

利用相机响应曲线实现高反光元件三维面形测量

李乾¹, 薛俊鹏^{1,2}, 张启灿^{1*}, 王敏¹, 王亚军¹¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065² 四川大学空天科学与工程学院, 四川 成都 610065

摘要 在先进制造中要求对加工的部组件进行在线质量检测, 条纹投影三维测量技术因符合在线、非接触的要求而被采用。然而, 金属材质表面反射率差异较大导致拍摄结构光图像过曝和欠曝光, 这会造成最终测量数据的缺失或出错。针对该问题, 以直接测量得到的不完整点云数据和由计算机辅助设计(CAD)得到的元件设计数据进行迭代最近点(ICP)点云配准, 进而得到相机坐标系下的被测物体估算面形的点云数据。将该数据作为预估面形, 结合系统标定参数, 可建立投影与成像间同名点的图像强度对应关系。利用相机对待测元件上每一点的光强成像响应曲线计算出投影灰度范围和最低投影灰度。最后, 利用生成的非等值系数投影光栅进行高反光元件的三维面形测量。实验结果表明, 所提方法在不改变测量系统结构参数和不增加测量系统结构复杂性的情况下, 可以更完整地实现高反光元件的三维面形测量。

关键词 测量; 工业检测; 高反光元件; 条纹投影; 相机响应曲线

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0712001

Three Dimensional Shape Measurement of High Reflective Elements Using Camera Response Curve

Li Qian¹, Xue Junpeng^{1,2}, Zhang Qican^{1*}, Wang Min¹, Wang Yajun¹¹ College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;² School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract It is required to carry out on-line quality detection on the processing components in advanced manufacturing. The fringe projection three-dimensional measurement technology is adopted because it meets the requirements of on-line and non-contact. However, due to the large difference of surface reflectivity of metal materials, the phenomena of overexposure and underexposure will occur in the captured structured images and result in the missing or mistaken of the final measuring data. Aiming at this problem, the point cloud data of the estimated shape of the measured object in the camera coordinate system is obtained by iterative nearest point (ICP) point cloud registration based on the incomplete point cloud data measured directly and the designed data of the components obtained by computer-aided design (CAD). Taking the data as the estimated shape, combined with the system calibration parameters, the image intensity correspondence of the same point between projection and imaging is established. The projection gray range and the minimum projection grayscale are calculated by using the intensity imaging response curve of each point on the measuring element by camera. Finally, the three-dimensional shape measurement of high reflective elements can be realized by using a projection grating with non-equivalent coefficient. The experimental results show that the proposed method can completely measure three-dimensional shape of high reflective elements without changing the structural parameters of the measurement system nor increasing the structural complexity of the measurement system.

Key words measurement; industrial inspection; high reflective elements; fringe projection; camera response curve

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-09-21; 录用日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(62075143)、教育部“春晖计划”合作科研项目(2020703-8)、四川省科技计划资助(2020YFG0077)

通信作者: *zqc@scu.edu.cn

1 引 言

金属高反光结构件的三维面形质量检测^[1]是先进制造中的一个重要阶段,特别是用于高铁车身和航空航天飞行器装配维修的金属结构件。在装配这些结构件之前必须对其进行三维面形几何数据的高精度测量,通过与其对应的计算机辅助设计(CAD)数据进行比较,可避免装配结构件在生产加工、运输和装卸过程中产生的瑕疵和碰撞伤痕等引起的问题^[2-4]。

对高反光结构件的三维面形测量通常有接触式和非接触式两种。接触式方法采用三坐标机对结构件进行逐点检测,但该方法测量速度较慢且可能对测量部件造成损伤。在非接触式测量中,结构光三维测量技术因具有精度高、灵活性好和无接触等特点而被广泛应用^[5]。通常高反光物体的三维面形测量技术也被称为高动态范围(HDR)三维测量技术,由于该类元件表面反射率分布不均匀,因此在测量过程中当投影灰度较亮时会出现拍摄图像过曝的问题。然而,降低投影灰度又会引起低反射率区域曝光不足导致信息丢失或误差较大的现象出现。因此,可以通过在待测元件表面喷涂白色粉状颗粒使元件表面形成适合结构光三维测量的漫反射表面,但该方法可能会对元件造成损坏且不易去除的粉状颗粒会引起测量误差^[6]。

诸多学者针对该问题提出了不同的解决方法,这些方法按处理思路的不同可以分为三种。第一种思路是控制相机的曝光时间。Zhang 和 Yau^[7]提出了使用多重曝光的“HDR 扫描”技术,通常低曝光时间下拍摄的图片包含的是高反射率区域信息,高曝光时间下包含的是低反射率区域信息。调整相机的曝光时间可将不同曝光时间下拍摄的图像组合为一组相移图像。然而,该方法需要依据测量人员的经验调整曝光时间,主观性较强,缺乏合理依据进行曝光时间的程序化选取。Feng 等^[8]利用直方图将测量出的表面反射率分组,自适应地预测每组图片的最佳曝光时间,然后使用这些最佳曝光时间拍摄图像合成 HDR 图像。Cui 等^[9-10]提出了一种基于自动多次曝光的测量方法,通过预设测量灰度值范围和曝光时间范围获取定义的基准图像基准点,根据基准点像素值随曝光时间的变化计算相机响应函数,进而使用相机响应函数计算相机曝光次数和曝光时间,将不同曝光时间获取的图像融合为高质量的条纹图像。该方法能自适应地重建表面反射率复

杂的物体,但需要测量人员根据主观经验选取预设的测量灰度值范围和曝光时间范围,且需多次改变相机的曝光时间并多次投影条纹图像以获取用于图像融合的变形条纹图像序列。该类方法通过合理控制相机的曝光时间可以获得具有较高信噪比的条纹图像,但需要根据主观经验改变系统的结构参数。

第二种思路是在光路中增加光学元件。Riviere 等^[11]通过在光路中增加偏振片的方式降低投影仪的输出光强度和相机的入射光强,但这会造成低反射率区域信息的丢失。Salahieh 等^[12]提出了多极化条纹投影测量系统,通过选择适当的偏振通道来增强条纹对比度,投影条纹在入射光路中经过偏振片后会被包含有 4 个状态的偏振片阵列相机采集到,这在保证物体高反射率区域图像不过曝的同时,保留了低反射率区域的信息。这类方法虽然可以降低入射在待测物体高反射率区域的光强,但是增加了测量系统本身的复杂性,同时对光学元件的摆放也有严格的要求。

第三种思路是从投影仪端调制投影光栅。Waddington 和 Kofman^[13]提出了调整最大输入灰度级投影正弦条纹图案的技术(MIGL),通过投影不同最大灰度级的多幅相移图像,将拍摄的相移图像中最亮的非饱和像素合成为 HDR 图像以获得具有较高信噪比的图像^[14]。虽然该技术可以适应不同的环境光照条件,但是会降低反射率较低表面区域的图像信噪比。Feng 等^[15]提出了基于图像融合和插值预测的自适应条纹投影方法。该方法基于掩模图像融合的方式求取最佳投影灰度值所需的饱和阈值,并结合插值预测查找算法以求得最佳投影灰度值。然而,该方法需要通过降低整体投影强度进行坐标匹配,故获得的相位质量较低,即像素匹配精度较差。Li 等^[16]提出了一种自适应条纹投影技术,先在物体上投影整体灰度较低的正交条纹以获取相机和投影仪之间的坐标匹配,再结合最小二乘法自适应地生成相移条纹。该方法在进行相机与投影仪的坐标匹配时也使用了整体灰度较低的结构光图像,且二分法阈值的选取依赖于测量人员的经验。Chen 等^[17]提出了一种投影彩色正交条纹图案的方法,根据被测物体表面的反射率自适应地调整每个像素的投影强度,利用不同灰度级的光强图像计算每个像素点的最佳投影光强。Lyu 等^[18]利用傅里叶变换轮廓术首先计算出待测物体的预估面形数据,进行投影仪与相机之间的像素粗配准。然后,逐像素地修改投影端图案的投影强度值。然而,当变

形条纹图像出现过曝时,相应的预估面形信息也会出错。此外,当待测物体表面梯度变化较大时,获得的预估面形与实际面形相差较大,此时匹配精度难以保证。这类调整投影图案的方法是通过相机和投影仪的像素匹配找到相机中过曝像素点在投影仪端对应的像素位置,再逐像素地调整投影光强,以获得具有较高信噪比的条纹图像。

本文针对在先进制造中已有 CAD 设计数据的金属材质部组件的质量检测问题,提出了利用相机响应曲线实现高反光元件三维面形测量的方法。利用直接测量得到的部分数据缺失的点云和待测元件的 CAD 设计数据进行迭代最近点(ICP)点云配准,获得测量系统在相机坐标系下的被测物体估算面形点云数据,结合测量系统的标定参数可进行反向投影以完成相机和投影仪之间的像素匹配。逐点考虑待测元件表面在当前测量系统下的反射特性并建立投影与成像之间同名点的图像强度对应关系,依据待测元件表面的反射率分布,利用待测元件上每一点在该测量系统中相机的成像响应逐像素地计算元件上每一点对应的投影灰度值范围和最低投影灰度。结合相机和投影仪的像素匹配结果生成非等值系数投影光栅,投影后可完成金属材质高光工件的三维形貌测量。通过合理利用投影仪-相机的成像响应完成投影仪端逐像素点的投影强度调制,有效解决了测量过程中待测元件高反光区域图像过曝的问题。

2 基本原理

2.1 三维数据重建原理

单目测量系统原理示意图如图 1 所示,该系统由一台相机(CCD)和一台投影仪(DMD)组成。编码条纹由投影仪投射,经物体高度调制后被相机拍摄,进而得到变形条纹图。处理变形条纹图可以求出与物体高度相关联的相位信息,通过系统标定可以进一步得到物体的高度信息。获得物体三维面形的步骤主要有:1)变形条纹的获取;2)截断相位的计算;3)相位展开;4)系统标定;5)物体三维面形恢复^[19]。

通常由相机拍摄的变形条纹图像强度分布可以表示为

$$I_c(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \left[\phi(x, y) + \frac{2\pi n}{N} \right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N \text{ and } N \geq 3, \quad (1)$$

式中: $A(x, y)$ 是条纹图像的背景光强; $B(x, y)$ 是

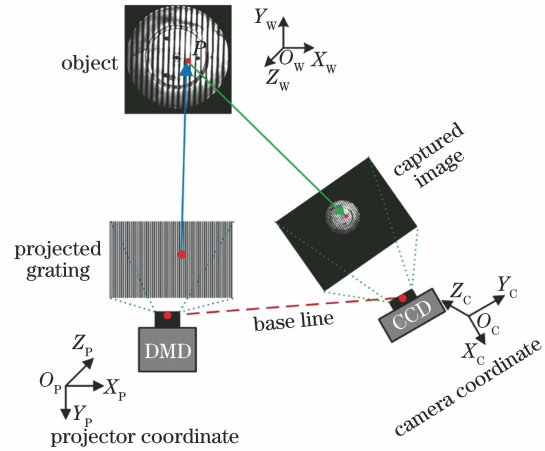


图 1 单目测量系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of monocular measurement system
受物体表面反射率影响的调制光强; n 是相移步数; N 是相移总步数。 $\phi(x, y)$ 为包含在变形条纹图中的相位信息,其表达式为

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \frac{2\pi n}{N}}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \frac{2\pi n}{N}}. \quad (2)$$

由于(2)式使用了反正切函数,故 $\phi(x, y)$ 求出的值域为 $(-\pi, \pi]$,称其为截断相位^[20]。投影不同频率的多组相移条纹对每个像素点在时间轴上进行相位展开,进而获得连续相位 $\Phi(x, y)$,本文采用三频法时间相位展开算法。

将 3 组频率(条纹周期数)分别为 $1, \sqrt{t}, t$ 的投影条纹进行四步相移,首先由(2)式计算出每组条纹的截断相位,分别为 $\phi_1(x, y), \phi_{\sqrt{t}}(x, y), \phi_t(x, y)$ 。然后,进行相位展开^[21]可以得到

$$\begin{cases} \Phi_1(x, y) = \phi_1(x, y) + 2k_1\pi \\ \Phi_{\sqrt{t}}(x, y) = \phi_{\sqrt{t}}(x, y) + 2k_2\pi, \\ \Phi_t(x, y) = \phi_t(x, y) + 2k_3\pi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} k_2 = \text{NINT} \left[\frac{\frac{\sqrt{t}}{1} \Phi_1(x, y) - \phi_{\sqrt{t}}(x, y)}{2\pi} \right], \\ k_3 = \text{NINT} \left[\frac{\frac{t}{\sqrt{t}} \Phi_{\sqrt{t}}(x, y) - \phi_t(x, y)}{2\pi} \right], \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\text{NINT}(\cdot)$ 为取整函数。 $\phi_1(x, y)$ 为频率为 1 的条纹对应的相位信息,因为 $k_1=1$,没有截断,所以其展开相位 $\Phi_1(x, y) = \phi_1(x, y)$ 。根据 3 组条纹频率之间的倍数关系可以求得(4)式中的 k_2, k_3 ,并由此计算出最高频率条纹对应的展开相位 $\Phi_t(x, y)$ 。

分别对相机和投影仪进行系统标定,将投影仪

看作一个逆向工作的相机^[22],向标定靶面上投影正交条纹,在求取对应的相位信息后建立投影仪和相机的对应关系,进而完成相机、投影仪和测量系统的标定。在实际测量中,一旦获得被测元件的展开相位信息,结合标定的系统参数便可恢复待测物体的三维面形数据。

由于高反光元件表面反射率分布不均匀,导致相机拍摄结构光图像时反射率较高区域图像过曝,故在求取相位信息时会出现错误,无法正确重建三维面形。因此,提出了非等值系数投影光栅的计算方法,通过投影非等值系数的条纹图像,有效抑制了高反射率区域的过曝和低反射率区域的欠曝光,可以获取具有较好信噪比的结构光图像,完成高反光元件的三维面形测量。

2.2 非等值系数投影光栅的计算方法

一般地,投影仪的输出强度 I_p 与相机的响应强度 I_c 之间的关系可以用强度传递函数 $I_{ITF} = I_c / I_p$ 表征^[23]。在理想情况下 I_{ITF} 的值为 1,但在实际拍照过程中由于环境光、噪声和投影仪伽马等因素的影响,投影仪和相机之间的响应并不是线性的,故相机对空间中反射率不同的点有不同的强度响应。通过投影并拍摄灰度图像序列,结合多项式拟合的方法可以得到系统的灰度响应曲线^[24]。

对于采用 8 bit 灰度响应相机的测量系统,为保证成像亮度的稳定性,在拍摄灰度图和变形条纹图像的过程中需要固定相机的光圈和相机曝光时间等光学参数不变。投影仪对空间中一待测物体投影灰度图像序列,然后对每个像素点在不同灰度图像下相机记录的强度值进行多项式拟合,得到物体上每一点在该系统下的相机响应曲线。投影仪-相机的响应曲线如图 2 所示,横轴 x_1 表示投影范围,纵轴 y_1 表示相机响应强度。理想情况下投影灰度与响应强度一一对应,但实际测量的响应强度值与图 2 中的离散点对应。依据测量数据拟合的相机响应曲线如 2 图中的虚点线所示。图 2 中点 a 表示当投影灰度不小于 30 时相机响应不为 0,点 b 表示当投影灰度不小于 130 时图像过曝,即当该点对应的最低投影灰度为 30,投影灰度范围小于 100 时,相机拍摄图像不会过曝和欠曝光。同样地,通过逐像素调整投影光栅的投影灰度范围和最低投影光强可以避免拍摄图像过曝和欠曝光的问题。

根据待测元件表面的反射特性,利用测量元件上每一点在该测量系统中的相机响应曲线,计算该点的投影灰度范围和最低投影灰度,按照

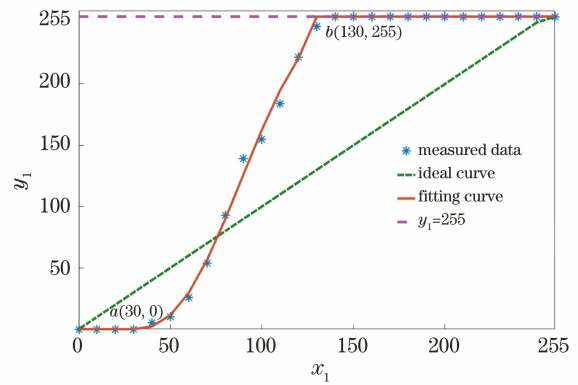


图 2 投影仪-相机的响应曲线

Fig. 2 Response curve of projector-camera

$$\begin{cases} I_{\text{mod}}(x, y) = I_p(x, y) \frac{r_{\text{hdr}}}{255} + G_{\text{min}}, \\ r_{\text{hdr}} = G_{\text{max}} - G_{\text{min}} \end{cases} \quad (5)$$

对标准正弦条纹进行调制,便可以生成能有效抑制高反光且避免欠曝光的投影光栅。式中: $I_{\text{mod}}(x, y)$ 为 (x, y) 点调制后的光栅强度; $I_p(x, y)$ 为点 (x, y) 在标准正弦条纹图像中的强度; r_{hdr} 为计算得到的投影灰度范围; G_{min} 为最低投影灰度; G_{max} 为相机响应刚好饱和时对应的投影灰度。

图 3 给出了投影光栅的调制原理示意图。图 3(a)为一金属待测物体,当利用如图 3(b)所示的标准正弦条纹进行投影时,拍摄的变形条纹图像如图 3(c)所示。图 3(b)中画出了标准正弦条纹第 300 行的强度曲线,为了说明非等值系数投影光栅的调制过程,取该条曲线上第 900 列的点 P_1 进行描述,此时点 P_1 对应的强度值为 165[图 3(b)中对应标注为 $P_1(900, 165)$]。图 3(c)给出了第 600 行对应的强度曲线,可以看出,对应物体的高反区域图像过曝。结合图 3(d)所示的该点的投影仪-相机响应曲线可知,此时相机响应强度值为 255,即图像过曝。同时, a 点对应的最低投影灰度为 30, b 点对应的最大投影灰度约为 133,结合(5)式可知,与 P_1 点对应的投影灰度范围 r_{hdr} 应小于 100,并利用(5)式对标准正弦条纹进行调制。图 3(e)为调制后的非等值系数的投影光栅及其第 300 行的强度分布曲线。此时,将该曲线上第 900 列的点 P_2 对应的强度值修改为 100[图 3(e)中对应标注为 $P_2(900, 100)$],与投影仪-相机的响应曲线对应,相机响应强度值为 162,从而避免了拍摄图像中点 P 成像过曝。图 3(f)为经过投影非等值系数光栅后拍摄的变形条纹图像及其第 600 行的强度曲线。图 3(c)中原过曝区域在图 3(f)中未出现过曝情况。

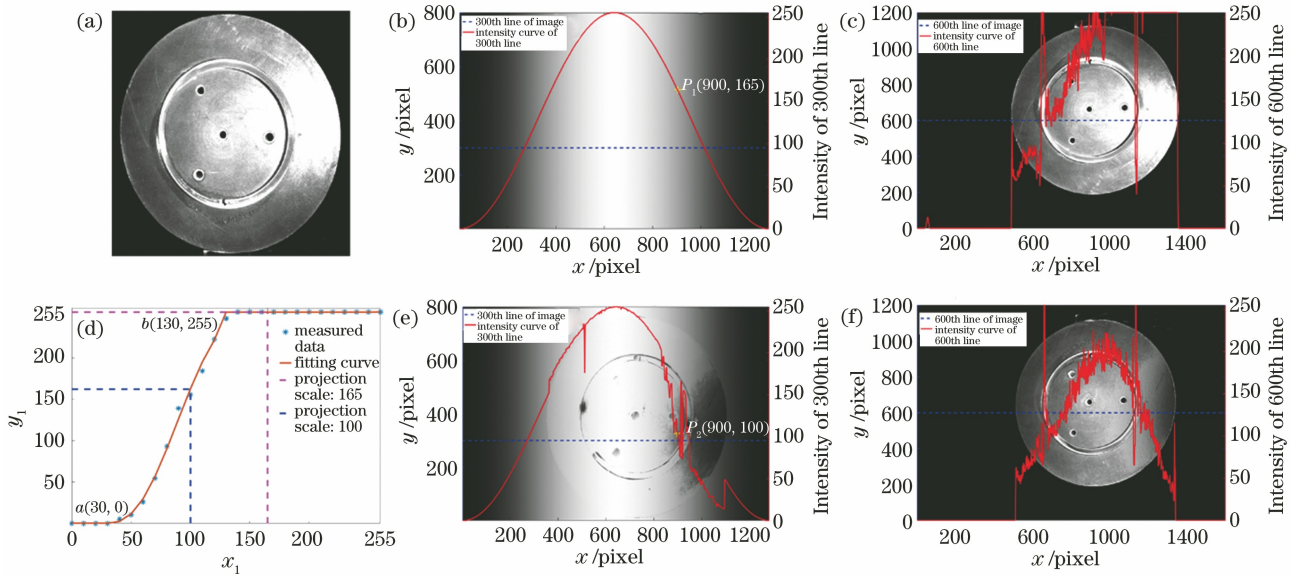


图 3 投影光栅调制原理示意图。(a)待测物体;(b)标准正弦条纹及其第 300 行强度曲线;(c)投影标准正弦条纹拍摄的变形条纹图像及其第 600 行强度曲线;(d)投影光栅点(300, 900)处的投影仪-相机的响应曲线;(e)非等值系数投影光栅及其第 300 行强度曲线;(f)投影非等值系数光栅后拍摄的变形条纹图像及其第 600 行强度曲线

Fig. 3 Schematic diagram of modification principle of projection grating. (a) Object to be tested; (b) standard sinusoidal fringe and intensity curve of its 300th line; (c) deformed fringe image captured by standard sinusoidal fringe projection and intensity curve of its 600th line; (d) projector-camera response curve at projection grating point (300, 900); (e) projection grating with non-equivalent coefficients and intensity curve of its 300th line; (f) deformed fringe image captured after projecting grating with non-equivalent coefficients and intensity curve of its 600th line

对待测元件上每一点进行图 3 所示的计算便可以求出大小与相机分辨率相同的调制矩阵 M_{C1} 和 M_{C2} , M_{C1} 中的元素为求出的元件上每一点所对应的投影灰度范围, M_{C2} 中的元素为每一点所对应的最低投影灰度值。若要完成对投影端条纹的调制, 则需要对相机和投影仪的像素坐标匹配, 找到相机图像上每个像素坐标在投影仪投影平面上对应的像素坐标。本文利用待测元件的 CAD 设计数据作为预估面形, 结合标定得到的系统参数进行世界坐标系和成像面坐标系之间的关系转化, 进而建立相机和投影仪之间的像素匹配关系。

如图 4 所示, 相机成像模型是光学成像几何关系的简化, 可以将其看作是针孔模型^[25]。对于 CAD 设计数据上任意一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$, 其成像需要从世界坐标系变换到图像坐标系, 整个过程可以描述为

$$s_c [u_p^c \quad v_p^c \quad 1]^T = A_c [R_c \quad t_c] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T, \quad (6)$$

式中: s_c 为相机成像尺度因子; $[u_p^c \quad v_p^c \quad 1]^T$ 为点 P 在相机图像中对应的齐次坐标; A_c 为相机的内参矩阵, 大小为 3×3 ; $[R_c \quad t_c]$ 为相机的外参矩阵, 大小为 3×4 ; $[X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T$ 为点 P 在世界坐

标系中对应的齐次坐标。投影仪投射图像与相机工作拍摄图像的过程刚好相反, 进而投影仪可以被看作是一个逆向工作的相机, 故投影仪的投影变换关系可以描述为

$$s_p [u_p^p \quad v_p^p \quad 1]^T = A_p [R_p \quad t_p] [X_w \quad Y_w \quad Z_w \quad 1]^T, \quad (7)$$

式中: s_p 为投影仪投影的尺度因子; $[u_p^p \quad v_p^p \quad 1]^T$ 为点 P 在投影仪图像中对应的齐次坐标; A_p 为投影仪的内参矩阵, 大小为 3×3 ; $[R_p \quad t_p]$ 为投影仪的外参矩阵, 大小为 3×4 。

由(6)、(7)式可知, 对任一空间点, 如果已知其空间坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 和相机的内外参数, 就可以求出其图像坐标 (u_p^c, v_p^c) 。同理, 若已知投影仪的内外参数, 则可以求出其在投影仪中对应的坐标 (u_p^p, v_p^p) 。不同于 Li 等^[16] 向待测物体投射正交条纹和 Lyu 等^[18] 利用傅里叶变换轮廓术获得预估面形的方法, 本文利用已有的 CAD 标准数据和标定好的系统参数便可完成相机和投影仪之间的像素匹配, 避免了因拍摄的初始变形条纹图像过曝和欠曝光导致的求解相位信息错误所引起的像素匹配误差问题。

在完成相机与投影仪之间的像素匹配后, 结合

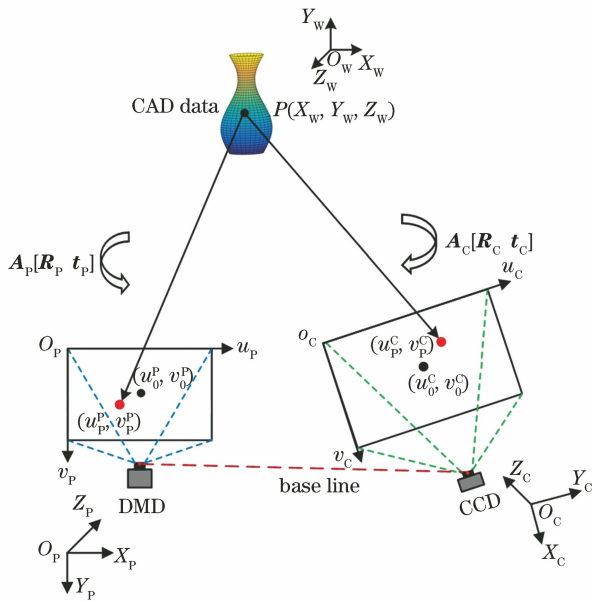


图 4 相机和投影仪像素匹配的原理示意

Fig. 4 Schematic diagram of camera and projector pixel matching

计算得到的相机端的调制矩阵 M_{C1} 和 M_{C2} , 便可以计算出与投影仪分辨率相同的投影端调制矩阵 M_{P1} 和 M_{P2} 。然后, 按照

$$I_{\text{final}}(x, y) = I(x, y) \cdot M_{P1}(x, y) + M_{P2}(x, y), \quad (8)$$

生成非等值系数投影光栅。式中: $M_{P1}(x, y)$ 和 $M_{P2}(x, y)$ 为投影端的调制矩阵, 两个矩阵大小相同。将标准正弦光栅强度 $I(x, y)$ 与计算得出的投影灰度范围矩阵 $M_{P1}(x, y)$ 点乘, 加上最低投影灰度范围矩阵 $M_{P2}(x, y)$ 便可生成与待测物体相对应的非等值系数投影光栅强度 $I_{\text{final}}(x, y)$, 然后便可进行高反光元件的三维面形测量重建。

整个算法的主要步骤为:

- 1) 系统标定, 得到相机和投影仪的内外参数;
- 2) 利用单目结构光测量系统投影标准正弦条纹图像测量待测元件的三维面形, 得到局部数据缺失的三维点云;

3) 将步骤 2) 中所得部分数据缺失的三维点云与待测元件的 CAD 设计数据进行 ICP 点云配准, 获得测量系统相机坐标系下待测元件的预估面形点云数据, 结合步骤 1) 中标定所得相机和投影仪之间的相对关系, 根据透视投影模型进行相机和投影仪的像素匹配;

4) 固定相机的光圈和曝光时间等光学参数不变, 投影仪投影灰度图序列以计算物体上每一点在该系统下的投影仪-相机响应曲线, 生成相机端的调

制矩阵 M_C ;

5) 根据步骤 3) 所得的像素匹配关系和步骤 4) 所得的调制矩阵 M_C , 计算出投影仪端的调制矩阵 M_P ;

6) 生成非等值系数投影光栅, 投影后可解算面形整体相位信息, 完成高反光元件的三维面形重建。

3 实验结果分析与讨论

为验证所提算法的可行性, 搭建了一套单目测量系统进行实验验证。实验系统包括: 分辨率为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$ 的数字光处理(DLP)数字投影仪; 分辨率为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ 的德国 IDS 公司生产的工业相机, 镜头焦距为 12 mm ; 用于投射编码条纹和记录存储结构光图像的电脑。实验系统结构如图 5(a) 所示。固定已有 CAD 设计数据金属圆盘的位置, 投影仪依次投影灰度为 $0, 10, 20, \dots, 250, 255$ 的 27 张灰度图以测量金属元件上每一点在该系统下的投影仪-相机响应曲线。图 5(b) 给出了投影灰度分别为 $0, 80, 160, 255$ 时所拍的灰度图。可以发现, 当投影亮度较低时, 低反射率区域的信息会丢失, 投影亮度过高时高反射率区域会过曝。因此, 应当在保证低反射区域信息不丢失的情况下降低高反射率区域的投影亮度, 以获得具有较好信噪比的图像。

在求得反光元件每一点在该系统下的投影仪-相机响应曲线后, 便可以求出相机端的调制模板矩阵。图 6(a) 为相机端计算出大小均为 $1600 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ 的投影范围矩阵 M_{C1} 和最低投影灰度矩阵 M_{C2} 。在利用元件 CAD 设计数据和系统的结构参数完成相机端与投影仪端的像素坐标匹配后, 可以求出投影仪端对应的投影范围矩阵 M_{P1} 和最低投影灰度矩阵 M_{P2} , 大小均为 $1280 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$, 如图 6(b) 所示。根据 (8) 式对标准正弦条纹进行调制, 求出非等值系数投影光栅后可投影测量物体的三维面形数据, 图 6(c) 给出了频率分别为 1、8、64 对应的非等值系数投影光栅。

图 7 给出了利用传统方法直接测量和利用本文生成的非等值系数投影光栅测量拍摄的变形条纹图像和对应的展开相位结果。其中, 图 7(a1)、(a2) 分别为投影标准正弦条纹和本文所提的非等值系数投影光栅拍摄的频率为 64 的变形条纹图像。可以发现, 与直接测量时相比, 本文生成的非等值系数光栅避免了高反光区域拍摄图像过曝问题的出现。图 7(b1)、(b2) 为传统方法和所提方法计算得到的展开相位

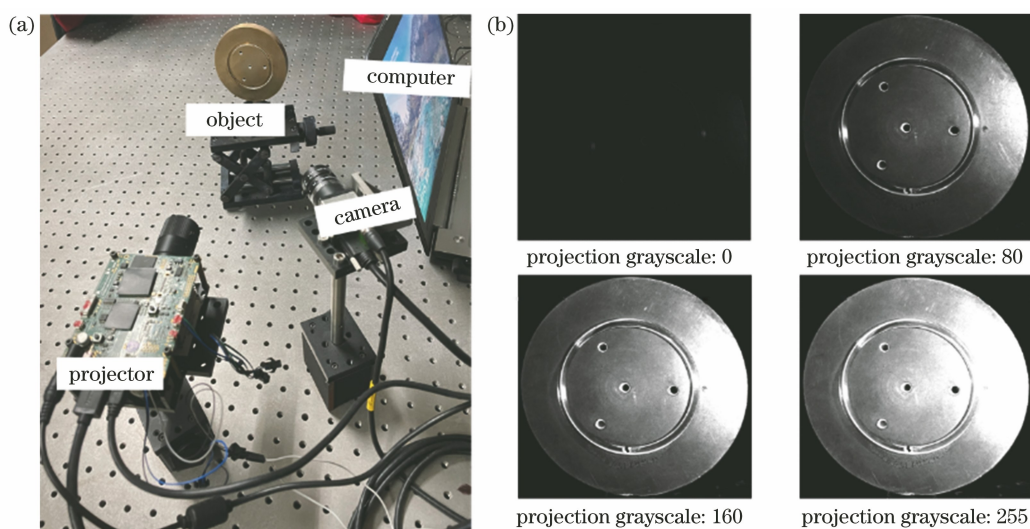


图 5 实验系统。(a)实验装置;(b)投影灰度为 0,80,160,255 时的相机记录的图像

Fig. 5 Experimental system. (a) Experimental devices; (b) image captured by camera when projection grayscale is 0, 80, 160, 255, respectively

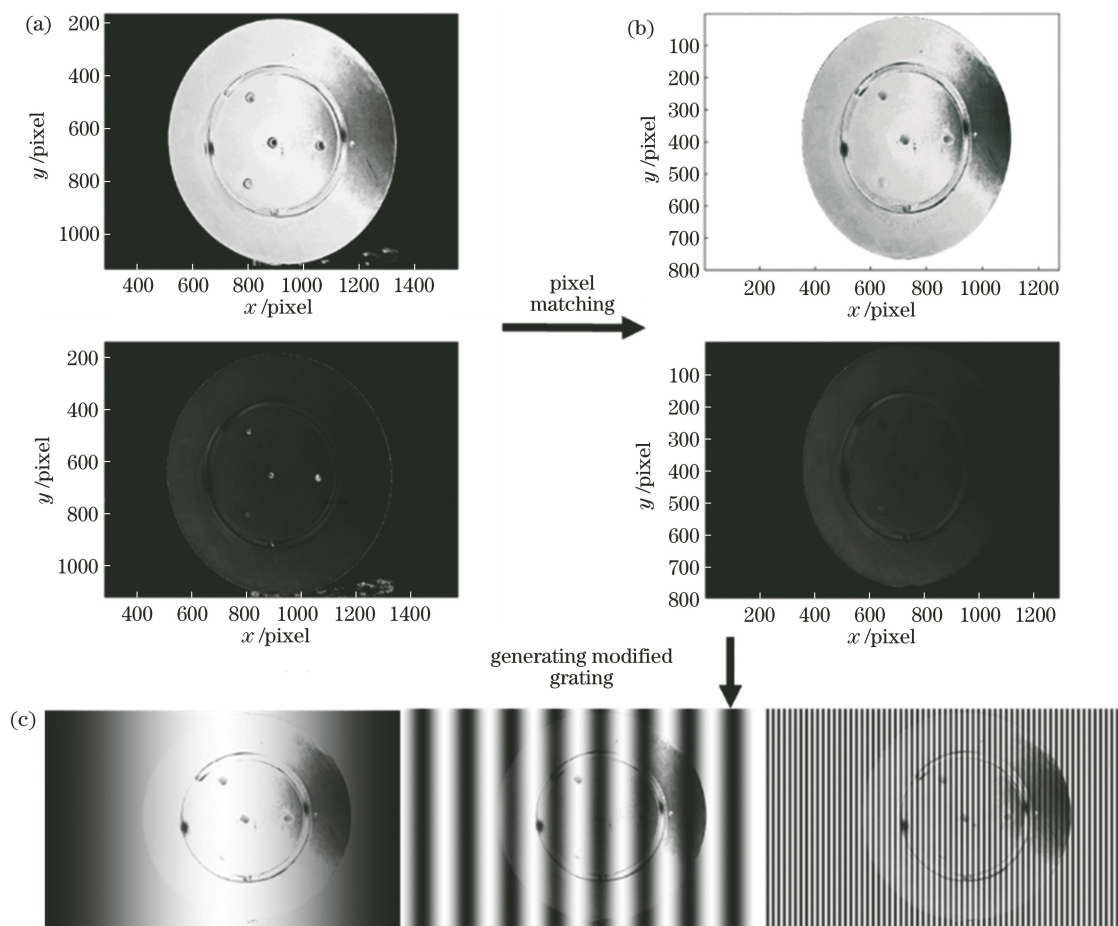


图 6 非等值系数投影光栅生成过程。(a)相机端投影范围矩阵和最低投影灰度矩阵;(b)投影仪端投影范围矩阵和最低投影灰度矩阵;(c)生成的非等值系数投影光栅

Fig. 6 Generation of projection grating with non-equivalent coefficients. (a) Projection range matrix and minimum projection gray matrix of camera; (b) projection range matrix and minimum projection gray matrix of projector; (c) generated projection grating with non-equivalent coefficients

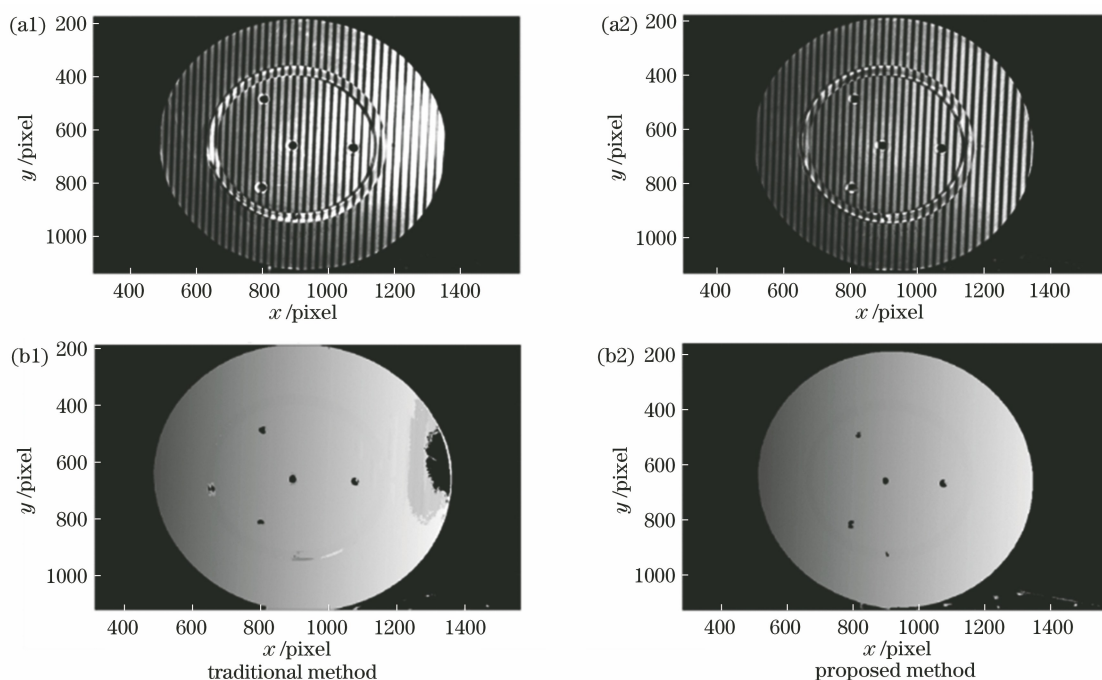


图 7 传统方法与所提方法对金属圆盘的测量结果对比。(a)变形条纹图像对比;(b)展开相位对比
Fig. 7 Comparison of measurement results of metal disk between traditional method and proposed method.
(a) Comparison of deformed fringe images; (b) comparison of unwrapping phases

对比。可以发现,传统方法因拍摄图像过曝出现了展开错误,而利用所提方法投影的非等值系数投影光栅可以得到完整的展开相位。

图 8 给出了最终的实验结果。图 8(a)为表面配有 4 个螺孔的待测元件对应的 CAD 设计数据。图 8(b)为在单目测量系统下直接测量时得到的点云数据。可以发现,高反光区域存在点云缺失。图 8(c)为所提方法测得的点云数据。为了更好地展示 3 组数据的差异,图 8(d)~(f)分别给出了标准 CAD 数据、传统方法测量数据和所提方法测量数据在 Geomagic 软件中的点云显示截图。图 8(g)给出了三种方法获得的点云数据在同一行上的高度对比。可以发现,所提方法与标准 CAD 数据之间的差异主要在元件的凹孔处。对元件平面部分求取拟合平面与所提方法得到的数据的标准偏差,如图 8(h)所示。可以发现,所选平面区域与 Geomagic 中的拟合平面之间的标准偏差为 0.103 mm。最终,可以发现,与传统方法直接测量相比,所提方法可以完整地恢复元件的三维面形。

为进一步证明所提方法的可行性,选取如图 9(a)所示的带孔柱形金属件进行测量。然而,该物件为非标准件,缺少 CAD 设计数据,故事先通过对元件表面喷涂显影剂获得如图 9(b)所示的完整三维点云数据,并将其作为标准数据预估模型。

图 9(c)为图 9(b)在 Geomagic 软件中显示。通过投影标准正弦条纹获得如图 9(d)所示的变形光栅图和图 9(e)所示的部分缺失的点云数据,将两个点云数据进行 ICP 配准后可得到测量系统在相机坐标系下元件完整的点云数据。接着,根据所提算法的步骤 4)完成相机和投影仪之间的像素匹配,生成非等值系数光栅进行测量以验证所提算法的可行性。图 9(f)为传统方法测得的数据在 Geomagic 中的显示。图 9(g)为所提方法得到的频率为 64 的变形条纹图像。图 9(h)、(i)分别给出了所提方法获得的点云数据和其在 Geomagic 中的显示截图。图 9(j)为三种方法获得的点云数据中在同一行上的高度对比。图 9(k)为待测元件与 Geomagic 中拟合圆柱面之间的标准偏差,求出的标准偏差值为 0.065 mm。可以看出,与传统方法直接测量相比,所提方法可以较好地完成高反光元件的三维面形检测。

4 结 论

针对先进工业加工中高反光元件的部组件检测,利用传统方法测得的不完整点云数据和待测元件的 CAD 设计数据进行 ICP 点云配准,获得测量系统在相机坐标系下待测元件的预估面形点云数据,并结合测量系统的结构参数进行投影仪和相机

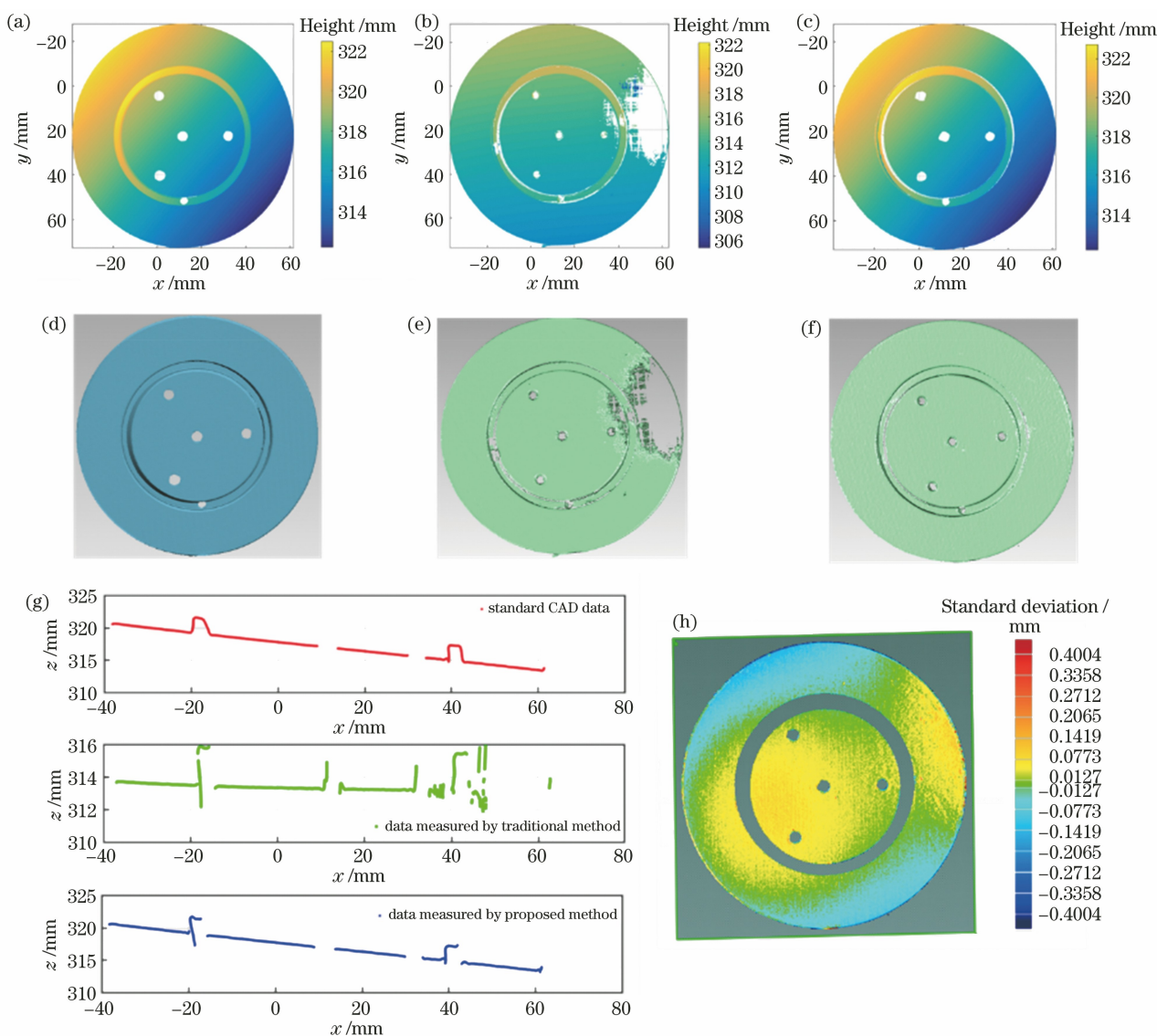


图 8 金属圆盘测量结果。(a)标准 CAD 数据;(b)传统方法获得的点云数据;(c)所提方法获得的点云数据;(d)标准 CAD 数据在 Geomagic 中的显示;(e)传统方法测量数据在 Geomagic 中的显示;(f)所提方法测量数据在 Geomagic 中的显示;(g)三组数据某一行高度对比;(h)所提方法得到的数据与 Geomagic 拟合平面的标准偏差

Fig. 8 Measurement results of metal disk. (a) Standard CAD data; (b) point cloud data obtained by traditional method; (c) point cloud data obtained by proposed method; (d) standard CAD data displayed in Geomagic; (e) data measured by traditional method displayed in Geomagic; (f) data measured by proposed method displayed in Geomagic; (g) height comparison of one row of three sets of data; (h) standard deviation between data obtained by proposed method and Geomagic fitting plane

之间的像素匹配。然后,依据待测元件表面的反射率分布,通过逐像素地求取待测元件在测量系统下投影仪-相机的响应曲线,计算出待测元件上每一点对应的投影灰度范围和最低投影灰度,生成非等值系数投影光栅进行高反光元件的三维面形测量。

实验结果表明,所提方法在不改变测量系统结构参数和不增加测量系统结构复杂性的情况下,充分利用了待测元件的 CAD 设计数据和待测元件在测量系统中每一点的相机成像响应,有效避免了金

属元件测量时拍摄图像局部过曝导致的相位展开错误和测量数据局部缺失问题的出现,可以较好地恢复高反光物体的三维面形数据。所提方法对测量人员的主观经验要求低,不需要多次改变相机的曝光时间进行多个图像的融合,节省了测量时间,且对应的测量系统光路简单易行。因此,有望在工业检测,尤其是在已有 CAD 设计数据的工件检测和加工装配误差分析中得到推广应用。

目前,所提方法主要被应用在先进制造中已有

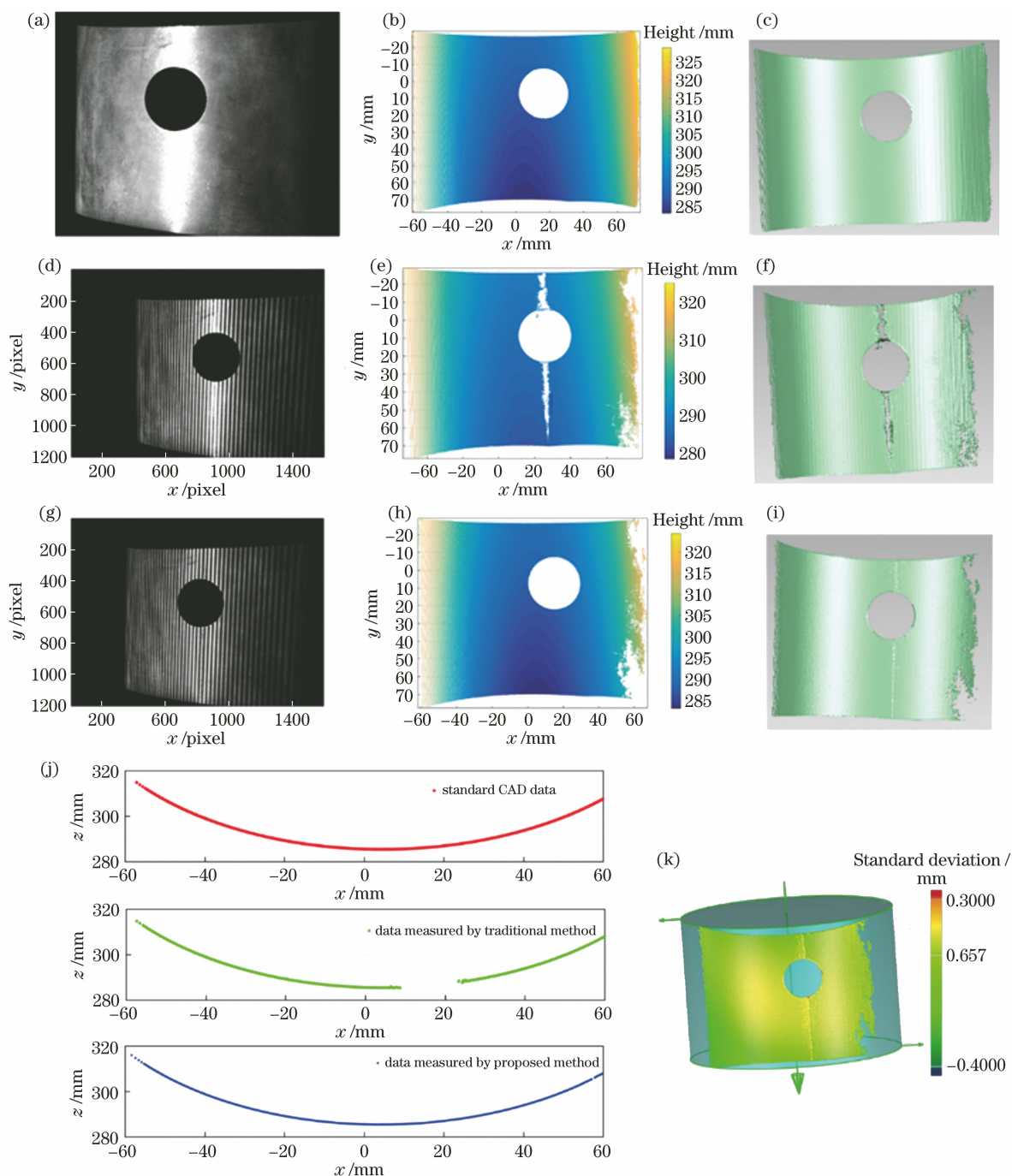


图 9 带孔柱形金属件的测量结果。(a)待测物体;(b)标准数据;(c)标准数据在 Geomagic 中的显示;(d)传统方法拍摄的变形条纹图像;(e)传统方法获得的数据;(f)传统方法结果在 Geomagic 中的显示;(g)所提方法拍摄的变形条纹图像;(h)所提方法获得的数据;(i)所提方法结果在 Geomagic 中的显示;(j)三组数据某一行高度对比;(k)所提方法得到的数据与 Geomagic 拟合圆柱面的标准偏差

Fig. 9 Measurement results of cylindrical metal part with hole. (a) Object to be tested; (b) standard data; (c) standard data displayed in Geomagic; (d) deformed fringe image captured by traditional method; (e) data obtained by traditional method; (f) result obtained by traditional method displayed in Geomagic; (g) deformed fringe image captured by proposed method; (h) data obtained by proposed method; (i) result obtained by proposed method displayed in Geomagic; (j) height comparison of one row of three sets of data; (k) standard deviation between data obtained by proposed method and Geomagic fitting cylindrical surface

CAD 设计数据工件的质量检测中,算法中可直接利用设计模型与因反光造成表面点云缺失的三维数据

进行配准,实现相机与投影仪之间的像素对应。若待测工件缺少 CAD 设计数据,则可采用其他手段获得其完整面形点云数据,并将其作为同型号工件的预估面形数据,用于相机与投影仪之间的像素匹配。例如,本研究在原理验证实验中采用元件表面喷涂显影剂的方式获取圆柱体金属件的基本面形数据,或者在利用傅里叶变换轮廓术、投影正交条纹等手段和方法得到预估面形数据后,按照所提方法求取相机与投影仪像素间的对应关系并生成非等值系数投影光栅,最终可获得高光工件精确的三维面形数据。此外,为精确确定投影仪与相机之间的强度响应关系,本研究采用投影 27 张均匀灰度图像的方式获取投影仪-相机响应曲线。然而,如果使用 n 次多项式拟合的方法,投影 $n+1$ 张灰度图便可获得投影仪-相机响应曲线,故之后可以通过此方式减少投影灰度图像数量,进一步提高测量效率和测量精度。

参 考 文 献

- [1] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [2] Hou T L, Sun Y K, Ma L, et al. Machine vision inspection method for high-speed rail body-in-white assembly quality [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2021, 40(7): 142-144.
侯天龙, 孙永奎, 马磊, 等. 高铁白车身装配质量的机器视觉检测方法[J]. *传感器与微系统*, 2021, 40(7): 142-144.
- [3] Hu T P, Gao L M, Yang H N. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(8): 70-75, 87.
胡婷萍, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(8): 70-75, 87.
- [4] Chi B S, Yu H T, Dang S, et al. Application of nondestructive testing technology in maintenance of coal mine machinery and equipment [J]. *China Plant Engineering*, 2021(14): 155-156.
迟宝锁, 于海亭, 党帅, 等. 浅谈无损检测技术应用于煤矿机械设备维修的实践[J]. *中国设备工程*, 2021(14): 155-156.
- [5] Su X Y, Zhang Q C, Chen W J. Three-dimensional imaging based on structured illumination [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
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): 0209001.
- [6] 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.
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.
- [7] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique [J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(3): 033604.
- [8] 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.
- [9] Cui H H, Cheng Y S, Li Z J, et al. An adaptive 3D measurement method of structured light based on camera response curve: CN108827184A [P]. 2018-11-16.
崔海华, 程筱胜, 李兆杰, 等. 一种基于相机响应曲线的结构光自适应三维测量方法: CN108827184A [P]. 2018-11-16.
- [10] Li Z J, Cui H H, Liu C Y, et al. A shape measurement method based on automatic multiple exposure surface structured light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112004.
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.
- [11] Riviere J, Reshetouski I, Filipi L, et al. Polarization imaging reflectometry in the wild [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 1-14.
- [12] Salahieh B, Chen Z Y, Rodriguez J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10064-10071.
- [13] Waddington C, Kofman J. Modified sinusoidal fringe-pattern projection for variable illuminance in phase-shifting three-dimensional surface-shape metrology [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 084109.
- [14] Waddington C, Kofman J. Camera-independent saturation avoidance in measuring high-reflectivity-variation surfaces using pixel-wise composed images from projected patterns of different maximum gray level [J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 32-37.
- [15] 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.
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.
- [16] Li S 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.
- [17] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Adaptive pixel-to-pixel projection intensity adjustment for measuring a shiny surface using orthogonal color fringe pattern projection[J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(5): 055203.
- [18] Lyu C G, Gao S, Yang J C. An optimisation design of adaptive illumination for a multi-reflective 3D scene [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 93: 128-138.
- [19] Guo W B, Zhang Q C, Wu Z J. Real-time three-dimensional imaging technique based on phase-shift fringe analysis: a review [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0800001.
郭文博, 张启灿, 吴周杰. 基于相移条纹分析的实时三维成像技术发展综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0800001.
- [20] Chong Q, Cao Y P, Chen Y T. Stroboscopic online phase measurement profilometry for high-speed rotating objects [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0812003.
种晴, 曹益平, 陈雨婷. 高速旋转物体频闪在线相位测量轮廓术[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0812003.
- [21] Xue J P, Zhang Q C, Li C H, et al. 3D face profilometry based on galvanometer scanner with infrared fringe projection in high speed [J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1458.
- [22] Gai S Y, Da F P. A new model of 3D shape measurement system based on phase measuring profilometry and its calibration [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(9): 902-910.
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的相位法三维轮廓测量系统模型及其标定方法研究[J]. 自动化学报, 2007, 33(9): 902-910.
- [23] Cao Y P, Su X Y, Xiang L Q, et al. Intensity transfer function of DMD and its application in PMP [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4778: 86-89.
- [24] Li Z W. Research on structured light 3D measuring technology and system based on digital fringe projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 27-31.
李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 27-31.
- [25] Wang G H, Qian K M. Review on line-scan camera calibration methods [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111011.
王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111011.