

一种基于自动多次曝光面结构光的形貌测量方法

李兆杰, 崔海华*, 刘长毅, 程筱胜, 张小迪

南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016

摘要 为解决视觉测量中重建强反射表面时遇到的过度曝光或曝光不足的问题,提出了一种基于自动多次曝光的面结构光测量方法。该方法的核心是根据基准点像素值随曝光时间的变化计算相机响应曲线。利用相机响应曲线和不同曝光时间下的图像计算出当前场景测量所需的曝光次数和曝光时间。将具有不同曝光时间的图像序列融合成新的条纹图像序列进行重建。实验结果表明:所提方法能够准确计算每次曝光的时间,克服了强反射表面引起的条纹图像饱和或过暗的问题,能够实现高动态范围表面反射率物体的三维形貌光学非接触测量。

关键词 测量; 相机响应曲线; 照度; 多次曝光; 图像融合; 三维测量

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1112004

A Shape Measurement Method Based on Automatic Multiple Exposure Surface Structured Light

Li Zhaojie, Cui Haihua*, Liu Changyi, Cheng Xiaosheng, Zhang Xiaodi

Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract In order to solve the problems of overexposure or underexposure that are easily encountered when reconstructing a strong reflective surface in visual measurement, we propose an automatic multiple exposure surface structure light measurement method. The core of this method is to calculate the camera response curve according to the variation of the reference point pixel value with the exposure time. Using camera response curves and images at different exposure time, we calculate the numbers of exposure and exposure time required for the current scene measurement. Image sequences with different exposure time are fused into a new fringe image sequence for reconstruction. The experimental results show that the method can accurately calculate the time of each exposure and overcome the problem of saturation or oversaturation of the fringe image caused by the strong reflection surface, and realize the three-dimensional optical non-contact measurement of the object with high dynamic range surface reflectivity.

Key words measurement; camera response curve; illumination; multiple exposure; image fusion; three-dimensional measurement

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 120.5060; 100.5070

1 引 言

面结构光三维测量是将一定模式的光栅条纹图像投射到待测物体表面,相机获取经被测物体形状调制而发生变形的光栅图,进而计算被测物体三维信息数据的一种主动式光学测量技术。该技术对光栅图的强度非常敏感^[1-3]。当表面曝光过强或不足时,如发生镜面反射时,相机的成像并不能真实地反映物体

表面的灰度信息,从而造成测量精度下降或无法重建的问题。目前常用的方法是在物体表面喷粉,使物体表面成为漫反射表面,但这种方法不仅影响了测量精度,还限制了结构光技术的应用范围^[4-5]。

现阶段,多次曝光技术被广泛应用在结构光重建技术中。Song等^[6]首先获取不同曝光下物体表面调制的光栅图像,然后用高动态范围(HDR)技术将其合成为一张低动态范围(LDR)图像,再利用

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-06-12; 录用日期: 2018-06-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(NS2017033)、江苏省精密与微细制造技术重点实验室开放基金项目、南京航空航天大学研究生创新基地开放基金(kfj20170518)

* E-mail: cuihh@nuaa.edu.cn

LDR 图像对基准图像进行调整,以改善局部过亮或过暗的问题。姜宏志等^[7]先分别用亮、暗条纹投射到物体表面上,以获取其掩模图像,再利用掩模图像将不同投射亮度的条纹、不同曝光时间的光栅图像合成一幅图像进行重建。Zhang 等^[8]获取多次曝光图像后,分别选择同一位置像素值最高但不饱和的点参与重建。上述测量方法虽然取得了较好的测量效果,但其曝光时间、曝光次数全凭操作者的经验,从而影响了这些方法的测量效果和工业应用。Feng 等^[9]提出了一种基于灰度直方图计算多次曝光时间的算法,并利用该算法预测了被测物体的反射率,以及反射率对应的曝光时间,取得了良好的效果,但该算法在对复杂反射率表面测量时仍存在不能准确曝光的问题。

针对视觉测量中重建强反射表面时的过度曝光或曝光不足的问题,本文提出了一种自适应曝光重建方法,该方法可以对具有高动态范围表面反射率的物体进行自动重建。首先,在不同曝光时间下的图像中选择基准图像,在基准图像中选择基准点;其次,根据基准点像素值随曝光时间的变化来计算相机响应函数,并使用响应函数和图像序列来计算曝光次数和曝光时间;最后,将不同曝光时间获取的图像融合为用于三维重建的新的条纹图像序列。该方法的自动化程度高,对环境的适应性好,能高效地实现多场景下强反射物体表面的三维重建。

2 自动多次曝光测量方法

2.1 测量原理

本方法使用基于相位测量轮廓术(PMP)的结构光测量方法,其原理是利用多个具有一定相位差的条纹图像来计算每个像素的相位值,然后根据相位值计算出物体的三维信息^[10-11]。单目结构光测量系统模型如图 1 所示。

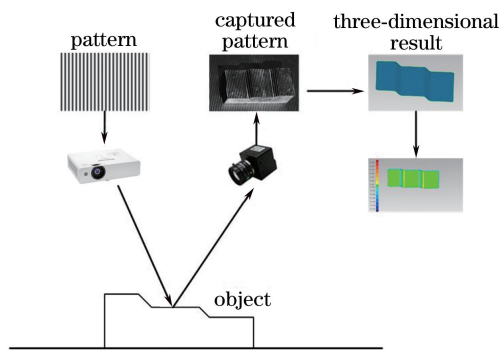


图 1 结构光测量系统模型

Fig. 1 Model of structured light measurement system

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

$$\begin{cases} I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \pi/2] \\ I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y) + \pi] \\ I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y)\cos[\varphi(x, y) + 3\pi/2] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $I_i(x, y)$ 为第 i 幅条纹图在坐标 (x, y) 处的灰度值; $I'(x, y)$ 为图像的平均灰度; $I''(x, y)$ 为图像的灰度调制; $\varphi(x, y)$ 为所求包裹初始相位。光栅图像相位主值为

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

得到相位主值后,根据相位展开算法^[12]可求得绝对相位。根据 Cui 等^[13]提出的模型,将投影仪视为一个主动式相机,利用图像中的坐标及其相位即可重建出三维点。

2.2 相机响应函数

相机响应函数^[14]是相机曝光量与成像灰度值之间的关系,如图 2 所示。曝光量 H 是照度 E 和曝光时间 t 的乘积,即 $H = E \times t$ 。通常,相机接收到的照度与场景中相应点的亮度呈正比。相机响应函数可以表示为

$$V = f(Et), \quad (3)$$

式中: V 为由相机获得的图像中的点的像素灰度值; f 为相机响应函数。 f 是单调增函数,根据函数关系和像素灰度值可以计算出像素点对应的曝光量,进而获得曝光时间或照度值。因相机获取图像的范围是 $0 \sim 255$,当曝光量大于或小于某个阈值时,强度值不能反映场景的真实亮度。这就是为什么在视觉测量过程中经常会遇到曝光不足或曝光过度的问题。

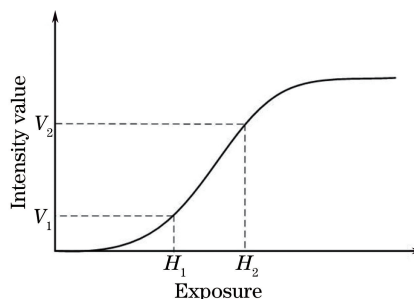


图 2 相机响应曲线

Fig. 2 Camera response curve

2.3 自适应多次曝光方法

定义图 2 中 $V_1 \sim V_2$ 为测量强度范围,其对应的曝光量为 $H_1 \sim H_2$,相机响应函数在该范围内表

现出良好的线性。同时, $t_1 \sim t_2$ 被定义为测量时间范围, 在设置 t_1 的值时, 须确保在当前曝光时间下对应的被测物体的图像的最大强度值小于等于 V_2 ; 同理, 在设置曝光时间 t_2 时, 须确保对应的被测物体的图像的最小强度值大于等于 V_1 。自适应多次曝光方法的具体流程如下:

1) 选择基准曝光时间和基准点

投影仪向测量物体表面投射灰度值与条纹图最大灰度值一致的纯白图像, 在曝光时间范围 $t_1 \sim t_2$ 内, 以步长 Δt 逐渐改变相机的曝光时间, 调整过程中的图像和曝光时间, 并分别保存至图像序列 P^S 和曝光时间序列 t^S 中; 统计不同曝光时间下图像像素点在最佳测量范围 $V_1 \sim V_2$ 内的数量, 选择点数量最大时的曝光时间为基准曝光时间 t_b , 基准曝光时间对应的图像称为基准图像, 用 I_b 表示, 选择过程如图 3 所示。在图像 I_b 中查找像素灰度值为 V_1 的点, 将其作为基准点并保存它们的位置。由相机响应曲线可知, 基准点拥有相同的照度值, 在所提方法中将其全部假设为任意非零常量, 如 300。

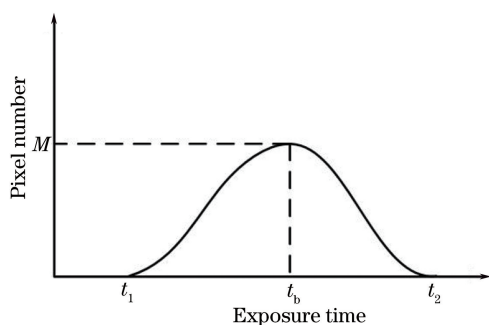


图 3 选择基准曝光时间

Fig. 3 Selection of datum exposure time

2) 拟合相机响应曲线

$H_1 \sim H_2$ 段的相机响应曲线用 4 次多项式表示:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e, \quad (4)$$

式中: x 为曝光量; a, b, c, d, e 为函数系数; y 为像素灰度值。根据获得的相机响应函数, 计算像素灰度值处于 $V_1 \sim V_2$ 时对应的曝光量, 并保存在曝光量序列 H^S 中。从基准曝光时间 t_b 开始, 以一定的间隔逐渐增大曝光时间, 直到基准点灰度值大于等于 V_2 时停止。不同曝光时间基准点灰度值可以直接在图像序列 P^S 中查到。以调整过程中基准点曝光量为自变量, 基准点对应的灰度值为因变量, 利用最小二乘法求解 4 次多项式。

3) 计算曝光次数和曝光时间

以基准时间 t_b 为初始曝光时间, 以一定的时间间隔增大曝光时间, 直到获取图像的最小像素灰度值大于等于 V_1 或曝光时间超过 t_2 时停止, 利用当前曝光时间和图像中灰度值在 $V_1 \sim V_2$ 之间最接近 V_1 的值对应的曝光量计算最小照度值 E_{\min} , 计算公式为

$$E = H/t. \quad (5)$$

以基准时间 t_b 为初始曝光时间, 以一定的时间间隔减小曝光时间, 直到对应图像中的像素最大值小于等于 V_2 或曝光时间小于 t_1 时停止, 利用当前曝光时间和图像中灰度值在 $V_1 \sim V_2$ 之间最接近 V_2 的值对应的曝光量计算最大照度值 E_{\max} 。上述时间、图像、曝光量均可在序列 t^S, P^S, H^S 中直接得到。

根据得到的 E_{\min}, E_{\max} 和序列 H^S , 计算需要的曝光时间, 计算过程如图 4 所示。

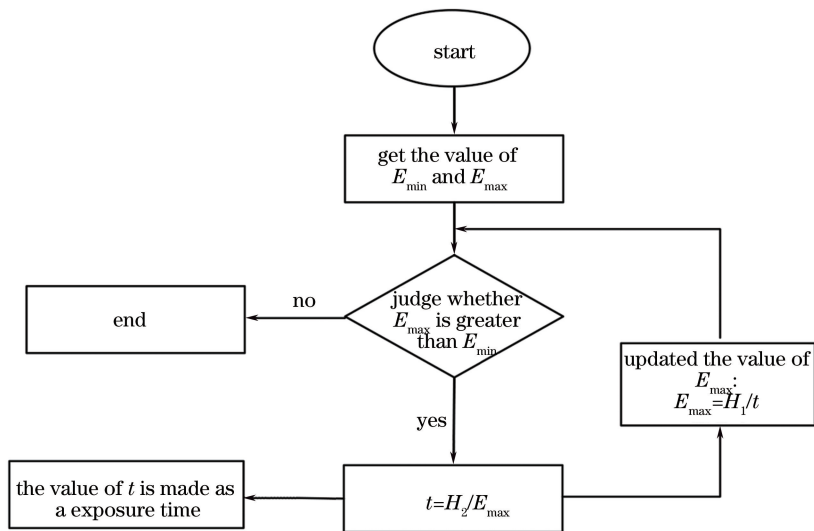


图 4 计算曝光时间的流程图

Fig. 4 Flow chart of exposure time calculation

4) 图像融合与重建

在计算出的 N 个曝光时间下, 相机向测量物体投射条纹图和白图, 相机在投射白图情况下采集到的图像被存储在序列 I^S 中, 采集到的条纹图序列被

存储在序列 J^S 中。

图像融合算法的核心思想在于选择不同曝光时间下灰度值小于 255 中的最大像素点。定义合成方法所需的掩模图像序列为 M^S , 其计算公式为

$$M_i^S(x, y) = \begin{cases} 1, & I_i^S(x, y) < 255 \text{ and } I_i^S(x, y) \geq I_j^S(x, y), (j = 1, 2, \dots, i, \dots, N) \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $I_i^S(x, y)$ 、 $I_j^S(x, y)$ 分别为序列 I^S 中第 i 幅、第 j 幅图像在坐标 (x, y) 处的像素灰度值; N 为曝光次数。

定义 G 为合成的条纹图, 其计算公式为

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^N M_i^S(x, y) \cdot J_i^S(x, y), \quad (7)$$

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) 处的像素灰度值; $J_i^S(x, y)$ 为条纹图序列 J^S 中的第 i 幅图像在坐标 (x, y) 处的像素灰度值。

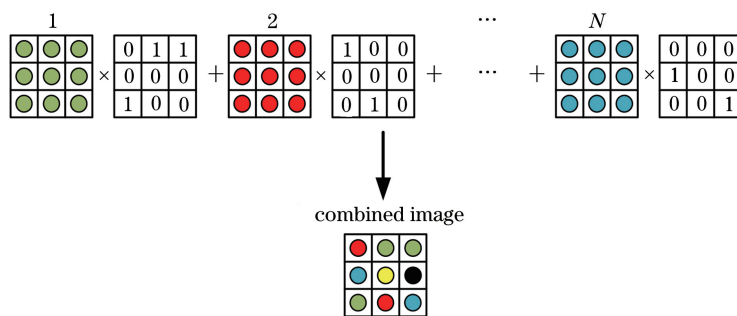


图 5 图像融合示意图

Fig. 5 Schematic of image fusion

3 实 验

实验设备是由投影仪和工业相机组成的单目测量系统, 相机帧率设置为 30 frame/s, 曝光范围设置为 0.001~0.1 s, 曝光步长设置为 0.001 s, 最佳测量范围设置为 150~249, 基准点照度值设置为 300。系统采用四步相移和多频外差方法进行测量, 共需投射 12 张条纹图 and 一张白图。

为验证本方法的有效性, 选择具有复杂反射率表面的不锈钢叶片作为测量对象, 实物图如图 6 所示。



图 6 不锈钢叶片实物图

Fig. 6 Picture of stainless steel blade

所提方法计算的基准曝光时间为 9 ms。在基准图像上选择基准点, 根据基准点曝光时间和灰度值的变化计算对应于最佳测量范围的函数表达式, 结果为

$$y = -0.017646 \cdot x^4 + 0.892272 \cdot x^3 - 16.0417 \cdot x^2 + 120.12889 \cdot x - 56.744629. \quad (8)$$

计算得到相机响应函数对应的曲线如图 7 所示。

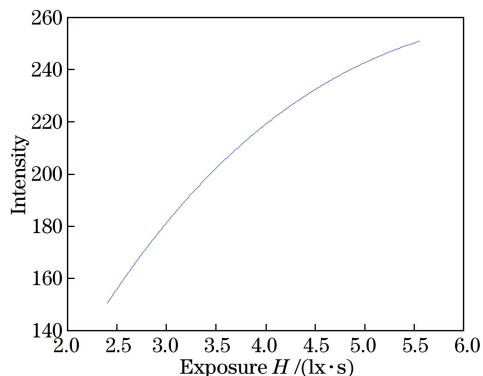


图 7 计算得到的相机响应曲线

Fig. 7 Calculated camera response curve

在获得相机的响应曲线后, 结合图像序列和曝光时间序列, 就可以获得物体的相对照度分布, 如图 8 所示。

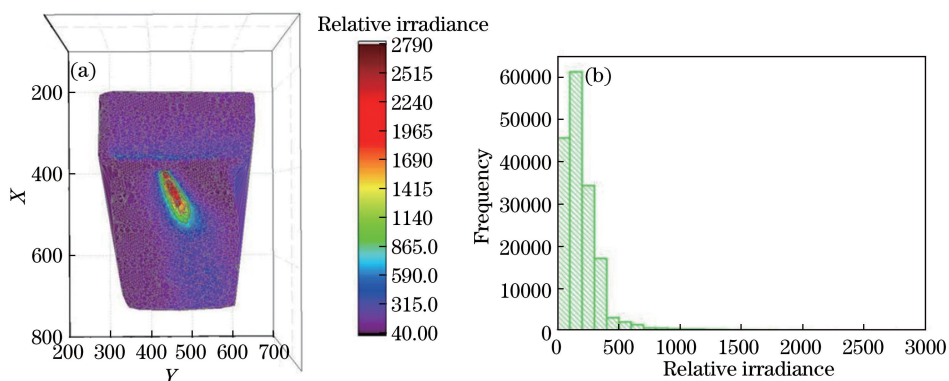


图 8 计算得到的被测物体的照度。(a) 相机照度分布图;(b) 照度直方图

Fig. 8 Calculated irradiance of detected object. (a) Distribution diagram of camera irradiance; (b) histogram of irradiance value

从图 8 中可以看出:由于基准点照度值设置为 300,因此大部分相对照度值接近 300。结果符合预期,即过度曝光区域具有相对较高的照度值,曝光不足的区域则相反。结果显示,曝光不足区域的相对照度值接近 300,曝光过度区域的值远远大于 300。这表明曝光不足区域对曝光时间的调整更为敏感,在设置时间调整间隔时需要加以考虑。

根据获取到的相机序列和相机响应曲线,可求得当前测量条件下的曝光时间 t 分别为 63.73, 30.30, 13.33, 11.49, 5.81, 1.17 ms。

为了与自动曝光进行比较,按照经验手动选择

了如表 1 所示的不同的曝光时间进行曝光和重建。

按照表 1 中的曝光时间进行采图,图像如图 9 所示。

表 1 不同曝光方式下的曝光时间

Table 1 Exposure time at different exposure methods

Number	Exposure time /ms	
	Manual exposure	Automatic exposure
1	66.67	63.73
2	20.00	30.30
3	12.04	13.33
4	6.41	11.49
5	3.40	5.81
6	1.40	1.17

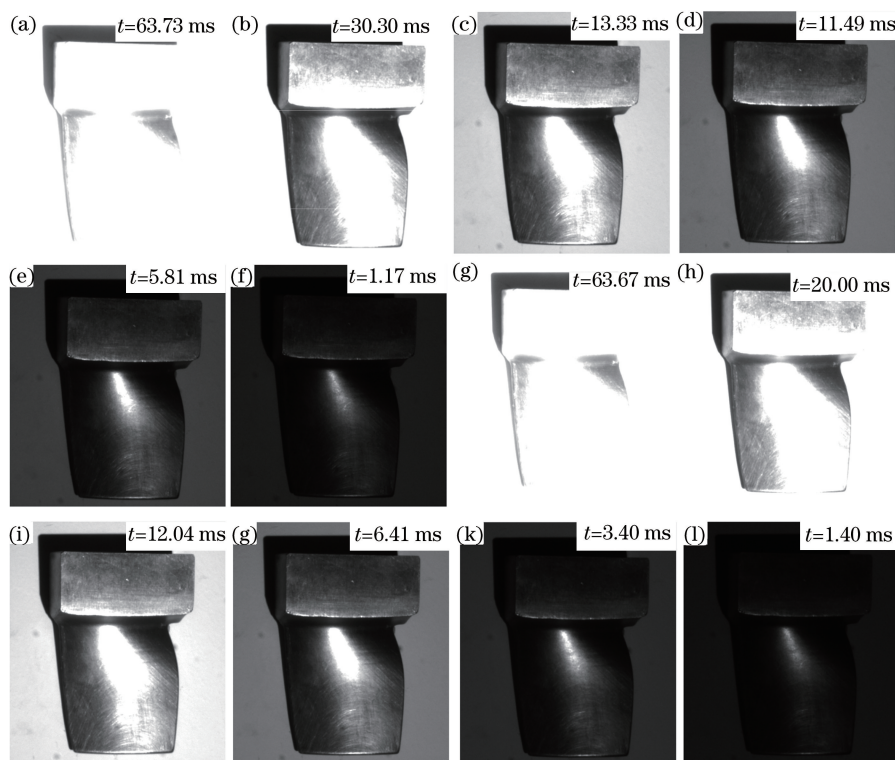


图 9 不同曝光时间获取的图像。(a)~(f)手动曝光;(g)~(l)自动曝光

Fig. 9 Images acquired at different exposure time. (a)-(f) Manual exposure; (g)-(l) automatic exposure

肉眼观察后,认为图像的效果是相似的,但实际上却是有差异的。使用 2.3 中的步骤 4)描述的方法

将不同曝光时间获取的条纹图像序列进行融合,融合后的条纹图像如图 10 所示。

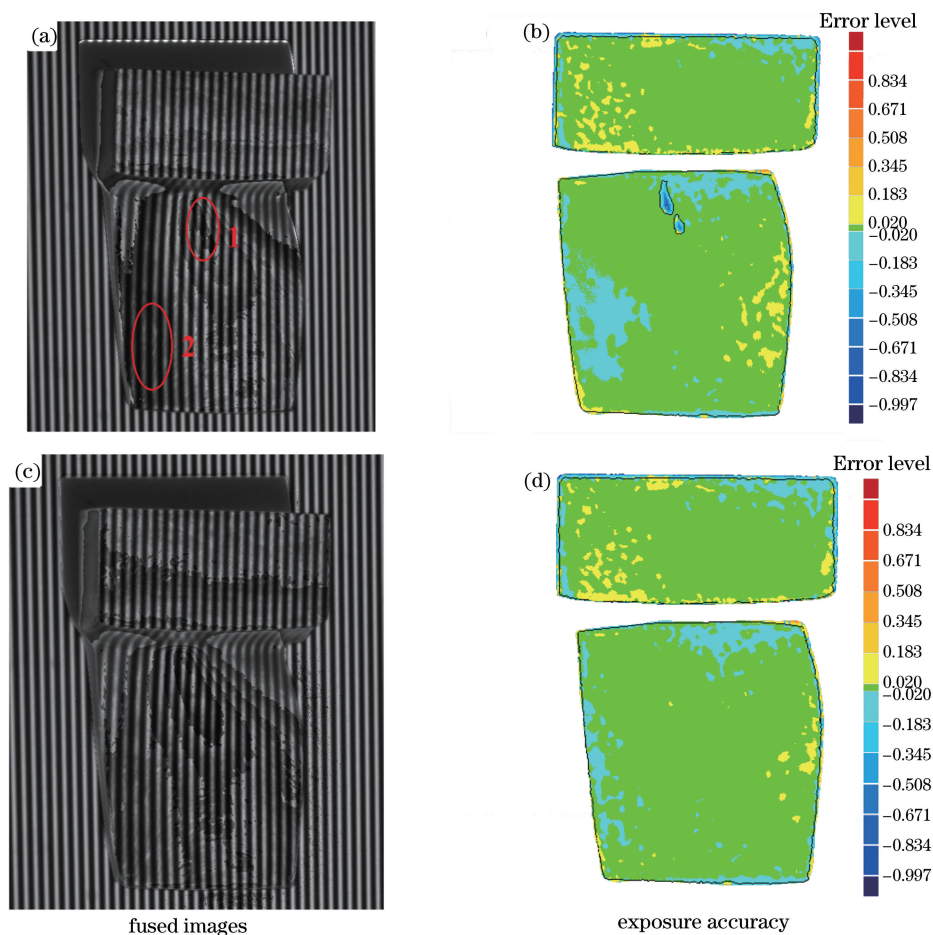


图 10 不同曝光方式下的融合图像和曝光精度。(a)~(b)手动曝光;(c)~(d)自动曝光

Fig. 10 Fused images and exposure accuracy at different exposure methods. (a)-(b) Manual exposure; (c)-(d) automatic exposure

由图 10(b)可知,手动曝光存在 3 个主要的问题:1)操作全凭经验,自动化程度低;2)部分区域曝光不准确,如区域 1;3)曝光导致精度受到影响,如区域 2。从图 10(d)可以看出,所提自动多次曝光方法可以自动计算曝光次数和曝光时间,避免了上述问题。与手动曝光方式相比,自动多次曝光方法不仅提高了自动化程度,而且提高了曝光精度。其他零件的测量结果如图 11 所示。

实验结果表明,所提方法能自适应重建具有复杂反射率表面的物体,自动化程度高,曝光准确,重建精度较高,在工业上有较大应用潜力。

4 结 论

提出了一种用于结构光测量的自动多次曝光测量方法,该方法能够自动计算出测量所需的曝

光时间和曝光次数,并能根据图像模板将条纹图进行融合和重建。多次曝光技术是测量具有大动态表面反射率表面的可行途径,但曝光时间和曝光次数的确定完全取决于操作者的经验,极大地影响了其在工业上的进一步应用。该方法的关键步骤是根据基准点像素值随曝光时间的变化计算相机响应函数,从而通过相机响应函数和不同曝光时间的图像获得曝光次数和曝光时间。最后,将具有不同曝光时间的条纹图像序列组合成新的条纹图像序列。利用所提方法对不同的金属部件(铝合金板和增材制造铁板)进行了重建,并进行手动曝光和自动曝光的对比实验。实验结果说明了所提方法的有效性,避免了基于操作者经验进行手动选择曝光时间的缺点,提高了自动化水平和曝光的准确性。

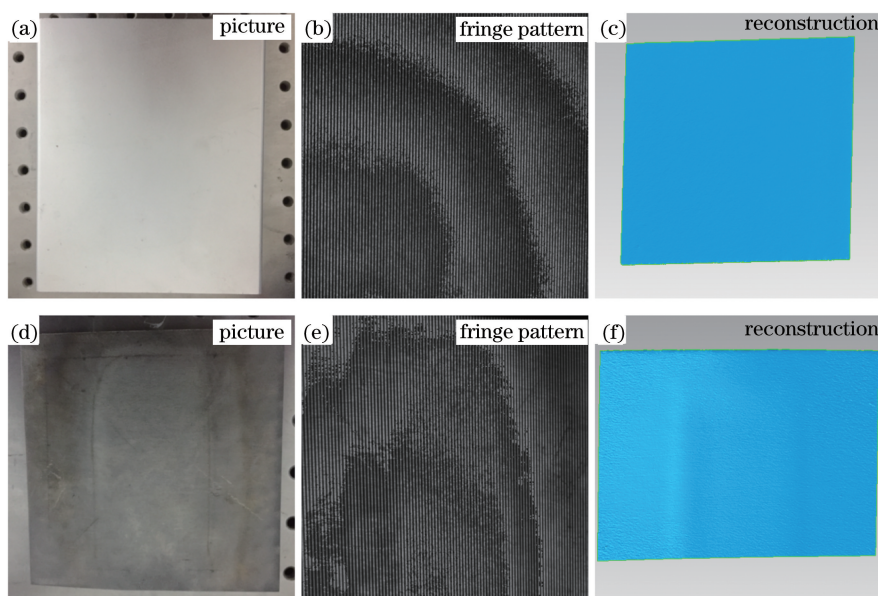


图 11 所提方法对不同零件的重建结果。(a)~(c)铝合金板;(d)~(f)增材制造铁板

Fig. 11 Reconstruction of different parts using the proposed method. (a)-(c) Aluminum alloy plate;
(d)-(f) 3D printed iron plate

参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Mao X F, Chen W J, Su X Y, *et al.* Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 225-229.
毛先富, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 225-229.
- [3] Cai Y Y, Su X Y. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1641-1646.
蔡元元, 苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1641-1646.
- [4] Zhang Y, Li J L, Huang Z W, *et al.* Research on reflection and phase shift characters of metal surface based on BRDF model[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 32-35.
张颖, 李金龙, 黄趾维, 等. 基于 BRDF 模型的金属表面反射特性及相变特性研究[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(3): 32-35.
- [5] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Three-dimensional shape measuring for specular surface based on phase measuring deflectometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212004.
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): 0212004.
- [6] 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.
- [7] Jiang H Z, Zhao H J, Li X D, *et al.* Projected fringe profilometry for profile measurement of high reflective surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 2002-2008.
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.
- [8] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7066(3): 033604.
- [9] Feng S J, Zhang Y Z, 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.
- [10] Breuckmann B, Halbauer F, Klaas E, *et al.* 3D-metrologies for industrial applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3102: 20-30.
- [11] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [12] 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.
- [13] Cui H H, Liao W H, Dai N, *et al.* Reliability-guided phase-unwrapping algorithm for the measurement of discontinuous three-dimensional objects [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 063602.
- [14] Debevec P E, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1997: 369-378.