

文章编号 1004-924X(2004)02-0190-05

火箭弹离轨参数测量中的图像处理方法

王建军, 苏增立, 苏建刚
(中国人民解放军 63921 部队, 北京 100094)

摘要:根据高速摄像系统在火箭弹离轨参数测量中的应用,介绍了火箭弹离轨参数测量原理,提出了帧相减、相关滤波定位、轴线自动提取等多种图像处理方法,并将这些方法应用于工程实际。实践表明,在利用帧相减和边缘跟踪技术进行粗定位的基础上,采用相关滤波技术在小区域进行定位可以减少计算量,使定位精度达到0.2个像元,而在轴线自动提取中,用灰度图像形态学边缘检测方法,可使姿态角测量精度优于0.5°。

关键词:图像处理; 轴线自动提取; 火箭弹; 离轨参数

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Image processing for measurement of rocket's initial trajectory parameters

WANG Jian-jun, SU Zeng-li, SU Jian-gang

(The CPLA 63921 Unit, Beijing 100094, China)

Abstract: Using the application of high-speed photography for measurement of rocket's initial trajectory parameters, the measurement principle of rockets' initial trajectory parameters is introduced, several image processing methods, such as inter-frame-correlation, correlation filter, axes auto-detection are proposed for engineering applications. Practical use shows that rough positioning by inter-frame-correlation and edge tracking + positioning in small zone by correlation filter can reduce computation work and reach a positioning accuracy of 0.2 pixel, and the use of edge detection for axes auto-detect may keep the attitude angle measurement accuracy better than 0.5°.

Key words: image processing; axes auto-detection; rocket; initial trajectory parameter

1 引言

火箭弹离轨速度、加速度及弹体下沉量等离轨参数是评价火箭弹的重要技术指标,是常规靶场兵器试验中的重要测试内容。传统的靶场测量方法是采用胶片式高速摄影机将火箭弹离轨时的

图像记录在胶片上,事后通过对胶片的人工分析判读完成离轨参数的测量^[1-2]。目前,由于传感器技术和大容量数据存储技术的发展,常规靶场采用了新型数字式高速摄像系统,用于火箭弹离轨参数测量。本文主要针对数字式高速摄像系统,开展了部分图像处理方法的研究,用于火箭弹离轨参数测量。

2 火箭弹离轨参数测量原理

火箭弹离轨参数的测量实际上可归结为目标空间位置和时间的测量。由于靶场高速摄像系统通常都配置有时码终端^[3],时间的测量可以由每帧图像对应的绝对时间来确定。对目标空间位置的测量,则采用外定标法完成。顾名思义,外定标法就是在光学设备视场可覆盖范围的空间区域内设置两个参考基准点(以下称为“参考点”),参考点的间距已知或可测,视场内目标点到原点的距离(例如目标到炮口的距离)则通过参考点的间距求得。这种测量方法通常用于非跟踪式的高速摄像设备。

为保证测量精度,通常对设备布站有一定的要求,主要归纳为以下 3 个方面:

设备应布设在炮位侧方一定距离处。为数据处理方便,摄像系统光学视轴应与目标飞行方向所在的铅垂面(本文中定义为弹道射面)垂直,这样可保证弹道射面与摄像系统光电探测器靶面平行;

两个参考点的连线应在同一水平面内,且与弹道射面平行,由此可形成数据处理时坐标系的水平基准线;

应保证目标、坐标原点以及两个参考点包含在摄像机的视场内。

2.1 有关术语定义

(1) 射面:过炮口的铅垂线和弹道射向构成的平面;

(2) 射角(θ):炮身管与水平面之间的夹角。数据处理时,该值取实际射击时的装定值;

(3) 姿态角:弹尖与弹尾连线(弹轴线)相对于水平面的夹角;

(4) 下沉角:射角与姿态角之差;

(5) 弹体下沉量:弹丸重心偏离理论飞行高度的程度。若能够给出弹丸重心相对于弹尖或弹尾的位置,弹体下沉量可由弹尖或弹尾坐标、姿态角及射角求出。

2.2 坐标系定义

2.2.1 图像坐标系

坐标原点 O :图像左下角;

X 轴:水平方向,向右为正(单位:像素数);

Y 轴:垂直方向,向上为正(单位:像素数)。

2.2.2 探测器靶面坐标系

坐标原点 O :有效输出靶面的右上角;

X 轴:与图像坐标系 x 轴平行,方向相反(单位:mm);

Y 轴:与图像坐标系 y 轴平行,方向相反(单位:mm)。

2.2.3 炮口坐标系

坐标原点 O :炮口;

X 轴:射面内过原点与水平面平行的射线,指向射击方向为正(单位:mm);

Y 轴:射面内过原点与水平面垂直的射线,向上为正(单位:mm);

Z 轴:与 X 、 Y 轴组成右手螺旋关系(单位:mm)。

2.3 坐标变换

从图像坐标系到靶面坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot w_x w_y \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, w_x 、 w_y 分别为探测器像元在 x 和 y 方向的宽度;通常 $w_x = w_y$; x 、 y 分别为目标像点在图像坐标系中的取值; x 、 y 分别为目标像点在靶面坐标系中的取值。

从靶面坐标系到炮口坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos & \sin \\ -\sin & \cos \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, x_0 、 y_0 为炮口像在靶面坐标系中的坐标值;是由于摄像系统在水平方向不可能调整到绝对水平,靶面坐标系 x 轴的水平倾角; m 为摄像系统影像缩小倍率。

如果参考点与弹道平面不在同一平面内,摄像系统到两参考点连线所在垂面的距离与到弹道平面的距离分别为 d_1 、 d_2 ,两参考点在炮口坐标系和在靶面坐标系中的距离分别为 l 、 l ,则由三角形相似性可得到弹道平面内目标影像缩小率为:

$$m = \frac{l}{l} \times \frac{d_1}{d_2}, \quad (3)$$

在不同图像帧,通过提取目标、参考点(两个)、炮口在图像坐标系中的位置以及目标的姿态角,就能够通过上面 3 个式子计算出目标的位置,因此很容易求出目标的速度、加速度值以及火箭弹离轨的其他参数^[4]。

3 图像处理方法

高速摄像系统拍摄的图像实时存储在系统本身的内存(DRAM)中,事后可转存到光盘或活动硬盘。该系统图像处理的目的就是从这些光盘或活动硬盘存储的图像数据中提取计算火箭弹离轨参数所需要的弹尖、参考点、炮口在图像坐标系的准确位置以及火箭弹的姿态角。为了快速准确提取上述位置和角度,图像处理主要采用了以下技术手段。

3.1 帧相减技术

帧相减技术又称数字减影法、差图像法,其原理非常简单,直接将两幅图相减。由于高速摄像系统采用固定式非跟踪方式,标杆及炮身等静止不动,天空背景变化缓慢,在相邻两帧图像(高帧频)中基本保持不变。对相邻两帧的图像相减,得到新的图像。

$$f(i, j) = | f_k(i, j) - f_{k-1}(i, j) |$$

如果目标不动,则得到的新图像为全黑(灰度为 0);如果目标在运动,则得到背景处为 0 而目标区域不为 0 的图像。图像中沿着目标运动方向,即火箭弹弹头和弹尾部分为亮目标,而其他区域为全黑。在此基础上,采用边缘跟踪算法^[5],可以快速定位火箭弹弹尖(或弹尾)的位置,其精度在 1~2 个像素内。

3.2 相关滤波定位技术

为提高系统精度,该系统采用亚像素处理方法,其中最主要的是相关滤波定位技术。此方法是根据目标形状和大小等特征制作一个数字模板,然后用此模板对图像进行相关滤波,得到一幅相关系数图像。模板的大小可以根据目标的大小及处理的需要进行调整。一幅数字图像一般用矩阵 F 表示为:

$$[f(i, j)]_{K \times L}$$

i, j 取整数, $0 \leq i \leq K-1, 0 \leq j \leq L-1$ 。

数字模板的大小一般小于图像的大小,可用矩阵 M 表示为:

$$[m(i, j)]_{(2M+1) \times (2N+1)}$$

i, j 取整数, $-M \leq i \leq M, -N \leq j \leq N$ 。

相关系数图像可表示为:

$$[c(k, l)]_{(K-2M) \times (L-2N)}$$

k, l 取整数, $M \leq k \leq K-M-1, N \leq l \leq L-N-1$ 。

$$c(k, l) = \frac{\sum_{i=-M}^{M} \sum_{j=-N}^{N} m(i, j) f(i+k, j+l)}{[\sum_{i=-M}^{M} \sum_{j=-N}^{N} m^2(i, j) \sum_{i=-M}^{M} \sum_{j=-N}^{N} f^2(i+k, j+l)]^{1/2}} \quad (4)$$

当图像与模板完全一致时,相关系数取 1;否则,相关系数小于 1。一般情况下,由于噪声干扰和误差的存在,相关系数均小于 1,但相关系数应在目标点位置取极值。因此,通过求极值的方法可确定目标的精确位置。

要提高定位的精度,数字模板的制作十分关键,因此必须针对不同的目标制作不同的模板。本系统根据需要,制作了参考点模板、炮口模板、弹尖模板,同时根据成像大小、火箭弹射角的不同,还可以调整模板的大小和系数。

从式(4)中可以看出,相关系数的计算量较大。为了缩短处理周期,减小计算量,应尽量缩小数字模板和相关系数图像阵的大小。数字模板受目标成像大小的制约,人为减小模板的大小反而会造成位置误差,影响测量精度。所以缩小相关系数图像阵,必须保证目标粗位置的准确性。弹尖的粗位置提取,采用 3.2 部分提到的帧相减技术和边缘跟踪技术,可获得 1~2 个像素的精度。参考点和炮口因在整个序列图像中的位置保持不变,可以先采用半自动提取方法,由人工在初始帧图像点取参考点和炮口的粗略位置,再采用相关滤波技术获得它们的精确位置。

3.3 轴线自动提取技术

火箭弹基本上是轴对称的,从侧面任何位置观察,其边缘轮廓相对于其轴线都是对称的。从上面思路出发,先对图像进行边缘检测,获取目标的边缘轮廓,然后通过轴线提取技术获得火箭弹在图像坐标系中的中轴线方程。

边缘检测是数字图像处理与分析中最基本的手段,其检测结果直接决定着后续轴线提取的精度和结果。传统的边缘检测方法很多,如 Laplace 算子、Sobel 算子和梯度算子等,这些边缘算子主要是采用高通滤波技术,对图像边缘探测效果不是很好,尤其是在目标和背景复杂、图像噪声较大时,更是如此。通过对几种方法比较,本文主要采用了灰度图像形态学边缘检测方法^[6]。数字图像

这个集合集中反映了物体的形状、面积、纹理、灰度(或色彩)等,该方法基于集合的观点,利用形态学中的腐蚀、膨胀等基本运算,提取目标的边缘细节(见参考文献[6]),其最大特点是经过边缘检测处理后的图像,在边缘的连续性和各向同性方面都优于传统方法,充分保留原图像细节,十分有利于图像的边缘定位处理。

从火箭弹轮廓边缘提取其中轴线,可以先对两条边缘进行直线拟合,然后计算两直线的中心线,即中轴线^[7]。本文采取简化的轴线自动提取技术,直接从边缘点提取中轴线。首先将边缘检测的图像二值化^[8],得到边缘点的点集。从理论上可以证明,对于细长形轴对称目标,边缘点到轴线上的距离和最小。基于这一理论,寻找目标的轴线方程,就是寻找边缘集合点到某直线距离和最小的直线。由火箭弹的射角(θ)和弹尖的位置(x_1, y_1)可以计算出轴线的初始方程

$$y = k \cdot (x - x_1) + y_1, \quad (5)$$

其中, $k = \tan(\theta + \alpha)$ 。

因此,边缘点到直线的距离和为

$$S = \frac{|k \cdot (i - x_1) + y_1 - j|}{\sqrt{k^2 + 1}}, \quad (6)$$

其中, (i, j) 为边缘点在图像坐标系中的坐标值;

表示对所有边缘点求和。在实际应用中,考虑到弹的尾部由于火焰的影响,造成边缘的不规则,边缘点的选取时,舍去尾部部分。

从初始直线开始,采用“爬山”法,可以使直线越来越逼近目标的轴线。当所得到的直线满足姿态角测量精度要求时,即可终止“爬山”过程。此时,目标的姿态角为

$$\theta = \arctan(k) - \alpha. \quad (7)$$

参考文献:

- [1] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京:科学出版社,1990.
TAN X X. *Test & measurement techniques by high speed photography* [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese).
- [2] THOMAS D L. High-speed electronic memory video recording techniques[J]. *SPIE*, 1991, 1539:164-173.
- [3] 苏增立, 王建军. 高速电视用于火箭弹离轨参数测量[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(4): 80-83.
SU Z L, WANG J J. Research on the measurement of initial trajectory parameter by using a high speed photo-electronic camera [J]. *Journal of Aircraft Measurement and Control*, 2003, 22(4): 80-83. (in Chinese).
- [4] 贺忠海, 王宝光. 图像处理中的边缘跟踪法研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 261-262.
HE ZH H, WANG B G. Study on boundary tracking method used in image processing[J]. *Journal of Instrument & Meter*, 2001, 22(3): 261-262. (in Chinese).
- [5] 冯桂, 桂预风. 灰度图像边缘检测中的形态学方法[J]. 遥感信息, 2000, 3:12-14.

4 方法实现

图像处理部分主要包括图像预处理(图像增强、伪彩色显示、放大、边缘提取等)、参数校准(输入参考点的距离、射角、摄像系统帧频等)、半自动提取、自动提取、帮助等部分。为便于更好理解,图1描述了主要部分方法实现的程序流程图。

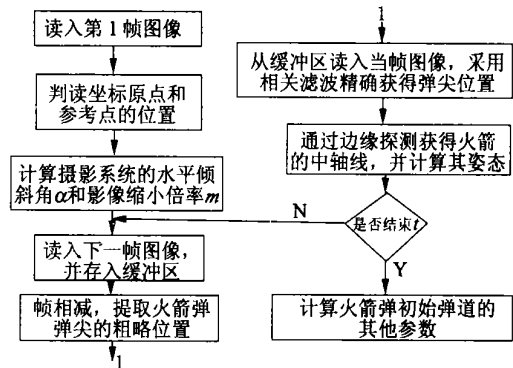


图1 主程序的流程图

Fig.1 Procedure of main program

5 结束语

工程实践表明,本文提出的帧相减、相关滤波技术和轴线自动提取等图像处理方法,可以解决火箭弹离轨参数测量中的图像数据处理问题。这种方法算法简单,在利用帧相减和边缘跟踪技术进行粗定位基础上,采用相关滤波技术在小区域进行精确定位,从而减小计算量,提高定位精度,其定位精度可达到0.2个像元;在轴线自动提取中,采用灰度图像形态学边缘检测方法,使姿态角测量精度优于0.5°。

- FENG G, GUI Y F. Morphology methods using in grade image edge detection [J]. *Remote Sensing Information*, 2000, 3: 12-14. (in Chinese).
- [6] 于起峰, 孙祥一. 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. A new method of measuring 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. (in Chinese).
- [7] 尹志武, 程维明. 条纹图的图像处理方法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1): 51-58. YIN ZH W, CHENG W M. Image processing about fringe pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(1): 51-58. (in Chinese).

作者简介:王建军(1970-),男,湖南株州人,1993年毕业于国防科学技术大学应用物理系,主要研究方向为卫星、导弹光学测控设备总体工作,曾获部委级科技进步二等奖两项、三等奖两项,发表论文多篇。

向您推荐《液晶与显示》期刊

中国最早创办的液晶学科专业期刊

中国唯一的液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊

中国光学光电子行业协会液晶分会会刊,中国物理学会液晶分会会刊

英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(P)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

中文核心期刊,影响因子为 0.702

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态。本刊内容丰富,信息量大,涵盖面广,可读性强。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。同时,竭诚欢迎社会各界洽谈广告业务、合作组织技术交流与信息发布活动。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价 15.00 元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。广告经营许可证号:2200004000068。

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

地 址:长春市东南湖大路 16 号

国内统一刊号:CN 22-1259/O4

《液晶与显示》编辑部

国际标准刊号:ISSN 1007-2780

国际刊名代码(CODEN):YYXIFY

邮 编:130033

电 话:(0431) 6176862

传 真:(0431) 5682346

网 址:www.ciom.ac.cn

E-mail:yjxs@ciomp.ac.cn