

带有可信度的红外弱小点目标关联检测及性能分析

邵明礼¹, 温永强², 张红刚¹, 李建勋³

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009;

2. 中国人民解放军驻六一三所军代表室, 河南 洛阳 471009; 3. 上海交通大学自动化系, 上海 200240)

摘要: 对红外序列图像中运动弱小点目标的关联检测问题进行了研究。在多假设检测的基础上采用“K/N”规则检测算法,并引入带有可信度信息的判决融合,其中,可信度取自噪声概率分布函数。该方法把多假设检测与“K/N”规则检测算法有机地结合起来,克服了多假设检测运算量大,难以实时处理的缺点。引入可信度信息避免了当序列图像中某帧突然出现一个强的噪声脉冲时,使得穿越该点的可能轨迹的统计量增大,导致算法判断为出现多个虚假目标的情况。对信噪比较小的点目标,特别是在有个别帧点目标被云层完全遮挡住的情况下,该方法仍然有很高的检测概率;最后,从理论上详细分析了该方法的检测性能。理论分析和实测数据结果有效地验证了检测算法的可行性。

关键词: 红外目标; 关联检测; 可信度; 多假设检测; “K/N”规则

中图分类号: TM 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)08-0098-04

Association Detection of Small Infrared Object with Credibility Information and the Performance Analysis

SHAO Ming-li¹, WEN Yong-qiang², ZHANG Hong-gang¹, LI Jian-xun³

(1. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China; 2. Military Representative Office of PLA in No. 613 Institute, Luoyang 471009, China; 3. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The association detection of dim, small moving object in infrared image sequences was studied. Based on multi-hypothesis, “K/N” regulation was adopted, and credibility was introduced as noise probability distribution function. Multi-hypothesis and “K/N” regulation were organically combined, which could overcome such problems of the former as large computation cost and inability for real-time processing. Credibility is helpful for improving the robustness of detection, and the method has high detection probability even when there is noise pulse and cloud coverage. Theoretical analysis and real data test prove the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: infrared target; association detection; credibility; multi-hypothesis detection; “K/N” regulation

0 引言

利用红外成像实现自动目标识别(ATR)是精确制导武器的主要技术发展方向。它具有智能化程度高、被动隐蔽、作用距离远等优点。远距离红外点目标图像由于信噪比低,目标像素少,缺乏相关结构信息,所以对其检测的研究一直是热点和难点问题^[1-2]。

远距离小目标一般为一个或几个像素,缺乏目标大小、形状、纹理等结构信息。如果仅仅从灰度来分析,与噪声类似,仅仅依靠单帧检测是非常困难的。因此,国内外学者在单帧检测基础上利用运动目标的连

续性和规律性对弱小点目标进行序列关联检测。目前常用的关联检测包括多假设检测^[3]和“K/N”规则检测。文献[2]率先提出了MHT(多假设跟踪)算法用于跟踪红外成像目标;文献[4-5]基于多级假设检验中的截断序贯实现对低信噪比图像序列中的点目标检测,但这些基于MHT的算法均存在计算量大、难以实时处理的问题,“K/N”规则检测算法运算量小,容易实时处理;文献[6]在“K/N”规则检测基础上提出了一种基于计数累积的候选轨迹确定以及实现检测的算法,但“K/N”规则检测对信噪比较小的点目标,特别是在有个别帧点目标被云层完全遮挡住的情况下的检测效果不是很好;此外,文献[7]提出一种基于多级滤波的序列图像检测方法;文献[8]在多假设检验的基础上提出一种基于膨胀累加的检测方法使同一目标处于

不同帧上的能量仍然能够实现有效累加。

虽然这些关联算法一定程度上提高了点目标检测概率,但这些方法都有各自的局限性。例如 MHT 算法计算量大,难以实时处理;动态规划算法在信噪比很低时,目标检测的性能将不会随着处理帧数的提高而提高,从而限制了其应用范围。为此,本文针对红外序列图像运动弱小点目标关联检测问题,在多假设检验的基础上采用“K/N”规则检测算法,并引入带有可信度信息的判决融合。即在单帧检测的基础上,先以3帧为一组,累加目标点灰度值,然后以噪声概率分布函数作为可信度信息引入到“K/N”规则检测算法中。这样,N组的输出结果不再是非“0”即“1”,而是一个 $[0, 1]$ 区间上的数。该方法把多假设检测与“K/N”规则检测算法有机地结合起来,克服了多假设检测运算量大,难以实时处理的缺点。引入可信度信息避免了序列图像中某帧突然出现一个强的噪声脉冲时,会使得穿越该点的可能轨迹的统计量增大,导致算法判断为出现多个虚假目标。对信噪比较小的点目标,特别是在有个别帧点目标被云层完全遮挡住的情况下,该方法仍然有很高的检测概率。最后,从理论上详细分析了该方法的检测性能,并与标准“K/N”规则检测算法和经典 MHT 算法检测性能进行了比较。

1 序列关联检测

序列检测是利用运动目标的连续性和规律性,融合多帧的目标信息,提高对真实目标的检测能力。

1.1 单帧检测

红外序列图像运动弱小点目标关联检测是在单帧检测的基础上进行的。单帧检测采用基于改进遗传算法训练参数的 Top-Hat 形态学滤波器,并且采用自适应门限对目标进行分割^[5]。自适应分割门限表达式为

$$\tau = u + \sigma R_{S,N} - \sigma \Phi^{-1}(p_d) \quad (1)$$

式中: p_d 为单帧检测概率; $R_{S,N}$ 为序列图像信噪比; τ 为检测门限; u 为某个 $n \times n$ 图像单元背景对消后的噪声均值; σ 为噪声均方差。

1.2 跟踪门

在单帧检测的基础上,进行带有可信度信息的多假设检测。

多假设检测就是累加落在跟踪门内的点目标灰度值。这里,以某一帧检测出的可能目标点为基准,膨胀一个区域,即跟踪门,检测下一帧落在跟踪门里的可能目标点。为了保证下一帧可能的目标点能落在跟踪门内,跟踪门的大小和位置与目标在最近邻几帧的速度有关。这里假设头一帧已检测出的可能点目标位置坐标为 $(x_0, y_0) = (0, 0)$,之前两帧的目标坐标位置依次

为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 。可以把目标的运动分为匀速直线运动和非匀速直线运动。本文中,跟踪门的形状取为 $n \times n$,则下一帧自适应的跟踪门大小和位置(跟踪门中心坐标)定义为

$$n = \begin{cases} 3, & \text{匀速直线运动} \\ 3 + [|x_1|], & \text{非匀速直线运动} \end{cases} \quad (2)$$

$$x = \begin{cases} v \cos \theta, & \text{匀速直线运动} \\ x_0 + (x_0 - x_1) + [x_0 - x_1 - (x_1 - x_2)] \alpha = \alpha x_2 - (1 + 2\alpha)x_1, & \text{非匀速直线运动} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $[]$ 代表取整; α 为调节因子。对于已知速度和方向的匀速直线运动目标,假设其运动速度为 v 像素/帧,运动方向与水平方向的角度为 θ 。

1.3 带可信度的多帧检测

考虑图像处理的前后帧,以三帧为一组,累加经单帧检测后落在跟踪门内的目标点灰度值。如果序列图像中某帧突然出现一个强的噪声脉冲,会使得穿越该点的可能轨迹的统计量增大,导致算法判断为出现多个虚假目标。为此,在多假设检测的基础上引入隶属度函数作为每组的可信度。典型隶属度函数如图1所示。

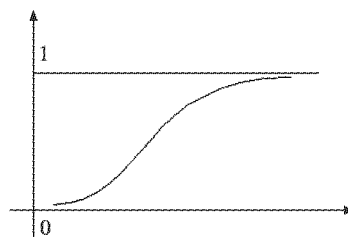


图1 典型隶属度函数

Fig. 1 Typical membership function

这样,“K/N”规则检测算法每组输出值不再是非“0”即“1”,而是一个 $[0, 1]$ 区间上的数。

这里,隶属度函数取自噪声概率分布函数。这是因为噪声概率分布函数满足以下性质:1) $\mu(x) \in [0, 1], \forall x$; 2) $\mu(x_i) \geq \mu(x_j), x_i \geq x_j$; 3) $\lim_{x \rightarrow -\infty} \mu(x) = 0$; 4) $\lim_{x \rightarrow \infty} \mu(x) = 1$ 。

性质1是隶属度函数共有的性质;性质2表明该函数是单调递增的,像素幅值越大,越可能是目标像素;性质3和4给出了隶属度函数的趋势,当观测值中包含一个很强的噪声脉冲,其输出只能非常接近于“1”,从而提高了检测系统的鲁棒性。

在多假设检测的基础上,带有可信度信息的判决融合可描述为

$$\begin{cases} \text{真实目标轨迹} & \text{if } s = \sum_{i=1}^N f(x_i) \geq T \\ \text{虚假目标轨迹} & \text{if } s = \sum_{i=1}^N f(x_i) < T \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_i 为第 i 组落在跟踪门内的点目标灰度累加值, $f(x)$ 为噪声概率分布函数, T 为关联检测门限。

给定总的检测性能: 检测概率 $p_d > \beta$, 虚警概率 $p_f < \alpha$ 。关联检测门限 T 求取公式为

$$p_f = 1 - H_N(t) \tag{5}$$

其中, $H_N(t)$ 是 t 的概率分布函数。

本文提出的序列关联检测如图 2 所示。

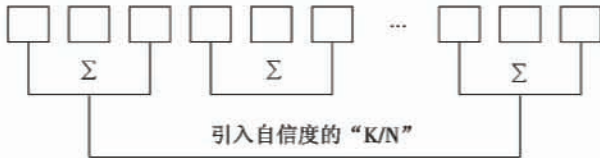


图 2 序列关联检测示意图

Fig. 2 The program of sequential association detection

2 性能分析

通常用假设 H_1 代表目标存在的情况, 用假设 H_0 代表目标不存在的情况, 设 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_L\}$ 为序列图像的一组观测值。假设图像的背景噪声为高斯白噪声, 则二元假设可描述为

$$H_1: z_i = m_1 + \eta \tag{6}$$

$$H_0: z_i = m_0 + \eta \tag{7}$$

式中: m_1 为目标信号幅值与背景噪声均值之和; m_0 为背景噪声的均值; η 是均值为 0、标准差为 σ 的高斯分布白噪声。观测图像序列中每个像素点的概率密度函数为

$$p\{z_i | H_1, i=1, 2, \dots, L\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z_i - m_1)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{8}$$

$$p\{z_i | H_0, i=1, 2, \dots, L\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z_i - m_0)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{9}$$

经过单帧图像预处理阶段背景对消后的图像噪声为高斯分布的白噪声。在单帧检测的基础上, 以 3 帧为一组进行多假设检测时,

$$p_d^* = \int_{\tau}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}3\sigma} \exp\left(-\frac{(x-3u-\sigma R_{s,N1}-\sigma R_{s,N2}-\sigma R_{s,N3})^2}{2 \times (3\sigma)^2}\right) dx = \Phi\left|\frac{3u + \sigma R_{s,N1} + \sigma R_{s,N2} + \sigma R_{s,N3} - T}{3\sigma}\right| \tag{10}$$

$$p_f^* = \int_{\tau}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}3\sigma} \exp\left(-\frac{(x-3u)^2}{2 \times (3\sigma)^2}\right) dx = \Phi\left|\frac{3u - T}{3\sigma}\right| \tag{11}$$

可推出多假设检测的检测概率和虚警概率的关系为

$$\Phi^{-1}(p_d^*) - \Phi^{-1}(p_f^*) = R_{s,N1} + R_{s,N2} + R_{s,N3} \tag{12}$$

经过多假设检测后, 引入自信度信息。为了利用多帧处理提高检测性能, 将带有自信度信息的多假设检测结果沿各条假定轨迹累加求和。由于已知检测隶属

度函数输出结果的分布为 $[0, 1]$ 区间上的均匀分布, 可以解析地求出累加和 $s = \sum_{i=1}^N f(x_i)$ 的概率密度函数。

$$h_n(s) = \frac{1}{(n-1)!} [s^{n-1} - C_n^1(s-1)^{n-1} + C_n^2(s-2)^{n-1} + \dots + (-1)^{\text{floor}(s)} C_n^{\text{floor}(s)}(s-\text{floor}(s))^{n-1}] \tag{13}$$

式中, $\text{floor}(\cdot)$ 为向负无穷小方向取整函数。

由给定的虚警率 p_f 通过式(5)可以确定检测门限 T , 而检测概率可以通过产生大量信噪比为 $R_{s,R}$ 的目标样本(10000 组 n 帧数据), 所有大于门限的样本数除总体样本数, 可以近似认为就是算法的检测概率。

3 仿真与分析

本实验采用法国 Sofradir 中波热成像仪采集到的 320 像素 \times 240 像素, 6733 帧 8 位真实红外对空序列图像, 截取其中的 1000 帧数据验证能量匹配滤波检测与数据关联跟踪算法。由于探测目标距离很远, 采集图像的信噪比约为 2, 属于典型的低信噪比弱小目标检测问题。

运用本文提出的检测算法对 $R_{s,N} = 2$ 的 1000 幅连续序列图像进行滤波处理, 其中任意两幅图像处理结果如图 3 ~ 图 4 所示。



原始图像 1

原始图像 2

图 3 原始图像

Fig. 3 The original images



滤波后图像 1

滤波后图像 2

图 4 滤波后图像

Fig. 4 The filtered images

运用本文提出的检测算法对有个别帧点目标被云层完全遮挡住情况下的序列图像进行检测, 并在相同关联帧数条件下与标准的“K/N”规则算法检测性能进行比较。这里, 设每组三帧序列图像信噪比为: $R_{s,N1} = 2, R_{s,N2} = 2, R_{s,N3} = 0$, 即每组有一帧图像点目标被云层完全遮挡。图像单元背景对消后的噪声均值 $u = 5.1876$, 噪声均方差为 $\sigma = 16.7636$, 如表 1 所示。

表 1 本文检测算法与标准“K/N”算法性能对比表
Table 1 Performance comparison between the proposed algorithm and “K/N”

	本文检测算法	标准“K/N”算法
P_f	5.0656×10^{-6}	9.6368×10^{-4}
P_d	0.9042	0.7995
N	3(9)	9

将本文提出的检测算法与经典 MHT 算法进行比较。给定虚警概率为 $P_f \leq 10^{-5}$ ，则在相同关联帧数(9 帧)情况下两者检测概率与信噪比之间关系曲线如图 5 所示。

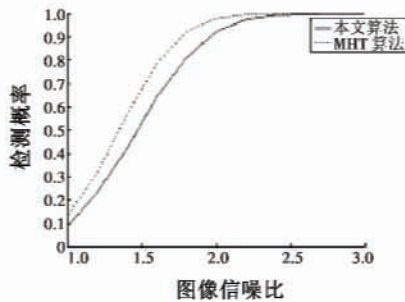


图 5 本文算法与 MHT 算法检测概率与信噪比关系曲线图
Fig. 5 p_d -SNR of the proposed algorithm and MHT

从图 5 可以看出,经典的 MHT 检测算法比本文提出的检测算法检测性能要优秀,但两者差别并不是很大,本文检测算法的检测性能接近经典 MHT 算法检测性能。实际红外图像序列中,在某些图像帧中突然出现脉冲噪声的情况比较普遍。本文通过仿真研究在图像中含有脉冲噪声的情况下,两种检测算法的鲁棒性,即是否具有抗干扰特性。通过计算机产生 100000 组 n 帧噪声数据,假设噪声服从标准正态分布 $N(0,1)$,在该 n 帧数据中某一帧出现一个脉冲噪声,当检测虚警率为 $P_f = 10^{-5}$ 时,分别利用恒虚警率准则确定本文检测算法及经典 MHT 算法的检测门限。显然,在图像中出现脉冲噪声,而检测门限确定的条件下,虚警率会有所提高。在相同关联帧数(9 帧)的条件下,两种检测算法的虚警次数与脉冲噪声幅值的关系如表 2 所示。

表 2 两种算法的虚警次数与脉冲噪声幅值的关系表
Table 2 Relationship between false alarm number and pulse noise amplitude

噪声幅值	1	2	3	4	5	6	7	8
本文算法	1	3	5	5	6	6	7	8
MHT 算法	1	6	21	85	246	642	1652	3497

当图像序列中出现脉冲噪声时,本文检测算法的鲁棒性远远优于经典的 MHT 算法。随着脉冲噪声幅值的增大,两种检测算法的虚警次数都呈上升趋势,但是本文检测算法的虚警次数变化趋势非常平缓,在脉冲噪声幅值为 8 时,其虚警次数仅为 8,相当于虚警概

率为 $p_f = 8 \times 10^{-5}$;而经典的 MHT 算法的虚警次数随着噪声幅值的增加急剧上升,在脉冲噪声幅值为 8 时,其虚警次数为 3497,相当于虚警概率为 $p_f = 3.497\%$,与设计的虚警概率已经完全不符了。

4 结论

本文针对红外序列图像中运动弱小点目标的检测问题,在多假设检测的基础上采用“K/N”规则检测算法,并引入带有可信度信息的判决融合,其中,可信度取自噪声概率分布函数。该方法把多假设检测与“K/N”规则检测算法有机地结合起来,克服了多假设检测运算量大、难以实时处理的缺点。引入可信度信息避免了序列图像中某帧突然出现一个强的噪声脉冲时,会使得穿越该点的可能轨迹的统计量增大,导致算法判断为出现多个虚假目标的情况。对信噪比较小的点目标,特别是在有个别帧点目标被云层完全遮挡住的情况下,该方法仍然有很高的检测概率。最后,从理论上详细分析了该方法的检测性能,并与标准“K/N”规则检测算法和 MHT 算法检测性能进行了比较。理论分析和实测数据结果有效地验证本文算法的可行性。

参考文献

- [1] TZANNES A P, BROOKS D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 570-586.
- [2] BLOSTEIN S D, HUANG T S. Detecting small, moving objects in image sequences using sequential hypothesis testing[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1991, 39(7):1611-1629.
- [3] ZENG M, LI J X, ZHANG P. The design of Top-Hat morphological filter and application to infrared target detection [J]. IR Physics and Technology, 2006, 48(1):67-76.
- [4] BLOSTEIN S D, RICHARDSON H S. A sequential detection approach to target tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1):197-212.
- [5] BARNIV Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1985(1):144-156.
- [6] 韩客松,陈景春,崔常鬼. 红外图像中运动点目标检测技术[J]. 系统工程与电子技术,1998(4):23-26.
HAN K S, CHEN J C, CUI C W. A technique for detecting moving point targets in infrared images[J]. Systems Engineering and Electronics, 1998(4):23-26.
- [7] 张聪,张天序. 运动目标检测与识别方法研究[J]. 红

(下转第 109 页)

- WANG Y J. Studies of jamming against the radar based on linear frequency modulation signals and the digital jamming synthesis[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [4] 杨绍全, 张正明. 对线性调频脉压雷达的干扰[J]. 西安电子科技大学学报, 1991(3): 24-30.
YANG S Q, ZHANG Z M. Jamming of LFM pulse compression radar [J]. Journal of Xidian University, 1991(3): 24-30.
- [5] 刘忠. 基于 DRFM 的线性调频脉冲压缩雷达干扰新技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
LIU Z. Jamming technique for countering LFM pulse compression radar based on digital radio frequency memory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [6] 吕波, 冯起, 袁乃昌. 对 LFM 脉冲压缩雷达的移频压制干扰技术研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(1): 9-12.
LÜ B, FENG Q, YUAN N C. A study on frequency-shifting blanket jamming to LFM pulse-compression radar [J]. Modern Radar, 2009, 31(1): 9-12.
- [7] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对合成孔径雷达的脉间分段移频干扰[J]. 航天电子对抗, 2010(1): 53-57.
WU X F, WANG X S, LU H Z. Interpulse subsection-shift-frequency jamming to SAR [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010(1): 53-57.
- [8] 束礼宝, 宋克柱, 王砚芳. 伪随机数发生器的 FPGA 实现与研究[J]. 电路与系统学报, 2003(6): 121-124.
SHU L B, SONG K Z, WANG Y F. The implementation and research on pseudo random number generators with FPGA [J]. Journal of Circuits and System, 2003(6): 121-124.
- [9] 王会华, 李宝平. m 序列发生器的设计与实现[J]. 北京电子科技学院学报, 2007, 15(2): 58-61.
WANG H H, LI B P. Design and realize of m sequence generator [J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2007, 15(2): 58-61.
-
- (上接第 101 页)
- 外与激光工程, 2004, 33(2): 164-168.
ZHANG C, ZHANG T X. Research on detection and recognition method of moving targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(2): 164-168.
-
- (上接第 105 页)
- [3] 高晖, 陈欣, 夏云程. 无人机航迹规划综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 35-38.
GAO H, CHEN X, XIA Y C. Introduction of route planning for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(2): 35-38.
- [4] SURESH M, GHOSE D. Role of information and communication in redefining unmanned aerial vehicle autonomous control levels [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224(2): 171-197.
- [5] ARMANDO A N, MACHARET D G, CAMPOS M F M. On the generation of trajectories for multiple UAVs in environments with obstacles [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 2010, 57(1-4): 123-141.
- [6] SVEN K, MAXIM L. Real time adaptive A* [C] // Proceeding of the International Conference on Autonomous Agents, Hakodate, Japan, ACM, 2006: 281-288.
- [7] 李璠, 郝应光. 基于改进混沌遗传算法的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2012, 19(8): 15-19.
LI F, HAO Y G. Path planning of UAVs based on improved chaotic genetic algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(8): 15-19.
- [8] 熊辉, 沈振康, 魏急波, 等. 低信噪比运动红外点目标的检测[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 26-29.
XIONG H, SHEN Z K, WEI J B, et al. Moving infrared low SNR target detection algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 26-29.
-
- [8] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C] // Proceedings of the IEEE International conf on Neural Networks, Perth, Australia, IEEE, 1995: 1942-1948.
- [9] COELHO L D S. A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2008, 37(5): 1409-1418.
- [10] JIN Y S, KNOWLES J, LU H M, et al. The landscape adaptive particle swarm optimizer [J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 295-304.
- [11] 刘月, 魏瑞轩, 刘敏, 等. 用改进变异粒子群算法实现突发威胁下的无人机航迹规划[J]. 光电与控制, 2010, 17(1): 22-25.
LIU Y, WEI R X, LIU M, et al. Path planning of UAVs based on improved variant PSO algorithm [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(1): 22-25.
- [12] 于会, 于鑫, 李伟化. 基于粒子群优化算法的航迹规划与重规划[J]. 计算机工程, 2009, 35(15): 206-207.
YU H, YU X, LI W H. Route planning and re-planning based on PSO algorithm [J]. Computer Engineering, 2009, 35(15): 206-207.
- [13] 郑昌文. 飞行器航迹规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
ZHENG C W. Research on air vehicle path planning algorithms [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.