

# 基于网格 IC 图象的多模板快速匹配算法

韦燕凤 彭思龙

(中国科学院自动化研究所集成电路工程中心, 北京 100080)

**摘要** 为了加快 IC 图象中多个相似单元模板的匹配与定位, 提出了一种基于网格 IC 图象的多模板快速匹配算法. 该算法首先抽取网格图象和模板的二值拓扑结构, 以构成图象和模板的粗分辨率表示; 然后, 在拓扑结构表示上通过综合来构造多模板的二叉树模型; 接着, 在二值拓扑结构表示上运用树模型进行搜索, 在搜索过程中应用二叉决策树识别多个模板; 最后, 将粗匹配得到的目标, 在原图象对应位置的小邻域内进行二次匹配, 以确定模板和对应实例的位置. 应用此算法对 IC 图象库进行测试, 结果表明, 所提出的多模板二叉决策树搜索算法与逐个模板匹配的方法相比, 速度和效率均有较大幅度的提高.

**关键词** 计算机图象处理(520·6040) 多模板匹配 拓扑结构抽取 综合 二叉决策树

**中图分类号**: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)02-0193-05

## A Fast Multiple Template Matching Algorithm Based on Grid Structure IC Images

WEI Yan-Feng, PENG Si-Long

(National ASIC Design Engineering Center, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract** In order to accelerate the matching and locating speed of multiple circuit cell templates which are all similar to each other in integrate circuit (IC) micro images, a fast multiple template matching algorithm based on the uniform grid structure of IC image is proposed. First, the binary topological structure of the original image and multiple templates is decimated base on their uniform grid structure, and the decimated binary topological structure is the coarse resolution representation of the original image and templates. Second, a synthesis strategy is designed to construct a binary tree model of multiple templates' topological structure. Third, the tree model is applied to search in the coarse resolution images, and the binary tree decision is used to recognize multiple templates during the search. Finally, the matched targets in the coarse resolution image are guided to a small region of the original image. The corresponding original template is marched on that region for the true target and exact position. This algorithm is tested with IC micro-images database. It shows that the proposed multiple templates binary tree model and the decimation of topological structure can highly increase the matching speed and the efficiency of the cells matching and location system. Compare to searching multiple templates sequentially on the original images, the speed-up factor of binary tree model is very high.

**Keywords** Computer image processing, Multiple template matching, Decimation of topological structure, Synthesis, Binary tree decision

## 0 引言

在一般的模式匹配中, 人们经常遇到在一幅图象中, 匹配  $k$  个模板的情形. 如果  $k$  个模板之间没有任何相关性, 那么将难以找到比逐个的模板匹配更

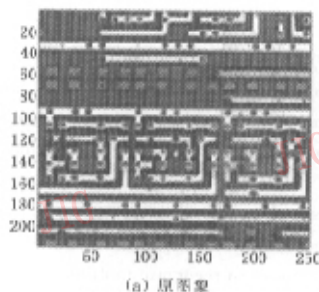
好的方法. 因此多模板匹配方法总是基于已经知道模板之间具有局部相似性, 然后在算法中, 利用这些相似性加速匹配的进程. 为实现多模板的快速搜索, 很多研究人员提出了各种多模板的匹配方法. Olson 等对同种武器的多个离散化三维视角模型, 构造边缘位置和方向的多模型树结构来减少匹配时间<sup>[1]</sup>.

Gavrila 将平面目标的旋转和缩放当作多模板来处理,建立多模板分级的树结构,通过从粗到细的匹配方法来删减图象空间和模板空间,获得较高的加速因子<sup>[2]</sup>.这些多模板匹配算法都是针对比较具体的应用而提出的,以提高匹配的速度.

在集成电路反向工程中,单元的匹配和定位是在整个版图图象上找出几十种,甚至上百种电路单元的所有实例及其位置.其中有些单元不仅大小相当,而且具有较高的局部相似性,为了提高多个相似单元模板的匹配速度,减少多个相似模板的误识别现象,对具有网格结构的 IC(Integrate circuit)图象提出了多个相似模板的快速匹配算法.该算法在实现快速搜索的同时,确保了识别出与实例对应的最好模板,避免了相似模板实例间的误识现象.

## 1 二值拓扑结构的抽取

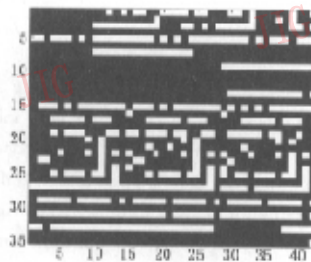
网格结构的集成电路图象分布着水平线、竖直线和孔等基元目标,受骨架技术<sup>[3]</sup>和抽取方法<sup>[4]</sup>的



(a) 原景象

启发,拟在二值化图象上将基元目标表示成单像素宽度的骨架,即抽取二值化目标的拓扑结构.例如对于一条线目标,抽取其中心线(单像素宽)来表示该线,而对于孔只用一个像素表示,将这样的骨架信息抽取出来,构成其拓扑结构表示,从而减少了图象表示的数据量.

关于拓扑结构的抽取算法,它主要基于二值形态学开运算滤波,即首先,将竖直线全部过滤掉,即将图象往垂直方向投影,投影中心即为水平线的中心位置,对属于布线位置但没有实际布线的地方,或者因不够长而被滤掉的那些水平线的位置,均需进行插值处理,同时,为了体现目标的拓扑结构,应在确定了每相邻的线位置中点插入一个背景信息的位置,这样便获得了垂直抽取的位置向量;其次,将水平线全部过滤掉,即将图象往水平方向投影,并经过以上类似的处理,获得水平抽取的位置向量;获得两个方向抽取的位置向量后,就可以方便地抽取拓扑结构图象.详细介绍见文献[5],图1所示为原图象和抽取的二值拓扑结构图象.



(b) 二值拓扑结构图象

图1 拓扑结构抽取

## 2 多模板的综合与识别

对原图象抽取其二值化拓扑结构之后,图象数据量已经大大减少,其缩小的比例取决于 IC 图象走线的线宽和线距<sup>[5]</sup>,这样的拓扑结构实际上是二值图象的粗分辨率表示.为进一步提高多模板匹配的速度和效率,构造多模板的二叉树模型,并在二值拓扑图象上匹配时,采用二叉决策树来进行搜索.

### 2.1 综合和构造多模板的二叉树

对多个模板分别抽取其拓扑结构,然后在拓扑结构表示上进行综合.本文的综合是指寻找多个相似模板的共同目标点,其在二值图象上可以通过与运算来实现.模板的大小可以不一样,但其差异应足

够小.综合将在所有模板中的最小高度和最小宽度范围内进行,模板之间通过平移来确定最佳相对位置,称为模板的规范化处理.最佳相对位置就是两者重合目标像素最多的位置.

在综合过程中,建立如图2所示的多模板二叉树模型.除根节点外,二叉树的每一层至少包含一个叶节点,节点上分布着各个模板.显然,对这样的树结构,由  $k$  个模板构造的二叉树包含  $k$  层.在各树叶上分配模板时从第  $k$  层开始,相应的综合也从第  $k$  层开始.设规范化后的两个二值模板分别为  $A$  和  $B$ ,对两者的综合用逻辑与运算来实现,综合结果  $S_{AB}$  为

$$S_{AB} = A \wedge B \quad (1)$$

式中,  $\wedge$  表示逻辑与运算.原则上,从第  $k$  层开始分配模板并进行综合,要求树的每一层综合得到的新

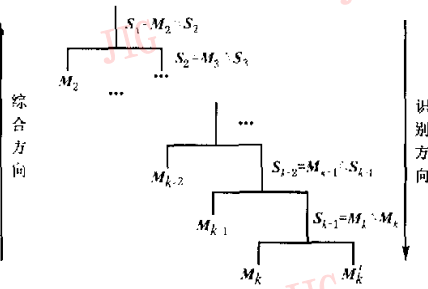


图 2 多模板二叉树模型

模板的目标像素要尽可能多,这项指标可通过下式定义的重合的目标像素分数  $f$  来衡量。

$$f = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A(i, j) \wedge B(i, j)) \quad (2)$$

模板的规范大小为  $m \times n$ ,  $f$  值越大,表示重合的目标像素越多。

构造二叉树时,计算多模板中两两之间的  $f$  值,构成多模板间的重合像素分数矩阵  $F$ ;选择重合像素分数最大的一对分配在第  $k$  层的叶节点上,该层的两个叶节点模板用  $M_k$  和  $M'_k$  表示。两者的综合结果作为上一层的枝节点模板,也称为该层的综合模板。若第  $j$  层的叶节点模板用  $M_j$  表示,第  $j$  层的综合模板用  $S_j$  表示,则  $k$  个模板的树模型综合过程表示如下

$$S_{k-1} = M_k \wedge M'_k \quad (3)$$

$$S_j = M_{j+1} \wedge S_{j+1}, \quad j = 1, \dots, k-2 \quad (4)$$

当产生第  $k-1$  层的综合模板  $S_{k-1}$  后,分别计算  $S_{k-1}$  和没有分配的各模板的重合目标像素分数( $f$  值),将产生最大  $f$  值的那个模板分配给该层的叶节点,然后用式(4)综合,形成上一层的综合模板。每一层都按同样的规则来选择模板和综合运算,直到获得第 1 层的综合模板(根节点模板)  $S_1$ ,它将作为匹配的母板。图 2 表示的就是  $k$  个模板的综合示意图和对应的二叉树模型。

为减少二叉树模型数据存储的冗余和更加方便快速搜索,将二叉树模型以如下方式存储:每个枝节点仅存储本节点模板出现,而其父节点模板不出现的那些目标像素集;叶节点除了存储本节点模板出现,而其父节点模板不出现的那些目标像素集之外,还要存储本节点模板的非目标像素集;根节点则存储根节点模板的目标像素集。

由于逻辑与的综合方法对模板间的相似性比较敏感,当模板的数目比较多或者模板组中包含多个

相似小组时,树模型的根节点模板的目标像素很少,这时综合就失去了意义。因此在综合过程中,若发现综合模板的目标像素较少时应停止综合,应建立多个树模型再分别综合,直到将所有的模板处理完毕,这个问题正在探讨和研究中。

### 2.2 二值匹配度量

由多模板综合方法构造得到的树模型,识别时只是用母板在平移空间进行遍历匹配,当匹配值达到阈值条件时,采用二叉决策树模型来识别对应的模板。由于综合模板的目标像素体现该分支下,所有模板共有的目标点集,因此母板与实例、各枝节点模板与实例的匹配度量采用单向匹配分数。若  $D$  表示母板或枝节点模板的目标点集,母板平移到当前位置下的窗口目标用阵列  $B$  表示,则从模板  $D$  到实例  $B$  的单向匹配分数  $s$  定义为

$$s(D, B) = \frac{1}{N(D)} \sum_{a \in D} B(a) \quad (5)$$

式中,  $N(D)$  表示点集  $D$  的基数(目标像素的个数)。

叶节点模板表示各模板的实际二值化,叶节点模板与窗口目标之间的匹配度量采用二值匹配度。若  $M$  表示叶节点模板,大小为  $m \times n$ ,窗口目标用  $B$  表示,则  $M$  和  $B$  之间的二值匹配度  $s$  为

$$s(M, B) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i, j) \vee B(i, j) \quad (6)$$

其中,  $\vee$  表示逻辑同或运算,二值匹配度是一种无方向度量,它表示两者完全匹配的像素总数占模板总像素的比例。

二值匹配度是值域在  $[0, 1]$  区间的一种相似性度量,可以证明,该度量满足类似于三角不等式的三角关系。设  $A, B, C$  分别为 3 个大小相同的二值图象,  $s(A, B) = t_1, s(A, C) = t_2$ , 则  $B, C$  之间的匹配度  $s(B, C)$  满足下式

$$s(B, C) \leq 1 - t_1 - t_2 + 2\min(t_1, t_2) \quad (7)$$

证明 如图 3 所示,用集合的大小来表示匹配度,将模板的所有像素点集的大小归一化为 1,图 3 中,面积为 1 的外方框表示模板像素点集的大小。根据匹配度的含义,  $t_1$  表示  $A$  和  $B$  交集  $X_{AB}$  的大小,  $t_2$

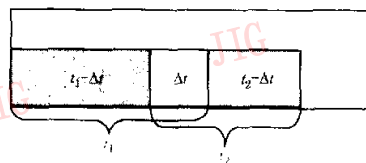


图 3 匹配度的三角关系示意图

表示  $A$  和  $C$  交集  $X_{Ac}$  的大小,  $\Delta t$  表示  $X_{Ab}$  和  $X_{Ac}$  交集的大小, 即  $A, B, C$  交集的大小. 由交集的含义,  $B$  和  $C$  的交集只可能落在图 3 中阴影以外的区域, 因此该交集的大小最大只能达到该区域的面积. 由此可知,  $B, C$  之间的匹配度  $s(B, C)$  不大于该区域的面积, 表示如下

$$s(B, C) \leq 1 - (t_1 - \Delta t) - (t_2 - \Delta t) = 1 - t_1 - t_2 + 2\Delta t$$

其中,  $\Delta t$  的范围为  $0 \leq \Delta t \leq \min(t_1, t_2)$ ,  $\Delta t$  的上下限分别表示  $X_{Ab}$  和  $X_{Ac}$  的不相交和包含关系, 因此  $s(B, C)$  满足下面的不等式

$$s(B, C) \leq 1 - t_1 - t_2 + 2\min(t_1, t_2)$$

### 2.3 多模板的搜索与识别

对于上面构造的多模板二叉树模型, 仅用母板在平移空间内搜索. 当从母板到窗口目标的单向匹配分数达到阈值条件时, 运用二叉决策树识别对应的模板(如果有的话). 在二叉决策树识别过程中, 从式(7)的匹配度三角关系可知, 当某一层叶节点模板与窗口目标的匹配度大于某个阈值  $\tau$  时, 可以判断更高层的叶节点模板与该窗口目标的匹配度必小于  $\tau$ . 其中  $\tau$  和模板之间的匹配度有关.

设某一模板  $M_i$  与当前窗口目标  $O$  的匹配度  $s(M_i, O) = t_1$ , 已知  $M_i$  与另一模板  $M_j$  的匹配度  $s(M_i, M_j) = t$ , 则  $s(M_j, O)$  满足式(7). 对于给定的模板,  $t$  不变, 在搜索过程中, 匹配度  $t_1$  是变化的, 当  $t_1 > \tau$  时, 式(7)的不等式变成

$$s(M_j, O) \leq 1 - t_1 + t \quad (8)$$

$t_1$  越大, 则  $s(M_j, O)$  越小. 当  $t_1$  增大到阈值  $\tau (t_1 = \tau)$  时, 恰好使不等式右边等于  $\tau (s(M_j, O) \leq \tau)$ , 即

$$t + (1 - \tau) = \tau \Rightarrow \tau = (t + 1)/2 \quad (9)$$

上式中, 若  $t$  表示当前叶节点模板与更高层各叶节点模板之间的最高匹配度, 则上式表明, 当  $s(M_i, O)$  高达  $(t + 1)/2$  时, 窗口目标  $O$  与更高层各叶节点模板之间的匹配度不可能更高. 因此在二叉决策树搜索中,  $(t + 1)/2$  就是模板  $M_i$  匹配的最优阈值, 树的每一层叶节点模板均可用式(9)通过离线计算的方式求出匹配的最优阈值.

为实现模板识别的快速性并保证最优, 运用二叉决策树识别多模板时, 对二叉树模型的左节点, 设高低两个匹配阈值. 高阈值为各模板的最优阈值(通过离线计算得到), 左节点的低阈值、根节点和右节点的阈值设为同一个值. 对平移空间搜索时, 首先计算树模型的根节点模板和窗口目标的单向匹配分数, 当匹配分数达到设定阈值时, 依据树模型的存贮

方式, 进行二叉决策树搜索. 即, 沿二叉决策树对两个分支累计匹配的目标像素个数, 求出当前节点模板的目标点集匹配分数. 对于叶节点模板还要计算其匹配的非目标像素个数, 以进一步求它与窗口目标的匹配度. 若左节点模板匹配度大于高阈值, 则锁定该模板并结束该平移位置的树搜索; 若匹配度在低阈值和高阈值之间, 且该匹配度大于已存在的候选模板的匹配度, 则该模板取代原来候选模板成为新的候选模板, 假如没有已存的候选模板, 那么只要匹配度在低阈值和高阈值之间, 就将该模板定为候选模板. 左节点匹配度小于高阈值, 就需检验右节点, 若右节点的匹配分数小于低阈值, 则结束该平移位置的树搜索; 否则往下一层迭代累加; 使用同样的决策, 直到树的末级. 在这样的二叉决策树搜索下, 如果产生匹配的模板, 它就是最优的匹配模板.

### 3 原图象边缘特征的二次确认与定位

在模板和图象的拓扑结构图象上, 已经利用多模板的二叉决策树搜索找出各个模板实例在拓扑结构图象上的位置. 根据抽取时所保存下来的位置信息, 这些实例可以直接映射到原图象的相应位置. 但由于拓扑结构抽取的线, 并不总是正好穿过原图象线(点)的中心, 有时会产生一两个像素的偏移; 另外, 因多模板综合时, 已经对不同大小的模板进行规范化处理, 所以不是对整个模板进行匹配, 可能搜索出假目标. 基于这些原因, 有必要在原图象上进行目标的二次确认和精定位.

二次确认和定位是在全分辨率图象上, 在一次匹配结果对应位置的一个较小的邻域内, 用原模板再次搜索和匹配. 搜索区域很小, 占用的时间只是很小的一部分. 二次匹配采用基于边缘特征的部分 Hausdorff 距离<sup>[6]</sup>匹配方法, 它对图象的部分遮挡、局部微小差异、出现的杂乱等具有较好的鲁棒性. 这正好可以解决 IC 图象各单元实例中由某些局部小短线或孔位置的不同所带来的匹配误差.

### 4 实验结果

为了验证本文算法的快速性和有效性, 将该算法和多模板逐一搜索的方法进行了比较. 图 4 所示是待搜索的 IC 显微图象的局部, 图 5 所示是待匹配的 5 个模板. 匹配度的低阈值  $\tau = 0.8$ , 算法用

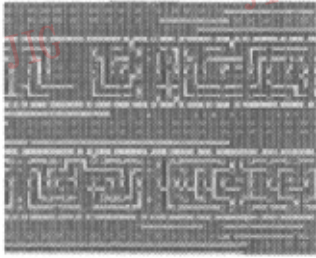


图4 为搜索图象的局部



图5 模板组

MATLAB 程序实现,在 P III 800 计算机上运行测试,表 1 为运行结果的比较。

表 1 多模板搜索算法和逐一搜索方法的比较

方法	运行时间 (s)	找到目标 个数	假目标 个数	丢失目标 个数
本文算法	289	45	1	0
多模板 逐一搜索	1418	52	8	0

搜索区域大小为  $1160 \times 5550$ ; 软硬件环境为 Win 2000, MATLAB 6.1, P III 800, 256M RAM。

多模板逐一搜索的方法也是首先在拓扑结构抽取的粗分辨率图象上实现,然后在原分辨率图象上进行基于边缘的二次匹配。因此表 1 中的运行时间所体现的加速效果只是二叉决策树搜索的贡献,可以看出多模板二叉决策实现了搜索的快速性,搜索时间非常接近单模板匹配的时间,即加速因子接近  $n$  倍,其中  $n$  为模板个数。在匹配性能上,多模板二叉决策树搜索充分利用了模板间的相似关系,确保了搜索确定的模板是最优(最匹配)模板,因此有效地减少了假目标,而多个模板逐一搜索方法则把满足阈值条件的目标实例都找了出来,由于没有利用模板之间的相似关系,导致相似多模板的目标实例间的误识别,因此产生了较多的假目标,这些假目标由于模板的高度相似,仍然无法通过二次匹配给予排除。

IC 图象的单元匹配与定位是典型的多模板匹配问题,对于具有网格结构的这类 IC 图象,拓扑结构信息抽取的方法,极大地减少了匹配处理的数据。在此基础上提出相似的多模板二叉决策树搜索方法

不仅提高了匹配速度,还保证了搜索确定的模板是最优模板。二次匹配将一次匹配产生的一些假目标筛选掉,将真目标定位得更准确。因此整个系统的匹配速度和效率都得到了提高。本文算法通过综合构造的多模板二叉树模型适用于相似模板组的处理。IC 图象的单元定位通常需要处理几百个模板的匹配,其中包含很多个相似小组的模板,因而本文算法应用到 IC 图象的单元匹配,效果十分显著。将相似多模板的匹配推广到任意多模板的匹配,值得进一步地研究和探讨。

### 参考文献

- Olson C F, Huttenlocher D P. Automatic target recognition by matching oriented edge pixels [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1997, 6(1): 103~113.
- Gavrila D M. Multi feature hierarchical template matching using distance transforms [A]. In: Proc. IEEE International Conference on Pattern Recognition [C]. Brisbane, Australia, 1998: 439~444.
- Kenneth R. Castleman. Digital image processing\_M [J]. 北京:清华大学出版社(影印版), 1998: 473~475.
- Chen Zikuan, Karim Mohammad A, Hayat Majced M. Locating target at high speed using image decimation decomposition processing [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(3): 685~694.
- 韦燕凤, 谢启伟, 彭思龙. 一种基于网格结构图象的目标匹配定位方法 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7A(7): 658~662.
- Huttenlocher D P, Klanderman G A, Rucklidge W J. Comparing images using the hausdorff distance [J]. IEEE Trans. PAMI, 1993, 15(9): 850~863.



韦燕凤 1972 年生, 广西大学电气工程学院讲师, 现为中国科学院自动化研究所国家专用集成电路设计工程技术研究中心博士研究生, 主要研究方向为图象处理、目标识别等。



彭思龙 1971 年生, 1998 年获中国科学院数学所博士学位, 现为中国科学院自动化所国家专用集成电路设计工程技术研究中心研究员、博士生导师, 主要研究方向为小波理论及应用、模式识别、图象处理等, 发表论文 20 余篇。