

文章编号:1004-4213(2011)11-1706-5

真实场景的三维视频采集及显示

李勇¹, 卢世江¹, 宋芳², 王辉¹, 金洪震¹

(1 浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

(2 中国人民解放军装备指挥学院, 北京 101416)

摘要:提出了一种真实场景三维视频采集及彩色显示的方法. 设计了一种采用条纹投影的实时三维成像系统及采用液晶空间光调制器的实时全息彩色三维显示系统. 在三维成像系统中采用 π 相移正弦条纹与编码图案结合实现绝对相位测量, 从而可以测量孤立物体. 同时对采用数字微镜的投影仪进行改造, 实现高速投影, 并与高速摄像机配合实现三维视频采集. 首先利用实时三维成像系统同时获取三维场景的彩色强度像和距离像; 然后根据这些三维成像数据, 设计和制作计算菲涅耳全息图; 最后在实时全息彩色三维显示系统中再现. 三维信息的采集和显示速度达到了 60 帧每秒.

关键词:三维成像; 条纹投影; 计算机全息; 三维显示

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20114011.1706

0 引言

全息图可以再现原始物光的空间分布, 实现逼真的三维(3D)物体重现. 全息三维显示技术是目前具有良好应用前景的真三维显示技术之一. 传统的激光全息术存在防震要求高、灵活性差等问题, 不适合用于三维显示. 而数字化的计算机全息^[1-2](Computer-Generated Hologram, CGH)克服了上述缺点, 随着电子技术的发展, 采用 CGH 的全息三维显示技术正逐渐走向实用^[3-5]. 以视频速度进行三维显示^[6-7], 实现全息电视是全息三维显示技术的发展方向之一. 常见的 CGH 主要以计算机设计的三维场景为数据源. 文献[7]提出了一种真实场景 CGH 制作方法, 采用激光三维扫描仪获得物体三维形貌和彩色表面纹理, 然后采用计算机制作真彩色彩虹全息图, 得到了较好的显示效果. 但是由于激光三维扫描仪速度较慢, 无非采集动态场景. 文献[8]设计了一种特殊的摄像机, 采用双目视觉的方法采集真实场景信息并实现了 CGH 三维显示. 双目视觉中采用特征匹配实现三维测量, 该方法对表面纹理特征不明显物体的三维信息采集比较困难.

本文提出了采用条纹投影的高速三维扫描仪以视频速度采集动态物体三维数据和表面彩色纹理, 制作彩色 CGH 并在彩色全息显示系统中实现了动态场景的彩色三维视频显示. 由于采用了主动三维测量系统, 测量数据不依赖于物体表面纹理特征, 比

双目视觉方法有更好的适应性. 实验表明该方法是可行的.

1 原理

1.1 高速三维信息及纹理获取原理

图 1 为条纹投影三维测量系统原理示意图. 由投影仪投射条纹到物体表面, 摄像机拍摄被条纹照明的物体. 通过求解拍摄图像中条纹的相位, 得到摄

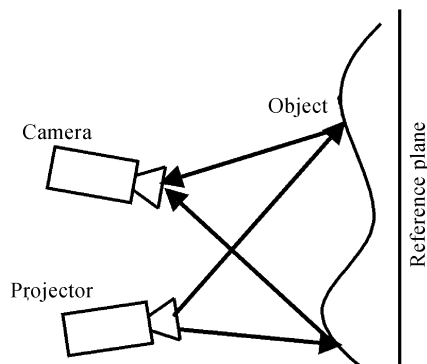


图 1 条纹投影三维测量原理

Fig. 1 Sketch diagram of 3D measurement system based on fringe projection

像机上像素点与投影仪上像素点的对应关系. 然后采用式(1)得到物体三维信息^[9]

$$\begin{cases} Z_w(u, v) = \sum_{n=0}^N k_n(u, v) \Delta \varphi^n(u, v) \\ X_w(u, v) = a_1(u, v) + b_1(u, v) Z_w(u, v) \\ Y_w(u, v) = a_2(u, v) + b_2(u, v) Z_w(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60702078) 资助

第一作者: 李勇(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学三维传感、全息三维显示. Email: liyong@zjnu.cn

收稿日期: 2011-06-14; 修回日期: 2011-08-15

式中 u, v 是摄像机像素坐标, $\Delta\varphi$ 是被测表面与参考平面的条纹相位差, a_1, a_2, b_1, b_2, k_n 为与摄像机像素坐标有关的常量. 通常 N 取 5 就可以得到足够的准确度. 为得到动态物体三维信息及纹理, 本文在条纹投影方案和测量系统硬件两方面进行了研究. 在投影方案上, 要求投射尽可能少的图案同时又能得到比较准确的三维信息及表面纹理. 为此, 采用了 π 相移正弦条纹及三值编码图案^[10], 利用相移傅里叶变换法获取条纹相位. 被条纹照明的物体图像可表示为

$$I_1(u, v) = a(u, v) + b(u, v) \cos [2\pi f_0 u + \phi(u, v)] \quad (2)$$

$$I_2(u, v) = a(u, v) - b(u, v) \cos [2\pi f_0 u + \phi(u, v)] \quad (3)$$

式中 $a(u, v)$ 为背景光照明下物体图像, 可以当作物体表面纹理, $b(u, v)$ 为条纹对比度, f_0 为条纹载频, $\phi(u, v)$ 为受物体表面高度调整产生的相位改变量. 由式(2)、(3)可知, 物体表面纹理可用式(4)求得.

$$T(u, v) = \frac{I_1(u, v) + I_2(u, v)}{2} \quad (4)$$

为得到条纹相位, 将式(2)减去式(3)得到

$$I'(u, v) = 2b(u, v) \cos [2\pi f_0 u + \phi(u, v)] \quad (5)$$

将式(5)进行傅里叶变换, 滤除负频率并逆傅里叶变换可得

$$\hat{I}_0(u, v) = b(u, v) \exp [i2\pi f_0 u + i\phi(u, v)] \quad (6)$$

则条纹的截断相位分布可以用式(7)求解

$$\varphi_w(u, v) = \arg [\hat{I}_0(u, v)] \quad (7)$$

式中 $\arg[\cdot]$ 表示求辐角运算. 由于式(7)得到的是截断相位, 无法实现摄像机与投影仪的对应点匹配. 必须将相位展开, 并得到连续的绝对相位. 为此, 本文采用了空间编码图案来确定条纹的级次. 图 2 是 π 相移正弦条纹与编码图案对应关系示意图. 编码图案中共有 3 种灰度, 并由一系列宽度与正弦条纹周期相同的竖条组成, 每条竖条最多由 2 种灰度构成. 由图中可以看到, 只有一种灰度的竖条有 3 类,

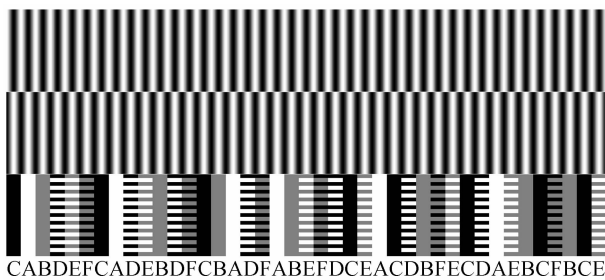


图 2 正弦条纹与编码图案

Fig. 2 Sinusoidal fringes and encoded pattern

定义为“A”、“B”和“C”; 有两种灰度的竖条也有 3 类, 定义为“D”、“E”和“F”. 这 6 类竖条按伪随机序排列, 构成了编码图案. 由于伪随机序列具有窗口特性, 即长度超过一定值(窗口长度)的子序列只在序列中出现一次. 利用这一特性可以通过子序列匹配求解竖条在编码图案中的位置来确定对应的条纹级次, 从而得到对应条纹的绝对相位. 假设条纹级次为 k , 则条纹上的绝对相位为

$$\varphi_a(u, v) = \varphi_w(u, v) + 2k\pi \quad (8)$$

在测量硬件方面, 本文对单片数字光处理(Digital Light Procession, DLP)投影仪进行了改造实现高速黑白投影. 单片 DLP 投影仪采用顺序颜色的方法实现彩色图像投影. 这种方法将一幅彩色图像的刷新周期分为 3 个时间片, 每一时间片内投影对应的红、绿或蓝三分色图像, 利用人眼的视觉暂留现象实现彩色图像投影. 因此, 单片 DLP 投影仪实际的图像刷新速度为彩色图像刷新速度的 3 倍. 本文采用白光 LED 作为投影仪光源, 将投影仪的场同步信号引出, 设计电路进行处理得到与红、绿或蓝三分色图像投影时刻对应的同步信号. 并用它控制高速 CCD 摄像机拍摄, 从而实现高速三维记录. 三维测量流程如图 3. 通常投影仪的彩色图像刷新速度为 60 fps(单色图像刷新速度为 180 fps). 本文采用高速彩色摄像机拍摄变形条纹, 一次测量需采集三幅图像. 因此采用本文提出的投影方案, 可以达到每秒 60 帧三维信息及彩色纹理的记录速度.

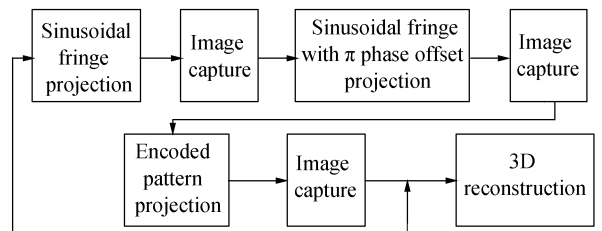


图 3 三维测量流程

Fig. 3 Measurement procedure

1.2 CGH 制作原理

获得三维信息及纹理后就可以进行 CGH 的制作. 图 4 为 CGH 制作模型. 将物体看成是一系列发

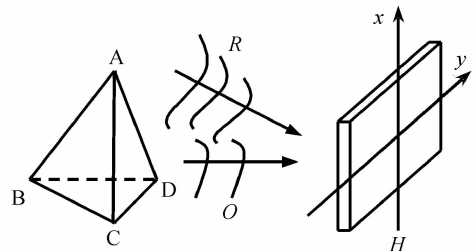


图 4 CGH 制作模型

Fig. 4 Computational model of CGH

光点的集合,则每一点所发的光在 CGH 上的分布为

$$O_i(x, y) = \frac{T(u, v)}{r_i(x, y)} \exp \left\{ j \left[\frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y) + \theta_i \right] \right\} \quad (9)$$

式中 $r_i(x, y) = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + z_i^2}$ 为物点到全息面上点 (x, y) 的距离, λ 为波长, $T(u, v)/r_i(x, y)$ 是振幅, θ_i 为初相位, 通常取随机值. 以平行光作为参考光时, 采用双极强度法计算 CGH, 则其灰度分布可表示为^[11]

$$H(x, y) = A + \sum_{i=1}^M T(u, v) \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} r_i(x, y) + \theta_i - \psi(x, y) \right\} \quad (10)$$

式中 A 为直流偏置, 使强度非负, $\psi(x, y)$ 为参考光相位, M 为场景中的总物点数. 要实现彩色显示, 只要将纹理分解成红、绿、蓝三原色图像, 根据再现时的红、绿、蓝三色激光器的波长分别计算三张 CGH 就可以了.

1.3 彩色动态全息显示系统原理

图 5 为彩色动态全息显示系统示意图. 红、绿、蓝三色激光器分别进行扩束、准直后照射到对应的三个液晶空间光调制器(Liquid Crystal Modulator, LCM)上. 经调制后的光经合色棱镜 XBOX 合色后投射到空间. LCM 由计算机控制. LCM 是一种像素离散化的光调制器件, 在 CGH 显示中 LCM 本身的结构参量对全息图的计算与再现有着重要的影响.

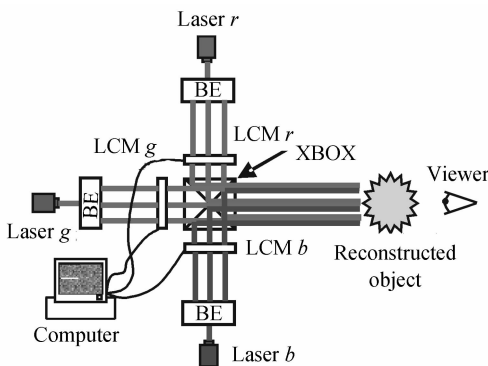


图 5 彩色动态全息三维显示系统
Fig. 5 Schematic diagram of color holographic display system

LCM 的像素间隔决定了全息图的参物夹角与物体的大小. 由采样定理可知, LCM 的像素间隔 du 决定了计算全息图时的最大参物夹角为

$$\sin \theta_{\max} = \frac{\lambda}{du} \quad (11)$$

在已经满足再现像分离的条件时, 式(11)对制作 CGH 时所选取物体的大小作了限制. 同时 LCM 本身具有光栅结构特性, 全息图再现像被调制到光栅的各个衍射级次上. 其像素间隔(相当于光栅周

期)直接影响着再现时所能有效使用的再现区域大小. 如图 6, LCM 的像素间隔为 du , 则再现像在 x 方向可能具有的线度范围 l 为

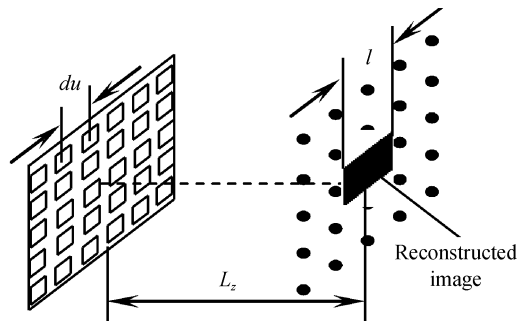


图 6 LCM 全息再现像范围示意图
Fig. 6 Space occupied by reconstructed image

$$l = \frac{\lambda L_z}{du} \quad (12)$$

因此在 CGH 计算时应根据式(11)和(12)综合考虑物体的大小与参物夹角.

LCM 的尺寸决定了全息图再现像的分辨率. 设 LCM 尺寸为 $L_x \times L_y$, 则全息图再现像的分辨率为

$$\Delta x_i = \frac{\lambda z_i}{L_x}, \Delta y_i = \frac{\lambda z_i}{L_y} \quad (13)$$

本文使用的 LCM 像素数为 $1\,920 \times 1\,080$, 像素间隔为 $8.5 \mu\text{m}$, 则其物理尺寸为 $16.3 \text{ mm} \times 9.18 \text{ mm}$. 由式(13)可知, 若再现像位于全息图 2 m 处, 其分辨率高于 0.1 mm . 由于使用激光再现, 实际中分辨率还受激光散斑的影响, 再现像分辨率低于式(13)计算结果.

2 实验及结果

本文采用改进的 DLP 投影仪和高速彩色摄像机(RMC-6740CL)搭建了高速物体三维信息及纹理采集系统. 同时对一台 3LCD 投影仪(分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$)进行了改装, 制作了彩色动态全息三维显示系统, 图 7 为该系统照片. 由于 LCM 的空间带宽积较小, 再现像不易观察, 这里采用了雾屏将再

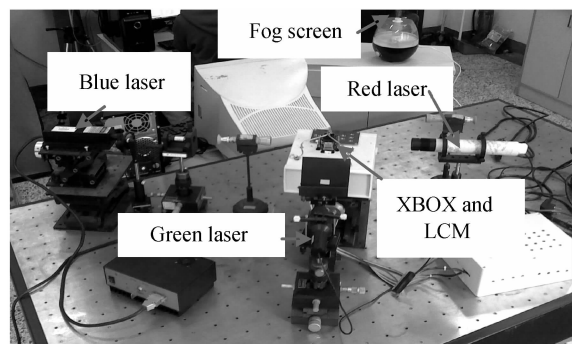


图 7 彩色动态全息三维显示系统照片
Fig. 7 Photograph of color dynamic holographic 3D display system

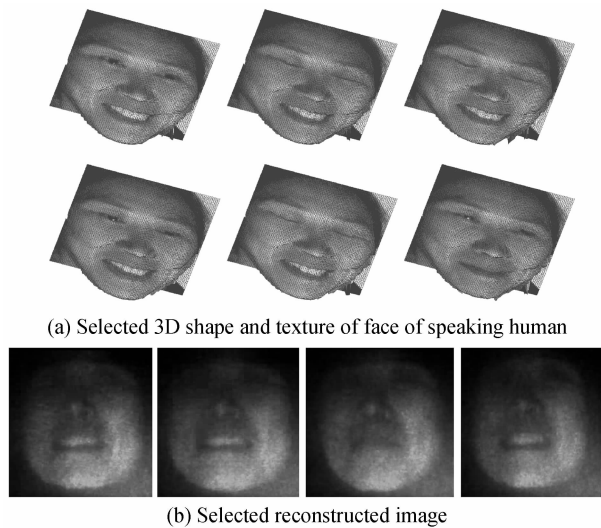


图8 人脸变化三维采集与全息三维显示

Fig. 8 3D capture and holographic display of the face change
 现光散射开,便于观察.首先利用高速三维面采集系统获取了说话过程中人脸三维形貌和纹理变化数据并制作了全息图进行动态全息三维显示实验.三

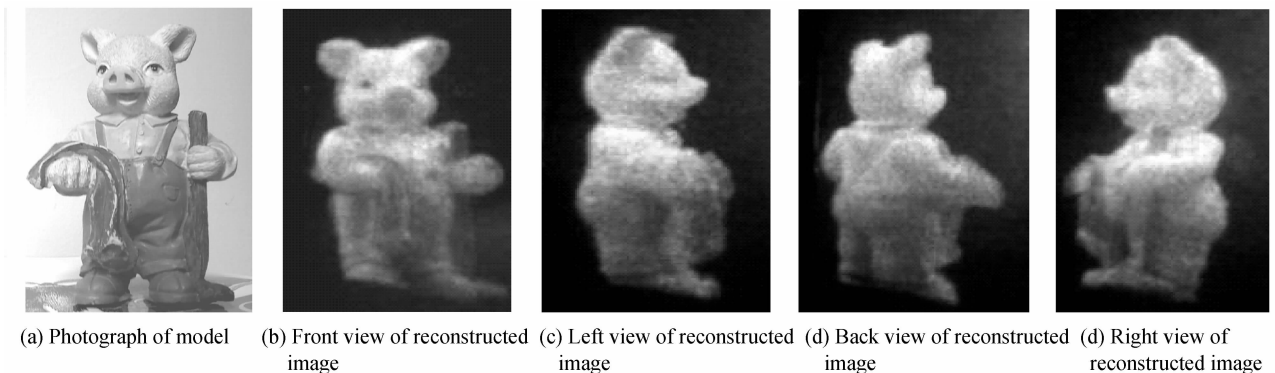


图9 模型照片及再现像

Fig. 9 Photograph of model and reconstructed images

3 结论

真实场景的动态全息彩色三维显示是 CGH 三维显示的发展趋势之一.本文对单片 DLP 投影仪进行了改装,结合彩色高速摄像机制作了高速三维信息和彩色纹理采集装置.设计了 π 相移正弦条纹加三值编码图案的投影方案,实现了真实场景信息每秒 60 帧的高速采集.同时对 3LCD 投影仪进行了改装,制作了彩色动态全息三维显示系统.利用高速三维数据采集装置采集的三维信息和彩色纹理制作了彩色 CGH,在该显示系统上实现了动态真实场景彩色全息三维显示.由于目前 LCM 的空间带宽积比较小及像素间隔比较大,全息再现像分辨较低;要实现大尺寸物体再现,再现光路比较长.另外全息图的计算速度有待进一步提高.

参考文献

[1] YATAGAI T. Three-dimensional displays using computer-

维场景信息记录速度为 60 帧每秒.图 8(a)是选取的 6 帧贴上纹理的动态三维数据.以绿光(波长为 532 nm)为参考光,以与 z 轴夹 0.8° 的角入射.由于 LCM 的像素间隔为 $8.5 \mu\text{m}$,取 $L_z = 2 \text{ m}$,根据 1.3 节分析得在 2 m 处的最大能有效使用的再现区域线度为 $6 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$.必须将原物的尺寸按比例缩小,使头像 x, y 向的大小在 $6 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$ 以内.采用双极强度计算公式算出全息图.然后以视频速度送入 LCM 显示.图 8(b)是用摄像机拍摄的四帧再现像.

另外,本文采集了转动的彩色小猪模型进行动态全息彩色三维显示实验.图 9(a)为模型的实物照片.红色参考光波长为 650 nm,绿色参考光波长为 532 nm,蓝色参考光波长为 473 nm,计算距离为 2 m,参考光入射角为 0.8° .图 9(b)~(e)分别为几个特征角度再现像的视频截图.由于摄像机灵敏度比人眼低,拍摄图像的信噪比较低,实际观看效果比视频截图清晰.

generated holograms[J]. *Optics Communications*, 1974, **12** (1):43-45.

[2] LI Yong, XU Fu-yang, JIN Hong-zhen, *et al.* A fast computation method for fresnel hologram[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 529-532.

李勇,许富洋,金洪震,等.一种非涅尔全息图的快速算法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 529-532.

[3] CHOI K, KIM J, LIM Y, *et al.* Full parallax viewing-angle enhanced computer generated holographic 3D display system using integral lens array[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(26): 10494-10502.

[4] XU Fu-yang, LI Yong, JIN Hong-zhen, *et al.* Study on Reconstruction of the Kinoform with White-light Illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 271-274.

许富洋,李勇,金洪震,等.三维场景全息图的白光再现研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2):271-274.

[5] GAO Zhi-qiang, LI Yong. Relationship of image quality of digital hologram and grey level adjustment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 327-331.

高志强,李勇.灰度调整与数字全息图像质的关系[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3):327-331.

[6] LUCENTE M, HILAIRE P S, BENTON S A, *et al.* New approaches to holographic video[C]. *SPIE*, 1992, **1732**: 377-

- 386.
- [7] YAMAGUCHI T, OKABE G, YOSHIKAWA H. Real-time image plane full-color and full-parallax holographic video display system[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**: 125801.
- [8] SHI Yi-le, WANG Hui, LI Yong, *et al.* Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(21): 4219-4226.
- [9] KIM S, HWANG D, LEE D, *et al.* Computer-generated holograms of a real three-dimensional object based on stereoscopic video images[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(22): 5669-5676.
- [10] LI Yong, SU Xian-yu, WU Qing-yang. Accurate phase - height mapping algorithm for PMP[J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, **53**(14): 1955-1964.
- [11] LI Yong, ZHAO Cui-fang, QIAN Yi-xian, *et al.* High-speed and dense three-dimensional surface acquisition using defocused binary patterns for spatially isolated objects[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(21): 21635-21642.
- [12] LUCENTE M. Interactive computation of holograms using a look-up table[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, **2**(1): 28-34.

Three-dimensional Capture and Display of Real Scene with Video Speed

LI Yong¹, LU Shi-jiang¹, SONG Fang², GAO Zhi-qiang¹, JIN Hong-zhen¹, WANG Hui¹

(1 *Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China*)

(2 *Institute of Command and Technology, PLA, Beijing 101416, China*)

Abstract: An approach for capture and display three-dimensional real scene with video speed was proposed. A real-time three-dimensional imaging system using fringe projection was designed. And a real-time color holographic display system using liquid crystal spatial light modulator was designed. Two fringe patterns with phase shift π and an encoding pattern were adopted in 3D imaging system. Absolute phase was obtained and isolated objects could be measured. A high speed projector was obtained by modifying a projector using digital micromirror device. Three-dimensional capture with video speed was realized by combining the modified projector and high speed camera. The color image and range image of three-dimensional scene was captured with the proposed three-dimensional imaging system. Then, Fresnel holograms were produced with these three-dimensional data. Finally, color three-dimensional images were reconstructed with proposed display system. The speed of capture and display reaches 60 fps.

Key words: Three-dimensional imaging; Fringe projection; Computer-Generated Hologram(CGH); Three-dimensional display