

文章编号: 1672-8785(2017)02-0026-06

# 基于增强现实的动态红外场景仿真系统设计研究

祝清瑞<sup>1,2</sup> 李 争<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 传统的仿真技术会受算法的复杂度、运算能力及接口等的限制。针对这一问题, 设计了一种基于增强现实的思想在真实图像上进行实时动态红外场景仿真的系统。首先使用 3DS MAX 生成虚拟目标模型, 再对虚拟目标模型进行几何一致性变换和红外辐射一致性变换, 使用 SURF-ORB 特征匹配对探测器的运动姿态进行跟踪, 最终通过光栅渲染使虚拟目标与真实场景进行虚实融合, 完成基于增强现实的动态红外场景仿真系统的设计。实验结果显示, 该系统能够实现高帧频、高真实性的红外仿真图像, 具有较强的可扩展性。

**关键词:** 红外场景仿真; 增强现实; 几何一致性; 红外辐射一致性; SURF-ORB 特征匹配

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.02.005

## Design of Dynamic Infrared Scene Simulation System Based on Augmented Reality

ZHU Qing-rui<sup>1,2</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Traditional simulation technologies are limited by algorithm complexity, computing power and interface bottlenecks. To solve this problem, a system which implements real-time dynamic infrared scene simulation in real images on the basis of augmented reality is designed. Firstly, 3DS MAX is used to establish a virtual target model. The geometric consistency transformation and infrared radiation consistency transformation are carried out for the virtual target model. Then, SURF-ORB feature matching is used to track the motion of the detector. Finally, the virtual target is fused with the real scene through raster rendering. Thus, the design of the dynamic infrared scene simulation system based on augmented reality is completed. The experimental results show that high frame rate and high realism infrared simulation images can be obtained by this system. Its scalability is very strong.

**Key words:** infrared scene simulation; augmented reality; geometric consistency; infrared radiation consistency; SURF-ORB feature matching

收稿日期: 2016-12-27

作者简介: 祝清瑞(1989-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究方向为红外成像与信息处理。

E-mail: zhqr010230@126.com

## 0 引言

红外成像仿真技术现已被广泛应用于红外系统的优化设计、性能评估以及搜索跟踪算法的测试评估等多个领域,其在军事领域的应用已被越来越多的国家所关注<sup>[1]</sup>。由于时间、气象条件和成本等因素的限制,红外探测系统在科研和演习过程中不能采集飞机、导弹等目标在各种环境下的图像。红外仿真成像大大弥补了这种不足,可提供各种气象与环境条件下的红外仿真图像,并且仿真结果可重复、成本低、效率高<sup>[2]</sup>。

红外成像仿真技术主要有物理仿真法和图像仿真法。物理仿真法主要有电阻桥阵列、数字微镜器件 (Digital Micromirror Device, DMD) 等方式。电阻桥阵列方式由于存在电阻的热扩散现象,图像边缘模糊且热时间常数大,响应速度慢,难以得到高帧频的动态图像。数字微镜器件 DMD 依赖输入彩色图像进行红外辐射反演,图像的真实感不强。利用图像仿真法生成动态红外仿真场景一直被认为是最适用和方便的。传统的红外图像仿真法基于虚拟现实的思想,建立大量的模型库,根据要仿真的场景及目标一一添加对应的模型,然后利用纹理贴图法或直接生成仿真背景。其计算量非常大,只能以“电影回放”的方式进行仿真。

增强现实 (Augmented Reality, AR) 技术是借助计算机图形学和计算机视觉实时生成真实环境中不存在的虚拟目标,并在显示设备上将虚拟目标与真实环境混合为一体,给用户带来真实感官效果的新技术<sup>[3]</sup>。本文基于增强现实的思想,针对不同的红外探测器参数和光学系统参数,生成高实时性的红外场景仿真图像,并对红外探测器的运动姿态进行跟踪,使虚拟目标的投影图像跟随探测器视场的变化,实现虚拟目标与真实场景的虚实融合,完成闭环动态红外场景仿真系统的设计。该系统仿真的图像具有高动态实时性和高逼真度。

## 1 系统架构

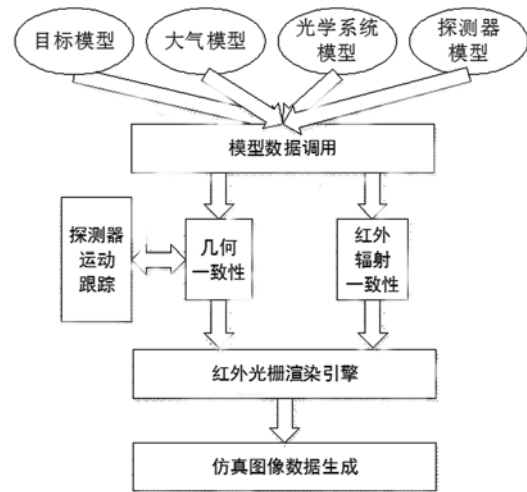


图 1 系统结构框图

本系统的结构框图如图 1 所示。整个系统分为模型生成部分、生成多种目标的三维模型、多种大气环境模型、光学系统模型和探测器模型数据总共 5 个部分。几何一致性部分的功能是设置虚拟目标的运行轨迹,完成从虚拟目标坐标系到探测器图像坐标系的转换。探测器跟踪部分的功能是提取图像特征,进行特征匹配,估计相机的相对运动姿态。红外辐射一致性部分的功能包括虚拟目标的温度场重建、大气路径衰减、光学系统的弥散效应和探测器光敏元的响应。光栅渲染部分的功能是完成虚拟目标与真实场景的虚实融合。

红外成像仿真系统为了达到高逼真度的虚实融合效果,要求虚拟目标与真实场景在几何形状和红外辐射等属性上保持一致。其中,几何一致性变换要求虚拟目标按照正确的空间位置,透视投影关系,实时渲染到真实场景中;红外辐射一致性变换部分为虚拟目标设置真实场景参数,为虚拟目标投影在图像上的像素赋予正确的亮度值。探测器跟踪部分准确跟踪探测器的位置和视域方向,以确定探测器的观察点和虚拟目标在真实场景中的准确位置。

## 2 各部分的关键技术研究

### 2.1 模型生成部分

本系统利用 3DS MAX 生成虚拟目标三维模型。模型包括顶点坐标、三角面元和面元材料等属性。为了更逼真地仿真目标,将三维模型划分为多个子模块,每个子模块代表虚拟目标的一部分。以飞行目标为例,将其主要分为蒙皮、尾喷管和尾焰等,每一个子模块的面元材料不同,其自身的发射率和对环境红外辐射的反射率也不同<sup>[4]</sup>。子模块对加速红外温度场的计算有关键意义。

飞行目标在大气中飞行时,红外探测器所接收到的都是经过大气衰减后的红外辐射强度。大气衰减主要与大气中的气体分子吸收、气体分子和微粒气溶胶的散射作用,云、雾、雨、雪等气象条件的衰减作用有关<sup>[5]</sup>。这些衰减会造成图像变形和变模糊,影响模拟图像的逼真度。目前,国内外通常采用 LOWTRAN 或 MODTRAN 软件模拟生成大气模型。本文使用 MODTRAN7 大气传输软件建立大气传输衰减模型。该模型含六种模式:热带大气、中纬度夏季大气、中纬度冬季大气、高纬度夏季大气、高纬度冬季大气以及几种气溶胶模式。

光学系统对成像结果的影响主要体现在两个方面:一是透视投影,它不会导致像质下降;二是渐晕斑,它是由于光学系统透镜像差、工艺缺陷等问题,空间中一个点经过光学系统成像时表现出的斑点,又称弥散斑<sup>[6]</sup>。光学系统模型用调制传递函数  $MTF(f_x, f_y)$  进行描述。

探测器模型对红外仿真图像的影响主要源于探测器光敏元的空间积分作用、光敏元对波长范围内光谱产生的不同响应、探测器响应的非均匀性、外围读出电路伴随的信号放大以及电压灰度等级量化等因素。

### 2.2 几何一致性部分

基于增强现实的思想将虚拟目标融合在真实场景中,必须首先确保虚拟目标在真实场景图像中的正确投影,满足几何一致性。根据探测器的成像原理,虚拟目标的几何一致性变换过程包括多次坐标变换,依次是虚拟目标坐标系、世

界坐标系、探测器坐标系、投影坐标系和图像坐标系。坐标系之间的变换关系如图 2 所示。

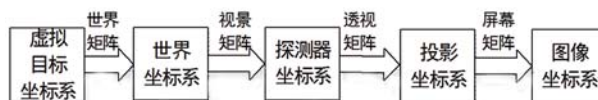


图 2 几何一致性部分框图

虚拟目标坐标系是虚拟目标的三维模型生成时顶点坐标所在的坐标系。世界坐标系  $(X_w, Y_w, Z_w)$  表示目标在真实环境中所处的位置和运动姿态;应用时,先设置目标运动轨迹,然后计算世界矩阵,再完成虚拟坐标系到世界坐标系的变换。探测器坐标系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  是以探测器位置为坐标原点,以光轴方向为  $Z$  轴正方向的坐标系;应用时,根据探测器跟踪部分得到的探测器相对运动姿态,完成世界坐标系到探测器坐标系的转换。投影坐标系  $(X, Y, Z)$  是以探测器系统的光轴与像平面的交点为原点,以水平方向为  $x$  轴,以垂直方向为  $y$  轴的直角坐标系;应用时,已知探测器的焦距,利用透视投影变换矩阵实现相机坐标系到投影坐标系的变换。图像坐标系  $(U, V)$  相比于投影坐标系,完成屏幕矩阵的转换。若已知探测器内参数,则即可进行二坐标系之间的转换。具体转换公式如图 3 所示。其中  $dx$ 、 $dy$  表示探测器像元的长宽,  $(U_0, V_0)$  表示光轴与像平面的交点,  $f$  表示光学系统的焦距。

### 2.3 探测器的跟踪部分

为了体现虚拟目标的真实性,AR 要求在探测器运动时必须跟踪探测器的运动姿态,调整虚拟目标的视景矩阵,体现不同的视点和视场角下所得的不同目标姿态,完善几何一致性变换,提高结果的逼真度,以使结果更符合实际应用的需求。

探测器实时跟踪算法通常需从场景中提取相应的特征点进行跟踪,并根据特征点在相邻红外关键帧的投影坐标来计算摄像机的姿态参数。不同的特征点的跟踪算法在稳定性和速度上各有优劣,通常越稳定的特征点的算法的复杂度越高,时间复杂度也越高。

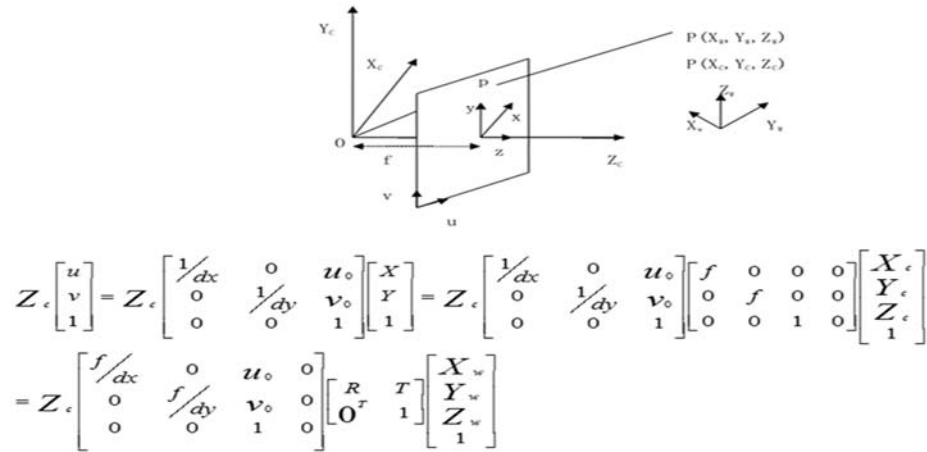


图 3 探测器坐标的变换公式

针对 ORB(oriented FAST and rotated BRIEF) 算法不具备尺度不变性的缺陷, 本文结合 SURF(Speed Up Robust Features) 算法, 将 ORB 算法改进为 SURF-ORB 算法。SURF 特征提取算法源于 SIFT(Scale Invariant Feature Transform), 同时具有尺度不变性和旋转不变性, 并比 SIFT 算法的速度提升了 3 倍。构建 ORB 算法描述子, 可大大提高描述子的匹配速度。SURF-ORB 算法集成了二者的优点, 增加了特征点的数量, 能满足系统的实时性需求而不丢失其优良精度。该算法由粗到精进行特征匹配, 去除伪点对, 估计相邻两关键帧的 2D-2D 单应变换, 分析探测器的相对运动姿态<sup>[7]</sup>。该算法的流程为:

1. 初始化探测器关键帧跟踪。
2. 提取候选关键帧的 SURF 特征点, 计算 ORB 特征点描述子。

3. 对两幅图像中的 ORB 描述子进行 Hamming 距离初步匹配。
4. 采用最近邻 KNN 算法粗匹配特征点, 并采用 RANSAC 进行精匹配去伪。
5. 如果匹配点对数量低于阈值 T, 继续第 6 步, 否则跳第 2 步。
6. 计算 2D-2D 基础矩阵。结合探测器内参数, 估计探测器的相对运动姿态。
7. 更新探测器的视景矩阵, 更新虚实融合图像。

实验结果表明, 图像尺度变化时, SURF-ORB 算法的平均匹配准确度为 91%, 约为 ORB 算法准确度的 3 倍; SURF-ORB 算法平均耗时约为 SURF 算法的 75%, 经 RANSAC 滤除后的匹配点对的正确率为 100%, 具有较强的实时性和可行性。匹配结果如图 4 所示。

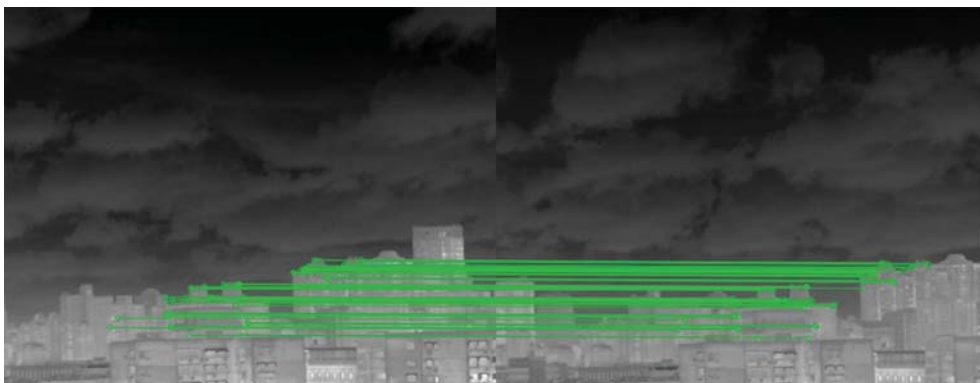


图 4 RANSAC 的匹配结果



## 2.4 红外辐射一致性部分

在某特定环境条件下准确融合虚拟目标的红外仿真图像,需要进行虚拟目标的温度场建模、辐射能量计算、大气传输路径损耗、光学弥散渐晕、探测器光敏元响应率损耗等流程。红外辐射一致性部分的框图如图5所示。

(1) 飞行目标的温度场热平衡有以下几个影响因素:对太阳光红外辐射的吸收、地球表面反射的太阳辐射及地球表面红外辐射的吸收;对大气中 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等长波红外辐射的吸收;飞行目标内部发动机内热源以及尾喷管尾焰的高温辐射;飞行目标在大气中进行的热力学平衡换热;飞行目标在大气中飞行时因为摩擦生热产生的自身辐射<sup>[8]</sup>。以上因素共同作用即得到飞行目标各模块的温度。根据热力学第一定理,通过求解热平衡方程可得到温度场的分布。

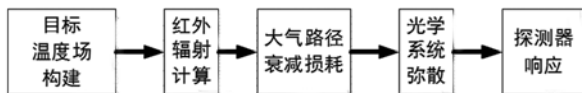


图5 红外辐射一致性部分的框图

(2) 求解飞行目标的温度场后,获得各子模块如蒙皮、尾喷管等的温度。根据模型数据生成模块导入的三维虚拟目标模型数据,获得初始设置的各子模块所用材质的发射率,再分别计算红外辐射强度。根据探测器的视线方向和探测波段以及各子模块的三角面元法线,滤除遮挡的面元,计算可视面元的红外辐射强度。若飞行目标无穷远,可将其视为一个点目标时,将各子模块的红外辐射强度进行加权相加,从而求出飞行目标整体的红外辐射强度<sup>[9,10]</sup>。飞机目标各子模块的红外辐射及总红外辐射为

$$I_{\lambda} = I'_{t,\lambda} + I_{p,\lambda} + I_{s,\lambda} \quad (1)$$

$$I'_{t,\lambda} = I_{t,\lambda}(\lambda, a) * \tau(\lambda, a, s) \quad (2)$$

式中,  $I_{t,\lambda}(\lambda, a)$  表示飞行目标尾喷管的红外辐射强度;  $\tau(\lambda, a, s)$  为飞行目标喷射的尾焰在其路径长度的透过率;  $I_{p,\lambda}$  为飞行目标尾焰的红外辐射强度;  $I_{s,\lambda}$  为飞行目标蒙皮的红外辐射强

度;  $s$  为目标红外辐射到达探测器时的传输路径。通过式(1)即可求出飞行目标在某给定波段内任意飞行状态和任意视线方向上的红外辐射强度,  $I_{t,\lambda}$ 、 $I_{p,\lambda}$ 、 $I_{s,\lambda}$  代表飞行目标不同子模块三角面元的红外辐射强度。

(3) 地对空的目标探测需要考虑大气的透过率和路径辐亮度的影响。大气透过损失会影响目标信号的幅度,路径辐射会增加背景噪声。而且降低目标与背景的对比度,对高灵敏度探测极为不利。由读入模块生成部分获得大气模型数据,得到红外辐射在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的平均透过率 $\tau$ ,并得到经过大气衰减后的各部分的红外辐射强度:

$$I_a = \tau * \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} \quad (3)$$

(4) 虚拟目标在投影过程中需要经过光学系统的点扩散渐晕效应,利用模型生成部分的光学系统调制传递函数(相位传递函数) $MTF(f_x, f_y)$ 可以描述这种现象,而且在实际应用中并不影响成像的清晰度。本文实现了对光学系统效应的仿真模拟。具体实现过程为

1. 首先对原始灰度图像  $f(x, y)$  进行快速傅里叶变换,得到  $F(f_x, f_y)$ 。
2. 求出调制传递函数  $MTF(f_x, f_y)$ 。
3. 用  $MTF$  对  $F(f_x, f_y)$  进行处理,得到处理结果  $F'(f_x, f_y)$ 。
4. 对  $F'(f_x, f_y)$  进行快速傅里叶反变换,得到经光学系统效应后的结果灰度图  $f(x, y)$ 。

(5) 与可见光相似,红外探测器的光敏元接收经光学系统之后的红外辐射照度。对红外探测器进行建模,考虑探测器光敏元的响应率、积分时间、光敏元面积等参数,探测器输出端的信号可以表示为

$$V_s = R \times H \times A_d \quad (4)$$

式中,  $R$  是探测器光敏元的响应率,  $H$  是光学系统聚集原始辐射形成的辐射照度,  $A_d$  是探测器光敏元的面积。

灰度映射基于探测器像平面读出电路的电压最大值、最小值以及图像量化的灰度等级范围,将探测器输出的电压信号映射为灰度等级,

并为面元着色<sup>[4]</sup>。为简单处理,在此采用一种均匀量化的方式,将辐射能量和灰度值之间看成一种线性关系:

$$G = G_{min} + \frac{(V_s - V_{min}) \times (G_{max} - G_{min})}{V_{max} - V_{min}} \quad (5)$$

最后,遍历虚拟目标的三维模型的所有顶点进行几何一致性变换,对所有三角面元进行红外辐射一致性变换,光栅渲染部分完成虚拟目标在探测器输出图像上的精确投影,并对投影范围内的各像素准确赋值,完成探测器实时运动跟踪的虚实融合,获得高逼真度且实时的红外仿真图像。因此,本文所述的系统具有通用性高、扩展性强的实用意义。

### 3 系统运行及测试

本文设计了一种基于增强现实的动态红外场景仿真系统。该系统基于 Linux 开发,以 Qt 为编译环境,在 Core i5 2.6GHz 处理器、4G 内存的硬件配置下可以流畅运行。实验所用探测器为中波红外探测器,光学镜头选用 OPTO-E 公司的中波红外光学镜头,其  $F$  数为 2,焦距为 50 mm,像元的大小为 15  $\mu\text{m}$ ,水平视场角为 10.96°,垂直视场角为 8.78°,光谱范围为 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ ,系统运行的实物图如图 6 所示。



图 6 系统运行的实物图

程序启动后,系统读入直升机三维虚拟目标模型,加载中纬度冬季大气雨天模型、光学系统模型和探测器参数,通过以太网接收红外图像,根据设置的目标运动轨迹,计算几何一致性

和红外辐射一致性,通过光栅渲染实现虚实融合。实验结果如图 7(a) 所示。



(a)



(b)

图 7 中波红外仿真实验结果

当移动探测器的位置时,探测器跟踪部分会计算探测器的运动姿态,实现真实场景的动态跟踪,结果如图 7(b) 所示,从而完成基于增强现实的动态红外场景仿真。实验结果表明,该系统能很好地完成设计要求,其动态性高,能实现 14 帧/s 的帧频,而且操作方便,可扩展性好。通过修改目标的三维模型、大气模型以及探测器模型,可生成多种探测器的多种虚拟目标的仿真图像。

### 4 结论

红外场景仿真系统广泛应用于军事、航空、航天和民用领域,增强现实技术已成为红外场景仿真技术的一个重要分支。随着立体视觉、全

(下转第 48 页)