



# 指さしによる空中像の結像位置知覚および立体感の評価

小湊咲<sup>1)</sup>, 福岡美結<sup>1)</sup>, 小泉直也<sup>1)</sup>

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

**概要:** 2次元光源ディスプレイを用いて空中像を提示すると、多くのユーザが立体的に知覚していることが報告される。またユーザが空中像に触れる動作を行う際は、空中像に指がめり込む位置に持っていき様子が多く見られる。これはユーザが空中像に立体感を感じているにもかかわらず、その正確な位置を把握できていないことを示している。そこで本研究では、指さしによって、ユーザの知覚している2次元空中像の立体感の計測を実施した。

**キーワード:** 立体・空中像ディスプレイ, 視覚, 空中像, 立体感

## 1. はじめに

2次元光源ディスプレイを用いて空中像を提示すると、その空中像は平面上に表示されているにもかかわらず、多くのユーザが立体的に知覚していることが報告された。大学での一般向け展示において、体験者に猫の空中像を見せて、自身の指でそれを回転させる動作をしてもらったところ、多くの体験者が猫に立体感を感じると述べていた。

しかし、ユーザが空中像に触れる際、空中像が本来結像している位置よりも奥に指を持っていく傾向が多く見られた。これはユーザが空中像を立体的に知覚しているにもかかわらず、その位置を正確に把握できていないことを示している。

そこで本研究では、指さし実験を通じてユーザが知覚している空中像の位置と立体感を明らかにする。具体的には、ユーザに空中像として表示した球体の前面と天頂の2か所を指さししてもらう。まず、空中像の前面の結像位置がどこにあると知覚しているのかを明らかにするため、前面を指さししてもらう。次に、ユーザの知覚している空中像の立体感を明らかにするため、天頂を指さししてもらい、前面から天頂までの距離の差を測定する。この差がユーザの感じている物体の立体感を表す。したがって、この指さし実験によって、ユーザが知覚する空中像の結像位置と立体感を明確にできる。さらに、空中像と実物の知覚される立体感の違いを評価するために、実物の場合も同様に測定する。

## 2. 関連研究

### 2.1 空中像

空中像とは光源から出た光が光学素子によって反射・屈折し、空中に結像した実像のことである。空中像を結像させる光学系には、Micro Mirror Array Plate (MMAP) [1] や、Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR) [2] などがある。これらを用いることで、空中像を裸眼で観察できる。

### 2.2 空中像を用いたインタラクション

空中像を用いたインタラクションとして、Kim らの MA RIO[3] が挙げられる。これは空間上に配置されたブロックのもっとも高い場所に空中像が移動するインタラクションである。このシステムは、奥行方向を含む3次元空間での空中像の移動を可能にしている。ユーザが空中像の奥行位置を把握しやすくするために、空中像の下に影を表示させている。これは、影がない場合には空中像の奥行位置が把握しづらいという多くのユーザからの報告を受けたためである。このように、空中像の奥行位置の把握には手掛かりが必要である。しかし、手掛かりがない状態でユーザが空中像の位置をどのように知覚するかについては、まだ明らかにされていない。

### 2.3 空中像の立体感知覚に関する研究

空中像の立体感の知覚変化に関する研究として、Yano らの影の提示による空中像の立体感錯視の研究 [4] が挙げられる。空中像の特性として、空中像の厚みは実物よりも認識しにくいとされている。そこで Yano らは、空中像の直下に影を提示し、その影の長さを変化させることで、空中像の厚みの知覚にどのような変化が起こるかを検証した。その結果、影の長さを実際の値よりも長くすると知覚される厚みが増加し、短くすると減少することが報告されている。しかし、この研究では影が提示されていない状態での空中像において知覚される厚みは定量的に測定されていない。

### 2.4 絵画的奥行き手掛かりによるリーチング距離を測定する手法

McIntosh らの研究 [5] は、絵画的奥行き手掛かりがリーチング距離に与える影響を明らかにしている。この研究では、線遠近法やテクスチャグラデーションのような絵画的な奥行き手掛かりを持つ背景をテーブル上に投影し、その上に重ねて表示された目標に手を伸ばすことで、奥行き手掛かりの影響を測定した。結果として、絵画的奥行き手掛かりは、目標周囲の背景パターンの収束において特にリーチング距離に明らかな影響を与えることが示された。彼ら

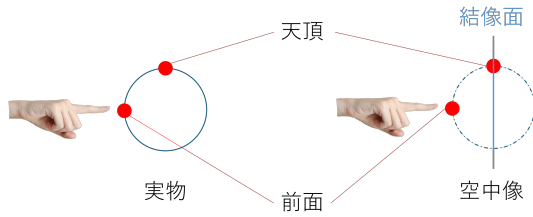


図 1: 前面と天頂の位置

の研究は、絵画の手掛かりがリーチング距離に与える影響を指さし手法で測定することを実現している。

### 3. 手法

本研究では、実物と空中像の球体に対して図 1 に示すように、前面と天頂の 2 か所を指さしてもらい、ユーザが知覚している空中像の結像位置と立体感が、実物と比較してどの程度の差があるのかを明らかにする。前述したように、前面を指さすことで、ユーザが知覚している空中像の位置を測定できる。さらに天頂を指さすことで、前面から天頂までの指さし位置の差を測定する。この差を明らかにすることで、ユーザが知覚している空中像の立体感を把握できる。

#### 3.1 仮説

##### 3.1.1 仮説 1: 空中像の結像位置の知覚に関する仮説

空中像を立体的に感じているということは、空中像の中心に結像面があると仮定した場合、空中像の前面がその結像面よりも手前にあるように見えると考えられる。具体的には、球体の半径の長さ分手前に前面があることになる。そのため、ユーザが空中像を立体的に知覚している場合、その分だけ指を手前に持ってくる予想できる。

##### 3.1.2 仮説 2: 空中像の立体感の知覚に関する仮説

実験では球体の前面と天頂の 2 か所の指さし動作をしてもらう。この前面の指さし位置と天頂の指さし位置の差が、ユーザが空中像に感じている立体感を示すものとなる。そのため、空中像の球体に対して実物の球体と同様の立体感を感じている場合、前面と天頂の指さし位置の差が、実物の球体の半径の長さと同じになると予想できる。

### 4. 実験

#### 4.1 実験装置

実物の球体を提示する条件では、直径 10 cm の白い発泡スチロール製のものを使用した。発泡スチロールを選んだ理由は、光沢や陰影がはっきりと表れにくい素材にすることで、表面の質感による立体感の知覚への影響を少なくするためである。一方、空中像の球体を提示する条件では、実物と見た目が同様になるよう、単色の白い球体を Unity で生成して表示した。空中像の大きさはディスプレイに表示された状態で直径 10 cm になるように調整した。提示する物体として球体を選んだ理由は、球体は運動視差による立体感の知覚への影響が少ないためである。

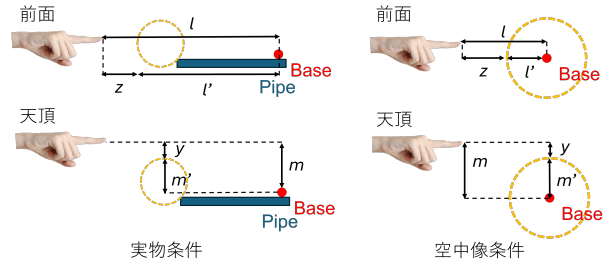


図 2: 球体の前面から指先までの距離の算出と天頂から指先までの距離の算出 (左: 実物条件, 右: 空中像条件)

指の位置計測には、光学式モーションキャプチャシステムである OptiTrack V120: Trio を使用した。被験者の人差し指にマーカーを装着させ、指の位置を取得した。

実物の球体は棒の先に取り付けて提示した。OptiTrack の Base を基準点とし、この点から指先までの奥行方向の相対距離  $l$  と高さ方向の相対距離  $m$  を計測した。球体の前面から指先までの距離  $z$  を算出するために、計測した相対距離  $l$  から、基準点から球体の前面までの距離  $l'$  を差し引いた (図 2 左上)。同様に、球体の天頂から指先までの距離  $y$  を算出するために、計測した相対距離  $m$  から、基準点から球体の天頂までの距離  $m'$  を差し引いた (図 2 左下)。

空中像の球体は、図 3 のように MMAP を用いて提示した。MMAP は ASKANET 製 ASKA3D プレート (488 mm × 488 mm) を使用した。2D ディスプレイには JAPANNEXT 製 JN-MD-173GT240FHDR ゲーミングモニター (17.3 インチ) を使用した。空中像の結像位置は、MMAP に対してディスプレイと面対称な位置となっている。迷光を抑えるために、ディスプレイにはルーバーフィルムを取り付けた。結像面の位置は MMAP の中心から 47 cm のところに設定した。これはルーバーフィルムを取り付けた状態で迷光が目立たない位置である。この面に結像する球体の中心を基準点 Base として、実物条件と同様に、基準点から指先までの奥行方向の相対距離  $l$  と高さ方向の相対距離  $m$  を計測した。空中像の球体の前面から指先までの距離  $z$  を算出するために、計測した相対距離  $l$  から、基準点から球体の前面までの距離  $l'$  を差し引いた (図 2 右上)。同様に、空中像の球体の天頂から指先までの距離  $y$  を算出するために、計測した相対距離  $m$  から、基準点から球体の天頂までの距離  $m'$  を差し引いた (図 2 右下)。実験では、あご台を用いて被験者の頭部の位置を正面に固定し、目線の位置を地面から 105 cm 上、結像面から 30 cm 手前に設定した。

#### 4.2 実験手順

実物の球体と空中像の球体の 2 条件において指さしを行い、指先の位置を計測した。ただし実物と空中像の実験は別日に行った。

まず、実物の球体における指さしの手順について説明する。初めに実物の球体を被験者の前に提示し、球体の前面の位置を正面から観察させた。このとき、球体を指で触れる行為は禁止した。また球体の見え方を被験者間で統一す

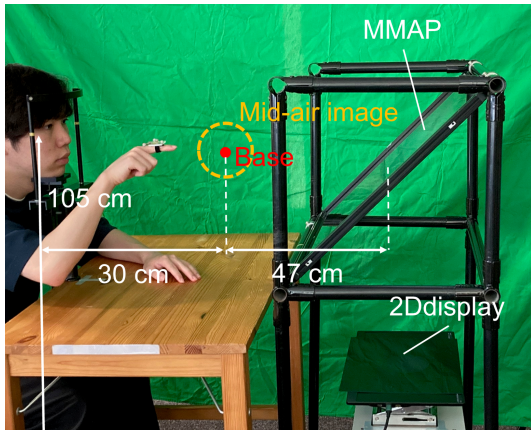


図 3: 空中像の球体を提示する装置と指さし動作の様子

るために、被験者の目線の高さは球体の中心の位置に設定した。観察後に球体を取り除き、球体の前面の位置を指でさしてもらった。次に、再び球体を装置に取り付けて提示し、被験者に球体の天頂を観察させた。観察後に球体を取り除き、球体の天頂位置を指でさしてもらった。

実物条件での指さしにおいて球体を取り除く理由は、球体を取り付けたまま指さしを行うと、指先が球体に触れる位置まで指を持っていくことで触覚的な手掛かりが加わってしまうためである。触覚手掛かりがない空中像と同じ条件にするために、視覚の情報のみで実物の指さしを行った。以上の手順を 1 試行として、5 試行を行った。

次に、空中像の球体における指さしの手順について説明する。空中像は図 3 のように提示した。このとき、空中像の球体の見え方を被験者間で統一させるために、あご台を用いて被験者の視点位置を固定した。空中像の条件では、触覚手掛かりの影響がないため、空中像の球体を表示させたまま指さしを行った。被験者には、まず空中像を観察しながら球体の前面の位置を指でさしてもらった。次に空中像を観察しながら球体の天頂の位置を指でさしてもらった。以上の手順を 1 試行として、5 試行を行った。

また空中像の条件では、実験の最後に「空中像の球体が立体的に見えたか」という質問に回答してもらった。これは被験者が空中像の球体に対して、立体感を知覚しているかを確認するためである。

以上の実験を、21 歳から 26 歳までの正常視力である 10 人の男性の被験者に対して、実物と空中像の 2 条件で実施した。被験者には左右のどちらの指で指さしをするかは問わなかった。

4.3 実験結果

4.3.1 指さし位置の比較

まず前面と天頂の指さし位置を、実物と空中像の 2 条件においてそれぞれ計測し、本来の球体の位置との差を比較した。指さし位置は奥行方向 (z 方向) と高さ方向 (y 方向) の 2 つの軸で測定した。図 4, 5 にそれぞれ実物条件と空中像条件において、各被験者の 5 試行における指さし位置の

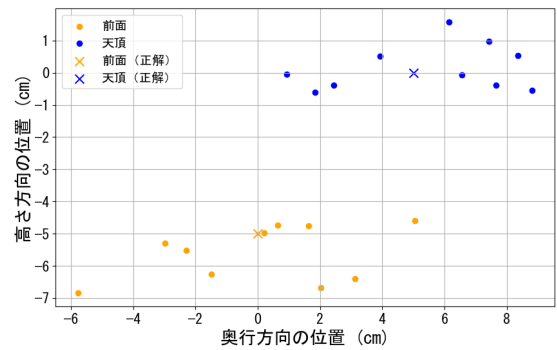


図 4: 実物の球体における前面と天頂の指さし位置

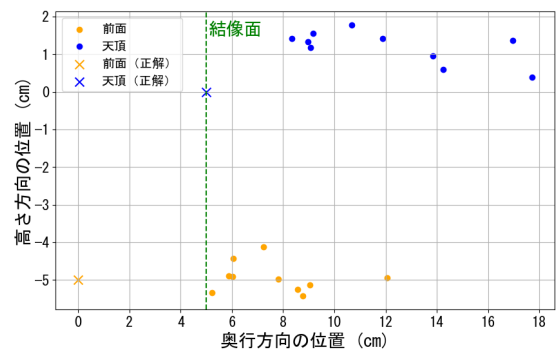


図 5: 空中像の球体における前面と天頂の指さし位置

平均値をプロットした。横軸は指の奥行方向の位置を示し、本来の前面位置を 0 cm とする。数値が大きくなるほど、本来の球体の前面位置よりも奥に指をさしていることを意味する。縦軸は指の高さ方向の位置を示し、本来の球体の天頂位置を 0 cm とする。数値が大きくなるほど、本来の天頂位置よりも上に指をさしていることを意味する。用いた球体は直径 10 cm であるため、本来の前面位置が (0, -5)、本来天頂の位置が (5, 0) (図 4, 5 においてそれぞれ前面 (正解)、天頂 (正解) で表される) となる。

図 4 より、実物体の前面の指さしでは、本来の球体の前面位置の前後約 3 cm の範囲に指を持っていく傾向がみられた。天頂の指さしでは、本来の球体の天頂位置の前後約 4 cm の範囲に指を持っていく傾向がみられた。全体的に指さし位置にばらつきがみられるのは、球体の位置を一時的に記憶してもらった後で球体を取り除いて指さしを行ったためと推測される。

一方で図 5 より、空中像の前面の指さしでは、結像面から約 4 cm 奥までの範囲に指を持っていく傾向がみられた。このことから、空中像の球体の前面は結像面の位置に知覚されると考えられる。また、天頂の指さし位置には約 10 cm のばらつきがみられた。

4.3.2 立体感の比較

次に図 4, 5 の結果をもとに、ユーザが知覚する空中像の立体感を算出した。本実験では、立体感を前面から天頂まで



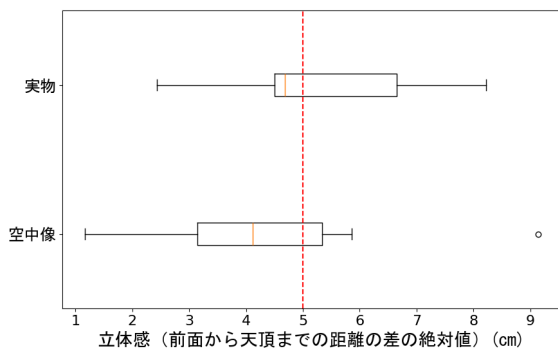


図 6: 実物と空中像の球体における立体感知覚の差

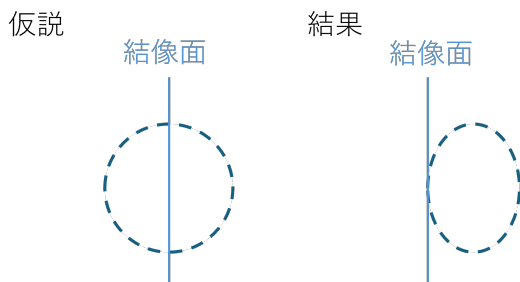


図 7: 知覚される空中像の球体の位置と立体感

の奥行方向の距離として定義する。各被験者が実物と空中像の 2 条件において、知覚した立体感を算出した結果を図 6 に示す。横軸は前面から天頂までの距離の差の絶対値、すなわち球の立体感を表す。実験で使用した直径 10 cm の球体における、物理的な前面から天頂までの距離 (5 cm) を赤い点線で示す。

図 6 を比較すると、空中像条件では、立体感が 5 cm 未満と知覚する被験者が実物条件よりも多いことがわかる。実験後の質問「空中像の球体に立体感を感じたか」に対して、10 人中 7 人の被験者が「立体感を感じた」と回答したが、そのうちの 3 人からは「実物と比較して立体感がやや低下した」という意見が得られた。

## 5. 考察

実物体の指さし位置にばらつきがみられた理由として、球体の位置を一時的に記憶してもらった後で球体を取り除いて指さしを行ったことが挙げられる。一方で、空中像条件での前面の指さし位置のばらつきが小さくなった理由は、空中像を観察したまま指さしを行ったためと考えられる。

天頂の指さし位置に約 10 cm のばらつきがみられたことについては、空中像がどれだけ立体的に見えているかによって天頂を指す位置が変化することから、被験者によって知覚される立体感の度合いが異なることを示していると考えられる。

知覚される立体感については、空中像条件では実物条件に比べてやや低下する傾向が見られた。実験後の回答でも、一部の被験者は「実物と比較して立体感がやや低下した」と

感じていた。このことから、空中像には立体感を感じるものの、物理的な球体に比べて立体感がやや低下する可能性が示唆される。

今後の課題として、空中像の種類による立体感の変化を調査することが挙げられる。本実験では単色の白い球体の空中像を提示したが、テクスチャやアニメーションが加わることで立体感がより増すと考えられる。特に、模様の歪みが大きいテクスチャや回転などのアニメーションを追加することで、立体感がさらに向上する可能性がある。また、陰影や空中像の形状によっても立体感が増えると考えられる。今後はこれらの要素を踏まえて、知覚される空中像の立体感をより詳細に調査する必要がある。

## 6. むすび

本研究では、ユーザが知覚している 2 次元空中像の結像位置と立体感を、指さしによって測定することで明らかにした。実験の結果、(1) 空中像の前面が結像面にあるように知覚されること、(2) 空中像の立体感は知覚されるが、実物に比べてやや減少することが示された。

今後は、テクスチャやアニメーションの追加、陰影や形状の変化による空中像の知覚される立体感の変化を調査したい。

**謝辞** 本研究は、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR216L の支援を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Satoshi Maekawa, Kouichi Nitta, and Osamu Matoba. Transmissive optical imaging device with micromirror array. In *Three-Dimensional TV, Video, and Display V*, Vol. 6392, 63920E, 2006.
- [2] 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, 2014.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Robert D. McIntosh, Matthew H. Iveson, Sebastian Sandoval Similä, and Antimo Buonocore. Pictorial depth cues always influence reaching distance. *Neuropsychologia*, Vol. 190, pp. 108701:1–12, 2023.