

基于机器视觉的制袋机裁切定位系统设计

胡宏宇¹, 王景良², 朱龙彪¹, 陈丰明³, 傅启桃³

(1.南通大学 机械工程学院, 南通 2226019; 2.江苏海事职业技术学院, 南京 211199;

3.无锡鼎茂机械制造有限公司, 无锡 214107)

摘要: **目的** 针对圆角包装袋传统裁切工艺中存在的毛刺和废料问题, 设计一种基于机器视觉的高精度制袋机裁切定位系统。**方法** 利用 LED 背光源、低畸变镜头、CMOS 黑白相机和工控机搭建视觉系统硬件平台, 在 Visual Studio 开发环境中, 基于 OpenCV 函数库设计视觉软件, 用基于最小二乘法检测图像边缘, 进而标定相机, 提取包装袋圆角轮廓为特征信息。系统以特征信息为匹配模板对圆角位置进行精确定位, 得到亚像素级角点位置, 最终控制伺服系统执行误差补偿裁切。**结果** 该定位算法可实现 16 ms 内精确定位圆角坐标, 绝对误差小于 ± 0.02 像素点。**结论** 基于机器视觉的定位系统具有运算速度快、定位精度高等特点, 有效改进了传统制袋工艺, 能够满足生产需求。

关键词: 包装袋; 机器视觉; 特征提取; 检测; 定位

中图分类号: TB486; TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)03-0200-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.03.030

Design of Location System for Cutting of Bag Making Machine Based on Machine Vision

HU Hong-yu¹, WANG Jing-liang², ZHU Long-biao¹, CHEN Feng-ming³, FU Qi-tao³

(1.School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 2226019, China; 2.Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211199, China; 3.Wuxi KING-MO Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuxi 214107, China)

ABSTRACT: The work aims to design a location system for cutting of high-precision bag making machine based on machine vision, aiming at the problems of burrs and wastes in the traditional cutting process of fillet packaging bags. LED backlight, low distortion lens, CMOS black-and-white camera and industrial personal computer were used to build the hardware platform of the vision system. In the Visual Studio development environment, the vision software was programmed based on OpenCV function library. The image edge was detected based on the least square method for the camera calibration. The package fillet contour was extracted as the feature information. The system took the feature information as the matching template to accurately locate the fillet position, obtain the sub-pixel level point, and finally control the servo system to perform error compensation and bag cutting. The location algorithm could achieve precise location of fillet in 16 ms, and the absolute error of location was less than ± 0.02 pixels. Featured by fast operation speed and high precision location, etc., the location system based on machine vision effectively improves the traditional bag making process, and can meet the production requirements.

KEY WORDS: packaging bag; machine vision; feature extraction; detecting; locating

收稿日期: 2018-10-10

基金项目: 无锡市科技发展资金 (CBE01G1511)

作者简介: 胡宏宇 (1994—), 男, 南通大学硕士生, 主攻机电控制和机器视觉。

通信作者: 朱龙彪 (1964—), 男, 南通大学教授, 主要研究方向为机电控制和故障诊断等。

制袋机属于包装机械设备的一种，主要是利用塑料的热塑原理将印刷好的薄膜制成包装袋。制袋过程涉及送料、烫封、牵引和裁切等诸多工艺环节及各参数的相互协调控制^[1]。制袋机的裁切过程和工艺水平将直接影响产品的包装质量。随着计算机应用与图像技术的发展，机器视觉技术也逐渐地应用到包装生产工艺中。王文静、辛洪兵^[2]等提出了将 Canny 边缘检测算法以及由它改进得到各种算法应用于包装的流水线控制中。王保升、左健民^[3]提出了基于数字图像处理的自动纠偏方法，通过采用边缘直线方法对倾斜图像进行处理，获取跑偏信息，从而实现在线监测和纠偏。曹飞、熊和金^[4]提出了基于机器视觉的张力检测系统。然而针对制袋机定位控制的机器视觉应用尚未被提出。传统的裁切定位通过色标传感器捕捉薄膜上特征色块实现^[5]，此方法存在定位精度低问题。在生产圆角包装袋时，色标传感器捕捉膜料图案的特征色块以触发停料信号，伺服系统控制切刀装置在圆角处裁切膜料 2 次，解决圆角袋容易产生边角毛刺问题^[6]，其弊端会加快切刀结构的机械磨损，增加维护成本。针对传统方法诸多弊端，设计了一种基于机器视觉的裁切定位系统，可快速并精确地实现包装袋圆角定位功能。

1 问题描述

制袋机裁切装置简图见图 1。生产圆角包装袋时，色标传感器抓取膜料特征色块以触发停料信号，冲孔器执行冲圆角孔动作。移刀伺服系统控制刀架运动到圆角前方，切刀伺服系统执行第 1 次裁切动作，切落成品包装袋。再移动刀架至圆角后方，执行第 2 次裁切动作，切除毛刺废料。

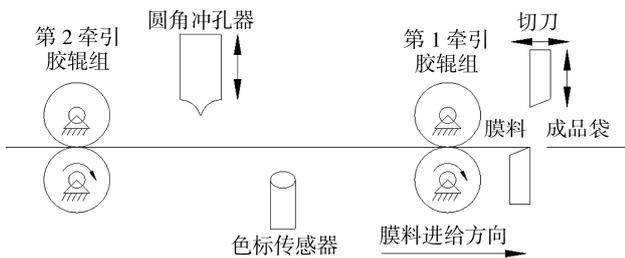


图 1 制袋机裁切装置简图
Fig.1 Schematic diagram of cutting device of bag making machine

由于色标传感器抓标响应速度低、膜料印刷误差等因素，切刀并不能在 2 个包装袋之间进行准确裁切，裁切下来的包装袋将出现毛刺，这不仅影响美观度，而且顾客在包装、使用时存在伤手的隐患。尽管目前普遍采用了双切生产工艺，即切刀在膜料圆角处连续裁 2 次，但是当出现较大印刷误差或因拉膜张力不稳定造成膜料拉伸变形时，毛刺仍然无法消除。双

切工艺还会产生废料，并需配备吸除废料装置，不仅增加生产成本和能源消耗，而且双切工艺还将增加切刀工作频率，加快机械结构的磨损，缩短使用寿命。

2 检测位置及系统架构

2.1 检测位置选择

制袋机的生产速度很快，由于存在色标传感器抓标性能、印刷误差和拉伸变形等诸多不稳定因素，导致圆角袋产生毛刺，所以选择合适的检测位置至关重要。在制袋生产过程中，能够对包装袋进行定位的位置主要有 2 个：距离切刀刀架向后一个袋长位置；距离圆角冲孔器向前一个袋长位置。位置分布见图 2。

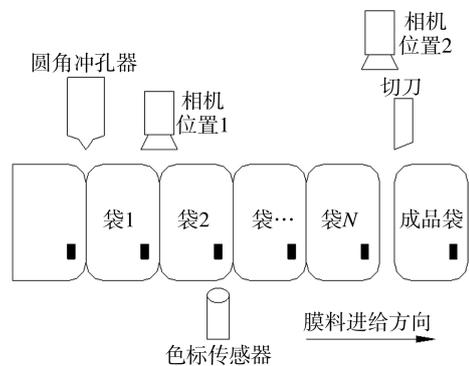


图 2 可检测的位置分布
Fig.2 Distribution of detectable positions

在位置 1 处，检测到圆角并计算坐标后，再控制伺服电机牵引对应的长度，控制策略简单，程序易实现，但由于空间狭小不便于设备安装和相机标定。在位置 2 处，空间大，便于选择合适位置进行设备安装，同时便于统计每个袋长数据，累计误差，最终实现移刀补偿。根据对包装袋生产流程与经济因素的分析，研究提出在冲孔器前方一个袋长位置即位置 2 处进行检测的方案。

2.2 视觉系统架构

基于机器视觉的袋长定位系统的架构见图 3。系统由硬件和软件两大部分组成。

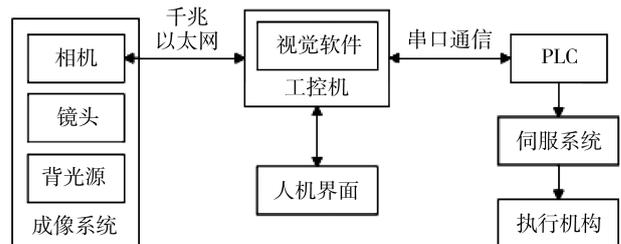


图 3 视觉系统架构
Fig.3 Architecture of machine vision system

视觉系统的硬件部分由工业相机、镜头、光源、

工控机组成。其中工业相机选用海康威视千兆以太网相机，相机参数为 CMOS 感光元件，全局快门，输出黑白图像，分辨率为 640×480，每秒输出 173 帧图像；镜头选用海康威视 HF 系列镜头，分辨率为 600 万，超低光学畸变，焦距为 8 mm，可调光圈，手动聚焦。背光源为 LED 导光板，白色光，尺寸为 180 mm×100 mm×3.2 mm；工控机配有四核四线程处理器、千兆网口、DIO 接口、USB 和 HDMI 接口等。视觉系统成像系统见图 4，硬件平台见图 5。



图 4 视觉系统成像系统
Fig.4 Imaging system of machine vision system



图 5 视觉系统硬件平台
Fig.5 Hardware platform of machine vision system

视觉系统的软件部分在 VS2013 开发环境下基于 OpenCV 开源计算机视觉库设计，使用 C++ 语言编写代码。视觉软件由视觉系统主界面和相机标定、特征提取、裁切定位 3 个子进程组成。工控机安装 Windows7 系统，运行视觉系统软件，通过串口与松下 FP-X PLC 进行数据通信。

3 软件设计

视觉系统的软件部分由视觉系统主界面和相机标定、特征提取、裁切定位 3 个子进程组成。在制袋机系统调试阶段使用特征提取与相机标定进程，在生产包装袋时运行裁切定位进程。

3.1 视觉系统主界面

基于 MFC 框架开发设计了人机交互界面，见图 6，为视觉系统的主界面，可启动相机标定、特征提取与裁切定位 3 个子进程。在主界面中可设置冲孔器与切刀之间包装袋数量，配置工控机与 PLC 的通信端口号和波特率。

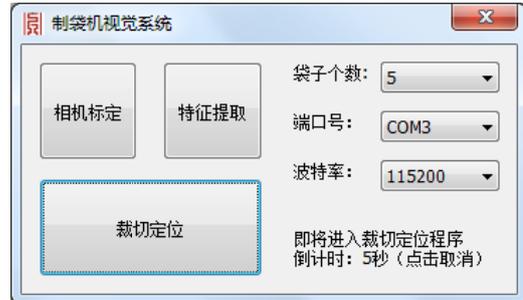


图 6 视觉系统主界面
Fig.6 Main interface of machine vision system

3.2 相机标定

机器视觉的基本任务之一是从相机采集的图像信息计算出三维空间中物体的几何信息，并由此重建和识别物体^[7-8]。建立相机像素坐标系与世界坐标系的函数关系必须通过实验与计算才能得到，这个过程被称为相机标定^[9]。相机标定是机器视觉中一个基础但很关键的问题^[10]。该系统采用基于最小二乘法边缘检测的相机标定方法，建立在平面二维空间中成像平面像素坐标系与伺服系统坐标系的函数关系。

标定方法：PLC 控制伺服系统从膜料上裁切出宽度为 1000 个脉冲的窄带，将窄带放置在背光源上；视觉系统采集图像，在图像中窄带左边画一条直线，通过遍历法，检测窄带的 2 条边缘线并得到点集，以直线两端点坐标作为图像遍历的起始行与终止行的起点，以直线垂直高度作为边缘拟合的采样数，见图 7。

在拟合方法中，基于最小二乘准则的函数拟合是一个有效的数学工具^[11]。用最小二乘准则进行图像测量，可以达到较高的精度，保证测量的可靠性和效率^[12]。通过最小二乘法拟合出 2 条边缘线的直线方程，并计算出 2 条直线的间距。设拟合直线方程为：

$$X = a_0 + a_1 Y \tag{1}$$

以实测值 X_i 与计算值 X_j ($X_j = a_0 + a_1 \times Y_i$) 的残差的平方和 φ 最小为“优化判据”。

$$\varphi = \sum (X_i - X_j)^2 \tag{2}$$

当残差平方和 φ 最小时，可用函数 φ 对 a_0, a_1 求偏导数，令这 2 个偏导数等于 0。

$$\sum 2(a_0 + a_1 Y_i - X_i) = 0 \tag{3}$$

$$\sum 2Y_i(a_0 + a_1 Y_i - X_i) = 0 \tag{4}$$

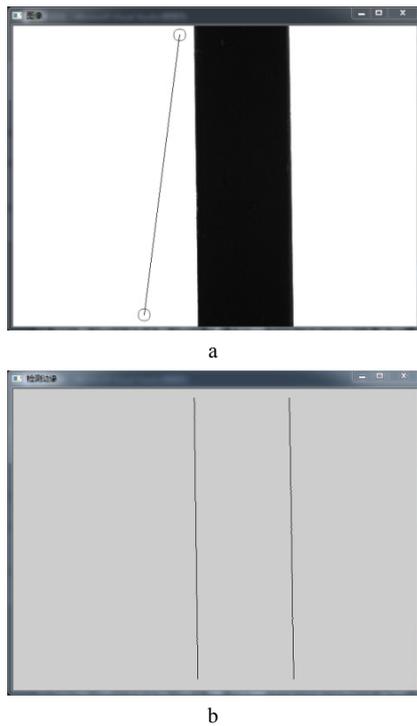


图 7 检测窄带边缘线

Fig.7 Detection of edge lines of the narrow band

解方程得：

$$a_0 = \frac{(\sum Y_i) - a_1(\sum X_i)}{n} \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (6)$$

将 2 条边缘直线的点集分别代入式 (5) 式 (6) 中，得到边缘的一元线性回归方程。

$$X = a_{0L} + a_{1L} Y \quad (7)$$

$$X = a_{0R} + a_{1R} Y \quad (8)$$

通过式 (9) 得到窄带的宽度为：

$$D = \frac{|a_{0L} - a_{0R}|}{\sqrt{1 + (a_{1L}^2 + a_{1R}^2 + a_{1L} a_{1R})}} / 3 \quad (9)$$

最终得出标定参数：

$$k = D / 1000 \quad (10)$$

为了验证该相机标定法的精度，伺服系统分别裁切 600, 700, 800, 1000 脉冲数的窄带，并对其图像进行标定，标定结果见表 1。

表 1 相机标定结果
Tab.1 Result of camera calibration

实验次数	k_1	k_2	k_3	k_4
1	0.254 79	0.254 738	0.254 781	0.254 594
2	0.254 792	0.254 736	0.254 775	0.254 591
3	0.254 787	0.254 737	0.254 801	0.254 592
4	0.254 818	0.254 758	0.254 786	0.254 617
5	0.254 803	0.254 719	0.254 805	0.254 611

实验结果表明，基于最小二乘法边缘检测的相机标定方法，标定误差小于 0.09%，标定精度较高。

3.3 特征提取

从图像中提取有用的数据或信息，得到图像的“非图像”表示或描述，如数值、向量和符号等，这一过程就是特征提取，而提取出来的这些“非图像”的表示或描述就是特征^[13]。常用的图像特征有颜色特征、纹理特征、形状特征、空间关系特征等^[14]。其中形状特征有 2 类表示方法：轮廓特征和区域特征。图像的轮廓特征主要针对物体的外边界，而图像的区域特征则关系到整个形状区^[15]。

在该视觉系统中，以 2 个包装袋之间的圆角轮廓特征为特征信息，特征提取的方法如下。

LED 背光源安装在膜料正下方，黑白相机在逆光条件下采集不透光膜料的灰度图像，设置合适的曝光时间和增益等参数，色彩丰富、像素强度分布广的膜料将呈现出整体亮度较低且强度分布密集图像，而背光源部分则呈现整体高亮的图像。膜料图像的灰度值集中在 0~50 区间内，LED 背光源图像的灰度值集中在 200~255 区间内。此时，包装袋圆角的轮廓清晰可见，见图 8。

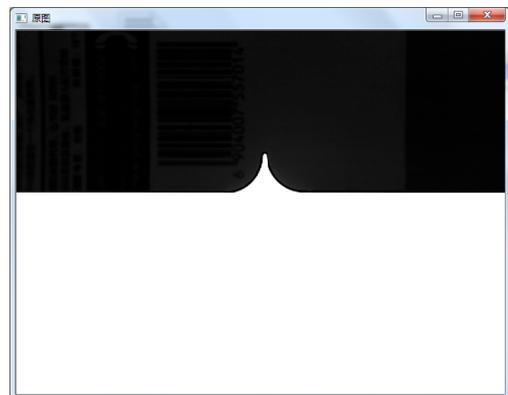


图 8 包装袋圆角轮廓图像

Fig.8 Image of fillet contour of packaging bag

首先对图像进行双边滤波，去除图像噪声并保留边缘细节。再对图像进行阈值化处理，图像中膜料部分与背光源部分灰度值差距较大，且各部分灰度值分布集中，所以设定阈值为 128。调用 Canny 算子，检测出薄膜与背光源的分界线，获得清晰的圆角轮廓。调用 Shi-Tomasi 算法检测图像中的角点，记录该点坐标 $C(x, y)$ 。以 C 为坐标原点，将圆角轮廓信息保存在 Point 类型数组中，角点左侧的 30 个点集坐标保存在 L 数组中，角点右侧的 30 个点集坐标保存在 R 数组中。然后将 L 点集分别向左上与右下 2 个方向偏置，保存在 A_1, A_3 数组中。同理，从 R 点集生成 A_2, A_4 数组。此时，包装袋圆角的特征信息提取完成，由 4 段连续曲线，共 120 个坐标点组成，见图 9。

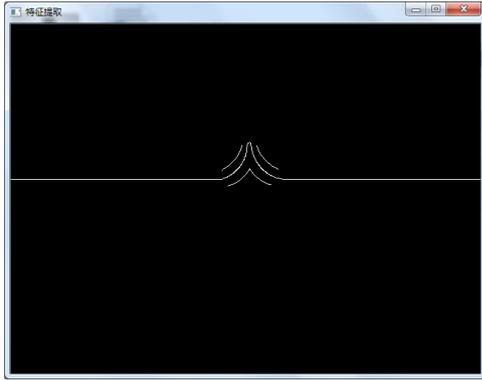


图9 圆角轮廓特征信息
Fig.9 Feature information of fillet contour

3.4 裁切定位

视觉系统提取轮廓特征信息后,以轮廓特征信息为模板,在输入图像中寻找与模板匹配的角点区域,根据圆角的对称性,检测圆角轮廓坐标,最终计算得出角点的精确位置。

首先遍历相机采集的原始图像,当像素点灰度值大于阈值时,即该像素点为白色点,具备图像角点必要条件。以当前点坐标作为特征点集的偏置坐标,并进行如下处理。

$$p_i = \begin{cases} 1 & A_1, A_2 \text{ 偏置像素点灰度值} \leq \text{阈值} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (11)$$

$$p_i = \begin{cases} 1 & A_3, A_4 \text{ 偏置像素点灰度值} > \text{阈值} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (12)$$

概率 p 数组共 120 布尔型变量,表示特征点集的偏置坐标是否在圆角的内侧或外侧。当 $\sum p = 110$ 时,确定该像素点为角点;若 $\sum p < 110$ 时,继续遍历图像,直至检测到角点。选取圆角轮廓中 30 组对称点,计算每组点的对称轴并求算数平均值,最终得到亚像素级角点 x 轴坐标。

$$P = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} L_i - R_i \quad (13)$$

制袋机每分钟生产 120 个包装袋,制袋周期是 500 ms,其中拉料时间为 250 ms,烫压时间为 250 ms。在烫压时间段内,制袋机停止拉料,并执行冲孔和裁切工序。

视觉系统的裁切定位方法是在停止拉料时,检测当前图像的角点坐标 P_1 ,根据参考位置 r 得到单个袋长误差:

$$e_1 = P_1 - r \quad (14)$$

冲孔器和切刀之间包装袋个数为 N ,则制袋总误差为:

$$s = \sum_{i=1}^N e_i \quad (15)$$

视觉系统将像素单位的 s 数据转换成脉冲单位的误差补偿数据,通过串口发送至 PLC,制袋机系统将

切刀移动对应的补偿距离,裁切包装袋。

在色标传感器定位性能理想的条件下,冲孔器安装位置与工件坐标系零点距离精确等于袋长整数倍时,移刀伺服不需要误差补偿,切刀即可在原点位置单次裁切圆角包装袋。当相机与冲孔器安装距离精确等于一个袋长时,图像中角点在图像对称轴即参考位置 r 上,误差补偿为 0,切刀可在零点位置裁切包装袋。当相机与冲孔器安装位置距离不等于 1 个袋长,或冲孔器安装位置与工件坐标系零点距离不等于 1 个袋长时,且 r 为默认值为 320,则经过误差补偿后裁切的包装袋会出现毛刺,毛刺宽度一致。通过修改 r 值,可消除以上机械安装误差的影响,解决毛刺问题。

基于机器视觉的制袋机裁切定位工作流程见图 10。

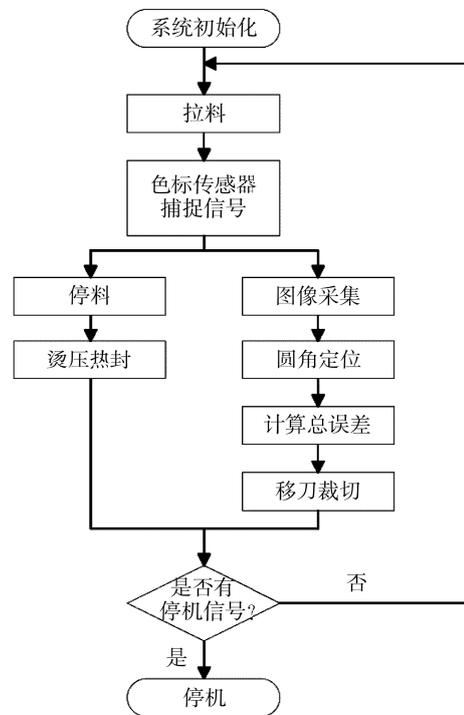


图10 视觉系统裁切定位工作流程
Fig.10 Work flow of cutting and location of machine vision system

4 测试分析

利用该研究提出的定位算法进行试验分析,将视觉系统安装在三边封制袋机上,对 8, 10, 14 mm 半径的圆角包装袋提取特征信息并定位裁切,定位输出图像见图 11。

传统制袋工艺生产的圆角包装袋产品中有毛刺的不合格品见图 12,采用该研究设计的基于机器视觉制袋工艺生产的圆角包装袋产品见图 13。

Shi-Tomasi 算法与该算法计算时间对比见表 2。其中 t_1 为采用 Shi-Tomasi 算法检测角点的运算时间,

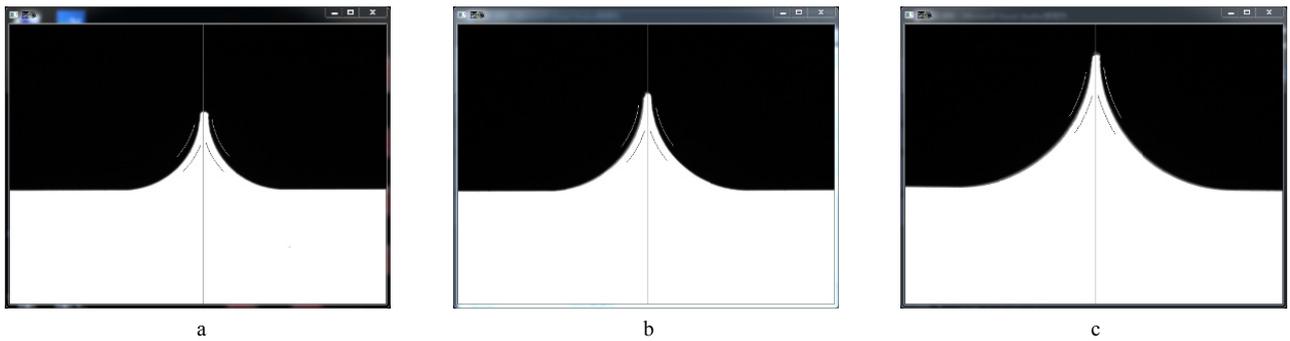


图 11 圆角定位输出图像
Fig.11 Output image of location of fillet



图 12 传统制袋工艺产品
Fig.12 Product of traditional bag making process



图 13 基于机器视觉制袋工艺产品
Fig.13 Product of bag making process based on machine vision

随圆角尺寸变大而小幅增长；该研究设计的定位算法计算时间对于角点坐标敏感。相较于 Shi-Tomasi 算法，该研究设计的定位算法可以更快地检测出角点，定位误差小于±0.02 像素点，即±0.079 脉冲。伺服系统脉冲当量为 10 μm，则定位误差小于±0.79 μm，定位精度较高。

表 3 3 种尺寸圆角包装袋定位数据
Tab.3 Data of location of three sizes of fillet packaging bag

实验次数	R=8	R=10	R=14
1	318.226 563	321.242 188	321.726 563
2	318.218 750	321.203 125	321.742 188
3	318.234 375	321.226 563	321.734 375
4	318.242 188	321.242 188	321.750 000
5	318.250 000	321.210 938	321.757 813

5 结语

设计了一种基于机器视觉的制袋机裁切定位系统，阐述了系统设计的整体方案以及硬件、软件的实现。在调试阶段，系统采用 Shi-Tomasi 算法检测角点，提取圆角轮廓特征。在生产阶段，系统采用遍历特征匹配算法对角点精确定位，伺服系统执行切刀单切工艺。视觉系统定位精度高，有效地解决了包装袋外观的毛刺问题、传统工艺产生的机械损耗、结构冗余等问题，满足工业生产的需求，实际应用价值较大。

表 2 Shi-Tomasi 算法与该算法检测角点计算时间对比
Tab.2 Comparison of computing time of detecting corner of Shi-Tomasi algorithm and the proposed algorithm

圆角半径/mm	t ₁ /ms	t ₂ /ms
8	181.170 489	15.340 238 4
10	182.551 944	9.104 174 1
14	186.146 469	2.495 797 9

t₂ 为采用该研究提出的定位算法检测角点的运算时间。该算法角点定位实验数据见表 3。结果表明，对于此应用场景，Shi-Tomasi 算法检测角点的计算时间

参考文献：

[1] 毕楚瑜, 薛伟. 制袋机系统的伺服控制[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(1): 71—73.
BI Chu-yu, XUE Wei. Servo System of Bag Making Machine[J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(1): 71—73.

[2] 王文静, 辛洪兵, 刘振宝. 在包装流水线中边缘检测算法的比较[J]. 包装工程, 2006, 27(3): 94—96.
WANG Wen-jing, XIN Hong-bing, LIU Zhen-bao. Comparison of Edge Detection Algorithms for Pack-

- aging Line[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(3): 94—96.
- [3] 王保升, 左健民. 基于数字图像处理的卷筒包装材料自动纠偏[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 16—18.
WANG Bao-sheng, ZUO Jian-min. Automatic Rectification of Rewinding Packaging Material Based on Digital Image Processing[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(3): 16—18.
- [4] 曹飞, 熊和金. 基于 DSP 的纱线张力检测系统[J]. 电脑编程技巧与维护, 2008(10): 71—14.
CAO Fei, XIONG He-jin. The Tension Measurement System of Yarn Based on DSP[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2008(10): 71—14.
- [5] 彭珍瑞, 董海棠, 殷红, 等. 新型纸纱复合制袋机控制系统的研制[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(6): 90—92.
PENG Zhen-rui, DONG Hai-tang, YIN Hong, et al. Research and Fabrication of Control System of New Paper and Yarn Compounding Bag-making Machine[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2011, 30(6): 90—92.
- [6] 彭泽光, 彭杭, 辛少荣, 等. 全自动多功能多制式制袋机的创新与研究[J]. 中国包装工业, 2012(2): 58—59.
PENG Ze-guang, PENG Hang, XIN Shao-rong, et al. Innovation and Research of Automatic Multi-functional Multi-standard Bag Making Machine[J]. China Packaging Industry, 2012(2): 58—59.
- [7] ZHANG Z Y. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330—1334.
- [8] ZHANG Z. Camera Calibration with One-dimensional Objects[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 2004, 26(7): 892—899.
- [9] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43—55.
QIU Mao-lin, MA Song-de, LI Yi. Overview of Camera Calibration for computer Vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43—55.
- [10] FAN Fang, WANG Zhen-wei, LIU Shuang-yin. 3D Reconstruction of Weak Texture Surface Based on Binocular Vision[C]// Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology. Shenzhen: Atlantis Press, 2016: 125—128.
- [11] 孙少红, 袁华, 张彤. 常用的亚像素边缘检测方法的对比研究[J]. 大众科技, 2014, 16(4): 27—29.
SUN Shao-hong, YUAN Hua, ZHANG Tong. Comparative Study on the Methods of Common Sub-pixel Edge Detection[J]. Popular Science & Technology, 2014, 16(4): 27—29.
- [12] IRAKAWA K H, PARKS T W. Image Denoising Using Total Least Squares[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2006, 15(9): 2730—2742.
- [13] 王怡萱, 阚江明, 张俊梅, 等. 基于 VC++的植物种类模式识别系统研究[J]. 湖南农业科学, 2011(23): 131—135.
WANG Yi-xuan, KAN Jiang-ming, ZHANG Jun-mei, et al. Pattern Recognition System for Plant Species Based on VC++[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(23): 131—135.
- [14] 章毓晋. 基于内容的视觉信息检索[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
ZHANG Yu-jin. Visual Information Retrieval Based on Content[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] 宁丽, 林意. 基于几何形状的点集聚类[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(10): 2613—2615.
NING Li, LIN Yi. Point-set Clustering Based on Geometry-figure[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(10): 2613—2615.