

基于数字全息的回转类机械零件三维显示

税云秀, 胡琳, 戴姚辉, 吴海钰, 朱岗, 杨岩*

重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054

摘要 提出了一种针对弱漫反射物体在重建平面内的重建像位置预标记法。利用物体上某个特定区域的镜面反射光作为物光, 获得全息图, 对+1级重建像所在区域进行预标记; 不改变物体位置, 对物体上的漫反射面发出的物光进行全息记录, 在原预标记区域提取弱漫反射物体的重建像。改变照明光倾角方式, 并结合 FIMG4FFT 方法, 获取特定视角下的物体三维轮廓。获得多个视角的三维轮廓后, 提出利用粒子群算法将非线性方程组的求解问题转化为优化问题求解拼接参数, 实现圆柱坐标系下的多视角物体三维轮廓拼接。误差标定实验证明最大相对测量误差为 5.6%。所提方法成功地对螺纹表面进行多视角三维轮廓获取、拼接, 实现了回转类零件的三维全息显示。

关键词 全息; 数字全息; 螺纹表面; 轮廓拼接; 粒子群算法; 三维显示

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.060901

Three-Dimensional Display of Rotary Mechanical Parts Based on Digital Holography

Shui Yunxiu, Hu Lin, Dai Yaohui, Wu Haiyu, Zhu Gang, Yang Yan*

College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract A pre-labeling method for the reconstructed image position of a diffuse reflector in the reconstructed plane is proposed. Firstly, a hologram is obtained by using the specular reflected light of a specific area on the object as object light, and the area where the +1st-order reconstruction image is located is pre-marked. Then, without changing the position of the object, the object light emitted by the diffuse reflector on the object is holographically recorded, and weak diffuse reflection is extracted from the original pre-marked area. By changing the inclination of illumination light and combining FIMG4FFT method, the three-dimensional contour of the object at a specific viewing angle is obtained. After obtaining the three-dimensional contours at multiple viewing angles, the problem of solving non-linear equations is transformed into an optimization problem by using particle swarm optimization (PSO) to solve the stitching parameters, so as to achieve the final stitching of the three-dimensional object contours at multiple viewing angles in cylindrical coordinates. The error calibration experiment shows that the maximum relative measurement error is 5.6%. The proposed method can successfully acquire and stitch the threaded surface with multi-view and three-dimensional contours, and realize the three-dimensional holographic display of rotary parts.

Key words holography; digital holography; thread surface; contour stitching; particle swarm algorithm; three-dimensional display

OCIS codes 090.1995; 100.2000; 100.3010

1 引言

目前获得物体三维轮廓的光学方法有机器视觉、光栅投影法、光学三角法、光刀扫描法及光学干

涉计量法等^[1-6]。机器视觉法可用于三维物体的轮廓识别以及位置、形状分析, 但具有精度不高、计算耗时等缺点; 光栅投影法的测量精度高且速度快, 但需要光栅投影机, 还需要进行相位展开运算, 运算过

收稿日期: 2019-07-07; 修回日期: 2019-08-14; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(11272368, 51875068)

* E-mail: yangyan@cqut.edu.cn

程复杂,易受外界因素影响;光学三角法虽然具有计算简单、对应用环境要求不高的优点,但其测量对象为点,因此,测量效率较低,为得到三维轮廓必须增加辅助的扫描装置;刀扫描法实际为线扫描测量法,适合大型物体的测量,测量精度高,效率较高,但要获得三维轮廓仍需要配合一维扫描装置;光学干涉计量法,如经典干涉、全息干涉、散斑干涉和云纹干涉等,已成为测量变形、形状的常用手段。由于通常记录的是干涉光场的强度,而与被测物理量直接相关的常是隐含其中的光学相位,因此需要从光强分布中提取相位信息。上述方法各有优势和缺陷,每种方法涉及的原理、所需硬件、测量效率、测量精度各有不同,根据被测对象的实际要求而定,相比较而言,数字全息测量方式更为简单,对于装置的要求较低,可以实现非接触式、无损定量检测。近年来随着计算机和电荷耦合器件(CCD)的发展,基于数字全息的三维物体显示也得到相应的发展。北京邮电大学桑新柱等^[7]在三维显示方面有深入的研究,认为全视差光场显示和全息显示是未来三维光显示发展的方向。Yamaguchi 等^[8-9]采用相移数字全息方法获得了物体的三维轮廓,该方法消除了共轭像和零级像,可以测量十几毫米大小的物体,但对环境的稳定性要求很高,而且需要高精度的相移器。2018年,同济大学张小兵等^[10]利用数字全息测量技术实现了对密封平面表面形貌的在线测量,并实现了对工业现场测量结果的可视化显示。2018年,王凤鹏等^[11]利用同轴-离轴复合数字全息方法对复杂物体实现了高分辨率成像。数字全息中,可以采用双光源法或倾斜照明光法^[12-15],通过计算前后两幅再现像的相位差得到物体的三维形貌,实现三维显示。但是,在目前的测量过程中,主要存在以下两个问题:第一,测量弱漫反射物体时,由于其物光强度低,因而重建像对比度差,难以在重建像平面上准确定位物体+1级像,影响后续干涉相位图的获取;第二,受 CCD 阵列

尺寸和像素总数的影响,其成像视角受限,因此需要采用一些额外的方法实现多视角轮廓的融合。

在研究漫反射物体离轴数字全息重建过程的基础上,针对弱漫反射物体发出的物光强度低、对比度差、物体+1级像在重建平面内的位置无法准确定位的问题,本文提出了一种针对漫反射物体的重建像位置预标记方法。通过改变照明光倾角方式,并结合 FIMG4FFT 方法,获取特定视角下的物体三维轮廓。对一个由两个量块组成的高度差为 9 mm 的物体进行了实验验证,采用该预标记方法获得漫反射物体的三维形貌,其高度测量误差在 0.1~0.5 mm 之间,即最大相对测量误差为 5.6%。另外,数字全息因受 CCD 阵列尺寸和像素总数的影响,其成像视场受到制约,考虑采用拼接的方法扩大视角。拼接的方法在平面型三维物体上应用较多,但在回转类三维物体上应用较少。回转类三维物体采用圆柱坐标系下的多孔径拼接技术,该技术涉及非线性问题的求解,提出采用粒子群算法将非线性方程组的求解问题转化为优化问题,从而求解多个视角轮廓的拼接参数以实现拼接,进行三维显示,最后采用机械零件中比较典型的回转类三维物体螺栓上的螺纹表面进行实验验证。

2 基本原理

2.1 FIMG4FFT 波前重建方法

数字全息重建的一次快速傅里叶变换(1-FFT)计算法中,再现像在重建平面上所占面积较小^[16]。为了得到较高质量的重建图像,可采用像面滤波技术^[17],在 1-FFT 重建像平面内仅框选重建像,再通过重建像周围的补零操作、衍射逆运算以及角谱衍射方法等,最终得到高质量的数字全息重建像。该方法需要进行 4 次 FFT 计算,简称 FIMG4FFT 法^[18-20]。1-FFT 重建像平面的光波场可用菲涅耳衍射积分表示为^[16]

$$U(x, y) = \frac{\exp(jkz_0)}{j\lambda z_0} \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x_i^2 + y_i^2)\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ I(x, y) \exp\left[\frac{jk}{2z_0}(x^2 + y^2)\right] \right\} \exp\left[-2\pi j\left(\frac{x_i}{\lambda z_0}x + \frac{y_i}{\lambda z_0}y\right)\right] dx dy, \quad (1)$$

式中: λ 为光的波长; $k = 2\pi/\lambda$; z_0 为物距; $I(x, y)$ 为数字全息图; (x_i, y_i) 为重建像坐标。得到 1-FFT 重建像后,利用像面滤波技术,框选得到无干扰的数字全息再现像,将框选区域移到像的中

央,对其进行周边补零后通过逆衍射得到 $z = 0$ 平面无干扰的数字全息图,利用重建波面半径为 z_0 的球面波照射,无干扰的数字全息图经距离 z_i 传播后的光波场为

$$U_i(x, y) = F^{-1} \{ F [\omega(x, y)U^*(x, y)R_c(x, y)] \exp [jkz_i \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)}] \}, \quad (2)$$

式中： F 表示 FFT； $R_c(x, y) = \exp \left[\frac{jk}{2z_c}(x^2 + y^2) \right]$ 为球面波； $\omega(x, y)$ 为全息图的窗口函数； $U^*(x, y)$ 为像平面上框选截取的物体局部图像所对应的 $z=0$ 平面的物光场； f_x, f_y 为 x, y 相对应的频域坐标。

重建距离 z_i 需满足

$$z_i = 1 / (1/z_0 - 1/z_c - 1/z_r), \quad (3)$$

式中： z_r 为参考光波面半径。

通过角谱衍射 [(2) 式] 得到放大率为 $M = z_i/z_0$ 的物光场的重建像。若选择合适的放大率, 使 $MD_0 < L$, 则可以让重建物光场在重建平面中 [16, 20]。李俊昌等 [17] 研究表明当放大率满足

$$M = \frac{L^2}{\lambda z_0 N_s} \quad (4)$$

时, 可完整重建物体的像。(4) 式中 N_s 为 1-FFT 像平面上的滤波窗宽度, L 表示全息图的宽度, D_0 表示物体的宽度。

2.2 圆柱坐标下的拼接模型及求解

因视角关系, 对整个三维零件的图像采集和显示, 不能一次完成, 只能通过拼接完成 [21-22]。因

为圆柱坐标系下相邻区域之间是旋转关系, 所以求解相邻两个视角之间的相对位置关系时需要求解非线性方程组的最小二乘解, 求解过程复杂。旋转时, 由于机械设备存在一定的运动误差, 所以从一个视角运动到下一个视角时, 相邻重叠区域之间出现不重合的现象, 这时坐标原点和轴之间均发生了偏移。坐标轴不重合的圆柱坐标系如图 1 所示。

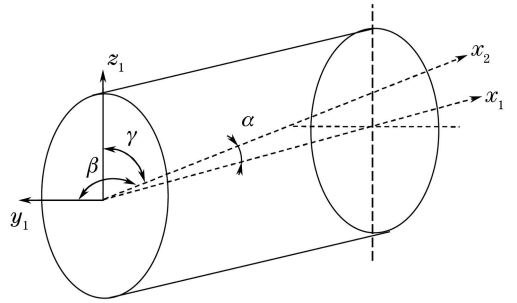


图 1 坐标轴不重合的圆柱坐标系

Fig. 1 Two cylindrical coordinates with uncoincident axes

为研究偏移, 将圆柱坐标系中的两个圆面投影在某一 x 为常数的平面上, 即两个不同心的圆, 两个圆心之间的距离 (ρ'_0) 和方位角 (θ'_0) 可表示为

$$\rho'_0 = \sqrt{(\rho_0 \sin \theta_0 + x_1 \cos \beta / \cos \alpha)^2 + (\rho_0 \cos \theta_0 + x_1 \cos \gamma / \cos \alpha)^2}, \quad (5)$$

$$\theta'_0 = \arctan \left(\frac{\rho_0 \sin \theta_0 + x_1 \cos \beta / \cos \alpha}{\rho_0 \cos \theta_0 + x_1 \cos \gamma / \cos \alpha} \right), \quad (6)$$

式中： ρ_0, θ_0 分别表示 $x_1=0$ 的平面上两个圆柱与该平面相交形成的两个圆的圆心之间的距离和方位角。(5) 式和 (6) 式出现的方位关系如图 2 所示。

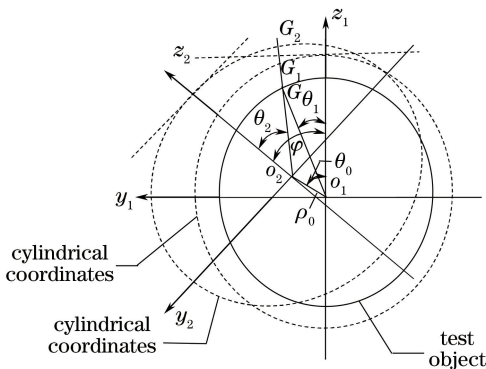


图 2 圆柱坐标系下的坐标变换关系

Fig. 2 Coordinate transformation relations in cylindrical coordinate systems

根据两个重叠区域, 利用圆柱坐标系之间的几何关系, 可以得到两个坐标系之间的变换关系为

$$\begin{cases} \rho_1 = \sqrt{\rho_2^2 + \rho_0^2 - 2\rho_2\rho_0\cos(\theta_2 - \theta'_0 - \varphi)} \\ \theta_1 = \arcsin [(\rho'_0/\rho_1)\sin(\theta'_0 - \theta_2 - \varphi)] + \theta_2 + \varphi, \\ \rho_1 = f(\theta_1, x_1) \end{cases} \quad (7)$$

式中： φ 是两个坐标系之间绕 x_1 轴的转角； ρ_1 和 ρ_2 分别表示物体在圆柱坐标系下第一个视角和第二个视角下的半径； θ_1 和 θ_2 分别表示物体在圆柱坐标系下第一个视角和第二个视角下的方位角。

为减小噪声的影响, 选取重叠区域的若干点代入 (6) 式, 形成非线性方程组, 求解其最小二乘解, 得到参数 ρ_0, θ_0 以及方向余弦 ($\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$), 通过坐标变换将各个视角 (局部坐标系下的测量结果) 转换到全局坐标系下, 达到多视角拼接的目的。该

模型的主要缺点为方程组存在严重非线性问题,使得求解过程复杂。为简化该过程,将优化算法中的粒子群算法引入圆柱坐标系的图像拼接中,将非线性问题转化为优化问题进行求解。

粒子群算法求解流程如图 3 所示^[23],首先是初始化群体,包括位置和速度,然后根据目标函数计算适应度,寻找个体最优和全局最优,更新位置和速度,满足终止条件停止迭代,否则返回寻找个体最优和全局最优。

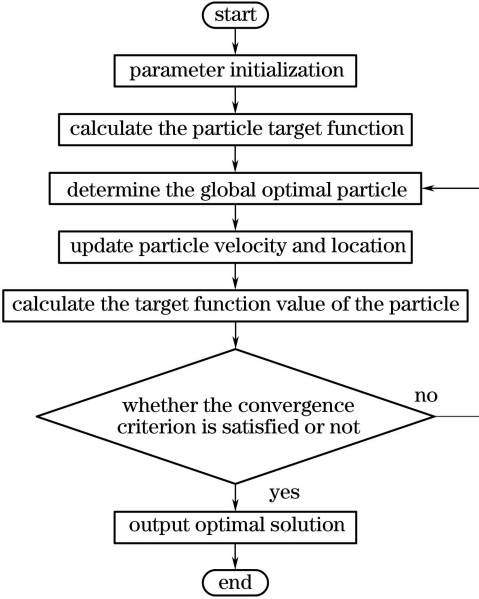


图 3 粒子群算法求解流程图

Fig. 3 Particle swarm optimization solution flow chart

理想情况下两个子孔径重叠区域的面形完全相同,但在实测过程中,机械运动误差导致两个子孔径重叠区域的面形不相等。假设重叠区域基准面形为 ρ_{base} ,与基准面形拼接的面形为 $\rho = f(\rho_0, \theta_0, \alpha, \beta)$,两者之间面形差值为^[23]

$$\Delta\rho = \rho_{base} - \rho. \quad (8)$$

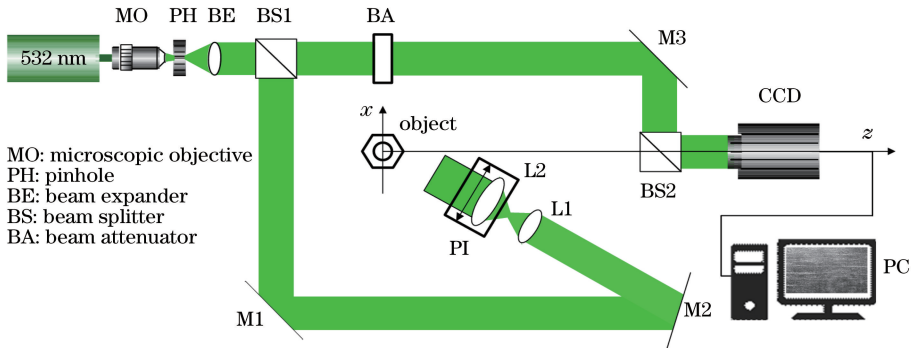


图 4 倾斜照明光测量实验光路图

Fig. 4 Experimental optical path of inclined illumination light measurement

为减小误差的影响,采用最小二乘圆柱的误差描述实际圆柱,最小二乘圆柱表示从该圆柱到实际被测圆柱上各点的径向距离的平方和为最小值。

理论上来说若重叠区域完全相同,则面形差值为 0,但一般情况下不可能为 0,所以建立的目标函数为重叠区域的面形差值最小,即

$$\min \Delta\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta\rho_i^2}, \quad (9)$$

式中: N 为重叠区域点的个数; $\Delta\rho_i$ 为第 i 个重叠区域的面形差。当 $\Delta\rho$ 趋近于最小值 0 时,对应的 $(\rho_0, \theta_0, \alpha, \beta)$ 即为(8)式的解。

对于粒子群算法的关键参数选择可以基于文献^[24]得出。 c_1, c_2 都不为 0 时称为完全型粒子群算法,该取值更容易保持收敛速度和搜索结果的均衡,所以实验设置 c_1, c_2 取 $[0, 1]$ 的随机数。当 $\omega \in [0.8, 1.2]$ 时收敛速度提高,当 $\omega > 1.2$ 时收敛失败^[25],所以实验取 ω 为 0.96。

3 实验

3.1 实验装置

图 4 是利用离轴菲涅耳数字全息系统光路并使用倾斜照明光法测量物体三维形貌的光路图,图 5 为实物图。BS1 和 BS2 为分束镜,M1、M2、M3 均为反射镜,BA 为光束衰减器,L1、L2 为透镜,L1 的焦距为 100 mm,L2 的焦距为 200 mm,L2 装在高精度精密位移平台 PI 上,其平移精度为 $20 \mu\text{m}$,可以沿垂直于照明光的方向垂直移动,使得照明光的角度发生微小的改变。激光器发出的光经扩束准直系统 BE 后成为均匀的平行光,平行光被分为两路:一路光经过 BA 和 M3 后作为参考光;另一路经过 M1、M2 反射后,先经过 L1 的聚焦再经过装在 PI 上的 L2 准直后,照向物体,CCD 接收物体表面反射的散射光。

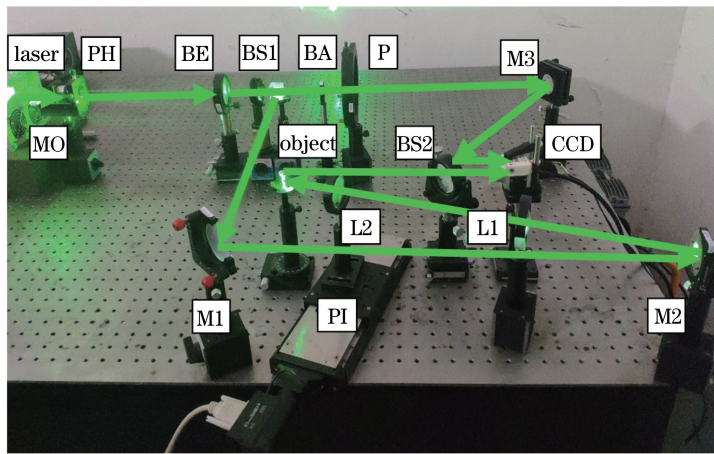


图5 倾斜照明光测量实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for measuring inclined illumination light

实验采用波长为 532 nm 的绿光激光器,采用的 CCD 的像素数为 2748 pixel(H) × 3664 pixel(V),像元大小为 1.67 μm,则像素尺寸为 4.6 mm(H) × 6.1 mm(V)。照明光倾斜角 $\theta = 11^\circ$,记录距离为 290 mm, L2 在 PI 上的移动距离为 30 μm,则照明光倾斜角的改变量为 $\Delta\theta \approx 0.0086^\circ$ 。

3.2 镜面反射和漫反射对重建像质量的影响

实验采用螺母和螺柱搭配的情况,螺母旋在螺柱上并一起被固定在旋转位移台上,旋转位移台固定在气动台上。由于螺母表面存在镜面反射和漫反射的情况,影响重建图像的质量,而重建图像的质量高低直接影响后面干涉条纹图像的质量,从而影响三维形貌的测量。由于漫反射物体的重建图像质量较低,对比度差,即使采用像面滤波技术也难以找到

物体在 1-FFT 平面上所成的像。图 6 分别给出利用螺母镜面反射和漫反射的光在 1-FFT 平面上所成像的效果以及像面滤波后角谱重建的结果,可以看到漫反射物体在 1-FFT 平面上所成的像很不清晰,所以提出 1-FFT 重建像平面 +1 级像的标记方法。实验中,考虑先利用螺母镜面反射的光进行重建,很容易找到 1-FFT 重建像平面 +1 级像的位置,再旋转螺母,使镜面反射的光远离 CCD,使螺母漫反射的光进入 CCD,因为螺母固定在旋转台上,只进行旋转,其空间位置没有改变,所以参考光的角度也没有改变,因此在 1-FFT 重建像平面上相同的位置得到物体漫反射的 +1 级重建像。图 7 为 1-FFT 重建像平面 +1 级像标记方法的流程图。

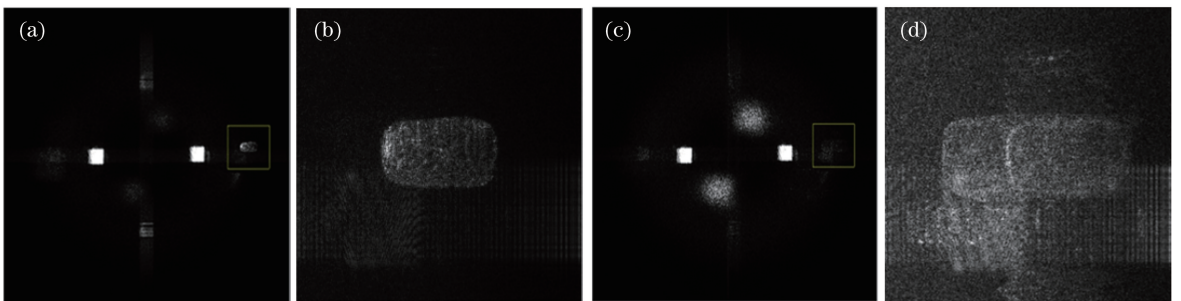


图6 镜面反射和漫反射的再现结果。(a)镜面反射在 1-FFT 面上结果;(b)镜面反射像面滤波后重建结果;(c)漫反射在 1-FFT 面上结果;(d)漫反射像面滤波后重建结果

Fig. 6 Reconstruction results of specular and diffuse reflection. (a) Result of specular reflection on 1-FFT plane; (b) reconstruction of specular reflection image after filtering; (c) result of diffuse reflection on 1-FFT plane; (d) reconstruction of diffuse reflection image after filtering

图 8 对镜面反射和漫反射的重建像进行分析,可以看到若镜面反射强时重建的像只可以看见螺母的一个面,若镜面反射的光逐渐减弱时,可以看到利

用漫反射重建的螺母效果明显较好,重建像质量的好坏直接影响相位差图像质量的好坏,因为相位差图像产生的条纹由两幅重建像的相位相减得到,进

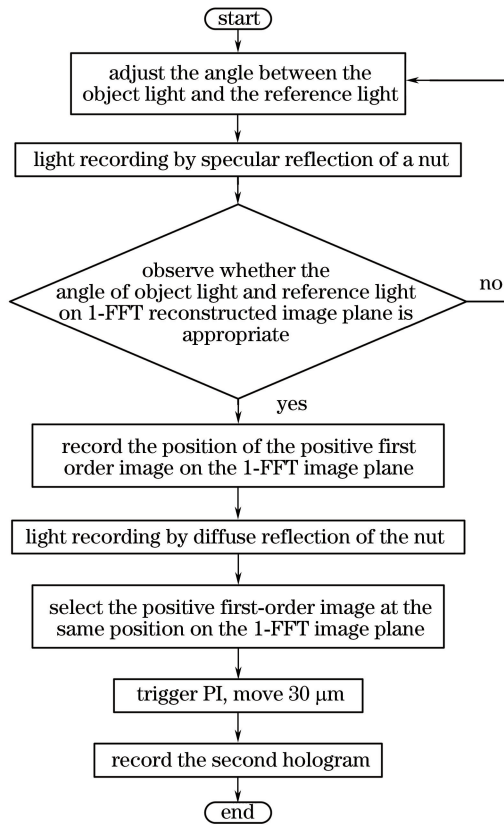


图7 1-FFT重建像平面+1级像标记方法的流程

Fig. 7 Flow of +1st-order image marking method on the 1-FFT reconstructed image plane

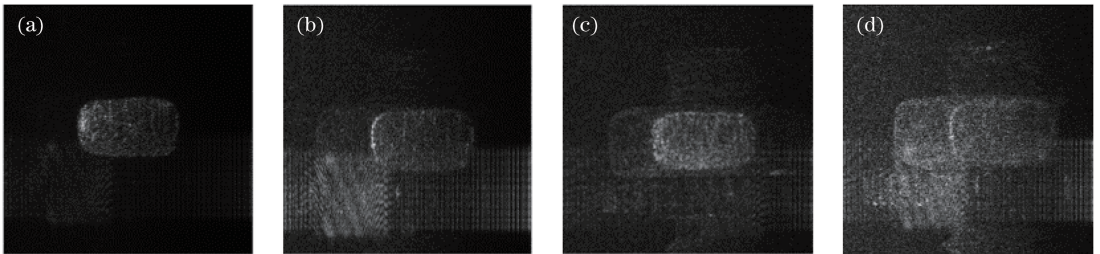


图8 镜面反射逐渐减弱的效果。(a)镜面反射强;(b)镜面反射减弱;(c)同时存在;(d)漫反射

Fig. 8 Effect of gradual specular reflection weakening. (a) Strong specular reflection; (b) weakened specular reflection;

(c) simultaneous existence; (d) diffuse reflection

而影响相位图的质量。

3.3 高度测量误差的标定

为了估计数字全息倾斜照明光法高度测量误差的大小,实验先采用两个量块组合成一个高度为9 mm的阶梯形物体,相当于用两个平行平面组成一个高度差为9 mm的物体,如图9所示,为了使两个量块能够合在一起,在其中一个量块的背面吸住一块磁铁,再采用倾斜照明光法进行测量。

先拍摄照明光倾斜前后的两幅数字全息图,再分别进行重建获得1-FFT重建像,利用像面滤波技术得到无干扰的FIMG4FFT重建图像,将照明光倾斜前后的相位图像相减得到相位差图像,去掉与 x 有关

的线性倾斜项,再对其进行滤波。图10(a)~(f)依次是通过倾斜照明光法获得的其中一幅全息图、1-FFT重建像、FIMG4FFT重建图像、相位差图像、去除线性倾斜项后的图像、去噪之后的图像。

为了便于直观显示,取出高度差部分进行分析,图10(f)中矩形框和矩形框中的线条对应的轮廓图像如图11和图12所示。

由图12可以看到,两平面之间的高度差 Δh 约为8.891 mm。为了获得较为准确的实验结果,在相位图像中又随机选取四个位置的相位曲线,得到其高度测量误差范围为0.1~0.5 mm,即最大相对测量误差为5.6%。

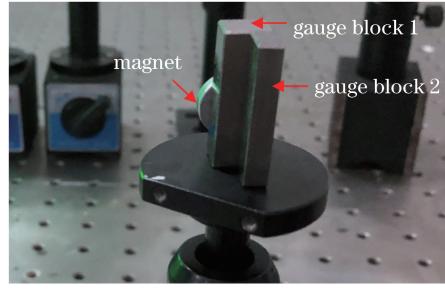
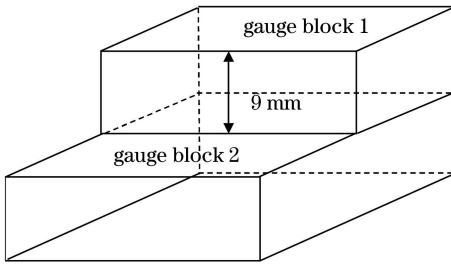


图 9 两个量块组合成一个高度差为 9 mm 的物体

Fig. 9 One object with a height difference of 9 mm, combined by two gauge blocks

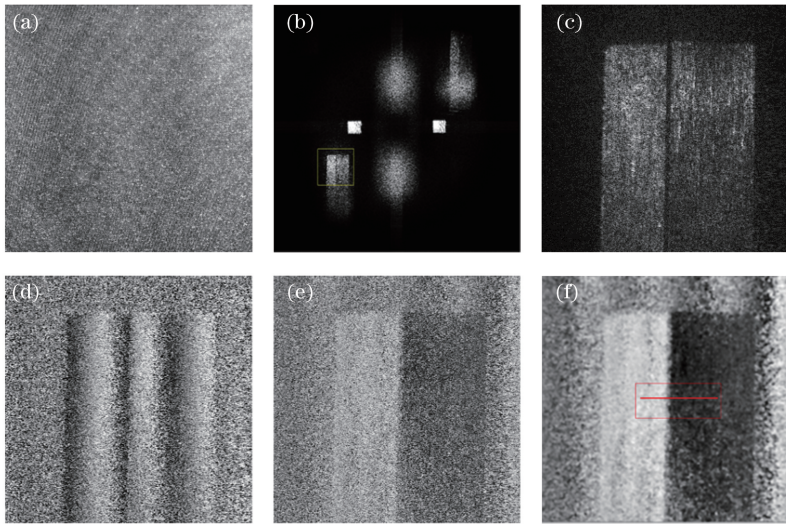


图 10 倾斜照明法测量量块高度。(a)数字全息图;(b) 1-FFT 重建像;(c) FIMG4FFT 重建图像;
(d) 相位差图像;(e) 去除线性倾斜项的图像;(f) 去噪之后的图像

Fig. 10 Height of measuring block by inclined illumination method. (a) Digital hologram; (b) 1-FFT reconstruction image; (c) FIMG4FFT reconstruction image; (d) phase difference image; (e) image with linear tilt terms removed; (f) image after denoising

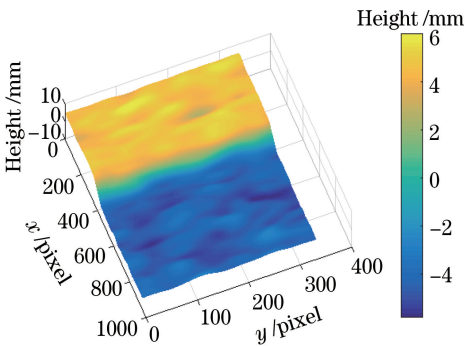


图 11 图 10(f)中矩形框对应的轮廓图像

Fig. 11 Contour image of the box in Fig. 10(f)

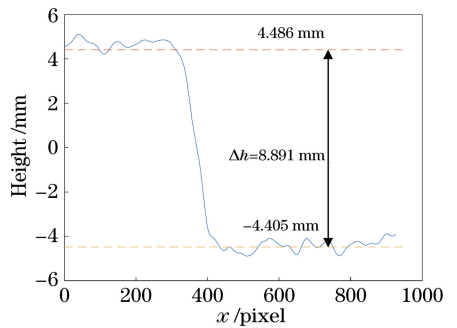


图 12 图 10(f)中线条对应的曲线

Fig. 12 Curve corresponding to the line in Fig. 10(f)

3.4 回转型三维物体轮廓获得及拼接

对螺母下面的螺纹部分即双头螺柱进行数字全息三维测量和拼接,螺柱的尺寸大小为 M6。因为螺柱类似于圆柱体,所以单个视角可以拍摄得到螺柱一半的面积,也就是对应的圆周角为 180° 。拍摄

整个螺柱需记录四次,即在 0° 视角下拍摄得到第一个视角下的图像,旋转台转动 90° 拍摄得到第二个视角下的图像,两个视角下的重叠区域对应的圆周角为 90° ,即重叠区域为 50%。图 13 是倾斜照明法测量双头螺柱的轮廓,先拍摄得到照明光倾斜前后的两幅全息图,再通过菲涅耳衍射积分的 1-FFT

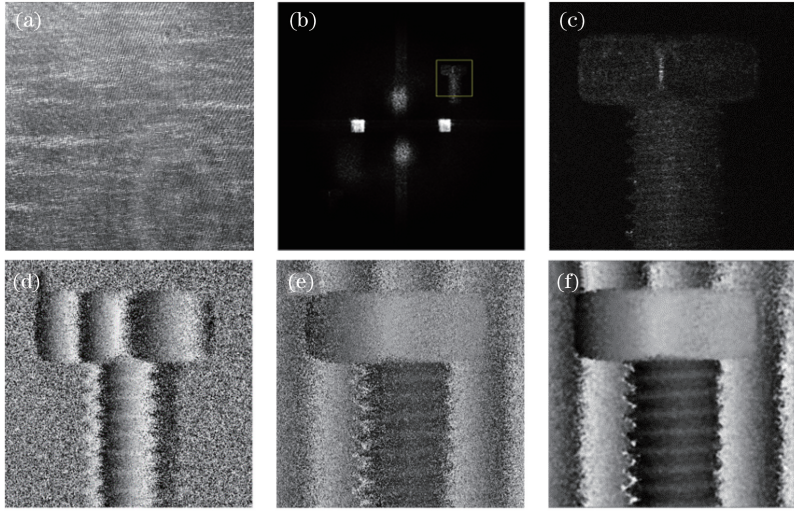


图 13 倾斜光照法测量双头螺柱的轮廓。(a)数字全息图;(b) 1-FFT 重建像;(c) FIMG4FFT 重建图像;
(d)相位差图像;(e)去除线性倾斜项的图像;(f)去噪之后的图像

Fig. 13 Stud contour measured by inclined light illumination method. (a) Digital hologram; (b) 1-FFT reconstruction image; (c) FIMG4FFT reconstruction image; (d) phase difference image; (e) image with linear tilt terms removed; (f) image after denoising

得到 1-FFT 重建像平面上的图像,接下来针对像面滤波后角谱重建的结果,即 FIMG4FFT 重建图像,将两幅相位图像相减得到相位差,去除线性倾斜项,

最后进行滤波去噪。图 14 是各个视角下螺柱的三维再现相位分布,图 15 是拼接后螺柱的三维形貌,可以看到效果较好。

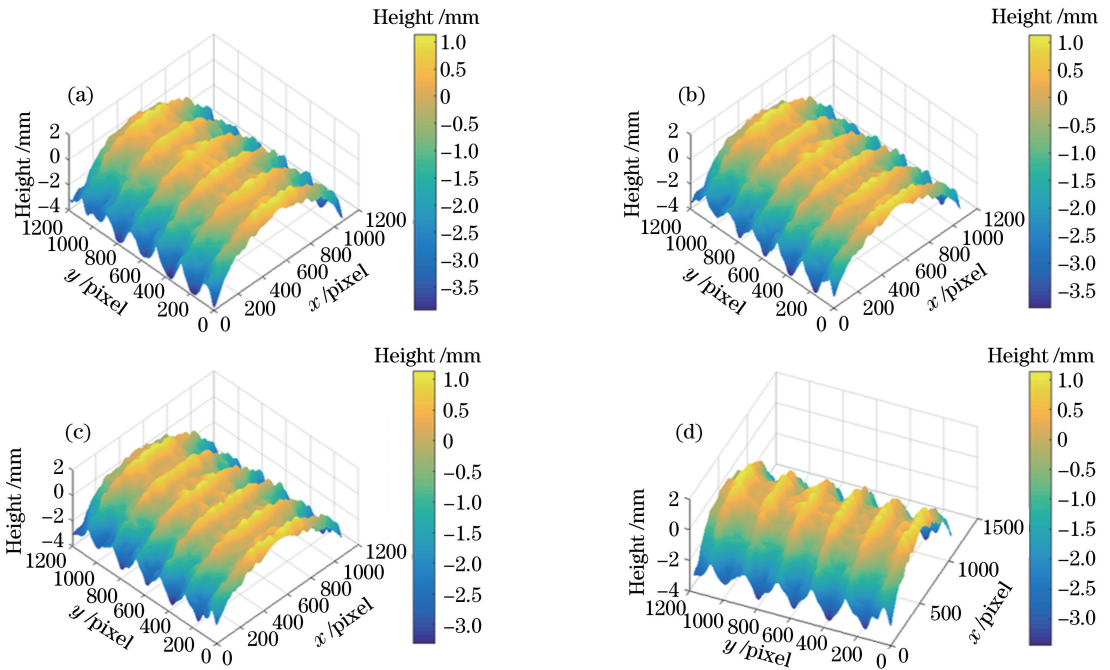


图 14 螺柱每个视角下的三维相位分布。(a) 0°;(b) 90°;(c) 180°;(d) 270°

Fig. 14 Three-dimensional phase distribution of studs at each viewing angle. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°

4 结 论

针对弱漫反射物体发出的物光强度低,重建像对比度差,开展像面滤波时无法对+1级像进行准

确定位的问题,提出了一种针对弱漫反射物体在重建平面内的重建像位置预标记法。先将物体上某个特定区域的镜面反射光作为物光,获得全息图,并对+1级重建像所在区域进行预标记;不改变物体位

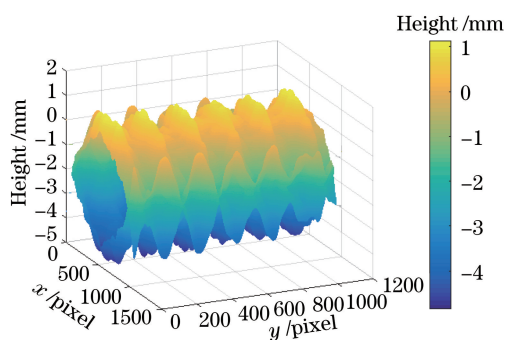


图 15 螺柱拼接后三维形貌图

Fig. 15 Three-dimensional topography after stud splicing

置,再对物体的漫反射面发出的物光进行全息记录,并在重建像平面的原预标记区域提取弱漫反射物体的重建像。利用该方法对螺柱进行了记录和重建,经过全息图记录、1-FFT重建、FIMG4FFT重建、计算相位差、去除线性倾斜项、滤波去噪和相位解包裹等步骤获得了特定视角的三维轮廓。通过误差标定实验证明,最大相对测量误差为5.6%。获得多个视角的三维轮廓后,提出利用粒子群算法将非线性方程组的求解问题转化为优化问题求解拼接参数,成功地对螺栓上的螺纹表面进行多视角三维轮廓的拼接,实现了回转类零件的三维全息显示。

参 考 文 献

- [1] Li B, Luo Y P, Wang Z, et al. Study on the rapid measuring method of multi light-knife for 3D profile [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(6): 738-741.
李兵, 罗意平, 王昭, 等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究[J]. 光子学报, 2003, 32(6): 738-741.
- [2] Li F, Zhou C L. A novel profilometry with dual-frequency grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(4): 632-635.
李方, 周灿林. 一种新的双频光栅轮廓术[J]. 光子学报, 2005, 34(4): 632-635.
- [3] Sun P, Zhang L, Tao C X. 3-D shape measurement with Fourier transform based on LCD projector [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(8): 1250-1252.
孙平, 张丽, 陶春先. 基于LCD数字投影技术的傅里叶变换法测量物体三维形貌[J]. 光子学报, 2005, 34(8): 1250-1252.
- [4] Yuan C J, Zhai H C, Wang X L, et al. Three-dimensional surface contouring of reflecting micro-object by digital holography with short-coherence light source [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 218-223.
袁操今, 翟宏琛, 王晓雷, 等. 采用短相干光数字全

息术实现反射型微小物体的三维形貌测量[J]. 物理学报, 2007, 56(1): 218-223.

- [5] Deng X T, Gao N, Zhang Z H. Calibration of system parameters based on direct phase measuring deflectometry [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061204.
邓小婷, 高楠, 张宗华. 基于直接相位测量术的系统参数标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061204.
- [6] Liu K, Wang J, Yo S H. Unidimensional scalable method for structured light projection of 3D measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061202.
刘凯, 王江, Yo S H. 三维测量结构光一维编码投影机设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061202.
- [7] Sang X Z, Yu X B, Chen D, et al. Research progress on three-dimensional optical display technology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050006.
桑新柱, 于迅博, 陈铎, 等. 三维光显示技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050006.
- [8] Yamaguchi I, Zhang T. Phase-shifting digital holography [J]. Optics Letters, 1997, 22(16): 1268-1270.
- [9] Yamaguchi I, Kato J I, Ohta S. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography [J]. Optical Review, 2001, 8(2): 85-89.
- [10] Zhang X B, Liu H J. Measurement and model reconstruction of topography of sealing plane based on digital holography [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0912001.
张小兵, 刘海江. 基于数字全息的密封平面表面形貌测量及其模型重建[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912001.
- [11] Wang F P, Wang D Y, Wang Y X, et al. In-line and off-axis hybrid digital holography for high resolution imaging of complex shape objects [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6): 0609001.
王凤鹏, 王大勇, 王云新, 等. 复杂物体离轴-同轴复合数字全息高分辨率成像[J]. 中国激光, 2018, 45(6): 0609001.
- [12] Jia F, Feng Z Y, Zhou L B, et al. Three dimensional surface shape measurement of big objects by pre-imaging digital holography [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(11): 2239-2243.
贾昉, 冯忠耀, 周利斌, 等. 预成像数字全息测量大物体三维形貌[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2239-2243.

- [13] Guo X M, Chen C, Wang W S, et al. Three-dimensional shape test based on digital holography [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science), 2015(1): 34-38.
郭晓明, 陈晨, 王文生. 基于数字全息的三维面形测试[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015(1): 34-38.
- [14] Pedrini G, Fröning P, Tiziani H J, et al. Shape measurement of microscopic structures using digital holograms [J]. Optics Communications, 1999, 164 (4/5/6): 257-268.
- [15] Feng Z Y, Jia F, Zhou J H, et al. Three-dimensional surface shape measurement of big objects by image splicing in digital holography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 2017-2021.
冯忠耀, 贾昉, 周景会, 等. 数字全息中利用图像拼接测量大物体的三维形貌[J]. 中国激光, 2008, 35 (12): 2017-2021.
- [16] Picart P, Leval J. General theoretical formulation of image formation in digital Fresnel holography [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(7): 1744-1761.
- [17] Li J C, Song Q H, Gui J B, et al. Research of image plane filtering technique in digital holographic wavefront reconstruction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900135.
李俊昌, 宋庆和, 桂进斌, 等. 数字全息波前重建中的像平面滤波技术研究[J]. 光学学报, 2011, 31 (9): 0900135.
- [18] Li J C, Peng Z J, Tankam P, et al. Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2011, 28(6): 1291-1296.
- [19] Li J C, Song Q H, Pascal P, et al. Discussion of wavefront reconstruction algorithm of off-axis digital holography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (2): 0209008.
李俊昌, 宋庆和, Pascal P, 等. 离轴数字全息波前重建算法讨论 [J]. 中国激光, 2014, 41 (2): 0209008.
- [20] Li J C. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0501001.
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0501001.
- [21] Cheng W M, Chen M Y, Ding Z, et al. Surface testing for 3D object using multiaperture connection in cylindrical coordinates [J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(6): 811-815.
程维明, 陈明仪, 丁峥, 等. 圆柱坐标下的多孔径拼接测量三维面形 [J]. 光学学报, 1999, 19(6): 811-815.
- [22] Guo H W. 360° profilometry by multi-aperture overlap-scanning technique [D]. Shanghai: Shanghai University, 2001.
郭红卫. 多孔径拼接技术实现 360°面形测量 [D]. 上海: 上海大学, 2001.
- [23] Shui Y X, Hu L, Dai Y H, et al. Research on 3D object contour fusion technology based on digital holography [J]. Laser Journal, 2019, 40(11): 42-48.
税云秀, 胡琳, 戴姚辉, 等. 基于数字全息的三维物体轮廓融合技术研究 [J]. 激光杂志, 2019, 40(11): 42-48.
- [24] Bian F. Research and application of particle swarm optimization on TSP [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
卞锋. 粒子群优化算法在 TSP 中的研究及应用 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [25] Shi Y, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer [C] // 1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98TH8360), May 4-9, 1998, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE, 1998: 69-73.