

激光技术

基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形

李森森^{1,2}, 吴凡¹, 吕志伟²

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308 2. 可调谐气体激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

摘要 液晶空间光调制器是改善空间光束质量的有效方法,提出了一种空间光强度整形迭代算法。在复杂结构的激光系统中,利用前级小口径液晶空间光调制器的主动控制光束振幅的方法,补偿了后级激光系统的50 m传输距离的空间不均匀性,实现了系统末级近场分布均匀激光输出。实验结果表明,液晶空间光调制器能很好的改善近场光束质量,整形输出光束通量调制度达到1.26:1,通量对比度达到5.1%,光束边缘软化因子为8.1%,与目标光斑的近场相似度达到99.83%。

关键词 空间光调制器;通量调制度;光束质量

中图分类号: TN244

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-03-0019-05

Beam Shaping of Laser Nearfield Based on Liquid Crystal Spatial Light Modulator

LI Sen-sen^{1,2}, WU Fan¹, LU Zhi-wei²

(1. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin 150080, China)

Abstract: Liquid crystal spatial light modulator (SLM) is an effective method to improve spatial beam quality. A shaped iterative algorithm of spatial light intensity is proposed. The spatial non-uniform of the back-stage laser system with 50 m transmission distance is compensated in the complex high-power solid-state laser system by using a small-aperture liquid crystal SLM of the front stage. Experimental results show that nearfield beam quality can be improved by using SLM. After spatial beam shaping, the output nearfield modulation is 1.26:1, the fluence contrast value is 5.1%, the soft-edge factor is 8.1% and the nearfield similarity to the target beam is 99.83%.

Key words: spatial light modulator; fluence modulation; beam quality

高功率固体激光器在惯性约束核聚变^[1]、工业加工^[2]、高能密度物理研究^[3]等领域发挥着重要作用。近场光束质量对高功率固体激光器的应用具有重要价值。高功率固体激光器由于放大介质(钕玻璃, Nd:YAG)的增益不均匀性和透射元件的透过率不均性等因素造成输出激光的近场光束空间均匀性变差。在高功率激光器中控制激光束的振幅的重要性,无论如何强调都不为过,它们在增益预补偿和热斑抑制等方面有着重要的应用。因此,在高功率激光系统中,有必要进行空间光强度整形。

空间光强度整形的方法可以分为被动整形和

主动整形。被动整形的方法有软边光阑、掩膜板等。软边光阑和锯齿光阑对大口径光束边缘进行软化,但不能对光斑中心部分整形。掩膜板具有一定透射率分布,能够对空间光强度整形。被动整形的方法要求激光系统状态固定,一旦系统状态变化,如光路漂移,光学元器件的透反射率随时间发生变化,整形的效果就会变差。主动整形的方法能克服这个问题,它利用可编程液晶空间光调制器,根据激光系统,调整各个位置的透射率或反射率,达到对光束的任意空间整形。在整形效果上,可编程液晶空间光调制器比被动整形器件得到的近场

光束质量更好,但这也是以牺牲能量为代价的。在系统增益足够的情况下,可以用可编程液晶空间光调制器进行空间整形。

液晶空间光调制器(spatial light modulator, SLM)能够实现输出光振幅、相位和偏振态的控制^[5-6]。SLM在许多大型激光系统中已有应用,如NIF装置上的光寻址液晶SLM^[7],OMEGA-EP装置上的硅基板液晶SLM^[8]和法国LMJ装置原型LIL上的光寻址液晶SLM^[9]等。文中利用可编程液晶空间光调制器主动整形的方法,根据目标光斑的分布,主动调节前级注入的光束空间强度分布,实现后级光束的比较均匀空间光强分布。在复杂固体激光器上,研究了基于前级小口径液晶空间光调制器实现后级激光近场均匀输出的整形理论与实验方法,并对输出光束质量进行了多方面的评价。

1 实验原理

液晶SLM的基本原理是利用液晶分子的偏振旋光和双折射特性来达到控制激光振幅和相位的目。外加电压能够改变液晶分子的指向,液晶的折射率也随之发生变化^[10-11]。SLM实现空间调制的过程需要结合空间滤波,CCD图像采集和加载电压的实时控制等。SLM主要包括一个液晶层和前后两个偏振片,即一个起偏器和一个检偏器,如图1所示。实时控制加载在每个液晶面元上的电压能够实现对空间透过率的控制,因此,液晶空间光调制器是一种实时可编程器件。

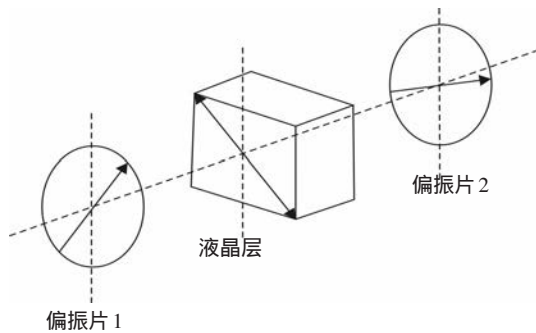


图1 液晶空间光调制器结构

液晶空间光调制器SLM作为相位型器件,动态范围是 2π 。当输出激光强度出现变化需要重新补偿时,SLM首先要做出相位上的调整,改变注入激光的空间分布。液晶具有电控双折射特性,与单轴

晶体类似,寻常光和非寻常光的折射率分别为 n_o 和 n_e 。外加电压能够改变液晶分子的指向,双折射系数也随之发生变化。如图2所示。

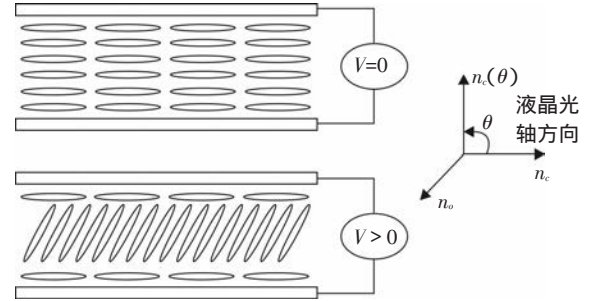


图2 液晶电控双折射原理图

向列型液晶分子的指向与所加电场有关,在上图未加电场情况下, o 光和 e 光之间的相位延迟表示如下

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d \quad (1)$$

式中, d 为液晶层厚度(单位为mm); λ 为入射光波长(单位为nm)。

在图2中有外加电场时,液晶分子偏转一个角度 θ ,此时 e 光的折射率为 $n_e(\theta)$, o 光和 e 光的相位延迟表示为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e(\theta) - n_o)d \quad (2)$$

根据液晶电控双折射效应,在电场作用下,液晶分子发生偏转的角度 θ 与所加电压有关^[12],具体关系表示如下

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left\{ \exp \left[- \left(\frac{V_{rms} - V_c}{V_0} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

式中, V_{rms} 和 V_c 分别为工作电压和阈值电压(单位为V); V_0 为过载电压(单位为V)。

$n_e(\theta)$ 与液晶分子偏转角 θ 的关系可表示为

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_o^2} \quad (4)$$

通过以上公式,可以得出液晶分子中的相位延迟大小受控于所加电场强度。扭曲型SLM是利用液晶可使入射光的偏振方向发生变化的特性制成的,如图3所示。入射光偏振方向与 x 轴成 α 角,在液晶后端 z_0 处电场分量表示如下

$$\begin{cases} E_x = E_0 \cos \alpha \sin(\omega t - k_e z_0) \\ E_y = E_0 \sin \alpha \sin(\omega t - k_o z_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中, ω 为光的角频率; k_e 和 k_o 分别为平行和垂直液晶长轴方向的波矢。

将式(5)合成可得

$$\left(\frac{E_x}{\cos \alpha}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{\sin \alpha}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{\cos \alpha \sin \alpha} \cos \delta = E_0^2 \sin^2 \delta \quad (6)$$

式中, δ 为光束经过 z_0 后 o 光和 e 光之间的相位差, $\delta = (k_e - k_o)z_0$ 。

由此可知, 出射光偏振光状态由 δ 所决定。若在液晶的出射处放置一个检偏器, 检偏方向与 x 轴夹角为 β , 则透射光强为

$$I = E_0^2 \left[\cos^2(\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (7)$$

当 $\alpha = \beta$ 时, 即前后两偏振片平行时, 有

$$I = E_0^2 \left(1 - \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (8)$$

当 $\alpha = \pi/4$ 时, 强度调制深度最大, 有

$$I = E_0^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (9)$$

这就是 SLM 进行强度调制原理。文中的液晶空间光调制器 LC2002 的前后两偏振片平行, 起偏方向与液晶分子的长轴夹角为 $\pi/4$, 液晶的动态范围 $2\pi/532 \text{ nm}$ 。图 3 为液晶引起偏振光状态的变化图。

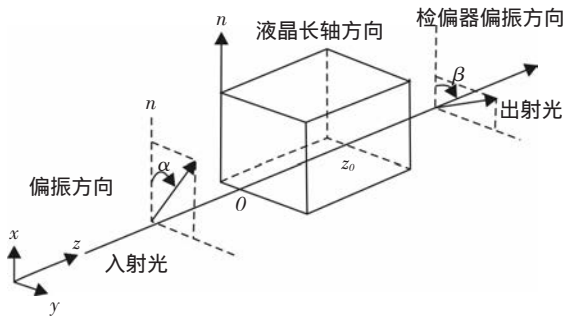


图3 液晶引起偏振光状态的变化

2 实验装置

液晶空间光调制器(SLM)的工作原理是利用液晶分子所具有的旋光偏振特性和双折射性, 在外加电压控制之下, 通过改变液晶分子的指向来改变液晶材料的折射率, 最终实现对光波的空间调制。调制过程结合滤波, CCD 采集, 计算机实时控制加载电压等一系列方法来完成。SLM 的主要结构是由

两片偏振片和一个液晶层所组成, 改变加载在每个液晶元上的电压, 可以改变 SLM 上每一点的透过率。

实验中采用的激光系统为 MOPA 结构的钕玻璃棒状放大器, 主体为双程放大结构。激光系统主要包括全光纤前端, 预放系统, 主放系统, 光束测量系统和计算机集中控制系统。前端 FD 采用全光纤结构, 能够产生单纵模 1053 nm , 3 ns 方波, 单脉冲能量 10 nJ 。经过光纤准直头注入到预放, 能够提供 10^6 的增益最后液晶空间光调制器整形输出 $200 \mu\text{J}/\Phi 13 \text{ mm}$ 。经过加载图像的 SLM 后, 空间上的一部分光的偏振方向改变了一定角度, 改变的角度与加载到液晶电极上的电压有关, 也即与写入图像的灰度有关。整形后的激光经过主放系统, 全程像传递, 输出能量 100 J , 光束口径 $\Phi 60 \text{ mm}$, 脉冲宽度 3 ns 方波^[13-17]。在整形实验中, 激光系统静态运行, 即主放系统未加电, 只有前端和预放工作, 目的是验证前级 SLM 经过复杂激光系统的整形能力。

激光系统前级的预放系统中安装的液晶空间光调制器型号为 LC2002, 800×600 像素, 像元尺寸 $32 \mu\text{m}$, 采用电寻址工作方式。整个激光系统的初始像面在 SLM 上, 经过全系统的像传递, 传输到频率转换晶体上。光束口径从 $\Phi 13 \text{ mm}$ 扩束到 $\Phi 60 \text{ mm}$ 。在基频光输出的光路中, 有取样镜将主激光分出一部分, 反射率 0.9% , 进入到基频测量模块, 能够进行参数诊断, 包括近场强度分布, 能量, 远场, 时间波形和波前分布。取样光束口径为 $\Phi 60 \text{ mm}$, 镜 10 倍 $4 f$ 望远镜系统缩束, 将像面传递到基频光近场测量 CCD 上。CCD 上测量的激光光斑能够反映激光像传递面上的空间强度分布。

空间光强度整形的结构如图 4 所示。

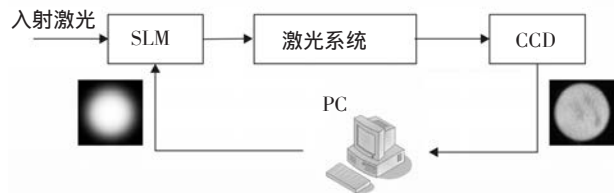


图4 激光空间强度整形装置示意图

液晶空间光调制器 SLM 与 CCD, 像传递激光光路组成了空间光强度整形系统。入射到液晶空间

光调制器SLM上的激光是具有一定空间分布,SLM的空间分布透过率可调,经过复杂的激光系统时,由于系统的传输与放大以及频率转换等因素,激光的空间强度分布会受到影响。在测量系统中用CCD测量输出激光的近场强度分布,通过计算机分析,利用相应的算法修改SLM透过率分布,使CCD测量得到的输出光斑趋于均匀平顶分布。激光系统是全像传递系统,SLM和CCD之间是互为像面的,这样能够保证近场补偿不失真。

激光束的空间光强分布可以用灰度图像来表示,灰度值大的地方代表光强比较大。SLM和光学元器件的透过率也可以用灰度图像表示,灰度值大的地方代表透过率比较大。在图像的一块比较小的区域,认为光强是一致的,所以可以用8 bit的灰度图像来表示空间光强分布。光束在传输过程中的扩束和缩束,不会影响光斑强度分布。

激光的强度补偿时把激光系统作为线性系统来处理。根据基频输出光斑,结合目标光斑分布,得到一个补偿光斑比例系数,再结合液晶的图像,得到新的补偿图像。写入液晶,就能得到比较完美的基频近场分布。

3 实验结果与讨论

近场空间光束质量的评价方法采用通量调制度、通量对比度、近场相似度和光束软化因子。实验中,近平顶光束的全强度口径定义为光斑尺寸的90%。激光光斑定义为测量激光束最大光强的10%对应的口径。由于空间分布近平顶的光斑边缘比较陡峭,测量激光束从最大光强的1%~50%的位置,尺寸差别不大,由于CCD测量光斑噪声的存在,截取的光斑有误差,取值太小带来的误差比较大,所以这个值取10%。光束的通量调制度定义为激光脉冲空间分布的全强度口径内通量最大值与平均值之比,用下式表示为

$$M_F = \frac{F_{\max}}{F_{\text{avg}}} \quad (10)$$

式中, F_{\max} 和 F_{avg} 分别是近场空间分布的最大通量和平均通量。由于CCD测量激光近场是一个积分的过程,表示的是激光通量的大小,因此用通量调制度表示近场光束质量,也用近场调制度表示。

激光通量对比度 σ 定义为激光脉冲空间分布的

全强度口径内所有点的光强的RMS值,用下式表示为

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - F_{\text{avg}})^2}}{F_{\text{avg}}} \quad (11)$$

式中, σ 为光束通量对比度; F_i 和 F_{avg} 分别为近场空间分布的第*i*个点的通量和平均通量; N 为CCD测量光斑的全强度口径内的点数。

近场相似度是两个近场图像的相似程度,这里指输出激光近场与理想光斑的相似程度。近场相似度反映了近场补偿的效果。为了减小计算误差,这里的两个近场图像都是二维归一化的。近场相似度定义为

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N (F_{li} \cdot F_{oi})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N F_{li}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N F_{oi}^2}} \quad (12)$$

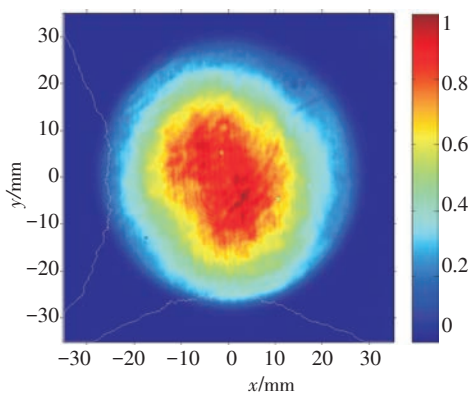
式中, F_{li} 是实验得到近场空间分布的第*i*个点的通量; F_{oi} 是理想的近场空间分布的第*i*个点的通量; N 是CCD测量光斑的全强度口径内的点数。

对于圆光斑,光斑(光束尺寸)定义为以光强最大值的1%为边缘对应的宽度。标准圆光斑的光束软化因子是光斑内光强最大值的90%处与10%处对应的宽度与光斑尺寸的比值。实验中测得光斑并非标准的圆,测量激光束的软化因子 S_{EA} 定义为

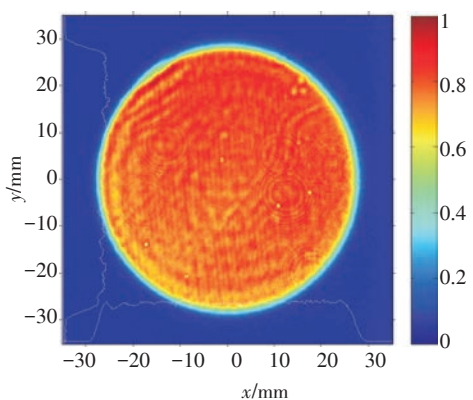
$$S_{EA} = \frac{D_0 - D_F'}{2D_0} \quad (13)$$

式中, D_0 为零强度边长,按光斑90%面积内的各像素灰度均值的5%对应的最大距离计算; D_F' 为全强度边长,按光斑90%面积内的各像素灰度均值的95%对应的最大距离计算。

在近场整形前,激光系统输出近场如图5a所示。计算其近场调制度为1.85:1,通量对比度 $F_{\text{all}} = 36.8\%$ 。激光近场强度整体为高斯型分布,中间强,两边弱。利用前面介绍的方法,经过SLM主动整形后,输出近场趋于平顶分布,结果如图5b所示。经计算,得到其近场调制度为1.26:1,通量对比度为5.1%,边缘软化因子为8.1%。实验中目标光斑是软化因子为8%的平顶图像,计算结果表明,整形后输出近场与目标光斑的近场相似度达到99.83%。



(a)整形前输出近场



(b)整形后输出近场

图5 整形前后输出近场对比

4 结论

在复杂结构的激光系统中,利用前级液晶空间光调制器的主动控制光束振幅的方法,补偿了后级激光系统的50 m传输距离的空间不均匀性,获得了系统末级近场分布均匀激光输出。整形输出光束通量调制度达到1.26:1,通量对比度达到5.1%,光束边缘软化因子为8.1%,与目标光斑的近场相似度达到99.83%。

参考文献

[1] Elder I. Performance requirements for countermeasures lasers[J]. Proc SPIE, 2010, 7836: 783605.
 [2] Caird J. Nd: glass laser design for laser ICF fusion energy (LIFE)[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 56(2): 607-617.
 [3] Kubacki F, Weitze H, Bruns P, et al. Successful diode laser material processing using application specific micro-optical beam shaping-art. no. 682403[J]. Semiconductor

Lasers and Applications Iii, 2008, 6824: 82403-82403.
 [4] Rostohar D, Lucianetti A, Endo A, et al. HiLASE project: high intensity lasers for industrial and scientific applications[J]. International Society for Optics and Photonics, Prague, Czech Republic, 2015: 945002.
 [5] Zhang C, Hu Y, Li J, et al. An improved multi-exposure approach for high quality holographic femtosecond laser patterning[J]. Appl Phys Lett, 2014, 105(22): 221104.
 [6] Jesacher A, Bernet S, Ritsch-Marte M. Combined holographic optical trapping and optical image processing using a single diffractive pattern displayed on a spatial light modulator[J]. Opt Lett, 2014, 39(18): 5337-5340.
 [7] Heebner J, Borden M, Miller P, et al. A programmable beam shaping system for tailoring the profile of high fluence laser beams[J]. International Society for Optics and Photonics, Boulder, Colorado (US), 2010: 78421C.
 [8] Barczys M, Bahk S-W, Spilatro M, et al. Deployment of a spatial light modulator-based beam-shaping system on the OMEGA EP laser[J]. International Society for Optics and Photonics, San Francisco, California (US), 2013:86020F.
 [9] Luce J. Beam shaping in the MegaJoule laser project[J]. International Society for Optics and Photonics, San Diego, California (US), 2011:813002.
 [10] Hendriks A, Naidoo D, Roux F C, et al. The generation of flat-top beams by complex amplitude modulation with a phase-only spatial light modulator[J]. Optical Engineering Applications, 2012: 849006.
 [11] Sasaki H, Yamamoto K, Wakunami K, et al. Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 6177.
 [12] Soutar C, Lu K. Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell [J]. Opt Eng, 1994, 33(8): 2704-2712.
 [13] Li S, Zhou L, Cui C, et al. Wavefront shaping by a small-aperture deformable mirror in the front stage for high-power laser systems [J]. Appl Sci, 2017, 7(4): 379.
 [14] Wang Y, Liu Z, Yuan H, et al. A promotion of stability for temporal compression based on SBS in an interferometric scheme[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(17): 1734-1740.
 [15] Li S, Wang Y, Lu Z, et al. Spatial beam shaping for high-power frequency tripling lasers based on a liquid crystal spatial light modulator[J]. Opt Commun, 2016, 367: 181-185.
 [16] Li S, Wang Y, Lu Z, et al. Hundred-Joule-level, nanosec-

4 结论

设计了一种基于静电探测理论的微弱信号检测电路,该电路基于动态电荷检测法。仿真结果表明,该电路具有较好的信号放大功能和较高的灵敏度。检测电极感应到的电流经过后续电路的放大、处理,可以识别出空中飞过的带电目标。如果在一个位置不同方向上摆放多个静电探测电极,通过面向不同方向的探测电极上的感应电流强度,经过处理,还可以得到空中静电目标的位置信息。

参考文献

- [1] 董志鹏. 电子战和信息战技术与装备[M]. 北京: 原子能出版社, 航空工业出版社, 兵器工业出版社, 2003.
- [2] 陈曦. 被动式地面静电探测技术研究[D]. 北京: 北京理

- 工大学, 2005.
- [3] 白强, 夏善红, 陈绍凤, 等. 新型旋片式空中电场探测器及应用[J]. 电子与信息学报, 2004(4).
- [4] 代方震. 基于电极扫描原理的被动式静电探测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2004.
- [5] 崔占忠, 宋世和, 徐立新. 近炸引信原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [6] 孙可平. 工业静电[M]. 北京: 中国石化出版社, 1994.
- [7] 林蔚. 静电成像探测极其信息处理[D]. 北京: 北京理工大学, 2007.
- [8] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] Chen, X, Cui, Z, Bi, Z, et al. Research on low input impedance measuring system in electrostatic field measurement[J]. ISTMT/2003 5th International Symposium on Test and Measurement, 2003, 1:53-56.
- [10] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

(上接第23页)

- ond-pulse Nd:glass laser system with high spatiotemporal beam quality[J]. High Power Laser Sci Eng, 2016, 4: e10.
- [17] Li S, Wang Y, Lu Z, et al. High-quality near-field beam

achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system[J]. Opt Express, 2015, 23(2): 681-689.

(上接第48页)

3 结论

基于线结构光扫描法提出了一种RGB激光扫描方法,三基色激光合并成一束白光光源。相比于单个RGB分别扫描的方法,省去了依据三线间的距离进行计算再合成彩色的步骤。同时三束光合成后,光束能量增大、扫描速度快、效率高,可以实时获取并重建三维信息,颜色再现真实准确。

参考文献

- [1] Evans C, Doshir. Tale of two underwater lenses[J]. SPIE, 1991, 1537:203-214.
- [2] Jules S J. Underwater optical imaging: status and prospects, oceanography[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2001, 14(3): 64-75.
- [3] Raimondo S, Silvia C. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing 2010: 746052.
- [4] Woods AJ, Penrose J D. The development of a compact

- underwater stereoscopic video camera[J]. SPIE, 1997, 3012:92-95.
- [5] 杨宇, 于佳, 王添, 等. 基于激光扫描的人脸三维重建方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12).
- [6] 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4):39-46.
- [7] 张会霞, 朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 26.
- [8] Davies E R. Computer & machine vision: theory, algorithms, practicalities[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 387-421.
- [9] Trimble G M. Area reconnaissance, object relocation, and classification using cooperating autonomous underwater vehicles[J]. SPIE, 1999, 3711:195-202.
- [10] 冀光强. 基于线结构光扫描的水下三维重建技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [11] Wang C C. Nonmetric camera calibration for underwater laser scanning system[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2007, 32(2): 383-399.
- [12] 杨宇, 阚凌雁, 于佳, 等. 水下环境的线结构光扫描和三维重建[J]. 光学学报, 2012, 32(s1):s111002.