

激光与光电子学进展

融合区域匹配的快速多线结构光测量方法

林群鸿^{1,2}, 张举^{1,2}, 江开勇^{1,2}, 林俊义^{1,2*}¹华侨大学厦门市数字化视觉测量重点实验室, 福建 厦门 361021;²华侨大学福建省特种能场制造重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 针对多线结构光测量中测量效率与测量精度相矛盾的问题,提出了一种融合区域数字图像相关匹配的快速三维测量方法。采用双边滤波和天津阈值法对图像进行预处理,利用重心法提取初始条纹中心点。用双三次插值法提升初始点的局部邻域分辨率,在局部邻域内再次利用灰度重心法提高中心点的提取精度。以左图像提取的中心线为基准,利用数字图像相关法在右图像中心线附近搜索基准对应的立体匹配点,大大缩小了数字图像相关法的搜索范围,提高了测量效率和立体匹配精度。对标准块规的测量实验结果表明,该方法的中心线提取速度为 Steger 法的 3.29 倍,均方根误差相比传统极线约束立体匹配法减小了 68.57%。

关键词 测量与计量; 多线结构光; 灰度重心法; 数字图像相关法; 立体匹配; 三维测量

中图分类号 TP391 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212748

Fast Multi-Line Structured Light Measurement Method Integrated with Region Matching

Lin Qunhong^{1,2}, Zhang Ju^{1,2}, Jiang Kaiyong^{1,2}, Lin Junyi^{1,2*}¹Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China;²Fujian Provincial Key Laboratory of Special Energy Manufacturing, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract According to the contradiction between measurement efficiency and accuracy in the multi-line structured light measurement, a fast measurement results of the measurement method base on region digital image correlation matching is proposed in this paper. The bilateral filter and Otsu thresh method are used to preprocess the image, and the gray centroid method is utilized to extract the initial point of the stripe center. The bicubic interpolation method is adopted to improve the local neighborhood resolution of the center initial point for the reuse of the gray centroid method in the local neighborhood to improves the accuracy of the center point extraction. Based on the center line extracted from the left image, the digital image correlation method is used to search for stereo matching points corresponding to the reference near the center line of the right image, which greatly reduced the search range of the digital image correlation method and improved measurement efficiency and stereo matching accuracy. The measurement experimental result of the standard block gauge show that the centerline extraction speed of the method is 3.29 times that of the Steger method, and compared with the traditional epipolar constrained stereo matching method, the root mean square error of this method is reduced by 68.57%.

Key words measurement and metrology; multi-line structured light; gray centroid method; digital image correlation method; stereo matching; three-dimensional measurement

1 引言

线结构光技术作为一种非接触式主动测量方法,具有成本低、检测效率高、适应性强等特点,被广泛应

用于工业自动化中,如三维重建^[1-2]、误差检测^[3]及目标定位^[4]。在线结构光技术中,条纹中心线提取的准确性直接影响了三维测量的精度,已有的中心线提取方法主要有极值法、灰度重心法、曲线拟合法和 Hessian

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-11-19; 录用日期: 2021-12-01; 网络首发日期: 2021-12-11

基金项目: 福建省产学研资助项目(2019H6016)、福建省引导性资助项目(2017H0019,2018H0020)

通信作者: *ljy2004@hqu.edu.cn

矩阵法等^[5-7]。灰度重心法因具有速度快、稳定性好等优点近年来得到了人们的青睐,如:杨毅等^[8]采用均值法和 Savitzky-Golay 滤波算法对灰度重心法提取的中心线进行平滑处理,减小了中心线凸起和毛刺对测量精度的影响;曾超等^[9]采用灰度重心法提取的结果作为初始点,通过方向模板计算出初始点的法线方向,再将沿法线方向计算的灰度重心作为条纹的中心点,显著提高了弯曲光条的中心线提取精度;Li 等^[10]根据灰度重心法提取的中心点定义一个矩形区域,在矩形区域法线方向上重新计算每个中心点的坐标。基于 Hessian 矩阵的 Steger 法^[11]充分考虑了激光条纹的方向和走势,提高了中心线提取的精度与稳定性,如: Xu 等^[12]采用 Hessian 矩阵计算出条纹中心初始点,利用随机采样一致性算法剔除离群点并拟合出精细的中心线;王福斌等^[13]利用二次灰度重心法提取条纹中心并计算出小范围的连通域,然后利用主成分分析求解协方差矩阵的特征值和特征向量;程鑫等^[14]提出一种融合极值法、Hessian 矩阵法和高斯函数拟合法的的中心线提取方法,在黑色胶条背景下提高了中心线提取算法的鲁棒性和精度。但这类方法较大的计算量及复杂的参数设置限制了其在工业现场的应用。

在双目线结构光系统中,立体匹配是三维重构的关键步骤,匹配精度直接影响最终的重构精度。而目前的立体匹配都依赖于激光中心线的提取,提取出左右图像的中心线后利用极线约束原理就能直接完成中心线的立体匹配,这类方法的重构精度不仅与左右图像中心线的提取精度有关,还取决于双目立体校正的精度,如:激光中心线在左右图像中存在差异(像素数目不同^[15-16]、中心位置差异^[17])会影响匹配精度;理论上,经立体校正后可在同一行像素中查找匹配点,但校正误差也会引起行方向产生偏差,匹配精度不高。基于区域匹配的数字图像相关(DIC)法如灰度梯度法^[18-19]、曲面拟合法和反向组合法^[20]的匹配精度较高,但将其用于基于灰度分布的全局匹配时计算量大,严重限制了该方法在工业实际中的应用。

针对上述问题,本文提出了一种融合区域匹配的快速多线结构光测量方法。该方法不需要考虑左右图像中心线的差异,直接以重心法提取中心线,以左图像的中心线为基准,利用 DIC 法在右图像中心线附近进行区域匹配,计算获得精确的匹配点,在减小 DIC 法区域匹配范围的同时提高了立体匹配效率,且匹配精度较高。

2 方法描述

融合区域匹配的快速多线结构光测量方法主要流程如图 1 所示。首先,利用系统参数对左右相机拍摄的图像进行立体校正,并对校正后的图像进行预处理。然后,利用传统重心法提取左右图像的条纹中心初始点。以初始点为中心根据条纹宽度生成子区域图像块,采用双三次插值法对子区域进行分辨率提升,对提

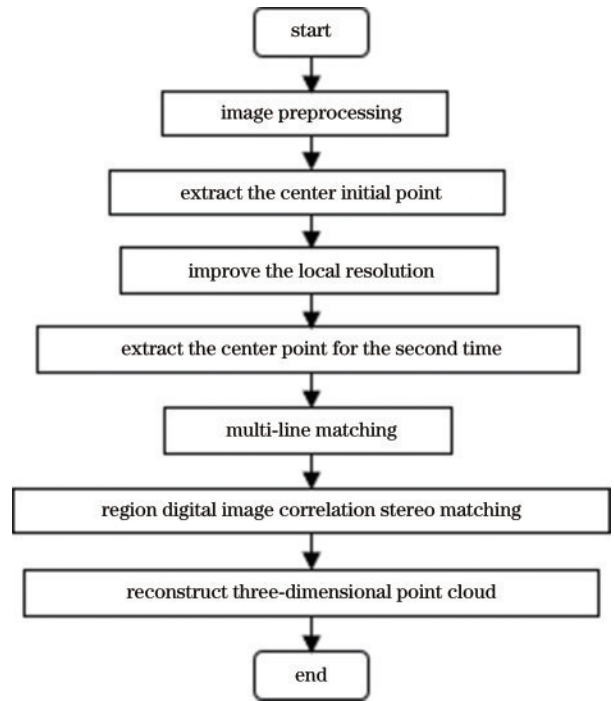


图 1 多线结构光测量方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-line structured light measurement method

升后的区域采用重心法进行二次中心线提取。进一步利用激光条纹在左右图像中的单应性关系确定左图像中每条激光条纹在右图像中的匹配条纹,完成多线立体匹配。最后,以左图像激光中心线像素为基准,采用 DIC 法在右图像同一行的中心点附近进行区域匹配,获得最佳匹配点并根据立体视觉原理重构出三维点。

2.1 中心初始点提取

激光条纹横截面的灰度值一般服从高斯分布,但在图像采集过程中会产生随机噪声,而双边滤波方法考虑了像素点间的距离信息和灰度信息,能保留条纹的边缘信息,有助于中心线的提取。由于测量背景复杂,图像中的非条纹区域会干扰中心线的提取,同时增加不必要的计算量。因此,根据条纹区域与背景区域的灰度值差异,设定阈值对图像进行二值化。本方法采用大津阈值法自适应计算出最佳阈值,分割出需要进行计算的条纹区域。

在条纹区域内,逐行计算灰度重心点作为条纹中心初始点。重心法的基本原理:假设某一行中像素点的坐标为 (u_i, v) , $i = 0, \dots, m$, 对应的灰度值为 f_i , 则条纹中心初始点的横坐标可表示为

$$u = \frac{\sum_{i=0}^m f_i \times u_i}{\sum_{i=0}^m f_i} \quad (1)$$

采用重心法遍历左右图像的条纹区域,可获得左右图像的所有中心初始点。

2.2 局部分辨率的提升

虽然灰度重心法的计算速度快,稳定性较好,能减少干扰引起的误差,但在不考虑条纹方向的情况下,条纹中心线提取精度较低。因此,以 2.1 节提取的中心点为初始点,在初始点的局部邻域内对图像分辨率进行提升,具体流程如下。

1) 对于左图像和右图像中心线上的每一个点 (u, v) , 选取尺寸为 $k \times k$ 的子区域 P , 子区域的尺寸根据条纹宽度决定, 一般为 $10 \sim 20$ pixel。对子区域 P 分别在 u 方向和 v 方向进行分辨率提升, 提升系数为 m , 并利用双三次插值得到尺寸为 $km \times km$ 的子区域 P' 。提升系数的大小理论上可以任意选取, 但实际应用中要根据子区域的灰度分布情况确定。一般设置为奇数, 以便于以原区域的中心点为中心。

2) 受测量时环境光的影响, 左图像与右图像子区内的灰度值分布不一致, 且区域插值后灰度值的变化范围较小, 导致后续匹配步骤中产生误差。因此, 对子区域 P' 进行灰度值归一化, 将灰度值统一到 $[50, 220]$ 区间内。

3) 采用双三次插值获得高分辨率中各像素的灰度值, 此时, 子区域中心不再是该行的灰度重心, 需要遍历子区域 P' 中间行的各像素, 再次利用重心法计算该行的灰度重心点。假设计算得到该行灰度重心点与子区域中心的坐标偏差为 $\Delta u'$, 将 $\Delta u'$ 除以拉伸系数 m 就能得到子区域 P 中心点的坐标偏差 Δu , 则该行中心点的坐标为 $(u + \Delta u, v)$, 如图 2 所示。

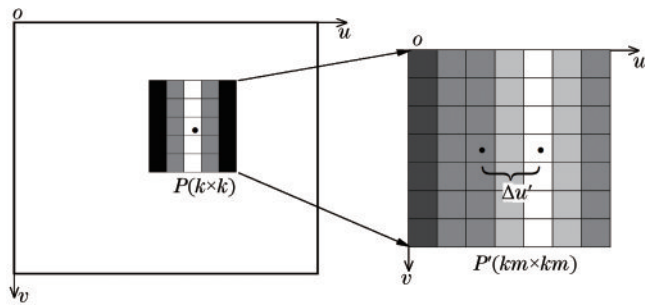


图 2 局部分辨率的提升示意图

Fig. 2 Diagram of local resolution enhancement

2.3 区域 DIC 立体匹配

在双目多线结构光系统中, 中心线的立体匹配存在一对多的问题, 因此基于单应性矩阵的方法解决多线激光条纹的立体匹配问题。将每条激光中心线看作是一个虚拟的光平面, 每个光平面映射到左右相机像平面上的像素点形成一一对应关系, 在左右相机中获得任意三个不在同一直线上的像素点, 从而建立左右图像中关于该激光条纹的单应性矩阵。采用标定物通过多个中心像素点进行单应性矩阵标定, 计算每条激光中心线的单应性矩阵。实际测量时, 左图像的任一激光条纹中心线经过其对应的单应性变换后, 将与右图中相匹配的激光中心线重合, 从而快速完成左图像中各激光条纹中心线的立体匹配。完成多线条纹立体匹配后, 与单线激光测量原理一样, 利用极线约束原理直接计算左图像与右图像的匹配点, 经过立体校正后, 左图像中心线的某一点坐标 (u, v_i) 在右图像中的匹配点一定为同一行的中心线点 (u', v_i) 。当被测物体表面存在曲率变化和反射率差异或左右相机拍摄到的中心线像素数目不一致时, 需要通过插值获取匹配点在 v 方向的精确位置。由于相机参数标定存在一定误差, 立体校正后左右图像也存在亚像素级误差, 即经过立体校正可保证左右图像上的匹配点位于像素级的同一行上, 但也存在亚像素级误差, 且该误差在计算时往往被忽略, 从而影响最终三维重构的精度。

为了解决上述问题, 同时考虑立体匹配的效率, 提出了一种融合区域 DIC 立体匹配的方法。在高分辨率子区域中, 以左图像提取的中心线为基准, 在右图像中心线的邻近区域采用 DIC 方法搜索相关系数最大的像素点, 并利用子区域的灰度梯度计算出亚像素位移。立体校正后的匹配精度可达到亚像素量级, 因此 DIC 方法在右图像中的搜索范围可以限定在高分辨率子区域内。在左右图像的子区域 P'_L 和 P'_R 内分别选取尺寸为 $n \times n$ 的图像子区域 P''_L 和 P''_R 进行相关性计算并取亚像素级位移, 如图 3 所示。

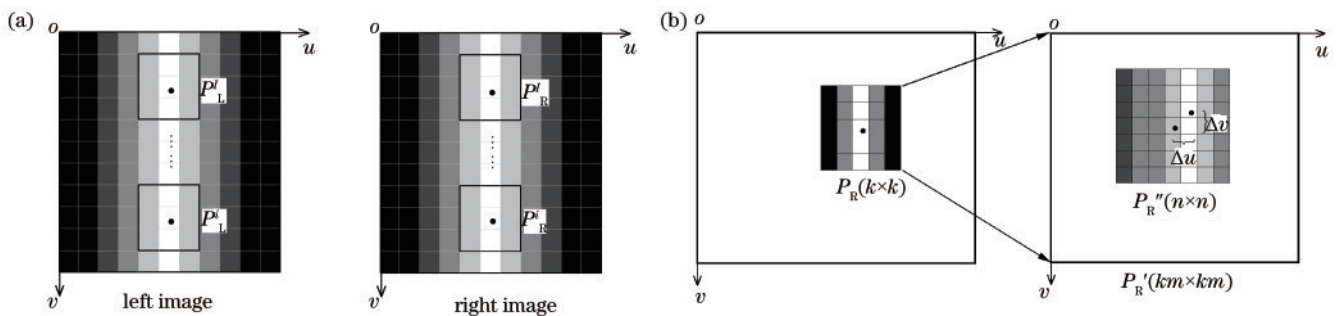


图 3 DIC 立体匹配示意图。(a) 左右图像; (b) 左右图像的局部高分辨率子区域

Fig. 3 Schematic diagram of DIC stereo matching. (a) Left and right images; (b) local high-resolution sub-regions of left and right images

设 $f_L(u_0, v_0)$ 与 $f_R(u', v')$ 分别为左图像子区域 P_L' 与右图像子区域 P_R'' 中对应点的灰度值, 在传统 DIC 法中, 通常假设对应匹配点的灰度值相同, 但由于环境光和噪声的影响, 实际测量中会导致较大的误差。左右图像中像素点坐标的关系可表示为

$$\begin{cases} u' = u_0 + \Delta u \\ v' = v_0 + \Delta v \\ f_R(u', v') = \delta(u_0, v_0) f_L(u_0, v_0) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: Δu 和 Δv 分别为右图像像素点 (u_0, v_0) 在 u 和 v 方向上的亚像素级位移; $\delta(u_0, v_0)$ 为灰度变化函数。文献 [19] 中假设左右子区域的灰度值呈线性关系, 引入灰度变化函数。相关系数函数用于评价左右图像子区域的相似程度, 考虑到了噪声、灰度值不均等因素对图像的影响, 因此选取具有较强抗干扰能力的最小平方距离相关函数, 将式 (2) 代入相关函数, 得到

$$C(\Delta u, \Delta v) = \frac{\sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l [\delta(u_0, v_0) f_L(u_0 + i, v_0 + j) - f_R(u' + i, v' + j)]^2}{\sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l f_L^2(u_0 + i, v_0 + j)}, \quad (3)$$

灰度变化函数 $\delta(u_0, v_0)$ 满足

$$\frac{\partial C(\Delta u, \Delta v)}{\partial \delta(u_0, v_0)} = 0, \quad (4)$$

将式 (3) 代入式 (4) 中, 得到

$$\begin{cases} \frac{\partial f_R(u, v)}{\partial u} = \frac{1}{12} f_R(u-2, v) - \frac{8}{12} f_R(u-1, v) + \frac{8}{12} f_R(u+1, v) - \frac{1}{12} f_R(u+2, v) \\ \frac{\partial f_R(u, v)}{\partial v} = \frac{1}{12} f_R(u, v-2) - \frac{8}{12} f_R(u, v-1) + \frac{8}{12} f_R(u, v+1) - \frac{1}{12} f_R(u, v+2) \end{cases}. \quad (8)$$

结合式 (7) 与式 (8), 计算出右子区域 P_R'' 中最佳匹配点距离子区域中心的像素偏差 $(\Delta u, \Delta v)$, 将偏差 $(\Delta u, \Delta v)$ 除以分辨率提升系数 m , 得到右子区域 P_R 中最佳匹配点距离中心的像素偏差 $(\Delta u', \Delta v')$, 即可求得最佳匹配点的像素坐标。

基于上述区域 DIC 立体匹配对左图像中任意一个中心点在右图像中匹配得到具有亚像素坐标的中心点, 该匹配点不仅在 u 方向获得了较高的匹配精度, 在 v 方向也校正了立体匹配引起的位置偏移。利用立体重构原理可以计算每个匹配点对的空间三维坐标, 完成被测物体的三维重构。

3 实验结果及分析

基于上述方法搭建双目视觉系统进行测量实验。实验设备: 波长为 650 nm 的红色线激光器; 分辨率为 1600 pixel \times 1200 pixel 的映美精 DMK23U247 工业相机; 使用 Visual Studio 2015 开发环境结合 OpenCV3.4.5

$$\delta(u_0, v_0) =$$

$$\frac{\sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l f_L(u_0 + i, v_0 + j) f_R(u'_0 + i, v'_0 + j)}{\sum_{i=-l}^l \sum_{j=-l}^l f_L^2(u_0 + i, v_0 + j)}. \quad (5)$$

相关系数函数在极大值附近呈单峰性的曲面分布, 相关系数函数的解即一阶导数为 0 的地方, 可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial C(\Delta u, \Delta v)}{\partial (\Delta u)} = 0 \\ \frac{\partial C(\Delta u, \Delta v)}{\partial (\Delta v)} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

求解式 (6), 得到

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \sum \left(\frac{\partial f_R}{\partial u} \right)^2 & \sum \sum \frac{\partial f_R}{\partial u} \frac{\partial f_R}{\partial v} \\ \sum \sum \frac{\partial f_R}{\partial u} \frac{\partial f_R}{\partial v} & \sum \sum \left(\frac{\partial f_R}{\partial v} \right)^2 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \sum \sum (\delta f_L - f_R) \frac{\partial f_R}{\partial u} \\ \sum \sum (\delta f_L - f_R) \frac{\partial f_R}{\partial v} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $\frac{\partial f_R}{\partial u}$ 和 $\frac{\partial f_R}{\partial v}$ 分别为右图像在 u 和 v 方向上的梯度。因此, 只需计算右图像子区域的灰度梯度就能求解出位移。目前 Barron 梯度算子的计算结果最准确, 其计算方法可表示为

和 PCL1.8.1 开源库进行编程。

首先, 对中心线提取精度进行测量分析。将激光投射到平面上, 采用双目相机采集图像, 分别利用传统灰度重心法、Steger 法和本文方法对中心线进行提取。实际测量中条纹宽度为 15 pixel, 因此选取尺寸为 15 pixel \times 15 pixel 的子区域, 并将提升系数设置为 11。传统灰度重心法、Steger 法以及本文方法提取的中心线如图 4 所示。可以发现: 在分辨率放大 11 倍的情况下, 传统灰度重心法提取的中心线具有明显的台阶效应, 精度较低; Steger 法考虑了条纹方向, 提取的中心线比较光滑且精度较高; 本文方法由于提升了局部分辨率, 提取的中心线比较光滑, 精度也较高。

为验证本方法的快速性, 分多次对平面进行测量实验, 并记录 3 种方法提取右图像中心线的时间各 10 次后取平均值, 结果如表 1 所示。可以发现, 本方法的运行速度约为 Steger 法的 3.29 倍, 满足实时测量的要求。

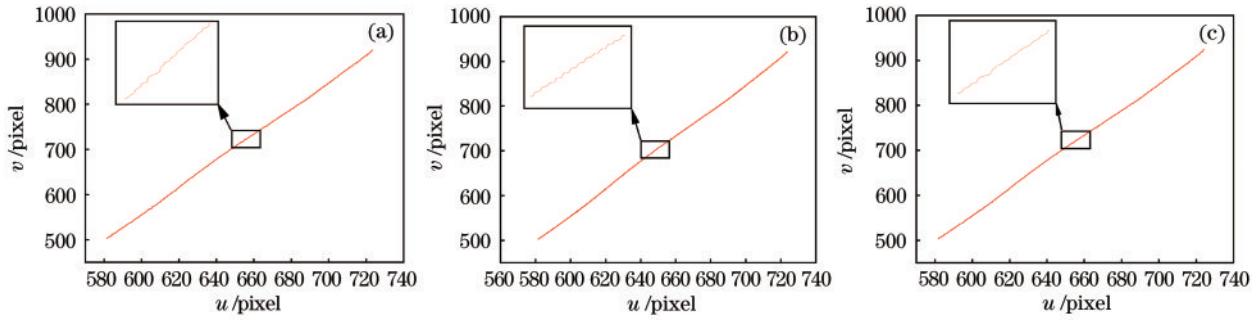


图 4 不同方法提取的条纹中心。(a)灰度重心法;(b)Steger法;(c)本方法

Fig. 4 Fringe centers extracted by different methods. (a) Gray centroid method; (b) Steger method; (c) our method

表 1 不同方法的平均运行时间

Table 1 Average running time of different methods unit: s

Image No.	Gray centroid method	Steger method	Our method
1	0.052429	0.740557	0.222822
2	0.045875	0.701235	0.229376
3	0.032768	0.734003	0.209715

由于无法测量条纹的真正中心线,以 Steger 法提取的中心线为标准进行精度分析,计算传统灰度重心法与本方法提取的中心线均方根误差(RMSE),结果如表 2 所示。可以发现,相比传统灰度重心法,本方法的中心线提取精度得到了一定的提升, RMSE 减小了 0.085 pixel。原因是本方法将子区域的分辨率提升了 11 倍,相当于在原有子区域的一个像素点内计算高精度的中心点。

表 2 不同方法的 RMSE

Table 2 RMSE of different methods unit: pixel

Image No.	Gray centroid method		Our method	
	Left	Right	Left	Right
1	0.23	0.18	0.17	0.14
2	0.23	0.22	0.13	0.16
3	0.23	0.27	0.13	0.12
Average value	0.23	0.22	0.14	0.14

对高度为 1 mm 和 6 mm 的标准块规进行测量,以分析不同方法的三维测量精度,标准块规如图 5 所示。将多线激光投射到标准块规上,采用搭建的双目系统进行图像采集,分别用传统重心法提取中心线+极线约束立体匹配(CJ)、Steger 法提取中心线+极线约束立体匹配(SJ)、本方法提取中心线+极线约束立体匹配(BJ)、传统重心法提取中心线+区域 DIC 立体匹配(CD)、Steger 法提取中心线+区域 DIC 立体匹配(SD)以及本方法提取中心线+区域 DIC 立体匹配(BD)6 种方案对块规进行测量实验。图 6 为第 1 次测量时采用本方法获取的三维点云数据。

根据点云数据拟合出两个块规平面,以 1 mm 块规点云数据拟合的平面为基准,计算高度为 6 mm 块

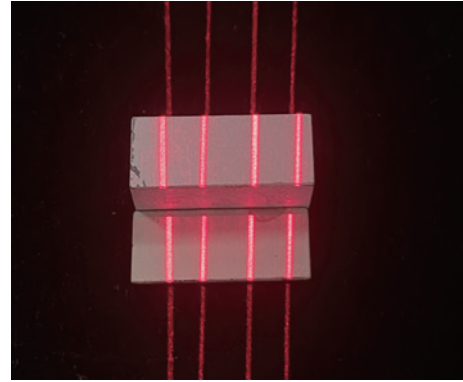


图 5 高度为 1 mm 和 6 mm 的块规
Fig. 5 Block gauges with heights of 1 mm and 6 mm

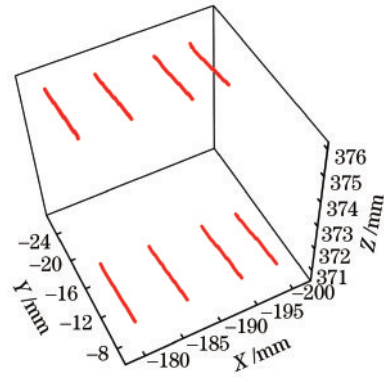


图 6 本方法获取的点云
Fig. 6 Point cloud obtained by our method

规点云数据点到该平面的距离,并用该距离减去标准高度差得到误差值。表 3 为 6 种方案提取中心线的

表 3 不同方案的 RMSE
Table 3 RMSE of different schemes unit: mm

Image No.	CJ	SJ	BJ	CD	SD	BD
1	0.11	0.08	0.07	0.07	0.05	0.05
2	0.16	0.07	0.07	0.10	0.05	0.04
3	0.16	0.11	0.04	0.11	0.07	0.03
4	0.14	0.12	0.07	0.08	0.10	0.05
5	0.13	0.08	0.08	0.05	0.07	0.05
Average value	0.140	0.092	0.066	0.082	0.068	0.044

RMSE。可以发现:BJ方案提取的中心线RMSE比CJ方案减少了52.86%,与SJ方案的精度相差较小,验证了本方法对中心线提取精度的实用性;CD方案提取的中心线RMSE比CJ方案减少了41.43%,验证了区域DIC匹配方法的有效性;BD方案提取的中心线RMSE比CJ方案平均减少了68.57%。

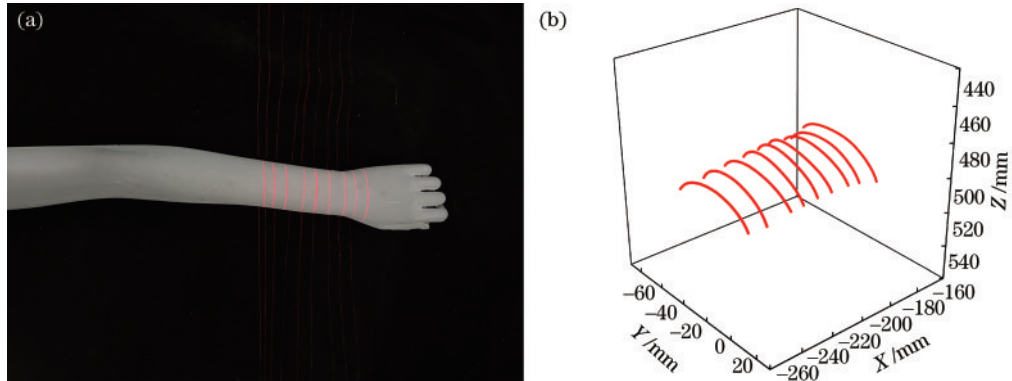


图7 手臂模型的测量结果。(a)测量模型;(b)三维点云数据

Fig. 7 Measurement results of the arm model. (a) Measurement model; (b) three-dimensional point cloud data

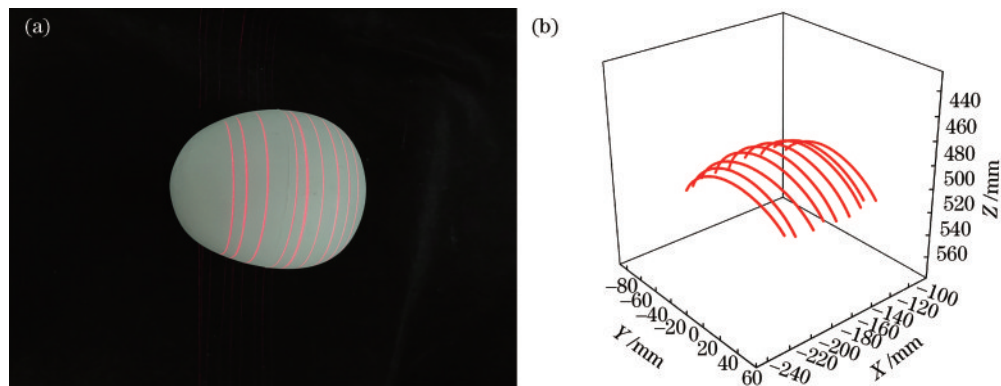


图8 头部模型的测量结果。(a)测量模型;(b)三维点云数据

Fig. 8 Measurement results of the head model. (a) Measurement model; (b) three-dimensional point cloud data

4 结 论

提出了一种融合区域匹配的快速多线结构光测量方法,以传统的重心法为基础,通过提升局部区域分辨率获得更高的中心线初始点,利用立体校正获得左右相机的初始匹配点,进而基于灰度梯度的DIC法进行亚像素精确匹配。将DIC法引入线结构光立体匹配中,利用线结构光的匹配关系,缩小了传统DIC法的匹配搜索范围,提高了立体匹配的效率。同时解决了立体校正误差引起的匹配精度下降问题,进一步提高了线结构光的测量精度。通过块规测量实验验证本方法的有效性,结果表明,本方法能实现快速、高精度的线结构光三维重建,测量误差小于0.05 mm,可应用于机器人引导加工、在线实时检测等工业自动化领域中。

参 考 文 献

[1] 庞兆智,韩雷,邵华,等.基于线结构光的大型螺纹在线

将本方法运用到机器人引导加工中,利用搭建的视觉系统对手臂模型和头部模型进行了局部三维测量。图7为手臂模型测量图和点云数据,图8为头部模型测量图和点云数据。可以发现,本方法能很好地实现物体的三维重构,获得较为精确的三维点云数据。

测量与重构方法研究[J].工具技术,2021,55(3):81-85.

Pang Z Z, Han L, Shao H, et al. On-line measurement and reconstruction of large screw thread based on line structured light[J]. Tool Engineering, 2021, 55(3): 81-85.

[2] 王雪嵩,邵双运,苏晓东,等.基于双目线结构光的轴承台测量[J].激光与光电子学进展,2020,57(21):211202.

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.

[3] 李东洁,宋贺,徐立航.一种基于激光视觉的焊缝实时检测技术研究[J].激光与红外,2019,49(7):818-823.

Li D J, Song H, Xu L H. A real-time welding seam detection technology based on laser vision[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(7): 818-823.

[4] 俞隽,李泷泉,李根,等.一种基于多线结构光视觉引导的工业机器人定位方法[J].航空制造技术,2020,63(22):84-91.

Yu J, Li S G, Li G, et al. An industrial robot positioning method based on guidance of multi-line structured light

- vision[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(22): 84-91.
- [5] 张瑞峰, 刘畅. 分区间曲线拟合的干涉条纹中心点提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(8): 0812002.
Zhang R F, Liu C. Interference fringe center point extraction method based on interval curve fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(8): 0812002.
- [6] He L Y, Wu S S, Wu C Y. Robust laser stripe extraction for three-dimensional reconstruction based on a cross-structured light sensor[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 823-832.
- [7] 吴庆华, 周阳, 李子奇, 等. 双频曲线拟合线结构光条纹中心提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(14): 141502.
Wu Q H, Zhou Y, Li Z Q, et al. Extracting method for light strip center of linear structural light based on dual frequency curve fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 141502.
- [8] 杨毅, 闫兵, 董大伟, 等. 基于二次平滑算法的线结构光中心线提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101504.
Yang Y, Yan B, Dong D W, et al. Method for extracting the centerline of line structured light based on quadratic smoothing algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101504.
- [9] 曾超, 王少军, 卢红, 等. 线结构光光条中心提取算法[J]. *中国图象图形学报*, 2019, 24(10): 1772-1780.
Zeng C, Wang S J, Lu H, et al. Center extraction algorithm of line structured light stripe[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2019, 24(10): 1772-1780.
- [10] Li Y H, Zhou J B, Huang F S, et al. Sub-pixel extraction of laser stripe center using an improved gray-gravity method[J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 814.
- [11] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113-125.
- [12] Xu G, Yuan J, Li X T, et al. Reconstruction method adopting laser plane generated from RANSAC and three dimensional reference[J]. *MAPAN*, 2018, 33(3): 307-319.
- [13] 王福斌, 刘贺飞, 王蕊, 等. 线结构光条纹中心亚像素自适应提取算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(3): 350-356.
Wang F B, Liu H F, Wang R, et al. Sub-pixel adaptive center extraction of line structured light stripe[J]. *Laser Technology*, 2021, 45(3): 350-356.
- [14] 程鑫, 凌鹤, 李硕. 汽车焊缝密封胶条的光条中心提取算法研究[J]. *应用光学*, 2019, 40(5): 823-828.
Cheng X, Ling H, Li S. Light bar center extraction algorithm for automotive weld sealant strips[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(5): 823-828.
- [15] 贾振元, 樊超楠, 刘巍, 等. 双目视觉测量中等匹配点的光条中心提取[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1582-1591.
Jia Z Y, Fan C N, Liu W, et al. Extraction of laser stripe centers based on equal matching points for binocular vision measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1582-1591.
- [16] 孙海卫, 毕远伟, 徐仕东. 反向重投影多线结构光立体视觉测量方法[J]. *激光杂志*, 2021, 42(2): 47-51.
Sun H W, Bi Y W, Xu S D. A measurement method of multi-line structured light stereo vision based on reverse reprojection[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(2): 47-51.
- [17] 肖华军, 侯力, 游云霞. 一种基于图像融合的多线结构光立体视觉测量方法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(3): 154-159.
Xiao H J, Hou L, You Y X. A measurement method of multi-line structured light stereo vision based on image fusion[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(3): 154-159.
- [18] 赵健. 数字散斑相关方法及其在工程测试中的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Zhao J. Research on digital speckle correlation method and its applications in mechanical engineering measurement [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [19] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [20] Bing P, Wu D F, Xia Y. Incremental calculation for large deformation measurement using reliability-guided digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50(4): 586-592.