

DOI: 10.3901/JME.2013.22.034

# 隐马尔可夫树模型在带钢表面缺陷 在线检测中的应用\*

徐科 宋敏 杨朝霖 周鹏

(北京科技大学高效轧制国家工程研究中心 北京 100083)

**摘要:** 通过图像分割算法寻找由缺陷组成的可疑区域是热轧带钢表面缺陷在线检测与识别的关键。将热轧带钢表面图像分为“背景”和“缺陷”两大类,采用隐马尔可夫树(Hidden Markov tree, HMT)模型分别建模并实现多尺度缺陷分割。将不同类别的缺陷用同一个“缺陷模型”来表示,可以降低算法复杂度。HMT模型对带钢表面常见缺陷的分割正确率达到94.4%,分割错误率为18.8%。针对HMT模型得到的细尺度分割结果中分割错误率较高问题,引入基于环境的多尺度融合方法(Context-adaptive hidden Markov tree, CAHMT),将不同尺度的分割结果融合,大幅降低细尺度分割的分割错误率,达到3.7%。

**关键词:** 隐马尔可夫树模型 图像分割 热轧带钢 表面检测

中图分类号: TP391

## Application of Hidden Markov Tree Model to On-line Detection of Surface Defects for Steel Strips

XU Ke SONG Min YANG Chaolin ZHOU Peng

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology,  
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract:** Finding suspicious areas with algorithms of image segmentation is essential to on-line detection and recognition of surface defects for hot-rolled steel strips. Surface images of steel strips are divided into two categories: “background” and “defect”, and the two categories are modeled by hidden Markov tree(HMT) respectively and are detected at different scales. Detecting various types of defects by a same “defect” model could greatly reduce the algorithm complexity. The detection rate of common steel strip defects by hidden Markov tree model is 94.4% and the false rate is 18.8%. To reduce the steel strip’s defects segmentation false rate at finer scales, the context-adaptive hidden Markov tree model(CAHMT) is introduced and used to fuse the raw segmentations of HMT model at different scales. By the help of CAHMT, the false rate reaches 3.7%.

**Key words:** Hidden Markov tree model Image segmentation Hot-rolled steel strip Surface inspection

## 0 前言

基于机器视觉和图像处理的带钢表面缺陷检测系统是近几年新兴的技术<sup>[1]</sup>。现有的检测系统直接对获取的带钢图像提取特征并分类,由于带钢表面缺陷种类多样、纹理复杂,对所有缺陷精确分类的算法复杂度会较高。带钢生产节奏快,图像数据

量特别大,精确的缺陷检测分类算法往往很难满足系统实时性的要求。在海量的带钢图像中,真正需要精确分类的可疑区域只占少部分,大部分都是相对单一的背景图像。如果能用相对简单的方法寻找原始图像中的可疑区域,只将可疑区域传输给特征提取和分类的算法,就可以提高算法效率,满足实时性的要求。

图1是某钢厂热轧带钢表面缺陷检测与识别流程<sup>[2]</sup>,其中的图像分割步骤是从摄像机采集到的带钢表面图像分割出可疑区域,保存在计算机缓存中,以便进一步处理。图像分割步骤的准确性是缺陷检

\* 国家科技支撑计划课题(2012BAB19B06)、中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-09-027B)资助项目。20130131收到初稿,20130628收到修改稿

测与识别流程的关键,也就是要尽可能把所有的缺陷区域都找出来,以便避免缺陷的漏识;但同时又不能找出太多的伪缺陷,以便减少可疑区域的数量,从而减轻后续步骤的运算量。

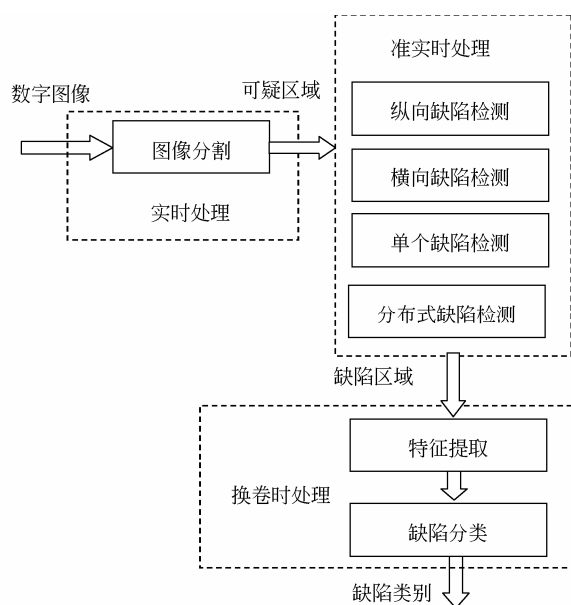


图1 热轧带钢表面缺陷检测与识别流程

本文采用小波域隐马尔可夫树(Hidden Markov tree, HMT)模型进行带钢表面图像分割,从而寻找图像中的缺陷可疑区域。小波变换具有很多优良的性质,如压缩性、持续性、局部性等<sup>[3]</sup>,这些性质都为小波域建模提供了良好的基础。HMT模型是一种多尺度的小波域建模方法,充分利用了小波变换的性质以及小波变换的四叉树结构。HMT模型中通过高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)为同一尺度内的小波系数分布建模,用小波系数四叉树结构为尺度间的系数相关性建模,是一种高效准确的建模方法。HMT模型可以得到图像在不同尺度的初始分割结果,基于环境的多尺度融合方法(Context-adaptive hidden Markov tree, CAHMT)模型将不同尺度的初始分割融合,可以降低分割结果的分割错误率。

## 1 HMT 模型

HMT模型是莱斯大学CROUSE等<sup>[4]</sup>将小波理论与隐马尔可夫模型联系起来提出的。HMT模型开辟了多尺度变换域统计信号处理这一新的研究领域,被广泛应用于纹理图像的分割<sup>[5-6]</sup>和图像的去噪<sup>[7]</sup>。

HMT模型是在高斯混合模型的基础上,借助小波系数四叉树结构,对系数尺度间相关性建模的方

法。高斯混合模型对同一尺度小波系数的非高斯性建模,是HMT模型的重要组成部分。

### 1.1 GMM 模型

小波变换压缩性表明,图像的小波系数往往呈现稀疏分布,即同一尺度内只有少量的系数包含图像的绝大部分信息,因而取值较大,其余系数对应图像中的平缓区域,取值较小。因此,同一尺度内的小波系数概率密度分布不满足高斯分布,而是在零点位置更尖、在分布的两端呈现出明显拖尾的“尖峰重拖尾”分布,是典型的非高斯分布。图2a、2b分别是带钢背景图像、带钢夹杂缺陷图像及图像最精细尺度小波系数的直方图分布,可以近似模拟小波系数的概率密度分布。从图2可以看出,不同类型图像的小波系数分布差异很大,但都具有非高斯性。通过对图像的小波系数分布建模,可以表征同种类型图像的主要特征。

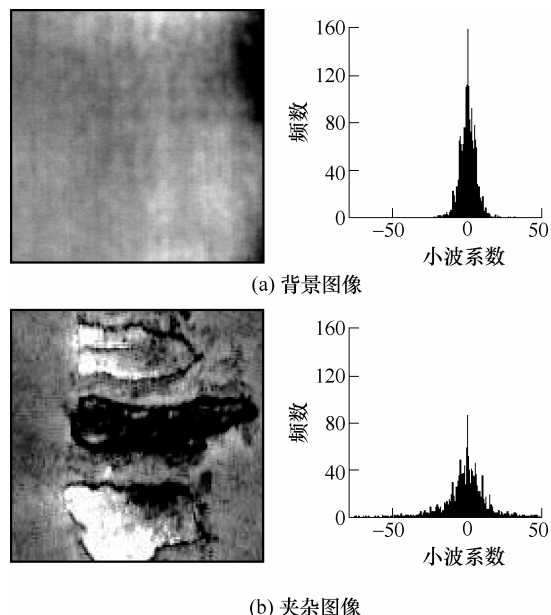


图2 带钢表面图像及尺度为1时LH方向小波系数分布

GMM模型是对非高斯分布建模的经典方法。GMM模型通过两个或多个高斯分布加权累加来模拟非高斯分布,每一个用于累加的高斯分布称为模型的一个“状态”,更一般地讲,一个包含 $M$ 状态的随机变量 $W$ 的模型包含以下内容<sup>[8]</sup>。

- (1) 离散状态 $S$ 的概率质量函数 $p_S(S)$ 。
- (2) 高斯概率密度函数 $f_{W|S}(w|S=s)$ 。

式中, $S=1,2,\dots,M$ ,本文采用2状态的高斯混合模型,因此 $M$ 取值为2。

### 1.2 尺度间系数相关性建模

GMM模型假设同一尺度内的小波系数相互独立,忽视了小波系数尺度间的相关性。小波变换的持续性和聚集性说明,如果某个小波系数相对较大,

那么与其相邻的小波系数(同一尺度内以及相邻尺度)也会较大。隐马尔可夫树模型借助小波变换的四叉树结构,为尺度间小波系数的相关性建模,增加了模型的准确性。

图 3 是图像经小波变换后,得到的三个方向小波系数关系图,从中可以看出每个方向上的小波系数分别构成一棵四叉树。四叉树结构如图 4 所示,每个小波系数一般都有四个子节点和一个父节点。小波变换的持续性说明,如果父节点是大(小)状态,其四个子节点也很可能是大(小)状态;聚集性说明,同一节点的四个子节点,状态相同的概率也较大。

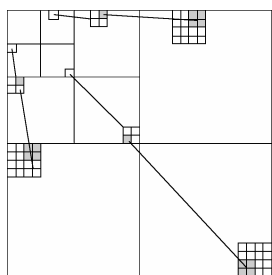


图 3 三个子带小波系数间的父子关系示意图

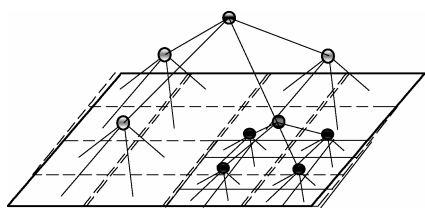


图 4 单一子带上小波系数四叉树示意图

HMT 模型假设图像小波系数在不同尺度间相关性满足马尔可夫性,但是由于小波系数在尺度间呈现出指数级衰减<sup>[9]</sup>,无法直接对小波系数建模,因此借助于高斯混合模型的“状态”。一个 HMT 模型包含以下参数。

- (1) 节点  $s_i$  的状态分布概率  $p_{s_i}(m)$ , 其中  $m=1,2,\dots,M$ 。
- (2) 尺度间状态转移矩阵  $\epsilon_{i,\rho(i)}^{mn}$ ,  $\epsilon_{i,\rho(i)}^{mn} = p_{S_i|S_{\rho(i)}}(m|S_{\rho(i)}=n)$ , 其中,  $\rho(i)$  表示节点  $i$  的父节点。
- (3)  $\mu_{i,m}$  和  $\delta_{i,m}^2$  为节点  $i$  在状态为  $m$  时的均值和方差。

将这些参数用一个模型参数矩阵表示如下

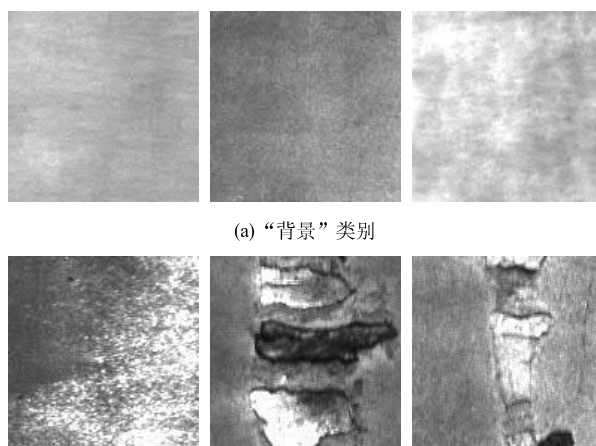
$$\theta_{HMT} = \{p_{s_i}(m), \epsilon_{i,\rho(i)}^{mn}, \mu_{i,m}, \delta_{i,m}^2 | i=1,2,\dots,P; m,n=S,L\}$$

## 2 HMT 模型分割带钢缺陷

在带钢图像中,大部分区域是相对单一的背景,而缺陷区域包含较多的突起和边缘。针对这种

情况,本文提出将带钢图像分为“背景”和“缺陷”两种类别分别建模,将不同类别的缺陷图像共用一个模型,可以降低算法复杂度。这种两个模型的建模方法可以找到带钢图像中的缺陷可疑区域,精确的缺陷分类还需要借助更复杂的特征提取和分类方法。HMT 模型是一种多尺度的建模方法,使用其分割图像可以得到不同尺度的初始分割结果。

HMT 模型参数估计的目标是使模型能最大程度的表征训练样本的特征,可以采用最大似然概率原则,本文采用经典的 EM 迭代算法。本文选用的训练样本如图 5 所示,“背景”类别样本的标准是尽量平整,能表征带钢在不同光照强度下及不同钢种的背景特征,“缺陷”类型样本的标准是表面复杂,能代表常见的带钢缺陷特征。



(a) “背景”类别

(b) “缺陷”类别

图 5 训练样本

图 6 是按照“背景”和“缺陷”分别构建 HMT 模型后,对“背景”、“辊印”、“裂纹”、“划伤”、“夹杂”、“麻点”等图像在不同尺度的分割效果,图中黑色区域即分割出的缺陷可疑区域。缺陷识别采用 HMT 模型的“前向后向算法”。

从图 6 分割结果可以看出,本文将带钢图像划分为“背景”和“缺陷”两种类别,分别进行 HMT 建模并分割的方法是可行的。粗尺度的分割效果较好,能够较准确地找到图像中缺陷的位置,错误分割的情况很少,这是由于粗尺度上的小波系数在原始图像中对应的图像块较大,包含的图像信息更多,因而分割效果更具鲁棒性。不足之处在于,粗尺度分割效果的锯齿明显,在描述缺陷具体形状方面,明显不如较细尺度。较细尺度的分割效果中,孤立点和误分情况很多,但是能描述出缺陷相对比较清晰的边缘轮廓。

图 7 是将 HMT 模型与 GMM 模型对带钢夹杂缺陷图像分割效果的对比。从图 7 可以看出,由于 HMT 模型考虑了图像小波系数尺度间的相关性,能更精确地分割出图像中的缺陷。

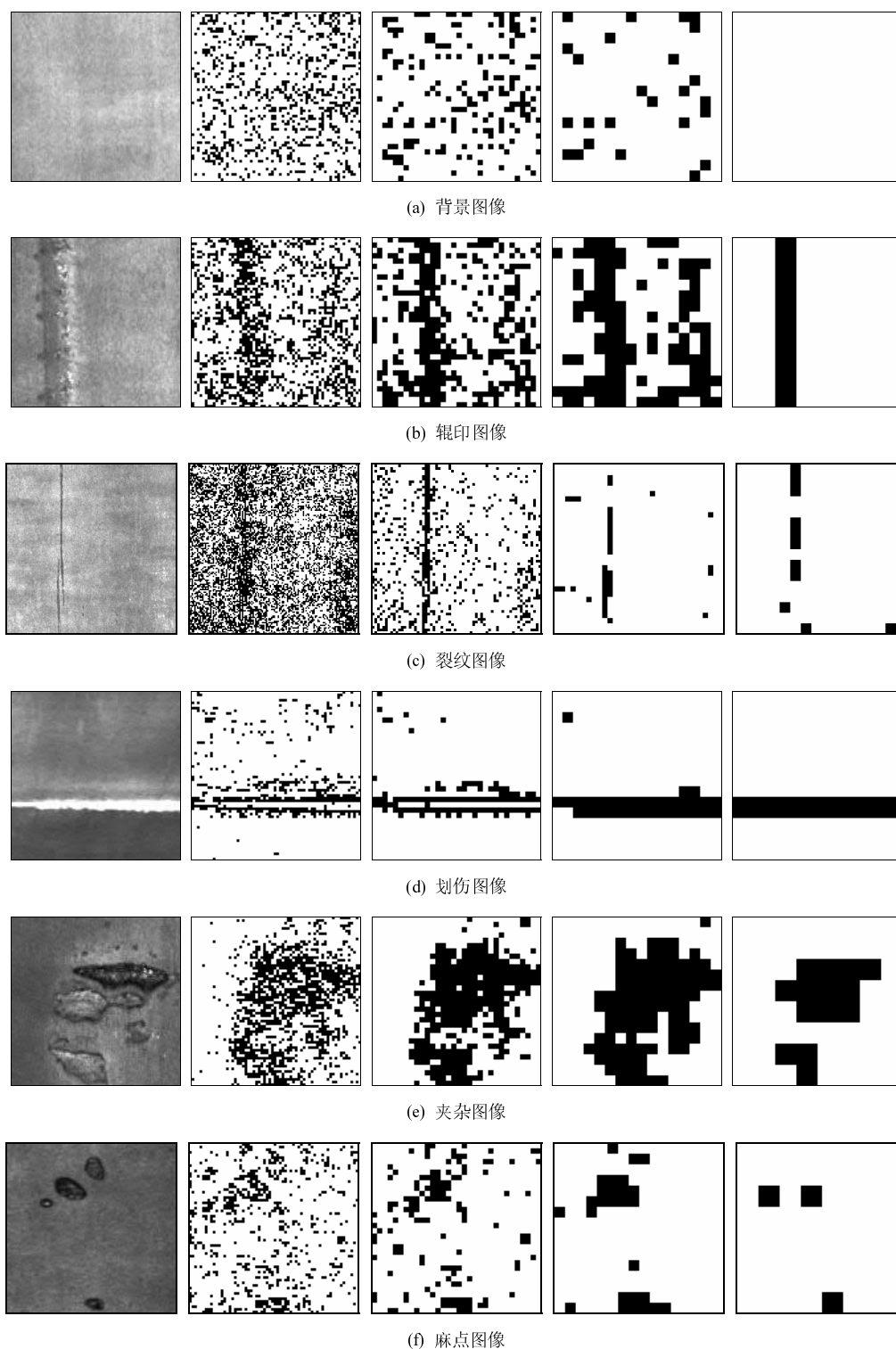


图 6 带钢表面图像及尺度分别为 1、2、3、4 时的分割效果(从左到右)

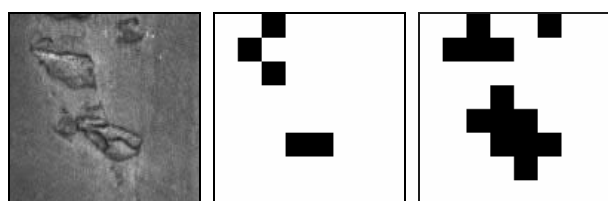


图 7 夹杂缺陷在尺度为 4 时的分割效果

为了进一步验证 HMT 模型对带钢表面缺陷分割的效果, 本文从某钢厂表面检测系统获取的带钢图像中, 截取了带钢不同缺陷的图像构建了待测样本库。样本库中图像大小均为 128 像素×128 像素, 图像缺陷类别分布如表 1 所示。

本文中, 分割正确率

$$A = \frac{a_1}{a_0}$$

式中,  $a_1$  表示待测样本集中被正确分割的缺陷图像数,  $a_0$  表示待测样本集中缺陷图像总数。

表 1 待测样本集图像缺陷分布

类别	夹杂	裂纹	横向 划伤	纵向 划伤	辊印	麻点	总计
数量	45	49	41	43	36	42	256

分割错误率

$$B = \frac{b_1}{b_0}$$

式中,  $b_1$  表示待测样本集中被分割成缺陷的背景图像数,  $b_0$  表示待测样本集中背景图像总数。

用训练好的“背景”和“缺陷”类别的 HMT 模型对带钢待测样本集中的 256 张缺陷图像进行识别, 统计不同缺陷的分割正确率与分割错误率如表 2、3 所示。

表 2 HMT 模型分割正确率 %

尺度	类别						总计
	夹杂	裂纹	横向 划伤	纵向 划伤	辊印	麻点	
1	97.8	69.4	97.6	97.4	100	76.2	86.3
2	97.8	85.7	97.6	96.5	100	95.2	94.4
3	97.8	83.7	97.6	96.5	100	97.6	94.4
4	93.3	63.3	76.2	75.4	100	80.1	80.2

表 3 HMT 模型缺陷分割错误率 %

尺度	类别						总计
	夹杂	裂纹	横向 划伤	纵向 划伤	辊印	麻点	
1	88.9	100	83.3	84.6	100	45.2	84.8
2	84.4	79.6	57.1	56.3	100	30.9	69.6
3	28.9	12.2	11.9	10.8	22.2	16.7	18.8
4	4.4	2.1	4.8	5.0	0	2.4	3.14

从表 2 可以看出, 应用 HMT 模型对带钢缺陷图像进行分割, 在尺度 2 和尺度 3 的分割正确率最高, 达到 94.4%, 其中划伤、辊印、夹杂缺陷由于纹理明显, 分割正确率达到 97% 以上, 辊印分割正确率甚至达到 100%。裂纹的分割正确率相对较低, 是因为裂纹形状细长, 在较粗的尺度不容易与背景区分。

从表 3 可以看出, 不同尺度的分割错误率差异很大。细尺度的分割错误率很高, 尺度 1 的分割错误率为 84.8%, 随着尺度的上升, 分割错误率大幅降低, 尺度 4 的分割错误率只有 3.14%, 达到了很好的效果。细尺度的缺陷分割错误率高是由于细尺度的小波系数对应的图像块较小, 包含的图像局部信息少。

### 3 多尺度分割结果融合

在基于 HMT 模型的带钢缺陷分割中, 粗尺度的分割效果明显好于较细尺度的分割效果, 但锯齿明显。细尺度分割结果虽然包含很多孤立点和误分, 却能够很好地反映缺陷的精细轮廓。如果能将 HMT 在不同尺度上的分割结果融合, 在获取带钢缺陷主体轮廓的前提下, 有效保留住局部边缘细节信息, 就可以得到更理想的分割效果。近年来, 许多学者在多尺度分割结果融合方面提出了很多创新性的方法, 如 HMTseg 分割<sup>[9]</sup>方法和 CAHMT 多尺度融合方法<sup>[10]</sup>。

本文采用基于环境的自适应融合方法, 其基本思想是将各个数据块基于 HMT 模型的分类结果和各数据块周围邻域的结果相结合, 构成环境信息, 得到最终尺度的分割结果。CAHMT 模型多尺度融合的具体过程参见文献[10], 模型计算过程中, 很多细尺度上的数据块的分类, 在较粗的某一尺度上已经确定, 因此整体计算量远小于一般的多尺度融合算法。CAHMT 在考虑父节点的同时, 还引入了同一尺度内相关性的考虑。

CAHMT 模型主要是根据某个数据块及其邻域的初始分割结果来实现多尺度融合, 邻域可以选择 8 邻域或 4 邻域。本文通过试验对比了两种不同邻域分割效果, 图 8 显示了试验中夹杂缺陷用 CAHMT 模型将初始分割结果融合后的效果。

通过图 8 可以得到如下结论。

(1) CAHMT 模型可以有效地将 HMT 模型得到的初始分割结果融合, 在保证缺陷主体轮廓的基础上, 局部细节也可以很清晰。尤其是尺度 1 的融合结果, 已经与原图中的缺陷很接近。

(2) 8 邻域的融合结果略好于 4 邻域的融合结果。相比于 4 邻域, 8 邻域的计算量会比较大, 因此使用 4 邻域就可以在较少的计算基础上, 得到较好的分割效果。

(3) 多尺度融合之后的分割结果, 不仅能准确地描述缺陷的具体位置, 而且能准确描述缺陷的形状, 可以为后续精确的缺陷识别提供重要信息。

用 CAHMT 模型的多尺度融合算法处理待测样本集中的 256 张图像, 可以得出多尺度融合后不同尺度分割正确率与误分率, 如表 4、5 所示。

从表 4、5 可以看出, CAHMT 模型在不同尺度上的分割正确率与 HMT 模型保持相同, 但是分割错误率大幅降低, 即使在尺度 1 整体分割错误率也

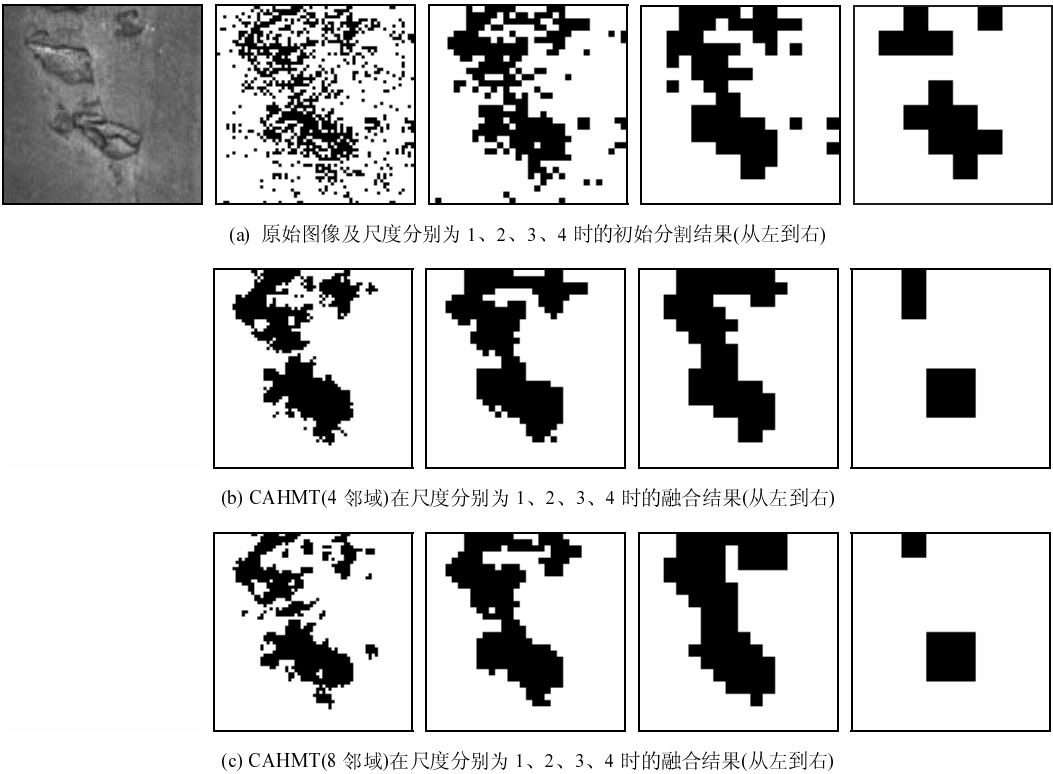


图 8 夹杂缺陷的初始分割结果及 CAHMT 融合结果

表 4 CAHMT 模型分割正确率 %

尺度	类别						总计
	夹杂	裂纹	横向划伤	纵向划伤	辊印	麻点	
1	97.8	69.4	97.6	96.7	100	76.2	86.3
2	97.8	85.7	97.6	96.7	100	95.2	94.4
3	97.8	83.7	97.6	96.7	100	97.6	94.4
4	93.3	63.3	76.2	75.4	100	80.9	80.2

表 5 CAHMT 模型缺陷分割错误率 %

尺度	类别						总计
	夹杂	裂纹	横向划伤	纵向划伤	辊印	麻点	
1	24.4	20.4	9.5	9.5	38.9	9.5	18.9
2	6.7	4.1	7.1	7.1	5.6	2.4	5.2
3	4.4	2.1	4.8	5.6	5.6	2.4	3.7
4	2.2	0	2.4	0	0	0	1.1

降低到了 20%以下。这是由于 CAHMT 模型是用粗尺度的分割结果指导细尺度分割结果，可以减少细尺度的孤立点，提高细尺度的分割精度。

4 结论

(1) 本文将带钢图像分为“背景”和“缺陷”两大类，并用 HMT 模型建模，实现对带钢缺陷的“粗过滤”。通过对待测样本库的分析统计发现，

HMT 模型在尺度 3 的分割正确率达到 94.4%，分割错误率为 18.8%。

(2) CAHMT 模型将 HMT 模型得到的不同尺度初始分割结果融合，大幅降低了较细尺度的分割错误率，多尺度融合之后，尺度 3 的分割错误率降为 3.7%。

(3) 本文中使用的 HMT 模型主要是为相邻尺度间小波系数的相关性建模，没有考虑同一尺度内小波系数的相关性，在今后的研究工作中，可以将同一尺度相关性的建模引入到带钢表面图像 HMT 模型中，进一步增加模型的准确性。

参 考 文 献

[1] 徐科, 周茂贵, 徐金梧, 等. 基于线型激光的热轧带钢表面在线检测系统[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 77-79.  
XU Ke, ZHOU Maogui, XU Jinwu, et al. On-line surface inspection system for hot-rolled strips based on liner laser[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(1): 77-79.

[2] 徐科, 杨朝霖, 周鹏. 热轧带钢表面缺陷在线检测的方法与工业应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 111-114.  
XU Ke, YANG Chaolin, ZHOU Peng. Technology of on-line surface inspection for hot-rolled steel strips and its industrial application[J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2009, 45(4): 111-114.
- [3] JUSTIN K R, HYEOKHO C, BARANIUK R G. Bayesian tree-structured image modeling using wavelet-domain hidden markov models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(7): 1056-1068.
- [4] COURSE M S, NOWAK R D. Wavelet-based statistical signal processing using hidden markov models[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1998, 46(4): 886-902.
- [5] 李晓峰, 徐军, 罗积军, 等. 基于 Contourlet 域 HMT-3S 模型的激光主动成像图像分割[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 531-536.
- LI Xiaofeng, XU Jun, LUO Jijun, et al. Laser active image segmentation based on Contourlet-domain hidden Markov trees-3S model[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 531-536.
- [6] 焦李成, 孙强. 多尺度变换域图像的感知与识别: 进展与展望[J]. 计算机学报, 2006, 29(2): 177-193.
- JIAO Licheng, SUN Qiang. Advances and perspective on image perception and recognition in multiscale transform domains[J]. Chinese Journal of Computers, 2006, 29(2): 177-193.
- [7] SURESH R M. Image denoising using improved semantic approximation algorithm in wavelet domain Hidden Markov model[C]// Signal and Image Processing, 2010: 467-470.
- [8] PESQUET J C, KRIM H, HAMMAN E. Bayesian approach to best basis selection[C]//IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Process, 1996: 2634-2637.
- [9] CHOI H, BARANIUK R G. Multiscale image segmentation using wavelet-domain hidden markov models[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(9): 1309-1321.
- [10] 宋锦萍, 侯玉华, 杨晓艺, 等. 基于小波域多状态隐马尔科夫树模型的自适应文本图像分割算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 118-122.
- SONG Jinping, HOU Yuhua, YANG Xiaoyi, et al. Context-adapted document segmentation based on multi-state hidden markov tree model in the wavelet domain[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 35(1): 118-122.
- 
- 作者简介: 徐科(通信作者), 男, 1972 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为表面检测、图像处理、机器视觉和智能系统。  
E-mail: xuke@ustb.edu.cn
- 宋敏, 男, 1987 年出生。主要研究方向为表面检测、图像处理。  
E-mail: smzfn@foxmail.com