

〈图像处理与仿真〉

基于两方法博弈的马尔可夫随机场红外图像分割算法

王 坤, 张 恺, 王 力, 诸葛晶昌
(中国民航大学, 天津 300300)

摘要: 电路板红外图像芯片提取是电路板红外故障检测系统中的重要环节, 已成为红外图像分割领域关注的一个重点。针对红外图像的特性及传统分割算法效率和精度不足的缺陷, 提出一种基于两种优化策略博弈的马尔可夫随机场红外图像分割方法。首先通过 OTSU 算法对图像进行初始分割; 然后利用马尔可夫随机场理论建立图像分割模型; 最后, 通过 SA、ICM 优化策略间的博弈对图像进行分割, 将两种优化策略视为博弈的两个局中人, 通过寻找博弈的纳什均衡点来实现分割; 实验结果表明, 算法能够无人工干预地准确提取电路板红外图像所有芯片发热区域, 并且很好地抑制噪声, 准确处理边缘信息, 具有一定的实用性和鲁棒性。

关键词: 图像分割; 马尔可夫随机场; SA; ICM; 博弈论

中图分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)02-0134-05

Infrared Image Segmentation Based on MRF Combined with Two-algorithm Game

WANG Kun, ZHANG Kai, WANG Li, ZHUGE Jing-chang
(Civil aviation university of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Extracting the infrared image chip exothermic area at a circuit board, which is an important part of the fault detection system, has also been a key point in field of image segmentation. With the characteristics of infrared image and insufficient of traditional segmentation algorithm efficiency and accuracy considered, an infrared image segmentation algorithm based on MRF combined with two-algorithm game is proposed. First, OTSU method is used for initial segmentation, then the image segmentation model is established through MRF; Finally, segmentation is achieved through game between SA and ICM optimization strategy and by searching for the Nash equilibrium point. The simulation results show that the algorithm can not only extract accurately exothermic areas of all circuit board chips without manual intervention, but also make the speckle noise suppressed and keep the detail characteristics effectively. And the algorithm has a certain practicality and robustness.

Key words: image segmentation, MRF, SA, ICM, the game theory

0 引言

近年来, 随着红外技术的不断发展, 其作为非接触检测方式, 广泛应用于无损检测领域, 由于红外成像抗干扰性强, 准确性高、受环境影响小等特点, 成为电路板故障诊断的重要方式之一。一般情况下, 在红外图像提取时由于检测设备的固有特性及成像环

境的影响, 使得红外图像对比度差、信噪比低, 这些因素直接影响被检测设备故障检测和智能诊断^[1-3]。

近些年随着数学各分支在理论和应用上的逐步深入, 使得数学形态学、变分法、遗传学算法和随机场等理论在图像分割技术中取得了很大的发展, 成为该领域一个新的研究热点。其中基于马尔可夫模型的分割算法建立起图像局部特征与全局特征的互相关系,

收稿日期: 2014-11-02; 修订日期: 2014-11-29.

作者简介: 王坤 (1978-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为图像处理。

基金项目: 中国民航大学校级项目基金, 编号: 2010kyE07, 2010QD02S; 国家自然科学基金, 编号: U1333111; 天津市自然基金, 编号: 12JCQNJC00600; 中国民航机务维修科研基地资助。

表示了二维图像系统的后验概率分布和先验概率分布，并通过势函数来确，广泛应用于图像分割领域。

对 MRF 模型的能量优化方法有许多种，其中，全局优化的松弛算法需要大量时间来获取最优解；而局部优化的松弛算法虽具有较快的处理速度，但只能获得局部最优解，分割效果较差，不适用于实际的图像处理工程。

针对以上提到的红外图像特点，检测时的难点及传统算法的缺陷，提出基于两方法博弈的马尔可夫随机场红外图像分割算法，将图像分割问题视为 2 种传统方法的博弈过程，进行互动决策优化求解。首先，利用现有的 OTSU 算法^[4]将图像分割为目标域和背景域，为之后的细致分割提供初始依据；然后，建立马尔可夫随机场图像分割模型；最后，引入博弈理论，形成基于 SA、ICM 算法的博弈分割模型，通过共享信息寻找博弈过程中的纳什均衡点确定分割的最优解，该方法能够在无人工干预下自动确定目标芯片，并且较传统算法在分割效率和分割准确度上都有明显提高。

1 MRF 图像分割模型

在 MRF 模型中，常用 2 个随机场来描述待分割图像^[5-6]，令观测场数据集为 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_s\}$, ($s \in S, 0 < s < n+1$)，标记场数据集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$, ($x_s \in \Omega = \{1, 2, \dots, x_{lab}\}$), x_{lab} 为标记类别总数，本文中取 2，分别表示目标区域和背景区域。根据贝叶斯定理，则图像的分割问题可以表示为：

$$P(X | Y) = \frac{P(Y | X)P(X)}{P(Y)} \quad (1)$$

式中： $P(X | Y)$ 是标记场 X 的条件概率分布（也称作似然函数）； $P(Y | X)$ 表示观测场 Y 的条件概率； $P(Y)$ 是观测场 Y 先验概率； $P(X)$ 为标记场 X 的先验概率。

由 Hammersley-Clifford 定理可知，MRF 与 Gibbs 随机场等价^[7-9]，因此可以用 Gibbs 随机场的概率密度函数表示先验概率：

$$P(X) = z^{-1} \times e^{-\frac{1}{T}U_1(X)} \quad (2)$$

式中： $z = \sum_X e^{\frac{U_2(X)}{T}}$ 是归一化常数， T 为温度参数；

$$U_1(X) = \sum_{c \in C} V_c(X_c), \quad C \text{ 为势团集合, MRF 的邻域势团}$$

结构形态有多种，常见的有一阶和二阶结构，具体形态见图 1 所示， $V_c(X_c)$ 为势团势能，本文采用同构而且各向同性的二阶邻域系，势能为：

$$V_c(x_c) = V_{\{s, r\}}(x_s, x_r) = \begin{cases} -\beta(x_s = x_r) \\ \beta(x_s \neq x_r) \end{cases} \quad (3)$$

式中： β 是模型参数，一般取值在(0.5,1)上，本文取 0.75。

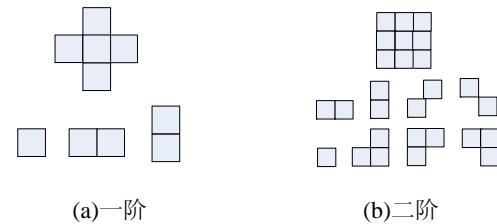


图 1 邻域系统势团结构

Fig.1 Neighborhood system potential group structure

最优问题可以等价为：

$$\hat{X} = \arg \min_X \left\{ \sum_{s \in S} (\ln(2\pi\sigma_{x_s}^2) + \frac{(y_s - \mu_{x_s})^2}{2\sigma_{x_s}^2}) + \sum_{c \in C} V_c(x_c) \right\} \quad (4)$$

式中： μ_{x_s} 和 x_s 是该分布的参数； μ_{x_s} 表示标记值为 x_s 的像素值的均值； $\sigma_{x_s}^2$ 表示标记值为 x_s 的像素值的方差。

2 两方法博弈模型

2.1 基于 MRF 的分割算法 SA 与 ICM 算法

MRF 中 MAP 问题的求解方法是基于 MRF 的图像分割的关键技术之一，也是这一领域的研究热点^[10-11]。传统的求解方法有 SA 算法、ICM 算法、MMD 算法等。ICM 算法是一种典型的确定松弛方法，也是 MRF-MAP 问题的常用算法，该方法的计算结果有很大程度上依赖于初始值的确定。判断条件简单，收敛速度较快，但是容易陷入局部最优；SA 算法与 ICM 不同，它是一种典型的随机松弛犯法，该法在理论上可以得到收敛于全局的结果，不会陷入局部最优解，但是由于加入了随机扰动，计算速度比较慢^[12]。

2.2 两方法博弈模型

博弈论是研究两人或者多人决策问题的理论，在一个博弈局当中，局中人集合为 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_i\}$, ($0 < i < k+1$)，每个局中人在博弈过程中都从策略集 $N = \{N_{r_1}, N_{r_2}, \dots, N_{r_k}\}$, ($N_{r_k} \in \Omega = \{1, 2, \dots, n_{lab}\}$) 中选择自己的策略 N' ，从而使自己的收益值为最大，即代价函数 W_i 最小，也就是达到博弈的 Nash 平衡。所谓的 Nash 平衡点，就是对于一个状态 $\eta = \Omega \setminus \{n_{lab}\}$ ，如果没有任何一个局中人通过改变自己的策略使代价函数减少，即称该状态为 Nash 平衡点^[13]。

在本文中，将两种分割方法视为两个局中人，局中人集合记为 $M = \{M_1, M_2\}$ ，两个局中人对应的策略

空间分别是 N_1 和 N_2 , 对应的代价函数为 $W_i = N_1 \times N_2$, ($i=1, 2$)。图像分割的过程就是每个局中人通过选取不同的策略使自身的代价函数最小, 当达到纳什均衡点博弈结束。

具体模型如图 2 所示, OTSU 算法对红外图像进行粗分割, 提供像素的初始标记, 然后将 CA 和 ICM 算法产生的新标记场作为先验知识输入到另一模块中, 依次迭代更新, 直至新的标记场满足代价函数最小则停止。



图 2 两方法博弈模型

Fig 2 Two-algorithm game model

算法具体流程如下:

1) 由 OTSU 算法得到初始组态 x^0 , 将图像的像素点标记为目标域或者背景域, 令 $k=0$, 则得到一个全局状态 $\eta=\Omega\{x^k\}$ 。

2) 建立马尔可夫随机场图像分割模型, 在基于两方法博弈的搜索模块中, 分别用 CA、ICM 算法对图像进行进一步分割, 初始状态为 x^0 , 每一个像素点 $y(y \in S_n(l \leq n \leq m))$ 选择一种标记 x' , $x' \neq x^k$, 通过式(5)迭代, 得到每个点具有最小局部能量的标记, 即满足:

$$x^{k+1} = \begin{cases} x', & \text{if } \Delta h \leq 0 \text{ 或 if } \Delta h \geq 0 \text{ 且 } \ln(\alpha) \leq \{-\Delta h / T\} \\ x^k, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 是能量控制阈值, 在算法的最开始取值, 一般的 $\alpha \in (0, 1)$, 具体取值见下述实验。由 $\Delta h_s = h_s(x') - h_s(x^k)$ 判断像素 y 的新标签 η_s 是否被接受:

$$h_s(x') = \min_{\lambda \in \Lambda - \{x_s^k\}} h_s(\lambda) \quad (6)$$

式中: Λ 表示总体样本集。

3) 每轮决策后, 更新标记场, 两个模块产生的新标记场为 X'_1 , 且作为另一个模块的初始标记, 进行新一轮的决策优化。另, 每轮决策后, 当任一像素点及其邻域内的全部像素点标记与前一状态相比, 保

持不变时, 认为该像素点接受当前标记。

4) 直到每个模块都不能单独获得更优的结果, 即若 $|\Delta H_i| = |H(x^k) - H(x^{k+1})| < 0.001H(x^k)$, 则算法终止。否则 $k=k+1$ 。

3 实验结果与分析

实验原图采用 IntraTec 第一代 ImageIR 高端制冷型红外热成像系统采集的电路板工作时红外图像, 图像处理软件为 Matlab7.0。

实验一: 对相同工作状态下采集到的红外图像, 分别采用了传统的 Gibbs 采样法、SA 算法、ICM 算法和本文的改进算法进行分割处理, 将得到的实验结果进行对比。SA 算法分割时受温度因子的影响, 令温度递减因子 $T^{k+1}=0.95T^k$, α 取值均为 0.6。实验结果见图 3。

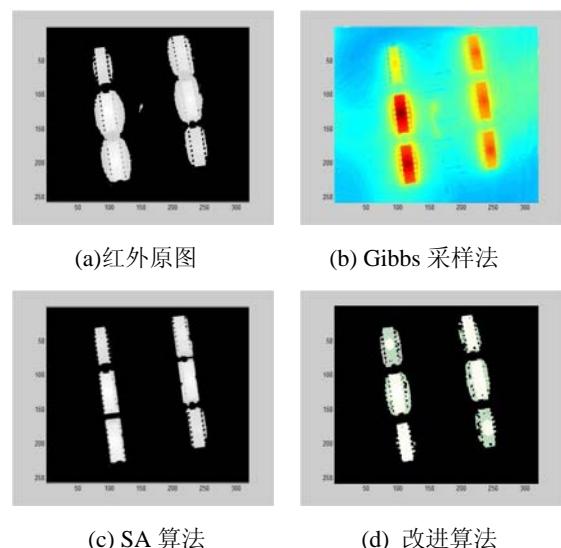


Fig.3 The segmentation results comparison chart of three different method

由表 1 各项分割指标参数对比可知:

1) SA 算法与 ICM 算法同属于本文改进算法的两个博弈模块, 从表 1 可以看出, SA 算法迭代次数约为改进算法的 2 倍, 但是计算速度慢为改进算法的 12 倍, 虽然两者收敛能量近似, 但是分割效果上, 改进算法明显优于 SA 算法, 对细节和边缘的处理新算法有更强的能力。

表 1 不同分割算法迭代对比

Table 1 The iterative comparison of three different algorithm

Algorithm	SA	ICM	Method combined with two-algorithm game
Iterations	691	81	397
Total iteration time/s	733.14	9.31	59.48
Global convergence energy	68862.41	733291.16	63316.71

2) 从表 1 的数据可见, ICM 算法在迭代次数与算法用时上低于改进算法, 可见其计算速度快, 执行效率高, 全局能量上 ICM 算法是改进算法的 10 倍之多, 但从分割效果上来讲, 由于是逐像素点更新图像标记, 容易陷落于局部收敛, 虽然在迭代次数上较少, 但可以明显地看出芯片的边缘分割效果较差, 辐射区域与发热区域无法被区分。本文改进算法在时间和分割精度上都有较大优势, 这是因为新算法结合博弈理论对迭代条件做了改进, 通过两种优化策略之间的博弈, 形成互补性较强的分割模块, 以微观的个体行为“自下而上”的寻找纳什均衡点来获得能量最小点, 从而大大减少了迭代次数和运算时间, 同时提高了系统的通用性和鲁棒性。

实验二: 在不同工作状态下采集电路板红外图像, 本实验分别取芯片工作 5 min、15 min、35 min 时的图像, 与传统的 SA 算法、ICM 算法和本文改进算

法进行对比, 参数取值同上, 引入错分率 (MRC) 的概念量化地评估和对比。实验结果如图 4 所示, 错分率对比见表 2。

从图 4 可以看出, 传统的 SA、ICM 算法处理后边缘细节模糊, 有漏分割现象, 由于芯片工作时产生的热辐射区域的严重干扰, 传统算法无法清晰定位芯片核心发热区域; 而本文改进算法能够很好地完成电路板红外图像的分割, 将芯片的核心发热区域提取出来, 达到将目标与背景分离的目的, 并且核心发热区域的边缘细节也很清晰, 对于不同状态下的芯片, 较完整地体现芯片的发热区域和发热位置。不管是在主观视觉上还是客观数据上, 都要优于传统算法。

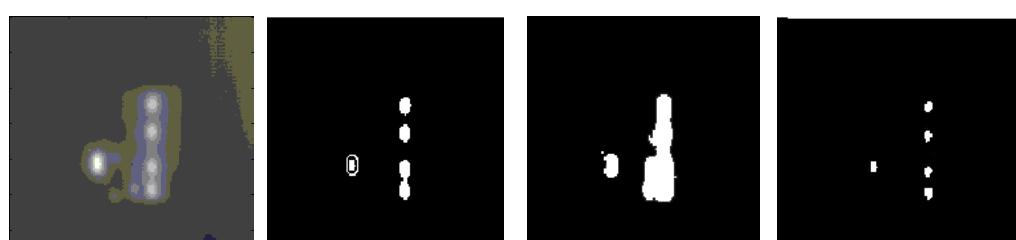
4 结束语

本文针对机载电子板卡的固有特征及现有分割

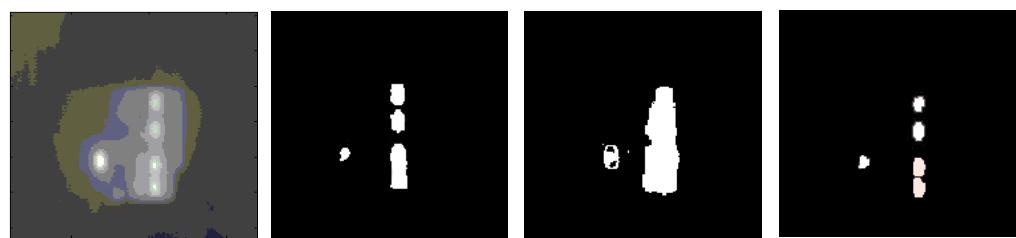
表 2 MMD 算法改进前后错分率对比

Table 2 MRC of the traditional and improved MMD algorithm

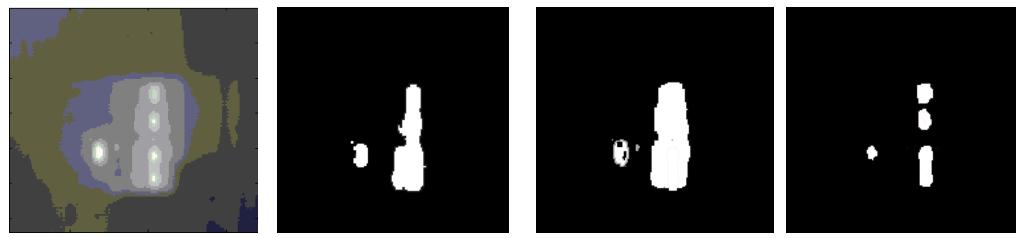
Time/min	5	15	35
SA	11.32	14.58	19.79
ICM	15.47	18.17	22.06
Method combined with two-algorithm game	1.72	4.33	7.24



(a) 芯片工作 5 min 时 SA、ICM、本文方法分割结果对比



(b) 芯片工作 15 min 时 SA、ICM、本文方法分割结果对比



(c) 芯片工作 35 min 时 SA、ICM、本文方法分割结果对比

图 4 芯片不同状态下传统 3 种算法分割效果对比

Fig.4 The segmentation results comparison in different chip working conditions

算法的缺陷，给出了一种电路板红外图像分割的新思路，在传统的 OTSU 算法分割基础上，建立了基于 SA 算法和 ICM 算法两模块博弈的 MRF 红外图像分割算法。新方法既避免了单独使用 SA 或 ICM 算法时因电路板芯片辐射区域带来干扰引起的过分割，其次，是将博弈理论引入到图像分割中，建立了基于两方法博弈的双向图像分割框架，通过信息共享进而改善分割精度和提高运算效率，实验表明，该算法具有很高的可行性和鲁棒性，解决了电路板红外图像分割的难题，并且能够很好地保护芯片的边缘信息，准确定位核心发热位置。

参考文献：

- [1] 宫明文, 李云霞, 蒙文, 等. 浅析国内基于红外技术的电路板故障检测方法[J]. 红外, 2012, 33(7): 6-10.
- [2] 赵建川, 王弟男, 陈长青, 等. 红外激光主动成像和识别[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 795-802.
- [3] 彭智浩, 杨风暴, 王志社, 等. 基于数学形态学和自动区域生长的红外目标提取[J]. 红外技术, 2014, 36(1): 47-52.
- [4] 李旭, 赵文杰, 杨凯达. 基于小目标预提取的 OTSU 分割方法[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 492-496.
- [5] Markov A A. Mosaic models for image analysis and synthesis[D]. Maryland: University of Maryland, College Park, 1979.
- [6] Geman S, Geman D. Stochastic Relaxation, Gibbs distribution, and the Bayesian restoration of image[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, PAMI-6(6): 721-741.
- [7] 刘爱平, 付琨, 尤红建, 等. 基于 MAR-MRF 的 SAR 图像分割方法 [J]. 电子与信息学报, 2009(11): 2556-2562.
- [8] 徐胜军, 韩九强, 刘光辉. 基于马尔可夫随机场的图像分割方法综述[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2576-2582.
- [9] 姚婷婷, 谢昭. 多层次 MRF 重标记及映射法则下的图像分割[J]. 自动化学报, 2013, 39(10): 1581-1593.
- [10] 李旭超, 朱善安. 图像分割中的马尔可夫随机场方法综述[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(5): 789-798.
- [11] 胡钦瑞, 肖国强. 基于粗糙集和 MRF 的彩色图像分割方法[J]. 西南师范大学学报, 2014, 39(4): 113-119.
- [12] 段林珊, 刘培玉, 谢方方. 基于模拟退火的样本加权 FCM 算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(6): 2004-2008.
- [13] Ibragimov B, Likar B, Pernu F, et al. A Game-theoretic framework for landmark-based image segmentation[J]. IEEE Transaction on Medical Imaging, 2012, 31(9): 1761-1776.

全国第十五届红外加热暨红外医学发展研讨会征文通知

由中国光学学会红外与光电器件专业委员会、中国光学光电子行业协会红外分会、国家红外及工业电热产品质量监督检验中心、中国机械工程学会工业炉分会、锦州市光学学会、云南省光学学会、中国电子学会量子电子学与光电子学分会、中国电工技术学会电热专业委员会联合主办，国家红外及工业电热产品质量监督检验中心、福建省中医药研究院承办，《红外技术》编辑部、《工业加热》编辑部等协办的全国第十五届红外加热暨红外医学发展研讨会，定于 2015 年 10 月在福建省福州市召开。

本届会议主要反映与交流近年来，红外加热技术及红外医学领域的新成果和新进展。会议重视学术交流的质量与成效，扩展各学科及技术领域之间的信息交流，最大限度地推动红外加热与红外医学技术应用及产业化。为此，在开展正常学术交流的同时，本届会议将增加相关的行业信息交流与新产品展示；并就广大企业普遍关注的专业技术问题，邀请国内红外光电领域的知名专家、学者到会做专题技术报告。热诚欢迎从事红外加热与红外医学研究及工程应用的科研人员、医疗专家踊跃投稿并参会！大会学术委员会届时将评选会议优秀论文，并推荐到中文核心期刊《红外技术》和《工业加热》期刊发表。

一、应征论文范围

- 1. 红外加热与红外医疗技术在国民经济中地位、作用及发展前景的综述、评论；
- 2. 红外辐射与物质、人体相互作用，红外加热及红外医疗理论与机理的研究；
- 3. 红外加热元件、红外辐射涂料的新成果、新工艺及相关技术研究；
- 4. 各种红外加热装置的优化设计与制造及应用实例剖析；
- 5. 红外加热检测技术、物质的红外光谱及相关技术研究；
- 6. 红外加热技术在节能减排方面的研究成果；
- 7. 红外加热在生物学与医学中的应用等；
- 8. 红外医学新仪器、新材料、新技术、新成果及国内外发展动向；
- 9. 红外医学的临床理论研究，临床应用研究；
- 10. 红外加热技术在建筑供暖领域的应用研究；
- 11. 红外加热技术与红外保健产品在日常生活领域的应用研究；
- 12. 相关的红外激光、太赫兹、微波、毫米波研究与应用。

二、应征论文作者请在 2015 年 9 月 20 日前，将论文全文的电子文档发送到 E-mail：1171288057@qq.com 或 zengyu18@sina.com；或寄到：国家红外及工业电热产品质量监督检验中心（邮政编码：430048）曾宇教授收。并请作者注明详细通讯地址、工作单位及职务、职称和邮政编码。

三、经审稿录用的论文及论文摘要集，将由《红外技术》编辑部、中国学术期刊（光盘版）电子杂志社编辑出版。

四、会议筹备组的通信地址：武汉市东西湖区金银湖东二路 5 号，国家红外及工业电热产品质量监督检验中心（邮政编码：430048）

联系人：曾宇，吴迪 电话：027-68853723, 027-85808990

传真：027-85795691 E-mail: 1171288057@qq.com、zengyu18@sina.com。