

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.06.07

基于快速散斑结构光三维重建的在线测量系统

郭继平, 李名兆*, 周迎春, 李阿蒙, 张俊杰

(深圳市计量质量检测研究院, 广东 深圳 508055)

摘要: 在流水生产线中实现工件表面三维信息的快速获取及尺寸的快速测量是当前辊压成形等制造业智能化升级过程中的迫切需求。基于散斑投影的三维重建方法仅需利用单幅物体散斑图像即可重建出物体表面的三维数据,在流水线工件快速测量中具有一定优势。本文对散斑三维重建中较为耗时的对应点搜索算法进行了优化,并在此基础上研制出适用于辊压成形制造生产线的工件快速三维测量系统。实验结果显示,该系统具有较快的三维数据重建速度,测量误差在0.035 mm范围内,能够满足辊压成形工件三维结构尺寸的快速在线测量需求。

关键词: 在线检测; 光学三维成像; 散斑测量; 运动物体测量

中图分类号: TB913

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2022)06-0048-05

Online measurement system based on fast speckle structured light 3D reconstruction

GUO Jiping, LI Mingzhao*, ZHOU Yingchun, LI Ameng, ZHANG Junjie

(Shenzhen academy of metrology and quality inspection, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The rapid acquisition of 3D surface information and measurement of dimensions of workpieces online in the flow production line is strongly required in the current intelligent upgrading process of manufacturing industries such as roll forming. The speckle projection based 3D reconstruction method can reconstruct the 3D data of object surface only by using a single object speckle image, which has certain advantages in the rapid measurement of workpieces online. In this paper, on the basis of optimizing the time-consuming corresponding point search algorithm in speckle 3D reconstruction, a rapid 3D measurement system for online workpiece measurement that is suitable for the roll forming production line is developed. The experimental results show that the system has a fast 3D data reconstruction speed, and the measurement error is within 0.035 mm, which can meet the requirements of rapid online measurement of 3D structural dimensions of rolled parts.

Key words: online inspection; optical 3D imaging; speckle measurement; moving object measurement

0 引言

随着制造业数字化、智能化转型发展,生产线上对运动状态下产品或工件物体的非接触表面三维结构尺寸和表面缺陷的高精度快速测量需求日益增多。基于散斑结构光投影和立体视觉原理

的三维成像和测量技术,具有非接触、速度快、抗环境干扰能力强、适用于运动物体测量等特点,在工业测量领域有着广阔的应用前景,成为近年来国内外研究的热点^[1-5]。

基于散斑投影的三维重建方法的关键步骤是利用数字图像相关算法搜索查找左右相机采集的

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2022-10-29

基金项目: 广东省市场监督管理局科技项目(2020HBZ01, 2020ZJ04); 国家科技基础条件平台重点项目“计量科学数据项目”(APT2101-1)

引用格式: 郭继平, 李名兆, 周迎春, 等. 基于快速散斑结构光三维重建的在线测量系统[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 48-52.

Citation: GUO J P, LI M Z, ZHOU Y C, et al. Online measurement system based on fast speckle structured light 3D reconstruction[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(6): 48-52.



散斑图像的对应点。该步骤计算量大、计算复杂度高、耗时长,成为散斑投影三维重建方法应用于快速在线工业测量的限制因素之一。此外,在钣金件辊压成形等典型的连续性制造中,工业产线对产品和工件的质量检测,需要同时对3D面轮廓及关键表面几何结构尺寸进行精确快速测量,当前国内缺乏针对性的自主在线测量设备。本文针对上述问题,通过对散斑三维重建算法的优化,提升三维重建计算效率,结合辊压成形智能制造场景中钣金件快速检测需求,研究开发基于快速散斑三维重建的在线测量系统,并通过已校准溯源的测量标准对系统测量数据结果的精度进行了验证分析。

1 基于快速散斑结构光三维重建的在线测量方法

1.1 散斑结构光三维重建步骤

典型的基于散斑投影的三维重建系统一般由1个投影装置和2个相机组成,如图1所示。其基本步骤为:①投影装置投射散斑结构光至物体表面,左右两个相机同步采集包含物体表面信息的散斑图像;②对散斑图像进行预处理,包括滤波、散斑区域的提取、图像去畸变等;③对处理后的图像进行投影校正,并利用数字图像相关算法搜索得到物体表面点在两个相机所成图像中的整像素匹配点对;④利用非线性优化方法计算亚像素匹配点对;⑤基于系统标定数据,利用双目立体视觉原理计算匹配点对的空间三维坐标,获得物体表面三维数据。

上述步骤③和④的匹配点对搜索是关键步骤,但由于计算量较大,较为耗时,选择合适的搜索

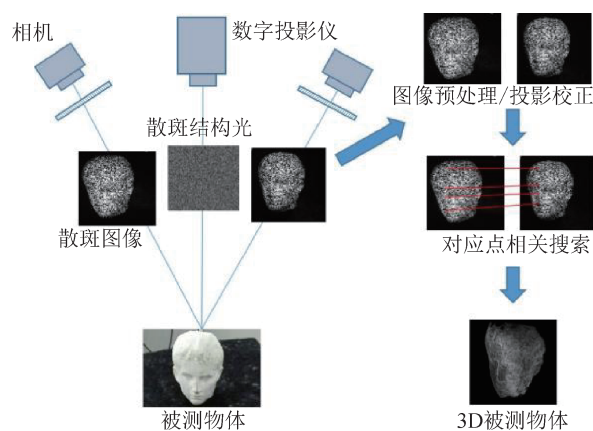


图1 散斑投影三维重建示意图

Fig.1 Schematic diagram of speckle projection 3D reconstruction

策略和优化算法十分重要,关系到三维重建的精度和效率^[6-7]。本文利用二阶图像投影校正算法和优化的亚像素优化算法提升三维数据重建效率。

1.2 二阶图像投影校正

基于散斑投影的三维重建系统中的两个相机构成双目立体视觉系统,其中一个相机获得的散斑图像特征点位于另一个相机平面对应的极线上。如图2所示, $a_L(u_L, v_L)$ 和 $a_R(u_R, v_R)$ 是物体表面点A在左右相机所成散斑图像中的对应点, (u_i, v_i) ($i = L, R$)为各自图像坐标。 a_L, a_R 分别落在对应图像的极线 p_{aL}, p_{aR} 上,图中 e_L, e_R 为极点, O_L, O_R 为相机光心。这一性质可用于左右相机散斑图像对应点的搜索过程,使得数字图像相关计算搜索从整个图像区域的二维搜索简化为沿极线方向的一维搜索,可减少搜索计算时间。通常情况下,极线在图像中有一定的斜率。直接沿极线进行对应点搜索仍较为耗时,且容易产生误匹配。为此,可对预处理后的散斑图像进行投影校正,使得搜索路径沿 u 轴方向进行,以进一步提升效率,减少错误^[8-9]。

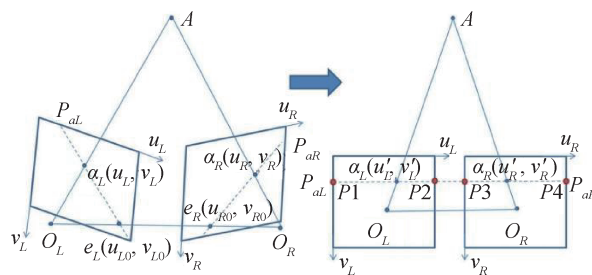


图2 极线搜索及图像投影校正示意图

Fig.2 Schematic diagram of polar line search and image projective rectification

采用的图像投影校正方法包括图像水平线变换校正和共线性变换校正两个步骤。首先根据式(1)将左右相机图像极线调整至与 u 轴平行。

$$\begin{bmatrix} u_L^h \\ v_L^h \\ 1 \end{bmatrix} = M_L \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} u_R^h \\ v_R^h \\ 1 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{式中: } M_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{u_{i0}} & 0 & 0 \\ -\frac{v_{i0}}{u_{i0}} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{u_{i0}} & 0 & 1 \end{bmatrix}, (u_i^h, v_i^h) \text{ 为变换调整后}$$

的成像点图像坐标, (u_{i0}, v_{i0}) 为左右图像极点坐标,

$i = L, R$ 。经过水平性变换后,共轭极线 p_{al}, p_{ar} 与左右图像 v 轴交点坐标之间存在的拟合关系为

$$v_{Rj}^h = av_{Lj}^{h^2} + bv_{Lj}^{h^2} + c \quad (j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

式中: a, b, c 为调整系数,可通过已知对应图像坐标点由最小二乘法解算求出。然后,可根据式(3)完成共线性变换。

$$\begin{bmatrix} u'_R \\ v'_R \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_R^h \\ av_L^{h^2} + bv_L^{h^2} + c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

通过变换,左右相机图像共轭极线 p_{al}, p_{ar} 的 v

$$C_i = \frac{\sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m [f_i(u_p, v_q) - \bar{f}_i] \cdot [g_i(u_p, v_q) - \bar{g}_i]}{\sqrt{\sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m [f_i(u_p, v_q) - \bar{f}_i]^2 \cdot \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m [g_i(u_p, v_q) - \bar{g}_i]^2}} \quad (4)$$

式(4)中: f_i 为 I_L 中第 i 个子区内像素点对应的灰度值; $\bar{f}_i$ 为对应子区图像度值均值; g_i 为右相机图像水平极线上第 i 个待匹配子区域内像素点的灰度值; $\bar{g}_i$ 为该子区图像灰度均值。当 C_i 取最大值时对应的子区域即为匹配区域,其中心点即为对应点。

1.4 对应点亚像素优化及三维重建算法

经过上述快速对应点搜索步骤,得到整像素级对应点坐标。为提升散斑重建三维数据精度,

$$\begin{cases} u_R = u_L + u_T + \frac{\partial u_T}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial u_T}{\partial v} \Delta v + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_T}{\partial u^2} (\Delta u)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_T}{\partial u \partial v} \Delta u \Delta v + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u_T}{\partial v^2} (\Delta v)^2 \\ v_R = v_L \end{cases} \quad (5)$$

$$\tau = 1 - \frac{1}{2} \sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m \left[\frac{f(u_p, v_q) - \bar{f}}{\sqrt{\sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m [f(u_p, v_q) - \bar{f}]^2}} - \frac{g(u_p, v_q) - \bar{g}}{\sqrt{\sum_{p=-m}^m \sum_{q=-m}^m [g(u_p, v_q) - \bar{g}]^2}} \right]^2 \quad (6)$$

定义待优化参数为

$$\sigma = \left\{ u_T, \frac{\partial u_T}{\partial u}, \frac{\partial u_T}{\partial v}, \frac{\partial^2 u_T}{\partial u^2}, \frac{\partial^2 u_T}{\partial u \partial v}, \frac{\partial^2 u_T}{\partial v^2} \right\} \quad (7)$$

并由此定义优化目标函数 $\tau(\sigma)$,采用Newton-Raphson迭代算法可实现该优化过程求解,其迭代公式为

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{\nabla \tau(\sigma_0)}{\nabla \nabla(\sigma_0)} \quad (8)$$

式中: σ_0 为初值(可采用整像素对应点坐标参数); $\nabla \tau(\sigma_0)$ 为 $\tau(\sigma)$ 在 σ_0 处的梯度值; $\nabla \nabla(\sigma_0)$ 为 $\tau(\sigma)$ 在 σ_0 处的二次偏导。

按照式(8)循环迭代,直至前后两次结果的差值小于规定阈值,即可得到 σ 的最优解,并将结果代入式(5),可得到对应点亚像素图像坐标 $x_i(u_i, v_i, 1)$, $i = L, R$ 。根据双目立体视觉原理,

坐标调整至相同,散斑图像的对应点相关搜索仅需沿 u 轴进行,可大幅提升对应点搜索效率^[10]。

1.3 对应点快速搜索

完成上述投影校正变换处理后,通过双线性插值算法获得可直接进行数字相关计算的新物体散斑图像。本文选择搜索子图像窗口半宽 m 为10像素,对左相机子图像区域 I_L 沿其中心点 v 坐标在右相机图像中沿 u 轴进行相关搜索,并采用基于去均值归一化互相关函数的相关算法依据式(4)计算相关系数 C_i ^[11]。

需对整像素对应点坐标进行亚像素优化。采用简化的视差变换模式构造目标函数对整像素对应点坐标进行亚像素优化^[10]。首先,利用二阶视差变换模式给出对应点坐标的变换关系,如式(5);同时再构建优化目标函数,如式(6)。其中, u_T 为左右相机散斑相机子区域图像水平视差; $\Delta u, \Delta v$ 为对应点距子区域图像中心的图像坐标偏差。

将 x_i 带入式(9)联立方程即可求得对应点的空间三维坐标。

$$x_i = M_i [R_i \ T_i] X \quad (i = L, R) \quad (9)$$

式中: M_i 为相机内参矩阵; R_i, T_i 为世界坐标系到相机坐标系的旋转平移变换矩阵,可通过相机标定预先获得^[12]。

2 实验验证与精度分析

根据上述方法,构建基于散斑投影的三维在线测量系统如图3所示。系统中使用的投影模块有效像素数为 1280×800 ,相机有效像素数为 2448×2048 ,帧率为20 fps。直线电机可模拟在线测量工况带动被测工件运动。

为验证本文开发系统的实用性,选取辊压成形制造工件作为测量对象,模拟流水线运动状态

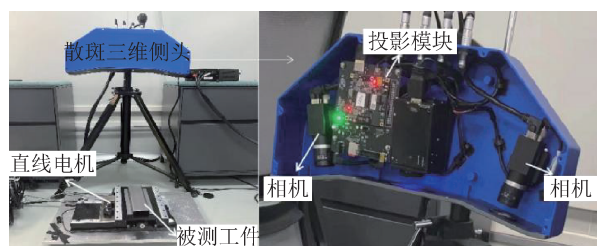


图3 散斑三维在线测量装置图
Fig.3 Speckle 3D online measurement system

进行测量实验,将测量结果与工件设计3D模型进行对比,输出整体面形误差及在线检测中关注的关键几何尺寸。同时为验证系统测量结果的准确性,采用经校准溯源的台阶标准器进行了测量实验,给出测量数据的误差分析结果。

2.1 工件测量实验结果

应用本文测量系统对如图4(a)所示的辊压成形钣金件进行测量,测量时设置电动马达带动工件以1.5 m/min速度运动。图4(b)和图4(c)给出了两个相机采集到的物体散斑图像和三维重建数据结果。使用本文优化的图像投影校正和亚像素优化算法,图像采集及计算处理时间总计约4.6 s。使用优化前的算法重复该实验过程,图像采集及计算处理时间总计约8.2 s。由此表明,优化的算法可显著提高散斑图像三维重建效率。

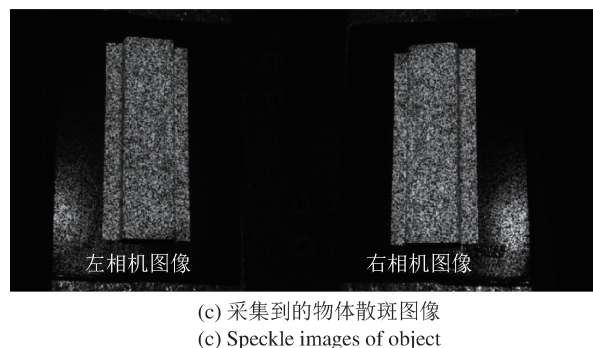
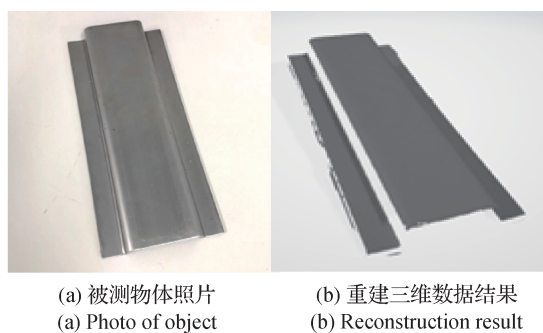


图4 工件三维重建实验结果

Fig.4 3D reconstruction result of workpiece

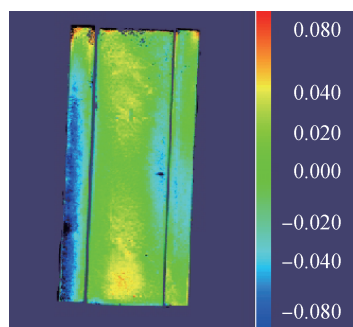


图5 面型轮廓分析结果
Fig.5 Measurement results of surface profile

结合产线对该工件的实际质量检测需求,使用本文系统软件分别对工件整体面型轮廓误差、上下面高度差及平面度进行了测量分析。整体面型轮廓与CAD模型进行自动匹配,得到误差分布如图5所示。同时,系统可根据获得的3D数据计算出工件上下面高度差为54.075 mm,工件上表面平面度为0.530 mm。实验结果表明本文开发的散斑三维测量系统适用于工件在线测量任务。

2.2 精度验证实验结果

为验证测量结果的精度,使用图6(a)所示台阶标准器进行了验证测量。应用本文系统对该标准器重建的三维数据结果如图6(b)所示。台阶标准器的台阶面高度、上台阶面平面度经校准溯源,使用本系统软件测量得到的结果及误差如表1所示,台阶高和平面度计算时,去除了部分错误三维数据点。根据验证测量结果,本文系统台阶面高度测量误差为-0.032 mm,上台阶面平面度测量误差为0.052 mm(采用最小二乘平面拟合,参与拟合计算的有效数据点数为12681个,拟合标准偏差为0.009 mm)。由实验结果可知,结构尺寸测量误差可控制在0.035 mm以内,可满足工业生产中部分产品或工件的在线测量要求。

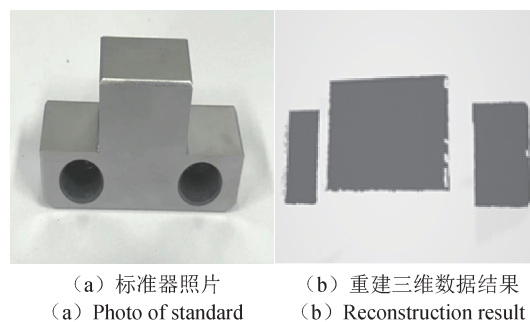


图6 验证标准器三维重建结果

Fig.6 3D reconstruction result of step standard

表1 数据精度验证结果
Tab.1 Precision verification results mm

被测参数	校准值	测得值	误差
台阶高度	21.546	21.514	-0.032
平面度	0.003	0.055	0.052

3 结束语

针对物体表面在线三维测量需求,利用优化的投影校正算法和亚像素优化算法,开发出一种基于散斑结构光投影的三维测量系统,可成功用于钣金件等产品的在线测量。此次研究开发的系统仅能实现一个视角下的物体表面数据三维重建和测量分析,对于有遮挡关系的复杂物体数据获取不完整,不能实现对物体全部表面完整数据的获取和测量,三维数据重建和测量分析过程仍相对耗时。今后仍需对完整物体表面数据获取、快速实时在线测量算法进行深入研究,进一步提高系统的应用范围。

参考文献

- [1] 郜魏柯,杜小平,王阳,等.激光散斑目标探测技术综述[J].中国光学,2020,13(6):1182-1193.
GAO W K, DU X P, WANG Y, et al. Review of laser speckle target detection technology [J]. Chinese optics, 2020, 13(6): 1182-1193. (in Chinese)
- [2] SANSONI M T G, DOCCHIO F. State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation[J]. Sensors, 2009, 9(1): 568-601.
- [3] 王晶晶,张大治,薛景峰,等.数字散斑干涉在振动测量中的应用[J].计测技术,2008,28(1):31-34.
WANG J J, ZHANG D Z, XUE J F, et al. Application of digital speckle pattern interferometry to vibration measurement [J]. Metrology and measurement technology, 2008, 28(1): 31-34. (in Chinese)
- [4] GARCÍA J, ZALEVSKY Z, GARCÍA-MARTÍNEZ P, et al. Three-dimensional mapping and range measurement by means of projected speckle patterns [J]. Applied optics, 2008, 47(16): 3032-3040.
- [5] 张扣文,梁晋,尤威,等.基于双目视觉和散斑投射的快速形貌测量[J].激光与红外,2016:1517-1520.
ZHANG K W, LIANG J, YOU W, et al. Fast morphology measurement based on the binocular vision and speckle projection [J]. Laser and infrared, 2016: 1517-1520. (in Chinese)

- [6] 笪健,屈惠明,陶天阳,等.结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法[J].光学学报,2016:368-377.
DA J, QUHM, TAOTY, et al. Real-time three dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. 2016, 36(10): 368-377. (in Chinese)
- [7] 何进英,刘晓利,彭翔,等.基于灰度约束的三维数字散斑整像素相关搜索[J].中国激光,2017,44(4):156-163.
HE J Y, LIU X L, PENG X, et al. Integer pixel correlation searching for three dimensional digital speckle base on gray constraint [J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(4): 156-163. (in Chinese)
- [8] ISGRO F, TRUCCO E. Projective rectification without epipolar geometry [C]. Proceedings 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, 91: 1-99.
- [9] HARTLEY R. Theory and practice of projective rectification [J]. International journal of computer vision, 1999, 35(2): 115-127.
- [10] GUO J P, PENG X, LI A M, et al. Automatic and rapid whole-body 3D shape measurement based on multi-node 3D sensing and speckle projection [J]. Applied optics, 2017, 56(31): 8759-8768.
- [11] STEFANO L D, MATTOCCIA S, TOMBARI F. ZNCC-based template matching using bounded partial correlation [J]. Pattern recognition letters, 2005, 26(14): 2129-2134.
- [12] PENG X, LIU X L, YIN Y K, et al. Optical measurement network for large-scale and shell-like objects [J]. Optics letters, 2011, 36(2): 157-159.

(本文编辑:田艳玲)



第一作者:郭继平(1985—),男,高级工程师,博士,深圳市计量质量检测研究院研发中心主任,主要研究方向为数字化计量与检测、光学三维成像与测量、智能传感。



通讯作者:李名兆(1964—),男,教授级高工,硕士,主要研究方向为精密计量测试、医学测量、智能传感技术。