

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500133

研究課題名(和文) コンピュータホログラフィの技術基盤形成

研究課題名(英文) Building up technology infrastructures in 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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、コンピュータホログラフィによる3D映像の技術基盤を形成することを目的として、高解像度の計算機合成ホログラム(CGH)の研究を実施した。その結果、ダイクロイックミラーを用いたフルカラー再生や、多視点画像からの高解像度CGHの作成、合成開口デジタルホログラフィによって取得した実物体像を拡大・縮小する技術、また専門知識がないデザイナーでもCGH作品の制作ができるソフトウェアツールを開発した。また、ひとつの成果として約250億画素の高解像度CGHを作成し、米国のマサチューセッツ工科大学博物館において約3年に渡ってそれを展示することができた。

研究成果の概要(英文)：Researches into high-definition computer-generated holograms (CGH) were carried out for the purpose of building up technology infrastructures in computer holography. Several techniques are developed in this research, which include full-color optical reconstruction using dichroic mirrors, high-definition CGH produced from multi-viewpoint images, a technique for digital resizing of object field captured by synthetic-aperture digital holography, and software tools intended for designers and artists who are not experts in holography. As a result, a high-definition CGH composed of 25 billion pixels was fabricated and had been on display at Massachusetts Institute of Technology (MIT) Museum in USA for approximately three years.

研究分野：応用情報光学

キーワード：3次元映像 ホログラフィ 計算機合成ホログラム ディスプレイ

1. 研究開始当初の背景

計算機合成ホログラム(Computer-generated hologram; CGH)は、計算機内に保持した物体モデルからの光波をシミュレート(数値合成)し、仮想物体の立体画像を作り出すホログラムである。研究代表者らは当初この技術を狭い意味でのコンピュータホログラフィと呼んでいた。しかしながら、本課題の前身である科研(21500114)において、合成開口デジタルホログラフィ(Digital Holography; DH)により実在物の光波を撮影して3Dシーンに配置することにも成功した^①。そのため、本課題の研究開始時点では、仮想的な物体モデルのみならず、実在物も含めて、デジタルデータとして扱われるホログラムから3次元立体画像を再生する技術を広くコンピュータホログラフィと呼んでいる。

CGH以外の他の立体画像が人間の知覚を部分的に欺くことにより立体感を生じるのに対して、CGHは光波そのものを発生する。そのため知覚の相互矛盾が一切発生しない。このことからCGHは究極の3次元立体画像と呼ばれることもある。CGHの研究は長い歴史を有している。しかしながら、究極と言われつつも、実際にはCGHは古典的な光学ホログラムに匹敵するような高品質で強い立体感を与える3次元画像を産み出すことができなかった。

これは主に、CGHが必要とする巨大な解像度で光波を数値合成する計算機技術、および算出した高解像度画像を描画/表示する技術がなかったためである。CGHでは、観察者が視点を動かすことのできる範囲(視域)がピクセルピッチに概ね反比例するため、視域が広く大きな画像サイズのCGHを実現するためには莫大なディスプレイ解像度が必要である。これは、CGHにおける空間バンド積の問題と呼ばれている。

この問題に対して研究代表者らは、科研費(21500114)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。研究代表者らはこれを高解像度CGHと呼んでいた^②。本課題の研究開始時点では、仮想物体を再生する高解像度CGHにおいては、CGと同様のテクスチャマッピングや表面の鏡面反射を実現する技術^{③④}、また前述のとおり、実在物を取り込む技術も実現していた。さらに、バビネの原理を用いてポリゴン単位の隠面消去を高速化する技術も提案され、後年大きく発展するスイッチバック法と呼ばれる高速隠面消去技術のアイデアも生まれていた。

これらの大きな成果として、2012年6月から、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、研究代表者らが作成しBrothersと名付けた高解像



図1 MITミュージアムにおける高解像度CGHの展示

度CGHの展示が始まった(図1)。なお、この高解像度CGHの展示は、研究代表者らからMITミュージアムへの貸与として始まった。その後、当初の予定を大きく延長して2015年3月まで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。

2. 研究の目的

前節で述べたように、研究開始時点では、すでにある程度の高解像度CGHが作成できるようになっており、アートやサイネージへの応用が期待される状態となっていた。しかしながら、そのような応用に至るための十分な技術基盤が確立されたといえる状態ではなかった。そこで本課題では、この技術基盤を確立するために、主として以下の3点を目的として研究を実施した。

(1) カラー化技術

CGHはコヒーレントな単色光を前提として数値合成されるため、作成したCGHの光学再生像も単色となる。しかし、アートやサイネージ等の応用を考える場合、フルカラー再生は必須とも言える。

(2) シーン構成素材の拡張と表現技術の向上
従来、シーンを構成する素材は、ポリゴンメッシュ、2次元画像、合成開口デジタルホログラフィ(DH)で取得した光波の3点に絞られていた。しかし、風景などの実在物をシーン中に織り込むためには、多視点画像等の入力素材が扱える必要がある。また、DHで取得した実在物光波も、シーン中での位置を変えることや多重化する程度のデジタル編集しかできなかった。そこで、本課題では、実在物体光波の拡大縮小編集を目指した。

(3) 作品制作ソフトウェア環境の構築

従来、高解像度CGHの制作にはプログラミングが必須であった。また、シーンデザイン自体がソースコード中にハードコーディングされてしまっており、アルゴリズムとデータの分離ができていなかった。また、作品制作にはCGHや波動光学の知識が必須であり、一般のデザイナーやアーティストによるCGH制作は不可能であった。

そこで、そのような専門知識やプログラミングスキルが不要であり、また3Dシーンデザインを保存・管理できるソフトウェア環境の構築を目指した。

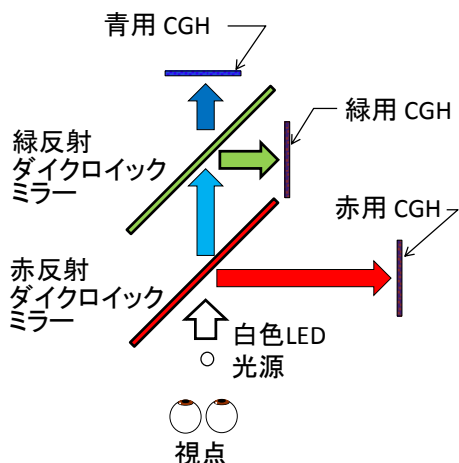


図2 フルカラー再生光学系

3. 研究の方法

以下、前節で述べた3項目に分けて述べる。

(1) カラー化技術

CGHをフルカラー再生するためには、RGBの三原色の再生像を重畳して再生する必要がある。このための手法はいくつかあるが、本課題では、主として図2に示したダイクロイックミラーを用いた方式の研究を実施した。これは、白色LEDなどの白色光源の光をダイクロイックミラーによってRGBに分離し、それを照明光としてRGBの3枚の高解像度CGHを再生する方式である。再生光は光路を逆行して再びダイクロイックミラーで重ねあわされるため、観察者はフルカラー再生像を見ることができる。

なお、本課題では、ダイクロイックな反射膜で干渉縞を作成し、それを重ねあわせる積層型⁹⁾も試みた。

(2) シーン構成素材の拡張と表現技術の向上

合成開口DHでは撮影が困難な大型の実在物体や風景等をシーン構成素材として使用するため、図3に示す仮想光学系を用い、特定の視線方向にはその向きの像が再生されるホログラフィックステレオグラムを数値合成し、シーン内に取り込んだ。

また、同様に仮想光学系、あるいは伝搬計算法を工夫することにより、合成開口DHで取得した実物体光波を拡大縮小して3Dシーンを構成した。

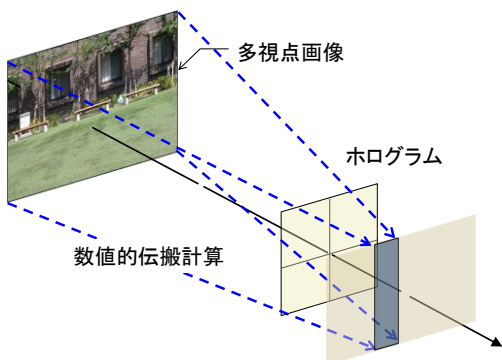


図3 仮想光学系によるホログラフィックステレオグラムの計算



図4 高解像度CGHのフルカラー再生像

(3) 作品制作ソフトウェア環境の構築

従来からホログラム計算/波動光学シミュレーション用のC++クラスライブラリを開発していた。それをベースとしてC++/CLIを用い、CGH計算の複雑なパラメータ設定とシーンデザインがWindows上のGUI環境で可能なアプリケーションを構築した。このアプリケーションでは、デザインしたシーンやパラメータをXMLファイルとして保存でき、おなじアプリケーションで読み込むだけでなく、研究者が自分のコードにそれを取り込むこともできる。



図5 多視点画像を合成した高解像度CGHの再生像

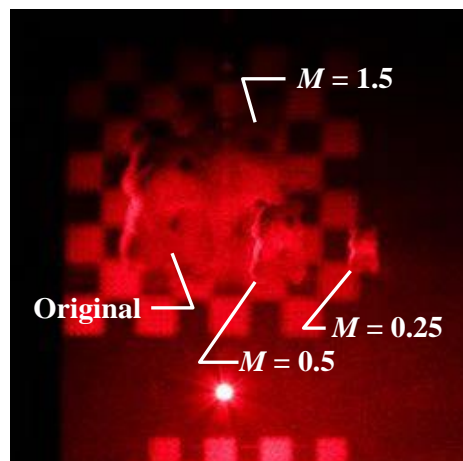


図6 合成開口DHで取得した実物体像を拡大/縮小して作成した高解像度CGHの再生像

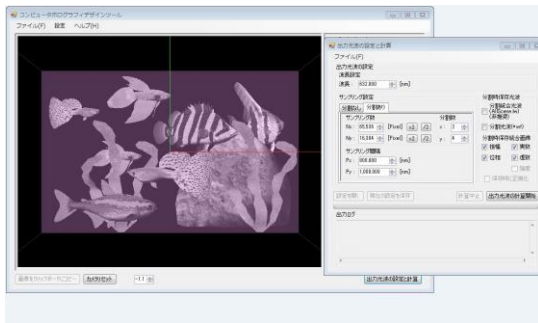


図7 作成したアプリケーションソフトのスクリーンショット

4. 研究成果

(1) カラー化技術

図2に示したダイクロイックミラーを用いたフルカラー再生光学系で光学再生した高解像度カラーCGHの写真を図4に示す. 数値合成時の波長等を最適化した結果, ほとんど色ずれのない美しい再生像が得られている. ただし, 再生光学系が大きくて重く, 実際の展示などで必要な可搬性には欠ける問題点がある.

この問題を解消できる手法としては積層型の作成を試みたが, ダイクロイックな反射膜で干渉縞を作成することが難しく, 良好な結果は得られなかった.

(2) シーン構成素材の拡張と表現技術の向上
多視点画像から数値合成した光波を, ポリゴンで構成したCGモデル物体と同じシーン内に配置して作成した高解像度CGHの光学再生像を図5に示す. また, 合成開口DHで取り込んだ物体光波に拡大縮小編集を行って作成した高解像度CGHの光学再生像を図6に示す.

(3) 作品制作ソフトウェア環境の構築

本課題で作成したアプリケーションソフトウェアのスクリーンショットを図7に示す. CGを用いてCGHの3Dシーン構成がプレビューできる構造となっている. また, 実際の高解像度CGH計算時には, このソフトで構成を完了した3Dシーンやパラメータを保存し, 大容量コンピュータで実行される専用の計算ソフトウェアにそのXMLデータを入力して実際の計算を実行することができる.

<引用文献>

- ① K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara: "Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects," Appl. Opt. **50**, H278 (2011).
- ② K. Matsushima, S. Nakahara: "Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method," Appl. Opt. **48**, H54 (2009).
- ③ K. Matsushima, et al.: Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography, J. Electron. Imaging 21, 023002 (2012).

- ④ H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara: Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms, Appl. Opt. **50**, H245 (2011).
- ⑤ T. Kampfe, et. al.: "Design and fabrication of stacked CGH for multicolor image generation," Appl. Opt. **46**, 5482(2007).

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10件)

- [1] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara, Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography, SPIE Proc., 査読無し, Vol. 9386, 2015, 93860N, DOI: 10.1117/12.2076876
- [2] S. Masuda, K. Matsushima, S. Nakahara, Optimization of the switch-back technique used for fast occlusion-processing in computer holography, SPIE Proc., 査読無し, Vol. 9386, 2015, 93860L, DOI: 10.1117/12.2075998
- [3] 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, 査読有り, Vol. 22, No. 20, 2014, 24450-24465, DOI: 10.1364/OE.22.024450
- [4] S. Masuda, K. Matsushima, S. Nakahara, Techniques for applying rigorous light-shielding to high-definition computer holography, SPIE Proc., 査読無し, Vol. 9006, 2014, 90061G, DOI:10.1117/12.2039216
- [5] W. Nishii, K. Matsushima: A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms, SPIE Proc., 査読無し, Vol. 9006, 2014, 90061F. DOI: 10.1117/12.2039174
- [6] 松田篤史, 松島恭治, 光源スイッチング方式時分割ホログラフィックディスプレイ, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有り, Vol. J96-D, No.3, 2013, 381-388, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-d_3_381&category=D&year=2013&lang=J&abst
- [7] K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Arima, H. Nishi, H. Yamashita, Y. Yoshizaki, K. Ogawa, Computer holography: 3D digital art based on high-definition CGH, J. Phys.: Conf. Ser., 査読無し, Vol. 415, 2013, 012053, DOI: 10.1088/1742-6596/415/1/012053

[学会発表] (計 42 件)

- [1] T. Miyaoka, K. Matsushima, S. Nakahara, Optimization of design-wavelength for unobtrusive chromatic aberration in high-definition color computer holography, Practical Holography XXIX: Materials and Applications, San Francisco (USA), 2015.2.11.
- [2] S. Masuda, K. Matsushima, S. Nakahara, Optimization of the switch-back technique used for fast occlusion-processing in computer holography, Practical Holography XXIX: Materials and Applications, San Francisco (USA), 2015.2.11.
- [3] K. Matsushima, S. Nakahara, S. Masuda, T. Miyaoka, Research facilities for computer holography at Kansai University and several recent topics, International Workshop on Holography and Related Technologies 2014 (IWH2014), Beijing (China), 2014.10.16.
- [4] K. Matsushima, S. Nakahara, Computer holography and a great future of spatial 3D imaging, The 14th International Meeting on Information Display (IMID2014), Daegu (Korea), 2014.8.27.
- [5] K. Matsushima, S. Masuda, S. Nakahara, Performance of the switch-back technique for fast hidden-surface removal in computer Holography, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2014, Seattle (USA), 2014.7.15.
- [6] K. Matsushima, S. Nakahara, Switch-back method: A fast technique for hidden-surface removal in computer holography, Workshop on Information Optics 2014 (WIO2014), Neuchatel (Switzerland), 2014.7.10.
- [7] S. Masuda, K. Matsushima, S. Nakahara, Techniques for applying rigorous light-shielding to high-definition computer holography, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, San Francisco (USA), 2014.2.5.
- [8] W. Nishii, K. Matsushima, A wavefront printer using phase-only spatial light modulator for producing computer-generated volume holograms, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, San Francisco (USA), 2014.2.5.
- [9] K. Matsushima, S. Nakahara, S. Masuda, D. Fujita, Recent techniques for hidden surface removal in computer holography, The 3rd Korea-Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2013), Daejeon (Korea), 2013.11.9.
- [10] S. Murata, K. Matsushima, S. Nakahara, Development of an integrated design system for computer holography, International Workshop on Holography and Related Technologies 2013 (IWH2013), Kitami Institute of Technology (北海道), 2013.10.17.
- [11] W. Nishii, K. Matsushima: A wavefront printer using complex-amplitude modulation by using phase-only SLM, International Workshop on Holography and Related Technologies 2013 (IWH2013), Kitami Institute of Technology (北海道), 2013.10.17.
- [12] K. Matsushima, S. Nakahara, Computer holography: a perfect digital 3D technique for real and virtual objects, 5th EOS Topical Meeting on Optical Microsystems, Capri (Italy), 2013.9.13.
- [13] S. Masuda, K. Matsushima, S. Nakahara, Rigorous light-shielding for hidden-surface removal in high-definition computer holography, Three Dimensional System and Application 2013 (3DSA2013), Grand Front Osaka (Osaka), 2013.6.28.
- [14] D. Fujita, K. Matsushima, S. Nakahara, Digital resizing of reconstructed object images in digitized holography, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2013, Hawaii (USA), 2013.4.24.
- [15] K. Matsushima, S. Nakahara, Wave-field rendering in computer holography: a way of creating the perfect 3D digital image, Electronic Imaging 2013 (EI2013), San Francisco (USA), 2013.2.5.
- [16] K. Matsushima, D. Fujita, Y. Yoshizaki, S. Nakahara, Taking advantage of virtual optics in computer holography, HODIC in Taiwan 2013: Symposium for Holographic Display Technology and Art, Tainan (Taiwan), 2012.12.11.
- [17] K. Matsushima, S. Nakahara, Y. Arima, H. Nishi, H. Yamashita, Y. Yoshizaki, K. Ogawa, Computer holography: 3D digital art based on high-definition CGH, International Symposium on Display Holography 2012 (ISDH2012), Cambridge (USA), 2012.6.28.

[その他]

- [1] K. Matsushima, S. Nakahara, Stepping closer to the perfect 3D digital image, SPIE Newsroom, (6 Nov. 2012). DOI: 10.1117/2.1201210.004526.
- [2] 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/>

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

(2)研究分担者

中原 住雄 (NAKAHARA, SUMIO)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：90067760