

3D ディスプレイにおける立体視可能領域最適化に関する研究

池田 匡視^{a)}・宮崎 貴大^{b)}・岡崎 直宣^{c)}

Study on Optimization of Stereoscopic Viewing Space for 3D Display

Masami IKEDA, Takahiro MIYAZAKI, Naonobu OKAZAKI

Abstract

The lenticular lens type autostereoscopic display is paid to attention as next generation's display device. However, its narrow stereoscopic viewing space brings eyestrain or inconvenience to the viewers. In this paper, to solve the above problem, we propose a method for the optimum distribution of the pixels corresponding to the position of the viewer for lenticular lens type autostereoscopic display. This method focused on angle of light refractive by lenticular lens. We estimate the the position of viewer's eyes and angle between viewer and the center of display, and calculate the angle formed by the eye position and the display. Finally, the best position to the pixel for the viewer is calculated from this angle. We made an experimental lenticular lens type 3D-display to demonstrate that the proposed method sufficiently improve the performance.

Keywords: Autostereoscopic Display, Lenticular Lens, Optimum Distribution of the Pixels

1. はじめに

液晶パネルの発達や映画などのコンテンツの普及により、立体感のある映像を視聴者に提供する 3D ディスプレイが現在注目されている。3D ディスプレイにはいくつかの方式が存在するが、大きく分けて眼鏡方式と裸眼方式がある。本論文では、これから普及してくるであろう裸眼方式の 3D ディスプレイ、特にレンチキュラーレンズを用いるレンチキュラー方式を対象とし、表示画素を視聴者の位置に合わせ動的に変化させることによって、立体視可能領域を視聴者に最適化する手法を提案する。ここで、立体視可能領域とは視聴者が映像を立体的に見ることができる領域のことである。レンチキュラーレンズは、かまぼこ状のレンズがたくさん並んだ形をしており、各レンズに同じ角度で入射した光を並行に射出する特性を持っている。この特性を利用して左右の眼に異なる光を射出することで視差を作り出し、視聴者に立体視を提供しているが、視差を得られる領域に限られる、ユーザの目に負担をかけ不快感を与えるとといった問題がある。

そこで本論文では、レンチキュラーレンズによって屈折する光の角度に着目し、適切な画素から光を出すことで、立体視可能領域を変化させユーザの視聴位置に合わせた最適な立体映像を提供する手法を提案する。さらに、提案

a) 情報システム工学専攻大学院生

b) 情報システム工学科学部生

c) 情報システム工学科教授

手法を検証するため 3D ディスプレイを作成し、評価実験により、提案手法の有効性を示す。

2. 3D ディスプレイについて

人間の目が物を立体的に見ることができるのは、左目と右目で異なる画像を認識しているためである。人間の左目と右目は約 65mm 離れているため、その分だけ左右にずれた画像を見ていることになる。この左目と右目の画像のずれを視差と呼び、視差によって物体の奥行きを得ている。3D ディスプレイでは、この視差を人工的に作り出し視聴者に立体感を与えている。眼鏡方式は、左目用画像と右目用画像を同一面に重ねて表示、または、短い間隔で交互に表示し、専用の眼鏡型デバイスによって表示された画像を左目用画像と右目用画像に分離することで立体視を可能としている。主な眼鏡方式には映像を赤と青の光で重ねて表示し、左右に赤と青のカラーフィルタがついた眼鏡で画像を分離するアナグリフ方式、左右の映像に直交する直線偏光や円偏光をかけ重ねて投影し、偏光フィルタのついた眼鏡によって分離する偏光眼鏡方式、映像を交互に再生し、左右の視界が交互に遮蔽される液晶シャッターを備えた眼鏡によって立体感を得る液晶シャッター眼鏡方式などがある。一方、裸眼方式では、空間に複数の視点を設定し、それぞれの視点に対して異なる画像を表示することでより自然な立体表示を可能としている。主な裸眼方式には、表示画素の手前に左右 2 画素ごとに一つの穴、または溝

を設けた遮蔽板を立てることで両眼視差を作り出すパララックスバリア方式や本論文で対象とするかまぼこ状のレンズがたくさん並んだレンチキュラーシートによって両眼視差を作り出すレンチキュラー方式がある。レンチキュラーレンズシートとは、1次元のレンズであるシリンドリカルレンズを、レンズ中心軸と直交方向に多数配置したシートである(図1)。

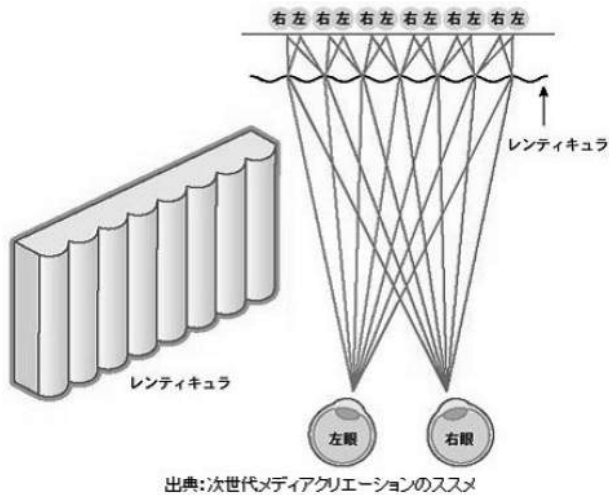


図1. レンチキュラー方式.

2次元ディスプレイの表示面の複数の画素にレンチキュラーレンズの一つを対応させ、3次元画素を構成する。レンチキュラーレンズの中心軸から各画素までの水平距離で、その画素から出る光のレンチキュラーレンズ通過後の水平進行方向の角度 ϕ は式(1)で求めることができる。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{x}{f} \quad (1)$$

この方式の問題点として水平進行方向の光の重なりによってムラができることが報告されている⁴⁾。立体視可能領域が均一ではなく、視聴者が前後左右に移動した場合には、正常な立体感が得られず、眼精疲労などの不快感を覚えることがある。

3. 関連研究

東京農工大学で行われている SMV(Super Multi View) と呼ばれる超多眼表示の研究では、表示画像数(視差数)を 50~100 程度(水平方向)とすることで立体視可能領域におけるムラを改善することが可能である。しかし、既存の液晶ディスプレイとレンチキュラーレンズでは、ディスプレイのドットの細かさ(DPI)とレンチキュラーレンズの本数(LPI)の関係から視差数を増加させることに限界がある。そこで、液晶ディスプレイに対してレンチキュラーレンズを斜めに重ねることで視差を増大させる方法を提案している(図3)。この方式では、ピクセルを構成してい

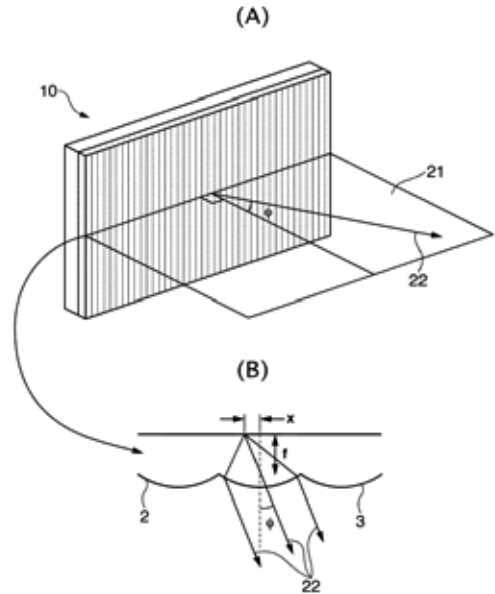


図2. レンチキュラーレンズ通過後の水平進行方向. 出典:三次元ディスプレイ³⁾

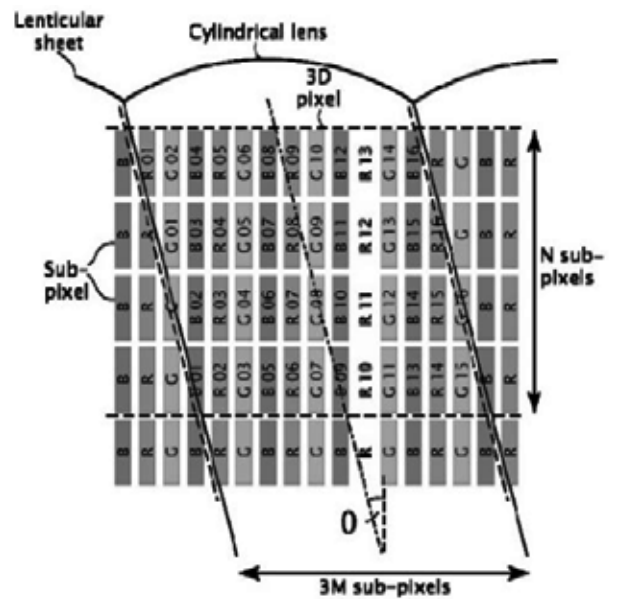


図3. 斜めレンチキュラー方式. 出典:疲れのないめがねなし立体ディスプレイ⁵⁾

る赤:R, 緑:G, 青:Bのサブピクセルを分割して使用しているため視聴位置によってレンズによる色むらが発生する。この問題を解決するために、あらかじめ斜めにRGBの画素が配置された液晶パネルを開発している。

東芝は2010年12月に家庭用裸眼3Dテレビを発売した⁶⁾。この製品はRGBを表示するサブピクセルを縦に配置し、27個(横9本×RGB)のサブピクセルで1画素を表示する9視差のディスプレイで、モアレを生じやすい映像であっても美しく表示するため、各サブピクセルをわずかに蛇行して配置している。

4. 提案手法

4.1 最適な画素位置の計算

レンチキュラー方式では、LPI と DPI の関係や視野角、視差数などによって立体視可能領域が限られている。

本論文では、視聴者の位置に合わせてディスプレイの適切な場所に画素を配置することで、立体視可能領域を最適化する手法を提案する。レンチキュラーレンズによって屈折した光の進行方向は式(1)によって計算できる。逆に進行方向の角度を知ることができれば、レンズの中心から画素までの距離 x を求めることができる。

画素の位置を求める前に、左右の眼の位置がディスプレイの中心からどれだけ離れているか求める必要がある。

例として図4のaとb場合を考え説明する。ここで、 l と γ は既知とする。この l と γ を知る方法として⁷⁾ や⁸⁾ などがある。また、両眼の幅は $2\Delta = 65\text{mm}$ とし、ディスプレイの中心と両眼の中心を結んだ線と左右の眼を結んだ線が垂直であるとする。

このとき、 l' と γ' は式(2)、(3)で求められる。

$$\begin{aligned} \tan\theta &= \frac{l}{\Delta} \\ \theta &= \tan^{-1} \frac{l}{\Delta} \\ \cos\theta &= \frac{\Delta}{l'} \\ l' &= \frac{\Delta}{\cos\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\gamma' = \frac{\pi}{4} - \theta + \gamma \quad (3)$$

次に、両眼の位置 h, i, p, q を求める (図4-c)。

まず、左眼の位置 h, p について求める (図4-d)。式(2)で求めた l' を用いて h, p を求めるが、求める際に、角度 ϕ が必要になる。

ここで、 ϕ と γ' は錯角なので式(4)が成り立つ。

$$\angle\psi = \angle\gamma' \quad (4)$$

よって式(5)により、左眼の位置 h, p を求めることができる。

$$\begin{aligned} \cos\gamma' &= \frac{h}{l'} \\ h &= l' \cos\gamma' \\ \sin\gamma' &= \frac{p}{l'} \\ p &= l' \sin\gamma' \end{aligned} \quad (5)$$

また、右眼の位置 i, q は三角形 ABC と三角形 DEC は相似なので $\angle CAB = \gamma$ となる (図4-e)。

これによって、式(7)を用いて右眼の位置 i, q を求める。

$$\begin{aligned} \cos\gamma &= \frac{a}{2\Delta} \\ a &= 2\Delta \cos\gamma \\ \sin\gamma &= \frac{b}{2\Delta} \\ b &= 2\Delta \sin\gamma \quad (6) \\ i &= h + b \\ q &= p - a \quad (7) \end{aligned}$$

最後に、これまでに求めた値を用いて図4-fの ϕ' を求めることができる。

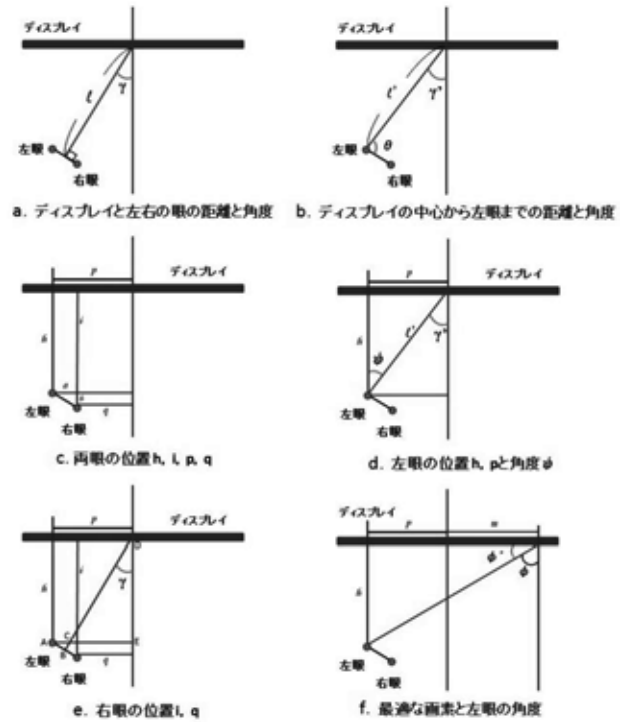


図4. 提案手法によるピクセルの最適位置の計算.

ここで式(8)によって求められる ϕ' は、ディスプレイの中心から m 離れたピクセルからの光が左眼に入射する角度である。

$$\begin{aligned} \tan\phi' &= \frac{h}{p+m} \\ \phi' &= \tan^{-1} \frac{h}{p+m} \end{aligned} \quad (8)$$

よって、レンチキュラーレンズによって屈折した光の進行方向の角度 ϕ は式(9) によって求められ、画素の位置 x は式(10) によって求められる。

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \phi' \quad (9)$$

$$x = f \tan \phi \quad (10)$$

ただし、式(11)(12) が成り立つとする。

$$x(\max) = \frac{1 \text{ レンズあたりの本数}}{2} \times \text{ピクセル幅}$$

$$= \frac{DPI}{2LPI} \times \frac{1}{DPI} \times \frac{1}{\cos \theta}$$

$$= \frac{1}{2LPI} \times \frac{1}{\cos \theta}$$

$$x < x(\max) \quad (11)$$

$$\phi(\max) = \tan^{-1} \frac{x(\max)}{f}$$

$$\phi < \phi(\max) \quad (12)$$

これらの計算によって求められた値を使用し、ディスプレイの中心から m 離れたレンズにおいてレンズの中心から x 離れた場所に画素を配置することで視聴者に最適な立体視可能領域を提供できる。

4.2 3D ディスプレイの設計

(1) 視差

レンチキュラー方式では視差数の増加に伴って、解像度が低下するといった特徴がある。これは、一本のレンズに複数のピクセルを割り当てるためである。液晶パネルの高精細化によって、割り当てられる視差数を増加させることが可能となるが、フル HD 画質 (1920×1080) の 3D ディスプレイを作成する場合、縦のピクセル数は 1080 と現在と変わらないが、横のピクセル数が 1920 × 視差数となり大幅に増加する。また、横ピクセルの増加にともなって、縦と横の比率が変化するため、ピクセル自体の大きさも変化させる必要がある。

そこで、本論文ではレンチキュラーレンズを斜めに設置する斜めレンチキュラー方式(図3) を用いることで、斜めにしない場合と比べて視差を増やしている。

レンズの角度は、条件を満たす一般的な液晶ディスプレイであれば設定する視差数によって一定の値をとる。この条件とは 1 ピクセルの縦の長さとの横の長さがほぼ等しいこと、サブピクセル RGB で 1 つのピクセルが構成されていることである。ピクセルは図5 のように 3 つのサブピクセルから構成されている。そのためサブピクセルは縦と横の比が 3:1 となっている。

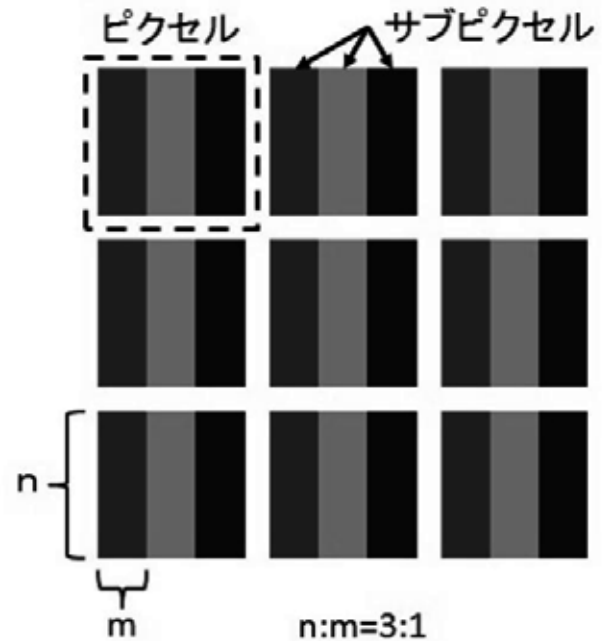


図5. サブピクセル.

斜めレンチキュラー方式では、表示画像の縦と横の比を一定に保つため 1 つの 3D ピクセルの縦に N 個のピクセルを割り当て、横のピクセルには $3N$ のサブピクセルを割り当てれば良い。

この場合のレンズの傾き θ は式(13)で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{サブピクセル幅}}{\text{ピクセル幅}} \quad (13)$$

ここで視差数は $3N$ となるが仮のものであり、実際の視差数は組み合わせるレンズの LPI によって変化する。

(2) レンズの種類

レンチキュラーレンズは本来、印刷物と組み合わせて使用される。このため、3D ディスプレイの作成に用いる場合は適したものを使用する必要がある。

レンズを選択する際、必要となるのは LPI とレンズの厚みである。

レンチキュラーレンズには 1 インチあたりのレンズ数を表す LPI という単位がある。また、ディスプレイにはピクセルの細かさを表す単位の DPI がある。1 レンズあたりに割り当てられるピクセル(DPL)は式(14) で求められ、斜めレンチキュラー方式の場合は式(15)で求めることができる。

$$DPL = \frac{DPI}{LPI} \quad (14)$$

$$DPL = \frac{DPI}{LPI} \times \frac{1}{\cos \theta} \times 3 \quad (15)$$

レンズの厚み(=焦点距離)の決定は、組み合わせるディスプレイによって様々な値をとるため明確な決定方法はない。先ほども述べたようにレンチキュラーレンズは印刷物と組み合わせて使用される。この場合レンズと印刷物の間は密着している状態である。しかし、液晶ディスプレイと組み合わせた場合、液晶ディスプレイとレンズは直接密着することができない。これは、ディスプレイの表面に反射光の防止や表面を保護するためのコーティング、偏光板、接着シートなどたくさんの薄いシートが層として存在するためである。これらの層によってレンズの焦点距離が変化するため、立体感を得ることが難しくなる。

この問題を解決するために、レンズを裏返す方法が考えられている。これは、レンズに焦点が表と裏に1つずつ存在することを利用したもので、凸レンズの面をディスプレイに密着させることで、焦点距離を調節している(図6)。

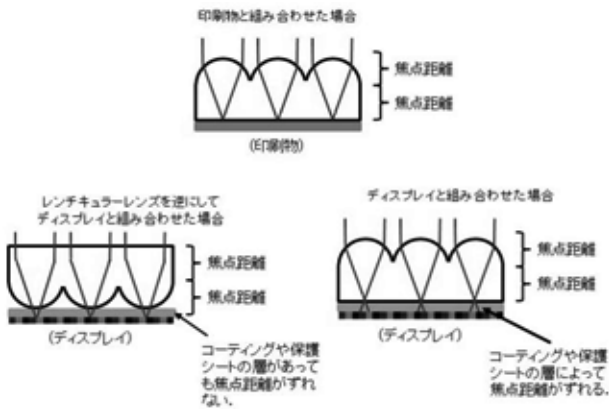


図6. 焦点距離の調整.

(3) ピッチ

式(14)や式(15)で求められるDPLはピッチパラメータと呼ばれることもある。液晶ディスプレイとレンズの選択においてDPLつまりピッチパラメータが整数となることが最も望ましい。これは、余りが出た場合設定した画素とレンズがずれるため、適切な視差画像の表示ができなくなるからである(図7)。

この問題を完全に解決するためには液晶ディスプレイまたはレンズのどちらか一方を専用で作成する必要があるが、コストや手間がかかるため、多くの場合ずれを軽減するためのソフトウェア処理が行われる。

この処理の例として以下のようなものが考えられる。

- DPLの小数点以下を足し合わせ整数になった時点で、表示画素をずらす方法
- 隣り合った画素の色の差を目立たないようにする方法

DPLが6.5の場合、1レンズにサブピクセルが6.5個入るため2レンズで13個のサブピクセルが使用される。

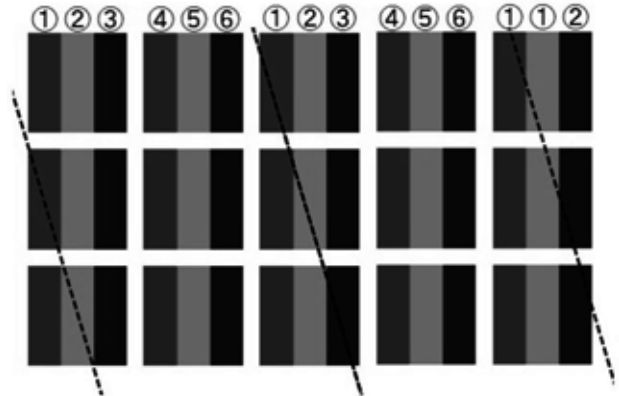


図7. レンズのずれ.

(4) 最大視野角

最大視野角は式(11)(12)によって求められる。一般的な液晶ディスプレイの場合、反射防止フィルタ(0.15mm)、偏光フィルタ(0.15mm)、カラーフィルタ(0.65mm)などのフィルタが表示画素とレンズの間に存在する。このため、30LPIのレンズと組み合わせた場合、最大視野角は約25.17度となる。本研究では、最大視野角を拡大するため反射防止フィルタ(0.15mm)、偏光フィルタの一部(0.05mm)を除去することによって、表示画素とレンズの距離を0.2mm縮め、30LPIのレンズと組み合わせた場合、約30.76度と一般的な液晶ディスプレイと比べて5度以上も拡大した(図8)。

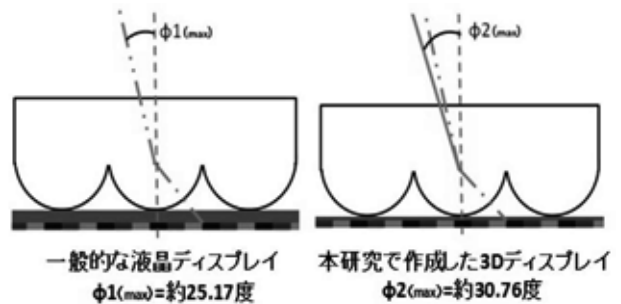


図8. 最大視野角.

4.3 ソフトウェアの設計

ここでは提案手法の検証にあたり作成したソフトウェアについて図9のフローチャートに従い簡単に述べる。

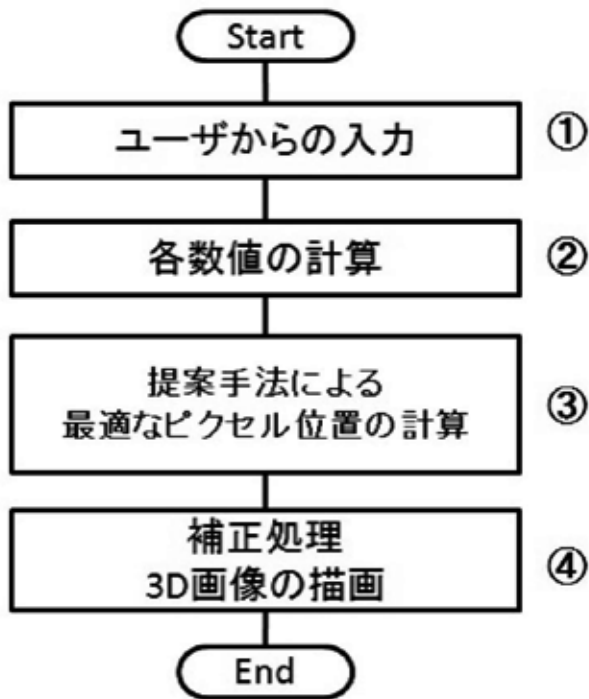


図9. フローチャート.

- ① ではユーザによる入力によって以下の値を取得する。
- ディスプレイの大きさ (インチ)
 - ディスプレイの縦 (ピクセル)
 - ディスプレイの横 (ピクセル)
 - レンズの厚み (mm)
 - 1 インチあたりのレンズ数 (LPI)
 - 視聴者とディスプレイの距離 (mm)
 - 視聴者とディスプレイの角度 (deg)
 - 視差画像数
 - 視差画像一枚あたりの縦 (ピクセル)
 - 視差画像一枚あたりの横 (ピクセル)
- ② では①の入力により以下の値を計算する。
- 1 インチあたりのピクセル数 (DPI)
 - 1 ピクセルあたりの大きさ (IPD)
 - 1 レンズあたりの幅 (IPL)
 - 1 レンズあたりのピクセル数 (DPL)
 - ピクセルのピッチ幅 (インチ)
 - 視差数
 - 総レンズ数
- ③ では提案手法によって得られる 3D 映像の描画に最適なピクセルの位置を計算する。
- ④ では③によって得られたピクセル位置に画像を描画する処理、レンズと画素のずれを補正する処理を行う。この処理として以下を行った。

(1) アンチエイリアス処理

表示する 1 視差の画像 1 ピクセルにつき各 RGB のサ

ブピクセルが 1 つずつ入らなければならないがレンズが斜めになっているため他の視差に割り当てられたピクセルを含んでしまう(図 10)。

そこで、アンチエイリアス処理を行い、上下に配置されたサブピクセルの色の差を減少させることで色むらを防ぐ。

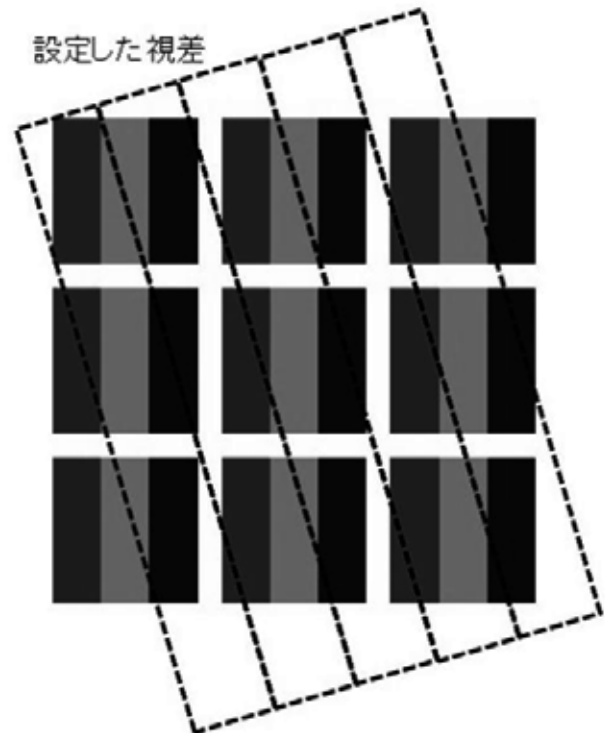


図10. アンチエイリアス処理.

(2) 誤差を補正する処理

1 レンズあたりのドット数 (DPL) が整数にならない場合視差数は小数部分を切り捨て整数になるが切り捨てられた小数部分がレンズ毎に累積されレンズとドットの組み合わせにずれが発生する。図 7 の場合、DPL が 6.5 であるので 1 レンズあたり 6 枚の視差画像を割り当てる。しかし小数部分の 0.5 には次のレンズに割り当てられた 1 枚目の視差画像が表示される。また、2 レンズ毎に 1 ドットずれる計算になるためディスプレイ全体で見ると大きな影響が出る。

そこで、小数部分をレンズ毎に加算し、1 より大きくなった時点の視差画像をもう一度次のドットに割り当てることで誤差を補正する。

5. 評価

本論文による提案手法の評価を行うため、17 インチ、解像度 1280 × 1024 の液晶ディスプレイ (iiyama AS4315UT) と 30LPI のレンズによって 3D ディスプレイ

を作成した。斜めレンチキュラー方式で重要となるレンズの角度は式(16)によって決定した。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{サブピクセル幅}}{\text{ピクセル幅}}$$

$$= \tan^{-1} \frac{1}{3}$$

$$\approx 18.5 \text{ 度} \tag{16}$$

作成したディスプレイに対して視聴者とディスプレイの距離と角度を変化させ、その位置で適切な画像が表示できているか検証した(図11)。また、図12に作成したディスプレイと実験の様子を表す。

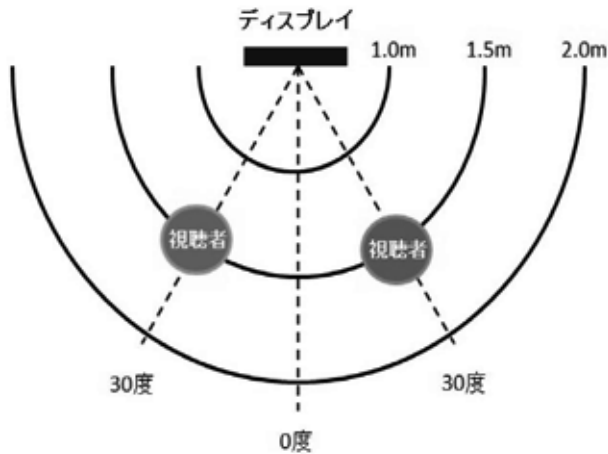


図11. 検証実験.

ディスプレイには、提案手法によって計算された右目と左目に最適な画素のみを表示し、それ以外の画素は、黒色を表示するようにした。つまり、入力した視聴者の位置では左右の眼に適切な画像が表示されるが、入力位置以外では画面に黒色の画像が表示される。



図12. 作成したディスプレイと実験の様子.

表1. 実験結果のまとめ.

入力した設定値		視聴者の位置			
		左 30度	0度	右 30度	
実験1	1.0m	+	-	++	
	右 30度	1.5m	-	-	++
	左 30度	2.0m	+	-	++
実験2	1.0m	+	++	-	
	0度	1.5m	+	++	-
	左 30度	2.0m	+	++	-
実験3	1.0m	-	++	+	
	0度	1.5m	-	++	+
	右 30度	2.0m	-	++	+

視聴者の人数を2名、ディスプレイの正面を0度とし、以下の場合について実験を行った。また、視聴者とディスプレイの距離は2名とも1.0m、1.5m、2.0mとした。

- 視聴者 A,B とディスプレイとの角度

実験1 A:右30度、B:左30度

実験2 A:正面、B:左30度

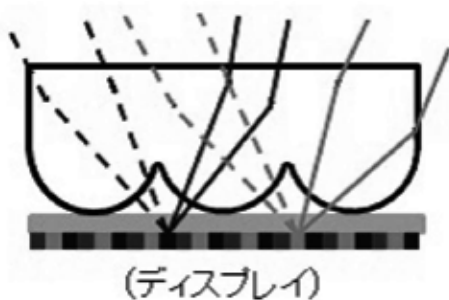
実験3 A:正面、B:右30度

実験の結果を表1にまとめる。

表1において、++はよく見える、+は見える、-はまったく見えないことを表している。視聴者の位置として設定していない場所では画像を見ることができないことが確認できる。

視聴者の位置をディスプレイの正面(0度)に設定した場合に最もよく画像が見えることがわかる。これは各レンズの中心付近の画素を使用するため、式(10)によって求められるレンズの中心からの距離 x が大きくなっても式(12)を満たすためである。一方、視聴者の位置が左右に30度ずれた場合、各レンズの中心から離れた場所の画素を使用するため、レンズの中心からの距離 x が大きくなると式(12)を満たさなくなり、画像が見えにくくなっていると考えられる(表1の+)。

また、視聴者の位置を正面から30度以上ずらして設定した場合、設定した位置では画像を見ることができず、設定した位置の反対側へ約90度ずれた位置で画像が見えることを確認した。立体視ができない理由として本研究で作成した3Dディスプレイは最大視野角が約30.76度であるため、これより大きな角度になった場合は立体視を見ることができない、また、ずれた位置で画像を見ることができない理由としてそのレンズに割り当てられている画素ではなく、隣のレンズに割り当てられている画素の光が漏れレンズに入射しているからであると考えられる(図13)。



点線は隣のレンズに割り当てられた光の漏れによってできる光線を表す

図13. 光の漏れ。

本検証実験では、あらかじめディスプレイのDPIとレンズのLPIによるピッチずれや色むらを想定し、補正処理やアンチエイリアス処理を行ったが、左右ともに角度を30度と設定した場合、内側(0度側)に10度程度のずれが見られた。また、ディスプレイと視聴者の視点を同じ高

さに設定した場合と視聴者の視点の高さを変化させた場合を比較すると見え方にムラがでることが確認された。これらを改善するために、ピッチずれの補正処理などの微調整や追加が必要であるが、DPIやLPIによる影響が大きいため、高DPIのディスプレイを使用するなどハードウェア面の改良も必要であると考えられる。

6. まとめ

本論文ではレンチキュラーを用いた裸眼3Dディスプレイにおいて、視聴者の位置に適した表示画素を選択することで立体視可能領域を改善する手法について検討し、作成した3Dディスプレイにおいて検証実験を行った。実験により、本論文の視聴位置に適した画素を選択する手法は2名の視聴者に対して正常な立体視を提供することが可能であり、立体視可能領域の改善に有効であることが分かった。

今後、現在のディスプレイよりも更に大画面かつ高精細なディスプレイが普及し、ピッチずれ問題の改善や視差数の増大が考えられる。これにより、3名以上の視聴者への本手法の適用および更なる立体視可能領域の改善が可能と考えられるため実験を通して有効性を検証したい。

参考文献

- 1) 3D コンソーシアム:CREATORS LOUNGE, 次世代メディアクリエーションのススメ, http://www.creatorslounge.com/seminar/003_3.html
- 2) 東京農工大学, 東京農工大学での立体研究, http://www.3dc.gr.jp/jp/act_rep/100727/takaki.pdf
- 3) 独立行政法人科学技術振興機構/高木康博, 三次元ディスプレイ, <http://patent.astamuse.com/ja/granted/JP/No/4402578>
- 4) NTT DOCOMO, 人間工学シンポジウム講演資料, 2010.3.5, http://home.jeita.or.jp/device/lirec/symposium/fpd_2010/doc/4b_horikoshi.pdf
- 5) 東京農工大学, 疲れのないめがねなし立体ディスプレイ, <http://jstshingi.jp/bunya/pdf/121407.pdf>
- 6) TOSHIBA, GL1 シリーズ/3D 画質・録画・機能, <http://www.toshiba.co.jp/regza/option/gl1/quality.html>
- 7) 安藤 寛哲, 藤吉 弘亘: 人検出結果に基づくカメラの自己キャリブレーションと3次元位置推定, 第16回画像センシングシンポジウム(SSII2010), IS3-03, 2010.
- 8) 富士ゼロックス, 3次元位置計測技術, http://www.fujixerox.co.jp/company/technical/fundamental/3d_measure.html