体的には、光源の配置を仮想鏡のある平面内に限定して仮想鏡面を境に手前の空間のみを照らす照明を行う。

本システムでの実装を述べる。仮想鏡光学系の正面以外を暗幕で覆う。仮想鏡面には大きな板を設け、仮想鏡の部分に穴を開ける。この板は照明からの光が光学系に入らないようにするための間仕切りである。照明はこの板の手前側の外周に貼り付けるように設ける。このように照明を仮想鏡のある平面内に限定することが重要で、この配置により照明の光が仮想鏡面を横切らず、仮想鏡より奥は真っ暗になる。同時に仮想鏡より手前を明るく照らせるので、一見するとわからないが光の当たる空間と当たらない空間を明確に区分することができる。

この照明による効果は主に 3 つある。

- 光学系に余計な光が入って迷光になる事を防ぐ。
- 鏡を通り抜けた物体のうち鏡を越えた部分は本来ならその鏡像が仮想鏡よりも手前に来て複雑な見え方にな

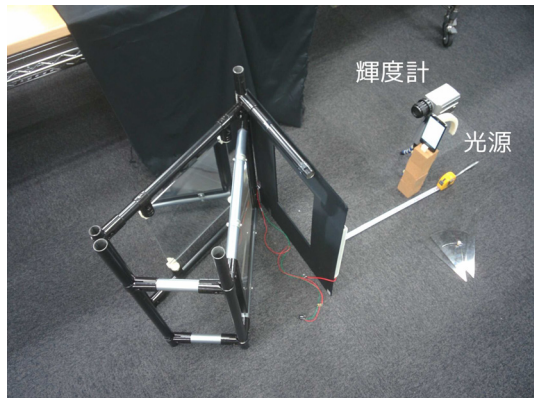


図 4 実験装置。実験中は仮想鏡システムに暗幕をかぶせた。

Fig. 4 Experimental arrangement. The virtual mirror system was wrapped with blackout fabric during the experiment.

るが、そのような部分に光が当たらないので鏡像も生じず、位置関係が見やすくなる。

- 鏡を通り抜ける物体自体に明暗の境目がはっきり現れることで、仮想鏡との位置関係が分かりやすくなる。

3.2 光学設計

仮想鏡を形成するにあたって再帰透過光学系と鏡がなす角度は任意であり、この値は仮想鏡の反射率、必要な光学素子の大きさ、迷光の見え方に影響する。そこで本稿ではこの角度を「開き角度」と呼び、最適な値を検討することにする。

仮想鏡の開き角度を変化させながら仮想鏡の反射率を計測する実験を図 4 のように行った。光源は液晶ディスプレイを用いた。仮想鏡に手を入れる際の顔の距離を想定し、光源は仮想鏡の正面約 50cm に置き、輝度計測はその約 10cm 横で行った。反射率は仮想鏡に映したときの輝度を、光源を約 100cm の距離から直接計測した輝度で割った値とした。開き角度は 5° 刻みで 30~55° の範囲を変化させた。

結果を図 5 に示す。なお反射率は同一条件下でもおよそ ±5% の範囲でばらついた。開き角度が 35~40° のときに仮想鏡の反射率が最も高くなることが分かった。

本システムにおいては反射率は高くなり、光学素子は小さく済むのが望ましい。反射率に関しては実験の結果より開き角度 35~40° が好ましい。また、開き角度に対する必要な再帰透過光学系のサイズはおおよそ $1/(\cos \text{開き角度})$ に比例し、開き角度は小さいほうが良い。

しかしながら開き角度 35° だと迷光がよく見えてしまう。この迷光とは再帰透過光学系での表面反射である。入射角 0° 付近での表面反射率はおよそ 12% と所望の鏡像と同程度の明るさに達し、目立って良くない。迷光が見える範囲を狭めて体験への悪影響を軽減するため、本実装では反射率は 1 割減、必要な寸法は 1 割増となるものの、より

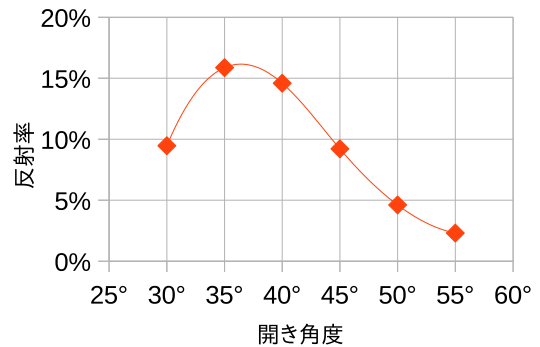


図 5 開き角度による仮想鏡の反射率の変化。

Fig. 5 Variation of reflectance of the virtual mirror with the opening angle.

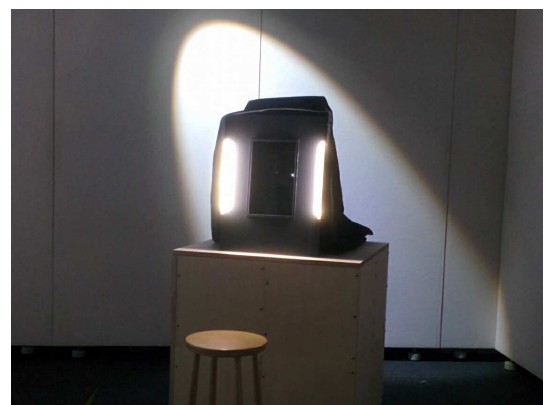


図 6 展示の様子。

Fig. 6 Exhibit.

大きな開き角度 40° を採用した。

4. 展示

提案システムを用い、東京大学制作展において 5 日間の展示 [6] を行った。図 6 に示すように展示にあたっては会場を暗くし、かつ会場の照明が仮想鏡に直接当たらないようにした。また仮想鏡は斜めからは見えないため、来場者の動線を正面からにし見えやすくした。さらに正面に椅子を設け、身長差による視点位置の違いを減らした。

ユーザの観察を行った。仮想鏡であることを伝えずに何が見えるか尋ねると、鏡との答えが多数で、一部にガラス、膜との答えもあった。軽く触れるよう促すと、指紋がつくことに遠慮する体験者がよく見られた。このことから、通常の鏡より反射率が低くても鏡と認識されうること、少なくとも実体のある反射面の存在が認識されることが確かめられた。

体験の感想としては、不気味、気持ち悪い、怖いといったネガティブな感想、凄い、楽しい、面白いなどポジティブな感想の両方が見られ、特異な体験を実現できたと言える。この他にも吸い込まれる、仮想鏡に触れる瞬間ゾワッと触覚を感じる、という声もあった。

また、来場者が撮影した体験動画 [7] が人気となり、それ以降は撮影を試みるユーザが増えた。このことは通り抜ける鏡というコンテンツが社会に受け入れられることを示唆している。

5. まとめ

本稿では仮想鏡を作る光学系を用いて自分の手などが鏡を通り抜ける体験を実現する実装を行った。実装では通り抜ける物体と鏡との位置関係が見えるような照明の工夫を提案し、また光学系のパラメータを実験により検討し、光学設計を行った。このシステムを実際に展示することで、インパクトのある体験を提示できることを確認した。

謝辞

実験・実装にあたっては東京大学苗村研究室からの機材支援を受けた。

参考文献

- [1] 独立行政法人情報通信研究機構, 前川 聡: 光学システム, 特許第 4734652 号 (2011).
- [2] 筧 康明, 苗村 健: through the looking glass, 芸術科学会論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 185–188 (2004).
- [3] 木島竜吾, 渡邊純哉, 近藤大祐: 再帰透過性素材を用いた虚像投影式頭部搭載型プロジェクタ: 動作原理と初期実装, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 32, No. 22, pp. 7–12 (2008).
- [4] 株式会社アスカネット: Aerial Imaging technologies, (online), available from <http://aerialimaging.tv/> (accessed 2017-12-25).
- [5] 株式会社パリティ・イノベーションズ: About Parity Innovations, (online), available from <http://www.piq.co.jp/about.html> (accessed 2017-12-25).
- [6] 大川達也: ミラーレス・ミラー, 第 19 回東京大学制作展 (2017).
- [7] カサネタリウム ほり @kasanetarium: 『ミラーレスミラー』そこにあるのに触れないミラー。..., Twitter(オンライン), 入手先 (<https://twitter.com/kasanetarium/status/932233604507115521>) (参照 2017-12-25).