

文章编号 1004-924X(2017)04-1077-09

基于结构光的身管膛线高度差检测

丁超^{1*}, 唐力伟¹, 曹立军¹, 邵新杰², 邓士杰¹

(1. 军械工程学院 火炮工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 军械工程学院 车辆与电气工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 身管内膛表面几何特征参数的准确量化一直是身管疵病检测和寿命预测的一大难点, 而身管膛线的高度差是其中最重要的几何参数之一。本文依托结构光三维检测手段, 采用激光三角法对身管膛线高度差进行定量检测。首先将特定结构光栅投影到模拟身管内膛的标定圆筒内壁上, 并采集经圆筒内表面散射后的变形结构光图像; 然后利用图像边缘分割算法中的多个算子分别对标定圆筒内壁的结构光图像进行分割, 同时引入灰度共生矩阵概念客观评价出最优的分割算子, 对图像中结构光条的边缘分割进行优化; 之后通过图像转换比例反推算法计算得到内壁图像高度差和实际凹槽高度差之间的转换关系, 最终应用于身管膛线高度差的测量过程中。试验结果表明: 绝对偏差控制在 0.04 mm 内, 满足系统的精度要求, 同时该方法检测手段方便、快捷。本文方法为精确量化身管内膛疵病的几何参数奠定了坚实基础。

关键词: 身管膛线; 标定圆筒; 结构光; 边缘分割; 转换比例

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172504.1077

Height difference detection of barrel rifling based on structured light

DING Chao^{1*}, TANG Li-wei¹, CAO Li-jun¹, SHAO Xin-jie², DENG Shi-jie¹

(1. *Artillery Engineering Department, College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China;*

2. Vehicle and Electrical Engineering Department,

College of Ordnance Engineering, Shijiazhuang 050003, China)

** Corresponding author, E-mail: duncan1119@163.com*

Abstract: In view of correct quantization of geometrical characteristic parameters on barrel's inner surface has always been one of difficult points for barrel defect detection and life forecast, and height difference of barrel rifling is one of the most important geometric parameters, this paper performed quantitative determination to height difference of barrel rifling by relying on the structured light three-dimensional detection means and adopting laser triangulation method. Firstly, certain structured raster was projected on inner wall of calibration cylinder of simulated barrel bore, and deformed structured light image scattering by internal surface of cylinder was collected. Secondly, structured light image on inner wall of calibration cylinder was segmented by utilizing numerous operators in image edge segmentation algorithm (IESA), the gray-scale co-occurrence matrix concept was introduced simultaneously to evaluate optimal segmentation operator objectively and edge segmentation of structured

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2017-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51575523)

light in image was optimized. Finally, image conversion ratio backward inference algorithm (ICRBIA) was used to derive transformation relation between height difference of inner wall image and that of actual groove. Height difference measurement experiment on actual barrel rifling indicates that the absolute deviation is controlled within 0.04 mm, which meets accuracy requirement of measurement system, and at the same time, the detection means of the method are convenient and fast. It can be concluded that the proposed algorithm may lay solid foundation for precise quantization of geometrical parameter of barrel bore defect.

Key words: Barrel rifling; demarcated cylinder; structured light; edge segmentation; conversion ratio

1 引言

身管是火炮的核心部件,膛线是身管的关键结构,其用于保证弹丸飞行的稳定性。但在发射过程中,由于火药燃气流的剧烈冲刷,以及弹体和弹带的机械作用,导致膛线逐渐被磨损和破坏,直接影响到火炮的发射精度、身管寿命和剩余发数等关键指标^[1]。因此,身管膛线烧蚀磨损检测在火炮检修中起着十分重要的作用,而膛线尺寸的精确测量又是获得膛线烧蚀磨损量的基础。目前针对火炮身管膛线的检测大多采用接触式测量和相机直接成像等方式,存在着测量精度偏低、易受环境光照度影响等不足^[2]。

结构光检测技术^[3-4]具有非接触、测量速度快和精度适中等优点,在逆向工程、工业形貌测量等领域得到了广泛应用,尤其是在近些年发展较快,例如郑鹭斌等人^[5]基于结构光和双目视觉技术研究了针对焊缝的三维重建方法;李伟等人^[6]提出了一种基于结构光的路面错台三维检测方法;冷惠文等人^[7]构建了基于结构光的复杂深孔内轮廓三维测量系统。然而在军事领域,尤其是火炮身管内膛检测过程中结构光检测技术鲜有涉

及。目前报道的有关火炮身管内膛检测的文献,如傅建平等^[8]基于半球全景成像技术,获得了身管内膛的全景图像;张振友等人^[1]应用光机电控制技术和 CCD 成像技术针对身管内膛表面进行了定性及定量检测。上述方法在内膛三维模型构建等宏观方面进行了深入研究,但在疵病测量等细节的精确量化上存在不足。本文借鉴前人的研究成果^[6],利用结构光检测技术,通过精确测量投影到火炮内膛表面因膛线起伏造成的结构光条的变形量,反推得到膛线的实际高度差。本文的研究将为精确计算内膛疵病几何参数开拓一条新的思路。

2 基于结构光的身管内膛三维检测系统

本系统利用结构光栅,以 45° 斜射到内膛表面形成多条变形的结构光条,如图 1(a)所示,然后采用电荷耦合元件(CCD)相机垂直拍摄经内膛表面散射后的变形结构光条,最后根据激光三角法^[9-10]进一步反推得到膛线的实际高度差,该系统原理如图 1(b)所示。结构光栅分别由 126 根宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 的结构光条、14 根宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 的

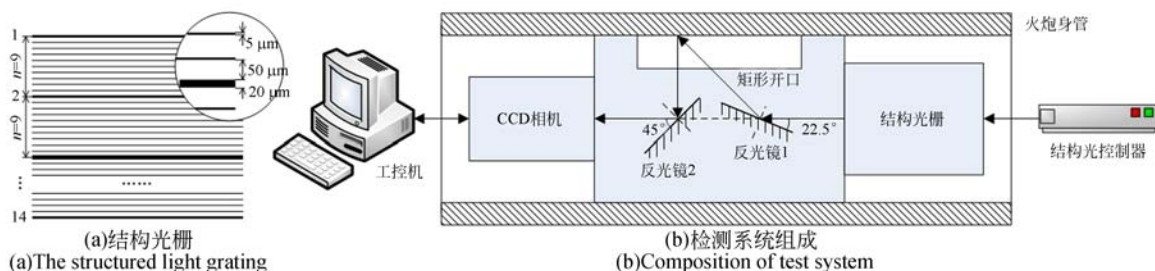


图 1 检测系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of test system

结构光条以及 1 根宽度为 $60\ \mu\text{m}$ 的结构光条按照间隔 $50\ \mu\text{m}$ 的距离平均分布;其中宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 结构光条用于精确提取光条中心,宽度为 $60\ \mu\text{m}$ 和宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 结构光条除了上述作用外,还用于系统粗定位。

由图 1 可知,基于结构光的身管内膛三维检测系统(Three-dimensional Test System of the Barrel Inner Surface Based on the Structured Light, TTSBSL)主要包括高性能工控机、高分辨率面阵 CCD 相机、结构光控制器、不间断电源 UPS 等。其中,结构光控制器负责提供连续照射身管内膛表面的结构光栅,再由面阵 CCD 相机采集经过内膛表面反射后的变形结构光栅,为后续膛线高度差的计算提供原始图像数据;不间断电源 UPS 负责为三维检测系统不间断地提供电力;高性能工控机一方面控制 CCD 相机采集经内膛表面反射后的结构光图像,另一方面负责存储、分析和处理采集到的原始图像数据。

受身管内膛物理空间的限制,将 CCD 相机、结构光控制器以及结构光栅传输所需的物理载体集成到直径略小于身管内径的圆管内部,便于后续拍摄身管内膛表面工作的开展。

3 标定圆筒内壁检测

为便于试验开展,本文事先设计、制造了一个标定圆筒,用于模拟 TTSBSL 系统检测火炮身管内膛的实时场景,如图 2 所示。通过检测标定圆筒内壁,采集经过圆筒内壁表面反射后的变形结构

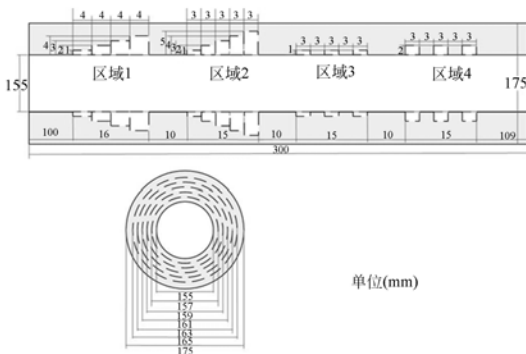


图 2 标定圆筒尺寸图

Fig. 2 Diagram of calibration cylinder size

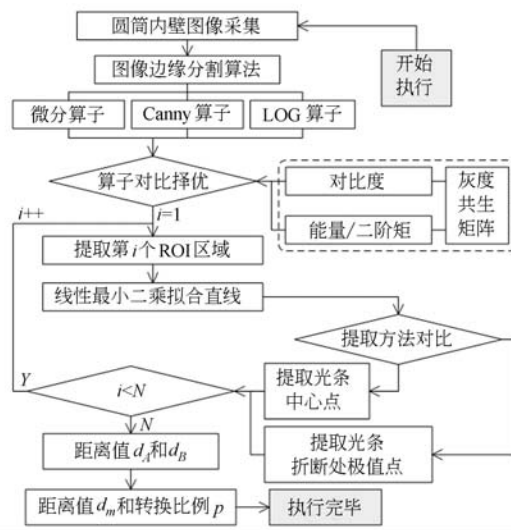


图 3 内壁凹槽高度差计算过程

Fig. 3 Calculation process of height difference for groove in cylinder inner surface

光栅,并针对采集到的结构光图像进行边缘分割和高度差量化^[11-12],得到变形结构光条折断处的图像距离;通过空间几何分析(Spatial Geometric Analysis, SGA)知,圆筒凹槽处实际高度差与对应结构光条折断处的图像距离呈线性关系,经过对比可获得两者间的转换关系,并最终应用于身管膛线的检测,其具体计算过程如图 3 所示。

3.1 内壁结构光图像边缘分割

图像边缘分割算法^[13]主要分为边缘分割算子(Edge Segmentation Operator, ESO)和基于灰度共生矩阵的客观评价算法(Objective Judgment Algorithm, OJA),目的是准确判定图像中有意义的结构光条边缘,便于计算结构光条变形量。

3.1.1 边缘分割算子

目前热门的边缘分割算子主要有微分算子、Canny 算子和 LOG 算子等,采用 4 种算子分别对内壁图像进行处理,如图 4 所示。凭主观分析知,采用 Canny 算子对内壁图像进行边缘分割的效果最好且有效抑制了虚假边缘,其中算子的分割阈值 thresh 取为 $[0.04, 0.05]$ 。然而主观分析受人为主观因素影响极大,难以满足在线检测的客观要求,为此提出了基于灰度共生矩阵的客观评价算法。

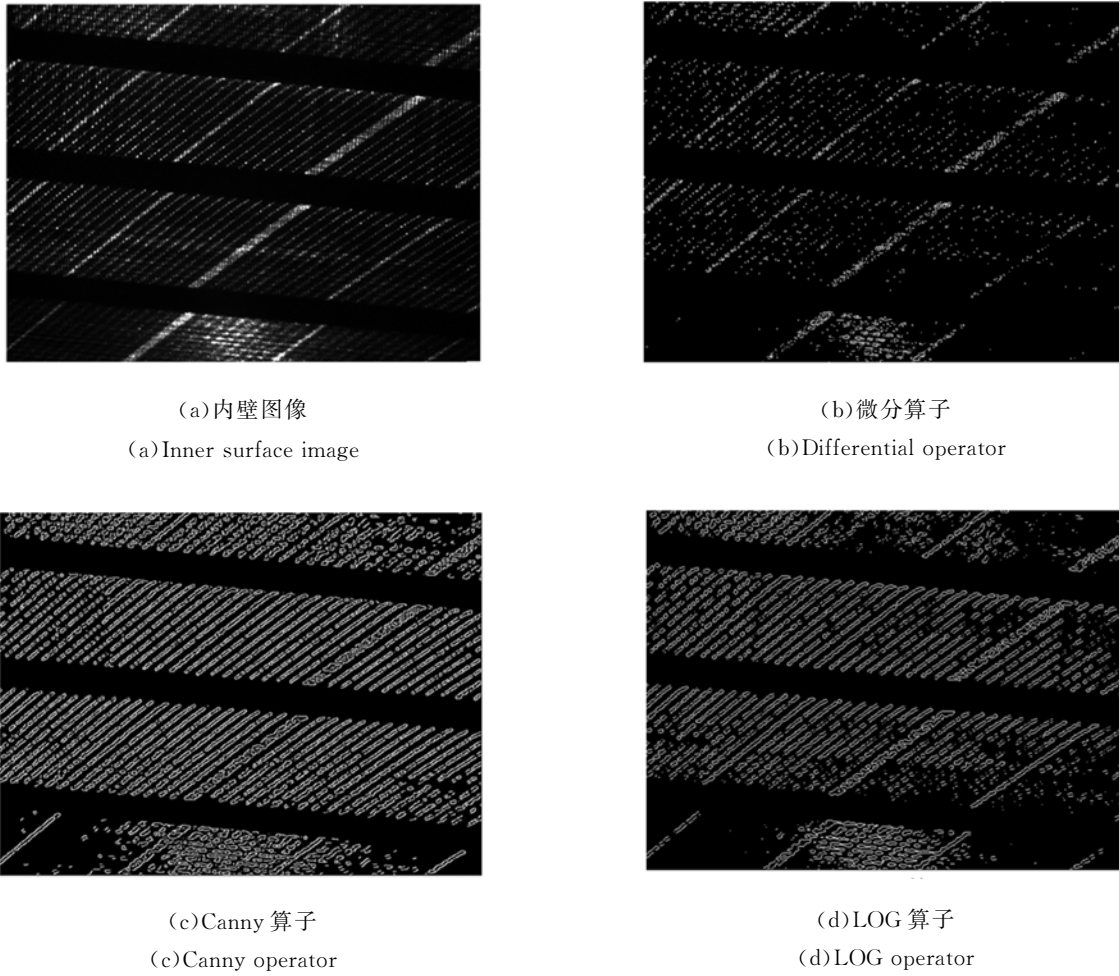


图 4 标定圆筒内壁图像边缘分割结果

Fig. 4 Segmentation results of image edge for calibration cylinder inner surface

3.1.2 本文提出的客观评价算法

借鉴灰度共生矩阵 GLCM^[14] 概念, 本文提出了一种客观评价算法。它研究了图像中灰度在空间(方向、相邻间隔、变化幅度等)上的相关特性, 如式(1)所示。其中 $f(x, y)$ 表示二维灰度图像,

$$GLCM(g_1, g_2) = \frac{\#\{[(x_1, y_1), (x_2, y_2)] \in S | f(x_1, y_1) = g_1 \ \& \ f(x_2, y_2) = g_2\}}{\# S}, \quad (1)$$

基于 GLCM 分析原始图像和分割后图像的相关标量特征, 如对比度(Contrast, CON)和能量(二阶矩)(Energy, ASM), 分别如式(2)和式(3)所示。其中, CON 反映了图像的清晰程度, CON 越大, 即图像对比度越大, 则视觉效果越清晰; ASM 是 GLCM 元素值的平方和, 反映了图像灰度分布的均匀程度, ASM 越大, 则图像灰度分

S 表示目标区域中具有特定空间联系的像素对集合, 分子表示具有某种空间关系且灰度值分别等于 g_1 和 g_2 的像素对数目, 分母表示像素对的总数目(#表示数量)。

布越均匀, 视觉上观察到的图像越模糊。

$$CON = \sum_i \sum_j (i - j)^2 GLCM(i, j), \quad (2)$$

$$ASM = \sum_i \sum_j GLCM(i, j)^2, \quad (3)$$

标定圆筒内壁结构光图像的相关标量特征数据如表 1 所示。由表 1 知, 经 Canny 算子处理后图像的对比度更大, 灰度分布更不均匀。

表 1 分割后图像相关标量特征

Tab.1 Related scalar characteristics of image after segmentation

标量特征	分割算子	微分算子	Canny 算子	LOG 算子
对比度 CON		0.032	0.214	0.122
二阶矩 ASM		0.927	0.593	0.754

3.2 结构光图像转换比例反推

针对圆筒内壁结构光图像转换比例进行计算,为身管膛线高度差量化奠定基础,其反推算法 ICRBIA 的具体步骤如下。

步骤 1 结构光条提取:依据图像特点,采用区域选取函数 roipoly,手动选择向量大小相等的行序号 c_i 和列序号 r_i ,设置感兴趣区域(Region of Interest, ROI),并将 ROI 区域划分为区域 A 和 B,如图 5(a)所示。依次提取 ROI 区域中 2N 条结构光条并分别进行编号,其中区域 A 和 B 中各有 31 条结构光条。由图 5(a)可知,区域 A 和区域 B 中宽度为 60 μm 和宽度为 20 μm 的结构光条易于实现相互对应,在此基础上利用粗光条的粗定位功能,通过计算细结构光条与粗光条间的光条数目,可实现所有结构光条间的一一对应。

步骤 2 线性拟合:以区域 A 和区域 B 中第 i 条结构光条为例,在不考虑光条存在多处断线的情况下,采用线性最小二乘拟合算法(Linear Least Squares Fitting Algorithm, LLSFA)拟合得到第 i 条直线段,如图 5(b)中灰色直线所示。

其中 LLSFA 的核心公式如下:

$$F(a, b) = \sum_{i=0}^n (ax_i + b - y_i)^2, \frac{\partial F}{\partial a} = 0, \frac{\partial F}{\partial b} = 0. \quad (4)$$

步骤 3 特征点提取:选择合适的提取方法分别提取区域 A 和区域 B 中对应直线段的特征点(极值点或中心点的统称),常用的特征点提取方法有极值点坐标法和中心点坐标法。

a. 极值点坐标法(Extreme Value Point Coordinate, EVPC)主要用于高度差变化剧烈的图像。其通过提取结构光条拟合直线段的极值点坐标,即提取区域 A 中直线段横坐标的最大值 x_{max} 和区域 B 中对应直线段横坐标的最小值 x_{min} ,并将它们代入直线段方程,得到横坐标极值条件下的纵坐标 y_{max_x} 和 y_{min_x} 。这样就得到了结构光条在区域 A 和区域 B 边界折断处的极值坐标($x_{\text{max}}, y_{\text{max}_x}$)和($x_{\text{min}}, y_{\text{min}_x}$),如图 5(c)所示;

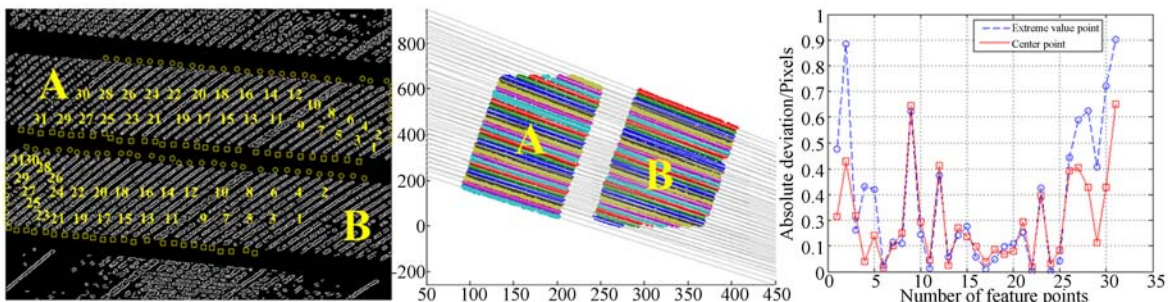
b. 中心点坐标法(Center Point Coordinate, CPC)主要针对高度差变化缓慢的图像。该方法通过在区域 A 和区域 B 中任意提取两点坐标,计算两区域中拟合直线的中心点坐标(x_{m1}, y_{m1})和(x_{m2}, y_{m2})。此外,中心点坐标法同样适用于高度差变化剧烈的图像,但要确保所选取的两点尽可能包含图像中结构光条的直线部分,如图 5(e)所示。

步骤 4 循环:如果 $i < N$,则返回步骤(1),直到 $i = N$ 为止。

步骤 5 高度差计算:将提取到的所有特征点代入公式(5)中,

$$d = \frac{|A_1 x_0 + B_1 y_0 + C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}} = \frac{|(y_{\text{max}_x} - y_{\text{min}_x})x_0 + (x_{\text{min}} - x_{\text{max}})y_0 + (x_{\text{max}}y_{\text{min}_x} - x_{\text{min}}y_{\text{max}_x})|}{\sqrt{(y_{\text{max}_x} - y_{\text{min}_x})^2 + (x_{\text{min}} - x_{\text{max}})^2}}, \quad (5)$$

得到距离值(即图像高度差) d_A 和 d_B ,以及两者的均值 d_C ,如图 5(d)和图 5(e)所示,相关数据如表 2 所示。



(a)提取分割后图像中的结构光条 (b)线性最小二乘拟合提取结构光条 (c)两类方法绝对偏差分布
 (a)Structured light stripe extracted from image after segmentation (b)Structured light stripe extracted by LLSFA (c)Absolute deviation distributions of two kinds of methods

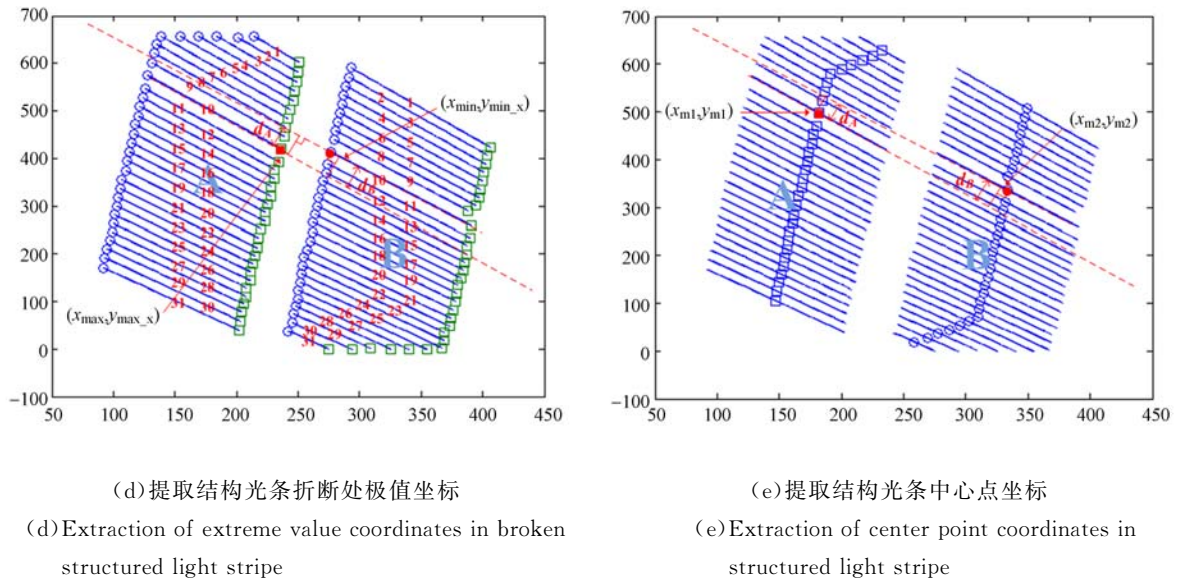


图 5 圆筒内壁结构光图像处理

Fig. 5 Image processing of structured light for cylinder inner surface

式(5)中 (x_0, y_0) 表示特征点, A_1 、 B_1 和 C_1 可通过 LLSFA 拟合得到; 然后取平均值进一步消除误差,

最终得到极值点坐标法下的距离值 $d_{m1} = 29.218$ pixel 和中心点坐标法下的 $d_{m2} = 29.221$ pixel。

表 2 内壁凹槽高度差计算相关数据

Tab. 2 Related calculation data of height deviation for inner surface groove

编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差 E /像素	编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差 E /像素
1	29.996	29.389	29.693	0.474	17	29.582	28.874	29.228	0.01
2	30.375	29.828	30.102	0.883	18	29.607	28.923	29.265	0.047
3	29.688	29.074	29.381	0.163	19	29.415	28.823	29.119	-0.099
4	29.874	29.225	29.55	0.331	20	29.521	28.693	29.107	-0.111
5	29.849	29.227	29.538	0.32	21	29.727	29.015	29.371	0.153
6	29.523	28.964	29.243	0.025	22	29.579	28.856	29.218	-0.001
7	29.418	28.79	29.104	-0.114	23	29.864	29.224	29.544	0.326
8	29.689	28.966	29.328	0.109	24	29.605	28.837	29.221	0.003
9	30.156	29.526	29.841	0.623	25	29.591	28.932	29.261	0.043
10	29.674	29.051	29.362	0.144	26	29.084	28.467	28.776	-0.443
11	29.605	28.861	29.233	0.015	27	28.958	28.302	28.63	-0.588
12	29.881	29.306	29.594	0.375	28	28.89	28.297	28.594	-0.625
13	29.532	28.791	29.162	-0.057	29	29.015	28.608	28.812	-0.407
14	29.646	29.073	29.36	0.141	30	28.719	28.277	28.498	-0.72
15	29.453	28.629	29.041	-0.177	31	28.442	28.193	28.318	-0.901
16	29.669	28.88	29.275	0.056					

极
值
点
坐
标
法

续表 2

编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差 E /像素	编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差 E /像素
1	30.563	27.447	29.005	-0.216	17	32.18	26.342	29.261	0.04
2	31.074	28.223	29.649	0.427	18	31.838	26.78	29.309	0.088
3	30.667	27.338	29.003	-0.219	19	31.606	26.699	29.153	-0.069
4	31.153	27.367	29.26	0.039	20	32.024	26.258	29.141	-0.08
5	31.285	27.443	29.364	0.143	21	32.229	26.602	29.416	0.194
6	31.015	27.395	29.205	-0.016	22	31.926	26.555	29.24	0.019
7	31.346	26.897	29.121	-0.1	23	32.023	27.013	29.518	0.297
8	31.842	26.902	29.372	0.151	24	32.27	26.235	29.253	0.031
9	32.176	27.557	29.867	0.645	25	31.922	26.689	29.306	0.084
10	31.801	27.028	29.414	0.193	26	31.198	26.459	28.829	-0.393
11	32.109	26.425	29.267	0.046	27	31.194	26.438	28.816	-0.405
12	31.644	27.625	29.635	0.413	28	30.918	26.867	28.893	-0.329
13	31.763	26.63	29.197	-0.025	29	30.438	27.779	29.109	-0.113
14	31.746	27.041	29.394	0.172	30	30.138	27.649	28.894	-0.328
15	32.072	26.1	29.086	-0.135	31	29.198	27.943	28.571	-0.651
16	32.212	26.427	29.32	0.098					

中心点坐标法

步骤 6 转换比例计算:对比距离值 d_m 与标定圆筒凹槽实际高度差 $d_r=1\text{ mm}$ (图 5(a)对应图 2 中的区域 1),得到转换比例 $p=d_m/d_r$,如式(6)所示:

$$p=d_m/d_r=29.218/1=29.218, \quad (6)$$

其中 p 是计算身管膛线实际高度差的必要参数,在保证精度的基础上,为减少不必要的计算量,保留计算数据到小数点后 3 位。

图 5(c)给出了极值点坐标法和中心点坐标法的绝对方差分布曲线。根据式(7)可得,极值点坐标法和中心点坐标法下的绝对偏差 E 均小于单个像素,即小于 0.04 mm 。两种方法的精度分布和走势基本一致,在图像中间区域的精度明显好于边界区域。

$$E=d_r/p=1/29.218\approx 0.034\text{ mm}<0.04\text{ mm}. \quad (7)$$

4 火炮身管内膛验证

利用采集的火炮身管内膛结构光图像验证本文方法性能,结果如图 6 所示。由于身管内膛结构光图像的采集、边缘分割和高度差量化过程与圆筒内壁结构光图像的标定过程相同,具体过程在此不作赘述。

针对身管内膛结构光图像进行边缘分割,如图 7(a)所示,设定 Canny 算子的分割阈值 thresh

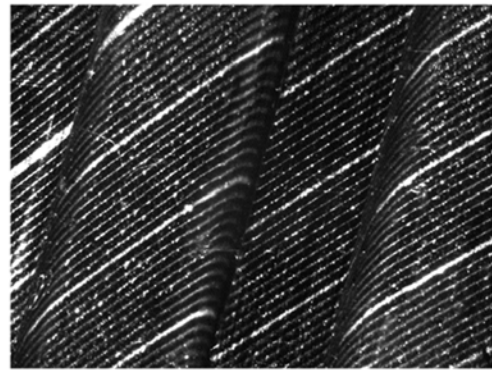


图 6 火炮身管内膛结构光图像

Fig. 6 Structured light image of artillery barrel inner surface

为 $[0.03, 0.21]$;利用 OJA 算法对分割后图像的相关特征,如表 3 所示。由表 3 知,经 Canny 算子处理后的图像在对比度和二阶矩指标上的优势明显。

表 3 分割后图像相关标量特征

Tab. 3 Related scalar characteristics of image after segmentation

分割算子	微分算子	Canny 算子	LOG 算子
对比度 CON	0.062	0.302	0.142
二阶矩 ASM	0.871	0.492	0.730

提取 15 条结构光条作线性拟合,结果如图 7

(b)所示。由于身管内膛结构光图像的高度差变化缓慢,故采用中心点坐标法提取结构光条中心点,如图 7(c)所示;提取中心点坐标代入公式(5),得到距离值 d_A 、 d_B 和 d_C ,如表 4 所示。分析表 4 中绝对偏差 E ,提取图像中间区域绝对偏差

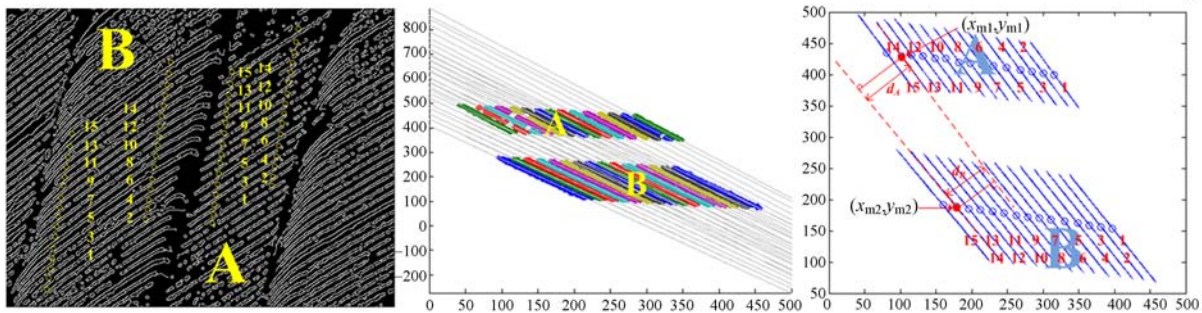
E 小于单个像素的距离值作为有用数据,取平均得 $d_{m2}=71.726$ pixel,结合转换比例 p ,最终得到计算高度差 d_r ,如式 8 所示。(由于膛线实际高度差涉密,在此不便详述)

$$d_r = d_{m1} / p = 71.726 / 29.218 \approx 2.455 \text{ mm. (8)}$$

表 4 身管膛线高度差计算相关数据

Tab. 4 Related calculation data of height difference in barrel rifling

编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差/像素	编号	d_A /像素	d_B /像素	d_C /像素	绝对偏差/像素
1	67.658	80.192	73.925	2.231	9	65.353	76.255	70.804	-0.89
2	67.155	79.309	73.232	1.538	10	67.681	77.014	72.348	0.653
3	68.132	78.114	73.123	1.429	11	65.95	75.45	70.7	-0.994
4	67.318	77.78	72.549	0.855	12	64.96	75.678	70.319	-1.375
5	66.093	77.914	72.004	0.309	13	64.964	74.774	69.869	-1.825
6	67.31	77.719	72.515	0.82	14	67.414	75.541	71.477	-0.217
7	65.443	77.669	71.556	-0.138	15	64.51	74.817	69.664	-2.031
8	66.146	76.521	71.334	-0.361					



(a)提取分割后图像中结构光条
(a)Extraction of structured light stripe of image after segmentation
(b)线性最小二乘拟合提取结构光条
(b)Structured light stripe extracted by LLSFA
(c)提取结构光条中点坐标
(c)Extraction of center point coordinates of structured light stripe

图 7 身管膛线结构光图像处理

Fig. 7 Structured light image process of artillery barrel inner surface

5 结 论

身管内膛特征参数的精确量化一直是火炮检测领域的难题,本文依托结构光检测手段,采用图像边缘分割 IESA 算法和图像转换比例反推 ICRBIA 算法,实现了身管内膛特征关键参数膛

线高度差的准确量化。结果显示,本文方法可将绝对偏差控制在 0.04 mm 以内,提高了测量精度,降低了检测的复杂程度,更加符合工程实际。下一步将针对因发射弹丸磨损造成的身管膛线高度差变化所引起的检测误差以及磨损处的三维空间结构的准确描述进行研究。

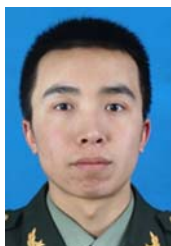
参考文献:

[1] 张振友, 杨歧子, 于政庆, 等. 数字式高炮身管疵病探测仪的设计[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 590-594.

ZHANG ZH Y, YANG Q Z, YU ZH Q, et al. . Research on digital detector for detecting the flaws of anti-aircraft artillery barrel [J]. ACTA ARMAMENTARII, 2015, 36(4): 590-594. (in Chinese)
[2] 曾朝阳, 赵继广. 火炮身管疵病深度测量系统[J].

- 光学精密工程, 2010, 18(10): 2221-2229.
- ZENG ZH Y, ZHAO J G. Measuring system of flaw depth of gun barrel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2221-2229. (in Chinese)
- [3] 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学精密工程, 2009, 17(5): 1057-1062.
- XIONG H Y, ZONG ZH J, CHEN CH H. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1057-1062. (in Chinese)
- [4] 张晓龙, 尹仕斌, 任永杰, 等. 基于全局空间控制的高精度柔性视觉测量系统研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2805-2812.
- ZHANG X L, YIN SH B, REN Y J, *et al.*. High-precision flexible visual measurement system based on global space control [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2805-2812. (in Chinese)
- [5] 郑鹭斌, 王晓栋, 严菲. 一种基于线结构光的焊缝三维重建方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014(4): 118-124.
- ZHENG L B, WANG X D, YAN F. 3D reconstruction method based on linear-structured light stripe for welding seam [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014(4): 118-124. (in Chinese)
- [6] 李伟, 沙爱民, 孙朝云, 等. 基于线结构光的水泥混凝土路面错台三维检测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(7): 1039-1044.
- LI W, SHA A M, SUN Z Y, *et al.*. Joint faulting three-dimension detection method on cement concrete pavement with line-structure light [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(7): 1039-1044. (in Chinese)
- [7] 冷惠文, 徐春广, 肖定国, 等. 基于线结构光的复杂深孔内轮廓三维测量方法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(2): 139-143.
- LENG H W, XU CH G, XIAO D G, *et al.*. A method for measuring complicated deep-hole profile using line-structured-light sensor [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2013, 33(2): 139-143. (in Chinese)
- [8] 傅建平, 雷洁, 王建成, 等. 火炮内膛全景图像窥测技术研究[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 103-106.
- FU J P, LEI J, WANG J CH, *et al.*. Research on gun-bore spying technology of panoramic image [J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(4): 103-106. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] SCHALK P, OFNER R, O' LEARY P. Pipe eccentricity measurement using laser triangulation [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, 25(7): 1194-1203.
- [11] 张怀柱, 向长波, 宋建中, 等. 改进的遗传算法在实时图像分割中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 333-337.
- ZHANG H ZH, XIANG CH B, SONG J ZH, *et al.*. Application of improved adaptive genetic algorithm to image segmentation in real time [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 333-337. (in Chinese)
- [12] 刘子伟, 许廷发, 王洪庆, 等. 深度成像理论与实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0726001-1:5.
- LIU Z W, XU T F, WANG H Q, *et al.*. Theory and implementation of depth photography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0726001-1:5. (in Chinese)
- [13] 巢渊, 戴敏, 陈恺, 等. 基于广义反向粒子群与引力搜索混合算法的多阈值图像分割[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 879-886.
- CHAO Y, DAI M, CHEN K, *et al.*. Image segmentation of multilevel threshold using hybrid PSO-GSA with generalized opposition-based learning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 879-886. (in Chinese)
- [14] 王昊鹏, 李慧. 基于局部二值模式和灰度共生矩阵的籽棉杂质分类识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 236-241.
- WANG H P, LI H. Classification recognition of impurities in seed cotton based on local binary pattern and gray level co-occurrence matrix [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(3): 236-241. (in Chinese)

作者简介:



丁超(1990—),男,河北定兴人,博士研究生,2009年、2013年于军械工程学院分别获得学士、硕士学位,现为军械工程学院火炮工程系博士研究生,主要从事机器视觉及数字图像处理的研究。E-mail: duncan1119@163.com

导师简介:



唐力伟(1961—),男,北京人,教授,博士生导师,1984年、1990年、1996年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为军械工程学院火炮工程系教授,主要从事机械性能检测与故障诊断、机器视觉等方面的研究。E-mail: tom5157@163.com