

线结构光双目融合补缺重建技术

张博霄¹, 于佳慧¹, 焦小雪^{1,2,3}, 张雷^{1,2,3,4*}

¹河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;

²河北省计算光学成像与光电检测技术创新中心(筹), 河北 邯郸 056038;

³河北省计算光学成像与智能感测国际联合研究中心, 河北 邯郸 056038;

⁴河北省煤矿智能化工程研究中心, 河北 邯郸 056038

摘要 针对现有线结构光对复杂物体进行三维重建时存在信息缺失的问题, 分析遮挡导致信息残缺的机理, 定量分析线结构光系统参数和遮挡残缺之间的关系, 提出一种长短基线结构光交叉补缺重建方法。基于双目线结构光硬件设备, 构建了双目长基线和左右单目短基线 3 套不同基线的线结构光系统, 对物体进行图像采集和三维重建。重建结果融合了双目、左目、右目图像的重建结果, 实现了信息补缺, 较好地改善了线结构光对具有复杂表面的物体进行三维重建时存在信息缺失的问题。实验结果显示, 相比于传统双目线结构光, 所提双目线结构光融合重建技术的重建缺失阈值从 4.28 mm 降低为 2.14 mm, 信息重建完整率从 88% 提升到 92%, 分别采集了充电器、盒子、开发板的三维数据, 最高能够实现 94% 的信息重建。所提双目线结构光融合重建技术在不改变双目线结构光硬件设备的基础上, 增加了信息采集完整度, 拓宽了应用范围。

关键词 线结构光; 双目; 三维重建; 表面突变

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222288

Line Structured Light Binocular Fusion Filling and Reconstruction Technology

Zhang Boxiao¹, Yu Jiahui¹, Jiao Xiaoxue^{1,2,3}, Zhang Lei^{1,2,3,4*}

¹School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China;

²Hebei Computational Optical Imaging and Photoelectric Detection Technology Innovation Center (in preparation), Handan 056038, Hebei, China;

³Hebei International Joint Research Center for Computational Optical Imaging and Intelligent Sensing, Handan 056038, Hebei, China;

⁴Hebei Coal Mine Intelligent Engineering Research Center, Handan 056038, Hebei, China

Abstract This study aimed to resolve the issue of information missing during the reconstruction of complex objects using existing line structured light. Herein, we have examined the mechanism of information incompleteness caused by occlusion along with the relationship between the parameters of the line structured light system and the occlusion incompleteness quantitatively. Furthermore, a new method for cross-complementary reconstruction of long and short baseline structured light is proposed. Based on the binocular line structured light hardware equipment, three sets of line structured light systems are created, which have a binocular long baseline and left and right monocular short baselines, conducting image acquisition and three-dimensional (3D) reconstruction of objects. The reconstruction result integrates the left-eye and right-eye images and binocular reconstruction findings, accomplishing information filling and resolving the problem of information loss effectively while performing 3D reconstructions for objects with complex surfaces using line structured light. The experimental results demonstrate that compared with the traditional binocular structured light, the reconstruction missing threshold of the proposed binocular line structured light fusion reconstruction technology is reduced

收稿日期: 2022-08-12; 修回日期: 2022-09-09; 录用日期: 2022-10-13; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(11904073, 11474169)、河北省自然科学基金(F2019402351, F2016402115)、河北省生态矿山联合基金(F2021402011)、河北省重点研发计划(20371802D)

通信作者: *lzhang@hebeu.edu.cn

from 4.28 mm to 2.14 mm, the information reconstruction integrity rate is enhanced from 88% to 92%. And we collected objects such as chargers, boxes, and development boards, moreover, this study shows that up to 94% of the information can be rebuilt. Thus, the proposed binocular line structured light fusion reconstruction technology increases the integrity of information acquisition and expands the application range without altering the hardware of binocular line structured light.

Key words line structured light; binocular; three-dimensional reconstruction; surface mutation

1 引言

随着人工智能在各个领域不断应用,三维成像技术在近些年来也得到了迅猛的发展。线结构光三维成像作为光学三维成像技术的一种,具有非接触、成像速度快、测量精度高、真实感强的优点。在当今社会正朝着自动化、智能化、数字化、信息化方向发展的趋势下,光学三维成像技术作为连接现实世界和数字世界的桥梁之一,为下游各个行业提供了数据源,在工业制造、医疗卫生、文化旅游、电子商务^[1-4]等领域取得了日益广泛的应用。

光学三维成像技术根据光源的不同可以分为主动式和被动式两大类。被动式光学三维成像技术借助环境光源直接从一个或者多个摄像机获取的二维图像集中提取目标物体的三维数据。根据图像传感器个数和运动方式,被动式光学三维成像技术可以简单分为单目运动式 SFM(structure from motion)^[5]、双目立体三维成像^[6]和集成成像多目阵列三维成像 II(integral imaging)^[7]等技术,优点是无需照明、结构简单、成像范围相对较大,成像范围一般为 1~1000 m,缺点是对弱纹理或者无纹理的物体三维成像效果较差。主动式光学三维成像技术利用投射装置向目标物体投射光源,探测经物体表面调制后的光学信息,由此恢复出被测物体的三维数据。宏观尺度下,典型主动式光学三维成像技术主要有飞行时间(TOF)法^[8]、激光雷达^[9-10]和结构光^[11]等技术,优点是精度相对较高、适配性好,缺点是额外光源、成像范围相对较小,成像范围一般为 0.1~10 m。

传统的结构光三维扫描系统由 1 个摄像机加 1 个线结构光发射器组成。该方法系统组成简单,可以快速对物体进行扫描,但系统标定较为困难,而且在扫描复杂物体表面时,由于物体自身的遮挡,会出现对表面有突变的物体进行三维重建时存在信息缺失的问题。双目线结构光扫描系统由 2 个相机和 1 个线结构光投影仪组成,因为增加了两相机之间的基线距离,所以利用三角测量法测量时精度更加准确,但是因为激光光线只起到了扫描物体深度信息的作用,所以仍然存在对复杂物体表面进行测量时,左右相机由于物体自身的遮挡导致进行三维重建时信息缺失的问题,无法准确地全面地恢复出物体的完整三维形貌。

针对以上存在的问题,本文提出了一种单目和双目相融合的线结构光扫描方法。在原始双目测量系统的基础上,将左右目分别与投影仪组成两套测量系

统,提出了一种信息融合算法将三套测量系统相融合,搭建了双目线结构光融合重建系统,所提方法能够在保证扫描精度的同时又可以得到更为完整的三维形貌图像。光学实验结果显示:对于点云数量为 884160 的问题,原始双目系统能够采集到 777141 个点云,信息完整度为 87.9%;所提单目和双目相融合补缺的方法增加了 107019 个点云,其中左目系统弥补了 25892 个点云,右目系统弥补了 26485 个点云,信息采集完整度提升到 93.8%;对于盒子、开发板等物体的更多实验结果显示,原始双目系统对扫描物体重建的完整度分别为 88.6% 和 92.9%,优化后的系统可以将信息采集完整度分别提升到 90.6% 和 94.6%,进一步提升了线结构光三维重建技术对扫描图像完整度的要求。

2 单目线结构光三维重建

2.1 线结构光重建原理

原始的双目线结构光采集系统使用的是在实验室中搭建的图像采集系统。将被测样本放置在传送带上,传送带的正上方装设有双目相机和线激光器。当样本从相机下方匀速通过时,线激光器射出的线结构光束照射在样品上,因样本三维形貌的不同而出现高低变化。左右相机(LEN_{left}和 LEN_{right})将受调制后的光束成像到像素平面上,得到像素平面上的像点 I_{left} 和 I_{right} 。图 1 为原始双目线结构光三维成像原理图。

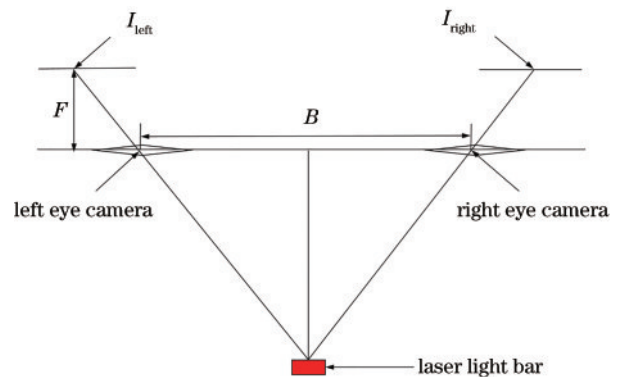


图 1 原始双目线结构光三维成像原理

Fig. 1 Principle of original binocular line structured light 3D imaging

左相机和右相机光心之间的距离(基线)长度 B 已知,双目相机的焦距 F 已知,测量出光束在左右相机成像的像点差值,利用光条中心提取算法^[12-14],通过计算可以得到激光光条到左右相机的距离 m :

$$m = \frac{F \times B}{I_{\text{right}} - I_{\text{left}}}, \quad (1)$$

式中： I_{left} 为左目系统光心到投影点的距离； I_{right} 为右目系统光心到投影点的距离。将实验样本放置在传送带上，使其带动样本从右到左匀速向前移动，通过双目相机和线激光器的正下方，在线结构光束的照射下，双目相机逐帧采集激光条纹的变化，根据式(1)计算出激光条纹的距离 m ，从而计算出实验样本的三维形貌。图 2 为基于传送带的实验样品图像采集系统的结构示意图。

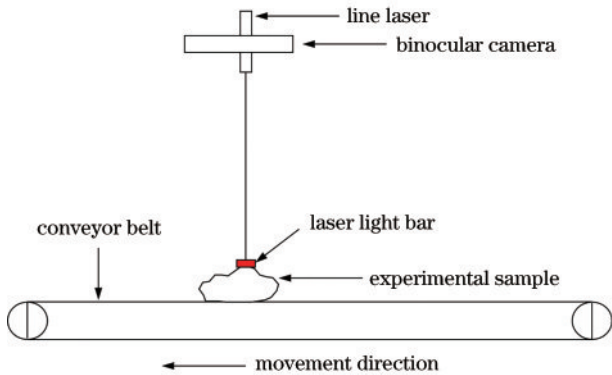


图 2 实验样品采集结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of experimental sample collection

2.2 线结构光重建信息缺失定量分析

图 3 为线结构光成像原理。从图 3 可以看出，对于线结构光而言，线结构光投射的激光线经物体调制后被图像传感器接收。其中 B 为线激光器到相机光心的距离， f 为图像传感器焦距， N 为线激光器在图像上的像素坐标。根据三角测距原理^[15-16]可以得到，激光线位置的深度信息 Z 为

$$Z = \frac{f \times B}{N \times S}, \quad (2)$$

式中： S 为图像像素大小。当结构光扫描方向上存在一高度为 h 的凸起时，投射到物体表面的线结构光被凸起遮挡，导致图像传感器接收不到光条信息，从而导致重建过程中此部分三维信息缺失，如图 4 所示。

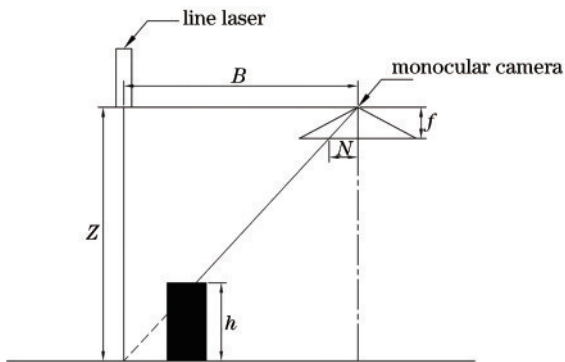


图 3 线结构光成像原理

Fig. 3 Principle of line structured light imaging

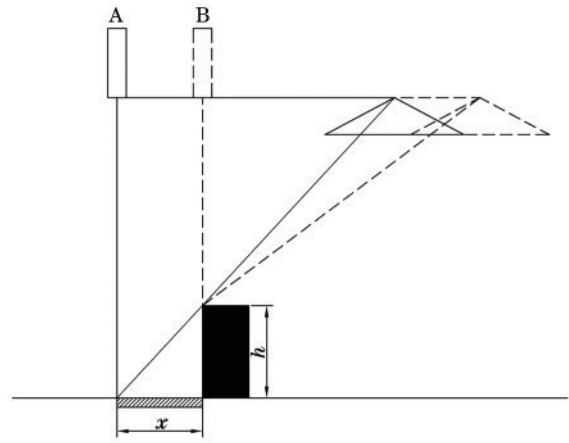


图 4 信息缺失定量分析

Fig. 4 Quantitative analysis of missing information

当结构光三维成像系统从左向右逐线扫描样品时，当存在高度为 h 的凸起时，在一个长度为 x 的扫描范围内，图像传感器无法接收到光条数据，如图 4 所示。根据三角形相似原理，可得

$$x = \frac{h}{Z} B, \quad (3)$$

式中： Z 为基准平面距离； x 为被遮挡区域。虽然缩短基线 B 可以减小被遮挡区域 x 的宽度，但是同时也会降低三维重建的精度。

2.3 图像缺失融合原理

进一步研究发现，被遮挡的部分，往往出现在远离图像传感器的一侧。当图像传感器位于激光线右侧时（如图 3 所示），凸起部分的左侧有宽度为 x 的区域被遮挡；当图像传感器位于激光线左侧时（如图 5 所示），凸起部分的右侧有宽度为 x 的区域被遮挡。

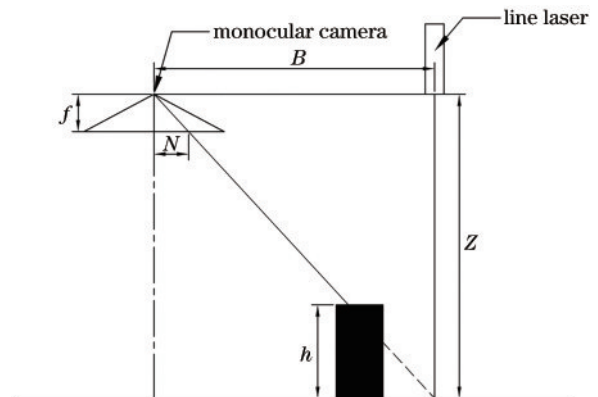


图 5 右侧遮挡示意图

Fig. 5 Schematic of right occlusion

3 双目线结构光三维重建

在现有的结构光扫描三维成像系统中，针对物体的遮挡造成扫描图像信息缺失的问题，常见方法有改变光条扫描模式，如 Ko 等^[17]研究的基于激光结构光成像方法的彩色 3D 扫描仪增加了旋转平台来对物体进

行扫描;或对激光扫描的线目参数进行优化,肖华军团队^[18]利用多相机的图像融合测量方法来实现对缺失信息的重建。本文不改变扫描模式和相机数量,在不改变原始双目系统构造的基础上对信息缺失问题进行优化。所提方法为:以 ZED2 双目相机和线结构光激光器组成的原始双目系统为基础,同时包括左目相机与线激光器组成的左目系统,右目相机与线激光器组成的右目系统,三套系统同时对被测物体进行扫描,得到不同系统模式下扫描得到的 3 幅三维形貌。

1) 利用双目系统进行三维重建,得到三维信息。根据设定坐标系,三维信息的 Z 值为负值。当双目系统中任意一目存在遮挡时,三维信息缺失,重建点云数据中 Z 值为 0。

2) 对双目系统中重建点云数据中 Z 值为 0 的数据、左目结构光重建数据、右目结构光重建数据进行检索。

a) 如果左目或者右目有重建数据,则将该数据回填到整体重建结果中。

b) 如果左目和右目均无重建数据,则表示该点超出了高度为 h 的凸起所造成遮挡的成像范围。

根据理论分析,基线越短,缺失的成像范围越小;基线越长,成像精度越高。本文综合了长基线成像精度的特点,同时利用光条中心提取算法,融合短基线成像范围广的优点,实现了对复杂表面物体的三维重建。优化后的双目线结构光三维重建系统实际上由 1 套长基线双目结构光成像系统和 2 套短基线单目线结构光成像系统联合而成,左目线结构光系统基线长度 B_l ,右目线结构光系统基线长度 B_r ,分别应对左右侧遮挡区域。根据上述分析,当基准平面上存在高度为 h 的凸起时,左侧被遮挡部分由左目负责信息采集,右侧被遮挡区域由右目负责信息采集,其余部分由所有相

机共同采集。左右相机项目交叉融合,即可实现被遮挡区域的信息采集,其系统原理如图 6 所示。

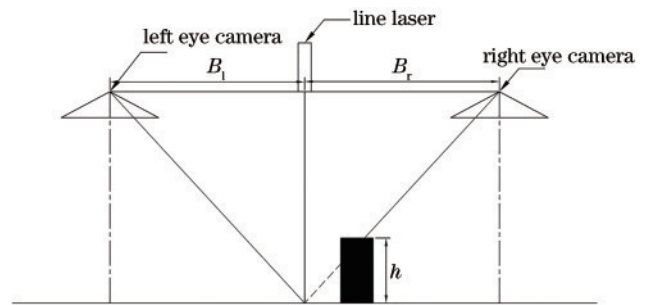


图 6 双目线结构光三维重建

Fig. 6 3D reconstruction of binocular line structured light

双目线结构光三维成像技术中,仅有两个凸起同时存在,且两个凸起间距为 x 时,此时两个凸起中间是宽度为 x 的区域,同时遮挡了左目和右目,导致三维重建信息缺失。也就是说对于深孔(孔径/孔深 $< B/Z$),双目线结构光无法实现正确重建,相比于单目线结构光的单边凸起(高度/深度 $< B/Z$)即无法正确重建,已经有了极大提升。

系统参数:ZED2 双目相机,左基线 $B_l=61.6$ mm,右基线 $B_r=58.4$ mm, $F=2.12$ mm,基准深度 $Z=280$ mm。当不考虑两个凸起同时存在,仅当一个凸起存在,高度为 10 mm 时,扫描结果如表 1 所示。原始双目系统基线最长,虽然精度最高,但是造成的缺失大;左右单目系统缩短了基线长度,减小了缺失的范围,但也降低了精度;将三个系统采集得到的三维形貌图像交叉融合后,既减小了缺失的范围,也保证了采集信息的精度,在不考虑深孔情况时,缺失范围可以缩减至 2.09 mm。

表 1 各采集系统参数与扫描结果

Table 1 Parameters of each acquisition system and scanning results

Parameter	Original binocular system	Left eye system	Right eye system	Optimized binocular system
B /mm	120	61.6	58.4	61.6, 58.4, 120
x /mm	4.28	2.20	2.09	2.09

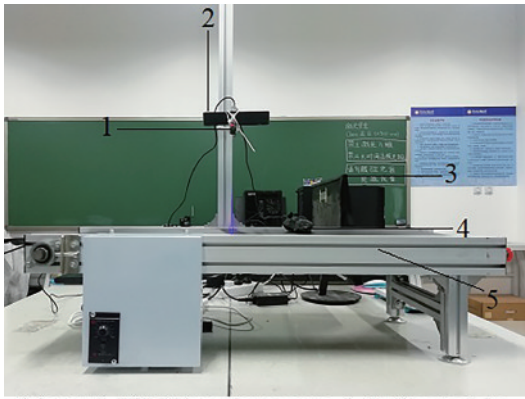
4 双目线结构光三维重建系统

实验采集系统现场如图 7 所示。扫描采集的实验样品有充电器、盒子和开发板,实物如图 8 所示。

首先,将实验样本放置在传送带一端,打开开关,使样本匀速向前移动,样本经过 ZED2 双目相机和激光器正下方时,激光器发出的线结构光条照射在样本表面上,同时 ZED2 双目相机对线结构光的投射结果进行采集。ZED2 双目相机以 $2 \times (672 \times 376)$ 的分辨率,100 Hz 的速度对光束条纹进行连续采集,在同一照明功率 50 mW 下,采集了 650 nm 波长下的单张实验样本双目图像,如图 9 所示。

实验样本前进通过激光线条,激光线逐帧扫描完整样本。对得到的图像进行左右分图后,根据灰度重心法,以光条纹截面的灰度值分布中的质心作为光条纹的中心,提取光条中心位置,利用式(1),利用 MATLAB 软件对图像的数据进行处理运算,得到实验样本的三维形貌。

本实验采用了一体化双目设计,使得双目相机在测量过程中稳定无位移,保证了实验测量的准确性。对优化后的双目成像系统使用了融合算法。在三角测量法原理中,分辨率确定的情况下,越长的基线距离使得系统的精度越高^[19-20]。在没有遮挡的情况下,以双目原始的图像为基准,使用长基线的三角测量法,保证



1. laser; 2. ZED2 binocular camera; 3. display module; 4. experimental sample; 5. conveyor belt

图 7 实验采集系统

Fig. 7 Experiment collection system

了扫描后得到的图像信息拥有较高的精度。当扫描过程中出现因物体自身遮挡而扫描不到的情况时,判断遮挡的情况,若是右目相机无法获得扫描信息,以左目相机与线激光投影仪组成的单目系统来采集样品深度信息;同理,当左目相机无法获得扫描信息时,则以右目相机与线激光投影仪组成的单目系统来采集样品深度信息。通过左右目系统和原始双目系统这三套系统的交叉测量采集,既保证了扫描得到的图像精度,也很好 地弥补了遮挡部分缺失的图像信息。图 10 为各个系统得到的单张样本三维形貌重建后的结果。图 10(a)为原始双目线结构光三维重建系统得到的结果,图 10(b)和图 10(c)为两套单目线结构光三维重建系统得到的结果,图 10(d)为优化后的双目线结构光三维重建系统得到的结果。



图 8 实验样品实物图。(a)充电器;(b)盒子;(c)开发板

Fig. 8 Physical maps of the experimental sample. (a) Charger; (b) box; (c) development board

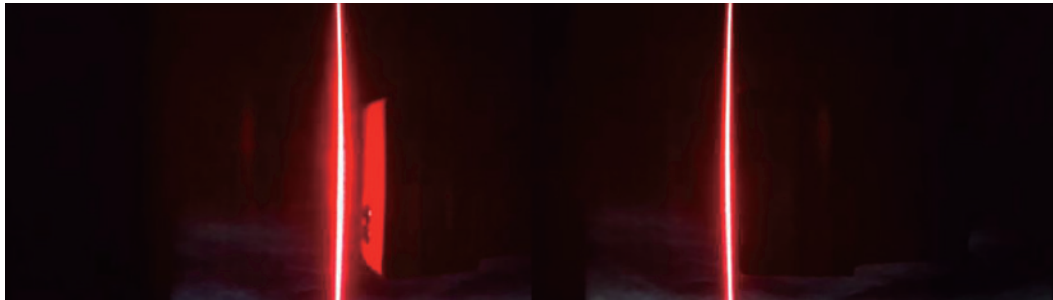


图 9 实验样本双目图像

Fig. 9 Binocular image of experimental sample

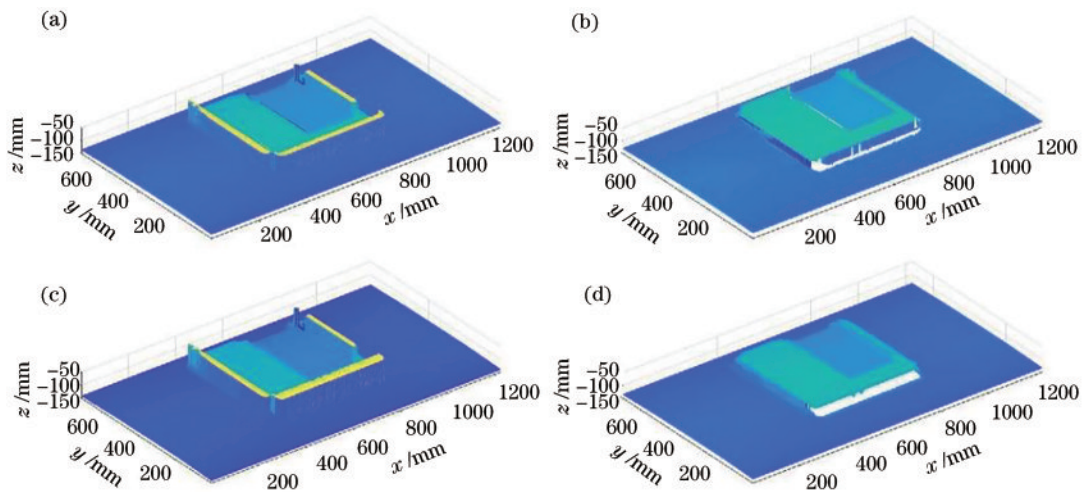


图 10 三维形貌采集结果。(a)原始双目;(b)原始左目;(c)原始右目;(d)优化双目

Fig. 10 3D topography acquisition results. (a) Original binocular; (b) original left eye; (c) original right eye; (d) optimized binocular

根据得到的图像,由原始双目相机采集到的样本三维形貌图可以看出,样本边缘由于遮挡存在缺失,原因是左右目相机拍摄的图像均会出现不同程度的遮挡。从采集到的三维形貌数据结果中可以看出,有效的三维数据全都是负值,没有有效数据的位置其数据为0,同时也是重建缺失的部分。根据缺失部分数据,从左目或者右目中检索相应位置的重建结果,得到优化后的双目系统即可实现被遮挡区域的信息采集。其中原始的双目系统精度最高但是缺失最为严重,将激光线投影仪和左右相机组成左目系统和右目系统,从而缩短基线,以此方法进行测量,弥补了物体自身遮挡而导致采集到的图像信息缺失的问题,但是因为基线的缩短,降低了测量精度。优化后的双目系统将左右目系统和原始的双目系统相结合,使三个系统采集得到的三维形貌图像交叉融合,既保证了图像采集的精度,也实现了被遮挡区域的信息采集。

根据不同系统得到的三维形貌图像,将三维形貌图像的点云信息转换为可视化的结果,通过MATLAB软件将不同系统得到的三维形貌点云数据用不同的颜色来表示,原始双目系统采集到的三维形貌图像点云信息用红色表示,左目相机拍摄的图像点云信息用绿色表示,右目相机拍摄的图像点云信息用蓝色表示,结果如图11所示。

将采集结果对比图导入MATLAB软件中,通过对比各系统扫描重建后的点云信息区域完整度,计算各系统采集到的点云信息数量,在图片中以实际像素个数表示,采集结果如表2所示。图11和表2充分展

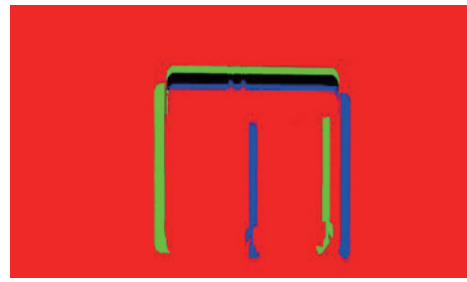


图 11 各系统三维形貌点云数据采集区域对比
Fig. 11 Comparison of 3D topography point cloud data collection areas of each system

示了优化后的双目系统相比于原始双目系统采集三维形貌数据的优势。实验结果显示,在图像总像素为884160个的条件下,左目系统弥补了25892个像素,右目系统弥补了26485个像素,相较于原始双目系统扫描结果缺失的107019个像素,优化后的双目系统一共弥补了52377个像素,另外未采集完成的像素有54642个。原因是当复杂物体表面有两个凸起同时存在,且两个凸起间距为 x 时,此时两个凸起中间是宽度为 x 的区域,凸起同时遮挡了左目和右目,导致三维重建信息缺失。也就是说对于深孔(孔径/孔深 $<B/Z$),双目线结构光无法实现正确重建,但此结果相比原始双目采集到的信息的完整度,已经有了很大提升,信息采集完整度从87.9%提升到93.8%。

为了保证实验数据的可靠性,对多个不同的样本进行了三维形貌的数据采集。选取了其他两个实验样品进行三维信息扫描,结果如图12~14所示。

表 2 充电器三维形貌采集数据信息

Table 2 3D topography acquisition data information of a charger

Parameter	Total picture	Original binocular system	Left eye system	Right eye system	Total filling	Missing part	Optimized binocular system
Number of pixels	884160	777141	25892	26485	52377	54642	829518
Proportion	1.0000	0.8790	0.0293	0.0300	0.0592	0.0618	0.9382

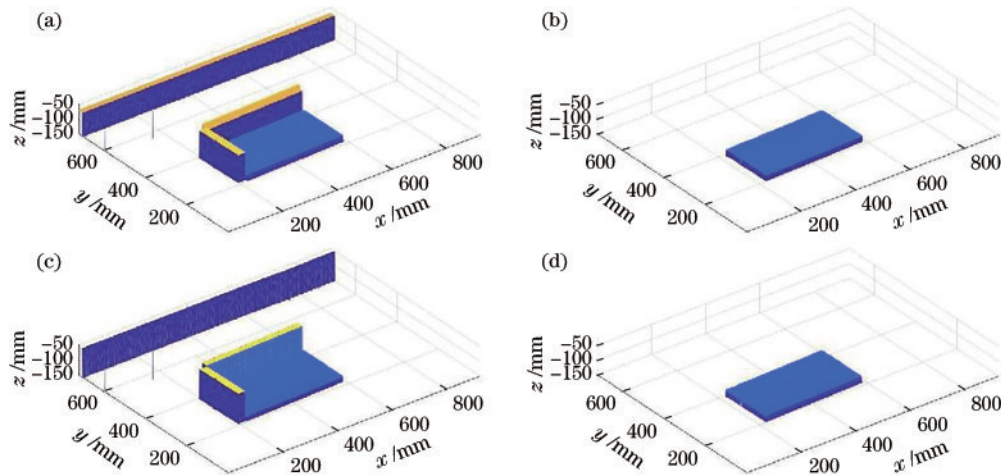


图 12 盒子三维形貌采集结果。(a)原始双目;(b)原始左目;(c)原始右目;(d)优化双目

Fig. 12 3D topography acquisition results of a box. (a) Original binocular; (b) original left eye; (c) original right eye; (d) optimized binocular

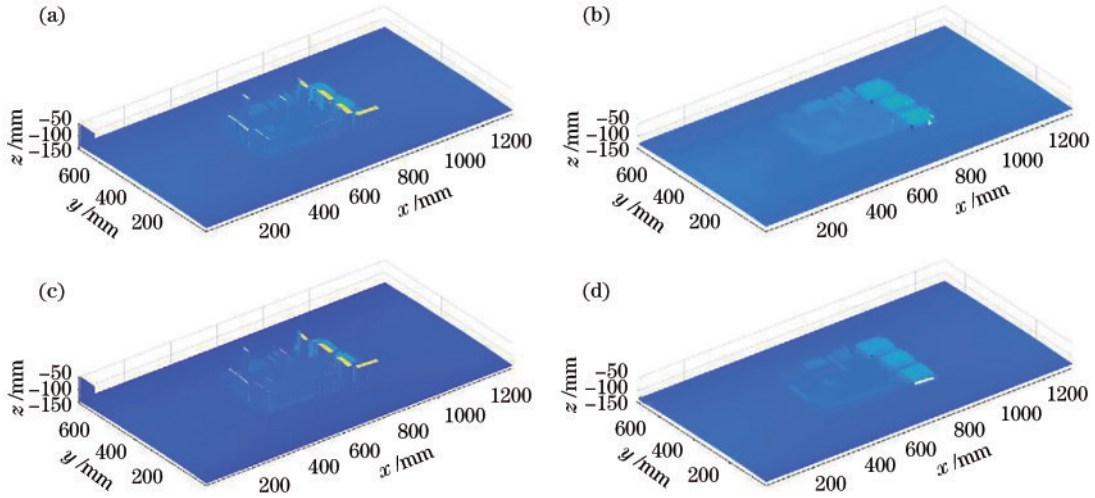


图 13 开发板三维形貌采集结果。(a)原始双目;(b)原始左目;(c)原始右目;(d)优化双目

Fig. 13 3D topography acquisition results of a development board. (a) Original binocular; (b) original left eye; (c) original right eye; (d) optimized binocular

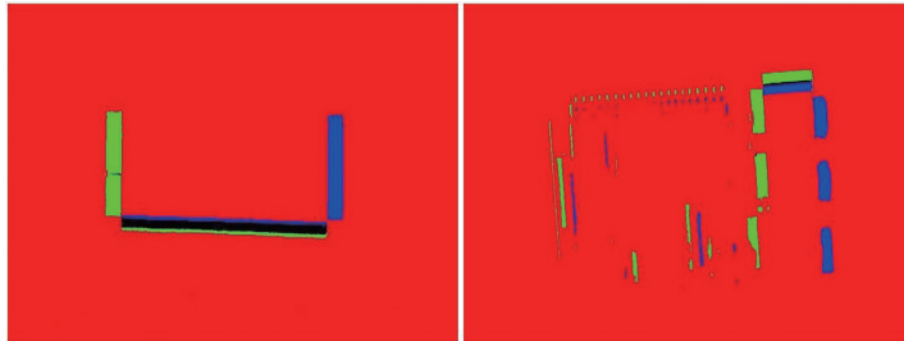


图 14 三维形貌数据采集区域对比

Fig. 14 Comparison of 3D topography data collection areas

通过对不同模型进行三维数据采集,可以看出,相比传统单目线结构光系统和原始的双目线结构光系统,优化后的双目采集系统减少了出现重建缺失的问题,并且保证了测量的精度,拓宽了线结构光重

建技术的应用范围。通过对比各系统扫描重建后的信息区域完整度,双目线结构光融合重建技术能够实现最高 94% 的信息重建,分析结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 盒子三维形貌采集数据信息

Table 3 3D topography acquisition data information of a box

Parameter	Total picture	Original binocular system	Left eye system	Right eye system	Total filling	Missing part	Optimized binocular system
Number of pixels	639392	566547	7312	5699	13011	59834	579558
Proportion	1.0000	0.8861	0.0114	0.0089	0.0203	0.0936	0.9064

表 4 开发板三维形貌采集数据信息

Table 4 3D topography acquisition data information of a development board

Parameter	Total picture	Original binocular system	Left eye system	Right eye system	Total filling	Missing part	Optimized binocular system
Number of pixels	954720	887498	7394	8060	15454	51768	902952
Proportion	1.0000	0.9296	0.0077	0.0084	0.0162	0.0542	0.9458

5 结 论

针对传统双目线结构光扫描方法所造成的扫描结

果图像缺失的问题,利用原始双目系统和左右目与投影仪组成的两个单目系统,将三个系统所得到的图像结果相融合,得到了优化后的三维形貌图像。与原始

双目系统所得到的图像相比,优化后的双目系统既保证了图像识别的精度,也弥补了被扫描物体由于自身遮挡所带来的图像信息的缺失,大大提升了三维重建后图像信息的完整度,使得双目线结构光扫描系统在对复杂物体进行三维重建时,也能得到完整的图像信息。与传统双目相机相比,双目线结构光融合重建技术的信息重建完整率从 88% 提升到 92%,在完成了充电器、盒子、开发板等物体的信息采集实验后,结果显示最高能够实现 94% 的信息重建,进一步拓展了线结构光重建技术的应用范围。

参 考 文 献

- [1] 孙立新,戴士杰,李慨,等.基于线结构光多道焊跟踪系统图像处理[J].焊接学报,2002,23(3):53-55,70.
Sun L X, Dai S J, Li K, et al. Research on the image processing of multi-pass seam based on line structure light [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 53-55, 70.
- [2] 郭富强.基于结构光的颅骨部位三维重建方法研究[D].长春:吉林大学,2011.
Guo F Q. The research of 3D reconstruction about the skull parts based on structured light[D]. Changchun: Jilin University, 2011.
- [3] 任卿,刁常宇,鲁东明,等.基于结构光的文物三维重建[J].敦煌研究,2005(5):102-106.
Ren Q, Diao C Y, Lu D M, et al. 3D reconstruction of cultural relics based on structured light[J]. Dunhuang Research, 2005(5): 102-106.
- [4] 朱洲.三维人体信息获取及虚拟服装试穿技术研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
Zhu Z. Research on acquiring 3D information of human body and virtual try-on[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [5] 王琨,郑南宁.基于SFM算法的三维人脸模型重建[J].计算机学报,2005,28(6):1048-1053.
Wang K, Zheng N N. 3D face modeling based on SFM algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(6): 1048-1053.
- [6] 刘振.基于结构光的双目立体成像技术研究[D].成都:中国科学院光电技术研究所,2013.
Liu Z. Research on techniques for binocular stereo vision based on structured light[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [7] 焦小雪,赵星,杨勇,等.基于相机阵列的三维集成成像记录系统[J].光学精密工程,2012,20(8):1653-1660.
Jiao X X, Zhao X, Yang Y, et al. Pick-up system for three-dimensional integral imaging with camera array[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(8): 1653-1660.
- [8] 潘华东,王其聪,谢斌,等.飞行时间法三维成像摄像机数据处理方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(6):1049-1056.
Pan H D, Wang Q C, Xie B, et al. Data processing method of time-of-flight 3D imaging camera[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(6): 1049-1056.
- [9] Sherman J B. A laser radar ranging system using pseudo-random-code modulation[J]. IEEE Transactions on Education, 1966, 9(1): 2-9.
- [10] 徐国权,张一帆,万建伟,等.高分辨率三维成像激光雷达的应用[J].光学学报,2021,41(16):1628002.
Xu G Q, Zhang Y F, Wan J W, et al. Application of high-resolution three-dimensional imaging lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1628002.
- [11] 吴庆华.基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
Wu Q H. Study on theory and application of 3D surface defect on-line detecting based on line-structured laser scanning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [12] 李凤娇,李小菁,刘震.基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法[J].光学学报,2014,34(11):1110002.
Li F J, Li X J, Liu Z. A multi-scale analysis based method for extracting coordinates of laser light stripe centers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1110002.
- [13] 解则晓,辛悦向,金明,等.光条亮度对线结构光测量精度的影响[J].光学技术,2008,34(S1):52-54.
Xie Z X, Xin Y X, Jin M, et al. Influence on the accuracy of structured-light sensors by the brightness of laser stripe[J]. Optical Technique, 2008, 34(S1): 52-54.
- [14] 李伟明,梅枫,胡增,等.线激光光条中心内部推进提取算法[J].中国激光,2021,48(11):1104002.
Li W M, Mei F, Hu Z, et al. Internal propulsion algorithm for extracting center of line laser stripe[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1104002.
- [15] Huang W, Kovacevic R. A laser-based vision system for weld quality inspection[J]. Sensors, 2011, 11(1): 506-521.
- [16] Wu J H, Chang R S, Jiang J A. A novel pulse measurement system by using laser triangulation and a CMOS image sensor[J]. Sensors, 2007, 7(12): 3366-3385.
- [17] Ko Y, Yi S. Development of color 3D scanner using laser structured-light imaging method[J]. Current Optics and Photonics, 2018, 2(6): 554-562.
- [18] 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.
- [19] 殷永凯,于锴,于春展,等.几何光场三维成像综述[J].中国激光,2021,48(12):1209001.
Yin Y K, Yu K, Yu C Z, et al. 3D imaging using geometric light field: a review[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1209001.
- [20] He K J, Sui C Y, Lü C Y, et al. 3D reconstruction of objects with occlusion and surface reflection using a dual monocular structured light system[J]. Applied Optics, 2020, 59(29): 9259-9271.