



インタラクションに適した立体空中像の広視野角化

室伏皓太¹⁾, 橋本直己¹⁾

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究所

(〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, murofushi@ims.cs.uec.ac.jp, naoki@cs.uec.ac.jp)

概要: 近年, 再帰透過光学系を使って空中像を実現する研究が盛んに行われており, 娯楽やインタフェースへの応用が大きく期待されている. しかし, 観察視野角が狭く, 像とのインタラクションが制約されることが問題視されている. そこで本研究では, 再帰透過光学系により結像される空中像に対して, 従来観察者に届かなかった光線を対称ミラーにより観察可能にするシステムを提案し, 広視野角空中像とのインタラクション特性の評価を行う.

キーワード: 空中像, 裸眼立体視, インタラクション, 多視点

1. はじめに

近年, 空中に映像を生成し, まるで物体がそこに浮いているかのように見せることのできる空中像に関する研究が盛んに行われている. 空中像を用いたシステムは, 仮想物体を実在するかのように提示できるため, 近未来感やインパクトのある演出が可能である. さらに, 空中像は触れた際の多彩なリアクションを複数人で共有できることや, 触れても汚れないことから, 現状のディスプレイやプロジェクタでは実現できない未来の映像提示システムとしての普及が期待されている.

最近では, 空中像を生成する方法の一つとして, 空中に光を結像させる再帰透過光学素子の一種である Micro-Mirror Array Plate (MMAP) が普及しつつある. しかし, 現状の提示手法である単一ディスプレイの映像を MMAP により空中結像させる方法では, 提示される空中像が平面に限定され, 立体感が十分とはいえない. さらには, 空中像の観察範囲が装置の正面に限定されている. そのため, 提示される像とのインタラクションの種類が制約される. 空中像を未来の映像提示システムとして実現するためには, (1)空中に像が結像している, (2)像に立体感が感じられる, (3)像に直接触れることができる, (4)複数人で同時に広い角度から見ることもできる, という条件を満たす必要がある.

そこで本研究では, 図 1 に示すように, 空中像を広視野角から複数人で同時に観察し, インタラクションすることで共有可能な立体空中像の提示を目指す.

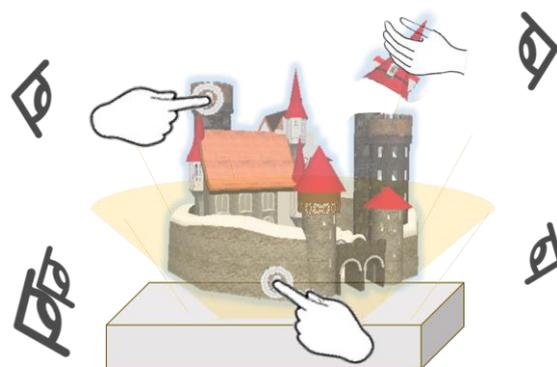


図 1: 複数人でインタラクションが可能な立体空中像

2. 関連研究

MMAP は, 映像のある一点から放たれる複数の光を再び空中で結像させることで, 光源に対して対称の位置に空中像を提示する機能を備えている. この MMAP を用いた研究として, Monnai ら[1]は, 空中像として提示された映像と超音波振動子アレイによる触覚提示を組み合わせたインタラクションを提案している. しかし, 生成される空中像は, ディスプレイで表示した単一面のみであり, 観察者の視点位置変化にも対応していないため, 十分な立体感を提示することができない. 一方, Makino ら[2]は, 光源として手や紙風船などの実物体を利用し, それらを MMAP によって空中結像させることで, 複数の観察角度に対応した立体空中像を提示する手法を提案している. 生成される空中像は, 実物体を光源としている特性を活かして, 観察視点に応じた視差を再現可能な立体像となる. この手法では, 自然な立体像とのインタラクシ

Kota MUROFUSHI, and Naoki HASHIMOTO

ョンを実現しているが、実物体を光源として用いるため、提示可能な対象が制限される。Hunter ら[3]は、実物体を用いずに立体空中像を提示するシステムを提案している。このシステムでは、回転するミラーに対して、その反射方向ごとに異なる画像を投影することで、観察者が視差により立体感を感じられる像を生成している。その立体像を MMAP によって空中像として結像させることで、直接触れるようなインタラクションが可能である。しかし、空中像の観察角度は、使用する MMAP の性質により約 40 度[4]であり、複数人での同時観察には不向きである。

3. 提案手法

本研究では、回転ミラーと MMAP を用いて両眼視差画像を空中結像させることで、立体感のある空中像を提示する方式[5]に加えて、その観察範囲を対称的に配置したミラーによって拡張することで、広視野角な立体空中像を提示するシステムを提案する。

3.1 回転ミラーと MMAP による立体空中像の提示

本研究では、立体空中像を生成する手法として、回転するミラーによって左右の目に視点位置に応じた視差をもつ映像を提示し、それを MMAP によって空中像として結像させる方法を用いる。この手法の概要を図 2 に示す。

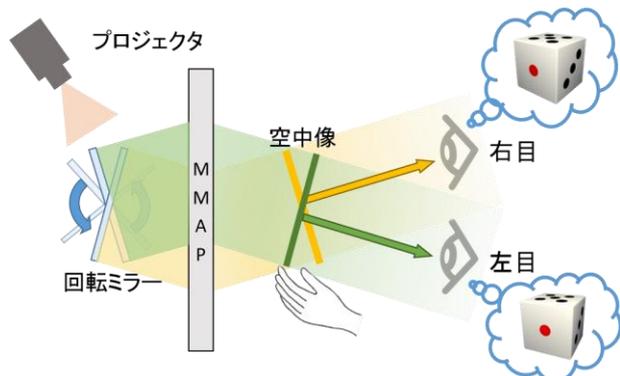


図 2: 回転ミラーと MMAP による立体空中像の提示

回転ミラー部では、プロジェクタから傾斜したミラーへと画像を投影し、ミラーを回転させることであらゆる方向に光を反射させる。プロジェクタから投影する画像は、表示する物体を、ミラーを介した各観察視点に応じて、視差画像として事前に生成したものである。そして、ミラーの回転角に同期して投影映像を切り替えることで、各観察位置に対して適切な視差を備えた映像を提示する。本システムでは、回転ミラーによる像を空中に結像させるために MMAP を用いる。これにより回転ミラー上に存在する視差をもつ立体像が空中に結像され、あらゆる方向から観察できる立体空中像として提示される。

3.2 対称ミラー構造による視野角拡張

本システムでは、空中像の視野角を拡張するために、対称に配置したミラーを用いる。MMAP が光源に対して対称の位置に空中像として光を結像することができるのは、光源から発せられる光のうち、MMAP に入射する光のみ

であり、それらの光が結像し、観察可能である範囲が視野角となる。そのため、入射しない光は空中像として観察することはできず、その光線分の視野角は失われてしまう。そこで本システムでは、従来 MMAP に入射しない光を、複数のミラーにより反射させ、MMAP へ入射させることで空中像の観察範囲を拡張する。ミラーは、図 3 で示すように、光源側と空中像側においてそれぞれ対称となるように配置し、これを対称ミラー構造と定義する[6]。

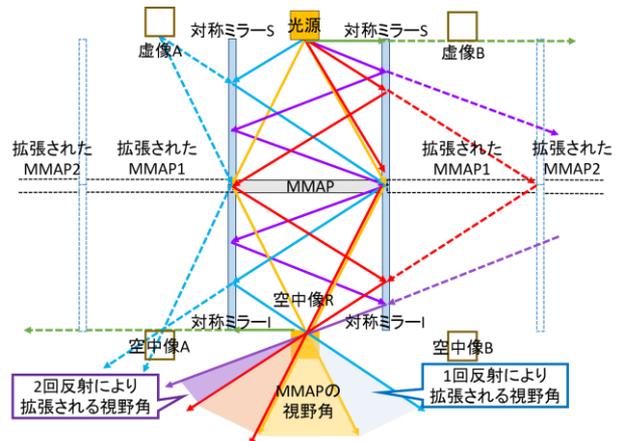


図 3: 対称ミラーによる広視野角化の原理

光源側に置かれた対称ミラーSでは、光源からの光が入射することで、虚像A、Bが光源の左右に生成される。この虚像A、Bからの光を、MMAPにより対称の位置に空中結像させ、空中像A、Bを生成させる。そして、空中像側にも対称ミラーIを配置することにより、空中像A、Bを生成する光が折り返され、空中像Rの位置に結像する。このとき、空中像A、Bの視野角の分だけ、空中像Rの視野角が拡張される。こうして、本来の観察対象である空中像Rの視野角拡張を実現する。

このように拡張された視野角は、対称ミラーによって拡張された MMAP が生成されると考えたとき、光源からの光が、拡張された MMAP によって対称の位置に空中像として結像されたときの視野角と等しい。この時の光路は図 3 における赤矢印のように考えることができる。そのため、光源からの光が光源側の対称ミラーIで1回反射して生成される空中像の視野角は、拡張された MMAP1へ入射したと考えると結像される空中像の視野角と等しく、同様に、対称ミラーで2回反射して生成される空中像は、さらに拡張された MMAP2へ入射してできる空中像の視野角と等しい(図3中の紫矢印)。

3.3 対称ミラーの配置角度による視野角の変化

対称ミラーの配置において、MMAP と対称ミラー間の角度によって、空中像の視野角が変化する。対称ミラーの配置角度ごとの視野角の違いを図 4 に示す。

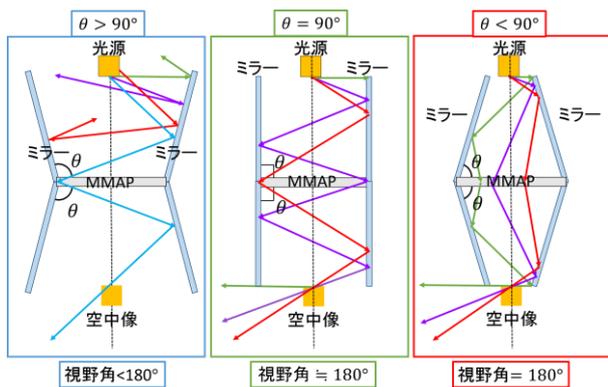


図 4: 対称ミラーの配置角度による視野角の違い

$\theta = 90^\circ$ のとき、視野角は前節で述べたように、拡張された MMAP によって結像する空中像の視野角と等しいと考えられる。そのため、無限に近い個数だけ拡張された MMAP を考えると、その視野角は 180 度となる。しかし、ミラーにおける光の反射回数が膨大になるため、MMAP へ入射するまでの光路が長くなり、MMAP の性質によって空中像に歪みが生じ、品質が低下してしまう。そのため、実際に視認可能な視野角は約 180 度となる。また、 $\theta > 90^\circ$ のときには、ミラーで反射された光のうち、MMAP へ入射する方向へ向かう光線数が $\theta = 90^\circ$ のときと比べて減少する。そのため、ミラーの角度を 90 度よりも大きくしていくと、空中像の視野角が徐々に縮小していく。一方、 $\theta < 90^\circ$ とすると、ミラーで反射された光のうち、MMAP へ入射する方向へ向かう光線数が $\theta = 90^\circ$ のときと比べて増加する。そのため、複数回反射して MMAP へ入射していた光が、より少ない反射回数で入射するようになる。従って、前述した 180 度付近での空中像の歪みを低減することができる。ただし、この際のミラーの角度は、光源の大きさによって制限される。

4. 実装

4.1 システムの実装

実装したシステムの構造を図 5 に示す。

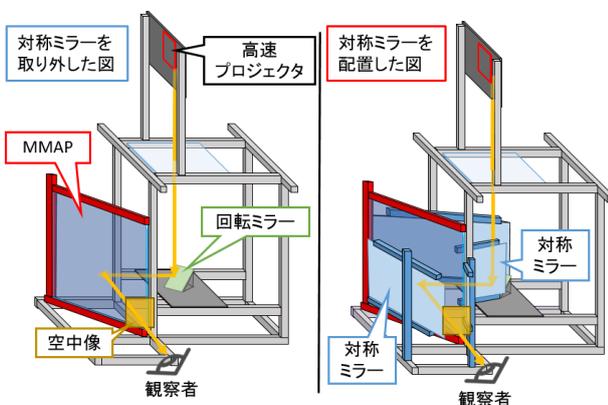


図 5: システムの構造図

回転ミラーの上部に高速プロジェクタを設置し、投影され

た映像が、回転ミラーによって反射され、MMAP へ入射する。MMAP は、迷光が空中像生成位置の方向へ提示されないように、回転ミラーに対して 45 度傾けて配置している。そのため、MMAP に入射した光は、対称の位置である図 5 の空中像位置に結像する。また、プロジェクタにより提示する視差画像枚数は 96 枚で、ミラーの回転速度は毎秒約 40 回転である。次に、本システムを、図 5 における観察者側から見た様子を図 6 に示す。

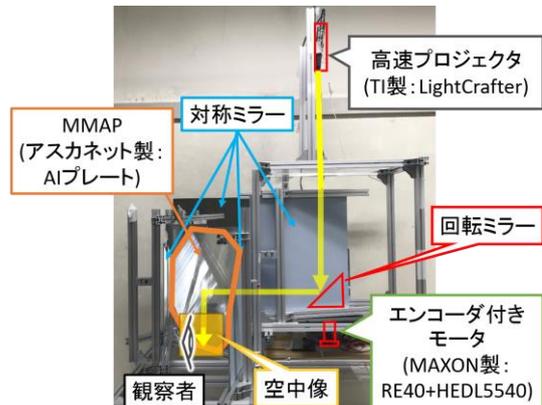


図 6: システムを横から見た全体図

対称ミラーは、図 4 における $\theta < 90^\circ$ になるように配置した。使用した回転ミラーのミラー幅は縦横 9.2cm である。また、回転ミラーの中心から MMAP の中心までの距離は 35cm であるため、空中像と MMAP の距離も 35cm となる。

4.2 空中像の視野角計測

MMAP のみによる空中像と、対称ミラーを用いて視野角拡張を行った空中像の、それぞれの視野角を計測した。計測方法は、カメラで空中像を観察して像が見切れた左側の角度と右側の角度の位置を記録し、空中像の提示位置との直線を引くことで、各直線間の角度を計測した。計測結果は、MMAP のみを用いた視野角が 43.2 度であり、対称ミラー構造を用いた視野角が 113.9 度であった。この結果より、対称ミラーを用いた本手法により、視野角が約 70 度拡張されていることがわかる。

次に、空中像が見切れない範囲における本システムによる空中像を図 7 に示す。

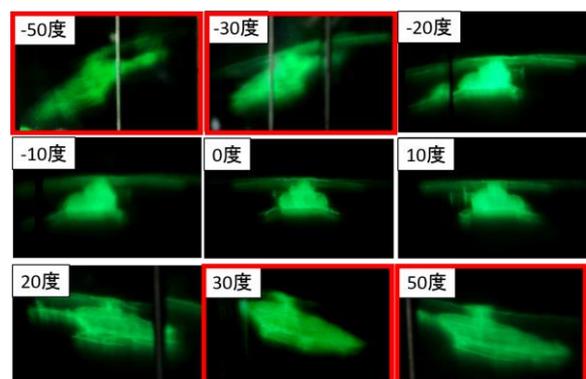


図 7: 観察された空中像

-20度から20度までがMMAPのみで観察できる空中像であり、-50度から50度が対称ミラーを配置することで観察可能な空中像である。図7より、対称ミラー構造によって、大きく像の横に回り込んだ観察が可能になり、視野角が拡張されていることを確認した。それにより、図8のような、3人での観察が可能になった。



図8. 複数人での空中像の観察

5. 評価実験

本研究では、対称ミラーによる空中像の広視野角化によって、インタラクションに適した効果が生じているかを検証した。実験は、対称ミラーを用いずにMMAPのみで生成した空中像と、対称ミラーにより視野角が拡張された空中像の2つを観察し、アンケートに答えるものとした。アンケート評価は、表1に示すように、空中像の立体感や像に手を伸ばしたときの感覚、視野角に関する内容に5段階評価で回答してもらった。被験者には、複数の角度から空中像を観察し、像へ手を伸ばして触れてもらうといった、実際の利用場面を想定したインタラクション動作を体験してもらい、それらをもとにアンケートに答えてもらった。また、被験者は20代男女6名とした。

表1. アンケート内容

番号	質問内容
Q1	像の立体感があった
Q2	像の存在感があった
Q3	像の位置に手を伸ばせた感じがした
Q4	像に触れられた感じがした
Q5	像の凹凸を感じた
Q6	観察範囲は広がった

実験では、それぞれ奥行き感や形状の異なる3つのモデルを使用した。それらを図9に示す。



図9. 評価実験に使用した三つのモデル

アンケート回答者による評価の平均値を図10に示す。

各質問の平均値に対して有意水準5%でt検定を行ったところ、オオカミではQ4とQ6、ヘリコプターではQ4、金魚ではQ6において有意差が確認できた。この結果より、像に触れられたような感覚を向上させる効果や観察範囲の広さが感じられ、よりインタラクションに適した提示が可能になったと考えられる。

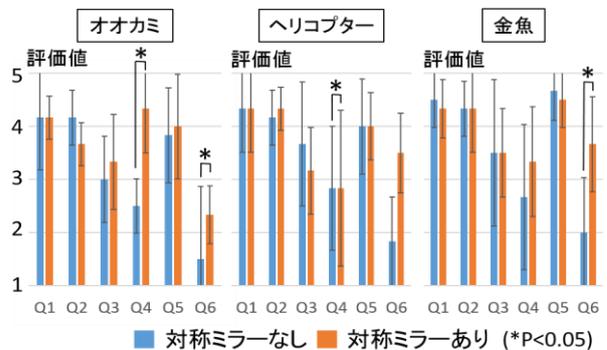


図10. アンケート結果

6. おわりに

本研究では、回転ミラーによる立体像をMMAPにより空中結像させ、その観察角度を対称的に配置したミラーによって拡張した広視野角な立体空中像を提示するシステムを提案した。また、評価実験によりインタラクションに向けた効果が向上されたことを確認した。

今後は、より詳細なインタラクション特性の評価や空中像に触れた際のリアクションの実装を行っていく。

参考文献

- [1] Y.Monnai et al.: "HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen", the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.663-667, 2014.
- [2] Y.Makino et al.: "HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback", CHI '16 Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1980-1990, 2016.
- [3] S.Hunter et al.: "Mid-air interaction with a 3D aerial display", ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies Article, No. 17, 2017.
- [4] <https://aska3d.com/ja/>
- [5] 室伏皓太ら: "多視点観察可能なインタラクティブ立体空中像の提示", 映情学技報, vol. 42, no. 6, ME2018-50, pp. 21-24, 2018.
- [6] N.Hashimoto et al.: "Aerial 3D Display using a Symmetrical Mirror Structure", ACM SIGGRAPH 2018 poster, 2018.