

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21500114

研究課題名（和文）

大規模デジタル合成ホログラムの高速生成が可能なポリゴンベース手法の開発

研究課題名（英文）

Development of polygon-based method for fast creation of large-scaled computer-generated holograms

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

研究成果の概要（和文）：コンピュータで合成される大規模なホログラムを作成するため、ポリゴンベースの手法における分割/並列計算、鏡面レンダリング、隠面消去等の手法の開発に取り組んだ。その結果、最大の物では、解像度約 250 億ピクセル、画面サイズ約 13×11 cm<sup>2</sup>、視域角 45°以上の世界最高レベルのホログラムを合成することができた。このホログラムは、従来の 3D 技術では困難な深い奥行き感のある美しい立体像を再生し、米国 MIT ミュージアムでの特別展示にも選ばれている。

研究成果の概要（英文）：Some important techniques, such as parallel/segmented computing, specular rendering, hidden surface removal, are developed for creating large-scaled computer-generated holograms by polygon-based methods. A hologram composed of 25 billion pixels, whose size is approximately 13×11cm<sup>2</sup> and viewing angle is more than 45°, is created in the top data. This hologram reconstructs true fine 3D images with a strong sensation of depth, which has never been achieved by conventional 3D systems, and therefore has been selected as a special exhibition taking place in MIT museum (Cambridge, USA).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：グラフィクス、ホログラフィ

1. 研究開始当初の背景

(1) 当該分野の全般的状況と問題点

計算機合成ホログラム (Computer-Generate Hologram, 以下 CGH) と呼ばれる

ことが多いこの技術は、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フィ技術である。

その最も大きな特徴は、他の多くの立体画像技術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、この技術では光波そのものを発生することである。そのため知覚の相互矛盾が一切発生せず、究極の3次元立体画像と呼ばれていた。

しかしながら、デジタル合成ホログラムは主に二つの問題により実用化を阻まれていた。一つ目は、その光学再生にはサブミクロンオーダーの高い物理解像度と10億ピクセルを超えるディスプレイ解像度が要求されることである。そのため、鑑賞に堪えうるほどのホログラムを作製・表示することは困難であった。

二つ目の大きな問題点は、物体光波をこの様な高解像度で数値合成するためには莫大な計算量が必要であり、その計算時間が長大になることであった。

## (2) 表示技術の状況

研究開始当初、電子的表示デバイスについては、その解像度は高品質なホログラム表示には全く不十分であった。この状況は、現時点でも基本的には変わっていない。しかし、近年の平面型表示デバイスの急速な高解像度化・高フレームレート化に支えられ、時分割技術を用いて将来のホログラフィックディスプレイの基礎的技術を築く下地が整いつつあった。

一方、静止画の描画については、研究開始当初よりサブミクロン微細加工技術の低コスト化が進んでおり、光の波長程度の分解能で超高解像度の画像を製作することが容易になってきていた。

## (3) 計算技術の状況

従来広く用いられてきたのは、点光源に基づく手法(以下、点光源法)であった。この手法は理解が容易であり、ソフトウェアあるいはハードウェアに実装するのも比較的簡単であった。そのため、種々の加速計算アルゴリズムや専用CPUの開発、GPUによる実装等、幅広い研究が報告されていた。

しかしながら、点光源法の計算時間は点光源数とホログラムピクセル数との積に比例するため、特に表面モデル物体の全方向視差ホログラムにおいて、その高解像度化・高品質化が難しいという問題点がある。

そこで著者らは、点光源の発光ではなく、面光源(ポリゴン)からの発光に基づく手法(以下、ポリゴン法)を研究開始当初より提案していた。従来、この様な手法は難しかったが、これはホログラム面に対して様々な角度を有するポリゴンからの光波回折計算が容易でなかったためである。しかし、著者らは光波の回折変換理論とその数値計算法を開発することによりこれを克服していた。

この手法は、FFTを用いた計算が主体であるため計算が大規模化した場合も比較的高速であり、CG技術と類似しているためそこで養われた技術を活かせるという特徴もあった。

その一方、ポリゴンベース手法の問題点として、計算の分割が難しいことがあった。点光源法では、物体上の点とホログラムピクセルとの間の1対1の演算であるのに対し、ポリゴンベースの手法では光波の回折伝搬を行うため、ホログラム面の複素光波分布(フレームバッファ)の分割が難しい。そのため、フレームバッファ分割によるシーケンシャルな処理や非共有メモリを用いたネットワーク分散型並列処理が容易でないことが問題となっていた。

また、ポリゴン法だけに限らず点光源法でもそうであったが、単なる拡散面だけではなく鏡面をレンダリングする技術や、複雑な物体の隠面消去を行う技術が不十分であり、その開発が必要であった。

## 2. 研究の目的

以上のような背景に基づき、主に高解像度で大規模な静止画ホログラムにおいて、ポリゴン法の新しい技術開発を目的とした。また、補助的に将来の電子ホログラフィにも寄与するような技術開発を行った。具体的には、次の4つの研究目的を当初より設定した。

### (1) ポリゴン法における並列/分割計算技術

並列処理はリアルタイム計算に重要である。また、同じ技術で並列処理の代わりに順次処理(分割処理)することにより共有メモリサイズに限定されない大規模な計算が可能になる。

### (2) GPGPUを用いた高速計算技術

計算時間上のボトルネックは、光の伝搬回折計算や光波回折変換であるため、GPUを用いてこの処理を高速化する。

### (3) ポリゴン面の光の拡散性を制御する技術

低解像度のリアルタイムホログラムではさして問題にはならないが、高解像度の大規模ホログラムでは重要となる「質感」を制御する適切な計算手法を開発する。具体的にはポリゴンベース手法で鏡面をレンダリングする技術を開発する。

### (4) 実用的な隠面消去技術

すでにシルエット法による光波遮蔽手法や高精度の光波遮蔽手法を提案しているが、処理に時間がかかる難点がある。これらを改良し実用的な隠面消去技術を開発する。

## 3. 研究の方法

本研究は物体光波数値合成のための数値計算アルゴリズム・手法の開発を主目的としている。開発した手法が有効であるかどうかを検証するためには、最終的には実際に光学再生して像を観察するしかない。そのため、大規模・広視域のホログラムについては、試作を繰り返し、様々な観点から再生像を観察しその結果をアルゴリズムにフィードバックすることを行った。

また、電子的表示デバイスによっても表示を行なって再生像を確認した。ただし、現在の表示システムではそれほど明瞭な再生像を得ることはできないため、この場合は、計算手法による像品質の差異までは確認できず、主に小規模なホログラムにおけるリアルタイム処理の可能性を調べた。

具体的な研究目的項目に沿った研究方法以下の通りである。

#### (1) 並列/分割計算技術

ポリゴン法は光の回折伝搬計算を用いる手法であるため、伝搬計算の分割処理が重要となる。そのため、Rayleigh-Sommerfeld 回折公式を発展させることにより、数値計算手法を工夫した。また、大規模な計算ではネットワーク分散による速度向上を確認した。

#### (2) GPGPU の利用

Nvidia 社が提供する CUDA を用いて、回折伝搬計算を GPU によって実行するライブラリの構築を行なった。

#### (3) 拡散性の制御

ポリゴン法では、ポリゴン光源(面光源)を定義するために表面関数呼ぶ複素関数を用いる。鏡面のレンダリングを可能にするためには、この表面関数の空間スペクトルを適当なモデルに従って整形する手法を開発した。

#### (4) 隠面消去

本研究にもう一つの柱として物体の後方

より飛来する光を物体のシルエット形状マスクにより遮蔽するシルエット法を用いている。従来、物体全体のシルエットを用いるシルエット法を開発していたが、物体に自己オクルージョンがある場合には、完全な遮蔽計算ができなかったことから、バビネの原理に基づき、ポリゴン単位で高速に遮蔽する手法を開発した。

#### 4. 研究成果

本研究の目的 (1) である分割処理については、伝搬距離に制約のあったシフテッドフレネル伝搬計算を用いた従来法に対して、そのような制約が無いシフテッド角スペクトル伝搬計算法を開発し、それを用いた手法を完成した。これにより、3D シーン中に自由に物体を配置することが可能となり、デザインの自由度が大きく向上した。

これを用いて作成したのが、図 1 に示すホログラム「Brothers」である。このホログラムは実顔のポリゴンメッシュを 3D スキャナで計測して作成したものであり、250 億ピクセルで  $12.6 \times 10.5 \text{ cm}^2$  の規模がある。その視域角度は水平垂直とも  $45^\circ$  以上であり、奥行き感が強く非常に美しい空間像を再生する。著者らの知る限り、現在までに制作された最高のコンピュータホログラムである。その先進性の故、このホログラムは、2012 年 6 月から 2013 年 9 月までの 1 年 3 ヶ月間、米国ケンブリッジにある MIT ミュージアム(マサチューセッツ工科大学博物館)に展示される予定となっている。

このホログラムでは、ポリゴン法の CG との類似性を利用してグーローシェーディングを行っており、ポリゴンの境界が見えない滑らかな拡散面の再生像となっている。一方、目的(3)の拡散性の制御については、フォンの反射モデルに基づき鏡面を再生する手法を完成した。それも、多角形面を再生する手法と滑らかな曲面を再生する手法の二つの手法を完成している。さらに、目的(4)の隠



図 1 「Brothers」の再生像



図 2 「Rose in Ring」の再生像

面消去では、光学におけるバビネの原理に基づいてシルエット法を高速に実行する「スイッチバック法」と呼ぶ手法を開発した。これらの手法を用いて制作したのが、図2に示す「Rose in Ring」である。このホログラムは約170億ピクセルの規模があり、薔薇曲線に基づく3次元パラメトリック曲線から数学的に発生した鏡面性曲面の物体を再生する。この物体は複雑な自己オクルージョンを示すが、スイッチバック法による隠面消去により破たんのない奥行き感の強い像を再生することができる。

目的(3)のGPUを用いた計算の高速化では、ポリゴン法に必要な伝搬計算法等のライブラリを実際にCUDAで実装し、CPUの場合のおよそ10倍の計算速度を達成した。このライブラリは本研究のようなホログラムだけではなく、一般の光学シミュレーションでも有用なものである。一方、GPUがあまり大きな内蔵メモリを持たないことから、大規模ホログラム計算には、GPUの適用が難しいことがわかった。また、単純な形状の物体でポリゴン単位の隠面消去が不要な場合には、計算に粗粒度並列性があるため、GPUよりもむしろ多数のコアを用いたCPUによる並列計算の方が大きな効果を発揮することがわかった。

しかし、原理的にどのような複雑な物体でもポリゴン単位で隠面消去を行なえるスイッチバック法では粗粒度並列性がなく、マルチコアCPUによる並列化は効果がない。このような場合にはGPUを用いた計算はかなりの効果が期待できることがわかった。

最後に、ホログラムの動画再生(リアルタイム再生)については、光源スイッチング時分割多重再生方式を提案し、試作システムを開発した。これは、現在著しい発展を続けている高フレームレート表示デバイスを用いて、電子的表示デバイスの低解像度を時分割により補うものである。現時点では、その解像度は前述の高解像度静止画ホログラムには到底及ばないが、提案方式は、可動部が一切なく、レーザーダイオード光源の高速スイッチング性を活かした方式となっているため、今後登場するであろう高フレームレートデバイスの性能を活かした方式となっている。

## 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11件)

- ① 中村将樹, 松島恭治, 中原住雄, 超高解像度CGHにおけるBabinetの原理と部分光波伝搬を用いた隠面消去法, 映像情報メディア学会誌, 査読有, 66巻, 5号, 2012, J136-J143, DOI: 10.1117/1.

JEI.21.2.023002

- ② K. Matsushima, H. Nishi, S. Nakahara: Simple wave-field rendering for photorealistic reconstruction in polygon-based high-definition computer holography, J. Electron. Imaging, 査読有, Vol.21, No.2, 2011, 023002, DOI: 10.1117/1.JEI.21.2.023002
- ③ 松島恭治, 中原住雄, ポリゴン法による100億画素規模の超高解像度コンピュータホログラムの作成, レーザー研究, 査読有, 40巻, 2012, 18-27
- ④ K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara, Digitized holography: modern holography for 3D imaging of virtual and real objects, Applied Optics, 査読有, Vol.50, No.34, 2011, H278-H284, DOI: 10.1364/AO.50.00H278
- ⑤ H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara, Rendering of specular surfaces in polygon-based computer-generated holograms, Applied Optics, 査読有, Vol.50, No.34, 2011, H245-H252, DOI: 10.1364/AO.50.00H245
- ⑥ 村上和也, 松島恭治, 数値的レンズ結像を用いた全方向視差計算機合成ホログラムの波動光学的再生シミュレーション, 映像情報メディア学会誌, 査読有, 65巻, 12号, 2011, 1793-1800, DOI: 10.3169/itej.65.1793
- ⑦ K. Matsushima, Shifted angular spectrum method for off-axis numerical propagation, Optics Express, 査読有, Vol.18, 2010, 18453-18463, DOI: 10.1364/OE.18.018453
- ⑧ K. Matsushima, T. Shimobaba, Band-Limited Angular Spectrum Method for Numerical Simulation of Free-Space Propagation in Far and Near Fields, Optics Express, 査読有, Vol.17, 2009, 19662-19673, DOI: 10.1364/OE.17.019662
- ⑨ K. Matsushima, S. Nakahara, Extremely High-Definition Full-Parallax Computer-Generated Hologram Created by the Polygon-Based Method, Applied Optics, 査読有, Vol.48, 2009, H54-H63, DOI: 10.1364/AO.48.000H54

[学会発表] (計62件)

- ① H. Yamashita, K. Matsushima, S. Nakahara, Image-type high-definition CGHs encoded by optimized error diffusion, Practical Holography XXVI: Materials and Applications, San Francisco, 2012.1.25

- ② H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara, Advanced rendering techniques for producing specular smooth surfaces in polygon-based high-definition computer holography, Practical Holography XXVI: Materials and Applications, San Francisco, 2012.1.25
- ③ 寺口功, 松島恭治, GPU 支援ライブラリを用いた準リアルタイム波動光学シミュレーション, Optics & Photonics Japan, 大阪大学, 2011.11.30
- ④ 松田篤史, 寺口功, 松島恭治, 光源多重方式時分割電子ホログラフィによる水平視域角の拡大, Optics & Photonics Japan, 大阪大学, 2011.11.29
- ⑤ K. Matsushima, H. Nishi, Y. Arima, S. Nakahara, Computer Holography: 3D Imaging of Virtual and Real Objects, International Workshop on Holography and related technologies, Utsunomiya, 2011.11.16
- ⑥ H. Yamashita, K. Matsushima, S. Nakahara, High-Definition Image CGH Created by the Polygon-Based Method and its Reconstruction by White Light, International Workshop on Holography and related technologies, Utsunomiya, 2011.11.16
- ⑦ H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara, Smooth Shading of Specular Surfaces in Polygon-Based High-Definition CGH, 3DTV-Conference, Antalya (Turkey), 2011.5.16
- ⑧ Y. Arima, K. Matsushima, S. Nakahara, Spatial 3D Imaging by Synthetic and Digitized Holography, 3DTV-Conference, Antalya (Turkey), 2011.5.16
- ⑨ H. Nishi, K. Matsushima, S. Nakahara, A Novel Method for Rendering Specular and Smooth Surfaces in Polygon-Based High-Definition CGH, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Tokyo, 2011.5.11
- ⑩ Y. Arima, K. Matsushima, S. Nakahara, Hybrid CGH by Digitized Holography: CGH for Mixed 3D Scene of Virtual and Real Objects, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Tokyo, 2011.5.11
- ⑪ K. Matsushima, Y. Arima, S. Nakahara, Digitized Holography: Spatial 3D Imaging of Virtual and Real Objects, "SPIE Defense, Security + Sensing", Orland, 2011.4.27
- ⑫ H. Nishi, K. Higashi, Y. Arima, K. Matsushima, S. Nakahara, New techniques for wave-field rendering of polygon-based high-definition CGHs, Practical Holography XXV: Materials and Applications, San Francisco, 2011.1.26
- ⑬ K. Matsushima: Spatial Imaging Based on Extremely High-Definition Computational Holography - Wave-Field Oriented 3D imaging -, 17th International Display Workshop (IDW '10), Fukuoka, 2010.12.2
- ⑭ K. Matsushima, H. Nishi, Y. Arima, K. Higashi, M. Nakamura, S. Nakahara, Impact of Spatial 3D Imaging by Extremely High-Definition Computational Holography - Wave-Field Oriented 3D imaging -, 17th International Display Workshop (IDW '10), Fukuoka, 2010.12.2
- ⑮ K. Matsushima, Wave-Field Rendering in Computational Holography - The polygon-based method for Full-Parallax High-Definition CGHs, 9th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science, Yamagata, 2010.8.20
- ⑯ K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara, I. Kanaya, Computational Holography: Real 3D by Fast Wave-Field Rendering in Ultra-High Resolution, SIGGRAPH 2010, Los Angeles, 2010.7.27-28
- ⑰ K. Matsushima, M. Nakamura, S. Nakahara, Novel Techniques Introduced into Polygon-Based High-Definition CGHs, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, Miami, 2010.4.12
- ⑱ K. Matsushima, S. Nakahara, high-definition full-parallax CGHs created by using the polygon-based method and the shifted angular spectrum method, Practical Holography XXIV: Materials and Applications, San Francisco, 2010.1.27

[その他]

- ① K. Matsushima, Computer holography: 3D imaging of virtual and real objects, SPIE Newsroom, 25 April 2011, <http://spie.org/x47735.xml?highlight=x2410&ArticleID=x47735>

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

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：