

多視点表示と体積表示の融合による三次元像形成

掛 谷 英 紀

3D Image Formation by Combining Multiview and Volumetric Displays

Hideki KAKEYA

This paper reviews the recent advancements of coarse integral volumetric imaging (CIVI) displays, which combines volumetric solutions with multiview solutions based on integral imaging. A compact CIVI display that can present floating 3D image with large depth and little vergence-accommodation conflict is realized by layering color and monochrome panels behind the elemental lenses. Brighter image presentation is attained by reducing the number of polarizing filters between panels.

Key words: integral imaging, volumetric display, multiview, contrast, monochrome panel

近年、立体ディスプレイの普及が進みつつあるが、それと並行して、立体視の目への負担や悪影響を指摘する議論も頻繁になされている。立体ディスプレイによる目の疲労の原因としては、クロストークノイズによるゴースト像の発生など多くの要因が知られているが、なかでも本質的に解決の難しい問題として、輻輳調節矛盾の発生がある。現在製品化されている立体ディスプレイのほとんどは、目の焦点調節をスクリーン上に固定し、視差提示により目の輻輳角のみを意図的に変化させることで立体感を演出する。そのため、目の焦点調節と輻輳角の間に矛盾が生じてしまう。

この問題を解決した立体ディスプレイの実現方法のひとつに、体積表示を行うボリュームディスプレイがある。しかしながら、この方法では実際に複数の奥行き面に画像を提示するため、輻輳調節矛盾は発生しないものの、光沢面や物体間のオクルージョンを表現するのは難しい。

オクルージョンや光沢面を表示することが可能であると同時に、輻輳調節矛盾も発生しない立体表示方式として、筆者らは粗インテグラルボリューム表示法 (coarse integral volumetric imaging: CIVI)^{1,2)} を提案している。この方式は、ボリュームディスプレイと粗インテグラルイメージングによる多視点表示法を組み合わせたものである。

CIVI は、おもに作業シミュレーター (手術シミュレ

ーションなど) やロボットの遠隔操作などの用途を想定して開発されている。従来の三次元ディスプレイの多くは映画やゲームなどのエンターテインメントを想定しているものが多い。それらの用途では必ずしも正確な奥行き知覚は必要ない。しかし、作業シミュレーターや遠隔操作などの用途に応用するためには、提示像の正確な奥行き知覚が得られなければならない。そのためには輻輳調節矛盾の解消、視点に応じた上下左右方向の両眼視差と運動視差提示が実現されることが求められる。CIVI は多視点表示と体積表示を組み合わせることで、これらの要求をすべて同時に満たすように設計されている。

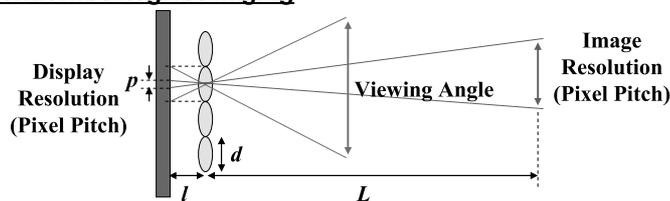
本稿では、この粗インテグラルボリューム表示法 CIVI による立体ディスプレイに関する最近の研究成果を紹介する。

1. 粗インテグラルボリューム表示

約一世紀前にリップマンによって提案されたインテグラルフォトグラフィー³⁾ は、最近のディスプレイ技術の進歩により電子ディスプレイへの応用も進んでおり、その応用が写真に限定されないという意味でインテグラルイメージングと言い換えられて、現在広く研究されている。

インテグラルイメージングは、基本的には光線再生方式であるため、フライアイレンズシート (レンズアレイ) の

Conventional Integral Imaging



Coarse Integral Imaging

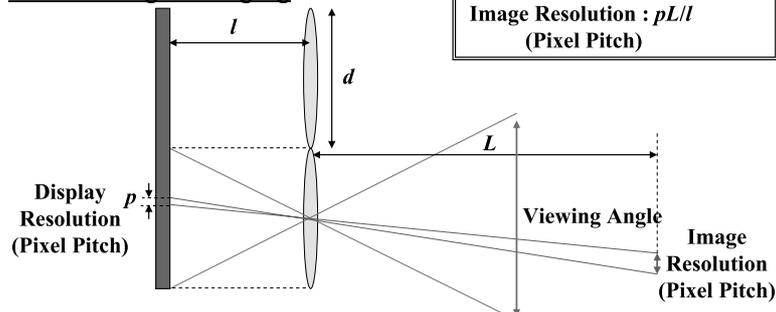


図1 フライアイレンズの目の細かさが異なるインテグラルイメージングの比較。

背後に配置される画像表示部の解像度が十分細かければ、幅広い奥行き範囲に輻輳調節矛盾のない立体像を提示することが可能である。しかしながら、特に電子ディスプレイへの応用を考える場合、ディスプレイパネルのピクセルピッチを小さくすることには限界がある。そのため、図1に示すように、一定の視野角を維持しようとする、フライアイレンズシートから離れた奥行きへの提示像の解像度は著しく粗くなる。よって、実用的には、フライアイレンズシート付近の狭い奥行き範囲にしか立体像を提示できないという問題があった。

フライアイレンズシート面から離れた位置に、解像度が高い立体像を提示する手段として、フライアイレンズを構成する要素レンズとして焦点距離と径の大きなものを使用する方法がある。筆者はこの構成を粗インテグラルイメージング (coarse integral imaging: CII) とよんでいる。この場合、図1下図に示すように、フライアイレンズ面から離れた位置でもレンズによる画素の拡大率が大きくなりすぎないため、提示像の解像度はある程度維持される。

ただし、CIIで深い奥行き表現を行う場合、要素画像間の視差が大きくなるため、図2のように要素レンズの継ぎ目で提示像が不連続になるという問題が生じる。その問題を解決する方法として、ディスプレイパネル面を多層化する体積表示方式を組み合わせることが考えられる。提示像の奥行きに近い像面に描画を行う場合、要素画像間の視差量は小さくなり、要素レンズの継ぎ目における画像の接続が向上することが期待される。この手法は、多視点立体表示方式に体積表示を組み合わせるハイブリッド立体表示法

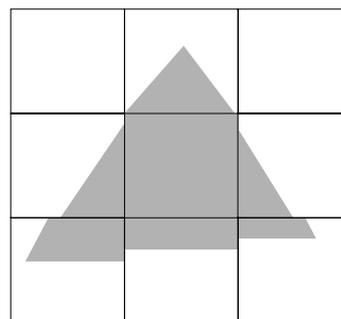


図2 粗インテグラルイメージングにおける提示像の不連続性。

と位置づけられるもので、同様の試みはすでにいくつか行われている⁴⁻⁸⁾。その中で、フライアイレンズシートを構成する要素レンズに目の粗いレンズを用い、ディスプレイパネルを多層に積み重ねた立体表示法も存在している^{9,10)}。

インテグラルイメージングに目の粗いレンズを用いる結像光学系では、要素画像中の複数の画素が1つの要素レンズを通して観察される構造となる。つまり、要素画像の一部が要素レンズによって実像または虚像として結像した画像が観察されることになる。よって、要素画像を多層化すると、ボリューム化された実像または虚像が観察されることになり、焦点調節を適切な奥行きに誘導することが可能となる。そのため、目の疲労や立体酔いの原因である輻輳調節矛盾が大幅に軽減される。また、ボリューム方式と多視点方式を組み合わせる場合、パネル数のある程度間引いても、斜めから見たときに像が分離することはない。さらに、従来のボリュームディスプレイでは表現することができなかったオクルージョンや光沢面の表現も可能である。

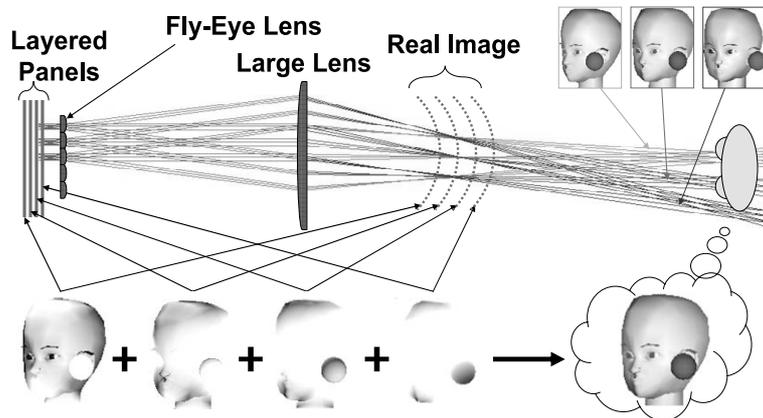


図3 粗インテグラルボリューム表示法の基本構成.

しかしながら、離散的パネルおよび要素画像間の連続性に問題があり、十分な画質は実現できていなかった。

この問題を解決する方法として、筆者らはパネル間の奥行きを滑らかな接続と要素画像間の連続的接続を可能にする粗インテグラルボリューム表示法 (CIVI) を提案している。図3に実像系のCIVIの概略図を示す。CIVIでは、多層化したパネルからの像が、光学系を通して異なる奥行きに結像される。ここで、像はレンズによって歪んだ曲面上に結像する。それぞれの三次元画素は、複数の結像面のうち、最も近い面に対応するパネルに描画することで、適切な奥行きへの焦点調節を誘導することができる。また、パネル間の表現を補完するために、depth-fused 3D (DFD) 表示法¹¹⁻¹²⁾ で用いられている、表示面との距離に比例して前後のパネルに輝度を分配する描画法を使用している。これにより、複数の結像面にまたがる大きなオブジェクトを、滑らかに連続した立体像として表現することが可能となる。さらに、要素画像間をスムーズに接続するためには、像面湾曲、樽型歪曲収差、色収差などのレンズによって発生する歪みを補正した像を要素画像として提示する必要がある。これについては、光学シミュレーターを用いたレイトレーシングによる結果を用い、テクスチャマッピングによる歪み補正を行うことで対応している¹³⁾。

CIVIの実装において問題となるのが、多層パネル部の実現方法である。パネルの透過率が低い場合、積層するパネル数が増えると提示画像の輝度は指数関数的に低下する。特に、カラー液晶パネルを用いる場合、カラーフィルターにより輝度が3分の1以下になるため、多層化することで輝度は劇的に低下することになる。

この問題を回避する手段として、図4のように、ハーフミラーにより異なる奥行きを合成する方法がある。この方法は、提示する奥行きが小さく、積層すべき面数が少なくすむ場合は効果的であるが、深い奥行き表現を実現

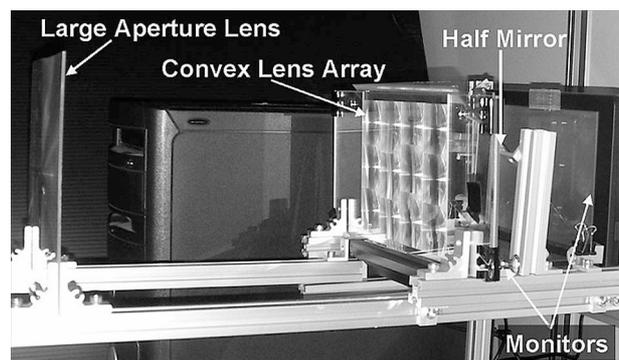


図4 ハーフミラーによる粗インテグラルボリューム表示法の実装例.

するために積層する面数を増やす必要がある場合、多数のハーフミラーによる折り返しを含む巨大な装置を組まなければならない。

2. 多層パネルによる装置の実現

前章で述べたとおり、薄型の装置を実現するためには透過率が高いパネルを積層する必要があるが、カラーパネルの積層では十分な透過率は得られない。そこで、カラーパネルと透過率が高いモノクロパネルを組み合わせて積層する方式が提案されている¹⁴⁾。

人間は物体を注視する際、焦点誘導の手掛かりとしてコントラスト情報を用いている。このことを利用して、モノクロパネルによるカラーパネルの代用を行う。具体的には、まず画像を色情報とコントラスト情報に分ける。そして、コントラストを表現するモノクロ画像について、DFDと同じ原理で奥行き標本画像を作成する。そして、モノクロパネルにはその奥行きに対応するモノクロ画像を表示し、カラーパネルには、すべての色情報にその奥行きに対応するモノクロ画像を足し合わせた画像を表示する。つまり、モノクロのボリューム像とカラー像を重ね合わ

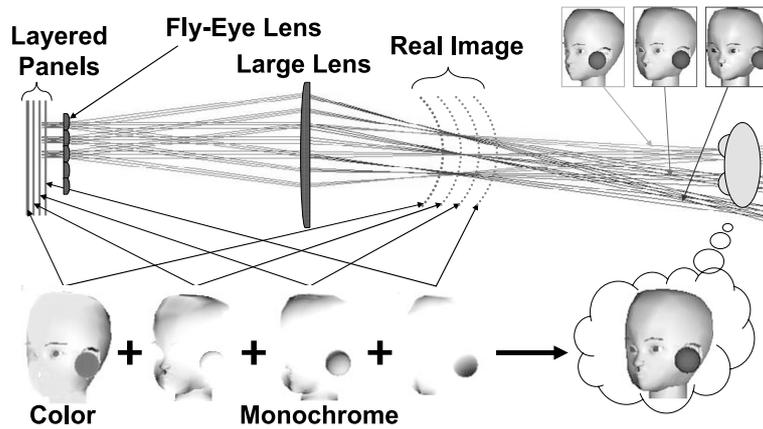


図5 カラーパネルとモノクロパネルの積層による粗インテグラルボリューム表示法.

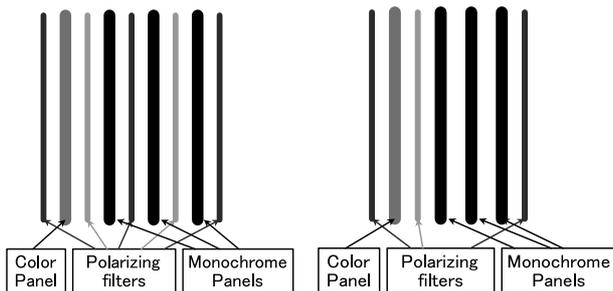


図6 パネルの積層時におけるモノクロパネル間の偏光板の有無の比較.

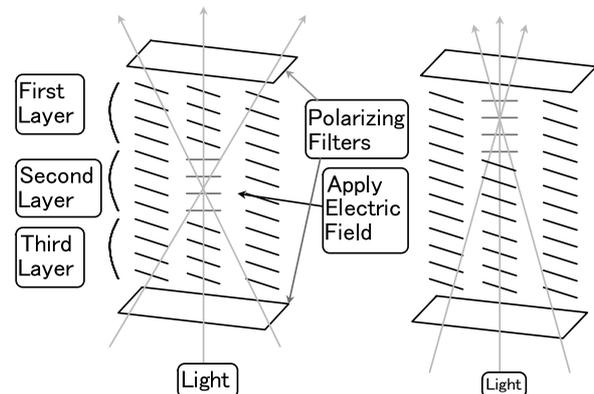


図7 モノクロパネル間に偏光板がない場合の光の透過.

せ、擬似的にカラーボリューム像を再現する.

ピクセルの描画方法の基本的な原理を図5に示す. 表示したい画素のRGB値を (r, g, b) , $M = \max(r, g, b)$, パネルで表示できる最大輝度値を L とすると, カラーパネルのピクセルのRGB値 (R, G, B) はそれぞれ

$$(R, G, B) = \frac{L}{M}(r, g, b)$$

で表される. この (R, G, B) は色相を維持したまま (r, g, b) の輝度を最大化したものに相当する. これを M/L 倍すれば元の色に戻る. この M/L 倍の減光を行う位置をそのピクセルの深さに近い場所で行うことで画像のコントラストが発生し, その奥行きに焦点を誘導することができる.

ここで, ディスプレイパネル間の奥行きをなめらかに表現するため, DFD表示法を応用する. パネルAとパネルBの間の3Dピクセルを表現するとき, パネルAの透過率を α ($0 \leq \alpha \leq 1$), パネルBの透過率を β ($0 \leq \beta \leq 1$) とし, パネルAと3Dピクセルの間の距離を d_1 , パネルBと3Dピクセルの間の距離を d_2 とすると,

$$\alpha\beta = \frac{M}{L}$$

$$(1-\alpha):(1-\beta) = d_2:d_1$$

の連立方程式を解き, それぞれのパネルの透過率を決定する.

3. 提示画像の輝度の向上

前章の方法では, カラー液晶パネルを積層する場合に比べ輝度は大きく向上するが, それでも積層するパネル数を増やすと十分な輝度は得られなくなる. 加えて, ピクセルの開口率が限定されているパネルを重ねることによるモアレ発生も問題となる.

これらの問題を解決する手段として, モノクロパネル間の偏光板を除去する方法¹⁵⁾が提案されている. なお, ここでは, 液晶パネルとしてIPS (in-plane switching) パネルを使用する場合について考える. 図6は前章での方式とモノクロパネル間の偏光板を取り除く方式を比較したものである. IPSパネルにおいては, 偏光板は1枚ごとに偏光軸を90度回転させるクロスニコルで配置されている.

図7はモノクロIPSパネルを積層し, 積層されたパネルの最背面と最前面にのみ偏光板を配置した場合における, 光の通過の概略図である. ここでは, 液晶の分子に電圧を

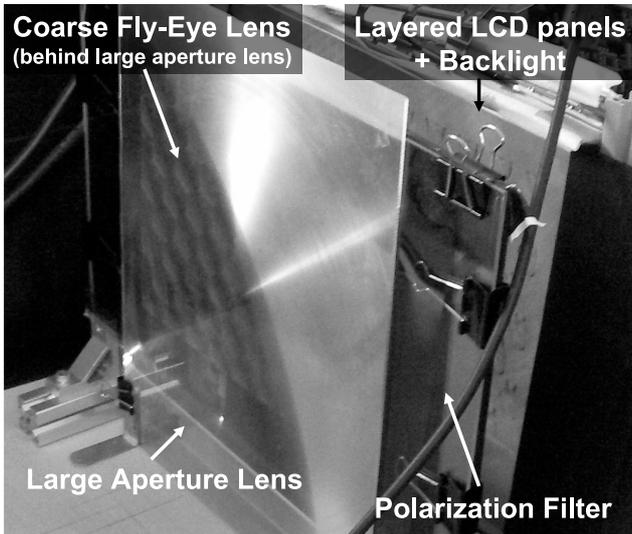


図8 製作した装置。

かけて、その配向を捻じ曲げた部分を通過する光路で光が透過することになる。よって、電圧を引加した画素から光が出ているように疑似的に見なすことが可能である。

当然ながら、この方式においては、体積表示の方法を変更する必要がある。前章の方式では、すべての液晶層で光が減光され、透過率の掛け算によって合計の透過率が決まる。この方式では光の透過率はパネルにおける位相変化の総量に依存するため、体積表示はそれに応じた変更を要する。

この方式には、輝度の向上だけでなく、モアレが低下する利点もある。モノクロパネル間に偏光板がある場合、すべてのパネルにおいて、開口部以外の部分で光が遮断されてしまうが、間に偏光板がない場合、すべてのパネルで位相変化のない光線のみが遮断されることになる。これにより、遮断される光線は大幅に減り、モアレも低減される効果が期待できる。この方式に基づいて実際に製作した装置の写真を図8に示す。

図9は、前章で紹介した方式により提示した立体像と、本章で紹介した方式による立体像を比較したものである。

本章の方式による立体像は、3視点から観察した画像を提示している。いずれの方式においても、実機は1枚のカラーパネルと3枚のモノクロパネルで構成され、画面サイズはすべて18インチで、解像度は1280×1024である。そのパネルの90mm手前に、1辺が15mm、焦点距離が90mmの正六角形のレンズを76個並べたレンズアレイを配置しており、さらにその前に焦点距離600mmの大口径レンズを配置している。図9に示すように、モノクロパネル間の偏光板を取り除くことで、輝度が高く、色の再現性が改善された立体像が提示できている。さらに、視点に応じてその方向から観察されるべき適切な画像提示が実現できていることもわかる。また、モアレについては完全に除去されるには至っていないが、ある程度低減できていることがわかる。

本稿では、インテグラルイメージング型多視点表示と体積表示を組み合わせる粗インテグラルボリューム表示(CIVI)の最近の改良について紹介した。CIVIにおいて、異なる奥行きに配置されたパネルをハーフミラーで合成する方法を用いる場合、高画質の立体像の実現が可能である。しかしながら、深い奥行き表現のために奥行き標本数を増加するには、多数のハーフミラーを配置した大型の装置が必要となる。カラーパネルを物理的に多層化すれば、装置の大型化は防ぐことができるが、提示画像の輝度は著しく低下する。そこで、多層カラーパネルの代わりに、1枚のカラーパネルと複数モノクロパネルを多層化した構造を用いることで、輻輳調節矛盾を抑えた形で深い奥行きのある空中浮遊像の提示が可能な小型ディスプレイ装置を構成できる。この方法では、パネルの限られた開口のため、モアレの発生が大きな問題となるが、モノクロパネル間の偏光フィルターを間引くことで、モアレを低減したより輝度の高い立体像の提示が可能となった。

ただし、現時点で実現されている提示画像は、まだモアレが残る点やレンズの物理的な継ぎ目が目立ってしまう点

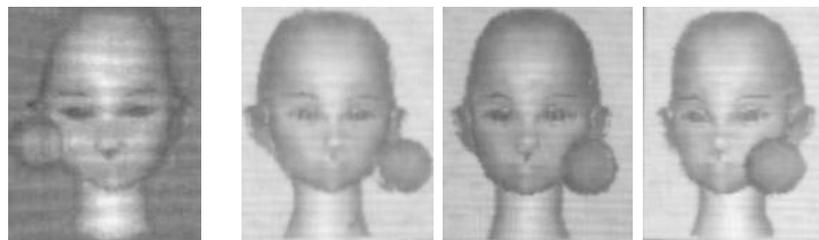


図9 モノクロパネル間に偏光板がある場合(左)とない場合(右)の画質の比較。

など、ハーフミラーによるシステムと比べるとまだ画質の面では劣っている。今後は、これらの画質面での問題を、装置をコンパクトに保ちながら解決していくことが課題となる。また、現状ではコンピュータグラフィックスの表示しかできていないため、作業シミュレーター用途にしか応用できない。今後、遠隔操作システムへの展開を考える場合、この表示装置に実写映像を表示するための撮像系の開発も必要となる。特に、ボリューム表示を組み合わせるためには、各画素の奥行き推定が必要であり、それを実時間で正確に行うための手法の開発が課題となる。

文 献

- 1) H. Kakeya: "Coarse integral imaging and its applications," Proc. SPIE, **6803** (2008) 680317.
- 2) H. Kakeya: "Improving image quality of coarse integral volumetric display," Proc. SPIE, **7237** (2009) 723726.
- 3) G. Lippmann: "La photographie integrale," Comptes Rendus Acad. Sci., **146** (1908) 446-451.
- 4) B. Lee, S. Jung, S.-W. Min and J.-H. Park: "Three-dimensional display by use of integral photography with dynamically variable image planes," Opt. Lett., **26** (2001) 1481-1482.
- 5) J.-H. Park, S. Jung, H. Choi and B. Lee: "Integral imaging with multiple image planes using a uniaxial crystal plate," Opt. Express, **11** (2003) 1862-1875.
- 6) S.-W. Min, B. Javidi and B. Lee: "Enhanced three-dimensional integral imaging system by use of double display devices," Appl. Opt., **42** (2003) 4186-4195.
- 7) R. Yasui, I. Matsuda and H. Kakeya: "Combining volumetric edge display and multiview display for expression of natural 3D images," Proc. SPIE, **6055** (2006) 60550Y.
- 8) H. Ebisu, T. Kimura and H. Kakeya: "Realization of electronic 3D display combining multiview and volumetric solutions," Proc. SPIE, **6490** (2007) 64900Y.
- 9) Y. Kim, J.-H. Park, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho and B. Lee: "Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices," Appl. Opt., **45** (2006) 4334-4343.
- 10) Y. Kim, H. Choi, J. Kim, S.-W. Cho, Y. Kim, J. Park and B. Lee: "Depth-enhanced integral imaging display system with electrically variable image planes using polymer-dispersed liquid-crystal layers," Appl. Opt., **46** (2007) 3766-3773.
- 11) S. Suyama, H. Takada, K. Uehira, S. Sakai and S. Ohtsuka: "A novel direct-vision 3-D display using luminance-modulated two 2-D images displayed at different depths," *The Society for Information Display (SID) International Symposium Digest of Technical Papers*, 54.1 (2000) pp. 1208-1211.
- 12) S. Suyama, H. Takada and S. Ohtsuka: "A direct-vision 3-D display using a new depth-fusing perceptual phenomenon in 2-D displays with different depths," IEICE Trans. Electron., **E85-C** (2002) 1911-1915.
- 13) S. Sawada and H. Kakeya: "Coarse integral volumetric imaging with flat screen and wide viewing angle," Proc. SPIE, **7863** (2011) 78631L.
- 14) H. Kakeya, T. Kurokawa, Y. Mano: "Electronic realization of coarse integral volumetric imaging with wide viewing angle," Proc. SPIE, **7524** (2010) 752411.
- 15) Y. Ueda, H. Kakeya: "Multilayered integral imaging with improved image clarity," *The Society for Information Display (SID) International Symposium Digest of Technical Papers* (2011) pp. 1116-1119.

(2011年7月11日受理)