

# 面向光条遮挡问题的双镜头激光面型测量方法

王蔚松, 王新宇, 李盼园, 史祎诗\*

中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对单镜头激光三角法存在的光条遮挡问题, 提出了一种解决光条遮挡问题的双镜头激光面型测量方法。首先通过实验观察并探究了光条在传感器中的分布现象及形成原因, 分析了物体表面形貌、光学系统与光条分布的关系, 以及光条分布对三维重建的影响; 然后基于直入射激光三角法原理设计了双镜头测量系统, 应用形态学处理结合灰度重心法等多种算法提取光条中心坐标, 最后基于方差最小化对双镜头数据进行关联融合。实验结果表明: 双镜头能够解决由光条遮挡造成的大面积形貌缺失的问题, 能够重建待测物体表面形貌的完整包络, 数据缺失占比小于 0.5%。

**关键词** 测量; 双镜头三角法; 光条遮挡; 轮廓丢失; 三维重建

**中图分类号** TP212.1; TH122

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202047.1104002

## A Dual-Lens Laser Surface Profile Measurement Method for Solving the Problem of Light Stripe Occlusion

Wang Weisong, Wang Xinyu, Li Panyuan, Shi Yishi\*

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Herein, a dual-lens laser profile measurement method was proposed to solve the problem of light stripe occlusion in the single-lens laser triangulation method. First, we experimentally observed and explored the distribution of light stripe in the sensor and its reasons for the formation. Moreover, we analyzed the surface morphology of the object, the relation between the optical system and light stripe distribution, and the light stripe distribution effect on three-dimensional reconstruction. Then, based on the direct incidence laser triangulation principle, a dual-lens measuring system was designed. Morphological processing combined with a gray-scale centroid method and other algorithms was used to extract the center coordinates of the light stripe. Finally, the dual-lens data were fused based on the minimization of variance. Experimental results show that the proposed dual-lens can solve the problem of large-area morphology loss caused by light stripe occlusion and reconstruct the complete envelope of the object's surface morphology. Furthermore, the associated data loss ratio was less than 0.5%.

**Key words** measurement; dual-lens triangulation method; light stripe; loss of profile; three-dimensional reconstruction

**OCIS codes** 120.4290; 120.6650; 150.3040

## 1 引 言

激光三角法具有非接触、系统结构简单、测量精度高、测量范围大等优点<sup>[1-3]</sup>。在三维连续曲面测量方面, 单激光三角法被广泛应用<sup>[4-6]</sup>。在物体表面形貌剧烈变化的情况下, 单镜头光路往往由于结构单一、镜头视场受限而产生自我遮挡, 缺失部分被标记

为被遮挡表面或未成像表面<sup>[7-8]</sup>, 本文将这种大范围的光条丢失称为光条遮挡。研究人员发现, 受激光器位置及发散角的影响, 激光光条还会出现小范围内的缺失和交叉<sup>[9]</sup>。

激光双三角法根据器件组成可分为双激光与双镜头两种形式, 该方法通过关联不同的位置信息与亮度信息来实现重建精度和完整度的提

**收稿日期:** 2020-06-30; **修回日期:** 2020-08-07; **录用日期:** 2020-08-15

**基金项目:** 中国科学院科教融合项目; 中国科学院大学优秀青年教师科研能力提升项目; 中国科学院青年创新促进会项目(2017489)

\* **E-mail:** shiyishi@ucas.ac.cn

升<sup>[10]</sup>。Wang 将<sup>[11]</sup>双激光探头用于测试表面粗糙度和微位移;Shiou 等<sup>[12]</sup>设计了双激光结合多 CCD 的系统,并采用该系统对倾斜表面进行了角度测量;Lee 等<sup>[13]</sup>利用双激光拟合花瓣的表面曲率,提高了重建还原的精度。在遮挡问题的研究中,Munaro 等<sup>[14]</sup>采用双激光同时扫描待测物体,保证有多于一条的激光线出现在视场中,从而减少了被遮挡表面的出现;Peiravi 等<sup>[15]</sup>基于两种不同颜色的激光和一种彩色 CCD 相机设计了三维扫描仪,它可以较好地解决遮挡问题。双镜头三角法在解决遮挡问题上具有一定优势,Zhou 等<sup>[16]</sup>使用双镜头直入射三角法恢复了遮挡问题较严重的沟槽的三维形貌。在双镜头数据融合方面,Vilaca 等<sup>[17]</sup>分别校正了横向和纵向上的镜头畸变,使融合后的数据误差小于 0.4 mm;Mavrinac 等<sup>[18]</sup>提出了基于图像透视关系的双镜头数据融合方法,数据缺失占比为 0.1%~2.49%。

本文对光条问题的产生给出了具体的解释和定义,并针对光条遮挡问题,提出了双镜头直入射激光三角法方案,具体包括双镜头支撑结构、光条中心提

取算法、双镜头数据融合算法设计等。所提方法通过双镜头同步采集和方差最小化算法极大地降低了数据缺失量,减小了光条遮挡造成的未成像表面的面积,实现了待测物体表面完整形貌的重建。本文提出的方案仅使用了一种激光器,结构简单,工作距离为 250 mm,适用于高度在 20 mm 以内的物体的三维重建;所提方案采用双镜头同步采集,数据缺失占比小于 0.5%。

## 2 光条分布

受待测物体、光路结构和成像原理的影响,光条在传感器中的分布会产生混乱现象:光条遮挡、光条交叉与光条缺失。

如图 1(a)所示,待测物体存在自我遮挡的表面,扫描区域的漫反射信息无法进入传感器,产生了视觉盲区。未成像表面会导致重建轮廓丢失。本文将自我遮挡产生的大范围的光条丢失现象定义为光条遮挡。光条遮挡的实际情况和 CMOS 采集的光条分布如图 1(b)、(c)所示。

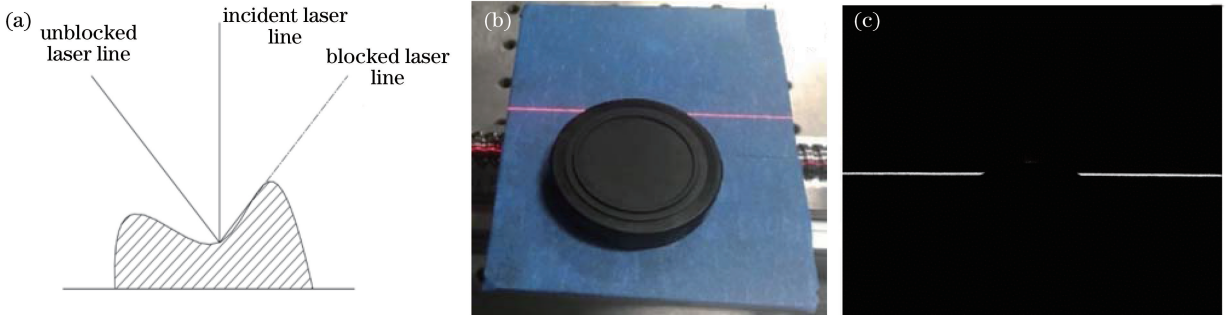


图 1 光条遮挡。(a)自我遮挡;(b)实物图;(c) CMOS 采集图

Fig. 1 Light stripe occlusion phenomenon. (a) Self-occlusion; (b) physical map; (c) CMOS acquisition map

在梯度交界处,极易出现小范围内的混乱光条,如图 2(a)所示。它与大范围的光条遮挡不同,可将此现象定义为光条缺失与光条交叉。本文将同一方

向上小范围内没有光条信息的现象称为光条缺失,如图 2(a)的 *a* 线位置;将同一方向上小范围内出现多个光条的现象称为光条交叉,如图 2(a)中的 *b* 线位置。

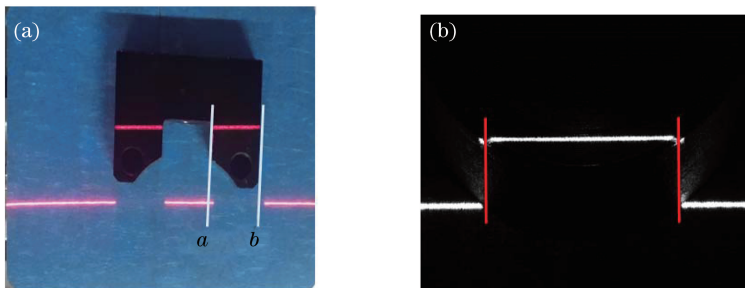


图 2 光条交叉与光条缺失。(a)实物图;(b) CMOS 采集图

Fig. 2 Intersection and loss of light stripe. (a) Physical map; (b) CMOS acquisition map

图 2(b)给出了光条交叉在传感器中的表征。

光条缺失和交叉是由线激光发散角度和镜头景深引起的。如图 3(a)所示,物体面型的高低分布会影响线激光投影的分布,从而导致光条交叉和缺失,

并且此问题在物体处于视场边缘时尤为严重。另外,直入射激光三角法不满足 Scheimpflug 条件,景深导致不同位置有不同的放大倍率,从而产生了光条交叉和缺失,如图 3(b)所示。

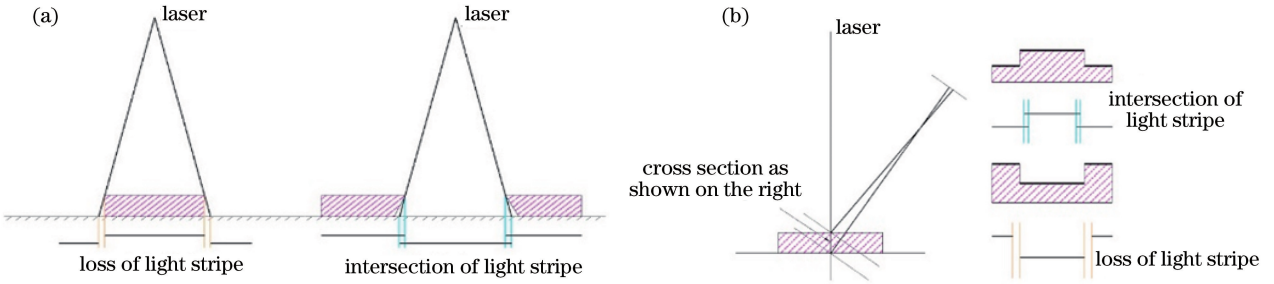


图 3 光条缺失和光条交叉。(a)激光发散角造成的光条缺失和光条交叉;(b)景深造成的光条缺失和光条交叉

Fig. 3 Loss and intersection of light stripe. (a) Loss and intersection of light stripe caused by laser divergence angle; (b) loss and intersection of light stripe caused by depth of field

### 3 双镜头激光三角法

为了获得对象表面上任何位置的点,测量时必须满足两个条件:1)物体必须被照明;2)相机必须能够获取被照明点。换句话说,激光器与传感器需同时作用于物点。

双镜头直入射激光三角法原理如图 4 所示,理论公式<sup>[19]</sup>为

$$y = \frac{ax \sin \beta}{b \sin \alpha + x \sin(\alpha + \beta)}, \quad (1)$$

式中: $y$  为表面高度; $x$  为传感器上光斑位置  $M_1$  与基面光斑位置  $M_0$  的偏差距离; $a$  为镜头物距; $b$  为相距; $\alpha$  为光轴与基面法线的夹角; $\beta$  为传感器靶面与光轴的夹角。

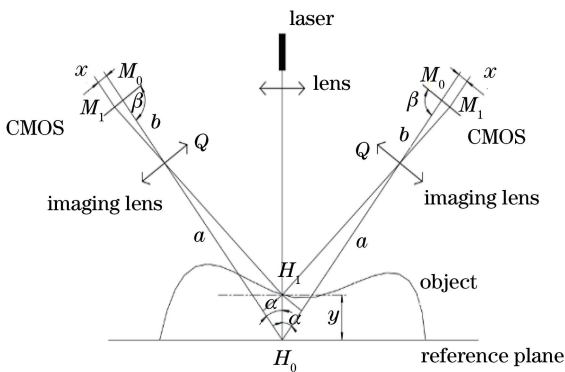


图 4 双镜头直入射激光三角法

Fig. 4 Dual-lens direct incidence laser triangulation

两镜头的成像光轴与激光线都相交于待测物体表面的同一点  $H_1$ ,两条光轴与激光线都成  $\alpha$  角,两镜头关于激光光源的位置绝对对称,以保证采集位置坐标的一致性。针对表面梯度特征不同的待测物

体,双 CMOS 会呈现三种成像方式:1)双 CMOS 同时获得漫反射信息,未出现光条遮挡;2)一个 CMOS 获得漫反射信息,而另一个 CMOS 没有获得,从而在一个方向上产生光条遮挡;3)双 CMOS 均未获得漫反射信息,左右两方向都出现光条遮挡(例如,物体表面的缝隙极深,且深度超过了激光器和探测器的工作距离,三角法已无法使用,此情况本文不予讨论)。

使用双镜头激光三角法时,应保证同一时刻至少一个传感器能够获取照明点,以消除光条遮挡造成的测量死角。本文基于以上原理提出了如图 5 所示的双镜头激光三角法方案。系统由硬件部分和软件部分构成,系统硬件部分对待测物体进行扫描并存储数据信息,然后用算法对数据进行处理,以提高恢复物体的完整性。

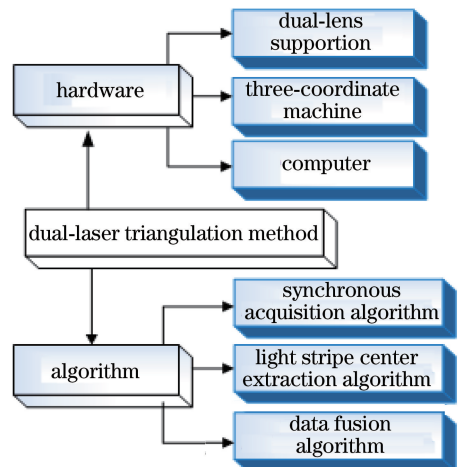


图 5 双镜头激光三角法方案

Fig. 5 Dual-lens laser triangulation method

## 4 双镜头激光三角法方案

双镜头激光三角法方案的关键是基于直入射激光三角法原理的双镜头支撑结构、基于 LabVIEW 的双 CMOS 同步采集算法、光条中心提取算法、双镜头数据匹配融合算法。

### 4.1 双镜头直入射支撑结构

如图 6 所示,系统硬件部分主要有双镜头支撑结构、三维坐标位移平台及计算机组成。其中:激光器的波长为 632 nm,激光线的几何线宽为 25  $\mu\text{m}$ ,标准工作距离为 250 mm;相机的采集速度为

36 frame/s;工业镜头的焦距为 25 mm,最小工作距离为 200 mm。

为实现双镜头采集,设计了如图 6(c)所示的双镜头支撑结构,激光器发射线激光,左右 CMOS 的主光轴关于激光器的主光轴对称;可调节的装配结构可以分别调节左右 CMOS 的位置,实现多角度采集。两个 CMOS 的主光轴与激光器的主光轴交于一点,且该点为 CMOS 旋转轨道(图 6(c)中的实线)的圆心。激光器输出面到圆心的距离为激光器的最佳工作距离,此距离可以保证探测面上激光线的几何线宽最窄。

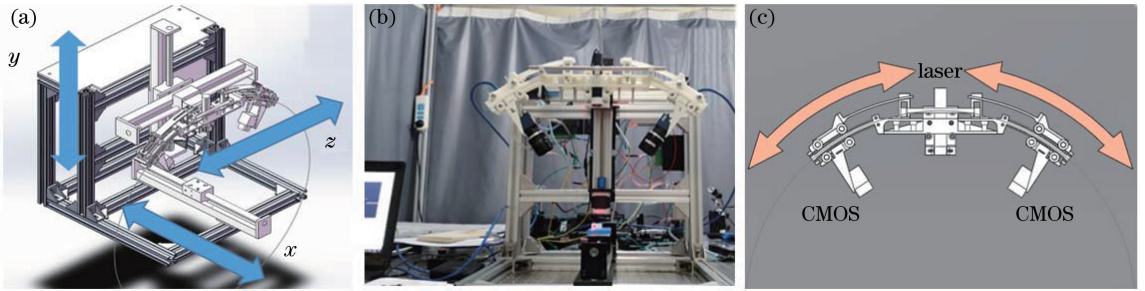


图 6 双镜头系统结构。(a)模型图;(b)实物图;(c)双镜头直入射激光三角法支撑结构

Fig. 6 Structure of dual-lens system. (a) Model map; (b) physical map; (c) dual-lens direct incidence laser triangulation support structure

### 4.2 同步采集与光条中心提取

双镜头方案采集的关键之一是保证同步采集,即两台 CMOS 在同一时刻采集的是待测物体表面的同一位置。基于 LabVIEW 平台实现了双 CMOS 的高速同步采集,采集在时间上无偏差,如图 6(a)所示,即两台 CMOS 在  $z$  方向上的数据无偏差。通过相同的触发条件控制 LabVIEW 的 NI-IMAQdx 模块,可以实现双 CMOS 的同步采集。为实现高帧率采集的要求,本文采用二进制文件的方式进行存储,即直接以 .bin 的格式将传感器采集的光斑图像写入计算机硬盘,这样就可以使双 CMOS 同步快速采集待测物体表面的光条分布特征。

本文采用多种算法对采集图像的数据进行预处理,以降低背景噪声,优化光条形状,保证光条的连续性,提高光条中心坐标的定位精度。采用阈值处理、形态学优化、灰度重心法和 Hessian 矩阵法提取光条中心坐标<sup>[20-23]</sup>,将其与基面坐标相减就可求出像素的移动距离  $x$ ,将  $x$  代入(1)式即可反演测量位置的高度数据。提取过程如图 7 所示。

### 4.3 双镜头数据合成算法

同步采集系统保持了双镜头在时间序列( $z$  方向)上的一致性,因此,在数据融合中,由镜头对称性

产生的单维度( $x$  方向)偏移误差占主导,这种偏移体现在双镜头反演的高度数据中。即:高度矩阵中相同位置的点对应的二维坐标存在一个固定的偏差。

左右 CMOS 采集到的高度数据只存在激光线方向上的偏移(如图 8 所示),故本文基于方差最小偏移量设计了双镜头数据融合算法,算法如下:

计算两个高度数据矩阵在不同偏移量下的方差,并以方差最小的偏移量直接作为整体的最佳偏移量。

第一步,在左右 CMOS 采集到的高度数据矩阵中各选择一个点,用该点替换掉各自矩阵中的无数据点。

第二步,对数据进行归一化。针对每一个不同的偏移量,根据其正负和大小对左右高度数据矩阵进行不同的裁剪,裁剪后两个数据矩阵的方差如(2)式所示,并存储该方差。

$$v = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{n-j} [l(k, j) - r(k, j)]^2}{m(n-j)}, \quad (2)$$

式中: $v$  为该偏移量下计算得到的方差; $n$  为原始数据中一行数据点的个数; $m$  为原始数据的行数; $j$  为计算得到的偏移量的绝对值; $l(i)$ 、 $r(i)$  分别为裁剪

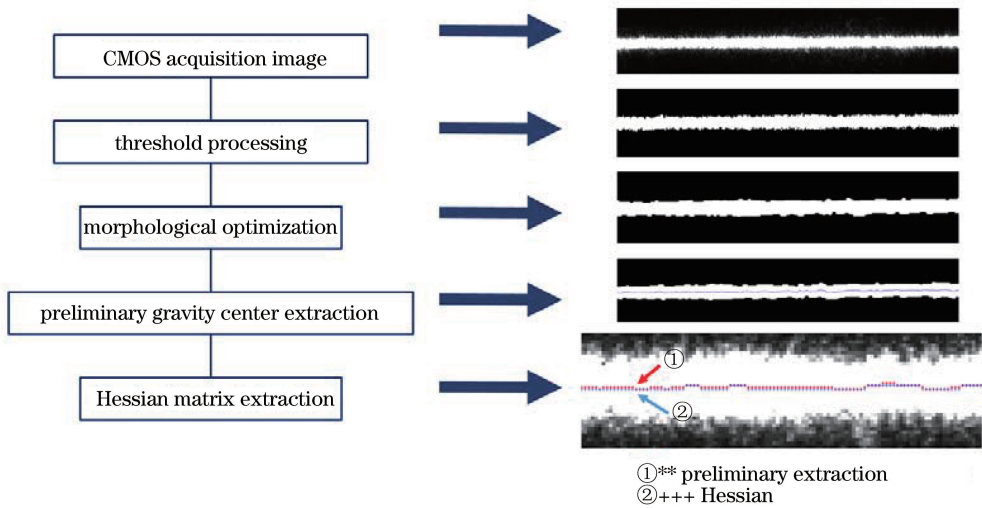


图 7 光条中心提取

Fig. 7 Light stripe center extraction

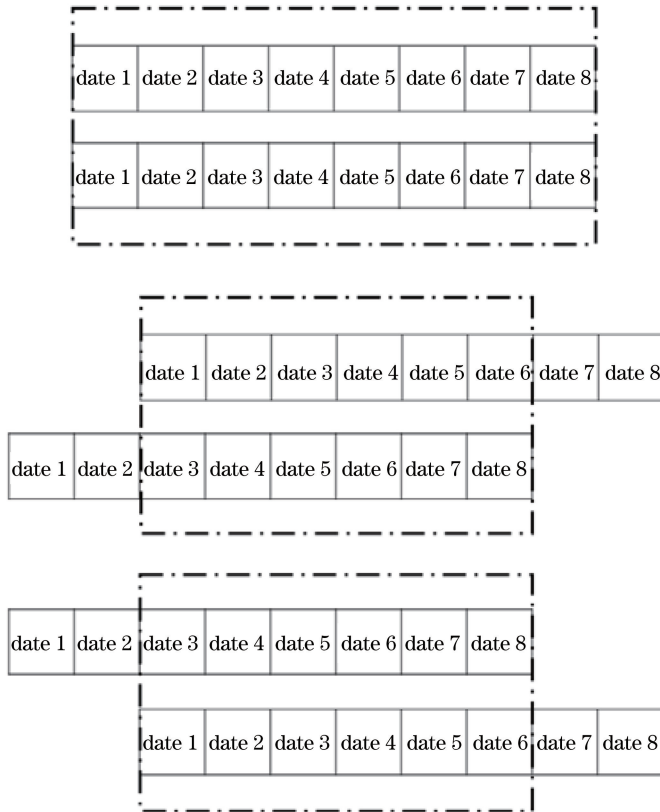


图 8 数据偏移

Fig. 8 Data offset

后左、右矩阵在计算行的第  $i$  个高度数据。将每一行对应方差最小的偏移量作为该行数据的最佳偏移量(图 9 中极值点的偏移量为最佳偏移量)。

第三步,在设定的偏移范围内,计算所有偏移量下的方差数据,并以计算范围内方差最小的点对应的偏移量作为最终的偏移量。

第四步,用第三步中得到的偏移量对原始数据矩阵进行裁剪合并。此外,对每一个数据点进行判定,当裁剪后的两个数据矩阵在某一点的最大值大于最小值的两倍时,认为此处的最小值为数据丢失类型点,此处的高度为最大高度,其余点的高度数据为两个矩阵在该点处的均值。

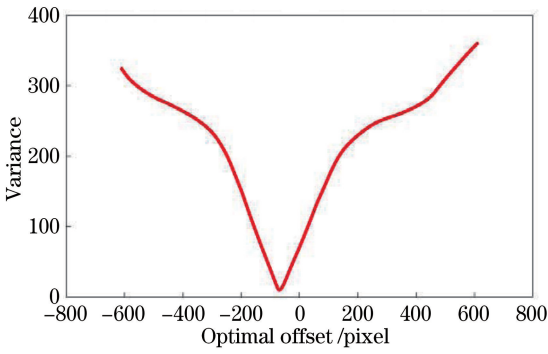


图 9 最佳偏移量与方差

Fig. 9 Optimal offset and variance

## 5 实验结果及可行性分析

分别采用单镜头和双镜头方案对待测物体进行三维形貌恢复,然后对单镜头恢复结果、双镜头恢复结果、算法、误差等展开分析,以证实双镜头激光三角法解决光条遮挡的可行性。

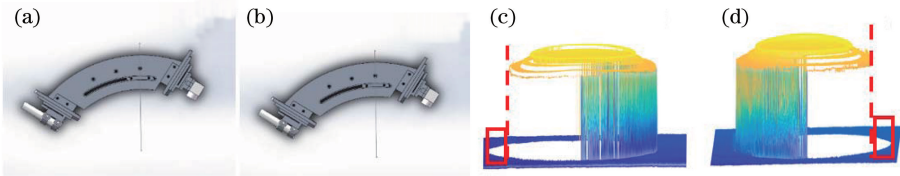


图 10 光条遮挡影响下的三维恢复结果。(a)左偏 12.5°; (b)右偏 12.5°; (c)左偏 12.5°光条遮挡现象;(d)右偏 12.5°光条遮挡现象

Fig. 10 Three-dimensional recovery results under light stripe occlusion. (a) 12.5° to the left; (b) 12.5° to the right; (c) 12.5° light stripe occlusion on the left; (d) 12.5° light stripe occlusion on the right

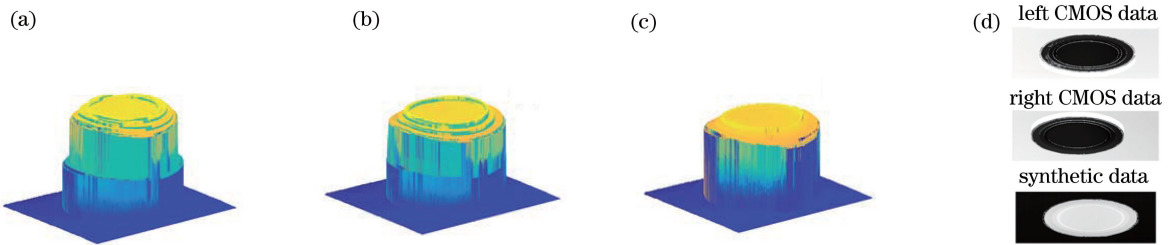


图 11 镜头盖重建结果。(a)匹配融合前重建;(b)匹配融合后重建;(c)修正数据差后重建;(d)表面特征

Fig. 11 Lens cover reconstruction. (a) Reconstruction before matching fusion; (b) reconstruction after matching fusion; (c) reconstruction after modifying data difference; (d) surface features

将逐行计算方法得到的最终合成结果与原始数据进行对比。如图 11 所示,(a)为左右镜头原始数据直接相加的结果,(b)为左右镜头原始数据校正偏移后相加的结果,(c)为采用全局算法和数据融合后的结果;(d)为左右 CMOS 拍摄到的高度数据灰度图与数据融合修正后得到的高度数据灰度图。可以看到,原始数据中很多缺失的数据点(表现为背景中散布的白色亮点)得到了很好的处理,并且恢复的

### 5.1 单镜头激光三角法的恢复结果

实验设置了单镜头在不同角度下的扫描过程,角度变换如图 10(a)、(b)所示。通过改变单镜头支撑结构的固定位置和观测角度发现,光条遮挡是不可避免的,并且当前后两次观测角度相反时,光条遮挡造成的数据缺失不仅位置对称,而且范围相等,如图 10(c)、(d)所示。

### 5.2 双镜头恢复结果

针对单镜头激光三角法恢复结果出现的不可避免的遮挡问题,本文采用双镜头进行了恢复,图 11 显示了双镜头恢复结果。在实验中,通过匹配两台 CMOS 采集信息(两台 CMOS 互相补偿轮廓丢失区域),然后采用算法对数据进行融合,恢复结果如图 11(c)所示。可见:双镜头完整地恢复了物体的三维形貌,空白区域的轮廓信息被补偿,具有高度信息。在图 11(d)所示的表面灰度图像中,轮廓周围空白缺失被补偿。

数据特征基本重合。

本文选取自我遮挡严重的圆柱体作为待测物体进行实验,其三维形貌恢复结果与镜头盖相同,表现为梯度交界处和基面部分的轮廓信息丢失,如图 12(a)、(b)所示。图 12(c)为双三角法的恢复结果,可见,双镜头有效地将高梯度边界闭合,经过数据修正后,边缘部分的轮廓缺失得到了补偿,垂直边缘比较平滑。

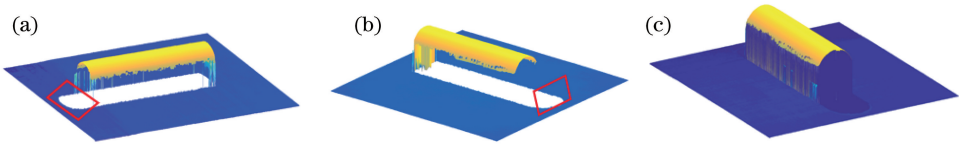


图 12 圆柱体数据融合图。(a)左镜头数据;(b)右镜头数据;(c)圆柱体完整形貌图

Fig. 12 Cylinder data fusion diagrams. (a) Left lens data; (b) right lens data; (c) complete cylindrical topography

本文针对镜头盖、圆柱体、钥匙和硬币的双镜头恢复数据缺失情况进行了统计,如表 1 所示。数据显示:左右单镜头数据缺失的占比较大;数据融合

后,数据缺失比例降低到 0.5% 以下,优于其他双镜头结构和算法的恢复效果。这进一步证明了本文解决光条遮挡方案的可行性。

表 1 数据缺失的占比

Table 1 Percentage of missing data in the full data

Data source	Lens cover	Cylinder	Key 1	Key 2	Coin	%
Left lens	10.39	2.52	2.02	1.57	19.91	
Right lens	8.07	4.17	1.42	0.99	1.62	
Data fusion	0.34	0.43	0.1	0.11	0.45	

### 5.3 双镜头数据融合失真分析

双镜头三角法在对缺失数据进行补偿时,需要保证数据量的增大不会加大融合结果的混乱程度,不会造成三维形貌的改变。

双镜头重建物体(钥匙)三维形貌的效果与单镜头重建效果如图 13 所示,其中:图 13(a)为单镜头恢复结果,由于钥匙表面形貌相对平缓,高度差较

小,存在小范围的自我遮挡效应,出现了小范围轮廓丢失(矩形轮廓内)现象;图 13(b)为双镜头恢复结果,相比之下,钥匙的三维形貌没有发生改变,未出现双镜头数据量增多后导致融合结果产生的混乱现象,同时补偿了中央部分的数据缺失区域,使钥匙的轮廓闭合完整,表面平滑。这一结果证明了双镜头激光三角法的可行性。

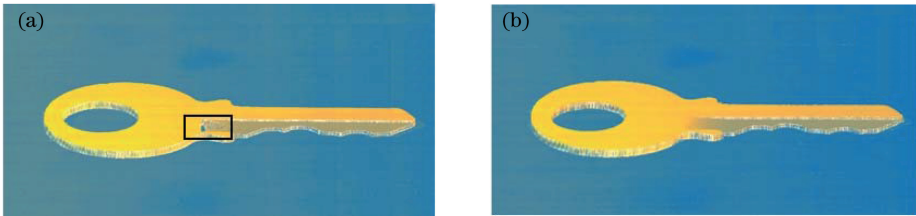


图 13 单双镜头恢复结果的对比。(a)单镜头恢复结果;(b)双镜头恢复结果

Fig. 13 Comparison of single and double lens recovery results. (a) Single lens recovery result; (b) dual-lens recovery result

### 5.4 算法分析

#### 5.4.1 算法对比

为验证全局算法计算偏移量的稳定性,本文将计算数据量巨大的逐行偏移量算法与全局算法进行对比。逐行算法同样基于方差最小化来计算偏移

量,不同的是逐行计算的速度较慢,但它考虑了每行数据,可以保证高的精度。故而,本文将其与全局算法进行对比,证明全局算法的准确性。

两种算法恢复的最终结果如图 14 所示,可见,逐行算法与全局算法都能够很好地闭合大梯度边

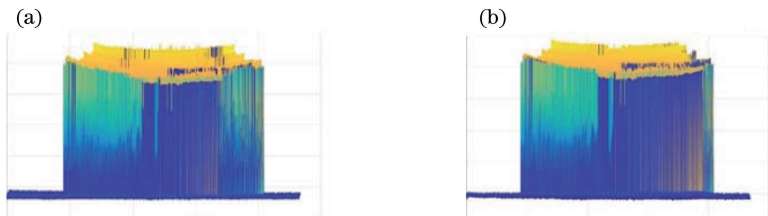


图 14 两种算法的对比。(a)逐行算法;(b)全局算法

Fig. 14 Comparison of two algorithms. (a) Progressive algorithm; (b) global algorithm

缘,完整地恢复待测物体的表面形貌。

两种算法所得结果的差别基本可以忽略,而且在物体表面形貌不是十分复杂的情况下计算出的结果不存在差别。由表 2 可知,全局算法和逐行算法得到的偏移量差异较小,且在数据较差的情况下仍能保证一定的可信度。但是全局算法具有更快的计算速度,并且人工参与更少,是一种更为优良的算法。全局算法的不足之处在于数据识别区间(偏移量的计算范围)的选择限制了该算法对原始数据误差的容忍度。当两个 CMOS 采集到的数据存在较大差别时(这种情况很难出现),在不同的识别区间下会有不同的识别结果;当区间较宽时,有可能出现数据最小值不是真实偏移量的情况;但是在左右 CMOS 数据差别不是非常大的情况下,不会出现该问题。

表 2 逐行算法和全局算法数据偏移量的对比

Table 2 Comparison of data offsets between progressive algorithm and global algorithm pixel

Objective	Progressive algorithm offset	Global variance algorithm offset
Cylinder	8	5
Key 1	13	13
Key 2	-69	-69
Lens cover	108	97
Coin	-47	-48

后续测试发现,在两种算法的方差计算这一步中,若待合成的两个数据本身差别较大,尤其是在归一化灰度图中灰度分布存在显著差异的情况下,直接计算方差有可能无法寻找到具有最适宜偏移量的点。因此,本文对算法进行了改进,在每一次计算一定偏移量下该行的方差之前,以右侧高度数据为目标,使用 MATLAB 的 polyfit 函数对左侧 CMOS 采集到的高度数据进行一次一阶线性拟合,使方差最小。线性拟合公式为

$$\mathbf{R} = k \times \mathbf{L} + \mathbf{b}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{L}$  分别为裁剪后的左右数据矩阵; $k$  为待求解的一阶拟合系数; $\mathbf{b}$  为待求解的常数矩阵。

使用全局算法融合双镜头数据,并对方差进行拟合。由图 15 可见,线性拟合后的方差相对拟合前有明显降低,但变化趋势和方差最小值点的位置保持不变,且最小方差接近。这说明这一步拟合能够在保证计算结果正确的前提下有效地提高数据的可信度。

#### 5.4.2 最佳偏移量的相对误差

双镜头数据融合算法因充分考虑了使采集到的

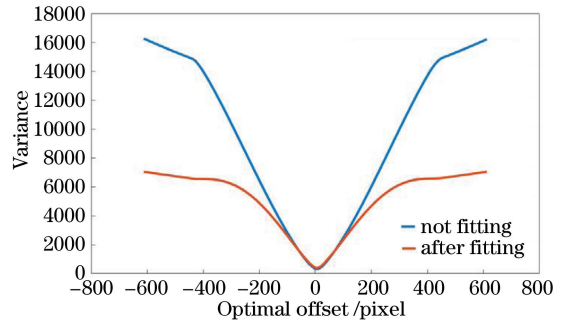


图 15 拟合后的最佳偏移量与方差

Fig. 15 Optimal offset and variance after fitting

数据单维度( $x$  方向)误差占主导,故而原理简单,具有较高的使用价值。为了验证该算法计算偏移量的稳定性,本文提取了多次实验条件下偏移量的相对误差,即全局偏移量对于每个行列数据集偏移量的相对误差  $r$ ,计算公式为

$$r = \frac{S - E}{E}, \quad (4)$$

式中: $S$  表示由逐行算法求得的每一行的最佳偏移量; $E$  为  $S$  的算术平均值。

如图 16 所示,在五次测量中,最佳偏移量都有一定的波动。考虑到数据波动程度较大,本文使用一次函数进行线性拟合,得到的拟合系数如表 3 所示。五次测量数据的拟合结果显示,一阶系数均极小,表明偏移量没有明显的变化趋势,这也印证了该算法设计的基础,即两个高度数据矩阵仅在  $x$  方向上具有相对稳定的位置偏差。

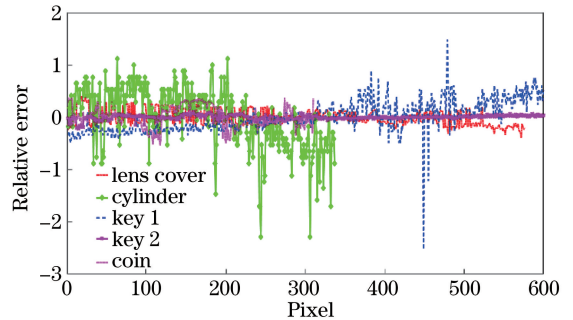


图 16 最佳偏移量的相对误差

Fig. 16 Relative error of optimal offset

表 3 偏移量拟合系数

Table 3 Fitting coefficient of offset

Surface type	First-order coefficient	Constant term
Lens cover	-0.0003553	0.1045
Cylinder	-0.0033	0.5666
Key 1	0.0011	-0.3607
Key 2	0.00009605	-0.0309
Coin	-0.0003487	0.0563



## 5.5 局限性

本文只针对光条问题中的光条遮挡展开论述并提出了解决方案。对于光条缺失和交叉问题,有不同的解决方法。对于由激光发散角产生的光条缺失和交叉,可通过改变光路结构,添加反射镜改变激光投射路径,使点发散光变为平行光;这样便不存在发散角问题,避免了光条交叉和缺失的产生。对于由景深产生的光条交叉和缺失,一种方法是通过相机标定不同 CMOS 位置处的放大倍率,利用算法补偿由镜头放大倍率造成的光条形貌的变化,并在实物采集中对高度信息加以校正。此方法需要严谨的算法,实现起来具有一定难度。另一种方法是将传感器前的普通镜头替换成远心镜头。普通镜头的景深较小,当需要测量的物体在纵深方向上的高度过大时,就会出现景深问题;而使用远心镜头,就可以只让平行入射的物方光线到达像面,像就没有近大远小的现象,景深问题得以改善。

## 6 结 论

本文针对激光三角法三维恢复的弊端展开研究,分析了不同类型的光条分布问题,提出了解决光条遮挡的详细方案,且该方案具有可行性。

针对光条遮挡的成因,设计了双镜头支撑采集新结构,该结构能够实现对称角度采集,扩大采集视场,降低光条遮挡的影响。通过分析待测物体的表面形貌、反射、外部环境因素对光条质量的影响,提出了多种算法融合的光条中心检测流程。结合阈值处理、形态学处理、灰度重心法和 Hessian 矩阵提取等多种算法,降低了镜面反射等噪声的影响,优化了光条形状,提高了光条的连续性和光条中心的定位精度。为保证双镜头同步采集以及数据坐标的匹配,使用 LabVIEW 实现了双 CMOS 在时间序列上的无差采集以及在低硬件配置下的高速采集;同时,本文还提出了基于数据偏移量均方差最小的双镜头数据融合方法,并采用该方法匹配双镜头坐标系实现了三维形貌的整合。

本文通过对单双镜头恢复结果、双镜头数据融合失真情况、误差等展开分析,证明了双镜头激光三角法解决光条遮挡的可行性,数据缺失占比小于 0.5%,数据偏移稳定。

## 参 考 文 献

[1] Hosni Y, Ferreira L. Laser based system for reverse engineering [J]. Computers & Industrial

Engineering, 1994, 26(2): 387-394.

- [2] Vukašinović N, Bračun D, Možina J, et al. A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(9/10/11/12): 1097-1104.
- [3] Donges A, Noll R. Laser measurement technology [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 247-278.
- [4] Sun B, Wang J H. Application of the laser displacement sensor in the large-diameter aspheric parabolic mirror detection [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99(5/6/7/8): 1579-1588.
- [5] Liu B, Zhang M, Pang Y. Laser triangulation method for measuring the size of parking claw [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10458: 104581C.
- [6] He B F, Ding S Y, Wei C E, et al. Review of measurement methods for areal surface roughness [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(1): 78-93.  
何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 78-93.
- [7] Reed M K, Allen P K. 3-D modeling from range imagery: an incremental method with a planning component [J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(2): 99-111.
- [8] Park J, DeSouza G N, Kak A C. Dual-beam structured-light scanning for 3-D object modeling [C] // Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, Quebec City, Que., Canada. New York: IEEE, 2001: 65-72.
- [9] Usamentiaga R, Molleda J, García D F. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments [J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(1): 179-196.
- [10] Liu Z. High-precision surface defect based on laser triangulation method [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.  
刘钊. 基于激光三角测量法的高精度表面缺陷检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [11] Wang S H, Jin C J, Zhang T, et al. Dual laser probe for testing surface roughness and microdisplacement [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4231: 628-634.
- [12] Shiou F J, Liu M X. Development of a novel scattered triangulation laser probe with six linear charge-coupled devices (CCDs) [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(1): 7-18.
- [13] Lee K C, Yang J S, Yu H H. Development and evaluation of a petal thickness measuring device based on the dual laser triangulation method [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 99: 85-92.

- [14] Munaro M, Michieletto S, So E, et al. Fast 2.5 D model reconstruction of assembled parts with high occlusion for completeness inspection [J]. International Journal of Electronics and Communication Engineering, 2011, 5(11): 1506-1512.
- [15] Peiravi A, Taabbodi B. A reliable 3D laser triangulation-based scanner with a new simple but accurate procedure for finding scanner parameters [J]. Journal of American Science, 2010, 6(5): 80-85.
- [16] Zhou X M, Liu H B, Ge J M. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0512001.  
周兴敏, 刘恒彪, 葛剑敏. 激光三角测量中物面反射光斑重心偏移的修正[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0512001.
- [17] Vilaca J L, Fonseca J C, Pinho A M. Calibration procedure for 3D measurement systems using two cameras and a laser line [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(2): 112-119.
- [18] Mavrinac A, Chen X, Denzinger P, et al. Calibration of dual laser-based range cameras for reduced occlusion in 3D imaging [C] // 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 6-9, 2010. Montreal, QC, Canada. New York: IEEE, 2010: 79-83.
- [19] Yang G S, Chen T, Zhang Z F. Study and application on transparent plate thickness measurement based on laser triangulation with light compensation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0708004.  
杨桂栓, 陈涛, 张志峰. 基于激光三角法对透明平板厚度测量光线补偿的研究及应用[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708004.
- [20] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [21] Liu J, Liu L H. Laser stripe center extraction based on hessian matrix and regional growth[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021203.  
刘剑, 刘丽华. 基于海森矩阵与区域增长的激光条纹中心提取[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021203.
- [22] Ai X. Edge detection based on mathematical morphology and its application to image scaling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.  
艾鑫. 基于数学形态学的边缘检测算法及其在图像缩放中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [23] Wang H H, Zeng N, Lu W, et al. Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 903-906.  
王海虹, 曾妮, 陆威, 等. 基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 903-906.