

ホログラフィックプロジェクタを用いたリアルタイム三次元映像の実像と虚像の空中表示 Aerial display of real and imaginary images of real-time three-dimensional video using a holographic projector

内田 十内[†] 成島 佑華[†] 小田 好洸[‡] 森口 嘉軌[†] 高田 直樹^{*}
Junai Uchida Yuuka Narishima Yoshihiro Oda Yoshiki Moriguchi Naoki Takada

1. はじめに

ホログラフィは、三次元物体から発せられる光（物体光）を二次元媒体に記録し、また、記録した二次元媒体に再生光を照射することで、元の物体光を忠実に再生することができる技術である。元の物体光を忠実に再生するため視覚疲労が生じず、様々な角度から眺めることができる。コンピュータで計算した計算機合成ホログラム(CGH: Computer-Generated Hologram)による電子化したホログラフィは“究極の三次元テレビ”になるものと考えられている。しかし、CGHの計算量は膨大であり、毎秒30枚のCGHをリアルタイム再生するためには高い演算能力を必要とする[1]。CGH計算は使用するデータ量に比べ、演算量が多く並列化に向いている。GPUを用いたCGH計算高速化に関する研究が報告されている[2,3]。

近年、新型コロナウイルス感染症が猛威を振るい、感染症予防対策のための非接触タイプの空中ディスプレイが注目を浴びている。再帰性透過光学素子を用いた空中ディスプレイ[4]や再帰反射材を用いた空中ディスプレイ(Aerial Image by Retro-reflection: AIRR)が提案されている[5]。

著者らは、ホログラフィックプロジェクタを用いたリアルタイムの三次元映像の空中表示を試みている[6]。本研究では、ホログラフィックプロジェクタを用いてリアルタイム三次元映像を立体スクリーンに投影して、その拡散光を用いることで、三次元の実像を空中に再生する。また、実像の投影と同時に、リアルタイム三次元映像をハーフミラー上部の立体スクリーンに投影し、その光をハーフミラーに反射させて虚像として空中表示する。

2. ホログラフィックプロジェクタ

2.1 計算機合成ホログラム

本研究では、CGH計算において点群で構成されたポイントクラウドモデルの三次元物体を用いる。再生する三次元物体の点の位置座標から物体点を点光源として考え、全ての点光源からの球面波からの重ね合わせにより、CGH上の光強度を求めることができる。ホログラム面上の点 $(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ における光の強度 $I(x_\alpha, y_\alpha, 0)$ はフレネル近似により次式となり、これによりCGHを計算する。

$$I(x_\alpha, y_\alpha, 0) \approx \sum_{j=1}^{N_p} A_j \exp \left(i \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{(x_\alpha - x_j)^2 + (y_\alpha - y_j)^2}{z_j} \right) \right) \quad (1)$$

[†] 高知大学大学院総合人間自然科学研究科 Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University

[‡] 高知大学理工学部 Faculty of Science and Technology, Kochi University

* 高知大学教育研究部自然科学系理工学部門 Research and Education Faculty, Natural Sciences Cluster, Science and Technology Unit, Kochi University

本研究では、式(1)の位相による位相CGHを用い、次式によって得られる。

$$\phi(x_\alpha, y_\alpha, 0) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{I(x_\alpha, y_\alpha, 0)\}}{\text{Re}\{I(x_\alpha, y_\alpha, 0)\}} \right) \quad (2)$$

ここで、三次元物体上の点 j の座標を (x_j, y_j) とした。 A_j は j 番目の物体点の光の強度を示す。 λ は三次元情報の記録に使用される参照光の波長である。なお、三次元物体の再生時に使用される再生光は、参照光と同じ波長の光を使用する。作成するホログラムの解像度を $H \times W$ とすると、計算量は $O(NHW)$ となり、膨大である。

2.2 ホログラフィックプロジェクタ

GPUによりCGH計算を行い、空間光変調器(SLM: Spatial Light Modulator)にCGHを表示する。CGHを表示したSLMに平行光を照射し、再生された実像を距離の離れたスクリーンに投影する。この装置をホログラフィックプロジェクタと呼ぶ。

図1に本稿で使用するホログラフィックプロジェクタの概略図を示す。再生照明光にレーザ光を使用し、対物レンズによって一点に収束させたのち、コリメータレンズによって平行光を作成する。平行光はハーフミラーを反射し、上記反射型のSLMに照射される。その後SLMから反射した回折光をスクリーンに照射することで三次元映像が再生される。

ホログラフィックプロジェクタは、計算によりCGHを変更することで、再生像の距離、大きさ、形等を、レンズを用いずに自在に変更できる。1台のホログラフィックプロジェクタで距離や角度の異なる複数のスクリーンに焦点のあった映像を投影することも可能である。さらに、図1のように、立体スクリーンへの三次元映像の投影も可能である。

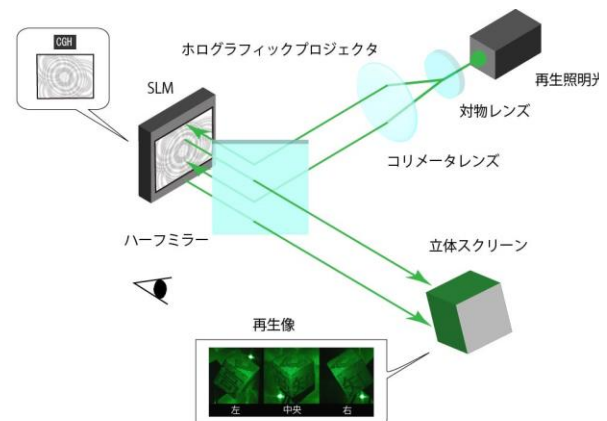


図1 ホログラフィックプロジェクタの概略図

3. 三次元空中投影装置

図 2 にホログラフィックプロジェクタを用いた三次元映像の空中投影装置の概略図を示す。三次元映像が立体スクリーンに投影され、透過拡散しながらハーフミラーを通過し、再起反射材に入射する。その光が再起反射され、ハーフミラーで反射されることでスクリーンから拡散された光が一点に集まることでスクリーンに再生された像と同じ像が空中に投影される。この空中像は実像で、ハーフミラーを軸としてスクリーンから面対称に投影され様々な角度から眺めることが可能である。それと同時に、SLM から投影された像の光の一部がスクリーンを通さずにハーフミラーを透過する。ハーフミラーを透過した光が立体スクリーンに投影される。その光がハーフミラーを反射し、観察者の目に入ることでハーフミラーの奥に立体像が視認される。これらの実像と虚像は裸眼で様々な角度から眺めることが可能である。

4. 結果

計算された位相型 CGH により、ホログラフィックプロジェクタで立体スクリーンに焦点のあった映像を投影した。ホログラフィックプロジェクタの SLM として HOLOEYE 社 GAEA-2-VIS-036 を用い、位相型 CGH の解像度は $3,840 \times 2,048$ とした。また、投影する三次元映像は最大 22,955 点からなる回転する立方体と地球と月のモデルを利用した。本稿で使用した PC を Table 1 に示す。

GPU で位相型 CGH の計算を行った。図 3 に空中表示装置を示し、図 4 に再生された空中像を示す。正面と左右から見る事ができる再生像が投影されている。観察者はさまざまな視点から空中像を見ることができ、視点を移動すると像の見える範囲が変わり、三次元像であることが確認できる。

5. まとめ

ホログラフィックプロジェクタを用いた三次元投影可能な空中ディスプレイを用いて、立体スクリーンに三次元映像を投影し、ハーフミラーの前方に実像を、ハーフミラーの奥に虚像を同時に空中表示することを試みた。解像度 $3,840 \times 2,048$ の CGH を用いて、最大 22,955 点からなる三次元映像を 30fps で投影することに成功した。

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費・基盤研究(C) (課題番号 21K11996)および競輪の補助によって行なわれた。

参考文献

- [1] T. Sugie, T. Akamatsu, T. Nishitsuji, R. Hirayama, N. Masuda, H. Nakayama, Y. Ichihashi, A. Shiraki, M. Oikawa, N. Takada, Y. Endo, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "High-performance parallel computing for next-generation holographic imaging", Nature Electronics, 1, pp.254–259 (2018).
- [2] H. Sannomiya, N. Takada, T. Sakaguchi, H. Nakayama, M. Oikawa, Y. Mori, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time electroholography using a single spatial light modulator and a cluster of graphics-processing units connected by a gigabit Ethernet network," Chinese Optics Letters, Vol.18, Issue 2, pp.020902-(2020).
- [3] H. Sannomiya, N. Takada, K. Suzuki, T. Sakaguchi, H. Nakayama, M. Oikawa, Y. Mori, T. Kakue, T. Shimobaba, T. Ito, "Real-time spatiotemporal division multiplexing electroholography for 1,200,000 object points using multiple-graphics processing unit cluster," Chinese Optics Letters, Vol.18, Issue 7, pp.070901-(2020).

- [4] M. Otsubo, "Optical imaging apparatus and optical imaging method using the same," U.S. Patent 8 702 252 B2, Apr. 22, 2014.
- [5] H. Yamamoto, Y. Tomiyama, and S. Suyama, "Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retroreflection," Optics Express 22, pp. 26919–26924 (2014).
- [6] J. Uchida, S. Wada, Y. Narishima, Y. Oda, Y. Moriguchi, N. Takada, The 29th International Display Workshops (IDW'22), 3Dp1-10L, 2022.

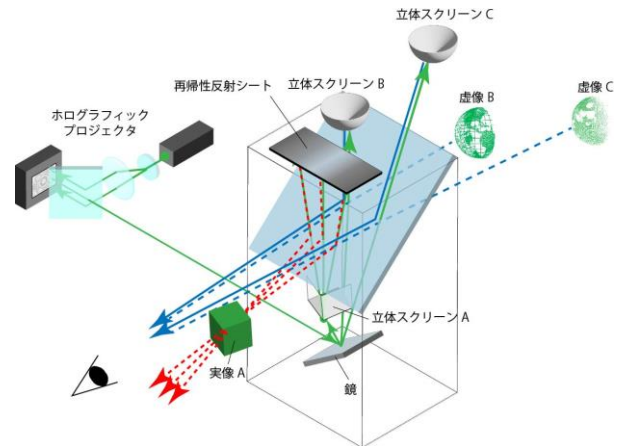


図 2 提案装置概略図

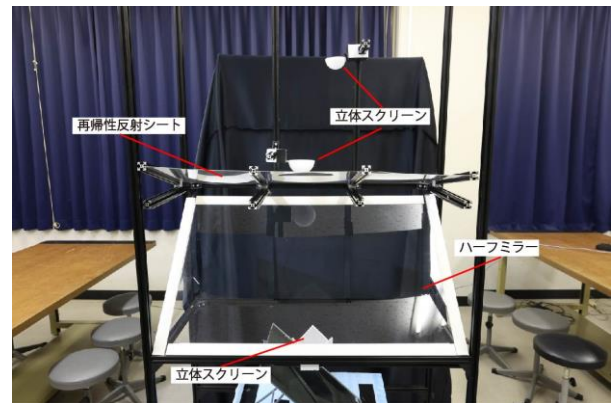


図 3 三次元空中表示装置

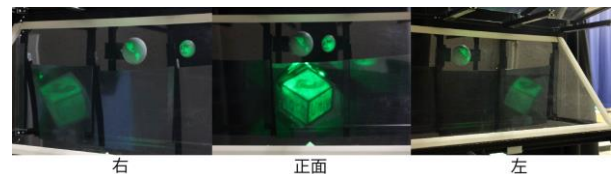


図 4 再生された空中像

Table 1 PC の仕様

GPU	Intel Core i7-4770 (Base clock: 3.40GHz)
Main memory	32GB
OS	Linux (Ubuntu 20.04.LTS)
Software	NVIDIA CUDA 12.0 SDK OpenGL
GPU	NVIDIA GeForce RTX 4090