

計算機合成ディスプレイホログラム用高解像度プリンタ

High-Resolution Printer for Fabricating Computer-Generated Display Holograms

正会員 松島 恭治[†], 上甲 篤^{†*}

Kyoji Matsushima[†] and Atsushi Joko^{†*}

Abstract A special-purpose high-resolution printer has been constructed for fabricating computer-generated holograms. This printer is capable of drawing fringe patterns exceeding 10^4 dpi in resolution. The patterns are numerically synthesized and have a continuous gray level. The print time is less than an hour for holograms measuring 1 cm^2 . The mechanism and structure of the constructed printer and optically reconstructed images of holograms fabricated by using the printer are described.

キーワード: ホログラム, 3次元立体画像, 計算機合成ホログラム, デジタル合成ホログラム, CGH, 描画装置

1. ま え が き

一般的な立体画像が、生理的立体感の一部のみを満たすのに対して、ホログラムは人間の生理的立体感をすべて満たした完全な3次元画像である。しかしながらホログラム記録時には、物体にレーザー光を照射して散乱した光波と、参照光波を感光材料上で干渉させる必要があるため、実在の物体が必要である。これに対して、近年発展の著しいコンピュータ技術を援用したホログラムを、デジタルホログラムと総称し、この中でも、実在しない物体の光波をコンピュータによって合成し、表示または印刷するホログラムを計算機合成ホログラム (Computer-Generated Hologram, 以下 CGH)、あるいはデジタル合成ホログラムと呼ぶ。

CGHは、作成時に被写体を必要としないという利点がある反面、物体光波合成の計算量が莫大であること、さらに高解像度の表示デバイスを必要とすることが大きな問題点となっている。前者については、テーブル参照法¹⁾、差分法²⁾³⁾、漸化式⁴⁾、波面展開法⁵⁾⁶⁾などのアルゴリズムにより高速化が進んでいるものの、後者は依然大きな問題である。計算機合成ホログラムの静止画描画には、レーザープリンタ⁷⁾やイメージセッタ⁸⁾、あるいはそれらの出力の写真縮小⁹⁾が用いられるが、いずれも解像度が不十分で

ある。ホログラムの干渉縞の間隔はおよそ $1 \mu\text{m}$ 以下 (解像度 25,000dpi 以上に相当) であり、これに対し製版用高解像度印刷機器であるイメージセッタでも、その解像度は 4000dpi 程度である。ホログラムの回折角は、ほぼその解像度に比例するため、これらの方法では大きな視域角は得られない。また、本来のホログラムの干渉縞パターンの濃度 (再生時の透過率) が連続値であるのに対して、これらの機器は、本質的に2値の濃度階調でしか描画できないため、バイナリーホログラムとするか、擬似階調を用いる必要がある。前者は量子化ノイズの要因となり、また後者は一般に実効的な解像度の低下を招く。電子線描画や光リソグラフィの技術を用いれば、波長以下の分解能で描画することが可能であるが¹⁰⁾、一般にこれらの設備は極めて高価でその利用には専門技術が必要であり、また製作時間も数日から数ヶ月と長いものとなる。そのため、回折光学素子など数平方ミリ程度の非ディスプレイ用途のCGH作製に用いることはできても、一般にディスプレイ用ホログラムの作製には適さないことが多い。

そこで本論文では、解像度 10^4 dpi 以上でマルチレベルの濃度階調付ピクセルが描画でき、 1 cm^2 あたり1時間以下の描画時間で写真縮小の過程なしに直接CGHを描画できるプリンタの試作結果を報告する。また、本プリンタで描画したCGHの光学再生像を示す。

2. 原理と構造

試作したプリンタの構造を図1に示す。本プリンタでは、振幅変調したパルス信号で駆動するレーザーダイオード (以下 LD) の出力光を、対物レンズでホログラム乾板上に回折限界近くまで集光することにより、乾板上に濃淡像を

平成13年関西連大、2002年電子情報通信学会総合大会で発表
2002年4月8日受付、2002年7月29日再受付、2002年9月6日採録
† 関西大学工学部電気工学科

(〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35, TEL 06-6368-0933)

* 現在、松下電器産業(株)勤務

† Department of Electrical Engineering, Kansai University
(Yamate-cho 3-3-35, Suita, Osaka 564-8680, Japan)

* Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

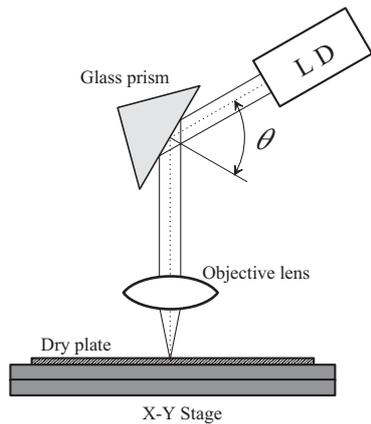


図 1 試作プリンタの構造
Schematic structure of the constructed printer.

描画している。試作プリンタで用いたレーザダイオードモジュールは出力のアナログ変調が可能であり、LD ドライバに入力する制御電圧に対して、その出力パワーが最大 4mW まで線形に変化する。またこの時、定格の最大変調周波数は 500kHz であり、実際のパルス入力に対する立上り/立下り時間は約 $0.2\mu\text{s}$ である。

ホログラム乾板の適正露光量は、ロシア製 PFG03C ではおよそ $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ 、アグファ 8E75 ではおよそ $5.0 \times 10^{-7} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ と言われている。しかしながら、LD の定格出力をマイクロメートル程度のスポットサイズまで集光した場合、光強度が約 $1\text{mW}/\mu\text{m}^2$ に達するため、レーザパルス幅を数マイクロ秒としても、レーザ出力を $-20 \sim -40\text{dB}$ 程度減衰する必要がある。LD モジュール自身による出力制御では、LD の閾値以下でインコヒーレントな LED モードに移行するため、微小出力で使用することは困難である。したがって本プリンタでは、LD 出力の波面を乱すことなく、このような大きな減衰量を得るため、次節で述べるように、表面コートのないガラスプリズムの表面反射を利用してレーザ光の減光を行っている。

2.1 レーザ光学系

具体的には、波長 635nm、定格出力 4mW の直線偏光 LD モジュールの出力光を、p 偏光で屈折率 1.52 の BK7 ガラス製直角プリズムに入射角 θ で入射させ、その表面反射光を用いている。この場合、ブルスタ角が 56.6 度であるため、 $\theta \approx 60^\circ$ の時 -30dB 程度の強度減衰率が得られる。減光したレーザ光を 20 倍の対物レンズ (定格 N.A. = 0.4) により乾板表面上に集光している。また、用いた LD モジュールの出力光の横モードが $5.6 \times 1.5\text{mm}^2 (1/e^2)$ の楕円パターンであることから、その長径軸がホログラムの水平方向と一致するように対物レンズに入射させ、水平方向でのスポット径を減少して、光学再生時の水平方向の視域が垂直方向のそれよりも広がるように工夫している。

2.2 ステージとレーザパルスの制御

ホログラム乾板は、精密 X-Y ステージ上に積載している。試作プリンタでは、X-Y ステージとしてシグマ光機

製自動ステージ (AES-120X(IS)-100) を用いた。このステージでは、内蔵する光学リニアスケールにより、分解能 $0.1\mu\text{m}$ でエンコーダ信号が得られる。通常、このエンコーダ信号はステージ位置・速度のサーボ制御等を行うために用いられ、そのようなクローズドループ制御下でのステージ移動速度の最大定格値は 4mm/s である。しかしながら、本プリンタでは、ステージの位置決めそのものは重要ではないため、クローズドループ制御を行っていない。すなわち、本プリンタのステージは、再生時に水平方向になる 1 ラインの描画中は、オープンループ制御のパルスモータにより停止することなく移動し続けている。その代わりに、エンコーダ信号に基づいてレーザパルス照射タイミングを制御することにより、結果としてエンコーダの精度と等しい位置精度を確保している。その結果、用いたステージコントローラの最大駆動周波数 $2.4 \times 10^5 \text{pulse/s}$ で、駆動パルスあたりの移動量を $0.1\mu\text{m}/\text{pulse}$ に設定してステージを駆動し、 24mm/s の最大ステージ移動速度を得ている。

また、レーザパルス幅は約 $2\mu\text{s}$ であるので、ステージが最大速度で運動しているときの 1 パルス照射中の移動量は $4.8 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ となり、数ミクロン径の描画ドットでは数 % 程度の誤差となる。しかし、本プリンタのように高 N.A. で集光している場合、運動中のステージ自体の垂直方向位置の変動や、ホログラム乾板のガラス基板の厚さと感光剤の膜厚のむらなどにより、集光スポットサイズのその程度の変動は定常的に生じるため、移動による描画ドットの変形は無視できる。

本プリンタの制御系のブロック図を図 2 に示す。エンコーダ信号は、制御コンピュータの ISA バス上のエンコーダカウンタに入力される一方、一組のプログラマブルカウンタを介して LD 駆動パルスをトリガする。これにより、コンピュータのソフトウェア制御を介さずにレーザ照射タイミングが得られるため、ステージの最大移動速度と等しい描画線速度を実現している。

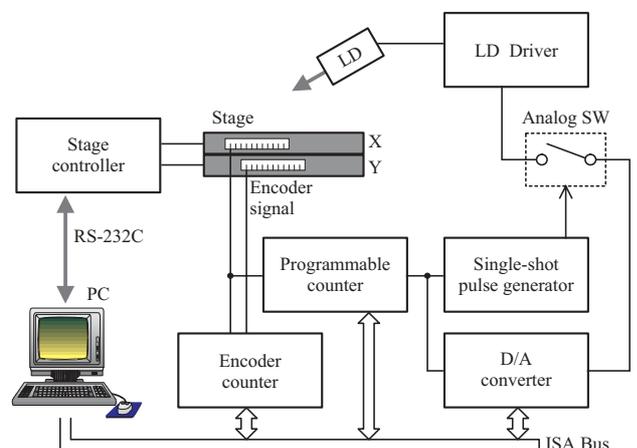


図 2 プリンタの制御回路

A block diagram of control circuits for the constructed printer.

また、D/A コンバータの出力電圧を単パルス発生器と C-MOS アナログスイッチでスイッチングすることにより、一定パルス幅で波高値が PC により制御された LD 駆動パルスを発生し、LD ドライバの制御電圧として入力している。前述のとおり、本プリンタで使用している LD ドライバでは、LD 出力波形が制御電圧波形に比例してアナログ変調されるため、LD は制御電圧パルスと同じ幅で波高値に比例したパワーのレーザパルスを発生する。

2.3 レーザ照射タイミングの制御

サブミクロンの精度で水平方向のドット位置を制御しつつある程度高速な描画を実現するためには、レーザパルス照射タイミングの制御に工夫を要する。

図 3 に内蔵光学リニアスケールがエンコーダ信号パルスを発生する位置とレーザ照射位置、描画禁止領域の関係を示す。ステージはパルスモータで駆動され、 $0.1\mu\text{m}$ の分解能で移動指令を受け入れるが、パルスモータのオープンループ制御だけでは実際にその精度での位置決めは期待できず、1 ラインを走査する度に走査開始点と終了点が変動する。そこで、エンコーダ信号に基づいて次のように LD 駆動パルスをトリガしている。

ステージが X 軸（再生時の水平方向）の正方向に移動を始めると、 $\delta=0.1[\mu\text{m}]$ 移動する毎に内蔵光学リニアスケール（エンコーダ）が up パルスを出力する。タイミング制御回路では、この up パルスをまずプログラマブルな n_1 進カウンタに入力し、このカウンタがカウントアップするまで、 $d_1 = \delta \times n_1$ の区間は LD 駆動パルスのトリガを抑制し、図 3 に示すパルス照射禁止区間とする。 n_1 進カウンタがカウントアップすると、up パルスは別のプログラマブルカウンタで n_2 分周され、 $d_2 = \delta \times n_2$ 間隔で LD 駆動パル

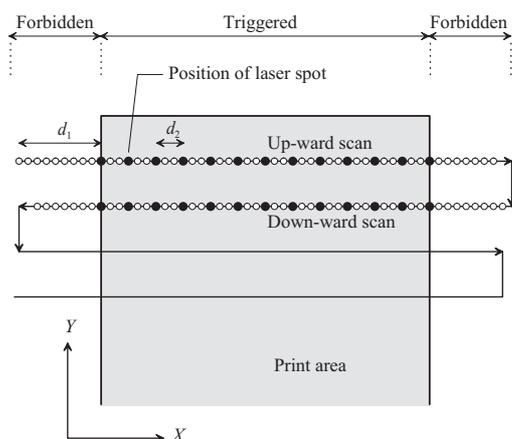


図 3 レーザ照射位置と禁止領域の模式図。○印はエンコーダ信号パルスが得られる位置、●印はレーザ照射位置を表す。この図は、最初の up 方向走査が $n_1 = 9$ 、 $n_2 = 3$ で行われた場合を表している。

Schematic diagram of laser-irradiated spots and forbidden areas. Open circles (○) and solid circles (●) show positions in generating encoder pulses and laser irradiated spots, respectively. This diagram is drawn in a case that the first up-ward scan is making in $n_1 = 9$ and $n_2 = 3$.

スをトリガし、レーザが照射される。

設定したパルス数を照射し終えた後、ステージはさらにしばらく進み、移動指令で指定された位置付近で停止するが、その停止位置をクローズドループ制御していないため、停止位置には数ミクロン程度の誤差が生じる。この停止位置の誤差量は、別途 up/down パルスをカウントしているエンコーダカウンタにより検出できるので、down 方向に描画する際には、down 方向の照射禁止区間を決定するカウンタにこの誤差量を補償する値を設定する。これにより、走査開始点と終了点の変動しても、常に一定の描画領域にサブミクロンの位置精度でドットを描画している。

3. 描画像とバイナリーホログラムの光学再生像

図 4 に X 方向に $5\mu\text{m}$ 間隔で描画したドット列の顕微鏡写真を示す。この結果からドットサイズが X 方向で約 $2\mu\text{m}$ 、 Y 方向で約 $4\mu\text{m}$ であることがわかる。図 5(a) に示した 8bit グレイスケールのテスト画像 (240×200 ピクセル) を、試作プリンタを用いて横 $2\mu\text{m}$ 、縦 $4\mu\text{m}$ のドット間隔で描画した画像の顕微鏡写真を図 5(b) に示す。この画像は、PFG03C 乾板にレーザ駆動パルス幅 $2.1\mu\text{s}$ で描いたものであり、描画像の実サイズは $0.48 \times 0.8\text{mm}^2$ である。同様に、図 6(a) の原画像 (512×256 ピクセル) を同じ条件とドット間隔で描画した結果を (b) に示す。描画像の実サイズは $1.024 \times 1.024\text{mm}^2$ である。これらの結果により、濃度階調を有する画像を設定したドット間隔で描画できることが確認できた。

次に、試作プリンタを用いて同じ乾板上にバイナリーホログラムの描画を試みた。作製したホログラムのパラメータを表 1 に示す。このホログラムは、波長 633nm の He-Ne レーザによる光学再生用に、横幅 14mm のワイアフレーム物体をホログラムの背面 200mm に配置し、漸化式



図 4 描画ドット列の顕微鏡写真。
A photomicrograph of printed dots.

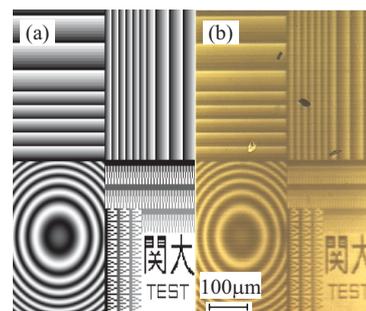


図 5 テスト画像の描画結果。(a) 原画像、(b) 描画像の顕微鏡写真。

A printed test pattern: original image (a) and its printed image through a microscope (b).

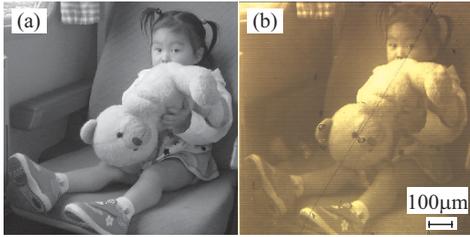


図 6 自然画像の描画結果 . (a) 原画像 , (b) 描画像の顕微鏡写真 .

A printed portrait: original photograph (a) and its printed image through a microscope (b).

表 1 作製した CGH の主要なパラメータ
Parameters used for fabricating holograms.

Number of pixels	8192 × 4096	
Dot size	2 × 4	µm ²
Reconstruction wavelength	633	nm
Actual width of object	14	mm
Incident angle of reference wave	3	deg

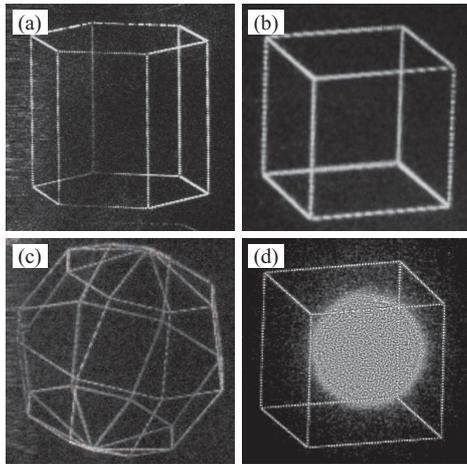


図 7 バイナリーホログラムの光学再生像 . (a) 六角柱 , (b) 立方体 , (c) 球 . (d) イメージセッターで作製したバイナリーホログラムの再生像 .

Optically reconstructed images of a binary hologram printed by the constructed printer for a hexagonal prism (a), a cube (b) and a sphere (c); reconstructed images of a binary hologram printed by an image-setter (d).

を用いた点光源モデル光線追跡法⁴⁾により合成した物体光波をバイナリーホログラムとして描画したものである . ホログラムのサイズは $16.4 \times 16.4 \text{mm}^2$ で , ドット間隔から計算される視域角は水平 18.2 度 , 垂直 9.1 度である . 六角柱 , 立方体 , 球のホログラムの再生像を図 7(a) , (b) , (c) にそれぞれ示した . また , 比較のために 4064dpi のイメージセッターを用いて , (b) と同じ立方体に対して作製したバイナリーホログラムの光学再生像を (d) に示す . (d) のホログラムでは , ドット間隔が縦横とも $6.25 \mu\text{m}$ で最大回折角がわずかに 2.9 度であるため , インライン型のホログラムしか作製できず , 再生像の中心に非回折光の明るいピークが生じている . この非回折光は , 観察者の眼に直接入射するため , 再生像の観察を妨げるのみならず危険でもある .



図 8 透過率測定用テストチャート . (a) 元画像 , (b) 描画像 .
A test chart to measure transmittance of the printed dots: an original image (a) and its printed image (b).

それに対して , 同じ立方体を本プリンタで作製したホログラムの再生像 (b) や , 再生像 (a) , (c) では , 回折角が大きく , 再生光入射角度を大きく取れるため , 非回折光の問題を大きく軽減できる .

4. LD 出力の制御とマルチレベルホログラムの光学再生像

試作プリンタでは , バイナリーホログラムは比較的容易に描画できたが , 本来の目的であるマルチレベルホログラムの再生像は非常に暗く , その視認は簡単ではなかった . これは , 図 5 や図 6 のように濃淡を有する画像を描画できても , 再生光に対するその透過率が計算どおり制御できないと完全なホログラムにならないためであると考えられる . そのため , 図 8(a) に示した 9 段階の濃度テストチャートを作成した . このテストチャートの描画像 (b) では , それぞれの濃度領域が一辺 5mm の正方形になるように描画しており , その描画パターンのそれぞれの濃度領域に He-Ne レーザを実際に透過することにより , He-Ne レーザに対する透過率を測定した . LD に印加する制御電圧と透過率の関係を PFG03C 乾板で測定した結果の一例を図 9 に示す .

この図からわかるとおり , レーザ制御電圧と描画ピクセル濃度の関係が線形でなく , レーザ出力が高い時には濃度が飽和する傾向にあることがわかった . 一般にホログラムの記録・再生の理論では , 記録時の干渉縞強度と再生時の透過率分布が線形であることを仮定しており , 干渉縞パターンを数値的に合成する CGH でも , それを前提条件として計算している . しかしながら , 本プリンタでの描画はそのような線形な領域で行われておらず , 描画ピクセル濃度が高濃度 (低透過率) 側にシフトしていることが , 描画したマルチレベルホログラム再生像を劣化させている原因と考えた .

また , このような測定を繰り返すことにより , 透過率の絶対値は現象液の状態や温度などによって多少変化するが , 曲線の概形そのものに大きな変化はないことがわかった . そこで , この曲線を 3 次スプラインで補間し , 数値合成したホログラムの濃度階調に対して透過率が線形になるように電圧制御した . この制御の結果 , 図 10 に示すとおり , 合成したホログラムの濃度階調に対して線形に近い透過率分布を描画することが可能となった .

以上のような制御により , 描画したマルチレベルホログラムの再生像を図 11 に示す . 物体は , 点光源密度

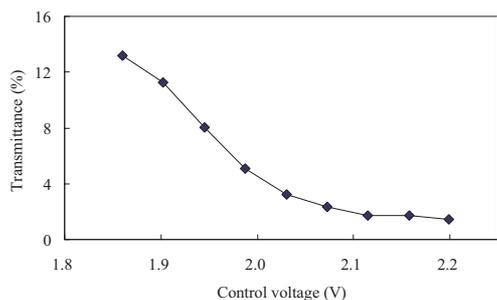


図 9 LD 制御電圧と透過率の関係
Intensity transmittance vs. control voltage of LD

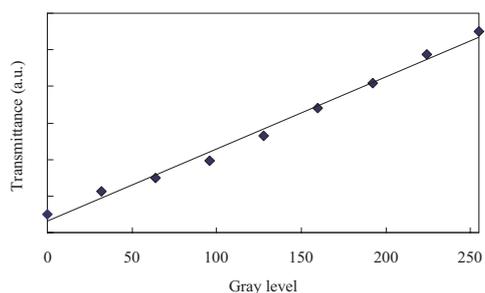


図 10 透過率曲線に基づいて LD 出力制御をした時の濃度階調と相対的透過率。
Relative transmittance vs. gray level of numerically synthesized hologram in LD power control.

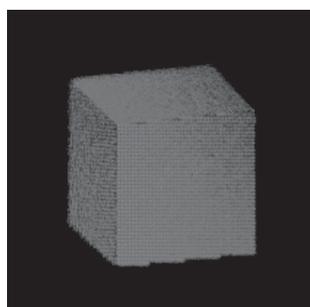


図 11 点光源の振幅変調により陰影付けした表面モデル立方体に対するマルチレベルホログラムの光学再生像
An optically reconstructed image of a multi-level hologram synthesized with shading by using amplitude modulation of point sources.

$2.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ の点光源モデル光線追跡法で合成した表面モデルの立方体である。これは、透過率を線形化せずにマルチレベルで描画した時には、再生像が暗く視認が困難であったホログラムの 1 つであるが、透過率を線形化することにより、明瞭な再生像が得られるようになった。またこのホログラムでは、面ごとに点光源振幅を変化するだけで、陰影付けができています。バイナリーホログラムでは、一般に点光源振幅による面の輝度の制御は困難であり、陰影付けを行うためには、マスク処理などの追加処理が必要であるが¹¹⁾、このホログラムでは、数値合成時の点光源振幅を

変化するだけで、観測方向によって変化する平面の輝度補正¹¹⁾と陰影付けを実現している。

5. 議 論

本プリンタでのホログラム描画試験では、アグファ8E75 やロシア製 PFG03C を主に用いていた。アグファが現在入手困難となった結果、PFG03C を主力として使用しつつある。一方、実験結果よりレーザービームは約 $2\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$ のスポットに集光していることがわかった。このスポットサイズとパルス幅 $2.1\mu\text{s}$ 、さらにプリズムによる減衰量から計算されるエネルギー密度は、 $1.3 \times 10^{-6} \mu\text{J}/\mu\text{m}^2$ である。これは、PFG03C の適正露光量をかなり下回る値である。しかしながら、図 9 からわかるとおり、透過率曲線は飽和する傾向にある。この理由の 1 つとしては、レーザースポットの集光面積内で、光強度が均等に分布していると仮定していることである。実際には、ビームウェストではガウス型の強度分布であり、スポット中心部での光強度は数倍高い。また、上記の最適露光量のカタログ値はアナログホログラムを撮影した場合に、高い回折効率を得られる露光量であり、ビーム集光時の最適値とは必ずしも一致しない可能性も高い。さらに、このような特殊な露光条件に対して、温度や時間などの現象・定着条件が不適切であることも考えられる。

6. ま と め

ディスプレイ用の計算機合成ホログラムを作製するための高解像度プリンタを試作した。このプリンタは、ガラスプリズムの表面反射を利用して減衰したレーザーダイオードの出力を対物レンズによりホログラム乾板上に集光することにより、ドットサイズ $2 \times 4\mu\text{m}^2$ 以下のドット列を描画することができる。また、ホログラム乾板を動かすステージに内蔵されている、光学リニアスケールからの信号に基づいてレーザー照射タイミングを制御することにより、描画時の最大線速度 24mm/s を実現している。これにより、 1cm 角程度のホログラムであれば、1 時間以下で描画が可能である。

また試作プリンタでは、レーザーパルスのパワー変調により、濃度階調を有する画像の描画を可能にしている。この時、LD 出力に対する描画像の透過率曲線を測定し、測定した透過率曲線に基づいて LD 出力を制御することにより、合成したホログラムの濃度階調とほぼ線形な透過率分布の描画を可能とした。これにより、マルチレベルホログラムを描画し、その光学再生像を確認することができた。

本プリンタの試作・実験にご協力頂いた卒業生の近藤剛司と星野哲也、大学院在学学生の中村俊介、および CGH 作成にご協力頂いた近藤暁靖の各氏に深謝致します。また、本研究に有意義な議論と支援を頂いた関西大学高井正弘先生に感謝致します。

〔文 献〕

- 1) M. Lucente: "Interactive computation of holograms using a look-up table", J. Electronic Imaging, **2**, pp. 28-34 (1993).
- 2) 岩瀬, 吉川: "差分法に基づくフレネルホログラムの高速計算法", 映情学誌, **52**, 6, pp. 899-901 (1998).
- 3) H. Yoshikawa, S. Iwase and T. Oneda: "Fast computation of Fresnel holograms employing difference", SPIE Proc. Practical Holography XIV and Holographic Materials VI, #**3956**, pp. 48-55 (2000).
- 4) K. Matsushima and M. Takai: "Recurrence formulas for fast creation of synthetic three-dimensional holograms", Appl. Opt., **39**, pp. 6587-6594 (2000).
- 5) 松島, H. Schimmel, F. Wyrowski: "波面展開法を用いた表面モデル CGH の高速計算法", 3次元画像コンファレンス 2001, pp. 13-16 (2001).
- 6) K. Matsushima, H. Schimmel and F. Wyrowski: "New creation algorithm for digitally synthesized holograms in surface model by diffraction from tilted planes", SPIE Proc. Practical Holography XVI and Holographic Materials VIII, #**4659**, pp. 53-60 (2002).
- 7) A. J. Lee and D. P. Casasent: "Computer generated hologram recording using a laser printer", Appl. Opt., **26**, pp. 136-138 (1987).
- 8) 梶木: "マルチ照明法による計算機合成バイナリホログラムの視域の拡大", 3次元画像コンファレンス'99, pp. 293-294 (1999).
- 9) 山岸, 吉川: "計算機合成ホログラムの広視域化", 光学, **27**, pp. 535-538 (1998).
- 10) N. Yoshikawa, M. Itoh and T. Yatagai: "Binary computer-generated holograms for security applications from a synthetic double-exposure method by electron-beam lithography", Optics Lett., **23**, pp. 1483-1485 (1998).
- 11) 松島, 本荘: "陰影付けした表面モデル 3次元物体の全方向視差計算機合成ホログラム", 映情学誌, **56**, 6, pp. 986-992 (2002).



まつしま きょうじ
松島 恭治 1984年, 大阪市立大学工学部応用物理学科卒業. 1990年, 同大学院博士課程修了. 同年, 関西大学助手. 1996年, 同大専任講師. 2000年, ドイツ Friedrich-Schiller Jena 大学客員研究員. 光励起遠赤外レーザー, 計算機合成ホログラム, 回折光学素子の研究に従事. 工博. 正会員.



じょうこう あつし
上甲 篤 2000年, 関西大学工学部電気工学科卒業. 2002年, 同大学院前期博士課程電気工学専攻修了. 同年, 松下電器産業(株)入社.