

融合最小生成树和四叉树的图割图像分割方法

彭智东, 宣士斌

(广西民族大学 信息科学与工程学院, 广西 南宁 530006)

摘要: 图像分割是图像处理中最关键的步骤, 基于图割的图像分割方法近年来备受关注。针对传统图割图像分割方法没有充分考虑相邻相近像素点可能属于不同类的情况, 提出了一种结合最小生成树的图割方法。该方法重新构造了能量函数, 在能量函数的构造中考虑了原本两个相邻的节点在最小生成树中可能不相邻的情况, 对于这种不相邻的情况, 重新确定了图中边的权值计算方法, 使图的构造更加准确, 从而提高了算法的分割精度。但提高算法精度的同时势必会增加算法的复杂度, 为降低算法的复杂度, 在提出算法中引入了四叉树方法对图像进行预处理, 从而减少图中节点的数量。实验结果表明, 该方法相比已有的图割方法在分割的精确度和效率上有较大的提高, 具有更好的效果。

关键词: 图割; 最小生成树; 四叉树; 最大流/最小割

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2018)12-0102-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2018.12.022

Image Segmentation Method Based on Graph Cut Combining Minimum Spanning Tree and Quadtree

PENG Zhi-dong, XUAN Shi-bin

(School of Information Science and Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China)

Abstract: Image segmentation is the key step in image processing. The image segmentation method based on graph cut has paid much attention in recent years. In view of the fact that the traditional image segmentation method does not fully consider the adjacent pixels may belong to different classes, we propose a new image segmentation method combined with minimum spanning tree, which reconstructs the energy function. In the construction of the energy function, the case that two adjacent nodes might not be adjacent in the minimum spanning tree is considered. For this case, we determine the weight calculation method of the edges in the graph again, which makes the construction of the graph more accurate and improves the segmentation accuracy of the algorithm. However, the improvement of algorithm precision is bound to increase the complexity. For this, the quadtree method is introduced to preprocess the image, so as to reduce the number of nodes in the graph. The experiment shows that compared with the existing graph cutting method, the proposed method can greatly improve the precision and efficiency of segmentation with a better effect.

Key words: graph cut; minimum spanning tree; Quadtree; maximum flow / minimum cut

0 引言

图像分割是将图像中人们感兴趣的部分提取出来的一个过程, 是图像处理环节中最关键的步骤, 直接影响图像的后续处理。现有的图像分割方法主要分为两大类: 传统的图像分割方法和基于特定理论的方法。在基于特定理论方法中, 基于图的方法近年来备受关注, 最常见的有 minimum cut^[1]、average cut^[2]、ratio cut^[3]、normalized cut^[4]、min-max cut^[5]。其中 min-max cut 是一种经典的基于图论的分割方法。

1989年, 基于图论的方法^[6]首次引入到图像处理

领域, 由于当时技术的限制, 该方法并没有得到较好的发展。21世纪初, Boykov等^[7]通过引入最大流算法^[8], 提出了一种快速的基于图论的图像分割算法, 加快了对图割的研究。在随后数年中, 图割算法逐渐应用到各领域, 如医学^[9]、地理^[10]、人体行为识别^[11]、视频分割^[12]等, 使得人们不断地去改进图割算法。而对算法的改进, 无非是从图的构造和能量函数的构造这两个方面进行。文献[13-14]使用了分水岭和均值漂移的方法, 将图像划分为多个小型区域, 最后使用最大流最小割实现图像分割。文献[15]在原有图割方法

收稿日期: 2018-01-18

修回日期: 2018-05-24

网络出版时间: 2018-09-21

基金项目: 广西自然科学基金(2015GXNSFAA139311); 广西民族大学研究生科研创新项目(gxun-chxps201674)

作者简介: 彭智东(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为图像处理与识别; 宣士斌, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为图像处理与识别。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180920.1536.022.html>

的基础上加入了自适应的形状先验模型。文献 [16] 在传统的方法上加入了非局部信息, 并且用像素片替代了像素, 从算法的效率和效果两方面提高了算法的性能。文献 [17] 使用了对目标和背景种子点特征向量聚类的方法, 以改进算法的分割效果。文献 [18-19] 通过重新构造边上的权值和删除图中简单边的方法来改进算法等。

在上述研究的基础上, 文中提出了一种结合最小生成树的图割方法, 并通过实验对其进行验证,

1 图割概述

图像分割问题从本质上来讲是像素分配的问题, 也可以说是像素的标记问题。给定一个标签集合 L , 图像中的一个像素为 $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 图像分割就是对图像中的每一个像素分配一个标签 $P_i \in L_o$ 或者 $P_i \in L_p (L_o$ 为目标, L_p 为背景) 的过程。图割是基于图论的一种方法, 首先将一幅图像映射为一个网络图 $G = (V, E)$, 在这个图中有两类节点, 即普通节点 P_i , 端节点 S 和 T , 其中 S 为前景目标, T 为背景目标。边 $E = \{ (u, v) \mid u \in P, v \in P \}$ 表示图中边的集合, 一般的图割方法中只有相邻的节点间才存在边, 每条边上都有权值 $\omega(u, v)$ 。所要解决的问题就是在已知能量函数的前提下, 如何将这个图切割开, 并且隔开后的代价最小。 G_1, G_2 为被割开后的子图。

$$\text{Cut} (G_1, G_2)_{\min} = \sum \omega(u, v) \quad (1)$$

一般情况下, 用到的能量函数的形式为:

$$E(L) = \alpha R(L) + B(L) \quad (2)$$

其中, $R(L)$ 为区域项, 决定 t-link 边的权值。

$$R(L) = \sum_{p \in P} R_p(l_p) \quad (3)$$

其中, $R_p(l_p)$ 表示像素 p 分配给标签 l_p 的代价, 也可以说是 $P_i \in l_p$ 的概率。

$$R_p(l_p) = \begin{cases} -\ln P(l_p \mid \text{obj}) & l_p = 1 \\ -\ln P(l_p \mid \text{bkg}) & l_p = 0 \end{cases} \quad (4)$$

当像素 p 属于前景的概率 $P(l_p \mid \text{obj})$ 大于属于背景的概率 $P(l_p \mid \text{bkg})$ 时, 就给 p 分配标签 $l_p = 1$, 反之, 给 p 分配标签 0。如果全部的像素都被正确划分后, 此时区域项 $R(L)$ 的能量值就达到最小。

$B(L)$ 表示边界项, 决定 n-link 边的权值。

$$B(L) = \sum_{(p, q) \in \mathbb{N}} B_{\langle p, q \rangle} \cdot \delta(l_p, l_q) \quad (5)$$

其中

$$\delta(l_p, l_q) = \begin{cases} 0, & \text{if } l_p = l_q \\ 1, & \text{if } l_p \neq l_q \end{cases} \quad (6)$$

$$B_{\langle p, q \rangle} = \frac{1}{\|p - q\|} \exp\left(-\frac{(I_p - I_q)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

其中, $B(L)$ 为权重函数, 表示像素 p 和像素 q 之间被切割开所要花费的代价; \mathbb{N} 为图像邻域, $p, q \in \mathbb{N}$ 表示 p 和 q 为两个相邻的像素, $\|p - q\|$ 表示两像素点之间的欧氏距离; σ 为图像噪声参数。当两个像素之间的变化不大时, 表示它们更可能是图像的边界点, 它们之间的局部权值就越小, 反之亦然。

参数 α 是一个作为平衡区域项与边界项的平衡参数, α 的大小直接影响到图像分割的结果。当 α 越大时, 表示分割的结果受区域项的影响更大, 当 $\alpha = 0$ 时, 只考虑边界项。对于 α 的取值并没有明确的规定。文献 [20] 中介绍了一种自适应 α 的方法。

2 融合最小生成树和四叉树的图割方法

2.1 结合最小生成树的权值构造

传统图割算法的复杂度较高, 对于部分图像来说, 还容易造成错误的分割。在一幅图像中, 将图像映射成图, 在图中可能存在本不应该被割开的边, 然而实际却被分割开了, 这就造成了错误的分割。对此, 文中借鉴最小生成树的思想^[21], 最小生成树也可以用来做图像切割。加入最小生成树后, 能有效降低错误分割。在实验中, 随机生成一个 3 阶矩阵, 然后将这个矩阵映射成图, 如图 1 所示。然后对图进行最小生成树处理, 结果如图 2 所示。

6	9	5
5	6	4
1	4	1

图 1 随机 3 阶矩阵

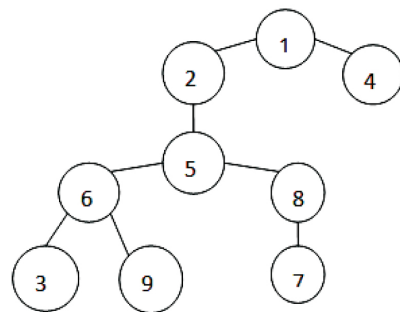


图 2 最小生成树

由图 2 和图 3 的比较可以看出, 原来每两个相邻节点之间都存在着一一条边, 而现在只有部分相邻节点之间还存在着边, 另一部分相邻节点之间的边被删除, 并且被删除边后的两个节点之间的距离也随之发生变化。例如, 节点 4 和 7 之间的距离为 5, 节点 8 和 9 之间的距离为 3 等。

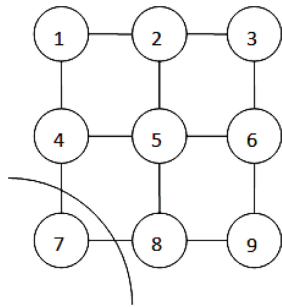


图 3 图割分割结果

在图的构造中借鉴最小生成树的思想,对图中边的权值进行了新的定义:

$$\varphi_{pq} = \begin{cases} |\gamma B_{\langle p,q \rangle} + (\gamma - 1) S_{pq}| & \text{if } p, q \notin \mathbb{N} \\ \gamma B_{\langle p,q \rangle} + (1 - \gamma) S_{pq} & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

其中, p, q 为图像中两个相邻的像素, $p, q \notin \mathbb{N}$ 表示像素 p, q 在最小生成树中不相邻; $0 \leq \gamma \leq 1$ 为一个调节参数,当 $\gamma = 1$ 时 φ 退化为传统权重函数; S_{pq} 表示像素 p 和 q 在最小生成树中的相似程度。

$$S_{pq} = \exp\left(-\sum \omega(p, q)\right) \frac{1}{d(p, q)} \quad (9)$$

其中, $\sum \omega(p, q) = \omega(p, p_1) + \omega(p_1, p_2) + \dots + \omega(p_n, q)$ 表示从像素 p 到像素 q 所经过最短路径的权值之和; $d(p, q)$ 表示两个像素之间的距离,即像素 p 到 q 之间最短路径上边的条数。

通过对图中边的权值进行重新定义,能够尽可能地提高图像分割的精确度,使分割结果更加理想。图 3 为加入最小生成树方法后使用最大流/最小割得到的分割结果。通过实验证明,该方法有效提高了分割的精确度,但在精确度提高的同时,势必会增加算法的复杂度,于是考虑从减少图的节点上去减少算法运行的时间。因此,引入了一种四叉树方法^[22]来减少图中节点的数量。

2.2 四叉树分割方法

令 G 表示一幅图像,将 G 分割成 n 个子区域 G_1, G_2, \dots, G_n 的过程就叫分割,满足的条件如下:

- (1) $\cup_{i=1}^n G_i = G$;
- (2) $G_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是一个连通域;
- (3) $G_i \cap G_j = \emptyset, i \neq j$;
- (4) $P(G_i) = \text{TRUE}$;
- (5) $P(G_i \cup G_j) = \text{FALSE}$, 对于任意相邻像素 G_i 和 G_j 。

其中, $P(G_i)$ 是定义在集合 G_i 的点上的逻辑谓词, \emptyset 表示空集。

四叉树的分解步骤如下:

- (1) 将原图像分成几个(一般为 4 个)大小相同的区域。
- (2) 将所分图像的每个区域依次判定是否满足判

定标准,如果不满足,就将这个区域继续细分,直到所有的区域都满足这个评判标准为止。使用的评判标准为,同一区域内像素值的方差不超过某个阈值,即 $S(R_i) < A$, A 越小,分割的区域精度就越高,算法执行的时间也就越长,反之亦然。

(3) 使用像素点合并的方法,合并孤立的像素点。

(4) 迭代重复上述过程,直到所有的区域都符合评判标准。

2.3 融合最小生成树和四叉树的图割方法

文中将 graph cut 方法和最小生成树方法相结合,在图权值的构造中,考虑了原本相邻的两个节点在最小生成树中也相邻或者不相邻的情况。重新构造了边的权值。但是当面对图中节点数过多时,生成最小生成树和使用最大流最小割求解能量函数的过程中非常耗时,于是又引入四叉树的方法,将原始图像分割成各个小区域,将各个小区域建立赋权图 $G = (V, E)$,最后采用最大流最小割的方法完成区域的划分。这样会大大减少图中节点的数量,缩短算法的时间。该方法的详细步骤如下:

(1) 选取一个合适的阈值,根据四叉树的分解方法分解该图像。

(2) 将分解后的图像映射成赋权图 $G = (V, E)$ 。

(3) 对该图进行最小生成树处理,并求出 φ_{pq} 。

(4) 重新构造赋权图 $G = (V, E)$ 。

(5) 使用最大流/最小割进行分割。

$$E_N(L) = \alpha R(L) + B_N(L)$$

$$B_N(L) = \sum_{(p, q \in \mathbb{N})} \varphi_{pq} \cdot \delta(l_p, l_q)$$

此时的 p, q 分别表示区域 p 和区域 q ,并且 p 和 q 是两个相邻的小区域。区域 p 和 q 的像素值为该区域内所有像素的平均值,区域 p 到 q 的欧氏距离为两个区域中心点之间的距离。

3 实验结果与分析

为了验证算法的准确性与快速性,选择 MATLAB 自带图像库中的经典图像进行分析和研究。在参数的选择上,并没有做更深入的研究,而是取了一些常规参数。实验中 A 取值为 20。 A 的大小是至关重要的, A 越大,算法运行所需的时间就越少,但是图像对细节的保留也就越少,会丢失更多的细节。例如,图 4(f) 相较于图 4(e) 就丢失了部分细节。这种细节的丢失可以通过更改 A 的大小来弥补。文中并没有严格地给出参数 A 的计算方式,更多的是根据实验对 A 进行取值。参数 γ 的取值为 0.4。参数 γ 主要决定在边权值重新构造的过程中,是否要更多的依赖最小生成树中两个节点之间的距离。 γ 越小表示在权值构造中,更多的是

考虑最小生成树中两个节点距离对权值的影响,反之亦然。参数 γ 大小对算法时间并没有直接影响。对于参数 γ 的选取同样是根据实验得出。

实验结果如图 4 和图 5 所示,分割时间对比见表 1。



图 4 对比实验 1

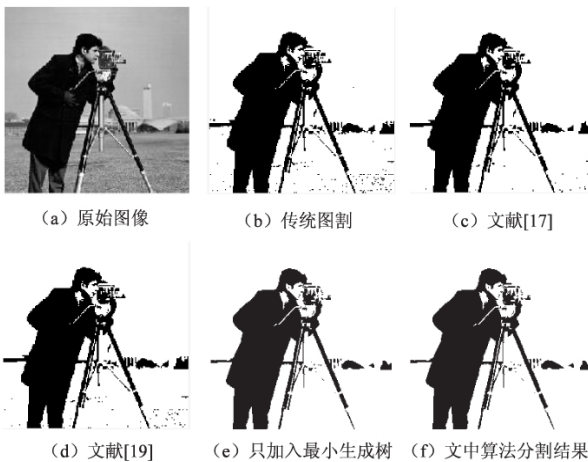


图 5 对比实验 2

表 1 分割时间对比

图像	图 4	图 5
b	1.025	1.147
c	0.892	0.918
d	0.855	0.874
e	1.773	1.952
f	0.755	0.837

由图 4 和图 5 可以看出,使用传统图割方法的效果并不是很好,特别是对背景比较复杂的图像,分割效果更是差强人意。在加入最小生成树的方法之后,分割效果立竿见影,但是在分割的时间上有所增加,例如图 4(e) 相较于图 4(f) 所用时间增加了 0.758 s,图 5(e) 相较于图 5(f) 所用时间增加了 0.805 s,算法运行时间的增加是不能接受的。在加入四叉树后,算法运行效率明显提高,并且分割结果也优于传统的图割方法,但是,对于复杂背景的图像来说,会丢失部分细

节,例如图 4(f) 相较于图 4(e) 就丢失了一部分的细节,细节丢失的程度由参数 A 控制。从图 4(c) 和 (d) 中可以看出,复杂背景中细节的丢失是不可避免的。图 5(f) 相较于图 5(e) 来说,并没有明显的变化。所以,对于简单的背景图像,细节的丢失是可以忽略的。因此对于简单图像的分割,不管是算法的效果还是复杂度,该方法都无疑是最好的选择。

4 结束语

在传统方法的基础上加入了最小生成树和四叉树的方法,重新定义了能量函数,重构了图中边的权值计算方法,最后构图并通过最大流/最小割算法进行求解。在计算边与边的权值时引入最小生成树方法,提高了相似性计算的正确性。为了提高算法的效率,采用四叉树的方法,减少图中节点的数量,在保证算法准确度的同时,降低了算法执行的时间,最后实验也证明了其可行性。但是该算法同时也存在一些缺陷,如参数 A 和 γ 的设定并不明确,以及克服图像细节的丢失等,这些问题都将在以后的学习和工作中有待进一步改进。

参考文献:

- [1] WU Zhenyu, LEAHY R. An optimal graph theoretic approach to data clustering: theory and its application to image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1101-1113.
- [2] SARKAR S, BOYER K L. Quantitative measures of change based on feature organization: eigenvalues and eigenvectors [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 71(1): 110-136.
- [3] WANG Song, SISKIND J M. Image segmentation with ratio cut [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 675-690.
- [4] SHI Jianbo, MALIK J. Normalized cut and image segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(8): 888-905.
- [5] DING C, HE Xiaofeng, ZHA Hongyuan, et al. A min-max cut for graph partitioning and data clustering [C]//Proceedings 2001 IEEE international conference on data mining. San Jose, CA, USA: IEEE, 2001: 107-114.
- [6] GREIG D M, PORTEOUS B T, SEHEULT A H. Exact maximum a posteriori estimation for binary images [J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1989, 51(2): 271-279.
- [7] BOYKOV Y, JOLTY M P. Interactive graph cut for optimal boundary and region segmentation of objects in N-D images [C]//Proceedings of eighth IEEE international conference on computer vision. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2001: 105-112.

(下转第 126 页)

- 诊断的应用[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(12): 28-31.
- [2] 李维铮, 孟 桥. 基于遥测数据动态特征的卫星异常检测方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(2): 201-207.
- [3] 张晓洁, 赵海涛, 苗 强, 等. 基于动态故障树的卫星系统可靠性分析[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1249-1254.
- [4] 姜连祥, 李华旺, 杨根庆, 等. 航天器自主故障诊断技术研究进展[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1320-1326.
- [5] CUSHING M J, MORTIN D E, STADTERMAN T J, et al. Comparison of electronics-reliability assessment approaches [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1993, 42(4): 542-546.
- [6] 马凯航, 高永明, 李 磊, 等. 基于遥测数据的在轨卫星性能预测方法研究[J]. 现代电子技术, 2017, 40(21): 1-5.
- [7] 周 枫, 皮德常. 一种时间序列分解的卫星周期性参数预测方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(2): 9-12.
- [8] LEE J. Measurement of machine performance degradation using a neural network model [J]. Computers in Industry, 1996, 30(3): 193-209.
- [9] HUANG Runqing, XI Lifeng, LI Xinglin, et al. Residual life predictions for ball bearings based on self-organizing map and back propagation neural network methods [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(1): 193-207.
- [10] TALBOT D, LI S, KAHRAMAN A. Prediction of mechanical power loss of planet gear roller bearings under combined radial and moment loading [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(12): 121007.
- [11] 徐国平. 基于支持向量机的动调陀螺仪寿命预测方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [12] 安伟光, 孙振明, 张 辉. 预测区间技术在航天器数据处理中的理论与应用研究[J]. 宇航学报, 2006, 27: 109-112.
- [13] 向 刚, 张会彬, 李海孟, 等. 基于灰色理论与专家系统的电子设备在线故障预测方法研究[J]. 航天控制, 2013, 31(4): 88-92.
- [14] GEBRAEEL N, LAWLEY M, LIU R, et al. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(3): 694-700.
- [15] 胡昌华, 胡锦涛, 张 伟, 等. 支持向量机用于性能退化的可靠性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1246-1249.
- [16] 于 勇, 姜兴涓. 基于 ARMA 模型的卫星故障预测技术应用研究[C]//2000 年全国振动(诊断、模态、噪声)技术及工程应用学术会议论文集. 南京: 出版地不详, 2000: 148-151.
- [17] 李瑞莹, 康 锐. 基于 ARMA 模型的故障率预测方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1588-1591.
- [18] 朱晓乐, 王 华, 符菊梅, 等. 基于 ARMA 模型的动力系统缓变数据故障趋势预测[J]. 载人航天, 2011, 17(2): 54-58.
- [19] 魏武维. 时间序列分析: 单变量和多变量方法[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009.
- [20] 王 环, 郭义琪, 秦 巍, 等. 构建多航天器在轨管理支持平台[J]. 航天器工程, 2007, 16(3): 114-119.
- [14] CIGLA C, ALATAN A. Region-based image segmentation via graph cuts [C]//15th IEEE international conference on image processing. San Diego, CA, USA: IEEE, 2008: 2272-2275.
- [15] 辛月兰, 张晓华, 汪西莉. 自适应形状先验的图割分割方法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(3): 648-653.
- [16] 王 涛, 纪则轩, 孙权森. 结合非局部信息与图割的图像分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(5): 783-791.
- [17] 汤依婷, 韩彦芳. 一种改进的图割目标分割算法[J]. 电子科技, 2016, 29(10): 43-46.
- [18] 王梦娇. 基于图割算法改进的图像分割方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [19] 曹国震, 彭 寒. 基于区域一致性的图割立体匹配[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(1): 160-163.
- [20] 刘 毅, 黄 兵, 孙怀江, 等. 利用视觉显著性与图割的图像分割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(3): 402-409.
- [21] 黎 莹, 戴 芳, 郝 勇, 等. 基于最小生成树的图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(13): 149-151.
- [22] FISHER Y. Fractal image compression: theory and applications [M]. [s. l.]: Springer-Verlag, 1995.

(上接第 105 页)

- [8] BOYKOV Y, KOLMOGOROV V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(9): 1124-1137.
- [9] ZENG Yezhan, ZHAO Yuqiao, TANG Ping, et al. Liver vessel segmentation and identification based on oriented flux symmetry and graph cuts [J]. Computer Methods and Programs in Biomedical, 2017, 7(2): 215-227.
- [10] CHENG Dongcai, MENG Gaofeng, XIANG Shiming, et al. Efficient sea-land segmentation using seeds learning and edge directed graph cut [J]. Neurocomputing, 2016, 207: 36-47.
- [11] YU Xiaoming, LIU Weibin, XING Weiwei. Behavioral segmentation for human motion capture data on graph cut method [J]. Journal of Visual Languages and Computing, 2017, 1(10): 158-169.
- [12] 陈华榕, 钱康来, 王 斌. 结合支持向量机和图割的视频分割[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(8): 1389-1395.
- [13] LI Y, SUN J, TANG Q, et al. Lazy snapping [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 303-308.