

2章
デバイス・原理・基礎

2-1
空中ディスプレイの視覚・認知

正会員 水科晴樹[†], 正会員 陶山史朗[†]

キーワード：空中像, 奥行き, 不安定性, 貼りつき, 運動視差

1 まえがき

本項では、最近注目を集めている空中像に関して、その奥行き知覚の不安定性と解消法、およびその原因などに関して概説する。

2 空中像の実物への貼りつき現象と、アーク3D表示と運動視差を用いたその解消方法

空中像は、実像/虚像を問わずに、前後の実物との輝度関係が、いわゆる透明視と異なるため、その知覚される奥行き感に不安定性がある。例えば、可変焦点レンズ型3D表示¹⁾においては、光学的な実像が、可変焦点レンズにより空中に形成されるが、その設定位置付近にボールなどの実物を配置するなどの方策をとらないと、知覚される奥行き位置がレンズ面に貼りつきやすくなることが知られている。ましてや、満足する生理的要因が限られる空中立体/3D像の場合には、その不安定性の増大が危惧される。

図1に、観察者も画像も静止している場合に、二眼式立体表示あるいはアーク3D表示(図2参照)により提示される空中立体/3D像の実物への貼りつき現象²⁾を示す。図1(a)空中立体/3D像の知覚される奥行き位置が、実物の奥行き位置の変化に沿って変化していることがわかる。すなわち、頭部や画像が静止している場合には、空中立体/3D像の設定奥行きとは関係なく、空中立体/3D像が実物表面付近に貼りついて知覚されるということが明らかとなった。

このため、応用面としても、図1右に示すように、実物への貼りつきが障害となって、図1(b)車両ナビゲーションや図1(c)手術ナビゲーションなどが実質的に困難となっている現状があり、その解消方法が求められていた。

われわれは、この空中3D像の実物への貼りつきを解消するために、運動視差を利用することを提案した²⁾。当然、運動視差を利用するためには、連続的な運動視差を有する3D表示が必要である。そこで、連続的な運動視差と広い視域を併せ持つ数少ない3D表示の一つとして、アーク3D

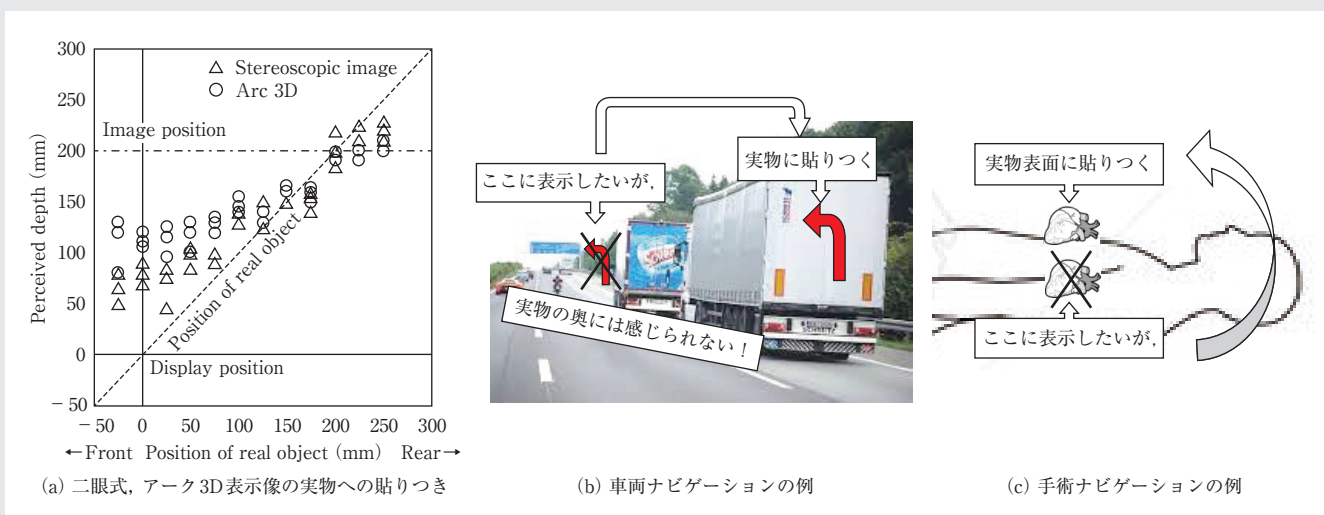


図1 空中立体/3D像の実物表面への貼りつき現象(静止)

[†] 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部
"Devices, Principles, Fundamentals of Aerial Display; Perceptual Phenomena in Floating Images" by Haruki Mizushima and Shiro Suyama (Graduate School of Technology, Industrial and Social Science, Tokushima University, Tokushima)

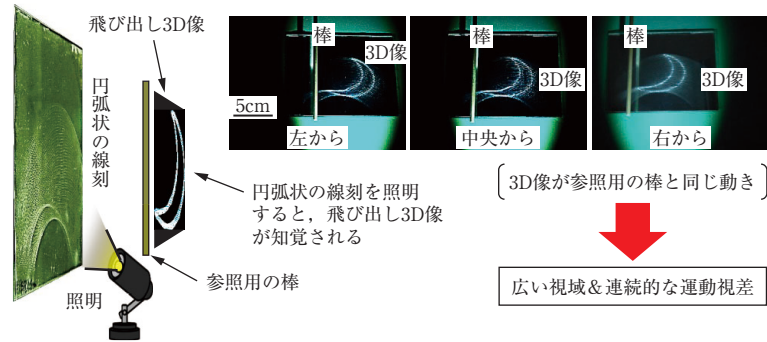


図2 アーク3D表示方式の原理と連続的な運動視差

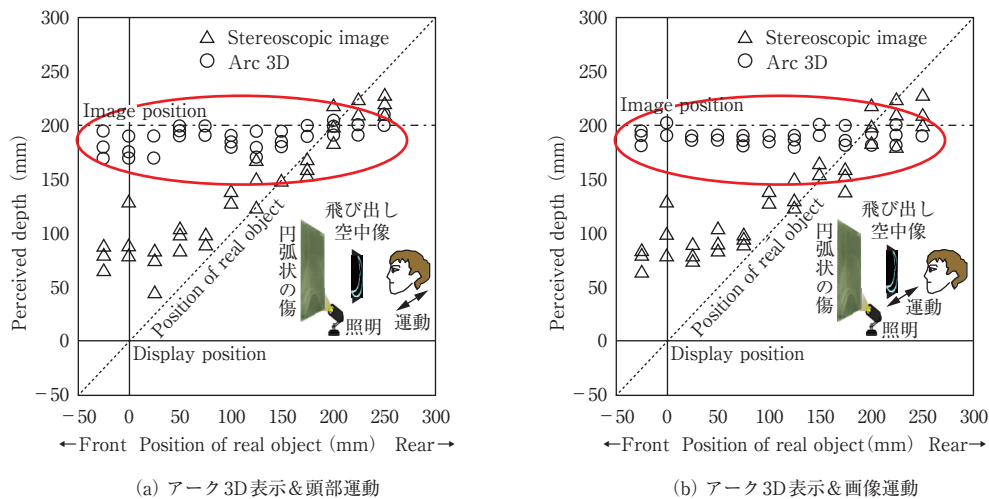


図3 アーク3D表示の適用と、(a) 頭部運動、(b) 画像運動による、運動視差を利用した3D像の貼りつき現象の解消

表示を適用した。

図2に、アーク3D表示の原理³⁾を示す。アーク3D表示は、図2左端の写真にあるように多くの円弧状の線刻から構成され、一つの線刻が通常のディスプレイの一画素に相当する。この円弧状の線刻群を単一光源で照明すると、一つの線刻から空中に一つの輝点が知覚され、図2左のような空中3D像を提示できる。この空中3D像は、図2右上のように観察位置が左右に連続的に移動した場合でも、参照用の実物の棒との位置関係からわかるように、知覚される奥行きと左右位置は変化しない。したがって、アーク3D表示は、連続的な運動視差と、広い視域を併せ持っている数少ない3D表示方式の一つであることがわかる⁴⁾。

図3に、運動視差を利用して、空中3D像の実物への貼りつきを解消する方法²⁾を示す。運動視差は、図3(a) 頭部運動と、図3(b) 画像運動により提示した。まず、運動視差を有しない二眼式立体表示の場合は、頭部運動や画像運動を行っても、空中立体像の知覚される奥行きは、実物の奥行きに沿って変化しており、貼りつきはまったく解消されないことがわかる。

これに対して、連続的な運動視差を有するアーク3D表

示の場合には、赤枠で囲ったように、空中3D像の知覚される奥行きは、設定された奥行き位置付近にすべて分布しており、実物の奥行き変化には影響されないことがわかる。

以上、観察者も画像も静止している場合には、空中立体/3D像の知覚される奥行きは実物に貼り付くこと、およびこの貼りつき現象は、連続的な運動視差を有するアーク3D表示の適用と、運動視差を利用することにより解消できることを明らかにした。

3 実物への貼りつき現象を利用して、空中虚像の奥行きを簡便に変化させる方法

上記の貼りつき現象を逆に利用して、光学的な空中虚像の知覚される奥行き位置を容易に変化させる方法⁵⁾を、図4のように提案した。まず、図4左下に示すように、舞台などでハーフミラーによるモニタ画像の光学的な空中虚像を、実物の俳優と共演させるという取り組みが行われており、大変な好評を博している⁶⁾。しかし、この方式では、空中虚像の奥行き位置を変化させるためにモニタを移動することは大掛かりになり過ぎて、実質上、困難である。

そこで、われわれは、図4右下に示すように、空中虚像

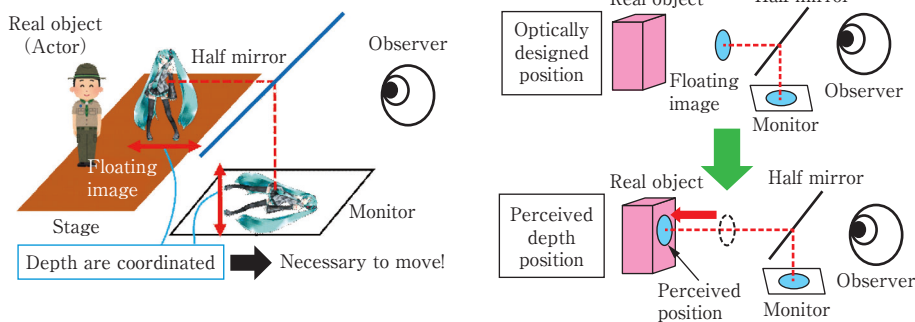
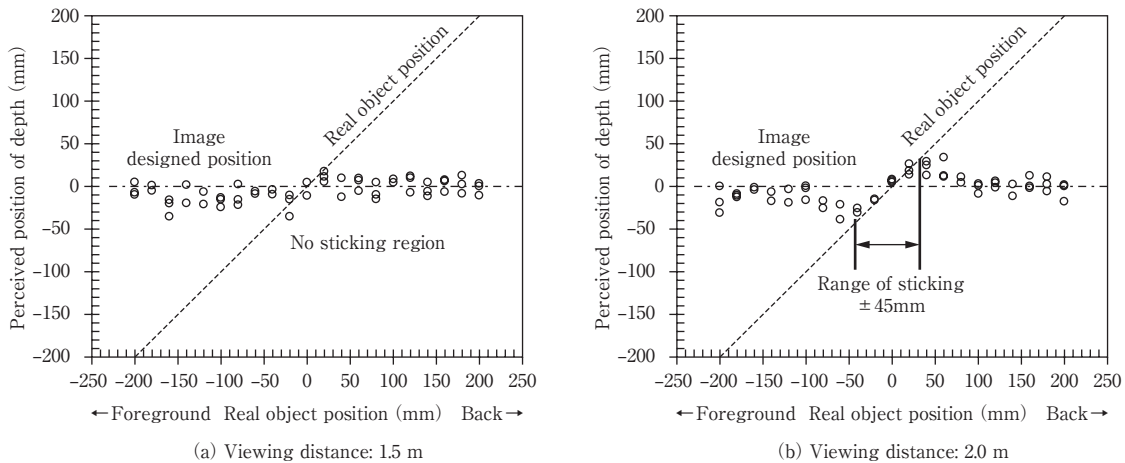


図4 ハーフミラーによる光学的な空中虚像の実物表面への貼りつき現象

の実物への貼りつきを利用して、知覚される奥行き位置を移動させる方法を提案した⁵⁾。図1に示したように連続的な運動視差を有するアーク3D表示においても、頭部や画像が静止している場合には、実物への貼りつきがあることから、光学的空中像でも貼りつきの発生が予想されるからである。

図4(a)、図4(b)に、実物への貼りつきによる虚像の知覚される奥行き変化を示す。図4(a) 観察距離1.5 mでは、空中虚像の奥行きは設定位置にあり、貼りつきは見られない。これに対して、図4(b) 観察距離2.0 mでは、光学像であるにもかかわらず、空中虚像の設定奥行き位置の周辺の約±45 mmの範囲で貼りつきが見られ、光学的な空中虚像の知覚される奥行きを、実物の奥行きとほぼ同一にして変化できることが明らかとなった。

以上、空中虚像の実物への貼りつき現象を利用することにより、光学的な空中虚像であっても、その奥行き位置を容易に変化できることを明らかにした。

4 空中像の奥行き知覚の不安定性

空中像において、上記に挙げたような奥行き知覚の不安定性はさまざまな要因によって引き起こされる⁷⁾⁸⁾。例として、実像/虚像による空中像の場合を考える。実像/虚像はその位置にある実物と光学的には等価である。したがって、両眼視差、運動視差、輻輳、調節といった、奥行き知

覚の生理的要因をすべて満たしており、空中像単体で考えると奥行き知覚を不安定化させる要素は見当たらない。

では、その空中像の背後から眼に向かう光についてはどうか。もし、実物が不透明な物体であれば、背後からの光は物体により遮断されるため、オクルージョン(遮蔽)が生じて実物の背後は見えない。また、実物が光学フィルタなどの透明物体であっても、物体背後からの光は何らかの形で物体の影響を受ける。その影響は輝度の低下であったり色の変化であったりするが、結果として、そこに透明な実物があるという知覚が生じる(透明視)。一方、空中像の場合、像の背後からの光はそのまま透過するので、オクルージョンが生じないことはもちろん、透明視の成立に必要な実物と背後の輝度の関係も満たさない。例えば、図5に示すように、透明視の場合は、実物の存在が背後の輝度の低下する方向に影響を及ぼすが、空中像の場合は背後の輝度に空中像の輝度が足し合わされるため実物の透明視とは異なる。このような通常の視覚体験との相違が、絵画的要因による奥行き知覚に影響していると考えられる。

直交ミラーアレイ(Crossed Mirror Array: CMA)は、楕形のステンレスミラーを格子状に組み合わせることにより、開口部に入射した光がステンレスミラーにより2回反射され、光源に対してCMAと面对称の位置に幾何光学的な実像を形成する素子である⁹⁾。われわれは、このCMAによる空中実像を用いて、空中像の知覚位置の評価を行っ

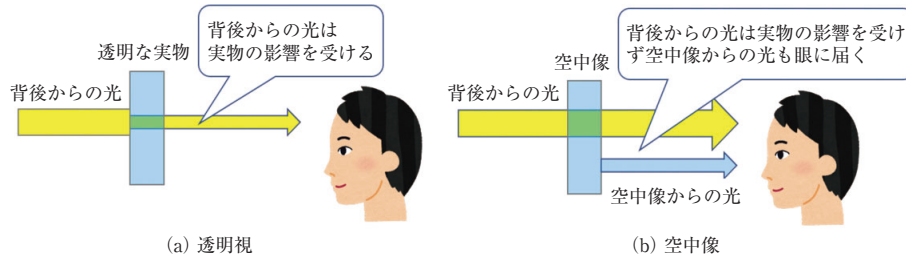


図5 実物の透明視と空中像の違い

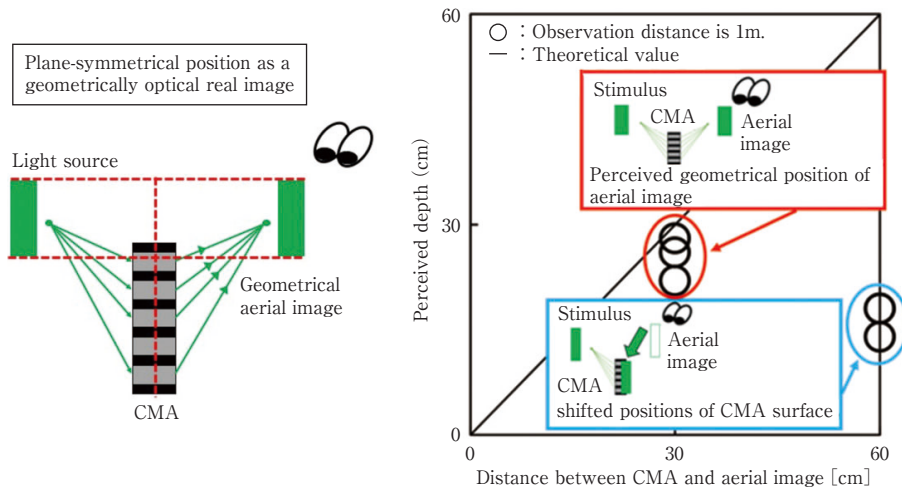


図6 CMAの原理と、CMAによる空中像における奥行き知覚の不安定性

た。図6に示すように、実像の形成される位置がCMAから離れると、空中像は実像の位置ではなくCMA表面付近に知覚され、奥行き知覚が不安定になることがわかる¹⁰⁾。先述の理由により、実物の透明視と異なる状況になっているが、実像付近に知覚されるときは、両眼視差などの生理的要因が奥行き知覚に優位に作用し、一方で、CMA表面付近に知覚されたのは、CMAの格子により空中像にオクルージョンが生じていると解釈されたためと考えられる。

実像/虚像における知覚の不安定性を考えると、満足する生理的要因が限られる空中立体/3D像において奥行き知覚の不安定性が生じることは想像に難くない。また、前節で述べた空中像の実物への貼り付き現象も、空中像と前後の物体の輝度の関係が透明視の条件を満たさないため、空中像が実物表面に投影された像であると視覚系が解釈したために生じたと考えられる。一方で、空中像と前後の実物との輝度の関係を、オクルージョンが生じている場合と等しくなるように調整すれば、安定したオクルージョンによる奥行き知覚を得ることも可能である¹¹⁾。

5 奥行き知覚の不安定性に対するオクルージョンと注視点の影響

先述のようにCMAによる空中実像は、両眼視差や運動視差などの生理的要因によれば、図7左のようにCMAの

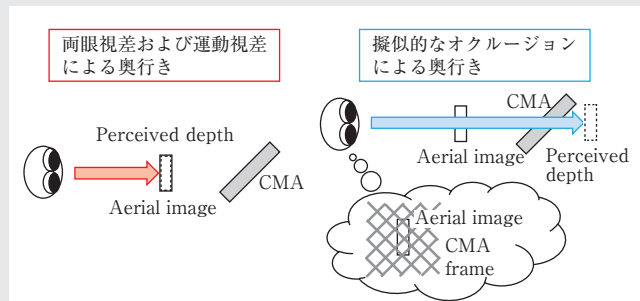


図7 CMAによる空中像の不安定性を引き起こす二つの奥行き手がかり

手前に形成された実像の位置に知覚されるが、図7右のようなCMAによる擬似的なオクルージョンが生じているという絵画的要因によれば、CMAの奥に知覚されることになる。これら奥行き知覚手がかりの矛盾の結果が、像が形成されている位置からの奥行き知覚の逸脱や不安定性として現れると考えられる。

この仮説を検証するにあたり、われわれは空中像の輝度を変化させることで、CMAの格子の見やすさが変わることに着目した¹²⁾。図8にその様子を示す。図8(a)の低輝度(4.5cd/m²)の場合はCMAの表面がほとんど見えず、空中像の奥行きはグラフ内の傾き1の線で示す実像の位置付近に安定して知覚される。図8(b)に示すように輝度が40cd/m²ま

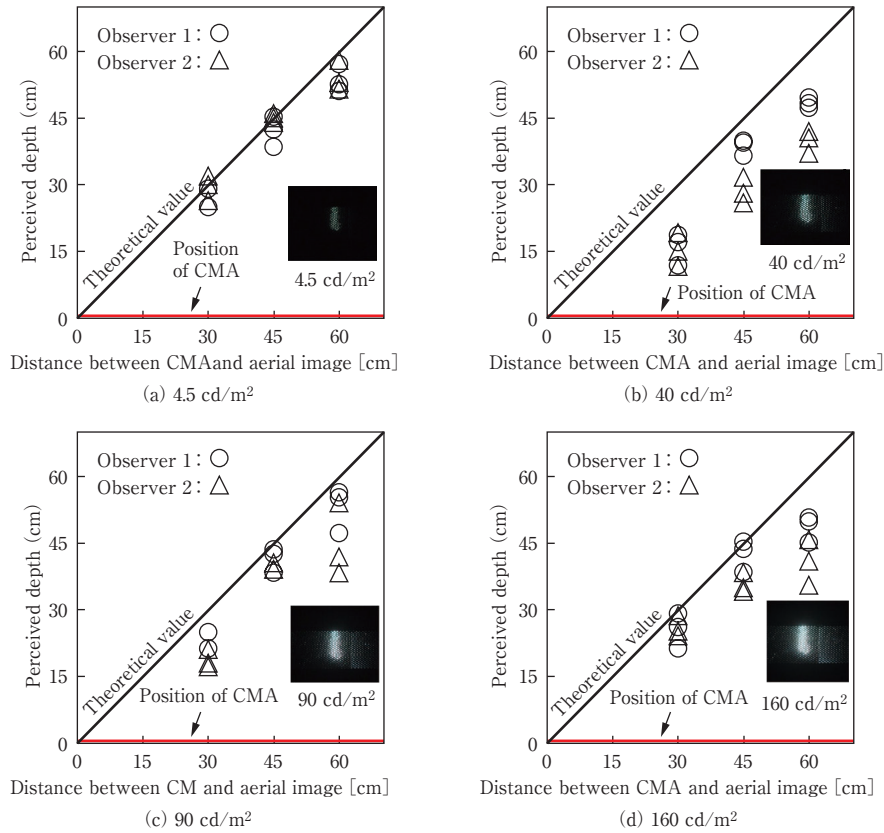


図8 CMAによる空中像の奥行き知覚における輝度の影響

で上昇すると、CMAの格子面が明確に視認できるようになり、空中像の奥行き位置はCMAの方向(グラフの下方向)にシフトする。さらに高輝度(90 cd/m²および160 cd/m²)になると、CMA格子面に対して明るい実像がより目立つようになり、図8(c)、図8(d)のように空中像は実像の位置付近に知覚されるようになる。輝度が変わっても実像の位置は変わらないので、両眼視差などの生理的要因が示す奥行きは一定であるが、輝度の変化によるCMAの視認性の変動に由来するオクルージョンなどの絵画的要因の寄与が変わるために、知覚される奥行きが変化したと考えられる。

上記の実験では、オクルージョンなどの絵画的要因の寄与を調べるために輝度の影響に着目したが、生理的要因の影響も無視できない。実像の位置が決まれば両眼視差や運動視差は一意に決まるが、注視点が明確に与えられていなければ、観察者の輻輳は注視する位置によって異なる。そこでわれわれは、観察者の輻輳が空中像の奥行き知覚に与える影響を評価した¹³⁾。輻輳を厳密に統制するために、実物の注視点を用いるのではなく、図9下に示すノニアス刺激(水平方向に視差がついた線分の上半分と下半分を左右眼に別々に呈示する)を用いた。図9(a)～図9(c)は、CMAからの注視点の距離がそれぞれ0 cm、30 cm、60 cmの場合の空中像の奥行き知覚を示す。注視点の位置を変化

させると、空中像の奥行き知覚が注視点付近に引っ張られていることがわかる。このことから、観察者の輻輳の状態も空中像の奥行き知覚に影響することがわかる。

以上のことから、空中像のように奥行き知覚手がかりの間で、通常の透明視とは異なる状況や矛盾が生じ、奥行き知覚が不安定な場合においては、それぞれの手がかりの変動が、奥行き知覚に大きく影響する。一方で、2節における運動視差のように、奥行き知覚手がかりを適切に付加することにより、奥行き知覚を安定化させることも可能であると言える。

6 むすび

空中像における奥行き知覚の不安定性の例、それを解消する方法、および、その原因について概説した。不安定性の原因が明確になれば、知覚を安定化させるための方策も明らかになる。今後の空中像の応用展開を考えるうえで、空中像の知覚特性を適切にコントロールできることが重要と考える。

(2020年12月7日受付)

〔文 献〕

- 1) S. Suyama, M. Date and H. Takada: "Three-Dimensional Display System with Dual-Frequency Liquid-Crystal Varifocal Lens". Jpn.J. Appl. Phys. 1. 39, 2A, pp.480-484 (2000)

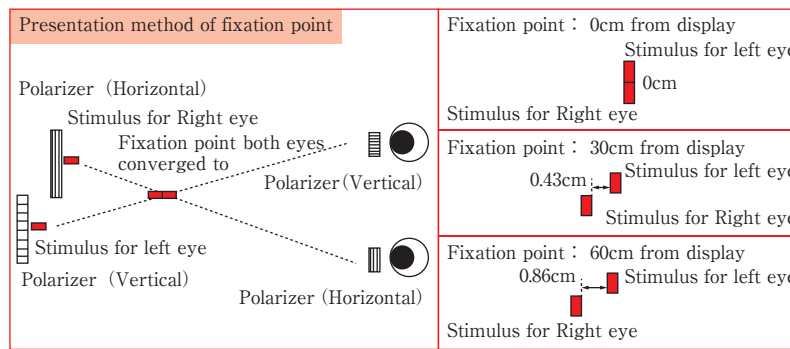
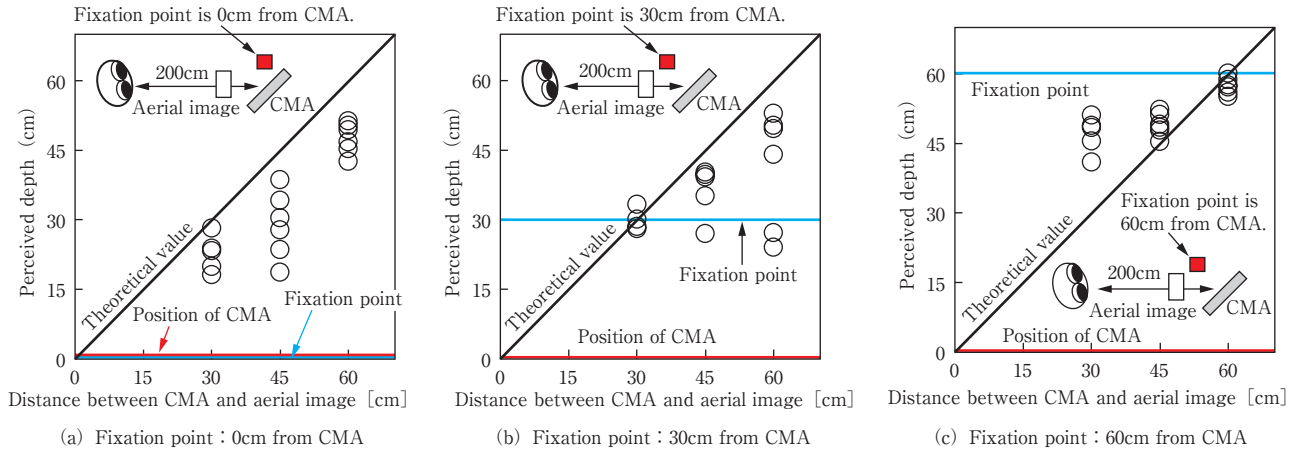


図9 観察者の輻輳が空中像の奥行き知覚に与える影響

2) K. Nakano, T. Yoshida, H. Mizushina and S. Suyama: "Perceived Depth in Arc 3D Display Can Penetrate into Behind Real Object by Moving Arc 3D Images in Contrast to Unpenetrated Perceived Depth in Stereoscopic Display", Proc. IDW '19, 3DSAp2/3Dp2-14, pp.167-170 (2019)

3) S. Suyama, H. Mizushina and H. Yamamoto: "Theoretical and Experimental Perceived Depths in Arc 3D Display and Its On/Off Switching Using Liquid-Crystal Active Devices", Proc. IEEE IAS 2019, 2019-ILDC-0674 (2019)

4) S. Suyama, H. Yamamoto: "Recent developments in DFD (depth-fused 3D) display and arc 3D display", Proceedings of Three-Dimensional Imaging, Visualization and Display 2015, 9495, 949507 (2015)

5) 清原稜, 陶山史朗, 水科晴樹: "実物体への重畳表示により浮遊像の知覚される奥行きを操作可能な奥行き貼り付き効果における視距離の影響", 映像学技報, 3DIT2020-22, 44, 27, pp.25-28 (2020)

6) S. Uchida, M. Imoto, H. Takada and K. Ogawa: "Evaluation of Observation Position in Immersive Telepresence Platform "Kirari", Proc. of IBC2016 Conference on IBC Future Zone and the IBC Technical Papers, 15 (2016) / M. Makiguchi, T. Kawakami, M. Sasai and H. Takada: "Smooth Motion Parallax Glassless 3D Screen System Using Linear Blending of Viewing Zones and Spatially Imaged Iris Plane", Proc. of SID2017, pp.61-2 (2017)

7) J.E. Swan, A. Jones, E. Kolstad, M.A. Livingston and H.S. Smallman: "Egocentric Depth Judgments in Optical, See-Through Augmented Reality", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 13, 3, pp.429-442 (2007)

8) E. Kruijff, J.E. Swan and S. Feiner: "Perceptual Issues in Augmented Reality Revisited", 2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Seoul, pp.3-12 (2010)

9) H. Yamamoto, H. Bando, R. Kujime and S. Suyama: "Design of crossed-mirror array to form floating 3D LED signs", Proc. SPIE 8288, Stereoscopic Displays and Applications XXIII, 828820 (2012)

10) K. Yamamoto, H. Mizushina and S. Suyama: "Perceived Depth Instability of Aerial Image by Changing Image Position from Crossed Mirror Array", IMID 2019 DIGEST, 661 (2019)

11) 村瀬香緒里, 小木哲朗, 齋藤康太, 小山尚英: "大画面ハーフミラーによる没入型拡張現実環境の構築とオクルージョン表現", 日本バーチャルリアリティ学論誌, 13, 2, pp.141-150 (2008)

12) 山本航平, 水科晴樹, 陶山史朗: "直交ミラーアレイによる空中像の知覚位置の不安定性における刺激輝度の影響", 信学技報, HIP2020-42, 120, 185, pp.50-55 (2020)

13) K. Yamamoto, H. Mizushina and S. Suyama: "Perceived Depth Instability Difference of Aerial Image in CMA (Crossed Mirror Array) by Changing Fixation Point of Eyes", Proc. IDW '19, 3DSAp2/3Dp2-17, pp.179-182 (2019)



水科 晴樹 (みずか はるき) 2003年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士後期課程修了。高知工科大学, カナダ・ヨーク大学, 東京工業大学, (株)国際電気通信基礎技術研究所 (ATR), 情報通信研究機構 (NICT) を経て, 2015年より, 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師。視覚心理物理学 (主に奥行き知覚, 眼球運動), 3D表示システムの研究に従事。博士 (工学)。正会員。



陶山 史朗 (すやま しろう) 1981年, 九州大学工学研究科修士課程修了。同年, 日本電信電話公社入社。液晶ディスプレイ関連技術, および, 2000年前後より3D表示技術の研究開発に従事。2007年より, 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授。3D表示システム関連 (DFD表示, アーク3D表示, 液晶アクティブデバイス, 立体知覚, 脳内補完システム等) の研究に従事。工学博士。正会員。