

中图法分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1015-07

论文索引信息: 卞维新, 徐德琴. 指纹图像细化的复合式算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1015-1021

指纹图像细化的复合式算法

卞维新, 徐德琴

(安徽师范大学数学计算机科学学院, 芜湖 241003)

摘要: 指纹图像细化是指纹识别算法中的重要环节, 对特征提取起到关键作用。为了快速和高质量地对指纹图像进行细化, 对快速细化算法和改进 OPTA 细化算法不足产生的内在原因进行分析, 提出一种新的复合式指纹图像细化算法, 该算法设计一套预处理模板, 避免了快速细化算法形成的毛刺, 并对改进 OPTA 算法进行了优化。大量实验结果表明, 该算法不但具有以往算法的优点, 有较好的细化速度, 而且细化质量有显著地提高, 细化后的图像光滑几乎无毛刺。

关键词: 指纹; 细化; 并行算法; 模板

Composite thinning algorithm for fingerprint image

Bian Weixin, Xu Deqin

(College of Mathematics and Computer Science, Anhui Normal University, Wuhu 241003 China)

Abstract: Fingerprint image thinning is an essential step in the fingerprint recognition system, which plays a key role in the feature extraction. In order to thin the fingerprint image efficiently, we analyze the underlying causes of the disadvantages of the existing fast parallel thinning algorithm and the improved OPTA thinning algorithm, and then present a new composite fingerprint image thinning algorithm is presented in this paper. A set of preprocessing templates are designed to smooth images after fast thinning. In addition, the improved OPTA algorithm is optimized for speed. A large number of experimental results show that, the presented algorithm has high thinning speed, and can obtain good thinning quality.

Keywords: fingerprint; thinning; parallel algorithm; template

0 引言

指纹图像细化是指纹识别技术的重要步骤之一, 细化的好坏是指纹特征提取的关键。指纹细节提取步骤中, 大部分提取算法都是从细化图像中提取局部细节特征点, 从而得到指纹的生物特征模式, 算法是基于细化后的指纹骨架的^[1]。理想的细化纹线应该是原始纹线的中间位置, 并保持纹线的连接性、拓扑结构和细节特征。因此, 一种好的细化方

法应满足收敛性、连接性、拓扑性、保持性、细化性中轴性和快速性^[2]。

由于细化过程要不断重复扫描图像, 所以图像细化是非常耗时的操作。因此, 研究如何用最少的迭代次数来得到完全细化的指纹图像以缩短细化时间是很有意义的。很多文献对细化算法进行研究, 提出了多种细化方法: Hilditch 算法^[3]、OPTA 细化方法^[4]、快速细化算法^[5]、基于神经网络的细化方法^[6]等。每种算法都有其特定的应用, 在性能上各有所长。目前使用较多的是基于八邻域像素拓扑关

收稿日期: 2010-07-05; 修回日期: 2010-10-19

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重点项目 (KJ2010A140); 安徽高校省级自然科学研究项目 (KJ2011Z136); 安徽师范大学青年基金项目 (2009xqn59)。

第一作者简介: 卞维新 (1974—), 男, 讲师。2005 年于贵州大学获计算机应用技术专业硕士学位, 主要研究方向为图像处理 and 模式识别。E-mail: bwx2353@mail.ahnu.edu.cn。

系计算的快速细化算法 FAT(fast thinning algorithm) 和 OPTA 算法及其各种改进形式^[7-9]。

细化算法的优劣主要是从细化质量和细化速度两个方面进行评价。本文通过对快速细化算法和改进 OPTA 算法的优缺点进行分析,将快速细化算法速度快的优势和优化 OPTA 算法的优点相结合,提出了一种新的复合式指纹图像细化算法。本文算法在进行快速细化之前对二值化图像使用一组模板进行了预处理,该方法有效地消除了快速细化产生的毛刺,在优化 OPTA 算法细化后用修正后的文献 [10]算法对细化结果进行了分叉点彻底细化处理。最后把本文算法和文献 [8-9]算法进行有针对性的比较,结果表明本文算法在运算速度和细化质量上均有良好表现。

1 现有算法分析

1.1 快速细化算法

快速细化算法的运行速度很快,但存在一个严重的缺陷,由于该算法是 4 连通算法,因此由该算法得出的细化纹线很多不是单像素宽(很多是双像素宽,特别是45°方向),细化不彻底。如图 1 所示是快速细化后的纹线局部放大图。

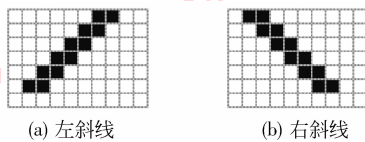


图 1 快速细化后纹线局部放大图

Fig.1 Local ridge magnified chart after fast thinning algorithm

快速细化算法细化后毛刺比模板类细化算法要少很多,但仍然存在较多毛刺。

从对大量的实验数据进行深入分析,得出导致快速细化毛刺产生的原因主要有如下几种:

1) 二值化指纹纹线上的毛刺,如图 2(a)所示。由于第 1 行第 6 列的点 $P_{1,6}$ 的存在,使得点 $P_{1,5}$ 不能删除,并最终导致细化产生毛刺,如图 2(b)所示。

2) 二值化指纹纹线上的像素落差,主要在垂直方向的左右两边的双素落差可能在快速细化时产生毛刺,如图 3(a)所示。由于第 8 行第 2、3 列的点形成的落差,使得点 $P_{8,2}$ 不能删除,又致使 $P_{8,3}$ 不能删除,并最终导致细化产生毛刺,如图 3(b)所示。

3) 二值化指纹纹线上的孤立点,如图 4(a)所

示。由于第 7 行第 5 列的孤立点的存在,使得点 $P_{7,5}$ 不能删除,并最终导致细化产生毛刺,如图 4(b)所示。

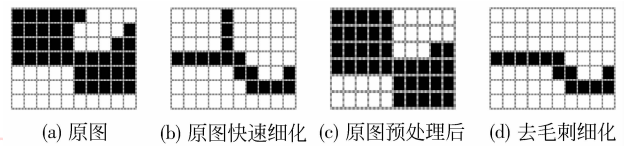


图 2 二值化纹线毛刺产生的细化毛刺及修正

Fig.2 The burr of binary ridge result in the burr after thinning and correction

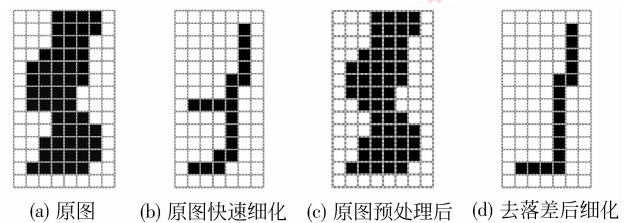


图 3 二值化纹线像素落差产生的细化毛刺及修正

Fig.3 The pixels difference of binary ridge result in the burr after thinning and correction

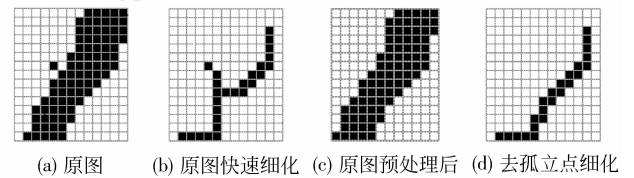


图 4 二值化纹线孤立点产生的细化毛刺及修正

Fig.4 The isolated point of binary ridge result in the burr after thinning and correction

4) 二值化指纹纹线上的单像素缺口,如图 5(a)所示。由于第 5 行第 7 列的像素点不能被删除,即点 $P_{5,7}$ 不能删除,并最终导致细化产生毛刺,如图 5(b)所示。

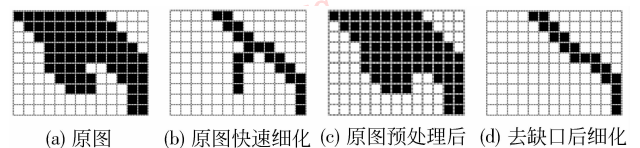


图 5 二值化纹线单像素缺口产生的细化毛刺及修正

Fig.5 The single pixel gap of binary ridge result in the burr after thinning and correction

1.2 改进的 OPTA 模板

改进的 OPTA 模板^[2]采用统一的 4 × 4 模板,改

善了原 OPTA 算法消除模板和保留模板不一致的情况, 构建了统一的消除模板 (8 个) 和保留模板 (6 个), 如图 6 和图 7 所示。E 为当前脊线点。

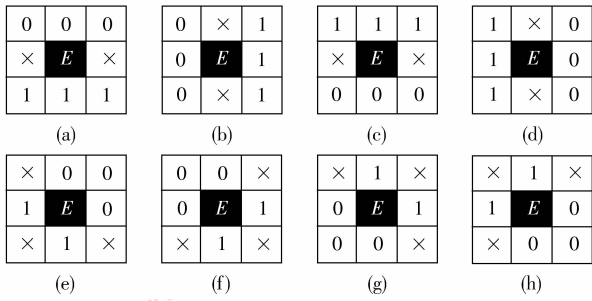


图 6 文献[2]算法的消除模板

Fig. 6 Elimination templates in reference[2]

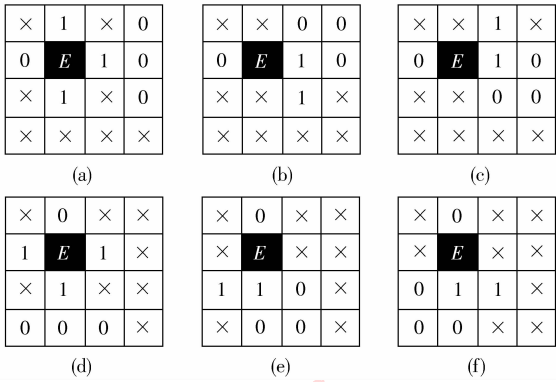


图 7 文献[2]算法的保留模板

Fig. 7 Reservation templates in reference[2]

该算法在一定程度上改善了 OPTA 算法细化后图像扭曲大、毛刺多、不光滑的缺点, 但它依然存在 3 个比较严重的缺陷。

1) 分叉点处细化不完全 改进的 OPTA 算法在分叉点处细化不彻底^[10], 如图 8 所示, 主要在 45° 方向及水平和垂直方向。

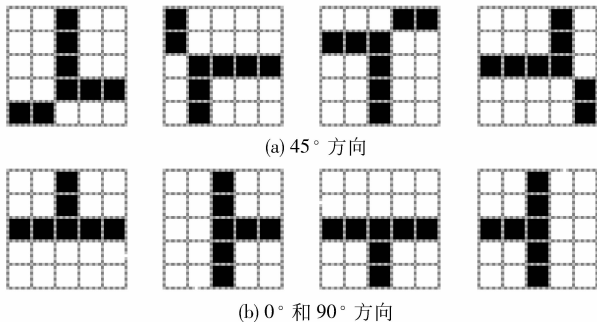


图 8 分叉点处细化不彻底示意图

Fig. 8 Incomplete thinning at the ridge bifurcation

2) 细化图像中仍有大量毛刺 由于改进的 OPTA 算法消除模板的不完全对称导致细化后有大量毛刺产生, 特别是纹线方向角在第 2 象限的时候。该细化算法对纹线一定方向上的突起十分敏感, 使得纹线上一点小小的突起不能被完全删除, 最后演变成了毛刺。

3) 对右斜线细化时迭代次数大量增加 图 1 (b) 所示, 用改进的 OPTA 模板细化时一次扫描只能细化一个像素点, 所以要完全细化, 需要迭代 6 次。可见迭代次数与斜线长度呈正比关系, 斜线越长扫描图像的个数越多, 花费的时间也就越长。文献[7]认为这是由于该算法保留模板条件过于宽松导致的, 因此文献[7]重新提出了一组保留模板来解决此问题。该算法虽然明显减少了迭代次数, 很好地解决了右斜线效应, 但却有可能破坏纹线的拓扑性, 产生新的断点, 破坏了细化质量。文献[8]针对文献[7]的问题提出了一组优化后组合模板细化算法, 解决了文献[7]细化速度快, 细化后可能出现新断点的问题, 但细化后的纹线依然存在较多毛刺。因此文献[8]又在细化后加入了去毛刺处理, 这必然要增加新的处理难度和运算速度。此外, 文献[8]给出的算法核心部分实现描述缺陷 2) 中存在错误, 两个给定的条件中 q_9 点均应该为 1, 而其给出的描述中有一个为 0, 导致细化后右斜线的毛刺比文献[2]更多。文献[9]算法为了提高细化质量, 针对分叉点处细化不彻底增加了 8 个消除模板, 针对向左、向上和向右的毛刺, 去除了保留模板的 3 种特殊情况。该算法细化后的质量比文献[2]有所提高, 但毛刺仍较多, 且细化速度有略微下降。

2 一种复合式细化算法

提出一种新的复合式细化算法。该算法将快速细化算法和优化 OPTA 模板相结合, 综合它们的优点, 并在快速细化之前加入了去刺处理, 保证快速细化后除不能彻底细化外几乎无毛刺, 最后用修正后的文献[10]的方法对 OPTA 模板分叉点处细化不完全进行了处理。新算法在细化质量和细化速度上均有良好表现。

2.1 细化预处理

基于以上导致快速细化毛刺产生的原因分析, 提出 1 组修正二值化指纹模板, 如图 9 所示: (a) — (d) 共 4 个模板是为了消除二值指纹纹线上

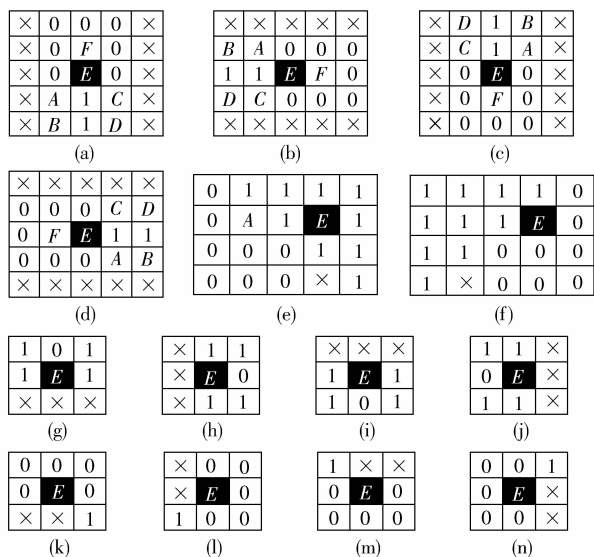


图 9 二值化图像修正组合模板

Fig. 9 The corrected combination-templates of binary image

两类水平和垂直方向上的毛刺;模板(e)(f)消除双像素落差可能形成的细化落差;(g)一(j)共 4 个模板用于消除单像素缺口导致的细化毛刺,共 4 个方向;模板(k)一(n)可去除孤立点造成的细化毛刺。预处理规则如图 10 所示。具体规则描述如下:

1) 若当前点满足图 9 中的模板(a)一(d),如果 $A=1 \& B=1$ 或 $C=1 \& D=1$,则修改 E, F 为谷线点。从而去除二值化纹线毛刺,使快速细化后无毛刺。

2) 若当前点满足图 9 中的模板(g)一(j),则修改与模板中 0 对应像素点为脊线点,填充二值化纹线单像素缺口,使快速细化时不会产生毛刺。

3) 若当前点满足图 9 中的模板(k)一(n),则修改 E 点为谷线点,以去除二值化纹线上的孤立点,使快速细化时消除由孤立点引起的毛刺。

4) 若当前点满足图 9 中的模板(e),则修改 A 点为谷线点;若满足模板(f),则修改 E 点为谷线点。此规则可修正二值纹线像素落差为单像素落差,使快速细化时没有毛刺。

实验结果表明,该组模板及相应的细化规则能很好地消除快速细化算法在细化后产生的毛刺,图 2(c)、图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)分别是图 2(a)、图 3(a)、图 4(a)和图 5(a)用本文预处理规则处理结果。图 2(d)、图 3(d)、图 4(d)和图 5(d)分别是图 2(c)、图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)快速细化结果。

本文在快速细化之前使用上述模板对二值指纹图像进行了修正预处理,模板中的黑色像素点,即 E

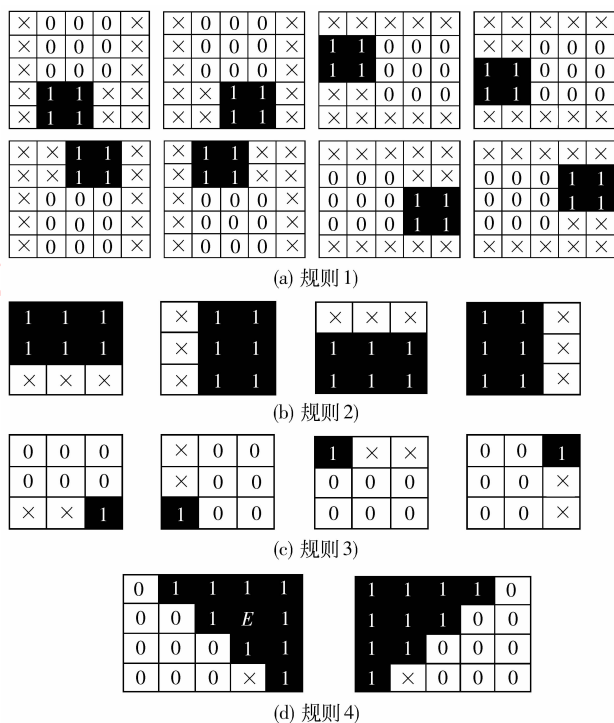


图 10 二值化预处理规则

Fig. 10 The preprocessing rules of binary image

点为当前脊线点。为了提高速度,只扫描边界点,匹配模板时只匹配模板中值为 0 和 1 的点,& 表示逻辑与运算。预处理过程如下:

- 1) 从二值化图像的左上角开始按从左往右,从上往下的次序扫描图像边界点;
- 2) 分别使用规则 1)、规则 2) 和规则 3) 处理当前点;
- 3) 重复 1) 和 2),直到没有任何脊线点被处理;
- 4) 重复 1),使用规则 4) 处理当前点;
- 5) 重复 4),直到没有任何脊线点可以被删除。

2.2 优化后的 OPTA 细化算法

在指纹图像中斜线部分占据了很大部分,而快速细化后斜线部分纹线大多是双像素宽,因此对双像素斜线的快速细化是非常重要的。经研究发现,只要把文献[2]的扫描起点改为左下角^[11],按照从下往上,从左往右的顺序扫描就可以实现对右斜线的一次迭代细化,而且该方法在细化左斜线时和文献[2]一致,可一次细化。

用优化 OPTA 算法对图 1(b)所示的右斜线细化:当扫描到第 6 行第 7 列的点 $P_{6,7}$ 时,因符合改进 OPTA 算法的消除模板 g,但不符合任意保留模板,所以删除;当扫描到点 $P_{6,8}$ 时,因不符合任意消除模

板, 所以保留; 同样分析, $P_{5,6}, P_{4,5}, P_{3,4}, P_{2,3}$ 点被删除, $P_{5,7}, P_{4,6}, P_{3,5}, P_{2,4}, P_{1,2}, P_{1,3}$ 保留; 可见一次扫描就可完成细化。该方法在细化图 1(a) 所示的左斜线(双像素)时: 当扫描到第 6 行第 2 列的点 $P_{6,2}$ 时, 因不符合改进 OPTA 算法的任一消除模板, 所以保留; 当扫描到 $P_{6,3}$ 时因符合改进 OPTA 算法的消除模板 h, 但不符合任意保留模板, 所以删除; 同样分析, $P_{5,3}, P_{4,4}, P_{3,5}, P_{2,6}, P_{1,7}$ 保留; $P_{5,4}, P_{4,5}, P_{3,6}, P_{2,7}$ 删除; 一次扫描就可完成细化。可见优化后的 OPTA 算法在细化左斜线(双像素)时不仅可实现文献[2]的功能, 且细化时所有的保留点都只须与 8 个消除模板比较, 无须与保留模板比较, 细化速度更快。

2.3 分叉点彻底细化处理

改进的 OPTA 算法在分叉点处细化不彻底, 如图 8 所示。文献[10]引入 OPTA 细化模板的思想, 通过构建新的细化模板来克服 OPTA 算法在分叉点处细化不彻底的问题。该算法的细化模板如图 11 所示, D, E, F 为脊线点, E 为当前点。依据 A, B, C 3 点是否为脊线点进行细化。

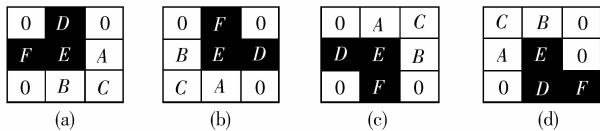


图 11 文献[10]算法的细化模板
Fig. 11 Thinning templates in reference[10]

文献[10]的细化规则较好地完成了对分叉点处的完全细化, 但实验发现, 该算法对 45° 方向分叉点细化时会形成新的断点, 图 12(b) 为文献[10]细化模板对图 12(a) 细化结果。当扫描到 $P_{5,4}$ 点时, 满足细化模板(d), 并符合其删除规则, $P_{5,4}$ 被删除, 形成断点。分析发现这主要是由于其细化模板的不对称性造成的, 把图 11(d) 细化模板修正为图 13 所示的模板即可得到完全细化的指纹图像。图 12(c) 为修正后模板对图 12(a) 细化结果。

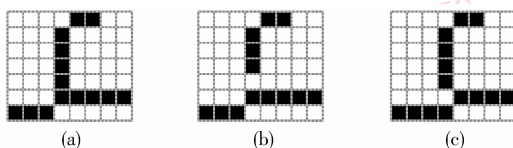


图 12 文献[10]算法细化图
Fig. 12 Thinned image in reference[10]

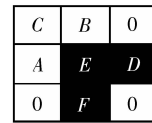


图 13 修正细化模板
Fig. 13 The corrected thinning template

2.4 复合式细化算法

本文新算法的细化过程如下:

- 1) 用 2.1 节提出的细化预处理方法对二值化指纹图像进行处理, 得到更为平滑的指纹图像;
- 2) 用快速细化算法对指纹进行初步细化, 得到快速细化后的指纹;
- 3) 采用优化 OPTA 细化算法对快速细化后指纹进行进一步细化, 得到较完全的细化指纹;
- 4) 用 2.3 节修正后的细化模板对细化指纹进行分叉点彻底细化处理, 得到完全细化指纹。

3 实验结果比较与分析

为验证和分析本文实验, 从 FVC2000 指纹库中提取了多幅指纹图像, 图像大小为 256×364 , 256 级灰度图像, 在 Intel Pentium 2.5 G 双核 CPU、2 G 内存的计算机上用 VC++ 6.0 平台编程实现了本文提出的方法。为了进行对比实验, 本文还在同一平台用相同的编程思路编程实现了文献[2, 8-9]的方法, 进行了大量的实验。图 14 为本文从大量实验结果中随机挑选的一组细化结果图。

从图 14(c)(d) 对比可见文献[8]细化结果和文献[2]几乎一致, 细化质量没有提高, 存在大量毛刺; 从图 14(c) 和(i) 对比发现文献[9]细化结果质量比文献[2]有较大提高, 毛刺相对减少很多, 纹线更光滑; (j) 是本文算法细化结果。所有对比实验都反映了本文提出的方法细化质量非常理想, 几乎无毛刺, 而且对分叉点处也能彻底细化。

为了对比各算法的细化速度, 本文随机抽取了 10 幅图像在同等条件下的细化时间及细化迭代次数, 实验数据如表 1 所示。从表中可以看出, 文献[9]算法在迭代次数和执行时间上和文献[2]接近, 甚至更多; 文献[8]在迭代次数和执行时间上比文献[2]好很多, 基本解决了右斜线效应, 取得了较好的细化速度; 本文提出的优化后 OPTA 算法在迭代次数和执行时间上大多数情况下比文献[8]还要好。

表 1 实验结果比较

Tab. 1 Results comparison

图像 编号	文献[2]算法		文献[8]算法		文献[9]算法		优化后 OPTA 算法	
	时间 /ms	迭代 次数	时间 /ms	迭代 次数	时间 /ms	迭代 次数	时间 /ms	迭代 次数
1	45	14	26	7	42	11	28	7
2	40	14	23	7	45	15	21	6
3	54	14	28	6	58	13	31	7
4	47	13	28	7	49	12	25	6
5	60	15	35	7	62	14	28	6
6	65	19	31	7	66	17	25	6
7	66	20	31	7	104	32	30	7
8	39	14	28	9	46	18	18	6
9	43	12	25	6	49	12	25	6
10	53	16	30	8	59	16	23	6

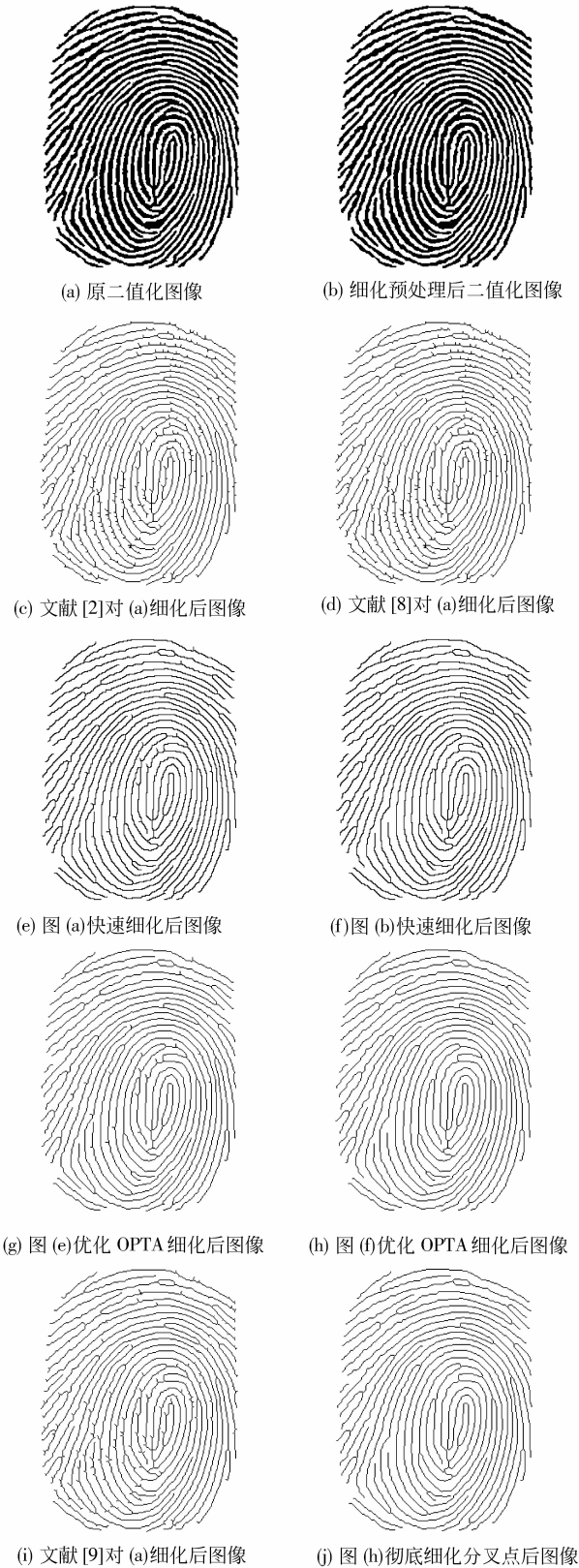


图 14 细化结果对比图

Fig. 14 The thinning results with different algorithms

4 结 论

由于结合了快速细化算法速度快的优势和优化 OPTA 算法模板化的优点,本文算法的细化结果几乎无毛刺,质量要明显好于文献[2,8-9]算法,并且有较好的细化速度。细化结果为完全单像素宽,不会出现细化不彻底现象。在实现方式上大大简化了传统方法中细化后去除毛刺操作的复杂性,是一种较为理想的细化方法。

参考文献 (References)

[1] Tian Jie, Chen Xinjian, Zhang Yangyang, et al. Recent progress on fingerprint identification technologies[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(4):400-406. [田捷,陈新建,张阳阳,等. 指纹识别技术的新进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(4): 400-406.]

[2] Feng Xingkui, Li Linyan, Yan Zuquan. A new thinning algorithm for fingerprint image [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, 4A(10): 835-838. [冯星奎, 李林艳, 颜组泉. 一种新的指纹图像细化算法[J]. 中国图象图形学报, 1999, 4A(10):835-838.]

[3] Hilditch C J. Linear skeletons from square cupboards [J]. Machine. Intelligence, 1969, (4): 403-420.

[4] Chin R T, Wan H K, Stover D L, et al. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation [J]. Computer Vision Graphics Image Processing, 1987, 40(1): 30-40.

[5] Flores E L. A fast thinning algorithm [J]. Telecommunications Symposium, 1998, (2): 594-599.

- [6] Gu Xiaodong, Yu Daoheng, Zhang Liming. Image thinning using pulse coupled neural network [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(9): 1075-1084.
- [7] Wang Jialong, Guo Chengan. An improved image template thinning algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(3): 297-301. [王家隆, 郭成安. 一种改进的图像模板细化算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(3): 297-301.]
- [8] Mei Yuan, Sun Huaijiang, Xia Deshen. An improved template-based rapid thinning algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(9): 1306-1311. [梅园, 孙怀江, 夏德深. 一种基于改进后模板的图像快速细化算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(9): 1306-1311.]
- [9] Wang Yelin, Ning Xinbao, Yin Yilong. Study on the fingerprint image thinning algorithm [J]. Journal Nanjing University (Natural Sciences), 2003, 39(4): 468-475. [王业琳, 宁新宝, 尹义龙. 指纹图像细化算法的研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2003, 39(4): 468-475.]
- [10] Wang Peng, Zhang Youguang, Zhang Shuo. A synthetically thinning algorithm for fingerprint image [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(2): 179-182. [王朋, 张有光, 张烁. 指纹图像细化的综合化算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(2): 179-182.]
- [11] Bian Weixin, Xu Deqin, Wang Junshu. A research based on quick thinning algorithm and improved OPTA thinning algorithm in two stages [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2005, 34(3): 80-84. [卞维新, 徐德琴, 王俊书. 基于两极复合式指纹图像细化算法的研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2005, 34(3): 80-84.]