

基于层次分析法的红外仿真图像逼真度 综合评估算法

卢瑞涛, 申 通, 杨小冈, 朱正杰, 王思宇
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对传统红外仿真图像逼真度评估存在指标不完整、评估方法不足且不配套等问题, 首先, 以红外成像全链路场景模拟过程为依据, 构建多层、多特征、多任务的逼真度评估总体框架, 并建立红外仿真数据逼真度评价指标体系。其次, 针对该体系中存在的指标种类多、特征描述针对性强、指标之间的关联性与制约性复杂等特点, 提出基于层次分析法的逼真度综合评估算法, 通过构建判断矩阵科学确定各项指标之间的权重, 完成图像逼真度的有效综合评估。最后, 以部分应用场景和典型目标的真实及仿真红外配对图像作为数据支撑, 对包含图像结构、图像信息、图像反演、深度模型、预适应评估5个方面共18类指标的评价体系进行4组实验测试。结果表明: 该算法可实现多场景、多类型、多域目标仿真图像的综合评估。

关键词: 红外场景仿真; 层次分析法; 图像逼真度; 评价指标

中图分类号: TP391.41; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2741(2024)06-023-08

Analytic Hierarchy Process-based Comprehensive Assessment Algorithm of Infrared Simulated Image Fidelity

LU Ruitao, SHEN Tong, YANG Xiaogang,
ZHU Zhengjie, WANG Siyu

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: For traditional fidelity assessment methods of infrared simulated images, incomplete evaluation indicators as well as inadequate and incompatible evaluation methodologies are the main obstacles for accurate assessment. To solve the problem, a comprehensive fidelity evaluation framework with multiple layers, features, and tasks, as well as an index system for evaluating the fidelity of infrared simulation data were firstly established based on the simulation process of the entire infrared imaging scene. Considering the characteristics of the proposed index system, such as a great variety of indicators, strong specificity for feature descriptions as well as intricate interrelations and constraints between indicators, a comprehensive image fidelity evaluation algorithm was proposed based on the analytic hierarchy process (AHP). Simultaneously, the ef-

收稿日期: 2024-05-05

基金项目: 国家自然科学基金 (62276274)

第一作者: 卢瑞涛 (1988—), 男, 副教授, 博士, 主要从事模式识别、图像处理和机器学习等方面的研究。

E-mail: lrt19880220@163.com

引用格式: 卢瑞涛, 申通, 杨小冈, 等. 基于层次分析法的红外仿真图像逼真度综合评估算法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(6): 23-30.

fectiveness of the proposed algorithm was ensured by scientific indicators weights, which were determined by a judgment matrix. Finally, four sets of experimental tests of the evaluation system, which consisted of 18 indicators in five aspects of the image structure, the image information, the image inversion, the depth model and the pre-adaptation evaluation, were conducted on real and simulated paired infrared images from select application scenarios and representative targets. Results indicated that the proposed algorithm could comprehensively assess simulated images of targets in multiple scenes, multiple types and multiple domains.

KEYWORDS: infrared scene simulation; AHP; image fidelity; evaluation indicator

国内外红外仿真技术的研究和发展促进了仿真技术在实际中的应用,但同时也对红外场景仿真图像真实性、准确性提出了更高的要求。图像的真实性和准确性关系到整个研发系统的真实可信性,因此,如何全面、合理、可靠地评估红外仿真图像与红外真实图像之间的相似性成为亟待解决的问题。

逼真度是描述仿真事物与实际事物之间的相似程度。对逼真度相关理论的系统研究可以追溯到 20 世纪 90 年代,国外逼真度实施小组(Fidelity Experimentation Implementation Study Group, ISGFEX)收集了一些关于逼真度的工作及论文,并进行了比较全面的总结,详细阐述了逼真度的相关概念^[1]。逼真度在视景仿真方面具有重要意义,虽然国内开展视景仿真系统逼真度验证相关研究起步较晚,但也取得了一定的进展。西北工业大学唐凯等^[2]基于模糊层次分析理论对作战视景仿真系统建立了逼真度评价体系,并设计了一套开发视景仿真系统的规则。哈尔滨工业大学的李健^[3]实现了一种基于逼真度的仿真系统评估,为红外仿真图像逼真度的定量评估提供了一种方法。北京航空航天大学的王国良等^[4]研究了逼真度分析的要素分解和指标标准化的指标聚合方法,形成了一套逼真度分析方法。西安电子科技大学陈业朝^[5]对红外视景的仿真逼真度进行了研究,提出了一种定量的评估方法。

随着人工智能、深度学习技术的蓬勃发展,利用深度学习思想和方法进行仿真图像逼真度分析成为一个新的研究方向。Kang 等^[6]通过卷积神经网络提取有效的图像自然场景统计信息,对图像质量和失真度进行评估。Ren 等^[7]以恢复重建失真图像为研究目标,采用生成对抗网络来生成恢复图像,将失真图像和恢复图像一起输入到评价网络中对图像质量进行评估。西安电子科技大学的董存泉^[8]提出了基于孪生神经网络的仿真图像

相似度评估方法,阐述了神经网络和卷积网络的原理和训练过程,然后针对仿真图像相似度评估问题,搭建孪生神经网络进行训练,并对训练过程进行了改进,最后对仿真图像进行了两组相似度评估,证明了孪生神经网络在图像相似度评估中的可靠性和优势。尽管国内外学者利用传统方法或深度学习方法对仿真逼真度的理论和试验验证进行了大量研究,并在理论上取得了一定进展,但是针对具体仿真应用,分层次、分要素、综合性、定性和定量相结合的评估方法体系还没建立,逼真度评估体系也较为杂乱。其次,现有评价体系存在指标种类多、特征描述针对性强、指标之间的关联性与制约性复杂等问题,需要可行性、标准化、可操作性更强的方法来对红外仿真图像的逼真度进行度量。

为了解决上述问题,本文基于红外成像全链路场景模拟过程,确立红外仿真数据逼真度评价指标体系构造原则。综合红外物理层、机器视觉层、图像特征层、中层信息层、深度模型层、跨域任务层,构建多层、多特征、多任务的逼真度评估总体框架及评价指标。其次,将层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)引入评估算法设计中,对不同任务场景科学构建判断矩阵,实现图像逼真度的综合评估,进一步解决红外仿真数据逼真度评价指标体系各指标种类多、特征描述针对性强、指标之间关联性与制约性复杂等问题。最后,构造部分应用场景和典型目标的真实及仿真配对图像数据集,对本文提出的评估算法进行实验对比。

1 红外仿真图像逼真度评价指标体系建立

1.1 构造原则

红外仿真图像的逼真度是对最终红外图像相似性结果的评定,将仿真和真实的对比结果以具

体的数值表现出来,以衡量、检验整个仿真链路
的正确性和合理性。因此,对红外仿真系统链路
的简要分析有助于建立合理的逼真度指标评价
体系。而对这样复杂的系统,最常用的分析方
法就是把系统分解,一般按照树形结构分层进
行。

通过研究搭建的数学模型模拟目标/环境辐
射源发出的辐射能量到达红外成像系统形成红
外图像整个链路过程^[9],从自底向上的仿真逻辑来看,主要由五大部分组成,包括:模拟目标的图像结构特性、模拟成像图像信息特征分析、模拟红外成像反演结果、模拟深度模型评估、模拟任务层应用。相对应地,从层次特性来分析也可分为5层,分别对应目标图像结构特性层、图像信息特征层、红外成像反演层、有效的深度模型层、域适应的任务层。

1.2 评价指标建立

通过分析红外仿真成像系统整个链路过程,本文综合图像结构层、图像信息特征层、图像反演层、深度模型层、域适应任务层,构建了多层次多特征的逼真度评估总体框架。红外仿真图像逼真度评价指标的总体框架如图1所示,由图像结构特性逼真度(P_1)、图像信息特征逼真度(S_1)、图像反演逼真度(I_1)、模型特征逼真度(M_1)、域适应逼真度(T_1)组成。

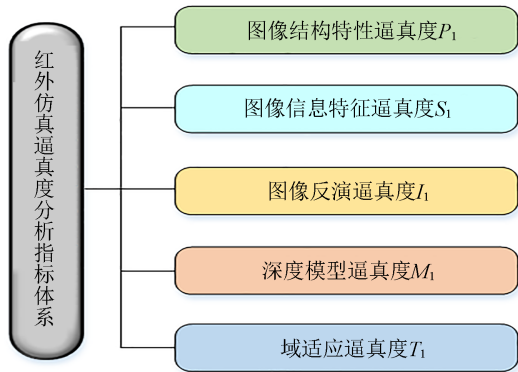


图1 红外仿真图像逼真度评价指标的总体框架

Fig.1 General framework of indicators for evaluating fidelities of infrared simulated images

1) 图像结构特性逼真度是对仿真图像和实拍图像从图像结构特征角度进行逼真度评估。一般根据图像的多种属性进行衡量对比,如通过颜色、结构、内容、纹理和质量特征,比较仿真图像和真实图像之间的逼真度^[10-11]。

2) 图像信息特征逼真度以完成仿真图像和真实图像的可识别性准则和分析策略为目的,着重

研究灰度差异、特征分布、相似程度的目标评价准则,设计匹配性分析、通视性分析、可见性分析、跟踪性分析等分析策略。

3) 图像反演逼真度以生成对抗网络为基础。由生成对抗网络的原理可知,生成器负责生成图像,判别器负责给生成图像的真实度打分^[12]。通过学习真实红外图像的特征,实现可见光图像的反演生成,并使得生成对抗网络生成的伪图像更接近真实红外图像。

4) 模型特征逼真度以卷积神经网络为基础,通过深度辨别模型来实现对仿真红外图像与真实红外图像的差异化检测,主要包括检测性能差异、语义差异、内容差异、边缘特征等。

5) 域适应逼真度旨在弥合红外真实数据(源域)和红外仿真数据(目标域)间由于成像环境等因素导致的数据差异。

2 基于层次分析法的红外图像逼真度评估算法

在上文所提出的仿真图像逼真度评价指标体系基础上,本文将使用层次分析法^[13]确定各评价指标的权重。主要步骤为:建立层次结构模型,将与评价对象有关的元素分解为目标、准则、任务3层结构;其次,构造判断矩阵,并根据判断矩阵计算特征向量进行层次排序;第三,对得到的权重是否合理再进行一致性检验;最后,计算仿真图像的逼真度。

2.1 层次结构模型构建

针对图像逼真度评估任务,具体细分为基于图像结构特征、图像信息特征、图像反演模型^[14]、神经网络深度模型和域适应评估5个评价准则。模型结构如图2所示。

2.2 构造判断矩阵

采用一致矩阵法来构建判断矩阵,即不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较。此时采用相对尺度,以尽可能减少性质不同因素相互比较的困难,提高准确度^[15]。两两因素之间的评价标度如表1所示。

按照建立的层次递阶结构模型,每一层因素以相邻上一层因素为基准,按照表1取值方法两两比较构造判断矩阵。指标的标度值由专家根据不同场景任务取定,构造判断矩阵 $A=[a_{ij}]_{m \times n}$ 。其中, a_{ij} 表示指标*i*与指标*j*的重要性之比, m 和 n 为

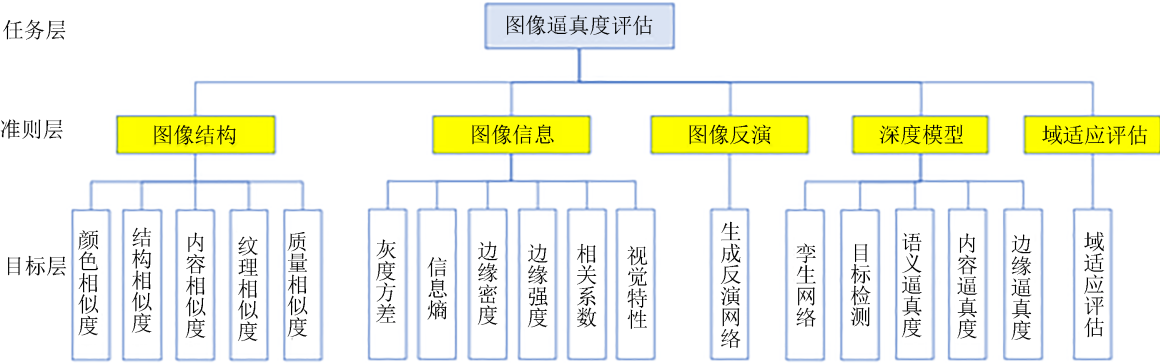


图 2 图像逼真度评估的 AHP 模型

Fig. 2 AHP model for evaluating image fidelity

矩阵的行和列数。

表 1 判断矩阵评价标度

Tab. 1 Evaluation scales of the judgement matrix

标度 a_{ij}	含义
1	i 指标比 j 指标同样重要
3	i 指标比 j 指标略微重要
5	i 指标比 j 指标明显重要
7	i 指标比 j 指标重要得多
9	i 指标比 j 指标重要很多
2,4,6,8	介于上述两两判断的中值
倒数	描述 j 指标比 i 指标的重要程度

2.3 特征向量与最大特征根求解

对应于判断矩阵最大特征根的特征向量，经归一化（使向量中各元素之和为1）后记为 W 。权重向量 W 的元素为同一层次元素对于上一层某因素相对重要性的排序权值，这一过程称为层次单排序。具体计算步骤如下。

(1) 判断矩阵规范化

$$\bar{a}_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij}$$

(2) 计算特征向量权重

$$\bar{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{a}_{ij}$$

(3) 计算最大特征根

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{w_i}$$

2.4 一致性检验

一致性检验是指对判断矩阵 A 确定不一致的允许范围。 n 阶一致阵的唯一非零特征根为 n ， n 阶正互反阵 A 的最大特征根 $\lambda_{\max} > n$ 时， A 为非一

致矩阵，比 n 大得越多， A 的不一致性越严重；当且仅当 $\lambda_{\max} = n$ 时， A 为一致矩阵。由此来判断矩阵 A 是否为一致矩阵。通过理论分析可得，如果 A 是完全一致的成对比较矩阵，应该满足

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, 1 \leq i, j, k \leq n$$

但实际上，在构造成对比较矩阵时要求满足上述众多等式是不可能的。因此，退而要求成对比较矩阵有一定的一致性，即可以允许成对比较矩阵存在一定程度的不一致性。

由分析可知，对于完全一致的成对比较矩阵，其绝对值最大的特征值等于该矩阵的维数。将对成对比较矩阵的一致性要求转化为要求绝对值最大的特征值和该矩阵的维数相差较小。检验成对比较矩阵 A 一致性的步骤如下。首先，定义一致性指标 I_c 为

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其次，为了衡量 I_c 的大小，定义随机一致性比率 R_c 为

$$R_c = I_c / I_R$$

式中： I_R 为判断矩阵的平均随机一致性指标。按照有关资料^[16]，1~12 阶的 I_R 值参见表 2。

表 2 平均随机一致性指标

Tab. 2 Average random consistency indexes

n	I_R	n	I_R	n	I_R
1	0	5	1.12	9	1.45
2	0	6	1.24	10	1.49
3	0.58	7	1.32	11	1.52
4	0.90	8	1.41	12	1.54

一般认为：当一致性比率 $R_c < 0.10$ 时，判断矩阵 A 的不一致程度在容许范围之内，可以通过

一致性检验, 并且可以用其归一化的特征向量作为权向量; 否则, 要重新构造成对的比较矩阵进行调整。

2.5 基于层次分析法的逼真度计算

针对通过一致性检验后的判断矩阵 A , 采用几何平均的方式计算层次内各指标的权重。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

由此, 通过几何平均法求得权重为

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{1/n}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$

红外仿真数据逼真度评价指标体系下的逼真度评估结果集合 $L = [L_{\text{结构}}, L_{\text{信息}}, L_{\text{反演}}, L_{\text{深度}}, L_{\text{域适应}}]$, 各层次权重计算得到最终评估逼真度为

$$L_{\text{总}} = W_{\text{总}} \cdot (W_{\text{结构}} \cdot L_{\text{结构}} + W_{\text{信息}} \cdot L_{\text{信息}} + W_{\text{反演}} \cdot L_{\text{反演}} + W_{\text{深度}} \cdot L_{\text{深度}} + W_{\text{域适应}} \cdot L_{\text{域适应}})$$

式中: 由于图像反演和域适应准则层评估指标下的目标层要素只有 1 个, 故权重 $W_{\text{反演}}$ 和 $W_{\text{域适应}}$ 为 1。

3 实验验证

3.1 应用层次分析法确定指标权重

根据上述层次分析法构造判断矩阵原则, 在典型目标红外图像逼真度评估场景中构建具体准则层判断矩阵和各因素层判断矩阵, 如表 3~6 所示。其中, 基于网络反演和域适应评估相似度评估指标只有 1 个目标层, 因此不需构建判断矩阵。

表 3 准则层判断矩阵构造

Tab. 3 Construction of the criterion level judgement matrix

项目	图像结构	图像信息	网络反演	神经网络	域适应评估
图像结构	1	3	5	5	3
图像信息	1/3	1	3	3	2
网络反演	1/5	1/3	1	3	2
神经网络	1/5	1/3	1/3	1	2
域适应评估	1/3	1/2	1/2	1/2	1

根据表 3 判断矩阵可计算出准则层特征值为 5.417 2, $I_c = 0.104 3$ 。通过查表得到 $I_R = 1.12$,

计算得到 $R_c = 0.093 1 < 0.1$, 一致性检验通过。

表 4 基于图像结构的因素层判断矩阵

Tab. 4 Image structure-based judgement matrix for the factor layer

项目	颜色相似度	结构相似度	形状相似度	纹理相似度	辐射相似度
颜色相似度	1	7	5	7	5
结构相似度	1/7	1	2	3	3
形状相似度	1/5	1/2	1	2	3
纹理相似度	1/7	1/3	1/2	1	3
辐射相似度	1/5	1/3	1/3	1/3	1

根据表 4 判断矩阵可计算出图像结构因素层特征值为 5.418 2, $I_c = 0.104 6$ 。通过查表得到 $I_R = 1.12$, 因此计算得到 $R_c = 0.093 3 < 0.1$, 一致性检验通过。

表 5 基于图像信息的因素层判断矩阵

Tab. 5 Image information-based judgement matrix for the factor layer

项目	相关系数	灰度方差	信息熵	边缘密度	边缘强度	图像质量
相关系数	1	7	7	7	7	9
灰度方差	1/7	1	2	3	3	5
信息熵	1/7	1/2	1	2	2	5
边缘密度	1/7	1/3	1/2	1	2	5
边缘强度	1/7	1/3	1/2	1/2	1	5
图像质量	1/9	1/5	1/5	1/5	1/5	1

根据表 5 判断矩阵可计算出图像信息因素层特征值为 6.500 7, $I_c = 0.100 1$ 。通过查表得到 $I_R = 1.24$, 因此计算得到 $R_c = 0.080 8 < 0.1$, 一致性检验通过。

表 6 基于深度模型的因素层判断矩阵

Tab. 6 Depth model-based judgement matrix for the factor layer

项目	孪生网络	目标检测	语义逼真度	内容逼真度	边缘逼真度
孪生网络	1	2	2	3	3
目标检测	1/2	1	2	2	3
语义逼真度	1/2	1/2	1	2	3
内容逼真度	1/3	1/2	1/2	1	3
边缘逼真度	1/3	1/3	1/3	1/3	1

根据表 6 判断矩阵可计算出图像信息因素层特

征值为 5.192 7, $I_c = 0.048\ 2$ 。通过查表得到 $I_R = 1.12$, 因此计算得到 $R_c = 0.043\ 0 < 0.1$, 一致性检验通过。

针对特定场景下构建的准则层 W_1 和各因素层 (W_2, W_3, W_4) 的判断矩阵, 使用 2.5 节几何平均法可以得到最终各层权重为

$$W_1 = [0.464\ 7, 0.225\ 8, 0.136\ 3, 0.087\ 3, 0.085\ 9]$$

$$W_2 = [0.592\ 8, 0.164\ 0, 0.118\ 2, 0.081\ 1, 0.053\ 8]$$

$$W_3 = [0.564\ 2, 0.157\ 0, 0.106\ 1, 0.081\ 4, \\ 0.065\ 1, 0.026\ 3]$$

$$W_4 = [0.356\ 4, 0.248\ 5, 0.188\ 3, 0.133\ 1, 0.073\ 6]$$

3.2 数据验证

本文构建了 4 组真实及仿真红外配对图像作为

实验数据, 如图 3 所示。其中: 测试 1 和测试 2 数据来源于 VEDAI 遥感影像数据集, 图中展示的是公路场景鸟瞰视角图像; 测试 3 和测试 4 数据来源于自行研发的典型应用场景和目标的数据集, 无人机飞行场景的真实红外图像以及调整仿真链路参数所得到的两张仿真图像。

结合上述构建的准则层判断矩阵和各因素层判断矩阵, 可以基于层次分析法得到各层权重, 然后综合总体指标下的评估结果集合和各层次权重, 计算得到最终评估结果。结果用 0 到 1 之间的小数来表示, 0 表示红外仿真图像与红外真实图像没有任何相似, 1 表示仿真图像与真实图像之间完全相同。实验结果如表 7 所示。

表 7 基于层次分析法的逼真度综合评估实验结果
Tab. 7 Experimental results of comprehensive assessment of fidelity based on AHP

准则层	目标层	逼真度			
		测试 1	测试 2	测试 3	测试 4
图像结构	颜色逼真度	0.834 1	0.904 3	0.065 5	0.301 4
	结构逼真度	0.722 3	0.668 5	0.788 9	0.285 4
	内容逼真度	0.971 8	0.998 0	0.879 4	0.774 4
	纹理逼真度	0.593 8	0.437 5	0.687 5	0.312 5
	质量逼真度	0.187 3	0.202 2	0.169 3	0.135 6
	结构特性综合	0.777 7	0.801 1	0.336 3	0.346 7
图像信息	相关系数	0.482 8	0.023 2	0.500 0	0.100 0
	信息熵	0.654 8	0.827 3	0.016 5	0.066 7
	边缘密度	0.772 8	0.650 3	0.016 0	0.191 5
	边缘强度	0.587 1	0.754 5	0.568 8	0.572 3
	灰度方差	0.864 6	0.837 7	0.889 1	0.934 7
	视觉特性	0.941 5	0.853 9	0.566 4	0.691 7
	信息特征综合	0.586 0	0.350 3	0.124 6	0.156 9
图像反演	生成对抗	0.939 0	0.955 7	0.919 7	0.864 8
深度模型	语义逼真度	0.835 2	0.876 4	0.932 5	0.885 6
	边缘逼真度	0.827 9	0.873 3	0.943 1	0.921 4
	内容逼真度	0.519 0	0.507 5	0.261 5	0.291 4
	孪生网络	0.971 4	0.971 4	0.975 8	0.982 5
	目标检测	0.568 7	0.483 6	0.685 9	0.542 9
	深度模型综合	0.772 2	0.789 8	0.796 3	0.770 2
域适应评估	域适应评估	0.797 0	0.478 5	0.873 0	0.298 2
综合逼真度评估结果		0.749 4	0.683 6	0.448 2	0.402 6

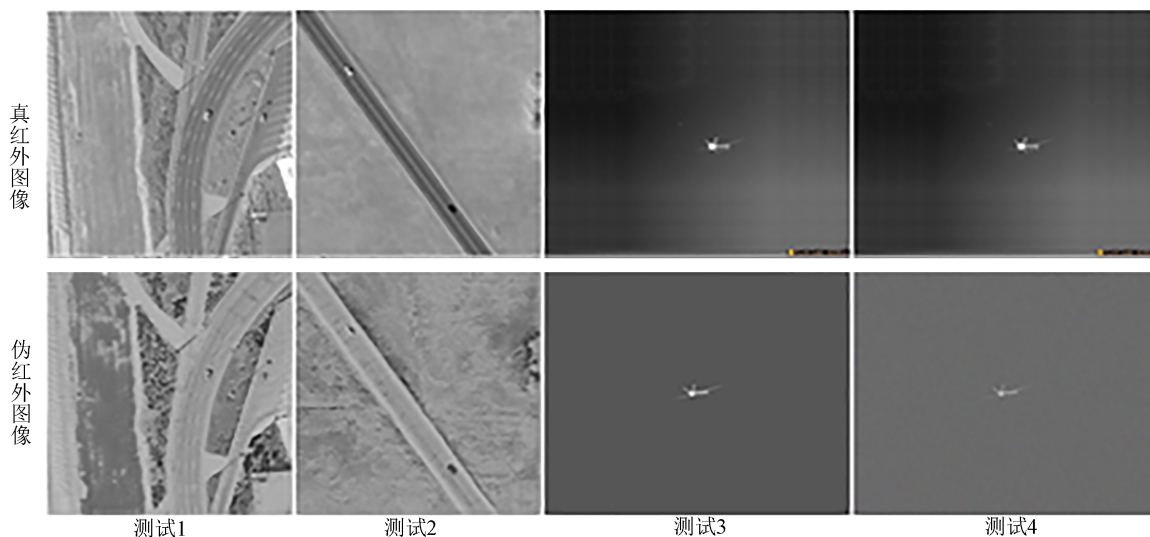


图3 不同目标的真实红外和仿真红外图像

Fig. 3 Real and simulated infrared images of different targets

可以看出, 测试1和测试2在不同准则层的逼真度结果各有差异。例如: 测试2中的图像由于其图像结构相对简单, 因此, 仿真图像在图像结构这一准则层中的逼真度较高; 而测试1的图像信息特征比较丰富, 仿真图像能较好还原真实图像中的信息特征, 因此, 信息特征综合逼真度评估较高。另外, 相对于测试3, 测试4的仿真图像是在对视景仿真生成系统调整参数, 加入噪声调节对比度后得到的, 按照仿真链路准则, 其逼真度应该低于测试3。通过实验可以发现, 测试4仿真图像的综合逼真度评估结果明显下降, 表明该算法有效。

4 结论

为全面准确评估红外仿真图像与实际图像的相似程度, 本文建立了多层次、多特征、多任务的逼真度评估总体框架和评价指标体系。在此基础上, 引入层次分析法来优化各指标体系的权重分配, 建立了基于层次分析法的红外仿真图像逼真度评估算法。最后, 构建了部分应用场景和典型目标的真实及仿真红外配对图像的测试数据, 并在此基础上对评估算法进行实验对比分析。实验结果表明, 该算法可以有效实现多场景、多类型、多域目标仿真图像的综合评估, 有效解决当前逼真度研究存在的评估指标体系不统一、评估方法不全面等问题, 可以为红外场景仿真评价提供新的参考方案。

参考文献

- [1] GROSS D. Report from the fidelity implementation study group[C]//Proceedings of 1999 Spring Simulation Interoperability Workshop. Orlando Florida, USA: Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), 1999: 231-240.
- [2] 唐凯, 康凤举. 基于模糊AHP的视景仿真系统逼真度评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(22): 6049-6053, 6057.
TANG K, KANG F J. Evaluation method of visualization simulation fidelity based on fuzzy AHP [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(22): 6049-6053, 6057.
- [3] 李健. 基于逼真度的仿真系统评估研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 23-33.
LI J. Research on evaluation of simulation systems based on fidelity[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 23-33.
- [4] 王国良, 申绪润, 叶礼邦, 等. 作战目标仿真逼真度分析方法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(2): 6-10, 101.
WANG G L, SHEN X J, YE L B, et al. Research on analysis method of target simulation fidelity[J]. Computer Simulation, 2015, 32(2): 6-10, 101.
- [5] 陈业朝. 红外视景仿真系统逼真度试验验证及综合评估研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 106-109.
CHEN Y Z. Research on experimental verification and synthetic evaluation of the fidelity of infrared scene simulation system[D]. Xi'an: Xidian Uni-

- versity, 2017: 106-109.
- [6] KANG L, YE P, LI Y, et al. Simultaneous estimation of image quality and distortion via multi-task convolutional neural networks[C]//2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 2791-2795.
- [7] REN H Y, CHEN D Q, WANG Y Z. RAN4IQA: Restorative adversarial nets for no-reference image quality assessment[C]//The Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence. New Orleans, Louisiana, USA: AAAI, 2018, 32(1): 7308-7314.
- [8] 董存泉. 基于深度学习的仿真图像评估研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 41-50.
- DONG C Q. Research on simulation image evaluation based on deep learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 41-50.
- [9] 刘路, 宗周红, 周海飞, 等. 近场爆炸作用下节段预制拼装 RC 桥墩的易损性评估[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 212-223.
- LIU L, ZONG Z H, ZHOU H F, et al. Vulnerability assessment of precast segmental RC bridge piers under near-field explosion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(4): 212-223.
- [10] 李晨阳. 基于三维场景的红外成像仿真系统及实现[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2019: 16-24.
- LI C Y. The infrared imaging simulation system based on three-dimensional scene and its implementation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center), 2019: 16-24.
- [11] 陈大秀. 基于深度学习的红外仿真图像质量评价研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022: 27-34.
- CHEN D X. Research on infrared simulation image quality evaluation based on deep learning[D]. Xi'an: Xidian University, 2022: 27-34.
- [12] 王金华, 严卫生, 刘旭琳, 等. 视景仿真可信度评估体系的扩充及其应用[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(8): 1912-1915, 1919.
- WANG J H, YAN W S, LIU X L, et al. Concept extension and application of visual simulation credibility evaluation[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(8): 1912-1915, 1919.
- [13] 张兰, 王光霞, 安利, 等. 基于改进层次分析法的遥感影像压缩质量评价[J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(4): 8-12.
- ZHANG L, WANG G X, AN L, et al. Remote sensing image compression quality evaluation based on improved analytic hierarchy process[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(4): 8-12.
- [14] 李一凡, 杨萍. 基于 StyleGAN 的图像反演算法综述[J]. 软件, 2023, 44(9): 84-87.
- LI Y F, YANG P. A review of image inversion algorithms based on StyleGAN[J]. Software, 2023, 44(9): 84-87.
- [15] 胡利平, 刘锦帆, 王洪叶, 等. 基于模糊综合评判的车辆目标 SAR 仿真图像评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(3): 534-540.
- HU L P, LIU J F, WANG H Y, et al. Vehicle SAR simulation images validation method based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(3): 534-540.
- [16] 汪应洛. 系统工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003: 130-140.