

基于机器视觉的红外成像系统探测性能评估*

王晓蕊^{1,2)} 张建奇¹⁾

(¹⁾西安电子科技大学技术物理学院, 陕西, 西安, 710071;

²⁾西安应用光学研究所, 陕西, 西安, 710100)

摘要 在分析红外成像系统的基础上, 提出了一种基于机器视觉的系统探测性能评估模型, 阐述了该种性能评估模型的基本思想、子模块及其预测性能的方法。实验结果表明该性能评估模型能很好地预测复杂背景中目标的探测性能。

关键词 性能评估模型, 机器视觉, 背景杂波, 信号干扰比, 探测性能。

MACHINE VISION BASED IR IMAGING SYSTEM DETECTION PERFORMANCE EVALUATION*

WANG Xiao-Rui^{1,2)} ZHANG Jian-Qi¹⁾

(¹⁾Institute of Technical Physics, Xidian Univ, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

²⁾Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract On the basis of the analysis of IR imaging systems, a kind of IR imaging system detection performance model based on the machine vision is presented. Its fundamental theory, subsystem modules and the prediction methods of the detection performances are illustrated. The experimental results show that this performance model can make a good prediction for the detection performance of the target in complex background.

Key words performance evaluation model, machine vision, background clutter, signal-to-interference ratio, detection performance.

引言

随着红外成像技术的发展, 特别是在军事领域的广泛应用, 对红外成像系统的性能评价显得越来越重要。红外成像系统性能评估模型的研究, 是红外成像系统评估和测试研究领域的一个重要课题, 对于评价红外成像系统本身的性能参量, 预测其在各种复杂环境中的现场性能有着重要的意义, 同时还可以为系统的优化设计和分析提供参考依据。

目前, 国外关于红外成像系统性能评估方面的研究主要集中在以系统的综合性能参量—最小可分辨温差 MRTD 理论模型为基础, 利用约翰逊准则来预测现场性能。但是这种性能评估模型存在许多不足之处: 一是它认为目标和背景都是均匀的, 没有考虑到目标的细节和形状、背景杂波等因素对系统性能的影响; 二是没有考虑到图像处理算法对杂波背

景和系统噪声的抑制作用; 不能正确评价采样不足造成的图像混叠现象。并且这类模型主要用于由人眼来完成探测识别的红外成像系统, 而不适合由机器视觉完成识别的红外成像系统性能的评估。为了准确评估机器视觉的红外成像系统的性能, 本文提出了一种基于机器视觉的红外成像系统性能评估模型, 阐述了这种性能评估模型的基本思想, 分析了影响探测性能的子模块数学模型。最后, 给出利用这种性能评估模型预测探测性能的方法。

1 基于机器视觉的红外成像系统性能评估模型框架

要准确地评估由机器视觉完成识别的红外成像系统的性能, 就必须考虑影响系统性能的所有因素: 目标和背景杂波、大气环境、红外成像系统本身因素和图像处理算法, 并给予详细的数学描述, 图 1 给出

* 国家自然科学基金(批准号 60277005)资助项目
稿件收到日期 2002-10-08, 修改稿收到日期 2003-02-16

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60277005)
Received 2002-10-08, revised 2003-02-16

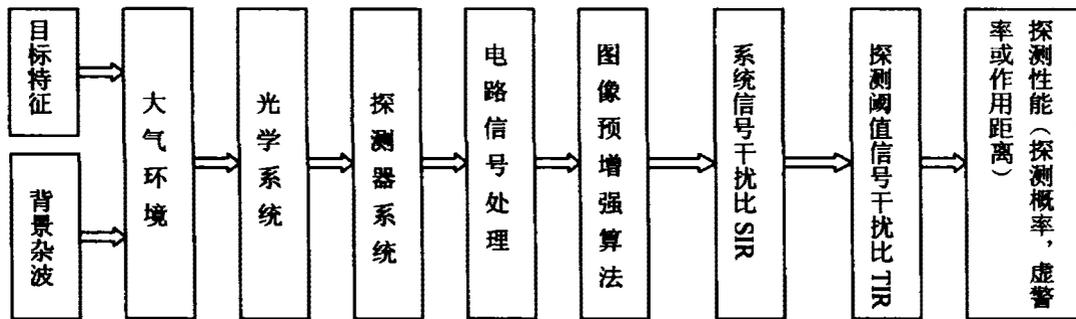


图1 基于机器视觉的红外成像系统性能模型基本框架

Fig. 1 Basic diagram IR imaging system performance model based on machine vision

了基于机器视觉的探测性能评估模型

1.1 基本思想

该探测性能评估模型以系统的信号干扰比(SIR)为理论基础,把目标信号、杂波背景、系统调制传递函数MTF、系统传感器总噪声以及图像处理算法对杂波噪声的抑止作用联系起来,综合考虑了各因素对系统探测性能的影响.利用探测算法所对应的探测信号干扰比阈值以及系统的探测概率与信号干扰比SIR或信号杂波比SCR的积分关系,获得红外成像系统对不同环境、不同距离处目标的探测概率及虚警概率.下面分析影响红外成像系统性能模型各因素模块.

1.2 目标特征和背景杂波

目标特征和背景杂波是红外成像系统性能评估的重要部分.传统的性能评估模型,一般以目标和背景间的对比度—面积权重温差表示目标的特征,没有考虑目标的形状和内部热结构,也没有考虑背景杂波的影响.为此,我们引入了一种改进目标特征模型—统计温差,即以目标和背景的温度均值,温度均方根值来表示目标的特征.

$$\Delta T = \sqrt{(\mu_T - \mu_B)^2 + (\sigma_T - \sigma_B)^2}. \quad (1)$$

同时,采用高斯-马尔可夫功率谱统计模型或巴特沃斯功率谱模型表示背景杂波.对于不严重杂波的情况,可用高斯-马尔可夫模型拟合,而对严重杂波的情况,因其低估了杂波中的高频信息,可利用巴特沃斯模型准确拟合严重背景杂波信息^[1],巴特沃斯功率谱模型为

$$\text{PSD}_{cl}(k) = C_0 / \{1 + (|k|/k_0)^m\}, \quad (2)$$

式(2)中 C_0 , k_0 和 m 参数由测量背景热辐射数据拟合得到,这些参数决定了杂波等级程度.

1.3 大气环境

大气对目标和背景的信号影响主要反应在大气

的消光作用、大气背景辐射、大气湍流以及气溶胶的多次前向散射效应.要准确地预测红外成像系统的现场性能,对大气辐射衰减的定量评价非常重要.本模型不仅考虑了不同天气功的的消光作用,而且还考虑大气的扰动和湍流效应.结合国内具体的大气模式,对大气软件模型LOWTRAN7进行合理的修正.并利用修正的LOWTRAN7软件求得不同分段高度的消光系数,然后利用插值算法求得其他高度的消光系数,最终得到不同方向(水平方向和垂直方向)和不同海拔高度的大气透过率.

1.4 光学系统

光学系统对目标信号的影响,主要表现为光学系统的衰减;光学系统本身产生的衍射、像差和散焦.为了充分的模拟这些效应,引入光学系统的衰减透过率 τ 来描述其对能量的衰减,和用光学传递函数来模拟光学系统对空间频率信息的影响.光学系统的传递函数取决于波长、焦距和孔径的形状.光学系统的总传递函数为衍射、像差和散焦传递函数的乘积

$$\text{OTF}_{\text{optics}} \approx \text{OTF}_{\text{diff}} \text{OTF}_{\text{aberration}} \text{OTF}_{\text{defocus}}. \quad (3)$$

1.5 探测器

探测器对图像质量的影响有三个方面:探测器本身引入的各类噪声、探测器的有限尺寸引入的空间效应和探测器的抖动效应,要正确地模拟探测器对成像系统性能的影响,就要对这三方面分别建模.

系统的灵敏度与系统的时域噪声和固定图样噪声有关.现代红外成像探测器结合了复杂的焦平面结构和成熟的探测器后序处理及电子技术.传统的噪声模型是假设噪声仅随时间变化,在空间上不变,但在面阵成像系统中,探测器在水平和垂直方向上都对图像进行采样,而面阵探测器在水平和垂直方向上响应的不均匀性使得噪声不仅是时间的函数,

也是二维空间的函数. 为了全面定量地描述所有的噪声源, D' Agostino 和 Webb 提出的三维噪声模型, 为分析各种噪声源提供了基本的框架^[2]: 把噪声分成八个部分, 并将时空噪声与三维坐标联系起来.

三维噪声模型

$$U(t, v, h) = S + N_T(t) + N_V(v) + N_H(h) + N_{TV}(t, v) + N_{TH}(t, h) + N_{VH}(v, h) + N_{TVH}(t, v, h), \quad (4)$$

$U(t, v, h)$ 代表实验数据的总值, 是帧、垂直方向和水平方向的函数. S 是所有数据组中所用点的平均值, 它与信号输入(固定平均背景)的响应有关. 而其余各项是用以表征沿三维方向具有特殊性能的 7 种类型的噪声, 这 7 种噪声可分为两大类: 时间噪声和固定图样噪声.

探测器有限尺寸引起的空间频率响应为

$$H_{det}(f_x, f_y) = \text{sinc}(\pi\alpha f_x) \text{sinc}(\pi\beta f_y), \quad (5)$$

α, β 为探测器的水平张角和垂直张角.

探测器的抖动对信号的调制效应由下式描述

$$H_j(f_x, f_y) = \exp(-(2\pi)^2 \sigma^2 (f_x^2 + f_y^2)), \quad (6)$$

σ 为探测器的抖动因子. 采样导致的叠加效应也是影响探测性能的因素, 在此暂不考虑.

1.6 电路处理

在信号处理的电子线路中, 许多前置放大器可以看成是单个或双重的阻容低通滤波器, 交流耦合器可以看成是阻容高通滤波器. 因此热成像系统的信号处理电路可以看作是低通、高通、调制传递函数(MTF)增强电路等滤波器的组合, 在采用数字电路时, 还有各种数字滤波器. 采用不同的处理电路可以得到不同的滤波效果.

电子线路所传递的信号是时域信号, 具有卷积性质, 但卷积积分是单侧的, 即应该用拉氏变换而不是傅氏变换求其传递函数, 且所得到的传递函数对应时间频率域. 在计算热成像系统的传递函数时, 须将电子线路的时域传递函数按 $f_i = \omega f = f \frac{\alpha}{\tau_d}$ 转换成空间频率的传递函数, 才能统一进行计算.

1.7 图像处理算法模块

从成像系统传感器传过来的实时视频图像信息包含有目标信息、背景杂波、噪声等, 为了更利于分辨背景杂波噪声中的目标信息, 通常利用实时图像增强处理算法, 抑止杂波和噪声, 从而增加成像系统的探测能力. 常用的处理算法有: 帧差值处理算法、多帧积分算法、模糊逻辑算法^[3]、形态图像处理算法等等. 例如: 当探测空中目标时, 为了减弱杂波的影响, 通常利用目标相对于背景运动的恒定差值

(从工作平台观察)的算法, 算法中最简单的是 2—帧差值. 此时用一帧的杂波减去另一帧的杂波, 如果目标相对于杂波运动, 它将不会被减掉, 将有比另一帧具有更高的对比度. 目标背景信息经过大气、成像系统传感器, 再经过图像算法处理后, 最后乘余干扰信号的功率谱密度 PSD 由剩余的杂波、传感器噪声, 固定图样噪声 PSD 组成. 经图像处理算法作用后, 干扰信号在很大程度上得到抑止, 系统的探测能力增强. 为了有效定量地评价图像处理算法对成像系统探测能力的改善程度, 引入信号干扰比(SIR)作为评价品质因子, 算法起到了使 SIR 最大的匹配滤波器的作用^[4]. 因此, 理论上可以用匹配滤波器模型($H_{sp}(f_x, f_y)$)来模拟这些算法的增强效果. 不同的图像增强算法对应理论模型是不同. 如: 对于两帧处理可以看作 2-D 滤波器, 多帧处理可以看作 3-D 匹配滤波器.

2 具体系统的信号干扰比数学模型

目标和背景的辐射能量信息经过大气传输、光学系统、探测器系统、实时图像增强处理算法后, 系统的信号干扰比受到以上因素的影响. 假设背景杂波和目标的功率谱密度分别为 $PSD_{cl}(f_x, f_y)$, $H_{tgt}(f_x, f_y)$, 目标与背景的温差为 ΔT , 目标的面积为 A_{tgt} , 大气的消光系数为 τ_{atm} , 成像系统的调制传递函数为 $H_{sys}(f_x, f_y)$ (包含光学系统和探测器), 光学系统的透过率 τ_{opt} , 图像增强算法的调制传递函数为 $H_{sp}(f_x, f_y)$, 成像系统本身噪声功率谱密度为 $S_{sys}(f_x, f_y)$ (包含固定图样噪声和其它类型噪声), 那么, 可知道输出干扰信号包括经图像增强算法处理后的剩余杂波功率、传感器的时域噪声和固定图样噪声功率. 由杂波功率能量传递路线可知, 背景杂波受到大气的衰减, 成像系统和图像增强算法的影响, 分析得到: 系统输出的剩余杂波功率绝对值为

$$\sigma_c^2 = \tau_{atm} \tau_{opt} \iint H_{sys}^2(f_x, f_y) * H_{sp}^2(f_x, f_y) * PSD_{cl}(f_x, f_y) df_x df_y, \quad (7)$$

而噪声产生于探测器, 不受大气和光学系统的影响, 只受图像处理算法的影响, 因此, 输出噪声的功率绝对值为

$$\sigma_n^2 = \iint S_{sys}(f_x, f_y) * H_{sp}^2(f_x, f_y) df_x df_y, \quad (8)$$

则总的干扰为

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}, \quad (9)$$

目标信号和背景杂波一样受到大气、成像系统和图

像处理算法的影响,则输出信号为

$$S_1^2 = \Delta T A_{igt} \tau_{atm} \tau_{opt} \iint H_{igt}(f_x, f_y) * H_{SYS}^2(f_x, f_y) * H_{SP}^2(f_x, f_y) df_x df_y, \quad (10)$$

则系统的信号干扰比为

$$SIR = \frac{S_i}{\sigma_{total}}. \quad (11)$$

3 探测性能与图像探测算法的关系

信号干扰比确定后,探测性能决定于探测算法.当探测算法确定后,应该在预处理阶段通过特殊的处理确保 SIR 以获得所要求的探测性能.对于具有机器视觉的红外成像系统,其是利用自动目标识别算法完成目标探测的,因此探测算法的阈值决定着系统的探测性能.根据不同图像探测算法,不同的分辨等级,可确定探测目标所对应的信号干扰比阈值,然后利用信号干扰比与探测性能的关系,确定探测性能[5].假设辐射强度具有平均值 I_0 ,探测算法的信号干扰比阈值 TIR 已知,则基于机器视觉的红外成像系统的探测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{SIR - TIR}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (12)$$

$$P_f = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{TIR}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (13)$$

式中

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

$$TIR = \frac{T}{\sigma_{total}} \quad T \text{ 为探测算法阈值, } \sigma_{total} \text{ 为系统总}$$

干扰信号.

4 计算实例与分析

本例利用上述性能评估模型对一个典型的红外成像系统作了探测概率计算,具体计算概率值如表 1 所列.其中成像系统具体指标和工作环境如下:

工作波段 8~12 μm ;帧频 25 帧/s;视场为 $5^\circ \times 5^\circ$;光学系统焦距 27.5cm;通光孔径 10cm;透过率 0.7;探测器峰值比探测率 $2 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$;探测元光敏面尺寸 $50 \times 50 \mu\text{m}$;图像多帧积分增强算法(5 帧);图像探测算法阈值信号干扰比为 TIR =

2.5;大气的消光系数 0.075;目标高度为 2m,宽度为 3m;温度为 45° ;发射率为 1;背景温度为 300K;背景杂波参数为 $C_0 = 1.20E + 7 [K^2 / (\text{cycle/m})^2]$, $k_0 = 3.88E - 4 (\text{cycle/m})$, $m = 1.93$, $\sigma_0 = 2.0 (K)$.现场试验结果显示该性能评估模型在误差为 20% 条件下能够很好地预测机器视觉成像系统探测性能.

表 1 不同距离处的目标探测概率

Table 1 Target detection probability at different distances

距离 (km)	8	10	12	14	16
性能评估模型 (Pd)	0.78	0.63	0.58	0.36	0.25
现场试验测试 (Pd)	0.95	0.84	0.76	0.52	0.34

5 结语

本文分析了影响机器视觉红外成像系统性能的几个因素,重点讨论了背景杂波和图像处理算法对红外成像系统探测性能影响的模拟问题,给出了系统性能模型各子模块数学模型和系统探测性能的信号干扰比理论模型.同时结合现有的系统信噪比和探测性能的关系以及机器视觉探测算法,给出了系统探测概率、虚警率、作用距离与信号干扰比的关系.这里仅给出了探测性能的预测,当考虑了跟踪算法之后,可以把该种模型推广应用于系统跟踪性能的预测.

REFERENCES

- [1] Chister Wigren. A generic IRST detection performance model. *SPIE Proceedings*, 2000, **4030**: 206—217
- [2] John D McGlynn, Dino J Sofianos. Parametric Model-based characterization of IR clutter. *SPIE Proceedings*, 1995, **2470**: 236—244
- [3] Agostino J D, Webb C. 3-D analysis framework and measurement methodology for imaging system noise. *SPIE Proceedings*, 1991, **1488**: 110—121
- [4] Thomas J Meizler, Haprpreet Singh, Labib Arefeh, et al. Computing the probability of target detection in infrared and visual scenes using the fuzzy logic approach. *SPIE Proceedings*, 1997, **3063**: 2—11
- [5] HUANG Shi-Ke, LI Li-Juan, CHEN Bao-Guo, et al. Performance evaluation system of signal processing algorithm. *SPIE Proceedings*, 2001, **4553**: 185—190