

# 両眼視差と被写界深度ボケを同時に提示する注視反応ディスプレイ

折笠 達郎<sup>†</sup> 岡谷 貴之<sup>†</sup> 出口光一郎<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東北大学 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

E-mail: †{orikasa,okatani,kodeg}@fractal.is.tohoku.ac.jp

あらまし 眼の被写界深度の制約により眼の網膜上に生成される像のボケは、重要な奥行き手掛かりの一つである。ビューアの注視位置を計測し、これに基づいてリアルタイムに表示映像を変えるやり方で、このボケを映像上に疑似的に再現する映像ディスプレイシステムがある。本稿では、これを眼鏡方式の3次元ディスプレイと組み合わせることで、被写界深度制約によるボケと両眼視差を、ビューアに同時に提示するシステムについて述べる。このシステムを使って、2つの奥行き手掛かりを提示することによる奥行き感や臨場感の強化の度合いを調べる実験を行ったので、その結果を示す。

キーワード 立体視、立体表示、3次元UI、視線追跡・解析

## 1. はじめに

究極の映像ディスプレイとは、われわれが自分の眼で現実シーンを見るときに感覚や視覚的体験をそのまま再現してくれるようなものだろう。映像ディスプレイに関する長年にわたる多様な研究開発は、この目標へ向けて進められてきたと言える。この目標を実現するには、映像表示の基本性能—コントラスト、色再現性や解像度など—の一層の向上と、奥行き手掛かりのさらに忠実な再現が必要である。

人が3次元シーンを見るとき、その視覚システムは、画像に存在する奥行き手がかりを使って、網膜上の2次元的な像から3次元情報を引き出している。いろいろな奥行き手がかりのあることが知られているが、それらは一般に絵画的 (pictorial) 手がかりと非絵画的な手がかりに分類できる。絵画的な手がかりとは、絵画で3次元シーンを描写するときのように、2次元画像上に表現可能な手がかりを指す。これには、パースペクティブ、物体の前後関係 (手前の物体が奥の物体を部分的に遮蔽する)、相対的な大きさ、さらにはコントラストなどがある。これらは従来の2次元映像ディスプレイでもほぼ完全に再現できる。非絵画的な手がかりには、両眼・運動にかかわる視差、輻輳および焦点調節がある。いわゆる3次元ディスプレイはこれらの再現のためにある。

もうひとつの重要な手がかりが、網膜上で生じる像のボケである。眼の被写界深度に制約があることで、眼から物体までの奥行きに応じて、像の場所ごとに程度が異なるボケが生じる。以降このボケのことをDOF (Depth-Of-Field) ボケと呼ぶことにする。眼の焦点調節は、DOFボケと深い関連のある奥行き手掛かりだが、両者は異なるものと考えられる。前者は、水晶体の厚みを変える毛様体筋への指令およびそのフィードバックとして、奥行き情報を与えると考えられているが、DOFボ

ケはこの焦点調節の結果、網膜上に生成される像のボケ量が与える奥行き情報である。

既に広く市販されている眼鏡方式のものを含め、現在までに実現されている3次元ディスプレイのほとんどは、視差および輻輳の再現に重点が置かれている。そこでは焦点調節はもちろん、DOFボケも再現されない。ボケや焦点調節を再現する理想的な方法は、シーンのライトフィールドを完璧に再現することである。インテグラル・フォトグラフィ方式など、この方向を目指した研究開発が近年盛んだが、今のところ完璧なライトフィールドを再現し得る映像デバイスは存在しない。ごく限られた奥行き範囲であれば、体積型のディスプレイによってこのことはある程度達成できるが、表示映像の品質に問題が残る問題がある。

以上を踏まえて本研究では、両眼視差とDOFボケを同時に提示可能ないわゆる注視反応ディスプレイを構築し、その効果を調べた。これは、視差を再現する眼鏡方式の3次元ディスプレイ上を使い、それを見るビューアのディスプレイ面上の注視位置を連続的に計測し、その結果に基づいて表示映像をリアルタイムに変化させることで、視差を提示しつつ眼に生じるDOFボケを疑似的に再現するシステムである。その狙いは、視差とDOFボケを同時に提示することで、奥行き感覚を強化することにある。焦点調節を再現することはできないままだが、これら重要な2つの奥行き手掛かりを、解像度やコントラストなどの映像品質を犠牲にすることなく再現し得る点で大きな意義があると考えている。

本稿では、高速な注視計測および映像合成—システムの性質上重要となる—を可能にするシステムの実装方法を示した後、そのシステムを用いて行った実験結果を示す。実験では、2つの手掛かりを同時提示することにより、奥行き感覚がどのように強化されるかを調べた。また、眼鏡方式の3次元ディスプレイでは、両眼融合に関



図 1 DOF ボケの効果の例．左図の絵画（Christina's World, Andrew Wyeth）に適切な奥行き分布を仮定し，それに基づいて DOF ボケを与えたものが右図．

わる視覚的違和感がしばしば生じることが知られているが，DOF ボケを提示することでこれが打ち消される可能性が以前から指摘されている．実験ではこの調査も対象とした．

### 1.1 関連研究

仮想現実感（VR）の研究で，二次元画像として表現される仮想世界の見えの現実感を強化する目的で，注視点変化に応じて画像の DOF ボケを変化させるというコンセプトを最初に示したのが [11] である．また [12], [20] には，2 次元映像ディスプレイを用いた注視反応ディスプレイ，すなわちビューアの注視位置を計測し，これに応じて映像の DOF ボケを変化させるシステムの実装，およびそれを用いた実験の報告がある．[12] では，注視に基づく DOF ボケの提示により，ゲームなどの VR 作業空間におけるタスクの遂行精度が上がると述べられている．[20] では，ビューアに自分の意思で注視点を選ぶ自由を許しつつ，ボケに基づいて奥行き感覚を強化することができたと報告されている．

これらは DOF ボケのみを再現しようとしている点で本研究とは異なるが，[13] では，注視点に応じて左右眼それぞれに提示する画像上の DOF ボケを変化させるシステムを実装しており，その基本的な考え方はわれわれのシステムと同じである．ただしこの研究では，眼鏡方式の 3 次元ディスプレイを用いて立体視を行う際に生じる二重像（視差範囲の広い環境で起こりやすい）による不快感を軽減することが目的としている．ビューアが注視していない領域がボケることで，二重像による違和感が軽減されると報告されているが，奥行き感覚の強化には関心が払われていない．なお，このような指摘（二重像による違和感を DOF ボケが低減すること）は以前からある（例えば [21]）ことを記しておく（ただし [13] の実験結果は貴重である）．

これに対し本研究では [13] のように視覚的違和感の抑制のみを目標とするのではなく，奥行き感覚を強化することを目標としている．現実シーンにおいてあたかもビューアがそこにいるかのような感覚（＝臨場感）を再現する映像ディスプレイの実現が目標であり，動機が異なる．また本研究では，注視計測および画像合成の高速化に特に注意を払っている点でも従来研究と異なる．

2 次元映像ディスプレイに基づくシステムを示した [20] では，注視計測装置の性能不足，特にその計測速度の低さから，ビューアにボケの変動の過程が知覚されてしまい，それによる違和感の発生が指摘されていた．なお [12], [13], [20] では，60Hz 程度の時間分解能しかない市販の注視計測装置を用いており，人の眼の運動速度を考えればこれが不十分なのは明らかである．本研究では高速カメラと GPU を用いて，注視位置を高速に計測する方法を示す．また，同じく GPU を用いて，DOF ボケを再現した映像を実時間で合成する方法の実装についても述べる．

本研究のシステムではビューアは一人に限定され，3 次元ディスプレイの他に注視計測装置や提示映像の計算が必要となるなど制約も多いが，視覚体験の現実感や自然さを特に重要視する用途—例えばテレグジスタンスの実現が必要な遠隔医療など—において十分な実用性があると考えている．

以降，人視覚において DOF ボケが果たしている役割について議論し，本研究の狙いをより明確にした後，システムの実装方法について詳述し，このシステムによる奥行き感覚の強化度合いを調べた実験についてその結果を述べる．

## 2. 人視覚における DOF ボケの役割

人の視覚において DOF ボケはいくつかの役割を果たしていると考えられる．本節ではこれら役割について，これまでの研究をまとめながら議論し，本研究の狙いを述べる．

### 2.1 奥行き手掛かりとしての DOF ボケ

DOF ボケは，人の奥行き知覚に相当程度寄与することは分かっている．これは，次に述べるような研究により明らかにされてきた．

DOF ボケが奥行き手がかりとなることを最初に指摘したのは Pentland [1] である．そこでは，画像上のボケの空間変化がシーンの点までの相対的な距離の量的手がかりを与え得ることが，計算論的立場から示され，また人の視覚系がこの手がかりに基づいて奥行き情報を認識していることが示唆された．DOF ボケの絵画的手がかりとしての側面は Mather らの論文 [2] ~ [4] に詳しい．

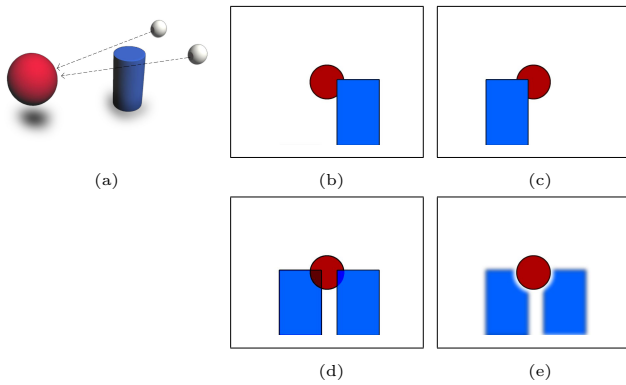


図 2 両眼視野闘争と DOF ボケが果たす役割 . (a) 両眼視野闘争が発生する状況 . (b) 左眼の網膜像 . (c) 右眼の網膜像 . (d) 両眼視野闘争のイメージ . (e) DOF ボケの効果 .

それらでは、人の視覚系がボケた領域とシャープな領域の境界を用いて物体の奥行き順序を判断していることが報告されている。さらに Nguyen らの論文 [5] では、他の奥行き手がかりがない場合に、視覚系は網膜上のボケから対象までの距離を判断できることが示された。また、網膜上のボケが焦点調節を駆動すること [6], [7] , さらにその運動指令あるいは感覚から奥行き知覚が行われ得ることが示されている [8] .

上の各研究のほとんどは、静止映像中の静的な DOF ボケに関するものである。しかしながら DOF ボケは本来動的な性質を持つ。人は、眼の前の 3 次元シーンを観察する際、注意や関心が様々な場所に時間的に移り行くのに応じて、注視点を絶えず移動させる。このとき、眼はその被写界深度の制約のため、シャープな像を得るために絶えず焦点調節を行う。注視点の移動前後で注視する物体の奥行きが変化すれば、それに応じた焦点調節によって眼の被写界深度は変化し、故に DOF ボケの分布も動的に変化する。

未だはっきりした研究はない模様だが、注視点の移動という（能動的）行動と、それによって引き起こされる網膜像上の DOF ボケ変化という反応の因果的ペアは、視覚体験の自然さと深く結び付いているのではないだろうか。特に、映像ディスプレイシステムによる臨場感などの感覚の擬似的な再現に、一定の効果があると予想され、これが本研究の基礎となっている。

## 2.2 視差を提示する 3 次元ディスプレイにおいて DOF ボケの提示が生む効果

人は左右の眼に異なる像が入力されたとき、その 2 つの像が交互に意識に現れることがある。この現象を両眼視野闘争と呼ぶ。これは、ストレスや眼精疲労を引き起こすと言われている。自然な条件下でも、視差が大きすぎて融像がなされない場合、典型的に両眼視野闘争が起こる。例えば図 2 のように人の頭部に比較的近いところに物体があり、それより奥の物体を注視していて左右像が大きく異なる場合がそうである。

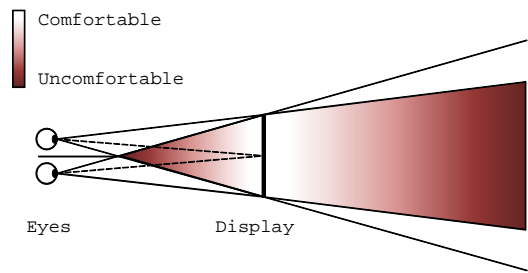


図 3 快適な立体視が可能な領域 .

このような現象は、眼鏡方式などの視差を提示する 3 次元ディスプレイにおいて顕著に生起することが知られている。これは、ビューアに与えるストレスや眼精疲労の主要な要因の一つであると考えられている [9] . そうならないためには、左右像の視差が一定の範囲に収まっていて、融像されなければならない。このことから、ビューアが快適に立体視可能な奥行き範囲が決まる。立体視が快適に行われるとされる領域の例を図 3 に示す。

このため、眼鏡方式の 3 次元ディスプレイのためのコンテンツでは、対象とする 3 次元シーンの視差を適切に修正することが行われている [9] . コンテンツ製作にあっては、立体視可能な奥行き範囲に収まるように、視差を移動・縮小したり、あるいは非線形変換を施すことが行われる。上述の視差範囲の他にも、視差感度、視差勾配、視差速度などについて同様の制約があり、それぞれの制約を満たすように視差は修正される。しかしながらこうして再現される視差は不正確であり、奥行き情報も不正確なものとなるから、それによる損失は大きい。

われわれの普通の視覚体験では、3 次元ディスプレイで生じるようなストレスを頻繁に感じることはない。これには、人の眼球の網膜像上に生じる DOF ボケが寄与しているせいであると考えられる。例えば図 2 のような場合、注視していない近接物体の像は網膜上で大きくボケる。左右の眼の像が大きく異なっても、その異なる部分が強くボケ、コントラスト等が低下していることから、その部分が無意識に抑制され、両眼視野闘争の生起を回避できていると考えられる。実際、融像がなされない左右の眼の映像のうち、意識上でどちらが優位になるかは、コントラストや色といった、視覚刺激の強さによるところが大きいことが知られている [10] .

このように、DOF ボケを適切に再現することは、眼鏡方式の 3 次元ディスプレイにて正しい視差を提示し、正確な奥行き感覚を伝える上で役立つと考えられる。

## 2.3 視覚系における DOF ボケの振る舞い

提案システムでは、注視点の計測に基づいて画像を変化させることで焦点調節をシミュレートしようとする。この考えの背景には、人がシーンを観察するとき、注視点変化と焦点調節が主従関係にあるという仮定がある。注視点変化はいつも焦点調節より時間的に先んじ [14] , 注視点変化がフォーカスずれを生み、それを補

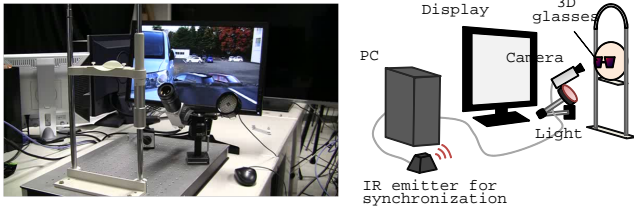


図 4 左：システムの全景．右：システムの構成．

正するために網膜像のボケに基づいて焦点調節が実行される [6], [7]．また，注視には選択の自由度があり，その決定には潜在的に様々な要因が関与し得る一方で，焦点調節に許される自由度は圧倒的に少ない．このようなことから少なくとも機能的には，目の焦点調節はカメラの AF 同様に，ボケを入力にある程度自動的・反射的に行われる自律的で独立した機能であると仮定できるのではないか．もしそうならば，提案システムのように焦点調節をディスプレイ上の画像変化で置き換えても，ビューアの奥行き知覚にさほど負の影響を与えないだろうと期待される．

なお [15] では，奥行きの知覚が焦点調節に影響を与えるという，上の仮定と矛盾する報告がなされている．絵画を見るとき，注視点を変えると絵画の奥行き手がかりによる奥行き感の変化がきっかけとなって，焦点調節が誘発されるという．しかしながら，より最近の研究 [16] でこれとは反対の結果，つまり奥行きの知覚は焦点調節に影響しないという報告がある．われわれは後者の立場を採用する．

### 3. 視差と DOF ボケを同時に提示する注視反応ディスプレイ

#### 3.1 システム概要

図 4 に示すように，システムは 3 次元ディスプレイ，高速カメラと近赤外光源，映像出力用と視線計測用の 2 基のグラフィックスカード (GPU) を搭載した PC で構成される．ビューアの注視位置を正確に計測するため，単一のビューアを想定する．

3 次元ディスプレイには 23 インチの DELL 社製 Alienware OptX AW2310 (と nVidia 社製 nVidia 3D Vision)，あるいは 46 インチのソニー社製 KDL-46LX900 のいずれかを用いた．注視点の計測用カメラとして，ディテクト社製高速カメラ HAS-220 を用いた．PC は CPU に Intel 社の Core i7，8 GB のメモリを有し，GPU に nVidia 社の GeForce GTX480 を 2 基搭載している．OS は 64 ビット版の Windows7 である．

ビューアは 3D 眼鏡を装着し，あご台に頭を固定してディスプレイ上に表示される視差を再現した映像を見る．シーンは現実のものでも仮想的なものでもよいが，それぞれのシーンの奥行き分布は画像面に対して 1 価の関数であるとする．ビューアがシーンの画像を見ている間，視線計測装置はビューアの注視点，すなわち画像のどの

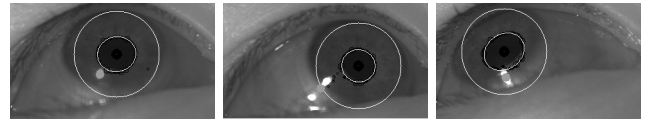


図 5 眼球トラッキングの様子を示すスナップショット．

点を見ているかを連続的に計測する．ここでは計測対象は片方の眼 (以下の実験では右眼を使用) のみとし，その注視点からシーンの奥行き値を取得し，その奥行き値への焦点調節をシミュレートした画像を左右の眼にそれぞれ提示する．注視点の計測から，それに基づく画像の合成・表示にいたる一連のプロセスはリアルタイムで実行される．

[20] にも指摘があるように，この方法で視覚的な違和感を生じさせないためには，ビューアの視線変動に対する時間遅れを最小にする必要がある．そのため，高速カメラによる眼球画像の撮影に加えて，注視計測と画像の合成にそれぞれ 1 基ずつの GPU を用いることで，計算時間の最小化を図った．以下，注視計測と画像合成の方法を順番に述べる．

#### 3.2 注視点計測

ビューアのディスプレイ上の注視位置は角膜反射法によって計測する．角膜反射法とは眼前にカメラと近赤外光源を配置し，瞳孔中心と角膜表面における反射像 (プルキンエ像) の位置から注視点を計測する方法である．カメラと近赤外光源を配置した時，カメラから得られる映像を図 5 に示す．

画像中の瞳孔中心，プルキンエ像を検出し，その相対ベクトルをキャリブレーションにより画面上の注視点に対応付け，注視位置を算出する．本研究で用いた 3D 眼鏡はアクティブシャッター方式だが，それはシャッターの開閉によらず近赤外光を透過する．そのため近赤外光源を用い，カメラに入射される可視光を IR フィルタでカットすることで，3D 眼鏡のシャッターの影響を受けずに注視点の計測を行うことが出来る．図 5 は，3D 眼鏡を装着した状態で撮影したビューアの眼の画像でトラッキングを行っている様子である．

##### 3.2.1 瞳孔中心のトラッキング

一連の処理について計算量を比較すると，プルキンエ像の検出および注視位置算出はともに計算量が小さく，瞳孔の検出が支配的となり，これをいかに高速に行うかが鍵となる．瞳孔は円形に近いので，図 5 のように画像上では近似的に楕円になる．そのため提案システムでは瞳孔のエッジ候補点を取り，RANSAC アルゴリズムを用いてこの楕円を検出する．

具体的には，瞳孔のエッジ候補点を多数検出した後，そこからランダムに 5 点を選んで楕円を計算し，全エッジ点との距離から楕円を評価することを繰り返し，最も高い評価を与える楕円を最終解とする．計算量を考えると，楕円の計算は式 (1) の楕円パラメータ  $a, b, c, d, e, f$

を，サンプルのエッジ候補点座標  $x_n, y_n$  から線形最小二乗法で求める．

$$ax_n^2 + bx_n y_n + cy_n^2 + dx_n + ey_n + f = 0 \quad (1)$$

なお楕円の評価は計算量を低減するため，楕円中心とエッジ候補点を結ぶ直線上で測ったエッジ候補点と楕円上の点との距離を使う．

$n$  点を選択する RANSAC アルゴリズムにおいて必要なサンプル数  $k$  は，インライアの割合を  $w$ ，計算 1 回当たりに要求する信頼度を  $G$  として

$$k = \frac{\ln(1 - G)}{\ln(1 - w^n)} \quad (2)$$

と表される [17]．この式から，例えばアウトライアが 7 割存在し，計算 1 回当たりの信頼度を 0.999 確保したい場合，2840 個のサンプルの生成と評価が必要になる．高速化のため提案システムでは，サンプルの生成と評価を GPU を用いて並列化した．提案システムは GPU に nVidia 社の GeForce GTX 480 を用いており，4096 のサンプルを理論上同時に並列計算できる．

具体的には，以下のようなアルゴリズムで楕円検出を行う．

(1) 画像上で楕円中心の初期位置を定め，そこから放射状に線を  $m$  本引き，その上の濃淡値を  $n$  ピクセル分，双線形補間によりサンプリングし， $m \times n$  画素の画像を作る（極座標変換）．

(2)  $m$  本の線上で，1次元のボックスフィルタによる平滑化を行い，それぞれの 1 階微分と 2 階微分をそれぞれ計算する．1 階微分がある閾値 ( $T$ ) 以上で，2 階微分の値が正から負へと変化する画素位置を特定する．1 階微分の値が大きなものから順に， $p$  個選んで記録する．

(3) (2) で得たエッジ点に対し RANSAC を実行し，楕円を推定する．計算は GPU 上で行う．全エッジ点の画像座標およびスコア値（1 階微分の値）を，GPU の shared memory に記憶し，RANSAC のサンプル数と同じ数のスレッドを立ち上げる．各サンプルごとに楕円を計算し，楕円の妥当性を評価，最大スコアを与える 5 点を得る．

(4) RANSAC の最大スコアで得られた 5 点を使って改めて楕円上の点を再度選び，その全点を使って楕円を計算し直す．

全エッジ点の画像座標およびスコア値（1 階微分の値）を，GPU のシェアードメモリに記憶する必要性から， $m \times p \times 3$  個の float 型の数をシェアードメモリに確保する必要がある．RANSAC のサンプル数と同じスレッドを立ち上げる時（最大サンプル数）=（ブロック数） $\times$ （スレッド数）であるが，1 ブロックは GPU の 1 マルチプロセッサに相当するので，ブロックはその GPU の総マルチプロセッサ数に近い数にするのがよい．以上の実装により，画像 1 フレームの処理時間は 1.8 ミリ秒以下に抑えられた．

なおブルキン工像のトラッキングは，図 5 に示すように，ブルキン工像は非常に明るい像として画像に現れることを利用する．前フレームのブルキン工像の座標を中心とした矩形領域を事前に設定した閾値で二値化し，その重心を求める手法でトラッキングを行う．

### 3.2.2 キャリブレーションと注視点の計算

こうして得られた瞳孔中心とブルキン工像の座標とを，画面上注視点に変換する．画面上の注視位置は，ブルキン工像と瞳孔中心の相対ベクトルの多項式として表現する．指定したポイントをビューアに注視させ，そのときの瞳孔中心とブルキン工像の座標を記録しておき，この多項式の係数を最小二乗法で求める．

### 3.3 ボケ画像の合成と表示

前節で得られた注視点に応じて DOF ボケを再現した画像を立体ディスプレイを使って左右の眼にそれぞれ提示することで，両眼視差と DOF ボケの同時提示を実現する．

#### 3.3.1 DOF ボケの合成

DOF ボケ画像を，リアルタイムかつ高品位に作成するのは簡単ではない．DOF ボケとは，単にシーンの奥行きに応じてボケの程度を変化させればよいわけではなく，2 つの物体が遮蔽関係にあって，手前の物体がぼけ，後ろの物体にピントが合う状況では，手前のボケはその境界を越えて後ろの物体像を侵食するようにぼける．物理的に正しい映像を作ることは原理的には簡単だが，GPU を使っても実時間では計算できない．そこで本研究では，文献 [18] の手法を利用した．この方法は，ボケの異なる 3 種の画像を用意し，それらをピクセルごとに計算した錯乱円（Circle of confusion）のサイズによって重み付けを変えて足し合わせることで，DOF ボケを再現するというものである．錯乱円の半径を画像化したマップに対し，合焦する奥行きよりも手前の領域について，その境界をぼかすことで，手前にあるボケた物体の像が，周囲のピントの合った領域にまで拡散される効果を疑似的に再現する．この方法で左右 2 枚分の  $1920 \times 1080$  画素の画像を合成するのに 12.5 ミリ秒要する．本研究で用いたディスプレイのリフレッシュレートが最速でも片目分で 60Hz であり，これは十分その範囲内に収まっている．

#### 3.3.2 焦点調節のシミュレート

注視点でのシーンの奥行きをそのまま合焦深度として上記手法で被写界深度ボケを再現した場合，注視点変化に応じて即座に焦点調節が行われる．しかし，ヒトの目の焦点調節は即座に目標値に到達するものではなく，応答には若干の遅れが生じる [19] ことが知られており，あまりに高速なボケの切り替わりはビューアに違和感を与える．本研究では立体感や臨場感の強化を目的としているため，この遅れを再現するように合焦深度を制御している．具体的には，合焦深度の変化速度をシグモイド関数で制御し，近似的に焦点調節の遅れを再現している．



図 6 提示シーンとそのデプスマップの例。

### 3.3.3 コンテンツの生成

4.2 節の実験では、実世界のシーンを対象に作成したコンテンツを使う。ここでは、2 台のステルカメラを三脚に固定し、シーンの画像を撮影することでステレオ画像を得た。その際、本システムにおけるビューアの眼球位置とディスプレイとの相対的な位置関係と、シーンに対する 2 台のカメラの位置関係を合同にし、実世界のシーンの視差と輻輳を正確に再現する。2.2 節で述べたように、快適に立体視が可能な視差の範囲には制約がある。この制約はビューアの眼間距離、被写界深度などにより個人差があるため、視差の範囲は小さめに見積もるのが望ましい。そこで平均値が 65mm とされているヒトの眼間距離を 60mm に設定し、若干視差が小さくなるように画像を作成した。なお DOF ボケの合成のために必要となるデプスマップは、シーン中の基準となる点の実測値を元に手作業で作成した。実際に作成したシーンの画像、およびそのデプスマップの例を図 6 に示す。

## 4. 実験

本システムの効果、特に奥行き感覚をどれだけ強化するかを主に調べるため、2 つの実験を行った。1 つは、被験者の奥行き判定能力を客観評価する実験で、もうひとつは被験者の得る奥行き感を主観評価する実験である。両実験ともに、20 代の健康な男性 4 名を被験者とした。

### 4.1 奥行き前後関係の判定実験

まず、2 つの平面オブジェクトの前後関係を被験者に判定させる実験を行った。具体的には図 7 のように、ビューアに対して正対する 2 つの平面オブジェクトと、ランダムなテクスチャを持つ背景からなるシーンを合成し、2 つの平面オブジェクトの前後関係をビューア（被験者）に回答させる実験を行った。両眼視差と DOF ボケの効果を評価すべく、このシーンに対し、全焦点画像で視差のみを再現した場合、視差を再現しないで注視反応の DOF ボケのみを再現した場合、および視差と注視反応の DOF ボケの両方を再現した場合の 3 通りを比較した。

実験では、2 つの平面オブジェクトの配置をランダムに変えて画像を生成し、これを被験者に提示し、平面オブジェクトのどちらがより手前に見えるかを被験者に答えさせ、その正否を記録する。これを 10 回繰り返して正答率を算出した。シーンにおけるオブジェクトの配置は、まず左右のどちらかをランダムに選び、選んだ方が手前に来るように決める。もう一方のオブジェクト（後ろに来る方）は、手間のオブジェクトの後方 50mm から



図 7 奥行き前後関係の判定実験における提示映像の例。

500mm の位置にランダムに配置する。手前に来るオブジェクトは、ビューアから 500, 1000, 1500mm の 3 通りの距離に配置し、それぞれ別の実験した。なお、被験者からディスプレイまでの実空間での距離は 740mm とした。本実験では、3.1 節で述べた 23 インチの 3 次元ディスプレイを用いた。

結果を図 8 に示す。図は、手前に来るオブジェクトの距離（500, 1000, 1500mm）を横軸に、4 人の被験者 A, B, C, D それぞれの正答率（赤、緑、青、紫）を表す。

同図 (a) は視差のみを全焦点画像で提示した場合の結果である。被験者による違いは若干見られるものの、総じてビューアからのオブジェクトの距離が小さいほど、正答率が低くなっていることが分かる。これは、輻輳調節矛盾の影響であると解釈できる。輻輳調節矛盾は、眼球の輻輳位置と焦点調節位置との不一致により立体視が困難となる現象で、実験システムで使っているような普通の 3 次元ディスプレイでは、ビューアからディスプレイ面までが比較的近いとき、表示した物体までの仮想的な奥行きが 1m 以下のとき顕著に現れるとされる。実際、被験者の何名かから、オブジェクトの両眼融像が困難であること、立体視が安定に行えないことが報告された。

図 8(b) は、DOF ボケのみを提示した場合の結果である。被験者による違いを除いても、視差のみ提示した (a) とは逆に、オブジェクトの距離が大きくなるにしたがって正答率が低下しているのが分かる。被写界深度は合焦する奥行き位置によって大きく変化し、ビューアからの距離が大きくなるほど深く（＝より広範囲に焦点が合い、ボケ量が小さく）なる。(b) の正答率低下は、この性質によってうまく説明できる。

図 8(c) は、視差と DOF ボケを同時に提示した場合の結果である。(a) の視差のみ、(b) の DOF ボケのみの結果と異なり、オブジェクトがどの距離にあっても安定して高い正答率を記録している。つまり、(a) で正答率の低下した近距離、および (b) で正答率の低下した遠距離の双方で、正答率が高い。このことは視差と DOF ボケの、奥行き手掛かりの相補性を示唆している。つまり、2 つの奥行き手掛かりの不得手な部分を互にうまく補っていると言える。

さらに仔細に見ると、各被験者、各オブジェクト距離において、単に (a) と (b) のうち高い方の正答率が、(c) のそれになっているわけではないことが分かる。つまり、(c) の正答率はほぼすべての場合に、(a)、(b) の高い方の

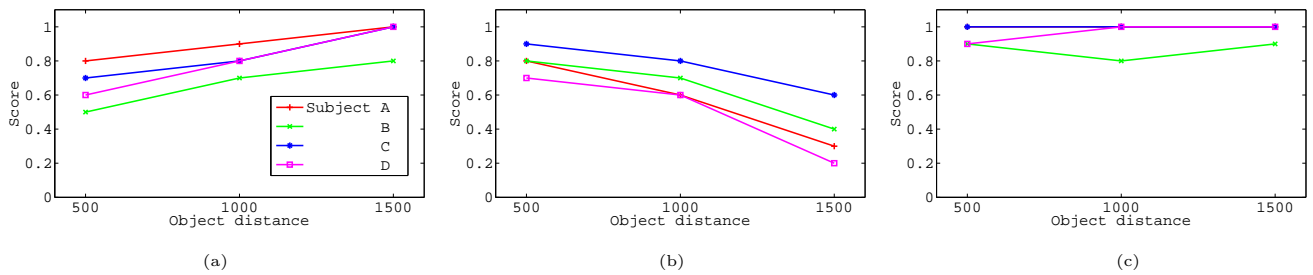


図 8 奥行き前後関係の判定実験の結果。(a) 視差のみ提示。(b) DOF ボケのみ提示。(c) 両方を同時に提示。それぞれ、横軸が(より手前の)オブジェクトのビューアからの距離、縦軸が被験者が回答した前後関係の、複数回にわたる正答率。

正答率をさらに上回っている。このことから両者は相補的なだけでなく、相乗効果もあるらしいことが見て取れる。被験者の視知覚において、2つの奥行き手掛かりのうち良い方が選択され、奥行き知覚(前後関係の判定)に使われたのではなく、両者が相乗効果を持ち、そのことがこの実験で記録された可能性がある。ただしこの知見はわずかな差に基づくものであり、さらなる実験評価が必要である。

なお、平面オブジェクトのテクスチャを何種類か変えて行ったが、ほぼ同じ結果を得たことを記す。この中にはテクスチャのない平面オブジェクトも含まれる。このことは、物体の輪郭(遮蔽境界)でのボケの差が奥行き知覚にとって重要なのであって、輪郭から離れた部分のテクスチャはあまり関与しないことが示唆される。これは[2]~[4]の報告を裏付ける。

#### 4.2 臨場感評価実験

次に、奥行き感覚の強化度合いを主観評価によって調べる実験を行った。実験では、図9に示す実在する5つのシーンを撮影し、そこから作成したコンテンツを被験者に提示し、30秒程度自由に見せた後で、臨場感(その場にいる感覚)を10段階の数値にて評価させた。臨場感の数値は、現実のシーンのそれを10、本システムのディスプレイを使って2次元全焦点画像を提示したときのそれを0とするように被験者に伝えた。なお被験者には事前に、実験で用いた実際のシーンを見せた。最初の実験同様、両眼視差とDOFボケそれぞれの効果を比較評価するため、全焦点画像で視差のみ再現した場合、DOFボケのみ再現した場合、視差とDOFボケの両方を再現した場合の3つの場合を試した。被験者は最初の実験と同じ4名である。

この実験では、視界の広さが結果に与える影響等を調べることを目的に、3.1節に述べた23インチと46インチの2つのディスプレイを使った。23インチディスプレイはビューアから740mmの距離に、46インチは1010mmの距離に置いた。それぞれ、ビューアの視野の約20%および約40%をカバーする計算になる。なおこの視野角の違いにより、シーンからコンテンツを作成する際に切り抜かれる領域はそれぞれ異なる。



図9 臨場感の主観評価実験に用いた5つのシーン。

図9のように、シーン1は奥行き変化が比較的連続するシーン、シーン2は手前と奥の領域で奥行きに急激な変化が見られるシーン、シーン3は手前の物体が奥の物体を遮蔽し、両眼視野闘争が発生しやすいシーンである。また、シーン4は断続的な奥行き変化を含む室内のシーンで、シーン5は比較的近距离に多くの物体があり、輻輳調節矛盾や両眼視野闘争の発生が顕著なため3次元ディスプレイによる立体視が不安定になりやすい室内のシーンである。

図10に、4人の被験者が回答した臨場感の主観評価値を示す。それぞれ、平均と最大・最小値を表示した。図の横軸は図9のシーン番号である。DOFボケのみを再現した場合を赤、視差のみ再現した場合を緑、両者を同時に再現した場合を青で示す。図から、視差単体、DOFボケ単体の場合と比べ、視差とDOFボケを同時提示した場合が明確に高い評価を得たことが分かる。5つあるどのシーンでも基本的にこの傾向は同じであり、視差単体を提示する3次元ディスプレイならびにDOFボケ単体を提示する2次元注視反応ディスプレイよりも、提案

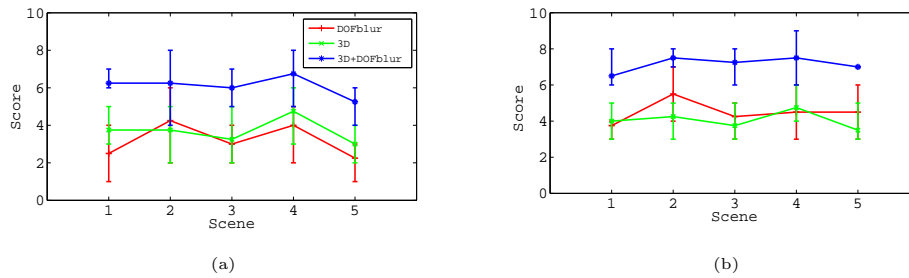


図 10 臨場感の主観評価結果 . (a) 23 インチディスプレイ使用時 . (b) 46 インチディスプレイ使用時 .

システムは臨場感を強化できるといえる .

なお、シーン 3 や 5 で、視差のみを 3 次元ディスプレイで提示した場合には両眼融合が行われず二重像を知覚したが、DOF ボケと同時に提示した場合には二重像を知覚しなくなり、より快適にシーンを見ることができたとの報告が、複数の被験者からもたらされたことも記しておく . これは、視差に併せて DOF ボケを提示すれば、輻輳調節矛盾や両眼視野闘争などの生成を抑制することにより、3 次元ディスプレイに生じる違和感を軽減し得ることを示唆しており、従来からの予想および [13] の報告を裏付けるものである .

3 次元ディスプレイが 23 インチ (視野カバー率 20%) の場合 (図 10(a)) と 46 インチ (視野カバー率 40%) の場合 (同図 (b)) を比較すると、後者の方が、DOF ボケ単体提示時、および視差と DOF ボケの同次提示時の 2 つの場合において、高い臨場感主観評価値を残している . 視野単体提示の場合、臨場感はほとんど変わらなかったため、DOF ボケ提示による臨場感の向上度合いと視野カバー率との間に何らかの相関のあるらしいことが分かる . この差は大きなものではないので、今後の詳細な実験評価が必要であるものの、視野周辺部での DOF ボケ変化が、どのようにどの程度奥行き知覚に影響を与えるかなど色々可能性を示唆し、今後の研究の課題となる .

## 5. ま と め

本研究では、奥行き感覚の強化を目的とする新しいディスプレイシステムを提案した . システムは、眼鏡方式の 3 次元ディスプレイと注視反応方式による DOF ボケの再現表示を組み合わせたもので、両眼視差と DOF ボケの両方を同時に、解像度やコントラストなどの映像品質を犠牲にすることなく提示可能なことが特長である .

実装したシステムを使っていくつかの実験を行い、その効果を調べた . 具体的には、2 つの平面オブジェクトの前後関係を判定するタスクを被験者に行わせることで、提示シーンの奥行き感を 2 つの手掛かりが相補的に強化できることが確認され、また同時提示が相乗効果を示すらしいことも分かった . また、実世界のシーンを対象に作成したコンテンツを用いて、本システムがビューアに「その場にいる感覚」=臨場感をどれだけ向上させられるかを、主観評価実験にて調べた . 視差と DOF ボケの同

時提示は確かに効果があることが分かった . また従来から指摘されているように、眼鏡方式の 3 次元ディスプレイで頻繁に生じる二重像に関わる違和感が DOF ボケの提示により低減できることも確認された .

## 文 献

- [1] A. P. Pentland. A new sense for depth of field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, pp. 523–531, 1987.
- [2] G. Mather. Image blur as a pictorial depth cue. In *Proceedings of Biological Sciences*, Vol. 263, pp. 169–172, 1996.
- [3] G. Mather. The use of image blur as a depth cue. *Perception*, Vol. 26, pp. 1147–1158, 1997.
- [4] G. Mather and D. R. R. Smith. Blur discrimination and its relation to blur-mediated depth perception. *Perception*, Vol. 31, pp. 1211–1219, 2002.
- [5] V. A. Nguyen, I. P. Howard, and R. S. Allison. Detection of the depth order of defocused images. *Vision Research*, Vol. 45, pp. 1003–1011, 2005.
- [6] K. J. Ciuffreda. Accommodation and its anomalies. In W. N. Charman, editor, *Visual Optics and Instrumentation*, pp. 231–279. Macmillan Press, London, UK, 1991.
- [7] K. J. Ciuffreda. Accommodation, the pupil and presbyopia. In W. Benjamin, editor, *Borish's Clinical Refraction*, pp. 77–120. W. B. Saunders Co., Philadelphia, PA, 1998.
- [8] K. Fisher and K. J. Ciuffreda. Accommodation and apparent distance. *Perception*, Vol. 17, pp. 609–621, 1988.
- [9] M. Lang, A. Hornung, O. Wang, S. Poulakos, A. Smolic, and M. Gross, “Nonlinear Disparity Mapping for Stereoscopic 3D,” *Proc. SIGGRAPH 2010*, vol. 29, Los Angeles, July, 2010.
- [10] T. J. Mueller and R. Blake. “A fresh look at the temporal dynamics of binocular rivalry. *Biological Cybernetics*”, 61, 223–232, 1989.
- [11] P. Rokita, “Generating depth-of-field effects in virtual reality applications,” *Proc. IEEE, Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, pp. 18–21, 1996.
- [12] S. Hillaire, A. Lecuyer, R. Cozot, and G. Casiez, “Using an eye-tracking system to improve camera motions and depth-of-field blur effects in virtual environments,” *Proc. IEEE, Virtual Reality*, pp. 47–50, March, 2008.
- [13] T. Blum, M. Wiczorek, A. Aichert, R. Tibrewal and N. Navab, “The Effect of Outof- focus Blur on Visual Discomfort When Using Stereo Displays,” *Proc. ISMAR 2010*, October, 2010.
- [14] C. M. Schor, L. A. Lott, D. Pope, and A. D. Graham. Saccades reduce latency and increase velocity of ocular accommodation. *Vision Research*, Vol. 39, pp. 3769–3795, 1999.
- [15] T. Takeda, K. Hashimoto, N. Hiruma, and Y. Fukui. Characteristics of accommodation toward apparent depth. *Vision Research*, Vol. 39, pp. 2087–2097, 1999.
- [16] A. Busby and J. Ciuffreda. The effect of apparent depth in pictorial images on accommodation. *Ophthalmic and Physiological Optics*, Vol. 25, No. 4, pp. 320–327, 2005.
- [17] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381.395, June, 1981.
- [18] E. Hammon, “Practical Post-Process Depth of Field,” *GPU Gems 3*, Chapter 28.
- [19] C. M. Schor, L. A. Lott, D. Pope, and A. D. Graham. “Saccades reduce latency and increase velocity of ocular accommodation,” *Vision Research*, 39:3769–3795, 1999.
- [20] 岡谷貴之, 石澤 昂, 出口光一郎 “被写界深度ぼけの提示により奥行き感を強化する注視反応型ディスプレイ,” *電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J92-D(8)*, pp. 1298–1307, 2009.
- [21] 吉良雅貴, 立体視画像作成方法および装置, 特開 2006-42298 (出願日 2004 年 11 月 2 日, 公開日 2006 年 2 月 9 日) .