

文章编号:1001-5078(2018)01-0056-05

· 红外技术及应用 ·

飞行器尾焰红外图像定位方法研究

李晓冰

(92941 部队,辽宁 葫芦岛 125000)

摘 要:针对红外图像测量中,飞行器尾焰受飞行轨迹及气流影响,形态变化复杂,常规目标定位方法难以实现的问题。本文按照目标测量中图像判读的具体要求,依据尾焰形成的原理,采用重心法和 Hough 变换技术准确检测尾焰的中轴线和前端的半圆。提出了一种基于 Hough 变换的飞行器尾焰跟踪方法,克服了尾焰形态变化和镜头衍射对目标图像跟踪的影响,实现了尾焰前端的稳定跟踪和精确定位。实验结果表明:该方法跟踪稳定,定位精度高,适用于各种情况下的尾焰定位,且算法简单,执行效率高。

关键词:测量图像;尾焰;红外;Hough 变换;定位

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.010

Research on the location method of aircraft tail flame with infrared image

LI Xiao-bing

(PLA Unit 92941, Huludao 125000, China)

Abstract: In the infrared image measurement, the tail flame of the aircraft is affected by the flight trajectory and air flow. The morphological change is complex, so the conventional target location method is difficult to realize the location. Aim at this problem, according to the specific requirements of image interpretation in target measurement and according to the principle of tail flame formation, a tracking method of aircraft tail flame based on Hough transform is proposed. The center line of tail flame is accurately detected by centroid method and Hough transform. The method overcomes the influence of the change of the tail flame and the diffraction of the lens on the target image tracking, and realizes the stable tracking and precise positioning of the tail flame. The experimental results show that the method is stable and accurate, and is suitable for tailing localization in various situations, and the algorithm is simple and has high efficiency.

Key words: measurement image; tail flame; infrared; Hough transform

1 引 言

随着传感器的分辨率和拍摄频率的提高,光学测量在飞行器弹道测量中得到广泛的应用。在飞行器测量中,一般将尾焰前端作为测量点,但是,由于尾焰为流体状态,形状变化复杂。其次,

由于飞行器轨迹的变化,尾焰不可能保持稳定的状态,即使状态大致稳定,由于轨迹和拍摄方向的变化,导致尾焰的成像形状也发生变化^[1]。因此,常规的匹配、重心等跟踪方法并不适用于不断变化的尾焰,基于非参数的跟踪方法也难以适应。

而目前大多数研究都是基于弱目标和标准刚体目标,未发现对此方面的研究文献,但是,随着传感器感应能力的逐渐增强,此类尾焰目标成像的情况将越来越多。

本文通过长期的飞行器尾焰红外测量图像分析工作,发现其图像多数灰度层的尾焰前端一般成半圆形,且半圆的中垂线基本与尾焰中轴线重合。因此,提出了一种利用 Hough 变换和 FCM 算法,检测中轴线和半圆的尾焰前端的跟踪定位方法,并对此方法进行了算法精简,取得了良好的效果。

2 尾焰特性及定位原理

飞行器尾焰在红外和可见光图像上的成像是不同的^[2],且飞行器处于不同的飞行阶段时,尾焰自身的形态也是不断变化的,因此,估算飞行器喷口位置难度较大。根据尾焰的成像机理及喷焰的流动结构可知^[3],尾焰在可见光图像中,中间明亮的锥形区域是拦截冲波与正冲波之间的处于膨胀状态的气流,以及过渡段的核心区。飞行器高速运动产生的推举力使尾焰锥形区域的头部成半圆形并偏离喷口位置。根据对拦截冲波的形成和马赫盘半径结构分析,一般尾焰在图像上轴线与头部半圆的交点即为尾焰头部。对于红外图像,尾焰中间气流主体周围的边界区域具有明显的温度梯度场,在红外图像上有典型的灰度区域轮廓线,并且轮廓线向中心轴线靠拢,其轴线与尾焰前端相交。

根据以上分析,尾焰前端应当为一圆形,但是,由于镜头衍射的影响,前端不可能是光滑的圆形。因此,本方法首先采用 Otsu^[4]方法对图像进行二值化,提取圆锥形的尾焰图像,并利用重心法得到初步中轴直线。但是,由于尾焰完全垂直或水平的情况很少,靠近前端的线段必然弯曲。因此,利用 FCM 均值聚类方法对得到中轴线进行聚类得到实际中轴线,在中轴线及其延长线上利用 Hough^[5-7]方法得到尾焰前端半圆,将中轴线延长,与半圆的交点即为尾焰的实际前 endpoint。由于实际红外图像的边缘灰度变化平缓,噪声较大,因此,得到重心中轴线和尾焰边缘不可能很规整。因此,本方法采用聚类及 Hough 的投票性质消除噪声,得到实际的中轴线及尾焰前端半圆,算法原

理图和流程图如图 1 和图 2 所示。

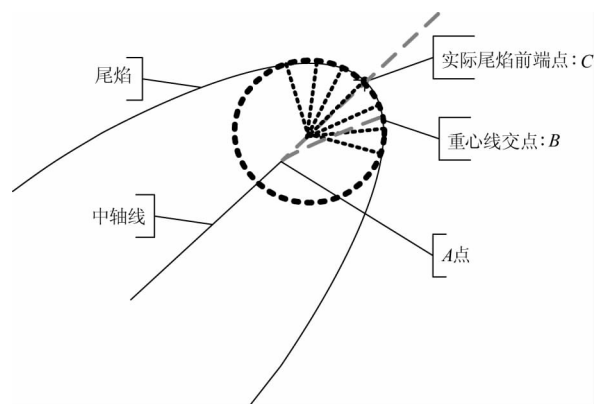


图 1 算法原理图

Fig. 1 The principle diagram of the algorithm

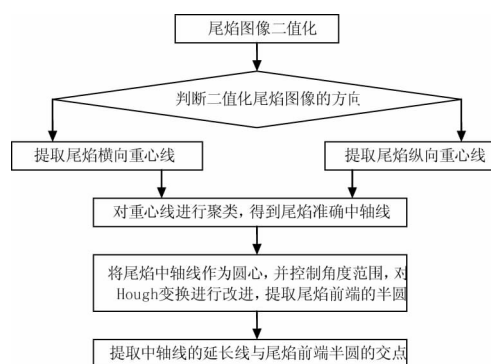


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 算法实现

3.1 尾焰近似中轴线的提取

按原理尾焰前端图像应当为一半圆形图像,但是,由于成像环境影响及光学镜头衍射的作用,其前端图像不规则并伴随放射状衍射光条。由于衍射光条灰度远远小于尾焰灰度,因此,利用 Otsu 算法对此区域的图像进行二值化, Otsu 具体算法见文献[4],可消除图像中的放射状光条。

其次,通过二值化尾焰图像的 x 和 y 方向的边缘坐标,判断二值化图像的方向,横向和纵向尾焰的

近似中轴点分别为: $\left(x_i, \frac{\sum_{j=1}^{\text{col}} y_j}{\text{col}}\right)$ 和 $\left(\frac{\sum_{j=1}^{\text{row}} x_j}{\text{row}}, y_i\right)$, 其

中, col 和 row 为尾焰二值化图像中对应此坐标一行或列的像素总数。

3.2 尾焰准确中轴线的提取

由于尾焰不可能处于完全垂直或水平方向,因此,其靠近尾焰前端的线段必然弯曲,如图 1 所示。

中轴线自 A 点开始弯曲,与尾焰前端交于 B 点。但是,由于尾焰在空中一般存在较长,几十米,甚至几百米,所以,尾焰的中轴线段绝大多数必然为直线。当然,有可能存在一些断点和噪声的影响。因此,本方法首先利用 Hough 变换提取重心线中一定长度的线段,其次,为了消除噪声,利用 FCM 算法对这些线段进行聚类,得到最终的中轴线。

(1) 提取重心线段

Hough 是一种将图像空间的像素坐标映射到参数空间的算法,具体算法见参考文献[5]~[7],重心线的坐标为 (x_i, y_i) 。首先,采用 Hough 变换,将重心线转换为极坐标曲线,然后,利用量化角度间隔 $\Delta\theta$ 和长度 $\Delta\rho$ 对极坐标曲线参数空间进行分区,以累积投票的方式得到各局部峰值,具体算法如下:

由于实际 Hough 变换计算量很大,因此,为减小计算量,本文对算法进行改进。首先,缩小 θ 的范围,对 (x_i, y_i) 进行统计,得到最大点坐标 $(x_{\max}, y_{\max})$ 和最小点坐标 $(x_{\min}, y_{\min})$,则 θ 范围为:

$$\begin{aligned}\theta_{\max} &= \arctan \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \\ \theta_{\min} &= \arctan \frac{y_{\min} - y_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}\end{aligned}\quad (1)$$

设 $\Delta\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{h}$, 利用 $\Delta\theta$ 将 θ 离散化,离散

值为 θ_q , $q = 1, 2, 3, \dots, h$, $h = 180$ 对于图像中的像素点 (x_i, y_i) , 计算 $\rho_{iq} = x_i \cos \theta_q + y_i \sin \theta_q$, 利用计算结果 ρ_{iq} 得到矩阵 ρ 。设量化间隔 $\Delta\rho = 1$, 对 ρ_{iq} 进行量化,离散值为 ρ_j , 得到矩阵 ρ_{ijq} , 其中, $j = 1, 2, 3, \dots, l$ 。按 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$ 建立参数累积矩阵 ρ' , 并置 0。统计矩阵中的元素 $\rho'(i, j, q)$ 相邻的间隔为 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\rho$ 的交点数。即: $A(j, q) = A(j, q) + 1$ 。得到局部峰值矩阵 $A(\rho_1, \theta_1)$, $A(\rho_2, \theta_2)$, $\dots$, $A(\rho_n, \theta_n)$, n 为峰值矩阵单元总数。

(2) 提取中轴线

由于受到噪声等因素的干扰,得到的各个线段并不一定在一条直线上,因此,以最小类内平方误差和为聚类准则,对局部峰值数据进行聚类^[8-9],具体算法如下:

利用峰值矩阵 A 、聚类中心和加权隶属度,对目标函数进行迭代优化。FCM 算法^[10]的目标函数为:

$$J_m = \sum_{k=1}^c \sum_{f=1}^n \mu_{kf}^m \|X_f - v_k\|^2 \quad (2)$$

式中, $X = \{X_f, f = 1, 2, \dots, n | X_f \in R^d\}$ 为数据集,表示峰值矩阵 A 的一阶化; c 为聚类的类数,即峰值矩阵 A 所分的类数,取 3 为宜,且 $2 \leq c \leq n - 1$; n 为矩阵单元总数; $\|\cdot\|$ 为欧拉距离; m 为模糊加权指数,且 $1 < m < \infty$, 取值 1.5; $V = \{v_k\} (k = 1, 2, \dots, c)$ 为聚类中心矩阵; $U = \{u_{kf}\} (k = 1, 2, \dots, c; f = 1, 2, \dots, n)$ 为模糊隶属度矩阵,其满足以下约束条件:

$$\{u_{kf} \in [0, 1] \mid \sum_{k=1}^c u_{kf} = 1, \forall f, 0 < \sum_{f=1}^n u_{kf} < n, \forall k\} \quad (3)$$

式中, u_{kf} 的含义为峰值矩阵中的 X_f 属于第 k 类的程度,即隶属度; v_k 是第 k 类的中心。聚类中心和隶属度函数的迭代更新表达式为:

$$u_{kf} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left(\frac{\|X_f - v_k\|}{\|X_f - v_j\|} \right)^{2/(m-1)}} \quad (4)$$

$$v_k = \sum_{f=1}^N u_{kf}^m X_f / \sum_{f=1}^N u_{kf}^m \quad (5)$$

因为,在此聚类结果中,数据间相关性最强并与相差较近的数据为第一个类,而最佳峰值一般在第一个类中,所以,利用此峰值 X_f 的 $A(\rho, \theta)$ 得到尾焰的中轴线。

3.3 基于改进 Hough 的尾焰前端的提取

理想情况下只要将中轴线延长,与尾焰前端相交,即可得到尾焰前 endpoint,但是,由于噪声及镜头衍射的影响,尾焰前端不可能十分平滑。直接交叉产生的前 endpoint 必然存在误差。根据上面的分析,尾焰前端理想状态下为一半圆,因此,为了得到真实的尾焰前端,仍采用 Hough 变换进行检测,将前端半圆表示为:

$$\begin{cases} a = x - r \cos \theta \\ b = y - r \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

其中, (a, b) 为圆心; r 为半径; (x, y) 为尾焰图像中圆周上的像素点, $r \in [R_{\min}, R_{\max}]$ 。其中, $R_{\min}$ 可取 0, 而 $R_{\max}$ 可取中轴线长度,利用量化间隔 $\Delta r = 1$, 将 r 离散化为 r_j ; 利用前面得到的 $\Delta\theta$, 将 θ 离散为 θ_q , 其中, $q = 1, 2, 3, \dots, h$, $h = 180$, 得到累加器阵列 $B(a, b, r)$ 。检测时,先计算图像梯度值,并求边缘点,然后,利用 θ 和 r 参数进行 r 遍历,并累加 $B(a, b, r)$ 。则图像上任一像素点 (x_i, y_i) 一定对应

参数空间 (a_i, b_i, r_i) 的一个圆锥面。图像尾焰前端圆上所有的点,必然对应参数空间的所有圆锥面,并交于一点 (a_0, b_0, c_0) ,则该点对应于圆,即为尾焰前端圆的圆心 (a_0, b_0) 和半径 r_0 。

可以看出,Hough 变换计算量是十分巨大的,因此,本算法对其进行改进,根据尾焰特性可知,其半圆的圆心必然在尾焰中轴线上或其延长线上。由于传感器能够成像尾焰时,一般处于飞行器速度较低,距离较近的情况。此时尾焰宽度较大,即半圆半径较大,中轴线一般能够包含圆心。只有在极端情况下,才在延长线上。因此,可将累加器修改为

$$\left(x_i, \frac{\sum_{j=1}^n y_j^i}{n}, r_w\right) \text{ 或 } \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_j^i}{n}, y_i, r_w\right), \text{ 其中, } i \text{ 为中轴线的}$$

像素序号, w 为不同的半径,其移动距离为整像素,算法按两层进行循环,以即求中轴线上每一点

$$\left(x_i, \frac{\sum_{j=1}^n y_j^i}{n}\right) \text{ 或 } \left(\frac{\sum_{j=1}^n x_j^i}{n}, y_i\right) \text{ 为圆心, } r_w \text{ 为圆的半径,由}$$

于在中轴线上取圆心,因此,圆心点有限,可大大提高效率。得到圆后,中轴的延长线与半圆交于图 1 的 C 点,即为尾焰前 endpoint。

4 实验及结果分析

为了全面检测算法的跟踪定位性能,采用一幅带有镜头衍射,且成倾斜状态的红外尾焰测量图像对算法进行验证,实验结果如图 3~图 6 所示。



图 3 原始图像
Fig. 3 Original image

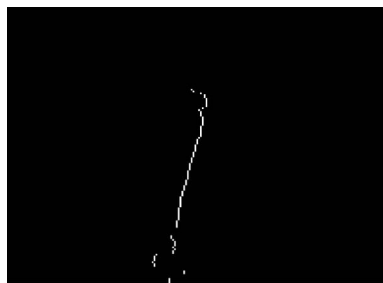


图 4 重心线图像
Fig. 4 Focus line image

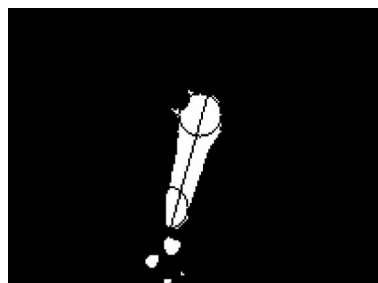


图 5 聚类及 Hough 变换图像
Fig. 5 Clustering and hough transform of the image

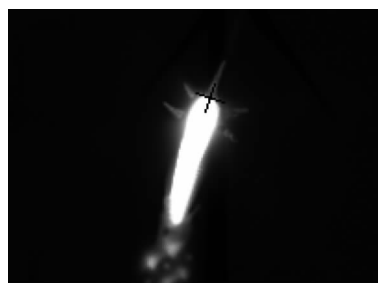


图 6 定位结果
Fig. 6 Positioning results

从图 4 中可以看到:重心线到尾焰前部时,由于受到前端半圆形的形状及镜头衍射线的影响,重心线发生明显的弯曲,所以,采用重心线作为中轴线与尾焰前端直接相交的方法是不可行的。对重心线进行均值聚类后的直线如图 5 所示,由图中可以看出,由于镜头衍射及噪声的影响,尾焰前端并不光滑。因此,利用聚类直线与尾焰前端直接相交,误差也较大。所以,以此直线为圆心,对图像进行 Hough 变换,从图中可以看到:所得的圆并不完整,说明此尾焰图像受噪声等干扰较大,从另一个方面也可以说明,Hough 变换投票机制的抗噪声能力是很强的,图中 Hough 的累积点已小于所求圆总点数的一半,尾焰前端半圆仍能检测准确,说明此算法对图像质量具有较大的适应能力,图 6 为定位结果图像,其尾焰前端坐标为 $(109, 48)$,经过弹道测量结果反算,此帧图像尾焰前端的实际坐标为 $(108.6, 47.5)$,误差在一个像素之内,因此,此结果符合尾焰图像的判读精度要求。

从以上实验可以看出:对于尾焰形状的变化和镜头衍射的干扰及噪声的影响具有较强的适应能力,能够实现准确定位。

5 结论

本文提出的基于 Hough 变换的飞行器尾焰跟踪方法解决了光学测量中尾焰前端稳定跟踪的难

题,且算法跟踪稳定,定位准确,算法简单,执行效率高。尤其在飞行器平飞阶段效果更佳,而飞行器平飞阶段几乎占90%以上,所以,此方法应用极为广泛。同时,由于本方法采用了Hough技术,因此,对于尾焰图像的噪声有很强适应性,可应用到各种成像较差的尾焰图像中。由于飞行目标的光学测量基本上都以尾焰前端为定位点,所以,此方法大大提高了光学测量的目标轨迹精度。

参考文献:

- [1] ZHANG Zhibo, TONG Zhongxiang, WANG Chaozhe, et al. Simulation of plume IR image based on figure envelope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1788 – 1792. (in Chinese)
张志波, 童中翔, 王超哲, 等. 外形包络面的尾焰红外图像仿真[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1788 – 1792.
- [2] SUN Dandan, GAO Jiaobo, SUN Kefeng. Aircraft and tail flame IR simulation [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2016, 35(8): 62 – 65. (in Chinese)
孙丹丹, 高教波, 孙科峰. 飞机及尾焰的红外仿真[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(8): 62 – 65.
- [3] LU Yuan, FENG Yunsong, LING Yongshun, et al. Infrared radiations of aircraft exhaust plume and its passive ranging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1660 – 1664. (in Chinese)
路远, 冯云松, 凌永顺, 等. 飞行器尾焰红外辐射及其被动测距 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1660 – 1664.
- [4] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. *IEEE Trans*, 1979, SMC9(1): 62 – 66.
- [5] SUN Quan, AN Bowen. Infrared small target detection and trajectory fitting under sea-sky background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 46(11): 1419 – 1423. (in Chinese)
孙权, 安博文. 海天背景下红外小目标检测与轨迹拟合 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(11): 1419 – 1423.
- [6] YE Feng, CHEN Canjie, LAI Yizong. Fast circle detection algorithm using sequenced Hough transform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 1105 – 1110. (in Chinese)
叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1105 – 1110.
- [7] TIAN Yuexin. Application of hough transform in search and surveillance tracking [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(11): 1141 – 1143. (in Chinese)
田岳鑫. Hough 变换在小目标检测中的应用 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(11): 1141 – 1143.
- [8] Bezdek J C. Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms [J]. New York: Plenum, 1981.
- [9] CHEN W J, GIGER M L, BICK U. A fuzzy cmeans (FCM)-based approach for computerized segmentation of breast lesions in dynamic contrast-enhanced MR images [J]. *Academic Radiology*, 2006, 13(1): 63 – 72.
- [10] ZHU Yu, JIANG Linjia. Image segmentation based on GA-FCM clustering and probability relaxation [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(4): 392 – 394. (in Chinese)
朱煜, 江林佳. 基于遗传模糊 C-均值与概率松弛法的图像分割研究 [J]. *激光与红外*, 2008, 38(4): 392 – 394.