

時分割パララックスバリア式裸眼立体表示の
医療応用と複数人対応

2022年 3月

楊 斌

時分割パララックスバリア式裸眼立体表示の
医療応用と複数人対応

楊 斌

システム情報工学研究科

筑波大学

2022年 3月

目次

第 1 章	序論	6
1.1	研究背景	6
1.2	手術シミュレーションと 3D ディスプレイの組み合わせ	8
1.3	裸眼立体ディスプレイ	10
1.3.1	パララックスバリア方式.....	10
1.3.2	レンチキュラ(凸レンズ)方式.....	11
1.3.3	導光フィルムを用いた裸眼立体表示(3M).....	12
1.3.4	指向性バックライト式	13
1.3.5	時分割パララックスバリア式.....	16
1.4	研究目的	19
1.5	論文の構成.....	20
第 2 章	手術トレーニングシステム.....	21
2.1	映像の取得.....	21
2.2	裸眼立体ディスプレイの選択.....	22
2.3	手術トレーニングシステム	26
2.4	2D 表示と 3D 表示による操作性の対照実験.....	27

2.4.1	実験内容	27
2.4.2	実験結果	29
2.5	3D 表示の視差強度による操作性の対照実験	30
2.5.1	実験内容	30
2.5.2	実験結果	32
2.6	まとめと複数観察者対応の必要性	34
第 3 章	複数観察者対応	35
3.1	従来方式の問題点	35
3.2	視域	36
3.2.1	複数観察者時の視域	37
3.2.2	視域幅調整	38
3.3	分数時分割	40
3.4	適応時分割	42
3.5	結果	45
3.6	まとめ	48
第 4 章	視域計算とクロストークレベル評価	49
4.1	視域計算	49
4.2	クロストークレベル	49

4.2.1	12/3, 14/3, 16/3 時分割時.....	50
4.2.2	奇数分子時分割	51
4.2.3	12/3~18/3 時分割時.....	52
4.2.4	結果と考察.....	54
4.3	まとめ.....	57
第5章	まとめ.....	59
謝辞	61
参考文献	62
著者文献	65

第1章 序論

1.1 研究背景

2025年の日本の人口ピラミッド予想は図1.1のように少子高齢化が進んでおり、生産年齢人口比率は今後ますます低下することが予想されており、医療の供給にも影響が出る可能性がある。と同時に、高齢以下により提供すべき医療サービスの量が増えていくとも考えられる。もちろん、医学部人気は続いており、厚労省の調査でも20代の若手医師が増える傾向がみられる。しかし、外科などの勤務が過酷な診療科は敬遠される傾向があり、20代の外科医師は平成10年から減少を続けている（図1.2）。

若手外科医師が執刀可能な外科医になるには長期OJT(On-The-Job Training)が必要のため、このまま外科医の減少が続くと、外科医の不足によって思うように手術が受けられないという事態が起こりかねない。この問題解決には若手外科医の育成期間を短縮することが求められる。

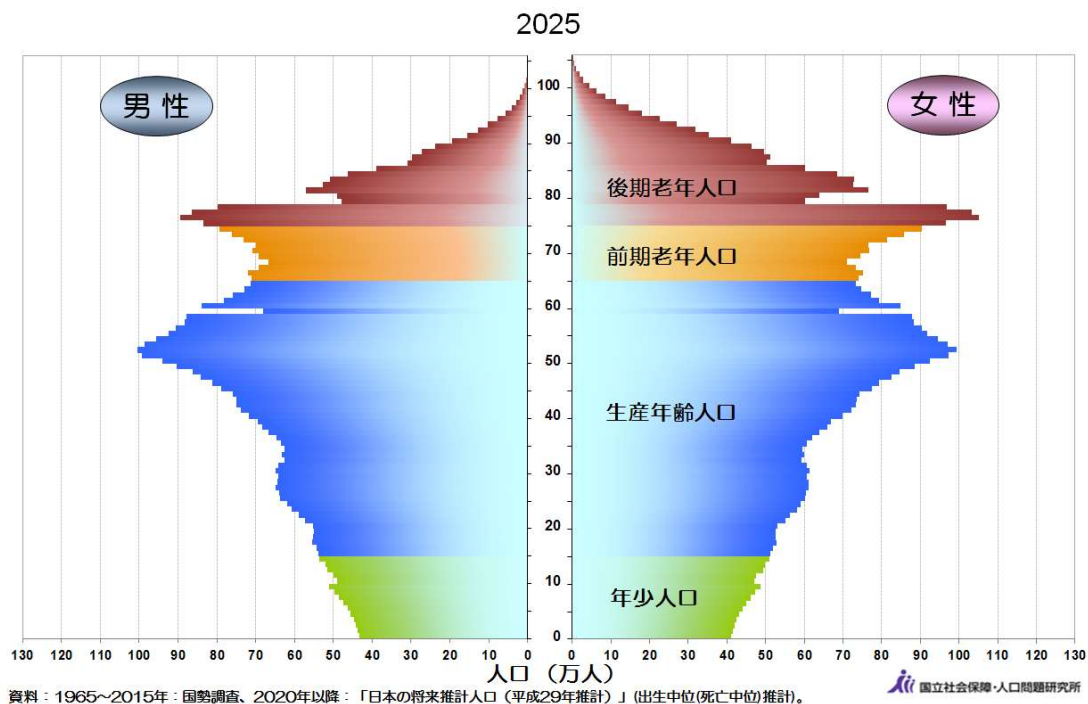


図1.1 2025年日本人口ピラミッド[1]

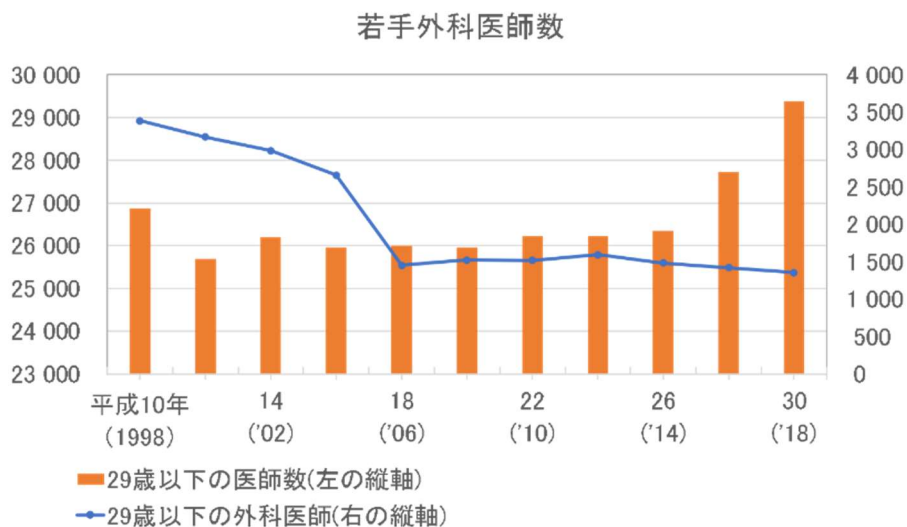


図1.2 平成10年～30年の若手外科医師数[2]

OJT 期間を短縮する手法の1つに、CG(Computer Graphics)による手術シミュレーションシステムの利用がある。しかし従来の外科手術現場および手術シミュレーションシステムでは図 1.3 ように 2D ディスプレイを使用しているため、外科医師は 2D 映像を観察しながら 3 次元像を頭の中で構築し、ディスプレイとは違う位置にある対象に対して両手を協調させて操作を行う能力が要求される。そのため、内視鏡手術は、従来の開腹手術に比べて高度な技術と豊富な経験を要する。実際、内視鏡手術における医療事故は多発している。



図1.3 内視鏡外科手術現場[3]

この問題を解決する手段として、内視鏡手術トレーニングシステムの拡充が求められている。手技そのものは、トレーニングを繰り返し向上させることは可能である。しかしながら、頭の中で解剖的な立体構造を再構築する能力を醸成することには困難を伴う。そこで、3D ディスプレイと組み合わせた手術システムが検討されている。

ここでは手術シミュレーションシステムから 3D ディスプレイに求められている機能について考える。実際の外科手術は、複数人の共同作業で行われるのが通常である。よって、より現実に近い環境を提供するには、複数人で同時に手術トレーニングを行えるシステムが必要である。また、作業中のアイコンタクトなど、共同作業を円滑に進められるようにするためには、立体眼鏡あるいは VR 装置のような特殊な装置を装着せずに立体視ができる環境を提供することが望ましい。また、手術がより正確的に行うためには、高解像度の映像提供も求められている。まとめると、手術現場に求められるのは、高解像度・高精細な 3 次元映像を、裸眼でかつ複数人同時に視聴可能できる環境である。

1.2 手術シミュレーションと 3D ディスプレイの組み合わせ

既に商品化されている医療用途の 3D ディスプレイは表 1.1 が示したようにほとんど眼鏡式であり、手術シミュレーションの裸眼で視聴可能という要求を満たしていない。

表 1.1 3D 医療用途の 3D ディスプレイ [4-9]

メーカー	製品名	3D方式	解像度
Panasonic	EJ-MDA32N-K	偏光眼鏡	960x1080
	EJ-MDA26N	偏光眼鏡	960x1080
JVC	GD-323D20	偏光眼鏡	960x1080
Sony	LMD-2451MT	偏光眼鏡	960x1080
	LMD-X310MT	偏光眼鏡	2048x2160
	LMD-X550MT	偏光眼鏡	1920x2160
Toshiba	HyperViewer	レンチキュラ式	1280x800

例えばオリンパスが 2013 年発売した 3D 内視鏡システムは、ソニーの眼鏡式 3D ディスプレイと先端に湾曲機能を搭載した 3D ビデオスコープを組み合わせ、外科医師に奥行きのある立体映像を提示できるシステムである。このシステムは内視鏡スコープの先端にステレオカメラを備え、配置された 2 つの CCD カメラが対象物の左目用画像および右目用画像をそれぞれ撮像し、ディスプレイに交互に表示する。一方、手術スタッフは、専用の 3D メガネを装着した状態で、ディスプレイに表示される画

像を見る。ここで、3Dメガネは、左目用画像と右目用画像の切り替えに同期して左右の視界を交互に遮断する液晶シャッターを備えているため、左目用画像は左目だけに見え、右目用画像は右目だけに見えるようになる。その結果、手術スタッフは脳内で左右の画像を合成し、対象物の立体イメージを得ることができる。当時のシステムは LMD-2451MT を使用して、片目に提示できる解像度は 960x1080 であったが、2017 年 1 月 10 日に発売する予定の LMD-X550MT と LMD-X310MT は 4k 液晶モニターを使用することで、解像度が向上し、より精細な立体映像を提示できるようになった。とはいえ、片眼が観察できる解像度が半減になることにより、2D 内視鏡の映像に比較するとやや劣る。そのため、現在のフルハイビジョン 2D 映像に慣れている外科医の組織を見る力を十分に生かし切れていない可能性がある[10]。また、メガネを用いる立体視では奥行き感が出るが、目への負担が大きく長時間の手術を行う医師からは疲れやすい、という声がある。メガネなどの器具をつけるため、手術室の感染対策上などで懸念もあるため、立体眼鏡のような特殊な装置を装着せずに立体視ができる環境を提供することが望ましい。

また、オリンパスの 3D 手術システムに使用されている 3D ビデオスコープの先端カメラ間距離は図 1.4 のように 3 mm に固定されている。一方、人間の平均両眼距離が 65 mm であり、実際にカメラを臓器と 45 mm 離れた場所から撮影するよう設置した場合、観察者に提示された立体像は図 1.5 が示したように 975 mm 離れた位置から見るのに等しく、観察者に十分な立体感を与えることは難しい。



図1.4 3Dビデオスコープの先端湾曲部分

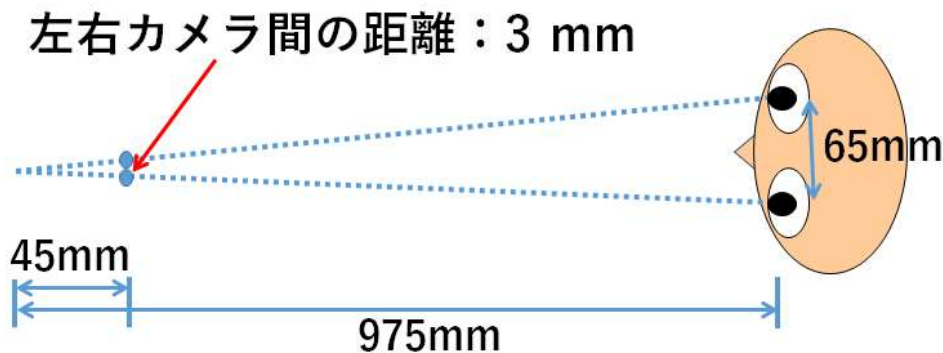


図1.5 既存の3D手術システムの視差

一方、東芝の医療 3D ディスプレイは裸眼式であるが、高精細液晶パネルにレンチキュラシートを貼り付け、9 視点からの画像を提示しているため、1 視点あたりの解像度が 1280 x 800 と低くなる[11]。解像度が低いため、内視鏡外科手術での効果期待できないと考えられる。

このように、商品化されている医療用途の 3D ディスプレイは手術シミュレーションシステムから求められている機能を満たしていないため、新たな裸眼立体ディスプレイを開発することが必要であると考えられる。

1.3 裸眼立体ディスプレイ

本節では、これまで提案されてきた立体ディスプレイについて、眼鏡の装着を必要としない裸眼式の既存技術の概略とその特徴を述べる。

1.3.1 パララックスバリア方式

最もシンプルで実現しやすい裸眼立体表示法の 1 つに、図 1.6 に示すパララックスバリア方式がある。この方式は、ディスプレイパネル上に右目用画像と左目用画像を一画素ごとに交互に描画し、ディスプレイパネルの前に均等な幅を持つバリアを置くことによって、裸眼立体表示を実現する（正視）。

パララックスバリア方式では、頭の位置が動くと、左右の画像が入れ替わって奥行きが逆転した像が観察される（逆視）。この問題は、観察者の頭の位置を検出し、それに応じて提示像を入れ替えることによって解決できるが、正視できる場所と逆視が起こる場所の間では、右目用画像と左目用画像が混じって観察される場所が残る。また、画像表示パネルは 2 視点分の視差画像を提示しているため、実際に観察された解像度が半分になるという欠点もある。

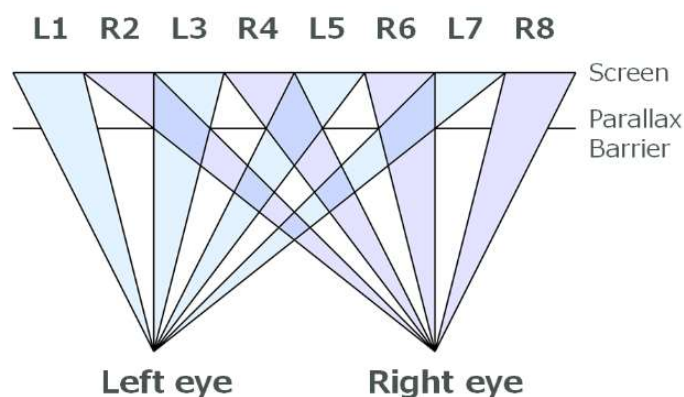


図 1.6 パララックスバリア

また、フル解像度の 2D 表示と半分の解像度の 3D 表示を切り替えられるようにするため、任天堂 3DS では図 1.7 のようにスイッチ液晶を導入している。このシステムでは、従来画像を表示するディスプレイパネルより手前に配置しているパララックスバリア部分を後面に配置している。スイッチ液晶が全面光透過の場合は、一般の 2D ディスプレイと同じ表示になり、スイッチ液晶がパララックスバリアとして機能する場合は、裸眼立体ディスプレイとして機能する。

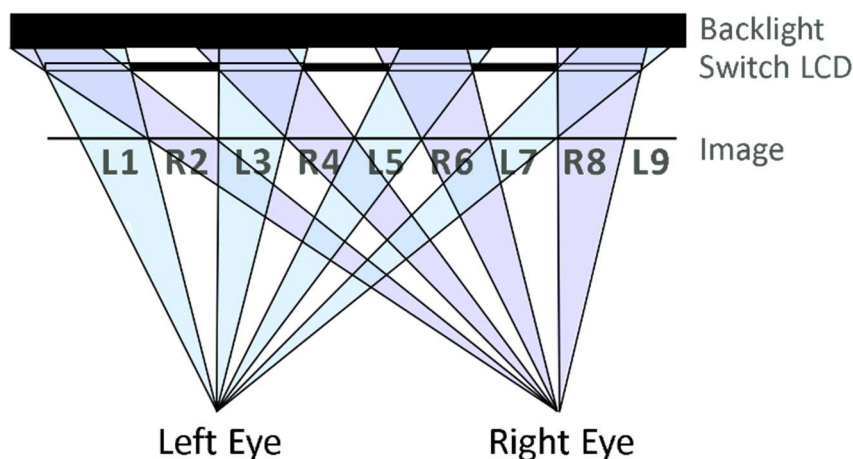


図 1.7 スイッチ液晶を用いた 2次元表示と 3次元表示を切り替えられるディスプレイシステム

1.3.2 レンチキュラ(凸レンズ)方式

パララックスバリア方式と並んで広く知られた裸眼立体表示法の一つとして、レンチキュラ(凸レンズ)方式がある(図 1.8)。この手法もパララックスバリアと同じように視差画像を分割して、交互に並べている。光線を制御する部分はバリアではなく、

半円柱状のレンズを並べたレンチキュラシートを使用し、右目用の視差画像と左目用の視差画像を観察者の眼の位置にそれぞれ集光させることで、左右の眼に別々の視差画像を見せることで、立体視を実現している。

この手法は、レンズによる集光系を用いるため、パララックスバリア方式よりも提示像が明るくなるという利点がある。しかしながら、立体視の光学的原理はパララックスバリアとほぼ同じであるため、立体視のできる視点領域が狭い領域に限定される、解像度が LCD パネルの半分になる等のパララックスバリア方式の欠点はそのま受け継がれるという問題がある。

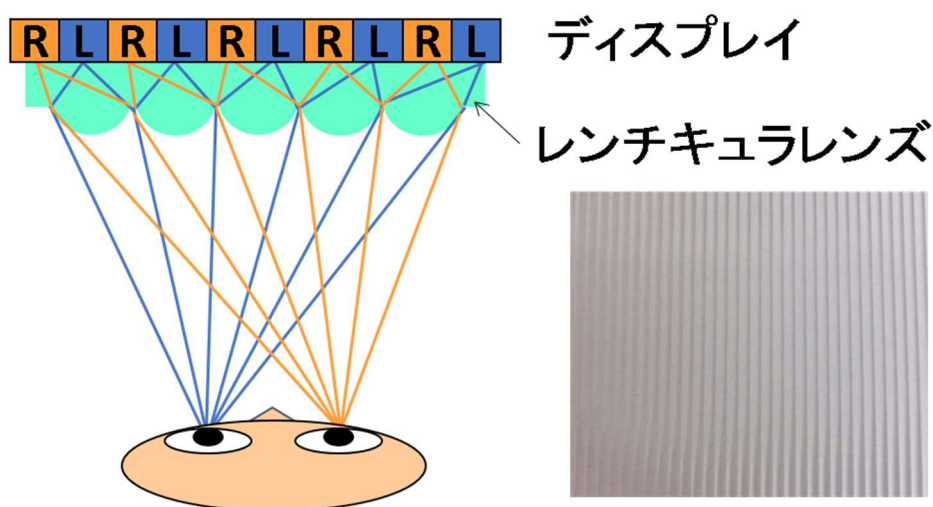


図 1.8 レンチキュラ式裸眼立体表示

1.3.3 導光フィルムを用いた裸眼立体表示(3M)

解像度が半分に落ちるパララックスバリアとレンチキュラ方式以外に、パネルの解像度をフル活用できる、2つの光源と導光フィルムを組み合わせる方法がある[12-14] (図 1.9)。この方式では、右目用光源と左目用光源がそれぞれ導光フィルムの右と左側に配置される。右側にある右目用光源を点灯させると、導光フィルムの反射により、光線が右目だけに照射する。逆に左側にある左目用光源を点灯させると、同じく導光フィルムの反射によって、光線が左目だけに照射する。ここで、右目用光源と左目用光源を交互に点灯させ、それと同期して前面の液晶パネルの提示映像を右目用視差画像と左目用視差画像を交互に提示することで、立体視が実現される。この方式ではパネルの解像度をフル活用できる利点があるが、観察位置が依然として固定されることと、同時に立体画像を観察できる観察者数が1人に限られる問題がある。この手法をベースにして複数人観察可能にする試みもあるが[15-16]、これらの手法を使用しても立体視できる位置はかなり限定される。

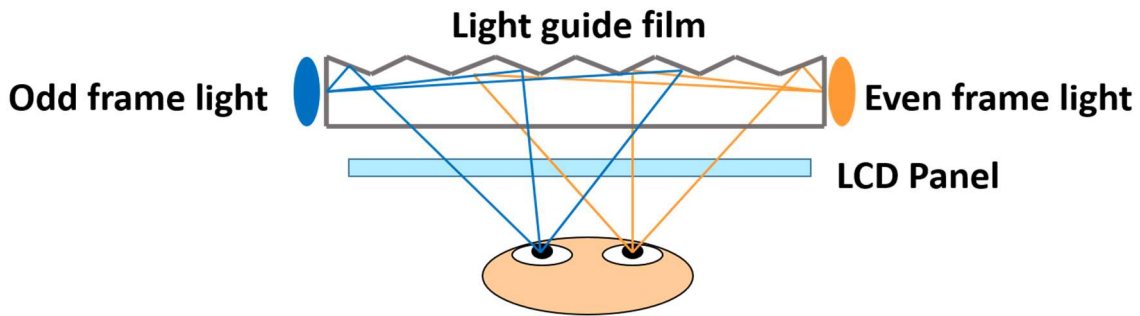


図 1.9 導光フィルムを用いた裸眼立体表示

1.3.4 指向性バックライト式

多数の観察者を対象として裸眼立体視を実現する手法として、凸レンズや凹レンズを利用した指向性バックライト方式がある。大口径凸レンズと発光位置を制御できるバックライトを組み合わせた裸眼立体表示法はその一つである[17]。この手法では、図 1.10 が示すように観察者の両眼の位置に応じて、それぞれの目のみに光が届くようにバックライトの発光位置を調整して、指向性バックライトを実現している。大口径レンズ手前の視差画像表示用のパネルには、指向性バックライトの時分割点滅に合わせて、それぞれの眼用の視差画像を表示することで、裸眼立体表示が実現される。

この手法では大口径レンズ使用することで光を収束させるため、大画面表示をする際はレンズとバックライトの間の距離が長くなり、装置の厚みが著しく増加する問題がある。また、観察者の左右移動する際は、バックライトの発光位置を制御して立体視が維持できるが、奥行方向で移動する際立体視を維持するには、レンズとバックライト間の距離もそれに依り調整する必要あるため、レンズ位置を物理的に調整する必要ある。

これらの問題を解決するために、服部は図 1.11 に示すように、大口径レンズの代わりに凸レンズアレイを用いる方法を提案している[18-21]。この手法でも、レンズアレイを光源から要素レンズの焦点距離分だけ離れた位置に設置することで平行光を実現する。それぞれのフレームで、観察者の片目と要素レンズの中心を結ぶ直線に光がバックライトと交わる位置に発光させることで、各眼周辺のみ光が届くようになる。さらに、レンズアレイ手前に置いてある視差画像提示用のパネルの映像とバックライトの発光制御と同期して 120Hz 以上で切り替えることで、メガネをかけていない前後左右移動している観察者にフル HD で立体視を提示することができる。発光位置を増やすことで、複数観察者への対応も可能である。

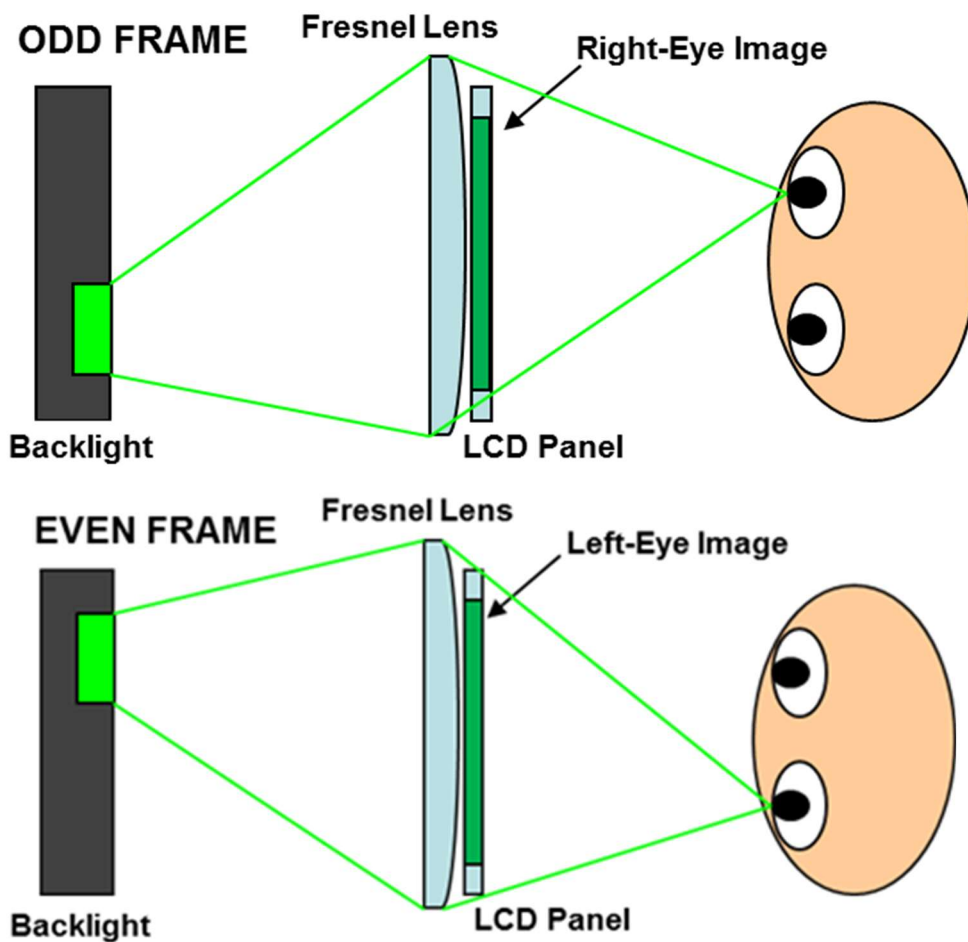


図 1.10 大口径凸レンズを用いた裸眼立体表示

また、この方式に対する改善手法も提案されており、改善後のシステムは図 1.12 が示す構造になる。従来のシステムではレンズの中心と周辺のバックライト輝度が異なるため、レンズアレイの形状に沿った輝度ムラが観察される問題がある。これを軽減するために、要素レンズを段階的に位相シフトして並べながら、垂直方向にのみ光を拡散する指向性拡散板をレンズアレイとパネルの間に挿入することで、立体視を崩すことなく、輝度ムラのない均質な画像提示ができるようになる[22-23]。また、レンズアレイの光学系を使用しているため、像面湾曲の影響を緩和するために大口径凸レンズを挿入することも提案されている[24]。さらに、レンズアレイの段ごとにそれぞれミラーを挿入し、ミラーによる光の折り返しの効果で、観測者がディスプレイの上部や下部から観察を行っても、立体視および輝度を維持できる [25]。

垂直方向に光を拡散する指向性拡散板を入れる場合、頭を傾けると立体視を維持できなくなる。この指向性拡散板を入れずに輝度ムラを解消する方法として、隣り合う要素フレネルレンズを構成する微小プリズムを交互に入り合いにして配置する特殊な

レンズアレイを使用する方法が提案されている[26-27]。この入り合いレンズは、もともと粗インテグラルイメージング[28-33]において、要素レンズの継ぎ目を目立たなくするために提案されたものである[34]。この技術を時分割指向性バックライトに応用することで、拡散板を挿入せずとも輝度ムラを解消し、頭を傾けても立体視を維持することが可能になる。

これらの方式はディスプレイの厚みの問題をある程度改善することに成功したが、光学系の制限（レンズの焦点距離）により、十分に薄型にはできない問題が残る。

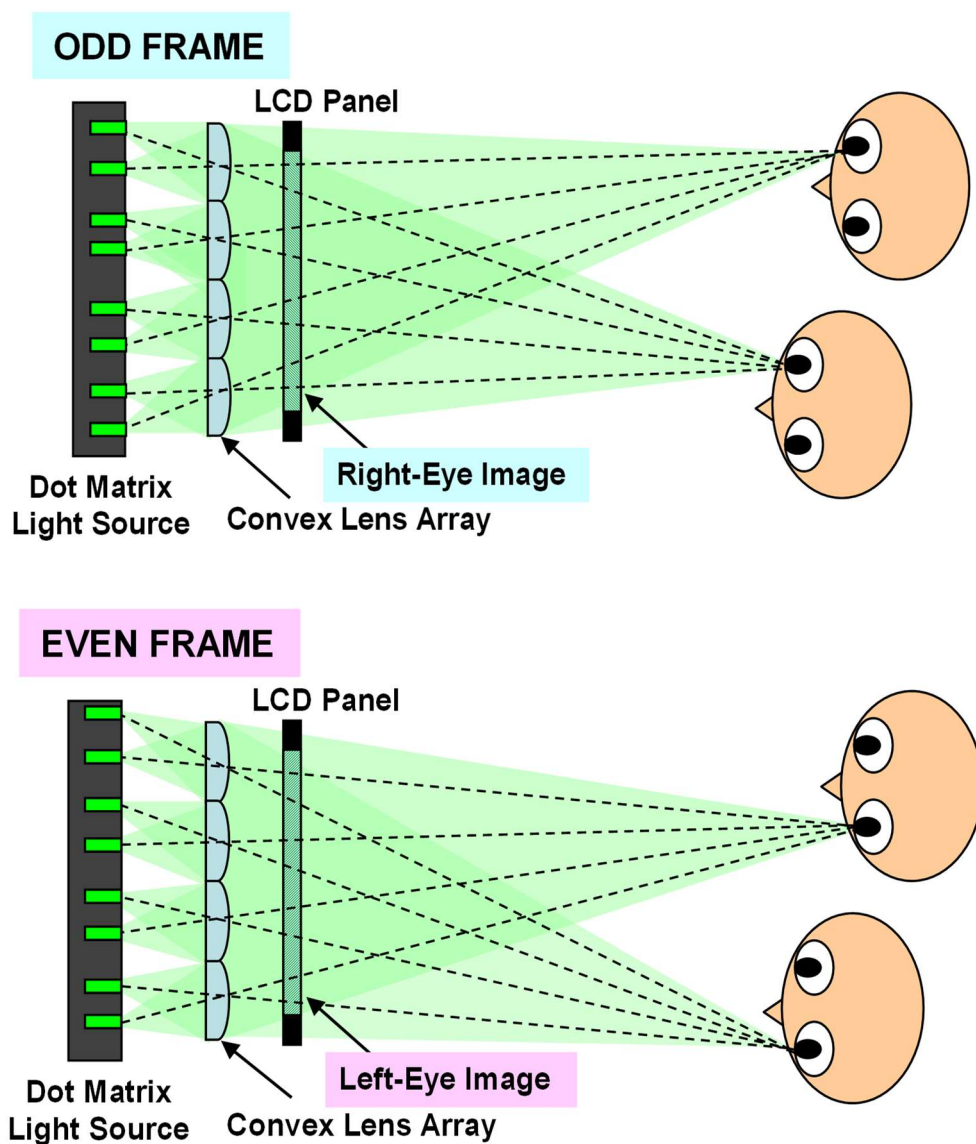


図 1.11 凸レンズアレイを用いた指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイ

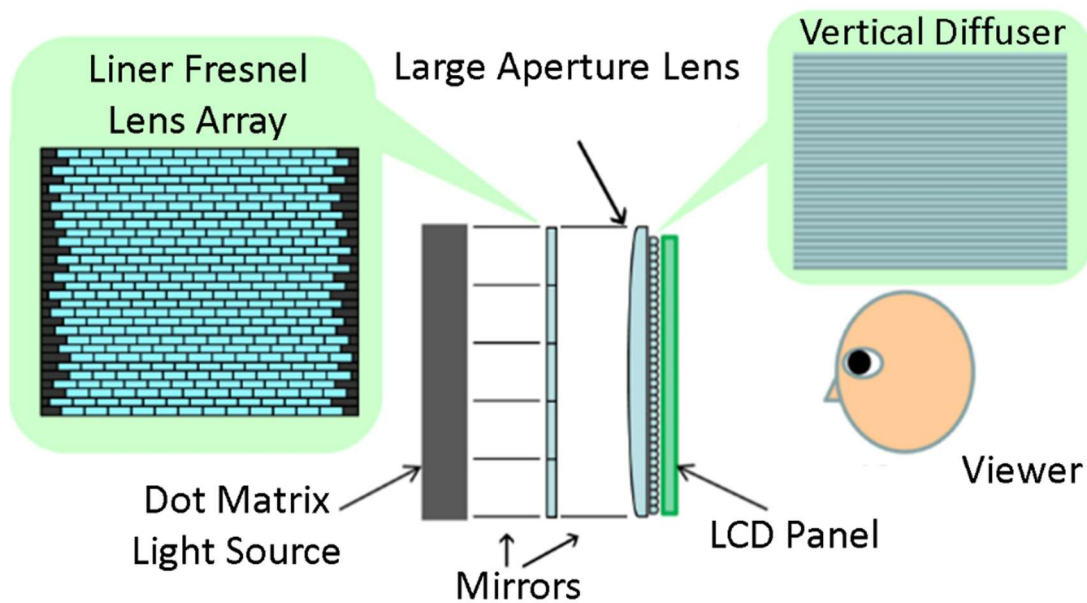


図 1.12 レンズアレイと拡散板を用いた指向性バックライト式
裸眼立体ディスプレイ

1.3.5 時分割パララックスバリア式

裸眼立体ディスプレイの解像度低下の問題は時分割表示法によっても解決されている[35-38]。図 1.13 のように 2 フレームでパララックスバリアを 120 Hz のリフレッシュレートで切り替え、これに応じて右目用画像と左目用画像の出す位置を変えることによって、パネルの解像度をすべて利用することが可能となる。ただし、この手法ではパララックスバリアのパターンを変化させる必要があるため、液晶パネルなどを用いて電子的に制御できるアクティブなバリアを実現する必要がある。

連続した視域を提示するため、Zhang らはこれを拡張して、図 1.14 のように 4 時分割表示で 4 視点分の画像表示を行う手法を提案している[39-42]。さらに、4 視点に使用する画像を左右視点画像の 2 種類にすることで、クロストークのない視域を拡張することができる。A,B 視点に右目用画像を提示し、C,D 視点に左目用画像を提示すると、右目が A,B の間、左目が C,D の間にあれば、クロストークのない立体視が可能となる。

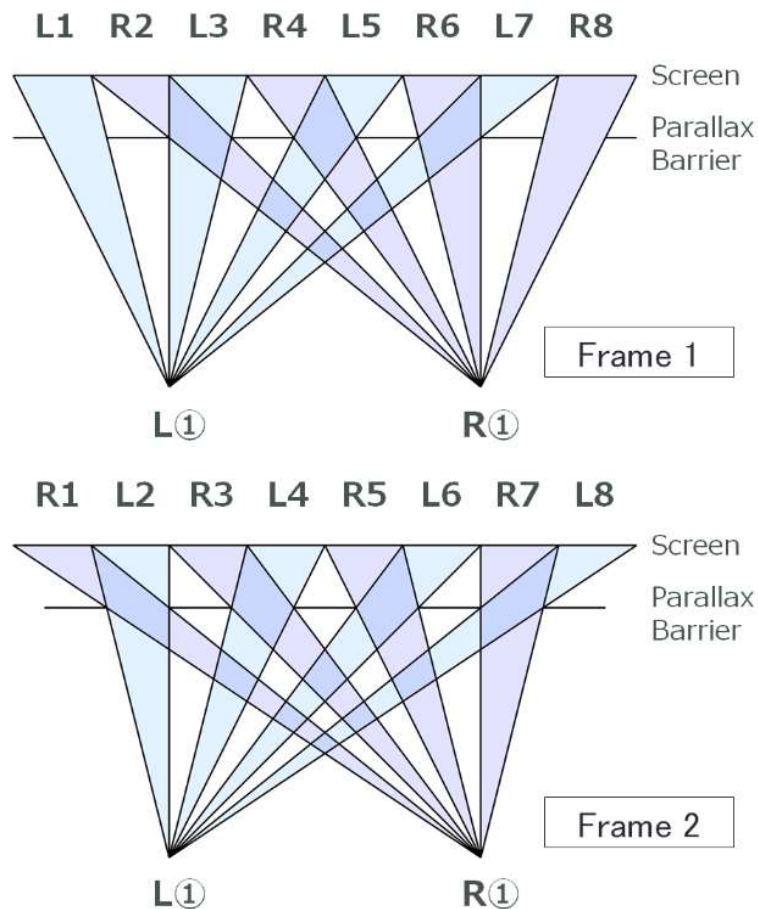


図 1.13 時分割パララックスバリア

しかしこの手法には、LCD パネルのカラーフィルタが横に並んでいるため、色モアレ防止のために設置向きが縦置きに制限される問題がある。そこで、ディスプレイを横置きの状態でも立体視を可能にする手法として、サブピクセル構造を利用した斜めライン方向のパララックスバリア方式が提案されている[43]。斜めパララックスバリアの概要図を図 1.15 に、拡散板の設置向きを図 1.16 に示す。パララックスバリアおよび拡散板の傾斜角度 θ は、

$$\theta = \tan^{-1} 1/3 \quad (1.1)$$

と表される。LCD パネルを回転させずに立体画像の提示するため、拡散板の配置向きを斜めにし、斜めパララックスバリアを用いる。拡散板を斜めに配置することで、垂直方向に発生する色モアレを軽減することが可能になる。また、パララックスバリアおよび拡散板の傾斜角度が小さい場合、観察者が頭を若干傾斜しても立体視を維持できる。

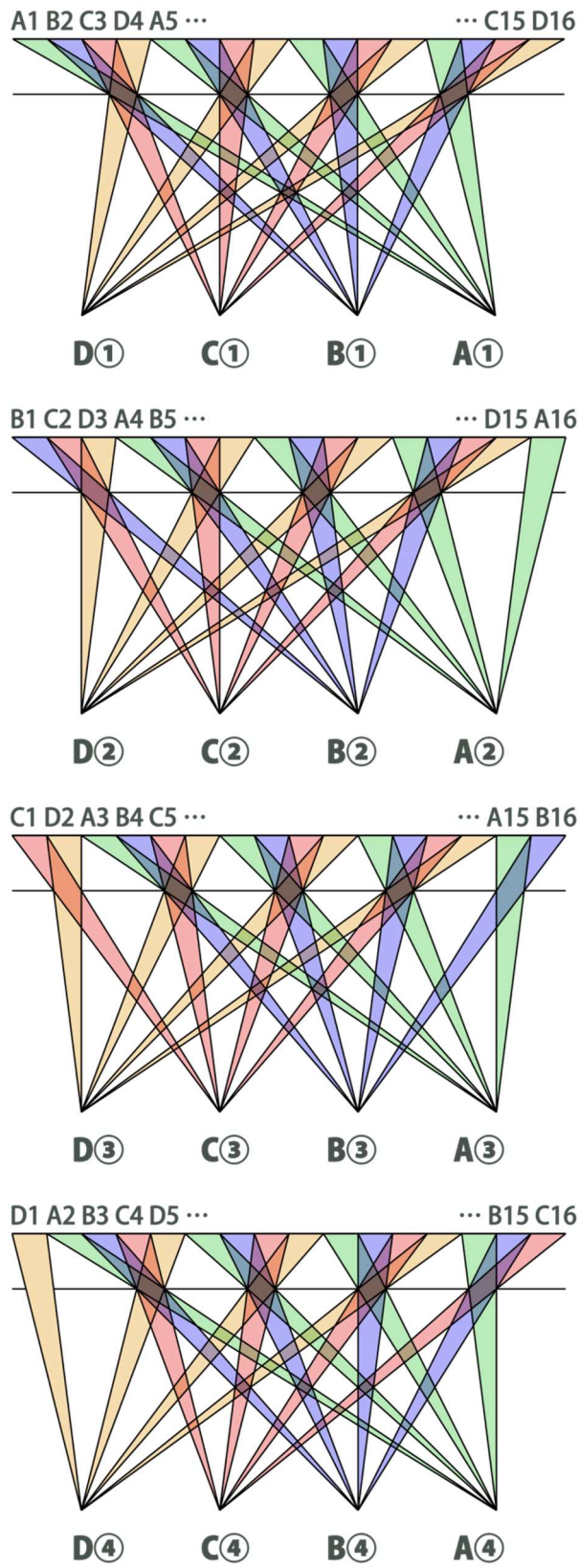


図 1.14 4時分割パララックスバリア [39-42]

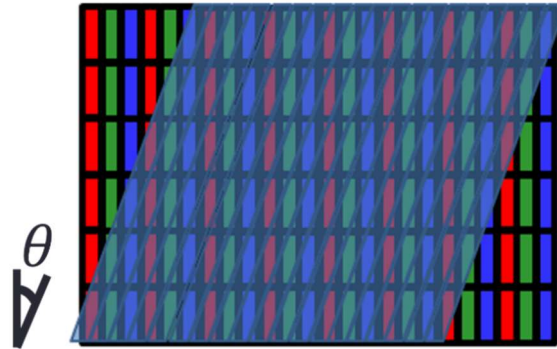


図1.15 斜めパララックスバリア[43]

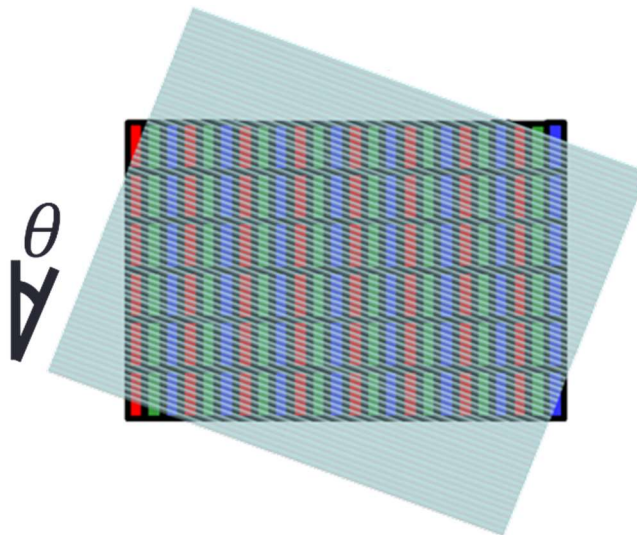


図1.16 斜めパララックスバリアの拡散板[43]

1.4 研究目的

医療現場から高解像度繊細な映像表示ができる裸眼立体ディスプレイが望まれているが、既存の裸眼立体ディスプレイは解像度が低い、観察位置が限定される、同時に一人しか観察できないなどの問題があった。本論文ではこれらの問題を解決したフルハイビジョン裸眼立体ディスプレイを実現し、手術トレーニングと組み合わせたシステムを構築することを目指す。

また、複数観察者対応機能が求められているため、従来パララックスバリアベースの裸眼立体表示法では絶対解決できない一人しか観察できない問題を克服し、プロトタイプシステムの実装することを目指す。

1.5 論文の構成

本論文は以下のように構成される。第2章では構築したルハイビジョン裸眼立体ディスプレイを使用した手術トレーニングシステムについて述べる。第3章では既存のパララックスバリアベース方式の複数観察者対応の方法について述べる。第4章では実装した裸眼立体ディスプレイの視域の計算及び複数観察者同時に視聴する際のクロストークレベルの評価について述べる。第5章ではまとめと今後の展望について述べる。

第2章 手術トレーニングシステム

本章では、第1章で述べた研究背景及びすでに商品化されている医療用途の3Dディスプレイの問題点を考慮し、高解像度で立体映像を裸眼で観察できる3Dディスプレイと手術トレーニングを組み合わせたシステムの実装について述べる。

2.1 映像の取得

実写立体映像をリアルタイムで裸眼立体ディスプレイに表示するため、撮影カメラとキャプチャーボードは必要となる。本論文が構築したシステムはJVC製のフルハイビジョン3Dビデオカメラ Everio GS-TD1(B)とSKNET製キャプチャーボード MonsterX U3.0Rを使用している。それぞれの仕様を図2.1と図2.2に示す。



メーカー型番	GS-TD1(B)
有効画素数	207万画素
撮像素子	1/4.1型CMOSx2
ズーム倍率(光学)	5倍
デジタルHD方式	MPEG-4 MVC/H.264 (1920×1080×2 /16:9)
焦点距離	f=3.76~18.8mm

図2.1 JVC製のフルハイビジョン3DビデオカメラEverio GS-TD1(B)
(3Dモード仕様)[44]



製品名	MonsterX U3.0R
インターフェース	USB3.0
映像入力	HDMI ver.1.3
映像出力	HDMIパススルー
映像入力解像度	1920×1080p 60/30/24fps 1920×1080i 60field 1280×720p 60fps 720×480p 60fps
録画形式	AVI形式(非圧縮)

図2.2 SKNET製キャプチャーボードの仕様 [45]

3Dカメラをキャプチャーボードと接続し、さらにキャプチャーボードをHDMI端子経由でパソコンと繋ぐことで、プログラム側から3Dカメラに映る映像データを取

得できる。

本論文ではキャプチャーボードを DirectShow デバイスとして検出し、解像度を 1920 x 1080、リフレッシュレートを 60 Hz に設定する。さらに、FFmpeg と SDL2 を用いて、デバイスから取得した映像データをデコードし、フレームごとに画素データに変換する。

デコーディングプロセスに従って、3D ディスプレイの描画部は並列で実行されている。描画用の左目画像と右目画像を取得するため、描画スレッドは 30 Hz でデコーディングスレッドにアクセスし、画素データをテクスチャに変換する。このテクスチャを用いて、市販の眼鏡式 3D テレビに Side-By-Side 方式で表示させ、観察者はリアルタイムで 3D 実写映像を見ることができる。しかし、今回用いたキャプチャーボードの解像度は最大 1920 x 1080 であり、両眼用画像にそれを振り分けると、解像度は半減して 960 x 1080 となる。より高い入力解像度のキャプチャーボードを用いれば、片目に提示できる画像が 1920 x 1080 に至ることが可能と考えられる。

2.2 裸眼立体ディスプレイの選択

高解像度で立体映像を表示させるため、従来のパララックスバリア方式とレンチキュラ方式では要求を満たせないため、手術トレーニングシステムには適切ではないと考えられる。導光フィルムを用いた裸眼立体表示方式はフルハイビジョンで立体視実現できるが、操作中に観察者が動く手術トレーニングシステムでは適切な選択ではない。そこで、時分割指向性バックライト方式と時分割パララックスバリア方式が有力な候補となる。

指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイとサブピクセル構造を利用した 4 時分割パララックスバリア方式のどれを導入するか検討するにあたり、それぞれのクロストークレベルの評価を行った。

評価実験では 800mm 離れた位置において、正面からディスプレイを観察する場合のクロストークレベルを求める。クロストークレベルは照度から算出できるため照度の測定実験を行う。View 1 (左目用画像には白色画像、右目用画像には黒色画像を提示)、View 2(左目用画像には黒色画像、右目用画像には白色画像を提示)、View 3(左目、右目用画像共に黒色画像を提示)の 3 つの実験環境を設定する。View 1、View 2、View 3 それぞれの環境で、左目位置と右目位置のディスプレイ照度を測定する。また、View 3 の照度を環境光と設定しているため、View 1 と View 2 のそれぞれの測定値から View 3 の測定値を引いた値を測定結果としている。

時分割指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイでの測定結果を表 2.1 に示す。また、サブピクセル構造を利用した 4 時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイでの測定結果を表 2.2 に示す。このそれぞれの測定値から、左右の目それぞれに

発生するクロストーク量を求め、その平均をクロストークレベルとする。クロストークレベルは

$$crosstalk = \frac{1}{2} \left(\frac{I_L(\theta_R)}{I_L(\theta_R) + I_R(\theta_R)} + \frac{I_R(\theta_L)}{I_L(\theta_L) + I_R(\theta_L)} \right) \quad (2.1)$$

で与えられる。 $I_L(\theta_R)$ は右目位置における View 1 の照度、 $I_L(\theta_L)$ は左目位置における View 1 の照度、 $I_R(\theta_R)$ は右目位置における View 2 の照度、 $I_R(\theta_L)$ は左目位置における View 2 の照度を表す。

この式から、時分割指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイでのクロストークレベルは 13.4 %と算出される。また、サブピクセル構造を利用した 4 時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイでのクロストークレベルは 5.0 %と算出される。よって、こちらはメガネ式の立体ディスプレイと同程度のクロストークレベルであることが確認できた。この結果より、本システムではよりクロストークレベルの低いサブピクセル構造を利用した 4 時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイを使用する。

表2.1 指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイのクロストークレベル

	左目位置	右目位置
View 1 (左目⇒白, 右目⇒黒)	1.76 [lx]	0.29 [lx]
View 2 (左目⇒黒, 右目⇒白)	0.25 [lx]	1.74 [lx]

表2.2サブピクセル構造を利用した4時分割パララックスバリア方式の
クロストークレベル

	左目位置	右目位置
View 1 (左目⇒白, 右目⇒黒)	1.51 [lx]	0.08 [lx]
View 2 (左目⇒黒, 右目⇒白)	0.09[lx]	1.75 [lx]

さらに、時分割指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイとサブピクセル構造を利用した4時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイを用いた手術シミュレーションの3D提示で、どちらがよりシミュレーション使用者の助けとなるかについても評価を行った[46]。

評価はアンケート形式により行った。アンケートの回答者は、年齢が21歳から24歳の筑波大学の医学生計11名（男性6名、女性5名）で行った。アンケートの項目は、

- (1) どちらがより高画質に感じましたか？
- (2) 立体視が崩れ、映像が2重に観えてしまうことがありましたか？
- (3) 全体を通して、どちらを使用したいと思いましたか？

の3つである。

各項目について、アンケートの回答を集計した結果を図2.3から図2.5に示す。図2.4の結果はサブピクセル構造を利用した4時分割パララックスバリア式裸眼立体ディスプレイでクロストークが多いと答えた人がいないことから、クロストークレベル5.0%の影響が効いていると確認される。

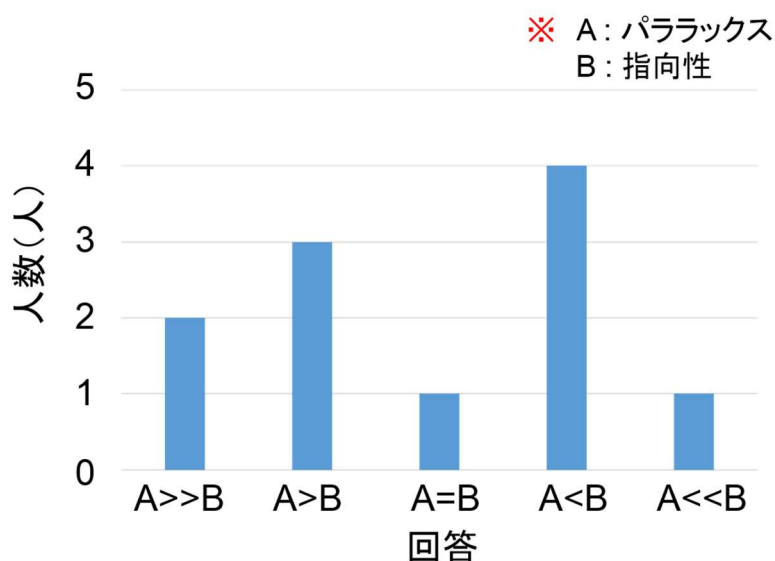


図2.3 質問(1)の結果

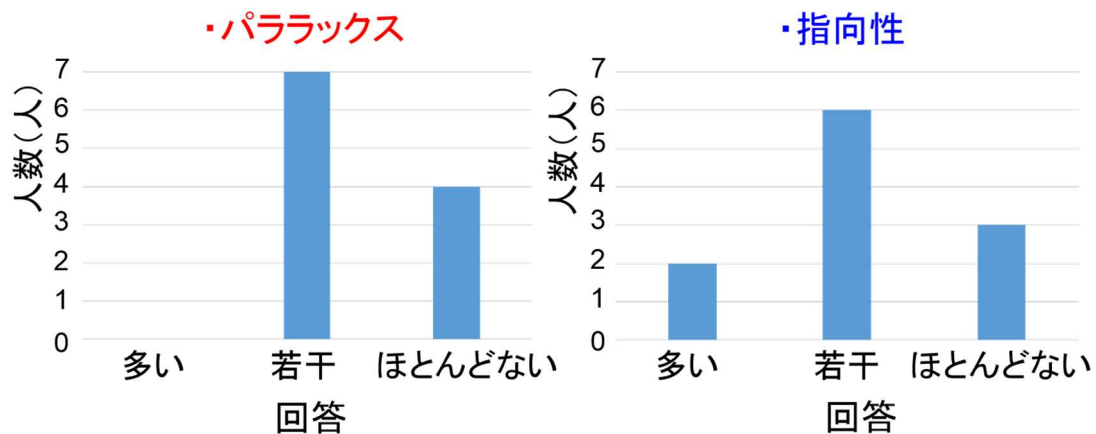


図2.4 質問 (2)の結果

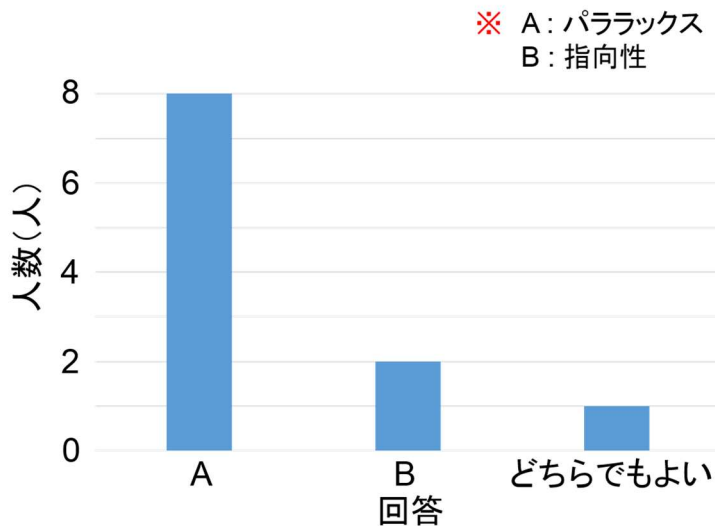


図2.5 質問 (3)の結果

以上より、サブピクセル構造を利用した4時分割斜めパララックス方式裸眼立体表示法がよりクロストークレベルが低く、よりシミュレーション使用者の助けとなることがわかった。また、実際の手術現場ではすでに医療機器が多く設置されているので、省スペースの方が望ましい。指向性バックライト式では光学系の制限により、十分に薄型にはできない問題がある。トレーニング時にも、より薄型にできたほうがより運搬しやすくなり、トレーニングの支障にならないと考慮したうえで、本研究ではサブピクセル構造を利用した4時分割斜めパララックス方式裸眼立体表示法を採用することとした。

2.3 手術トレーニングシステム

本節では、本研究で使用する手術トレーニングシステムについて述べる。立体表示には、前節で述べた通りサブピクセル構造を利用した4時分割斜めパララックス方式裸眼立体表示法を用いている。製作した実機を図2.7に示す。なお、前節でも述べた通り、この装置のクロストークレベルは5%である。

また、3Dカメラを遠くから撮影するように設置するため、トレーニングボックスの手前に二枚の平面鏡を置く。一枚目は6cm離れ、6cmの高さで、水平方向と53°の角度がつくように設置する。二枚目は一枚目の平面鏡の真上、高さ31.3cmのところに、水平方向と152°の角度がつくように設置する。撮影カメラはトレーニングボックスの奥に、12.5cm高い所に、上に30°傾けて撮影する。こうして平面鏡で二回折り返すことによって、カメラの虚像は13°斜めで、手術トレーニングを行う場所と97.5cm離れた所にあるようになる。この距離を確保することにより、既存の眼鏡式3D内視鏡手術システムが提示する視差量が再現される。実装したシステムが使用されている様子を図2.8に示す。

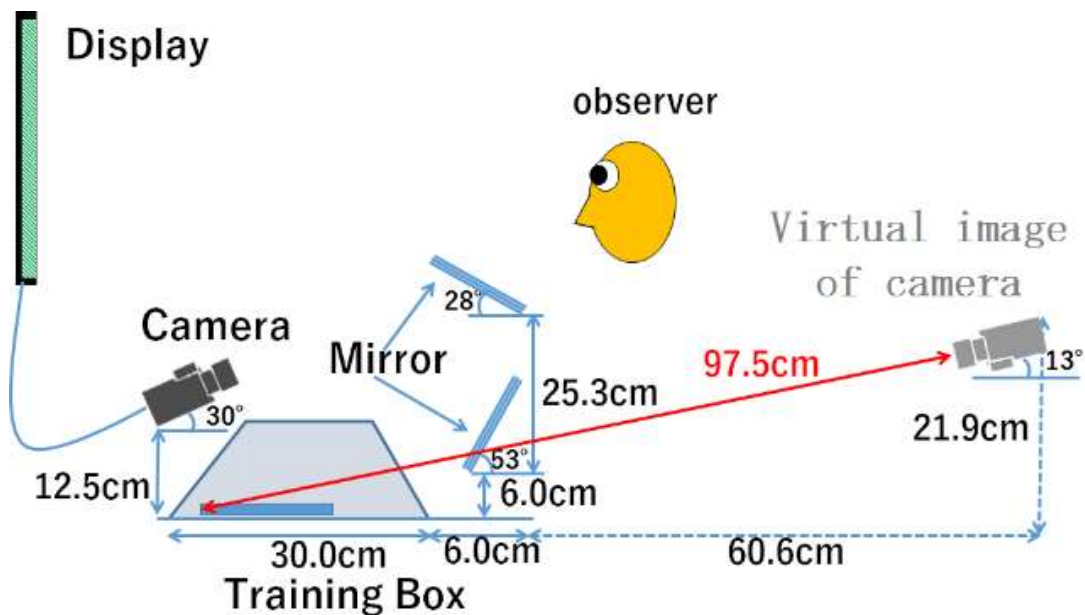


図2.6 システム構成



図2.7 使用する3Dディスプレイ

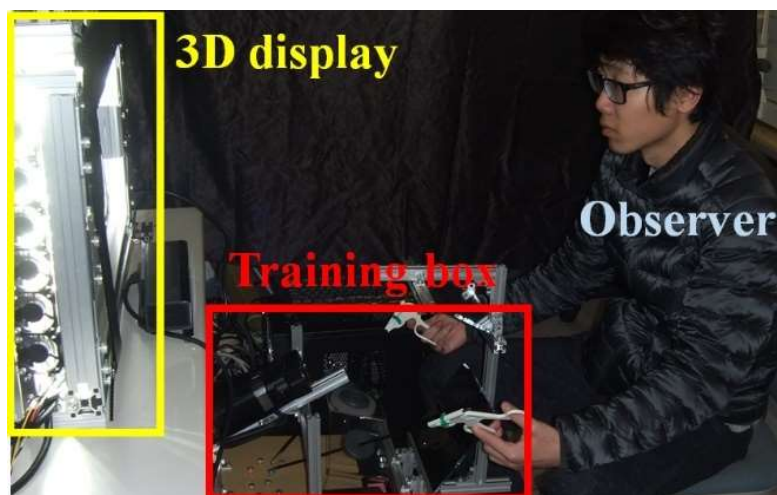


図 2.8 プロトタイプシステムの様子

観察者は裸眼立体ディスプレイに映るトレーニングボックスの内部様子を見ながら、ボックスに差し込んだ鉗子を用いてトレーニングを行う。トレーニングボックスの中央がゼロ視差となるように調節する。これにより、ボックスの手前半分はディスプレイ画面の手前に見えるようになり、奥半分はディスプレイの奥に見えるようになる。

2.4 2D 表示と 3D 表示による操作性の対照実験

2.4.1 実験内容

従来の 2D 表示と比べ、3D 映像の使用による操作性の向上を評価するため、次のような対照実験を行った。

被験者はディスプレイを観察しながら、2 つの鉗子を用い、トレーニングボックス

内部左側の 4 つの突起に 1 つずつはめられた 4 つの輪ゴムを右側の同じ色つけた 4 つの突起に移動させ、さらにそれをもとの位置に戻すという作業を行う。なお、輪ゴムの移動の際は、途中で一方の鉗子からもう一方の鉗子へ輪ゴムを空中で持ちかえるよう指示をする。被験者ごとに、2D と 3D の条件下で上記の作業に要する時間を計測する。実験する様子は図 2.9 に示す。



図2.9 2Dと3D操作性対照実験のトレーニング作業様子

秩序性を避けるため、8 つの突起は図 2.10 が示したようになって、左右に同じ色を付けられた突起は必ず違う奥行き所に配置されている。違う色を付けられた突起も全部場所をずれて配置されている。これにより、被験者は実験中に常に奥行情報を把握しなければ作業を進められないことになる。

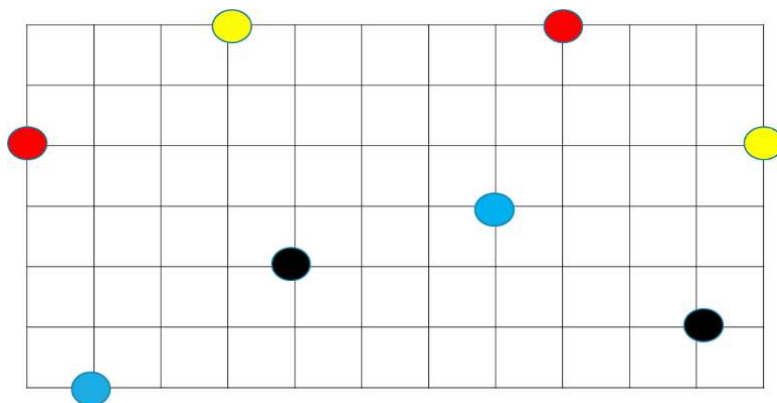


図 2.10 色付きの突起の配置(1マス1.5 cm)

2.4.2 実験結果

矯正視力 0.7 以上の 20 代～40 代の男性 8 人を対象に実験を行った。8 人の被験者のうち、1 から 4 番の人は先に 2D 条件で操作し、残りの 4 人は先に 3D 条件で操作を行う。それぞれの被験者の 2D と 3D 条件での操作時間を図 2.11、平均を図 2.12 に示す。

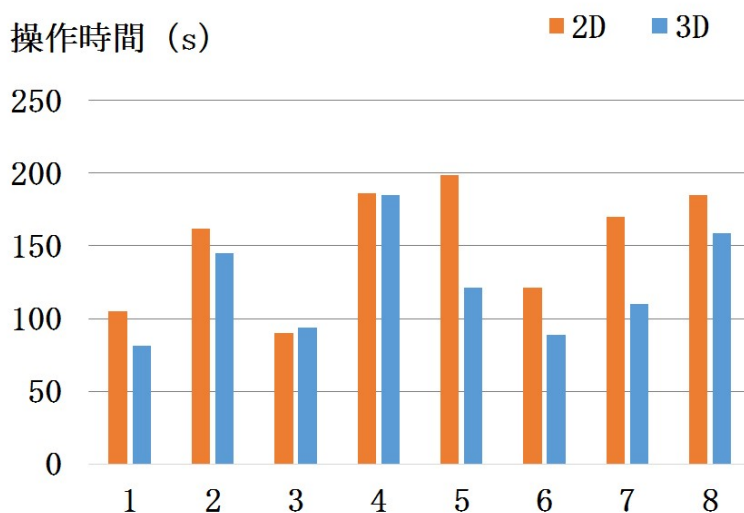


図2.11 2Dと3D操作性対照実験結果

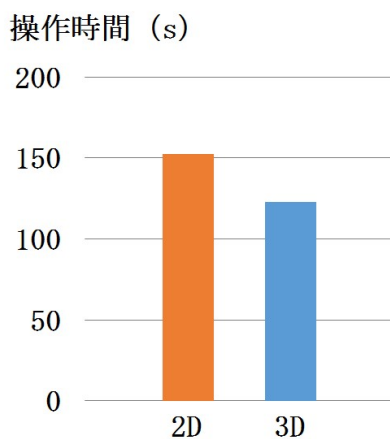


図2.12 平均操作時間

操作時間の平均を注目すると、3D 表示の方が操作性高いとわかる。全体のデータを詳しく考察してみると、先に 3D 表示で操作した 1 番から 4 番の被験者は、操作時間の差は多くないが、5 番から 8 番の人は操作性の向上が顕著である。これは作業の慣れの影響と考えられる。

また、図 2.11 のデータを用いて対の T 検定を行ったところ、 $p = 0.021$ であり、実験対象の数が少ないが、たくさん行えば 3D 映像の使用によって操作性向上すると考

えられる。

2.5 3D 表示の視差強度による操作性の対照実験

2.5.1 実験内容

被験者は2つの鉗子を用い、左側の4つの別々の色付けた場所に1つずつ設置した4つの輪ゴムを右側の同じ色つけた所に移動させ、さらにそれをもとの位置に戻すという作業を行う。輪ゴムの移動の際は、途中で1方の鉗子からもう1方の鉗子へ輪ゴムを空中で持ちかえるよう指示をする。被験者ごとに、4つの視差条件下で上記の作業に要する時間を計測する。実験中の様子を図 2.13 に示す。視差強度による操作時間に差は大きくないと考慮したうえ、操作ミスなどによる操作時間の増加をなるべく避けるために、突起を除去した。

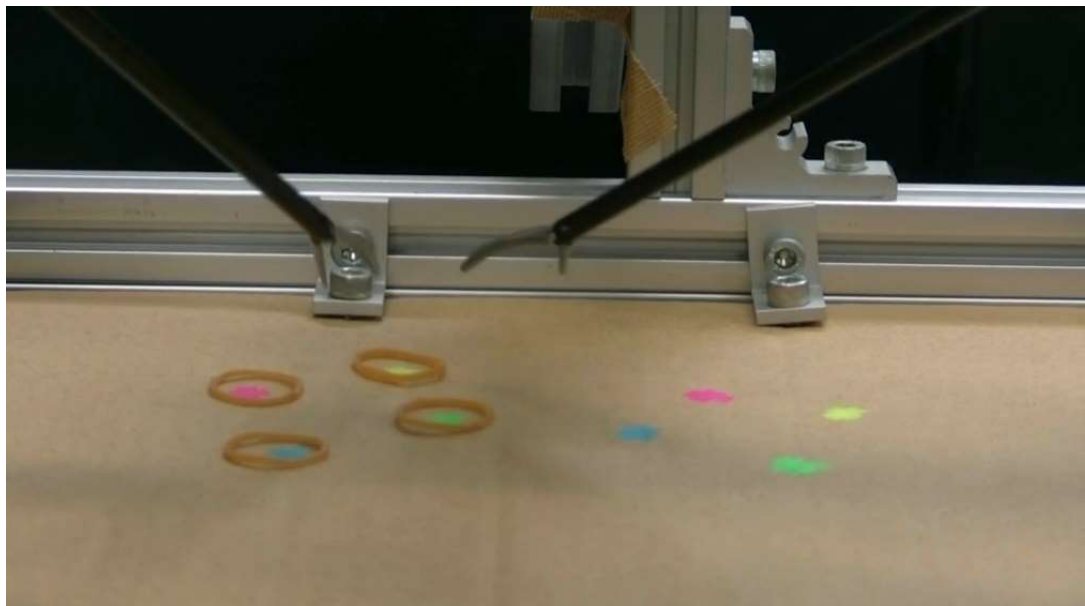


図2.13 視差強度による操作性対照実験のトレーニング作業様子

図 2.14 に示しているよう、4つの視差強度条件を提示するため、3D 撮影カメラは向きを変更せずに、平面鏡との距離を4段階設置した。視差条件 I ではカメラ虚像が操作スペースと 97.5 cm 離れており、既存眼鏡式 3D 内視鏡手術システムが提示する視差量と同じである。条件 II から IV は、カメラが 5 cm ずつ平面鏡に近づけ、その結果、観察距離はそれぞれ 92.5 cm, 87.5 cm, 82.5 cm となり、それに応じて視差量が増している。

なお、10人の被験者のうち、5人は条件 I から条件 IV の順番、視差が段々強くなっていく順で実験し、残りの5人は条件 IV から条件 I の順番で実験する。

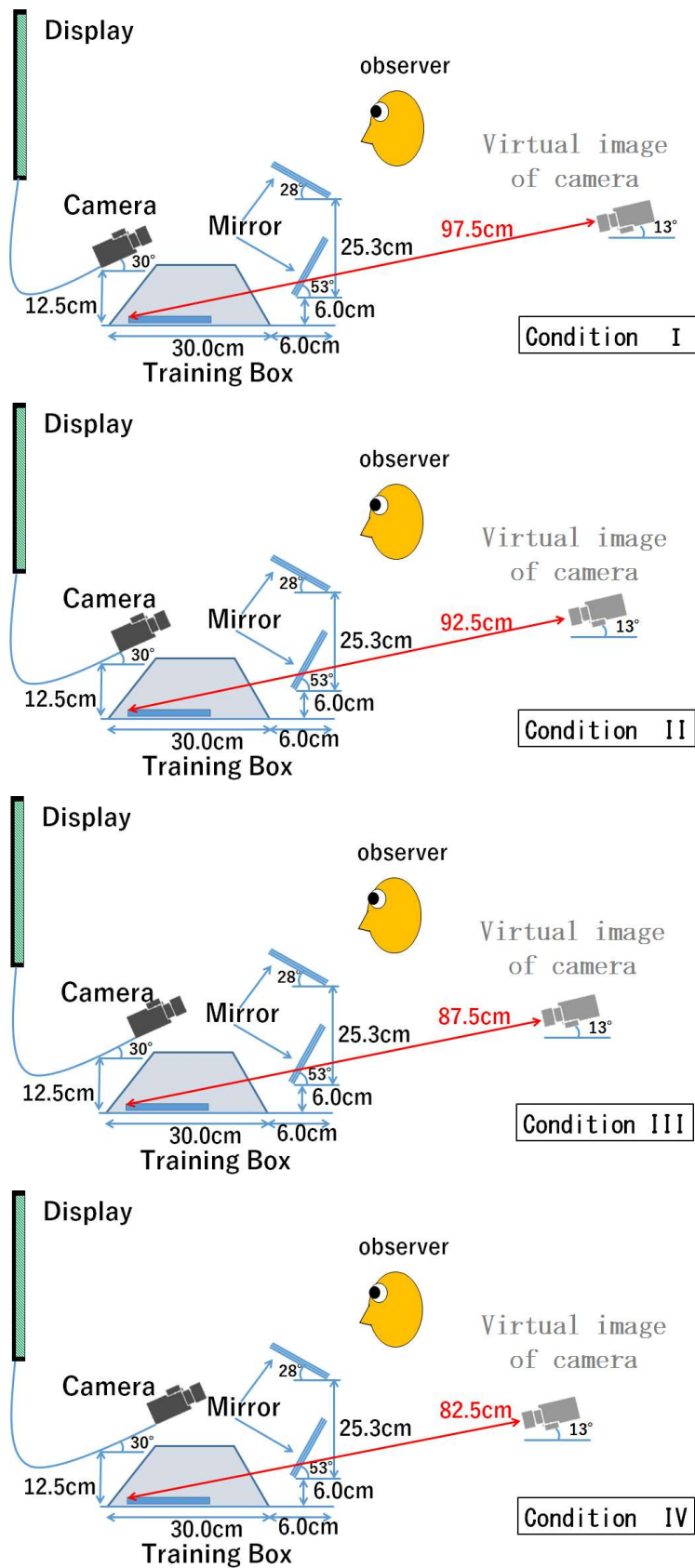


図2.14 4つの視差条件

2.5.2 実験結果

矯正視力 0.7 以上の 20 代～40 代の男性 10 人を対象に実験を行った。10 人の被験者のうち、1 番から 5 番の被験者の実験では撮影カメラが順に遠ざかり、残りの 5 人の実験では撮影カメラが順に近づく。それぞれの被験者の 4 つの視差条件での操作時間を図 2.15、平均を図 2.16 に示す。

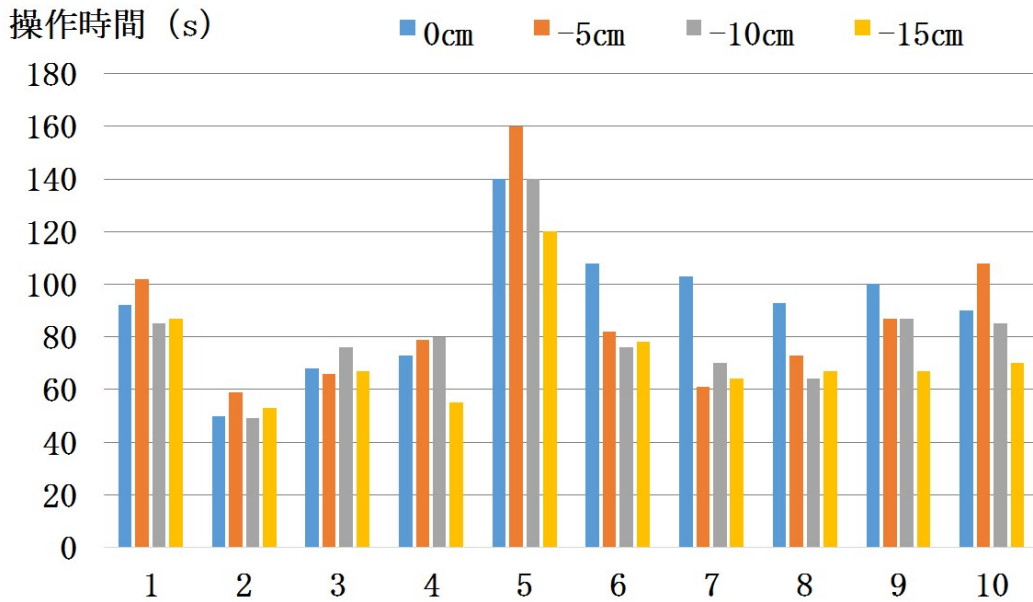


図2.15 視差強度による操作性の対照実験結果

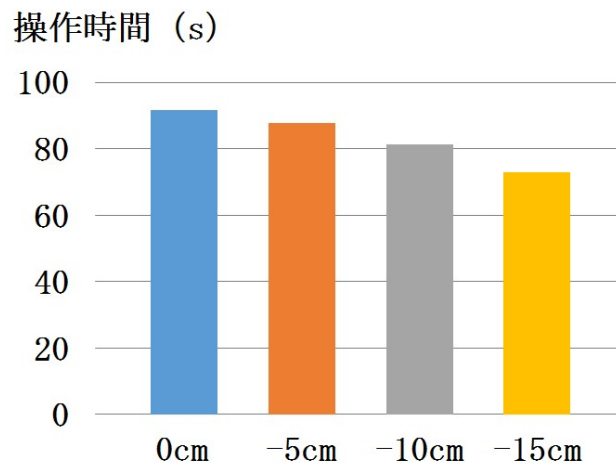


図2.16 平均操作時間

実験結果から、視差が強ければ強くなるほど、操作時間が短縮する傾向があることが分かる。それぞれの数値に対して対の T 検定を行った結果を表 2.1 に示す。観察距離の差が 50 mm の場合、統計的な有意差が見られないが、観察距離の差は 100 mm

と 150 mm の場合は統計的有意差があり、観察距離が近い場合、すなわち視差が大きい条件下で、操作性が向上していることが確認された。

表 2.1 対の T 検定結果 (p values)

	0 mm	-50 mm	-100 mm	-150 mm
-150 mm	0.002	0.013	0.056	
-100 mm	0.041	0.091		
-50 mm	0.533			
0 mm				

図 2.17 のように、最も観察距離の差が大きい条件 I (0 cm) と条件 IV (-15 cm) に着目して考察すると、10 名の被験者のうち 9 名が視差の強い条件下の操作時間が短い。1 番から 5 番の被験者は視差が徐々に小さくなっていく順番で実験している。それによる慣れの効果があっても、4 人の被験者は視差の強い条件下で高い操作性を示している。以上のことから、視差量の拡大は操作性向上に寄与したと結論づけられる。

もちろん、視差量が大きくなりすぎると、逆に作業効率は低下する恐れがある。しかしながら、本研究で用いたシステムではこれ以上カメラを近づけて視差量を増やすことはできない。視差量をどの程度大きくすると弊害が生じるかを調べるのは今後の課題である。

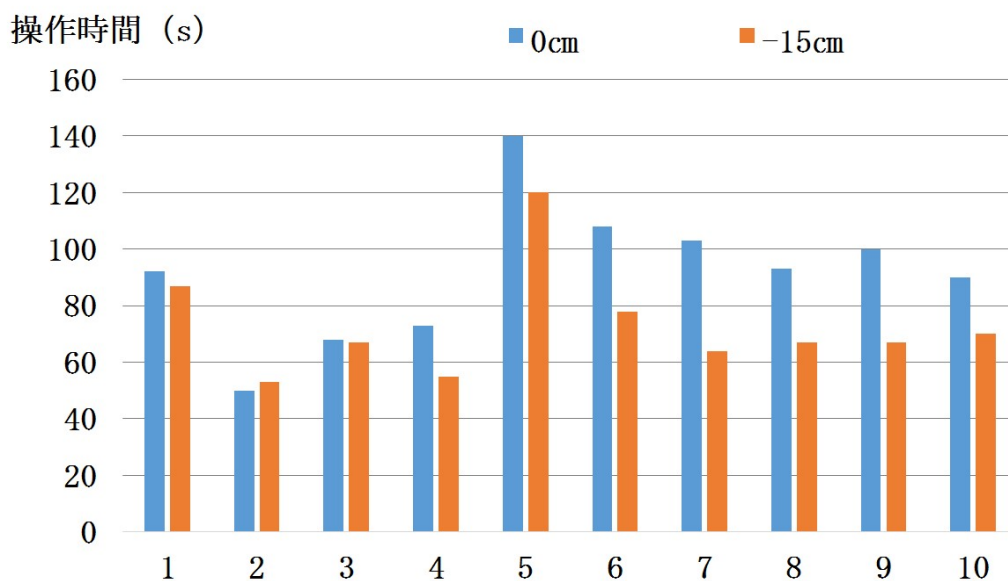


図 2.17 条件 I (0 cm) と条件 IV (-15 cm) の比較

2.6 まとめと複数観察者対応の必要性

本節は裸眼立体ディスプレイと手術トレーニングを組み合わせたシステム構想し、プロトタイプシステムを実装した。このシステムでは裸眼でわずかなクロストークレベル(5%)フルハイビジョンの立体映像が観察できて、手術中の奥行き把握と目のストレス軽減に期待できる考えられる。

また、システムを使用して、従来の 2D フルハイビジョン映像と立体映像使用の条件下、簡易な手術トレーニングタスクの操作時間を比較することで、時間短縮の傾向がみられ、3D 映像の使用による操作性向上が確認できた。同じ 3D 映像使用する条件下、既存の立体内視鏡システムの提示する視差と比較するために、3 段階強い視差強度条件でトレーニングタスクを行った結果、視差が強いほうが奥行きを把握しやすくなる傾向があり、従来のシステムでは視差強度が足りないことを示した。

実際の医療現場では執刀医以外にも看護師などのスタッフがいて、共同作業しながら手術を進めているため、一人しか観察できない裸眼立体ディスプレイでは、人数分のディスプレイを手術現場に置くことになる。それは現実的で解決策ではない。また、トレーニングの際も図 2.18 に示すように、指導者が隣で同じ立体映像を観察しながら指導する場合が多い。それぞれ一台ずつディスプレイを並んで別々観察すると、立体イメージのシェアリングに齟齬が発生しやすくなり、個別のパーツへのポインティングも難しくなるため、一台の装置で複数人同時に立体視を観察できることが望ましい。次章では、この問題を解決する方法を論じることにする。

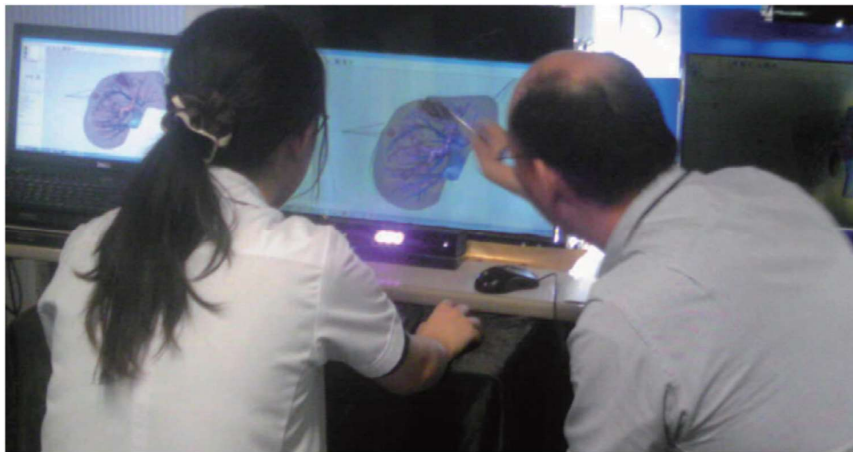
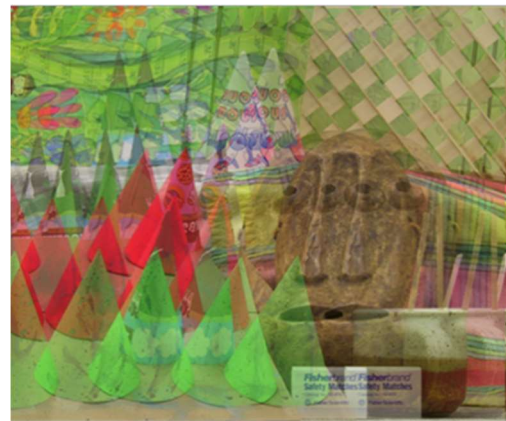


図 2.18 トレーニング時の様子

この時の観察者 B は左目と右目でそれぞれ観察される視差画像が真逆になる。また、極端な場合でなくても、図 3.2 に示すように右目用画像と左目用画像が混じり合う問題が生じうる。このように視差画像が混じり合うことをクロストークという。従来のパララックスバリア方式は、常に観察者 A の頭の位置をトラッキングしながら立体視差画像を表示しているため、何か特殊な対応しない限り、もう一方の観察者 B にとってはどうしてもこの問題は発生する。



(a) 正しい視差画像



(b) 強いクロストークを含む視差画像

図3.2 クロストーク現象

3.2 視域

従来のパララックスバリアベースの裸眼立体表示法の複数観察者時の問題を解決するために、まず視域を考察する必要がある。

従来のパララックスバリア方式の視域はすでに先行研究で詳細に調べられている[47]。その考え方を図 3.3 に示す。左目視点画像と右目視点画像がそれぞれ観察できる領域を ΔL と ΔR として示され、視差画像が混じり合って観察されるクロストーク領域を ΔEye として示される。従来の方式の視域状態は ΔL 、 ΔR を繰り返しながら、間隔に ΔEye が挟む形になっている。

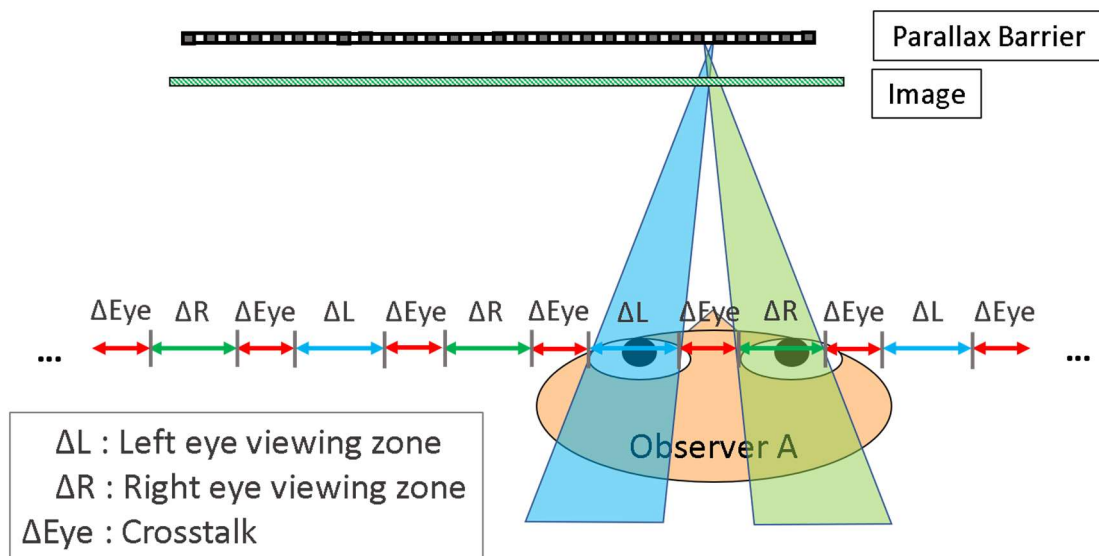
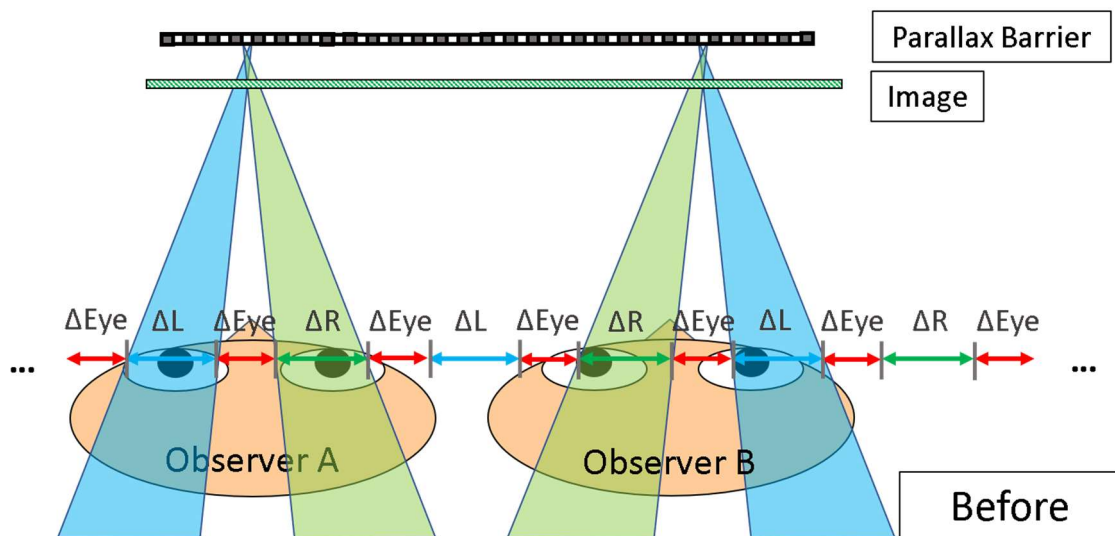


図3.3 従来方式の視域

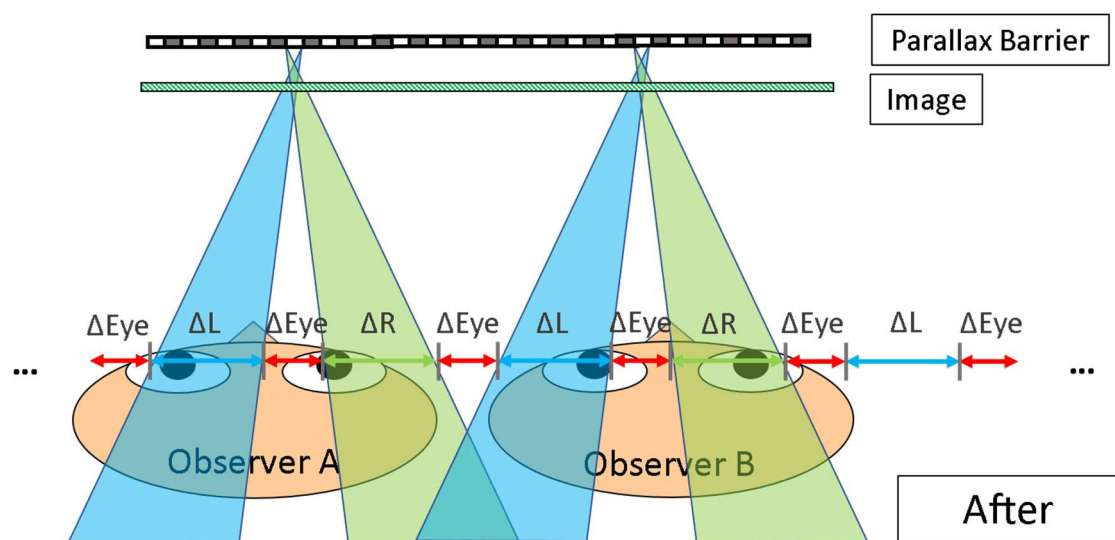
3.2.1 複数観察者時の視域

従来方式の場合、3.1 節で述べた複数観察者時の視域は図 3.4(a)に示したようになり、観察者 B は両眼が完全に逆の視域に入り、右目画像と左目画像を入れ替えた逆視を観察される。

ここで、それぞれ ΔL 、 ΔR 、 ΔEye の幅を調節して、図 3.4(b)に示すように、2 人の観察者の左目と右目が同時に正しい視域に入るようにできれば、2 人の観察者の立体視が維持されると考えられる。問題は、どのようにして ΔL 、 ΔR 、 ΔEye の幅を調節するかである。



(a) 従来の方のクロストーク



(b) 提案手法

図 3.4 複数観察者時の立体視維持

3.2.2 視域幅調整

視域の幅を変更する最も簡単な方法は、時分割数を変更することである。この方法は従来、観察者が前後に移動するとき立体視を維持するために用いられてきた[48]。図 3.5 と図 3.6 は、それぞれ 3 時分割と 4 時分割時の視域を示している。時分割数が増加すると視域は広がるが、時分割の 1 つのループ分のフレーム数が上昇し、ちらつきが目立って、立体視の品質に影響する。また、固定で 3 サブピクセルでバリアをシフトしているため、全体に対して光ってるバリアの幅も狭くなるため、輝度も落ちる。

一方、時分割数が減少すると、光ってるバリアが割合的に上昇し、提示された画像の輝度が高くなるが、視域が狭くなり、クロストークレベルが増加する。一定以下に下げると、そもそも視域が存在しなくなり、立体視が成り立たなくなる。したがって、視聴品質を保てる整数時分割数は限られている。

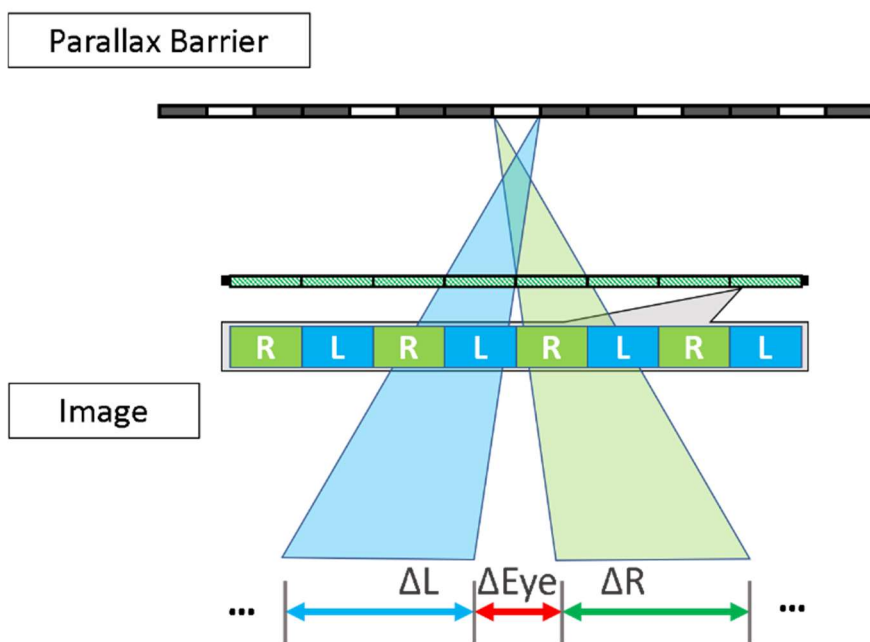


図3.5 3時分割の視域

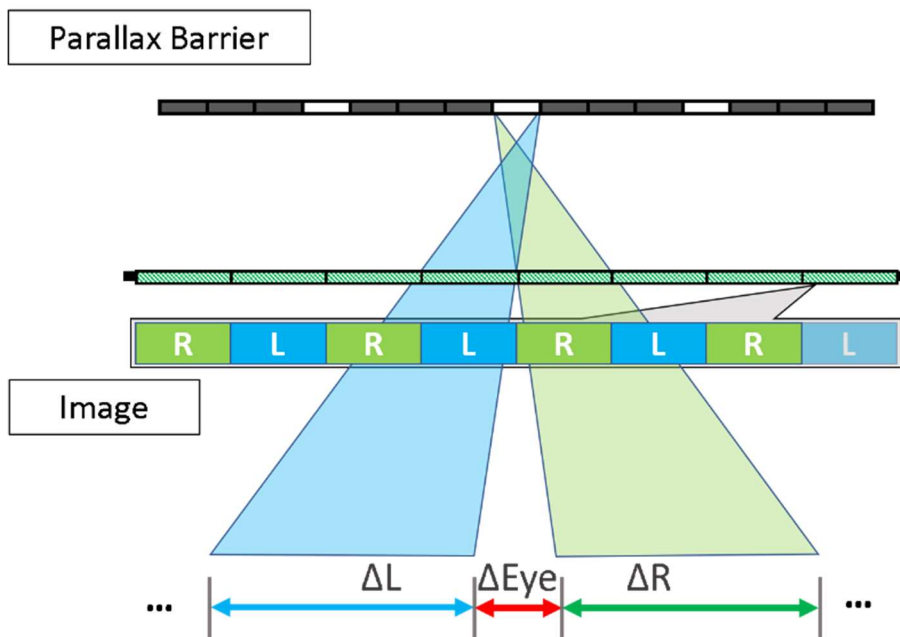


図3.6 4時分割の視域

3.3 分数時分割

時分割の方法には、整数時分割のほかに、分数時分割が考えられる[49]。

図 3.7 は、分数時分割パララックスバリアの例として、 $10/3$ 時分割を示している。この場合、各画像ユニットは 10 サブピクセルで構成され、左目と右目の画像はそれぞれ 5 個のサブピクセルで構成される。バリア部分は、3 サブピクセル (1 ピクセル) 幅のスリットと 7 サブピクセル幅のバリアが交互に繰り返される。スリットの位置は、フレームごとにシフトし、10 フレーム後、すべてのサブピクセルがそれぞれ 3 回スリットになり、 $10/3$ 時分割といえる。 $10/3$ 時分割の詳細を図 3.8 と図 3.9 に示している。

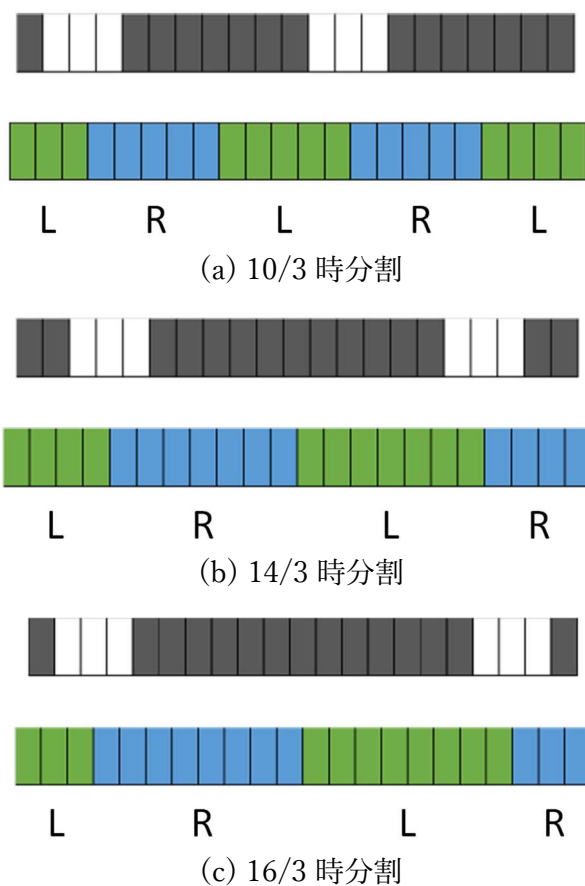


図3.7 シーケンシャルフレームの1つ

同様に、 $14/3$ 時分割バリアでは 3 サブピクセルスリットと 11 サブピクセルバリアが交互に繰り返され、 $16/3$ 時分割バリアでは 3 サブピクセルスリットと 13 サブピクセルバリアが交互に繰り返される。インターリーブされた左目と右目の画像の幅は、 $14/3$ 時分割で 7 サブピクセル幅、 $16/3$ 時分割で 8 サブピクセル幅である。

分数時分割で考えられる問題の 1 つは、周期が長いためにちらつきが発生すること

である。表 3.1 に、異なる時間（フレーム番号） t でのスリットの位置を示す。スリットのシフトが大きくなり、スリットの位置が大きくなる場合次のフレームでは、現在のフレームのバリア部分の中心に近づく可能性があり、残像効果のためにちらつきが目立たなくなる。

プロトタイプシステムでは、 $10/3$ 、 $14/3$ 、および $16/3$ の分数時分割を従来の 4 時分割（ $12/3$ ）と組み合わせて使用する。

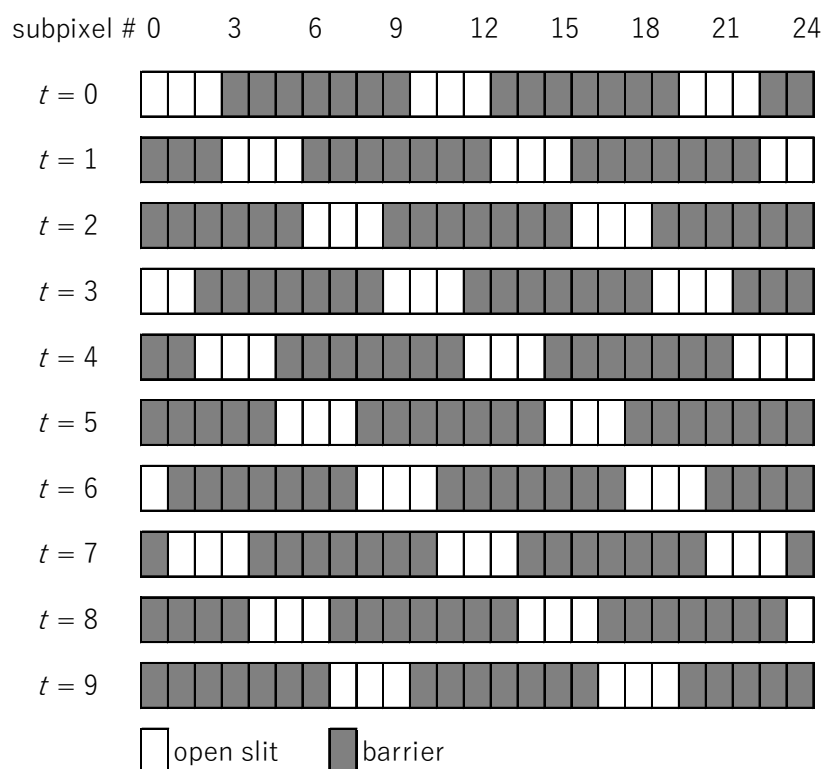


図3.8 $10/3$ 時分割視差バリアスリットの時系列

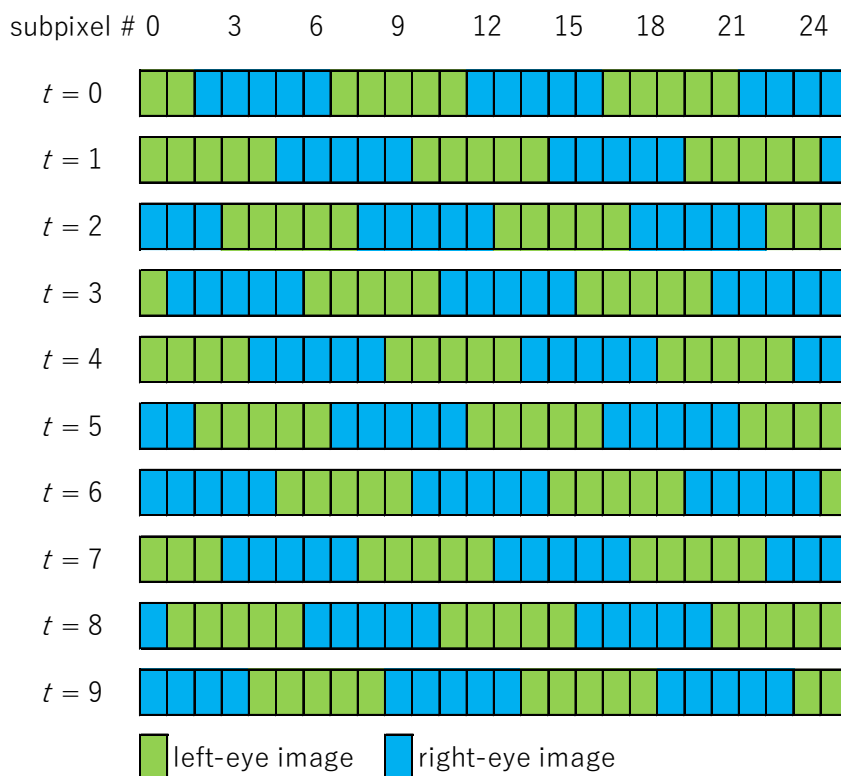


図3.9 10/3時分割インターリーブ画像の時系列

表 3.1 n 番目のサブピクセルが各時分割の t 番目のフレームで開いている条件

時分割	n 番目のサブピクセルが t 番目のフレームで開いている条件
10/3	$(n - 3t) \bmod 10 < 3$
12/3	$(n - 3t) \bmod 12 < 3$
14/3	$(n - 5t) \bmod 14 < 3$
16/3	$(n - 7t) \bmod 16 < 3$

3.4 適応時分割

複数分数時分割を使用して、アクティブ視差バリアを使用することにより、複数の観察者の裸眼立体視表示を実現できる。前述の通り、2 人が従来のシステムでステレオ画像を同時に観察すると、一方の観察者は正しい立体視を取得でき、もう一方の観察者は右目画像と左目画像を入れ替えた逆視を観察される問題がある。

この問題を回避するために、節 3.2.1 で述べたように、2 人の観察者間の距離に応じて最適な時分割数を使用して、2 人の観察者の左目と右目が正しい視域に入れば、2 人の観察者の立体視が維持される。

複数観察者間の距離に応じて視域を適切な間隔を保つために、視域の幅調整に様々な数の時分割数選択肢が必要となる。前節で述べた分数時分割を整数時分割の代わり

使用し、適切な時分割数を選択する。

時分割の数を T とし、その時分割の1ユニットの幅 ($\Delta L + \Delta R + 2\Delta Eye$) を W_T とする。システムでは2人の観測者の距離が d の場合、 d/W_T が整数に最も近くなるように時分割数 T を選択する。

図 3.10 に示すように、2人の観察者が適切な立体画像を観察できるようにするために、2人の観測者間の距離 d は

$$nW_T - \Delta d < d < nW_T + \Delta d \quad (3.1)$$

を満たす必要がある。ここで、 Δd は、一方の観察者が視域の端にいる時、もう一方の観察者が正しい視域内を移動できるマージンである。また、観察者の瞳孔間距離を P で表す。 $P > \Delta Eye + \Delta L = \Delta Eye + \Delta R$ の場合、 $\Delta d = \Delta Eye + \Delta L + \Delta R - P$ が成り立つ。それ以外の場合、 Δd は $\min(P - \Delta Eye, \Delta L)$ または $\min(P - \Delta Eye, \Delta R)$ で与えられる。

プロトタイプシステムではフレームごとに、各観察者の目の位置を追跡し、それらの間の距離を計算しする。その距離に最適な時分割数を選択して表示システムに適用する。また、水平方向にスリットを観察者の位置に合わせて移動する。

ここで、バリアとスリットが傾斜していることに留意する必要がある。2人の観察者間の水平距離 d を計算するとき、水平方向の視域が垂直方向の傾斜したバリアに沿って移動するため、2つのヘッドは同じ高さにある必要がある。また、頭が前後すると、各視域の幅も増減するため、二人の観察者の頭の位置を同じ奥行きに合わせる必要もある。

まず、観察者の両眼計算位置をディスプレイから近い方に合わせて、同じ奥行きにいるように調整する(図 3.11)。また、観測者の頭が同じ高さでない場合、図 3.12 に示すように、スリットの傾斜角に沿って頭の1つを仮想的にシフトし、2つの頭が同じ高さに揃うようにして、水平距離 d を計算する。

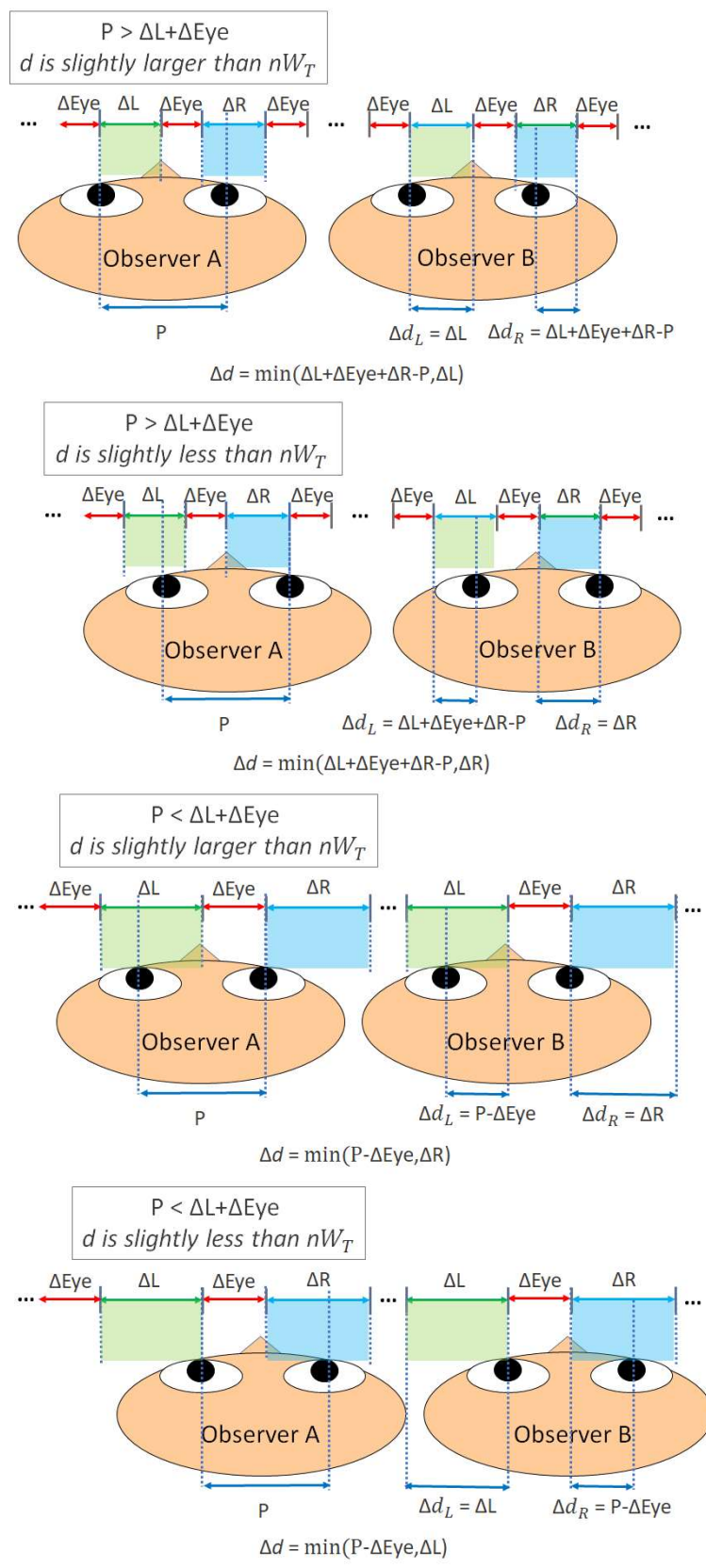
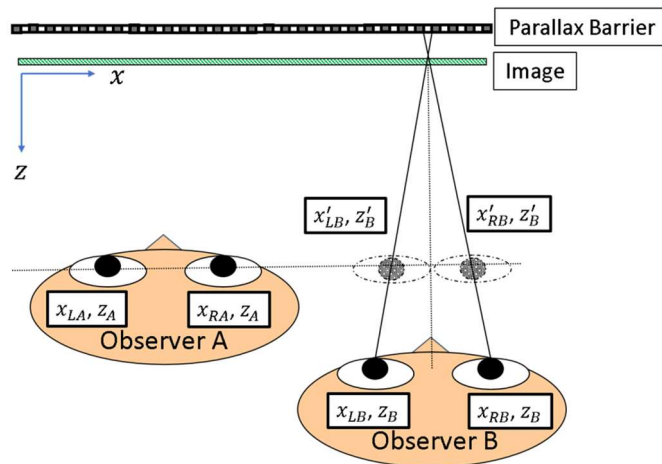


図3.10 立体視維持する距離条件

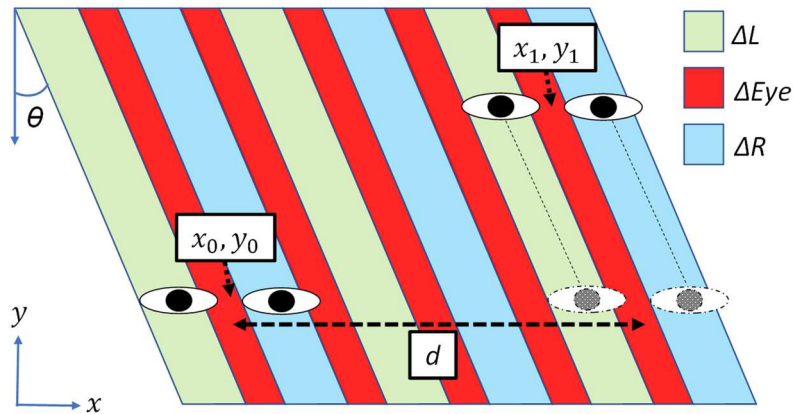


$$z'_B = z_A$$

$$x'_{LB} = \frac{(x_{LB} - x_{RB})z_A + (x_{LB} + x_{RB})z_B}{2z_B}$$

$$x'_{RB} = \frac{(x_{RB} - x_{LB})z_A + (x_{LB} + x_{RB})z_B}{2z_B}$$

図3.11 2人の観察者の両眼位置を同じ奥行きに合わせる



$$d = |x_1 - x_0 + (y_1 - y_0) \tan \theta|$$

図3.12 バリアパターンが傾斜している場合の2人の視聴者間隔の計算

奥行き方向の調整と斜めパララックスバリアでの距離計算補正で、2つのヘッドが同じ奥行きと高さにあると想定される場合の仮想水平距離 d に基づいて、時分割回数を決定し、3D ディスプレイに適応する。

3.5 結果

4 時分割パララックスバリアに適応時分割を導入してプロトタイプシステムを実装して、テストを行った。プロトタイプシステムは、23.8 インチの LCD パネル

(AUO M238DTN01.3、2560 x 1440 ピクセル) のペアで構成され、ピクセルピッチ p は 0.206 mm である。拡散板を挿入して、2つのパネル間の間隔 L_d を 5 mm まで広く保ち、バリアパターンと拡散板の両方を $\tan^{-1} 1/6$ 傾斜させて、モアレを抑制した。スリットの幅は 3 サブピクセルで、10/3、12/3 (= 4)、14/3、および 16/3 の時間分割を導入して切り替えする。また、KinectV2 を使用して、2人の観察者の目を 30 fps で追跡した。

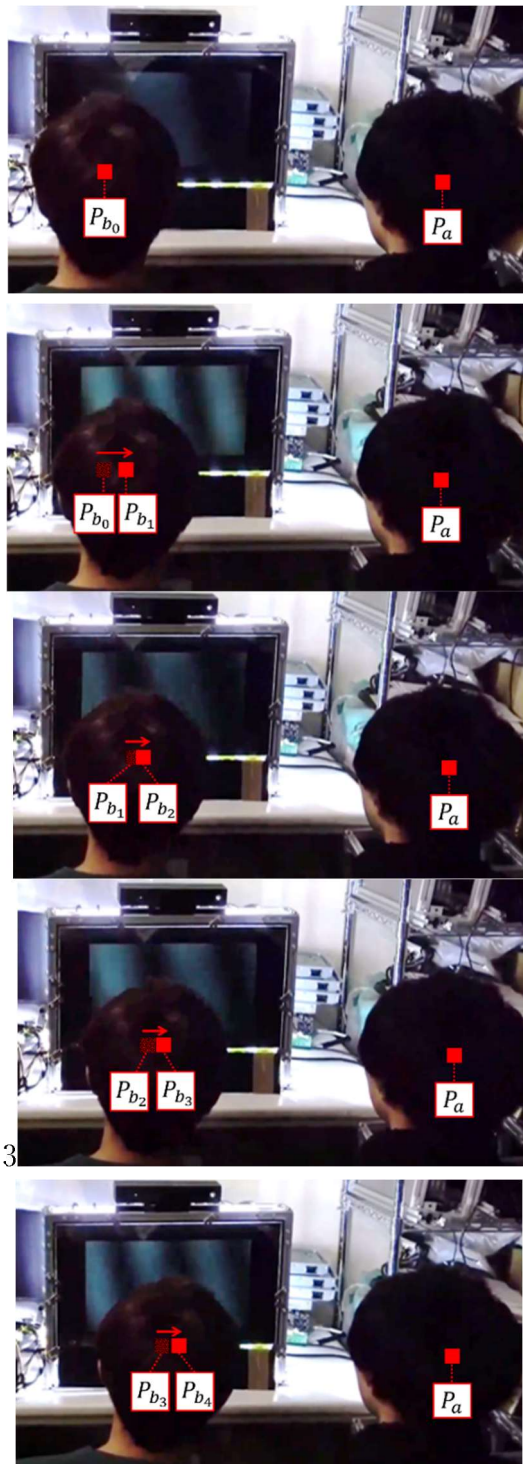
プロトタイプシステムで同時に 2 人の視聴者が立体画像を観察した場合について、クロストークの確認を行った。ほとんどの場合、両方の観察者に対して立体視が期待どおりに維持されるが、2 人目の観察者は、2 人の観察者間の距離変化中にクロストークを知覚することがある。よって、提案されたシステムでは、すべての条件下でクロストークを排除するのに十分ではないことがわかった。

図 3.13 は、左目に白い画像、右目に黒い画像を表示したときの写真を示している。ここでは、右側の視聴者が静止し、もう一方の視聴者が右に移動している。

黒と白の縞模様は、黒の縞模様が視聴者の右目と重なるように、白の縞模様が視聴者の左目と重なるように生成されている。黒の画像を右目画像に置き換え、白画像を左目画像に置き換えると、2 人の視聴者の立体視が実現される。図のように、左側の観察者が移動するにつれて、視域の位置と幅が調整され、両方の適切な立体視が維持されることが確認できる。

時分割数が増えると、スリットの口径比が小さくなるため、画像の輝度が低下する。安定した輝度を維持するためには、時分割数が多いほどバックライトの輝度を高くするように制御する必要がある。なぜクロストークが観察されるかについてはシステムのクロストーク及び視域の分析が必要になる。これについては次章で説明する。

また、白黒画像の適応時分割の結果確認のほかに、医療用画像をシステムに表示させ、複数観察者で正しく立体視ができることを確認できた(図 3.14)。



P_a : 観察者 A の位置

P_{b_t} : 時間 t 時の観察者 B の位置

図3.13 プロトタイプシステムにおける適応時間分割。システムでは左目に白い画像、右目に黒い画像を提示している。左側の観察者が左から右に移動している間、右側の観察者はじっと座っている



図 3.14 複数観察者同時に裸眼で立体医療画像観察

3.6 まとめ

本章は従来複数人で同時に観察できないパララックスバリアベースの裸眼立体表示法について、複数観察者対応の方法を提案し、プロトタイプシステムを実装した。

従来のシステムを複数観察者同時に観察する場合、1人の観察者が正しく立体視できても、もう一人の両眼が適切な視域に入るとは限らないため、立体視が崩れることがほとんどである。時分割数を調整することで視域の幅を拡縮させ、本来適切な視域にいない観察者も調整後正しい視域に入るようにし、2人同時に立体視を指せることに成功した。より適切な時分割数が見つかるために、分数時分割を提案し、 $10/3$, $12/3$, $14/3$, $16/3$ 時分割を実装した。また、観察者間の距離の補正かけた後の値を用いて、適切な時分割数を計算方法し、導いた結果に基づいてプロトタイプシステムを実装した。

実装したプロトタイプシステムを複数の観察者で左目に白画像、右目に黒画像を表示し、正しい立体画像が二人同時にそれぞれの目で観察できることを確認した。しかし、2人のうち一方の観察者に対してはまだ時々クロストークのある画像が提示されるため、手術トレーニングや実際の現場への導入にはまだ改善する必要がある。次章ではこの原因の究明とその改善方法について議論する。

第4章

視域計算とクロストークレベル評価

本節は節3で実装した複数観察者対応後のシステムの視域を計算して、そのクロストークレベルについて評価を行う。

4.1 視域計算

従来の時分割パララックスバリア方式のクロストークのない視域はすでに先行研究で理論値を確立されている[47,48]。プロトタイプシステムでは、スリットの幅が3サブピクセルであるため、スリットの幅はピクセルピッチ p に等しくなる。この場合、視域の幅は

$$\Delta L = \Delta R = (2\mu - (1 + \mu)\alpha - 2\beta)pL_D/L_d, \quad (4.1)$$

$$\Delta Eye = ((1 + \mu)\alpha - \mu + 2\beta)pL_D/L_d, \quad (4.2)$$

で与えられる。ここで、 $\mu = T/2$ 、 L_D はフロントディスプレイパネルと観察者の間の距離、 α はスリットの開口率、 β は最小位相シフトであり、スリットが3サブピクセル幅で、スリットの傾斜角は $\tan^{-1} 1/6$ である。開口率は、従来研究では $\alpha = 1.1$ で与えられている[49]。プロトタイプシステムでは、LCD パネル間の間隔 L_d は 5 mm である。

ここでは、 L_D を 700 mm と仮定する。次に、各時分割の ΔL 、 ΔR 、および ΔEye の理論値を表 4.1 に示す。瞳孔間距離 P が 63 mm の視聴者に対して 10/3 の時分割の L_D では視域が確保されていないため、計算から除外する。 $(L_D$ が大きい場合は 10/3 時分割が有効になる。)

表 4.1 Theoretical values of ΔL , ΔR , and ΔEye

T	ΔEye [mm]	$\Delta L, \Delta R$ [mm]
12/3	42.30	15.38
14/3	43.26	24.03
16/3	44.22	32.69

4.2 クロストークレベル

複数観察者時のクロストークレベルは図 4.1 に示したように定義する。観察者が左

目が ΔL 範囲にあり、右目が ΔR 範囲にある最適な領域にいる場合、クロストークレベルは 0%と定義し、視点が真逆になる最悪の場合、クロストークレベルは 100%と定義する。その間に、クロストークレベルが 0%から 100%まで線形的に増加する。

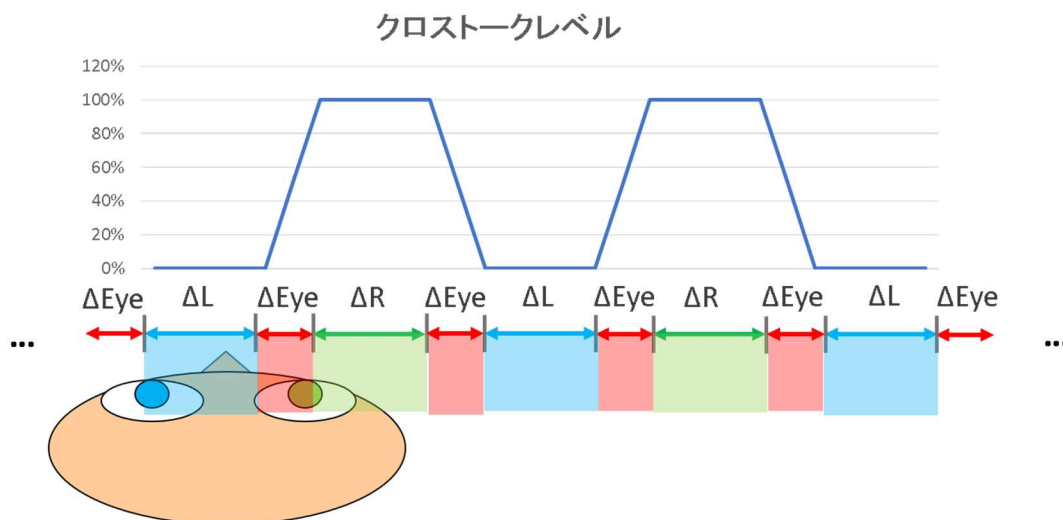


図 4.1 クロストークレベル定義

観察者の現在位置からクロストークのない最も近い視点までの距離 ΔD は

$$\Delta D = \min[\max\{d - W_t \text{ floor}\left(\frac{d}{W_t}\right) - \Delta d, 0\}, \max\{W_t \text{ ceiling}\left(\frac{d}{W_t}\right) - d - \Delta d, 0\}]. \quad (4.3)$$

で与えられる。クロストークレベルは、100%に達するまで ΔEye 領域で線形的に増加すると考えると、

$$\text{Crosstalk level} = \min(\Delta D / \Delta Eye, 1). \quad (4.4)$$

で与えられる。

4.2.1 12/3, 14/3, 16/3 時分割時

観察者からディスプレイまでの距離 L_D を 700 mm と仮定し、式(4.3)と式(4.4)に基づいて、2 人の観測者間の距離に応じて、異なる時間分割時のクロストークレベルの計算結果は図 4.2 に示す。システムでは常に最小クロストークレベルの時分割モードを選択しているため、その結果、各観測者間距離でのクロストークレベルが図 4.3 に示すようになる。

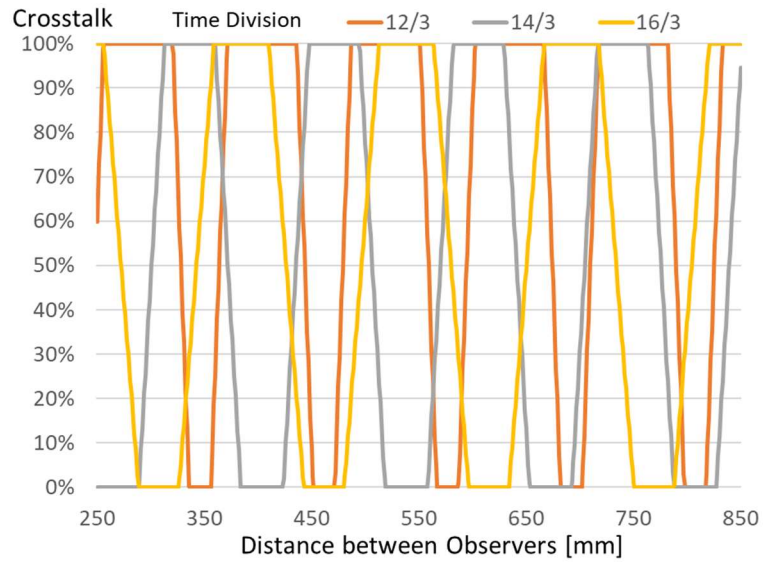


図 4.2 12/3, 14/3, 16/3 時分割のクロストークレベル

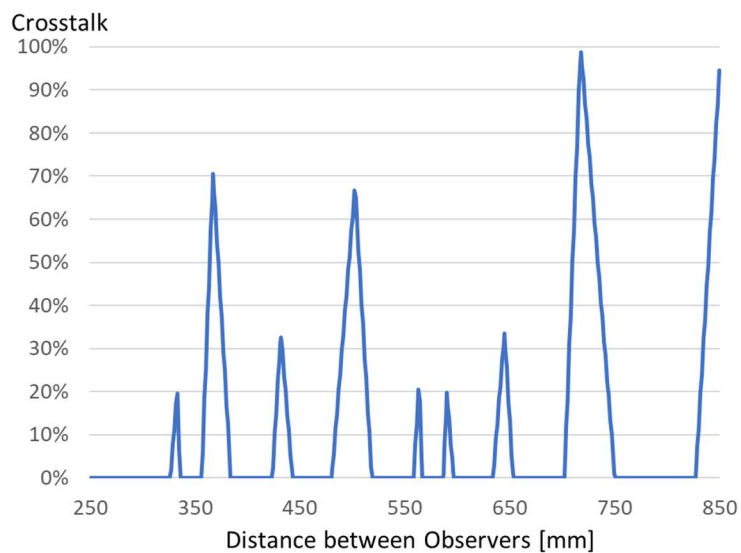


図 4.3 プロトタイプシステムのクロストークレベル理論値

この図が示すように、2 人の観察者間の距離が変化するにつれてクロストークが発生する場所がある。これが、プロトタイプシステムで観察されたクロストークの原因であると考えられる。

4.2.2 奇数分子時分割

最小クロストークレベルをさらに下げる 1 つの方法として、時分割のより細かい制御が考えられる。今までプロトタイプシステムでは偶数分子の時分割しか使用してないが、奇数分子時分割の利用も考えられる。

分数時分割の分子が奇数の場合、左目と右目のインターリーブ画像の幅は、各スキャンラインで均等に分割できない。ただし、バリアの傾きが $\tan^{-1} 1/6$ の場合、図4.4に示すように、幅を各スキャンラインで交互に変更して、自然な方法で均等に分割することができる。これを導入することにより、偶数分子と奇数分子時分割が全部使用できるようになり、理論的に二人の観察者が同時に立体視できる時分割数が存在する可能性が高くなる。

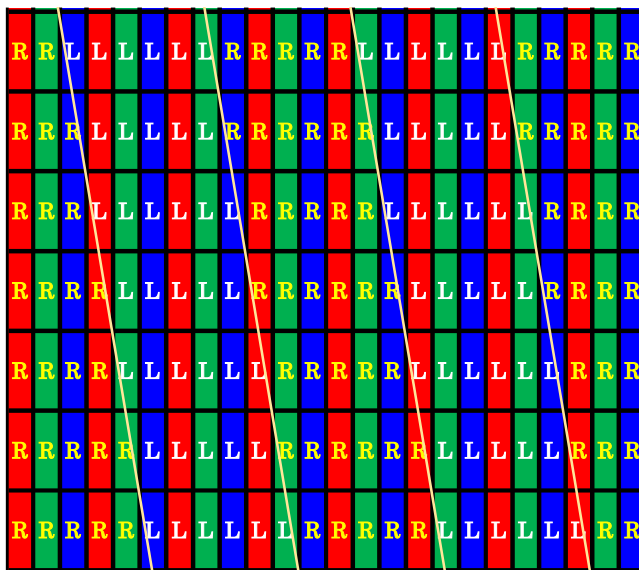


図 4.4 時分割の分子が奇数の場合のインターリーブ画像生成。ここでは、11サブピクセルが分割され、Lは左目画像を示し、Rは右目画像を示す

4.2.3 12/3～18/3 時分割時

前節の奇数分子時分割の利用により、12/3~18/3 までの時分割は理論的に実現できると考えられる。ここでは、12/3、13/3、14/3、15/3、16/3、17/3、および 18/3 時分割パララックスバリアモードを使用し、 L_D が 700 mm である条件下、それぞれのクロストークレベル計算結果を図 15 に示す。7つのモードの中から最適な時分割数を選択した後のクロストークレベルを図 16 に示す。この図が示す通り、観察者間の距離が 250mm から 800mm までの間はクロストークレベルが常に 0%に維持できると分かる。プロトタイプシステムに7つのモードを導入した結果、前章の観察結果に比べてクロストークが大きく軽減されることが確認された。

表 4.2 Theoretical values of ΔL , ΔR , and ΔEye

T	ΔEye [mm]	$\Delta L, \Delta R$ [mm]
12/3	42.30	15.38
13/3	42.78	19.71
14/3	43.26	24.03
15/3	43.74	28.36
16/3	44.22	32.69
17/3	44.70	37.01
18/3	45.18	41.34

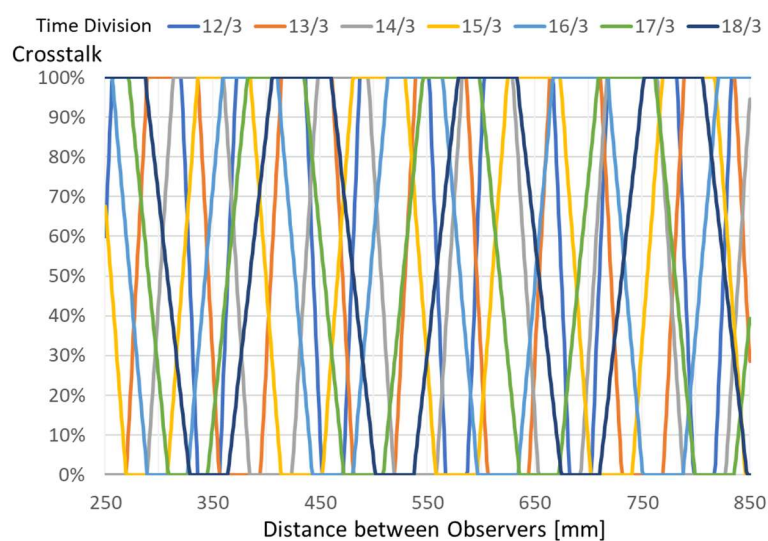


図 4.5 12/3~18/3 時分割のクロストークレベル

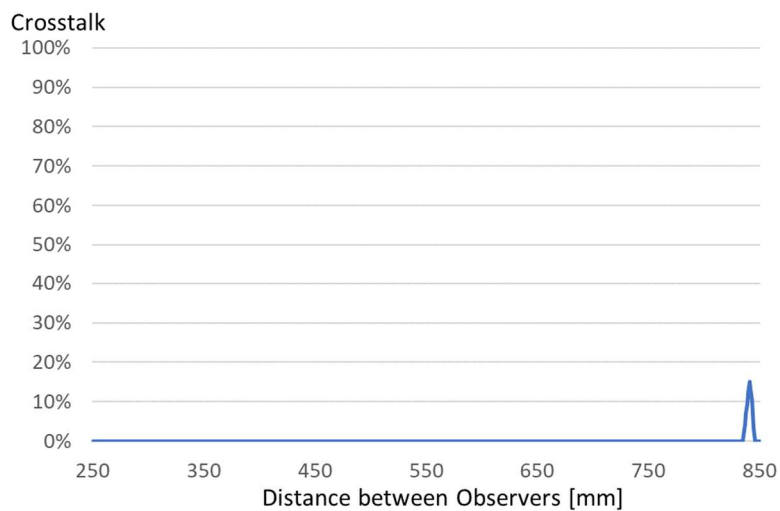


図 4.6 12/3~18/3 適応時分割のクロストークレベル

4.2.4 結果と考察

本節はプロトタイプシステムでの視域を計算し、クロストークレベルの評価を行った。その結果、予想通りに時分割候補が多ければ多くなるほど、複数観察者にとってクロストークレベルが軽減することを確認できた。観察者瞳孔間距離が 63 mm 時、12/3~18/3 の時分割候補モード下では、観察者間距離が 250 mm から 800 mm までの間はクロストークレベルが常に 0% に維持できると分かった。

しかし、人間の瞳孔間距離 P は個人差があり、調査によると 52 mm から 78 mm まで幅広くなっている[50]。平均の 63 mm 以外でのクロストークレベルの評価も意味あると考えられる。

また、本システムで観察者が頭を傾けて観察する際、等しい両眼間の位相距離について考察する。左側へ傾けて観察する際は図 4.7 が示したように、傾き角度が $0 \sim 2\theta$ の時は位相距離 P' が両眼距離 P より若干大きくなる(最大は $P/\cos\theta$)。 2θ 以上の場合 P より小さくなる。右側へ傾ける際は図 4.8 に示す。この場合は傾き角度問わず、両眼間の位相距離が常に両眼距離より小さい。位相距離が大きくなると、 ΔEye (クロストーク領域)を収まるので、クロストークが発生しにくくなる。逆に位相距離が小さくなると、両眼が片眼が ΔEye に入り、クロストークが発生する可能性が高くなる。

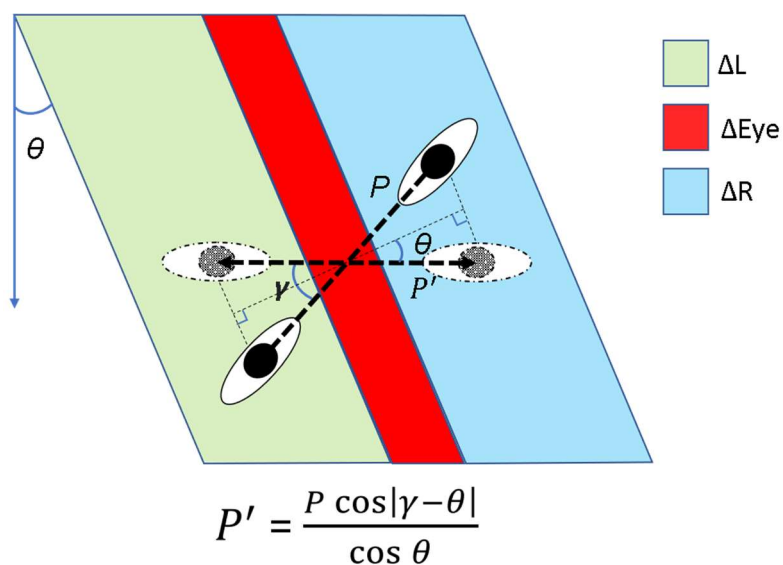


図4.7 観察者が頭を左側へ傾けて観察する際の両眼位相距離

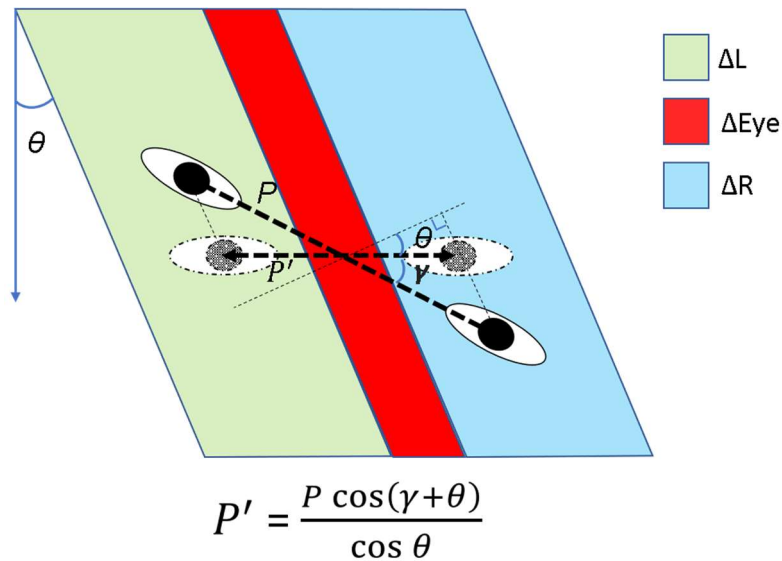


図4.8 観察者が頭を右側へ傾けて観察する際の両眼位相距離

12/3~18/3 時分割時、瞳孔間距離を 52 mm から 66 mm までのクロストークレベルをそれぞれ計算した。観察者からディスプレイまでの距離 L_D も 700 mm と仮定する。計算の結果を図 4.9 に示す。瞳孔間距離が小さくなるほど、クロストークレベルの上昇傾向が見られる。つまり頭を傾けて観察する際にはクロストークが上昇することが確認できた。12/3~18/3 の時分割候補では、瞳孔間距離狭い観察者或いは頭を傾けて観察する観察者にとって、クロストークレベルが 10%より低い時分割数を見つからない場合が比較的が多い。

瞳孔間距離が狭くても、頭を傾けて観察しても、クロストークレベルを軽減するには、12/3~18/3 の時分割以外にさらに時分割数を増やすことが考えられる。3.2.2 節で述べた通り、時分割数の整数範囲は決められているため、12/3~18/3 の時分割以外には、時分割でシフトするサブピクセル数を変えることが考えられる。つまり分数時分割数の分子を変えることである。しかし、シフトするサブピクセル数を上げると、パララックスバリアのスリット部分の幅が広くなり、一つのループ分のフレーム数が上がり、画面のちらつきが顕著的に上がる。よって立体視の品質が下がる。また、高速で切り替えるステレオ画像の幅も広がり、インターレースが眼立って、立体視を崩れる可能性がある。一方、シフトするサブピクセル数を下げると、スリット部分の幅は狭くなる。光の回折効果でクロストークが増加する。つまり、使用する LCD パネルのスペックによって、品質保てるシフトサブピクセル数が限られている。

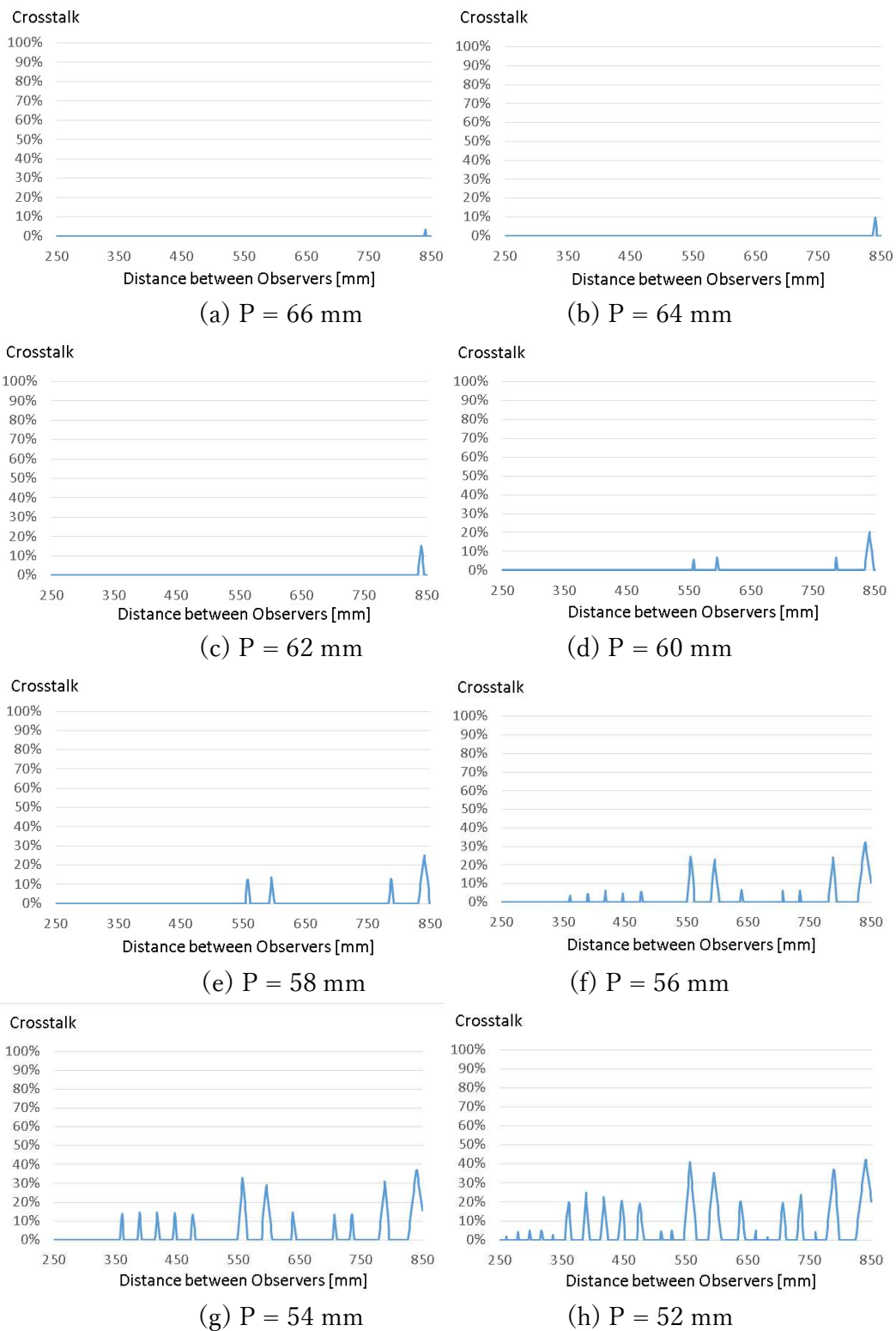


図 4.9 瞳孔間距離が 52 mm~66 mm 時のクロストークレベル

12/3~18/3 の時分割以外に、19/5~29/5 時分割数も候補に入れてのクロストークレベルを理論的に計算した。分母が5の時分割は、スリット幅が5サブピクセルの時に適応できる。

結果を図 4.10 に示す。瞳孔間距離が 54 mm 以下時はたまに 10%程のクロストークレベルを生じるが、56 mm 以上の観察者に対してはほとんどクロストークが生じないことが分かった。12/3~18/3 に加え、19/5~29/5 時分割数候補のシステムでは理論的に頭を若干傾けて観察してもクロストークがほとんど観察されないと結論づけられる。

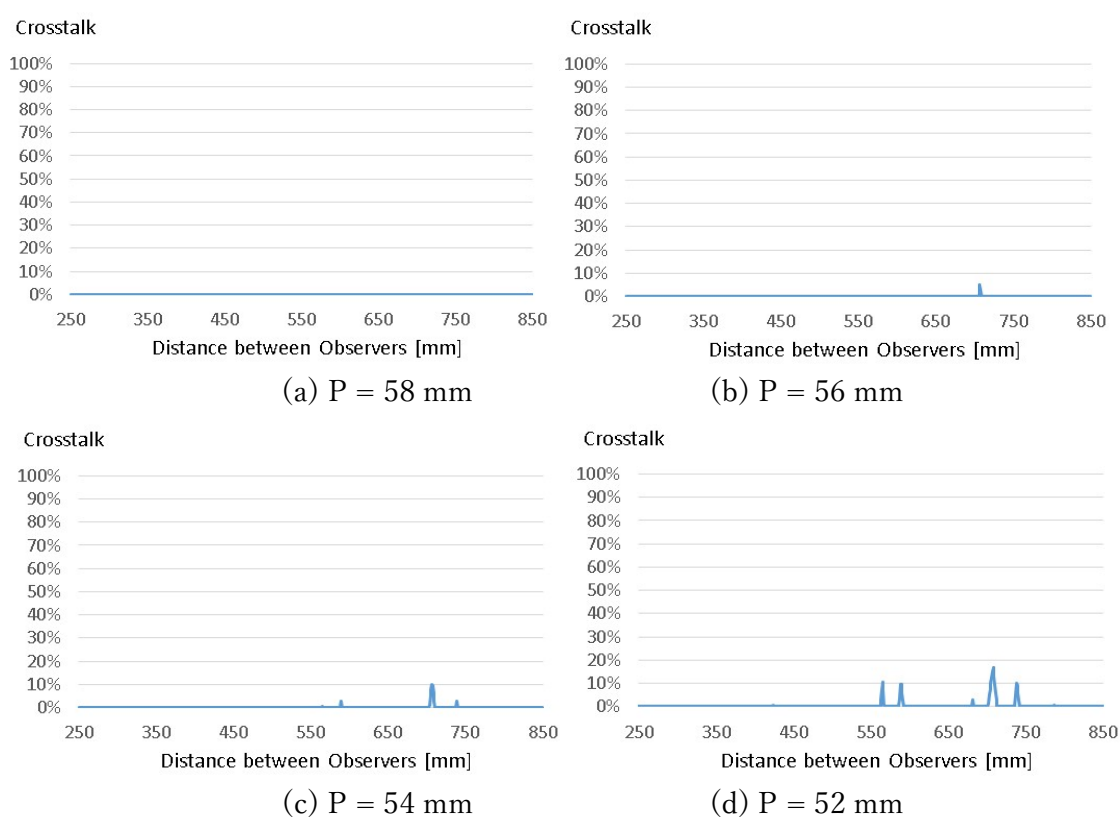


図 4.10 瞳孔間距離が 52mm~58mm 時のクロストークレベル

4.3 まとめ

本章は実装した複数観察者対応の裸眼立体ディスプレイに対して、固定奥行き ($L_D = 700$ mm)時、それぞれの時分割数での視域の理論計算を行った。また、複数観察者場合のクロストークレベルを定義し、時分割数の選択肢が 12/3、14/3、16/3 の場合について、距離が 250 mm から 800mm までのクロストークレベルを計算した。その結果、高いクロストークが発生するケースが多いことが分かった。

時分割数候補が多ければ、より適切な時分割数が見つかりやすくなるため、奇数分

子時分割を新たに提案した。12/3~18/3の時分割数候補で計算した結果、クロストークレベルの低減が確認された。ディスプレイを観察する際、頭の傾きは避けられない問題であり、その時の仮想両眼距離を計算した。両眼距離が狭くなると、クロストークレベルが上昇するが、分母を大きくして時分割数の選択肢をさらに増やすことで、クロストークレベルが理論的に低減できることを確認した。

第5章 まとめ

本論文では、フルハイビジョン裸眼立体ディスプレイを使用した内視鏡手術トレーニングシステムを構築した。このシステムを用いて、2つの対照実験を行ったところ、従来の2D表示と比べ、3D映像の使用による操作性の向上が確認された。さらに、視差をより強めにすることで、操作性が向上することも確認された。手術トレーニングにおいては複数観察者対応の要求に応じて、2人の観測者が同時に立体視を維持できる適応分数時分割パララックスバリア法を提案した。クロストークのない視域を理論的に評価し、時分割をより細かく制御することでクロストークの発生を一定の範囲で完全に抑えられることを確認した。

手術現場において3D医療ディスプレイに求められる機能は、高解像度繊細な映像表示、省スペース、裸眼でかつ複数人同時に視聴可能なことである。既存の裸眼立体表示法のうち、従来のパララックスバリア方式とレンチキュラ方式では解像度半減するため、適切ではないと考えられる。導光フィルムを用いた裸眼立体表示方式は観察位置が固定されるため適さない。指向性バックライト式裸眼立体ディスプレイは光学系の制限による薄型化できず、クロストークレベルも比較的高い。

そこで、本研究では、薄型にでき低クロストークレベルを達成できるサブピクセル構造を利用した4時分割パララックスバリア方式を使用し、手術トレーニングシステムを構成した。この方式のクロストークレベルは5%で、手術中の奥行き把握と目のストレス軽減を期待できる。ディスプレイに表示される立体映像は3Dカメラで手術操作スペースをリアルタイムで撮影されたものを用いた。キャプチャーボード経由で画像データを取り込み、視差画像に分割して3Dディスプレイに提示した。システムユーザーは3Dディスプレイを観察しながら、操作スペースでトレーニングタスクを実行した。

このシステムを使用して、従来の2Dフルハイビジョン映像と立体映像使用の条件下で、簡易な手術トレーニングタスクの操作時間を比較したところ、操作時間短縮の傾向がみられ、3D映像の使用による操作性向上が確認された。同じ3D映像使用する条件下で、既存の立体内視鏡システムの提示する視差と比較するために、4段階の視差強度条件下でトレーニングタスクを行った結果、視差が強い方が奥行き把握がしやすくなる傾向を確認した。

手術トレーニングにおいては複数観察者が同時に立体視することが必要な状況が多くあるため、3Dディスプレイの機能拡張を行った。従来のパララックスバリアベース裸眼立体表示で観察者が複数の場合、一方の観察者は正しい立体視を取得できるが、もう一方の観察者は右目画像と左目画像が入れ替わった逆視状態が頻繁に起きる。時分割数を調整することで視域の幅が拡縮し、適切な視域にいない観察者も調整後正し

い視域に収まり、立体視を維持することができる。しかしながら、時分割数を増加すると、輝度が低下し、ちらつきもより目立つなど、立体映像の品質に影響を及ぼす。時分割数が減少すると、輝度は上昇するが、視域が狭くなるとともにクロストークレベルが増加しやすくなる。よって、視聴品質を保てる整数時分割数は限られている。

そこで、より適切な時分割数を見つけやすくするため、分数時分割を提案した。10/3, 12/3, 14/3, 16/3 時分割と観察者間の距離に応じた適切な時分割数を計算し、導いた結果に基づいてプロトタイプシステムを実装した。実装したシステムにおいて、2人の観察者に対して左目に白画像、右目に黒画像を表示し、正しい画像が2人同時に観察されることを確認した。

しかし、プロトタイプシステムでは、片方の観察者がまだクロストークを観察する場所があるため、より詳細な分析を行った。まず、それぞれの時分割数での視域の理論計算を行った。次に、複数観察者場合のクロストークレベルを定義し、時分割数の選択肢が12/3、14/3、16/3の下、2人の観察者間の距離が250 mmから800 mmまでの時のクロストークレベルを計算した。その結果、クロストークが高いところはまだ多いことが確認された。

複数観察者がいる時のクロストークレベル軽減には、時分割数候補数を増やす必要がある。そこで、偶数分子のほかに、奇数分子時分割も選択肢に加えた。12/3~18/3の時分割数候補で計算した結果、時分割数候補の増加により、クロストークレベルの低減が確認された。

また、ディスプレイを観察する際の頭の傾きについて考察した。頭を傾けて観察する際の仮想両眼距離を計算し、両眼距離が狭くなっても正しく立体視できるかどうかの理論的の検証のため、両眼距離を52 mmから66 mmまでのクロストークレベルをそれぞれ計算した。その結果、両眼距離が狭くなると、クロストークレベルも全体的に増加していくとことがわかった。両眼距離が狭くても、時分割数候補の増加によるクロストークレベルの低減を確認するために、19/5~29/5時分割を候補に加えた。計算の結果、クロストークレベルの低減が確認された。頭の傾きによるクロストークレベル増加問題は、時分割数候補を増やせば解決できることを確認した。

謝辞

指導教員である掛谷先生には大変お世話になりました。先生には研究内容の指導以外にも、文章の書き方やプレゼンの仕方を丁寧に指導して頂いたことを非常に感謝しております。コロナの中であまり研究室に通うことがないが、毎回先生と社会や政治の雑談ができて、色々ご教訓を頂き、心底からありがたいと思っております。

亀田先生、矢野先生、黒田先生、滝沢先生にはお忙しい中、論文の審査をしていただき感謝を申し上げます。

視覚メディア研究室のメンバーにも助けてもらうことが多く感謝しております。特にガリマガイさんにいつも休日の実験協力しいていただき、とても助かりました。

株式会社マーベラス開発部の方々には、既に社会人の身分ながら大学に通うということに理解をしていただき、柔軟に対応してくれたことを感謝しております。

最後に、いつでも遠方で支えてくれた両親に心からの感謝の意を表し、本論文を締めくくります。

参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所
<https://www.ipss.go.jp/site-ad/TopPageData/2025.png>
- [2] 平成 30 年(2018 年)医師・歯科医師・薬剤師統計の概況
<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/ishi/18/index.html>
- [3] “内視鏡手術センター 大垣市民病院”
<https://www.ogaki-mh.jp/naisikyoushujutsu/>
- [4] “パナソニック 3D LCD モニター EJ-MDA32N-K”
<http://www.panasonic-healthcare.com/jp/medical-imaging/monitors/mda32>
- [5] “パナソニック 3D LCD モニター EJ-MDA26N”
<http://www.panasonic-healthcare.com/jp/medical-imaging/monitors/mda26>
- [6] “JVC 32 型 3D 液晶モニター GD-323D20”
<http://www3.jvckenwood.com/pro/monitor/3d/gd-323d20>
- [7] “ソニー 3D 対応液晶モニターLMD-2451MT”
https://www.sony.jp/medical/products/LMD-2451MT/feature_1.html#L2_10
- [8] “ソニー 3D 対応液晶モニター LMD-X310MT”
http://www.sony.jp/medical/products/LMD-X310MT/feature_1.html#L2_80
- [9] “ソニー 3D 対応液晶モニター LMD-X550MT”
https://www.sony.jp/medical/products/LMD-X550MT/feature_1.html#L2_10
- [10] 大内田 研宙, “内視鏡外科手術における 3D システムの現況と展望,” 頭頸部外科 2014 年 24 巻 1 号 p. 15-18 (2014)
- [11] “東芝医療用裸眼 3D ディスプレイ HyperViewer”
http://www.toshiba-medical.co.jp/tmd/products/ct/3d_display/index.html
- [12] John C. Schultz, et al., “Full Resolution Autostereoscopic 3D Display for Mobile Applications,” SID 09 Digest, pp. 127-130 (2009)
- [13] Adrian Travis, Neil Emerton, Tim Large, Steven Bathiche, and Bernie Rihn, “Backlight for viewsequential autostereo 3D,” SID 10 Digest, pp. 215–217 (2010)
- [14] M. J. Sykora, “Optical characterization of autostereoscopic 3D displays,” SPIE Proc. 7863, 78630V (2011)
- [15] C-H Ting, et al., “Multi-user 3D film on directional sequential backlight system,” SID 11 Digest, pp. 460-463 (2011)
- [16] Hyunkyung Kwon and Hee-Jin Choi, “A time-sequential multi-view autostereoscopic display without resolution loss using a multi-directional backlight unit and an LCD panel,” Proc. SPIE 8288, 82881Y (2012)
- [17] A. Hayashi, et al. “A 23-in. full-panel-resolution autostereoscopic LCD with a novel directional backlight system,” Journal of the Society for Information Display, 18, pp. 507-512 (2010)
- [18] 服部 知彦, “立体映像表示装置” 特開平 08-160355, A (1996)
- [19] 服部 知彦, “立体映像表示装置” 特開平 08-160356, A (1996)

- [20] 服部 知彦, “立体映像表示装置” 特開平 08-160556, A (1996)
- [21] 服部 知彦, “立体映像表示装置” 特開平 08-163603, A (1996)
- [22] S. Ishizuka, T. Mukai, and H. Kakeya, “Realization of Homogeneous Brightness for Autostereoscopic Displays with Directional Backlights Composed of Convex Lens Arrays,” Proc. IDW '14, pp. 836-839 (2014)
- [23] S. Ishizuka, T. Mukai, and H. Kakeya, “Multi-Phase Convex Lens Array for Directional Backlights to Improve Luminance Distribution of Autostereoscopic Display,” IEICE Trans. Electron., Vol. E98-C (11), pp. 1023-1027 (2015)
- [24] T. Mukai and H. Kakeya, "Enhancement of viewing angle with homogenized brightness for autostereoscopic display with lens-based directional backlight," Proc. SPIE 9391, pp. 93911A.1-8 (2015)
- [25] 吉田篤史、掛谷英紀、大城幸雄、大河内信弘: 医療用フル HD 裸眼立体表示におけるクロストークの低減, 第 25 回日本コンピュータ外科学会大会論文集 (2016)
- [26] G. Borjigin and H. Kakeya, “An autostereoscopic display with time-multiplexed directional backlight using a novel linear Fresnel lens array,” Proc. IDW' 20, pp. 482-485 (2020)
- [27] G. Borjigin and H. Kakeya, “A backlight system using a novel interleaved Fresnel lens array that attains a uniform luminance and two-dimensional directional light control,” Optics Letters (in print)
- [28] H. Kakeya, “Coarse integral imaging and its applications,” Proc. SPIE 6803, 680317 (2008)
- [29] H. Kakeya, T. Kurokawa, and Y. Mano, “Electronic realization of coarse integral volumetric imaging with wide viewing angle,” SPIE Proceedings 7524, 752411 (2010)
- [30] H. Kakeya, “Realization of undistorted volumetric multiview image with multilayered integral imaging,” Opt. Express Vol. 19, No. 21, 20395–20404 (2011)
- [31] H. Kakeya, S. Sawada, Y. Ueda, and T. Kurokawa, “Integral volumetric imaging with dual layer fly-eye lenses,” Optics Express, Vol. 20, No. 3, pp. 1963-1968 (2012)
- [32] S. Sawada and H. Kakeya, “Coarse Integral Volumetric Imaging with Flat Screen and Wide Viewing Angle,” Journal of Electronic Imaging, Vol. 21, No.1, pp. 0110004.1-7 (2012)
- [33] S. Sawada and H. Kakeya, “Integral volumetric imaging using decentered elemental lenses,” Optics Express, Vol. 20, No. 23, pp. 25902-25913 (2012)
- [34] H. Kakeya and S. Sawada, "Reduction of image discontinuity in coarse integral volumetric imaging," Optics Letters, Vol. 40, No. 23, pp. 5698-5701 (2015)
- [35] Ken Perlin, Salvatore Paxia, Joel S. Kollin, “An Autostereoscopic Display,” Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.319-326 (2000)
- [36] Hyo Jin Lee, Hui Nam, Jang Doo Lee, Hyoung Wook Jang, Myoung Seop Song, Beom Shik Kim, Ja Seung Gu, Chan Young Park, Kyung Ho Choi, “A High Resolution Autostereoscopic Display Employing a Time Division Parallax Barrier,” SID Symposium Digest of Technical Papers, Vol.37, pp.81-84 (2006)
- [37] Kihyung Kang, et al., “Field Sequential LC Barrier for a Full Resolution Auto-stereoscopic 3D Display” SID 11 Digest, pp. 456-459 (2011)
- [38] J. E. Gaudreau, “Full-resolution autostereoscopic display with all-electronic tracking

- system,” SPIE Proc. 8288, 82881Z (2012)
- [39] Q. Zhang, and H. Kakeya, “An autostereoscopic display system with four viewpoints in full resolution using active anaglyph parallax barrier,” Proc. SPIE 8648, 86481R.1-10 (2013)
- [40] Q. Zhang and H. Kakeya, “Time-division multiplexing parallax barrier based on primary colors,” Proc. SPIE 9011, 90111F (2014)
- [41] Q. Zhang and H. Kakeya, “A high quality autostereoscopy system based on time-division quadruplexing parallax barrier,” IEICE Trans. Electron., Vol. E97-C, No. 11, pp. 1074-1080 (2014)
- [42] Q. Zhang and H. Kakeya, “Time-division quadruplexing parallax barrier employing RGB slits,” Journal of Display Technology, Vol. 12, No. 6, pp. 626-631 (2016)
- [43] K. Okada and H. Kakeya, “Autostereoscopic Display System Using Quadruple Time-Division Multiplexing Parallax Barrier with Subpixel Structure,” IDMC '15 3DSA, AP3-001 (2015)
- [44] “Feature GS-TD1B Full HD 3D Everio Camcorder”
<http://camcorder.jvc.com/product.jsp?pathId=119>
- [45] “SB3.0 HDMI Video Capture Device MonsterX U3.0R | SKNET corporation”
<https://sknet-web.co.jp/english/mvxu3r/specification.html>
- [46] H. Kakeya, A. Yoshida, B. Yang, Y. Oshiro, and N. Ohkohchi, "A Liver Surgery Simulator Using Full HD Autostereoscopic Displays," ITE Trans. on MTA, Vol. 6, No. 1, pp. 11-17 (2018)
- [47] H. Kakeya, K. Okada, and H. Takahashi, "Time-Division Quadruplexing Parallax Barrier with Subpixel-Based Slit Control," ITE Trans. on MTA, Vol. 6, No. 3, pp. 237-246 (2018)
- [48] H. Kakeya, A. Hayashishita, and M. Ominami, “Autostereoscopic Display Based on Time-Multiplexed Parallax Barrier with Adaptive Time-Division,” Journal of the Society for Information Display, Vol. 26, pp. 595-601 (2018)
- [49] Y. Watanabe, A. Hayashishita, and H. Kakeya, “Time-Multiplexing Parallax Barrier with Fractional Time-Division,” SID Digest of Technical Papers, 50, pp. 1561-1564 (2019)
- [50] N. A. Dodgson, "Variation and extrema of human interpupillary distance," in Stereoscopic Displays and Applications XV, Proc. SPIE vol. 5291, pp. 36-46 (2004)

著者文献

H. Takeya, A. Yoshida, B. Yang, Y. Oshiro, and N. Ohkohchi, "A Liver Surgery Simulator Using Full HD Autostereoscopic Displays," ITE Trans. on MTA, Vol. 6, No. 1, pp. 11-17 (2018)

B. Yang and H. Takeya, "An Adaptive Time-Division Multiplexing Parallax Barrier Allowing Multiple Observers," Proc. IDW 2019, pp. 72-74 (2019)

B. Yang and H. Takeya, "Autostereoscopy for Two Observers by Adaptive Fractional Time-Division Multiplexing Parallax Barrier," ITE Trans. on MTA, Vol. 9, No. 2, pp. 136-142 (2021)

B. Yang and H. Takeya, "Endoscopic Surgery Training Using Full HD Glass-less Stereoscopic Displays," Proc. IDW 2021, pp. 602-604 (2021)