

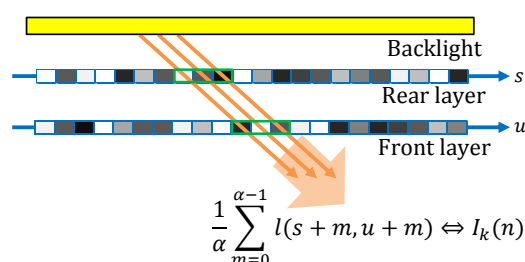
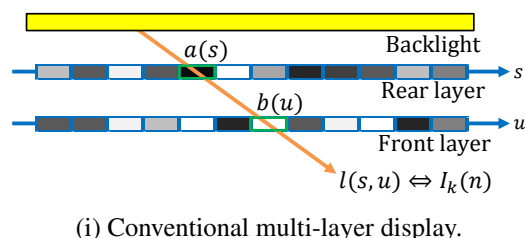
# レイヤ型 Light Field Display におけるレイヤ高解像度化の効用 Benefits of Using High Resolution Layers for Multi-Layer Light Field Display

小林優斗 高橋桂太 藤井俊彰  
Yuto KOBAYSHI Keita TAKAHASHI Toshiaki FUJII

## 1 はじめに

Light field display は、方向に依存して視差のある映像を表示することで 3 次元空間を知覚させる。現在主流のパララクスバリア方式 [1][2][3][4] やレンズアレイ方式 [5][6][7][8][9] は、1 枚のディスプレイパネルに全視点の映像を並べて表示し、それをバリアやレンズを用いて視点方向に振り分ける。用いるディスプレイパネルは全視点の全画素を同時に表示する必要がある (視点数  $\times$  一視点の画素数 = ディスプレイの総画素数)。一方、レイヤ型 [10][11][12][13][14][15] は、液晶パネルのような透過率を制御できる素子を複数積み重ねた構造 (レイヤ構造, Fig. 1) により、角度に依存した表示を実現する。この方式では、各視点の画像がレイヤの同一の画素を共有して表示される。そのため、ディスプレイの総画素数をはるかに超える情報量が表示可能であり、表示効率の点で優れた方式である (視点数  $\times$  一視点の画素数  $\gg$  ディスプレイの総画素数)。そこで我々は、この特性を生かして、レイヤ型ディスプレイとカメラアレイを組み合わせた高解像度な実写映像表示システムの開発に取り組んできた [16][17]。しかし、レイヤ型にも限界があり、ディスプレイの空間周波数特性の制約により、表示される物体がディスプレイ面から前後に飛び出すほどボケる問題がある。

そこで、レイヤ型において、より高解像度の (画素が細かい) レイヤを使うことを考える。レイヤの高解像度化は既に文献 [18] で提案されているが、表示原理や性能についての詳細は開示されていない。本稿では、レイヤの透過率の計算方法といったディスプレイの表示原理を示す。また、レイヤの高解像度化がディスプレイの空間周波数特性を向上させ、その結果、飛び出した物体のボケが解消されることを明らかにする。さらに、レイヤを高解像度化した場合、表示映像の品質を低下させることなく、レイヤの一画素あたりの階調数を削減できることも示す。これら 2 つの効用 (空間周波数特性の向上, 階調数の削減) を合わせることで、レイヤ型の利点である高効率性を維持したまま、ディスプレイの空間周波数特性を向上させることが可能で



(ii) High resolution multi-layer display.

Fig. 1: Light field parametrization for a display.

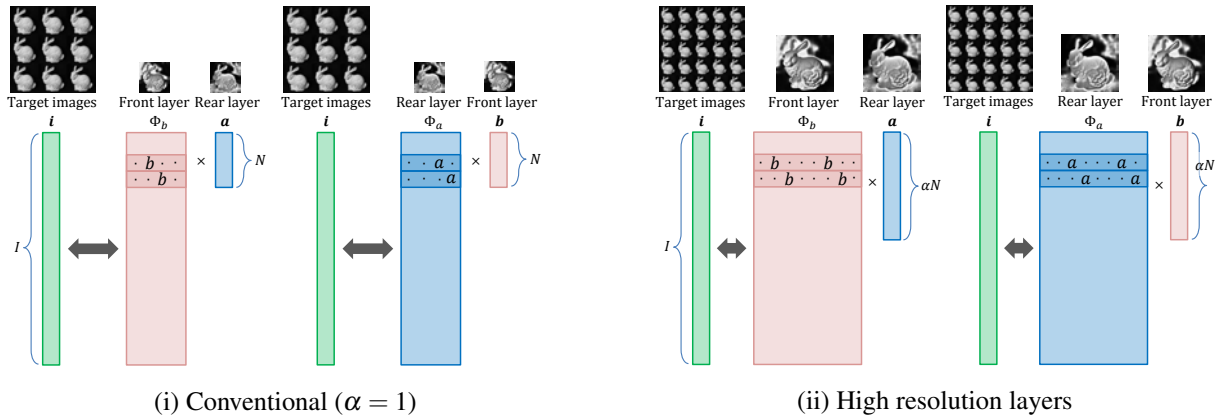
ある。つまり、高解像度かつ低階調数のディスプレイパネルを用いることで、ディスプレイの総ビット数を抑えたまま、飛び出した物体の表示品質を向上させることができる。Light field display において、ディスプレイパネルの階調数を含めた議論は本研究が初めてであり、今後のディスプレイの開発に新たな知見を与えることが期待される。

## 2 レイヤ型 Light field display の原理

本節では、レイヤ型ディスプレイを用いた light field の表示を定式化し、入力として与えられた多視点画像から各レイヤの透過率を計算する手法について説明する。2.1 では、表示する各視点の解像度とレイヤの解像度が同一の場合、つまり従来のレイヤ型ディスプレイについて、2.2 では、高解像度のレイヤを用いる場合について述べる。

### 2.1 従来のレイヤ型

Light field は一般に 4 次元空間で定義されるが、本節では簡単のため 2 次元平面で表現する。2 枚のレイヤから構成されるディスプレイの模式図を Fig. 1-(i) に示す。奥のレイヤの座標  $s$ 、手前のレイヤの座標  $u$  を通

Fig. 2: Illustrations of  $\Phi_b$  and  $\Phi_a$  in the Eq. 4, Eq 5.

過する光線の強度を  $l(s, u)$  と表す。この光線の強度は、バックライトと各レイヤにおける 1 画素の透過率の積になるので、

$$l(s, u) = a(s)b(u)L_0 \quad (1)$$

である。ここで  $a(s)$  は奥のレイヤにおける座標  $s$  の透過率、 $b(u)$  は手前のレイヤの座標  $u$  の透過率、 $L_0$  はバックライトの輝度値を表す。表示する各視点の解像度とレイヤの解像度が同一の場合、各視点の画像の画素  $I_k(n)$  と、ディスプレイが出力する光線  $l(s, u)$  は一対一に対応する。

$$I_k(n) \Leftrightarrow l(s, u), \quad k = s - u, n = u \quad (2)$$

$I_k(n)$  は  $k$  番目の視点の画像における  $n$  番目の画素を表す。

次に、透過率パターンの計算手法について説明する。各方向に表示したい画像群 (多視点画像)  $I_k(n)$  のすべての画素を並べた列ベクトルを  $\mathbf{i} \in \mathbb{R}^I$  と表す。同様に、奥と手前のレイヤの透過率をそれぞれ  $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^N$ 、 $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^N$  とする。ここで、 $I$  は多視点画像の総画素数、 $N$  は各レイヤの画素数である。このとき、多視点画像  $\mathbf{i}$  を入力とした、レイヤの透過率パターン  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  の計算は、以下に示す最適化問題となる。

$$\arg \min_{\mathbf{a}, \mathbf{b}} \|\mathbf{i} - \phi(\mathbf{a}, \mathbf{b})L_0\|^2 \quad (3)$$

$\phi(\cdot)$  は Eq. (1), Eq. (2) をまとめたレイヤ  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  から表示映像を生成するオペレータである。具体的には、 $\mathbf{i}$  の各要素と対応する光線を生成するため、 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  から 1 つずつ画素を選び、それらを掛け合わせる、という処理をする。つまり Eq. (3) は、表示すべき光線群  $\mathbf{i}$  に対して、実際に出力される光線群  $\phi(\mathbf{a}, \mathbf{b})L_0$  がなるべく近くなるようなレイヤ  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  を求める問題である。この問

題を解くうえで、バックライトの輝度値  $L_0$  を表記したまま計算すること、多視点画像  $\mathbf{i}$  をあらかじめ  $L_0$  で割ってから計算することは等価であるので、以降記述からは省略する。文献 [10][11] は、この最適化問題を非負値行列因子分解として解いているが、2.2 で説明する高解像度レイヤの計算に対応できないため、本稿ではより汎用的な形式で記述する。最適な  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  を一度に求めることは困難なため、 $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  のうち一方を既知とし、もう一方を更新するという作業を繰り返すことで、レイヤ全体の最適化を図る。 $\mathbf{b}$  または  $\mathbf{a}$  を既知とした場合のそれぞれで、Eq. (3) は以下のように書き直すことができる。

$$\arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{i} - \Phi_b \mathbf{a}\|^2 \quad (4)$$

$$\arg \min_{\mathbf{b}} \|\mathbf{i} - \Phi_a \mathbf{b}\|^2 \quad (5)$$

Eq. (4), Eq. (5) のイメージ図を Fig. 2 に示す。 $\Phi_b \in \mathbb{R}^{I \times N}$  は  $\mathbf{a}$  とかけることですべての出力光線を生成する行列である。各行のうち 1 つだけが  $\mathbf{b}$  の要素を持ち、それ以外は 0 である。 $\Phi_a \in \mathbb{R}^{I \times N}$  も同様である。Eq. (4), Eq. (5) のエネルギーを減少させるため、以下の更新演算を行う。

$$\mathbf{a} \leftarrow h \left( \mathbf{a} \circ \frac{\Phi_b^T \mathbf{i}}{\Phi_b^T \Phi_b \mathbf{a}} \right) \quad (6)$$

$$\mathbf{b} \leftarrow h \left( \mathbf{b} \circ \frac{\Phi_a^T \mathbf{i}}{\Phi_a^T \Phi_a \mathbf{b}} \right) \quad (7)$$

$$h(x) = \begin{cases} \varepsilon & (x < \varepsilon) \\ x & (\varepsilon \leq x \leq 1) \\ 1 & (1 < x) \end{cases} \quad (8)$$

$h(x)$  は、レイヤの透過率が 0 ~ 1 の範囲に収まるように、閾値処理をする関数である。Eq. (6), Eq. (7) の演算を収束するまで交互に繰り返すことで、最適なレイヤ  $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$  を算出する。

## 2.2 高解像度レイヤ型

表示する各視点の解像度に対し  $\alpha$  倍の解像度レイヤを用いる場合, Eq. (2) に示した各視点の画像とディスプレイが出力する光線との対応関係は以下ようになる.

$$I_k(n) \Leftrightarrow \frac{1}{\alpha} \sum_{m=0}^{\alpha-1} l(s+m, u+m),$$

$$k = s - u, \quad \alpha n = u \quad (9)$$

ここでは, Fig. 1-(ii) に示すように, 隣り合う複数の光線の平均が 1 つの画素を表現するとモデル化した. これに合わせて,  $\phi(\cdot)$ ,  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$  も変わる.  $\phi(\cdot)$  は,  $\mathbf{a}$ ,  $\mathbf{b}$  から  $\alpha$  個ずつ要素を選び, それぞれを掛け合わせ  $\alpha$  個の光線を生成し, それらの平均をとるオペレータになる.  $\Phi_b$  は, 各行のうち  $\alpha$  個が  $\mathbf{b}$  の要素を持つ.  $\Phi_a$  も同様である. これを Fig. 2-(ii) に示す.

繰り返し計算の手順については, 2.1 で述べた従来のレイヤ型ディスプレイの場合と同じである.

## 3 レイヤ高解像度化の効用

### 3.1 角度分解能と空間周波数特性

Light field display の表示映像が劣化する要因として, ディスプレイの空間周波数特性がある. ディスプレイの画素ピッチ (空間分解能) と, 隣り合う視点間の角度 (角度分解能) により, 奥行きに依存して, 空間周波数の上限が決定される. 一般に, light field display は, ディスプレイ面から離れた奥行きほど, 空間周波数の上限が低い. つまり, ディスプレイ面から大きく飛び出すほど映像がボケる. そして, 角度分解能が高いほど空間周波数特性が良く, 飛び出した物体も鮮明に表示できる.

レイヤの解像度とディスプレイの角度分解能の関係を Fig. 3 に示す. レイヤ間隔を固定した場合, レイヤの高解像度化に伴い, 隣り合う視点間の角度が小さくなり, 角度的により高密度な表示が可能になる. ディスプレイの視野角を一定に保つとすると, 角度分解能が大きいほど表示できる視点数は増加する. 本稿では, すべての実験において, 文献 [19] の “The Stanford Bunny” を表示画像として用いる. 実験の際, 表示物体の立体感とディスプレイの視野角を固定するために, レイヤの解像度の倍率  $\alpha$  に応じて, 用いる多視点画像の視点と枚数を調節する.  $\alpha$  と用いた画像群の対応関係を Fig. 4 に示す.

文献 [10][11][16] では, レイヤの枚数, 間隔, 画素ピッチを変数とし, ディスプレイの空間周波数特性を

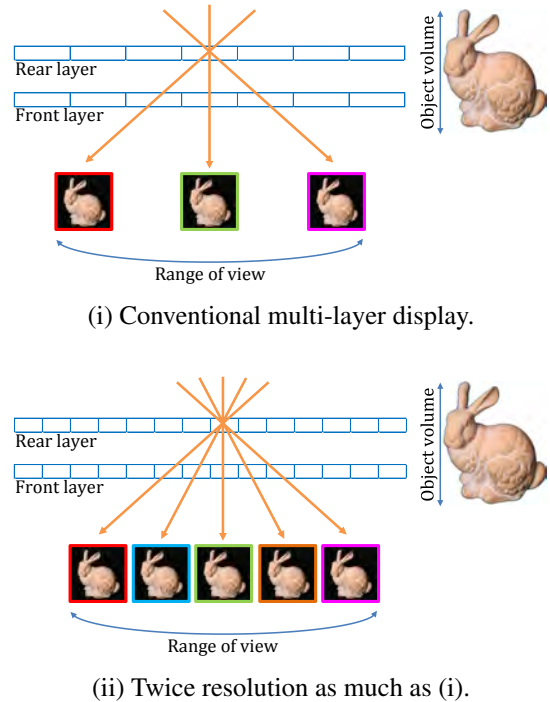


Fig. 3: Relationship between angular resolution and display views.

解析している. これを参考に, 2 枚のレイヤで構成されたディスプレイの空間周波数特性を解析し, レイヤの解像度による比較を行った. 結果を Fig. 5 に示す. 横軸は奥行き位置であり, 0.0 と 1.0 に 2 枚のレイヤがそれぞれ配置されている. 縦軸は空間周波数である. 被写体を鮮明に表示するためには, 空間周波数の上限が表示したい画像のナイキスト周波数以上でなければならない.  $\alpha = 1$ , つまり各視点へ表示する画像とレイヤの解像度が同一の場合の空間周波数特性を青線で示した. 空間周波数の上限は, 奥行き 0.5 で最大となり, 0.5 から離れるに従い低下する. ナイキスト周波数以上を達成できる範囲 (以降, 有効範囲と呼ぶ) は, 0.0 ~ 1.0 である. レイヤを  $\alpha$  倍高解像度化すると, それに伴い空間周波数の上限も  $\alpha$  倍される. その結果, 有効範囲も広がる. つまり, レイヤの高解像度化は, 横方向の解像度だけではなく, 奥行き方向の解像度の向上にもつながると言える. Fig. 5 からわかるように, 有効範囲の幅  $d$  と, レイヤの倍率  $\alpha$  は,  $d = 2\alpha - 1$  の関係にある.

ディスプレイの空間周波数特性によるボケの影響をシミュレーションした. 結果を Fig. 6 に示す.  $\alpha = 1$  の場合, ディスプレイから大きく飛び出した箇所 (ウサギの耳やモモ) がボケる. 一方,  $\alpha = 6$  の場合, ディスプレイから飛び出した箇所も鮮明に表示することができる.

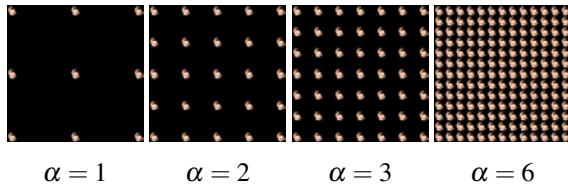


Fig. 4: Display views used for the all experiments.

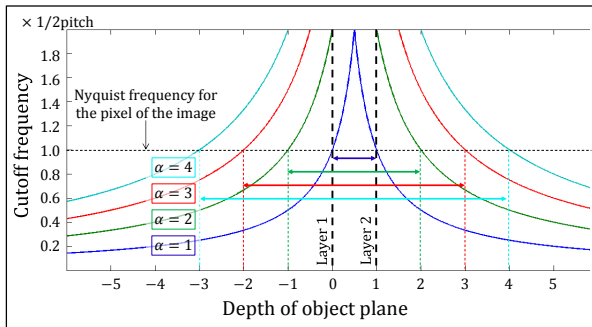


Fig. 5: Upper bound for spatial frequency depending on depth.

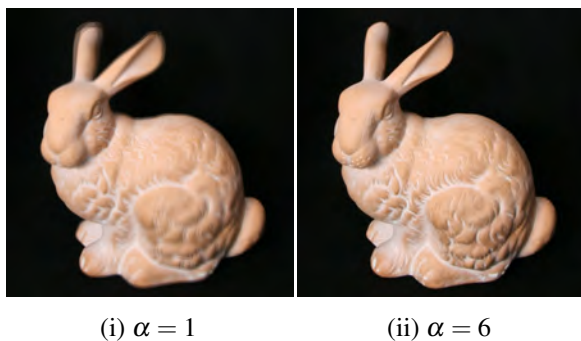


Fig. 6: Simulated images with different resolutions.

### 3.2 画素階調数の削減

従来のレイヤ型（表示する各視点の解像度＝レイヤの解像度）では、奥と手前のレイヤから1つずつ画素を選び、それら2つの積で1つの光線を表現する。一方、高解像度レイヤ型（縦横 $\alpha$ 倍）は、各レイヤから $\alpha^2$ ずつ画素を選び、それらの積で $\alpha^2$ 個の光線を作り、それらの平均で1つの光線を表現する。したがって、後者の方が、数多くの画素を用いて1つの光線を作り出しており、表現すべき光線に対しての自由度が大きい。このことから、高解像度レイヤ型では、レイヤの画素1つあたりの階調数を削減しても、連続的な輝度値の光線を生成し、所望の映像を表示できると考えられる。レイヤの画素が表現できる値が連続値ではなく離散である場合、透過率パターンの計算は組み合わせ最適化となり数値的に解くことは困難である。そこで我々は、

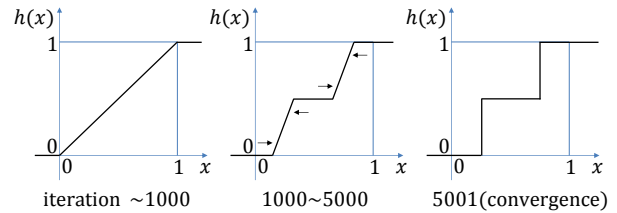
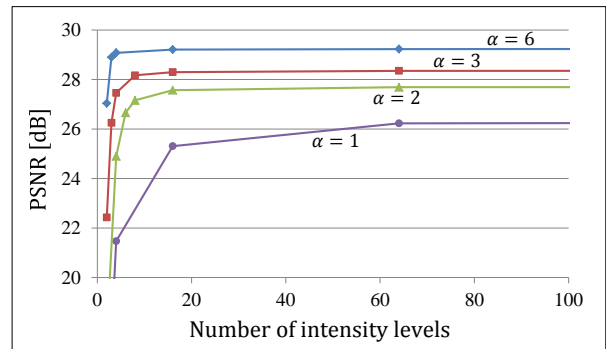
Fig. 7: Illustrations of the threshold function  $h(x)$ . (number of intensity level is 3.)

Fig. 8: Quality of displayed images with different resolutions and number of intensity levels.

次のような経験的な手法を用いた。レイヤの透過率パターンは、Eq. (6)–Eq. (8)の演算を繰り返すことで最適化される。その繰り返し計算の中で、閾値処理 $h(x)$ を徐々に厳しくすることで、最終的なレイヤの画素が離散値になるようにした。例として、階調数が3の場合の $h(x)$ をFig. 7に示す。

レイヤの画素階調数の削減が、表示品質へ与える影響を評価する。レイヤの解像度の倍率 $\alpha$ とレイヤの画素の階調数を変えて透過率パターンを計算し、それらを用いて表示映像をシミュレーションした。表示する多視点画像として、文献[19]の“The Stanford Bunny”をグレースケール化し用いた。表示物体の立体感とディスプレイの視野角を固定するため、Fig. 4に示すように、 $\alpha$ に応じて用いる多視点画像の視点と枚数を調節した。実験結果をFig. 8に示す。 $\alpha=1$ では、階調数の削減に伴い表示品質が大きく低下する。一方、 $\alpha$ が大きい場合、階調数を削減しても表示映像の劣化は小さい。このことから、レイヤを高解像度化する場合、それに合わせてレイヤの各画素の階調数を削減できるといえる。特に $\alpha=6$ では、階調数が2（画素値：0.0 or 1.0）のみでも、まずまずの品質で映像表示ができています。 $\alpha=6$ における、階調数256と階調数2の場合のレイヤの透過率パターン、そこからシミュレーションし

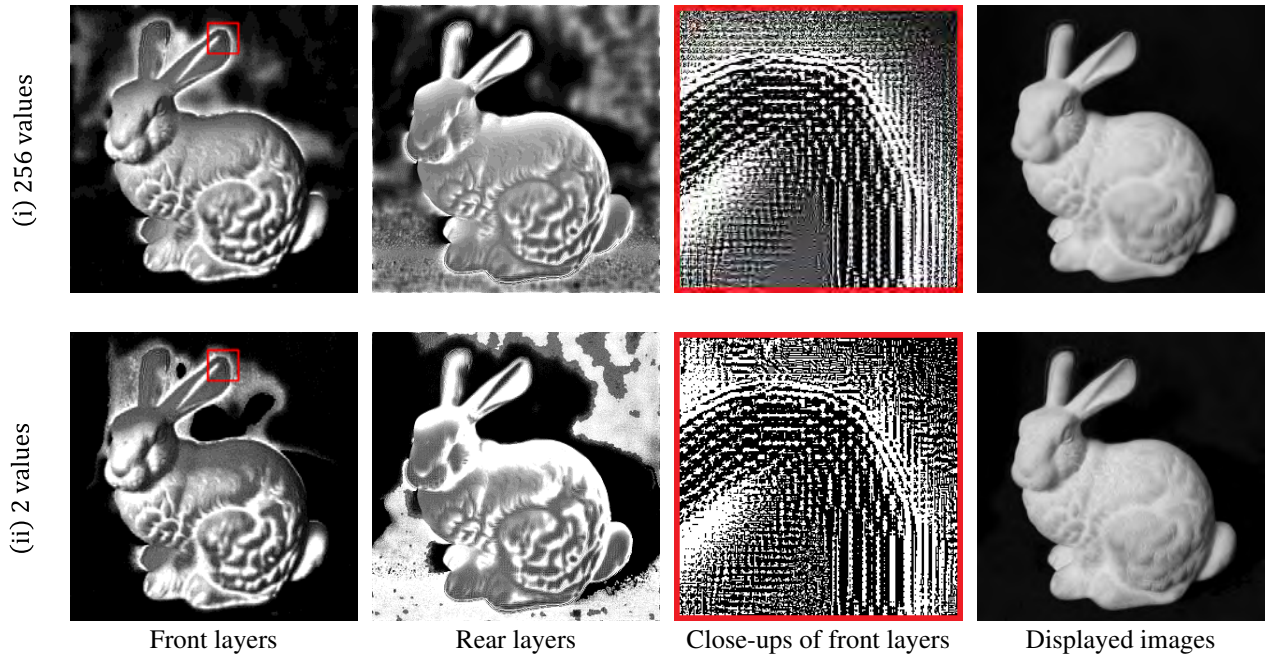
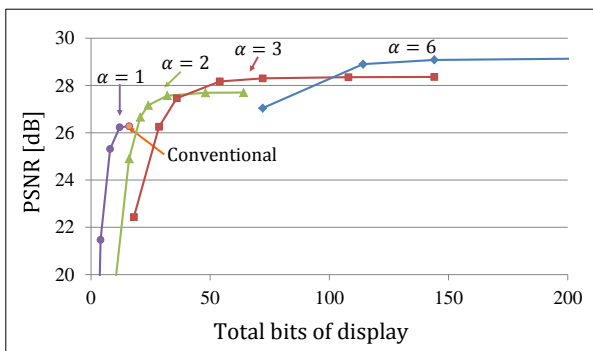


Fig. 9: Display simulation with different number of intensity levels.

Fig. 10: Quality of displayed images and total bits of display. Horizontal axis is normalized by the number of pixels of the displayed image ( $512 \times 512$ ).

た表示映像を Fig. 9 に示す。レイヤは 2 値しか表現できないにも関わらず、最終的には望みの映像が表示できることがわかる。

## 4 高解像度化と表示効率

3.1 で述べたように、レイヤを高解像度化することで、ディスプレイの空間周波数特性を向上させ、飛び出した物体のボケを解消できる。しかし、レイヤの高解像度化は、ディスプレイの総画素数の増加させ、レイヤ型ディスプレイの持つ表示効率の良さという利点を失わせてしまう。一方で、3.2 で述べたように、レイ

ヤを高解像度化した場合、レイヤの一面素あたりの階調数が削減できる。そこで本稿では、ディスプレイの表示効率を、一面素あたりの階調数も含めた、ディスプレイの総ビット数で議論する。この指標では、提案するレイヤの高解像度化は必ずしも表示効率の低下にはつながらない。高解像度で階調数の少ないパネルを用いることで、表示効率の良さを残しながら、空間周波数特性を向上させることができる。

ディスプレイの総ビット数と表示性能の関係を評価する。横軸をディスプレイの総ビット数に変更し、Fig. 8 をプロットし直したものを Fig. 10 に示す。ここでは、ディスプレイの総ビット数を、以下のように定義した。

ディスプレイの総ビット数

$$= \text{ディスプレイの総画素数} \times \log_2(\text{階調数}) \quad (10)$$

従来のレイヤ型ディスプレイ ( $\alpha = 1$ , 階調数 256) を橙点で示した。ディスプレイの総ビット数は小さいが、 $\alpha = 1$  であるため、空間周波数特性が低く、物体を鮮明に表示できる奥行き範囲が狭い。空間周波数特性を向上させるためにレイヤを縦横  $\alpha$  倍すると、総ビット数は  $\alpha^2$  倍になってしまう。しかし、高解像度化した場合、階調数の点でコストを削減できる。そのため総ビット数の増加を抑えつつ高い空間周波数特性を達成することが可能である。

## 5 まとめ

本稿では、レイヤ型ディスプレイにおいて、レイヤの高解像度化が、ディスプレイの空間周波数特性を向上させ、飛び出した表示物体のボケの解消につながることを示した。さらに、レイヤを高解像度化した場合、表示映像の品質を低下させることなく、レイヤの一面素あたりの階調数を削減できることを実験的に示した。これらに基づき、高解像度かつ低階調数のディスプレイパネルを用いることで、ディスプレイの持つ総ピット数を抑えつつ、空間周波数特性の高いディスプレイが実装できることを示した。

## 参考文献

- [1] F. E. Ives: "Parallax stereogram and process of making same," U.S. Patent US72556A, 1903.
- [2] H. Isono, M. Yasuda, and H. Sasazawa, "Autostereoscopic 3-D LCD display using LCD-generated parallax barrier," *Japan Display*, pp. 303–306, 1992.
- [3] K. Sakamoto and T. Morii, "Multiview 3D display using parallax barrier combined with polarizer," *Proc. SPIE*, vol. 6399, 2006.
- [4] T. Peterka, R. L. Kooima, D. J. Sandin, A. Johnson, J. Leigh, and T. A. DeFanti, "Advances in the dynallax solid-state dynamic parallax barrier autostereoscopic visualization display system," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 14, no. 3, pp. 487–499, 2008.
- [5] G. Lippmann: "Epreuves reversibles donnant la sensation du relief," *Journal of Physics*, vol. 7, no. 4, pp. 821–825, 1908.
- [6] T. Okoshi, *Three-Dimensional Imaging Techniques*, Academic Press, 1976.
- [7] R. Borner, "Autostereoscopic 3D-imaging by front and rear projection and on flat panel displays," *Elsevier Displays*, vol. 14, no. 1, pp. 39–46, 1993.
- [8] M. McCormick, "Integral 3D imaging for broadcast," *Int. Display Workshop*, vol. 14, no. 1, pp. 39–46, 1993.
- [9] J. Arai, F. Okano, M. Kawakita, M. Okui, Y. Hanio, M. Yoshimura, M. Furuya, and M. Sato, "Integral three dimensional television using a 33-megapixel imaging system," *Journal of Display Technology*, vol. 6, no. 10, pp. 422–430, 2010.
- [10] G. Wetzstein, D. Lanman, W. Heidrich, R. Raskar: "Layered 3D: Tomographic Image Synthesis for Attenuation-based Light Field and High Dynamic Range Displays," *SIGGRAPH 2011 papers*, no. 95, 2011.
- [11] G. Wetzstein, D. Lanman, M. Hirsch, R. Raskar: "Tensor Displays: Compressive Light Field Synthesis using Multilayer Displays with Directional Backlighting," *SIGGRAPH 2012 papers*, no. 80, 2012.
- [12] D. Lanman, G. Wetzstein, M. Hirsch, W. Heidrich, R. Raskar: "Polarization Fields: Dynamic Light Field Display using Multi-Layer LCDs," *SIGGRAPH Asia 2011 papers*, no. 186, 2011.
- [13] M. Hirsch, G. Wetzstein, R. Raskar, "A Compressive Light Field Projection System," *ACM Proc. of SIGGRAPH (Transactions on Graphics 33, 4)*, 2014.
- [14] L. Seungjae et al. "Additive light field displays: realization of augmented reality with holographic optical elements," *SIGGRAPH 2016*. vol. 35. issue 4. no. 60.
- [15] F. Huang, K. Chen, G. Wetzstein, "The Light Field Stereoscope: Immersive Computer Graphics via Factored Near-Eye Light Field Displays with Focus Cues", *ACM SIGGRAPH (Transactions on Graphics 33, 5)*, 2015.
- [16] T. Saito, Y. Kobayashi, K. Takahashi, T. Fujii: "Displaying Real-World Light-Fields with Stacked Multiplicative Layers: Requirement and Data Conversion for Input Multi-view Images," *OSA/IEEE Journal of Display Technology*, vol. 12, no. 11, pp.1290–1300, 2016.
- [17] K. Takahashi, Y. Kobayashi, T. Fujii: "Displaying Real World Light Fields Using Stacked LCDs," *International Display Workshops in conjunction with Asia Display 2016, DES4/3D8-1, Invited talk*, 2016.
- [18] M. Hirsch, D. Leithinger, T. Baran, "Lumii: DIY light field prints," In *ACM SIGGRAPH 2016 Studio (SIGGRAPH '16)*, Article no. 3, 2016.
- [19] "The (new) stanford light field archive", <http://lightfield.stanford.edu>.