

基于体全息的三维显示方法

王 靖 曹良才 张 浩 金国藩

清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 全息三维显示具有呈现包含真实物体所有特征的三维场景的能力, 这对信息的数据量和分辨率提出了极高的要求。体全息术可以为高分辨率三维显示提供大容量数据存储和基于三维布拉格光栅的实现方式。提出体全息三维显示方法, 通过计算全息算法得到三维物体的全视差相息图, 由相位型空间光调制器对物光波进行波前编码, 利用体全息光栅的角度选择特性在光致聚合物的同一全息图基元中复用多幅全息图。在参考光照射下, 可以重建出多角度的三维场景, 扩充了三维显示的空间带宽积。

关键词 全息; 全息显示; 波前编码; 计算全息; 体光栅; 光存储材料

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0909003

Three-Dimensional Display Based on Volume Holography

Wang Zheng Cao Liangcai Zhang Hao Jin Guofan

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument,
Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Holographic three-dimensional (3D) display can present a 3D scene with all characteristics of real-world objects. Large data recording and high resolution reconstruction are the challenges for holographic display. Volume holography is capable of recording and retrieving large capacity data based on 3D Bragg grating for high resolution 3D display. 3D display based on volume holography is studied. Full-parallax kinoforms of the 3D objects are acquired by the algorithm of computer generated holography. The wavefront information is encoded by a phase-only spatial light modulator. Multiple holograms can be imposed into the same holographic element(hogel) in the volume holographic polymer by using angle multiplexing. The 3D object are reconstructed by illuminating with the reference beam. The space-bandwidth product of the system is expanded.

Key words holography; holographic display; wavefront encoding; computer holography; volume gratings; optical storage materials

OCIS codes 090.2870; 110.7348; 090.1760; 090.7330; 090.2900

1 引 言

全息三维显示能再现出光场传播的全部特征, 包括振幅和相位信息^[1], 区别于传统的视差型三维显示方式, 可给观察者直接提供三维视觉效果。由于包含了三维场景所有的深度信息, 计算全息图所携带的数据量十分巨大^[2-3]。现有的显示技术很难完成如此高分辨率的三维影像重建。体全息技术可以为海量全息图提供长时间、高效率、寻址方便、可快速读取的高密度存储, 相较于平面全息, 布拉格条件使体全息术具有更好的波长和角度复用性^[4-6]。体全息术利用角度复用对计算全息图进行存储, 可以为高分辨率三维显示提供新的思路。

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-02-15

基金项目: 国家973计划(2013CB328803)、国家自然科学基金(61275013)、国家自然科学基金委员会与财团法人李国鼎科技展基金委合作项目(61361160418)

作者简介: 王 靖(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事全息显示方面的研究。E-mail: wang-z13@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 曹良才(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事全息与光学信息处理方面的研究。

E-mail: clc@tsinghua.edu.cn (通信联系人)

空间光调制器(SLM)是全息三维显示系统中的关键部件。传统的全息三维显示方式采用振幅型 SLM 上载二维图像来调制物光波,将三维物体的不同二维视图记录为不同的全息图基元(Hogel)^[7-8],单幅三维图像需要记录的 Hogel 数量十分庞大,所需的记录时间较长。亚利桑那大学的 Tay 等^[9]提出的三维显示系统在光折变聚合物材料中写入全息图,将三维物体的全部 Hogel 信息写入全息材料,一幅全视差图像需要记录约 100×100 个 Hogel。另外,SLM 的像素数是制约三维显示系统空间带宽积的瓶颈^[10]。现有的解决方案主要采用拼接或阵列 SLM 来扩充显示系统的空间带宽积^[11]。包括 Zebra Imaging 公司^[12]、QinetiQ 公司^[13]都采用了多块 SLM 来搭建高分辨率三维显示系统。

为了实现全视差三维图像的快速写入,并突破 SLM 对系统空间带宽积的限制,本文基于体全息存储和光场重建技术,提出了一种体全息三维显示方法。该方法利用体全息光栅的角度复用特性将多幅全视差相位全息图复用记录于同一 Hogel 位置,再现时可重建出多重三维场景,可以扩展系统的空间带宽积。

2 物光波前相息图的体全息记录

传统体全息存储技术主要包括像面存储方式和谱面存储方式。像面存储系统中,干涉记录发生在成像面上,在高密度存储系统中,记录的光斑尺寸需要尽量缩小,像面存储方式受到图像大小、光学系统参数和材料吸收等因素影响,读出图像存在严重不均匀性;谱面存储系统中,全息图平面、记录材料、CCD 和透镜组构成 4f 系统,物光和参考光在频谱面附近发生干涉完成记录,具有记录光斑小、读出图像均匀的优势^[14],此外,谱面存储方式的优点还包括记录冗余度大,对材料表面灰尘和内部缺陷不敏感,易于实现分维复用等。因此高密度体全息存储系统往往选择谱面存储方式。

相息图是计算全息图的一种,通过计算机编码模拟全息图干涉记录过程制作全息图,无需物体的真实存在,具有较大的设计灵活性,同时具有衍射效率高的优点,可用以获得高质量的三维波前信息^[15]。计算相息图的算法主要有点元法和面元法^[16]。为了实现全视差三维图像的单次写入,采用点元法对三维物体进行波前计算编码,得到相息图,并由体全息物光波前存储系统直接在材料中写入 Hogel。点元法原理如图 1(a)所示,物体被离散化为一系列采样点,SLM 平面上的复振幅分布 $H(x,y)$ 可由物体的所有点源发出的三维波前叠加得出

$$H(x,y) = \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{r_j} \exp[-i(kr_j + \varphi_j)], \quad (1)$$

式中 n 是物体采样点总数, A_j 是每个点光源的振幅, $k = 2\pi/\lambda$ 是自由空间波数, λ 为波长, 初始位相 φ_j 为 0 到 2π 的随机位相, r_j 是物体上的第 j 个采样点 (x_j, y_j, z_j) 到全息图平面的点 $(x, y, 0)$ 的距离, 表示为

$$r_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + z_j^2}, \quad (2)$$

对计算得到的复振幅分布 $H(x,y)$ 提取相位信息并加载至纯相位 SLM, 可得到三维物体的全视差相息图。用此方式进行位相编码的全息图能获得良好的三维图像重建效果^[17]。Hogel 的记录过程如图 1(b)所示。物光和参考光在傅里叶透镜后焦面附近发生干涉。物光波前存储方式保留了谱面存储的优点,同时无谱面存储的 4f 系统限制,只需要一个傅里叶透镜即可实现三维波前重建,大大提高了系统的设计自由度。

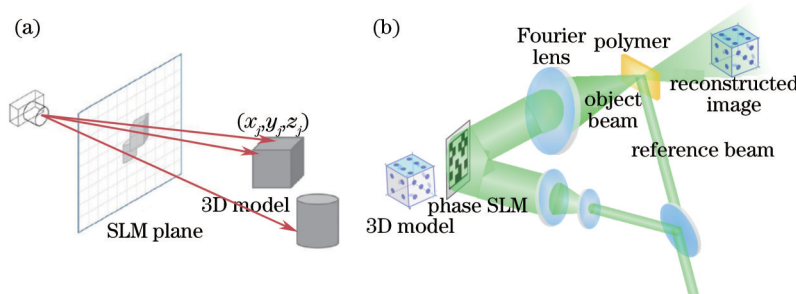


图 1 (a) 点元法计算相息图; (b) Hogel 记录过程

Fig.1 (a) Point source method for kinoform; (b) Hogel recording procedure

在透镜后焦面上进行存储时,大部分能量集中于零级谱上,对于均匀的记录材料,各点的动态范围是相同的,容易出现零级谱过饱和而其他级次的谱线没有被记录,造成像质蜕变等现象。采用离焦记录来抑制零级谱强度,加强一级谱能量,可以改善像质并充分利用材料的动态范围。

3 掺杂金纳米颗粒体全息聚合物

全息记录与显示材料包括卤化银、铋酸锂晶体和光折变聚合物等,其中厚聚合物材料具有存储容量大、稳定性好、角度复用特性良好的优势^[18],因此适用于记录数据量巨大的全视差三维图像,并可以通过其良好的角度复用特性实现多场景复用显示,提高系统的空间带宽积。

本文研制了一种掺杂金纳米颗粒光聚合物材料。在聚甲基丙烯酸早酯(PMMA)中掺入金纳米颗粒后,通过金纳米颗粒局域表面等离子共振增强效应,在材料中形成强吸收体全息光栅。强吸收光栅一方面增大了聚合物材料的折射率调制度,从而增强了体全息衍射效率;同时抑制了体全息光栅的角度选择性旁瓣,从而让材料获得了更好的角度复用特性^[19]。

材料制备过程如下:将热引发剂和光引发剂(PQ)在溶剂单元中混合溶解,再将澄清的混合溶液与油溶性金纳米球溶液按一定的体积比混合,油浴加热后采用孔径为0.22 μm的滤纸过滤,继续油浴搅拌至粘稠态,将其灌入自制的玻璃模具中,加热烘干使其完全热聚合成固态块状材料,从模具中取出块状材料即可用于全息记录。通过控制模具厚度可以制备0.2~2 mm的样品,控制模具形状,可制备不同形状的材料,模具及制备的不同形状光致聚合物。在实验中的双光束干涉系统(测量波长为532 nm)的测量下,样品衍射效率可以大大超过了传统的PQ-PMMA光聚合材料,同时体光栅的角度选择性旁瓣被抑制了4倍以上,金纳米颗粒掺杂浓度为0.05%的样品在全息记录中的复用记录角度可达0.1°,大大提高角度复用记录时的全息图存储密度。

4 体全息三维显示系统

基于掺杂金纳米颗粒光聚合物的良好角度复用特性和高衍射效率,可设计高空间带宽积的三维显示系统。利用物光波前存储系统,相息图依次以偏差0.1°的不同写入角度记录于体全息聚合物中,形成包含多重三维波前信息的角度复用Hogel。记录完成后用参考光照射Hogel位置,三维场景即可同时呈现。

实验系统原理图如图2所示。激光光源为532 nm固体激光器。激光经过准直扩束后由偏振分光镜分为两路:反射光路经过二级扩束,由分光镜反射至上载了相息图的SLM表面,得到加载了Hogel信息的物光光束;透射光路为参考光。系统采用像素间距6.4 μm、分辨率1920 pixel×1080 pixel的反射式硅基液晶空间光调制器,型号为LETO(HOLOEYE Photonics AG)。由于相位型SLM只能对p偏振光进行调制,偏振片和半波片2用来调节入射光束p偏振,增强信噪比。为提高记录效率,物光和参考光都是s偏振,通过半波片3和

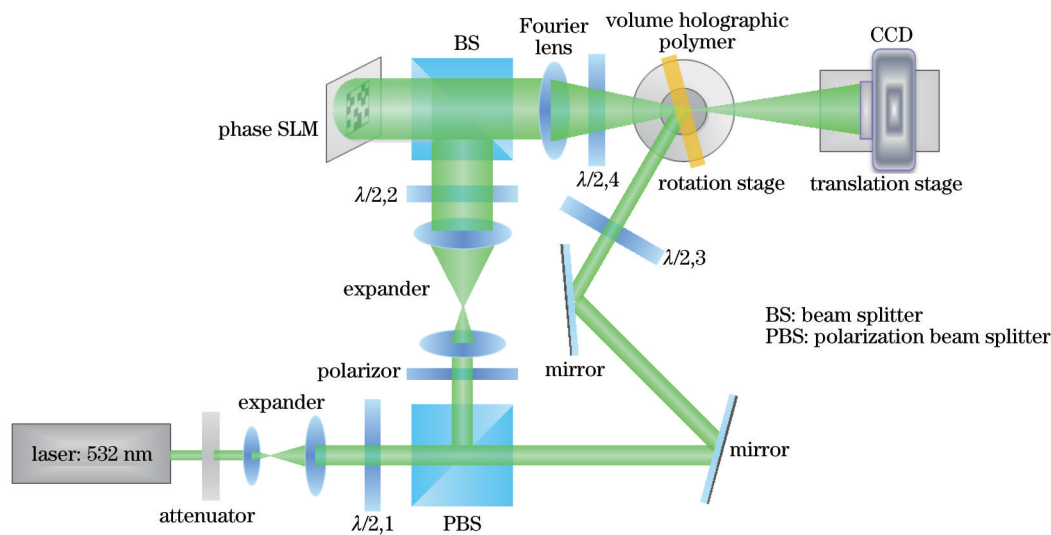


图2 体全息三维显示系统光路图

Fig.2 Optical setup schematic of volume holographic 3D display system

4 调节实现;同时在材料内发生干涉的两束光的光功率密度应该大致相等且足够强,系统通过半波片 1 调节分束比,使物光和参考光的光功率密度为 10 mW/cm^2 。实验中参考光直径为 5 mm ,为避免参考光光能损失,主光路部分的扩束比不宜太大,同时在 PBS 后的反射光路加入二级扩束来获得足够大的物光光束。

厚度 1 mm 的掺杂金纳米颗粒光聚合物材料放置于电动旋转台上以实现角度复用存储。实验中,在每个角度记录不同的相息图;再现时,可以用肉眼直接观测到三维图像,由于重建的图像为实像,可以通过 CCD 进行拍摄。CCD 前不需要成像透镜,通过电动平移台前移动成像面的位置,得到对焦于不同深度位置处的物体图像,可以验证三维重建结果。

实验中的三维模型为一个无遮挡效果的三维骰子模型,如图 3(a)所示。该模型的 10 张不同视角的波前相息图被写入体全息聚合物的角度复用 Hogel,单张相息图如图 3(b)所示。相息图的记录复用角度间隔为 0.1° ,并被无串扰的重建显示出来。部分实验结果如图 3(c)和(d)所示,其中图 3(c)为通过 SLM 直接重建的三维图像,图 3(d)所示为体全息聚合物重建三维图像。骰子图像聚焦于顶点 A,远处的顶点 G 则处于离焦状态。实验结果验证了物光波前存储系统和体全息聚合物角度复用记录,并成功获得了三维显示效果,在体全息材料的同一位置处复用重建了十幅三维图像,通过单点多图像角度复用记录与重建将三维显示的空间带宽积提升了 10 倍。

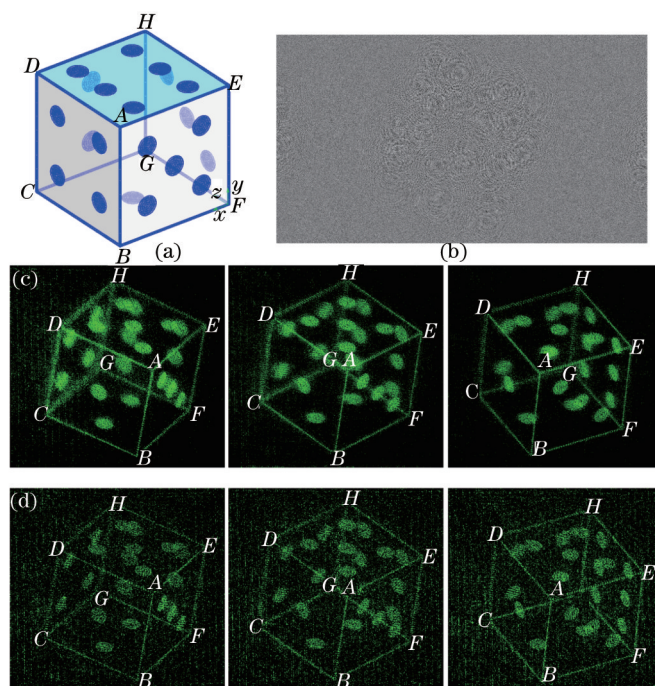


图 3 (a) 三维骰子模型; (b) 计算得到的相息图; (c) SLM 重建得到的三维图像; (d) 体全息聚合物重建的三维图像
Fig.3 (a) 3D model of the dice; (b) a computer generated kinoform; (c) 3D images reconstructed by the SLM; (d) 3D images reconstructed by the volume holographic polymer

该方法突破了单幅全息图空间带宽积受 SLM 像素数的限制。当多幅全息图被角度复用记录于体全息材料的单点 Hogel 位置处时,重建的三维图像就包含了所有全息图的海量像素信息,因而突破了 SLM 的像素数限制。通过角度复用全息图重建方式,系统不需要拼接 SLM 即可成倍大幅扩展空间带宽积,利用体全息聚合物中的三维体布拉格光栅实现单 SLM 的空间分时拼接,因此多重的三维景象可以同时显示甚至合成。显示的空间带宽积随着单点 Hogel 复用存储的全息图增加而增加。在掺杂金纳米颗粒体全息聚合物中,由于复用角度间隔只有 0.1° ,因此可在单点存入上百上千幅全息图,系统的信息显示能力理论上可提高 2~3 个数量级。本文提出的三维显示方法适用于各类体全息材料,在可擦写存储材料的支持下,利用光折变聚合物材料在高电压下或光致色变材料在紫外照射下的擦写特性,该方法也可用于实现可刷新动态实时三维显示。

5 结 论

体全息三维物光波前存储原理进行了研究,设计了基于掺杂金纳米颗粒聚合物材料的体全息三维显示

系统。通过计算全息算法获得全视差三维物体波前相位全息图,并在实验中搭建了全息图复用记录与显示系统,将全息图写入体全息聚合物角度复用的Hogel中,使多幅全息图记录于材料的同一位置处,每个记录角度对应一个三维场景,利用掺杂金纳米颗粒聚合物良好的角度复用特性和高衍射效率实现了高空间带宽积的三维场景重建。该系统充分利用了材料的动态范围,实现了全息图的高密度存储和均匀读出,无需成像透镜即可实现三维场景重建,具有高度的设计灵活性。结合材料记录的空间复用存储,系统能实现更多数据的写入和读取。在医用层析图像三维重建、动态三维场景显示等方面,体全息物光波前存储和高分辨率三维显示方法都具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 S A Benton, V M Bove Jr. Holographic Imaging[M]. John Wiley & Sons, 2008.
- 2 K Curtis, L Dhar, A Hill, *et al.*. Holographic data storage[M]. New York Wiley, 2010.
- 3 Wang Hui, Jin Hongzhen, Wu Dongyuan, *et al.*. Information capacity and reduction in computing holographic three-dimensional display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209012.
王 辉, 金洪震, 毋东元, 等. 计算全息三维显示的信息量及其简化[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209012.
- 4 A Sinha, W Liu, D Psaltis, *et al.*. Imaging using volume holograms[J]. Opt Eng, 2004, 43(9): 1959-1972.
- 5 Zheng Guangwei, Tan Jichun, Shen Benjian, *et al.*. Research on harmonic wave separation and beam sampling characteristics of superposed volume Bragg gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0305001.
郑光威, 谭吉春, 沈本剑, 等. 复用体布拉格光栅的谐波分离以及光束取样特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0305001.
- 6 Dong Jianwen, Chen Dingchen, Pang Xiaoning, *et al.*. Spatial-domain computer generated holographic three-dimensional display[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0701001.
董建文, 陈定尘, 庞晓宁, 等. 空域计算全息三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0701001.
- 7 M Lucente. Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1994.
- 8 D Abookasis, J Rosen. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints [J]. J Opt Soc Am A, 2003, 20(8): 1537-1545.
- 9 S Tay, P A Blanche, R Voorakaranam, *et al.*. An updatable holographic three-dimensional display[J]. Nature, 2008, 451(7179): 694-698.
- 10 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic images based on a pixelated spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0309001.
沈 川, 张 成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0309001.
- 11 J Hahn, H Kim, Y Lim, *et al.*. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators[J]. Opt Express, 2008, 16(16): 12372-12386.
- 12 M Klug, T Burnett, A Fancello, *et al.*. A scalable, collaborative, interactive light-field display system[C]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013, 44: 412-415.
- 13 C Slinger, C Cameron, M Stanley. Computer-generated holography as a generic display technology[J]. IEEE Computer, 2005, 38(8): 46-53.
- 14 Li Jianhua, Cao Liangcai, Tan Xiaodi, *et al.*. Transmission type of collinear volume holographic storage technology based on LiNbO₃ crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409001.
李建华, 曹良才, 谭小地, 等. 基于 LiNbO₃晶体的透射式共光轴体全息存储技术[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409001.
- 15 A W Lohmann, D Paris. Binary Fraunhofer holograms, generated by computer[J]. Appl Opt, 1967, 6(10): 1739-1748.
- 16 Z Hao, X Jinghui, L Juan, *et al.*. Optical reconstruction of 3D images by use of pure-phase computer-generated holograms[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(12): 1101-1103.
- 17 O Matoba, T J Naughton, Y Frauel, *et al.*. Real-time three-dimensional object reconstruction by use of a phase-encoded digital hologram[J]. Appl Opt, 2002, 41(29): 6187-6192.
- 18 Y N Hsiao, S H Lin, W T Whang. Analyses on physical mechanism of holographic recording in phenanthrenequinone-doped poly (methyl methacrylate) hybrid materials[J]. Opt Eng, 2004, 43(9): 1993-2002.
- 19 C Li, L Cao, J Li, *et al.*. Improvement of volume holographic performance by plasmon-induced holographic absorption grating[J]. Appl Phys Lett, 2013, 102(6): 061108.