光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022031701

一种基于结构光的高反光表面三维重建算法

迟云鹏[1,2*]，刘文波[1,2]，徐　方[1,2]

（1. 南京航空航天大学 自动化学院，南京 211100；
2. 高速载运设施的无损检测监控技术工业和信息化部重点实验室，南京 211100）

摘　要： 针对高反光表面的三维重建一直是结构光技术中的重点及难点。文章基于多重曝光法及调整投影条纹强度法，提出了一种曝光时间序列以及条纹亮度序列的选择方法，利用被测物体在不同投影条件下的表面临过曝像素点数统计直方图，结合图像中像素点数的不过曝比例，计算所求的曝光时间及条纹亮度序列，完善了针对高反光表面的高动态范围技术。实验结果表明，文章提出方法能够有效地提升高反光表面三维重建的精度，点云中有效像素点数可以达到96%以上。

关键词： 投影光栅相位法；高反光表面；高动态范围技术；相位立体匹配；三维重建

中图分类号： TP391.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0809－07

A 3D Reconstruction Algorithm for Highly Reflective Surfaces Based on Structured Light

CHI Yunpeng[1,2], LIU Wenbo[1,2], XU Fang[1,2]

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, College of Automation Engineering, Nanjing 211100, CHN;
2. Non-Destructive Testing and Monitoring Technology for High-Speed Transport Facilities Key Laboratory of Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Nanjing 211100, CHN)

Abstract: Three-dimensional reconstruction of highly reflective surfaces has always been the focus and difficulty in structured light technology. Based on the multiple exposure method and the method of adjusting the projected fringe intensity, this paper proposed a selection method of exposure time sequence and fringe brightness sequence. Using the statistical histogram of the number of overexposed pixels on the surface of the tested objects under different projection conditions, combined with the non-overexposure ratio of the number of pixels in the image, the desired exposure time and fringe intensity sequence was calculated, and the high dynamic range technology for highly reflective surfaces was completed. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of 3D reconstruction of highly reflective surfaces, and the number of effective pixels in the point cloud can reach more than 96%.

Key words: fringe projection profilometry; highly reflective surface; high dynamic range technology; phase-based stereo matching; 3D reconstruction

0　引言

在三维形貌测量技术中，结构光三维重建技术因其速度快、精度高、非接触等优势，在诸多应用领域发挥着作用[1-3]。针对高反光表面的三维重建仍是研究中的重点及难点。

高反光表面大致分为类镜面表面和漫反射表面。类镜面表面趋向于镜面反射，解决其图像过曝的方法中比较常见的是相位测量偏折术，该方法运用相机拍摄显示屏上条纹经过反射的镜像，再根据相位得到高度信息[4]。

漫反射表面成像出现过曝是由于物体表面反射

收稿日期：2022－03－17.
基金项目：国家重点研发计划项目(2018YFB2003304)；国家自然科学基金项目(61871218)；中央高校基本科研业务费项目(NJ2019007，NJ2020014).
* **通信作者：**迟云鹏　**E-mail：**1059619370@qq.com

光较强，或是源于投射光线与相机角度的关系导致的物体表面反射率变化范围较大，造成成像灰度超出相机传感器动态范围。解决其图像过曝最常用的方法即为高动态范围技术（High Dynamic Range，HDR）[5-8]。现有的 HDR 技术大抵分为六类：多重曝光法、调整投影条纹强度法、偏振滤光片法、颜色不变量法、光度立体技术以及其他技术，本文着重研究前两类。多重曝光技术是指将不同曝光时间下采集的图像合成一幅图像来避免饱和；调整投影条纹强度法是指根据物体表面反射率的不同来确定投影条纹的强度，从而避免图像过曝[9]。

国内外诸多学者以上述 HDR 技术为基础开展了诸多研究。姜宏志等[10]提出了一种改良的投影栅相位法，利用亮暗条纹投射、多曝光时间采集图像解决成像灰度与相机动态范围不一致的问题，但其在曝光时间以及条纹亮度的选择上只是根据表面特点进行手动选择。姜嫚妮等[11-12]采用了一种改进的三维测量方法，将投影条纹进行二值化处理，再进行多曝光时间图像采集融合，该方法增强了编码图像的鲁棒性。王平靖等[13]基于稀疏表示理论，提出了空间自适应迭代奇异值阈值算法，该方法可以增强图像细节信息，自适应地去除高光像素。张翼翔等[14]提出了一种结合独立分量分析算法的投影栅相位法，通过在镜头前旋转偏振片得到不同角度的偏振图像，再利用独立分量分析算法，将漫反射光分量分离出来而完成重建。

本文基于多重曝光法以及调整投影条纹强度法，提出了一种曝光时间序列以及条纹亮度序列的选择方法，完善了针对高反光表面的高动态范围技术。在传统方法的基础上，利用被测物体表面曝光度的统计直方图进行合理的甄别选择，使图像融合更平滑，重建精度更高，从而高效地完成对具有高反光表面物体的三维形貌测量。

1 高反光表面物体测量方法

1.1 反射模型分析

光线具备漫反射波瓣、镜面反射波瓣、镜面反射波尖三种基本反射模式，具体如图 1 所示[15]。漫反射在所有方向均匀散射光，即漫反射波瓣的反射光强在所有方向相等；镜面反射中光线只会在一组反射方向上散射，镜面反射波瓣的反射光强分布在与反射光线成一定角度的范围内，镜面反射波尖的反射光强集中在反射光线的方向上。

高反光表面的反射模型是三种反射模式的综合，其中，漫反射波瓣的光强较弱，镜面反射波瓣和镜面反射波尖的光强较强，由于相机感光元件动态范围有限，漫反射波瓣对应处会过暗，镜面反射波尖对应处会饱和。在后续的相位解算中，若图像过暗会导致部分灰度值数据数值过小，再经由相机本身噪声以及灰度量化误差等的干扰，图像信噪比会大幅下降，从而计算出的相位值误差也会较大，无法满足测量精度的要求；若图像饱和会导致部分灰度值数据达到最大值，无法真实反映高反光表面的条纹图像亮度，从而导致公式计算出的相位值出现错误，无法正常测量。

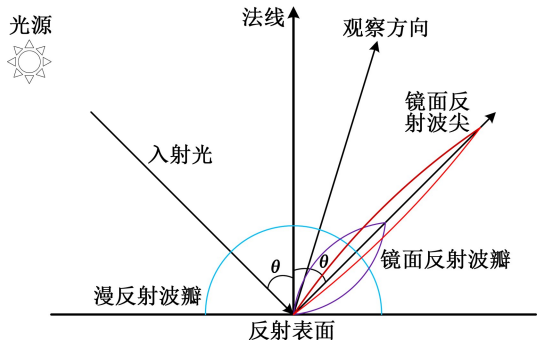


图 1 物体表面反射模型

1.2 测量原理分析

本文采用的基础测量方法是基于投影栅相位法的结构光测量技术，若被测表面不具有高反光特性，即可直接采集图像进行重建。对图像的处理步骤分为三步：双目系统标定、相位信息提取、相位立体匹配。

1.2.1 双目系统标定

双目系统由双目相机、投影仪等硬件器材组成，标定是为了得到摄像头的内参、畸变系数、外参，在之后的立体匹配当中需要上述参数来进行双目校正和深度图生成。

本文采取张正友标定法，利用圆点标定板，从不同方向拍摄多组图片，具体流程如图 2 所示：首先对左右相机进行靶标图像采集，靶标即为标定所用的圆点标定板；再对左右靶标图像提取特征点，即圆心；接着对左右相机图像特征点做亚像素优化；然后相机单独内参标定，得出相机内参矩阵，其中包括焦距 f_x 和 f_y、主点坐标 x_0 和 y_0，以及坐标轴倾斜参数 s 等；最后联合标定，即可得出全部相机内外参数，外参包括旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$、平移矩阵 $\boldsymbol{T}$ 等。

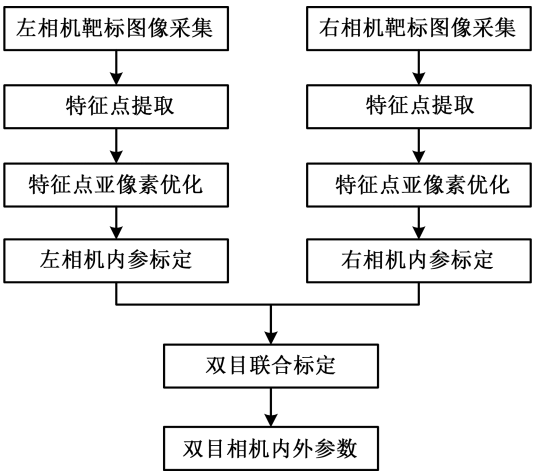


图 2　双目标定流程图

1.2.2　相位信息提取

相位信息提取通常可分为相位解调、相位展开两部分。相位解调的目的是获取某个频率光栅条纹的主值相位。本文采取四步相移法，该方法对被测物体连续投射四次正弦光栅，相邻两幅光栅图像之间的相位差为 $\pi/2$，则四幅条纹图像在坐标(x,y)处的灰度值分别为

$$\begin{cases} I_1(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[\theta(x,y)] \\ I_2(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[\theta(x,y)+\pi/2] \\ I_3(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[\theta(x,y)+\pi] \\ I_4(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[\theta(x,y)+3\pi/2] \end{cases} \tag{1}$$

式中，$I_i(x,y)$为第 i 幅光栅图像的光强分布，$A(x,y)$表示背景光强值，$B(x,y)$为调制强度，$\theta(x,y)$为光栅条纹图像的主值相位。根据式(1)可以推出计算主值相位 $\theta(x,y)$的公式为

$$\theta(x,y)=\arctan^{-1}\left[\frac{I_4(x,y)-I_2(x,y)}{I_1(x,y)-I_3(x,y)}\right] \tag{2}$$

相位展开的目的是对主值相位进行去周期化，获得全场连续的绝对相位分布，本文使用多频外差法。首先选择三种频率的光栅条纹，其图像条纹数依次为 N，$N-1$，$N-\sqrt{N}$；其次利用外差合成将多种频率的相位分布函数合成为一个频率更低的相位分布函数；最后再利用相位展开，以低频的相位函数为基础，获得高频主值相位的展开相位函数，具体流程如图 3 所示。

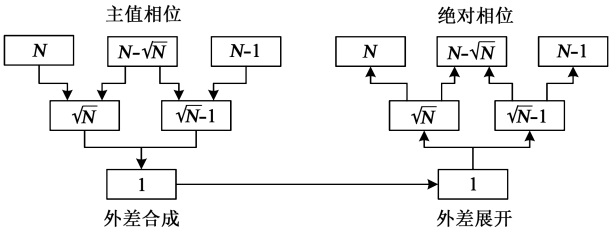


图 3　多频外差法流程图

1.2.3　相位立体匹配

相位立体匹配的目的是找到空间中某点在左右相机成像点的对应关系。根据多视图几何原理，立体匹配可将同名点的对应关系转换成视差图输出，利用视差图结合相机内外参数即可得到物体的三维坐标。

该步骤的输入为左右绝对相位图。首先进行极线校正，使左右图像中的同名点位于两幅图像的同一横行上，便于后续的匹配。接着将单点相位差的绝对值作为匹配代价，得到被测物体的视差图。再根据视差图计算出该物体的三维坐标，即可生成点云，完成重建。

1.3　针对高反光表面的测量方法

高反光表面按上述方法得到的点云会有空洞，为解决该问题，本文结合 HDR 技术提出了曝光时间序列以及条纹亮度序列的选择方法。

1.3.1　高动态范围技术

摄像机在同一环境下对亮暗区域的识别有一定范围，即动态范围。HDR 技术即可扩大动态范围，改善图像质量。本文参考了 HDR 技术中的多重曝光法及调整投影条纹强度法。多重曝光法是对同一高反光表面，选择多个曝光时间拍摄图像再融合；调整投影条纹强度法是对同一高反光表面，选择多种强度的光栅条纹对其进行投射并融合。对于高反光表面，若曝光时间较长或投影条纹亮度较高，图像的较暗区域会变得清晰但反光区域就会过曝；若曝光时间较短或投影条纹亮度较低，图像的反光区域会变得清晰但较暗区域就会欠曝。

据此不难看出两种技术的重点即是对于曝光时间以及投影条纹亮度的选择。目前国内外学者对此提出了多种方法，各有优劣。本文提出了一种利用表面临过曝像素点数统计直方图计算所需数据的方法，临过曝像素点数意为在该曝光时间下未过曝而在下一时间点将过曝的像素点数。

1.3.2　曝光时间及条纹亮度选择方法

选择曝光时间以及条纹亮度是测量过程中的重点，为此本文提出的流程如下：

(1)针对被测表面构建小型数据集

首先确定好被测物体附近环境光，在图像采集流程中尽量保持不变。将被测物体放入左右相机视

野当中，投影仪投射白光，用于制作掩模图像。

依据被测物体表面特性选择曝光时间下限值 $t_\min$ ms，上限值 $t_\max$ ms，测量次数 r_i 次，则每次测量间隔为 $(t_\max-t_\min)/n$ ms，每次选择的曝光时间即为 t_i ms$(i=0,1,\cdots,n)$。下限值不宜过小，能使得被测物体所有反光位置不过曝即可；上限值亦不宜过大，使得被测物体过暗位置清晰可见即可。按照测量间隔对被测表面采集图像，得到该被测物体关于曝光时间容量为 r_i 的小型数据集。条纹亮度同理，本文采用相对亮度无量纲，范围是 0～255。设定其下限值 $b_\min$，上限值 $b_\max$，测量次数 m 次，每次测量间隔即为 $(b_\max-b_\min)/m$，每次选择的条纹亮度即为 $b_i(i=0,1,\cdots,m)$。具体情况如图 4 所示，两个小数据集构建完成。

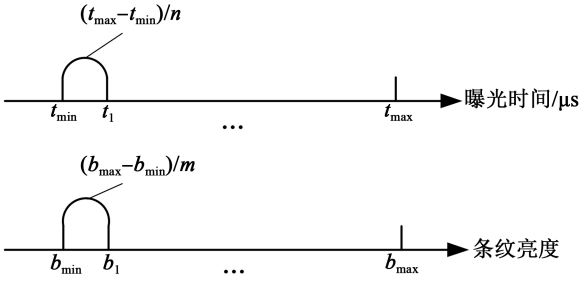


图 4 小型数据集构建示意图

(2)构建统计直方图

对数据集进行筛选，选出在采集过程中完成不过曝到过曝转换的像素点。对于曝光时间，挑选出所有在 $t_\min$ ms 不过曝却在 $t_\max$ ms 过曝的像素点，将上述像素点存放在矩阵 $\boldsymbol{t}_\exp$ 中；同理，对于条纹亮度，挑选出所有在 $b_\min$ 不过曝却在 $b_\max$ 过曝的像素点，该组像素点的灰度值存放进 $\boldsymbol{b}_\exp$ 中。

接下来对矩阵中的像素点进行统计，找出每个像素点临过曝的估计曝光时间 t_pre 以及每个像素点临过曝的估计条纹亮度 b_pre，公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} t_\mathrm{pre}=\dfrac{t_\max-t_\min}{n}\times j_{\mathrm{t}} \\ (\boldsymbol{t}_\exp(i_{\mathrm{t}},j_{\mathrm{t}})<1\&\&\boldsymbol{t}_\exp(i_{\mathrm{t}},j_{\mathrm{t}}+1)=1) \\ b_\mathrm{pre}=\dfrac{b_\max-b_\min}{m}\times j_{\mathrm{b}} \\ (\boldsymbol{b}_\exp(i_{\mathrm{b}},j_{\mathrm{b}})<1\&\&\boldsymbol{b}_\exp(i_{\mathrm{b}},j_{\mathrm{b}}+1)=1) \end{cases} \tag{3}$$

式中，i_{t}，j_{t} 分别为 $\boldsymbol{t}_\exp$ 矩阵中的横坐标及纵坐标，同理 i_{b}，j_{b} 分别为 $\boldsymbol{b}_\exp$ 矩阵中的横坐标及纵坐标。通过式(3)即可求出 t_pre 以及 b_pre。最后再以 t_i 为横坐标，以把 t_i 作为 t_pre 的像素点的数量作为纵坐标，即可作出关于曝光时间的统计直方图，称之为 $f_t(t_i)$；同理以 b_i 为横坐标，以把 b_i 作为 b_pre 像素点的点数作为纵坐标，即可作出关于条纹亮度的统计直方图，称之为 $f_b(b_i)$。

(3)曝光时间及条纹亮度的选择

经过上述处理，已经得到了以曝光时间为横坐标，点数为纵坐标的统计直方图，接下来即可利用该直方图进行精确曝光时间的推算，公式如式(4)所示。

$$\left(\sum_{\mathrm{floor}(x_k)}^{n} f_t(t_i)\right)-[x_k-\mathrm{floor}(x_k)]\times f_t\cdot[\mathrm{floor}(x_k)+1]=p_k\times \mathrm{sum}_t(0\leqslant k\leqslant k_\max) \tag{4}$$

式中，sum_t 表示该直方图的总点数，x_k 表示待求的精确曝光时间，$k_\max$ 即为待求曝光时间的数量。公式最左边的求和部分是以 $\mathrm{floor}(x_k)$ 为下限，以测量次数 n 为上限，其实由于曝光时间的特殊性，当确定一个曝光时间以后，只有临过曝时间大于该过曝时间的像素点不会发生过曝现象，反映在直方图上即是该曝光时间右侧直方条所对应的像素点不会过曝，而左侧直方条对应的像素点依旧过曝。故在计算过程中，公式中累加步骤是从最右侧直方条开始，直到累加到离待求曝光值最近的直方条停止。p_k 即为在曝光时间 x_k 下，易于过曝的像素点中不过曝像素点所占的比例，之前统计的 $\boldsymbol{t}_\exp$ 矩阵中的像素点即为易于过曝的像素点。设定好不过曝比例 p_k 之后，即可解式(4)得到所求曝光时间 x_k。

计算条纹亮度 y_k 过程同上，具体计算公式如式(5)所示。

$$\left(\sum_{\mathrm{floor}(y_l)}^{m} f_b(b_i)\right)-[y_l-\mathrm{floor}(y_l)]\times f_b\cdot[\mathrm{floor}(y_l)+1]=q_l\times \mathrm{sum}_b\quad(0\leqslant l\leqslant l_\max) \tag{5}$$

式中，sum_b 表示条纹亮度直方图的总点数，y_l 表示待求的精确条纹亮度，$l_\max$ 表示待求条纹亮度的数量，q_l 即为不过曝比例。

(4)图像采集与融合

经过上述处理，即可计算出 $k_\max$ 个精确曝光

时间，以及 $l_\max$ 个精确条纹亮度，接下来在 y_l 条纹亮度投影下采集曝光时间为 x_k 的图像。理论上会采集 $k_\max\times l_\max$ 组图片，但在实际操作中，在数值较大的 y_l 下，数值较小的一部分 x_k 曝光时间的图像无需采集，因为该类图像的可用像素可被其余图像取代；同理，在数值较小的 y_l 下，数值较大的一部分 x_k 曝光时间图像也无需采集。

在图像采集过程中，依照上述的曝光时间和条纹亮度拍摄白光图像，存入图像序列 I 中，以此来制作掩模图像 Mask，其作用为确定图像中像素是否有效，有效为 1，无效为 0，具体掩模计算公式如式(6)和(7)所示。

当 $i=1$ 时，

$$\mathrm{Mask}_i(x,y)=\begin{cases}1 & I_i(x,y)\leqslant I_{\max}\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}\tag{6}$$

当 $i>1$ 时，

$$\mathrm{Mask}_i(x,y)=\begin{cases}1 & I_i(x,y)\leqslant I_{\max}\\ & \mathrm{Mask}_j(x,y)=0\\ & (j=1,2,\cdots,i-1)\\ 0 & \text{otherwise}\end{cases}\tag{7}$$

式中，i，j 为图像序号，$I_i(x,y)$为图像序列 I 中第 i 幅图像 I_i 在坐标(x,y)处的灰度值，$\mathrm{Mask}_i(x,y)$，$\mathrm{Mask}_j(x,y)$为掩模序列中 I_i，I_j 对应的掩模图像在坐标(x,y)处的掩模值，$I_{\max}$ 为掩模灰度阈值。

制作完掩模图像后，按照计算得到的曝光时间和条纹亮度拍摄条纹图像，存入图像序列 P 中。将条纹序列 P 与掩模序列 Mask 进行图像融合，得到最终条纹图像 H，如式(8)所示。

$$H(x,y)=\sum_{i=1}^{r}M_i(x,y)\times P_i(x,y)\tag{8}$$

式中，r 表示拍摄条纹的总次数，$P_i(x,y)$表示图像序列 P 中第 i 幅图像在点(x,y)处的灰度值，$H(x,y)$表示图像 H 中在点(x,y)处的灰度值。至此，图像采集合成步骤完成，可按 1.2 节流程处理，得出高反光表面的点云。

2　实验与分析

2.1　实验设备

本文所用实验设备由 DLP 投影仪以及左右两个高分辨率相机组成，实物图如图 5(a)所示。DLP 投影仪(DLP LightCrafter4500)分辨率为 912 pixel×1 140 pixel，两个相机(acA2440-75 μm)分辨率为 2 448 pixel×2 048 pixel。

实验中被测物体与实验设备的距离约为 700 mm，左右相机之间距离约为 250 mm。实验选择被测物体为表面具有漫反射特性但仍具有高反光特点的陶瓷材质碗盖，如图 5(b)所示。本实验以黑色绒布为测量背景，在较为稳定的环境光下对被测物体进行三维重建，测量具体环境如图 5(c)所示。



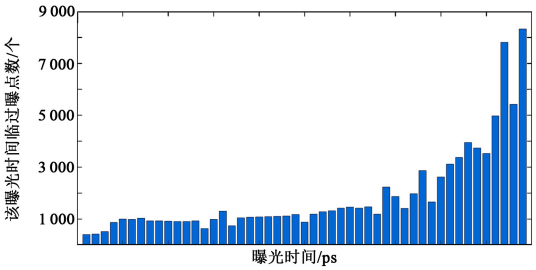
(a)　(b)　(c)

图 5　实验装置图。(a) 实验设备实物图；(b) 被测物体实物图；(c) 整体实验环境图

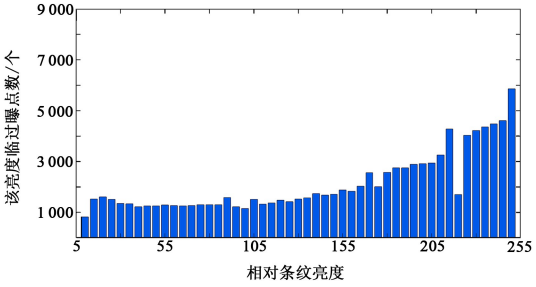
2.2　高反光表面三维重建实验

2.2.1　构建统计直方图

针对曝光时间，本文选择的下限为 0 ms，上限为 50 ms，采集 50 张白光图片，采集间隔为 1 ms；针对相对条纹亮度，本文选择下限为 5，上限为 255，采集 50 张白光图片，采集间隔为 5。依照 1.3.2 节第二部分内容绘制的直方图如图 6 所示。



(a)　曝光时间统计直方图



(b)　条纹亮度统计直方图

图 6　曝光时间与条纹亮度统计直方图

根据统计直方图可以看出，除极个别位置以外，随着曝光时间、条纹亮度的增加，临过曝点数呈上升趋势，接下来即可根据该规律选择合适的像素点数不过曝比例。

2.2.2 选择曝光时间以及条纹亮度

通过直方图可以看出曝光时间的影响效果要比条纹亮度的大，所以本文选择在两种条纹亮度下，做多组曝光时间变化实验。根据图 6(b)统计规律，兼顾亮条纹与暗条纹均衡投射及实验经验，本文选择的条纹亮度不过曝比例为 0.35 及 0.90；根据图 6(a)统计规律，兼顾高低曝光时间及实验经验，本文选择的曝光时间不过曝比例分别为 0.35，0.75，0.88，0.95，0.97，0.99。高不过曝比例表示低曝光时间，由于该被测物体过曝处极其敏感，尖峰处过曝非常严重，于是本文集中于低曝光时间选择序列。在不同亮度下投射条纹情况如表 1 所示。

表 1 测量用条纹亮度曝光时间对应表

条纹亮度对应不过曝比例 p	相对条纹亮度 b	曝光时间对应不过曝比例 q	曝光时间 t/ms
0.35	204.774	0.35	42.988
		0.75	23.369
		0.88	11.597
0.9	39.032	0.75	23.369
		0.88	11.597
		0.95	4.942
		0.97	3.199
		0.99	1.425

从表 1 可以看出，本次实验并没有在每个条纹亮度下选择同样数量的曝光时间，而是在高亮度下选择少且高的曝光时间，低亮度下选择多且低的曝光时间，是因为高亮度下的低曝光时间与低亮度下的高曝光时间成像效果相似，无需采集，可以减少投影次数，节省实验时间。为与上述实验做对比，手动选择一组条纹亮度曝光时间，具体数据如表 2 所示。

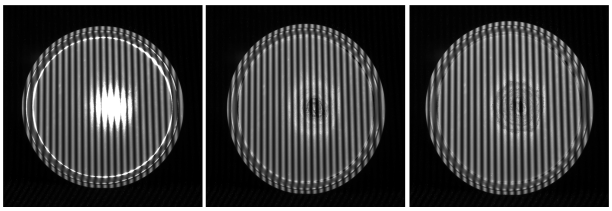
表 2 手动选择条纹亮度曝光时间对应表

相对条纹亮度 b	曝光时间 t/ms	相对条纹亮度 b	曝光时间 t/ms
200.000	40.000	50.000	40.000
	30.000		30.000
	20.000		20.000
	10.000		10.000
	1.000		1.000

2.2.3 图像采集与融合

按照 2.2.2 节中所计算得出的条纹亮度和曝光时间进行白光图像与条纹图像采集，利用白光图像计算出每个条件下的掩模，进行图像融合，结果如图 7 所示。

图 7(a)所示的投影条纹相对亮度为 200，曝光时间为 40 ms。可以看出，未进行处理的采集图像过曝非常严重，有着大块反光斑点；经由图 7(b)所示手动选择的数据融合之后，过曝处即可看见条纹，只是原过曝处周围灰度值落差较大，较为显眼；而图 7(c)相比前图有所改善，融合处较为平滑。



(a) (b) (c)

图 7 图像融合结果。(a) 未进行融合示意图；(b) 手动选择数据融合效果图；(c) 直方图计算选择数据融合效果图

2.2.4 三维重建实验

接下来根据 1.2 节内容，对融合图像进行三维重建，得到解相图及点云，如图 8 所示。

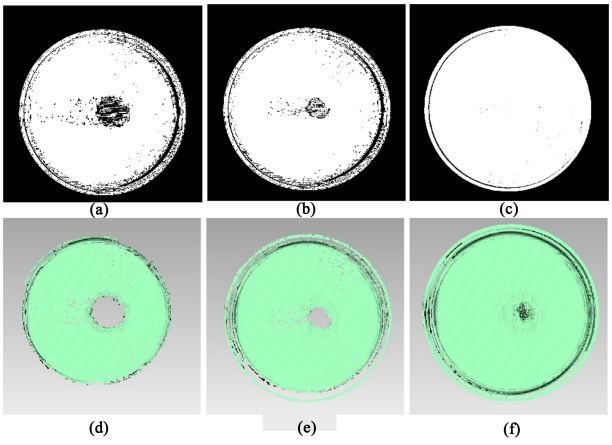


图 8 三维重建结果。(a) 未融合解相图；(b) 手动选择数据解相图；(c) 直方图计算选择数据解相图；(d) 未融合点云；(e) 手动选择数据点云；(f) 直方图计算选择数据点云

通过图 8 可以直观地看出本文提出的直方图计算方法能够大幅度改善解相图以及点云的成像质量。关于点云数据的直观对比如表 3 所示。

表 3 可识别点云数据所占比例

点云数据名称	未反光碗盖点云像素数量/个	点云有效像素数量/个	点云有效像素数量所占比例/%
未融合点云	730 514	545 024	74.61
手动选择数据点云		617 730	84.56
直方图计算数据点云		704 083	96.38

表 3 可以直观反映出本文所提方法对于点云像素点数量比例的提升，可达到 96%以上。

3 结论

本文基于 HDR 技术提出了一种曝光时间以及条纹亮度的选择方法，完善了针对高反光表面的重建方法。利用被测物体在不同投影条件下的表面临

过曝像素点数统计直方图对曝光时间和条纹亮度的计算选择，使图像融合更平滑。该方法与传统 HDR 方法比较，点云像素点比例提升到 96%以上，可以实现对高反光表面进行重建的要求。

参考文献：

[1] 薛　峰，陈　龙，张峰峰. 基于结构光的强反射表面三维重建方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报，2021，26(5)：18-24.
Xue Feng，Chen Long，Zhang Fengfeng. Research on 3D reconstruction method of strongly reflective surface based on structured light[J]. J. of Harbin University of Science and Technology，2021，26(5)：18-24.

[2] 王道川. 高反光物体表面的三维重建方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2020.
Wang Daochuan. Research on 3D reconstruction method of highly reflective surfaces[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2020.

[3] Song Z，Chung R，Zhang X. An accurate and Robmst strip-edge-based structured light means for shiny surface micromeasurement in 3-D[J]. IEEE Trans. on Industrial Electron.，2013，60(3)：1023-1032.

[4] 王　乐. 基于相位测量偏折术(PMD)的高反射镜面三维重建方法研究[D]. 青岛：山东科技大学，2020.
Wang Le. Research on 3D reconstruction method of highly reflective mirror surface based on phase measurement deflectometry (PMD)[D]. Qingdao：Shandong University of Science and Technology，2020.

[5] 孙　婧，徐　岩，段绿茵，等. 高动态范围(HDR)技术综述[J]. 信息技术，2016(5)：41-45，49.
Sun Jing，Xu Yan，Duan Lüyin，et al. Review of high dynamic range (HDR) technology[J]. Information Technology，2016(5)：41-45，49.

[6] Song Z，Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. Proc. SPIE，2009，7066：033604.

[7] Jiang Hongzhi，Zhao Huijie，Li Xudong. High dynamic range fringe acquisition：A novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces[J]. Optics and Lasers in Engineering，2012，50(10)：1484-1493.

[8] Song Z，Jiang Hualie，Lin Haibo，et al. A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface[J]. Optics and Lasers in Engineering，2017，95(8)：8-16.

[9] 张宗华，于　瑾，高　楠，等. 高反光表面三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程，2020，49(3)：104-116.
Zhang Zonghua，Yu Jin，Gao Nan，et al. Three-dimensional topography measurement technology of highly reflective surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(3)：104-116.

[10] 姜宏志，赵慧洁，李旭东，等. 用于强反射表面形貌测量的投影栅相位法[J]. 光学精密工程，2010，18(9)：2002-2008.
Jiang Hongzhi，Zhao Huijie，Li Xudong，et al. Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface[J]. Optics and Precision Engineering，2010，18(9)：2002-2008.

[11] 姜嫚妮，李　锋，严婷婷. 基于投影栅相位法的强反射表面三维测量[J]. 电光与控制，2021，28(1)：94-97.
Jiang Manni，Li Feng，Yan Tingting. Three-dimensional measurement of strongly reflective surfaces based on projection grating phase method[J]. Electro-Optics and Control，2021，28(1)：94-97.

[12] 姜嫚妮. 强反射表面的光栅投影三维测量方法研究[D]. 镇江：江苏科技大学，2020.
Jiang Manni. Research on 3D measurement method of grating projection on strongly reflective surfaces[D]. Zhenjiang：Jiangsu University of Science and Technology，2020.

[13] 王平靖. 基于稀疏表达的强反射表面高光抑制方法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2017.
Wang Pingjing. Research on the method of highlight suppression on strongly reflective surfaces based on sparse representation[D]. Harbin：Harbin University of Science and Technology，2017.

[14] 张翼翔，张连新. 基于投影栅相位法和独立分量分析的强反射表面形貌测量[J]. 激光与光电子学进展，2020，57(5)：129-135.
Zhang Yixiang，Zhang Lianxin. Topography measurement of strongly reflective surfaces based on projected grating phase method and independent component analysis[J]. Advances in Lasers and Optoelectronics，2020，57(5)：129-135.

[15] 袁　婷，张　峰，陶小平，等. 基于相位测量偏折术的反射镜三维面形测量[J]. 光学学报，2016，36(2)：109-115.
Yuan Ting，Zhang Feng，Tao Xiaoping，et al. Three-dimensional surface shape measurement of mirrors based on phase-measuring deflectometry[J]. J. of Optics，2016，36(2)：109-115.

作者简介：

迟云鹏(1998—)，男，辽宁省大连市人，硕士生，主要研究方向为图像处理、机器视觉。