

文章编号: 0258-7025(2010)07-1892-06

# 基于数字微反射镜器件的快速成形系统

胥光申 马训鸣 罗 声 邱荣华 胡松桥 潘 焕

(西安工程大学机电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 为实现微小零件高精度低成本快速制作, 构建了新型面曝光快速成形试验系统。该系统由视图发生器、精密升降工作台及控制系统构成。利用视图发生器生成的零件截面图形作为动态掩模, 对光敏树脂整层曝光固化, 实现微小三维零件的制作。对视图平面紫外光强分布进行了研究, 建立了光强分布关于被测点位置及视图灰度的关系模型, 利用该模型, 实现了视图平面紫外光强分布的均匀化, 紫外光强的最大与最小值之差达到  $0.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。利用该快速成形系统, 制作了具有复杂微小特征的三维零件。测试件的测量和分析结果表明, 误差在  $\pm 0.06 \text{ mm}$  范围内尺寸数量占有所有测量尺寸的 72.2%。与扫描式光固化激光快速成形系统相比, 该系统成本低, 制作时间短。

**关键词** 光学制造; 快速成形; 光固化; 微制作

**中图分类号** TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103707.1892

## Novel Stereolithography System Employing Digital Micro-Mirror Device

Xu Guangshen Ma Xunming Luo Sheng Qiu Ronghua Hu Songqiao Pan Huan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** To fabricate small objects with high accuracy and low cost, an integral stereolithography (SL) system has been developed, and the system consists of dynamic pattern generator, recoating system and control system. Photo-sensitive resin is solidified with image mask produced by dynamic pattern generator, and then small objects can be fabricated. Ultraviolet (UV) light intensity distribution in the imaging plane is investigated, and the relationship of UV light intensity with position in the imaging plane and gray-scale of pattern is established with least squares method. Uniformity UV light intensity distribution is obtained by controlling the gray-scale value at different positions in the imaging plane according to the relationship, and the difference between maximum and minimum value of UV light intensity is  $0.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Small objects with microstructures are built with the SL system. A test part was designed, and the results of accuracy testing and statistical analysis demonstrate that the dimensions with error within  $\pm 0.06 \text{ mm}$  are 72.22% in all testing dimensions. The notable characteristic of the novel SL system is that the new SL system can fabricate micro-structures with high-resolution at low cost.

**Key words** optical fabrication; rapid prototyping; stereolithography; micro-fabrication

## 1 引 言

随着国防、微电子、现代医学以及生物工程等技术的发展, 对三维微小零件(特征尺寸在微米级到毫米级)的需求日益迫切, 因此, 发展三维微小零件的制造技术具有重要意义<sup>[1,2]</sup>。基于离散/堆积原理的快速成形技术能准确制作具有复杂曲面的微小零件, 和去除材料的加工方法相比, 其制作时间、成本等与零件的复杂程度无关; 还能制作具有复杂内腔或者复杂内流道的零件, 因此, 快速成形(SL)技术

在三维微小零件制造技术中具有极大的潜力和应用前景<sup>[3,4]</sup>。光固化法是现有快速成形技术中精度最高、表面质量最好的技术, 故实现微小结构制作的快速成形技术研究多采用光固化法<sup>[3,5]</sup>。根据固化单元不同, 微型光固化技术可分为扫描法和整层曝光法<sup>[6]</sup>。扫描法是对传统扫描固化工艺的改进, 采用单膜激光器, 聚焦后光斑直径最小可达到  $1 \mu\text{m}$ , 由工作台运动完成光斑的精确扫描, 实现微细结构的制作<sup>[7~10]</sup>。该方法采用激光器作光源, 系统成本

收稿日期: 2009-10-23; 收到修改稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(50745017, 50875194)和陕西省教育厅自然科学基金(08JK305)资助课题。

作者简介: 胥光申(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事高分辨率快速成形技术方面的研究。E-mail: xugs988@126.com

高。整层曝光法的原理为：在光路中设置以空间光调制器(SLM)为核心的视图发生器<sup>[11]</sup>，视图发生器在树脂表面形成零件截面视图，用该视图为掩模，实现对树脂的选择性固化<sup>[3,7]</sup>。该成形方法的优点是：能以可见光为光源，系统成本较低；整层树脂一次曝光固化，制作时间短。该方法多采用 LCD 作为视图发生器，构建用于微器件制作的快速成形系统<sup>[12~14]</sup>。但光束透过 LCD 时有较大的能量损失，LCD 的对比度较低，影响细微结构特征的精确制作。

本文构建了以数字微反射镜器件(DMD)为核心的视图发生器，利用该视图发生器生成的零件分层截面视图作为动态掩模，实现对光敏树脂整层曝光固化；建立了基于 DMD 的面曝光快速成形试验系统。对该系统视图平面紫外光强分布进行了研究，建立了光强分布关于被测点位置及视图灰度的关系模型，利用该模型实现了视图平面紫外光强分布的均匀化。

## 2 视图发生器的构建

### 2.1 DMD 及其特点

DMD 结构为：在硅基底上用扭臂铰链安装了许多可倾斜的微反射镜，在每个微镜下面，用 CMOS 工艺制作出存储器单元，根据存储器内容的不同，微镜单元分别倾斜不同的角度 ( $12^\circ$ ,  $-12^\circ$ )<sup>[15]</sup>。将 DMD 置于光路中，光源的光线照射到镜面时，若微镜倾斜  $12^\circ$ ，光线被反射进入光学系统的入射孔，视图中对应像素变亮；若微镜倾斜  $-12^\circ$  时，光线被反射到光线吸收板上，不能进入光学系统入射孔，视图中对应像素变暗。

和 LCD 相比，DMD 具有很多优点：首先 DMD 有更高的光调制效率，若以 DMD 为核心构建快速成形系统，该快速成形系统将具有更高的曝光量，使得成形速度更快，成形效率更高；DMD 具有更小的像素尺寸，使以 DMD 为掩模的快速成形系统能制作微小结构的最小单元尺寸更小，有利于提高制作分辨率；DMD 具有更高的对比度，使得以 DMD 为核心构建视图发生器所产生的视图明暗对比更为清晰，用于整层曝光快速成形系统时，制作的细微结构也更为清晰。DMD 具有更高的开关速度，使得以 DMD 为核心的视图发生器更易实现像素级的灰度调制，用于整层曝光的快速成形系统制作微小结构时，更容易实现曝光量的精确控制，有利于微小结构的制作和精度控制。

### 2.2 视图发生器组成

图 1 是以 DMD 为核心的高分辨率视图发生器组成示意图。视图发生器由抛物面反射镜，高压汞灯(紫外光源)，准直镜头组，曝光快门，DMD 器件，DMD 控制器，聚焦透镜及计算机组成。光源处于抛物面反射镜焦点时，光线经抛物面反射镜反射后形成准平行光。在光源的输出端加入匀光器，对射入 DMD 的光束光强进行分布均匀化处理。光束再经准直镜后射向 DMD 的微镜面。要生成视图的图形文件经计算机传送给 DMD 控制器，由该控制器生成相应的指令驱动微镜单元动作，在视图平面上生成零件截面视图。平面既是视图聚焦平面，也是用于快速成形系统时树脂液面所在的平面。聚焦透镜的作用是对生成的视图聚焦，将视图成像在平面上。为避免制作过程处于涂层等成形准备阶段时，有光线照射到树脂表面而造成不必要的曝光固化，在视图发生器的光路中设置了曝光快门。视图发生器中采用 TI 公司的 DMD 器件，其主要参数为：分辨率  $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ ，像素尺寸  $13.7 \mu\text{m} \times 13.7 \mu\text{m}$ ，微镜的转角为  $12^\circ$ 。系统中使用远心成像镜头作为聚焦透镜组，其特点是在物面、像面略不垂直于光轴或稍有离焦的情况下可保证恒定的放大倍率。透镜组的  $F$  数为 2.8，焦距为 200 mm。成像面上生成视图的最小尺寸为  $14 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。每个像素的最小尺寸可达  $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ ，能满足微小结构的制作要求。

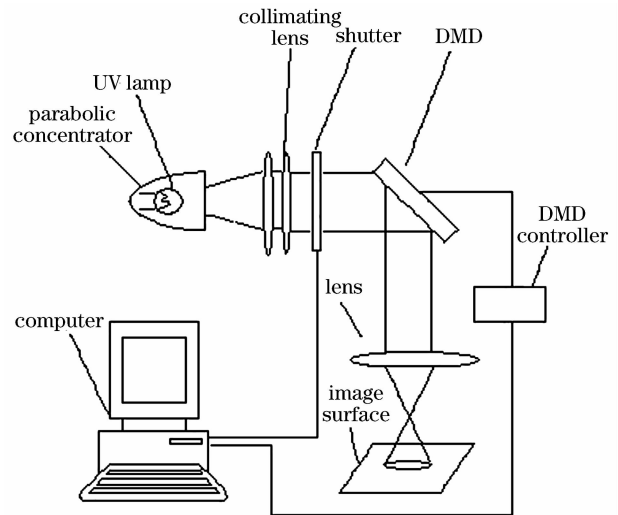


图 1 视图发生器结构图

Fig. 1 Schematic of dynamic pattern generator

## 3 面曝光快速成形实验系统

### 3.1 实验系统组成

图 2 是构建的面曝光快速成形实验系统组成原

理图,该实验系统主要由视图发生器、控制系统及涂层系统构成。

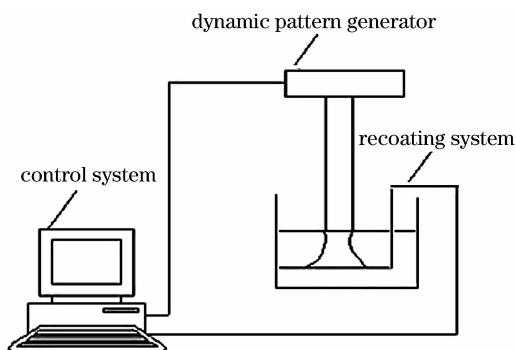


图2 新型快速成形实验系统组成

Fig. 2 Schematic of the SL system

控制系统主要功能有:升降工作台的控制、曝光快门的控制以及视图发生器的控制等。面曝光快速成形实验系统的控制采用两级控制系统。控制计算机作为上层的主控机,主要完成整个成形系统的集中管理,负责对三维模型的切片及生成符合快速成形工艺要求的数据,向下一级控制系统发送数据和控制命令,并负责信息处理、参数设置、显示及键盘管理等。而运动控制器(MPC08SP)实现对精密升降工作台运动和曝光快门的控制。

涂层系统由升降工作台及树脂槽组成,涂层工艺采用了自然流平法。升降工作台由运动控制器、伺服电机、工作台、伺服电机驱动器及滚珠丝杠等组成半闭环运动控制系统,保证工作台 $z$ 向精密移动。驱动器直接对电机编码器反馈信号进行采样,在内部构成速度环,避免了运动过程中的丢步或过冲现象。曝光快门也由运动控制器控制,利用曝光快门可实现制作过程中曝光能量和曝光时间的控制。

### 3.2 实验系统特点

面曝光快速成形实验系统使用高压汞灯作光源,利用DMD生成制件截面视图,与基于扫描法原理的激光快速成形系统相比,该系统成本较低,有利于推动快速成形技术的应用。

基于扫描法原理的激光快速成形系统在制作过程中,零件截面形状较复杂时,光束跳转次数增加,导致扫描时间增加。而面曝光快速成形系统对整层树脂一次曝光固化,固化时间与截面形状的复杂程度无关,因此在制作截面形状复杂的制件时,面曝光快速成形系统的制作时间更短。

面曝光快速成形系统的高压汞灯功率分布在很宽的频谱范围内,成形材料既可选用紫外光敏的树脂,也可选用可见光敏的树脂,选择范围较大。

## 4 视图平面紫外光强分布

若生成的视图中光强分布不均匀,将造成固化成形过程中固化深度出现较大差异,从而导致制作零件产生明显的变形,致使微小结构的制作精度无法保证。为此,需要对该成形系统的视图平面紫外光强分布进行整形。

将视图平面划分为 $13 \times 9$ 个区域,每个区域的面积为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。利用紫外辐射测量仪(UV-Radiometer, UV-A)对每个区域紫外光强度进行测量。测量时只有被测区域有光照射,其余区域均无光照射。图3是视图平面紫外光强分布情况,从图中可以看出,视图平面紫外光强分布极不均匀,紫外光强最大值达到 $15.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,最小值为 $2.8 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,不能满足准确制作微小结构的要求。

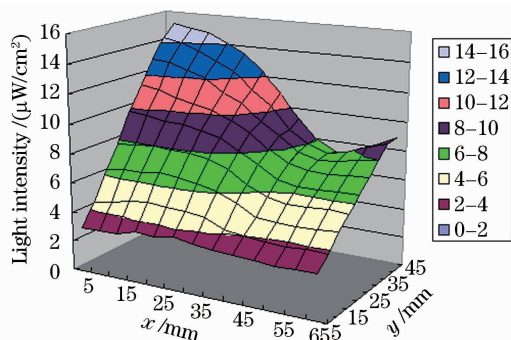


图3 紫外光强的不均匀分布

Fig. 3 Non-uniformity light intensity distribution

图3表明该视图平面上紫外光强度分布是被测点位置坐标 $(x, y)$ 的函数。由于DMD中每个微镜可以独立操作,使得视图上相应点的灰度可以控制。为实现视图平面上光强的均匀分布,应建立视图平面上紫外光强度 $E$ 关于被测点位置坐标 $(x, y)$ 及视图灰度 $z$ 的函数。视图平面上紫外光强度分布模型为

$$E(x, y, z) = P(x, y)S(z), \quad (1)$$

式中 $E(x, y, z)$ 为紫外光强度, $P(x, y)$ 为紫外光强度关于被测点位置坐标 $(x, y)$ 的函数, $S(z)$ 为紫外光强度关于灰度 $z$ 的函数。利用最小二乘法对实验数据进行拟合,分别得到 $P(x, y)$ 和 $S(z)$ 的函数形式

$$P(x, y) = (-1.1x^3 - 0.8y^3 + 0.8xy^2 + 0.05x^2y + 11.5x^2 + 12.5y^2 - 2.8xy - 0.3x - 63.6y + 161.8) \times 10^{-8}, \quad (2)$$

$$S(z) = -10^{-6}z^3 + 5.78 \times 10^{-4}z^2 - 0.101z + 5.72. \quad (3)$$

将(2),(3)式代入(1)式,得到了紫外光强度分布模

型

$$E(x,y,z) = (-1.1x^3 - 0.8y^3 + 0.8xy^2 + 0.05x^2y + 11.5x^2 + 12.5y^2 - 2.8xy - 0.3x - 63.6y + 161.8) \times (-10^{-6}z^3 + 5.78 \times 10^{-4}z^2 - 0.101z + 5.72) \times 10^{-8}. \quad (4)$$

按照以上模型,改变不同位置处的灰度时,相应视图平面区域的紫外光强度也将得到调整,可以使整个视图平面的紫外光强度分布均匀化。图 4 是通过改变各区域灰度得到的视图平面紫外光强分布,其中最大与最小的紫外光强度之差仅为  $0.4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,表明视图平面紫外光强分布已比较均匀,能满足准确制作微小零件的要求。

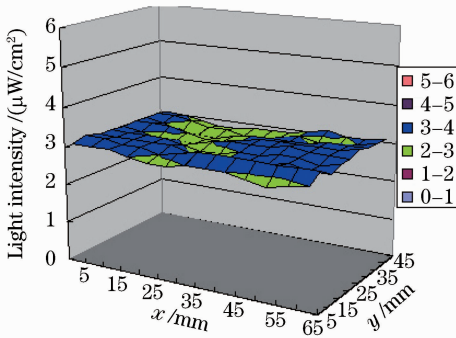


图 4 紫外光强均匀分布

Fig. 4 Uniformity light intensity distribution

## 5 微小零件的制作

### 5.1 模型的数据处理

采用 Pro/Engineer 软件设计要制作零件的三维 CAD 实体模型,将该实体模型输出为 STL 格式的表面网格模型,利用 RPdata 软件对实体模型进行分层切片,得到模型每一分层截面的轮廓点数据。利用 VC++ 软件将轮廓点数据依次连接生成轮廓线,然后对轮廓截面进行填充,可得切片截面视图。计算机将该视图文件发送给视图发生器,便可在树脂表面形成零件截面视图,对树脂进行选择性曝光固化。

### 5.2 小尺寸零件的制作实例

利用面曝光快速成形系统进行了三维零件的制作实验。图 5 为某齿轮切片后得到的零件截面视图,图 6 为制作出的相应齿轮在显微镜(VH-8000)下的照片。该齿轮的模数为  $0.2 \text{ mm}$ ,分度圆半径为  $1 \text{ mm}$ ,齿槽宽及齿厚为  $0.31 \text{ mm}$ ,中心孔半径为  $0.27 \text{ mm}$ 。图 7 为制作的小尺寸涡轮照片,图 8 为制作的三维卡通照片。实验用树脂为 Aidi 2230,曝光

时间  $8 \text{ s}$ 。

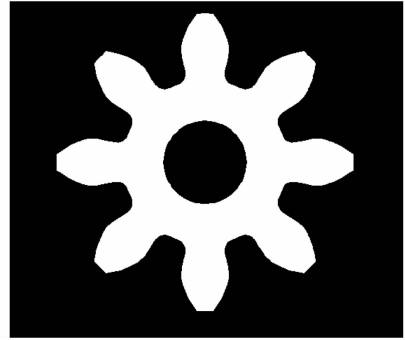


图 5 小齿轮的截面视图

Fig. 5 Section pattern of a gear

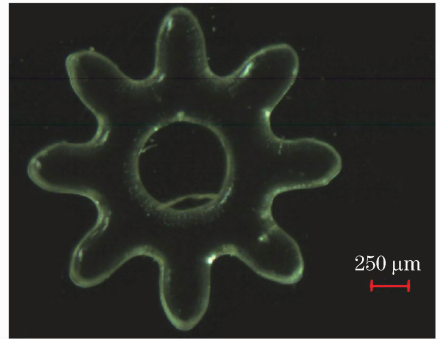


图 6 制作的小齿轮

Fig. 6 Gear with a module of  $0.2 \text{ mm}$



图 7 小尺寸涡轮

Fig. 7 Small turbo

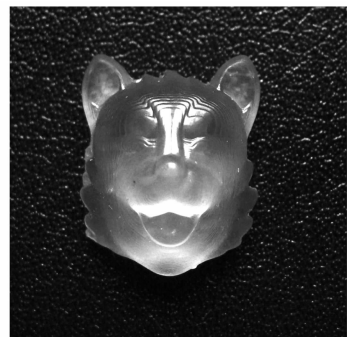


图 8 三维卡通

Fig. 8 Three-dimensional cartoon

### 5.3 制作精度

为考核快速成形实验系统的制作精度,设计了如图9所示的精度测试件。先利用面曝光快速成形实验系统制作了3个测试件,然后用显微镜对36个尺寸进行了测量。测量结果显示平均误差为 $-0.0036\text{ mm}$ 。误差在 $\pm 0.06\text{ mm}$ 范围内尺寸数量占有所有测量尺寸数量的72.2%,这说明该面曝光快速成形系统具有初步制作微小结构的能力。但以上测量结果显示系统的制作精度与制作微小结构的要求相比,尚有一定差距,还需对系统制作精度进行深入研究。

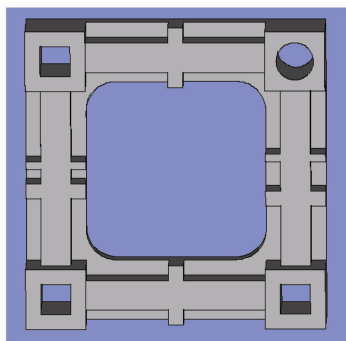


图9 测试件模型

Fig.9 Test part model

影响制作精度的主要因素有:零件截面视图像素尺寸、曝光参数、光敏树脂收缩性能以及涂层质量等。零件截面视图的像素大小决定了制件在水平面内的制作分辨率与制作精度,而DMD的分辨率又决定了零件截面视图的像素大小,DMD的分辨率越高,零件视图的像素尺寸越小,系统在水平面内能制作的最小单元尺寸就越小,制作分辨率及制作精度也越高。由于树脂光固化是动态过程,固化单元尺寸受曝光参数(如曝光时间、曝光强度)影响<sup>[16]</sup>,若曝光参数设置不当,会使固化单元尺寸增大,导致制作分辨率和制作精度降低。树脂由液态向固态转变的光固化过程中,树脂会发生明显的收缩<sup>[17]</sup>,导致制件发生扭曲变形。涂层厚度的精度及均匀度影响着堆积方向的尺寸精度<sup>[18]</sup>,涂层厚度的精度及均匀度越高,堆积方向尺寸精度也越高。因此,要提高该快速成型系统的制作精度,首先要采用分辨率较高的DMD器件,减小零件截面视图的像素尺寸,提高零件截面视图的质量;其次,要对曝光固化参数的组合进行优化,寻找最佳曝光参数组合;还应选用流动性好、固化收缩率低的光敏树脂,以减小固化收缩引起的扭曲变形;最后,应采用合适的涂层工艺,以获得较高的涂层精度和均匀度。

## 6 结 论

以DMD为核心,以高压汞灯为光源,构建了动态视图发生器,建立了面曝光快速成形实验系统。实现了利用视图发生器生成的零件截面视图作为动态掩模,对光敏树脂整层曝光选择性固化的快速成形方法。建立了紫外光强分布关于被测点位置及视图灰度的关系模型,利用该模型实现了视图平面紫外光强分布的均匀化。利用该快速成形系统,制作了具有复杂微小特征的三维零件。该新型快速成形系统具有成本低、分辨率高等特点,在中间尺度微小结构制作领域具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Sun Yazhou, Liang Yingchun, Cheng Kai. Micro-scale and meso-scale mechanical manufacturing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, **40**(5):1~6  
孙雅洲,梁迎春,程凯.微米和中间尺度机械制造[J].机械工程学报,2004,**40**(5):1~6
- 2 Yu Huadong. Development of ultra-precision micro-machining technology [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, **31**(3):1~8  
于化东.超精密微机械制造技术研究进展[J].长春理工大学学报(自然科学版),2008,**31**(3):1~8
- 3 B. Arnaud, B. Paul, V. Christian. Rapid prototyping of small size objects [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2002, **6**(4):259~266
- 4 Zhong Minlin, Liu Wenjin. Leading areas and hot topics on global laser materials processing research [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11):1653~1659  
钟敏霖,刘文今.国际激光材料加工研究的主导领域与热点[J].中国激光,2008,**35**(11):1653~1659
- 5 C. Sun, X. Zhang. Experimental and numerical investigations on microstereolithography of ceramics [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(8):4796~4802
- 6 Xu Guangshen. A review of rapid prototyping techniques for small object with high-resolution [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2004, **23**(10):156~159  
胥光申.高精度小尺寸零件激光快速成形技术的发展与现状[J].机械科学与技术,2004,**23**(10):156~159
- 7 Y. H. Cho, I. H. Lee, D. W. Cho. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in microstereolithography [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, **11**(3):158~167
- 8 Suhas P. Deshmukh, Shashikant. Optical analysis of scanning microstereolithography systems [C]. *SPIE*, 2006, **61090**
- 9 Y. Mizukami, D. Rajniak, A. Rajniak et al.. A novel microchip for capillary electrophoresis with acrylic microchannel fabricated on photosensor array [J]. *Sensor. Actuat. B-Chem.*, 2002, **81**:202~209
- 10 Xu Guangshen, Zhao Wanhua, Tang Yiping et al.. Novel stereolithography system for small size objects [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, **12**(1):12~17
- 11 Wang Dapeng, Wei Sui. Characterization of a digital micromirror device for computer generated holographic video [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1):50~55  
王大鹏,韦穗.数字微镜器件在视频全息中的应用[J].光学学报,2008,**28**(1):50~55
- 12 P. Christophe, M. Serge. Complex ceramic-polymer composite

- microparts [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2004, **25**(1):59~64
- 13 M. Farsari, F. Claret-Tournier, S. Huang. A novel high-accuracy microstereolithography method employing an adaptive electro-optic mask [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2002, **107**(6):167~172
- 14 Peng Qinjun, Guo Yongkang, Chen Bo *et al.*. LCD real-time mask technique for fabrication of continuous microoptical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2):220~224  
彭钦军,郭永康,陈波等. 液晶实时掩膜技术制作连续微光学元件[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2):220~224
- 15 Gao Jiaobo, Wang Jun, Yang Bin. Dynamic IR scene projector using the digital micromirror device [C]. *SPIE*, 2005, **5640**:174~177
- 16 Duan Yugang, Wang Suqing, Tang Yiping *et al.*. The effect of optical characteristics of photosensitive resin on the building of SL parts [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2):250~254  
段玉岗,王素琴,唐一平等. 光固化快速成型中光敏树脂的光学特性对成型的影响[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2):250~254
- 17 Huang Biwu, Chen Weifan, Chen Weiqing. Study on the properties of SL7510 type photosensitive resin for laser curing rapid prototyping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12):2354~2358  
黄笔武,陈伟凡,谌伟庆. 激光固化快速成形 SL7510 型光敏树脂性能研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12):2354~2358
- 18 Xu Guangshen, Zhao Wanhua, Lu Bingheng. Novel recoating process with dynamic optimized blade speed [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(7):1~5  
胥光申,赵万华,卢秉恒. 动态优化刮刀速度的涂层工艺研究[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(7):1~5