

基于线阵图像傅里叶与灰度匹配算法的三维测量

杨凌辉, 杨金成, 廖瑞颖*, 马璐瑶, 胡烁陶

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 双线扫描相机三维测量系统的匹配环节容易受到表面纹理和光源的影响, 从而影响点云的精度和完整性。为此, 提出了一种基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法, 以实现高精度匹配和处理部分过度曝光。此外, 建立了测量系统的成像模型, 提出了一种灵活的线扫描相机静态标定方法。最后, 搭建了实验平台验证了所提匹配算法的效果和测量系统的精度。相机标定结果的重投影误差优于 0.3 pixel, 基于所提算法的测量点云完整且能良好反映被测物深度突变处的真实形貌, 标准平板测量点云到拟合平面均方根误差为 0.023 mm。结果表明, 所提匹配算法既能有效保证点云的完整性, 又能保留被测物的表面细节特征。

关键词 测量; 形貌测量; 线扫描相机; 傅里叶变换; 灰度; 标定

中图分类号 TB863; TH701

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2012001

Three-Dimensional Measurement Based on Line-Scan Image Fourier and Grayscale Matching Algorithm

Yang Linghui, Yang Jincheng, Liao Ruiying*, Ma Luyao, Hu Shuotao

State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The matching link of the three-dimensional (3D) measurement system based on the dual line-scan camera is easily affected by the surface texture and light source, affecting the point cloud's accuracy and integrity. This study investigates a grayscale matching algorithm based on Fourier transform to achieve high-precision matching and deal with partial overexposure. Additionally, the imaging model of the measurement system is established and a flexible static calibration method for line-scan cameras is introduced. Finally, an experimental platform is developed to verify the proposed matching algorithm's effectiveness and the measurement system's accuracy. The reprojection error of the camera calibration results is better than 0.3 pixel. Based on the proposed algorithm, the measurement point cloud is complete and can reflect the real shape of the depth mutation of the object. The root mean square error of standard plate from the point cloud to the fitting plane is 0.023 mm. Results show that proposed matching algorithm can effectively ensure the integrity of the point cloud and retain the surface details of the measured object.

Key words measurement; surface measurement; line-scan cameras; Fourier transform; grayscale; calibration

OCIS codes 120.6650; 150.1135; 150.1488; 150.6910

1 引言

高精度三维形貌测量技术通过大量的点云数据重现被测物体的三维形貌, 与传统的单特征测量相比, 三维形貌测量具有数据量大、精度高、测量信息

完整等优点^[1]。目前, 光学三维形貌测量方法主要分为激光扫描^[2]和视觉测量^[3-5]。其中, 视觉测量对于实现多参数、自动化、快速测量具有更加突出的优势^[6]。

相机是视觉测量信息获取的源头传感器。与面

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2020-12-14; 录用日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51975408, 51721003)、天津市微低重力环境模拟技术重点实验室(TJWDZL2019KT005)

通信作者: *ruiyingliao@tju.edu.cn

阵相机相比,线扫描相机具有分辨率高、采集速度快(27 kHz 时可达 16384 pixel)、无缝隙采集和图像采集过程中的运动自由等突出特点。基于线扫描相机的三维形貌测量技术也逐渐应用于工业制造领域,如传送带质量检测、汽车白车身在线检测、印刷电路板检测等。

近年来,国内外已经对基于线扫描相机的三维形貌测量技术进行了一些研究,涌现了一些相关的文献。文献[7]中提出了一种单线扫描相机结合面结构光的三维形貌测量方法,但是由于采用傅里叶轮廓术实现三维形貌的测量,该方法仅适用于大型平滑表面测量,被测物存在空洞、断裂以及突起时会导致相位提取算法失效,造成较大测量误差。文献[8]提出了基于双线扫描相机的三维形貌测量方法,但是由于采用特征点匹配的稀疏匹配算法,导致该方法点云密度和精度均较低,均无法满足工业高精度测量的需求。文献[9]提出设计了一种采用灰度相似性匹配算法的线扫描形貌传感器,但是只能测量具有明显的纹理特征的表面。文献[10]提出了一种基于静态伪随机二值投影的动态连续三维形貌测量的双线扫描传感器,然而基于灰度相似性的匹配算法在过度曝光的情况下会失效。文献[11]提出了利用线扫描相机和结构光进行三维曲面重建的方法。设计了一种特殊的光源来产生不同的条纹图,介绍了时间相关法和相移法两种匹配方法,相移法深度范围小,而时间相关法扩大了测量高度。

简而言之,现有的基于双线扫描相机的三维形貌测量方法在图像的匹配环节存在着以下的问题:1)特征点匹配的算法的点云密度和精度无法满足工业高精度测量的需求;2)灰度相似性匹配算法的测量精度依赖于物体表面纹理,对于表面纹理单一的物体或表面结构重复的物体,如白墙和棋盘格,匹配时往往难以找到或错找同名像点;3)灰度相似性匹配算法中过度曝光导致局部点云缺失,灰度相似性匹配的匹配算法依赖于像素灰度变化实现,而局部过度曝光意味着局部对应像素灰度值不发生变化,因此过曝处的像点难以匹配。

为解决上述问题,本文提出了一种基于傅里叶变换(FT)的灰度相似性匹配算法,将基于傅里叶变换的匹配算法和基于灰度相似性的匹配算法相结合。基于傅里叶变换的匹配算法能实现线阵图像的密集匹配,保证获取点云的完整性,基于灰度相似性的匹配算法进一步计算最优匹配点,最终实现高精度亚像素匹配。此外,搭建了基于双线扫描相机和

数字投影仪的三维形貌测量系统,描述了成像模型和点云扩展方法,采用了一种灵活的线扫描相机静态标定方法消除线扫描相机从不同视角拍摄靶标时产生的偏心误差。

2 测量原理

2.1 系统概述

测量系统主要由双线扫描相机、数字投影仪、机械共面调整装置、运动平台和一些机械转接固定件组成,测量系统示意图如图 1 所示。双线扫描相机是测量系统的核心传感器,用于获取物体表面信息。投影仪作为主动光源,安装在两个相机之间,考虑到投影仪频率和线扫描相机采集频率匹配问题,通过离焦投影如图 2 所示的一位二进制图像可在被测物表面产生准正弦条纹。为了简化立体匹配和兼容结构光照明,使用精密共面调整装置将系统中的双线扫描相机的视场平面调整为共面状态。线扫描相机和投影仪通过转接部件悬挂安装于龙门架上,龙门架固定于平面上。将被测物体置于运动平台上,运动平台提供匀速的线性运动。双线扫描相机的交会角度对测量精度有影响,但 $45^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 之间的交会角

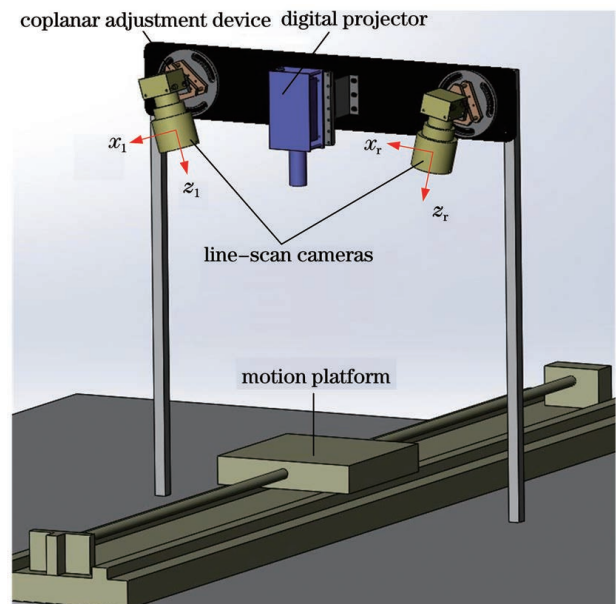


图 1 测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

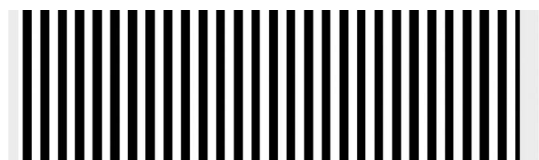


图 2 一位二进制图像

Fig. 2 1 bit binary pattern

能够满足大多数的应用场景^[12]。

2.2 成像模型

线扫描相机的成像模型可以被视作面阵相机

的一维成像形式。双线扫描相机的静态成像模型如图 3 所示。双线扫描相机成像模型可以描述为^[13]

$$\begin{cases} 0 = r_{21}(X_w - X_o) + r_{22}(Y_w - Y_o) + r_{23}(Z_w - Z_o) \\ u = u_c + \Delta u + F_x \frac{r_{11}(X_w - X_o) + r_{12}(Y_w - Y_o) + r_{13}(Z_w - Z_o)}{r_{31}(X_w - X_o) + r_{32}(Y_w - Y_o) + r_{33}(Z_w - Z_o)} \\ 0 = r'_{21}(X_w - X'_o) + r'_{22}(Y_w - Y'_o) + r'_{23}(Z_w - Z'_o) \\ u' = u'_c + \Delta u' + F'_x \frac{r'_{11}(X_w - X'_o) + r'_{12}(Y_w - Y'_o) + r'_{13}(Z_w - Z'_o)}{r'_{31}(X_w - X'_o) + r'_{32}(Y_w - Y'_o) + r'_{33}(Z_w - Z'_o)} \end{cases} \quad (1)$$

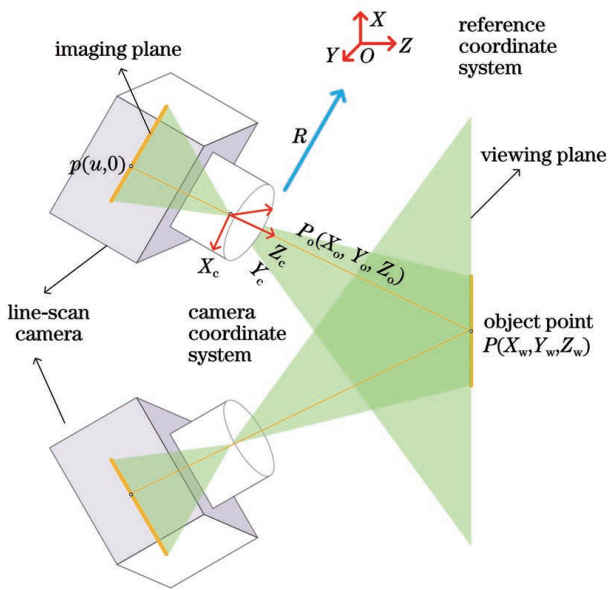


图 3 双线扫描相机的图像模型

Fig. 3 Image model of dual line-scan cameras

镜头的畸变模型可描述为^[14]

$$\Delta u = k_1(u - u_c)^5 + k_2(u - u_c)^3 + k_3(u - u_c)^2, \quad (2)$$

式中： $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 为参考系中目标点的坐标； $p(u, 0)$ 为对应的像点； $P_o(X_o, Y_o, Z_o)$ 是参考坐标系中相机坐标系原点的坐标；参数 r_{ij} ($i=1, 2, 3, j=1, 2, 3$) 是旋转矩阵 R 的项；参数 u_c 是主点坐标； F_x 是线扫描相机的焦距。带有上标的参数表示第二台线扫描相机的参数。对两台线扫描相机的内参数 (u_c, F_x)、畸变模型参数 (k_1, k_2, k_3) 和外参 (r_{ij}, X_o, Y_o, Z_o) 进行了预先的标定。在两个扫描相机采集图片中的同名像点像素坐标已知的前提下，空间目标点的坐标可用(1)式计算。

相机和投影仪保持静止，被测物体在运动平台上做匀速直线运动。如果预先知道速度在三个坐标轴上的分量 v_x, v_y 和 v_z ，则点云扩展方程为

$$\begin{cases} X(t) = X_w - v_x t \\ Y(t) = Y_w - v_y t \\ Z(t) = Z_w - v_z t \end{cases}, \quad (3)$$

式中： t 为间隔时间。

3 立体匹配

立体匹配是点云获取的重要组成部分，测量系统中立体匹配相关的核心组件是双线扫描相机和投影仪，投影仪将二值条纹离焦投影到被测物表面。利用极线约束的匹配方法被广泛应用于面阵相机的立体匹配中，然而，对于线阵相机而言，由于物体和线阵相机之间的相对运动，对应于每一行图像的相机位置姿态随时间发生变化，在假设物体和线阵相机相对位置线性变化而姿态不变的前提下，一幅图像中的一点在另一幅图像中的极线模型近似于双曲线^[15]。并且线阵图像中不存在极线对的概念，每个图像点在另一幅图像中都各自存在着与其唯一对应的极线，增加了利用极线约束进行匹配的复杂程度^[16]。因此，为了简化立体匹配环节并兼容结构光照明，设计了机械共面调整装置来确保双线扫描相机的视场平面近似共面，将二维图像的匹配问题转化为一维图像的匹配问题。在立体匹配过程中，忽略了相机视场平面非严格共面的影响。

基于共面调整后的立体相机，为了在提高匹配的成功率同时保留深度突变处的细节，本文提出了基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法。

3.1 基于傅里叶变换的匹配算法

傅里叶变换轮廓术广泛应用于面阵相机和投影仪的组合系统中^[17-18]。这种方法建立了高度和相位差之间的关系，只用一帧(或者两帧)的变形条纹图足以进行三维坐标的计算。本文提出的基于傅里叶变换的匹配算法借鉴了傅里叶变换的思想。由于建立的测量系统中包含两个线扫描相机，采用基于双

目立体视觉的方法计算三维坐标,所以无需标定高度和相位差之间的关系,而仅仅是匹配两个相机图片之间的展开相位。

相机采集的变形条纹的灰度函数可表示为 $g(u, v) = a(u, v) + c(u, v) + c^*(u, v)$ 。(4) 并且 $c(u, v)$ 和 $c^*(u, v)$ 可表示为

$$\begin{cases} c(u, v) = \frac{1}{2}b(u, v)\exp\{i[2\pi f_0 u + \varphi(u, v)]\} \\ c^*(u, v) = \frac{1}{2}b(u, v)\exp\{-i[2\pi f_0 u + \varphi(u, v)]\} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $a(u, v)$ 和 $b(u, v)$ 分别是背景强度和条纹振幅; $\varphi(u, v)$ 是由物体高度产生的相位调制; f_0 是光栅图像的基频。

式中: * 表示共轭复数,大写字母表示对应小写字母所表示信号的傅里叶频谱。采用合适滤波器将信号滤波后只剩下基频分量 $C(f - f_0)$,对基频分量作傅里叶逆变换,可表示为

$g(u, v)$ 的傅里叶变换可描述为

$$G(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*(f + f_0), \quad (6)$$

$$c(u, v) = \frac{1}{2}b(u, v)\{\cos[2\pi f_0 u + \varphi(u, v)] + i\sin[2\pi f_0 u + \varphi(u, v)]\}. \quad (7)$$

包裹相位可表示为

$$\varphi(u, v) = \frac{\text{Im}[c(u, v)]}{\text{Re}[c(u, v)]}. \quad (8)$$

包裹相位的范围是 $(-\pi, \pi)$,对于两幅图像,在投影条纹的范围内计算相位值。然后使用一维相位展开算法展开包裹相位,得到

$$\psi(u, v) = \varphi(u, v) + 2\pi k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

式中: k 为条纹的次序。

采用线性插值法得到精确的匹配点,若 $\psi_l(u_l, v)$ 是左图像中待匹配点 u_l 的展开相位,则它在右图中的相邻相位是 $\psi_r(u_r, v)$ 和 $\psi_r(u_r - 1, v)$ 。 u_l 的亚像素匹配点坐标 u_{subpixel} 计算公式为

$$u_{\text{subpixel}} = \frac{\psi_l(u_l, v) - \psi_r(u_r - 1, v)}{\psi_r(u_r, v) - \psi_r(u_r - 1, v)} + u_r - 1. \quad (10)$$

在所提基于傅里叶变换匹配算法中,由于信号是非周期的,傅里叶变换需要对信号在空域上进行周期拓展,周期拓展可能会发生频谱泄漏,因此需要

给原始信号加汉宁窗^[19-20]。此外,因为只有一幅图像,只能使用基于图像的相位展开算法。

基于傅里叶变换的匹配算法能消除局部过度曝光的影响,但该方法仅能展开完整相位图,并且一些高频信息可能会被带通滤波器滤掉,导致细节的丢失。此外在被测物存在断裂突起时会导致相位提取算法失效,造成较大的误差。

3.2 基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法

为解决基于傅里叶变换匹配算法细节不足和表面不连续时的误差较大的问题,进一步引入基于灰度相似性的匹配方法计算最优匹配点。

基于灰度相似性的匹配方法通过计算左右子窗口图像中灰度值的相似性进行匹配。本文采用一维归一化协方差相关(NCC)度量左右子窗口图像的灰度值相似性,左子窗口 L 中的像素点 (u, v) 与右子窗口 R 中的像素点 (u', v) 的协方差相关系数表示为

$$C(u, u', v) = \frac{\sum_{i=-n}^n [L(u+i, v) - \bar{L}][R(u'+i, v) - \bar{R}]}{\sqrt{\sum_{i=-n}^n [L(u+i, v) - \bar{L}]^2 \sum_{i=-n}^n [R(u'+i, v) - \bar{R}]^2}}, \quad (11)$$

式中: $L(u, v)$ 和 $R(u, v)$ 分别为左相机和右相机上点 (u, v) 的灰度值; n 为子窗口长度的一半; \bar{L} 和 \bar{R} 分别为左右子窗口图像灰度平均值;协方差相关系

数的取值范围为 $-1 \sim 1$,便于为整个图像设置统一的阈值。

用 NCC 方法得到的最佳匹配点仅仅是整数像

素值,最大值点 (u_1, C_1) 和它旁边的两个点 $(u_1 - 1, C_0)$ 和 $(u_1 + 1, C_2)$ 近似符合高斯分布,可用一元二次多项式进行拟合,为了达到亚像素匹配精度,将拟合曲线的最大值对应的像素作为亚像素匹配点的坐标值。因此,采用拉格朗日插值法计算亚像素匹配点的坐标值表示为

$$u_{\text{subpixel}} = u_1 - 0.5 \frac{C_2 - C_0}{C_0 + C_2 - 2C_1} \quad (12)$$

基于灰度相似性匹配算法可以达到亚像素精度,但是计算整个图像的相关系数非常耗时,并且由于遮挡等原因会出现一些误匹配点。此外基于灰度相似性匹配算法对被测物表面的纹理和光照条件敏感,容易受到恶劣环境的影响,在过度曝光的情况下,算法会直接失效。

在提出的基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法中,首先利用基于傅里叶变换匹配算法计算匹配点的初始值。若存在过度曝光的情况,则通过(10)式计算亚像素匹配点,否则使用基于灰度相似性的匹配算法来进一步计算最优匹配点,在初始值

附近一定范围内搜索协方差相关系数的最大值,然后通过(12)式计算亚像素匹配点。

4 系统标定

线扫描相机的标定是保证测量精度的关键环节,到目前为止,现有的标定方法可以分为扫描标定方法和静态标定方法^[21-22]。由于扫描标定方法不适用于工业现场,静态标定具有一定的优越性。为了在极端环境中也能确保标定精度,采用了文献[23]中提出的线扫描相机静态标定方法。制作了如图4(a)所示的空心条纹立体靶标,每条空心线由两条白线组成,一条黑线夹在其中,四角上的反光标志圆点用来通过辅助仪器确定坐标系,这三个平面在不同的高度。相机标定的示意图如图4(b)所示,线扫描相机从靶标的正上方拍摄靶标获取一维图像。标定过程如下所述:使用近景摄影测量系统(V-STARS)确定靶标三个平面上各自局部坐标系与参考坐标系的相对位置;利用调和共轭理论,确定空间特征点在一维图像上的精确投影位置像素坐

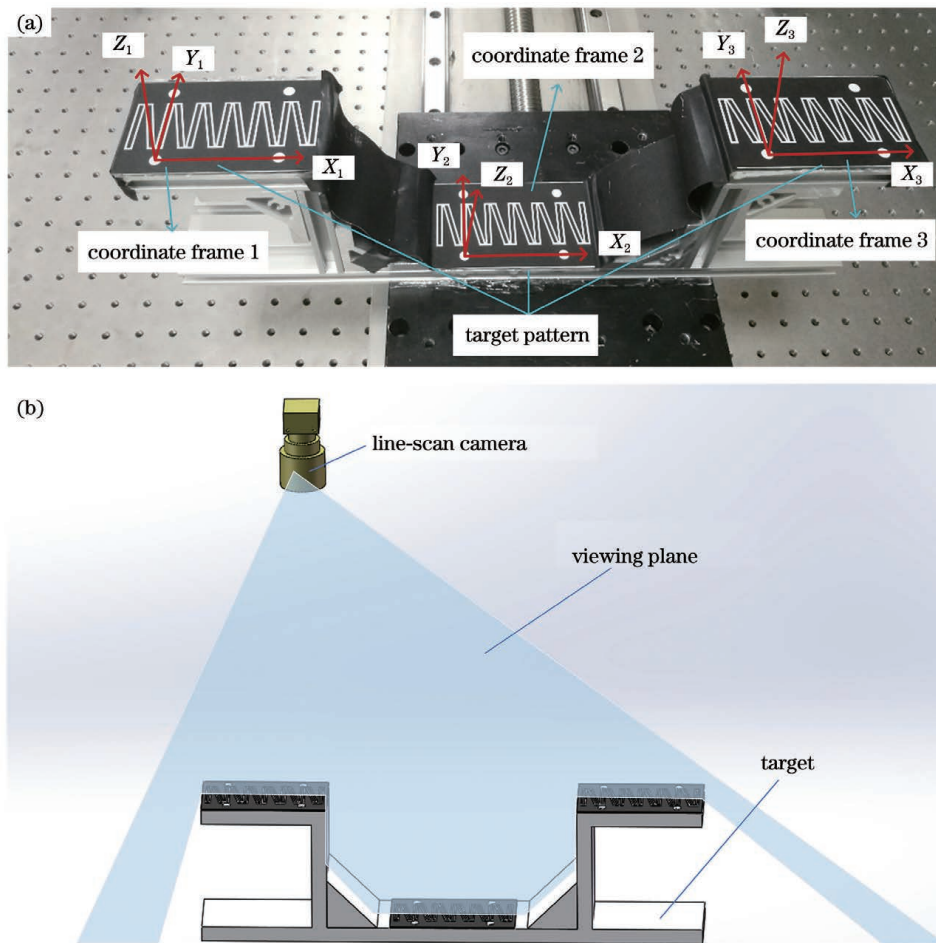


图 4 线扫描相机标定。(a)空心条纹立体靶标;(b)相机标定示意图

Fig. 4 Calibration of line-scan camera. (a) A stereo target with hollow stripes; (b) camera calibration diagram

标;利用交比不变性原理,由像素坐标计算空间特征点三维坐标;在已知特征点的三维坐标和对应的一维图像中像素坐标的前提下,利用 Lagrange 乘数法计算内、外参数的初始值^[24];最后以重投影误差最小为目标建立目标函数对系统的参数进行优化,待优化的参数包括系统的内参数、外参数、视场平面方程系数。

此外,值得注意的是需要将靶标固定在移动平台上,两个线扫描相机采集图片期间靶标不应该被移动,确保参考坐标系的统一。然后利用 V-STARS 分别测量移动平台移动前后靶标上的反光标志点的坐标,通过坐标系转换标定移动平台的运动方向。

5 实 验

5.1 实验系统组成

利用两个线扫描相机(Basler racer raL8192-12gm)、数字投影仪(Texas Instrument Pro4500)、微调节云台(Leofoto LB-68)、精密位移平台、铝型材和设计加工的机械零件等器件,在实验室环境下搭建了如图 1 所示的测量系统。使用第 4 节所述的方法标定线扫描相机和移动平台的运动方向。线扫描相机的标定结果如表 1 所示。其中 (r_1, r_2, r_3) 为旋转矩阵的 Rodrigues 向量,两个相机标定的重投影误差小于 0.3 pixel。

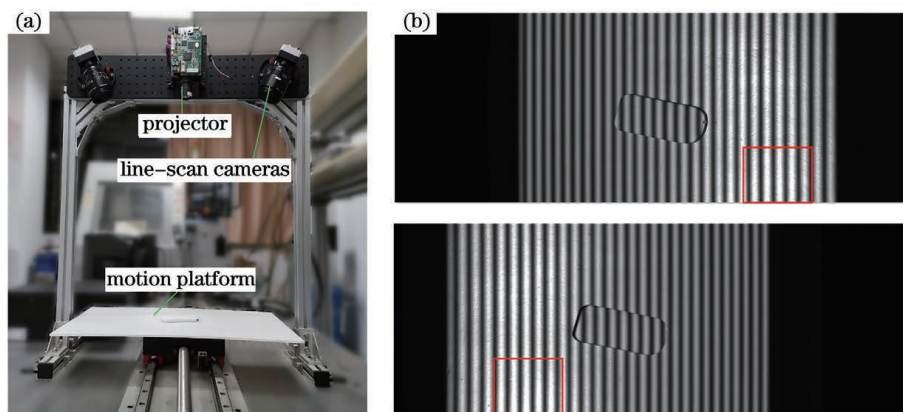


图 5 匹配算法比较实验。(a)现场实验平台;(b)扫描相机采集的图片

Fig. 5 Comparative experiment of matching algorithm. (a) On site experimental platform; (b) pictures captured by line-scan camera

图 6 展示了基于灰度相似性的匹配算法、基于傅里叶变换的匹配算法和基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法的点云计算结果。在图 6(a)中,由于过度曝光,导致大量的点云缺失。在图 6(b)中,点云完整无明显缺失,但被测物高度突变处的点云呈

表 1 双线扫描相机的标定结果
Table 1 Calibration results of two line-scan cameras

| Parameter | Left camera | Right camera |
|--------------------|-------------|--------------|
| u_c/pixel | 3863.35 | 4264.13 |
| F_x/pixel | 11087.53 | 11060.43 |
| r_1 | -3.062 | 3.072 |
| r_2 | 0.022 | -0.020 |
| r_3 | 0.670 | 0.696 |
| X_o/mm | 428.02 | -68.63 |
| Y_o/mm | 21.98 | 25.83 |
| Z_o/mm | 548.91 | 546.71 |
| $k_1/10^{-17}$ | 1.82 | 0.57 |
| $k_2/10^{-10}$ | -7.56 | -5.62 |
| $k_3/10^{-7}$ | -4.51 | 2.09 |
| Error /pixel | 0.23 | 0.25 |

5.2 算法验证

为了验证所提算法的效果,进行了如下实验。被测物置于移动平台上,投影仪将二值条纹离焦投影到被测物表面,移动平台带动被测物匀速直线运动,线扫描相机同步采集一维图像序列,如图 5(a)所示。双线扫描相机采集的图像如图 5(b)所示,由于被测物表面光滑,镜面反射较强,两个相机均会出现局部过度曝光的现象,方框中为两幅图像中过度曝光的部分。

现出平滑的曲面,边缘处的准确度降低。在图 6(c)中,点云完整且能良好反映被测物深度突变处的真实形貌特征,可以看出,基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法结果优于基于灰度的算法或基于傅里叶的算法。

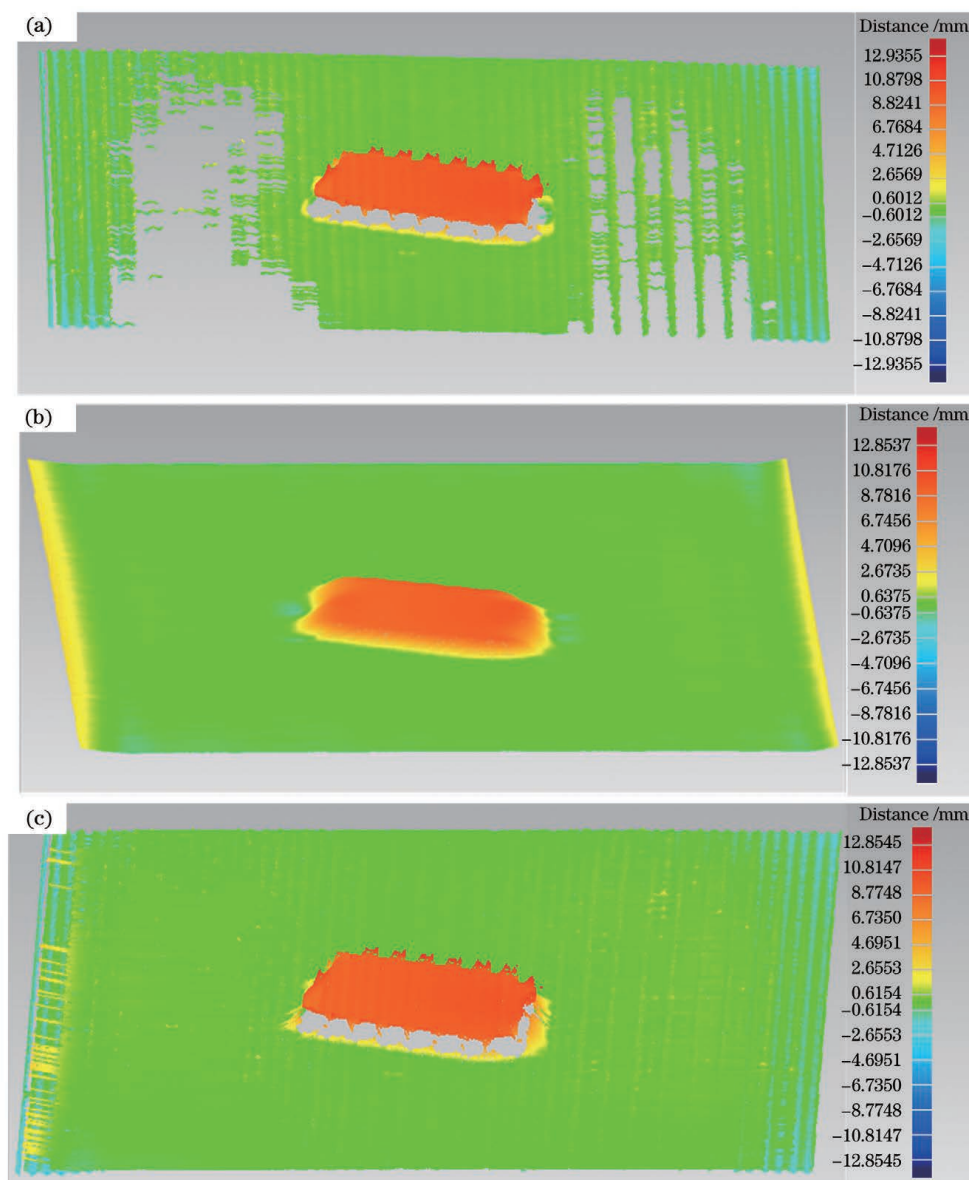


图 6 三种匹配算法的点云计算结果。(a)基于灰度算法得到的点云;(b)基于傅里叶算法得到的点云;(c)基于傅里叶的灰度匹配算法得到的点云

Fig. 6 Point cloud calculation results of three matching algorithms. (a) Point cloud based on grayscale algorithm; (b) point cloud based on Fourier algorithm; (c) point cloud obtained by Fourier-based gray matching algorithm

5.3 系统精度验证

为了验证测量系统的精度,进行了氧化锆标准平板的形貌测量实验,标准平板的平面度为 0.008 mm ,可以被视作绝对平面。被测氧化锆平板标准件实物如图 7(a)所示,其中一个线扫描相机采集图像如图 7(b)所示,对测量得到的点云进行平面拟合,点云到拟合平面的偏差的色差图如图 7(c)所示,点云到拟合平面的最大距离为 0.070 mm 和 -0.113 mm ,均方根误差为 0.023 mm 。结果表明,测量系统的横向分辨率可以达到 $30\text{ }\mu\text{m}$,能够满足工业测量场景的精度要求。

6 结 论

本文建立了一种基于线扫描相机的三维形貌测量系统,描述了成像模型以及一种灵活的线扫描相机静态标定方法,特别地,提出了一种基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法。对比实验结果显示基于傅里叶变换匹配算法点云完整性高,但在表面深度变化明显的地方细节不足;基于灰度相似性匹配算法细节丰富、精度更高,但由于过度曝光的影响出现明显的点云缺失;基于傅里叶变换的灰度相似性匹配算法效果优于上述单一的算法。本文算法降低了

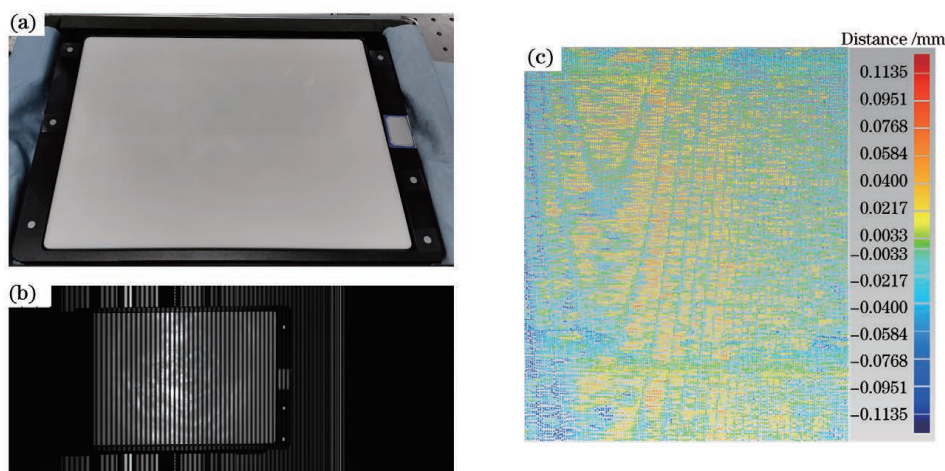


图 7 氧化锆标准平板测量实验。(a)氧化锆平板实物图；(b)线扫描相机采集的图像；(c)点云色差图
Fig. 7 Measurement experiment of zirconia standard plate. (a) Physical picture of zirconia plate; (b) image captured by line-scan camera; (c) color difference map of point cloud

物体表面纹理和过度曝光对立体匹配的影响,保证了点云的完整性,并具有亚像素的匹配精度,有效保留了被测物的表面细节。另外,标准平板测量实验中均方根误差为 0.023 mm ,验证了测量系统的横向分辨率可以达到 $30\text{ }\mu\text{m}$,具有工业应用的潜力。然而无论是单一的匹配算法还是结合的方法都对被测物表面的深度变化有限制,后续可研究针对深度变化范围大的表面测量的匹配算法。

参 考 文 献

- [1] Schmitt R H, Peterek M, Morse E, et al. Advances in large-scale metrology-review and future trends[J]. CIRP Annals, 2016, 65(2): 643-665.
- [2] Hayashi E, Mochizuki T. Three-dimensional object recognition using laser range sensor [J]. Artificial Life and Robotics, 2008, 13(1): 320-325.
- [3] Cheng Z Y, Lu R S, Mao C L. Measurement method of three-dimensional shape of bright surface with binocular stereo vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071202.
程子怡, 卢荣胜, 毛翠丽. 光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071202.
- [4] Tao T Y, Chen Q, Feng S J, et al. High-precision real-time 3D shape measurement based on a quad-camera system[J]. Journal of Optics, 2018, 20(1): 014009.
- [5] Wang X S, Shao S Y, Su X D, et al. Measurement of rail bearing platform based on binocular line-structured light [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 211202.
王雪嵩, 邵双运, 苏晓东, 等. 基于双视线结构光的
- [6] Zhu J G, Yu Z J. Principle of vision metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] Denkena B, Huke P. Development of a high resolution pattern projection system using linescan cameras [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7389: 73890F.
- [8] Zhang P C, Arre T J, Ide-Ektessabi A. A line scan camera-based structure from motion for high-resolution 3D reconstruction[J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(5): 656-663.
- [9] Ilchev T, Lilienblum E, Joedicke B, et al. A stereo line sensor system to high speed capturing of surfaces in color and 3D shape [C] // Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory, 2012: 809-812.
- [10] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Sensor for in-motion continuous 3D shape measurement based on dual line-scan cameras[J]. Sensors, 2016, 16(11): E1949.
- [11] Lilienblum E, Al-Hamadi A. A structured light approach for 3-D surface reconstruction with a stereo line-scan system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(5): 1258-1266.
- [12] Yang L H, Sun B, Liao R Y, et al. A stereo line-scan system for 3D shape measurement of fast-moving objects [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10621: 106210A.
- [13] Sun B, Zhu J L, Yang L H, et al. Stereo line-scan sensor calibration for 3D shape measurement [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 211202.

- Applied Optics, 2017, 56(28): 7905-7914.
- [14] Fang S P, Xia X H, Xiao Y. A calibration method of lens distortion for line scan cameras [J]. Optik, 2013, 124(24): 6749-6751.
- [15] Wang M, Hu F, Li J. Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(3): 347-355.
- [16] Gong D C, Zhang Y S, Chen X Y. On the extended epipolarity of linear CCD pushbroom images [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(4): 246-249, 253.
巩丹超, 张永生, 陈筱勇. 线阵 CCD 推扫式影像的扩展核线模型 [J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 246-249, 253.
- [17] Su X Y, Chen W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 35(5): 263-284.
- [18] Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3-D shape measurement method: a review [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- [19] Chen W J, Su X Y, Tan S X. Discussion on phase errors caused by frequency leakage in FTP [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1429-1434.
陈文静, 苏显渝, 谭松新. 傅里叶变换轮廓术中频谱泄漏的讨论 [J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1429-1434.
- [20] Berryman F, Pynsent P, Cubillo J. The effect of windowing in Fourier transform profilometry applied to noisy images [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(6): 815-825.
- [21] 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.
- [22] Wu J, Xu J, Li Y L, et al. Internal calibration method of linear array CCD using nonparametric model [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041507.
吴军, 徐鋆, 李雁玲, 等. 采用非参模型的线阵 CCD 内参校准方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041507.
- [23] Liao R Y, Zhu J G, Yang L H, et al. Flexible calibration method for line-scan cameras using a stereo target with hollow stripes [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 113: 6-13.
- [24] Sun B, Zhu J G, Yang L H, et al. Calibration of line-scan cameras for precision measurement [J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6836-6843.