

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 6日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656234

研究課題名（和文） 時分割表示によるスペックルレス・ホログラフィーの実現

研究課題名（英文） Speckle-free holography using time-multiplexing technique

研究代表者

高木 康博 (TAKAKI YASUHIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50236189

研究成果の概要（和文）：スペックルが発生せずシェーディング処理されたホログラム画像を表示する技術を実現した。3次元物体を多数の物体点で表現し、物体点を複数の物体点グループに分けて時分割表示する。それぞれの物体点グループでは、物体点を互いに干渉が生じない程度離して2次元配置する。各物体点グループは、空間光変調器にゾンプレーットの2次元アレイを表示することで発生する。ゾンプレーットを2次元的に振幅変調することで、物体点から発せられる光の角度強度分布を制御し、再生像のシェーディング処理を実現する。

研究成果の概要（英文）：A hologram display technique that provides speckle-free and shaded reconstructed images is realized. A three-dimensional object is composed of object points, and the object points are divided into plural object point groups that are displayed in a time-sequential manner. Each object point group consists of two-dimensional (2D) array of object points that are separated such that interference among the object points does not occur. Each object point group is generated by displaying a 2D array of zoneplates on a spatial light modulator. The amplitude distribution of the zoneplates is modulated two-dimensionally to control the angular intensity distribution of light emitted from the object points so that reconstructed images are shaded.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：ディスプレイ、ホログラフィー、立体表示、スペックル

1. 研究開始当初の背景

ホログラムは光の波面を再生する理想的な立体表示方式と言われているが、再生像にスペックルノイズが発生することが大きな問題点である。スペックルはランダムな光の干渉により生じる微細で高コントラストな光強度分布で、立体像の物体表面にざらざらした分布を生じる。

スペックルは画質を大きく低下させるため、ホログラムのスペックル低減法については、多くの研究が古くから行われている。し

かし、ほとんどがホログラム再生光の時間的あるいは空間的コヒーレンスを低下させてスペックルパターンをぼかす方法であるため、再生像にもボケが生じる。そもそもスペックルの発生自体を抑制する方法は知られていない。

2. 研究の目的

ホログラムは理想的な立体表示方式と言われている。しかし、実際には、スペックルによる画質劣化があり、これは光のランダムな

干渉に起因し、ホログラムの記録・再生原理に関わる本質的な問題である。本研究では、時分割表示で現実のインコヒーレントな光波状態を再現し、スペックルの発生をなくし、従来のホログラム表示を超えた「真に理想的な立体表示」を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すように、3次元物体を多数の物体点の集まりで表し、物体点をゾーンプレートにより発生する。ゾーンプレートとは、同心円状の強度分布をもつ円板をいい、空間の一点に集光する球面波を発生する。この集光点が物体点になる。したがって、ゾーンプレートの足し合わせでホログラムの分布が計算できる。

上述のように立体像を多数の物体点の集合で表すと考えた場合、スペックルは物体点間のランダムな干渉により生じると考えることができる。そこで、図2に示すように、すべての物体点を、干渉が生じない程度離れた物体点で構成される複数の物体点グループに分ける。これらの物体点グループを時分割表示すると、異なる時間に表示された物体点グループの間には干渉は生じないから、スペックルのないホログラム表示が実現できる。

物体点グループの表示は、空間光変調器 (SLM) の表示面を図3に示すように縦横に並ぶ小領域に分割し、各領域にひとつのゾーンプレートを対応させることで実現する。物体点グループを構成する物体点の位置に応じて、小領域の位置を水平・垂直にシフトした表示パターンをSLMで時分割表示する。

ゾーンプレートから発せられた球面波の集光点が物体点になることから、図4に示すように、ゾーンプレートの各点から光線が発せられて物体点に集光した後に物体点から広がる様に進むと考える。この場合、ゾーンプレートの光強度を2次的に変調すれば、物体点から広がる光線の強度を方向によって制御できることになる。すなわち、物体表面での反射の強さを方向によって変えることができ、立体像のシェーディングが可能になる。

上記の2つの方法を組み合わせることで、スペックルのないシェーディングされたホログラム表示が可能になる。スペックルのないホログラム表示では、物体点グループの時分割表示に高フレームレートSLMを用いる。高フレームレートSLMは一般に階調表現性が低いので、複数の表示パターンをさらに時分割表示することで階調表現性を向上させる。ゾーンプレートを2次元変調した分布を時分割表示することで、立体像のシェーディングを実現する。

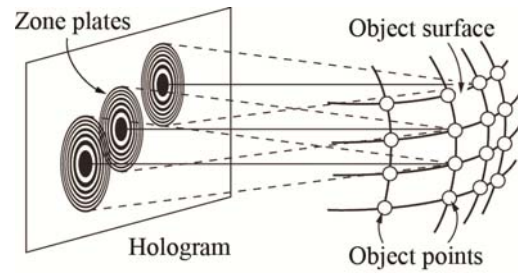


Fig. 1 Zoneplate method.

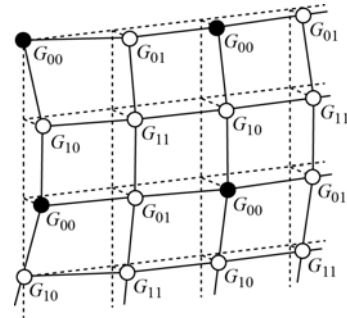


Fig. 2 Object point groups.

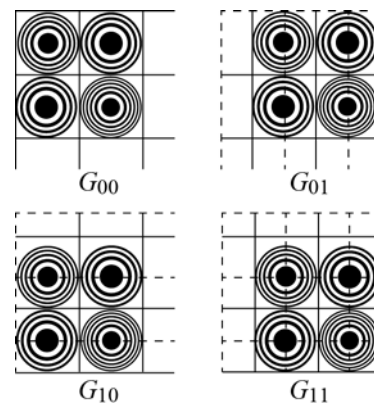


Fig. 3 Hologram patterns for generating object point groups.

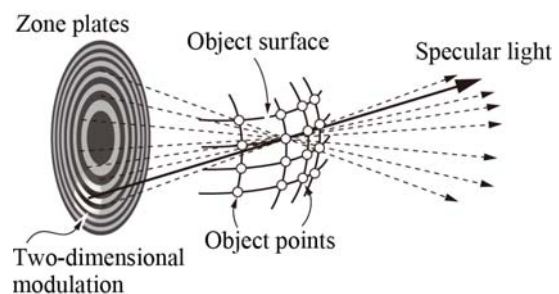


Fig. 4 Two-dimensional modulation of zoneplate.

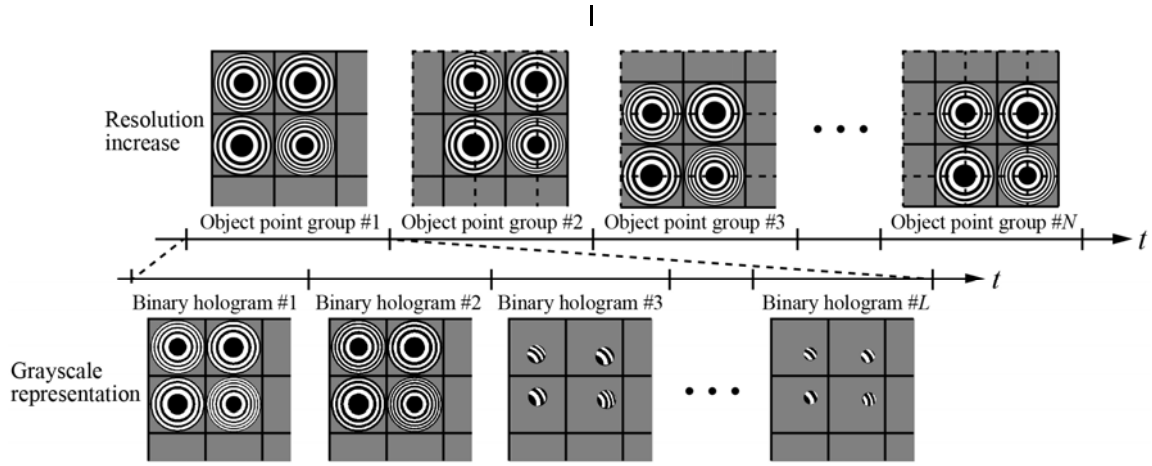


Fig. 5 Proposed time-multiplexed hologram display technique.

提案する方法を、図5を用いて説明する。ここでは、SLMは2階調表示とする。すべての物体点を、複数の物体点グループに分けて時分割表示する。ゾーンプレートの2次元変調のために、各物体点グループをさらに複数の2値パターンに分解して時分割表示する。それぞれの2値パターン表示時のSLM照明光の光強度を変えることで、さらに階調表現性を高めることが可能である。

再生像のシェーディングを実現するゾーンプレートの2次元変調法としては、Phongの反射モデルにもとづく方法を用いた。Phongの反射モデルについて説明する。図6に示す物体表面を考える。物体表面からの反射光を、拡散反射光、鏡面反射光、および、環境光の3種類の光で表す。拡散反射光は、図7(a)に示すように、照明光が様々な方向に一樣に散乱された光で、照明光の強度 I_l と物体表面への入射角 θ （法線ベクトル \mathbf{n} と照明光線ベクトル \mathbf{l} のなす角）を用いて、その強度 I_d は、

$$I_d = k_d I_l \cos \theta = k_d I_l |\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}| \quad (1)$$

で与えられる。ただし、係数 k_d は材質によって決まる拡散反射係数である。鏡面反射光は、図7(b)に示すように、照明光が反射ベクトル \mathbf{r} を中心とする方向に指向性反射された光で、視線ベクトル \mathbf{v} と反射ベクトル \mathbf{r} のなす角 α を用いて、その強度 I_s は、

$$I_s = k_s I_l \cos^n \alpha = k_s I_l |\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}|^n \quad (2)$$

で与えられる。ただし、係数 k_s は材質によって決まる鏡面反射係数で、 n は光線の指向性を決めるパラメータである。環境光は、物体を一樣に照明する光（強度 I_a ）の反射光で、面の反射率 k_a を用いて、 $k_a I_a$ で与えられる。以上をまとめて、物体表面の反射光は、

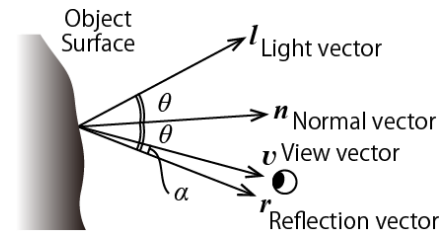


Fig. 6 Vectors used for Phong reflection model.

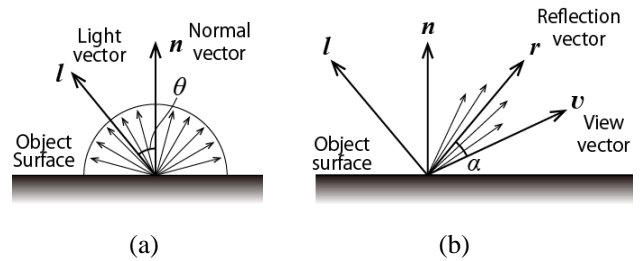


Fig. 7 Phong reflection model: (a) diffused light, and (b) specular reflection light.

$$I = k_d I_l |\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}| + k_s I_l |\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}|^n + k_a I_a \quad (3)$$

で与えられる。

図8に示すように、ゾーンプレートの各点から出た光は物体点に集光する。そのため、ゾーンプレート中心を原点としたときに、ゾーンプレート上の点 (x, y) から発せられた光は、ベクトル $(-x, -y, z)$ の方向に進むと考えることができる。本研究では、このベクトルの方向がPhongの反射モデルにおける視線ベクトル \mathbf{v} に対応すると考える。このとき、視線ベクトル \mathbf{v} は、

$$\mathbf{v} = (-x, -y, z) / (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \quad (4)$$

で与えられる。この \mathbf{v} を用いて計算した反射光強度 I でゾーンプレート上の点 (x, y) の強度を変調することで、見る方向によって異なる反射を与える 3次元シェーディングが実現できると考える。本研究で提案するゾーンプレートの 2次元変調は、図 9 に示すように、鏡面反射光に対応した反射ベクトル \mathbf{r} の方向にピークをもつ変調と、拡散反射光と環境光に対応した一様な変調の和で表せる。

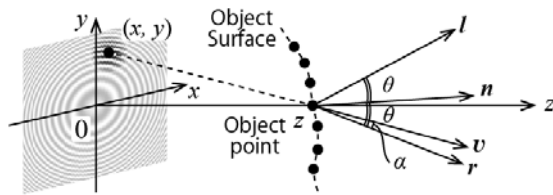


Fig. 8 Generation of object point by zone plate.

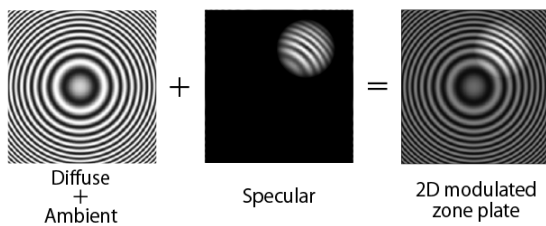


Fig. 9 Two-dimensional modulation of zone for 3D shading.

4. 研究成果

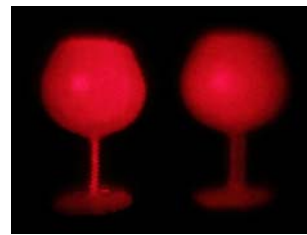
本研究では、提案した方法を実験により確かめた。

実験には、共役像のないホログラム表示が可能なシングルサイドバンドフィルタを含む 4f 光学系を使用した。高フレームレート SLM には、Digital Micromirror Device (Texas Instruments, Discovery™ 3000) を用いた。解像度は $1,024 \times 768$ で、フレームレートは 13.333 kHz である。以前の研究で求めたスペックルが生じない表示条件を用い、各物体点グループを 16×24 の物体点で構成し、水平方向に 8 回、垂直方向に 4 回シフトして時分割表示した。そのため、再生像の物体点数は 128×96 となる。さらに、階調表現のために、各物体点グループを 8 枚の 2 値画像に分けて時分割表示した。そのため、立体表示のフレームレートは 52 Hz となる。光源には、波長 635 nm の半導体レーザを用いた。レーザ光の強度変調は、半導体レーザのパルス幅を変えることで実現した。

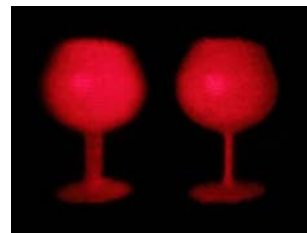
提案手法により表示したホログラム再生像の例を図 10 に示す。異なる奥行位置に 2

つの物体を表示している。スペックルのない再生像が得られていることがわかる。図 10 (a) は手前の物体に焦点を合わせた場合で、同図 (b) は奥の物体に焦点を合わせた場合の撮影画像である。

提案法によるシェーディングの効果を確かめるために、同一のオブジェクトデータを用いて CG によって生成した画像とホログラムによって光学的に生成した立体像を比較した。図 11 (a) は CG で合成した画像で、同図 (b) はホログラムで生成した立体像の撮影画像である。光源の位置は、両方とも物体正面とした。ほぼ同等なシェーディング効果が得られていることがわかる。



(a)

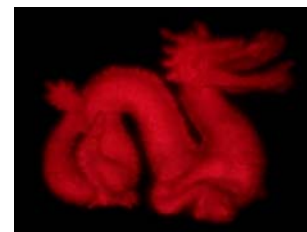


(b)

Fig. 10 Reconstructed images focused on (a) front object, and (b) rear object.

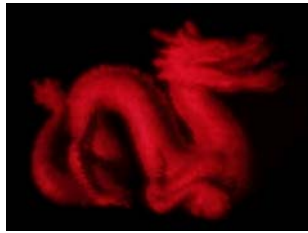


(a)

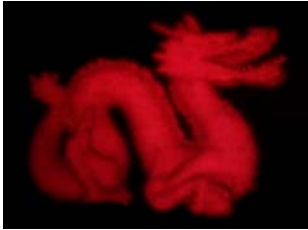


(b)

Fig. 11 Shaded images generated by (a) CG, and (b) hologram.

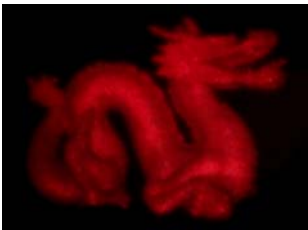


(a)



(b)

Fig. 12 Shaded reconstructed images illuminated from (a) left, and (b) lower right.



(a)



(b)

Fig. 13 Shaded reconstructed images with (a) shiny surface, and (b) matte surface.

シェーディングにおける光源位置を変化させた場合の再生像を図 12 に示す。同図(a)は、左側から物体を照明した場合である。同図(b)は、右下から物体を照明した場合である。どちらの場合も正面の同一位置から再生像を撮影した。光源位置の変化に応じて、物体表面の鏡面反射光と拡散反射光が変化していることがわかる。

つぎに、シェーディングにおける物体の材質を変化させた場合の再生像を図 13 に示す。同図(a)は、物体表面の光沢を強くした場合であり、同図(b)は拡散を強くした場合であ

る。どちらの場合も、光源の位置は物体正面とし、正面の同一位置から再生像を撮影した。物体表面での反射に違いが生じていることがわかる。

今後は、コンピュータグラフィックの分野で研究されているより高度なシェーディング手法をゾーンプレート調の 2 次元変調に取り入れて、よりリアルなホログラム表示を実現したいと考えている。また、電子的なホログラフイーには、スペックルの発生以外に、画面サイズが小さく視域が狭いといった問題がある。研究代表者は、この問題を解決するために幾つかの電子的なホログラフイーの実現方法を提案している。これらの方法に、本研究の成果を適用することを、今後行いたいと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1) T. Kurihara and Y. Takaki, "Speckle-free, shaded 3D images produced by computer-generated holography," *Opt. Express*, vol. 21, 4044-4054 (2013). (査読あり) DOI:10.1364/OE.21.004044

2) T. Kurihara and Y. Takaki, "Using electronic holography to generate speckle-free and shaded reconstructed images," *Proc. SPIE*, vol. 8644, 86440E (2013). (査読なし) DOI:10.1117/12.2003437

3) T. Kurihara and Y. Takaki, "Shading of a computer-generated hologram by zone plate modulation," *Opt. Express*, vol. 20, 3529-3540 (2012). (査読あり) DOI: 10.1364/OE.20.003529

4) T. Kurihara and Y. Takaki, "Shading of holographic reconstructed image by two-dimensional amplitude modulation of zone plates," *Proc. SPIE*, vol. 8281, 82810H (2012). (査読なし) DOI: 10.1117/12.907621

[学会発表] (計 4 件)

1) T. Kurihara and Y. Takaki, "Using electronic holography to generate speckle-free and shaded reconstructed images," *Photonics West 2013, Practical Holography XXVII: Materials and Applications*, Moscone Center, San Francisco, California, USA, Feb. 2, 2013.

2) 栗原貴之, 高木康博, "スペックル除去とシェーディングを実現するホログラム表示法の提案", 3次元画像コンファレンス 2012, 東京, 早大, 2012年7月12日.

- 3) T. Kurihara and Y. Takaki, "Shading of holographic reconstructed image by two-dimensional amplitude modulation of zone plates," Photonics West 2012, Practical Holography XXVI: Materials and Applications, Moscone Center, San Francisco, California, USA, Jan. 21, 2012.
- 4) 栗原貴之, 高木康博, "ゾーンプレート of 2次元変調による3次元シェーディングを施したホログラム", 3次元画像コンファレンス 2011, 京都, 京都工繊大, 2011年7月15日.

[その他]

ホームページ等

<http://www.tuat.ac.jp/~e-takaki>

映像情報メディア学会立体映像技術研究会 (2013年3月4日開催、東京農工大学)において、本研究で開発したホログラフィー技術に関する見学会を開催した。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 康博 (TAKAKI YASUHIRO)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：50236189

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし