

基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法

邢威, 张福民, 冯维, 曲兴华

天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 在投影结构光的三维形貌测量方法中,由于镜面反射,高光面物体的三维测量无法得到清晰的编码图像,影响了三维坐标信息的解算,进而无法拟合出完整的三维形貌。提出应用数字微镜器件(DMD)为核心的新型 DMD 相机,应用 DMD 的高动态范围成像解决传统电荷耦合器件(CCD)采集编码图像过曝光的问题。在传统单目三维测量系统基础上搭建新的系统,建立了 DMD 相机的高动态范围成像和三维测量的数学模型,结合格雷码的图像匹配方法,获取物体的三维坐标信息。实验结果证明,该系统对高光面物体的成像起到了良好的效果,获得了比较完整的点云位深图,能够进行高动态范围的三维形貌测量。

关键词 测量; 三维测量; 高动态范围; 数字微镜器件; 数字微镜器件相机

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1212002

Three-dimensional Measurement Method of Objects with Specular Surface Based on Digital Micromirror Device

Xing Wei, Zhang Fumin, Feng Wei, Qu Xinghua

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument,
Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract For the three-dimensional measurement method of projection structure light, the three-dimensional measurement of the objects with specular surface can't get a clear coded image because of the specular reflection. It affects the calculation of the three-dimensional coordinate signal, and the whole three-dimensional morphology cannot be fitted. A new type of digital micromirror device (DMD) applying DMD as core is proposed. The problem of over saturation in acquiring coded image for traditional charge coupled device (CCD) is solved with high dynamic range imaging of DMD. A new system is built based on traditional monocular three-dimensional measurement system. The digital model of three-dimensional measurement and high dynamic range imaging of DMD camera are established. Combined with the matching method of Gray Code, three-dimensional coordinates of the object are obtained. The experimental results show that the system has a positive effect on the imaging of object with specular surface, and relatively complete bitmap is obtained. The system is able to measure three-dimensional morphology with high dynamic range.

Key words measurement; three-dimensional measurement; high dynamic range; digital micromirror device; digital micromirror device camera

OCIS codes 120.4820; 120.6650

1 引 言

三维测量技术在制造业、计算机辅助医学、虚拟现实、文物保护等方面都得到了广泛应用^[1-4]。投影结构光的三维测量技术具有高精度、高效率和非接触性等优点,已成为目前非接触三维测量方法中的主流技术。该测量方法通过向被测物体表面投射编码图像,由一个或多个摄像机获取经过物体表面高度调制后的编码

收稿日期: 2017-06-13; **收到修改稿日期:** 2017-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(51675380)

作者简介: 邢威(1993—),男,硕士研究生,主要从视觉测量方面的研究。E-mail: wei445857371@163.com

导师简介: 张福民(1982—),男,博士,副教授,主要从事光电测量技术等方面的研究。E-mail: zhangfumin@tju.edu.cn
(通信联系人)

图像并解码,获取物体表面采样点的三维坐标。该方法可以节省大量时间,提高了测量效率^[5]。

在一般情况下,结构光测量针对的是表面为漫反射变化范围不大的物体,但在现代工程应用中,存在大量的类镜面物体需要测量^[6]。对于反光的被测物表面,镜面反射带来的相机曝光饱和造成三维信息的丢失,无法实现三维重构。高光表面的三维重构称为高动态范围(HDR)技术,众多学者对高动态范围的三维测量进行研究,提出了一些测量方法。Yoshinori等^[7-8]提出了一种使用偏振滤镜分离镜面反射和漫反射成分的成像方法。Chen等^[9]应用偏振成像和相移的方法进行半透明物体的三维形貌测量。李锋等^[10]应用类似方法,通过起偏器和检偏器的作用消除高光表面反射对摄影系统的影响,该方法在消除强反光的同时降低了整个图像的信号,进而降低图像的信噪比。Hu等^[11]在单目系统的基础上提出了一种三步相移算法的高动态范围扫描技术,但该方法需要多次曝光才能获取信息,缺乏定量的方式来确定曝光时间,而且测量花费时间较长且测量质量很难保证。Feng等^[12]依据被测物表面反射率分布,利用直方图预测最佳曝光时间,解决了自适应曝光的问题,同时将多次曝光和偏振滤镜的方法结合起来,由于图像信噪比低,需要采集多幅编码图像用于合成高动态范围图像。综上所述,对于编码图像来说,大多数图像处理的算法是比较复杂的,人们需要一种相对简单、能够处理编码图像中部分区域曝光问题且满足实时性的测量方法。

本文提出一种新型测量方法,在电荷耦合器件(CCD)相机前加入数字微镜器件(DMD)进行调制,利用DMD的高动态范围成像,恢复编码图像缺失的信息。本文第二部分分析了DMD成像原理,建立了DMD相机成像数学模型;第三部分建立了三维重构的数学模型,介绍了格雷码编码解码原理;第四部分依据原有结构光三维测量的结构,搭建新的测量系统,测量高光面物体,对比分析DMD调制前后的结果;最后进行了总结。

2 DMD 成像系统

2.1 DMD 相机

DMD是成像系统的核心器件,它是采用微电子机械原理,使用半导体工艺制作的数字开关阵列,可以用二进制脉宽调制技术精密地控制。作为一个空间光调制器,DMD由成千上万的微型反射镜组成,所有的微镜都能通过单独的开关信号来控制。图1为DMD成像原理图,DMD能够改变入射光的方向,镜片可以稳定在任意位置上^[13],但是实际上系统只用到了微镜片+12°和-12°两个稳定状态(以微镜片平行于基底的位置作为平态),分别对应于二进制的“1”和“0”状态,也就是对应着“开”和“关”两个状态。当光线以48°入射时,开的状态反射光线为0°,关的状态反射光线为-48°。DMD相当于严密的光学开关,决定光能否进入到CCD相机中。当DMD状态设置为“开”时,来自物体的反射光通过透镜,在CCD上成像。每个反射镜都能实现“开”和“关”的控制,通过这种方式,DMD完成了二维空间的选择性成像。

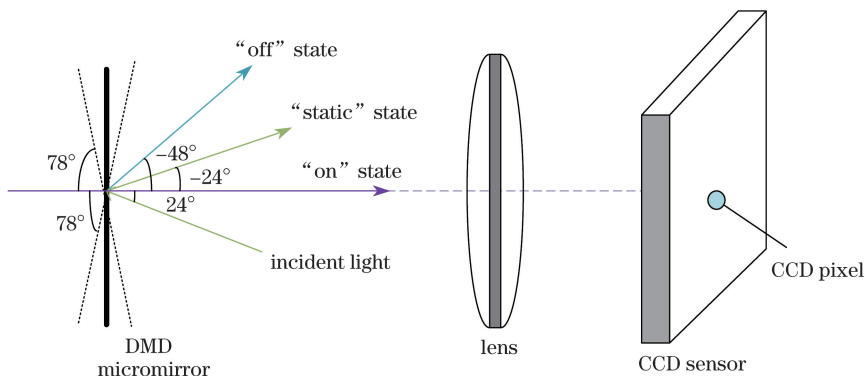


图1 DMD 成像原理图

Fig. 1 Principle schematic of DMD imaging

DMD相机结构包括DMD、CCD、两个透镜和全内反射(TIR)棱镜,如图2所示。从结构上看,DMD和CCD相当于面对面,每一个DMD的镜元要对应CCD的像素,通过叠栅条纹法,完成DMD与CCD的一一匹配。被测物的反射光通过L1透镜和TIR棱镜进入DMD,DMD图像通过L2透镜成像在CCD上,由DMD来决定物体是否能够在CCD上成像。如按照原理图搭建DMD相机,其中DMD选取DLP6500FTE,

分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 每个镜元尺寸为 $7.6 \mu\text{m}$ 。应用 TIR 棱镜是为了减少入射光的损失, 通过对 DMD 的控制将入射光全反射至 CCD 相机中, 降低系统内光能的损耗。

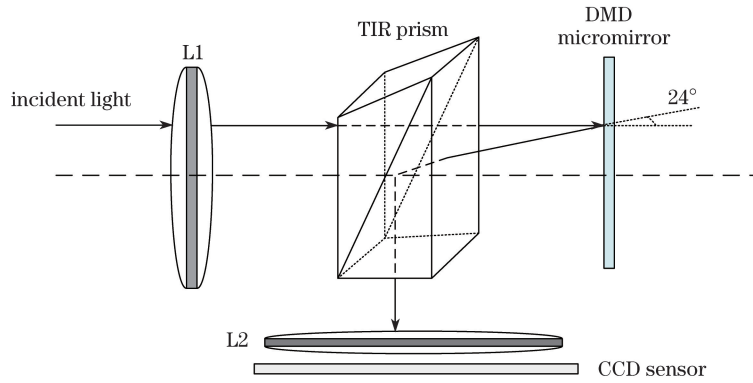


图 2 DMD 相机原理图

Fig. 2 Schematic diagram of DMD camera

2.2 高动态范围成像原理

由 DMD 成像原理可知, CCD 每一个像素的亮度取决于 DMD 在“开”状态的停留时间。除此之外, DMD 可以通过 8 位二进制编码图像调制过曝光区域, 这种图像称为掩膜。通过生成掩膜的方式进行图像调制步骤如下: 1) DMD 上所有微镜都处于“开”状态, 保证物体的反射光能够进入 CCD; 2) 针对 CCD 采集的原始图像, 用数字处理的算法提取图像中的过曝光区域; 3) 根据 DMD 和 CCD 的匹配关系, 产生一个掩膜将相应的 DMD 微镜设置为“关”状态, 减弱过曝光区域的入射光。用这种方式, 图像的过曝光区域得到有效的减弱^[14-15]。

在 DMD 相机中, 核心成像器件是图像传感器, 一般其动态范围表示为

$$R_D = 20 \times \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}}\right), \quad (1)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别代表图像传感器采集的最大亮度和最小亮度。一般由 8 位相机采集的最小亮度为 1, 因此动态范围是 $20 \times \lg 255 = 48.13 \text{ dB}$ 。将 DMD 看作光衰减器来记录入射光的衰减值, T_{\max} 和 T_{\min} 分别代表 DMD 微镜处于“开”状态的最大时间和最小时间, 则 DMD 相机的动态范围表示为

$$R_{D, \text{DMD}} = 20 \times \lg\left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \cdot \frac{T_{\max}}{T_{\min}}\right), \quad (2)$$

由(2)式可计算得 $20 \times \lg(255 \times 255) = 96.26 \text{ dB}$, 对比两者可以看出, DMD 相机成像的动态范围比普通相机大得多。

3 三维测量

3.1 三维重构系统模型

三维重构原理如图 3 所示。根据光路可逆原理, 投影仪可以看作是一个逆向的摄像机, 其焦距为 f_p , 投影仪光轴和焦平面的交点在成像面上的坐标为 (u_{p0}, v_{p0}) , 即投影仪图像中心, 则对于任意一点在投影坐标系下坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 结合摄像机的针孔成像模型, 其与投影仪成像坐标系对应关系为

$$\begin{cases} u_p = u_{p0} + f_p \frac{x_p}{z_p} \\ v_p = v_{p0} + f_p \frac{y_p}{z_p} \end{cases} \quad (3)$$

空间中任意一点 M , 在摄像机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c$ 下的坐标是 $M_c(x_c^M, y_c^M, z_c^M)$, 对应在 DMD 上的坐标为 (u_c^M, v_c^M) , 成像坐标系下的坐标为 (u_c^M, v_c^M) , 相机中的 DMD 只会对成像光强产生影响, 不会改变坐标, 依据 DMD 的成像原理, 成像之前会对 CCD 和 DMD 进行一一匹配, 因此 (u_c^M, v_c^M) 和 (u_c^M, v_c^M) 是一一对应的。

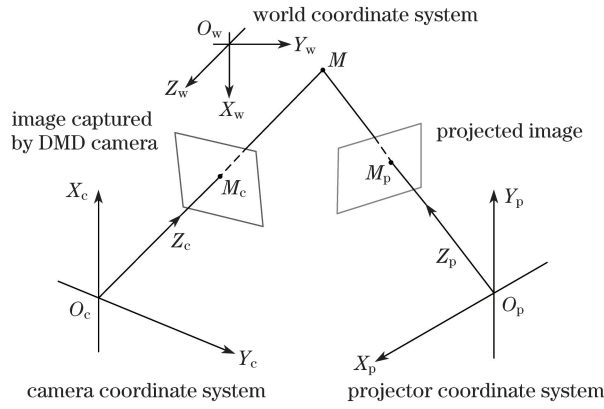


图 3 三维重构原理图

Fig. 3 Schematic diagram of three-dimensional reconstruction

在投影仪坐标系下点 M 的坐标为 $M_p(x_p^M, y_p^M, z_p^M)$, 对应在投影仪成像坐标系的坐标为 (u_p^M, v_p^M) , 点 M 在摄像机坐标系和投影仪坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_p^M \\ y_p^M \\ z_p^M \end{bmatrix} = \mathbf{R}_p \begin{bmatrix} x_c^M \\ y_c^M \\ z_c^M \end{bmatrix} + \mathbf{T}_p = \begin{bmatrix} r_{p1} & r_{p2} & r_{p3} \\ r_{p4} & r_{p5} & r_{p6} \\ r_{p7} & r_{p8} & r_{p9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c^M \\ y_c^M \\ z_c^M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{p1} \\ t_{p2} \\ t_{p3} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{R}_p, \mathbf{T}_p$ 代表了投影仪坐标系的点关于摄像机坐标系的旋转、平移矩阵, 称为投影仪相对于摄像机的外参数。由(3)式得到点 M_c 和 M_p 对应的成像关系为

$$\begin{cases} u_c^M = u_{c0} + f_c \frac{x_c^M}{z_c^M} \frac{du}{dv}, & u_p^M = u_{p0} + f_p \frac{x_p^M}{z_p^M} \frac{du}{dv} \\ v_c^M = v_{c0} + f_c \frac{y_c^M}{z_c^M} \frac{du}{dv}, & v_p^M = v_{p0} + f_p \frac{y_p^M}{z_p^M} \frac{du}{dv} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 u_{c0}, v_{c0} 指摄像机光轴和图像平面交点在图像坐标系中的坐标, 即摄像机图像中心, 综合(4)、(5)式可得:

$$\begin{cases} z_p^M \frac{u_p^M - u_{p0}}{f_p/dv} = r_{p1} z_c^M \frac{u_c^M - u_{c0}}{f_c/du} + r_{p2} z_c^M \frac{v_c^M - v_{c0}}{f_c/dv} + r_{p3} z_c^M + t_{p1} \\ z_p^M \frac{v_p^M - v_{p0}}{f_p/du} = r_{p4} z_c^M \frac{u_c^M - u_{c0}}{f_c/du} + r_{p5} z_c^M \frac{v_c^M - v_{c0}}{f_c/dv} + r_{p6} z_c^M + t_{p2}, \\ z_p^M = r_{p7} z_c^M \frac{u_c^M - u_{c0}}{f_c/du} + r_{p8} z_c^M \frac{v_c^M - v_{c0}}{f_c/dv} + r_{p9} z_c^M + t_{p3} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $f_c/du, f_c/dv, f_p/du, f_p/dv, \mathbf{R}_p, \mathbf{T}_p$ 以及摄像机和投影仪的光心位置是通过相机标定和系统标定得到的已知参数, 摄像机拍摄点图像坐标 (u_c^M, v_c^M) 和投影仪投影点图像坐标 (u_p^M, v_p^M) 是未知量。如果想要计算 M 点坐标, 拍摄点和投影点的匹配是必要的。本实验中采用组合格雷码匹配的方式, 实现摄像机平面和投影仪平面内点与点的匹配关系, 进而计算 M 点在摄像机坐标系的坐标。

3.2 格雷码

格雷码方法的基本原理是通过向被测物表面投影格雷码编码图案, 同时利用摄像机采集对应的变形条纹图并进行格雷码解码来完成出射点与成像点的匹配^[16]。对于二进制编码来说, 格雷码错误率是很低的。因为自然二进制的相邻码词之间互相转换时可能每一位都要变, 编码出错的概率会很大。而格雷码则没有这一缺点, 它的相邻码之间只有一位不同, 因此大大地降低了转换过程中出错的可能性。格雷码图案只有黑白两种灰度值, 用黑条纹表示逻辑值 0, 白条纹表示逻辑值 1, 由 n 幅不同频率且灰度呈一定规律变化的黑白光栅图可获得 n -bit 的格雷码, 将图像分为 2^n 个区域。应用 9-bit 组合格雷码, 将图像分为 512 个不同的区域, 每码字 1~3 个像素。系统中所用投影仪是德州仪器的 DLP4500(912 pixel×1140 pixel), 投影仪投射 9 组水平条纹和 9 组竖直条纹的组合编码图, 实现点对点的对应^[17]。

从方法上看,解码是比较简单的,对于相机采集的编码图像,只需要用阈值判断每个像素是否被照亮。一般情况下,需要两幅参考图像,一幅全黑图像和一幅全白图像,比较图像中每个像素值和两幅参考图像的平均值。然而在实际应用中,这种方法效果不是很好,总是有环境光进入 CCD,导致图像的一些区域更亮。本研究不仅投射水平和竖直的格雷码编码图,同时投射其反码图像。解码时,编码图与反码图相减,消除环境光影响,用阈值判定每个像素是否被照亮,经过 9 组相同的计算,获取一组格雷码。依据编码原理,将格雷码转换成二进制码,再转换成十进制数,即完成解码。每个像素都能解出水平码值和竖直码值,这样能够准确找到投影仪平面与之对应的点。很显然,这种方法匹配更加准确,但其缺点是需要两倍的编码图。

4 实 验

测量系统包括硬件和软件两个部分,系统硬件结构如图 4 所示,系统搭建过程中,摄像机和投影仪交叉无约束放置,不要求摄像机和投影仪光心连线平行于参考平面,也不要求摄像机光轴垂直于参考平面。系统的软件部分实现包括:1)根据相应算法对相机和系统进行标定,保存标定数据和标定采集的图像;2)产生格雷码编码图像,由投影仪依次向被测物表面投射编码图像,每投射一幅,触发相机采集二维图像,直到所有编码图像采集完成;3)解码存储的编码图像,借助标定数据进行三维坐标的计算;4)存储点云数据,生成位深图。

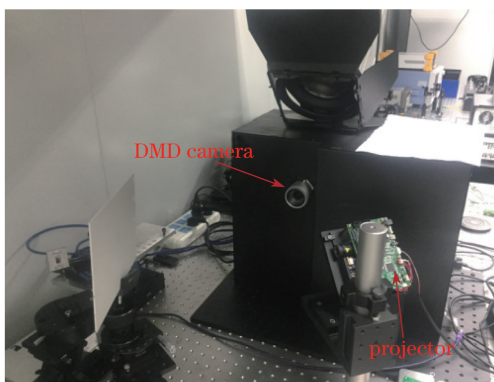


图 4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

为使摄像机图像和投影仪图像之间的匹配更加准确,选择 9-bit 格雷码图案作为结构光投射。实验投射组合格雷码图案到被测物表面,包括横向条纹、纵向条纹及其反码图案共 36 幅。

选取两种金属材质的高光面物体作为被测物,如图 5 所示,在不加入 DMD 调制的情况下,为了突出被测物过曝光部分且不影响其他部分测量,相机曝光调到了适合的值。结构光投射到被测物表面上,从图 6 可以看出,被测物中间有较大部分过饱和。金属盒和工件的过曝光部分已经影响了格雷码的解码,如图 7 所示,直接导致位深图中信息的缺失,无法得到完整的三维坐标信息。如图 8 所示,经过 DMD 相机加掩膜调制,从相机采集的结构光投射图像中可以看出曝光区域明显减弱,从位深图中可以看到信息比较完整。

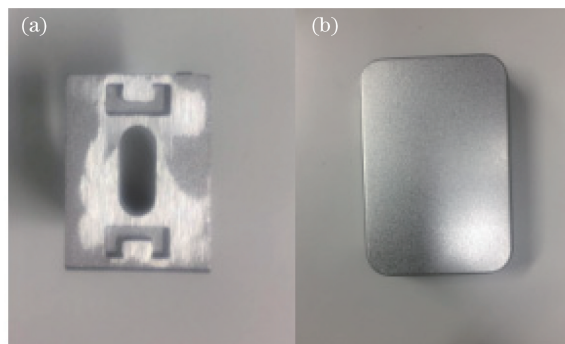


图 5 (a)铝制工件;(b)铁盒

Fig. 5 (a) Aluminum workpiece; (b) iron box

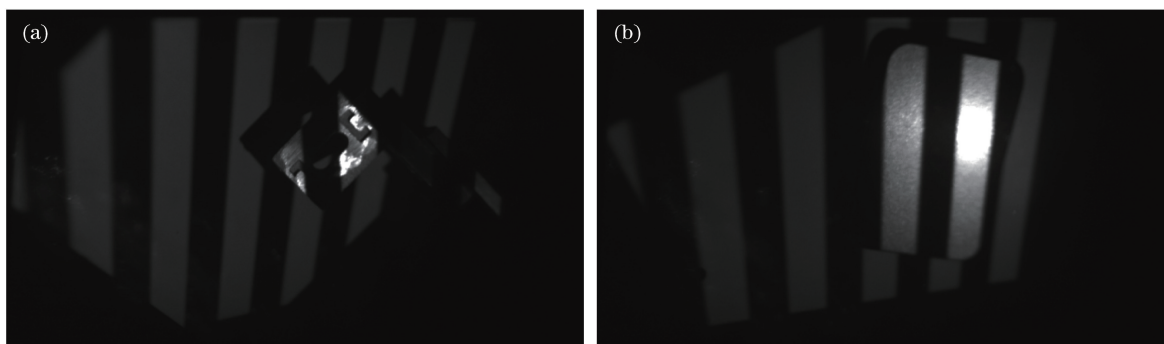


图 6 编码图像。(a) 铝制工件；(b) 铁盒

Fig. 6 Coded image. (a) Aluminum workpiece; (b) iron box

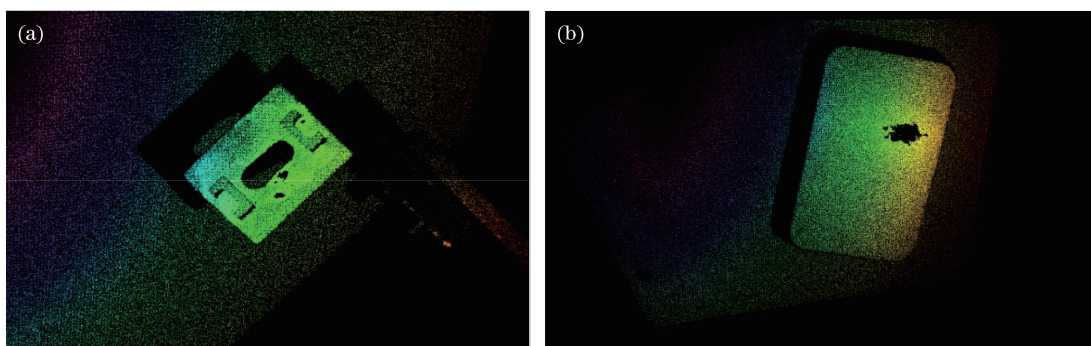


图 7 位深图。(a) 铝制工件；(b) 铁盒

Fig. 7 Bit depth map. (a) Aluminum workpiece; (b) iron box

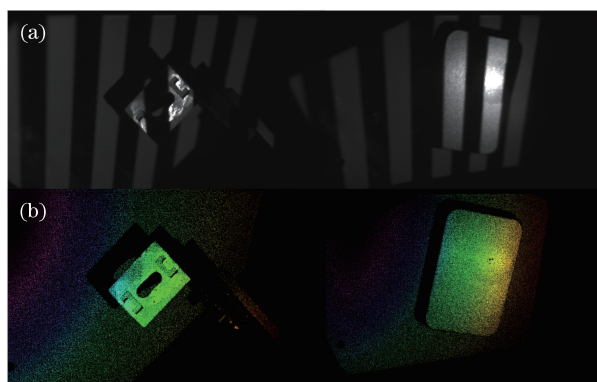


图 8 掩膜调制后的(a)编码图像和(b)位深图

Fig. 8 (a) Coded image and (b) bit depth map after mask modulation

相对于其他高动态范围的三维测量,本研究提出的测量方法从硬件系统上改善,实现图像像素的调制,不会影响算法的改变。从算法上提高测量速度和质量不会对该系统有影响,通过算法的改善,完全可以实现速度更快的三维测量。但是该系统的测量精度很大程度上受 DMD 相机的影响,当前对 DMD 高动态范围成像的研究还有待深入研究,不能完全满足三维测量的需求。

5 结 论

相对于传统基于结构光的三维测量方法,本研究致力于高光表面物体的测量,设计了基于 DMD 相机的结构光三维测量系统,以新型 DMD 相机替代传统的 CCD 相机,调制编码结构光图像的曝光区域,使得三维测量不再局限于只测量漫反射表面的物体。该系统投影格雷码编码图像,用于相机平面和投影仪平面点与点的匹配。上述实验表明,所提出的方法能够有效地调制被测物表面的反射光,解决信息缺失的问题,获取的点云更加完整。

从理论上讲,这种方法不会受过曝光程度和过曝光区域大小限制,对任何材质的被测物都会有很好的效果。然而 DMD 相机镜元和像元的匹配以及结构不够严密等问题将对结果产生较大影响,这是后续研究亟待解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Zhang S. Handbook of 3D machine vision: optical metrology and imaging[M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [2] Yang Jie. Research on high-accuracy 3D measurement method of the larger complex object[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.
杨杰. 复杂较大物体高精度三维测量方法的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- [3] Ou Pan, Wang Ting, Li Ruixiang. A three-dimensional teeth measurement system based on structured light[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011102.
欧攀, 王婷, 李瑞祥. 一种基于结构光的牙齿三维测量系统[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011102.
- [4] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are?[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [5] Salvi J, Pagès J, Batlle J. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- [6] Tao Tao, Guo Hongwei, He Haitao. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces[J]. Optical Instruments, 2005, 27(2): 90-95.
陶涛, 郭红卫, 何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述[J]. 光学仪器, 2005, 27(2): 90-95.
- [7] Yoshinori Y, Hiroyuki M, Osamu N, *et al.* Shape measurement of glossy objects by range finder with polarization optical system[J]. Gazo Denshi Gakkai Kenkyukai Koen Yoko, 2003, 200: 43-50.
- [8] Umeyama S, Godin G. Separation of diffuse and specular components of surface reflection by use of polarization and statistical analysis of images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2004, 26(5): 639-647.
- [9] Chen T B, Lensch H P A, Fuchs C, *et al.* Polarization and phase-shifting for 3D scanning of translucent objects[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1-8.
- [10] Li Feng, Liu Jiantao, Cai Jiajia. Shape measuring of mirror object based on structured light method[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(5): 882-886.
李锋, 刘建涛, 蔡佳佳. 基于结构光方法的类镜面物体的面形测量[J]. 电子器件, 2014, 37(5): 882-886.
- [11] Hu Q Y, Harding K G, Du X M, *et al.* Shiny parts measurement using color separation[C]. SPIE, 2005, 6000: 125-132.
- [12] Feng S J, Zhang Y Z, Chen Q, *et al.* General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 59: 56-71.
- [13] Ri S, Fujigaki M, Matui T, *et al.* Accurate pixel-to-pixel correspondence adjustment in a digital micromirror device camera by using the phase-shifting moire method[J]. Applied Optics, 2006, 45(27): 6940-6946.
- [14] Dudley D, Duncan W, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]. SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [15] Feng W, Zhang F M, Qu X H, *et al.* Per-pixel coded exposure for high-speed and high-resolution imaging using a digital micromirror device camera[J]. Sensors, 2016, 16(3): 331.
- [16] Wang Zhen. Research and implementation of key technology of 3D model measurement system based on grating projection[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
王震. 基于光栅投影的三维模型测量系统关键技术研究是实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [17] Furukawa R, Kawasaki H. Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning[C]. IEEE Xplore Conference: 3-D Digital Imaging and Modeling, 2005: 302-309.