

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560032

研究課題名（和文） トポロジカル光波生成のための計算機ホログラム設計法の開発

研究課題名（英文） Development of computer-generated holograms for topological optical wavefront generation

研究代表者

吉川 宣一 (YOSHIKAWA NOBUKAZU)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00282335

研究成果の概要：再生像の位相に対して相互作用の概念を導入することにより自己組織化機構に基づいた CGH 設計法を開発した。任意パターンに対しても位相の連続性を実現し、スペックルノイズの完全な除去に成功した。空間光変調器を用いて収差補正された位相型 CGH を実現し、再生像のノイズが十分に抑制されることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：トポロジカル光波、計算機ホログラム、光渦、位相制御、自己組織化、スペックルノイズ

1. 研究開始当初の背景

近年、光渦という特異な性質をもつ光波が注目されている。光渦とは、ビーム面内において光軸を周回する方向に連続的に位相が変化して光軸を周回すると $2m\pi$ (m : 整数) だけ変化するような螺旋位相分布によって発生するものであり、光渦の周回を中心点では光強度がゼロになる位相特異点をもつ。このような光波はトポロジカルチャージで定義される軌道角運動量を持つ。トポロジカルチャージは光が示す量子力学的な性質と考えられ、光の新しい制御パラメータとして量子光学などへの応用が期待されている。このと

き m はトポロジカルチャージ数と呼ばれている。本研究では光渦を有する光波をトポロジカル光波と呼ぶことにする。

トポロジカル光波の生成法は、レーザー共振器の固有モードである Laguerre-Gaussian モードを直接利用する方法とスパイラル位相板や計算機ホログラム (Computer-generated hologram: CGH) を用いて平面波を変調して間接的に生成する方法に大別されるが、さまざまな制限のため、一つの光渦を発生させることが多い。そのため、光渦が本来持っている光波の空間における幾何学的な位相分布という新しい光のパラメータの研究は十分ではなく、多数の光渦を自由に

発生させる手法の開発が期待されている。

CGH を用いたトポロジカル光波の生成法の一つにスペックルノイズを利用する方法がある。スペックルノイズとは、散乱物体のCGHからの再生像に含まれる多数の斑点状のノイズのことであり、その周囲で螺旋位相をもつため、空間的にランダムに分布した光渦として知られている。しかし、スペックルノイズがトポロジカル光波として利用されることはほとんどない。なぜならば「必要なスペックルノイズを発生させること」と「不要なスペックルノイズを除去すること」を同時に行うことが困難であるからである。さらにCGHの回折効率は低いため、応用を考えると位相型CGHが望まれるが、位相型CGHは複素振幅の振幅項を一定にする非線形操作が行われるため、スペックルノイズが発生し易いという問題もある。

本研究では、このスペックルノイズを利用するCGH方式に注目する。CGH設計により必要な位置に光渦を発生させることは可能と考えられるが、不要なスペックルノイズの除去は大きな問題である。これまでにスペックルノイズの抑制に関する最適化設計法が提案されているが、再生強度に対する最適化の場合が多く完全な除去は困難であった。

スペックルノイズの制御のためには新しいCGH設計思想が必要である。そこで本研究では自然界に見られる自己組織化による秩序形成、特に、液晶の自己組織化におけるダイナミクスに注目した。液晶は、液体から液晶状態に移ると液晶分子の向きにマクロな秩序が現れる。このマクロな秩序は空間のあちこちで様々な向きに発生するため、異なった領域の境界では秩序が急激に変化することから欠陥が生じる。これが液晶におけるトポロジカル欠陥と呼ばれる構造である。これらの欠陥は互いに衝突することにより消滅（対消滅）を繰り返し、より秩序の高い状態へと変わっていく。注目すべき点は、液晶のトポロジカル欠陥は対消滅により取り除くことができることである。液晶分子のダイレクタの配向ベクトルとスペックルノイズにおける位相の間に類似性を見つけることができる。液晶の対消滅の現象、すなわち、自己組織化による秩序化機構をCGH設計に導入することができればスペックルノイズの制御が可能になると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、トポロジカル光波生成のための自己組織化による秩序化機構を導入したCGH設計法を新たに提案する。さらにスペックルノイズの除去および任意の特性をもつトポロジカルチャージを任意の位置に多数発生させる設計法を開発を行う。また、空間

光変調器を用いた光学実験によるトポロジカル光波の検証実験を行い、自由度の高いトポロジカル光波の生成法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 自己組織化機構を導入したCGH設計法の開発

CGH設計法として反復フーリエ変換法 (Iterative Fourier transform method: IFT) がある。この手法は、ホログラムと再生像の複素振幅に対して実空間とフーリエ空間において制約条件を適用しながら、回折計算に基づいて反復的に計算して、最終的に収束したホログラムの複素振幅から最適なCGH情報を求める方法である。本研究ではこのIFTを採用する。また、応用面の要請から位相型CGHの設計を行う。

CGH設計に自己組織化機構を導入するにあたり、エントロピーが増大するよりもエネルギー的に安定する平衡状態を作り出すような秩序化のための相互作用が必要となる。本研究では、ある一点の位相はその周囲の位相によって影響されて決定されるという相互作用を定義する。これは物理的に存在する相互作用ではなく、コンピュータ内の計算において独自に定義するものであるが、位相の特異性に関する考察から十分に妥当性があるものとする。この相互作用により、小さな領域で起こった位相の連続性がダイナミックな変化として周辺領域にドミノ的に伝播して最終的には全体で連続な位相分布を形成するようになり、再生像からは位相特異点が消滅することになる。さらに位相の均一化を抑制するために再生像に非平衡なエネルギー分布を導入する。これらの条件は再生像面における拘束条件として導入する。

(2) スペックルノイズ除去のための位相平滑化方式の実装と解析

トポロジカル光波生成のために、まず自己組織化機構を導入したIFTによりスペックルノイズの除去を行い、連続的な位相分布をつくることを考える。任意の位置にトポロジカルチャージを発生させるためには、その後に螺旋位相を再生像に固定するように埋め込んで最適化を行えばよい。

IFTでは二次元複素振幅情報の反復計算を行うため、計算時間やメモリ利用率の最適化も重要である。実用的なアルゴリズムの開発を行い、大きな空間バンド幅をもつCGHに対しても対応できるようにする。

これらの方針に基づいてCGH設計ソフトウェアを開発し、提案手法の詳細な解析を行う。

(3) 位相変調型空間光変調器を用いたCGHの再生実験

位相型CGHを実際に実現するために、本研究では位相変調型の空間光変調器を用いる。

再生像は高感度 CCD カメラで観察する。螺旋形状の位相分布を測定するため、デジタルホログラフィによる計測系を組み再生波面の位相分布を調べられるようにする。また、空間光変調器を用いて光学システムの収差特性の最適化を行えるようにする。

4. 研究成果

(1) 自己組織化機構を導入した CGH 設計法の開発

CGH 設計の基本となる IFT アルゴリズムを図 1 に示す。本研究では位相型 CGH を考えるため、フーリエ空間の制約条件として、振幅を 1 にするハードクリップ処理と CGH の大きさに相当する帯域制限処理を用いた。実空間の制約条件には位相の相互作用を新たに導入した。位相の相互作用として、ある一点の位相は周囲の位相分布の値と近い値になるように決定される、という原理を考え、ここでは作用領域内の位相の平均値を用いる方法を考案した。対象となる値が周期性を持つ位相であるため、たんなる平滑化処理とは異なる手続きが必要になる。

位相平滑化の方法として、直接位相平滑化法と複素振幅平滑化法を考案した(図 2)。直接位相平滑化法は、位相の範囲を $-\pi \leq \theta < \pi$ に限定して、位相の平均値をとる方法であり、位相の周期性を無視することになる。複素振幅平滑化は複素振幅の位相値を偏角として持つベクトルをつくり、合算したベクトルの偏角を位相の平均値とする方法であり、ベクトルとして扱うため位相の周期性を内包する。

実際に位相平滑化を用いて最適化を行うと、位相値が一定値に収束する結果が得られた。これは平滑化された位相をもつ複素振幅のスペクトルが低周波数領域に集中してしまうため、フーリエ空間における振幅一定の

拘束条件を適用すると、意味のある位相情報が CGH の帯域の一部だけにしか存在できないためである。そこで、実空間の制約条件として、再生像が存在する信号領域とそれ以外のノイズ領域を考え、それらの領域に対して非平衡なエネルギー分布を導入する方法を考案した。これは、再生像のエネルギー比が、信号領域：ノイズ領域 = $\alpha : 1 - \alpha$ 、(α ：分配係数) になるように振幅を規格化することで実現される。 α の値は回折効率と等価である。また、位相平滑化は信号領域のみに適用することにした。 α の値は 0.1~0.2 の値を持つとき十分なスペックルノイズの除去効果が得られた。一度スペックルノイズを除去した後に α を 0.5 程度まで増やしてもスペックルノイズが発生しないという性質があったが、最初から大きな値にするとスペックルノイズの除去が困難になることがわかった。

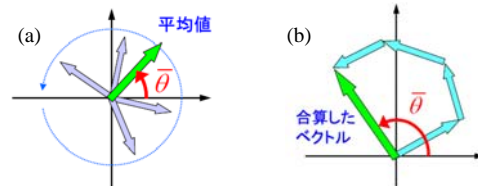


図 2 (a)直接位相平滑化と(b)複素振幅平滑化

(2) スペックルノイズ除去のための位相平滑化方式の実装と解析

新しい実空間の制約条件を用いて CGH 設計を行ったところ、スペックルノイズの除去が可能であることを確認した。

直接位相平滑化法においては位相の取りうる範囲が制限されるため位相特異点そのものが生じなくなることが分かった。図 3 (a), (b) に最適化された CGH からの再生像の強度分布と位相分布を示す。位相分布は見かけ上は複雑なパターンを形成しているが全ての範囲で連続であり、螺旋位相は全く発生していない。それゆえにスペックルノイズはまったく発生していない。この場合、トポロジカルチャージ数はゼロであることから、再生像の領域において光波は平面波とトポロジカルに同相である、といえる。一様な強度でも同様な結果が得られた。

複素振幅平滑化法では、スペックルノイズが発生するが、自立的に位相特異点を排除して位相が連続になろうとする機構があることがわかった。図 4 に対消滅によるスペックルノイズの除去の様子を示す。強度分布においてスペックルノイズの見かけ上の違いはないが、位相分布をみるとその位相の回転方向がそれぞれ決まっていることが分かる。異なる位相の回転方向をもつ 2 つのスペックルノイズが衝突すると対消滅が起こり、2 つのスペックルノイズは一度に除去され、対消滅後の位相分布は連続となった。スペックルノ

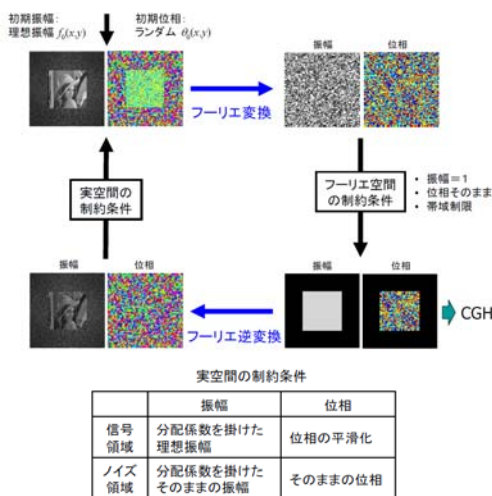


図 1 自己組織化機構を導入した反復フーリエ変換法

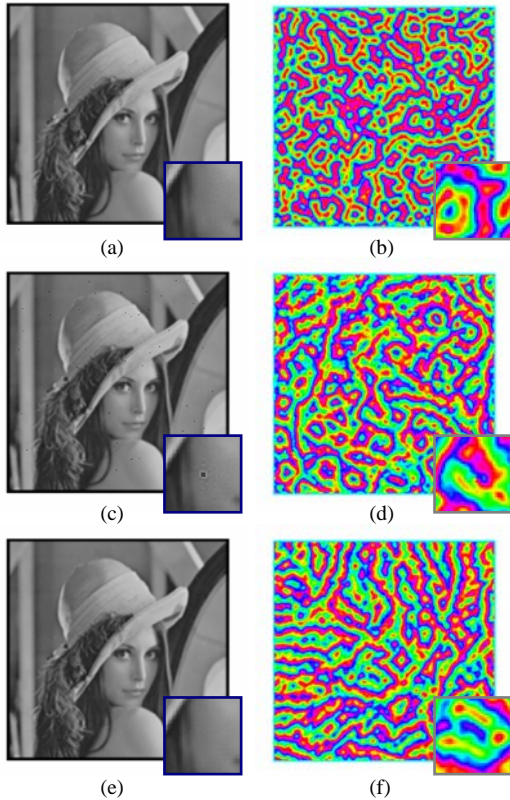


図3 直接位相平滑化法を用いて最適化されたCGHの再生像の(a)強度分布、(b)位相分布、複素振幅平滑化法の場合の(c)強度分布、(d)位相分布、流れのある複素振幅平滑化法の場合の(e)強度分布、(f)位相分布。小枠は拡大された中央部。

イズの位相の回転方向により、同方向ならば引き合い、異方向ならば反発しあう様子が見られた。さらにスペックルノイズが信号領域からノイズ領域へ排出されるという新しい現象が発見された(図5)。これは対消滅とは異なり一つのスペックルノイズでも除去することが可能である。

CGH設計は回折理論に基づいているため、引力・斥力に相当するものは原理的に存在しない。また、計算モデルにも引力・斥力となるような条件は入っていない。あたかも位相分布が自律的に位相特異点を排除しようと働くような自己組織化機構が実現しており、反復回数を増やすことによりスペックルノイズの除去は可能になった。しかし、実際には反復回数は有限であり、最終的な再生像の結果は図3(c)、(d)のようにスペックルノイズの完全な除去は困難であった。

そこで強制的にスペックルノイズをノイズ領域に排出する新しい平滑化カーネルを考案した。これは一般的な平滑化カーネルの一部を0に置き換えて欠陥をつくったものである。複素振幅平滑化においてこのカーネルを用いると位相分布に流れが生じる。対消滅が起こらずに孤立した位相特異点は信号領域の端まで流されて最終的にはノイズ領域

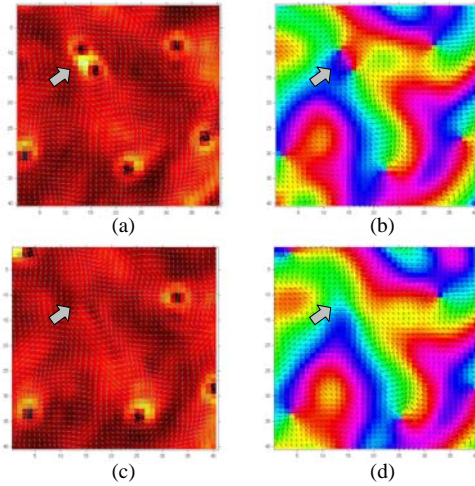


図4 (a)スペックルノイズの対消滅前の強度分布と(b)位相分布、(c)対消滅後の強度分布と(d)位相分布。

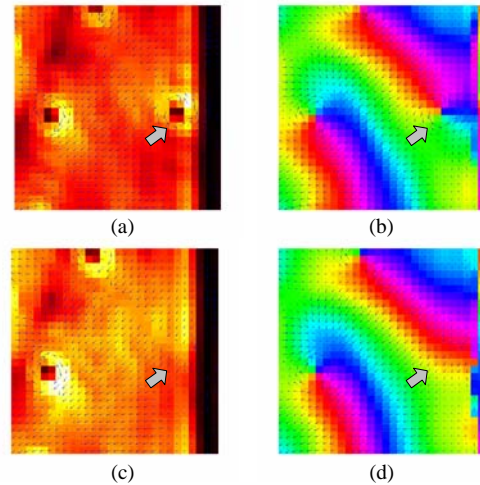


図5 (a)信号領域にあるスペックルノイズの強度分布と(b)位相分布、(c)ノイズ領域へ排出後の強度分布と(d)位相分布。

へ排出される。これにより少ない反復回数で全ての位相特異点を除去することが可能になった。この流れのある複素振幅平滑化を行った結果を図3(e)、(f)に示す。流れの方向に依存した複雑なパターンを形成しているが、位相分布は全ての範囲で連続であり、スペックルノイズを全て除去できることに成功した。

再生像の位相分布(図3(b)、(f))の断面形状の一部を図6に示す。直接位相平滑化法では位相が1波長程度の範囲に収まり、複素振幅平滑化法では4波長以上の範囲に拡大していた。これは位相平滑化における周期性の有無の影響と考えられる。これらの違いによる再生像の影響を計算機シミュレーションにより調べたが、明らかな差異は見られなかった。これらの影響は実際にCGHをつくる場合と合わせて考える必要がある。

制約条件の有無による自乗誤差の変化を図7に示す。反復回数は5000回とした。実

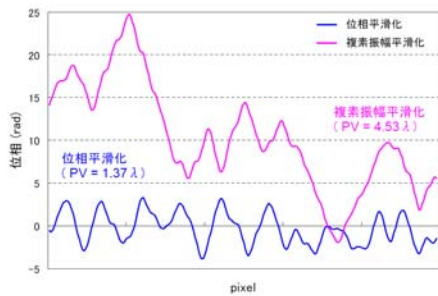


図 6 各方式における再生像の位相の断面形状.

空間の制約条件は、位相特異点が除去された後は実質的な効果なくなるので、位相の連続性が保たれた時点で解除して最終的な位相分布を求めた。いずれの方式においても今回導入した実空間における制約条件、非平衡エネルギー分布と位相の平滑化、があるとき最も誤差の少ない値が得られており、提案手法によって位相特異点の除去が効果的に行われていることがわかる。

スペックルノイズ除去の後に任意の位置にトポロジカルチャージを発生させることを検討した。実空間の制約条件として、螺旋位相を固定するように埋め込む方式を提案し、トポロジカルチャージが発生することを確認した。しかし、螺旋位相と周囲の位相分布を滑らかにつなげるためには十分な反復回数が必要であることがわかった。

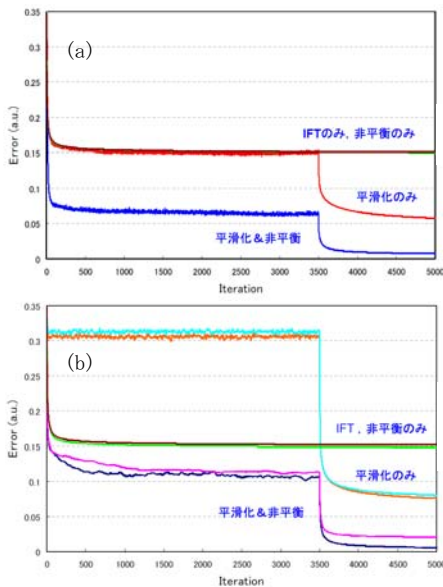


図 7 (a)直接位相平滑化法と(b)複素振幅平滑化法を適用したときの自乗誤差の変化.

(3) 位相変調型空間光変調器を用いた CGH の再生実験

反射型液晶デバイス LCOS 型空間光変調器 (浜松ホトニクス社製, Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulator: LCOS-SLM) を用いて CGH を実現した。LCOS-SLM は光の位

相のみを変調することが可能である。画素ピッチが 20mm なので画像再生には十分ではないが、CGH データのリアルタイム表示や収差補正などが容易にできるという利点がある。図 8 に実験システムを示す。ここではフーリエ変換型 CGH を考えているため、レンズにより光学的フーリエ変換を行い、CCD カメラで再生像を取得する。CGH 情報にレンズの位相情報を加えると、レンズが不要になり実験系の簡素化が可能になる (レンズレス方式)。また、参照光を別方向から CCD に向けて照射することにより再生波面をデジタルホログラフィとして記録することができる。対象画像は 256×256 画素の二値画像 (face) と 512×512 画素のグレースケール画像 (LENNA) を用いた。焦点距離 $f=500\text{mm}$ のレンズを用いた。

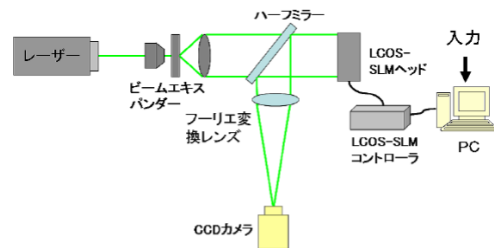


図 8 CGH 再生光学系

図 9 に face の再生像を示す。(a)はフーリエ変換レンズを用いた光学系による従来法の再生像であり、斑点状のスペックルノイズが発生していた。(b)はフーリエ変換レンズを用いた光学系による直接位相平滑化法の再生像であり、線状のノイズが発生していた。フレネル回折による再生シミュレーションを行ったところ再生面ではこのような線状ノイズは発生しないが、再生面の手前で線状の再生パターンが発生することがわかった。すなわち、再生光学系に収差が発生しており十分なフーリエ変換作用が行われていないと考えられる。そこで収差補正項を加えて CGH の再生を行ったところ、(c)のような線状ノイズは抑制されてほぼ一般的な再生強度を得ることができた。(d)は直接位相平滑化法の場合の再生シミュレーション結果であり、(c)とよく一致していることがわかる。

図 10 に LENNA の再生像を示す。従来法に比べて提案法のほうが細部も認識できるようになった。しかし、線状のノイズが残ってしまったため位相平滑化法と複素振幅平滑化法およびフーリエ変換レンズ方式とレンズレス方式の再生像の違いはあまり確認できなかった。デジタルホログラフィを用いた解析でもほとんど差は見られなかった。これらの差異を解析するためには、LCOS-SLM の画素の大きさの制限に合わせた再生パターンを用いて伝搬する光波の位相分布の変化を詳細に調べる必要がある。

本研究では、再生像の位相に対して相互作用の概念を導入することにより自己組織化機構に基づいた CGH 設計法を開発した。提案手法は CGH 合成における新しい設計思想に発展するものと考えられる。任意パターンに対しても位相の連続性を実現し、スペckルノイズの完全な除去ができることを示した。

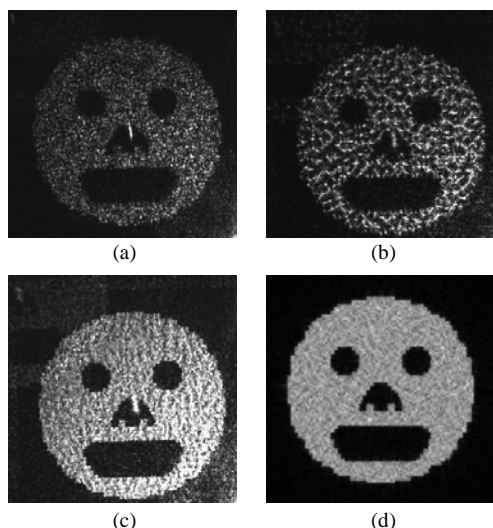


図 9 (a)フーリエ変換レンズ方式の従来法、(b)フーリエ変換レンズ方式の直接位相平滑化法、(c)収差補正を行った場合の再生像、(d)位相平滑化法の場合の再生シミュレーション。

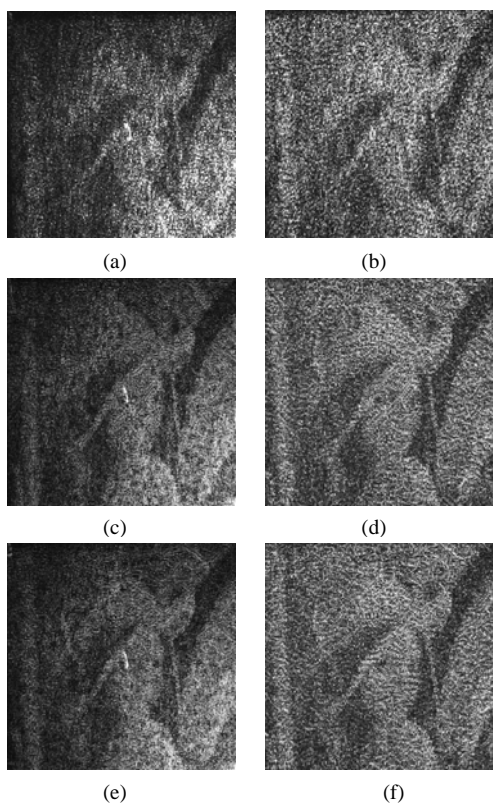


図 10 (a),(b)従来法、(c),(d)位相平滑化法、(e),(f) 複素振幅平滑化法、左はフーリエ変換レンズ方式、右はレンズレス方式の再生像である。

再生像の位相分布は図 3 に見られるように奇妙なパターンを形成した。このようなパターン形成は時間発展的な自己組織化においてよく見られるものである。自然界における自己組織化現象と比較および CGH 設計における位相パターン形成の原因の解明により、光渦の位置や回転方向を制御した自由度の高いトポロジカル光波生成のための効率的な方法が得られると考えられる。将来的には、制御された光渦を用いて原子や微粒子の角運動量制御や高分子に対するトポロジカルな物質構造制御などトポロジカル光波のもつ幾何学的位相の特徴を利用した応用が期待される。

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 1 件)

- ① Nobukazu Yoshikawa and Sinya Ogami, Indirect synthesis of interference terms in digital holography, Optics Letters, Vol.34, pp.7375-7377 (2009) 査読有。

[学会発表] (計 6 件)

- ① 吉川宣一, 月岡万早人, 仮想的な位相の相互作用を用いた計算機ホログラム設計法, 第 56 回応用物理学関係連合講演会 p-ZX-3, p. 1049, 2009/3/31 筑波大学。
- ② Nobukazu Yoshikawa and Shinya Ogami, "Indirect interference term generation in digital holography", International Commission for Optics ICO 21, 2008 Congress, Book of Proceedings, p.161, 2008/7/9, Sydney convention & Exhibition centre, Sydney, Australia.
- ③ Nobukazu Yoshikawa and Yuichi Sugawara, Depth detection of target object using parallax information produced by digital holography, Proc. of the Second International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Kumamoto, Japan, B16-03, 2007/9/6, Kumamoto City International Center, Kumamoto, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 宣一 (YOSHIKAWA NOBUKAZU)

埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00282335