

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.06.012

快速亚像素筘齿定位算法在高速穿经机中的应用

张 继¹,王洪元¹,冯 燕²,朱海鹏¹

(1.常州大学 微电子与控制工程学院,江苏 常州 213164;2.常州市翔云智能控制系统有限公司,江苏 常州 213017)

摘要:自动穿经机是纺织行业的一种将纱线快速穿筘的机器,目前国内外穿经机的速度一般在 120 r/min 以下。为提高穿经机的速度,设计了一种应用于高速穿经机的快速筘齿定位算法。通过图像预处理、亚像素一维边缘定位算法和筘齿线亚像素拟合与定位等方法,实现筘齿的快速和精确定位。通过在高速穿经机上的测试和应用表明,本算法在降低硬件成本的基础上,能保证 30 ms 以内的工作周期和 ± 0.02 mm 以内的测量误差,效果良好,保证了转速在 140 r/min 以上高速穿经机不打齿、不停地稳定运行。

关键词:筘齿定位;亚像素;高速穿经机

中图分类号:TP 27

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)06-0076-07

Application of Fast Sub-Pixel Reed Positioning Algorithm in High-Speed Warping Machine

ZHANG Ji¹, WANG Hongyuan¹, FENG Yan², ZHU Haipeng¹

(1. School of Microelectronics and Control Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Xiangyun Intelligent Control System Co., Ltd., Changzhou 213017, China)

Abstract: Automatic warping machine is a kind of machine that can cross reeds quickly in textile industry. Generally, the speed of warping machines is lower than 120 r/min at present. In order to improve the speed of the high-speed warping machine, this paper designs a fast reed positioning algorithm, which includes image preprocessing, 1D sub-pixel positioning of reed edges, edge line fitting and positioning of reeds. The tests and applications show that, with the decrease of hardware cost, our method can guarantee the working period within 30 ms and the measurement error within ± 0.02 mm, and it ensures the stable operation of the high-speed warping machine which is over 140 r/min.

Key words: reed positioning; sub-pixel; high-speed warping machine

收稿日期:2020-07-11。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61976028,61572085)。

作者简介:张继(1981—),男,江苏常州人,硕士,讲师。通信联系人:王洪元(1960—),E-mail: hywang@cczu.edu.cn

引用本文:张继,王洪元,冯燕,等.快速亚像素筘齿定位算法在高速穿经机中的应用[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(6):76-82.

随着中国智能制造的自动化程度的一步步提升,在纺织行业,织造速度和控制精度也有了很大的提高。穿经是织造的准备工序,是要将经纱穿入综眼和箱齿,并使综、箱附近的经纱在箱齿的控制下,在前方向上不发生相对运动,只保留在上下方向有若干相对活动的余地。一直以来,穿综、穿箱都是由人工完成,速度慢且生产效率低,不能适应现代高速喷气织机的生产和订单需求。

自动穿经机作为一种新型的自动化穿经设备,近几年已经越来越多地应用于纺织企业^[1-2]。它的速度和穿经质量大大地超过了手工穿经,也契合了现代纺织行业的发展需求。

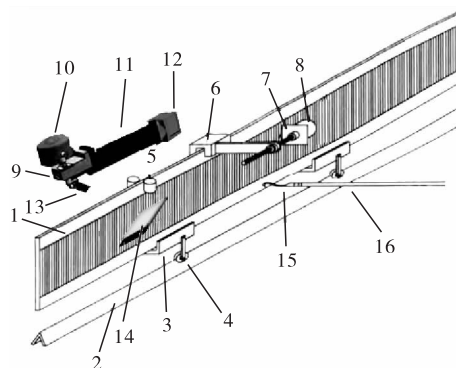
1 高速穿经机工作原理

1.1 工作原理

自动穿经(穿箱)系统结构如图1所示^[1]。钢箱1由大量箱齿构成,箱齿之间有间隙,纱线需要从箱齿间隙穿过。钢箱锁紧支架3将钢箱1下端锁紧并由支架移动滚轮4支撑在导轨上前后运动,导向滚轮5将钢箱1上端压紧;当钢箱夹子6夹紧钢箱1,钢箱1可由伺服电机8和滚珠丝杠7带动做往返运动。

自动穿经机的视觉系统包括面阵光源14,45°棱镜(在相机支架9内部),远心镜头11和工业相机12构成。工业相机12采集图像后由工控机识别钢箱1的箱齿是否移动到箱刀13对准的位置;如果对位有误差,可以根据测量得到的偏差值,使用伺服电动机8带动钢箱移动进行位置补偿,如果判断钢箱已经移动到位,则箱刀13由步进电机10驱动向前进给,插入箱齿,扩大箱齿缝隙,然后剑带16进给穿过箱齿缝隙,剑带头上的穿引钩15钩住纱线,剑带16后退,纱线穿引钩15将纱线勾过钢箱,这就完成了一个自动穿箱周期动作;纱线被勾过钢箱以后,箱刀13从箱齿缝隙中退回,钢箱夹子6带动钢箱1,钢箱1拖动锁紧支架3沿着V型导轨2向前移动至视觉系统测量得到的下一个箱齿齿间距离,移动到位后,工业相机12再次拍照判断,自动穿箱系统重复上述动作。钢箱夹子6运动到滚珠丝杠7行程末端时,当纱线穿引钩15勾回纱线后,箱刀13并不退回,而是留在箱齿缝隙内防止钢箱1前后移动,钢箱夹子6松开钢箱,然后在丝杠传动下回移到原点,到原点后,钢箱夹子6再次夹住钢箱1,箱刀13退出箱齿缝隙,钢箱夹子6继续带动钢箱1做进给运动,系统重新开始穿箱。

根据上述工作流程,可以将穿经机视觉系统的任务分成:①手工标定图2(b)所示箱刀尖部位置 (x_i, y_i) ;②识别箱刀尖部所在高度 y_i 前1个和后 N 个(一般要求 $N \geq 4$)钢箱的中心点坐标(图3);③向控制器反馈箱刀尖部所在位置 (x_i, y_i) 与后续 N 个钢箱中心点的实际距离,并由前者驱动伺服电机控制钢箱前进或回退。视觉系统一个工作周期包括:图像的硬触发采集并传输至工控机、计算箱刀平移距离和通过串口通信向控制器反馈各个距离。从控制工艺上而言:①为了确保箱刀不打箱齿而导致箱刀和箱齿损坏,要求视觉系统的测量精度在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内;②为了确保140 r/min以上转速的高速穿经机的工作节拍不受影响,要求视觉系统的一个流程工作时间小于40 ms(目前市场上已有的穿经机



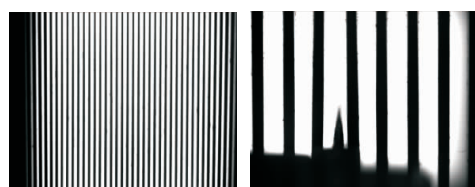
说明:1—钢箱;2—导轨;3—钢箱锁紧支架;4—支架移动滚轮;5—导向滚轮;6—钢箱夹子;7—滚珠丝杠;8—伺服电机;9—相机支架(内含45°棱镜);10—步进电机;11—远心镜头;12—工业相机;13—箱刀;14—面阵光源;15—纱线穿引钩;16—剑带。

图1 自动穿箱系统工作原理图

Fig.1 Schematic diagram of automatic reed system

一般为 100 r/min 或 120 r/min,其视觉系统工作周期一般都大于 60 ms)。要实现 140 r/min 乃至更高的穿经速度,视觉系统的工作周期需要低于 40 ms。

目前在 120 r/min 转速以下的穿经机上使用的是康耐视公司的智能相机,整个流程的耗时需要将近 70 ms,无法满足高速穿经机的速度要求。



(a) 较密的箱齿 (b) 较疏的箱齿

图 2 两种型号钢箱成像效果对比

Fig.2 Comparison of imaging effects of two types of reeds

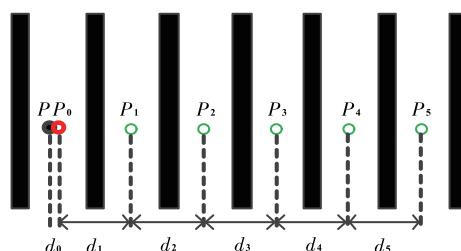


图 3 钢箱定位示意图

Fig.3 Diagram of reed positioning

1.2 视觉系统硬件选型

由于不同型号钢箱的箱齿间距不同(图 2),为了保证所有型号的钢箱都能具有良好的成像效果,且能保证箱刀所在位置右方还有至少 4 个箱齿,视觉系统有效视野需要在 20 mm 左右;同时,由于不同型号钢箱的厚度不同,要求视觉系统成像景深达到 5 mm,再结合钢箱定位精度 ± 0.02 mm 和处理周期小于 40 ms 的限制,选择大恒 MER-132-43GM 工业相机(130 万像素、外触发、GigE 接口黑白相机)和浩蓝光电 AZURE-60033TSM 远心镜头(60 mm 工作距离、5 mm 景深),光源使用 20 mm * 20 mm 面阵白光光源,构成如图 1 所示的视觉系统。穿经机视觉处理与伺服控制共用工控机,其 CPU 为双核 1 GHz 主频。

2 箱齿的快速亚像素定位

2.1 钢箱图像预处理

穿经机在工作过程中,钢箱的箱齿间时常有残留的纱线,同时箱刀插入箱齿时在图像中会呈现出较大块的阴影,如图 4 第 3 行所示。这些残纱和箱刀阴影的存在会严重影响到箱齿的定位。为此,需要先通过预处理,消除残纱对箱齿定位带来的影响。

首先对箱齿图像做阈值化处理,将灰度图转换为二值化图,如图 4(b)所示。由于箱齿在图像中一般是接近垂直方向的,可以使用垂直方向的形态学算法对原始图像进行开运算操作,以清除图像中较小的残纱。这种开运算可以消除大部分依附在箱齿上的残纱,但对于较长的残纱或者箱刀的去除效果并不够理想。图 4(a)中箱齿上原有的残纱在图 4(c)中已经消除,但下方的钢箱不能完全去除,如图 4(c)的第 1 行和第 2 行。此时可以通过 BLOB 分析的方法,通过检测各个连通区域的面积来去除箱刀,如图 4(d)所示。对于箱刀与箱齿黏连在一起的图像,同样可以使用 BLOB 分析的方法,提取图像中的矩形区域即可。这样就基本去除了箱齿定位的干扰因素,下面将对箱齿进行精确定位。

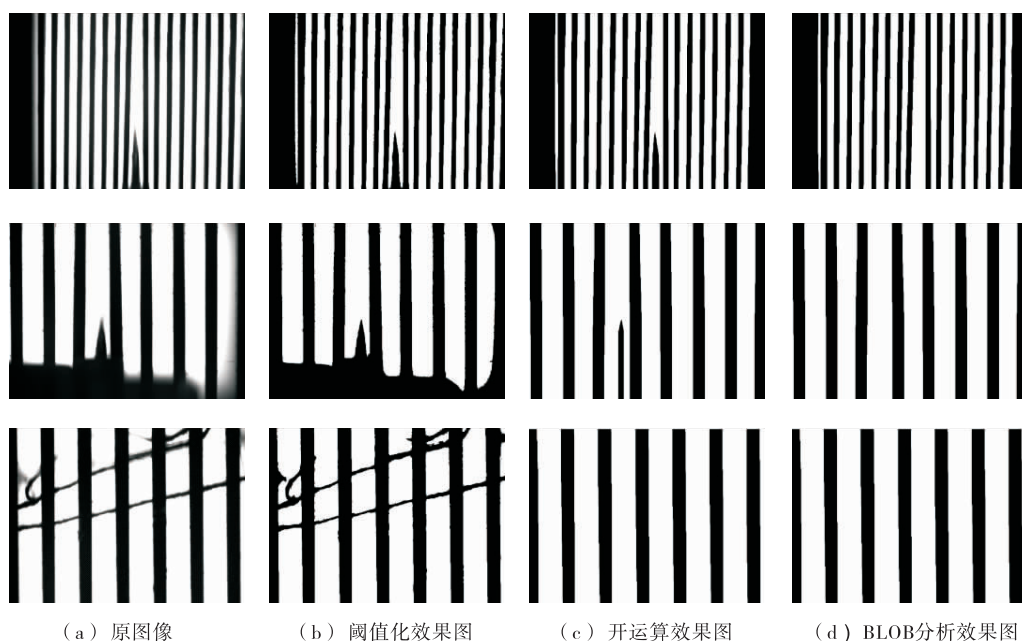


图 4 不同图像预处理效果图

Fig.4 Result images of preprocessing procedure

2.2 快速亚像素箱齿定位算法

2.2.1 箱齿粗定位

根据视觉系统硬件选型,可以计算得到图像中像素分辨率大约为每个像素 0.02 mm,测量精度大约为 0.05 mm。像素级的精度不能满足穿经机的工艺要求,因此必须借助于亚像素方法。

在进行箱齿边缘的亚像素级定位之前,需要先用像素级的边缘定位算子对预处理后的箱齿边缘进行粗定位。像素级的边缘检测算子包括 Sobel, Prewitt, Canny 等,其中 Canny 算子具有边缘定位准确、定位速度快的优点,因此本文利用 Canny 算子实现边缘粗定位^[3-5]。

2.2.2 亚像素一维边缘定位算法

在箱齿边缘定位任务中,由于无需考虑 y 方向的边缘位置,因此可以将其看作是一维边缘定位的问题^[3-5]。对于这种问题,以边缘点为中心,沿着边缘法线方向在图像中截取一行或一列共 M 个像素点的灰度值,如图 5 所示。 M 太大会降低检测速度, M 太小则定位不够准确,本文取 $M=5$ 。将最中心点 x 坐标定义为 0,从左至右依次为 $(-2, -1, 0, 1, 2)$, y 坐标为灰度值。本文使用多项式拟合方法。根据 Schemite 正交化公式^[6]获得如下正交基函数

$$\begin{cases} \varphi_0(x) = 1 \\ \varphi_1(x) = x \\ \varphi_2(x) = x^2 - \frac{4}{3} \\ \varphi_3(x) = x^3 + \frac{15}{8}x^2 - \frac{12}{5}x - \frac{5}{4} \end{cases} \quad (1)$$

以式 $\{\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3\}$ 为基底,进行三次正交多项式拟合,拟合多项式方程为

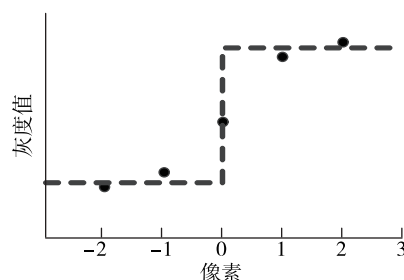


图 5 图像边缘灰度变化

Fig.5 Gray changes near the edge of image

$$P_3(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + a_2\varphi_2(x) + a_3\varphi_3(x) \quad (2)$$

为了减少计算量,根据正交多项式拟合原理^[7],变换为如下矩阵形式的线性方程组

$$\begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\varphi_1, \varphi_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\varphi_2, \varphi_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\varphi_3, \varphi_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y, \varphi_0) \\ (y, \varphi_1) \\ (y, \varphi_2) \\ (y, \varphi_3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由方程组(3)可得多项式系数值为

$$a_0 = \frac{(y, \varphi_0)}{(\varphi_0, \varphi_0)}, \quad a_1 = \frac{(y, \varphi_1)}{(\varphi_1, \varphi_1)}, \quad a_2 = \frac{(y, \varphi_2)}{(\varphi_2, \varphi_2)}, \quad a_3 = \frac{(y, \varphi_3)}{(\varphi_3, \varphi_3)} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)可得拟合多项式

$$P_3(x) = \frac{(y, \varphi_0)}{(\varphi_0, \varphi_0)}\varphi_0(x) + \frac{(y, \varphi_1)}{(\varphi_1, \varphi_1)}\varphi_1(x) + \frac{(y, \varphi_2)}{(\varphi_2, \varphi_2)}\varphi_2(x) + \frac{(y, \varphi_3)}{(\varphi_3, \varphi_3)}\varphi_3(x) \quad (5)$$

由式(5)可知 $P_3(x)$ 是关于 x 的三次多项式,由此可求出其唯一的二阶过零点,即

$$P''_3(x) = 2 \frac{(y, \varphi_2)}{(\varphi_2, \varphi_2)} + \frac{15(y, \varphi_3)}{4(\varphi_3, \varphi_3)} + 6 \frac{(y, \varphi_3)}{(\varphi_3, \varphi_3)}x = 0 \quad (6)$$

整理可得

$$x = -\frac{(y, \varphi_2)(\varphi_3, \varphi_3)}{3(y, \varphi_3)(\varphi_2, \varphi_2)} - \frac{5}{8} \quad (7)$$

x 即为所需定位的一维边缘位置。

2.2.3 箱齿线的亚像素拟合与定位

使用上述方法可以计算得到每个边缘的亚像素位置,但此时计算得到的位置并不一定是箱齿边缘的真实位置。这是因为,虽然在图像预处理过程中能够去除残留在箱齿中的残纱,但仍有部分残纱不能完全去除,如果单纯地依靠上述亚像素边缘定位方法很可能造成箱齿定位时出现误差。为保证更高的定位精度,本文采取箱齿线拟合的方法,其原理如图 6 所示。

首先提取 k 条相互平行的水平线($l_1: y=y_1$, $l_2: y=y_2, \dots, l_k: y=y_k$),这些水平线与每个箱齿有左右 2 个交点。使用上述一维亚像素边缘定位方法可以计算得到每个交点的亚像素 x 坐标,其中, k 条水平线与箱齿 a 左边缘相交的亚像素位置定义为 $(x_{a11}, y_1), (x_{a12}, y_2), \dots, (x_{a1k}, y_k)$,与箱齿 a 右边缘相交的亚像素位置定义为 $(x_{ar1}, y_1), (x_{ar2}, y_2), \dots, (x_{ark}, y_k)$,与其他箱齿相交的位置与此类似定义。

根据每条箱齿线上提取的 k 个点,可以通过拟合算法求解每个箱齿的左右边缘所在直线。但是,线性回归模型的基本假设满足时,用最小二乘法得到的回归系数估计量是无偏的且具有最小方差,即使在高度多重相关的情况下,最小二乘法的回归系数估计量依然是线性无偏的,且具有最小的方差,也就是说多重共线性并不影响最小二乘估计量的无偏性和最小方差性。因此在所有的线性无偏估计中,最小二乘估计仍然具有较小的方差,但这并不意味着最小二乘估计是最好的。为此,使用岭回归方法^[8]求解该拟合问题。例如,对于箱齿 a 左边缘的向量 $\mathbf{X}_{a1} = \{x_{a11}, x_{a12}, \dots, x_{a1k}\}$ 和 $\mathbf{Y}_{a1} = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$,定义如下损失函数

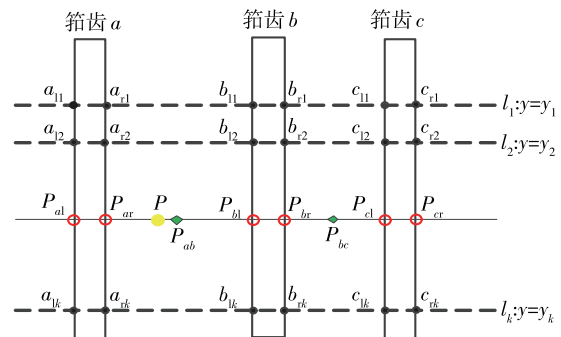


图 6 箱齿线拟合原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of reed line fitting

$$J(\mathbf{w}_{a1}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{Y}_{a1} - \mathbf{X}_{a1}\mathbf{w}_{a1}\|^2 + \frac{1}{2}\lambda \|\mathbf{w}_{a1}\|^2 \quad (8)$$

式中: λ 为正则化系数; \mathbf{w}_{a1} 为箔齿 a 左边缘直线参数向量(斜率和截距)。其解为

$$\mathbf{w}_{a1} = (\mathbf{X}_{a1}^T \mathbf{X}_{a1} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{X}_{a1}^T \mathbf{Y}_{a1} \quad (9)$$

式中 \mathbf{I} 为单位阵。以此类推,可以快速求解出所有箔齿左右边缘的直线参数。

根据上述求得的直线参数,结合箔刀尖部所在水平线,可以计算得到 P_{a1} , P_{ar} , P_{b1} , P_{br} 等交点的 x 坐标,从而可以计算出相邻箔齿的中点 P_{ab} , P_{bc} 等的 x 坐标。

2.2.4 相机标定与实际距离的计算

上述过程计算得到的坐标是图像坐标系上的坐标,要真正实现视觉测量任务,必然需要对视觉系统进行标定,也就是要建立图像坐标系与世界坐标系的映射关系。本文使用间距 2 mm 的玻璃材质棋盘格标定板,其成像效果如图 7 所示。使用 OpenCV 自带的标定算子进行标定,由于标定板成像时可能会有倾斜,标定时选取的定位点矩阵为 5×3 大小,最终得到的标定矩阵如图 8 所示。

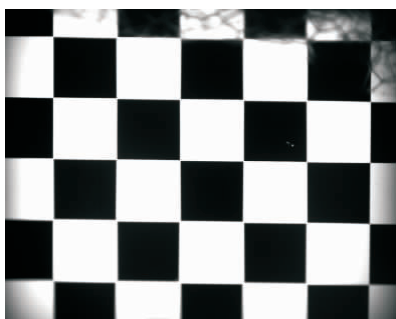


图 7 棋盘格标定板成像效果

Fig.7 Checkerboard calibration board

```
<BoardSize>5 3</BoardSize>
<ChessSize>2.</ChessSize>
<CameraMatrix type_id="opencv-matrix">
  <rows>2</rows>
  <cols>3</cols>
  <dt>d</dt>
  <data>
    9.6173509281928110e-003 1.0160212000018482e-004
    -1.0767036854008345e+000 -1.8091610234935896e-004
    9.9901092289238907e-003 -2.6604978199531399e+000
  </data>
</CameraMatrix>
```

图 8 相机标定结果

Fig.8 Calibration result

得到标定后,将 P 点和上述计算得到的 P_{ab} , P_{bc} 等图像坐标系中的坐标使用标定矩阵映射得到世界坐标系中的坐标,从而可以得到真实的偏移距离(如图 3 标注的真实的偏移距离 d_0 , d_1 , d_2 等)。

3 结果及分析

上述算法使用 VC2013 编程实现,软件界面如图 9 所示。其中,上方图像区域中的框线为图像处理区域,可由人工任意选取,框线中圆点 P 为手工标定的箔刀原点位置;下方图像为上方图像处理区域的放大,其中, P 点为箔刀原点位置,1~5 为计算得到的箔齿间距中心点。

整个视觉系统在精度和速度方面的测试使用 1.2 所述的机器视觉硬件环境在永旭晟机电科技(常州)有限公司的高速穿纱机上进行。通过连续数周的实际测试表明:

1) 本文的算法和系统能保证 ± 0.02 mm 以内的测量精度,满足了精度要求。使得箔齿能顺利准确地插入各种型号、疏密不同的箔齿间隙中间,保证穿纱机不打齿、不停机。

2) 从控制器向工业相机发送外触发指令开始计时,直到控制器接收到工控机发送来的 N 个偏移距离信号(N 可在软件界面上人工设置),时间基本控制在 20 ms 左右,最高不超过 30 ms,满足了时间要求,保证穿纱机控制周期不超时停机。

相比现有的基于康耐视智能相机开发的视觉系统,在大幅缩减硬件成本的前提下,算法单个周期的运行速度缩减了近 40 ms。

目前,本文的算法和软件已经应用于永旭晟机电科技(常州)有限公司生产的中国第一台自主研发的 140 r/min 高速穿经机,该设备于 2019 年获得常州市首台(套)重大装备认定^[8-9]。

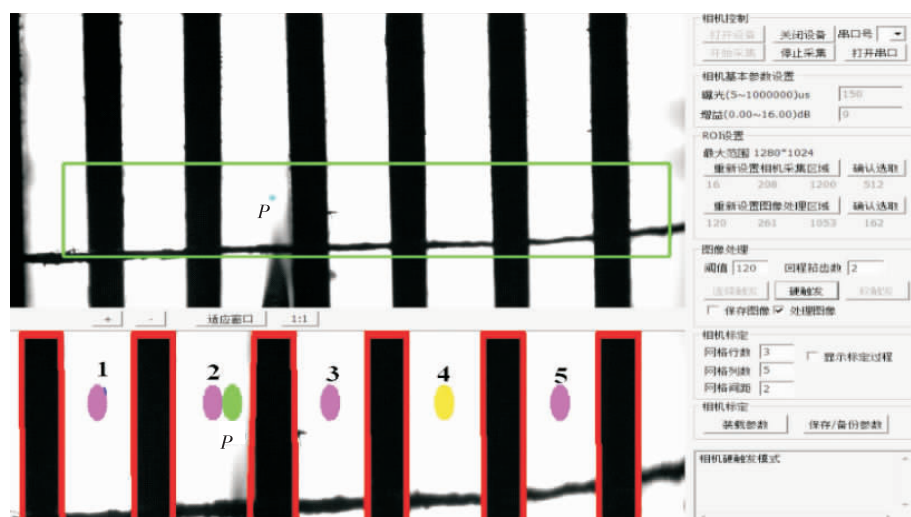


图9 人机交互界面

Fig.9 GUI

4 结 论

针对高速穿经机提出一种快速箱齿定位算法,使用该算法的图像预处理、亚像素边缘定位算法、直线拟合方法等流程,能够保证穿经机视觉系统在 30 ms 内完成图像硬触发采集、箱刀平移距离计算、通信反馈距离数值这一个周期的工作任务,并能实现 ± 0.02 mm 的测量精度,确保了高速穿经机稳定运行。

参考文献:

- [1]颜鹏,王二化.穿经机自动穿箱系统设计[J].毛纺科技,2019,47(10):75-78.
- [2]王明涛.不同组织织物的穿箱方法浅析[J].棉纺织技术,2008,36(4):34-39.
- [3]吴一全,邹宇,刘忠林,等.基于Franklin矩的亚像素级图像边缘检测算法[J].仪器仪表学报,2019,32(5):221-229.
- [4]陈伟,蔡占川,齐东旭.一类新的正交矩-Franklin矩及其图像表达[J].计算机学报,2015,38(6):1140-1147.
- [5]陈彦燕,王元庆.常用边缘检测算法的定量比较[J].计算机工程,2008,34(17):202-204.
- [6]王新民,术洪亮.工程数学计算方法[M].北京:高等教育出版社,2005:30-41.
- [7]THEODORIDIS S, KOUTROUMBAS K. 模式识别[M].李晶皎,王爱侠,王骄,等译.4版.北京:电子工业出版社,2016:63-81.
- [8]常州市人民政府.市工信局关于公布2018年度常州市首台(套)重大装备及关键部件认定名单的通知:常工信装备(2019)28号[EB/OL].(2019-03-21).http://www.changzhou.gov.cn/gi_news/164155315236286.
- [9]徐盼盼,永旭晟:打造国产自动穿经机第一品牌[J].纺织服装周刊,2018(22):33.

(责任编辑:李艳)