

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area



宮崎 大介 (Daisuke MIYAZAKI, Dr. Eng.)

大阪市立大学大学院 工学研究科 電子情報系専攻
准教授

(Associate Professor, Department of Electric & Information
Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka City
University)

応用物理学会 電子情報通信学会 Optical Society of America

研究専門分野：情報光学

あらまし 特殊な眼鏡等を必要とせず、何も存在しない空中に、上下左右方向に視差を持つフルパララックス 3 次元像を形成し、その像を全周囲から観察することができる立体表示手法の開発を行っている。同じ 3 次元像を周囲から複数人で観察しながら協調作業を行い、さらに空中像を触るような感覚で 3 次元像を操作できる新しいビジュアルインターフェイスが実現される可能性がある。本研究では、レンズアレイによるインテグラルイメージングと回転ミラーによる 360 度走査、さらに凹面鏡による空中結像を組み合わせたシステムが提案されている。フレームレートの高いデジタルマイクロミラーデバイスを用いて表示システムを試作し、提案手法の有効性を確認している。さらに、像の形成領域における光線の方向を計測し、その情報をインテグラルイメージングの画像生成に利用することで、光学系の収差やアライメント誤差により発生する像の歪みの補正手法を提案している。

1. はじめに

情報処理や通信技術の発展に伴い、増大する情報量を効果的に利用するためには、情報機器と人との間のインターフェイス技術をさらに進展させる必要がある。特に、人は多くの情報を目から得ているため、視覚的な情報インターフェイス技術の開発は特に重要である。そのような、視覚的情報インターフェイスの一つとして、3 次元構造を持つ情報を直感的に理解することができる立体表示技術が注目され、実用的な 3 次元ディスプレイの実現が期待されている。立体テレビや劇場用の立体映画として普及している立体映像技術は、主に偏光フィルタや液晶光スイッチを利用した特殊な眼鏡を用いている。近年は、そのような特殊な装着物を必要としない裸眼立体ディスプレイ技術の開発が活発になっている。パララックスバリアやレンチキュラシートを用いた裸眼立体ディスプレイはすでに実用化されているが、画像の観察角度に制限があり、それを拡張することが技術課題の一つとなっている。観察角度を大幅に拡張し、表示像を周囲 360 度からの観察を可能とした立体ディスプレイ手法が研究されている。全周囲からの観察を可能とすることにより、観察者が回り込むことで表示物体の側面や背後も見ることができ、3 次元物体としての存在感を増すことができる。また、複数の人数で表示像の周りを囲んで観察しながら協調作業をするなど、これまででない映像インターフェイスを実現できる可能性がある。

全周囲から観察可能な立体ディスプレイとして、投影スクリーンを高速に回転させながら断面像を表示して 3 次元的な光の分布を形成する体積型ディスプレイ [1] や、発光ダイオードアレイを回転させて、全周囲から観察可能な 3 次元像の表示を行う円筒型ディスプレイの手法が提案されている [2]。また、高フレームレートのプロジェクタから投影された映像を回転するミラーに投影し、観察領域を全周に拡張する手法が提案されている [3][4]。さらに、立体ディスプレイの表示面を水平に設置し、図 1 に示すように周囲から観察するテーブルトップ型の立体表示装置が開発されている [5][6][7]。

本研究は、テーブルトップ型で全周囲からの観察可能な裸眼立体ディスプレイの開発を目標としている。

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area

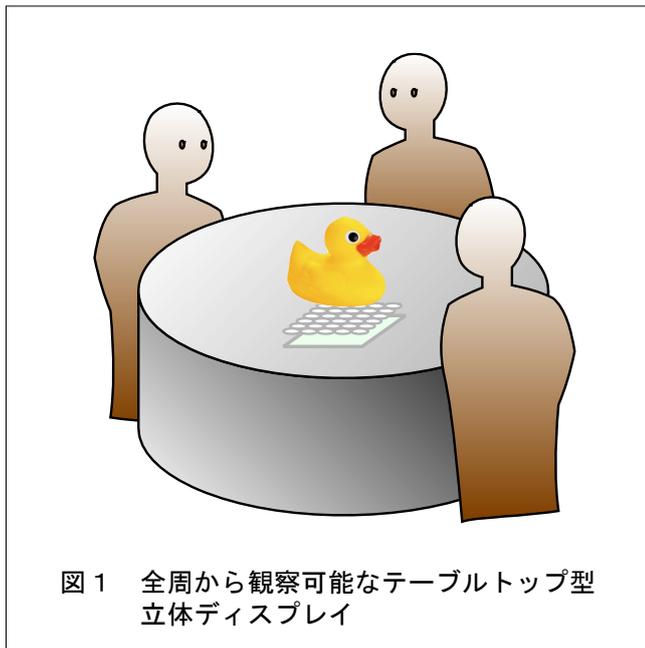


図1 全周から観察可能なテーブルトップ型立体ディスプレイ

従来の全周囲観察型の立体ディスプレイの多くは、水平方向にのみ視差を持つものが多いが、本研究では垂直と水平両方向ともに視差を持つフルパララックス立体ディスプレイの実現を目指す。また、指やポインティングデバイスを用いて表示像の3次元的位置を直接指し示して操作するようなインタラクティブ性を持たせるために、何もない空中における浮遊像の形成を目指す。これらの特長をそれぞれ個別に持つ立体ディスプレイ技術はすでに開発されているが、これらの条件を全て同時に満たす技術はまだ開発されていない。本研究では、インテグラルイメージング[8]と回転ミラーによる360度走査[3][4]、さらに、凹面鏡による空中結像[9]を組み合わせた全周囲からの観察が可能な浮遊3次元像の形成手法を提案している[10][11]。立体ディスプレイシステムを試作し、実際に像の表示を行って提案手法の有効性を実証する。また、光学系の誤差や収差に基づく像の歪みを補正するために、光学系のキャリブレーション手法を検討する。

2. 全周囲観察可能な3次元空中映像形成の原理

本研究の提案手法では、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、凹面鏡と回転ミラーによる走査光学系を導入して、全周囲から観察可能な立体像を形成する。図2に提案する立体ディスプレイ

システムの概略図を示す。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。

典型的なインテグラルイメージング光学系は、2次元ディスプレイとレンズアレイにより構成される。レンズアレイの各要素レンズに対応する要素画像において、発光する画素の位置によってレンズから射出される光線の角度が変化する。これを利用して、観察方向に従って観察できる画像を変化させることができ、上下左右方向に視差を持った立体画像表示を行える。

リレー光学系は、レンズによる結像光学系であり、インテグラルイメージング光学系で形成された立体画像を全周囲走査光学系に導く働きがある。また、リレー光学系のレンズ配置により、立体画像からの光線方向を調節することができる。

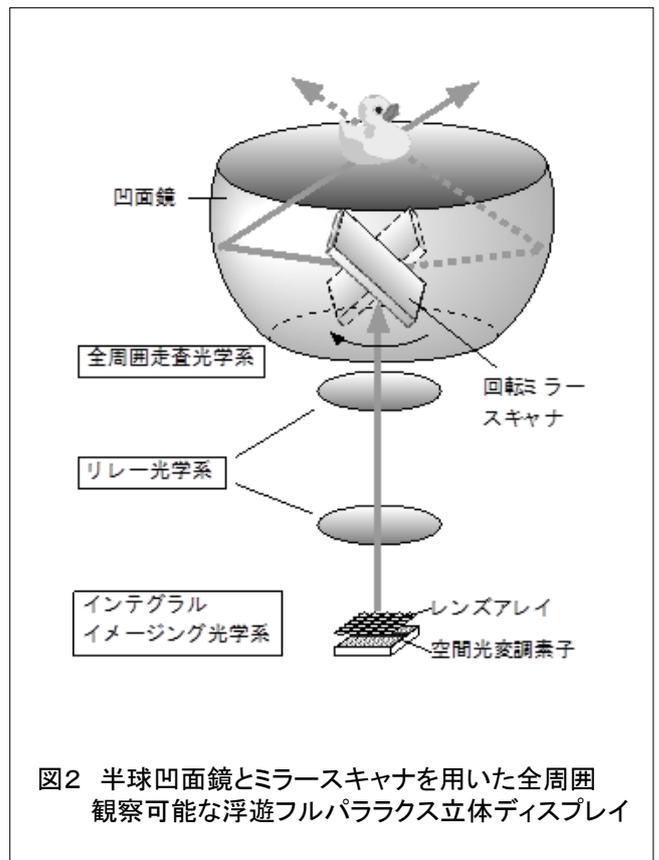


図2 半球凹面鏡とミラー スキャナを用いた全周囲観察可能な浮遊フルパララックス立体ディスプレイ

全周囲走査光学系は凹面鏡と回転ミラー スキャナにより構成されており、スクリーン等の存在しない空中に、周囲360度からの観察が可能な実像を形成するこ

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area

とができる。回転ミラーは凹面鏡の中心付近に配置されている。図2に示すように、リレー光学系を介して送られた画像は、ミラースキャナと凹面鏡で反射され、中心付近に再度結像する。ミラーを回転させて凹面鏡上の光の反射位置を変化させると、実像の形成位置は凹面鏡の中心付近のままであるが、画像と光線の向きを変化させることができる。ミラーを高速に回転させながら、全周の様々な方向から見える立体画像を角度に合わせて切り替えて表示すると、立体画像を全周囲から観察できるようになる。

従来の全周囲立体ディスプレイの多くは水平方向の視差のみを実現していたが、本手法では、レンズアレイを用いたインテグラルイメージングに基づいて、垂直方向の視差も同時に実現している。また、通常のインテグラルイメージングに基づく立体ディスプレイでは、光線角度数と表示像の画素数の積が、2次元ディスプレイの画素数と等しくなり、表示立体像の解像度が低下する問題があった。本手法では、空間的な走査を導入しているため、時間多重化により画素数や視差方向の分解能を従来のインテグラルイメージングよりも向上できる可能性がある。

3. インテグラルイメージングに基づく全周囲観察可能な浮遊立体像形成

提案手法の有効性の検証のために、立体ディスプレイシステムを試作した。構成したシステムを図3に示す。スキャナの角度に合わせて投影する画像を高速に切り替える必要があるため、デジタルマイクロミラーデバイス(DMD)により構成される高フレームレートプロジェクタ(テキサスインスツルメンツ製 DLP LightCommander)を用いた。

フィールドレンズはプロジェクタから焦点距離の分だけ離して配置し、プロジェクタからフィールドレンズの位置に画像を投影した。フィールドレンズのすぐ後にレンズアレイ(各要素レンズの直径:1mm, 焦点距離:3.0mm)を配置し、インテグラルイメージングに基づく3次元画像表示を行った。この画像は、4枚の凸レンズ(直径:152mm, 焦点距離:248.5mm)で構成されるリレー光学系により全周囲走査光学系に伝送される。

全周囲走査光学系は、穴の空いた半球凹面鏡(焦点距離:175mm, 直径:700mm)、およびパルスモーターによりミラーを回転させるスキャナにより構成される。投影画像はミラーと凹面鏡で反射した後、凹面鏡の中心付近に実像として結像される。



図3 実験系

ミラーの回転周波数を20Hzとし、それに同期して1回転の間に映像を200枚の画像を切り替えて表示するようにDMDプロジェクタを制御した。

その他のシステムの仕様を表1に示す。

表1 実験システムの仕様

プロジェクタ解像度	1024×768
レンズ数	60×60
一回転の画像数	200
レンズ当たりの画素数(光線数)	52
水平方向視野角[度]	360
垂直方向視野角[度]	17

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area

図4に、コンピューターシミュレーションにより実験光学系の光線追跡を行った結果を示す。図中の最下部の破線は、プロジェクタからの映像が投影される位置を表している。投影画像中の点から拡散する光線が、凹面鏡の上に集光して像を形成することがシミュレーションにより確かめられた。

プロジェクタにより表示する画像を得るために、通常のインテグラルイメージングの原理に基づいて、コンピュータ内で構成した3次元物体を様々な角度から観察した画像を計算し、それを元にレンズアレイ中の各レンズに対応する要素画像を求めた。プロジェクタにより表示される画像の一例を図5に示す。

ミラースキャナを駆動させ、それに同期してミラー角度に合わせてプロジェクタの表示を切り替えることで、全周囲から観察可能なフルパララックス3次元像形成を行った。形成された立体像を異なる角度からカメラにより撮影した結果を図6に示す。水平方向に関しては全周囲からの観察が可能であった。フルパララックス特性を持つことから、観察角度を上下方向に観察位置を移動しても視差に基づく画像の変化が得られた。これらの結果より、提案手法で空中に浮遊する立体映像を形成できることが確認できた。

実験結果において、表示像の歪みや像の多重化が生じている。これは、インテグラルイメージングの要素画像の生成において、実際の光学系が光学素子の配置誤差や収差、形状誤差等により、設計とは異なることから生じている。

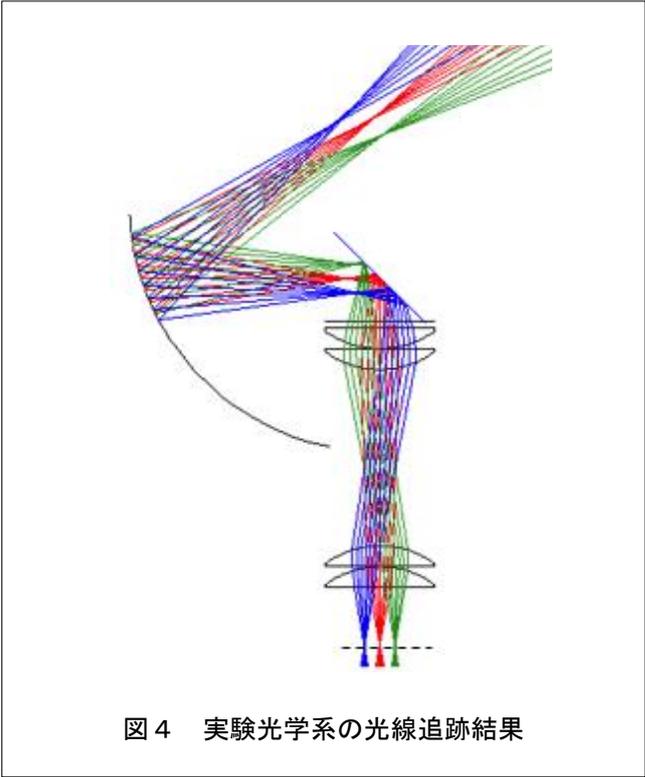


図4 実験光学系の光線追跡結果



図5 プロジェクタに表示する画像の一例

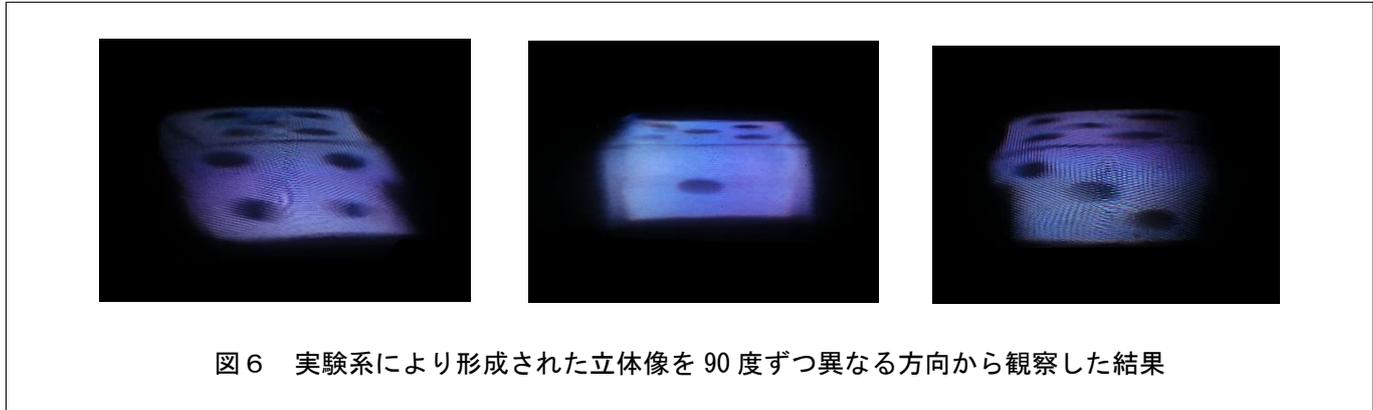


図6 実験系により形成された立体像を90度ずつ異なる方向から観察した結果

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area

4. 光学系のキャリブレーションによる像の歪み補正

実験において問題となった像の歪みや多重像の発生を解決する方法として、実際の光学系における画像形成の特性や光線の方向を計測して、その結果をインテグラルイメージングの画像生成に反映させることが考えられる。本研究では、複数の位置で光点の位置を計測することで、光線の角度を測定した。

測定手順として、ミラースキャナを一定の角度で固定した状態で、間隔を置いて配置された光点により形成される画像をプロジェクタに表示し、空中像を形成させた。像が形成される領域に、画像が投影されるスクリーンとして拡散板を配置し、投影画像をカメラにより計測した。スクリーンは垂直に立てられ、面の方向はミラーの水平方向の角度に合わせた。スクリーンを面の法線方向に移動させ、投影された画像を撮影した。画像内での各光点の位置を求め、二つの画像における光点の移動距離により、光の進行方向を求めた。光点の配置を変更し、同様の処理を繰り返すことにより、プロジェクタの各画素からの光が、像の形成領域でそのような光線として伝搬しているかを計測することができる。

計測により得られた光線方向とプロジェクタ上の画素との関係を用いて、インテグラルイメージングの要素画像を生成した。ディスプレイシステムにおけるミラースキャナの角度を固定した状態で得られたインテ

グラルイメージングの結果を図7(b)に示す。図7(a)のキャリブレーションを行っていない場合と比べると、像の歪みが軽減していることがわかる。

5. まとめ

レンズアレイによるインテグラルイメージング、回転ミラーによる360度走査、さらに凹面鏡による空中結像を組み合わせた立体ディスプレイの手法を提案した。提案手法により、水平方向に関して360°の広い観察角度を持つ裸眼立体ディスプレイを実現でき、周囲から複数により同じ3次元像を観察しながら協調作業を行うことが可能となる。また、上下左右方向ともに視差を持ち、焦点調節と輻湊角とのずれ少ない自然な立体像が形成できる。空中像を形成することで、3次元像を直接触るような動作により操作できるような新しいビジュアルインターフェイスを実現することができる。高フレームレートなデジタルマイクロミラーデバイスを用いて立体ディスプレイシステムを構成し、提案手法の有効性を確認した。また、像形成領域での光線の状態を計測して像の歪みを補正する手法を提案し、実験的に原理を確認することができた。歪みの補正を十分に行うためには、光線の測定精度をさらに向上させる必要がある。



(a) キャリブレーションなし



(b) キャリブレーションあり

図7 スキャナのミラーを固定した状態で撮影した立体像

全周観察可能なフルパララックス空中立体像の表示技術

Full-parallax stereoscopic display technique that forms floating image visible from surrounding area

参考文献

- [1] 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," Cockpit Displays IX: Displays for Defense Applications, Proc. SPIE, 4712 (2002) 300-312.
- [2] T. Yendo, T. Fujii, M. Tanimoto, "The Seelinder: Cylindrical 3D display viewable from 360 degrees," J. Vis. Commun. Image R., 21 (2010) 586-594.
- [3] A. Jones, I. McDowall, H. Yamada, M. Bolas, P. Debevee, "Rendering for an interactive 360° light field display," ACM Trans. Graph., 26 (2007) 40.
- [4] M.-U. Erdenebat, G. Baasantseren, N. Kim, K.-C. Kwon, J. Byeon, K.-H. Yoo, and J.-H. Park, "Integral-floating Display with 360 Degree Horizontal Viewing Angle," J. Optical Soc. Korea, 16 (2012) 365.
- [5] 平山雄三, "平置き型立体ディスプレイシステム", 光学, 35 (2006) 416-422.
- [6] Y. Takaki and S. Uchida, "Table screen 360-degree three-dimensional display using a small array of high-speed projectors," Opt. Express, 20 (2012) 8848.
- [7] S. Yoshida, "fVisiOn: Glasses-free tabletop 3D display to provide virtual 3D media naturally alongside real media," Proc. SPIE Vol., 8384 (2012) 838411.
- [8] F. Okano, J. Arai, K. Mitani, and M. Okui, "Real-time integral imaging based on extremely high resolution video system," Proc. IEEE, 94, (2006) 490-501.
- [9] 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.
- [10] D. Miyazaki, N. Akasaka, K. Okoda, Y. Maeda, T. Mukai, "Floating three-dimensional display viewable from 360 degrees," Stereoscopic Displays and Applications XXIII, Proc. SPIE, 8288 (2012) 82881H.
- [11] D. Miyazaki, G. Miyazaki, Y. Maeda, and T. Mukai, "Floated integral imaging display viewable from surrounding area," Digital Holography & 3-D Imaging 2014 (2014) DW2B.5.

この研究は、平成21年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成22～24年度に実施されたものです。