

文章编号:1004-4213(2011)10-1542-5

一种改进型视角投影图像彩色计算全息术的 三维重构算法

薛东旭, 杨勇, 张慧敏, 赵星, 袁小聪

(南开大学 现代光学研究所; 光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘 要:本文提出了一种利用三维景物的二维视角投影图像合成计算全息图, 并重构出彩色再现三维影像的方法. 该方法基于利用视角投影图像获取景物的三维傅里叶频谱的理论, 采用电荷耦合器件记录三维景物在白光照明条件下横、纵两正交方向的一系列视角投影图像, 并利用这些视角投影图像合成计算全息图, 从而重构出三维再现像. 通过采用在频谱面上的容余采样方法, 提高了图像频谱信息的利用率, 通过实验论证, 证明了该方法的可行性. 利用该方法使得视角投影图像的记录过程更加简单, 节省了采样时间, 提高了程序运行速度; 能够在利用同等数量的视角投影图像的条件下, 提高合成全息图的质量, 使得重构的彩色再现三维影像更加清晰.

关键词:计算全息; 三维重构; 三维傅里叶频谱; 视角投影图像

中图分类号: O438

文献标识码: A

doi: 10. 3788/gzxb20114010. 1542

0 引言

自 1948 年 Gabor 首次提出全息术以来, 全息术已经在很多领域得到广泛应用, 尤其在信息光学领域, 因为其能再现出带有深度信息的三维物体图像的影像, 被认为是最好的三维显示手段之一^[1]. 但由于在全息图的获取过程中, 需要搭建由相干照明的复杂光学系统, 且由于激光照明的局限, 使其无法对体积大且距离远的物体成像. 随着计算机技术的发展, 计算全息术成为一种解决方案^[2], 计算全息术可以通过数值方法得到计算全息图 (Computer Generated Holograms, CGHs), 无需相干光学系统. 然而采用计算全息术合成 CGHs 时需要知道所描述的三维景物的物波函数, 通常真实三维景物的信息量大, 难以用具体的函数描述, 所以常规的数值合成 CGHs 的方法不适用于真实世界的三维物体, 因此目前对真实三维物体的全息成像依然需要使用相干光学系统^[3-5].

针对这个问题, 人们提出白光照明下多视角投影图像合成 CGHs 的方法^[6-9], 由于该方法无需相干光源, 并采用电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 获取真实彩色景物的复杂影像^[10], 所以特别适合记录三维真实景物. Abookasis 和 Sando

等人^[6-7]最初将 CT 中的断层扫描理论引入到三维物体的计算全息成像研究领域, 利用提取三维物体在不同方向上二维投影信息的方法, 合成该物体的波前分布. 此后, 他们又采用透镜阵列^[7]获取视角投影图像的方法合成了菲涅尔全息图^[8]和彩色傅立叶全息图^[9]. 然而, 在已有的报道中, 视角投影图像的获取均需采用二维机械扫描机构实现 CCD 在整幅范围内扫描, 这导致获得投影图像的过程十分费时和复杂, 且需处理的图像数量多.

针对该问题, 本文在基于视角投影图像获取三维傅立叶频谱的理论方法的研究基础上^[7,9-10], 提出利用仅在横、纵两个正交方向扫描拍摄的方法获得视角投影图像, 重构出三维影像的方法; 此外, 在制作 CGHs 的过程中, 提出采用容余采样的方法来减小取整噪音, 在同等数量的投影图像下, 获得更高质量的彩色三维再现影像.

1 本方法的原理

1.1 视角投影图像和三维傅里叶频谱

假定三维物体表面的反射光来自各向同性的外部光线, 一般情况下, 物体的空间反射率很复杂, 在非相干照明下, 假定三维物体的空间反射率为 $O(x, y, z)$, 对于空间某物体, 除了应用于干涉仪, CCD 不能

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No. 2010CB327702) 和天津市应用基础及前沿技术研究计划 (No. 11JCYBJC01400) 资助

第一作者: 薛东旭 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字全息. Email: dx-xue@mail. nankai. edu. cn

导师 (通讯作者): 杨勇 (1972-), 男, 副研究员, 主要研究方向为三维成像与显示技术、数字全息技术. Email: yangyong@nankai. edu. cn

收稿日期: 2011-03-23; 修回日期: 2011-07-06

记录物体的相位信息, 假定物体反射的相位分布在空间是不变的, 使物体位于正透镜的前焦平面上, 且透镜主光轴与 z 轴重合, 可以得到其 在后焦面上的振幅分布为^[11]

$$g(x_0, y_0) = \iiint O(x, y, z) \exp \left\{ -\frac{i2\pi}{\lambda} \left[\frac{x_0 x + y_0 y - (x_0^2 + y_0^2)z}{2f^2} \right] \right\} dx dy dz \quad (1)$$

式中 λ 和 f 分别为入射光波的波长和透镜的焦距, 如图 1. x_0 和 y_0 为频谱面的坐标, 为了得 $g(x_0, y_0)$

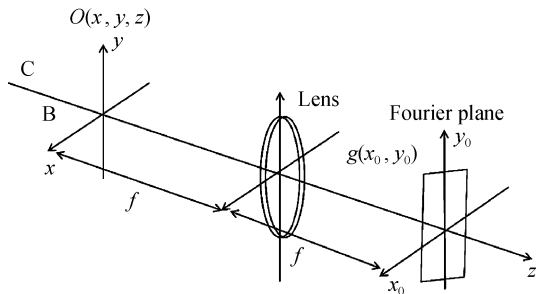


图 1 三维物体获得傅里叶频谱的光学系统
Fig. 1 An optical system for obtaining the spectra of the 3-D object

和三维傅里叶频谱的关系, 令 $u_0 = x_0/\lambda f$ 和 $v_0 = y_0/\lambda f$ 代入式(1)得

$$g(x_0, y_0) = \iiint O(x, y, z) \exp \left\{ -i2\pi \left[ux + vy - \frac{\lambda}{2} (u^2 + v^2) z \right] \right\} dx dy dz = \left\{ \iiint O(x, y, z) \cdot \exp \left[-i2\pi (ux + vy + wz) \right] \cdot dx dy dz \right\} \Big|_{w = -\frac{\lambda}{2} (u^2 + v^2)} = F \left[O(x, y, z) \right] \Big|_{w = -\lambda(u^2 + v^2)/2} \quad (2)$$

式中 $F[\cdot]$ 是三维傅里叶变换算符, u, v, w 为频域坐标, 由此表达式可见三维傅里叶频谱在空间中是一个旋转抛物面, 如图 2.

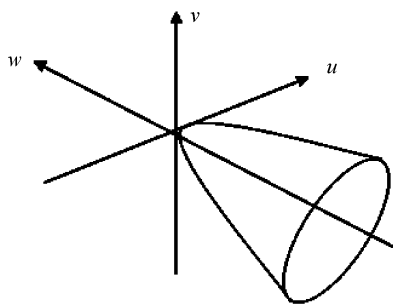


图 2 三维傅里叶频谱旋转抛物面
Fig. 2 Paraboloid of revolution for the 3-D Fourier spectra

通过比较式(1)和式(2)得出, 在透镜后焦面也就是傅里叶平面上的光场分布与三维傅里叶频谱在旋转抛物面上的部分是等价的. 为了获得三维傅里叶频谱, 利用透镜后焦面获得的一系列二维傅里叶频谱与旋转抛物面相交的部分, 可以近似得到获得三维傅里叶频谱. 原三维实物与其视角投影图像的

空间关系如图 3 和图 4, 得到坐标关系为

$$u \cos \theta + v \sin \theta = 0 \quad (3)$$

$$w = -\lambda(u^2 + v^2)/2 \quad (4)$$

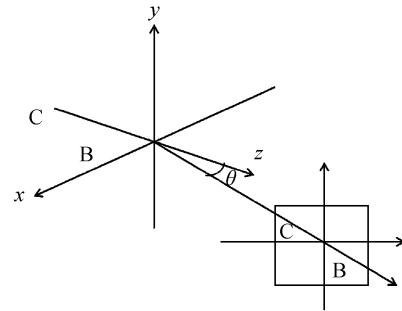


图 3 物体与其视角投影图像
Fig. 3 Projection of the object in the real space

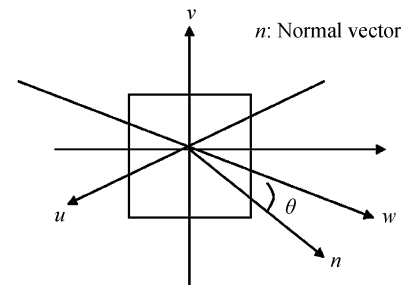


图 4 投影图像获得的与三维傅里叶空间截面的坐标分布
Fig. 4 A sectional plane in the 3-D Fourier space obtained from a projection image

式中 θ 为投影角. 由式(3)和式(4)可以推导出 $(u - \tan \theta/\lambda)^2 + v^2 = (\tan \theta/\lambda)^2$ (5)

式(5)给出了二维频谱和旋转抛物面之间的关系, 可以看出, 二者交线是个椭圆. 为了简化运算, 把交线椭圆投影到 $u-v$ 平面, 椭圆就变成了圆, 圆心为 $(\tan \theta/\lambda, 0)$, 半径为 $\tan \theta/\lambda$, 它们都随着投影角的变化而变化, 于是在每个二维傅里叶频谱上抽样提取一个满足式(5)前半部分的圆, 那么这个圆也近似在旋转抛物面上也就是三维傅里叶频谱上, 如图 5.

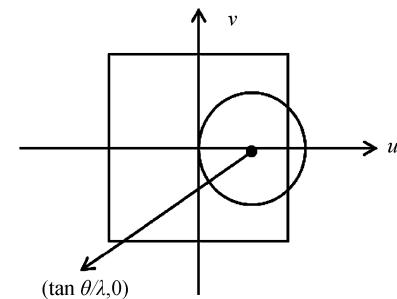


图 5 投影图像频谱与三维傅里叶频谱相交椭圆近似成的圆
Fig. 5 Intersections between the paraboloid of revolution and a sectional Fourier plane

所以物体的三维傅里叶频谱可由不同投影角的一系列视角投影图像合成, 如图 6.

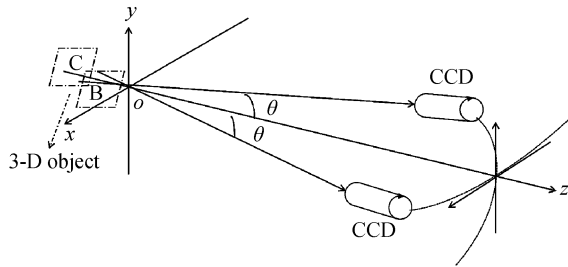


图 6 记录的光学系统

Fig. 6 A recording optical system

保持 CCD 与三维物体的距离不变,沿横、纵两个一维方向分别拍摄,也就是 CCD 在 $z-x$ 及 $z-y$ 平面转动,与 z 轴的夹角 θ 分别由 $-8^\circ-8^\circ$ 得到视角投影图像,然后分别进行傅里叶变换,在频谱空间内遵循式(5)合成三维傅里叶频谱.通过以上分析,采用在横、纵两个正交方向扫描拍摄的方法获得视角投影图像序列,可以用于重构三维傅里叶频谱,与通过复杂机械扫描获得视角投影图像序列的方法相比,减少了系统的复杂程度.

1.2 取整噪音的处理

在处理图像的时候用抽样出二维傅里叶频谱和旋转抛物面的交线,由于在进行数据处理时,数据转化成矩阵形式保存,在提取这个圆的时候,一定会产生取整噪音,会导致再现的图像不清晰.为了减少取整产生的噪音,本文提出采用容余采样的方法,由于采用取整函数为四舍五入的算法,所以在离散式(5)的时候就要对 $u \pm 0.5, v \pm 0.5$ 取整,即取五个圆

$$\begin{aligned} ([u] - \tan \theta / \lambda)^2 + [v]^2 &= (\tan \theta / \lambda)^2 \\ ([u + 0.5] - \tan \theta / \lambda)^2 + [v - 0.5]^2 &= (\tan \theta / \lambda)^2 \\ ([u + 0.5] - \tan \theta / \lambda)^2 + [v + 0.5]^2 &= (\tan \theta / \lambda)^2 \\ ([u] - \tan \theta / \lambda)^2 + [v + 0.5]^2 &= (\tan \theta / \lambda)^2 \\ ([u] - \tan \theta / \lambda)^2 + [v - 0.5]^2 &= (\tan \theta / \lambda)^2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $[\cdot]$ 表示取整,把提的这五个圆放在平面上,逼近三维傅里叶频谱,该方法减少了取整带来的噪音误差.

1.3 频谱冗余信息的讨论

假设传统方法提取的第一个采样圆记为表达式 F_1 ,依次类推这五个采样圆分别记为 F_2, F_3, F_4, F_5 .由于在处理上是直接提取出五个采样圆放在同一个矩阵中,所以在频谱面上所得到的频谱为 $F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$,得到频谱图以后,合成全息图,并重构出再现影像,最后得到的图像是单独提取每个圆得到再现图像的叠加.

提取采样圆的时候,在频谱上,得到了更多的信息量.为了分析这些信息对再现图像带来的影响,首先分析这些信息的组成成分,由于以 $u \pm 0.5, v \pm 0.5$ 为标准取整取圆,相对于 u, v 的值来讲改变

很小,所以每个采样圆会带有大部分所需要的频谱信息,每个圆也都缺失了部分频谱信息,当然也带来了冗余信息.于是在每个采样圆上有三部分信息:有用信息、缺失信息以及冗余信息.第一部分有用的信息是指在采样圆上,并且位于三维傅立叶频谱面上的信息,起着再现图像的作用;第二部分缺失的信息是指本应该在三维傅立叶频谱面上却由于取整造成的丢失的那部分信息,频谱部分丢失以后,无论是高频还是低频,都会导致图像整体清晰度降低;第三部分信息是指不在三维傅立叶频谱上却由于取整造成的多余的那部分信息,这部分信息不在三维傅立叶频谱上,经过运算对应到再现图像上就是图像的背景,由于实验中用的三维物体是单一背景,所以这部分冗余信息对图像的三维重构没影响.由以上分析得出,抽取五个采样圆的候,得到的是五个频谱的叠加,因为信息的互补,有用信息在最少采样圆的条件下,最大限度获得三维傅里叶频谱面,本方法带来的冗余频谱信息由于三维物体的单一背景性,所以不会带来对再现图像的影响,因此得到的再现图像比只抽取一个采样圆更加清晰而不会因为冗余频谱信息而使之模糊.

1.4 算法程序设计

如图 6, $z-x$ 和 $z-y$ 平面 CCD 对准三维物体转动角度由 $-\theta$ 到 θ ,这里每隔 α 度拍一次,共获得 n 幅图像,然后存入计算机,以下过程用 MATLAB 处理,把 n 幅图像读入计算机,生成矩阵编号 $1 \sim n$,全彩图像对应的矩阵是三维的,由于三维图像矩阵不能直接进行二维离散傅里叶变换,在做全息图的时候利用以下处理方式:首先把图像分成 R, G, B 三个分量,每个分量图像就变成了二维灰度图像,把 $1 \sim n$ 图像的 R 分量进行二维离散傅里叶变换,用以上方法进行抽样,得到三维傅里叶频谱矩阵 A ,采用博奇编码方式合成 CGHs,然后进行菲涅尔再现,同样的方式处理 G, B 分量,最后将所得到的 R, G, B 影像合成为全彩影像.

2 实验结果与分析

在投影图像的获取阶段,首先在计算机中生成一个虚拟的三维场景,该三维场景由一前一后两个深度值不同的平面图形组成,如图 6.为便于区分,这两个平面上分别写有大写的字母 B 和 C,其中 B 字母平面在前, C 字母平面在后,且这两个平面的大小均为 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,在 x, y, z 方向上的距离差分别为 $50 \text{ mm}, 50 \text{ mm}$ 和 0.24 mm ;其次,在该场景中模拟相机对物体的拍摄过程,利用相机分别在横、纵两个正交方向上对三维场景进行一维扫描,且在

每个方向上相机镜头转动的最大角度为 16° , 每隔 0.5° 拍摄物体的一幅角投影图像, 共拍摄 66 幅投影图像. 其中摄像机与三维物体中心投影角为 0° 的中心视角图像被重复拍摄了一次, 需要注意的是, 这两幅图像在处理时只需要其中一幅, 即总共处理 65 张图片. 在投影图像的拍摄过程中, 三维场景的中心相距相机成像透镜的距离为 450 mm, 相机的像素为 256×256 .

结合上文 1.4 设计的算法流程, 处理得到实验结果.

1) 常规传统处理方法: 把图像导入计算机, 编号 1~65, 并分别分成 R 、 G 、 B 三个分量, 把 1~65 图像的 R 分量进行二维离散傅里叶变换, 对满足方程 (5) 数据进行抽样, 得到抽样图样, 即三维傅里叶频谱矩阵, 采用博奇编码方式合成 CGHs, 然后进行菲涅尔再现, 同样的方式处理 G 、 B 分量, 最后将所得到的 R 、 G 、 B 影像合成为全彩影像.

2) 容余抽样处理方法: 在获取抽样圆之前处理

方法是相同的, 在获取三维傅里叶频谱矩阵时, 是对满足方程 (6) 数据进行抽样, 得到抽样圆, 下面的处理跟常规方法相同, 同样的得到现在全彩影像.

3) 在以上所述的实验条件下, 首先给出以往文献报道的抽样方法与本文抽样方法所得到的图样对比如图 7. 由图 7(a)、(b) 对比可以看出容余采样提取圆的时候, 图 7(b) 带有信息量明显增大.

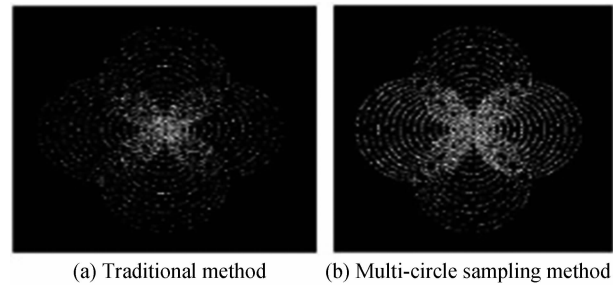


图 7 抽样图样

Fig. 7 Extracting results

4) 在不同的菲涅尔衍射距离下得到再现图像, 如图 8.

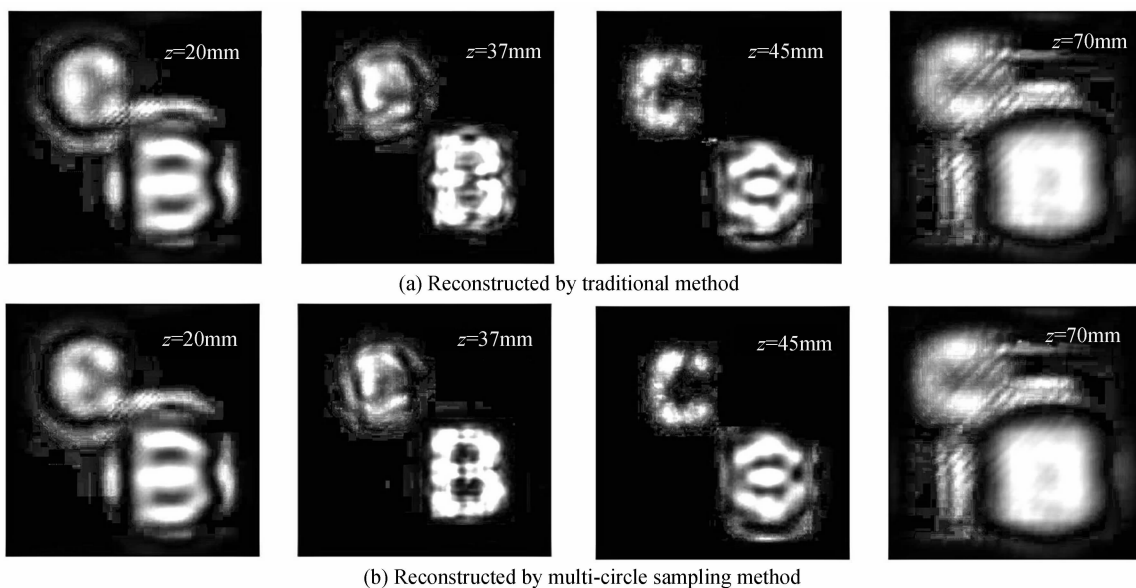


图 8 不同衍射距离的再现图像

Fig. 8 Numerical reconstructed images at different diffraction distance

在此实验条件下考虑到沿 z 轴方向的放大率近似为 $34.5^{[10]}$. 由图 8(a) 可以看出, 随着再现距离的增大, 字母 B 、 C 分别在 37 mm 和 45 mm 处清晰, 说明再现的图像带有了三维深度信息. 对比图 8(b), 可以看出, 在同样的衍射距离下, 得到的再现图像的清晰度要优于图 8(a). 在同等条件下本文采用的抽样方法得到的图像质量高, 验证了此方法的正确性与可行性.

3 结论

本文介绍了一种通过物体的视角投影图像合成 CGHs 重构三维物体的新方法, 采用了两正交方向

扫描拍摄的方法, 减小了系统的复杂程度和拍摄时间. 通过在抽样方法上进行改进, 减少抽样误差, 由传统的单一采样改进成容余采样, 并对该方法的可行性进行了实验验证. 该方法提供了一种有效的采样方式, 即在具有同等数量投影图像的条件下, 有效地提高图像的利用率, 提高了再现图像的质量. 本方法对具有单一背景的三维物体再现图像清晰度的提高有很大的帮助. 此外, 由于这种方法以空间三维傅里叶频谱和视角投影图像的关系为基础, 因此, 可以广泛应用在断层领域内, 在核磁共振, X 射线、CT 扫描等医学领域有广阔的前景.

参考文献

- [1] XU Fu-yang, LI Yong, JIN Hong-zhen, *et al.* Stay on reconstruction of the kinoform with white-light illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 271-274.
许富洋,李勇,金洪震,等. 三维场景相息图的白光再现研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 271-274.
- [2] LOHMANN A W, PARIS D P. Binary Fraunhofer holograms generated by computer[J]. *Applied Optics*, 1967, **10**(6): 1739-1748.
- [3] PARK J H, KIM N. Fresnel and Fourier hologram generation using orthographic projection images [J]. *Optics Express*, 2009, **8**(17): 6320-6334.
- [4] WAN Yuan-hong, ZHANG Jin, PU Dong-lin, *et al.* Making three-dimensional holograms with a novel digital method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1268-1271.
万远红,张瑾,浦东林,等. 一种三维全息图的数字化实现方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1268-1271.
- [5] CHEN Xiu-shan, LI En-pu, ZHAO Jian-lin, *et al.* Measurement and reconstruction of 3D acoustic standing wave field using digital holographic interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 95-99.
- [6] ABOOKASIS D, ROSEN J. Computer-generated holograms of three-dimensional objects synthesized from their multiple angular viewpoints[J]. *JOSA A*, 2003, **8**(20): 1537-1545.
- [7] SANDO Y, ITOH M. Holographic three dimensional display synthesized from three dimensional Fourier spectra of real existing objects [J]. *Optics Letters*, 2003, **24**(28): 2518-2520.
- [8] SHAKED N T, ROSEN J. Modified Fresnel computer generated hologram directly recorded by multiple viewpoint projections[J]. *Applied Optics*, 2008, **19**(47): D21-D27.
- [9] SANDO Y, ITOH M, YATAGAI T. Full-color computer generated holograms using 3-D Fourier spectra [J]. *Optics Express*, 2004, **25**(12): 6246-625.
- [10] SANDO Y, YATAGAI T. Color computer-generated holograms from projection images[J]. *Optics Express*, 2004, **11**(12): 2487-2493.
- [11] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1996: 66-105.

An Improved Algorithm for 3D Reconstruction Based on Color CGHs of 3D Objects Using Multiple Projection View Images

XUE Dong-xu, YANG Yong, ZHANG Hui-min, ZHAO Xing, YUAN Xiao-cong
(*Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, (Ministry of Education), Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: A novel method for the acquisition of full-color three dimensional (3-D) images of real objects was proposed based on multiple projections. In order to improve sampling efficiency, an orthogonal scanning mode was presented, instead of conventional 2-D scanning mode, to capture a series of projection images by a color charge coupled device in both vertically and horizontally direction with an incoherent light source. The 3-D Fourier spectra were extracted by using the projection images. The computer-generated hologram (CGH) was synthesized and the numerical 3-D image was reconstructed. The experimental results show that the acquisition method of multiple projection view images has good performance, high efficiency. Moreover, a new extraction method was adopted to improve viewing quality of 3-D imaging by using the multi-circle sampling area. Comparison with experimental result shows that more available data is used to synthesize the CGH and a significant improvement in image definition.

Key words: Digital holography; Three-dimensional reconstruction; 3-D Fourier spectra; Projection image