

LeVITable: 空中立体結像システムにおける ライティングインタラクション

明石 穂紀^{1,a)} 倉本 大資^{1,b)} 韓 燦教^{1,c)} 苗村 健^{1,d)}

概要: 筆者らはこれまで対面 2 方向から鑑賞可能なテーブルトップ空中立体結像システムを提案してきた。本稿ではこのシステムの、体験者やその持ち物も空中像として光源立体物の前に表示されるという相互結像性に着目し、体験者が懐中電灯で卓上を照らすことで懐中電灯の空中像が光源立体物を照らし、立体物の空中像が浮かび上がるライティングインタラクションを提案する。このインタラクションでは、懐中電灯による照明の変化に時間的・幾何学的・光学的に整合して、立体物の空中像の陰影や煌めきも変化する。また懐中電灯の角度によって、結像した懐中電灯が光源を近距離から照らす結像光モードと、懐中電灯が直接遠くから光源を照らす透過光モードの比率が切り替わる。実物を照らす場合と比較して整合性を確認するとともに、角度によるモードの比率の切り替わりの理論値を算出し実際の様子を確認した。

1. はじめに

筆者らはこれまで対面 2 方向から鑑賞可能なテーブルトップ空中立体結像システムを提案してきた [1]。しかしこれまでの研究は立体ディスプレイとしての提案であり、体験者は空中像を受動的に眺めるだけであった。そこで本研究ではこのシステムにおける体験者と空中像とのインタラクションの実現を目的とする。

本稿ではこのシステムの、光源である立体物が立体空中像として体験者の前に表示されると同時に、体験者やその持ち物も空中像として光源立体物の前に表示されるという「相互結像性」に着目する。この性質により、体験者が懐中電灯で卓上を照らすと懐中電灯の空中像が光源立体物を照らし、立体物の空中像が浮かび上がるライティングインタラクションを提案する。このインタラクションでは、懐中電灯の位置や角度などの照らし方に応じて、陰影や煌めきといった立体物の空中像の照らされ方も、幾何学的・時間的・光学的に整合して変化する。また懐中電灯の角度によって、結像した懐中電灯が光源を近距離から照らす結像光モードと、懐中電灯が直接遠くから光源を照らす透過光モードの比率が切り替わる。このインタラクションが可能な提案システムを、Levitating Volumetric Imaging Table; LeVITable と名付ける。

2. 関連研究

2.1 空中像の環境光適応インタラクション

空中像は実空間中に結像した実像であり、空間と溶け込んで存在することが可能である。しかし通常は、実環境の光学的条件とは無関係に光源の光がそのまま反映される。これは複合現実感における実環境との 3 つの整合性 [2] (時間的・幾何学的・光学的整合性) のうち、光学的整合性がないことを意味している。

この課題に対し、部屋の照明などの固定された環境光に空中像の陰影が整合する手法 [3], [4] のみならず、環境光の変化にも適応する研究も行われている [5], [6], [7], [8], [9]。しかし環境光適応手法において 3 つの整合性をすべて満たした手法はない。小泉らの手法 [5], [6] ではレンズ拡散板と透明液晶を組み合わせた光源を照らすことで、光源の直上に結像する空中像が照らされる。計算処理が不要な物理系であるため時間的整合性はあるが、照らされる光源と表示される空中像の位置には上下のずれが存在するため幾何学的整合性が満たされていない。Fukuoka らの手法 [7] ではライトに見立てた棒の位置や向きに応じてレンダリングを行うことで空中像が照らされる。短い処理時間により時間的整合性と光学的整合性の両立を実現しているが、表示される影は空中像と同じ平面上にあるため幾何学的整合性を満たしてはいない。平井らの手法 [8], [9] では結像位置の光線情報を取得し機械学習モデルによって空中像の 3D モデルの陰影を更新するが、処理に時間がかかることから時間的整合性に欠く。

¹ 東京大学

a) akashi@nae-lab.org

b) qramo@nae-lab.org

c) hanc@nae-lab.org

d) naemura@nae-lab.org

本研究ではコンピュータ処理を介さない物理光学系によって時間的整合性を確保し、結像光モードにおいて幾何学的に整合する相互結像性を実現することで、陰影に関する光学的整合性を実現する。輝度に関しては、光学系の光利用効率が100%ではないため低下し、また照明の角度による結像光モードの割合の変化に影響を受ける。

2.2 相互結像性

本稿において「相互結像性」と呼ぶ性質について述べる。空中像光学系は反射や屈折により空中に実像を結像するため、光路が可逆である。これにより光源が空中像として体験者の前に結像される際に、体験者やその持ち物も空中像として光源の前に結像されるという性質である。

Retro-Transmissive Plate (RT Plate)[10]などの再帰透過光学系はある基準面に対して光源と面対称な位置に空中像を結像させるため、空中像の奥行きが反転するという性質がある。この奥行き反転を解消することで光学系の両側に相互に結像した空中像と光源の位置関係が一致（幾何学的に整合）する。同時に奥行き反転の解消により立体物を光源とした立体の空中像表示も可能となる。奥行き反転を解消し相互結像性を活かした研究として、2人の体験者がお互いを空中像として観察しあうテレプレゼンスコミュニケーションに空中触覚を組み合わせた HaptoClone[11]がある。

本研究では筆者らがこれまでに提案した空中像立体結像システムにおいて、相互結像性に着目したライティングインタラクションを提案する。

3. 提案手法

本章では3.1節で筆者らがこれまでに提案したテーブルトップ空中像システム[1]について説明し、3.2節でこのシステムを用いたライティングインタラクションを提案する。このインタラクションが可能な提案システムを Levitating Volumetric Imaging Table; LeVITable と名付ける。

3.1 提案システム (LeVITable)

筆者らはこれまで対面2方向から鑑賞可能なテーブルトップ空中立体結像システムを提案した[1]。システムの概要を図1に示す。このシステムでは光源として立体物を用い、2枚のRT Plateを用いて奥行き反転を解消する。更に、複数の対称ミラー構造[12], [13]を垂直に用いることで輝度連続に視域を拡大し、対面2方向から立体物の空中像を鑑賞可能にしている。

上下のRT Plateの両側にそれぞれ垂直な対称ミラー構造を用い、各RT Plateの長さを鏡像により3倍に伸ばすことで視域を拡大している。実質的なRT Plateの長さが伸びることにより上下のRT Plateの位置を揃えた対称性のある構造とすることができるため、テーブルの両側から同じように空中像を鑑賞することができる。

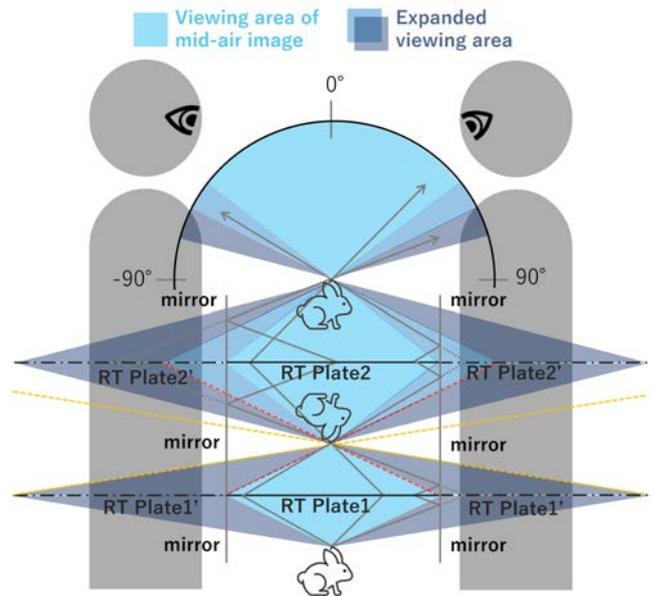
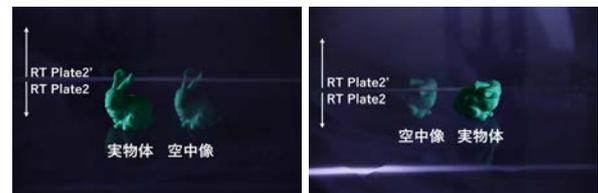


図1: 提案システム [1]



(a) 前からの様子

(b) 後ろからの様子

図2: 提案システムによる空中像 [1]

実装においては、2枚のRT PlateにはASKA3D-630を用い、RT Plate間の距離を40cmとした。下のRT Plateの下部および上のRT Plateの上部の鏡の長さを20cm、RT Plate間の鏡の長さを40cmとした。光源はターンテーブル上にのせることで移動可能にし、ターンテーブルの高さを鏡の下端である下のRT Plateから距離20cmとした。このとき空中像として現れるターンテーブルの面は上のRT Plateから20cm浮かんだ位置である。実際に観察される空中像を図2に示す。

3.2 提案インタラクション

これまでLeVITableは立体ディスプレイとしてのみ使用され、体験者は空中像を受動的に眺めるだけであった。本稿ではLeVITableの相互結像性に着目し、立体の空中像を実際の懐中電灯で照らすことができるライティングインタラクションを提案する。

具体的には、図3(a)のように体験者が持つ懐中電灯を卓上に向けると①結像した懐中電灯の空中像が②光源立体物を照らし③空中像が明るくなって浮かび上がるインタラクションを提案する。このインタラクションでは懐中電灯の位置や角度などの照らし方に応じて、陰影や煌めきといった立体物の空中像の照らされ方も時間的・幾何学

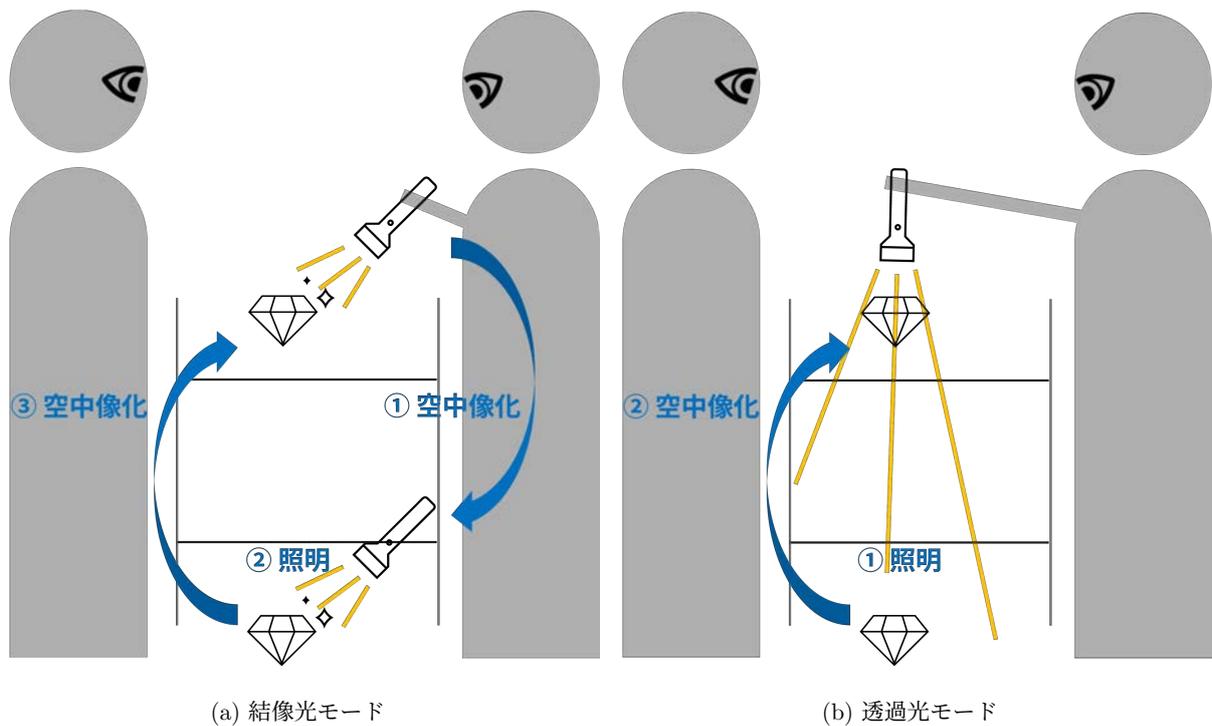


図 3: 提案インタラクション

的・光学的に整合して変化する。また、実物を照らす場合と異なり光学系が中継を担うことによって生まれる特徴として、図 3(a) のように結像した懐中電灯が光源を近距離から照らす結像光モードと、図 3(b) のように懐中電灯が直接遠くから光源を照らす透過光モードの比率が、懐中電灯の角度によって切り替わる。この点は 3.2.2 項で述べる。

3.2.1 時間的・幾何学的・光学的整合性の実現

LeViTable は一切の計算処理を行わない物理系であるため時間的整合性が常に実現される。懐中電灯の光は光学系内の反射のみによって空中像として結像し、光源立体物を照らす。照らされた立体物からの拡散光は光学系内の反射のみによって懐中電灯の先に空中像として結像する。この光速の処理のレイテンシは実装されたテーブルの高さ 80 cm 程度の距離を往復する数 ns である。

LeViTable の相互結像性により光学系の両側の空中像と光源（立体物の空中像と懐中電灯、懐中電灯の空中像と立体物）の位置関係が一致することで幾何学的整合性も実現される。これは RT Plate の結像精度と、対称ミラー構造の実装の厳密さに依存する。RT Plate による結像が Plate に対して面对称からずれるほど、および対称ミラー構造をなす 2 枚の鏡が RT Plate に対して面对称からずれるほど整合しなくなる。

幾何学的に整合して懐中電灯の空中像が結像した場合、立体物の空中像の照らされ方は実物の立体物が懐中電灯で照らされる場合と同様となり、陰影に関する光学的整合性が実現される。懐中電灯を持つ体験者に対面するもう一人の体験者からも、立体により遮蔽がおこるため不自然に裏

側が照らされるようなことは起こらない。ただし、立体物の空中像を懐中電灯が突き抜けた際に物体を内側から照らすような挙動がおこったり、迷光の影響で本来照らされる以上の部分が照らされたりということは生じる。

3.2.2 角度による照明モードの切り替わり

LeViTable において空中像を結像させている素子である RT Plate は、角度によって結像効率が異なるという特性がある。使用している RT Plate である ASKA3D においては、入射角度が 45° に近いと結像光として出射しやすい一方で、 0° に近いほど透過光として出射されやすい。この性質の理論値については 4.2.1 項で算出する。なお、ASKA3D では結像光と透過光のほかに 2 種の再帰光が存在するが、これらはある点光源からの光としては振舞わない。

従って、 45° に近い斜め向きで懐中電灯を向けた場合は結像した空中像による照明がおり、結像点からの狭い範囲に対して幾何学的に整合した照明がなされる一方で、真上から RT Plate に垂直な角度で懐中電灯を向けた場合は透過光により長い距離を広がりながら光が進むことで、広い範囲を上から照らしたような照明がなされる。この結像光モードと透過光モードが懐中電灯の角度に合わせて比率が切り替わることで、立体物の空中像が一部のみながらはっきりと陰影や煌めきが現れたり、立体物の空中像全体が照らされて姿が露になったり、照らし方によって変化することになる。これは実物を直接照明した時には起こらない現象であり、体験者が様々な向きで照明を試みるモチベーションとなりうる。色々な当て方をするごとに光り方を発見していくことで、すぐには飽きない体験となる。

4. 評価

4.1 幾何学的・光学的整合性の確認

時間的整合性は原理上実現されることから、幾何学的整合性と光学的整合性の評価を行う。照明を結像光モードとなる角度で固定し、空中像を照らす場合と、結像位置に同一の実物を置いて照らす場合を撮影し比較した。空中像を照らす際は空中像が空中に浮かんで結像するが、実物を照らす際は結像位置に実物を置くためにアクリル板のテーブル面を用意した。カメラは Canon EOS 5D Mark II を用い、F 値 4.0, 露光時間 1/30 s, ISO 感度 2000 で撮影した。

結果を図 4 に示す。光学系の光利用効率の影響により反射拡散光の輝度は異なるものの、明るく照らされる部分や陰は共通しているため、空中像をその結像位置にある実物体と同じように照らすことができている。従って懐中電灯と空中像との間に幾何学的整合性が成立している。陰だけでなく影に関しても、アクリル板上に現れる実物の影と同様に空中に浮かぶ空中像の影が空中の存在しない平面上に現れており、あたかも存在しないテーブル面の上にあるかのように見えている。このように、輝度面においては実物とは異なるものの、結像光モードでは陰影に関する光学的整合性が成り立つ。幾何学的・光学的整合性が成り立つ条件である結像光モードの比率に関しては次節で述べる。

4.2 角度による照明のモードの切り替わり

結像した懐中電灯が光源を近距離から照らす結像光モードと懐中電灯が直接遠くから光源を照らす透過光モードの比率に関して、懐中電灯の角度ごとに理論値を算出するとともに、実際の様子を確認した。

4.2.1 モード比率の理論値算出シミュレーション

Kheibarihafshejani ら [14] と同様のシミュレーションにより、RT Plate に入射する角度と入射する位置を変え、結像光と透過光の割合の理論値を算出した。入射角度 θ は 0° (RT Plate の法線方向) から 90° まで 1° 刻みで変化させた。入射位置 (x, y) は各角度ごとに RT Plate の格子内を 100×100 分割した 10000 地点とした。光線は入射する際にガラスによって屈折し、角度 ϕ で RT Plate 内を直進する。 ϕ は Snell の法則により式 (1) で求められる。屈折率 n にはガラス製 ASKA3D の屈折率 1.523 を用いた。ASKA3D 内の各 Slit Mirror Array (SMA) を抜けるまでに進む距離 L は SMA の厚さを T として式 (2) で求められる。SMA のピッチを P とすると、光線の進む方向は SMA の並びと 45° 角度がついているため、光線が $\sqrt{2}P$ 進むごとに反射することになる。従って入射位置を加味した各 SMA での反射回数 (C_x, C_y) は式 (3) と式 (4) で求められ、 C_x, C_y が共に奇数だと結像光、共に偶数だと透過光となる。なお、SMA の厚み T とピッチ P のアスペクト比はガラス製 ASKA3D のアスペクト比である 3 とした [15]。



(a) 空中像を照らした様子



(b) 実物を照らした様子

図 4: 空中像と実物の陰影が一致する様子

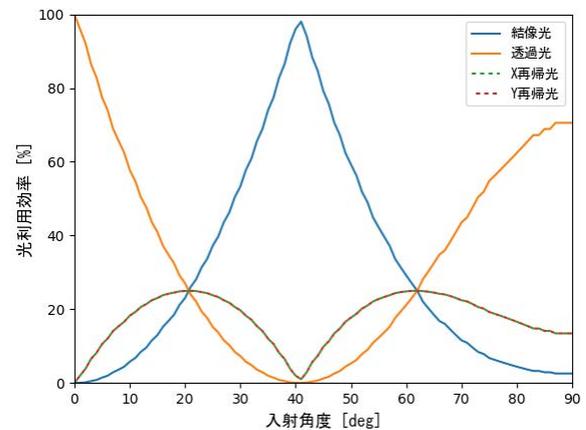


図 5: モード比率のシミュレーション結果

$$\phi = \arcsin(\sin \theta / n) \quad (1)$$

$$L = T \tan \phi \quad (2)$$

$$C_x = \text{Floor}((L + x) / (\sqrt{2}P)) \quad (3)$$

$$C_y = \text{Floor}((L + y) / (\sqrt{2}P)) \quad (4)$$

シミュレーション結果を図 5 に示す。結像光のピークは 41° で約 98% であり、透過光のピークは 0° で 100% であった。



(a) 45°: 結像光モード

(b) 30°: 両モード混在

(c) 0°: 透過光モード

図 6: 角度による照明モードの切り替わり

4.2.2 モード切り替わりの実際の様子

実際にモードが切り替わる様子を確認するため、格子模様の書かれた紙を光源とし、主に結像光モードとなる 45°、結像光モードと透過光モードが混在する 30°、主に透過光モードとなる 0° で懐中電灯の角度を変えて空中像を撮影し比較した。使用した懐中電灯は $\pm 18^\circ$ 程度に光が広がるものである。カメラは Canon EOS 5D Mark II を用い、F 値 4.0、露光時間 1/30s、ISO 感度 2000 で撮影した。

結果を図 6 に示す。どの角度においてもみられる斜め方向に照らされたラインは結像光でも透過光でもない迷光によるものである。主に結像光モードとなる 45° (結像光 79%, 透過光 1.2%) では光源の近距離に結像した懐中電灯の空中像が近距離から高輝度・狭範囲を照らしている。主に透過光モードとなる 0° (結像光 0%, 透過光 100%) では光源の約 80 cm 上方にある懐中電灯からの光が RT Plate を透過して全体を広範囲に照らしている。結像光モードと透過光モードが混在する 30° (結像光 53%, 透過光 7.3%) では結像した懐中電灯の空中像が近距離から狭範囲を照らすと同時に、RT Plate を透過した懐中電灯からの光が全体を広範囲に照らしており、それぞれのモードによる輝度は 45° や 90° よりは低くなっている。

4.3 様々なマテリアルに対する照明

照らされるマテリアルによって光り方が異なる。一例を図 7 に示す。

実物を照らす場合と同様に、図 7(a)、図 7(b)、図 7(c) などの拡散反射するマテリアルではある程度広い範囲が照らし出される一方、金属である図 7(d) などの鏡面反射するマテリアルでは一部が強く輝き、図 7(e)、図 7(f) などのクリスタルのような光が内部まで侵入するマテリアルでは複雑な全反射により煌めく。拡散反射は表面の滑らかさが少ないほど起こりやすいため、図 4 のプラスチックや図 7(b) のイチゴのような比較的滑らかな表面では光が強く当たる部分とそうでない部分のコントラストが大きい一方、図 7(a) のような毛皮や図 7(c) の石のようなざらざらした表面では照らされた全体の輝度が比較的均一となる。

空中像を照らす場合特有の事象として、懐中電灯を空中像の中に突き刺すことができる。これにより図 7(e)、図 7(f)

のクリスタルのような光が内部まで侵入するマテリアルでは物体を内側から照らすことができる。光が内部に一切侵入しない場合は結像前の光が照らすだけであるが、図 7(a) の耳の部分が薄い布であるなど、光がある程度透過する場合は実物では体験することのできないライティングをすることができる。

5. おわりに

本稿では、筆者らがこれまでに提案した対面観察可能なテーブルトップ空中立体結像システムにおいて、その相互結像性に着目したライティングインタラク션을提案し、このインタラク션을実現するシステムを LeVITable と名付けた。LeVITable では結像された空中像に対して実際の懐中電灯で時間的・幾何学的・光学的に整合したライティングが可能であるとともに、照明の角度によって結像光と透過光の比率が切り替わることや懐中電灯を空中像に突き刺して照らすことができることから空中像ならではのライティング体験となりうる。

謝辞 本研究は中山未来ファクトリーおよび JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2108 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Akashi, Y., Kuramoto, D., Han, C. and Naemura, T.: Expanding Viewing Area of Mid-air Images of 3D Objects Using Retro-Transmissive Plates, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 51–56 (2026).
- [2] 神原誠之: 拡張現実感 (Augmented Reality:AR) 概論, *情報処理学会誌*, Vol. 51, No. 4, pp. 367–372 (2010).
- [3] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Maekawa, S. and Naemura, T.: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233–241 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2014.10.008> (2014).
- [4] Yano, Y. and Koizumi, N.: Mid-air Image's Background Changes the Impression of a Mid-air Image, *ICAT-EGVE 2023 - International Conference on Artificial Reality and Teleexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments* (Normand, J.-M., Sugimoto, M. and Sundstedt, V., eds.), The Eurographics Association, (online), DOI: 10.2312/egve.20231309 (2023).
- [5] 小泉直也, 梶田 創, 山本紘暉, 苗村 健: 環境光適応型

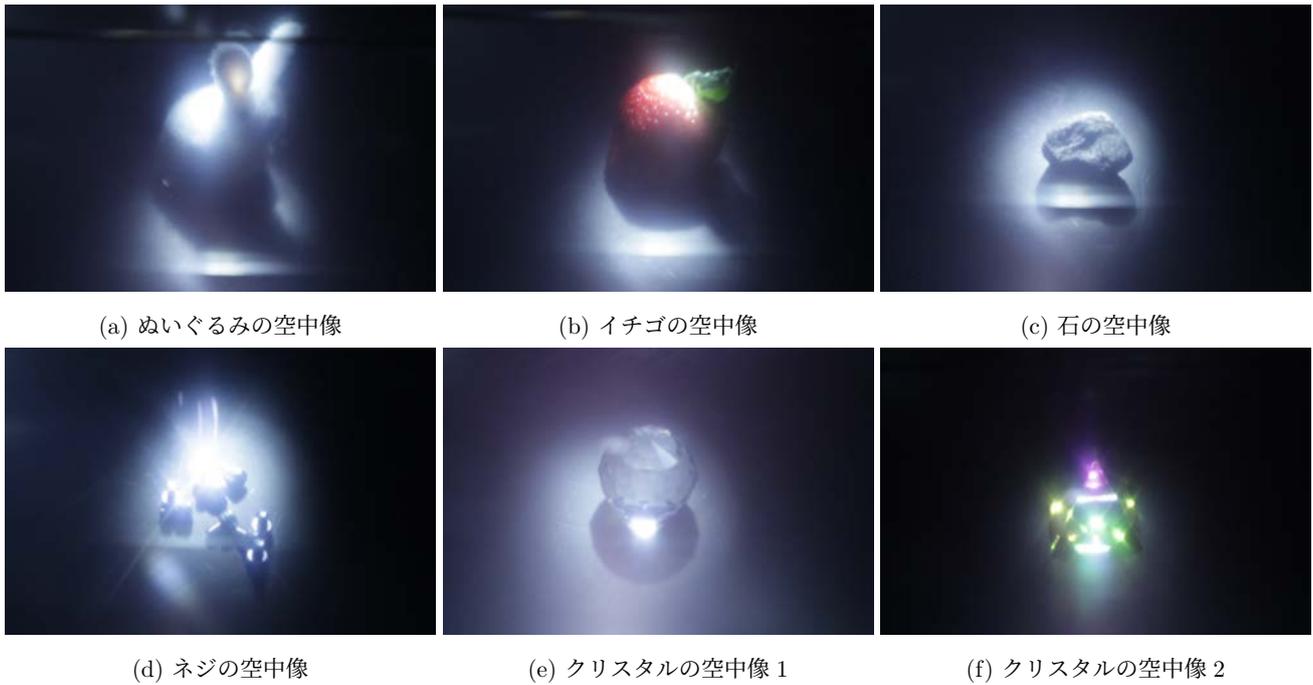


図 7: マテリアルによる照らされ方の違い

- 空中像ディスプレイの基礎検討, インタラクシオン 2016, 3C69 (2016).
- [6] Koizumi, N. and Naemura, T.: Passive Mid-air Display, *Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '16*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3001773.3001812 (2016).
- [7] Fukuoka, M. and Koizumi, N.: Dynamic Lighting for Enhanced Sense of Depth in 2D Mid-air Image, *2025 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pp. 1-5 (online), DOI: 10.1109/ICCE63647.2025.10929871 (2025).
- [8] 平井良磨, 井村誠孝: 現実空間の光源情報を反映した空中像提示, インタラクシオン 2024, 2B-28 (2024).
- [9] 平井良磨, 井村誠孝: 再帰透過素子を用いた光学的整合性を有する空中ディスプレイ, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2024 論文集, No. 6, pp. 278 - 285 (2024).
- [10] Otsubo, M.: Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same, U.S. Patent No.8, 702, 252 (2014).
- [11] Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S. and Shinoda, H.: HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-Time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1980-1990 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858481 (2016).
- [12] 横瀬哲也, 阪口紗季, 苗村 健: 対称ミラー構造を用いたテーブルトップ空中像ディスプレイ, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1C-02 (2019).
- [13] Kikuchi, T., Yahagi, Y., Fukushima, S., Sakaguchi, S. and Naemura, T.: AIR-range: Designing optical systems to present a tall mid-AIR image with continuous luminance on and above a tabletop, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 75-87 (online), DOI: 10.3169/mta.11.75 (2023).
- [14] Kheibarihafshejani, S. and Park, J.-H.: Time multiplexing multi-view display using slit mirror array and light emitting diode illuminated digital micromirror device, *Journal of Information Display*, Vol. 25, No. 4, pp. 349-365 (online), DOI: 10.1080/15980316.2024.2329124 (2024).
- [15] 大坪 誠: 【招待講演】空中ディスプレイの原理と応用事例、及び今後の展望, 画像電子学会研究会講演予稿, Vol. 23.02, pp. 18-22 (オンライン), DOI: 10.11371/wi-ieeej.23.02.0.18 (2023).