

# 光学学报

## 基于全景成像的膛线自动跟踪缠角测量方法

景文博<sup>1\*</sup>, 张俊豪<sup>1</sup>, 冯萱<sup>1</sup>, 熊泽宇<sup>2</sup>, 刘桐伯<sup>1</sup>, 夏璇<sup>1</sup>, 吴雪妮<sup>1</sup>, 王彩霞<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 火炮整体性能评价体系中,身管缠角是至关重要的指标之一,现有缠角测量方法存在系统复杂、测量精度不高的问题,本文提出一种基于全景成像的膛线自动跟踪身管缠角测量方法。利用全景成像技术获取身管内膛全景图像,在极坐标系下推导内膛全景环形图像增强映射函数;通过建立环形模板匹配模型跟踪沿身管方向预设的阴阳膛线的边缘,完成膛线旋转角的粗定位;根据周期阴阳膛线图像对比度设计目标函数,优化目标函数完成膛线旋转角的精定位,结合身管轴向距离解算身管缠角。真实身管缠角测量实验结果表明,所提方法测量精度优于 $1'$ ,能够满足实际缠角测量中的应用需求。

**关键词** 缠角测量; 全景成像; 火炮身管; 膛线跟踪

**中图分类号** TP391 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231095

### 1 引言

目前,火炮身管缠角测量方法<sup>[1]</sup>主要分为两类:接触式测量和非接触式测量。接触式测量中,量规检测法<sup>[2]</sup>通过通规和止规二者配合判断工件是否合格,杜建安等<sup>[3]</sup>和孙培慧等<sup>[4]</sup>根据身管结构导出缠角与膛线在圆周向的旋转角度关系测量身管缠角;Salafia<sup>[5]</sup>使用 Delaunay 三角测量方法<sup>[6]</sup>将测量数据线性拼接在一起,构建三维模型测量膛线缠角;丁柏秀等<sup>[7]</sup>使用光栅尺和轴角编码器结合并根据缠角计算公式解算缠角。接触式测量时,极易对内膛表面造成附加的损伤,测量准确度也受测量工具的制造精度、使用方法、测量环境等因素的影响,不利于测量的实际应用。最初的非接触测量方式主要使用 $45^\circ$ 反射镜结合周向电机旋转采集身管内膛图像,基于图像处理算法(直线检测<sup>[8]</sup>、自适应阈值边缘检测<sup>[9-10]</sup>、最小二乘拟合<sup>[11]</sup>等)提取膛线,再测量身管缠角。上述非接触测量方法在实际应用中存在一些问题,例如电机的使用在增加了系统复杂性和成本的同时,也面临着图像拼接的挑战,如果拼接算法不准确或存在偏差,会直接影响测量结果的准确性。随着光电技术的不断发展,具有大视场、高分辨率的全景成像装置以一次拍摄可实现 $360^\circ$ 范围无缝全景成像的特点,能够将被测物体的信息无盲区地捕捉下来。国内采用全景成像技术测量身管缠角的研究报道较少,已有测量方法多以锥面折反射全景成像系统为主,

由于锥面折射镜的形状和材料特性,锥面折反射全景成像可能引入图像畸变,影响成像质量的同时,也存在一些其他的局限性。郑军等<sup>[12-13]</sup>采用反射锥镜对身管内膛成像,全景展开所采集的身管内膛图像后,再计算膛线缠角,测量速度和精度均有损失;王坚等<sup>[14]</sup>采用相同成像方式,对采集图像应用图像处理算法后,建立含未知参数的缠角方程和检测函数,通过检测函数极值点解算未知参数完成缠角计算,但该方法对不同型号的身管无法保证缠角测量的稳定性和准确性。

综上所述,本文提出一种基于全景成像的膛线自动跟踪缠角测量方法。利用折射式全景成像技术获取身管内膛全景图像,分析广角全景图像特性,在极坐标系下推导内膛全景环形图像增强映射函数;建立环形模板匹配模型跟踪预设阴阳膛线边缘,完成膛线旋转角的粗定位;根据单周期内阴阳膛线对比度差异设计目标函数,通过目标函数优化完成精定位并获取膛线旋转角,结合身管轴向距离,无需图像展开算法即可完成身管缠角的解算。

### 2 基本测量原理

#### 2.1 全景成像身管缠角测量原理

全景成像的身管缠角测量方法的总体测量方案如图 1(a)所示。窥膛装置采用折射式全景成像方式,成像镜头使用具有较短焦距和广阔视场角的广角镜头。广角镜头能够将一定视场角范围内的场景信息映射到

收稿日期: 2023-06-05; 修回日期: 2023-07-04; 录用日期: 2023-08-02; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(D21009)、科技部项目(2018YFB1107600)、吉林省科技发展计划(20210201021GX)

通信作者: \*wenbojing@cust.edu.cn

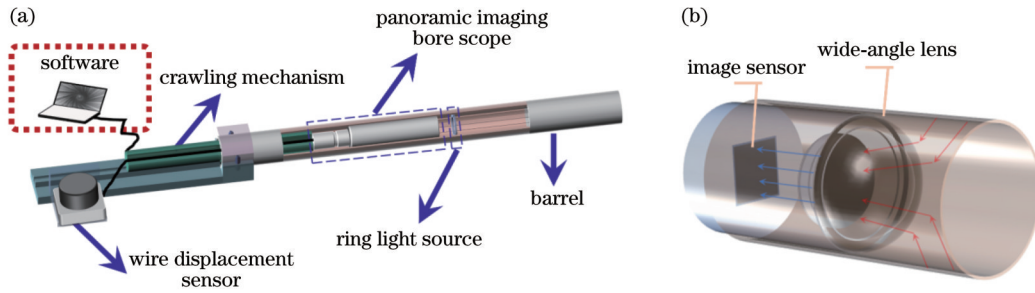


图 1 总体测量图。(a)总体方案图;(b)折射式窥膛装置成像示意图

Fig. 1 Overall measurement chart. (a) Overall scheme diagram ; (b) schematic diagram of refractive endoscope device imaging

二维平面,其成像示意图如图 1(b)所示,光线经膛腔内表面反射到广角镜头,经内部光学系统多次折射后,被聚焦到图像传感器的近似中心点上。由于广角镜头具有较大的视角,其成像特性与传统图像有所区别,身

管相同深度的特征以图像中心为原点,极径为扩散方向,呈环形分布,特征在图像中表现出明显的环状结构,每个环状结构内像素均具有最大相关性,这种成像特性为后续身管缠角测量提供了基础和特征依据。

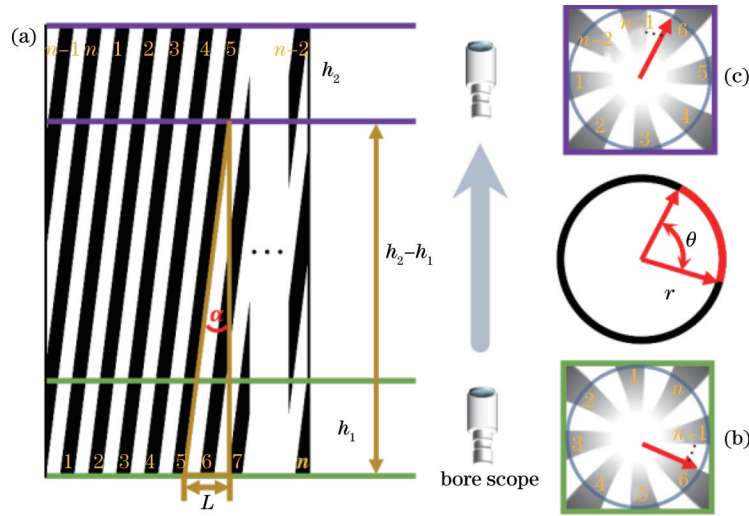


图 2 测量原理示意图。(a)真实身管的轴向展开图;身管(b) $h_1$ 深度处;(c) $h_2$ 深度处,以 6 号膛线为跟踪目标,取半径为  $r$  的环形域内图像

Fig. 2 Schematic diagram of measurement principle. (a) Axial expansion diagram of real barrel; At depth (b)  $h_1$ ; (c)  $h_2$  of barrel, with the 6th rifling as tracking target, take image in circular domain with a radius of  $r$

全景成像的身管缠角测量原理如图 2 所示。一根半径为  $R$  的真实身管,其轴向展开图如图 2(a)所示,图中黑色为阴膛线,白色为阳膛线,对阴膛线进行编号,  $\alpha$  所示角度即为身管缠角。将窥膛装置置于身管  $h_1$  深度处,以 6 号膛线为跟踪目标,取半径为  $r$  的环形区域内图像,如图 2(b)所示。推动执行机构,将窥膛装置置于身管  $h_2$  深度处,取同样的环形区域,如图 2(c)所示。窥膛装置由  $h_1 \rightarrow h_2$  的过程中,目标膛线发生类旋转变,身管缠角  $\alpha$  与膛线旋转角度  $\theta$  存在如下关系:

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\theta \times 2\pi R}{360^\circ (h_2 - h_1)} \right], \quad (1)$$

式中,  $h_2 - h_1$  的值可由拉绳位移传感器获得。

目标膛线的旋转角度  $\theta$  是一个非常关键的参数,其定位精度直接影响缠角测量结果的准确性,本文后

续将就图像增强和自动跟踪定位膛线旋转角两方面分别详细阐述其原理和步骤,保证测量结果的准确性。

### 2.2 全景成像身管缠角测量流程

所提方法的测量流程如图 3 所示,具体流程如下:

- 1) 预先进行窥膛装置的标定,获得矫正矩阵,对于同一全景成像窥膛装置和同一身管标定只需一次即可;
- 2) 将窥膛装置放在起始位置并开始采集图像,使用全景图像增强算法完成图像增强,并预设跟踪膛线边缘;
- 3) 由执行机构推动窥膛装置到指定测量位置,利用膛线自动跟踪与定位算法跟踪目标膛线并获取膛线的旋转角度  $\theta$ ;
- 4) 利用拉绳位移传感器得到测量位置的轴向位移  $\Delta h$ ,结合旋转角信息  $\theta$ ,基于缠角计算公式完成单次

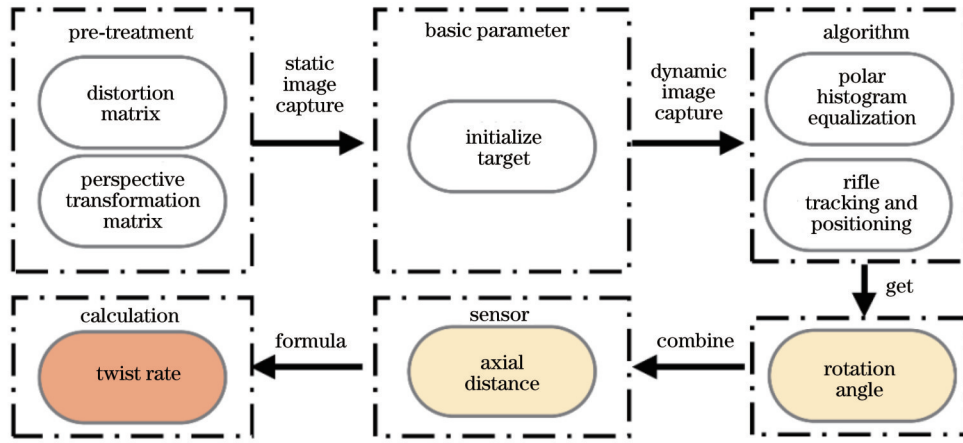


图 3 基于全景成像的身管缠角测量流程图

Fig. 3 Flow chart of twist rate measurement of barrel based on panoramic imaging

缠角计算;

5) 重复步骤 3)~4), 取多次测量结果的算术平均值为最终缠角计算结果。

### 3 基于极坐标系的图像增强

身管内部膛线的高低差异导致阴阳膛线在图像中具有明显的明暗对比, 高对比度有助于突出阴阳膛线

的膛线区域特征, 提高自动跟踪定位算法的准确性。传统图像一般使用直角坐标系表示, 特征的表达通常以水平向量和垂直向量作为基向量, 而广角镜头的全景图像特性区别于传统图像, 采用极坐标系表示全景图像特征, 能够更加准确地反映身管内的空间结构和特征相关性, 根据全景图像特性推导极坐标全景图像增强算法。

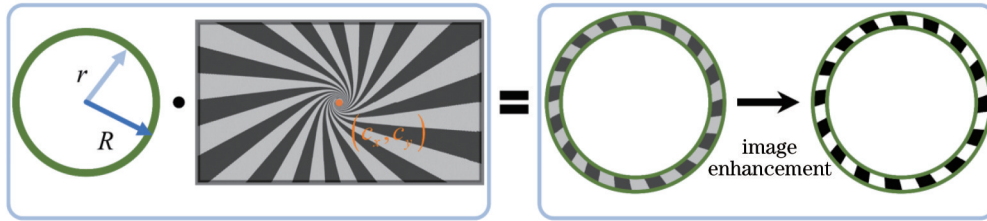


图 4 极坐标的全景图像增强算法流程

Fig. 4 Process of panoramic image enhancement algorithm based on polar coordinates

以  $f(x, y)$  表示归一化的原图像,  $g(x, y)$  表示原图经过增强后的归一化图像。对  $f(x, y)$  存在:

$$g(x, y) = T[f(x, y)]. \quad (2)$$

图 4 为基于极坐标的全景图像增强算法流程图, 在图像坐标系下设置内径为  $r$ 、外径为  $R$ 、环心为  $(c_x, c_y)$  的环形窗口抓取感兴趣区域 (ROI) 图像  $I^{ROI}$ , 并将其转换到极坐标系下:

$$f(x, y) = I^{ROI}(\rho \cos \theta + c_x, \rho \sin \theta + c_y), \quad (3)$$

式中,  $\rho \in [r, R]$  和  $\theta \in [0^\circ, 360^\circ)$  分别为环形窗口的有效极径和有效极角范围。

假定  $g(x, y)$  的分布函数用  $F(g)$  表示, 其概率密度函数为  $p(g)$ , 根据分布函数定义有

$$p(g) = \frac{dF(g)}{dg} = \int_0^{2\pi} \int_r^R p[I^{ROI}(\rho, \theta)] d\rho d\theta \frac{d[I^{ROI}(\rho, \theta)]}{dg}, \quad (4)$$

式中,  $g(x, y)$  满足区间上的均匀分布, 存在  $p(g) = 1$ ,

将其代入式 (4) 积分并使用频率代替概率表示离散图像  $I^{ROI}$ , 可得极坐标系下用于全景图像增强的灰度映射函数为

$$g_k = T \left[ I_k^{ROI}(\rho \cos \theta + c_x, \rho \sin \theta + c_y) \right] = \sum_{n=0}^k \frac{\sum_{i=0}^{2\pi} \sum_{j=r}^R I_k^{ROI}(\rho_i, \theta_j)}{N}, \quad (5)$$

式中,  $k = 0, 1, \dots, 255$ 。由式 (5) 可知, 增强后的全景图像各像素的灰度值  $g_k$  可由离散图像  $I^{ROI}$  的灰度值直接求出。

### 4 膛线自动跟踪与定位

基于全景成像测量身管缠角时, 目标膛线的定位精度直接影响最终缠角测量的精度。全景图像采集过程中, 由于相邻采样位置的全景图像在不同身管深度下采集, 它们之间存在特征差异, 相邻采样图像无法通过简单旋转得到。此外, 身管内部的构造使得阴阳膛线呈现周期性分布, 各周期内的膛线特征相似, 难以确

定跟踪目标在全图的从属区域,导致传统的定位算法难以精确对膛线进行追踪定位。本文针对阴阳膛线的固有特征,提出一种双阶段定位算法,使用极坐标模板匹配得到旋转角初值完成第一阶段的粗定位,设计目标函数并优化完成第二阶段的精定位。

#### 4.1 膛线自动跟踪

身管内膛全景图像采集过程中,由于阴阳膛线各周期的特征较相似,且相邻两帧全景图像在身管不同位置采集,特征在图像上发生位置变化,基于算子特征的匹配算法容易匹配到错误区域,本文推导了基于灰度相关的模板匹配算法。

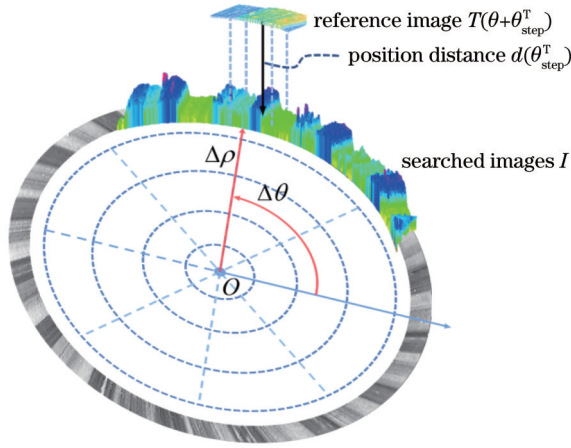


图 5 极坐标模板匹配示意图

Fig. 5 Schematic diagram of polar coordinate template matching

极坐标系下模板图像  $T$  在原始图像  $I$  的偏移的表达式为

$$T_{\Delta\rho, \Delta\theta}(\rho, \theta) = T(\rho + \Delta\rho, \theta + \Delta\theta), \quad (6)$$

式中,  $\Delta\rho$  和  $\Delta\theta$  分别为模板图像  $T$  沿极径和极角偏移的距离。需要明确的是,匹配阴阳膛线分界处才是所需要的,不需要跟踪模板图像,而是要基于相似性原理快速确定阴阳膛线分界处的旋转角初值,因此,对式(6)进行化简得到以下模板公式:

$$T_{\Delta\theta}(\theta) = T(\theta + \Delta\theta). \quad (7)$$

为度量图像的相似程度,本文使用误差平方和作为二维灰度图像中的相似度量函数,计算极角每一次移动  $\theta_{\text{step}}^T$  后的参考图像和搜寻图像中所对应的子图像的距离  $d(\theta_{\text{step}}^T)$ , 如图 5 所示。

$$d(\theta_{\text{step}}^T) = \sum_{\theta} [I(\theta) - T(\theta + \theta_{\text{step}}^T)]^2. \quad (8)$$

度量函数可以得到最近似的旋转角,它提供了一个  $\Delta\theta$  满足  $d(\Delta\theta)$  最大或最小,以获得初值

$\theta_0 = \theta + \Delta\theta$ 。设定极坐标模板匹配的极角步长  $\theta_{\text{step}}^T$  和模板匹配极角范围  $\Delta\theta$ , 基于初值和极角步长会获得一个旋转角范围  $[\theta_0 - \theta_{\text{step}}^T - \epsilon, \theta_0 + \theta_{\text{step}}^T + \epsilon]$ , 其中  $\epsilon$  是为应对噪声、光照变化等因素干扰而引入的松弛因子。

#### 4.2 膛线精确定位

阴阳膛线分界处将阴阳膛线对比度拉到最大, 本文将其定义为全景图像特征。虽然相邻两帧全景图像无法建立旋转关系, 但全景图像特征具备旋转特性, 使用状态方程推导, 通过目标函数完成膛线定位。

定义前一帧特征增强后的图像为  $I_{f-1}$ , 执行机构推进  $h$  后, 获得当前帧特征增强后的图像  $I_f$ , 存在函数  $R$  使得

$$I_f = R(I_{f-1}, \Delta\theta). \quad (9)$$

由于全景图像表现为矩形, 在极坐标系下引入圆环窗口  $(\rho_d, \rho_u)$ , 圆环窗口内, 存在扇形窗口  $w(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_r)$  使得

$$I_{f-1}^1 = I_{f-1} w(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_r), \quad (10)$$

式中:  $I_{f-1}^1$  为  $I_{f-1}$  一个周期的数据;  $(\rho_d, \rho_u)$  为圆环窗口的极径范围;  $(\theta_l, \theta_r)$  为扇形窗口的极角范围。

全景图像的单个周期数据由一组阴阳膛线组成, 将  $(\theta_l, \theta_r)$  拆解为

$$I_{f-1}^1 = I_{f-1} w_{\text{groove}}(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_0) + I_{f-1} w_{\text{land}}(\rho_d, \rho_u, \theta_0, \theta_r), \quad (11)$$

式中:  $(\theta_l, \theta_0)$  为扇形窗口内阴膛线的极角范围, 有  $\theta_0 - \theta_l = \theta_{\text{groove}}$ ;  $(\theta_0, \theta_r)$  为扇形窗口内阳膛线的极角范围, 有  $\theta_r - \theta_0 = \theta_{\text{land}}$ 。扇形窗口  $w(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_r)$  内,  $R$  是关于  $\theta$  的线性函数, 如图 6 所示, 将式(11)代入式(9)可得一个周期阴阳膛线的状态方程为

$$I_f^1 = I_f w_{\text{groove}}(\rho_d, \rho_u, \Delta\theta + \theta_l, \Delta\theta + \theta_0) + I_f w_{\text{land}}(\rho_d, \rho_u, \Delta\theta + \theta_0, \Delta\theta + \theta_r). \quad (12)$$

由模板匹配可以获得旋转角初值  $\theta_0$  和一个更小的范围  $[\theta_0 - \theta_{\text{step}}^T - \epsilon, \theta_0 + \theta_{\text{step}}^T + \epsilon]$ 。式(12)对应到全景图像特征分割的阴阳膛线, 全景图像特征是图像对比度最大处, 阴膛线偏向黑色, 阳膛线偏向白色。因此, 扇形窗口  $(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_r)$  内, 当  $\theta \in [\theta_0 - \theta_{\text{step}}^T - \epsilon, \theta_0 + \theta_{\text{step}}^T + \epsilon]$  时必然存在  $\Delta\theta$  使图像对比度  $D$  的值最大, 有目标函数如下:

$$D(\Delta\theta) = \frac{(m - m_1)^2}{(m_1 + \tau)^2}, \quad (13)$$

式中:  $\tau$  为平滑项;  $m, m_1$  具体如下:

$$m = \max \left( \frac{\iint_{\omega_{\text{groove}}} I_{\text{groove}}^1 d\omega_{\text{groove}}}{\iint_{\omega_{\text{groove}}} I d\omega_{\text{groove}}}, \frac{\iint_{\omega_{\text{land}}} I_{\text{land}}^1 d\omega_{\text{land}}}{\iint_{\omega_{\text{land}}} I d\omega_{\text{land}}} \right), m_1 = \min \left( \frac{\iint_{\omega_{\text{groove}}} I_{\text{groove}}^1 d\omega_{\text{groove}}}{\iint_{\omega_{\text{groove}}} I d\omega_{\text{groove}}}, \frac{\iint_{\omega_{\text{land}}} I_{\text{land}}^1 d\omega_{\text{land}}}{\iint_{\omega_{\text{land}}} I d\omega_{\text{land}}} \right).$$

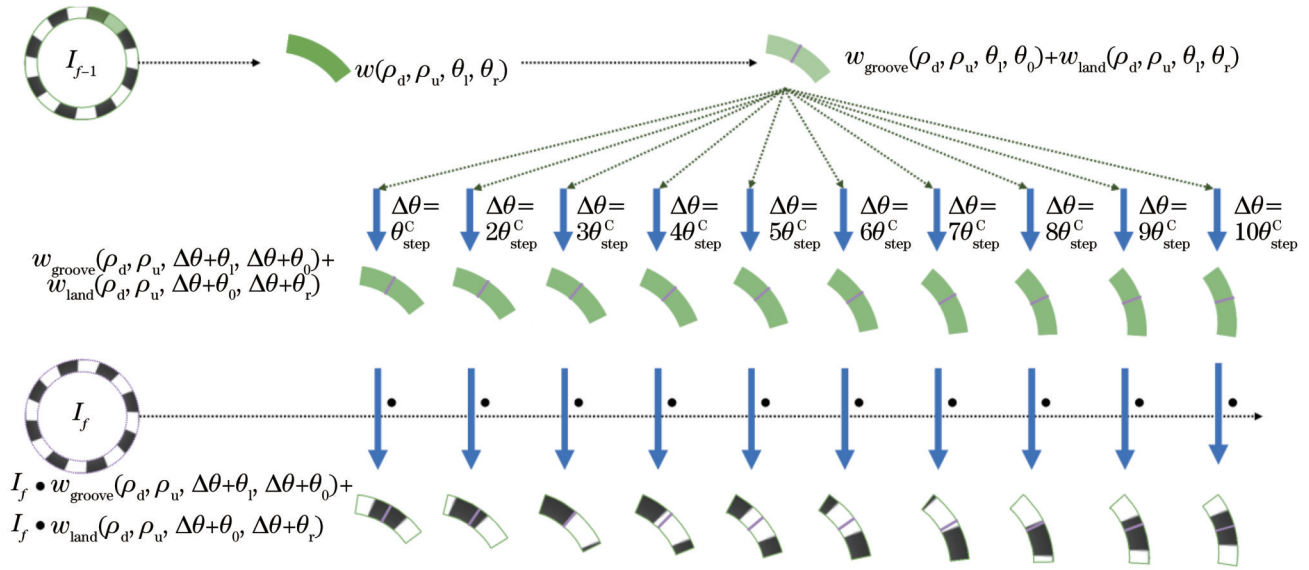


图 6 扇形窗口功能图

Fig. 6 Functional diagram of sector window

设点  $P(\Delta\theta_0, D_0)$  为  $\theta \in [\theta_0 - \theta_{step}^T - \epsilon, \theta_0 + \theta_{step}^T + \epsilon]$  时的最大值点, 取  $P$  左右点  $(\Delta\theta_{-1}, D_{-1})$  和  $(\Delta\theta_1, D_1)$ , 利用泰勒级数对点  $P$  小区域内目标函数结果进行泰勒展开得

$$D(\Delta\theta) \approx D(0) + D'(0)\Delta\theta + \frac{D''(0)}{2}\Delta\theta^2, \quad (14)$$

式中:  $D(0) = D_0$ ;  $D'(0) = \frac{D_1 - D_{-1}}{2\theta_{step}^c}$ ;  $D''(0) = \frac{D_1 + D_{-1} - 2D_0}{(\theta_{step}^c)^2}$ . 对式(14)求极大值得

$$D'(\Delta\theta) = D'(0) + D''(0)\Delta\theta \xrightarrow{D'(\Delta\theta)=0} \Delta\theta = \frac{\theta_{step}^c(D_1 - D_{-1})}{2(D_1 + D_{-1} - 2D_0)}. \quad (15)$$

在扇形窗口  $w(\rho_d, \rho_u, \theta_l, \theta_r)$  内, 当目标函数取最大值时, 表示成功定位目标。

## 5 实验结果与分析

### 5.1 膛线跟踪与定位仿真实验

考虑到膛线旋转角难以准确获得, 为验证所提膛线追踪与定位算法对目标膛线追踪定位的精度, 使用

Matlab 制作仿真数据对所提算法进行了仿真实验。仿真数据制作过程如图 7 所示, 全景图像分辨率为  $1000 \text{ pixel} \times 1000 \text{ pixel}$ , 设置环形窗口 ( $r = 450, R = 500, c_x = 914, c_y = 561$ ) 抓取 ROI。窥膛装置捕获身管不同深度下的图像时表现为图像旋转, 本文选取身管一定深度下的全景图像作为初始图像, 即  $0^\circ$  图像, 将初始图像按照随机生成的旋转角度进行中心旋转, 取相邻图像之间的旋转角差值作为旋转角参考值, 如  $3^\circ$  到  $4^\circ$  旋转角度参考值为  $1^\circ$ 。同时, 不同周期内的图像特征会受到环境噪声的干扰, 导致图像膛线特征变换, 因此采用简单线性迭代聚类 (SLIC) 超像素分割算法<sup>[15]</sup> 将旋转后的全景图像分割为不同区域, 在分割区域中随机添加高斯或椒盐噪声改变各周期膛线特征, 高斯噪声可以引入随机扰动模拟环境噪声的影响, 而椒盐噪声可以引入更多的随机性和干扰因素, 评估算法的鲁棒性等性能。

为了评估算法的有效性和准确性, 选取不同深度下的全景图像, 制作两组仿真数据。图 8 显示了膛线追踪与定位算法的定位结果图, 追踪目标已在图中框出, 横线所在数值为最终定位的结果。表 1 与表 2 分别显示了两组仿真数据算法测量结果。由表中可以看出, 多数情况下, 模板匹配所获得的旋转角初值与参考

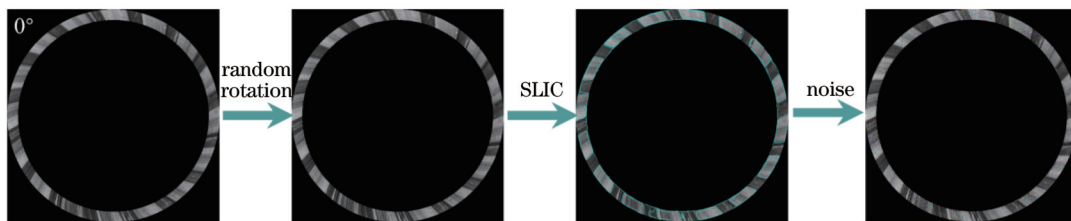


图 7 仿真数据制作过程

Fig. 7 Process of generating simulation data

表 1 仿真数据 1 实验结果

Table 1 Experimental results of simulation data 1

Random angle / (°)	Reference value / (°)	Template matching	Function localization	Localization error
3-4	1	0°41'10"	0°59'10"	0°00'50"
4-6	2	1°00'00"	2°00'00"	0°00'00"
6-13	7	6°10'12"	7°04'12"	0°04'12"
13-14	1	2°51'10"	1°03'00"	0°03'00"

表 2 仿真数据 2 实验结果

Table 2 Experimental results of simulation data 2

Random angle / (°)	Reference value / (°)	Template matching	Function localization	Localization error
5-6	1	0°42'47"	1°00'47"	0°00'47"
6-9	3	2°41'13"	2°59'13"	0°00'47"
9-12	3	1°19'19"	2°57'50"	0°02'10"
12-14	2	3°48'04"	1°57'32"	0°02'28"

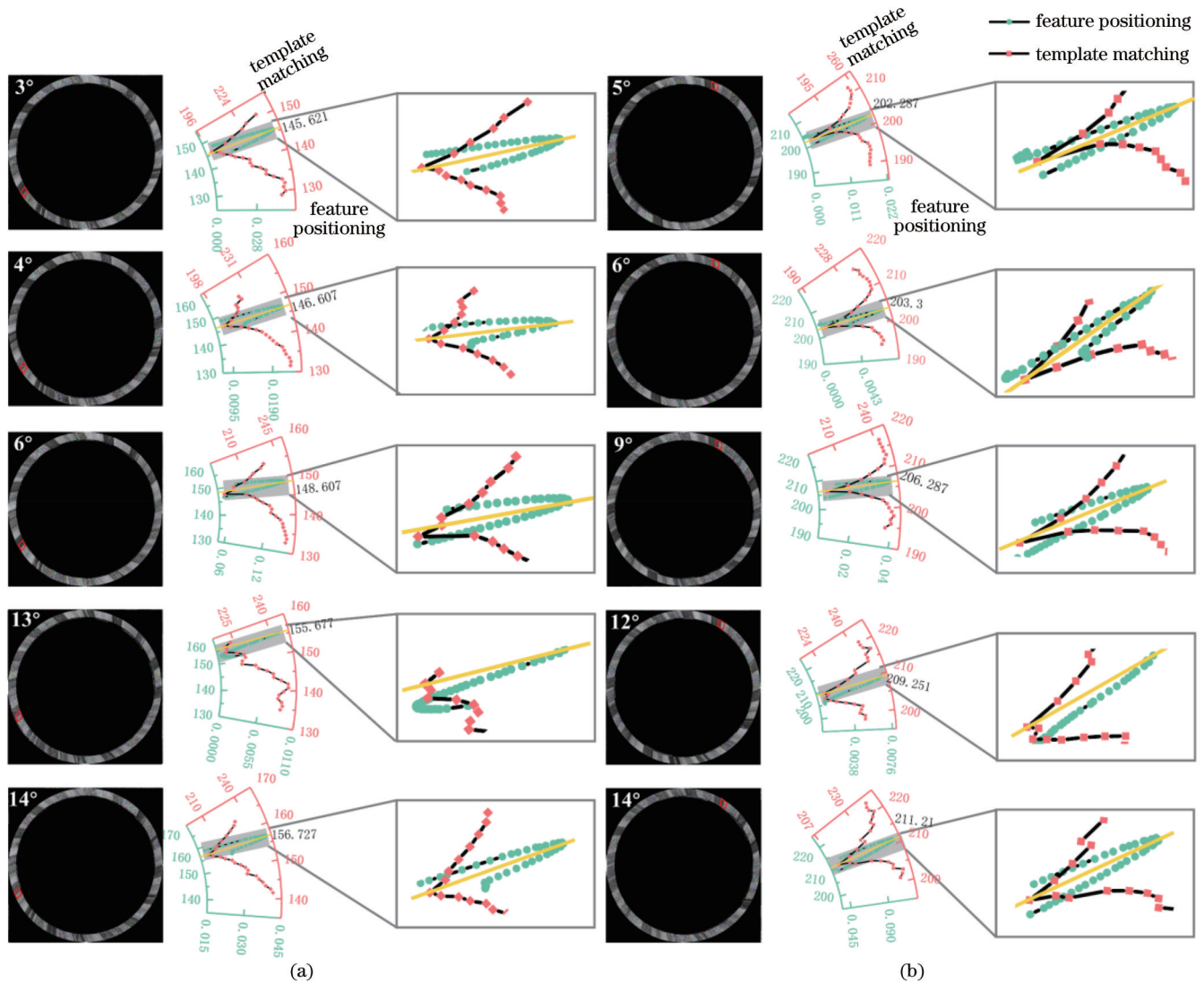


图 8 追踪定位算法定位结果图。(a)仿真数据 1 追踪定位算法定位结果；(b)仿真数据 2 追踪定位算法定位结果

Fig. 8 Localization result images of tracking and positioning algorithm. (a) Localization results of tracking and positioning algorithm for simulation data 1; (b) localization results of tracking and positioning algorithm for simulation data 2

值都存在明显误差,经过二次精确定位后,测量结果与参考值更为接近,最大测量误差为 4'12",说明目标函

数的定位成功修正了误差,更准确地匹配到了目标区域。算法定位结果图中,最大测量误差出现于图 8(a)

13°处,相对于其他图像,该图像的目标相邻区域遭受了更强烈的噪声干扰,图像中细节信息受到的破坏最为严重,但目标区域仍然保留了一定程度的对比度本质特征,通过最大限度地利用这些特征信息,本文所设计的目标函数能够将定位结果趋近于最优,有效地减小了定位误差,即使存在严重噪声干扰的情况下也能具有较高的鲁棒性。

## 5.2 身管缠角实际测量实验

图 9 为身管缠角实际测量场景,全景成像窥膛装置主要参数如表 3 所示,位移传感器为 MILONT 公司的 MPS 系列拉绳位移传感器,其线性精度为  $\pm 0.1\%$ ,重复性精度为  $\pm 0.01\%$ 。待测身管口径为 30 mm,有

效长度为 1320 mm,缠角为  $7^{\circ}30' \pm 1'$ ,图 10 为测量实验中算法的部分结果图。实际测量实验前须先完成测量系统标定,对采集到的全景图像应用基于极坐标系的全景图像增强算法完成图像增强,膛线自动追踪与定位算法完成对全景图像的目标膛线追踪。身管缠角测量过程中,全景成像窥膛装置前进后退均测量一次,重复 3 次,共 6 次测量。待测身管有效长度为 1320 mm,设置实际测量实验轴向距离全长为 1000 mm,每隔 200 mm 计算一次缠角,单次测量可获得 5 个身管缠角测量结果,6 次测量共获得身管缠角测量结果 30 个,如表 4 所示。

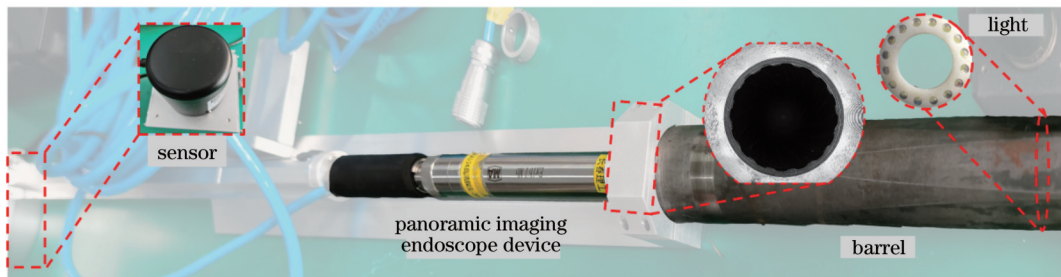


图 9 身管缠角实际测量场景

Fig. 9 Actual measurement scenario of barrel twist angle

表 3 全景成像窥膛装置主要参数

Table 3 Key parameters of panoramic imaging endoscope device

Endoscope parameter	Value
Endoscope diameter /mm	24
Focal length /mm	3.6
Field of view /( $^{\circ}$ )	70
Resolution ( $H \times W$ ) /pixel	1920 $\times$ 1080

由于给定身管的缠角存在误差,本文取  $7^{\circ}30'$  为计算真值,依据国家军用标准(GJB)<sup>[16]</sup>,取最远距离 6 次结果的算术平均值作为缠角的最终测量结果,最终测量结果为  $7^{\circ}30'22''$ ,测量结果误差小于  $1'$ 。图 11(a)显示了缠角实际测量实验结果,在轴向距离较短时,测量方法的缠角测量结果有所波动,当轴向距离大于 600 mm 时,测量结果趋向稳定。图 11(b)显示了缠角

实际测量实验结果绝对值误差区间,由图可知,测量方法的最大缠角测量误差为  $2.8966'$ ,小于  $3'$ ,随着轴向距离的增加,测量方法实际测量结果平均误差的绝对值越小,结果越趋于稳定,测量结果越接近真实值。根据误差分析结果,所提测量方法最大缠角测量误差小于  $3'$ ,缠角测量精度优于  $1'$ 。

## 6 结 论

针对火炮身管膛线缠角在火炮制造质量和性能评估中的重要性,提出一种基于全景成像的膛线自动跟踪缠角测量方法。该方法利用折射式全景成像技术采集身管内膛图像,在极坐标系下推导内膛全景环形图像增强映射函数对内膛全景图像进行特征增强;分析阴阳膛线固有特性,设计双阶段定位算法解决膛线旋转角难以准确追踪的问题,建立环形模板匹配模型获取膛线旋转角初值完成粗定位;根据

表 4 身管缠角测量实验结果

Table 4 Experimental results of barrel twist rate measurement

Number of experiment	Axial distance /mm					Average value
	200	400	600	800	1000	
1	$7^{\circ}31'58''$	$7^{\circ}29'45''$	$7^{\circ}30'58''$	$7^{\circ}30'34''$	$7^{\circ}30'29''$	$7^{\circ}30'22''$
2	$7^{\circ}28'22''$	$7^{\circ}27'58''$	$7^{\circ}29'59''$	$7^{\circ}29'33''$	$7^{\circ}29'37''$	
3	$7^{\circ}29'05''$	$7^{\circ}28'45''$	$7^{\circ}29'17''$	$7^{\circ}29'52''$	$7^{\circ}30'34''$	
4	$7^{\circ}31'05''$	$7^{\circ}30'44''$	$7^{\circ}29'21''$	$7^{\circ}29'26''$	$7^{\circ}29'18''$	
5	$7^{\circ}32'54''$	$7^{\circ}31'44''$	$7^{\circ}31'26''$	$7^{\circ}31'10''$	$7^{\circ}31'29''$	
6	$7^{\circ}31'44''$	$7^{\circ}31'01''$	$7^{\circ}30'48''$	$7^{\circ}30'51''$	$7^{\circ}30'49''$	

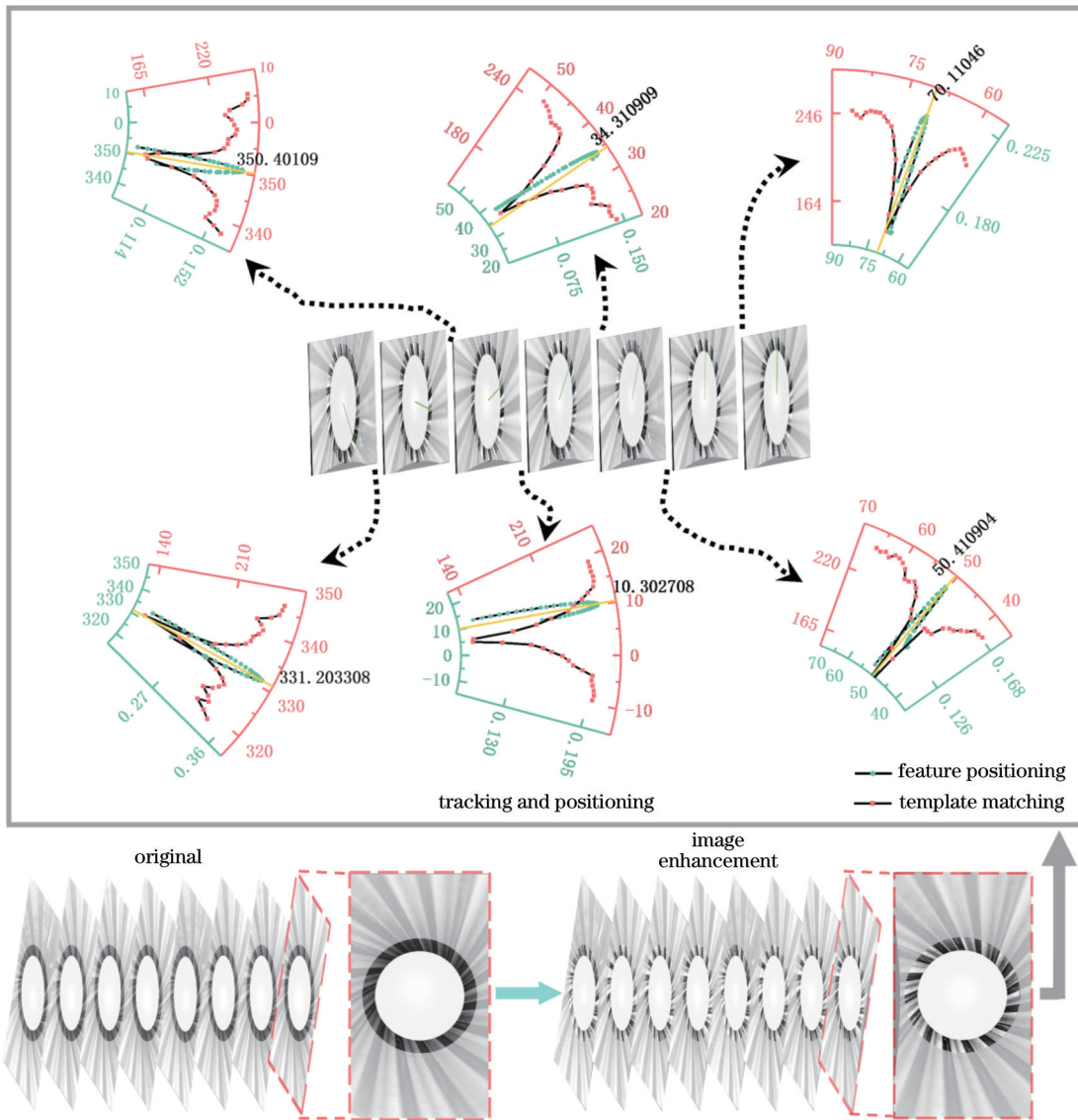


图 10 测量实验算法的部分结果图

Fig. 10 Partial result images of measurement experimental algorithm

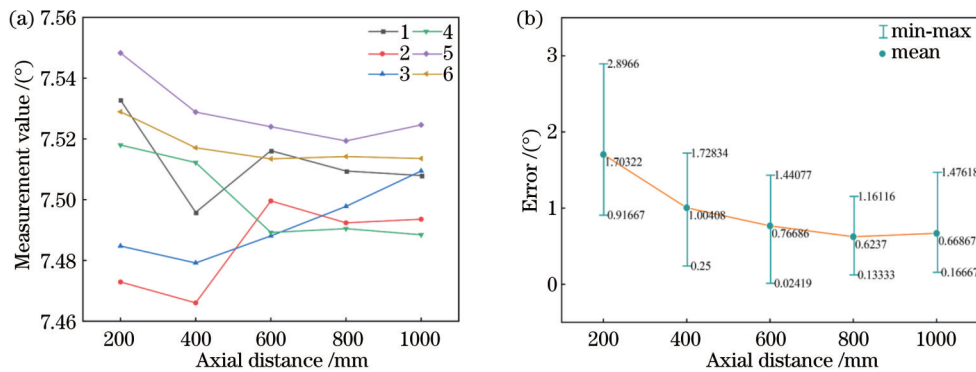


图 11 身管缠角测量实验图。(a)身管缠角实际测量实验结果图；(b)身管缠角实际测量实验结果绝对值误差区间图

Fig. 11 Experimental diagram of barrel twist rate measurement. (a) Actual measurement experimental results of barrel twist rate; (b) absolute error interval chart of actual measurement experimental results of barrel twist rate

阴阳膛线对比度关系设计目标函数,优化目标函数完成膛线旋转角的精定位,结合身管轴向距离完成待测身管缠角解算。实验结果表明,所提身管缠角

测量方法的测量精度优于 $1'$ ,验证了测量方法的有效性和可行性,在火炮性能评估等领域中有广阔的应用前景。



## 参 考 文 献

- [1] 张野. 多口径身管缠度缠角光学检测技术与系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.  
Zhang Y. Research on optical detection technology and system of multi-caliber barrel winding angle[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [2] 韩永林, 王素芬. 火炮身管缠度在线检测系统设计分析[J]. 长春理工大学学报, 2005, 28(1): 118-119.  
Han Y L, Wang S F. The online detection system of Gun barrel inside bore's twist pitch of rifling design analysis[J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2005, 28(1): 118-119.
- [3] 杜建安, 李省恒, 孔方桂. 火炮身管等齐膛线缠角检测方法研究[J]. 机械管理开发, 2009, 24(6): 13, 18.  
Du J A, Li X H, Kong F G. Method on check twist angle of uniform twist rifling[J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(6): 13, 18.
- [4] 孙培慧, 徐锦波, 侯晨, 等. 一种炮上身管缠角检测方法: CN109029219A[P]. 2018-12-18.  
Sun P, Xu J, Hou C, et al. Cannon barrel twining angle detection method: CN109029219A[P]. 2018-12-18.
- [5] Salafia D. Visual characterization of wear in large caliber weapons[M]//Nondestructive characterization of materials X. Amsterdam: Elsevier, 2001: 365-370.
- [6] Gold C M. Contouring—a guide to the analysis and display of spatial data[J]. Computers & Geosciences, 1993, 19(10): 1571-1572.
- [7] 丁柏秀. 火炮身管在线检测技术[D]. 长春: 长春理工大学, 2003.  
Ding B X. On-line detection technology of Gun barrel[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2003.
- [8] 郑军, 徐春广, 肖定国. 基于图像变换的火炮身管膛线参数检测技术研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 134-138.  
Zheng J, Xu C G, Xiao D G. An image transformation technique for the detection of artillery's rifling parameter[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(2): 134-138.
- [9] 姜洪朝. 基于数学形态学和非接触实时测量及算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.  
Jiang H C. Research on non-contact real-time measurement and algorithm based on mathematical morphology and CCD[D]. Xi'an: Xidian University, 2006.
- [10] 韩保君, 姜洪朝, 薄华, 等. 基于类别方差的 CCD 缠度非接触测量研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2005, 6(5): 50-52.  
Han B J, Jiang H Z, Bo H, et al. Study of non-contact measurement of the twist pitch of rifling based on class variance [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2005, 6(5): 50-52.
- [11] 郭琦, 傅建平, 李雷, 等. 火炮内膛图像膛线识别及其参数计算方法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(23): 5789-5792.  
Guo Q, Fu J P, Li L, et al. Research for rifling recognition and parameter calculation on Gun bore image[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(23): 5789-5792.
- [12] 郑军, 徐春广, 肖定国, 等. 火炮身管内表面综合测量系统研究[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6): 694-698.  
Zheng J, Xu C G, Xiao D G, et al. A comprehensive measuring system for the inner surface of artillery[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(6): 694-698.
- [13] Bai B X, Hao Y H. On-line testing technique for artillery body [C]//2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, December 11-13, 2009, Wuhan, China. New York: IEEE Press, 2009.
- [14] 王坚, 单长胜. 新型火炮缠角测量系统设计[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 32-33, 41.  
Wang J, Shan C S. NEW measurement system for angle of artillery[J]. China Measurement, 2006, 32(1): 32-33, 41.
- [15] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(11): 2274-2282.
- [16] 中国人民解放军总装备部司令部. 火炮静态检测方法: GJB 2977A—2006[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.  
Headquarters of People's Liberation Army General Armaments Department of the People's Liberation Army. Static detection method for artillery: GJB 2977A—2006[S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2006.

## Twist Rate Measurement Method Based on Panoramic Imaging for Automatic Tracking Barrel Rifling

Jing Wenbo<sup>1\*</sup>, Zhang Junhao<sup>1</sup>, Feng Xuan<sup>1</sup>, Xiong Zeyu<sup>2</sup>, Liu Tongbo<sup>1</sup>, Xia Xuan<sup>1</sup>,  
Wu Xueni<sup>1</sup>, Wang Caixia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>2</sup>College of Electronical and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

### Abstract

**Objective** In the overall performance evaluation system of artillery, the twist rate of the barrel is a crucial indicator. Existing methods for measuring twist rate feature complexity and limited measurement accuracy. With the continuous development of optoelectronic technology, panoramic imaging devices with large field of view and high resolution have emerged to enable seamless 360° panoramic imaging in a single shot without blind spots, thus capturing comprehensive information of the measured object. However, research on measuring the twist rate of barrels based on panoramic imaging

technology is limited, and existing methods mostly rely on conical refractive panoramic imaging systems. Due to the shape and material properties of the conical refractive mirror, such systems may introduce image distortion, affecting image quality and posing challenges to image stitching and unwrapping. Thus, we propose a panoramic imaging-based automatic tracking and measurement method for the twist rate of barrels using refractive panoramic imaging technology, which achieves twist rate calculation without the image unwrapping algorithms.

**Methods** We put forward a panoramic imaging-based automatic tracking and measurement method for the twist rate of barrels. Refractive panoramic imaging technology is utilized to obtain a panoramic image inside the barrel. After obtaining the image, a detailed analysis of the characteristics of the wide-angle panoramic image is conducted, and the image is transformed from Cartesian coordinates to polar coordinates. In the polar coordinate system, the image enhancement mapping function for the panoramic ring-shaped bore image is derived to enhance the features of the twist rate. To achieve automatic tracking and measurement of the twist rate, we build an annular template matching model to track the edges of the pre-set positive and negative rifling twists along the direction of the barrel, thereby accomplishing coarse positioning of the twist rate. Next, an objective function is designed based on the contrast differences between the positive and negative rifling twists within a single cycle. Precise positioning of the twist rate is achieved by optimizing this objective function to acquire the twist angle. After obtaining the twist angle, the axial distance of the barrel is combined to calculate the twist rate of the barrel and complete the twist rate measurement.

**Results and Discussions** To validate the effectiveness of the proposed measurement method, we generate simulation data to verify the accuracy of the rifling tracking and positioning algorithms for target rifling tracking. Additionally, practical twist rate measurement experiments are conducted with real test barrels. The simulation experiments demonstrate that, in most cases, the algorithm's positioning error is less than 3 arc minutes ( $3'$ ) (Table 1 and Table 2). Even under strong noise interference [Fig. 8(a) at  $13^\circ$ ], the maximum positioning error of the algorithm is only  $4'12''$ . Before conducting the actual measurement experiments, the measurement system is calibrated, and the acquired panoramic images are enhanced by an enhancement algorithm based on the polar coordinate system. The practical experiments of twist rate measurement show that the measurement results tend to stabilize with the increasing axial distance of the barrel [Fig. 11(a)]. During the measurement, the maximum twist rate measurement error is less than 3 arc minutes ( $3'$ ) [Fig. 11 (b)]. The twist rate measurement precision is better than  $1'$  as indicated in Table 4, confirming the effectiveness and feasibility of the measurement method.

**Conclusions** Given the significance of twist rate in the quality and performance evaluation of barrel manufacturing, a panoramic imaging-based automatic tracking and measurement method for the twist rate of the barrel is proposed. Refractive panoramic imaging technology is utilized to capture internal bore images within the barrel. By deriving an image enhancement mapping function in the polar coordinate system for the panoramic ring-shaped bore images, the features of the rifling twist are enhanced. The inherent characteristics of the rifling twist are analyzed, and a two-stage positioning algorithm is designed to address the challenge of accurately tracking the rotation angle of the rifling twist. Meanwhile, an annular template matching model is built to obtain the initial value of the rifling twist rate for coarse positioning. Based on the contrast relationship of the rifling twist, an objective function is formulated, and an optimization process is employed to achieve precise positioning of the rifling twist rate. The twist rate of the measured barrel is determined by combining the axial distance of the barrel. Experimental results demonstrate that the proposed method for measuring the barrel's twist rate achieves a measurement accuracy better than  $1'$ , thus verifying the effectiveness and feasibility of the measurement method. The method exhibits vast application potential in military fields, such as artillery performance evaluation.

**Key words** twist rate measurement; panoramic imaging; barrel; rifling tracking