

基于局部渐进图割的印刷电路板图像分割

董昌灏*, 闫 斌, 曾 磊, 童 莉, 李建新

(信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

(*通信作者电子邮箱 chdongouc@163.com)

摘 要:针对图割算法对灰度不一致且结构复杂的印刷电路板(PCB)图像不能有效分割的情况,提出一种新的交互式局部渐进图割方法。通过分析用户交互过程中提供的信息生成局部约束能量项,并将其融入图割模型中,其中局部约束能量项依据用户添加的种子点的位置、类型以及与前一次分割结果的相对位置等信息自适应地生成。通过对多组锥束计算机断层成像(CBCT)系统采集的PCB图像进行分割实验,结果表明与经典的图割算法相比,所提方法能得到更准确的分割结果、更好的可控性及用户体验。

关键词:交互式图像分割; 印刷电路板; 图割; 局部约束; 计算机断层成像

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Printed circuit board image segmentation by local progressive graph cuts

DONG Changhao*, YAN Bin, ZENG Lei, TONG Li, LI Jianxin

(Communication Engineering College, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: The Graph Cuts segmentation algorithm is not sufficient to segment Printed Circuit Board (PCB) images with non-uniform gray level and complicated inner structure. A new interactive Local Progressive Graph Cuts (LPGC) segmentation method that modeled local constrained energy into a graph cuts framework was presented in this paper. The local constrained energy was adaptively generated by modeling the user's additional information behind the interaction, such as the location of the seed, the class of the seed and the relative position between the seed and previous result. Through a comparison of different PCB image segmentation experiments, the results demonstrate the proposed method has better performance compared with the state-of-art method such as graph cuts in terms of segmentation accuracy, controllability, and user experience.

Key words: interactive image segmentation; Printed Circuit Board (PCB); graph cuts; local constraint; Computed Tomography (CT)

0 引言

基于锥束扫描的三维CT技术具有快速无损等优点,逐渐成为近年来进行印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)无损检测的重要手段。PCB的无损检测需要对PCB图像进行处理和分析,其中的一项重要内容就是实现对PCB图像的分割。PCB由承载导线的基板、大量的多层敷铜导线以及过孔等金属构成,其内部结构复杂,并且PCB板的厚度较薄,锥束CT扫描得到的PCB图像中导线、焊盘等目标的灰度往往不一致,甚至会出现目标的灰度值接近或低于背景的灰度值,要得到精确的分割结果难度很大。

由于图像类型的多样性和内容的复杂性,使得交互式分割相比全自动分割具有更强的实用性,应用也越来越多^[1]。由Boykov等提出的graph-cut模型^[2],是目前研究和应用最为广泛的交互式图像分割方法之一。它具有很多优良的特性,比如多特征/约束融合能力、全局最优、数值鲁棒性强、执行效率高和分割加权图的拓扑结构自由等^[1]。其中Graph Cuts^[3]和Lazy Snapping^[4]算法是该方法的典型代表。文献[5]通过实验比较了多种交互式分割算法的性能,其中Graph Cuts算法在准确性、效率和可重复性等方面都具有很好的性

能。然而目前基于种子点或笔画的graph-cut算法的一个普遍的问题在于较少的种子点或笔画通常不能得到满意的分割结果,因此需要用户不断地进行交互直到获得满意的分割结果。

现有的大部分算法,比如Graph Cuts和Lazy Snapping等仅仅使用种子点或笔画处像素的颜色信息来更新图割模型,然后在新的图割模型上重新进行分割。这种方法会造成在交互过程中出现“波动”效应^[6-8],即用户不希望的前景和背景标号的改变。针对自然图像分割中的“波动”效应问题,文献[6]中提出的Progressive Cut算法通过对交互过程中用户真实意图的分析,相应地在能量函数中添加用户意图项来实现对图像的分割,有效地避免图割算法由于全局优化特性造成的“波动”效应。然而,该算法设计的用户意图项主要跟像素与用户笔画的空间距离相关,而没有考虑颜色信息,使得该算法只能在图像目标简单的情况下取得较好的效果。而PCB图像中的目标物体往往结构复杂,导线等目标之间存在大量空隙,仅仅依靠空间距离来刻画用户意图项存在很明显的不足。比如,用户添加一个额外种子点在一根细长导线上时,由于导线长宽比很大,而用户意图项仅仅与空间距离相关,用户意图项就不可能沿导线方向分布,而是一个以种子点为中心

收稿日期: 2013-03-21; 修回日期: 2013-05-29。 基金项目: 国家863计划项目(2012AA011603)。

作者简介: 董昌灏(1987-),男,河南荥阳人,硕士研究生,主要研究方向:交互式图像分割; 闫斌(1976-),男,河南安阳人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、工业CT检测; 曾磊(1975-),男,湖南邵阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像处理; 童莉(1978-),男,湖北武汉人,讲师,博士,主要研究方向:图像处理、工业CT检测; 李建新(1953-),男,浙江杭州人,教授,主要研究方向:无损检测、自动化装置。

的圆形区域内,且与种子点的距离成负相关,这时生成用户意图与期望值之间必然存在较大误差,即导线两侧的背景区域可能存在与导线上区域具有相同的用户意图项的值。这些因素都使得 Progressive Cut 算法难以适用于 PCB 图像的分割。文献[7]中提出的 Paint Selection 算法为了解决“波动”效应问题,在获取分割结果之后添加了一个额外的“波动”消除操作,主要是通过判断新的分割区域与用户笔画刷的连通性来实现去除“波动”效应的功能。该方法虽然简单,但是应用于 PCB 图像分割时实用性不强,比如对 PCB 图像进行分割时,需要沿着错误分割的所有区域分别添加笔画,于是,该算法应用于含有大量细长导线等目标的 PCB 图像时,需要非常仔细地在错误区域添加笔画,人工交互的工作量将十分巨大。

为解决上述问题,本文提出一种新的交互式局部渐进图割(Local Progressive Graph Cuts, LPGC)方法,其主要思路是:依据用户新添加的种子点自适应地生成局部约束能量项,并添加到能量函数中,最后对改进的加权图模型应用 s-t 最小割算法,获得分割结果。由于将用户添加种子点生成的约束项限制在局部范围内,可以有效降低甚至避免传统图割算法中的“波动”效应,因此也可以使得分割结果对用户来说更加可控,改善了用户体验。

1 基于 Graph Cuts 的图像分割框架

基于 Graph Cuts 的图像分割框架的核心思想在于定义一个能量函数,然后将求解二元标号问题的全局优化过程转换为基于图论中的网络流优化^[9]。

记 O 和 B 为用户选取的目标和背景像素, N 为邻接像素对 $\{p, q\}$, 每个像素 i_k 从 $L_k \in \{\text{obj}, \text{bgd}\}$ 中获取一个二元标号,其中 obj 和 bgd 分别代表目标和背景,则分割结果可以用向量 $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)$ 表示。需要最小化的能量函数可以用数据项 $E_{\text{data}}(L)$ 和边界项 $E_{\text{smooth}}(L)$ 的带权组合^[2]表示:

$$E(L) = \lambda E_{\text{data}}(L) + E_{\text{smooth}}(L)$$

其中

$$E_{\text{data}}(L) = \sum_{p \in P} E_{\text{data}}(L_p)$$

$$E_{\text{smooth}}(L) = \sum_{(p,q)} E_{\text{smooth}}(L_p, L_q) \delta(L_p, L_q)$$

并且

$$\delta(L_p, L_q) = \begin{cases} 1, & L_p \neq L_q \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

通常将待分割图像构造为一个特殊的弧带权有向图 $G = (V, E)$, 其中: V 为节点集, G 中的弧 E 可以分为 n-连接和 t-连接。n-连接为每对邻接像素 p 和 q 构造的带权有向边 (p, q) 和 (q, p) ; t-连接为每个像素 p 和终端节点之间的弧。则最小化能量函数可以通过求图 G 的最小割来实现。图割示意图如图 1 所示:图 1(a) 为大小为 7×1 的灰度图像, O 为目标种子点, B 为背景种子点;图 1(b) 为图 1(a) 对应的加权图, S 为源节点, T 为汇节点,节点之间的连接越粗表示其权值越大;图 1(c) 中虚线为图 1(b) 加权图上求得的最小割。

2 局部渐进图割

2.1 带局部约束项的 Graph Cuts 模型

记 $S = \{s\}$ 为用户添加的种子点集合, $P = \{p\}$ 为图像像素集合,本文设计的能量函数形式如下:

$$E(L) = \alpha \sum_{p \in P} E_{\text{data}}(L_p) + \beta \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} E_{\text{local}}^s(L_p) +$$

$$\sum_{(p,q)} E_{\text{smooth}} \delta(L_p, L_q)$$

其中: $E_{\text{data}}(L_p)$ 为数据项,其通常采用最大后验概率的马尔可夫随机场(MAP-MRF)模型中的形式^[10],其形式如下:

$$E_{\text{data}}(L_p = \text{"obj"}) = -\log \Pr(I_p | O)$$

$$E_{\text{data}}(L_p = \text{"bgd"}) = -\log \Pr(I_p | B)$$

E_{smooth} 为边界项,其具体形式如下:

$$E_{\text{smooth}} = \exp(-(x_p - x_q)^2 / 2\sigma^2) / \text{dist}(p, q)$$

$E_{\text{local}}^s(L_p)$ 为局部约束项,用于引入分割时背离局部约束的代价,用户添加新的种子点时通常是要对种子点一定邻域范围内产生影响。本文中其定义如下所示:

$$E_{\text{local}}^s(L_p) = \frac{(\varepsilon(|e^{(I_p - I_s)^2 / 2\sigma^2} - 1|) + (1 - \varepsilon) \|p - s\|)}{r}$$

其中 I_p, I_s 分别为像素 p 和种子点 s 的灰度值, $\|p - s\|$ 为像素与种子点之间的距离, $\varepsilon \in [0, 1]$ 为权重, r 为作用半径。

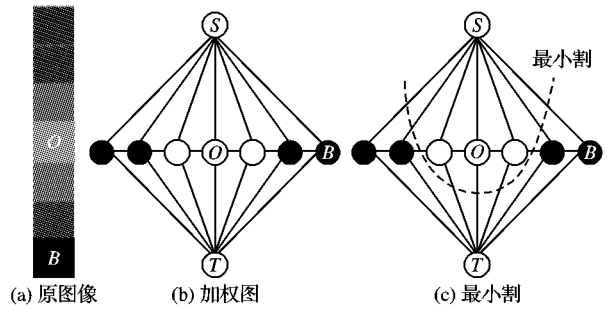


图1 图割示意图

2.2 局部约束项分析

局部约束项表示图像像素与新添加种子点局部约束的背离程度,值越小表示像素的背离程度越小,反之则越大。其中局部约束项可以从用户添加的种子点的位置,类型以及与前一次分割结果的相对位置中分析出来。具体地,种子点的位置体现局部约束集中的区域,种子点的类型以及与前一次分割结果的相对位置表明用户期望的修正类型。

局部约束项 $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 主要与三个参数相关,其中 ε 的大小影响像素与种子点间的空间距离和灰度相似性在 $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 中所占的比重,而作用半径 r 控制 $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 影响范围的大小。此外,当像素与种子点的灰度差 $|I_p - I_s| < \sigma$ 时 $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 的值较小;但是当 $|I_p - I_s| > \sigma$ 时, $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 的值变得很大。

局部约束能量的例子如图 2 所示,其中图 2(b) 中箭头所指的目标种子点对应的局部约束能量项如图 2(a) 所示,图 2(b) 为新添加种子点后本文算法的分割结果,从图 2 中可以看出任意像素与种子点之间的空间距离和灰度差越小则对应的局部约束能量值也越小,反之则越大。

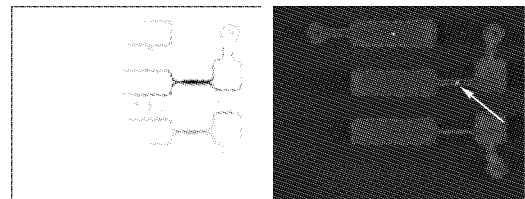


图2 局部约束能量项及本文算法分割结果

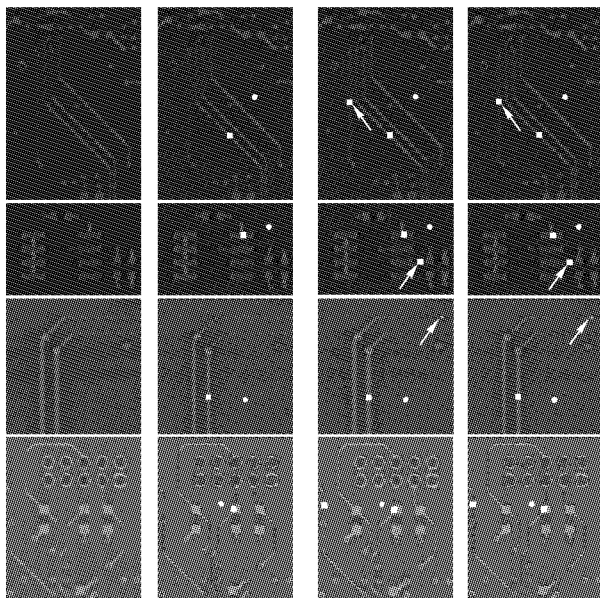
此外,当对图像中的任意像素 p 分配一个标号 L_p 时,本文添加的局部约束项 $E_{\text{local}}^s(L_p)$ 起到一元项的作用。将其作为一元项引入的优势在于引入后并不会改变新的能量函数的次模性条件,这样新的能量函数仍然可以用最小 s-t 割算法来得

到最优值^[11]。

3 实验结果与分析

本节使用锥束 CT 系统采集的 PCB 图像进行实验,比较分析了本文方法相对于文献[5]中交互式 Graph Cuts 算法在分割质量上的优势。本文方法采用 C++ (Qt) 进行系统实现,并使用了 CImg 图像处理库,其中最大流/最小割算法使用了文献[12]中的算法。实验仿真环境为奔腾双核 E6500 2.93 GHz 处理器、2 GB 内存和 Windows XP 系统 PC, Virtual Studio 2008 编译器。

实验结果如图 3 所示,其中:(a)为原始图像;(b)为添加两个种子点时的分割结果,其中方框种子点代表目标,圆圈种子点代表背景。(c)为添加一个新的种子点(如图中箭头所指)时文献[5]中 Graph Cuts 算法的分割结果。(d)为添加相同的额外种子点时本文算法的分割结果。



(a) 原始图像 (b) 初次分割结果 (c) Graph Cuts 算法 (d) LPGC 算法
图 3 图割算法和本文 LPGC 算法分割结果的对比

从图 3 中可以看出,锥束 CT 系统采集的 PCB 图像中由于多种因素造成的部分导线灰度值较小,初次分割结果通常不能获得满意的分割结果。添加新的种子点后,传统图割算法仅仅利用了其灰度信息更新颜色模型,使得分割出目标的同时产生“波动”效应,影响了整体的分割效果。而本文算法将新添加的种子的作用范围限制在局部范围内,因此可以有效避免上述情况,同时使得分割结果更符合用户的预期。

4 结语

本文提出了一种新的局部渐进图割算法 (LPGC) 用于 PCB CT 图像分割。本文的方法设计了新的局部约束能量项,更好的利用了用户新添加种子点的信息。通过使用锥束 CT 采集的 PCB CT 图像与 Graph Cuts 算法进行比较,实验结果表明本文的方法在准确性方面有更好的性能,减少了图割方法中“波动”效应的影响,并且有效改善了分割结果的可控性以及用户体验。

参考文献:

- [1] 韩守东, 赵勇, 陶文兵, 等. 基于高斯超像素的快速 Graph Cuts 图像分割方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(1): 11-20.
- [2] BOYKOV Y Y, JOLLY M P. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in N-D images[C]// Proceedings of the Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ: IEEE, 2001, 1: 105-112.
- [3] BOYKOV Y, FUNKA-LEA G. Graph cuts and efficient N-D image segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2006, 70(2): 109-131.
- [4] LI Y, SUN J, TANG C-K, SHUM H-Y. Lazy snapping[C]// Proceedings of SIGGRAPH 2004. New York: ACM, 2004: 303-308.
- [5] McGUINNESS K, O'CONNOR N E. A comparative evaluation of interactive segmentation algorithms[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(2): 434-444.
- [6] WANG C, YANG Q, CHEN M, et al. Progressive cut[J]. IEEE Multimedia, 2007, 14(3): 56-66.
- [7] LIU J, SUN J, SHUM H Y. Paint selection[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 1-7.
- [8] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BOYKOV Y, et al. Interactive foreground extraction using graph cut, MSRTR-2011[R]. Seattle: Microsoft, 2011.
- [9] FREEDMAN D, ZHANG T. Interactive graph cut based segmentation with shape priors[J]. CVPR 2005: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005, 1: 755-762.
- [10] CHEN S Y, TONG H Y, CATTANI C. Markov models for image labeling[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 480-497.
- [11] KOLMOGOROV V, ZABIH R. What energy functions can be minimized via graph cuts? [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(2): 147-159.
- [12] JAMRISKA O, SYKORA D, HORNING A. Cache-efficient graph cuts on structured grids[C]// Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2012: 3673-3680.

(上接第 2860 页)

参考文献:

- [1] MIMOSO M S. Gartner: Pescatore comments on state of enterprise security[EB/OL]. [2012-10-07]. http://www.searchsecurity.techtarget.com/qna/0289202, sid14_gci905234, 00.html.
- [2] 许涛, 刘蓓, 李新友. 我国政务终端安全桌面核心配置标准研究[J]. 计算机安全, 2010(11): 71-74.
- [3] The USAF Standard Desktop Configuration (SDC) [EB/OL]. [2012-10-07]. <http://www.techrepublic.com/whitepapers/the-usaf-standarddesktopconfiguration-sdc/350235>.
- [4] 刘竹涛. 使用 GPMC 实现组策略的网络管理[J]. 计算机与网络, 2008(18): 41-43.
- [5] The Technical Specification for the Security Content Automation Protocol (SCAP): SCAP Version 1.0 (SP800-12-6) [EB/OL]. [2010-08-03]. <http://csrc.nist.gov/publications/Pub-sSPs.html>.
- [6] Security content automation protocol validated products [EB/OL]. [2010-08-10]. <http://nvd.nist.gov/scapproducts.cf-m>.
- [7] 刘兰, 朱程荣. 政务终端安全基线管理系统的设计与实现[J]. 计算机与现代化, 2013(2): 173-176.
- [8] 赵伟骅, 田伟. 计算机组策略应用安全研究[J]. 电脑编程技巧与维护, 2013(6): 84-86.
- [9] GB/T 22239-2008. 信息安全技术: 信息系统安全等级保护基本要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.