

文章编号 : 0253-2239(2002)08-0994-05

一种新型彩色三维光学成像系统*

张宗华 彭 翔 胡小唐

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 提出一种新型三维彩色光学数字成像系统。此系统利用投影结构光对现实世界中的物体进行数字化, 同时得到对应的彩色纹理。详细介绍了系统的硬件设计和软件体系结构设计, 得到物体彩色纹理的两种不同方法: 直接获取和从编码条纹中提取, 给出了用该系统得到的实验结果并简单评价了系统的性能。此系统在反求工程、影视制作、三维游戏制作、医学应用等方面有远大的应用前景。

关键词: 数字成像系统; 深度图像; 彩色纹理

中图分类号: TN863 文献标识码: A

1 引 言

20 世纪 80 年代以来, 计算机技术的飞速发展, 产生了计算机辅助光学三维数字成像技术, 由于这种技术具有快速、非接触、高精度、自动化等优点, 越来越受到各方面的重视和应用^[1,2]。

基于光学三维测量技术的常见方法有^[3]: 成像雷达、干涉测量、光学三角化和结构光^[4~6]等。其中, 结构光方法是把特定模式的光投影到物体表面, 从成像系统看到的光模式将由于物体表面高度的变化而不同, 即受到调制, 解调含有光模式的图像, 可得到和物体表面高度相对应的深度图像。此方法只需采集一幅图像即得到物体某方向的深度图像, 因此在实验研究和工业生产中得到广泛应用。结构光方法中, 由于光栅直条纹方法在处理上的方便和利用相位计算得到高精度的测量结果而被广泛采用^[7~9]。我们成功开发出基于白光数字莫尔的三维数字成像系统^[10], 并对此系统进行了大量的研究工作^[11~14]。最近, 作者又开发出一种彩色三维光学数字化成像及造型系统, 利用此系统可同时得到物体的三维数字图像(深度图像)和彩色纹理, 拓宽三维数字化技术的应用领域。

全文组织如下: 首先简述彩色三维数字化系统的整体结构设计; 第三部分分析系统对应的软件体系结构, 阐述获得物体深度图像所对应纹理图像的

两种方法; 第四部分给出实验结果并简单评价系统的性能; 第五部分简单说明系统在各个领域的应用; 最后对全文进行总结并指出进一步的研究工作。

2 结构设计

三维数字成像系统的原理是把光栅直条纹投影到物体表面, 受物体表面形状调制, 其变形光场可表示为:

$$I(x, y) = r(x, y) \times \left\{ a(x, y) + b(x, y) \cos \left[\frac{2\pi}{P_0} x + \Delta\varphi(x, y) \right] \right\} \quad (1)$$

其中, $r(x, y)$ 为与物体表面反射率有关的参数, $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 为条纹对比度, P_0 为条纹周期, $\Delta\varphi(x, y)$ 为与物体表面形状相关联的相位因子。

用傅里叶变换的方法计算相位并利用基于混合模板的相位复原技术可获得连续的相位分布。连续的相位分布和物体表面各点相对高度之间的关系由系统的结构参数确定, 标定系统的光学结构参数, 从而可求得待测物体的三维数字像^[10,12]。在本文系统中, 用彩色 CCD 摄像机和彩色图像采集卡对表面投影光栅条纹的物体采集时, (1) 式中的光场对应红、绿、蓝三个分量, 分别用 $I_r(x, y)$, $I_g(x, y)$, $I_b(x, y)$ 表示, 相位计算需用条纹的亮度信息。根据从彩色图像提取亮度的方法得到条纹图像中每个像素点对应的亮度信息 $I_c(x, y)$ 为:

$$I_c(x, y) = 0.28I_r(x, y) + 0.5I_g(x, y) + 0.22I_b(x, y). \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(69875013)和中国博士后科学基金资助课题。

E-mail: xpeng@tju.edu.cn

收稿日期: 2001-08-13; 收到修改稿日期: 2001-10-04

对亮度信息 $I_c(x, y)$ 进行相位计算即可得到物体的三维数字像,其方法和文献[10]中相同。彩色三维光学数字化系统如图 1 所示,主要由投影和成像两部分组成。此外还包括用于控制采集调制图像和纹理图像的控制单元。

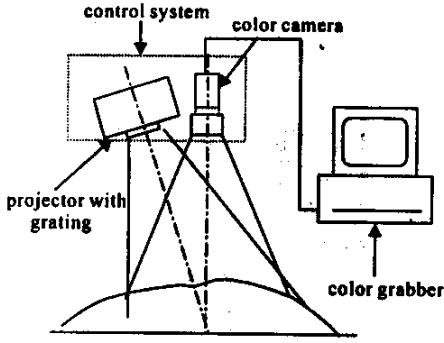


Fig.1 Schematic diagram of setup

2.1 投影系统

投影系统由非相干光投影单元和特殊设计的正弦光栅组成,投影单元的焦距事先确定。此部分的功能是产生平行光栅直条纹并把此条纹投影到物体表面。

2.2 成像系统

成像系统由彩色 CCD 摄像机、成像镜头、彩色图像采集卡和计算机组成。为得到较清晰和准确的图像,采用具有高图像分辨率和大感光像素总数的 CCD(日本 JVC),靶面感光面积:7.95 mm × 6.45 mm,靶面上有效感光像素数:752(H) × 582(V),由此可计算出每个感光单元的尺寸:10.57 μm(H) × 11.08 μm(V)。根据系统总体设计要求,待测物体与成像系统单元的距离(工作距离)拟设定在 1.2 m ~ 1.6 m 左右的范围内,待测物体的横向尺寸在 0.1 m ~ 0.5 m 之间。经过简单的光学计算,应该给 CCD 摄像机配置 12.7 mm(1/2 英寸)焦距范围为 8 mm ~ 48 mm 的六倍三可变镜头以满足设计要求。

3 软件体系结构

3.1 软件体系结构

系统除完成对原始条纹图像采集和通过一系列计算得到物体的三维数字图像外,还要具有以不同方式实时快速显示三维数字图像的功能,具体包括:点、网格、着色和纹理的显示,此外还要考虑以后对软件功能的升级和扩充等。因此,对软件的设计应该满足以下要求:

- 1) 友好的交互式图形界面,易于操作使用;
- 2) 快速处理数据,实时显示图像;
- 3) 管理程序代码简单容易,便于以后对系统功能升级。

微软公司最近推出的 Visual C++ 6.0 编程工具除满足上述要求外,在内存管理、资源管理、动态链接库(DLL)、多线程编程等方面都进行了大量基础研究工作,形成微软基础类库(MFC),在很大程度上屏蔽了隐藏在上层应用程序背后编程的复杂性。因此,利用 Visual C++ 6.0 来开发三维成像系统的软件系统。根据系统对物体采集、重建和显示的要求,建立如图 2 所示的软件体系结构。其中,编码条纹图采集类、三维编码解调重建类、空间坐标映射及模型建立类是应用软件系统中三个主要的定制类,分别完成图像采集、重建、坐标映射和显示功能。这三个定制类间需要大量的数据交换,这种交换通过中间文档类实现,具体方法是在文档类中分别声明这三个定制类各自的对象,再通过对象建立不同类之间的数据交换。

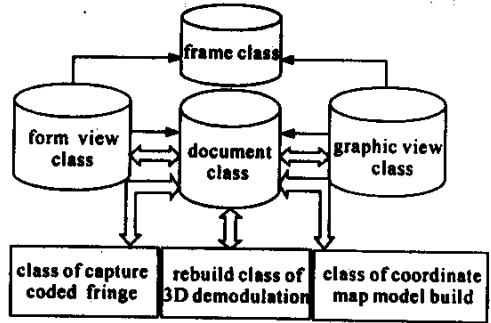


Fig.2 Basic structure of applied software system

3.2 彩色纹理的获取

利用本系统,除可得到物体的深度信息,还可用两种不同的方法得到深度图像对应的纹理图像。

一种方法是从原始编码条纹图像中提取出相应的纹理图像。原始条纹图像光场中每个像素由红、绿、蓝三分量 $I_r(x, y), I_g(x, y), I_b(x, y)$ 组成,每个分量可表示成(1)式的形式。为便于说明问题,把(1)式改写为:

$$I(x, y) = A(x, y) + \alpha(x, y) \exp\left(i \frac{2\pi}{P_0} x\right) + C^*(x, y) \exp\left(i \frac{2\pi}{P_0} x\right), \quad (3)$$

其中,

$$A(x, y) = r(x, y) a(x, y),$$

$$\alpha(x, y) = \frac{1}{2} r(x, y) b(x, y) \exp[i \Delta \varphi(x, y)],$$

$C^*(x, y)$ 是 $A(x, y)$ 的复共轭。对(3)式进行二维傅里叶变换：

$$\mathcal{F}\{f_x, f_y\} = \mathcal{A}\{f_x, f_y\} + \mathcal{A}\{f_x - f_0, f_y\} + \mathcal{C}\{f_x + f_0, f_y\}, \quad (4)$$

\mathcal{A}, \mathcal{C} 表示 I, A, C 的空间频谱, f_x, f_y 为频域中 x, y 方向的空间频域坐标, $f_0 = 1/P_0$ 。由(4)式可知, 得到的频谱分为三个部分, 如图3, $\mathcal{A}\{f_x - f_0, f_y\}$ 与 $\mathcal{C}\{f_x + f_0, f_y\}$ 对应频谱图中的 $+1, -1$ 级谱, 包含着相位 $\Delta\varphi(x, y)$ 信息, $\mathcal{A}\{f_x, f_y\}$ 为物体表面纹理对应的频谱。通过低通滤波器 $\text{LPF}[\cdot]$ 滤掉高频信息, 提取出功率谱中的低频信息, 则对(4)式滤波后的结果可表示为：

$$\text{LPF}[\mathcal{F}\{f_x, f_y\}] = \mathcal{A}\{f_x, f_y\}, \quad (5)$$

对(5)式进行傅里叶反变换即可从原始条纹图中提取出物体表面的纹理信息。

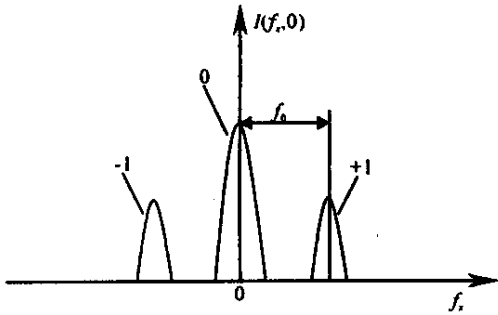


Fig.3 Frequency spectra of deformed fringe

本系统原始条纹图像的每个像素由三部分： $I_r(x, y), I_g(x, y), I_b(x, y)$ 组成, 代表像素的红、绿、蓝分量。对这三个分量按照上述方法进行处理, 得到不包含条纹信息的纹理图像, 分别设为： $T_r(x, y), T_g(x, y), T_b(x, y)$ 。重新组合变换后的图像, 即各个位置点的颜色分量信息由变换后图像相应位置点的颜色信息 $T_r(x, y), T_g(x, y), T_b(x, y)$ 组成, 即可完成从原始条纹图像中提取出彩色的纹理图像。

由于从同一幅调制图像中提取深度信息和纹理信息, 得到的深度图像和纹理图像间存在着精确的对应关系。同时, 由于只需采集一幅图像, 使得此方法适用于采集活性物体, 例如人体。但此方法的一个缺点是: 从调制图像中提取纹理, 得到的纹理图像不真实。图4是从原始条纹图中提取得到的纹理图像, 其中图4(a)是系统采集的包含变形条纹信息的图像, 图4(b)是经过上述方法处理后得到的纹理图像。

另外一种获取纹理的方法是用一个摄像机分别

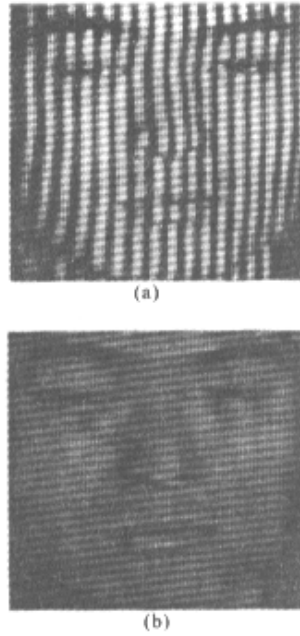


Fig.4 Texture extracted from deformed fringe image. (a) Deformed fringe image; (b) Texture extracted from (a)

采集纹理图像和调制图像, 即顺次采集两幅图像, 得到物体的纹理信息和深度信息。其方法是首先采集结构光照明下物体表面投影条纹的图像, 然后采集环境光照明下的相应图像。在采集两幅图像期间, 如果保证物体和采集设备间相对静止, 那么深度图像和纹理图像间也是精确的对应关系。利用此种方法虽然得到较真实的纹理图像, 但由于不是同时获得纹理信息和深度信息, 它们间的对应关系可能存在一定的偏差。图5所示是关闭投影系统以后, 由系统直接采集得到的纹理图像。和图4所得到的纹理图像相比较, 图像更清晰, 色彩也更真实。



Fig.5 Captured texture

在实际应用中, 根据所采集对象和具体要求来选择使用哪种方法。

4 实验结果和性能分析

利用本系统对人体面部进行数字化, 采集到的

原始条纹图像和直接采集到的纹理图像如图 4(a) 和图 5 所示。

经过软件系统处理得到的结果如图 6 所示, 此图是从视角 $x = -4^\circ$, $y = -39^\circ$ 透视投影观察到的结果。图 6(c) 是从调制图像中提取出的纹理, 图 6(d) 是直接采集得到的纹理。

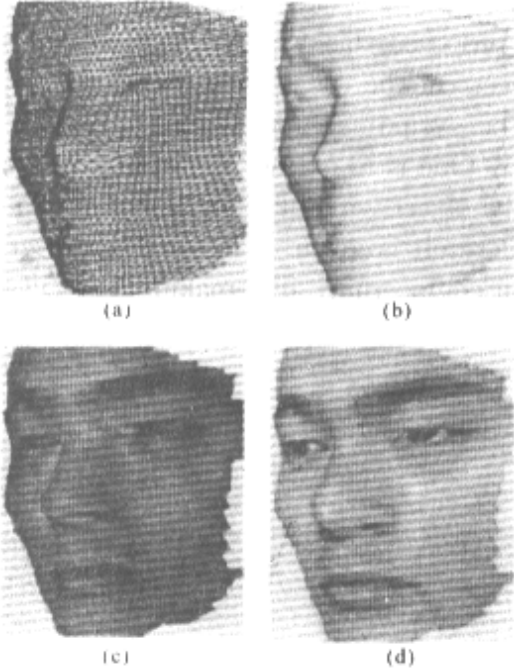


Fig. 6 Display of view angle $x = -4$, $y = -39$. (a) Mesh; (b) Shading; (c) Texture; (d) Texture

系统运行的环境是桌面机(Pentium II 350, 内存是 128 M) 处理时间是 20 s 左右。利用文献 [12] 中提出的方法对系统进行了简单标定, 平均相对误差可达到 0.7536%。

5 应用领域

三维光学数字成像系统可快速、便捷地得到物体三维实体造型, 满足了相关行业的需求。如制造业中的反求工程, 工程师可以利用已有实物快速设计出新型模具, 满足快速响应的要求, 高精度的三维数字化技术将从根本上改变工业检测技术和质量控制, 具有为制造过程提供实时反馈的能力, 影视业和娱乐业可利用三维数字像在商业影视、游戏中产生大量的特殊效果, 在医学中, 可将三维数字成像用于获取人体骨骼和人体面部特征, 从而推动假肢制造和人体美容业的发展。

结论 本文提出了一种新型彩色三维光学数字成像

系统, 同时得到物体的数字化图像和对应的彩色纹理图像, 从而拓宽了三维数字化系统的应用范围。有关此系统更进一步的工作, 如对此系统更加有效的标定方法和彩色纹理的合成等, 正在研究之中。

参 考 文 献

- [1] Petrov M, Talapov A, Robertson T. Optical 3D digitizers: bringing life to the virtual world. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1998, **18**(5/6): 28~37
- [2] Borghese N A, Ferrigno G, Baroni G. Autoscan: A flexible and portable 3D scanner. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1998, **18**(5/6): 38~41
- [3] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- [4] Sansoni G, Carocci M, Rodella R. 3D vision based on the combination of gray code and phase shift light projection. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- [5] Sjudahl M, Synnergren P. Measurement of shape by using projected random pattern and temporal digital speckle photography. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(10): 1990~1997
- [6] Sansoni G, Corini S, Lazzari S. Three dimensional imaging based on gray-code light projection: Characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial application. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(23): 4463~4472
- [7] Windecker R, Tiziani H J. Topometry of technical and biological objects by fringe projection. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(19): 3644~3649
- [8] Yang Z, Wang Y F. Error analysis of 3D shape construction from structured lighting. *Pattern Recognition*, 1996, **29**(2): 189~206
- [9] Caspi D, Kiryati N, Shamir J. Range imaging with adaptive color structured light. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1998, **20**(5): 470~480
- [10] Peng Xiang, Zhang Zonghua, Zhu Shaoming et al.. 3D digital imaging system based on white-light digital Moire. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(10): 1401~1405(in Chinese)
- [11] Peng Xiang, Zhang Zonghua, Zhu Shaoming et al.. An analytical approximation model for 3D digital image. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(11): 1571~1575(in Chinese)
- [12] Zhang Zonghua, Peng Xiang, Shi Weiqiang et al.. The research on calibration of the object's 3D phase map. *Chinese J. Scientific Instruments*(仪器仪表学报), 2000, **21**(5): 555~558(in Chinese)
- [13] Zhang Zonghua, Peng Xiang, Hu Xiaotang. Intergrating range images by MSL and SSL. *J. Engng. Graphics*(工程图学报), 2001, **22**(2): 102~109(in Chinese)
- [14] Zhang Zonghua, Peng Xiang, Shi Weiqiang et al.. A new method for multi-view range image fusion. *Proc. SPIE*, 2000, **4221**: 115~119

A New Color 3-D Optical Imaging System

Zhang Zonghua Peng Xiang Hu Xiaotang

(*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments ,
Tianjin University , Tianjin 300072*)

(Received 13 August 2001 ; revised 4 October 2001)

Abstract : A new type of 3-D digital imaging system is proposed. Using this system , the shape of an object can be digitized and the texture of this object can be obtained simultaneously. The hardware design and software framework design of the system are described in detail. Two methods to get the color texture of object are introduced. One is to extract from the coded fringe pattern ; the other is directly to capture the texture of the object without fringe pattern. The 3-D digital image made on a human face as an experimental result is given. The system has great a potential in many industrial applications such as reverse engineering , film-making , CAD/CAM , virtual reality , biomedical imaging , etc.

Key words : 3-D digital imaging ; machine vision ; color texture