デジタルミラーデバイスを用いた高速広帯域化光造形装置

非会員 富田 裕樹* 非会員 岩澤 綾子*
正 員 高橋 幸郎*

High Speed and Wide Range Rapid Prototyping System Using a Digital Micromirror Device

Yuki Tomita*, Non-member, Ayako Iwasawa*, Non-member, Kohro Takahashi*, Member

The digital micromirror device (DMD) is a new display device fabricated by the micromachining technique and used in projectors. In this paper, the DMD serves as rapid prototyping. In the system, the DMD and a mercury lamp are used as a pattern generator and an UV source, respectively. Since the developed exposure system doesn't need LASER, a simple and low cost system can be realized. By using the DMD with a quartz glass window, all kinds of resins from UV to visible light can be available. Excess growth was suppressed by reduction of unnecessary light length contained in a mercury lamp. It is possible to reduce the design time for non-scanning rapid prototyping by introducing 3DCAD.

キーワード：光造形, DMD, 紫外線, 石英ガラス, 3DCAD, 余剰成長

Keywords : rapid prototyping, DMD, ultraviolet light, quartz glass, 3DCAD, excess growth

1. はじめに

デジタルマイクロミラーデバイス (DMD) は、マイクロマシニング技術により作られ、各画素にはマイクロミラーが数十万個、アレイ状に配列されており、各ミラーの傾斜により、投影データに対する光学シャッターとして動作する。静電気力により各画素毎にミラーを傾斜させることで入射光の経路を変化させることが出来る⁽¹⁾。

現在一般的な光造形システムにおいては、レーザ走査による露光方法が使われているが、これらのシステムは複雑であり、かつ設備コストが高い。一方 DMD を使用する非走査型光造形システムは、光源にレーザを用いないことから、低コストで光造形システムが構成できる利点がある。これまでに可視光源と可視光用光造形樹脂を用いた低コストの光造形システムが開発されているが⁽²⁾、本方式では、高圧水銀ランプを使用することで、これまでにレーザ用に開発されている全ての紫外線対応の光造形樹脂が使用可能である⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

ここでは本方式を用いて実用的な光造形システムを実現するために、以下の検討を行った。

- (1) 照射波長の広帯域化と照射光強度の増加
- (2) DMD 寿命対策

(3) 余剰成長の抑制

2. システム構成

図 1 に示す様に、本システムは光学系 (高圧水銀ランプ/DMD/レンズ)、機械系 (xy ステージ/z ステージ/タンク)、制御システム (コンピュータ/DMD コントローラ/パルスステージコントローラ) から成る。また DMD 及びシステムの仕様を表 1 に示す。DMD は各画素サイズ $17\mu\text{m} \times 17\mu\text{m}$ 、画素数 600×800 (0.7SVGA, TI 社製⁽⁶⁾)である。この DMD は 90%の反射領域と 200 : 1 のコントラスト比を有しており、液晶パネルに比べ紫外光に対しても高いコントラストが得られる。水銀ランプからの紫外光が光学系のレンズを介して DMD 上に投影される。マイクロミラーを画素毎に制御することで光の反射方向を変化させ、z ステージ上に任意のパ

図 1 システム構成

Fig. 1. System structure.

* 埼玉大学工学部電気電子システム工学科
〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255
Department of Electrical and Electronic Systems, Faculty of
Engineering, Saitama University
255, Shimo-ohkubo, Saitama, Saitama 338-8570

表 1 DMD およびシステムの仕様
Table 1. Specification of DMD and the system.

DMD	
number of pixels	600 x 800
contrast ratio	200 : 1
reflection area	90 %
pixel's gap area	5 %
pixel size	17 μm x 17 μm
Developed system	
leveling method of resin surface	free
UV source	Mercury lamp (200W)
resolution	600 x 800
UV resin	Epoxy, Acryl
pixel size	21 μm ~330 μm square
luminance on resin surface	500 mW (365 nm)
minimum thickness of stacking layer	50 μm
maximum model size	200 mm x 267 mm

ターンを投影する。この投影倍率を変化させることにより任意の造形サイズを得ることができる。本システムでは最大の造形サイズを 200 mm×267 mm としているが、この時 1 画素寸法は 330 μm 角となる。DMD およびステージコントローラはコンピュータにより自動化している。自由液面法では DMD によって作られた露光パターンを、すでに露光硬化された層を沈下して、一定の厚みの樹脂をこの上に被覆した液面上に投射し、硬化する。このプロセスを繰り返すことで 3 次元モデルが造形される。

DMD のミラーギャップでは、光照射がないことから樹脂の硬化エネルギー不足となるが、上部層により樹脂が閉じこめられると同時に、上部層の照射時において、樹脂中の光散乱によりギャップ部の硬化が進行する。またミラーギャップがミラー寸法の約 5 %であることから、最大画素寸法 330 μm における誤差は約 17 μm 相当となり、最小積層厚みの 50 μm と比較しても約 30 %であることから、表面にわずかな筋状の模様が生ずる以外に造形精度に対する影響は小さい。またミラーを支える支柱部は反射率が少ないため光量不足となり、樹脂の硬化が不十分となるが、最表面以外は上の層により埋められていくため、ミラーギャップ同様造形上問題とはならない。

3. 光学系

本システムで用いている光学系を図 2 に示す。高圧水銀ランプからの光は、照度ムラを均一化するためのインテグレータを通った後、コンデンサレンズおよび TIR (Total Internal Reflection) プリズムを通して DMD に照射され、投影レンズを介して、DMD 上の画像が樹脂液面に投影される。照射波長を遠紫外線領域にまで広げるため、これら全ての光学部品を可視光用ガラス材から UV 用石英ガラス材に変更した。DMD も遠紫外光が通過できるように、図 3 に示す石英製の窓ガラス材を用いたパッケージ構造とした。

図 2 光学系

Fig. 2. Optical system.

図 3 DMD パッケージ

Fig. 3. DMD packaging.

図 4 DMD 反射特性

Fig. 4. Reflection characteristic of the DMD.

これには石英窓材との膨張率の差による接合後の応力を減らすため、室温で接合している。

図 4 に石英製窓材とした DMD の反射特性を示す。これより、反射可能な波長は 200 nm の遠紫外線領域にまで拡張されていることが分かる。この結果、He-Cd レーザ (325 nm) および Ar レーザ (355 nm) 用光造形樹脂に対し、水銀灯の i 線 (365 nm) と j 線 (313 nm) で露光可能となる。

表 2 に波長 365 nm における光学系の変更前後の伝送効率を示す。(但し DMD はミラーの on time ratio 92 %を含む。) これより、改良後の総合光伝送効率は 42 %に増加しており、313 nm においてもほぼ同等の効率を示す。またコンデンサ

表 2 光伝送効率

Table 2. Transmittance and reflectance.

Optical Parts	Condenser lens	Prism	DMD	Projection lens	Total
Visual	85 %	35 %	65 %	25 %	5 %
UV	90 %	74 %	78 %	81 %	42 %

レンズへの入射光量が波長 365 nm において 1.2 W あることから、液面での総光量は約 500 mW が得られている。

4. DMD の寿命

パッケージへの強制冷却をしない DMD に固定パターンを表示させた状態で、200W の高圧水銀灯の全スペクトル光を約 10 時間連続照射した後に、全白パターンを投影させたときの画像を図 5 に示す。これより中央部にパターンの焼き付きが、また周辺部にはミラーが動作しないために黒領域がみられる。この現象は前者が DMD の動作温度の上昇によりメモリ効果が生じたためであり、後者は温度と短波長の紫外線照射との相乗効果によりミラーのスティッキングが発生したためと思われる。

高輝度の光を DMD に照射した場合、その動作寿命に影響するものとして、

- (1) ミラーヒンジの機械疲労
- (2) ミラーのメモリ効果
- (3) ミラーのスティッキング
- (4) 光照射による駆動回路の動作不良

が考えられ、これらについて考察と対策を行った。

DMD はミラーを載せたヨークと呼ばれる基板が 2 本の AI 薄膜製のヒンジにより浮上した構造をしており、電界によりヒンジが捻れ、ミラーの傾斜動作を生ずる。この機械的疲労による故障試験では、 2×10^{12} 回以上の動作試験においても、ヒンジによる動作不良は生じていない⁽⁷⁾。これはミラーが毎秒 5000 回の動作を行うとして積算動作時間が 10 年以上あることになり、この値からヒンジの機械的疲労による故障は考慮しなくて良いことになる。この理由として、機械的疲労による破断は、金属表面でのディスロケーションから疲労クラックが発生するが、ヒンジに使われている AI 薄膜は、バルク材料と異なりディスロケーションがほとんど無く、疲労クラックが生じないためと推測されている。

ミラーのメモリ効果とは、駆動電界を与えない状態でも、ミラーの位置が元の作成時の水平位置に戻らない状態を指す。これは、DMD のミラー表面を観察したときに、パターンの焼き付きが認められる。但し、その傾きの程度が小さな時は、反対側に戻す駆動電界が加われば、逆方向に傾くが、これが大きくなると電界が不足し、ミラーの動作不良となる。この現象が起きる原因は、ミラーの傾きの平均回数が高温下で不均衡な状態にあると、クリープ現象により、ヒンジに塑性変形が生ずるためである。即ち、光造形のように、変化の少ない静止面を長時間投射するような場合、ミラーの傾きが一方方向となり、メモリ効果を生じ安く

図 5 メモリ効果とスティッキングが生じた DMD

Fig. 5. Memory effect and sticking in DMD.

なる。これについて TI 社の M.R.Douglass は動作温度とミラーの傾く方向の比 (Duty Ratio) を変えたときのメモリ効果および DMD 寿命を報告している⁽⁷⁾。これによれば、65℃の動作温度で、Duty Ratio を 95/5 としたとき、ミラーを戻すために必要なバイアス電圧 (リセット電圧) の変化は、初期に 18 V であったものが、1150 時間後には 21 V が必要であり、時間経過とともにこのバイアス電圧は増加する。さらに、動作温度が高いほど、その影響は増加し、Duty Ratio が 95/5 のとき DMD の寿命は、25℃では 100 万時間であるものが 65℃では 4000 時間に短縮する。従って光造形で DMD を使用する場合は、その動作温度の上昇を防ぐことが重要である。

ミラーの傾斜角度は、基板に設けたランディングチップと呼ばれる部分にヨークが接触する事で $\pm 10^\circ$ に設定されるが、この接触においてスティッキングが発生する原因となる。その対策として接触表面にアンチスティッキング表面処理や、スプリングチップを設け、スティッキング防止策が行われている⁽⁷⁾。しかし可視光線領域の照射において有効な対策も、紫外線を照射した場合は、その化学的作用から、接触し合う固体表面が改質されることにより⁽⁸⁾、スティッキングが生じ安くなる。これは短波長程影響が大きく、且つ照射パワーと照射時間との積算エネルギーにも依存する。さらに動作温度が高いと、ヒンジのメモリ効果により、ヒンジの戻り力が低下し、スティッキングが加速すると思われる。

駆動回路への光照射の影響としては、光電子による誤動作および CMOS ゲート界面の劣化であるが、回路の能動領域が上部のミラー部分に遮られて直接照射されない構造であることから、電気的な問題は生じていない。

以上の考察から、高輝度紫外光照射下での DMD の動作寿命への影響を減ずるために、本システムでは以下の対策を行った。

- (1) 熱線防止フィルタにより水銀灯から DMD への熱線照射を減らし、またそのパッケージをペルチェ素子により強制冷却し、その温度上限を 17℃に抑えた。
- (2) 水銀灯の出射口に機械式シャッターを設け、非露光

時である液面調整時間（造形ステージを下げ、次の積層厚み分だけの樹脂が平坦になるまでのレベルング時間）にはシャッターを閉じ、DMD への光照射積算時間を抑制するとともに、投影パターンを白黒反転させた画像を DMD に表示させることで、Duty Ratio の平均化を行い、メモリ効果を抑制する。

5. 露光時間

図6に光硬化樹脂 SCR701(JRS 製)を使用した時の波長 365 nm の光の露光エネルギーに対する硬化厚さの関係を示す。硬化厚さと露光エネルギーの関係は対数となり、100 μm の硬化厚みを得るための露光エネルギーは 10.7 mJ/cm^2 が必要である。この硬化厚みを得るための露光エネルギーに対して、露光領域を変化させた時に必要な露光時間の関係を図7に示す。液面への総光量が一定であれば、露光時間は露光領域に比例する。改良前のシステムでは液面総光量が 37mW であり、露光領域 100 cm^2 で露光時間が 27 秒であったのに対し⁽⁴⁾、今回のシステムでは液面総光量が 365 nm において約 500 mW に高輝度化したことから、同一露光領域に対する露光時間は約 2 秒に短縮される。

図6 露光エネルギーに対する硬化厚さの変化
Fig. 6. Exposure energy vs. thickness of layer.

図7 露光領域に対する露光時間の変化
Fig. 7. Exposure area vs. exposure time.

6. 余剰成長抑制

高圧水銀ランプからの光スペクトルには、遠紫外から赤外光までが含まれており、これをそのまま樹脂に照射した場合、オーバーハング部において設計位置より下側が硬化する余剰成長が生じる。特に長波長ほど光の樹脂内部への浸透が大きいためその影響が大きい。従って、使用樹脂に不必要な波長を光学フィルタでカットする必要がある。図8に光硬化樹脂として SCR701 を用いて光学フィルタにより 405 nm (h 線) と 365 nm (i 線) の強度比を (a) 6.9 から (d) 0.46 まで変化させた光源で造形を行った余剰成長を示す。テストモデルは、下部が直径 8.5 mm、高さ 5 mm、上部が直径 17 mm、高さ 3 mm である。また、一層厚みは 200 μm で、下部が 25 層、上部が 15 層である。h/i の強度比が大きくなる程、h 線による下方への余剰成長により上部の厚みは増加している。(d) の 0.46 では、上部厚みは 3 mm となり、1 層 200 μm で 15 層積層した値と一致する。これより、不要な長波長側をカットすることでオーバーハング部下側の余剰成長が抑制されることが分かる。

余剰成長を抑制することで、図9に示す様な円の中心軸が積層平面に対し平行な孔を有するオーバーハング構造体が

図8 余剰成長
Fig. 8. Excess growth.

図9 オーバーハングを有するモデル
Fig. 9. Test structure with an overhang.

図 10 投影データの生成

Fig. 10. Preparation of projection data.

が精度良く造形できている。

7. 3DCAD を用いた設計

非走査型光造形のための投影データ作成に 3DCAD を用いた。本システムではレーザによる露光方式の様にスライスデータを、一筆書きするデータに変換する必要がないために、この設計図に対し、図 10 (b) の様にスライス平面との積を作れば、これがそのまま (c) の様な光造形用原図となる。1 層当たりの積層厚みを指定することで、(d) の様に投影用のスライスデータをファイルとして自動生成させることが可能である。

8. 光造形の実用例

〈8・1〉 インペラモデル 図 11 に 3DCAD で設計し、そのデータから波長 403 nm 用アクリル樹脂 (VRM-1001, レジナス化成製) を用いて光造形を行ったインペラモデルを示す。一層当たりの積層厚みは 200 μm で積層数は 200 層である。例えばこのモデルにおいて、3DCAD ソフトウェアとして Rhinoceros により 3 次元データから 200 層の断面データを作成する時間は、CPU に Pentium III を用いた場合 5 分程度である。

〈8・2〉 頭蓋骨モデル X線CTデータから光造形した実物大の頭蓋骨モデルを図 12 に示す。一層厚みは 300 μm , 積層数 500 層, サイズは幅 130 mm, 奥行き 180 mm, 高さ 150 mm のモデルを SCR701 樹脂を使って 8 時間で造形できた。照射強度の増大により、実大医用モデルを実用的な時間内で形成することが可能となった。

〈8・3〉 マイクロチャネル 本システムによる微細光造形の可能性を検討するため、電気泳動用マイクロチャネルの造形を試みた。光造形法において、パイプ状の閉鎖空間を有する構造体を作成する場合、造形後に空隙内の未硬化樹脂を除去する必要があるが、マイクロチャネルのように、空隙が微細になるにつれてそのコンダクタンスが小さくなり、さらにチャネル蓋部分の露光時において光の浸透により樹脂が半硬化してゲル状となり、その粘性が増加するため、未硬化樹脂の除去が困難になる。このため樹脂の

(a) 3DCAD モデル
(a) 3DCAD model. (b) 光造形モデル
(b) Rapid prototyping model.

図 11 3DCAD によるインペラモデル

Fig. 11. Design and modeling of impeller by 3DCAD and rapid prototyping.

図 12 CT データから造形した頭蓋骨モデル

Fig. 12. Skull model using CT data.

粘性が小さくかつ微細な造形に適した He-Cd レーザ用アクリル樹脂 (URP-HP-4820, サンノブコ製) を使用し、図 13 に示す造形プロセスにより、マイクロチャネルを形成した。即ち、(a)チャネルを造形後、(b)ディッピングにより表面に樹脂を塗布し、(c)上部に薄板ガラスを被覆し、(d)再度同一のチャネルパターンを露光し既硬化樹脂と接合する。これによりチャネル内に光が浸透しないため、樹脂の粘性が上昇せず、(e)チャネル内から未硬化樹脂の除去が行える。

実際に造形したマイクロチャネルを図 14 に示す。チャネ

図 13 マイクロチャネル造形プロセス
Fig. 13. Fabrication process of micro channel.

図 14 光造形によるマイクロチャネル
Fig. 14. Micro channel fabricated by rapid prototyping.

ル幅は $220\ \mu\text{m}$ 、深さは $150\ \mu\text{m}$ であり、遠紫外光まで広帯域化した本光造形システムにより、He-Cd レーザ用樹脂による μm オーダーの微細加工が可能である。

9. まとめ

DMD を用いた光造形システムにおいて、光学系に石英を用いることで、扱える光造形樹脂を可視光用から He-Cd レーザ用まで使用出来る様になった。更に光伝送効率を高めたことにより、光照射エネルギーが増加した結果、露光時間を著しく短縮し、高速広帯域光造形システムが実現できた。

DMD の動作温度を下げると共に、レベリング時間に反転パターン表示させ、更にシャッターにより不要な光照射をなくすことで、紫外光の高輝度照射下での DMD のメモリ効果およびスティッキング対策を行い、DMD の動作寿命への影響を減らした。

高圧水銀ランプの光に対し、不要な波長を光学フィルタでカットすることで余剰成長を抑制することが出来、オーバーハングを有する構造体を精度良く造形することが可能である。

3DCAD を用いて 3 次元設計原図から非走査型光造形用投影原図を自動生成させることが可能である。

(平成 16 年 6 月 23 日受付, 平成 16 年 8 月 30 日再受付)

文 献

- (1) L. J. Hornbeck : "Digital Micro Light Processing: A new MEMS-based display", 4th Sensor symp., pp.297-304 (1996)
- (2) 平田幸紀 : 「高速光造形装置「LSC-2000 シリーズ」」, 映像情報インダストリアル, 2 月号, pp.21-26 (2000)
- (3) K. Takahashi and J. Setoyama : "A UV-Exposure System using DMD", Electronics and comm. in Japan, Part 2, Vol.83, No.7, pp.56-58 (2000)
- (4) K. Takahashi and T. Akahane : "High-Speed Rapid Prototyping System Using a Digital Micromirror Device", The Sensor Symp. 2000, pp.271-274 (2000)
- (5) Y. Kaneko and K. Takahashi : "UV Exposure System for Photolithography and Rapid Prototyping Using DMD Projector", Asia Display / IDW' 01, pp.1339-1342 (2001)
- (6) Web Site : 「<http://www.marubun.co.jp/semicon/index.jsp>」 参照
- (7) M. R. Douglass : "Lifetime Estimation and Unique Failure Mechanisms of the Digital Micro Mirror Device (DMD)", IRPS (1998)
- (8) 加藤浩一郎・松本好家・菊池 清 : 特許第 3127228 号「金属表面の改質方法」(2000)

富 田 裕 樹

(非会員) 1982 年 2 月 4 日生。04 年 3 月埼玉大学工学部電気電子システム工学科卒業。同年 4 月同大学大学院理工学研究科博士前期課程電気電子システム工学専攻入学。現在、在学中。

岩 澤 綾 子

(非会員) 1977 年 10 月 21 日生。02 年埼玉大学工学部電気電子システム工学科卒業。04 年 3 月埼玉大学大学院理工学研究科博士前期課程電子電子システム工学専攻修了。同年 4 月松下電器産業(株)入社。

高 橋 幸 朗

(正員) 1947 年 8 月 13 日生。77 年 3 月東北大学大学院博士課程電子専攻修了。同年東北大学工学部助手。88 年 10 月埼玉大学工学部電子工学科助教授, 96 年 10 月同教授。この間主として医用電子回路, 電子デバイスの研究に従事。工博。