

面向大型零部件的三维形面高精度测量方法

刘巍, 高鹏, 张洋, 杨帆, 李晓东, 兰志广, 贾振元, 高航

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 目前, 辅助激光视觉测量法已广泛应用于大型零部件的三维形面测量。针对该方法在测量过程中普遍存在的轮廓边界信息获取不准确的问题, 提出一种面向大型零部件的三维形面测量方法以获得精确的形面信息和轮廓边界信息。首先, 根据光条图像序列采集特性, 基于时间流的光条自适应定位方法实现了光条所在区域的实时定位; 其次, 提出了一种基于光条几何特征突变的边界提取方法, 获取光条处的被测物边界行(列)坐标位置; 然后, 利用光条区域内快速提取的光条中心结果, 确定准确的边界特征点坐标, 并仅保留边界特征点以内的有效光条中心点; 最后, 对所提取的有效光条中心进行了三维重建, 结合光条扫描实现了整个形面的三维快速测量。实验验证结果表明: 该方法可实现被测物三维形面信息的高精度快速测量, 同时获取精确的轮廓边界信息, 其测量精度达到 0.06 mm, 且大大减小运算量, 满足大型零部件的快速高精度测量要求。

关键词: 视觉测量; 光条定位; 边界提取; 三维测量

中图分类号: TP853.1; TP751.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0317003

High-precision measurement method for 3D shape of large-scale parts

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

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

Abstract: The measurement method based on laser-aided machine vision has been widely used in 3D shape measurement for large-scale components and parts at present. To solve the problem of the inaccurate extraction for components' boundaries, a high-precision method of 3D shape measurement for large-scale parts was proposed in this paper. Firstly, an adaptive light stripe locating method based on time flow was proposed according to the sequence of acquiring images, by which the region of the light stripe can be located in real time. Next, a boundary detection method based on light stripe mutations was presented to acquire the row or column coordinates of the object boundaries in the light stripe. Then the coordinates of the boundaries can be determined precisely combined with the extraction results of light stripe centers. And the effective light stripe centers for measurement within the two determined boundary feature points can be retained. At last, the extracted light stripe centers were matched and reconstructed to accomplish 3D shape measurement. Experiment results show that the measurement accuracy of this

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-10

基金项目: 973 计划项目(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(51321004)

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

method reaches 0.06 mm and precise boundary information of objects can be acquired. The cost of computation is also reduced greatly. Thus, the proposed method can satisfy the measurement requirements of high precision and rapid speed.

Key words: vision measurement; location of light stripe; boundary extraction;
3D shape measurement

0 引言

随着汽车工业、船舶制造、航空航天等领域中大型零部件制造技术的迅速发展,机械加工的精度和复杂度越来越高,对零部件检测的精度、效率和自动化程度的要求也越来越高^[1]。以飞机平、垂尾为例,在其制造和装配过程中三维形面的高精度测量是其高质量制造与连接装配的前提和保证^[2-4]。但由于这类零部件尺寸大、形状复杂、局部精度要求高,其形面的三维精确测量是现代测量技术中的一个亟待解决的难题^[5-6]。同时,在现场测量中测量时间有限、测量环境复杂,因此如何实现在位的、快速高精度的大型形面测量对于大型零部件的制备十分重要。

视觉测量法是近些年研究比较热点的一种三维形面测量方法,由于具有检测速度快、测量精度高、自动化程度高而且测量非接触等优势,目前已被广泛的应用于航空、航天以及汽车工业等重要领域^[7]。国内外学者在这方面进行了大量研究。日本学者 Hirofumi Nakai^[8]等人设计了一套由一台相机和一台激光扫描测距仪组成的视觉系统,采用手持式线激光器进行扫描实现三维形面的测量,测量过程中需要实时定位激光器位置,测量精度难以得到保证。西班牙学者 Rubén Usamentiaga^[9]等人在应用辅助激光视觉进行三维测量时,对工业环境下光照亮度和反光条件的变化进行了一定地分析,提出一种快速、高鲁棒性的光条提取方法,满足工业现场实时快速测量要求,但测量误差相对较大。国内学者在三维视觉测量方面也做了大量的研究并取得了很好的结果。南京大学张旭莘^[10]等人对大视场三维视觉测量过程中的图像模糊和测量误差等问题进行了分析,对图像进行离焦恢复和相位一致行变换进行特征增强从而提取光条亚像素级中心,实现对被测物三维几何尺寸测量,测量精度得到提高;但增加了算法的复杂度,三维测量效率有所降低。北京航空航天大学冯萍^[11]等人开发了一套光笔式三维视觉测量系统,通

过设计的光笔可以实现大视场三维柔性化测量,测量精度优于 0.2 mm;测量需要移动光笔逐点测量,适合少数关键特征点的测量,并且光笔无法准确定位到被测物轮廓边界进行测量。吉林大学徐关^[12]等开发了一套汽车形貌检测系统,通过线结构光扫描结合视觉测量的方式进行汽车车身的三维测量,通过卡尔曼滤波预测光条区域,提高了测量效率;但所选光条区域仅在车身内,忽视了对车身的边界轮廓信息的获取。总体来说,现有的视觉三维测量方法由于其自身算法和测量设备的限制,通常无法兼顾测量精度和测量效率的双重要求,并且普遍忽视了对被测物轮廓边界信息的精确获取,暂时还不能满足大型零部件的快速高精度测量要求。

然而,对于某些重要装备零部件(例如大飞机平、垂尾等)的制造和装配现场,不仅要求快速获得其装配面的三维信息,还要求其在零部件的边界处轮廓信息也能精确的测得,才能有效的保证其制造和连接装配的高质量要求。因此,文中针对上述问题在双目立体视觉测量的基础上,提出了一种面向大型零部件的三维测量方法。文中首先介绍了三维形面测量系统的工作原理;然后提出了基于时间流的光条自适应定位方法,以快速获取光条区域,提高检测效率;其次对光条进行亚像素提取,并提出了基于光条几何特征突变的边界提取方法,获得高精度的目标边界位置;最后对所提取的光条中心进行匹配和三维重建,并进行了相应的实验验证。

1 三维形面测量系统组成及工作原理

文中采用辅助激光扫描结合双目立体视觉测量的方法以实现大型零部件的三维形面测量。系统主要由两部分组成:双目立体视觉测量系统和辅助激光扫描系统。双目立体视觉测量系统包括两台工业相机、同步触发器、计算机及相应的软硬件辅助设施;辅助激光扫描系统主要包括扫描线激光器及实现扫描的运动机构,如图1所示。

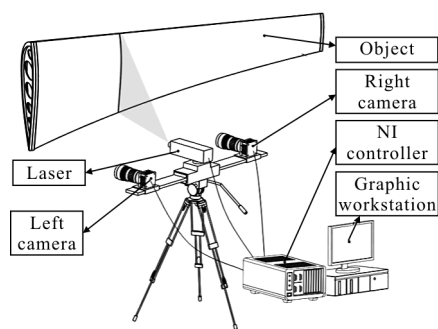


图 1 三维形面测量系统组成

Fig.1 Components of the 3D shape measurement system

线激光扫描结合双目立体视觉测量的基本原理是视差原理。采用双目相机获取投射在被测物表面被调制的线激光光条图像,确定左右图像线激光条纹中心的位置,通过匹配寻找空间位置同一点在左右图像中的像点进行三维重建得到该点的空间位置;通过一一匹配和重建线激光条纹中心得到光条位置处被测物表面的三维信息,通过光条扫描的方式便能得到整个被测物表面的三维形面稠密点云数据。

2 基于时间流的光条自适应定位

投射于被测物表面被调制的激光条纹中心反映了被测物的空间位置信息,因此,准确的光条中心的提取是实现三维形面高精度测量的关键。然而,由于测量过程中普遍存在大面积背景干扰和复杂光照环境的干扰,导致直接对整幅图像进行光条提取时阈值难以确定。并且对整幅光条图像进行处理运算量大,提取效率低。因此,文中提出一种基于时间流的光条自适应定位方法,实时定位光条区域。

在图像采集过程中,激光器匀速转动进行光条扫描。由于相机采集帧频较高,拍摄过程中相邻两帧时间间隔较短,因此可以认为光条在物体表面近似作匀速运动,相机等时间间隔进行采集,得到序列光条图像可以表示为 $\{f(x,y,t_0), f(x,y,t_1), f(x,y,t_2), \dots, f(x,y,t_{n-1})\}$ 。考虑到相邻两张光条图像存在的时间流约束关系,结合已知的光条扫描运动,在得到初始光条位置的基础上通过递推的方法即可快速获得后续序列扫描图像中的光条所在区域。具体实现过程如下。

首先,在图像中选择包含被测物形面信息的多边形区域作为初选被测物区域,该区域包含序列扫

描图像中所有投射到被测物表面的有效光条信息。将图像中的该初选区域内所有像素值置 1,区域外的置 0,由此构造一个二值化模板图像。将该图像与所有序列光条灰度图像相乘,可以快速去除光条图像中绝大部分的大面积背景干扰,得到包含被测物表面信息、光条信息和少量背景干扰的灰度图像 $f'(x,y,t_i)$ 。

通过在初始位置确定的基础上,结合光条扫描运动和相机采集特性实现光条区域的自适应定位。定义序列光条图像 $\{f'(x,y,t_0), f'(x,y,t_1), \dots, f'(x,y,t_{n-1})\}$ 中第 i 张光条图像的光条位置状态为 X^i ,则相邻两张光条图像的光条位置关系可以用以下递推公式表示:

$$X^{i+1} = X^i + d\omega / f, \quad i=0,1,2,\dots,n \quad (1)$$

式中: $X^i = [X_{\min}^i, X_{\max}^i]$, X_{\min}^i 为上述图像进行阈值分割处理后的光条连通区域在水平方向上的最小分量; X_{\max}^i 为最大分量; d 为激光器到被测物表面的平均测量距离,可实验前大致获得; ω 为激光器的扫描角速度; f 为相机的采集帧频。这里只需搜索初始光条连通区域位置 $X^0 = [X_{\min}^0, X_{\max}^0]$,即可利用公式(1)进行后续序列光条图像中光条位置的快速定位,从而得到第 i 张序列图像的光条区域列坐标取值范围。

$$[C_{\min}^i, C_{\max}^i] = X^i + [-\Delta c, \Delta c] \quad (2)$$

其中,考虑到测量距离 d 平均近似处理会造成光条定位误差, Δc 为光条区域的预留给值,一般取光条宽度的 3~5 倍,文中 Δc 取 30 pixel。

光条区域的行坐标取值范围可直接计算该时刻 x_{\min}^i 对应的垂直方向上与初选被测物区域边界相交的最小分量 $y_{\min}^{i,1}$ 和最大分量 $y_{\max}^{i,1}$,以及 x_{\max}^i 对应的垂直方向上与其相交的最小分量 $y_{\min}^{i,2}$ 和最大分量 $y_{\max}^{i,2}$ 。因此可以确定光条区域行坐标取值范围。

$$[R_{\min}^i, R_{\max}^i] = [\min(y_{\min}^{i,1}, y_{\min}^{i,2}), \max(y_{\max}^{i,1}, y_{\max}^{i,2})] \quad (3)$$

于是得到完整的光条实时区域为:

$$Q^i = \begin{bmatrix} C_{\min}^i & R_{\min}^i \\ C_{\max}^i & R_{\max}^i \end{bmatrix} \quad (4)$$

上述得到的光条区域内不仅包括待提取的光条特征信息,还包括该光条处被测物轮廓边界信息。因

此, 仅需在该区域内进行图像处理即可获得所有所需的被测形面信息和边界信息, 大大节约了计算整幅图像的冗余时间, 有利于提高提取效率。

3 光条特征高精度提取

光条特征的提取将直接决定三维形面的测量精度。对于如飞机平、垂尾等重要零部件, 其边界信息是其测量的重要指标之一。因此在光条特征提取的过程中, 在保证光条中心的提取精度的同时, 要实现光条在被测物边界的高精度提取。

3.1 基于光条几何特征突变的边界提取

在现场测量中, 由于环境背景复杂, 被测物边界制造质量较差, 在光条提取时, 边界处会产生较多噪点, 难以保证边界的提取精度。

当光条投射在被测物表面时, 被测物与背景物体之间存在复杂的空间位置关系, 光条在被测物边界处通常呈现与背景连续、断开和弯折等几种成像情况 (如图 2 所示), 传统的边界检测算子仅可通过阈值分割的方式获得有灰度差别的边界信息, 而对于光条投影在被测零件边界的特征信息, 无法实现稳定、高精度的获取。因此文中提出了一种基于光条几何特征突变的边界提取方法以实现复杂环境干扰

下的轮廓边界准确获取。针对研究过程中所遇到的实际情况, 文中考虑的边界处光条的突变特征为光条的宽度值, 即由于材料的反射特性不同, 当激光光条以相同角度投射到不同材料表面时光条宽度值不同。因此文中以边界处宽度特征变化最剧烈处表征被测物的边界位置。

首先, 采用阈值分割的方法分割出图像光条连通区域, 由上到下逐行(列)搜索光条宽度值 d , 得到光条宽度值数列如下:

$$[d_{i-\lambda}, \dots, d_i, \dots, d_{i+\lambda}] \quad (\lambda \geq 1, i=k, k+1, \dots, k+n) \quad (5)$$

式中: d_k 为第 k 行光条宽度值; k 为光条连通区域的首行; n 为光条连通区域的总行数。然后以每一行 i 的宽度值 d_i 及其上下各 λ 行元素构造计算数列 $[d_{i-\lambda}, \dots, d_i, \dots, d_{i+\lambda}]$ ($\lambda \geq 1, i=k, k+1, \dots, k+n$), 计算其光条宽度变化率 ψ_i , 以离散型方差的形式定义光条的宽度变化率如下:

$$\psi_i = \sum_{j=i-\lambda}^{i+\lambda} p_j (d_j - \mu)^2 \quad (6)$$

式中: p_j 为第 j 行 ($j \in [i-\lambda, i+\lambda]$) 光条宽度值 d_j 出现的概率, $p_j = 1/(2\lambda+1)$, 文中取 $\lambda=1$; μ 为该计算数列各宽度元素的平均值。

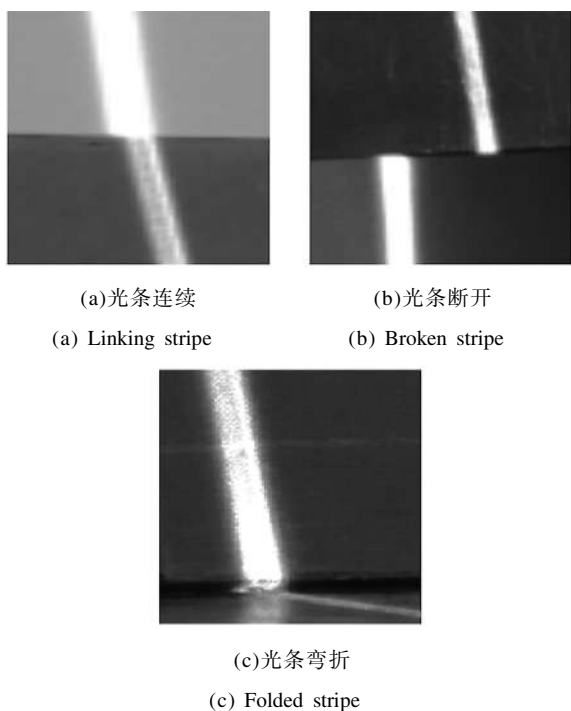
$$\mu = \sum_{j=i-\lambda}^{i+\lambda} d_j / (2\lambda+1) \quad (7)$$

因此, 得到第 i 行的光条宽度变化率为:

$$\psi_i = \sum_{j=i-\lambda}^{i+\lambda} (p_j d_j^2) - \left(\sum_{j=i-\lambda}^{i+\lambda} d_j / (2\lambda+1) \right)^2 \quad (8)$$

其中, 为满足运算规则, 将 $i=1$ 和 $i=n$ 处溢出部分的宽度值 d_{k-1} 和 d_{k+n+1} 按等于 0 进行处理, 从而得到光条宽度变化率曲线如图 3 所示。

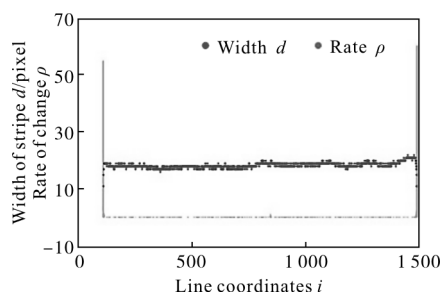
由图 3 可以看出, 针对不同的光条成像情况, 其宽度变化率曲线通常会出现 2~4 个不同的局部极大值点, 对应可能的边界行坐标位置 i_{\max}^s ($s=1, 2 \sim 4$)。这



(a) 光条连续
(a) Linking stripe
(b) 光条断开
(b) Broken stripe
(c) 光条弯折
(c) Folded stripe

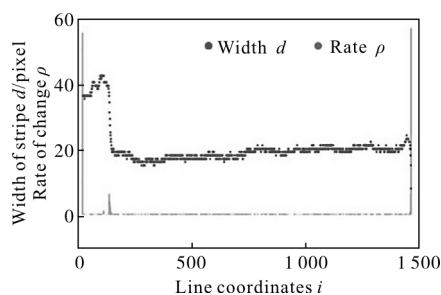
图 2 光条在被测物边界处成像情况分析

Fig.2 Imaging analysis of light stripes at the object edge



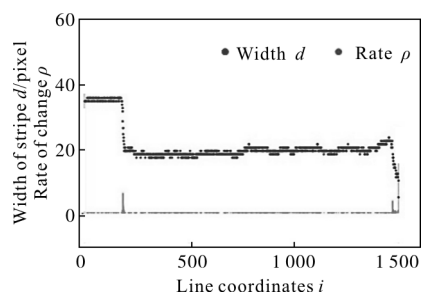
(a) 两端断开

(a) Broken in the two edge



(b) 一端断开, 一端连续

(b) Broken in one edge but linking in another



(c) 两端连续

(c) Linking in the two edge

图 3 光条宽度突变结果

Fig.3 Mutation of light stripe width

3 种情况的局部极大值点分别对应 3 种不同情况, 如图 3(a)所示, 若光条两端在边界处均出现断开的现象, 则出现 2 个局部极大值点; 如图 3(b)所示, 若光条其中一端断开, 另一端在边界处与背景物体表面光条连续, 则出现 3 个局部极大值点。若光条两端在边界处均连续, 则出现如图 3(c)所示 4 个局部极大值点。

光条区域定位后被测物通常被置于视场中间部分, 因此计算光条区域中间某几行光条宽度的平均值作为被测物表面光条的实际宽度值 D , 并设定判定阈值 Δd 。结合以上光条宽度变化率曲线局部极大值处的光条宽度值 $d_{i_{max}^s}$ 与实际宽度值 D 进行对比。

$$\begin{cases} |d_{i_{max}^s} - D| \geq \Delta d & i_{max}^s \notin \text{edgepoint} \\ |d_{i_{max}^s} - D| < \Delta d & i_{max}^s \in \text{edgepoint} \end{cases} \quad s=1,2\sim 4 \quad (9)$$

由此可以判断出每条光条上属于被测物边界处的 2 个行坐标位置。

3.2 光条中心提取

通过第 2 节中提取到的每张序列图像的光条区域, 在该区域内应用 Steger 提出的 Hessian 矩阵法^[12]进行光条中心的高精度提取, 即利用高斯卷积计算光条各点的 Hessian 矩阵, 由此确定其法线方向, 进

而求得法线方向上的光条中心坐标。假设图像灰度函数为 $f(x,y)$, $g_x, g_y, g_{xx}, g_{yy}, g_{xy}$ 分别是 $f(x,y)$ 与相应微分形式的高斯核卷积得到的偏导数, 于是光条上任一点的 Hessian 矩阵可以表示为:

$$H(x,y) = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} \\ g_{xy} & g_{yy} \end{bmatrix} \quad (10)$$

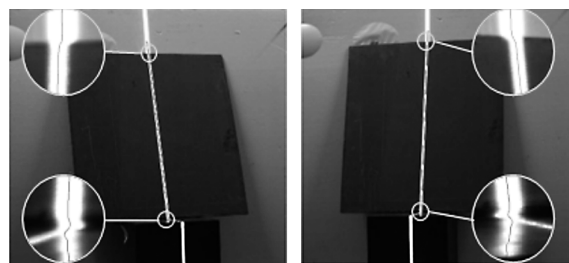
通过计算 Hessian 矩阵最大特征值对应的特征向量即是光条法线方向, 记为 (n_x, n_y) , 其中 $\|(n_x, n_y)\|=1$ 以感兴趣区域每像素行最大值点 (x_m, y_m) 为初始基准点, 则计算得到的光条中心亚像素位置为:

$$(x_c, y_c) = (x_m + tn_x, y_m + tn_y) \quad (11)$$

其中, $t = \frac{n_x g_x + n_y g_y}{n_x^2 g_{xx} + 2n_x n_y g_{xy} + n_y^2 g_{yy}}$, 且 $(tn_x, tn_y) \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] \times \left[\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$ 。

由于 Steger 算法需要进行大量的卷积运算, 因此首先确定合理的光条提取区域能够大量减少搜索范围和 Gaussian 卷积的数目, 提升运算速度。

结合 3.1 节中提取到的光条所在处被测物边界的行坐标, 判断对应边界行坐标位置的光条中心坐标, 从而确定其为准确的上下边界特征点, 如图 4 所示。

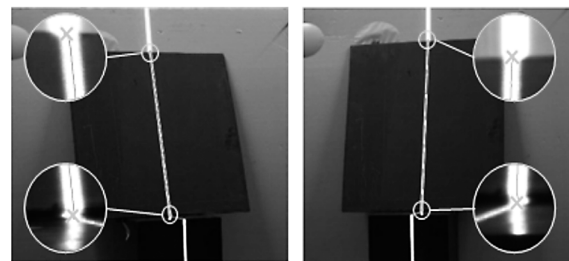


(a) 左图像光条

(b) 右图像光条

(a) Extraction of left image

(b) Extraction of right image



(c) 左图像边界

(d) 右图像边界

(c) Boundary detection of left image

(d) Boundary detection of right image

图 4 光条中心及被测物边界提取结果

Fig.4 Results of light stripe centers extraction and the object boundary detection

从图中可以看出,通过该方法能够有效地提取出灰度对比明显的上边界特征点以及灰度无明显差异的下边界特征点,通过对序列图像的每一根光条进行边界识别从而得到完整的被测物轮廓边界信息。

4 三维重建

双目视觉测量过程中左、右图像对应特征点的匹配和重建是实现三维重建的关键。通过上述 3.2 节中提取到的高精度光条中心特征点以及 3.1 节中提取出的边界特征点,从而剔除边界位置以外的光条中心坐标,实现边界及边界以内光条特征点的匹配和重建,即可完成被测物的三维重建。

结合图像采集前完成的摄像机标定,以实现提取到的光条中心点的匹配和三维重建。首先,利用双目立体视觉测量系统左、右摄像机图像平面满足极线约束关系进行左、右图像中对应光条特征点的匹配,其满足

$$p_r^T F p_l = 0 \quad (12)$$

其中, p_l 、 p_r 分别为左、右图像对应匹配点,基本矩阵 F 可通过已知准确距离的两个标定板进行标定计算。以左图像为基础,基于基本矩阵的极线约束计算右图像的匹配点。根据得到的左、右图像对应匹配点,结合双目视觉重建基本原理可实现上述匹配点的三维重建。对空间任意一点 p_i ,重建得到其三维空间坐标如下所示:

$$p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_i'}{f_1} \\ \frac{z_i'}{f_1} \\ \frac{f_1(f_1 t_y - y_i' t_z)}{Y_1(r_7 x_i' + r_8 y_i' + r_9 f_1) - f_2(r_4 x_i' + r_5 y_i' + r_6 f_1)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: x_i' 、 y_i' 分别为左摄像机采集的特征点在图像坐标系下的横、纵坐标; x_i'' 、 y_i'' 分别为右摄像机采集的特征点在图像坐标系下的横、纵坐标; f_1 、 f_2 分别为左、右摄像机标定得到的焦距; $[r_1 \ r_2 \ r_3; r_4 \ r_5 \ r_6; r_7 \ r_8 \ r_9]$ 是右摄像机相对于左摄像机的旋转矩阵, $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ 是右摄像机相对于左摄像机的平移矩阵,均由双目摄像机的标定获得。

5 实验与分析

在实验室搭建大视场三维形面测量系统如图 5 所示,主要由两台 CMOS 工业相机(VC-12MC-M/C 65, 焦距 35 mm,分辨率 3 072×4 096)、一台线激光器、计算机(intel i3 3.1 GHz, 2 G 内存)、NI 采集系统等组成。采用 MATLAB 2013b 进行图像处理。

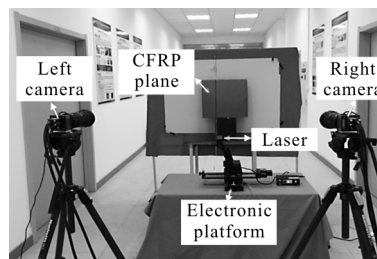


图 5 大视场三维形面测量系统实物图

Fig.5 3D shape measurement system of large field of view

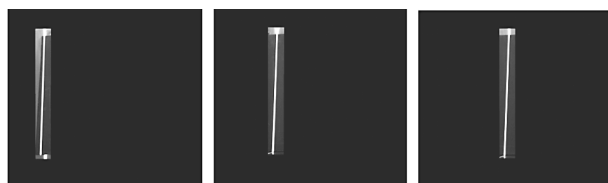
5.1 复合材料平板三维重建实验

选用一块约 400 mm×400 mm 的碳纤维材料方形平板进行实验。实验前采用三坐标测量机在其表面均匀采集 4 556 个采样点,验证其平面距离均方根误差 RMSE 为 0.098 1 mm。图像采集时相机选用 35 mm 焦距,工作距离 1.5 m,视场大小约为 1 000 mm×1 200 mm。激光器安装于转台上以角速度 $\omega=0.1$ rad/s 进行匀速扫描,NI 采集系统控制双目相机进行同步采集,相机以 20 帧的帧频采集 5 s。

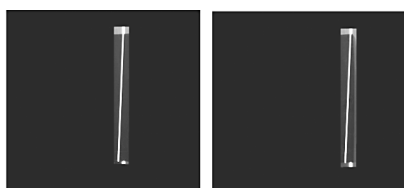
如图 6 所示为其中 5 帧右相机拍摄光条图像的光条定位结果,能够有效地获得光条区域;图 7 所示为上述 5 帧图像的光条中心提取结果以及对应的边界识别结果,红线为所提取的光条亚像素中心位置。将文中方法对单帧图像提取光条所用时间与经典 Steger 算法对整幅图像进行光条提取所用时间进行比较,对比结果如表 1 所示。可以看出,文中通过定位光条区域的方法有效地降低了光条提取运算量,提取时间较传统 Steger 算法平均节约 72.61%。

分别采用不考虑边界识别的测量方法和文中方法对该复材平板进行三维重建,得到点云结果如图 8 所示。图 8(a)为前者方法得到的三维形面测量结果,可以看出许多轮廓边界外的错误信息被提取出来,造成最终测量结果在边界处存在较多误差点。图 8(b)为利用文中方法重建得到的结果,采用

文中方法进行三维轮廓测量可以得到良好的边界处理效果。



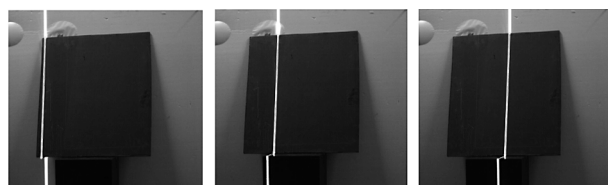
(a)第 1 帧 (b)第 20 帧 (c)第 40 帧
(a) 1st frame (b) 20th frame (c) 40th frame



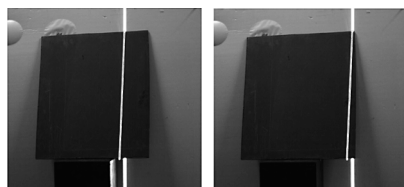
(d)第 60 帧 (e)第 80 帧
(d) 60th frame (e) 80th frame

图 6 光条区域定位结果

Fig.6 Region location of light stripe



(a)第 1 帧 (b)第 20 帧 (c)第 40 帧
(a) 1st frame (b) 20th frame (c) 40th frame



(d)第 60 帧 (e)第 80 帧
(d) 60th frame (e) 80th frame

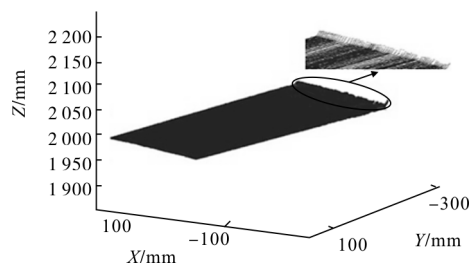
图 7 光条特征提取结果

Fig.7 Results of light stripe features extraction

表 1 光条提取运算时间

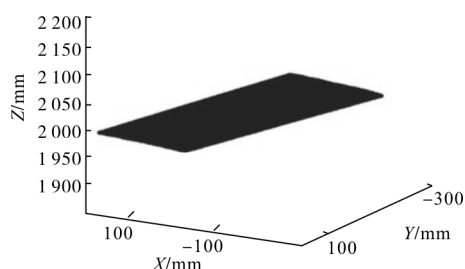
Tab.1 Operation time of the light stripe extraction

Position of laster stripe	Operation time/s		Saved time
	Steger method	Method proposed	
1st frame	3.739 8	0.981 2	73.76%
20th frame	3.744 3	0.958 0	74.41%
40th frame	3.437 8	1.050 3	69.45%
60th frame	3.639 9	1.009 6	72.26%
80th frame	3.582 0	0.961 3	73.16%



(a) 未考虑边界识别的测量方法

(a) Results with the measuring method of no boundary recognition



(b) 文中方法

(b) Proposed method in the paper

图 8 复材方形平板三维重建结果

Fig.8 3D reconstruction results of composite plat

文中采用均方根误差 RMSE 对得到的复材平板重建结果进行评价,评价公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \left(\frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{(A^2 + B^2 + C^2)^{1/2}} \right)^2}{M}} \quad (14)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为根据最小二乘法拟合的平面方程 $Ax + By + Cz + D = 0$ 的参数; $(x_i + y_i + z_i)$ 为重建点坐标值; M 为三维重建点的个数。在实验室进行 5 次重复拍摄测量,误差评价结果如表 2 所示。文中方法测得结果 RMSE 在 0.15 mm 以下,而采用三坐标机测量得到结果 RMSE 为 0.0981 mm。可以看出文中方法测得结果更接近真实值,方法稳定可靠,能显著提高测量精度,精度达到 0.06 mm 以下。

表 2 三维重建误差分析

Tab.2 Error analysis of the 3D reconstruction

Number	RMSE/mm		Measurement result by CMM/mm	Error/mm
	Common method	Method proposed		
1	0.263 8	0.125 9		0.027 8
2	0.291 5	0.151 4		0.053 3
3	0.274 6	0.132 7	0.098 1	0.034 6
4	0.264 9	0.127 8		0.029 7
5	0.269 7	0.130 2		0.032 1

5.2 航空零件部装现场测量实验

在某航空零件部装现场对约为 2.5 m×3 m 的大型壁板类曲面零件进行分区域测量实验,如图 9 所示。对被测区域进行光条扫描完成壁板零件表面的三维重建,其结果如图 10 所示。其中图 10(a)所示为未考虑边界识别的常规方法重建结果,边界处许多错误轮廓信息被获取,而利用文中方法进行处理得到如图 10(b)所示结果,可以稳定地得到光滑平直的边界轮廓线。

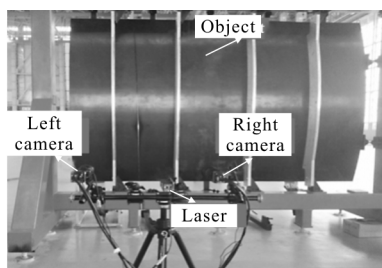
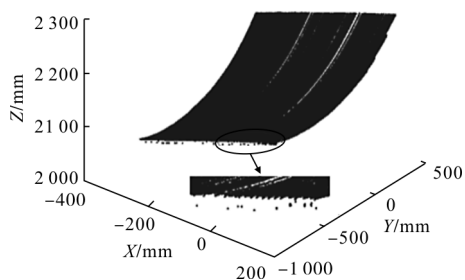


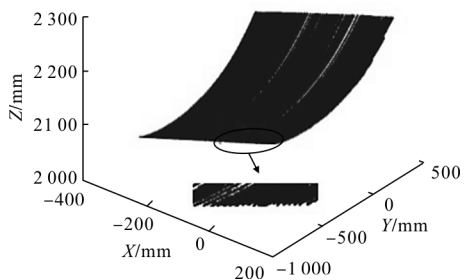
图 9 现场实验图

Fig.9 Field experiment in assembly site



(a) 未考虑边界识别的测量方法

(a) Results with the measuring method of no boundary recognition



(b) 文中方法

(b) Proposed method in the paper

图 10 机身壁板三维重建结果

Fig.10 3D reconstruction results of a fuselage panel

为了进一步说明文中方法提取的边界精度,对两种方法识别到的边界特征点进行对比。如表 3 所示为 10 组相同位置光条两种方法识别到的边界特

征点坐标。分别进行直线边界拟合,得到其均方根误差 RMS,结果表明文中方法能够有效地得到更为准确边界轮廓信息。

表 3 边界特征点识别结果

Tab.3 Recognition results of edge feature points

Number	3D coordinates/mm	
	Common method	Method proposed
1	(-350.2,-539.5,203 7)	(-375.5,-539.6,204 0)
2	(-314.2,-543.6,205 1)	(-314,-543.3,205 0)
3	(-274.8,-545.3,205 3)	(-277.8,-546.5,205 8)
4	(-231.7,-549,206 3)	(-234.5,-550.1,206 8)
5	(-173.6,-554.2,208 3)	(-173.7,-555.1,208 3)
6	(-118.6,-560.2,209 5)	(-119,-559.6,209 6)
7	(-70.78,-562.9,210 2)	(-72.72,-563.2,210 6)
8	(-18.3,-567.4,211 3)	(-20.61,-567.7,211 8)
9	(38.3,-572.7,212 7)	(36.92,-572.4,213 2)
10	(72.34,-576.1,213 6)	(72.49,-576.2,214 0)
RMS/mm	2.57	1.24

6 结论

文中提出了一种三维形面高精度测量方法,有效解决了诸如大型航天航空、航海等领域大型零部件测量过程中的时间有限、光照复杂及轮廓边界信息难以获取等问题。该方法利用基于时间流的方式自适应定位了光条位置,实现了光条区域的实时定位。在定位的区域内进行光条特征的提取,大大减少了光条图像处理的冗余计算量,提高了光条提取效率;基于光条的几何特征突变有效地确定了准确的被测物轮廓边界信息;对边界以内的光条中心坐标进行了匹配和重建,完成了被测物表面的三维形面测量。实验证明,文中所提方法不仅能够快速地扫描出被测物三维形面信息,对其轮廓边界信息也能精确获知,测量精度达到 0.06 mm 以下,满足大型零部件测量精度要求,且较传统方法时间缩短了 72.61%,有效实现了航天航空大型零部件的快速高精度测量。

参考文献:

[1] Fu Shuai, Zhang Liyan, Ye Nan, et al. Light pen based on-site vision measurement system for large workpieces [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36 (2):

- 430-438. (in Chinese)
- 富帅, 张丽艳, 叶南, 等. 面向大型工件现场测量的光笔式视觉测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 430-438.
- [2] 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.
- [3] Li Hui, Zhang Linxuan, Xiao Tianyuan, et al. Real-time control for CPS of digital airplane assembly with robust H-infinity theory [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2015, 20(4): 376-384.
- [4] Bai Suqin, Shi Jinlong, Qian Qiang, et al. 3D measurement of large steel plates based on the integration of computer vision and laser technology [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015(3): 581-585. (in Chinese)
- 白素琴, 史金龙, 钱强, 等. 视觉与激光相融合的大尺度钢板三维测量[J]. 光电子·激光, 2015(3): 581-585.
- [5] 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.
- [6] Zhou Na, An Zhiyong, Li Yonghao. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2465-2468. (in Chinese)
- 周娜, 安志勇, 李咏豪. 采用激光雷达的三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2465-2468.
- [7] Cai Huaiyu, Feng Zhaodong, Huang Zhanhua. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015(3): 1-6. (in Chinese)
- 蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. 中国激光, 2015(3): 1-6.
- [8] Nakia H, Iwai D, Sato K. 3D shape measurement using fixed camera and handheld laser scanner [J]. *Ipsj Sig Notes Cvim*, 2008, 1536-1539.
- [9] Ruben U, Julio M, Daniel F G. Fast and robust laser stripe extraction for 3D reconstruction in industrial environments [J]. *Machine Vision and Applications*, 2012, 23: 179-196.
- [10] Zhang Yixin, Wang Shun, Zhang Xuping. Defocused blur image restoration in large scale 3D vision measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(12): 2748-2753. (in Chinese)
- 张益昕, 王顺, 张旭苹. 大尺度三维视觉测量中的离焦模糊图像恢复[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2748-2753.
- [11] Feng Ping, Wei Zhenzhong. Light probe based large FOV 3D vision measurement system [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(9): 2217-2224. (in Chinese)
- 冯萍, 魏振忠. 光笔式大视场三维视觉测量系统 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2217-2224.
- [12] Sun Lina. Research on the methods of sub-pixel extraction and tracking of laser curve in inspection system of vehicle profile [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 39-55. (in Chinese)
- 孙丽娜. 汽车形貌检测系统的光条亚像素提取及跟踪方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 39-55.