

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00512

研究課題名(和文) コンピュータホログラフィによるフルカラー3次元画像の作成

研究課題名(英文) Creation of full-color 3D images by computer holography

研究代表者

松島 恭治 (MATSUSHIMA, KYOJI)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：70229475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、実際に展示可能なフルカラー計算機合成ホログラム(CGH)の作成を目指して、液晶カラーパネルと同様のRGBカラーフィルタをレーザーリソグラフィで描画した干渉縞に貼りつけてカラー再生を行う技術を開発した。この技術では、カラーフィルタのRGB各色に対応する干渉縞をその色に対応する波長で計算しているため、色ずれすることなくフルカラー再生像が得られる。これに付随する技術として、CGHの非専門家であるデザイナーが利用できるアプリや、実在物の光波を3波長デジタルホログラフィで撮影してフルカラーCGHで再生するカラーデジタイズドホログラフィの技術などを開発した。

研究成果の概要(英文)：A novel technique for full-color computer-generated holograms (CGH) is developed for actual exhibition of full-color 3D images. In this technique, RGB color filters are attached closely to a fringe pattern printed by laser lithography. Since the fringe pattern behind the RGB color filters is generated at a wavelength corresponding to the RGB color, viewers can see a full-color 3D image without any severe color smear. In addition, application software is developed for non-experts of computer holography to design and calculate full-color CGHs. The technique of full-color digitized holography is also developed to make full-color CGHs that reconstruct a 3D scene including physical real-existing objects as well as CG-modeled virtual objects. In this technique, the object field of a subject is recorded at three wavelengths using synthetic aperture digital holography.

研究分野：コンピュータホログラフィ, 波動光学シミュレーション

キーワード：計算機合成ホログラム フルカラー3次元画像 カラーCGH カラーデジタイズドホログラフィ

1. 研究開始当初の背景

現在実用化している3次元映像技術では、人が奥行きを知覚する際に用いている両眼視差・輻輳・調節・運動視差のうち、両眼視差と輻輳しか正確に刺激しない。そのため、知覚した距離に矛盾が生じる。特に、輻輳による距離感と調節による距離感が一致しない問題は輻輳・調節矛盾と呼ばれ、このような不完全な3次元映像における違和感や疲労感の原因と言われている。

半世紀以上の歴史を有する古典的な光学ホログラフィでは、実在の物体からの光波を参照光との干渉によって記録し、その干渉縞パターンからの回折によりオリジナルの物体光波を再生するためこのような知覚矛盾が生じない完全な3次元画像が得られる。しかし、光学ホログラフィは実在する物体が必要な写真技術であり、非実在の物体や数値データから像を形成することができなかった。これに対して、干渉縞パターンを計算機で発生するコンピュータホログラフィでは、実在しない物体の光波を再生する計算機合成ホログラム(Computer-Generated Hologram, 以下CGH)を作成することができる。そのため、実在、非実在を問わず感覚矛盾のない完全な3次元映像を再生することができる。

しかし、実際には、視域が広く大きな画像サイズのCGHを実現するためには、サブミクロンの高密度描画技術と10億画素を超える莫大なディスプレイ解像度が必要であり、展示・鑑賞可能なほどの大きさや品質を有するCGHは長い間作成できなかった。

この問題に対して研究代表者らは、科研費21500114(2009年-2011年)の研究において開発したポリゴンベース手法に基づく大規模計算技術と、レーザーリソグラフィ装置による高解像度画像描画技術により、全方位に連続的な視差を有し、古典的なホログラムに匹敵するほどの美しいCGHを作成することに成功していた<sup>①-④</sup>。

さらに、その成果を踏まえて行った科研費24500133「コンピュータホログラフィの技術基盤形成」(2012年-2014年)の研究では、新しいデジタルアートを目指して、複雑な物体の隠面消去<sup>⑤</sup>、屋外シーン等の多視点画像からのCGHの合成、作品制作ソフトウェア環境の構築の研究等を行っている。これらの成果の一環として、ボストン近郊のMITミュージアム(マサチューセッツ工科大学博物館)において、研究代表者らが制作した高解像度



図1 MITミュージアムにおける高解像度CGHの展示

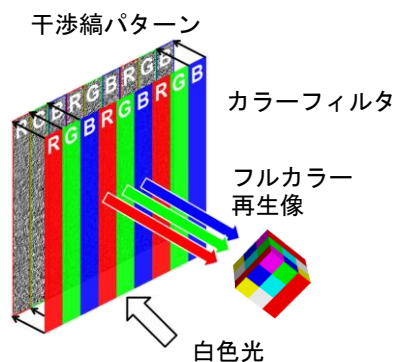


図2 カラーフィルタ方式フルカラーCGHの原理<sup>[雑誌論文6]</sup>

CGH(モノクロ)が2年9ヶ月に渡って展示され、最終的に同ミュージアムの収蔵物として寄贈されている(図1)。

しかし、このようなCGHでは、従来、赤や緑など単色の再生像しか得られない問題があった。そこで、研究代表者らはダイクロミックミラーを用いて像合成することにより、フルカラー再生を報告している<sup>⑥</sup>。しかし、この方式では、像合成の光学系が重くてかさばり、そのアライメント調整も難しいため、カラーCGHを手軽に展示可能ではなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、実際にミュージアム等で展示可能なフルカラーCGH作成技術の開発を目的としている。目的達成のために、主として、液晶ディスプレイと同様のカラーフィルタ方式による高解像度CGHのフルカラー再生を目指した。

また、この目的を実現するために、CGH再生に適したカラーフィルタの選択とそのためシミュレーション技術の開発を行った。さらに、フルカラーCGHの周辺技術として、3波長デジタルホログラフィで取得した物体光波をフルカラー再生する技術の開発を行った。また、カラーCGH作品制作ソフトウェアの整備を行い、別のカラー再生方式として積層方式の基礎研究も試みた。

3. 研究の方法

カラーフィルタ方式フルカラーCGHの原理を図2に示す。1枚のホログラム干渉縞を空間的に領域分割し、それぞれにRGBの三

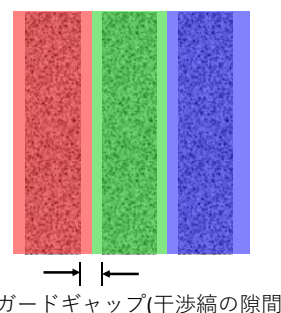


図3 干渉縞とカラーフィルタの位置合わせ

原色に相当する波長で計算した干渉縞を形成する。これらの干渉縞にその設計波長に応じたカラーフィルタを貼り合わせることで、設計波長に対応する波長で再生像が形成され、それらが重畳してフルカラー3次元像が再生される。

干渉縞はガラス基板の金属膜のパターンとして形成している。このとき、従来の単色CGHでは、高反射率のガラス基板側から照明光を入射していたが、ガラス基板にカラーフィルタを装着した場合、干渉縞とカラーフィルタが密着しないため、やや反射率の劣る金属膜側から再生照明光を入射する構造としている。また、カラーフィルタの位置合わせ誤差の許容度を上げるため、図3に示すように、ガードギャップと呼ぶ保護エリアを設けている。

ただし、液晶パネル等に用いられるカラーフィルタでは、図4に示すように、その波長帯域が広く大きな色収差が生じる。そこで、本研究では、蛍光体を用いた一般的な白色LEDではなく、異なった中心波長のLEDを一つに素子に集積したマルチチップLEDを照明光源として用い、不完全なフィルタ特性を補った。図5にマルチチップLEDを用いた場合の実効照明スペクトルを示す。かなり狭帯域なスペクトルとなっていることがわかる。

しかしながら、液晶用のカラーフィルタをそのままCGHに用いても良好な結果が得られない。そこで、カラーフィルタの透過・反射率や金属膜の反射率に基づいた物理シミュレーション技術を開発した。このシミュレ

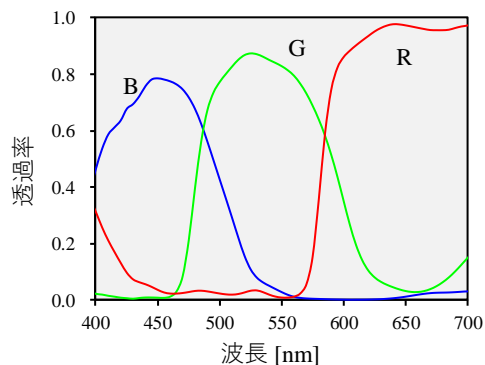


図4 カラーフィルタの透過率スペクトル

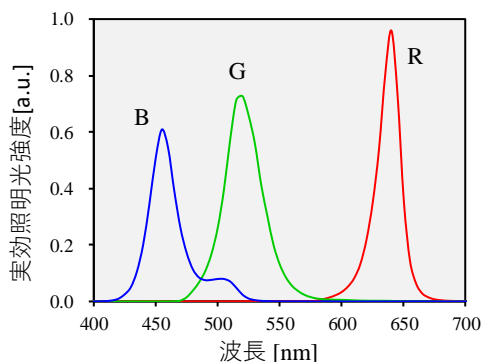


図5 マルチチップLEDを照明光源とした場合の実効照明スペクトル



図6 フルカラーCGH “Color Cube” (64K×64K)の再生像〔雑誌論文6〕

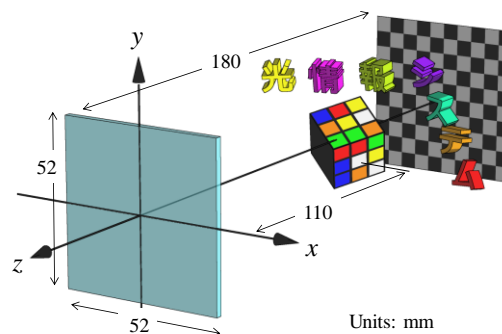


図7 フルカラーCGH “Color Cube”の3Dモデル

ーションによりホログラムに適した特性を有するカラーフィルタを設計し、実際のカラーフィルタを特注した。このカラーフィルタを装着した高解像度ホログラムを試作したところ、良好な再生像を得ることができた〔雑誌論文6〕。

また、CGモデルではなく、実在物の光波を合成開口デジタルホログラフィの技術によって取得し、それをカラーフィルタ方式CGHとして再生するフルカラーデジタルホログラフィを試みた。この研究では、従来の単一波長合成開口デジタルホログラフィを3波長に拡張した〔雑誌論文1〕。

#### 4. 研究成果

開発した物理シミュレーション技術を用いて実際のRGBカラーフィルタを設計し作成した。さらに、ガードギャップを設ける技術を用い、RGBカラーフィルタを装着した高解像度ホログラムをマルチチップ白色LEDで照明して良好な光学再生像が得られることを確認した〔雑誌論文6〕。

この技術により作成した約40億画素(64K×64K、ただし1K=1024)のフルカラーCGHの光学再生像とその3Dモデルを図6と図7に示す。また約160画素(128K×128K)の別のフルカラーCGHの光学再生像を図8に示す〔雑誌論文6〕。これらのCGHの物理解像度は $0.8\mu\text{m} \times 0.8\mu\text{m}$ であるため、その視域角は約45度に達している。

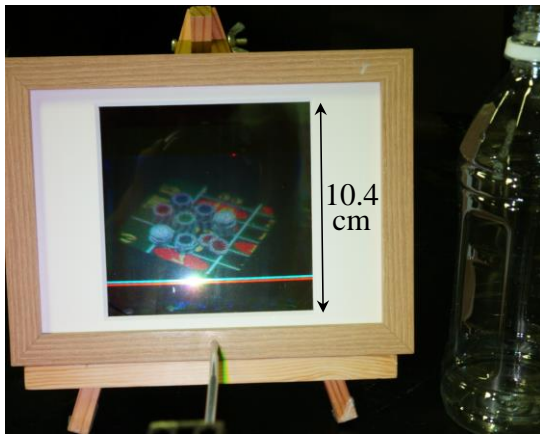


図8 フルカラーCGH “Casino Chips”の光学再生像

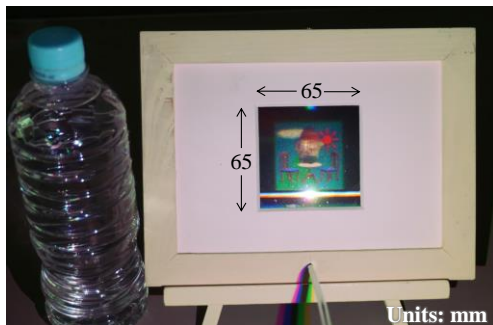


図9 フルカラーCGH “Tea Time”の光学再生像<sup>[雑誌論文1]</sup>

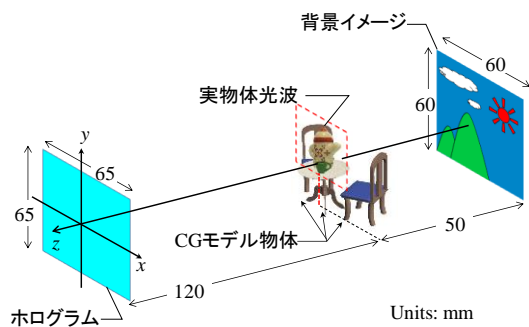


図10 フルカラーデジタルホログラフィによるカラーCGH “Tea Time”の3Dシーン

さらに、実在の物体を3波長合成開口デジタルホログラフィで撮影するフルカラーデジタルホログラフィの技術で作成したカラーフィルタ方式CGHの光学再生像を図9に、その3Dシーンを図10に示す<sup>[雑誌論文1]</sup>。このように、この技術では実物体のホログラム像をCGモデルの仮想物体と共に3Dシーン内に埋め込んで再生することができる。

その他の成果として、CGHの非専門家であるデザイナーやアーティストが使うことのできるGUIベースのアプリケーションの開発を行った。

さらにカラーCGHの別の方式として、波長を選択的に再生する性質を有する体積ホログラムに従来のCGHを転写し、三原色の波長で再生する3枚の体積ホログラムを積層してフルカラー再生する手法を試みた。しかし

ながら、体積ホログラムの基板の厚さや屈折率により収差が生じるため、色ずれが生じることが分かった。

#### <引用文献>

- ① K. Matsushima, S. Nakahara: “Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method,” *Appl. Opt.* **48**, H54 (2009).
- ② K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: “Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects,” *Appl. Opt.* **50**, H278 (2011).
- ③ H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms, *Appl. Opt.* **50**, H245 (2011).
- ④ K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography, *J. Electron. Imaging* **21**, 023002 (2012).
- ⑤ K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara: Silhouette method for hidden surface removal in computer holography and its acceleration using the switch-back technique, *Optics Express* **22**, 24450-24465(2014).
- ⑥ T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara: Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography, *SPIE Proc.* **9386**, 93860N (2015).

#### 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8件)

- [1] K. Matsushima, N. Sonobe: Full-color digitized holography for large-scale holographic 3D imaging of physical and nonphysical objects, *Appl. Opt.* **57**, Issue 1, A150-A156 (2017). 査読有  
<https://doi.org/10.1364/AO.57.00A150>
- [2] K. Matsushima, Y. Tsuchiyama, N. Sonobe, S. Masuji, M. Yamaguchi, Y. Sakamoto: Full-color large-scaled computer-generated holograms for physical and non-physical objects, *SPIE Proc.* **10233**, 1023318 (2017). 査読無 doi:10.1117/12.2265798
- [3] H. Nishi, K. Matsushima: Rendering of specular curved objects in polygon-based computer holography, *Appl. Opt.* **56**, Issue 13, F37-F44 (2017). 査読有 doi:10.1364/AO.56.000F37
- [4] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, S. Nakahara, M. Yamaguchi, Y. Sakamoto: Full-color high-definition CGH reconstructing hybrid scenes of physical and virtual objects, *SPIE Proc.* **10127**, 101270Y



- (2017). 査読無 doi:10.1117/12.2251414
- [5] N. Nakatsuji, K. Matsushima: Comparison of computation time and image quality between full-parallax 4G-pixels CGHs calculated by the point cloud and polygon-based method, SPIE Proc. **10127**, 101270Z (2017). 査読無 doi:10.1117/12.2251766
- [6] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: Full-color large-scaled computer-generated holograms using RGB color filters, Opt. Express **25**, Issue 3, 2016-2030 (2017). 査読有 doi:10.1364/OE.25.002016
- [7] K. Matsushima, S. Nakahara: Computer holography as an application of computational optics, SPIE Proc. **9630**, 963010 (2015). 査読無 doi:10.1117/12.2197470
- [8] K. Matsushima: Digital signal processing of light in holographic 3D imaging, SPIE Proc. **9599**, 95990H (2015). 査読無 doi:10.1117/12.2188046

〔学会発表〕 (計 45 件)

- [1] H. Nishi, K. Matsushima: Rendering of transparent objects in polygon-based computer holography, Information Photonics 2017 (IP'17), Yokohama (Kanagawa), (2017.3.21).
- [2] K. Matsushima, Y. Tsuchiyama: Full-color high-definition CGH employing RGB color filters, International Workshop on Holography and related technologies (IWH2016), Jiaoxi (Taiwan), (2016.11.12).
- [3] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Sakamoto: Full-color high-definition CGH using color filter and filter design based on simulation, Imaging and Applied Optics 2016 (DH2016), Heidelberg (Germany), (2016.7.27).
- [4] Y. Higashino, T. Tsuchioka, K. Matsushima: Light-source switching time-division multiplexing holographic display and reduction of degradation by higher order diffraction images, Imaging and Applied Optics 2016 (DH2016), Heidelberg (Germany), (2016.7.25).
- [5] K. Matsushima: Scale expansion beyond a hundred billion pixels in computer holography, International Symposium on Holography: Bridging Art and Technology (HODIC in Taiwan 2015), Hsinchu (Taiwan), (2015.12.14).
- [6] K. Matsushima: Occlusion processing in computer holography -With a focus on switch-back technique -, The 22nd International Display Workshops (IDW '15), Otsu (Shiga), (2015.12.10).
- [7] Y. Tsuchiyama, K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Sakamoto: A Simulation

technique for selection of color filter used for full-color high-definition CGH, International Symposium on Holography and Related Technologies 2015 (IWH2015), Ginowan (Okinawa), (2015.12.3).

- [8] N. Nakatsuji, K. Matsushima, T. Ito, T. Shimobaba: Comparison of computation time and image quality between CGHs calculated by the point cloud and polygon-based method, International Symposium on Holography and Related Technologies 2015 (IWH2015), Ginowan (Okinawa), (2015.12.3).
- [9] N. Sonobe, Y. Tsuchiyama, K. Matsushima: Capture of large-scaled wave fields for full-color digitized holography, International Symposium on Holography and Related Technologies 2015 (IWH2015), Ginowan (Okinawa), (2015.12.2).
- [10] K. Matsushima, Y. Tsuchiyama, N. Sonobe, S. Nakahara: New techniques in high-definition computer holography, International Symposium on Display Holography 2015 (ISDH2015), St Petersburg (Russia), (2015.7.1).
- [11] K. Matsushima, Y. Tsuchiyama: Reduction of memory usage and full-color reconstruction in high-definition computer holography, Workshop on Information Optics 2015 (WIO2015), Kyoto, (2015.6.3).
- [12] K. Matsushima, S. Nakahara: Frequency filtering for reduction of memory usage in computer holography, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2015, Shanghai (China), (2015.5.25).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 3 件)

名称：ホログラフィ表示装置  
 発明者：松島恭治, 東野好伸  
 権利者：関西大学  
 種類：特許  
 番号：特願 2016-121830  
 出願年月日：2016 年 6 月 20 日  
 国内外の別：国内

名称：フルカラー高解像度計算機合成ホログラム表示装置、その作製方法及びその作製装置  
 発明者：松島恭治, 土山泰裕  
 権利者：関西大学  
 種類：特許  
 番号：特願 2016-121832  
 出願年月日：2016 年 6 月 20 日  
 国内外の別：国内

名称：フルカラー高解像度計算機合成ホログ

ラム表示装置その作製方法及びその作製装置

発明者：松島恭治, 土山泰裕

権利者：関西大学

種類：特許

番号：特願 2015-130267

出願年月日：2015年6月29日

国内外の別：国内

[その他]

- [1] WaveField Tools: コンピュータホログラフィと波動光学計算支援ツールキットの公式サイト,  
<http://www.laser.ee.kansai-u.ac.jp/WaveFieldTools/>
- [2] 関大デジタルホロスタジオ,  
<http://holography.ordist.kansai-u.ac.jp/digitalholostudio/>
- [3] ホログラム展示, イノベーションジャパン2016, 東京ビッグサイト, 2016年8月25日～26日
- [4] ホログラム展示, IDW'17 and HODIC Joint Exhibition, 仙台国際センター, 2017年12月6日～12月8日

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

松島 恭治 (MATSUSHIMA, KYOJI)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：70229475

### (4)研究協力者

東野 好伸 (HIGASHINO, YOSHINOBU)

園部 徳晃 (SONOBE, NORIAKI)

土山 泰裕 (TSUCHIYAMA, YASUHIRO)

中辻 憲昭 (NAKATSUJI, NORIAKI)

斎藤 智崇 (SAITO, TOMOTAKA)

土岡 智旭 (TSUCHIOKA, TOMOAKI)

中尾 弘希 (NAKAO, HIROKI)

五十嵐 勇祐 (IGARASHI, YUSUKE)

中清 裕貴 (NAKASE, YUKI)

石上 智也 (ISHIGAMI, TOMOYA)

西川 凌 (NISHIKAWA, RYO)

増地 将哉 (MASUJI, SYOYA)

松崎 昭太 (MATSUZAKI, SYOTA)

井伊 美穂 (II, MIHO)