2章 ホログラフィックプロジェクタ

長 浜 佑 樹[†](正会員), 下馬場 朋 禄[†](正会員), 角 江 崇[†](正会員), 伊 藤 智 義[†](正会員)

キーワード: ホログラフィ, プロジェクタ, 画像処理

1. まえがき

ホログラフィックプロジェクタ¹⁾とは, ホログラフィのレンズを用いずに光を制御できる特性を用いたプロジェクタである. ホログラフィックプロジェクタはズームレンズを用いることなく投影画像の拡大, 縮小が可能²⁾であり, 液晶ディスプレイ (LCD: Liquid Crystal Display) などの表示デバイスのサイズも小型であることから小型化が期待されている. また, レンズの収差の影響をなくすこともできる. さらに, レンズレスに光を制御可能であることや, ホログラムが多重記録可能であることから, 複数のスクリーンに対してそれぞれ異なる映像を投影するマルチプロジェクション³⁾や, 自由曲面や傾いた面のスクリーンに対して全面にフォーカスのあった映像の投影^{4)~6)}など, 既存のプロジェクタでは不可能であった映像投影が理論上可能とされている.

本稿では, ホログラフィックプロジェクタについて, その原理や既存のプロジェクタとの違いについて述べる. 続いて, ホログラフィックプロジェクタの実現へ向けた要素技術や技術的課題を紹介する.

2. ホログラフィックプロジェクタの映像投影の原理

ホログラフィックプロジェクタによる映像投影はホログラムの生成と再生の二つの工程に分けられる. ホログラムの生成は, スクリーン上にある原画像から出る光の波面の状態から, ホログラム上での光波の波面の状態を回折計算によって求めることで行う (図1 (a)). ここで生成したホログラムに参照光を照射すると, ホログラムが再生され, 生成時に決めたスクリーンの位置に原画像が投影される (図1 (b)).

ホログラフィックプロジェクタはズームレンズを用いる

図1 ホログラフィックプロジェクタに用いるホログラムの生成と再生の模式図

図2 回折計算前後のサンプリング間隔の変更による再生像の拡大

ことなく投影画像の拡大, 縮小が可能であるが, これは ARSS (Aliasing-Reduced Scaled and Shifted) フレネル回折⁷⁾とよばれる, フレネル回折⁸⁾を拡張した回折計算手法によって実現されている. ARSSフレネル回折は, 回折計算前後のサンプリング間隔, つまりは原画像とホログラムのピクセルの間隔を変更できる. 原画像のピクセル間隔をホログラムのものよりも大きく設定して計算することで, 図2のようにホログラムの大きさよりも大きな再生像を得ることができる. また, 回折計算は基本的に互いに平行な平面間でのみ可能であったが, 近年では非平行平面間での回折計算手法⁹⁾が提案されていることから, ホログラムとスクリーンが互いに平行でない場合においても映像投影¹⁰⁾が実際に可能になっている.

[†] 千葉大学 工学研究院

"Holographic Projector" by Yuki Nagahama, Tomoyoshi Shimobaba, Takashi Kakue and Tomoyoshi Ito (Graduate School of Engineering, Chiba University, Chiba)

図3 さまざまなプロジェクタの光学系の模式図

表1 プロジェクタの方式ごとの比較

	透過型液晶プロジェクタ	レーザ走査方式	ホログラフィックプロジェクタ
光学系のサイズ	大きい	小さい	小さい
同時に投影できる映像数	調整した距離に1映像	フォーカスフリーで1映像	複数
事前計算の必要	なし	なし	あり
その他		*小型化に有利	*多重記録が可能 *画素の欠陥に対する高い冗長性

3. 既存のプロジェクタとの違い

図3に既存のプロジェクタに採用されている光学系の例を示す¹¹⁾。

図3(a)は、透過型液晶ディスプレイと投影レンズを用いた、透過型液晶プロジェクタの光学系である。この光学系では、2次元の表示デバイスに表示した画像をズームレンズによって拡大することで画像を投影する。ズームレンズは一般的に、レンズの収差の影響を打ち消すために複数枚合わせて用いられる。そのため光学系が大きくなるという問題がある。また、同時にフォーカスを合わせることで投影距離は一つに限られる。

図3(b)は、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ミラーを用いた、レーザ走査方式のプロジェクタの光学系である。この光学系では、表示したい画像を1画素ごとに時分割して投影する。さらにその画素をMEMSミラーで高速に水平、垂直方向に走査することで画像を投影する。レーザ光源から出た光はレンズなどによって収束、拡散することなくスクリーンに入射される。そのため、投影距離にかかわらずフォーカスを合わせることができる。

図3(c)は、透過型液晶ディスプレイを用いたホログラフィックプロジェクタの光学系である。この光学系では、液晶ディスプレイにホログラムを表示し、ホログラムを再生することでスクリーンに映像を投影する。ホログラフィックプロジェクタは、レーザ光源とホログラムの表示

デバイスのみで光学系を構築できるため、小型化が期待できる。また、ホログラムは多重記録が可能であるため、複数の投影距離でフォーカスを合わせることが可能である。さらに、他のプロジェクタでは表示デバイスの画素の欠陥が画像の欠陥に直結するが、ホログラムでは、原画像の各画素の情報が全体に分散して記録されるため、表示デバイスの画素の一部に欠陥が生じたとしても原画像の画素の情報が完全に失われることはなく、画素の欠陥に対して冗長性が高いという特徴がある。

各プロジェクタの光学系のサイズ、同時に投影できる映像数、事前計算の必要について比較したものを表1にまとめる。表1をみると、現在のプロジェクタの方式の中では、レーザ走査方式が他の方式に比べ高い優位性を持っている。そのため、ホログラフィックプロジェクタを実用化させるためには、ホログラム生成のための事前計算の高速化などのほかに、ホログラフィの独自性を生かしたホログラフィックプロジェクタ独自の投影手法を検討していくことが課題となる。

4. 技術的課題と解決への取組み

4.1 再生像の画質

ホログラフィックプロジェクタの再生像の画質に関する課題の一つに、スペクルノイズによる画質の劣化があげられる。これは、ホログラムを生成するときに、原画像から出る光をホログラムに集めるために、ランダム位相とよ

図4 原画像に与える位相パターンによる光の進み方の違い

図5 GSアルゴリズムの計算手順

ばれる位相パターンを与えて拡散させていることに起因する。ランダム位相を与えられた光は図4 (a) に示すようにランダムに進むため、それらの光同士で不要な干渉が起こり、スペックルノイズが発生する。しかしながら、原画像にランダム位相を与えなかった場合、原画像から出る光は図4 (b) に示すようにまっすぐにしか進まないため、ホログラムの正面からずれた部分の原画像の情報はホログラムに記録されなくなってしまう。

そこで、不要な光の干渉を起こさずにホログラムへ光を集められるような位相のパターンを原画像に与えることでスペックルノイズを軽減する手法がいくつか提案されている。その一つがGS (Gerchberg-Saxton) アルゴリズム¹²⁾である。

図5にGSアルゴリズムの計算手順を示す。GSアルゴリズムでは、ある一定の拘束条件下で、スクリーン面とホログラム面の間の回折計算を繰り返すことで、スクリーン上で不要な光の干渉を起こさないようなホログラムへ最適化する。

また、ランダム位相とは異なる位相パターンを用いる手法として、ランダム位相フリー法¹³⁾という手法が提案され

図6 ホログラム生成手法ごとの再生像の違い

ている。ランダム位相フリー法では、図4 (c) に示すようにスクリーン上の原画像からホログラムを経由して収束する球面波の位相パターンを原画像に与えている。この位相パターンは光をランダムに散乱させることがないため、不要な光の干渉を防ぐことができる。

図6にランダム位相を用いて生成したホログラムと、GSアルゴリズムによるホログラム、そしてランダム位相法によるホログラムの再生像をそれぞれ示す。図6をみると、図6 (a) の全体にかかっているざらざらとしたスペックルノイズがGSアルゴリズムやランダム位相フリー法によって軽減されていることがわかる。

〔文 献〕

- 1) E. Buckley: "Holographic Laser Projection", J. Disp. Tech. **99**, 1-6 (2010)
- 2) T. Shimobaba, M. Makowski, T. Kakue, M. Oikawa, N. Okada, Y. Endo, R. Hirayama and T. Ito: "Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction", Opt. Express, **21**, 25285-25290 (2013)
- 3) Y. Nagahama, T. Shimobaba, T. Kawashima, T. Kakue and T. Ito: "Holographic multi-projection using the random phase-free method", Appl. Opt., **55**, 1118-1123 (2016)
- 4) T. Tommasi and B. Bianco: "Computer-generated holograms of tilted planes by a spatial frequency approach", J. Opt. Soc. Am. A., **10**, 299-305 (1993)
- 5) K. Yamamoto, Y. Ichihashi, T. Senoh, R. Oi and T. Kurita: "Calculating the Fresnel diffraction of light from a shifted and tilted plane", Opt. Express, **20**, 12949-12958 (2012)
- 6) S.D. Nicola, A. Finizio and G. Pierattini: "Angular spectrum method with correction of anamorphism for numerical reconstruction of digital holograms on tilted planes", Opt. Express, **13**, 9935-9940 (2005)
- 7) T. Shimobaba, T. Kakue, N. Okada, M. Oikawa, Y. Yamaguchi and T. Ito: "Aliasing-reduced Fresnel diffraction with scale and shift operations", J. Opt., **15**, 075302 (5pp) (2013)
- 8) J.W. Goodman, 尾崎義治・朝倉利光 (訳): "フーリエ光学 (第3版)", 森北出版 (2012)
- 9) K. Matsushima, H. Shimmel and F. Wyrowski: "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves", J. Opt. Soc. Am. A., **20**, 1755-1762 (2003)
- 10) 山口由美, 長浜佑樹, 川島徹也, 下馬場朋祿, 角江崇, 伊藤智義: "ホログラフィックプロジェクトによるマルチプロジェクションおよび画質改善," 映情学誌, **71**, J101-J105 (2017)
- 11) 黒田和男, 山本和久, 栗村直 (編): "解説レーザディスプレイ," オプトロニクス社 (2010)
- 12) R.W. Gerchberg and W.O. Saxton: "A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures", Optik, **35**, 237-246 (1972)
- 13) T. Shimobaba and T. Ito: "Random phase-free computer-generated hologram", Opt. Express, **23**, 9549-9554 (2015)

図7 マルチプロジェクションのためのホログラムの生成と再生の模式図

図8 マルチプロジェクションを行った場合の再生像

4.2 ホログラフィックプロジェクト独自の投影手法

ホログラムには多重記録が可能であるということは先にも述べたが, これを利用した投影手法がマルチプロジェクションである。マルチプロジェクションでは, 複数のそれぞれ異なるスクリーンに投影する原画像の情報を図7(a)に示すように1枚のホログラムに重ね合わせて記録することで, 図7(b)のように複数のスクリーンへのそれぞれ異なる映像投影を可能にしている。

図8はホログラフィックプロジェクトによるマルチプロジェクションの再生像である。この画像では, 画像左側にある手前のスクリーンに女性の顔の画像を, 画像右側にある奥のスクリーンにマンダリンの顔の画像を投影している。図8を見ると, 手前のスクリーンと奥のスクリーンにそれぞれ合焦した画像が投影されていることがわかる。

5. むすび

本稿では, ホログラフィを応用した新しい方式のプロジェクトであるホログラフィックプロジェクトについて, その原理, 他の方式のプロジェクトとの違い, 実現へ向けた要素技術や技術的課題を紹介した。近年の表示デバイスの解像度の向上や計算機の性能向上などもあり, ホログラフィックプロジェクトの実現に向けた研究は少しずつ進んできている。しかしながら, 他の方式のプロジェクトの性能向上や小型化も見逃せなくなってきている。そのため, 単なる光学系の小型化が見込めるプロジェクトに留まらない, ホログラフィを応用することによるさらなる独自性を持った技術の開発が期待されている。(2017年9月28日受付)

長浜 佑樹 2012年, 千葉大学工学部電気電子工学科卒業。2015年, 千葉大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2017年, 日本学術振興会特別研究員(DC2)。同年, 千葉大学大学院工学研究科博士後期課程修了。ホログラフィ応用技術の研究に従事, 日本学術振興会特別研究員(PD)。博士(工学)。正会員。

下馬場朋祿 1997年, 群馬大学工学部卒業。2002年, 千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。同年, 理化学研究所基礎科学特別研究員。2005年, 山形大学工学部助教授。2007年, 同大学院理工学研究科准教授。2009年, 千葉大学工学研究科准教授。ホログラフィ応用技術の研究に従事。博士。正会員。

角江 崇 2006年, 京都工芸繊維大学工学部卒業。2008年, 同大学大学院工学科学研究科博士前期課程修了。2011年, 日本学術振興会特別研究員(DC2)。2012年, 京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科博士後期課程修了。同年, 千葉大学大学院工学研究科助教。ホログラフィに基づく3次元映像技術や3次元計測技術に従事。博士(工学)。正会員。

伊藤 智義 1989年, 東京大学教養学部卒業。1992年, 東京大学大学院総合文化研究科博士課程中退。同年, 群馬大学工学部助手。1994年, 同大学助教授。1999年, 千葉大学工学部助教授。2004年, 同大学教授。専用計算機による数値計算の高速化の研究に従事。博士(学術)。正会員。