

弹丸目标红外图像的阈值分割算法研究

尚在飞, 王春平, 付强
(军械工程学院, 石家庄 050003)

摘要: 针对红外弹丸目标图像的特点, 在分析比较了几种传统的基于直方图阈值分割算法的基础上, 探讨了提高该类算法实时性的途径。结合弹丸目标体积固定的特点, 提出了一种基于 p 率直方图的快速算法。在分割效果上提高了对弹丸目标提取的准确性, 在运行时间上与传统直方图阈值分割算法相比平均降低了 30% 以上。在 Matlab 环境下进行了仿真, 验证了算法的有效性和实时性。

关键词: 红外小目标; 目标检测; 弹丸目标; 图像分割; 直方图方法; p 率直方图

中图分类号: V271.4; TP751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)01-0034-05

A Threshold Segmentation Algorithm for Infrared Images of Projectile Target

SHANG Zai-fei, WANG Chun-ping, FU Qiang
(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: According to the characteristics of infrared projectile target images, and on the foundation of analyzing several histogram-based threshold segmentation algorithms, a method for improving the real-time performance of such algorithms was studied. Considering the feature of fixed pixels of projectile images, we proposed a rapid algorithm based on p -tile histogram. On the segmentation effectiveness, the algorithm can improve the accuracy for extracting the projectile target. Compared with the traditional histogram-based thresholding algorithms, the algorithm can decrease the running time by 30%. Simulation based on Matlab shows the effectiveness and real-time performance of the algorithm.

Key words: infrared small target; target detection; projectile target; image segmentation; histogram-based method; p -tile histogram

0 引言

红外技术以其较强的抗干扰能力、较宽的频谱以及良好的全天候适应能力受到越来越多的关注, 与此相关的红外图像处理技术也有了长足的发展, 而红外弱小目标的检测和识别更是成为近年来的研究热点。所谓弱小目标, 主要体现在目标对比度低和目标像素数少^[1], 由此给目标的检测识别带来诸多困难。相比于一般意义上的弱小目标, 红外弹丸目标还具有速度快的特点。一方面, 快速运动的目标在一定曝光时间内运动的距离更长, 沿光轴纵深方向上的变化导致成像对焦的困难, 径向上的快速变化在成像时造成拖影,

导致图像质量急剧下降; 另一方面, 观测快速运动的目标需要更高的帧频, 对检测算法的实时性提出了更高的要求。

目标检测的重要前提是对目标进行有效的分割。在多种图像分割算法中, 灰度阈值化是最简单的分割处理^[2]。阈值化计算代价小、速度快, 还可以很容易地用特殊硬件实时实现。阈值选取的准确与否直接决定了图像的分割效果, 因此, 阈值的选取需要参考全局或局部的信息, 基于直方图的阈值选取算法以其简单和易于获取的特点, 得到了众多学者的关注。文献[3]中提出了一种将图像直方图看成是两种模式的组合, 选取直方图最小值处对应的灰度值作为阈值的算法; 1979年, 文献[4]中提出一种最大类间方差算法(OTSU), 可以根据图像直方图自适应地选取阈值; 同年, 在文献[5]、[6]分别提出迭代的方法, 实现了与文献[4]近似的结果; 文献[7]将该方法用于红外小目标的

收稿日期: 2014-03-18

修回日期: 2014-11-17

基金项目: 军队预研重点项目

作者简介: 尚在飞(1989—), 男, 河北张家口人, 硕士生, 研究方向为图像处理与目标跟踪。

阈值分割;文献[8]中提出的最大熵算法结合了信息熵思想,实现了阈值的准确提取。对以上各类典型算法进行了比较分析,文献[3]的双峰法对图像直方图分布的假设过于严格,在实际中很难满足,而 OTSU 算法和最大熵法不能反映局部空间信息,当图像受到噪声干扰、光照不均匀等因素影响时,难以获得满意的分割结果^[9],其运行时间也是制约此类算法应用的一个重要因素。本文结合弹丸类目标特点提出了一种基于 p 率直方图的快速算法,对 OTSU 算法和最大熵算法进行了改进,实现了对阈值快速、精确的提取,对提高算法实时性有一定的借鉴意义。

1 传统直方图阈值处理算法

假定一幅大小为 $M \times N$ 的图像具有 L 个灰度级,图像的灰度直方图用 $h(i)$ ($i=0,1,2,\dots,L-1$) 表示。对 $h(i)$ 进行归一化处理,有

$$p(i) = \frac{h(i)}{M \times N} \quad (1)$$

式中, $p(i)$ 为图像中像素点具有灰度值 i 的概率密度的估计^[2]。阈值 t 将图像分为目标和背景两类,假定灰度值大于 t 的像素点属于目标类,灰度值小于等于 t 的像素点属于背景类。对几种典型的基于直方图的阈值选取方法进行简要介绍。

1.1 双峰法

假设图像由目标和背景两类像素点组成,将这类图像的直方图看成是两种分布的合成,即目标类像素点的分布和背景类像素点的分布,形象地称之为双峰,文献[3]最早提出了这个假设,选取双峰之间数量最少的灰度级作为阈值。这种方法虽然很直观,但其苛刻的假设制约了在实际中的应用。

图像灰度直方图还能够提供更多的信息。为了进一步对图像进行描述,由图像像素值的概率分布 $p(i)$, 可以定义如下统计量

$$P(t) = \sum_{i=0}^t p(i) \quad (2)$$

如果把 t 视为阈值, $P(t)$ 就可以表示像素点被分到背景类的概率,同时也可以表示背景类像素点占全部像素点的比率,在已知图像大小的前提下,也就能够得到图像中背景面积的大小。文献[10]中提出一种在已知目标大小信息前提下的 p 率阈值选择算法,即选择一个阈值 t ,使得 $1 - P(t)$ 尽可能接近实际图像中目标像素点与全部像素点的比率 p 。

1.2 最大熵算法

上文中提到,图像的灰度直方图可以看作是像素点具有某个灰度值的概率估计,借鉴信息熵的相关概念,文献[8]中提出了最大熵算法。阈值 t 将图像像素

点分为 C_1, C_2 两类,其分布分别为 $C_1: \frac{p(0)}{P(t)}, \frac{p(1)}{P(t)}, \dots,$

$$\frac{p(t)}{P(t)} \text{ 和 } C_2: \frac{p(t+1)}{1-P(t)}, \frac{p(t+2)}{1-P(t)}, \dots, \frac{p(L-1)}{1-P(t)}。$$

定义 C_1, C_2 两类的熵为

$$H(C_1) = - \sum_{i=0}^t \frac{p(i)}{P(t)} \ln \frac{p(i)}{P(t)} = \ln P(t) + \frac{H_t(t)}{P(t)} \quad (3)$$

$$H(C_2) = - \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{p(i)}{1-P(t)} \ln \frac{p(i)}{1-P(t)} = \ln(1-P(t)) + \frac{H_{L-1} - H_t(t)}{1-P(t)} \quad (4)$$

式中:

$$H_t(t) = - \sum_{i=0}^t p(i) \ln p(i) ; \quad (5)$$

$$H_{L-1} = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \ln p(i) 。 \quad (6)$$

图像被阈值 t 分割的 C_1, C_2 两类熵总和 $\varphi(t)$ 为

$$\varphi(t) = H(C_1) + H(C_2) = \ln P(t)(1-P(t)) + \frac{H_t(t)}{P(t)} + \frac{H_{L-1} - H_t(t)}{1-P(t)} 。 \quad (7)$$

在区间 $[0, L-1]$ 上遍历,找到 $\varphi(t)$ 最大值,其对应的 t 即为最大熵意义下的最佳阈值。

1.3 OTSU 算法

OTSU 算法是由日本学者 OTSU 提出的一种以类间方差最大化为优化指标的算法^[11]: 用阈值 t 试分图像,得到 C_1, C_2 两类均值 m_1, m_2 距全局均值 m_G 的“距离”,类间方差定义为

$$\sigma_B^2(t) = P(C_1)(m_1 - m_G)^2 + P(C_2)(m_2 - m_G)^2 \quad (8)$$

式中:

$$P(C_1) = \sum_{i=0}^t p(i) ; \quad (9)$$

$$P(C_2) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p(i) ; \quad (10)$$

$$m_1 = \frac{1}{P(C_1)} \sum_{i=0}^t ip(i) ; \quad (11)$$

$$m_2 = \frac{1}{P(C_2)} \sum_{i=t+1}^{L-1} ip(i) ; \quad (12)$$

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} ip(i) 。 \quad (13)$$

找到 $\sigma_B^2(t)$ 最大时对应的 t 为 OTSU 算法下的最佳阈值。经化简,式(8)可写为

$$\sigma_B^2(t) = \frac{[m_G P(t) - m(t)]^2}{P(t)[1-P(t)]} \quad (14)$$

式中:

$$m(t) = \sum_{i=0}^t ip(i) 。 \quad (15)$$

2 p 率直方图快速算法

通过以上对最大熵算法和 OTSU 算法的介绍,将两类算法的具体计算步骤进行总结,如表 1 所示。

表 1 最大熵算法和 OTSU 算法计算步骤

Table 1 Steps of maximum entropy algorithm and OTSU

最大熵算法步骤	OTSU 算法步骤
1) 直方图统计并计算归一化直方图 $p(i)$;	1) 直方图统计并计算归一化直方图 $p(i)$;
2) 计算累加概率 $P(t) = \sum_{i=0}^t p(i)$;	2) 计算累加概率 $P(t) = \sum_{i=0}^t p(i)$;
3) 计算 $H_t(t) = -\sum_{i=0}^t p(i) \cdot \ln p(i)$	3) 计算 $m(t) = \sum_{i=0}^t ip(i)$;
4) 计算 $H_{L-1} = H_t(t) _{t=L-1}$;	4) 计算 $m_G = m(t) _{t=L-1}$;
5) 计算 $\varphi(t) = \ln P(t) \left(1 - \frac{H_t(t)}{P(t)} + \frac{H_{L-1} - H_t(t)}{1 - P(t)} \right)$;	5) 计算 $\sigma_B^2(t) = \frac{[m_G P(t) - m(t)]^2}{P(t)[1 - P(t)]}$;
6) 找到 $\max_{0 \leq t \leq L-1} \varphi(t)$ 对应的 t 。	6) 找到 $\max_{0 \leq t \leq L-1} \sigma_B^2(t)$ 对应的 t 。

对表 1 进行分析可以看出,在计算累加概率等参量时需要重复遍历像素空间 $[0, L-1]$,制约此类算法的主要因素有 3 点:

- 1) 计算相应指标采用的运算类型(如加减(+/-)、乘除(\times/\div)、对数等);
- 2) 执行算法进行的循环次数;
- 3) 寻优时需要遍历的搜索范围。

基于以上分析,此类算法优化可以从改进计算指标、减少循环次数、降低搜索范围 3 方面进行考虑。

弹丸目标的一个显著特点是确定的弹丸实体大小基本固定,而实体大小与图像中像素数量的比值是一定的,这个比值与望远系统的系统参数、摄像系统的光学参数有关。

因此,在观测距离一定、观测设备不变的情况下,弹丸目标表现的图像中,所占的像素数是可以提前预知的。结合目标大小的先验知识,参照文献[10]提出的 p 率阈值选取算法思想,可以提前划定最佳阈值在像素空间的大致位置,减小了需要遍历的像素空间大小,从而实现对阈值更为准确、快速的提取。假设最佳阈值对应的大致范围是 $[p_1, p_2]$, p_1 表示目标图像最小时的像素数占全部像素数的比值, p_2 表示目标图像最大时的像素数占全部像素数的比值。这样,在表 1 中对应的步骤 2)、步骤 3)、步骤 5) 可以将累加概率 $P(t)$, $H_t(t)$ (或 $m(t)$) 和 $\varphi(t)$ (或 $\sigma_B^2(t)$) 的计算范围由 $[0, L-1]$ 减小至 $[p_1, p_2]$, 步骤 6) 中的寻优范围也减小至 $[p_1, p_2]$, 大大降低了这两类算法的计算范围。既增加了对最佳阈值确定的可靠性,又节省了计算开

销。图 1 所示为 p 率直方图快速算法流程。

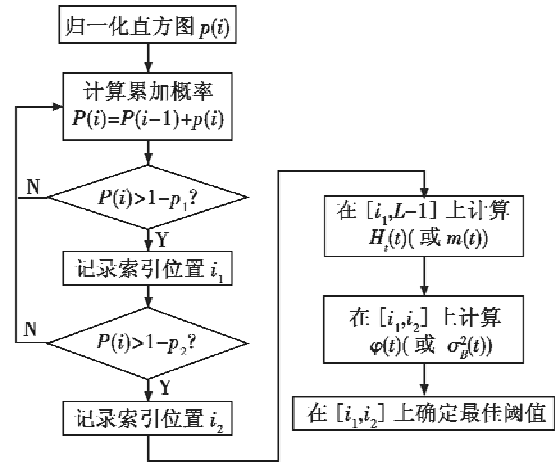


图 1 p 率直方图快速算法流程图

Fig. 1 Flow diagram of p -tile histogram fast algorithm

3 实验结果分析

利用本文提出的 p 率直方图快速算法对包含弹丸目标的红外图像进行阈值分割,并与最大熵方法和 OTSU 算法做比较,验证算法的分割效果。包含弹丸目标的红外图像如图 2 所示。图中背景分布很不均匀,弹丸目标的成像也较为模糊并且出现了拖影,这些因素导致图像质量下降,给全局阈值的确定带来了很大困难。因此,对弹丸目标阈值分割算法的研究应在局部区域进行。这里交互地确定了包含弹丸目标的处理窗口,对弹丸目标的局部阈值处理算法进行研究,处理窗口设定为目标大小的 2 倍,图 2 中标识的 5 个位置是弹丸所在的区域,下文主要对弹丸目标图像质量较好的第 2~4 窗口进行处理分析。

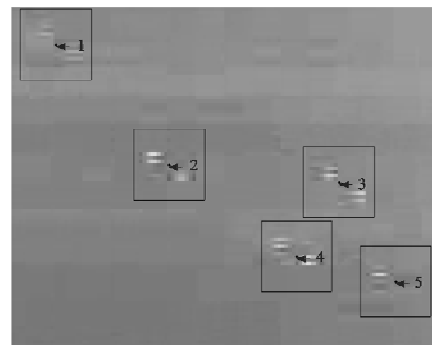


图 2 弹丸目标红外图像

Fig. 2 Infrared image of projectile target

图 3 所示为几种算法的分割效果。其中:图 3a 为第 2,3,4 处理窗口内的原始图像;图 3b 为相应灰度图像用最大熵算法进行阈值处理后的二值化图像,白色区域为大于阈值的像素点,认为是分割出的弹丸目标;图 3c 为用 OTSU 算法进行阈值处理后的二值化图像;图 3d、图 3e 分别为 p 率最大熵算法和 p 率 OTSU 算

法的分割结果,其中, p 取为 $[0.0227, 0.0454]^{[12]}$ 。

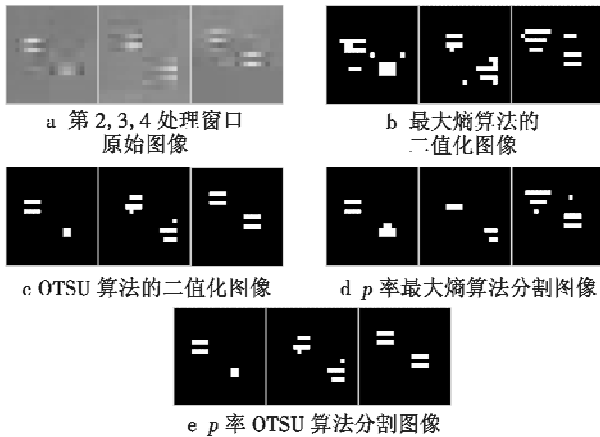


图 3 算法分割结果比较

Fig. 3 Result of different algorithms

对比以上阈值分割算法可以看出,图 3c 和图 3e 的分割效果最好,图 3b 的分割效果最差,图 3d 算法对图 3b 算法分割结果的改进十分明显。图 3b 中,分割出大量非目标点散落在真实弹丸目标周围,这就对下一步的目标定位造成障碍,而在图 3d 中,大部分非目标点被剔除,取得了较好的分割效果。

图 4 所示为阈值选取准则函数在区间 $[70, 256]$ 上的分布,红色虚线表示确定的阈值 t 。

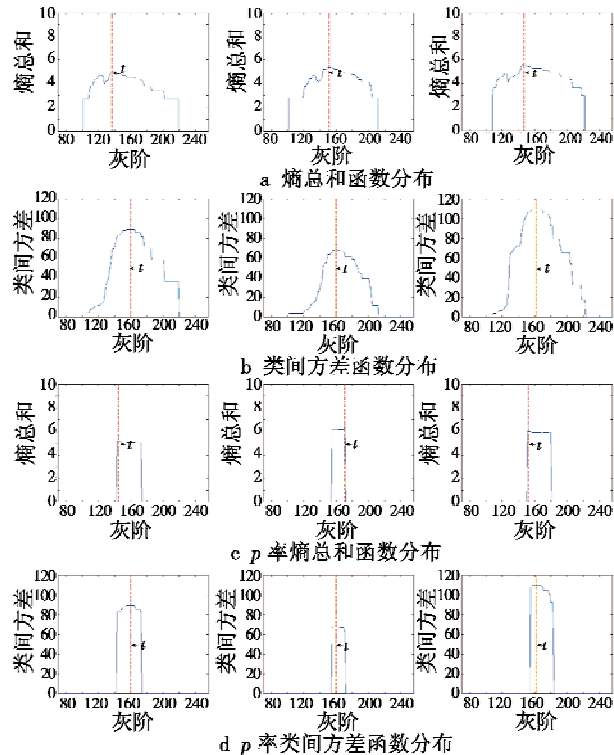


图 4 阈值选取准则函数分布

Fig. 4 Criterion function distribution of thresholding

图 4a 是最大熵算法选用的熵总和函数 $\varphi(t)$ 在区间 $[70, 256]$ 上的变化情况,虚线表示函数 $\varphi(t)$ 对应的

最大位置,对应的横坐标就是阈值 t 的取值;图 4b 为 OTSU 算法选用的类间方差函数 $\sigma_B^2(t)$ 在区间 $[70, 256]$ 上的变化情况,虚线表示函数 $\sigma_B^2(t)$ 对应的最大位置,对应的横坐标就是阈值 t 的取值;图 4c、图 4d 分别展示了 p 率最大熵算法和 p 率 OTSU 算法所用函数的分布。可以看出,熵总和函数在区间上的分布较为平缓,导致熵总和函数最大值对应的阈值 t 与最佳阈值出现偏差,反映在分割结果上导致对非弹丸目标点的误判,而 p 率最大熵算法降低了熵总和函数的遍历空间,弹丸目标大小信息使阈值的确定更为精确。基于 p 率直方图的快速算法的优势更多地体现在运算速度上,表 2 列出了在 Pentium (R) Dual-Core CPU 的台式机 Matlab2011b 上运行上述 4 种算法的时间。可以看出, p 率最大熵算法比传统的最大熵算法在运行时间上平均提高了 41.7%, p 率 OTSU 算法与传统 OTSU 算法相比平均提高 28.5%。

表 2 阈值分割算法运行时间比较

Table 2 Running time of thresholding algorithms

窗口	最大熵算法	OTSU 算法	p 率最大熵算法	p 率 OTSU 算法
2	0.927 5	0.725 4	0.596 9	0.470 2
3	0.941 8	0.701 1	0.497 6	0.510 6
4	0.985 6	0.876 2	0.567 7	0.672 5

ms

4 总结

本文对传统的双峰法、最大熵算法、OTSU 算法进行了介绍,探讨了提高该类基于直方图的阈值算法改进的途径,并将最大熵算法和 OTSU 算法应用于弹丸目标检测中,针对弹丸目标大小固定的特点给出了基于 p 率直方图的快速算法,改善了分割效果和运行时间,对提高阈值分割算法实时性进行了一定探索。

参考文献

- [1] 汪国有,陈振学,李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述[J]. 红外技术, 2006, 28(5): 287-292. (WANG G Y, CHEN Z X, LI Q L. A review of infrared weak and small targets detection under complicated background[J]. Infrared Technology, 2006, 28(5): 287-292.)
- [2] SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 3 版. 艾海舟, 苏延超, 译. 北京:清华大学出版社, 2011. (SONKA M, HLAVAC V, BOYLE R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. 3rd ed. Translated by AI H Z, SU Y C. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.)
- [3] PREWITT J M S, MENDELSON M L. The analysis of

- cell images[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1966, 128:1035-1053.
- [4] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, SMC-9(1):62-66.
- [5] RIDLER T, CALVARD S. Picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1978, SMC-8:630-632.
- [6] TRUSSELL H J. Comments on picture thresholding using an iterative selection method[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, SMC-9:1238-1239.
- [7] 王浩,高晓光.基于连续帧的红外小目标检测技术[J]. *火力与指挥控制*, 2012, 37(11):153-155. (WANG H, GAO X G. An infrared small target detecting algorithm with consecutive frames [J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(11):153-155.)
- [8] KAPUR J N, SAHOO P K, WONG A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1985, 29:273-285.
- [9] 张新明,李振云,孙印杰.快速二维直方图斜分最小误差的图像阈值分割[J]. *电光与控制*, 2012, 19(6):8-12. (ZHANG X M, LI Z Y, SUN Y J. Fast image thresholding with minimum error based on 2-D oblique segmentation [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6):8-12.)
- [10] DOYLE W. Operations useful for similarity-invariant pattern recognition[J]. *Journal of the ACM*, 1962, 9(2):259-267.
- [11] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 3版. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京:电子工业出版社,2012. (GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital image processing*[M]. 3rd ed. Translated by RUAN Q Q, RUAN Y Z. Beijing:Publish House of Electronics Industry, 2012.)
- [12] 王建华,王春平,梁伟,等.单帧红外图像多弹迹点检测[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(5):124-128. (WANG J H, WANG C P, LIANG W, et al. Multi-shell track detection in one single frame infrared image[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(5):124-128.)

(上接第 27 页)

- [2] FRELINGER D, KVITKY J, STANLEY W. Proliferated autonomous weapons[R]. Santa Monica: Rand Corporation, 2005.
- [3] SCHUMACHER C J, CHANDLER P R, RASMUSSEN S R. Task allocation for wide area search munitions[C]//*Proceedings of the American Control Conference*, 2002, 3:1917-1922.
- [4] DUNKE R E. Investigation of cooperative behavior in autonomous wide area search munitions[R]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2002.
- [5] GOZAYDIN O. Analysis of cooperative behavior for autonomous wide area search munitions[R]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2002.
- [6] REYNOLDS C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model[J]. *Computer Graphics*, 1987, 21(4):25-34.
- [7] PARK C S, TAHK M J, BANG H. Multiple aerial vehicle formation using swarm intelligence[C]//*AIAA Guidance Navigation and Control Conference and Exhibit*, Austin, Texas, August, 2003:5729-5737.
- [8] 郭美芳,范宁军,袁志华.巡飞弹战场运用策略[J]. *兵工学报*, 2006, 27(5):944-947. (GUO M F, FAN N J, YUAN Z H. Battlefield operation strategy of loitering munition[J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(5):944-947.)
- [9] MARZOLF G S. Time critical targeting predictive versus reactionary methods: An analysis for the future[M]. Maxwell Air Force Base, Alabama: Air University Press, 2004.
- [10] 彭辉,沈林成,霍霄华.多 UAV 协同区域覆盖搜索研究[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(11):2472-2476. (PENG H, SHEN L C, HUO X H. Research on multiple UAV cooperative area coverage searching [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11):2472-2476.)
- [11] 沈延航.攻击型无人机飞行轨迹优化设计与仿真[D].西安:西北工业大学,2003. (SHEN Y H. *Optimal design and simulation of flying paths of attack UAVs* [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2003.)
- [12] SHANMUGAVEL M. Path planning of multiple autonomous vehicles [D]. UK: Cranfield University, 2007.
- [13] PETERSSON P O, DOHERTY P. Probabilistic roadmap based path planning for an autonomous unmanned aerial vehicle [C]//*The 14th International Conference on Automated Planning and Scheduling*, Canada, 2006, 17:395-405.