

ホログラムの自由空間光通信装置への適用に関する検討

山下 泰輝^{*1, *2}, 涌波 光喜^{*2}, 市橋 保之^{*2}, 山本 健詞^{*2}, 高山 佳久^{*3}

Studies on characteristics of holograms for free-space optical communications

by

Hiroki YAMASHITA^{*1, *2}, Koki WAKUNAMI^{*2},
Yasuyuki ICHIHASHI^{*2}, Kenji YAMAMOTO^{*2} and Yoshihisa TAKAYAMA^{*3}

(received on Sep. 28, 2017 & accepted on Jan. 11, 2018)

あらまし

大気中を伝搬路とする自由空間光通信システムでは大気のゆらぎによって自由空間光リンクを形成するレーザービームの伝搬方向が変動する。本稿では自由空間光通信装置の精追尾機構をホログラフィック光学素子(Holographic Optical Element, HOE)によって代替する手法について検討する。複数の回折格子を重畳して記録したHOEを用いて、大気によって擾乱を受けた通信ビームの伝搬方向を補正する。単一の回折格子を記録したHOEを作製しその回折特性を測定する。測定結果からHOEを自由空間光通信装置に適用する効用を示すと同時に、課題とその原因について考察する。

Abstract

Free-space optical communication equipment uses a fine tracking mechanism for correct the propagation direction of laser beam of communication link which fluctuated by atmospheric turbulence. We proposed a method which uses a HOE (Holographic Optical Element) instead of fine tracking mechanism with fast steering mirror. We measured the characteristic of HOE recorded single diffractive grating. We show the advantage of HOE and some feature of that to be improved.

キーワード:ホログラフィ, 空間光通信, 追尾システム

Keywords: Holography, Free-Space optical communication, Tracking System

1. はじめに

自由空間光通信はレーザー光線を用いて無線通信リンクを構築し、長距離かつ高速なデータ伝送を可能とする手法である。通信に使うビームが電波に比べて先鋭であり伝搬先での電力密度が高いため小型なアンテナを持つ通信装置によって、より高速で長距離の通信を行える点で優れており、小型無人機や人工衛星などの搭載容量に制限がある移動体で利用する高速通信の手段として期待されている¹⁾。

自由空間光通信システムではデータの送受信にレーザービームを用いるため、通信リンクを確立するためには送信ビームの伝搬方向や光アンテナの指向方向を精密に制御する必要がある。通信相手が移動体の

場合には、互いの光アンテナが移動する通信相手を常に指向するように制御する必要がある。また大気中を伝搬路とする自由空間光通信の伝搬路では、大気揺らぎの影響を受けてビームの進行方向や位相と振幅の分布が変動するため、送受信ビームの進行方向の微調整が必要となる。このような通信リンクを確立する制御のために、自由空間光通信システムの通信装置には捕捉追尾機構が組み込まれる。捕捉追尾機構には粗追尾機構と精追尾機構があり、粗追尾機構のジンバルによって光アンテナの指向方向を決定し、精追尾機構によって送信光の出射角度と受信光が受信光学系に入射する角度を一定に保つ。特に受信系においては受信した光を効率よくフォトディテクタへ導くために、精追尾機構を用いた制御が重要である。

精追尾機構は大気の乱流に追従するために動作速度と駆動精度の両方が十分に高いことが重要である。この要件を満たす装置の一つとしてアクチュエータによって鏡を高速に駆動する機械的な装置、高速駆動鏡 (Fast Steering Mirror, FSM) が挙げられる。人工衛星に搭載する光通信装置においても精追尾機構にFSMが利用されているが、駆動のための電源確保や駆動時の振動対策が必要であり、通信装置や人工衛星全体の設計をよりシンプルにするためにはFSMを搭載することは好ましくない。またFSMは機械的な機構を用いて鏡を駆動するため駆動速度や作動精度に限

*1 情報通信学研究科情報通信学専攻 修士課程
Graduate School of Information and
Telecommunication Engineering, Course of Information
and Telecommunication Engineering, Master's Program
*2 国立研究開発法人情報通信研究機構 電磁波研究所
電磁波応用総合研究室
National Institute of Information and Communications
Technology, Applied Electromagnetic Research
Institute, Electromagnetic Applications Laboratory
*3 情報通信学部通信ネットワーク工学科 教授
School of Information and Telecommunication
Engineering, Department of Communication and
Network Engineering, Professor

界があり、精追尾機構の性能を向上させる上で課題となっている。

本研究の目的は空間光通信装置の精追尾機構を現在利用されている装置よりシンプルな装置で実現することである。そのために著者らはHolographic Optical Element (HOE)を用いて精追尾機構の役割を代替することを考案した。HOEは光学素子として所望の回折特性をもつように設計・製作されたホログラムである。HOEはホログラフィック材料にレーザー光で回折格子を焼き付けて作製した単一の個体の素子であるため機械的な可動部を持たない。よってHOEを利用すれば、受信光が光アンテナへ入射する角度が変動した場合にもその角度を補正し、受信光学系へ入射する光軸の角度を常に一定に保つような仕組みを、機械的な機構を用いず実現できると考えられる。

本稿では従来利用されている精追尾機構の装置とその課題について述べ、ホログラフィック光学素子の特徴を利用した本提案について説明する。さらに提案手法の実現性を実験によって示し、その結果を考察する。

2. 高速駆動鏡を用いた精追尾機構

FSMを利用した精追尾機構の概念図をFig.1に示す。BSはビームスプリッタ、QDは四分分割フォトダイオード、Ampは光アンプ、SMFはシングルモードファイバーである。受信光がFSMで反射した後にBSを通過してQDに入射する。QDでは4象限に別れたフォトディテクタで受信光を受けることによってその輝度重心を計測する。設計上の光軸と実際に入射した受信光の光軸の差をFSM制御部にフィードバックし、QDによって検出される受信光の光軸と光学系の設計上の光軸が平行となるようにFSMの角度を制御する。この制御によって受信光が内部光学系に入射する角度の変動を補正し空間光通信リンクを安定に維持している。

FSMは piezo素子やボイスコイル等のアクチュエータで駆動される。報告されているFSMを利用した精追尾機構の製作例では、piezo素子の動作周波数は1kHz程度、ボイスコイルの場合には800Hz程度とされている²⁾。QDで測定したビーム中心の誤差からFSMの角度を更新するまでに要する時間を考慮すると、精追尾機構全体のクローズドループの動作周波数はより低速であると考えられる。一方で大気ゆらぎによる受信光の強度変動の速度は数kHz程度までが支配的であることが知られており、現在の精追尾機構には更なる駆動性能の向上が期待されている。またFSMは機械的な可動部を有するため、作動時の振動や作動誤差の発生を避けられない。

FSMを利用した精追尾機構は地上-衛星間を結ぶ空間光通信システムに組み込まれ、通信品質の向上に貢献している。しかし、複雑な制御系が必要なことと、作動速度の限界や作動誤差を有していることが、よりシンプルな機構によって精追尾機構の役割をHOEで代替する本研究の動機となっている。

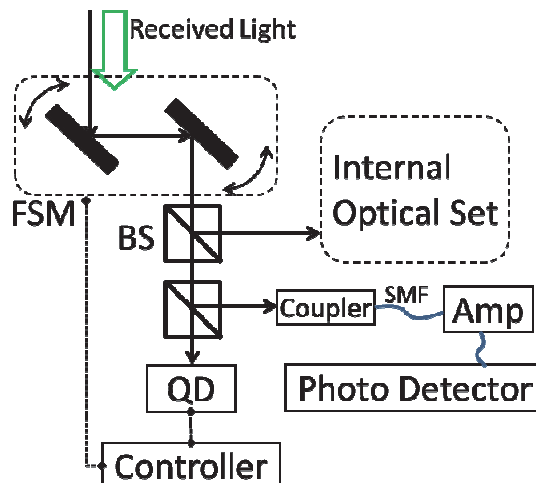


Fig.1 Fine tracking mechanism using FSM

3. HOEの空間光通信装置への適用

3.1 ホログラフィック光学素子

ホログラフィック光学素子 (HOE) はホログラムを記録する際の物体光として所望する光を入射させ、参照光との干渉縞を感光材料に記録することで作製できる。HOEの大きな特徴は、単純な回折格子としての機能だけでなく、様々なレンズや反射型にすることにより、鏡の機能も実現可能であることと、それらの複数の機能を一つのHOEで実現できることである。また所望の回折特性を持つHOEを作製するために必要な物体光の複素振幅分布はスカラー回折理論によって計算可能であり、波面プリンタを用いてコンピュータで設計したHOEを印刷することも可能である。

3.2 提案手法

大気中を伝搬する空間光通信リンクでは、リンクを形成するレーザービームの伝搬方向が大気の擾乱を受けて変動する。受信光学系における精追尾機構の役割は、受信光が通信装置の内部光学系へ入射する角度が常に一定になるよう補正することである。現在利用されている精追尾機構ではFSMが用いられているが、本稿ではその役割をHOEで代替することを提案する。

提案する伝搬角度補正システムの模式図をFig.2に示す。光アンテナで集光してコリメートされた受信光が左側からHOEに入射している。この受信光はHOEにとっての参照光である。HOEは反射型であり、HOEで生じた回折光はBSで反射し、通信装置の内部光学系へ入射する。受信光がHOEに入射する角度はレーザービームが大気中で受けた擾乱の影響で常に変動している。HOEへの参照光の入射角が変動しても常にファイバークプラーの方向へ光アンプの最低要求電力とカップリング利得の和を超えるパワーの回折光を生じるようにHOEを作製することにより、従来の精追尾機構の役割を単一のHOEによって代替できる。提案した機能を持つHOEを実現する手法について以下に述べる。

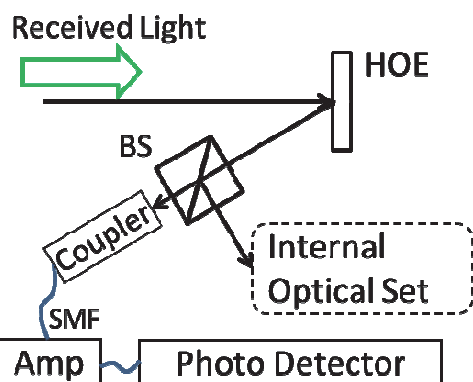


Fig.2 Propagation Direction Correcting System using HOE

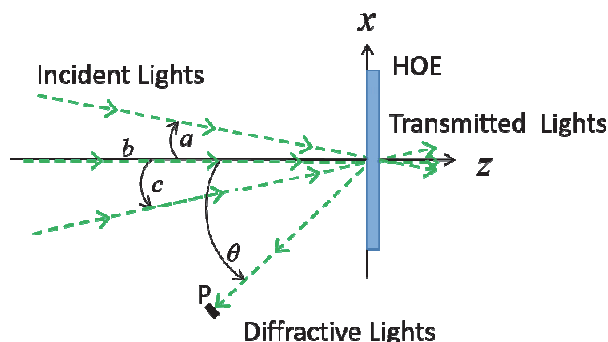


Fig.3 Design concept of proposed HOE

ホログラムの回折効率は、再生時に照射する参照光の入射角が書き込み時の参照光の入射角から外れると低下する。そこで、回折光の出射角度は等しいが、それぞれ異なる参照光の入射角で回折効率が高くなるような複数の回折格子を重ねて記録したHOEを作製する。そのようなHOEの設計上の参照光と回折光の関係をFig. 3に示す。図のHOEには回折格子A, B, Cが重ねて記録されており、それぞれの回折格子は参照光の入射角が a, b, c の時に回折角が θ になるように設計されている。

このHOEに角度 a から角度 c まで角度を変化させながら参照光を照射することを考える。この時、点Pにおける回折光の強度はA, B, Cそれぞれの回折格子から生じた回折光の強度の和である。回折格子A, B, Cの点Pにおける回折光の強度は参照光の入射角が a, b, c の時にそれぞれ最大となる。この回折光の強度の和が一定の角度範囲内で一定の値を下回らないように記録する回折格子を設計すると、参照光の入射角が一定の範囲で変動しても特定の方向へ常に一定以上の強さの光を回折するHOEを作製できる。

HOEには回折格子の機能だけでなく他の光学的機能も同時に付与することができる。すなわち空間光通信装置の精追尾機構だけでなく他の光学機器もHOEで置き換えられる。HOEは複数のレンズや鏡を通った結果として得る光を再生する単一のホログラムとして作製できるため、光アンテナで集光した光を光ファイバーへカップリングさせるための内部光学系を単一のHOEによって置換可能である。複数の光学的機能を併せ持ったHOEを、その回折効率が通信装置としての利

用に耐えうるように製作すると空間光通信装置の構成を大幅に簡易かつ安価にすることが可能と考えられる。

4. HOE の特性評価

本稿では本研究の目的を達成するための端緒として、単一の回折格子を記録したHOEを作製し評価した結果を報告する。空間光通信装置に組み込むHOEの評価では、HOEへ入射する光の入射角が変化した時に特定の方向へ回折する光の強度の変動の様子を知ることが重要である。そこで、HOEから得られた回折光を端面が固定されたシングルモードファイバーへカップリングし、カップリングした光の強度を参照光の入射角を変化させながら測定した。また、FSMでは追従不可能なほど高速に受信光の入射角が変動した場合においてHOEによる補正機構が有効性と優位性を有するか調べるために、固定した鏡についてHOEの評価と同様の測定を対照実験として行った。以下にHOEの作製手法と評価実験及び対照実験の手法を述べる。

4.1 HOE の作製

実験で使用したHOEは大きさ3mm四方の矩形の反射型回折格子として作製し、回折角 $\theta=15\text{deg}$ 、記録時の物体光と参照光の波長を532nmとした。実際に作製し評価を行ったHOEをFig. 4に示す。HOEの位相分布 g_1 は、フーリエ面で回折角 θ になる点を求め、それを逆フーリエ変換することにより得た。そして g_1 を記録するためのホログラムを算出し、波面プリンタを用いてフォトポリマーに記録した。詳しくは参考文献³⁾を参照されたい。波面プリンタには自由な位相分布を再現し記録することが出来るという特徴がある。その一方で1回の露光で記録できるspatial bandwidthは空間光変調器の画素数で制限される。面積の大きなHOEを作る場合には複数回に分けて記録する必要があるため、HOEの品質を向上させることが波面プリンタの課題である⁴⁾。

4.2 HOE の特性評価

実験光学系をFig. 5に示す。レーザー光源から出射したビームをコリメートし、鏡Aで反射した後に二枚のレンズB, Cを通してHOEへ照射する。このビームはHOEにとっての参照光である。鏡Aはコリメートされたビームの光軸と直交する鉛直の軸を中心に回転する。HOEは鏡Aの回転軸と共役な点に置かれており、鏡Aを回転し、ビームのHOEへの入射角度が変化してもHOE

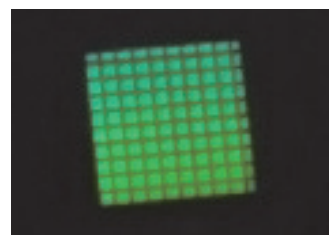


Fig.4 The HOE for this experiment

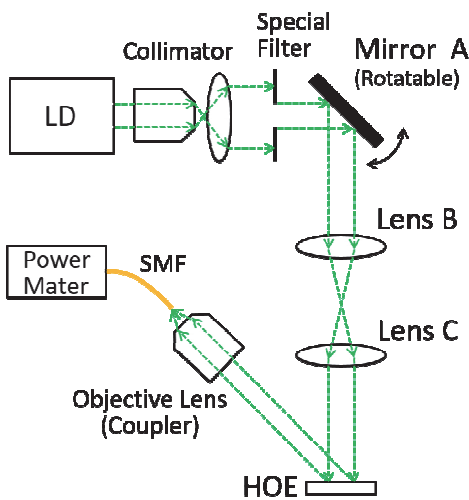


Fig.5 Optical set for evaluate HOE

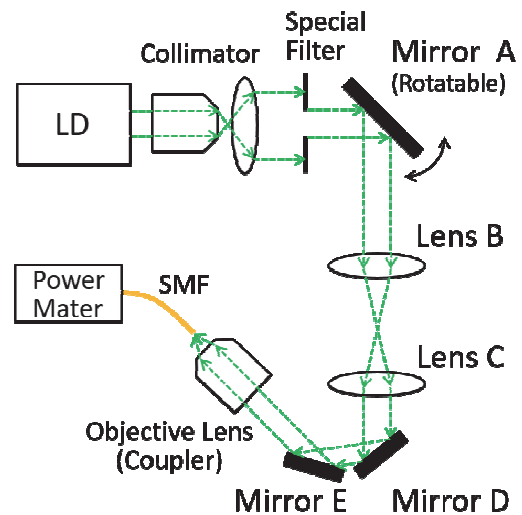


Fig.6 Optical set for control experiment

への入射位置は変化しないように、HOEは鏡Aの回転軸と共益な位置に置いた。HOEから出射した回折光は対物レンズによってシングルモードファイバー(SMF)へカップリングされる。HOEへのビームの入射角度が変化すると回折光の出射角度も変化するが、本実験ではHOEから見て特定の方向に固定された光通信装置へ向かって直進する回折光の成分にのみ着目するためHOEと対物レンズの距離は問題にならない。この光学系を空間光通信システムの役割に当てはめると、レーザー光源から鏡Aまでの部分が光アンテナで捉えた受信光を模擬し、レンズBからSMFに繋がるパワーメータまでが内部光学系と通信装置に相当する。

本実験では鏡Aを回転し、SMFへカップリングした光の強度のHOEへのビームの入射角度依存性を測定した。測定する入射角は -0.5deg から $+0.5\text{deg}$ の間とし、 -0.25deg から -0.25deg までは $1/72\text{deg}$ ごとに測定を行った。より大きな角度については $1/12\text{deg}$ ごとに測定を行った。

対照実験として、FSMを利用した精追尾機構を有する空間光通信装置においてSMFへカップリングする光の強度を測定する。この実験では、受信光の入射角がFSMの作動速度より非常に速い速度で変動しFSMの鏡が入射角の変動に追従できない状況を想定し、FSMの代わりに設置角が固定された2枚の鏡を使用する。実験に利用する光学系をFig.6に示す。この光学系では、Fig.5の光学系におけるHOEの代替としてFSMに見立てた2枚の鏡D、Eを挿入する。対物レンズの開口面の位置は、カップリングする光強度の角度依存性を最大限緩和するために、鏡Aを回転してもビームが照射する領域が移動しない面とした。測定では、鏡AをHOEの評価と同様に動かし、それぞれ同じ角度でSMFへカップリングした光の強度を測定した。

Fig.7にHOEの評価結果と鏡の場合の評価結果を示す。青線がHOEの実験結果であり、赤線が鏡の実験結果である。グラフの横軸はHOEあるいは鏡へのビームの入射角度、縦軸はSMFへカップリングした光の強度を

鏡を用いた場合のピーク強度を1として正規化した光強度を示す。また、Fig.7-(b)はFig.7-(a)の点線枠で囲まれた範囲を拡大したものである。HOEと鏡のどちらの実験でもレンズCを通過した後のビームの強度は同じである。HOEから出射した回折光をSMFへカップリングした光強度の最大値は鏡で反射させた場合の7%であった。一方でHOEを利用した場合の測定結果の包絡線の半値幅は、鏡を利用した場合に同等以上の光強度を得られる角度幅に比べて2.56倍幅広いピークを有していた。

5. 考察

4.2節では、反射型HOEおよび鏡にビームを入射した場合、特定の回折・反射角度に配置したSMFへカップリングした光強度の入射角依存性を測定し比較した。その結果、HOEへビームを入射した場合、得知恵の方向へ反射・回折する光強度は、鏡の場合に比べてその入射角度依存性が小さいということを確認した。HOEの場合のピークの最大値は鏡の場合の7%と低い値だが、空間光通信装置に搭載される光アンプの最低要求電力を上回る光強度が得られるように通信システムの設計を行うことで実用に耐えうると考えられる。前述のように、HOEの場合に得られた光強度は、入射角度 -0.25deg から -0.07deg および 0.05deg から 0.25deg では、鏡を用いた場合のそれよりも大きく、良好な値を示しており、FSMが追従できないほど高速に自由空間光リンクを形成するビームの光通信装置に入射する角度が変動する場合にはHOEを用いる提案手法が有効であると考えられる。しかし、Fig.7に示すように、HOEの場合にはSMFへカップリングした光の強度が入射角の変動に対して周期的に振動している。これは複数スリットからの回折光の振幅分布に類似した特徴である。本稿の実験では、縮小したホログラムをタイル状に並べて作製したHOEを使用している。この手法では大面積のホログラムを作製できるが、Fig.4のようにHOEに周

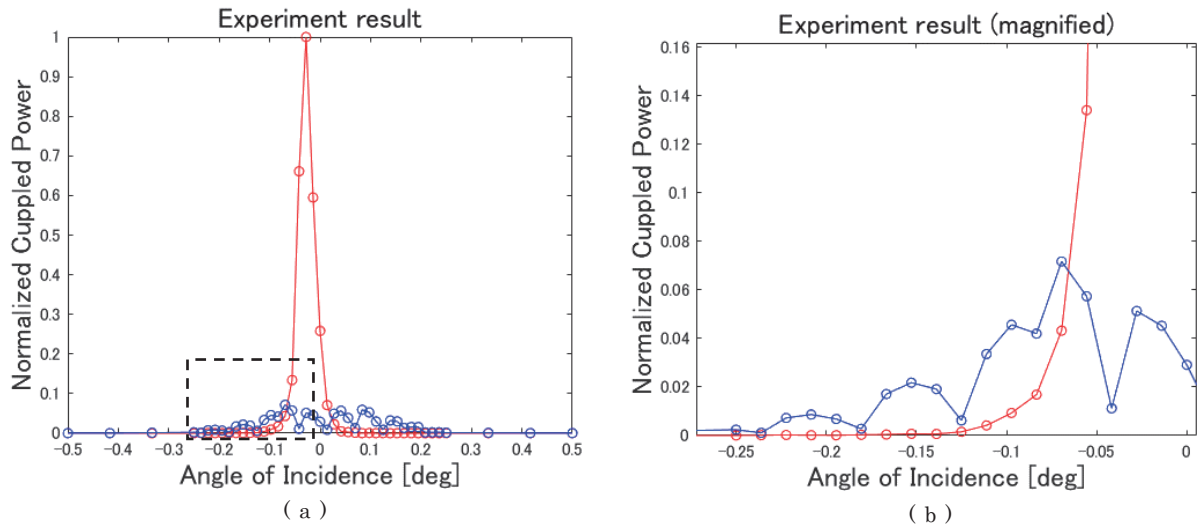


Fig.7 Experiment results of HOE and mirror.
(Blue line is data of HOE, red line is data of mirror.)

期的な矩形のパターンが重畳される可能性がある. すなわちHOEの実験結果が周期的な特性を示す原因は, HOEに重畳された矩形のパターンがスリットと同様の働きをしたものと考えられる.

6. 結論

本稿では自由空間光通信システムにおける精追尾機構の性質と構成の複雑さに着目し, 一般にはFSMを用いる精追尾機構をHOEによって置き換えることを提案した. HOEで精追尾機構の機能を置き換えるためには, HOEに複数の回折格子を記録し, 特定の地点においてそれぞれの回折格子から得る回折光の強度の和が一定値を下回らないよう設計されたHOEを利用することが一つの手法であると考え. 提案手法を実現するための端緒として, 本稿では単一の回折格子を記録したHOEが特定方向へ回折する光の強度のHOEの入射角依存性を測定した. 同時に, 精追尾機構と比較するために, 固定した鏡がFSMとみなせる条件において鏡が特定方向へ反射する光の強度を測定し, HOEの場合と比較した. 比較の結果, HOEの場合の回折光の強度の最大値は鏡にくらべて小さいが, より広い入射角度の範囲に対して鏡の場合よりも大きな光強度が得られ入射角度依存性が小さく, 良好な特性を持つことを実証した.

一方で今回作製したHOEでは, 参照光の入射角に対して, 特定方向へ伝搬する回折光の強度が周期的に変

化する様子を確認した. これを改善し, よりなめらかな特性を得ること, 複数の回折格子を重ねて記録したHOEを作製し, 提案手法を実現することが今後の課題である.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP26790064 の助成を受けたものです.

参考文献

- 1) M. Toyoshima, "Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications," J. Opt. Networking, 4, 6, 300-311 (2005).
- 2) M. Shimizu et al., "A Free-Space Optical Communication between Ground Terminal and Mobile Terminal using In-orbit and Networked Optical Ground Stations Experimental Verification Advanced Testbed(INNOVA)", Proc. Ka and Broadband communications, navigations and earth observation conference, Ka 5, pp.1-9, 2014.
- 3) K. Wakunami, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi, K. Yamamoto, "Wavefront printing technique with overlapping approach toward high definition holographic image reconstruction," Proc. SPIE 9867, 98670J (June 1, 2016).
- 4) Y. Ichihashi, K. Yamamoto, K. Wakunami, R. Oi, M. Okui, T. Senoh, "An analysis of printing conditions for wavefront overlapping printing," Proc. SPIE 10127, 101270L (April 6, 2017).