

博士論文

3層の液晶パネルによる偏光演算を用いた
複数視点・セキュア・空中表示に関する研究

宇都宮大学大学院 工学研究科

システム創成工学専攻

内田 景太郎

概要

近年の情報通信技術の普及に伴い、ユーザーに情報を提示するディスプレイにおいてもタッチ入力機能の付与だけでなく、3D 表示、覗き込み防止表示、複数のユーザーに対して異なる映像を表示する複数視点表示など、多彩な機能が求められている。従来の情報機器においては、これらの機能ごとに専用のディスプレイハードウェアを必要としてきた。しかし、3D 表示や覗き込み防止は常時、求められる機能ではなく、必要な時にだけこれらの機能を使用できることが好ましい。複数のハードウェアを持ち歩くことは煩わしいだけでなく、電源やバックライトなどの部品を重複して必要とする課題があり、持続可能な発展(SDGs)の観点でもハードウェアの削減が望ましい。

情報ディスプレイに表示する映像信号の暗号化とのぞき込み防止を実現する技術は、セキュアディスプレイと呼ばれ、視覚復号型暗号表示を利用した実現が代表例である。視覚復号化暗号は秘密画像を複数の鍵画像に分散し、設定した枚数以上の鍵画像を揃えることで秘密画像が復元される暗号表示である。秘密画像は透明フィルムに印刷し、重ね合わせることで視覚的に秘密画像の復号が行われる。この視覚復号化暗号には全体の輝度が低下する課題があったが、2枚の液晶パネルの積層による偏光演算により、解像度の劣化なしに暗号表示を可能にする偏光演算型セキュアディスプレイが報告されている。さらに、この2層の液晶パネルによる偏光演算を用いて、2つの視点位置で異なる映像を表示する2視点表示も報告されている。スリットアレイを必要とするパララックスバリア方式の複数視点表示に対して、偏光演算を利用する複数視点表示方式では画像の解像度を維持できる特長を有する。暗号化を行わない複数視点表示方式としては、テンソルディスプレイと呼ばれる積層された液晶パネルによるライトフィールド表示が報告されている。テンソルディスプレイにおいては、ライトフィールドを近似値に分解して近似解を用いて、それぞれの液晶パネルに表示する画像を生成している。しかしながら、3枚の液晶パネルを積層する偏光演算型のディスプレイにおいて、設計された視点位置に提示したい画像の画素値から、各層の液晶パネルに表示する画像の画素値を決定論的に求める手法は明らかではない。

次に、情報端末の進化と共に、ディスプレイに求められる機能として空中表示技術があり、その1つに再帰反射を利用した空中結像(AIRR: Aerial Imaging by Retro-Reflection)がある。AIRRは光源、ビームスプリッタ、再帰反射素子の3つで構成される。AIRRは他の空中表示技術と比較し、広い視野角を有していることから、複数人で

空中像を視認できる。迷光によるゴーストがなく、低コストであることから、プロトタイプ、空中大型スクリーン、空中看板などの用途に適している。AIRRを含む空中表示技術では光源を空中像化するため、通常のディスプレイでは奥行き情報を表示することができない。

そこで本論文では、これらの課題を解決するために、3枚の液晶パネルを積層した偏光演算型ディスプレイを提案する。まず、視点位置に表示する画像から表示画像を生成する論理式を明らかにする。次に明らかにした論理式を基に、多視点表示や暗号表示、およびその組み合わせなど、3層液晶ディスプレイを用いて、機械的な機構は変更することなく表示画像の切り替えのみで実現した様々な表示を提案する。さらに空中表示技術に応用し、3層液晶ディスプレイを用いて可能となった空中表示技術について報告する。

本論文は6章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究背景を述べたのち、本研究の位置づけと目的を示す。

第2章では、暗号表示技術や多視点表示技術に関する先行研究について述べる。

第3章では、3層液晶パネルによる偏光演算の原理について述べる。また、偏光演算を用いて異なる3方向で観察される3枚の秘密画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する表示画像の画素値の関係を表す式を求めることで、3層液晶パネルを用いた3視点表示の解の存在を明らかにする。

第4章では、本論文で明らかにした3方向に提示する画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の関係式をもとに生成した表示画像を用いて、多視点表示や暗号表示、およびその組み合わせを中心に、2D表示、3D表示、覗き込み防止表示など、機構の変更や調整をすることなく、表示画像を切り替えるだけで実現可能となった様々な表示について実証することで、単一のハードウェアで実現した多機能化について報告する。

第5章では、3層液晶ディスプレイを光源として空中表示への応用を行う。これまでのディスプレイから出た光を空間で結像させていた空中表示とは異なり、ユーザーに奥行き情報を提供できる。従来のディスプレイを空中表示に用いた場合、表示機能を切り替えるたびに光学系の一部として組み込まれた光源用ディスプレイを交換する必要があったが、3層の液晶パネルを用いることで、機械的な変更を必要とせず、表示画像を切り替えるだけで様々な空中表示が可能となる。

第6章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

目次

第 1 章 諸言	1
1.1. 本研究の背景	2
1.2. 本研究の目的	3
1.3. 本論文の構成	4
第 2 章 先行研究における暗号表示	5
2.1. はじめに.....	5
2.2. 秘密分散法.....	5
2.3. 視覚復号型暗号表示	6
2.4. 位相差フィルムの積層による暗号表示	8
2.4.1. 偏光.....	8
2.4.2. 位相差フィルム.....	9
2.4.3. 位相差フィルムを用いた暗号表示	11
2.5. 2層液晶ディスプレイ	13
2.5.1. 液晶.....	13
2.5.2. 2層液晶ディスプレイによる暗号表示と 2 視点表示.....	14
2.6. おわりに.....	18
第 3 章 偏光演算の原理.....	19
3.1. はじめに.....	19
3.2. 位相差フィルムによる偏光演算.....	19
3.3. 通常の TN 液晶ディスプレイ	20
3.4. 2層液晶ディスプレイによる偏光演算.....	21
3.4.1. 偏光演算型 2層液晶ディスプレイによる暗号表示の原理.....	22
3.4.2. 偏光演算型 2層液晶ディスプレイによる 2 視点表示の原理	23
3.5. 3層液晶ディスプレイの偏光演算の原理	24
3.6. 3層液晶ディスプレイによる暗号表示.....	25
3.7. 3層液晶ディスプレイによる多視点表示	28
3.7.1. 水平方向の 3 視点表示.....	28
3.7.2. 垂直方向の 3 視点表示.....	30
3.7.3. 中央の視点位置を含む水平・垂直の 3 視点表示	31
3.7.4. 中央の視点位置を含まない水平・垂直の 3 視点表示	35
3.8. 多段の偏光回転による着色	36
3.8.1. 偏光回転角と輝度の関係.....	36
3.8.2. 180 度回転と 270 度回転の着色.....	41
3.8.3. 波長分散による着色の補正	46
3.9. おわりに.....	47

第 4 章	表示画像の切り替えによる表示機能の多様化.....	48
4.1.	はじめに.....	48
4.2.	2D 表示.....	49
4.3.	立体表示.....	50
4.3.1.	マルチレイヤー表示.....	51
4.3.2.	DFD 表示.....	52
4.4.	セキュリティ表示.....	54
4.4.1.	ランダムドットパターンの積層による視点位置の限定.....	54
4.4.2.	2枚の任意画像を鍵として用いる暗号表示.....	58
4.5.	多視点表示.....	61
4.5.1.	水平方向の 3 視点表示.....	61
4.5.2.	2 視点暗号表示.....	64
4.5.3.	水平・垂直方向の 3 視点表示(中央の視点位置を含む).....	65
4.5.4.	水平・垂直方向の 3 視点表示(中央の視点位置を含まない).....	75
4.6.	おわりに.....	78
第 5 章	AIRR による空中多機能表示.....	79
5.1.	はじめに.....	79
5.2.	再帰反射による空中結像(AIRR)の原理.....	80
5.3.	3 層液晶ディスプレイを光源に用いた AIRR による空中表示.....	86
5.3.1.	空中マルチレイヤー表示.....	87
5.3.2.	空中暗号表示.....	88
5.4.	おわりに.....	90
第 6 章	結言.....	91
付録	93
参考文献	122
謝辞	126
研究業績	128

第 1 章 諸言

近年，情報社会の発展に伴い，様々なディスプレイが開発され，我々を取り巻くディスプレイは多様化している．携帯電話，スマートフォン，デジタルカメラなど小型端末においてディスプレイは欠かせない．テレビモニターの普及は言うまでもなく，カーナビゲーションなど自動車用ディスプレイも広く普及している．街頭など公共スペースには大型ディスプレイが設置され，劇場やコンサートホールでは大型スクリーンにより迫力ある映像が観衆を魅了する．このようにディスプレイが日常生活に深く浸透した現在においては，我々はディスプレイを介して情報化社会を体験していると言ってよい．コンピュータの処理速度が人の近くに比べて十分に早くなり，ディスプレイを通じた入出力性能が情報機器のパフォーマンスにおいて重要な役割を占めるようになった．したがって，ディスプレイには単なる表示性能だけでなく，多様な機能が求められるようになった．本章では，まず背景を記し，情報表示用途を中心にディスプレイ技術の現状と課題を述べたあと，本論文で提案する 3 層液晶ディスプレイの位置づけについて述べる．

1.1. 本研究の背景

内閣府が提唱する Society 5.0[1]は未来社会の科学技術対策であり，サイバー空間(仮想空間)とフィジカル空間(現実空間)を高度に融合させたシステムにより経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会の構造である．これまでの情報社会は知識，情報の共有，連携が不十分で必要な情報は探して，人が自ら分析する必要があったが，Society 5.0 では，人の能力を超える人工知能(AI)によって解析済みの情報が適切なタイミングで人に提供されるになることで，これまでにはできなかった新たな価値が産業や社会にもたらされることになる．センサー情報について，人から AI への入力では人の五感に代わるセンシング技術が普及しており，一部では人を超越する能力を超えるセンサーまで登場しており，LiDAR，ミリ波，テラヘルツなど人の目に見えない帯域のセンシング技術などが例にあげられる．一方，新たな価値として，AI から人への出力フィジカル空間の人間に様々な形でフィードバックされるとあるが，現在，一般に普及しているのは 2D の視覚情報と聴覚情報のみである．Society 5.0 の実現が近づくにつれ，より膨大なビッグデータを AI が解析し，その結果が人間にフィードバックされる．このフィードバックに対応するためには，より直感的に五感に訴える出力装置の開発が必要である．より直感的に視覚に訴える出力装置として，近年，コロナウイルスの影響もあり，空中ディスプレイ技術が注目され，社会実装も進んでいる．現在は 2D ディスプレイを光源とするものが多く，その 2D ディスプレイを空中に再結像したものが，多く見られるが未来社会の実現に向けて更なる多機能化が期待される．

近年のコロナウイルスによるパンデミックは日常生活に戻らない大きな変化を与えた．その一つにリモートワークがあり，働く場所を選ばなくなった．しかし，セキュリティ対策の整ったオフィスを離れるというリスクも発生する．ショルダーハッキングの対策として覗き込み防止フィルムがあるが，画面が見づらくなることからオフィスでは使用しないことが多く，つけ外しが面倒である．情報端末も多機能化し，タッチパネル等の入力装置が複合化されるだけでなく，3D 表示，覗き込み防止表示，あるいは複数ユーザーに対して異なる映像を提示する複数視点表示など，多くの機能が求められる．従来はこれらの機能ごとに専用のハードウェアを必要としてきたが，機能の異なるディスプレイを持ち歩くのは煩わしく感じる．

1.2. 本研究の目的

これらの研究背景から，本研究では未来のディスプレイに求められる能力として表示機能を多様化させると共に，機能ごとのハードウェアを必要とせず，単一のデバイスで表示機能を状況に応じて容易に切り替えることができるディスプレイの実現を目的とする．

3枚の液晶パネルを積層した偏光演算型ディスプレイを作製し，機構の変更や調整を必要とせず，表示画像の切り替えのみで，通常の2D表示はもちろんのこと，立体表示，暗号表示，覗き込み防止表示，多視点表示などの多機能表示を実現する．

複数枚の液晶パネルを積層したテンソルディスプレイとよばれるライトフィールドディスプレイが提案されている[2]．表示したいライトフィールドを近似的に分析し，各液晶ディスプレイに表示する画像を生成する．しかしながら，3枚の液晶パネルを積層するディスプレイにおいて，設計された視点位置に提示したい画像の画素値から，各層の液晶パネルに表示する画像の画素値を決定論的に求める手法は明らかにされていない．

そこで本論文では3方向の視点位置に提示する画像から，各液晶パネルに表示する画像を生成する論理式を明らかにする．明らかにした論理式をもとに多視点表示や暗号表示，およびその組み合わせなどの表示を実現する．

最後に3層液晶ディスプレイを光源として空中表示への応用を行う．これまでのディスプレイから出た光を空間で結像させていた空中表示とは異なり，ユーザーに奥行き情報を提供できる．従来のディスプレイを空中表示に用いた場合，表示機能を切り替えるたびに光学系の一部として組み込まれた光源用ディスプレイを交換する必要があったが，3層の液晶パネルを用いることで，機械的な変更を必要とせず，表示画像を切り替えるだけで様々な空中表示を実現する．

1.3. 本論文の構成

本論文は6章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第1章では、研究背景を述べたのち、本研究の位置づけと目的を示す。

第2章では、暗号表示技術に関する先行研究について述べる。

第3章では、通常のディスプレイの表示原理について述べたあと、先行研究である2層液晶ディスプレイによる偏光演算の原理について述べる。次に3層液晶パネルによる偏光演算の原理について述べる。また、偏光演算を用いて異なる3方向に提示する3枚の画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の関係式を明らかにする。

第4章では、本論文で明らかにした3方向に提示する画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の関係式をもとに生成した表示画像を用いて、多視点表示や暗号表示、およびその組み合わせの表示を行う。また、2D表示、3D表示、覗き込み防止表示など、機構の変更や調整をすることなく、表示画像を切り替えるだけで実現可能となった様々な表示について実証することで、単一のハードウェアで実現した多機能表示について報告する。

第5章では、3層液晶ディスプレイを光源として空中表示への応用を行う。これまでのディスプレイから出た光を空間で結像させていた空中表示とは異なり、ユーザーに奥行き情報を提供できる。従来のディスプレイを空中表示に用いた場合、表示機能を切り替えるたびに光学系の一部として組み込まれた光源用ディスプレイを交換する必要があったが、3層の液晶パネルを用いることで、機械的な変更を必要とせず、表示画像を切り替えるだけで様々な空中表示が可能となる。

第6章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第2章 先行研究における暗号表示

2.1. はじめに

本研究の先行研究は偏光演算を利用した2層液晶ディスプレイによる暗号表示である。暗号表示については秘密分散法を用いた視覚復号化暗号がある。視覚復号化暗号には解像度が劣化する課題があったが、位相差フィルムを積層することで解像度の劣化なしに暗号表示が可能になった。さらに位相差フィルムに代わって液晶パネルを使用することで、書き換え可能な暗号表示が可能になった。本章では秘密分散法、視覚復号型暗号表示、位相差フィルムの積層による暗号表示、および2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示について記す。位相差フィルム、2層液晶ディスプレイおよび3層液晶ディスプレイの偏光演算の原理については次章に記す。

2.2. 秘密分散法

秘密分散法はBlakley[3]とShamir[4]がそれぞれ独自に発表している。秘密情報を複数に分散し、分散された情報から任意の個数の情報を集合させることにより、元の秘密情報を得る手法を秘密分散法という。秘密分散法では、秘密情報 S を n 個の分散情報 $W_j(j=1,2,3,\dots,n)$ に分散符号化する。 (k, n) 閾値型の秘密分散法においては、 n 個の分散情報のうち、任意の k 個の分散情報を集合させることにより秘密情報 S を復元可能であるが、任意の $k-1$ 個の分散情報からは S の情報が全く得られない。 (k, n) 閾値型の秘密分散法の例を Fig. 2.1 に示す。Fig. 2.1 では $(3, 4)$ 閾値法について示しているが、これは秘密情報を4つの分散情報に秘密分散し、そのうちの任意の3つの分散情報を集めることにより元の秘密情報を復元できるものである。このように、秘密分散法は漏洩や破壊、故障においても安全な情報の記録システムを実現できる。

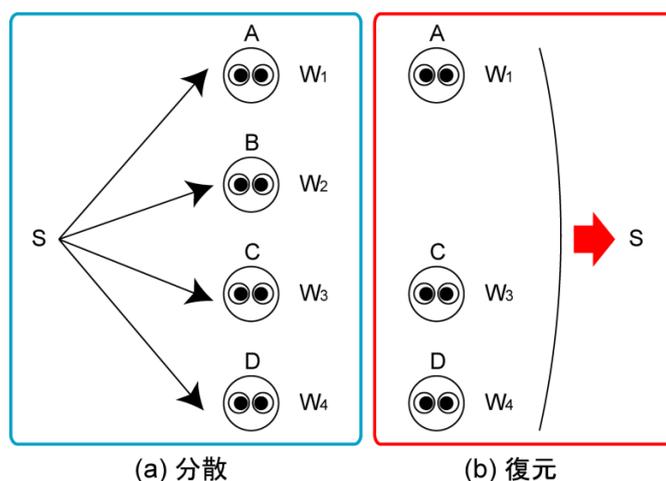


Fig. 2.1. $(3, 4)$ 閾値型秘密分散法の例.

2.3. 視覚復号型暗号表示

視覚復号型暗号表示[5]は秘密画像を複数の鍵画像に分散し、設定した枚数以上の鍵画像を揃えることで秘密画像が復元される暗号方法である。秘密画像は OHP シートなどの透明フィルムに印刷し、重ね合わせることで視覚的に秘密画像の復号が行われる。この方式は、秘密分散法の (k, n) 閾値法を視覚によって復号する手法である。秘密画像は n 枚の鍵画像に分散され、 n 枚の鍵画像の内の任意の k 枚の鍵画像を重ね合わせた場合に秘密画像を観察することができ、 k 枚未満の鍵画像を重ね合わせた場合においては秘密画像に関する情報を確認することができない。秘密画像の各画素は、 n 枚の鍵画像上において、それぞれ a 個の画素で表現される。人の眼は、分散された鍵画像を見て画素中の色の密度の差によって秘密画像の情報を得ることができる。(2, 2)閾値における視覚復号型暗号表示についての例を図 Fig. 2.2 に示す。Fig. 2.2 では 2 枚の透明シートを重ね合わせることにより K の文字を復号するものである。



Fig. 2.2. (2, 2)閾値法による視覚復号型暗号表示.

白か黒の異なる画像構造を持ち、分散された画像上の各画素もこの白と黒 2 種類の画素により、白黒画像の各画素は構成される。復元された秘密画像は、黒画素の密度の違いを持たせることにより、視覚的に認識することが可能である。黒の密度変化を表現するために秘密画像上での 1 画素は、 a 個の鍵画像の画素に分割されて表現される。鍵画像を重ね合わせた際、秘密画像が黒画素のとき、鍵画像の画素がすべて黒になるように重なり、白画素であった部分は、すべてが黒とはならず白の画素が残るように重なる。

秘密画像を 3 枚の鍵画像に分散し、3 枚の鍵画像を物理的に重ね合わせて、秘密画像を復号する視覚復号型(3, 3)閾値法において、1 画素を 4 分割($a=4$)して暗号化を行う視覚復号型暗号表示の例として Fig. 2.3 と Fig. 2.4 に示す。このとき、3 枚未満のスライドだけでは、秘密画像の情報が一切わからないように鍵画像へ分散される。Fig. 2.3 では、白画素を暗号化するときの鍵画像の画素と復号結果を示したものであり、復号した際に白画素は重ねた場合でも白が残り、人の眼においては白として認識される。Fig. 2.4

では，黒画素を暗号化するときの鍵画像の画素と復号結果を示したものであり，復号結果において黒として認識される．このように暗号化のときは，秘密画像の白画素と黒画素を鍵画像の画素に置き換える．そして，復号化の際は，鍵画像を必要枚数重ねたとき，秘密画像において黒画素であった部分が人の眼では，黒が強調されて見える．

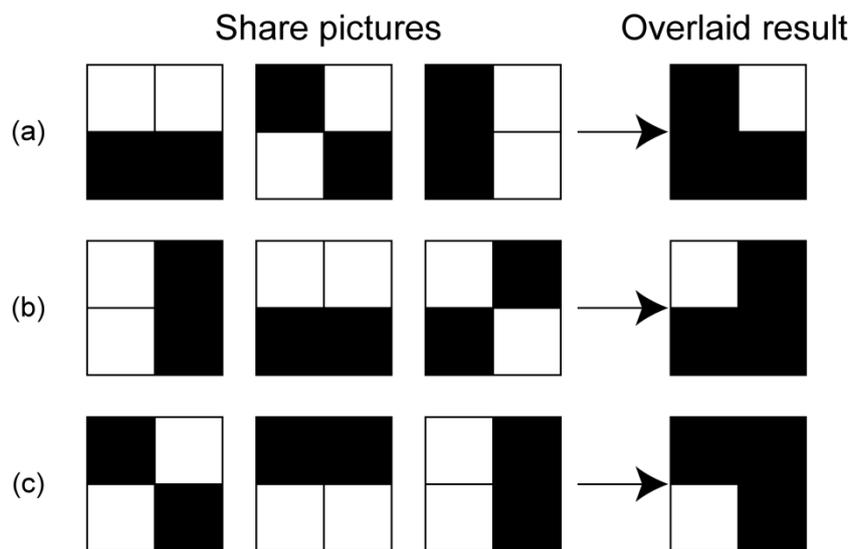


Fig. 2.3. 視覚復号型(3, 3)閾値法における白画素復号.

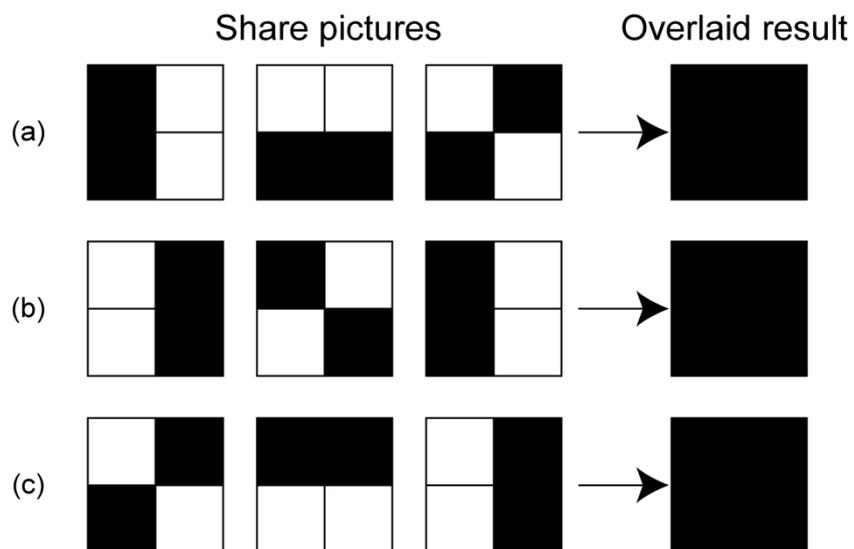


Fig. 2.4. 視覚復号型(3, 3)閾値法における黒画素復号.

視覚復号型(k, n)閾値法は行列で表現することができる． Fig. 2.3 と Fig. 2.4 で示した白黒表示を例とすると，鍵画像を構成する画素に対して，その画素が黒であれば1，白であれば0として，1つの鍵画像の画素を行ベクトルとし，それぞれの鍵画像の画素に

対応する合計 3 画素の行ベクトルを集めて行列となる。白画素を暗号化した 3 行 4 列の行列は次のように表される。

$$(a) \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(b) \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(c) \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

また、黒画素を暗号化した Fig. 2.4 における 3 行 4 列の行列は次のように表される。

$$(a) \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(b) \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$(c) \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

視覚復号型暗号表示は秘密情報を複数に分散し、記録した透明なシートを重ね合わせるにより復号可能である。上記のように行列式で明暗を表すことができるため、秘密画像の画素値から、鍵画像生成は容易である。

2.4. 位相差フィルムの積層による暗号表示

視覚復号型暗号表示は秘密画像の解像度が劣化する課題があったが、位相差フィルムによる偏光演算を利用することで、積層した暗号表示では、秘密画像の解像度を劣化させることなく復号できる[6]。

2.4.1. 偏光

光は空間を伝搬するとき、振動が進行方向と直交する 2 つの方向をとることができる。振動方向が特定の方向に偏っている光を偏光という。太陽光や蛍光灯など、一般的な光に偏りはなく、ランダムな方向に振動しているため、非偏光または自然光という。偏光板を用いることで非偏光から偏光を取り出すことができる。一般的に液晶デ

ディスプレイで使用されている偏光板はポリビニルアルコール(PVA)フィルムにヨウ素化合物を吸着し、延伸配向させたものである[7]. Fig. 2.5 で示すように偏光板は透過軸と吸収軸を有しており、ランダムに振動する非偏光が偏光板を通過するとき、透過軸方向に振動する光は透過し、吸収軸方向に振動する光は吸収され透過しない。また、斜めに振動する光は透過軸方向と吸収軸方向にベクトル分解して透過と吸収を考えることができる。

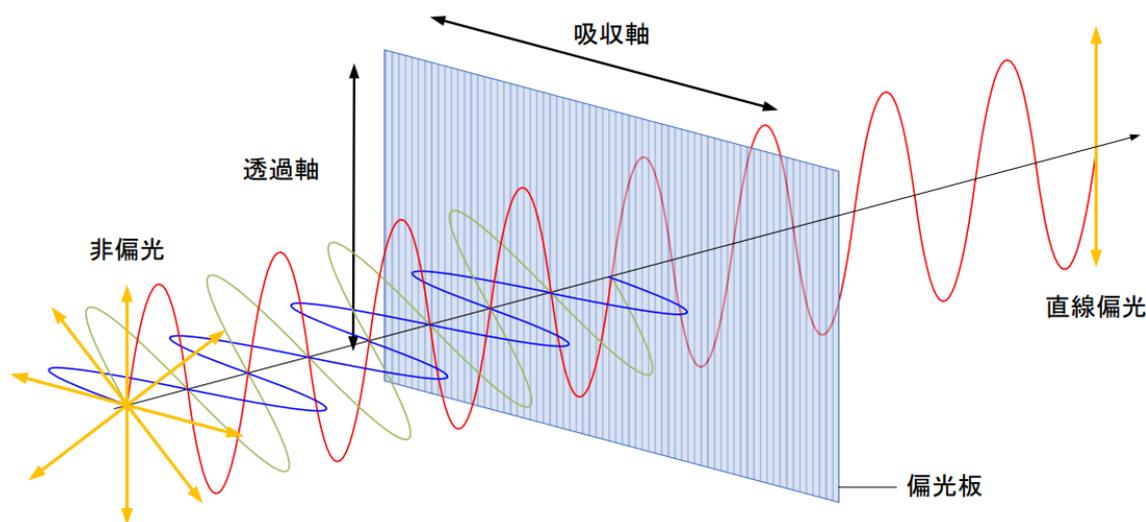


Fig. 2.5. 吸収型偏光板.

2.4.2. 位相差フィルム

波長板に直線偏光を入射すると 2 つの直行偏光成分に位相差を与えて射出させることができる。波長板には偏光方向によって屈折率が異なる複屈折結晶を用いる。複屈折結晶の光軸と厚さを調整することで任意の位相ずれを発生させることができる。また高分子フィルムを一定方向に引っ張り、分子の配向を制御することで位相差を発生させる機能を付加したものは位相差フィルムと呼ばれる[8]。人の目では偏光状態を認識できず、位相差フィルム単体は無色透明である。1/2 波長板は入射光の 2 つの直行偏光成分に $\pi (= \lambda/2)$ の位相差を与え射出する波長板である(Fig. 2.6)。波長板の光学軸を進相軸とも呼び、進相軸方向は屈折率が小さく光が速く進む。進相軸に直交する軸を遅相軸と呼び、遅相軸方向は屈折率が大きく光が遅く進む。

1/2 波長板の光学軸に対して 45 度の直線偏光を入射させる。この方位角 45 度の直線偏光が 1/2 波長板を通過する間に進相軸方向と遅相軸方向で 1/2 波長の位相差が発生する。この 1/2 波長の位相差により、入射した直線偏光を 90 度回転させて射出させることができる。

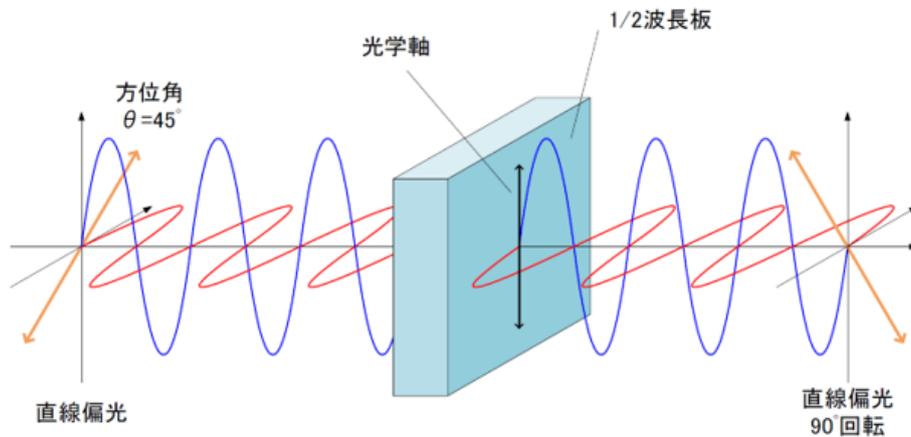


Fig. 2.6. 1/2 波長板による 90 度の偏光回転.

1/4 波長板は入射光の 2 つの直行偏光成分に $\pi/2 (= \lambda/4)$ の位相差を与え射出する波長板である (Fig. 2.7). 1/4 波長板の光学軸に対して 45 度の直線偏光を入射させる. この方位角 45 度の直線偏光は 1/4 波長板を通過する間に進相軸方向と遅相軸方向で 1/4 波長の位相差が発生する. この 1/4 波長の位相差により, 入射した直線偏光を円偏光にして射出させることができる. また 1/4 波長板を 2 枚使用することで, 1/2 波長板と同様の効果を得ることができる (Fig. 2.8). 1 枚目の 1/4 波長板で 1/4 波長の位相差, 2 枚目の 1/4 波長板でさらに 1/4 波長の位相差が発生するため, 合計で 1/2 波長の位相差が得られ, 入射した直線偏光を 1/2 波長板のように 90 度回転させることができる. また 2 枚の 1/4 波長板の光学軸を直交に配置するとき, 入射光と同じ偏光方向の直線偏光を射出させることができる (Fig. 2.9). 1 枚目の 1/4 波長板で水平方向は 1/4 波長分位相が遅れる. 2 枚目の 1/4 波長板は水平方向に光学軸があり, 鉛直方向に 1/4 波長分の位相遅れが発生する. 直交する 2 枚の 1/4 波長板によって水平方向, 鉛直方向ともに 1/4 波長の位相遅れが生じるため, 射出される直線偏光は入射する直線偏光と同じ偏光方向になる.

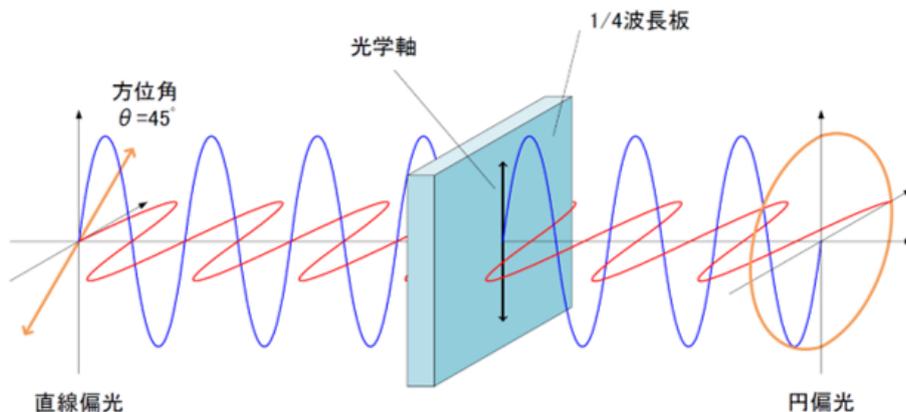


Fig. 2.7. 1/4 波長板による円偏光.

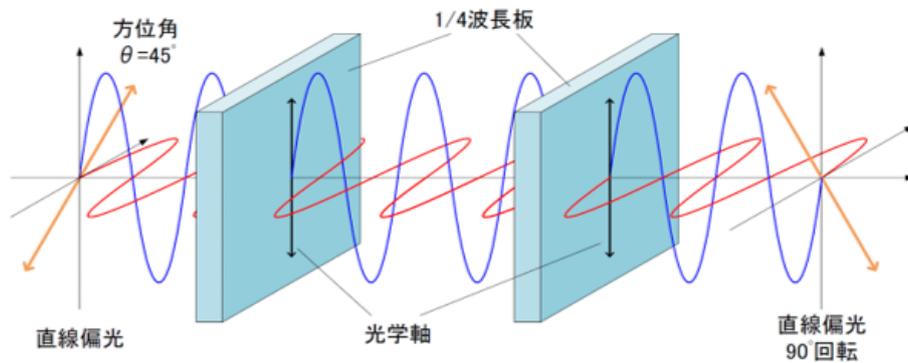


Fig. 2.8. 2枚の1/4波長板による90度の偏光回転.

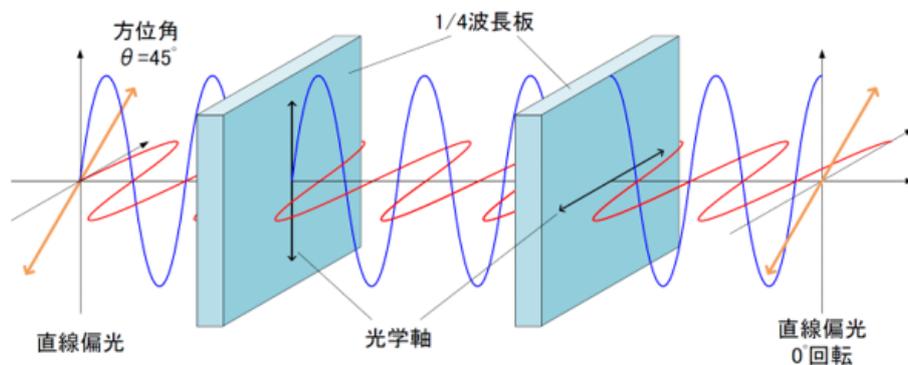


Fig. 2.9. 2枚の1/4波長板による0度の偏光回転.

2.4.3. 位相差フィルムを用いた暗号表示

偏光変調による光暗号表示は液晶光学変調素子を用いた研究が報告されているが[9, 10], 位相差フィルムを積層しても可能である. 位相差フィルムを用いた偏光演算による暗号構成の原理を Fig. 2.10 に示す. 偏光暗号フィルム1と2の各画素は光学軸が縦方向(R_1)と横方向(R_2)の1/4波長板を張り合わせて構成される. 方位角45度の直線偏光が入射するとき, 偏光暗号フィルム1と2はそれぞれに用いた2枚の1/4波長板の遅相軸が同方向である場合は, $\lambda/2$ の位相差が発生し, 通過する直線偏光の偏光方向が90度回転する. 遅相軸が直交している場合の偏光方向は変化しない. 偏光子と検光子がクロスニコル配置の場合は, 2枚の偏光暗号フィルムによる偏光面の回転角が0度または180度のとき, 黒色の画素に再現され, 偏光面の回転角度が90度のときは白色の画素に再現される. また偏光子と検光子が平行ニコル配置のときはこの明暗の関係が逆になる. これらの偏光面の回転角を得る組み合わせは複数存在し, 秘密画像の画素ごとにランダムに組み合わせが決定されるため, 2枚の偏光暗号フィルムを重ねて初めて復号結果の明暗が確認できる.

2枚の偏光暗号フィルムを用いた暗号表示の結果を Fig. 2.11 に示す. 目視では偏光

状態を認識できず，暗号化されたフィルム単体の見かけは透明であり，1枚の偏光暗号フィルムのみを偏光板の間において観察したときは秘密画像の情報は一切わからない．2枚の偏光暗号フィルムを重ねて偏光板の間において観察して初めて秘密画像が復号される．

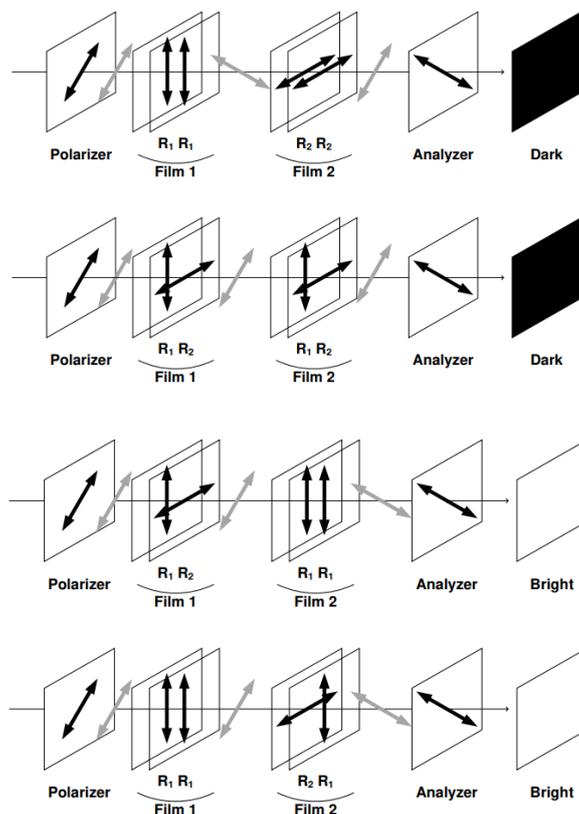


Fig. 2.10. $\lambda/4$ 板を用いた偏光暗号フィルムによる偏光演算.

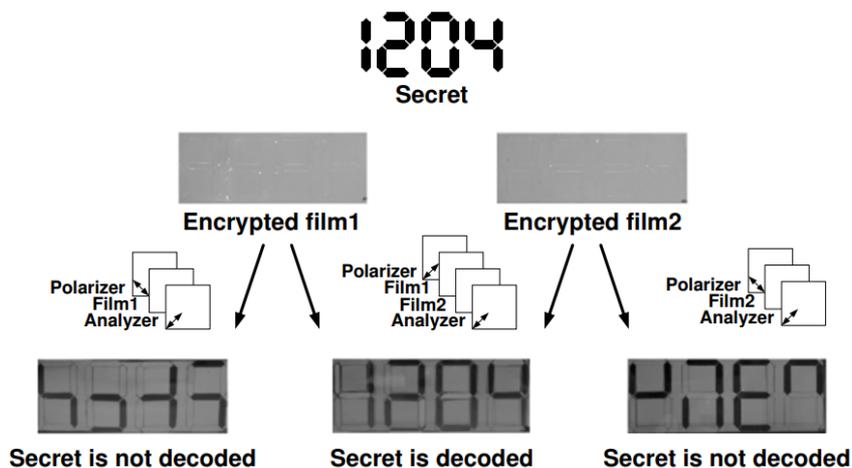


Fig. 2.11. 偏光暗号フィルムによる秘密画像の復号.

2.5. 2層液晶ディスプレイ

液晶パネルの積層による多機能化が提案されている。これまで、2層の液晶パネルを用いた3D表示[11]、視野限定を行う暗号表示[12]、2方向に異なる映像を表示する2視点表示[13]、ならびにこれらの機能の再構築が可能な多機能表示[14, 15]が報告されている。ここでは2層液晶ディスプレイの構成と暗号表示、2視点表示について述べる。

2.5.1. 液晶

まず積層ディスプレイで使用しているネマチック液晶について述べる。液晶は液体と固体の中間の物理特性を持つ。動きまわられる楕円の回転体のような形状の分子を持ち、液体のように位置の規則性を欠いているが、結晶のように全体としては方向の規則性を維持する(Fig. 2.12)。

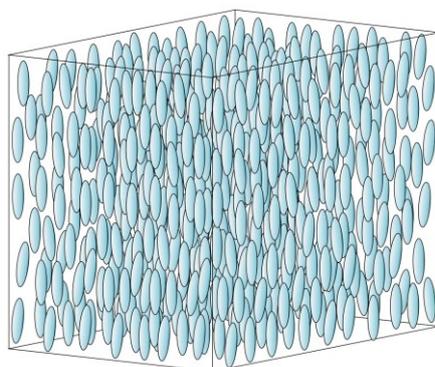


Fig. 2.12. ネマチック液晶.

ディスプレイにはツイストネマチック(TN)液晶パネルが使用される。TN液晶パネルはネマチック液晶を2枚のガラス板で挟み込む。ガラス板の片面には透明な金属膜が形成されている。これにより2枚のガラス板は電極として働き、間に配置されたネマチック液晶を制御することができる。ガラス板の金属膜側をこすり、微細な溝を形成している。この溝に沿ってネマチック液晶は配向する。この溝が直交するよう2枚のガラス板を90度回転させると、ネマチック液晶も回転に合わせてらせん状に並ぶ。このようにTN液晶セルを形成する(Fig. 2.13)。セルに電圧を印加するとねじれ軸に対して平行な電場がガラス板間に形成される。これにより、ガラス板の微細な溝に触れている液晶分子を除いて、液晶分子の長軸方向が電場方向に合わせて向きを変える。

TN液晶セルに直線偏光を入射する。Fig. 2.14(a)に示すように、直線偏光は液晶のねじれに沿うように90度回転する。Fig. 2.14(b)に示すように、セルに電圧をかけると液晶のねじれが消失し、偏光を回転させる機能も無くなる。電圧の印加をやめると液晶は再びねじれた状態に戻り、偏光を回転させることができる。

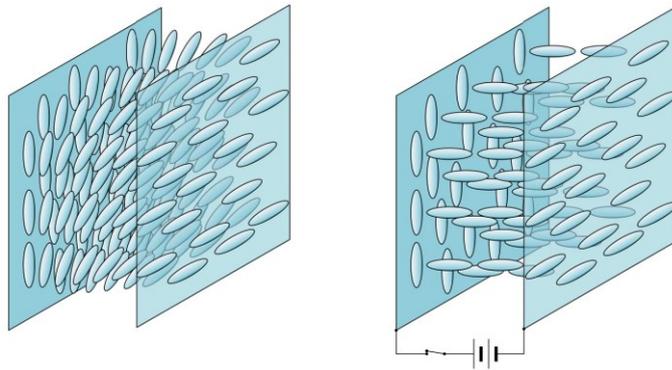


Fig. 2.13. 電圧の印加によって配向状態が変化する TN 液晶セル.

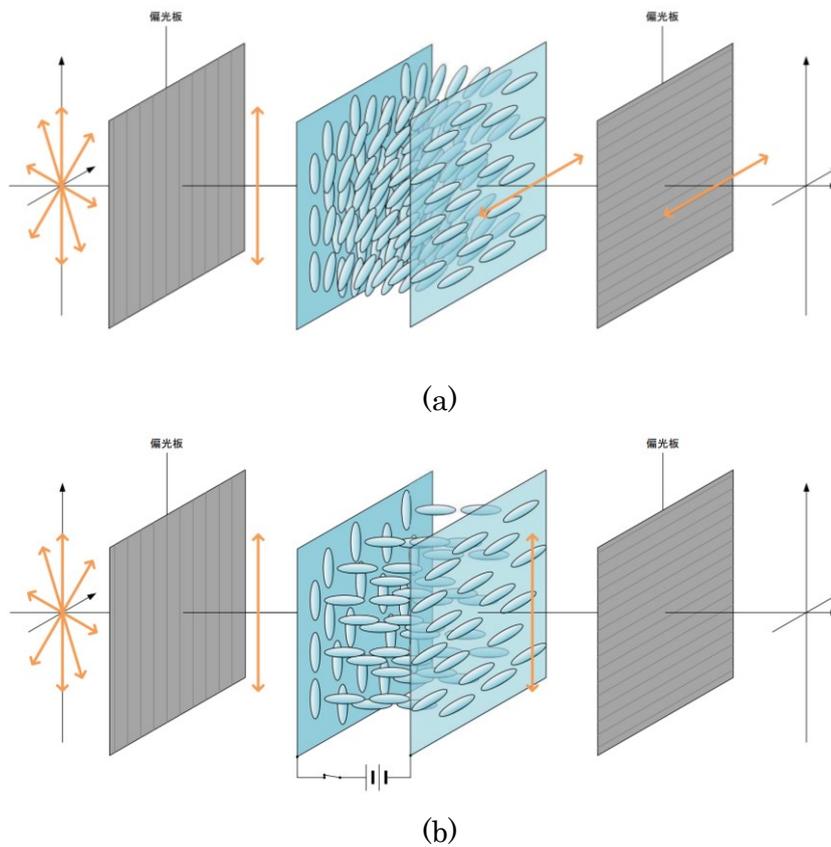


Fig. 2.14. (a)TN 液晶セルによる偏光回転と(b)電圧を印加した状態.

2.5.2. 2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示

偏光演算型2層液晶ディスプレイを Fig. 2.15 に示す. 通常の液晶ディスプレイは光源側から, バックライト, 偏光子, 液晶パネル, 検光子の構成である. 先行研究である2層液晶ディスプレイは光源側からバックライト, 偏光子, 2枚の TN 液晶パネル, 検光子で構成される. 2枚の TN 液晶パネルの間には一定の間隔を設けている. この2枚の液晶パネルが偏光暗号フィルムの役割を果たしている.

2層液晶ディスプレイを用いて暗号表示を行うための構成を Fig. 2.16 に示す. Fig.

2.17 には前面パネルと後面パネルに表示する白黒の 2 値画像を示す。液晶セルの電圧を ON/OFF 制御することで 2 値画像を表示することができる。白色の表示状態となる画素は電圧が印加されず、入射光を 90 度回転させる。黒色の表示状態となる画像には電圧が印加され、偏光を回転させない。位相差フィルムによる暗号表示と同様にそれぞれの表示画像からは秘密画像はわからないが、2 層液晶ディスプレイに表示し、重ねることによって秘密画像が復号される(Fig. 2.18)。また、2 枚の液晶パネルには積層間隔を設けていることから視差が生じ、正面からのみ秘密画像が観察でき、上下左右の覗き込んだ位置からは秘密画像はわからない。

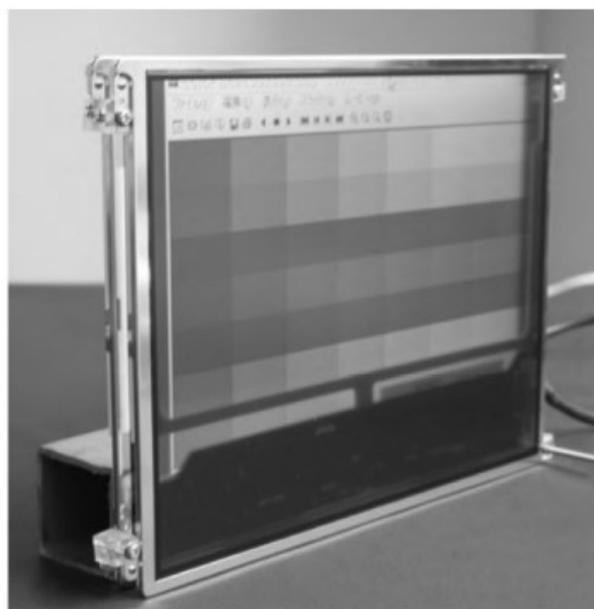


Fig. 2.15. 偏光演算型 2 層液晶ディスプレイ.

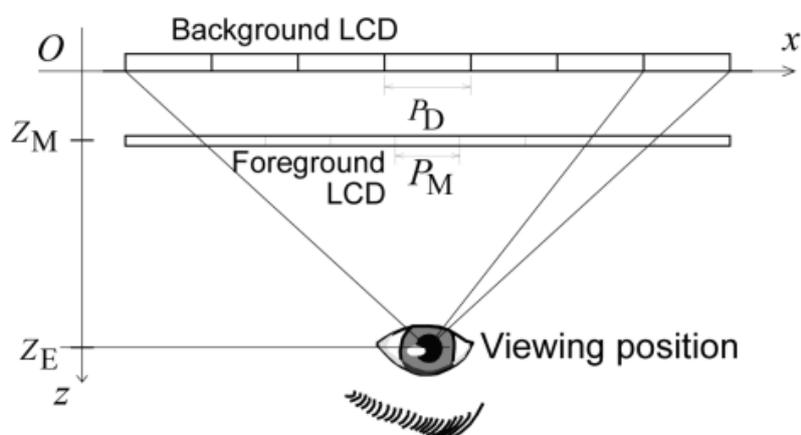


Fig.2.16. 2 層液晶ディスプレイによる暗号表示するための構成.

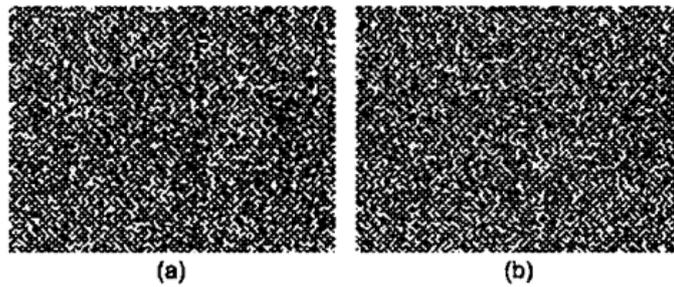


Fig. 2.17. 偏光演算に基づく復号を可能にする暗号化されたシェア画像.
((a)は後面, (b)は前面)

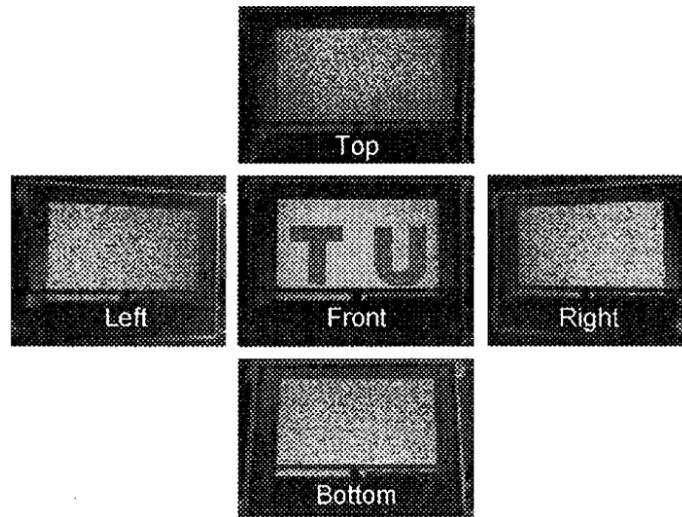


Fig. 2.18. 2層液晶ディスプレイによる暗号表示の観察結果.

また2枚の液晶パネルに積層間隔を設けたことによる視差を利用して、2方向に異なる画像を提示する2視点表示も可能である。2層液晶ディスプレイによる2視点表示を実現するための構成を Fig. 2.19 に示す。2視点表示を実現するために作製した画像を前面と後面の液晶パネルに表示する。前面の液晶パネルに表示した画像は視差によって、左右で観察したときに1画素ずれて重なるよう設計されている。

Fig. 2.20 に2視点表示を行うための2枚の表示画像を示す。表示画像生成手順については3章で詳しく述べる。これらの画像を2層液晶ディスプレイに表示し、左右の視点位置から観察した結果を Fig. 2.21 に示す。左の視点位置では「偏光」、右の視点位置では「演算」の異なる文字が観察でき、2視点表示を実現している。2枚の液晶ディスプレイの積層間隔は1cmであり、後面液晶パネルに表示する画像は前面液晶パネルに表示する画像の1.01倍に拡大している。Fig. 2.21の観察結果は1mで左右に6.5cm離れた位置で撮影している。他の多視点表示方式であるパララックスバリア[16-18]による従来の2視点表示ではスリットによる水平解像度が半減する課題があるが、本方式では2方向の画像情報を2層の液晶パネルに分配しているため、スリットアレイに

よる縞模様が存在ない。

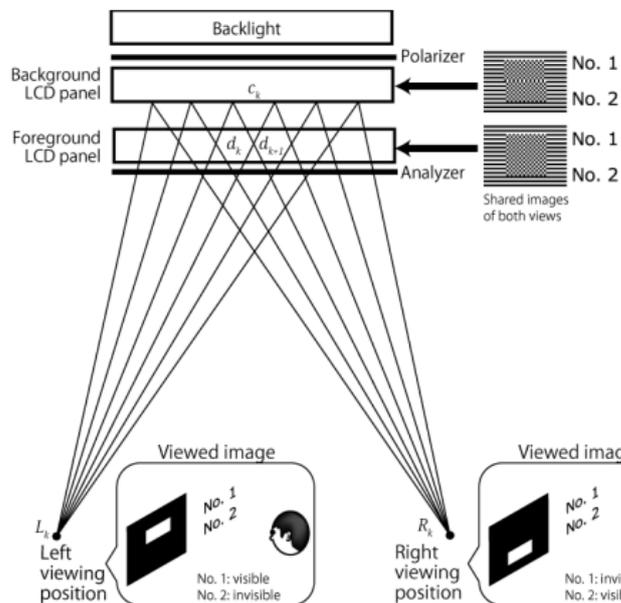


Fig. 2.19. 2層液晶ディスプレイによる2視点表示の構成.



Fig. 2.20. 2視点表示に用いる表示画像.
((a)は後面, (b)は前面)

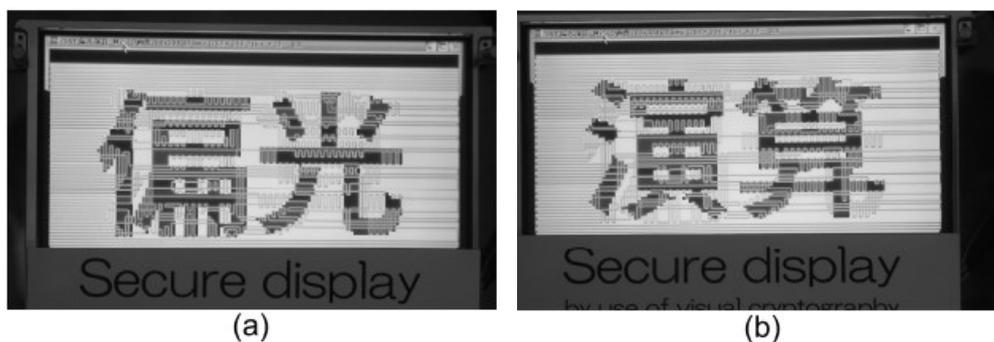


Fig. 2.21. 2視点表示の観察結果.
((a)は左側の観察位置, (b)は右側の観察位置)

2.6. おわりに

本章では、先行研究である秘密分散法、視覚復号型暗号表示、位相差フィルムを用いた偏光暗号、偏光演算型 2 層液晶ディスプレイによる暗号表示と 2 視点表示について述べた。2.4 節では偏光板を用いて非偏光から直線偏光を取り出す方法について述べたあと、1/2 波長板や 1/4 波長板を用いて直線偏光を 90 度回転の直線偏光や円偏光に変換する方法について述べた。また 2 枚の 1/4 波長を積層する向きによって、入射する直線偏光を 90 度回転、または 0 度回転で射出する方法についても述べた。さらに本研究のために作製した 3 層液晶ディスプレイでも使用しているツイストネマチック液晶による表示の原理についても述べた。3 章ではツイストネマチック液晶パネルの積層による偏光演算について、より詳しく述べる。

第3章 偏光演算の原理

3.1. はじめに

本章では、3層液晶ディスプレイによる偏光演算について述べるため、初めに先行研究である位相差フィルムを用いた暗号表示の原理について詳しく述べる。次に先行研究である2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示の原理について詳しく述べ、液晶パネルによる偏光演算について記す。

本研究のために作製した3層液晶ディスプレイの構成を説明し、3層液晶ディスプレイによる偏光演算について記す。2層液晶ディスプレイから、液晶パネルの積層枚数を増やして、最適化計算により、複数方向の映像を表示する方法はすでに提案されている[19, 20]。また、複数の液晶パネルの積層によるセキュアディスプレイの提案[21]があり、3枚の液晶パネルを用いた3視点表示が実現された[22]が、表示画像の構成法の報告はまだないことから、本論文で解決したい課題の一つである3方向に提示したい画像の画素値から3枚の液晶パネルに表示する画素の画素値を求める論理式が存在することを本章で明らかにする。

3.2. 位相差フィルムによる偏光演算

先行研究である位相差フィルムによる暗号表示の原理を詳しく述べることで、波長板を用いた偏光演算について記す。直線偏光を入射すると2つの直行偏光成分に位相差を与えて射出させることができる。ここでは2章で述べた1/4波長板の積層による偏光制御をもとに、暗号表示の原理について述べる。Fig. 3.1で示すように、位相差フィルムによる暗号表示に用いる偏光暗号フィルムは光学軸が直交する2種類の1/4波長板の組み合わせによって作製されている。偏光暗号フィルムを2枚用いた場合の偏光暗号フィルム1, 2の偏光回転角度の組み合わせに対する復号される画素値の関係は排他的論理和(XOR)で表すことができる。暗号化したい入力画像をS、鍵画像をKとして、暗号化された画像Eは以下の式で表すことができる。

$$E = S \oplus K \quad (3.1)$$

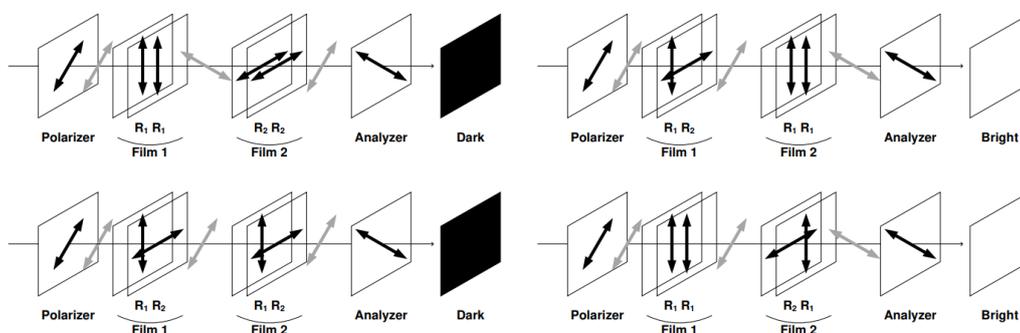


Fig. 3.1. 位相差フィルムを用いた偏光演算.

ここで \oplus は対応する画素にしてのXOR演算を表す。復号結果Dは鍵画像とXOR演算

により

$$D = E \oplus K = S \oplus K \oplus K = S \oplus 0 = S \quad (3.2)$$

として得られる。これらの式をもとに、2章で説明した偏光暗号フィルムを作製し、位相差フィルムによる暗号表示を実現している。

3.3. 通常の TN 液晶ディスプレイ

通常の TN 液晶ディスプレイの構造を Fig. 3.2 に示す。観察者側から偏光板、液晶パネル、偏光板、バックライトという構造を持つ。観察される輝度は液晶パネルでの偏光面の回転角度によって決まる。TN 液晶ディスプレイは黒色の表示状態では液晶分子が垂直に配向しているため、偏光面は変化しない。一方で白色の表示状態では液晶分子が 90 度ねじれた配向をしているため、直線偏光が入射されるとその偏光方向は液晶分子のねじれに沿って 90 度回転する[23]。また、黒色と白色の間の中間調のグレースケールでの表示では、0 度~90 度間の偏光方向の回転に応じて輝度が変化する。偏光の回転角度を α とすると、輝度は $\sin^2 \alpha$ で表すことができる。

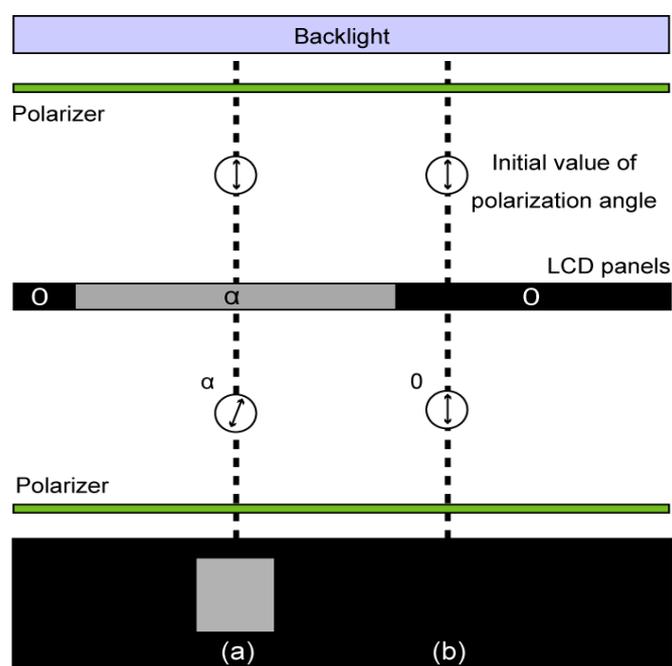


Fig.3.2. 通常の TN 型液晶ディスプレイの偏光変調.

3.4. 2層液晶ディスプレイによる偏光演算

先行研究である2層の液晶ディスプレイの表示方式を Fig. 3.3 に示す。2枚の液晶パネルを2枚の偏光板の間に間隔を設けて配置されている。2枚の液晶パネルには2章で説明した TN 液晶パネルを使用している。2枚の液晶パネルには白黒の2値画像を表示するとき、白色の表示状態では偏光面を90度回転させ、黒色の表示状態では偏光面を回転させない。前面と後面が黒の表示状態のときは偏光面を回転させないため、観察結果は黒色に再現される。前面が黒色、後面が白色の表示状態のときは偏光面を90度回転させることから、観察結果は白色になる。また前面が白色、後面が黒色の表示状態のときも偏光面を90度回転させるため、観察結果は白色になる。一方の液晶パネルのみ、白色の表示状態のときは前面と後面に関係なく白色が観察される。前面と後面が白色の表示状態のときは偏光面を90度ずつ回転させ、合計で偏光面を180度回転させることから、偏光面を回転させていない0度回転と同様に黒色が観察される。

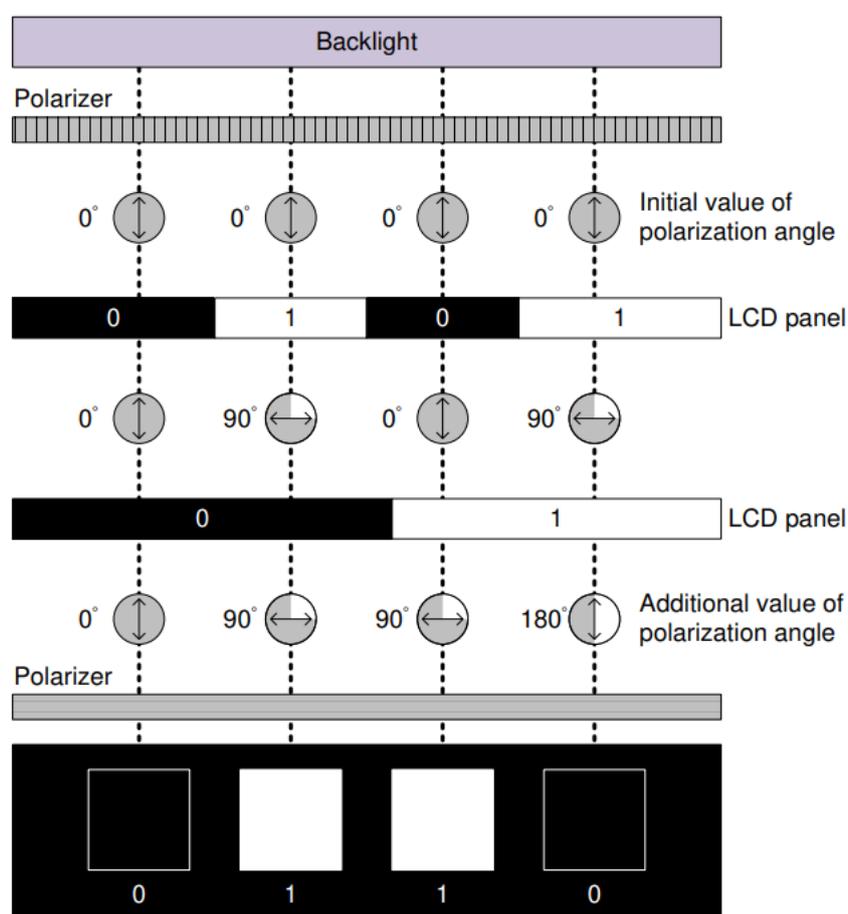


Fig.3.3. 2層 TN 型液晶ディスプレイの偏光変調.

3.4.1. 偏光演算型 2 層液晶ディスプレイによる暗号表示の原理

先行研究である偏光演算型 2 層液晶ディスプレイを用いた暗号表示の原理について述べる。偏光演算により、観察領域を限定する構造を Fig. 3.4 に示す。2 枚の液晶パネルの間には間隔を設けている。2 枚の液晶パネルに 2 値画像を表示するときは一方の液晶パネルに表示する画像をランダムドットパターンとすると、他方の液晶パネルに表示する画像は XOR 演算により暗号化される。空間符号化に暗号を用いて観察位置を限定するセキュアディスプレイ [24, 25] と同様に、図のように観察者から見て前面の液晶パネルに表示する画像の画素ピッチを、後面の液晶パネルに表示する画像の画素ピッチより縮小することで、偏光暗号が復号されて観察可能な位置を限定することができる。

後面と前面の液晶パネルに表示する画像の作製手法について述べる。2 値画像の画素値を 0, 1 で表す。後面と前面の液晶パネルに表示する画像の画素値をそれぞれ $r_{k,l}$, $f_{k,l}$ とし、視点位置で観察される秘密画像 S の画素値を $S_{k,l}$ とすると、

$$r_{k,l}, f_{k,l}, S_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.3)$$

で表すことができる。 (k, l) は画素の座標を表す。視点位置からは前面、後面の液晶パネルに表示する画像は同じ座標 (k, l) が重なって、秘密画像 S の座標 (k, l) が観察されるとすると、

$$r_{k,l} \oplus f_{k,l} = S_{k,l} \quad (3.4)$$

と表すことができる。 \oplus は XOR 演算を表す。

一方の液晶パネルに表示する画像はランダムドットパターンとするから、ここでは前面をランダムドットとすると、前面のランダムドットの座標 (k, l) の画素値 $f_{k,l}$ と秘密画像 S の座標 (k, l) の画素値 $S_{k,l}$ から、後面に表示する画像の画素値 $r_{k,l}$ が一意に定まる。ランダムドットパターンは自由に設定できることから、自由度はランダムドットパターンの画素数と等しい。この画像生成の手順に従って、2 章で説明した 2 層液晶ディスプレイによる暗号表示で使用した表示画像を作製し、暗号表示を実現している。

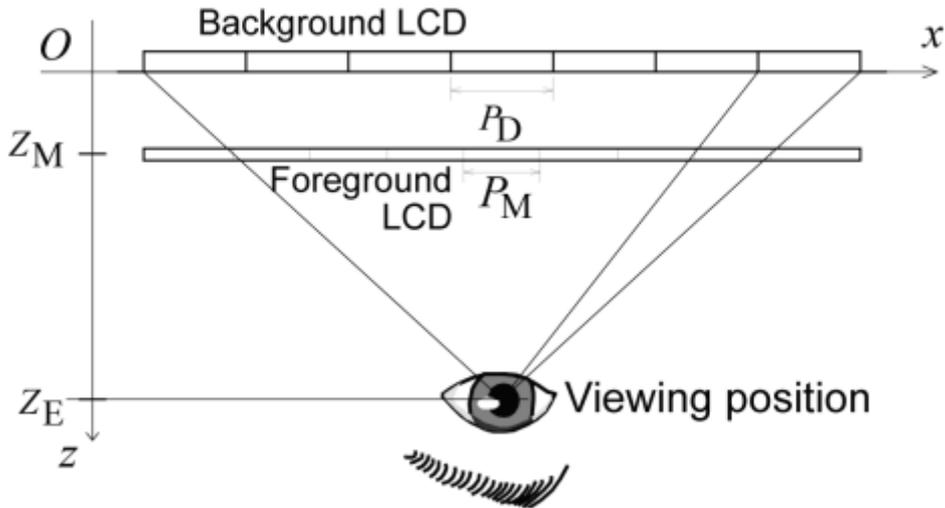


Fig.3.4. 2層液晶ディスプレイによる暗号表示するための構成.

3.4.2. 偏光演算型2層液晶ディスプレイによる2視点表示の原理

先行研究である偏光演算型2層液晶ディスプレイを用いた2視点表示の原理について述べる. 偏光演算により, 2視点表示を行うための構造を Fig. 3.5 に示す. 2枚の液晶パネルの間には間隔を設けている. 後面の液晶パネルに表示される画像の画素値に応じて偏光変調された光が前面の液晶パネルにおいて再度偏光変調された後, 左右の観察位置に到達する. 前面の液晶パネルに表示する画像の画素ピッチと表示位置を調節することで, 後面の液晶パネルの各画素が, 前面の液晶パネルに表示する画像で隣り合う画素で変調されるように配置することができる. 左側の観察位置に提示する画像と右側の観察位置に提示する画像の画素値を後面と前面の液晶パネルに配分することで, 2視点表示が可能になる.

後面と前面の液晶パネルに表示する画像の作製手法について述べる. 2値画像の画素値を $0, 1$ で表す. 後面と前面の液晶パネルに表示する画像の画素値をそれぞれ $c_{k,l}, d_{k,l}$ とし, 左右の視点位置で観察される画像の画素値を $L_{k,l}, R_{k,l}$ とすると,

$$c_{k,l}, d_{k,l}, L_{k,l}, R_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.5)$$

で表すことができる. (k, l) は画素の座標を表す. 左の視点位置からは後面, 前面の液晶パネルに表示する画像は同じ座標 (k, l) が重なり, 右の視点位置からは前面の表示画像が1画素隣にずれるため, 次の式で表すことができる.

$$L_{k,l} = c_{k,l} \oplus d_{k,l} \quad (3.6)$$

$$R_{k,l} = c_{k,l} \oplus d_{k+1,l} \quad (3.7)$$

と表すことができる。⊕は XOR 演算を表す。2章で説明した2層液晶ディスプレイによる2視点表示では、この画素値の関係式を満たすように前面と後面に表示する画像の画素値を求め、表示画像を作製し、2視点表示を実現している。

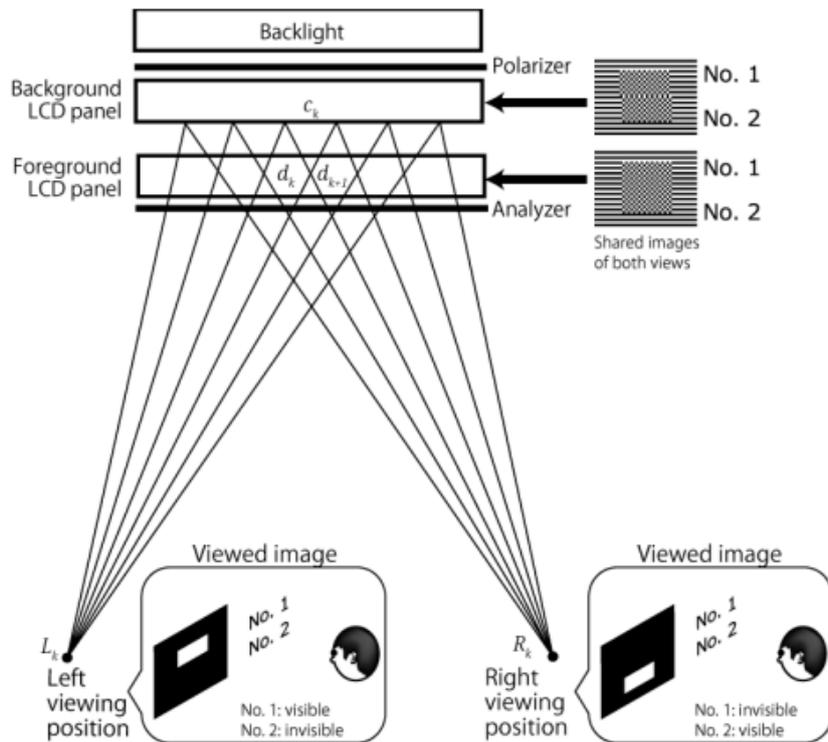


Fig. 3.5. 2層液晶ディスプレイによる2視点表示の構成.

3.5. 3層液晶ディスプレイの偏光演算の原理

本研究のために作製した3層液晶ディスプレイの表示方式を Fig. 3.6 に示す。3枚の液晶パネルを2枚の偏光板の間に1cmの間隔を設けて配置している。3枚の液晶パネルには2章で説明したTN液晶パネルを使用している。先行研究である2層液晶ディスプレイに白黒の2値画像を表示した結果から、各液晶パネルでの偏光回転角の和で観察される明暗が決まることから、3枚の液晶パネルに白黒の2値画像を表示したときの観察結果は、3枚の液晶パネルでの偏光回転角の和で考える。

3枚の液晶パネルをすべて黒色の表示状態とするとき、それぞれの液晶パネルでの偏光回転角は0度であり、3枚の液晶パネルによる偏光回転角の和も0度になることから、観察結果は黒色になる。1枚の液晶パネルのみ、白色の表示状態とするときは偏光回転角の和は90度になることから、観察結果は白色になる。2枚の液晶パネルに白色、1枚は黒色の表示状態とするときは偏光回転角の和が180度になるため、観察結果は暗く

なる。3枚とも白色の表示状態とするととき、偏光回転角の和が270度になるため、明るい画像が観察されることが考えられる。よって、3枚の液晶パネルのうち、 n 枚だけ白色の表示状態とすると3枚の液晶パネルによる偏光回転角の和は $90 \times n$ 度と考えることができる。偏光回転角の和で、観察される画像の明暗が決まるため、 n 枚の白色画像を前面、中面、および後面のどの液晶パネルに表示しているかは観察結果の明暗に影響しない。

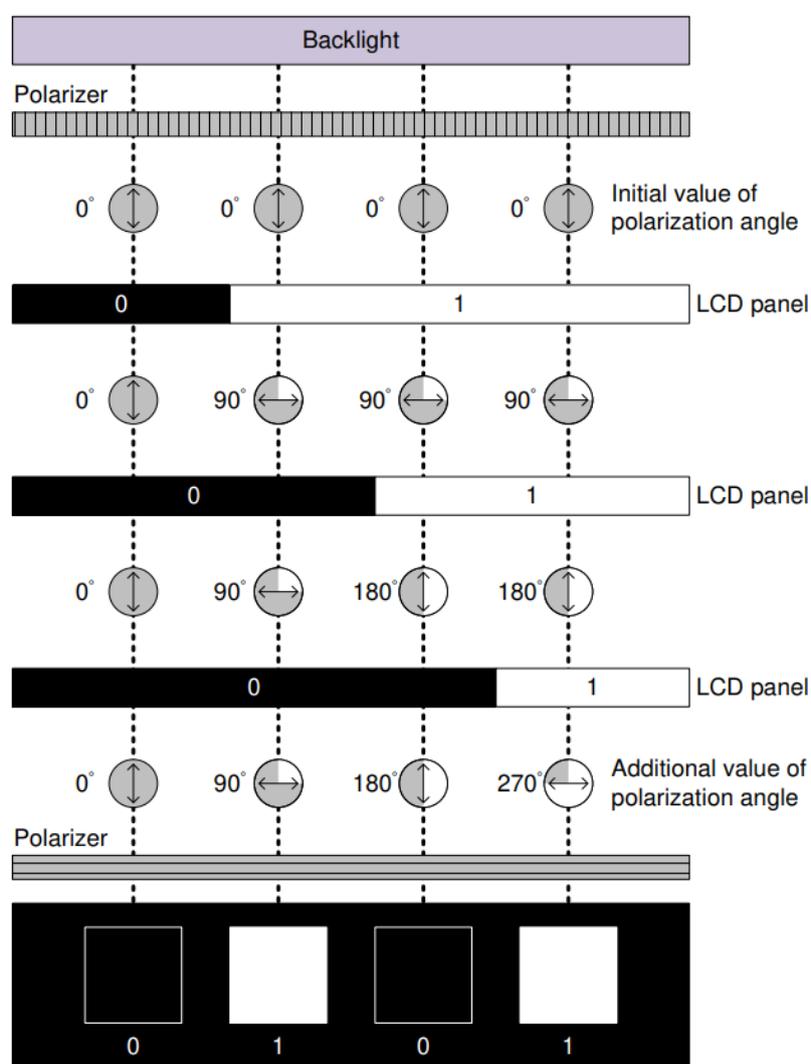


Fig. 3.6. 3層液晶ディスプレイによる偏光変調.

3.6. 3層液晶ディスプレイによる暗号表示

3層液晶ディスプレイを用いて、偏光演算を利用した2枚の任意画像を鍵として用いるセキュリティ表示を実現するための構造を Fig. 3.7 に示す。3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とし、表示する画像の画素値を0,1で表すとき、観察される画像の

画素値は 3 枚の液晶パネルの偏光演算によって得られる。後面、中面および前面の液晶パネルに上に表示する画像の画素値をそれぞれ $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ で表す。偏光は $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ で偏光変調さる。この偏光変調の結果が正面の視点位置で観察される秘密画像の画素値 $E_{k,l}$ として得られる。秘密画像と秘密画像はどちらも 2 値画像であることから、

$$r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l}, E_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.8)$$

と表すことができる。

秘密画像の画素値 $E_{k,l}$ は 3 枚の液晶パネルによる偏光演算の結果で表すことができるため、以下の式で表すことができる。

$$E_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.9)$$

ここで \oplus は XOR 演算を表す。画素値が決まっているのは秘密画像の画素値 $E_{k,l}$ のみであることから、 $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ のうち、2 つは自由に設定することができる。

暗号表示を行うための表示画像を Fig. 3.8 に示す。ここでは後面と中面の液晶パネルに表示する画像を異なるランダムドットパターンとした。密画像の画素値 $E_{k,l}$ 、後面と中面の液晶パネルに表示するランダムドットパターンの画素値 $r_{k,l}$, $m_{k,l}$ から式(3.9)を用いて、前面に表示する画像の画素値 $f_{k,l}$ を求めることで、暗号化された表示画像を生成することができる。それぞれの表示画像からは秘密画像を判読できない。

偏光演算型 3 層液晶ディスプレイを用いて、暗号表示を行った結果を Fig. 3.9 に示す。表示画像の画素に基づき観察距離 50cm で正面と左右に 15cm 離れた位置で撮影した。正面からのみ秘密画像が観察され、正面以外からはスクランブルされた画像が観察され、秘密画像は判読できない。ディスプレイの積層間隔は 1cm とし、表示画像の画素サイズに関しては、中面、後面に表示する画像を前面に表示する画像の 1.02 倍、1.04 倍とした設定した観察位置である正面 50cm と、上下左右に 15cm 離れた位置から撮影した。

表示画像は 30×60 画素であり、2 枚のランダムドットパターンの自由度は $(30 \times 60)^2$ である。2 層液晶ディスプレイで同様の暗号表示を行った場合の自由度は 30×60 であり、液晶パネルを 3 層にしたことで暗号の強度が上がる。

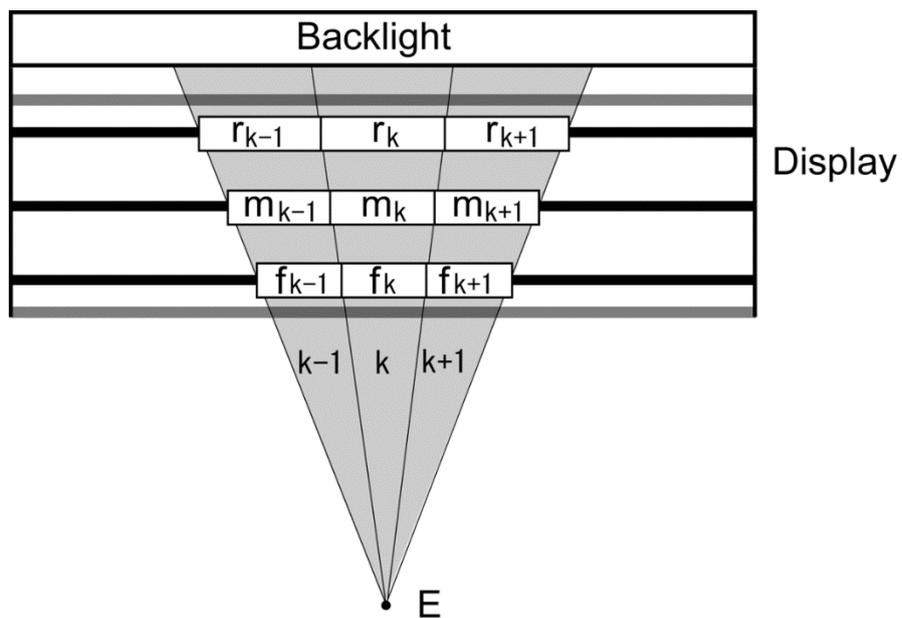


Fig. 3.7. 3層の液晶パネルに表示した画像の画素値の位置関係.



Fig. 3.8. 3層液晶ディスプレイによる暗号表示に用いる表示画像.

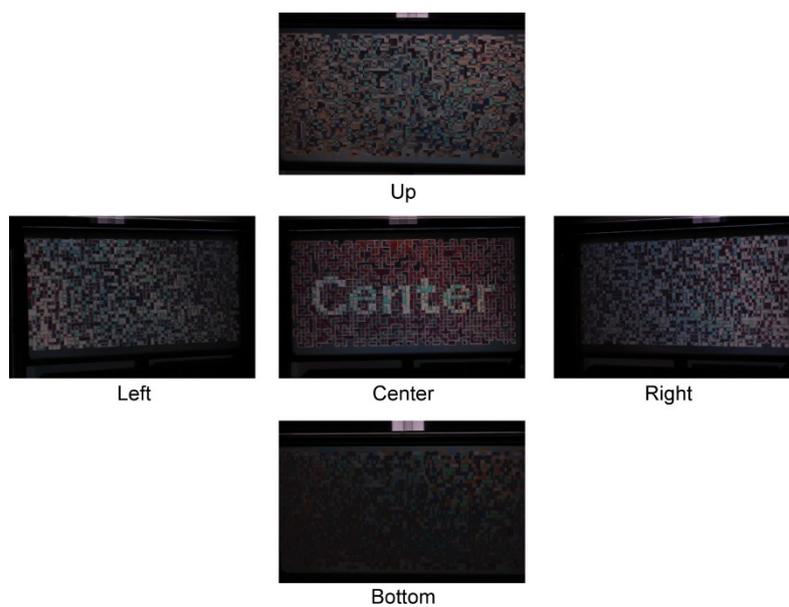


Fig. 3.9. 3層液晶ディスプレイによる暗号表示の観察結果.

3.7. 3層液晶ディスプレイによる多視点表示

これまで3層液晶ディスプレイによる3視点表示において、表示画像の画素値を決定論的に求める手法は報告されていない。ここでは任意の方向への3視点表示を実現するため、3方向に提示する画像の画素値から3枚の表示画像の画素値を求めるための論理式を明らかにする。

3.7.1. 水平方向の3視点表示

偏光演算を用いて水平方向の3視点の暗号表示を実現するための構造を Fig. 3.10 に示す。中央の観察位置では後面、中面、および前面に表示する画像の同じ座標の画素で偏光変調された結果が観察される。左の観察位置では中央の観察位置と比較し、中面は同じ画素、後面は1画素だけ右側、前面は1画素だけ左側を通過して偏光変調された結果が観察される。右の観察位置は左の観察位置と逆の関係になる。

3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とし、表示画像の画素値を0,1で表すとき、3方向で観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られる。後面、中面および前面の液晶パネルに上に表示する画像の画素値をそれぞれ $r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l}$ で表す。左右と中央の視点位置で観察される画像の画素値を $L_{k,l}, C_{k,l}, R_{k,l}$ と表すと、それぞれの画素値を

$$r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l}, L_{k,l}, C_{k,l}, R_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.10)$$

と表す。

3方向に表示画像の画素値 $L_{k,l}, C_{k,l}, R_{k,l}$ は3枚の液晶パネルによる偏光演算の結果で表すことができるため、以下の式で表すことができる。

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (3.11)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.12)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (3.13)$$

\oplus は XOR 演算を表す。3方向の視点位置から観察される画像の画素値から、3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求めるため、式(3.11)-(3.13)の連立方程式を $r_{k,l}, m_{k,l}$ および $f_{k,l}$ について解く。

$$(3.11) \oplus (3.13)$$

$$L_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.14)$$

$m_{k,l}$ の値に関わらず、XOR 演算において、 $m_{k,l} \oplus m_{k,l} = 0$ となるため、同じ項の和をつくることで、式から項を減らすことができる。

よって、式(3.14)は次のように表すことができる。

$$L_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.15)$$

同様に

$$(3.12) \oplus (3.13)$$

$$C_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (3.16)$$

$$(3.11) \oplus (3.13)$$

$$L_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (3.17)$$

$$(3.16)_{k+1}$$

$$C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (3.18)$$

$$(3.15) \oplus (3.18)$$

$$\begin{aligned} & L_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$r_{k,l} \oplus r_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l} = 0$ となるため，式(3.19)は

$$f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} = L_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \quad (3.20)$$

と表すことができる．

式(3.20)が得られたことから，3方向に提示する3枚の画像の画素値から，前面の液晶パネルに表示する画素値が定まることが明らかになった．同様に， $r_{k,1}$ ， $m_{k,1}$ について解く．

$$r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+2,l} = L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} \quad (3.21)$$

$$m_k \oplus m_{k+2} = L_{k+1} \oplus C_k \oplus C_{k+2} \oplus R_{k+1} \quad (3.22)$$

式(3.20)-(3.22)が得られたことから，水平3方向の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．

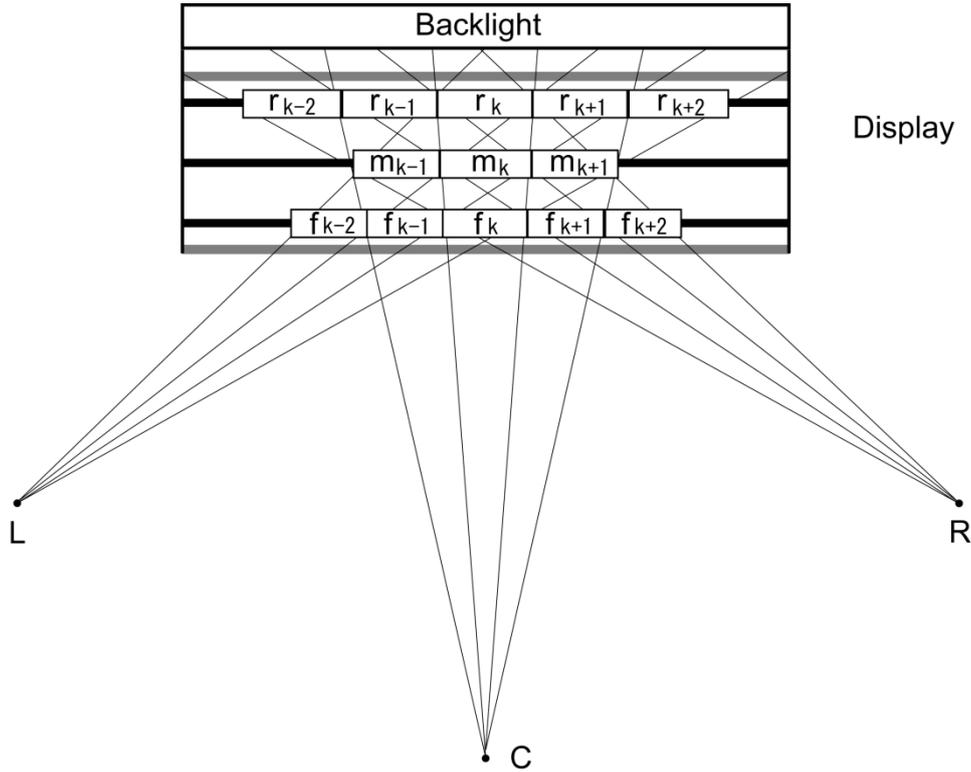


Fig. 3.10. 3 視点表示の視点位置と復号される画素の関係.

3.7.2. 垂直方向の 3 視点表示

偏光演算を用いて垂直方向の 3 視点表示を実現するための構造を Fig. 3.11 に示す. 各視点位置で観察したときに重なる表示画像の画素の位置関係は Fig. 3.11 の通りとなる. 3 枚の液晶パネルに表示する画像を 2 値画像とし, 表示画像の画素値を 0,1 で表すとき, 3 方向で観察される画像の画素値は 3 枚の液晶パネルの偏光演算によって得られる. 後面, 中面および前面の液晶パネルに上に表示する画像の画素値をそれぞれ $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ で表す. 上下と中央の視点位置で観察される画像の画素値を $U_{k,l}$, $C_{k,l}$, $B_{k,l}$ と表すと, それぞれの画素値は下記で表すことができる.

$$r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l}, U_{k,l}, C_{k,l}, B_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.23)$$

3 方向に表示画像の画素値 $U_{k,l}$, $C_{k,l}$, $B_{k,l}$ は 3 枚の液晶パネルによる偏光演算の結果で表すことができるため, 以下の式で表すことができる.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (3.24)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.25)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (3.26)$$

\oplus は XOR 演算を表す. 3 方向の視点位置から観察される画像の画素値から, 3 枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求めるため, 式(3.24)-(3.26)の連立方程式を $r_{k,l}$, $m_{k,l}$ および $f_{k,l}$ について解くと

$$r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} = U_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l+1} \quad (3.27)$$

$$m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} = U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+2} \oplus B_{k,l+1} \quad (3.28)$$

$$f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} = U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l} \quad (3.29)$$

が得られる. このことから, 垂直 3 方向の 3 視点表示において, 3 方向に提示する画像の画素値から, 3 枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった.

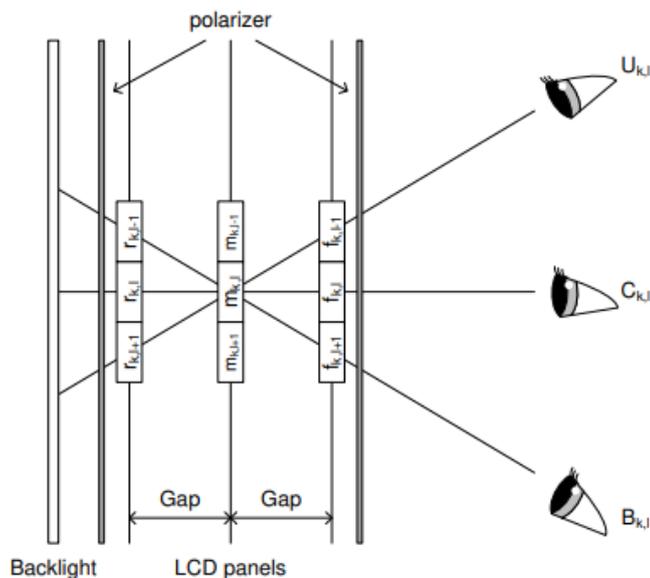


Fig. 3.11. 垂直方向の 3 視点表示の視点位置と復号される画素の関係.

3.7.3. 中央の視点位置を含む水平・垂直の 3 視点表示

視点位置と表示画像の画素の位置関係を Fig. 3.12 に示す. 3 枚の液晶パネルに表示する画像を 2 値画像とし, 表示画像の画素値を 0,1 で表す. 後面, 中面および前面の液晶パネルに上に表示する画像の画素値をそれぞれ $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ で表す. 各視点位置で観察される秘密画像の画素値を $U_{k,l}$, $L_{k,l}$, $C_{k,l}$, $R_{k,l}$, $B_{k,l}$ と表すと, それぞれの画素値は下記で表すことができる.

$$r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l}, U_{k,l}, L_{k,l}, C_{k,l}, R_{k,l}, B_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (3.30)$$

各視点位置で観察される画像の画素値 $U_{k,l}$, $L_{k,l}$, $C_{k,l}$, $R_{k,l}$, $B_{k,l}$ は 3 枚の液晶パネルによる偏光演算の結果で表すことができるため、以下の式で表すことができる。

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (3.31)$$

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (3.32)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3.33)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (3.34)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (3.35)$$

\oplus は XOR 演算を表す。ここでは隣り合う 3 方向の視点位置について検討するため、中央の視点位置を含むこととする。このときの 3 視点の組み合わせは(上, 左, 中央), (上, 中央, 右), (左, 中央, 下), (中央, 右, 下)の 4 通りになる。

上, 左, 中央の 3 視点表示の論理式を求めるため、式(3.31)-(3.33)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+2,l} \\ &= U_{k,l} \oplus U_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l-1} \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \\ &= U_{k,l} \oplus U_{k+2,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+2,l-1} \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l} \\ &= U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l} \end{aligned} \quad (3.38)$$

が得られる。このことから、上, 左, 中央の 3 視点表示において、3 方向に提示する画像の画素値から、3 枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった。

次に上, 中央, 右の 3 視点表示の論理式を求めるため、式(3.31), (3.33), (3.34)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus r_{k+2,l+2} \\ &= U_{k+1,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus C_{k+2,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (3.41)$$

が得られる．このことから，上，中央，右の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．

次に左，中央，下の3視点表示の論理式を求めるため，式(3.32), (3.33), (3.35)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \end{aligned} \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (3.44)$$

が得られる．このことから，左，中央，下の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．

最後に中央，右，下の3視点表示の論理式を求めるため，式(3.33)-(3.35)の連立方程式を解くと

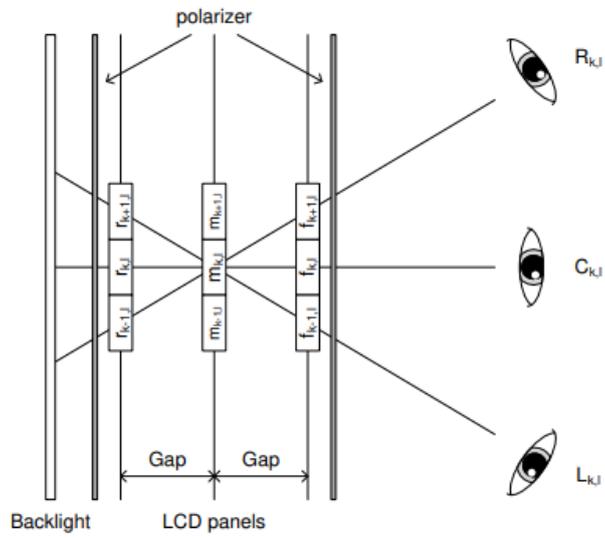
$$\begin{aligned} & r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \\ & = C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \\ & = C_{k,l+2} \oplus C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (3.46)$$

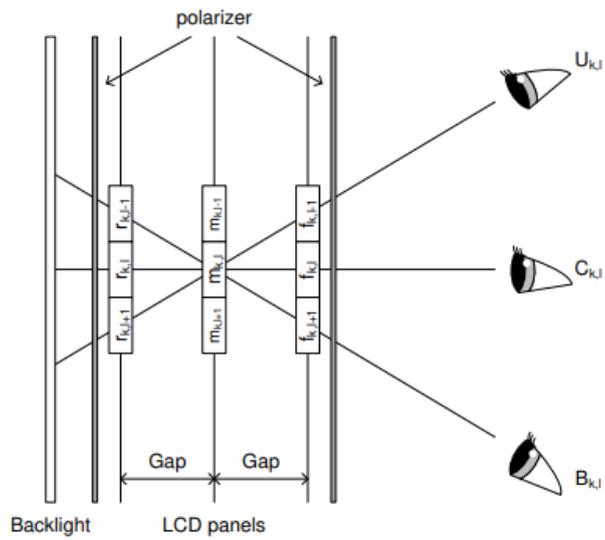
$$\begin{aligned} & f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \\ & = C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (3.47)$$

が得られる．このことから，中央，右，下の3視点表示において3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．

以上より，中央の視点位置を含む水平・垂直の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求めるための論理式の存在を明らかにした．



(a) 上から見た視点位置と画素の関係



(b) 横から見た視点位置と画素の関係

Fig. 3.12. 水平・垂直方向の3視点表示の視点位置と復号される画素の関係.

3.7.4. 中央の視点位置を含まない水平・垂直の3視点表示

ここでは中央の視点位置意を含まない3方向の3視点表示について検討する。このときの3視点の組み合わせは(上, 左, 右), (上, 左, 下), (上, 右, 下), (左, 右, 下)の4通りになる。

まず, 上, 左, 右の3視点表示の論理式を求めるため, 式(3.31), (3.32), (3.34)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\ & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l-1} \end{aligned} \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\ & = U_{k,l} \oplus U_{k+4,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+3,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+3,l-1} \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\ & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l+1} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus R_{k+3,l} \end{aligned} \quad (3.50)$$

が得られる。このことから, 上, 左, 右の3視点表示において, 3方向に提示する画像の画素値から, 3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった。

次に上, 左, 下の3視点表示の論理式を求めるため, 式(3.31), (3.32), (3.35)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\ & = U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\ & = U_{k,l} \oplus U_{k+2,l+2} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l+2} \oplus B_{k+2,l} \end{aligned} \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\ & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+2} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (3.53)$$

が得られる。このことから, 上, 左, 下の3視点表示において, 3方向に提示する画像の画素値から, 3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった。

次に上, 右, 下の3視点表示の論理式を求めるため, 式(3.31), (3.34), (3.35)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\ & = L_{k+2,l+1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \end{aligned} \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned}
& m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\
& = L_{k+1,l+1} \oplus L_{k+3,l-1} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+3,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+4,l} \quad (3.55)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\
& = L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus R_{k+2,l-1} \oplus R_{k+3,l} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \quad (3.56)
\end{aligned}$$

が得られる．このことから，上，右，下の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．

最後に，左，右，下の3視点表示の論理式を求めるため，式(3.32)，(3.34)，(3.35)の連立方程式を解くと

$$\begin{aligned}
& r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\
& = U_{k+2,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+2,l+1} \quad (3.57)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\
& = U_{k,l+2} \oplus U_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l+2} \quad (3.58)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\
& = U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+2} \quad (3.59)
\end{aligned}$$

が得られる．このことから，左，右，下の3視点表示において，3方向に提示する画像の画素値から，3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める論理式が存在することが明らかになった．以上より，中央の視点位置を含まない場合の水平・垂直の3視点表示においても論理式の存在を明らかにした．

3.8. 多段の偏光回転による着色

3.5項3層液晶ディスプレイの偏光演算の原理では，理想的な偏光演算の原理として述べたが，3.6項3層液晶ディスプレイによる暗号表示の結果として示した Fig. 3.9 からわかるように，白黒の2値画像を表示したときの観察は XOR 演算で明暗を表すことができているものの，3枚の液晶パネルで偏光面を 180 度回転させた黒色は赤みがかかり，270 度回転させた白色は緑がかった白色として再現されている．ここではこの着色の原因について議論する．

3.8.1. 偏光回転角と輝度の関係

3層の液晶ディスプレイの表示方式を Fig. 3.13 に示す． Fig. 3.14. (a)~(c) は前面，中面および後面の液晶パネルにそれぞれ白色の表示画像を表示したとき，ディスプレイで観察される偏光面を 90 度回転させた白色の波長スペクトルである．測定には分光放射輝度計 CS-2000(コニカミノルタ)を使用した． Fig. 3.14. (d)は測定した波長

スペクトルを比較した結果である。この結果より、3枚の液晶パネルのうち1枚の白色画像を表示するとき、どの液晶パネルに白色画像を表示した場合でも、観察される白色の波長スペクトルには差がないことがわかる。

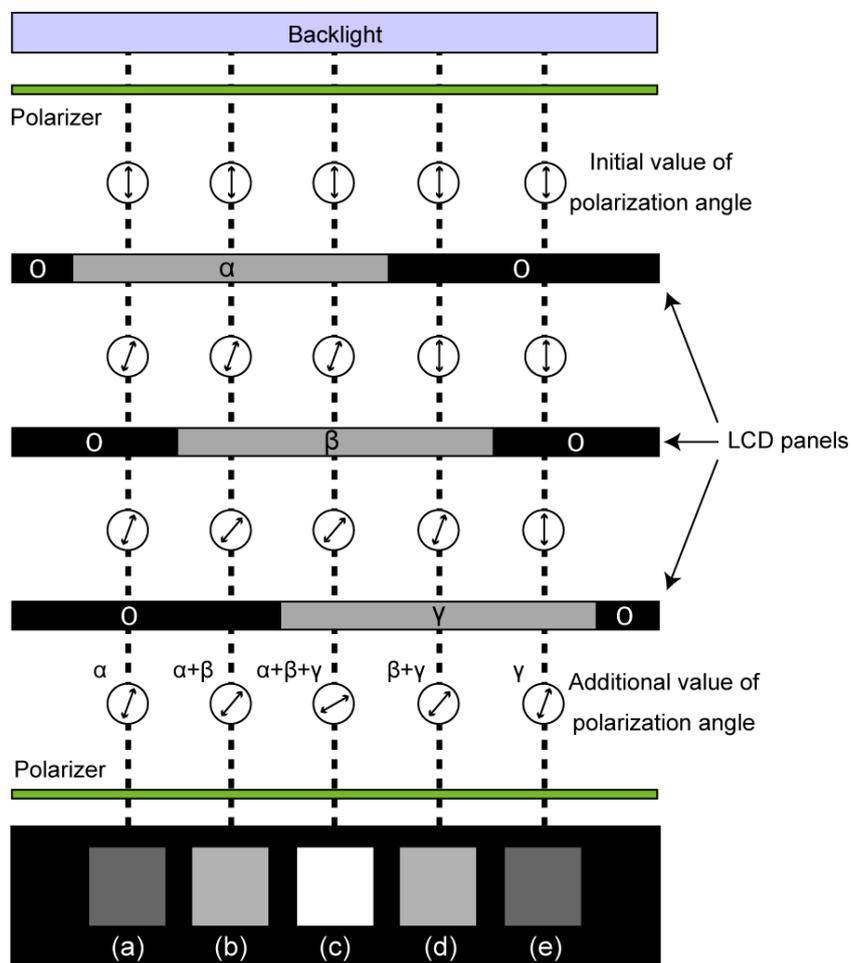
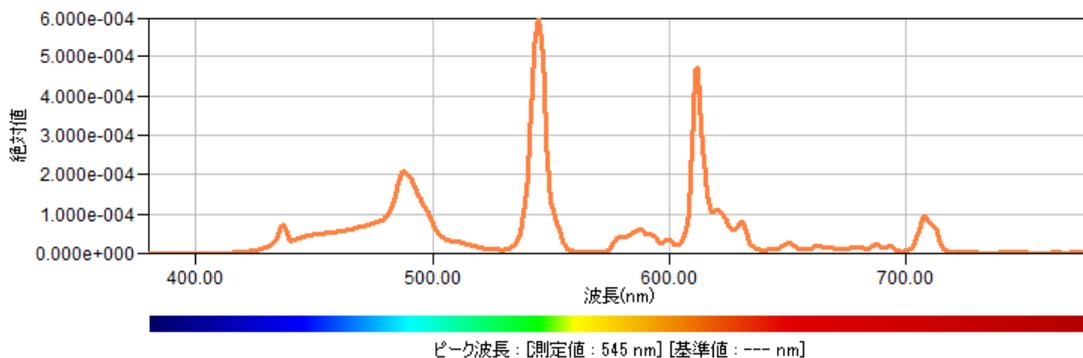
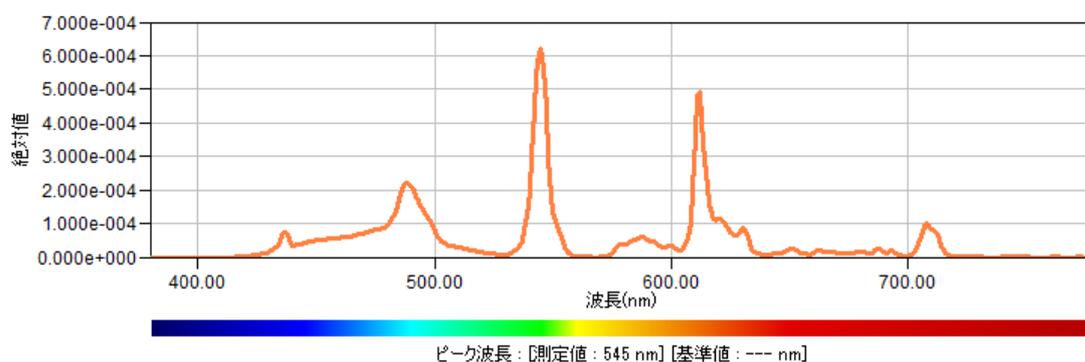


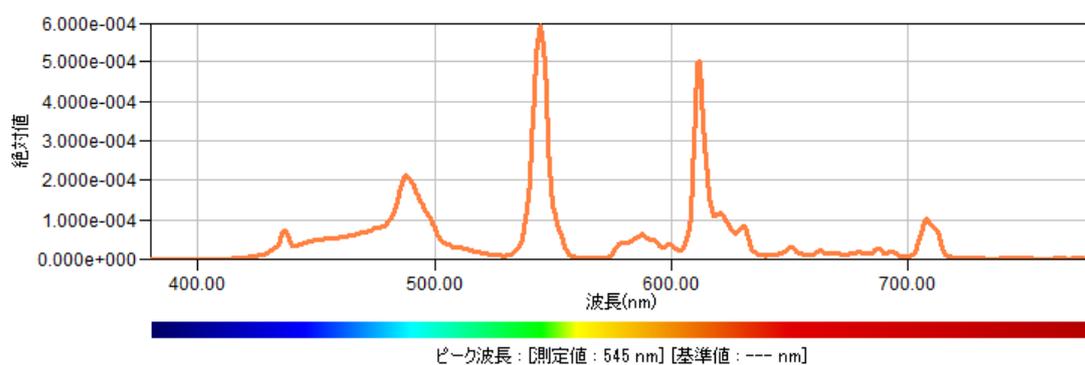
Fig. 3.13. 3層の液晶パネルによる偏光変調.



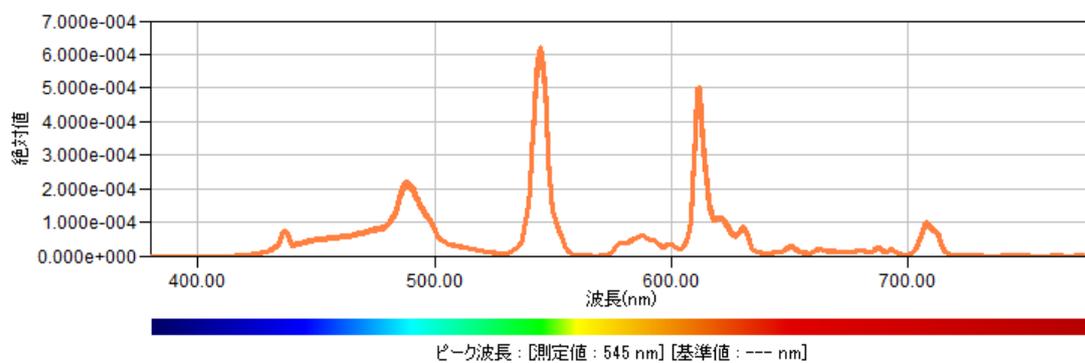
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.14. (a)は後面液晶パネルに白色の画像を表示, (b)は中面の液晶パネルに白色の画像を表示, (c)は前面の液晶パネルに白色の画像を表示した場合の波長スペクトル図.
(d)は(a),(b),(c)を比較した波長スペクトル図.

次に2枚の液晶パネルで偏光面を回転させた場合について議論する。2枚の液晶パネルで偏光角を変化させた場合、偏向の回転角は加算され、輝度も加算されると仮定する。複数枚の液晶パネルでの表示画像が重なった場合、得られる輝度について検証する。通常の液晶ディスプレイの場合、液晶パネルでの偏光面の回転角度を α とすると、輝度は $\sin^2\alpha$ で表されるため、2枚の液晶パネルを積層した場合、得られる輝度は2枚の液

晶パネルでの偏光面の回転角が加算されると仮定する。2枚の液晶パネルの偏光面の回転角をそれぞれ α, β とすると、次の式で輝度を表すことができる[26].

$$\sin^2(\alpha + \beta) \quad (3.60)$$

Fig. 3.13 に示した 3 層液晶ディスプレイを用いて、前面と後面の液晶パネルのみに画像を表示し、観察される画像の波長スペクトルを測定した。測定では、後面液晶パネルの輝度を一定にし、前面の輝度を変化させた。前面液晶パネルと後面液晶パネルのそれぞれの輝度と全体の輝度の関係を測定した結果を Fig. 3.15 に示す。この結果より、概ね前面液晶パネルと後面液晶パネルの偏光面の回転角度の和によって、輝度値を表すことができる。

次に、3枚の液晶パネルを用いたときの偏光回転角と理論式の関係について考える。3枚の液晶パネルの偏光面の回転角を α, β, γ とすると、次の式で輝度を表すことができる。

$$\sin^2(\alpha + \beta + \gamma) \quad (3.61)$$

式(3.61)に基づき、偏光面の回転角度の和から観察される輝度を算出する。白色の画像の透過率を変化させた表示画像を各液晶パネルに表示し、観察される画像の輝度を測定した後、輝度から式(3.61)を用いて、表示画像によって回転した偏光面の角度を求める。白色の画像を表示したときの偏光面の回転角を 90 度、黒色の画像を表示した場合の偏光面の回転角度を 0 度とし、中間調は白色の表示画像の透過率を 20%ずつ変化させたものを使用した。この画像をそれぞれの液晶パネルに表示して輝度を測定し、その輝度の値から回転角を算出した。その結果を Tab. 3.1 に示す。この結果もとに透過率と輝度値の関係を定義し、3枚の液晶パネルに透過率の異なる白色画像を重ねて表示したとき、観察される輝度の理論値を式(3.61)により算出した。実際に 3枚の液晶パネルに透過率の異なる白色画像を表示して輝度を測定した。この理論値と実測値を比較したものを Fig. 3.16 に示す。この結果から、偏光面の回転角度の和が大きくなるにつれ、輝度の理論値と実測値のずれが大きくなることがわかる。理論的には白色の表示画像を 2枚重ねると偏光面が 180度回転するため、黒色のみを表示した 0度回転と同じ黒色として観察され、白色の表示画像を 3枚重ねると偏光面が合計で 270度回転するため、1枚の液晶パネルに白色の表示する 90度回転と同じ白色が観察されるはずであるが、実際は着色が発生し、白色の表示画像を 2枚重ねたときは深紅色、3枚重ねたときは緑がかった白色の画像として観察された。このときの表示画像と観察された像の色の関係を Tab.3.2 に表わす。この着色が Fig. 3.16 で示している偏光回転と観察される輝度の関係で、回転角が大きくなるにつれ、理論値と実測値がずれた原因であると予

想される。

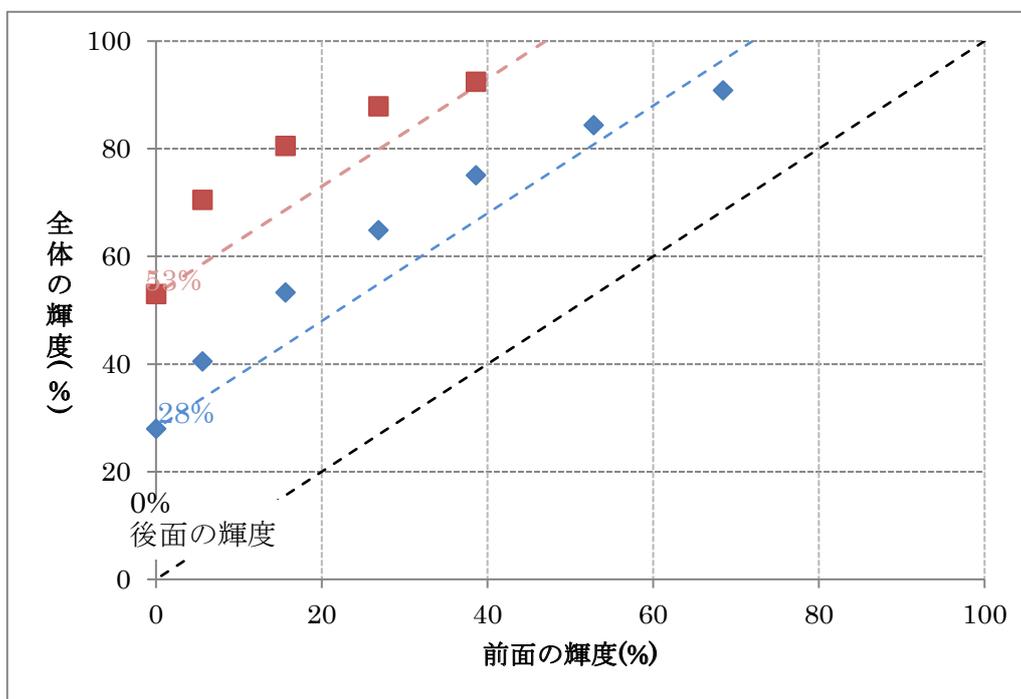


Fig. 3.15. 前面と後面の偏向角の変化量の加算と関係.

Tab. 3.1. 透過率と偏光面の回転角度の関係.

Transmittance (%)	Rotation angle(degree)			
	Theory	Rear(=α)	Center(=β)	Front(=γ)
100	0	0	0	0
80	26.6	25.5	22.5	22.9
60	39.2	41.2	38.6	37.9
40	50.8	62.2	55.8	56
20	63.4	83.7	80.5	82.7
0	90	90	90	90

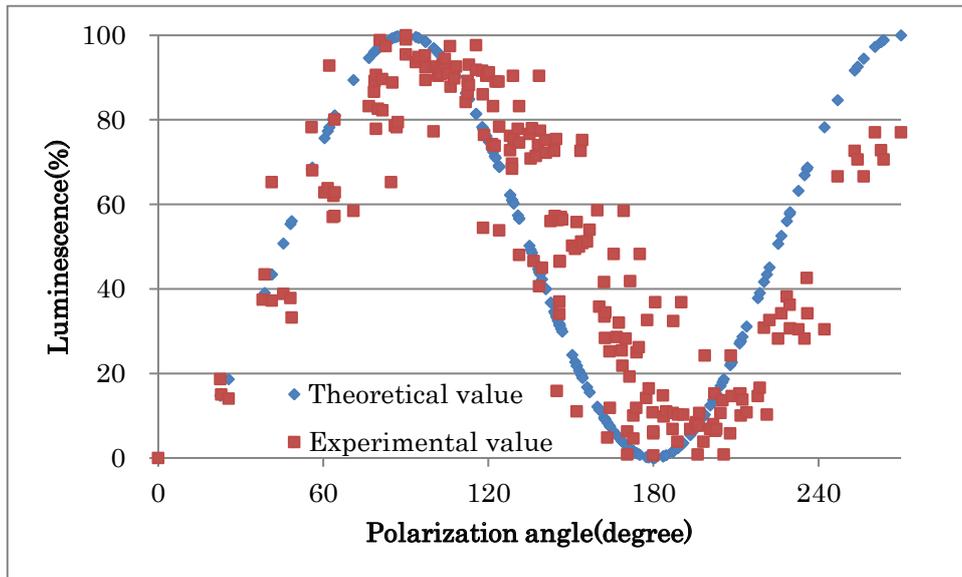


Fig.3.16. 偏光回転角の和と観察される輝度の関係.

Tab. 3.2. 理想的な偏光演算の結果と観察された画素値

Image	Image	Image	Theoretical	result
Black	Black	Black	Black	Black
Black	Black	White	White	White
Black	White	White	Black	Cardinal
White	White	White	White	Greenish White

3.8.2. 180度回転と270度回転の着色

次に白黒の2値画像を表示し、偏光面の0度、90度、180度、270度回転させたときの着色について検証する。Fig. 3.17に示すように、白黒の2値画像を3枚の液晶パネルに表示する。理想的な偏光演算が行われたときの観察結果はFig. 3.18に示す。実際にFig. 3.17の画像を3枚の液晶パネルに表示して、観察された画像をFig. 3.19となり、180度回転の黒色と270度回転の白色は着色が生じている。3枚の表示画像によって、8つに分かれた領域を分光放射輝度計CS-2000(コニカミノルタ)で測定した結果をFig. 3.20に示す。

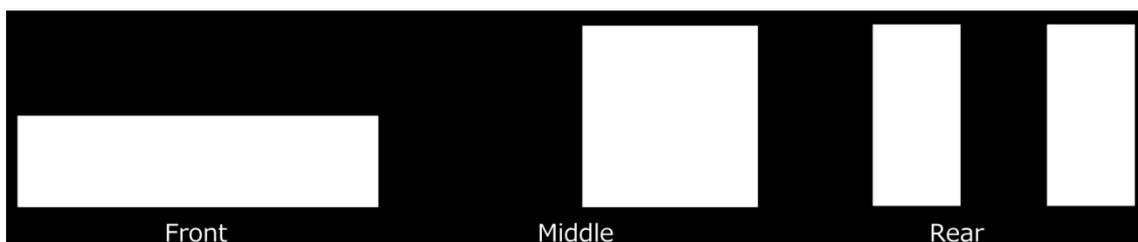


Fig. 3.17. 3層の液晶パネルに表示する白黒の2値画像.

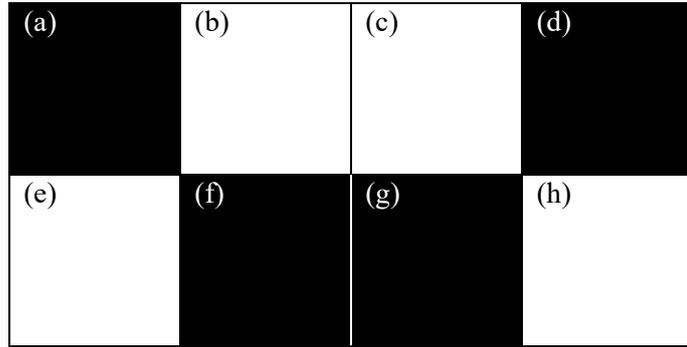


Fig. 3.18. 理想的な偏光演算における復号結果.

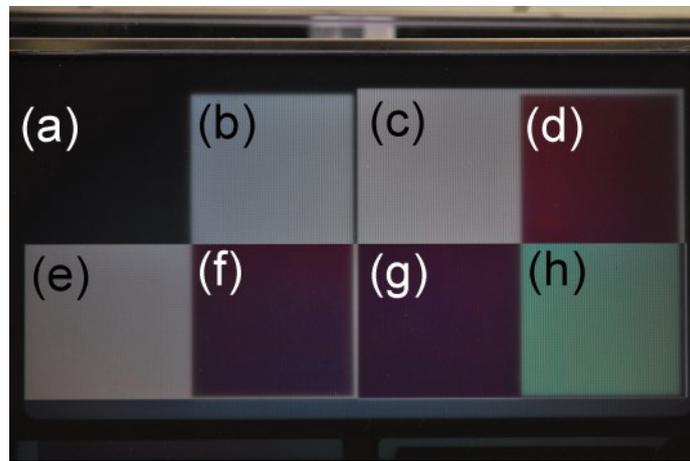
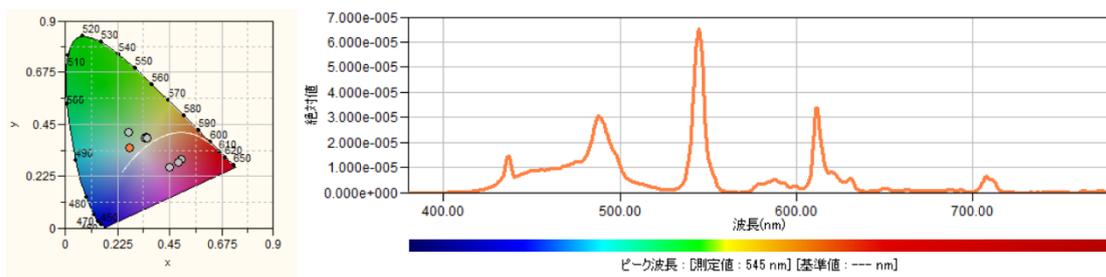
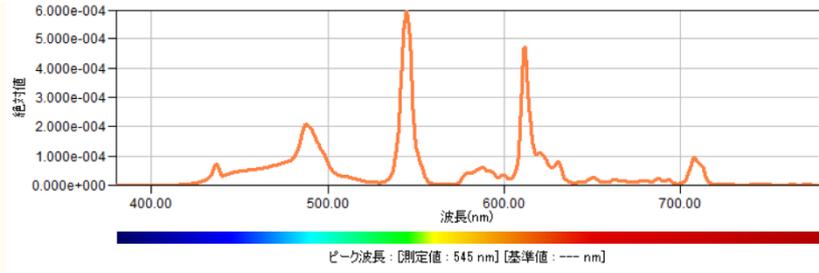
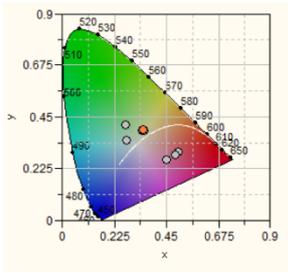


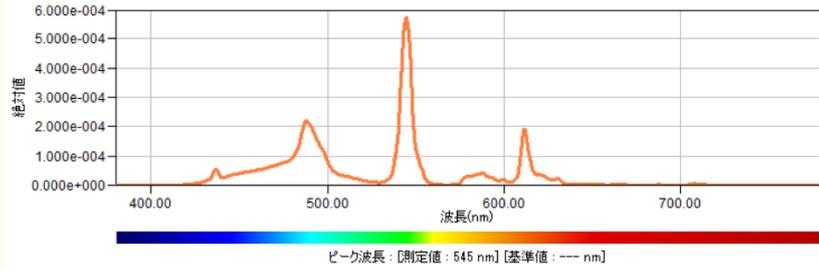
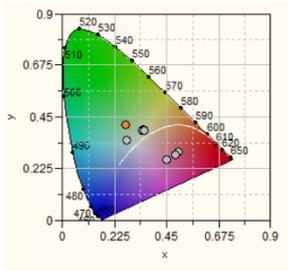
Fig. 3.19. 2値画像を3層液晶パネルに表示した結果.



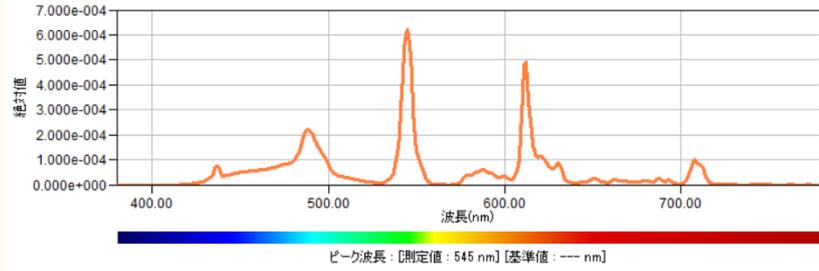
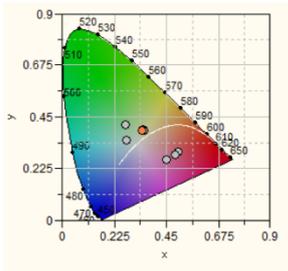
(a)



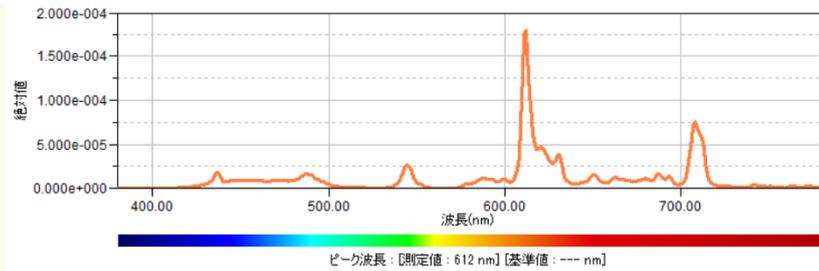
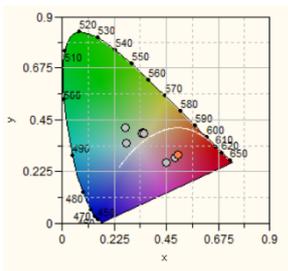
(b)



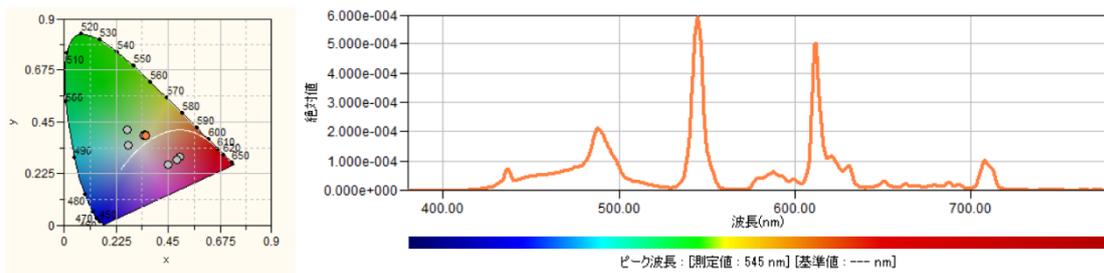
(c)



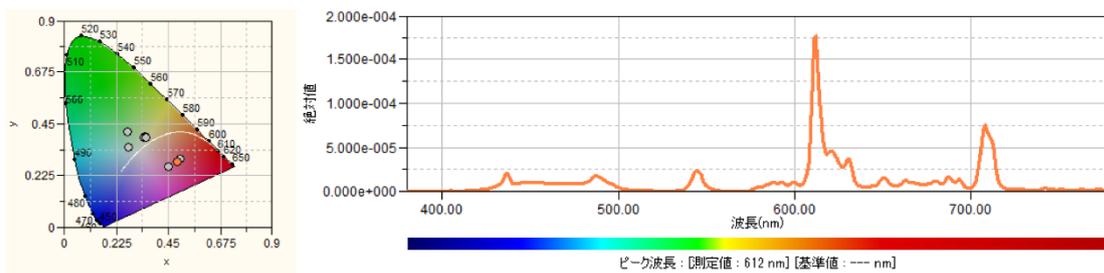
(d)



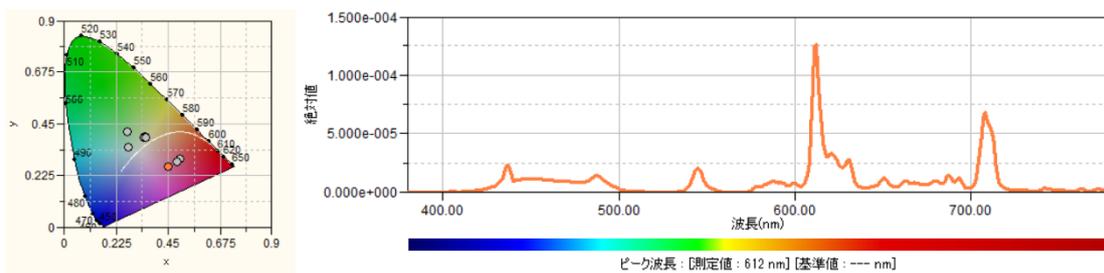
(e)



(f)



(g)



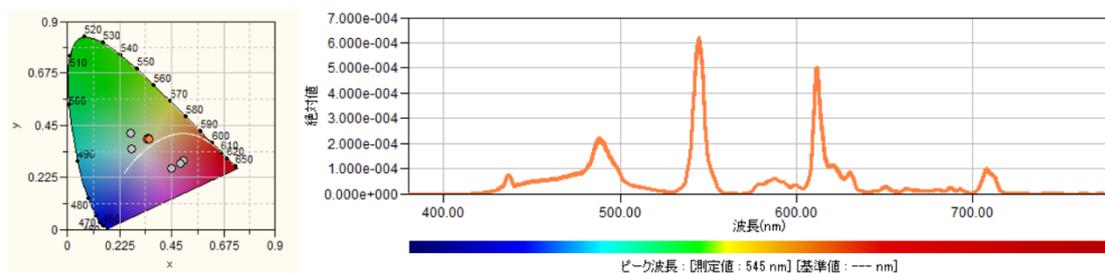
(h)

Fig. 3.20. 観察された画像のスペクトル図および色度図.

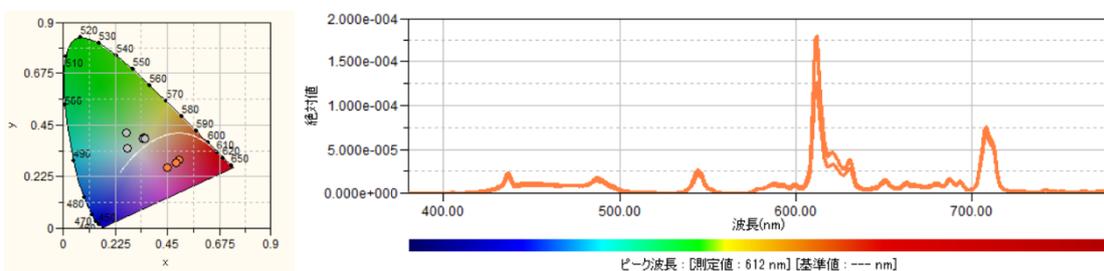
1枚の白色の表示画像と2枚の黒色の表示画像が重なっている領域，すなわち3枚の液晶パネルでの偏光面の回転角が90度になる領域の波長スペクトルおよび色度図である Fig. 3.20. (b),(c),(e)を比較したものを Fig. 3.21.(a)に示す．こちらは，波長スペクトルと色度図上で差はみられない．2枚の白色の表示画像と1枚の黒色の表示画像が重なっている領域，すなわち3枚の液晶パネルで偏光面の回転角の和が180度になる領域の波長スペクトルおよび色度図である Fig. 3.20.(d),(f),(g)を比較したものを Fig. 3.21.(b)に示す．着色が発生して深紅色に再現されているものの，2枚の白色画像を3枚の液晶パネルのうちどの2枚に表示しても，観察される深紅色に差がないことがわかる．

偏光面の回転角の和が0度と180度の波長スペクトルおよび色度図を比較するため，Fig. 3.10.(a),(d)を比較した Fig. 3.21.(c)を作成した．波長スペクトルから，0度回転と180度回転では600nm以上の波長領域が大きく異なっていることがわかる．また，偏光面

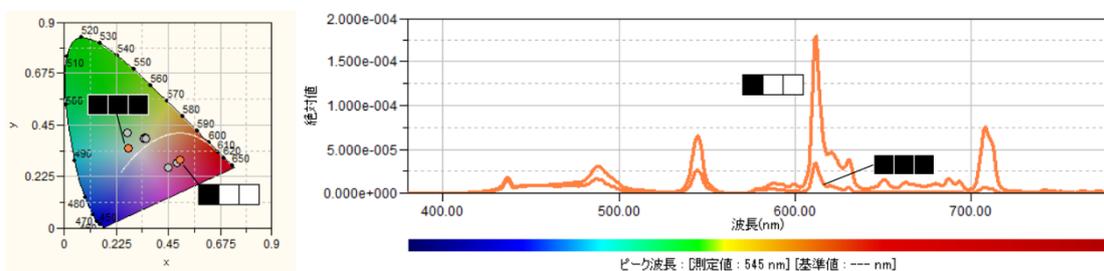
の回転角の和が 90 度と 270 度の波長スペクトルおよび色度図を比較するため、Fig.3.10.(a),(d)を比較した Fig. 3.11.(d)を作成した。ここでも波長スペクトルより、600nm 以上の波長領域で大きく異なっている。以上のことから、TN 液晶パネルの液晶分子のねじれに沿って偏光面が 90 度回転するとき、波長 600nm 以上の光は波長分散により、十分に 90 度の回転できておらず、通常の TN 液晶ディスプレイ同様に回転角の和が 0~90 度では回転角の誤差は認識できない程度であるものの、複数回の偏光回転では波長 600nm の赤色領域の回転角の遅れによる影響が認識できるようになったと考えられる。これにより、2 回の偏光回転では赤い光の回転角が 180 度に達していないため、深紅色に再現された。また、3 回の偏光回転では赤い光の回転角が 270 度に達していないため、赤が足りない白、すなわち緑がかった白に再現されている。



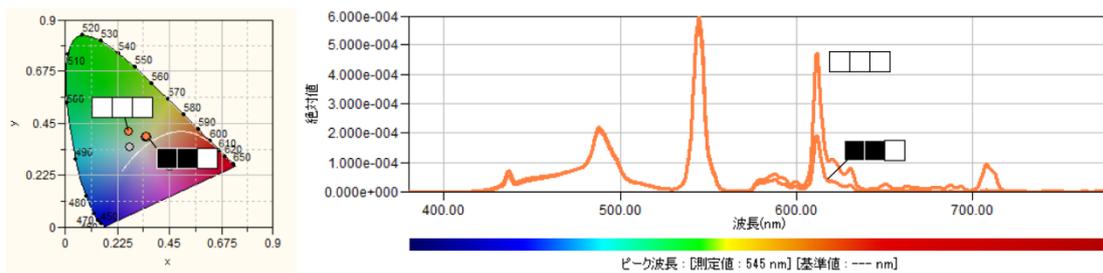
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3.21. スペクトルおよび色度図の比較.

3.8.3. 波長分散による着色の補正

ここでは赤い光の偏光回転角の不足分を深紅色の表示画像を重ねることで改善できないか検証する. 波長 612nm と 708nm の分光放射輝度に着目して検証を行った.

Tab. 3.3 では表示画像の組み合わせと各波長での分光放射輝度の比較をする. 白色の表示画像を W, 黒色の表示画像を B, 深紅色の表示画像を C で表す. たとえば, (B,C,W)は前面の液晶パネルに黒色の画像, 中面の液晶パネルに深紅色, 後面の液晶パネルに白色を表示した場合を表す. (B, B, B), (B, W, W), (C, W, W)のスペクトル図を比較した結果を Fig. 3.22 に示す. Fig. 3.22 より, 2 枚の白色の表示画像を積層した場合と, さらに深紅色の表示画像を積層した場合を比較すると深紅色の表示画像を重ねることによって黒色の表示状態のスペクトルに近づき, 612nm では 98%, 708nm では 56%改善した.

Tab. 3.3. 表示画像の組み合わせと各波長での分光放射輝度の比較.

	612nm	708nm
(B,W,W)	0.000178(w/sr · m ² · nm)	0.0000754(w/sr · m ² · nm)
(C,W,W)	0.0000679(w/sr · m ² · nm)	0.0000367(w/sr · m ² · nm)
(B,B,B)	0.0000343(w/sr · m ² · nm)	0.00000657(w/sr · m ² · nm)

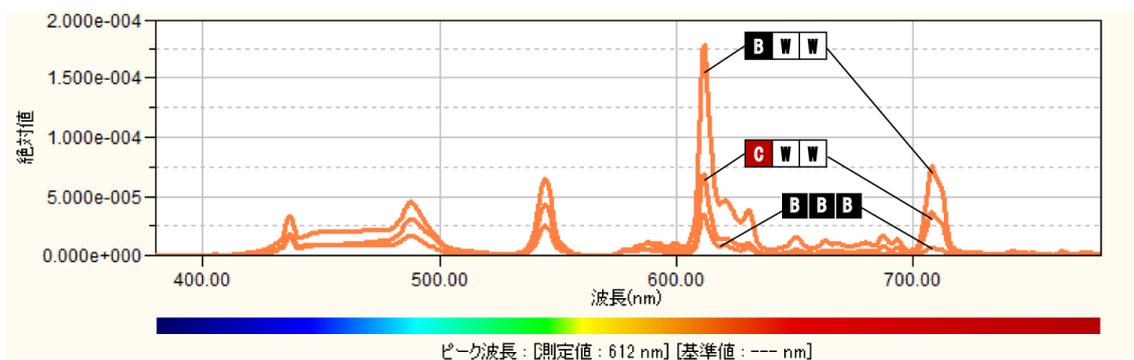


Fig. 3.22. 深紅色の表示画像による着色の改善.

3.9. おわりに

本章では、3層液晶ディスプレイによる偏光演算の原理について述べるため、初めに先行研究である位相差フィルムによる暗号表示の原理と2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示について詳しく述べた。次に3層液晶ディスプレイの構成と偏光演算について記し、白黒の2値画像を表示したときの偏光演算の結果として、観察される画像の明暗をXOR演算で表すことができることを明らかにした。これをもとに3層液晶ディスプレイによる暗号表示の手法を明らかにし、さらに本論文で解決したい課題の1つである3視点表示における3方向に提示する画像の画素値から、3枚の液晶ディスプレイに表示する画像の画素値を求める論理式の存在を明らかにした。

180度の偏光回転と270度偏光回転で生じる着色の原因が白色の表示状態で赤い光の回転角が90度に達していないことを確認し、180度回転で観察される深紅色に似せた色の画像を重ねることで、赤い光の回転不足を補正した。本研究で作製した3層液晶ディスプレイでは偏光面を0~270度の範囲で回転させ、回転角が大きくなるにつれ、着色が目立ったことから、1/2波長板を使用し、-90~180度の範囲で偏光面を回転させることで着色を抑える効果が期待できる。ただし、この3層液晶ディスプレイの液晶パネル間に1/2波長板を挿入した場合は表示画像と観察される画像の明暗が反転することが予想されるため、直行配置の2枚の偏光板を平行に配置するなどの対策が必要と考えられる。

第4章 表示画像の切り替えによる表示機能の多様化

4.1. はじめに

本章では，本論文で解決したい課題の 1 つである単一デバイスによる多機能表示について述べる．本研究のために作製した 3 層液晶ディスプレイを用いて，機構の変更を必要とせず，3 枚の液晶パネルに表示する画像を切り替えることで可能になった様々な表示機能について述べる．

通常のディスプレイと同様に 2D 表示を行い，更に立体表示，セキュリティ表示を行った結果について記す．また，第 3 章で明らかにした 3 視点表示の論理式をもとに，3 視点表示を実現するための表示画像を作製し，実際に 3 層液晶ディスプレイに表示して，設定した視点位置からディスプレイを観察する．

4.2. 2D 表示

2D 表示を可能にする表示画像を Fig. 4.1 に示す. 前面の液晶パネルには 2D という文字を表示しており, 中面と後面の液晶パネルには何も表示していない. 観察された画像は Fig. 4.2 に示す. 3 枚の液晶パネルを積層したディスプレイでも, 通常のディスプレイと同様な 2D 表示が可能である. また, 第 3 章で 1 枚の白色画像をどの液晶パネルに表示しても, 観察結果の明暗は変化しないことと同様に, 表示する液晶パネルを変えても, 2D 表示が可能である. このとき, 積層間隔 1cm によって奥行きが変化して観察される.

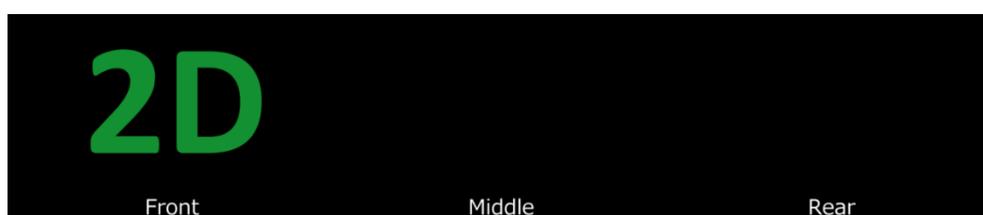


Fig. 4.1. 2D 表示を可能にする表示画像.

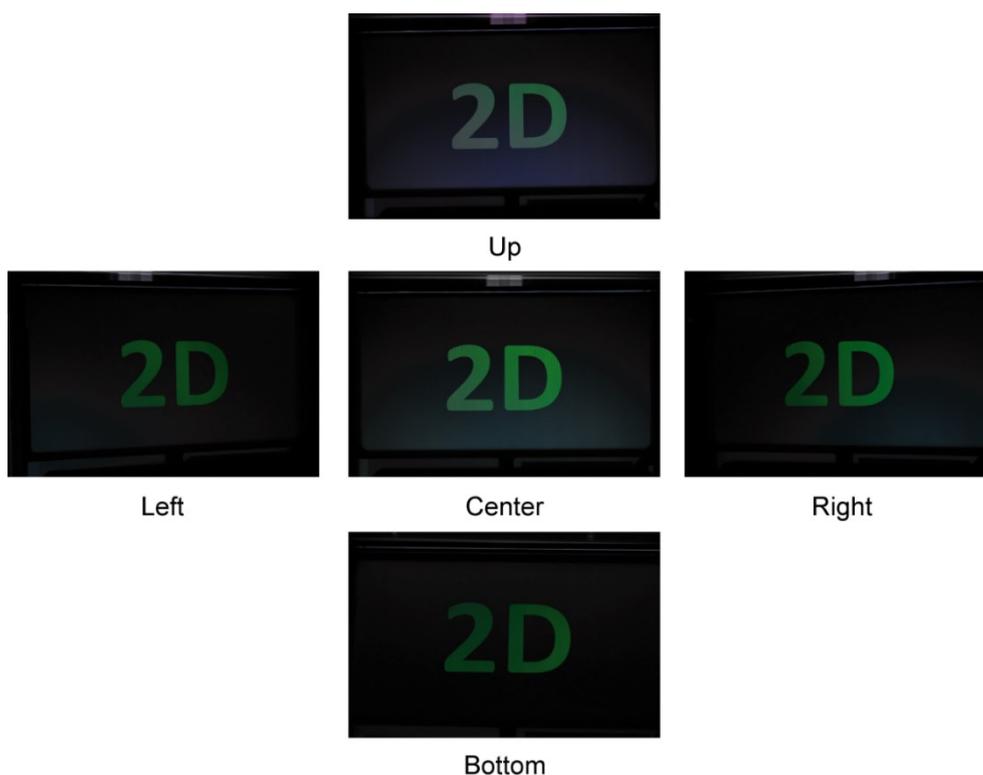


Fig. 4.2. 2D 表示の観察結果.

4.3. 立体表示

3D 表示の歴史は古く、これまでに様々な 3D 表示方式が提案されている。我々が奥行きを知覚する要因には様々なものがあり、心理的要因及び生理的要因の 2 種類の要因に大別される[27, 28].

心理的要因

心理的要因は、相対的な大きさ／リニアパースペクティブ／隠蔽／模様の勾配／陰影に細分される。心理的要因は絵画の手法として奥行き表現に用いられることが多い。

(a) 相対的な大きさ

同じサイズの複数の対象が網膜像に移っている場合、網膜像の大きいほうがより近いと知覚される。ただし、対象のサイズに関する知識がなければ作用しない。

(b) リニアパースペクティブ

景色が後方の一点に収束することで奥行きを判断する、経験的な手がかりの 1 つ。

(c) 隠蔽

物体の重なりによって前後関係の情報が得られる。後方にある物体は、前方にある物体によって遮られる。

(d) 模様の勾配

より遠くの距離になるほど物体は密になる。

(e) 陰影

日常生活において、基本的に光源は上方にある。そのため、影が対象の下側にあれば膨らみと判断し、影が上側にあれば凹状に見える。効果は余り強くない。

生理的要因

もう 1 つの要因である生理的要因には、両眼視差／輻輳／調節／運動視差の 4 種類が存在する。

(a) 両眼視差

左右の網膜像の相対的な位置ずれの程度から、奥行きを判断する。

(b) 運動視差

単眼であっても、物体が運動しているか観察者が移動することで、両眼視差と同様の効果が得られる。

(c) 調節

水晶体のピント調節機構を担う毛様体筋の緊張の変化から奥行きを判断する。

(d) 輻輳

対象に視線を交差させる両眼の動き。物体が近いほど輻輳角が大きくなる。

4.3.1. マルチレイヤー表示

マルチレイヤー表示とは、異なる層に像を表示することで奥行きが知覚される立体表示である。マルチレイヤー表示を可能にする表示画像を Fig. 4.3 に示す。前面、中面、後面の液晶パネルにはそれぞれ 1,2,3 という数字を表示する。観察された結果を Fig. 4.4 に示す。覗き込んだ観察位置からは、正面から観察したときと比較すると視差の影響により、上下の観察位置では数字の並びが傾き、左右の観察位置からは数字の間隔が変化していることから奥行きが確認できる。

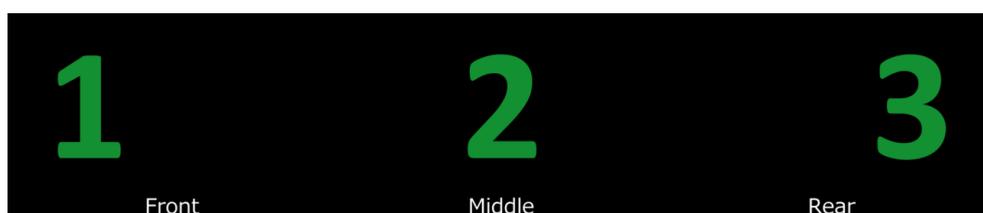


Fig. 4.3. マルチレイヤー表示を可能にする表示画像.



Fig. 4.4. マルチレイヤー表示の観察結果.

4.3.2. DFD 表示

DFD 表示方式とは、同様の像を表示した 2 つの表示面を重ね合わせて観察することで、2 つの像が 1 つに融像する 3D 表示方式である[29]。重ね合わせの方法は様々で、透過型の液晶ディスプレイや、ハーフミラーを用いる方法が提案されている。2 つの表示面には同一の像を表示し、それら表示面を一定間隔空けて配置する。Fig. 4.5 に示すように 2 つの表示面の像を重ね合わせて観察すると、前後に分かれている 2 つの同一の像が 1 つに融像して知覚される。

融像可能な位置は基本的に面と面の間制限される[30, 31]。融像位置は、前面と後面の像の輝度比によって決定される。前面・後面の輝度が等しい場合、融像位置は両面の中間位置となる。しかし、両面の輝度が異なる場合、融像位置は輝度のより大きな表示面側にシフトする。

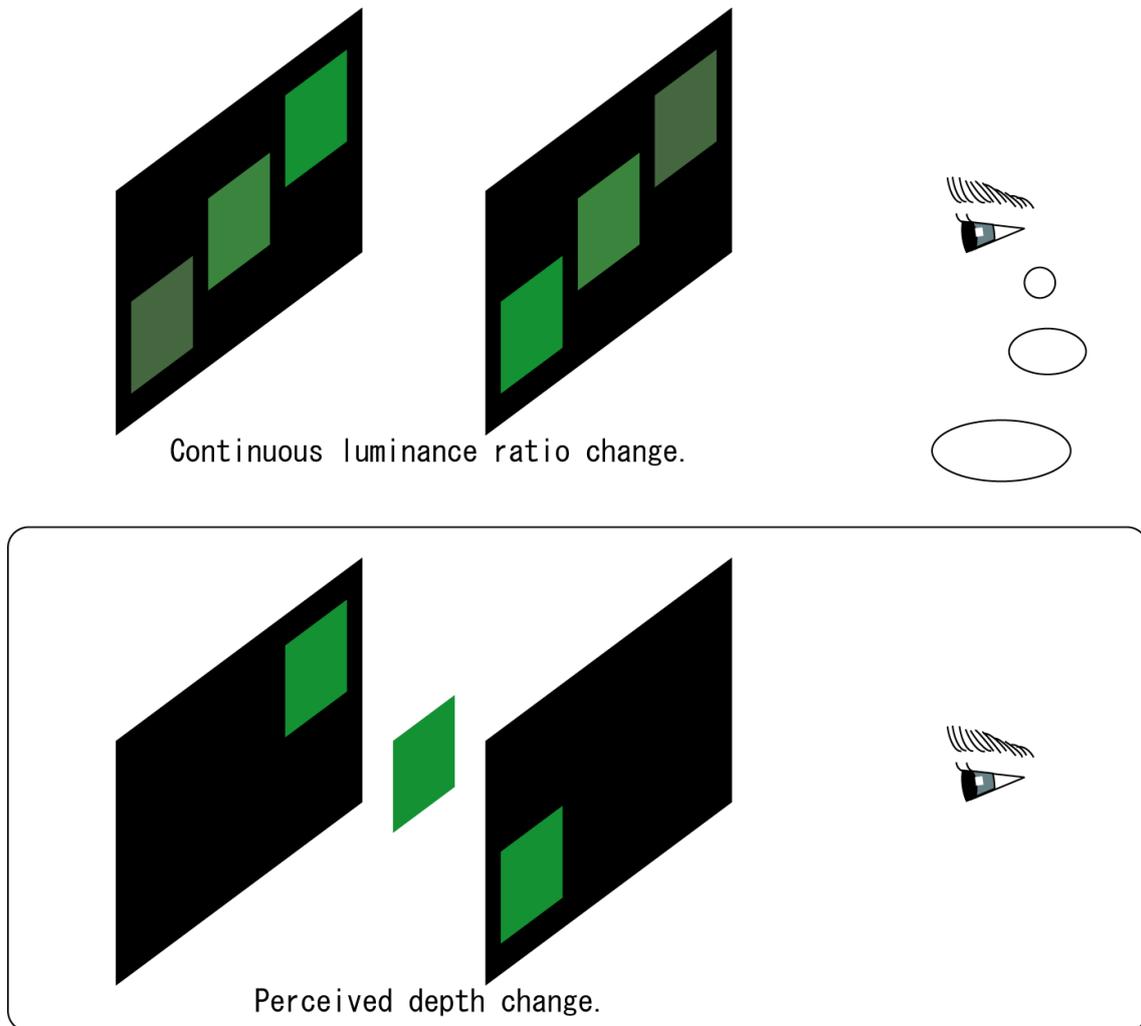


Fig. 4.5. DFD 表示の原理.

これまでにグラデーションによる輝度分配がなされた2つパターンによるDFD表示が報告されている[32]. 今回は3層の液晶パネルにグラデーションによる輝度分配がなされたパターンを表示することでDFD表示を行った.

DFD表示を可能にする表示画像をFig. 4.6に示し, 観察された画像をFig. 4.7に示す. 上から前面と中面, 前面と後面, 中面と後面, 前面と中面および後面の4つのパターンのDFD表示を行った. 液晶パネルの積層間隔は1cmに設定してあるので, 前面と後面のDFD表示は面間2cm, 他は面間1cmのDFD表示である. グラデーションにより輝度分配がなされた部分が, 滑らかな奥行きを知覚させるため, 液晶パネルの間でも像が観察された.

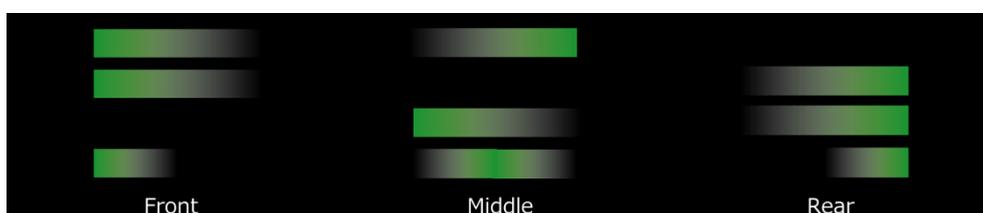


Fig. 4.6. DFD 表示を可能にする表示画像.

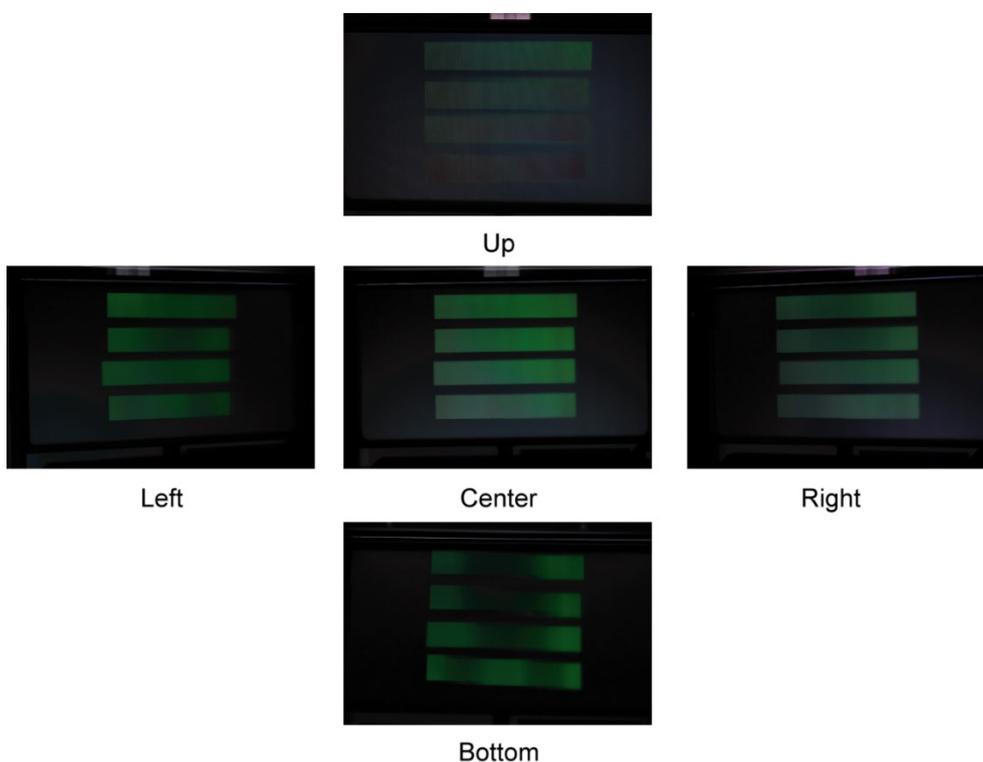


Fig. 4.7. DFD 表示の観察結果.

4.4. セキュリティ表示

4.4.1. ランダムドットパターンの積層による視点位置の限定

偏光演算を用いてランダムパターンを用いて視点位置を限定する覗き込み防止表示を実現するための構造を Fig. 4.11 に示す. 3 枚の液晶パネルに表示する画像を 2 値画像とし, 表示画像の画素値を 0,1 で表すとき, 観察される画像の画素値は 3 枚の液晶パネルの偏光演算による XOR 演算によって得られる. 後面, 中面および前面液晶パネル上に表示する画像の k 番目の画素値をそれぞれ $r_k, m_k, f_k \in \{0,1\}$ で表す. ディスプレイ中央の観察位置からは前面液晶パネルの k 番目, 中面液晶パネルの k 番目, 後面液晶パネルの k 番目の画素を観察し, 画素値 $E_k \in \{0,1\}$ が再現される. このとき, 3 枚の液晶パネルによる偏光演算により

$$E_k = r_k \oplus m_k \oplus f_k \quad (4.1)$$

で表される明暗が再現される. ここで \oplus は XOR 演算を表す.

白黒の 2 値画像のランダムパターンを前面の液晶パネルに表示した場合, Fig. 4.12 に示す画像が観察される. 同じランダムパターンを中面の液晶パネルに表示した場合, Fig. 4.13 に示す画像が観察される. これらのランダムパターンを同時に前面と中面に表示した場合, 観察される画像を Fig. 4.14 に示す. 同じランダムパターンを重ねて表示しているため, 正面からは暗い画像が観察される. しかし, 覗き込んだ位置からは 2 枚のランダムパターンの重なりが変化するため, スクランブルされた画像が観察される. このとき, 後面に任意の画像を表示すると, 正面からのみ後面の画像を観察可能な覗き込み防止の効果が期待できる.

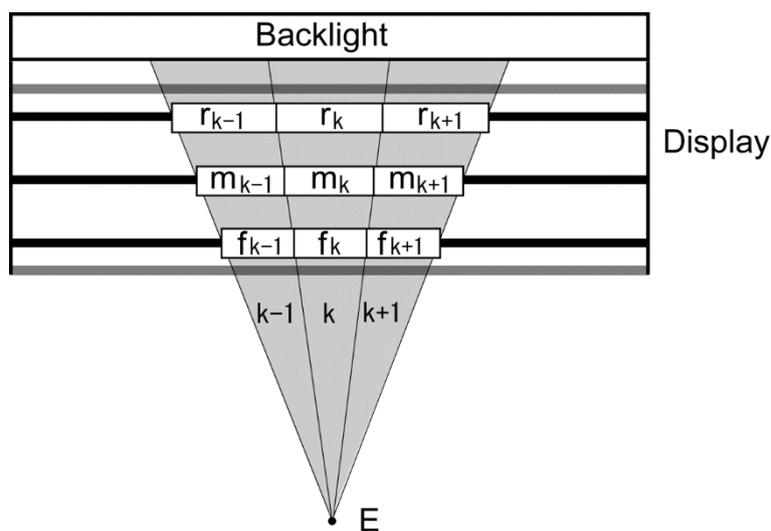


Fig. 4.11. 覗き込み防止表示を可能にするディスプレイの構造.



Fig. 4.12. 前面の液晶パネルにランダムパターンを表示.



Fig. 4.13. 中面の液晶パネルにランダムパターンを表示.

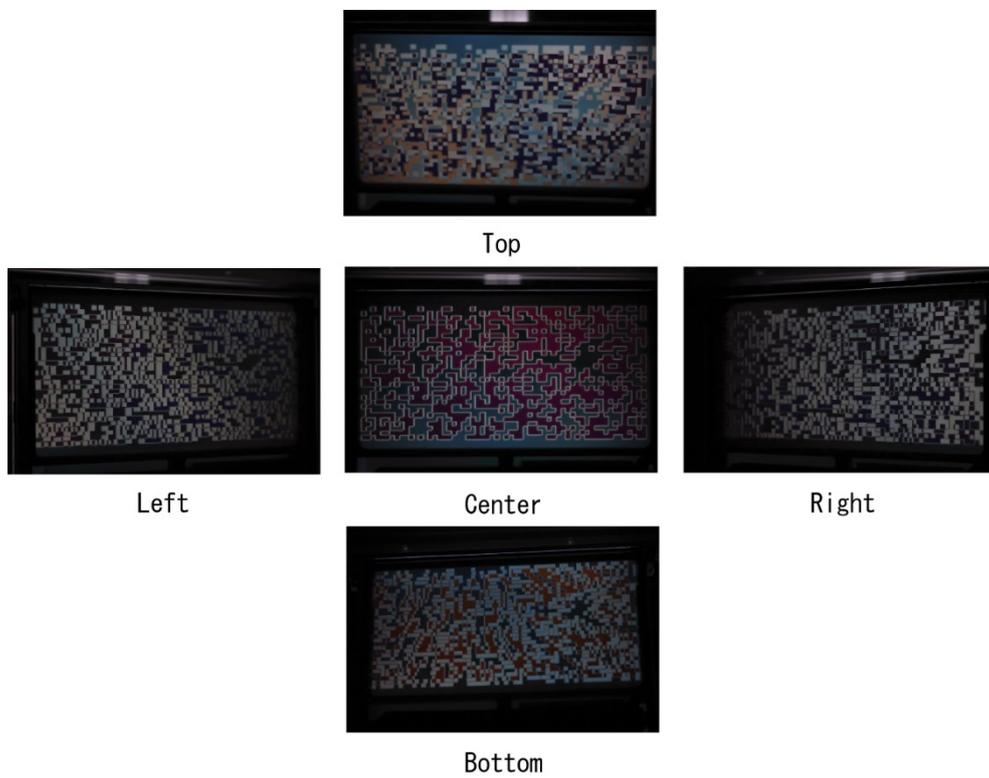
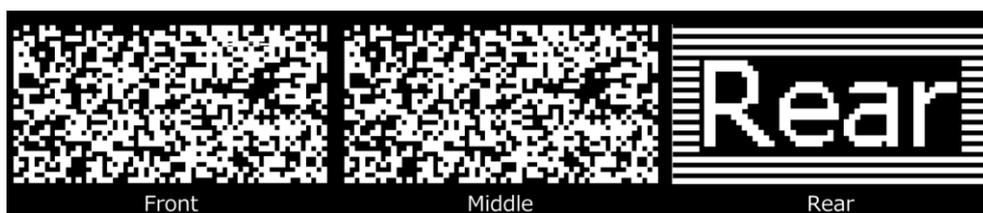


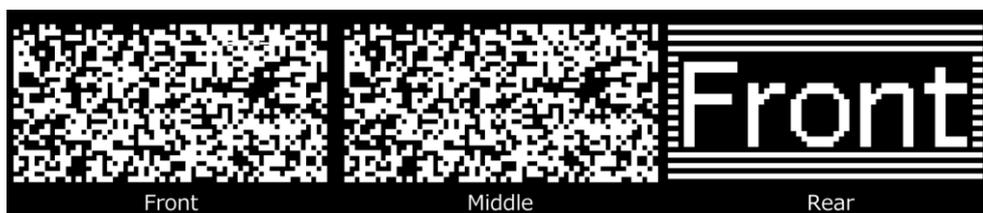
Fig. 4.14. 同一のランダムパターン2枚を表示したときの観察結果.

覗き込み防止表示を行うための表示画像を Fig. 4.15 示す。前面と中面の液晶パネルにはそれぞれ任意の画像を表示し、後面にはディスプレイ正面のみで観察させたい画像を表示している。Fig. 4.15 は任意の表示画像をランダムパターンに設定している。今回の実験では液晶パネルの積層間隔を 1cm とし、表示画像の画素ピッチに関して、液晶パネルの積層間隔を考慮し中面および後面の画素は、それぞれ前面に表示する画像の 1.02 倍および 1.04 倍の大きさに設定している。

表示画像の画素に基づき観察距離 50cm で正面と左右に 15cm 離れた位置で撮影した観察結果を Fig. 4.16 に示す。正面からのみ秘密画像が観察された。正面以外からはスクランブルされた画像が観察される。また、後面の表示画像は任意であるため、2枚のランダムパターンを積層するだけで、覗き込み防止表示の効果が得られる。秘密画像を表示画像となるため、暗号表示の効果はないが、同じランダムドットの積層で容易に覗き込み防止表示ができるため、暗号表示と比較して処理負荷が軽減される。



(a)



(b)

Fig. 4.15. 覗き込み防止表示を可能にする表示画像.

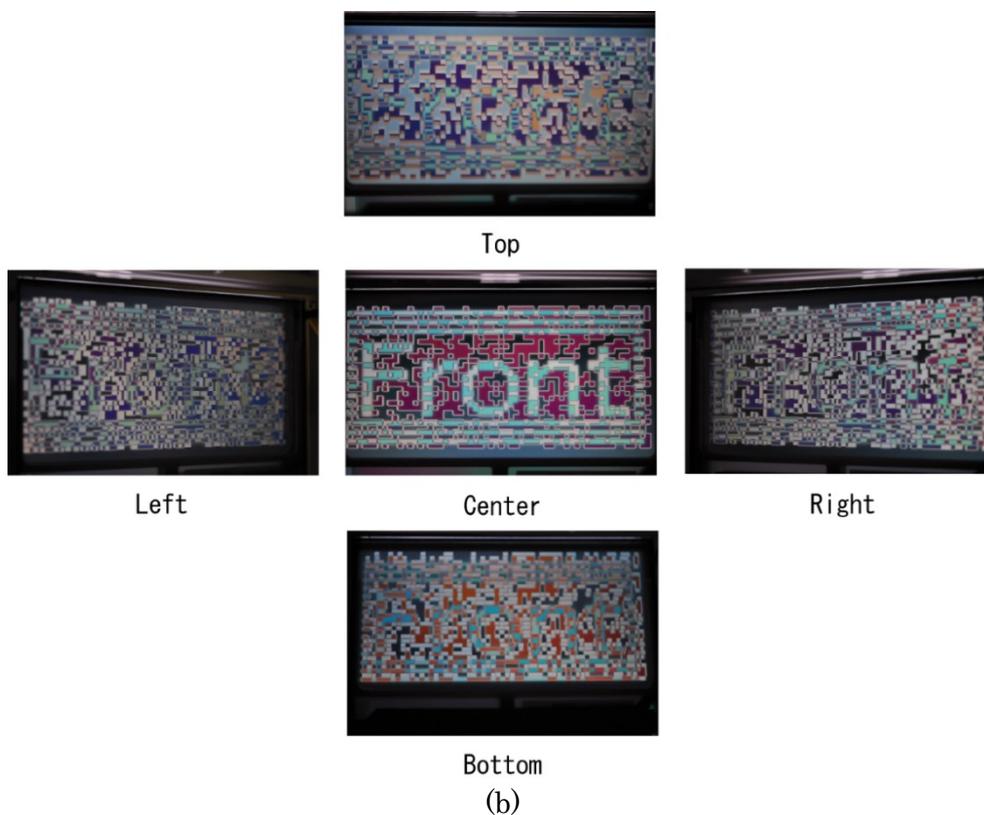
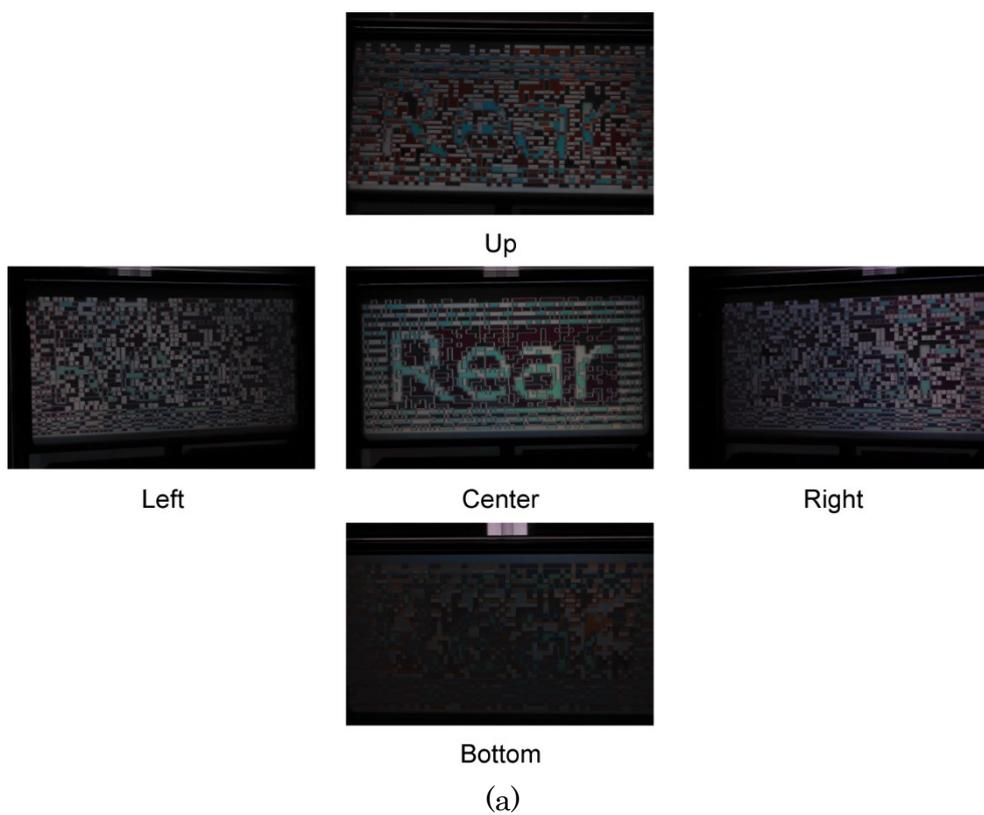


Fig. 4.16. 正面からのみ観察される後面液晶パネルの表示画像.

4.4.2. 2枚の任意画像を鍵として用いる暗号表示

偏光演算を用いて 2 枚の任意画像を鍵として用いるセキュリティ表示を実現するための構造を Fig. 4.17 に示す. 3 枚の液晶パネルに表示する画像を 2 値画像とし, 表示画像の画素値を 0,1 で表すとき, 観察される画像の画素値は 3 枚の液晶パネルの偏光演算による XOR 演算によって得られる. 後面, 中面および前面液晶パネル上に表示する画像の k 番目の画素値をそれぞれ $r_k, m_k, f_k \in \{0,1\}$ で表す. ディスプレイ中央の観察位置からは前面液晶パネルの k 番目, 中面液晶パネルの k 番目, 後面液晶パネルの k 番目の画素を観察し, 画素値 $E_k \in \{0,1\}$ が再現される. このとき, 3 枚の液晶パネルによる偏光演算により

$$E_k = r_k \oplus m_k \oplus f_k \quad (4.2)$$

で表される明暗が再現される. ここで \oplus は XOR 演算を表す.

セキュリティ表示を行うための表示画像を Fig. 4.18 に示す. 前面と後面の液晶パネルにはそれぞれ任意の画像を表示し, 中面の液晶パネルには暗号化された画像を表示している. 表示画像からは観察される秘密画像を判読できない. Fig. 4.18 (a) は任意の表示画像をランダムドットのパターンに設定している. 表示画像は 30×60 画素であり, 2 枚の任意の表示画像はそれぞれ 3600 通りで, その組み合わせは 1296 万通りある. また, 2 枚の表示画像は任意であるため, Fig. 4.18 (b) で示すように, 2 枚の表示画像に情報を持たせることも可能である.

今回の実験では液晶パネルの積層間隔を 1cm とし, 表示画像の画素ピッチに関して, 液晶パネルの積層間隔を考慮し中面および後面の画像は, それぞれ前面の画像の 1.02 倍および 1.04 倍の大きさに設定している.

表示画像の画素に基づき観察距離 50cm で正面と左右に 15cm 離れた位置で撮影した観察結果を Fig. 4.19 に示す. 正面からのみ秘密画像が観察された. また, 正面以外からはスクランブルされた画像が観察される.

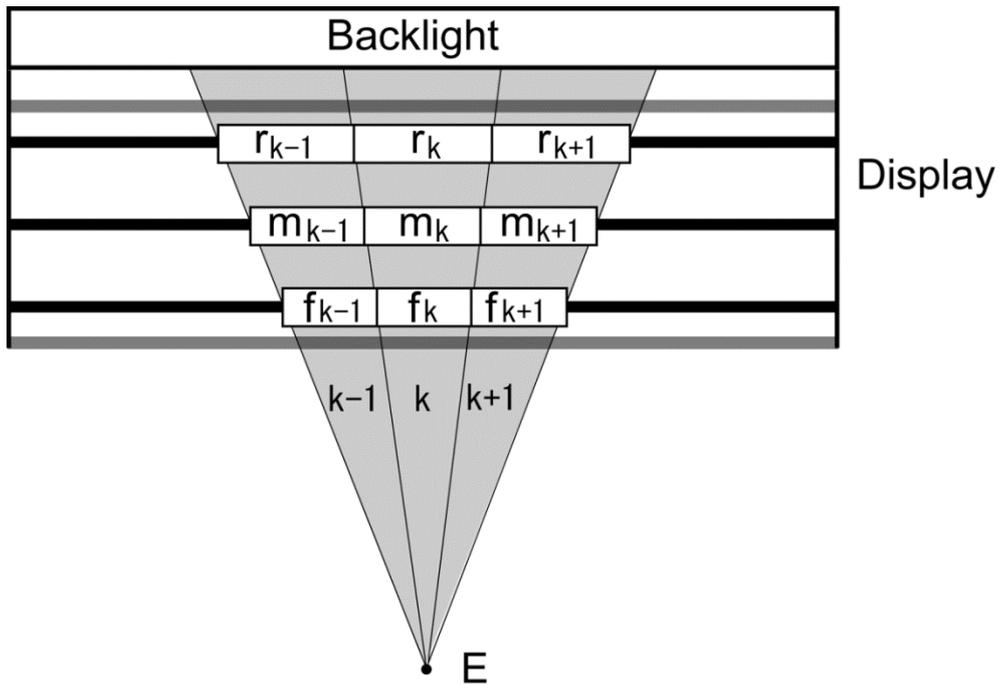
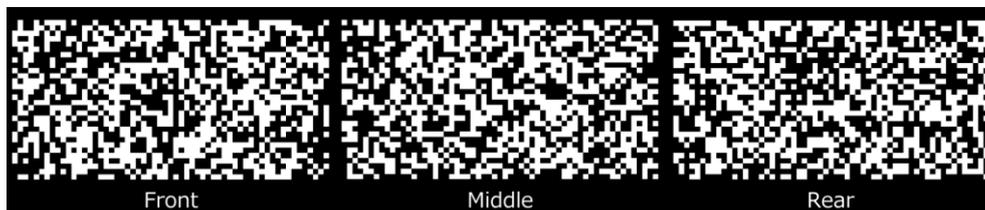
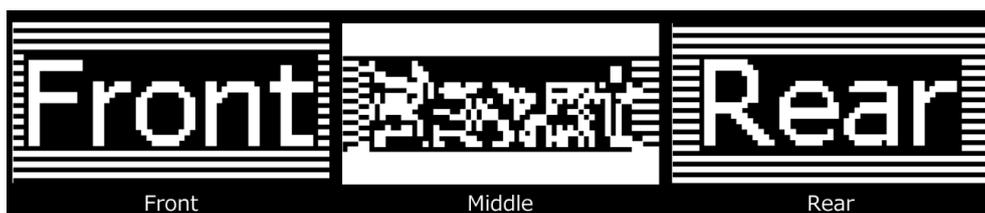


Fig. 4.17. セキュリティ表示を可能にするディスプレイの構造.



(a)



(b)

Fig. 4.18. セキュリティ表示を可能にする表示画像.

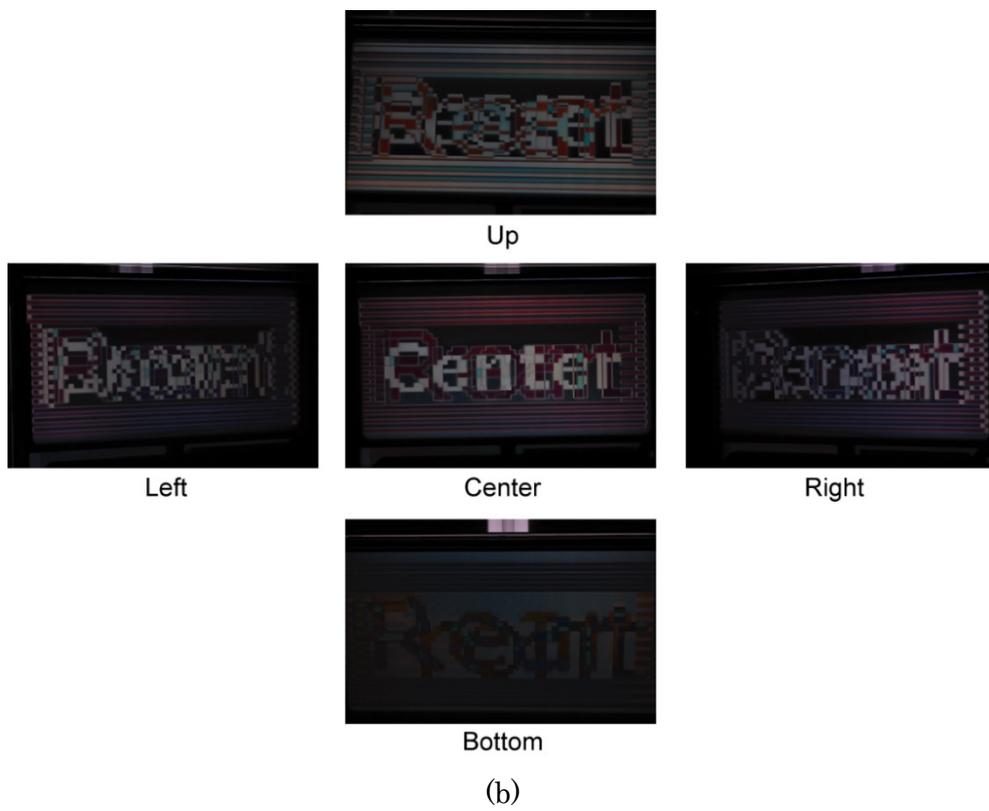
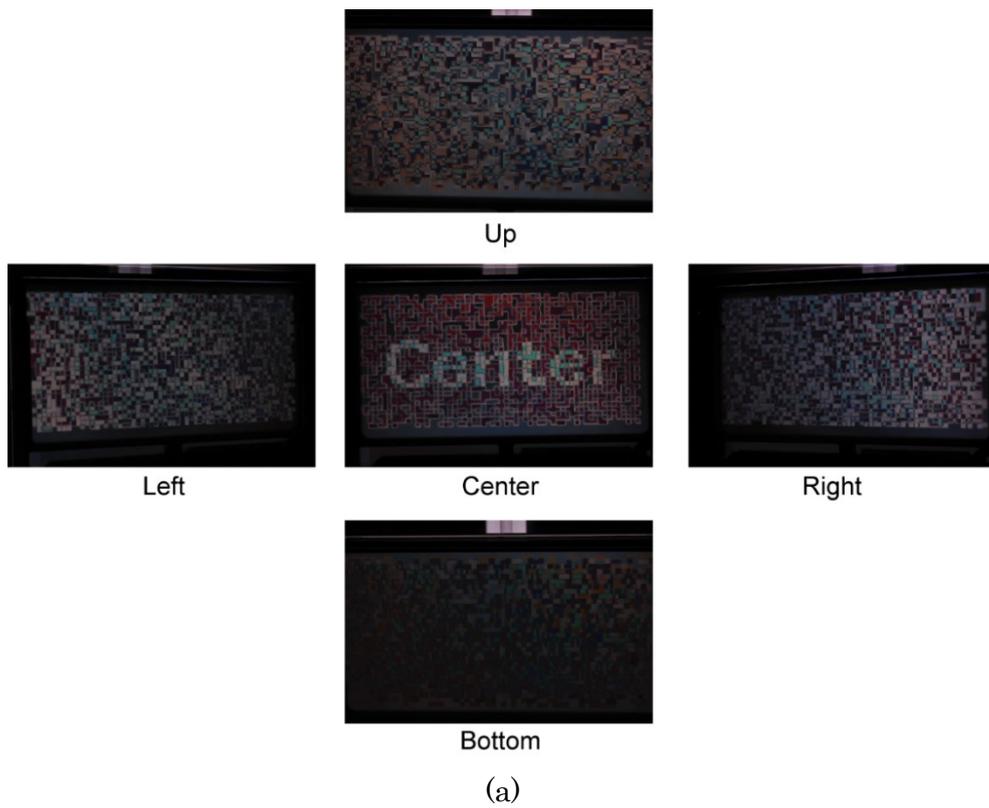


Fig. 4.19. 観察される画像.

4.5. 多視点表示

4.5.1. 水平方向の3視点表示

第3章で明らかにした水平の3方向に提示する画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の関係式から、表示画像を生成し、水平方向の3視点表示を行う。偏光演算を用いて3視点の暗号表示を実現するための構造を Fig. 4.20 に示す。3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とし、表示画像の画素値を0,1で表すとき、観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られ、XOR演算で表すことができる。それぞれの視点位置での観察結果は次の式で表すことができる。

$$L_k = r_{k+1} \oplus m_k \oplus f_{k-1} \quad (4.3)$$

$$C_k = r_k \oplus m_k \oplus f_k \quad (4.4)$$

$$R_k = r_{k-1} \oplus m_k \oplus f_{k+1} \quad (4.5)$$

\oplus はXOR演算を表す。3式の連立方程式を層ごとの画素値について解いた結果が次の通りである。

$$r_{k-1} \oplus r_k \oplus r_{k+1} \oplus r_{k+2} = L_{k+1} \oplus C_k \oplus C_{k+1} \oplus R_k \quad (4.6)$$

$$m_k \oplus m_{k+2} = L_{k+1} \oplus C_k \oplus C_{k+2} \oplus R_{k+1} \quad (4.7)$$

$$f_{k-1} \oplus f_k \oplus f_{k+1} \oplus f_{k+2} = L_k \oplus C_k \oplus C_{k+1} \oplus R_{k+1} \quad (4.8)$$

水平方向の3視点表示を行うために論理式をもとに生成した表示画像を Fig. 4.21 に示す。3方向に表示する画像の背景を黒色に設定しているため、 r_0, m_0, f_0 のうち2つを1、残りの1つを0として $r_0 \oplus m_0 \oplus f_0 = 0$ としたパターンで画像上部と下部を作成した。そのため、表示画像には縞模様が発生している。また、 $r_0 = m_0 = f_0 = 0$ として $r_0 \oplus m_0 \oplus f_0 = 0$ として背景の黒を作成することも可能である。縦方向は独立しているため、式(4.6)-(4.8)に従って一行ずつ表示画像を生成する。ここでは初期値を入力するセルを行ごとに左右交互に入れ替えて入力することで表示画像が複雑化された。

表示画像の画素ピッチに関して、今回は1cmとした液晶パネルの積層間隔を考慮し中面液晶パネルおよび後面液晶パネルの画素は、それぞれ前面液晶パネルの画素の1.02倍および1.04倍の大きさに設定している。液晶パネルの積層間隔と表示画像の拡大比率に基づき、観察距離50cmで正面と左右に15cm離れた位置で撮影した復号結果を Fig. 4.22 に示す。正面と左右の観察位置で異なる画像が観察された。また、異なる観察位置からはスクランブルされた画像が観察される。

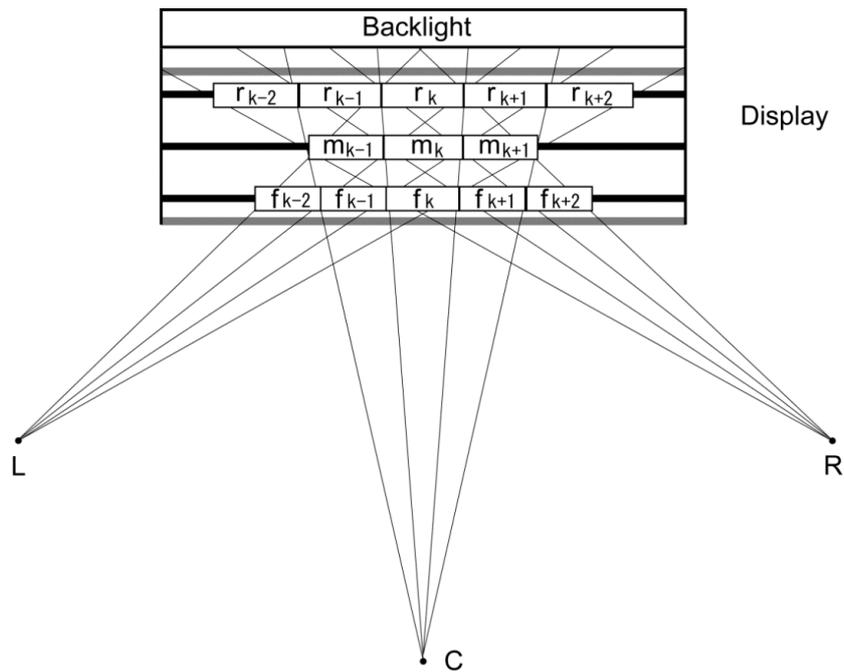


Fig. 4.20 観察位置によって異なる復号結果.

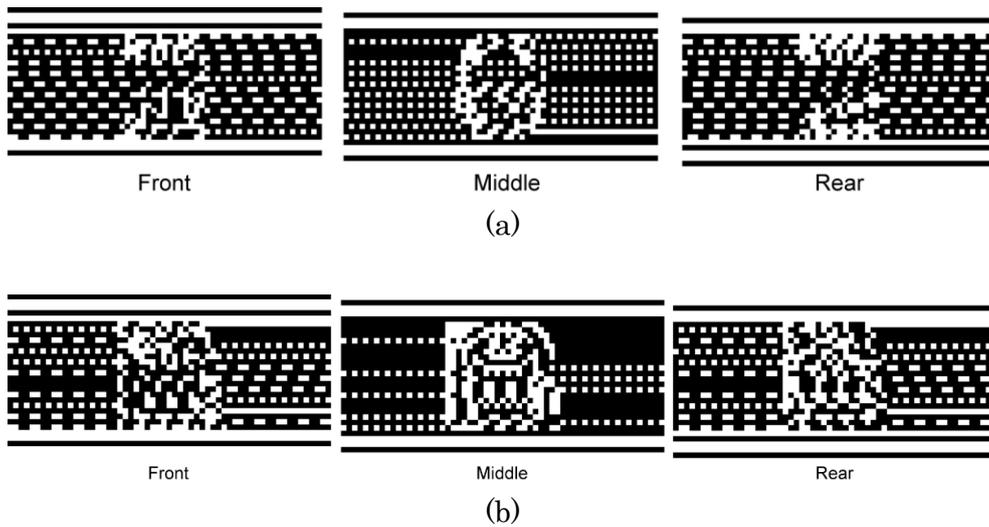


Fig. 4.21. 3枚の液晶パネルに表示する表示画像.

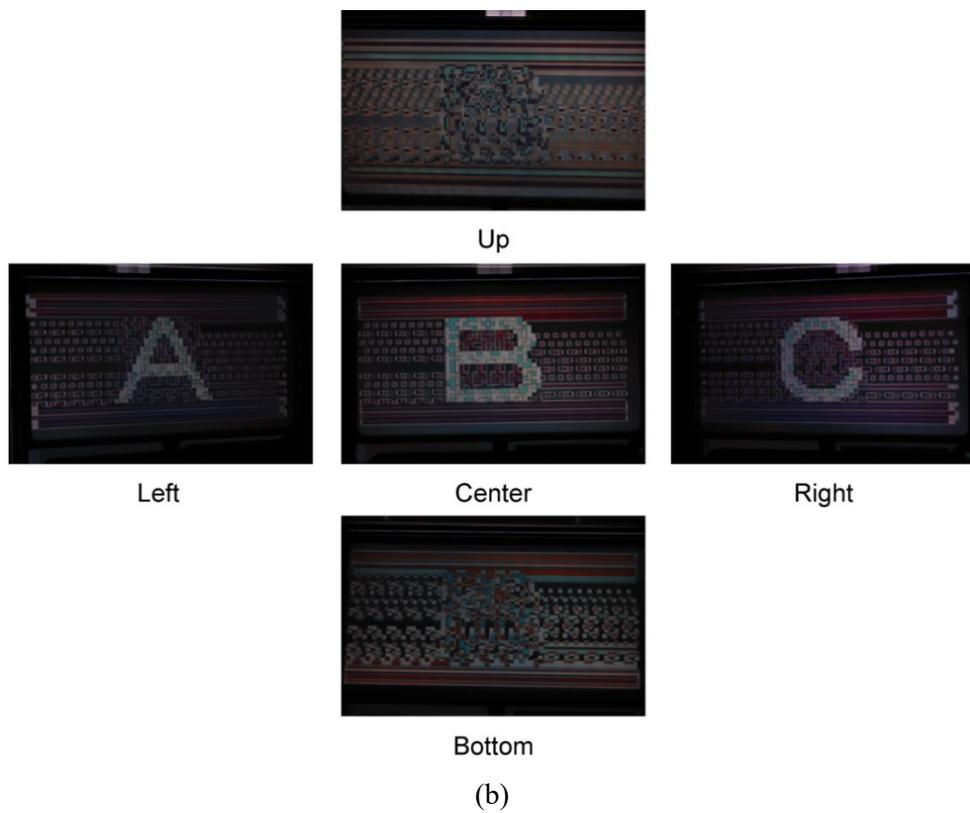
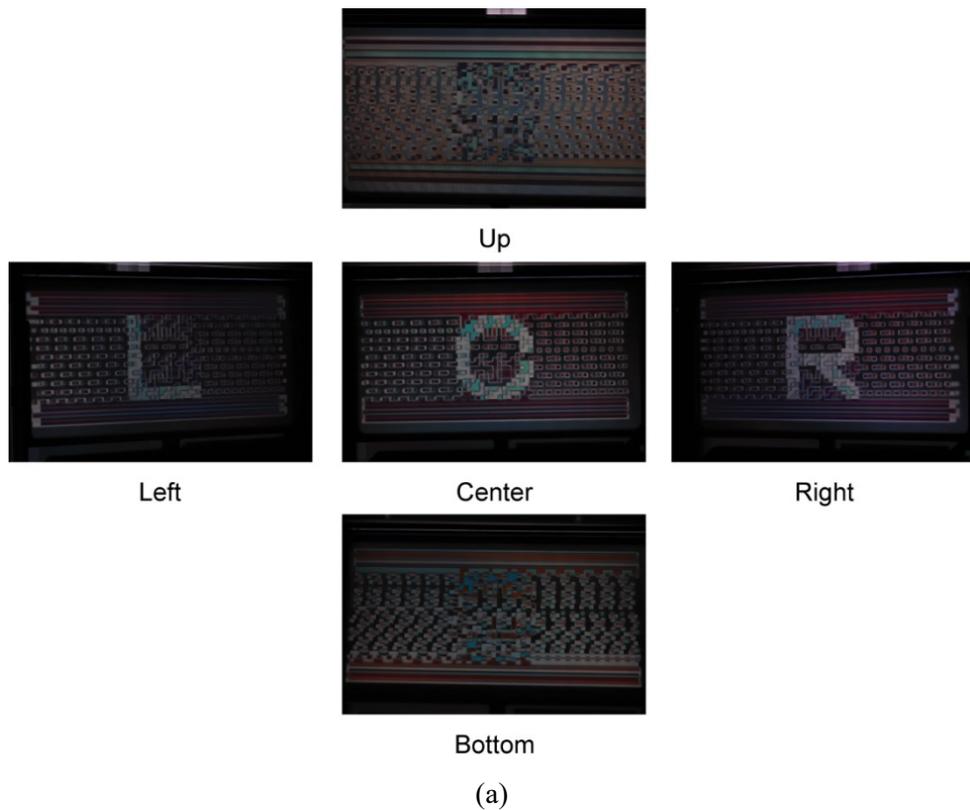


Fig. 4.22. 3 視点表示の観察結果.

4.5.2. 2 視点暗号表示

第 3 章で明らかにした視点位置に提示する画像の画素値と 3 枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の論理式から表示画像を生成する。2 視点暗号表示では、左右と中央の視点位置に対し、中央の視点からはランダムドットパターンを提示する。生成した表示画像を Fig. 4.23 に示す。3 視点表示の表示画像と比較し、3 視点のうちの 1 つにランダムドットパターンを設定したことによって表示画像が暗号化されている。

表示画像の画素に基づき観察距離 50cm で正面と左右に 15cm 離れた位置で観察した復号結果を Fig. 4.24 に示す。左右では異なる画像が観察された。また別の角度からはスクランブルされた画像が観察される。

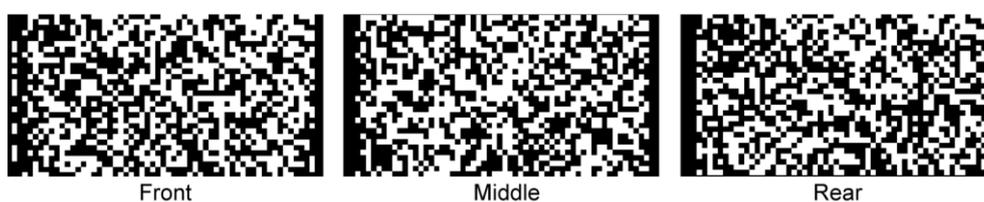


Fig. 4.23. 3 枚の液晶パネルに表示する表示画像.

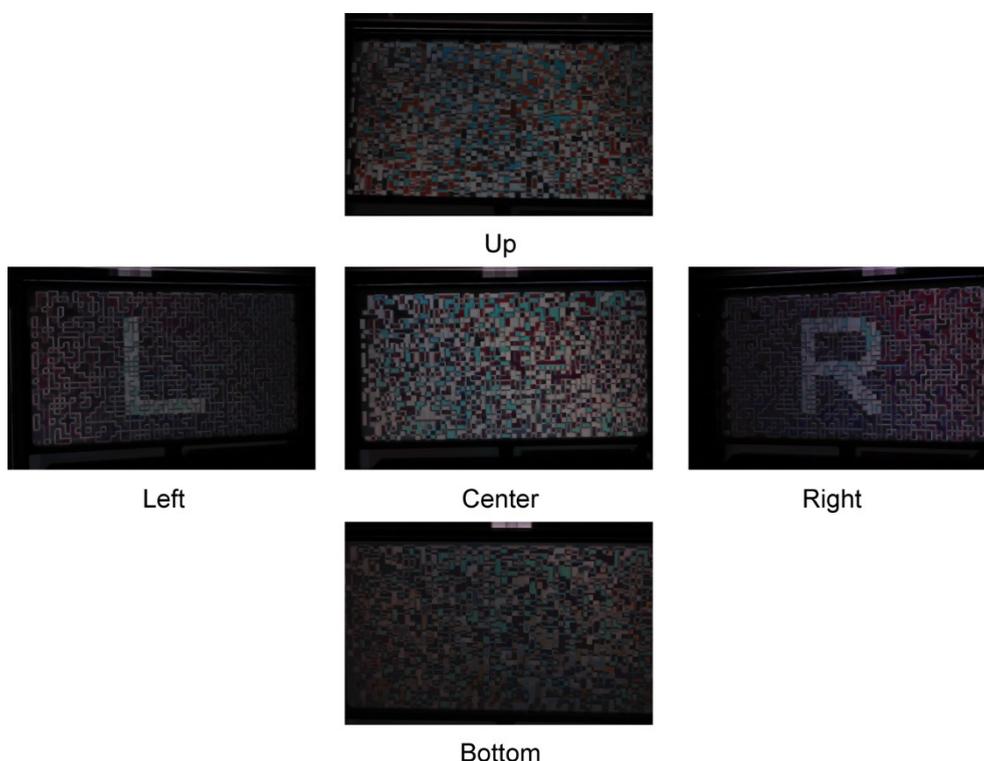


Fig. 4.24. 2 視点暗号表示の観察結果.

4.5.3. 水平・垂直方向の3視点表示(中央の視点位置を含む)

第3章で明らかにした水平・垂直の視点位置のうち中央の視点位置を含む3方向に提示する画像の画素値と3枚の液晶パネルに表示する画像の画素値の関係式から、表示画像を生成し、水平方向の3視点表示を行う。まずは左、中央、下の視点位置への3視点表示を行う。偏光演算を用いてディスプレイ正面、左側および下側の3方向の視点位置を持つ3視点表示を実現するための構造を Fig. 4.25 に示す。3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とすると、3方向で観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られ、XOR 演算で表すことができる。それぞれの視点位置での観察結果は次の式で表すことができる。

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (4.9)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (4.10)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (4.11)$$

\oplus は XOR 演算を表す。3式の連立方程式を層ごとの画素値について解いた結果が次の通りである。

$$\begin{aligned} & r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l+2} \oplus C_{k+2,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

左、中央、下の3視点表示を行うため、論理式をもとに作製した表示画像を Fig. 4.26 に示す。ディスプレイ正面、左側および下側の視点位置で観察された画像を Fig. 4.27 に示す。視点位置によって表示画の重なりが変化し、3視点表示を実現している。

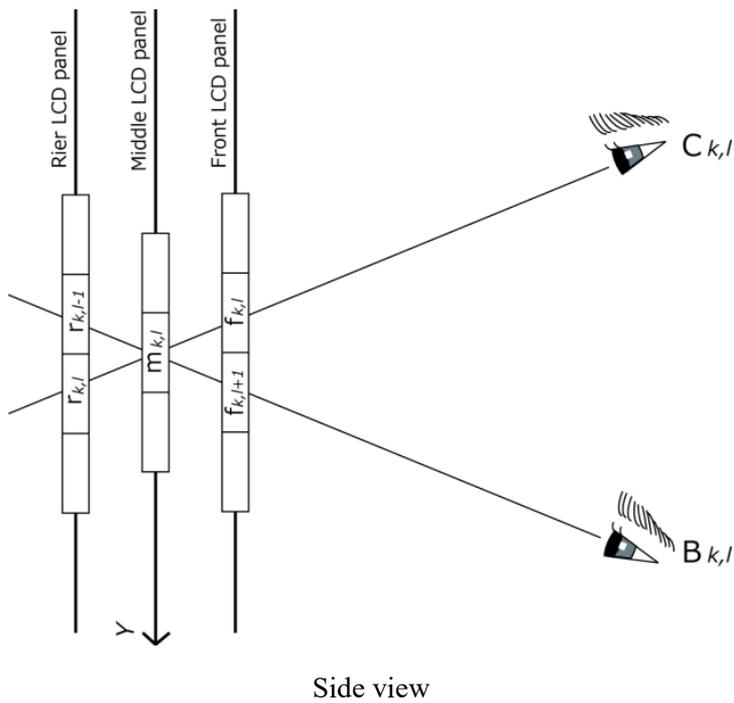
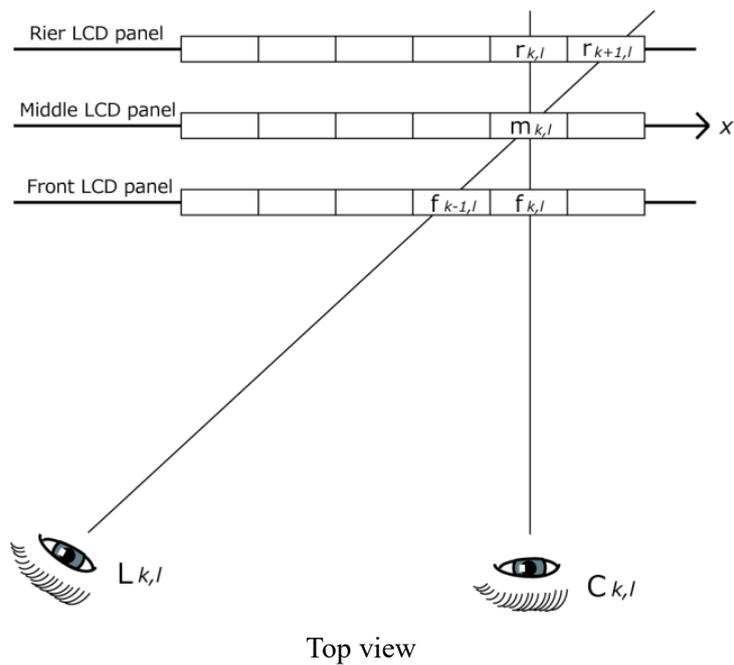


Fig. 4.25. 左, 中央, 下の視点位置で観察する表示画像の画素値.

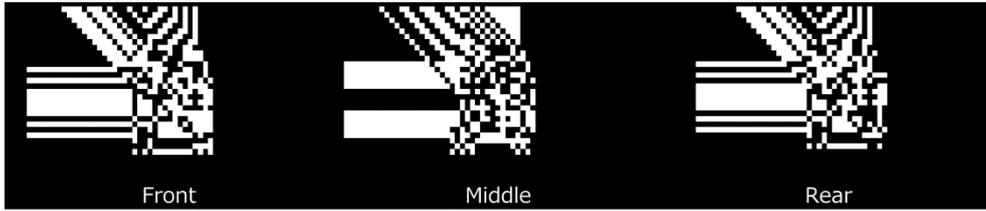


Fig. 4.26. 左, 中央, 下の3視点表示を可能にする表示画像.

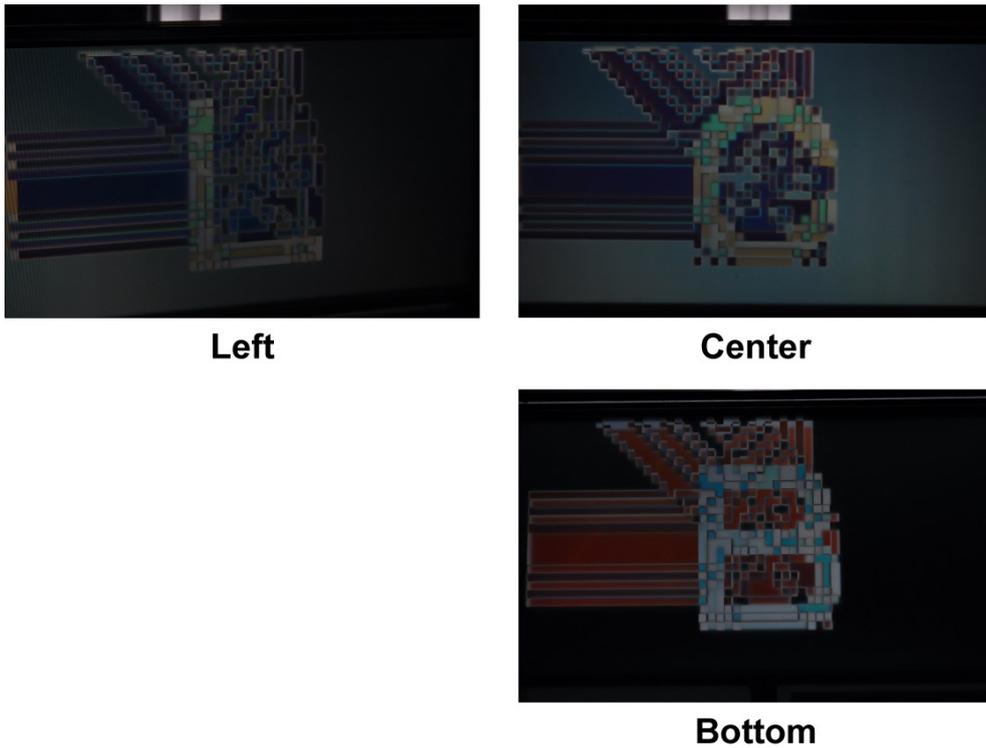


Fig. 4.27. 左, 中央, 下の視点位置における観察結果.

右, 中央, 下の3方向への3視点表示を行う. 偏光演算を用いてディスプレイ正面, 右側および下側の3方向の視点位置を持つ3視点表示を実現するための構造を Fig. 4.28 に示す. 3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とすると, 3方向で観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られ, XOR 演算で表すことができる. それぞれの視点位置での観察結果は次の式で表すことができる.

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4.15)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (4.16)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (4.17)$$

\oplus は XOR 演算を表す. 3式の連立方程式を層ごとの画素値について解いた結果が次の

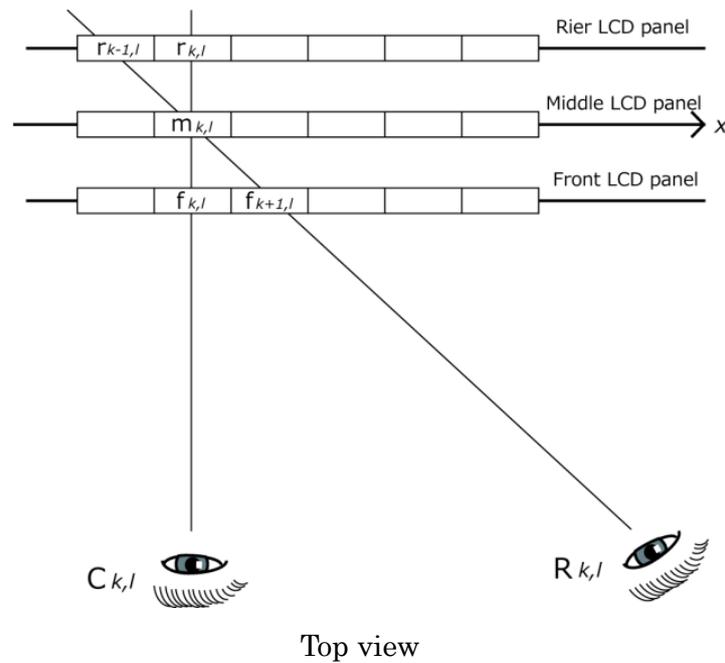
通りである.

$$\begin{aligned} & r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l+2} \oplus C_{k+2,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (4.20)$$

右, 中央, 下の3視点表示を行うため, 論理式をもとに作製した表示画像を Fig. 4.29 に示す. ディスプレイ正面, 右側および下側の視点位置で観察された画像を Fig. 4.30 に示す. 視点位置によって表示画の重なりが変化し, 3視点表示を実現している.



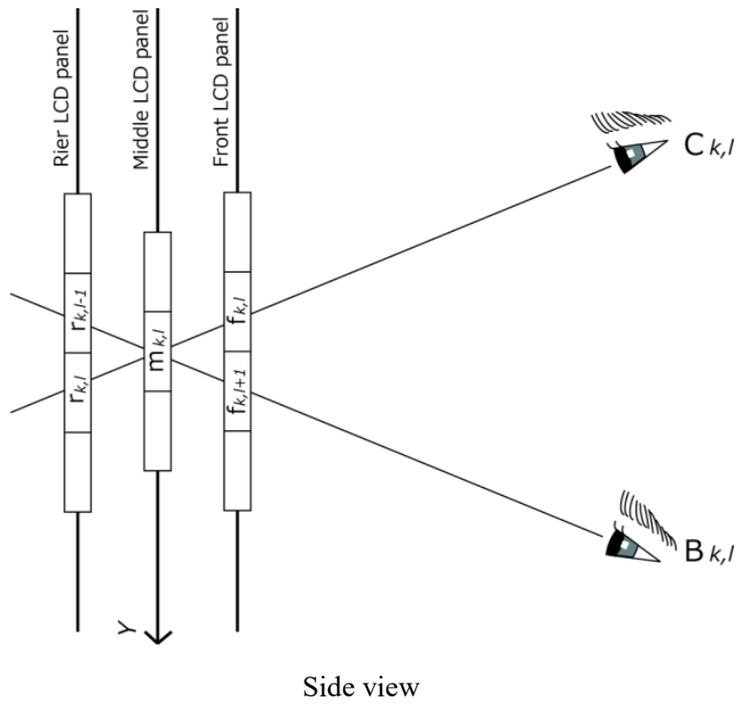


Fig. 4.28. 右, 中央, 下の視点位置で観察する表示画像の画素値.

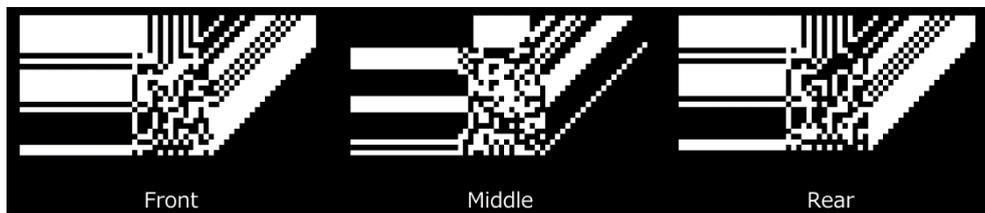


Fig. 4.29. 右, 中央, 下の3視点表示を可能にする表示画像.

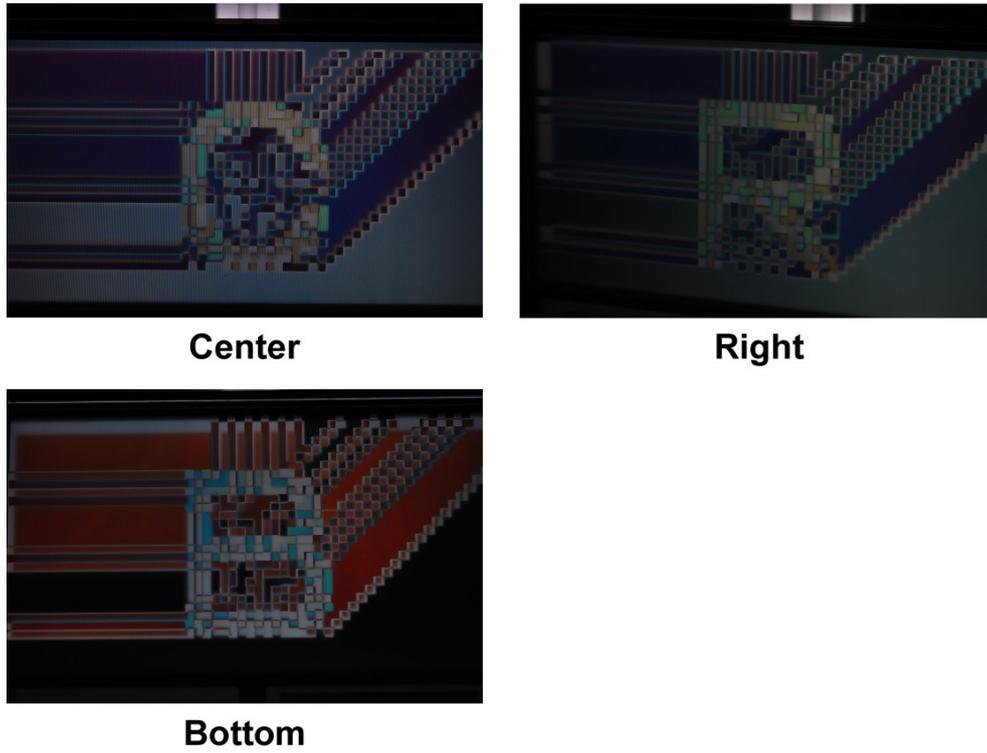


Fig. 4.30. 右，中央，下の視点位置における観察結果.

上，中央，右の3方向への3視点表示を行う．偏光演算を用いてディスプレイ正面，右側および上側の3方向の視点位置を持つ3視点表示を実現するための構造を Fig. 4.31 に示す．3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とすると，3方向で観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られ，XOR 演算で表すことができる．それぞれの視点位置での観察結果は次の式で表すことができる．

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4.21)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (4.22)$$

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (4.23)$$

\oplus は XOR 演算を表す．3式の連立方程式を層ごとの画素値について解いた結果が次の通りである．

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus r_{k+2,l+2} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus C_{k+2,l+1} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \\ = & R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned}
& f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \\
& = R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+1}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

上, 中央, 右の3視点表示を行うため, 論理式をもとに作製した表示画像を Fig. 4.32 に示す. ディスプレイ正面, 右側および上側の視点位置で観察された画像を Fig. 4.33 に示す. 視点位置によって表示画の重なりが変化し, 3視点表示を実現している.

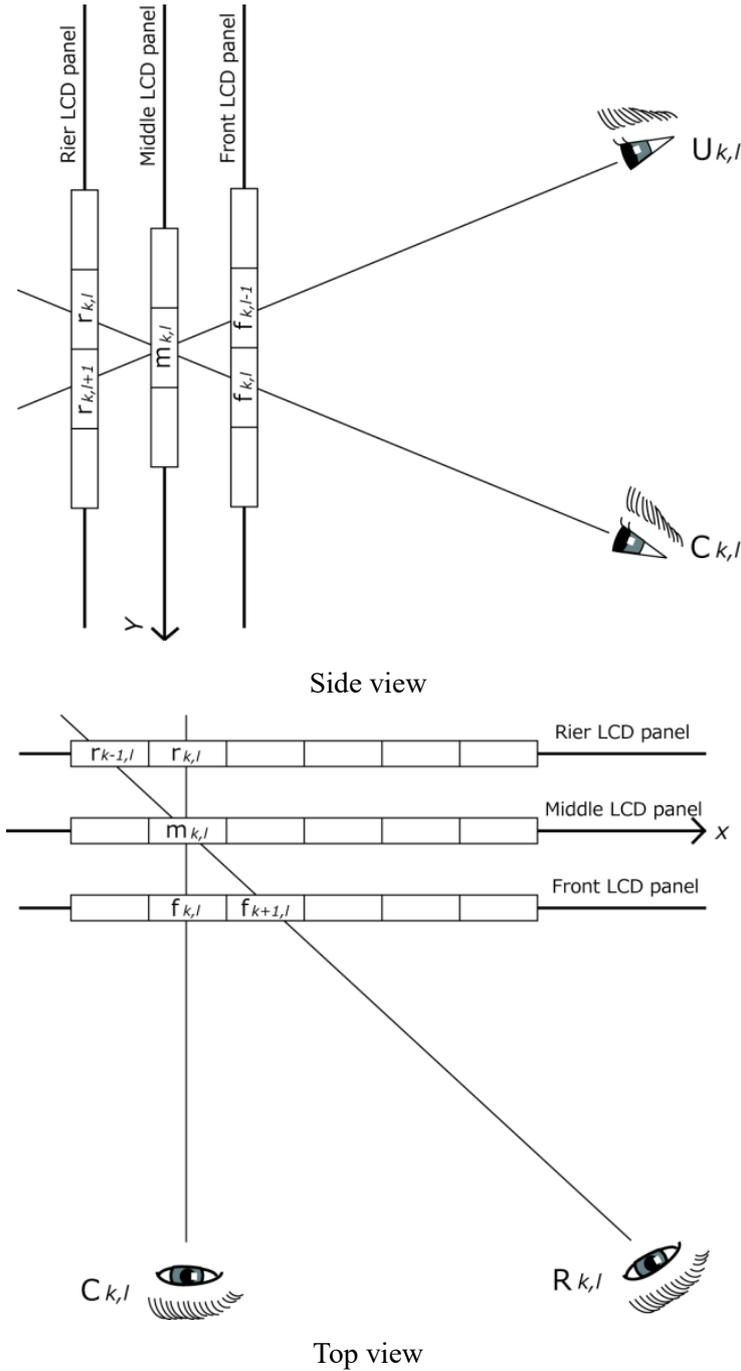


Fig. 4.31. 右, 中央, 上の視点位置で観察する表示画像の画素値.

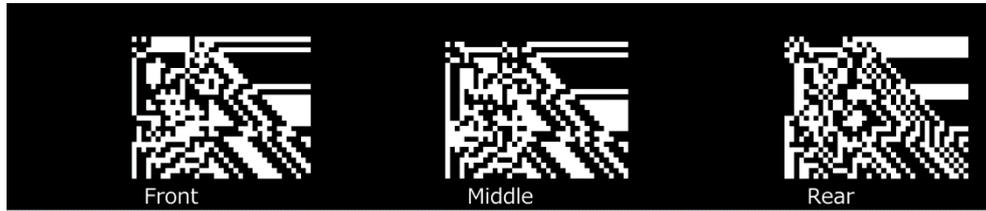
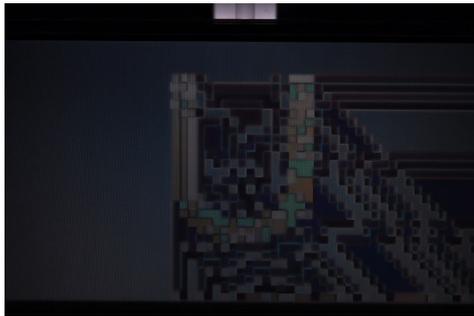
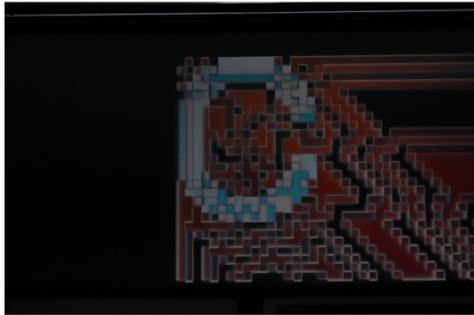


Fig. 4.32. 右, 中央, 上の3視点表示を可能にする表示画像.



Up



Center



Right

Fig. 4.33. 右, 中央, 上の視点位置における観察結果.

上, 中央, 左の3方向への3視点表示を行う. 偏光演算を用いてディスプレイ正面, 左側および上側の3方向の視点位置を持つ3視点表示を実現するための構造を Fig. 4.34 に示す. 3枚の液晶パネルに表示する画像を2値画像とすると, 3方向で観察される画像の画素値は3枚の液晶パネルの偏光演算によって得られ, XOR 演算で表すことができる. それぞれの視点位置での観察結果は次の式で表すことができる.

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (4.27)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (4.28)$$

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (4.29)$$

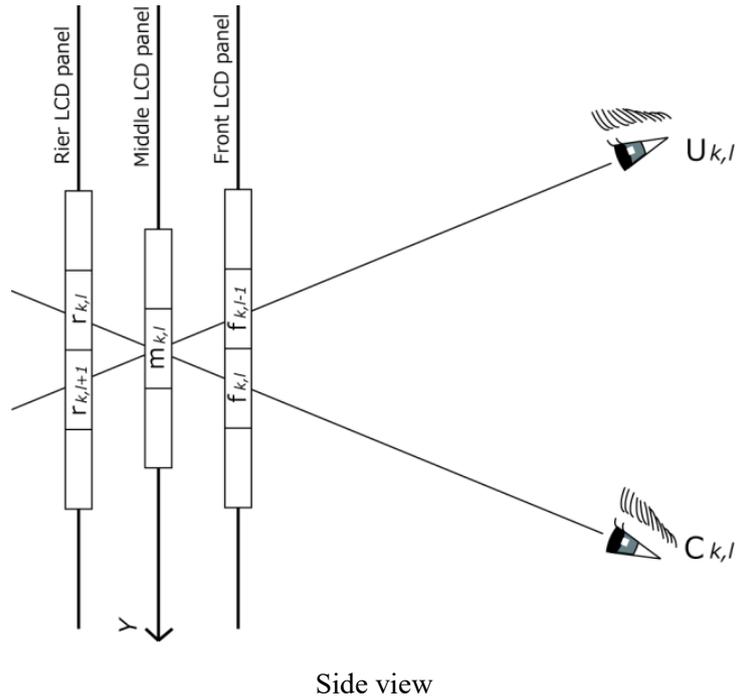
\oplus は XOR 演算を表す. 3 式の連立方程式を層ごとの画素値について解いた結果が次の通りである.

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+2,l} \\ &= L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l-1} \oplus U_{k,l} \oplus U_{k+1,l} \end{aligned} \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \\ &= L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+2,l-1} \oplus U_{k,l} \oplus U_{k+2,l} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l} \\ &= L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l} \oplus U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l} \end{aligned} \quad (4.32)$$

上, 中央, 左の 3 視点表示を行うため, 論理式をもとに作製した表示画像を Fig. 4.35 に示す. ディスプレイ正面, 左側および上側の視点位置で観察された画像を Fig. 4.36 に示す. 視点位置によって表示画の重なりが変化し, 3 視点表示を実現している.



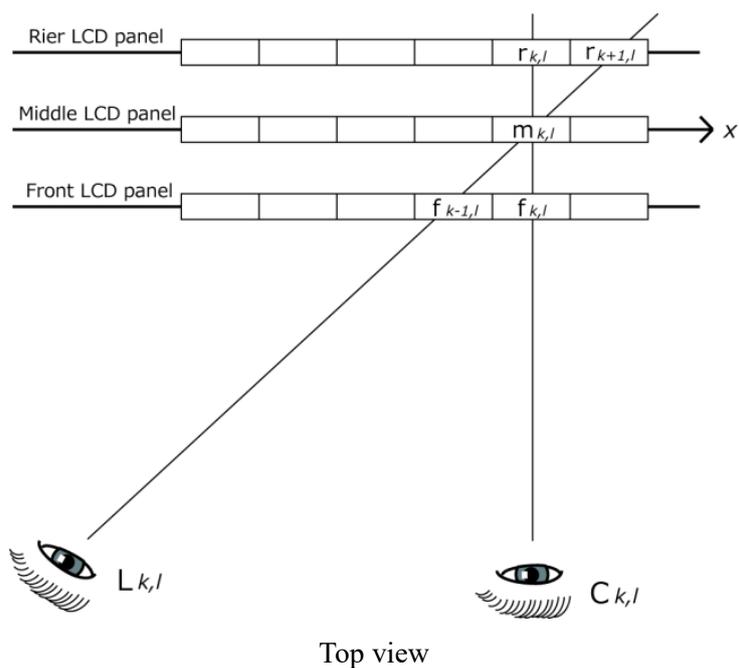


Fig. 4.34. 左, 中央, 上の視点位置で観察する表示画像の画素値.

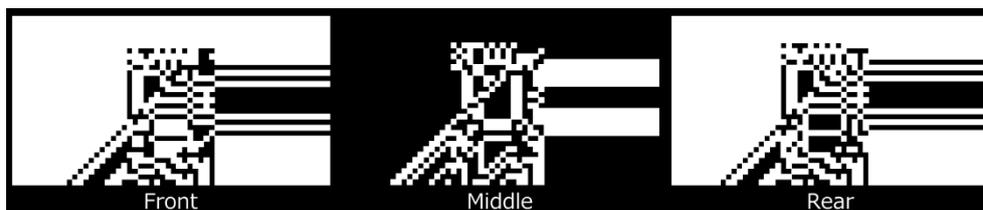


Fig. 4.35. 左, 中央, 上の3視点表示を可能にする表示画像.

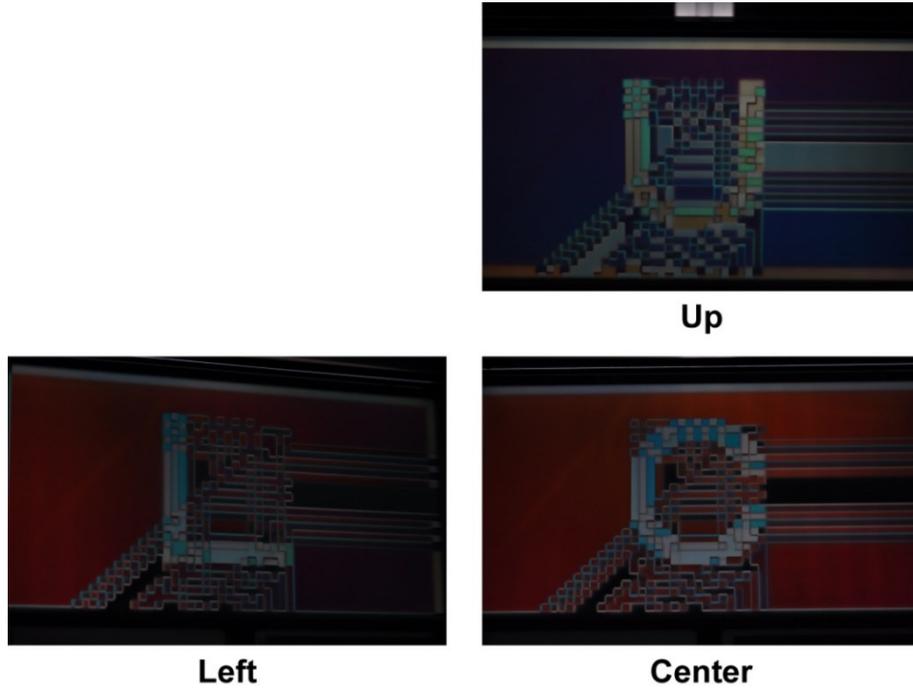


Fig. 4.36. 左, 中央, 上の視点位置における観察結果.

4.5.4. 水平・垂直方向の3視点表示(中央の視点位置を含まない)

第3章で求めたとおり, 上, 左, 右の3視点表示の論理式は以下の通りである. これをもとに作製した表示画像を Fig. 4.37 に示す. 作製した表示画像を3層液晶パネルに表示した結果を Fig. 4.38 に示す. 論理式をもとに作製した表示画像によって, 上, 左, 右の3視点表示を確認した.

$$\begin{aligned}
 & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\
 & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l-1}
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

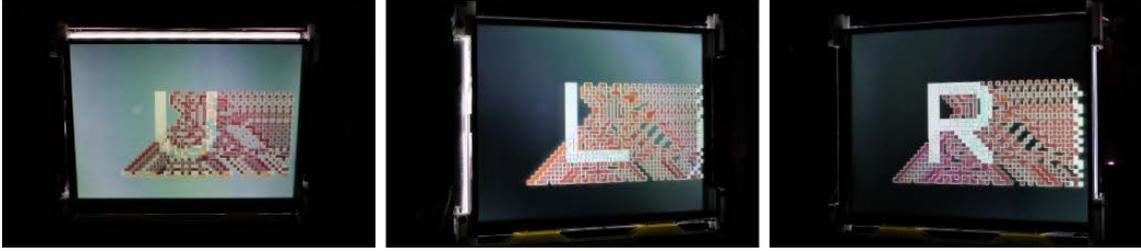
$$\begin{aligned}
 & m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\
 & = U_{k,l} \oplus U_{k+4,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+3,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+3,l-1}
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

$$\begin{aligned}
 & f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\
 & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l+1} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus R_{k+3,l}
 \end{aligned} \tag{4.34}$$



後面 中面 前面

Fig. 4.37. 上, 左, 右の3視点表示を可能にする表示画像.



上 左 右

Fig. 4.38. 上, 左, 右の視点位置における観察結果.

上, 左, 下の 3 視点表示の論理式は以下の通りである. これをもとに作製した表示画像を Fig. 4.39 に示す. 作製した表示画像を 3 層液晶パネルに表示した結果を Fig. 4.40 に示す. 論理式をもとに作製した表示画像によって, 上, 左, 下の 3 視点表示を確認した.

$$\begin{aligned}
 & r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\
 & = U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l}
 \end{aligned} \tag{4.35}$$

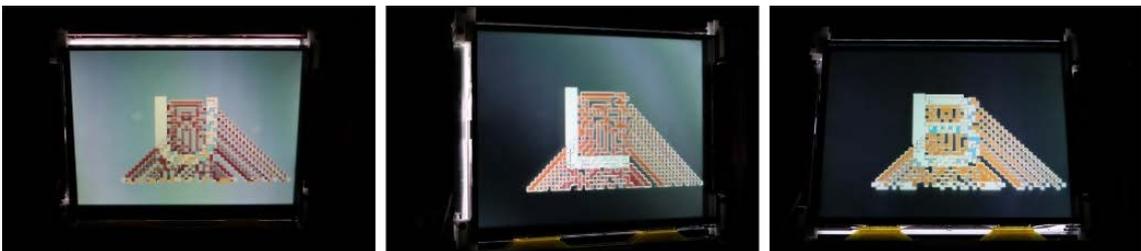
$$\begin{aligned}
 & m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\
 & = U_{k,l} \oplus U_{k+2,l+2} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l+2} \oplus B_{k+2,l}
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

$$\begin{aligned}
 & f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\
 & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+2} \oplus B_{k+2,l+1}
 \end{aligned} \tag{4.37}$$



後面 中面 前面

Fig. 4.39. 上, 左, 下の 3 視点表示を可能にする表示画像.



上 左 下

Fig. 4.40. 上, 左, 下の視点位置における観察結果.

上, 右, 下の 3 視点表示の論理式は以下の通りである. これをもとに作製した表示画像を Fig. 4.41 に示す. 作製した表示画像を 3 層液晶パネルに表示した結果を Fig. 4.42 に示す. 論理式をもとに作製した表示画像によって, 上, 右, 下の 3 視点表示を確認した.

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\ & = L_{k+2,l+1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \end{aligned} \quad (4.38)$$

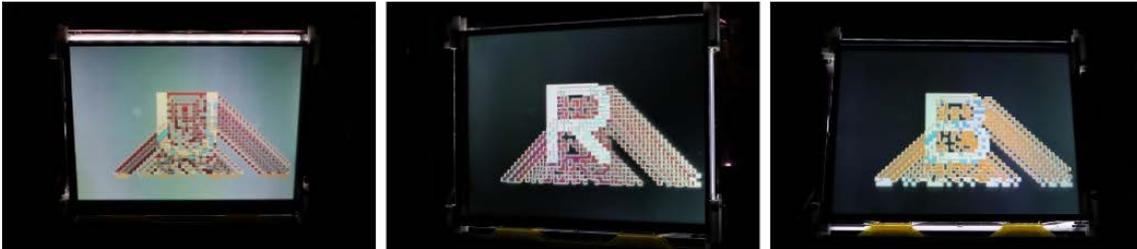
$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\ & = L_{k+1,l+1} \oplus L_{k+3,l-1} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+3,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+4,l} \end{aligned} \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus R_{k+2,l-1} \oplus R_{k+3,l} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \end{aligned} \quad (4.40)$$



後面 中面 前面

Fig. 4.41. 上, 右, 下の 3 視点表示を可能にする表示画像.



上 右 下

Fig. 4.42. 上, 右, 下の視点位置における観察結果.

左, 右, 下の 3 視点表示の論理式は以下の通りである. これをもとに作製した表示画像を Fig. 4.43 に示す. 作製した表示画像を 3 層液晶パネルに表示した結果を Fig. 4.44 に示す. 論理式をもとに作製した表示画像によって, 左, 右, 下の 3 視点表示を確認した.

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\ & = U_{k+2,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (4.41)$$

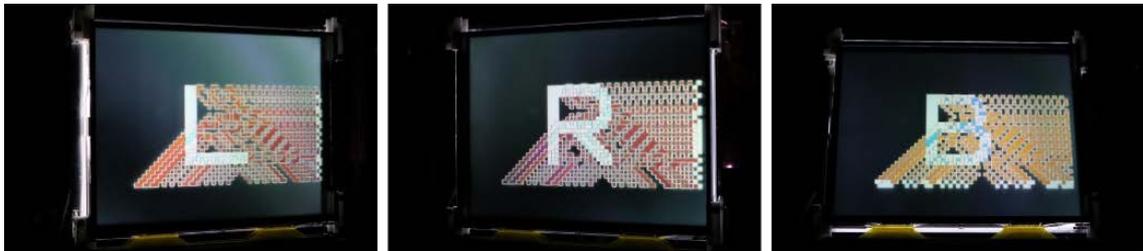
$$\begin{aligned}
& m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\
& = U_{k,l+2} \oplus U_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l+2}
\end{aligned} \tag{4.42}$$

$$\begin{aligned}
& f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\
& = U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+2}
\end{aligned} \tag{4.43}$$



後面 中面 前面

Fig. 4.43. 左, 右, 下の3視点表示を可能にする表示画像.



左 右 下

Fig. 4.44. 左, 右, 下の視点位置における観察結果.

4.6. おわりに

本章では、本論文で解決したい課題の1つである単一デバイスによる多機能表示について述べた。本研究のために作製した3層液晶ディスプレイを用いて、機構の変更を必要とせず、3枚の液晶パネルに表示する画像を切り替えることで可能になった様々な表示機能について述べた。

通常の2D表示、3層の奥行きを利用したマルチレイヤー表示、グラデーションによる輝度分配で3枚の液晶パネルの間にも像が知覚されるDFD表示などのセキュリティ表示と立体表示を可能にした。

セキュリティ表示では同一のランダムドットパターンを2枚表示することで、視点位置を限定し、覗き込み防止表示を実現した。2枚の表示画像を鍵画像とする暗号表示も実現した。多視点表示では3章で明らかにした3視点表示の論理式をもとに、水平方向の3視点表示、暗号表示と組み合わせた2視点暗号表示を実現した。さらには中央と上下左右の任意の3方向への3視点表示を可能にした。これにより、自由に視点位置を選択できるため、観察者が動いて視点位置が変わった場合でも、視点位置を追跡して3視点表示が可能になる。

第5章 AIRRによる空中多機能表示

5.1. はじめに

本章では単一のデバイスで複数の機能を有する空中ディスプレイを目的とした偏光演算型ディスプレイと AIRR を用いて実装した空中多機能ディスプレイについて報告する。

近年、空中表示技術[33, 34]が注目されており、光源から発散する光を集束させる光学系を用いて空中に実像を形成する表示技術である。空中表示を用いることで、ユーザーに高い臨場感を提供ができ、従来のディスプレイとは異なった情報提示技術として期待されている。空中像が視認される位置には物理的には何も存在しないため、赤外線センサーなどと組み合わせて、物理的には非接触な空中タッチパネルが提案されている[35-39]。このように、空中表示技術は更なる進化が期待されるディスプレイ技術の1つであるといえる。

空中表示に欠かせない光学素子として 2 面コーナリフレクタアレイを用いる DCRA(Dihedral Corner Reflector Array)[40, 41], ASKA 3D [42], 再帰反射材などが挙げられる。ここでは再帰反射による空中表示(AIRR: Aerial imaging by Retro-Reflection)[43, 44]を用いて、空中多機能表示を実現する。他の方式と比較し、迷光が少ない、視野角が 120 度と広い、低コストである点から、AIRR を採用して空中多機能表示を実現する。

5.2. 再帰反射による空中結像(AIRR)の原理

再帰反射による空中表示(AIRR: Aerial imaging by Retro-Reflection)[45-47]は再帰反射シートを用いて実像を形成する技術である。空中ディスプレイは視野角が限定されるものが多いのに対し、AIRRは広い視野角を有するため、複数人で観察する空中ディスプレイとして使用できる。また、AIRRのキーデバイスである再帰反射素子[48, 49]は交通標識など広く一般的な用途に使用されていることから、大量生産や大型化[50, 51]が比較的容易であるといえる。AIRRは光源、ハーフミラー、再帰反射シートから構成される。一般的な反射と再帰反射について、Fig. 5.1に示す。光源からの光が粗面で反射すると光は乱反射し、四方八方に広がる。また、光源からの光が鏡面で反射するときは正反射し、入射角と反射角が等しい。正反射は鏡面反射とも呼ぶ。対して、再帰反射は光源からの光を光源の方向に返す反射をいう。再帰反射には特殊な形状をした再帰反射材が必要である。

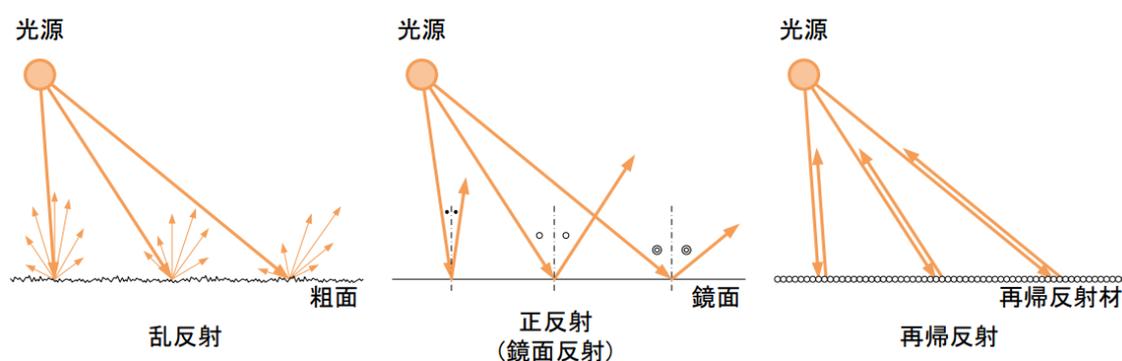


Fig. 5.1. 乱反射と正反射および再帰反射の比較.

コーナーキューブと呼ばれる鏡を直角に3面合わせにすることで再帰反射が可能である。コーナーキューブの形状を Fig. 5.2 に示す。再帰反射の原理については簡単のために、Fig. 5.3 で示したような平面で考える。ここでは底面のミラーを考えずに、側面の2面直交ミラーをZ軸方向から観察している。1枚目のミラー面に角度 θ で入射した光は、反射角 θ で正反射する。次に、直交する2枚目のミラー面には入射角 $(90-\theta)$ 度で入射し、反射角 $(90-\theta)$ 度で正反射する。2回の反射によって、入射光と反射光が平行になっていることから、直交ミラーは光を来た方向に返していることがわかる。この直交ミラーにおける反射が3面で空間的に行われることで、光を来た方向に返す再帰反射が可能になる。

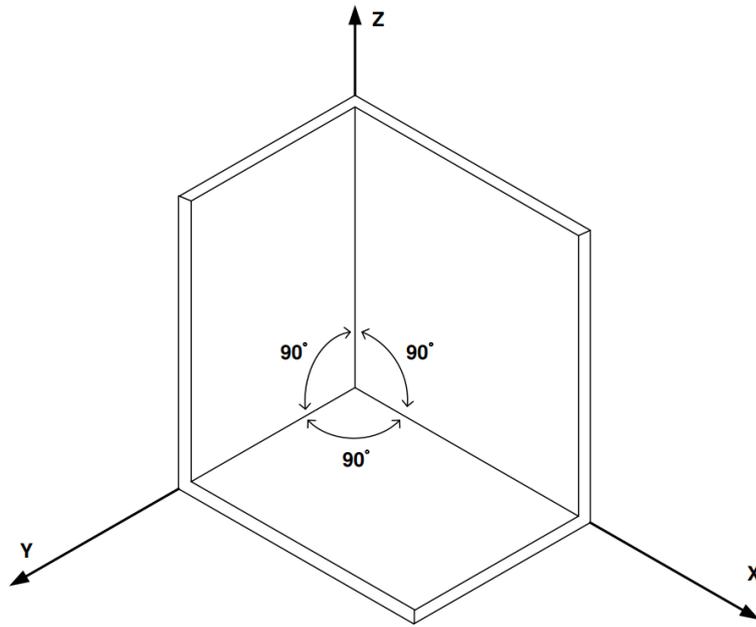


Fig. 5.2. コーナーキューブの形状.

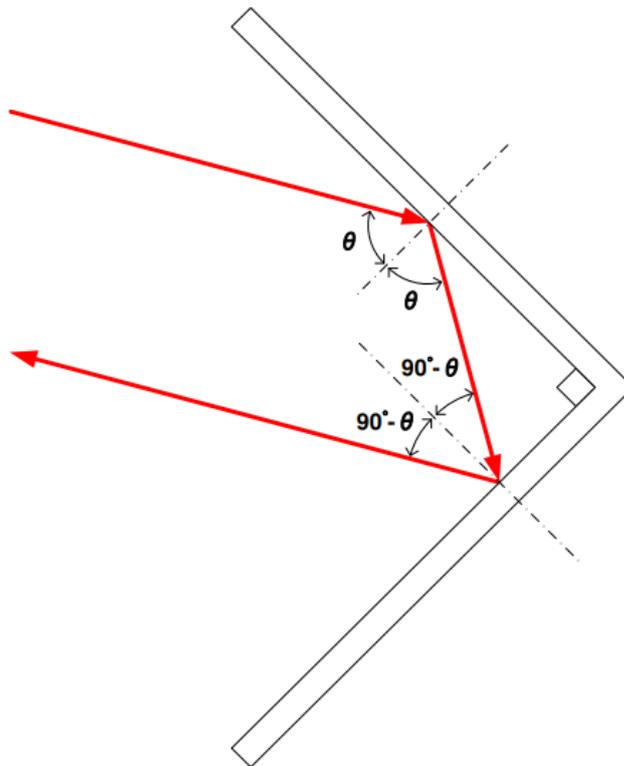


Fig. 5.3. 直交ミラーによる2回反射.

コーナーキューブの他にボールレンズを使用することでも、再帰反射は可能である。ボールレンズによる再帰反射の原理を Fig. 5.4 に示す。ボールレンズに入射した光は空間とレンズの境界で 2 度屈折する。ボールレンズの形状に合わせた反射面を設けることで、再びボールレンズに入射し、2 度屈折して空間に出たとき、入射した方向に光を返すよう設計することができる。

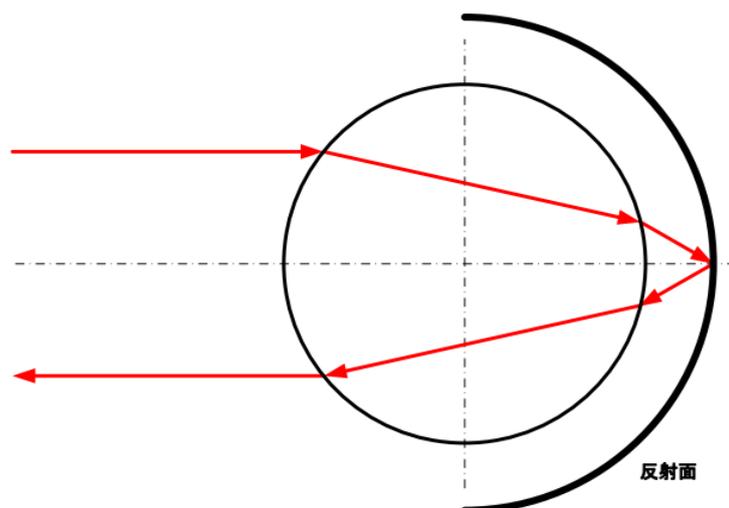


Fig. 5.4. ボールレンズによる再帰反射.

このように再帰反射を行うために必要な再帰反射シートの構造にはプリズムタイプとビーズタイプの 2 種類がある。プリズムタイプの再帰反射シートは極めて小さいコーナーキューブがシートに塗布された構造となっており、ビーズタイプは微小なボールレンズがシートに塗布されている。

次にハーフミラーの原理を示したものを Fig. 5.5 に示す。一般的にハーフミラーは入射光の半分を透過し、半分を反射するという特性を持つミラーである。透過と反射の割合は 1:1 以外でも作製できる。再帰反射シートとハーフミラーを用いた空中表示技術である AIRR の原理を Fig. 5.6 に示す。光源から広がる光はハーフミラーによって透過光と反射光に分かれる。ハーフミラーで反射された光は再帰反射シートで再帰反射され、集光しながら進む。ハーフミラーによって再度、透過光と反射光に分かれ、その透過光がハーフミラーに対して光源の面対称となる位置で一点に集まり結像し空中像が形成される。

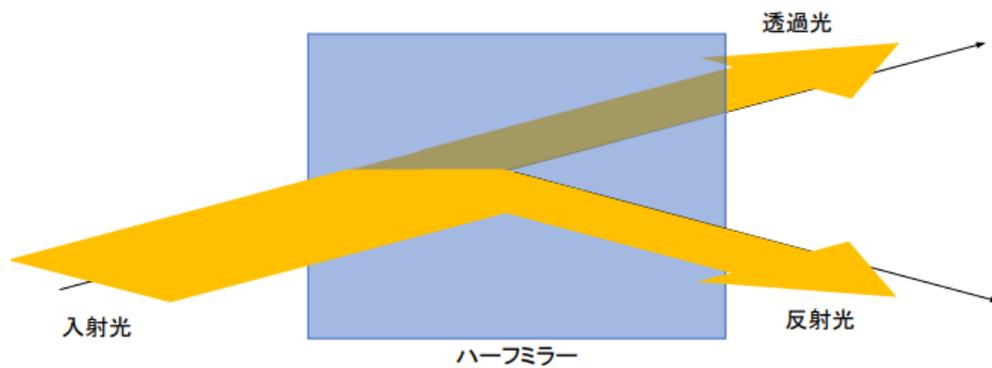


Fig. 5.5. ハーフミラーによって分かれる透過光と反射光.

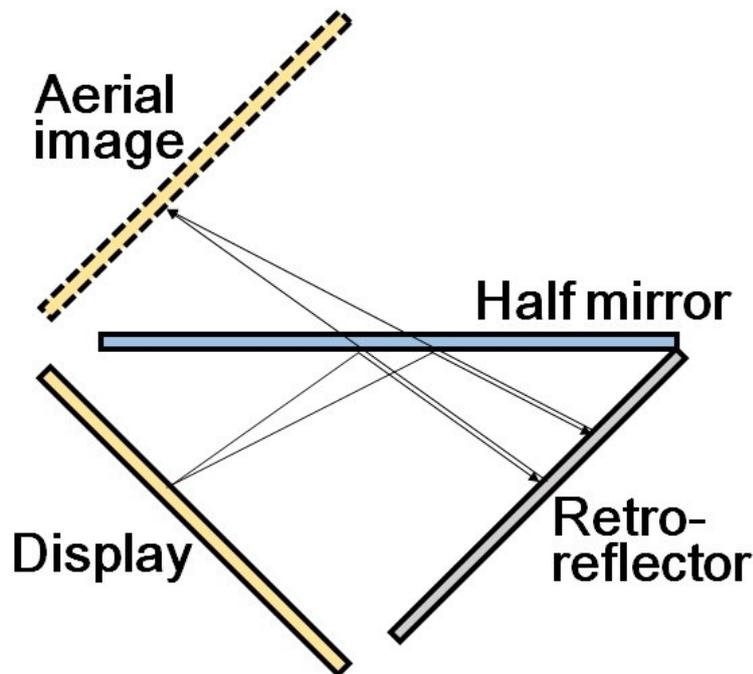


Fig. 5.6. AIRR の構成.

しかし、AIRR による空中表示において、光源からの光はハーフミラーで透過される光と、再帰反射後の再びハーフミラーに入射し、反射され光源に戻る光は空中結像に使用されず損失となることから、光の利用効率が低くなってしまふ。そこで偏光を用いて光の利用効率を向上させた空中像結像技術が pAIRR (Polarized AIRR)[52, 53] である。pAIRR は光源、反射型偏光板、1/4 波長板、再帰反射シートから構成される。反射型偏光板の原理を Fig. 5.7 に示す。反射型偏光板は直行する透過軸と反射軸がある。非偏光を光源としたとき、反射型偏光板に入射した光は、透過軸方向に偏光した光と反射軸方向に偏光した光に分解される。そのため、透過光と反射光は直線偏光であり、偏光方向は直行する。吸収型偏光板同様にベクトル成分で分解して、透過光と

反射光を考えることができるため、吸収のない理想的な反射型偏光板に完全な非偏光を入射した場合は透過光と反射光に半分ずつに分かれる。また入射光を直線偏光としたときは、反射型偏光板の透過軸と平行な直線偏光を入射させた時にはすべての光が透過し、透過軸と直交する直線偏光を入射させたとき、すべての光を反射させる。45度の直線偏光を入射した場合は、非偏光と同様に1:1に透過光と反射光にわかれる。

次に1/4波長板の原理図をFig. 5.8に示す。波長板は屈折率に異方性があることで、偏光方向によって光路長が異なる。1/4波長板は光学軸(進相軸ともいう)に直交する遅相軸方向に偏光した光を進相軸方向に偏光した光より、1/4波長だけ遅らせて射出することで1/4波長分の位相差を与える素子である。したがって、光学軸に対して方位角45度の直線偏光が1/4波長板を通ると射出された光は円偏光になる。また円偏光を入射することで直線偏光に変換することも可能である。また、方位角45度以外の直線偏光を入射させると楕円偏光となる。

1/2波長板は1/4波長板の同様の原理で、進相軸と遅相軸の光路長の差から1/2波長の位相差を発生させることができる(Fig. 5.9)。光学軸に対して方位角45度の直線偏光を入射すると、入射時の直線偏光と直交する直線偏光となるため、偏光方向を90度回転させることができる。1/4波長板を2枚重ねにすると、1/4波長の位相遅れを2度発生させることから、1/2波長板と同じ直線偏光を90度回転させる効果が得られる(Fig. 5.10)。このとき、方位角は45度に設定するとともに、2枚の1/4波長板の光学軸の向きを合わせる必要がある。

pAIRRの原理をFig. 5.11に示す。先ほどのAIRRと比較して、ハーフミラーを反射型偏光板に偏光し、再帰反射シートと1/4波長板を重ねた構成となっている。光源には直線偏光を射出するものを使用したとき、光源からの射出された直線偏光と反射型偏光板の透過軸が直交するように反射型偏光板を配置する。これにより、光源から射出された直線偏光を反射型偏光板で透過させることなく反射させることができる。反射した直線偏光は再帰反射シートによって再帰反射を行う。このとき1/4波長シートを2回通過することから、1/2波長板と同等の効果が得られ、再帰反射前後で偏光面が90度回転する。2回目に反射型偏光板に到達した直線偏光は、1回目と比較して偏光面が90度だけ回転していることから、反射型偏光板を反射することなく透過できる。透過した光は反射型偏光板に対して光源から面対称の位置で結像する。偏光を利用したことで、AIRRの損失を軽減することができ、光源が直線偏光で射出するものであれば、pAIRRにすることで、理論上はAIRRより4倍明るい像を空中で結像できる。

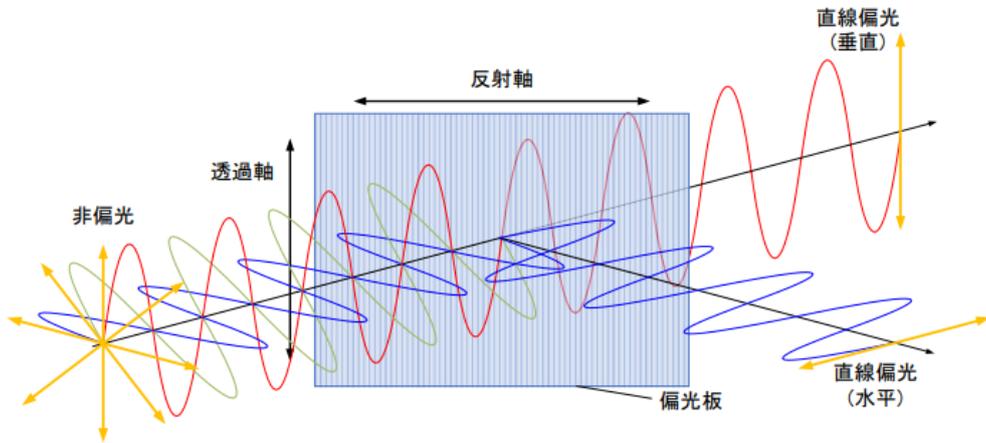


Fig. 5.7. 偏光方向によって透過光と反射光に分離する反射型偏光板.

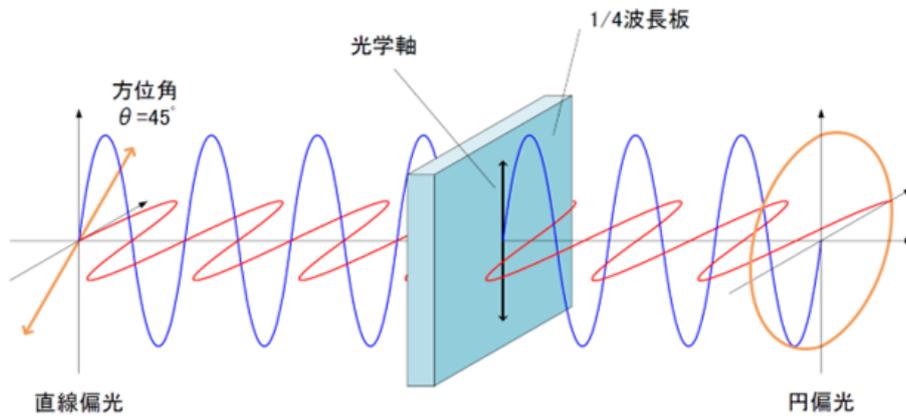


Fig. 5.8. 位相差により直線偏光を円偏光に変化させる 1/4 波長板.

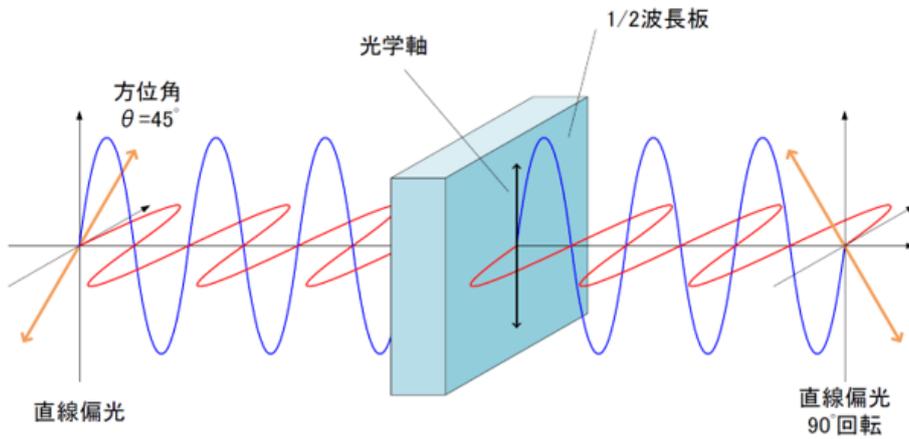


Fig. 5.9. 位相差により直線偏光を 90 度回転させる 1/2 波長板.

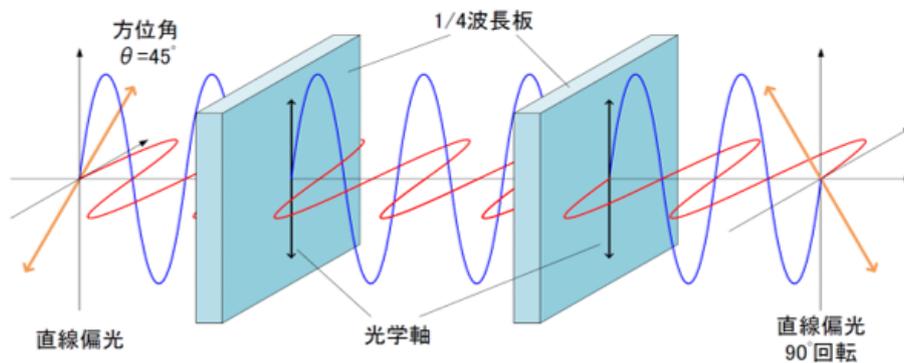


Fig. 5.10. 位相差により直線偏光を 90 度回転させる 1/2 波長板.

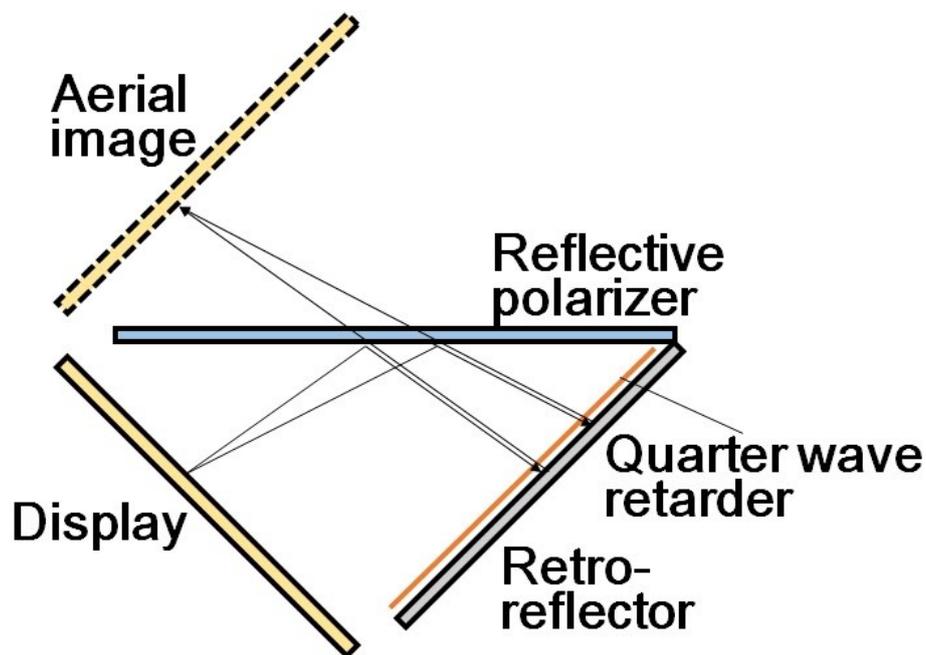


Fig. 5.11. pAIRR の構成.

5.3. 3層液晶ディスプレイを光源に用いた AIRR による空中表示

本研究で作製した偏光演算型 3 層液晶ディスプレイを AIRR の光源として使用することで、AIRR による空中多機能表示について報告する。AIRR を用いて空中多機能表示を実現するための構成を Fig. 5.12 に示す。ビームスプリッタから 45 度傾いて空中像が表示される。光源には 3 層液晶ディスプレイを使用している。ビームスプリッタには透過率、反射率ともに 50% のハーフミラーを使用し、再帰反射材はプリズムタイプを使用している。

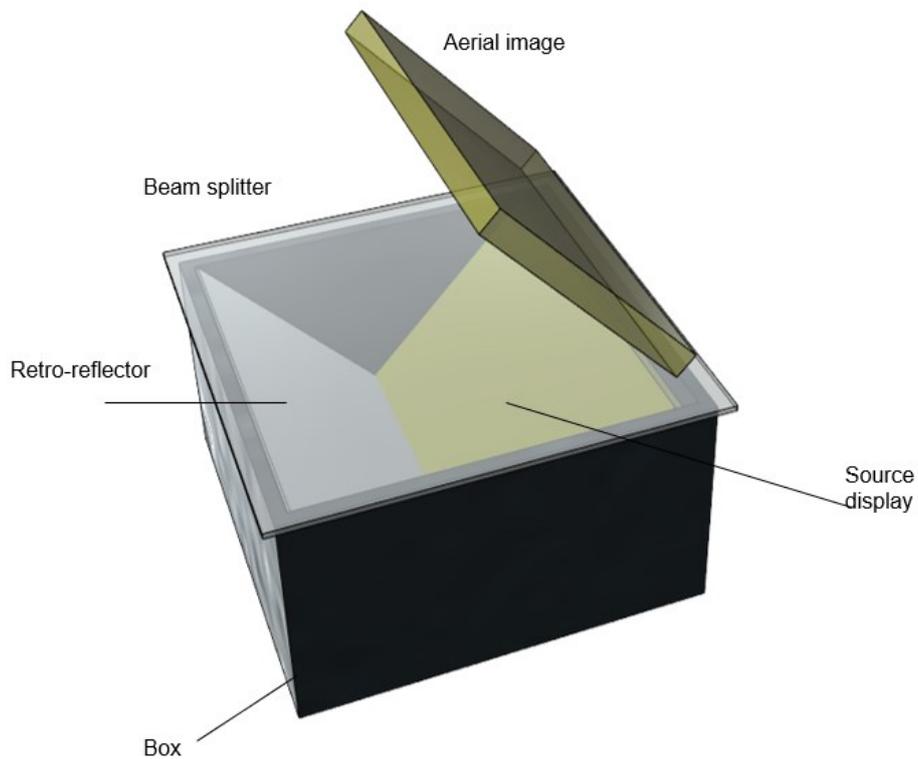


Fig. 5.12. 光源に 3 層液晶ディスプレイを用いた ARR による空中表示装置の構成.

5.3.1. 空中マルチレイヤー表示

空中マルチレイヤー表示に使用する 3 枚の表示画像は 4 章のマルチレイヤー表示と 3 枚の液晶パネルに表示する画像と同じである. 3 層空中表示を観察した結果を Fig. 5.13 に示す. 123 の表示はハーフミラーの上に 45 度傾いた状態で浮かんで見える. 3 層の液晶パネルの積層間隔(1cm)により, 視差が生じるため, 奥行きを知覚できる. また, AIRR による空中結像位置はビームスプリッタで面対象になるため, Fig. 5.14 に示すとおり, 直接ディスプレイを観察した 4 章と奥行きが反転して知覚される.



Fig. 5.13. 空中レイヤー表示の観察結果.

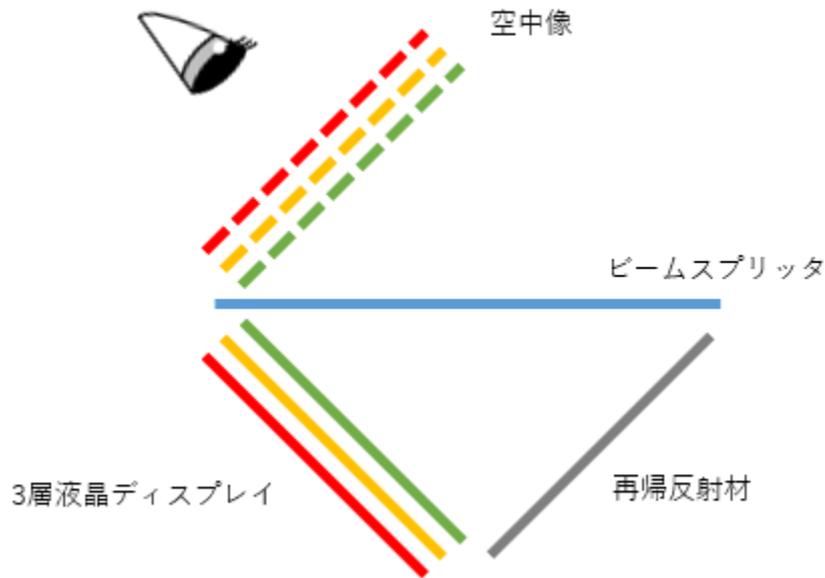


Fig. 5.14. 3層液晶ディスプレイを光源とした AIRR.
 空中像では 3層液晶ディスプレイをバックライト側から観察.

5.3.2. 空中暗号表示

暗号化された画像を 3 枚の液晶パネル表示し，視点位置のみで秘密画像が観察可能な空中暗号表示を実現した．暗号化された表示画像を空中ディスプレイに表示し，撮影した結果を Fig. 5.15 に示す．3 枚の表示画像を 1 枚ずつ対応する液晶パネルに表示している．他の 2 枚の液晶パネルは黒色の表示状態であり，偏光角が変化しないように設定している．通常の AIRR による空中表示と同様に 2D ディスプレイとしても空中表示が可能である．

3 枚の表示画像を 3 層液晶パネルに表示した結果を Fig. 5.16 に示す．前面と後面の液晶パネルに鍵画像を表示し，中央の液晶パネルに暗号化された画像を表示することで，限られた視点位置から秘密画像の「Center」が観察された．また，覗き込んだ位置からは秘密画像は確認できない．

装置を回転させ，視野角の確認する．異なる視点位置から，観察した空中像を Fig. 5.17 に示す．正面の 0 度の視点位置では復号結果が最も鮮明に見えた．ディスプレイ正面の 0 度から，空中表示を左側から覗き込んだときを正の角度，右側から覗き込んだときを負の角度で表している．観察結果からは視野角は水平方向で±4 度程度であった．4.4 度の視点位置では「Center」の 2 つ目の「e」が観察できず，-4.4 度の視点位置では「Cen」が視認できない．



Fig. 5.15. 3枚の表示画像を単独で空中表示.



Fig. 5.16. 視点位置を限定した空中暗号表示.

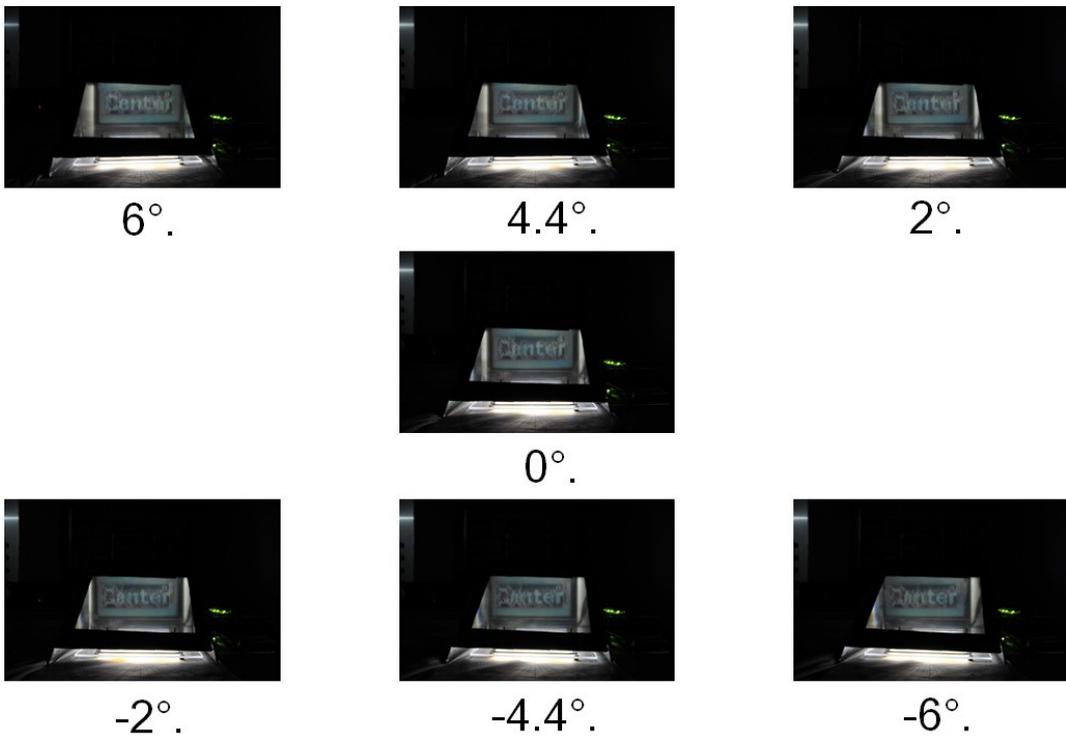


Fig. 5.17. 視野角が限定された空中暗号表示.

5.4. おわりに

本章では、初めにAIRRによる空中表示の原理について述べた。AIRRで使用する再帰反射材による再帰反射の原理ではコーナーキューブによる再帰反射の原理を詳しく説明し、ビーズによる再帰反射の原理やハーフミラーについても記した。次に偏光を応用することで結像効率を改善したpAIRRについても原理を述べた。pAIRRで使用する反射型偏光板の原理と、波長板による偏光回転の原理についても記した。

AIRRの光源として、偏光演算型3層液晶ディスプレイを使用することで、2D表示、立体表示の1つであるマルチレイヤー表示、視点位置を限定し覗き込みを防止した暗号表示などの空中多機能表示を実現した。これまでの空中表示では2Dディスプレイを光源としていたため、空中像を2Dであったが、3層液晶ディスプレイを用いることで、3段階の奥行きを持った空中表示が可能となった。例えば、空中タッチパネル用のディスプレイに使用した場合は、ボタンを押す操作を行ったとき、ボタンを奥の層の液晶パネルに表示することで、操作に対するフィードバックを返すことができる。さらに視点位置を限定した暗号空中表示では、表示される情報のセキュリティを確保できるため、ATMや医療情報端末などのアプリケーションに有効である。

第6章 結言

本論文では、これまで表示機能ごとに異なるデバイスを必要としてきたディスプレイにおいて、3枚の液晶パネルを積層した偏光演算型3層液晶ディスプレイを作製し、ハード的な機構の変更を必要とせず、3枚の液晶パネルに表示する画像を切り替えるだけで、様々な表示が可能な多機能ディスプレイを提案した。

表示機能の1つである複数視点表示においては、テンソルディスプレイと呼ばれる液晶パネルを積層したライトフィールドディスプレイ表示として報告されている。しかし、ライトフィールドを近似値に分解し、近似解を用いて各液晶パネルに表示する画像を生成しており、設計された視点位置に提示したい画像の画素値から、各層の液晶パネルに表示する画像の画素値を求める手法は明らかにされていない。この課題に対して、3層液晶ディスプレイによる3視点表示における表示画像の画素値と視点位置に提示する画像の画素値の関係式を初めて明らかにした。

近年、需要が高まっている空中表示技術において、3層液晶ディスプレイを光源に応用した。3層液晶ディスプレイを光源としたことで、これまで、ディスプレイから出た光を空中で結像させていた空中表示とは異なり、ユーザーに奥行き提示が可能となった。奥行き提示以外にも表示画像の切り替えのみで、暗号表示や覗き込み防止表示、多視点表示など、空中表示の多機能化を実現できる。空中表示技術における光源は筐体内に組み込まれるため、容易に手を触れることができなくなる。提案した手法は表示画像の切り替えのみで、表示機能を切り替えることができるため、空中表示の多機能化には極めて有効な手法である。

以下に各章で得られた結果をまとめる。

2章では先行研究である秘密分散法、視覚復号化暗号、位相差フィルムによる暗号表示と、本研究に深いつながりのある2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示について述べた。

3章では偏光演算について、位相差フィルムによる暗号表示と2層液晶ディスプレイによる暗号表示と2視点表示の原理について詳しく述べることで、2回の偏光変調によるこれまでの偏光演算の原理を示した。3層液晶ディスプレイの構成を示し、3回の偏光変調の原理をのべた。白黒の2値画像を表示したときの偏光演算の理論を示し、暗号表示と多視点表示の原理を明らかにした。さらに、この章で本論文の課題である3視点表示を実現するため、視点位置に提示する画像の画素値と3枚の表示画像の画素値の論理式を明らかにした。

4章では3章で明らかにした論理式をもとに3視点表示を実現するための表示画像の作製し、実際に3層液晶ディスプレイに表示することで、3視点表示を実現するとともに、本論文で明らかにした視点位置に提示する画像の画素値から、表示画像の画素値を求める論理式が正しいことを証明した。3視点表示の他に、2D表示、マルチレイヤー表示やDFD表示などの立体表示、暗号表示や覗き込み防止表示などのセキュリティ

表示，多視点表示とセキュリティ表示を組み合わせた 2 視点暗号表示など，ハードの変更を加えることなく，表示画像の切り替えのみでこれらの表示機能の切り替えを実現した。

5 章では，4 章で示した多機能表示を空中表示に応用した。これまでの空中表示には 2D の光源を使用しており，光源から拡散する光を空中に再結像するだけの空中に浮かぶ 2D 表示であったが，3 層液晶ディスプレイを光源としたことで，空中マルチレイヤー表示を実現したことから，空中表示で奥行き情報の提示を可能にした。また，空中暗号表示を実現したことで，空中表示に覗き込み防止の効果を付与することができた。表示画像の切り替えのみで表示機能を切り替えることができる点から，光源を筐体内に閉じ込める構成となる空中ディスプレイにおいて，有効な空中多機能表示の手法を提案できた。

今後の展望については，多視点表示では上下左右の 5 方向から 3 方向の視点位置を自由に選択できることを明らかにしたが，視点位置が隣接しない場合，すなわち中央の視点位置を含まない上下左右の 4 方向から 3 視点を選択する 3 視点表示では論理式が得られないと予想していた。しかし，3 章で示した通り，中央の視点位置を含まない 3 視点表示でも論理式が得られ，さらに 4 章で実際に 3 層液晶ディスプレイを用いて，中央の視点位置を含まない 3 視点表示を実現できた。これにより，視点位置が隣接しない 3 方向への 3 視点表示が可能であると考えることができた。本論文で明らかにした中央と上下左右の 5 方向に加え，斜めの視点位置を加えた 9 方向から任意の 3 方向を選択し，3 視点表示が実現可能か検討し，さらに柔軟に視点位置を選択するための論理式の存在を明らかにしたい。

付録

3層液晶ディスプレイによる3視点表示の論理式の導出

上下左右と中央の視点位置で観察される画像の画素値 $U_{k,l}$, $L_{k,l}$, $C_{k,l}$, $R_{k,l}$, $B_{k,l}$ と後面, 中面, および前面の3枚の表示画像の画素値 $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ の関係は以下の通りである.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

\oplus は XOR 演算を表す. それぞれの画素は黒=0, 白=1 とした2値画像とするため, 以下のように表す.

$$U_{k,l}, L_{k,l}, C_{k,l}, R_{k,l}, B_{k,l}, r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

式(1)-(5)から, 3式を組み合わせ, 連立方程式を解く. 組み合わせた3式の視点位置で観察される秘密画像の画素値から, 表示画像を生成するための論理式を得ることができる.

水平 3 方向の 3 視点表示

式(2), (3), (4)の連立方程式を解く.

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

(2) \oplus (3)

$$L_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus \cancel{m_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k,l}} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l}$$

同一の項の XOR 演算は 0 にため

$$L_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \quad (5)$$

(3) \oplus (4)

$$C_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (6)$$

(6)_{k+1}

$$C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (7)$$

(5) \oplus (7)

$$L_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (8)$$

(5)_{k+1}

$$L_{k+1,l} \oplus C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (9)$$

(6) \oplus (9)

$$L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+2,l} \quad (10)$$

(2)_{k+1}

$$L_{k+1,l} = r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l} \quad (11)$$

(3) \oplus (11)

$$L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \quad (12)$$

(3)_{k+1}

$$C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (13)$$

(4) \oplus (13)

$$C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l} \quad (14)$$

(14)_{k+1}

$$C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} = m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \quad (15)$$

(12) \oplus (15)

$$\oplus L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \quad (16)$$

式(8), (10), (16)より

$$r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+2,l} = L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} \quad (17)$$

$$m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} = \oplus L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} \quad (18)$$

$$f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} = L_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \quad (19)$$

式(2)-(4)の連立方程式を解き，式(18)-(19)を導出したことより，水平 3 方向に表示する 3 つの画像から，後面，中面，および前面に表示する画像生成のための論理式が存在が明らかになった。

垂直 3 方向の 3 視点表示

式(1), (3), (5)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

$$(1) \oplus (3)$$

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \quad (20)$$

$$(3) \oplus (5)$$

$$C_{k,l} \oplus B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (21)$$

$$(20)_{l+1}$$

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l+1} = r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (22)$$

$$(21) \oplus (22)$$

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \quad (23)$$

$$(21)_{l+1}$$

$$C_{k,l+1} \oplus B_{k,l+1} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \quad (24)$$

$$(20) \oplus (24)$$

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l+1} = f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \quad (25)$$

$$(1)_{l+1}$$

$$U_{k,l+1} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (26)$$

$$(3) \oplus (26)$$

$$= r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \quad (27)$$

$$(3)_{l+1}$$

$$C_{k,l+1} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l+1} \quad (28)$$

$$(5) \oplus (28)$$

$$C_{k,l+1} \oplus B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \quad (29)$$

$$(29)_{l+1}$$

$$C_{k,l+2} \oplus B_{k,l+1} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \quad (30)$$

$$(27) \oplus (30)$$

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+2} \oplus B_{k,l+1} = m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \quad (31)$$

式(23), (25), (31)より

$$r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} = U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l} \quad (32)$$

$$m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} = U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+2} \oplus B_{k,l+1} \quad (33)$$

$$f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} = U_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus B_{k,l+1} \quad (34)$$

式(1), (3), (5)の連立方程式を解き, 式(32)-(34)を導出したことより, 垂直 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

上, 左, 中央の3視点表示

式(1)-(3)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

(3)_{l+1}

$$C_{k,l+1} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l+1} \quad (35)$$

(1) ⊕ (35)

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l+1} = m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \quad (36)$$

(1) ⊕ (3)

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \quad (37)$$

(1)_{l+1}

$$U_{k,l+1} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (38)$$

(3) ⊕ (38)

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \quad (39)$$

(2)_{l+1}

$$L_{k,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k-1,l+1} \quad (40)$$

(2) ⊕ (40)

$$L_{k,l} \oplus L_{k,l+1} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+1} \quad (41)$$

(36) ⊕ (41)

$$\begin{aligned} & U_{k,l} \oplus L_{k,l} \oplus L_{k,l+1} \oplus C_{k,l+1} \\ &= r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \end{aligned} \quad (42)$$

(37)_{k+1}

$$U_{k+1,l} \oplus C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l} \quad (43)$$

(42) ⊕ (43)

$$\begin{aligned} & U_{k,l} \oplus U_{k+1,l} \oplus L_{k,l} \oplus L_{k,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \\ &= \oplus f_{k-1,l} \oplus \oplus f_{k-1,l+1} \oplus \oplus f_{k,l-1} \oplus \oplus f_{k,l+1} \oplus \oplus f_{k+1,l-1} \oplus \oplus f_{k+1,l} \end{aligned} \quad (43)$$

(37)_{l+1}

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l+1} = r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (44)$$

(41)_{k+1}

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \\ &= r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \end{aligned} \quad (45)$$

(44) \oplus (45)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \\ & = r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (46)$$

(39)_{k+1}

$$U_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \quad (47)$$

(46) \oplus (47)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \\ & = r_{k,l+1} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (48)$$

(2) \oplus (2)_{l+2}

$$L_{k,l} \oplus L_{k,l+2} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+2} \quad (49)$$

(39)_{k+1}

$$U_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \quad (50)$$

(49) \oplus (50)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l+1} \oplus L_{k,l} \oplus L_{k,l+2} \oplus C_{k+1,l} \\ & = m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+2} \end{aligned} \quad (51)$$

(36)_{l+1}

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l+2} = m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \quad (52)$$

(51)_{k+1}

$$\begin{aligned} & U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k+2,l} \\ & = m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \end{aligned} \quad (53)$$

(52) \oplus (53)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l+2} \oplus C_{k+2,l} \\ & = m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (54)$$

式(43)_{k+1}, (48)_{l-1}, (54)_{l-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+2,l} \\ & = U_{k,l} \oplus U_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l-1} \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \\ & = U_{k,l} \oplus U_{k+2,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+2,l-1} \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l} \\ & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l} \end{aligned} \quad (57)$$

式(1), (2), (3)の連立方程式を解き, 式(55)-(57)を導出したことから, 上, 左, 中央の3方向に表示する3つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

上, 中央, 右の3視点表示

式(1), (3), (4)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

(1)_{l+1}

$$U_{k,l+1} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (58)$$

(3)_{l+1}

$$C_{k,l+1} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l+1} \quad (59)$$

(1) ⊕ (3)

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \quad (60)$$

(1) ⊕ (59)

$$U_{k,l} \oplus C_{k,l+1} = m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \quad (61)$$

(3) ⊕ (58)

$$U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \quad (62)$$

(4)_{l+1}

$$R_{k,l+1} = r_{k-1,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (63)$$

(4) ⊕ (63)

$$\begin{aligned} & R_{k,l} \oplus R_{k,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (64)$$

(62) ⊕ (64)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (65)$$

(60)_{k+1,l+1}

$$U_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (66)$$

(65) ⊕ (66)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (67)$$

(4)_{l+2}

$$R_{k,l+2} = r_{k-1,l+2} \oplus m_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (68)$$

(4) ⊕ (68)

$$R_{k,l} \oplus R_{k,l+2} = r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (69)$$

$$(61)_{k+1,l+1} \quad U_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} = m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (70)$$

$$(69) \oplus (70) \quad \begin{aligned} & U_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+2} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (71)$$

$$(71)_{k+1} \quad \begin{aligned} & U_{k+2,l+1} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (72)$$

$$(62) \oplus (72) \quad \begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \\ &= m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (73)$$

$$(61) \oplus (64) \quad \begin{aligned} & U_{k,l} \oplus C_{k,l+1} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (74)$$

$$(74)_{k+1} \quad \begin{aligned} & U_{k+1,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (75)$$

$$(60) \oplus (75) \quad \begin{aligned} & U_{k,l} \oplus U_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \\ &= f_{k,l-1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (76)$$

式(67)_{k+1}, (73), (76)_{l+1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus r_{k+2,l+2} \\ &= U_{k+1,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus C_{k+2,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (78)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (79)$$

式(1), (3), (4)の連立方程式を解き, 式(77)-(79)を導出したことより上, 中央, 右の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

左, 中央, 下の3視点表示

式(2), (3), (5)の連立方程式を解く.

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

(2)_{k+1}

$$L_{k+1,l} = r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l} \quad (80)$$

(3)_{k+1}

$$C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (81)$$

(3) ⊕ (80)

$$L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \quad (82)$$

(2) ⊕ (3)

$$L_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \quad (83)$$

(2) ⊕ (81)

$$L_{k,l} \oplus C_{k+1,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (84)$$

(5)_{k+1}

$$B_{k+1,l} = r_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (85)$$

(5) ⊕ (85)

$$B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (86)$$

(82) ⊕ (86)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+2,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (87)$$

(83)_{k+1,l+1}

$$L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (88)$$

(87) ⊕ (88)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (89)$$

(86)_{l+1}

$$B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (90)$$

(83) ⊕ (90)

$$\begin{aligned} & L_{k,l} \oplus C_{k,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (91)$$

$$(84)_{l+1} \quad L_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l+1} = m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (92)$$

(91) \oplus (92)

$$\begin{aligned} & L_{k,l} \oplus L_{k,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \\ & = f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (93)$$

(5)_{k+2}

$$B_{k+2,l} = r_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (94)$$

(5) \oplus (94)

$$B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (95)$$

(96)_{l+1}

$$B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (96)$$

(82) \oplus (96)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l} \oplus C_{k,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ & = m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (97)$$

(84)_{k+1,l+2}

$$L_{k+1,l+2} \oplus C_{k+2,l+2} = m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+2} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (98)$$

(97) \oplus (98)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ & = m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (99)$$

式(89)_{l+1}, (93)_{k+1}, (99)より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus r_{k+2,l+2} \\ & = L_{k+1,l+1} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (100)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (101)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \\ & = L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus C_{k+2,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (102)$$

式(2), (3), (5)の連立方程式を解き, 式(100)-(102)を導出したことより左, 中央, 下の3方向に表示する3つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

中央, 右, 下の3視点表示

式(2), (3), (5)の連立方程式を解く.

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (3)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

(3)_{k+1}

$$C_{k+1,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (103)$$

(4)_{k+1}

$$R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (104)$$

(3) ⊕ (4)

$$C_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (105)$$

(4) ⊕ (103)

$$C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \quad (106)$$

(3) ⊕ (104)

$$C_{k,l} \oplus R_{k+1,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (107)$$

(5)_{k+1}

$$B_{k+1,l} = r_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (108)$$

(5) ⊕ (108)

$$\begin{aligned} & B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (109)$$

(107) ⊕ (109)

$$\begin{aligned} & C_{k,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l} \end{aligned} \quad (110)$$

(105)_{k+1}

$$C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (111)$$

(110)_{l+1}

$$\begin{aligned} & C_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (112)$$

(111) ⊕ (112)

$$\begin{aligned} & C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= f_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (113)$$

(106) \oplus (109)

$$\begin{aligned} & C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (114)$$

(105)_{*l*+1}

$$C_{k,l+1} \oplus R_{k,l+1} = r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (115)$$

(114) \oplus (115)

$$\begin{aligned} & C_{k,l+1} \oplus C_{k+1,l} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l} \end{aligned} \quad (116)$$

(5)_{*k*+2}

$$B_{k+2,l} = r_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (117)$$

(5) \oplus (117)

$$B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} = r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (118)$$

(107)_{*l*+1}

$$C_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} = m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (119)$$

(118) \oplus (119)

$$\begin{aligned} & C_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l} \end{aligned} \quad (120)$$

(106)_{*k*+1}

$$C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l} \quad (121)$$

(120)_{*l*+1}

$$\begin{aligned} & C_{k,l+2} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (122)$$

(121) \oplus (122)

$$\begin{aligned} & C_{k,l+2} \oplus C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (123)$$

式(113)_{*l*-1}, (116)_{*k*+1}, (123)_{*l*-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+2,l} \\ &= C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+2,l} \end{aligned} \quad (124)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \\ &= C_{k,l+1} \oplus C_{k+2,l-1} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \end{aligned} \quad (125)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l} \\ &= C_{k,l} \oplus C_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l} \end{aligned} \quad (126)$$

式(3), (4), (5)の連立方程式を解き, 式(124)-(126)を導出したことより中央, 右, 下の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

上, 左, 右の3視点表示

式(1), (2), (4)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

(1)_{l+1}

$$U_{k,l+1} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (127)$$

(2)_{k+1}

$$L_{k+1,l} = r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l} \quad (128)$$

(1)_{k+1}

$$U_{k+1,l} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l-1} \quad (129)$$

(2)_{l+1}

$$L_{k,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k-1,l+1} \quad (130)$$

(127) \oplus (128)

$$U_{k,l+1} \oplus L_{k+1,l} = r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \quad (131)$$

(1) \oplus (2)

$$U_{k,l} \oplus L_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (132)$$

(129) \oplus (130)

$$U_{k+1,l} \oplus L_{k,l+1} = m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \quad (133)$$

(133)_{k+1,l+1}

$$U_{k+1,l+1} \oplus L_{k+1,l+1} = r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \quad (134)$$

(2)_{k-1,l+1}

$$R_{k-1,l+1} = r_{k-2,l+1} \oplus m_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l+1} \quad (135)$$

(2) \oplus (135)

$$\begin{aligned} & R_{k-1,l+1} \oplus R_{k,l} \\ &= r_{k-2,l+1} \oplus r_{k-1,l} \oplus m_{k-1,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l} \end{aligned} \quad (136)$$

(134) \oplus (136)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l+1} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus R_{k-1,l+1} \oplus R_{k,l} \\ &= r_{k-2,l+1} \oplus r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus m_{k-1,l+1} \oplus m_{k,l} \end{aligned} \quad (137)$$

(137)_{kl+1}

$$\begin{aligned} & U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+2,l+1} \oplus R_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \end{aligned} \quad (138)$$

(131) \oplus (138)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l+1} \oplus R_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus r_{k+3,l+1} \end{aligned} \quad (139)$$

(136)_{k+1}

$$\begin{aligned} & R_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l} \end{aligned} \quad (140)$$

(133) \oplus (140)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l} \oplus L_{k,l+1} \oplus R_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l} \\ &= r_{k-1,l+1} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l} \end{aligned} \quad (141)$$

(141)_{k+1}

$$\begin{aligned} & U_{k+2,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+2,l} \\ &= r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+3,l} \end{aligned} \quad (142)$$

(132) \oplus (142)

$$\begin{aligned} & U_{k+2,l} \oplus U_{k,l} \oplus L_{k,l} \oplus L_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+2,l} \\ &= f_{k-1,l} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l-1} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+3,l} \end{aligned} \quad (143)$$

(133)_{k+2,l+1}

$$U_{k+3,l+1} \oplus L_{k+2,l+2} = m_{k+2,l+2} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+3,l} \quad (144)$$

(4)_{k+2}

$$R_{k+2,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+3,l} \quad (146)$$

(4)_{l+2}

$$R_{k,l+2} = r_{k-1,l+2} \oplus m_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (147)$$

(146) \oplus (147)

$$\begin{aligned} & R_{k,l+2} \oplus R_{k+2,l} \\ &= r_{k-1,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+3,l} \end{aligned} \quad (148)$$

(146) \oplus (147)

$$\begin{aligned} & U_{k+3,l+1} \oplus L_{k+2,l+2} \oplus R_{k,l+2} \oplus R_{k+2,l} \\ &= r_{k-1,l+2} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \oplus m_{k+3,l+1} \end{aligned} \quad (149)$$

(149)_{k+1}

$$\begin{aligned} & U_{k+4,l+1} \oplus L_{k+3,l+2} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus R_{k+3,l} \\ &= r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+3,l} \oplus m_{k+3,l+2} \oplus m_{k+4,l+1} \end{aligned} \quad (150)$$

(131) \oplus (150)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+4,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+3,l+2} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus R_{k+3,l} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+3,l} \oplus m_{k+3,l+2} \oplus m_{k+4,l+1} \end{aligned} \quad (151)$$

式(139)_{k+1, l-1}, (143)_{k+1}, (151)_{l-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\ = & U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l-1} \end{aligned} \quad (152)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\ = & U_{k,l} \oplus U_{k+4,l} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+3,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus R_{k+3,l-1} \end{aligned} \quad (153)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\ = & U_{k+1,l} \oplus U_{k+3,l} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l+1} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus R_{k+3,l} \end{aligned} \quad (154)$$

式(1), (2), (4)の連立方程式を解き, 式(152)-(154)を導出したことより上, 左, 下の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

上, 左, 下の3視点表示

式(1), (2), (5)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

(1)_{l+1}

$$U_{k,l+1} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (155)$$

(1)_{k+1}

$$U_{k+1,l} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l-1} \quad (156)$$

(2)_{k+1}

$$L_{k+1,l} = r_{k+2,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l} \quad (157)$$

(2)_{l+1}

$$L_{k,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k-1,l+1} \quad (158)$$

(155) \oplus (157)

$$U_{k,l+1} \oplus L_{k+1,l} = r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \quad (159)$$

(1) \oplus (2)

$$U_{k,l} \oplus L_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (160)$$

(156) \oplus (158)

$$U_{k+1,l} \oplus L_{k,l+1} = m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \quad (161)$$

(2)_{k+1,l+2}

$$U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l+2} = r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (162)$$

(5)_{l+1}

$$B_{k,l+1} = r_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \quad (163)$$

(5)_{k+1}

$$B_{k+1,l} = r_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (164)$$

(163) \oplus (164)

$$\begin{aligned} & B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (165)$$

(162) \oplus (165)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \end{aligned} \quad (166)$$

(159) \oplus (166)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \\ & = r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (167)$$

(161) \oplus (165)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l} \oplus L_{k,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \\ & = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \end{aligned} \quad (168)$$

(168)_{l+1}

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l+1} \oplus L_{k,l+2} \oplus B_{k,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \\ & = r_{k,l+1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k,l+3} \oplus f_{k-1,l+2} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (169)$$

(160) \oplus (169)

$$\begin{aligned} & U_{k,l} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus L_{k,l} \oplus L_{k,l+2} \oplus B_{k,l+2} \oplus B_{k+1,l+1} \\ & = f_{k-1,l} \oplus f_{k-1,l+2} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+3} \oplus f_{k+1,l} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (170)$$

(5)_{k+2,l+1}

$$B_{k+2,l+1} = r_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (171)$$

(5)_{l+3}

$$B_{k,l+3} = r_{k,l+2} \oplus m_{k,l+3} \oplus f_{k,l+4} \quad (172)$$

(171) \oplus (172)

$$\begin{aligned} & B_{k,l+3} \oplus B_{k+2,l+1} \\ & = r_{k,l+2} \oplus r_{k+2,l} \oplus m_{k,l+3} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+4} \oplus f_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (173)$$

(159) \oplus (173)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus B_{k,l+3} \oplus B_{k+2,l+1} \\ & = m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+3} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+4} \oplus f_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (174)$$

(2)_{k+1,l+3}

$$U_{k+2,l+3} \oplus L_{k+1,l+4} = m_{k+1,l+4} \oplus m_{k+2,l+3} \oplus f_{k,l+4} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (175)$$

(174) \oplus (175)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+2,l+3} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+4} \oplus B_{k,l+3} \oplus B_{k+2,l+1} \\ & = m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+3} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+4} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+3} \end{aligned} \quad (176)$$

式(167), (170)_{k+1}, (176)_{l-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\ & = U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l+2} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l} \end{aligned} \quad (177)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\ & = U_{k,l} \oplus U_{k+2,l+2} \oplus L_{k+1,l-1} \oplus L_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l+2} \oplus B_{k+2,l} \end{aligned} \quad (178)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\ & = U_{k+1,l} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus L_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l+2} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (179)$$

式(1), (2), (5)の連立方程式を解き, 式(177)-(179)を導出したことより上, 左, 下の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

上, 右, 下の3視点表示

式(1), (4), (5)の連立方程式を解く.

$$U_{k,l} = r_{k,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l-1} \quad (1)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

(2)_{k+1,l+1}

$$U_{k+1,l+1} = r_{k+1,l+2} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l} \quad (180)$$

(4)_{k+1,l+1}

$$R_{k+1,l+1} = r_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (181)$$

(4) ⊕ (180)

$$U_{k+1,l+1} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \quad (182)$$

(1) ⊕ (4)

$$U_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k+1,l} \quad (183)$$

(1) ⊕ (181)

$$U_{k,l} \oplus R_{k+1,l+1} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (184)$$

(5)_{k+1,l+1}

$$B_{k+1,l+1} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (185)$$

(5) ⊕ (185)

$$\begin{aligned} & B_{k,l} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (186)$$

(182) ⊕ (186)

$$\begin{aligned} & U_{k+1,l+1} \oplus R_{k,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (187)$$

(183)_{l+2}

$$U_{k,l+2} \oplus R_{k,l+2} = r_{k-1,l+2} \oplus r_{k,l+3} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \quad (188)$$

(187) ⊕ (188)

$$\begin{aligned} & U_{k,l+2} \oplus U_{k+1,l+1} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k,l+2} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k-1,l+2} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k,l+3} \oplus r_{k+1,l} \oplus r_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (189)$$

(184) ⊕ (186)

$$\begin{aligned} & U_{k,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+1,l+1} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k,l-1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+1,l+2} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (190)$$

$$(183)_{k+1} \quad U_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+2,l} \quad (191)$$

$$(190)_{l+1} \quad \begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+2} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (192)$$

$$(191) \oplus (191) \quad \begin{aligned} & U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+2} \\ &= f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (193)$$

$$(5)_{l+1} \quad B_{k,l+1} = r_{k,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus f_{k,l+2} \quad (194)$$

$$(194)_{k+2,l+2} \quad B_{k+2,l+3} = r_{k+2,l+2} \oplus m_{k+2,l+3} \oplus f_{k+2,l+4} \quad (195)$$

$$(194) \oplus (195) \quad \begin{aligned} & B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+3} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+2,l+3} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+4} \end{aligned} \quad (196)$$

$$(182)_{k+1} \quad U_{k+2,l+1} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l+1} \quad (197)$$

$$(196) \oplus (197) \quad \begin{aligned} & U_{k+2,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+3} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+3} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+4} \end{aligned} \quad (198)$$

$$(181)_{l+3} \quad U_{k,l+3} \oplus R_{k+1,l+4} = m_{k,l+3} \oplus m_{k+1,l+4} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+4} \quad (199)$$

$$(198) \oplus (199) \quad \begin{aligned} & U_{k+2,l+1} \oplus U_{k,l+3} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+4} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+3} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k,l+3} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+4} \oplus m_{k+2,l+1} \oplus m_{k+2,l+3} \end{aligned} \quad (200)$$

式(189)_{k+1}, (193), (200)_{l-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k,l+2} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+3} \oplus r_{k+2,l} \oplus r_{k+2,l+2} \\ &= U_{k+1,l+2} \oplus U_{k+2,l+1} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (201)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k,l+2} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+3} \oplus m_{k+2,l} \oplus m_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+2} \oplus U_{k+2,l} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+1,l+3} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l+2} \end{aligned} \quad (202)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+3} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \\ &= U_{k,l+1} \oplus U_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+1,l+2} \end{aligned} \quad (203)$$

式(1), (4), (5)の連立方程式を解き, 式(201)-(203)を導出したことより上, 右, 下の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

左, 右, 下の3視点表示

式(2), (4), (5)の連立方程式を解く.

$$L_{k,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l} \quad (2)$$

$$R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (4)$$

$$B_{k,l} = r_{k,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l+1} \quad (5)$$

(2)_{k+2}

$$L_{k+2,l} = r_{k+3,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (204)$$

(4)_{k+2}

$$R_{k+2,l} = r_{k+1,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+3,l} \quad (205)$$

(2) ⊕ (4)

$$L_{k,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k+1,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k+1,l} \quad (206)$$

(2) ⊕ (205)

$$L_{k,l} \oplus R_{k+2,l} = m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k+3,l} \quad (207)$$

(4) ⊕ (204)

$$L_{k+2,l} \oplus R_{k,l} = r_{k-1,l} \oplus r_{k+3,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \quad (208)$$

(5)_{k+2}

$$B_{k+2,l} = r_{k+2,l-1} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (209)$$

(5) ⊕ (209)

$$\begin{aligned} & B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+2,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (210)$$

(208) ⊕ (210)

$$\begin{aligned} & L_{k+2,l} \oplus R_{k,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+3,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \end{aligned} \quad (211)$$

(206)_{k+1,l+1}

$$L_{k+1,l+1} \oplus R_{k+1,l+1} = r_{k,l+1} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \quad (212)$$

(211) ⊕ (212)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l+1} \oplus L_{k+2,l} \oplus R_{k,l} \oplus R_{k+1,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \\ &= r_{k-1,l} \oplus r_{k,l-1} \oplus r_{k,l+1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus r_{k+2,l+1} \oplus r_{k+3,l} \end{aligned} \quad (213)$$

(207) ⊕ (210)

$$\begin{aligned} & L_{k,l} \oplus R_{k+2,l} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+2,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+2,l-1} \oplus f_{k-1,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+2,l+1} \oplus f_{k+3,l} \end{aligned} \quad (214)$$

(206)_{k+1}

$$L_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+2,l} \quad (215)$$

(214)_{l+1}

$$\begin{aligned} & L_{k,l+1} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+2,l} \oplus f_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+3,l+1} \end{aligned} \quad (216)$$

(215) \oplus (216)

$$\begin{aligned} & L_{k,l+1} \oplus L_{k+1,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+2,l+1} \\ &= f_{k-1,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+2,l} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+3,l+1} \end{aligned} \quad (217)$$

(5)_{k+4}

$$B_{k+4,l} = r_{k+4,l-1} \oplus m_{k+4,l} \oplus f_{k+4,l+1} \quad (218)$$

(5) \oplus (218)

$$\begin{aligned} & B_{k,l} \oplus B_{k+4,l} \\ &= r_{k,l-1} \oplus r_{k+4,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+4,l} \oplus f_{k,l+1} \oplus f_{k+4,l+1} \end{aligned} \quad (219)$$

(219)_{l+1}

$$\begin{aligned} & B_{k,l+1} \oplus B_{k+4,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+4,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+4,l+1} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+4,l+2} \end{aligned} \quad (220)$$

(207)_{k+1,l+2}

$$L_{k+1,l+2} \oplus R_{k+3,l+2} = m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+3,l+2} \oplus f_{k,l+2} \oplus f_{k+4,l+2} \quad (221)$$

(208)_{k+1}

$$L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+4,l} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+3,l} \quad (222)$$

(220) \oplus (221)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l+2} \oplus R_{k+3,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+4,l+1} \\ &= r_{k,l} \oplus r_{k+4,l} \oplus m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+3,l+2} \oplus m_{k+4,l+1} \end{aligned} \quad (223)$$

(222) \oplus (223)

$$\begin{aligned} & L_{k+1,l+2} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+3,l+2} \oplus B_{k,l+1} \oplus B_{k+4,l+1} \\ &= m_{k,l+1} \oplus m_{k+1,l} \oplus m_{k+1,l+2} \oplus m_{k+3,l} \oplus m_{k+3,l+2} \oplus m_{k+4,l+1} \end{aligned} \quad (224)$$

式(213)_{k+1}, (224)_{l-1}, (217)_{k+1, l-1} より

$$\begin{aligned} & r_{k,l} \oplus r_{k+1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus r_{k+3,l-1} \oplus r_{k+3,l+1} \oplus r_{k+4,l} \\ &= L_{k+2,l+1} \oplus L_{k+3,l} \oplus R_{k+1,l} \oplus R_{k+2,l+1} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \end{aligned} \quad (225)$$

$$\begin{aligned} & m_{k,l} \oplus m_{k+1,l-1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l-1} \oplus m_{k+3,l+1} \oplus m_{k+4,l} \\ &= L_{k+1,l+1} \oplus L_{k+3,l-1} \oplus R_{k+1,l-1} \oplus R_{k+3,l+1} \oplus B_{k,l} \oplus B_{k+4,l} \end{aligned} \quad (226)$$

$$\begin{aligned} & f_{k,l} \oplus f_{k+1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l-1} \oplus f_{k+3,l+1} \oplus f_{k+4,l} \\ &= L_{k+1,l} \oplus L_{k+2,l-1} \oplus R_{k+2,l-1} \oplus R_{k+3,l} \oplus B_{k+1,l} \oplus B_{k+3,l} \end{aligned} \quad (227)$$

式(2), (4), (5)の連立方程式を解き, 式(225)-(227)を導出したことより左, 右, 下の 3 方向に表示する 3 つの画像から, 後面, 中面, および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった.

左上, 中央, 右下の視点位置で観察される画像の画素値を $UL_{k,l}$, $C_{k,l}$, $BR_{k,l}$, 後面, 中面, おおよび前面の 3 枚の液晶パネルに表示する画像の画素値を $r_{k,l}$, $m_{k,l}$, $f_{k,l}$ としたときの画素値の関係は次の式で表すことができる.

$$UL_{k,l} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k-1,l-1} \quad (228)$$

$$C_{k,l} = r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k,l} \quad (229)$$

$$BR_{k,l} = r_{k-1,l-1} \oplus m_{k,l} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (230)$$

\oplus は XOR 演算を表す. それぞれの画素値は 2 値画像とするため, 以下のように表す.

$$UL_{k,l}, C_{k,l}, BR_{k,l}, r_{k,l}, m_{k,l}, f_{k,l} \in \{0, 1\} \quad (231)$$

式(228)-(230)の連立方程式を解くことで斜めの視点位置についても論理式が得られるか検証する.

$$(228)_{k+1,l+1}$$

$$UL_{k+1,l+1} = r_{k+2,l+2} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l} \quad (232)$$

$$(229)_{k+1,l+1}$$

$$C_{k+1,l+1} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (233)$$

$$(229) \oplus (232)$$

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \quad (234)$$

$$(228) \oplus (229)$$

$$UL_{k,l} \oplus C_{k,l} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l-1} \oplus f_{k,l} \quad (235)$$

$$(228) \oplus (233)$$

$$UL_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} = m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k-1,l-1} \oplus f_{k+1,l+1} \quad (236)$$

$$(230)_{k+1,l+1}$$

$$BR_{k+1,l+1} = r_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (237)$$

$$(230) \oplus (237)$$

$$BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (238)$$

$$(234) \oplus (238)$$

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} = \cancel{r_{k,l}} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus \cancel{m_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \quad (234)$$

$$BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus \cancel{r_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (238)$$

\Rightarrow

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (239)$$

(235)_{k+2,l+2}

$$UL_{k+2,l+2} \oplus C_{k+2,l+2} = r_{k+2,l+2} \oplus r_{k+3,l+3} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (240)$$

(239) \oplus (240)

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus \cancel{r_{k+2,l+2}} \oplus \cancel{f_{k+1,l+1}} \oplus \cancel{f_{k+2,l+2}} \quad (239)$$

$$UL_{k+2,l+2} \oplus C_{k+2,l+2} = \cancel{r_{k+2,l+2}} \oplus r_{k+3,l+3} \oplus \cancel{f_{k+1,l+1}} \oplus \cancel{f_{k+2,l+2}} \quad (240)$$

 \Rightarrow

$$UL_{k+1,l+1} \oplus UL_{k+2,l+2} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k+3,l+3} \quad (241)$$

(236) \oplus (238)

$$UL_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} = \cancel{m_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \oplus f_{k-1,l-1} \oplus \cancel{f_{k+1,l+1}} \quad (236)$$

$$BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus \cancel{m_{k,l}} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \oplus \cancel{f_{k+1,l+1}} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (238)$$

 \Rightarrow

$$UL_{k,l} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus BR_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k,l} \oplus f_{k-1,l-1} \oplus f_{k+2,l+2} \quad (242)$$

(242)_{k+1,l+1}

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+2,l+2} = r_{k,l} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus f_{k,l} \oplus f_{k+3,l+3} \quad (243)$$

(235) \oplus (243)

$$UL_{k,l} \oplus C_{k,l} = \cancel{r_{k,l}} \oplus \cancel{r_{k+1,l+1}} \oplus f_{k-1,l-1} \oplus \cancel{f_{k,l}} \quad (235)$$

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+2,l+2} = \cancel{r_{k,l}} \oplus \cancel{r_{k+1,l+1}} \oplus \cancel{f_{k,l}} \oplus f_{k+3,l+3} \quad (243)$$

 \Rightarrow

$$UL_{k,l} \oplus UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+2,l+2} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+2,l+2} = f_{k-1,l-1} \oplus f_{k+3,l+3} \quad (244)$$

(230)_{k+2,l+2}

$$BR_{k+2,l+2} = r_{k+1,l+1} \oplus m_{k+2,l+2} \oplus f_{k+3,l+3} \quad (245)$$

(230) \oplus (245)

$$BR_{k,l} \oplus BR_{k+2,l+2} = r_{k-1,l-1} \oplus r_{k+1,l+1} \oplus m_{k,l} \oplus m_{k+2,l+2} \oplus f_{k+1,l+1} \oplus f_{k+3,l+3} \quad (246)$$

(246)_{k+1,l+1}

$$BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} = r_{k,l} \oplus r_{k+2,l+2} \oplus m_{k+1,l+1} \oplus m_{k+3,l+3} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+4,l+4} \quad (247)$$

(234) \oplus (247)

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} = \cancel{r_{k,l}} \oplus \cancel{r_{k+2,l+2}} \oplus m_{k,l} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \quad (234)$$

$$BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} = \cancel{r_{k,l}} \oplus \cancel{r_{k+2,l+2}} \oplus \cancel{m_{k+1,l+1}} \oplus m_{k+3,l+3} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+4,l+4} \quad (247)$$

⇒

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} = m_{k,l} \oplus m_{k+3,l+3} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+4,l+4} \quad (248)$$

(236)_{k+3,l+3}

$$UL_{k+3,l+3} \oplus C_{k+4,l+4} = m_{k+3,l+3} \oplus m_{k+4,l+4} \oplus f_{k+2,l+2} \oplus f_{k+4,l+4} \quad (249)$$

(248) ⊕ (249)

$$UL_{k+1,l+1} \oplus C_{k,l} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} = m_{k,l} \oplus \cancel{m_{k+3,l+3}} \oplus \cancel{f_{k+2,l+2}} \oplus \cancel{f_{k+4,l+4}} \quad (248)$$

$$UL_{k+3,l+3} \oplus C_{k+4,l+4} = \cancel{m_{k+3,l+3}} \oplus m_{k+4,l+4} \oplus \cancel{f_{k+2,l+2}} \oplus \cancel{f_{k+4,l+4}} \quad (249)$$

⇒

$$UL_{k+1,l+1} \oplus UL_{k+3,l+3} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+4,l+4} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} = m_{k,l} \oplus m_{k+4,l+4} \quad (250)$$

式(241)_{k+1,l+1}, (250), (244)_{k+1,l+1} より

$$r_{k,l} \oplus r_{k+4,l+4} = UL_{k+2,l+2} \oplus UL_{k+3,l+3} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+3,l+3} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+2,l+2} \quad (251)$$

$$m_{k,l} \oplus m_{k+4,l+4} = UL_{k+1,l+1} \oplus UL_{k+3,l+3} \oplus C_{k,l} \oplus C_{k+4,l+4} \oplus BR_{k+1,l+1} \oplus BR_{k+3,l+3} \quad (252)$$

$$f_{k,l} \oplus f_{k+4,l+4} = UL_{k+1,l+1} \oplus UL_{k+2,l+2} \oplus C_{k+1,l+1} \oplus C_{k+3,l+3} \oplus BR_{k+2,l+2} \oplus BR_{k+3,l+3} \quad (253)$$

式(228)-(230)の連立方程式を解き，式(251)-(253)を導出したことより左上，中央，右下の 3 方向に表示する 3 つの画像から，後面，中面，および前面に表示する画像生成のための論理式の存在が明らかになった。

参考文献

- [1] 内閣府, “第 5 期科学技術基本計画 Society 5.0,”
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- [2] D. Lanman, G. Wetzstein, M. Hirsch, W. Heidrich, and R. Raskar, “POLARIZATION FIELDS,” *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Asia 2011)*.
- [3] G. R. Blakley, “Safeguarding cryptographic keys,” *Managing Requirements Knowledge, International Workshop on (AFIPS)*, p. 313, 12 (1979).
- [4] A. Shamir, “How to share a secret,” *Communications of the ACM*, Vol. 22, No. 11, pp. 612-613(1979).
- [5] M. Naor, and A. Shamir, “Visual cryptography,” *Lecture Notes in Computer Science (Advance in Cryptology- EUROCRYPT '94)*, Vol. 950, Elsevier, pp. 1-12 (1990).
- [6] T. Imagawa, S. Suyama, and H. Yamamoto, “Visual Cryptography Using Polarization-Modulation Films,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 48 09LC02 (2009).
- [7] W.A. シャークリフ: “偏光とその応用”, 共立出版, 1985.
- [8] Y. Fujimura, T. Nagatsuka, H. Yoshimi, and T. Shimomura, “Optical properties of retardation films for STN LCDs,” *SID Int. Symp. Digest Tech.*, 739-742 (1991).
- [9] S. Fukushima, T. Kurokawa, and Y. Sakai, “Image encipherment based on optical parallel processing using spatial light modulators,” *IEEE Trans. Photon. Tech. Lett.* 3, pp. 1133-1135 (1991).
- [10] H. Tu, C. Cheng, and M. Chen, “Optical image encryption based on polarization encoding by liquid crystal spatial light modulators,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 6 524 (2004).
- [11] M. Date, T. Hisaki, H. Takada, S. Suyama, and K. Nakazawa, “Luminance addition of a stack of multidomain liquid-crystal displays and capability for depth-fused three-dimensional display application,” *Applied Optics*, 44, pp. 898-905 (2005).
- [12] H. Yamamoto and Y. Hayasaki, “Secure Display by use of visual cryptography based on polarization processing,” *Proc. IDW '07 (The 14th International Display Workshops)*, 1757-1760 (2007).
- [13] H. Yamamoto, “Multi-functional display by use of polarization processing,” *Technical Digest of Information Photonics 2008*, pp. 254-255 (2008).
- [14] H. Yamamoto, and S. Suyama, “Spatial-coding-based 2-D / 3-D / P-P display,” *Proc. SPIE*, 72371Y (2009).

- [15] 山本裕紹: “液晶パネルを用いたセキュアディスプレイ”, 液晶, 24, pp. 255-262 (2010).
- [16] 大越 考敬: 三次元画像工学(朝倉書店, 東京, 1991年) p. 11.
- [17] H. Yamamoto, M. Kouno, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu, and N. Nishida, “Enlargement of viewing area of stereoscopic full-color LED display by use of a parallax barrier,” *Applied Optics*, Vol. 41, pp. 6907-6919 (2002).
- [18] H. Yamamoto, T. Sato, S. Muguruma, Y. Hayasaki, Y. Nagai, Y. Shimizu, and N. Nishida, “Stereoscopic full-color Light emitting diode display using parallax barrier for different interpupillary distances,” *Optical Review*, Vol. 9, pp. 244-250 (2002).
- [19] H. Gotoda, “A multilayer liquid crystal display for autostereoscopic 3D viewing,” *Proc. SPIE*, Vol. 7524, 75240P (2010).
- [20] D. Lanman, G. Wetzstein, M. Hirsch, W. Heidrich and R. Raskar: “Polarization fields: dynamic light field display using multi-layer LCDs”, *ACM Transactions on Graphic (SIGGRAPH Asia 2011)*.
- [21] 山本裕紹, “液晶式画像表示装置および液晶式画像表示方法”, 特願 2006-081836 (2006), 特許第 5087774 号 (2012).
- [22] K. Uchida, H. Yamamoto, and S. Suyama, “Multi-functional display by use of three-layered LCD panels,” *IMID 2013 DIGEST*, p. 228 (2013).
- [23] 藤掛英夫, “液晶ディスプレイ”, *映像メディア学会誌* Vol. 61, No. 3 (2007).
- [24] H. Yamamoto, Y. Hayasaki, and N. Nishida, “Securing information display by use of visual cryptography,” *Optics Letters*, Vol. 28, pp. 1564-1566 (2003).
- [25] H. Yamamoto, Y. Hayasaki, and N. Nishida, “Secure information display with limited viewing zone by use of multi-color visual cryptography,” *Optics Express*, Vol. 12, pp. 1258-1270 (2004).
- [26] 高田英明, 陶山史朗, 伊達宗和, 昼間香織, 中沢憲二: “前後 2 面の LCD を積層した小型 DFD ディスプレイ”, *映像メディア学会誌* Vol. 58, No. 6, pp. 807-810 (2004).
- [27] 河合隆史, 盛川浩志, 太田啓路, 阿部信明, “3D 立体映像表現の基礎”, オーム社, 2010年9月.
- [28] 大山 正, “視覚心理学への招待 見えの世界へのアプローチ”, サイエンス社, 2000年11月.
- [29] S. Suyama H. Takada, and S. Ohtsuka, “A Direct-Vision 3-D Display Using a New Depth-Fusing Perceptual Phenomenon in 2-D Displays with Different Depth,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E85-C, No.11, pp.1911-1915 (2002).
- [30] 園部博史, 定國 溪, 山本裕紹, 陶山 史朗, “DFD(Depth-fused 3-D)表示の飛び

出し知覚の評価 — 面間の距離による飛び出し知覚の変化 —”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 35, No. 22, 3DIT2011-55, IDY2011-22 (2011). 20110616 NICT (京都府精華町).

- [31] 園部 博史, 定國 溪, 山本 裕紹, 陶山 史朗, “飛び出し DFD 表示方式の知覚される奥行き量の変化”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2011 in Osaka 講演予稿集 CD, P20 (2011). 2011 年 11 月 28 日. 大阪大学 (吹田市).
- [32] S. Suyama, S. Ohtsuka, H. Takada, K. Uehira, and S. Sakai, “Apparent 3-D image perceived from luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths,” Vision Res. 44, pp. 785-793 (2004).
- [33] B. Javidi, A. Carnicer, J. Arai, T. Fujii, H. Hua, H. Liao, M. Martínez-Corral, F. Pla, A. Stern, L. Waller, Q. Wang, G. Wetzstein, M. Yamaguchi, and H. Yamamoto, “Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display,” Optics Express, Vol. 28, pp. 32266-32293 (2020).
- [34] Jason Geng, “Three-dimensional display technologies,” Advances in Optics and Photonics, Vol. 5, pp. 456-535 (2013).
- [35] 東芝テック, “世界初※! 非接触・空中ディスプレイ技術を POS レジに採用『デジ POS』の実証試験をセブン-イレブン店舗にて開始,”
https://www.toshibatec.co.jp/release/20220128_01.html.
- [36] 日刊スポーツ, “「空中ディスプレイ」が脚光 SF 映画の世界現実にも.”
<https://www.nikkansports.com/general/nikkan/news/202012200000114.html>.
- [37] 日立オムロンターミナルソリューションズ株式会社, “医療機関や公共施設、製造現場などの機器を利用する環境で空中でのボタン操作によるタッチレスソリューションを展開,” <https://www.hitachi-omron-ts.co.jp/news/2020/202005-001.html>.
- [38] マクセルホールディングス株式会社, “高輝度で視認性のよい空中映像と高精度の空中操作が可能な非接触 HMI 「Advanced Floating Image Display」を開発,”
https://ssl4.eir-parts.net/doc/6810/ir_material21/144618/00.pdf.
- [39] 富士通フロンテック株式会社, “広島銀行様、長野県信用組合様と共同で新型コロナウイルス感染症の感染防止対策をした ATM の実証実験を開始,”
<https://www.fujitsu.com/jp/group/frontech/about/resources/news/press-releases/2020/1215.html>.
- [40] Y. Maeda, “Floating image display based on a dihedral corner reflector array,” Proc. IDW 22, pp. 822-825 (2015).
- [41] "Parity Innovations," <https://www.piq.co.jp/>.
- [42] 藤島智彦, 大坪誠, “光学結像装置に使用する光制御パネルの製造方法,” 特開 962011-175297 (2011).
- [43] H. Yamamoto, and S. Suyama, “Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR),” SID

- 2013 DIGEST, pp. 895-897 (2013).
- [44] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *Optics Express*, Vol. 22, pp. 26919-26924 (2014).
- [45] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, "Multilayered floating display by use of retro-reflector," *Proc. IWH' 14*, pp. 34-35 (2014).
- [46] Y. Tokuda, A. Hiyama, M. Hirose, and T. Large, "Comparison of material combinations for bright and clear floating image by retro-reflective re-imaging technique," *Proc. IDW' 14*, pp. 818-819 (2014).
- [47] Y. Tokuda, A. Hiyama, M. Hirose, and H. Yamamoto, "R2D2 w/ AIRR: Real time & Real space Double-Layered Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection," *Proc. SIGGRAPH Asia'15, Emerging Technologies* (2015).
- [48] 日本カーバイド工業株式会社, "再帰反射シート,"
https://www.carbide.co.jp/product/retroreflective_material/
- [49] 日本カーバイド工業株式会社, "空中ディスプレイ用リフレクター,"
https://www.carbide.co.jp/product/airial_display/
- [50] S. Onose, T. Okamoto, K. Onuki, M. Takahashi, H. Yamamoto, "Developments of Large Aerial LED Display with Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)," *IMID 2016 DIGEST*, E45-3(2016).
- [51] M. Yasugi, H. Yamamoto, "Exploring the combination of optical components suitable for the large device to form aerial image by AIRR," *Proc. IDW*, Vol. 26, pp. 1382-1383 (2019).
- [52] Y. Tokuda, and H. Yamamoto, "Illumination & Display Polarized aerial imaging by retroreflection for 2.5 D floating image displays," *SPIE Newsroom*.
- [53] K. Onuki, M. Nakajima, T. Okamoto, N. Kawagishi, and H. Yamamoto, "Brightness improvement by polarization modulation in the aerial imaging by retro-reflection (AIRR)," *proc. OSA'16*, pp. JT3A.65 (2016).

謝辞

本論文の執筆にあたり、2011年の徳島大学光応用工学科での研究室配属依頼から本日に至るまで、指導教員としてご指導頂きました山本裕紹教授に感謝申し上げます。徳島大学での研究室配属から同大学院修了までの間に加え、社会人学生として宇都宮大学大学院に入学してから本日に至るまでの10年以上に渡る大変長い期間、研究活動に関しまして様々にご指導を頂きましたこと深く感謝いたします。

本論文の副査をお引き受けいただいた玉田洋介准教授、藤村隆史准教授、副専門研修にてご指導いただいた早崎芳夫教授、杉原興浩教授に感謝申し上げます。玉田洋介准教授、藤村隆史准教授、予備審査及び資格審査にて、本論文について多くのご助力、ご指導を頂きました。深く感謝いたします。早崎芳夫教授、杉原興浩教授には予備審査及び資格審査では、本論文についてご助言頂きましたことに加え、副専門研修の指導を担当頂き、感謝申し上げます。早崎教授からの課題ではニアアイディスプレイ、LiDAR等の歴史と現状についての調査し、開発品の社会実装に向けたアプローチについて、気づきを得ることができました。杉原教授には光通信について講義頂き、課題では以前、業務で取り組んでいた開発テーマを振り返る機会を頂きました。講義頂いた内容から解決手段に気づくことができました。

大谷利幸教授、NATHAN HAGEN 教授には幾何光学についてご指導いただき、感謝申し上げます。徳島大学時代にすでに履修済みではありますが、復習のための受講を認めて頂いたことありがたく思います。幾何光学について理解が深まり、業務にも活かすことができました。業務の課題についても相談に乗って頂きましたこと感謝いたします。

山本研究室の陶山史朗特任教授には2011年当時の徳島大学 陶山・山本研究室時代から本日に至るまでの大変長い間、ご指導頂きましたこと深く感謝いたします。研究を含め様々な面で相談に乗って頂きましたこと、大変感謝申し上げます。

私が在籍していた当時の徳島大学 陶山・山本研究室の先輩、同期、後輩にあたる皆様にも感謝申し上げます。皆様に助言や協力を頂きましたおかげで、卒業論文や修士論文に加え、博士論文まで執筆することができました。

宇都宮大学山本研究室の学生並びにOBの皆様には、研究活動および論文執筆、学会発表など様々な面でご協力いただきましたこと感謝いたします。また山本研究室OBで日本信号株式会社に入社頂いた皆様の存在のおかげで、社会人として恥ずかしくない先輩でいるために気を引き締めて研究および本論文の執筆に励むことができました。感謝申し上げます。現在は皆様と部署が違いますが、いつか一緒に宇都宮大学で身につけた知識を活かして仕事ができる日が来ることを楽しみにしております。業務を続けながらの博士後期課程進学を承認頂きました日本信号株式会社の上司の皆様には大

大変感謝申し上げます。

最後に、徳島大学、大学院時は学費や生活面での支援を頂き、宇都宮大学では業務と学業の状況で精神的な支えになってくれた両親に感謝いたします。

研究業績

A. 査読付き原著論文

1. Keitaro Uchida, Shusei Ito, Hirotsugu Yamamoto, “Multifunctional aerial display through use of polarization-processing display,” *Optical Review*, 24, 72-79 (2017).
2. Keitaro Uchida, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, “Formulation and Evaluation of Polarization-modulated Triple-view Information Display with Three TN-LCD Layers,” *Optical Review*, (Accepted)

B. 受賞

1. 2014年3月 徳島大学工業会賞

C. 国際学会発表

1. Keitaro Uchida, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, “Secure display with triple views based on polarization modulations by use of three-layered LCD panels,” The Second Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics, C033(2 pages), 2012.
2. Keitaro Uchida, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, “Three-layered secure display based on polarization modulation,” The 19th International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2012, VHFp-6(pp.1329-1332), 2012.
3. Keitaro Uchida, Hirotsugu Yamamoto, Shiro Suyama, “Multi-functional by use of three-layered LCD panels,” The 13th International Meeting on Information Display, 50-4(P.228), 2013.
4. Keitaro Uchida, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, “Horizontal and vertical triple-view display by use of three-layered LCD panels,” JSAP-OSA2013, 17p-D5-11(1 page), 2013.
5. Keitaro Uchida, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto, “Triple-view and secure dual-view display by use of three-layered LCD panels,” The 20th International Display Workshops, FMCp-13(pp. 610-613), 2013.
6. Keitaro Uchida, Hirotsugu Yamamoto, Shiro Suyama, “Deterministic Formulas for Horizontal and Vertical Triple-View Display,” The 12th Laser Display and Lighting Conference (LDC2023), LDC-PD-04(2 pages), 2023.

D. 国内学会発表

1. 内田景太郎, 陶山史朗, 山本裕紹: “3層の液晶パネルによる多機能ディスプレイ,” レーザー学会学術講演会第32回年次大会, H201aVII02(1/2頁), 2012.
2. 内田景太郎, 陶山史朗, 山本裕紹, “3層の液晶パネルによる偏光変調を利用した偏光演算型セキュアディスプレイ,” 第6回新画像システム・情報フォトンクス研究討論会 予稿集, pp. 37-38, 2012.
3. 内田景太郎, 陶山史朗, 山本裕紹, “3層液晶ディスプレイによる偏光変調型セキュアディスプレイの視野角,” 第73回応用物理学会学術講演会, 12p-F3-5(1頁), 2012.
4. 内田景太郎, 陶山史朗, 山本裕紹, “3層の液晶ディスプレイによる偏光演算を用いた3視点セキュアディスプレイ,” Optics & Photonics Japan 2012, 25pP17(2頁), 2012.
5. 内田景太郎, 山本裕紹, 陶山史朗, “3層の液晶パネルによる偏光変調を用いた2視点暗号表示,” 第60回応用物理学会春季学術講演会, 30a-PA1-1(1頁), 2013.
6. 内田景太郎, 山本裕紹, 陶山史朗, “2枚の任意画像を鍵として用いる3層液晶セキュアディスプレイ,” Optics & Photonics Japan 2013, 13pP15(2頁), 2013.
7. 内田景太郎, 山本裕紹, 陶山史朗, “3層液晶パネルを用いた偏光演算による多機能表示,” 発光型/非発光型ディスプレイ合同研究会, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 38, No. 2, pp. 129-132, 2014.

E. 特許（登録済）

1. 内田景太郎(50%), 石川智之(50%), 測距装置, 特願 2019-139784(特開 2021-21691, 特許番号 7313956), 2019年7月30日出願.

F. その他（連名による学協会での発表）

1. 山本裕紹, 内田景太郎, 高橋昌史, 陶山史朗: “3層液晶パネルによる3視点表示およびセキュア2視点表示,” 映像メディア学会誌 Vol. 68, No. 10, pp. J460-J463, 2014.