



# 視焦点の移動によるボケの変化勾配の有無が 融像困難性に与える影響

Effect of Inclination of Blur Amount with Depth of Observer's Focus  
on Difficulty of Stereoscopic Fusion

野倉大輝<sup>1)</sup>, 木島竜吾<sup>2)</sup>

Daiki NOKURA and Ryugo KIJIMA

1) 岐阜大学 自然科学技術研究科 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, nokura.daiki.i4@s.gifu-u.ac.jp)

2) 岐阜大学 工学部 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1, kijima.ryugo.n4@f.gifu-u.ac.jp)

**概要**：立体視にとって重要な眼の機能である輻輳と調節は、連動性がある。視差式 3 次元ディスプレイにおいては、提示する輻輳と調節の距離情報が矛盾し、像面から離れた物体を融像しにくい。マクスウェル光学系を用いると焦点深度が非常に深い映像を提示でき、融像を容易にすることができる。本研究では、マクスウェル光学系を用いてボケを付与した映像を提示する場合と焦点深度が浅い一般的な 3 次元ディスプレイと同じ場合で融像に要する時間を調べた。その結果、ボケの変化勾配の矛盾は融像困難に寄与していることが明らかになった。

**キーワード**：視覚，融像，ボケの変化勾配，マクスウェル光学系

## 1. はじめに

現在、3D 映画や 3D ゲーム機といった立体的にモノを表示できる 3 次元ディスプレイが普及している。さらに、ディスプレイを頭にのせることでユーザーに高い臨場感や没入感を提示できる頭部搭載型ディスプレイも普及している。これらの主流は左右両眼に異なる像を見せる視差式である。提示する映像は一般に一定の深さにあり、与えられる 3 次元の手掛かりは両眼視差のみである。3 次元ディスプレイを使用すると酔いや眼精疲労などの悪影響や使用中に融像ができない、または難しくなるという影響がある。

人間の眼の機能のうち、立体視にとって重要なものは輻輳と調節である。輻輳は、ある対象物を見るように両眼が回転する機能であり、調節はある対象物を見るときに水晶体の厚さを変化させて網膜上に明瞭な像を得ようとする機能である。輻輳と調節は連動し、一方を制限するともう一方の制御できる範囲が制限されることが実験により明らかになっている[1]。

現実世界では、輻輳と調節の制御系が与える距離情報が一致している。しかし、視差式の 3 次元ディスプレイでは、映像の提示面は固定であり、鮮明な網膜像を得るために調節をそこに合わせようとする。また、輻輳は立体像を見るように動作するため、両者の制御系が与える距離情報の矛

盾が生じる[1]。これは輻輳調節矛盾と呼ばれ、視覚疲労などの影響を与えることが指摘されている[2]。

マクスウェル光学系は、ピンホールやレンズなどの光学部品を使用し、光線を一点に収束させる。収束点に眼を置くと、瞳にあたかもピンホールがあるよう状態になり、焦点深度が非常に深くなる。これはマクスウェル視と呼ばれている。筆者らは、このマクスウェル光学系に非常に深い映像を提示することで、融像を容易にすることができるこ

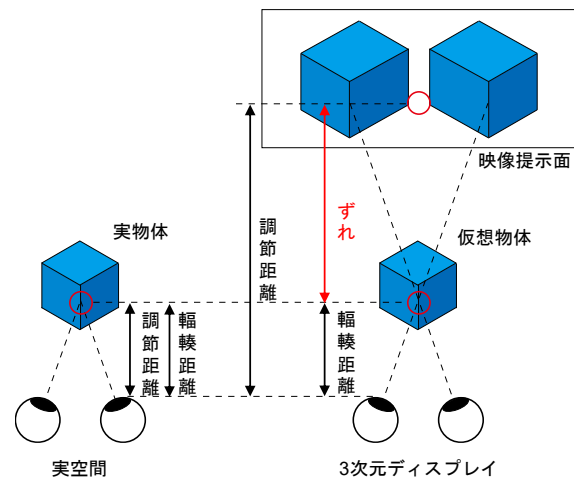


図 1: 輻輳調節矛盾

と、そして1[mm]から2[mm]のピンホール像でも効果があることを発見した[3][4].

筆者らは、融像困難のメカニズムを解明することは価値があることだと考えている. [3][4]における実験中、像面が約1mにあり、視差による提示距離が近距離である場合、被験者から融像はできたがぼやけて見えたという報告があった. また、若年者に視差式の3次元ディスプレイで提示する物体を前後に往復させたとき、被験者の輻輳及び調節は提示物体を追うように作用していたという報告もある[5]. これらのことを踏まえると、必ずしも調節は提示面に固定されるわけではなく、輻輳に引っ張られて動いていると考えられる. すると、視差式3次元ディスプレイの融像困難性の要因は2つ考えられる. 一つは、ボケの変化勾配の矛盾である. 通常はボケの量が少なくなる、つまりピントが合うように調節を行っているが、視差式3次元ディスプレイでは逆にボケの量が多くなるように作用することになる. 眼はボケの変化をみており、ボケの量が増えることで融像が難しくなるという仮説が立てられる. もう一つは、単なるボケの大きさである. 提示面と視焦点がずれるほどボケの量が大きくなり、ボケの量が大きいほど融像が難しくなるという仮説である. 本研究では、マクスウェル光学系を用いて焦点深度が非常に深い映像を提示する場合と、マクスウェル光学系を用いてボケを付与した映像を提示する場合と、焦点深度が浅い一般的な視差式3次元ディスプレイと同じ場合で融像に要する時間を調べ、これらの2つの仮説を検証した.

2. 融像困難原因の仮説検証

2.1 装置

本研究で使用した装置を紹介する. マクスウェル光学系を用いたディスプレイを2つ作成し、右眼および左眼の前に置くことで3次元ディスプレイとした. 設計図を図2に示す. この調節が自由であるディスプレイを Focus Free Display (FFD) と呼ぶ (図3). 本研究では0.1[mm]のピンホールを使用した. また、FFD からピンホールを除いてディフューザーを追加すると虚像が立ち、焦点深度が浅いディスプレイとなる. これを Virtual Image Display (VID) と呼ぶ (図4). 虚像は眼から約1.1[m]の位置に立つ. 装置の視野角は27.824[deg], 換算視力[6]は0.1453である.

FFD と VID でカメラの焦点距離を変化させて撮影した像を図5に示す. これを見ると FFD は距離によらず、明

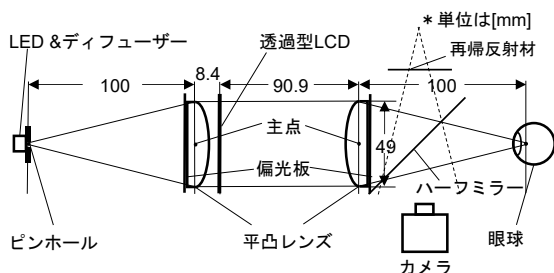


図 2:ディスプレイの設計図

瞭な像が得られるが VID では虚像距離と離れるにしたがってボケ具合が大きくなることが確認できる.

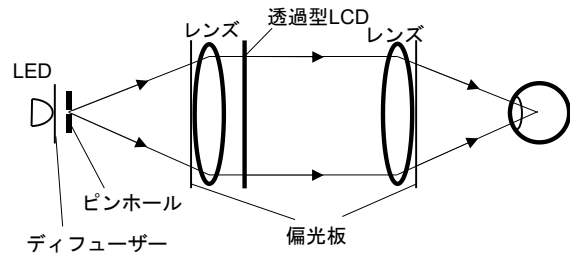


図 3:Focus Free Display (FFD) の光線動作図

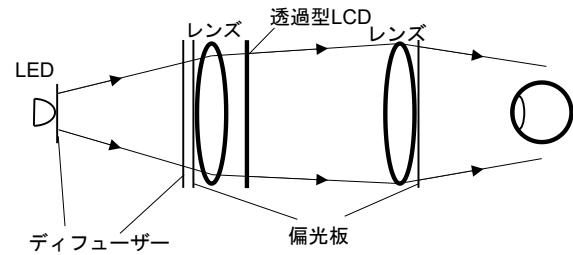


図 4:Virtual Image Display (VID) の光線動作図

表 1:装置の材料諸元

平凸 レンズ	製造元	Edmund Optics
	品番	#32-972
	焦点距離	100.00[mm]@587.6[nm]
	有効径	49[mm]
	BFL	93.41[mm]
透過型 LCD	製造元	テイデック(液晶板)
	品番	ATM0430D25(液晶板) ZEDV0430D25(基盤)
	有効エリア	95.04[mm]×53.856[mm]
	解像度	480×272[px]
	ドットピッチ	0.066[mm]×0.198[mm]
LED	製造元	Opto Supply
	品番	XPGWHT-L1-STAR-G53
	電流	350-1500[mA]
	光束	130-433[lm]
	サイズ	3.45[mm]×3.45[mm]
ピン ホール	製造元	Edmund Optics
	品番	#56-283
	直径	0.1[mm]

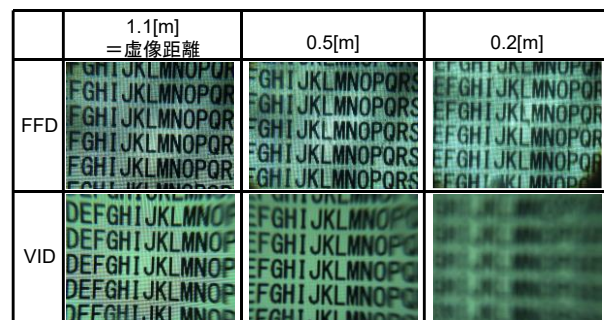


図 5:FFD と VID の像

2.2 実験条件

FFD と FFD にボケを付与した映像を提示する場合 (FFDB とする) と VID の 3 条件で融像にかかる時間を測定する実験を行った。提示する視標は図 6 に示すような立方体視標と立方体ワイヤーフレーム視標を使用した。立方体ワイヤーフレーム視標は傾けて表示することで両眼網膜像差を大きくしている。正方形視標では、6 種の距離条件 (0.1[m], 0.5[m], 0.3[m], 0.25[m], 0.2[m], 0.175[m]), 立方体ワイヤーフレーム視標では、5 種の距離条件 (0.1[m], 0.5[m], 0.3[m], 0.25[m], 0.2[m]) で実験を行った。なお、この距離は立方体の中心からカメラまでの距離である。大きさによる距離情報を無くすために、距離条件に変わらず正方形視標では約 2.86[deg], 立方体ワイヤーフレーム視標では約 7.6[deg]に統一した。さらに、ディスプレイの輝度による要因を取り除くため、どの条件でもディスプレイの輝度を 20[cd/m<sup>2</sup>]±1[cd/m<sup>2</sup>]に合わせ実験を行った。なお、輝度の測定・計算は瞳径が 4[mm] であるとし行った。

2.3 ボケを付与した映像

マクスウェル光学系でボケを付与した場合 (FFDB) の提示映像について述べる。VID で仮想物体の提示距離に焦点を合わせた場合のボケの量を理論的に導出し、レンダリング時にボケを付与した。なお、観察者の瞳径は 4[mm]とし計算をした。

VID でカメラの絞りを 4[mm]にし、焦点距離を変化させて撮影した画像と理論的に計算したボケを付与したレンダリング画像を図 7 に示す。

2.4 手続き

実験の手順を述べる。はじめに被験者の両眼間隔を測定し装置や提示映像のセッティングを行う。暗幕に囲まれた非常に暗い環境で、顎台の上に顔を置き固定する。

被験者がディスプレイに提示している映像を見られる状態になったら実験を開始する。はじめに眼から 3[m]の位置に青色の基準オブジェクトが表示される。5 秒後に基準オブジェクトが消え、緑色の視標オブジェクトが表示される。被験者が融像できたときにキーボードのキーを押すことで、融像にかかった時間を計測する。10 秒経過しても融像ができない場合は、実験を中断し融像不可として記録をする。これをそれぞれの距離条件で 2 回ずつランダムな順番で行った。

この実験を各被験者に対して FFD と FFDB と VID においてランダムな順番で行った。被験者が実験中に急速に慣れ、結果が大きくなることを懸念し、予めどの条件においても練習を行うことで、ある程度慣れた状態で実験を行った。被験者は 20 代の男性 7 人であり、全員正方形視標の実験を終えてから立方体ワイヤーフレーム視標の実験を行った。

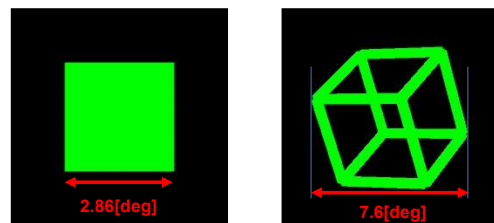


図 6: 実験で提示した視標  
左: 正方形視標, 右: 立方体ワイヤーフレーム視標

視標距離	VIDで指標距離にカメラの焦点を合わせて撮影した画像		左を模擬して shader でボケを付与した出力画像
	右眼ディスプレイ	左眼ディスプレイ	
0.5[m]			
0.3[m]			
0.25[m]			
0.2[m]			
0.175[m]			

視標距離	VIDで指標距離にカメラの焦点を合わせて撮影した画像		左を模擬して shader でボケを付与した出力画像	
	右眼ディスプレイ	左眼ディスプレイ	右眼ディスプレイ	左眼ディスプレイ
0.5[m]				
0.3[m]				
0.25[m]				
0.2[m]				

※両眼間隔が6.4[mm]の場合

図 7: VID で指標距離にカメラの焦点を合わせて撮影した画像とそれを模擬して shader でボケを付与した出力画像  
左: 正方形視標, 右: 立方体ワイヤーフレーム視標

2.5 結果

本研究での実験では、予め練習をしっかりと行っていたためか、正方形視標と立方体ワイヤーフレーム視標の実験ともに融像不可の結果は一つも得られなかった。そのため、被験者毎に各距離条件での平均融像時間を求めグラフを作成した。そのグラフを図 8, 9 に示す。縦軸が融像にかかった平均時間、横軸は視標の距離条件、エラーバーは標準誤差である。また、有意水準 5% で Paired t-test を行った。

正方形視標のグラフと立方体ワイヤーフレームのグラフともに、1.1[m]や 0.5[m]ではどの条件もあまり差が見られないが、0.3[m]以下では VID が FFD や FFDB よりも高い傾向があることが確認できる。

FFD と FFDB の間では融像に要する時間の差が小さいので、提示する映像のボケ（明瞭さ）は融像困難に影響を与えていないと考えられる。一方、FFDB と VID の間では融像に要する時間は FFDB < VID であることから、ボケの変化勾配の矛盾が融像困難に影響を与えていると考えられる。前者の考察は比較的信頼度が高いが、後者の考察には当てはまらない距離条件もあった。

3. 結論

融像困難が発生するメカニズムを知りたく、本研究では、視差式 3 次元ディスプレイにおける融像困難の原因として、単にぼけることと、ボケの変化勾配の矛盾を取り上げ調べた。その結果、ボケの量は融像困難を招かず、ボケの変化勾配の矛盾がより融像困難に寄与していることを明らかにした (図 10)。

参考文献

[1] 原島博, 元木紀雄, 矢野澄男: 3 次元画像と人間の化学, オーム社, 2000.

[2] 山賀達也, 吉澤誠, 杉田典大, 阿部誠, 本間経康, 3D 映像視聴における焦点距離と輻輳距離の矛盾が生体に与える影響の評価, 計測自動制御学会東北支部研究集会, 287-10, 2014.

[3] 野倉大輝, 稲守一晃, 木島竜吾: マクスウェル光学系を用いた輻輳調節矛盾の解消効果, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D3-1, 2022.

[4] 野倉大輝, 木島竜吾: 視差式ディスプレイにおける両眼立体視時の融像困難性と観察瞳制限の関係, 信学技報, Vol. 123, No 60. MVE2023-10, pp 51-56, 2023.

[5] 塩見友樹, 堀弘樹, 長谷川聡, 高田宗樹, 大森正子, 松浦康之, 石尾広武, 長谷川旭, 神田哲也, 宮尾克: 実物体と 2D 映像, 3D 映像を用いた水晶体調節反応と輻輳運動の長時間同時測定 -若年者と中高齢者の立体視機構の違い-, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, Vol. 16,

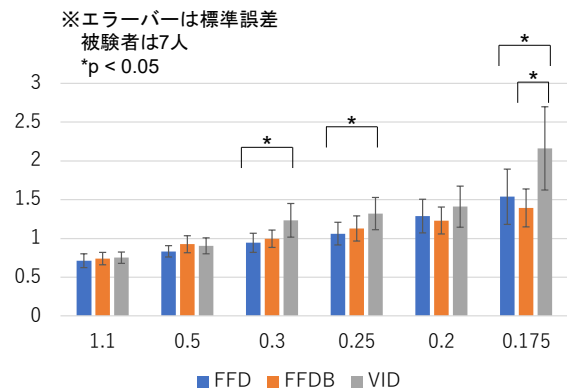


図 8: 融像するまでに要した平均時間 (正方形視標)

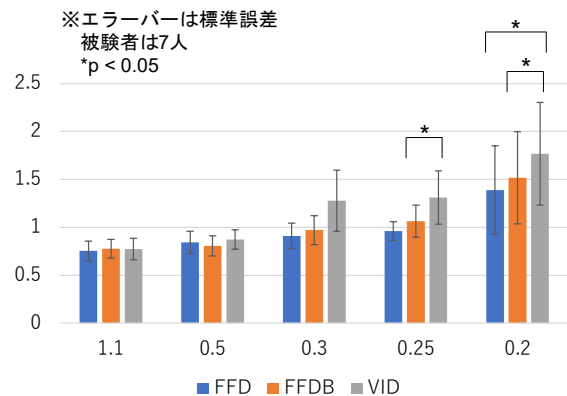


図 9: 融像するまでに要した平均時間 (立方体ワイヤーフレーム視標)

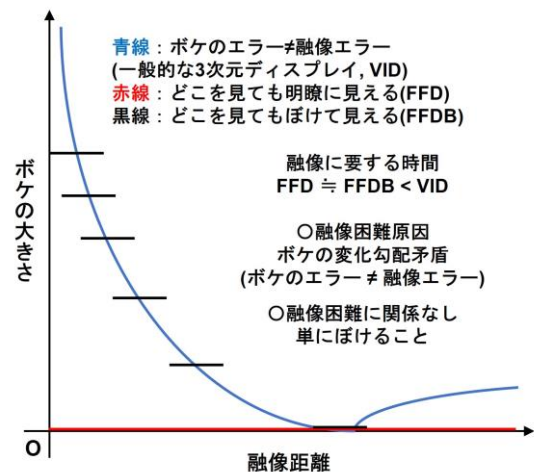


図 10: 融像困難の発生理由の仮説

Num.2, pp. 139-148, 2011.

[6] 岩本和世, 前田太郎, 谷江和雄: 視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討, 人間工学, Vol. 30, Num. 2, pp. 99-109, 1994.