

注視反応ディスプレイによる両眼視差とボケの同時提示

折笠 達郎^{†1} 鈴木 孝明^{†1}
岡谷 貴之^{†1} 出口 光一郎^{†1}

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簡単な実験を行ったので、それについて述べる。

Gaze-Reactive Display Simultaneously Presenting Binocular Disparity and Defocus Blur

TATSURO ORIKASA,^{†1} TAKA AKI SUZUKI,^{†1}
TAKAYUKI OKATANI^{†1} and KOICHIRO DEGUCHI^{†1}

Retinal image blur generated by the depth-of-field (DOF) limitation of eyes is one of important depth cues. The image display system was proposed that virtually reproduces this image blur by measuring the gaze of the viewer and changing the displayed image in real time based on the gaze measurement. In this paper, we present a new display system that can simultaneously present the DOF blur and binocular disparity by combining the previous system with a 3D display based on the alternate-frame sequencing. We also show a few results of preliminary experiments conducted to examine the magnitude of the enhancement in depth sensation and visual presence by simultaneously presenting both the depth cues.

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。この目標を達成するには、2次元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 手掛かりに分類できる。絵画の手がかりとは、絵画で3次元的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 手掛かりには、両眼・運動にかかわる視差、輻輳および焦点調節がある。3次元ディスプレイはこれらの再現のためにある。

DOF ボケもまた重要な奥行き手掛かりである。これは、眼や撮像システムの被写界深度制約のせいで生み出される、場所ごとに程度が異なる画像のボケである (これは焦点調節と深いつながりがあるが、手掛かりとしては異なる。「焦点調節」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取得される奥行き情報を指すが、DOF ボケは焦点調節の結果として網膜上に生成される像のボケ量が与える奥行き情報を指す。)

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。DOF ボケはビューアの注視位置を指定すれば静止映像としては再現できるが、自然視のようにビューアが自発的に注視位置を変えることはできずその再現は不完全である。視差はこれらに勝る相対的に強い手掛かりであるとは言え、このことは輻輳調節矛盾をはじめとするいくつかの問題を引き起こす。

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

^{†1} 東北大学
Tohoku University



図1 (絵画的) 奥行き手掛かりとしての DOF ボケの効果の例。左図の絵画 (Christina's World, Andrew Wyeth) に適当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。

ことである。インテグラル・フォトグラフィ方式など、この方向を指向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するのは無理である。ごく限られた奥行きの範囲であれば、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、その代償として表示映像の品質に問題が残る。

これらを踏まえてわれわれのグループでは、注視位置計測とそれに連動した映像の提示に基づいて、注視変動に伴う DOF ボケ変化をビューアに擬似的に体験させる、注視反応ディスプレイと呼ぶシステムを研究している¹⁾。システムは、視線計測装置と2次元ディスプレイを組み合わせたもので、ビューアがディスプレイに示される3次元的な広がりのあるシーンの画像を見る間、現在ビューアが注視しているシーンの点に焦点をあわせた画像を提示するようなものである。

このシステムにより、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を強化することに成功している¹⁾。ビューアの眼はディスプレイ面に合焦することとなるので、焦点調節は正しく提示されず、さらに視差や輻輳もまったく再現されない。にもかかわらず、その後の継続研究により、臨場感—その場にいる感覚—が強化される傾向のあることが確かめられている。

本稿では、DOF ボケを両眼視差と同時に提示することで、相乗的に奥行き感を増強し、あるいはその他の効果を作り出すシステムについて述べる。これは、従来のシステム¹⁾における映像ディスプレイを、眼鏡方式の3次元ディスプレイに置き換えることで実現される。狙いは奥行き感の強化の他、眼鏡方式の3次元ディスプレイを使うときビューアが感じる視覚的違和感を、DOF ボケの適切な提示により解消あるいは軽減されるかどうかを調べることにある。

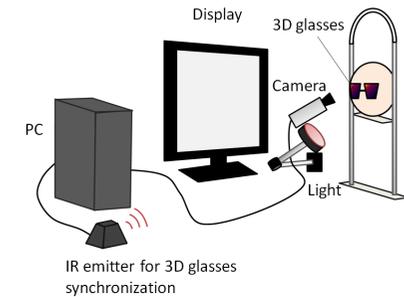


図2 左：システムの全景。右：システムの構成

以降、関連研究について述べ、本システムの狙いを詳述した後、システムの実装について詳述する。特に以前のシステム¹⁾では、主に注視計測装置の性能不足、特に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。高速カメラとGPUを用いて、注視位置を高速に計測可能なシステムおよび、GPUを用いてリアルタイムでDOF ボケを再現する方法について述べる。システムを用いて簡単な視覚心理実験を行ったので、それについても報告する。

2. システム概要

図2に示すように、システムは、3次元映像ディスプレイシステム、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を搭載したPCで構成される。ビューアの注視の計測を前提としていることから、単一のビューアを想定する。

システムは立体ディスプレイとしてDELL社のAlienware OptX AW2310とnVidia社のnVidia 3D Visionを用い、注視点計測用カメラとしてディテクト社の高速カメラHAS-220を用いた。PCはCPUにIntel社のCore i7、8GB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Windows7 64 bitを用いている。

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(例えば右)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。画像は、ビューアの眼の被写界深度制約による DOF ボケが再現されているようなものである。注視点の計測からそれに基づく画像の書き換えにいたる一連のプロセスはリアルタイムで実行される。

3. 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、これまでの研究を振り返りつつ議論する。

3.1 奥行き手掛かりとしての DOF ボケ

DOF ボケは、人の奥行き知覚にかなり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 Pentland²⁾ である。ここでは、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 ボケの絵画的手法がかりとしての側面は Mather らの論文³⁾⁻⁵⁾ に詳しい。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⁶⁾ 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^{7),8)}、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⁹⁾。

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、目の前の 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ろい行くのに応じて、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る。本稿のシステムはこの予想に基いている。

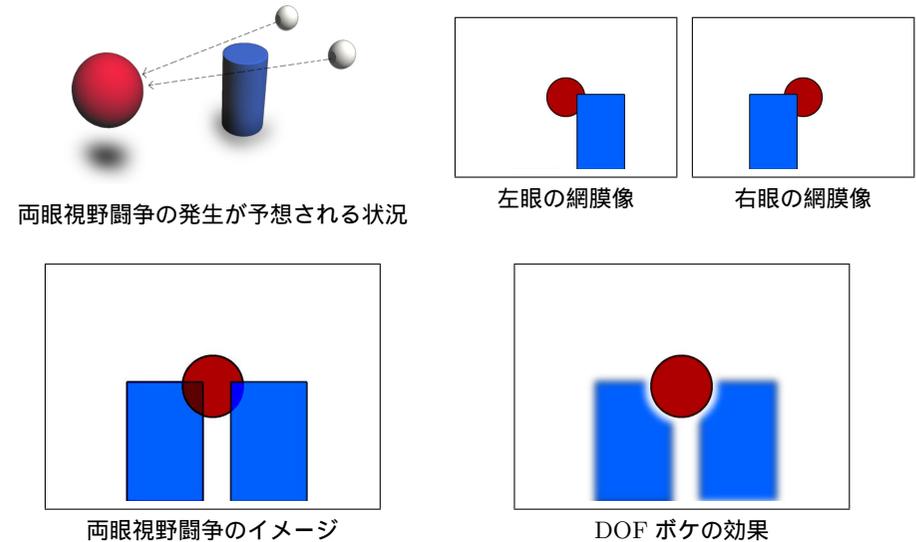


図 3 頭部近接物体の左右像と両眼視野闘争および DOF ボケの効果。

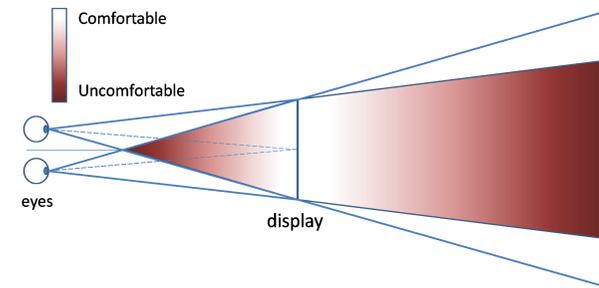


図 4 快適な立体視が可能な領域。

3.2 視差を再現する 3 次元ディスプレイにおける DOF ボケの効果

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3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。

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より顕著に起こる。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¹⁰⁾。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4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¹⁰⁾。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。上述の視差範囲以外にも、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。

われわれの普段の視覚体験では、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3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¹¹⁾。

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。本研究のシステムは、この動機にも基づく。本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重要視する応用では、十分実用性があると考えている。

3.3 前提とする条件

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が、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¹²⁾、注視点変化がフォーカスズレを生み、それを補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^{7),8)}。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と^{*1}。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¹³⁾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。ただし、より最近の研究¹⁴⁾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もある。さらなる研究が待たれるが、われわれは¹⁴⁾らの立場を採用する。

4. 注視点計測

角膜反射法を用いて、ビューアのディスプレイ上の注視点を計測する。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、注視点を計測する。本研究で用いたnVidia 3D Visionはアクティブシャッター方式の3D眼鏡だが、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(ユーザの視覚に影響を与えず)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目の画像で、瞳孔トラッキングを行っている様子である。

4.1 瞳孔中心のトラッキング

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。瞳孔のエッジ候補点は画像を平滑化した後、検出する楕円の内部にとった初期位置が

*1 ただし、焦点調節は、例えば輻輳と密接に関係することが知られており、厳密に焦点調節のみを独立した機能として捉えるのは無理があるのも事実である。

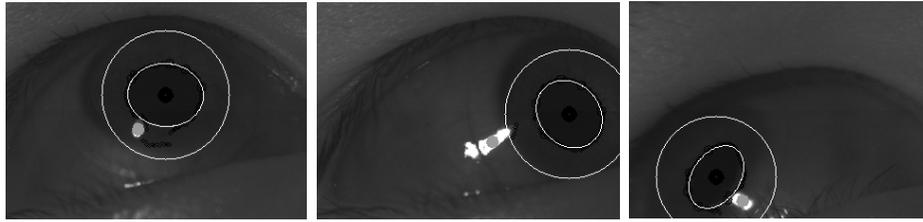


図 5 瞳孔トラッキングの様子。

ら放射状に走査し濃淡値 I が中心からの距離 r に対し

$$\frac{dI}{dr} < -T, \quad \frac{d^2I}{dr^2} = 0 \quad (1)$$

を満たす点を選ぶ。 T は適当な正の閾値である。ここで二番目の式は離散的な値を取るため、値が正から負へと変化するサブピクセルでのゼロクロス位置を、エッジ候補点とする。このエッジ候補点からランダムに 5 点を選び、RANSAC アルゴリズムのサンプルとする。ランダムな 5 点から楕円を計算し、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。計算量を考慮して、楕円の計算は式 (2) 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。

$$ax_n^2 + bx_ny_n + cy_n^2 + dx_n + ey_n + f = 0 \quad (2)$$

楕円の評価は、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。この距離 L は、楕円中心を X_0, Y_0 、楕円中心からエッジ候補点を結ぶ線と x 軸のなす角を θ とし

$$L = \sqrt{(X_0 - x_n)^2 + (Y_0 - y_n)^2} - \sqrt{\frac{-aX_0^2 + bX_0Y_0 + cY_0^2 + dX_0 + eY_0 + f}{a \cos^2 \theta + b \cos \theta \sin \theta + c \sin^2 \theta}} \quad (3)$$

によって計算出来る。 L は、通常のエッジ点から楕円までの距離よりも高速に計算できる。 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

$$k = \frac{\ln(1 - G)}{\ln(1 - w^n)} \quad (4)$$

と表される¹⁵⁾。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。計算時間短縮のため提案システムでは、これを 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 のサンプルを並列計算することが理論上可能である。

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ルし、 $m \times n$ 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 ($-T$) 未満で、2 階微分の値が正から負へと変化するゼロクロスの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、 $m \times p \times 3 \times 4$ 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。

4.2 キャリブレーションと注視点の計算

図 5 に示すように、プルキンエ像は非常に明るい像として画像に現れる。前フレームのプルキンエ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プルキンエ像のトラッキングを行う。

こうして得られた瞳孔中心とプルキンエ像の座標とを、画面上注視点に変換する。画面上の注視位置は、プルキンエ像と瞳孔中心の相対ベクトルの 2 次式として表現する。この 2 次式の係数は事前のキャリブレーションによって決める。ビューアがポインタを注視しながらディスプレイ上でマウスをクリックしたデータを元に、この係数を最小二乗法で求める。



図 6 ステレオ画像セットの例(上の黒丸を網膜上で合わせることで、平行法による立体視が可能である)

5. 画像の表示

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。

5.1 視差画像の生成

本研究では提示映像として、カメラで撮影した実世界のシーンを用いた。しかし、カメラで撮影した画像をそのまま用いた場合、視野角の違いなどから不正確な立体映像となる。そのため、眼球とディスプレイの位置関係とカメラと画像面の位置関係を合同にすることで、実世界のシーンの視差と輻輳を正確に再現する。

ただし注意点として、3.2 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限があることが知られている。この制限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 6.5 cm と言われているヒトの眼間距離を 6.0 cm として、視差を小さくした画像を作成した。実際に作成したシーンのステレオ画像の例を図 6 に示す。23 インチのディスプレイまでのビューアからの距離は 580 mm とした。

5.2 DOF ボケの再現

ここでは、DOF ボケ画像をリアルタイムかつ高品位に作成する手法について述べる。DOF ボケとは、単にシーンの深度に応じてボケの程度を変化させるものではなく合焦深度によって変化する錯乱を再現するものである。また二つの物体が遮蔽関係にあり、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。

本研究のシステムでは文献¹⁶⁾の手法を利用し、DOF ボケの再現を行った。具体的にはボケの異なる 3 種の画像を用意し、それらをピクセルごとに計算した CoC (Circle of confusion) 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 ボケを再現した画像が作成される。この時、合焦深度より手前の領域の CoC マップの境界をぼかしておくことで、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が再現される。なお、シーンの奥行きマップは手作業で与えている。

5.3 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、ヒトの眼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¹⁷⁾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。

6. 実験

本システムにより実際に立体感が向上することを確認するため、本研究では二種類の実験を行った。いずれも被験者は 20 代の健康な男性 3 名である。

6.1 奥行き感評価実験

まず、両眼視差と DOF ボケの同時提示による奥行き感の向上度合いを評価するために、視差と DOF ボケのみを奥行き手がかりとして再現する 2 つのオブジェクトを CG で作成し、被験者に前後関係を判定させる実験を行った。実験は視差ありの全ピント画像の提示、視差なしの注視点反応 DOF ボケ画像の提示、視差ありの注視点反応 DOF ボケ画像の提示の 3 パターンを行い、画像面上に射影されるオブジェクトの大きさが一定になるよう距離に応じてオブジェクトの大きさを変化させながら表示する。

オブジェクトの位置関係は手前のオブジェクトまでの距離を 500mm, 1000mm, 1500mm の三種類について実験を行い、500 mm - 50 mm の範囲で 50mm 刻みの距離に奥のオブジェクト提示するものとした。また被験者から 3000mm の位置に背景画像を提示する。図 7 に、この実験に用いた提示映像の一例を示す。

手前の物体が各距離にあるときの正答率を図 8 に示す。縦軸は正答率、横軸はビューアから手前のオブジェクトまでの距離を表し、色は 3 人の被験者をそれぞれ表す。

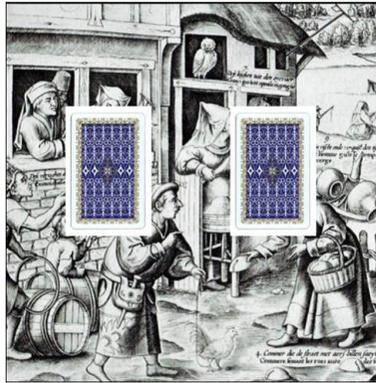


図 7 奥行き感評価実験における提示映像の一例

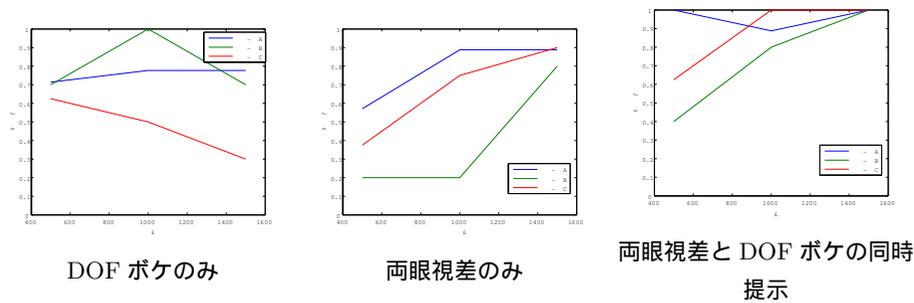


図 8 奥行き感評価実験結果

全ての場合で DOF ボケと両眼視差を同時に提示した場合のスコアが最も高い値か、もしくはそれに近い値を示した。視差のみ、あるいは DOF ボケのみを提示した場合に低いスコアを示した距離であっても、同時に提示した場合のスコアは高い値を保っている。このことは、二つの奥行き手掛かりを同時に提示することで、一つの手掛かりで奥行き知覚が困難な場合にも、他の一方で相補的に奥行き知覚の精度をある程度向上させることが可能であることを示唆する。

距離が 1000mm, 1500mm を超える場合の結果をみると、DOF ボケのみあるいは両眼視

差のみを提示した場合での高い方のスコアを、同時に提示した場合のスコアが更に上回っている。これは、ヒトがシーンの奥行き知覚を行うとき、DOF ボケと両眼視差の二つの奥行き手掛かりのうちでより高分解能な奥行き手掛かりのみを利用してシーンの奥行き知覚を行うのではなく、二つの奥行き手掛かりを同時に利用し、相乗的に分解能を向上させられる可能性があることを示唆していると考えられる。

6.2 臨場感評価実験

また、両眼視差と DOF ボケの同時提示による臨場感の向上度合いを評価するため、主観評価実験を行った。被験者には視差ありの全ピント画像の提示、視差なしの注視点反応ボケ画像の提示、視差ありの注視点反応ボケ画像の提示を 4 種類のシーンについてそれぞれ実験を行い、現実のシーンの臨場感を 10、単なる平面の全ピント画像の臨場感を 0 として 10 段階の評価を求めた。主観評価に用いた 4 種類のシーンの画像を図 9 に示す。シーン 1 は連続的な奥行き変化が見られるシーン、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 は手前の物体で奥の物体が遮蔽され、両眼視野闘争の発生が予想されるシーン、シーン 4 は比較的小さな視差での両眼視野闘争の発生が予想されるシーン、である。

実験の結果得られた、各シーンの臨場感の 3 名の被験者にわたる主観評価スコアを示す。いずれのシーンにおいても、ボケと視差を同時に提示した場合の評価が最も高いスコアが

表 1 臨場感評価実験スコア

	Scene1	Scene2	Scene3	Scene4
視差のみ	3.33	3.33	3.33	5.33
ボケのみ	3.33	2.66	2.66	2.00
ボケ + 視差	7.00	6.00	5.33	6.66

得られている。この結果から、本研究のシステムによりボケと視差を同時に提示することで、相乗的に臨場感を強化し提示出来ている可能性があると言える。

7. ま と め

本稿では、両眼視差と DOF ボケを同時に提示するシステムの実装について述べ、そのシステムにより得られる効果を測る簡易的な実験の結果を述べた。そこでは奥行き手掛かりとしての精度を向上させる効果、臨場感を向上させる効果を実験により検証し、一定の効果が

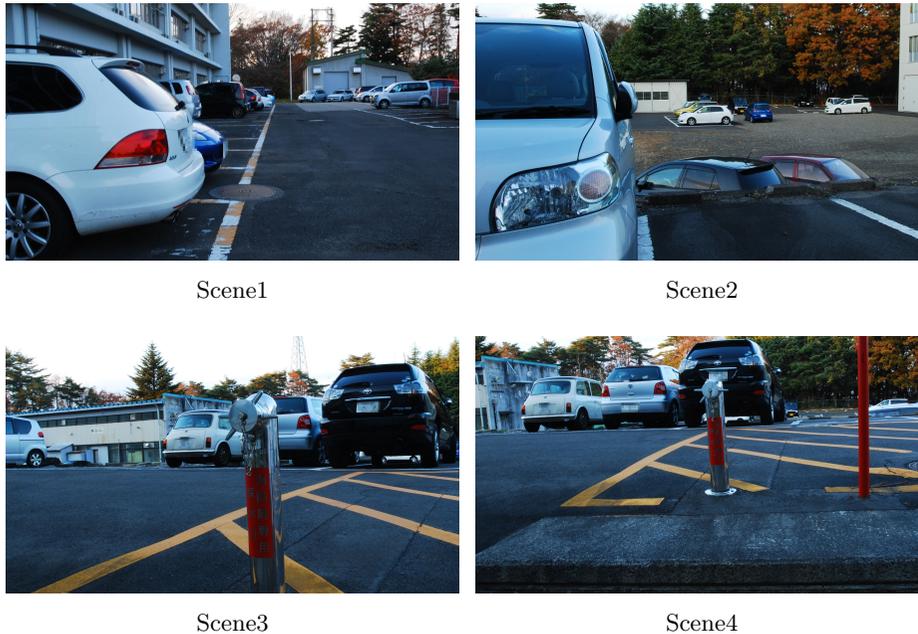


図 9 臨場感評価実験に用いるシーン

ありそうなことを確認できたが、被験者数が少なく、精度には問題がある。今後、被験者を増やし、信頼度の高いデータを用いて両眼視差と DOF ボケの同時提示による効果を検証してゆく。

参 考 文 献

- 1) 石澤 昂, 岡谷貴之, 出口光一郎 “被写界深度ボケ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,” 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), July. 2008.
- 2) A.P. Pentland. A new sense for depth of field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.9, pp. 523–531, 1987.
- 3) G.Mather. Image blur as a pictorial depth cue. In *Proceedings of Biological Sciences*, Vol. 263, pp. 169–172, 1996.
- 4) G.Mather. The use of image blur as a depth cue. *Perception*, Vol.26, pp. 1147–

1158, 1997.

- 5) G.Mather and D.R.R. Smith. Blur discrimination and its relation to blur-mediated depth perception. *Perception*, Vol.31, pp. 1211–1219, 2002.
- 6) 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.
- 7) K. J. Ciuffreda. Accommodation and its anomalies. In W.N. Charman, editor, *Visual Optics and Instrumentation*, pp. 231–279. Macmillan Press, London, UK, 1991.
- 8) 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.
- 9) K. Fisher and K. J. Ciuffreda. Accommodation and apparent distance. *Perception*, Vol.17, pp. 609–621, 1988.
- 10) Manuel Lang, Alexander Hornung, Oliver Wang, Steven Poulakos, Aljoscha Smolic, Markus Gross, “Nonlinear Disparity Mapping for Stereoscopic 3D,” Proc. SIGGRAPH 2010, vol. 29, Los Angeles, July. 2010.
- 11) T. J. Mueller and R. Blake: “A fresh look at the temporal dynamics of binocular rivalry. *Biological Cybernetics*”, 61, 223–232, 1989.
- 12) 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.
- 13) T.Takeda, K.Hashimoto, N.Hiruma, and Y.Fukui. Characteristics of accommodation toward apparent depth. *Vision Research*, Vol.39, pp. 2087–2097, 1999.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Earl Hammon, Jr, “Practical Post-Process Depth of Field,” *GPU Gems 3*, Chapter 28.
- 17) 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.