

計算機合成ホログラムを用いた複数の2次元映像投影 Projecting Multiple 2D Images Using Computer Generated Hologram

川島 徹也[†] 長浜 佑樹[†] 下馬場 朋禄[†] 角江 崇[†] 老川 稔[†] 杉江 崇繁[†] 伊藤 智義[†]
Tetsuya Kawashima Yuki Nagahama Tomoyoshi Shimobaba Takashi Kakue Minoru Oikawa Takashige Sugie Tomoyoshi Ito

1. はじめに

一般的なプロジェクタは映像の拡大にズームレンズを用いるため収差により映像が劣化し、また、極端に傾いた面や曲面・凹凸面に全体が合焦した映像を投影することは困難である。これに対し、ホログラフィックプロジェクタは空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)にホログラムを表示し、そこにレーザー光を照射することで映像を投影する。表示するホログラムを変更するだけで映像の拡大が行えるためズームレンズが不要であり[1]、また、SLMに対して非平行な面に設定した映像からホログラムを生成可能なため、投影面の角度や形状に依らずに映像を合焦させられる。この特長から、任意の平面及び曲面に対する映像投影や、非同一平面への複数投影に応用が期待されている。

本研究では、SLMとして高精細の反射型液晶ディスプレイ(Liquid Crystal Display: LCD)を1枚だけ使い、ホログラフィックプロジェクタにより複数の2次元映像を異なる平面に同時投影する手法を提案する。

2. ホログラフィックプロジェクタ

ホログラムは被写体となる物体の表面で散乱する光を干渉縞として記録した媒体である。また、光伝搬のシミュレーションにより電子データとして作成されたホログラムは計算機合成ホログラム(Computer Generated Hologram: CGH)と呼ばれる。ホログラフィックプロジェクタでは、2次元映像から作成したCGHを用いて映像投影を行う。

図1に、ホログラフィックプロジェクタの投影光学系の概略図を示す。まず、投影したい映像から回折計算によってスクリーン上の光波場分布を求め、CGHを作成する。これを画素間隔 p のLCDに表示し、ハーフミラーを用いて、波長 λ のコヒーレント光を照射する。これにより、LCD上で回折した光は投影映像の情報を持つ光となり、ハーフミラーを透過してスクリーンに映像が投影される。この際、回折現象により、回折角 θ の位置に式(1)を満たすような次数 m の回折像が、距離 $\lambda z/p$ 間隔で生じる。

$$p \sin \theta = m \lambda \quad (1)$$

また、照射光がLCDでそのまま反射された光(直接光)もスクリーンに映る。

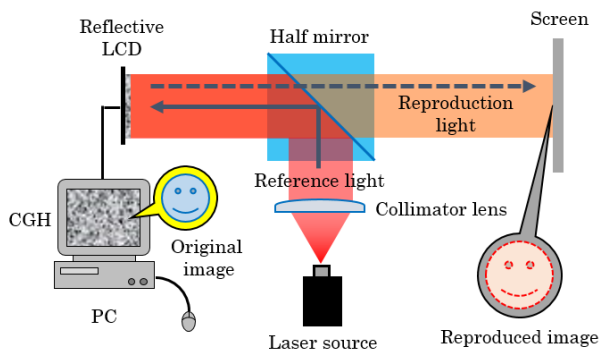


図1 ホログラフィックプロジェクタの再生光学系

3. 非平行平面間の回折計算

3.1 角スペクトル法

本研究では伝搬距離に制約のない角スペクトル法と呼ばれる手法によって光伝搬を計算することで、CGHの作成に必要な光波場分布を求めた。ある点における光波場の複素振幅 $U(x, y, z)$ のフーリエ変換 $A(f_x, f_y, z)$ を角スペクトルと呼ぶ。角スペクトルは物理的には、そのスペクトルに対応した角度方向に伝搬する平面波と解釈できる。ここで、 f_x, f_y はそれぞれ x, y 方向の空間周波数を表す。従って、式(2)に示すように光波場の複素振幅は角スペクトルの逆フーリエ変換によって求まる。

$$U(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1}[A(f_x, f_y, z)] \\ = \iint_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y, z) \exp(j2\pi(f_x x + f_y y)) df_x df_y \quad (2)$$

また、伝搬距離 $z = z$ (伝搬面, スクリーン)における角スペクトルは $z = 0$ (開口面, LCD)における角スペクトルから式(3)のように求まることが知られている[2]。

$$A(f_x, f_y, z) = A(f_x, f_y, 0) \exp\left(j2\pi z \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2}\right) \quad (3)$$

よって、式(2)、(3)により伝搬面における光波場の複素振幅を開口面における角スペクトルから求めることができる。ここで求めた光波場分布からCGHを作成する。

3.2 非平行平面間における角スペクトル法

前節における角スペクトル法は平行平面間を前提としており、非平行平面間では使用できない。そこで、開口面上の点 P_a を行列 \mathbf{T} で一次変換し、平行移動ベクトル \mathbf{t} で移動させ、伝搬面上の点 P_a と関係付ける。この関係を式(4)に示す。

$$P_a = \mathbf{T}P_a + \mathbf{t} \quad (4)$$

この式における $\mathbf{T}P_a$ は、開口面と共通の原点を持ち伝搬面に平行な座標系(平行面)上の点に相当する。従って、式(4)の両辺のフーリエ変換より角周波数の関係が得られるため、角スペクトル法により非平行平面間の光伝搬が計算できる[3]。各平面の関係を図2に示す。

4. ホログラフィックプロジェクタへの応用

4.1 非平行平面への映像投影

本研究では、以上の計算によって得られた光波場分布から位相分布を抽出し、位相変調型CGHを作成した。今回は平面間の光伝搬を考えるため、式(4)の行列 \mathbf{T} は単純に回転行列とすればよい。例えば、スクリーン(xy 平面に平行な平面)に対して、 y 軸を回転軸として角度 θ 傾けたLCDから映像を投影する場合、行列 \mathbf{T} は式(5)で表される。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

[†] 千葉大学大学院工学研究科 Graduated School of Engineering, Chiba University

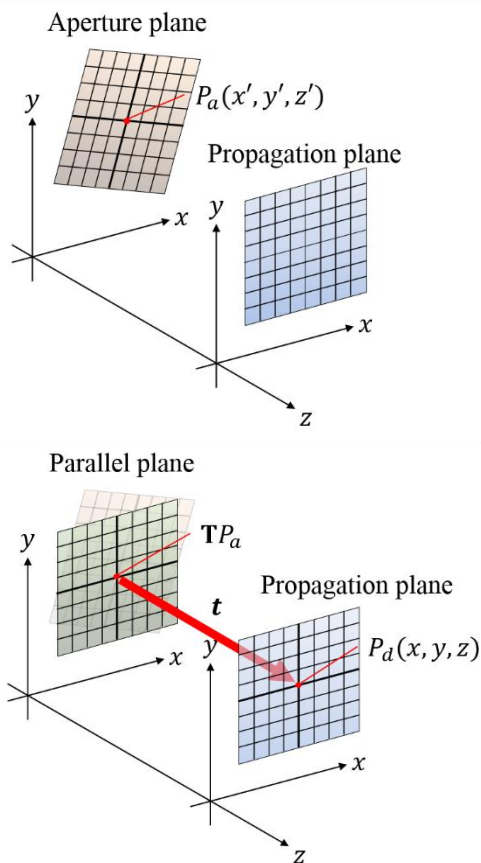


図2 非平行平面での座標系

4.2 非同一平面への複数同時投影

位相変調型 CGH は、光波場の位相分布を重ね合わせることで複数の再生像を同時に生成可能である[4]。本研究では、3章に示した一連の光伝搬計算を2つの映像に対して個別に行い、これらの位相分布を重ね合わせることで1つの表示媒体で2映像を同時投影する。これにより、静止映像の位相分布は再計算する必要がなくなる。また、一方の映像の投影位置や角度を変更した際に、2映像を同時に用いて1つのCGHを作成するよりも少ない計算量で投影が可能となる。

5. 結果・今後の展望

図3に、投影させる映像(キーボード)と、式(5)の θ を $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ としてCGHを作成した各場合について投影した結果を示す。いずれの角度においても元の映像と同様の映像が投影できていることが分かる。

図4に、同一平面上にない2つのスクリーンに対して単独及び同時に映像(「阿」, 「吽」)を投影した結果を示す。「阿」は図2のx軸周りに 60° 、「吽」はy軸周りに 60° 回転させたスクリーンに投影している。いずれも、元の映像から形が歪まずにスクリーンに合焦して投影されていることが分かる。

今後の展望としては、投影映像のカラー化、曲面や凹凸面への映像投影、投影面認識による映像の自動補正機能の実装が挙げられる。また、リアルタイムでの計算及び投影に向けて、本研究で用いた計算方法による計算速度の検討も視野に入れていく。

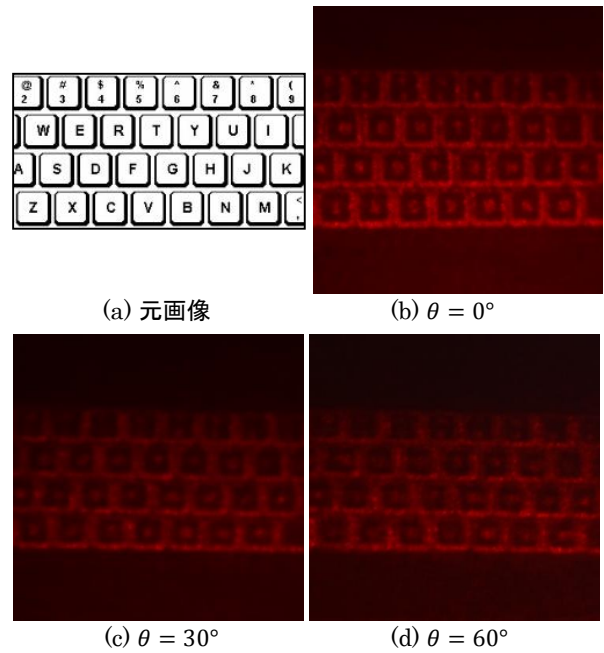


図3 投影した映像



図4 複数映像の同時投影

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 25330125, JSPS 科研費 25240015, 矢崎科学技術振興記念財団, 柏森情報科学振興財団の助成により行われました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Shimobaba *et al.*: "Lensless zoomable holographic projection using scaled Fresnel diffraction," *Opt. Express* **21**, 25285-25290 (2013).
- [2] K. Yamamoto *et al.*: "Calculating the Fresnel diffraction of light from a shifted and tilted plane," *Opt. Express* **20**, 12949-12958 (2012).
- [3] K. Matsushima *et al.*: "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves," *Opt. Express* **20**, 1755-1762 (2003).
- [4] L. B. Lesem *et al.*: "The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device," *IBM Res.* **13**, 150-155 (1969).