

## 结合分层处理的激光光条亚像素中心提取方法

刘巍,张洋,高鹏,杨帆,兰志广,李晓东,贾振元,高航

(大连理工大学机械工程学院,辽宁大连 116024)

**摘要:**为实现大型航空零件三维测量过程中激光光条的快速高精度提取,提出了一种结合分层处理的激光光条亚像素中心提取方法。首先,根据序列图像的结构不变性将高分辨率图像压缩为低分辨率图像。接着,通过二次拟合求解低分辨率图像中激光光条中心的法线斜率。然后,将低分辨率图像求得的法线斜率还原到高分辨激光光条图像中。进而通过灰度重心判断准则,快速计算激光光条的亚像素中心。最后,采用所提出的方法分别在实验室和大型航空零件装配测试台上进行了复合材料标准样件和复杂零件的三维形貌测量。实验结果表明:该方法的单激光光条重建误差为 0.269 mm,三维形面的重建误差为 0.268 mm。该方法可有效提高工程零件快速测量过程中激光光条提取精度,满足大型航空零件现场测量的工程要求。

**关键词:**激光光条提取;视觉测量;大型零件;分层处理;亚像素

**中图分类号:** TH161<sup>+.1</sup>; TH161<sup>+.7</sup> **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017010

## Sub-pixel center extraction method of laser stripe center based on hierarchical processing

Liu Wei, Zhang Yang, Gao Peng, Yang Fan, Lan Zhiguang, Li Xiaodong, Jia Zhenyuan, Gao Hang

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A sub-pixel center extraction algorithm based on hierarchical processing was proposed for the implementation of laser stripe processing in the large aerospace parts measurement with high speed and precision. Firstly, the high-resolution image was compressed into low-resolution image with structural invariance. Then, the normal vector of the center of laser stripe was calculated by using quadratic curve fitting in the low-resolution image. The normal vector in the low-resolution image was reproduced to the high-resolution image based on the theory of normal regression. The judgment of gray center on normal direction was established to determine calculated pixels. The sub-pixel center of calculated pixels on the normal direction was accurately calculated by the gray weighted centroid method. Finally, the presented method was utilized to measure a composite material standard part and complex aviation parts in the laboratory and assembly testing machine, respectively. Experimental results show that the precision of the reconstruction of a single stripe on the surface of object is 0.269 mm and the precision of three-dimension

收稿日期:2017-02-05; 修订日期:2017-03-03

基金项目:国家 973 计划(2014CB46504);国家自然科学基金(51375075,51227004);辽宁省自然科学基金(2014028010);  
国家自然科学基金创新研究群体项目(51621064)

作者简介:刘巍(1979-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事视觉测量、光学精密测量等方面的研究。Email:lw2007@dlut.edu.cn

surface measurement is 0.268 mm. It indicates that the proposed method can improve the speed and precision of the engineering measurement of large part. Moreover, the method can satisfy the requirements of the in-site measurement of large aerial parts.

**Key words:** laser stripe extraction; computer vision; large parts; hierarchical processing; sub-pixel

## 0 引言

大型零构件如大型飞机尾翼、大型天线等形面尺寸的高精度测量是保证航天、航空领域中重大装备结构安全性能的重要指标<sup>[1-2]</sup>。随着大型装备尺寸的大幅增加,三维高精度测量也面临了更高的挑战<sup>[3-4]</sup>。现有的三维高精度测量方法有视觉测量法、激光雷达法、室内 GPS 方法等<sup>[5-7]</sup>,其中基于辅助激光扫描的双目视觉测量方法是采用双目摄像机采集在被测物表面做扫描运动的辅助激光光条,通过重建该光条中心,实现被测物形面轮廓尺寸高精度的测量。该方法具有测量精度高、速度快、非接触、信息多等优点,成为大型形面轮廓尺寸高精度测量的重要方法之一。

辅助激光光条作为测量过程中的唯一特征信息,其提取精度直接决定大型形面尺寸的测量精度<sup>[8]</sup>。然而,由于大型零构件形面尺寸大,该激光光条在被测物表面移动尺度大,同时受现场光照、空间位置等多源因素影响,传统的光条中心提取方法很难实现大尺寸形面测量中激光光条的中心高精度提取,因此大型构件的激光光条中心提取一直是各国学者的研究热点。Lukas 通过粗提取确定光条中心的初步位置,然后在其附近的 5 pixel 进行高斯拟合求取光条中心<sup>[9]</sup>,该方法对于直线光条具有较高的提取精度,但对光条的每一列进行高斯拟合,运算速度较慢;Steger 利用 Hessian 矩阵得到图像中光条的法线方向<sup>[10]</sup>,通过法线方向求极值点得到光条中心的亚像素位置,该方法具有精度高等优点,但运算量大,难以实现光条快速提取并且对于质量较差的光条提取稳定性差;王雪娟等基于 HOG 特征提出了直线段提取方法<sup>[11]</sup>,该方法利用矩阵的行、列积分运算实现对原始图像特定方向直线段的投影,进而根据矩形函数的一阶导数性质将确定直线段端点位置的问题转化为对列方向向量的求导问题,从而解决了直线段端点不准确和直线段断裂问题,有效提取出图像中

的直线段,但该方法不适用于扫描中特征曲线的提取;孙军华等针对钢轨磨损动态测量中激光光条中心快速精确提取的问题,提出一种卡尔曼滤波和 Hessian 矩阵相结合的激光光条中心快速提取方法<sup>[12]</sup>,该方式可有效对光条特征区域进行预测,减少了计算量,其对于特征光条噪声较少时有较好的结果。在大型航空零件测量过程中,由于现场环境光复杂、被测零件尺寸大,激光光条亮度分布不均匀,图像质量相当较差,基于 Steger 法等改进的提取方法对单张质量较好的光条有较高精度,但是对图像质量不均的多序列图像难以保证提取的稳定性和提取速度;基于灰度重心法等传统提取方法对于图像质量适应性好、提取速度快,但是其精度较低。因此,目前对于大型航空零件现场测量中的激光光条难以快速高精度提取的问题仍未有很好的方法可以很好地解决。

文中结合图像分层技术提出一种快速高精度的光条中心提取方法。文中首先介绍了大型航空零构件三维测量系统的测量原理,然后提出了基于分层技术和改进灰度重心法的亚像素中心提取算法;最后,文中对所提出的亚像素中心提取算法进行了验证实验。

## 1 大型航空零构件测量系统工作原理

大型航空零构件测量系统采用基于辅助激光扫描的双目视觉测量方法,该系统由两台高速、高分辨率的 CMOS 摄像机、一台高稳定性一字线半导体激光器、高精度电控平台、一台高性能的图像工作站构成。在测量过程中,激光器投射一字激光条纹于被测物体表面,通过高精度的电控平台的控制,激光光条在物体表面进行扫描运动,双目摄像机实时对激光光条进行序列图像采集,当双目摄像机机完成三维空间与二维图像转换的相机标定后,由二维图像提取激光光条中心可实现三维空间的坐标重建,从而可确定被测物体表面的形面轮廓尺寸,完成大型形

面的三维测量,文中针对大型航空复合材料零构件表面利用基于辅助激光扫描的双目视觉测量系统进行形面尺寸测量,其测量原理图 1 所示。在实际现场测量过程中,其测量视场大,测量精度要求高,动态序列图像的光条中心的高精度提取将耗费较多的数据处理时间,如何实现光条亚像素中心的快速提取将直接决定大型航空零构件测量的精度与速度。

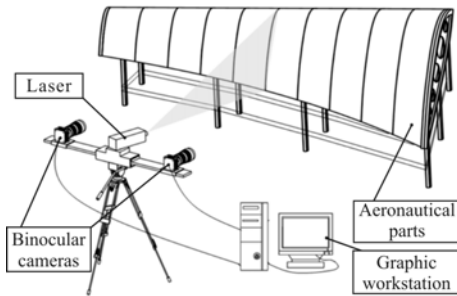


图 1 测量系统原理图

Fig.1 Principle diagram of measuring system

## 2 激光光条亚像素中心快速提取算法原理

该方法通过在不同分辨率图像中提取激光光条的特征信息,实现激光光条的亚像素中心快速提取。其算法步骤如下:(1)对原始高分辨图像进行压缩,得到低分辨率图像,针对低分辨率图像进行光条的预处理快速获得光条的法线斜率;(2)然后在高分辨率图像中还原光条的法线斜率,并在光条法向方向上计算光条灰度中心,实现光条亚像素中心的快速提取。

### 2.1 图像的分层处理

图像的分层提取技术原是由 C.Heipke 提出用于实现航拍图像中道路的高精度识别<sup>[13]</sup>。由于航拍图像中存在树木阴影等复杂情况,严重干扰了道路的准确识别,采用低分辨率图像将具有宽度信息的道路压缩为只有一个像素的线性特征,从而去除过多的环境干扰;然后结合高分辨图像中道路的认识情况,对图片信息在两种情况下同时进行判定,基于判断结果进行航拍道路的准确识别。

在视觉高精度测量中为实现激光光条的高精度提取,需花费大量时间计算光条的法向方向。而低分辨率图像具有干扰信息少、数据量低、保留原图像中的特征结构信息等优势。因此,文中提出了基于分层处理的光条提取算法,即在图像处理的过程中加入低

分辨率图像处理,对低分辨率图像进行耗时较多的法向计算,基于光条的结构特征,在高分辨图像中进行光条中心的亚像素提取。

其中,低分辨率图像的压缩方法如下:将双目摄像机采集的高分辨率激光光条图像(分辨率为  $m \times n$ )按照压缩比例因子  $\tau$  进行图像压缩,即将高分辨率图像中  $\tau \times \tau$  个像素按照灰度求和再求均值的方式压缩为一个像素。文中为简化计算,定义压缩比例因子  $\tau$  为 4 的整数倍,则低分辨率图像压缩的计算准则如下:

$$I_{i,j}^c = (\sum_{\sigma=1}^{\tau} \sum_{\delta=1}^{\tau} I_{\pi(i-1)+\delta, \tau(j-1)+\sigma}) / \tau^2, \quad (1)$$

$$i=1, 2, \dots, \frac{m}{\tau}, j=1, 2, \dots, \frac{n}{\tau}$$

式中:  $I_{i,j}^c$  为压缩图像的第  $i$  行  $j$  列的像素灰度值;  $I_{\pi(i-1)+\delta, \tau(j-1)+\sigma}$  为在高分辨图像中第  $\pi(i-1)+\delta$  行、 $\tau(j-1)+\sigma$  列的像素灰度值;  $\sigma$  和  $\delta$  分别是计算系数;  $m$  和  $n$  分别是高分辨率图像的行列数。

### 2.2 低分辨率图像中的光条法线斜率的计算

原始图像被压缩为低分辨率图像后,图像中的特征信息仍保持一定的结构特征,根据低分辨率图像中光条特征计算光条的法线斜率,以实现光条法线斜率的快速提取。文中在低分辨率图像中采用光条中心点拟合的方式确定光条的法线斜率,如图 2 所示,其计算方法如下:(1)提取低分辨率图像中的初始中心。首先将低分辨率图像进行二值化处理,然后采用 sobel 算子<sup>[14]</sup>提取光条边界,进而通过几何中心法确定低分辨率图像中光条的行中心  $P_i^c = (\overline{v_i^c}, \overline{u_i^c})$ ,其中具有上角标  $c$  的像素点为低分辨率图像中像素点;(2)计算光条的法线斜率。将所提取的光条中心进行曲线拟合计算光条的法线斜率,为保证曲线的拟合精度,需选取 4 个以上的光条中心点进行拟合计算,因此采用被测像素点及其前后  $w$  行的像素中心,其选取的光条几何中心数列为:

$$\{P_k | i-w \leq k \leq i+w; k \geq 1, k \in Z; w \geq 3\} \quad (2)$$

式中:  $i$  为低分辨率图像的行数。因航天航空零件的曲率变化较小,为减少计算量,文中采用二次曲线  $v_i^c = f_i(u_i^c)$  进行拟合,其偏导数为第  $i$  行中心的切线斜率  $q_i^c$ ,则法线斜率  $k_i^c$  为:

$$k_i^c = 1/q_i^c = 1 / \left( \frac{\partial f_i(u_i^c)}{\partial x} \right) \quad (3)$$

当某像素上的切线方向与图像行向量方向夹角为  $0^\circ$  或者  $180^\circ$  时, 则  $k_i^c$  取为 0, 其几何意义为光条为按照行向量分布的光条, 因此, 需按照像素的列方向进行灰度搜索; 同理当某像素的切线方向与图像行向量夹角为  $90^\circ$  或  $270^\circ$  时, 则  $k_i^c$  取为无穷大, 其几何意义为光条为按照列向量分布的光条, 按照像素的行方向进行灰度搜索。则光条的低分辨率图像上的法线斜率  $k_i^c$  为:

$$k_i^c = \begin{cases} 0, |q_i^c| \geq \zeta \\ 1/q_i^c, \varepsilon \leq |q_i^c| \leq \zeta \\ \text{inf}, |q_i^c| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\text{inf}$  为无穷大的符号;  $\zeta, \varepsilon$  分别为所设定的极大值和极小值, 文中取  $\zeta=10^{10}, \varepsilon=10^{-10}$ 。

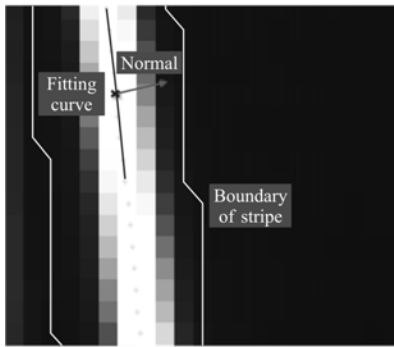


图 2 低分辨率法线斜率提取图

Fig.2 Normal slope extraction of low-resolution image

### 2.3 高分辨图像中的光条亚像素中心提取

基于低分辨率图像中的光条法线斜率的计算, 大大减少了计算过程, 将所求的法线斜率还原到高分辨率图像中, 进而基于法线方向的灰度计算, 快速获得高分辨率图像中的激光光条亚像素中心。

#### 2.3.1 激光光条中心的初提取

在高分辨图像的采集过程中, 由于传感器质量及光照等环境因素造成图像产生噪声干扰, 影响图像的采集质量。因此, 在光条中心提取前, 采用高斯滤波进行图像预处理。然后, 对图像进行二值化处理, 进而提取光条的边界, 其图像第  $i$  行的两端边界分别记为  $(v_j, u_{j-f}), (v_j, u_{j-l}), v_j$  为该行的行向量,  $u_{j-f}, u_{j-l}$  分别为边界起始点的列向量。采用几何中心法计算光条中心, 其计算方法如下:

$$(v_j^e, u_j^e) = \left( v_j, \frac{u_{j-f} + u_{j-l}}{2} \right) \quad (5)$$

当几何中心  $(v_j^e, u_j^e)$  为非整数时, 对像素坐标取整, 则其几何中心的像素坐标为  $P_j^e = (\overline{v_j^e}, \overline{u_j^e})$ , 以该点为光条精提取的初始值。

#### 2.3.2 光条法线斜率的计算与验证

将低分辨率图像求解的光条中心的法线斜率还原到高分辨图像的光条中, 低分辨率图像的一行像素代表高分辨图像的  $\tau$  行像素, 定义低分辨率中每行中心的光条法线斜率为高分辨图像中相对应的压缩光条的法向线斜率, 即

$$k_{\tau(i-1)+h} = k_i^c, h=1, 2, 3, \dots, \tau \quad (6)$$

式中:  $k_{\tau(i-1)+h}$  为在高分辨图像中  $\tau(i-1)+h$  行位置的法线斜率, 其中  $\tau$  为压缩系数,  $i$  为低分辨率图像中光条中心所在的行向量。为便于高分辨图像中法向斜率的表达, 将公式(6)整理为:

$$k_j = k_{(j-h)/\tau+1}^c, h=1, 2, 3, \dots, \tau \quad (7)$$

式中:  $j$  为高分辨率图像中光条中心所在的行向量。

为验证法线斜率的提取偏差, 在高分辨率图像中对光条的每行的中心点进行法线斜率求解, 其高分辨率图像拟合的光条法向斜率为  $k_j^s$ , 计算该斜率与文中方法所求斜率  $k_j$ , 偏差值如图 3 所示, 其中平

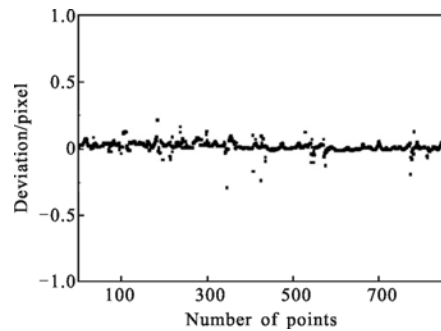


图 3 法线斜率偏差结果图

Fig.3 Analysis result of normal slope errors

均值为 0.023 6, 由于灰度重心的搜索直线为:

$$v_j^\sigma = k_j(u_j^\sigma - \overline{u_j^e}) + \overline{v_j^e}, \sigma=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

式中:  $(v_j^\sigma, u_j^\sigma)$  为  $j$  行搜索直线所经过的图像像素坐标;  $(\overline{v_j^e}, \overline{u_j^e})$  为光条重心的初始值。当斜率存在偏差时, 其行提取偏差为:

$$\Delta v_j^\sigma = \Delta k_j (u_j^\sigma - \bar{u}_j^\sigma) = (k_j - k_j^\sigma) (u_j^\sigma - \bar{u}_j^\sigma) \quad (9)$$

由于列搜索量  $(u_j^\sigma - \bar{u}_j^\sigma)$  小于一个像素, 则行向量像素偏差小于 0.023 6 个像素, 满足测量精度要求。

### 2.3.3 激光光条中心的高精度提取

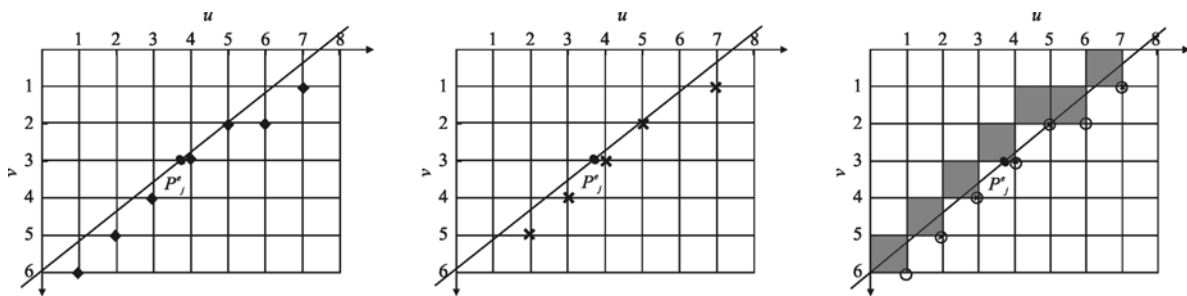
按照法线方向对对高分辨率图像上的灰度信息进行判定, 进而计算沿法线方向上的灰度中心, 如图 4 所示, 其判定准则如下:

(1) 判断法线斜率与列向量的交点, 文中定义经

过初始中心  $P_j^\sigma$  斜率为  $k_j$  的直线为法向直线, 沿法向直线在边界范围内搜索与其相交的列向量的像素坐标。因像素坐标为整数, 因此, 所得的行向量坐标向无穷大方向取整, 其所取的像素点如图 4(a) 所示;

(2) 判断法线与行向量的交点, 根据列向量交点的求取方法, 对边界内行向量进行求取, 其所取的像素点如图 4(b) 所示;

(3) 对与行、列向量相交判断所得的像素点进行整理, 其像素点序列为  $S_j = \{P_o^s | P_o^s = (v_o, u_o), o=1, 2, \dots, N\}$ ,



(a) 列向量交点 (a) Cross points of columns  
(b) 行向量交点 (b) Cross points of rows  
(c) 提取像素格 (c) Extraction pixels

图 4 法线方向灰度重心判断示意图

Fig.4 Schematic diagram of judgment method of gray centroid in the direction of normal vector

其中  $P_o^s$  为在法线方向判断的像素点,  $N$  为像素点个数, 该序列内像素点互不相同, 将该序列点列进行灰度重心<sup>[14]</sup>的计算, 其计算公式如下:

$$\begin{cases} vc_j = \sum_{o=1}^N v_o I_o / \sum_{o=1}^N I_o \\ uc_j = \sum_{o=1}^N u_o I_o / \sum_{o=1}^N I_o \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $I_o$  为第  $v_o$  行第  $u_o$  列的灰度值。因此可求光条亚像素中心  $P_j = (vc_j, uc_j)$ 。

## 3 测量实验与结果

### 3.1 测量系统及精度验证方法

系统针设备采用 vieworks 公司高精度 CMOS 相机, 分辨率为 4 096×3 072, 摄像机焦距为 25 mm, 激光器运用 450 nm 的一字线激光, 对大型飞机构件中主要复合材料 T800 的平面表面进行三维形貌测量, 实验系统如图 5 所示。

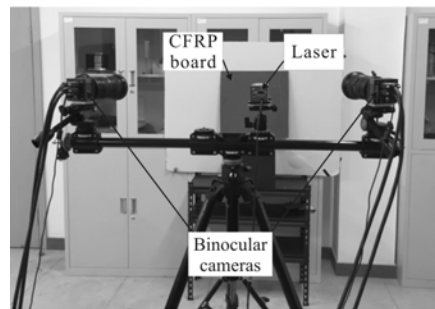


图 5 测量系统图

Fig.5 Diagram of measurement system

采用平面拟合残差评价三维重建误差, 即计算每个重建点到拟合平面的距离误差的均方根。首先根据最小二乘法拟合平面方程为:  $Ax + By + Cz + D = 0$ , 重建点的三维坐标为  $p_i = (x_i, y_i, z_i)$ , 则平面拟合残差计算公式如下:

$$\left( \sum_{i=1}^M \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{(A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}} \right) / M, i=1, 2, 3, \dots, M \quad (11)$$

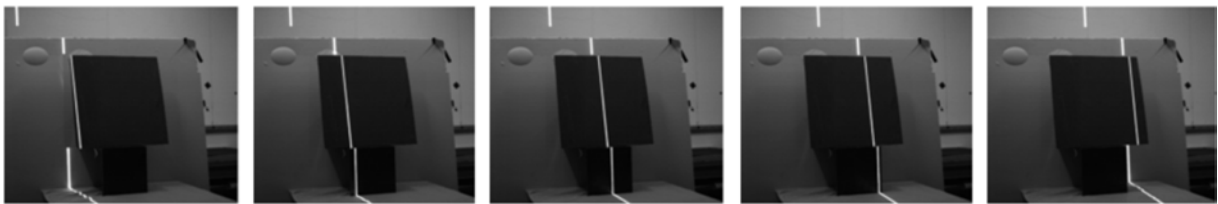
式中： $M$  为三维重建点的个数。

### 3.2 实验室测量验证

对复合材料标准平面样件进行了测量验证实验,该复合材料标准样件尺寸为 380 mm×400 mm,采用三坐标测量机在其表面均布测量 27 783 个点,距离均方根为 0.09 mm,下文简称复合材料标准平面样件为样件。

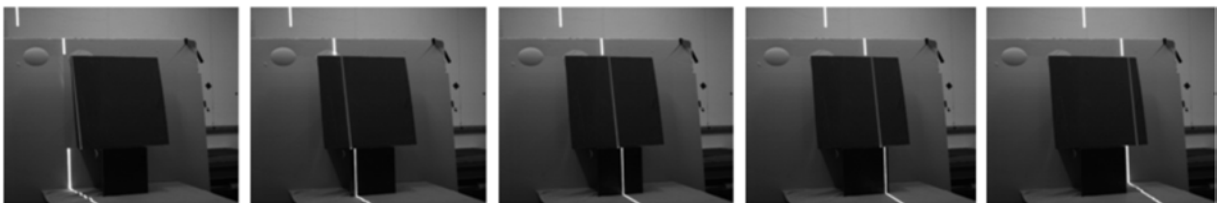
在测量过程中,选用 10 frame/s 帧频,采集时间 10 s 对该样件进行扫描测量,采用文中所提出的光

条亚像素中心快速提取方法,对激光光条图像进行处理,然后通过多序列光条的重建获得测量平面。为验证单光条的重建精度,采用单光条重建均方根误差进行精度评价,即计算单根光条上提取点到测量平面距离的均方根误差从采集的序列图像任选 5 张光条图像,其图像如图 6(a)所示,其中心的提取图如图 6(b)所示。将 5 张光条的测量误差与工程中常用的灰度中心法,几何中心法进行对比,其测量结果如表 1 所示。



(a) 激光光条采集图

(a) Images of laser stripes acquisition



(b) 激光光条提取图

(b) Images of laser stripes extraction

图 6 激光光条采集与提取图

Fig.6 Images of laser stripes acquisition and extraction

表 1 不同方法的单光条重建结果(单位: mm)

Tab.1 Single stripe reconstruction results for different methods (Unit: mm)

Number	1	2	3	4	5
Geometrical center method	0.338	0.319	0.324	0.334	0.314
Gray centroid method	0.276	0.283	0.275	0.278	0.280
Method in this paper	0.269	0.264	0.262	0.267	0.268

对于单根直线光条,采用几何中心法提取的光条的重建误差为 0.338 mm,灰度重心法为 0.283 mm,

文中所提出方法为 0.269 mm,文中所提方法的直线重建精度高于工程常用的灰度重心法及几何中心法。利用灰度重心法和文中所提出的方法对光条扫描的序列图像进行被测物三维形面重建,图 7 为两种方法对边缘区域的重建情况,由于灰度重心法为一维的亚像素方法,缺乏方向性判断,对于光条突变的边界区域,产生较多的误差点,重建精度差,如图 7(a)所示;而文中所提出的方法基于低分辨率图像进行了法向的快速求解,进而获得了光条中心的二维亚像素求解,提高了边界提取精度,图 7(b)为文中方法所重建的边界区域。

对于该标准样件的三维测量,采用文中方法所提取的激光光条的三维重建误差为 0.268 mm,采用

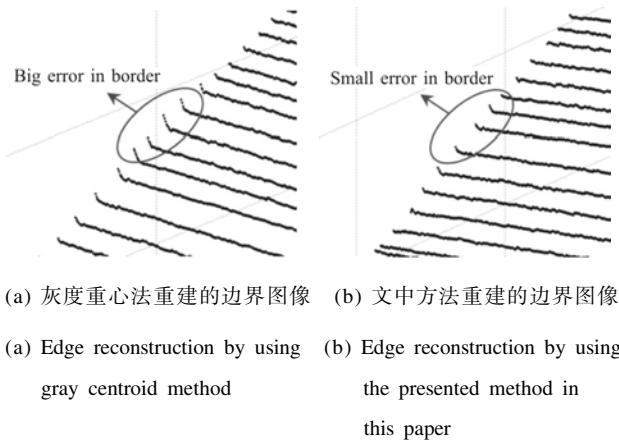


图 7 边缘提取对比图

Fig.7 Comparison diagram of edge extraction

灰度重心的重建误差为 0.276 mm。文中所提出的方法精度优于灰度重心法。因此,文中所提出的方法可有效地实现光条的快速高精度亚像素提取,其重建结果图如图 8 所示。

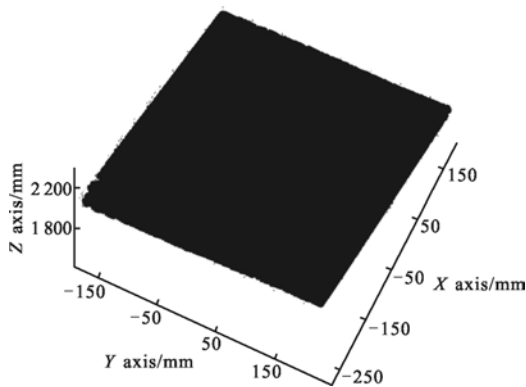
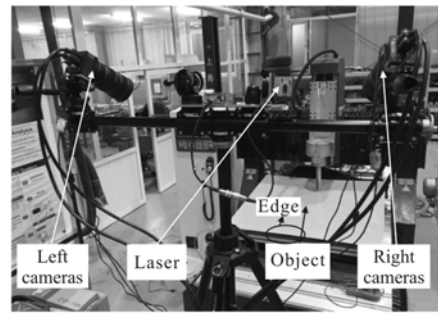


图 8 三维重建结果图

Fig.8 Results of three-dimensional reconstruction

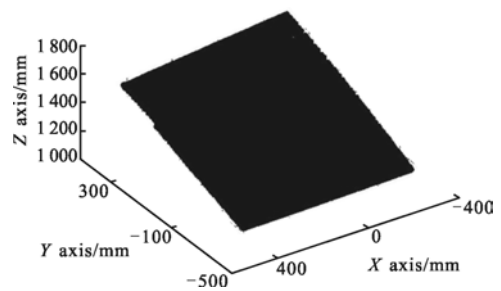
### 3.3 航空零件现场测量实验

为分析航空复合材料零件在承受不同装配应力下的变形情况,需要在位测量被测零件的三维形面。图 9 为在航空零件装配实验台上对不规则的航空玻璃纤维复合材料零件测量的实验图,其零件尺寸约为 700 mm×800 mm。采用文中方法对该不规则零件曲面进行测量,其重建结果如图 9(b)所示,结果表明文中所提出的方法在现场在位环境下可有效实现被测物三维形面的重建,在零件边界处具有较少的误差点,获得了良好的三维重建边界。因此,文中所提出的方法满足于工程现场的测量要求。



(a) 现场实验图

(a) Field experiments



(b) 重建结果图

(b) Results of reconstruction

图 9 现场测量图

Fig.9 Images of field measurement

## 4 结论

文中针对大型航空零件现场测量过程中,激光光条难以实现快速、高精度提取的问题,根据激光光条特征提出了结合分层处理的激光光条亚像素中心提取方法,实现了大型航空零件测量中光条中心的快速高精度提取,并有效解决了传统测量方法在测量过程中的边界提取、重建精度差的问题。通过理论分析和实验验证,得出如下结论:

(1) 提出了一种结合分层处理的激光光条中心法线斜率的快速提取方法,大大减少了光条中心法线斜率的计算量,通过法线斜率还原误差分析,验证了该方法所提取的法线斜率精度可满足大型航空零件的现场测量要求;

(2) 提出了一种激光光条亚像素中心快速提取方法,通过光条中心法线斜率在高分辨率图像的还原,基于法线方向灰度重心判断准则,实现了光条亚像素中心的快速高精度提取,有效解决了光条边界提取误差大的问题;

(3) 文中所提出的光条亚像素中心快速提取方法可准确提取大型航空零件的扫描光条信息, 减少边界突变情况, 其测量精度为 0.268 mm; 满足大型航空零件现场测量的快速高精度的要求, 有效实现了大型航空零件的快速高精度测量。

#### 参考文献:

- [1] Zhao Sihong, Lu Yabing, Chen Xiaoxu, et al. Realization of real-time automatic target reporting system for simulant airborne weapon attacking over ground[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S1): 78–82. (in Chinese)  
赵思宏, 陆亚兵, 陈晓旭, 等. 航空武器对地模拟攻击实时自动报靶系统的实现 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(S1): 78–82.
- [2] Li H, Zhang L X, Xiao T Y. Real-time control for CPS of digital airplane assembly with robust H-infinity theory [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, 20(4): 376–384.
- [3] Gao Yuhan, An Zhiyong, Wang Jinsong, et al. Precision measurement technology of 3D surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2261–2264. (in Chinese)  
高琨含, 安志勇, 王劲松, 等. 三维面型精密测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2261–2264.
- [4] Shi Jinlong, Qian Qiang, Pang Linbin, et al. Three-dimensional measurement and registration for large scale plates [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(5): 1165–1170. (in Chinese)  
史金龙, 钱强, 庞林斌, 等. 大尺度钢板的三维测量和拼接 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1165–1170.
- [5] Zheng Xuehan, Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun. Expeditions calibration algorithm of visual tracking and measurement system with field coordinate system for moving target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2175–2181. (in Chinese)  
郑学汉, 魏振忠, 张广军. 运动目标视觉跟踪测量系统与场地坐标系的快速统一方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2175–2181.
- [6] Kieu H, Pan T, Wang Z, et al. Accurate 3D shape measurement of multiple separate objects with stereo vision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(1): 35–40.
- [7] Qu Hengkuo, Zhang Qingyuan, Ruan Youtian. Laser radar based on scanning image tracking [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 242–247. (in Chinese)  
屈恒阔, 张清源, 阮友田. 扫描成像跟踪激光雷达[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 242–247.
- [8] Feng Ping, Liu Zhen. Automatic localization method of the multi-planar strip in rudder angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(6): 911–916. (in Chinese)  
冯萍, 刘震. 舵面角度测量中结构光光条图像自动定位方法[J]. 中国光学, 2014, 7(6): 911–916.
- [9] Lukás J, Fridrich J, Goljan M. Detecting digital image forgeries using sensor pattern noise [C]//International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [10] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(2): 113–125.
- [11] Wang Xuejuan, Luo Haibo, Wei Yongwang, et al. Extracting line segments method with HOG feature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 513–518. (in Chinese)  
王学娟, 罗海波, 魏永旺, 等. 一种采用 HOG 特征的直线段提取方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 513–518.
- [12] Sun Junhua, Wang Heng, Liu Zhen, et al. Rapid extraction algorithm of laser stripe center in rail wear dynamic measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 690–696. (in Chinese)  
孙军华, 王恒, 刘震, 等. 钢轨磨耗动态测量中激光光条中心的快速提取[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 690–696.
- [13] Heipke C, Steger C, Multhammer R. A hierarchical approach to automatic road extraction from aerial imagery [C]//SPIE, 1995, 2486(5): 213122.
- [14] Zhu Jigui, Yu Zhijing. The Principle of Vision Metrology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)  
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, 2011.