

一种基于结构光的牙齿三维测量系统

欧攀 王婷* 李瑞祥

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 提出了一种基于结构光的牙齿三维轮廓测量系统。该系统由电荷耦合器件(CCD)相机和数字光处理(DLP) 4500 投影模块组成。采用格雷码与相移法结合的投影方法。基于张正友标定法提出一种快速、精确的相机与投影仪联合标定的方法。在系统标定的基础上进行牙模扫描实验,得到了牙模三维点云轮廓。实验结果表明,该系统能够对牙模进行精确的三维测量,为其以后在牙科领域的应用奠定基础。

关键词 成像系统; 三维测量; 投影仪-相机联合标定; 格雷码-相移编码; 牙齿

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.011102

A Three-Dimensional Teeth Measurement System Based on Structured Light

Ou Pan Wang Ting Li Ruixiang

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract A three-dimensional tooth profile measurement system based on projected structured light is presented. The system consists of a CCD (charge coupled device) camera and a DLP (digital light processing) 4500 projection module, combining Gray code and phase shifting fringe projection. A fast and accurate calibration method of camera and projector based on the calibration method proposed by Zhang Zhengyou is presented. Based on the system calibration, dental mold scanning experiments are performed to obtain a three-dimensional point cloud contour of dental wax. The experimental result shows that the system is capable of measuring the three-dimensional dental mold accurately, which provides a basis for the further application in the dental field.

Key words imaging systems; three-dimensional measurement; camera and projector calibration; Gray code and phase shifting coding; teeth

OCIS codes 110.6880; 120.6650; 150.1488; 150.1135

1 引言

用传统方法设计和制作假牙非常复杂,牙科技师需要准备蜡诊断模型,经过患者咬模得到投资模具。倒入恢复性材料(金属、树脂、陶瓷等)得到模具,制作牙冠、牙桥、局部义齿或全口义齿。所有工序基本全手工制作,很大程度上依赖于牙科技师的技术,加工工艺繁琐,制作效率低。牙病患者就诊次数多、时间长,给牙病患者带来了诸多不便。

相对于传统方法,非接触式的光学三维测量方法极大地缩短了测量时间,能够提供更精确的数字计算机辅助设计(CAD)牙齿模型,同时便于模型管理、记录^[1]。常用的光学三维测量方法有激光扫描,双目视觉、时间飞行(TOF)和结构光。激光三维测量技术具有测点精度高、测点密度大等优点,但是成本比较高,测量速度慢,不适合测量动态场景,而且容易对人或者动物的眼睛造成伤害^[2]。TOF相机不受物体表面灰度和特征影响,可以非常准确地进行三维探测,且深度计算精度不随距离的改变而变化,但是目前TOF相机分辨率较低,成本较高,所以尚未得到广泛使用^[3]。双目视觉系统精度较高且成本较低,但是双目图像匹配的运算量非常大,比较耗时^[4]。在结构光三维重构系统中,由于引入了投影仪,通过投射不同的图案可以使得匹配问题变得非常简单。

收稿日期: 2015-07-15; 收到修改稿日期: 2015-08-03; 网络出版日期: 2015-12-28

作者简介: 欧攀(1977—),男,博士,副教授,主要从事3D扫描成像、光纤激光器、光纤传感器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: oupan@buaa.edu.cn

*通信联系人。 E-mail: wangtingood@163.com

对相机捕捉到的投影图案进行分析、解码,从而建立起投影仪和相机图像之间的像素点对应关系。根据已知结构光三维成像系统的标定数据,即可用与双目视觉相同的方法计算出三维信息,且测量精度高^[5]。

本文介绍了一种基于结构光的牙齿三维测量系统,该系统由计算机、电荷耦合器件(CCD)相机、数字光处理(DLP)4500投影模块组成。在张正友标定法的基础上,用离散点阵图作为标定板并使用DLP投影仪投射点阵图,与现有的方法相比简化了标定步骤和解码算法,加快标定速度,同时降低了传统棋盘格标定板由于反射DLP投影仪投射点阵图不均匀而引起的误差,因此该标定方法提高了DLP投影仪-相机联合标定的精度。投影仪投射格雷码-相移编码图案到扫描物体上,相机在另一角度采集包含物体轮廓信息的图像。通过解算采集到的图像,重建出物体表面的三维轮廓。利用该系统对牙模进行三维测量,得到精确的牙模三维轮廓。

2 格雷码-相移编码原理

相移法是采用一系列的相移余弦图案照射场景,在这样的模式中强度分布可以表示为^[6]

$$I_n(x,y) = I_0(x,y) \left[1 + R(x,y) \cos \left(2\pi \frac{N}{w} x + n \frac{2\pi}{K} \right) \right], \quad (1)$$

式中 I_0 为背景照明, $R(x,y)$ 为物体表面每个点的反射率, N 为条纹的数目, w 为用像素表示的条纹宽度, K 为相移次数。该测量系统使用了5步相移法。由(1)式可以得到相位分布:

$$\phi(x,y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^5 I_n(x,y) \sin(2n\pi/5)}{\sum_{n=1}^5 I_n(x,y) \cos(2n\pi/5)} \right]. \quad (2)$$

因为背景光强 $I_0(x,y)$ 和表面反射率 $R(x,y)$ 相抵消,所以相位 $\phi(x,y)$ 只与光强的比值有关^[7]。由(2)式获得的相位在区间 $[0, 2\pi]$ 上,因此 $\phi(x,y)$ 仅分段连续,是折叠相位。相移法适用于表面光滑的物体,且需要满足高信噪比才能获得物体轮廓信息。而且当 $\Delta\phi > 2\pi$ 时,采用相移法将无法测量到物体表面的高度信息。

为了满足相位展开的需要,需要在视场中能够识别每个条纹。格雷码可以给每个相移条纹一个二进制编码。相移周期与格雷码条纹宽度相等,那么格雷码投影序列会给每一个相移周期一个二进制编码,而每个二进制码又对应一个十进制数值 k ,因此由扫描物体上的折叠相位分布可以得到绝对相位分布^[8]:

$$\Phi(x,y) = \phi(x,y) + 2k\pi. \quad (3)$$

得到绝对相位分布后,采用相位-高度转换算法得到物体的三维信息^[9]。

3 DLP 投影仪-相机联合标定

系统标定是三维测量系统的关键步骤。吴庆阳等^[10]利用棋盘格标定板,实现线结构光双摄像机系统的标定,但是这些标定方法均不涉及投影仪的标定。目前对相机和投影仪的标定技术, Merner 等^[11]只做相机的标准标定,据此能计算出物体上一点的 X 坐标和 Y 坐标,而 Z 坐标的值由高度与相位的多项式关系得到。由于多项式拟合是近似拟合而且过程复杂,行编码投射相移条纹到标定板上, CCD 相机采集标定板的相移条纹,解码相位分布,建立 CCD 阵元与数据微镜装置(DMD)阵元之间的对应关系,从而可以从相机图像推知从 DMD 观察到的物体图像,使用标准的相机标定程序来做 DLP 投影仪的标定^[12]。在该方法中,使用的标定板不是常用的黑白色棋盘格型标定板,而是彩色棋盘格标定板,这样利于投影仪投射的相移条纹的反射。由于投射 X 和 Y 方向的相移条纹和解码相位分布算法复杂,因此这种方法速度也比较慢。

提出的 DLP 投影仪-相机联合标定的原理如图 1 所示。首先由投影仪投射白光图像到标定板,相机采集标定板图像,投影仪再投射点阵图像到标定板,相机同样采集标定板图像。之后,变换标定板位置,重复以上操作,得到两组图像。一组是在投影仪投射白光条件下获取的,用于相机的标定。另一组是在投影仪投射点阵图条件下获取的,利用点阵对投影仪的 DMD 阵列进行编码,并在相机标定的基础上利用该组图像标定投影仪。投影仪投射的点阵的世界坐标由第二组图像结合相机标定结果计算得到。

在投影仪投射白光的情况下,相机采集得到的标定板图像如图 2(a)所示。在标定板上建立坐标系,这样标定板上黑点的世界坐标 \vec{M} 就已知。由张正友标定法^[13]可知 $s\vec{m} = A[R, T]\vec{M}$, 根据图 2(a)获取标定板上黑点所对应的图像坐标 \vec{m} , 即可求得相机标定的内部参数与外部参数。

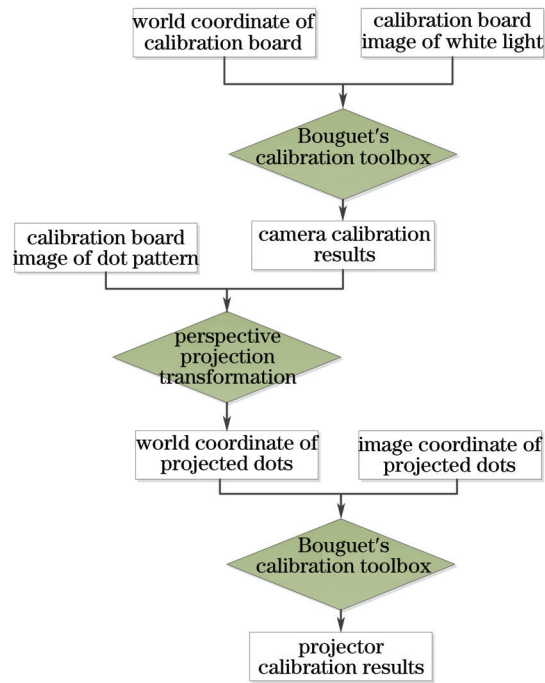


图1 相机-投影仪联合标定原理图

Fig.1 Joint calibration of camera and DLP projector

首先对图2(a)进行全局二值化处理,再取反得到的图像如图2(b)所示。图2(b)中有很多连通域,每一个小亮点是一个小的连通域,每个小亮点对应标定板上一点。两边的白色区域也是一个连通域。黑色背景也是一个连通域。用图像处理的方法,获得每一个连通域的几何中心和连通域面积,并给每一个连通域一个数值标签值,根据连通域的数值标签值画图,灰度值代表其数值标签值,如图2(c)所示。

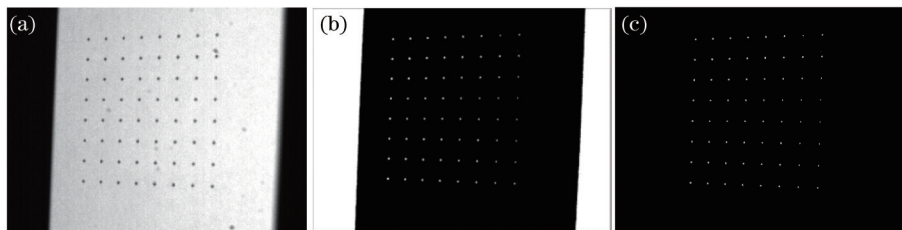


图2 (a) 相机采集标定板图像; (b) 图像二值化处理; (c) 数值标签值画图

Fig.2 (a) White light image; (b) image binarization; (c) numerical label image of connected regions

获取标定板每一个点对应的图像坐标就是获取图2(c)每一个小亮点区域的几何中心。利用图像处理的方法^[14],最终可以确定所有点阵对应的图像坐标 \tilde{m} 。得到点阵的图像坐标后,使用Bouguet教授的标定工具包^[15],完成相机的标定,得到相机的内部参数和外部参数。

图3(a)是某位置标定板重投影结果,图3(b)是相机标定的重投影误差分布图,沿 x, y 方向的点分布均方

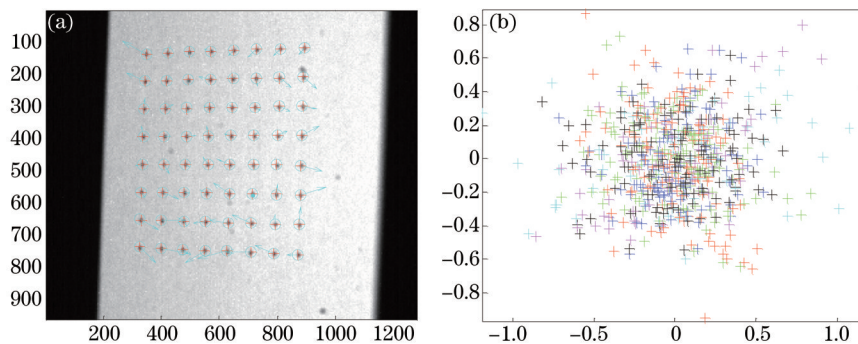


图3 (a) 标定板重投影结果; (b) 相机标定的重投影误差分布图

Fig.3 (a) Reprojection result of calibration board; (b) reprojection error of camera

差分别为 $\sigma_x = 0.30752, \sigma_y = 0.26292$ 。

投影仪可以视为逆摄像机。由光路可逆原理,投影仪原理可以用针孔成像模型说明,也可采用上述标定方法对其进行标定。投影仪投射点阵图案时,相机采集的图案如图4(a)所示。可以看出离散点的位置非常清晰,相比于传统棋盘格标定板,降低了反射不均匀带来的误差。图4(b)是投影仪标定的重投影误差分布图,沿 x, y 方向的点分布均方差分别为 $\sigma_x = 0.33744, \sigma_y = 0.19413$ 。

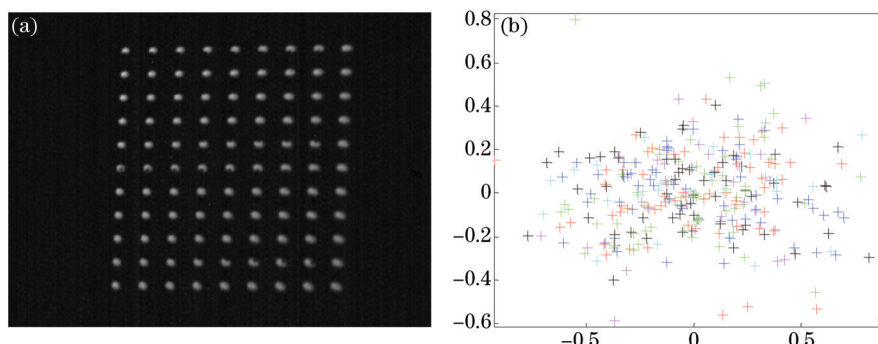


图4 (a) DLP 投射点阵图案到标定板得到的图像; (b) 投影仪标定的重投影误差分布图

Fig.4 (a) Calibration board image of dot pattern; (b) reprojection error of projector

由标定结果可知,DLP 投影仪-相机联合标定误差较小,精度满足系统的需求。该标定方法用离散点阵图作为标定板和 DLP 投影仪投射点阵图,由于采用了离散点阵图作为标定板和 DLP 投影仪投射点阵图,这种方法不需要用两种正交方向的相移条纹来标定 DMD 芯片与 CCD 芯片之间的对应关系,只需要向不同位置的标定板投影点阵图案并成像即可,标定速度与文献[11-12]中的方法相比有很大程度的提升,同时降低了传统棋盘格标定板由于反射 DLP 投影仪投射点阵图不均匀引起的误差,因此该标定方法提高了 DLP 投影仪-相机联合标定的精度。

4 实验结果与分析

实验所使用的测量物体是一部分牙模。牙模包括牙龈部分和牙冠部分,与人体牙齿结构相近。该部分牙模包括 4 个牙齿,生理结构上,这 4 颗牙齿位于磨牙区。实验时,通过 DLP4500 模块的图形用户界面(GUI)操作,开始投影结构光。DLP4500 按照设定的方式投射格雷码图案和相移图案序列,同时触发 CCD 相机采集,得到一系列扫描图像。对格雷码图像进行解码后,得到的条纹十进制编码图像如图 5(a)所示。图中每个条纹都对应一个十进制数值,代表该条纹的位置。经 5 步相移法解码得到的折叠相位分布如图 5(b)所示,相位周期与格雷码条纹一一对应。根据二者的对应关系,可以将折叠相位展开,得到绝对相位分布,如图 5(c)所示。得到绝对相位分布后,结合 DLP 投影仪-相机标定结果,根据三角原理^[10]计算得到牙模的重建三维轮廓如图 6 所示。在三维重建轮廓中,能看到牙模的一些特征,包括牙齿咬合面的沟、窝,以及外侧的一部分牙龈。



图5 (a) 格雷码解码条纹图像; (b) 牙模折叠相位; (c) 绝对相位分布

Fig.5 (a) Decoding of Gray code fringe pattern; (b) wrapped phase; (c) unwrapped phase

图 6 中, Z 坐标是牙模上一点与参考面的距离。实验时,牙模粘在一个小平台上,该平台距参考面有一定距离。经过测量,扫描结果基本符合牙模高度,各点测量结果与扫描结果相差在 0.1 mm 以内。

5 结 论

提出了一种基于结构光的牙齿三维测量系统。采用相移-格雷码结合的投影方法,基于张正友标定法

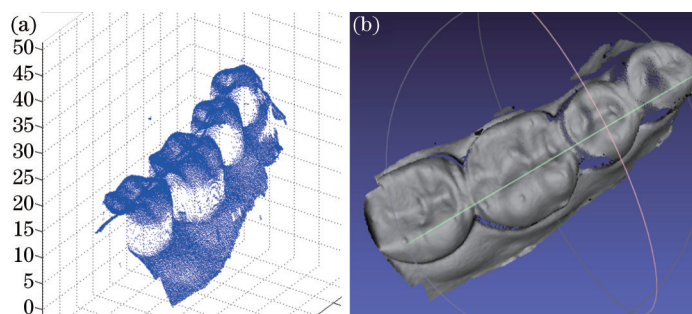


图6 (a) Matlab软件中显示牙模点云图; (b) Meshlab软件中显示牙模点云图

Fig.6 Point clouds of teeth model. (a) In Matlab; (b) in Meshlab

提出了点阵图作为标定板并使用DLP投射点阵图的联合标定方法。与现有的方法相比简化了标定步骤和解码算法,同时降低了传统棋盘格标定板由于反射DLP投影仪投射点阵图不均匀引起的误差,因此该标定方法提高了DLP投影仪-相机标定的速度和精度。实验结果表明,该系统能够进行牙模的精确三维测量,且测量误差小于0.1 mm。系统现在只能进行单个角度的三维扫描,不能提供牙模完整的三维扫描轮廓。在今后的工作中,需要完善扫描方法,减少相位解调误差,实现多角度扫描轮廓的拼接。该系统为其以后在牙科领域的应用奠定基础。

参考文献

- 1 Adaškevičius R, Vasiliauskas A. 3D multicamera dental cast scanning system[J]. *Electronics and Electrical Engineering*, 2015, 82(2): 49-52.
- 2 Gao Yan, Shao Shuangyun, Feng Qibo. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708005.
高岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708005.
- 3 Nielsen T, Bormann T, Wolbeck S, *et al.*. Time-of-light analysis of flight pulses with a temporal resolution of 100 ps[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67(5): 1721-1724.
- 4 Dang Le. Study on 3D Reconstruction Method Based on Binocular Stereo Vision[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
党乐. 基于双目立体视觉的三维重建方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- 5 Geng J. Structured-light 3D surface imaging: A tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- 6 Skotheim Ø, Couwelleers F. Structured light projection for accurate 3D shape determination[C]. *12th International Conference on Experimental Mechanics*, 2004: 29.
- 7 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Structured light imaging technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- 8 Sansoni G, Carocci M, Rodella R. Three-dimensional vision based on a combination of Gray-code and phase-shift light projection: Analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- 9 Zhang C, Huang P S, Chiang F P. Microscopic phase-shifting profilometry based on digital micromirror device technology [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(28): 5896-5904.
- 10 Lu Jin, Sun Huibin, Chang Zhiyong. A novel method for camera calibration with orthogonal vanishing points[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0208001.
卢津, 孙惠斌, 常智勇. 新型正交消隐点的摄像机标定方法[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0208001.
- 11 Merner L, Wang Y, Zhang S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(5): 514-519.
- 12 Zhang S, Huang P S. Novel method for structured light system calibration[J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.
- 13 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- 14 Ruan Qiuqi. *Digital Image Processing*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007.
阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- 15 Bouguet J Y. Pyramidal implementation of the affine Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm[R/OL]. Intel Corporation, 2000. http://robots.stanford.edu/cs223b04/algo_tracking.pdf
- 16 Creath K. Phase-measurement interferometry techniques[J]. *Progress in Optics*, 1988, 16: 351-393.

栏目编辑: 吴秀娟