

基于自适应多曝光融合的高动态范围表面测量方法

雷经发^{1,2}, 谢浩然^{1,2}, 李永玲^{1,3*}, 吴东⁴, 张森^{1,2}, 赵汝海^{1,2}

1. 安徽建筑大学机械与电气工程学院, 安徽合肥 230601;
2. 工程机械智能制造安徽省教育厅重点实验室, 安徽合肥 230601;
3. 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室, 四川自贡 643000;
4. 中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230026)

摘要: 为解决结构光测量高动态范围表面物体时出现局部过度曝光或曝光不足的问题, 提出一种改进的多曝光融合方法, 利用自适应曝光代替手动曝光, 并对图像融合过程进行优化。首先, 将初始曝光时间下拍摄的图像利用直方图进行分析, 将被测物体表面反射率不同的区域分为若干组, 分别计算出每个组别的最佳曝光时间; 在此基础上, 拍摄不同组别对应最佳曝光时间下投射白光和条纹的图像, 并去除图像中超过设定阈值的高灰度值区域, 再将投射白光处理后的图像制作成掩模图, 与相同曝光时间下投射条纹处理后的图像相乘, 进而对多组相乘后的图像进行亮度压缩与融合; 最后, 通过 CLAHE 算法提高融合后所生成条纹图的对比度与清晰度, 并对条纹解相后进行点云重建和尺寸测量。实验结果表明: 文中方法中自适应曝光相较于手动曝光具有高效性和准确性, U 型卡、连接块、圆盘三个高动态范围表面物体的点云重建率分别高达 99.98%、99.74%、99.76%, 测量出的标准块阶梯高度差绝对误差为 0.062 mm, 相对误差仅为 0.69%, 该方法有效解决了高动态范围表面物体测量时点云缺失的问题, 提高了三维轮廓的测量精度。

关键词: 高动态范围表面物体; 自适应曝光时间; 多曝光融合技术; 三维轮廓检测

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230370

0 引言

三维测量是一种利用计算机或其他设备对物体三维表面进行精确测量的技术^[1]。结构光扫描技术因具有测量速度快、精度高、分辨率高等优点, 成为制造业、建筑设计、医疗、生物医学等领域中应用较为广泛的三维测量技术之一^[2-3]。条纹投影轮廓术是一种常用于三维形状测量的结构光扫描技术^[4-5], 通过投影仪将条纹图投射到物体表面, 利用相机捕获变形的条纹图, 求解出绝对相位后, 结合系统标定参数对物体进行点云重建实现三维轮廓的测量^[6]。

对于高动态范围表面的物体, 由于物体表面反射光具有较大的动态范围, 很难保证在单次曝光时间下

被测物体表面的不同区域同时捕捉到高质量的条纹图。因此, Zhang 等^[7]提出了一种高动态范围扫描技术, 通过合成不同曝光时间下捕获的条纹图, 融合生成图像质量良好的条纹图, 但该方法需要手动设置曝光时间, 效率较低且依靠操作者的经验。Song 等^[8]利用两个相机捕获物体表面的图像, 其中一个相机捕获反射率较低的区域, 另一个相机捕获反射率较高的区域, 最后利用所得到的不同曝光下的图像, 结合双向反射分布函数模型, 得到物体的三维形状信息, 但该方法对于实验环境要求较高且过程较为复杂。李兆杰等^[9]提出了一种自适应曝光重建的方法, 利用响应函数和图像序列来计算曝光次数和曝光时间, 该方法对环境的适应性较好, 但需要拍摄大量图片, 不具备

收稿日期: 2023-06-10; 修订日期: 2023-07-15

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目 (1804a09020009); 过程装备与控制工程四川省高校重点实验室开放基金项目 (GK202101); 安徽高校协同创新项目 (GXXT2022-019); 安徽高校自然科学研究重大项目 (KJ2021ZD0068, 2023AH040036); 合肥市自然科学基金资助项目 (2021019)

作者简介: 雷经发, 男, 教授, 博士, 主要从事视觉检测与人机工程方面的研究。

通讯作者: 李永玲, 女, 讲师, 博士, 主要从事机器视觉方面的研究。

通用性。姜宏志等^[10]采用向被测物投射明暗条纹图方法,通过设置不同的相机曝光时间采集图像,并将采集到的图像合成一幅无失真的条纹图,但该方法对投射条纹图的明暗程度要求较高。薛峰等^[11]提出了一种在多曝光融合过程中通过替换像素点灰度值的方法得到高质量条纹图,但当某块区域图像质量整体偏差时,得到的条纹图质量依然不高。

针对上述方法,选取曝光时间的局限性以及获得的条纹图质量不高的问题,文中提出了一种改进的多曝光融合方法。首先在初始曝光时间下对拍摄的图像进行直方图分析,通过直方图的集群分布将被测物表面反射率分为若干个组,分别计算每个组别的最佳曝光时间。在不同组别对应的最佳曝光时间下分别拍摄投射白光和投射条纹的图像,先对拍摄的图像进行阈值预处理,将预处理后的投射白光的图像制作成掩模图像并与相同曝光时间下的条纹图相乘,对相乘的图像进行亮度压缩与融合,采用 CLAHE(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)算法提高融合后的图像的对比度与清晰度,最后通过求解相位和系统标定对物体进行三维点云重建。该方法自动化程度高,适用范围广,能够实现高动态范围表面物体高精度三维轮廓测量。

1 实验原理

1.1 自适应曝光时间

结构光扫描技术中,曝光时间会直接影响拍摄到的条纹图质量和精度^[12]。在环境光强不变的情况下,曝光时间的选取取决于被测物体表面反射率的大小。如果反射率较大,应选择相对较短的曝光时间,避免过度曝光;如果反射率较小,需要考虑增加曝光时间来提高成像的信噪比。传统的手动曝光的方法全凭操作者的经验,从而影响三维测量的精度。基于此,文中利用直方图自适应计算曝光时间。条纹投影轮廓术原理如图 1 所示。

图 1 中, I_p 为投影强度; α 为表面反射率; αI_p 为反射光; β_1 为环境光; $\alpha\beta_1$ 为反射的环境光; β_2 为直接进入相机的环境光。所以当投射均匀明亮的白光时,相机捕获的图像强度可以表示为:

$$I(x, y, t) = st(\alpha(x, y)I_p + \alpha(x, y)\beta_1(x, y) + \beta_2(x, y)) \quad (1)$$

式中: s 、 t 分别为相机感光度和曝光时间,因为实验情

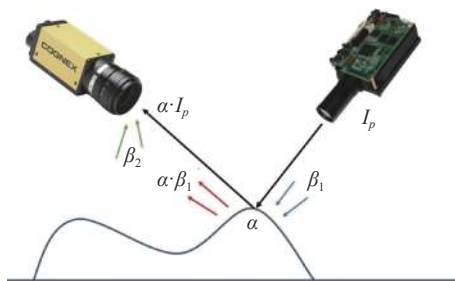


图 1 条纹投影轮廓术原理图

Fig.1 Schematic diagram of stripe projection profilometry

况下场景亮度不变,所以相机感光度 s 通常为常数^[13]。又因为该实验在黑暗环境下进行,环境光可忽略不计,所以上式可以简化为:

$$I = st\alpha I_p \quad (2)$$

由公式 (2) 可知捕获的图像强度主要取决于曝光时间 t , 想要获取高质量的图像, 需选择合适的曝光时间。假设 t_{opt} 为相机的最佳曝光时间, I_{ideal} 为理想拍摄强度, 代入公式 (2) 可得:

$$I_{ideal} = st_{opt}\alpha I_p \quad (3)$$

通常情况下, 对于 8 bit 的图像, I_{ideal} 设为 254^[14], 这个值可以保证条纹图具有高信噪比的同时避免了相机传感器饱和现象的发生。由公式 (3) 可知只要求出 $st\alpha I_p$, 便可得出最佳曝光时间 t_{opt} , 因此, 通过引入一个初始曝光时间 t_0 , 对应的捕获图像强度为 I_0 。将其代入公式 (2) 可表示为:

$$I_0 = st_0\alpha I_p \quad (4)$$

将公式 (3) 与公式 (4) 联立可得:

$$t_{opt} = \frac{I_{ideal}}{I_0} t_0 \quad (5)$$

在初始曝光时间 t_0 下拍摄图像 I_0 的直方图如图 2 所示。

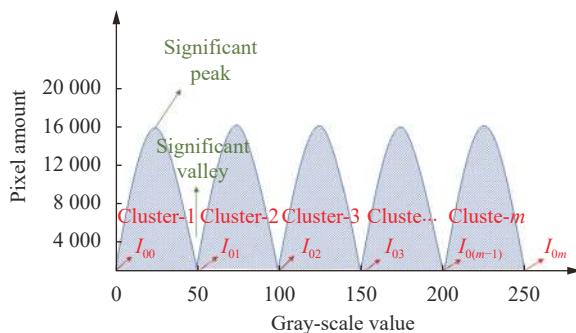


图 2 I_0 直方图示例

Fig.2 Example of I_0 histogram

图 2 中,横轴代表 I_0 的灰度值,纵轴代表相应灰度值的像素数,阴影区域代表 I_0 的整个变化范围。通过该方法将整个大的范围进一步划分为由 I_0 小范围变化形成的几个集群,如图 2 所示,每个集群由一个波峰和两个波谷来区分,沿着 I_0 的正方向,从 1~ m 标记集群, m 是确定集群的总数,由于同一集群内的像素具有相同的反射率,所以在单个集群中只需单次曝光。为了计算一个能够完全覆盖整个集群的曝光时间,选择每个集群右侧谷底对应的 I_0 值来计算曝光时间。所以对于高动态范围表面物体,根据表面反射率的不同,可以计算出 m 个最佳曝光时间 t_{opt} 。

1.2 图像融合

对于低动态范围表面物体,单次曝光可以提供足够的曝光量^[15],但对于高动态范围表面物体,单次曝光难以获得高质量的条纹图。多曝光融合技术通过多次曝光将条纹图进行融合,可以有效提高条纹图的清晰度,进而提高相位测量的精度^[16]。传统多曝光融合方法获得的条纹图虽然去除了过曝点,但条纹图的整体质量依然不高。所以文中在传统的多曝光融合的方法上进行改进,具体流程如下:通过自适应曝光方法得出的 m 个最佳曝光时间 t_{opt} ,投影仪按照曝光时间顺序向物体投射纯白图像,将相机拍摄的图像依次存入序列 I^s 中,同样按照曝光时间顺序在每个最佳曝光时间 t_{opt} 下采集 4 幅相移为 $\pi/2$ 的光栅条纹图像,将拍摄的图像存入序列 J^s 中。对于序列 I^s 和序列 J^s 中的图像通过百分比的方式进行阈值预处理,具体的操作为首先将灰度图归一化,选择一个合适的百分比值,例如百分比值设置为 95%,表示图像灰度级范围 95% 的灰度值作为阈值,接着将这个百分比值转换为像素值。如果图像的灰度级范围为 0~255,则 95% 的像素点的灰度值为 $0.95 \times 255 = 242.25$,最后将此灰度值作为阈值,大于这个阈值的像素点灰度值将被截断到指定阈值 $threshold$ 。

对序列 I^s 和序列 J^s 中的图像进行阈值预处理后,将序列 I^s 中的图像制作成掩模图,定义掩模图序列为 M^s ,计算公式如公式 (6) 所示:

$$M_i^s(x,y) = \begin{cases} 1, & I_i^s(x,y) < threshold \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $M_i^s(x,y)$ 为掩模图像序列 M^s 中第 i 幅图像在坐标 (x,y) 处的灰度值; $I_i^s(x,y)$ 为序列 I^s 中第 i 幅图像在

(x,y) 处的灰度值。

将掩模图像序列 M^s 与条纹图序列 J^s 依次相乘,定义 G^s 为合成的条纹图序列,可得:

$$G_i^s(x,y) = M_i^s(x,y) \cdot J_i^s(x,y) \quad (7)$$

式中: $G_i^s(x,y)$ 为合成的条纹图序列 G^s 中第 i 幅图像在坐标 (x,y) 处的灰度值; $J_i^s(x,y)$ 为条纹图序列 J^s 中第 i 幅图像在坐标 (x,y) 处的灰度值。

为了防止下一步图像融合的时候图像出现新的饱和区域,文中使用亮度压缩的方法将灰度值范围缩小到相同的范围得到序列 F^s ,用公式可表示为:

$$F_i^s(x,y) = \mu G_i^s(x,y) \quad (8)$$

式中: $F_i^s(x,y)$ 为序列 F^s 中第 i 幅图像在坐标 (x,y) 处的灰度值; μ 为亮度压缩系数。

用 T 表示融合后的光栅图像,坐标点 (x,y) 处的灰度值 $T(x,y)$ 计算公式如下:

$$T(x,y) = \sum_{i=1}^m F_i^s(x,y) \quad (9)$$

最后对融合后的图像 T 采用 CLAHE 算法提高条纹图的对比度和清晰度。

1.3 相位解算

相移法是一种通过投影若干幅具有一定常量相位差的光栅条纹图像来求解相位场的方法,所以又被称为相位测量术^[17],文中采用四步相移法求解相位主值,需投射 4 幅条纹图,则每幅条纹图的灰度分布为:

$$\begin{cases} I_1(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\varphi(x,y)] \\ I_2(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\varphi(x,y) + \pi/2] \\ I_3(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\varphi(x,y) + 3\pi/2] \\ I_4(x,y) = I'(x,y) + I''(x,y) \cos[\varphi(x,y) + 2\pi] \end{cases} \quad (10)$$

由公式 (10) 可知四步相移中相邻的两个光栅条纹图像的相位差为 $\pi/2$,此时的相位主值提取的公式为:

$$\varphi(x,y) = \arctan \left[\frac{I_4(x,y) - I_2(x,y)}{I_1(x,y) - I_3(x,y)} \right] \quad (11)$$

此时,求出的相位主值由于反正切函数的性质使得相位值被包裹在 $[0,2\pi]$ 之间^[18],需要对包裹的相位进行展开。解包裹相位的方法包括格雷码法、傅里叶法、双频外差法等^[19]。传统的格雷码法解相位可能会因为投影仪和相机畸变效应等原因,在包裹相位的边缘处可能会发生跳变,所以文中使用互补格雷码进行

解相。互补格雷码如图 3 所示引入一张 5 位格雷码，与 4 位格雷码形成互补^[20]。互补格雷码的原理如图 4 所示。

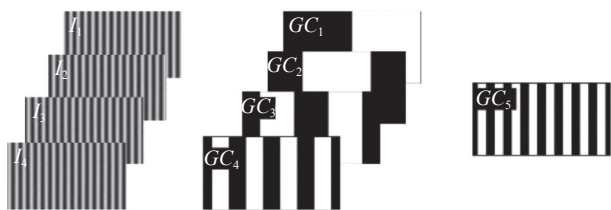


图 3 互补格雷码加四步相移图

Fig.3 Complementary Gray code and four step phase shift graph

GC ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
GC ₂	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
GC ₃	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
GC ₄	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
GC ₅	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
k ₁	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
k ₂	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

图 4 互补格雷码原理图

Fig.4 Schematic diagram of complementary Gray code

互补格雷码的计算如下式所示：

$$\Phi(x,y) = \begin{cases} \varphi(x,y) + 2\pi k_2(x,y), \varphi(x,y) \leq -\pi/2 \\ \varphi(x,y) + 2\pi k_1(x,y), -\pi/2 < \varphi(x,y) < \pi/2 \\ \varphi(x,y) + 2\pi k_2(x,y) - 2\pi, \varphi(x,y) \geq \pi/2 \end{cases} \quad (12)$$

式中： k_1 为 4 张格雷码图使用传统解相方法获得； k_2 为全部 5 张格雷码图进行解相获得，最后求得的 $\Phi(x,y)$ 即为绝对相位。

2 实验过程与分析

测量系统由 DLP 投影设备和 Congex 工业相机组成，系统采用四步相移和互补格雷码的方法进行测

量，共需投射 4 幅相移图和 5 幅格雷码图以及一张投射白光图。

选取标准块作为被测物，设置初始曝光时间 t_0 为 18 ms 时，图像直方图呈现规律的集群分布，为了观察明显，将 t_0 取 18 ms 时图像的直方图划分 30 等分如图 5 所示。

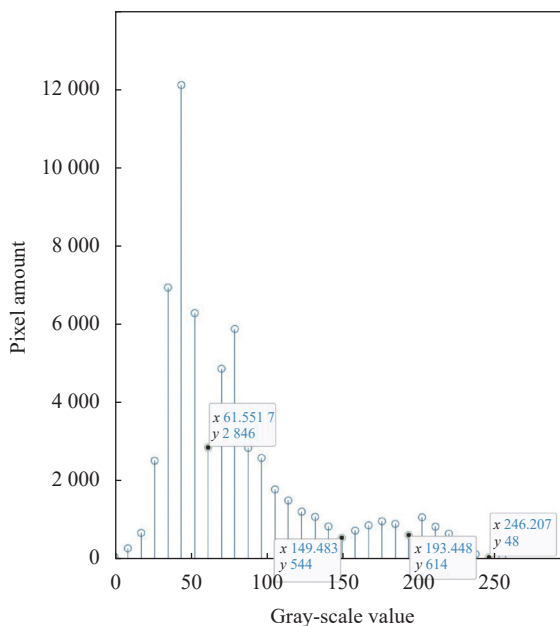


图 5 18 ms 时图像直方图示例

Fig.5 Example of image histogram at 18 ms

由图 5 可知，图像的直方图有 4 个明显的集群，将每个集群右侧谷底的 I_0 值以及 t_0 值代入公式 (5) 求得的最佳曝光时间 t_{opt} 依次为：18.57、23.63、30.59、74.28 ms。同时根据经验设置的第一组曝光时间为 20、40、60、80 ms；第二组曝光时间为 10、20、30、60 ms，不同曝光时间下融合的条纹图如图 6 所示。

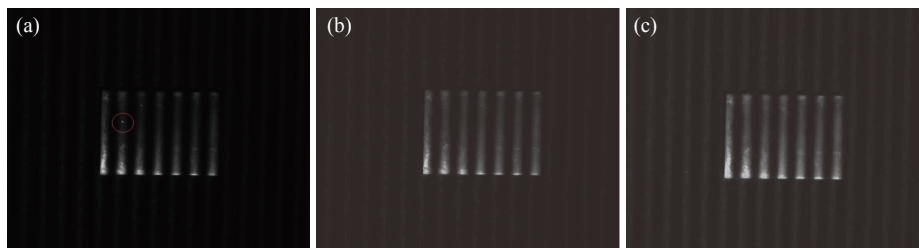


图 6 不同曝光时间融合的条纹图。(a) 第一组曝光；(b) 第二组曝光；(c) 自适应曝光

Fig.6 Fringe patterns fused with different exposure times. (a) First group exposure; (b) Second group exposure; (c) Adaptive exposure

通过图 6 的对比可以看出，手动曝光第一组融合的条纹图仍然存在过曝点；手动曝光第二组融合的线条

纹图虽然没有过曝点，但条纹图整体偏暗，光栅条纹不清晰；自适应曝光融合的条纹图没有过曝点且条纹

图的整体清晰度较好。通过以上对比可知,自适应曝光避免了设置曝光时间全凭操作者经验的问题,同时提高了曝光精度。

同时文中选取 U 型卡,连接块和圆盘作为高动态范围表面测量物体,对其进行三维轮廓检测。被测物的各参数值如表 1 所示,表中的阈值百分比和亮度压缩系数通过多组实验对比择优选出。

实验分别采用投影栅相位法、文献 [11] 方法、文中方法对样件进行测量,其中投影栅相位法通过单次曝光的方法获得条纹图,文献 [11] 和文中通过多曝光融合的方法获得条纹图,文献 [11] 和文中选取相同的曝光时间,图 7~图 9 分别为通过投影栅相位法,文献 [11] 方法和文中方法得到的 3 个被测物相同周期

表 1 被测物体各参数值

Tab.1 The parameter values of the tested object

Tasted object	Optimal exposure time/ms	Threshold processing percentage	Brightness compression coefficient
U-card	18.43, 37.56, 68.40, 98.33	95%	0.6
Connection block	18.64, 34.46, 62.54, 81.26	92%	0.5
Disc	18.59, 42.36, 74.54, 96.43	95%	0.6

内的条纹图。

投影栅相位法因为单次曝光的原因,在测量高动态范围物体时,拍摄的条纹图部分区域过亮或过暗;文献 [11] 方法在图像融合过程中进行像素值替换,但

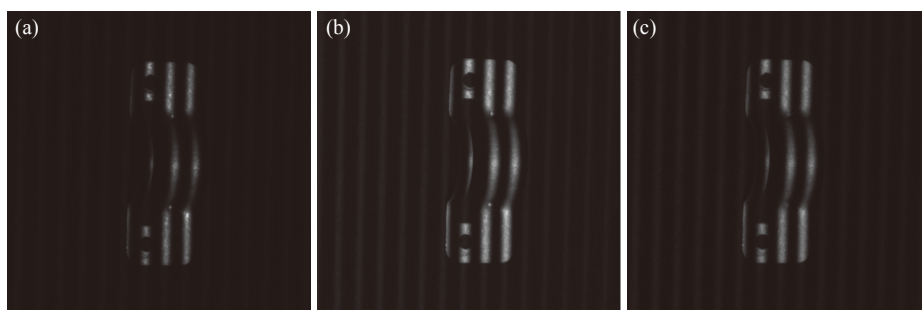


图 7 U 型卡在不同方法下的条纹图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.7 Fringe image of U-card in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

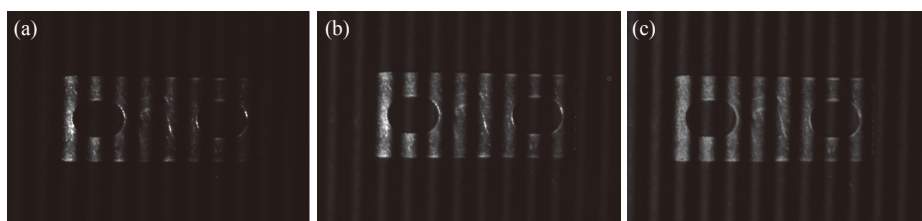


图 8 连接块在不同方法下的条纹图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.8 Fringe image of connection block in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

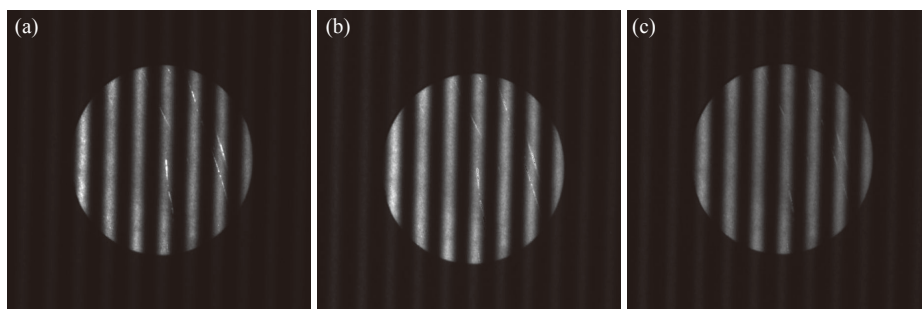


图 9 圆盘在不同方法下的条纹图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.9 Fringe image of disc in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

对于某块区域图像质量整体偏差的情况,获得的条纹图质量依然较差。文中的方法对于过亮区域和过暗区域都进行了优化,融合后的条纹图没有过亮和过暗

的区域,且条纹图的整体质量良好。

将条纹图经过相位解算和参数标定后,得到被测物的三维点云图,如图 10~图 12 所示。

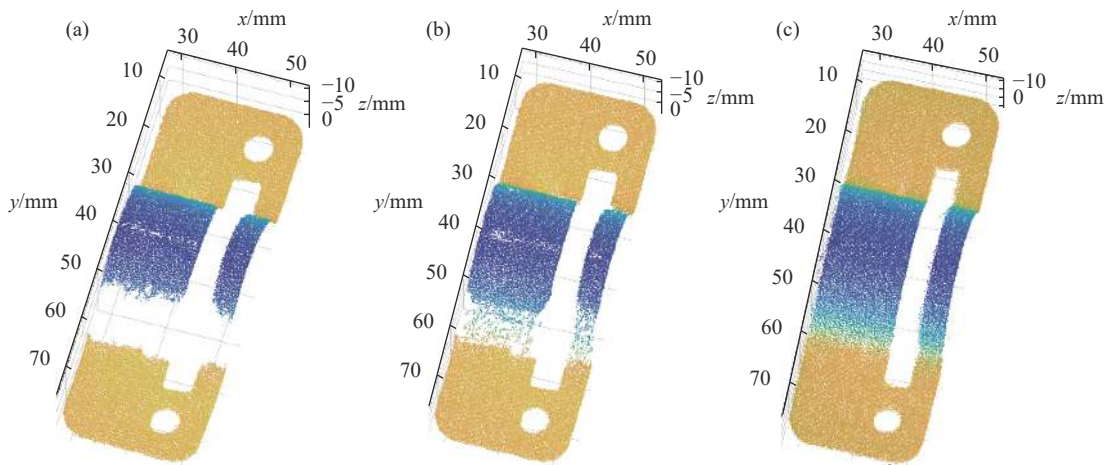


图 10 U 型卡在不同方法下的点云图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.10 Point cloud image of U-card in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

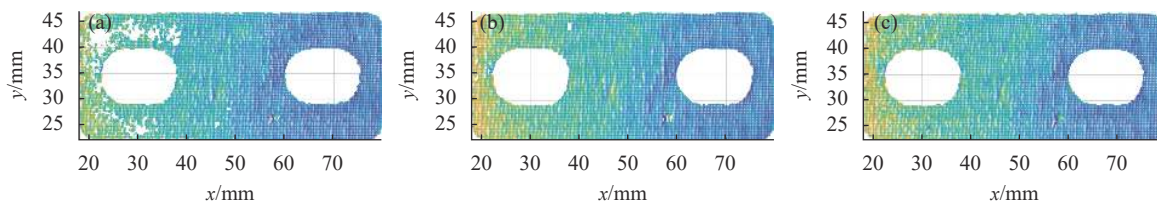


图 11 连接块在不同方法下的点云图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.11 Point cloud image of U-card in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

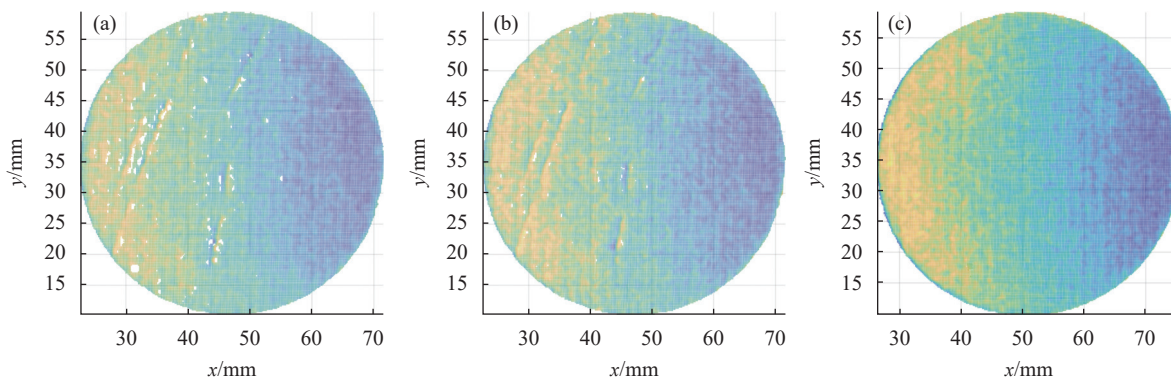


图 12 圆盘在不同方法下的点云图像。(a) 投影栅相位法; (b) 文献 [11] 方法; (c) 文中方法

Fig.12 Point cloud image of disc in different methods. (a) Projection phase method; (b) Methods of Ref.[11]; (c) Proposed method

通过点云图对比可以看出,投影栅相位法在测量高反光物体时,因为单次曝光的局限性,从而导致点云图缺失严重。文献 [11] 方法对于部分饱和区域有一定的修补效果,但如果饱和区域过大,得到的点云

图仍然会有缺失的现象。文中的方法提高了条纹图的整体质量,得到的点云图无明显缺失,整体较好。

在 3 个被测物的表面喷一层显像剂,使之呈现漫反射特性,将喷显像剂三维重建的点云数设置为基准

数。U 型卡、连接块、圆盘在投影栅相位法、文献 [11] 方法和文中方法测出的三维点云数、重建率如图 13 所示。

从图 13 可知,文中方法测出的点云数与喷显像

剂法测出的三维点云数相近,且重建率分别达到了 99.88%、99.75%、99.76%,说明文中方法可以有效解决测量高动态范围表面物体三维点云缺失的问题。

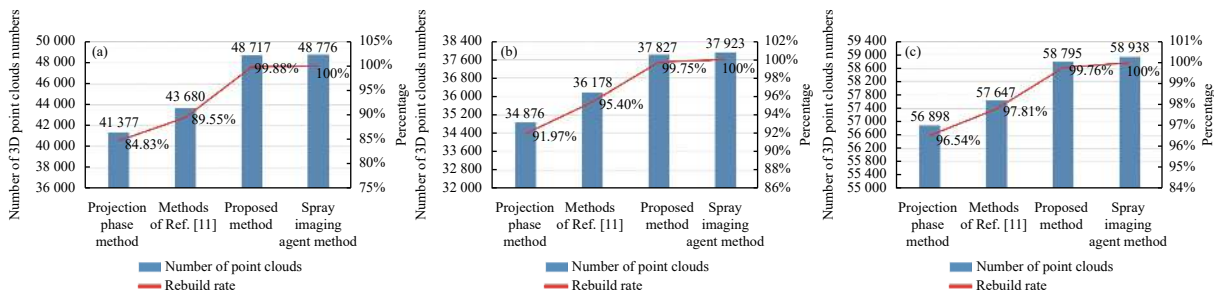


图 13 不同方法下测出的三维点云数和重建率。(a) U 型卡; (b) 连接块; (c) 圆盘

Fig.13 The number and reconstruction rate of 3D point clouds measured using different methods. (a) U-card; (b) Connection block; (c) Disc

文中方法在解决三维点云缺失问题的同时,也进一步提高了测量精度。为验证文中方法的测量精度,选用具有高动态范围表面的标准块阶梯进行测量,并与投影栅相位法和文献 [11] 方法进行对比。标准量块的高度差为 9 mm,精度等级为 0 级。将其堆叠成图 14(a) 所示的阶梯状,并重建形成三维点云,通过设置半径滤波的相邻点和阈值去除点云图中杂乱点,使

用 Geomagic Wrap 软件将经滤波处理后的点云进行封装,并对封装图的上下两个平面进行拟合,拟合平面之间的垂直距离即为标准量块的高度差。使用不同方法测量的高度差结果如表 2 所示。采用文中方法测量得出的标准块阶梯三维点云封装图以及标准块阶梯上下两个表面的高度差如图 14(b) 和图 14(c) 所示。

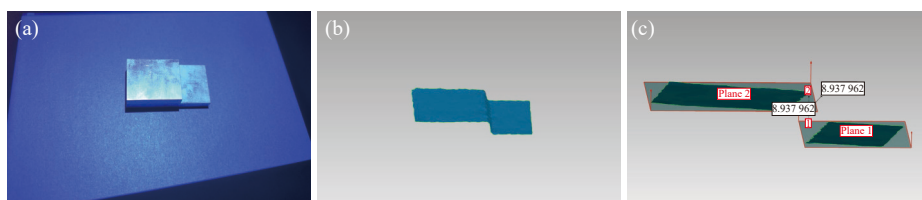


图 14 标准块阶梯高度差测量。(a) 标准块阶梯实物图; (b) 标准块阶梯三维点云封装图; (c) 高度差测量结果

Fig.14 Standard block step height measurement. (a) Standard block ladder physical diagram; (b) Standard block ladder 3D point cloud encapsulation diagram; (c) Height difference measurement results

通过表 2 可知,投影栅相位法和文献 [11] 方法测出的高度差绝对误差分别为 0.174 mm 和 0.124 mm,相对误差分别为 1.93% 和 1.40%,而文中方法测出的

高度差绝对误差和相对误差仅为 0.062 mm 和 0.69%,说明了文中方法可以有效提高高动态范围表面物体的测量精度。

表 2 不同方法测量标准块阶梯误差对比分析

Tab.2 Comparative analysis of step error in measuring standard blocks using different methods

Method	Height/mm	Absolute error/mm	Relative error/mm
Projection phase method	8.826	0.174	1.93%
Methods of Ref.[11]	8.876	0.124	1.40%
Proposed method	8.938	0.062	0.69%

3 结 论

针对高动态范围表面物体三维轮廓检测失效的问题,文中提出了一种改进的多曝光融合方法,利用自适应曝光取代手动曝光,同时在图像融合的过程中通过设定阈值、亮度压缩以及使用 CLAHE 算法等方法提高条纹图的对比度和清晰度。实验结果表明:自适应曝光相较于手动曝光具有高效性和准确性,对不

同的高动态范围表面物体点云重建率均在 99.75% 以上, 测量出的标准块阶梯高度差绝对误差和相对误差仅为 0.062 mm 和 0.69%, 有效解决了检测高动态范围表面物体三维点云缺失的问题, 提高了测量效率和三维轮廓测量的精度。

参考文献:

- [1] Yin Yongkai, Zhang Zonghua, Liu Xiaoli, et al. Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303008. (in Chinese)
- [2] Sun J, Zhang Q. A 3D shape measurement method for high-reflective surface based on accurate adaptive fringe projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 153: 106994.
- [3] Jia Liu, Changqiu Lu, Jie Wen, et al. Three-dimensional measurement method based on binary coded fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0112004. (in Chinese)
- [4] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48: 133-140.
- [5] Ren Mingyang, Wang Lizhong, Zhao Jianbo, et al. Viewpoint planning of surface structured light scanning for complex surface parts [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 113-126. (in Chinese)
- [6] Liu Fei, Li Jiabin, Lai Junlin, et al. Full-frequency phase unwrapping algorithm based on multi-frequency heterodyne principle [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 011202. (in Chinese)
- [7] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [8] Song Z, Jiang H, Lin H, 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.
- [9] Li Zhaojie, Cui Haihua, Liu Changyi, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112004. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] Xue Feng, Chen Long, Zhang Fengfeng. Research on 3D reconstruction of strongly reflected surface based on structured light [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2021, 26(5): 18-24. (in Chinese)
- [12] Zhang Zonghua, Yu Jin, Gao Nan, et al. Three-dimensional shape measurement techniques of shiny surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303006. (in Chinese)
- [13] Fu Yifan, Wu Jian, He Honghui. Non-linear correction of area CMOS sensor in polarization imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0633001. (in Chinese)
- [14] Feng S, Zhang Y, 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.
- [15] Wang Yonghong, Zhang Qian, Hu Yin, et al. 3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry: a review [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 447-457. (in Chinese)
- [16] Yang Hongfei, Xia Hui, Chen Xin, et al. Application of image fusion in 3D reconstruction of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0926002. (in Chinese)
- [17] Zhu Xinjun, Hou Linpeng, Song Limei, et al. Fringe structured light 3D reconstruction based on virtual binocular [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(11): 20210955. (in Chinese)
- [18] Zhang Liantao, Lu Rongsheng, Cheng Ziyi. Measurement technique of high-reflected surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(1): 0112002. (in Chinese)
- [19] Guo Y, Duan Z, Zhang Z, et al. Fast and accurate 3D face reconstruction based on facial geometry constraints and fringe projection without phase unwrapping [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107216.
- [20] Zhang Qican, Wu Zhoujie. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303004. (in Chinese)

High dynamic range surface measurement method based on adaptive multi-exposure fusion

Lei Jingfa^{1,2}, Xie Haoran^{1,2}, Li Yongling^{1,3*}, Wu Dong⁴, Zhang Miao^{1,2}, Zhao Ruhai^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Construction Machinery, Anhui Education Department, Hefei 230601, China;

3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Process Equipment and Control Engineering, Zigong 643000, China;

4. Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract:

Objective For low dynamic range surface objects, a single exposure can provide sufficient exposure, but for high dynamic range surface objects, it is difficult to obtain high-quality fringe patterns with a single exposure, the multi-exposure fusion technology fuses the fringe pattern through multiple exposures, which can effectively improve the definition of the fringe pattern, thereby improving the accuracy of phase measurement. The traditional multi-exposure fusion technology needs to manually set the exposure time, which has problems such as low efficiency and poor exposure accuracy, in this paper, the method of adaptive exposure is used to obtain the exposure time, which avoids the disadvantages of manual exposure. Although the fringe image fused by traditional multi-exposure fusion technology has removed overexposure points, the overall quality of the fringe image is still not high, therefore, this paper improves the fusion process of multi-exposure images, a fringe map with better image quality is obtained.

Methods Firstly, the images taken under the initial exposure time are analyzed by histogram, the areas with different reflectance on the surface of the measured object are divided into several groups, the optimal exposure time of each group is calculated respectively; on this basis, the images of projected white light and projected stripes were taken under the optimal exposure time corresponding to different groups, after removing the high gray value area exceeding the set threshold in the image, then making the image collected when projecting white light into a mask image, and multiplied with the image acquired when the fringes were projected at the same exposure time, perform brightness compression and fusion on multi-group multiplied images; finally, improve the contrast and clarity of the fringe image generated after fusion through the CLAHE algorithm, thereby performing stripe unwrapping and point cloud reconstruction.

Results and Discussions The adaptive exposure used in this paper is more efficient and accurate compared to manual exposure (Fig.6), for the three high dynamic range surface objects of the U-card, the Connection Bock and the Disc, the fringe image fused by the method in this paper has no overly bright and overly dark areas, and the overall quality of the fringe pattern is good (Fig.7, Fig.8, Fig.9), there is no obvious loss in the point cloud image after 3D reconstruction (Fig.10, Fig.11, Fig.12), the number of point clouds measured by the method in this paper is similar to the number of three-dimensional point clouds measured by the spray imaging agent method, the reconstruction rate has reached more than 99.5% (Fig.13), the measured absolute error and relative error of the standard block step height are only 0.062 mm and 0.69% (Tab.2).

Conclusions Aiming at the failure of 3D contour detection of high dynamic range surface objects, this paper

proposes an improved multi-exposure fusion method, replacing manually setting exposure with adaptive exposure, at the same time, in the process of image fusion, the contrast and clarity of the fringe image are improved by setting the threshold, brightness compression, and using the CLAHE algorithm. Experimental results show that adaptive exposure is more efficient and accurate than manually setting exposure, the point cloud reconstruction rate of different high dynamic range surface objects is above 99.75%, the measured absolute error and relative error of the standard block step height are only 0.062 mm and 0.69%, effectively solved the problem of missing 3D point clouds for detecting high dynamic range surface objects, improved measurement efficiency and accuracy of 3D profile measurement.

Key words: high dynamic range surface objects; adaptive exposure time; multi-exposure fusion technology; 3D contour detection

Funding projects: Anhui Province Key Research and Development Plan Project (1804a09020009); Process Equipment and Control Engineering Open Fund Project of Key Laboratory of Sichuan Universities (GK202101); Anhui University Collaborative Innovation Project (GXXT2022-019); Anhui University Natural Science Research Major Project (KJ2021ZD0068, 2023AH040036); Supported by the Natural Science Foundation of Hefei City (2021019)