

基于关键路径优化交叉遗传算法的掌纹识别

许爽¹ 叶恺¹ 毕新熙²

¹(中州大学 河南 郑州 450044)

²(河南天冠燃料乙醇有限公司 河南 南阳 473000)

摘要 传统的掌纹识别算法在大多情况下运行缓慢以致效率不高,通常会依赖昂贵的技术装备而导致成本较高。针对这一问题,提出基于关键路径优化交叉遗传算法(CGA)的掌纹识别算法。首先,利用关键路径算法找到染色体的关键路径,借助于交叉概率剔除染色体的最差候选种群;然后选择最佳候选种群进行交叉运算,有效地改善低质量掌纹图像的问题;最后,在掌纹图像上的实验验证该算法的有效性及其可靠性。实验结果表明,相比 18 项参数总和算法,该算法取得了更高的识别率,同时大大地降低了识别所耗时间,有望运用于实时掌纹识别系统。

关键词 关键路径 交叉遗传算法 掌纹识别 交叉概率 18 项参数总和

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2014.07.049

PALMPRINT RECOGNITION BASED ON GENETIC ALGORITHM WITH CRITICAL PATH OPTIMISED CROSSOVER

Xu Shuang¹ Ye Kai¹ Bi Xinxi²

¹(Zhongzhou University, Zhengzhou 450044, Henan, China)

²(Henan Tianguan Fuel Alcohol Co., Ltd, Nanyang 473000, Henan, China)

Abstract Traditional palmprint recognition algorithms have poor efficiency in most cases due to slow operation, and usually rely on expensive technical equipment which results in higher costs. In light of this problem, we propose the palmprint recognition algorithm which is based on the genetic algorithm with critical path optimised crossover. First, we use critical path algorithm to find the critical path of chromosomes and get rid of the worst candidate population of chromosomes with the help of crossover probability. Then, we select the best candidate population for crossover operation, which effectively improves the problem of low quality palmprint image. Finally, the experiments on palmprint images verify the effectiveness and reliability of the proposed algorithm. Experimental results show that proposed algorithm achieves higher recognition rate than the algorithm of 18 parameters' summation and meanwhile greatly reduces the time cost of recognition, thus it can be expected to apply to real-time palmprint recognition system.

Keywords Critical path Crossover genetic algorithms Palm recognition Crossover probability 18 parameters' summation

0 引言

随着生物特征识别系统的发展,掌纹识别技术^[1,2]已渐渐吸引了学者们的关注,主要用于鉴别个人身份^[3]。由于人的手掌几何特征具有足够的唯一性,使得掌纹识别算法非常适用于身份的认证^[4,5]。

学者们曾经针对掌纹识别提出了许多算法,例如,文献[6]利用四个检测器从标准掌纹图像中找到线条特征来布置多角度的过滤器组,将每张掌纹图像划分成若干小块,并与所有的过滤器进行卷积,得出的结果则对应于线条的方向,从而生成手掌线条的定向印迹。文献[7]提出采用适应度函数的全局优化变换算法,来提高两张指纹图像的识别率。文献[8]将遗传算法嵌入 Kohonen 自组织神经网络,提高了掌纹识别算法的学习性能和神经网络的准确性。基于直线提取和图像匹配原理,文献[9]描述了一种掌纹匹配算法,通过遗传算法找到一组过滤器,利用掌纹的各种统计信息执行适应度评估。虽然这些掌纹识别

算法都具有可行性,也取得了不错的识别率,但由于复杂的计算开销,往往在实际快速身份认证系统中很难得到应用^[10,11]。

针对快速身份认证系统,提出了一种基于关键路径优化交叉遗传算法的掌纹识别算法,通过使用交叉遗传算法^[12,13]实现了快速搜索,实验结果表明了本文算法的有效性及其高效性。

1 关键路径

为了更清楚地描述所设计的交叉算子,首先介绍关键路径。关键路径法 CPM(Critical Path Method)^[14]最早出现于 20 世纪 50 年代,它是通过分析项目过程中哪个活动序列进度安排的总时差最少来预测项目工期的网络分析。这种方法产生的背景是,在当时出现了许多庞大而复杂的科研和工程项目,这些项目常常需要运用大量的人力、物力和财力,因此如何合理而有效

收稿日期:2013-09-09。许爽,讲师,主研领域:图形图像,信息安全。叶恺,讲师。毕新熙,本科。

地对这些项目进行组织,在有限资源下以最短的时间和最低的成本费用下完成整个项目就成为一个突出的问题,这样 CPM 就应运而生了。

对于所有操作 $O_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 中的时序型顺序,操作 $O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33}$ 可以一个一个处理而没有中断和重复,其中 O_{ij} 表示任务 i 在机器 j 上处理, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$, 关键路径算法可描述如下:

第 1 步 设 $K = \{O_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}, Q = \Phi$ 。

第 2 步 当 $\exists \alpha \in K$, 没有 $\beta \in K$ 满足 $C(\alpha) = S(\beta)$, 然后删除 K 中的 α , 并更新 K , 其中, C 表示完成所有操作 $O_{ij}(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 所需总时间, S 表示完成所有操作所需的总库存。

第 3 步 选择一个操作 $\alpha_1 \in K$ 满足 $S(\alpha_1) = 0$, 将它插入到 Q 中, 设 $k = 1$ 。

第 4 步 当 $(C(\alpha_k) \neq \text{总完成时间})$, $k = k + 1$, 选择一个操作 $\alpha \in K$ 满足 $S(\alpha_k) = C(\alpha_{k-1})$, 将它插入到 Q 中。

第 5 步 将集合 Q 中的元素 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ 排队。显然 $\alpha_1 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \dots \rightarrow \alpha_k$ 是关键路径。

假设 $K = \{O_{11}, O_{12}, O_{13}, O_{21}, \dots, O_{33}\}, Q = \Phi$, 对于操作 $\alpha = O_{32}, O_{31}, O_{23}, O_{22}$, 没有 $\beta \in K$ 满足 $C(\alpha) = S(\beta)$, 所以删除 K 中的它们, 得到 $K = \{O_{11}, O_{12}, O_{13}, O_{21}, O_{33}\}$ 。

将它们依次插入到集合 Q 中, 得到集合 $K = \{O_{21}, O_{11}, O_{12}, O_{13}, O_{33}\}$, 作为结果, 可以得到一个关键路径 $O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33}$ 。

2 系统设计

2.1 交叉遗传算法提出

遗传算法中, 如果后代包含了双亲个体的关键路径, 后代的总完成时间不可能比双亲个体的小, 因此, 采用了以下策略来增加产生一个更好个体的概率。假设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_{n \times m})$ 和 $y = (y_1, y_2, \dots, y_{n \times m})$ 是两个双亲个体, 基于关键路径算法, 设计的交叉遗传算子描述如下:

第 1 步 将子代染色体 $z = (z_1, z_2, \dots, z_{n \times m})$ 初始化为空, 然后一个向量 $h = (h_1, h_2, \dots, h_{n \times m})$ 由集合 $\{0, 1\}$ 的元素随机产生。

第 2 步 从 $i = 1$ 到 $n \times m$:

如果 $h_i = 0$, 则 $z_i = x_i$, 删除 x 中的 x_i , 让 $x_i = x_{i+1} (i = 1, 2, \dots)$ 。删除第一个基因 y_k , 它满足 $y_k = x_i$, 让 $y_i = y_{i+1}, (i = k, k + 1, \dots)$ 。

否则, $z_i = y_i$, 删除 y 中的 y_i , 让 $y_i = y_{i+1} (i = 1, 2, \dots)$ 。删除第一个基因 x_k , 它满足 $x_k = y_i$, 让 $x_i = x_{i+1}, (i = k, k + 1, \dots)$ 。

第 3 步 如果子代 $z = (z_1, z_2, \dots, z_{n \times m})$ 包含 x 或 y 中的关键路径, 然后转到第 1 步。否则, 输出子代 $z = (z_1, z_2, \dots, z_{n \times m})$ 。

表 1 描述了设计的交叉算子。

表 1 交叉算子

| | | | |
|-------|-------------------|-------|-------------------|
| $x :$ | 2 1 3 1 2 1 2 3 3 | $x :$ | 2 1 3 1 2 1 2 3 3 |
| $y :$ | 1 3 2 2 1 3 3 1 2 | $y :$ | 1 3 2 2 1 3 3 1 2 |
| $h :$ | 0 0 1 1 1 0 1 0 0 | $h :$ | 1 1 0 0 0 1 0 1 1 |
| $z :$ | 2 1 3 2 1 1 3 2 3 | $z :$ | 1 3 2 1 2 3 1 3 2 |

采用关键路径算法可得到 $x = (213121233)$ 的关键路径

$O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33}, y = (132213312)$ 的关键路径 $O_{11} \rightarrow O_{21} \rightarrow O_{23} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{13}$, 其中 Q_{ij} 表示在机器 j 上处理的任务 $i, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ 。

当 $h = (001110100)$, 使用交叉遗传算法可得到 $z = (213211323)$ 。从表 1 可以得到相应的操作序列 $O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{23} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{22} \rightarrow O_{33}$ 显然, 它包含 $x: O_{21} \rightarrow O_{11} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33}$ 的关键路径, 所以可以产生另一个 h , 如 $h = (110001011)$, 得到 $z = (133123132)$ 和相应的操作序列 $O_{11} \rightarrow O_{32} \rightarrow O_{21} \rightarrow O_{12} \rightarrow O_{23} \rightarrow O_{31} \rightarrow O_{13} \rightarrow O_{33} \rightarrow O_{22}$ 它不包含 x 或 y 的关键路径, 所以将它作为子代。

2.2 掌纹识别

如图 1 所示为具有显著特征的指纹样本及其特征类型, 从中可以清晰地看出, 指纹图像的质量很低, 因此, 本文算法仅采用手指特征, 从而最小化信息量并使精度最大化。

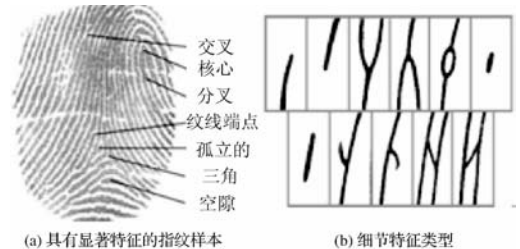


图 1 指纹样本及特征

本文算法的整体框图如图 2 所示, 首先通过分析提交给软件的图像中的每个像素点, 将图像的背景填充成黑色而手掌印迹填充成白色, 根据不同的填充颜色进行图像间的比对, 从而获得图像之间背景及手掌印迹的区别; 接着, 基于手掌的几何特征, 测定出手指的所在区域; 然后住借助于交叉遗传算法, 按照数据库中的记录标准化手指坐标和转弯角; 最后, 通过计算机相同的像素识别手掌。

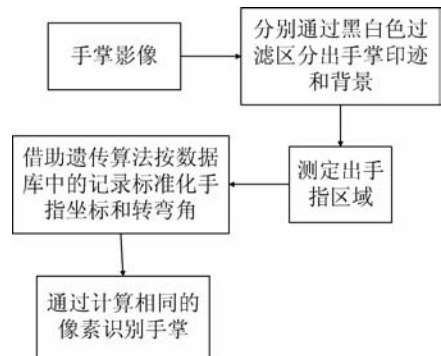


图 2 本文算法的整体框图

当使用全排序算法时, 每次手指印迹在 x 和 y 轴上仅被移动一个位置, 或者说每一次转一个度角。当确定了印迹的新位置时, 就进行白像素点的检测, 交叉遗传算法主要用于加速转向手指的排序。通过估算出匹配候选或标准印迹的白色像素点数量, 制定出候选印迹的适用性。交叉遗传算法用到的染色体由 3 个参数组成, 分别是手指印迹的位置坐标 (x 和 y) 和角度 (α)。

3 实验

所有实验均在台式机 (Intel Core 2Duo 2.99Ghz 处理器、2048MB 内存、Windows XP Pro SP3 操作系统) 上进行, 所用编程

环境为 MATLAB 7.0。为了测试所提算法,专门收集了 25 幅手掌图像。

3.1 参数设置

参数如表 2 中定义(实验性算法),通过表 2 中列出的参数,手掌仅需要移动很小的位置就能通过软件识别出来。

表 2 测试算法时用到的遗传算法参数值

| | |
|-----------------|------|
| X 轴的边界搜索(像素单位) | 10 |
| Y 轴的边界搜索(像素单位) | 10 |
| 转动印迹的边界搜索(像素单位) | 10 |
| 迭代次数 | 30 |
| 种群数量 | 100 |
| 交叉概率 | 0.92 |
| 变异概率 | 0.08 |
| 每代种群变化率(%) | 64 |

3.2 实验结果

实验分别选取手掌间的差异值为 30、60、75、105、200,对比手掌数目分别为 1、2、3、4,参数设置如表 2,测试结果如表 3 所示。

表 3 本文算法的手掌识别率

| 手掌间的差异 (像素单位) | 正确识别手掌的数量 | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 对比 1 个手掌 | 对比 2 个手掌 | 对比 3 个手掌 | 对比 4 个手掌 |
| 200 | 190 | 191 | 193 | 194 |
| 105 | 94 | 97 | 100 | 101 |
| 75 | 71 | 69 | 70 | 72 |
| 60 | 57 | 55 | 57 | 58 |
| 30 | 27 | 28 | 27 | 28 |

测试结果表明,当比对手掌的 4 个手指时,该算法的平均可靠度达到 96%,而对比 1 个手指时平均可靠度也有 92%。

3.3 比较及分析

为了证明本文算法的有效性及其高效性,将该算法的识别率、所耗时间与 18 项手掌参数总和算法^[15]作了比较。

1) 识别率比较

采用软件测量 18 项手掌参数的算法中对其中的 13 项手指印迹都进行了计算,计算的精度是像素单位,最终的结果是手掌所有测量值的总和,如表 4 所示。

表 4 18 项手掌参数总和算法的手掌识别率

| 手掌间的差异 (像素单位) | 正确识别手掌的数量 | | | |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 对比 1 个手掌 | 对比 2 个手掌 | 对比 3 个手掌 | 对比 4 个手掌 |
| 200 | 137 | 150 | 173 | 196 |
| 105 | 80 | 85 | 92 | 90 |
| 75 | 48 | 53 | 57 | 63 |
| 60 | 37 | 40 | 41 | 51 |
| 30 | 13 | 15 | 18 | 20 |

从表 4 可以看出,当手掌间差异为 200 像素时,对比 4 个手掌,18 项参数总和算法的识别率比本文算法高 1%,然后,其他情况下,识别率均不如本文算法,采用 18 项参数总和算法的手掌识别系统不如本文算法可靠,平均识别率仅为 75%,比本文算法低了 21%。

2) 耗时比较

实验还将本文算法与采用 18 项参数总和算法的测试时间进行了比较,测试各算法时,都有其它系统进程来增加测试系统的负载,但它们都不会影响测试算法的时间消耗,比较结果分别如图 3 所示。

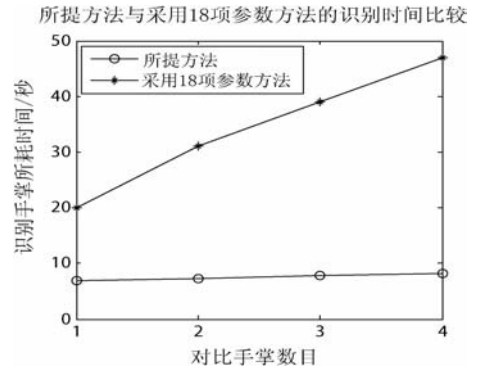


图 3 本文算法与采用 18 项参数算法的识别时间比较

从图 3 可以看出,采用 18 项参数总和算法时,手掌识别的平均时间是 34.5 秒,而采用交叉遗传算法时则不会超过 10 秒,即提高了 2.5 倍的效率,本文算法在缩短计算时间的同时,仍然保持了很高的识别精度,由此体现了本文算法的高效率。

4 结 语

为了解决传统掌纹识别的低效率、高成本问题,提出了基于交叉遗传算法的掌纹识别算法,在自己收集的掌纹图像上的实验验证了本文算法有效性及高效性。实验结果表明,相比采用 18 项参数总和算法,在手印搜索和识别系统中应用遗传算法能节省了 3.5 倍的时间。同时,该算法的识别可靠性高达 92% ~ 96%,足以表明其有望应用于快速生物识别认证系统中。

未来会通过优化差遗传算法的参数来进一步改善识别性能,并努力将其运用到快速检测系统中。

参 考 文 献

- [1] 岳峰,左旺孟,张大鹏. 掌纹识别算法综述[J]. 自动化学报,2010,36(3):353-365.
- [2] 苑玮琦,冯素月. 改进的非接触式在线掌纹识别模拟系统[J]. 光学学报,2011,31(7):114-119.
- [3] Choras M, Kozik R. Contactless Palm Print and knuckle biometrics for mobile devices[J]. Pattern Analysis and Applications, 2012, 15(1): 73-85.
- [4] 郭金玉,孔晓光,李元,等. 基于多线性核主成分分析的掌纹识别[J]. 光电子·激光,2011,22(2):288-291.
- [5] 郭金玉,刘玉芹,苑玮琦. 基于最近相关性分类器的单样本掌纹识别[J]. 光电子·激光,2012(8):027.
- [6] Morales A, Ferrer M A, Kumar A. Towards contactless palm print authentication[J]. IET Computer Vision, 2011, 5(6):407-416.
- [7] 王暄,王峰,梁荷岩. 基于 Contourlet 变换与 SVM 的掌纹识别[J]. 计算机工程,2012,38(6):196-200.
- [8] 王艳霞,阮秋琦. 一种新的掌纹图像预处理算法[J]. 中国图象图形学报,2008,13(6):1115-1122.

(计算公式: 绝对装箱个数 = $V_{\text{集装箱}}/V_{\text{小货箱}}$), 实际操作中不可能达到。这里列出仅供参考, 不作为算法优劣的比较依据。此

外, 由于宫佩珊算法^[13]和杨涛算法^[14]相关文献中例题过少, 不方便做算法优劣的比较。

表 1 几种算法计算结果比较

| 集装箱 (5 800, 2 300, 2 450) | 一般堆法(A) | | 火狐装箱软件(B) | | 隋树林算法(C) | | 杨德荣算法(D) | | 动态规划法 | | 绝对装箱数 | |
|------------------------------|---------|--------|-----------|--------|----------|--------|----------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) |
| 390, 320, 310 | 756 | 89.49 | 804 | 95.17 | 806 | 95.41 | 806 | 95.41 | 805 | 95.29 | 844 | 99.90 |
| 510, 330, 290 | 560 | 83.63 | 640 | 95.57 | 645 | 96.32 | 652 | 97.37 | 657 | 98.11 | 669 | 99.90 |
| 530, 310, 470 | 390 | 92.15 | 401 | 94.75 | 402 | 94.98 | 408 | 96.40 | 408 | 96.40 | 423 | 99.94 |
| 560, 370, 310 | 432 | 84.9 | 490 | 96.30 | 492 | 96.69 | 494 | 97.09 | 498 | 97.87 | 508 | 99.84 |
| 600, 530, 310 | 288 | 86.87 | 312 | 94.1 | 316 | 95.31 | 322 | 97.12 | 322 | 97.12 | 331 | 99.84 |

| 集装箱 (1 201, 233, 239) | 一般堆法(A) | | 火狐装箱软件(B) | | 隋树林算法(C) | | 杨德荣算法(D) | | 动态规划法 | | 绝对装箱数 | |
|--------------------------|---------|--------|-----------|--------|----------|--------|----------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) | 个数 | 利用率(%) |
| 60, 50, 30 | 644 | 86.66 | 692 | 93.12 | 700 | 93.92 | 700 | 93.92 | 692 | 93.12 | 743 | 99.98 |
| 60, 50, 40 | 460 | 82.50 | 524 | 89.5 | 524 | 94.02 | 524 | 94.02 | 524 | 94.02 | 557 | 99.94 |
| 61, 56, 39 | 476 | 94.82 | 480 | 95.62 | 487 | 97.01 | 489 | 97.41 | 490 | 97.61 | 502 | 99.99 |
| 63, 87, 32 | 316 | 82.87 | 361 | 94.67 | 361 | 94.67 | 361 | 94.67 | 361 | 94.67 | 381 | 99.92 |
| 87, 68, 52 | 172 | 78.81 | 196 | 89.97 | 212 | 93.10 | 194 | 89.24 | 195 | 89.70 | 217 | 99.81 |

一般堆法、火狐、隋树林和杨德荣算法分别称为算法 A、B、C、D, 分析表 1 的结果可得如下结论:

- (1) 本文比 A 所有解好, 明显提高箱容利用率。
 - (2) 本文和 B 相比, 6 个好解, 3 个相同解, 1 个差解, 解的质量高。
 - (3) 本文和 C 相比, 5 个好解, 2 个相同解, 3 个差解, 解质量稍好或接近, 但装箱方案简单。
 - (4) 本文和 D 相比, 4 个好解, 4 个相同解, 2 个差解, 解质量稍好或接近, 但本文可以避免上层物体悬臂梁式布局的问题。
- 特别地, 采用动态规划法来求解三维装箱, 很大程度上缩短了计算时间, 以上案例均可以 3 秒内输出装箱方案。

5 结 语

本文算法具有如下优点: (1) 采用切片式装箱方案, 每个切片内的小货箱按排排列, 装箱方案简单, 从而可减少装箱的工作量。(2) 采用动态规划算法, 递推式简单, 易于转化成程序代码。(3) 根据文献中例题的实验结果, 本文算法得到的最好解个数最多, 表明本文算法所得解的质量较高。(4) 本文算法能避免上层物体悬臂梁式布局的问题。

参 考 文 献

[1] 查建中, 唐晓君, 陆一平, 等. 布局及布置设计问题求解自动化的理论与方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 16(8): 705-712.

[2] 陈德良, 陈治亚. 三维装箱问题的智能启发式算法[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 134-137.

[3] 刘嘉敏, 马广焜, 黄有群. 基于组合的三维集装箱装入启发式算法的研究[J]. 工程图学学报, 2005, 26(1): 22-25.

[4] 杨德荣, 杨超. 三维装箱布局的单向寻优搜索法[J]. 工程图学学报, 2007, 28(2): 35-41.

[5] 隋树林, 邵巍, 高自友. 同一尺寸货物三维装箱问题的一种启发式算法[J]. 信息与控制, 2005, 34(4): 490-494.

[6] 杨德荣. 集装箱单一规格物体装箱的优化算法[J]. 交通运输工程

与信息学报, 2007, 5(2): 17-23.

[7] 杨德荣. 一类集装箱布局问题的优化计算[J]. 物流管理, 2006, 29(132): 43-45.

[8] 崔耀东. 计算机排样技术及其应用[M]. 机械工业出版社: 北京, 2004.

[9] 王峰, 李夏苗, 祁明明. 铁路易腐货物非紧密装载方案的优化方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 87-90.

[10] 王哲, 刘俊. 铁路同类货物装箱优化模型与算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(5): 107-112.

[11] 姚怡, 崔耀东. 一种高效的同尺寸长方体的装箱算法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(10): 192-194.

[12] 徐丽丽, 李忠, 夏继梅. 同规格货物装箱问题的优化计算[J]. 山东大学学报, 2008, 38(3): 14-17.

[13] 宫佩珊. 集装箱递阶优化装箱算法[J]. 青岛大学学报, 1997, 12(4): 90-92.

[14] 杨涛, 杨传民, 陈少为, 等. 立方体包装件集装离散优化(七)--集装优化 CAD 系统的研究[J]. 包装工程, 2000, 21(1): 45-47.

~~~~~

### (上接第 197 页)

[9] 张建新, 欧宗瑛, 刘典婷. 基于移动设备的掌纹验证系统[J]. 计算机工程, 2010, 36(4): 164-168.

[10] Ei-Emery I M, Ei-Kareem M A. towards Using Genetic Algorithm for Solving Nonlinear Equation Systems[J]. World Applied Sciences Journal, 2008, 5(3): 282-289.

[11] 苑玮琦, 林森, 吴微, 等. 基于仿射尺度不变特征变换的掌纹识别[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1594-1600.

[12] 陆青, 梁昌勇, 杨善林, 等. 面向多模式函数优化的自适应小生境遗传算法[J]. 模式识别与人工智能, 2009, 22(1): 91-100.

[13] 梁亚澜, 聂长海. 覆盖表生成的遗传算法配置参数优化[J]. 计算机学报, 2012, 35(7): 1522-1538.

[14] 李鹏, 兰巨龙, 李立春. 统一关键路径时延为基准 FPGA 模拟退火布局算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(3): 521-526.

[15] 殷俊, 杨万扣. 核稀疏保持投影及生物特征识别应用[J]. 电子学报, 2013, 41(4): 639-645.