

一种基于多次反射像的三维测量方法

徐顺雨, 徐晓*

华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510641

摘要 采用多目结构光对金属类物体进行三维测量时,由于反射光强随角度变化极大,各相机获得的结构光图像会有明显差异,从而降低了图像的匹配程度;在某些反射强烈的位置,杂散光甚至会造成线结构光无法测量的情况。此外,使用同一参数对图像进行匹配或处理时,在反射率和反射性能差别较大的材料同时出现的情况下,测量精度会比较差。针对上述问题,提出一种基于形成多次反射成像的结构光三维测量方法以及仪器标定方法。此方法通过建立多次反射像对应点的图像坐标与空间坐标的关系来解算结构光像点的空间坐标。实验结果表明,该方法在一定程度上克服了用结构光测量高反表面时遇到的亮度反差大和高反问题,其测量精度在本实验平台上达到了 ± 0.1 mm的工程要求。

关键词 测量; 结构光; 高反表面; 多次成像; 机器视觉

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1612001

A Three-Dimensional Measurement Method Based on Multiple Reflected Images

Xu Shunyu, Xu Xiao*

School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China

Abstract When multi-view structured light is used for three-dimensional measurement of metallic objects, the structured light images obtained by each camera exhibit obvious differences because the reflected light intensity significantly changes with the angle; thus, the degree of matching of images is reduced. At some locations with strong reflections, stray light can even render the measurement of line structured light impossible. Moreover, when the same parameter is used to match or process the image, the accuracy of the measurement is poor if materials with large differences in reflectivity and reflection performance are simultaneously encountered. To mitigate these problems, a three-dimensional structured light measurement method and an instrument calibration method based on the formation of multiple reflected images are proposed. The three-dimensional structured light measurement method solves the spatial coordinates of structured light image points by establishing a relation between the image and spatial coordinates of the corresponding points of the multiple reflected images. Experimental results indicate that to a certain extent, this method overcomes the problems of large brightness contrast and high reflectance encountered in structured light measurement of high-reflection surfaces. Moreover, the measurement accuracy in our experimental platform reaches the engineering requirement of ± 0.1 mm.

Key words measurement; structured light; high-reflection surface; multiple imaging; machine vision

OCIS codes 120.6650; 150.5670; 150.6910

1 引 言

测量物体三维形貌的光学非接触式测量方法主要分为光学探针法^[1]、光学干涉法^[2-4]、光学三角法^[5]和光栅编码法^[6-8]几种。而常用于高反材料表面测量的传统方法主要有基于多次曝光的测量方法、基于投射图案亮度调节的测量方法、基于条纹反

射的测量方法、基于极化的测量方法^[9]等。基于多次曝光的测量方法很难对曝光次数、每次曝光的时间及光圈大小进行快速有效的确定,往往需要花费较长时间^[10];基于投射图案亮度调节的测量方法需要设计投射条纹的编码、解码方式,运算量大且复杂^[11-12];基于干涉条纹或摩尔条纹的测量方法比较适合用于镜面反射的物体,但该方法对条纹图像的

收稿日期: 2020-04-03; 修回日期: 2020-04-22; 录用日期: 2020-05-06

* E-mail: physicsxuxiao@163.com

要求较高,导致对系统硬件的要求较高,且往往需要进行多次成像解算,过程复杂,在有振动的情况下取样比较困难^[6,13-19];极化方法只适用于测量非导体材料,改进后的极化方法能在一定程度上消除高光对相机的影响,但对较暗部分则难以测算^[20-21]。

随着图像处理技术的发展,近年来出现了一些新方法。一是结合双立体单眼结构光系统^[22]改善融合区域融合质量的方法,该方法可以在一定程度上解决反射表面的测量问题,但需要多相机、多图参与计算,增加了系统和计算的复杂程度。二是通过远心光学元件和远心同轴照明的光学路径,对带有反射标记的光滑表面的图像进行解算来实现三维重建的方法^[23],但该方法只能重建光滑表面,因为标记之间缺少测量值。三是自适应条纹投影方法,该方法利用非最小二乘法确定每个饱和像素的最大输入灰度级,再对投影出的条纹图案进行三维重建^[24],但该方法具有计算量大、环境条件要求高、需要多次投影而不适合动态取样的缺点。

在高反表面的三维测量过程中,为了解决亮度反差大、反射强烈部位亮度太高等问题,同时又要满足工程上简便、低成本的要求,本文提出了一种形成多次反射成像的结构光三维重建方法^[25],并展示了此方法的工程化装置和实验。该方法具有标定简单、一次成像、运算快速、成本低等特点,可以达到0.1 mm精度的常见工程要求,具有一定的实用性。尤其是一次成像即可进行测量这一特点,使得该方法获取信息的时间由一次成像的曝光时间决定,可应用于有较高动态要求的工业环境中。

本方法可使结构光的像在呈一定角度并近距离放置的半反半透镜反射面和平面镜之间多次反射,每一反射像再穿过半反半透镜的透射面到达相机,从而在像面上成多次像。在这些像对应的光线中,能进入相机的部分光线的角度相差较小,从而降低了角度变化带来的信息差异,使得各次成像的信息彼此正确匹配。此外,多次反射像的光强逐渐降低,限制了杂散光在多次像中的出现。由于每次反射像的光强都不同,因此在照射到不同反射率材料上的结构光多次像中,总有某几次可用于计算,从而有利于对反射特性不同的物体表面上结构光信息的提取。

本文使用的标定方法如下:用线结构光照射平整木块,通过建立在木块平面上的世界坐标系,得到木块平面上几个标志点的世界坐标;再利用带螺旋测微器的平移台前后移动木块,然后根据线激光照射到的木块标志点的空间坐标与图像坐标,推导出

两者之间的关系,就可以根据图像坐标求得结构光的空间坐标。

最后,本文通过对不同材料(包括金属)的定量测量,初步确定了该方法的检测范围和精度。

2 测量模型和方程的建立

2.1 实验平台

图1为本实验采用的实验平台的俯视示意图。如图1所示,平面镜与半反半透镜成一定角度放置,通过三维俯仰台调整两镜平面都垂直于水平基准面,相机光轴也调至与平面镜所在平面垂直。待测物体平行放置在相机左侧,线激光与待测面成 45° 入射,水平方向的激光线与水平基准面平行。

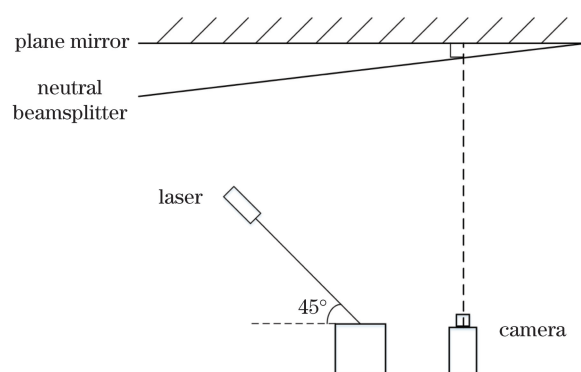


图1 实验平台示意图

Fig. 1 Experimental platform schematic

图2为实验平台的实际拍摄图。本实验使用MER-500-7UM/C工业相机(15 mm定焦低畸变镜头,红色十字线激光),其分辨率为 $2592 \text{ pixel} \times 1944 \text{ pixel}$ 。本实验未对激光的束散角进行精确测量,根据实测光条宽度和距离,估计激光远场束散角为0.0025 rad。为了减小外界环境光的干扰,本实验在黑暗条件下进行。在实验条件下,以 45° 斜入射在木块表面的光条的宽度为1.5 mm,光条在相机

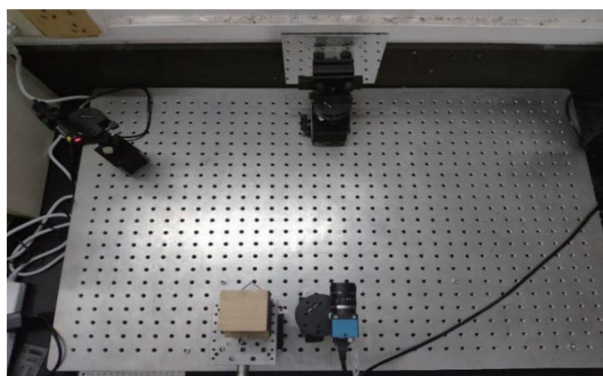


图2 实验平台实拍图

Fig. 2 Experimental platform real shot

中的成像宽度约为 7 pixel。

2.2 成像模型

图 3 所示为点 D_0 经过反射镜 M1 形成像点 D_1 , 再经过半反镜 M2 形成 D_2 , 并以此类推不断反射后生成的像点的俯视图, 两镜面之间的夹角为 θ 。图中的所有像点都在以 M1 与 M2 的交点 $A(X_0, 0, 0)$ 为圆心的圆上, 且在空间中均位于同一高度 (y 坐标相同)。图中的 z 轴与相机光轴重合, x 轴与像面水平线平行。可以证明, M1 上方点 (令其坐标的下标为 M) 的坐标满足如下递推关系 (i 表示第 i 次反射):

$$\begin{pmatrix} x_{M,i+1} - x_0 \\ y_{M,i+1} \\ z_{M,i+1} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ -\sin(2\theta) & \cos(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} x_{M,i} - x_0 \\ y_{M,i} \\ z_{M,i} \end{pmatrix}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

若直接采用以上模型, 则在进行测量前需要对该系统进行一系列的校正和计算, 要校正图 3 中的两镜之间的夹角、两镜面交线与相机光心的位置关系等, 而且对系统的调整有很高的要求。

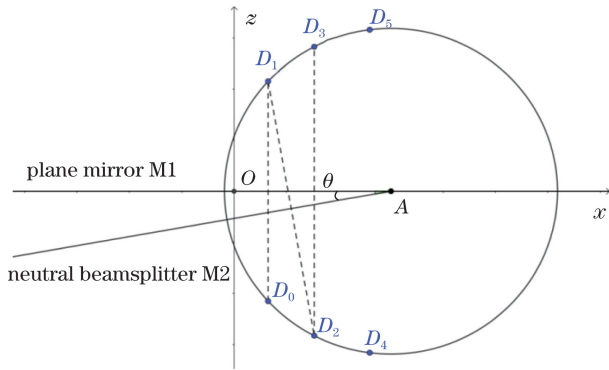


图 3 像点映射俯视图

Fig. 3 Top view of pixel mapping

为了简化运算和校正过程, 本文在上述方法的基础上提出了简化模型: 线结构光照射到物体上, 相当于空间中的一个平面与待测平面相交, 所成的像点就变成了空间两面交线上的一系列点通过理想相机模型后在像面上的投影。由于线激光的线性和激光切面的平面性, 若是使用针孔相机进行摄影, 则待测结构光上的点与投影到像平面上所成的像点之间的映射关系为线性关系。2.3 节中的图和计算得出的公式证明了这种关系的正确性。

2.3 坐标关系

如图 2 所示, 将表面平整且带有标记点的木块

放在配有螺旋测微器的平移台上。螺旋测微器的初始刻度在 10 mm, 以 1 mm 的步长向后平移, 每平移一次采集一次图片, 每次采集到的图片都类似图 4 所示, 只是每次光条的位置会有所移动。

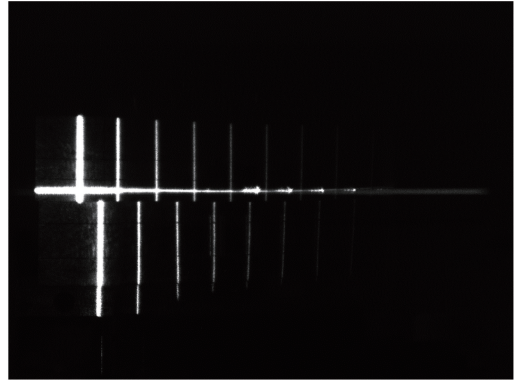


图 4 木块实拍图

Fig. 4 Real shot of wooden block

将像面坐标记为 (u, v) , 单位为 pixel。在调整时, 特意将激光十字的竖直方向调整为与像面的竖直方向 (v 方向) 平行, 实验中取前三根光条的中心线数据来推导坐标系的关系方程。由于光条亮度均匀且方向固定, 所以本实验采用重心法提取光条的中心线^[26], 计算公式为

$$\begin{cases} u_c = \frac{\sum_{i=1}^n g(u_i, v_i) \cdot u_i}{\sum_{i=1}^n g(u_i, v_i)} \\ v_c = \frac{\sum_{i=1}^n g(u_i, v_i) \cdot v_i}{\sum_{i=1}^n g(u_i, v_i)} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: u_c 为提取的中心点横坐标; v_c 为提取的中心点纵坐标; u_i 为图像横坐标; v_i 为图像纵坐标; $g(u_i, v_i)$ 为像素点 (u_i, v_i) 的灰度值; n 为参与计算的像素点的个数。

本文采用 3×3 窗口, 计算精度为小数点后四位, 提取后的某组中心线如图 5 所示。

提取完中心线后, 再根据木块上已经标有的 4 条水平线与光条中心的交点, 以及光条十字的中心, 确定每组光条的 5 个标志点的图像坐标 $(u_i, v_i), i = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

图像坐标确定后, 为方便起见, 如图 6 所示, 将受到照射的木块平面 $ABCD$ 记为 S 面。将世界坐标系的原点定在 S 面上的某个标志点 o 处。在木块位于初始位置 (即螺旋测微器刻度 10 mm 处) 时,



图 5 某组光条中心线

Fig. 5 Centerline of a group of light bars

o 点在竖直方向结构光的中心线上。将竖直方向定为 y 轴方向,与 y 轴垂直的方向定为 x 轴方向,而垂直于 S 面的方向(即木块平移方向)为 z 轴方向。如图 1 所示,由于激光的入射方向与 S 面的法线方向成 45° (木块后退的距离,与照射在木块表面的光条水平移动的距离之差可以忽略不计),因此每后退 1 mm,标志点的 x 、 z 坐标都同样增大 1 mm,同时 y 坐标保持不变。各标志点的初始坐标可由游标卡尺测量得出。根据上述规则便可确定各点每次移动后的世界坐标。

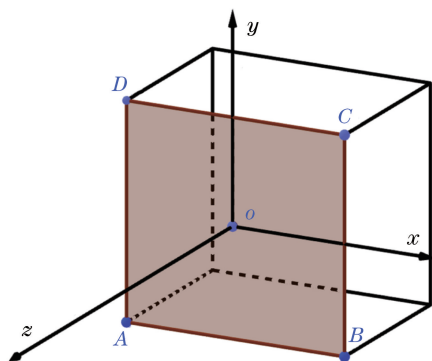


图 6 世界坐标图

Fig. 6 World coordinate

将在每条光条上采集到的图像坐标与世界坐标的数据点的 $u(x, z)$ 坐标和 $v(y, z)$ 坐标分别画出,第一组如图 7 所示,后两组的结果与第一组基本相同。

从图 7 中可以看出,图像坐标 (u, v) 与世界坐标 (x, y, z) 成明显的线性关系,由此证明了 2.2 节所提出的简化模型是成立的。

另外,由于激光沿 45° 入射,故在本实验精度范围内, x 坐标和 z 坐标相同。由于 x 、 z 坐标只与图像的横坐标 u 有关,而 y 坐标与 u 、 v 都有关,因此将各组数据分别导入 Excel 进行 x 、 z 坐标的线性

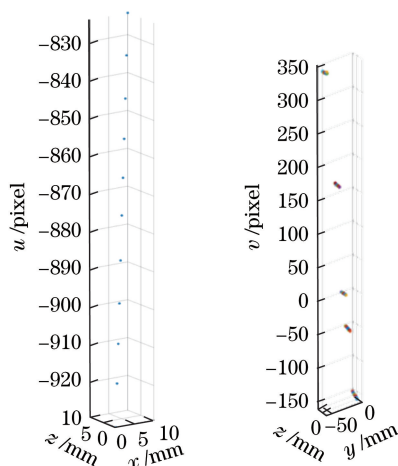


图 7 第一组 $u(x, z)$ 与 $v(y, z)$ 的坐标图

Fig. 7 $u(x, z)$ and $v(y, z)$ coordinate of first group

拟合以及 y 坐标的二元函数线性回归,得到各组的计算结果。第一组的分析结果如图 8 和表 1 所示。

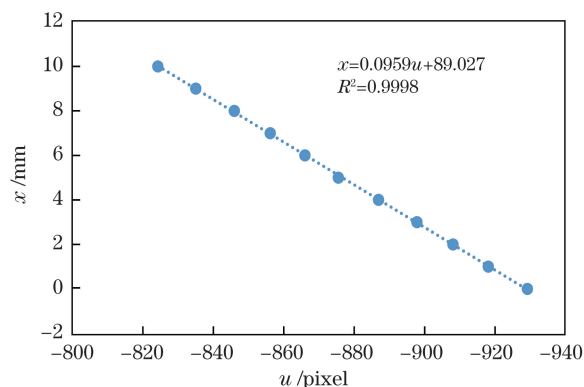


图 8 x 关于 u 的拟合结果

Fig. 8 Fitting result of x about u

表 1 y 关于 u 、 v 的线性回归结果

Table 1 Linear regression result of y about u and v

Intercept	Variable u	Variable v
-14.876	0.003568	-0.11492

因此得到该组光条的坐标对应关系为

$$\begin{cases} x = 0.0959u + 89.027 \\ y = 0.003568u - 0.11492v - 14.876, \\ z = 0.0959u + 89.027 \end{cases} \quad (3)$$

在后续实验中,对其余各组光条也进行同样的操作,便可得到所有各组光条的 (u, v) 坐标与 (x, y, z) 坐标的对应关系。

由图 8 可以发现,在 z 坐标所对应的 u 坐标为 $-920 \sim -880$ pixel 的位置,回归效果最好,其最大偏差不超过 0.7 pixel,即 z 的最大偏差不超过 0.067 mm。为了保证整个测量实验误差在 $-0.1 \sim 0.1$ mm 之间,将测量物体放置在 z 坐标为此段的

位置进行实验。

2.4 测量信息的处理方法

1) 对某一物体在结构光照射下获得的多次反射像进行摄影,并在摄影后对图像进行切割,把各次反射像分开;

2) 对分开的像求取中心线,然后根据激光的位置恢复出中心线对应的目标物上对应点的空间位置,该过程具体可参考 2.3 节;

3) 对求得的各反射像的目标位置进行平均,获得最后的结果,此结果即所要求取的目标的空间位置坐标。

3 测量与精度评估

3.1 不同材料的测量

在之前用于确定坐标关系方程的木块表面贴上厚度为 0.13 mm 的黑色胶带,将激光打在贴有胶带的部分。为了测量结果的准确性,用游标卡尺对胶带厚度进行了 8 次测量,测量结果如表 2 所示。8 次测量结果的平均值为 0.1025 mm,将其作为标准值。

表 2 胶带厚度的测量值

Table 2 Measured tape thickness

No.	Thickness /mm
1	0.08
2	0.11
3	0.12
4	0.08
5	0.12
6	0.11
7	0.13
8	0.07

如图 9 所示,照射在胶带上的光条与其他部分光条的亮度明显不同。通过测量胶带上方和下方与胶带部分在 z 方向的差距,就可以知道本方法在曝光强弱差距较大时的测量效果。

将图 9 中前三条光条分别经过中心线提取和坐标计算后的结果进行平均,得到的测量厚度值为 0.0987 mm,比 0.1025 mm 小 0.0038 mm。测量后的点的三维坐标图如图 10 所示,凸起部分即为贴胶带的位置。

以上是前三条较亮光条的测量结果。接下来对后三根较暗光条进行同样的测量,测量结果为 0.0959 mm,比 0.1025 mm 小 0.0066 mm。

为了验证在某一位置测量结果的重复性,保持

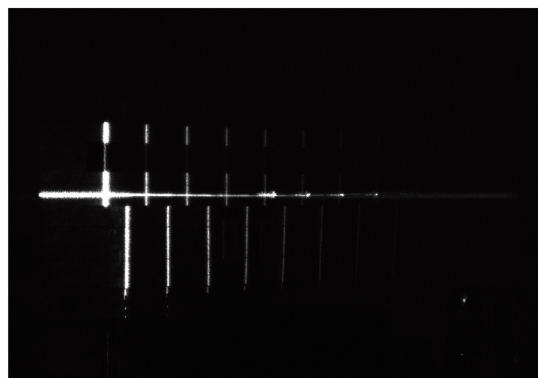


图 9 贴胶带木块的实拍图

Fig. 9 Real shot of wooden block with tape

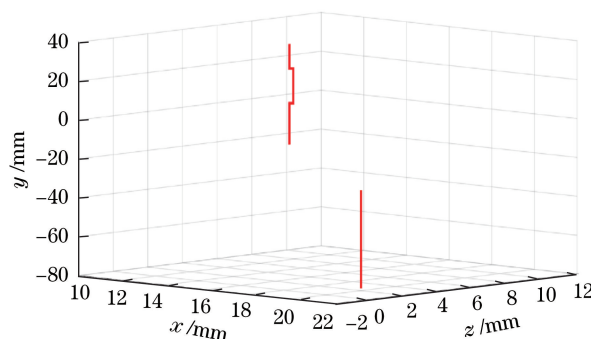


图 10 贴胶带木块的三维图

Fig. 10 Three-dimensional map of wooden block with tape
木块的位姿不变将其放在平移台上,旋转旋钮分别至刻度为 10,7,3 mm 三个位置。每个位置分别在不同的曝光时间下拍摄 10 幅图片,共采集 30 幅图片来测量计算胶带的厚度。

将上述三个位置的测量结果做成折线图,如图 11 所示,可以看出,每组的重复测量误差不超过 10 μm ,三组联合观察的重复测量最大误差为 10.8 μm 。经过计算,图 11 所示测量结果的均方根为 0.0035 mm。

为了进一步验证不同位置测量结果的重复性和准确度,将木块的摆放位姿(分为左偏和右偏)和平移台刻度位置(分别在 0,2,4 mm)都进行变化。3 个位置、2 种位姿的 6 种组合(如 0 mm 左偏、2 mm 右偏等)共产生 6 组结果,每组分别曝光采集 5 张图片,共 30 张图片,计算结果如图 12 所示。从图 12 中同样可以看出,每组的重复测量结果波动不超过 10 μm ,整体差距最大为 12 μm 。计算后可得图 12 中数据的均方根为 0.0035 mm。

再换金属块进行同样的实验。由于金属表面粘贴胶带部分的面积过小,不易测量胶带厚度,故沿用上文的 0.1025 mm 作为参考厚度。测得的胶带厚度为 0.0973 mm,比 0.1025 mm 小 0.0052 mm。

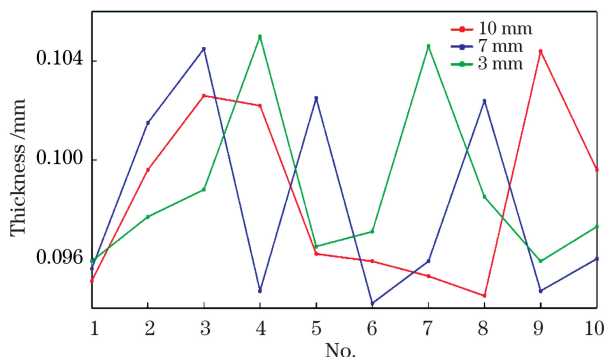


图 11 木块位姿不变情况下,不同位置处胶带厚度的测量结果

Fig. 11 Measured thickness of tape on wooden block at different positions with posture unchanged

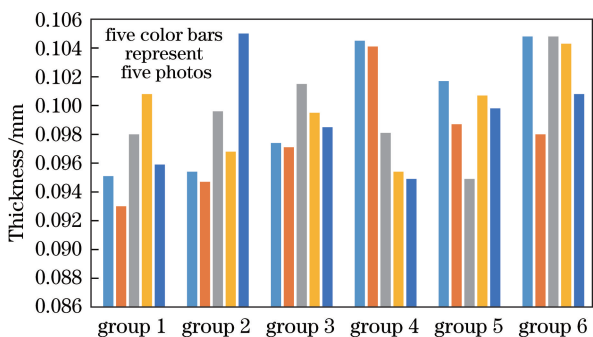


图 12 不同位置 and 不同位姿下,木块上胶带厚度的测量结果

Fig. 12 Measured thickness of tape on wooden block at different positions with posture changed

实拍图与三维图如图 13、14 所示。图 13 所示为只测量贴有胶带的部分结果,左边的光条为激光照射到金属表面再次反射的结果,不进行测量。

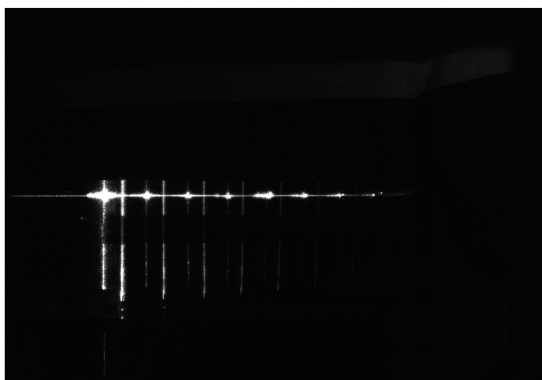


图 13 贴胶带金属块的实拍图

Fig. 13 Real shot of metal block with tape

由于测量得到的厚度数值太小,如果坐标轴的单位长度相同,则从三维图上看不出明显的凸起,因此在作图时选择不将坐标轴刻度均匀化,并且选择了容易观察结果的角度进行截取,以使结果更直观地呈现。

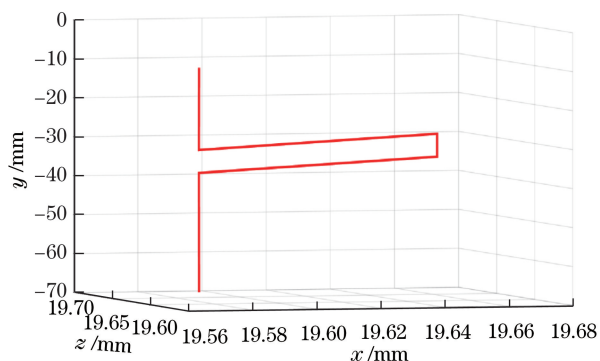


图 14 贴胶带金属块的三维图

Fig. 14 Three-dimensional map of metal block with tape

同样对后三根较暗光条进行测量,测得厚度为 0.0944 mm,与参考值相差 0.0081 mm。

为了验证贴胶带金属重复测量结果的稳定性,本文进行了与上述木块实验相类似的重复测量实验。先是保持金属块的位姿不变,在不同位置(1.5, 3.5, 5.5 mm)分别曝光拍摄 10 张图片,共计 30 张照片。将 30 张照片的测量结果以折线图表示,如图 15 所示。同样可以看出,每组的重复测量误差不超过 10 μm ,三组联合观察的重复测量最大误差为 10.3 μm ,均方根为 0.0035 mm。

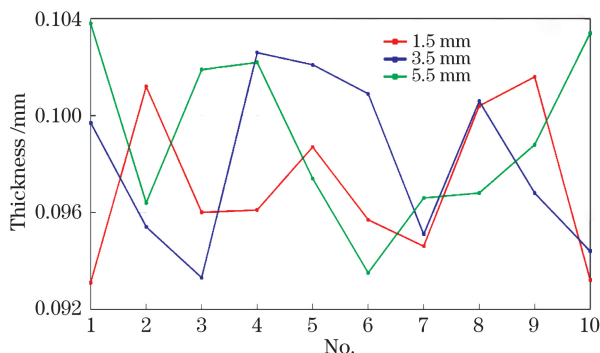


图 15 金属位姿不变时不同位置的测量结果

Fig. 15 Measurement results of metal block at different positions with posture unchanged

与木块一样,在不同位置(1.5 mm 刻度和 3.5 mm 刻度)和不同摆放位姿(左偏和右偏摆放)下对金属块表面的胶带进行重复测量,共 4 组组合,每种组合拍摄 5 张照片,共计 20 张照片。统计结果如图 16 所示,每组重复测量误差同样不超过 10 μm ,整体最大误差为 13.4 μm ,均方根为 0.0037 mm。

在本课题组之前的工作中遇到过如图 17 所示的高光反射情况,即部分反光过强(如图中圆圈位置所示),会对测量造成很大影响。该情况在图 13 左起第一根光条中同样有体现;但在图 13 中,后面高次像的高光亮斑明显减弱。此外,在图 4 的

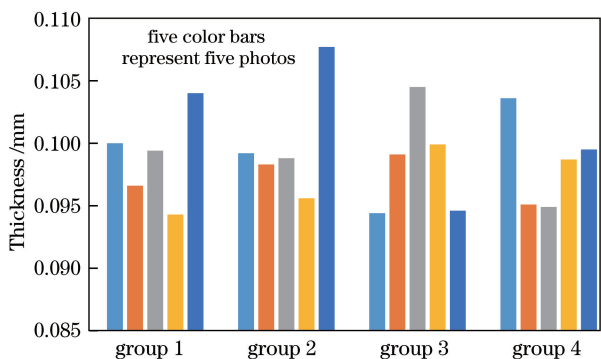


图 16 不同位置 and 不同位姿下,金属块上胶带的测量结果
Fig. 16 Measured thickness of tape on metal block at different positions with posture changed

木块实拍图中,左起第一根光条的曝光也同样过高,导致光条变粗,但后面的光条就没有这样的问题。以上事实说明本方法具有对高光反射表面进行测量的能力。

3.2 系统精度评估

为评估本方法在本实验平台上的测量精度,选用被测物为黑色金属平移台。由于该平移台不带计



图 17 高光反射表面结构光的实拍图

量工具,无法知晓其准确的移动距离,因此将旋钮旋转 10 圈,用游标卡尺测量其位移为 3.31 mm,若旋钮螺纹均匀,则每圈移动距离为 0.331 mm。测量步骤如下:平移台固定不动,每次旋转一圈旋钮,采集图像后计算中心线的三维坐标,与测得的 0.331 mm 比较;再旋转一圈,重复上述操作,共旋转 8 次,求出 8 次的差值,如表 5 所示。

表 3 平移台旋转每圈的误差

Table 3 Error of each rotation of translation stage

Number of rotations	1	2	3	4	5	6	7	8
Nominal displacement /mm	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331
Measuring displacement /mm	0.3897	0.231	0.3103	0.3185	0.328	0.3362	0.3444	0.3539
Error/mm	0.0587	-0.100	-0.0207	-0.0125	-0.003	0.0052	0.0134	0.0229

将每圈测量误差单独提出绘制其分布图,如图 18 所示。图中横坐标为旋转圈数,纵坐标为测量误差。可以看出,前两圈波动较大,误差接近 ± 0.1 mm,后面几圈的误差集中在 0 附近波动,且波动程度很小。

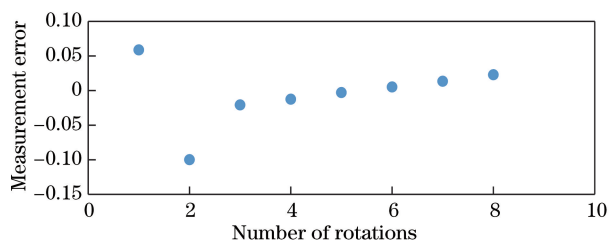


图 18 每圈测量误差分布

Fig. 18 Measurement error distribution per rotation

为了检验本方法在精度评估测试方面的稳定性,在金属平移台(待测物)左偏和右偏放置两种位姿下,将旋钮转 6 圈,测量每圈的位移,测量结果如表 4、5 所示,将测量结果与 0.331 mm 进行比较。从表 4、5 中可以看出,每圈误差与表 3 中的数据类似,同样在 0 附近波动,但均在 $-0.1 \sim 0.1$ mm 之间。

由于平移台螺纹本身不一定均匀,因此每圈的位移不一定相同;同时,用游标卡尺测量 10 圈的位移也会有一定误差,再加上每次旋转一圈是人为目测旋钮上的标志点来确定,并不完全准确,因此每圈误差波动的上下限差距较大。从表 3 以及表 4 的数据可以看出,表 3 的前两组数据与表 4 的最后两组对应数据的误差均接近 ± 0.1 mm,其余大部分数据

表 4 左偏平移台旋转每圈的测量误差

Table 4 Measurement error of each rotation of left-headed translation stage

Number of rotations	1	2	3	4	5	6
Actual displacement /mm	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331
Measuring displacement /mm	0.3705	0.3075	0.2705	0.4057	0.2365	0.4248
Error /mm	0.0395	-0.0235	-0.0645	0.0747	-0.0945	0.0938

表 5 右偏平移台旋转每圈的测量误差

Table 5 Measurement error of each rotation of right-headed translation stage

Number of rotations	1	2	3	4	5	6
Actual displacement /mm	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331	0.331
Measuring displacement /mm	0.3603	0.379	0.3162	0.3549	0.3202	0.3063
Error /mm	0.0293	0.048	-0.0148	0.0239	-0.0108	-0.0247

的误差均远小于该值,说明作为待测物的金属平移台存在较大的机械误差,测量误差实际上高于0.1 mm。鉴于系统平台只要求达到 ± 0.1 mm的可用水平,因此还是将总体测量精度定为 ± 0.1 mm的标准。

4 结 论

本实验通过半反半透镜和平面镜组成的双镜结构形成多次结构光成像来进行三维测量。利用调整好的相机-双面镜结构、 45° 入射的结构光和带螺旋测微器的平移台,实现了对空间多个位置处光条的多次采集,并推导出了图像坐标与空间坐标的转换方程。之后测量了木块、金属两种材料贴上黑色胶带之后的结构光中心线坐标,并利用另一块金属平移台进一步确定了检测范围和精度。

得到的实验结果总结如下:一,本方法在本实验平台上达到的测量精度符合 ± 0.1 mm的工程要求;二,对不同材料在不同位置 and 不同位姿下的测量结果的均方差约为0.0035 mm;三,本方法的重复测量精度约为10 μ m。

必需强调的是,本文方法主要适用于金属材料与其他材料工业零部件混合存在的情况,当遇到亮度反差大或高反情况时,能快速、稳定和经济地获得 ± 0.1 mm精度的数据,以便于在火车轮对的实时检测、机械接口快速对准与插拔等领域开展工作^[27],而不是追求更高的精度。因此,本文并未采用更精密的校准和机械平台进行实验。根据实际需要,本方法可以通过采用更细的激光线宽和更精密的光学、机械器件来实现更高精度的测量。

高光反射现象会对测量造成较大影响。在本实验中,首先,由于系统本身对进入光线的范围有一定限制,只有在一定角度范围内入射的光才能在两镜面间进行多次反射,这会对亮斑的形成有一定的抑制作用;其次,由于多次反射像间的曝光逐渐衰弱,就算形成了亮斑,也可以通过选择后面的高次像,以及调整曝光等简单方法进行有效规避。如图13所示,在低次像中存在的高光现象在后面的高次像中

会减弱甚至消失,再加上多组光条平均之后,原本的亮斑影响几乎可以忽略不计。因此,本实验可以在一定程度上解决高反材料结构光三维测量时遇到的亮度差距过大以及曝光过于强烈而导致无法测量的问题。

本实验的测量结果会受激光品质、相机分辨率等多种因素的影响;同时,在测量精度时的参考标准也会因被测物的客观条件以及操作时不可避免的人为误差而受到影响,从而导致测量结果有一定程度的误差,但这并不影响整体精度范围的确定。上述影响因素的消除还有待在之后的工作中继续研究。

参 考 文 献

- [1] Pu Z B, Yang C L, Zhao H. Application of geometric light probe method in surface topography measurement[J]. Measurement Technique, 2001(1): 20-23.
浦昭邦, 杨春兰, 赵辉. 几何光探针法在表面形貌测量中的应用[J]. 计量技术, 2001(1): 20-23.
- [2] Shang W Q, Zhang W X, Wu Z, et al. Three-dimensional measurement system based on full-field heterodyne interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(10): 2097-2104.
尚万祺, 张文喜, 伍洲, 等. 全视场外差干涉三维测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2097-2104.
- [3] Yi J G. Research on 3D contour measurement algorithm of laser interference fringes[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
易军高. 基于激光干涉条纹的三维轮廓测量算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [4] Liu G M, Yu X C, Ren H X, et al. Three-dimensional shape measurement method based on laser shearing interference [J]. Laser & Infrared, 2018, 48(4): 464-468.
刘光明, 余学才, 任华西, 等. 激光剪切干涉三维形貌测量[J]. 激光与红外, 2018, 48(4): 464-468.
- [5] Zhu Y. Three dimensional profile measurement system based on laser trigonometry[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.

- 朱妍. 基于激光三角法的三维轮廓测量系统[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [6] Li S H. Optical 3D shape measurement of ultra-precision specular surface[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
李绍辉. 超精密加工高反射曲面光学非接触三维形貌测量[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [7] Bai J X, Qu X H, Feng W, et al. Separation method of overlapping phase-shift gratings in three-dimensional measurement of double projection structured light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1112002.
白景湘, 曲兴华, 冯维, 等. 双投影结构光三维测量中重叠相移光栅的分离方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1112002.
- [8] Wyant J C, Creath K. Recent advances in interferometric optical testing[J]. *Laser Focus*, 1985, 21(11): 118-132.
- [9] Lin H. Structured light based high dynamic range shiny surface 3D shape measurement technique and system development[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017.
林辉. 高动态范围光亮表面的结构光三维形貌测量方法研究与实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
- [10] Zhang S, Yau S T. High dynamic range scanning technique[J]. *Optical Engineering*, 2008, 48(3): 033604.
- [11] Feng J Y, Feng Q B, Kuang C F. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2004, 25(3): 33-36.
冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. *应用光学*, 2004, 25(3): 33-36.
- [12] Knauer M C, Kaminski J, Hausler G. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 366-376.
- [13] Han S J. 3D shape reconstruction algorithm of specular surface based on phase deflection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
韩淑建. 基于光栅相位偏折的高反射曲面三维重建算法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [14] Li S H, Liu S G, Zhang H W, et al. Three dimensional shape measurement of specular surface based on phase deflectometry[J]. *Computer Engineering*, 2013, 39(6): 299-303.
李绍辉, 刘书桂, 张宏伟, 等. 基于光栅相位偏折的高反射曲面三维形貌测量[J]. *计算机工程*, 2013, 39(6): 299-303.
- [15] 李绍辉, 张宏伟, 刘书桂, 等. 高反射自由曲面光栅投影快速非接触测量方法及装置: CN102607466A [P]. 2012-07-25.
- Li S H, Zhang H W, Liu S G, et al. Grating projection rapid non-contact measurement method and device for high-reflectance free-form curved-surface parts: CN102607466A [P]. 2012-07-25.
- [16] Tang Y, Su X Y, Liu Y K, et al. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 965-969.
唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. *光学学报*, 2009, 29(4): 965-969.
- [17] 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.
- [18] Bothe T, Li W, von Kopylow C, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5457: 411-422.
- [19] 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.
- [20] Nayar S K, Fang X S, Boulton T. Separation of reflection components using color and polarization [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, 21(3): 163-186.
- [21] Li F, Liu J T, Cai J J. Shape measuring of mirror object based on structured light method[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2014, 37(5): 882-887.
李锋, 刘建涛, 蔡佳佳. 基于结构光方法的类镜面物体的面形测量[J]. *电子器件*, 2014, 37(5): 882-887.
- [22] Wang D C, He K J, Sui C Y, et al. Highly reflective surface measurement based on dual stereo monocular structured light system fusion[J]. 2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2019: 1762-1768.
- [23] Negara C, Laengle T, Beyerer J. Calibration-free 3D reconstruction of specular surfaces with orthogonal projections by using reflection markers [J]. *TM-Technisches Messen*, 2019, 86(7/8): 373-383.
- [24] Wang L, Chen C, Gao N, et al. Three-dimensional shape measurement of high reflective objects based on adaptive fringe-pattern projection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(3): 71-76.

- [25] Xiao X. Structured light three-dimensional reconstruction device and method for forming multi-reflection imaging: CN110443888A[P]. 2019-11-12.
徐晓. 一种形成多次反射成像的结构光三维重建装置及方法: CN110443888A[P]. 2019-11-12.
- [26] Xiao H, Xu X. Thickness detection of the locomotive brake shoe based on the binocular line structure light [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2016, 14(3): 54-57.
肖虹, 徐晓. 基于双目线结构光的机车闸瓦厚度检测 [J]. 光学与光电技术, 2016, 14(3): 54-57.
- [27] Guan Y. Automatic detection of wearing train wheel tread based on CCD[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016.
关毅. 基于 CCD 的火车车轮踏面磨损的自动检测 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.