

2次元空中像の立体感提示のための動的な照明の提案

福岡 美結^{1,a)} 小泉 直也^{1,b)}

概要：本研究は、空中像における現実感設計の手法を明らかにすることを目的とする。空中像を結像するための光源として、高解像度な空中像を比較的低コストで容易に実装できる2次元光源がよく用いられるが、3次元空中像のような体積表現をすることは難しく、実物体のような立体感を知覚させることに課題がある。複合現実感において、実空間とCG映像の照明環境を一致させることで光学的整合性が高まり、実在感や形状の知覚に影響を与えることが知られている。そこで、実空間における動的な照明を導入し、光学的整合性および時間的整合性を両立させた照明環境をつくり出すことで、2次元空中像の立体感を向上させることを目指す。デモ展示では、立体感や実在感の効果が定性的に観察された。さらに、心理物理実験において、従来の静的な照明と比較して動的な照明が2次元空中像の立体感をより強く知覚させることが示唆された。

1. はじめに

空中像は複合現実感の一つであり、実空間上にCG映像を表示する技術である。空中像は、光源から出た光が再帰透過光学系によって空中に結像された像のことであり、映画「スター・ウォーズ」などのSF映画で見られるように、実空間上にバーチャル物体を表示させることができる。空中像によって、現実には存在しないキャラクターや特殊効果を表示でき、ファンタジー世界を現実世界に持ち込みシームレスに融合できる。映画の中での空中像は、演出として現実離れした表現で描かれることが多いが、空中像で表示されるバーチャル物体が現実世界に本当にあると思わせるような効果を与えることで、さらに魔法のような体験が期待できる。

現実世界と情報世界を継ぎ目なく融合する高度な複合現実感を実現するためには、幾何的整合性・光学的整合性・時間的整合性を確保する必要がある。幾何的整合性とは、現実世界と情報世界の3次元的な位置合わせを指す。光学的整合性とは、実物体とCG等の陰影や画質の整合性の問題である。時間的整合性とは、体験者の変化や現実世界の動きに対して遅延や同期ずれがないことを指す。

しかし、2次元光源を用いて結像される空中像は、高解像度の空中像を容易に提示できるものの、立体像を表示することはできないため、幾何的整合性における体積表現の課題を克服する必要がある。2次元空中像にもかかわらず、

容易に実物体のような立体感を提示できれば、3次元空中像技術に代わる手法として有用である。そこで、2次元映像でも表示できる立体感の要素として、絵画的奥行き手がかりである陰影（shading）と投射影（cast shadow）に着目した。陰影や投射影は、光学的整合性によって設計することが可能である。実空間とバーチャル物体の照明環境を一致させ、光学的整合性をとることで、バーチャル物体の位置や形状、実在感の知覚に効果を与えることが確認されている [1]。

そこで、実空間で操作可能な動的な照明を導入し、それに対応した陰影と投射影をリアルタイムに提示することで2次元空中像の立体感を質的に向上させることを目指す。実空間上の仮想光源に対して正しい位置に陰影と投射影を描画する「光学的整合性」に加え、光源の移動に対して遅延なく描画する「時間的整合性」を両立させた光源環境をつくり出すことで、幾何的整合性が欠けている2次元空中像にもかかわらず、立体感の効果が観察された。

2. 関連研究

空中像は、光源から出た光が光学素子によって反射・屈折し、空中に結像した像のことであり、空中像光学系として再帰透過光学系があり、Micro Mirror Array Plate (MMAP) [2]、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [3] などがある。空中像は裸眼で観察でき、実環境の中にCG映像が存在しているように感じさせる効果がある。

空中像の下に投射影を表示することで、結像位置の把握や厚みの知覚に影響を与えることが知られている。Kimら [4] は、プロジェクターで投射影を表示することで、空

¹ 電気通信大学

^{a)} fukuoka@media.lab.uec.ac.jp

^{b)} koizumi.naoya@uec.ac.jp

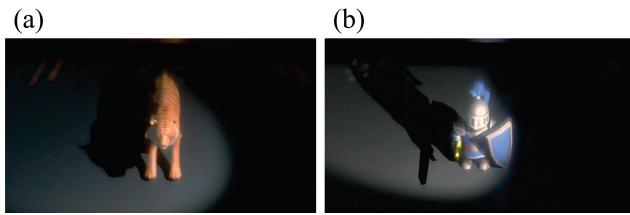


図 1 (a) 投射影により側面形状が見えるトラの例 (b) 盾による影がキャストされた騎士の例

中像の位置がより理解しやすくなると報告している。ただし、表示されている空中像は 2 次元の陰影がないキャラクターのイラストで、厚み感の提示は行われていない。Yano ら [5] は、投射影の長さが空中像の厚み知覚に影響を与えることを明らかにしている。しかし、両眼立体視で 3 次元的に物体を知覚できる環境での研究であり、空中像が 2 次元平面として表示される場合には検証されていない。また、これらの研究では光源が空中像の上部にあるという静的な条件に限られている。

これらの研究は、2 次元空中像における立体感の提示に焦点を当てていない。3 次元空中像は厚みのある立体的な表示が可能だが、装置が大規模であったり、表現可能な奥行幅に制限がある。一方、2 次元空中像は比較的安価で実装が容易であり、高解像度で表示できる。2 次元画像から 3 次元情報を知覚するために重要な要素として、陰影と投射影がある。本研究では、動的な照明を導入し、空中像の陰影と投射影をリアルタイムで変化させることで、2 次元空中像に立体感を持たせ、3 次元空中像に代わる立体感の提示を目指す。

3. 提案手法

空中像のリアリティ向上のための探索的プロトタイプینگの過程で、図 1 のように空中像の陰影や投射影を与えることで、2 次元空中像の実在感と立体感が質的に向上することを発見した。先行研究 [4][5] では、空中像 CG オブジェクトを照らす照明は固定されている。これを動的に操作することで、バーチャル物体が実際に存在しているかのような実在感と、従来の 2 次元空中像よりも高い立体感を生じることが観察された。

本稿では、実空間で動的に操作可能な光源の位置に一致するように、空中像 CG オブジェクトの陰影や投射影を描画する手法を提案する。実空間で操作可能な仮想光源の位置および角度の取得は、光源に見立てた手持ちの棒の先に再帰性反射マーカを取り付け、光学式モーションキャプチャシステムである OptiTrack で実現する。

空中像を表示するための光学設計を図 2 に示す。空中像を表示する手法として、テーブル面の反射を用いた直立空中像光学系である EnchanTable[6] の手法を援用した。この光学系によって、空中像は投射影が表示されるテーブル

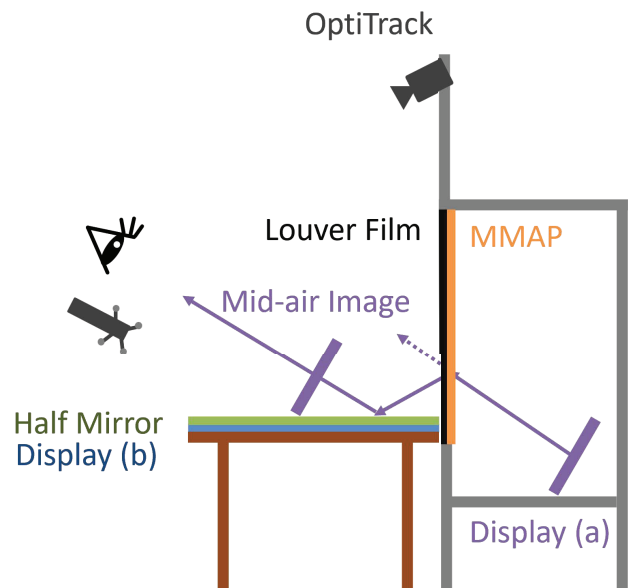


図 2 光学装置

面に接地するように結像される。ディスプレイ (a) から出て MMAP を介した光は、ハーフミラーに反射してテーブル面上に空中像を結像する。

空中像の陰影と投射影は、ゲームエンジンである Unity を用いてリアルタイムにレンダリングされる。実空間にある仮想光源の位置をリアルタイムに取得し、CG 空間上の同じ位置にスポットライトを配置することで、光学的整合性のある空中像の陰影と投射影を表示した。スポットライトは光の減衰が生じ、光源から離れるほど暗く照らされ、近づくほど明るく照らされる。さらに、CG 空間内のバーチャル物体の下に平面オブジェクトを配置し、この面に投影された投射影をディスプレイ (b) に表示した。

4. 展示

実空間上にある操作可能な光源を動かすことで、従来の静的な照明による手法と比較して空中像の立体感や実在感が向上するかを定性的に確認するため、オープンキャンパスでデモ展示を行った。体験者は仮想光源の位置としてトラッキングされるマーカーが付いた棒を手を持って、空中像を照らす照明を操作した。空中像として、球体とアニメーション付きのキャラクターを表示した。

空中像 CG オブジェクトに対して仮想光源を動かすことで、「立体的に見える」「そこに存在しているように見える」といった反応が得られ、立体感や実在感の効果が観察された。また、実空間にある照明を操作することによって、陰影やハイライトが変化するインタラクション体験に興味を持つ体験者も多く見られた。

5. 実験

本研究では立体感に焦点を当て、空中像の見かけの奥行

きに及ぼす、空中像の陰影および投射影の動的変化の効果
を明らかにすることを目的とした実験を行った。空中像
の見かけ奥行きの評価は、井上ら [7] の先行研究を参考に
行った。

5.1 仮説

本実験では、探索的なプロトタイプと展示から下記の仮
説を立て、検証する。

- H1: 動的な照明条件の方が全体的に厚みが大きくなる
- H2: 動的な照明条件の方がサイズ変化による厚み知覚
の差が小さくなる

動的な照明条件とは、空中像の陰影や投射影が変化する
ように照明を 3 次的に動かす環境のことを指す。本実験
における動的な照明条件の具体的な実装は後述する。仮説
1 に関して、動的な照明が立体感に効果があるならば、静
的な照明よりも厚みすなわち見かけの奥行きが大きくなる
はずである。仮説 2 に関して、動的な照明環境が厚み知覚
における精度向上に効果を与えるならば、サイズ変化によ
る影響を受けにくくなり、サイズ変化による厚み知覚の差
が小さくなるはずである。

5.2 実験条件

本実験は、2 次元空中像を照らす照明が静的か動的か、
および投射影の有無の 2 要因で設計した (図 4)。空中像と
して表示される CG オブジェクトを照らすスポットライト
は Unity のスポットライトオブジェクトを用い、円錐形
である照明領域の頂角を 50 度に設定した。静的な照明条件
において、スポットライトは CG オブジェクトの上部 30
cm の位置に配置された。動的な照明条件においては、図
3 に示すように、スポットライトは高さ 27cm の位置から
常に CG オブジェクトを向くように斜め下向きに照らし、
CG オブジェクトを中心とする半径 30 cm の円周上を、正
面を 0 度としたとき左右に -70 度から 70 度まで片道 3 秒間
で ease-in-out で往復させ、空中像の陰影と投射影をリアル
タイムに変化させた。投射影の有無は、球体の投射影の描
画をオンまたはオフすることで制御した。

図 4 に示すように Unity で生成された直径 r cm の球体
を視覚刺激として提示した。球体の直径は 1 cm から 7 cm
まで 1 cm 刻みで、7 種類の異なるサイズの球体 (直径 r
cm) を用意した。参加者は 2 次元空中像と投射影を俯角
30 度から見下ろすように観察する。図 5 のように空中像
の光源となる 2 次元ディスプレイは直立から 30 度傾けて
配置され、これによって結像される 2 次元空中像が参加者の
視線に対してほぼ垂直な面になるようにした。視線に対し
てほぼ垂直な面に 2 次元空中像を表示することによって、
平面に結像していることを知覚しにくいようにした。2 次
元ディスプレイに表示される球体の画像は、実験時に参加
者が視覚刺激を観察するときの俯角と同様に CG カメラを

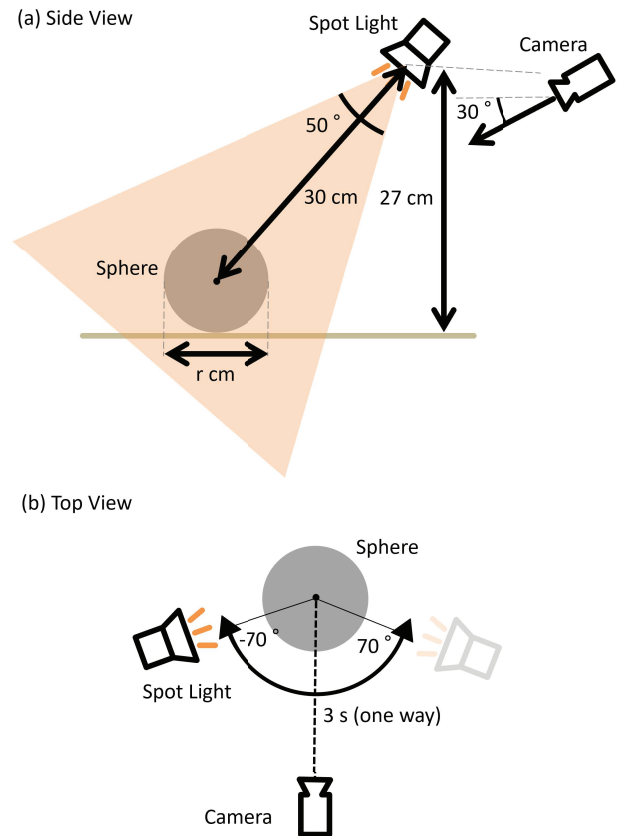


図 3 動的照明の配置設定

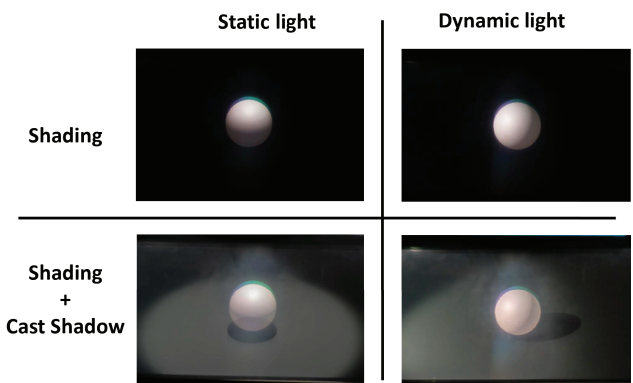


図 4 動的な照明条件と静的な照明条件および投射影の有無の条件
における視覚刺激

俯角 30 度に傾けて撮影し、レンダリングした。静的な照
明条件における投射影の中心位置は、空中像の結像位置と
一致するよう配置した。また、空中像は投射影を表示する
ディスプレイに接地するように結像された。

5.3 実験手順

暗室で参加者の前に空中像を提示し観察させた。図 5 の
ように参加者の視点は空中像の結像位置から俯角 30 度の
位置にほぼ等しくなるように、顎台を用いて固定された。
見かけの奥行の評価方法について描画を用いて説明した
後、先行研究 [7] と同様に、視覚刺激に対しての見かけの

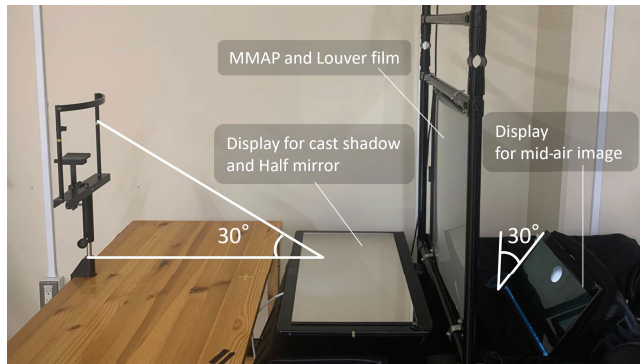


図 5 実験装置

奥行きの評価値をマグニチュード推定法にて求めた。すなわち、2次元空中像として表示される視覚刺激を球体と見たときの半径分の奥行きに凸状に見える場合を 100、平面に見える場合を 0 として、各刺激の見かけの奥行きを 0 から 100 の間で回答させた。

各試行における空中像の表示時間は 6 秒であり、試行のたびに見かけの奥行きに対する評価値を回答させた。各条件において、空中像の表示順はランダムで、各条件あたり 21 試行（球体の直径 7 種類 × 繰り返し 3 回）実施した。照明の変化の有無と投射影の有無の試行順序による効果は、ラテン方格法を用いて実験参加者間でカウンターバランスをとった。参加者は裸眼視力あるいは矯正視力で正常な学生 6 名（男性 5 名、女性 1 名、平均年齢 22.5 歳）であった。

5.4 実験結果

図 6 は各条件および各刺激サイズにおける見かけの奥行きの評価値の平均をプロットしたグラフである。また、図 7 は各条件における参加者全員の評価値をプロットしたグラフである。横軸は視覚刺激として用いた球体の直径、縦軸は各刺激サイズにおける半径を 100 としたときの見かけの奥行きの評価値を示す。

仮説 1 を検証するために、各条件におけるすべての刺激サイズの評価値を平均化した結果を図 8 に示す。2（照明の変化の有無）× 2（投射影の有無）の 2 要因の分散分析を行ったところ、照明の主効果（ $F(1, 5) = 20.19, p < 0.01$ ）および投射影の主効果（ $F(1, 5) = 10.12, p < 0.05$ ）が有意差であった。照明と投射影の相互作用の主効果（ $F(1, 2) = 0.715, p > 0.05$ ）に有意差はなかった。

仮説 2 を検証するために、図 6 のデータに対して、最小二乗法による直線フィッティングを行ったときの傾きの比較結果を図 9 に示す。2（照明の変化の有無）× 2（投射影の有無）の 2 要因の分散分析を行ったところ、照明の主効果（ $F(1, 5) = 1.352, p > 0.05$ ）、投射影の主効果（ $F(1, 5) = 0.172, p > 0.05$ ）、および照明と投射影の相互作用の主効果（ $F(1, 5) = 0.327, p > 0.05$ ）に有意差はなかった。

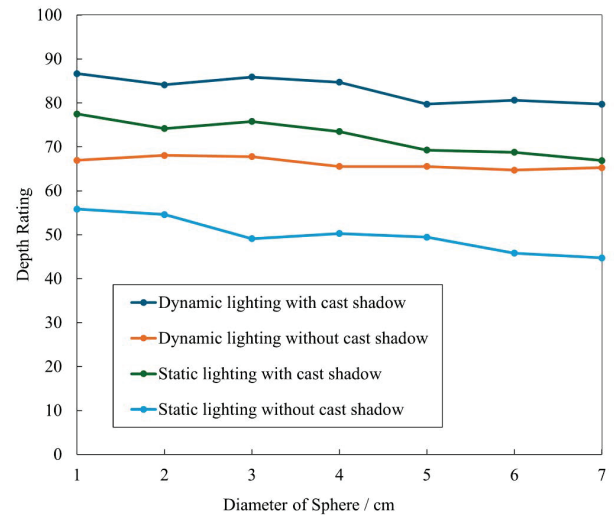


図 6 見かけの奥行きの評価値

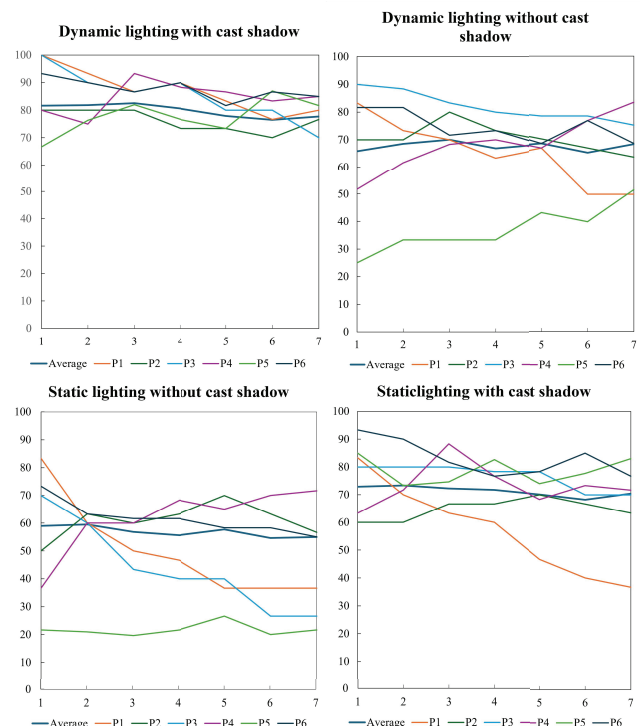


図 7 各条件における各参加者の評価値

6. 考察

図 8 および分散分析の結果より、動的な照明条件の方が静的な照明条件よりも立体感を大きく知覚させることが示唆された。また、空中像に投射影を表示することで、さらに立体感を大きく知覚されることが示唆された。

図 9 および分散分析の結果より、精度による効果の差は見られなかった。図 9 および図 7 からわかるように、サイズの小さい視覚刺激ほど評価値が高い（傾きが負である）参加者と、サイズの大きい視覚刺激ほど評価値が高い（傾きが正である）参加者がいることがわかる。実験後に収集

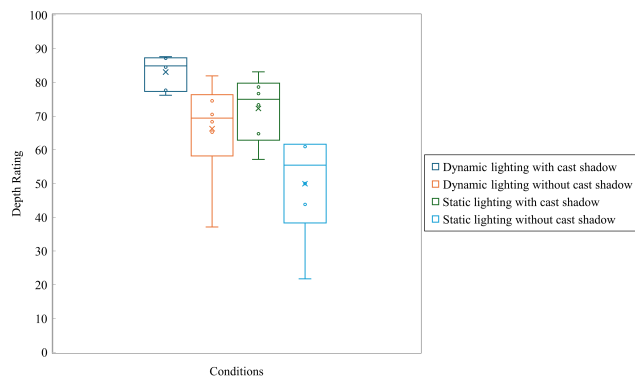


図 8 見かけの奥行きの評価値のすべての刺激サイズの平均値の比較

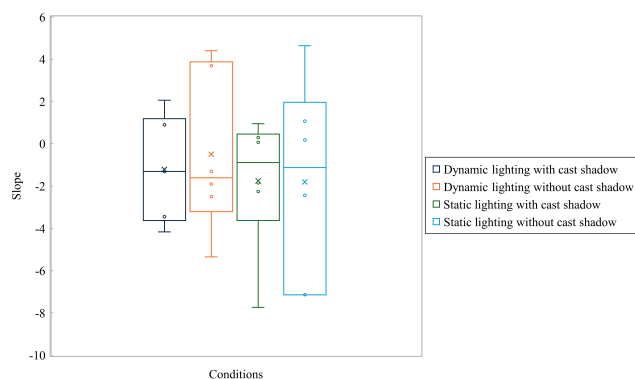


図 9 直線フィッティングによる傾きの比較

したコメントより、サイズの小さい刺激はサイズの大きい視覚刺激と比較して、陰影の情報が見えづらいため奥行感がわかりづらいという意見があった。一方で、サイズの小さい刺激の方が実質的な厚みが小さいため、ほぼ完全な球体に見えるといった意見もあった。

また、実験結果より、投射影ありの動的な照明条件においては評価値を 100 とする回答は見られたが、評価値 100 を超えるような回答はなかった。すなわち提示される 3DCG オブジェクトの本来のスケール以上の立体感を与えることは難しい。矢野らの研究 [5] では投射影の奥行方向の長さを変化させることで厚み知覚を本来の厚みよりも大きくできることを確認している。本実験ではリアルに近くなるように計算された陰影や投射影を用いていたが、本来の影よりも誇張した表現をすることで評価値 100 を超えるような立体感を与えることができるかもしれない。

予備実験にて、見かけの奥行きの評価値を半径分凹んでいる状態を -100 として、-100 から 100 の間で参加者に回答させたところ、動的な照明条件で投射影がない条件において、負の値を回答すなわち凹んでいるように見えるという回答が得られた。この参加者によると、照らされる位置によって凹状態で見える瞬間と凸状態で見える瞬間があるという。ただし、動的な照明条件で投射影がある条件では、常に凸状態に見えるという評価であったことから、投射影が光源位置の手がかりとなり、凹凸の知覚に影響を与える

ことが示唆された。

本実験では、実空間上に物理的な光源手がかりなしで、陰影と投射影の変化のみで実験したため、光源位置は固定されると仮定して、物体の凹凸が変化することで陰影が変化していると解釈されたと考えられる。これより、動的な照明において、投射影を用いることは安定して凸状態に知覚させるために重要であることが示唆された。また、外部の物理的な光源手がかりが必要であると解釈することもできる。動的な照明環境において、実空間上に外部の照明手がかりを配置することの効果は今後調査する必要がある。

7. おわりに

本稿では、2 次元空中像の立体感を向上させることを目的として、実空間上で操作可能な動的な照明を導入し、リアルタイムに対応する陰影や投射影を提示する手法を提案した。実空間にある仮想光源の位置をモーショントラッキングし、リアルタイムに陰影と投射影を表示することで、実空間と空中像間における光学的整合性および時間的整合性を確保した。デモ展示では、2 次元空中像の立体感と実在感の効果が観察された。本研究では立体感に焦点を当て心理物理実験を行い、2 次元空中像において、従来の静的な照明と比較して動的な照明環境の方が立体感をより強く知覚することが示唆された。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR216L の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Natsuki Sugano, Hirokazu Kato, and Keihachiro tachibana. The effects of shadow representation of virtual objects in augmented reality. In *The Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings.*, pp. 76–83, 2003.
- [2] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In *Three-dimensional TV, video, and display V*, Vol. 6392, pp. 130–137. SPIE, 2006.
- [3] Hirotugu Yamamoto, Yuka Tomiyama, and Shiro Suyama. Floating aerial led signage based on aerial imaging by retro-reflection (airr). *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924, Nov 2014.
- [4] Hanyuool Kim, Issei Takahashi, Hiroki Yamamoto, Satoshi Maekawa, and Takeshi Naemura. Mario: Mid-air augmented reality interaction with objects. *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233–241, 2014.
- [5] Yutaro Yano and Naoya Koizumi. Mid-air Image's Background Changes the Impression of a Mid-air Image. In *Proceedings of the ICAT-EGVE2023*, pp. 19–26, 2023.
- [6] 山本紘暉, 梶田創, 小泉直也, 苗村健. Enchantable: テーブル面の反射を用いた直立空中像ディスプレイ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 401–410, 2016.
- [7] 井上浩義, 渡辺功. 奥行き知覚に及ぼす陰影のハイライトの位置の効果. 心理学研究, Vol. 76, No. 1, pp. 51–56, 2005.