

空間周波数に対する感度特性を利用した 立体映像の重畳表示手法の評価

日暮 拓海¹ 澤田 拓也² 福地 健太郎^{1,a)}

概要: ディスプレイやスクリーンを使う立体映像提示装置のうち眼鏡式のものでは、左眼用と右眼用のそれぞれの映像を同一の面に重畳表示するため、専用眼鏡を外して映像を観ると両者の映像が混ざる「クロストーク」の発生により、映像の視認性が損われる。我々は今回、このクロストークを軽減しつつ立体感を保持する映像提示手法を開発し、その有効性を評価した。提案手法は、片方の映像の空間周波数が低下しても両眼視した際に立体感を感じ、かつ周波数低下の効果を感じにくく、また空間周波数の偏り方が異なる画像を重畳表示した場合に高周波成分を含んだ画像を優先的に認知しやすいという人間の視覚特性を応用したものである。

1. はじめに

ディスプレイやスクリーンを使う立体映像提示装置のうち、利用者が眼鏡型の専用機器を装着する眼鏡式のものでは、左眼用と右眼用のそれぞれの映像を同一の面に重畳表示する。専用眼鏡その重畳表示された画像を何らかの方法で左眼用映像と右眼用映像とに再分解し、それぞれの目に映像を届ける役割を持つ。

このため、専用眼鏡を外して映像を観ると両者の映像が混ざる「クロストーク」の発生により、映像の視認性が損われる。事前に専用眼鏡の用意がない利用者はそのため、提示された立体映像を視認できないだけでなく、何が写っているかすら判然としない映像を観ることとなる。これは家庭や映画館などで、すべての利用者が専用眼鏡を装着することを前提できる環境では問題とならないが、例えば公共の場に設置されたディスプレイで不特定多数の人に映像を届けようとした場合には問題となる。

我々は今回、このクロストークを軽減しつつ立体感を保持する映像提示手法を開発した。本手法は、片方の映像の空間周波数が低下しても両眼視した際に立体感を感じ、かつ周波数低下の効果を感じにくく、また空間周波数の偏り方が異なる画像を重畳表示した場合に高周波成分を含んだ画像を優先的に認知しやすいという人間の視覚特性を応用したものである。

提案手法の一つの問題点として、クロストークを低減さ

せるためには空間周波数をより低下させることが有効であるが、一方で周波数を下げ過ぎると立体感が得られにくくなるため、両者がトレードオフの関係にあることにある。そのため、立体感を損ねずに空間周波数をどこまで下げられるかを評価する必要があるが、その閾値はこれまで明らかにされていなかった。

今回、単純な図形を対象に閾値を明らかにするための評価実験を実施した。その結果、対象図形が円の場合、ガウシアンフィルタによる空間周波数低下では、半径が9ピクセルを超えると立体感が強く損なわれ始めることが分かった。しかしながらこれは対象図形の性質に強く依存し、正方形の場合はより小さな半径でも立体感が損われることも分かった。

そのため、実用場面を想定した場合にどの程度の周波数低下が望ましいかは、実写映像やCG映像などを対象に、より実際の使用場面に近い映像で試験する必要があることが示唆された。

2. 立体映像技術について

映像を立体的に見せる技術のうち、本研究では両眼立体視を利用した映像技術を対象としている。これは視差のある一対の画像を左右それぞれの眼に提示することにより立体視を可能とするもので、現在では広く製品化されている。

大型ディスプレイや投影スクリーンなどのような、多数の観客が同時に同一の画面を視聴するような上映装置においてこの両眼立体視を実現するには、左右の画像を重畳表示し、なんらかの手法でそれを一対の画像に分解し、それぞれを観客の左右の眼に分けて提示する必要がある。

¹ 明治大学総合数理学部
² 明治大学大学院理工学研究科
^{a)} kentaro@fukuchi.org

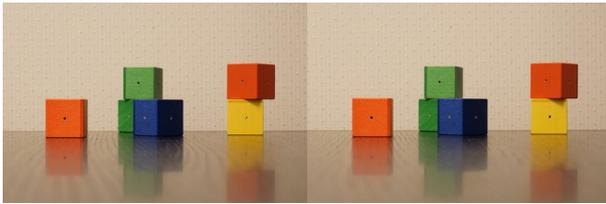


図 1 原画像。交差法で立体視できるよう並べてある。

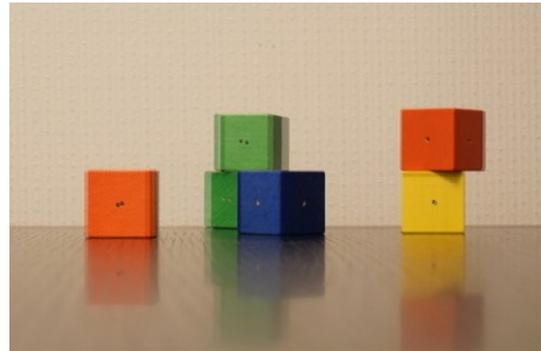


図 2 図 1 の左右画像を重畳表示したもの。(再現図)

映画館などで広く利用されているのは眼鏡式のもので、重畳表示された映像を専用眼鏡によって左眼用の画像と右眼用の画像とに分解する。液晶シャッター方式と偏光方式の2種類が普及しており、前者は左右画像を時分割で表示し、同期開閉する液晶シャッターを搭載した眼鏡を使用する。後者は左右画像のそれぞれに異なる偏光特性を持たせ、その特性に合致した偏光フィルタを装着した眼鏡を使用する。

画像の表示方式としてはプロジェクション方式のものや発光型ディスプレイ方式のものがある。液晶シャッター方式の場合はどちらも一台の表示装置上で時分割表示を行う。偏光方式の場合、プロジェクション方式の場合は2台のプロジェクタを用いてスクリーン上に映像を重ねて投影するのが一般的である。発光型ディスプレイの場合は、走査線単位で偏光特性を切り替える方式が普及している。

3. 立体ディスプレイにおける重畳表示の問題

前節で述べたように、両眼映像を同一ディスプレイ面に重畳表示する方式を採用した、眼鏡式の立体映像提示装置の場合、専用眼鏡を装着していない利用者には、左右両眼用の映像が重なって見えてしまう。これは街頭広告やインスタレーション展示などでは大きな問題となっている。こうした場面においては、専用眼鏡の装着・非装着に関わらずコンテンツとしての視聴に耐える映像を提示することが強く求められる。

以下に例を示す。図 1 は左眼用と右眼用の画像を横に並べたものであり、それらを重畳表示したものが図 2 に示されている。この画像では中央手前にある青ブロックに視点を合わせてあるため、それより奥にある緑のブロックでは視差が大きくなっており、重畳した際のずれが目立っている。

なお、実際には図 2 はディスプレイ面上では異なって見える。液晶シャッター方式の場合は左右眼用の映像が交互に表示され、専用眼鏡非装着時にはそれらが重なって見える。偏光方式の場合は左眼用映像と右眼用映像とが走査線単位で交互に表示されるため、視差量の大きい領域では縞状の模様となってその差が現われる。

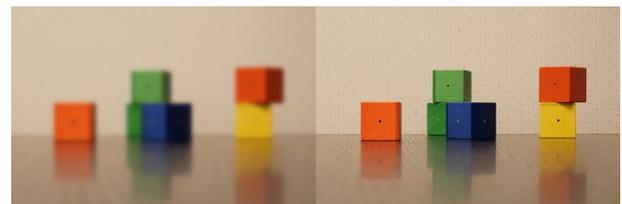


図 3 右目用画像にのみ平滑化処理を施したもの。立体視した際に平滑化の効果はあまり感じられない。

4. 平滑化フィルタによるクロストークの低減

4.1 概要

重畳表示時の視認性の低下の要因を検討した結果、左右どちらの画像も同程度の情報量を持つため、原画像の輪郭や細かいテクスチャが互いに干渉しているのがその一因であると我々は考え、この干渉を低減することを目指した。

そこで我々は、片方の画像にのみ平滑化フィルタを適用するという手法を考案した [2]。両眼立体視において、視力の違いなどの要因により片眼のみ画像がぼけていても、ぼけが弱い場合には立体感は強くは損われないことが知られており [4]、これを応用したものである。

図 3 は右眼画像（左図）にのみ平滑化フィルタを適用したもので、右眼画像の細部はぼけのために失われてしまっている。しかし、これを立体視すると図 1 に近い立体感を得ることができる。

次にこの図の左右画像を重畳表示したものを図 4 に示す。原画像に比べると、シャープさは失われ、霞がかかったような印象を受けるが、原画像の持つ輪郭形状やテクスチャ感は強くは損われておらず、また図 2 に見るようなクロストークは低減されていることがわかる。これは、空間周波数の異なる二つの画像を重ねた場合に、知覚される範囲内であれば空間周波数の高い領域が優先して知覚される [1] という、人間の視覚特性に起因する。

なお、図 2 および図 4 に示した重畳画像は、偏光プロジェクタ方式や液晶シャッター方式の立体ディスプレイを想定した再現図であるが、実際に両方式による立体映像において提案手法を実装し、著者らが目視した限りでは効果

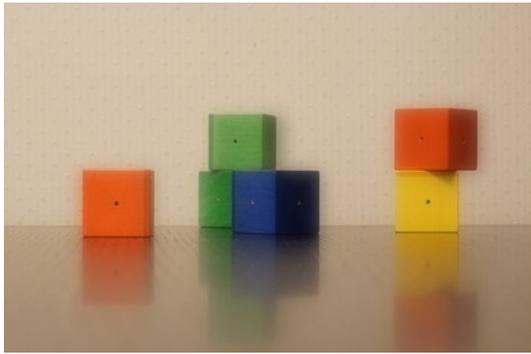


図 4 右眼用画像にのみ平滑化処理を施した上で、重畳表示したものの。(再現図)

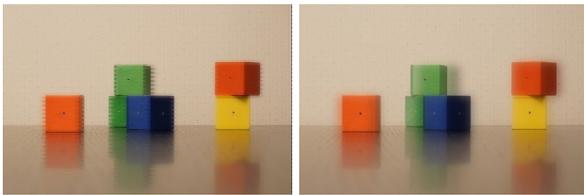


図 5 左: line-by-line 式立体ディスプレイでの重畳表示。右: 視差が大きい立体画像に提案手法を施し重畳表示したもの。(いずれも再現図)

が得られている。line-by-line 表示による偏光式立体ディスプレイにおいても効果は得られるが、クロストークは前掲図に比べるとやや目立つ (図 5 左に再現図)。

4.2 制約および課題

重畳画像において平滑化した側の画像が目立たなくなる条件としては、ほぼ同位置に対応する高周波成分を持つ画像が重なっていることが必要となる。そのため、両画像の視差が大きいとこれが満たされなくなり、クロストークが大きくなる (図 5 右)。これは同一画像内での手前の被写体と奥の被写体との間の距離が大きい場合に生じやすい。ここでクロストークの低減をさらに図るには、平滑化フィルタをより強く適用し空間周波数をさらに下げる必要があるが、その場合、立体感は大きく損われるのみならず、両眼視野闘争が生じてチラツキ感が生じる。

また、画像上で面積の小さな被写体は平滑化フィルタの適用によってほとんど見えなくなってしまう。このため、原画像が点群によって構成されるような画像の場合には提案手法は適用できない。

次節で、こうした課題について調査した結果を報告する。

また両眼間でフォーカスが大きく乖離した映像を長時間眺めていると眼精疲労を起こす「不同視 (anisometropia)」と呼ばれる現象が広く知られている。同様の現象が提案手法でも起きることが予想され、また実際に疲労を感じる場合が観察されているため、長時間の視聴には向いていない。

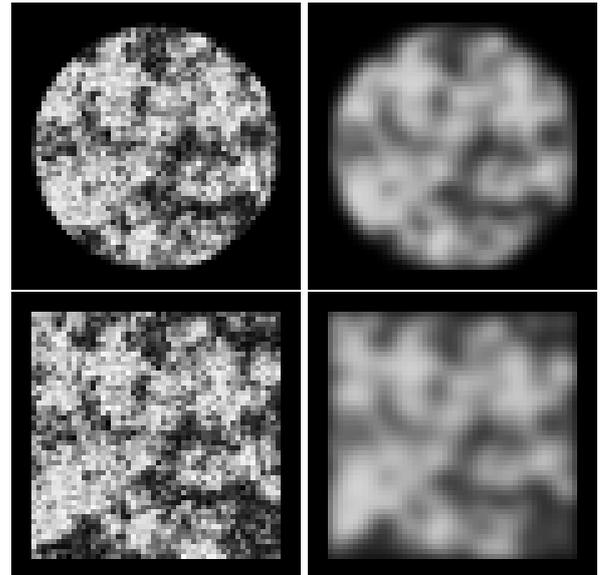


図 6 左: line-by-line 式立体ディスプレイでの重畳表示。右: 視差が大きい立体画像に提案手法を施し重畳表示したもの。(いずれも再現図)

5. 評価実験

5.1 概要

すでに述べたように、提案手法の一つの問題点は片眼画像に平滑化をかけることでクロストークを低減させられるものの、平滑化をかけ過ぎると立体感が失われるところにある。そこで、平滑化フィルタの強度をどこまで上げると立体感が失われるのかを調査する実験を実施した。

被験者が立体感をどの程度確かに感じているか、被験者の主観を口頭で回答させようとする、平滑化フィルタの効果のためか、曖昧な回答が多く集計が難しいことが予備実験を通じて判明した。

そのため、被験者に能動的に操作をさせることで、被験者が感じている立体感を定量的に評価する手法を考案した。具体的には、画面上には二つの図形を上下に並べて提示した。片方は提案手法に沿って平滑化フィルタを適用した図形で、視差量がシステムにより与えられている。もう片方は平滑化フィルタを適用していない図形で、その視差量を被験者はマウスホイールを用いて調整できる。この両者の奥行方向の位置が等しいと感じたところで被験者は操作を止め、ボタンをクリックすることで回答する。

この手法を用いることで、被験者が立体感を感じている場合には、回答された視差量の平均は真値に近付き、かつ分散も小さいことが期待される。立体感が得られにくくなるにつれ、分散が大きくなることが予想される。

実験で提示する図形は、中が塗り潰された円と正方形を用いた。またその塗り方は、単色の白と、フラクタル性を持ったグレースケールのノイズ画像をテクスチャとしたものの 2 種類を用意した。

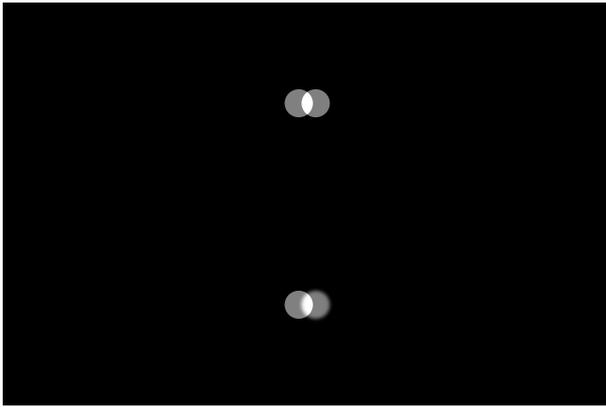


図 7 実験用ソフトウェア実行時の画面例。画面上部には被験者が操作可能な、平滑化処理が適用されていない図形が提示され、下部には平滑化処理が適用されたターゲット図形が提示されている。

これらの図形に対し、視差量・平滑化フィルタの強度を 2 種のパラメータを様々に変えて、その都度被験者に回答させた。提示の順番はランダムとした。

5.2 実験条件

提示画面は背景を黒とし、画面中央に二つの図形を縦に並べて提示した。上側の図形は上から四分の一の高さに、下側の図形は下から四分の一の高さに、それぞれ提示した。

上下とも、両眼視差による立体視が可能な図形を提示した。下側に提示した図形はターゲットとなる図形で、提案手法を適用して提示した。今回の実験では常に左眼用画像にのみ平滑化フィルタを適用した。一方、上側に提示した図形は提案手法を用いておらず、両眼用の画像とも平滑化フィルタを適用していない。被験者はこの図形の視差量を操作し、ターゲット図形と奥行き感が一致するように調整することが求められる。

提示した図形の形状は、直径 50 ピクセルの円および一片の長さが 50 ピクセルの正方形の、2 種類であった。またそのテクスチャは、白一色のものと、フラクタル性を有するグレースケールのノイズ画像の、2 種類であった。

平滑化フィルタとしてはガウシアンフィルタを使用した。その強度はぜんぶで 11 段階とした。平滑化を施さないものは強度 0 とし、強度 1 ではガウシアンフィルタのカーネルサイズを 5 ピクセルに設定し、以降強度が 1 増す毎にカーネルサイズを 2 ピクセルずつ増加させた。強度 10 でのカーネルサイズは 23 ピクセルとなる。

下側に提示する参照図形の視差量、すなわち左眼用画像と右眼用画像との間に設けた差は $10 \cdot 20 \cdot 30$ ピクセルの 3 段階とした。視差量が大きいくほど、被験者にとっては手前に飛び出て見える。ただし背景は黒一色であり、27 インチディスプレイの前に着座して見ると、上側の図形と下側の図形との相対的な奥行き差は明瞭に知覚されるのに対して、図形がディスプレイ面より手前に出ているか奥に出て

いるかの知覚は難しい。

以上の 4 条件の組み合わせすべて、 $2 \times 2 \times 11 \times 3 = 132$ 通りの条件を各被験者に提示した。提示順については、形状とテクスチャの組み合わせ計 4 種の順番は、円・正方形の順にそれぞれテクスチャなし・ありの順で固定とした。それぞれにおいて、視差量 $3 \times$ ぼかし強度 $11 = 33$ 通りの条件は、その順序をランダムに入れ替えて提示した。

5.3 実験手順

実験は形状・テクスチャが同一条件で視差量・ぼかし強度が変化する 33 課題からなるセッションを 1 セッションとし、先述した順で 4 セッションを、休憩時間を挟みながら実施した。

最初のセッションの前に、偏光眼鏡を装着した状態で立体画像がどのように見えるかを体験してもらう準備期間を設けた。この準備期間中、画面下部には視差量を 0 にした円を表示し、上部には視差量を $30 \cdot 20 \cdot 10$ ピクセルの 3 段階で順番に変化させた図形を提示し、立体映像がどのように見えるかについて、被験者にあらかじめ体験してもらった。

各セッションでは、先述した 33 通りの条件からランダムな順で選択された条件の図形が画面下部に提示された。被験者はマウスホイールを操作し、画面上部の図形と下部の図形とが同じ奥行きに見えるよう調整することが求められた。操作によって視差量は $0 \sim 50$ ピクセルの間で変化させることができたが、被験者は図形の奥行き知覚によってのみ視差量を知覚でき、他に視差量を表わす数字やグラフなどは与えられなかった。

被験者は、両図形の奥行きが一致したと思ったら、マウスのボタンをクリックして確定することが求められた。確定した後は、3 秒間のブランク画面を表示した後に、次の条件の図形を提示した。これを 33 回繰り返すことでセッションを完了する。

5.4 実験環境

実験は大学の実験室で、通常の照明下で特に環境を統制せず実施した。ディスプレイは LG Electronics 社製の円偏光式の立体表示が可能な 27 インチ液晶モニター DM2752D を使用した。液晶モニターは机の上に設置し、被験者はその前に着座して実験を行った。

5.5 実験結果

実験には、矯正含めて 0.8 以上の視力を有する 30 名の大学生・大学院生が参加した。

図 8 に、それぞれの図形条件毎に、提示視差量に対して回答された視差量の平均値を図示した。エラーバーは標準偏差 ($\pm SD$) を示している。上図は平滑化フィルタを施していない場合の結果を示している。グラフより、いずれ

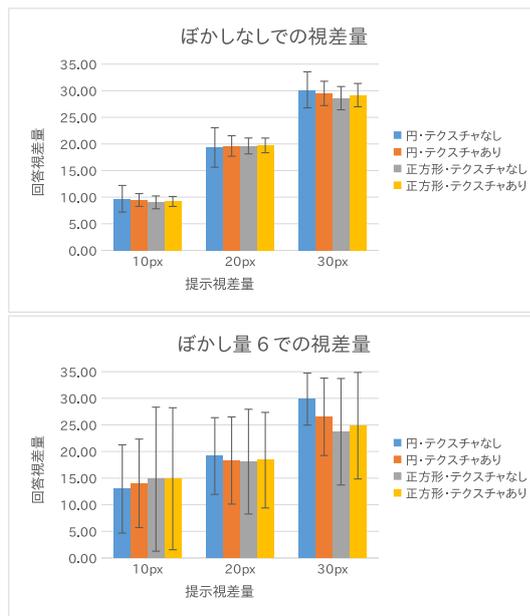


図 8 提示視差量に対する回答視差量の平均値を、各図形条件毎に示した。エラーバーは $\pm SD$ を表わす。

の条件においても提示視差量とほぼ同じ視差量が回答されており、分散も小さいことがわかる。このことから、マウスホイールを操作して視差量を回答する本実験手法によって、被験者が感じている立体感を定量的に測定できていることがわかる。図 8 下図はぼかし強度を 6 にした場合の結果を示したもののだが、分散が大きくなり、平均値も提示視差量からの乖離が大きくなっており、立体感が損ねられていることが読み取れる。

続いて図 9 に、ぼかし強度が回答視差量に及ぼす影響を図示する。

「円・テキストなし」条件においては、ぼかし強度が 4 を超えるとそれぞれの分散が大きくなるため、条件間での差は確かなものではなくつつある。「円・テキストあり」条件は、テキストなし条件に比べるとやや分散が大きい傾向が見られるが、詳しい分析は今後の課題とする。

「正方形・テキストなし」条件は、「円・テキストなし」条件と比べて、同じぼかし強度の場合により分散が大きくなっており、立体感が得られにくくなっていることがわかる。「正方形・テキストあり」条件でも同様で、いずれもぼかし強度 3 を超えると条件間の差は不明瞭となっている。

6. 応用

立体映像を平面画像に埋め込むことにより、様々な応用が可能になる。例えば一見普通に描かれたポスターだが、眼鏡をかけることで特定の文字が浮かびあがることで、隠れたメッセージを浮かび上がらせる、といった演出が可能となる。これにより、眼鏡の着脱によるコンテンツとの新しいインタラクションを設計することが可能となる。

加えて、例えば偏光方式による立体映像提示装置を用いた場合には、通常入手可能な両眼にそれぞれ異なる偏光特性を持たせた眼鏡のみならず、片方だけの偏光特性を両眼に持たせた眼鏡を用意することで、同じコンテンツに対しメガネの種類によって複数種類のコンテンツを埋め込むことが可能となる。

6.1 考察

以上の結果より、今回の実験で提示した、円および正方形を単独で提示した場合、ぼかし強度は 4 以内に収めることで立体感を損わずに提案手法を適用できることがわかった。ぼかし強度 4 は、ガウシアンフィルタのカーネルサイズは 11 ピクセルに相当する。

円に比べて正方形では立体感が損われやすいという傾向が得られた。正方形に平滑化フィルタを強くかけていくと四隅が丸くなり、全体として丸みを帯びたものになってしまい、立体視のための手がかりが失われてしまうことがその原因の一つであるだろう。この際、テキストを与えることで手がかりが得やすくなるのではないかと予想したが、本実験ではテキストの有無は結果に影響を及ぼしていない。

6.2 本実験の限界

空間周波数の低い部位での両眼立体視は現象として不明瞭な点が多い。今回の実験ではプリミティブな図形を提示しての実験にとどまったが、実際の使用場面を考慮し、より複雑な画像での実験が必要であろう。また、動きのある映像に対して提案手法がどのような効力を持つかは分かっていない。

また、提案手法は立体視可能な映像を提示する手法であり、かつ両眼映像が重畳表示された状態でもクロストークが低減される点に特徴があるが、このクロストークがどこまで低減されたかについてはまだ調査ができていない。

7. 結論

両眼立体視映像の、片眼画像の空間周波数を意図的に低下させることで、両眼画像の重畳表示のクロストークを低減させつつ、立体視可能な手法を提案した。評価実験により、直径 50 ピクセルの図形要素に対し、カーネルサイズ 11 ピクセルまでのガウシアンフィルタを適用しても立体感が損われないことが確認された。

今後、同様の条件でクロストークがどこまで低減可能かを調査し、提案手法が有効な範囲を定めることを課題とする。

8. 関連研究

藤村らの 2x3D[3] は、片側だけにフィルタを装着した専用眼鏡を用い、フィルタされていない側の眼に重畳画像

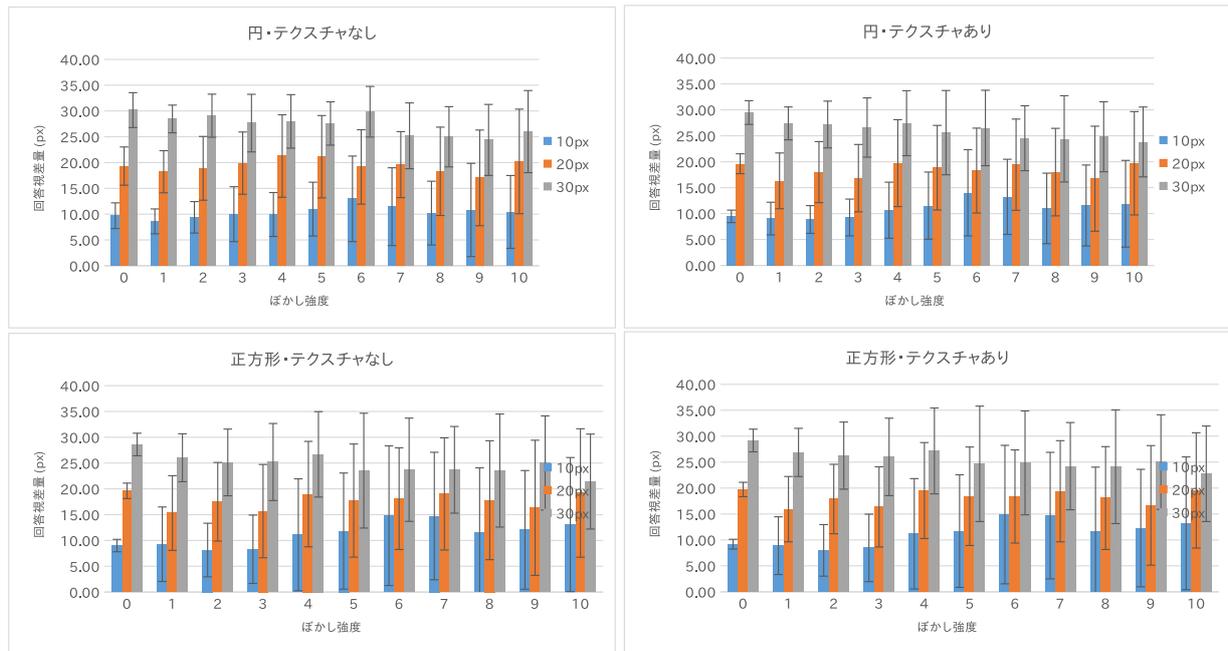


図 9 提示視差量に対する回答視差量の平均値を、各図形条件およびぼかし量毎に示したものの。エラーバーは $\pm SD$ を表わす。

を、フィルタ側の眼に重畳画像に埋め込まれた片眼用画像を提示することで立体視を可能にしつつ、専用眼鏡の非着用時にも違和感のない映像を提示することができるものである。我々の手法では立体視用眼鏡は通常製品と変わらないため既存製品への適用が容易であり、またコントラスト圧縮を行わないため階調解像度に優れるが、空間解像度は藤村らの手法に比べると劣る。

富士フイルム社は 3D マンモグラフィ像提示において、片眼映像の空間周波数が低くても立体感を得られることを利用して、患者の放射線被曝量を低減する手法を提案している [5]。通常の線量で高解像度の X 線像を撮影した後、角度を変えて視差のある画像を撮影する際に線量を下げ、解像度を犠牲にする代わりに被曝量を低減している。読影に求められる解像度は確保しつつ、三次元情報を付加することに成功している。

参考文献

- [1] Oliva, A., Torralba, A. and Schyns, P. G.: Hybrid Images, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 25, No. 3, pp. 527–532 (online), DOI: 10.1145/1141911.1141919 (2006).
- [2] 福地健太郎, 澤田拓也: HybriD: 空間周波数に対する感度特性を利用し立体映像提示におけるクロストークを軽減する重畳表示手法, *インタラクション 2016 論文集* (2016).
- [3] 藤村 航, 小出雄空明, 早川貴奉, 谷中一寿, 白井暁彦: 2x3D : 2D+3D 同時上映可能なハイブリッドシアター, *日本バーチャリアリティ学会大会論文集*, Vol. 17, pp. 570–573 (2012).
- [4] 井上卓也, 小林義征, 定國 溪, 山本裕紹, 陶山史朗: 立体表示において片眼画像をぼかした場合に知覚される奥行きの変化: 二眼式立体表示における奥行き変化, *映像情報メディア学会技術報告*, Vol. 33, No. 42, pp. 41–44 (2009).
- [5] 楠木哲郎: 3 D マンモグラフィシステムの開発, *技術報告*

21(2), 日本画像医療システム工業会 (2011).