

文章编号:1001-9014(2009)01-0016-04

基于多传感器融合的红外图像序列检测性能分析

张光明^{1,3}, 盛卫东², 樊士伟³, 张伟¹

(1. 哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要:针对红外图像目标检测性能问题,从多传感器融合算法的典型流程出发,推导单帧检测性能、多帧检测性能和多传感器融合性能的关系,并从理论上对单个因素的影响进行定量分析.分析结果表明,多传感器融合的性能比单帧检测性能和多帧检测性能更优越.

关键词:红外图像;检测性能;多传感器融合

中图分类号:TN911.73 **文献标识码:**A

ANALYSIS OF DETECTION PERFORMANCE OF INFRARED IMAGE SEQUENCE BASED ON MULTI-SENSOR DATA FUSION ALGORITHM

ZHANG Guang-Ming^{1,3}, SHENG Wei-Dong², FAN Shi-Wei³, ZHANG Wei¹

(1. Research Center of Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Aiming at the problem of detection performance of infrared (IR) images, from the typical flow of multi-sensor data fusion algorithm, the relationship among the detection performances of single IR image, IR image sequence, and multi-sensor data fusion algorithm was deduced. The influence of single factor was also analyzed quantitatively. Analytical results show that the detection performance of multi-sensor data fusion algorithm is much better than that of single IR image and IR image sequence.

Key words: infrared image; detection performance; multi-sensor data fusion

引言

红外探测是对运动点目标进行跟踪与识别的常用手段^[1],其中,检测概率和虚警概率是红外探测系统最为重要的两项技术指标.目前,对红外探测系统中的目标检测算法已经有了比较多的研究,其中比较常见的检测算法有单帧检测^[2,3]、多帧检测^[4,5]和多传感器融合^[6]等.但是专门研究检测算法性能的文章还很少.本文以分析检测算法的性能为目的,以概率统计为基础,从红外目标检测算法的流程出发,分析了单帧检测性能、多帧检测性能和多传感器融合性能三者之间的关系.从本文的分析结论可

以看出,在单帧检测条件下,只有当图像的信噪比(SNR)大于5.6dB时才能实现高检测概率、低虚警概率的性能,而采用多传感器融合算法,更低的图像信噪比就可以实现相近的检测性能.这既可以进一步提高目标的检测概率,降低虚警概率,同时对于红外探测系统的总体指标设计也具有重要的指导意义.

1 单帧图像检测的性能分析

在目标检测过程中,一般情况下我们都要进行门限分割,通常可将分割门限取为

$$Th = \mu + k\sigma \quad (1)$$

收稿日期:2008-07-21,修回日期:2008-12-18

基金项目:国防预研基金项目(51401040104JW6527)

作者简介:张光明(1967-),男,浙江宁波人,博士研究生,主要研究方向为空间光学工程.

Received date: 2008-07-21, revised date: 2008-12-18

其中 μ 、 σ 分别为图像的均值和均方差, k 为一系数. 假设背景噪声 n (服从 $N(\mu, \sigma^2)$ 的高斯分布), 小目标中心的灰度值为 s , 则定义图像的信噪比 SNR 为

$$\text{SNR} = \frac{s - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

当背景均值较小时, 可以写成如下形式

$$\text{SNR} = \frac{s}{\sigma} \quad (3)$$

设单帧过门限率为 $P_f^{(1)}$, 单帧检测概率为 $P_d^{(1)}$, 则推导出单帧检测概率、单帧过门限率、信噪比三者之间的关系如下,

$$\Phi^{-1}(P_d^{(1)}) - \Phi^{-1}(P_f^{(1)}) = \text{SNR} \quad (4)$$

$$\text{其中, } \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) da.$$

为保证单帧检测概率 $P_d^{(1)} \geq 98\%$, 单帧过门限率 $P_f^{(1)} \leq 10^{-6}$, 则 SNR 必须大于 6.7 dB; 如果 $P_d^{(1)} \geq 98\%$, $P_f^{(1)} \leq 10^{-4}$, 则 SNR 必须大于 5.6 dB. 实际上, 单帧检测很难达到高检测率、低虚警率的指标, 因此必须进行多帧检测和多传感器数据融合.

2 多帧图像检测的性能分析

多帧检测, 主要是利用目标的时间相关性对单帧检测的备选目标进行处理, 进一步确认目标和消除虚假目标. 与此过程对应的指标为多帧检测概率和多帧虚警概率.

2.1 多帧图像检测性能推导

多帧图像检测的原理主要是基于目标在连续几帧内的运动特征和辐射特征^[7,8], 具体如下: 目标的红外辐射强度基本保持不变, 可以将它看作恒定灰度值的点源; 目标的运动接近匀速直线运动; 目标帧与帧之间的最大距离小于某一固定值.

多帧检测原理直接决定了关联算法及其性能, 即决定了关联区域的大小、关联区域存在虚警点的概率 p_0 、关联区域包含目标点的概率 p_1 .

根据假设检验理论, 首先建立两种假设 H_0 和 H_1 , 即,

- H_0 : 目标不存在, 轨迹来自虚警点;
- H_1 : 目标存在.

对应每种假设的似然函数 F_{0m} 和 F_{1m} 分别为,

$$\begin{aligned} H_0: F_{0m} &= C_m^n \cdot (P_f^{(1)} \cdot p_0)^n \cdot (1 - P_f^{(1)})^{m-n}, \\ H_1: F_{1m} &= C_m^n \cdot (P_f^{(1)} \cdot p_1)^n \cdot (1 - P_d^{(1)})^{m-n}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, m 为观测次数; n 为检测到目标的次数; $C_m^n = \frac{m!}{n! \cdot (m-n)!}$.

假设虚警点空间上在图像平面内为均匀分布, 且虚警点在时间上(即帧与帧之间)是不相关的, 则 p_0 为:

$$p_0 = 1 - (1 - N \cdot P_f^{(1)}) \quad (6)$$

其中, N 为关联区域内像素点的数目. 因此关联区域越大, 关联区域内存在虚警点的概率也就越大.

影响 p_1 的主要因素是像平面的测量误差, 则 p_1 ^[8] 为

$$\begin{aligned} p_1 &= \iint_S \frac{1}{(2\pi) \sqrt{|\mathbf{R}|}} e^{-\frac{\mathbf{g}^2}{2}} dz \\ &\approx (2\Phi(T_x) - 1)(2\Phi(T_y) - 1) \quad (7) \end{aligned}$$

其中, S 为关联区域的面积, $|\mathbf{R}|$ 为测量协方差矩阵的行列式, \mathbf{g} 为目标测量的残差范数, T_x 为关联区域在图像 X 方向上的边界, T_y 为关联区域在图像 Y 方向上的边界.

则多帧检测的似然比 U_m 判决为

$$U_m = \frac{F_{1m}}{F_{0m}} > \frac{H_1}{H_0} \eta \quad (8)$$

其中, η 为判决门限. 将两边取对数, 可以化简为,

$$\begin{aligned} n > \frac{H_1}{H_0} \eta &= \frac{\ln \eta - m \ln \frac{1 - P_f^{(1)}}{1 - P_d^{(1)}}}{\ln \frac{P_d P_1 (1 - P_f^{(1)})}{P_f P_0 (1 - P_d^{(1)})}} \quad (8) \end{aligned}$$

对于统计量 n (检测到的次数), 其概率分布只是在 $[0, 1, 2, \dots, m]$ 等离散点上, 多帧检测概率、多帧虚警概率与检测门限的关系分别为

$$\begin{aligned} P_d^{(2)} &= \sum_{i=1}^{m-k} P_{1,k+i} \\ &= \sum_{i=1}^{m-k} C_m^{k+i} \cdot (P_d^{(1)} \cdot p_1)^{k+i} (1 - P_d^{(1)})^{m-k-i} \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_f^{(2)} &= \sum_{i=1}^{m-k} P_{0,k+i} \\ &= \sum_{i=1}^{m-k} C_m^{k+i} \cdot (P_f^{(1)} \cdot p_0)^{k+i} (1 - P_f^{(1)})^{m-k-i} \quad (10) \end{aligned}$$

其中, $k = [\eta]$, $[\cdot]$ 为取整函数.

2.2 多帧图像检测性能分析

从上述对多帧检测概率、多帧虚警概率的分析可以看出, 多帧检测的性能不仅取决于多帧检测的准则, 而且与单帧检测的性能有密切的关系.

图 1 给出了在单帧检测概率为 0.95、单帧过门限率为 10^{-3} 时, 多帧检测概率和多帧虚警概率与检测门限的变化曲线, 计算中假设观测次数为 10 次, 关联区域大小保证 $p_1 \geq 0.99$.

从图 1 可以看出, 随着门限的增大, 多帧检测概

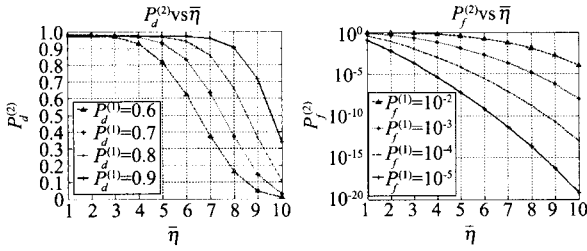


图1 多帧检测性能与门限的关系 (a)多帧检测概率~门限 (b)多帧虚警概率~门限
Fig.1 Relation between detection performance of image sequence and threshold (a) $P_d^{(2)}$ vs $\bar{\eta}$ (b) $P_f^{(2)}$ vs $\bar{\eta}$

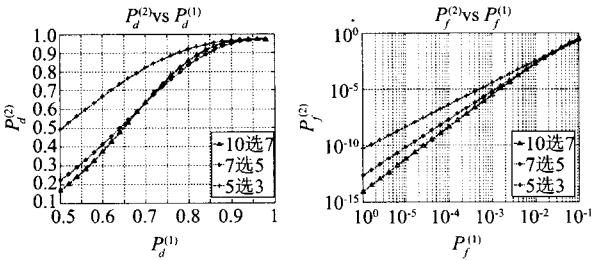


图2 多帧检测性能与单帧检测性能关系 (a)多帧检测概率~单帧检测概率 (b)多帧虚警概率~单帧过门限率
Fig.2 Relation between detection performance of image sequence and that of single image (a) $P_d^{(2)}$ vs $P_d^{(1)}$ (b) $P_f^{(2)}$ vs $P_f^{(1)}$

率和多帧虚警概率都减小;门限的选择是检测概率和虚警概率的折中,为了保证多帧检测概率大于90%,虚警概率小于 10^{-5} ,门限应为6~7.

图2给出了多帧检测概率与单帧检测概率、多帧虚警概率与单帧过门限率的关系.从图2可以看出,随着单帧检测性能的提高多帧检测性能也将提高;为了保证较高的多帧检测性能,单帧检测概率应在90%以上.

3 多传感器融合的性能分析

多传感器融合检测,是根据多传感器检测的结果进行进一步的处理以提高对目标的检测性能,特别是在某一个(或几个)传感器受到强杂波干扰时,多传感器融合检测可以维持较好的检测性能.与此过程对应的指标为融合检测概率和融合虚警概率.

3.1 多传感器融合性能推导

设在多个传感器观测区域,每个传感器做出的判决记为 $u_i (i=1, 2, \dots, M)$,其中 M 为传感器数目,定义:

表1 u_i 在 H_0 和 H_1 假设的概率

Table 1 Probability of u_i under the assumption of H_0 and H_1

		H_1	
		$u_i = 0$	$u_i = 1$
H_i	H_0	$1 - P_{f,i}^{(2)}$	$P_{d,i}^{(2)}$
	H_1	$1 - P_{d,i}^{(2)}$	$P_{f,i}^{(2)}$

$$u_i = \begin{cases} 0, & \text{传感器 } i \text{ 判决目标不存在,即 } H_0 \text{ 成立} \\ 1, & \text{传感器 } i \text{ 判决目标存在,即 } H_1 \text{ 成立} \end{cases}$$

则输入的 u_i 为一个(0-1)分布的随机变量,其在 H_0 和 H_1 假设下的概率如表1所示.表中, $P_{d,i}^{(2)}$ 、 $P_{f,i}^{(2)}$ 分别为传感器 i 的多帧检测概率和多帧虚警概率.

多传感器融合检测同样也可以归结为一个二元假设检验问题,此时似然比检验表示为

$$U = \frac{P\{u_1, u_2, \dots, u_M | H_1\}}{P\{u_1, u_2, \dots, u_M | H_0\}} > H_1 < H_0 \quad \eta \quad (11)$$

由于每个传感器的判决是相互独立的,因此多传感器对数似然比检验可以化简为,

$$T = \sum_{i=1}^M \left[\ln \frac{P_{d,i}^{(2)}(1 - P_{f,i}^{(2)})}{(1 - P_{d,i}^{(2)})P_{f,i}^{(2)}} \right] u_i > H_1 < H_0 \quad (12)$$

$$\bar{\eta} = \ln \eta + \sum_{i=1}^M \left[\ln \frac{(1 - P_{f,i}^{(2)})}{(1 - P_{d,i}^{(2)})} \right]$$

为了书写方便,定义 a_i 如下,

$$a_i = \ln \frac{P_{d,i}^{(2)}(1 - P_{f,i}^{(2)})}{(1 - P_{d,i}^{(2)})P_{f,i}^{(2)}} \quad (13)$$

在此取传感器数目为2个,即 $M=2$.对于统计量 T ,其概率分布只是在 $[0, a_1, a_2, a_1 + a_2]$ 四个离散点上,可以得到双传感器融合检测概率和虚警概率.

3.2 双传感器融合性能分析

当门限取 $0 < \bar{\eta}_1 < \min(a_1, a_2)$ 时,双传感器融合的逻辑为“或”逻辑,此时双传感器融合检测概率和融合虚警概率分别为

$$\begin{aligned} P_d^{(3)} &= 1 - (1 - P_{d,1}^{(2)})(1 - P_{d,2}^{(2)}), \\ P_f^{(3)} &= 1 - (1 - P_{f,1}^{(2)})(1 - P_{f,2}^{(2)}). \end{aligned} \quad (14)$$

当门限取 $\max(a_1, a_2) < \bar{\eta}_3 < a_1 + a_2$ 时,双传感器融合的逻辑为“与”逻辑,此时双传感器融合检测概率和融合虚警概率分别为

$$\begin{aligned} P_d^{(3)} &= P_{d,1}^{(2)} \cdot P_{d,2}^{(2)}, \\ P_f^{(3)} &= P_{f,1}^{(2)} \cdot P_{f,2}^{(2)}. \end{aligned} \quad (15)$$

当门限取 $\min(a_1, a_2) < \bar{\eta}_2 < \max(a_1, a_2)$ 时,双传感器融合的逻辑为“与”逻辑和“或”逻辑的折中,其检测性能与综合检测性能最好的传感器相同,此

表 2 双传感器融合后的检测性能

Table 2 Detection performance of dual-sensor data fusion algorithm

		传感器 1	传感器 2	双传感器融合		折中
				“与”逻辑	“或”逻辑	
情况 1	$P_d^{(3)}$	0.95	0.95	0.9025	0.9975	0.95
	$P_f^{(3)}$	10^{-4}	10^{-4}	10^{-8}	2×10^{-4}	10^{-4}
情况 2	$P_d^{(3)}$	0.9	0.95	0.855	0.995	0.9
	$P_f^{(3)}$	10^{-4}	10^{-3}	10^{-7}	1.01×10^{-3}	10^{-4}
情况 3	$P_d^{(3)}$	0.8	0.95	0.76	0.99	0.95
	$P_f^{(3)}$	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-2}	10^{-4}

时双传感器融合检测概率和融合虚警概率分别为:

$$\begin{aligned} P_d^{(3)} &= P_{d,i}^{(2)}, \\ P_f^{(3)} &= P_{f,i}^{(2)}. \end{aligned} \quad (16)$$

其中, i 由 $a_i = \max(a_1, a_2)$ 决定.

对于上述三种门限,双传感器融合检测概率和融合虚警概率都不同,因此,双传感器融合准则的选择应根据系统指标要求和多帧检测性能决定.考虑到在实际中两个传感器观测的背景环境不一定相同,则两个传感器多帧检测性能在同一时刻也可能不相同,双传感器融合准则应根据不同的检测条件自适应调整,保证系统一直处于高检测性能的状态.根据上述分析,表 2 给出了在双传感器不同检测性能情况下,双传感器融合后的检测指标.

从表 2 可以得出如下结论:

- “与”逻辑最大限度地降低了虚警概率,检测概率也随之降低;

- “或”逻辑最大限度地提高了检测概率,虚警概率也随之提高;

- “与”和“或”的折中,确保了较高的检测概率和较低的虚警概率.

4 结语

本文从多传感器融合的红外图像检测流程出

发,推导了单帧检测性能、多帧检测性能、多传感器融合性能三者之间的关系,分析了单帧检测性能对多帧检测性能的影响和多帧检测性能对多传感器融合性能的影响.从本文的分析结论可以看出,在单帧检测条件下,只有当图像 $SNR > 5.6$ dB 时才能实现高检测概率、低虚警概率的性能,而采用多传感器融合算法,更低的图像 SNR 就可以实现相近的检测性能.

REFERENCES

- [1] Tzannes A P. Detection of small targets in infrared image sequences containing evolving cloud clutter [D]. PH. D. Dissertation, Northeastern University. Boston, MA. 1999.
- [2] ZHANG Gao-Yu, YANG Wan-Hai. Infrared small weak targets detection via HOSA [J]. *Infrared Technology* (张高煜, 杨万海. 采用高阶谱分析的红外弱小目标检测. *红外技术*), 2005, 27(1): 62—65.
- [3] LUO Jun-Hui, JI Hong-Bing, LIU Jin. Algorithm of IR small target detection based on spatial filter and its application [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外弱小目标检测算法及其应用. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(3): 209—212.
- [4] Tzannes A P, Brooks D H. Detecting small moving objects using temporal hypothesis testing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(1): 570—585.
- [5] NIE Hong-Shan, ZHAO Xin-Yu, CHEN Xiao-Fei. A temporal algorithm for IR fast small targets detection [J]. *Infrared Technology* (聂洪山, 赵新昱, 陈晓飞. 基于时域的红外图像序列中快速运动小目标检测算法. *红外技术*), 2006, 28(6): 319—323.
- [6] LIU Sheng-Peng, FANG Yong. Infrared image fusion algorithm based on Contourlet transform and improved pulse coupled neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘盛鹏, 方勇. 基于 Contourlet 变换和 IPCNN 的融合算法及其在可见光与红外线图像融合中的应用. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(3): 217—221.
- [7] Liviu I V, Ron P, Harley R M. Detection performance prediction on IR images assisted by evolutionary learning [J]. *SPIE on Targets and Backgrounds: Characterization and Representation V*, 1999, 3699: 282—292.
- [8] Mc Williams J K, Srinath M D. Performance analysis of a target detection system using infrared imagery [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, 20(1): 38—48.