

引用格式:王佳慧,武静,张川,等.用于HVS的拉普拉斯金字塔变换图像融合研究[J].电光与控制,2019,26(1):77-80,91. WANG J H, WU J, ZHANG C, et al. Laplacian pyramid based image fusion for use in HVS[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1):77-80, 91.

用于HVS的拉普拉斯金字塔变换图像融合研究

王佳慧^{1,2}, 武静², 张川², 曹行健³

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

3. 电子科技大学信息与通信工程学院, 成都 611731)

摘要: 平视视景系统(HVS)融合了增强视景系统(EVS)和合成视景系统(SVS),在飞机近陆运行阶段,为飞行员提供实时外景信息,提高飞行安全。提出了一种用于HVS的图像融合方法:首先将源图像进行拉普拉斯金字塔变换,然后对高频层采用绝对值取大的方法进行融合,低频层采用区域能量与改进的区域平均梯度相结合的方法进行融合,最后进行拉普拉斯反变换得到最终融合图像。实验表明该方法用于EVS与SVS图像的融合时具有良好的融合效果。

关键词: 图像融合; 拉普拉斯金字塔; 区域能量

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.01.017

Laplacian Pyramid Based Image Fusion for Use in HVS

WANG Jia-hui^{1,2}, WU Jing², ZHANG Chuan², CAO Xing-jian³

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China; 2. Luoyang Institute

of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China; 3. School of Information and Communication

Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

Abstract: The Head-up Vision System (HVS) integrates the Enhanced Vision System (EVS) with the Synthetic Vision System (SVS), and provides real-time location information for the pilot to improve flight safety during the aircraft's near-land operation. A new image fusion algorithm used in HVS is proposed in this paper. First, Laplacian pyramid transform is carried out for each source image. Then, the method of selecting the larger absolute value is used on the high-frequency part, and the method of local energy combined with local average gradient is used for the fusion of the low-frequency part. Finally, the fused image is obtained by inverse Laplacian pyramid transform. The experimental results show that this algorithm has good fusion effect in the fusion of EVS image with SVS image.

Key words: image fusion; Laplacian pyramid; local energy

0 引言

平视视景系统(HVS)是一种先进的飞机进近着陆辅助系统,融合了增强视景系统(EVS)实时探测的红外图像与合成视景系统(SVS)根据数据库绘出的地图信息,在飞机起飞、进近、着陆等近陆运行的阶段,为飞行员提供实时、清晰且易于识别的外景,在低能见度下也能看清跑道及周边地况,显著增强飞行员的态势感知能力、降低运行成本、提高飞行安全性。因此,EVS图像与

SVS图像的融合是HVS实现中的关键环节,图像融合的效果直接决定HVS的性能。

图像融合包括像素级、特征级和决策级^[1],其中,像素级融合可以尽可能多地保留场景的原始信息,提供其他两类融合所不能提供的丰富、精确、可靠的信息,是应用最广泛的融合技术。像素级图像融合又分为基于空间域和基于变换域的融合。基于空间域的融合直接对源图像的每个像素点灰度值进行融合,融合方法简单,但融合效果相对较差;基于变换域的融合方法能够突出各源图像的特征和细节信息,符合人眼对边缘信息敏感的观察规律^[2],因此在近年来人们提出的许多图像融合方法中,基于变换域的融合方法最为常见,而拉普拉斯金字塔变换是图像在变换域融合中使用的一种最经典的多分辨率分析^[3-5]。

收稿日期:2018-05-22

修回日期:2018-11-12

基金项目:“十三五”预先研究项目

作者简介:王佳慧(1994—),女,河南洛阳人,硕士生,研究方向为图像融合。

1 拉普拉斯金字塔图像融合原理

拉普拉斯金字塔是一种多尺度、多分辨率的图像处理方法,可以将图像的边缘和纹理等特征按照不同的尺度分解到不同分辨率的塔层上,再将多幅源图像的对应塔层分别进行融合,得到融合后的金字塔以后,再重构得到最终融合图像。

1.1 高斯金字塔分解

要对图像做拉普拉斯金字塔分解,首先要进行高斯金字塔分解。高斯金字塔是通过连续的高斯低通滤波和隔行隔列的下采样得到的一系列子图像,底层为原始图像,其余每层图像的大小都为下面一层的四分之一。

分解过程如下所述。

设 G_0 表示原始图像,将 G_0 作为高斯金字塔的零层,构造高斯金字塔的第 l 层图像为

$$G_l = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m,n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n) \quad (1)$$

s. t. $1 \leq l \leq N, 0 \leq i \leq R_l, 0 \leq j \leq C_l$

式中: N 为高斯金字塔顶层的层号; R_l 和 C_l 分别表示高斯金字塔第 l 层图像的行数和列数; $w(m,n)$ 是一个 5×5 的低通窗口函数,且满足可分离性、归一性、对称性和奇偶项等 4 个约束条件,即

$$w = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}, \text{通过式(1)可依次得}$$

到 G_0, G_1, \dots, G_N , 构成高斯金字塔图像。

1.2 拉普拉斯金字塔分解

拉普拉斯金字塔是高斯金字塔每层与其上一层插值扩大后的差值图像,反映的是高斯金字塔两级间的信息差,实际上就是图像的轮廓、边缘信息。

分解过程如下所述。对高斯金字塔第 l 层进行插值膨胀,得到放大图像 G_l^* ,使 G_l^* 的尺寸与 G_{l-1} 的尺寸相同,即

$$G_l^*(i,j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m,n) G_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \quad (2)$$

式中, $G_l^*\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) = \begin{cases} G_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) & \frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \text{为整数} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$,

$1 \leq l \leq N, 0 \leq i \leq R_l, 0 \leq j \leq C_l$ 。令

$$\begin{cases} LP_l = G_l - G_{l-1}^* & 0 \leq l < N \\ LP_N = G_N & l = N \end{cases} \quad (3)$$

式中: LP_N 为拉普拉斯金字塔的顶层图像; LP_l 是拉普拉斯金字塔分解的第 l 层图像。通过式(2)、式(3)可

依次得到 LP_0, LP_1, \dots, LP_N , 构成拉普拉斯金字塔。

1.3 由拉普拉斯金字塔重构图像

由式(3)可得

$$\begin{cases} G_N = LP_N & l = N \\ G_l = LP_l + G_{l+1}^* & 0 \leq l < N \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表明,拉普拉斯金字塔可以从顶层开始,由上至下逐层按式(4)进行递推,求得其对应的高斯金字塔,并最终得到原始图像 G_0 。

2 图像融合规则

对两幅源图像进行拉普拉斯金字塔分解以后,对不同塔层分别采用不同的融合规则进行融合,达到突出各层次特征信息的目的。

设 LA_l 为 EVS 图像的拉普拉斯金字塔的第 l 层, LB_l 为 SVS 图像的拉普拉斯金字塔的第 l 层, LF_l 为融合后图像的拉普拉斯金字塔的第 l 层 ($0 \leq l \leq N$), LA_N, LB_N, LF_N 分别为 EVS 图像、SVS 图像和融合图像的拉普拉斯金字塔的最顶层。图 1 所示为算法流程图。

对于高频层,系数的绝对值越大,说明源图像的边缘灰度变化越明显,因此采用绝对值取大的规则,能够有效地融合两幅图像的边缘细节特征,即

$$LF_l = \begin{cases} LA_l & |LA_l| \geq |LB_l| \\ LB_l & |LA_l| < |LB_l| \end{cases} \quad 0 \leq l < N. \quad (5)$$

对于低频层,即金字塔顶层,主要包含图像的纹理信息,提出一种基于区域能量和改进的区域平均梯度相结合的规则进行融合,能够更好地融合图像的纹理特征,算法流程如下所述。

首先计算金字塔顶层图像的区域能量,计算式为

$$E(i,j) = \sum_{\alpha=-p}^p \sum_{\beta=-q}^q w(\alpha,\beta) [LP_N(i+\alpha, j+\beta)]^2 \quad (6)$$

式中, $w(\alpha,\beta)$ 为加权系数。

本文中计算区域大小取 3×3 , 即令式(6)中 $p=1, q=1, w(\alpha,\beta) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ 。

传统的区域平均梯度计算式为

$$G = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2}{2}} \quad (7)$$

式中: $\Delta I_x = LP_N(x,y) - LP_N(x-1,y)$, ΔI_x 为水平方向梯度; $\Delta I_y = LP_N(x,y) - LP_N(x,y-1)$, ΔI_y 为垂直方向梯度。

提出一种改进的区域平均梯度,其在传统的水平和垂直的基础上增加了对角线的梯度值,能够更好地融合图像的细节信息,其计算式为

$$G(i,j) = \frac{1}{pq} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sqrt{\frac{\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2 + \Delta I_{xy}^2}{3}} \quad (8)$$

式中： ΔI_{xy} 为对角线方向梯度， $\Delta I_{xy} = LP_N(x, y) - LP_N(x - 1, y - 1)$ ，本文选取 3×3 窗口，即令式(8)中 $p=3, q=3$ 。

当一幅图像某点处的区域能量和区域平均梯度都较大时，取该点灰度值作为融合后图像对应点的灰度，当某点处区域能量较大而区域平均梯度较小时，采用加权融合的方法计算得出融合后图像对应点的灰度，计算式为

$$LF_N = \begin{cases} LA_N & EA > EB \text{ 且 } GA > GB \\ T \times LA_N + (1 - T) \times LB_N & EA > EB \text{ 且 } GA < GB \\ LB_N & EA < EB \text{ 且 } GA < GB \\ (1 - T) \times LA_N + T \times LB_N & EA < EB \text{ 且 } GA > GB \end{cases} \quad (9)$$

式中： EA, EB 分别为 EVS 和 SVS 图像的区域能量； GA, GB 分别为 EVS 和 SVS 图像的区域平均梯度； T 为加权系数， $0.5 < T < 1$ 。

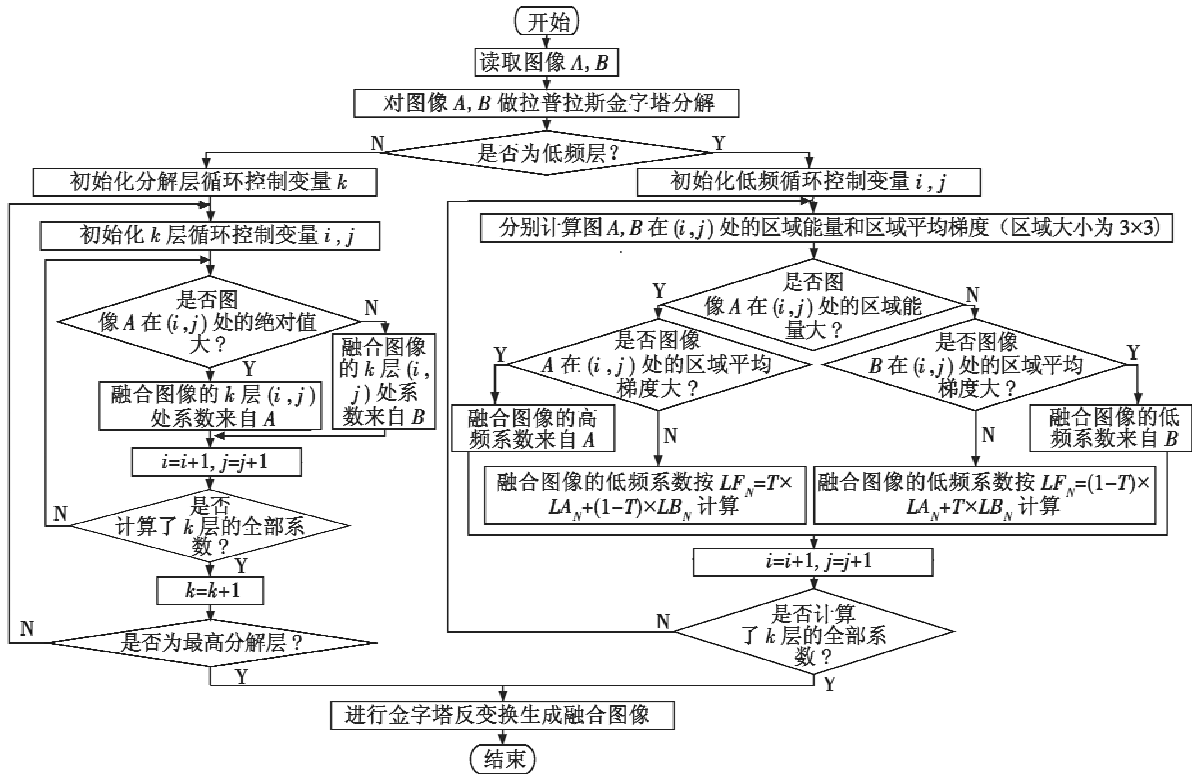


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

3 图像融合的评价标准

3.1 主观评价标准

表 1 所示为目前国际上规定的主观评价指标^[6-7]的判定方法。

表 1 主观评价标准

Table 1 Subjective assessment criterion

分数	质量尺度	妨碍尺度
1	很差	非常严重地妨碍观看
2	差	对观看有妨碍
3	一般	清楚看出图像质量变坏,对观看稍有妨碍
4	好	能看出图像质量变坏,但并不妨碍观看
5	非常好	丝毫看不出图像质量变坏

其中,专业人员采用表 1 中第 3 列的标准进行图像质量评价,非专业人员采用表 1 中第 2 列的标准进行图像质量评价。

3.2 客观评价标准

1) 方差。

方差反映了图像灰度的离散分布程度,方差越大,灰度级分布越分散,图像的对比度越大,包含的信息量越大。定义为

$$V = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (F(i, j) - \bar{F})^2 \quad (10)$$

式中, \bar{F} 为灰度均值,即

$$\bar{F} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F(i, j) \quad (11)$$

2) 等效视数。

等效视数反映噪声的抑制效果、边缘的清晰度和图像的保持性。等效视数越大,抑制噪声的效果越好,图像越清晰。定义为

$$E = \bar{F}^2 / V \quad (12)$$

3) 互信息。

互信息反映了融合图像从源图像中获得信息的多少,其值越大,表示融合图像从源图像中获取的信息越

丰富。定义为

$$M_I(A, B, F) = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} p_{abf}(i, j, k) \text{lb} \frac{p_{abf}(i, j, k)}{p_{ab}(i, j) p_f(k)} \quad (13)$$

式中: L 为图像的灰度级数; $p_f(k)$ 为融合图像 F 的归一化直方图; $p_{ab}(i, j)$ 为源图像 A, B 的归一化联合灰度直方图; $p_{abf}(i, j, k)$ 为 A, B, F 的归一化联合灰度直方图。

4) 平均交叉熵。

交叉熵反映两幅图像之间的信息差异, 其值越小, 表示图像间的差异越小。定义为

$$E_c^{R, F} = \sum_{i=0}^{L-1} p_R(i) \text{lb} \frac{p_R(i)}{p_F(i)} \quad (14)$$

式中, $p_R(i), p_F(i)$ 分别为参考图像和融合图像的灰度级分布。在不存在参考图像的情况下, 可以通过计算融合图像与源图像间的交叉熵 $E_c^{A, F}$ 和 $E_c^{B, F}$, 将两幅源图像和融合图像间的综合差异用平均交叉熵表示为

$$E_{MC} = (E_c^{A, F} + E_c^{B, F}) / 2 \quad (15)$$

4 实验结果和分析

为了比较不同算法的融合效果, 本文选取图 2a、图 2b 作为源图像进行融合。

利用 Matlab 对融合过程进行仿真^[8-9], 得到融合后图像。如图 2c ~ 图 2f 所示。

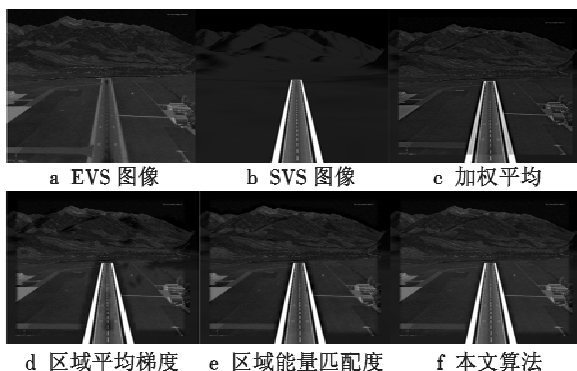


图 2 不同算法的融合结果

Fig. 2 Fusion results of different algorithms

加权平均算法原理简单, 但仅仅是两幅图像的简单叠加, 不能达到突出重点信息(如跑道边缘等)的效果; 基于区域平均梯度的算法体现灰度突变特征, 融合图像纹理细节清晰, 但易受到孤立噪声点的干扰; 基于区域能量匹配度的算法对邻域窗口内的分解系数做整体考虑, 图像平滑但边缘特征不够明显; 本文算法综合了区域能量和平均梯度这两种算法的优点, 在融合图像的质量上有所提高。

因本文应用场景的特殊性, 对融合图像的评价应首先偏重于主观视觉效果。从图 2 中可以看出, 图 2c

的跑道亮度较低, 不够清晰, 跑道增强效果不好; 图 2d 有几片明显的黑色斑块, 视觉效果不好; 图 2e^[10]、图 2f 在视觉效果上相差不是很明显, 因此使用客观评价标准做进一步的判定, 表 2 列出了两种融合结果的客观评价指标值。

实验数据表明, 本文算法得到的融合图像比基于区域能量匹配度的方法在互信息和平均交叉熵上有显著提高, 这说明本文算法在图像融合中能够更好地保留源图像中的细节信息。方差和等效视数也有所改善, 这表明应用本文算法融合得到的图像对比度更大、更清晰、更易于人眼观察。算法仿真计算时间接近, 说明本文算法在提高融合质量的同时没有增加算法的复杂度, 易于实现。

表 2 客观评价结果

Table 2 Objective assessment results

	区域能量匹配度	本文算法
方差	1.5728E+03	1.5957E+03
等效视数	1.0461	1.1497
互信息	3.0827	3.8056
平均交叉熵	830.6388	878.3420
时间/s	0.406808	0.402221

5 总结

本文提出一种基于区域能量和改进区域平均梯度相结合的 HVS 图像融合算法, 该算法结构简单, 易于实现。视觉效果和实验数据表明, 在飞机近陆运行时, 利用该算法得到的融合图像有效地增强了跑道及周边地况的视觉效果, 并且画面没有明显缺陷, 融合效果好, 对比其他算法有显著提高, 达到了预期的要求。

参考文献

- [1] POHL C, VAN GENDEREN J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5): 823-854.
- [2] 贾欢. 基于多尺度分解的图像融合算法及其实现 [D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [3] BURT P J, ADELSON E H. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, COM-31(4): 532-540.
- [4] BURT P J, KOLCZYNSKI P J. Enhanced image capture through fusion [C] // IEEE 4th International Conference on Computer Vision, 1993: 173-182.
- [5] DO M N, VETTERLI M. Framing pyramids [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(9): 2329-2342.

(下转第 91 页)

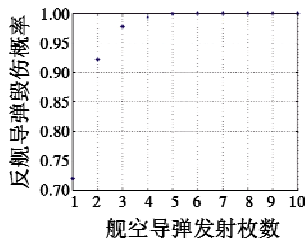


图 5 反舰导弹的毁伤概率图

Fig. 5 The damage probability of a anti-ship missile

表 2 n 次拦截反舰导弹的毁伤概率

Table 2 Damage probability of anti-ship missile in n times of intercepting

拦截次数 n	1	2	3	4	5
毁伤概率 $P_k^{(n)}$	0.7200	0.9216	0.9780	0.9939	0.9983
拦截次数 n	6	7	8	9	10
毁伤概率 $P_k^{(n)}$	0.9995	0.9999	1	1	1

5 结束语

针对舰载反导武器系统运用策略的优化问题,本文在分析舰空导弹拦截反舰导弹的典型作战流程和舰空导弹战斗部毁伤特性的基础上,在导弹几何坐标系中建立反舰导弹战斗部破片面密度模型,运用马尔可夫随机过程理论对反舰导弹的拦截过程进行马尔可夫分析,建立舰空导弹拦截反舰导弹的毁伤概率模型。通过算例应用分析,在已知来袭反舰导弹型号特性的基础上,计算出一次性发射 4 枚导弹可完成拦截任务。

面对反舰导弹的饱和攻击战法和当前舰载反导武器系统火力通道数量的限制,在水面舰艇防空作战中,提出“发射后不管”战法,即一次性连续发射击毁反舰导弹所需的 n 枚舰空导弹,而后迅速转火射击,拦截其他威胁目标,此方法可有效提高舰空导弹的拦截效率,进一步保障舰艇安全。

参考文献

- [1] 陈榕,沈培志,张海峰,等. 多型反舰导弹协同攻击岛礁区日标攻击方向选择研究[J]. 电光与控制,2016,23(5):22-25.
- [2] 李明,赵夏丽. 舰空导弹拦截反舰导弹仿真模型研究[J]. 计算机仿真,2006,23(5):14-17.
- [3] 张旭东,彭杰,刘卫东,等. 基于模糊综合评判法的舰艇反导能力评估[J]. 舰船电子工程,2011,31(8):33-35.
- [4] 孙建中. 舰载武器[M]. 北京:航空工业出版社,2010.
- [5] 王磊,姜颖资,李向阳. 爆破战斗部对超音速导弹毁伤效应研究[J]. 海军航空工程学院学报,2017,32(4):307-312.
- [6] 李翔宇,卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报,2007,30(1):44-48.
- [7] 王义磊,吴越. 一种离散与预制组合破片战斗部的数值模拟[J]. 兵器装备工程学报,2016,37(12):38-41.
- [8] 赵晨皓,韩朝超,黄树彩. 引战配合对反导导弹作战效能的影响[J]. 电光与控制,2010,17(12):5-7.
- [9] 何华锋,韩聪聪,杨宗浩. 弹道主动段射向变换建模与仿真[J]. 电光与控制,2017,24(12):1-4.
- [10] 李向东,杜忠华. 目标易损性[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013.
- [11] 王桐,杨萍,欧阳海波. 基于马尔可夫链的多波次导弹作战研究[J]. 战术导弹技术,2011(4):20-22.
- [12] 汪民乐,汪德武,刘刚. 战术导弹对单个目标射击效能的马氏链决策分析模型[J]. 系统工程理论与实践,2007(7):166-170.
- [13] 李向东,唐晓斌,董平. 破片式反导导弹引战配合仿真与效率计算[J]. 上海航天,2006(3):11-15.

(上接第 80 页)

- [6] 邢素霞,吴静珠,陈天华. 图像融合质量评价方法研究[J]. 微电子学与计算机,2010,27(6):157-159.
- [7] 王跃华,陶忠祥. 红外与可见光图像融合质量评价方法综述[J]. 红外,2012,33(6):7-11.

- [8] GONZALEZ R C. 数字图像处理(MATLAB 版)[M]. 阮秋琦,译. 北京:电子工业出版社,2005.
- [9] 张瑶,刘生辉. 基于 MATLAB 的图像融合技术[J]. 中国科技信息,2016(1):55-56.
- [10] 韩潇,彭力. 基于改进拉普拉斯金字塔的图像融合方法[J]. 自动化与仪器仪表,2014(5):191-194.