

基于自适应条纹的高反光表面三维面形测量方法

冯维*, 汤少靖, 赵晓冬, 赵大兴

湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068

摘要 提出了一种基于图像融合和插值预测的自适应条纹投影方法。该方法首先基于多幅掩模图像融合求取了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求得了最佳投影灰度值;然后通过降低整体投影强度,在不饱和情况下进行了坐标匹配,最终生成自适应条纹;最后将生成的自适应条纹投射至被测物体,并利用外差式多频相移法进行了相位解算和三维面形重构。实验结果表明:所提方法实现了局部过曝区域的相位信息的完整提取,绝对方向和正向的平均误差与标准偏差值均小于传统方法,且绝对方向平均误差减少了 84.1%,正向标准偏差值减少了 69.4%。所提方法有效地解决了高反光物体三维面形测量的难题。

关键词 测量; 面形测量; 高反光表面; 自适应条纹; 图像融合; 插值预测; 多频相移

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0512003

Three-Dimensional Shape Measurement Method of High-Reflective Surfaces Based on Adaptive Fringe-Pattern

Feng Wei*, Tang Shaojing, Zhao Xiaodong, Zhao Daxing

Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China

Abstract An adaptive fringe-pattern projection method based on image fusion and interpolation prediction is proposed. Firstly, based on multi-mask image fusion, the saturation threshold required for the optimal projection gray value is obtained, and the optimal projection gray value is obtained by combining interpolation prediction and search algorithm. Then, by reducing the overall projection intensity, the coordinate matching is carried out in the unsaturated condition, and the adaptive fringe is finally generated. Finally, the generated adaptive fringe is projected to the object to be measured, and the phase solution and three-dimensional shape reconstruction are performed by heterodyne multi-frequency phase shift method. The experimental results show that the phase information in local over-exposure region can be obtained completely by the proposed method, the average error and standard deviation in absolute direction and forward direction are smaller than those obtained by traditional method, and the average error in absolute direction is reduced by 84.1% and the standard deviation in forward direction is reduced by 69.4%. The proposed method effectively solves the difficult problem of 3D shape measurement of high-reflective surfaces.

Key words measurement; shape measurement; high-reflective surfaces; adaptive fringe-pattern; image fusion; interpolation prediction; multi-frequency phase shift

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 100.2000; 110.1080

1 引 言

相移条纹投影技术由于具有全场获取、非接触式、低成本、高精度和快速数据处理等优势,现已广泛地应用于学术研究和工业领域^[1-2]。基于数字投

影仪(DLP)与数字相机的数字投影光栅技术也被越来越多地用于高精度的光学三维测量中。传统的条纹投影三维精密测量系统对被测物体表面的光学特性有一定的要求,即要求被测物体表面有足够的漫反射且不能存在大面积的镜面反射。然而,在实

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-10-23; 录用日期: 2019-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(51805153, 51675166)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1801)、湖北工业大学博士科研启动基金项目(BSQD2019005)

* E-mail: david2018@hbut.edu.cn

实际的测量过程中,被测物体材质不同,其表面有不同反射特性,光栅条纹的调制效果会受到不同程度的影响。其中,物体表面高反射率造成的图像过饱和是影响相位获取和最终三维重建结果的因素之一。在使用编码结构光测量具有高反射率表面的物体时,采集图像容易产生饱和现象(即对于图像位深度为 8 bit 的相机,饱和区域灰度值超过 255),致使最终的测量结果发生较大偏差,从而难以进行精确测量^[3-4]。因此,研究高反光物体的三维面形测量对于进一步提高现有结构光三维扫描技术的自动化程度,并拓展其应用领域具有重要的研究意义和极大的应用价值。

目前,解决高反光物体三维面形测量问题的方法主要分为多相机或多视角拍摄法^[5-6]、改进的基于编码方案重建法^[7-9]、高动态范围成像法^[10-12]、多重曝光法^[13-15]、自适应条纹投影法和添加辅助硬件法^[16-18]等。其中自适应条纹投影法(ADFP)是基于自适应调整光栅投影强度的方法和反投影的思想提出的。对于相机-投影仪测量系统,在求得相机和投影仪坐标匹配关系以及图像灰度变化关系的基础上,可以得到投影仪像素灰度和采集图像灰度的对应关系,从而可通过改变投影图像灰度来使相机采集到最佳的图案^[19]。Babaie 等^[20]提出计算投影仪与相机的整体对应关系并逐像素调整光栅强度。该方法采用整体匹配关系生成光栅,无法对光栅强度值进行准确调整。Waddington 等^[21]通过减少投影强度来解决图像饱和问题,将多幅具有最大投影灰度值(MIGL)的条纹图案投影至被测物体上,以适应环境光的变化。但对于具有低反射率的表面,降低最大投影灰度值会降低图像的信噪比。Li 等^[22]提出自适应条纹投影法,利用二值化图像提取过曝区域及其边缘像素,由边缘像素解算出投影平面的过曝区域边缘,最终确定过曝区域在投影平面的局部补偿位置。该方法容易引起过曝区域边缘像素点的相位信息缺失,计算结果不够精确。Lin 等^[23]提出了一种逐像素的自适应调整光栅技术,通过求解相机-投影仪响应曲线来求取最佳投影灰度值,由饱和区域边缘的坐标匹配来估计饱和区域内部的坐标匹配关系。该方法可较好地生成像素级的自适应光栅,但利用单应性矩阵计算坐标匹配所涉及的计算量很大,且不适用于阶梯状的被测物体。Li 等^[24]采用基于二分法的灰度查找算法,利用图像灰度值有限、量化的特性以及投影仪-相机响应关系的有序单调性,实现最佳投影灰度值的快速查找。但查找过

程中饱和和阈值的设定是一个极具经验性的工作,若投影仪的精度有限,自适应光栅生成的质量将会受到很大影响。陈超等^[25]提出基于自适应条纹投影技术的彩色物体三维形貌测量,投射红、绿、蓝三幅光强图像至被测物体表面,并根据表面颜色的反射特性计算像素点的最佳投射强度与彩色值。但该方法对光照环境较为敏感,多应用于暗室环境下。

鉴于此,本文提出一种基于图像融合和插值预测的自适应条纹投影方法以测量高反光物体的三维面形。该方法根据被测物体表面的反射率变化,基于掩模图像融合求取饱和阈值,并结合插值预测算法求得最佳投影灰度值,然后通过整体降低投影强度,在采集图像不发生饱和的情况下进行坐标匹配。实验结果表明,相对于传统光学三维测量方法,所提方法采集的图像具有整体最佳条纹对比度,可实现高反光物体过曝区域的完整重建,有效解决了高反光物体的三维面形测量难题。

2 基本原理

2.1 自适应条纹投影法

本文提出一种自适应条纹投影技术用于高反光物体三维面形测量,根据被测物体表面的反射率自适应调整条纹灰度值,以避免采集图像饱和。这里的“自适应”是指在具有较大反射率变化的高反光物体三维面形测量中,能够计算出投射条纹图案中每个像素的最佳投影灰度值^[26]。原理如图 1 所示,利用计算结果生成自适应条纹并将其投影至被测物体,从而使相机采集的正弦条纹图案不发生饱和,以该调制度高且不饱和的正弦条纹图进行相位解算可获得高精度的相位测量结果。

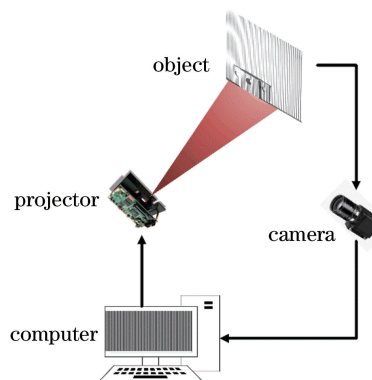


图 1 自适应条纹投影技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of adaptive fringe projection technology

所提方法的测量流程如图 2 所示。首先,投射

一定数目的均匀灰度图像序列至被测物体表面,利用相机采集后求取有效均匀灰度图像序列与掩模图像序列。其次,利用掩模图像序列提取有效均匀灰度图像序列以重新计算每个像素灰度值并合成最终图像,合成图像中的最大灰度值即为所需饱和阈值。然后,根据饱和阈值大小结合插值预测快速查找算法确定最佳投影灰度值。随后,投射水平与垂直的条纹序列,在低投影强度下采集经物体调制的条纹图像,计算绝对相位进行相机-投影仪坐标匹配。最后,投射自适应条纹序列至被测物体,并利用外差式多频相移法进行相位计算和三维重建。

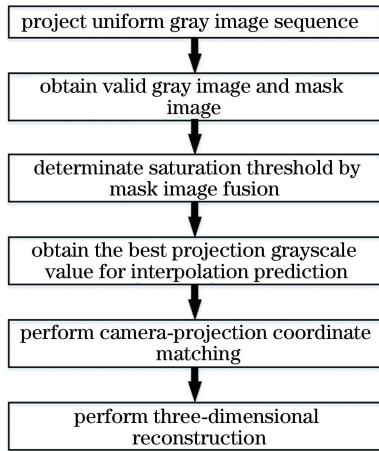


图 2 自适应条纹投影技术流程图

Fig. 2 Flow chart of adaptive fringe projection technology

2.2 求解最佳投影灰度值

本文通过图像融合的方法获得求取最佳投影灰度值所需的饱和阈值,结合插值预测查找算法求得最佳投影灰度值。首先,投射一系列具有不同均匀灰度值的图像序列至被测物体表面,并利用相机采集对应的灰度图像。在不同亮度的条纹投影下,只有使灰度图像都不出现过饱和现象的投影灰度值才是最佳投影灰度值。具体的求解流程如下。

1) 投射均匀灰度图像序列 $P_i = 255 - K \times (i - 1)$, 其中 i 为该图像序列数目编号, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为数目编号的最大值, K 为步长。对应的灰度图像为 I_i 。相机采集的图像序列为 $I_k(u^c, v^c)$, 其中 k 为采集图像序列数目编号, $k = 1, 2, \dots, N$, (u^c, v^c) 为相机像素坐标系下的图像坐标。投影强度最初设置为最高灰度值 255。通过降低投影强度,在恒定的步长 K 下所有的图像像素可达到不饱和状态。

2) 运用图像阈值分割方法,即反阈值化为 0,并求取有效均匀灰度图像序列 $G_i(u^c, v^c)$ 。

$$G_i(u^c, v^c) = \begin{cases} 0, & I_k(u^c, v^c) > t_{\text{thresh}} \\ I_k(u^c, v^c), & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: t_{thresh} 为设定的分割阈值。

3) 运用反二进制阈值化,求取有效掩模图像序列 $M_i(u^c, v^c)$ 。

$$M_i(u^c, v^c) = \begin{cases} 0, & I_k(u^c, v^c) = \max\{I_k(u^c, v^c) \mid I_k(u^c, v^c) > t_{\text{thresh}}\} \\ m_{\text{maxval}}, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

取最大阈值 $m_{\text{maxval}} = 1$, 实现反二进制阈值化。相机采集的图像序列 $I_k(u^c, v^c)$ 中所对应的最大不饱和像素点灰度值即为序列像素的最佳灰度值。

4) 投影图像 $H(u^c, v^c)$ 是由掩模图像序列 $M_i(u^c, v^c)$ 和有效均匀灰度图像序列 $G_i(u^c, v^c)$ 的灰度值合成,可表示为

$$H(u^c, v^c) = \sum_{i=1}^N M_i(u^c, v^c) \times G_i(u^c, v^c). \quad (3)$$

5) 由于阈值分割算法的不足和过曝区域边缘像素点的信息获取有部分缺失,因此该投影图像中最大灰度值并不是最终自适应条纹投影图案的最佳灰度值。相机-投影仪灰度响应曲线为

$$I_{\text{cam}}(x, y) = k_1 I_{\text{pro}}(u, v) + k_2 + I_n, \quad (4)$$

式中: $I_{\text{cam}}(x, y)$ 为相机采集的图像灰度值; $I_{\text{pro}}(u, v)$ 为投影灰度值; (x, y) 为相机像素坐标; (u, v) 为对

应的投影图像坐标; k_1 为投影仪、相机以及物体对投影强度的调制系数; k_2 为特定测量情况下的环境光等因素; I_n 为噪声强度。对于特定的被测物体与测量环境,若反射率、环境光、噪声等不变,相机参数、投影仪参数、投影图像共同决定相机采集的图像灰度值。(4)式为线性函数,它的定义域与值域均为有限且有序的数集,因此本文采用插值预测快速查找算法^[27]来求解。为了达到动态预测的目的,利用插值多项式 $L(x)$ 对数列中间值 (m_{mid}) 进行预测,求取公式为

$$L(x) = \frac{A[y_{\text{high}}] - A[y_{\text{low}}]}{h_{\text{high}} - l_{\text{low}}}(y_{\text{max}} - l_{\text{low}}) + A[y_{\text{low}}], \quad (5)$$

$$m_{\text{mid}} = \frac{y_{\text{max}} - A[y_{\text{low}}]}{A[y_{\text{high}}] - A[y_{\text{low}}]} \times (h_{\text{high}} - l_{\text{low}}) + l_{\text{low}}, \quad (6)$$

式中： y_{\max} 为步骤 4) 中合成的最终图像的最大灰度值；合成图像的宽度 l_{low} 和高度 h_{high} 取决于图像分辨率大小； $A[y_{\text{low}}]$ 为灰度值数组中的最小值； $A[y_{\text{high}}]$ 为灰度值数组中的最大值。将目标元素 y_{\max} 与数列中间元素的 m_{mid} 作比较，运用二分法查找，通过不断迭代即可求得最佳投影灰度值 x^{ideal} 。

2.3 相机-投影仪坐标匹配

在投影正交正弦相移光栅的三维测量系统中，相位解算是求得相机与投影仪坐标匹配关系的关键。利用相机采集经物体调制的光栅图像，利用解相位算法求得水平相位与垂直相位，解算出来的相位包含相机像素坐标 (x, y) 对应的投影图像坐标 (u, v) 信息。水平方向和垂直方向的相位直接对应于投影仪的横纵坐标。

$$u = \frac{\varphi_v(x, y)}{2\pi N_v} \times W, \quad (7)$$

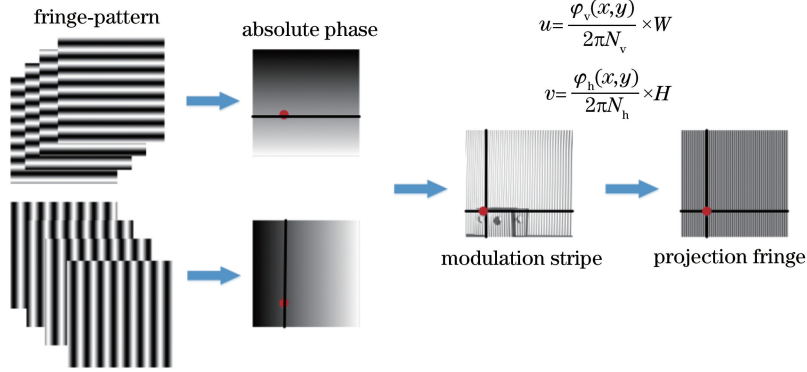


图 3 投影仪-相机坐标匹配示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate matching between projector and camera

考虑轮廓像素提取的复杂度和实际光学成像系统中某一点的像素值会受到周围多个像素点的影响，在实验中降低整体的投影强度，在低灰度不饱和的测量条件下进行有效坐标匹配。根据 2.2 节提出的方法求取所需的低投影强度 x^{ideal} ，在相机动态范围内，该强度可使相机图像最高灰度值不会出现饱和现象。

$$I_i(u, v) = x^{\text{ideal}} \{0.5 + 0.5\cos[\varphi(u, v) + \delta_i]\}, \quad (9)$$

$$v = \frac{\varphi_h(x, y)}{2\pi N_h} \times H, \quad (8)$$

式中：水平方向绝对相位 $\varphi_v(x, y)$ 和垂直方向绝对相位 $\varphi_h(x, y)$ 由外差式多频相移法求得； N_v 和 N_h 分别是自适应横纵光栅条纹的周期数； W 和 H 分别是自适应光栅条纹图像的宽和高。匹配过程如图 3 所示，投影正交正弦光栅，经相位解算后，投影仪坐标系和相机坐标系在投影光栅区域的每个像素点都具有唯一的水平和垂直的相位值。基于外差式多频相移法展开得到的是绝对相位值，利用相位相等关系可建立投影仪上像素点与相机上像素点的一一对应关系。随后遍历整个投影仪坐标系，即可构建投影仪与相机之间的亚像素级映射关系。从调制光栅图像中求解相位，利用相位计算对应的投影坐标即可得到匹配结果。最后，利用标定得到的相关参数即可得到被测物体的三维坐标。

$$u = \frac{\varphi_v(x, y)}{2\pi N_v} \times W$$

$$v = \frac{\varphi_h(x, y)}{2\pi N_h} \times H$$

式中： $\varphi(u, v)$ 为解算的相位主值；相移步长 $\delta_i = i \times \frac{2\pi}{N}$ ；两个 0.5 分别为条纹的平均强度 $I'(u, v)$ 和条纹的调制强度 $I''(u, v)$ 。利用(9)式生成条纹图案^[23]，得到经过投影强度调整的投影条纹图案 $I_i(u, v)$ 。 $\varphi(u, v)$ ， $I'(u, v)$ ， $I''(u, v)$ 的计算公式分别为

$$\varphi(u, v) = \arctan \left[\frac{\sum I_i(u, v) \times \sin \delta_i}{\sum I_i(u, v) \times \cos \delta_i} \right], \quad \delta_i = i \times \frac{2\pi}{N}, \quad (10)$$

$$I'(u, v) = \frac{\sum I_i(u, v)}{N}, \quad (11)$$

$$I''(u, v) = \frac{2}{N} \sqrt{[\sum I_i(u, v) \times \cos \delta_i]^2 + [\sum I_i(u, v) \times \sin \delta_i]^2}. \quad (12)$$

利用相机采集投影条纹图案,计算相位主值并解包裹相位,由相位信息解算饱和区域像素坐标匹配关系。

3 分析与讨论

为验证所提方法的有效性,搭建了一套自适应条纹投影测量系统,如图 4 所示。该系统由计算机、相机和数字投影仪组成。投影仪可实现 RGB 三通道投影,有效分辨率为 $1140 \text{ pixel} \times 912 \text{ pixel}$,可实现高速图案投射。相机为灰点数字相机,最大分辨率为 $2048 \text{ pixel} \times 1536 \text{ pixel}$,最大帧频可达到 121 frame/s 。采用外差式多频四步相移法进行相位解算,选取表面具有局部较大反射率的物体作为被测物体。

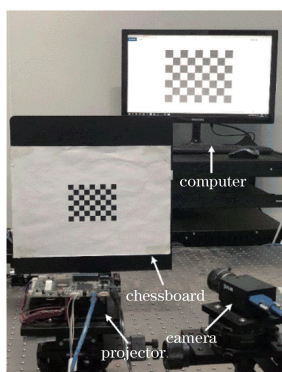


图 4 自适应条纹投影测量系统

Fig. 4 Adaptive fringe projection measurement system

首先,向被测物体投射一系列具有不同灰度值的均匀灰度图案序列 P_i ,由相机采集相应的均匀灰度图像序列 $I_k(u^c, v^c)$ 。均匀灰度图像序列 P_i 所投射的灰度值依次增大,分别为 30、60、90、120、150、180、210、240、255。为了降低环境光照和被测物体表面互反射等因素的影响,采集时相机光圈调整为较小,固定曝光时间并将相机的增益设置为 0 dB。为了使相机能与投影仪实现较好的同步,将相机的曝光时间设置为 $\frac{1}{f_p}$ 的整数倍,其中 f_p 为投影仪的帧频。

由(1)式和(2)式可计算有效均匀灰度图像序列与对应的掩模图像序列。考虑到相机自身的噪声影响,将像素 (u^c, v^c) 的灰度值 $I_k(u^c, v^c)$ 的阈值取为 248。再根据(3)式将掩模图像 $M_i(u^c, v^c)$ 和有效均匀灰度图像 $G_i(u^c, v^c)$ 融合成图像 $H(u^c, v^c)$,如图 5 所示。

通过在序列图像中遍历所有像素点,计算得到

合成图像的最大灰度值为 210。将合成图像的灰度值作为插值预测查找算法的设定饱和阈值,结合(5)式和(6)式,利用插值预测查找算法查找中间值大小,再利用二分法查找即能够快速求得最佳投影灰度值。此后,在低灰度下实现坐标映射关系生成自适应条纹,条纹投影效果对比如图 6(a)、(b)所示。由框选出的局部细节可以看出,相较于传统方法,所提方法下条纹调制度高且不发生饱和现象。

利用外差式多频相移法进行相位主值展开。投影三组条纹,每组四幅具有不同相移的正弦条纹图,设置条纹频率分别为 $\lambda_1 = 1/70$ 、 $\lambda_2 = 1/64$ 、 $\lambda_3 = 1/59$,其对应的相位主值分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 。使用外差原理分别叠加 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 ,求得频率为 λ_{12} 、 λ_{23} 的相位 ϕ_{12} 和 ϕ_{23} 。然后,再将频率为 λ_{12} 、 λ_{23} 的相位叠加得到全场范围内只有一个周期相位的 ϕ_{123} ^[28]。实现流程如图 7 所示。

对最终相位展开图抽取第 0~945 行相位值进行分析,结果如图 8 所示,其中 X、Y 分别为对应相位展开图的横、纵坐标。可以看出,所提出的自适应条纹投影技术在被测物体过曝区域可以成功实现相位的全部主值展开。结合测量系统的标定结果,应用相位-高度映射关系,可生成三维重建模型。先后使用传统光栅投影三维测量方法和本文所提方法,对同一具有高反光表面特性的金属工件进行三维测量,其效果对比如图 9(a)、(b)所示。可以明显看出,由传统光栅投影三维测量方法得到的被测表面三维重构图中存在明显的点云缺失现象,而由本文方法得到的被测表面的三维结构可被完整重构出来。其三维点云深度对比图如图 10 所示,其中 Z 为被测物体与被测基准面的距离。

对被测物体点云进行三角网格化以构建模型,进一步将模型数据与原始点云数据进行质量比较分析。规定基准面一侧的偏离值为负值,则另一侧为正值,利用最小二乘拟合平面计算点到平面的最大距离和最小距离,并计算出平均误差与标准偏差,结果分别如表 1、2 所示。

由表 1 与表 2 定量分析可得,所提方法在绝对方向与正向的平均误差和标准偏差均小于传统方法。绝对方向平均误差减少了 84.1%,正向平均误差减少了 83.7%;绝对方向标准偏差减少了 71.6%,正向标准偏差减少了 69.4%。进一步验证了所提方法对高反光物体的三维面形测量具有有效性。

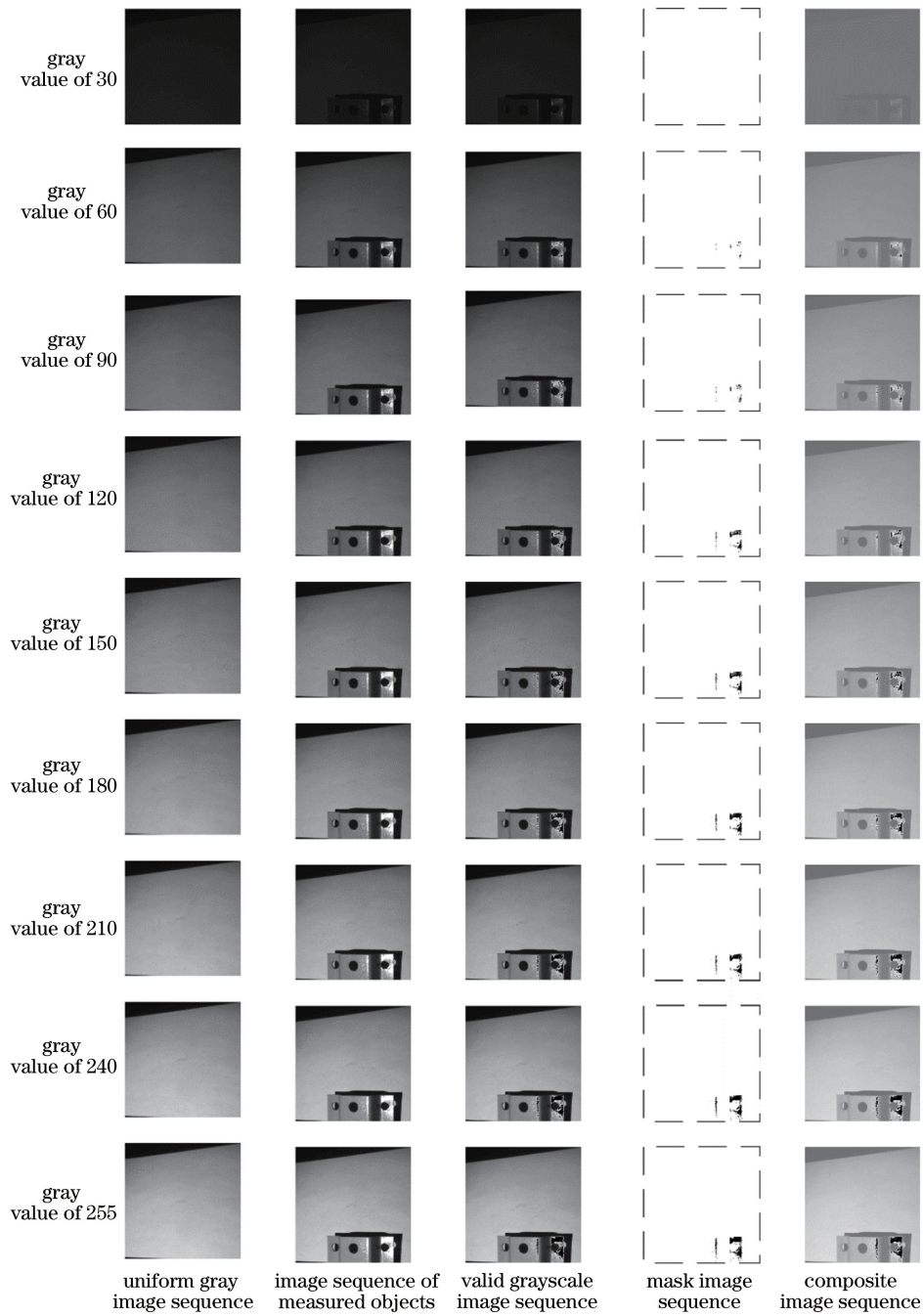


图 5 合成图像过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of synthetic image process

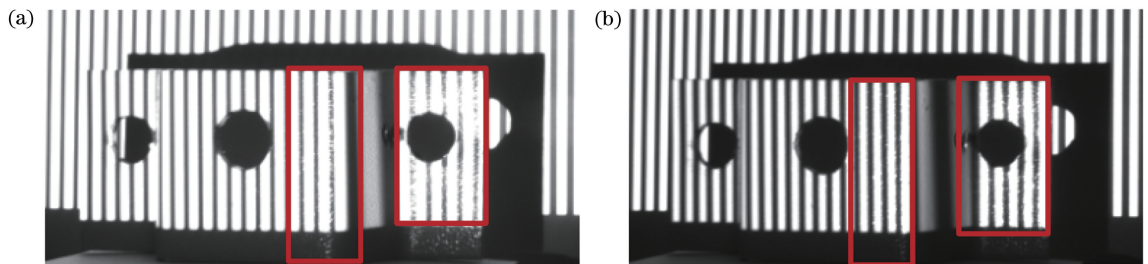


图 6 条纹投影效果对比图。(a)传统方法;(b)自适应条纹投影法

Fig. 6 Contrast map of fringe projection effect. (a) Conventional method; (b) adaptive fringe projection method

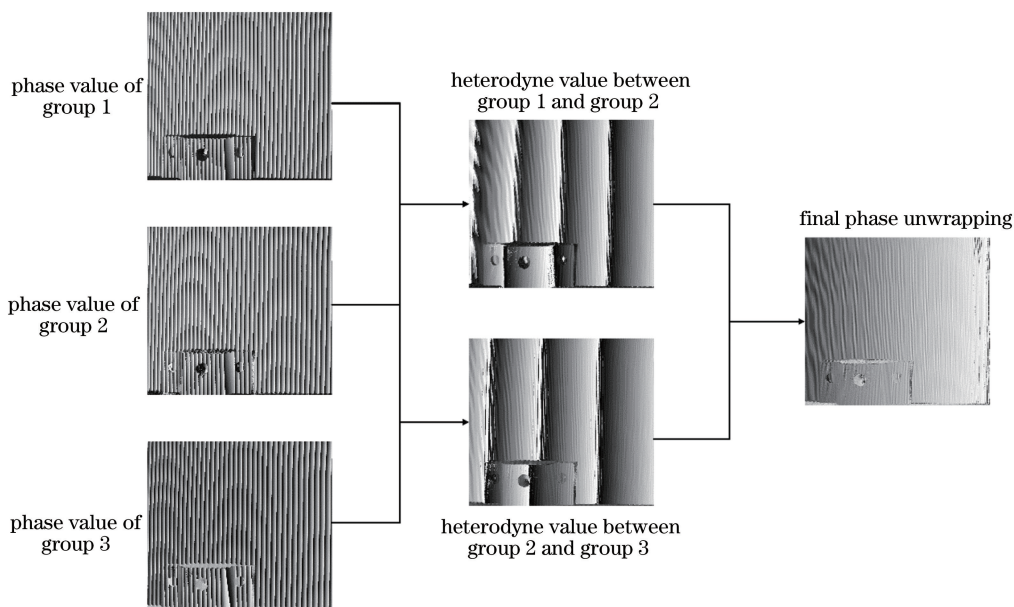


图 7 外差式多频相移法流程图

Fig. 7 Flow chart of heterodyne multi-frequency phase-shift method

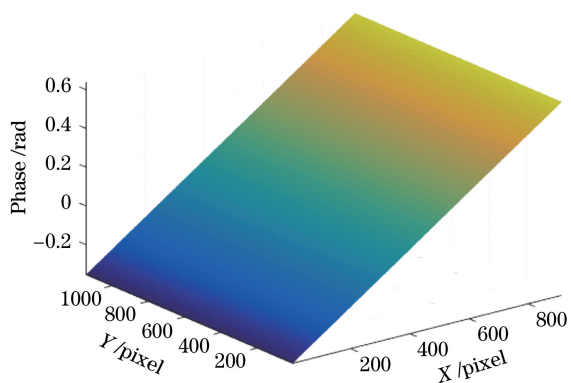


图 8 部分相位展开

Fig. 8 Partial phase unwrapping

4 结 论

针对具有较大表面反射率变化的物体的三维面形测量,提出了一种基于图像融合和插值预测的自适应条纹投影方法。实验结果表明,该方法可有效测量高反光物体的三维面形,获得较完整面形点云信息。所提方法不需要附加或改进任何硬件设备,也不需要大量采集和投射条纹图,绝对方向平均误差减少了 84.1%,正向标准偏差减少了 69.4%,可适用于高反光物体的三维面形测量。

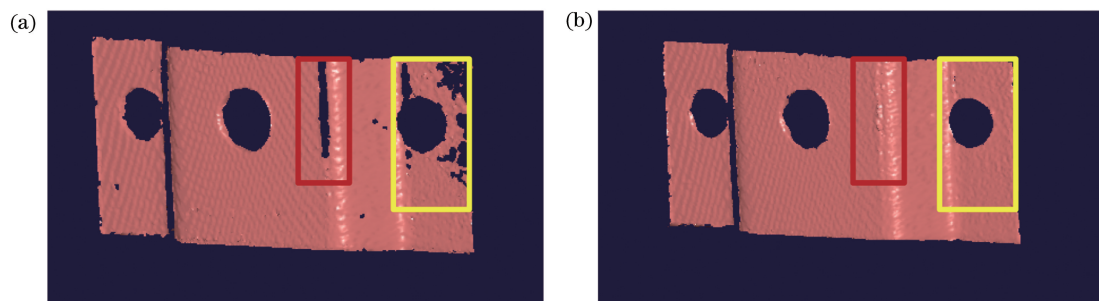


图 9 三维重建效果对比。(a)传统方法;(b)自适应条纹投影法

Fig. 9 Comparison of three-dimensional reconstruction effect. (a) Conventional method; (b) adaptive fringe projection method

表 1 传统方法点云测评分析

Table 1 Evaluation and analysis of point cloud by conventional method

Direction	Maximal value /mm	Average error /mm	Standard deviation /mm
Negative direction	-3.9525	-0.4587	0.4720
Absolute direction	3.9525	0.0088	0.0843
Forward direction	3.8243	0.0043	0.0544

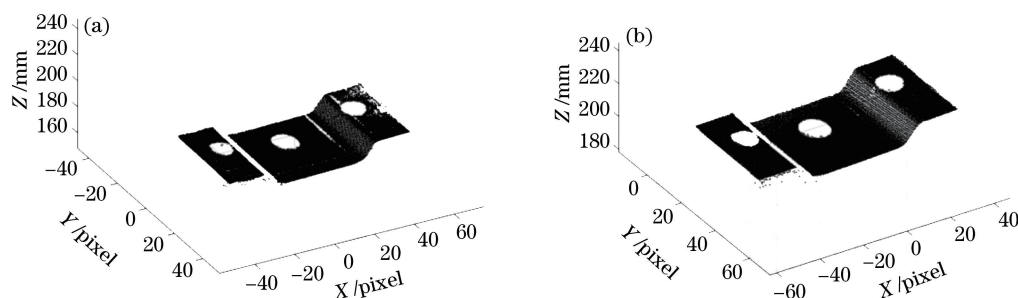


图 10 三维点云深度图对比。(a)传统方法;(b)自适应条纹投影法

Fig. 10 Three-dimensional point cloud depth map. (a) Conventional method; (b) adaptive fringe projection method

表 2 所提方法点云测评分析

Table 2 Evaluation and analysis of point cloud by proposed method

Direction	Maximal value /mm	Average error /mm	Standard deviation /mm
Negative direction	-0.9415	-0.3116	0.1994
Absolute direction	0.9415	0.0014	0.0239
Forward direction	0.8150	0.0007	0.0166

参 考 文 献

- [1] Huang L, Xue J P, Gao B, et al. Model mismatch analysis and compensation for modal phase measuring deflectometry [J]. Optics Express, 2017, 25 (2): 881-887.
- [2] Liu X L, Peng X, Chen H L, et al. Strategy for automatic and complete three-dimensional optical digitization [J]. Optics Letters, 2012, 37(15): 3126-3128.
- [3] Lin H, Gao J, Zhang G J, et al. Review and comparison of high-dynamic range three-dimensional shape measurement techniques [J]. Journal of Sensors, 2017, 2017: 9576850.
- [4] Tao T, Guo H W, He H T. Overview of optical three-dimensional measurement technique for specular reflection surfaces [J]. Optical Instruments, 2005, 27(2): 90-95.
陶涛, 郭红卫, 何海涛. 镜面反射面形光学三维测量技术综述 [J]. 光学仪器, 2005, 27(2): 90-95.
- [5] Chen S L, Xia R B, Zhao J B, et al. Analysis and reduction of phase errors caused by nonuniform surface reflectivity in a phase-shifting measurement system [J]. Optical Engineering, 2017, 56(3): 033102.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Tang S M, Zhang X, Tu D W. Micro-phase measuring profilometry: its sensitivity analysis and phase unwrapping [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 72: 47-57.
- [9] Wang M M, Du G L, Zhou C L, et al. Enhanced high dynamic range 3D shape measurement based on generalized phase-shifting algorithm [J]. Optics Communications, 2017, 385: 43-53.
- [10] Lin H B, Song Z. 3D reconstruction of specular surface via a novel structured light approach [C]// 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, August 8-10, 2015, Lijiang, China. New York: IEEE, 2015: 530-534.
- [11] 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.
- [12] Xing W, Zhang F M, Feng W, et al. Three-dimensional measurement method of objects with specular surface based on digital micromirror device [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1212002.
邢威, 张福民, 冯维, 等. 基于数字微镜器件的高光面物体三维测量方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1212002.
- [13] Jiang H Z, Zhao H J, Li X D. High dynamic range fringe acquisition: a novel 3-D scanning technique for high-reflective surfaces [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1484-1493.
- [14] Ekstrand L, Zhang S. Autoexposure for three-dimensional shape measurement using a digital-light-processing projector [J]. Optical Engineering, 2011,

- 50(12): 123603.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Zhu Z M, Pei S, Chen S M, et al. Highlight removal of high reflectivity workpiece and vision measurement based on polarization information [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112005.
祝振敏, 裴爽, 陈世明, 等. 基于偏振信息的强反射工件高光去除及视觉测量方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1112005.
- [18] Jeong J, Kim M Y. Adaptive imaging system with spatial light modulator for robust shape measurement of partially specular objects [J]. *Optics Express*, 2010, 18(26): 27787-27801.
- [19] Li W S, Bothe T, Osten W, et al. Object adapted pattern projection: Part I: generation of inverse patterns [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(1): 31-50.
- [20] Babaie G, Abolbashari M, Farahi F. Dynamics range enhancement in digital fringe projection technique[J]. *Precision Engineering*, 2015, 39: 243-251.
- [21] 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.
- [22] Li D, Kofman J. Adaptive fringe-pattern projection for image saturation avoidance in 3D surface-shape measurement [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9887-9901.
- [23] Lin H, Gao J, Mei Q, et al. Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7703-7718.
- [24] 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.
- [25] Chen C, Gao N, Wang X J, et al. Three-dimensional shape measurement of colored objects based on adaptive fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815008.
陈超, 高楠, 王向军, 等. 基于自适应条纹投影的彩色物体三维形貌测量 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815008.
- [26] 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.
- [27] Lobel I, Leme R P, Vladu A. Multidimensional binary search for contextual decision-making [J]. *Operations Research*, 2018, 66(5): 1346-1361.
- [28] Shang Z Y, Li W X, Dong M L, et al. 3D shape measurement system based on fringe projection in 4-step phase shifting [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 584-589.
尚忠义, 李伟仙, 董明利, 等. 基于四步相移光栅投影的三维形貌测量系统 [J]. *应用光学*, 2015, 36(4): 584-589.