

文章编号:1000-582X(2002)06-0027-05

# 一种基于点模式匹配的指纹识别方法\*

王崇文<sup>1</sup>, 李见为<sup>1</sup>, 郑治伟<sup>2</sup>, 林国清<sup>1</sup>,

(1. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆工学院 工商管理系, 重庆 400050)

**摘要:**把指纹用于身份认证已有上百年的历史,自动指纹识别(AFIS)已在各个领域广泛应用,除了传统的司法公安领域,自动指纹识别还可以作为计算机操作系统和网络访问认证用户的手段,以及用于金融保险方面的身份确认。指纹匹配是AFIS的最重要问题之一。一般用脊线的分歧点和端点这样的细节节点来表示一个指纹,并通过细节匹配来进行指纹匹配。这样指纹匹配就转化为点模式匹配的问题。传统的点模式匹配算法存在运算量过大且难于解决所有的非弹性形变等问题。文章提出了一种基于聚类的点模式匹配方法,来进行指纹识别,有效地解决了如何对数量和位置都不尽相同的两幅指纹细节图象进行最优匹配的问题,设计并给出了利用矢量对匹配确定图象间校准函数的流程。并通过实验证明所提出的算法具有较快的速度和较高的准确率。

**关键词:**点模式匹配; 指纹细节特征; 校准函数; 最大匹配点对支持数; 自动指纹识别系统; 指纹比对; 仿射变换

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

指纹是分布在人的指头表面的纹线。它具有唯一性和稳定性的特点,用它来做人的身份验证已有上百年的历史。就现在技术而言,指纹识别比其他生物识别技术如声纹、签名和虹膜等显得更加方便实用。自动指纹识别系统(Auto Fingerprint Identification System, 简称AFIS)有着广泛的应用背景。除了传统的在公安领域的应用,自动指纹识别系统还可以作为计算机操作系统和网络访问认证用户的手段。另外,它可作为嵌入式系统用于银行ATM卡和信用卡的使用确认,以及各种IC卡的双重确认,还可用于考勤系统和家用电子门锁等许多方面。

指纹识别是要确定两枚指纹是否来自同一个手指。过去人们对指纹识别做了许多研究。D. K. Isenor<sup>[1]</sup>提出了一种使用图形匹配来对两枚指纹进行匹配的算法; Andrew K Hrechak<sup>[2]</sup>等人用结构匹配来做指纹识别。但目前最常用的方法是用FBI提出指纹细节节点模型来做细节匹配。它利用指纹脊线的端点和分歧点(如图1所示)来鉴定指纹。通过将细节节点表示为点模式,一个自动指纹识别问题就转化为点模式匹配的问题。

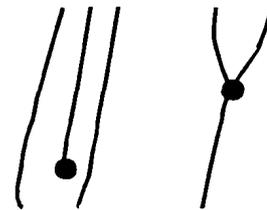


图1 脊线的端点和分歧点

## 1 点模式匹配

### 1.1 背景介绍

点模式匹配的问题是模式识别中的一个有名的难题。它是指对于两个含有不同数量的点集  $P\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  和  $Q\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , 如何找出它们之间的匹配关系。因此,一个好的点模式匹配算法应该能够有效地解决两个点集间的几何不变量问题。人们对一般的点模式匹配提出过很多算法。Ranade<sup>[3]</sup>等人的松弛算法, Skea<sup>[4]</sup>的三角形匹配算法等,这些算法有的只是针对部分几何不变量进行处理,如松弛算法主要处理点集间的平移,有的计算复杂度太高,如三角形法达到了  $O(n^8)$ 。

\* 收稿日期:2002-02-02

作者简介:王崇文(1974-),男,河南南阳人,重庆大学博士研究生。主要研究方向图象处理与模式识别。

点模式匹配中的2个点集  $P$  和  $Q$ , 其中  $P$  从第1幅图象抽取, 由  $m$  个点特征构成,  $Q$  从第2幅图象抽取, 由  $n$  个点特征构成, 即  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  和  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 。它们之间的匹配就是找到一个校准函数  $G(t_x, t_y, s, \theta)$ , 以使两个点集有最大数量点对之间存在稳定的一一对应关系。即  $G(p_i) = q_b$ , 而在实际应用中, 点的相对位置存在误差,  $G(p_i)$  不可能完全等于  $q_b$ , 所以我们一般用  $(\|G(p_i) - q_b\| \leq d)$  为允许的变形范围) 来表示  $Q$  与  $P$  中点对的对应关系。

文章中, 校准函数  $G(t_x, t_y, s, \theta)$  是一个含有4个参数的仿射变换, 其中  $s$  是两幅图象间的伸缩系数,  $\theta$  是偏转角度,  $t_x$  和  $t_y$  分别是沿  $x$  方向和  $y$  方向的位移。文章的目的就是对于2个从指纹图象中抽取的细节特征点集, 找出它们间的校准函数  $G(t_x, t_y, s, \theta)$ 。下面首先介绍2个与点模式匹配相关的定理。

1.2 定理

对于点集中的特征点, 用  $x$  方向和  $y$  方向的坐标来描述, 即  $P = \{(x_{p_i}, y_{p_i})^T \mid i = 1, \dots, m\}$ ,  $Q = \{(x_{q_a}, y_{q_a})^T \mid a = 1, \dots, n\}$ 。显然, 若  $P$  和  $Q$  中只有一个点存在对应关系, 即

$$q = G(p) \Rightarrow \begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}$$

校准函数有不定解。如果在点集  $P$  中有两个点  $(p_i, p_j)$  与点集  $Q$  中的两个点  $(q_a, q_b)$  存在对应关系, 且  $p_i \neq p_j, q_a \neq q_b$ , 则存在唯一的校准函数  $G$ 。该定理的描述和证明如下:

定理1(校准函数唯一性定理) 设  $(p_i, p_j)$  和  $(q_a, q_b)$  是点集  $P$  和  $Q$  中的两个点对, 且  $p_i \neq p_j, q_a \neq q_b$ , 那么存在唯一的校准函数  $G(t_x, t_y, s, \theta)$ , 使得  $q_a = G(p_i)$  和  $q_b = G(p_j)$  成立。其中  $s = |q_a q_b| / |p_i p_j|$ ,  $\theta = \theta_{q_a q_b} - \theta_{p_i p_j}$ ,  $t_x = x_{q_a} - x_{p_i} (s \cos \theta) + y_{p_i} (s \sin \theta)$ ,  $t_y = y_{q_a} - x_{p_i} (s \cos \theta)$ 。

证明: 因为  $q_a = G(p_i)$  和  $q_b = G(p_j)$ , 所以

$$\begin{pmatrix} x_{q_a} \\ y_{q_a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{p_i} \\ y_{p_i} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} x_{q_b} \\ y_{q_b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{p_j} \\ y_{p_j} \end{pmatrix} \quad (2)$$

(1) - (2) 得:

$$\begin{pmatrix} x_{q_b} - x_{q_a} \\ y_{q_b} - y_{q_a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s \cos \theta & -s \sin \theta \\ s \sin \theta & s \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{p_j} - x_{p_i} \\ y_{p_j} - y_{p_i} \end{pmatrix} \Rightarrow \quad (3)$$

$$q_a q_b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} p_i p_j \Rightarrow \quad (4)$$

$$q_a q_b = s |p_i p_j|, \theta_{q_a q_b} = \theta + \theta_{p_i p_j} \Rightarrow$$

$$S = |q_a q_b| / |p_i p_j|, \theta = \theta_{q_a q_b} - \theta_{p_i p_j},$$

$$t_x = x_{q_a} - x_{p_i} (s \cos \theta) + y_{p_i} (s \sin \theta),$$

$$t_y = y_{q_a} - x_{p_i} (s \sin \theta) + y_{p_i} (s \cos \theta)$$

证明完毕。

式(3)和式(4) 它们清楚地表明存在一个新的校准函数  $G(0,0,s, \theta)$ , 使得向量  $p_i p_j$  与  $q_a q_b$  具有对应关系。因此, 可以得到以下推论:

推论1: 如果  $(p_i, p_j)$  和  $(q_a, q_b)$  两个点对间存在校准函数  $G(t_x, t_y, s, \theta)$ , 则向量  $p_i p_j$  与  $q_a q_b$  间的校准函数为  $G(0,0,s, \theta)$ , 其中  $s = |q_a q_b| / |p_i p_j|$ ,  $\theta = \theta_{q_a q_b} - \theta_{p_i p_j}$ 。

定理2: 设点集  $A \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_k\}$  与点集  $B \{b_1, \dots, b_i, \dots, b_k\}$  存在一一对应关系, 其校准函数为  $G(t_x, t_y, s, \theta)$ , 则对任意对应点对  $a_i \leftrightarrow b_i$ , 存在两个具有一一对应关系的矢量集  $\{a_i, a_1, \dots, 0, \dots, a_i, a_k\}$  和  $B_i = \{b_i, b_1, \dots, 0, \dots, b_i, b_k\}$ , 它们间的校准函数为  $G(0,0,s, \theta)$ 。

定理2的证明可方便地由推论1得出。由定理2可以发现, 校准函数的参数由四个变成了两个, 而对于本文后面要涉及的指纹匹配, 因为所有指纹图象都由同一指纹采集器录入, 所以图象的放大系数  $s$  可认为基本不变, 这样, 校准函数就可以只对图象的偏转角度  $\theta$  进行估算, 而不用估算其他系数。

2 点模式匹配在指纹识别中的应用

2.1 自动指纹识别系统(AFIS)概述

图2是一个AFIS的简单流程。首先通过特定的指纹采集器获取指纹图象, 而后对指纹图象进行滤波、二值化和细化等预处理<sup>[5]</sup>, 得到指纹图象的单像素点线图, 在细化后的指纹图象上提取指纹的细节特征, 如分歧点和端点, 一般说来, 第一次提取的指纹细节特征中包含了很多伪特征, 这些伪特征一般是因为指纹图象预处理而产生的, 因而还需进行特征剪枝以保留可信度最高的细节特征<sup>[6]</sup>, 经过剪枝后的细节特征根据不同需要, 或存入指纹数据库或直接和指纹数据库中的样本比对, 进行指纹识别。在我们设计的自动指纹识别系统中, 指纹图象经特征剪枝后, 每一特征点是一个四维向量  $(x, y, \beta, c)$ , 其中  $x, y$  分别是该细节点的坐标位置,  $\beta$  是细节点的方向(该细节点所在局部脊线的方

向),  $c$  为细节点的类型(即是分叉点还是端点)。下面就介绍一下本文是如何基于点模式匹配的方法对从两

幅指纹图象中抽取的细节点集进行比对的。

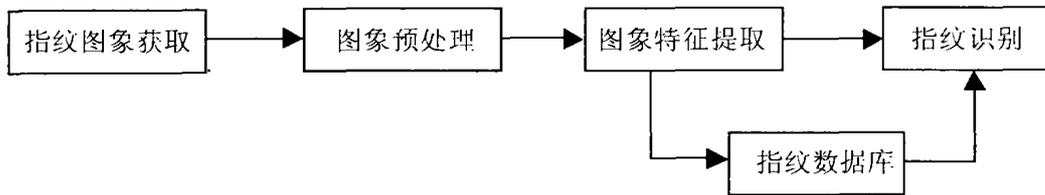


图 2 自动指纹识别系统流程

## 2.2 指纹匹配

### 2.2.1 计算匹配点对的支持数

在匹配点集  $P, Q$  中的  $p_i$  和  $q_a$  时, 构造了一个累加器数组  $M_{i,a}(\theta)$ 。设  $M_{i,a}(\theta)$  的最大值为  $w_{i,a}$ , 最大值所对应的参数  $\theta_{w_{i,a}}$ , 即  $w_{i,a} = M_{i,a}(\theta_{w_{i,a}})$ 。如果  $w_{i,a} = C$ , 则表示当  $p_i$  和  $q_a$  匹配时, 在相同的校准函数下, 还有  $C$  个点对存在一一对应关系。本文定义  $w_{i,a}$  为  $p_i$  和  $q_a$  匹配的点对支持数。以下是给定  $p_i$  和  $q_a$ , 确定其点对支持数的算法:

算法 1:

- 1) 置  $M_{i,a}(\theta) = 0$ ;
- 2) For  $j = 1 \dots m_1, j \neq i$ , 计算  $(|p_i p_j|, \theta_{p,p_j})$ ;
- 3) For  $b = 1 \dots n_1, b \neq a$ , 计算  $(|q_a q_b|, \theta_{q_a,q_b})$ ;
- 4) For  $j = 1 \dots m_1, j \neq i$ , For  $b = 1 \dots n_1, b \neq a$ , do
  - a. if  $(|p_i p_j| \approx |q_a q_b|)$  do
    - ① 计算  $\theta = \theta_{q_a,q_b} - \theta_{p,p_j}$ ;
    - ② if  $(\beta_j \approx (\beta_b - \theta))$  do
 
$$\text{matchflag}[j][b] = 1 / * p_j \leftrightarrow q_b \text{ 匹配} * /$$
 增加累加器  $M(\theta) = M(\theta) + 1$ ;
- 5) 从  $M(\theta)$  中找出最大值  $w_{i,a}$ , 使  $w_{i,a} = M_{i,a}(\theta_{w_{i,a}})$ 。

在该算法中, 数组  $\text{matchflag}$  来表示点  $j$  与点  $b$  是否匹配, 若  $\text{matchflag}[j][b] = 1$ , 则点  $j$  与点  $b$  匹配, 否则, 点  $j$  与点  $b$  不匹配。而点  $j$  与点  $b$  是否匹配由以下 2 个判断决定:

- 1) 细节点与参考点间的距离是否小于设定阈值  $d$ , 如 a 步所示;
- 2) 细节点本身的方向角偏差是否在在一定范围内, 如 ② 所示;

本算法在实际应用中, 考虑到从指纹图象中提取

的分叉点特征可信度要高于端点特征, 故以上  $m_1$  和  $n_1$  都是指的分叉点数目。从上述流程可以看出, 整个算法的计算量主要集中在步骤 4, 因此该算法的时间复杂度可近似为  $(m_1 - 1)(n_1 - 1)$ 。

### 2.2.2 确定校准函数的参数

如果  $p_j \leftrightarrow q_b$  是最优匹配, 则  $w_{j,b}$  应该是集合  $\{w_{i,a} | i = 1 \dots m; a = 1 \dots n\}$  中的最大值。在这个基础上, 本文提出了基于寻找具有最大支持数的匹配点对的校准函数参数确定的方法。该算法主要是确定两幅图象间的偏转角度。算法步骤如下:

算法 2:

- 1) 设最大支持数  $p_{\max} = 0$ ;  $\text{matchflag}[i][a] = 0$ ;
- 2) 设最大可能匹配上的点对数  $k = \min(m_1, n_1)$ ;
- /\* 在此,  $m_1$  和  $n_1$  分别指的是两个点集中分叉点的个数 \*/
- 3) For  $i = 1 \dots m$ , do
  - for  $a = 1 \dots n$ , do /\*  $m$  和  $n$  为两幅指纹图像所有细节特征点的数目 \*/
  - a. if  $(p_i$  和  $q_a$  都是分叉点), do
    - ① 如上所示, 计算  $p_i$  和  $q_a$  支持数  $w$  和该支持数对应的校准函数的参数  $\theta_w$ ;
    - ② if  $(w < t_w)$ , continue; /\*  $t_w$  为预先设定的最大匹配数的下限 \*/
    - ③ if  $(p_{\max} < w)$ , do
 
$$(p_{\max}, \theta_p) = (w, \theta_w), \text{pair-}i = I, \text{pair-}a = a$$
;
    - ④ if  $(p_{\max} \geq P_w)$ , go to 步骤 4; /\*  $P_w$  为预先设定的最大匹配数的上限,  $p_{\max} \geq P_w$  表明最大支持数已经找到 \*/
    - ⑤ if  $(p_{\max} \geq k)$ , 则最大支持数已经找到, go to 步骤 4;

b. 最大支持数未找到, 则  $k = k - 1$ ;

}

4) 点对  $p_{\text{pair-}i} \leftrightarrow q_{\text{pair-}a}$  具有最大的匹配支持数, 也就是说, 该点对即为图象匹配的基准, 并且校准函数的参数  $\theta = \theta_p$ 。

如果最大匹配的点对数目为  $k$ , 那么就意味着该算法要从集合  $\{w_{ia} \mid i = 1 \dots m - k + 1; a = 1 \dots n\}$  中找到最大值, 因此, 该算法的时间复杂度就为  $c * n * (m1 - 1) * (n1 - 1)$ , 其中  $c = m1 - k + 1$ 。根据此算法就可以确定校准函数的参数, 并在此基础上进行以下的指纹比对。

### 2.2.3 指纹比对

指纹图象经过预处理和特征提取, 保存的是不可逆的细节点集, 指纹比对实际是点模式集的匹配。由上所述, 我们已经确定了两幅图象的校准函数, 可通过以下步骤进行指纹比对:

算法 3:

1) 置两幅图象的最大匹配点对数为 0, 即  $p_{\text{match}} = 0$ ;

2) 如上所示, 设具有最大匹配支持数的点对为  $p_i$  和  $q_a$ , 则在两幅图象中, 分别以  $p_i$  和  $q_a$  为原点, 对其他点进行坐标变换, 注意在点集  $Q$  中, 要考虑到图象的偏转角  $\theta$ ;

3) For  $j = 1 \dots m, j \neq i$ , do, for  $b = 1 \dots n, b \neq a$ , do

3.1 if( $p_j$  与  $q_b$  匹配), do

3.1.1 从  $Q$  中删除  $q_b$ ;

3.1.2  $p_{\text{match}} = p_{\text{match}} + 1$ ;

4) if( $p_{\text{match}} > = T_m$ ), 则指纹比对成功。/ $* T_m$  为预置的匹配点对数  $*$  /

在该算法中, 点  $p_j$  与点  $q_b$  是否匹配由以下 3 个判

据决定:

a.  $q_b$  是否在以  $p_j$  为中心的预先设定的边界之内;

b.  $q_b$  的方向角与  $p_j$  的方向角的差值是否在一定范围之内;

c. 点  $p_j$  与点  $q_b$  的类型是否一致。

该算法的时间复杂度为  $m * n$ 。而整个指纹匹配过程的时间复杂度为  $c * n * (m1 - 1) * (n1 - 1) * m * n$ 。从实验得知, 一般而言, 指纹图像中的分歧点特征只占总特征的 25% ~ 40%, 即  $(m_1, n_1) = (1/4 - 2/5)(m, n)$ , 可以看出, 该方法相对于三角形法等其他算法, 在计算复杂度上得到了一定的改善。

### 3 实验结果

在设计自动指纹识别系统中, 图象采集器采用的是 veridicom 公司的电容式晶体传感器, 指纹图象的大小为  $300 \times 300$  像素, 图象分辨率为 500 dpi。我们总共从 20 个人身上采得了 500 幅指纹图象。对每个人采样 5 枚手指, 从同一手指采集 5 幅图象, 采集时, 对指纹输入的方向略有限制。在赛扬 433 的 PC 机上, 经过  $500 \times 499 = 249\,500$  次匹配试验, 得到以下结果: 当拒识率为 2% 时, 误识率为 1%, 而当拒识率为 5% 时, 误识率降为 0.4%。整个系统的特征提取时间平均为 1.272 s (包括预处理部分), 指纹登记平均时间为 2.524 s, 指纹识别平均时间为 0.707 s。该系统的整体性能, 对于一般商业用途, 完全可以满足要求。图 3 给出了基于点模式匹配寻找匹配基准的一个实例。(a) 和 (b) 为来自同一手指的两幅指纹, (c) 和 (d) 为提取细节特征后的指纹点线图, 图中用小黑点表示的是提取出的分歧点特征, 大黑斑表示的是两幅图象匹配的基准。两幅图象的偏转角度  $\theta$  为 5.230。

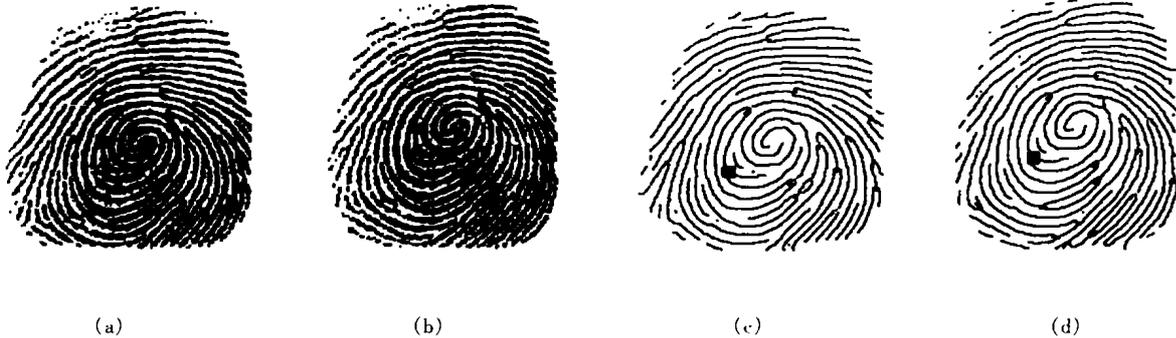


图 3 点模式匹配寻找基准

## 4 结语

笔者主要介绍了基于点模式匹配进行指纹识别的方法。提出了求解匹配点对的支持数和确定图象校准函数的算法,并把该算法应用于我们所设计的自动指纹识别系统。实验结果表明,该算法的有效性和可靠性都符合一般商业用途。当然,就系统而言,拒识率偏高对于产品的市场推广有不利影响,但我们在具体产品设计中,对于考勤系统,要求输入工号,进行“一对一”的比对,并在指纹登录时,登录两到三次,可把拒识率降到 0.7% 左右。另外,识别算法本身的计算也稍显复杂,下一步应在降低拒识率,保证识真率的基础上,尽量减少计算的复杂性,以使整个系统达到快捷可靠。

## 参考文献:

- [1] HUANG D C. Enhancement and feature purification of fingerprint image[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(11): 1 661 - 1 671.
- [2] QINGHAN XIAO, HAZEM RAAFAT. Fingerprint image postprocessing: a combined statistical and structural approach[J]. Pattern Recognition, 1991, 4(10): 985 - 992.
- [3] ISENER D K, ZAKY S G. Fingerprint identification using graph matching[J]. Pattern Recognition, 1986, 19(2): 113 - 122.
- [4] ANDREW K, HRECHAK, JAMES. A. Mchugh, Automated fingerprint recognition using structural matching[J]. Pattern Recognition, 1990, 23(8): 893 - 904.
- [5] SANJAY RANADE, AZRIEL ROSENFELD. Point pattern matching by relaxation[J]. Pattern Recognition, 1980, 12: 269 - 275.
- [6] SKEA D, BARRODALE, KUWAHARA R, et al. A control matching algorithm[J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 269 - 276.

# Fingerprint Identification Using Point Pattern Matching

WANG Chong - wen<sup>1</sup>, LI Jian - wei<sup>1</sup>, ZHENG Zhi - wei<sup>2</sup>, LIN Guo - qing<sup>1</sup>

(1. Optoelectrical College, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Department of Business Administration, )

**Abstract:** Fingerprint is those lines distributing on the finger surface. It's unique and stable. It has been hundreds years to use fingerprint to identity. AFIS (Auto Fingerprint Identification System) has been widely used. Besides traditional criminal, AFIS has been used to validate user in OS and web access, and embedded AFIS also has been used in ATM, credit card and door - lock. Fingerprint matching is one of the most important problems in AFIS. In general, the minutiae such as ridge endings and ridge bifurcation is to be used to represent a fingerprint and the fingerprint matching through minutiae matching. Based on this observation and by representing the minutiae as a point pattern, an automatic fingerprint verification problem may be reduced to a point pattern matching (minutia matching) problem. Point pattern matching is a famous problem in the field of pattern recognition. For a good point pattern matching approach, it is able to perform the geometrical invariant quantities (translation, rotation, and scaling) efficiently. Various algorithms have been proposed for point pattern matching. For example, the relaxation approach handles translational difference only and the complexity of triangles approach is very high. In this paper, an algorithm for fingerprint identification using point pattern matching based on cluster approach is proposed, which effectively solves the problems of optimal matching between two fingerprint minutiae images under geometrical transformation and minutiae quantity change. Process which bases on the matching of vector pairs is developed to determine the registration parameters. The experimental results show that the proposed matching algorithm is fast and has high accuracy.

**Key words:** point pattern matching; minutiae; maximum matching pairs support; registration; AFIS ; fingerprint identification; affine transformation

(责任编辑 张小强)