中国光学（中英文）
Chinese Optics
Ei 核心期刊

面向高反光表面的结构光面形测量方法

汪运 郭建英 梁浚哲 朱峰 陈光希 任茂栋 梁晋

Structured light surface shape measurement method for highly reflective surfaces

WANG Yun, GUO Jian-ying, LIANG Jun-zhe, ZHU Feng, CHEN Guang-xi, REN Mao-dong, LIANG Jin

引用本文:
汪运, 郭建英, 梁浚哲, 朱峰, 陈光希, 任茂栋, 梁晋. 面向高反光表面的结构光面形测量方法[J]. 中国光学, 2025, 18(1): 42–52. doi: 10.37188/CO.2024–0087
WANG Yun, GUO Jian-ying, LIANG Jun-zhe, ZHU Feng, CHEN Guang-xi, REN Mao-dong, LIANG Jin. Structured light surface shape measurement method for highly reflective surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(1): 42-52. doi: 10.37188/CO.2024-0087

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024–0087

文章编号　2097-1842(2025)01-0042-11

面向高反光表面的结构光面形测量方法

汪　运[1], 郭建英[1], 梁浚哲[2], 朱　峰[1], 陈光希[1], 任茂栋[3], 梁　晋[1*]
（1. 西安交通大学 机械工程学院 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
2. 西安交通大学 微电子学院, 陕西 西安 710049;
3. 新拓三维技术 (深圳) 有限公司 创新实验室, 广东 深圳 518060）

摘要: 高反光表面复杂的反射性质会使面结构光测量时出现过度曝光和曝光不足的问题。为完整准确地重建被测表面, 本文提出一种能根据被测表面反射强度预测曝光时间的多重曝光方法。首先, 通过投射一系列不同曝光时间下的均匀灰度图像获得成像系统的相机响应曲线, 同时计算得到能反映被测表面反射强度的辐照度图像。然后, 通过模糊 C 均值聚类方法, 自适应分割目标不同辐照度区域并获得各区域的中心辐照度, 利用相机响应曲线预测不同反射区域的最优曝光时间。最后, 结合多重曝光融合算法实现对高反光表面的三维重建。实验结果显示, 所提方法能同时重建铝合金表面的强烈反光区域和过暗区域, 重建误差小于 0.5 mm, 最大偏差降低了 74.78%, 标准偏差降低了 48.96%。上述结果表明, 所提方法能根据区域反射特性准确预测曝光时间, 有效克服区域过曝和区域过暗带来的相位缺失和相位失真问题, 完整准确地重建了高反光表面的不同反射区域。

关　键　词: 高反光表面; 结构光; 多重曝光; 辐照度; 聚类分割
中图分类号: TH741　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0087　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0087

Structured light surface shape measurement method for highly reflective surfaces

WANG Yun[1], GUO Jian-ying[1], LIANG Jun-zhe[2], ZHU Feng[1], CHEN Guang-xi[1], REN Mao-dong[3], LIANG Jin[1*]
（1. *State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering*, *School of Mechanical Engineering*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049, *China*;
2. *School of Microelectronics*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049,*China*;
3. *Innovation Lab*, *XTOP 3D Technology (Shenzhen) Co. Ltd.*, *Shenzhen* 518060, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *liangjin@mail.edu.cn*

Abstract: The complex reflective properties of highly reflective surfaces bring overexposure and underexposure problems to surface structured light technology. In order to reconstruct the measured surface completely and accurately, a multiple exposure method is proposed in this paper. The proposed method can predict the exposure time according to the reflective intensity of the measured surface. Firstly, the camera response curve of the imaging system is obtained by projecting a series of uniform gray images at different ex-

收稿日期: 2024-05-10; **修订日期:** 2024-06-25
基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2022YFB4601802); 国家自然科学基金资助项目(No. 52275543)
Supported by National Key R & D Program of China (No. 2022YFB4601802); National Natural Science Foundation of China (No. 52275543)

posure times, and the irradiance image that can reflect the reflection intensity of the measured surface is calculated. Then, the fuzzy C-means clustering method is used to adaptively segment different irradiance regions of the target and obtain the central irradiance of each region. The optimal exposure time is predicted for different reflection regions based on the camera response curve. Finally, the 3D reconstruction of the highly reflective surface is realized by combining the multiple exposure fusion algorithm. The experimental results show that the proposed method can simultaneously reconstruct the strongly reflective area and the excessively dark area of the aluminum alloy surface, with a reconstruction error of less than 0.5 mm, the maximum deviation reduced by 74.78%, and the standard deviation reduced by 48.96%. The proposed method can correctly predict the exposure time according to regional reflection characteristics, effectively overcome the problems of phase loss and phase distortion caused by regional overexposure and regional darkness, and completely and accurately reconstruct different reflection regions of highly reflective surfaces.

Key words: highly reflective surface; structured light; multiple exposure; irradiance; clustering segmentation

1　引　言

以相位测量轮廓术(phase measurement profilometry, PMP)[1] 为代表的主动非接触式结构光三维成像技术[2] 因精度、速度和成本等多方面优势被广泛应用在汽车制造,工业检测等众多领域[3]。虽然 PMP 能快速准确地测量漫反射物体[4],但对于反射模型复杂的高反光表面,其存在的类镜面反射或多路径效应干扰,将导致相机镜头采集的光强值超过图像量化范围[5]。光能在特定区域的集中,又使得图像其他区域能量分布较少,导致正弦条纹图像同时出现过曝区域和过暗区域[6],因此由其计算得到的目标相位不可避免地会出现失真或者缺失,即使经后续处理也难以恢复出准确相位,因此准确重建高反光表面成为了结构光领域的一大挑战。

传统的解决方案是在被测表面喷涂一层薄粉末,使其变为漫反射表面[7],但厚度的改变将带来测量误差。而向面结构光系统中增加硬件组件,例如使用偏振片滤去强反射光,又会增加系统的复杂性和成本,该方法还将降低图像信噪比,从而影响测量精度[8]。

多重曝光方法[9-10] 和调整投影条纹强度[11-12] 方法能在不增加系统硬件条件下,获得较高的重建质量。调整投影条纹强度方法由于需要在投影仪和相机之间建立准确的匹配关系,测量的准备工作较多[13]。文献 [14] 不断检测图像过曝面积,通过牛顿优化预测下一次曝光值,然而对曝光时间的分析受限于图像的动态范围。李兆杰等人[15] 通过实验拟合相机响应曲线,利用高低两个不同的辐照度迭代计算响光时间,在他们的实验中,多重曝光融合得到的相位能较好地重建高反光表面的缺失区域。

除此之外,李茂月等人[16] 采用图像处理技术恢复高反光位置的条纹信息,通过不断调节光圈和曝光时间获得最优曝光下的灰度区间,并使用改进的双边滤波方法恢复光栅条纹的边缘信息,有效抑制了高光反射对叶片检测的影响,但其处理过程较为繁琐。Jiang 等人[17] 的研究聚焦于高反光表面的多次反射和互反射现象,将单像素成像技术应用于高反光表面的三维重建领域,其通过光传输系数去除来自不相干区域的多重反射光和散射光,有效降低了相位饱和误差[18]。虽然基于单像素成像的方法重建效率较低,但为准确重建高反光表面提供了新的思路。

为获得准确的相机曝光参数,完整准确地重建高反光表面的不同反射区域,本文提出一种基于辐照度分割的多重曝光方法。首先,通过采集不同曝光时间下的均匀灰度图像,获得成像系统的相机响应曲线,同时计算得到动态范围更高、能反映被测表面反射强度分布的辐照度图像。然后,使用模糊 C 均值聚类算法自适应地将辐照度图像分割为多个区域,不同区域反映被测表面的不同反射水平。根据各区域的平均反射强度,确定它们的最优曝光时间,多重曝光融合得到的条纹图像将在各个区域拥有较好的相位质量。最后通过对两块铝合金金属板进行测试实验,验证了本文方法的有效性。

2　结构光重建原理

单目结构光系统如图 1 所示,主要包括摄像

机，投影仪和计算机。投影仪将计算机生成的正弦条纹图像投影至工件表面，图像经过物体表面调制后被相机捕获，经过调制后的条纹图像将携带被测表面的深度信息。在计算机中对捕获的条纹图像计算包裹相位和相位展开。根据系统标定结果和三角测量原理即可得到目标的三维点云数据。采用标准的四步相移算法计算光栅图像的相位主值，光强表达式为

$$\begin{cases} I_1 = A(x,y)+B(x,y)\cos\left[\varphi(x,y)\right] \\ I_2 = A(x,y)+B(x,y)\cos\left[\varphi(x,y)+\dfrac{\pi}{2}\right] \\ I_3 = A(x,y)+B(x,y)\cos\left[\varphi(x,y)+\pi\right] \\ I_4 = A(x,y)+B(x,y)\cos\left[\varphi(x,y)+\dfrac{3\pi}{2}\right] \end{cases} ,\quad (1)$$

式中：I_i为第i幅条纹图在坐标(x,y)处的灰度值；$A(x,y)$为图像的平均灰度；$B(x,y)$为图像的灰度调制。根据式 (2) 可以得到包裹相位$\varphi(x,y)$：

$$\varphi(x,y) = \arctan\frac{I_4-I_2}{I_1-I_3} \quad . \quad (2)$$

包裹相位在图像中含有多个周期，为得到全图唯一的绝对相位值，使用三频外差[19] 方法对包裹相位进行相位展开，展开后的绝对相位直接包含目标深度信息，进而完成对被测目标的三维重建。

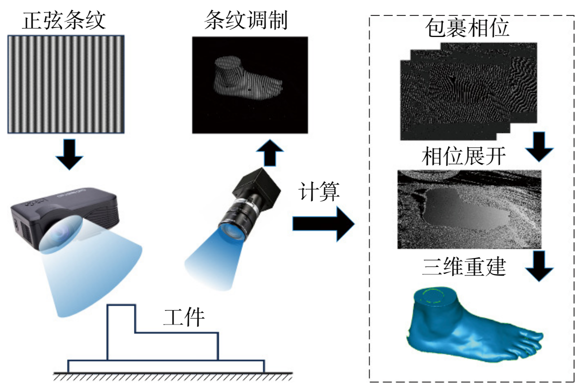

图 1 单目结构光测量系统模型

Fig. 1 Measurement system model for monocular structured light

3 反射模型与高动态范围技术

3.1 反射模型

高反光表面的反射模型较为复杂，如图 2(彩图见期刊电子版)所示。该表面同时具备漫反射波瓣和镜面反射波瓣，其中强烈的镜面反射将能量集中在特定方向，由于反射光的强度远远超过一般场景的亮度范围，导致图像出现过曝区域。此外，特定角度的光束入射不规则表面时会发生多次反射，如 B 点接收了来自 A 点的二次反射光，由于光强的叠加使得 B 点处也常出现过曝现象[18]，而各向同性的漫反射波瓣占有的能量少，使得图像同时存在过暗区域。区域过曝和区域过暗都会导致图像信息缺失，给相位计算带来误差和损失，因此，准确重建高反光表面不同反射区域成为结构光领域的难点。

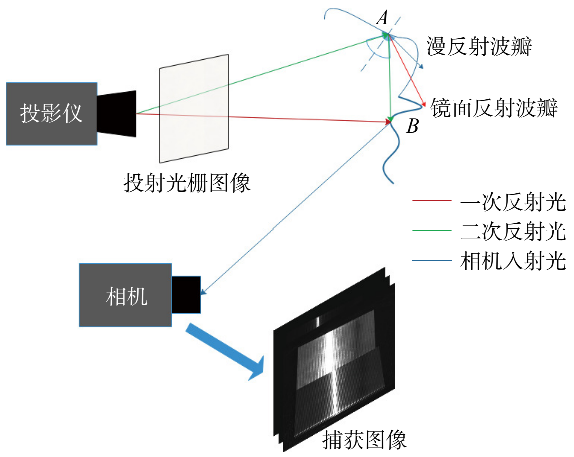

图 2 高反光表面反射模型

Fig. 2 Reflection model of highly reflective surface

对于两块表面精加工的铝合金金属板，使用工业相机分别采集高曝光和低曝光情景下的条纹图像，如图 3 所示。由于 8 比特图片仅能表示 0~255 的亮度范围，低曝光下图像存在大面积的过暗区域，而高曝光下强光反射明显，导致图像中间区域出现过度曝光。高反光表面的复杂反射特性，导致不同区域反射强度存在明显差异，单一曝光难以在全部区域获得信噪比好的条纹图像。

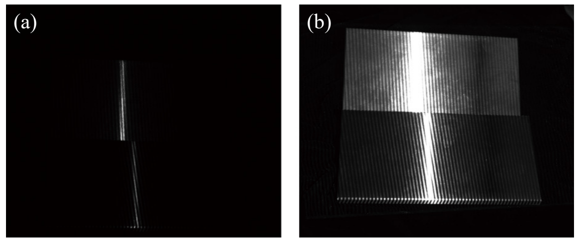

图 3 不同曝光下捕获的条纹图像。(a)低曝光图像；(b)高曝光图像

Fig. 3 Fringe images captured under different exposures. (a) Low exposure image; (b) high exposure image

3.2　高动态范围技术

高动态范围技术(high dynamic range, HDR),通过使用从低到高不同曝光水平拍摄的图像,可以捕捉到广泛的图像动态范围以准确反映被测表面的真实亮度水平。图 4 为 HDR 合成图像恢复结果。可见,过曝区域和过暗区域的细节信息得到了恢复。由此可知,基于 HDR 可以获得成像系统的相机响应曲线和场景辐照度信息,为分析高反光表面的反射强度分布提供依据。

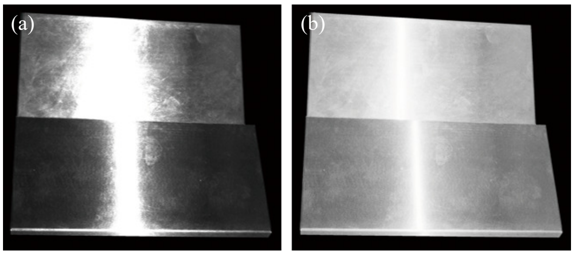

图 4　铝合金金属板亮度分布。(a)相机捕获图像;(b)HDR合成图像

Fig. 4　Luminance distribution on an aluminum alloy metal plate. (a) Camera captured image; (b) HDR composite image

相机响应曲线描述了场景曝光程度和图像亮度的转化关系,如图 5 所示。其通常为非线性曲线,在低曝光和高曝光区域相对平坦,而在中间亮度范围 (通常是中灰色级别) 具有较高的响应度和近似线性的响应关系,能够更好地捕捉和区分细节。

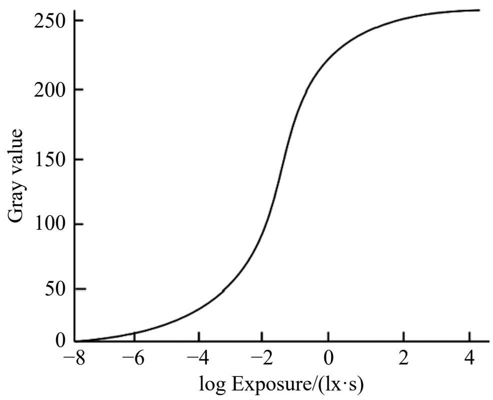

图 5　相机响应曲线

Fig. 5　Response curve of the camera

图 5 描述的非线性响应关系如式 (3) 所示[20]:

$$g(I_{ij}) = \ln(E_i \cdot t_j) \quad , \tag{3}$$

式中,相机响应函数g表示对数尺度下的场景曝光程度,E_i表示第i个像素的辐照度,t_j表示第j张图像的曝光时间,I_{ij}表示采样到的第i个像素点在第j次曝光时间下的图像灰度。其中未知项是辐照度E_i和相机响应函数g。可以通过投射均匀灰度图像,同时使用相机在不同曝光时间下采集的图像数据,对多个像素点进行最小二乘拟合获得函数g,建立目标函数为:

$$O = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}\{\omega(I_{ij})[g(I_{ij}) - \ln E_i - \ln t_j]\}^2 + \lambda \sum_{z=I_{\min}+1}^{z=I_{\max}-1}[\omega(z)g(z)'']^2 \quad , \tag{4}$$

式中N是图像像素的数量,M是曝光时间的数量。$g(z)'' = g(z+1) + g(z-1) - 2g(z)$表示$g$关于$z$的二阶导数,加入比例因子$\lambda$以平滑数据拟合结果,本文中$\lambda$取值为 10。$\omega(x)$是图像灰度的加权函数,表示权重大的中间灰度值像素包含更多的图像细节,将$\omega(x)$定义为:

$$\omega(x) = \begin{cases} x - I_{\min}, x \leqslant \dfrac{I_{\min} + I_{\max}}{2} \\ I_{\max} - x, x > \dfrac{I_{\min} + I_{\max}}{2} \end{cases} \quad . \tag{5}$$

辐照度是描述光强分布的物理量,通过多次曝光计算得到的辐照度图像拥有更大的动态范围,与场景的真实曝光水平成正比,能间接获得高反光表面不同区域的反射性质。得到函数g之后,可以计算出任意图像像素的辐照度E_i,本文使用加权平均处理以保证计算的鲁棒性,如式 (6) 所示:

$$\ln E_i = \sum_{j=1}^{M}\omega(I_{ij})[g(I_{ij}) - \ln t_j] / \sum_{j=1}^{M}\omega(I_{ij}) \quad . \tag{6}$$

4　基于辐照度分割的多重曝光方法

4.1　基于辐照度分割的曝光时间预测算法

鉴于高反光表面的反射性质,相机拍摄获得的图像将在不同区域出现过度曝光和曝光不足现象,在动态范围更高的辐照度图像上,这些区域将出现明显的强度差异。对于反射水平相近的区域内部,合适的单一曝光能够获得该区域完整的点云数据[21],因此可以将辐照度图像划分为不同区域,根据各区域的反射强度预测出最优曝光时间,从而实现对高反光表面完整的三维重建。

聚类分割算法能根据数据的自身特点自适应地分割图像,能够避免人工设置复杂的阈值或参数,且具有较好的鲁棒性和计算效率[22]。如图 6

所示，设置聚类数量为K，使用聚类分割算法后辐照度图像被划分为K个不同区域R_i，提取该区域的中心辐照度$\overline{E_i}$，其中$i=1,2,3,\cdots,K$。中心辐照度$\overline{E_i}$反映了区域R_i的平均辐照度水平，且将用于预测该区域的最优曝光时间，本文将聚类算法得到的聚类中心作为中心辐照度$\overline{E_i}$。

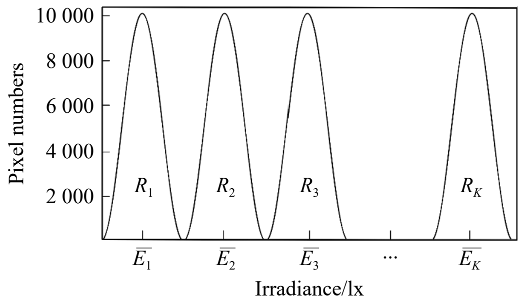

图 6　辐照度图像聚类分割结果

Fig. 6　Cluster segmentation results of irradiance image

对式 (3) 进行变形可建立本文预测的最优曝光时间$t^{\rm opt}$与中心辐照度$\overline{E}$、图像理想灰度值$I^{\rm ideal}$和相机响应函数g的关系，如式 (7) 所示。由于相机响应曲线对中间灰度范围敏感，因此可取中间灰度段的最大值作为图像理想灰度值$I^{\rm ideal}$。

$$t^{\rm opt}=\exp[g(I^{\rm ideal})]/\overline{E}\quad . \tag{7}$$

通过式 (7) 可获得不同区域的最优曝光时间$t_i^{\rm opt}$，保存全部预测曝光时间，即可得到多重曝光时间序列T^s，本文基于辐照度分割的曝光时间预测算法如图 7 所示。

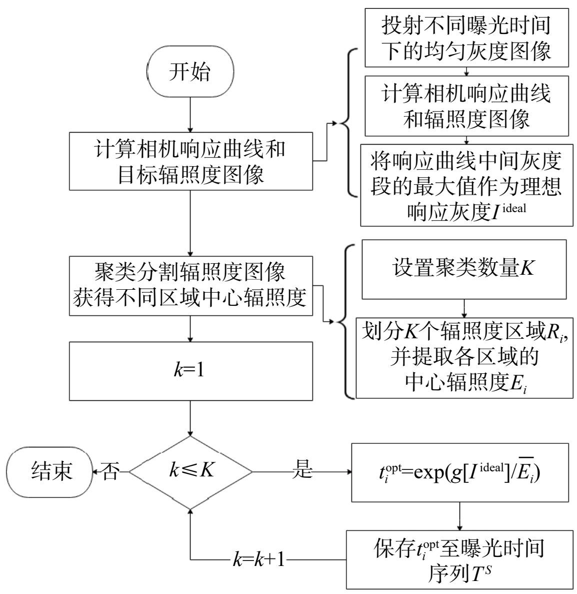

图 7　基于辐照度分割的曝光时间预测算法

Fig. 7　Exposure time prediction algorithm based on irradiance segmentation

4.2　模糊 C 均值聚类算法

本文使用模糊 C 均值聚类方法（Fuzzy C-means clustering, FCM）自适应地完成对辐照度图像的分割工作。FCM 基于模糊逻辑理论，将辐照度图像视为由L个像素点组成的、未标记的数据集$\boldsymbol{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_L\}$，隶属度$u_{ij}$表示第$j$个辐照度样本$\boldsymbol{x}_j$对第$i$个聚类中心$\boldsymbol{c}_i$的归属程度。算法的目标是迭代优化得到目标函数$O$，得到隶属度影响下全部样本点到聚类中心的最小距离，算法收敛后第i个类别中心$\boldsymbol{c}_i$即中心辐照度$\overline{E_i}$，同时将该类别中心$\boldsymbol{c}_i$所属的辐照度样本$\boldsymbol{x}_j$划分到区域R_i中。本文 FCM 算法的目标函数如式 (8) 所示：

$$O=\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L}u_{ij}\Phi(\boldsymbol{x}_j|\boldsymbol{c}_i,\boldsymbol{\Sigma}_i)+\gamma\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L}u_{ij}^2\quad , \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{\Sigma}_i$表示第i类的协方差矩阵，$\Phi(\boldsymbol{x}_j|\boldsymbol{c}_i,\boldsymbol{\Sigma}_i)$表示样本$\boldsymbol{x}_j$和聚类中心$\boldsymbol{c}_i$之间的距离函数，$\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L}u_{ij}^2$是使用隶属度参数的正则化项，它对较大的隶属度进行惩罚以获得更稀疏的相似度分布，比例因子γ作为控制成员关系稀疏性的平衡因子，本文中$\gamma=0.2$。

为更好地处理非球形数据，本文利用高斯度量下的距离函数以有效减少非均匀数据的干扰，记输入数据的维数为D，则$\Phi(\boldsymbol{x}_j|\boldsymbol{c}_i,\boldsymbol{\Sigma}_i)$如下：

$$\Phi(\boldsymbol{x}_j|\boldsymbol{c}_i,\boldsymbol{\Sigma}_i)=\frac{1}{2}[(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{c}_i)^{\rm T}\boldsymbol{\Sigma}_i^{-1}(\boldsymbol{x}_j-\boldsymbol{c}_i)+\ln|\boldsymbol{\Sigma}_i|+D\ln(2\pi)]\quad . \tag{9}$$

记全部隶属度组成的集合为$\boldsymbol{U}$，全部聚类中心组成集合$\boldsymbol{C}$，全部的协方差矩阵组成集合$\boldsymbol{\Sigma}$，并采用文献 [22] 的策略更新参数。为减少迭代次数，上述集合先使用欧式距离度量下的 FCM 算法确定初始值。本文的 FCM 算法步骤如表 1 所示。

表 1　本文 FCM 算法步骤

Tab. 1　The steps of the FCM algorithm in this paper

算法 1 高斯度量下的模糊C均值聚类算法

输入: 数据集 $\mathbf{X}=\{x_1,x_2,\cdots,x_L\}$, 聚类数量 K, 最大迭代次数 $T=50$,收敛阈值$\varepsilon=10^{-6}$, 正则化系数 $\gamma=0.2$.

输出: 隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}=\{u_{ij}\}$ #数据点x_i对聚类中心c_j的隶属度
聚类中心矩阵 $\boldsymbol{C}=\{c_1,c_2,...,c_K\}$.

1: 使用欧式距离度量下的模糊C均值聚类方法初始化隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}^{(o)}$, 聚类中心矩阵$\boldsymbol{C}^{(o)}$, 和协方差矩阵$\boldsymbol{\Sigma}^{(o)}$

2: 对于每一轮迭代, 执行以下步骤直到收敛或达到最大迭代次数:

a. 根据式(9)计算每个数据点到所有聚类中心的距离

续表 1

算法 1 高斯度量下的模糊C均值聚类算法

b. 根据距离更新隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$:
$$u_{ij} = -\Phi(\boldsymbol{x}_j|\boldsymbol{c}_i,\boldsymbol{\Sigma}_i)/2\gamma$$
c. 更新聚类中心矩阵$\mathbf{C}$:
$$\boldsymbol{c}_i = \sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{u}_{ij}\boldsymbol{x}_j / \sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{u}_{ij}$$
d. 更新协方差矩阵$\boldsymbol{\Sigma}$:
$$\boldsymbol{\Sigma}_i = \left[\sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{u}_{ij}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{c}_i)^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{c}_i)\right] / \sum_{j=1}^{L} \boldsymbol{u}_{ij}$$
e. 检测终止条件
计算聚类中心的变化量是否小于收敛阈值ε
如果变化量小于ε或得到最大迭代次数T, 则停止迭代
3: 输出最终的聚类中心矩阵 $\boldsymbol{C}$ 和隶属度矩阵 $\boldsymbol{U}$

4.3　多重曝光融合算法

根据求解的曝光时间序列 T^s, 投影仪向被测表面投射指定曝光时间的条纹图像, 相机采集到的光栅图像被存储在序列I^s中。对于序列I^s中不同的像素点, 图像融合算法的核心在于选择序列I^s中未过曝且像素值最大的像素点。掩模图像序列M^s的计算公式为

$$M_i^s(x,y) = \begin{cases} 1, & I_i^s(x,y) < 255 \text{ and } I_i^s(x,y) > I_j^s(x,y) \\ 0, & \text{others} \end{cases} , \tag{10}$$

式中: $I_i^s(x,y)$、$I_j^s(x,y)$分别为序列I^s中第i幅和第j幅图片在坐标(x,y)处的像素值, 且$i < j$。$M_i^s(x,y)$是第i幅掩模图像在坐标(x,y)处的像素值。定义F为合成的条纹图像, 其计算公式如式(11)所示:

$$F(x,y) = \sum_{i=0}^{N} M_i^s(x,y) \times I_i^s(x,y) \quad . \tag{11}$$

5　实验与分析

为验证所提方案有效性, 在垫有黑绒布的防震平台上对两块铝合金板进行测试实验, 实验采用新拓三维的 XTOM-MATRIX 结构光测头获取图像, 实验场景如图 8 所示。测头主要包括由五百万像素的 CCD 工业相机和 DLP 投影仪组成的单目结构光系统。系统主要参数如表 2 所示。

在投影仪可调节的 0~640 ms 曝光时间范围内, 以 10 ms 为曝光步长向被测表面投射均匀的灰度图像, 结果如图 9(彩图见期刊电子版)所示。其中, 得到的相机响应曲线如图 9(a)所示, 中间灰度段对应的灰度值范围为 25~245, 因此本实验的理想灰度值$I^{\text{ideal}} = 245$。图 9(b)显示了铝合金金属板的辐照度图像, 该图像定量给出了试件表面反射强度的具体差异。图中强烈反光的红色区域相对辐照度水平大于 2000, 而过暗边缘处的 E_3, E_4 点辐照度不足 100。图 9(b)说明高反光表面复杂的反射特性会导致不同区域反射强度差异明显。图 9(c)中的灰度变化曲线来自于 100 ms 曝光时间下相机捕获的灰度图像, 可以看出辐照度图像表示的动态范围远远高于灰度图像, 两者相差 10 倍以上。此外, 在灰度图像过曝的 x 轴方向, 辐照度图像恢复了该区域的亮度细节, 因此辐照度图像更能反映高反光表面的真实亮度水平。相较于使用灰度图像的传统方法, 本文采用辐照度图像分析被测表面的反射特性, 可以更准确地利用过曝区域所包含的图像信息。图 9(d)表示了图 9(b)中 4 个标记点的灰度变化情况, 强烈反光处的 E_1 点在很低的曝光时间下达到过曝, 然而 E_4 边缘点在 300 ms 以上灰度才能达到 255。由于不同测量区域的反射强度差异明显, 需要针对区域特性分别预测最佳曝光参数, 从而使各表面区域均有较高的重建完整度和测量精度。

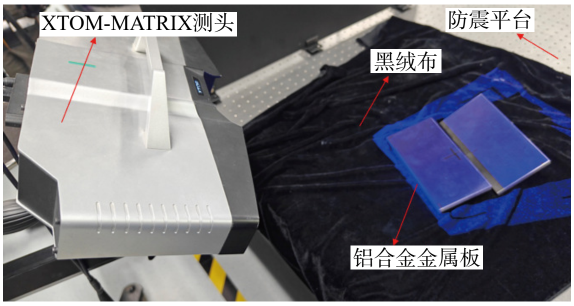

图 8　实验场景

Fig. 8　Experimental scene

表 2　单目结构光系统的主要参数

Tab. 2　Main parameters of monocular structured light system

性能参数	参数值
相机分辨率	2448(H)×2048(V)
投影仪分辨率	1028(H)×720(V)
测量幅面大小/mm	400×300
标准测距/mm	630
曝光时间调节范围/ms	0~640
投射光源	蓝光LED

多重曝光方法旨在融合不同曝光条件下的条纹图像, 以获得最好的相位和点云质量, 处理效果取决于能否准确选取曝光参数。设置曝光次数

为 5，将本文方法与 3 种传统方法进行比较，本文 FCM 算法划分的不同反射率区域如图 10(彩图见期刊电子版)所示。表 3 给出了不同方法获得的曝光时间序列。比较不同方法处理得到的相位图像和点云数据，以测试本文多重曝光方法的有效性，结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。

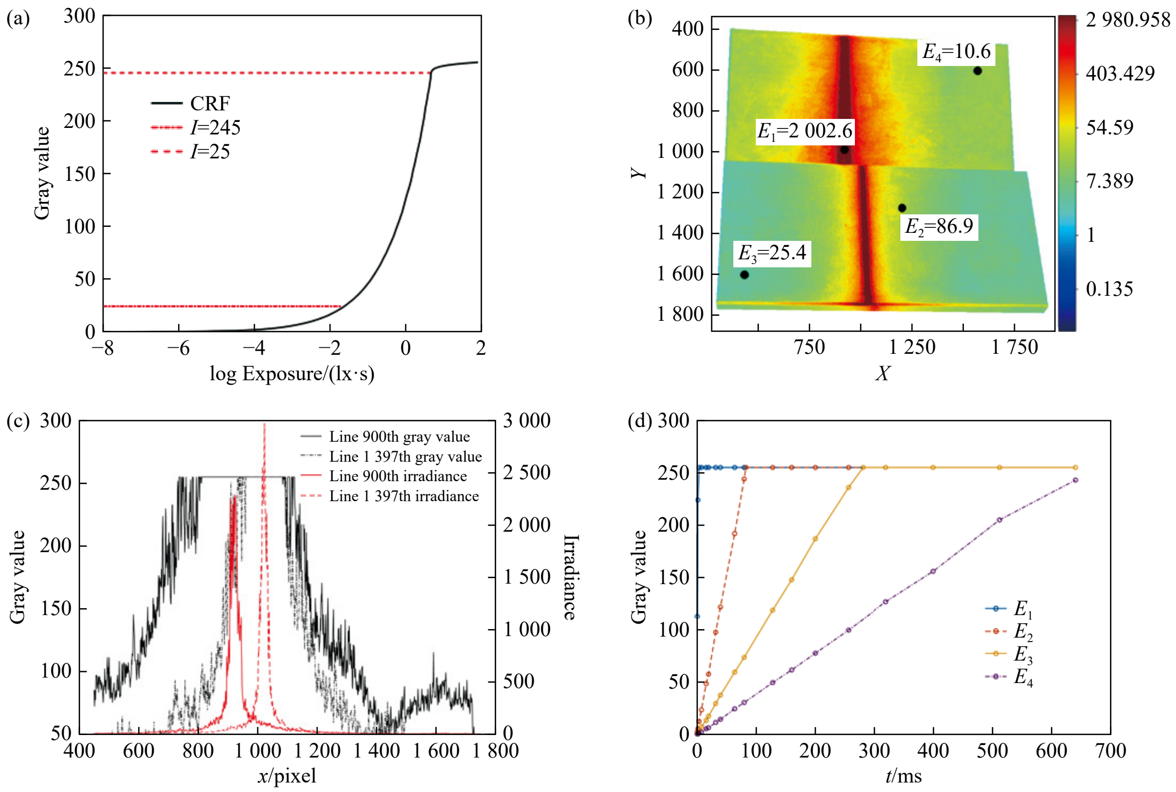

图 9 相机响应曲线和辐照度分布图像。(a)相机响应曲线；(b)辐照度图像；(c)灰度和辐照度在特定行的分布；(d)不同点的灰度变化曲线

Fig. 9 Response curve of the camera and the irradiance distribution image. (a) Camera response curve; (b) irradiance image; (c) distribution curve of gray scale and irradiance in a specific line; (d) gray-scale variation curves of different points

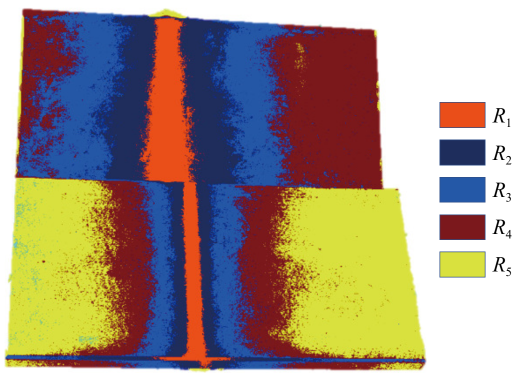

图 10 辐照度图像聚类分割结果

Fig. 10 Cluster segmentation results of the irradiance image

图 11(a)给出了 4 种不同方法处理得到的相位展开图像，可以明显看出单次曝光的 PMP 方法所获得的图像存在大面积的相位缺失区域(中间黑色部分)。根据文献 [14] 和文献 [15] 预测的曝光时间序列拍摄条纹图像可知，多重曝光融合后仍然有部分区域存在相位缺失，而本文方法获得的曝光参数较为准确，相位展开图像完整，在铝合金板中间区域有效抑制了强光反射导致的相位缺失问题。在 0~640 ms 曝光时间内，以 1 ms 为步长拍摄条纹图像。将全部条纹图像计算得到的展开相位作为实验真值，获得的第 900 行相位误差如图 11(b)所示。可见，除本文方法外，其他方法处理后的图像均存在相位误差较大的位置。上述结果说明所提方法能够准确预测相机曝光参数，多重曝光融合后能够恢复强反光区域的缺失相位，并且恢复后的相位具有较好的精度。

图 11(c)显示了传统 PMP 方法获得的点云数据，可以看出在铝合金板中间强反光区域缺失了大量点云，并且在上方铝合金板的边缘部分(图中红圈附近)出现一系列“小疙瘩”，表明由于区域过暗导致的条纹图像信噪比低，据此计算得到的点云存在较大的误差。图 11(d)为本文方法的

重建结果,可以看出本文方法完整重建了被测表面的过曝区域和过暗区域,且重建的点云较为平整。综上所述,本文方法能够得到较好的相位质量和重建点云。同时应当注意到,该方法仅需设置聚类数量即可得到准确的曝光时间序列,能避免盲目调整曝光参数带来的人力消耗。

为进一步检验不同方法的重建精度,使用线结构光扫描得到的、无高光效果的点云数据作为实验真值,将不同方法的重建点云导入 Geomagic Studio 软件进行偏差分析,得到的实验结果如图 12 所示。

表 3　不同方法的曝光时间序列

Tab. 3　Exposure time series of different methods

(unit: ms)

曝光次数	PMP	文献[14]算法	文献[15]算法	本文算法
1	100	2.69	1.58	0.75
2	-	15.50	10.13	22.92
3	-	109.73	102.69	59.19
4	-	162.21	269.32	113.22
5	-	203.36	469.32	231.11

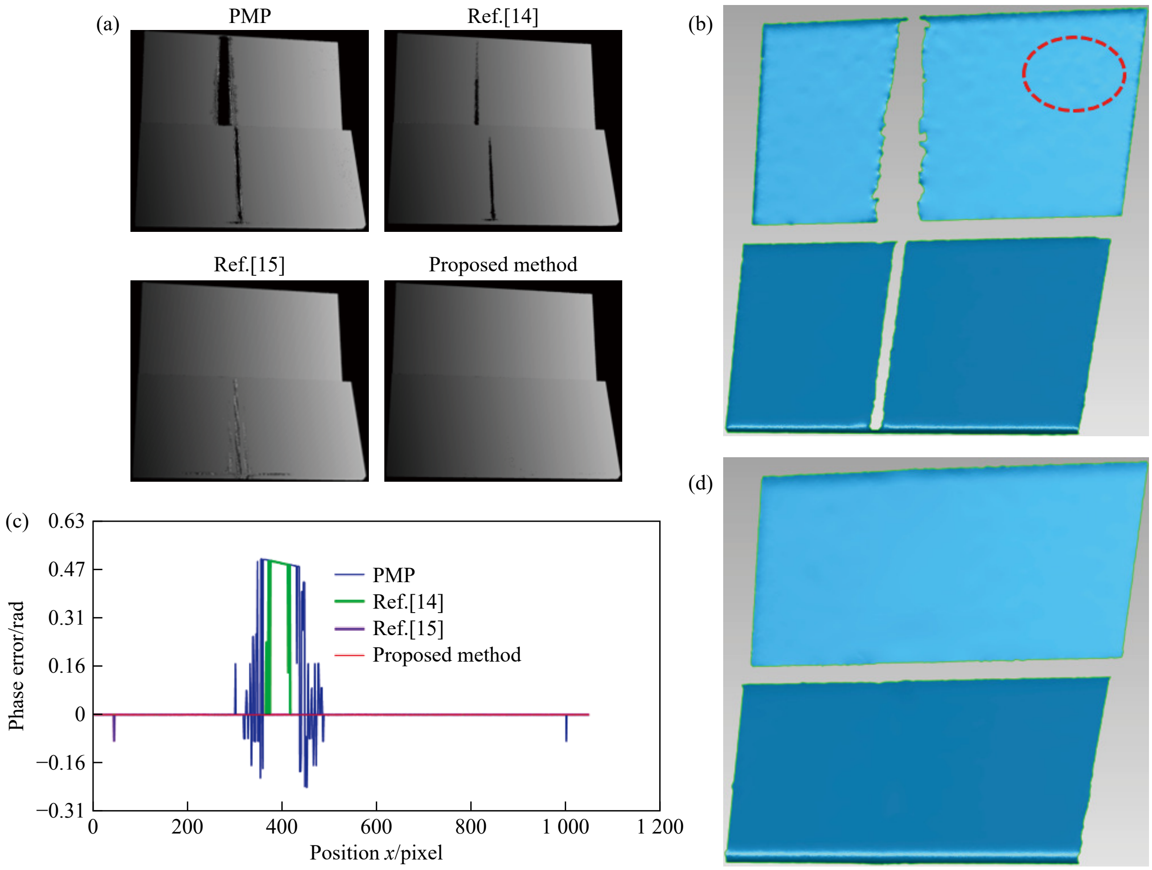

图 11　不同方法相位和点云处理结果。(a)不同方法获得的相位图片;(b)PMP 方法的点云数据;(c)不同方法的第 900 行相位误差;(d)所提方法的点云数据重建结果

Fig. 11　Phase and point cloud processing results of different methods. (a) Phase pictures obtained by different methods; (b) point cloud data of PMP method; (c) phase error of the 900th line obtained by different methods; (d) point cloud data of the proposed method

由偏差数据可以看出本文方法效果最好,PMP 方法的最大偏差和标准偏差分别为 1.8992 mm 和 0.0384,本文方法的最大偏差和标准差分别为 0.4789 mm 和 0.0188,分别降低了 74.78%, 48.96%。实验结果表明,本文方法所获点云具有更高的重建完整度和测量精度,能准确完成对铝合金表面不同反射区域的点云重建,并且重建误差小于 0.5 mm,满足一般工业检测要求。

为研究不同聚类数量 K 对实验结果的影响,本文在 NVIDIA GeForce RTX 3060 显卡设备上对算法进行并行运算,不同聚类数量下的点云重建效果如表 4 所示。从表 4 可以看出,当进行 4 次聚类或更多次聚类时,本文方法能较好地重建强烈反光的铝合金表面。随着聚类数量的增

加，运算时间增长较大，7 次聚类时计算效率很低，因此需要对算法进行加速优化或者选用更好的显卡设备。尽管如此，本文算法仅需调整聚类数量 K 即可自适应地获得各区域的合理曝光时间，多重曝光融合后图像强反光区域和过暗区域均可获得质量较好的点云数据，为避免手动调节曝光区域提供了新的思路。

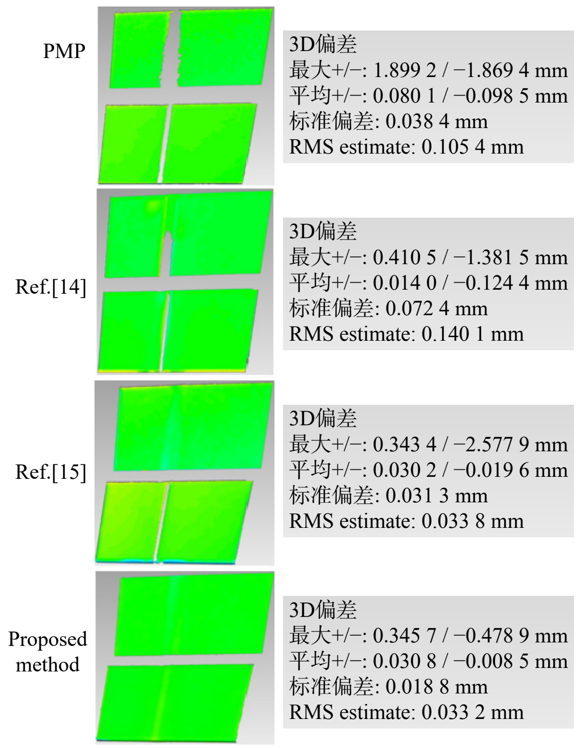

图 12　不同方法重建点云的偏差结果

Fig. 12　Deviation results of point cloud reconstruction by different methods

表 4　不同聚类数量获得的结果

Tab. 4　Results obtained by different clustering numbers

聚类数量	点云数量	最大偏差/mm	标准偏差/mm	RMS/mm	计算时间/s
3	532158	2.2817	0.0728	0.0839	53.08
4	574999	1.4990	0.0321	0.0532	85.47
5	604978	0.4789	0.0188	0.0332	130.81
6	656688	0.3612	0.0182	0.0303	201.33
7	680096	0.3010	0.0174	0.0293	294.54

将本文方法应用于汽车制造中常见的刹车盘和钣金件，处理结果如图 13(彩图见期刊电子版)所示。圆形刹车盘各角度均有明显的反光现象，钣金件尺寸较大且具有更复杂的形状特征，辐照度图像显示了它们不同区域的反射强度。通过对刹车盘和钣金件进行三维重建，显示了本文方法对于工业高反光件的适用性。

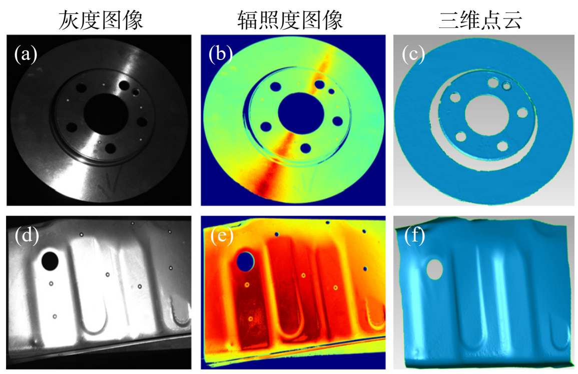

图 13　(a)~(c)汽车刹车盘和(d)~(f)钣金件处理结果

Fig. 13　Processing results of brake disc (a)−(c) and sheet metal workpiece (d)−(f)

6　结　论

高反光表面复杂的反射性质给面结构光三维重建带来挑战，本文提出一种结合相机响应曲线和辐照度聚类分割的多重曝光方法。该方法未直接使用原始图像数据，而是根据被测表面的辐照度分布在更高的动态范围内分析不同区域的反射强度，并使用模糊 C 均值聚类算法自适应划分不同反射区域，最后根据各区域中心辐照度预测曝光时间。实验结果表明，本文方法在具有强烈反光的铝合金表面能得到完整的点云数据，重建误差小于 0.5 mm，最大偏差降低了 74.78%，标准偏差降低了 48.96%。然而，本文方法对计算要求较高，过多的聚类数量导致算法的计算效率显著下降，尽管如此，本文方法仅需调整聚类数量即可完整准确地重建高反光表面的不同反射区域，避免了操作人员盲目调整曝光参数带来的损耗，为提高高反光表面的测量精度和自动曝光的准确性提供了新的思路。

参考文献:

[1]　刘泽隆，李茂月，卢新元，等. 高动态范围条纹结构光在机检测技术及应用进展[J]. 中国光学（中英文），2024, 17(1): 1-18.

LIU Z L, LI M Y, LU X Y, *et al*.. On-machine detection technology and application progress of high dynamic range fringe structured light[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 1-18. (in Chinese).

[2] 王中兴. 基于十六步相移技术的高精度三维重建系统[J]. 软件导刊, 2021, 20(5): 108-113.
WANG ZH X. Three-dimensional reconstruction system based on 16 step phase-shifting technology[J]. *Software Guide*, 2021, 20(5): 108-113. (in Chinese).

[3] 任明阳, 王立忠, 赵建博, 等. 复杂曲面零件面结构光扫描视点规划[J]. 中国光学（中英文）, 2023, 16(1): 113-126.
REN M Y, WANG L ZH, ZHAO J B, *et al*.. Viewpoint planning of surface structured light scanning for complex surface parts[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 113-126. (in Chinese).

[4] 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): 0303006.
ZHANG Z H, YU J, GAO N, *et al*.. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303006. (in Chinese).

[5] ZHAO H J, LI CH H, JIANG H ZH, *et al*.. Simulation framework for fringe projection profilometry using ray tracing and light transport coefficient measurement[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 22277-22291.

[6] JIANG H ZH, YAN Y J, LI X D, *et al*.. Separation of interreflections based on parallel single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 26150-26164.

[7] PALOUSEK D, OMASTA M, KOUTNY D, *et al*.. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy[J]. *Optical Materials*, 2015, 40: 1-9.

[8] ZHU ZH M, ZHU W T, ZHOU F Q, *et al*.. Three-dimensional measurement of fringe projection based on the camera response function of the polarization system[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(5): 055105.

[9] LIU G H, LIU X Y, FENG Q Y. 3D shape measurement of objects with high dynamic range of surface reflectivity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(23): 4557-4565.

[10] RAO L, DA F P. High dynamic range 3D shape determination based on automatic exposure selection[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2018, 50: 217-226.

[11] LI SH X, DA F P, RAO L. Adaptive fringe projection technique for high-dynamic range three-dimensional shape measurement using binary search[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(9): 094111.

[12] 冯建洋, 谌海云, 石础, 等. 基于结构光技术的高反射表面三维测量[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 221202.
FENG J Y, CHEN H Y, SHI CH, *et al*.. Three-dimensional measurement of highly-reflective surface using structured light technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221202. (in Chinese).

[13] 冯维, 徐仕楠, 王恒辉, 等. 逐像素调制的高反光表面三维测量方法[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 488-497.
FENG W, XU SH N, WANG H H, *et al*.. Three-dimensional measurement method of highly reflective surface based on per-pixel modulation[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 488-497. (in Chinese).

[14] 无锡图创智能科技有限公司. 不同反射率表面三维结构光测量的曝光值选择方法: 中国, 202111658669.6[P]. 2021-12-30.
Wuxi Tuchuang Intelligent Technology Co., Ltd. Exposure value selection method for measuring three-dimensional structured light on surfaces with different reflectivity: CN, 202111658669.6[P]. 2021-12-30. (in Chinese).

[15] 李兆杰, 崔海华, 刘长毅, 等. 一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1112004.
LI ZH J, CHUI H H, LIU CH Y, *et al*.. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112004. (in Chinese).

[16] 李茂月, 刘泽隆, 赵伟翔, 等. 面结构光在机检测的叶片反光抑制技术[J]. 中国光学, 2022, 15(3): 464-475.
LI M Y, LIU Z L, ZHAO W X, *et al*.. Blade reflection suppression technology based on surface structured light on-machine detection[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 464-475. (in Chinese).

[17] LI Y X, JIANG H ZH, ZHAO H J, *et al*.. Compressive parallel single-pixel imaging for efficient 3D shape measurement in the presence of strong interreflections by using a sampling Fourier strategy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25032-25047.

[18] 詹瑜, 胡丹, 刘凯. 面向高反光区域的自适应结构光[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1612001.
ZHAN Y, HU D, LIU K. Adaptive structured light for high-reflective areas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1612001. (in Chinese).

[19] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms[J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(9): 986-992.

[20] BATTIATO S, CASTORINA A, MANCUSO M. High dynamic range imaging for digital still camera: an overview[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2003, 12(3): 459-469.

[21] FENG SH J, ZHANG Y ZH, CHEN Q, *et al*.. General solution for high dynamic range three-dimensional shape measurement using the fringe projection technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 59: 56-71.

[22] JIA X H, LEI T, DU X G, *et al*.. Robust self-sparse fuzzy clustering for image segmentation[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 146182-146195.

作者简介：

梁　晋(1968—)，男，河南郑州人，教授，博士生导师，2001 年于西安交通大学获得博士学位，主要从事三维光学测量方面、机器视觉等方面的研究。E-mail: liangjin@mail.edu.cn