

位相変調におけるホログラム記録再生 メカニズムの解析

千田 正勝^{*1}, 金澤 大地^{*2}, 三浦 駿^{*2}

Analyses of Holography Reproduction Mechanism in Phase Modulation

Masakatsu SENDA, Daichi KANAZAWA, Shun MIURA

Intensities of holography reproduced images have freedom for phase components, and each calculated point on original image can be given any phase value in the computer-generated hologram. The reproduction mechanism when original images are phase-modulated was computationally analyzed in this work. The high-order sampling periodicity diffraction occurs faithfully according to the Raman-Nath condition, and this phenomenon does not depend on with or without phase modulation. So, ghost noise generation can be avoided by similar ways to the case without phase modulation. The phase periodicity, as well as the amplitude periodicity, plays an effective role as periodicity for holography diffraction, and phase modulation changes intensities and shapes of reproduced bright spots. The phase modulation can be a useful method for controlling reproduced images.

KEYWORDS : holography, computer-generated hologram, phase modulation

1. まえがき

ホログラフィは光の干渉・回折を応用した技術であり、媒体への情報記録に物体光と参照光を利用する記録型、および計算と微細加工(計算機ホログラム: computer-generated hologram(CGH))によって媒体を作製する読出し専用型がある。体積・多重記録、二次元一括処理の特長を活かし前者は大容量・高速次世代データストレージシステムへの適用が、また後者は小型大容量コンテンツ頒布用メモリ¹⁻⁴⁾および光通信・記録用光学素子への適用⁵⁾が検討されている。光波面は振幅成分と位相成分を有し、ホログラム再生像は光強度の二次元分

布として表現される。光強度は振幅²に等しいため、ホログラム再生において再生像は、位相情報の自由度を有することになる。特に CGH の場合には、基画像に対し容易に任意の位相変調が可能であるため、これによる再生像の制御、およびこれに伴う画質向上、メモリ応用時のビット誤り率向上等が期待される。一方で CGH では、基画像や各波面が標準化周期、符号周期を持つためその記録再生過程は複雑であり⁶⁾、これにさらに位相変調が加わった場合については不明な点が多い。本論では、位相変調による再生像制御法の確立を技術的背景とし、位相変調を伴った CGH におけるホログラム記録再生のメカニズム解析を計算実験により行った。

*1 電気電子創造工学科(Dept. of Innovative Electrical and Electronic Engineering), E-mail: senda@oyama-ct.ac.jp

*2 電気情報工学科平成 28 年 3 月卒業

2. 検討内容および実験方法

図1に本実験での計算モデルを示す。記録再生光学系には、ホログラフィに通常使用される (a) テレセントリック光学(T)系(記録型での $4f$ レンズ光学系に相当)、およびレンズの無いレンズレス光学(L)系を用いた。図中、 f はレンズの焦点距離、 θ_{NA} は記録再生時の開口数(NA)に対応する角度、また各面の全体が計算領域、その中央部がデータ領域、白抜き部が画像領域である。基画像面からのホログラム面生成(記録過程)、およびホログラム面からの再生像面構成(再生過程)は波動光学解析(回折積分計算)により行い、高速演算処理の過程で発生する巡回関数化雑音を除去するため zero-padding (ZP)処理^{2,7)}を施した。

基画像は種々の周期を持つ。図2にこれらを説明する。まず CGH では基画像、各波面は単位計算点の集まりで構成され、これらは物理的サイズを持つ。これが標準化周期(d_s)である。またメモリ応用にて用いる符号データの場合、明点の周期は画素ピッチ(p)の整数倍となり、これが符号周期(d_c)である。図3に4/9符号^{8,9)}および4/16符号¹⁰⁾を示す。4/9符号は 3×3 画素で1ブロックを成し左上 2×2 画素の明暗組合せにより、また4/16符号は 4×4 画素で1ブロックを成し左上 3×3 画素の明暗組合せにより、各々1ブロック当り (0000)~(1111)の4bitを表現する。これらの符号は1再生輝点の検出に撮像素子の複数画素を用いるオーバーサンプリング、およびテンプレートとの類似度比較を用いるテンプレートマッチ復号を特徴とし^{9,11)}、輝点位置ズレの対処、および高符号化率の実現を可能としている。本研究では、再生状態の観察を容易にするため、データを小規模とし(1111)パターンのみを配置した4/9疑似および4/16疑似符号データを用いた。4/9符号では $d_c=3p$ 、4/16符号では $d_c=2p$ である。本研究では $p=5d_s$ (5倍密計算)とした。一方自然画の場合には、基画像は何らかの光強度を持つ周期 d_s の計算点の集まりで表現される。本研究では自然画として振幅一定の"square"を用いた(図2(e)、(f))。 d_c は輝点の振幅に関する周期であるが、位相変調ではこれとは別に各輝点に個別の位相情報を持たせる。位相に周期性がある場合、これが位相周期(d_p)である。図2では $0/\pi$ 位相変調を例に示した。図中 $0, \pi$ は各輝点の位相を表す。変調無し状態では全輝点の位相は 0 radで揃っている。 $0/\pi$ 位相変調では数輝点毎に輝点

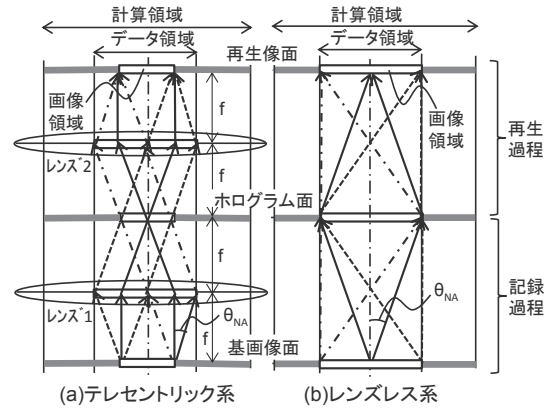


図1 記録再生光学系(計算モデル)

の位相を π rad に反転し周期 d_p を与える。4/9 疑似、4/16 疑似データに対し縦横交互に輝点の位相を $0/\pi$ と変調すると、各々 $d_p=3p$ (図2(b))、 $d_p=4p$ (図2(d))となる。また、"square"に対し10輝点毎に位相を π rad に反転すると $d_p=10d_s$ となる(図2(f))。基画像、各波面が上記のような周期を持つ場合、少なくとも d_s 、 d_c に関してはラマンナス回折条件を満たす場合 d_s 回折、 d_c 回折が発生する⁹⁾。ここでラマンナス回折は光波長(λ)に対し散乱因子サイズが $\ll \lambda$ である場合の回折現象であり、回折条件は、

$$d \sin \theta = n \lambda \quad (1)$$

となる。ここで d は周期、 θ は回折光の出射角度、 n は次数を表す整数、また本研究では $\lambda=0.66\mu\text{m}$ とした。図2で見る限り d_p は基画像に周期を与える

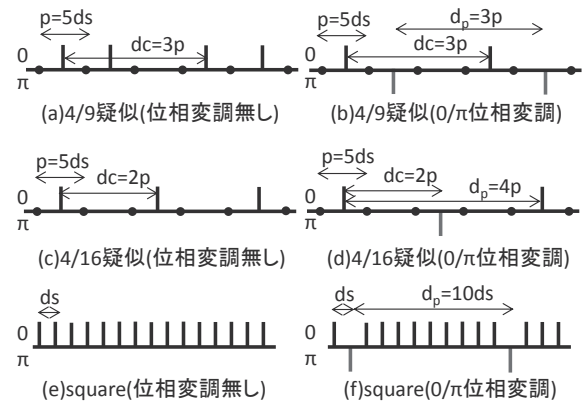


図2 基画像の周期

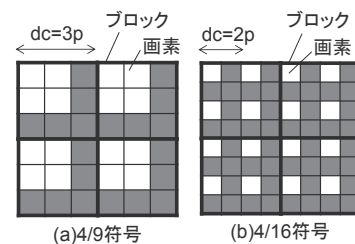


図3 4/9符号と4/16符号

が、このように基画像が周期的位相変調を施された場合の d_s 回折のメカニズム、基画像が周期的/非周期的位相変調を施された場合の d_s 回折およびこれに伴うゴーストノイズ⁹⁾発生メカニズム、および位相変調時における基画像が持つ空間周波数と記録再生メカニズムとの関係などについては不明な点が多く、また位相変調による再生像制御の可能性についても明らかでない。以下では、基画像に種々の位相変調を与え、波面追跡を行うことで上記各条件でのメカニズムの解析を試みる。

3. 検討結果と考察

3. 1 標本化周期 (d_s) 回折

本節では基画像が位相変調された場合の d_s 回折およびゴーストノイズについて解析する。サンプル基画像には振幅一定、周期 d_s の輝点で構成される”square”を用い、 $NA=0.2$ ($\theta_{NA}=11.5\text{deg}$) に固定し d_s を変化させて再生像(計算領域全体)を観察した。

先の検討⁹⁾により位相変調無しの場合には、 $d_s < \lambda$ 時には(1)式を満たす条件は存在せず回折は起きない(①)、 $d_s > \lambda$ 時には(1)式を満たす角度 θ_s 方向に回折光が出射し幾何学的に考えるとこれが画像領域外に出れば回折像の混入は無し(②)、画像領域内に入れば混入有り(③)となること、および図 1 中各面から直上に 0 次回折光(実像)、その周囲に高次 d_s 回折光が出射され、再生像面においてこれら高次回折光による像(高次回折像)が実像に混入・重畳するとゴーストとなることが解っている。ここで位相変調無しとは、基画像上全ての輝点の位相が 0 rad であることを意味する。図 1 のモデルでは上記条件は T 系では① $d_s < \lambda$ 、② $\theta_s > 3\theta_{NA}$ 、③ $\theta_s < 3\theta_{NA}$ 、L 系では① $d_s < \lambda$ 、② $\theta_s > 2\theta_{NA}$ 、③ $\theta_s < 2\theta_{NA}$ に対応する。図 4 の T 系位相変調無しでは、(a) ①: $d_s (=0.5\mu\text{m}) < 0.66\mu\text{m}$ 、(b) ②: $\theta_s (=41.3\text{deg}) > 3 \times 11.5\text{deg}$ 、(c) ③: $\theta_s (=26.1\text{deg}) < 3 \times 11.5\text{deg}$ 、L 系位相変調無しでは、(a) ①: $d_s (=0.5\mu\text{m}) < 0.66\mu\text{m}$ 、(b) ②: $\theta_s (=26.1\text{deg}) > 2 \times 11.5\text{deg}$ 、(c) ③: $\theta_s (=15.3\text{deg}) < 2 \times 11.5\text{deg}$ であり、画像領域に注目すると、両光学系共に(a)、(b)ではゴースト無し、(c)では有りと上記に従うことが確認できる。一方図 4 のランダム位相変調は、基画像上の各輝点の位相値を $0 \sim 2\pi$ rad 間でランダムに設定した場合を示す。図 4 より本変調により T 系、L 系共に再生像は霜降り状となるが、 d_s 回折像の発生のかたに関しては位

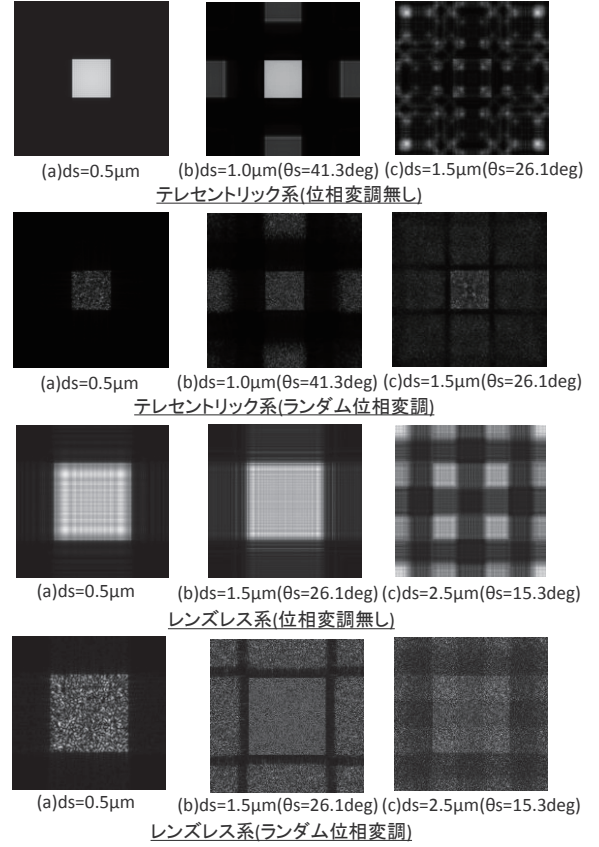


図 4 再生像($NA=0.2$)

相変調無しの場合と同様であることが解る。なお、T 系では位相変調無し(c)の場合を除き、データ領域端からに比較し画像領域端からの d_s 回折像がより強く現れる傾向にある。

次に 0 次光の出射角度を強制的に変化させるような位相変調(斜出射)を施し、同様に d_s 回折のかたを解析した。斜出射角度($\Delta\theta$)は、 d_s 周期で並ぶ輝点の位相を隣接位相差

$$\Delta\phi = 2\pi(d_s \sin[\Delta\theta]/\lambda) \quad (2)$$

とすることで実現する。図 5 に T 系、L 系各々の ②状態に対し、図の上方に $\Delta\theta=5.0\text{deg}$ で斜出射するよう設定した基画像を、また図 6 にこれらに対する各位置の波面の振幅像を示す。ここで L_{1F} はレンズ 1 の直前、 u_h はホログラム面、 L_{2F} はレンズ 2 の直前、 u_r は再生像面での波面を表す。T 系、L 系共に基画像から出た 0 次像は上方に $\Delta\theta=5.0\text{deg}$ だけ移動し、その後最終的に $\Delta\theta=5.0\text{deg}$ だけ下方に移動し再生像面では基の位置に戻る、また高次像は 0 次像に追従して同様に上方、下方に移動する様子が観察される。このように、高次像は各面にて 0 次像全体が(1)式に従いまるごと縦横 $\pm\theta_s (= \sin^{-1}[n\lambda/d_s])$ だけシフトした位置に出現する。

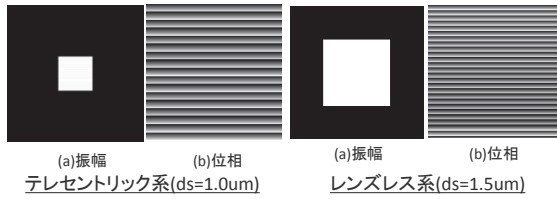


図5 基画像(斜出射 5.0deg)

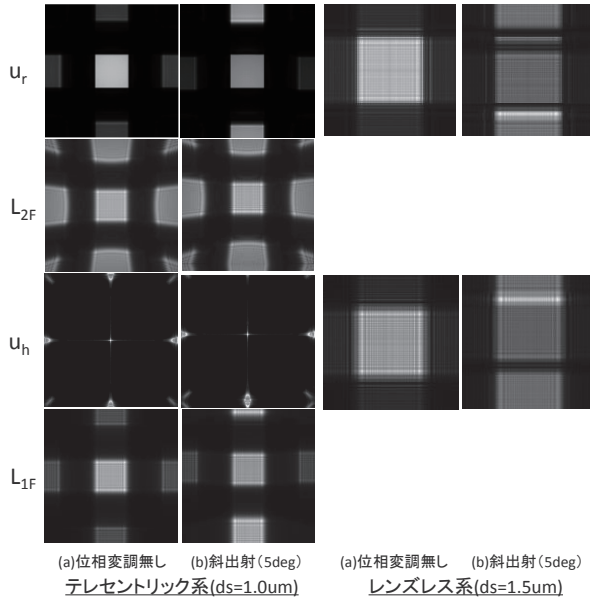


図6 各面の像(振幅, NA=0.2)

以上、L系、T系共に d_s 回折は、変調の有無に依らず、各面にて0次像全体を(1)式に従いまると縦横 $\pm\theta_s$ ($=\sin^{-1}(n\lambda/d_s)$)だけシフトさせる働きを持つことが解る。図4、6の結果は共にこの解釈により矛盾なく説明される。よって、位相変調時も、位相変調無し時と同様、①、②とすることでゴースト発生は回避される。

3. 2 符号周期(d_c)回折、位相周期(d_p)回折

本節ではまず、基画像が周期的位相変調を施された場合の d_p の回折現象に対する有効性について解析する。なお、NA=0.07($\theta_{NA}=4.0\text{deg}$)、0.14($\theta_{NA}=8.0\text{deg}$)、 $d_s=1.34\mu\text{m}$ ($\theta_s=29.5\text{deg}$)とし、T系($\theta_s>3\theta_{NA}=3\times 4.0\text{deg}$)、L系($\theta_s>2\theta_{NA}=2\times 4.0\text{deg}$)共に d_s 回折光を画像領域外とし考慮不要としている。

図7は”square”をベースに4/16疑似符号の輝点箇所のみ位相を πrad とする変調を施した基画像に対するホログラム(振幅像)と再生像である。各画像の外縁が θ_{NA} に相当する。またこの場合 $d_p=2p=10d_s$ であり、図2(f)に対応する。周期 d_p に

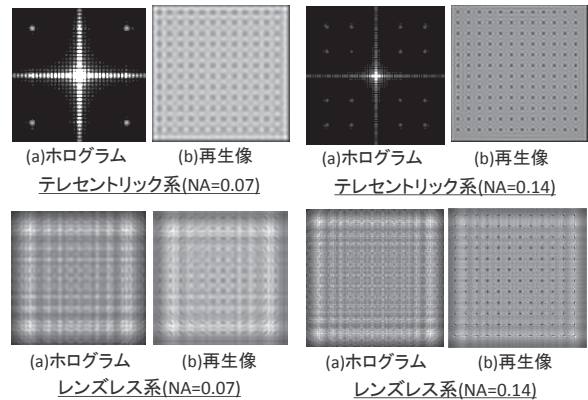
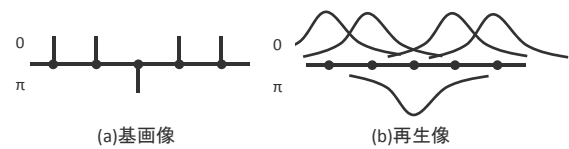


図7 ホログラム(振幅)と再生像

図8 基画像と再生像($0/\pi$ 位相変調)

対する回折光は(1)式により、 $\theta_{p1}=2.8\text{deg}$ (1次光)、 $\theta_{p2}=5.6\text{deg}$ (2次光)、 $\theta_{p3}=8.5\text{deg}$ (3次光)となる。T系では(a)ホログラムは基画像のフーリエ変換(FT)像に相当し、中央に”square”の0次像である十字状パターンと d_p 回折の0次像が、またその周囲にNA=0.07では $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ 以内である1次までの、NA=0.14では $\theta_{NA}(=8.0\text{deg})$ 以内である2次までの高次 d_p 回折像が出現している。L系ホログラムでも同様に回折像が重畳し、干渉縞模様を形成している。上記では基画像に”square”を用いたため基画像上の各輝点の振幅は一定であり、振幅に関しては d_s およびsquareパターン全体のサイズ以外の特別な周期は持たない。上記の結果は、位相のみが周期を持つ場合にもこれが d_c と同様の回折現象に対する有効な周期として機能することを示している。次に(b)再生像を見ると、両光学系共4/16疑似符号の輝点箇所において強度(=振幅²)が減少していることが解る。これはこれら再生輝点において位相が周辺と πrad だけ反転することで振幅のキャンセリングが起きるためと考えられる。この様子を図8に説明する。(a)基画像では位相 πrad の輝点があってもsquareパターン上で強度は一定であるが、(b)再生像においては各再生輝点は光の回折限界により広がり($\sim\lambda/NA$)を持つため、隣接輝点間で振幅の重なり部にキャンセリングが生じ強度が変化する。このように d_p は回折現象において d_c と同等の振る舞いを示し、また再生像上の輝点強度を変化させる機能を有することが解る。

次に振幅が d_c 周期を持つ 4/9 疑似、4/16 疑似符号データに図 2(b)、(d)に示す $0/\pi$ 位相変調を施した場合について、回折状態が明確な T 系を例に解析する。図 9 にホログラム(T 系、振幅)像を示す。いずれも画像の外縁が $NA=0.14$ での $\theta_{NA}(=8.0\text{deg})$ 、画像内の四角枠が $NA=0.07$ での $\theta_{NA}(=4.0\text{deg})$ に相当する。(a)位相変調無しでは、4/9 疑似では(1)式および $d_c=3p=15d_s$ に対応した $\theta_{c1}=1.9\text{deg}$ (1 次光)、 $\theta_{c2}=3.8\text{deg}$ (2 次光)、 $\theta_{c3}=5.7\text{deg}$ (3 次光)、 $\theta_{c4}=7.6\text{deg}$ (4 次光)まで、また 4/16 疑似では同様に $d_c=2p=10d_s$ に対応した $\theta_{c1}=2.8\text{deg}$ (1 次光)、 $\theta_{c2}=5.6\text{deg}$ (2 次光)までが出現している。これに対し(b) $0/\pi$ 位相変調では、4/9 疑似では(a)から縦横に 0、3 次回折点が消失した像が、また 4/16 疑似では(a)の回折点は全て消失し、それらの中間位置に新たに回折点が出現している。以下これらの現象を図 2(b)、(d)を用いて考察する。4/9 疑似では図 2(b)のように d_c だけでなく d_p も周期 $3p$ を持つ。 d_c 回折と d_p 回折は共に各々 $\sin\theta=(n\lambda/(3p))$ にて強め合い、またこれらは通常は互いに弱め合わない。但し周期 p では逆位相となるため d_c 回折と d_p 回折とは弱め合いを起こす。すなわち $\sin\theta=(n\lambda/p)=((3n\lambda)/(3p))$ により、 $0(n=0)$ 、 $3(n=1)$ 次にて回折点の消失が起きることになり、これは図 9 の結果と整合する。なお、位相変調無しの場合、逆に周期 p で同位相による強め合いが起きるため(a)では 0、3 次にて強度が強くなると解釈される。次に 4/16 疑似では図 2(d)より、 $d_c=2p$ 、 $d_p=4p$ である。この図より周期 $4p$ では強め合いが、一方周期 $2p$ では弱め合いが生じることが予想される。これらは回折条件式では各々 $\sin\theta=(n\lambda/(4p))$ 、 $\sin\theta=(n\lambda/(2p))=((2n\lambda)/(4p))$ となり、これは周期 $4p$ に対応した回折光($\theta_n=1.4n\text{ deg}$, n 次光)が出射されるが、このうち偶数次数($2n=0, 2, 4, \dots$)の高次光では回折点の消失が起きることを意味する。これも図 9 の結果を矛盾なく説明する。図 10 に 4/9 疑似、 $NA=0.07$ での再生像(T 系)を示す。図 8 に示したように再生像では、隣接輝点境界にて同位相では振幅の強め合いが、一方逆位相ではキャンセリングが起きる。図 10 では(a)に比較し(b)にて再生輝点サイズは小さく整形され、振幅キャンセリングの様子が確認できる。以上、基画像が d_c 、 d_p を持つ場合、両者が混在した周期性により回折が起きること、位相変調により再生輝点の強度および形状が変化することが解る。

最後に、位相変調時における基画像が持つ空間周波数と記録再生メカニズムとの関係について解

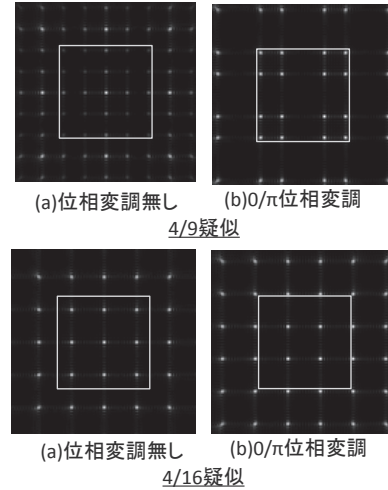


図 9 ホログラム(振幅)

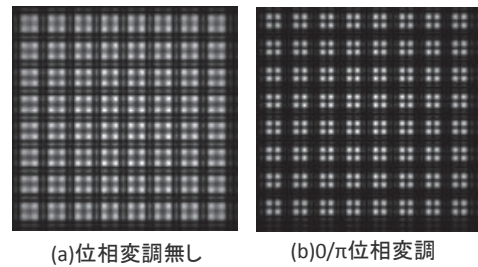


図 10 再生像(4/9 疑似, $NA=0.07$)

析する。T 系にてホログラムは基画像に対する FT 像に相当することから解るように、L 系も含めホログラムの記録再生系は基画像に対する低域通過フィルタ(LPF)として働く。ここでの周波数は空間周波数であり、この場合 LPF のカットオフ周波数に当るのが θ_{NA} である。位相変調無しの場合には基画像(=強度分布=振幅² 分布)の周波数特性がそのまま LPF を通って再生像を構成することになるが、位相変調を伴う場合この関係が成立しなくなる。以下では基画像が位相変調された場合の上記関係、特にランダム位相変調時について考察する。図 11 に(a)位相変調無し($u_{0,p}$: この図のみ 0 rad を白点表記)、(b) $0/\pi$ 位相変調、(c)ランダム位相変調での各面の像(T 系)を示す。4/16 疑似データを用い $NA=0.07$ とした。 $u_{0,p}$ は基画像位相、 $u_{h,a}$ はホログラム振幅、 $u_{r,a}$ は再生像振幅、 $u_{r,p}$ は再生像位相を表す。(a)、(b)に関しては $u_{h,a}$ に見るように、位相間の強め合い弱め合いがあるものの、振幅、位相に関する周波数特性が純粋に反映されて LPF を通り再生像が構成されと考えられる。 $u_{r,p}$ では各再生輝点の位相が $u_{0,p}$ と対応している様子が確認できる。一方(c) $u_{h,a}$ は、基画像の周波数特性を

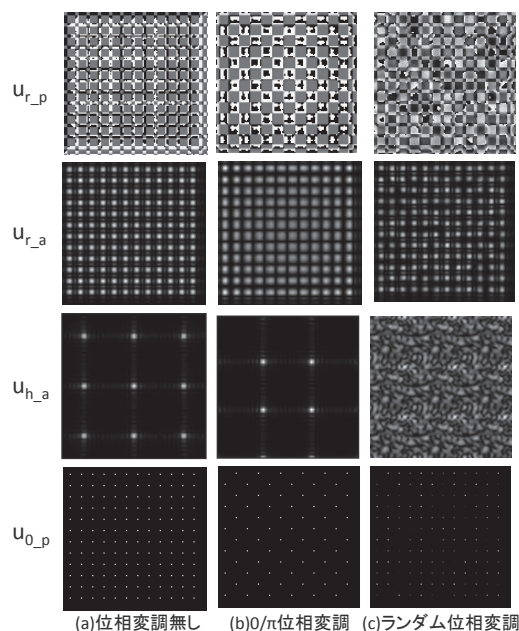


図 1.1 各面の像(4/16 疑似, NA=0.07)

反映したものとはかけ離れた画像全体にランダム分布したものとなる。但し $u_{r,p}$ 上の位相と $u_{0,p}$ の位相とは(a)、(b)と同様、対応関係にある。このことから(c)では、基画像からは周波数特性とは無関係に全方位に様に光が出射し(そのため $u_{h,a}$ では全面にほぼ均一に分布)、このうち $\pm\theta_{NA}$ 内に入ったものが記録再生系を通過し(よってこの場合記録再生系は LPF の機能を果たさない)、再生像はランダムな周波数特性($u_{r,a}$ は種々の周波数成分=画像分解能の情報を持った光により $u_{0,a}$ に従った輝点配列で構成)と位相情報($u_{r,p}$ 上と $u_{0,p}$ 上の位相は対応)を持って構成されると解釈される。

4. まとめ

再生像制御を目的に、基画像に位相変調を施した場合のホログラム記録再生メカニズムについて解析し、以下を明らかにした。

- (1) 高次 d_s 回折像は、0 次像(実像)の周囲に 0 次像全体がラマンナス回折条件に従って縦横一定角度シフトしたかたちで出現し、これは位相変調の有無に依らない。よって位相変調時も、位相変調無しの場合と同様の手法・条件によりゴーストを回避可能である。
- (2) d_p 周期は他の周期と同様、回折現象に対する有効な周期として機能する。また位相変調により再生像の改質(再生輝点の強度、形状の変

化)が起きる。

- (3) 位相変調時には基画像の空間周波数とは必ずしも関係無く、 $\pm\theta_{NA}$ 内に射出した回折光によって再生輝点、再生像は構成される。

これらについては T 系、L 系同様である。今後より詳細な検討を要するが、位相変調は再生像制御のための有力な 1 手法と考えられる。

参考文献

- 1) S. Yagi, T. Imai, A. Tate, M. Hikita, S. Tomaru, S. Imamura, T. Tamamura, Y. Kurokawa and M. Yamamoto : Multilayered Waveguide Holographic Memory Card, presented at the Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage '99, Koloa, Kauai, Hawaii, pp. 11-15 July (1999)
- 2) M. Ueno, Y. Kurokawa, T. Tanabe and M. Yamamoto : Fast Method of Computing Fresnel Diffraction Patterns, Proc. SPIE, Vol. 4225, pp. 96-101 (2001)
- 3) T. Mitasaki and M. Senda : Write-once Recording for Multilayered Optical Waveguide-type Holographic Cards, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 3, pp. 659-663 (2006)
- 4) M. Senda and Y. Aoki : Identification Data Reproduction in Multilayered Optical Waveguide-type Holographic Memory Cards, Appl. Opt. Vol. 47, No. 21, pp. 3973-3979 (2008)
- 5) 辻内順平 : ホログラフィ, pp. 295-368, 裳華房 (1997)
- 6) 千田正勝, 黒澤知之, 水島宏紀 : 計算機ホログラムのメモリ応用におけるゴーストノイズとビット誤り率解析, 小山高専研究紀要, Vol. 48, pp. 69-75 (2015)
- 7) 千田正勝, 福田純希, 海原洋介 : 計算機ホログラムにおける巡回関数化雑音とサブサンプリングの検討, 小山高専研究紀要, Vol. 45, pp. 85-90 (2012)
- 8) M. Endo, M. Ueno and T. Tanabe : Data Decoding Method and Data Decoding Apparatus, Japan laid-open disclosure public patent bulletin No. JP 2004-348378A (2004)
- 9) M. Senda : Tolerance for Translation Disturbances of Template-matching Two-dimensional Modulation Code for Holographic Memories, Opt. Eng. Vol. 49, No. 8, 0858031-08580311 (2010)
- 10) M. Senda : Defocusing Characteristics of Template Matching Recording Codes for Multilayered Waveguide Holographic Read-only Memory, Optik, Vol. 126, pp. 4098-4104 (2015)
- 11) 千田正勝, 染谷尚紀, 工藤聡 : 二次元記録符号におけるエラーブロック分析とデコード法の検討, 小山高専研究紀要, Vol. 47, pp. 71-76 (2014)

【受理年月日 2016年 6月10日】

千田正勝教授におかれましては、本年 9 月 15 日に急逝されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。