

## 基于 3D 模型的双色红外图像仿真研究\*

马丙辰, 谌海新, 沈振康

(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**基于商用动画和效果软件 Maya 输出的 Wavefront OBJ 文件造型数据, 结合仿真对象的热传递模型和红外传感器模型, 高细节地实现了基于 3D 模型的双色红外图像仿真。仿真结果满足红外图像自动目标识别系统(ATR)的设计需求, 为目标识别算法的验证提供了丰富可靠的仿真图像数据。最后给出了使用 C++语言和 Open GL 在 Microsoft Windows 平台的仿真结果。

**关键词:**热传递; 模型; 仿真; 红外成像; 自动目标识别

**中图分类号:**TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)03-0287-05

## Dual-band IR image simulation based on 3D model\*

MA Bing-chen, CHEN Hai-xin, SHEN Zhen-kang

(School of Electrical Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**Based on the output model data of Wavefront OBJ file, combined heat transfer model and infrared sensor model, infrared images based on 3D model with high details for the use of recognition algorithm are generated. The results meet the needs of Automated Target Recognition (ATR) system and provide rich and reliable IR images for testing of ATR algorithm. Finally, the simulated images are presented under the platform of Microsoft Windows and Open GL with C++.

**Key words:**Heat transfer; Model; Simulation; Infrared imaging; ATR

### 0 引言

红外焦平面凝视成像和双色红外体制的出现与发展使得目标信息融合、计算机视觉、图像理解和其他人工智能方法成为自动目标识别系统中的技术手段。然而由于费用、安全限制等因素使红外数据的获取成为限制其进一步发展的原因之一。超大规模集成电路的发展和 PC 机性能的提高为模拟红外图像数据提供了可能, 借此模拟出不同环境下不同特性目标的

红外数据, 这对于研究和测试高性能的目标识别系统是十分重要的。

目前, 直接使用红外目标仿真软件包、采用经验赋值方法、结合传热学定律和红外传感器模型是红外目标仿真工作的三种主要思路。可是, 如 Vega 的 Sensor Vision、美国空军地球实验室的 LOWTRAN 7 等仿真软件包尽管有便于快速开发和可信度较高等特点, 同时也有价格高, 不便定制等不足; 通过对红外目标表面直接赋经验灰度值可在特定的场景下重现

收稿日期: 2004-06-30; 修订日期: 2004-08-25

\* 基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(51483020203KG0111)

作者简介: 马丙辰(1976-), 男, 河南灵宝人, 硕士生, 主要从事场景仿真、目标识别研究。

红外图像,具有真实性较强的优点,但对实验条件要求较高,并且还需确保实验可行,同样具有不便定制和实验费用高昂的不足;第三种思路采用传热学规律自建模型,结合大气传输模型和红外传感器模型完成仿真工作。这种思路从原理上给出了系统的实现,然而模型复杂、工作量庞大。当前第三种思路的应用热点多在自动目标识别系统的算法验证上,并且多采用简化模型,这也是本文主要讨论和采用的思路,在不影响识别算法验证的基础上,本文的仿真工作暂不考虑大气传输模型的影响。

近年国内外已对红外目标的热学模型和红外成像传感器仿真及其在自动目标识别的应用方面进行了广泛、深入的研究。J.V.Black 在仿真红外与可见光图像后重点阐述了后期的融合工作<sup>[1]</sup>; Aaron D.Lanterman 等人使用一种全新的自顶而下的方法实现了红外目标自动识别并且把这种方法推广到了其他传感器模型<sup>[2]</sup>; Gavin Powell 等人使用其特殊模型完成了红外和激光雷达数据的仿真工作<sup>[3]</sup>; 张智丰等人在模型仿真的同时考虑了大气因素的影响<sup>[4]</sup>。但是,基于双色红外目标识别的仿真研究还提之甚少。本文系统地描述了 3D 模型双色红外成像仿真的热传递模型、红外传感器模型、仿真算法,并给出了仿真得到的细节丰富的、具有较高真实度的双色红外图像。工作的特色之处就在于完成了双色红外系统的图像仿真,为目标识别算法提供了可信而有价值的数据库。

仿真系统中使用了细节丰富的造型数据、适当的热传递模型、恰当传感器模型来获得自动目标识别系统所需数据。

### 1 系统组成

Maya 的 Wavefront OBJ 文件作为一种模型数据,其商用模型和互联网上大量的免费模型都为造型数据提供了诸多便利,也为按需构造模型提供了可能。对象模型借助 OBJ 文件的诸多便利,先结合本系统的热传递模型完成温度换算,再结合传感器模型完成热流换算和噪声叠加,最后得到自动目标识别系统所需的双色红外图像。

系统组成框图如图 1 所示,其中的主要模块按处理过程分为数据输入、仿真过程和图像应用三部分。

数据输入部分读入模型数据和仿真参数的调整信息。仿真过程主要包括五个阶段。首先,根据仿真数据细节需求和仿真环境确定热传递模型,计算出目标表面相应的温度场分布;其次,根据黑体辐射力  $F_{0-\lambda T}$  与  $\lambda T$  的关系得到面片的波段辐射,这样就得到了某波段在温度  $T_s$  时的辐射热量  $W(T_s)$ ;然后,根据探测器的响应得出其输出;最后即得出所需的红外数据。仿真结果经过后处理广泛应用于场景合成、目标识别或导航等领域。

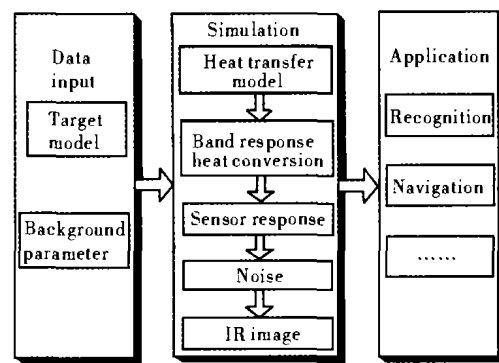


图 1 系统组成框图

Fig.1 Diagram Of system framework

### 2 热传递模型

物体的热像与其表面温度、材质和结构等因素有关,以一飞机红外图像的仿真过程为例,建立其热传递模型。红外探测仪敏感于飞机的表面温度。隐于模型内的发动机与太阳辐射是其主要热源,因而适于用面元分析法仿真此过程。

飞机内部的热源简化为点热源,见图 2(a)。由傅

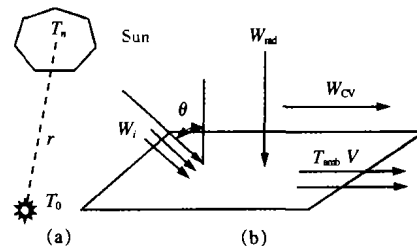


图 2 热传递模型

Fig.2 Heat transfer model

里叶定律,一维情况下热传导公式为:

$$q = \lambda(T_0 - T_n) / r \quad (1)$$

式中  $q$  为热流密度;比例系数  $\lambda$  为导热系数; $T_0$ 、 $T_n$  分别为点热源和模型面片温度; $r$  为点源到面片的距离。

太阳辐射如图2(b)所示。其中  $W_i$  为太阳辐射; $\theta$  为太阳入射方向与面片法线方向的夹角; $W_{abs}$  为面片吸收的热量; $W_{cv}$  为对流损失的热量; $W_{rad}$  为面片辐射的净热量; $W_{bal}$  是其他原因引起的热量损失; $T_{amb}$  和  $V$  分别是气温和风速。设各面片相互独立,当在任一给定时刻,进入面片的热量等于流出的热量,则有:

$$W_{abs} = W_{cv} + W_{rad} + W_{bal} \quad (2)$$

若再用  $\alpha_s$  表示材质表面对日光的吸收率; $h$  表示表面对流传热系数(它与风速,空气的热物理属性和表面的几何形状有关); $\varepsilon$  表示物体表面的红外发射率; $\delta$  表示斯蒂芬-波耳兹曼常数。 $W_i = \frac{A}{\exp(B/\sin\alpha)}$  是太阳的入射热量, $\alpha$  是纬度角,从表达式可以看出,其值可由经验模型得到,当然,也可由日射强度计直接测得。则公式(2)中  $W_{abs} = W_i \alpha_s \cos\theta_i$ ;  $W_{cv} = h(T_s - T_{amb})$ ,  $h = 0.733|T_s - T_{amb}| + 1.9v + 1.8h^{[4]}$ ; 根据斯蒂芬-波耳兹曼定律,  $W_{rad} = \varepsilon \delta (T_s^4 - T_{amb}^4)$ ; 根据参考文献[5]有  $W_{bal} = RW_{abs}$ ,  $R$  在户外场景对象的热特征分类中具有特殊特征,同时,在确定对象和环境的情况下可取常数。展开公式(2),可得:

$$\delta\varepsilon T_s^4 + hT_s + (R-1)W_i\alpha_s\cos\theta_i - hT_{amb} - \delta\varepsilon T_{amb}^4 = 0 \quad (3)$$

其中对于一般的室外物体,取  $\varepsilon = 0.9$ 。

在解公式(3)时,若  $\theta_i > \pi/2$ ,此时太阳辐射不对此面片产生影响,令面片温度等于环境温度,  $T_s = T_{amb}$ ; 否则使用 Bairstou 方法解关于  $T_s$  的一元四次方程(3),得正实数  $T_s$ 。

综合公式(1)和(3),面片的温度可以表示为:

$$T_i = T_n + T_s \quad (4)$$

对于无源红外目标的表面温度,直接取  $T_i = T_s$ 。

### 3 热像仿真

#### 3.1 波段辐射力

根据斯蒂芬-波耳兹曼定律,黑体辐射  $W_b = \delta T^4$ 。

此时要求  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  范围的辐射能量  $W_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ 。

设该波段辐射能量占全辐射能量的百分比为:

$$F_{\lambda_{1r}-\lambda_{2r}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} W_{b\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\lambda_2} W_{b\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} W_{b\lambda} d\lambda}{\delta_b T^4} = F_{0-\lambda_{2r}} - F_{0-\lambda_{1r}} \quad (5)$$

则

$$W_{b(\lambda_1-\lambda_2)} = F_{\lambda_1-\lambda_2} W_b \quad (6)$$

参考文献[6]给出了  $F_{0-\lambda T}$  与  $\lambda T$  的关系如表1所示。最后,根据公式(6)得出波段辐射力  $W_{b(\lambda_1-\lambda_2)}$ 。

表1  $F_{0-\lambda T}$  与  $\lambda T$  的关系

Tab.1 Relationship of  $F_{0-\lambda T}$  and  $\lambda T$

$\lambda T \times 10^{-3} \mu mK$	$F_{0-\lambda T}$	$\lambda T \times 10^{-3} \mu mK$	$F_{0-\lambda T}$
0.70	0.00000	1.20	0.00213
0.80	0.00002	1.30	0.00431
0.90	0.00009	1.40	0.00779
1.00	0.00032	1.50	0.01284
1.10	0.00091	1.60	0.01971

#### 3.2 探测器输出

假设探测器是线性的,参数可从实验获得。若对于温度为  $t_1$  和  $t_2$  的黑体,红外探测器的输出为  $o_1$  和  $o_2$ ,则对于温度  $t_s$ ,探测器输出为:

$$o = kW(t_s) + c \quad (7)$$

式中  $k = (o_2 - o_1) / (t_2 - t_1)$ ;  $c = o_1 - kW(t_1)$ 。

为了得到更加真实的图像,有必要加入由于镜头引起的图像模糊、红外探测器的量化噪声以及红外探测器的坏点和饱和点。图像模糊效果用高斯点扩散函数(PSF)模拟;量化噪声通过加入随机噪点模拟;探测器的坏点和饱和点用椒盐噪声模拟。

#### 3.3 热像输出

把探测器的辐射亮度均匀量化成灰度等级。设探测器的辐射亮度  $o$  对应的灰度为  $G$ ,探测器的辐射亮度最大、最小值  $o_{max}$ 、 $o_{min}$  分别对应灰度最大、最小值  $G_{max}$ 、 $G_{min}$ ,则:

$$G = \frac{o - o_{\min}}{o_{\max} - o_{\min}} (G_{\max} - G_{\min}) + G_{\min} \quad (8)$$

最后,从 Open GL 视图窗口输出所需的热像。

### 4 结果

本文使用奔腾 IV 2.0 G 处理器、512 M 内存、Windows 2000 操作系统、Micorsoft VC6.0 的开发环境完成了模型的绘制和双色红外图像的仿真工作。

图 3 是本文所用的战斗机模型 F-16 的网线图,造型数据由 10 个组共计 4592 个三角形面片组成。为了方便计算,战斗机 F-16 造型数据加载后先进行归一化;内热源设在机尾处,坐标为(0,0,-0.8);假设飞行时间是夏日的正午 12 点钟;飞行速度为 300 m/s;太阳辐射热量为 312 W/m<sup>2</sup>;大气温度为 300.0 K;日光吸收率为 0.8;材质的发射率为 0.91。

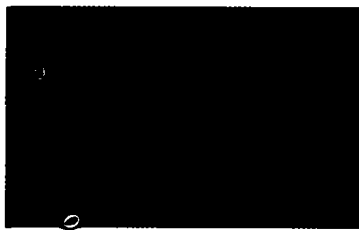


图 3 本文所用的飞机模型  
Fig.3 Fighter plane model used in the artical

表 2 给出了计算过程中由于内外热源引起的温度值和变化范围。表 3 给出了两个波段下辐射力的最大、最小值和变化范围。

图 4 和图 5 分别为只考虑内热源和只考虑太阳

表 2 内外热源引起的温度变化

Tab.2 Temperature change caused by heat source

Heat source	Temperature/K		
	Min	Max	Range
Out	300.0	326.6	26.6
In	393.1	681.9	288.8
SUM	693.1	1008.5	315.4

辐射时模拟的 F-16 灰度图像。从图 5 可以看出,模型面向太阳方向一面亮度较大、背对太阳方向的一面亮度较小,证实了前述可见面判断方法的正确性。

表 3 波段辐射力

Tab.3 Band radiation

IR band/ $\mu\text{m}$	Radiation/Wm <sup>-2</sup>		
	Min	Max	Range
3-5	3922	21136	17214
8-14	2921	6251	3330



图 4 内热源对模型表面灰度的影响  
Fig.4 Effect of heat source in the model on surface grey of the model

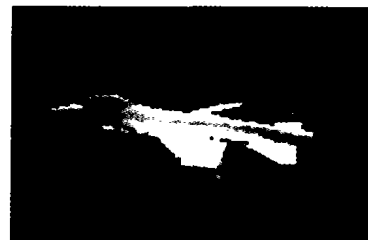


图 5 太阳辐射对模型表面灰度的影响  
Fig.5 Effect of heat source of sun on surface grey of the model

图 6 和图 7 分别给出了不考虑大气衰减时用中波红外(3~5  $\mu\text{m}$ )和长波红外(8~14  $\mu\text{m}$ )模拟的 F-16 未赋伪彩值的灰度图像和噪声叠加效果。在图中,(a)为模型红外仿真原始图像;(b)为加入点扩散函数后的图像,用来模拟由于镜头引起的图像模糊;(c)为加入随机噪声后的图像,用来模拟量化噪声;(d)为加入椒盐噪声后的图像,模拟坏点和饱和点的情况。

### 5 结束语

本文使用传热学原理,分析了空中目标在太阳辐

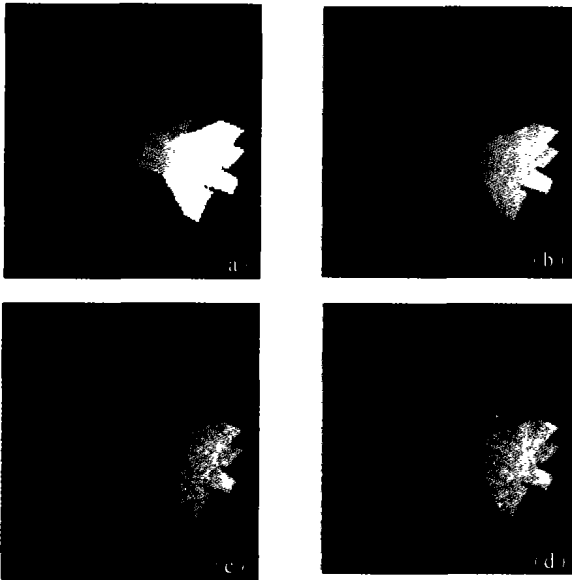


图6 中波红外(3~5 μm)仿真

Fig.6 Medium wave IR (3~5 μm)simulation



图7 长波红外(8~14 μm)仿真

Fig.7 Long wave IR (8~14 μm)simulation

射、内热源辐射和对流等因素影响下的热平衡方程,求出目标表面的温度场分布,并因之导出波段辐射,

借助热像仪的传感器模型,附加噪声后,得到目标的双色红外图像。

本文完成了双色红外图像的仿真工作,仿真结果为目标识别算法提供了可靠的数据;同时,在结构上为后续的红外仿真工作提供了系统框架。实验图像表明,文中所得仿真结果具备红外图像特征,满足了设计要求,并有一定的通用性。为了使仿真结果得到普遍应用,可以通过修正文中所提的一些简化模型(如探测器的响应函数)和增加大气衰减模型得到更为真实的数据;通过增加对象的纹理和与背景合成得到更为逼真的视觉效果,其中通过此方案获得的3D目标的红外图像和通过投影和几何变换已有红外背景可方便地合成所需的红外场景。

#### 参考文献:

- [1] Black J V. Fusion of infrared and visible-light images[A].Command Information Systems Workshop: 1st CIS Workshop[C].1994. 316-325.
- [2] Lanterman A D, Miller M I, Snyder D L. Automatic target recognition via the simulation of infrared scenes[A]. In Proc of the Sixth Annual Ground Target Modeling and Validation Conference[C]. Michigan: Keweenaw Research Center, Michigan Tech Univ, 1995, 195-204.
- [3] Powell Gavin, Martin Ralph, David Marshall, et al. Simulation of FLIR and LADAR data using graphics animation software[A]. Pacific Conference on Computer Graphics and Applications[C]. 2000. 126-134.
- [4] 张智丰, 李向新, 彭群生. 基于大气传输模型的动态目标红外成像仿真[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 524-527.
- [5] Nandhakumar N, Aggarwal J K. Integrated analysis of thermal and visual images for scene interpretation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(4): 469-480.
- [6] 俞佐平, 陆煜. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.

(上接第286页)

- [6] Nahrsted D A. Cloud modeling for laser weapon propagation analysis[A]. SPIE[C]. 2002, 4034. 69-82.
- [7] Allen J H, Malick J D. The Frequency of Cloud-Free Viewing Intervals[R]. 1983, AIAA-83-0441: 10-13.
- [8] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射-(1)云气候学和云的辐射作用[J]. 大

气科学, 1994, 18: 910-932.

- [9] 汪宏七, 赵高祥. 云和辐射-(2)环流模式中的云和云辐射参数化[J]. 大气科学, 1994, 18: 933-956.
- [10] 汪宏七, 赵高祥. 云微物理特性对云光学和云辐射性质的影响[J]. 应用气象学报, 1996, 7(1): 910-932.