

平置き型立体ディスプレイシステム

平山雄三

Flatbed-Type Autostereoscopic Display System

Yuzo HIRAYAMA

We have developed a new display technology that allows 3-D images to be viewed on a flatbed display without any need for special glasses. Viewing the display from an angle allows the viewer to experience 3-D images that stand out several centimeters from the surface of the display. By employing the integral imaging method, easy-to-view, natural, and less-fatiguing stereoscopic images were observed. The new technology opens up new areas of application for 3-D displays, including arcade games, e-learning, simulations of buildings and landscapes, and even 3-D menus in restaurants.

Key words: 3-D (3-dimension), autostereoscopic display, flatbed-type display, integral imaging

特殊なメガネを用いることなく、自然で見やすい立体映像が観察可能な裸眼立体ディスプレイの開発が盛んになっている。将来、これまで想像もできなかったような新しい立体映像空間を生み出すことにより、さまざまな恩恵が得られると期待される。

- (a) 感動を与えるエンターテインメントツール：高い臨場感、没入感を体験できるエンターテインメントツールを提供することにより、人々に感動や楽しみを与える。まさに、そこにいるかのような感覚を味わうことが可能となる。
- (b) リアルなコミュニケーションツール：会いたい人にいつでも会えるコミュニケーションツールを提供することにより、人々に安心感や心のやすらぎを与える。あたかも目の前にいるかのようなリアルなコミュニケーションや、共同作業をいながらにして可能にする。
- (c) 知的活性化、生産性向上ツール：人間の能力を最大限に引き出すツールを提供することにより、知的で豊かな生活を与える。例えば、情報量の多い立体ディスプレイを用いて立体映像を呈示することで脳を触発

し、新しい思考や発想を得て新たな価値の創造を可能とする。

これらの恩恵を実際に享受するには、視覚疲労の少ない人間に優しい立体ディスプレイが必要となる。さらに、いまそこにあるかのような立体映像表現が求められる。これらの要求に答えられる可能性のある方式のひとつとして、インテグラルイメージング方式がある。本稿では、その技術概要と、よりリアルな立体映像表現の創出を目指して開発した平置き型構成の立体ディスプレイに関して述べる。さらに、試作したディスプレイの各種評価結果と、想定される応用先や将来展望についても解説する。

1. 立体ディスプレイシステムの概要

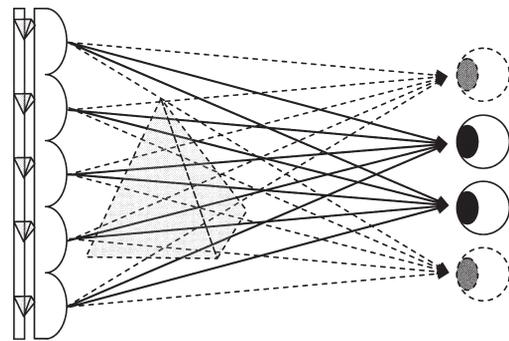
本研究で用いた平行光線一次元インテグラルイメージング方式の基本原理と従来方式との差異、新たに開発した要素技術について、以下に述べる。

1.1 基本構成

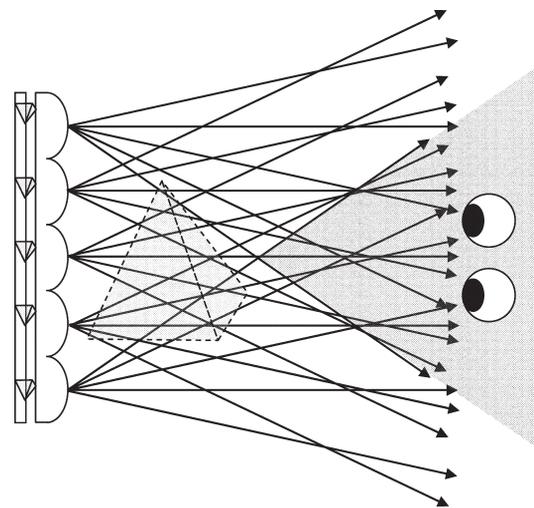
インテグラルイメージング方式は、古くから、空間像を再生する理想的な3D方式として知られている。この方式は、インテグラルフォトグラフィー方式と原理的に同じも

のであるが、特に写真の立体視と区別して、電子ディスプレイの立体視の場合はインテグラルイメージングとよばれる。このインテグラルイメージング方式は、一般には水平視差と垂直視差をつけた方式を指すことが多い。しかしながら、垂直視差を放棄し、水平視差のみをつけることも可能である。本研究では、精細度劣化をできるだけ少なくするために、水平視差のみをつけているのが特徴であり、これを一次元インテグラルイメージング方式とよぶことにする。

図1は、縦置き型立体ディスプレイを上から見た概略図である。多眼式も一次元インテグラルイメージング方式も、どちらも、フラットパネルディスプレイ (FPD) にレンチキュラーシートを設置した構成であるのは同じである。従来一般的に用いられている多眼式では、図1 (a) に示すように、約 65 mm 間隔の両眼位置にレンズの主光線が集まるような設計になっている。これに対し、本方式では、図1 (b) に示すように、レンズの主光線どうしがほぼ平行となる設計を用いている。すなわち、平行光線インテグラルイメージング方式を採用しているのが、もうひとつの特徴となっている。また、光線の角度間隔は、より密になるような設計としている。すなわち、多数の平行光線群による空間像を指向している。このように設計することで、観察者の眼の位置を特定する必要がなく、視域内で多少前後左右に動いても滑らかに立体映像が変化して見えるというメリットが生まれる。以上のように、多眼式も平行光線一次元インテグラルイメージング式も一見類似の構成を有するが、細かい点で異なっている。両者の違いをより明確にするために、表1に代表的な違いをまとめた。例えば、レンズの幅を A とすると、多眼式では、フラットパネルディスプレイ内に配置されたサブ画素の整数倍よりわずかに小さい値に設定されている。これは、観察者の眼の位置で集光させるためである。一方、平行光線一次元インテグラルイメージング方式では、サブ画素ピッチの整数倍として平行光線となるように設定している。個々のレンズに対応する要素画像の幅 B については、多眼式ではサブ画素ピッチの整数倍であるが、本研究で用いた平行光線一



(a)



(b)

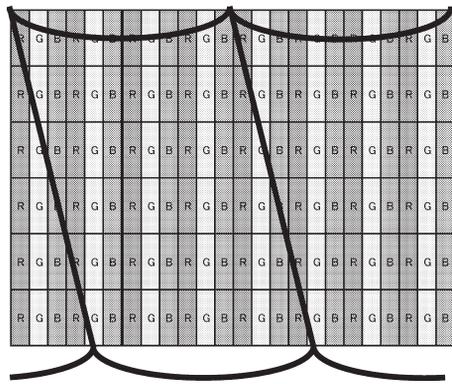
図1 平行光線一次元インテグラルイメージング (II) 方式と多眼式との構成比較。(a) 多眼式, (b) II方式。

次元インテグラルイメージング方式では、後述するようにサブ画素ピッチの整数倍よりわずかに大きくなるようにしている。

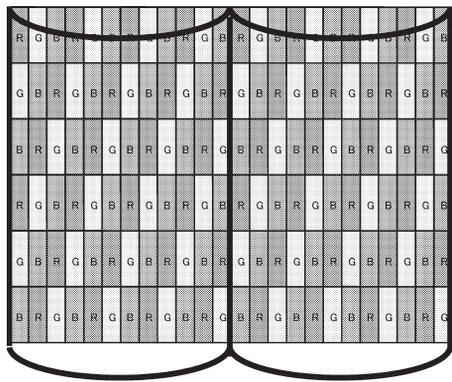
インテグラルイメージング方式は理想的方式ではあるものの、精細度が低くなりやすく¹⁾、正常に立体映像が見える範囲、すなわち視域が十分広くないなどの問題があった。筆者らは、これらの課題を解決するためにさまざまな技術開発を行っており²⁾、これらについて以下に述べる。

表1 平行光線一次元インテグラルイメージング (II) 方式と多眼式との比較。

	多眼式	平行光線 II 方式
レンズの幅 A	サブ画素ピッチの整数倍よりわずかに小	サブ画素ピッチの整数倍
要素画像の幅 B	サブ画素ピッチの整数倍	サブ画素ピッチの整数倍よりわずかに大
A と B の関係	$A < B$	$A < B$
光線の集光点	視距離にある	視距離にはない
光線の集光点の間隔	瞳孔間隔と等しい	—
運動視差	不連続	連続



(a)

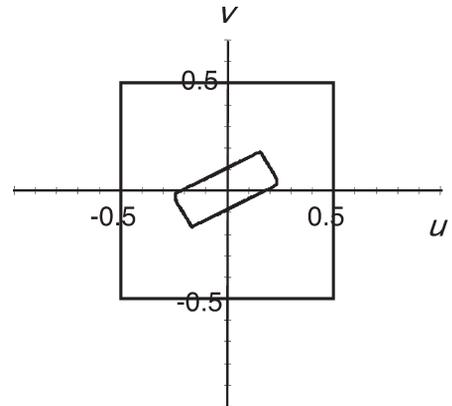


(b)

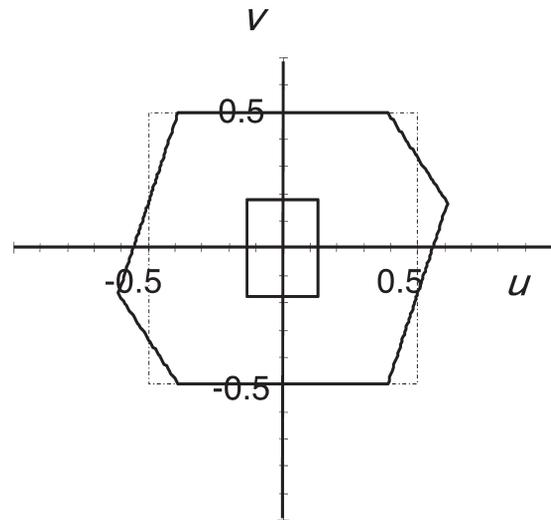
図2 立体表示用フラットパネルディスプレイのRGB画素配列。(a)縦ストライプ配列, (b)モザイク配列。

1.2 モザイクカラーフィルター配列

立体ディスプレイは、前述したように、液晶ディスプレイ (LCD) などのフラットパネルディスプレイ (FPD) の前面にレンチキュラーシートを設置した構成になっている。本研究では、下記に示すように、モザイクカラーフィルター配列のパネルを用いていることも大きな特徴である³⁾。FPDは通常、RGBの各サブ画素を有しているが、その配列は図2(a)に示すような縦ストライプ配列がよく用いられている。この場合、図中に実線で示したように、レンチキュラーシートを斜めに傾けて設置することで垂直画素成分を水平画素成分に割り当て、立体ディスプレイの水平解像度の劣化を少なくすることができる。しかし、3Dとしての解像度の上下左右の対称性が悪くなりやすい。図3(a)に、レンズ越しに見た画素配列の二次元ナイキスト限界を示す。外側の四角は、ベースになるFPDの画素配列のナイキスト周波数限界である。レンズ越しに見ることで、ナイキスト限界は内側の多角形となる。図は、1つのレンズ当たりに割り当てるサブ画素数が13の場合の結果である。このように、対称性があまりよくないことが多い。さらに、観察者の上下方向の動きにより、視域が左右



(a)



(b)

図3 3Dディスプレイにおけるレンズ越しの画素配列の二次元ナイキスト限界。(a)縦ストライプ配列FPDと斜めレンズの組み合わせ, (b)モザイク配列FPDと垂直レンズの組み合わせ。

にシフトするといった問題もある。後者は、特に平置き型にした場合、問題となることがある。

一方、図2(b)に示すようなモザイク配列のFPDを用いた場合には、レンチキュラーシートを垂直に設置しても水平解像度の劣化を低減できる。さらに、3D解像度の上下左右の対称性もよい。図3(b)に、モザイク配列パネルを用いた場合のナイキスト周波数限界を示す。1つのレンズ当たりに割り当てるサブ画素数が12の場合をプロットした。対称性が比較的良好であることがわかる。観察者が上下方向に動いても、視域が左右にシフトしないという特徴も有している。

1.3 視域最大化技術

平行光線一次元インテグラルイメージング方式では従来、図4(a)に示すように、視域が狭いという問題があった。図は縦置き型立体ディスプレイを上から見た場合であ

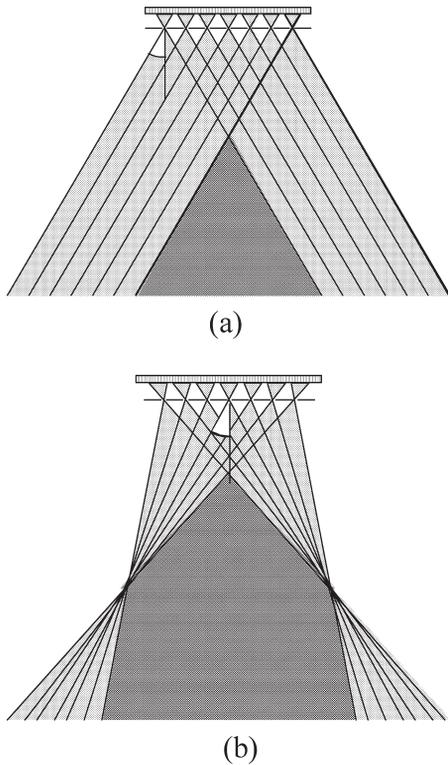


図4 視域のソフトウェア調整。(a) 特別な処理をしない場合、(b) 視域最大化処理をした場合。

り、ハッチを施した領域が視域を示している。視域は、各レンズからの光線が観察者にすべて見える範囲に相当している。レンズピッチがサブ画素の整数倍で、要素画像ピッチと等しい従来の平行光線一次元インテグラルイメージング方式では、光線の重なりが少なく視域は狭くなる。

今回の平行光線一次元インテグラルイメージング方式では、平均化した要素画像ピッチはレンズピッチよりわずかに大きくなっている。これを実現するために、要素画像を構成するサブ画素の数を N 個とし、間欠的に $N+1$ 個のサブ画素からなる要素画像を織り込むアルゴリズムを開発した⁴⁾。このようにして、図4 (b) に示すように、視域を最大化することが可能であった。

1.4 歪みの少ない立体映像表現

従来の平行光線一次元インテグラルイメージング方式では、平行投影画像をもとに立体映像を再構成していた。しかしながら、この場合、図5 (a) に示したように、垂直方向には正しい立体映像とはならず映像歪みが生じる。これは、再生側で垂直方向の視差を放棄しているためである。

水平方向には平行投影で、垂直方向には透視投影で撮影した画像データが本来必要である。このようなCGカメラを実際に作製することで、図5 (b) に示したような映像歪みの少ない自然な奥行き感のある立体映像表現が可能とな

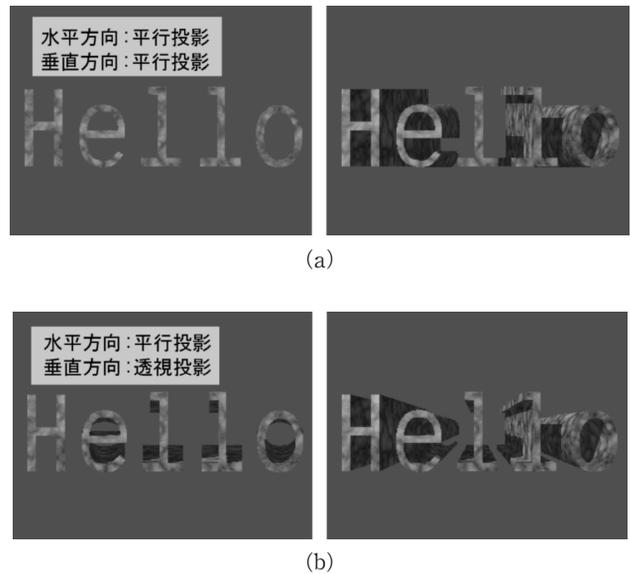


図5 立体映像歪みの制御。(a) 水平方向と垂直方向に平行投影で取得した画像(左)で立体映像を再構成すると歪みのある立体映像となる(右)、(b) 水平方向は平行投影で垂直方向は透視投影で取得した画像(左)で立体映像を再構成すると歪みのない立体映像が得られる(右)。

った⁵⁾。

1.5 オーサリングツールとミドルウェア

平行光線一次元インテグラルイメージング方式立体ディスプレイ用のコンテンツを作製するためのオーサリングツールを開発した。本ツールを用いることにより、ハードウェア特性に合わせた多数の視差画像群を作製することができる。これらの視差画像群を、3Dミドルウェアが自動的にインターリーブ処理して、特殊フォーマット画像に変換する仕組みになっている。この特殊フォーマット画像を立体ディスプレイに入力することで立体視が可能である。

2. 平置き型システム

赤青メガネを使用するアナグリフ方式を用いた平置き型の立体視により、そこにあるかのようなリアルな立体表現ができることが知られている⁶⁾。平行光線一次元インテグラルイメージング方式は比較的広い視域を有しており、このような平置き型ディスプレイとの整合性が高い。これは、観察者の体格の違いなどにより見る場所が異なるため、広い視域を確保する必要があるからである。

今回、平行光線一次元インテグラルイメージング方式を平置き型システムに応用した。コンテンツ作製のためのツールは、従来の縦置き型に加え、平置き型にも対応するよう拡張している。すなわち、斜め上からディスプレイを俯瞰して観察した場合にも、歪みの少ない立体映像が表現可能である。視差数は12あるいは16とした。水平画素数は

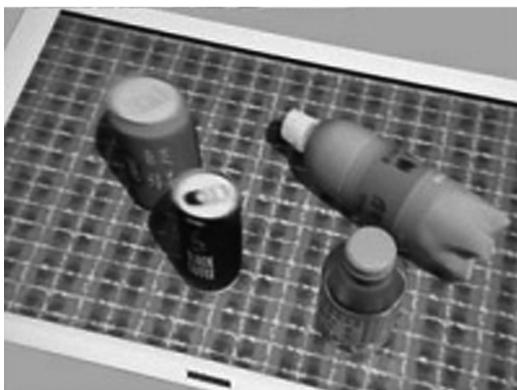


図6 平置き型立体ディスプレイ。上図は左側から見た場合、下図は右側から見た場合、右下の缶のみ実物である。

480, 視域角は30度である。図6に、平置き型立体ディスプレイの観察結果を示す。上図は左側から見た場合、下図は右側から見た場合である。見る方向の違いにより、缶と缶との重なり具合が変化していることがわかる。右下の缶のみ実物であるが、他の立体映像による缶やペットボトルと違和感なく同時に観察されている。また、縦置き型よりもさらにリアルな印象が得られることがわかった。

平置き型にすることにより、存在感のある立体映像が表示できる理由としては、いくつか考えられる⁷⁾。例えば、図7に示すように、縦置き型に比べて平置き型では、観賞者に意識させることなくディスプレイから観賞者までの距離を縮めることができる。同じ奥行きを表示しても、遠くから見るのに比べて近くから見るほうが、より大きな立体感が得られる。また、見下ろす位置に置かれた平置き型ディスプレイの領域は、「手作業範囲」に相当している。人間はものを扱うときに、無意識ではあるが、手のひらなど自分の体のサイズを基準にしているといわれている。手のひらサイズの立体映像が、「手作業範囲」内にあることで十分な存在感が呈示できると考えられる。さらに、実際に机の上に置かれているものは、手のサイズに対して妥当な大きさであることが多い。このために、立体ディスプレイ

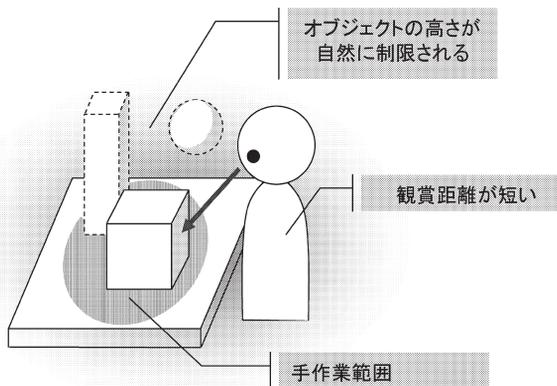


図7 平置き型ディスプレイの効果。

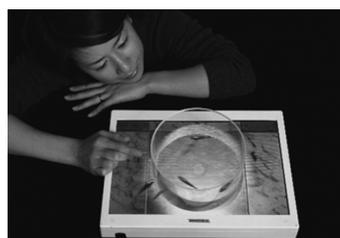


図8 実物体（透明円筒）と立体映像（水と金魚）との相互作用を実現した平置き型立体ディスプレイ。

の有する奥行き方向の表示範囲の制限を観賞者に感じさせにくい。これに対して、縦置き型では、窓から見える外の風景など広い奥行き表示性能が期待されてしまい、実際に表示可能な立体映像の有する奥行きとのギャップが大きいという問題がある。

さらに、平置き型を利用して、実物体との同時観賞を達成した。平行光線一次元インテグラルイメージング方式は、実物体の表面からの光を離散的にはあるが正しく再生していることから、像は空間中の正しい位置に表現できる。このため、立体映像を指差したり、現実の物体と同時に存在させたり、といった実物体との同時観賞が可能である。図8では、透明なアクリルで作製した筒を水槽に見たて、この壁面を利用して立体映像の水を溜めたように見せている。この水中には立体映像の金魚を泳がせているが、映像であることを利用して、水槽の外にまで金魚が泳ぎ出するような、現実にはありえない表現も盛り込んでおり、このような表現により「いまそこにあるような存在感を伴った映像」が可能であった。

3. 試作した立体ディスプレイの生体影響評価

立体ディスプレイが再生する立体映像の見やすさや生体への影響を調べることは、実際に応用するうえできわめて

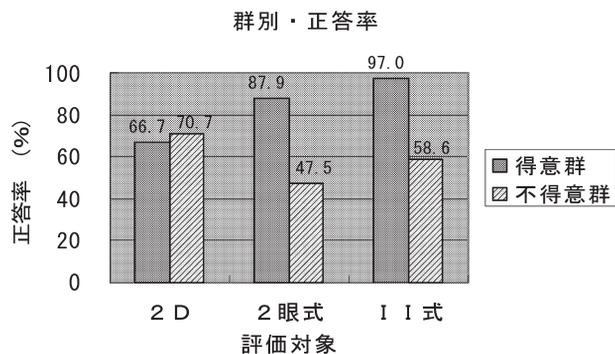


図9 主観評価結果。表示した指標が手前か否かを被験者に回答させ、その正答率をプロットした。

重要である。そのため、まずは縦置き型立体ディスプレイを用いてさまざまな評価を行った。例えば、立体映像を一瞬だけ呈示し、被験者に指標が手前か否かを回答させる「課題」を与えて見やすさを評価した⁸⁾。指標は、2文字の漢字熟語の文字を上下に呈示した。被験者には、下の文字を基準として上の文字を+5 cm~-5 cmまで変化させたときに、上の文字が手前か否かを回答させ、その正答率を測定した。評価対象は通常の2Dディスプレイ、2眼式立体ディスプレイ、平行光線一次元インテグラルイメージング方式立体ディスプレイの3種類である。通常の2Dディスプレイには、奥行きに応じて大きさが変化する指標を表示した。被験者数は12名であった。図9に正答率の結果を示す。立体視の得意でない3名は、不得意群として群分けした。図からわかるように、得意群の場合、2Dディスプレイより2眼式立体ディスプレイ、2眼式立体ディスプレイより平行光線一次元インテグラルイメージング方式立体ディスプレイで正解率が高かった。このように、立体感が得やすいことが確認された。さらに、脳血流量変化、自律神経系、内分泌系による客観評価結果からも、平行光線一次元インテグラルイメージング方式立体ディスプレイは通常の2D映像並みの疲労感で、従来の2眼式よりも立体感が得やすいことが確認されている⁹⁾。今後、平置き型に関しても評価を行う予定である。

4. 平置き型立体ディスプレイの応用先

平行光線一次元インテグラルイメージング方式による平置きシステムにより、見る方向に応じた映像がリアルに体感できた。実物との位置関係も自然に把握できるため、実物体と立体映像とが相互作用を起こすような表現も可能であった。そこにあるかのようなリアルな立体映像表現が可能な平置き型立体ディスプレイは、その特徴を生かしてさまざまな分野で使われていくものと期待される。図10に

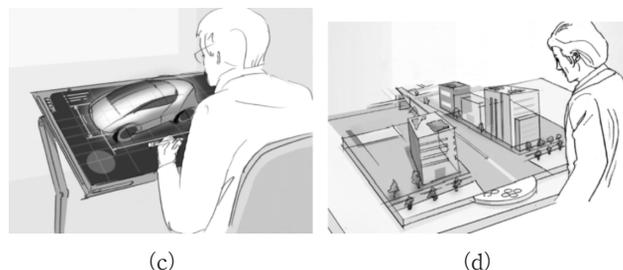
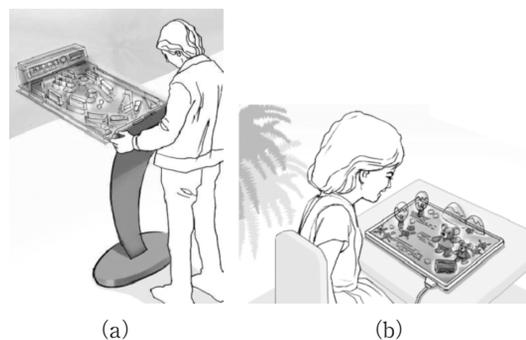


図10 各種応用イメージ。(a) ゲーム応用、(b) 教育応用、(c) 設計応用、(d) 監視応用。

いくつかの例を示した。ゲームだけでなく、教育分野も有望である。立体絵本や、立体図鑑への応用が考えられる。設計や監視の分野にも、視認性が高いという利点を生かして、有用な使われ方がされていくであろう。

平行光線一次元インテグラルイメージング方式の基本構成と、その要素技術である、モザイクカラーフィルター配列、視域最大化技術、歪みの少ない立体映像表現、ソフトウェア等について述べた。本立体ディスプレイを平置き型に应用することで、より効果的な立体映像表現が可能となった。縦置き型と同様に、平置き型ディスプレイ用のコンテンツ作製も、オーサリングツールにより比較的簡便に行える。また、縦置き型立体ディスプレイを用いて立体映像の生体への影響を調べた結果、通常の2D映像並みの疲労感で、従来の2眼式よりも立体感が得やすいことが確認された。今後、さらに精細度を高め、視域を拡大することがおもな課題である。これらの課題を解決することで、さらにリアルな立体映像をより自然に観察することが可能となり、新しい立体映像メディアとして将来さまざまな分野で使用されていくものと期待される。

本研究の一部は、総務省研究開発委託（II-2映像が生体に与える悪影響を防止する技術）の一環として行ったものである。

文 献

- 1) H. Hoshino, F. Okano, H. Isono and I. Yuyama: "Analysis of resolution limitation of integral photography," *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 2059-2065.
- 2) Y. Hirayama, T. Saishu, R. Fukushima and K. Taira: "Flatbed-type autostereoscopic display systems using integral imaging method," *Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* (2006).
- 3) K. Taira, R. Fukushima, T. Saishu, H. Kobayashi and Y. Hirayama: "Autostereoscopic liquid crystal display using mosaic color pixel arrangement," *Proc. SPIE*, **5664** (2005) 349-359.
- 4) R. Fukushima, K. Taira, T. Saishu and Y. Hirayama: "Novel viewing zone control method for computer generated integral 3-D imaging," *Proc. SPIE*, **5291** (2004) 81-92.
- 5) T. Saishu, K. Taira, R. Fukushima and Y. Hirayama: "Distortion control in a one-dimensional integral imaging autostereoscopic display system with parallel optical beam groups," *SID 04 Digest* (2004) pp. 1438-1441.
- 6) T. Wilson: "A phantogram retrospective," *Stereo Views*, **11**, No. 9 (2004) 1, 6-8.
- 7) 福島理恵子, 平山雄三: "観賞者参加型の3次元映像ディスプレイ", *情報処理*, **47** (2006) 368-373.
- 8) 永谷広行: "インテグラルイメージング方式3Dディスプレイを用いた映像安全性の主観評価", *映像情報メディア学会年次大会* (2006).
- 9) 永谷広行, 小幡亜希子, 千葉 滋: "インテグラルイメージング方式3Dディスプレイを用いた映像安全性の客観評価", *映像情報メディア学会年次大会* (2006).

(2006年6月27日受理)