

直視型インテグラル立体表示の色モアレ低減技術 — 3 台合成の検討 —

佐々木 久幸[†] 岡市 直人[†] 渡邊 隼人[†] 加納 正規[†] 河北 真宏[†] 三科 智之[†]

[†]NHK 放送技術研究所 〒157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11

E-mail: [†] sasaki.h-ey@nhk.or.jp

あらまし 直視型表示パネルを用いたインテグラル立体ディスプレイでは、パネルのカラー表示のためのサブ画素構造により立体像に色モアレが生じる課題がある。これまで、複数台の直視型立体表示装置による再生立体像を合成することで色モアレを低減する手法を提案し、2 台合成による結果を報告してきた。今回は、表示装置 3 台を合成することで、より効果的に色モアレを抑圧できることを示した。また、3 台合成時の立体像の解像度特性の向上効果についても検証を行った。

キーワード インテグラル立体, 立体映像, 色モアレ, レンズアレー, 直視型表示パネル

Color moiré reduction technique for direct-view type integral three-dimensional display — A study of three-unit synthesis —

Hisayuki SASAKI,[†] Naoto OKAICHI,[†] Hayato WATANABE,[†] Masanori KANO,[†]

Masahiro KAWAKITA,[†] and Tomoyuki MISHINA[†]

[†] Science & Technology Research Laboratories, NHK 1-10-11 Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo, 157-8510 Japan

E-mail: [†] sasaki.h-ey@nhk.or.jp

Abstract There is a problem in the integral three-dimensional (3D) display using the direct-view type display panel that color moiré occurs in the 3D image by the sub pixel structure for color display of the panel. We have proposed a method of reducing color moiré by combining reconstructed 3D images with multiple direct-view type display devices and reported the results of two-unit synthesis. In this paper, we show that color moiré can be suppressed more effectively by combining three display devices. In addition, the effect of improving the resolution characteristics of the 3D image in three-unit synthesis was also verified.

Keyword Integral photography, 3D, Color moiré, Lens array, Direct-view type display

1. まえがき

インテグラルフォトグラフィ[1]を基本原理として、動画立体映像を再生するインテグラル立体表示技術の研究を進めている[2]。高精細な直視型表示パネルを用いて要素画像群を表示することで、薄型のインテグラル立体表示系を実現できる。しかし、直視型表示パネルでは一般的に、赤色(R)、緑色(G)、青色(B)のサブ画素構造を有するため、インテグラル立体表示に使用した場合、レンズアレーによる空間標本化により、再生立体像に低い周波数の色モアレが生じる。従来、色モアレの低減策として、表示パネル面に拡散フィルムを使用したり、表示パネル面を要素レンズの焦点距離の奥行き位置からずらして要素レンズのデフォーカスを利用したりする方法[3,4]などがある。さらに、特殊な

カラーフィルタ構造を利用[5]したり、レンズアレーを斜めに傾けることでモアレ成分を高周波領域にシフトさせたりする[6]などの方法も提案されている。しかし、これらの方法では、要素画像の解像度特性の低下や、立体像の奥行き再現性の低下などの課題があった。筆者らは、複数(2台)の直視型インテグラル立体表示系を組み合わせることで立体像を合成することにより、この色モアレを改善し、再生立体像の総合的な再生品質を向上させる方法を提案している[7,8]。本稿では複数台の合成によるモアレ低減効果を詳細に解析するとともに、3 台合成の場合の色モアレの低減と解像度の向上効果について報告する。

2. 色モアレの低減方法とその効果

直視型表示パネルは、一般的に RGB 各色のサブ画素

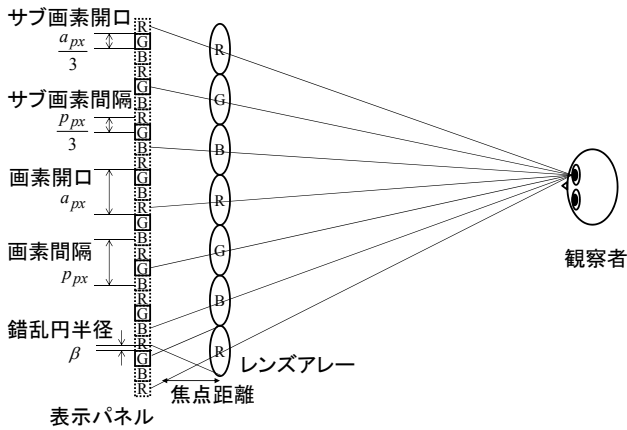


図 1 色モアレの発生

構造をもつ。例えば、縦長のストライプ状のサブ画素の場合、その RGB のサブ画素は画面の水平方向に繰り返し配置される。そのため、レンズアレーによる標本化で、低い周波数に折り返しが生じる[7,8]。一例として緑色(G)サブ画素に着目すると、画素間隔 p_{px} とその空間周波数 f_{px} は $p_{px} = 1/f_{px}$ の関係にある。画素と要素レンズによって生じる折り返しうなり(モアレ)の空間周波数 f_m は、要素レンズ間隔を $p_{lx} = 1/f_{lx}$ とすれば、

$$f_m = \min|f_{px} - n f_{lx}| \quad (1)$$

となる。この式からわかるように、標本化周波数 $1/p_{lx}$ 以下の周波数領域のモアレが立体映像に顕著に現れる。その様子を図1に示す。これはG以外のRとBについても同様であり、各色に対応したモアレが、位相が互いに $1/(3f_m)$ 異なった状態で重なり合うことで観察者には顕著な色モアレとして知覚される。このように、色モアレの発生は単色のモアレの発生と同じ原理であるため、本稿では以降G単色のモアレについて議論する。1台の表示パネル全面に100%輝度のG単色(すなわちGの直流信号)を表示する場合を考える。サブ画素が縦ストライプ構造である場合、水平方向にのみ周期成分を持ち、垂直方向には直流成分のみを持つため、水平x軸方向の1次元のみを考慮すればよい。簡単のため図1に示すように画素の開口率はそれぞれ100%であるとし、ブラックマトリクスは考慮せず、RGBそれぞれのサブ画素開口も画素開口 $a_{px} = p_{px}$ の1/3で

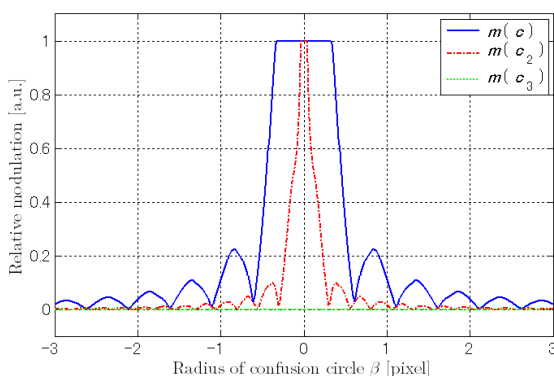


図 2 色モアレの変調度

あると仮定する。レンズアレーの各要素レンズによる読み出し時のデフォーカスの影響を考慮した表示パネル上での輝度 $c(x)$ は、基本波、高調波の重ね合わせとして次のようなフーリエ級数で表現できる[3,4]、

$$c(x) = k \left\{ F_s(0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n/3)}{\pi n/3} \cos(2\pi n x) F_s(2\pi n) \right\} \quad (2)$$

$$F_s(2\pi n) = \frac{2J_1(2\pi n\beta)}{2\pi n\beta} \quad (3)$$

ここで k は任意係数、 $F_s(2\pi n)$ は n 次高調波の振幅係数、 $J_1(\cdot)$ は1次の第1種ベッセル関数、 β は要素レンズをデフォーカスさせた場合の錯乱円の半径であり、距離は画素間隔を1として正規化した。この場合のモアレの変調度 $m(c)$ は、

$$m(c) = \frac{\max\{c(x)\} - \min\{c(x)\}}{\max\{c(x)\} + \min\{c(x)\}} \quad (4)$$

である。2台合成および3台合成した場合の表示パネル上での輝度をそれぞれ $c_2(x)$ および $c_3(x)$ とすると、レンズアレー上でのモアレを最も低減させるような表示装置の位置関係は、表示パネル上で考えればそれぞれ画素を1/2および1/3ずつずらして重ね合わせた場合と等価であり、

$$c_2(x) = c(x) + c(x + 1/2) \quad (5)$$

$$c_3(x) = c(x) + c(x + 1/3) + c(x + 2/3) \quad (6)$$

と表すことができる。それぞれの場合のモアレの変調度 $m(c)$ 、 $m(c_2)$ 、および $m(c_3)$ を計算した結果を図2に示す。なお、錯乱円半径 β はレンズアレーと表示パネルの距離が焦点距離より短い時は負値で、焦点距離より長い時は正值で表すものとする。1台の場合に比べて、2台合成ではデフォーカス時の錯乱円半径が0.03画素以下のごく小さい場合を除いて顕著なモアレ低減効果があり、例えばモアレの変調度が1/2に低減する錯乱円半径も0.45画素から0.13画素に改善している。また、3台合成の場合には理論上モアレを完全に抑圧できることがわかる。

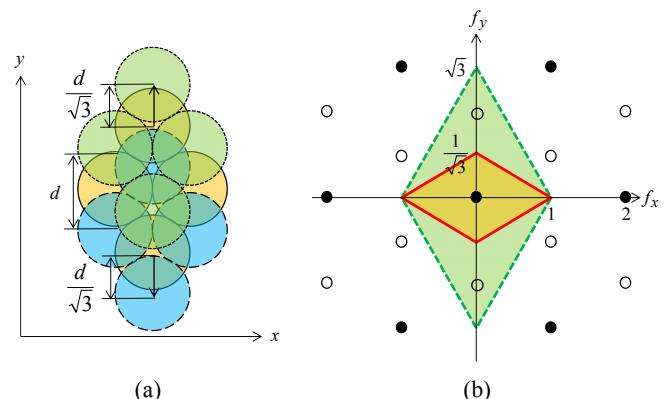


図 3 要素レンズの構成(a)とレンズずらしによる表示帯域の拡大(b)

3. レンズずらしによる解像度向上

色モアレの低減とともに解像度特性も向上させる[9]場合には、レンズ位置をずらして合成表示する方式(レンズずらし方式)が有効である。筆者らはこれまで正方格子状のレンズアレーを使用し、2 台の表示系をレンズずらし方式で合成表示している[7,8]。これは正方格子状の画素構造をもつ2 次元映像の画素ずらし表示[10]と同様の効果を持つ。合成する表示系の台数に応じて、立体映像の標本化点が増えるため、再生像の解像度を向上できる。前節での議論から、モアレの低減のためには3 台合成がより望ましい。また、レンズアレーがデルタ配列の場合は、2 台合成では幾何学的に等間隔のレンズずらしを行うことができない。しかし、3 台合成の場合は、等間隔にレンズずらしを実現できる。3 台合成の場合の要素レンズの構成を図3(a)に、またその標本化によって表現可能な立体像の空間周波数を図3(b)に示す。1 台の場合と3 台合成の場合をそれぞれ、キャリア周波数を白丸と黒丸で、ナイキスト周波数を実線と破線で示している。ナイキスト周波数内側の表示可能範囲がy 軸方向に3 倍に広がり、一見して帯域が3 倍に広がったように見えるが、これは標本化のみを考えた場合を示したものであり、要素レンズの開口の影響は考慮されていない。現実に即した画質の評価を行うには開口による空間周波数応答への影響を考慮する必要がある。

水平方向をx 軸、垂直方向をy 軸として、表示系1

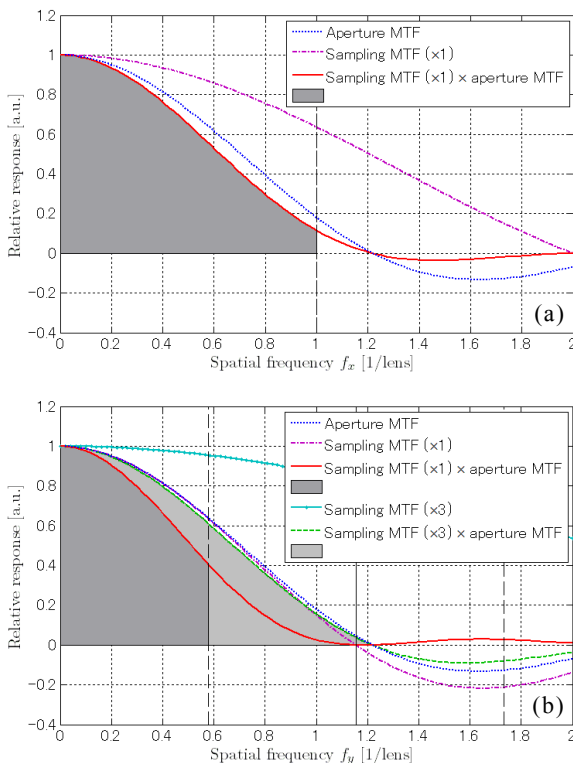


図4 レンズアレー上に表示された立体像の空間周波数特性 ((a)水平方向, (b)垂直方向)

台の場合の要素レンズの標本化による周波数応答を $D_{sx}(f_x)$ および $D_{sy}(f_y)$ 、要素レンズの開口による周波数応答を $D_a(f)$ 、それらによる総合周波数特性を $D_x(f_x)$ 、 $D_y(f_y)$ とすれば、レンズ面上に表示される立体像の空間周波数を f (特に水平方向を f_x 、垂直方向を f_y)、レンズ同士が互いに接しあう斜め 60° 方向のレンズピッチを p_l 、要素レンズの開口が円形でその直径を d とした場合、

$$D_{sx}(f_x) = \frac{\sin(\pi p_l f_x / 2)}{\pi p_l f_x / 2} \quad (7)$$

$$D_{sy}(f_y) = \frac{\sin(\sqrt{3}\pi p_l f_y / 2)}{\sqrt{3}\pi p_l f_y / 2} \quad (8)$$

$$D_a(f) = \frac{2J_1(\pi d f)}{\pi d f} \quad (9)$$

$$D_x(f_x) = D_{sx}(f_x) D_a(f_x) \quad (10)$$

$$D_y(f_y) = D_{sy}(f_y) D_a(f_y) \quad (11)$$

と表すことができる。3 台合成の場合、図3(a)のように基準となる1 台目の表示系に対して2 台目と3 台目をそれぞれ垂直y 軸方向に $\pm 1/\sqrt{3}$ レンズずらしして合成することで、レンズピッチは $1/2\sqrt{3}$ レンズとなる。これらの寄与を考慮した3 台合成後の標本化による周波数応答 $D_{sy3}(f_y)$ と総合周波数特性 $D_{y3}(f_y)$ はそれぞれ、

$$D_{sy3}(f_y) = \frac{\sin(\sqrt{3}\pi p_l f_y / 6)}{\sqrt{3}\pi p_l f_y / 6} \quad (12)$$

$$D_{y3}(f_y) = D_{sy3}(f_y) D_a(f_y) \quad (13)$$

となる。 p_l が直径 d に等しいものとして $p_l = d = 1$ とし、これらの式を計算した結果を図4に示す。1 台のみの場合の標本化周波数は $f_{lx} \equiv 1/p_{lx} = 2/p_l = 2$ および $f_{ly} \equiv 1/p_{ly} = 2/\sqrt{3}$ 、3 台合成時のy 軸方向については $f_{ly3} \equiv 3/p_{ly} = 6/\sqrt{3}p_l = 6/\sqrt{3}$ であり、これらのそれぞれ1/2 がナイキスト周波数である。1 台の場合と3 台合成の場合についてナイキスト周波数以下の領域の総合周波数特性をそれぞれ濃い灰色と薄い灰色の領域で表現した。図3(b)からもわかるようにx 軸方向に関しては1 台のみの場合と3 台合成の場合で変化はない。y 軸方向に関しては、1 台のみの場合にx 軸方向に比べて帯域が大幅に制限されているのに対して、3 台合成では表示可能な周波数帯域が2 倍以上に広がっている。加えて1 台の場合のナイキスト周波数 $f_y = 1/\sqrt{3}$ における応答が約1.5 倍に向上し低い周波数領域でも応答が改善することで、全体として水平・垂直方向の帯域バランスが良くなっていることがわかる。

4. 表示実験

図5に示す構成の表示系を試作し、実写インテグラル立体映像の表示実験を行った。直視型表示パネルとして、13.3型8K有機ELパネル(株式会社半導体エネルギー研究所製[11])を3 台使用した。実験装置の仕

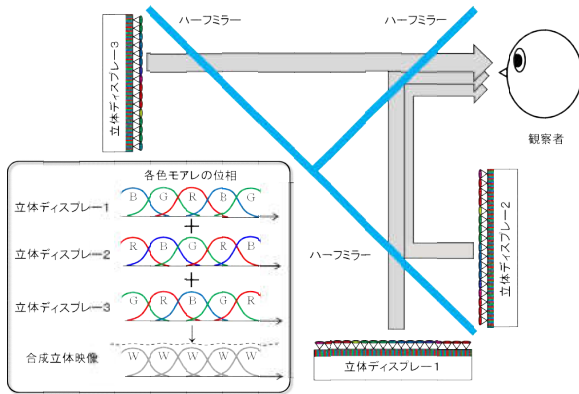


図 5 実験装置の構成

様を表 1 に示す。図 6(a)は 1 台のみ、図 6(b)は 3 台合成の結果の一部をそれぞれ切りだしたものである。3 台合成でモアレが少なくなっており、低減効果が確認できる。解像度に関しては人形の目や頭の模様、輪郭部分などにおいて改善効果を確認できる。なお、第 2 節で述べたように 3 台合成の場合、理論上は完全な色モアレの解消が期待できるが、実験結果では低減効果にとどまっている。その原因の一つとしては、今回の理論検討の条件では画素開口率を 100%と仮定し、パネルのブラックマトリクスを考慮しなかったが、実際のパネルではその構造に起因する折り返し成分がモアレとして残留することが考えられる。

5. むすび

本稿では直視型表示パネルを用いたインテグラル立体表示の色モアレを低減するため、複数の表示系によって立体像を合成表示する手法を解析した。その結果、例えば 1 台の場合にモアレの変調度が半分に低減する錯乱円の半径が 0.45 画素であるのに対して、2 台合成では半径 0.13 画素でも同等の低減効果が見込まれ、3 台合成では理論上モアレを完全に抑圧できることを明らかにした。さらに 3 台合成時のレンズずらしによる解像度向上効果についても周波数応答を理論的に解析し、垂直方向の帯域を 2 倍以上に拡大でき、1 台の場合のナイキスト周波数における応答を 1.5 倍近く改善できることを示した。実験では実写のインテグラル立体映像を表示し、色モアレが抑圧され、解像度の向上効果が得られていることを示した。今後、ブラックマトリクスの影響や各種カラーフィルタ構造について

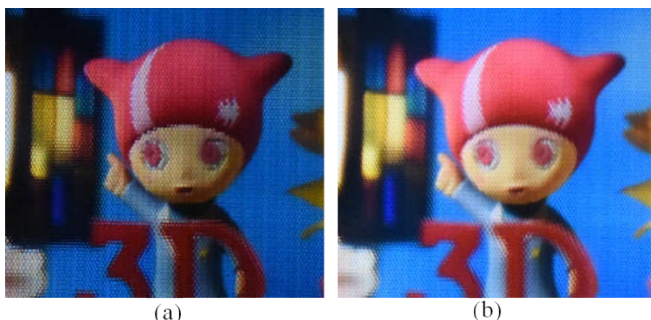


図 6 実写インテグラル立体像の表示実験

も解析を行う。また今回の手法は複数の表示装置を光学的に合成するものであるが、今後、単一の表示系においても色モアレ低減する手法を検討していく。

表 1 立体映像表示系の緒元

表示パネル	
画素数	7680(H) × 4320(V)
画素間隔	38.25 μ m
画素密度	664ppi
画面サイズ	293.8mm(H) × 165.2mm(V)
レンズアレー	
要素レンズ間隔	1.0 mm
焦点距離	1.74 mm
要素レンズ配列	デルタ

文 献

- [1] M. G. Lippmann, “Épreuves réversibles donnant la sensation du relief,” *J. Phys. (Paris)*, 4e série, VII, pp. 821–825, Nov. 1908.
- [2] F. Okano, J. Arai, H. Hoshino, and I. Yuyama, “Three-dimensional video system based on integral photography,” *Opt. Eng.*, 38, 6, pp. 1072–1077, Jun. 1999.
- [3] 小林, 奥井, 洗井, 岡野, “インテグラル立体テレビの色モアレ低減手法,” *映像学誌*, 59, 3, pp.439–447, March 2005.
- [4] M. Okui, M. Kobayashi, J. Arai, and F. Okano, “Moiré fringe reduction by optical filters in integral three-dimensional imaging on a color flat-panel display,” *Appl. Opt.* 44, pp. 4475–4483, Jul. 2005.
- [5] T. Koike, K. Utsugi, and M. Oikawa, “Moiré-reduction methods for integral videography autostereoscopic display with color-filter LCD,” *Journal of the Society for Information Display*, 18, pp. 678–685, 2010.
- [6] Y. Kim, G. Park, J.-H. Jung, J. Kim, and B. Lee, “Color moiré pattern simulation and analysis in three-dimensional integral imaging for finding the moiré-reduced tilted angle of a lens array,” *Appl. Opt.* 48, pp. 2178–2187, 2009.
- [7] 佐々木, 岡市, 渡邊, 河北, 三科, “直視型インテグラル立体表示の色モアレ低減技術,” *信学技報*, IE2016-105, , pp. 223–226, Feb. 2017.
- [8] H. Sasaki, N. Okaichi, H. Watanabe, M. Kano, M. Kawakita, T. Mishina, “Color moiré reduction and resolution enhancement technique for integral three-dimensional display,” 2017 3DTV Conference (3DTV-CON), Copenhagen, pp. 1–4, Jun. 2017.
- [9] Y. Kim, J.-H. Jung, J.-M. Kang, Y. Kim, B. Lee, and B. Javidi, “Resolution-enhanced three-dimensional integral imaging using double display devices,” *IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting (LEOS 2007)*, paper TuW3, pp. 356–357, Oct. 2007.
- [10] M. Kanazawa, K. Hamada, I. Kondoh, F. Okano, Y. Haino, M. Sato, and K. Doi, “An ultrahigh-definition display using the pixel-offset method,” *J. Int. SID*, 12, 1, pp. 93–103, Mar. 2004.
- [11] S. Kawashima, S. Inoue, M. Shiokawa, A. Suzuki, S. Eguchi, Y. Hirakata, J. Koyama, S. Yamazaki, T. Sato, T. Shigenobu, Y. Ohta, S. Mitsui, N. Ueda, and T. Matsuo, “44.1: Distinguished Paper: 13.3-in. 8K x 4K 664-ppi OLED Display Using CAAC-OS FETs,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 45, pp. 627–630, 2014.