

文章编号:1007-2780(2016)09-0897-05

基于线性扩散板的高光抑制方法研究

孙永建,孙晓明*,刘云起,王武超,王刘阳,李泊洋

(哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:陶瓷、金属等光滑表面的强反射性质,会使图像饱和产生高光现象,导致测量精度大幅下降。针对这一问题,本文利用扩散板对光的扩散作用,设计了基于线性扩散板的高光抑制系统。首先从理论上研究线性扩散板的扩散原理,并利用高光点反射辐射亮度分析线性扩散板对高光的抑制作用。然后搭建系统平台,完成相机标定、投影仪标定等系统搭建工作。最后对陶瓷盘子和大理石罐等具有强反射表面的物体进行三维测量,实验结果表明,线性扩散板能够实现三维测量中强反射表面高光抑制,其中大理石罐、陶瓷盘子、花盆、杯子的高光点数目相比未加扩散板时分别减少了 19.6 倍、5.6 倍、4.4 倍与 3.9 倍。扩散板能够减弱高光点的反射辐射亮度,对高光具有一定的抑制作用,三维重构结果中高光区域明显缩小。

关键词:三维视觉检测;高光抑制;结构光;线性扩散板

中图分类号:TP23 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163109.0897

Specular highlight suppression method based on linear diffuser

SUN Yong-jian, SUN Xiao-ming*, LIU Yun-qi, WANG Liu-yang, LI Bo-yang

(*Higher Educational Key Laboratory for Measuring & Control
Technology and Instrumentation of Heilongjiang Province,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

Abstract: Due to the strong reflection property of materials with smooth surfaces like ceramic and metal, it will cause saturation and the highlight phenomenon in the image when taking pictures of those materials. Focused on that problem and taking advantage of the diffusion effect of the diffuser, we design a highlight suppression system based on the linear diffuser. Primarily, we theoretically analyze the diffusing principle of the linear diffuser. Besides, we also analyze the highlight suppressing effect of the diffuser with reflected radiance of the highlight points. Then, we build up the system platform and complete the camera calibration and projector calibration. Finally, we implement 3D experiments on objects with strong reflecting surfaces like ceramic plate and marble can. Experimental

收稿日期:2016-03-21; **修订日期:**2016-06-15.

基金项目:国家自然科学基金(No.61401126);黑龙江省自然科学基金(No.QC2015083);黑龙江省博士后资助(No.LBH-Z14121);哈尔滨理工大学大学生创新创业训练项目(No.53)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61401126); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China(No.QC2015083); Heilongjiang Postdoctoral Financial Assistance (No.LBH-Z14121); University Students' Innovation and Entrepreneurship Training Project of Harbin University of Science and Technology(No.53)

* 通信联系人, E-mail: xiaoming_66881982@163.com

results show that with the help of the linear diffuser, the highlight caused by the strong reflecting surface can be well suppressed. The highlight pixel numbers of marble can, ceramic plate, flower pot and cup are decreased by 19.6 times, respectively, 5.6 times, 4.4 times and 3.9 times, respectively. Diffuser can reduce the reflected radiation of highlight points and suppress highlight. Three-dimensional reconstruction results show that highlight areas were significantly reduced.

Key words: 3D vision inspection; highlight suppression; structured light; linear diffuser

1 引言

视觉三维测量技术是三维测量领域的重点发展方向,其中结构光法作为一种主动式三维测量方法被广泛地应用到三维检测领域。与点结构光、线结构光相比,编码结构光因其高效、高速和无需扫描等优点而成为视觉结构光三维测量的发展趋势。在采用编码结构光法进行三维测量重构时,需要投影条纹到被测物体表面,条纹受到物体表面的影响携带了物体表面的空间坐标信息,然而在实际应用中尤其是工业检测中,由于被测场景中物体表面反射特性的影响,条纹截面的灰度变化会受到很多因素的干扰,而高光就是影响最为严重的因素之一。在工程中,特别是在现代制造业中,存在大量具有强反射表面特性的物体需要测量,高光的存在不仅会使相机饱和,丢失条纹灰度变化信息,而且还将改变原有漫反射条纹的灰度分布,影响条纹中心提取的准确性。对金属表面进行检测时,由于金属表面反射能力极强,即使在曝光适中的情况下,仍然会在金属局部产生极强反射光,从而对相机成像以及后续的各种图像处理分析造成很大的影响,条纹图像易出现饱和,导致测量失效,最终会导致表面检测出现错误,出现金属表面空洞现象,降低了检测系统的性能。同样,在对陶瓷等表面容易出现强反射高光现象的物体进行三维检测时,强反射的视点相关性会给三维信息获取带来严重的错误,直接影响物体的检测精度。高光去除问题目前已成为利用光学方法测量金属及强反射表面物体所面临的一个难点与共性问题。

多年来,国内外研究人员对高光抑制和高光去除的研究从没有间断过,Shafer^[1]提出了双色反射模型,该模型中漫反射反映物体本身的颜色信息,而镜面反射则反映光源的颜色信息。谭平利^[2]利用高光区域的周边部分信息,用补色的方法填充高

光区域。杨永敏^[3]利用偏微分方程的同态滤波算法对强反射表面感光区域的缺陷图像作预处理,来达到高光去除的效果。黄梅^[4]提出了一种基于局部统计的改进算法,但该算法很容易受到噪声的干扰。詹永鑫^[5]提出一种基于亮度分量的处理方法,该方法可以对图像进行增强,保持图像颜色信息,但是对于高光区域处理效果不明显。

柴玉亭^[6]采用基于频率域滤波的方法去除高光,但该方法仅适用于在条纹之间叶片表面曲率变化不显著的情况。B.J. Sohn^[7]对镜面偏振反射率之间的关系进行了分析。岳春敏^[8]同样运用基于偏振分析的方法恢复物体表面形状,但该方法的反射模型精度偏低,无法有效的滤除漫反射成分对实验的影响。W.-C. Ma^[9]等人使用极化法分离反射成分,但该方法需要不同极化方向的多副图像,图像数量过大,而且极化量由入射和出射的角度决定。X.T.Qian, K.G.Harding^[10]从多个角度拍摄同一内容的图像,再对所有角度拍摄的图像进行拼接处理,该方法引入了十分复杂的拼接问题。G.H.Liu^[11]通过调节曝光时间,使得高光区域不饱和,但未能修正高光带来的条纹中心偏移现象,不能满足测量的精度需求。S.K. Nayar^[12]将漫反射扩散板应用于强反射测量领域,取得了较好的效果。

因此,针对上述问题,本文围绕着强反射表面编码光测量这一主题,以精确测量强反射表面三维形状为目的,对强反射表面编码光测量存在着高光难以去除、去高光时编码图像细节丢失的难点问题进行研究,采用线性扩散漫射投影方法从照明角度减少高光现象。

2 扩散板抑制高光原理

传统的扩散板主要是在基材中加入化学颗粒作为扩散粒子,使光线在经过散射层时不断的在两个折射率相异的介质中发生多角度、多方向的

折射、反射与散射,以此产生光学扩散的效果。然而由于扩散粒子的大小以及分布位置不均匀将造成光场分布不均匀,同时不可避免地存在着扩散粒子对光的吸收现象,导致光能利用率下降。微结构光扩散板具有高透光率,通过改变其表面的微凹凸结构的形状和不同排布方式,可以调整扩散角度、光场的空间和能量分布,可以实现扩散板不同的均匀度和透光率,因此在光学实验研究中被广泛应用。本文选用线性微结构光扩散板(NT43-029)进行三维重构实验,并从以下两种情况分别对线性扩散板抑制高光原理进行分析。

(1)强反射物体表面反射的光未被相机捕获。这种情况中被测物体高光点反射的光线不在相机的拍摄范围内,相机无法识别其有效信息。此时,三维重构后会出现相应位置是空洞的现象。摄像机接收到高光点反射辐射亮度为 $L_{e1} = 0$ 。如果在光源与被测物之间加入扩散板,扩散板将入射到高光点的单一方向的强光扩散成均匀的多个方向的光的集合,同时高光点将多个方向的光进行反射,部分方向的反射光被相机接收,此时摄像机接收到的高光点反射辐射亮度为 $L_{d1} > L_{e1} = 0$,相机能够捕获到高光点的有效信息。

(2)强反射物体表面反射的光被相机捕获。这种情况中光强过高导致相机过度曝光,此时摄像机接收到高光点反射辐射亮度为 L_{e2} , L_{e2} 过高相机无法识别其有效信息。三维测量重构时同样会使得相应位置出现空洞现象。如果在光源与被测物之间加入扩散板,扩散板将入射到高光点的单一方向的强光扩散成均匀的多个方向的光的集合,同时高光点将多个方向的光进行反射,此时高光点反射的全部光的辐射亮度为 $L_{d2} \approx L_{e2}$ 。被摄像机接收到的辐射亮度为 L_d' , L_d' 是 L_{d2} 的一部分,即 $0 < L_d' < L_{d2} \approx L_{e2}$,大大减小了相机过度曝光的现象。

3 平台搭建

本文采用 Infocus 82 投影仪(分辨率 1 024 pixel×768 pixel)、DH-HV3151UC 工业相机(分辨率 2 048×1 536)组成结构光三维测量系统,扩散板采用 12 in×12 in(1 in=2.54 cm)的型号为 NT43-029 的透镜阵列,扩散板的散射程度为沿扩散轴±50°,系统平台示意图如图 1 所示。

3.1 相机标定

为了满足实验要求,如图 2 所示,本文设计了白色背景上特定位置有黑色圆点的相机标定模板,使其沿光学精密导轨与模板垂直的方向移动,根据待测物体尺寸及系统的可测范围,标定模板尺寸设计为 450 mm×600 mm。标定模板和光学导轨精度为 0.1 mm,模板黑色圆点中心的位置以灰度重心法确定。

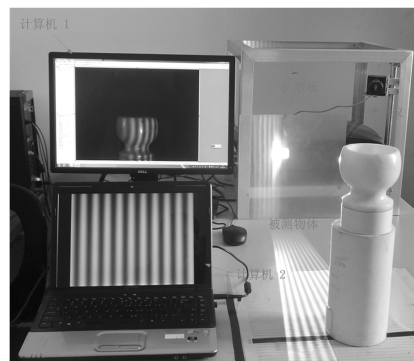


图1 系统平台

Fig.1 System platform

首先将标定模板至于光学导轨上,然后滑动导轨,在-4 cm、0 cm、+4 cm 三个位置分别拍摄模板,利用二值化将所拍摄的图像转化为白色背景的点阵标定模板样式,点阵中两点之间的距离为 20.5 mm,且以(0,0)为中心点。拍摄的多幅图像中,每两幅图像之间就存在一种几何约束关系,通过这种关系,可以建立多个线性方程组,最后通过对这些线性方程组的求解,建立 CCD 亚像素点坐标和空间标准点坐标的对应关系。

3.2 投影仪标定

投影仪标定原理与相机相同,不同之处在于投影仪像点坐标和空间标准点坐标对应关系的建立方法。本文采用基于正交格雷码的投影仪标定方法,原理如图 2 所示。标定系统主要包括光学精密导轨、模板、相机。模板可在光学精密导轨上沿着垂直于模板平面的方向移动;数码相机侧向拍摄模板获得标定所需图像;待标定的投影仪则向模板正向投射水平和垂直的格雷码图案,从而向标定系统传递其姿态、位置和设备参数信息。

投影仪标定具体可分以下步骤:

(1)将标定模板至于精密导轨上。

(2)将标定模板分别至于-4 cm、0 cm、+4 cm 三个位置上,用相机拍摄 3 个不同位置的标定

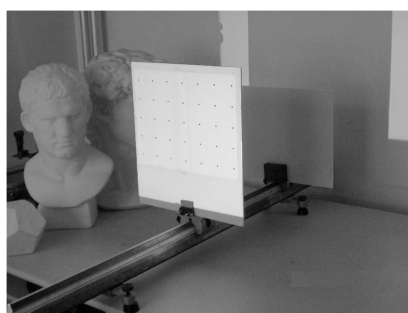


图 2 相机标定装置

Fig.2 Camera calibration device

模板图像。

(3) 采用灰度重心法定位所拍摄的三幅图像中黑色圆点的 CCD 亚像素位置, 并建立空间标准点坐标和 CCD 像点坐标的对应关系。

(4) 用白色模板替代标定模板, 依次置于上述三个相同位置上, 然后用投影仪分别投射水平和垂直的格雷码, 形成正交格雷码图样, 并用相机分别拍摄三个位置的图像。

(5) 将步骤 4 中每个黑色圆点包含的 CCD 像素点的格雷码值转换为投影仪像素点位置, 然后根据灰度重心法进行投影仪像点亚像素定位, 即可建立投影仪像点坐标和 CCD 像点坐标的对应关系。

(6) 根据步骤 3 和步骤 5 即可建立投影仪像点坐标与空间标准点坐标的对应关系。

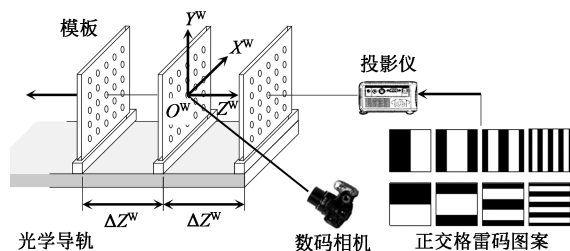


图 3 基于正交格雷码的投影仪标定原理

Fig.3 Projector calibration based on orthogonal Gray code

4 实验

为了验证线性扩散板对高光的抑制作用, 实验选用具有镜面反射特性、有明显高光且不同形状的大理石罐、盘子、杯子、花盆等大理石、陶瓷材质作为被测对象。如图 4 所示, 在被测物上分别投射相移编码条纹, 并采用相机进行采集, 对采集

到的图像进行计算, 最后对测量结果进行定量与定性的分析。

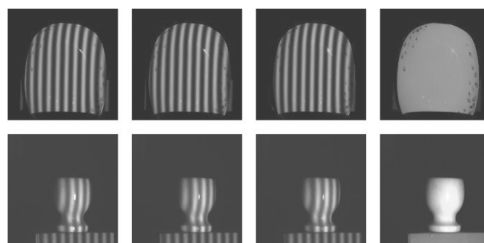


图 4 投影相移码样图

Fig.4 Projection phase shift image

图 5 为加扩散板与未加扩散板时大理石捣蒜罐的三维重构对比实验结果, 其中, 图 5(a) 为具有大理石材质的捣蒜罐的原图, 罐体上方和底盘上都出现了明显的高光。图 5(b) 为未加扩散板的三维重构图, 白色空缺区域是由于高光的存在造成的信息缺失, 图 5(c) 为加入线性扩散板的三维重构图, 从图中可以看出, 加入线性扩散板后, 高光区域明显变小, 重构出来的图像纹理也更加细腻, 边缘的弧度效果更加明显, 罐体下方的高光区域消失, 重构效果明显优于图 5(b)。

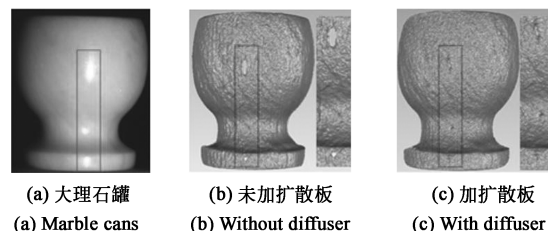


图 5 三维重构对比图

Fig.5 Comparison of three-dimensional reconstruction

为了进一步验证线性扩散板对高光的抑制作用, 本文分别对具有强反射特性的大理石罐、陶瓷盘子、陶瓷花盆、陶瓷杯子进行三维重构实验, 并定量统计重构后高光区域像素点的数量。表 1 为大理石罐、陶瓷盘子、花盆、杯子加入扩散板与未加扩散板时高光区域像素点定量统计结果, 从表 1 中可以看出, 大理石罐、陶瓷盘子、花盆、杯子的高光点数目相比未加扩散板时分别减少了 19.6 倍、5.6 倍、4.4 倍与 3.9 倍。实验结果表明线性扩散系统重构出的高光点区域比未加扩散板时的高光区域有明显缩小, 边缘轮廓清晰, 重构图像纹理更加细腻, 对高光有很好的抑制作用。

表1 高光位置缺失像素点数

Tab.1 The number of missing pixels in high light position

	未加扩散板	加扩散板	降低倍数
大理石罐	1 275	65	19.6
陶瓷盘子	1 038	135	5.6
花盆	71	16	4.4
杯子	3 116	802	3.9

5 结 论

陶瓷、金属等物体具有光滑表面,在结构光三

维重构时,这些物体表面的强反射特性使得重构后的物体产生失真,造成了较大的测量误差,针对这一问题,本文设计了基于线性扩散板的高光抑制系统,并分析了扩散板抑制高光的原理,分别对具有强反射特性的大理石罐、陶瓷盘子、花盆、杯子进行三维重构实验。实验结果表明,大理石罐、陶瓷盘子、花盆、杯子的高光点数目相比未加扩散板时分别减少了19.6倍、5.6倍、4.4倍与3.9倍。扩散板能够减弱高光点的反射辐射亮度,对高光具有一定的抑制作用,三维重构结果中高光区域明显缩小。

参 考 文 献:

- [1] SHAFER S A. Using color to separate reflection components [J]. *Color Research & Application*, 1985, 10(4): 210-218.
- [2] TAN P, LIN S, QUAN L, *et al.* Highlight removal by illumination-constrained inpainting [C]//*Proceedings of Ninth IEEE International Conference on Computer Vision, Nice, France: IEEE*, 2003, 1: 164-169.
- [3] 杨永敏,樊继壮,赵杰.强反射表面缺陷图像预处理[J].*光学精密工程*, 2010, 18(10): 2288-2296.
YANG Y M, FAN J Z, ZHAO J. Preprocessing for highly reflective surface defect image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2288-2296. (in Chinese)
- [4] 黄梅,吴志勇,梁敏华,等.暗背景下低灰度图像的实时增强[J].*液晶与显示*, 2011, 26(3): 374-378.
HUANG M, WU Z Y, LIANG M H, *et al.* Real-time enhancement method of low gray image under dark background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 374-378. (in Chinese)
- [5] 詹永鑫,郑学仁,陈建宾.基于亮度分量的快速图像增强方法[J].*液晶与显示*, 2010, 25(2): 273-277.
ZHAN Y X, ZHENG X R, CHEN J B. Fast Image Enhancement method based on luminance compment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(2): 273-277. (in Chinese)
- [6] 柴玉亭,王昭,高建民,等.基于频域滤波的高光去除方法[J].*激光与光电子学进展*, 2013, 50(5): 051205.
CHAI Y T, WANG Z, GAO J M, *et al.* Highlight removal based on frequency-domain filtering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(5): 051205. (in Chinese)
- [7] SOHN B J, LEE S M. Analytical relationship between polarized reflectivities on the specular surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2368-2374.
- [8] 岳春敏.基于偏振分析的物体表面形状恢复方法研究[D].长春:长春理工大学, 2008: 22-23.
YUE C M. Reconstruction study of object surface based on polarization analysis [D]. Changchun: *Changchun University of Science and Technology*, 2008: 22-23. (in Chinese)
- [9] MA W C, HAWKINS T, PEERS P, *et al.* Rapid acquisition of specular and diffuse normal maps from polarized spherical gradient illumination [C]//*Proceedings of the 18th Eurographics conference on Rendering Techniques*, Switzerland: ACM, 2007: 183-194.
- [10] QIAN X P, HARDING K G. Computational approach for optimal sensor setup [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(5): 1238-1248.
- [11] LIU G H, LIU X Y, FENG Q Y. 3D shape measurement of object with high dynamic range of objects with high dynamic range of surface reflectivity [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4557-4565.
- [12] NAYAR S K, GUPTA M. Diffuse structured light [C]//*Proceedings of IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, Seattle, WA: IEEE, 2012: 1-11.

作者简介:孙永建(1991—),男,河南周口人,研究方向:三维视觉检测。E-mail: 773148043@qq.com

孙晓明(1982—),女,黑龙江海林人,博士,副教授,研究方向:三维视觉检测、图像特征提取。E-mail: xiaoming_66881982@163.com