

# 智能白内障超声乳化技术中针头对碎片的实时跟踪技术

李爱丽, 韩辛亮, 涂序彦, 郑雪峰

(北京科技大学计算机与通信工程学院 618 室, 北京 100083)

**摘 要:** 本文提出一种超声乳化针头对白内障碎片的实时跟踪技术, 该技术可逐步实现将智能控制贯穿于整个白内障手术操作流程. 智能超声乳化技术的关键因素在于: 识别白内障和正常组织, 识别白内障的颜色和硬度; 实时跟踪乳化针头附近区域的白内障片段; 根据实时结果自动控制乳化针头正确释放能量, 避免损伤眼球. 霍夫变换、 $k$ 最近邻分类器和智能控制技术是本文提出的新超声乳化探针实时跟踪白内障片段方法的基础. 实验结果分析表明, 本新方法实现了超声乳化手术的智能控制, 并大幅提高了手术的安全性和效率.

**关键词:** 白内障; 实时跟踪; 霍夫变换; 智能控制

**中图分类号:** TN911.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2014)06-1157-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.06.018

## Phacoemulsification Probe Real-Time Tracking for Cataract Fragments of Intelligent Cataract Phacoemulsification

LI Ai-li, HAN Xin-liang, TU Xu-yan, ZHENG Xue-feng

(School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This report introduces the technique of phaco-emulsification probe real-time tracking for cataract fragments which can eventually realize the using of intelligent control throughout the procedure of cataract operation. The key factors of smart phaco-emulsification techniques are: recognition of cataract and normal tissue; recognition of the color and hardness of cataract; real-time tracking of cataract fragments in the area near emulsifying probe; automatic control of the emulsion probe which could accord to the real-time results to release energy and avoid eye injury caused by over-released energy. The basic to this new method of phaco-emulsification probe real-time tracking for cataract fragments are Hough transform,  $k$ -nearest neighbor classifier and intelligent control technology. By analyzing the experiment results, this new method realizes the intelligent control of phaco-emulsification operation and improves the operation's safety and efficiency considerably.

**Key words:** cataract; real-time tracking; Hough transform; intelligent control

### 1 引言

目前我国需手术的白内障患者约有 500 多万人, 每年新增白内障患者 100 多万, 而手术能力却严重不足. 且我国白内障患者发病特点为患者年龄大、程度重、并发症多<sup>[1]</sup>. 白内障超声乳化在欧美等发达国家中已成为白内障手术的首选技术<sup>[2]</sup>. 现在国内各大医院使用的手术设备——白内障超声乳化仪主要产自欧美等国, 设备使用要求较高, 价格昂贵, 适应范围有限, 且存在角膜内皮损伤, 虹膜及房角创伤, 后囊破裂等严重并发症, 甚至

部分患者因手术造成不可逆的永久失明. 因此, 研究高效安全, 智能可控的新型超声乳化仪和提高视觉质量的手术技术对提高白内障患者的复明效果至关重要.

智能白内障超声乳化技术是通过多年研究和试验, 对白内障手术过程的全面技术改进和创新, 采用模式识别技术和智能控制技术实现了对白内障和白内障碎片的实时识别和跟踪, 同时采用智能控制技术对超声能量进行精细控制, 大大降低手术风险, 在保证手术安全性的前提下也提高了手术效率.

## 2 概述

智能超声乳化仪识别系统主要由信号获取、预处理、特征提取和分类器构成。信号获取将原始信息转变为数字信息,便于计算机识别和处理;预处理完成识别目标的锁定、提取以及各种滤波、去噪功能,并最大限度地增强有用信息;特征提取则从目标中提取最能反映其类别本质的特征,从而不仅减小数据量,同时避免了非本质信息对识别的干扰;分类器根据所提取的特征实现对目标的识别。智能超声乳化仪识别系统是多变量协调控制系统<sup>[3]</sup>,能够做到根据图像和其它相关信息识别出针头所触及到的组织是正常结构还是白内障,从而为设备的控制提供依据。如果是正常结构,则控制设备不发能量,这样,即使针头接触到正常结构,也不会对其产生损伤,从而保证了手术的安全性;如果是白内障组织,则进一步识别其硬度,为能量释放模式的控制提供依据。

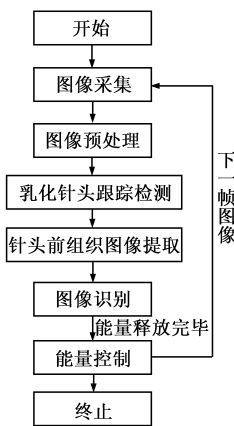


图1 智能超声乳化技术主要流程

## 3 眼球图像库建立

智能超声乳化技术的基础是建立眼球图像库。通过采集不同病例不同条件下的海量眼球图像,并由知识工程师和医学专家对其进行分类分析,进而建立眼球图像库,包括不同形态混浊的晶体皮质,不同晶体核硬度和图像基本信息,如表1至表3所示。

表1 晶体皮质浑浊度信息表

No	字段名称	数据类型	中文意义
1	UID	Number(6)	浑浊度索引
2	Name	Text(50)	浑浊度级别
3	Desc	Text(255)	描述

建成后的图像库还包括一个图像管理系统,可以根据需要方便的增删和检索眼球图像,如图2所示。

表2 晶体核硬度信息表

No	字段名称	数据类型	中文意义
1	UID	Number(6)	硬度索引
2	Name	Text(50)	硬度级别
3	Desc	Text(255)	描述

表3 图像基本信息表

No	图层名称	数据类型	中文意义
1	UID	Number(6)	图像索引
2	ID-HZD	Number(6)	晶体皮质浑浊度索引
3	ID-YD	Number(6)	晶体核硬度索引
4	PicWidth	Number(6)	图像宽度
5	PicHeight	Number(6)	图像高度
6	PicDepth	Number(6)	图像位深
7	PicType	Text(50)	图像文件类型
8	PicFullPath	Text(255)	图像完整路径
9	PartMemo	Text(255)	眼球组织
10	PicEyeSpec	Binary	特征值

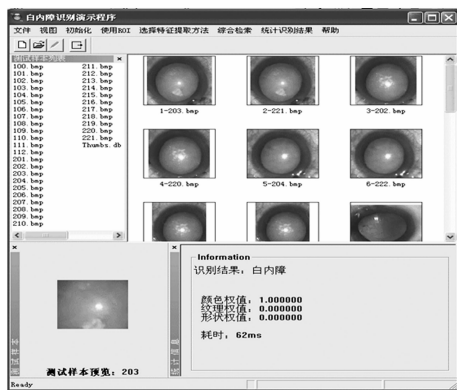


图2 眼球图像库管理系统

## 4 图像采集和预处理

图像采集使用蔡司 200-S8 型医用电子显微镜,其图像质量高,可连续采集,带有数字输出功能。

智能超声乳化系统对采集的每一帧图像首先进行图像预处理,实现图像去噪和图像增强,主要采用灰度变换、直方图和平滑滤波等常用图像处理方法,属于图像处理的基础研究,也非本文研究重点,不再赘述。

## 5 乳化针头的跟踪检测方法

对乳化针头的跟踪,是提取白内障碎片图像的前提。Hough 变换<sup>[4]</sup>是一种常用的形状特征描述方法,常用于直线、圆弧、抛物线的检测,已在诸多领域得到应用<sup>[5]</sup>,课题采用 Hough 变换对乳化针头进行检测。

## 5.1 Hough 变换检测乳化针头

对于图像空间中的一条直线  $y = m \times x + c$  ( $m$  为斜率,  $c$  为截距), 它在由斜率和截距组成的参数空间 ( $m, c$ ) 中满足方程  $c = -m \times x + y$ . Hough 变换的实质是对采集的图像进行坐标变换, 将原始坐标转换成 Hough 参数空间, 然后在参数空间中使用极值点检测方法完成超声乳化针头的检测. Hough 变换检测过程如图 3 所示:

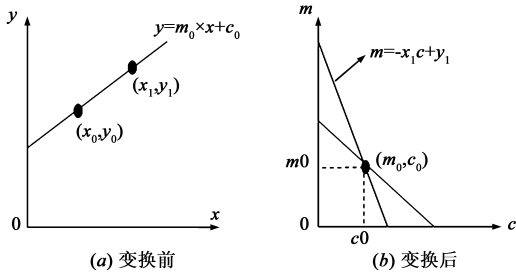


图3 Hough变换过程

本课题采用上述算法的原理用于超声乳化针头的检测, 其具体过程可概述为 4 个步骤:

**步骤 1** 随机选取数据点集合中的数据  $(x_k, y_k)$ , 若此点未经检测, 则进行 Hough 变换<sup>[6~8]</sup>;

**步骤 2** 假设存在累加器  $A(p_k, \theta_k)$ , 若其值大于预设的阈值, 则将对参数  $p_k, \theta_k$  输出, 然后将累加器  $A(p_k, \theta_k)$  清空;

**步骤 3** 根据上述过程求解出直线参数, 并在原始图中做直线连接, 将属于该直线的数据点标记为已检测;

**步骤 4** 检查集合中未处理的点, 若其数量小于阈值则退出, 否则返回步骤 1.

使用 Hough 变换直线检测定位乳化针头的结果如图 4 所示:

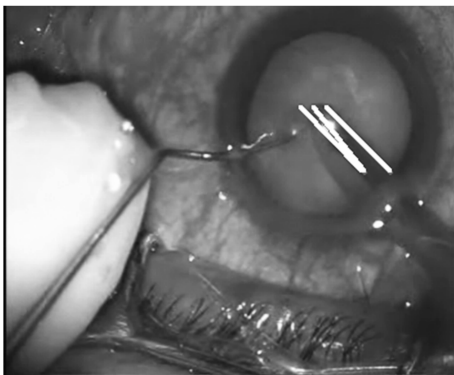


图4 Hough变换检测乳化针头

## 5.2 随机 Hough 变换检测眼球区域

Hough 变换检测眼球区域实际上是检测圆形, 与检测直线的原理相似, 是利用参数空间映射, 将原始空间中的曲线变换到参数空间的若干点, 把原始图像中圆形的检测问题转化为寻找参数空间极值点的问题<sup>[9]</sup>. Hough

变换提供了很多检测圆的方法, 主要取决于圆的表达形式, 课题中采用的是基于梯度信息的 Hough 变换.

课题中圆的表达形式采用极坐标形式, 如下所示:

$$\begin{cases} x = a + r \cos \theta \\ y = b - r \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

$\theta$  为圆周上一点的梯度方向角.

圆检测算法分两步:

(1) 二维 Hough 变换检测圆心;

(2) 一维 Hough 变换求解对应的半径.

式(1)可以通过变换可以转换为如下形式:

$$b = a \tan \theta - x \tan \theta + y \quad (2)$$

原来的三维被降为二维, 简化为一条直线, 根据 Hough 变换直线检测方法建立累加器  $A(a, b)$ , 根据累加器局部最大值找到圆心坐标, 随后初始化半径累加器  $A(r)$ , 相应累加器的峰值就是圆的半径. 该算法描述如下<sup>[10~14]</sup>:

**步骤 1** 扫描原图像并求解梯度, 对得到的梯度图像进行阈值变换, 得到二值图像;

**步骤 2** 扫描步骤 1 得到的图像, 对梯度值不为零 (即为 255) 的像素点, 求得其原始位图中的位置, 计算梯度方向角, 假设为  $\theta$ , 利用上面两式之一可计算出圆心坐标;

**步骤 3** 根据圆心坐标  $(a, b)$  进行累加;

**步骤 4** 扫描梯度图像, 累加数组中最大值的元素对应的  $a$  和  $b$  就是被检测圆的圆心坐标;

**步骤 5** 初始化累加器  $A(r)$ , 按照公式  $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$  累加, 最后得到的峰值就是对应圆的半径  $r$ .

采用 Hough 变换检测圆的方法对眼球进行定位, 然后将对直线段的检测区域限定在眼球的内部, 可以提高检测精度. 乳化针头所在区域如图 5 所示:

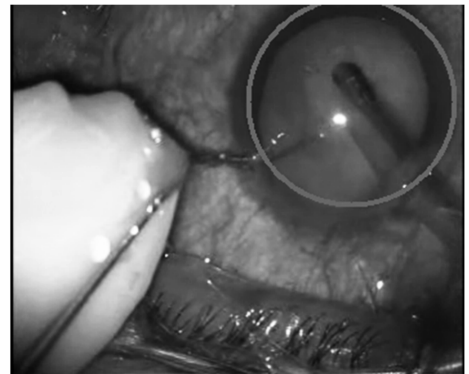


图5 乳化针头所在区域图

## 6 白内障碎片的跟踪检测方法

### 6.1 提取乳化针头前组织图像

以上方法在白内障手术过程中实时检测和跟踪乳化针头:

**步骤 1** 对白内障手术视频图像进行平滑、滤波、边缘检测等预处理操作;

**步骤 2** 利用 Hough 变换检测圆,即检测白内障视频图像中眼球和眼睑的交界,确定乳化针头所在位置;

**步骤 3** 利用 Hough 变换检测直线,在步骤 2 的基础上检测乳化针头,确定乳化针头的位置。

根据已精确检测到的乳化针头位置,提取针头前的图像,进而进行相应的分析,实现对白内障碎片的跟踪检测.针头前图像提取流程如图 6 所示。

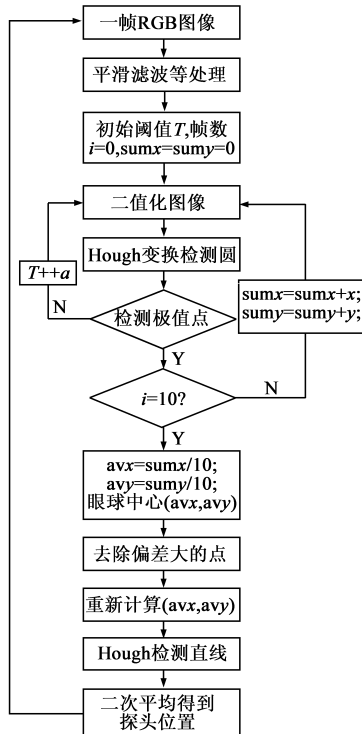


图6 针头前图像提取流程图

采用上述算法,在实验平台进行实验,实验数据从视频库中获取,视频图像大小为  $352 \times 288$ ,乳化针头前方图像提取如图 7 所示:(其中红色区域为提取的组织图像)

基于形状特征的 Hough 变换方法对针头的检测效果较好,能实现对针头的准确跟踪定位.乳化针头检测的越准确,得到的针头前白内障碎片图像越准确,碎片的识别正确率也越高。

## 6.2 乳化针头前白内障碎片的识别

依据提取的针头前组织图像,提取其颜色特征和纹理特征,以提高识别精度<sup>[15]</sup>.提取白内障碎片颜色特征采用颜色特征提取采用更符合人眼色彩视觉特征的 HSV 颜色模型,依据人眼的颜色感知特性,对 HSV 空间进行 63 级非均匀量化:

$$L = 9H + 4S + V$$

量化后形成一维特征向量,有效地压缩了颜色特征<sup>[16]</sup>.颜色特征可以表示为  $c = [c_0, c_1, c_2, \dots, c_{62}]$ .

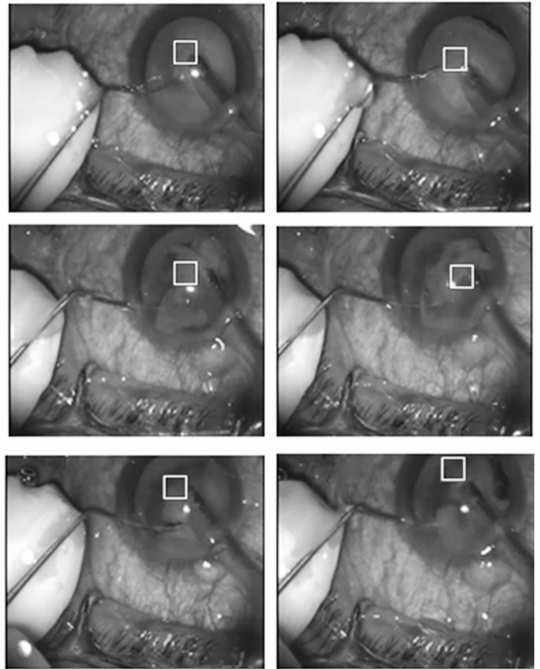


图7 提取乳化针头前组织图像

对纹理特征采用灰度共生矩阵提取反差 (CON)、能量 (ASM)、熵 (ENT) 和相关 (COR) 4 种不同的纹理特征,最后以各特征量的均值和标准差作为纹理特征,可表示为  $t = [t_0, t_1, t_2, \dots, t_7]$ .

为了区分白内障碎片与正常组织,分类器的设计是关键.最近邻法是一种很直观的分类方法,其基本思想就是在训练集中找到一个和待识别目标距离最小的样本,以它所属的类别作为识别结果.该算法是一种代表性的非参数法,能在一定程度上克服样本均值向量的偏差带来的影响。

本文采用  $k$  最近邻分类器实现,  $k$  取 5,在 Matlab7.0.4 实验平台下对白内障碎片和正常组织的准确率分别为 91.9% 和 97.8%。

智能白内障超声乳化针头识别跟踪系统,采用 VC6.0 开发,如图 8 所示。

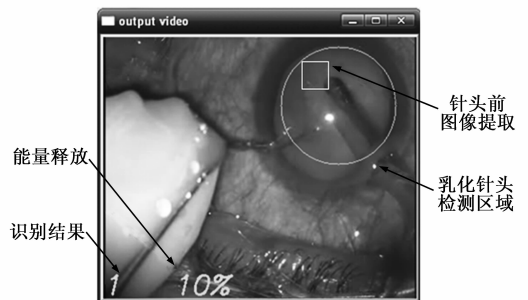


图8 识别跟踪系统界面图

## 7 超声能量释放的控制方法

理论研究和临床实践表明,白内障超声乳化手术中,超声能量过量是造成眼角膜内皮细胞损伤的主要原因之一,因此,在确保白内障超声乳化效果的前提下,如何降低能量强度,缩短作用时间,提高能量的利用率和手术安全性,就成为广泛关注的问题<sup>[17]</sup>。

超声能量智能控制采用多模态智能控制器实现,控制器硬件采用数字信号处理芯片,其总体结构如图 9 所示。

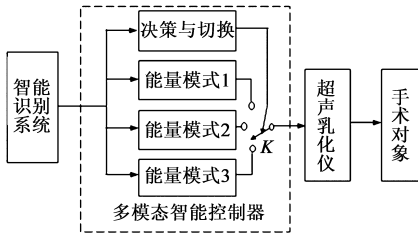


图9 多模态智能控制系统总体结构图

多模态智能控制器、智能识别系统和超声乳化硬件共同组成智能白内障超声乳化系统,可以实现智能控制的白内障超声乳化手术。超声能量智能控制原理是:智能识别系统的人眼实时信息(颜色、纹理、大小、硬度等)传输至多模态智能控制器,内部的决策控制模块分析后选择合适的超声乳化能量模式,从知识库中选择适当的专家知识和经验,模拟人类专家决策,计算超声乳化仪工作参数(包括超声乳化能量释放方式、大小、释放时间等),接通超声乳化仪,从而实现白内障手术的超声能量智能控制。

## 8 方法的意义和主要作用

智能白内障超声乳化技术,将原始图像转变为计算机能识别和处理的数字信息,进而去噪、滤波,最大限度的增强有用信息,采用 Hough 变换实现乳化针头的跟踪检测,进而识别乳化针头前的区域是否是白内障碎片、程度如何,并根据识别结果控制超声能量的释放。

该技术克服了传统白内障超声乳化手术的缺点,提高了手术安全性和普及率,是医学、信息学、模式识别、人工智能等多种理论技术集成应用的有益尝试。

### 参考文献

[1] 施玉英. 现代白内障治疗[M]. 北京:人民卫生出版社, 2006.  
 [2] 陈康. 超声乳化仪的原理、构成及进展[J]. 医疗卫生装备, 2005, 10(26): 59.  
 [3] 涂序彦, 韩力群, 马忠贵. 协调学[M]. 北京:科学出版社,

2012

[4] Paul Hough. Method and Means for Recognizing Complex Patterns[P]. US: 3069654, 1962  
 [5] 胡正平. 基于多尺度-局部方向轮廓综合的鲁棒虹膜定位算法[J]. 电子学报, 2007, 35(1): 131-134.  
 Hu Zheng-ping. Robust iris location based on multi-scale local-direction contour detection [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 131 - 134. (in Chinese)  
 [6] 顾思妍. 机器视觉的直线检测技术及应用研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.  
 [7] 陈海峰. 数字图像中基本几何形状检测算法的研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
 [8] 祁宝英. 运用 Hough 变换提高直线检测效率[J]. 计算机系统应用, 2012, 6(21): 228 - 231.  
 Qi Bao-ying. Enhancing line detection efficiency by using Hough transform [J]. Computer Systems & Applications, 2012, 6(21): 228 - 231. (in Chinese)  
 [9] 王睿. 基于气致变色传感器的图像识别系统的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.  
 [10] 瞿钧, 甘岚. 梯度 Hough 变换在圆检测中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2007, 24(1): 101 - 104.  
 Qu Jun, Gan Lan. The application of grads hough transformation in circle detection [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2007, 24(1): 101 - 104. (in Chinese)  
 [11] 刘延杰, 赖日飞, 荣伟彬, 孙立宁. 基于改进随机 Hough 变换的快速中心检测方法[J]. 纳米技术与精密工程, 2011, 09(4): 298 - 304.  
 Liu Yan-jie, Lai Ri-fei, Rong Wei-bin, Sun Li-ning. A fast center detecting method based on improved randomized Hough transform [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 09(4): 298 - 304. (in Chinese)  
 [12] 曾文静, 张铁栋, 万磊, 徐玉如. 基于 Hough 变换的水下管道检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1): 76-84.  
 Zeng Wen-jing, Zhang Tie-dong, Wan Lei, Xu Yu-ru. Underwater pipeline detection based on Hough transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 76 - 84. (in Chinese)  
 [13] 王宏健, 王晶, 曲丽萍, 刘振业. 基于模糊自适应 Hough 变换的海洋环境特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 32 - 37.  
 Wang Hong-jian, Wang Jing, Qu Li-ping, Liu Zhen-ye. Sea environment feature extraction based on fuzzy adaptive Hough transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 32 - 37. (in Chinese)  
 [14] 周封, 杨超, 王晨光, 王丙全, 刘健. 基于随机 Hough 变换的复杂条件下圆检测与数目辨识[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 622 - 628.  
 Zhou Feng, Yang Chao, Wang Chen-guang, Wang Bing-quan, Liu Jian. Circle detection and its number identification in com-

plex condition based on random Hough transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3): 622 - 628. (in Chinese)

[15] 宋艳, 刘方爱. 综合颜色与纹理的图像检索[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(17): 4180 - 4182.

Song Yan, Liu Fang-ai. Image retrieval based on color and texture [J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(17): 4180 - 4182. (in Chinese)

[16] 郝红卫, 黄芳益, 周静. 基于 ROI 与 MCS 的图像检索方法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(2): 240 - 245.

Hao Hong-wei, Huang Fang-yi, Zhou Jing. Image retrieval method based on ROI and MCS [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(2): 240 - 245. (in Chinese)

[17] 李希胜, 李忠虎. 多模态智能控制在白内障手术中的应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(7): 974 - 975, 985.

Li Xi-sheng, Li Zhong-hu. Study on multi-mode intelligent control in cataract operation [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(7): 974 - 975, 985. (in Chinese)

## 作者简介



**李爱丽** 女, 1965 年 10 月出生, 北京人, 中国医药信息学会教育专业委员会常务副秘书长, 北京医药信息学会副秘书长, 北京医药软件协会副秘书长, 从事人工智能和医药信息化等方面技术研究和管理工作。

E-mail: llaall88@sina.com



**涂序彦** 男, 1935 年生于江西南昌, 北京科技大学教授, 博士生导师, 中国人工智能学会荣誉理事长, 学术指导委员会主席、北京市人工智能学会名誉理事长、“拟人系统”国际学术会议主席, 研究领域: 人工智能、专家系统、智能控制。



**韩辛亮** 男, 1981 年 10 月出生, 山东济南人, 计算机应用硕士. 主要从事神经网络、智能控制等方面的研究工作。

E-mail: redchina5@163.com



**郑雪峰** 男, 1951 年生, 北京科技大学教授, 博士生导师, 计算机学会高级会员. 长期从事计算机网络技术, 计算机控制系统及信息安全领域的理论研究和应用。