

基于快速模板匹配的金标试纸条图像配准^①

陈欲劭, 马无锡

(浙江工贸职业技术学院, 温州 325000)

摘 要: 随着金标试纸条在医疗、水质和食品等众多领域的广泛使用, 以及国家对各类检测标准要求的提高, 研制可以对金标试纸进行定量检测的仪器具有重要的实际意义. 考虑到机器视觉在工业界的广泛应用, 可以通过工业摄像头获取金标试纸条图像, 利用合适的图像处理技术, 提取相应的特征, 从而可以实现对金标试纸条的定量检测. 为了解决工业相机采集到的金标检测卡图像存在的图像倾斜和试纸条区域寻找问题, 在前人研究的基础上, 根据金标检测卡外形的特点采用基于 LSD 的 Hough 变换来进行图像校正, 并提出了一种改进的基于水平投影直方图的模板匹配算法. 与传统的模板匹配算法相比, 该算法在保证匹配正确率的前提下, 具有更快的匹配速度, 并且随着待匹配图像的增大, 其所耗费的匹配时间的增长率较小.

关键词: 金标检测卡; Hough 变换; 模板匹配; 倾斜校正; 定量检测

Improved Template Matching Algorithm for Processing Test Strip Image Abstract

CHEN Yu-Meng, MA Wu-Xi

(Department of Information and Communications, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou 325000, China)

Abstract: It is practically important to develop an instrument for quantitative testing strips as the strips were widely used in areas like health, water, food, etc. and national higher demands were made on testing standard. Considering the widely use of machine vision, the test strip image can be got from the industrial camera. Taking advantage of the image processing for extracting corresponding feature can help achieve the quantitative test of the strips. In order to overcome the difficulties that rectificating the sloping test strip images and locating the region about test strip, this paper adopts the hough transform to correct the test strip image and proposes an improved template matching method based on the shape of integral projection. Compared with the traditional methods of template matching, this new method has much faster matching speed with guaranting the high matching accuracy. Moreover, the growing time of method proposed in this paper increase slowly along with enlarging the test strip image.

Key words: colloidal gold test strip; Hough transform; template matching; slope correction; quantitative determination

目前, 市场上存在的各种金标试纸条(简称试纸条)主要用于检验样品中是否含有被检物, 通过人眼观察反应过后的金标试纸条颜色来给出定性判断, 而无法给出被检物具体含量信息. 人眼具有非常好的视觉功能, 但是受主观(视觉疲劳)或者客观因素(环境光源)的影响而不能非常准确地给出错误的判断, 从而可能会给农产品、乳制品等食品生产厂商造成一定的经济损失或者对受测者个人的健康问题产生不利的影响^[1].

这时, 专门用于读取试纸条检测结果的仪器设备以及对试纸条定量检测结果的分析就显得尤为重要. 然而, 当前市场上的状况是能够对试纸条进行定量检测与分析的仪器设备的发展远远滞后于试纸条的发展. 随着机器视觉技术的发展, 越来越多的检测技术采用图像传感器来作为检测手段, 这样不仅可以提高检测效率, 还能弥补前面所述的人眼检测的各种缺点. 然而, 依赖于机器视觉的检测技术最重要的是对目标图像的处

^① 基金项目:浙江省工业设计科技(2013D40015);浙江省教育厅高校科技计划(Y201122063)

收稿时间:2014-09-16;收到修改稿时间:2014-10-24

理, 因此, 为了保证试纸条定量检测结果的准确性, 本文对金标检测卡的图像处理方法进行了研究, 主要包括试纸条图像的校正和显色区域寻找两个部分.

1 金标检测卡定量检测研究

1.1 金标检测卡简介

金标检测卡(文中后续简称检测卡)和传统的金标试纸条本质上是一样的, 只是为了保护试纸条少受外界污染、便于使用和查看, 而在金标试纸条的外面加了一层塑料外壳. 文中采用工业 CCD 相机获取金标检测卡图像如图 1 所示. 其中, 图 1(a)是由大连普瑞康生物技术有限公司提供的氯霉素快速检测卡图像, 主要用于水产品中氯霉素的检测, 精度为 3ppb(ng/ml), 也是本文的主要研究对象; 图 1(b)是金标检测卡内部包含的金标试纸条结构示意图. 显而易见, 在采集检测卡图像的时候, 得到的是包含了检测卡外壳和试纸条的图像, 并且外壳占据了图像中的大部分区域, 而塑料外壳对于试纸条特征的提取是毫无用处的, 因此如何快速获取检测卡图像中最关键的试纸条区域(图 1(a) 中用红框标注的区域)是提取试纸条特征的先决条件.

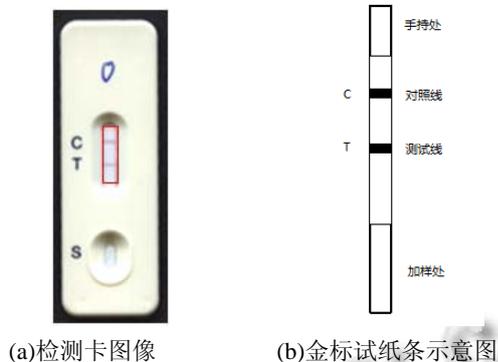


图 1 金标检测卡

1.2 检测卡图像处理现状

前人对金标试纸条的定量检测已经开展了很多研究, 比如: 文献[2, 3]采用光电扫描仪获得检测甲型胎蛋白金标试纸条的图像, 再使用训练过的反馈型神经网络来对图像信息进行判断, 得到所检测样品溶液的浓度. 文献[4-6]针对快速丙型肝炎病毒抗体检测试纸条的特点, 通过 CCD 图像传感器来获得试纸条的图像, 实现了对胶体金免疫层析试纸条的定量检测. 文献[7-9]重点对金标试纸条图像的处理方法进行了讨论, 采用 K-近邻分类法来区分检测不同浓度样品的试纸

条. 文献[10, 11]设计了基于线阵 CCD 的光电检测仪器, 并且使用五点平滑滤波来去除传感器所产生的各种图像噪声. 文献[12]通过 CMOS 图像传感器采集胶体金试纸条图像, 然后提取试纸条上的条纹强度特征信息, 实现对被测样品的精确测量.

在这些研究中, 大部分仅对金标试纸条的定量检测展开了分析、讨论, 却忽略了对金标试纸条图像的预处理阶段, 而该阶段直接影响着定量检测结果的准确性, 本文对该阶段存在的问题进行了深入地研究, 提出了相应的解决办法.

2 检测卡图像校正算法

在放置检测卡的时候, 不能保证其恰好很正地放置, 必然会产生一定程度的倾斜, 如图 2 所示. 如果倾斜角度太大则会影响模板匹配算法的效果, 无法正确匹配到试纸条区域, 因此首先需要对倾斜的检测卡图像进行校正. 关于校正倾斜图像的算法有很多, 应用范围也很广, 如: 车牌图像校正、文档类图像校正、光栅图像校正等. 用得较多的算法^[13]主要有: Hough 变换、Randon 变换、KL 变换以及基于这些方法的改进方法. 为了保证检测卡图像校正的有效性, 本文在检测图像直线段的基础上, 采用 Hough 来进行图像校正.

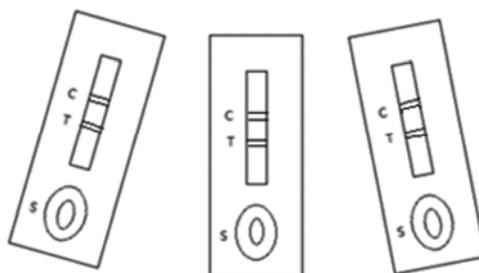


图 2 检测卡放置位置示意图

2.1 基于 LSD-Hough 变换的图像校正

对倾斜图进行像校正的一般步骤是先对图像进行边缘检测, 再使用 Hough 变换来检测出图像中可能的直线段, 从中选择具有代表性的直线段来计算出图像需要校正的角度, 最后对图像进行旋转校正. 采用 Hough 变换来检测直线的一个缺点就是需要先将图像进行二值化及边缘检测等预处理工作, 使图像变为宽度为一个像素的直线或者曲线形式的点阵图, 但是做了预处理工作之后, 会丢失许多原始图像信息, 由于

这个原因, 给其应用带来了一定的局限性.

Hough 变换的基本思想就是利用点和直线的对偶性, 将 X-Y 平面里的一个点对应到参数空间里的一条正弦曲线. 在 X-Y 平面内位于同一直线上的所有点呈现的斜率和截距是相同的, 因此它们对应于参数空间中的同一个点. 这样只需将 X-Y 平面内的所有点转换到参数空间中, 然后在参数空间中找到重合次数最多的聚集点, 则该点在参数空间中的坐标便对应了 X-Y 平面内直线的斜率和截距参数, 由此来确定 X-Y 平面内的一条直线.

如图 3 所示, 以图像的左上角为坐标原点, 横向为 X 轴, 纵向为 Y 轴, 虚线框是检测卡图像, 虚线里面的矩形为检测卡, 其中放置检测卡时的偏移角度记为 α (α 在坐标系中检测卡的中心线与 X 轴正向的夹角). 考虑到在放置检测卡的时候, 一般不会倾斜得非常厉害, 所以本文假设检测卡图像的倾斜角度范围 $\alpha \in (45^\circ, 90^\circ)$ 或者 $\alpha \in (90^\circ, 135^\circ)$.

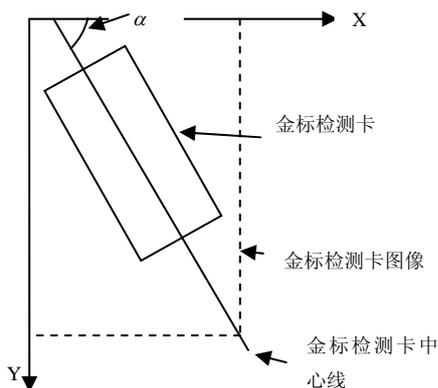


图 3 检测卡图像坐标系示意图

由于 Hough 变换是建立在边缘检测的基础上, 边缘检测会直接影响到 Hough 直线检测的效果. 为了使得 Hough 变换取得较好的直线检测效果, 本文采用了一种快速直线检测算法(Line Segment Detector, LSD)^[14]来代替传统的 Canny 算子来进行边缘检测.

LSD 是一种局部的直线段检测算法, 它的输入是一张灰度图像, 输出是一系列的直线段. 它通过计算图像中每个像素与水平线的夹角来合并方向相近的像素, 从而得到一系列的像素点区域; 对于每个像素区域寻找它的最小外接矩形, 并通过计算每个像素与水平线的夹角以及其外接矩形主方向的角度差和误差容忍度来判断该区域内的像素是否组成了一个直线段.

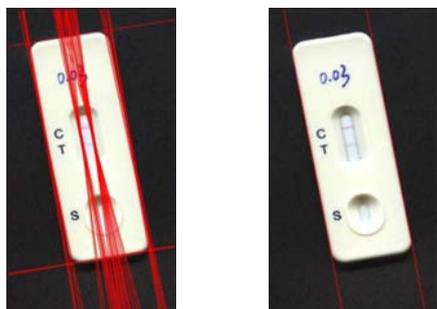
该直线检测算法使用非常简单, 无需进行任何参数的调整, 可以线性时间内取得亚像素级精度的检测结果, 得到的直线检测结果比传统的边缘检测算法(Sobel, Roberts, Canny 等)可以检测到更加精细、更加丰富的直线信息. 因为传统的边缘检测算子检测到的边缘中会包含很多非直线信息, 这些信息的存在会干扰直线检测, 而 LSD 检测到的基本上都是以直线段为主, 可以使得 Hough 变化达到更好的检测结果. LSD 与传统边缘检测算子得到的边缘图像的对比如图 4 所示. 其中: 图 4(a)是工业 CCD 相机采集到的检测卡图像; 4(b)是 Sobel 算子得到的检测卡边缘图; 4(c)是 Roberts 算子得到的检测卡边缘图; 图 4(d)是采用 Canny 算法检测到的直线标注图; 图 4(e)是采用 LSD 检测到的直线图. 从图中可以看出, 采用 LSD 的检测结果包含了检测卡图像中的大部分直线边缘, 抛弃了非直线边缘. 由于检测到的都是直线段, 因此可以根据检测到的线段的长短再过滤掉一些无用的直线段.



图 4 检测卡图像的边缘检测结果

图 5 所示的是检测卡图像在 LSD 检测到的直线段的基础上采用 Hough 变换得到的直线检测结果. 从图 5(a)中可以看到采用 Hough 变换检测到的很多的直线, 主要集中在检测卡的四周以及试纸条区域的两侧. 关于从这么多的直线中选择一条来作为图像校正的参照线, 本文尝试了两种方法: (1)利用 Hough 变换得到每条直线在极坐标系中的参数 θ 来进行投票, 从而选

出得票数最多的直线来作为校正图像的参考直线；(2) 尽量选择较大的 Hough 变换阈值，使得其检测出最长的直线，如图 5(b)所示，从检测出的直线中任选一条作为参考直线即可，文中采用了后一种方法。



(a) 直线检测(阈值取 30)(b) 直线检测(阈值取 90)

图 5 Hough 直线检测

综上所述，本文采用的检测卡图像倾斜校正的算法步骤可以归纳如下：

- (1)使用 LSD 来检测得到检测卡图像的边缘二值化图像；
- (2)根据检测卡的边缘图像，对边缘点进行 Hough 变换，根据检测阈值，得到符合条件的直线；
- (3)设置一个较大的 Hough 变换阈值，选择一条直线作为校正图像的参考线；
- (4)根据倾斜角度得到相应的图像校正角度并将图像进行旋转。

2.2 图像校正实验结果

图 6(a)是检测卡倾斜角度 $\alpha \in (90^\circ, 135^\circ)$ 的图像；图 6(b)是 Hough 变换检测到的直线标注图；根据直线计算得到的倾斜角度 $\alpha = 100^\circ$ ；图 6(c)是校正之后的检测卡图像。



(a) 检测卡灰度图

(b) 直线检测结果



(c) 校正结果

图 6 往左斜图像的校正

图 7(a)是检测卡倾斜角度 $\alpha \in (45^\circ, 90^\circ)$ 的图像；图 7(b)是 Hough 变换检测到的直线标注图；根据直线计算得到的倾斜角度 $\alpha = 76^\circ$ ；图 7(c)是校正之后的检测卡图像。



(a) 检测卡灰度图

(b) 直线检测结果



(c) 校正结果

图 7 往右斜图像的校正

3 检测卡图像的快速模板匹配算法

3.1 模板匹配算法简介

模板匹配算法一般用于在一副图像中寻找特定目标，即将模板图像在待匹配图像上进行匹配遍历，从而找到和模板图像最匹配的子图。模板匹配算法的复

杂度一般在于需要遍历整个待匹配图像, 以及计算模板图像与待匹配图像之间的相似度上. 因此, 如果要提高模板匹配算法的速度, 最直接的方法就是寻找一种可以加快模板图像与待匹配图像特征之间相似度的方法.

3.2 快速模板匹配算法

考虑到检测卡试纸条的特殊性(包含检测线和对照线, 如图 8 所示), 可以采用水平投影直方图(Horizontal Projection Histogram, HPH)的匹配方式来代替传统模板匹配算法中使用图像灰度比较的方法. 这种方法可以在一定程度上大大减少了模板匹配的复杂度, 比起传统的模板匹配算法(本文以归一化互相关匹配为例, Normalized Cross Correlation, NCC)^[15]有着更快的速度.

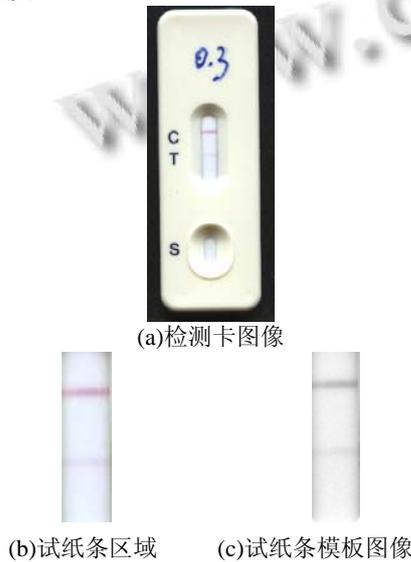


图 8 检测卡及其模板图像

假设待匹配图像 $I(x, y)$ 的高度为 Height(单位为像素), 宽度为 Width, 模板图像的高度为 h , 宽度为 w , 则在待匹配图像中, 左上角坐标为 (x, y) 的子图像(和模板图像同大小)的水平投影直方图可以记为:

$$\begin{aligned} hist(x, y) &= (hist_1(x, y), hist_2(x, y), \dots, hist_h(x, y)) \\ &= \left(\sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y), \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+1), \dots, \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+h-1) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

假设模板图像的水平投影直方图表示为 $hist_1$, 待匹配图像中子图的水平投影直方图表示为 $hist_2$, 则可以采用下面的公式来计算两个直方图之间的相似度:

$$similar = \sum_{i=1}^h abs(vec_i^1 - vec_i^2) \quad (2)$$

其中, $hist_1 = (vec_1^1, vec_2^1, \dots, vec_h^1)$, $hist_2 = (vec_1^2, vec_2^2, \dots, vec_h^2)$.

从模板匹配的定义可以看出, 在子图和模板图像进行匹配的时候, 需要不断重新计算子图和模板图像之间的相关系数, 如果采用传统的模板匹配算法, 则无法实现子图数据的重复利用, 这便是导致模板匹配算法需要消耗很多时间的地方. 考虑到各个子图之间存在着这么一种关系: 互为左右相邻关系的子图之间, 除了一列图像数据不同外, 其他 $w-1$ 列数据是相同的; 互为上下相邻关系的子图之间, 除了一行图像数据不同外, 其他 $h-1$ 行数据是相同的. 本文中的基于水平投影直方图匹配的算法则可以利用这个子图间的关系来优化子图与模板图像间的匹配时间(即本文所提出的改进的水平投影模板匹配方法, Improved Horizontal Projection Histogram, IHPH), 而传统的 NCC 算法却无法做到, 具体的公式推导方式如下所示.

如果采用公式(1)来表示某个子图的水平投影直方图, 则其相邻右边子图的水平投影直方图可以表示为:

$$\begin{aligned} hist(x+1, y) &= \left(\sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y), \sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y+1), \dots, \right. \\ &\quad \left. \sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y+h-1) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

则左右相邻子图之间存在如下的递推关系:

$$\begin{aligned} hist(x+1, y) &= \left(\sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y), \sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y+1), \dots, \sum_{i=x+1}^{x+w} I(i, y+h-1) \right) \\ &= \left(\sum_{i=x+1}^{x+w-1} I(i, y), \sum_{i=x+1}^{x+w-1} I(i, y+1), \dots, \sum_{i=x+1}^{x+w-1} I(i, y+h-1) \right) + (I(x+w, y), \\ &\quad I(x+w, y+1), \dots, I(x+w, y+h-1)) \\ &= \left(\sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y), \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+1), \dots, \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+h-1) \right) + (I(x+w, y), \\ &\quad I(x+w, y+1), \dots, I(x+w, y+h-1)) - \\ &\quad (I(x, y), I(x, y+1), \dots, I(x, y+h-1)) \\ &= hist(x, y) + (I(x+w, y), I(x+w, y+1), \dots, I(x+w, y+h-1)) - \\ &\quad (I(x, y), I(x, y+1), \dots, I(x, y+h-1)) \end{aligned} \quad (4)$$

从上面的递推关系可以看出: 只需将 $hist(x, y)$ 减去它第一列的像素值, 再加上其右一列的像素值, 便可以得到位于其右侧相邻子图的水平投影直方图 $hist(x+1, y)$. 上下子图的水平投影直方图可以表示为:

$$\begin{cases} hist(x, y) = \left(\sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y), \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+1), \dots, \right. \\ \quad \left. \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+h-1) \right) \\ hist(x, y+1) = \left(\sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+1), \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+2), \dots, \right. \\ \quad \left. \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+h-1), \sum_{i=x}^{x+w-1} I(i, y+h) \right) \end{cases} \quad (5)$$

从公式(5)可以看出只需将水平投影直方图 $hist(x, y)$ 向

量中的后 $h-1$ 个元素与第 $y+h$ 行数据重新组合成其下方相邻子图的水平投影直方图 $hist(x,y+1)$.

综上所述,只需要将图像中第一行第一列子图的水平投影直方图 $hist(0,0)$ 保存下来,便可以按照前面的两种递推关系得到每一行第一列子图的水平投影直方图以及该行后续的一系列子图的水平投影直方图,从而大大降低了计算复杂度.

3.3 模板匹配算法实验结果与分析

为了测试本文改进算法的有效性,采用 C++语言来实现了本文提到的三种算法: NCC、HPH 以及 IHPH,然后采集了一些列不同分辨率的检测卡图像来进行测试. 三种算法的匹配时间如表 1 所示. 从表 1 可以看出,随着检测卡图像分辨率的增加,三种算法的时间均有所增加, NCC 算法增长的时间明显是最大的,而 IHPH 的时间是最少的. 图 9 是三种算法在不同分辨率图像下的匹配时间增长关系图,从图中可以看出本文算法的时间增长速度明显远远低于其他两种算法.

表 1 匹配算法时间比较

算法	平均匹配时间(单位:毫秒)				
	250X46	500X58	650X66	750X68	900X90
	0	0	1	9	0
NCC	3776.06	10334.3	16747.9	19736.9	31479.4
HPH	1578.52	4141.32	6400.23	7649.01	12824.2
IHPH	199.952	594.256	909.697	1077.56	1778.69

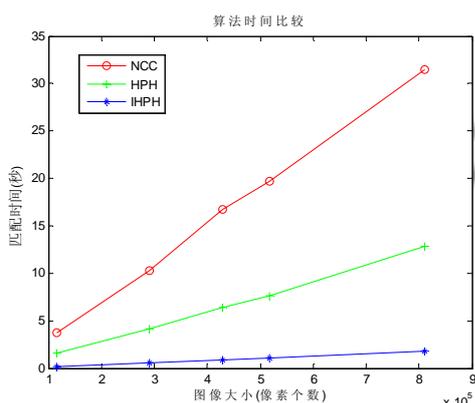


图 9 三种算法的匹配时间与图像大小间的关系

综上所述,在保证模板匹配精度的前提下, IHPH 的速度是最快的,并且随着图像分辨率的提高,其时间增长率也是最小的. 图 9 便是 IHPH 算法用于不同浓度的检测卡的匹配结果(采用的是图 8-(c)中的模板).

从图 10 中可以明确看出对于检测不同浓度的样本的检测卡(从左自右浓度分别为: 0ppb、0.03ppb、0.06ppb、0.12ppb),本文的基于水平投影直方图的模板匹配算法均可以准确地找到检测卡中的试纸条区域.

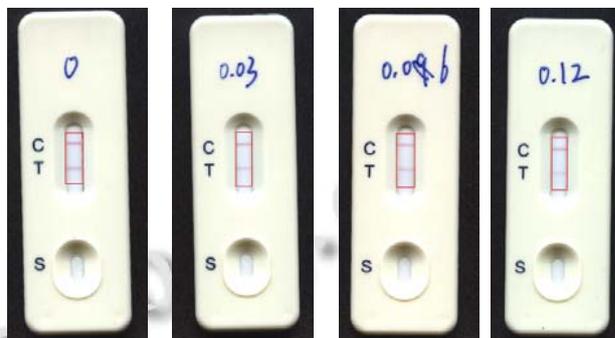


图 10 IHPH 算法匹配结果

4 结论

本文针对将金标检测卡用于做定量分析过程中的试纸条图像处理问题,首先采用 LSD 算法和 Hough 变换对倾斜的检测卡图像进行校正,再使用模板匹配的方法来寻找位于检测卡中的试纸条区域. 本文主要是在前人研究的基础上,对传统的模板匹配算法进行了改进,并通过实验验证了本文算法的有效性. 与传统算法相比,在保证图像匹配正确率的前提下,本文算法耗费的时间是最短的,而且随着图像分辨率的变大,本文算法的时间增长速率远远小于传统模板匹配算法.

参考文献

- 1 袁云峰.基于机器视觉的溶液 pH 值测试的试验研究.南宁:广西大学,2002.
- 2 Chuang L, Hwang JY, Chang HC, et al. Rapid and simple quantitative measurement of a-fetoprotein by combining immunochromatographic strip test and artificial neural network image analysis system. Clinica Chimica Acta, 2004, 348(1-2): 87-93.
- 3 Chuang L, Hwang JY, Chang HC, et al. Quantitative computer image analysis of serum a-fetoprotein rapid gold immunochromatographic dipstick assay. Proc. of the 4th IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering. 2004. 108-114.
- 4 Lin CS, Wu CY, Hsu HC, et al. Rapid bio-test strips reader

- with image processing technology. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2004, 115(8): 363–369.
- 5 Lin CS, Ho CW, Wu CY, et al. Automatic inspection device for HCV antibody rapid test strips for the production line. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2004, 63: 251–258.
- 6 Lin CS, Wu CY, Hsu HC, et al. An image based LCD positioning system utilizing the modified FHT method. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2003, 114: 151–160.
- 7 张峰. 基于图像测量的便携式金标试纸分析仪的研制[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2005.
- 8 王磊. 嵌入式金标试纸读取仪的研究与实现[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.
- 9 郭琰. 基于视觉原理的生物试纸分析系统设计[学位论文]. 长春: 吉林大学, 2006.
- 10 汪曛, 白玉洁, 张艳超, 李宁. 基于 CCD 的胶体金试纸条光电检测仪器设计及实验研究. *传感技术学报*, 2008, 21(8): 1370–1373.
- 11 白玉洁. 胶体金试纸条的光电检测仪器研制[学位论文]. 天津: 天津大学, 2008.
- 12 Zheng DZ, Wu ZL, Wang S. Detecting method of quantitative colloidal gold test strip concentration based on the DSP image processing. *Proc. of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (CBBE)*. 2010. 1–4.
- 13 顾思研. 机器视觉的直线检测技术及应用研究[学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2011.
- 14 von Gioi RG, Jakubowicz J, Morel JM, Randall G. LSD: a line segment detector. *Image Processing On Line*, 2012 (2): 35–55.
- 15 谢凤英, 赵丹培. *Visual C++ 数字图像处理*. 北京: 电子工业出版社, 2008.