

文章编号 1004924X(2004)030311205

# 基于模板抽样的快速图像匹配算法

姜 凯<sup>1,2</sup>, 陈海霞<sup>3</sup>, 刘立峰<sup>1</sup>, 汤建华<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100000; 3. 吉林大学 计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 为了提高图像匹配速度, 满足某些领域的实时性要求, 提出了一种快速图像匹配算法。该算法利用 Sobel 边缘算子得到模板的灰度边缘图像, 并对该边缘图像进行抽样以提取匹配点, 从而显著减少匹配过程的计算量。利用遗传算法的非遍历搜索机制, 迅速收敛到全局近似最优解, 进一步减少了匹配过程的计算量。在此基础上引入精确匹配环节, 找出了目标子图像的精确位移及旋转角度。将该算法应用于全自动金丝球焊机的图像识别系统, 在主频为 1 GHz 的工控机上实现该算法, 匹配时间平均约为 37 ms, 小于系统在 60 ms 内进行匹配的要求, 连续多次实验算法均能精确匹配目标的概率为 93.8%, 满足该系统的实时性与精度要求, 取得了理想的效果。

**关键词:** 图像匹配; 遗传算法; 全自动金丝球焊机

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

## Fast image matching algorithm based on template sampling

JIANG Kai<sup>1,2</sup>, CHEN Hai2xia<sup>3</sup>, LIU Li2feng<sup>1</sup>, TANG Jian2hua<sup>1</sup>(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2. Postgraduate Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

3. Department of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** A fast image matching algorithm was proposed to increase the running efficiency of the algorithm, and meet the real-time requirement for some applications. A gray edge image of the template was extracted using Sobel marginal operator. Matching points were sampled from the gray edge image and utilized to reduce the time complexity of the matching process. At the same time, the global searching mechanism of the genetic algorithm was exploited to expedite the convergence of the algorithm to the suboptimal solution to the problem. Based on it, a precisely locating phase was introduced to fix the location and rotating degree of the optimal target subimage in the scene image. Practical application of the algorithm to the image matching system of a fully automatic gold wire bonder demonstrated that the algorithm could meet the real-time requirement and the locating precision requirement of the system, and they worked as expected.

**Key words:** image matching; genetic algorithm; fully automatic gold wire bonder

## 1 引言

在航天、军事及工业自动化等领域的图像匹配中,实时性一直是一个非常棘手的问题,特别是随着待处理图像的增大与所要求处理精度的增加,算法的时间复杂度与空间复杂度都急剧增加。为此人们提出了各种快速匹配算法,其中最常用方法有3种<sup>[1]</sup>:不变矩算法、序贯相似性检测算法(SSDA)和多分辨率塔形结构算法(MPSA)。

不变矩算法能够有效地解决目标子图像旋转问题,在简单背景模式下这种方法是有效的,而在复杂背景模式下,由于对目标的提取比较困难,其效果往往不理想。序贯相似性检测算法能够得到图像匹配的最优解,但该算法随目标位置的不同,匹配时间很不稳定,不便于工程实现。多分辨率塔形结构算法在原理上存在失配的可能。更重要的是在目标子图像存在旋转的情况下,后两种算法难以保证匹配精度。

遗传算法<sup>[2]</sup>是近年来发展起来的一种新的优化算法,具有简单、通用、鲁棒性强和适于并行处理等优点。它采用有指导的非遍历随机搜索机制,可以快速收敛到全局次优解乃至最优解,所需的计算量较之传统的遍历搜索要少得多。因此,遗传算法非常适于本问题的求解。

现有的基于遗传算法的匹配方法<sup>[3]</sup>虽然能够解决目标子图像的旋转问题,但适应度的计算或是计算量大或是需要对场景图像进行复杂的预处理,不能满足系统的实时性要求。另外,对旋转角度的匹配精度在某些场合下也满足不了要求。为了对现有的基于遗传算法的匹配方法进行改进,本文提出了一种对二维模板图像的灰度边缘图像进行抽样的快速匹配算法。试验表明,该算法能够有效地减少适应度的计算量,在确保匹配精度的条件下,大幅度降低匹配时间。

## 2 图像匹配算法设计

工程经验表明,遗传算法通常可以很快收敛到全局近似最优解,如果要收敛到最优解则需要较长的时间,因此分两步对图像进行匹配。首先,在第一步的粗匹配中利用遗传算法得到关于目标子图像的近似最优解,然后在此基础上对目标子

图像的微小旋转角度及微小位移进行匹配,以找出目标子图像的精确位置及旋转角度。此外,在确保匹配精度的前提下对二维模板的灰度边缘图像以归一化后的灰度值作为概率密度进行抽样,这是一种在统计意义上对图像上有代表性的点的提取,从而减少了匹配过程中图像数据的运算量,提高了匹配速度。

### 2.1 对模板图像的预处理

记  $S$  为场景图像,大小为  $n @ n$ ,  $T$  为给定的模板图像,大小为  $m @ m$ ,  $S_{i,j}$  为  $S$  中欲与  $T$  匹配的子图像,  $(i, j)$  为  $S_{i,j}$  的左上角在  $S$  中的坐标。考虑到目标子图像存在旋转,因此需要对模板图像  $T$  以中心为对称点进行间隔为  $1b$  的离散化旋转处理,  $T_H$  表示模板图像以角度  $\theta$  旋转后得到的图像。定义  $S_{i,j}$  与图像  $T_H$  之间的距离  $D(S_{i,j}, T_H)$  为:

$$D(S_{i,j}, T_H) = \sum_{k=1}^1 |S_{i,j}(Sq(k)) - T_H(Sq(k))|, \quad (1)$$

为了对模板图像进行抽样得到抽样点序列  $Sq$  (1),需要对模板图像进行如下处理:

#### 2.1.1 模板图像的滤波

大多数滤波器在降低噪声的同时也导致了边缘强度的损失,因此在增强边缘和降低噪声之间需要折衷,为此选用既具有明显边缘保护特性又具有较强去噪能力的中值滤波器。一般中值滤波窗口越大,去噪能力也就越强,但过大的窗口会增加计算复杂性。通过试验选择了  $5 @ 5$  的窗口进行中值滤波,以便在滤除噪声的同时尽量保持图像边缘的清晰度。

#### 2.1.2 模板图像的边缘提取

边缘提取有多种算法,在这里采用 Sobel 边缘算子来得到模板的灰度边缘图像,定义其概率分布为:

$$P\{X = i, Y = j\} = \frac{G(i, j)}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m G(k, l)}, \quad (2)$$

其中  $G(i, j)$  表示灰度边缘图像在  $(i, j)$  点的灰度值。

#### 2.1.3 提取抽样点序列

得到模板的灰度边缘图像后,以式(2)确定的概率  $P$  对其进行抽样得到抽样点序列  $Sq(1)$ 。1 的大小由下式确定:

$$l = |\{(i, j) | G(i, j) > th\}|, \quad (3)$$

其中  $th$  为阈值。

## 2.2 利用遗传算法进行粗匹配

在粗匹配中,需要从全部匹配子图像集合中快速获得目标子图像的近似解,因此遗传算法适合本问题的求解。在应用遗传算法求解图像匹配问题时,主要解决以下2个问题。

### 2.2.1 染色体编码

染色体的编码策略对于遗传操作,尤其是对于交叉操作的功能有很大影响。采用实数编码无需进行问题空间与 GA 空间的数制转化,能直接反映出所求问题本身的结构特征,但可能产生无效编码,所以应引入编码的有效性检验机制。总的来说,实数编码的计算量要小于二进制编码,从而可以更有效地加快收敛,因此选用了实数编码。考虑到芯片图像有平移、旋转特性,将这些特性编到染色体中,有:

$$\text{Chrom} = \{i, j, H\}, \quad (4)$$

其中  $(i, j)$  表示待匹配子图像  $S_{i, j}$  中的  $(i, j)$ ,  $H$  表示  $S_{i, j}$  相对于模板图像的偏转角度(精确到  $1b$ )。因此,一个染色体对应一对  $(S_{i, j}, T_H)$ 。

### 2.2.2 适应度函数的构造

由于遗传算法在求解问题时基本不用外部信息,仅以适应度函数为依据,所以适应度函数设计的好坏直接影响遗传算法的性能好坏。

定义适应度函数  $\text{Fitness}(i, j, H)$  为:

$$\text{Fitness}(i, j, H) = \frac{1}{1 + \frac{D(S_{i, j}, T_H)}{(L-1) @l}}, \quad (5)$$

其中,  $L$  为图像灰度级。当  $T_H$  与  $S_{i, j}$  完全匹配时,  $D(S_{i, j}, T_H) = 0$ ,  $\text{Fitness}(i, j, H)$  取得最大值 1;  $D(S_{i, j}, T_H)$  越大,适应度函数  $\text{Fitness}(i, j, H)$  越小;当  $D(S_{i, j}, T_H)$  取得最大值  $(L-1) @l$  时,适应度函数  $\text{Fitness}(i, j, H)$  取得最小值 0.5; 这样就有了对图像匹配程度的有效判据。

确定了编码策略与适应度函数,下面对其他相关问题进行讨论。

### 2.2.3 初始群体的产生以及群体设定

由于要求在线进行图像匹配,因此难于获取有关目标子图像在场景图像的位置与角度的先验知识,只能随机生成初始群体。为了避免未成熟收敛现象,应采用较大的群体规模,以保证群体的多样性,但考虑到计算效率,群体规模不宜过大。

通过试验,选用群体规模为 60。

### 2.2.4 遗传操作设计

选择操作采用传统的轮盘赌方法。交叉操作采用中间重组方法<sup>[2]</sup>,该方法能够保证个体的多样性,但可能产生无效编码个体,因此引入了个体有效性检测机制。一旦产生无效个体,则重新进行中间重组直到生成合法个体为止。变异操作中采用实值变异因子。在进化过程中,为了加速收敛将父代的最优个体直接保存到下一代群体中。

## 2.3 模板图像的精确匹配

通过遗传算法得到的  $i, j, H$  不能满足某些场合的匹配精度要求,例如在全自动金丝球焊机图像识别系统中,要求焊接匹配精度为  $\pm 4 \mu m$ , 因此必须进行芯片图像的精确匹配。

当位移  $a, b$  及旋转角度  $B$  很小时,由泰勒级数展开,  $S_{i, j}$  与  $T_H$  之间满足下式<sup>[4]</sup>:

$$S_{i, j}(x, y) =$$

$$T_H(x \cos B - y \sin B + a, x \sin B + y \cos B + b) U$$

$$T_H(x, y) + \frac{5T_H(x, y)}{5x}(-yB + a) +$$

$$\frac{5T_H(x, y)}{5y}(xB + b), \quad (6)$$

于是有:

$$D = S_{i, j}(x, y) - T_H(x, y) =$$

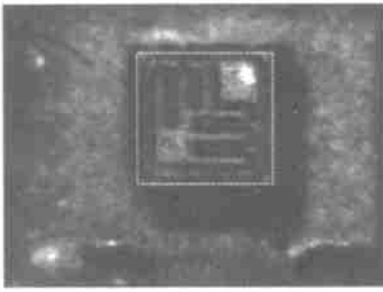
$$\frac{5T_H(x, y)}{5x}(-yB + a) + \frac{5T_H(x, y)}{5y}(xB + b), \quad (7)$$

为求解上式中的  $a, b$  以及  $B$ , 只需任取 3 个不同的点求解方程组即可,但为了确保精度,采用最小二乘法利用序列  $S_q(1)$  中的点唯一地确定  $a, b, B$ 。

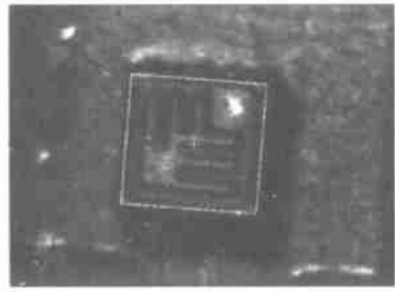
将第 1 步得到的  $i, j, H$  用  $a, b, B$  进行修正,即可得到最终结果:  $(i + a, j + b, H + B)$ 。

## 3 实验结果及分析

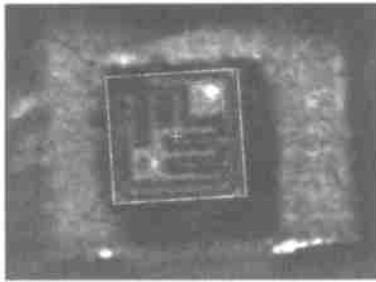
将本算法应用于全自动金丝球焊机<sup>[526]</sup>的图像识别系统,在主频为 1 GHz 的工控机上实现该算法,匹配时间平均约为 37 ms, 小于系统在 60 ms 内进行匹配的要求,连续多次实验算法均能精确匹配目标的概率为 93.8%。由于篇幅所限,在这里仅给出 2 个典型的匹配结果,如图 1(b)、(c)。实验场景图像大小为  $640 @ 480$ , 模板图像(图 1(a)中用白边框出)大小为  $228 @ 224$ ,  $-7b < H < +7b$ ,  $th = 128$ , 实验结果见表 1。



(a) 原始图像与模板  
(a) Original image and template



(c) 芯片 c 所在场景图像  
(c) Scene image for chip c



(b) 芯片 b 所在场景图像  
(b) Scene image for chip b

图 1 芯片图像定位  
Fig. 1 Chip image location

从表 1 中可以看出, 本算法能在较短的时间内精确匹配芯片图像, 其匹配精度满足系统要求, 从而为系统自动化提供了保证。第二阶段的加入可以将匹配精度提高 3~5 个百分点。时间有一定波动, 这主要是由于在遗传算法中加入了提前中止条件, 当最优个体的适应度大于设定阈值时中止计算造成的, 只要阈值设定合理(一般设定为一个较高的值), 对于系统的匹配精度是没有影响的。

表 1 算法定位结果

Tab. 1 Locating result of the algorithm

序号	匹配位置 (中心, 角度)	适应度		匹配时间 ms
		第 1 阶段	第 2 阶段	
b	(307.2, 236.5, -4.63)	92.7%	94.33%	34.51
c	(303.3, 242.6, 5.17)	89.6%	94.76%	38.24

由于全自动金丝球焊机使用的是固定照明, 所以光源比较稳定, 不会对适应度的计算造成干扰。对于光源不是很稳定的情况, 在公式(1)中加入图像灰度平均项即可, 令:

$$D(S_{i,j}, T_H) = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^k |S_{i,j}(S q(k)) - S_{i,j} - T_H(S q(k)) + T_H|, \quad (8)$$

其中  $S_{i,j} = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^k |S_{i,j}(S q(k))|$ ,  $T_H = \frac{1}{I} \sum_{k=1}^k T_H(S q(k))$ 。

## 4 结束语

本文提出了一种对二维模板图像的灰度边缘图像进行抽样提取匹配点的快速匹配算法, 有效地降低了遗传算法适应度的计算量, 并且引入了精确匹配环节, 使得该算法能够快速而精确地在场景图像中匹配目标子图像。实验表明, 该算法适于对实时性及匹配精度要求较高的系统, 它具有一定的抗噪声能力, 但抗畸变能力不是很强。

## 参考文献:

- [1] CHRISTIAN H. Overview of image matching technique[EB/OL]. www.dgphoto, 1998.
- [2] 王小平, 曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.  
WANG X P, CAO L M. Genetic algorithm theoretic, application and implementation [M]. Xi an: Xi an Jiaotong University Press. (in Chinese)
- [3] 朱红, 赵亦工. 基于遗传算法的快速图像相关匹配[J]. 红外与毫米波学报, 1999, 18(2): 142-150.  
ZHU H, ZHAO Y G. Fast image correlative matching based on genetic algorithm [J]. J Infrared Millim. Waves, 1999, 18(2): 142-150. (in Chinese)
- [4] 朱红. 数字图像处理- 应用篇[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
ZHU H. Digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [5] 王延风, 何惠阳, 孙宝玉, 等. 全自动金丝球焊机的 CAD/ CAE 设计研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(5): 466-470.  
WANG Y F, HE H Y, SUN B Y, et al. Research on the design of a fully automatic gold wire bonder with CAD/ CAE [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(5): 466-470. (in Chinese)
- [6] 刘立峰, 汤建华. 全自动金丝球焊机焊接匹配系统设计研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(6): 702-704.  
LIU L F, TANG J H. Research on the design of bond position system in automatic gold wire bonder [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(6): 702-704. (in Chinese)

作者简介: 姜凯(1976- ), 男, 山东省平度人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士研究生, 主要研究方向为模式识别与数字图像处理。E-mail: kjiang@eyou.com。