

化学结构图中化学键信息的自动提取

孙兰兰^{1,2}, 李存华^{2*}, 管燕²

(1. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 徐州 221116; 2. 淮海工学院计算机工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要:在化学结构图中,拐点信息异常重要,如果能对化学结构的拐点进行有效的判别,就可使化学键信息提取的有效性得到很大改善。本研究通过对化学结构的图形分析及特征总结,权衡了 Hough 变换等提取方法的优势和不足,发现了结构图边缘点偏移值的变化具有很强的规律性,其对图形拐点的提取以及化学键键型的判断有着重要作用。基于以上分析,提出了利用化学结构图偏移值变化的规律性进行化学键信息提取的方法。为了论证算法的有效性,实验时选取了 100 幅化学结构图,对 100 幅图形的化学键信息进行了提取并进行了统计分析,得出化学键信息的正确提取率为 73.83%,从而通过实验数据证实了算法的可行性。

关键词:化学结构图;化学键;直线段提取;拐点

中图分类号:TN301 **文献标志码:**A

The automatic extraction of the chemical bonds information in the chemical structure images

SUN Lan-lan^{1,2}, LI Cun-hua^{2*}, GUAN Yan²

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Computer Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The inflection points are very important for chemical structure graphs. If the inflection points of chemical structures could be discriminant effectively, they would make the effectiveness of the extraction of chemical bond information improved greatly. The characteristics of the chemical structure was analyzed and summarized, and the advantages and disadvantages of the Hough method was balanced. It was found that the offset value of the edge points was with strong regularity, which played an important role on the extraction of the inflection points and the judgment of chemical bond type. Finally, the experiments selected 100 BMP figures of the molecular structure to extract and count the chemical bond information. The statistic results showed that the accuracy rate of chemical bonds information extraction was of 73.83%, which proved the effectiveness of this method.

Key words: chemical structure graphs; chemical bonds; the line segments extraction; inflection points

0 引言

随着电子技术的发展,计算机在化学信息处理方面的重要性也日益突出^[1-5]。在化学信息学^[6]中,化学结构是最直观的具有代表性的信息之一,它能形象地反映物质分子内部各元素原子的秩序,也

是人们认识和掌握物质化学性质和化学反应规律的基础。面对化学领域大量的信息处理,如何使用计算机信息处理的优势已是当下的研究热点,而解决此问题首先需考虑的就是化学结构在计算机内怎样表述^[7-14]的问题,其表述形式的优劣将直接影响实际应用中信息获取的好坏。

目前,已有的化学结构计算机编码方式有:线性

收稿日期:2012-03-20

基金项目:江苏连云港市科技攻关资助项目(CG0923)

作者简介:孙兰兰(1986-),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为图像处理. E-mail:172960793@qq.com

* 通讯作者:李存华(1963-),男,江苏徐州人,教授,博士,主要研究方向为数据库理论,数据挖掘和计算机图形学. E-mail:cli@hhit.edu.cn

码、碎片码、连接表、拓扑码等,这些方法各有优点和局限性。但就建立化学结构信息系统、实现各种信息检索功能而言,真正适合于计算机的化学结构编码方式是其中的连接表。

为了满足人们对物质表述直观性的视觉需求,常见的化学结构都是一些静态图的表述形式,而信息处理时,计算机并不能自动获取静态图中的化学信息。所以,在信息提取前,需对化学结构的计算机表述形式加以转化,从而使计算机能读懂图中所含有的信息,才能实现对信息的有效提取。为解决上述问题,本研究对化学结构图特点进行了深入分析,在分析所得出的图形特点基础上,以图像处理的视角,实现计算机自动提取图中所含有的化学键信息的目标。

1 化学分子结构

本研究的对象是有机化合物的二维结构,见图1。相应的化学键是有机物的共价键。在有机化学中,由 σ 键、 π 键、 δ 键3种电子云重叠方式所形成的常见化学键有:单键,双键,三键,大 π 键,见图2。分析可知:如果单纯从图像角度解释化学结构图的图形特点,就是一幅幅由直线段、字母、数字按规律拼接而成的规则图形,且图像中通常都存在一类特殊的点,此类点不同于一般像素点,对化学键类型的判断有着重要作用,这些有着重要作用的特殊点一般是线与线的交点、单条线段的末端点。此类点有序地分布在各类化学键上,对计算机化学键信息的正确提取有着重要作用。

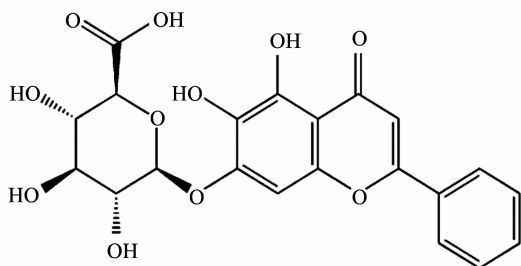


图1 化学结构二维拓扑图

Fig. 1 The two-dimensional topological graph of the chemical structure



图2 常见化学键

Fig. 2 Common chemical bonds

通过函数的构建与调用将此类点从化学结构图中筛选出来。在重要点筛选完后,再使用针对化学结构图形状特点而设计的边缘线段提取法^[15],最终实现对图中化学键信息的有效提取。

2 化学键信息的提取

2.1 已有直线提取方法

由于直线是分析图像的重要基元,所以直线提取^[16-18]的方法也是人们一直关注的焦点。迄今为止,较经典的直线提取算法主要分为两类。一类是相位组合法^[19],此类算法以边缘相位作为像素点编组的依据,能检测出对比度较弱的灰度变化,同时,由于拟合时的支持域来自邻近边缘点,所以此类方法直线定位准确。不过,也因邻域点的使用,相位组合法容易产生断裂的短线段。另一类是经典 Hough 变换及几种 Hough 变换改进算法:RHT、PHT 以及 MHT 等。Hough 变换^[20-25]是一种以全局统计特性为主要依据的直线提取法,利用图像空间共线的点与参数空间相交直线之间的对应关系进行直线的检测。在检测过程中,Hough 变换将直线上的点向参数空间的对应位置映射并进行累计投票,然后对参数空间投票的累计结果进行峰值的搜索以获取直线参数。Hough 变换的优点有:抗噪能力强,能很好的消除随机噪声的影响,检测时受中间断点的干扰较少,因此不需边缘点的预先连接。不足之处则主要是:Hough 变换需要的参数存储空间较大,所需的运算时间也较长。如:在对化学结构图直线段提取时,Hough 变换就经常会出现如下情形:①参数多,难以设置;②容易漏检;③细化后,有伪线段生成;其化学结构直线提取结果如图3所示。

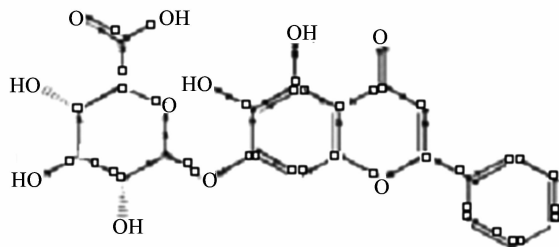


图3 Hough 变换的直线提取结果

Fig. 3 The Hough transform results of line extraction

图3中的星点和小方框表示化学结构图边缘的线段分割点。由图3可知,Hough 变换提取线段时,产生了许多错误的边缘分割点。所以,在研究提取化学结构图线段的过程中,本研究权衡了已有直线提取法的优势和不足,力求在提取线段时,能够把误差控制在最小范围内,以使出现的偏差不会对化学

基于对图形的认识,本研究在算法设计过程中,

键类型的判断造成影响。所以,本算法在直线段提取时,根据化学结构图的自身特点,从筛选对键类型的判定起决定性作用的点入手,简言之,也就是首先把图中的交点、末端点筛选出来,因此类点信息可有效预防边缘分割时伪线段的生成,也为最终判定化学键类型时,对线段端点的定性提供了信息依据。本研究在边缘分割点也即拐点的确定时,利用了边缘上各点偏移值变化的渐进和有序性,通过对边缘点偏移值大小的计算与比较,取其中最大值与设定的阈值比较大小,从而最终对此最大值点是否为所在边缘的拐点做出判定,以实现化学结构图线段的正确提取。最后,本研究综合所有的点信息和线段信息,结合基本的数学运算,最终,对结构图中所有的化学键类型做出判定,从而达到对化学结构图中的化学键信息的综合而有效的提取。

2.2 化学键信息提取主要过程

2.2.1 化学结构图中重要点的识别

化学结构图中重要点的识别需调用两个 Matlab 库函数,即 Makelut 函数和 Applylut 函数,还需构建两个句柄函数,即交点的判断函数和末端点的判断函数,通过上述自带函数和构建函数的适时调用,得出重要点信息查找表,最终筛选出结构图中所有符合要求的点。

(1) Makelut 函数

Makelut 函数的调用格式: $LUT = \text{Makelut}(\text{fun}, n)$, 参数 fun 表示函数句柄, n 表示领域,通常为 2 或 3,调用 Makelut 函数主要是为了构建查找表。

(2) Applylut 函数

Applylut 函数的调用格式: $A = \text{Applylut}(BW, LUT)$, 参量 LUT 即为 Makelut 函数构建的查询表,一般为 16 或 512 元素的向量, BW 是供查询的二值图像, Applylut 函数主要是通过 Makelut 函数提供的查询表,对二值图像 BW 进行 2×2 或 3×3 一系列的邻域计算,从而筛选出符合要求的重要点。

本研究使用 Matlab 的 Makelut 函数返回的是一张名为 lookup 的查询表,将其参数传递给 Applylut 函数,通过它在图像的 3×3 领域内筛选符合要求的交点、末端点信息。而查询表的构建关键是取决于 Makelut 中第一个参数 fun 即函数句柄的设计。交点、末端点函数句柄的构建思想介绍如下:

① 交点函数(Junction) 交点的判断是通过遍历 3×3 领域中心像素点的所有周围像素点,累计其相邻点的像素值发生(0,1)跳变的次数,其计算方法是逐个相减周围点的像素值,取其绝对值的累加和,若所得值为 6 或者 8,则此中心像素点即是

交点;

② 末端点函数(Ending) 末端点的判断也是通过遍历 3×3 领域中心像素点的所有邻近点,累计其相邻点像素值发生(0,1)跳变的次数,其计算方法同样是逐个相减周围点的像素值取其绝对值的累加和,若所得值为 2,则此中心像素点就为末端点。

化学结构图中的交点和末端点筛选过程如图 4。

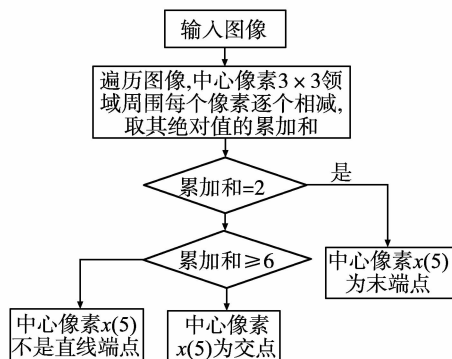


图 4 交点、末端点的筛选流程图

Fig. 4 The flow chart of intersection points and end points screening

最后通过调用 Find 函数得出所有交点和末端点的行列坐标,并用不同的形状标出,如图 5 所示。圆点即为交点,方框即为末端点。

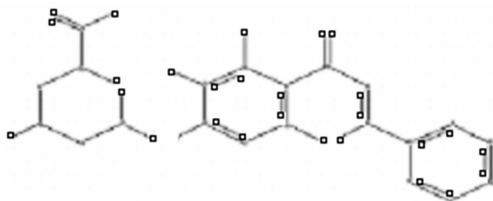


图 5 交点和末端点的示意图

Fig. 5 The diagram of intersection points and end points

2.2.2 化学键中直线段的提取

由以上分析可知,边缘上线段分割点的确定主要是通过边缘拐点的判别进行的。而判别边缘拐点时,首先需要将边缘各点的偏移值计算出来,也即计算点到点所在边缘的端点连线的距离。得出边缘点偏移值后,通过比较其偏移值大小,取其中的最大值,将此最大值再次与设定的阈值比较大小,若其值在阈值之上,则此点即为边缘的线段分割点。

在边缘的线段分割中,边缘点偏移值 d 的计算方法如下:

假设平面上存在两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$, 则连接 P_1 和 P_2 两点的直线 l 方程可表示为

$$x * (y_1 - y_2) + y * (x_2 - x_1) + y_2 * x_1 - y_1 * x_2 = 0, \quad (1)$$

则任意点 $p(x, y)$ 到直线 l 的距离 d 可表示为

$$d = \frac{d'}{D}, \quad (2)$$

$$D = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}, \quad (3)$$

$$d' = \text{abs}(x * (y_1 - y_2) + y * (x_2 - x_1) + y_2 * x_1 - y_1 * x_2), \quad (4)$$

其中, P_1 和 P_2 对应于被分割边缘的两端点。由式(3)和式(4)可知, 因标准差 D 位置的特殊性, 其取值不得为 0, 即所分割边缘不能为环状, 所以, 在计算环状边缘点的偏移值时, 本研究将环状边缘上各点到起点的欧氏距离作为此点的偏移值, 并设标准差 $D = 1$, 使标准差 D 得以通用。其具体表述如下:

设起点为 $P_1(x_1, y_1)$, 所求点为 $P(x, y)$, 则偏移值 d 为

$$d = \frac{d'}{D}, \quad (5)$$

$$d' = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \quad (6)$$

其中 P_1 即为边缘的起始点, P_2 即为边缘上欲求偏移值的点。

由于设定的阈值因边缘而异, 所以上述的偏移值计算方式, 不会影响边缘拐点的正确判断, 也使标准差的使用具有了一般性。

边缘拐点判别步骤如下:

(1) 遍历化学结构图像, 将跟踪后的边缘编号, 并将边缘跟踪结果存储在名为 edgelist 的元胞数组中;

(2) 按编号依次取出 edgelist 中的各边缘点, 计算出边缘点的偏移值, 取其中最大的偏移值 Maxlindev, 比较 Maxlindev 与设定阈值 tol 的大小;

(3) 若 $\text{Maxlindev} \geq \text{tol}$, 改变边缘的终点索引值, 即将边缘上最大偏移值点的索引值赋给所在边缘的终点索引值 lst, 赋值完后, 继续检测剩余的点;

(4) 在二次采样点时, 将偏移值小于 tol 的边缘点存储在名为 seglist 的元胞数组中, 此元胞数组的存储格式与边缘存储时的 edgelist 元胞数组相同, 其直线段提取流程如图 6。

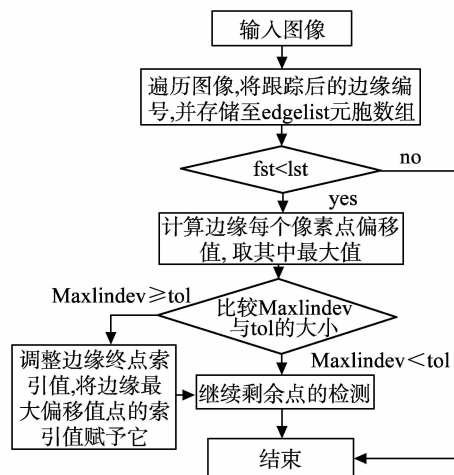


图6 化学结构直线段提取流程图

Fig. 6 The diagram of chemical structure line segments extraction

通过以上一系列的信息提取, 图中重要的点、线信息都被提取出来, 存储至各自的数组中。接着, 调用这些信息, 进行简单的数学运算, 就可以得到比较全面的化学键信息: 如通过线段斜率的计算即可判断图中是否存在单键, 双键, 三键; 如有端点重合的信息, 继续搜索与之相关的交点和线段信息, 推知大 π 键(苯环)的存在与否。而且, 其中的交点信息还隐含着未标注的 CH_n 中的 n 的数值大小, 即为 4 减去相交的线段数。

通过实验检测发现, 本研究对化学结构图具有良好的提取效果, 能有效减少化学结构图边缘断裂点的误判, 伪线段的产生, 提高线段端点性质判断的准确率, 使提取出的化学键信息更具说服力。

3 实验

实验时, 本研究选取了 100 幅有机化合物的 BMP 图像, 用论文算法对这 100 幅图的化学键进行了提取。为了测试算法在化学结构图直线提取上的性能, 本研究选取了其中的 15 幅, 用本算法和 Hough 变换对这 15 幅图中的线段进行了提取, 其实验数据如表 1。表 1 中 15 幅图形的直线总数为 560 条, 本研究算法的直线提取正确率为 85.37%, Hough 变换的直线提取正确率为 45.89%, 本研究算法正确率较高的原因如下: 本研究算法的针对性强; Hough 变换的经典决定了其面向性较广, 所以在一些规则性很强的领域问题处理方面, Hough 变换就会出现相对本研究算法这类具有针对性的直线提取法的提取图形直线段正确率偏低。Hough 变换运行速度比本研究算法慢, 原因有二: (1) 参数设置多; (2) 本算法的设计避免了图形空间到参数空间的映射, 及后续的股票累计, 峰值选取等工作。

表 1 Hough 变换与本研究算法直线提取统计表
Table 1 The statistics of Hough transformation and the algorithm of extracting straight lines

	本研究算法	Hough 变换
检测的总的直线数/条	560	560
正确数目	479	257
正确率/%	85.37	45.89
运行时间/s	1.78004	3.81009

表 2 是 100 幅化学图形重要点筛选结果统计表, 100 幅图形末端点、交点、拐点、线段端点各类点的平均正确识别率依次为 73.1%、79.9%、77.2% 和 71.7%。由于 100 幅图形的各图形间复杂度相差不大, 所以本研究计算各类点平均正确识别率时,

选取了图形各类重要点识别率区间的中间值,用各区间中值乘以此区间对应的图形个数,将所得值再除以图形总数 100 作为各类重要点的平均正确识别率。表 2 重要点的筛选归结于 Matlab 两个自带函数 Makelut、Applylut 的调用和 Makelut 句柄函数: junction 交点函数、ending 末端点函数的构建,通过返回查找表 lookup 并对查找表 lookup 的适时调用,实现图像重要点的筛选,其中,查找表 lookup 的构建决定了最终的点筛选效果。表 3 则是在对 100 幅图像直线和点提取的基础上,对这 100 幅图的化学键键型的判断,其各类键型平均判定准确率的换算同表 2 各类重要点平均识别正确率的计算。表 3 各类键型:单键、双键、三键以及大 π 键判定准确率分别为:71.7%、73.2%、77.2% 和 73.2%,键型判定准确率总的平均值为 73.83%。表 3 主要是调用已提取出的点、线信息,结合向量化及对已有直线信息斜率的换算,达到对化学结构图常见化学键键型判定的目的。由以上分析可知本算法的特点如下:(1) 针对性强;(2) 参数设置少;(3) 避免了经典直线提取时所需的空空间映射各项工作;(4) 主次性强,先提取重要点,使得后续的直线提取与线段端点的定性都有据可循。不过,本算法仍需进一步提高化学键提取时信息的准确性,所以在各边缘拐点即线段分割点确定时,阈值选取的方法仍需进一步研究。

表 2 化学结构图中重要点识别结果统计表
Table 2 The important points recognition results of chemical structure diagrams

识别率	图像幅数 (末端点)	图像幅数 (交点)	图像幅数 (拐点数)	图像幅数 (线段端点)
80% 以上	42	40	38	36
70% ~ 80%	14	15	17	19
60% ~ 70%	33	35	32	33
60% 以下	11	10	13	12

表 3 化学键判定结果统计表
Table 3 The results of chemical bonds judgment

识别率	图像幅数 (直线识别)	图像幅数 (单键)	图像幅数 (双键)	图像幅数 (三键)	图像幅数 (大 π 键)
80% 以上	40	38	36	39	41
70% ~ 80%	16	14	15	18	18
60% ~ 70%	34	36	39	38	30
60% 以下	10	12	14	13	11

4 结语

本研究使用图像处理技术,结合化学结构图的自身特点,以实现计算机对化学键信息的自动提取

为目标,设计了一种根据化学结构图各边缘点偏移度变化的有序和规律性,达到对化学结构图边缘拐点判别的目的。另外,为了尽量避免已有直线提取法的缺陷,增强化学结构图边缘线段信息提取的可靠性。在算法实现上,本研究首先就图中的重要点进行了筛选,以确保后续的化学结构的拐点判别和化学键类型判定达到有据可循,也使得信息提取的有效性得到了改善。

需指出的是,本算法在拐点判别时,因多次阈值的选取,使信息提取准确率未达到预期值,所以在以后的工作中还需在缩减误差上做出更大的努力。此外,本方法面向的图像对象也存在一定的局限性,针对的都是化学结构这种规则性很强的图形,而对于那种不规则或者结构不确定的一般图像,本算法在信息提取方面的有效性还得不到保证。所以,本研究也将为进一步实现算法的一般性做出努力。

参考文献:

- [1] 陈泓,曹庆文,李梦龙. 化学信息学发展现状[J]. 化学研究与应用, 2004, 16(4): 453-455.
CHEN Hong, CAO Qingwen, LI Menglong. Chemical informatics development status [J]. Chemical Research and Application, 2004, 16(4): 453-455.
- [2] 吴长江. Internet 上的化学化工信息资源[J]. 安徽化工, 2002, 116(2): 47-49.
WU Changjiang. The chemical information resources on Internet [J]. Anhui Chemical Industry, 2002, 116(2): 47-49.
- [3] 李一梅. 化学文献计算机检索系统之构想[J]. 科技情报开发与经济, 2007, 17(35): 62-64.
LI Yimei. Conception of computer retrieval system of chemical literatures [J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2007, 17(35): 62-64.
- [4] WIGGINS G. Chemistry on the internet: the library on your computer [J]. J Chem Inf Comput Sci, 1998, 56(38): 956-965.
- [5] 杨晓慧. 计算机在化学中的应用[J]. 长春大学学报, 2011, 21(2): 44-47.
YANG Xiaohui. The application of computers in chemistry [J]. Journal of Changchun University, 2011, 21(2): 44-47.
- [6] 殷昕. 计算机在化学领域中的应用[J]. 中国科技信息, 2007, 16(18): 182-184.
YIN Xin. Computer application in chemistry [J]. China Science and Technology Information, 2007, 16(18): 182-184.
- [7] 姚建华. 化学结构的计算机处理(II) 化学结构的计算机内存方式和文件格式[J]. 计算机与应用化学, 1998,

- 15(2):65-69.
- YAO Jianhua. Computer handling of chemical structures (II): the computer storage and file format of the chemical structure[J]. Computers and Applied Chemistry, 1998, 15(2):65-69.
- [8] 李琰,周家驹. VF算法在化学结构检索中的应用[J]. 计算机与应用化学,2002,19(5):575-576.
- LI Yan, ZHOU Jiaju. The VF algorithm in the application of chemical structure search[J]. Computers and Applied Chemistry, 2002, 19(5):575-576.
- [9] 文媛. 化学结构的计算机描述[J]. 科技情报开发与经济,2004,14(8):187-188.
- WEN Yuan. Computer based description of the chemical structure[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2004, 14(8):187-188.
- [10] 冯红君,周俊林. 化学分子结构在计算机中的表示方法[J]. 电脑知识与技术:学术交流,2007,13(9):837-838.
- FENG Hongjun, ZHOU Junlin. The expression method of chemical molecular structure in the computer[J]. Computer Knowledge and Technology: Academic Exchange, 2007, 13(9):837-838.
- [11] 李汉龄,韩风云,郭太胜. A-OT-FU 化学结构的特点及检验方法[J]. 山东大学学报:自然科学版,1986,24(4):43-44.
- LI Hanling, HAN Fengyun, GUO Taisheng. Chemical structure of A-OT-FU and analytical methods[J]. Journal of Shandong University: Natural Science Edition, 1986, 24(4):43-44.
- [12] YAO J H. Computer handling of chemical structure in general introduction to approaches of chemical structures representation[J]. Computers and Applied Chemistry, 1997, 13(3):81-86.
- [13] WEN Y. Computer-based description of the chemical structure[J]. Sci/Tech Information Development & Economy, 2004, 46(14):117-118.
- [14] MORGAN H L. The generation of a unique machine description for chemical structures-a technique developed at chemical abstracts service[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 23(8):57-59.
- [15] 董鸿燕. 边缘检测的若干技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008,12(5):15-18.
- DONG Hongyan. The research on some techniques in edge detection[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008, 12(5):15-18.
- [16] MATAS J, GALAMBOS C, KITTLER J. Robust detection of lines using the progressive probabilistic Hough transform[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 13(8):119-137.
- [17] CHING Yutai. Detecting line segments in an image-a new implementation for Hough transform[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 35(22):421-429.
- [18] ATIQUZZAMAN M, AKHTAR M W. A robust Hough transform technique for complete line segment description[J]. Real-Time Imaging, 1995, 13(1):419-426.
- [19] 朱卫纲,李生良. 相位编组方法提取直线[J]. 指挥技术学院学报,1999,10(4):65-67.
- ZHU Weigang, LI Shengliang. Phase-grouping method extracting straight lines[J]. Journal of the Academy of Equipment, 1999, 10(4):65-67.
- [20] 杨顺辽. 基于 Hough 变换提取直线的改进方法研究[J]. 电脑与信息技术,2006,14(5):29-31.
- YANG Shunliao. The improvement method research to extract lines based on the Hough transform[J]. Computer and Information Technology, 2006, 14(5):29-31.
- [21] 邱桑敏,夏雨人. 一种快速霍夫变换算法. 计算机工程, 2004,30(2):148-150.
- QIU Sangmin, XIA Yuren. A fast Hough transform algorithm[J]. Computer Engineering, 2004, 30(2):148-150.
- [22] RUPERT C D, CHRIS D Bradfield. A fast Hough transform for the parameterization of straight lines using Fourier methods[J]. Real-Time Imaging, 2004, 19(6):113-127.
- [23] AZRIEL Rosenfeld, ISAAC Weiss. A convex polygon is determined by its Hough transform[J]. Pattern Recognition Letters, 1995, 35(16):305-306.
- [24] 陈洪波,王强,徐晓蓉. 用于线段特征提取的改进 Hough 变换[J]. 计算机工程与应用,2004,35(21):206-209.
- CHEN Hongbo, WANG Qiang, XU Xiaorong. The improved Hough transform for line feature extraction[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 35(21):206-209.
- [25] 韩秋蕾,朱明,姚志. 基于改进 Hough 变换的图像线段特征提取[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):436-439.
- HAN Qiulei, ZHU Ming, YAO Zhi. The image line feature extraction based on improved Hough transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4):436-439.

(编辑:胡春霞)