



視覚的に等価なライトフィールドディスプレイにおける バリアの形状によるモアレ抑制

Moiré reduction method for visually equivalent light field display
using special barrier aperture structure

伊達宗和¹⁾, 三反崎暁経¹⁾, 北原正樹¹⁾

Munekazu Date, Tokinobu Mitasaki, Masaki Kitahara

1) 日本電信電話株式会社 NTT コンピュータ&データサイエンス研究所
(〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1, munekazu.date.zf@hco.ntt.co.jp)

概要: 視覚的に等価なライトフィールド (VELF3D) ディスプレイはパララックスバリアを使用した裸眼 3D 表示装置である。バリアと画素を平行に配置する必要があるため、画面の前面にバリアを設置するとモアレが発生し画像を著しく劣化させてしまう。本稿では、パララックスバリアのストライプに凹凸を設けることにより、バリア開口の左右方向の透過率の期待値を誤差関数の差にすることによりモアレを抑制できたので報告する。

キーワード: ライトフィールドディスプレイ, モアレ, パララックスバリア

1. はじめに

多眼表示やライトフィールドディスプレイのように観察方向によって異なる画像が見えるディスプレイでは、指向性の密度を向上すると、視点が回り込むような大きな視点移動だけでなく、瞳位置の微小な変化に対応した完全な運動視差を再現できる。さらに、瞳の中に同時に異なる方向の光線が入るほど指向性密度が向上すれば、調節をも満たすことができる。しかし、これまでのディスプレイでは指向性数を増加させると、解像度が低下してしまうというトレードオフがあった。

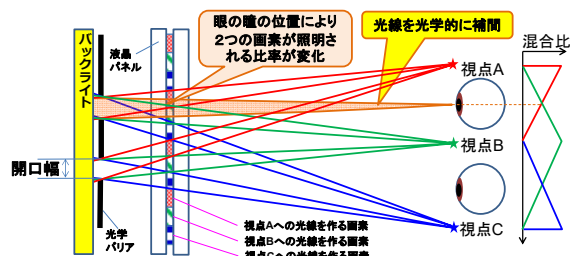


図 1: 視覚的に等価なライトフィールドディスプレイ

そこで、中間の視点位置で多眼表示の隣接視点の画像が光学的に混合 (リニアブレンディング) された画像を提示することで、視点位置に合わせて線形補間された画像を見せることで、なめらかかつ正確な運動視差を提示できると

考えた。当初は特殊な開口形状の絞りを使用して投射型表示を行っていたが[1], 結像系による画像の歪の影響が大きかった。そのため、図 1 に示すように、パララックスバリア型の裸眼 3D 表示装置において、画素周期とバリア開口の幅を一致させることにより、画素がバックライトにより照射される範囲が視点位置の移動量に比例して変化するようにした。図のグラフからもわかるように、各視点位置の画像の輝度は観察位置により線形に変化するので中間視点でリニアブレンディングになる[2,3]。光線の場合であるライトフィールドという観点では、中間視点でも人間の視覚にとっては正規の光線と等価に知覚されることから視覚的に等価なライトフィールドディスプレイ (Visually equivalent lightfield 3D display) と呼んでいる。

当初製作した表示装置では液晶パネルの下にバリアを設置していたため、バリアを透過した光を液晶パネル越しに観察することになった。パネル内の電極構造などにより光が拡散されるため、バリアの像が実効的にぼけるので、モアレが問題となることはなかった。しかし、市販のタブレットを改造する構成では[4], タブレット本体を改造して内部にパララックスバリアを追加することは困難であった。そのため、タブレットのタッチパネルの表面にバリアを貼ることにしたが、モアレが生じてしまった。

タッチパネルの上面に設置するには、タッチパネルの操作を阻害しないようにバリアは薄いフィルムである必要

がある。そのため、モアレ防止のために他の部材を追加することは現実的ではない。本論文では、フィルムに印刷されたバリアの開口形状を変えるだけでモアレを抑制することができたので報告する。

2. モアレ抑制の方法

視覚的に等価なライトフィールドディスプレイでは、ベースバンドすなわち画素周期とバリア周期の干渉で生じるモアレ縞により、視点位置を構成しリニアブレンディングで中間を補間している[5]。そのため、今回のモアレはベースバンドではなく高周波成分の干渉に起因すると考えられる。そこで、バリアの開口の高い空間周波数成分を抑制することとした。

パララックスバリアの開口形状は、パララックスバリアの周期を p_b 開口率を α_b とすると

$$Comb_{p_b}(x) * Rect_{p_b\alpha_b}(x)$$

と表すことができるここで*はコンボリューション、矩形関数 Rect および楕円関数 Comb は、それぞれ

$$Rect_a(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{a}{2} \\ 0 & \text{others} \end{cases}$$

$$Comb_a(x) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(x - ai)$$

である (δ はディラックのデルタ関数)。また、この開口を空間周波数空間で考えると

$$\frac{1}{p_b} Comb_{1/p_b}(f) \frac{\sin \pi f p_b \alpha_b}{\pi f}$$

となり、包絡線が sinc 関数 ($\text{sinc } x = \sin x / x$) の楕型関数である。包絡線の sinc 関数は長く裾を引くので高周波成分が存在する。そこで、実空間でも周波数空間でも速やかに減衰するガウス関数とのコンボリューションを開口とすることにした。このときの開口形状は、ガウス関数

$$Gauss_a(x) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2a^2}}$$

を用いて

$$Comb_{p_b}(x) * Rect_{p_b\alpha_b}(x) * Gauss_{\sigma p_b\alpha_b}(x)$$

と表すことができる。 σ はバリアの設計パラメータとなる。この関数は周波数空間では

$$\frac{1}{p_b} Comb_{1/p_b}(f) \frac{\sin \pi f p_b \alpha_b}{\pi f} \frac{\sigma p_b \alpha_b}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sigma p_b \alpha_b)^2 f^2}{2}}$$

となるので、高周波成分が指数関数の項により急速に減衰することがわかる。

スリット一本の透過率分布は、

$$Rect_{p_b\alpha_b}(x) * Gauss_{\sigma p_b\alpha_b}(x) = \frac{1}{2} \left\{ \text{erf} \left(\frac{x + p_b\alpha_b/2}{\sqrt{2}\sigma p_b\alpha_b} \right) - \text{erf} \left(\frac{x - p_b\alpha_b/2}{\sqrt{2}\sigma p_b\alpha_b} \right) \right\}$$

となり、2つの誤差関数(erf)の差になる。

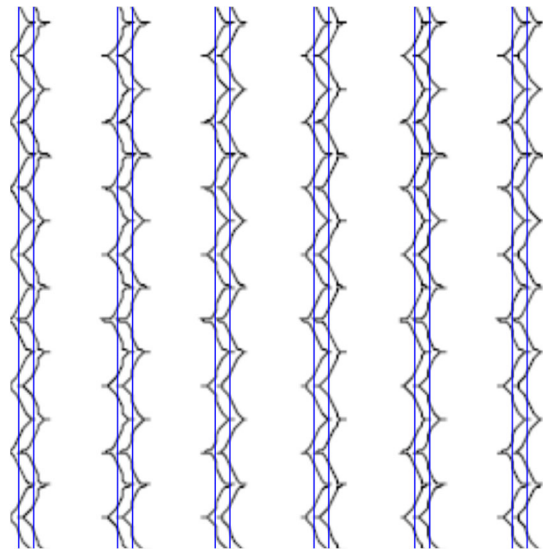


図 2: バリアの開口形状 ($\sigma=0.375$)。青線は従来の直線状の開口を示す。

3. パララックスバリアの制作

数 $10\mu\text{m}$ 程度の開口幅の周縁部で透過率をアナログ的に変えるのは製造上の難易度が高い。そこで2値の透過率で実現することを考えた。面積階調と同様にバリアと平行方向に平均した透過率が希望の値となるようにした。また、網点にすると印刷の際の分解能への要求が厳しくなるので、開口の周縁部を凹凸形状にすることとした。図2に示すように左右にわずかにずれた誤差関数の間を開口とすることで、平均の透過率が誤差関数の差になるようにした。

バリアの凹凸はパラメータ σ が大きくなるほど大きくなり、高周波成分の抑制も強くなる。しかし、原理的にリニアブレンディングになる条件は $\sigma=0$ なので、モアレが抑圧可能な最小の σ でディスプレイを構成する必要がある。そこで、 σ の値を場所によって変えたバリアを製作しモアレの発生状況を評価した。市販のタブレットの iPadPro 11 インチの画面を前面白色で表示し、タッチパネルの上にバリアフィルムを置いて、肉眼でモアレが最も粗くなる角度

にして、バリアとディスプレイの RGB のストライプが画素と平行となる条件で観察した。

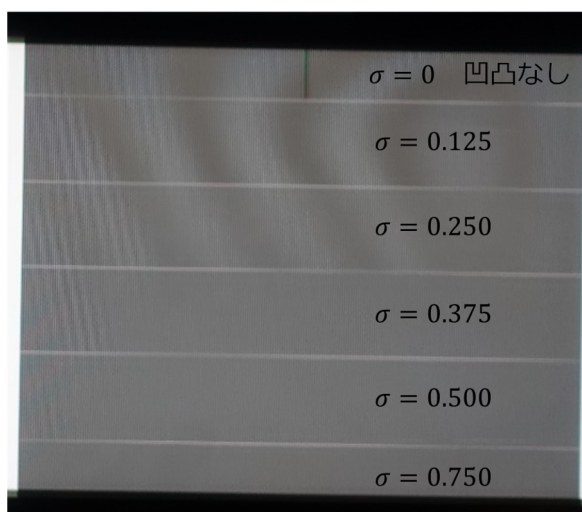


図 3: パラメータ σ によるモアレの変化

結果を図 3 に示す。写真の太い 5 本程度のモアレが今回抑制したいモアレである。細かいモアレは撮影に使用したカメラの画素とのモアレである。写真からわかるように $\sigma = 0.375$ より小さいと抑制できていることがわかる。また、モアレの抑制は連続的ではなく、閾値をもって変化しているように見える。

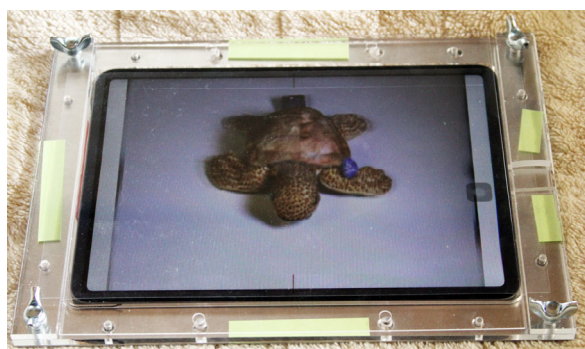


図 4: 提案のパララックスバリアをタブレットに使用して実写画像を 3D 表示した例

$\sigma = 0.375$ の条件のフィルムをタブレット iPadPro 11 インチの表面に貼り付けることで、図 4 に示すようにモアレのない表示装置を製作した[4]。7 視点の表示を表示するため、バリアの周期 $p_b = 223.58 \mu\text{m}$ は、サブ画素の幅 $32 \mu\text{m}$ の 7 倍よりも、若干小さくすることで約 45cm の視距離で光線を集束させている。開口幅はバリア周期の 1/7 である。写真からも明らかのようにモアレは生じず、また良好な 3D 画像を観察することができた。

4. 考察

提案したバリアの紋様によりモアレを抑制することができた。しかし、 $\sigma = 0.375$ の条件が何を意味するのか不明である。そこで、モアレに起因するバリア開口の各周波数成分とパネル画素の各周波数成分を整理することで考

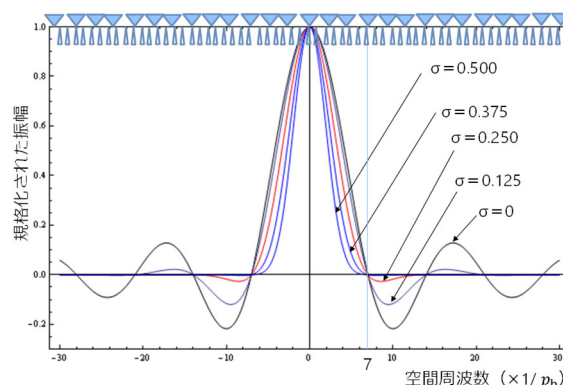


図 5: 空間周波数特性の包絡線関数の σ による変化。RGB 縦ストライプパネル 7 視点構成。 $p_b \alpha_b$ は開口幅、▲はバリアの周期に▼は画素周期に対応する空間周波数である。

察した。

図 5 はバリアのパラメータ σ を変えて周波数特性の包絡線をプロットしたものである。横軸はバリアの開口の周期で規格化した空間周波数、縦軸は空間周波数 0 の値で規格化した振幅である。RGB 縦ストライプパネルで 7 視点の多眼表示する構成での計算結果である。 $p_b \alpha_b$ は開口幅に対応する。グラフの上の▲はバリアの周期に対応する空間周波数、▼は画素周期に対応する空間周波数にマークしてある。図からもわかるように、空間周波数が 7 の位置で▲と▼が重なっており、この周波数でのモアレの発生が想定される。

グラフの曲線は sinc 関数と Gaussian のコンボリューションであり、楕型のスペクトルの包絡線に対応している。全ての曲線は空間周波数が 7 で横軸と交差しており着目している周波数での振幅がゼロになる。包絡線は、 $\sigma \leq 0.25$ の場合は空間周波数が 7 より大きい領域で 0 ではなく、7 以上空間周波数が十分に抑圧されていない。しかし、 $\sigma \geq 0.375$ の場合は空間周波数が 7 より若干小さい値から包絡線の値がほぼゼロになっており、着目している空間周波数の近傍を含めて十分に抑圧できていることがわかる。

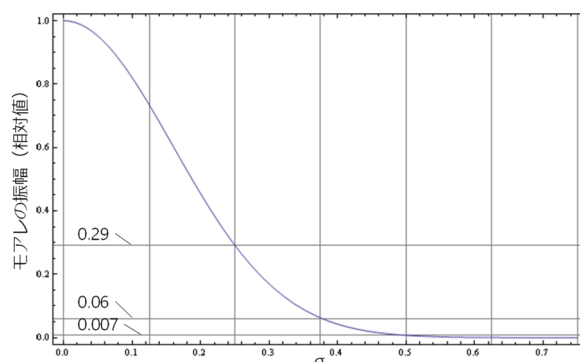


図 6: σ によるモアレの抑制度の違い。図 3 の空間周波数 7 に対応する振幅を示した。

図 6 に示すように当該空間周波数でのガウシアン値をプロットした。 σ が大きくなると 0 へと近づくのでモアレが強く抑制されていることがわかる。 $\sigma = 0.375$ の場合に振幅は $\sigma = 0$ の約 $1/16$ 、 $\sigma = 0.5$ の場合には約 $1/146$ になっている。 図 2 からわかるようにそれほどコントラストが高いモアレではないので、 $\sigma = 0.375$ でも十分に抑圧できたと考えられる。 また $\sigma = 0.25$ から 0.375 の間の変化はさらに σ が大きい条件に比べて大きいので、 その間で急にモアレがなくなったように見えたと考えられる。 この条件はディスプレイの眼数等に依らないため、 一般性の高いモアレ抑制の条件であると考えられる。

5. おわりに

パララックスバリアやレンチキュラーレンズとディスプレイ画素との干渉で生じるモアレは、 斜め配置により解消することが一般的であった。 しかし、 今回バリアの開口形状を変えるという新たな解消方法を提案し、 モアレ抑制に十分な効果があることを示すとともに、 必要な凹凸の大きさと抑制制度の関係を理論的に示すことができた。

本手法により、 パララックスバリアの開口部と画素ストライプをモアレの発生しやすい平行配置で使用する VELF3D ディスプレイで、 画面の上にバリアを設置する構成が可能となった。

参考文献

- [1] T. Kawakami, M. Date, M. Sasai, and H. Takada: "Optical Linear Blending of Viewing Zones Using Convolution of Iris for Smooth Motion Parallax Autostereoscopic 3D Display," *Journal of Display Technology*, 12(2), pp. 143–152, 2016.
- [2] 伊達宗和, 越智大介, 木全英明: 視覚的に等価なライトフィールドフラットパネル 3D ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会第 22 回大会論文集, 1B4-04, 2017.
- [3] M. Date, Y. Tanaka, M. Isogai, S. Shimizu, and H. Kimata: "Table Top Visually Equivalent Light Field 3D Display Using 15.6-inch 4K LCD Panel," *SID Display Week 2019*, 56-5, pp. 791–794, 2019.
- [4] M. Date, S. Shimizu, S. Yamamoto: "Visually Equivalent Light Field 3D for Portable Displays," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022. (in press)
- [5] M. Date, S. Shimizu, H. Kimata, D. Mikami, and Y. Kusachi, "Depth Range Control in Visually Equivalent Light Field 3D," *IEICE Transactions on Electronics*, E104.C, pp. 52–58, 2021.