

基于投影强度的快速高动态范围三维形状测量

周国平 朱文韬 易传华 曾龙辉 黄舒欣 祝振敏

3D shape measurement in fast high dynamic range based on projection intensity

ZHOU Guoping, ZHU Wentao, YI Chuanhua, ZENG Longhui, HUANG Shuxin, ZHU Zhenmin

引用本文:

周国平, 朱文韬, 易传华, 等. 基于投影强度的快速高动态范围三维形状测量[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 175–181. DOI: 10.5768/JAO202344.0103009

ZHOU Guoping, ZHU Wentao, YI Chuanhua, et al. 3D shape measurement in fast high dynamic range based on projection intensity[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 175–181. DOI: 10.5768/JAO202344.0103009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0103009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于二进制条纹加相位编码条纹离焦投影的三维测量方法

3D measurement method based on binary fringe plus phase coding fringe defocus projection

应用光学. 2017, 38(5): 790–797 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0503003>

基于自适应条纹投影的高反光物体三维面形测量

Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection

应用光学. 2018, 39(3): 373–378 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0303001>

用于三维测量的快速相位解包裹算法

Fast phase unwrapping algorithm for 3D measurement

应用光学. 2019, 40(2): 271–277 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0202005>

基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法

Three-dimensional shape measurement method based on sinusoidal and triangular fringe projection

应用光学. 2018, 39(4): 522–527 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0403002>

单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法

Calibration method for structured light 3D measurement system having single camera and single projector

应用光学. 2018, 39(2): 225–229 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0203003>

基于传像束的小视场双目结构光三维形貌恢复

3D shape restoration of binocular structure light in small field of view based on image bundles

应用光学. 2021, 42(1): 113–118 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0175-07

基于投影强度的快速高动态范围三维形状测量

周国平¹, 朱文韬², 易传华¹, 曾龙辉¹, 黄舒欣¹, 祝振敏²

(1. 江西省水投建设集团有限公司, 江西 南昌 330029; 2. 华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 条纹投影轮廓术由于具有速度快、精度高、对环境光照和表面纹理具有鲁棒性等优点, 在许多领域得到了广泛应用。但是, 它容易受到高动态范围 (high dynamic range, HDR) 对象的影响。因此提出了一种快速计算最佳投影亮度的方法。通过求解相机与投影仪之间的响应关系, 结合所提出的一个简便的投影亮度确定方法, 可以得到测量所需要的投影亮度。再基于所提出的图像融合算法融合求得的各个亮度下的原始图片, 从而获得高质量的融合图片, 实现对 HDR 物体的高精度的三维重构。相较于传统方法, 无需盲目投射和拍摄大量图片或计算复杂的单应性矩阵, 仅需要投影一张均匀白光至被测物体, 即可快速求解出相机和投影仪之间的响应函数, 从而获得所需的投影亮度, 使得测量速度有极大的提升。

关键词: 机器视觉; 投影强度; 三维测量; 相机响应函数

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0103009

3D shape measurement in fast high dynamic range based on projection intensity

ZHOU Guoping¹, ZHU Wentao², YI Chuanhua¹, ZENG Longhui¹, HUANG Shuxin¹, ZHU Zhenmin²

(1. Jiangxi Water Investment Construction Group Co., Ltd., Nanchang 330029, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Fringe projection profilometry is widely used in many fields due to its advantages of high speed, high accuracy, and robustness to ambient lighting and surface textures. However, it is susceptible to high dynamic range (HDR) objects. Therefore, a method to quickly calculate the optimal projected brightness was proposed. By solving the response relationship between camera and projector, and combined with a proposed simple method of projection brightness determination, the required projection brightness could be obtained. Then, based on the proposed image fusion algorithm, the obtained original images under each brightness were fused to obtain high-quality fused images and achieve high-precision three-dimensional reconstruction of HDR objects. Compared with the traditional methods, there was no need to blindly project and take a large number of pictures or calculate complex homography matrices. It only needed to project a uniform white light to the measured object, and the response function between the camera and the projector could be quickly solved, so as to obtain the required projection brightness, which greatly improved the measurement speed.

Key words: machine vision; projection intensity; 3D measurement; camera response function

引言

光学测量是一种表面非接触式三维形状测量技术^[1], 光学测量技术具有非接触、速度快、精度

高等优点, 已被广泛应用于工件检测、游戏模型、文物数字化、水库大坝形变或连接缝检测等场合中。光学方法包括定时飞行法、立体视觉法、阴影

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52065024); 江西省重点研发计划 (20202BBE53022); 江西省 03 专项 (20212ABC03A20)

作者简介: 周国平 (1970—), 男, 研究生, 工程师, 主要从事偏振结构光三维测量等技术研究。E-mail: 156185231@qq.com

通信作者: 祝振敏 (1984—), 男, 博士, 教授, 硕、博士生导师, 主要从事偏振结构光三维测量等方面的教学与科研工作。

E-mail: zhuzhenmin1984@163.com

估计法、激光距离扫描法和结构光法^[2-6]。其中,结构光法是应用最广泛的三维形状测量技术之一。结构光测量系统通常由投影仪和摄像机组成。投影仪将编码好的图形序列投影到被测物体表面,与此同时,使用相机捕捉被物体表面调制后的图案,这些图案携带有价值的物体深度信息,可通过相移算法检索。可以利用得到的绝对相位图,通过对系统进行标定,计算出物体表面的三维坐标。

由于 HDR 物体的反射率范围较大,会导致所拍摄的图像出现过亮或过暗的问题。为了克服这个问题,Zhang 提出了一种 HDR 扫描的技术^[7]。此技术通过拍摄多组不同曝光时间的条纹图像,从低曝光图像中提取高反射率区域,从高曝光图像中提取低反射率区域。最后基于像素最大不饱和原理对图像进行融合,从而得到高信噪比的图像。此方法能够很好地测量 HDR 物体。但是,由于并未对曝光时间进行量化,导致在测量复杂的 HDR 物体时,必须利用相机捕捉大量不同曝光时间的图像。因此,该方法存在图像数据耗时和冗余的缺点。为了克服这些缺点,Jiang 等人提出了一种通过同时调整曝光时间和投影光强来捕获原始条纹图像的技术^[8]。从原始图像中选择像素点合成复合条纹图像时,考虑的是最高调制强度而不是最亮的非饱和强度;因此,获得了较高的信噪比(signal to noise ratio, SNR)和环境光效应最小化。

调整投影仪的光强是解决 HDR 问题的另一种方法。Waddington 和 Kofman 提出了一种用修改后的最大灰度值来投影条纹图案的技术^[9],以此来适应可变的环境照明,从而解决图像饱和。由于该方法只调整了条纹图的最大灰度值,因此在测量反射率较低的表面区域时,可能会降低条纹图像的信噪比。Zhang 等人提出了基于黑白单色条纹用于三维重构,通过使用自适应强度模版对所投影的图案的亮度进行动态调节,以消除图像高光的影响^[10]。但是其中的问题是相机到投影仪的单应性矩阵难以被准确求解。倘若求解出的单应性矩阵不精确,就会导致坐标映射出现误差,从而会在后续三维测量中产生误差。

此外,还有使用偏振滤光片^[11-13]、彩色信息^[14-15]以实现 HDR 物体进行测量。然而,它们都需要额外的硬件来提高系统的性能,这可能会增加成

本或复杂的计算。

本文则提出了一种基于投影强度的快速的测量方法,该方法通过求解相机和投影仪之间的响应函数,并结合所提出的一种简便的最佳投影亮度的确定方法以及图像融合算法,能够得到高信噪比的融合图片,再基于该融合图片实现对被测物体的三维重构,能够有效提高其三维重构的精度。此外,该方法无需盲目投射和拍摄大量图片或计算复杂的单应性矩阵,使得测量速度有极大的提升。

1 基本原理

1.1 相机与投影仪的响应关系

如若要建立相机与投影仪的强度响应函数,前提是探究结构光系统中射进相机的光线的组成。一般情况下把进入系统的相机镜头的光分 3 类: 1) 由投影仪投射出的光经被测物体表面反射进入相机镜头; 2) 直接射进相机镜头的环境光; 3) 环境光射至被测物体表面而被反射入相机镜头。图 1 即显示了系统中的上述 3 类光线。其中 I_p 是由投影仪发出的投影光强度, I_a 为射至被测物体表面的环境光强, I_b 为直接射进相机镜头的环境光强, ρ 表示被测物体表面的反射率。

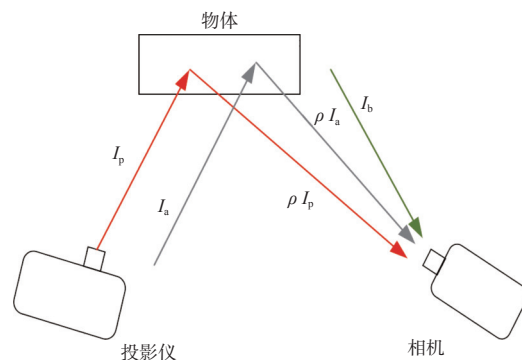


图 1 进入相机的光线组成

Fig. 1 Composition diagram of light to enter camera

所以可以推导出相机拍摄的图片的强度公式为

$$I(x,y) = k \times t \times \rho(x,y) \times (I_p + I_a) + k \times t \times I_b \quad (1)$$

式中: $I(x,y)$ 为结构光系统中相机所拍摄的图片灰度; $\rho(x,y)$ 是被测物的表面反射率; t 与 k 分别代表了相机曝光时间及增益。假设测量时外界环境是黑暗的,仅有投影仪发出的光,此时可以认为 I_a 与 I_b 为零。所以为了简化该相机-投影仪的响应关

系,测量时需保证为黑暗环境。此外在测量过程中对相机参数和其位置不做改变,而只改变系统中投影仪所射出的投影亮度时,这意味着参数 $\rho(x,y)$ 、 t 和 k 均不发生改变。因此上述3个参数的积则应该是一个确定的常数,可以将之定义为

$$k_1(x,y) = k \times t \times \rho(x,y) \quad (2)$$

由于 $k_1(x,y)$ 为一个确定常数,而测量环境为黑暗时参数 I_a 及 I_b 均为零。所以公式(1)可以写为

$$I(x,y) = k_1(x,y) \times I_p \quad (3)$$

假设结构光系统中的投影仪投射出一个已知的光照强度到被测物体上,另一边由相机拍摄此强度下被测物体的图片,就能够快速计算出参数 $k_1(x,y)$ 的值:

$$I_{cl}(x,y) = k_1(x,y) \times I_{p1} \quad (4)$$

式中: I_{p1} 是投影仪投射出的已知强度的光; $I_{cl}(x,y)$ 表示在 I_{p1} 下拍摄的图片强度。并且为了保证标定的参数 $k_1(x,y)$ 的准确性,投影仪所投射出的光强度应该在一个较低的灰度水平,确保相机拍摄的图片不过曝,即 $I_{cl}(x,y)$ 中不出现灰度值为255的像素点。此时能够推导出参数 $k_1(x,y)$ 为

$$k_1(x,y) = \frac{I_{cl}(x,y)}{I_{p1}} \quad (5)$$

结合上述公式,可得最终的相机-投影仪响应关系的关系式为

$$I_{pideal} = \frac{I_{p1} \times I_{ideal}(x,y)}{I_{cl}(x,y)} \quad (6)$$

式中: I_{pideal} 表示最佳投影亮度; $I_{ideal}(x,y)$ 则表示了所期望的相机拍摄的图片灰度。由公式(6)可知,能够基于确定所期望的图片灰度 $I_{ideal}(x,y)$ 求解出最佳投影亮度。

1.2 确定投影亮度策略

就理论而言, $I_{ideal}(x,y)$ 的期望值是254,这代表相机所拍摄的图片的像素点灰度值最大且不过曝。然而由于相机响应函数本身存在非线性因素,并且测量中还存在噪声所带来的影响,这便意味着要给 $I_{ideal}(x,y)$ 预留一些值,从而避免该非线性及噪声的影响。通过大量的实验表明, $I_{ideal}(x,y)$ 的值为250时测量效果最佳。所以将 $I_{ideal}(x,y)$ 为250代入公式(6):

$$I_{pideal} = \frac{250 \times I_{p1}}{I_{cl}(x,y)} \quad (7)$$

由于一张图片上拥有许许多多的像素点,因此基于参数 $k_1(x,y)$ 所计算出的最佳投影亮度亦数量

惊人。倘若要使得融合图片的每个像素灰度值均达到最大不饱和状态,就需要很多投影亮度进行补偿,这无疑会大幅降低测量速度。所以为保证测量效率,本文提出了一种简便的最佳投影亮度确定策略。正常情况下使用几个投影亮度即可较好地补偿被测物体。这是由于被测物体表面反射率 $\rho(x,y)$ 接近时,只用一个投影亮度即可。而对于HDR物体 $\rho(x,y)$ 较大时,则能够把 $\rho(x,y)$ 划分成若干个小区间,再根据区间进行取值,从而获得所需的投影亮度。而根据公式(2)可知,参数 $k_1(x,y)$ 与 $\rho(x,y)$ 是呈正比的,所以可以对参数 $k_1(x,y)$ 进行区间划分,以此获取最佳投影亮度。基于此原理,投射一个较低且已知强度的均匀光至被测物体表面,确保所拍摄的图片像素点不过于饱和,此时根据已知的投影强度与拍摄的图片可以迅速求解出参数 $k_1(x,y)$ 。进而得到参数 $k_1(x,y)$ 的像素分布直方图,随后根据该像素分布直方图进行曲线拟合,得到关于参数 $k_1(x,y)$ 的像素分布曲线。图2显示的是一幅关于参数 $k_1(x,y)$ 像素分布曲线的图例,图中的横坐标代表的是参数 $k_1(x,y)$ 的值;纵坐标则表示像素点的数量。由此像素曲线分布图能够把参数 $k_1(x,y)$ 分割成几个小范围的簇,而对每个簇实现划分则是基于 $k_1(x,y)$ 明显的一个尖峰与两边的峰谷。划分后的一个簇内的参数 $k_1(x,y)$ 的值是接近的,在理论上只需要一个投影亮度即可。但是为了兼顾尽可能多的像素点,本方法在一个簇内选取3个 $k_1(x,y)$ 。具体选取策略于图2的第一个簇内进行了标注。其中对参数 $k_1(x,y)$ 的第一个取值是取簇内左侧的峰谷,这样能够补偿反射率较小的像素点。第二个则取此簇内尖峰处的 $k_1(x,y)$ 值,取这个值能够补偿簇内最多的像素点。第三个值取本簇内右侧的峰谷,该值是本簇内参数 $k_1(x,y)$ 的最大值,可以确保这部分簇内的图像不会出现过饱和像素点。因此假设对 $k_1(x,y)$ 像素分布曲线上

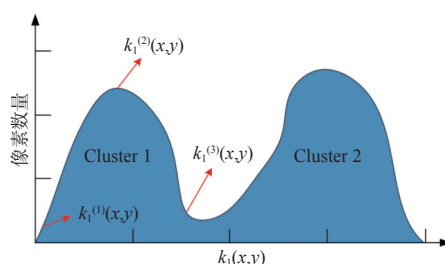


图2 像素分布曲线图

Fig. 2 Curves of pixel distribution

的簇由左到右分别从 1- i 进行标记, 总共 i 个簇。这样一共可以获得 $3i$ 个投影亮度。随后基于所获得的投影亮度拍摄被测物体的图片。

1.3 图像融合算法

得到数个最佳投影强度下的原始图片后, 需要保留图片上各个像素点的最佳灰度值, 因此能够通过建立一个掩模图片 $M_i(x,y)$ 来实现, 其公式如下所示:

$$M_i(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } I_{i+1}(x,y) < I_i(x,y) < 0.98 \times I_{\max}(x,y) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

由公式(8)得出 $M_i(x,y)$ 后, 把 $I_i(x,y)$ 和 $M_i(x,y)$ 相乘后求和, 这样可以保留 $I_i(x,y)$ 中的最佳像素灰度值融合到一张图片中去, 其公式如下所示:

$$I_{\text{opt}}(x,y) = \sum M_i(x,y) \times I_i(x,y) \quad (9)$$

式中: $I_{\text{opt}}(x,y)$ 是在最佳投影强度下的融合图片。此时融合图片的像素点灰度值大多是最大不饱和的。因此这样得到的融合图片的信噪比较高, 从而能够提高三维重构的精度。

2 实验与结果分析

为了验证本文所提出的方法的有效性, 搭建了如图 3 所示结构光测量系统。测量系统采用了 LCD 投影仪。相机则是 FLIR 公司制造的型号为 BFS-U3-23S3M-M 的灰度相机 (配 HC1605 镜头), 其分辨率为 $1\,920 \text{ pixel} \times 1\,200 \text{ pixel}$ 。



图 3 测量系统

Fig. 3 Physical picture of measurement system

本方法的实验步骤如下:

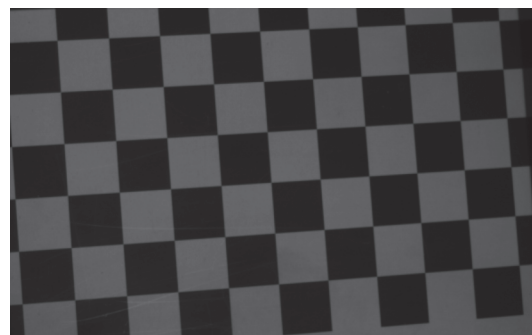
- 1) 投影一张灰度值已知的均匀白光至被测物体表面且由相机进行拍摄, 需保证所拍摄的图片上无饱和像素;
- 2) 快速求解出相机与投影仪的响应系数, 得到响应系数的分布曲线, 并基于所提出的最佳投影亮度确定策略得到所需的投影亮度;
- 3) 将确定的投影亮度分别投影至被测物体,

同时用相机拍摄各个亮度下的图片, 再根据图像融合算法对所拍摄的图片进行融合;

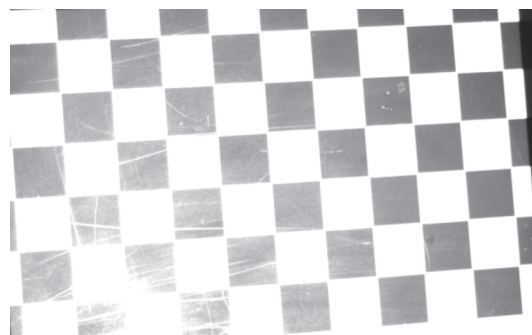
- 4) 基于所得的融合图片实现对被测物体的三维点云重构。

2.1 基于最佳投影亮度的图片融合

为验证本方法的有效性, 实验对象选择了黑白棋盘格, 因为其表面动态范围较大。图 4(a) 和图 4(b) 显示了相机所拍摄的黑白棋盘格在投影亮度分别为 100 和 255 时的图片。



(a) 投影亮度100的图像



(b) 投影亮度255的图像

图 4 不同投影亮度的图像。

Fig. 4 Images with different projection brightness

由图 4 可知, 由于该黑白棋盘格的动态范围较大, 导致仅在单一亮度下所拍摄的图片容易过亮或过暗, 因此如果在这样单个亮度下直接对被测物体进行三维测量很容易出现误差。所以在测量此类 HDR 表面物体时, 很有必要使用多个亮度对被测物体进行补偿。

图 5 显示了在投影亮度为 140 时黑白棋盘格的图片。

因为在投影亮度为 140 时图片上像素灰度值均不过饱和, 所以本实验使用该图片作为输入, 即可求解相机-投影仪的响应关系。所得响应关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 参数 $k_1(x,y)$ 按最佳投影亮度确定策略进行取值可得: 0.11、0.33、0.75、1.30、1.73、1.83。其中 $k_1(x,y)$ 的值小于 1 时, 意味

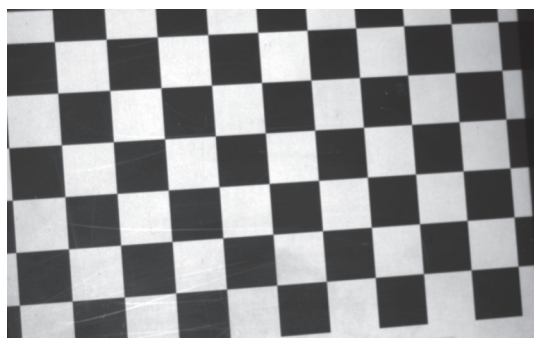


图5 投影亮度为 140 的图像

Fig. 5 Image with projection brightness of 140

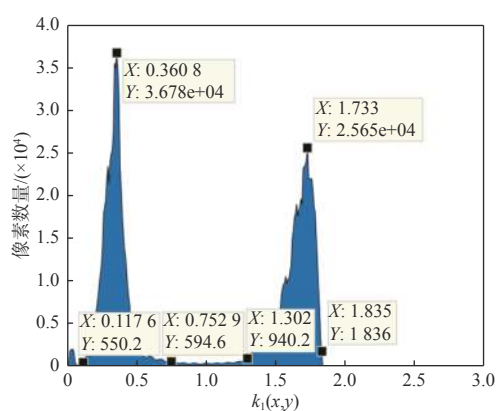


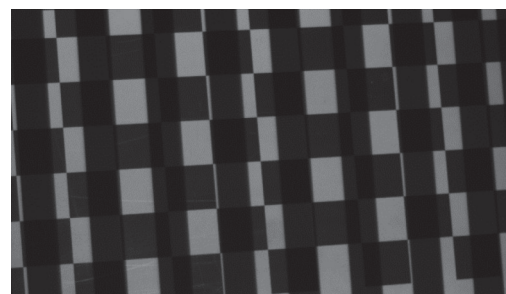
图6 相机与投影仪的响应分布曲线

Fig. 6 Response distribution curves of camera and projector

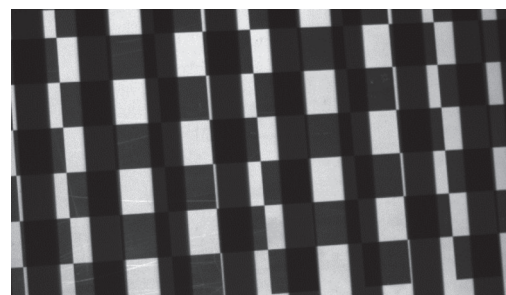
着被测物的此部分表面反射率过低, 在这种情况下, 只通过改变投影亮度, 无法使相机拍摄的图片达到最大不饱和状态。所以在 $k_1(x,y)$ 小于 1 时最佳投影亮度可设置为 250。因此根据参数 $k_1(x,y)$ 的值可以计算出所需要的投影亮度为: 135、145、192、250。

由上述方法得到的 4 个投影亮度的原始条纹图像如图 7(a)、7(b)、7(c)和 7(d)所示, 基于这 4 个投影亮度下的条纹图像进行图像融合, 得到最佳的融合图像。融合后的图像及其像素分布直方图如图 8(a)、图 8(b)所示, 由图 8(b)可以直观看出在融合后的图像中, 大部分像素的灰度并不饱和, 且都保持着高像素水平。

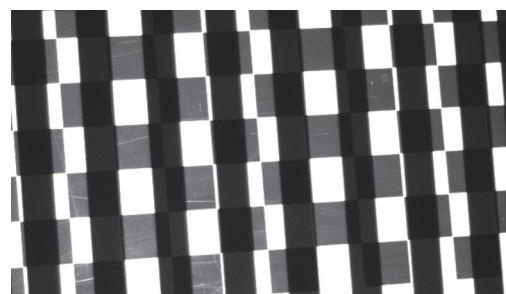
对融合图像及单张投影亮度下的图像进行信噪比计算, 结果如表 1 所示。表 1 显示了融合图片与其他几张单个亮度下的图片的信噪比。根据其信噪比大小可知, 融合图片在避免像素点饱和情况下保持了较高的信噪比, 有效提升了图片质量。



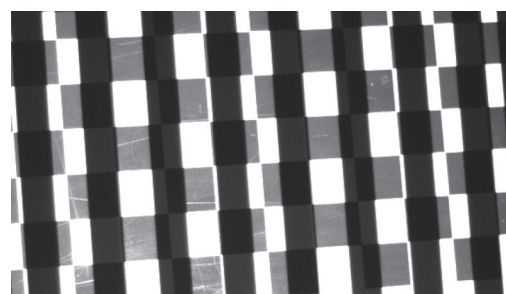
(a) 投影亮度为135的图像



(b) 投影亮度为145的图像



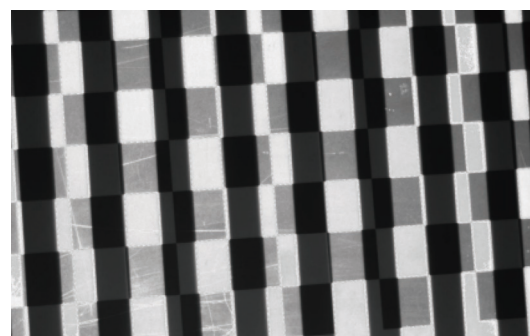
(c) 投影亮度为192的图像



(d) 投影亮度为250的图像

图7 4幅不同投影亮度的图像

Fig. 7 Four images with different projection brightness



(a) 融合图像

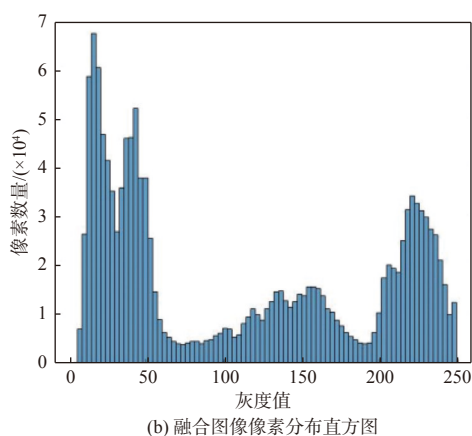


图8 融合图像及其像素分布直方图

Fig. 8 Fused image and histogram of pixel distribution

表1 多组图像对的信噪比

Table 1 Signal-to-noise ratio of multiple image pairs

图像	SNR
融合图片	15.09
投影亮度255图片	16.53
投影亮度140图片	13.30
投影亮度100图片	2.05

2.2 图像质量分析

图9是各亮度下的图片及融合图片的第310行频域分布曲线。由图9可知,融合图片的高频分量略小于投影亮度为255时图像的高频分量,远远高于其他亮度图片下的高频分量。而图片中高频分量即代表图像边缘,为图片中灰度变化剧烈的部分。这证明了本文所提出的方法在确保图片像素点不过饱和时,融合图片的高频分量得以增强。这意味着融合图片的边缘信息更加分明,其黑白条纹间的模糊过渡区域被大大减少。因此在

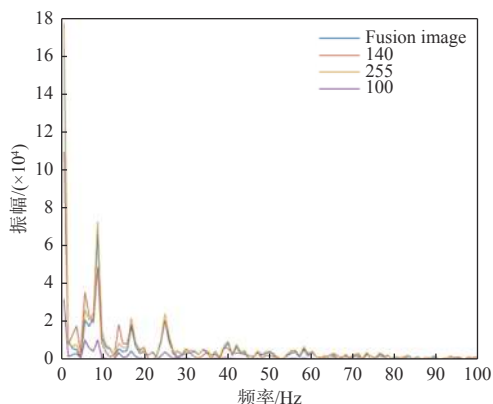


图9 融合图像及各个投影强度下的图像的频率分布

Fig. 9 Frequency distribution diagram of fused image and images under various projection intensities

条纹边缘提取时将更加精准,从而有助于提高三维测量精度。

2.3 被测物体三维重构

本实验中采用的结构光编码方式是格雷码的编码方式,被测物体是黑白棋盘格。根据提出的原理对被测物体进行三维重构,重构结果如图10所示。该图显示了被测物体的三维重构结果图。根据该重构结果可知,被测物体的三维点云完整。这证明了本文所提出的方法即可有效消除被测物体高反射率表面过亮的影响,亦可以有效补偿被测物体表面的低反射率区域,提升了对HDR物体三维点云重构的精度。

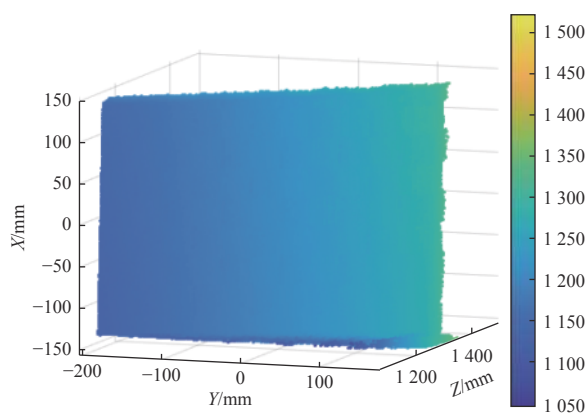


图10 三维重构结果

Fig. 10 Diagram of 3D reconstruction results

3 结论

本文提出了一种基于调整投影图案亮度的快速测量方法,该方法通过求解相机与投影仪之间的响应关系,结合所提出的一个简便的投影亮度确定方法,再基于所提出的图像融合算法,可以获得高质量的融合图片,从而实现了对HDR物体的高精度三维重构。与传统的基于改变投影亮度的方法相比,该方法仅需要投影一张均匀白光至被测物体上,并由相机拍摄一张图片,即可快速求解出相机和投影仪之间的响应函数,从而能够定量分析求得所需要的投影亮度,而无需盲目投射和拍摄大量图片或计算复杂的单应性矩阵,使得测量速度有极大的提升。

参考文献:

- [1] 李健, 陈长明, 高文娟. 三维信息测量技术研究[J]. 机械设计与制造, 2010(3): 222-224.

- LI Jian, CHEN Changming, GAO Wenjuan. Research on 3D information measurement technology[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2010(3): 222-224.
- [2] VO M, WANG Z, HOANG T, et al. Flexible calibration technique for fringe- projection-based three-dimensional imaging[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(19): 3192.
- [3] IZQUIERDO M, SANCHEZ M T, IBAEZ A, et al. Sub-pixel measurement of 3D surfaces by laser scanning[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 1999, 76(1): 1-8.
- [4] RUI H, SMITH W. Shape-from-shading under complex natural illumination[C]// IEEE International Conference on Image Processing, Belgium, Brussels: IEEE, 2011.
- [5] JU X, SIEBERT J, KHAMBAY B, et al. Self-correction of 3D reconstruction from multi-view stereo images[C]// IEEE, 12th International Conference on Computer Vision Workshops. Kyoto, Japan: ICCV Workshops, 2009: 1606-1613
- [6] HUANG H, BRENNER C, SESTER M. A generative statistical approach to automatic 3D building roof reconstruction from laser scanning data[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013: 79:29-43.
- [7] ZHANG S and YAU S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48: 033604.
- [8] JIANG H, ZHAO H, LI X. High dynamic range fringe acquisition: A novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces.[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50: 1484-93.
- [9] WADDINGTON C, KOFMAN J. Analysis of measurement sensitivity to illuminance and fringe-pattern gray levels for fringe-pattern projection adaptive to ambient lighting[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 251-256.
- [10] ZHANG C, XU J, XI N, et al. A robust surface coding method for optically challenging objects using structured light[J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2014, 11(3): 775-788.
- [11] FENG S, ZHANG Y, CHEN Q, et al. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2014, 59: 56-71.
- [12] 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.
- LI Feng, LIU Jiantao, CAI Jiajia. Surface measurement of specular-like objects based on structured light method[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2014, 37(5): 882-886.
- [13] SALAHIEH B, CHEN Z Y, RODRIGUEZ J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10064-10071.
- [14] 王张颖, 高楠, 张宗华. 基于并行四颜色通道条纹投影的三维测量术[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 217-224.
- WANG Zhangying, GAO Nan, ZHANG Zonghua. Three-dimensional measurement based on parallel four-color channel fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 217-224.
- [15] 张宗华, 刘小红, 郭志南, 等. 基于结构光的镜面/漫反射复合表面形貌测量[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 206-212.
- ZHANG Zonghua, LIU Xiaohong, GUO Zhinan, et al. Specular/diffuse reflection composite surface topography measurement based on structured light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 206-212.