

文章编号 1004-924X(2024)22-3288-12

基于彩色图像合成的互补线移条纹 高动态范围三维测量

古万煜^{1,2}, 史铿鸿^{1,2}, 王紫薇^{1,2}, 缪裕培^{1,2}, 蔡泽伟^{1,2},
汤其剑^{1,2}, 彭翔^{1,2}, 刘晓利^{1,2*}

(1. 深圳大学 物理与光电工程学院 教育部/广东省光电子器件与系统重点实验室,
广东 深圳 518060;

2. 深圳大学 物理与光电工程学院 深圳市智能光测与感知重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: 面对具有非朗伯表面的被测物体, 条纹结构光三维测量技术往往由于图像过饱和或条纹对比度过低等测量动态范围不足的问题而无法获取完整、有效的三维形貌数据。为进一步提升结构光三维测量技术的适应性, 本文提出一种改进的高动态范围三维测量方法。使用相较于正弦条纹更具鲁棒性的线移条纹作为编码图案, 构建互补线移条纹序列的对比度模型, 通过彩色相机各个颜色通道的强度响应差异, 在单次曝光时间下依据最佳对比度自适应检测合成新的线移图像, 排除由于动态范围不足引入的无效或误差数据。进一步利用背景归一化统一合成图像的不同通道分量的背景, 进而通过互补线移条纹对线条位置进行精确定位, 解调出准确的线移条纹编码信息进行三维重建。实验结果表明, 与多曝光方法相比, 图像采集时间减少了 82%, 总重建时间减少了 59%。所提出的方法能够获取表面反射特性复杂的金属工件的线条编码信息, 提升高动态范围三维测量的准确性和完整性, 实现高鲁棒、高效率、高精度三维测量。

关键词: 非朗伯表面; 高动态范围; 彩色图像合成; 互补线移条纹; 三维测量

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243222.3288

High dynamic range 3D measurement with complementary line-shifting strips based on color image synthesis

GU Wanyu^{1,2}, SHI Kenghong^{1,2}, WANG Ziwei^{1,2}, MIAO Yupei^{1,2}, CAI Zewei^{1,2},
TANG Qijian^{1,2}, PENG Xiang^{1,2}, LIU Xiaoli^{1,2*}

(1. Ministry of Education/Guangdong Province Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems,
College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Intelligent Optical Measurement and Detection, College of Physics and
Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

* Corresponding author, E-mail: lxl@szu.edu.cn

收稿日期: 2024-06-14; 修订日期: 2024-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62275173, No. 62175109, No. 62371311); 深圳市基础研究项目资助项目 (No. JCYJ20220531101204010); 深圳市高等院校稳定支持计划资助项目 (No. 20231122025852001); 深圳大学科研仪器研制培育项目资助项目 (No. 2023YQ009); 深圳大学创新科研团队项目资助项目 (No. 2023JCT003)

Abstract: Due to the problem of insufficient dynamic range, which may cause image supersaturation and low fringe contrast, traditional fringe projection three-dimensional (3D) measurement technology makes it difficult to obtain complete and effective 3D profiles of objects with non-Lambertian surfaces. To enhance the adaptability of structured light 3D measurement, we proposed an improved high dynamic range (HDR) 3D measurement method using line-shifting strips, which were more robust than sinusoidal fringes, as encoding patterns. A strip contrast model of complementary line-shifting strip sequences was constructed for optimum contrast detection of different color channels responding to light intensity. Subsequently, a color camera could be used to capture a color image sequence in a single exposure time to synthesize new line-shifting strip images, avoiding invalid or error data introduced by insufficient dynamic range. Finally, by using background normalization to unify the background of different channel components of the synthesized image, the line positions could be precisely located through complementary line-shifting strips. This allowed for the accurate demodulation of line encoding information, enabling 3D reconstruction. Experimental results demonstrate that, compared to the multiple exposure method, the image acquisition time is reduced by 82% and the total reconstruction time is reduced by 59%. The proposed method can demodulate the effective line encoding information of metal workpieces with complex surface reflection characteristics to obtain the complete and high-accuracy 3D point cloud, achieving efficient high dynamic range 3D measurement.

Key words: non-lambertian surface; high dynamic range; color image synthesis; complementary line-shifting strips; 3D measurement

1 引 言

结构光三维测量技术是一种非接触式的光学测量技术^[1],因其测量精度高、速度快而广泛应用于工业生产^[3]、生物医学检测^[4]、文物保护^[5]等场景。通过投射条纹结构光进行相位编码,并使用相移法或傅里叶变换法进行相位解调以实现高精度三维测量^[6],通常要求被测物体具有朗伯表面。然而,面对复杂表面反射特性(高反射率变化)的物体,条纹投影三维测量存在动态范围不足的问题^[9]。例如,对金属工件进行测量时,相机采集的图像在高反射率区域的像素灰度值趋于饱和,导致编码信息丢失,在低反射率区域则存在条纹对比度低、解调精度差的问题。针对这些问题,研究人员提出了自适应投影强度^[10]、多次曝光图像融合^[13]、多通道复用(如彩色相机、偏振相机)图像融合^[15]、多视角测量^[17]等多种高动态范围三维测量技术,提高了相位编码与解调的精度和鲁棒性。

条纹投影是一种正弦变化的多阶灰度编码模式,当编码串中任一灰度值偏离正弦分布时,容易造成相位信息的错误解码或引入计算误差,因此对物体表面反射率变化较为敏感。Song 等人^[20]

提出了一种二值条纹线移编码技术,与正弦条纹的灰度编码相比,二值条纹的线条编码信息对物体表面反射率变化具有更高的鲁棒性,从而减少动态范围不足引起的测量误差。随后,研究人员提出了不同的高动态范围线移条纹编码技术。Song 等人^[21]利用多曝光技术计算相机响应曲线,将具有不同曝光时间的多幅线移条纹图像融合成一幅高动态范围线移条纹图进行三维重建。Lin 等人^[22]提出一种全局自适应投影强度方法,通过预先投射一系列不同灰度级的匀光图案到物体上,逐像素确定图像未饱和且灰度值最大时的投影强度,从而避免由于物体表面高反光引起的图像过曝现象。自适应投影强度和多曝光方法通常需要采集一系列明暗程度不同的图像,因此测量效率较低。Liang 等人^[23]使用四通道偏振相机在单次曝光中获取四幅具有亮度差异的线移条纹图像,分别进行点云重建,并使用四个纹理图和深度图生成权重图,引导四组点云进行融合。Zhang 等人^[24]使用彩色相机采集互补线移条纹,使用改进的 M. Trobina 方法^[25]提取各个通道下的线条图像坐标,利用二值化后的互补线移条纹判断每个颜色通道线条信息的有效性,最后融合三个通道下线条位置,由此获得编码图像实现三维重建。然

而,多通道数据融合方法可能导致动态范围不足的通道下的一些无效或较大误差的数据一同融合进点云和线条位置,最终影响三维测量结果。

为了克服多通道图像融合方法的不足,本文提出了一种改进的高动态范围三维测量方法。建立了互补线移条纹序列的对比度模型,通过对比度计算反馈线移条纹图像不同区域的动态范围有效程度。通过自适应提取彩色图像三通道中最佳对比度的图像区域合成新的线移条纹图,提升线移图像的动态范围,尽可能排除由于图像动态范围不足而引入的无效或较大误差的测量数据。进一步利用背景归一化对合成图像背景进行统一,再通过线移条纹的互补性精确定位线条位置,获得准确的编码信息,实现高鲁棒、高精度三维测量。实验对复杂反射特性表面的金属工件进行测量,使用彩色相机在单次曝光时间下采集线移条纹图像,通过多通道图像合成高动态范围的互补线移条纹图,最终重建完整、高精度的金属表面三维形貌。

2 原理

2.1 高动态范围三维测量方法

为了实现面对复杂表面反射特性物体时,对投射在物体表面的编码结构光清晰成像并准确解码的高动态范围的三维测量,本文提出一种基于彩色图像合成的互补线移条纹高动态范围三维测量方法,总体技术路线如图1所示。首先,投影仪投射单色互补线移条纹图案序列到被测物体,彩色相机采集经物体表面调制的条纹图像,根据拜耳滤波器对不同波段光线的响应^[26],可将原始彩色图像分解为红、绿、蓝三个通道的图像。接着,利用对比度模型计算不同颜色通道的条纹对比度,选取各个颜色通道下具有最佳对比度的图像区域组合成高动态范围线移条纹图像,并通过背景归一化统一合成图像的背景。最后,利用互补线移条纹图像对进行线条位置检测定位,解码得到线移条纹图像的编码值,进而重建复杂表面反射特性的物体表面三维形貌。

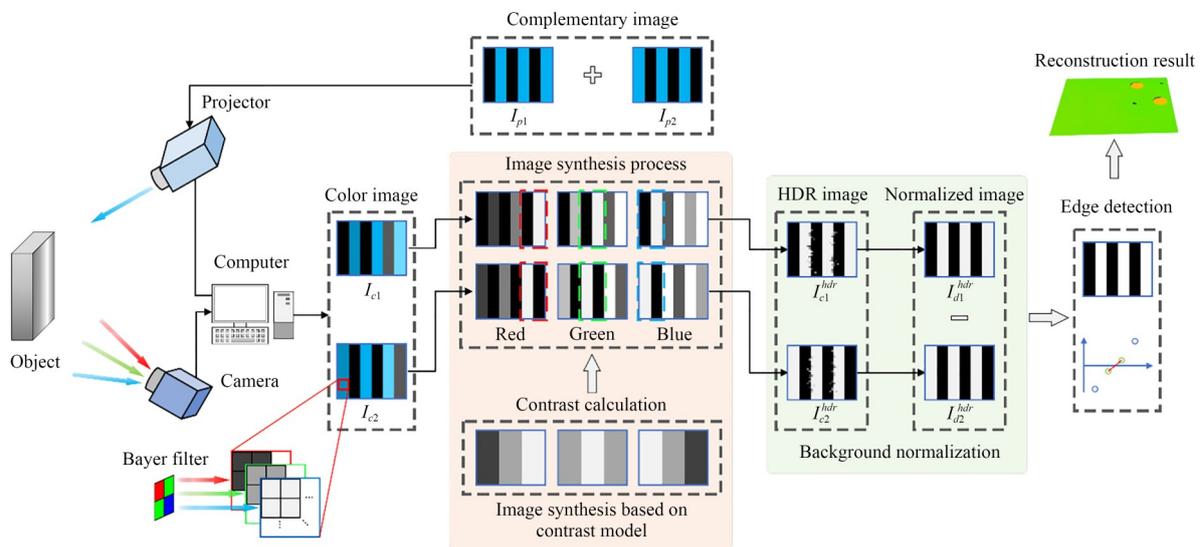


图1 彩色图像合成的互补线移条纹高动态范围三维测量

Fig. 1 High dynamic range 3D measurement with complementary line-shifting strips based on color image synthesis

2.2 互补线移条纹编码

与正弦条纹的灰度值编码相比,线条位置的编码信息在测量复杂反射特性的表面时能够更好地保留,具有更强的鲁棒性,因此本文使用线移条纹进行图像编码。线移条纹由一系列二值条纹图像组成,图像中黑色条纹与白色条纹的像

素宽度均为 m 。后一张线移条纹图由前一张条纹图整体向右移动 1 个像素单位得到,一个完整的编码图像序列由 m 幅无重复的线移条纹图构成,并以图像的投影时序作为每幅线移条纹图线条位置(黑白条纹边界位置)处的编码值。图 2 (a)展示了当条纹像素宽度为 $m=4$ 时的线移条

纹编码示意图。图中虚线指示的数字表示相应线移条纹的线条所在的像素位置处的编码值,可以看出虽然在不同像素位置处都有其对应的编码值,但是在重复的 m 个像素内具有周期歧义,因此需要确定不同周期下 m 个像素内编码值的级次,将重复编码值展开成最终的自然范围码值。本文采取基于时间编码的互补格雷码的方法来对线移条纹的重复编码值进行展开^[27],其中格雷码的最小编码周期应符合线移条纹的编码周期。对于图像宽度为 y 并具有垂直条纹的编码图像,格雷码的位数 n 可由式(1)确定:

$$\frac{y}{m} \leq 2^{n-1} < \frac{2y}{m}. \quad (1)$$

在本文中,使用互补线移条纹投影方法进行高鲁棒、高精度线条位置检测定位。一对标准互补线移条纹的图案可以表示为:

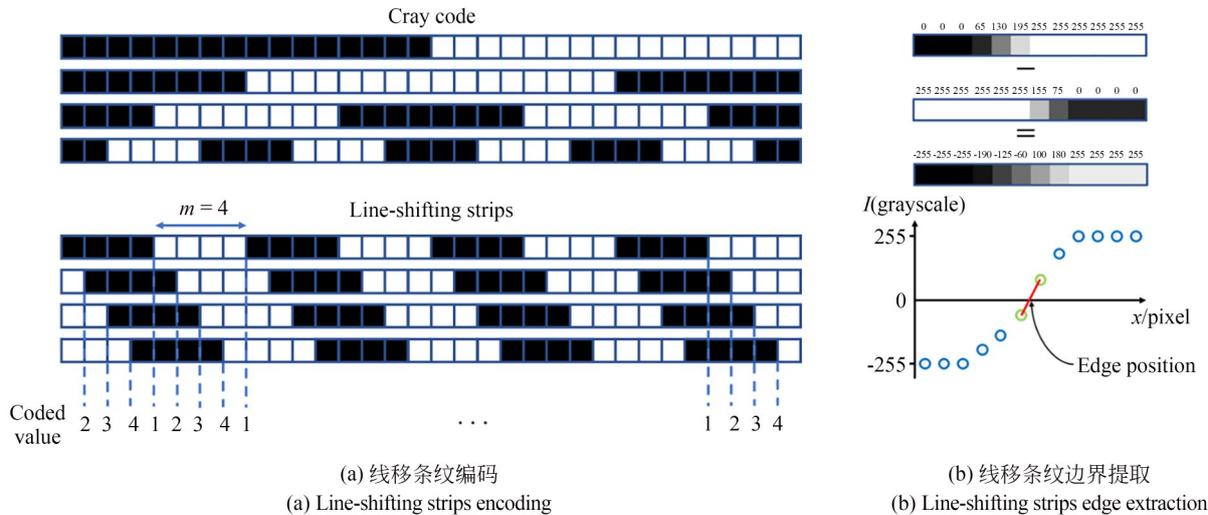


图 2 线移条纹编解码方案
Fig. 2 Line-shifting strips encoding and decoding scheme

2.3 彩色图像合成高动态范围三维测量

本文建立了基于互补线移条纹序列的对比度模型,用于表征线移条纹图像在不同区域的动态范围的有效程度。针对每一对互补线移条纹,可以生成各个颜色通道下的对比度图像,并通过该对比度图像序列,构建整体对比度图像,以最优对比度为依据逐像素地将各个通道下曝光适中的区域组合成一幅高动态范围的图像。进一步利用背景归一化统一合成图像的背景,更好地

保留高反射率区域和低反射率区域的图像细节,提高线移条纹边界检测的精度。
投影仪将互补的线移条纹投射到物体表面后,由彩色相机捕获的经物体表面调制的一对互补线移图像在各个颜色通道下的图像 $I_{c1,c2}^i(x,y)$ 可以表示为:

$$I_{\rho 1, \rho 2}(x, y) = a(x, y) \pm b(x, y) \times \text{sgn}[\sin(2\pi f x)]. \quad (2)$$

其中: $I_{\rho 1, \rho 2}(x, y)$ 是投影条纹的强度信息, $a(x, y)$ 表示背景强度, $b(x, y)$ 是调制幅度, $\text{sgn}[\sin(2\pi f x)]$ 是频率为 f 的方波函数, 设定 $I_{\rho 1}(x, y)$ 式中的符号为正, $I_{\rho 2}(x, y)$ 式中的符号为负。图 2(b) 展示了线移条纹的边界提取过程: 首先, 将一对灰度值互补的线移条纹进行相减, 生成新的条纹图。接着, 通过线性插值的方式提取条纹的亚像素边界。具体而言, 逐行遍历相减后的条纹图, 选取像素灰度值出现正负变化的两个像素(图中绿色点), 在以像素位置 x 为横坐标、灰度值 I 为纵坐标的坐标系中进行直线拟合, 该直线与横坐标轴的交点所在的亚像素位置即认为是条纹边界所在的位置(彩图见期刊电子版)。

保留高反射率区域和低反射率区域的图像细节, 提高线移条纹边界检测的精度。
投影仪将互补的线移条纹投射到物体表面后, 由彩色相机捕获的经物体表面调制的一对互补线移图像在各个颜色通道下的图像 $I_{c1,c2}^i(x,y)$ 可以表示为:

$$I_{c1,c2}^i(x, y) = q^i \times \left\{ ktr(x, y) \times [I_{\rho 1, \rho 2}^i(x, y) + I_c(x, y)] + kI_d(x, y) \right\} - \Delta I_{i,2}^i(x, y), \quad (3)$$

$$I'_{p_1, p_2}(x, y) = a(x, y) \pm b(x, y) \times \operatorname{sgn}\left\{\sin\left[2\pi fx + \phi(x, y)\right]\right\}. \quad (4)$$

式(4)表示由物体形貌调制后的条纹, $i = b, g, r$ 表示颜色通道, q^i 为红绿蓝各个颜色通道对应的拜尔滤波器对入射光的衰减率, k 为相机的灵敏度, t 为相机的曝光时间, $r(x, y)$ 为每个像素对应的物体的反射率, $I_c(x, y)$ 为经物体反射进入相机的环境光, $I_d(x, y)$ 为直接进入相机的环境光, $\phi(x, y)$ 为经过物体调制后条纹的相位变化。由于相机图像的量化范围有限(若相机图像为8位灰度图, 则相机图像的最大值灰度值记录为255, 最小值记录为0), 因此引入截断因子 $\Delta I_1^i(x, y)$ 和 $\Delta I_2^i(x, y)$, 表示实际条纹图像与相机记录图像的强度差异。线移条纹的解码依赖于条纹边界的位置, 需要确保条纹图具有高的清

$$c^i(x, y) = \left| \frac{I_{c1}^i(x, y) - I_{c2}^i(x, y)}{I_{c1}^i(x, y) + I_{c2}^i(x, y) + \alpha} \right| = \left| \frac{2A(x, y) \times \operatorname{sgn}\left\{\sin\left[2\pi fx + \phi(x, y)\right]\right\} - \Delta I_1^i(x, y) + \Delta I_2^i(x, y)}{2A(x, y) - \Delta I_1^i(x, y) - \Delta I_2^i(x, y) + \alpha} \right|. \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 若忽略 α , 当一对互补条纹图像中黑色条纹的灰度值为0, 白色条纹灰度值为0以外的任意值, 对比度都为1。因此在计算对比度时, 设置一个较小的常数 α , 使得对比度随一对互补线移条纹中黑白条纹亮度差值的变化而变化, 本文中 $\alpha = 1$ 。对于互补条纹的对比度可以分为以下两种情况讨论:

(1) 对于线移条纹图像没有过曝的区域, $\Delta I_1^i(x, y) = \Delta I_2^i(x, y) = 0$, 对比度表示为:

$$c_{non}^i(x, y) = \frac{2A(x, y)}{2A(x, y) + \alpha}. \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 随着衰减率 q_i 或反射率 $r(x, y)$ 的减小, 对比度 $c^i(x, y)$ 下降。在图像中反映为: 对于未产生图像过曝的区域, 随着条纹亮度的下降, 互补条纹的对比度下降。

(2) 对于线移条纹图像出现过曝的区域, 若两幅互补图像都过曝, 则该点对比度为0; 若只有其中一幅图像过曝, 并假设 $I_{c1}^i(x, y)$ 过曝, 有 $\operatorname{sgn}\left\{\sin\left[2\pi fx + \phi(x, y)\right]\right\} = 1$, $\Delta I_2^i(x, y) = 0$ 。

晰度和对比度, 所以合成高动态范围条纹图不能简单依据像素灰度值判断。可以根据互补线移条纹图像对的对应像素之间的条纹明暗差异来衡量条纹的对比度, 并通过对比度大小进行判断和选取最优图像区域, 合成高质量线移条纹图像。

设置线移条纹图像时, 令 $a(x, y) = b(x, y)$ 。对于暗室环境下采集一对互补线移条纹彩色图像, 可以省略环境光照参量 $I_c(x, y)$ 和 $I_d(x, y)$ 的影响, 此时相机捕获的图像可以表示为:

$$I_{c1, c2}^i(x, y) = A(x, y) \pm A(x, y) \times \operatorname{sgn}\left\{\sin\left[2\pi fx + \phi(x, y)\right]\right\} - \Delta I_{1, 2}^i(x, y), \quad (5)$$

其中, $A(x, y) = q_i k t r(x, y) \times a(x, y)$ 。建立不同颜色通道下的对比度表征 $c^i(x, y)$ 如式(6)所示:

此时, $I_{c1}^i(x, y) = 255$, $I_{c2}^i(x, y) = 0$ 。对比度表示为:

$$c_{one}^i(x, y) = \frac{255}{255 + \alpha} \approx 1. \quad (8)$$

可以看出, 只有一幅图像过曝的区域会出现较大的比度, 说明一对互补线移条纹不足以反映整体图像的动态范围情况, 需要综合所有互补线移条纹图像对的对比度以全面反映整个图像序列各区域动态范围的有效程度。

对所有互补线移条纹图像进行对比度计算可以得到一组对比度序列 $c_n^i(x, y)$, 其中 $n = 1, 2, 3, \dots, N$, N 表示互补线移条纹的对数。由对比度序列计算得到每个通道的整体对比度 $C^i(x, y)$:

$$C^i(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w^i(x, y) \times c_n^i(x, y), \quad (9)$$

其中:

$$w^i(x, y) = e^{-0.5\{1 + \operatorname{sgn}[I_c^i(x, y) - 255]\}} = \begin{cases} 1, & I_c^i(x, y) < 255 \\ e^{-1}, & I_c^i(x, y) = 255 \end{cases}, \quad (10)$$

在式(9)中, $w^i(x, y)$ 为对比度权重函数, $I_c^i(x, y)$ 为图像的灰度值, 并且设置 $\text{sgn}(0)=1$ 。通过权重函数可以减小过曝区域的对比度占比, 保证对比度对条纹清晰度描述的准确性。具体而言, 图像未过曝区域的对比度保持不变, 而图像过曝区域的对比度衰减为原来的 e^{-1} 。

最终, 根据计算得到的整体对比度, 对所有线移条纹图像逐像素进行最佳对比度的判断可以得到每个颜色通道合成掩膜:

$$\text{mask}^i(x, y) = \begin{cases} 1, & C^i(x, y) = \max[C^b(x, y), C^g(x, y), C^r(x, y)] \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (11)$$

通过合成掩膜合成三个颜色通道的图像得到具有高动态范围的互补线移条纹图像, 该过程可以表示为:

$$I_c^{\text{hdr}}(x, y) = \sum_i I_c^i(x, y) \times \text{mask}^i(x, y), \quad (12)$$

其中, $I_c^{\text{hdr}}(x, y)$ 表示由红绿蓝颜色通道合成得到的高动态范围线移条纹图像。

由于物体表面各个位置反射率的差异和每个颜色通道对同一单色光的衰减率影响, 在合成图像中将出现背景不一致的现象。为了消除背景不一致对线移条纹边界解码的影响, 利用背景归一化算法对合成的高动态范围图像进行处理, 得到条纹清晰度更高的归一化图像^[28]:

$$I_d^{\text{hdr}}(x, y) = \frac{2I_c^{\text{hdr}}(x, y) - I_0^{\text{hdr}}(x, y)}{I_0^{\text{hdr}}(x, y) + \gamma}, \quad (13)$$

其中: $I_d^{\text{hdr}}(x, y)$ 表示归一化后的高动态范围图像; $I_0^{\text{hdr}}(x, y)$ 为投影仪均匀照明下合成的高动态范围图像; γ 为一个极小的常数, 以避免除以 0 带来的误差, 在本文中设置为 0.05。在后续操作中, 将归一化图像的灰度值范围设置为 0~255。完成高动态范围的图像合成与背景归一化后, 根据第 2.1 节的方法, 解码得到线移条纹图像的编码值, 最终利用逆相机法得到的系统标定参数通过三角法恢复物体的三维形貌^[29]。

3 实验与分析

3.1 实验系统

为了证明所提方法的有效性, 本文搭建了基于线移条纹投影的单目三维测量系统, 如图 3 所示。系统由一个装配有 12 mm 焦距镜头的海康彩色相机 (MV-CH050-10UC) 和装配有 12 mm 焦距镜头的单色蓝光投影光机组成, 相机和光机的分辨率分别为 $2\,448 \times 2\,048$, $1\,920 \times 1\,080$ 。根据互补线移条纹编码方案, 投影图像包含了互补线移条纹图像 (20 幅)、格雷码图像 (9 幅)、以及灰度值为 0 的均匀图像和灰度值为 255 的均匀图像 (2 幅) 在内的共 31 幅图像。

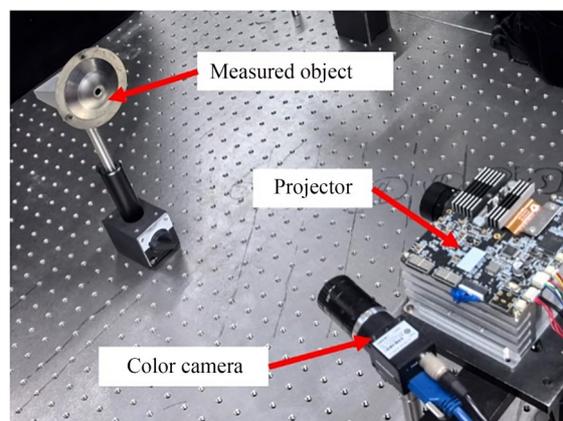


图 3 单目线移条纹测量系统

Fig. 3 Monocular line-shifting strips measurement system

3.2 金属工件测量

首先对表面凸起的金属圆片进行了测量, 其在均匀照明下的图像如图 4(c) 所示。实验中所有序列图样的曝光时间一致, 测试所提方法对测量动态范围的提升。相机采集的一对互补线移条纹的彩色图像及其对应的三个颜色通道下的图像如图 4(a)、4(b) 所示, 从彩色图像中可以看到高反区域的图像过曝以及低反区域图像亮度过低的现象; 在三个通道中线移条纹图像表现出了不同的动态范围, 并且各个图像区域的条纹具有不同的清晰程度。图 4(d) 为蓝色、绿色、红色通道计算所得的整体对比度图像。绘制了三个通道的对比度图像在图 4(d) 中 A、B、C 三个区域下的对比度曲线, 分别如图 4(e)~4(g) 所示 (彩图见期刊电子版)。从图中可以看出, 三个通道的对比度在不同的区域呈现出显著差异: A 区域对应被测圆片反

射率适中的区域,该区域绿色通道的图像最清晰,既没有蓝色通道图像的过曝现象,也没有红色通道图像的曝光不足的现象,因此在对比度图像中绿色通道具有最高的对比度;B区域对应被测圆片凸起的低反区域,该区域蓝色通道的对比度远高于其他通道,线移条纹也更加清晰;C区域对应

被测圆片的高反区域,蓝色通道和绿色通道的线移条纹图像由于过曝导致对比度较低,而红色通道的图像最清晰,具有最高的对比度。因此根据最佳对比度判断,对于图4(d)中划分的A,B,C三个区域,分别选取绿色、蓝色、红色通道的图像合成高动态范围图像。

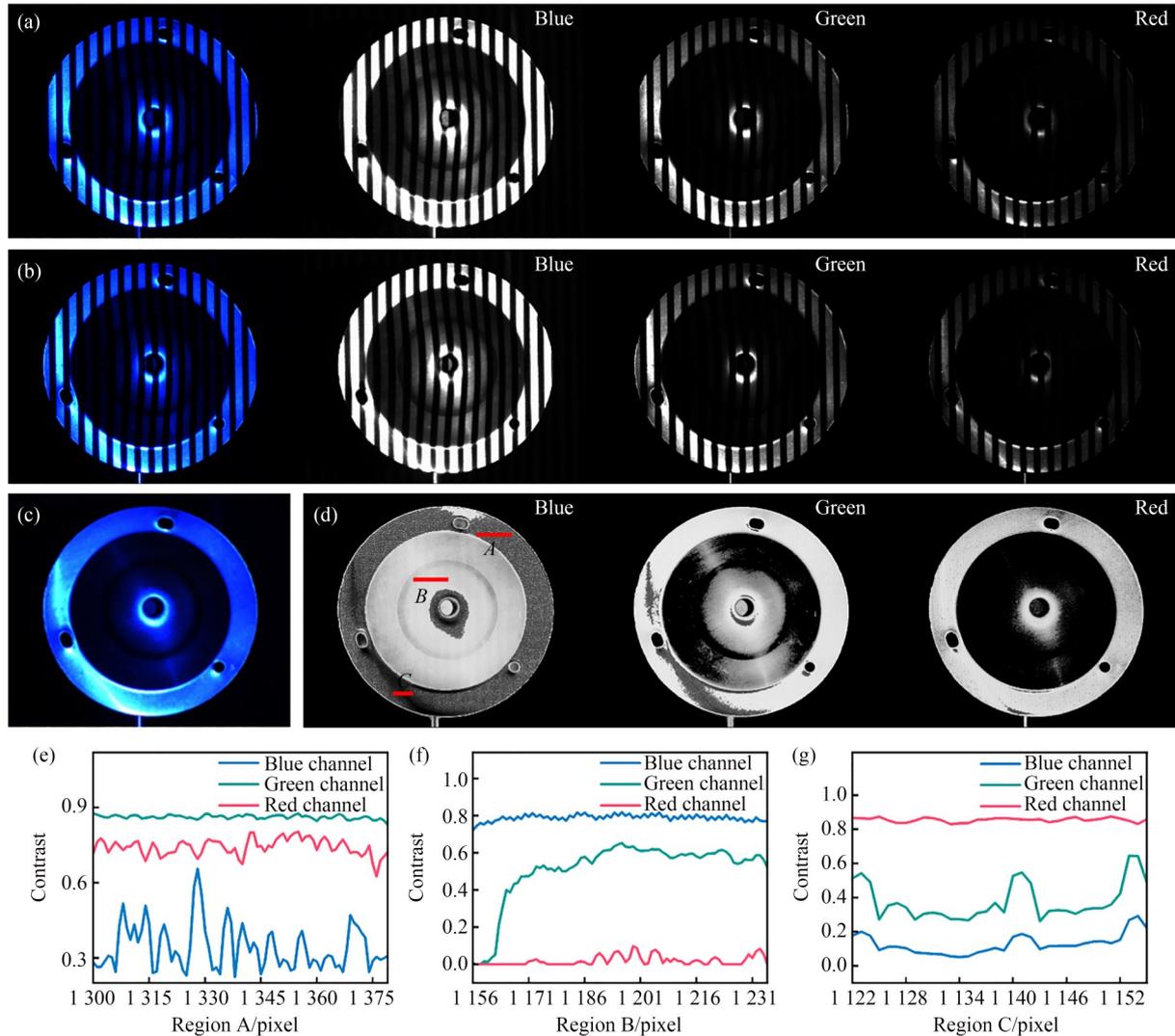


图4 线移条纹各个通道图像及对比度分布 (a)(b) 相机采集的一对互补线移条纹彩色图像及其在三个通道下的图像; (c) 均匀照明下的金属圆片; (d) 三个颜色通道对应的整体对比度图像; (e)(f)(g) 分别为图4(d)中A、B、C区域的对比度曲线

Fig. 4 Each channel image and contrast distribution of line-shifting strips. (a) (b) A pair of complementary line-shifting strips color images and their images in three channels captured by the camera; (c) The metal disc with uniform illumination; (d) The overall contrast image corresponding to the three color channels; (e) (f) (g) The contrast curves for regions A, B, and C in Figure 4(d), respectively

互补线移条纹的高动态图像合成结果如图5所示。图5(a)为根据图4(d)中三个通道的对比

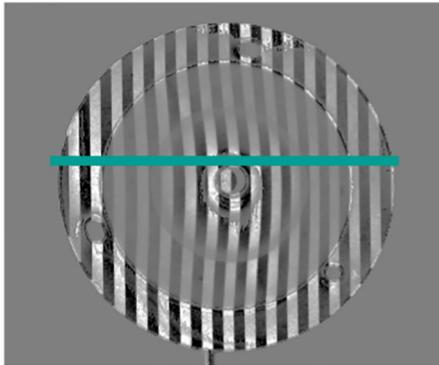
度图像进行最佳对比度判断后得到的合成掩膜。在背景归一化之前,通过合成掩膜对图4(a)、4

(b)所示的一对互补线移条纹分别进行高动态图像合成,其相减后的图像如图 5(b)所示;而对应的进行背景归一化操作之后的图像如图 5(c)所示。图 5(d)展示了图 5(b)和图 5(c)的图像在同一像素区域的截面图。从图中的对比可以看出,背景归一化之前的图像在对应于掩膜图像边缘

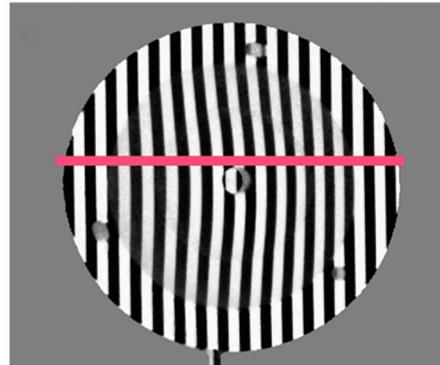
的拼接位置处出现灰度值的“跳变”,图像的整体背景不统一。经过背景归一化后的图像具有统一的背景,线移条纹更加清晰,并且更符合方波函数分布。以上的结果表明,在使用本文提出的方法处理图像后,在低反区域和高反区域黑白条纹的细节得到保留,说明光滑金属表面的耀光区



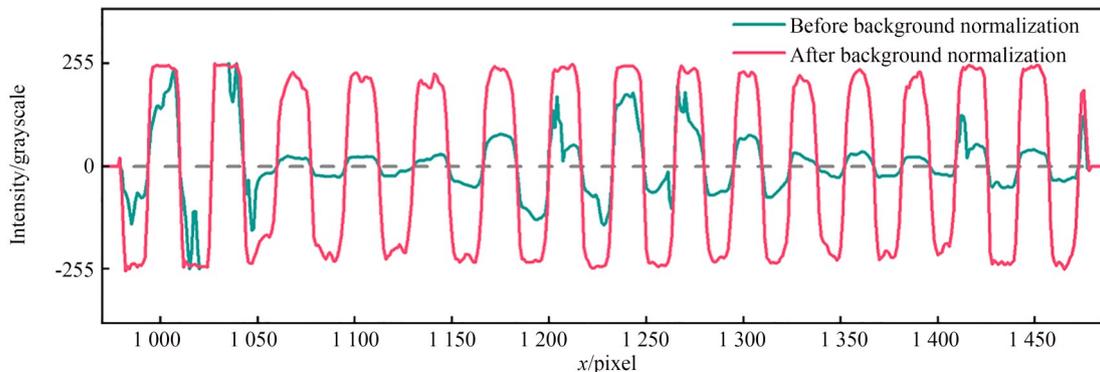
(a) 三个通道的合成掩膜
(a) Synthesis mask of the three channels



(b) 背景归一化前高动态互补线移条纹图像相减的结果
(b) Result of the subtraction of high dynamic complementary line-shifting strip images before background normalization



(c) 归一化后高动态互补线移条纹图像相减的结果
(c) Result of the subtraction of high dynamic complementary line-shifting strip images after background normalization



(d) 背景归一化前后的图像在相同像素区域的截面图
(d) Cross-sectional images of the same pixel area before and after background normalization

图 5 高动态范围图像合成结果

Fig. 5 High dynamic range image synthesis results

域对条纹边界的影响受到了抑制,提高了线移条纹的解码正确性。

图 6 展示了三个通道下金属圆片的点云重建结果(彩图见期刊电子版)。图 6(a)~6(c)分别为单独使用蓝色、绿色、红色通道的图像进行重建的点云。从各个通道图像的点云重建结果可以看出,由于过曝区域和过暗区域的互补线移条纹质量下降,导致对应区域出现点云残缺与精度降低,如图 6 中红色箭头所示。具体而言,蓝色通道在金属圆片表面的凸起部分所在的低反区域重建较好,但在高反区域点云稀疏且偏差较大;绿色通道在表面反射率适中的圆片边缘和中心

区域有较好的重建结果,但在低反区域和高反区域都出现了点云的残缺;红色通道能够完整地重建出圆片表面的高反区域,但整体点云的完整度低于其他通道。上述各通道图像在金属圆片表面不同反射率区域的点云重建结果表现与图 4(d)中各通道的对比度分布相对应,验证了本文构建的对比度模型的合理性。通过本文所提方法对金属圆片表面进行三维重建,如图 7(a)所示。重建结果表明,所提方法的重建点云综合了各通道点云中重建良好的部分,完整地显示了金属圆片表面的整体形貌,说明所提方法对复杂反射特性表面测量具有可行性。

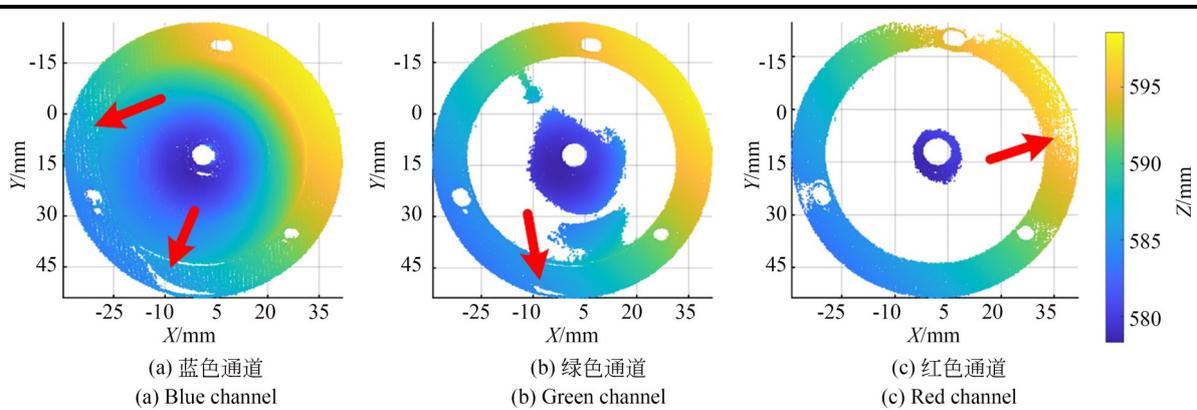


图 6 三个通道下金属圆片的重建点云

Fig. 6 Reconstructed point cloud of the metal disc for the three channels

3.3 方法对比

基于图像多曝光的方法是重建复杂反射特性表面常用的方法,通过合适的曝光时间,能够达到较好的测量效果,因此将本文所提方法与多曝光相移法^[13](以下称为多曝光方法)进行对比。在多曝光方法中,编码图像采用 12 步相移条纹,单独使用了蓝色通道的图像并设置了 5 个等间隔曝光时间。在每个设定的曝光时间中,采集了包括相移条纹(12 幅)、格雷码图像(9 幅)以及黑白图像(2 幅)在内的共 23 幅图像。对金属圆片的重建结果对比,如图 7 所示。图 7(a)和图 7(b)分别展示了所提方法的重建结果与多曝光方法的重建结果。对金属平板的重建结果比较如图 8 所示。其中,图 8(a)为均匀照明下的金属平板图像,图 8(b)为相机采集到的线移条纹图像,图 8(c)和图 8(d)分别展示了所提方法的重建结果与多曝光方法对金属平板的重建结果。从重建结

果的对比可以看出,所提方法与多曝光方法都能完整地呈现复杂反射特性表面的形貌,两者的重建完整性基本相同。

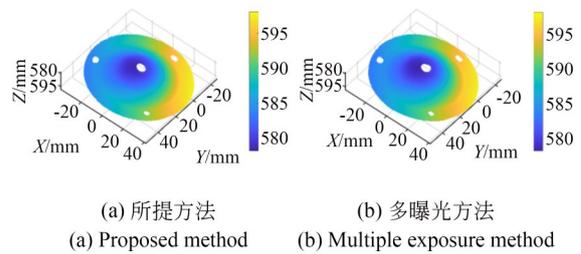


图 7 金属圆片的重建结果对比

Fig. 7 Comparison of the reconstruction results of the metal disc.

表 1 展示了所提方法与多曝光方法的图像采集对比。所提方法设定的曝光时间为 20 ms,相机采集的图像数量为 31 幅,总采集时间为

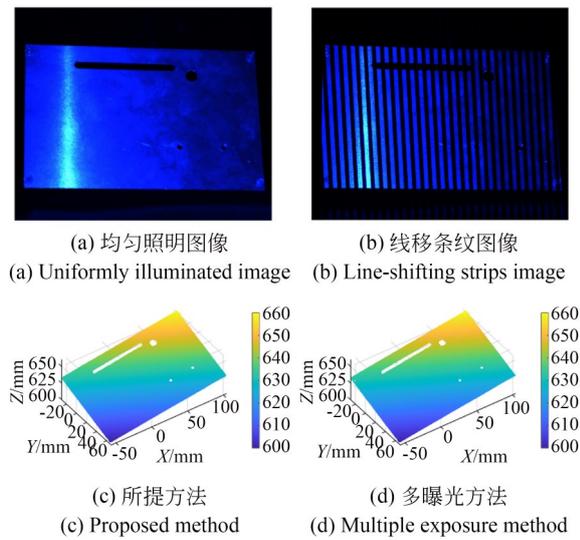


图 8 金属平板的重建结果对比

Fig. 8 Comparison of reconstruction results of metal plate

1.24 s;多曝光方法设定的曝光时间分别为 10, 25, 40, 55, 70 ms, 相机采集的图像数量为 115 幅, 总采集时间为 6.90 s。对于金属圆片, 所提方法和多曝光方法的数据处理与计算的时间分别为 8.09 s 和 15.68 s; 总的重建时间分别为 9.33 s 和 22.58 s, 所提方法缩短了 58% 的重建时间。对于金属平板, 两者的计算时间分别为 8.42 s 和 17.45 s, 总的重建时间分别为 9.66 s 和 24.35 s, 所提方法缩短了 60% 的重建时间。

从以上的对比结果可以看出, 所提方法采集的图像数量、采集时间和数据计算时间均优于多曝光方法, 采集时间缩短了 82%, 对于两个被测金属工件的重建时间平均缩短了 59%。同时复杂反射特性的金属工件表面得到了完整的重建, 表明所提方法在单次条纹投影下可精确获取复杂反射表面的完整测量数据, 达到快速、精确测量的目的。

表 1 所提方法与多曝光方法对比

Tab. 1 Comparison of proposed method with the multiple exposure method

项目	金属圆片		金属平板	
	所提方法	多曝光方法	所提方法	多曝光方法
图像数量	31	115	31	115
曝光时间/ms	20	10, 25, 40, 55, 70	20	10, 25, 40, 55, 70
总采集时间/s	1.24	6.90	1.24	6.90
计算时间/s	8.09	15.68	8.42	17.45
总时间/s	9.33	22.58	9.66	24.35

4 结 论

本文提出了一种改进的高动态范围三维测量方法, 使用彩色相机在单次曝光时间下采集一组线移条纹图像序列, 通过建立互补线移条纹的对比度模型, 利用最佳对比度检测不同颜色通道的强度响应差异, 由此合成高动态范围线移条纹图像, 并通过背景归一化进一步统一合成图像各个通道分量的背景, 利用互补线移条纹图像对精

确定位线条位置, 获得有效的线移条纹编码信息进行三维重建。实验结果表明, 与多曝光的方法对比, 所提方法对金属工件测量的图像采集时间缩短了 82%, 整体重建时间平均缩短了 59%。使用所提方法对具有复杂反射特性的金属工件表面的测量, 能够有效筛选剔除无效或误差较大的数据, 单次曝光时间下即可获得完整、高密度三维点云。实现高效率、高精度、高动态范围三维测量。

参考文献:

[1] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. 光学精密工程, 2002, 10(5):

528-532.

CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532.

- (in Chinese)
- [2] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135: 106193.
- [3] HAN L Y, CHENG X, LI Z W, *et al.* A robot-driven 3D shape measurement system for automatic quality inspection of thermal objects on a forging production line[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4368.
- [4] CHEN S. Intraoral 3-D measurement by means of group coding combined with consistent enhancement for fringe projection pattern[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 5018512.
- [5] SANSONI G, TREBESCHI M, DOCCHIO F. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation [J]. *Sensors*, 2009, 9 (1) : 568-601.
- [6] 陈新禹, 孙非, 傅莉, 等. 相移光栅轮廓术的便携式三维测量系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 105-111.
CHEN X Y, SUN F, Fu L, *et al.* Phase shifting fringe profilometry based portable 3D measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10) : 105-111. (in Chinese)
- [7] 张宗华, 刘巍, 刘国栋, 等. 三维视觉测量技术及应用进展[J]. *中国图象图形学报*, 2021(6): 1483-1502.
ZHANG Z H, LIU W, LIU G D, *et al.* Overview of the development and application of 3D vision measurement technology [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2021(6) : 1483-1502. (in Chinese)
- [8] 苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 1-10.
SU X Y, ZHANG Q C, CHEN W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2) : 1-10. (in Chinese)
- [9] 杨鹏斌, 邓林嘉, 陈元, 等. 基于结构光的高反物体三维形貌测量方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0204004.
YANG P B, DENG L J, CHEN Y, *et al.* Three-dimensional shape measurement of highly reflective objects based on structured light [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2) : 0204004. (in Chinese)
- [10] 冯维, 汤少靖, 赵晓冬, 等. 基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0512003.
FENG W, TANG S J, ZHAO X D, *et al.* Three-dimensional shape measurement method of high-reflective surfaces based on adaptive fringe-pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5) : 0512003. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] LI J, GUAN J T, CHEN X B, *et al.* Adaptive optimal exposure selection based on time cost function for 3D reconstruction of high dynamic range surfaces [J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(12): 125018.
- [13] ZHANG S, YAU S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 33604-33604-7.
- [14] 雷经发, 陆宗胜, 李永玲, 等. 基于投影栅相位法和多曝光图像融合技术的强反射表面轮廓检测 [J]. *光学精密工程*, 2022, 30(18): 2195-2204.
LEI J F, LU Z S, LI Y L, *et al.* High reflection surface topography measurement based on fringe projection phase method and multi-exposure image fusion technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(18) : 2195-2204. (in Chinese)
- [15] YIN Y K, CAI Z W, JIANG H, *et al.* High dynamic range imaging for fringe projection profilometry with single-shot raw data of the color camera [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 89: 138-144.
- [16] WANG Y H, ZHANG Q, HU Y, *et al.* Rapid 3D measurement of high dynamic range surface based on multi-polarization fringe projection [J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(8): 084107.
- [17] 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.
- [18] FENG S J, CHEN Q, ZUO C, *et al.* Fast three-dimensional measurements for dynamic scenes with shiny surfaces [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 18-27.
- [19] LI B Z, XU Z J, GAO F, *et al.* 3D reconstruction of high reflective welding surface based on binocu-

- lar structured light stereo vision [J]. *Machines*, 2022, 10(2): 159.
- [20] SONG Z, CHUNG R, ZHANG X T. An accurate and robust strip-edge-based structured light means for shiny surface micromasurement in 3-D [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 1023-1032.
- [21] SONG Z, JIANG H L, LIN H B, *et al.* A high dynamic range structured light means for the 3D measurement of specular surface [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 95: 8-16.
- [22] LIN H, GAO J, MEI Q, *et al.* Three-dimensional shape measurement technique for shiny surfaces by adaptive pixel-wise projection intensity adjustment [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 206-215.
- [23] LIANG J X, YE Y P, GU F F, *et al.* A polarized structured light method for the 3D measurement of high-reflective surfaces [J]. *Photonics*, 2023, 10(6): 695.
- [24] ZHANG Y N, QIAO D Y, XIA C F, *et al.* A method for high dynamic range 3D color modeling of objects through a color camera [J]. *Machine Vision and Applications*, 2023, 34: 6.
- [25] TROBINA M. Error model of a coded-light range sensor[S]. Technical Report, Communication Technology Laboratory, ETH Zentrum, Zurich, 1995.
- [26] ZHU H B, ZHANG X J, LI J, *et al.* Quantitative evaluation of Bayer chromatic imaging on the accuracy of photogrammetric measurements [J]. *Measurement*, 2019, 145: 724-734.
- [27] 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开 [J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1947-1951.
- SUN X Z, SU X Y, ZOU X P. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1947-1951. (in Chinese)
- [28] ZUO C, TAO T Y, FENG S J, *et al.* Micro Fourier Transform Profilometry (μ FTP): 3D shape measurement at 10, 000 frames per second [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [29] HUANG P S. Novel method for structured light system calibration [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(8): 083601.

作者简介:



古万煜(1999—),男,广东梅州人,硕士研究生,2022年于广东工业大学获得学士学位,主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: 2200453072@szu.edu.cn

通讯作者:



刘晓利(1980—),男,河北衡水人,博士,教授,博士生导师,2008年于天津大学获得博士学位,主要从事三维结构光测量、光场三维成像与测量、激光干涉测量等方面的研究。E-mail: lxl@szu.edu.cn