

红外图像模拟中的红外光学系统影响分析

曾朝阳, 贾云鹤, 戴琼松, 郭海冰
(解放军理工大学, 江苏 南京 210007)

摘要:基于红外成像原理对红外图像的模拟进行了分析,指出现有的红外图像模拟方法主要考虑被成像物的辐射能量分布以及红外探测器像元的视场划分,而忽视了热像仪光学系统对红外辐射信号的衍射效应,从而导致模拟的红外图像边界过于清晰与生硬,影响了模拟图像的逼真度。为考虑衍射效应对热图的影响,利用高斯点扩展函数对模拟热图进行卷积处理,结果表明:处理后的模拟红外图像细节更为逼真,有效的解决了模拟红外图像中边界过于明显的问题,在一定范围内提高了模拟红外图像与真实红外图像的相似程度。

关键词:红外热图模拟;红外光学系统;点扩展函数

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Analysis of infrared optical system influence in infrared image simulation

ZENG Zhao-yang, JIA Yun-he, DAI Qiong-shong, GUO Hai-bing
(PLA Univ. of Sic. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: Based on theory of infrared detection, the process of infrared image simulation is analyzed in this paper. It is pointed out that the present simulation methods only take into account the effects of radiant energy distribution and view field partition of infrared detector pixel. Whereas the diffraction effect of optical system on infrared radiation signal is neglected, which results in very clear boundaries in simulated infrared image. In order to simulate the somewhat blurred boundary in real infrared images, Gaussian point spread function is used to convolve the simulated infrared image. By this way, the similitude between the simulated images and real infrared images is improved significantly.

Key words: infrared image simulation; infrared optical system; point spread function

1 引言

红外图像模拟对于军事防护研究意义重大,原因在于军事目标与背景的红外图像随时间和环境条件而不断变化,有限的野外测试无法提供足够的信息。依据传热学原理对目标背景进行热特性分析,计算出目标背景的昼夜温度变化,再据此模拟出目标背景的热图,反而能够提供比较全面的信息,而野外测试可以作为对模拟计算进行验证的手段。多年来,人们一直尝试通过各种方法来模拟生成红外图像。Hinderer用热能经验数据确定车辆表面片的温度^[1],Gerhart等用热图像模型模拟目标的红外图像^[2]。覃雁冰等用有限元法建立了坦克温度分布

的计算模型^[3]。宣益民等建立了坦克三维瞬态温度场计算模型,并用有限差分法进行数值求解,模拟坦克的红外图像^[4]。于滢文等建立了车身表面热平衡方程,并运用计算机图形学理论设计适合红外图像的绘制方法,给出了地面车辆红外图像的模拟结果^[5]。江照意系统地建立了建筑物、铁路等热红外模型,完成了光学图像向红外图像的转换^[6]。

从文献报道的内容看,现有的红外图像模拟主要依据辐射规律完成从目标背景温度到热像仪灰度

作者简介:曾朝阳(1967-),男,副教授,从事伪装技术与伪装材料研究工作。E-mail: zengzy1212@hotmail.com

收稿日期:2009-05-05;修订日期:2009-06-22

的转换,考虑的因素包括目标背景的辐射特性、大气的传播特性以及红外探测器的物理特性。这样模拟出的红外图像具有真实热图的基本特性,不过在细节上还不够逼真,特别是热图中的边界,模拟的热图往往过于清晰。我们认为,红外热图模拟中对红外光学系统影响的忽视是造成模拟热图边界过于清晰的原因,本文的目的旨在分析红外光学系统对热图的影响,并在热图的模拟中将这种影响考虑进来。

2 热图模拟的基本过程

热图模拟可以看作是在时间、空间、光谱以及辐射能量等方面,对景物红外辐射分布、红外辐射在介质中的传播和在探测设备里能量转换过程的一种模拟。利用计算机进行仿真时,需要考虑景物的几何特征、红外辐射特征、气象条件、成像光学系统、探测器效应等对景物红外图像的影响,同时还需考虑目标和背景的热状态历史。

热图模拟计算中首先要考虑的是一定温度的单位热源的红外辐射能量,考虑到探测器的工作频段,真正有意义的辐射能量是频率处于探测器响应频率范围内的辐射能量,因此,单位热源的辐射能量可以描述为:

$$q = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda \quad (1)$$

其中, λ 是单位热源红外辐射的波长; T 是单位热源的表面温度; C_1, C_2 分别是第一和第二辐射常数。 λ_1, λ_2 是红外成像系统频率响应的下限和上限。

由单位热源表面辐射出的红外信号经过一定距离后才能被探测器接收,这导致辐射信号的衰减。设探测距离是 l , 探测器接收到的辐射能量为 Q , 则有:

$$Q = qe^{-(\alpha_a + \alpha_s)l} = qe^{-\alpha l} = T \cdot q \quad (2)$$

式中, $\alpha_a, \alpha_s, \alpha$ 分别称为大气对红外辐射的吸收衰减系数、散射衰减系数和衰减系数; T 为大气透过率。

当几个单位热源拼成一定的图案后,通过控温使不同单位热源具有不同的温度,则在热像仪上会出现相应的热图。对这样的热图进行模拟,只要知道每个单位热源的温度,按照式(1)转换成辐射能量,然后按照式(2)转换成接收能量,再按照热像仪的灰度转换公式(3)计算出每个单位热源的灰度即可:

$$G = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \times 255 \quad (3)$$

式中, G 是单位热源的灰度等级; Q 是单位热源温度对应的单位面积接收能量; Q_{\max}, Q_{\min} 分别是热图中温度最高和最低的单位热源对应的单位面积接收能量。

真实的红外热图要比理论的热图多出一些随机分布的噪声,这是因为在红外成像系统对目标进行成像时,其接收的辐射信号除了从目标辐射出信号外,还会同时接收到环境中的大气辐射、天空辐射以及探测器周围其他物体散射的辐射信号,因此红外图像不可避免的要受到红外热图噪声的影响,成像系统真正接收的入射信号也就变成了:

$$E = Q_{\text{invir}} + Q_{\text{path}} + T(l) \cdot (Q + Q_{\text{sky}} + Q_{\text{sun}}) \quad (4)$$

式中, Q_{invir} 是探测器接收到的环境辐射; Q_{path} 被称为路径辐射,它实际上是大气散射的红外辐射信号,它们的作用是使红外图像模糊化; $T(l)$ 是距离 l 对应的大气透过率; $Q_{\text{sun}}, Q_{\text{sky}}$ 分别对应太阳辐射和天空长波辐射。

探测器接收的辐射信号被成像系统放大后,就转变成红外热图中相应的灰度信号:

$$G = \frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} [1 + \beta \cdot \text{Random}(x, y)] \times 255 \quad (5)$$

其中, Q_{\max}, Q_{\min} 分别是成像系统视场范围内的最大和最小辐射信号; $\text{Random}(x, y)$ 是像平面上的正态分布随机函数; β 是成像系统的噪声等效系数。从式(4)和式(5)可以看出,正是由于环境辐射,路径辐射等的影响,使红外热图中多了我们不想要,但又不可避免的随机分布噪声,因此在红外热图模拟的过程中,噪声也是必须要考虑的因素。

3 红外光学系统对热图的影响

由于红外光学系统的条件限制,像模糊是红外光学系统成像过程中不可避免的,其原理可用是系统点扩展函数(OTF的傅里叶变换)来说明。如图1(a)所示,红外点光源发出的光透过透镜在探测器靶面上成像,此时靶面上的像点是一个比实际光源点略大的光斑,如图1(b)所示,当其大小大于一个探测器像元时,毫无疑问,每个像元接收到的辐射能量就不仅仅取决于其对应的微视场中的物体,而是与相邻视场中的物体有关。即便是点光源的成像光斑小于探测器像元时,那些处于探测器像元视场边缘的物体所辐射的能量也会被相邻的探测器像元接收到。因此成像时该点光源的光强不仅决定了其对应的中心探测器像元的灰度值,同时也在一定的程

度上决定了其相邻像元的灰度值。在物体成像时，成像物可以看成是多个点光源的集合，它们在探测

器上所成的像点之间相互重叠，这也就造成了红外光学系统成像中的像模糊。

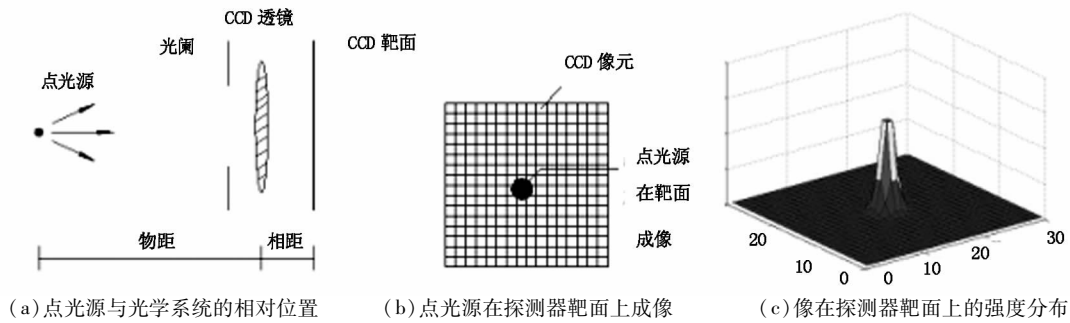


图1 点光源成像示意图

点扩展函数是描述红外成像系统特性的数学函数，是点光源经过红外成像系统后在像面上形成的强度分布^[7]，如图1(c)所示。点扩展函数与理想像进行卷积便可得到模糊的模拟像。在假定红外成像系统具有线性和移不变特性的条件下，成像过程可以表示为^[8]：

$$o(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} i(x'+y')s(x-x',y-y')dx'dy' \quad (6)$$

式中， $o(x,y)$ 为实际成像的亮度分布； $i(x',y')$ 为理想成像的亮度分布； $s(x,y)$ 为系统点扩展函数。上式可以简写成为：

$$o(x,y) = i(x,y) * s(u,v) \quad (7)$$

式中， $*$ 为卷积运算，即实际成像是理想成像与红外成像系统的点扩展函数的卷积。在计算机处理过程中，点扩展函数 $s(u,v)$ 可以应用Matlab软件中的相关程序生成。

4 考虑红外光学系统影响的热图模拟

生成处理模拟红外图像的点扩展函数(PSF)是本文的一个重要环节。由于在光学系统中成像的像点模糊是成像过程中光源点对其相邻像点作

用的结果，所以在热图模拟中可以根据点扩展函数原理对模拟生成的红外图像作卷积处理，模拟红外成像过程中模糊的效果，从而更加逼真的模拟红外图像。

高斯型点扩展函数是许多光学测量系统和成像系统模型中最常见的，本文中的滤波器设计都是在假设点扩展函数形式为高斯函数的基础上提出的。一种典型的高斯点扩展函数模型^[9]：

$$PSF(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (8)$$

运用Matlab软件生成基于上述高斯点扩展函数模型的掩模，如图2(a)、图2(b)所示分别为大小为 5×5 ，标准偏差为0.5的高斯掩模和大小为 9×9 ，标准偏差为0.6的高斯掩模。应用图2(a)、图2(b)所示掩模分别对图3(a)(四块温度灰度图像)进行卷积滤波处理，生成图3(b)和图3(c)。从处理结果中可以看出采用高斯掩模滤波后的图像中各块间边界明显模糊，通过改变高斯函数的参数设置可以调整边界的模糊程度，实验表明：掩模尺寸越大，偏差越大，处理后的图像模糊程度也就越大。

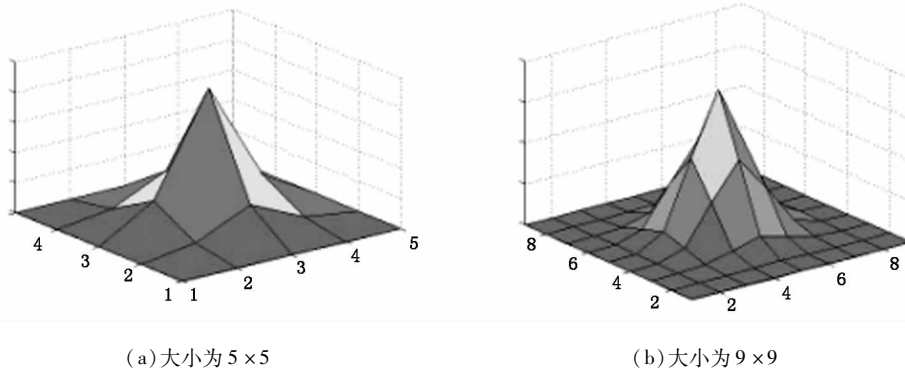


图2 基于高斯型点扩展函数所生成的掩模示意图

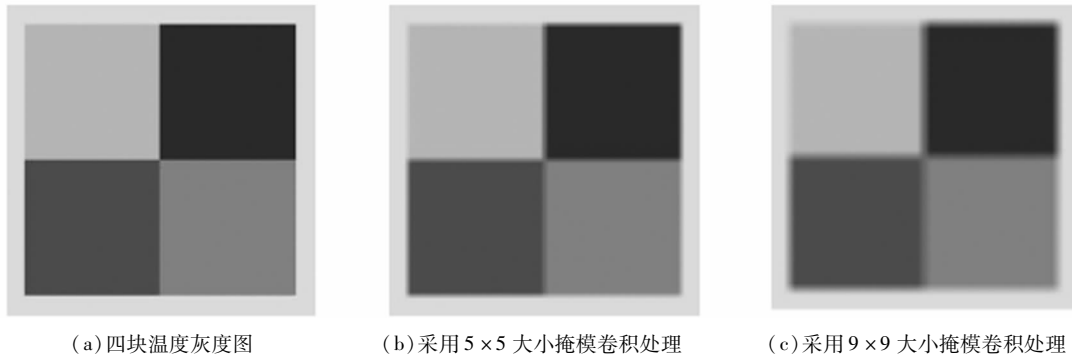


图3 卷积处理前后的图像对比

基于上述的原理与方法,下面对通过光学图像转换,模拟生成的红外热图进行处理。首先对可见光图像图4(a)采用智能剪刀方法^[10]进行分割,然后根据图像中不同的区域的红外辐射赋予相应的红外纹理,生成模拟红外图像图4(b),从该图中可以看到,目标与背景的边缘比较清晰、生硬,不符合红

外图像的特点。基于上述点扩展函数原理生成高斯掩模并对其进行卷积处理,处理后如图4(c)所示,对比可见目标与背景的边界已相对柔和。把卷积处理前后两副图像中目标与背景的边界局部放大,如图5所示,可以明显看到目标与背景的边缘明显相对模糊,更加接近真实的红外图像。



图4 基于高斯型点扩展函数对模拟红外图像的处理效果

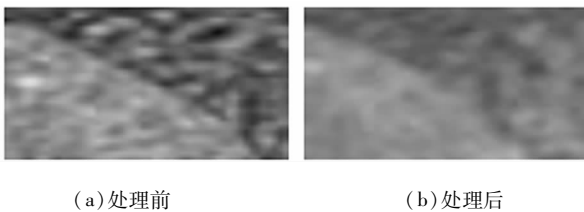


图5 处理前后模拟红外图像中目标与背景的边界对比

5 结 论

研究表明,根据红外成像中的点扩展函数原理,生成高斯掩模,对模拟生成的红外热图作卷积处理,能够使目标与背景的边界模糊,从而有效的解决了模拟生成的红外图像中目标与背景分界过于明显的问题,使其更符合红外光学系统成像的特点,为红外热图模拟的后期处理提供了一种有效方法。

参考文献:

[1] J Hindere. Model for generating synthetic three-dimensional (3D) images of small vehicles [C]//Proceedings of SHIE on Infrared Sensors and Sensor Fusion, Orlando, Florida, 1987, 782:9 - 12.
 [2] G Grehart, G Martin, T Gond. Thermal image modeling

[C]//Proceedings of SPIE on Infrared Sensors and Sensor Fusion. Odando, Florida, 1987, 782:3 - 9.
 [3] 覃雁冰,等. 坦克红外辐射理论模型计算研究[J]. 红外与环境特征研究, 1997, (1):36 - 43.
 [4] 宣益民,刘俊才,韩玉阁. 车辆特征分析及红外热像模拟[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(6):441 - 45.
 [5] 于滢文,刘羿君. 车辆红外图像的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2006, 23(12):209 - 211.
 [6] 江照意,彭群生. 典型目标场景的红外仿真研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.
 [7] Li Y, Kreske K, Rosen J. Security and encryption optical systems based on a correlator with significant output images[J]. Applied Optics, 2000, 39(29):5295 - 5301.
 [8] 周昕,陈建国. 双随机位相编码信息隐蔽传递过程中的融合和重构图像质量的研究[J]. 光学技术, 2004, 30(5):580 - 582.
 [9] 陶青川,邓宏彬. 基于小波变换的高斯点扩展函数估计[J]. 光学技术, 2004, 30(3):284 - 288.
 [10] E N Mortensen, W A Barrett. Intelligent scissors for image composition [C]//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 95, Los Angeles, CA, 1995:191 - 198.