

ドット描画式ドラム型フリンジプリンタの開発

小林 俊輔 宮内 宏之* 松島 恭治

関西大学 工学部 先端情報電気工学科

〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35

E-mail: shunsuke@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

あらまし ホログラム乾板上に解像度約 17,000[dpi]、最大描画線速度 20[mm/s]でマルチレベルの濃度階調を持つ干渉縞を描画できるフリンジプリンタをすでに報告しているが、このプリンタでは 24[mm] 角のホログラムを描画するのに約 7 時間かかり、実用的な時間で描画完了しない問題点があった。そこで本研究では、感光フィルム上に高速で干渉縞を描画できるドラム構造の新型デジタル合成ホログラム用フリンジプリンタの開発を行なった。

キーワード: ホログラム, 計算機合成ホログラム, フリンジプリンタ

Development of Single-Spot Drum-Type Fringe Printer

Shunsuke Kobayashi Hiroyuki Miyauchi Kyoji Matsushima

Department of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University

3-3-35 Yamatetyou, Suita, Osaka, 564-8680 Japan

E-mail: shunsuke@laser.ee.kansai-u.ac.jp, matsu@kansai-u.ac.jp

Abstract We have already reported a fringe printer to draw numerically synthesized multi-level fringe patterns exceeding 17000 dpi in resolution. However, the maximum line speed of the old fringe printer is limited to 20 mm/s and time to draw a hologram of 24 mm square in dimension is estimated approximately 7 hours. This is not sufficient for any practical applications. In this report, a novel drum-type fringe printer developed for improving the drawing speed is presented.

Keyword: hologram, Computer-Generated Hologram, fringe printer

1. はじめに

計算機合成ホログラムとも呼ばれるデジタル合成ホログラムは、計算機内に保持した物体モデル情報から物体光を数値合成し、ホログラムとして立体画像を作成する技術である。そのため、実在しない物体のホログラムを合成できるという利点がある。しかしホログラムの干渉縞は1[mm]あたりに1,000本以上の連続階調のある微細な線の集まりであり、理想的には解像度25,000[dpi]以上の高解像度の表示デバイスを必要とするという問題点がある。

現状の印刷機器では業務用高解像度印刷機であるイ

*現在、トヨタ自動車株式会社勤務

メージセッタを用いても、その解像度は4,000[dpi]程度である。CGHの視域角は解像度にはほぼ比例するためこのような印刷機では十分な視域角が得られない。

一方、近年は高解像度描画装置として電子線描画装置やレーザ直接描画装置等も用いられている。これらの装置を用いれば、波長以下のパターンも描画可能である。しかしこれらの装置は極めて高価であり、材料の準備も含めると一つのホログラム描画にも数日程度の時間が掛かる問題点がある。

これらの機器の問題点を克服するため、CGH描画専用フリンジプリンタの研究が行なわれている。その方法として、CD-R ドライブを利用する方法¹⁾ や、液晶パネ

ルに表示したパターンをテレセントリック光学系を用いて縮小し描画する方法^{2,3)}が報告されている。CD-Rドライブを用いる方法は、特別な装置を必要とせず手軽にCGHの描画ができるが、ドライブ自体が現在入手困難なことや再生像に歪みが生じるなどの問題点がある。

一方、液晶パネルを用いた方法では、1度に大量のピクセルを描画できるため描画の高速化が可能である。しかしこの方式は本質的にステッパーと同じであり高い解像度を得るためには、高品質な縮小光学系が必要であるため、高解像度化が難しいと考えられる。

我々はすでに、ホログラム乾板上に解像度約17,000[dpi]、最大描画線速度20[mm/s]でマルチレベルの濃度階調を持つ干渉縞を描画できるフリンジプリンタをすでに開発している^{4,5)}。

このプリンタでは、レーザー光を回折限界近くまで集光し、ドットを一点ずつ描画している。そのため描画速度は遅いものの、高い解像度が得られるという利点がある。しかし、このプリンタでは往復運動を必要とするため24[mm]角のホログラムを描画するのに約7時間かかり、実用的な時間で描画完了しない問題点があった。

そこで本研究では、感光フィルム上に高速で干渉縞を描画できるドラム構造の新型フリンジプリンタの開発について述べる。

2. ドット描画式フリンジプリンタの原理

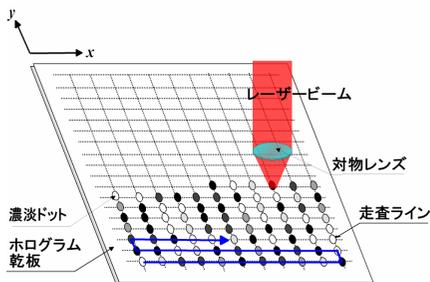


図1. 第1.5世代フリンジプリンタの原理

既報の第1.5世代フリンジプリンタの原理を図1に示す。第1.5世代プリンタでは、光を照射すると黒化するホログラム用ガラス乾板表面上に、レーザーダイオードから出力されたレーザー光を対物レンズを用いて集光し、微

細なドットを描画する。ドットの濃度は照射する光のパワーに応じて変化する。そのためレーザーダイオードの出力を変調することでドットの濃淡を変化させることができる。

第1.5世代フリンジプリンタは、ガラス乾板を載せたX-Yステージの移動によりレーザーの照射位置を変化させて描画を行う方式であった。このX-Yステージでは、内蔵された光学リニアスケールにより、ステージの絶対位置を精度0.1[μm]で検出することが可能である。そのため、その位置情報に基づいてD/Aコンバータとパルス発生器によって任意の波高値のパルスを発生してレーザーダイオードを駆動し、図1のようにX方向の双方向にスキャンを行っている。このプリンタの解像度は約17,000[dpi]、最大描画線速度40[mm/s]であり、24.6[mm]四方のホログラムを描画するのに約7時間が必要である。

しかしながら、24.6[mm]四方程度のホログラムではサイズが小さくて実用的な用途が考えづらく、面積比で4倍程度のホログラムが望まれるが、そのサイズのホログラムはこのプリンタでは実用的な時間で描画完了しない問題点があった。この形式のフリンジプリンタでは、ステージを往復移動させて主走査方向の描画を行うためそれによって生じるステージ移動の加減速時間によるロスと、ステージコントローラユニットと制御コンピュータの通信において生じるオーバーヘッド時間によるロスがあるために、描画速度をこれ以上増加することは困難であった。

3. 第2世代ドット描画式フリンジプリンタ

3.1 第2世代フリンジプリンタの構造

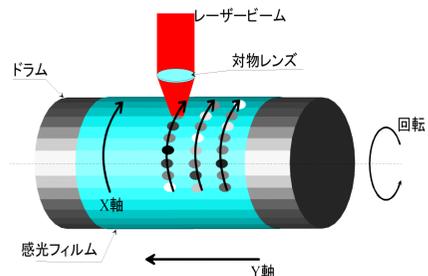


図2. 第2世代フリンジプリンタの原理

図2に本研究で製作した第2世代ドット描画式フリン

ジプリンタの原理を示す。光学系は前節で述べた第1.5世代フリッジプリンタと同じであり、レーザダイオードの出力光をプリズムで減衰し、対物レンズでドラム上の感光フィルム表面に集光している。

この新しいフリッジプリンタの大きな特徴はドラム構造を取り入れたことにある。このプリンタではドラムの回転によりX軸方向の走査を行い、直線ステージがレーザビームを集光する光学系全体を移動させることによりY軸方向の走査を行う。それにより、ステージの往復運動を不要とし、またステージコントローラと制御コンピュータの通信量を減少でき、ホログラム描画時間を大きく減少できる。

3.2 第2世代フリッジプリンタの制御系

本プリンタの制御回路の構成を図3に示す。本プリンタの制御システムはステージ制御部とレーザ照射パルスタイミング制御部からなる。

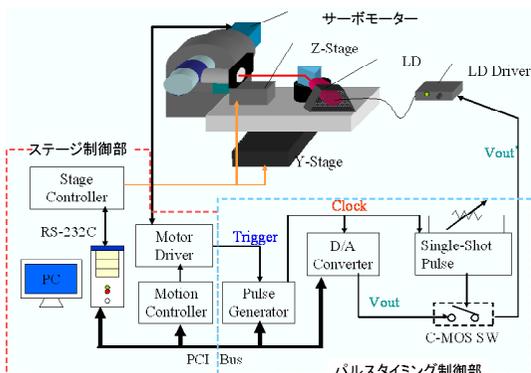


図3. 制御回路の構成

3.2.1 ステージ及びステージ制御部

ステージとしては、Y軸走査用のステージとしてストローク100[mm]、位置決め精度1[μm]以下の直線ステージ(駿河精機社製 KS113-100F)を使用し、焦点調整用のZ軸走査用のステージとしてストローク20[mm]、位置決め精度0.3[μm]以下の直線ステージ(駿河精機社製 KS101-20)を用いている。Y、Zステージはステッピングモーターコントローラ(駿河精機社製 D222)と接続し、これをRS232Cシリアルインターフェイスを介して制御コンピュータと接続している。一方、ドラムは制御コン

ピュータ内のPCIバスに設置したモーションコントローラ(インターフェイス社製 PCI-7209)を用いて制御を行っている。

3.2.2 ドラム

ドラムは直径35[mm]で有効長さ120[mm]であり、ドラム表面の半径方向振れ、軸方向振れ、円周方向振れは全て10[μm]以内となるように設計製作を行なった。ドラムはACサーボモータ(安川電機製 SGM-A3B312)により駆動され、その回転速度は0.5~5.0[rps]の範囲内で可変である。

3.2.3 レーザ照射パルスタイミング制御部

ドラムのエンコーダからドラムの回転に同期して1回転毎にZ相パルスが出力される。それによってパルスジェネレータ(インターフェイス社製 PCI-J632206)をトリガし、設定した周波数のクロック信号を出力する。このクロック信号により、単一パルスジェネレータとD/Aコンバータ(インターフェイス社製 PCI-3335)をトリガし、D/Aコンバータの出力を単一パルスジェネレータによって生成された一定幅のパルスでスイッチングすることにより任意の波高値のLD駆動パルスでLDを駆動している。

3.3 ドット間隔の制御

第2世代フリッジプリンタのX軸方向のドットのピッチ Δx は次式で求められる。

$$\Delta x = \frac{\pi \times D \times \phi}{f}$$

ここで、 f [Hz]はLD駆動パルスの周波数、 D [mm]はドラムの直径、 ϕ [rps]はドラムの回転速度である。この式より描きたいピッチ Δx に応じたパルス周波数を求めれば良いが、パルス発生器の周波数分解能の制約により、実際には近似値を用いなければならない場合がある。

4. ドラム偏心の測定結果

本方式のフリッジプリンタでは、ドラムの偏心が描画ドット径に大きく影響する。そのため、フィルム描画の前に図4に示すようにドラムの根元部、中央部、右端部

において偏心量を測定した。この測定のために、渦電流式変位センサのセンサヘッドをドラムに接近して設置し、ドラムを回転させてセンサヘッドからドラムまでの距離を測定した。中心部における回転角に対するセンサヘッドからドラムまでの距離の変位を図5に示す。

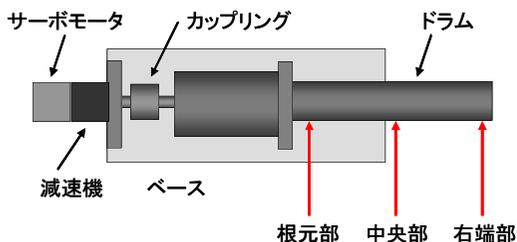


図4. ドラム上の偏心測定位置

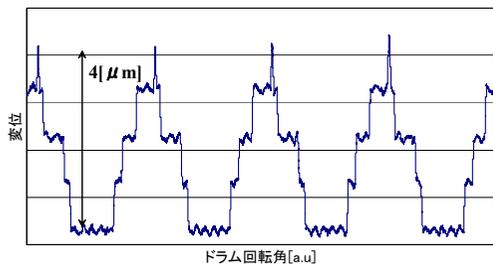


図5. ドラム中央部における偏心量の測定結果

図5より中央部において4[μm]程度ドラムが偏心を起していることがわかる。また同様の測定の結果、根元部においては2[μm]程度、右端部においては5[μm]程度偏心していることがわかった。実際の描画時には数μm程度の偏心なら問題なくドットが描画できるが、偏心が大きくなる程、フィルム表面がレーザ光の面から外れ描画ドットにボケが生じてしまう。

また現状のドラムでは、回転軸をモータとのカップリング部と中心の軸受けの二カ所で支えている。この構造は、横方向の力に非常に弱いため、回転軸に横方向の力がかかったり、ドラム支持構造全体がねじれたりすることによりドラムの偏心が大きくなったり、回転が不安定になるのではないかと考えられる。そのため現在ドラム支持構造の剛性を強化するため改修を行なっている。

5 ホログラム描画結果

5.1 ドット列の描画

実際に描画するためには、まずドラム上に貼り付けたフィルム上にレーザ光が焦点を結ぶようにしなければならぬ。そこで2×4[μm]のピッチで10000×100[Pixel]のラインを数ライン描画するごとに対物レンズのZ位置を変化しながら描画し、その描画結果を顕微鏡で観察することにより焦点位置を求めた。

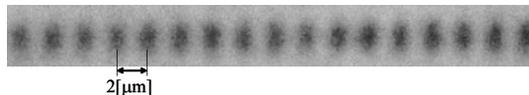


図6. 描画ドット列の顕微鏡写真

ドット列の描画結果を図6に示す。水平方向1.5[μm]、垂直方向3.0[μm]程度のドットが描画できたことから、水平方向解像度は約17,000[dpi]となり第1.5世代プリンジプリンタと同等の解像度が得られることが確認できた。

本プリンジプリンタを用いて、描画ピッチ2[μm]で10,000[Pixel]のラインを連続して描画した場合の描画像の描画開始端と描画終了端の顕微鏡写真を図7に示す。各ライン同士の間隔は4[μm]である。

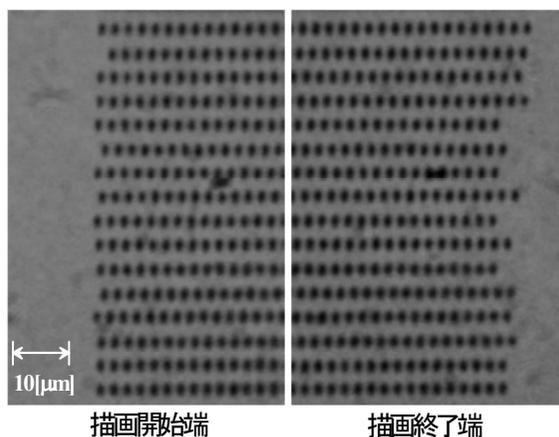


図7. 顕微鏡写真

この結果から描画像の両端でドットが揃っていないことが分かる。描画開始端で最大1[μm] (0.5[Pixel]) 程度のずれが生じ、描画終了端では最大5[μm] (2.5[Pixel])程

度のずれが生じている。開始端に比べて、終了端の方が大幅にずれていることが分かる。この最も大きな原因として、ドラムの回転速度にムラが生じていることが考えられる。

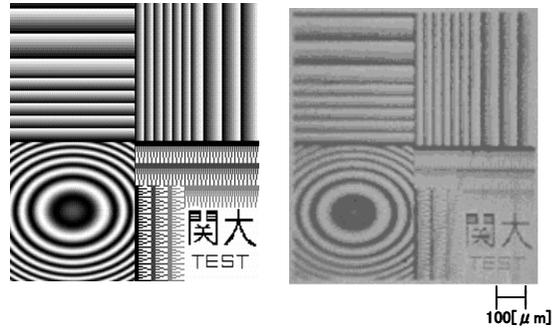
このドラムでは、ACサーボモータの回転を減速機を用いて10分の1に減速してドラムを駆動している。ドラムを120[rpm]で回転させたとき、ドラムのモータドライブに接続されているデジタルオペレータでモータの回転数を確認すると、1203~1204[rpm]の間で変動している。このことからドラムの回転速度にムラがあることが分かる。開始端がずれるのは、ドラムの回転とZ相エンコーダパルスが完全に同期していないことが原因だと考えられる。また、終了端側のずれが大きくなるのは10,000[Pixel]描画する間に回転速度のムラが蓄積することにより描画ドットのずれが大きくなるためであると考えられる。

5.2 テストパターンの描画

ホログラムを描画するだけの精度があるかを確認するため、図8(a)のテストパターンを描画した。その描画結果の顕微鏡写真を図8(b)に示し、描画パラメータを表1に示す。この結果より、 $1.5 \times 3 [\mu\text{m}^2]$ ピッチで濃淡のある微細な画像を描画できることを確認した。

表1. テストパターンのパラメータ

ピクセル数	400×200
ピクセルピッチ	$1.5 \times 3 [\mu\text{m}^2]$
描画サイズ	$0.72 \times 0.6 [\text{mm}^2]$
LD 制御電圧	1.94~2.08[V]



(a) 原画像 (b) 描画像の顕微鏡写真

図8. テストパターン描画結果

5.3 バイナリデジタル合成ホログラムの描画

本フリンジプリンタを用いてバイナリデジタル合成ホログラムの描画を行なった。そのパラメータを表2に示す。図9の再生像は幅1[cm]の六角柱であり、一方、図10に示したのは幅1.4[cm]の地球儀である。これらのホログラムの描画時間は1時間9分であった。

表2. バイナリデジタル合成ホログラムのパラメータ

ピクセル数	16,384×8,192
ピクセルピッチ	$1.5 \times 3 [\mu\text{m}^2]$
ホログラムサイズ	$24.6 \times 24.6 [\text{mm}^2]$

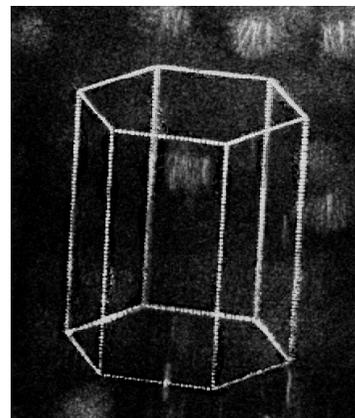


図9. バイナリデジタル合成ホログラムの再生像(六角柱)

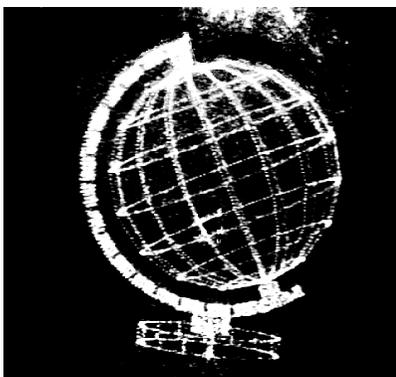


図10. バイナリデジタル合成ホログラムの再生像(地球儀)

6. まとめ

第2世代フリンジプリンタの開発状況について述べた。本フリンジプリンタでは、第1.5世代フリンジプリンタと同等の横1.5[μm] \times 縦3[μm]のドットを描画可能であり、水平方向の両側視域角は計算上24.4 $^\circ$ となる。また描画時間は従来の約7時間から1時間9分と約6分の1の時間で描画可能となり、描画の高速化が達成できた。

ここで当研究室で開発した各世代のプリンタの性能を表3にまとめる。

表3. 各世代のプリンタの性能^{4,5)}

	第1世代	第1.5世代	第2世代
NA	0.4	0.55	0.55
最小ドットサイズ[μm] (dpi)	2 (12500)	1.5 (17000)	1.5 (17000)
視域角[deg]	18.2	24.4	24.4
描画線速度[mm/s]	20	40	200

この表からもわかる通り今回開発したフリンジプリンタでは大幅に速度が向上している。例えば、現在主に描画しているホログラム縦横2倍に拡大した50[mm]四方のホログラムを描画する場合、第1.5世代フリンジプリンタでは28時間かかると推定されるが、第2世代フリンジプリンタでは10分の1以下の2時間20分で描画できると予想される。一方現時点の問題として、本フリンジプリンタでは、感光フィルムを用いる関係上、フィルムに傷がつきやすく、それが再生時にノイズとなって再生

像の観察を妨げることがある。また、5.1節で述べた描画像の両端でドットが揃っていない問題点から、像が重なって再生されてしまうことがある。これを解決するためには、ドラムの回転精度を上げることが今後の課題としてあげられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科研費(15300025)の助成を得た。

文献

- 1) 坂本, 森島, 臼井: 計算機合成ホログラム描画用CD-R システム, 映像情報メディア学会誌, **58**, pp.549-554(2004).
- 2) 立波, 佐々木, 武井, 吉川: フリンジプリンタによるホログラムの作製と評価, HodicCircular, **24**, No.2, pp.12-15(2004).
- 3) H.Yoshikawa, K.Takei: Development compact direct fringe printer for computergeneratedholograms, Practical Holography XVIII, SPIE, **5290**, pp.114-117(2004).
- 4) 山中, 松島: デジタル合成ホログラム用高解像度プリンタの高精度化, 映像情報メディア学会誌, **58**, pp.1665-1668(2004).
- 5) 松島, 上甲: 映像情報メディア学会誌, **56**, pp.1989-1994 (2002)