

目标高真实感红外图像生成方法

黄曦, 张建奇, 张绍泽, 吴鑫

(西安电子科技大学 技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 为满足仿真实验对高真实感目标红外图像的需求, 提出了一种基于实测图像与三维数字仿真相结合的红外图像生成方法。通过测量获得物体表面实际辐射分布, 以此为基础数据, 建立真实温度分布的数学反演模型, 生成目标红外纹理。再将纹理映射到几何模型, 利用三维渲染技术生成高真实感红外图像。实验结果表明: 该方法仿真灵活性强, 生成的目标红外特征自然、准确, 纹理细节丰富, 图像实用性强。

关键词: 图像生成; 红外目标; 数字仿真; 测量数据; 温度反演

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1084-05

Realistic infrared image generation method of target

Huang Xi, Zhang Jianqi, Zhang Shaoze, Wu Xin

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To meet the great demand of realistic infrared images of target for simulation experiments, a realistic infrared target image generation method was proposed, which based on the combination of measured data and three-dimensional simulation. The surface radiation distribution of target was measured, which was used as input data to a retrieval model for target temperature distribution. Then the infrared textures of target were created using the retrieved temperature distribution, and mapped to a three-dimensional geometry model. The realistic infrared image was generated by 3D rendering technique. The experiments demonstrate that the generation method is good flexibility, and the infrared images are accurate in infrared feature, rich in texture detail and strong in practicality.

Key words: image generation; infrared target; digital simulation; measured data; temperature retrieval

收稿日期: 2012-09-09; 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费基金(K50511050002)

作者简介: 黄曦(1977-), 男, 副教授, 博士生, 主要从事光电场景仿真方面的研究。Email: xhuang@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 张建奇(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电虚拟现实、光电成像系统仿真方面的研究。

Email: jqzhang@mail.xidian.edu.cn

0 引言

可信、丰富的目标红外图像是进行仿真实验时必需的数据源,被广泛应用于红外成像系统研制、测试与性能评估等研究。通过外场试验获取的实际测量图像具有准确、真实的特点,是最可信的,一直是仿真实验中最重要的一类测试图像^[1]。然而,在进行目标图像采集时,波段、目标观察距离、角度、图像分辨率、噪声等参数随成像过程被固化下来,这意味着无法将真实可信的实测图像运用于闭环仿真、半实物仿真等重要的仿真方法,数据应用缺乏灵活性。

另一种获取仿真实验测试图像的重要方法是采用三维红外场景数字仿真技术,生成大量不同波段、距离、天气状态下的动态红外图像^[2]。该方法能满足仿真实验对灵活性的要求。基于三维仿真技术生成目标红外图像的关键步骤是生成目标温度场,目前常用方法有两种:经验确定法与理论预测法。经验确定法是根据目标材料、结构及经验,人工给目标直接赋以温度值,如 Vega Prime^[3]中支持的温度描述接口法。这种方法操作性复杂,设计者往往简单地用有限几个温度值对物体进行简单描述,导致温度分布非常粗糙和随意,纹理不自然,可信性较差。理论预测法通常是基于热平衡理论和热传导过程方程,对物体几何外形进行不同的网格划分,采用数值计算方法联立求解微分方程组,计算物体表面温度分布^[4-5]。由于目标的红外辐射特征不仅与目标自身材料、结构、热特性参量有关,还与大气、目标周围环境及过去的热状态有关,理论预测法用于计算复杂几何结构的物体表面温度时误差较高,缺乏纹理细节,可信性有待提高。因此,数字仿真方法生成的目标图像虽具有很好的灵活性,但在真实感方面有较大的缺陷。

根据上述分析,实测法或数字仿真方法的优缺点具有互补性,因此有研究者提出了将实测与数字仿真相结合的图像生成方法。在计算机图形学研究领域,通过实测获得物体表面的双向反射率分布函数,以之生成目标高真实感的纹理,并结合三维渲染技术仿真目标,是生成照片级真实感的仿真图像的主要方法^[6]。另外,基于几何信息的多视点图像绘制研究中,也是基于实测图像与三维渲染结合来生成复杂环境可见光仿真图像^[7]。但是这些研究都针对的是可见光波段,其目标特征提取技术、仿真图像的三维渲染方法等研究成果都不能直接应用于红外波

段。针对红外波段,Sanders^[8]通过实测图像与PRISM (Physically Reasonable Infrared Signature Model)模型结合来获取物体的高真实感红外纹理,成功应用于基于网络的目标辨识训练系统;但其对测量数据的处理没有考虑环境衰减和成像模糊的校正与补偿,重建的目标特征误差较大。另外,笔者开展过初步研究^[9],但早期的工作在测量数据的处理上只简单考虑了大气衰减校正,提取的目标特征精度与纹理细节有待提高;且没能解除固化于实测图像上波段,仿真灵活性有待改进。

为提高目标红外仿真图像的逼真度与应用灵活性,文中提出了改进的目标红外图像生成方法。

1 高真实感目标红外图像生成

1.1 高真实感目标红外图像仿真流程

以实测图像为基础,结合三维数字仿真技术的红外图像生成流程如图1所示。

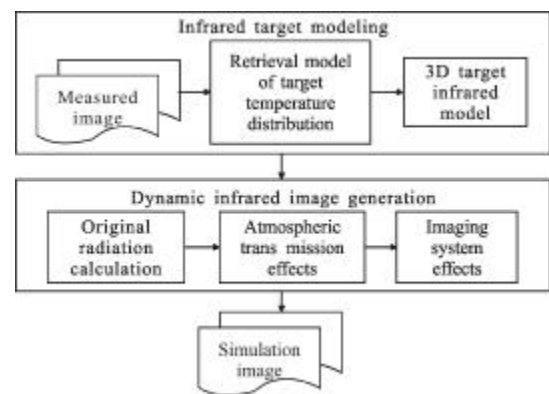


图1 高真实感目标红外图像仿真流程

Fig.1 Simulation flow of realistic infrared target image

实际测量结果是对目标辐射直接和真实的反映,所以基于实测图像生成目标温度分布场能有效地保留目标辐射特征细节。由于图像获取的辐射不仅是目标自身辐射,还混合了环境辐射、大气传输与热成像设备等多因素的影响,为将目标自身特征与其他混合辐射、成像波段、观察距离等因素进行解耦,需要建立从测量辐射到温度分布的数学反演模型,对实测数据进行校正与补偿,生成目标真实温度分布。

获得的目标温度特征虽真实感高,但仍存在应用不灵活的缺点。为此,首先采用纹理映射技术将反演生成的目标红外特征映射到三维几何模型,完成目标三维红外建模。然后利用三维红外渲染技术,将

目标、背景、大气与成像系统进行综合表达。最终根据环境气象与几何观察参数生成各波段的高真实感红外图像。

1.2 红外成像系统模型

根据上述仿真流程,首先目标温度场反演模型需要基于图像采集的逆过程进行建模,其次动态红外图像生成需要模拟目标经大气、成像系统影响后的图像。为满足这两个需求,应建立红外成像系统模型。

(1) 信号响应特性

目标自身辐射与反射辐射混合在一起,组成目标本征辐射 M_{it} ,可表示为:

$$M_{it}(\theta, \varphi) = \varepsilon M_e(T_t, \theta, \varphi) + \rho \int_{\Omega} L_{env}(\theta', \varphi') \cos \theta' d\omega + \rho(\theta_s, \varphi_s, \theta, \varphi) M_s(\theta_s) \cos \theta_t \quad (1)$$

式中: $M_{it}(\theta, \varphi)$ 表示从目标处发出的朝向观察方向 (θ, φ) 的本征辐射; ε 为目标发射率; $M_e(T_t, \theta, \varphi)$ 为表面温度为 T_t 的目标辐出度; ρ 为目标长波反射率; $L_{env}(\theta', \varphi')$ 为从方向 (θ', φ') 入射到目标表面的环境散射辐射; Ω 为目标表面的半球空间; $\rho(\theta_s, \varphi_s, \theta, \varphi)$ 为目标双向反射率分布函数; $M_s(\theta_s)$ 为目标表面接收的入射天顶角为 θ_s 下的太阳辐照度; θ_t 为目标表面法向与太阳照射方向之间的夹角。

本征辐射在大气传输过程中被衰减,然后叠加上路径大气程辐射后到达红外成像系统,即为镜头前目标表观辐射 M_{ap} ,表示为:

$$M_{ap}(\theta, \varphi) = \tau_a(r) M_{it}(\theta, \varphi) + M_{path}(r) \quad (2)$$

式中: $\tau_a(r)$ 为路径 r 的大气平均透过率; $M_{path}(r)$ 为路径 r 的程辐射。

表观辐照度经光学系统会聚到探测器并被吸收。在一定的增益设置下,成像单元吸收的辐射将线性转化为信号电压 V ,则有:

$$V = g \tau_o A_d R_{ave} \Omega_s M_{ap}(\theta, \varphi) + V_{off} \quad (3)$$

式中: g 为系统的响应系数; τ_o 为光学系统平均透过率; A_d 为光敏元面积; R_{ave} 为探测器平均响应度; Ω_s 为探测单元凝视瞬时视场(IFOV); V_{off} 为直流偏置电压(黑色电平)。

(2) 空间传递特性

空间传递特性在图像效果上表现为模糊,可利用系统总的调制传递函数 $MTF(u, v)$ 进行模拟,其频域表示式为:

$$G(u, v) = F(u, v) \cdot MTF(u, v) + N(u, v) \quad (4)$$

式中: $G(u, v)$ 为探测器输出的模糊退化图像; $F(u, v)$ 为输入图像; $N(u, v)$ 为噪声。

成像系统总的 MTF 等于光学系统、探测器和信号处理模块 MTF 的乘积,只与系统自身参数有关。

(3) 盲元与噪声

盲元和噪声是由于红外敏感元件、读出电路、半导体特性及放大电路等各种因素综合影响下产生的,从信息组成的角度来看,含有坏点的实际红外图像可以认为是由理想图像(即设系统不含盲元和随机噪声所生成图像)叠加上盲元信号和噪声,数学模型表示为:

$$X(x, y) = Y(x, y) + B(x, y) + u(x, y) \quad (5)$$

式中: $X(x, y)$ 表示系统实际输出红外图像灰度值; $Y(x, y)$ 表示系统的理想输入图像灰度值; $B(x, y)$ 是叠加在图像 (x, y) 位置的盲元信号; $u(x, y)$ 是噪声灰度值。

1.3 目标温度场反演模型

根据成像的逆过程来建立目标温度场反演模型,即首先对图像盲元与噪声进行抑制,然后对像质进行补偿,最后完成信号衰减校正,获得表面真实温度分布。

(1) 噪声抑制与盲元补偿

对于随机噪声,测量时保持目标、成像系统静止以获取多帧图像,对图像进行积分与平均来实现噪声抑制。

对于盲元,其中固定盲元在测量时由成像系统自动补偿。随机盲元采用基于场景的自适应检测算法检测出盲元,然后利用盲元周围的有效图像信息进行盲元补偿。

(2) 像质补偿

由公式(4)的像质模糊模型,在频域中将退化图像 $G(u, v)$ 乘以逆滤波函数,即可获得原始图像 $F(u, v)$ 的傅里叶变换估计 $\hat{F}(u, v)$ 。由于噪声项的影响,直接以 MTF 的倒数来构建逆滤波函数效果并不理想。为此采用维纳(Wiener)滤波法来构建频率域的维纳滤波器算子,可表示为:

$$P(u, v) = \frac{1}{MTF(u, v)} \cdot \left[\frac{MTF(u, v)^2}{MTF(u, v)^2 + K} \right] \quad (6)$$

式中: $P(u, v)$ 是维纳滤波器; K 与图像信噪比有关,为信噪比倒数,通常可用一个先验常数代替; MTF 可建立系统各部分的理论模型计算获取,或是测量实际系统获取。

利用维纳滤波器算子,可构建图像模糊补偿算法为:

$$\hat{F}(u, v) = G(u, v) \cdot P(u, v) \quad (7)$$

(3) 信号衰减校正

整理公式(1)~(3),并记 $g\tau_a R_{ave} \Omega_s$ 为 C_k ,有:

$$M_e(T_1, \theta, \varphi) = \left\{ \frac{V - V_{off}}{C_k} - M_{Path}(r) \right\} / \tau_a - \rho \int_{\Omega} L_{env}(\theta', \varphi') \cos \theta' d\omega - \rho(\theta_s, \varphi_s, \theta, \varphi) M_s(\theta_s) \cos \theta_s \} / \varepsilon \quad (8)$$

式中:在 MODTRAN4 程序的计算基础上进行加工可获得 $M_{Path}(r)$ 、 $\tau_a(r)$ 、 $L_{env}(\theta', \varphi')$ 、 $M_s(\theta_s)$ 等分量。 ε 、 ρ 、 $\rho(\theta_s, \varphi_s, \theta, \varphi)$ 等参数可采用经验值或测量值。 C_k 与 V_{off} 由定标实验确定。具体方法是通过将黑体放置在成像系统镜头前,其温度分别设定为 T_1 和 T_2 ,根据黑体公式计算出辐亮度分别为 $M_{bb}(T_1)$ 和 $M_{bb}(T_2)$,记录输出的电平值分别为 V_1 和 V_2 。由公式(3),可建立线性方程组:

$$V_1 = C_k M_{bb}(T_1) + V_{off} \quad V_2 = C_k M_{bb}(T_2) + V_{off} \quad (9)$$

解公式(9)的线性方程组即可求得 C_k 与 V_{off} 。

然后根据黑体公式,建立给定积分波段下黑体辐射度 M 与温度 T 的查找表,使用查表法计算 $M_e(T_1, \theta, \varphi)$ 对应的表面真实温度 T_1 。

对红外测量图像上目标每个像素进行信号衰减校正,结果组成了目标表面温度场。

1.4 目标红外图像生成

反演模型生成的目标温度场为二维场,且一张测量图像只能反映物体一个观察角度下的信息,为能自由观察三维目标,首先需要环绕目标进行不同角度的测量,利用反演模型生成目标各角度的温度场,结合发射率、双向反射率等参数,按红外图像动态仿真软件的要求将这些参数组织为浮点格式的 DDS(DirectDraw Surface)纹理。其次,需要建立这些环绕目标、不同角度的二维纹理与三维几何模型顶点之间的坐标映射关系。纹理映射确定了三维目标每个顶点具体对应到纹理上哪个像素的温度、反射率、双向反射率,即重建了目标的三维温度场。由于对非规则物体进行从纹理像素点(二维坐标空间)到模型顶点(三维坐标空间)的映射非常难以操作,文中采用 3DS Max 提供的反向映射技术实现了纹理映射,生成了目标三维红外模型。具体方法是利用

Unwrap UVW 功能将三维空间里的模型顶点投影到顶点二维拓扑平面,再在该拓扑平面上移动顶点,与相应的纹理像素点建立坐标映射关系。

为生成目标图像,还要将目标模型加载到红外图像动态仿真软件中。文中采用自研的基于 GPU 的三维红外场景渲染引擎 PRISSE (Physically Reasonable Infrared Scene Simulation Engine)完成这一工作。首先利用顶点着色器将三维模型顶点从世界坐标空间转换到投影空间,并进行裁剪与光栅化处理。接着在片段着色器中根据顶点的采样坐标、表面法向、太阳方位、相机位置等参数,分别获取温度、发射率、反射率、太阳直射辐射、背景辐射等数据,采用公式(1)所建立的辐射模型计算目标本征辐射。第三步继续利用片段着色器,根据观察点的海拔高度、天顶角与目标距离,获得大气透过率和大气路径辐射,根据公式(2)所建立的辐射传输模型计算目标表观辐射。最后,利用片段着色器的 PostProcess 技术,在表观辐射图像上叠加成像系统的 MTF、噪声等系统效应,完成不同的几何观察参数下目标红外图像的生成。

2 仿真结果及分析

利用法国 CEDIP 红外系统公司的长波 JADE 3/III LWIR 热像仪采集了某型坦克的红外图像。以 4 个侧面与顶部图像为数据源进行了温度场反演,建立了目标三维红外模型,利用 PRISSE 加载目标后生成了仿真图像。仿真图像与实测图像、经验确定法与理论预测法^[5]生成图像的纹理细节对比如图 2(a)~(b)所示。

从图 2 可以看出,文中方法生成的目标图像其温度特征与实际目标较吻合,较好地保持了目标表面的纹理细节。而经验确定法与理论预测法生成的目标图像,纹理细节都比较少,不同温度区域的过渡不够自然。对比结果显示文中方法具有较高的真实感。

图 3 给出了 PRISSE 仿真生成的对目标不同距离和角度进行观察的中波、长波红外图像。从图中可以看出,利用三维仿真技术可对目标进行任意角度和距离的自由观察,并根据所需的波段、分辨率等参数生成图像。还可以看出,由于大气衰减及环境辐射的影响,距离越远目标辐射被衰减得越强,目标自身细节与对比度下降得越多。仿真结果说明文中方法实现了对目标在不同波段、距离下的灵活仿真,不但

保持了目标特征的可信性,还有效解决了实测图像应用时参数固化的缺点。

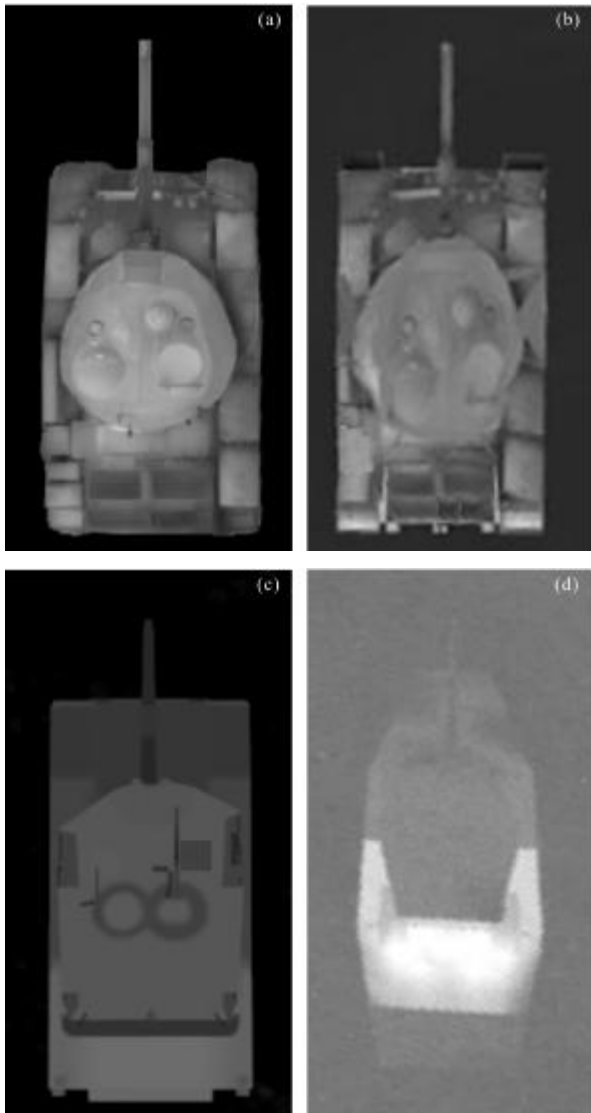


图 2 目标仿真图像与实测图像的对比

Fig.2 Contest of simulation and measured image of target

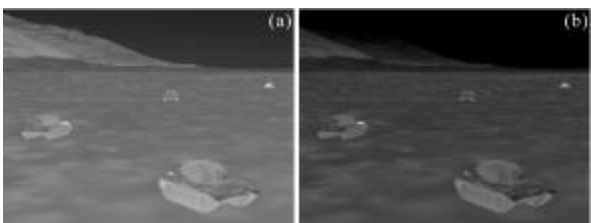


图 3 目标自由观察下的仿真图像

Fig.3 Free observation of simulation target

3 结论及展望

分析了单纯基于实测或数字仿真方法生成红外

图像的优点及不足,提出了一种目标红外图像生成方法,将测量图像与数学反演模型结合来生成目标红外纹理,并映射到三维几何模型,利用三维渲染技术实现了高真实感红外图像的生成。仿真结果表明:该方法较好地融合了实测图像的可信性与数字仿真的灵活性,是一种实用的红外图像生成方法。

文中方法将二维红外纹理映射到三维模型采用了人工操作,效率取决于设计人员能力和熟练度。后续工作将开展纹理自动合成与映射技术研究,以进一步提高建模效率与图像真实感。

参考文献:

- [1] Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. Electro-optical imaging system: modeling and performance evaluation theory [M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [2] Latger J, Cathala T, Douchin N, Goff A. Simulation of active and passive infrared images using the Se-Workbench [C]//SPIE, 2007, 6543: 654302.
- [3] MultiGen-Paradigm Corp. Vega prime IR user's guide [EB/CD]. 2002.
- [4] Li Yingjie, Lv Xiangyin, Wu Xiaodi, et al. Calculations of infrared radiation of space target using finite difference method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(2): 218-222. (in Chinese)
- [5] Luo Laikel, Xuan Yimin, Han Yuge. Study on infrared radiation characteristics of amphibious tank [J]. Infrared Technolog, 2009, 31(1): 18-22. (in Chinese)
- [6] Kim S, Lee J, Nam S. Realistic rendering system using the measured BRDFs [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences: Information Technology, 2009: 1116-1121.
- [7] Hauswiesner S, Straka M, Reitmayr G. Coherent image-based rendering of real-world objects [C]//ACM, Interactive 3D, 2011: 183-190.
- [8] Sanders J. High-resolution ground target infrared signature modeling for combat target identification training [C]//Targets and Backgrounds IX: Characterization and Representation XXX, 2003, 5057: 312-318.
- [9] Zhang Jian, Zhang Jianqi, Shao Xiaopeng. Method of synthetic infrared scene generation based on measure data and its implementation [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(10): 2399-2402. (in Chinese)