

引用格式: 吴冬, 王东鹤, 丁庆伟, 等. Canny 边缘检测和轴线矢量靶场目标姿态测量[J]. 中国测试, 2024, 50(1): 178-184. WU Dong, WANG Donghe, DING Qingwei, et al. Attitude measurement of target in range based on Canny edge detection and axis vector[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(1): 178-184. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2022080134



# Canny 边缘检测和轴线矢量靶场 目标姿态测量

吴冬<sup>1</sup>, 王东鹤<sup>1</sup>, 丁庆伟<sup>2</sup>, 赵立荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林省长春市 130000; 2. 中国人民解放军 63618 部队, 新疆 库尔勒 841001)

**摘要:** 对于靶场飞行目标的姿态测量问题, 提出一种基于 Canny 边缘检测与 Hough 直线检测的靶场目标图像轴线提取方法, 并利用成像平面交会获得旋转锥形载体的轴线, 实现目标轴线的姿态测量的目的。靶场试验一般有多台光学测量设备采集目标图像, 对采集到图像首先应用 Canny 算子检测目标边缘, 对边缘图像适用 Hough 直线检测算法提取到成像平面上的目标轴线, 进而可以得到测站和目标轴线所在的空间平面, 利用面面相交原理获得目标轴线矢量的姿态角。该测量方法是基于 Canny 边缘检测和 Hough 直线检测的轴线提取方法, 在仿真试验中对应用不同参数提取的轴线角度误差在  $0.3^\circ$  左右, 在实际试验中对目标的轴线提取误差在  $-0.7^\circ \sim -0.6^\circ$  之间。实验表明该方法提取出的目标轴线的姿态角能够满足试验需求。

**关键词:** 光学测量; Canny 边缘检测; 姿态计算; Hough 直线检测; 轴线检测

中图分类号: TB9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2024)01-0178-07

## Attitude measurement of target in range based on Canny edge detection and axis vector

WU Dong<sup>1</sup>, WANG Donghe<sup>1</sup>, DING Qingwei<sup>2</sup>, ZHAO Lirong<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China; 2. Unit 63618 of PLA, Kuerle 841001, China)

**Abstract:** For the attitude measurement of the flying target in the range, a method of extracting the axis of the target image in the range based on Canny edge detection and Hough line detection is proposed. And the axis of the rotating conical carrier is obtained by the intersection of imaging planes to achieve the attitude measurement of the target axis. Generally, multiple optical measuring devices are used to collect target images in the range test. Canny operator is applied to detect the edge of the target. Hough straight line detection algorithm is applied to the edge image to extract the target axis on the imaging plane. And then the space plane where the measuring station and the target axis are located can be obtained. The attitude angle of the target axis vector is obtained by using the principle of surface intersection. This measurement method is based on the axis

收稿日期: 2022-08-24; 收到修改稿日期: 2022-10-31

**作者简介:** 吴冬(1991-), 男, 辽宁凌海市人, 研究实习员, 硕士, 主要从事数字图像处理, 计算机软件开发等方面的研究。  
**通信作者:** 王东鹤(1983-), 男, 辽宁开封市人, 副研究员, 博士, 主要从事数字图像处理中的目标检测、目标识别等方面的工作。

extraction method of Canny edge detection and Hough straight line detection. In the simulation test, the axis angle error extracted by applying different parameters is about  $0.3^\circ$ , and in the actual test, the axis extraction error of the target is between  $-0.7^\circ$  and  $0.6^\circ$ . The experiment shows that the method can accurately extract the yaw angle and pitch angle of the target axis, which can meet the requirements of the range test. The experiment shows that the attitude angle of the target axis extracted by this method can meet the requirements of the experiment.

**Keywords:** optical measurement; Canny edge detection; attitude calculation; Hough line detection; axis detection

## 0 引 言

对目标的位姿测量,是指获取目标在指定坐标系下的位置参数和目标的运动姿态参数。对于导弹靶场的试验目标,一般是旋转锥形载体,为了更好地研究载体的运动,普遍用偏航角、俯仰角、滚转角和攻角等姿态角对载体相对于三个坐标轴的旋转运动进行表征<sup>[1]</sup>。对于目标的位姿测量,按照测量方式分类,大致可以分为遥测法和外测法。目前的靶场多数以外测法为主进行目标的位姿测量。外测法使用光电经纬等光测设备跟踪目标,获取包含目标的图像序列,通过图像处理算法完成目标图像的判读,一般利用多台光测设备同时对目标进行跟踪,可以获得目标在不同设备的图序列,通过配准、交会,可以完成对运动目标高精度位姿测量。

靶场测量的发展初期,对飞行目标的姿态测量还是以胶片相机摄影测量和遥测为主,随着光学测量设备的不断发展和进步<sup>[2]</sup>,现在靶场对目标的姿态测量结合了计算机、数字图像处理等技术手段,实现了不依赖于发射目标自身的惯导系统和发射装置的测量。基于光学数字图像的目标姿态测量精度,依赖于光学系统的成像效果和目标图像的特征提取的质量,因此对目标图像的姿态处理算法的改进,成为提高目标姿态测量精度的主要方向。数字图像的目标姿态计算,依赖特征提取,目前没有通用的方法,需要具体情况具体分析,针对特定目标来决定特征提取的方法。随着对测量精度的要求不断提高,寻找快速、合适的特征提取方法,是目前的研究热点,同时对于靶场目标姿态的测量,也具有重要的研究价值和意义。

国内外学者都有对目标位姿的外测方法进行相关研究。文献 [3] 提出了一种 PNL 问题的非迭代解方法,通过选择相机旋转轴,将参考直线分为相对的三组,构造 16 阶代价函数,通过对解代价函数

求导,找到最优解。文献 [4] 提出一种特征点的实时优化的方法,该方法基于双目视觉建立目标测量模型,并推导了测量误差模型,提出了基于误差传递矩阵优化特征点选取的目标函数。文献 [5] 提出了一种与当前的 PnP 方法相反的不需要特征点的 POP 姿态估计方法,它不需要  $n$  个空间点来估算相机的位姿,而是利用自然形状进行位姿估计,该方法需要获取目标上的明显几何形状,不适用于过远距离的目标姿态测量。文献 [6] 提出利用图像处理得到目标的轮廓,再用面面交会计算目标中轴线姿态。文献 [7] 提出一种基于弱透视成像模型的单目姿态解算方法,该方法可在相机内参未知条件下进行解算,但该方法需要已知目标的边长比例。文献 [8] 提出一种针对非合作航天器的位姿测量方法,该方法利用目标的椭圆轮廓和特征交点对目标识别,进而解算出位姿,但依赖成像质量和目标大小。

目前单站视觉测量的位姿解算方法虽然精度高,但需要庞大的计算量,因此不适合大范围推广<sup>[9]</sup>。双站视觉测量法利用同时刻的多个图像上目标的特征匹配,获得目标同名点线,再通过空间交会算法得到空间点和线的位置,进而计算出目标姿态,但是实际应用中还需针对不同情况使用具体图像处理的方法提取目标轴线。本文在双站视觉测量的基础上,针对导弹靶场的旋转锥形载体,应用 Canny 边缘检测算法以及 Hough 直线变换,获得图像上的目标轴线,再利用面面交会法,计算轴线的空间位置,进而实现对目标轴线的姿态测量,解决了导弹靶场使用光测设备测量目标姿态的需求。

## 1 弹体直线特征提取

对于数字图像中的直线检测,在图像分析和计算机视觉等领域,始终都是热门的研究课题。直线的检测算法,通常可以分为 Hough 变换法、边缘连接法和基于梯度的直线检测法。Hough 变换基本的

原理是建立参数空间与图像空间的映射关系,在参数空间中曲线相交表示在对应的图像空间中的点共线,通过寻找交点累加器的峰值,可以实现对于图像空间直线的检测,优点是集成全局信息、明确直线方向,缺点是不易直接确定直线段断点、依赖边缘检测。边缘连接法的直线检测基于图像边缘检测的像素链,首先提取到初始的直线段,然后基于拟合算法来拟合直线,最后生成完整的直线段,通过将梯度和主方向相结合,可以增强抗干扰性,总之边缘连接法的优势在于良好的抗噪、更快的速度,缺点是依赖边缘检测的效果、难以处理复杂的边缘响应。基于梯度的直线检测,需要利用梯度幅值和方向,以梯度幅度极值点作为种子,向邻域8个方向进行扩展,将小于阈值的像素点加入区域,迭代计算,最后区域形成近似矩形直线段,对矩形候选直线段进行验证,优点是不依赖边缘检测算法,缺点是对噪声敏感、计算量大。

本文为了减少噪声对后续图像处理的干扰,首先利用高斯滤波去噪,利用 Canny 边缘提取算法,准确获得边缘位置信息,最后利用边缘图像,通过 Hough 变换提取目标主体的轴线,下面对它们的原理分别进行说明。

### 1.1 目标边缘提取

使用 Canny 边缘提取算法实现目标边缘检测,优点是能在噪声的干扰条件下,较好提取出目标边缘。Canny 边缘提取首先用高斯滤波进行去噪平滑,再用梯度进行非极大值抑制和双阈值递归找到目标边缘点。

#### 1.1.1 高斯滤波平滑图像

高斯滤波器能够有效对图像噪声产生抑制,是在平滑的同时能够较好保留原有图像灰度特征的低通滤波器。二维高斯滤波的卷积核可以表示如下:

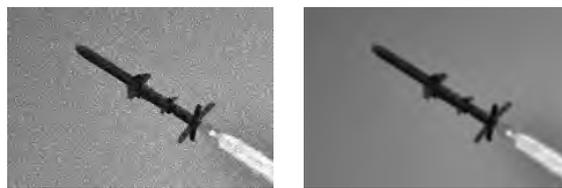
$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中 $\sigma$ 为高斯分布的标准差。

如图1所示,高斯滤波前后的对比,其中图(a)为高斯滤波前的图像,(b)为经过高斯滤波平滑后的图像。

#### 1.1.2 梯度计算

在点 $(x,y)$ 处梯度可以分为水平方向和垂直方向,它们分别为:



(a) 滤波前 (b) 滤波后

图1 高斯滤波前后对比图

$$\begin{cases} \varphi_1(x,y) = (f(x,y+1) - f(x,y) + f(x+1,y+1) - f(x+1,y))/2 \\ \varphi_2(x,y) = (f(x,y) - f(x+1,y) + f(x,y+1) - f(x+1,y+1))/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x,y)$ ——图像在 $(x,y)$ 处的灰度值;

$\varphi_1(x,y)$ —— $x$ 方向的偏导数;

$\varphi_2(x,y)$ —— $y$ 方向的偏导数。

由此可以得到在该点的梯度幅值和方向分别为:

$$\begin{cases} \varphi(x,y) = \sqrt{\varphi_1^2(x,y) + \varphi_2^2(x,y)} \\ \theta(x,y) = \arctan \frac{\varphi_2(x,y)}{\varphi_1(x,y)} \end{cases} \quad (3)$$

#### 1.1.3 非极大值抑制

为明确边缘,需要将局部梯度极大值点保留,而非局部极大值点梯度值置为0,具体操作是将邻域的中心像素与其梯度方向上的两个像素的梯度比较,如果不是梯度方向上的局部极大值,则将梯度置0。

#### 1.1.4 双阈值递归

对边缘梯度矩阵,引入高低两个阈值进行阈值分割,其中高阈值分割后的矩阵为 $T_2$ ,低阈值分割后的矩阵为 $T_1$ 。高阈值分割后一般边缘都会不闭合,当到达边缘的开口端点时,继续使用低阈值分割矩阵寻找边缘点。

### 1.2 目标轴线提取

对经过边缘查找后输出的只含有边缘点的图像,使用 Hough 变换提取直线,由于不是对全局像素点使用 Hough 直线检查,只对边缘上的点使用 Hough 直线检测,因此能够极大提高直线检测效率。Hough 变换原理是将空间坐标系的点 $(x,y)$ 映射到参数坐标系下用 $(\rho,\theta)$ 表示的曲线,具体的公式为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

式中: $\rho$ ——原点到直线的垂线距离;

$\theta$ ——从水平轴逆时针到垂线的角度。

Hough 直线检测首先是构造累加器 $(\rho,\theta)$ 并初始化为0,然后分别以指定的角度分辨率和距离分辨

率来对所有边缘点进行迭代, 并对这一点在参数空间对应累加器投票, 最后根据投票数量和设定的阈值, 认为超过一定投票阈值的累加器就是检测到的直线。对于角度分辨率一般为  $1^\circ$ , 长度分辨率为 1 个像素, 对于阈值, 则需要根据具体情况来调整到合适的值。

## 2 目标姿态计算

在靶场光学测量中, 对于火箭、导弹等目标一般可以认为是轴对称的, 可以通过计算他们对称轴的姿态, 来获得目标的姿态角度。先通过图像的处理, 提取出目标的轴线, 在轴线上找到两个点, 通过坐标变换, 最终转换到发射坐标系下, 这两个点可以确定在像平面上的轴线方程, 这个轴线方程与经纬仪的光学系统的中心点可以确定一个空间平面。再使用另外一个经纬仪捕捉的目标图像, 经过同样的处理可以确定另外一个空间平面, 这两个空间平面的交线, 就是目标的轴线。确定了轴线的方程, 就可以计算目标的姿态角。目标的姿态计算在靶场武器试验中存在重要作用, 因此本文研究了双站面面交会计算弹体姿态的相关方法。

### 2.1 坐标系的定义和转换

#### 2.1.1 相机坐标系与图像坐标系

图像坐标系可以分为用物理单位表示的物理坐标系, 以及用像素单位表示的像素坐标系<sup>[10]</sup>。如图 2 所示为光学设备的成像模型。一般以图像左上角为原点建立像素坐标系  $i-uv$ , 以  $u$  和  $v$  分别表示图像平面的宽度和高度方向, 单位是像素。 $o_c$  为光测设备的光学中心点,  $o_c$  点与图像平面的交点为  $o_p$ , 以为  $o_p$  原点建立物理坐标系  $o_p-xy$ , 其中  $x$  和  $y$  分别与  $u$  和  $v$  平行。以  $o_c$  为原点。

以相机的光学中心, 建立相机坐标系  $o_c-x_cy_cz_c$ ,

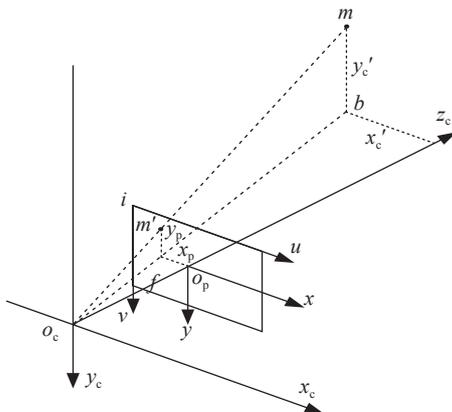


图 2 光学设备成像模型

其中  $z_c$  为光测设备的光轴垂直于成像平面,  $x_c$  和  $y_c$  分别与图像坐标系的  $x$  和  $y$  平行,  $o_c$  与  $o_p$  之间的距离即为焦距  $f$ 。在成像平面上点的像素坐标和物理坐标之间可以通过单位像元的尺寸进行转换<sup>[11]</sup>。

图像坐标系到相机坐标系的转换<sup>[12]</sup>, 是二维坐标系到三维坐标系的转换, 转换公式如下:

$$z_c w' = K[R]t w \quad (5)$$

式中:  $K$ ——相机内参矩阵;

$R$ ——旋转矩阵;

$t$ ——相机坐标系原点到世界坐标系原点的平移向量;

$w'$ ——成像平面上的目标投影点的齐次坐标;

$w$ ——空间中目标点的坐标。

#### 2.1.2 测量坐标系

测量坐标系以光测设备的照准轴、水平轴、垂直轴三轴的交点为原点,  $x$  轴是过坐标系原点的天文子午面与水平面的交线, 正方向指向大地北,  $y$  与原点处的水平面法线重合, 正方向指向天空,  $z$  轴正方向按照右手系的方式确定。

#### 2.1.3 发射坐标系

为了便于实现两个站的交会计算, 一般需要将在不同测量坐标系下的点转换到统一发射坐标系下表示。在发射水准面, 建立发射坐标系, 其原点位于发射台中心在发射工位水平面内的投影, 令经过发射点并与发射点铅垂线垂直的轴作为  $y$  轴, 正方向垂直水平面向上, 令发射点至落点的铅垂面与发射点水平面的交线为  $x$  轴, 指向落点方向(又称为射击方向)为正,  $z$  轴与  $x$ 、 $y$  轴构成右手坐标系。

相机坐标系、测量坐标系、发射坐标为三维坐标系, 它们转换关系可以通过坐标系统的平移和旋转实现<sup>[13]</sup>。

## 2.2 姿态计算模型

### 2.2.1 获取平面方程

如图 3 所示, 其中在弹体上的线段  $M_1M_2$  与弹体圆柱体的轴线平行, 线段  $AB$  和线段  $CD$  分别是线段  $M_1M_2$  在设备 1 和设备 2 成像平面上的投影,  $O_1$  和  $O_2$  分别为设备 1 和设备 2 的测量坐标系原点, 他们在发射系下的坐标分别是  $(x_{o_1}, y_{o_1}, z_{o_1})$  和  $(x_{o_2}, y_{o_2}, z_{o_2})$ 。

根据图像对应时刻的光测设备的方位角和俯仰角, 依据平面脱靶量的计算公式, 可以计算出成像

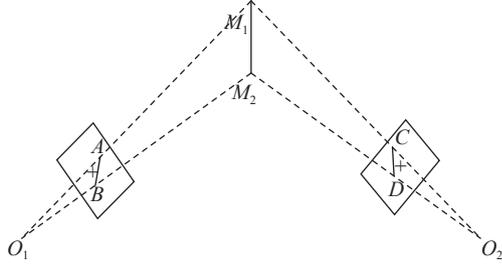


图3 姿态计算模型

平面上点的图像坐标系,再根据2.1节所介绍的坐标转换公式,可以获取成像平面上点A、B、C、D对应统一的发射坐标系下的坐标,分别为 $(x_A, y_A, z_A)$ 、 $(x_B, y_B, z_B)$ 、 $(x_C, y_C, z_C)$ 和 $(x_D, y_D, z_D)$ 。可以证明,如果点A和点B不为同一点时,向量 $O_1A$ 和 $AB$ 不会共线,因此向量 $O_1A$ 和 $AB$ 的向量积就是平面法的向量 $n$ 。又因为平面内任意一点 $X(x, y, z)$ 与 $O_1$ 点组成的向量与平面法向量的数量积为0,则可以得到平面 $O_1AB$ 的平面方程:

$$0 = n \cdot XO_1 = \begin{vmatrix} x - x_{O_1} & y - y_{O_1} & z - z_{O_1} \\ x_B - x_A & y_B - y_A & z_B - z_A \\ x_A - x_{O_1} & y_A - y_{O_1} & z_A - z_{O_1} \end{vmatrix} = a_1x + b_1y + c_1z + d_1 \quad (6)$$

式中:  $a_1, b_1, c_1$ —— $O_1AB$ 平面方程的系数;

$d_1$ ——常数项。

同理,可以得到平面 $O_2CD$ 的平面方程:

$$0 = a_2x + b_2y + c_2z + d_2 \quad (7)$$

式中:  $a_2, b_2, c_2$ —— $O_2CD$ 平面方程的系数;

$d_2$ ——常数项。

### 2.2.2 面面交会计算轴线姿态角

如图3所示,对于经过点 $M_1$ 和点 $M_2$ 的直线,属于平面 $O_1AB$ 和平面 $O_2CD$ 的公共直线,它是这两个平面的交线,因此经过点 $M_1$ 和点 $M_2$ 的直线方程可以表示如下:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

向量 $n_1(a_1, b_1, c_1)$ 和向量 $n_2(a_2, b_2, c_2)$ 分别是平面 $O_1AB$ 和平面 $O_2CD$ 的法向量,两个法向量同属于一个平面,直线 $M_1M_2$ 与向量 $n_1$ 和 $n_2$ 向量都垂直,则他们垂直于这两个向量形成的平面。因此,我们可以用向量 $n_1$ 和向量 $n_2$ 的向量积作为直线 $M_1M_2$ 的方向向量,即:

$$n_1 \times n_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix} = li + mj + nk \quad (9)$$

式中 $l, m, n$ 的值分别可通过各个系数行列式计算得到。

则弹体轴线的方向向量可以表示为: $(l, m, n)$ 。根据俯仰角的定义可以得到俯仰角 $\varphi$ 和偏航角 $\phi$ 的计算公式:

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\left(\frac{m}{\sqrt{l^2 + n^2}}\right) \\ \phi = -\arctan\left(\frac{n}{l}\right) \end{cases} \quad (10)$$

## 3 实验

### 3.1 轴线提取仿真实验

对于轴线的提取的精度,我们用仿真目标图像序列来进行验证。仿真目标为圆柱体,用投影的方式获取圆柱体目标在成像平面上的投影图像,图像用高斯分布的灰度模拟目标圆柱体上由于光线的变化引起的视觉变化。对于仿真目标图像,已知图像序列中的目标轴线与水平方向的所成角度,分别从 $0^\circ$ 以步长为 $1^\circ$ 旋转至 $90^\circ$ ,共91帧图像。如图4所示,在此展示图像序列中轴方向分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 的图像。

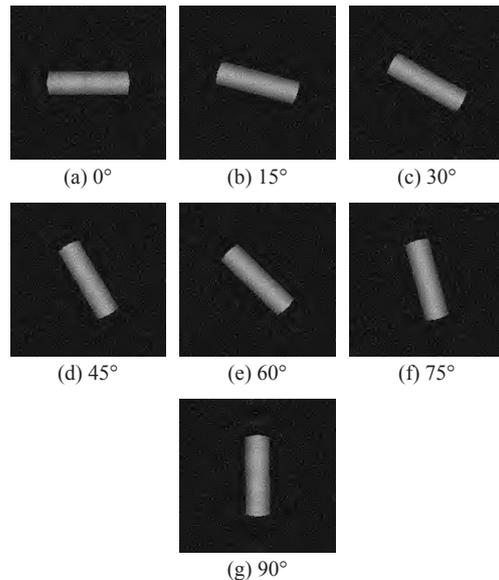


图4 仿真图像序列图像

利用本文中的方法对每一帧图像都提取出目标的轴线并计算轴线的角度。通过计算测量值与真值的差,来检验轴线的提取效果。如图5所示,为当Hough直线检测阈值为50时,检测到的91帧图像序列的检测值与真值的误差变化趋势图。

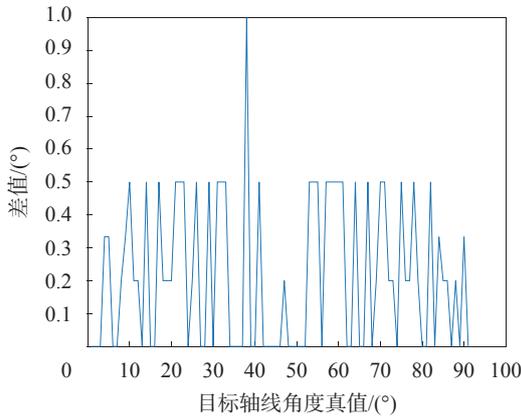


图 5 threshold=50 时的误差变化趋势

用同样的图像序列, 改变 Hough 直线检测的阈值, 分别让阈值取 40°、45°、50°、55°、60°来重复上述实验, 分别计算他们的均方差, 得到的结果如表 1 所示。从表中可以看出, 当 Hough 直线检测的阈值取不同值时, 会产生不同的影响, 对于不同背景、不同特性的目标需要使用不同的阈值来达到最好的轴线检测效果。

表 1 不同阈值下的误差均方根

序号	阈值	误差均方根
1	40°	0.308349°
2	45°	0.368957°
3	50°	0.314233°
4	55°	0.314233°
5	60°	0.372677°

### 3.2 实际图像测试

图 6~图 8 所示为提取实际目标图像的中轴线的过程, 其中图 6 表示对原图经过灰度转换、阈值分割再用 Canny 算子提取边缘到的目标边缘; 图 7 表示对边缘图像使用 Hough 直线检测的结果; 图 8 显示了目标轮廓、中心点及得到的轴线。从图中可以看到, 边缘提取算法能较完整地提取到目标弹体的边缘, 依据边缘提取到的轴线能较好反映弹体的轴线方向, 最后经过直线的聚类 and 轮廓分析, 能够准确地找到弹体的轴线。



图 6 Canny 边缘提取后的轮廓

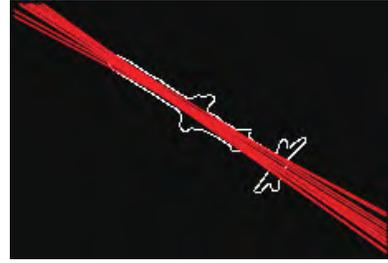


图 7 Hough 变换检测到直线

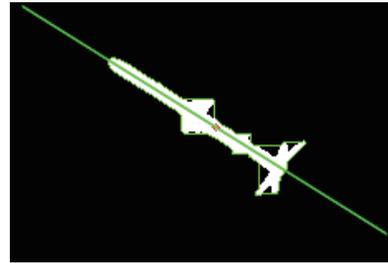


图 8 提取到的目标轴线和质心点

如图 9 所示, 实际外场测试时, 在  $o$  点建立发射坐标系, 光测设备布置在点  $c_1$  处和点  $c_2$  处, 目标弹首在点  $M$ , 弹体方向得的延长线经过世界坐标系原点  $o$ , 点  $M'$  是点  $M$  在平面  $xoz$  的投影且在点  $c_1$  和点的连线上, 并且  $oM'$  垂直平分连线, 则根据面面交会轴线姿态角的原理, 可以计算出偏航角和俯仰角。在 5 次实际测试中, 以弹体内部惯导系统测量的偏航和俯仰角作为标准值, 得出光测设备测量偏航和俯仰角的误差结果如表 2 和表 3 所示。

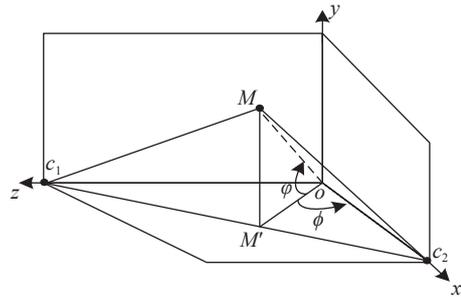


图 9 面面交会试验模型

表 2 偏航实际测量结果

弹序	标准值	测量值	误差
1	51.57°	51.34°	-0.23°
2	50.83°	51.26°	0.43°
3	45.64°	45.02°	-0.62°
4	44.25°	43.98°	-0.27°
5	40.72°	41.31°	0.59°

从测量结果中可以看出, 本文所述的方法在实际测量中, 偏航角误差在  $-0.62^{\circ} \sim 0.59^{\circ}$  之间, 俯仰角误差在  $-0.50^{\circ} \sim 0.54^{\circ}$  之间。由于本文中提出的方法

表3 俯仰角实际测量结果

弹序	标准值	测量值	误差
1	-60.36°	-59.82°	0.54°
2	-30.85°	-30.62°	0.23°
3	45.72°	45.35°	-0.37°
4	90.37°	89.87°	-0.50°
5	-45.16°	-44.98°	0.18°

是建立在双站交会的测量方法之上,因此测量目标必须同时保持在两个光电经纬仪的视场之内,并且交会角度应保持在60°~120°之间。为了实现弹体轴线的偏航角、俯仰角测量,应保证在光测设备捕获的图像中,弹体至少占40像素的长度。实际的测量结果,与边缘检测的参数和Hough直线检测阈值相关,需要根据实际情况具体调整。本试验中,图像宽度为320像素,高度为256像素,两个光测设备布站基线大约距离1 km, Canny边缘检测算法的高低阈值分别选择200和50, Hough直线检测阈值为120。

#### 4 结束语

本文对目标轴线提取与目标轴线姿态计算两方面进行了研究。关于目标轴线提取,首先使用了Canny边缘提取算法对目标边缘进行了有效保留,并对目标的轮廓应用Hough变换以及直线的聚类,得到目标轴线的特征参数。分析了面面交会法的实现原理及坐标系的变换方法。本文提出的方法在导弹靶场目标姿态测量试验中进行了测试,满足试验的要求。本文中的方法有助于增强靶场光学测量目标轴线姿态计算的能力。

#### 参考文献

- [1] 张双彪, 苏中, 李兴城. 旋转载体锥形运动的两轴旋转表征方法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(5): 1-6.  
ZHANG S B, SU Z, LI X. Double rotation presentation method for coning motion of spinning bodies[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(5): 1-6.
- [2] 杨会伟, 王伟, 杨会玲, 等. 高速CMOS相机图像采集系统关键技术研究[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(10): 24-26.  
YANG H W, WANG W, YANG H L, et al. High speed CMOS camera image acquisition system key technologies research[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2008, 27(10): 24-26.
- [3] PAUWELS K, RUBIO L, DIAZ J, et al. Real-time model-based rigid object pose estimation and tracking combining dense and sparse visual cues[C]//2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2013: 2347-2354.
- [4] GUO Y, CHEN G, MA H, et al. Researches on binocular vision pose measurement with selected feature points[J]. *Optik - International Journal of Light and Electron Optics*, 2016, 127(19): 8090-8095.
- [5] AMOR-MARTINEZ A, SANTAMARIA-NAVARRO A, HERRERO F, et al. Planar PÖP: Feature-less pose estimation with applications in UAV localization[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. IEEE, 2017: 15-20.
- [6] 于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2): 15-19.  
YU Q F, SUN X Y, CHEN G J. A New Method of Measure the Pitching and Yaw of the Axes Symmetry Object through the Optical Image[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2): 15-19.
- [7] 赵汝进, 刘恩海, 张文明, 等. 基于弱透视成像模型的目标三维姿态测量[J]. 光子学报, 2014, 43(5): 138-143.  
ZHAO R J, LIU E H, ZHANG W M, et al. Measurement of 3D pose of objects based on weak perspective model[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(5): 138-143.
- [8] 孙增玉, 高越. 基于视觉技术的非合作航天器相对位姿测量方法[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(4): 1-6.  
SUN Z Y, GAO Y. Relative position and attitude measurement for non-cooperative spacecraft based on binocular vision[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(4): 1-6.
- [9] 王继红, 吴伯彪, 张亚超, 等. 视觉和惯导信息融合小型无人机位姿估计研究[J]. 中国测试, 2021, 47(11): 134-140.  
WANG J H, WU B B, ZHANG Y C, et al. Pose estimation of small UAV based on vision and INS information fusion[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(11): 134-140.
- [10] 赵立荣. 基于机器视觉的靶场飞行器姿态测量方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.  
ZHAO L R. Methodology of attitude measurements for aircrafts in shooting range based on computer vision technique[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [11] 崔艺涵. 大目标高精度位置姿态测量技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.  
CUI Y H. Research on high precision position and attitude measurement technology of large target[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [12] 吴少石, 丁腾欢, 刘雪亚, 等. 基于骨架模型的空间图像配准方法研究[J]. 中国测试, 2021, 47(z1): 228-231.  
WU S S, DING T H, LIU X Y, et al. Research on space image registration method based on skeleton model[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(z1): 228-231.
- [13] 江铖, 黎俊, 步海军, 等. 近眼显示设备视场测试方法研究[J]. 中国测试, 2021, 47(z1): 199-202.  
JIANG C, LI J, BU H J, et al. Research on field of view test method of near eye display device[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(z1): 199-202.

(编辑:谭玉龙)