

基于 Delaunay 三角化的指纹匹配方法

尹义龙 张宏伟 刘宁

(山东大学计算机科学与技术学院 济南 250100)

(ylyin@sdu.edu.cn)

Fingerprint Matching Based on Delaunay Triangulation

Yin Yilong, Zhang Hongwei, and Liu Ning

(School of Computer Science and Technology, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract In this paper, a method for fingerprint matching is proposed based on Delaunay triangulation in computational geometry. First, minutiae taken from the template and the query fingerprint images are triangulated using the Delaunay's rule. Then reference minutiae pairs are obtained by searching two DT nets. Finally the query fingerprint image is adjusted according to the template fingerprint image with parameters computed from reference minutiae pairs and match score is calculated using a simple match algorithm. The experiments conducted on BVC2004 confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words fingerprint; fingerprint identification; fingerprint matching; Delaunay triangulation

摘要 将计算几何的三角划分方法引入指纹匹配,研究了一种基于DT(Delaunay triangulation)网的指纹匹配方法。通过对细节节点的拓扑结构进行DT划分,把空间上位置相近的细节节点按照一定规则相连,得到三角形网格。然后基于该网格寻找若干参考点对,并根据获得的参考点对将两幅指纹图像进行姿势调整。最后使用获得的参考点对实现基于点模式的指纹匹配。算法在第1届中国生物特征识别竞赛指纹组的测试结果证明了有效性。

关键词 指纹;指纹识别;指纹匹配;Delaunay三角化(德洛内三角剖分)

中图分类号 TP391

1 引言

自动指纹识别系统是生物特征识别研究的一个热点,包括指纹采集、指纹增强、指纹分类、特征提取和指纹匹配等内容。指纹匹配是自动指纹识别中的一个难点。现有的指纹匹配方法大致可以归结为两类:第1类是图形匹配的方式^[1~7],是基于纹线结构或者细节节点拓扑结构的匹配;第2类是人工神经网络的方法^[8,9],但是要经过足够数量样本的训练,所以不适合实时在线的自动指纹识别系统。在图匹配方式中,大多采用细节节点拓扑结构来实现匹配。它

利用指纹图像中纹线端点和纹线分叉点这两种点作为判断指纹惟一性的特征点来识别指纹,这就将指纹匹配的问题转化为点模式匹配的问题。

国内外的学者对此进行了大量的研究。Ranade和Rosenfeld^[1]提出了点模式匹配的松弛算法。松弛匹配使用迭代的方法,存在高复杂度和低效率问题。Starink和Backer^[2]使用了模拟退火算法,但是该方法计算代价比较大。Jain等人^[3]针对指纹匹配中的点模式匹配问题提出了一种改进的算法,Luo和Tian^[4]也提出了一种细节匹配算法。这两种算法均使用了指纹的脊线信息,虽然使用这些信息提高了匹配算法的有效性,但是增大了存储要求。单独进

行点模式下的匹配很难克服噪声、旋转及变形对指纹识别的干扰。在点模式匹配下同时利用指纹的结构信息的算法在一定程度上可以克服这种问题。但是 Jiang 和 Yau^[5]的基于局部和全局结构的细节点匹配算法存在局部结构中邻点个数的选取问题, Zhang 等人^[6]的基于奇异点的结构匹配算法又受到奇异点提取准确性的影响。

本文研究了一种基于 DT 网络的指纹匹配方法,这是一种局部结构匹配和全局点模式匹配相结合的方法。首先利用三角化产生的网状结构进行结构匹配寻找基准点,根据基准点对指纹图像进行姿势纠正;然后在姿势纠正之后的指纹中利用点模式匹配计算匹配得分。该方法中不但利用了细节点本身的角度和位置信息,相邻细节点间连线的距离及连线对应的矢量线段的角度等其他有关指纹结构的信息也得到有效利用。实验结果证明了该算法的有效性。

本文内容安排如下:第 2 节介绍 DT 网络的构造及 DT 网络在指纹匹配应用中的优势分析;第 3 节是算法描述;第 4 节是本文方法的测试结果;最后是对本文方法的总结。

2 DT 网络简介

2.1 DT 网构造

本文采用基于均匀网格的三角网生长法^[10]对离散点集进行三角划分,算法复杂度近似为 $O(n)$,其中 N 为点个数。算法由以下几个主要步骤组成:

(1) 数据的预处理。根据细节点的坐标值确定一个最大最小盒,对盒四周进行补偿,使该盒能容纳所有细节点。等分该盒所在矩形区域,得到均匀的矩形网格。对网格按顺序编号,使细节点根据坐标与网格号码对应,恰好位于网格线上的点按某种规则对应到附近网格中即可。对应到同一个编号的点按加入先后顺序构成一条链表。

(2) 找到第 1 条边。首先确定第 1 点,该点从网格中心或中心附近得到。然后在网格中寻找和该点距离最近的点,将这两点连接起来,生成第 1 条边。

(3) 生成第 1 个三角形。在当前边的右侧一个局部区域内搜索第 3 个点,形成第 1 个三角形,要求该三角形区域内不能有其他的点。

(4) DT 三角网格生成。继续从刚找到的新边的右侧找其他的点,形成更多的三角形。将这些三

角形按照规则连接起来,形成 DT 三角网。

一幅指纹图像的细节点生成 DT 网的过程如图 1 所示。图 2 显示了一幅指纹图像的特征点用 Delaunay 三角化方法进行三角划分的情况。

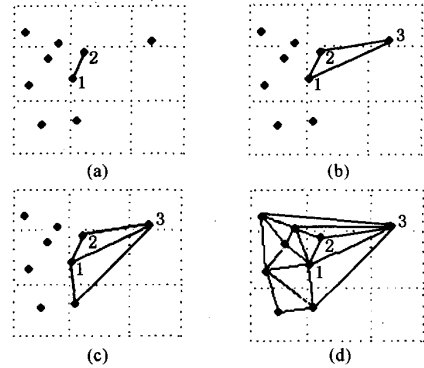


Fig. 1 Building DT net from minutiae. (a) Finding the first edge; (b) Forming the first triangle; (c) Adding the second triangle clockwise; and (d) Putting triangles together.

图 1 细节点 DT 网的形成过程。(a)第 1 条边的确定;(b)生成第 1 个三角形;(c)顺时针加入第 2 个三角形;(d)三角形组合在一起

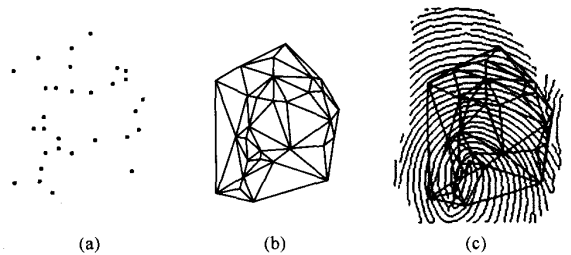


Fig. 2 DT net of a fingerprint image. (a) Minutiae without background; (b) DT net produced from minutiae in (a); and (c) DT net with thinning fingerprint image.

图 2 一幅指纹图像的 DT 网。(a)无指纹背景的细节点;(b)由图(a)中细节点形成的 DT 网;(c)带有原始图像的细化图的 DT 网

2.2 DT 网在指纹匹配中的应用分析

DT 网络具有如下两个重要的性质,使得它成为分析研究区域离散数据的有力工具:

(1) 空外接圆性质。空外接圆性质是指由点集 V 形成的 DT 网格中,每个三角形的外接圆内均不包含点集 V 中其他任意点。

(2) 最大的最小角度性质。最大的最小角度性质是指点集 V 所形成的 DT 网格中的三角形的最小角度最大。比起其他已知的拓扑结构,DT 网络最大可能地避免了出现狭长、尖锐的三角形连接,并具有惟一性。

在指纹特征点模式的匹配中,性质(1)可以使得少数真正特征点的缺失、个别伪特征点的出现和特征点的定位偏差等因素对划分结果的影响尽量局限在一个小的局部范围内.如图3所示,图3(a)中的点1在图3(b)中没有对应点,这表明1号点要么对于图3(b)来说是一种真点缺失的情况,要么对于图3(a)来说是一个伪点,但这都不影响在相应位置左下方找到两对相似三角形.而对于图3(a)和图3(b)中对应的2号点和3号点,虽然细节点定位有偏差,而这也影响到它们与周围若干邻点之间的结构,但并不影响在点周围找到若干匹配的三角形对.性质(2)能避免产生不稳定和瘦小的三角形,在指纹特征点模式中DT网格具有极好的结构稳定性.

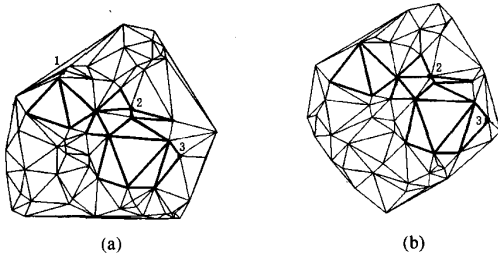


Fig. 3 DT nets of two fingerprint images from the same finger. (a) DT net of the first fingerprint; (b) The DT net of the second fingerprint. The triangles marked with the thick lines in (a); and (b) are similar triangle pairs (Point pairs 1, 2 and 3 are three pairs of corresponding minutiae). 图3 两幅同源指纹图像的DT网.(a)模板指纹的DT网;(b)待识别指纹的DT网(用粗线标出的三角形是相似三角形对,点对1,2和3分别是对应的点)

3 算法描述

在指纹匹配前,要对指纹图像进行相应的预处理并提取细节点信息.本文算法有如下几步:①细节点的DT网生成;②基于DT网的局部匹配与参考点对的求取;③姿势纠正与指纹匹配.

3.1 细节点的DT网生成

采用第2.1节的方法对两幅指纹图像的特征点构造DT网.

3.2 基于DT网的局部匹配与参考点对的求取

基于DT网的局部匹配算法是从模板指纹和待识别指纹中找相似三角形结构,将得到的相似三角形的顶点作为参考点.在寻找相似结构时,特征点方向、边的长度、三角形的内角等都得到了有效的利用,如图4所示:

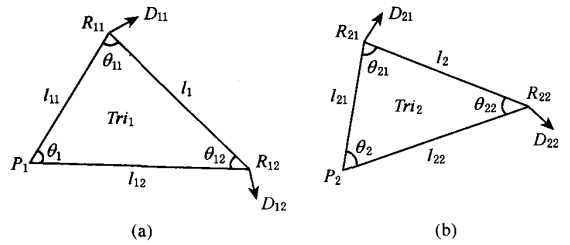


Fig. 4 Two similar triangles of two finerprint images from the same finger (minutiae direction, edge length and triangular angles are used to compare two triangles). (a) and (b) are triangles taken from DT nets of the template and the query fingerprint images, respectively.

图4 2个同源指纹图像中的相似三角形(比较2个三角形时用了细节点方向、边长和三角形的内角).(a)和(b)模板图像和待识别图像的三角网中的三角形

该算法主要由如下3个步骤组成:

(1)在两幅图像 Tem, In 的DT网里找相似边.从两个三角网中各选一条任意三角边 L_1, L_2 , 边长分别为 l_1, l_2 .边 L_1 的两个端点 R_{11}, R_{12} 其特征点方向为 D_{11}, D_{12} ,边 L_2 的两个端点 R_{21}, R_{22} 其特征点方向为 D_{21}, D_{22} ,判断这两条边是否满足下面条件:

$$① |l_1 - l_2| < T_1;$$

$$② ||D_{11} - D_{12}| - |D_{21} - D_{22}|| < T_2.$$

其中, T_1, T_2 是根据经验选取的阈值.若以上两个条件都满足,则表示 L_1, L_2 为一对相似边,转步骤(2);不满足则从图 In 中找下一条边和 L_1 进行匹配,直至图 In 的所有三角边和 L_1 全部比对过.对于 Tem 中的每一条边均和 In 中每一条边进行比对.假如两幅图分别有 M, N 条边,则一共比对 $M \times N$ 次.如果所有的边都比较完毕,且没有找到一对相似边,则算法结束.

(2)在DT网格中,边的结构包括4个标志位 s, t 和 l, r ,其中 s, t 对应边的两个端点, l, r 对应边的左右是否有三角形.令 s 对应 x 坐标较小的端点, t 对应 x 坐标较大的端点.根据一条边的方向及左右标志,可以找到这条边的左(右)邻三角形.设有左邻点 P_1, P_2 ,则有两个左(右)邻三角形 Tri_1, Tri_2 ,转步骤(3).

(3)比较三角形,除了 L_1, L_2 另外两对对应边为 P_1R_{11}, P_2R_{21} 和 P_1R_{12}, P_2R_{22} ,设 l_{11}, l_{21} 和 l_{12}, l_{22} 为对应的边长, $\theta_1, \theta_{11}, \theta_{12}$ 和 $\theta_2, \theta_{21}, \theta_{22}$ 分别为 Tri_1, Tri_2 的对应的3个夹角角度,判断是否满足以下条件:

$$\textcircled{1} |l_{11} - l_{21}| < T_3, |l_{12} - l_{22}| < T_3;$$

$$\textcircled{2} |\theta_{11} - \theta_{21}| < T_4, |\theta_{12} - \theta_{22}| < T_4, |\theta_1 - \theta_2| < T_4,$$

其中, T_3, T_4 是根据经验选取的阈值. 若以上两个条件都满足, 则认为这两个三角形相似, 记住该相似三角形. 若有右(左)邻三角形则对右(左)邻三角形判断. 若不满足以上条件, 并且没找到右(左)邻三角形则回到步骤(2)处理下一对相似边. 当所有相似边处理完毕, 算法结束.

重复以上 3 个步骤, 找到若干相似三角形并记录其对应顶点, 这些对应顶点即参考点对.

3.3 姿势纠正与指纹匹配

在全局匹配之前, 利用局部匹配阶段得到的参考点对计算旋转和平移参数, 根据模板指纹图像将待识别指纹图像进行姿势纠正, 实质是对细节点的位置和方向的调整. 调整之后, 将待识别图像和模板图像进行全局匹配并计算匹配得分.

姿势纠正及指纹匹配算法有以下 3 个步骤:

(1) 对于一对相似三角形, 其 3 个顶点均为参考点, 根据它们分别计算待识别图像相对于模板图像的平移(横向和纵向)和旋转参数, 可得到 3 组参数, 取其平均值作为横向平移 Δx 、纵向平移 Δy 以及旋转角度 $\Delta\theta$.

(2) 以 3 个顶点之一为中心, 按照上一步得到的

旋转、平移量根据式(1)对待识图像进行姿势纠正.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta & 0 \\ \sin\Delta\theta & -\cos\Delta\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta\theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $[X, Y, \theta]^T$ 表示待识别图像中任一特征点的坐标和所在纹线方向, 而 $[X', Y', \theta']^T$ 则表示待识别图像姿势纠正以后相应的值. 只有在对待识图像相对于模板图像进行姿势纠正以后, 才能匹配两幅图像中的特征点. 图 5 显示了两幅指纹图像在经过姿势调整后的叠加结果.

(3) 以模板图像的任一特征点为中心, 在待识别图像的预定的一个较小半径的范围内寻找与之相对应的特征点. 如果找到一个特征点, 且两个特征点所在纹线方向角相差不大, 就认为这是一对匹配的特征点. 继续考察模板图像中的下一个特征点, 统计匹配的特征点对数. 对于模板指纹中每一个特征点都和待识别指纹中所有未得到匹配的特征点匹配一遍之后, 我们得到一个待识别指纹中所有得到匹配的点对数 N , 令 $M1$ = 模板细节点总数, $M2$ = 待识别指纹细节点总数, 得匹配分数 $score = N/\sqrt{M1 \times M2}$.

对每一对相似三角形结构执行完以上 3 个步骤, 得到所有匹配分数中的最大值作为模板指纹和待识别指纹的最终匹配分数.



Fig. 5 Overlap of thinning fingerprint images after alignment. (a) Template image; (b) Input image; and (c) Input image aligned is mapped into template image, (c) overlap of the two fingerprints.

图 5 两幅细化指纹图像在姿势调整后的叠加结果。(a)为模板图像;(b)为待识别图像;(c)为两幅图像的叠加

4 实验结果

本文算法参加了第 1 届中国生物特征识别竞赛, 获得了指纹组的第 2 名, 算法编号是 FI015. BVC2004 指纹库中包含 5 个子库, 其中前 3 个库的指纹图像使用不同的传感器采集, 第 4 个库的指纹图像使用指纹生成器合成, 第 5 个库是卡片式指纹

库. 每个库中均 1000 幅指纹图像, 分为 100 组, 每组 10 幅图像, 同一组中的 10 幅指纹图像来自同一个手指. 共有 7 个单位和个人参加了指纹组的竞赛, 图 6 画出了所有 7 个参赛算法在其中 4 个子库上的 ROC 曲线. 本次竞赛的测试环境为 CPU: Pentium IV 3.0GHz; 内存: 256MB; 操作系统: Windows XP. 本文实验结果来自第 1 届中国生物特征识别竞赛组委会的网站^①.

^① www.sinobiometrics.com/chinese/conferences/sinobiometrics'04.htm

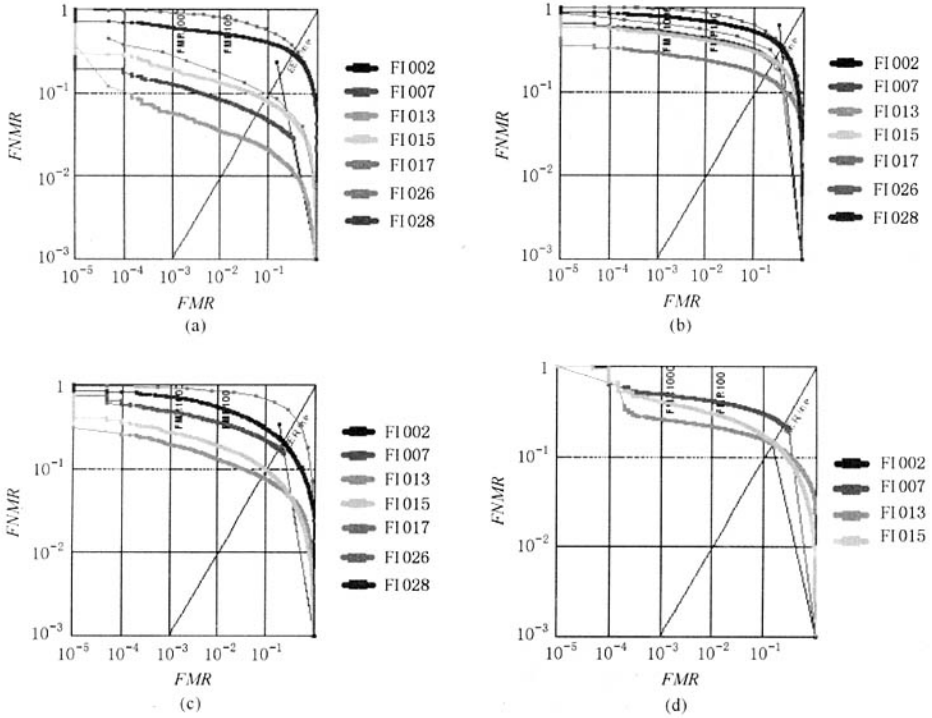


Fig. 6 ROC curves on four databases of BVC2004. (a) DB1_a; (b) DB2_a; (c) DB3_a; and (d) DB5_a.

图6 BVC2004 4个库上的ROC曲线图。(a) DB1_a上;(b) DB2_a;(c)DB3_a;(d) DB5_a

本次竞赛采用了 EER , FMR_{100} , FMR_{1000} , $ZeroFMR$ 和 $ZeroFNMR$ 等 5 个指标作为衡量指纹匹配算法性能的依据。其中, ERR 代表等错误率, 即拒识率和误识率相等时的平均错误率; FMR 代表误识率; $FNMR$ 代表拒识率; FMR_{100} 表示当 $FMR =$

法, 在原理上是一种局部结构匹配和全局点模式匹配相结合的方法。首先利用指纹的细节点生成 DT 网格, 通过三角形的边对比方式确定相似边和相似三角形, 然后使用相似三角形的顶点作为参考点, 对待识图像姿势纠正, 最后利用点模式匹配方法实现指纹匹配。第 4 届指纹识别算法竞赛的结果说明了

- 3 A. K. Jain, L. Hong, R. Bolle. On-line fingerprint verification. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, 19(4): 302~314
- 4 Luo Xiping, Tian Jie. Image enhancement and minutiae matching algorithms in automated fingerprint identification system. *Journal of Software*, 2002, 13(5): 946~956 (in Chinese)
(罗希平, 田捷. 自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法. *软件学报*, 2002, 13(5): 946~956)
- 5 Jiang Xudong, Yau Weiyun. Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures. *The 15th Int'l Conf. Pattern Recognition*, Barcelona, 2000
- 6 Zhang Weiwei, Wang Sen, Wang Yangsheng. Structure matching algorithm of fingerprint minutiae based on core point. *Journal of Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(6): 842~850(in Chinese)
(张伟伟, 王森, 王阳生. 基于中心点的指纹细节结构匹配算法. *自动化学报*, 2003, 29(6): 842~850)
- 7 Yin Yilong, Ning Xinbao, Zhang Xiaomei, *et al.* A fingerprint matching algorithm based on ridge comparability. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, 15(4): 502~506 (in Chinese)
(尹义龙, 宁新宝, 张晓梅. 一种基于纹线相似度的指纹匹配方法. *模式识别与人工智能*, 2002, 15(4): 502~506)
- 8 J. P. Starink, E. Backer. Finding point correspondence using simulated annealing. *Pattern Recognition*, 1995, 28(2): 231~240
- 9 V. V. Vinod, S. Ghose. Point matching using asymmetric neural networks. *Pattern Recognition*, 1993, 26(8): 1207~1214
- 10 Tsung-Pao Fang, Les A. Piegl. Delaunay triangulation using a uniform grid. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1993, 13(3): 36~47



Yin Yilong, born in 1972. Since 2002, he has been an associate professor in the School of Computer Science and Technology, Shandong University. His main research interests are biometrics, image processing and pattern recognition, machine learning.

尹义龙, 1972年生, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为生物特征识别、图像处理与模式识别、机器学习。



Zhang Hongwei, born in 1979. Received his B. A's degree from Shandong University of Chinese Traditional Medicine in 2002. Since 2003, he has been a M. A degree candidate in computing science from Shandong

University. His current research interests include biometrics, image processing and pattern recognition.

张宏伟, 1979年生, 硕士研究生, 研究方向为生物特征识别、图像处理与模式识别。



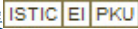
Liu Ning, born in 1980. She received her B. S. degree in applied mathematics in 2002 from Zhengzhou University, Henan, China. She is currently pursuing M. S. degree in the School of Computer Science and Technology, Shandong University. Her current research interests include biometrics, image processing and pattern recognition.

刘宁, 1980年, 硕士研究生, 研究方向为生物特征识别、图像处理与模式识别。

Research Background

Biometrics is the science of using physiological or behavioral traits of an individual to identify a person or to verify a claimed identity. A typical biometrical system includes fingerprint acquisition, fingerprint segmentation, fingerprint enhancement, feature extraction, fingerprint matching and/or fingerprint classification. Ridge ending and ridge bifurcation are two kinds of minutiae most used. Minutiae based matching algorithm is the most well-known and widely used algorithm for fingerprint matching. Although progress has been made in the development of various matching algorithm, but there are still many problems needed to handle with, such as fingerprint deformation, small overlap etc. In this paper, we proposed a scheme for fingerprint matching based on Delaunay triangulation in computational geometry. Triangulation is an effective tool in dealing with scattered data set. The DT net produced from triangulation is unique and invariable to rotation and translation. By comparing two DT nets generated from the template and the query fingerprint images, reference minutiae pairs are obtained to adjust two fingerprint images. Then fingerprint matching is made using point pattern matching. The experiments on BVC2004 indicate the validity of our algorithm.

基于DeLaunay三角化的指纹匹配方法

作者: [尹义龙](#), [张宏伟](#), [刘宁](#), [Yin Yilong](#), [Zhang Hongwei](#), [Liu Ning](#)
作者单位: [山东大学计算机科学与技术学院, 济南, 250100](#)
刊名: [计算机研究与发展](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF COMPUTER RESEARCH AND DEVELOPMENT](#)
年, 卷(期): 2005, 42(9)
被引用次数: 10次

参考文献(11条)

1. [A K Jain;L Hong;R Bolle](#) [On-line fingerprint verification](#)[外文期刊] 1997(04)
2. [J P Starink;E Backer](#) [Finding point correspondence using simulated annealing](#)[外文期刊] 1995(02)
3. [A Ranade;A Rosenfeld](#) [Point pattern matching by relaxation](#) 1993(02)
4. [查看详情](#)
5. [Tsung-Pao Fang;Les A Piegl](#) [Delaunay triangulation using a uniform grid](#)[外文期刊] 1993(03)
6. [V V Vinod;S Ghose](#) [Point matching using asymmetric neural networks](#)[外文期刊] 1993(08)
7. [J P Starink;E Backer](#) [Finding point correspondence using simulated annealing](#)[外文期刊] 1995(02)
8. [尹义龙;宁新宝;张晓梅](#) [一种基于纹线相似度的指纹匹配方法](#)[期刊论文]-[模式识别与人工智能](#) 2002(04)
9. [张伟伟;王森;王阳生](#) [基于中心点的指纹细节结构匹配算法](#)[期刊论文]-[自动化学报](#) 2003(06)
10. [Jiang Xudong;Yau Weiyun](#) [Fingerprint minutiae matching based on the local and global structures](#)[外文会议] 2000
11. [罗希平;田捷](#) [自动指纹识别中的图像增强和细节匹配算法](#)[期刊论文]-[软件学报](#) 2002(05)

引证文献(10条)

1. [陈晖. 殷建平. 祝恩](#) [一种扭曲指纹图像的细节点修正方法](#)[期刊论文]-[计算机研究与发展](#) 2010(12)
2. [杨栋. 杨公平. 尹义龙. 张利明](#) [基于多级结构相似度的快速指纹匹配算法](#)[期刊论文]-[山东大学学报\(工学版\)](#) 2010(2)
3. [刘宁. 宋涛](#) [一种基于采集设备无关性的指纹匹配算法](#)[期刊论文]-[福建电脑](#) 2009(7)
4. [何伟. 吴良. 张玲. 张萌. 杨建新](#) [基于全等三角形的指纹匹配算法的研究与实现](#)[期刊论文]-[信息与电子工程](#) 2008(4)
5. [唐好魁. 徐涛](#) [基于DeLaunay三角剖分的指纹识别](#)[期刊论文]-[济南大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)
6. [谷斌. 靳艳峰. 王力娟. 耿科明. 庞贵法](#) [基于贪心算法与多边形剖分的印鉴匹配算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2008(12)
7. [袁占亨. 张秋余. 靳艳峰](#) [基于DeLaunay与多边形三角剖分的印鉴识别算法](#)[期刊论文]-[模式识别与人工智能](#) 2007(2)
8. [袁占亨. 靳艳峰. 张秋余](#) [利用贪心算法进行三角剖分的指纹匹配方法](#)[期刊论文]-[计算机工程与应用](#) 2007(10)
9. [邹晓. 靳艳峰](#) [基于DeLaunay三角剖分的印鉴识别算法](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2007(12)
10. [邹晓. 靳艳峰](#) [基于贪心算法进行三角剖分的印鉴匹配方法](#)[期刊论文]-[计算机工程与设计](#) 2007(5)