



影プロジェクションによる空中像の立体感錯視

矢野裕太郎¹⁾, 星彩水¹⁾, 小泉直也¹⁾

1) 電気通信大学 (〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, y.yano, a.hoshi@media.lab.uec.ac.jp, koizumi.naoya@uec.ac.jp)

概要: 物体の位置や形状の知覚において影は重要な要素であり, 影は物体の位置や形状の知覚に効果を与えることが知られている. 本研究では現実空間に映像が表示されている空中像に形状の異なる影を投影することにより, 影が空中像の形状の知覚にどのような効果を与えるかを調査した. その結果, 影の形状によって空中像の形状の知覚が変化することがわかった.

キーワード: 影, 空中像, 厚み知覚

1. はじめに

物体の位置や形状を知覚するための要素の 1 つに影があり, これまでに影が知覚に与える効果について多くの研究がなされている. 影を用いることにより, 物体の位置の知覚や, 形状や実在感の知覚に効果を与えられることが確認されている.

これらの影が知覚に効果を与えることを調査した研究の多くは, CG 物体を画面内に表示して実施している. これは CG によって物体の形状等の特性を操作することが可能である実験上のメリットがあるためである. 一方で, 実験がモニター内部に限定されてしまう欠点がある.

実空間で物体に影を投影することにより物体の知覚に効果を与えることを示した研究も存在しており, 影の投影によって二次元物体が浮き上がっているように見えた, 影の投影によって空中像の正しい奥行位置の把握が可能になったということが報告されている. この知見に基づく, 実空間に映像が浮かび上がっている空中像を活用し, 空中像に対して影を投影することで空中像が苦手としている「厚みを感じにくい」という問題の解決にも貢献できるのではないかと仮説が立てられる.

本研究では, 空中像に形状の異なる影を投影することで空中像の形状の知覚にどのような効果を与えるかを調査する.

2. 関連研究

2.1 空中像

空中像とは, 光源からの光が反射・屈折することにより現実空間に結像された像のことである. 空中像を結像するための技術には, マイクロミラーアレイプレート (Micro Mirror Array Plates, MMAPs) [1], 回帰反射による空中撮影 (Aerial Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection, AIRR) [2], ルーフミラーアレイ (Roof Mirror Array, RMA) [3] などがある. 空中像は裸眼で観察でき, また, 観察者に表示装置の存在を意識させないことで映像がその場に存在しているように感じさせる効果がある.

空中像は物質的には存在しないため, 他の光を遮って影

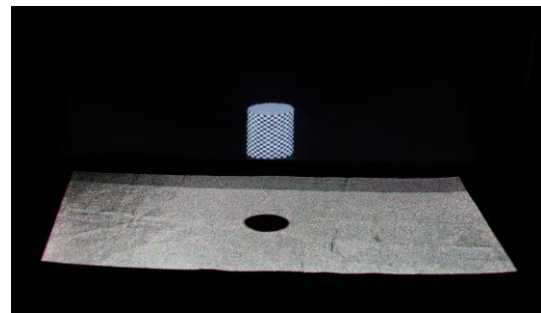


図 1: 影を投影した空中像

を作ることはできない. そのため, 空中像に影を落とすためにはプロジェクタなどを用いて現実世界で作られる影を模した画像を投影する必要がある.

2.2 影の提示による知覚の変化

影の提示による知覚の変化の研究はこれまでいくつも実施されている. Kersten ら [4] は, 物体の空間的近傍に動く影を投影すると, 物体に対する他の奥行き手がかりがないにもかかわらず, 静止した物体が動的に浮くという強い錯覚を報告している. このような影の空間的操作は, 写真上の物体の 3 次元的な配置を変化させることが知られている [5]. また, Sugano ら [6] は HMD 環境において影が物体の実在感を向上させること, また, 影が複数の物体の位置関係を速く容易に知覚するための手がかりとなっていることを示した.

これらの研究は, 物体が画面内で表示される環境での影の提示による様々な知覚の変化を調べたものである. 一方, 空中像のような実世界に映像が表示されている環境において, 影が知覚に効果を与えるかどうかを調査した研究も存在する. Kawabe ら [7] は実在する二次元の物体に影を投影することで物体のレイアウト錯視を起こすことに成功した. また, Kim ら [8] はプロジェクタを用いて空中像に影を投影することにより空中像がどの位置に表示されているのかが分かりやすくすることに成功した. 本研究では影の投影による空中像の厚みの知覚の変化に焦点を当てた.

3. 実験装置

3.1 光学設計

本システムでは、3Dディスプレイを使った立体的な空中像に対してプロジェクタを用いて影を投影する。図2は実験装置の光学設計である。3Dディスプレイ、MMAPs、プロジェクタからなる。ディスプレイから出た光が、MMAPsで再帰透過して空中像を結像する。なお、MMAPsの設置角度は 45° 、3Dディスプレイの設置角度は 15° 、プロジェクタは空中像の真上に設置した。

3.2 実装

空中像を結像し影を投影するために、ハードウェアとソフトウェアから構成される実験装置を実装した。実装した様子をそれぞれ図3、及び図4に示す。

ハードウェアは、3DディスプレイにLooking Glass Factory製Looking Glass 15.6インチ、MMAPsにASKANET製ASKA3Dプレート(488mm×488mm)、プロジェクタにHDピコレーザープロジェクター工作キット for Piを使用した。

ソフトウェアは、3Dディスプレイに表示する映像作成とプロジェクタで投影する映像作成にUnityソフトウェアを用いた。図4(左)は影の画像であり、この画面をプロジェクタで投影することで、空中像に影を重ねることができる。また、影の画像は事前に画像編集アプリケーションを用いて、影のエッジの部分をやや不鮮明にした。これにより現実の影に近い、もっとも暗い部分が影の大部分を占め、より明るいばやけた部分が一番遠くの外縁にのみ見られるような影を再現している。図4(右)はUnityのシーン画面である。この画面を3Dディスプレイに送ることで、ディスプレイに映像を表示させることができる。なお表示物体は、表示物体と同じ形状を持つ現実物体と同じような見え方になるように、シーン上で傾きを変更している。

4. 実験

4.1 予備実験

本実験における空中像に投影する影の奥行方向の長さのパラメータの指針を作るために、観察者が空中像に投影されている影の奥行方向の長さが空中像に対して違和感を感じるときの値を最長最短それぞれに関して調査した。

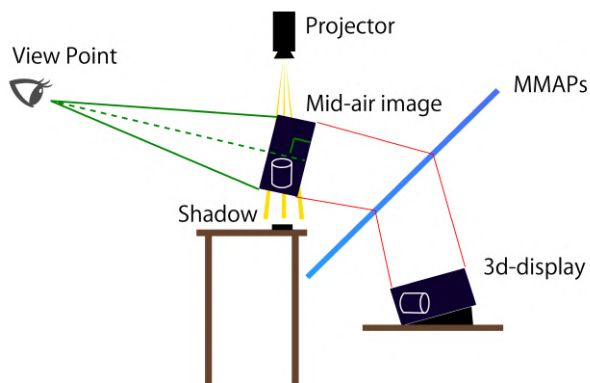


図2: 光学設計

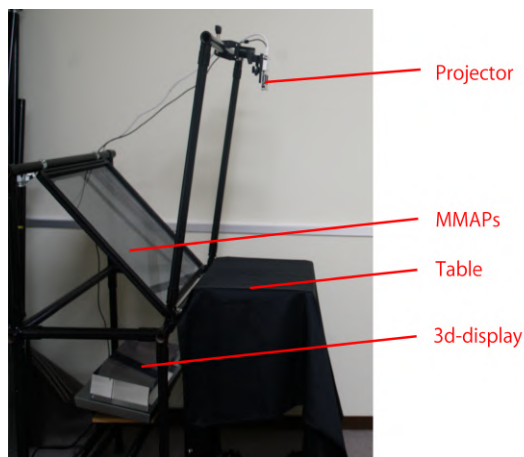


図3: 実装 (ハードウェア)

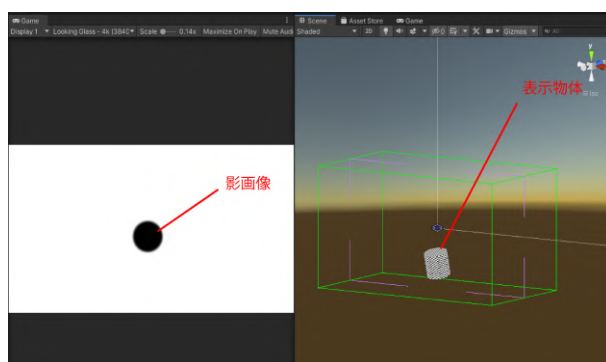


図4: 投影する影画像 (左), 3Dディスプレイに表示する画面 (右)

水平方向の直径が4.0 cm、奥行方向の直径が r cm、高さ4.0 cmの楕円筒の形をした空中像の真下に、プロジェクタを用いて水平方向の直径が4.0 cm、奥行方向の直径が r' cmの楕円筒の影が投影されている。実験参加者には r' を自分で変更することにより、実験参加者が影の奥行方向の長さが空中像に対して違和感を感じるときの長さを最長最短それぞれ決定してもらうよう指示した。 r の値は以下のように設定し、楕円筒の中心の位置はどの r の値であっても同じであった。

$$r = \{2.0, 4.0, 6.0, 8.0\} \text{ [cm]}$$

なお実験参加者は21歳から24歳の男性4名であった。

4.2 予備実験結果

図5は実験参加者全員の回答結果を平均したものをプロットし、最小二乗法で直線フィッティングしたグラフである。青・赤の線はそれぞれ違和感を感じるときの影の奥行方向の長さの最小値と最大値である。横軸の値は楕円筒の奥行方向の長さ r であり、縦軸の値は空中像に対して違和感を感じたときの影の奥行方向の長さ r' である。

実験結果から見られる傾向として、違和感を感じる影の奥行方向の長さは最長最短の両方において、楕円筒の奥行方向の直径が長くなるにともない増加した。また、違和感を感じる影の奥行方向の長さの最長と最短の差は楕円筒の奥行方向の直径の長さが増加してもそれほど開くことはな

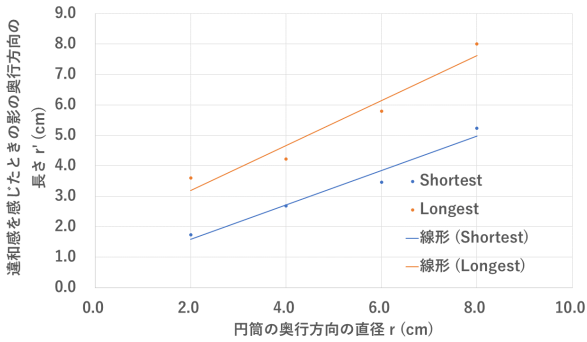


図 5: 予備実験の結果。各点は実験参加者の回答を平均したもの

かった。この結果を参考に、本実験で空中像に投影する影の奥行方向の長さのパラメータを決定した。

4.3 本実験

形状の異なる影を投影した空中像の厚みの知覚変化を検証するために、奥行方向の長さが異なる影を投影した空中像の奥行方向の見かけの厚みの計測を恒常法で行った。

4.3.1 実験条件

図 6 のような影を投影していない楕円筒の奥行方向の直径を r cm、影を投影する楕円筒の直径を 4 cm、空中像の真下に投影する影の奥行方向の長さを r' cm とし、これらの値は予備実験の結果を参考に以下のように設定した。楕円筒、影ともに水平方向の直径は常に 4.0 cm であった。なお楕円筒の中心の位置はどの r の値であっても同じであった。

$$r = \{2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5\} \text{ [cm]}$$

$$r' = \{2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0\} \text{ [cm]}$$

これらの条件を掛け合わせた 35 セットにおいて 1 セットずつ実験した。これらのセットの提示順はランダムで、1 人当たりの実験時間は 10 分程度であった。実験参加者は 21 歳から 27 歳の男女 11 名 (男性 10 名, 女性 1 名) で、ステレオテストを行った結果、全員が立体視機能を有していた。

4.3.2 実験手順

図 6 のような影を投影していない空中像と影を投影している空中像を実験参加者に 1 つずつ提示する。影が投影されている空中像は標準刺激で、影が投影されていない空中像は比較刺激であり、2 つの空中像の表示順はランダムであった。それぞれの空中像の表示時間は 4 秒で、1 つ目の空中像が消えて 2 つ目の空中像が表示されるまでの間隔は 1 秒であった。各セットごとに実験参加者にはどちらの空中像が奥行方向の厚みが大きかったかを強制二択で回答してもらい、「影を投影していない空中像のほうが奥行方向の厚みが大きかった」と回答した確率を算出する。実験の様子を図 7 に示す。

4.4 本実験結果

図 8 は「影を投影していない空中像のほうが奥行方向の厚みが大きかった」と回答した割合および累積正規分布関数による s 字カーブフィッティングの結果のグラフである。横軸は影を投影していない空中像の奥行方向の直径 r 、縦軸は「影が投影されていない空中像の方が奥行方向の厚みが

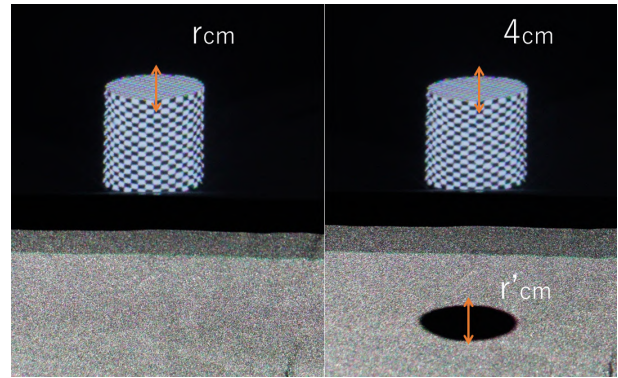


図 6: 影無しの空中像 (左), 影付きの空中像 (右)

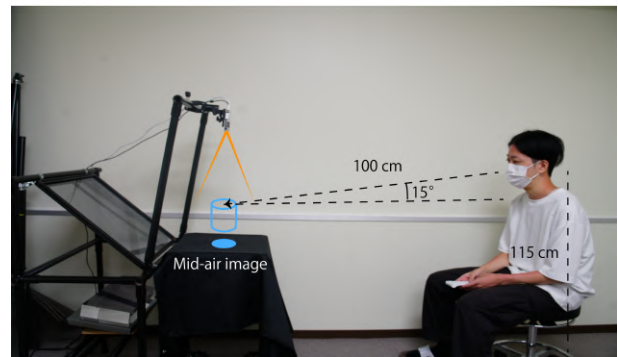


図 7: 実験の様子

大きかった」という回答の割合を示す。各曲線は影の奥行方向の長さ r' ごとに示されている。グラフ中央の破線は、割合が 50% に対応する主観的等価点 (Point of Subjective Equality, PSE) を示している。つまり PSE において、実験参加者は影が投影された空中像の厚み (4.0 cm) と r が等しいと評価したということである。表 1 に各条件における割合が 50% に対応する主観的等価点をまとめたものを示す。

この結果から、影の奥行方向の長さによって空中像の奥行方向の厚みの知覚が変化していることがわかる。しかし影の長さが 4.0 cm から 6.0 cm の範囲では空中像の厚みの知覚がほかの範囲と比べるとそれほど大きく変化していない。これは影の長さがある一定の長さを超えると、影と物体の対応が取れず、「この影はこの物体が落としたものではない」と感じ、影が形状知覚に与える効果が弱くなったからだと考えられる。

5. 考察

本研究では、空中像に対して形状の異なる影を投影することで、空中像の奥行方向の厚みの知覚が変化することを示した。本実験の結果から、影の奥行方向の長さによって空中像の奥行方向の厚みの知覚が変化することがわかった。

今回の実験は形状が異なる影を投影することで空中像の

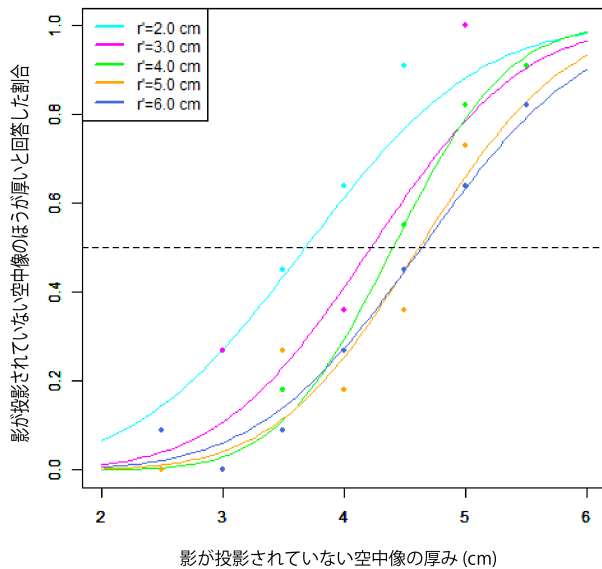


図 8: 累積正規分布関数のプロットの結果。各点は実験参加者のデータを用いたときの「影が投影されていない空中像の方が影が投影されている空中像より厚み大きい」と答えた確率

奥行方向の知覚が変化するかということ进行调查することに焦点を当てたが、そのほかの要因についても検討する必要がある。それは、影のぼかし具合と影の方向・位置の設定である。これまでの研究で影をぼかすことで強いレイアウト錯視を得られることが示されているが [1], どの程度ぼかせばよいかはわかっていない。今回の実験で空中像に投影される影の方向・位置は、仮想光源の方向・位置の違いにより、現実世界の物体の影の方向・位置と一致しない場合がある。影の作成にあたり、これらの要因を考慮することで影が空中像の形状知覚に与える効果に変化が生じる可能性がある。

6. おわりに

本研究では、プロジェクタを用いて空中像に形状の異なる影を投影することによる、空中像の奥行方向の厚みに関する知覚の変化を調査することを目的とし、形状が異なる影を投影したときの空中像の見かけの厚みの計測を恒常法で行った。実験の結果、影の奥行方向の長さが変化すると空中像の奥行方向の厚みの知覚も変化するという傾向がみられた。これより、影は空中像の奥行方向の厚みの知覚に影響を与えることが示された。

今後は影による空中像の立体感錯視をより詳細に検討するため、今回の実験で使用した以外の影の形状・方向・位置の条件を追加し実験をする。また今回は 3D の空中像に影を投影し空中像の厚みの感じ方が変化するか調査したが、2D の空中像に関しても影を投影することによる立体感の変化についても調査したい。

謝辞 本研究は放送文化基金の助成を受けたものです。

表 1: それぞれの影の長さにおける主観的等価点の値

影の長さ (cm)	主観的等価点 (cm)
2.0	3.67
3.0	4.21
4.0	4.40
5.0	4.61
6.0	4.64

参考文献

- [1] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, Osamu Matoba: Transmissive Optical Imaging Device with Micromirror Array, Proc, SPIE, Vol. 6392, 63920E (2006)
- [2] Yuki Maeda, Daisuke Miyazaki, Satoshi Maekawa: Aerial Imaging Display Based on a Heterogeneous Imaging System Consisting of Roof Mirror Arrays, IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), IEEE, pp. 211-215 (2014)
- [3] 株式会社アスカネット: 光学結像装置特開 2012-155345 (P2012-155345S)
- [4] Daniel Kersten, David C. Knill, Pascal Mamassian, Isabella Bühlhoff: Illusory motion from shadows. Nature 379, 6560 (1996)
- [5] Daniel Kersten, Pascal Mamassian: Cast shadow illusion. In The Oxford Compendium of Visual Illusions, Arthur Shapiro and Dejan Todorovic (Eds.). Oxford University Press, New York, NY, 214-220 (2017)
- [6] Natsuki Sugano, Hirokazu Kato, Keihachiro Tachibana: The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality, Mixed and Augmented Reality, Proceedings. The Second IEEE and ACM International Symposium on. IEEE, pp. 76-83 (2003)
- [7] Takahiro Kawabe. Shadow-based Illusion of Depth and Transparency in Printed Images. ACM Trans. Appl. Percept. 16, 2, Article 10, 12 pages (2019)
- [8] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Takayuki Kai, Satoshi Maekawa, Takeshi Naemura: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, ACE2013 Creative Showcase, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 8253, pp. 560-563 (2013)