

文章编号 1004-924X(2009)07-1701-06

基于微透镜阵列的三维数字成像

张 健^{1,2}, 辛 悦³, 刘伟奇¹, 李桂菊¹, 康玉思¹, 魏忠伦¹, 柳 华¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国电子科技集团公司第 27 研究所, 河南 郑州 450015)

摘要:基于微透镜阵列多视角成像特点, 利用几何光学原理, 提出一种对物体进行三维数字成像的重构算法。利用这种算法, 对 CCD 相机捕获到的基元图像阵列进行重构。与传统的利用光学系统对物体进行重构的方法相比, 该算法不再受到重构过程中遇到的杂光以及衍射效应等因素的影响, 具有实时性好、清晰度高的优点。搭建了基于微透镜阵列的三维数字成像系统实验平台, 利用此算法对实验中获得的骰子基元图像阵列进行重构, 成功地重构出原始物体的三维立体图像, 在理论上和实验上证明了这种重构算法的有效性和可行性, 并对实验中影响成像质量的因素进行了分析。

关键词:微透镜阵列; 几何光学; 三维数字成像

中图分类号:TH703; TP391 **文献标识码:**A

Three-dimensional digital imaging based on microlens array

ZHANG Jian^{1,2}, XIN Yue³, LIU Wei-qi¹, LI Gui-ju¹, KANG Yu-si^{1,2},
WEI Zhong-lun¹, LIU Hua¹

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China;*
3. *The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450015, China*)

Abstract: A new reconstruction algorithm was proposed based on multi-perspective imaging characteristics of a microlens array and geometrical optical principles. By proposed algorithm, an original object was reconstructed with the elemental image array captured by a CCD camera. In comparison with traditional method using optical systems, this algorithm was not affected by the stray light and diffraction effect in the process of reconstruction, and has advantages of real-time and sharp quality. An experimental platform based on a three-dimensional digital imaging system with a microlens array was setup to reconstruct the elemental image array of a die captured in experiment, a volumetrically original image was reconstructed through this algorithm successfully. It is proved that the algorithm is feasible and valid both theoretically and experimentally. Finally, several factors affecting the imaging quality in the experiment are analyzed.

Key words: microlens array; geometrical optics; three-dimensional digital imaging

收稿日期:2008-09-27; 修订日期:2009-01-20.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA030111)

1 引言

近年来,集成成像法作为一种三维立体成像技术,受到了越来越广泛的关注^[1-6]。集成成像技术与以往的编码孔径成像等方法^[7]不同,是用 2D 微透镜阵列获得多方位视角的单元图像实现 3D 成像的技术,可广泛用于三维电视和虚拟现实,也可以用于三维图像识别和光学神经网络。

为了获得实时的三维显示,传统上是通过光学办法对三维物体图像进行重构。但是这种光学重构的方法存在着很多的不足,主要原因在于进行光学重构时,整个光路不可避免地会受到杂散光的影响。此外,整个重构光学系统还要受到系统装调、光学设备性能的影响,这些都大大降低了重构得到的三维物体图像的分辨率。

针对光学系统进行重构的种种不足,本文提出了一种基于微透镜阵列的三维数字成像方法。该方法不受光学元件的限制,避免了透镜单元衍射及系统装调的影响,可获得比直接光学重构法更清晰的图像。

2 三维数字成像原理分析

提出的方法使用几何光学的光线追迹理论^[8-15],分析、模拟集成成像的整个光学重构过程来实现对基原图像的三维数字重构。通常将光线通过微透镜阵列后的每个单元图像称之为基原图像,系列基原图像通过 CCD 相机等图像传感器进行采集。提出的方法充分利用了原始物体的信息来重构三维物体图像。如图 1 所示,骰子表面的每个点在微透镜阵列后的像面上成像,随后被 CCD 摄像机记录,这就是从三维物体到基原图像的形成过程。换言之,骰子的整个表面对基原图像上所有的像素都产生贡献,然而那些位于骰子内部的体元不会对原始像起任何作用。

图 2 是三维数字成像原理的示意图。图中所示的三维数字成像方法是一种重构算法,它通过使用计算机合成的针孔阵列形成原始像的逆绘图程序。重构程序从基原像面的每个基原图像中选取像素点,并在重构像面上点 (x, y, z) 处显示出相关的像素。参考几何光学的理论,这些二维基原图像通过针孔阵列后投影在重构面上。因为

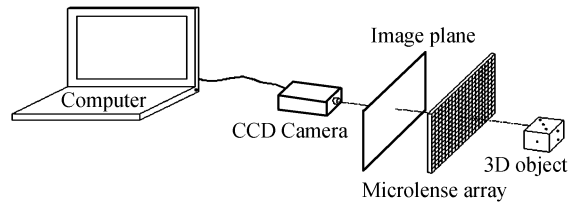


图 1 三维物体的成像过程

Fig. 1 Imaging process of 3D object

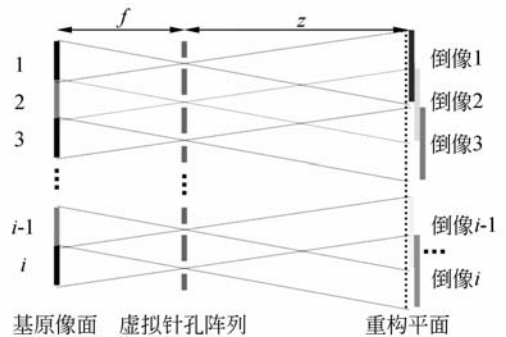


图 2 三维数字成像原理

Fig. 2 Three dimensional digital imaging principle

每个基原图像保存了物体不同的三维信息,所以这些基原图像投影后可以合成三维图像。因此,此种方法在计算上可行。图 2 中,基原像面和重构像面到图中虚线所示的虚拟针孔阵列距离分别为 f 和 z 。根据几何光学关系,每个基原图像通过针孔阵列后在重构像面上形成放大或缩小的倒像,其比例因子为 $M = z/f$ 。当 $M > 1$ 时,一系列连续的倒置像在重构面上彼此重叠。重构像面处的光强与基原图像到重构像面的距离的平方成反比。通过虚拟针孔阵列后所有基原图像的倒像在重构像面 z 处彼此线性重叠。

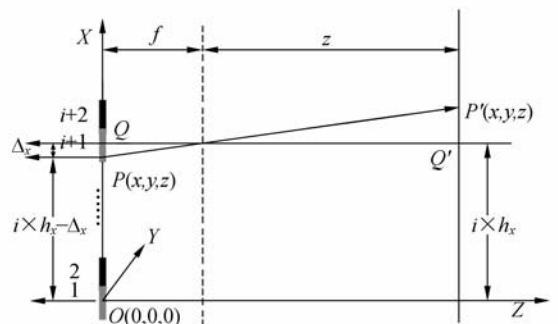


图 3 三维数字成像计算过程

Fig. 3 Computing process of three dimensional digital imaging

图3是三维数字成像计算过程示意图。平面XY表示基原像面,光线沿Z方向进行传播。位于点 $P(x, y, z)$ 处的第 $i+1$ 个基原图像,通过虚拟针孔后在重构像面上的投影点坐标为 $P'(x, y, z)$ 。实际情况下,基原图像上任意点的颜色都是由红、绿、蓝3个颜色分量大小决定。因此,可以在电脑中提取基原像面上每一点的三基色值,并相应地在重构像面上对每一点的颜色进行合成。

这里先讨论图中点 $P(x, y, z)$ 在X轴上的情况,即点 $P_y=0, P_z=0$,对于点 $P(x, y, z)$ 在XY平面上任意点的情况可以根据坐标的对称性获得。在X轴上,每个像元的高度为 h_x ,点Q为第 $(i+1)$ 个基原图像的中心,PQ距离大小为 Δ_x ,经过放大后在重构像面上的大小为 $M\Delta_x$ 。在重构像面上, $P'(x, y, z)$ 是重构平面上的任意点,根据几何关系可知:

$$P_x' = x = M\Delta_x + ih_x. \quad (1)$$

同样,在基原像面上,点 P_x 坐标为:

$$P_x = ih_x - \Delta_x. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得到 P_x' 和 P_x 的关系为:

$$P_x = ih_x - \frac{P_x' - ih_x}{M} = ih_x - \frac{x - ih_x}{M}. \quad (3)$$

显然,由坐标对称性可知 P_y' 和 P_y 的关系为:

$$P_y = jh_y - \frac{y - jh_y}{M}. \quad (4)$$

$$O_{m,n}^k(x, y, z) = \frac{I_{m,n}^k\left(ih_x - \frac{x - ih_x}{M}, jh_y - \frac{y - jh_y}{M}\right)}{(z+f)^2 + (x - ih_x)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 + (y - jh_y)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2}. \quad (7)$$

同理, $O_{m,n}(x, y, z)$ 可以表示为:

$$O_{m,n}(x, y, z) = \frac{I_{m,n}\left(ih_x - \frac{x - ih_x}{M}, jh_y - \frac{y - jh_y}{M}\right)}{(z+f)^2 + (x - ih_x)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 + (y - jh_y)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2}. \quad (8)$$

图3中, Δ 在 x, y 方向的取值范围分别为 $-\frac{h_x}{2} \leq \Delta_x \leq \frac{h_x}{2}$, $-\frac{h_y}{2} \leq \Delta_y \leq \frac{h_y}{2}$ 。根据(1)式中的关系,可知 $\Delta_x = \frac{x - ih_x}{M}$,所以(8)式中 x, y 坐标的取值范围为:

$$\begin{cases} -\frac{h_x}{2} \leq \Delta_x = \frac{x - ih_x}{M} \leq \frac{h_x}{2} \\ -\frac{h_y}{2} \leq \Delta_y = \frac{y - jh_y}{M} \leq \frac{h_y}{2} \end{cases},$$

根据两点坐标公式, $P(x, y, z)$ 点和 $P'(x, y, z)$ 的距离为

$$PP'^2 = \left(ih_x - \frac{x - ih_x}{M} - x\right)^2 + \left(jh_y - \frac{y - jh_y}{M} - y\right)^2 + (z+f)^2, \quad (5)$$

整理得:

$$PP'^2 = (ih_x - x)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 + (jh_y - y)^2\left(1 + \frac{1}{M}\right)^2 + (z+f)^2, \quad (6)$$

式中, h_x, h_y 分别表示基原像在X、Y方向上的大小。这里定义 $I_{m,n}^k(x, y, z)$ 为基原像面上第 m 行、第 n 列基原图像的第 k 个基原像素,同时定义 $O_{m,n}^k(x, y, z)$ 为 $I_{m,n}^k$ 在重构平面上所对应的像素点。重构过程中,可以将基原像面上的每一个像素点看成一个发出电磁波的点光源,即整个基原像面是由很多发出球面波的点光源组成。而每一个点光源经过一定距离后在重构平面所对应的点 $P'(x, y, z)$ 的能量大小与两点之间距离的平方成正比。因此,重构平面上的像素点 $O_{m,n}^k(x, y, z)$ 可以表示为:

即

$$\begin{cases} \left(i - \frac{M}{2}\right)h_x \leq x \leq \left(i + \frac{M}{2}\right)h_x \\ \left(j - \frac{M}{2}\right)h_y \leq y \leq \left(j + \frac{M}{2}\right)h_y \end{cases}. \quad (9)$$

对于整个重构平面,重构得到的图像是所有基原图像的倒置图像的线性叠加,所以,

$$O(x, y, z) = \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} O_{m,n}(x, y, z), \quad (10)$$

其中, i, j 分别是原始像在 x, y 方向上的数量。

3 实验结果及分析

根据三维数字成像原理设计了实验,以验证此重构方法的可行性。实验所用的微透镜阵列大小为 $51.6 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$, 含有 12×10 个微透镜单元, 焦距大小为 80 mm 。

实验中所使用的骰子大小为 $1.4 \text{ cm} \times 1.4 \text{ cm} \times 1.4 \text{ cm}$, 如图 4 所示, 所用透镜阵列如图 5 所示。微透镜阵列放在骰子前距离为 268 mm 处, 微透镜阵列和屏的距离为 108 mm 。图 6 所示为 CCD 相机所拍摄到的基原图像阵列, 阵列大小为 8×12 。由于基原图像阵列的边缘比较模糊, 所以只选取其中阵列大小为 5×10 的一部分来进行重构, 如图 7 所示。实验中所使用的 CCD 相机分辨率大小为 480×640 , 所以文中选取阵列的每个基原图像的像素大小为 66×48 , 整个图像阵列在计算机中的大小为 111 kB 。



图 4 实验中使用的骰子
Fig. 4 A die in experiment



图 5 实验中使用的透镜阵列
Fig. 5 Microlens array in experiment

采用文中所述的重构算法, 通过计算机对得到的基原图像阵列进行重构, 整个重构过程如下:

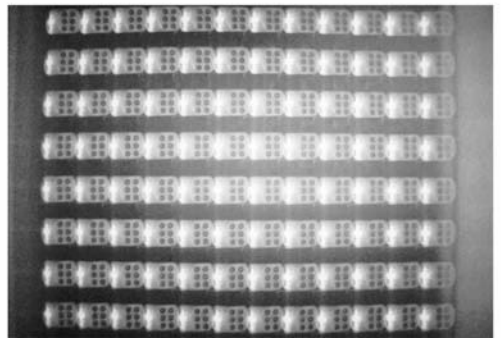


图 6 实验中 CCD 相机拍摄的基原图像阵列
Fig. 6 Elemental image array captured by CCD

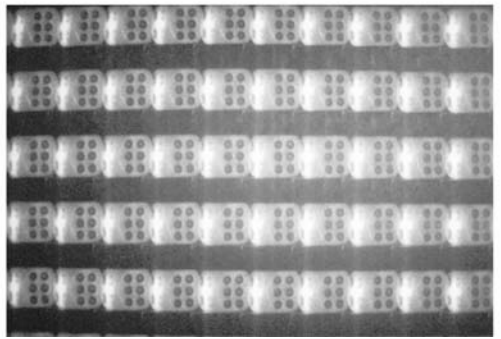


图 7 重构过程中使用的基原图像阵列
Fig. 7 Elemental image array used in reconstruction

- (1) 将基原图像阵列读入计算机中;
- (2) 分别提取基原图像阵列中每个像素的红、绿、蓝颜色分量并保存在计算机中;
- (3) 设定初始参数大小;
- (4) 在重构面上重构基原图像阵列, 并根据公式(6)(7)(8)对重构图像中每个像素的红、绿、蓝颜色分量大小进行赋值;

图 8 中列举了 5 个重构图像。这些图像没有经过任何处理和修饰; 但是, 如果经过平滑、滤波等适当的数字图像处理方法处理后, 图像质量应该会得到一定提高。实际上, 在这个实验中, 重构的图像的清晰度是由几个方面的因素共同决定的, 包括微透镜阵列中透镜单元的数量, 透镜单元的一致性, CCD 相机的分辨率, 实验装置装调过程中的人工误差以及照明光源的不均匀性。而这些因素中最重要的是透镜单元个数以及 CCD 相机的分辨率。此实验中, 虽然由于透镜单元个数有限, 在一定程度上影响了重构结果, 但从图 8 中可以看到, 重构是成功的。图 8 的 5 个重构图像在不同的重构面上清晰程度不同, (a)、(b)、(c)、

(d)4个图像的 z 值大小分别为80 mm、160 mm、240 mm和320 mm;(e)图像 z 值大小为400 mm。(a)~(d)4个图像重构平面距离较近,重构输出的图像比图(e)清晰一些。这是因为在超过400 mm的距离重构平面,重构图像的光强较弱。使用文中提出的数字重构技术,不仅可以在上述5个特定位置获得重构图像,还可以从距离针孔阵列的任意像面获得重构图像。另外,在重构过

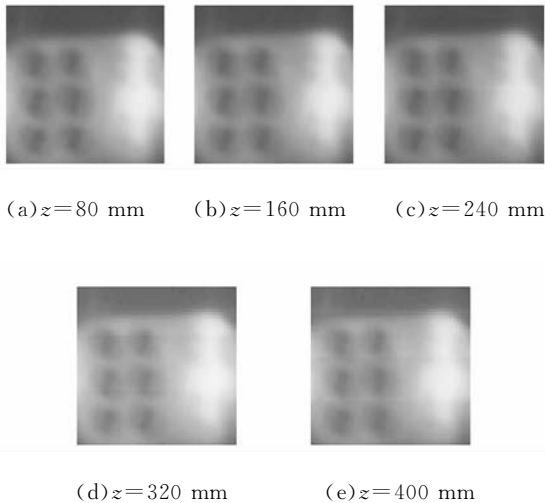


图8 在不同的重构平面上得到的重构图像

Fig.8 Reconstructed images at different reconstruction planes

程中,因为没有了装调误差、透镜单元衍射等因素的影响,所以可以获得比光学重构更好的图像质量。

4 结 论

本文提出了一种新颖的基于微透镜阵列的三维数字成像方法。通过使用微透镜阵列和 CCD 相机,在不同的重构面上将光学成像过程中得到的基原图像阵列进行了重构,得到了重构的图像。利用骰子实验初步证明了这种数字重构方法的可行性。这种重构算法因为不受光学元件的限制,消除了透镜单元衍射以及人工装调等过程的影响,因此可以获得比直接光学重构方法更加清晰的图片。基于这种方法的三维立体显示系统,因为需要 LCD 投影仪和 3 块 LCD 面板作为实验仪器,才可以在自由空间显示出三维真彩色立体图像^[17],条件较为苛刻,所以在本文中未能实现。另外,在此实验中,本文只是初步证明这种数字重构方法的可行性,关于微透镜阵列的景深对重构方法影响的定量分析,将是以后的工作内容。

参考文献:

- [1] LIPPMANN G. La photographie intergrale[J]. *C. R. Acad. Sci.*, 1908, 146: 446-451.
- [2] OKOSHI T. *Three-dimensional Imaging Techniques*[M]. New York: Academic Press, 1976.
- [3] LVES H E. Optical properties of a Lipmann lenticulated sheet[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1931, 21: 171-176.
- [4] ARIMOTO H, JAVIDI B. Integral three-dimensional imaging with digital reconstruction[J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26: 157-159.
- [5] JAND J S, JAVIDI B. Improved viewing resolution of three-dimensional integral imaging by use of non-stationary micro-optics[J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27: 324-326.
- [6] PRAUEL Y, JAVIDI B. Digital three - dimensional image correlation by use of computer-reconstructed integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41: 5488-5496.
- [7] 郎海涛,刘立人,阳庆国. 一种基于编码孔径成像原理的三维成像方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(1): 34-38.
- [8] 郎海涛,刘立人,阳庆国. 一种基于编码孔径成像原理的三维成像方法[J]. *光学学报*, 2006, 26(1): 34-38. (in Chinese)
- [8] 郝劲波,忽满利,李林森,等. 基于微透镜阵列的实时三维物体识别[J]. *光子学报*, 2007, 36(11): 2008-2012.
- [8] HAO J B, HU M L, LI L S, *et al.*. Real-time three-dimensional object recognition with microlens array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(11): 2008-2012. (in Chinese)
- [9] AMBS P, BIGUE L, BINET R, *et al.*. 3D image reconstruction using electrooptic holography [C]. *Proceedings of the 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-optics Society, LEOS*,

2003;172-173.

- [10] HONG S, JANG J S, JAVIDI B. Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2004(12):483-491.
- [11] HONG S H, JAVIDI B. Improved resolution 3D object reconstruction using computational integral imaging with time multiplexing[J]. *Opt. Express*, 2004(12):4579.
- [12] HONG S, JAVIDI B. Three-dimensional visualization of partially occluded objects using integral imaging[J]. *Display Technol.*, 2005, 1(2):354-359.
- [13] JAVIDI B, OKANO F. *Three Dimensional Television, Video, and Display Technology* [M]. Ber-

lin: Springer-Verlag, 2002.

- [14] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [15] OKOSHI T. *Three-dimensional Imaging Techniques* [M]. New York: Academic Press, 1976.
- [16] 郑华东, 于凝洁, 程维明. 三维立体显示技术研究新进展[J]. *光学技术*, 2008, 34(3):426-434.
- ZHENG H D, YU Y J, CHENG W M. A review on three dimensional display techniques[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3):426-434. (in Chinese)
- [17] JANG J S, BAHRAM J. Three-dimensional integral imaging of micro-objects[J]. *Optics Letter*, 2004, 29(11):1230-1232.

作者简介:



张健(1983—), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 主要从事光学成像和图像处理技术等方面的研究。E-main: ciomp.jian@gmail.com



康玉思(1977—), 男, 黑龙江密山人, 工程师, 主要从事光学设计及光学检测方面的研究。E-main: kyshdl@163.com



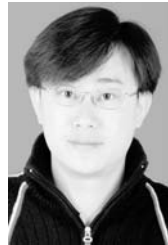
辛悦(1983—), 男, 吉林德惠人, 工程师, 主要从事光学跟踪技术的研究。E-main: xinyuege421@163.com



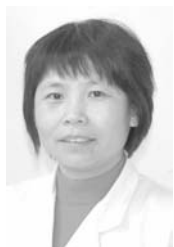
魏忠伦(1977—), 男, 黑龙江嫩江人, 工程师, 硕士, 主要从事图像处理软件开发研究。E-main: wzl-0@126.com



刘伟奇(1958—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光显示、虚拟成像以及非成像光学等方面的研究。E-main: liuwq@ciomp.ac.cn



柳华(1977—), 男, 海南海口人, 博士研究生, 主要从事光机结构设计的研究。E-main: liuhua0898@sohu.com



李桂菊(1964—), 女, 吉林吉林人, 研究员, 1985年于吉林大学获得学士学位, 1988年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事数字图像处理及DSP应用方面的研究。E-mail: lgjciom666@yahoo.com.cn