

三次元像の空中表示技術の現状と展開

宮崎 大介

Current Status and Future Prospects of Floating 3D Display Technology

Daiuske MIYAZAKI

Display technology forming a three-dimensional (3D) floating image in the air is reviewed. It is possible to obtain high reality and accessibility for a 3D display by forming a floating image. Some important recent researches on floating image generation are explained and classified. Some researches on floating 3D display performed by the author are introduced. One is a volumetric display system, in which floating image is formed with concave mirrors or a mirror array device. The other is integrated image display, which forms a floating 3D image with 360-degree viewing angle.

Key words: floating image, 3D display, stereoscopic display, volumetric display, integral imaging, imaging element

情報・通信技術の進展による情報量の増大に伴い、効率的に情報を提示できるヒューマンインターフェースの重要性は増す一方であり、特に映像情報インターフェースは今後も大きな発展が期待されている。映像ディスプレイ技術は、これまで解像度や画面サイズ、装置の薄さを競って進んできた技術的進歩が飽和傾向にあり、最近では新たな質的な転換が模索されている。そのようなアプローチのひとつに、立体表示技術がある¹⁻³⁾。画像処理技術の進歩により実物と見分けがつかないほどリアルな映像を合成し、高精度に表示することが可能となったが、立体表示はさらに高い現実感をもたらす可能性がある。すでに多くの立体映画が公開され、立体テレビが販売されるようになった⁴⁾。娯楽用途以外にも、医用画像の表示や製品設計などに立体表示を適用することも検討されている。現在のところは眼鏡式立体表示が主流であるが、レンチキュラーシートやパララクスバリアを用いた裸眼立体ディスプレイの開発も進んでおり、さらに自然な立体感を得るために、多視差化などさまざまな研究がさかんに行われている。

本稿では、何もない空中に三次元映像を形成することのできるディスプレイ技術について解説する。空中像形成には、現実感を高め、アクセス性を向上させるなどの新たな

利便性を付加できる可能性がある。最近の代表的な三次元像の空中表示技術を分類して解説し、具体例をいくつか紹介する。さらに、筆者らによる空中結像を基づいた三次元ディスプレイの研究を紹介する。ひとつは、凹面鏡やミラーアレイ結像素子により空間中像を形成し、ミラースキャナーにより走査する体積走査型三次元ディスプレイである。さらに、凹面鏡と回転ミラーを用いて、水平方向に関して全周囲から観察可能とした空中像形成についても紹介する。

1. 空中表示技術の意義

何もない空間に映像が浮かぶ様子はそれだけでインパクトがあり、SF映画やアニメなどでは未来の雰囲気を出すのに役立っている。空中像として表示すると、立体化していない二次元画像であっても、周囲からは浮き上がっていることから立体感を感じることができる。また、観察者に表示装置の存在を意識させないことで、表示画像ではなく現実の物と感じさせる効果がある。何もない空中に映像が浮かぶ面白さは人の目をひくので、デジタルサイネージに利用することが期待できる。また、現実感の高い三次元表示を博物館などでの展示に応用することが考えられる。

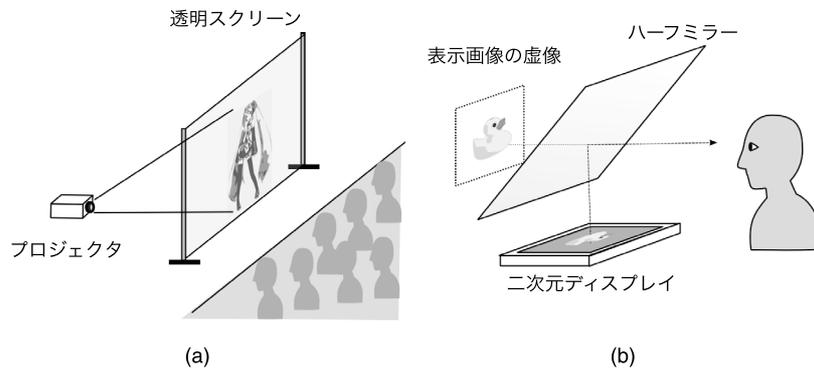


図1 結像素子を用いない空中像形成。(a) 透明スクリーン, (b) ハーフミラー。

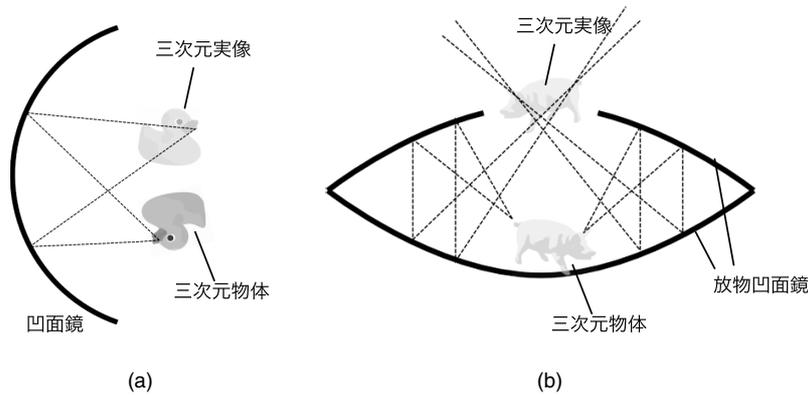


図2 凹面鏡による空中像三次元形成。(a) 球面凹面鏡, (b) 二枚合わせ放物面鏡による水平方向の全周囲から観察可能な実像形成。

空中像にすることの実用的な意義として、表示像へのアクセスの向上が挙げられる。表示画像を直接操作するようなインタラクティブ性をもたせることは、現実感を高めるのに有効である。三次元ポインティングデバイスを用いて三次元像を操作したり^{5,6)}、カメラで撮影した人の指先の動きをポインターとして使うことなどが可能である⁷⁾。これらの応用のためには、ポインティングを妨げないように空中に像を形成する必要がある。高精細な三次元映像を直接ポインティングして操作できるようになれば、三次元データに対する操作性は大幅に向上するので、工業製品の設計や、医療における手術シミュレーション、遠隔手術などへの応用が広がる可能性がある。

2. 空中像形成の手法

2.1 透明スクリーン, ハーフミラー

何もない空間に像を形成する容易な方法として、図1 (a) に示すように、透明度の高いスクリーンを置いて映像を投影することが古くから行われている。大きな半透明スクリーンを実現するために、霧に映像を投影することも行われている⁸⁾。スクリーンとして使うためには、霧をシート状に薄く分布させる必要がある。また、図1 (b) に示す

ように、ハーフミラーを用いて、虚像として空中に浮かぶ映像を表示することも行われている^{9,10)}。投影画像として立体化されていない場合でも、空中映像とするだけで立体感を感じることができる。これらの方法は本当の意味での空中像形成とはいえないが、実質的には同等の効果が得られ、比較的大きなサイズの像形成が可能である。

2.2 結像素子による空中像形成

2.2.1 レンズ, 凹面鏡

レンズや凹面鏡による実像を散乱媒体に投影せずに直接観察する場合、各点からの光の広がり角は結像系の開口数により決まるため、大きな観察角度を実現するためには口径の大きい光学系が必要である。フレネルレンズは大きな口径や非球面レンズも比較的安価に作成できるので、空中像形成によく利用される¹¹⁾。凹面鏡は、材料として不透明なものを使えるなど選択の幅が広いいため、通常のレンズに比べて大口径の結像素子を作りやすい⁹⁾。図2 (a) の光学系では、三次元物体を凹面鏡の中心付近に配置することで、三次元実像が形成されている。光路が折り畳まれるので、光学系の構成を小さくできる利点もある。図2 (b) に示すように、2枚の放物凹面鏡を用いたコンパクトな構成で、全周囲から観察可能な空中像を歪みを抑えて形成する

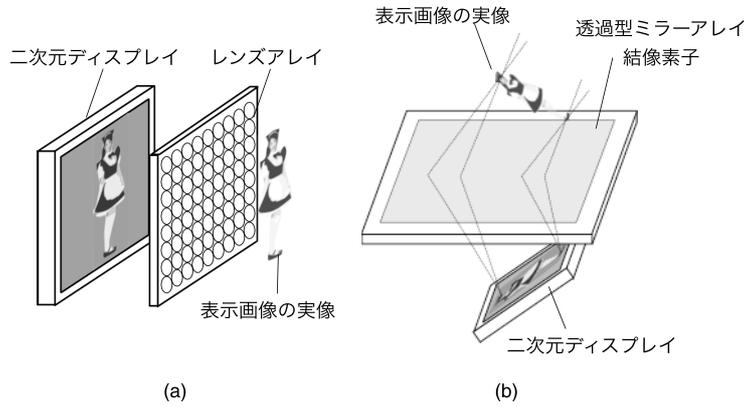


図3 平板アレイ結像光学素子による空中像三次元形成。(a) レンズアレイ, (b) ミラーアレイ面対称結像素子。

ことができる。

2.2.2 レンズアレイ結像素子

図3 (a) に示すように、多くの微小レンズを並べたレンズアレイを用いて空中像を形成することができる^{12,13)}。大きな口径のレンズを1つ用いた空中像形成とは違い、レンズアレイによる結像では、並べる光学素子の数を増やすことで焦点距離を保ったまま全体のサイズを大きくすることができ、大きな像に対しても少ない歪みで結像することが可能である。

2.2.3 ミラーアレイ結像素子

ミラーアレイ結像素子は、微小なミラーに入射する光を1つの光線とみなし、多くのミラーによりそれらの光線を制御して結像作用を実現する光学素子である。典型的な例として、再帰性反射を利用した結像素子がいくつか提案されている。例えば、金属の平板において壁面が鏡面となっている正方形の貫通穴が多数空けられた透過型面対称結像光学素子が提案されている^{14,15)}。穴内の隣り合う二面の内壁が二面コーナリフレクターになっており、素子面に対して面対称な位置に結像することができる。図3 (b) では、ミラーアレイ結像素子の下にディスプレイを配置し、面対称な位置にその実像を形成している。レンズ等の結像素子とは違い、焦点距離がないために像の形成位置が焦点距離によって制限されず、素子のすぐそばにも像を形成することができる。また、レンズにあるような収差も、原理的には存在しない。貫通穴での回折により像がぼけるので、像の位置が素子から離れるほど解像度は低下する。また、像を観察できる位置は、ミラーを2回反射した光を観察できる範囲内に制限される。この素子を利用した空中浮遊三次元像の形成例として、著者らによる体積走査型三次元ディスプレイに関する研究について後述する。

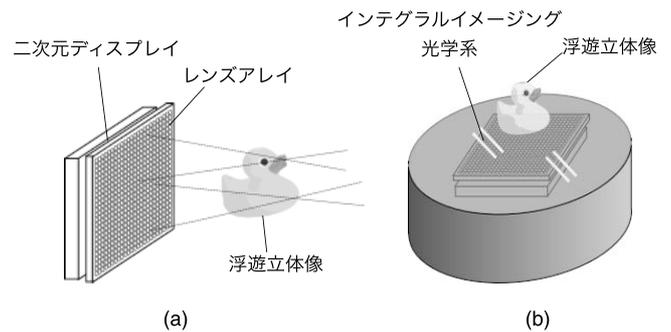


図4 立体ディスプレイによる空中三次元像形成。(a) インテグラルイメージング, (b) フラットベッド型。

2.3 立体ディスプレイによる空中像形成

2.3.1 視差方式・光線再生法・フラットベッド型・全周囲観察型

一般的な立体ディスプレイでは、図4 (a) に示すように、そのままディスプレイよりも前面に浮き上がる像形成を実現することが可能である。しかし、ディスプレイ面から像までの距離に制限がある場合が多い。例えば、視差画像方式の立体表示では、表示像の位置がディスプレイから離れるほど立体視の生理的要因における輻輳・調節感の矛盾が大きくなり、目の負担が増加する^{16,17)}。インテグラルフォトグラフィー等の光線再生方式の立体表示では、表示物体から放出される光線を再現して像形成を行えるので、より自然な立体感が得られる¹⁸⁾。しかし、点光源とマイクロレンズにより光線を形成していることから、表示像がディスプレイから離れるほど原理的に解像度が劣化するため、表示装置からの像形成位置の距離には制限がある¹⁹⁾。

光線再生方式の立体表示において、図4 (b) に示すように、表示面を水平に設置するフラットベッド型の配置²⁰⁻²³⁾にすると、奥行き方向の広がり表示デバイス面方向に対

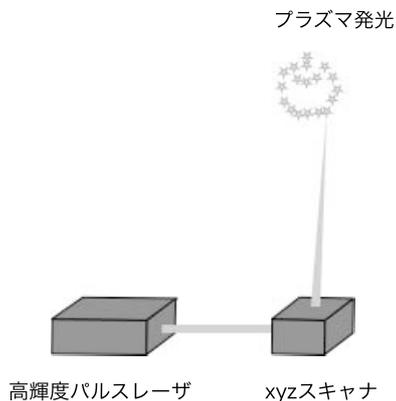


図5 高強度パルスレーザーの集光点走査によるプラズマ三次元像形成.

応し、表示物体の高さが表示面からの距離に対応するので、表示装置から像までの距離を大きくしなくても広がりのある三次元像を表示することができる。また、水平配置にすると、表示装置を半透明板の下に設置してテーブル状にすることで、表示装置を意識させなくすることができる。さらに、観察可能角度を大きくして全周囲から観察できるようにすると、表示像を回り込んで観察できることから、現実感をより高めることができる。全周囲観察の特長は、複数人数で表示像を取り囲んで行う協調作業などに利用できる。

2.3.2 体積走査型

空中映像ではないものの、スクリーンの回転等に基づく走査により三次元的に光点を配置できる体積型三次元ディスプレイでは、全周囲からの観察が可能であり、背景が透けて見えることから浮遊感を得ることができる^{24,25)}。蛍光材料を含んだ透明なスクリーンを用いた手法では、さらに高い浮遊感が得られる²⁶⁾。

散乱体を用いずに空中像を全方向から観察できる方法としては、図5に示すような、高強度のパルスレーザーを空气中で集光し、プラズマによる発光パターンにより空中三次元像を形成する技術が開発されている²⁷⁾。高精細な

三次元像を形成するにはいたっていないが、媒体が不要なため大型化に対応でき、全周囲から見ることができる真の三次元像を形成できる点で、他の手法では得られない特長をもつ。

結像光学系により形成された実像を高速に移動させて走査を行うタイプの体積走査型三次元ディスプレイについては、空中表示を行うことができる²⁷⁾。光学の実像により三次元的に走査する方法として、可変焦点レンズにより高速に縦方向に像を移動させる方法²⁸⁻³⁰⁾や、筆者らによる傾斜像を横方向へ移動させる方法³¹⁾がある。後者の詳細については後述する。

2.3.3 ホログラフィー

ホログラフィーは光波の再生により原理的に空中像形成が可能であるが、現状では表示デバイスの解像度の限界により、表示領域かあるいは観察可能角度が制限される。ホログラムの解像度不足を補うために、時分割多重や空間多重に基づく表示領域および観察角度の拡張の研究がさかんになっている^{32,34)}。また、観察可能角度の制限があっても、人の目の位置を検出してその位置へ光が向くように再生することで、角度の問題を解決することができる³⁵⁾。

2.4 立体ディスプレイへの結像素子の付加による空中浮遊立体像形成

さまざまな立体ディスプレイで形成された三次元像は、結像素子により実像を形成することで空中表示が可能である^{36,37)}。図6では、インテグラルイメージングに基づく立体ディスプレイに対して、レンズを適用して浮遊立体映像を形成している。光線再生型の三次元像形成では、高解像度で像が形成できる領域が表示デバイスの前後にまたがるが、結像系を用いるとその全領域を空中像とすることができる。また、表示素子やスクリーンを動かして三次元空間を掃引する体積走査型三次元ディスプレイに対して、結像素子を適用して空中像を形成させる試みもなされている³⁸⁾。

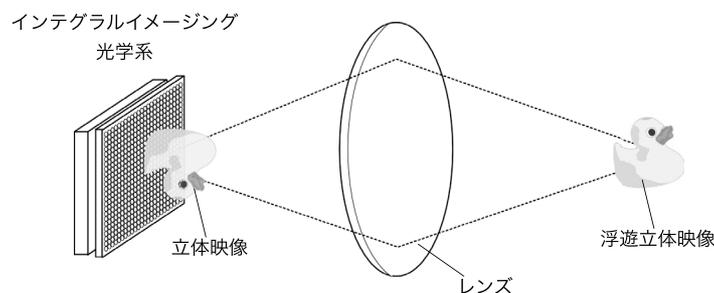


図6 インテグラルイメージングに結像素子を導入することによる空中三次元像形成.

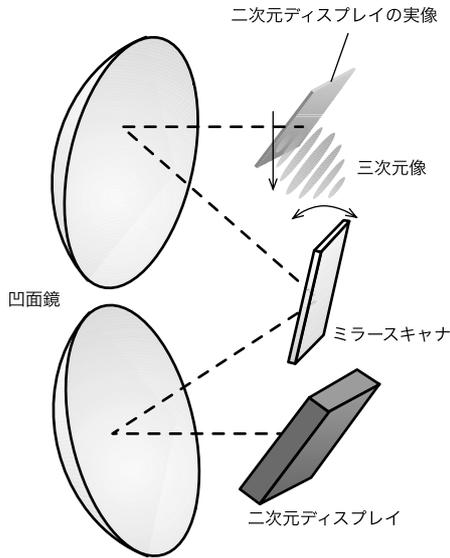


図7 傾斜像面の走査に基づく体積走査型三次元ディスプレイ。

3. 傾斜像面による体積走査型三次元ディスプレイ

筆者による関連研究として、二次元実像の移動により三次元的な走査を行う体積走査型三次元ディスプレイについて述べる。

3.1 原理

基本的なシステム構成は、図7に示すようにミラースキャナーが挿入された結像光学系において二次元ディスプレイが光軸に対して傾斜して配置されており、その表示画像の実像が空中に形成される。ミラースキャナーを駆動すると光軸に対して垂直な方向に像が移動するので、その位置に合わせて表示三次元物体の断面像を順次表示する。ミラースキャナーの駆動速度を十分速くすると、残像により各断面像を同時に観測できるようになり、その結果として三次元像が形成される。表示像の各点は結像光学系により空間中に実際に配置されているので、焦点調節や輻輳といった立体視の知覚要因をすべて満たした高精細な三次元像を得ることができる。

筆者らの研究グループは、提案手法の実証を行うために、結像素子として、レンズや凹面鏡、ミラーアレイ素子を利用したシステムをこれまで試作してきた。残像の残る時間内に多くの断面画像を表示する必要があるため、表示素子としては高速応答性と高精細性を備えたデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を利用した。

3.2 凹面鏡による実像形成

凹面鏡による空中結像を用いた体積走査型三次元ディスプレイの実験結果を示す³⁹⁾。光軸に対して45度傾けて配置した背面投影スクリーンにDMDの画像を投影すると、凹面鏡とミラースキャナーで構成される結像光学系によ



図8 体積走査型三次元ディスプレイによる空中三次元像形成結果。

り、空間中に三次元実像が形成される。ミラースキャナーの振動周波数を20 Hzとし、DMDにより毎秒8,000枚で画像表示で切り替えることで、200枚の切断画像により三次元像を形成できる。DMDの画素数は 1024×768 なので、三次元像の最大点数は $1024 \times 768 \times 200$ となる。三次元像の表示領域は1辺約150 mmの立方体である。DMDの各画素の階調は二値であるため、ディザリング手法により多階調表現を実現した。視野角は光学系の開口数により制限され、水平方向に約 ± 30 度、垂直方向は約15度であった。表示した三次元画像の例を図8に示す。形成された三次元像は、自然な立体感を有する空中像として観察することができた。

3.3 ミラーアレイに基づく透過型対称結像素子の利用

ミラーアレイに基づく透過型対称結像素子を用いて空中像を形成し、ミラースキャナーでその像を高速に移動させることで体積走査を行うシステムを構成した⁴⁰⁾。システムの構成図を図9に示す。透過型対称結像素子は、直径80 mmの円形で、厚さ $150 \mu\text{m}$ のニッケル板に一辺 $150 \mu\text{m}$ の正方形開口の貫通穴が $210 \mu\text{m}$ の間隔で正方格子上に並んだ構造をしている。本素子は、ナノ加工により銅製金型を作成し、電鍍によってニッケルに転写したのち、エッチングによって金型を溶解することで製作された。試作した体積走査型三次元ディスプレイで表示した結果を図10に示す。表示像は、結像素子から約80 mm離れた位置に三次元実像として得られた。像の観察可能角度は結像素子のサイズにより約10度に制限されている。ミラーホールでの回折や製造誤差等の影響による表示解像度の低下がみられた。原理的に取差を生じないことから、レンズや凹面鏡を用いたシステムに比べて歪みの少ない三次元像を形成できた。

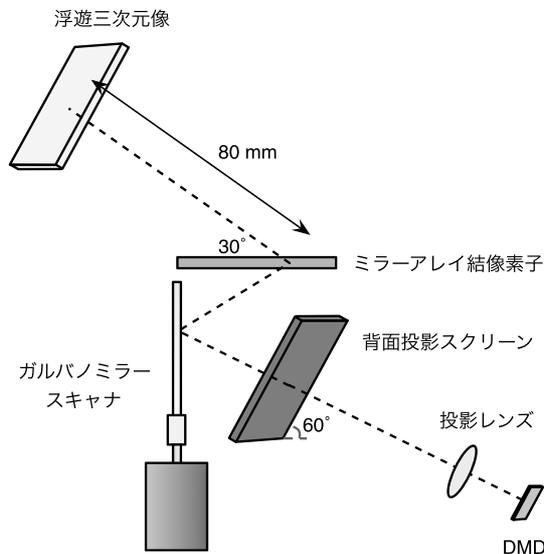


図9 ミラーアレイ結像素子を用いた体積走査型三次元ディスプレイ。

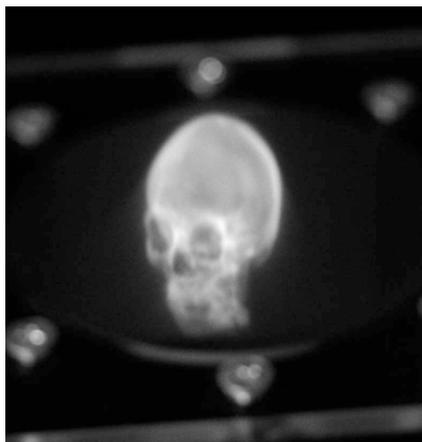


図10 ミラーアレイ結像素子を用いた体積走査型三次元ディスプレイによる空中三次元像形成結果。

4. 全周囲観察可能な浮遊三次元ディスプレイ

筆者らの研究グループは、全周囲から多人数で観察可能なフルパララックス空中立体像表示技術の開発を目指して、インテグラルイメージングに基づく立体表示技術に対して半球凹面鏡と回転ミラーによる走査光学系を導入し、水平方向の全周囲から観察可能な三次元ディスプレイを提案している⁴¹⁾。図11に提案するディスプレイシステムの光学系を示す。光学系はインテグラルイメージング光学系、リレー光学系、全周囲走査光学系の各部分により構成される。インテグラルイメージング光学系の典型的な構成として、二次元ディスプレイとレンズアレイの組み合わせが考えられる。リレー光学系は、インテグラルイメージング光学系で形成された画像を全周囲走査光学系に導く結像光学系である。全周囲走査光学系は、水平方向に周囲360

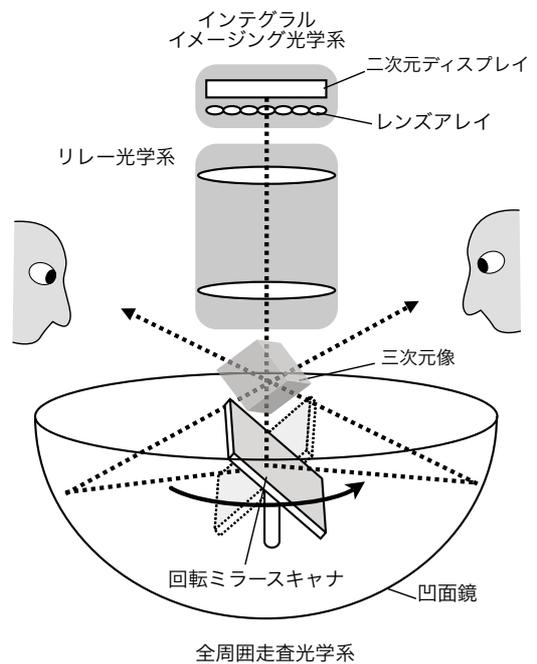
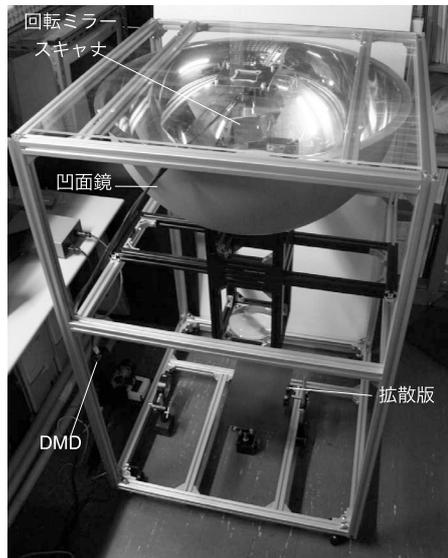
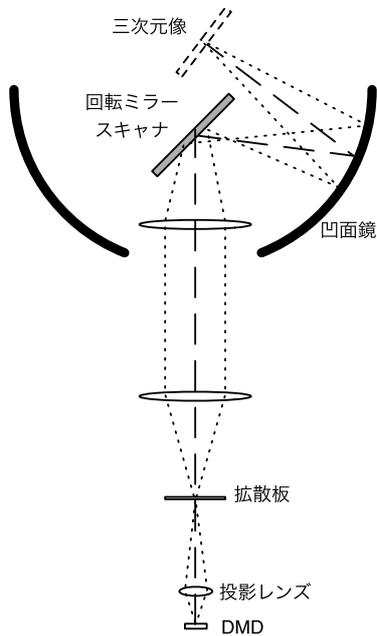


図11 全周囲観察可能なフルパララックス空中三次元像形成ディスプレイの構成図。

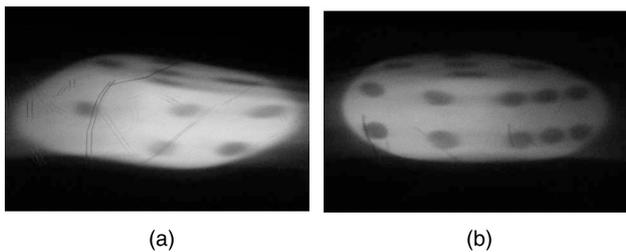
度からの観察が可能な空中像を形成するため、半球凹面鏡とその中心付近に置かれた回転ミラーにより構成されている。リレー光学系によって画像をミラー付近に結像すると、半球凹面鏡によって中心付近に再度空中像が形成される。この空中像は、インテグラルイメージングに基づく立体視が可能である。ミラーを回転させると、空中像の形成位置は大きく変化しないが、画像の向きを360度変化させることができる。ミラーの角度に合わせてそれぞれの方向から見える画像を高速に切り替えて表示することにより、全周囲観察が可能な立体像を形成できる。水平方向の視差は走査により実現でき、垂直方向の視差はインテグラルイメージングに基づいて実現できる。

提案手法の有効性の検証のために、二種類の表示システムを試作した。第一のシステムでは、スキャナーミラーを静止してインテグラルイメージングに基づく空中立体像形成を確認した。第二のシステムでは、二次元画像を全周囲走査光学系に入力し、ミラースキャナーを駆動して、全周囲から観察可能な空中映像の形成を確認した。

第一の実験システムでは、液晶ディスプレイの後にレンズアレイを配置してインテグラルイメージング光学系を構成した。インテグラルイメージングの原理に基づいて画像を設計し、液晶ディスプレイに表示することによって、凹面鏡による結像による空中立体像の形成が確認できた。観察角度を上下左右方向に変えると、それに応じて変化する視差画像が得られた。スキャナーミラーが駆動していない



(a) (b)
図 12 全周観察可能なフルパララクス空中三次元像形成の実験光学系.



(a) (b)
図 13 全周観察可能なフルパララクス空中三次元像形成の実験結果.

ために、観察角度はリレー光学系の開口数によって約 15 度に制限された。

次に、全周観察可能とするために、表示デバイスとして高速動作が可能な DMD を用いたシステムを作成した。レンズアレイは用いていないので、インテグラルイメージングではない。図 12 に示すように、表示像の観察を光学系が妨げないよう凹面鏡の下から画像を入射する構成にした。ミラーを 20 Hz で回転させ、三次元物体の観察角度を変えた画像を DMD に 1 回転で 400 枚の速度で表示することにより、全周囲観から 0.9 度方向ごとに変化する空中像を凹面鏡の中心付近に形成することができた。図 13 に、観察角度を約 90 度変えて撮影したさいころの像を示す。視差は全周囲走査と画像の切り替えにより得られているため、視差の変化は水平方向のみであった。観察画像は光学系の収差により歪んでいるが、これはあらかじめ表示画像を歪みを考慮して補正しておくことで回避可能と考えている。

インテグラルイメージングを適用した全周囲観察可能なフルパララクス空中立体表示の形成については、まだ十分な結果が得られていない。リレー光学系では開口数の大きなレンズを複数用いたためにアライメント誤差に敏感な光学系となり、さらにインテグラルイメージングでは空間的な歪みだけでなく光線方向の正確さも要求されるため、光線追跡のシミュレーションだけでは歪みを十分に補正することはできなかった。利用している光学素子の形状やアライメントのずれ等に対処するために、光学系に光を入射させて入力と出力の対応関係を測定し、実際のシステムに適応したインテグラルイメージングの要素画像を生成する必要がある。

本稿では、さまざまな光学技術を適用して、何もない空中に浮遊する三次元映像の表示技術について解説した。また、筆者による研究例として、体積走査型の空中三次元像形成および全周囲から観察可能な立体空中像形成技術を紹介した。空中像とすることで、表示装置をあまり意識しなくなることから現実感が増し、さらに表示像との間を遮るものがなくなるためにアクセス性が向上する。現実の世界のさまざまなことがら情報化され、流通されるようになったものの、その情報の利用形態の多くは平らなディスプレイ装置ごしに眺めるだけであった。情報を現実世界に引き寄せて自然な形で利用できるヒューマンインターフェイス技術の発展は、人の能力をさらに拡張できる可能性が

ある。本稿で解説した技術は、データの世界と現実世界の隔たりを減らし、融合をさらに深めることのできる映像インターフェイスとなりうる。

これまでのディスプレイ技術における性能向上はおもに電子デバイス技術の進歩により達成されてきたが、本稿で示したような新たな映像体験をもたらすディスプレイ技術の創造においては、光学技術が重要な役割を果たしている。これからの付加価値の高い映像技術の発展には、光情報処理や光学設計などの光学分野の多大な貢献が期待できる。

文 献

- 1) 宮崎大介：“三次元ディスプレイの最近の進展”，*応用物理*, **78** (2009) 646-649.
- 2) 榎並和雅：“総論—高臨場感システムの研究推進に向けて—”，*映像情報メディア学会誌*, **61** (2007) 578-582.
- 3) J. Son, B. Javidi and K. Kwack: “Methods for displaying three-dimensional images,” *Proc. IEEE*, **94** (2006) 502-523.
- 4) 野澤哲生：“特集：3D ディスプレイ 3 度目の正直”，*日経エレクトロニクス*, No. 987 (2008) 55-79.
- 5) C. Luciano, P. Banerjee, G. M. Lemole and F. Charbel: “Second generation haptic ventriculostomy simulator using the ImmersiveTouch™ system,” *Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality*, **14** (2006) pp. 343-348.
- 6) D. Miyazaki, T. Honda, K. Ohno and T. Mukai: “Three-dimensional user interface using a haptic device for volumetric display,” *Information Photonics*, **2008** (2008) pp. 198-199.
- 7) T. Komuro: “Vision-based 3D input interface technologies,” *The 17th International Display Workshops (IDW'10)* (2010) pp. 1739-1742.
- 8) S. DiVerdi, I. Rakkolainen, T. Höllerer and A. Olwal: “A novel walk-through 3D display,” *Proc. SPIE*, **6055** (2006) 428-437.
- 9) 石川 洵：“空間映像による映像と現実世界の融合”，*立体視テクノロジー (エヌ・ティー・エス)*, **2008** pp. 391-398.
- 10) 大塚理恵子：“小型で持ち運び可能な 360 度立体映像ディスプレイ技術の開発”，*立体視テクノロジー (エヌ・ティー・エス)*, **2008** pp. 222-225.
- 11) 加藤紀雄, 苗村 健：“2 つの結像系を用いた複合現実型空間立像ディスプレイ”，*日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, **12** (2007) 323-329.
- 12) 岡野文男, 洗井 淳, 奥井誠人：“屈折率分布レンズアレーによる 3 次元像の形成”，*レーザー研究*, **30** (2002) 731-736.
- 13) 石川 大：“箱庭的臨場感の提案とめがね無し小型立体表示装置の開発”，*PIONEER R&D*, **12** (2003) 47-58.
- 14) S. Maekawa, K. Nitta and O. Matoba: “Transmissive optical imaging device with micromirror array,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **6392** (2006) 63920E.
- 15) 板東宏記, 陶山史朗, 山本裕紹：“LED パネルの空中結像に向けた高い開口比を有する RMGA の検討”，*映像情報メディア学会技術報告*, **35** (2011) 17-20.
- 16) T. Shibata, J. Kim, D. M. Hoffman and M. S. Banks: “The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays,” *J. Vision*, **11** (2011) 1-29.
- 17) S. Yano, S. Idea, T. Mitsunashi, H. Thwaites: “A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images,” *Displays*, **23** (2002) 191-201.
- 18) 高木康博：“立体映像とフラットパネル型立体表示技術”，*光学*, **35** (2006) 400-409.
- 19) 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.
- 20) Y. Hirayama, T. Saishu, R. Fukushima and K. Taira: “Flatbed-type autostereoscopic display systems using integral imaging method,” *Digest of IEEE International Conference on Consumer Electronics 2006* (2006) 125-126.
- 21) H. Takahashi, N. Kureyama, M. Chikayama and K. Yamada: “Flatbed-type three-dimensional display system as a tool for cooperation working,” *3rd International Conference on Innovative Computing Information and Control (ICICIC) 2008* (2008) p. 57.
- 22) S. Yoshida: “fVisiOn: Glasses-free tabletop 3-D display: Its design concept and prototype,” *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest*, DTuA1 (2011).
- 23) 堀米秀嘉, 小池一郎, 梅崎太造：“水平 360 度表示 3D ディスプレイ「Holo-Table」への実写撮影立体画像表示”，*第 17 回画像センシングシンポジウム SSII 2011, DSI-09* (2011).
- 24) 宮崎大介：“真の 3 次元像を実現する体積走査型ディスプレイ”，*レーザー研究*, **35** (2007) 16-20.
- 25) G. E. Favalora, J. Napoli, D. M. Hall, R. K. Dorval, M. G. Giovinco, M. J. Richmond and W. S. Chun: “100 Million-voxel volumetric display,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **4712** (2002) 300-312.
- 26) S. Hisatake, S. Suda, J. Takahara and T. Kobayashi: “Transparent volumetric three-dimensional image display based on the luminescence of a spinning sheet with dissolved Lanthanide (III) complexes,” *Opt. Express*, **15** (2007) 6635-6642.
- 27) H. Saito, H. Kimura, S. Shimada, T. Naemura, J. Kayahara, S. Jaru-sirisawad, V. Nozick, H. Ishikawa, T. Murakami, J. Aoki, A. Asano, T. Kimura, M. Kakehata, F. Sasaki, H. Yashiro, M. Mori, K. Torizuka and K. Ino: “Laser-plasma scanning 3d display for putting digital contents in free space,” *Proc. SPIE*, **6803** (2008) 680309.
- 28) A. C. Traub: “Stereoscopic display using varifocal mirror oscillations,” *Appl. Opt.*, **6** (1967) 1085-1087.
- 29) S. Suyama, M. Date and H. Takada: “Three-dimensional display system with dual-frequency liquid-crystal varifocal lens,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 480-484.
- 30) 園田貴紀, 岡田裕也, 山本裕紹, 陶山史朗：“多焦点レンズと高速 2D 表示を用いた新たな体積型 3D 表示方式の提案”，*動的画像処理実用化ワークショップ 2011 講演概要集* (2011) pp. 349-353.
- 31) 宮崎大介：“光学の実像の移動による体積走査型三次元ディスプレイ”，*光技術コンタクト*, **48** (2010) 582-587.
- 32) 吉川 浩：“ホログラフィー方式の技術動向”，*O plus E*, **30** (2008) 714-717.
- 33) 三科智之：“立体電子ホログラフィー技術”，*電子情報通信学会誌*, **93** (2010) 492-498.
- 34) M. Tanaka, K. Nitta and O. Matoba: “Wide-angle wavefront reconstruction near display plane in three-dimensional display system,” *J. Display Technol.*, **6** (2010) 517-521.
- 35) R. Häussler, A. Schwerdtner and N. Leister: “Large holographic displays as an alternative to stereoscopic displays,” *Proc. SPIE*, **6803** (2008) 68030M.
- 36) H. Kakeya: “MOEvision: Simple multiview display with clear floating image,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **6490** (2007) 64900J.
- 37) S.-W. Min, M. Hahn, J. Kim and B. Lee: “Three-dimensional electro-floating display system using an integral imaging method,” *Opt. Express*, **13** (2005) 4358-4369.
- 38) K. Kameyama, K. Ohtomi and Y. Fukui: “Interactive volume-scanning 3D display with an optical relay system and multidimensional input devices,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **1915** (1993) 12-20.
- 39) D. Miyazaki, T. Honda, K. Ohno and T. Mukai: “Volumetric display system using a digital micromirror device based on inclined-plane scanning,” *J. Display Technol.*, **6** (2010) 548-552.
- 40) D. Miyazaki, N. Hirano, Y. Maeda, K. Ohno and S. Maekawa: “Volumetric display using a roof mirror grid array,” *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **7524** (2010) 75240N1-75240N9.
- 41) 宮崎大介, 赤阪亘弘, 大小田健太, 向井孝彰：“全周観察可能なフルパララックス空中立体像表示法”，*第 58 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集*, 27a-BJ-10 (2011).

(2011 年 7 月 28 日受理)