

# 高速医药自动化生产线大输液视觉检测与识别技术

张 辉<sup>1,2†</sup>, 王耀南<sup>2</sup>, 吴成中<sup>2</sup>, 周博文<sup>3</sup>, 陈铁健<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410004; 3. 清华大学 电子工程系, 北京 100084)

**摘要:** 药品灌装质量检测是制药过程的一个重要环节, 是药品质量的可靠保证. 针对医药大输液可见异物视觉检测的需求, 研制出基于多视觉的大输液自动化检测识别系统. 首先研究了医药图像的高速高可靠性预处理方法, 有效消除由机械振动和跟踪引起的干扰. 研究了以药液微小异物为目标的改进模糊细胞神经网络图像分割方法, 揭示了液体中异物目标、微粒、气泡等产生机理, 综合分析目标的形态特征、边缘轮廓、运行特征等, 得到各种异物的类型特征以及在序列图像中的动态变化信息. 最后, 使用序列图像的目标特征, 基于支持向量机的AdaBoosting分类算法进行异物识别, 结果证明本文提出的方法检测识别率高, 对工程设备的研制具有重要意义.

**关键词:** 医药大输液; 视觉检测; 改进模糊细胞神经网络; 异物分类识别

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

## Visual detection and recognition for medical infusion automatic production lines

ZHANG Hui<sup>1,2†</sup>, WANG Yao-nan<sup>2</sup>, WU Cheng-zhong<sup>2</sup>, ZHOU Bo-wen<sup>3</sup>, CHEN Tie-jian<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410004, China;

3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The detection of filling quality for pharmaceutical is an important element in pharmaceutical process, which guarantees the medication security. According to the detection demand of visible foreign substances for glass bottle medical infusion, a high-speed automated foreign substance detection system based on the machine vision consisting of multi-types image acquisition devices is developed. Firstly, a high-speed high reliability preprocessing method for medical infusion images is proposed to eliminate the disturbance caused by mechanical vibration and tracking. Then, an improved fuzzy cellular neural network (IFCNN) is developed for image segmentation to effectively solve the problem of edge detection, which reveals the mechanism of foreign substances, particles as well as liquid bubbles, comprehensively analyzes the morphological boundary of the target operating characteristics, and obtains various characteristics and the dynamic change information in image sequences. Finally, the classification approaches of support-vector-machine (SVM) and AdaBoosting, based on image sequences target characteristics, is employed to recognize multiple tiny insoluble foreign substances. Experimental results indicate that the developed approach is efficient and increases the recognition rate, which is of great significance to the development of engineering equipment.

**Key words:** medical infusion; visual detection; improved fuzzy cellular neural network; foreign substances classify and recognition

### 1 引言(Introduction)

医药大输液是我国医药行业五大重要制剂之一, 是医疗机构日常必须使用的药品, 在现代临床上占据十分重要的地位<sup>[1]</sup>. 据统计我国医疗输液每年高达104亿瓶, 相当于13亿人口每人输液8瓶, 远远高于国际上2.5至3.3瓶的水平, 产量居世界第一. 然而, 由于目前制药企业生产条件、技术和管理水平的不足,

在生产环节药品可能产生2次异物污染<sup>[2]</sup>. 在药品生产过程中, 由于: 1) 瓶体清洗不彻底; 2) 过滤材质破损; 3) 封口时玻屑脱落; 4) 高温灭菌过程中药液碳化; 5) 车间净化度等级不达标等因素, 使药液中易混入玻璃屑、纤维、毛发、漂浮物等微小不溶性异物. 此类异物一旦被注入人体, 易造成血管栓塞、静脉炎、过敏等不良反应, 甚至严重危害生命<sup>[3]</sup>.

收稿日期: 2014-01-16; 录用日期: 2014-10-09.

†通信作者. E-mail: zhanghuihy@126.com; Tel.: +86 18673199176.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401046); 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF11B00); 湖南省自然科学基金资助项目(13JJ4058); 湖南省教育厅科学研究青年基金资助项目(13B135).

目前,我国制药企业由于缺乏相关配套技术和生产成本考虑,大部分都没有在瓶装液体药品生产线中引进或建立自动化医药检测装备系统,而基本上都是采用人工灯检的方法,要求工作人员在暗室中进行,配备简单的检测灯箱,通过目视检测药液中的可见异物,这种方法检查速度慢、操作繁琐、可靠性差,还容易对药品造成2次污染,从而危害制药安全.而基于机器视觉的药品检测机器人能够实现药品在线、高速、高精度的自动化检测.国际上应用视觉技术开发的全自动灯检机有德国Seidenader<sup>[4]</sup>和意大利Brevetti C.E.A<sup>[5]</sup>两家公司,我国在灌装后的药品视觉检测设备研究开发方面远远落后于国外发达国家,国内对自动检测设备的研究起步较晚.西安丰唐广电、上海金纳德、湖南正中制药机械等厂家也进行过该类检测设备的生产研制.然而,由于机械、控制、视觉处理算法等关键技术瓶颈的限制,检测效果不理想.另外,国外设备价格昂贵且与国内生产线配套时存在一些问题导致检测效率不能达到预期效果.

药品图像目标检测是指从图像序列中寻找并提取出目标的过程,其中,基于多帧图像进行目标检测受到了国内外研究人员的关注<sup>[6]</sup>.多帧检测分为先检测后跟踪方法(detect before track, DBT)和先跟踪后检测方法(track before detect, TBD)两大类. DBT方法首先通过运动目标的一些特性,在单帧中将可疑目标检测出来,在此基础上对其进行跟踪,并在跟踪的过程中对检测出的目标进行确认,排出虚假目标,保留真实目标,与此同时得到运动目标的精确运动信息. DBT方法计算过程比较简单,原理容易理解,实时性强,因此比较适合医药异物的实时检测识别.

DBT方法由目标提取与目标确认两方面组成,可疑目标分割取决于算法对目标及背景的区别能力,而这依赖于目标与背景特性方面的先验知识.在单帧图像中分割出候选目标后,利用多帧序列图像来确定真实的目标,常用的目标分割方法有Otsu图像分割法、轮廓检测和分级图像分割、偏微分方程分割法、基于图像局部熵的分割法. S. Schultzer等人<sup>[6]</sup>提出了一种精确的联合分类-回归随机森林目标检测算法,采用这种方法在一个滑动窗口中精确地预测目标概率,同时采用单独模型回归到物体长宽比,目标检测精度高. A.Pablo等人<sup>[7]</sup>提出了轮廓检测与分层图像分割算法,轮廓检测器在谱聚类方法的基础上,联合多个局部线索和全局网络,分层图像分割算法是由通用机将轮廓检测器的结果转变为层次树实现的.这种方法将图像分割分解为轮廓检测,实验表明,轮廓检测与分割方法显著优于竞争算法. A. Sironi等人<sup>[8]</sup>研究了基于尺度空间距离变换学习的多尺度中心线检测算法,采用这种方法可以精确地提取二维和三维立体图像的中心线和管状结构的比例. 2008年,杨福刚等人<sup>[9]</sup>

提出基于最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)的输液异物检测算法,提取图像中目标和残留噪声的具有良好不变性的特征,通过LS-SVM分类器实现帧间点迹的匹配关联,检测算法取得了较好的效果,但它只利用了异物的相关特性对药品正品和次品进行区别分类,不能对药液中的异物识别.这些检测和分割方法应用于医药微弱异物检测时大多性能不佳.为此,本文研究针对异物微小、种类多样、无固定形状和纹理特征、工业现场噪声干扰大等条件下的异物目标检测识别方法.

在研究医药可见异物视觉检测方法时面临的技术难题:医药生产线的产品实时检测具有高速高精度的要求、液体药品异物图像往往具有多源异类特性、受到多种工业现场噪声的干扰、异物缺陷图像对比度低、能量小、微弱异物目标检测识别分类难度大,为提高视觉检测的准确性,降低系统误判率,必须研究有效的液体运动异物目标检测识别方法<sup>[10]</sup>.

## 2 系统架构(System configuration)

项目组成员联合湖南千山制药高端装备企业,开展了国内首台高速大输液在线智能视觉检测机器人的研制工作,提出了模拟人工检测动作,机械手抓取医药大输液瓶“夹持-高速旋转-急停-摆臂跟踪拍摄”的视觉检测原理,将瓶子中的可见异物充分搅动起来,在配置多路合理光学成像系统后,相机拍摄可见异物离心旋转的序列图像,通过处理序列图像检测识别出异物目标<sup>[11]</sup>.在视觉硬件系统中,采用6台高分辨率相机固定安装在跟踪摆臂上,构建了多相机旋转式图像获取方式,开发了基于多PC机并行处理的分布式控制结构,设计了系统中的旋转-急停-跟踪拍摄的控制时序、多段分区域搓瓶时间控制、以及跟踪摆臂运动控制等.在图像采集与处理子系统,从相机镜头选型到光学系统设计,经过反复实验,实现了在高速运动中获取清晰的药品图像,满足大规模高速医药产品高精度成像需求,如图1-2所示.

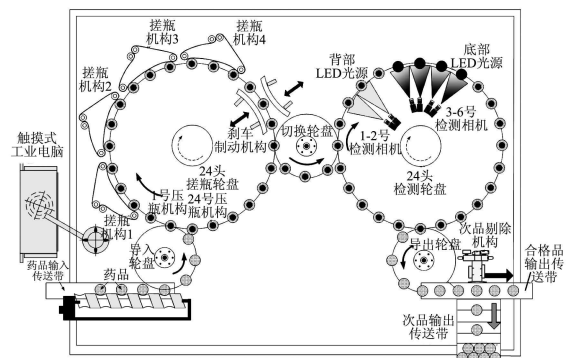


图 1 250 ml大输液可见异物视觉检测机器人的机械结构图  
Fig. 1 Mechanical system structure for 250 ml medical infusion foreign substance inspector

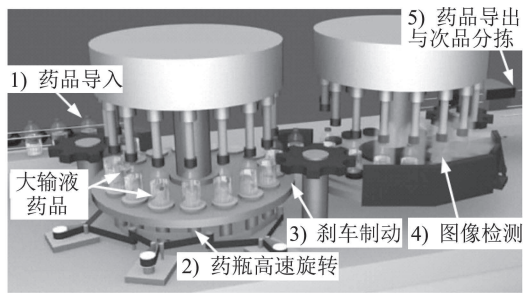
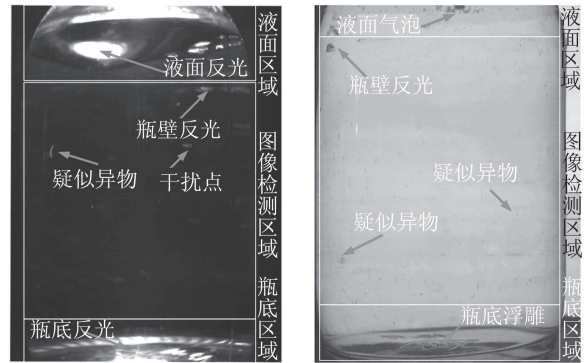


图2 250ml大输液可见异物视觉检测机器人的三维结构图  
Fig. 2 Three-dimensional structure diagram for 250 ml medical infusion foreign substance inspector

根据上述的检测原理, 设计了250 ml医药大输液检测系统, 如图2所示, 视觉检测机器人工作流程: 1) 药品导入: 完成灌装封口后的大输液药品, 由生产线传送带经输入入口送入检测装置内部; 2) 药瓶高速旋转: 搓瓶轮盘带动24个压瓶机构做圆周运动, 在这个过程中, 大输液药品中的药液高速旋转; 3) 刹车制动即药瓶停止旋转: 在外部刹车制动机构的作用下, 大输液药瓶停止旋转, 并随即通过切换轮盘进入24头检测轮盘; 4) 图像检测: 当药品经过白色异物检测工位时, 底部LED光源点亮, 1-2号检测相机分别对药瓶拍照, 相机和光源跟踪药瓶同步运动, 当获取完需要的图像后, 1-2号检测相机反方向运动跟踪接下来待检测药品, 同理3-6号相机和背部LED光源检测药品中的黑色可见异物, 获取的大输液图像如图3所示; 5) 药

品导出与次品分拣: 根据图像检测处理结果, 控制系统触发分拣装置动作, 实现次品剔除.



(a) 成像工位1:白色异物成像 (b) 成像工位2:白色异物成像

图3 获取的250ml医药大输液图像

Fig. 3 250ml medical infusion of image

2010版国家药典规定要求异物检测分辨率达到  $50 \mu\text{m}$  以下, 此时微粒呈现在图像中只有几个或十几个像素, 如图3所示, 从上面的图像检测装置来看, 获取的单帧图像中异物缺乏结构信息和明显特征, 仅从灰度来看, 很难将其与噪声(光源)、干扰(瓶身异物和浮雕)区分开来, 因此必须研究特定的溶液异物检测方法. 通过分析可知, 溶液中的运动异物具有2个明显特征: 其运动轨迹在时间轴上是连续的、异物图像的灰度与背景具有一定差异, 为此本文采用时间序列图像处理算法, 算法的基本流程如图4所示.

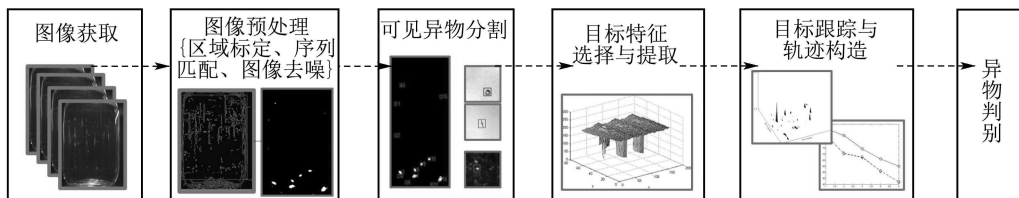


图4 可见异物检测算法流程图

Fig 4 Flow chart of image processing algorithm for detecting solution substance

### 3 药液内可见异物检测识别方法(Foreign substance detecting and identification algorithm)

#### 3.1 图像预处理(Image preprocessing)

当检测设备运行时, 安装在旋转摆臂上的工业相机跟踪药瓶做同步运动, 由于在机械上不能保证相机与药瓶的运动完全无相对位移, 因为获取的连续多帧图像, 往往会出现上下或左右偏差, 如果对这些多帧图像直接检测是否含有异物或杂质, 会出现较高的误检率和检测结果的不确定性. 因此, 论文研究了医药图像的高速高可靠性预处理方法, 通过对相邻帧图像进行图像快速配准完成图像匹配处理<sup>[12]</sup>, 将振动错位的图像移回到背景重叠的空间位

置上, 再进行帧间差分, 从而消除背景干扰. 图像配准算法的流程: 令  $f_1(x, y)$  表示获取序列图像中的第1帧图像,  $f_2(x, y)$  表示序列图像中的第2帧.  $f_1$  和  $f_2$  的快速配准采用快速傅里叶变换.

在傅里叶亚像素级图像匹配后, 可以将原图像中的一幅进行平移, 使两幅图像在空间位置上重合. 为了实现对图像进行亚像素级的平移, 本文基于傅里叶变换的平移特性, 利用计算得到的偏移量  $(\Delta x, \Delta y)$ , 按照用下式对输入图像  $I$  进行平滑的反向平移重构.

$$I_r = \text{REC}(f, \Delta x, \Delta y) = F^{-1}[e^{j2\pi(\frac{u(-\Delta x)}{N} + \frac{v(-\Delta y)}{M})} F(u, v)], \quad (1)$$

其中:  $F(u, v)$  为输入图像  $f$  的傅里叶变换,  $F^{-1}(\cdot)$  表示傅里叶逆变换,  $fr$  表示平移后的输出图像,  $REC(\cdot)$  为基于傅里叶变换的图像平移重构函数的简化表示. 大输液图像序列图像匹配时, 由于获得的序列图像存在的偏差是由机械电气系统的跟踪误差和抖动引起的, 图像偏差较小, 且晃动造成了图像中反光等噪声, 因此采用基于频域匹配算法. 该方法对噪声有很高的容忍程度, 同时检测结果与照度无关, 是基于图像的整体特征进行匹配, 计算精度高, 对图像局部变化不敏感, 对噪声有一定的鲁棒性.

### 3.2 目标检测(Target detection)

在图像分割前, 对第3.1节预处理后的序列多帧图像提出运动目标<sup>[13]</sup>, 利用运动异物在序列图像上发生位置的变化, 从而采用帧间差分的方法提取运动目标<sup>[14]</sup>. 在差分时将当前帧与序列图像的第1帧进行差分, 这种方法对于检测运动缓慢的运动目标效果很好. 在帧间差分法的计算过程可表示为

$$d(x, y, k) = |f(x, y, k) - f(x, y, 1)|, \quad (2)$$

其中:  $d(x, y, k)$  表示差分结果图像在点  $(x, y)$  处的灰度值,  $f(x, y, k)$  表示图像上任意点  $(x, y)$  在  $k$  帧的灰度值,  $f(x, y, 1)$  表示图像上任意点  $(x, y)$  在第1帧的灰度值,  $k$  为图像序列的帧数,  $k = 2, 3, \dots, 6$ , 本论文取6帧. 经过上述的计算后, 得到序列差分图像, 接着对这些序列图像累加求和.

针对传统细胞神经网络的分割准确率低的问题<sup>[15]</sup>, 采用改进型模糊细胞神经网络(improved fuzzy cellular neural network, IFCNN)结构, 通过实验测试, 它能有效地克服传统细胞神经网络无法解决的边缘检出问题, 使得异物分割图像能更好地接近真实图像.

从状态方程上看, IFCNN中细胞将增加几项输入, 这些项的增加有利于图像处理时更好地使边缘像素点二值化, 使分割后的图像能够更接近原图. 对于周围细胞的状态对中心细胞的影响, 笔者在IFCNN中用一个被称为模糊状态(fuzzy status)输入来反映, 从而得到下面新的模型方程, 其输入输出和状态方程等如下<sup>[16-17]</sup>:

输入方程:

$$u_{ij} = E_{ij}, \quad 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N. \quad (3)$$

输出方程:

$$y_{i,j} = f(x_{ij}) = \frac{1}{2}(|x_{i,j} + 1| - |x_{i,j} - 1|). \quad (4)$$

状态方程:

$$\begin{aligned} C \frac{dx_{ij}}{dt} = & -\frac{1}{R_x} x_{ij} + \sum_{c_{kl} \in N_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{kl} + \\ & \sum_{c_{kl} \in N_r(i,j)} B(i, j; k, l) u_{kl} + I_{ij} + \\ & \overset{\sim}{\wedge}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (A_{f \min}(i, j; k, l) + y_{kl}) + \\ & \overset{\sim}{\vee}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (A_{f \max}(i, j; k, l) + y_{kl}) + \\ & \overset{\sim}{\wedge}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (B_{f \min}(i, j; k, l) + u_{kl}) + \\ & \overset{\sim}{\vee}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (B_{f \max}(i, j; k, l) + u_{kl}) + \\ & \overset{\sim}{\wedge}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (F_{f \min}(i, j; k, l) + x_{kl}) + \\ & \overset{\sim}{\vee}_{c_{kl} \in N_r(i,j)} (F_{f \max}(i, j; k, l) + x_{kl}). \quad (5) \end{aligned}$$

约束条件:

$$|x_{ij}(0)| \leq 1, \quad 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N. \quad (6)$$

系统的对称条件:

$$\begin{cases} A(i, j; k, l) = A(k, l; i, j) \\ A_{f \min}(i, j; k, l) = A_{f \min}(k, l; i, j), \\ A_{f \max}(i, j; k, l) = A_{f \max}(k, l; i, j), \\ F_{f \min}(i, j; k, l) = F_{f \min}(k, l; i, j), \\ F_{f \max}(i, j; k, l) = F_{f \max}(k, l; i, j), \\ 1 \leq i \leq M, \quad 1 \leq j \leq N. \end{cases} \quad (7)$$

式(3)–(7)中各变量含义如下:  $u_{kl}$  表示邻域细胞  $c(k, l)$  的输入,  $y_{kl}$  表示邻域细胞  $c(k, l)$  的输出,  $x_{kl}$  表示细胞当前的状态.  $A(i, j; k, l)$  表示  $c(k, l)$  的输出  $y_{kl}$  与细胞  $c(i, j)$  间的联接权矩阵.  $B(i, j; k, l)$  表示  $c(k, l)$  的输入  $u_{kl}$  与细胞  $c(i, j)$  之间的联接权矩阵. 在对细胞神经网络引入非线性运算  $\min/\max$  后,  $A_{f \max}(i, j; k, l)$  和  $A_{f \min}(i, j; k, l)$  表示  $c(k, l)$  的输出  $y_{kl}$  与细胞  $c(i, j)$  之间的模糊反馈联接权矩阵.  $B_{f \max}(i, j; k, l)$  和  $B_{f \min}(i, j; k, l)$  表示  $c(k, l)$  的输入  $u_{kl}$  与细胞  $c(i, j)$  之间的模糊前馈联接权矩阵.  $F_{f \max}(i, j; k, l)$  和  $F_{f \min}(i, j; k, l)$  表示  $c(k, l)$  的状态与  $c(i, j)$  的模糊联接权矩阵. 由元素  $A(i, j; k, l)$  组成的矩阵  $A$ 、元素  $B(i, j; k, l)$  组成的矩阵  $B$  以及由  $A_{f \max}(i, j; k, l)$ ,  $A_{f \min}(i, j; k, l)$ ,  $B_{f \max}(i, j; k, l)$ ,  $B_{f \min}(i, j; k, l)$ ,  $F_{f \max}(i, j; k, l)$ ,  $F_{f \min}(i, j; k, l)$  组成的矩阵为IFCNN模板参数, 它们都是由  $(2r + 1)^2$  个元素组成的, 而每个神经元细胞与相邻细胞的联接都由这些模板中的元素所决定. 图5是一个单层加性IFCNN图, 拓扑结构为半径  $r = 1$  的矩形邻域.

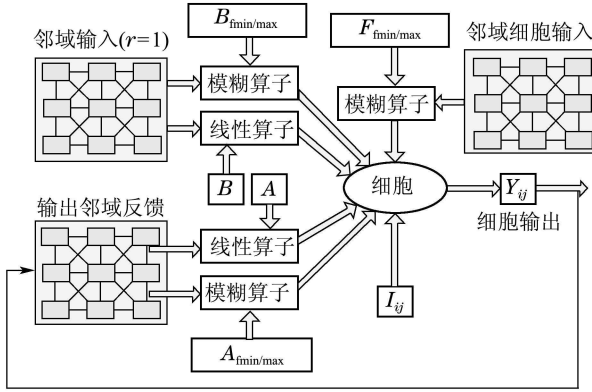
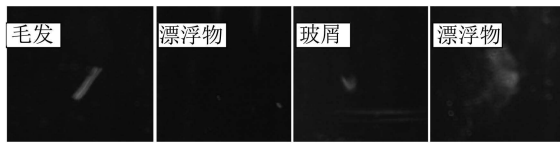


图 5 改进细胞神经网络(IFCNN)结构示意图  
Fig. 5 Structure chart of improved fuzzy cellular neural network

在使用IFCNN进行图像处理时,它的规模与待处理图像的规模一致,如果待处理图像中含有 $M \times N$ 个像素点,则构建的IFCNN就应包含 $M \times N$ 个细胞神经元,并且细胞与像素对应.在使用IFCNN进行图像处理时,网络中的细胞神经元的状态按照式(5)迭代改变,直到网络收敛.本方法就是将整个图像函数转化为一个动态系统,而动态方程则使神经元状态向IFCNN定义的能量最低的方向趋近.由于IFCNN考虑了细胞状态的因素,可免去确定经验参数的不便,在模板选取上有更大的空间,这也是考虑采用IFCNN的原因之一.

关于模糊细胞神经网络分割方法中的模板参数,不合适的参数模板会造成不同的分割效果.下面,笔者用试验的方法验证模板参数,设定模板参数,对医药图像进行处理,观测其处理结果,如图6所示.模板参数如下.



(a) 原图



(b) 模板A(过于膨胀)



(c) 模板B(过于腐蚀)



(d) 模板C

图 6 IFCNN的异物图像处理结果  
Fig 6 Foreign substances image processing results of IFCNN

关于参数模板的选择,笔者测试了3组模板参数,并给出了这些模板参数下的实验结果,参数模板的选择是建立在大量试验的基础上.

1) A组模板参数:

$$R_x = 1, I = 0, u = X, y = Y, x_0 \text{无定义},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, A_{f \max} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, B_{f \max} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$F_{f \min} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, F_{f \max} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

2) B组模板参数:

$$R_x = 1, I = 0, u = X, y = Y, x_0 \text{无定义},$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & -\frac{3}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 \\ 1 & 2 & -1 \end{bmatrix},$$

$$A_{f \min} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A_{f \max} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_{f \min} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{f \max} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix},$$

$$F_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{5}{9} \end{bmatrix}, F_{f \max} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$F_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{5}{9} \end{bmatrix}, F_{f \max} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{3}{9} \end{bmatrix}.$$

3) C组模板参数:

$R_x = 1, I = 0, u = X, y = Y, x_0$ 无定义,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, A_{f \max} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & 0 & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix},$$

$$B_{f \min} = \begin{bmatrix} \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{2}{9} & \frac{1}{9} \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{9} & \frac{1}{9} \end{bmatrix}, B_{f \max} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

从实验结果图6可以看出,利用模板参数A得到的分割图过于膨胀,不能很好地对应着原来图像中的异物边缘.利用模板参数B得到的分割图过于腐蚀,经过多次试验,选择模板参数C能很好地实现图像异物的近似完美分割.

在实验中,使用IFCNN进行异物检测时,选用模板参数C,在使用IFCNN进行异物检测时,在对比上述模板参数后,最终选用模板参数C.为了使实验结果具有可比性,这两种方法都采用10步迭代过程.图6给出了对4种含有不同类型异物类型的药品图像进行检测的结果图.图7给出了两组背光工位的图像分割实验结果,分析IFCNN处理后的图像结果,对比经IFCNN和CNN处理后的结果,它能有效地克服现有方法无法解决的边缘检出问题,其边缘更加接近真实异物边缘,得到的异物更加完整,对比除去光线干扰方面,也明显优于传统的分割方法,且能够抑制分割过度,提高了分割的准确度.关于模板参数选择中如何科学地计算参数这也是论文下一步研究的重点.

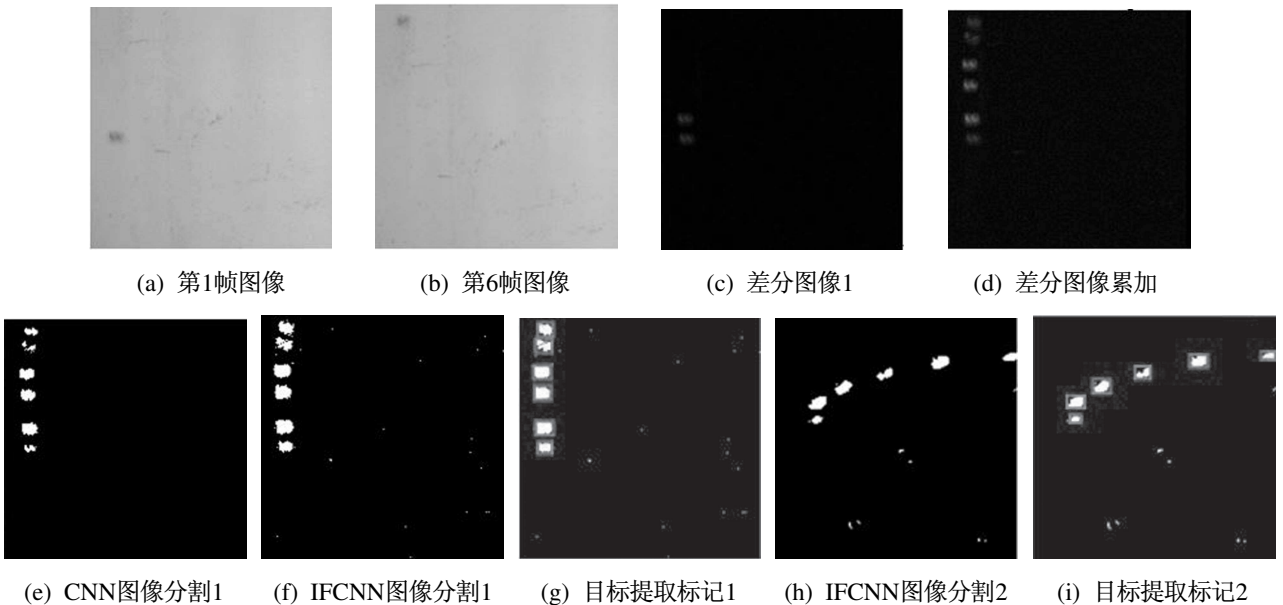


图 7 两组背光工位的图像分割实验

Fig 7 Two groups image segmentation experiment of back illumination location

### 3.3 目标识别(Target recognition)

对分割后的疑似目标进行特征提取,针对疑似目标提取以下几类特征: Hu矩(M1-M7,共7个),灰

度特征参数(灰度平均值 $\bar{f}$ ,灰度方差 $\sigma^2$ ,偏态系数 $f_s$ ,峰态系数 $f_k$ ,能量 $f_p$ ,熵 $f_E$ ,区域灰度均值和图像均值之差 $D_{\text{mean}}$ ,归一化的转动惯量 $J_{\text{obj}}$ 共8个),

形状特征参数(区域面积 $A$ , 周长 $D_L$ , 似圆度 $C$ , 外接矩形的长度 $L_{Length}$ , 外接矩形的宽长比为 $D_{W/L}$ , 区域边界到区域形心的距离方差为 $V_{var}$ 共6个)位置特征参数(区域重心的横纵坐标 $x, y$ 共2个), 总计23个特征参数.

首先, 根据目标的特征参数及运动方向判断目标是否为异物, 判断方法如下: a) 由于图像中疑似可见异物是向下运动的, 所以其形心纵坐标应该是依次变大的, 以左上角为坐标原点; b) 气泡是向上运动的, 运动方向与异物相反; c) 异物形成的轨迹曲线是光滑的, 噪声形成的轨迹是无序的. 因此, 如果检测到运动轨迹的形心纵坐标依次变小, 说明该

轨迹由气泡产生; 如果检测到运动轨迹平滑且形心纵坐标依次变大的轨迹, 说明有异物存在, 判断当前液体药品不合格.

接着再对异物使用分类器进行识别分类<sup>[18-21]</sup>, 由于医药异物数据小样本、非线性、不平衡等特点, 为了解决在异物分类识别中正品、4类次品样本类别不平衡学习时的分类识别精度, 选用AdaBoost-SVM分类方法<sup>[19]</sup>, 可以有效提高在不平衡数据集上的分类性能, 该算法的设计从AdaBoost的弱分类器考虑, 使用SVM担任AdaBoost的弱分类器, 对获取的目标特征使用该方法进行分类处理, 所述异物目标分类识别的具体步骤如图8所示.

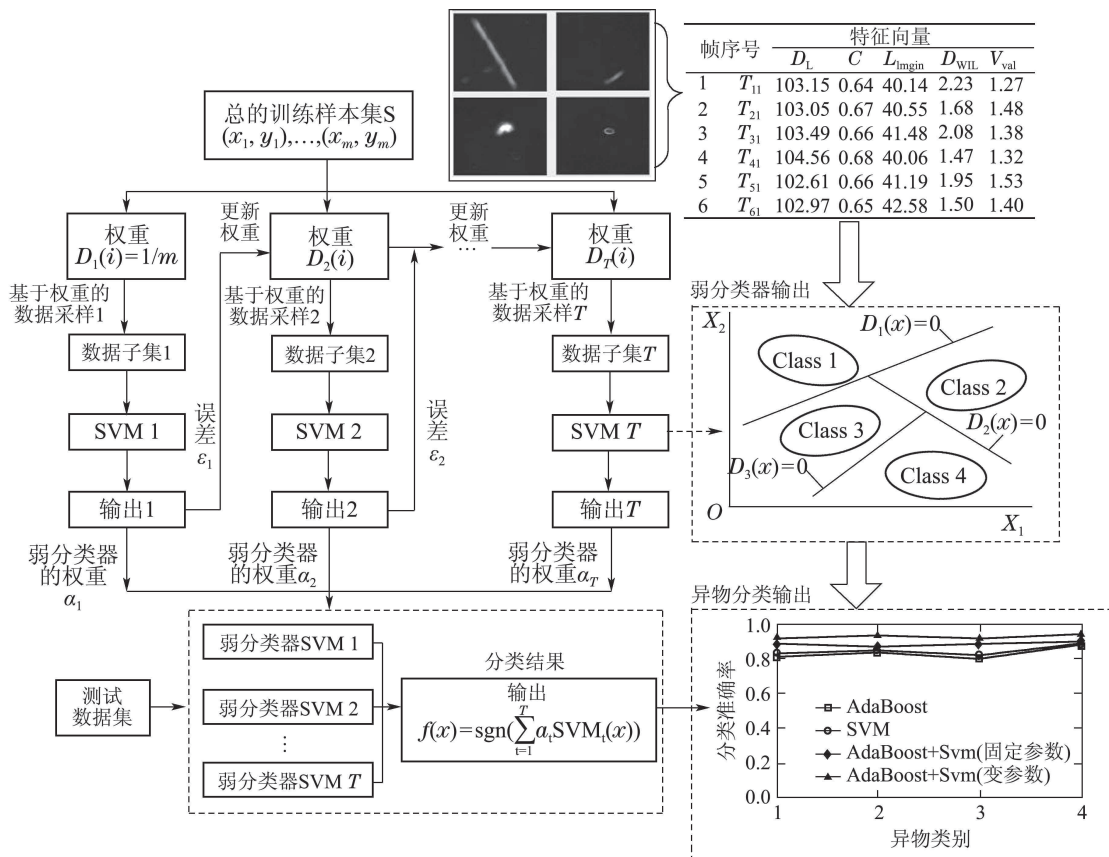


图8 基于SVM的AdaBoosting的分类算法训练流程图

Fig 8 Flow chart of AdaBoosting based SVM classification algorithm

1) 输入: 已知一组有标记的训练样本集

$$S = ((x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)),$$

其中:  $x_i \in X, y_i \in Y = \{1, -1\}$ , 迭代次数 $T$ , 弱学习器为RBFSVM;

2) 初始化: 初始化各样本的对应的权值:

$$D_1(i) = \frac{1}{N}, i = 1, 2, \dots, N;$$

3) For 迭代次数 $t = 1, 2, \dots, T$ .

a) 基于权重分布 $D_t(i)$ 在 $s$ 中采样得到训练弱学

习器 $C_t$ 的训练样本集 $s_t$ ;

b) 计算 $s_t$ 的标准差 $\sigma : \text{sqrt}(\text{mean}(\text{var}(s_t)))$ ;

c) 以 $d_t$ 为训练样本集,  $\sigma$ 为参数, 训练弱学习器 $C_t$ 得到 $h_t$ , 其中 $C_t$ 是以 $\sigma$ 为参数的RBFSVM;

d) 计算弱学习器 $h_t$ 的误判率:

$$\varepsilon_t : \varepsilon_t = \sum_{i=1}^n D_t(i), [h_t(x_i) \neq y_i],$$

即 $\varepsilon_t$ 相当于错分样本的权值 $w_t$ 之和;

e) 设置弱分类器 $h_t$ 的权值:  $a_t = \frac{1}{2} \ln(\frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_t})$ ;

f) 更新训练样本的权值

$$D_{t+1}(i) = \frac{D_t(i) \exp(-a_t y_i h_t(x_i))}{Z_t} = \frac{D_t(i)}{Z_t} \times \begin{cases} e^{-a_t}, & h_t(x_i) = y_i, \\ e^{a_t}, & h_t(x_i) \neq y_i, \end{cases}$$

$$i = 1, 2, \dots, N,$$

其中

$$Z_t = \sum_i D_t(i) \exp(-a_t y_i h_t(x_i))$$

为归一化算子, 使得  $\sum_{i=1}^n D_t(i) = 1$ ;

4) 循环结束, 输出最终假设:

$$H(x) = \text{sgn}(h_f(x)), \text{ 且 } h_f(x) = \sum_{t=1}^T a_t h_t(x).$$

对分割后的异物图像使用分类器识别, 通过分类器事先训练的样本最终判断出当前异物类型, 异物分类输出分别对应有: 毛发、漂浮物、玻屑、气泡4类. 根据分类结果中所记录的异物种类和尺寸大小是否超出规定的范围, 判断该异物是否为可见异物, 最终检测硬件设备可以根据次品类型将药品输出在不同的次品槽中.

为了验证本文提出的分类算法的有效性, 选取事先获得的多个数据集进行测试. 对变 $\sigma$ -AdaBoost RBFSVM的性能与固定 $\sigma$ -AdaBoost RBFSVM(用固定参数 $\sigma$ 的RBFSVM作为AdaBoost的弱分类器)、RBFSVM、AdaBoost的性能进行比较. 取迭代次数 $T$ 为100, 固定 $\sigma$ -AdaBoost RBFSVM的 $\sigma = 5$ , 惩罚参数 $C = 10$ .

表1的结果说明, 在分类精度方面变 $\sigma$ -AdaBoost RBFSVM方面明显优于其他方法, 同时其训练时间也和其他算法基本接近, 在线运行时的速度满足实时生产线的需求.

表 1 不同分类器的性能比较

Table 1 The performance comparison of different classifiers

分类方法	训练时间/s	分类准确率	( $\sigma, C$ )	方案类型
AdaBoosting	0.82	83.15%	—	一对多
SVM	1.24	84.38%	(0.5,10)	一对多
固定 $\sigma$ -AdaBoost	1.57	88.75%	(0.5,10)	一对多
变 $\sigma$ -AdaBoost	1.63	92.90%	—	一对多

#### 4 实验与精度分析(Experiments and accuracy analysis)

根据2005年版《中国药典》二部附录IXH中对药剂中“可见异物检查法”有关规定, 针对药液中粒径大于 $50\mu\text{m}$ 的可见异物进行检测识别. 本文采用CPU Pentium4(2.8 GHz)、内存1 G的工业电脑, 分辨率为200万像素的CCD图像传感器, 16 mm computar工业镜头, 点光源提供产品底部照明, 检测机器人系统实物如图9所示. 在系统性能的测试过程中, 通过国际通用测试方法(Knapp-Kushner)对本文设计的药液异物检测系统和算法的有效性进行验证, 该方法是通过在生产条件下, 测试现有检测系统的有效性, 与产品经过测试和选择时采用的筛选手段进行比较.

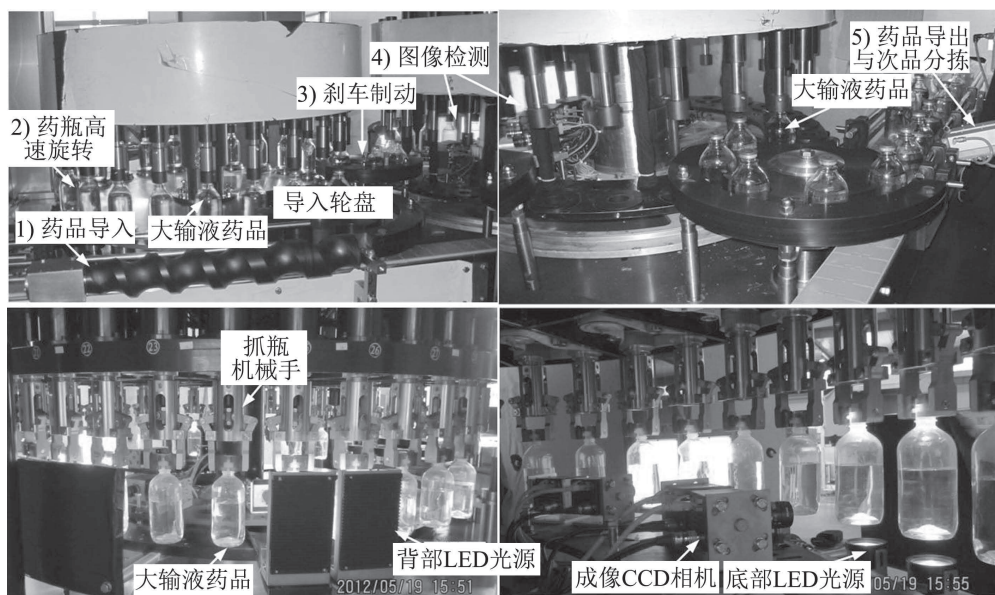


图9 大输液视觉检测机器人

Fig 9 Medical infusion foreign substance inspector



为了验证系统检测精度,将本文开发的系统和熟练人工检测精度对比,取国内某药厂生产的250 ml玻璃瓶装10%葡萄糖和0.9%氯化钠药液为测试对象,对每种药品取4个批次,每个批次取500瓶样本,自动化检测以9000瓶/h的检测速度,人工检测依据厂标实施检测,测试系统的误检率和漏检率,并与人工检测进行对比,如表2所示。

异物检测失败的原因简要分析如下: 各类异物

均存在误检率,这是由于:

① 在成像过程中液体晃动会造成成像结果在连续序列图像上出现随机干扰,这些干扰的出现使本文算法的检测结果误判;

② 在检测序列图像中,异物跟随液体旋转使得序列图像中的成像产生形变,这导致在序列图像特征提取时,目标特征向量中的 $Area_i$ 等特征匹配失效,造成误检。不同异物检测数据对比如表3所示。

表2 本文检测系统与人工检测精度对比

Table 2 Comparison of performance accuracy of artificial detection and automatic detection system

药品类型	抽样产品批号	自动化检测系统		人工检测	
		误检率/%	漏检率/%	误检率/%	漏检率/%
10%	20110621	2.6	0.4	3.0	1.0
葡萄	20110622	2.2	0.2	2.8	0.6
糖注	20110623	4.2	0.4	5.2	0.6
射剂	20110624	1.6	0	2.4	0.8
0.9%	20100410	1.0	0.6	1.0	0.8
氯化钠	20100411	1.8	0.2	2.6	1.4
溶液注	20100412	1.4	0	1.8	0.4
射剂	20100413	2.0	0.4	1.6	0.6

表3 不同异物类型检测数据对比

Table 3 Comparison of difference type foreign substances detection

药品类型	性能指标	暗色异物		浅色异物	
		漂浮物			
		毛发	纤维/橡胶	色点	玻屑
10/%葡萄	误检率/%	0.5	0.3	0.8	1.1
糖注射剂	漏检率/%	0	0.2	0.3	0.5
0.9/%氯化钠	误检率/%	0.4	0.1	0.2	0.8
溶液注射剂	漏检率/%	0	0	0.1	0.2

## 5 结论(Conclusion)

本文针对医药大输液药品内可见异物缺陷检测的特点设计了一套实时检测系统,该系统能针对医药自动化生产线上药品缺陷进行图像获取、自动识别和分类,对提高医药产品质量和实现全自动化检测有一定贡献。系统关键算法包括:基于模糊细胞神经网络的分割方法、AdaBoost-SVM异物图像分类方法,其主要优点有:1)采用基于模糊细胞神经网络的分割方法充分利用了图像中目标像素的灰度分布信息和像素间的相关信息,算法的实时性和鲁棒性好,同时克服现有方法无法解决的边缘检出问题,使得异物分割图像能更好地接近真实图像;2)根据图像中运动目标的特性,采用AdaBoost-SVM图像分类方法,对分割后的异物图像使用分类

器识别,提高了药液中各类异物与气泡检测识别的准确率,从而降低了气泡被错误识别为异物的可能性,降低了药品漏检率和误检率。基于以上技术基础,研制出大输液检测机器人,从工程应用角度,本文研究的方法需要进一步优化,如区分异物和干扰存在一定的误判率;分割算法的参数模板选择需大量试验,通用性较差等,此外,提高实时性和检测准确性是下一步研究的重点。

## 参考文献(References):

- [1] 胡江宁, 张建明. 2010年全国医药工业经济运行情况分析 [J]. 中国医药工业杂志, 2011, 42(2): 151 - 156.  
(HU Jiangning, ZHANG Jianming. Economic operation of Chinese pharmaceutical industry in 2010 [J]. *Chinese Journal of Pharmaceutics*, 2011, 42(2): 151 - 156.)

- [2] 曹晓群, 张宇, 杨慕升. 基于质量信息系统的大输液生产中的质量监控 [J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2010, 24(4): 69 – 71.  
(CAO Xiaoqun, ZHANG Yu, YANG Musheng. Quality monitoring in production of infusion solutions based on quality information system [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 24(4): 69 – 71.)
- [3] 王艳梅, 董洪涛. 影响大容量注射剂可见异物的因素及解决办法 [J]. 齐鲁药事, 2012, 31(8): 485 – 487.  
(WANG Yanmei, DONG Hongtao. Influence factors and solving methods of visible foreign matters in large volume injection [J]. *Oilu Pharmaceutical Affairs*, 2012, 31(8): 485 – 487.)
- [4] GRINDINGER H, NEUSSER H, SEIDENADER N, et al. Product testing apparatus [P]. US 2005/0117149 A1.
- [5] SPA B C. Inspection machine for pharmaceutical industry [EB/OL]. <http://www.brevetti-cea.com/>. [2013-10].
- [6] SCHULTER S, LEISTNER C, WOHLHART P, et al. Accurate object detection with joint classification-regression random forests [C] // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Ohio, USA: IEEE, 2014.
- [7] ARBELAEZ P, MAIRE M, FOWLKES C, et al. Contour detection and hierarchical image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(5): 898 – 916.
- [8] SIRONI A, LEPETIT V, FUA P. Multiscale centerline detection by learning a scale-space distance transform [C] // *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Ohio, USA: IEEE, 2014.
- [9] 杨福刚, 孙同景. 基于最小二乘支持向量机的输液异物检测系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(4): 104 – 109.  
(YANG Fugang, SUN Tongjing. Design of particle detection system for pharmaceutical liquid based on least square support vector machines [J]. *Journal of Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2008, 22(4): 104 – 109.)
- [10] ISHII A, MIZUTA T, TODO S. Detection of foreign substances mixed in a plastic bottle of medicinal solution using real-time video image processing [C] // *Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition*. Queensland, Australia: IEEE, 1998, 2: 1646 – 1650.
- [11] 张辉, 王耀南, 周博文. 基于机器视觉的液体药品异物检测系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(3): 548 – 553.  
(ZHANG Hui, WANG Yaonan, ZHOU Bowen. The research on foreign substances detection system of medicinal solution based on machine vision [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(3): 548 – 553.)
- [12] TZIMIROPOULOS G, ARGYRIOU V, ZAFEIRIOU S, et al. Robust FFT-based scale-invariant image registration with image gradients [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(10): 1899 – 1906.
- [13] 徐杨, 吴成东, 陈东岳, 等. 采用测地线活动轮廓模型检测与跟踪运动目标 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(6): 747 – 753.  
(XU Yang, WU Chengdong, CHEN Dongyue, et al. Moving object detection and tracking based on geodesic active contour model [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(6): 747 – 753.)
- [14] 叶斌, 彭嘉雄. 基于能量累积与顺序形态滤波的红外小目标检测 [J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(3): 251 – 255.  
(YE Bin, PENG Jiaxiong. Small target detection based on energy accumulation and order morphology filtering in infrared image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(3): 251 – 255.)
- [15] VAGLIASINDI G, MURARI A, ARENA P, et al. Cellular neural network algorithms for real-time image analysis in plasma fusion [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(8): 2417 – 2425.
- [16] WANG S T, CHUNG K F L, DUAN F. Applying the improved fuzzy cellular neural network IFCNN to white blood cell detection [J]. *Neurocomputing*, 2007, 70(7/8/9): 1348 – 1359.
- [17] WANG S T, FU D, XU M, et al. Advanced fuzzy cellular neural network: Application to CT liver images [J]. *Artificial Intelligence in Medicine*, 2007, 1(39): 65 – 77.
- [18] MATHANKER S K, WECKLER P R. AdaBoost classifiers for pecan defect classification [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 77(1): 60 – 68.
- [19] ROMERO E, MARQUEZ L, CARRERAS X. Margin maximization with feed-forward neural networks: A comparative study with SVM and AdaBoost [J]. *Neurocomputing*, 2004, 57(1/2/3/4): 313 – 344.
- [20] ZHANG J, MARSZALEK M, LAZEBNIK S, et al. Local features and kernels for classification of texture and object categories: A comprehensive study [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2007, 73(2): 213 – 238.
- [21] SANCHEZ J, PERRONNIN F, MENSINK T, et al. Image classification with the fisher vector: Theory and practice [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2013, 105(3): 222 – 245.

### 作者简介:

**张辉** (1983–), 男, 讲师, 博士, 研究方向为工业视觉检测、图像识别方法等, E-mail: zhanghuihy@126.com;

**王耀南** (1957–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能控制、模式识别, E-mail: yaonan@hnu.edu.cn;

**吴成中** (1987–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为图像检测识别方法, E-mail: hnrabbit2002@sina.com;

**周博文** (1985–), 男, 博士, 目前研究方向为工业实时检测系统研制, E-mail: bowenzhou@163.com;

**陈铁健** (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为智能制造装备和机器视觉, E-mail: chentiejian@gmail.com.