

基于互相关边界特性和图像积分的快速模板匹配算法

吴小洪, 钟石明

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

(zsmerry@126.com)

摘要:基于归一化算法求解相似度原理,提出了综合利用互相关的边界条件和图像积分计算相似度的快速算法,在不降低匹配精度的前提下较大地提高了匹配速度。计算相似度时,归一化算法需要计算各位置的自相关值和互相关值,本算法先只计算自相关值,再利用 Hölder 不等式原理,结合给定的边界阈值,剔除不满足条件的位置,减少其对应的互相关值计算。应用图像的积分进行匹配在于整个图像的积分可以在匹配之前进行计算,而在匹配过程中每一个子区域的自相关可以通过图像积分快速求得。本算法已在焊线机芯片识别系统中应用,结果表明该算法匹配的速度快而又不降低匹配精度,具有实际应用价值。

关键词:互相关边界特性;自相关;Hölder 不等式;图像积分;模板匹配

中图分类号: TP312 **文献标志码:** A

Fast template matching algorithm based on boundary cross correlation and image integration

WU Xiao-hong, ZHONG Shi-ming

(Faculty of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: A fast template matching algorithm was presented based on the theory of normalize cross correlation (NCC). With the goal of accelerating the matching speed and yielding exactly the same result as other matching methods, it is applied to calculate the similarity of bounded cross correlation and image integration. In this process, NCC must calculate cross correlation and self-correlation at each point. Self-correlation was calculated only first and then Holder inequality was applied. With the given threshold, it can remove the unsatisfied point, and reduce the complex computation of cross correlation, significantly accelerate template matching. The advantage of image integration is in the process of matching the integration of sub-image can be obtained quickly by the integration of the whole image calculated before matching. The proposed algorithm has been applied in the wire-bonder image recognition system, and the experiment results show that template matching algorithm is of fast speed and high accuracy and this algorithm has practical value.

Key words: boundary cross correlation; self-correlation; Hölder inequality; image integration; template matching

0 引言

模板匹配常用的一种相似度计算方法为模板与源图像对应区域的误差平方和。为了匹配的准确性,常采用归一化互相关作为误差的平方和测度,由归一化公式计算相似度。用归一化相关求匹配运算量非常大,因为模板要在源图像上每个可能的匹配点进行互相关和自相关运算,而其中互相关的运算量最大,自相关的计算量较少,对于单目标模板,除了最佳的一个匹配点外,其余的运算都是无效的。而其最大的优点就是匹配精度高。所以就有必要对其进行改进,以提高运算速度。在已有的算法中,有的通过缩小搜索区域的方法来加快匹配的速度,或利用多项式的性质进行匹配^[1]。还有不利用归一化算法的 FFT 算法^[2],它利用频率域和空间域的关系进行匹配计算。改变搜索区域的方法只能适应特定的情况,无法应对变化的工作条件,FFT 算法对图像进行全图搜索并节省了计算量,但其匹配速度还有待改进。

单目标模板匹配运算中,归一化算法要计算每一个点处的互相关和自相关,自相关的运算量比互相关小。因此根据

自相关计算量少的优点,文中提出先只计算自相关,利用 Hölder 不等式原理,将模板与源图像和模板对应的区域都划分成若干个小区域,对各像素点进行判决,剔除不可能的匹配点,减少复杂的互相关运算,从而快速地找到可能匹配点,对可能的匹配点再按归一化相似度计算公式计算该点的相似度。进行判决和计算可能匹配点相似度的过程中,自相关运算和子区域求各像素和都是必须的。本文对计算自相关值与各子区域像素的求和运算运用积分图像四点计算公式快速进行计算。进行匹配之前,一次性计算模板图像和源图像像素的平方的积分与图像像素和的积分,匹配过程中利用图像积分的四点计算公式计算每一个子区域的图像积分求自相关,速度快,在匹配过程中运算的时间复杂度为 $O(1)$ 。本算法的匹配速度比 FFT 算法和归一化快速算法都要快,且能达到 FFT 与归一化快速算法的匹配精度。

1 算法原理与设计

1.1 归一化互相关模板匹配算法

假设 T 表示大小为 $M \times N$ 的模板图像, I 表示大小为 $J \times$

收稿日期:2009-01-06;修回日期:2009-02-26。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475044);教育部科技研究重点项目(2004106);广东省科技计划项目(2006A10401003);广州市科技攻关项目(2006Z3D9071)。

作者简介:吴小洪(1966-),男,湖南株洲人,副教授,主要研究方向:微电子装备制造及其自动化;钟石明(1983-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向:数字图像处理、机器视觉。

K 的源图像。传统模板匹配算法利用模板图像与源图像进行比较,找到相关函数的最大值,以确定在源图像中是否存在与该模板相同或相似的区域^[3]。设定模板此时在源图像中对应的位置为 (x,y) ,并设源图像和模板对应的那部分子图像 $I_c(x,y)$,本文采用改进的归一化相似度计算公式:

$$R(x,y) = \frac{N\varphi(x,y) - \sum I \cdot \sum T}{\sqrt{[N\sum I^2 - (\sum I)^2] \cdot [N\sum T^2 - (\sum T)^2]}} \quad (1)$$

其中 N 表示模板中像素的个数, $\varphi(x,y)$ 表示源图像和模板的互相关计算:

$$\varphi(x,y) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(x+i, y+j) \cdot T(i,j) \quad (2)$$

$$\sum I = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(x+i, y+j) \quad (3)$$

$\sum I^2$ 表示源图像与模板对应区域的自相关计算:

$$\sum I^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I^2(x+i, y+j) \quad (4)$$

$$\sum T = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} T(i,j) \quad (5)$$

$\sum T^2$ 表示模板图像自相关计算:

$$\sum T^2 = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} T^2(i,j) \quad (6)$$

用式(1)求相似度在匹配过程中只要计算 $\sum I$, $\sum I^2$, $\varphi(x,y)$ 。自相关运算的运算速度快,在每一步的匹配判决和相似度计算都是必须计算的,而互相关运算量较大。

1.2 Hölder 不等式及应用

引理 设有 $a, b \in \mathbf{R}^m$, 并且 $S = \{1, 2, 3, \dots, m\}$, 因此,

$\forall S_1, S_2$, 有 $\begin{cases} S_1 \cup S_2 = S \\ S_1 \cap S_2 = \emptyset \end{cases}$, 则下面这个不等式成立:

$$\sqrt{\sum_{k \in S_1} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in S_1} b_k^2} + \sqrt{\sum_{k \in S_2} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in S_2} b_k^2} \leq \sqrt{\sum_{k \in S} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in S} b_k^2} \quad (7)$$

根据这个引理和 Hölder 不等式^[4], 可得以下不等式^[5]:

设有 $a, b \in \mathbf{R}^m$, 并且 $S = \{1, 2, 3, \dots, m\}$, 因此, $\forall r \in \{1, 2, \dots, m\}$ | $\begin{cases} S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_r = S \\ S_i \cap S_j = \emptyset \end{cases}, \forall i \neq j, i, j \in \{1, 2, \dots, r\}$, 使下面不等式成立:

$$\sum_{k \in S} a_k \cdot b_k \leq \sum_{k \in S_1} a_k \cdot b_k + \sum_{i=1, i \neq 1}^r \left(\sqrt{\sum_{k \in S_i} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in S_i} b_k^2} \right) \leq \sum_{i=1}^r \left(\sqrt{\sum_{k \in S_i} a_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k \in S_i} b_k^2} \right) \quad (8)$$

根据式(8)的思想,将模板与源图像和模板对应的区域划分成 m 部分,如图1($m=16$),应用于模板匹配中^[6-7],则式(8)可改写为:

$$\varphi(x,y) \leq \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i,j \in S_i} I(x+i, y+j) \cdot T(i,j) \right) + \sum_{i=n+1}^m \left(\sqrt{\sum_{i,j \in S_i} I^2(x+i, y+j)} \cdot \sqrt{\sum_{i,j \in S_i} T^2(i,j)} \right) \quad (9)$$

从式(9)可知,可以找到 $\varphi(x,y)$ 的一个上界,设这个上界函数为 $f(x,y)$,使得式(10)恒成立:

$$f(x,y) \geq \varphi(x,y) \quad (10)$$

把式(10)代入式(1),则有式(11)成立:

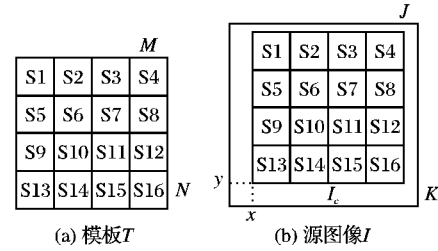


图1 图像分区

$$R_f(x,y) = \frac{Nf(x,y) - \sum I \cdot \sum T}{\sqrt{[N\sum I^2 - (\sum I)^2] \cdot [N\sum T^2 - (\sum T)^2]}} \geq R(x,y) \quad (11)$$

假定 R_a 是已扫描过的点中计算出来的相似度的最大值,如果在点 (x,y) 处有:

$$R_f(x,y) \leq R_a \quad (12)$$

则直接进行下一点的相似度计算,因为这个式子能保证该点所计算出来的相似度不会大于 R_a 。因此这个条件能有效地判断该点的相似度取值范围而不进行实际的相似度运算,从而提高匹配的速度。如果点 (x,y) 不满足该条件,就必须计算该点的相似度。

1.3 利用积分图像快速计算自相关

在1.2节中,介绍了计算相似度的判决条件。但是,不管是否满足给定的判决条件,匹配过程中 $\sum I$ 、 $\sum I^2$ 、 $\sum T$ 、 $\sum T^2$ 都必须计算,在此可以利用积分图像来快速计算自相关。

对图像进行积分,就是从图像的原点开始,逐行逐列依次计算,求像素的累积和。在本文中利用图像像素平方和与图像像素和的求积分公式来求解各子区域、整个源图像以及模板图。像素值和的积分图像计算公式为:

$$\text{sum}(x,y) = \sum_{x \leq x} \sum_{y \leq y} \text{image}(x,y) \quad (13)$$

像素平方和的积分图像计算公式为:

$$\text{sum}(x,y) = \sum_{x \leq x} \sum_{y \leq y} (\text{image}(x,y))^2 \quad (14)$$

从而可根据式(13)、(14)定义计算图像积分的四点计算公式:假设一个积分图像 $\text{sum}I(x,y)$ 中的一个矩形区域的四个点坐标为左下角点 (x_1, y_1) , 右下角点 (x_2, y_2) , 左上角点 (x_3, y_3) , 右上角点 (x_4, y_4) , 用 $p(x,y)$ 表示积分图像点 (x,y) 处的值,则这个矩形区域的积分 sumRec 的点计算公式为:

$$\text{sumRec} = p(x_4, y_4) - p(x_3 - 1, y_3) - p(x_2, y_2 - 1) + p(x_1 - 1, y_1 - 1) \quad (15)$$

1	2	5	1	2
2	20	50	20	5
5	50	100	50	2
2	20	50	20	1
1	5	2	5	2
5	2	25	2	5
2	1	5	2	1

(a)

1	3	8	9	11
3	25	80	101	108
8	80	235	306	315
10	102	307	398	408
11	108	338	430	442
16	115	370	464	481
18	118	378	474	492

(b)

图2 积分图像的计算

通过图2来说明如何计算一个子区域的积分,图2(a)表

示一个图像中一个 7×5 子区域的原像素的排列,图 2(b) 表示相应的像素和的积分。为了在(a)中求出中间那标记的矩形区域的积分,可以利用(b)中像素和的积分表按式(15)计算: $398 - 9 - 10 + 1 = 380$ 。因此求任意一个矩形框的内的图像积分可以由四点计算得到。

2 算法实现与流程设计

进行运算之前,初始化参数也显得特别重要,参数的初始化主要根据匹配前实验结果对照和实际经验给出,没有统一的理论算法。初始化从下面几个方面进行:

1) 分区数 m 值的确定。 m 值的确定应该根据实验结果,选取匹配速度最快对应的 m 值。

2) 分区后各个子区域的大小和分布的优化。分区的大小不一定要都一样大,可以根据模板的特征,有明显边缘特征的地方,子区域可以小一些,其他区域可以大一些。

3) R_a 的确定。 R_a 的确定要根据图像的质量以及工作的条件来确定,对于图像清晰工作条件好的场合, R_a 的值可以取大一些,但要小于匹配时给定的最低分数限。

4) 初始化时,还要根据模板的特征,优化子区域求互相关的先后顺序,将含有边缘特征子区域先求互相关,这样可以使算法的性能达到最佳。

确定初始化条件后,根据式(9)~(12)进行相似度的判别和计算。首先利用式(9)取 $n = 0$ 计算 $\varphi(x, y)$ 的上界,此时不用计算互相关,只要计算自相关,计算速度最快,将计算得到的上界值代入到式(11)、(12),如果式(12)成立,则马上进行下一个匹配点的相似度计算,而不用计算该点相似度的具体值;否则利用式(9)继续计算 $n = 1$ 时 $\varphi(x, y)$ 的上界值,此时只要计算其中一个子区域的互相关,其他子区域只要计算自相关,如果 $n = 1$ 时,式(12)成立,则马上进行下一个匹配点的相似度计算,而不用计算该点相似度的具体值;否则就再继续计算 $n = 2$ 时的情况。依此类推,对 n 的每一个取值进行判断,若 $n = m - 1$ 时,式(12)不成立就进行该点的最后一步计算,此时 $n = m$,演化成式(1)的计算方法,计算该点实际的相似度值 $R(x, y)$,如果式(16)成立:

$$R(x, y) > R_a \quad (16)$$

说明在所有的扫描过的点中,此时的相似度最大,把这个点计算出的相似度赋给 R_a 。假设把所要找的最佳匹配点的位置设为 (X_a, Y_a) ,则有:

$$R_a = R(x, y); X_a = x, Y_a = y \quad (17)$$

如果式(16)不成立,说明此点不是所有扫描过点中的最佳匹配点。因此不管此时的式(16)是否成立,都进入到下一点的相似度的计算。整个计算的流程如图 3 所示。

为了加快自相关值计算与区域求和,还必须利用积分图像的性质进行求解。匹配运算之前先求出整个模板图像与源图像的像素平方和与像素和的积分,然后在每一步的相似度判别和计算中,利用四点计算公式计算各子区域的积分。模板和源图像各个子区域的自相关利用图像像素平方和的积分,通过四点计算公式快速求得,而 $\sum I, \sum M$ 利用匹配前计算完成的图像像素和的积分,通过四点计算公式快速求得,运算的时间复杂度为 $O(1)$ 。

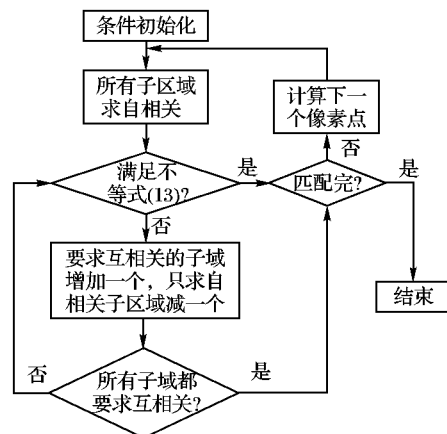


图 3 匹配计算流程

3 实验结果及结论

利用本文提出的快速算法在焊线机上进行单目标 LED 芯片识别验证,并与归一化快速算法和 FFT 匹配算法进行比较。利用此算法进行模板匹配的关键在于初始化该算法,初始条件取得好,则利用此算法进行匹配的效果会更好。 R_a 的初始化值和进行匹配时的光线环境有关以及所匹配芯片的质量有关。分区和各个子区域的计算顺序可根据模板边缘特征确定。在实验中,采用了常用的多分辨率金字塔型由粗到精分层搜索的思想,对给定的模板图像和源图像分成三个分辨率层。根据实验条件,选取 $R_a = 0.65$ 进行匹配运算。源图像的大小为 640×480 ,模板图像取两种进行对比,芯片模板 a 大小为 101×101 ,取 $m = 12$,见图 3(a),芯片模板 b 为 79×80 ,取 $m = 9$,如图 3(b),对于两图相应 m 值的确定,分别在不变实验条件下,对 m 取不同的值进行实验,比较匹配时间,取匹配时间最少时所对应的 m 值,实验结果如表 1,由此对模板 a 取 $m = 12$,模板 b 取 $m = 9$ 。

表 1 比较实验结果

模板 a		模板 b	
m 值	匹配时间/ms	m 值	匹配时间/ms
16	15.311	12	13.985
14	14.624	11	13.210
13	13.960	10	12.880
12	13.921	9	12.312
11	13.950	8	12.960
10	14.386	6	13.412

两种模板的子区域的执行顺序按图 4 中各数字顺序执行,源图像的分区和执行顺序和模板一样,结果如表 2。

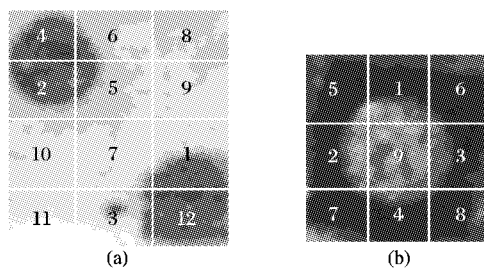


图 4 匹配模板

下面定义一个公式度量匹配的精度,如式(18), δ 表示两匹配点的精度差:

$$\delta = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (18)$$

点 (x_1, y_1) 和点 (x_2, y_2) 表示两匹配点,在此以归一化快速算法计算出来的匹配点为基准来度量FFT算法和本算法的匹配精度。根据表1测量出来的数据,计算出6组数据的累积

精度差,FFT算法和本快速算法的累积精度误差均为0。而速度方面,本算法比FFT算法和归一化算法的匹配速度都要快。

表2 匹配结果

模板	标准归一化算法(基准)		FFT 算法			本文算法			
	匹配时间/ms	匹配点 (x,y)	匹配时间/ms	匹配点 (x,y)	精度差	匹配时间/ms	匹配点 (x,y)	精度差	
模板 a	第一组	25.610	(267,207)	20.765	(267,207)	0	13.629	(267,207)	0
	第二组	25.650	(200,174)	21.011	(200,174)	0	14.153	(200,174)	0
	第三组	25.608	(171,165)	20.888	(171,165)	0	13.924	(171,165)	0
	第四组	25.600	(120,100)	20.912	(120,99)	0	13.920	(120,99)	0
	第五组	25.632	(189,80)	20.960	(189,80)	0	13.856	(189,80)	0
	每六组	25.596	(256,137)	20.896	(256,137)	0	13.900	(256,137)	0
模板 b	第一组	21.015	(356,161)	19.042	(356,161)	0	12.284	(356,161)	0
	第二组	22.019	(225,180)	19.406	(225,180)	0	13.107	(225,180)	0
	第三组	21.085	(216,178)	19.339	(216,178)	0	12.702	(216,178)	0
	第四组	21.950	(230,177)	18.976	(230,177)	0	12.962	(230,177)	0
	第五组	21.876	(153,210)	19.203	(153,210)	0	13.200	(153,210)	0
	第六组	21.643	(130,290)	19.320	(130,290)	0	12.487	(130,290)	0

参考文献:

- [1] OMACHI S, OMACHI M. Fast template matching with polynomials [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2139 - 2148.
- [2] GONZALEZ R C. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 高守传, 姚领田. Visual C++ 实践与提高 - 数字图像处理与工程应用篇 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [4] 史荣昌, 魏丰. 矩阵分析 [M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.

- [5] MATTOCCIA S, TOMBARICO F, STEFANO L D. Fast full-search equivalent template matching by enhanced bounded correlation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(4): 528 - 531.
- [6] STEFANO L D, MATTOCCIA S. Fast template matching using bounded partial correlation [J]. Machine Vision and Applications, 2003, 13(4): 213 - 221.
- [7] STEFANO L D, MATTOCCIA S. A sufficient condition based on the Cauchy-Schwarz inequality for efficient template matching [EB/OL]. [2008 - 09 - 20]. <http://www-video.eecs.berkeley.edu/Proceedings/ICIP2003/papers/cr2051.pdf>.

(上接第 1913 页)

存和 NVIDIA GeForce 6600 图形卡的 PC 机上使用 C++ 和 OpenGL 实现。

8 结语

由上述结果可见,本系统可以成功地使用多幅普通二维图像完成虚拟三维人体的重建,较其他对实验环境要求严格且价格昂贵的扫描系统而言,基于本方法有望搭建快捷、廉价、高质量的三维人体重建系统。本文通过引入原始模型结合特征点重建和 RBF 变形,避免了依靠扫描设备等传统方法所面临的孔洞、断裂等问题,而且大大降低了对实验环境和扫描对象的要求,在降低成本的同时保证了重建的质量。

参考文献:

- [1] ROSENHAHN B, KLETTE R, SOMMER G. Silhouette based human motion estimation [C] // International Conference on Hybrid Information Technology. New York: IEEE, 2004: 294 - 301.
- [2] KAKADIARIS I, METAXAS D. Three - dimensional human body model acquisition from multiple views [J]. Journal of Computer Vision, 1998, 30(3): 191 - 218.
- [3] HILTON A, BERESFORD D, GENTILS T. Whole-body modelling of people from multi-view images to populate virtual worlds [J]. The Visual Computer, 2000, 16(7): 411 - 436.
- [4] WEIK S. A passive full body scan using shape from silhouette [C] // Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 99 - 105.

- [5] WOLFGANG N. Automatic reconstruction of 3D objects using a mobile camera [J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(2): 125 - 134.
- [6] RICHARD S. Rapid octree construction from image sequences [J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 58(1): 23 - 32.
- [7] REMONDINO F. 3-D reconstruction of static human body shape from image sequence [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 93(1): 65 - 85.
- [8] 沈军行, 黄琦, 孙守迁. 基于 shape from silhouette 方法的虚拟人体构造 [J]. 中国图象图形学报: A 辑, 2002, 7(10): 1089 - 1093.
- [9] 李毅, 马颂德, 邱茂林. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43 - 55.
- [10] DEMENTHON D, DAVIS L S. Model-based object pose in 25 lines of code [J]. International Journal of Computer Vision, 1995, 15(1): 123 - 141.
- [11] SLABAUGH G, SCHAFER R, LIVINGSTON M. Optimal ray intersection for computing 3D points from n-view correspondences [D]. Maryland: University of Maryland-College Park, 1995.
- [12] LANDER J. Graphic content: skin them bones: game programming for the Web generation [EB/OL]. [2006 - 02 - 14]. <http://www.darwin3d.com/gamedev/articles/col0598.pdf>.
- [13] KAVAN L, COLLINS S, ZARA J. Skinning with dual quaternions [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. New York: ACM, 2007: 39 - 46.