

文章编号: 1672-8785(2015)02-0030-06

基于结构相似度和保真度的红外成像传感器 仿真评价方法研究

娄树理 韩艳丽 任建存 李召龙

(海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001)

摘 要: 红外成像传感器系统典型效应建模与仿真的真实性和逼真度决定着红外成像制导仿真的有效性, 因此研究红外成像传感器系统的典型效应仿真评价方法具有十分重要的意义。针对目前红外成像传感器仿真评价方法不足的问题, 基于结构相似度 (Structural Similarity, SSIM) 和保真度提出了一种红外成像传感器仿真图像验证评价方法。采用 SSIM 评价了仿真图像的亮度、对比度和结构相似度, 并采用保真度评价了仿真图像的空间几何特征和灰度特征。实验结果表明, 该方法可有效评价红外成像传感器的模糊、噪声等退化效应, 适于对红外传感器建模与仿真图像进行客观质量验证与评价。

关键词: 红外成像传感器; 建模与仿真; 图像评价

中图分类号: TP751.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.02.006

Research on Evaluation Method of Simulation of Infrared Imaging Sensor Based on Structural Similarity and Fidelity

LOU Shu-li, HAN Yan-li, REN Jian-cun, LI Zhao-long

(Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and
Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Since the effectiveness of infrared imaging guidance simulation is determined by the validity and fidelity of typical effect modeling and simulation of an infrared imaging sensor system, it is very significant to study the evaluation method of typical effect simulation of an infrared imaging sensor system. A method for evaluating the simulation image of an infrared imaging sensor based on Structural Similarity (SSIM) and fidelity is proposed due to the shortage of evaluation method of simulation of infrared imaging sensor systems at present. In the method, the SSIM is used to evaluate the brightness, contrast and structural similarity of the simulated image while the fidelity is used to evaluate the spatial geometric characteristics and gray level distribution of the simulated image. The experimental result shows that the proposed method can evaluate the degradation effects such as blurring and noise of the infrared imaging sensor system effectively. It is suitable to verify and evaluate the quality of modeling and simulated images of infrared sensors.

Key words: infrared imaging sensor; modeling and simulation; image assessment

收稿日期: 2015-01-05

基金项目: 总装备部“十二五”预研项目 (51303020403-3)

作者简介: 娄树理 (1976-), 男, 山东蒙阴人, 讲师, 博士, 主要从事光电制导、图像处理以及红外图像生成等方面的研究。E-mail: shulilou@sina.com

0 引言

红外成像制导技术的更新换代促进了红外成像仿真技术的发展。目前, 红外成像半实物仿真主要采用景象投影和信号注入两种方式^[1]。在信号注入式仿真中, 由于被测装备的红外成像传感器系统不直接参与仿真试验^[2], 所以必须对红外成像传感器系统的典型效应进行建模与仿真, 这也是对红外成像制导系统进行准确评估的关键。而红外成像传感器系统典型效应建模与仿真的真实性和逼真度决定着红外成像制导仿真的有效性, 因此研究红外成像传感器系统典型效应建模与仿真的验证方法具有十分重要的意义。

目前国内外针对红外成像传感器系统的典型效应建模与仿真的验证研究较少, 国际上尚无公认的评价指标^[3]; 而国内胡方明等人^[4]则利用归一化最小方差、保真度等客观度量准则进行了研究。由于只比较了像素点间的绝对误差, 却没有考虑像素点间的相关性, 也未考虑人眼的视觉特性, 他们对特定的退化图像类型的评价结果与主观评价结果之间存在比较明显的差异。李珂等人^[5]采用一维及二维直方图统计方法对成像仿真效果进行了评价, 但他们只利用

了单帧图像的统计信息。国外 Jonathan D F 等人^[6]采用了一种基于 SSIM 的评价方法。该方法对由噪声引起的图像失真比较敏感, 但其对图像模糊等失真类型的敏感程度较低, 且对某些模糊图像的评价结果也与人的主观感觉不一致。

本文针对目前各种评价方法的优缺点, 提出了一种基于 SSIM 和保真度的红外成像传感器效应建模与仿真验证评价方法, 并对红外仿真图像进行了实验验证及评价。

1 红外成像传感器系统的成像退化效应

一个典型的红外成像传感器系统包括光学系统、探测器以及相关的信号处理电路。根据红外成像系统的工作原理, 目标/背景发出的红外辐射经过大气传输衰减后被成像系统所接收; 在系统内部, 红外辐射通过光学系统、探测器、信号放大电路等环节后形成红外图像, 以供后续信号处理环节使用。其中, 光学系统用于接收目标和背景的红外辐射; 红外探测器用于实现光电信号转换; 信号放大电路负责完成微弱图像信号的放大和滤波处理。图 1 为红外成像系统的工作框图。

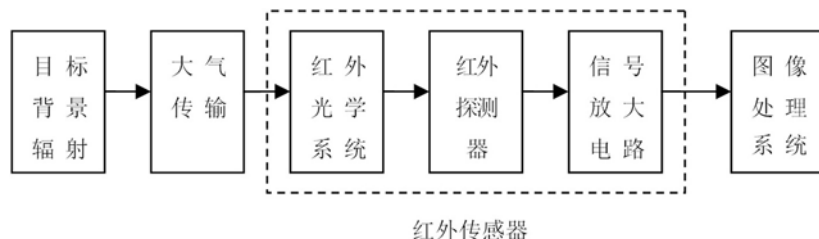


图 1 红外成像传感器系统的工作框图

从红外成像的物理过程来看, 通常对成像存在影响的是光学系统、探测器焦平面阵列器件和信号处理电路三个环节。不同物理结构的传感器系统只是对成像影响的主导因素不同^[7]。当光学系统对辐射信号进行空间滤波时, 存在各种辐射效应、几何效应和空间效应, 包括光学能量的传输衰减、渐晕、衍射、像差、畸变等; 其对成像的影响主要体现在几何变形失真、模糊

等图像退化方面。红外探测器阵列将辐射信号转换为电信号, 并对图像进行时(空)间采样, 其对红外成像质量的影响较大; 对于凝视型红外探测器器件来说, 既存在时间、空间采样效应, 也存在非均匀性、非线性的影响, 另外还有各种光子噪声、热噪声、暗电流等的影响。信号处理电路可以看作是低通、高通等滤波器的组合, 用于对电信号进行放大、量化、耦合等处理, 且对

成像具有模糊、噪声等影响。因此,对红外成像的退化影响综合体现为成像模糊、成像部分扭曲变形以及产生噪声。

2 基于 SSIM 和保真度的红外成像传感器仿真评价

由于全参考图像质量评价方法的准确性要远远优于无参考图像质量评价方法^[8],红外成像传感器系统的典型效应建模与仿真的验证可采取全参考图像质量评价方法,即利用红外成像系统对黑体辐射靶标进行成像,然后采用计算机仿真技术生成黑体的红外理想仿真图像,并使其经历红外成像系统各模块的退化效应作用,得到仿真的红外退化图像;最后采用保真度和 SSIM 评价指标对仿真图像和实拍图像进行比较。

2.1 保真度指标

与常用的峰值信噪比、均方误差评价指标一样,保真度 F 实质上是基于图像像素值进行统计和平均计算的。其衡量的是仿真图像与实拍图像之间的总体绝对差异,且具有以下形式^[4]:

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f^2(i,j)} \quad (1)$$

式中, $\hat{f}(i,j)$ 为实拍红外图像; $f(i,j)$ 为经传感器效应退化后的仿真图像; MN 为 $M \times N$ 图像的总像素数。

保真度越小,表示两幅图像之间的差异越大,也说明建模与仿真的图像越不可信。当 $F=1$ 时,表示所评价的仿真图像与实际拍摄图像之间没有差异,即置信度为 100%。

由于具有计算简单、数学理论清晰等特点,并综合考虑了图像灰度分布特征和图像像素之间的几何结构特征,保真度指标可以用于评价影响红外系统成像质量的绝大多数因素,比如能量衰减、分辨率以及信号处理对图像退化的影响。该指标具有很强的客观性,其缺点是对部分图像的评价结果可能与主观感知效果之间存在较大偏差。

2.2 SSIM

SSIM 方法的主要思想是认为图像信号是高度结构化的,即图像中的相邻像素之间具有很强的相关性。人类视觉系统对图像结构的变化具有高度敏感性。结构相似性评价算法则根据人眼可提取视觉场景中结构信息的特点,得到与人眼主观感知非常接近的图像评价结果。

SSIM 方法的思路是将图像的 SSIM 分成亮度比较、对比度比较和结构比较三类信息;假设 A 和 B 分别为传感器效应仿真图像和实拍图像信号,先分别计算亮度比较函数 $l(A,B)$ 、对比度比较函数 $c(A,B)$ 和结构比较函数 $s(A,B)$,然后计算图像的 SSIM,综合比较实拍图像和仿真图像在这些结构信息上的差异,并以此作为建模与仿真置信度的度量标准。图 2 为基于 SSIM 评价模型的基本系统框图。

图像的亮度比较函数的定义为^[9]

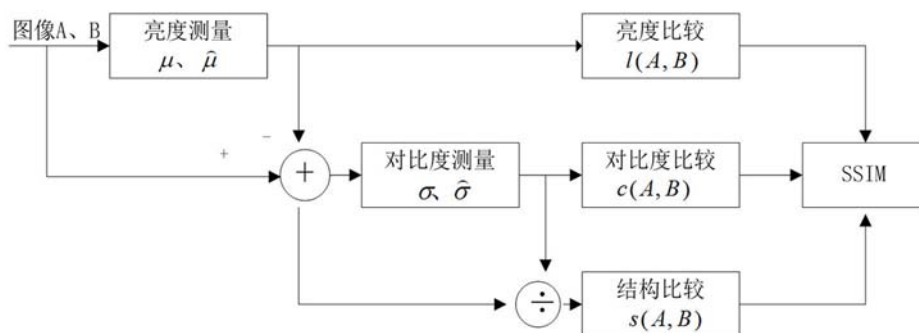


图 2 SSIM 评价模型的基本系统框图

$$l(A, B) = \frac{2\mu\hat{\mu} + C_1}{\mu^2 + \hat{\mu}^2 + C_1} \quad (2)$$

对比度比较函数的定义为

$$c(A, B) = \frac{2\sigma\hat{\sigma} + C_2}{\sigma^2 + \hat{\sigma}^2 + C_2} \quad (3)$$

两个图像信号的结构比较函数的定义为

$$s(A, B) = \frac{\sigma_{AB} + C_3}{\sigma\hat{\sigma} + C_3} \quad (4)$$

式中, μ ($\hat{\mu}$) 和 σ ($\hat{\sigma}$) 分别为传感器效应仿真图像(红外实拍图像)的亮度均值和标准差; C_1 、 C_2 、 C_3 是为了防止分母值接近零时出现不稳定情况而引入的常量, $C_1 = (K_1 L)^2$, $C_2 = (K_2 L)^2$ 。其中, L 为图像的灰度级数; 对于红外图像, L 通常为 256; K_1 和 K_2 为远小于 1 的常量。 σ_{AB} 为两个图像信号的相关系数, 其定义为

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i, j) - \mu] [\hat{f}(i, j) - \hat{\mu}] \quad (5)$$

最后将式 (2) ~ 式 (4) 综合起来, 经简化后可得到^[10]:

$$\text{SSIM}(A, B) = \frac{(2\mu\hat{\mu} + C_1)(2\sigma_{AB} + C_3)}{(\mu^2 + \hat{\mu}^2 + C_1)(\sigma^2 + \hat{\sigma}^2 + C_2)} \quad (6)$$

对于整幅图像, SSIM 方法不如局部分块的效果好, 这主要是因为人类观察者在一种情况下只能对图像中的一个局部区域具有高分辨率感觉。在实际应用中, 可对两幅图像进行分块。设两幅图像中大小相同的分块总数为 M , 分别计算每一分块的 SSIM, 并对其求平均后得到平

均结构相似度 (Mean Structural Similarity, MSSIM)^[11]。

$$\text{MSSIM}(A, B) = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M \text{SSIM}(A_r, B_r) \quad (7)$$

SSIM 可将对比度和亮度从图像的结构信息中分离出来并结合结构信息对图像质量进行评价, 在某种程度上可避开图像内容的复杂性问题, 因而可直接评价图像信号的结构相似性, 且算法实现的复杂度较低, 应用性较强。该方法可有效评价噪声对图像退化的影响, 但其对图像模糊的敏感程度较低, 导致对某些模糊图像的评价结果与人的主观感觉不一致。

3 实验结果分析

利用上述验证评价方法对红外成像传感器系统的典型效应建模与仿真结果进行了验证评价。本文实验采用的热像仪参数如下: 在光学系统方面, 光学焦距为 250 mm, 光学孔径为 125 mm, 波长下限为 8 μm , 波长上限为 12 μm ; 在探测器方面, 水平尺寸为 25 μm , 垂直尺寸为 25 μm , 水平采样间隔为 32 μm , 垂直采样间隔为 32 μm , 分辨率为 256×256, 帧频为 30, 时间常数为 $2e^{-7}$ s, 峰值响应波长为 10.5 μm , 三维噪声值取 FLIR92 的缺省值; 在电路方面, 数字量化动态范围为 0 ~ 256; 在图像处理算法方面, 采用均值滤波和自动增益调整。

当黑体辐射温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时, 利用红外热像仪拍摄了一系列图像。图 3 是从中随机选取的 4 幅。利用 SSIM 和保真度指标对实际拍摄的图像进行了分析。在比较分析时, 采用图 3(a) 作为参

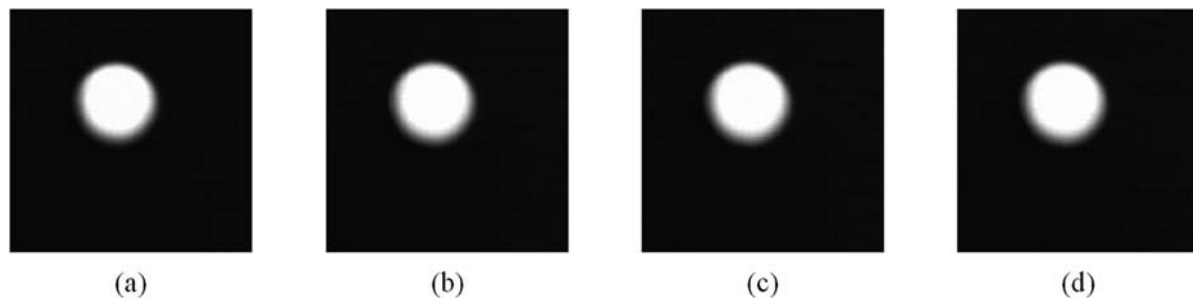


图 3 实际拍摄的红外图像

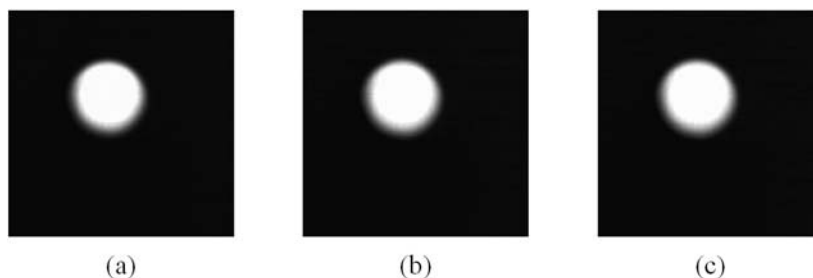


图 4 模糊及噪声图像评价实验

表 1 实拍红外图像的实验结果分析

图像	图 3(a)	图 3(b)	图 3(c)	图 3(d)
SSIM	1	0.9833	0.9825	0.9823
保真度	1	0.9997	0.9998	0.9997

表 2 模糊及噪声图像评价实验的结果分析

图像	未退化图像	模糊图像	高斯噪声图像
SSIM	1	0.9528	0.9108
保真度	1	0.9683	0.9995

考图像 (结果见表 1)。

从表 1 中可以看出, 对于同一条件下拍摄的红外图像, SSIM 和保真度都相对较为稳定, 其数值都接近于 1, 置信度都较高, 与主观评价结果一致。

利用 SSIM 和保真度对模糊和噪声退化图像分别进行了评价 (其结果见表 2)。

从表 2 中可以看出, 对于模糊图像和噪声退化图像, SSIM 和保真度评价结果并不一致, 因为 SSIM 和保真度是从不同角度进行评价的: SSIM 从图像结构特征进行评价, 对噪声退化效应较为敏感; 而保真度则针对两幅图像之间严格的像素灰度差异进行评价, 能够评价模糊效应对图像的影响。因此, 可以选择保真度和 SSIM 对

红外成像传感器各种退化效应的仿真质量进行评价。

分别利用以上两种指标对温度为 300 ℃ 的黑体的仿真图像进行了评价。图 5(a) 为实拍红外图像。根据靶标的几何特征和红外特征, 利用计算机仿真技术生成温度为 300 ℃ 的黑体的红外图像。该图像为未受红外成像系统各部分退化影响的理想图像 (见图 5(b))。最后使理想图像分别经历衍射、渐晕、噪声、低通滤波等各种退化效应, 并对其进行灰度增强处理后得到仿真图像 (见图 5(c))。表 3 列出了最终的实验分析结果。

表 3 实拍及仿真图像的实验分析结果

图像	实拍图像	仿真理想图像	仿真退化图像
SSIM	1	0.8830	0.9113
保真度	1	0.8820	0.8893

通过分析表 2 并结合以上三幅图像的一维及二维直方图 (见图 6) 可以发现, 考虑传感器效应的仿真图像比未考虑传感器效应的仿真图像更接近实拍图像, 而且验证评价综合指标的结果与主观评价结果一致, 说明该验证指标具有合理性, 能够对建模与仿真的置信度进行验证。



图 5 实拍及仿真图像

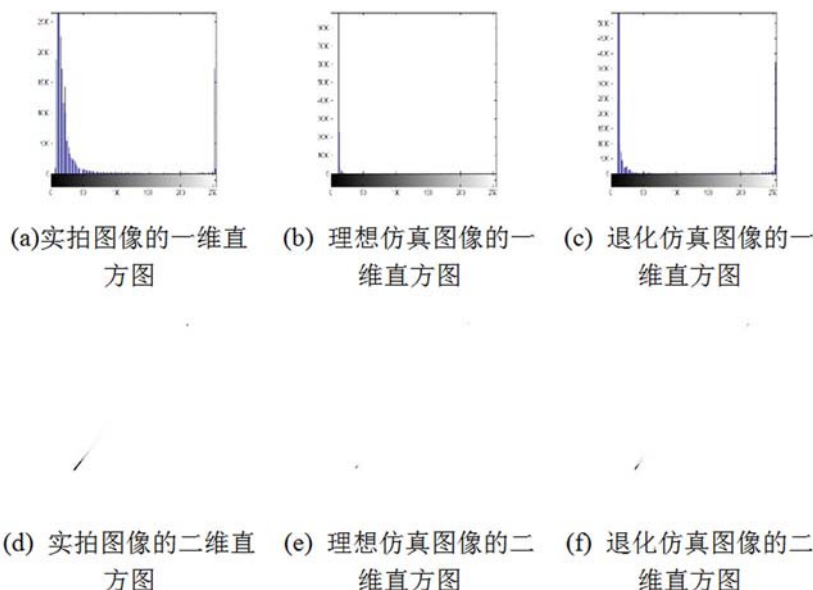


图 6 实拍及仿真图像的一维及二维直方图

4 结束语

本文基于 SSIM 和保真度提出了一种红外传感器仿真图像评价方法。该方法采用 SSIM 评价了红外仿真图像的亮度、对比度和结构相似度, 并采用保真度评价了仿真图像的空间几何特征和灰度特征。实验结果表明, 该方法得到的客观评价指标与主观评价结果一致, 因此是一种可有效地对红外传感器建模与仿真图像进行客观质量验证与评价的实用方法, 能够为红外传感器建模与仿真图像验证提供依据。

参考文献

- [1] James A J, David E K, Mark H B. Low Cost Real-time Infrared Scene Generation for Image Projection and Signal Injection [C]. *SPIE*, 1998, **3368**: 290–299.
- [2] Robert J M, Brian E O. Real-time Synchronized Multiple Sensor IR/EO Scene Generation Utilizing the SGI Onyx2 [C]. *SPIE*, 1999, **3368**: 300–309.
- [3] 张福娣, 张建奇, 徐茵. 红外凝视传感器定量仿真及模型验证 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(4): 596–601.
- [4] 胡方明, 王晓蕊, 张建奇. 光电图像质量客观度量准则的分析与比较 [J]. *红外技术*, 2005, **27**(2): 129–134.
- [5] 李珂, 王学伟, 王世立. 红外传感器模型的成像仿真效果分析 [J]. *计算机与数字工程*, 2012, **40**(7): 118–122.
- [6] Jonathan D F. Metrics for Image-Based Modeling of Target Acquisition [C]. *SPIE*, 2012, **8355**: 835514.
- [7] 娄树理, 张健, 任建存, 等. 红外成像传感器建模与仿真技术研究进展 [J]. *红外*, 2014, **35**(7): 1–4.
- [8] 赵文哲, 秦世引. 图像质量评价的研究进展和若干问题的解决途径 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 041002.
- [9] 朱里, 李乔亮, 张婷, 等. 基于结构相似性的图像质量评价方法 [J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 108–113.
- [10] 王宇庆, 刘维亚, 王勇. 一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(11): 1547–1550.
- [11] 王强, 梁德群, 毕胜, 等. 基于结构方向信息的图像质量评价方法 [J]. *计算机应用*, 2010, **30**(6): 1622–1625.