



分散配置の動的パララックスバリアによる 遠方空中像ディスプレイの基礎検討

三河祐梨¹⁾, 鈴木大河¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Yuri MIKAWA, Taiga SUZUKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, yuri_mikawa@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

概要: 近年, 裸眼空中像ディスプレイにおける, 遠方ユーザに対する提示の研究が活発である。しかし, 従来それらは単一のディスプレイで実現されるため, 遠方になるほど巨大化し, 設置の困難さ等により実用性に欠く問題があった。そこで本研究は, 動的パララックスバリアの複数台の分散配置による, 遠方の動的ユーザへの空中像提示システムを提案する。シミュレーションにより, 本提案に必要なディスプレイの性能の検討結果が示された。

キーワード: 動的パララックスバリア, 遠方空中像ディスプレイ, 指向性ディスプレイ, 裸眼立体視

1. はじめに

近年, 立体映像を空中に提示できる空中像ディスプレイは幅広い応用先が期待され, それを実現するさまざまな手法が研究されてきた。中でも裸眼で観察できる空中像ディスプレイは, デバイスの装着の必要がないことから, さまざまな実用的場面に有効だと期待される。さらに, 現在ある多くの空中像ディスプレイは装置のすぐ目の前に提示するものである一方で, それが広域空間で遠方提示できれば, 駅構内や横断歩道等の公共交通機関から, スポーツスタジアムやステージ等, 広いフィールドでの情報提示に利用でき, アプリケーションの幅が広がると期待できる。

従来の遠方空中像ディスプレイは, 主に両眼視差による立体視により実現されてきた。アナグリフや偏光板等を利用したメガネ方式による立体ディスプレイは, 現在多くの商業施設で用いられている。また, パララックスバリアを用いた遠方への裸眼立体ディスプレイも研究により実現された [1, 2]。これらはディスプレイ面周辺での立体提示としての利用だが, 視差を大きくすれば空中像提示としての利用も可能である。しかし, 図 1 (a) に示すように, これらは単一のディスプレイで実現するため, 提示位置が遠方になるほど装置が巨大化し, 設置が困難になる問題を有する。したがって, シアター等の巨大なスペースが前提となるエンターテイメント用途等を除いて, 設置コストの問題により, スポーツや公共交通機関等における実用的アプリケーションが見込めない。

そこで本研究は, 図 1 (b) に示すような, 指向性ディスプレイの分散配置による遠方空中像提示システムを提案する。これは, 従来の壁一面を覆うような大きな単一ディスプレイを, 複数の一般的な大きさ, あるいは小さなディスプレイの分散配置に代えることで, 設置コストを下げ, 従来のエンターテイメントの利用を超えて, さまざまな場面での

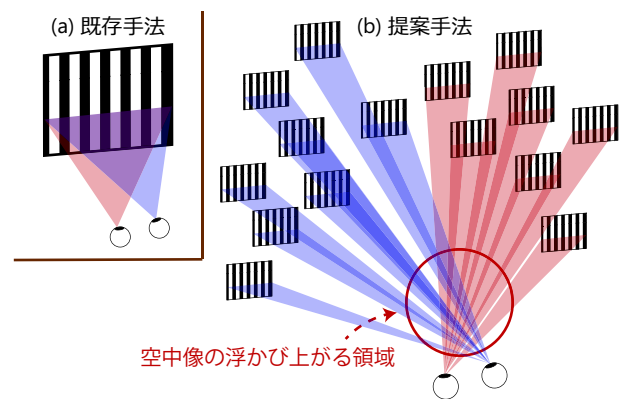


図 1: 遠方空中像ディスプレイに関する (a) 従来システム, および (b) 提案システムの概要図。

空中像提示を実現するものである。また, 右目と左目に映像を分離する各指向性ディスプレイには, ユーザのさまざまな位置に対応してバリアパラメータを動的に調整可能な動的パララックスバリア [3] を用いる。従来の壁一面を覆うディスプレイは, 任意の領域に空中像を提示できる一方で, 本提案ではディスプレイの分散配置のため, とびとびの領域に限定される。しかし, 文字情報や簡単な記号の提示など, 必要な情報を伝えるのに十分であり, それ以上に分散配置性による設置面の利点が上回ることに着目する。

本稿では, 提案システムの実現に向けて, シミュレーションにより動作原理の確認および本システムの各種性能の評価を行う。

2. 関連研究

2.1 裸眼立体ディスプレイ

裸眼立体ディスプレイ (英名: autostereoscopic display) を実現する手法はさまざま提案されてきたが, 中でも本研究が採用するものは, 視差映像による両眼立体視の方式 (視

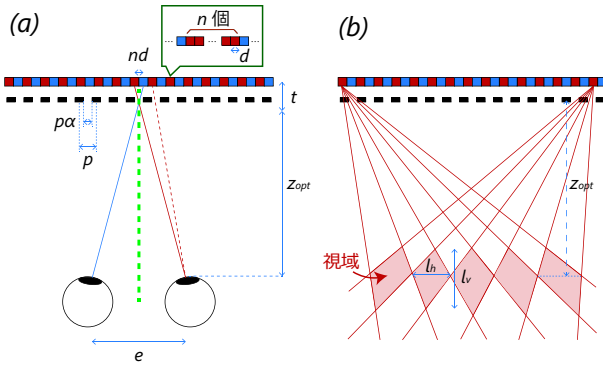


図 2: パララックスバリアによる立体視の概要図.

差方式)である。液晶等の平面ディスプレイ面の前方にレンチキュラーレンズやパララックスバリアを設置することで、左右の映像を分離して視差映像の提示を行うものである。映像装置の位置と観測される立体位置が異なることから輻輳調節矛盾等の違和感が懸念されるが、少ない素子数で省スペースで実現される利点に着目する。

視差方式の技術のうち、レンチキュラーレンズはその名の通り固定のレンズを用いるため、パラメータの変更ができない。他方、パララックスバリアについては、バリア面に液晶を利用することで、ユーザの位置変化や、バリア間の位置関係に対応して、パラメータの動的制御が可能である [3, 4]。本研究では、このような動的バリアディスプレイを複数台用いて、分散配置することで、広域遠方提示を目指すことを考える。

2.2 パララックスバリアによる立体視の基本原則

本節では、パララックスバリアによる立体視の基本原則を、図 2 (a) を参照しながら述べる。眼間距離を e 、ディスプレイの画素ピッチを d 、左右交互の視差映像のためにまともして用いるディスプレイの画素数を n とし、ディスプレイとバリアの間は空気であると仮定すると、バリア面からのユーザの適切な奥行き距離 z_{opt} に応じて、ディスプレイとバリア間の距離 t は以下のように求められる [5]。

$$t = \frac{ndz_{opt}}{e} \quad (1)$$

パララックスバリアのピッチ p の算出は、図 2 (a) に示すように、ディスプレイの画素ピッチの画素数倍: nd のほぼ 2 倍に等しいが、ある目に入光する特定の画素の距離に関する三角形の相似の関係に着目すると、厳密には以下のように求められる。

$$p = \frac{2nd}{1 + nd/e} \quad (2)$$

また、式 (1), (2) から、バリアのピッチ p とユーザ位置 z_{opt} に関する以下のような関係式が導かれる。

$$p = \frac{2e}{1 + z_{opt}/t} \quad (3)$$

式 (1), (3) より、 p, d ともに z_{opt} に反比例することが分かる。

なお、 α はバリアのデューティ比 (バリア開口のバリアピッチに対する割合) である。

パララックスバリアの作る各視点の領域、すなわち視域は、多くの場合、左右の異なる映像が同じ割合で観測される視点位置群を境界として定められたものである。視域は、図 2 (b) に示すように、四角形の領域がディスプレイ面に対し平行に並ぶものであり、 $z = z_{opt}$ の奥行き位置で隣り合う。視域のディスプレイ面に対し水平・垂直方向の長さをそれぞれ l_h, l_v 、またディスプレイの横幅を D (ただしここでは $D = \tilde{D}$: 左右交互の画素分の長さとして nd の偶数倍の数値とした) とした場合、それぞれ以下のように表される。

$$l_h = \frac{dz_{opt}}{t} = e \quad (4)$$

$$l_v \simeq 2z_{opt} \left| \frac{(\tilde{D} - 2nd)(e + nd)}{(\tilde{D} - 2nd)^2 - (e + nd)^2} \right| \quad (5)$$

特に、 l_h は瞳孔間距離 e に一致する。

パララックスバリアを含め、視差方式の裸眼立体ディスプレイは、視域外では逆立体視が生じる。また、視域の拡張を試みる手法もあるが、水平方向の分割数を増やすため、解像度低下が問題になる。

2.3 動的パララックスバリアの構成

先述のパララックスバリアの鑑賞可能領域の問題に対し、目あるいは頭部位置をトラッキングしながら適切に映像制御する手法が数多く提案されている。中でも本研究では、視域を適切に移動するためにバリアのパラメータを調整可能な動的パララックスバリアに注目する [3]。ここでは、ディスプレイと同じ液晶パネルが、ディスプレイ面から少し前方に配置され、動的バリアとして用いられることが多い [4]。

特に、ディスプレイ面に対し水平方向の視域移動のためのバリアのシフト値 s は以下のように求められる。

$$s = \frac{t}{t + z_{opt}} h_x = \frac{nd}{nd + e} h_x \quad (6)$$

3. 提案システム

本研究の提案する遠方空中像ディスプレイのシステムは、図 1 (b) に示すように、複数台の指向性ディスプレイの分散配置により構成されるものである。ユーザは空間内を移動すると想定し、動的パララックスバリアの既存手法 [3] を用いてディスプレイ・バリアのパラメータを適宜調整しながら、それに対応した適切な視差映像の提示を試みる。

3.1 動作原理

本提案システムにおける遠方空中像提示は、図 3 に示すように、ユーザの瞳孔位置を計測し、ディスプレイ群と瞳孔間の三次元位置関係を認識したのちに、バリアや映像の提示処理を行うといった一連の流れにより実現される。本節では、一部の処理について以下に詳しく述べる。

3.1.1 瞳孔追跡

動くユーザへの動的な空中像提示のため、高速な瞳孔追跡処理が求められる。これについては、高速カメラと明瞳孔法を用いて 1,000fps の速さで瞳孔追跡を実現した既存手法 [6] を、本研究でも用いることを検討している。

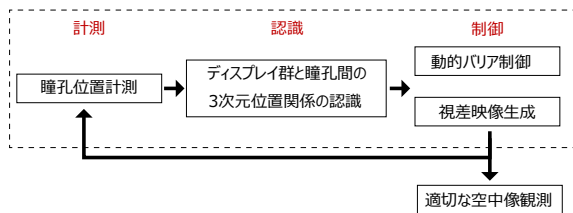


図 3: 本提案システムにおける処理の流れの概要図.

なお、瞳孔計測の空間分解能について、瞳孔径はおおよそ 2~6 mm である一方で、式 (4) により、視域の水平方向の幅 l_h は瞳孔間距離と等しいことから、本システムにおいてアイボックスサイズは十分であると考えられる。

3.1.2 動的バリア制御

計測したユーザの目の位置に合わせて、適切に視域が移動するように、式 (6) に従い、適宜バリアの水平方向のシフト制御を行う。

他方で、本研究では視域の奥行き制御は行わない。これは、式 (4) により、本稿の想定する遠方提示 ($z > 1000[\text{mm}]$)、かつ分散配置 ($D < 100[\text{mm}]$) において、視域の奥行き範囲 l_v が十分広いと考えられるためである。

3.1.3 視差映像の生成

交差領域に映像が浮かび上がるように、適切に映像を構成する必要がある。これについては、ユーザの各瞳孔の位置に対する提示したい立体を考え、各視差ディスプレイに対しその透視投影を行うことで生成される。

3.2 視域

本システムではすべてのディスプレイの視域の交差領域を視域とみなす。したがって、ディスプレイの散布範囲が広いほど、大きな映像を提示でき、かつユーザの広域な移動を担保できる一方で、視域が小さくなり、高い空間分解能のバリア制御が求められると考えられる。

さらに、パララックスバリア等の一般の裸眼立体ディスプレイは、視域の全領域で明瞭に視差映像を得られるのではなく、視域の境界線に近いほど左右の視差映像が混在するクロストークと呼ばれる現象が見られる。動的なユーザに対し高品質な映像提示を継続するためにも、高い空間分解能のバリア制御が求められる。

本稿では視域移動は水平方向のみと考えるが、これについては式 (6) により、ディスプレイのまとめて用いる画素数 n が大きく関与し、 n が大きいほど、同じバリアシフト値 s でも微小な視域移動が可能となる。しかし、人間の視覚の分解能の最大値はおおよそ 0.47 分 ($= 7.83 \times 10^{-3}$ 度) とされる [7] ため、 n が大きいことによりこの分解能を上回ること、意図しない縦縞模様が観測される可能性を有する。

4. 評価実験

本節では、シミュレーションにより、提案システムにおけるバリアシフトによる視域の水平移動量、およびディスプレイ群の散布範囲による視域の大きさの評価を行った。シミュレータにおけるシステム全体の様子を図 4 に示す。原点

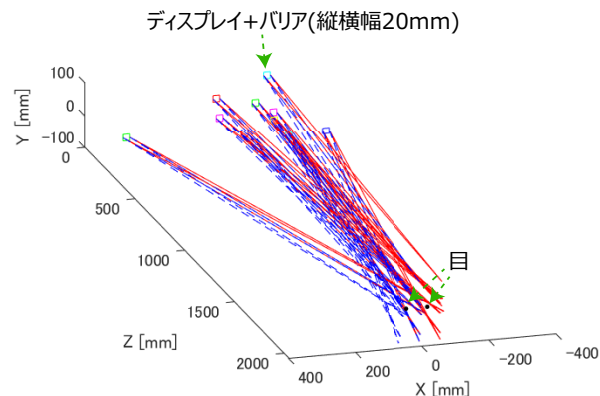


図 4: シミュレータにおけるシステム全体の様子。なお、可読性のため、本図ではディスプレイの生成数を 10 とした。

表 1: 各パラメータの説明と値。

眼間距離 e [mm]	63.0
ディスプレイからのユーザの最適距離 z_{opt} [mm]	2.00×10^3
ディスプレイの横幅 D [mm]	20
ディスプレイの画素ピッチ d [μm]	65.0
まとめて用いる画素数 n	5
ディスプレイ～バリアの距離 t [mm]	10.32
バリアピッチ p [μm]	646.7
バリアのデューティー比 α	0.50

周辺にディスプレイをランダムに 20 個生成したほか、ユーザの両目の中心は $(0, 0, 2000)[\text{mm}]$ の位置にあり、 Z 軸負方向を向くものとした。また、各ディスプレイ・バリアは表 1 に示すパラメータで構成された。簡単のため、ディスプレイ面はいずれも XZ 平面に平行であり、かつユーザの頭部の傾きは無いものとした。シミュレータには MATLAB R2021a を用いた。

4.1 バリアシフトによる視域の水平移動量の評価

まとめて用いる画素数 n を $[1, 10]$ の間で変化させたときの、バリアを 1 画素分、すなわち d 動かしたときの、視域の水平移動量 h_x 、およびディスプレイの角度分解能のグラフを図 5 に示す。このグラフから、視域の水平移動分解能とディスプレイの角度分解能はトレードオフの関係にあると考えられる。いずれも d が小さいほど小さな値を取るため、ディスプレイの解像度が高いことに越したことはないと考えられる。双方ともに鑑賞映像の品質にかかわるパラメータであるため、これだけでは最適な n の決定は難しく、ユーザスタディが必要と考えられる。

4.2 散布範囲と視域の面積の評価

本節ではディスプレイの散布範囲と視域の面積の関係を調べた。ディスプレイ面の横方向 (X 軸方向) と縦方向 (Y 軸方向) の散布範囲をそれぞれ D_x, D_y 、ディスプレイ面の法線方向 (Z 軸方向) を D_z と置いたとき、これらを以下のように設定した。なお、単位はいずれも $[\text{mm}]$ とする。

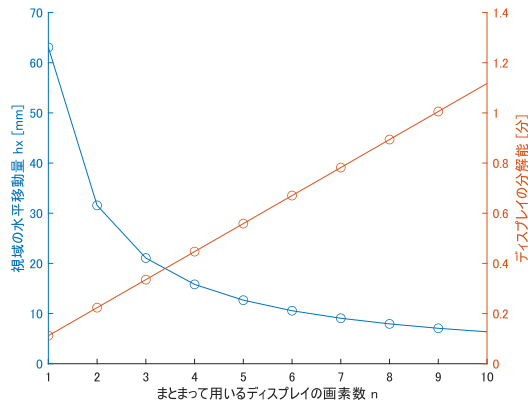


図 5: ディスプレイのまとめて用いる画素数 n と視域の水平移動量 h_x , およびディスプレイの角度分解能の関係。

$$\begin{aligned}
 -d_x/2 \leq D_x \leq d_x/2, \quad d_x &= \{200, 400, 600, 800, 1000\} \\
 -50 \leq D_y \leq 50 \\
 0 \leq D_z \leq d_z, \quad d_z &= \{0, 100, 200, 300, 400, 500\}
 \end{aligned}$$

D_y は一定の範囲のため, D_x , D_z によって変化する $5 \times 6 = 30$ 通りの視域の面積を, シミュレーションにより評価した. ディスプレイは散布範囲内でランダムに生成し, 視域の面積の計測を行うことを 15 回実施した. その時の面積の平均値のグラフを図 6 に示す. ディスプレイ位置が散布範囲の中でランダムな値を取るため揺らぎはあるものの, 散布範囲が大きいほど視域は小さくなり, 特に d_x の値が大きく寄与することが分かる. 視域の最大面積は $(d_x, d_z) = (200, 0)$ のときの 20713.9 mm^2 , 最小面積は $(d_x, d_z) = (1000, 500)$ のときの 2963.14 mm^2 であり, それぞれおよそ半径 81.2, 30.7 mm の移動範囲と考えられる. いずれも瞳孔径を十分上回る数値であり, アイボックスサイズは十分大きいと考えられる. これに加えてハードウェアの遅延や計測認識の処理時間を加味することで, ディスプレイの要求される性能 (フレームレートや分解能) が判明すると考えられる.

5. 結論

本研究では, 分散指向性ディスプレイによる空中像提示手法を提案し, その詳細を述べた. そして, シミュレーションによる実験により, 本システムの性能を簡単に評価した. 今後は, 計測認識の処理時間やディスプレイの性能に基づいた最大移動速度の評価を行うとともに, この検証結果をもとに適切な機材を選定し, 実際のシステムの構築を試みる.

参考文献

[1] Netalee Efrat, Piotr Didyk, Mike Foshey, Wojciech Matusik, and Anat Levin. Cinema 3d: large scale autotomultiscopic display. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 35, No. 4, pp. 1–12, 2016.

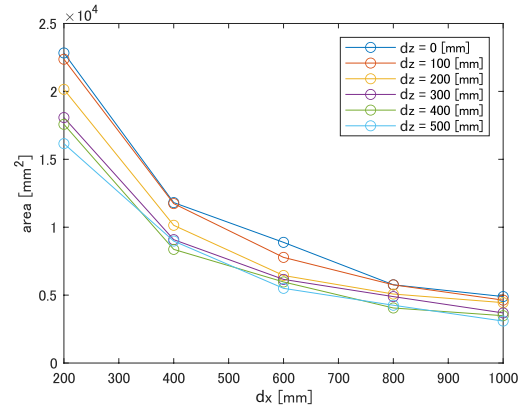


図 6: ディスプレイのランダムな生成範囲と視域の面積の関係を表すグラフ。

- [2] H Nishimura, T Abe, H Yamamoto, Y Hayasaki, and N Nishida. Development of 140-inch autostereoscopic display by use of full-color led panel. In *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XI*, Vol. 6486, p. 64861B. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [3] Tom Peterka, Robert L Kooima, Daniel J Sandin, Andrew Johnson, Jason Leigh, and Thomas A DeFanti. Advances in the dynallax solid-state dynamic parallax barrier autostereoscopic visualization display system. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 14, No. 3, pp. 487–499, 2008.
- [4] Hideki Kakeya, Ken Okada, and Hayato Takahashi. Time-division quadruplexing parallax barrier with subpixel-based slit control. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 6, No. 3, pp. 237–246, 2018.
- [5] Hirotsugu Yamamoto, Syuji Muguruma, Takeshi Sato, Kasai Ono, Yoshio Hayasaki, Yoshifumi Nagai, Yoshinori Shimizu, and Nobuo Nishida. Optimum parameters and viewing areas of stereoscopic full-color led display using parallax barrier. *IEICE transactions on electronics*, Vol. 83, No. 10, pp. 1632–1639, 2000.
- [6] Tomohiro Sueishi, Arata Jingu, Shoji Yachida, Michiaki Inoue, Yuka Ogino, and Masatoshi Ishikawa. Dynamic iris authentication by high-speed gaze and focus control. In *2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 813–814. IEEE, 2021.
- [7] Michael F Deering. The limits of human vision. In *2nd International Immersive Projection Technology Workshop*, Vol. 2, p. 1, 1998.