

基于 SEM 的彩色融合图像质量主观评价方法

何炳阳¹, 廖俊勃¹, 张宇², 华创录¹, 王新¹, 陈文勇¹

(1. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 渭南 714200; 2. 联勤保障部队预备役旅, 重庆 400054)

摘要:作为客观评价的研究基础,人眼主观评价是比较不同融合算法图像优劣的最直接有效的方法。通过开展主观评价实验,基于单因变量模型分析清晰度、颜色协调性等影响因素对彩色融合图像质量的影响程度,进而预测视觉任务下的融合图像总体质量,是目前流行的彩色融合图像质量主观评价研究方法。针对基于单因变量模型的研究方法易割裂“探测”与“感知”在探测识别过程中的联系的问题,本文以村庄环境下的探测识别视觉任务为例,选取“感知”和“探测”2个指标共同作为彩色融合图像质量的表现指标,组织15人对由8个场景、8种典型融合算法生成的42幅彩色融合图像的质量进行了主观评价。采用双因变量的结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)分析了筛选后的评价结果,建立了彩色融合图像质量的预测模型并验证了模型的正确性。结果表明,当同时表现“感知”和“探测”2种性能时,村庄环境、探测识别视觉任务下,彩色融合图像的质量可由“目标背景差异”、“场景清晰度”和“颜色协调性”3个因素预测,且“感知”和“探测”2种性能是均衡的。

关键词:彩色融合; 图像质量; 主观评价; 预测模型; 结构方程模型

中图分类号:TP391; TN219 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.09.011

Subjective assessment of color fused image quality based on SEM

HE Bing-yang¹, LIAO Jun-bo¹, ZHANG Yu², HUA Chuang-lu¹, WANG Xin¹, CHENG Wen-yong¹

(1. Huayin Ordnance Test Center of China, Weinan 714200, China;

2. Reserve Joint Logistics Support Brigade, Chongqing 400054, China)

Abstract: As the research foundation of the objective assessment, the subjective assessment of human eyes is the most direct and effective method to compare the image quality of different fusion algorithms. It is a popular research method for subjective assessment of color fused image quality at present to analyze impacts of factors as the sharpness and the color harmony on the color fused image quality based on the single-dependent variable model by carrying out subjective assessment experiments, and then to predict the overall quality of fused images under vision tasks. Aiming at the problem that the method based on the single-dependent variable model tends to cut apart the relationship between "detection" and "perception" in the process of detection and recognition, the vision task of detection and recognition in the village is taken as an example in this paper, "perception" and "detection" are selected as the externalization indicators of the color fused image quality. Fifteen people are organized to subjectively assess the quality of forty-two color fused images generated by eight typical fusion algorithms in eight scenes. The assessment results after screening are analyzed by the structural equation model (SEM) of dual-dependent variables. The prediction model of color fused image quality is established and the correctness of the model is verified. The results show that the color fused image quality under the detection and recognition vision task in the village environment can be predicted by three factors of

基金项目:军内科研孵化器项目(No. 2021FH003)资助。

作者简介:何炳阳(1989-),男,博士,工程师,主要从事目标探测与识别方面的研究。E-mail:hby1630@163.com

收稿日期:2022-11-01

"difference between targets and the background", and the two "scene sharpness" and "color harmony" are balanced when "perception" and "detection" are performed simultaneously.

Keywords: color fusion; image quality; subjective assessment; prediction model; SEM

1 引言

红外和低照度可见光图像彩色融合技术在综合不同波段互补信息、发挥不同成像机理优势的基础上,根据人眼对色彩敏感的特点,利用色彩增强融合图像的信息表达能力,能够进一步提高人眼视觉在低照度条件下对场景的快速理解、感知能力,和对目标的探测、识别能力,因而成为当前夜视技术的重要发展方向^[1-2]。

为了比较不同融合算法图像的优劣,需要对融合图像的质量作出评价,通常采用客观或主观评价。客观评价以主观评价的结果为基准,基于评价模型对融合图像计算得到评价值,具有高效率、低成本、结果重复性好等优点;而人眼主观评价则是图像质量最直接有效的评价方法,虽然评价的人力、时间成本较高,但作为客观评价的研究基础,一直是彩色融合图像质量评价的重要研究方向^[3]。

早期的彩色融合图像质量主观评价,研究的重点是评估彩色融合图像在探测识别、感知理解的效率和准确率等性能上相比于灰度融合图像、单波段图像的改善^[4-8]。随着研究的深入,综合评价彩色融合图像在探测识别、感知理解等视觉任务下的总体质量,逐步成为研究热点^[9-10]。通过开展主观评价实验,基于单因变量模型分析清晰度、颜色协调性等影响因素对视觉任务下图像质量的影响程度,并使用易于建模的影响因素预测融合图像的的总体质量,成为目前流行的研究方法^[11],学者们在主观评价实验设计^[12]、评价结果分析处理^[13]等方面持续开展研究。

但基于单因变量模型的彩色融合图像质量主观评价方法仍存在一些不足:以探测识别视觉任务为例,根据定义,探测识别是将目标从背景中区别出来并判定其类别的过程,而背景会为目标探测识别提供附加的信息。例如,视场中的道路上似乎有一个小斑点,其合理的概率是一辆车;同样的斑点如果在天空中或者海面上,则它更可能是一架飞机或一艘船^[14]。由于观察者通过背景来感知理解场景的内容,因而在探测识别过程中,“探测”和“感知”是同时存在的。另一方面,根据彩色

融合的原理,中、长波红外成像利于目标探测,低照度可见光成像符合人眼观察习惯,利于场景感知,色彩进一步增强了场景的信息表达能力,彩色融合则综合了双波段的信息、兼具了“探测”和“感知”两方面的优势。因此,在评价探测识别视觉任务下的融合图像总体质量时,若仅基于“探测”指标建立单因变量的总体质量预测模型^[15],不仅易使评价人员忽视“感知”在探测识别过程中的作用,也无法全面地反映彩色融合图像的质量、无法完整地体现融合的意义和目的。

针对该问题,本文以村庄环境下的探测识别视觉任务为例,选取“感知”和“探测”两个指标共同作为彩色融合图像质量的表现指标,设计并开展主观评价实验,基于双因变量的结构方程模型(Structural Equation Model, SEM)^[16]分析实验数据,确定彩色融合图像质量的影响因素及影响程度,建立彩色融合图像质量的预测模型并进行验证,为典型环境、典型视觉任务下、基于预测模型的彩色融合图像质量客观评价提供研究基础,同时为融合图像质量主观评价研究提供参考。

2 主观评价实验

彩色融合图像质量的主观评价需要评价人员在一定的观察条件下,根据评价指标的定义,按照评价方法给出融合图像的主观意见分。

2.1 待评价场景及其融合图像

待评价场景配准后的双波段灰度源图像从公开的 TNO Image fusion dataset 图像融合数据集^[17]中获取,根据视觉任务的类型,我们采用了模拟村庄场景的低照度可见光(0.4 ~ 0.7 μm)和长波红外(8 ~ 14 μm)黑热图像作为彩色融合算法的灰度源图像,所有图像大小均为 640 pixel \times 480 pixel。该模拟村庄为荷兰 Marnehuizen 军事训练场,主要用于训练士兵和警察,训练场内的各种设施、景物共同营造出真实的村庄环境。

结合研究目的,我们共选取了 8 个场景(如图 1 所示):编号为 01 至 05 的 5 个场景,用于建立探测识别视觉任务下,彩色融合图像质量的预测模型;编号为 11 至 13 的 3 个场景,用于预测模型的验证。



图1 模拟村庄场景的双波段灰度源图像

Fig.1 Dual-band gray source images of simulated village scenes

场景内容如下：

01：一排房屋前的道路上，在距离图像采集设备不远处有一个士兵在奔跑；

02：两栋房屋之间的路径，草地上的烟雾弹释放了轻度的烟幕，对低照度可见光成像设备造成了局部遮蔽，一个蹲姿手持步枪的士兵欲利用烟幕的掩护通过两栋房屋之间的草地；

03：一大一小两栋房屋及草坪，在大房屋二层的两扇窗户里各有一个士兵，一个士兵在敞开玻璃的窗户内，仅在长波红外源图像中可见，另一个士兵在在关闭玻璃的窗户内，仅在可见光源图像中可见；

04：一辆停放在村庄小广场上的吉普车，两个士兵坐在吉普车的前排，因车身遮挡，仅能看到士兵的头、肩等部位；

05：一条通向远处房屋的道路中间，距离图像采集设备较远处有一个士兵在行走；

11：银行的门前树立有标志牌，地面上布设有铁丝网，在距离图像采集设备较近处有一个士兵从银行走出；

12：两栋房屋之间的路径，草地上的烟雾弹释放了重度的烟幕，对低照度可见光成像设备造成了全局遮蔽，一个手持步枪的士兵利用烟幕的掩护面向图像采集设备走来；

13：一排房屋前的道路上，在距离图像采集设备不远处有一个士兵在奔跑。

根据融合原理的不同，目前彩色融合算法主要分为3类，我们从中选取具有代表性且便于获取的8种：TNO1996^[18]和NRL^[19]两种伪彩色融合算法，TNO2003^[20]、PAOCT^[21]、MAOCT^[21]三种基于色彩传递的自然彩色融合算法，以及TNO2016^[22]、CbCrLUT^[23]和RGBLUT^[24]三种基于样本的自然彩色融合算法。彩色融合图像质量的预测模型在建立和验证阶段采用的场景与融合算法的对应关系如表1所示。

表1 场景与融合算法的对应关系

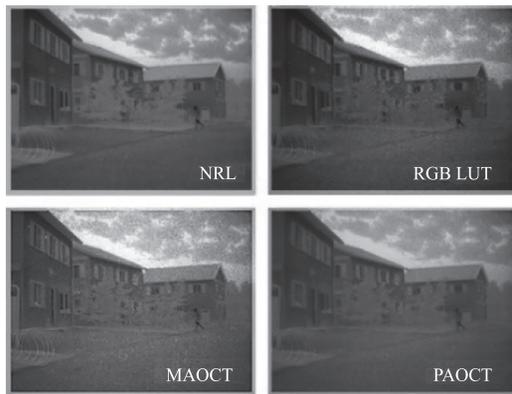
Tab. 1 Correspondence between scenes and fusion methods

融合算法	01	02	03	04	05	11	12	13
TNO1996	●	●	●	●	●			
NRL	●	●	●	●	●	●	●	●
TNO2003	●	●	●	●	●			
PAOCT						●	●	●
MAOCT	●	●	●	●	●	●	●	●
TNO2016	●	●	●	●	●			
CbCrLUT	●	●	●	●	●			
RGBLUT						●	●	●

为了充分验证预测模型的可靠性，我们在验证阶段采用了与模型建立阶段不同的算法（PAOCT、RGBLUT）、不同参考图像的相同算法（MAOCT），以及不同色彩通道映射关系的相同算法（NRL），生成不同场景、不同融合效果的评价图像。以场景03与场景13为例，融合效果的对比如图2所示。



(a)场景03



(b)场景 13

图 2 场景 03 与场景 13 的彩色融合图像

Fig. 2 Color fused images of the scene 03 and the scene 13

2.2 评价指标及影响因素

参考人眼视觉特性^[25]、已有彩色融合图像主观评价相关文献^[10-12],场景清晰度、目标背景差异、颜色自然感、颜色协调性等因素会对探测识别视觉任务下的彩色融合图像质量产生影响。由于多数彩色融合算法图像的颜色自然感较差、判断难度大^[10],且颜色自然感与颜色协调性具有强相关和共线性^[11-12],因此舍弃颜色自然感,在主观评价实验中设置彩色融合图像质量(Color Fused Image Quality)的影响因素 3 个:颜色协调性、目标背景差异、场景清晰度;表现指标 2 个:感知、探测,具体如下:

目标背景差异(Difference between Targets and the Background, DTB):目标与局部背景的差异程度,即背景中目标的突出程度,包含亮度差、色度差等。差异越大,主观评分越高。

场景清晰度(Scene Sharpness, SS):目标细节与景物细节的多少、纹理的清晰程度,保持源图细节与去除源图像噪声的平衡。图像越模糊、噪声越大,主观评分越低。

颜色协调性(Color Harmony, CH):不考虑目标、场景清晰度,融合图像的色彩搭配组合使观察者产生舒适、愉悦感受的程度。舒适、愉悦程度越高,主观评分越高。

感知(Perception):综合考虑图像的质量与色彩,场景内容是否易于快速理解。越易快速准确理解,主观评分越高。

探测(Detection):综合考虑图像的质量与色彩,是否易于快速发现目标并辨识目标的类别、细节、行为等。越易发现辨识,主观评分越高。

2.3 观察条件

为了获得有效的评价结果,主观评价实验需要在一定的观察条件下开展。参考已有彩色融合图像主观评价相关文献和彩色图像质量主观评价标准^[26-28],确定评价实验所需的环境照度、显示设备参数、观察距离等条件。

评价实验在室内进行,通过调整照明,将环境照度控制在 20 lx 左右。使用明基 SW270C 硬件校色显示器(2560 pixel × 1440 pixel, 60 Hz)作为彩色融合图像的显示设备,显示参数设置为 AdobeRGB 显示模式、D65 色温、75 % 亮度。采用 SpyderX 校色仪搭配 DisplayCAL - 3.8.9.3 校色软件对预热 30 min 后的显示器进行测试,测得峰值亮度为 172.5 cd/m²,背景色度为 6476 K,白点色度坐标为 (0.3134, 0.3279),与 D65 白点色度坐标 (0.3128, 0.3292) 基本重合,覆盖 98.1 % 的 AdobeRGB 色域,平均色差 $\Delta E_{00} < 0.39$,即对于人眼而言,显示色彩与标准色彩没有可觉察的差异^[29],融合图像的色彩能够稳定准确呈现。



图 3 场景 04 的展示情况

Fig. 3 Presentation of the scene 04

观察位置位于显示器的正前方,最佳观察距离与图像的展示方法相关。参考双刺激法和激励比较法,通过将低照度可见光和长波红外灰度源图像作为参考图像、将不同算法的融合图像同屏对比等方式,确保评价结果的稳定准确。在预测模型的建立阶段,每个场景分 3 行展示 8 幅图像,展示尺寸为 1920 pixel × 1440 pixel,第一行以固定顺序居中展示 2 幅双波段灰度源图像,第 2、3 行以伪随机顺序展示 6 种算法的彩色融合图像,例如图 3 所示为场景 04 的展示情况;在模型验证阶段,每个场景分 3 行显示 6 幅图像,第 2、3 行以伪随机顺序展示 4 种算法的彩色融合图像。根据不同尺寸图像的最佳水平观看角度^[30],设置观看距离为 80 cm。

2.4 评价人员和方法

参考 ITU-R BT. 500 - 14、GB/T 22123 - 2008 等标准^[26-28],结合实际条件,参与实验的评价人员共 15 人,其中男性 13 名,女性 2 名,年龄在 20 ~ 45 岁之间,具有正常(或矫正后正常)的视力和彩色视觉,全部具有长波红外图像的观察经验,部分还具有微光图像或彩色夜视图像的观察经验。

每次实验开始前,打开电脑预热显示器 30 min,期间采用无偏向性的语气,向入座的评价人员介绍测试方法、评价指标和评分等级,并展示与待评价场景内容相近的昼间彩色模拟村庄场景(1920 pixel × 1080 pixel,如图 4 所示),以帮助评价人员了解待评价场景的概况。



图 4 昼间彩色模拟村庄场景

Fig. 4 Simulated village scenes of daytime color

实验时,评价人员在对低照度可见光和长波红外灰度源图像的内容进行充分的理解后,通过对比,根据主观感受确定不同指标下的融合图像质量主观评分。评分采用 ITU 五级质量量表,分值为 1 至 5 分,按照各指标的定义,依次对应主观感受劣、差、中、良、优 5 个等级。实验要求评价人员在无法区分某些图像的优劣时给出相同的分数,以避免评价结果不准确,但相同分数图像的数量不应超过每个场景融合图像总数量的一半,以避免消极打分。评价人员每隔 30 分钟休息 5 分钟,单个场景的评价时长不受限制。

3 实验数据处理与分析

15 名评价人员根据 5 个指标的定义分别对彩色融合图像质量预测模型建立阶段的 5 个场景、验证阶段的 3 个场景中的融合图像进行主观评分,共获得模型建立阶段的实验数据 450 组(共计 2250 个主观评分值)、模型验证阶段的实验数据 180 组(共

计 900 个主观评分值),每组数据为 1 名评价人员对 1 个场景中 1 种融合算法图像 5 个指标的主观评分。

首先对获取的实验数据进行筛选;其次基于双因变量的结构方程模型对筛选后的 420 组(14 人)数据进行分析,建立探测识别视觉任务下的彩色融合图像质量预测模型;最后利用筛选后的 156 组(13 人)数据验证预测模型的正确性。

3.1 数据筛选

主观评价可能会受到评价人员情绪、理解能力、个人偏好等因素的影响,在分析数据前,需要对评价结果进行筛选,将评分显著偏离平均分的评价人员剔除。筛选程序参考 ITU-R BT. 1788 标准附录 2^[27],计算各评价人员主观评分与平均分的皮尔逊相关系数,并将低于最大相关门限的评价人员舍弃。筛选结果如表 2、表 3 所示,模型建立阶段剔除评价人员 1 名,模型验证阶段剔除评价人员 2 名。

表 2 模型建立阶段的筛选结果
(最大相关门限 = 0.67)

Tab. 2 Filtered results in the model building stage
(Max correlation threshold = 0.67)

评价人员	Pearson 相关系数	筛选结果
No. 1	0.78	保留
No. 2	0.68	保留
No. 3	0.73	保留
No. 4	0.82	保留
No. 5	0.78	保留
No. 6	0.47	剔除
No. 7	0.75	保留
No. 8	0.82	保留
No. 9	0.78	保留
No. 10	0.79	保留
No. 11	0.76	保留
No. 12	0.82	保留
No. 13	0.85	保留
No. 14	0.82	保留
No. 15	0.79	保留

3.2 彩色融合图像质量预测模型的建立

线性回归是最普遍流行的统计分析方法,但面对双(多)因变量模型时,只能对因变量逐一分析且

零),且“感知”和“探测”两种性能是均衡的。

$$\eta = 0.36x_1 + 0.32x_2 + 0.23x_3 \quad (3)$$

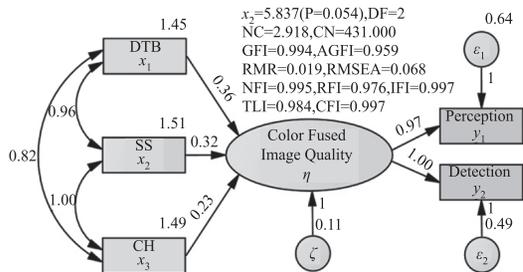


图6 模型建立阶段实验数据的分析结果

Fig.6 Analysis results of experimental data in the model building stage

表4 整体适配度指标及模型实测值^[32]

Tab.4 Overall fit indices and model measured values^[32]

类型	统计检验量	标准或临界值	模型建立阶段实测值	模型验证阶段实测值
绝对适配度指数	$p(\chi^2)$	>0.05	0.054	0.268
	GFI	>0.90	0.994	0.973
	AGFI	>0.90	0.959	0.955
	RMR	<0.05	0.019	0.081
	RMSER	<0.08	0.068	0.039
增值适配度指数	NFI	>0.90	0.995	0.954
	RFI	>0.90	0.976	0.949
	IFI	>0.90	0.997	0.991
	TLI	>0.90	0.984	0.990
	CFI	>0.90	0.997	0.991
简约适配度指数	NC	$1 < NC < 3$	2.918	1.232
	CN	>200	431	237

3.3 彩色融合图像质量预测模型的验证

使用 IBM SPSS Amos 26.0 软件分析预测模型与模型验证阶段筛选后的 156 组实验数据的适配性。参照式(3)和图6,将模型中的系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 和 λ_5 的值分别固定为 0.36、0.32、0.23、0.97 和 1,将误差 ζ 、 ε_1 和 ε_2 的方差分别固定为 0.11、0.64 和 0.48,基于该参数固定模型的分析结果如图7所示,检验表4和图7中的适配度指标和实测值,可知预测模型与模型验证阶段的实验数据相适配,由此验证了式(3)评价模型在模拟村庄环境下的正确性、有效性。

4 结论

作为客观评价的研究基础,人眼主观评价是比较不同彩色融合算法图像优劣的最直接有效的方

法。本文以村庄环境下的探测识别视觉任务为例,选取“感知”和“探测”2个指标共同作为彩色融合图像质量的表现指标,设计并开展了15人的彩色融合图像质量主观评价实验。采用双因变量的结构方程模型对筛选后的评价结果进行了分析,结果表明,当同时表现“感知”和“探测”2种性能时,村庄环境、探测识别视觉任务下,彩色融合图像的质量可由“目标背景差异”、“场景清晰度”和“颜色协调性”3个因素预测,且“感知”和“探测”2种性能是均衡的。

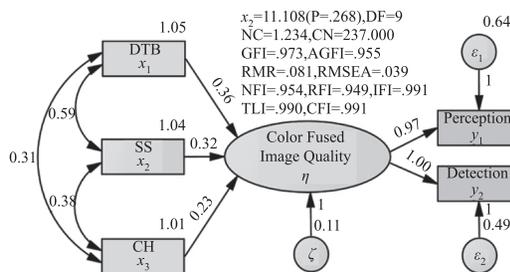


图7 模型验证阶段实验数据的分析结果

Fig.7 Analysis results of experimental data in the model validation stage

文中的主观评价实验设计、评价结果分析处理方法可为融合图像质量的主观评价研究提供参考;建立的村庄环境、探测识别视觉任务下的彩色融合图像质量预测模型为融合图像质量的客观评价提供了研究基础。增加实验样本数、进一步完善主观评价实验设计和数据分析方法,参照文中方法建立其他典型环境、典型视觉任务下的彩色融合图像质量预测模型是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Toet A, Hogervorst M A. Progress in color night vision [J]. Optical Engineering, 2012, 51(1):010901.
- [2] Gegenfurtner K R, Rieger J. Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes [J]. Current Biology, 2000, 10(13):805-808.
- [3] Zhou Jingchao, Dai Ruwei, Xiao Bohua. Overview of image quality assessment research [J]. Computer Science, 2008, 35(7):1-4, 8. (in Chinese)
周景超,戴汝为,肖柏华.图像质量评价研究综述 [J]. 计算机科学, 2008, 35(7):1-4, 8.
- [4] Toet A, IJspeert J K, Waxman A M, et al. Fusion of visible and thermal imagery improves situational awareness [J]. Displays, 1997, 18(2):85-95.
- [5] Essock E A, Sinai M J, McCarley J S, et al. Perceptual a-

- bility with real-world nighttime scenes: image-intensified, infrared, and fused-color imagery [J]. *Human Factors*, 1999, 41(3): 438 – 452.
- [6] Lanir J, Rotman S R, Maltz M. Comparing multispectral image fusion methods for a target detection task [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(6): 066402.
- [7] Dixon T D, Nikolov S G, Lewis J J, et al. Task-based scanpath assessment of multi-sensor video fusion in complex scenarios [J]. *Information Fusion*, 2010, 11(1): 51 – 65.
- [8] Toet A, de Jong M J, Hogervorst M A, et al. Perceptual evaluation of color transformed multispectral imagery [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(4): 043101.
- [9] Zheng Y, Dong W, Blasch E P. Qualitative and quantitative comparisons of multispectral night vision colorization techniques [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8): 087004.
- [10] Shi Junsheng, Jin Weiqi, Wang Lingxue. Study on perceptual evaluation of fused image quality for color night vision [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(3): 236 – 240. (in Chinese)
石俊生, 金伟其, 王岭雪. 视觉评价夜视彩色融合图像质量的实验研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, 24(3): 236 – 240.
- [11] Gao S, Jin W, Wang L. Quality assessment for visible and infrared color fusion images of typical scenes [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 081101.
- [12] Jin Weiqi, Jia Xiaoting, Gao Shaoshu, et al. Subjective evaluation of quality for color fusion images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3465 – 3471. (in Chinese)
金伟其, 贾晓婷, 高绍姝, 等. 彩色融合图像的质量主观评价 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3465 – 3471.
- [13] Zhang Xiaodong, Gao Shaoshu, Wang Yuxuan, et al. Subjective evaluation for quality assessment of color fusion images using subspace identification method [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2018, 35(5): 136 – 139. (in Chinese)
张晓东, 高绍姝, 王宇轩, 等. 子空间辨识彩色融合图像质量主观评价实验 [J]. *实验室研究与探索*, 2018, 35(5): 136 – 139.
- [14] Zhou Liwei. Targets detection and recognition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- 周立伟. 目标探测与识别 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [15] Zhang Xiaodong, Gao Shaoshu. Comprehensive quality psychophysical assessment experiment of color fusion images based on target detectability [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2016, 37(7): 110 – 113. (in Chinese)
张晓东, 高绍姝. 基于目标探测的彩色融合图像质量主观评价实验 [J]. *实验室研究与探索*, 2016, 37(7): 110 – 113.
- [16] Bollen K A. Structural equations with latent variables [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- [17] Toet A. TNO Image fusion dataset [EB/OL]. [2014-4-26]. https://figshare.com/articles/dataset/TNO_Image_Fusion_Dataset/1008029.
- [18] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(3): 650 – 658.
- [19] McDaniel R V, Scribner D A, Krebs W K, et al. Image fusion for tactical applications [J]. *Proceeding of the SPIE-Infrared Technology and Applications XXIV*. 1998, 3436: 685 – 695.
- [20] Toet A. Natural colour mapping for multiband night vision imagery [J]. *Information Fusion*, 2003, 4(3): 155 – 166.
- [21] Li Guangxin, Xu Shuyan, Dong Jihong. Architecture optimized version color transfer based fusion method [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(1): 213 – 218. (in Chinese)
李光鑫, 徐抒岩, 董吉洪. 结构优化型颜色传递融合方法 [J]. *电子学报*, 2011, 39(1): 213 – 218.
- [22] Hogervorst M A, Toet A. Improved colour matching technique for fused nighttime imagery with daytime colours [J]. *Proceeding of the SPIE – Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*. 2016, 9987: 174 – 187.
- [23] He Bingyang, Zhang Ziquan, Li Qiang, et al. Color fusion algorithm of dual-band images based on cber look-up table [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0133001. (in Chinese)
何炳阳, 张智谔, 李强, 等. 基于 CbCr 查找表的双波段图像彩色融合算法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0133001.
- [24] He Bingyang, Zhang Zhiqian, Li Qiang, et al. Natural color fusion algorithm based on BP neural network [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(5): 431 – 437. (in Chinese)
何炳阳, 张智谔, 李强, 等. 基于 BP 神经网络的自然感彩色融合算法 [J]. *红外技术*, 2018, 40(5): 431 – 437.
- [25] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. Principle and technology of photo-

- electric imaging[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- 白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [26] ITU-R. Recommendation ITU-R BT. 500 – 14. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[S]//Geneva: ITU-R, 2019.
- [27] ITU-R. Recommendation ITU-R BT. 1788 – 0. Methodology for the subjective assessment of video quality in multimedia applications[S]//Geneva: ITU-R, 2007.
- [28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22123—2008. 数字电视接收设备图像和声音主观评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [29] Tao Yuanyuan. Performance evaluation of infrared and low light level fusion night vision system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- 陶媛媛. 红外与微光融合夜视系统性能评价[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [30] ITU-R. Recommendation ITU-R BT. 2022 – 0. General viewing conditions for subjective assessment of quality of SDTV and HDTV television pictures on flat panel displays[S]. Geneva: ITU – R, 2012.
- [31] Fornell C, MD Johnson, Anderson E W, et al. The American customer satisfaction index: nature, purpose, and findings[J]. Journal of Marketing, 1996, 60(4): 7 – 18.
- [32] Wu Minglong. Structural equation model: operation and application of AMOS[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2010. (in Chinese)
- 吴明隆. 结构方程模型: AMOS 的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.