

## 計算機合成イメージホログラムによる 3 次元映像の凹面鏡による空中投影 Aerial Projection of Three-Dimensional Image Reconstructed from Computer-Generated Image Hologram by Concave Mirrors

川島 徹也<sup>†</sup>  
Tetsuya Kawashima

鈴木 啓介<sup>†</sup>  
Keisuke Suzuki

角江 崇<sup>†</sup>  
Takashi Kakue

下馬場 朋禄<sup>†</sup>  
Tomoyoshi Shimobaba

伊藤 智義<sup>†</sup>  
Tomoyoshi Ito

### 1. はじめに

近年普及している 3D テレビ等の 3 次元映像メディアは、主に両眼視差を利用した擬似的な 3 次元映像技術に基づいたものである。このような映像は視点移動に対する映像の変化がなく、左右の目に異なる情報が与えられるため鑑賞者に負担がかかる。これに代わる技術にホログラフィがある。これは、光の干渉・回折を利用して立体映像をホログラムと呼ばれる媒体に記録・再生する技術であり、鑑賞者の眼に負担がかからない。ホログラムの作成過程は、コンピュータ上でシミュレートすることで電子化することができる。このような手法で作成したホログラムを、計算機合成ホログラム (Computer Generated Hologram: CGH) と呼ぶ。

ホログラフィの他に注目を集める映像技術に、空中投影技術がある。現在主に使用されている空中投影は、コンピュータ上の 3 次元モデルで作成された映像を透過型ディスプレイに投影するというもので、投影映像は二次元映像であり横から見ることはできない。ホログラフィは原理的に 3 次元像を空中投影できるが、再生用デバイスの性能不足により得られる 3 次元映像の可視領域 (以下、視域と呼ぶ) が狭く、全周観察は不可能である。ゆえに、3 次元映像の空中投影は、映像技術研究の課題となっている。

3 次元映像の空中投影技術は、既にいくつかの手法が提案されている。NICT の「fVisiOn」は、数十台のプロジェクタを用いてテーブル上に 3 次元映像を投影するものであり、カラー化及び動画像を投影可能である[1]。Microsoft Research の「Vermeer」は、立体像表現装置内に映像投影用スクリーンを傾けて設置し、これをモータで回転させながらプロジェクタで映像を投影するもので、Kinect を用いたタッチディスプレイを実現している[2]。しかし、これらはいずれもプロジェクタで映像を投影するという原理上、装置の規模が大きくなるという問題がある。

そこで本研究では CGH を用いたプロジェクタ不要の空中投影手法の実装を目指し、図 1.1 に示す立体像表現装置を用いることにした。これは、2 枚の凹面鏡の一方に穴を開け、向かい合わせに組み合わせた装置で、装置内に物体を置くと上面の穴付近にその物体の立体像が空中投影される。そこで、装置内に液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD) を設置し、CGH を表示することで 3 次元映像を空中投影できると考えた。この手法では、モータによる回転のような動作が不要であり、CGH を表示するだけで空中投影できるため、投影映像の調整や変更を全てコン



図 1.1 立体像表現装置と立体像 (サイコロ)

ピュータで行うことができる。今回は、この手法によって 3 次元映像を空中投影可能であることを検証したので報告する。

### 2. 計算機合成ホログラム(CGH)

ホログラムは図 2.1 のように、レーザー光を被写体に当てて得た物体光と、直接記録材料に当てた参照光の干渉縞を記録したものであり[3]、参照光と同等の光を照射することで、記録物体のあった位置に再生像が生じる (図 2.2)。ホログラムは明るさ情報の振幅だけでなく方向情報の位相も記録できるため、記録情報を 3 次元映像として再生できる。CGH は、被写体を点群 (以下、物体点と呼ぶ) として仮想し、これらの光伝搬をコンピュータ上でシミュレートすることで生成したホログラムである。

図 2.3 に CGH の再生光学系の概略図を示す。ビームエキスパンダとピンホールにレーザー光を入射して広げ、更にこれをコリメータレンズに通すことでコヒーレント光とする。この光をハーフミラーで反射し CGH を表示した LCD に照射することで、LCD 表面で回折・反射された光が 3 次元情報を持つ再生光となる。再生光はハーフミラーを透過し、シミュレート時に指定した位置に再生像が生成される。

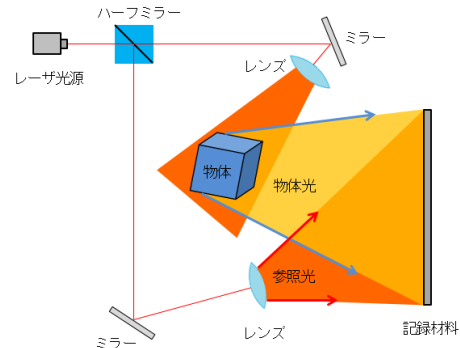


図 2.1 ホログラムへの記録

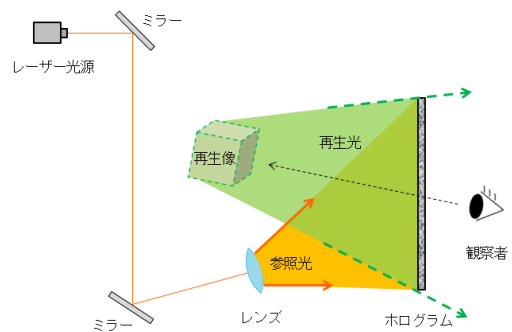


図 2.2 ホログラムからの再生

<sup>†</sup> 千葉大学大学院工学研究科 Graduated School of Engineering, Chiba University

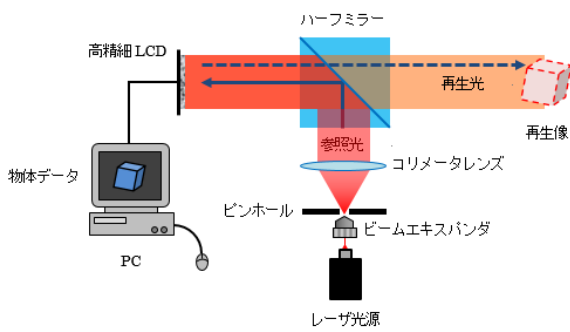


図 2.3 CGH 再生光学系の概略図

2.1 計算機合成イメージホログラム(CGIH)

図 2.4 のように、レンズを用いて記録材料面上に記録物体の実像を結像させ、参照光を照射することで作られるホログラムをイメージホログラムと呼ぶ。イメージホログラムは再生像がホログラム面近傍に生じるため、参照光の波長が異なることによる再生位置のずれが小さく、白色光でも鮮明な再生像が得られる[4]。この原理を用いて作成した CGH は、特に計算機合成イメージホログラム (Computer Generated Image Hologram: CGIH) と呼ばれる。

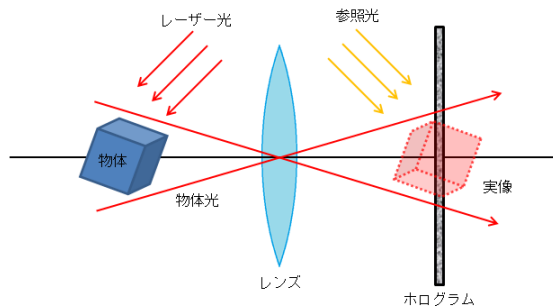


図 2.4 イメージホログラムの記録

図 2.5 に CGIH の再生光学系の概略図を示す。光源から出た光は、コリメータレンズを通ることで平行光束となる。これをハーフミラーで反射し、CGIH を表示した LCD を照射することで、LCD 付近に再生像が生じる。観察者はこれをハーフミラー越しに見ることで、3次元像を観察できる。図 2.6 に CGIH を、図 2.7 にその再生像を示す。再生像が倒立しているのは、立体像表現装置で投影すると立体像が倒立してしまうため、予め倒立させて作成したためである。

CGIH は、イメージホログラム同様白色光で再生可能ということの他に、通常の CGH に比べ計算量が少ないという特徴がある。これは、図 2.8 のように 1 物体点からその計算領域の外周を見上げる角度  $\theta$  が、参照光の波長  $\lambda$ 、ホログラムデータ画像の画素ピッチ  $p$  を用いて式(1)で表されるように、物体点の位置によって変化しないため、物体点がホログラム面に近いほど計算領域が小さくなるためである。

$$\theta = \frac{\lambda}{2p} \quad (1)$$

しかし、CGIH は再生像の視域が狭く、また、ホログラム面から離れた位置から観察する必要があるため、浮き上がって見えづらいという問題がある。そこで本研究では、

光学系を工夫することで CGIH の再生像をより立体的に見えるよう空中投影することを目指した。

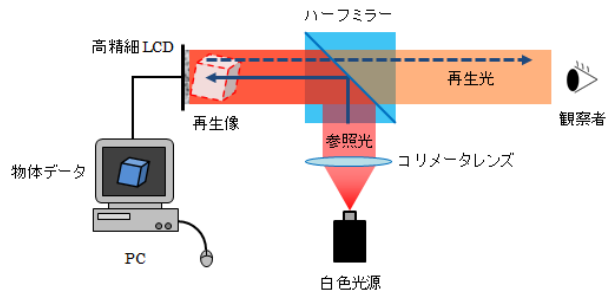


図 2.5 CGIH 再生光学系の概略図



図 2.6 CGIH (倒立した恐竜)

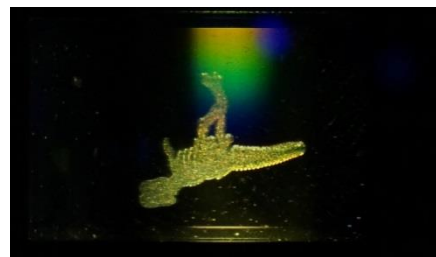


図 2.7 CGIH の再生像 (倒立した恐竜)

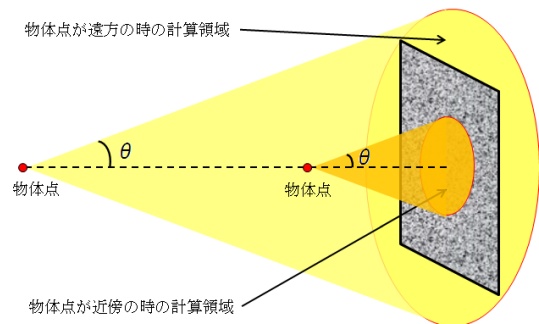


図 2.8 物体点の位置と計算領域の関係

3.3 次元映像の空中投影

3.1 基本原理

図 3.1 に立体像表現装置が立体像を投影する原理図を示す。明るい場所で物体を立体像表現装置の内部下面の中央に置くと、上面の穴から入った外部の光が物体に当たり散乱する。上方に散乱した光は上の凹面鏡の焦点付近から出た光であるから、上の凹面鏡で反射してほぼ真下に向かって直進する。この光は下の凹面鏡の光軸とほぼ平行であるから、下の凹面鏡で再び反射して焦点、すなわち上面の穴

に向かって直進する。これによって各散乱光が再び上面の穴付近に集まり、水平方向が反転した物体の虚像が生じる。

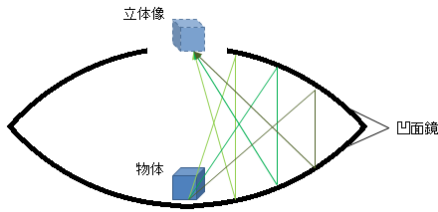


図 3.1 立体像表現装置の原理

### 3.2 空中投影の光学系

図 3.2 に CGIH の再生像を空中投影する光学系の概略図を、図 3.3 に実際の光学系を示す。この光学系は、図 2.3 の光学系のハーフミラーと LCD の間に、両面に穴の開いた立体像表現装置を設置したものである。ゆえに、図 2.3 と同様の原理で生成された再生像が立体像表現装置の LCD を設置した凹面鏡の穴付近に生成されるため、もう一方の穴付近にその立体像が生じる。これにより、観察者は立体像表現装置に物体を入れた時と同様の位置から装置を見ることで、再生像が倒立した立体像を観察できる。図 3.3 の光学系で実際に立体像を投影する際には、まず、立体像表現装置によって再生像が倒立して表示されるため LCD に倒立させた CGIH を表示させておく。次にハーフミラー越しに CGIH の再生像が正しく再生されていることを確認する。その後で立体像表現装置の位置を調節する。

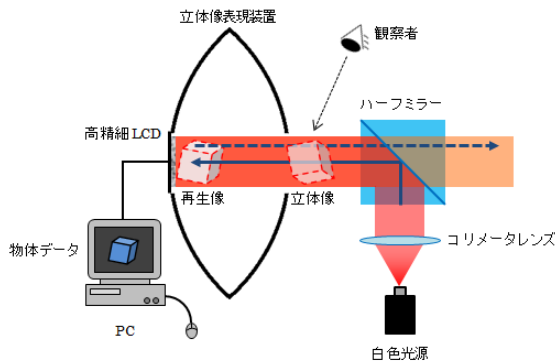


図 3.2 空中投影光学系の概略図

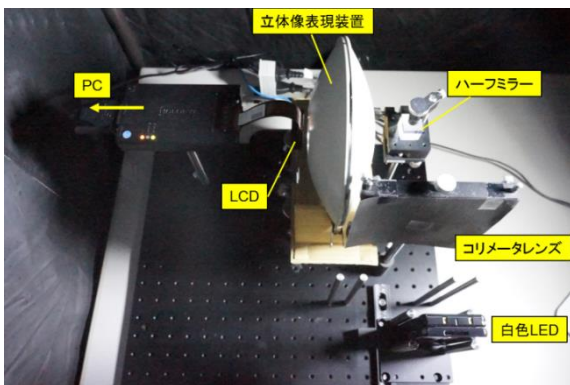


図 3.3 空中投影光学系

### 3.3 立体像の検証

CGIH の再生像はホログラム面付近に再生されるため、白色光源を用いるとホログラムと再生像が重なって見えてしまう。ゆえに、立体像が正しく投影できているか判別しづらいため、検証には単色光源 (グリーンレーザ) を用いた。この結果を図 3.4 に示す。この状態では、LCD に表示された CGIH (再生像ではなくホログラムそのもの) がそのまま投影されてしまっている。図 3.4 の長方形の光は参照光が LCD の表面で反射した光であり、恐竜の影に見える光は図 2.7 の CGIH で反射した光である。これは、CGIH の再生像の視域が 5°程度と狭く、再生光が上面の穴から漏れて凹面鏡に当たらないためである。従って、以下の 2 点を実施することにより、再生光を凹面鏡に効率よく当てることを考えた。

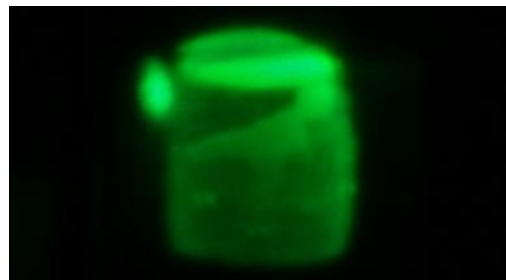


図 3.4 単色光源による投影結果

- ① 光源の入射位置及び LCD の角度の変更

図 3.5 に示すように光源の入射位置と LCD の角度を調節し、光源からの光を凹面鏡で反射して間接的に CGIH に当てることにより、再生光が凹面鏡に当たるようにする。

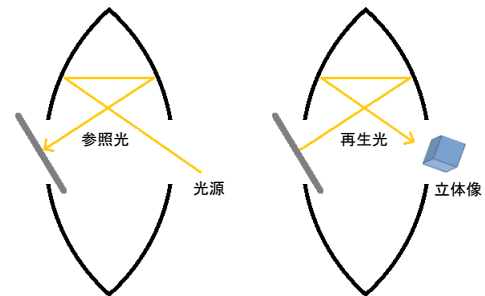


図 3.5 入射光と LCD を傾けることによる効果

- ② LCD を設置した方の凹面鏡の穴を小さくする

LCD 側の凹面鏡の穴の口径が大きいと、ホログラムから出た再生光の一部が立体像表現装置の外部に漏れたり、ホログラムが表示されていない部分に照射されるため、穴の口径が小さい凹面鏡に交換する (図 3.6s) .

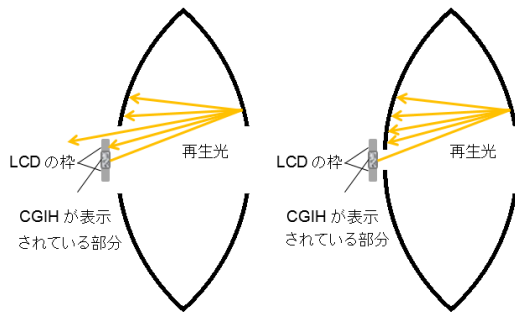


図 3.6 凹面鏡の穴の違いによる再生光の効率の変化

#### 4. 実験環境

本研究で用いた位相変調型高精細 LCD の仕様を表 1 及び図 4.1 に、立体像表現装置の仕様を表 2 及び図 4.2 に示す。

表 1 位相変調型高精細 LCD の仕様

メーカー	HOLOEYE
位相レベル	8ビットグレースケール
解像度	1920 × 1080 ピクセル
画素ピッチ	8.0[ $\mu\text{m}$ ]
フレームレート	60[Hz]

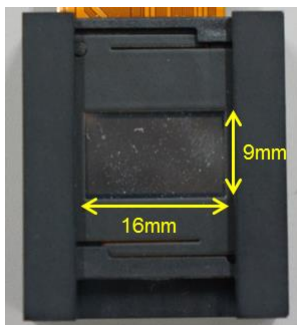


図 4.1 位相変調型高精細 LCD

表 2 立体像表現装置の仕様

メーカー	株式会社島津理化
各種寸法	直径 210[mm] 高さ 110[mm] 開口部直径 80[mm]
鏡部	メッキミラー



図 4.2 使用した立体像表現装置

#### 5. 検証結果

今回は、凹面鏡の光軸に対し光源の照射方向を  $45^\circ$  傾け、また、LCD を設置した凹面鏡の開口部の直径を 13[mm] に変えて実験を行った。その結果を図 4.3 に示す。赤線で囲っている部分が、CGIH の再生像が投影されたものである。投影像がぼやけているのは、今回使用した凹面鏡がメッキミラーであるため、再生光が鏡の表面で散乱してしまっているためであると考えられる。ゆえに、凹面鏡をより精巧な鏡にする必要がある。また、投影像に重なるように映る明るい光は、参照光が LCD の表面でそのまま反射した直接光であり、これによって投影像が観察しづらくなっている。このため、直接光の除去が課題に挙げられる。

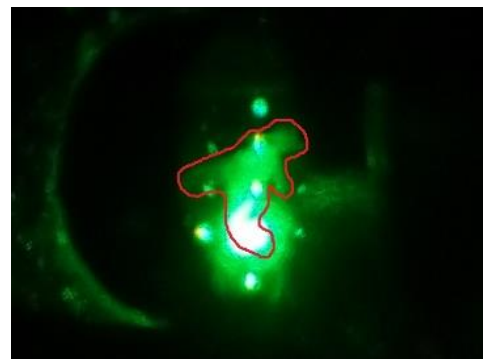


図 4.3 投影された立体像

#### 6. まとめ

本研究では、CGIH に立体像表現装置を組み合わせ、3 次元的な映像の空中投影を試みた。従来の CGIH ではプログラム面から離れた位置から観察する必要があり、浮き上がって見えづらいという問題があったが、立体像表現装置を用い、また、光源の入射位置及び LCD の角度を調節することにより、3 次元映像の空中投影に成功した。しかし、参照光が LCD で反射した光によって再生像が観察しづらくなるという問題が残った。

今後の展望としては、計算量が少ないという CGIH の特徴を活かした動画化や、光源を時分割で高速に切り替えることによるカラー化、反射型 LCD の代わりに透過型の LCD を用いることによる光学系の小型化が挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 25240015 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] 吉田俊介, 矢野澄男, 安藤広志, 『fVisiOn—全周囲より観察可能なテーブル型裸眼立体ディスプレイ—』, 情報通信研究機構季報 56(1・2) pp.67-77 (2010)
- [2] Steve Hodges, Shahram Izadi, David Kim, “Vermeer”, <http://research.microsoft.com/en-us/projects/vermeer.html>, Microsoft Research (2011)
- [3] 久保田敏弘, 『ホログラフィ入門—原理と実際—』, 朝倉書店 (2010)
- [4] 宮原理, 山口健, 吉川浩, 『フリンジプリンタを用いた計算機合成イメージホログラム』, 日本大学理工学部 学術講演会論文集 (2011)
- [5] 尾上守夫, 池内克史, 羽倉弘之, 『3 次元映像ハンドブック』, 朝倉書店 (2006)
- [6] 大越孝敬 著, 電子通信学会 編, 『ホログラフィ』, 電子通信学会 (1977)