視点追従型インテグラル3D映像表示システムの開発

Development of Integral 3D Display System Using Eye-tracking Technology

正会員 岡市直人[†], 正会員 佐々木久幸[†], 正会員 加納正規[†],
正会員 河北真宏[†], 正会員 苗村 健^{††}

Naoto Okaichi[†], Hisayuki Sasaki[†], Masanori Kano[†], Masahiro Kawakita[†] and Takeshi Naemura^{††}

あらまし 視点追従技術および従来設計より焦点距離の長いレンズアレーを用いて、広い視域と高い映像品質をもつ個人視聴に適したインテグラル3D映像表示システムを提案する。レンズアレーを回転させて水平・垂直方向の光学視域の比率を変化させる手法、瞳位置に応じた要素画像を高速に生成する手法、および視距離に応じて視域を最適化する手法を用いて、試作装置を構築した。従来設計と提案設計の試作装置において比較実験を行い、視点追従により視域が水平方向は2.9倍の81.4°、垂直方向は1.7倍の47.6°に拡大し、レンズアレーの焦点距離を2倍にしたことにより映像品質が向上したことを確認した。薄型かつ軽量のディスプレイを用いることによって、人がディスプレイを直接手に持ってインテグラル3D映像を楽しむことができるコンパクトな構成のシステムを実現した。

キーワード：インテグラル3D、視点追従、広視域化、高品質化

1. ま え が き

インテグラル3D映像表示は、立体写真技術であるインテグラルフォトグラフィ¹⁾の原理に基づいた空間像再生型の3次元映像表示技術である。水平・垂直方向の全視差(フルパララックス)を有し、奥行き方向に連続的で自然な3次元映像を再現することができる。さまざまな方向からの光線情報を記録した要素画像群とそれに対応するレンズアレーの組み合わせによって、実物体から発せられる光と等価な光線を空間に再現する。メガネ式やパララックスバリア式などの2眼方式において、視覚疲労や不快感の原因となる「輻輳と調節の不一致」が、インテグラル方式では原理上起こらないと考えられているため²⁾³⁾、将来の3次元映像方式として、放送、医療、エンタテインメント、広告などの産業への応用が期待されており、これまでさまざまな研究がなされてきた。

インテグラル方式は非常に多くの光線情報を再現する方式であり、高性能な映像表示には多画素かつ狭画素ピッチの表示デバイスを用いる必要がある⁴⁾。そのため、従来のようなディスプレイとレンズアレーのみの組み合わせで映像の表示性能を向上させることは現状では難しい。そこで、複数のデバイスを系統的に組み合わせることにより、インテグラル3D映像の広視域化および高品質化を行う研究が盛んに行われてきた^{5)~10)}。複数の表示デバイスを用

いることは、複数台分の画素を合わせて用いることができるため、3次元映像の性能を確実に向上させることができるが、システムが複雑になったり、装置全体の奥行きが大きくなったりするため、実用化には多くの課題を抱えている。

そこで、われわれはインテグラル3D方式に視点追従技術を組み合わせた表示システムについて、研究開発を行ってきた。3次元映像システムにおいて、視点追従技術を適用することは、観察者の視点に合わせて映像を提示し、限りある画素を有効に使うことができるため、高性能化に適している。また、視点追従技術は、ウェブカメラやデブスカメラなどのカメラを用いてシステム全体としてシンプルかつコンパクトに構成でき、装置のコストもそれほど高くないため、将来の実用化技術として、とても有用であると言える。

これまで、インテグラル3D方式と視点追従技術を組み合わせた研究はいくつか報告されている^{11)~13)}。これらは視点追従技術を使うことにより視域の拡大を実現した。ところが、レンズアレーの設計による光学視域が広く光線密度が低い場合、映像品質は低いままである。そこで、われわれは視点追従技術と焦点距離の長いレンズアレーを組み合わせて、効率よくインテグラル3D映像表示を広視域化および高品質化するシステムを提案する。従来設計と提案設計の試作装置を用いて比較実験を行い、視域および映像品質の向上を確認する。また、インテグラル3D映像は観察者が光学視域から外れることで映像が不連続になる現象が発生する。これにより光学視域の周辺部では多重像(クロストーク)が発生する。そこで、観察者が動くことで発生するクロストークを抑えるために、視点追従表示に適した

2020年8月28日受付, 2020年11月11日採録

[†] NHK 放送技術研究所

(〒157-8510 世田谷区砧1-10-11, TEL 03-5494-3327)

^{††} 東京大学

(〒113-8656 文京区本郷7-3-1, TEL 03-5841-6781)

(a) 従来設計 (視点追従なし)

(b) 提案設計 (視点追従あり)

図1 インテグラル3D映像表示システム

視域形成およびレンズアレー配列を提案する。

2. 提案システム

2.1 システム構成

提案システムは、瞳位置検出装置、要素画像群高速生成装置、ディスプレイおよびレンズアレーで構成される(図1(b))。瞳位置検出装置にはウェブカメラやデプスカメラを用いることができる。まず、瞳位置検出装置を用いて観察者の顔が含まれた映像を取得する。その映像を解析して、観察者の3次元的な両眼の位置を推定する。次に、瞳位置に応じた要素画像群を生成する。最後に、生成した要素画像群をレンズアレーを取り付けたディスプレイに表示する。上記の処理を毎フレームごとに行うことによって、観察者の瞳位置に応じた視域を形成でき、広視域かつ高品質なインテグラル3D映像を表示することができる。

2.2 視点追従技術による広視域化

従来設計のインテグラル3D表示においては、ディスプレイに表示する要素画像群とそれに対応するレンズアレーによって視域が形成される(図1(a))。光学設計において、要素画像のピッチ e と要素レンズの焦点距離 f によって決まる視域を光学視域、その角度 θ_{OVA} を光学視域角と呼び、次式で表される。

$$\theta_{OVA} = 2\arctan\left(\frac{e}{2f}\right) \quad (1)$$

要素画像の位置が静的な場合は、光学視域も静的となる。そこで、提案システムでは瞳位置を検出する装置を用いて、観察者の目の位置を推定し、観察者の動きに合わせて要素画像を変更して光学視域を動的に制御することで視域角を拡大する(図1(b))。視点追従システムにより形成される広い視域をシステム視域、その角度 θ_{SVA} をシステム視域角と呼ぶ。視点追従が可能な範囲は、瞳位置検出装置のカメラの画角によって決まるため、広角のレンズを使うことにより、従来システムと比べて非常に広い範囲のシステム視域を形成することができる。

2.3 レンズアレーの光学設計による高品質化

従来設計では複数人が同時に見る設計になっているた

め、 28° 程度以上の視域が必要となり、そのため焦点距離が短いレンズアレーを使う必要があった。それにより、光線密度が小さくなり映像品質の低下を招いていた。そこで、観察者を個人に限定し、インテグラル3D映像の品質を向上させるシステムを提案する。長い焦点距離のレンズアレーを用いて光学視域を狭めることにより光線密度を高め、3次元映像の品質を向上させる(図1(b))。

光学視域を狭めることにより、どのように品質を向上させられるか具体的に説明する。インテグラル3D映像において、「要素レンズ数(3次元映像画素数)」、「奥行再現範囲」および「光学視域」の3要素はトレードオフの関係になっている⁴⁾。ここでは、要素レンズ数と奥行再現範囲の2要素を3次元映像の品質とみなす。例として、ディスプレイの画素ピッチ $72\mu\text{m}$ 、視距離 500mm とすると、レンズピッチ 0.5mm 、焦点距離 1.0mm (視域角 28°)の正方配列のレンズアレーを用いた場合、3次元映像の空間周波数特性は図2の青線で示される。レンズピッチは 0.5mm のままで焦点距離を 2.0mm (視域角 14°)にすると赤線のグラフになり、空間周波数 500cycles/rad と比較すると、奥行再現範囲が2倍に拡大する。また、レンズピッチを 0.25mm 、焦点距離

図2 レンズアレー設計に応じた空間周波数特性

を1.0 mm (視域角 14°) にすると緑線のグラフになり、空間周波数500 cycles/radにおける奥行再現範囲は変化しないが、要素レンズ数が水平・垂直ともに2倍になる。このように、レンズアレーの光学設計によって、向上させる要素を柔軟に振り分けることができる。

2.4 視点追従表示に適したレンズアレー配列

焦点距離の長いレンズアレーを用いることで光線密度を高めることができる一方、光学視域は狭くなる。光学視域が狭すぎる場合、観察者が高速に動くと、瞳位置推定のエラーやレンダリングの遅延の影響により、瞳が光学視域の境界を見ることが生じるクロストークが頻発する。光学視域に十分なマージンをもたせることにより、瞳位置推定のエラーやレンダリングの遅延を吸収することができ、クロストークの発生が少ない頑健なシステムを構築することができる。

そこで、本システムに適した光学視域を形成するためのレンズアレーの配列を提案する。インテグラル3D映像において、要素画像と光学視域のアスペクト比は同じになるため、レンズアレーの配列と対応させる要素画像の形状を変化させることにより、光学視域の水平・垂直の比率を適宜変更することができる¹⁴⁾。この原理を応用することで、視点追従に適した低クロストークの視域を形成することができる。

人の目が水平に並んでいることを考慮すると、光学視域の形状は横長であることが望ましい。そこで、図3のように、ハニカム構造のレンズアレーを用いる場合を考える。レンズアレーの回転が 0° の時は、要素レンズと要素画像の関係性は図3(a)のように表されるので、光学視域のアスペクト比は $2:\sqrt{3}$ (水平:垂直) になる。レンズアレーを 30° 回転させると、図3(b)のように要素画像を配列することができ、光学視域のアスペクト比は $2:\sqrt{3}:1$ (水平:垂直) となる。したがって、水平方向に光学視域を拡大することができ、観察者の動きによるクロストークの少ない光学視域を形成することができる。

2.5 瞳位置に応じた要素画像群の高速生成

観察者の瞳位置に応じて光学視域を制御するために、毎フレーム要素画像群を生成し、ディスプレイの表示を更新する。コンピュータグラフィックスの技術を用いた要素画像群の高速生成手法として、さまざまな方向からの多視点

図3 ハニカム構造レンズアレーの要素レンズと要素画像の配列

映像を撮影して、それらの画素情報をGPU (Graphics Processing Unit) による並列処理でマッピングする手法が提案されている¹⁵⁾。仮想空間上に3次元モデルを配置し、仮想カメラアレーによってさまざまな方向からの多視点画像を撮影する。この時、それぞれのカメラは、投影方向が仮想レンズアレーの中心を向くように設定して撮影を行う。取得した多視点画像の画素情報を、レンズアレーとディスプレイの仕様に応じてマッピングすることによって要素画像群を生成する。

提案システムにおいては、ディスプレイに取り付けた瞳位置検出装置を用いて、観察者の瞳の3次元的位置を推定する。瞳位置に応じて要素画像群を変化させるために、仮想カメラアレーの中心が、形成される光学視域の中心にくるように、仮想カメラアレーを3次元的に移動させる。それによって、常に観察者の両眼の中心に光学視域の中心がくるように制御される。

図4にGPU実装による要素画像群生成のレンダリングパイプラインを示す。レンズアレーとディスプレイの仕様および瞳位置の3次元情報を元に、仮想カメラアレーの各カメラの3次元位置とプロジェクション行列を計算する。仮想カメラアレーの数が水平方向に M 台、垂直方向に N 台あるとき、モデルビュー行列とプロジェクション行列を $M \times N$ 回更新して多視点画像のレンダリングが行われる。多視点画像の情報はテクスチャ配列として各テクスチャメモリーに格納される。最終的にテクスチャ配列の画素情報をフラグメントシェーダによってマッピングして要素画像群を生成する。

レンズピッチと要素画像ピッチが同じ場合、各要素レンズで形成される光学視域は同じ形状で並列に形成され、それらが重なった領域が、画面全体でシームレスに3次元映像が見える視域になるが、その角度 θ_{F3D} は小さくなる(図5(a))。そこで、要素画像ピッチをわずかに拡大して、各要素レン

図4 要素画像群のレンダリングパイプライン

(a) レンズピッチと同じ場合 (b) 視距離に応じて拡大した場合

図5 要素画像のピッチによる視域の違い

ズで形成される視域の重なりが観察者の視距離で最大になるように要素画像を生成する(図5(b))。これを視域の最適化と呼ぶ¹¹⁾。視域を最適化の際の要素画像ピッチの拡大率 m は、レンズアレー面から観察者の瞳の距離(視距離)を L 、レンズアレーの焦点距離を f とすると、以下の式で表される。

$$m = \frac{L+f}{L} \quad (2)$$

3. 試作装置の構築

3.1 システム設計

瞳位置検出用のカメラ、瞳位置推定と要素画像群生成のためのコンピュータ、液晶ディスプレイおよびレンズアレーを用いて試作装置を構築した。提案設計の装置との比較実験を行うために、視点追従機能を持たない従来設計の装置も合わせて構築した。レンズアレーについて、従来設計ではレンズピッチ0.5 mm、焦点距離1.0 mmの正方構造のレンズアレーを用い、提案設計ではレンズピッチ0.5 mm、焦点距離2.0 mmのハニカム構造のレンズアレーを用いた。提案設計では、レンズアレーを30°回転させた配列で設置し、水平方向の光学視域を拡大した。

瞳位置の推定は、3次元ディスプレイの上部にカメラを取り付けて観察者を撮影し、顔検出プログラムを用いて行った。顔検出用のカメラは、フレームレートが60 fps (frames per second)、解像度が640×360画素、レンズの画角が78°のカメラを用いた。顔器官の検出にはオープンソースの機械学習ライブラリーであるDlibを用いた。取得した顔器官の座標を元に、PnP (Perspective-n-Points) 問題を解くことにより、顔の向きを推定し、両眼の3次元位置を導出した。PnP問題を解く際、瞳孔間距離を64 mmとした。実測値との比較において、推定誤差はXYZ方向すべてにおいて10 mm以下に抑えることができた。瞳の3次元的位置の取得により、仮想カメラアレーはXY平面上だけ

図6 コンパクトな構成の試作装置

ではなく、Z方向(奥行方向)にも動くことが可能で、それにより人が前後に動いても光学視域を最適化して表示することを可能にした。

Intel Core i7-9750 H 2.60 GHzのCPU、16 GBのメモリー、NVIDIA GeForce RTX2070 MAX-Qのグラフィックボードを搭載したコンピュータを用いて、要素画像群のリアルタイム生成を行った。約260万のポリゴン数のシーンにおいて、多視点画像撮影用の仮想カメラ台数が水平方向16台、垂直方向4台のとき、瞳位置推定の計算も含めて要素画像群の生成速度は約33.5 fpsであり、リアルタイムに瞳位置に応じた要素画像群を生成することができた。要素画像群生成プログラムの実装のためのソフトウェアとしてUnityを用いた。毎フレーム要素画像群を変更しているため、静止画のシーンだけでなく動画のシーンにおいても、自然に視点追従表示を行うことができる。

液晶ディスプレイには、画素ピッチが72 μm、画面サイズが12.5 inchで、4K解像度のものを用いた。厚さ9 mmと薄型で、重さ510 gと軽量であるため、直接ディスプレイを手に持ち3次元映像を見ることができる(図6)。また、要素画像群生成用コンピュータにノート型PCを用いたので、非常にコンパクトな構成を実現した。

3.2 3次元モデルの制作

4D View Solutions社(フランス)が開発・製造するボリュームメトリック・ビデオ・キャプチャシステム(4DViews)を用いて、動きのある3次元モデルデータを制作した¹⁶⁾。4Dviewsは、同期した32台のカメラを周囲に配置した専用のスタジオで撮影を行い、人の顔の凹凸や衣服のシワなどの複雑なテクスチャにおいても、高い再現性のある3次元モデルを生成することができる。撮影可能エリアは、スタジオの中心の直径約3 mの円形のエリアとなっており、約2.4 mの高さまでの被写体を撮影することができる。図7に動画シーンのインテグラル3D映像の表示例を示す。サッカーのリフティングの様子を3次元データ化してUnityに読み込ませて、視点追従型インテグラル3D映像

図7 動画シーンのインテグラル3D映像

表示を行った。リアルタイムで瞳位置に応じた要素画像群のレンダリングを行うことにより、滑らかな動きの動画シーンのインテグラル3D映像表示を実現できた。

4. 視域の拡大および映像品質の改善

表1に、従来設計、提案設計において視点追従しない場合および視点追従する場合の視域角の比較を示す。従来設計はレンズピッチ0.5mm、焦点距離1.0mmの正方構造(0°回転)のレンズアレーを用いたため、水平・垂直方向ともに28.2°の視域であった。従来設計は視点追従を行わないため視域が静的である。一方、提案設計はレンズピッチ0.5mm、焦点距離2.0mmのハニカム構造のレンズアレーを30°回転して用いたため、視点追従を行わない場合の視域は、水平方向24.4°、垂直方向7.2°であった。そして、視点追従を行うことによって水平方向81.4°、垂直方向47.6°に視域が拡大した。これは、従来設計と比較すると、水平方向は2.9倍、垂直方向は1.7倍になり、提案設計の視点追従なしの時と比較すると、水平方向は3.3倍、垂直方向は6.6倍になった。図8に、提案設計の試作装置において視点追従を行った場合の視域について、上下左右の端から撮影した3次元映像の様子を示す。視点追従による視域は使用した瞳位置推定用のカメラの画角によって決まる。今回用いたカメラの画角は78°であった。提案手法では、より広角なカメラを用いて視点追従することにより、さらに視域を拡大することが可能である。試作装置では、球面レンズアレーを用いたため、画面正面から大きく離れた視点位置では収差による表示性能の低下が生じたが、非球面レンズアレーや複合レンズアレーを用いることで収差の影響を低減できると考えられる。

図9に従来設計と提案設計によるインテグラル3D映像を拡大した様子を示す。女性モデルの右手の部分と雲の背景画像はレンズアレー面からそれぞれ手前と奥に約40～50mm離れた奥行位置に表示している。従来設計においてレンズアレー面から離れた像はぼやけて劣化しているのがわかる。一方、提案設計においてはレンズアレー面から離れた像に従来設計ほどの劣化は見られず高品質の映像が表示

表1 視域角の比較

	水平視域角	垂直視域角
従来設計	28.2°	28.2°
提案設計（視点追従なし）	24.4°	7.2°
提案設計（視点追従あり）	81.4°	47.6°

図8 視域の端から見た時の3次元映像(提案設計)

(a) 従来設計 (b) 提案設計

図9 映像品質の比較

できている。このように、焦点距離が従来設計の2倍のレンズアレーを用いたことにより、光線密度が水平・垂直方向ともに2倍となり、映像品質が向上したことを確認した。

5. む す び

本論文では、視点追従技術と従来設計より焦点距離の長いレンズアレーを用いてインテグラル3D映像の視域および品質を向上する手法を提案した。観察者の瞳位置に応じた要素画像群をリアルタイムに生成することで、光学視域を動的に制御するシステムを構築した。従来設計と提案設計の試作装置を構築し、比較実験を行った結果、視点追従技術により視域が拡大し、従来設計より焦点距離の長いレンズアレーにより映像品質が向上した。このように、提案システムは、視域と映像品質をバランスよく改善できる方

法であり、装置の構成もシンプルであるため、将来の個人視聴向け3次元ディスプレイとして実用化が期待できる。今後は、さらなる映像品質の向上を目指すとともに、スマートフォンやタブレットのような携帯型端末での3次元映像サービスの実用化に向けて、研究開発を進めていく。

〔文 献〕

- 1) M.G. Lippmann: "Épreuves, réversibles donnant la sensation du relief", J. Phys., 7, 1, pp.821-825 (1908)
- 2) S. Yano, M. Emoto and T. Mitsunashi: "Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images", Displays, 25, 4, pp.141-150 (2004)
- 3) Y. Kim, J. Kim, K. Hong, H.K. Yang, J.H. Jung, H. Choi, S.W. Min, J.M. Seo, J.M. Hwang and B. Lee: "Accommodative response of integral imaging in near distance", J. Disp. Tech., 8, 2, pp.70-78 (2012)
- 4) H. Hoshino, F. Okano and I. Yuyama: "Analysis of resolution limitation of integral photography", J. Opt. Soc. Am. A, 15, 8, pp.2059-2065 (1998)
- 5) H. Liao, M. Iwahara, N. Hata and T. Dohi: "High-quality integral videography using a multiprojector", Opt. Exp., 12, 6, pp.1067-1076 (2004)
- 6) N. Okaichi, M. Miura, J. Arai, M. Kawakita and T. Mishina: "Integral 3D display using multiple LCD panels and multi-image combining optical system", Opt. Exp., 25, 3, pp.2805-2817 (2017)
- 7) N. Okaichi, M. Miura, H. Sasaki, H. Watanabe, J. Arai, M. Kawakita and T. Mishina: "Continuous combination of viewing zones in integral three-dimensional display using multiple projectors", Opt. Eng., 57, 6, 061611 (2018)
- 8) H. Sasaki, N. Okaichi, H. Watanabe, M. Kano, M. Miura, M. Kawakita and T. Mishina: "Color moiré reduction and resolution enhancement of flat-panel integral three-dimensional display", Opt. Exp., 27, 6, pp.8488-8503 (2019)
- 9) N. Okaichi, M. Kawakita, H. Sasaki, H. Watanabe and T. Mishina: "High-quality direct-view display combining multiple integral 3D images", J. Soc. Inf. Disp., 27, 1, pp.41-52 (2019)
- 10) H. Watanabe, N. Okaichi, H. Sasaki and M. Kawakita: "Pixel-density and viewing-angle enhanced integral 3D display with parallel projection of multiple UHD elemental images", Opt. Exp., 28, 17, pp.24731-24746 (2020)
- 11) G. Park, J. Hong, Y. Kim and B. Lee: "Enhancement of viewing angle and viewing distance in integral imaging by head tracking", in Proc. Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, DWB27 (2009)
- 12) G. Park, J.H. Jung, K. Hong, Y. Kim, Y.H. Kim, S.W. Min and B. Lee: "Multi-viewer tracking integral imaging system and its viewing zone analysis", Opt. Exp., 17, 20, pp.17895-17908 (2009)

- 13) Z.-L. Xiong, Q.-H. Wang, S.-L. Li, H.-D. Deng and C.-C. Ji: "Partially-overlapped viewing zone based integral imaging system with super wide viewing angle", Opt. Exp., 22, 19, pp.22268-22277 (2014)
- 14) M. Miura, J. Arai, T. Mishina, M. Okui and F. Okano: "Integral imaging system with enlarged horizontal viewing angle", in Proc. SPIE, Vol.8384, 838400 (2012)
- 15) S.-W. Min, K.S. Park, B. Lee, Y. Cho and M. Hahn: "Enhanced image mapping algorithm for computer-generated integral imaging system", Jpn.J. Appl. Phys., 45, 28, L744-L747 (2006)
- 16) 4D View Solutions: 4DViews, <https://www.4dviews.com/>

おかいち なおと
岡市 直人 2008年、東京大学大学院新領域創成科学研究科修士課程修了。同年、NHKに入局。山口放送局を経て、2012年より、NHK放送技術研究所にて、3次元映像システムに関する研究に従事。正会員。

ささき ひさあき
佐々木久幸 2001年、筑波大学大学院工学研究科構造工学専攻修士学位取得。同年、NHKに入局。秋田放送局を経て、2006年より、NHK放送技術研究所に勤務。2012年～2016年、情報通信研究機構に転出。2018年、東北大学大学院情報科学研究科博士学位取得。ライトフィールドやホログラフィなどの3次元映像の研究に従事。現在、空間表現メディア研究部主任研究員。博士(情報科学)。正会員。

かのう まさひろ
加納 正規 2009年、上智大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年、NHKに入局。秋田放送局を経て、2013年より、NHK放送技術研究所にて、3次元映像処理に関する研究に従事。正会員。

かわきた まこと
河北 真宏 1990年、九州大学大学院総合理工学研究科修士課程修了。同年、NHKに入局。鹿児島放送局を経て、1993年より、NHK放送技術研究所にて、液晶デバイスや空間光変調素子、3次元映像システムなどに関する研究に従事。現在、空間表現メディア研究部上級研究員。博士(工学)。正会員。

なまむら たけし
苗村 健 1997年、東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程修了。米国スタンフォード大学客員助教授(日本学術振興会海外特別研究員)を経て、2002年、東京大学大学院情報学環助教授。同情報理工学系研究科電子情報学専攻准教授を経て、2013年、同情報学環教授となり、現在に至る。メディア+コンテンツ、実写に基づく映像合成、複合現実感、実世界指向情報環境、アート&エンタテインメントなどの研究に従事。博士(工学)。正会員。