

基于组合赋权的图像分割灰色评估模型

薛菁菁, 贺兴时, 冯颖, 贺飞跃

西安工程大学理学院, 陕西 西安 710048

摘要 分割评价是改善算法性能的重要途径。针对当前图像分割评价指标不能很好地反映分割结果的问题, 提出组合赋权的灰色评估模型。首先, 在现有典型评价准则中选取概率边缘指数、全局一致性误差、变换信息量 3 个准则来评价图像分割质量。其次, 提出结合德尔菲法、强制判定法和熵权法的主客观组合赋权法, 使权重既反映观察者主观偏好, 又突显图像客观差异。最后, 利用所提出的模型对测试图像进行综合评价。实验结果表明, 所提出的评价模型更符合主观评价结果与地面真实结果。将此模型用于比较基于花粉算法、遗传算法、蛙跳算法的最大熵阈值算法所得到的分割图, 与最大熵的排序结果一致, 进一步验证了该模型的有效性。

关键词 图像处理; 熵; 图像分割; 综合评价; 灰色关联度

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061008

Gray Evaluation Model of Image Segmentation Based on Combinational Weighting

Xue Jingjing, He Xingshi, Feng Ying, He Feiyue

College of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract Segmentation evaluation is an important way to improve the performance of algorithms. A gray evaluation model is proposed based on combinational weighting, aiming at the problem that the current index of image segmentation can not reflect the results of segmentation well. Firstly, variation of information, global consistency error, and probabilistic rand index are selected to evaluate the quality of image segmentation. Secondly, a subjective and objective combinational weighting method is proposed which combines Delphi method, forced decision method, and entropy method. The weights not only reflect the subjective preferences of observers, but also highlight the objective differences of images. Finally, the proposed model is used to make a comprehensive evaluation of test images. Experimental results show that the proposed evaluation model is consistent with the subjective evaluation results and the real ground results. Moreover, this model is used to compare the segmentation results of the maximum entropy threshold algorithms based on flower pollination algorithm, genetic algorithm, and shuffled frog leaping algorithm, respectively. The obtained rank is consistent with the result of maximum entropy, which further validates the effectiveness of this model.

Key words image processing; entropy; image segmentation; comprehensive evaluation; gray relational grade

OCIS codes 100.2000; 100.2960; 100.3008

1 引言

图像分割是一项基本并且关键的图像分析技术, 而分割评价是提高算法性能、改善分割质量的重要环节。目前, 研究人员已提出多种评估方法。文

献[1-3]分别用变换信息量(VOI)、全局一致性误差(GCE)、概率边缘指数(PRI)进行评估; 文献[4]基于 VOI、GCE、PRI, 并融入人类视觉感知信息, 以及分割质量中隐含的结构特征进行评估, 但未建立综合评价模型; 文献[5]基于面积因子、形状因子对分

收稿日期: 2017-11-24; 收到修改稿日期: 2017-12-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11501436)、陕西省软科学研究计划(2014KRM2801)、西安市教育科技重大招标项目(2015ZB-ZY04)、陕西省教育厅科研计划项目(16JK1326, 17JK0340)

作者简介: 薛菁菁(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事智能优化、图像处理方面的研究。E-mail: 810337070@qq.com

导师简介: 贺兴时(1960—), 男, 教授, 硕士生导师主要从事智能优化算法、数理统计等方面的研究。E-mail: xsh1002@126.com

割图像进行评估,提出精度依据准则,通过比较原始特征量值和实际特征量值的绝对值来判断算法的好坏,但未建立综合评价模型;文献[6]针对评价指标,建立综合评价模型,但赋予各指标相等的权重,忽略了各指标间的差异性;文献[7]通过层次分析法(AHP)确定各指标权重来评估图像的质量,但过于依赖主观因素;文献[8]利用熵权法确定权重后,只是简单地进行加权,未充分利用各指标的全部信息;文献[9]建立起基于强制判定(FD)法的灰色综合评判模型,但只是基于各向量与优向量的关联度进行排序,没有考虑与次向量的关联度,且权重的选择过于主观;文献[10]将有监督的图像质量分割评价准则分为基于区域的评价准则、基于像素点对的评价准则和基于边缘的评价准则^[11-12],使得评价准则更系统化。

基于对既往研究的述评,本文提出一种基于组合赋权的图像分割灰色评估模型。模型选取 VOI、GCE、PRI^[10]三个准则,具有较好的代表性,既包含了基于区域的评价准则(VOI 和 GCE),也包含了基于像素的评价准则(PRI),避免了单一测度的不确定性^[13]。所用的灰色关联分析对样本容量没有特别要求,计算量小,比较适合图像分割的性能评价。对于指标权重的确定,不单凭主观判断,而是主客观组合赋权,充分利用各指标的全部信息。最后,利用最小二乘法,既考虑各向量与优向量的关联度,也考虑与次向量的关联度,使评估结果更有效。

2 基于组合赋权法的灰色模型

2.1 准则的选择

为了使选择的评价准则具有代表性,本文选取了基于区域的评价准则——VOI 和 GCE,以及基于像素点对的评价准则——PRI,作为评价指标^[14-15]。

1) VOI。利用熵信息对实际分割结果 S' 与理想分割结果 S 的相似度进行衡量,分别求出 S' 、 S 的熵 $H(S')$ 和 $H(S)$,以及 S 与 S' 的联合熵 $I(S, S')$,利用 3 个熵值来判断分割结果的理想程度。VOI 的值越小,说明算法分割结果质量越好:

$$V_{\text{VOI}}(S, S') = H(S) + H(S') - 2I(S, S'). \quad (1)$$

2) GCE。根据两种分割结果共同包含某一像素的两个区域之间的相互包含关系来判定两种分割结果的相似程度。由 GCE 的计算原理可知,GCE 越小,说明全局一致性误差越小,实际分割结果与参考分割结果越接近:

$$V_{\text{GCE}}(S, S') =$$

$$\frac{1}{K} \min \left[\sum_i E(S, S', p_i), \sum_i E(S', S, p_i) \right], \quad (2)$$

式中 $E(S, S', p_i)$ 为局部细分误差, p_i 为原始图像中的某一像素; $E(S, S', p_i) = |\hat{R}\langle S, p_i' \rangle \setminus \hat{R}\langle S', p_i' \rangle| / |\hat{R}\langle S, p_i' \rangle|$, $\hat{R}\langle S, p_i' \rangle$ 为分割 S 中包含像素 p_i 的像素集合, $|\cdot|$ 为集合的基数, \setminus 为集合差分运算符。

3) PRI。用于衡量 S 与 S' 的接近程度。对于一个像素对 (x_i, x_j) ,在 S 中的标记分别为 l_i, l_j ,在 S' 中的标记分别为 l'_i, l'_j ,如果 $l_i = l'_i, l_j = l'_j$,那么该分割属于一个好的分割。PRI 的取值范围为 $[0, 1]$,PRI 的值越大,则实际分割结果与理想分割结果越接近:

$$V_{\text{PRI}}(S, S') = \frac{1}{C_K^2} \sum_i \sum_{j(i \neq j)} [I(l_i = l_j \& l'_i = l'_j) + I(l_i \neq l_j \& l'_i \neq l'_j)], \quad (3)$$

2.2 指标的主客观组合赋权

2.2.1 熵权法

提出基于组合赋权法的多测度灰色综合评价模型。熵权法综合考虑各评价指标所提供的信息量,而不是仅仅考虑评估问题中评价指标实际意义的重要性。根据已知的数据判定数据信息量,依据信息量确定权重。某个指标的熵值越小,表明其数值变异程度越大,提供的信息量越多,在综合评价中所起的作用越大,则其权重也应越大;反之亦然。所以可根据各指标数值的变异程度,利用熵值来计算各指标权重,并根据各指标权重对所有指标进行加权,从而得出较为客观的评价结果。主要包括以下步骤^[8]。

1) 定义各指标信息熵。

在有 n 个评价对象、 m 个评价指标的评估问题中,第 j 个指标的熵定义为

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, \quad (4)$$

式中 $p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$, x_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标下的值, $e = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ 。

2) 定义各指标的熵权。

$$\beta_j = (1 - e_j) / (m - \sum_{j=1}^m e_j), \quad (5)$$

式中 $0 \leq \beta_j \leq 1, \sum_{j=1}^m \beta_j = 1$ 。

2.2.2 德尔菲法和强制判定法

德尔菲法又称专家法,即集中专家的经验 and 意见确定各指标权重。强制判定法^[9]将评价指标两两

比较:同等重要打 2 分;一项比另一项重要,分别打 3 分和 1 分;一项比另一项重要得多,分别打 4 分和 0 分。最后计算出各评价指标的指标权重:

$$\alpha_j = k_j / \sum_{j=1}^m k_j, j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

式中 m 为评价指标的个数, $k = (k_1, k_2, k_3)$, k_1, k_2, k_3 为各评价指标的总分。

2.2.3 组合赋权法

由熵权法得到客观权重 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$, 由 Delphi-FD 得到主观权重 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 。组合赋权法就是将二者进行综合集成,使最终的指标权重既反映主观经验判断,又反映客观评价信息。最终指标权重为^[16]

$$w_j = \alpha_j \beta_j / \sum_{j=1}^m \alpha_j \beta_j, j = 1, 2, \dots, m. \quad (7)$$

2.3 灰色关联分析

灰色关联度^[17]的原理是,若干个统计数列所构成的各条曲线几何形状越接近,则它们的变化趋势越接近,其关联度就越大。关联度反映各评价对象与理想对象的接近程度,即评价对象的优劣次序,其中关联度最大的评价对象为最佳。因此,可利用关联度对评价对象进行排序比较。设 $C = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 为系统特征序列,相关因素序列为^[18]

$$\begin{cases} Z_1 = (z_{11}, z_{12}, \dots, z_{1m}) \\ \vdots \\ Z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{im}), \\ \vdots \\ Z_n = (z_{n1}, z_{n2}, \dots, z_{nm}) \end{cases} \quad (8)$$

相关因素序列 Z_i 与 C 的关联系数为

$$\xi_j(Z_i, C) = \frac{\min_i \min_j |z_{ij} - c_j| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - c_j|}{|z_{ij} - c_j| + \rho \max_i \max_j |z_{ij} - c_j|}, \quad (9)$$

相关因素序列 Z_i 与 C 的灰色关联度为

$$\eta(Z_i, C) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \xi_j(Z_i, C). \quad (10)$$

3 模型建立

1) 数据标准化。

将各个测度进行标准化处理,本文有 3 个评价准则,则原始矩阵 $X(n \times m)$ 为 $n \times 3$ 的矩阵。设原始矩阵 X 标准化后的矩阵为 $Y = (y_{ij})_{n \times m}$, 其中 y_{ij} 为第 i 个评价对象在第 j 个指标上的标准值。

对于大者为优的测度而言^[8],

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \quad (11)$$

对于小者为优的测度而言,

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}. \quad (12)$$

2) 确定各测度权重。

由熵权法计算各测度客观权重,由 Delphi-FD 法计算各测度主观权重,最后由(7)式计算各测度最终权重。

3) 灰度关联分析^[18]。

选取各性能指标的最优值形成系统的优向量 G ,最差值形成系统的次向量 B ,把分割图像的各性能指标 Y_i 组成比较序列,分别定义为

$$\begin{cases} G = (g_1, g_2, g_3) = [\max(y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}), \\ \max(y_{12}, y_{22}, \dots, y_{n2}), \max(y_{13}, y_{23}, \dots, y_{n3})] \\ B = (b_1, b_2, b_3) = [\min(y_{11}, y_{21}, \dots, y_{n1}), \\ \min(y_{12}, y_{22}, \dots, y_{n2}), \min(y_{13}, y_{23}, \dots, y_{n3})] \\ Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}), (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (13)$$

设 $\rho = 0.5$, Y_i 与 G, B 的关联系数如下:

$$\xi_j(Y_i, G) = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - g_j| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_j|}{|y_{ij} - g_j| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - g_j|}, \quad (14)$$

$$\xi_j(Y_i, B) = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - b_j| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - b_j|}{|y_{ij} - b_j| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - b_j|}, \quad (15)$$

Y_i 与 G, B 的熵权关联度为

$$\eta(Y_i, G) = \sum_{j=1}^3 w_j \xi_j(Y_i, G), \quad (16)$$

$$\eta(Y_i, B) = \sum_{j=1}^3 w_j \xi_j(Y_i, B). \quad (17)$$

4) 综合评判。

设分割图像的各性能指标 Y_i 分别以 $a_i, (1 - a_i)$ 从属于优向量 G 、次向量 B , 根据最小二乘法,可得目标函数为 $F = F(A) = \sum_{i=1}^n \{(1 - a_i)^2 [\eta(Y_i, G)]^4 + a_i^2 [\eta(Y_i, B)]^4\}$ 。为了求解最优解向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, Y_i 以 a_i 从属于 G 的关联度最大,由 $\frac{\partial F}{\partial a_i}$ 得

$$a_i = \{1 + [\eta(Y_i, B)]^4 / [\eta(Y_i, G)]^4\}^{-1}, \quad (18)$$

根据 a_i 的大小对各分割结果进行优劣排序。

4 实验

4.1 实验图像

本文选择的测试集^[2](图1)来自 <http://www.vision.ee.ethz.ch/~cvlsegmentation/seism/browse.php>。选取同一图像在不同分割算法下得到的6种分割情况,分别采用 PRI、GCE、VOI 这3个

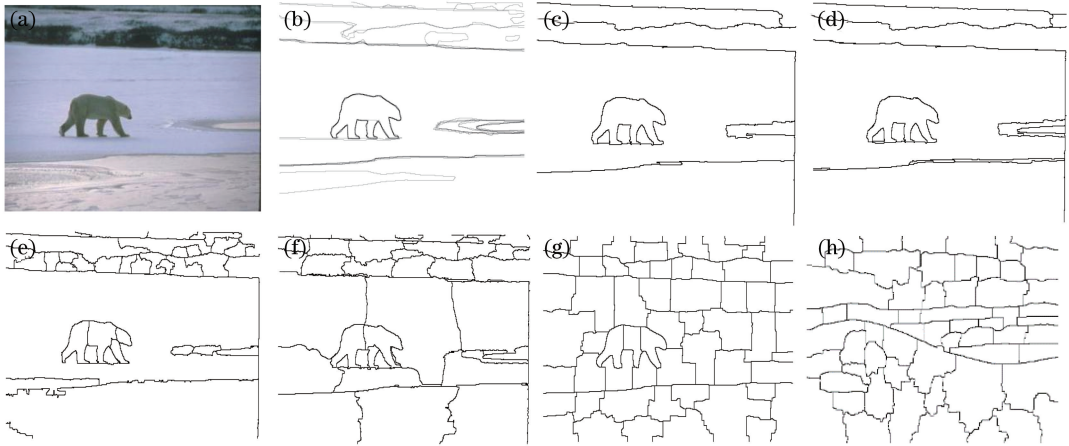


图1 测试图。(a)原图;(b)标准分割图;(c)~(h)6幅分割图

Fig. 1 Test image. (a) Original image; (b) standard segmentation image; (c)-(h) six segmented images

1) 建立标准化决策矩阵。

通过编程,得到分割图在 PRI、GCE、VOI 准则下的原始数据矩阵 \mathbf{X} ,在此基础上,利用(11)、(12)式进行无量纲化处理。构造标准化矩阵 \mathbf{Y} :

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.4152 & 0.5523 & 0.2716 \\ 0.4104 & 0.4818 & 0.2508 \\ 0.3450 & 0.2871 & 0.1726 \\ 0.3137 & 0.1740 & 0.1324 \\ 0.1944 & 0.0900 & 0.0640 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

2) 求解主客观组合权重。

根据(4)~(6)式分别计算各指标熵值 e 、熵权 β 、主观权重 α ,再根据(7)式将权重 β 与 α 进行集成,得到最终权重 ω (表1),表2为 Delphi-FD 法中的权重判别表。

表1 指标权重

Table 1 Weight of measures

Coefficient	PRI	GCE	VOI
e	0.9071	0.8510	0.8777
β	0.255	0.409	0.336
α	1/3	1/2	1/6
ω	0.2460	0.5919	0.1621

指标的综合模型来对图1(b)~(h)所示的7种分割图进行质量排序。

4.2 计算过程

采用建立的基于组合赋权法的灰色关联度模型,以 Matlab 2015b 为工具编程运算,对上述图像的分割结果的优劣进行排序,具体过程如下。

表2 Delphi-FD 法中的权重判别表

Table 2 Weight-decided table in Delphi-FD method

Measure	PRI	GCE	VOI	k	α
PRI	2	1	3	6	1/3
GCE	3	2	4	9	1/2
VOI	1	0	2	3	1/6

3) 模型综合评价。

由上文分析可知,优向量和次向量分别为 $\mathbf{G} = [1, 1, 1]$, $\mathbf{B} = [0, 0, 0]$,根据(14)~(17)式分别计算各个分割结果与优向量和次向量的关联系数、关联度。最后,通过(18)式综合判断,以各个分割结果从属于优向量的关联度大小做出排序。表3为测试图在基于组合赋权的图像分割灰色评估模型下的综合评价结果,此评估值越大,表明分割越好。可以看出,应用本文方法得到的排序与人眼排序结果完全一致。

表3 分割图1(b)~(h)的综合排名

Table 3 Total rank of segmented Fig.1 (b)-(h)

Test	Fig.1 (b)	Fig.1 (c)	Fig.1 (d)	Fig.1 (e)	Fig.1 (f)	Fig.1 (g)	Fig.1 (h)
Score	0.9878	0.1350	0.1157	0.0620	0.0438	0.0232	0.0122
Rank	1	2	3	4	5	6	7

本文方法在评价指标的权重设定上,将专家的主观偏好与图像客观信息予以有效集成,最大程度地确保了评价的适应性和客观性。

5 模型的应用

信息熵具有良好的物理热力学解释,因此该方法在阈值化技术中大放异彩^[19]。将此模型应用于分别由花粉算法(FPA)、遗传算法(GA)、蛙跳算法(SFLA)结合最大熵阈值算法分割的分割图^[20],囿于篇幅,以 Boat 图(图 2,原图来自 <http://sipi.usc.edu/database/>)为例,针对同一图像,3 种分割算法分别在 2、3、4 阈值的分割结果排序如表 4 所示,继而可以验证 3 种分割算法的好坏。图 2 每行

所示依次为 2、3、4 阈值分割图,图 2(a)为穷举法分割图,图 2(b)~(d)依次为 FPA、GA、SFLA 分割图。其中,标准分割图是由穷举法分割所得。

用本文评价模型来评估由 3 种分割算法得到的分割图的质量,实验结果如表 4 所示,表 4 中第 7 列为 3 种算法在阈值为 2、3、4 时的综合评估值,该评估值越大,表明分割结果越好。表 4 中第 6 列为每幅图的熵值,熵值越大,表明分割结果越好。排序结果由大到小都为 FPA、GA、SFLA,进一步验证了本文模型的有效性。

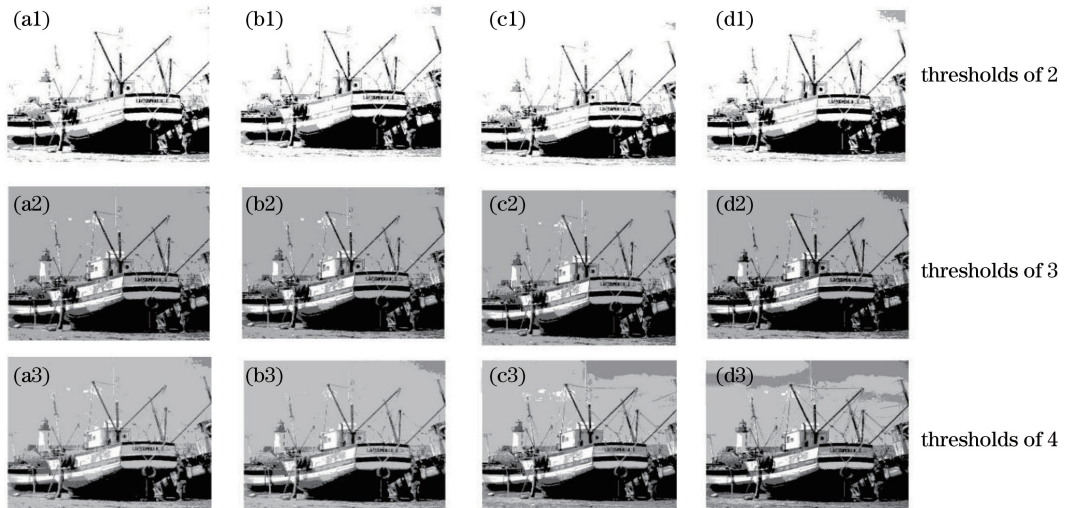


图 2 Boat 分割图。(a)~(d)由穷举法、FPA、GA、SFLA 分割出的结果

Fig. 2 Segmented images of Boat. (a)-(d) Segmented images processed by exhausted method, FPA, GA and SFLA, respectively

表 4 三种分割算法得到的分割图质量排序

Table 4 Rank of image segmentation quality of three algorithms

Method	T	PRI	GCE	VOI	Entropy	Value	Rank
FPA		1	0	0	11.9765	0.9878	1
GA	2	0.9281	0.2002	1.9668	11.9682	0.031	2
SFLA		0.9163	0.2148	2.1717	11.9603	0.0122	3
FPA		1	0	0	15.2431	0.9878	1
GA	3	0.9839	0.2483	2.4976	15.2387	0.1359	2
SFLA		0.9641	0.3186	3.4352	15.1126	0.0122	3
FPA		0.9739	0.3171	3.2774	18.0921	0.9878	1
GA	4	0.9416	0.3711	4.2518	18.0176	0.0261	2
SFLA		0.9327	0.3745	4.3318	17.8650	0.0122	3

6 结 论

选取 PRI、GCE、VOI 这 3 个具有代表性的评价准则,建立基于组合赋权的图像分割灰色评估模型。对于权重的确定,在很大程度上既避免了人为因素的过度干扰,又避免了仅仅使用客观赋权致使确定的权重与实际相悖的情况发生。同时,利用灰

色理论,即使在小样本下,也可对实验结果做出正确评估。通过对测试图,以及对由 FPA、GA、SFLA 算法得到的 Boat 分割图进行仿真实验,验证了该模型的有效性和实用性。此外,提出的模型不但可以用于图像分割性能评价,还可以广泛地用于其他信息处理研究中。然而,本文模型也有局限性,未考虑到基于边缘的评价准则。如何使此模型更全面地评

估分割图像,将是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Meilă M. Comparing clusterings: an axiomatic view [C] // Proceedings of the 22nd international conference on Machine learning. ACM, 2005: 577-584.
- [2] Pantofaru C, Hebert M. A comparison of image segmentation algorithms[C]. Biomedical Engineering International Conference, 2005.
- [3] Martin D, Fowlkes C, Tal D, *et al.* A database of human segmented natural images and its application to evaluating segmentation algorithms and measuring ecological statistics[C]//Proceedings of IEEE, 2001, 2: 416-423.
- [4] Shi D. Research on pooling strategies for image segmentation quality evaluation technology [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
石丹. 基于数据合并策略的图像分割质量评价技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [5] Wang C R, Ni Y J. The evaluation of image segmentation arithmetic based on precision gist [J]. Microcomputer Information, 2006, 22 (13): 248-249.
王成儒, 倪永婧. 基于精度依据准则的图像分割算法评价[J]. 微计算机信息, 2006, 22(13): 248-249.
- [6] Yan C X, Sang N, Zhang T X. Evaluation on transition region extraction based image segmentation [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(8): 60-63.
闫成新, 桑农, 张天序. 图像过渡区提取与分割算法评价[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(8): 60-63.
- [7] Di Y C, Deng Y P. The performance evaluation based on the grey multi-hierarchical appraise model of image segmentation[J]. Computer Science, 2002, 29 (11): 136-139.
狄宇春, 邓雁萍. 基于多层次灰关联分析的图像分割性能评估[J]. 计算机科学, 2002, 29(11): 136-139.
- [8] Zhang X, Ming D P. Geo-application oriented evaluations of remote sensing image segmentation [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(S0): 108-116.
张仙, 明冬萍. 面向地学应用的遥感影像分割评价[J]. 测绘学报, 2015, 44(S0): 108-116.
- [9] Ma M, He J, Ai L, *et al.* Performance evaluation on image segmentation based on FD-weighted grey relational analysis [J]. Proceedings of IEEE, 2010: 316-320.
- [10] Pont-Tuset J, Marques F. Supervised evaluation of image segmentation and object proposal techniques [J]. Proceedings of IEEE, 2016, 38(7): 1465-1478.
- [11] Freixenet J, Muñoz X, Raba D, *et al.* Yet another survey on image segmentation region and boundary information integration[C]. European Conference on Computer Vision, 2002: 408-422.
- [12] Martin D R. An empirical approach to grouping and segmentation [C]. International Symposium on Physical Design, 2002.
- [13] Guo T, Hua W S, Liu X, *et al.* Comprehensive evaluation optical camouflage effect based on performance of [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101002.
郭彤, 华文深, 刘恂, 等. 一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101002.
- [14] He F L, Guo Y C, Gao C. Improved PCNN method for human target infrared image segmentation under complex environments[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0215003.
贺付亮, 郭永彩, 高潮. 复杂环境下用于人体目标红外图像分割的改进 PCNN 方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0215003.
- [15] Zhang Y F. Research of color image segmentation algorithm based on wavelet and graph theory [D]. Changsha: Central South University, 2013.
张云峰. 基于小波变换和图论的彩色图像分割算法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [16] Yang B C, Chen Y. Study on project bidding evaluation method based on combination weighting TOPSIS [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2011, 13(1): 50-54.
杨宝臣, 陈跃. 基于组合赋权 TOPSIS 模型的项目评标方法研究[J]. 电子科技大学学报(社会科学版), 2011, 13(1): 50-54.
- [17] Deng J L. Basic methods of grey system [M]. 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [18] Yu F, Yang C W. Entropy weight-based grey evaluation of image segmentation [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(8): 930-934.
俞峰, 杨成梧. 基于熵权的图像分割性能灰色评判 [J]. 兵工学报, 2008, 29(8): 930-934.
- [19] Nie F Y, Li J Q, Zhang P F, *et al.* A threshold

selection method for image segmentation based on Tsallis relative entropy[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071002.

聂方彦, 李建奇, 张平凤, 等. 一种基 Tsallis 相对熵的图像分割阈值选取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071002.

[20] Xue J J, He X S, Yang X S, *et al.* Multi-threshold image segmentation method based on flower pollination algorithm[C]. *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*, 2017, 791: 39-51.