

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：34416

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26540191

研究課題名(和文) タイリングシステムによる超大型3Dディスプレイ用大規模計算機合成ホログラムの作製

研究課題名(英文) Fabrication of giga size CGH for large scale holographic display using tiling system

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：計算機合成ホログラムに特化し、レーザーリソグラフィシステムを用いて計算で得られた干渉縞パターンをフォトマスク基板にダイレクト描画、現像+クロム膜エッチングすることでバイナリーホログラムを得た。広視域、広視野角のために、ホログラムの拡大化、高精細化が望まれる。広視域化についてはホログラムのタイリングにより数m幅の視域を確保できた。また、広視野角化について、ヒートモードリソグラフィの手法をもとに、フォトリジストに波長オーダーのパターンの描画を試みた。ピクセルピッチ800nmの干渉縞をもとに縮小描画手法を行い、最小320nmのピクセルピッチのホログラム作製を行い、最大80°を超える視野角を得た。

研究成果の概要(英文)：We are developing the fabrication technology of hologram optical elements which is possible about the reconstruction of the true three-dimensional image. In the holography technology, a computer hologram is obtained. Using a laser lithography system, the pattern of the computed interference fringe is exposed directly on the photomask substrate. We are able to fabricate holograms by exposing a computed fringe pattern by the lithography system and etching to the chromium thin film after developing of photoresist. For wide view area, we used a tiling system of holograms with several meters. By the technique of the heat mode lithography, the pixel pattern of the sub-wavelength was exposed on the photoresist substrate. Based on the interference fringe pattern of the 800 nm pixel pitch, using the reduction exposure technique, we fabricated a hologram of the pixel pitch of the submicron like 320 nm with 80 degree of wide viewing angle.

研究分野：レーザー応用工学

キーワード：ホログラム 計算機ホログラム レーザリソグラフィ ディスプレイ タイリング 広視野角 広視域

1. 研究開始当初の背景

ホログラムは3D立体画像再生の技術として近年大幅な発展を遂げてきているが、ディスプレイ用としては規模が小さく、それを用いた種々の分野への実用化には程遠いのが現状である。それを阻害しているのは、実用に耐えうるピクセルサイズがサブミクロンでかつ大きさがメートル規模であるホログラムの作製技術の困難さである。加えて実用化対象となる広視野角を得られるメートルサイズ規模のホログラムのピクセル数は現在の計算機の能力に対して膨大な量になり、計算時間及びメモリの必要量の増大化など大きな問題となっている。この両者の大きな問題をブレイクスルーするため、計算のアルゴリズムの開発、サブミクロンピクセルで構成されるホログラムの作製法およびホログラムのタイリング手法の適用などを駆使し、これらの問題を解決することを課題とした。

2. 研究の目的

このホログラフィやCGHは長い歴史を有しているが、CGHはレーザ光と写真材料を用いた光学的なホログラムの迫力ある3D像と対抗出来ていなかった。CGHにおける再生像が観察できる視域はホログラムに記録されている干渉縞による回折角で制限されるが、計算機技術や描画出力技術の向上によって、図1に示すようなホログラムを作製できるようになり、古典的なホログラムと対抗出来るようになってきた[1]。我々は、これらの干渉縞を計算機により干渉縞画像を合成する計算機合成ホログラム (Computer Generated Hologram: CGH) の作製を行ってきた[2,3]。

図1にホログラムに記録された干渉縞と、異なる角度から撮影したホログラムからの再生像4つを示す。CGHの最大回折角度は記録された干渉縞画像を記録しているピクセルピッチにほぼ反比例する。具体的には可視光を用いるので、図1に示すように1μmのピクセルピッチの場合、赤色のλ=633nmであれば、視野角は18度程度になる。計算機合成ホログラム (CGH) の作製において、今以上に視野角を広げるためには再生像の回折角をより大きくする必要があり、このホログラムの干渉縞の空間周波数は500本/mm以上にすることが求められている。これ以上の要求を満たすためには、描画ピクセルサイズの単位をサブμmにする必要が迫られる。我々はレーザリソグラフィとフォトリソマスク基板を用い、サブミクロンサイズのピクセルで構成されたCGHを作製し、条件を満たす再生像を得ることを試みた[3]。本研究では、レーザ直接描画装置を用いることにより、数十cm角の大型ホログラム素子の作製を行い、その評価・検討を行った。レーザ直接描画装置は、ラスタースキャンによって、ウェハやマスクなどのサブミクロンレンジのフォトリソ露光やフォトエマル

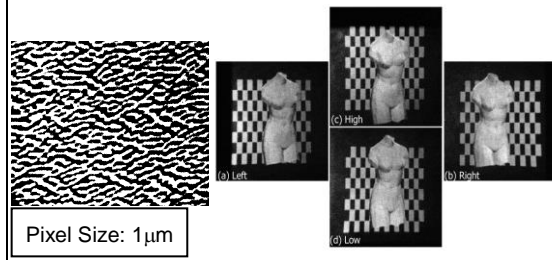


図1 CGHを構成している1μm×1μmピクセル干渉縞の顕微鏡写真と異なった観察点から見た再生像

ジョン露光を目的とした、非常に高い精度を持った装置である。本装置を用いることにより、描画・露光精度の向上、描画パターン及び描画サイズの自由度増大等が見込まれる。

3. 研究の方法

(1) 広視野角ホログラム用の干渉縞パターンの出力装置としてハイデルベルグ・インストルメンツ社製レーザ直接描画装置DWL66及びDWL66+を使用した。基板には市販のガラス基板上にCr膜とフォトリソが塗布されているフォトマスク基板を用いた。図2に基板の詳細図を示す。この基板をレーザ描画後、現像、エッチングを通してホログラムを得た。

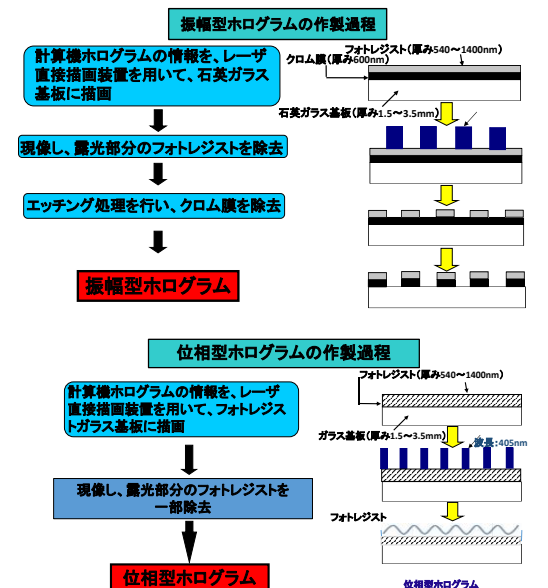
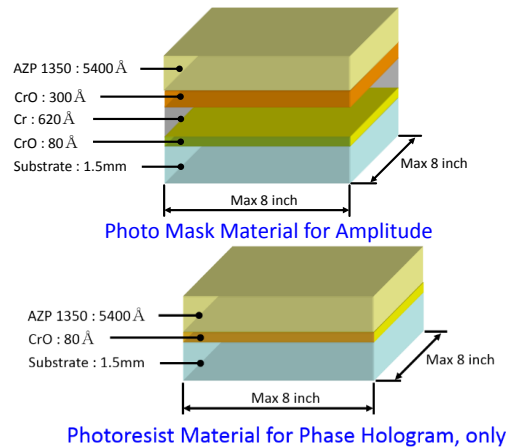


図2 (上)クロム膜付きフォトリソ基板とフォトリソのみの基板、(下)それぞれの処理手順

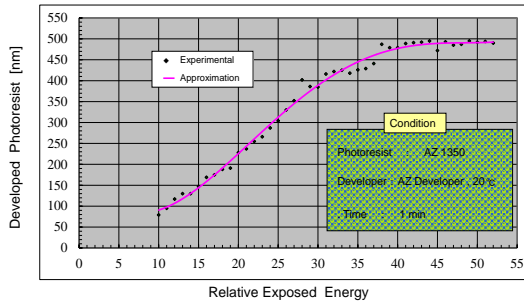


図3 露光レーザー強度とフォトレジストの除去量

図3にレーザー直接描画装置のパワーに対する基板上的レジストの掘れる深さを示した関係の一例を示す。図4には2スポット間のレイリーの解像度の関係図を示す。

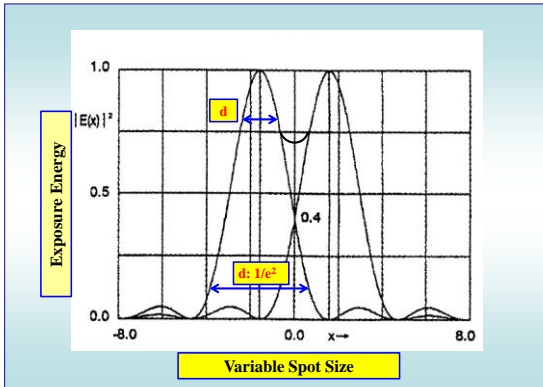


図4 ビームスポット形状と2点の分解能

本実験においては、この描画装置の描画時間の短縮化を図るため2値化された情報を入力するモードを使用したので、計算された干渉縞の強度分布を適当な閾値で2値化を行いバイナリー型ホログラムとして描画した。レーザー直接描画後にフォトレジスト現像とクロムエッチングを行った後の基板は、振幅型バイナリーホログラムとして参照光を照射すると再生像が確認できる。ここで作製したホログラムは、Cr膜を使用しており、それをマイクロミラーとして使用することが出来るため、反射型、透過型両方の機能を持ったホログラムが同時に作製される。

装置のスペックとしては最小スポット径  $0.8 \mu\text{m}$  となっている。2つの点光源の分解能  $\delta$  の定義は色々あるが、例えばレイリーの基準によれば

$$\delta = 0.61 \times \lambda / \text{NA}$$

$\lambda$  は光の波長 (405 nm)、NA は描画用レンズの開口数 (0.55) 計算上は  $0.5 \mu\text{m}$  程度が解像されることになる。しかし、レーザー照射条件や撮像系、レジストの現像条件、Cr膜のエッチング条件によって解像の極限值は変化するので、これが限界ではないと考えられる。

レーザー加工の分野ではヒートモードリソグラフィーという加工法がある[4]。これは、光ディスク製造技術から派生したパターン形成技術である。いわゆるリソグラフィーとは、レーザー光などに感光する材料を用いてパ

ターンを形成する方法である。通常のリソグラフィーではレーザービーム径内全域を感光させるのに対して、ヒートモードリソグラフィー技術ではビーム径の中心部分だけを熱反応させることで、従来よりもはるかに小さな径のパターンを形成することができる。レーザービーム径の約4分の1のサイズも形成できることが示されている。ある一定温度以上に過敏に熱反応する材料特性をパターン形成に利用することで、サイズが小さいだけではなく急峻で鮮明なパターンエッジとすることができる。レーザー光の照射とウェットエッチングによる簡易な方法で微細なパターンが形成できる。

一般的なリソグラフィーでは、パターンサイズは露光に用いるビーム径とほぼ等しくなることから、光の波長を短くすることしかパターンサイズを縮小することができない。そのため、可視光の波長  $400 \sim 700 \text{nm}$  程度かそれ以下の微細なパターンを形成するには、光源として電子線やX線を用いる高価な露光装置が必要になり、高コストな加工プロセスになる。一方、ヒートモードリソグラフィーは、レーザー光の解像限界を超えたパターン形成技術であることから、安価なレーザー露光装置を用いて微細なパターンを大面積に形成することができる特徴がある。我々が用いているポジ型のフォトレジストAZP1350なる感光材料はこれに該当する特性を持っているか不明であるが、従来のフォトマスク基板に塗布されている金属クロム膜にホログラムの干渉縞のパターンを描画するという概念から離れて、フォトレジストに干渉縞の描画パターンを転写できれば良いという手法を用いた。従って作成されるホログラムはレジストの厚みを変調成分を表すため、位相型ホログラムになる。

(2) 視域拡大に関して云えば小さな光学表示素子を使って実物大の物体と同じサイズの再生像を表示させることを考えると観察者の移動方向について、どの位置からでも標識像が見える様にするためには、一般的には横方向に長い光学表示素子を使う必要がある。光学表示素子としてホログラムを使う観点から一度にあまり大きな物を作ることはできない。比較的小さな要素ホログラムを並べて(タイリング)等価的に大きなホログラムにする必要がある。タイリングの考え方を

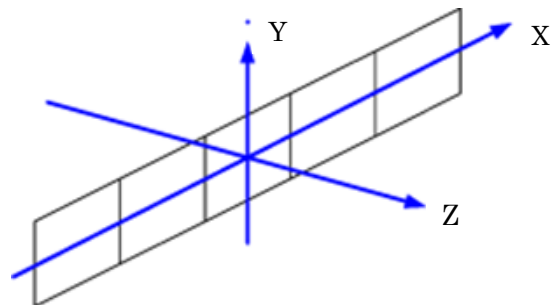


図5 ホログラムのXタイリングと座標系

図5 の座標系に従って示す。観察者の横方向をx軸にとる。高さ方向はy軸である。奥行き方向はz軸にとっている。

ここでは観察者の移動方向に大きなホログラムを作成する方法をxタイリングと称する。図5 に示す様にx方向に対して中央のホログラムの中心を原点に座標系をとる。x方向のタイリングは同じ大きさの光学表示素子をx方向に並べて横長にすることによってなされる。

このホログラムの中心に原点がある座標系を(x1, y, z)とする。タイリングされる要素ホログラムのx軸方向の長さをwとする。この座標系では先ほどの物体上の座標と参照光の座標値がそれぞれ次のようになる。

・ 物体上の点：(xo - w, yo, zo)

・ 参照光：(xr - w, yr, zr)

計算機ホログラムにおける物体光、参照光の計算の時には、個々の要素ホログラムのための座標系(x1, y, z)を用いて計算し個々の干渉縞を求める。このように個々に計算された干渉縞をx軸方向にタイリングすると全体として大きなホログラムとして機能することになる。

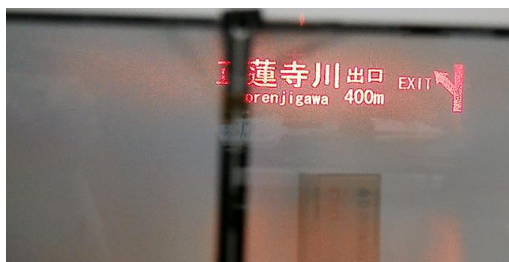


図6 Xタイリングホログラムからの再生像  
2枚の境界真ん中・左ホログラム・右ホログラム

#### 4. 研究成果

1枚だけのホログラムからの距離が離れた横方向の位置では、ホログラム自体のサイズが小さいため視域が狭く、像全体を観察することができなくなる。このことを解消するため作製したホログラムを横方向にタイリングすることにより視域を広くすることができた。図6 は実際のxタイリング(8インチサイズの基板8枚を横方向タイリングに)のホログラムの異なる場所での再生像の見え方を示す。

図4には2スポット間のレイリーの解像度の関係図を示したが本レーザ描画装置はラスタースキャン方式であるのでスキャンでビームの強度パターンが重なる部分が生じる。この時のレーザのパワーや減衰フィルターなどによりレジストへの露光エネルギーを変化させ現像後のレジスト除去量を調節する。そのため図3に示すようなレーザ直接描画装置のパワーに対する基板上的レジストの除去される量を示した関係を求める必要があり、その1例を示した。前述したようにレイリーの基準によると計算上は500nm程度が解像されることになるが種々の作製条件によって解像の極限值は変化すると考えられる。ヒートモードリソグラフィと同様のパターンがレジスト上に得られるとするなら、最少スポット径の4分の1程度であるので、200nmが限界かと思われる。

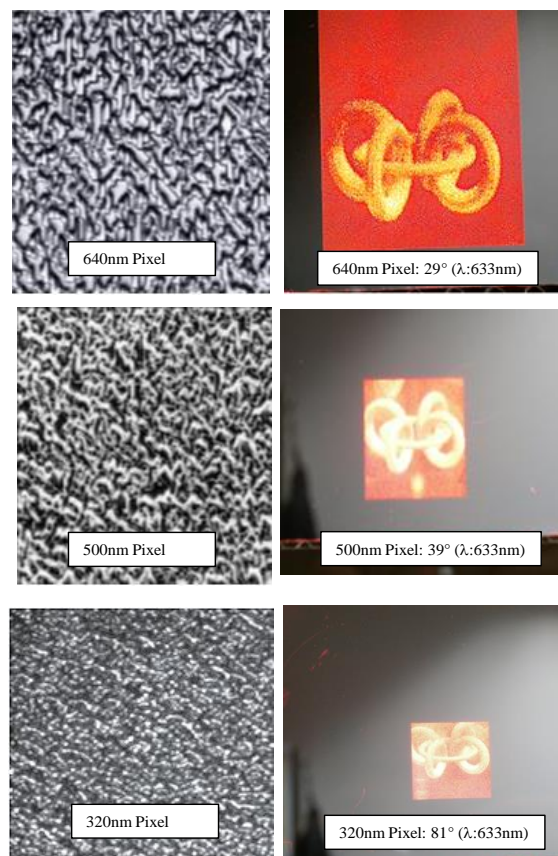


図7 (左)干渉縞の顕微鏡写真、(右)それぞれのホログラムの再生像。縮小露光しているため、ピクセルサイズが小さくなるにつれて描画ホログラムサイズも小さくなっている。

我々は、図3のデータをもとに、レーザのパワーと減衰フィルター、レジストの厚み及び現像時間を調節することによって、レジストの除去量をコントロールした。レーザリソグラフィとしては、800 nm ピクセルの干渉縞の元データを基に縮小露光 ( $\times 0.8$ ,  $\times 0.5$ ,  $\times 0.4$ ) することにより、640 nm、500 nm、320 nm のピクセルサイズのパターンを描画作製した。その結果として図7(左)に示すようなピクセルサイズ 640 nm、500 nm、320 nm の干渉縞を作製し、図7(右)に示すような再生像を得た。320nm ピクセルサイズのパターンで、波長 633nm の赤色を用いた場合、計算上、視野角は  $81^\circ$  になる。なお、再生照明光にはレーザ+LED の小型のプロジェクターを用いた。

#### むすび

レーザ直接描画装置を用いて、広視野角の高解像度なパターンを作製した。また、パターン再生において x タイリング手法を用いることにより広い視域を確保できることを示した。

#### <引用文献>

- [1] K. Matsushima and S. Nakahara, "Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method, Appl. Opt. 48(34), 2009, H54-H63.
- [2] 中原、仲市、川原、土谷、鳥取：“レーザ直接描画装置を用いた大型 CGH の作製”, HODIC Circular, Vol.24 No.4, 2005, 8-11.
- [3] 中原、松島：“レーザリソグラフィを用いた広視野角と視域拡大 CGH の作製”, HODIC Circular, Vol.34 No.1, pp.8-11 (Mar.2014)
- [4] H. Miura, N. Toyoshima, Y. Hayashi, S. Sangu, N. Iwata and J. Takahashi: Jpn. J. Appl. Phys. 45, 2006, 1410.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 中原住雄、増田幸勇、松島恭治、レーザリソグラフィによるサブミクロンピクセル CGH の作製、HODIC Circular、査読なし、34 巻 No. 4、2014、26-30.
- ② 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, 査読あり、22 巻、2014、24450-24465.
- ③ 増田幸勇、松島恭治、中原住雄、コンピュータホログラフィにおけるスイッチバック法を用いた隠面消去の高速化手法、HODIC Circular、査読なし、34 巻 No. 3、2014、6-9.

[学会発表] (計13件)

- ① S. Nakahara, K. Matsushima, Reconstruc-

tion of multi-images on coaxial depth direction using computer holography, 10th International Symposium on Display Holography (ISDH 2015), 02 July 2015, St. Petersburg, Russia.

- ② K. Matsushima, Y. Tsuchiyama, N. Sonobe, S. Nakahara, New techniques in high-definition computer holography, 10th International Symposium on Display Holography (ISDH 2015), 01 July 2015, St. Petersburg, Russia.

- ③ S. Nakahara, K. Matsushima, Laser lithography for fabricating computer generated hologram with submicron pixel-size for wide viewing angle, The 7th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP 2015), 27 May 2015, Kitakyushu International Conference Center, Fukuoka, Japan.

- ④ 松島恭治、中原住雄、コンピュータホログラフィの研究を支援する関大デジタルホロスタジオ、第19回関西大学先端科学技術シンポジウム、2015年1月23日、関西大学、吹田市、大阪府。

- ⑤ S. Nakahara, K. Matsushima, M. Takita, Y. Okino, Reconstructed multi-images on coaxial depth direction from computer generated hologram, International Symposium on Optical Memory 2014 (ISOM 2014), 22 Oct. 2014, Hsinchu, Taiwan.

- ⑥ 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), 16 Oct. 2014, Beijing, China.

- ⑦ K. Matsushima, S. Nakahara, Computer holography and a great future of spatial 3D imaging, The 14th International Meeting on Information Display (IMID2014), 27 Aug. 2014, Daegu, Korea.

- ⑧ 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, 15 July 2014, Seattle, Washington, USA.

- ⑨ S. Nakahara, K. Matsushima, Fabrication of computer generated holograms constituted from sub-micrometer pixel for wide viewing angle using laser lithography, OSA Topical Meeting on Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2014, 16 July 2014, Seattle, Washington, USA.

- ⑩ 宮岡貴史、松島恭治、中原住雄、コンピュータホログラフィにおけるスイッチバック法を用いた隠面消去の高速化手法、3次元画像コンファレンス、2014年7月11日、東京

大学 武田ホール、東京都。

⑪増田幸勇, 松島恭治, 中原住雄、コンピュータホログラフィにおけるスイッチバック法を用いた隠面除去の高速化手法、3次元画像コンファレンス、2014年7月11日、東京大学 武田ホール、東京都。

⑫ K.Matsushima, S.Nakahara, Switch-back method: A fast technique for hidden-surface removal in computer holography, Workshop on Information Optics 2014 (WIO2014), 10 July 2014, Neuchatel Switzerland.

⑬ S.Nakahara, K.Matsushima, Laser lithography to producing computer generated holograms with 3D image and wide-field of view, 18 June 2014, Vilnius, Lithuania.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

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