

doi: 10.7690/bgzd.2021.04.009

基于工业机器人系统的杏果分拣产线

党 淼, 王 娜

(河南工业职业技术学院机电自动化学院, 河南 南阳 473000)

摘要: 为解决杏果分拣过程中因果实体积小而拾取难度大的问题, 提出一种基于工业机器人的分拣系统。根据单目视觉的固定视觉系统工作原理, 建立视觉采集平台, 结合相机的内部和外部参数变换公式, 通过标定算法优化, 分别对相机安装误差和相机成像畸变进行修正, 在原有步进电机的基础上加入专家 PID 控制系统, 并通过机器人轨迹规划实验进行验证。验证结果表明: 该系统杏果拾取率达到 99.1%, 满足产线需要。

关键词: 工业机器人; 视觉标定; 专家 PID 控制

中图分类号: TP242.2 **文献标志码:** A

Apricot Fruit Sorting Production Line Based on Industrial Robot System

Dang Miao, Wang Na

(Department of Electromechanical Automation, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China)

Abstract: A sorting system based on industrial robot is proposed for the small size and difficulty in picking during apricot fruit sorting. According to the fixed vision system working principle of monocular vision, establish vision collection platform, combine interior and exterior parameter transformation formula, correct camera installation error and camera imaging distortion by calibration algorithm optimization. The expert PID control system is added on the basis of the original conveyor belt stepper motor. Verify it by robot trajectory planning test. The verification results show that the picking rate of apricots in this system reached 99.1%, meeting the needs of the production line.

Keywords: industrial robot; visual calibration; expert PID control

0 引言

在我国农业领域, 人工智能在果实采摘、产品分类、外形识别等方面被广泛应用。尤其在 2010—2020 这 10 年之间, 在机器视觉和工业机器人技术飞速发展的基础上, 推广了智能采摘机器人、农药喷洒机器人和果实动态分拣系统等人工智能系统^[1], 渗透了农业的生产、采摘、运输和处理等领域, 在一定程度上解放劳动力, 提高了生产效率^[2]。

水果产业是种植业中的第三大产业。该产业的特点是劳动力使用量大, 科技相关程度高, 在国际上具有较高的影响力和竞争力, 是我国对外贸易的优势产业之一^[3]。在水果产业中, 水果质量好坏以及采摘后的处理包装运输直接决定了其在市场中的销售水平^[4]。影响我国水果在国际上销售水平的主要原因是采摘后的处理包装以及运输技术的落后。处理被采摘水果的加工工序包括运输、清理、上蜡、干燥和分拣等, 除了分拣工序外, 其他工序的技术通常是流水线操作, 易于实现^[5]; 因此, 实现水果处理技术的关键在于解决水果的分拣技术。笔者以基于机器视觉的工业机器人系统为研究对象, 将工

业机器人技术与视觉识别技术应用于杏果分拣生产线中。

1 系统总体方案设计

1.1 工业机器人分拣系统设计

系统的任务是在 2 维平面上的视觉识别、定位、取放操作, 并且工业机器人需要根据传送带的实时运动状态, 随动完成作业; 因此, 笔者采用基于单目视觉的固定视觉系统(eye-to-hand)。系统工作流程为: 相机采集图像, 将采集的图像信息发送给图像处理处理器进行图像处理, 图像处理后将数据发送给上位机, 上位机将物料坐标、分拣种类传输给机器人, 确认机器人收到坐标后, 反馈给图像处理器, 并发送抓取信号, 令工业机器人进行抓取。工业机器人视觉分拣系统整体结构设计如图 1 所示。

系统工业机器人使用江苏汇博 HR20-1700-C10 型机器人, 机器人控制器为 KABA 公司 KeMotion r5000 系列的 CP252/X CPU 模块。视觉采集器使用飞凌公司 ARM11 架构的 S3C6410 处理器, 选用基于 Linux 的 Fedora9.0 操作系统。

收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-01-24

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(20B470003)

作者简介: 党 淼(1990—), 男, 河南人, 硕士, 助教, 从事工业机器人技术研究。E-mail: partycat@126.com。

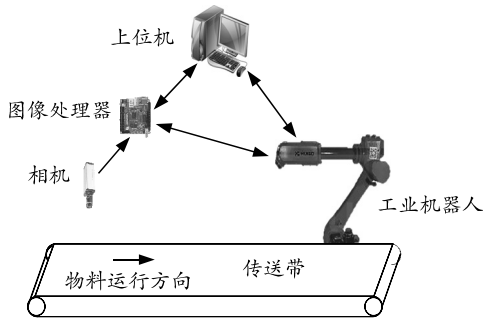


图 1 工业机器人视觉分拣系统整体结构

1.2 视觉采集平台建立

视觉采集平台的主要功能包括：图像采集与处理、坐标计算、与上位机通信、与机器人和位置传感器通信等。

将基于 Linux 的 Fedora9.0 操作系统移植入图像处理器中，建立完整的系统调用接口、各类子系统和底层驱动程序。在 Fedora9.0 内核的基础上，应用程序主要通过 Linux 系统库和 OpenCV 库等库函数实现对硬件设备的调用。系统中应用程序功能相对简单，仅对实时传输的性能有所要求；因此，可以简化为上位机通信、端口的输入/输出和图像采集等 4 个主要的应用程序。图像处理模块结构体系如图 2 所示。

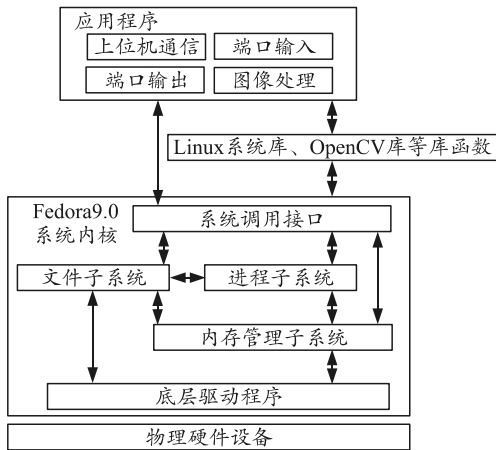


图 2 工业机器人视觉采集平台整体结构

2 工业机器人视觉标定

2.1 相机视觉标定算法实现

相机可以抽象为最简单的形式：小孔和成像平面。在成像平面和实际立体场景之间有小孔，来自现实世界的光，只能通过小孔到达成像平面；因此，在成像平面和通过小孔看到的实际立体场景之间存在对应关系，即图像中的平面图像点与实际立体世界中的立体点之间存在恒定的变换关系。小孔模型如图 3 所示。

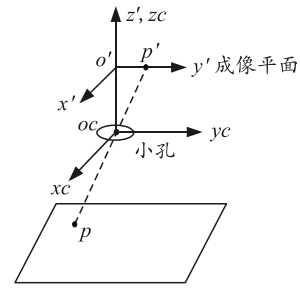


图 3 小孔成像模型

首先建立相机坐标系(3 维坐标系)，该坐标系建立在相机镜头(小孔)上，以焦点(相机的中心)oc 为原点和坐标轴 xc、yc、zc，组成了相机坐标系。接下来建立图像坐标系(2 维坐标系)，该坐标系建立在相机内成像平面上，以成像平面的中心 o' 为原点和坐标轴 x'、y'、z' 组成了图像坐标系。

综合相机的内部和外部参数变换公式，可得相机像素坐标系向世界坐标系变换公式

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & cx \\ 0 & f_y & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

对上式的矩阵进行化简。首先对旋转矩阵 \mathbf{R} 进行化简，可以分解为绕着世界坐标系 X_w 、 Y_w 、 Z_w 3 个坐标轴的旋转矩阵 \mathbf{R}_1 、 \mathbf{R}_2 、 \mathbf{R}_3

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a & \sin a \\ 0 & -\sin a & \cos a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos b & 0 & -\sin b \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin b & 0 & \cos b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos c & \sin c & 0 \\ -\sin c & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 a 、 b 、 c 分别为绕着世界坐标系 X_w 、 Y_w 、 Z_w 3 个坐标轴的旋转角度。

如图 4 所示，在系统中，世界坐标系与相机坐标系之间旋转关系为 X_w 、 Y_w 方向无旋转， Z_w 根据右手定则可得，旋转了 c° 。

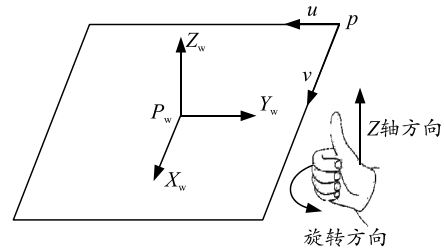


图 4 世界坐标系与像素坐标系之间的旋转关系

将旋转参数 $a=0^\circ$ 、 $b=0^\circ$ 、 $c=c^\circ$ 代入旋转矩阵可得

$$R=R_1R_2R_3=\begin{bmatrix} \cos c & \sin c & 0 \\ -\sin c & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据上式，将式(1)的坐标变换矩阵化简为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & cx \\ 0 & f_y & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos c & \sin c & 0 & t_x \\ -\sin c & \cos c & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos c \times f_x & \sin c \times f_x & cx & t_x \times f_x + t_z \times cx \\ -\sin c \times f_y & \cos c \times f_y & cy & t_y \times f_y + t_z \times cy \\ 0 & 0 & 1 & t_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $f_x = \alpha \cdot f$, $f_y = \beta \cdot f$ 。且此处 $\alpha = 1/dx$, $\beta = 1/dy$, dx 、 dy 分别为单位像素在 u 、 v 轴上的长度。

在系统中，杏果的平均高度约为 50 mm，故可以将 Z_w 轴方向上的变量作为一个固定参数 $Z=50$ mm 单独输入，并只计算 X_w 、 Y_w 方向上的变量；因此，式(1)的坐标变换公式可以化简为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos c \times f_x & \sin c \times f_x & t_x \times f_x + t_z \times cx \\ -\sin c \times f_y & \cos c \times f_y & t_y \times f_y + t_z \times cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

令式中 $k_1 = t_x \times f_x + t_z \times cx$, $k_2 = t_y \times f_y + t_z \times cy$ ，则公式可再次化简为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos c \times f_x & \sin c \times f_x & k_1 \\ -\sin c \times f_y & \cos c \times f_y & k_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

综上可得，坐标变换求取的参数为 f_x , f_y , k_1 , k_2 和 z 轴方向旋转角度 5 个参数。

2.2 相机视觉标定测试

测试使用标准 200 mm×200 mm 标定板，精度为 ±0.01 mm，圆点为 7×7 矩阵，圆心与圆心之间距离 25 mm，两圆间距 12.5 mm。标定板图样如图 5 所示。

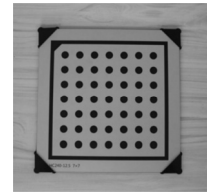


图 5 标定板图样

为了验证精度，重新准备标定纸，将纸上标定图样换成十字，用于结果的验证。标定实验如图 6 所示。

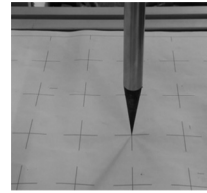


图 6 标定实验

现取 10 组数据进行验证对比，结果如表 1 所示。

表 1 标定结果

k	u_k	v_k	X_{wk}/mm	Y_{wk}/mm	X_k/mm	Y_k/mm	$X_{\text{误差}}/\text{mm}$	$Y_{\text{误差}}/\text{mm}$
1	405	1 534	846.64	-72.41	846.33	-72.70	0.31	0.29
2	812	1 330	1 050.14	-161.56	1 049.55	-161.99	0.59	0.43
3	984	1 124	1 125.42	-251.58	1 125.49	-251.29	-0.07	-0.29
4	989	918	1 127.61	-341.60	1 127.93	-341.63	-0.32	0.03
5	993	714	1 129.36	-430.75	1 129.01	-431.25	0.35	0.50
6	998	510	1 131.55	-519.90	1 131.40	-520.13	0.15	0.23
7	1 002	307	1 133.30	-608.61	1 133.64	-608.28	-0.34	-0.33
8	1 005	307	1 134.61	-608.51	1 134.92	-608.37	-0.31	-0.14
9	1 011	105	1 137.24	-696.88	1 137.37	-697.49	-0.13	0.61
10	1 016	99	1 139.43	-699.50	1 139.51	-700.02	-0.08	0.52

从表中可以看出： X 方向最大的误差为 0.59 mm， Y 方向最大的误差为 0.61 mm，误差超出预期。经分析，误差主要来自于镜头的畸变和失真，以及相机固定的垂直度；因此，需要进行相机误差修正。

2.3 相机误差修正

2.3.1 相机安装误差修正

由于相机在安装时无法避免的相对于传送带具

有一定的偏转角，使得 Z_w 、 Z_c 2 个轴并不是平行关系，而是产生了一定的夹角。笔者假设传送带上是一个圆形工件，会被识别成为椭圆形工件。成像效果如图 7 所示。

$$\left. \begin{aligned} & \text{用椭圆拟合算法将该工件拟合出椭圆方程}^{[6]} \text{为} \\ & F(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + 1 = 0 \\ & G(a, b, c, d, e) = \sum_{i=1}^n (ax_i^2 + bxy_i + cy_i^2 + dx_i + ey_i + 1)^2 \\ & \partial G / \partial a = \partial G / \partial b = \partial G / \partial c = \partial G / \partial d = \partial G / \partial e = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

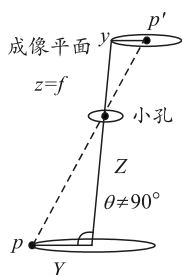


图 7 安装误差成像效果 (Y-Z 平面)

整理上述方程，椭圆圆心在相机下成像的坐标^[7]为

$$\begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \end{bmatrix} = \frac{L}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + f}} \begin{bmatrix} X_{c0} \\ Y_{c0} \\ Z_{c0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中：L 为椭圆 2 焦点距离；(x₀,y₀)为椭圆圆心坐标点。

2.3.2 相机畸变修正

相机畸变造成的失真有径向畸变和切向畸变。失真类型如图 8 所示。

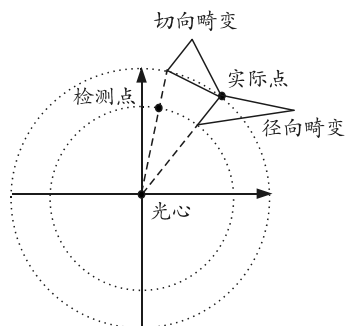


图 8 径向失真和切向失真效果

由图可知：切向畸变即为旋转角度的变化，一般旋转角很小，并且造成原因是镜头安装不准确；

因此，本算法将其忽略。故径向畸变成为主要的失真方式。假设检测点坐标为 (x, y)，实际点坐标为 (¹x, ¹y)，光心距离分别为 r, ¹r，像素坐标为 (u, v)、(¹u, ¹v)，光心坐标为 (u₀, v₀)。根据张氏标定法可得

$$\begin{cases} {}^1x = x + x(q_1r^2 + q_2r^4) \\ {}^1y = y + y(q_1r^2 + q_2r^4) \end{cases} \quad (9)$$

其中 q₁、q₂ 为畸变系数，并且可得像素坐标系等价方程为

$$\begin{bmatrix} {}^1u - u_0 \\ {}^1v - v_0 \end{bmatrix} = (1 + q_1r^2 + q_2r^4) \begin{bmatrix} u - u_0 \\ v - v_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

令 F(r) = (1 + q₁r² + q₂r⁴)，整合式(10)后为

$$\begin{bmatrix} {}^1u \\ {}^1v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(r) & 0 & u_0(1-F(r)) \\ 0 & F(r) & v_0(1-F(r)) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

综上所述，整体坐标变换公式可改写为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{L}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + f}} \begin{bmatrix} F(r) & 0 & u_0(1-F(r)) \\ 0 & F(r) & v_0(1-F(r)) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos c \times f_x & \sin c \times f_x & k_1 \\ -\sin c \times f_y & \cos c \times f_y & k_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.4 相机视觉标定验证

如表 2 所示，取 10 组数据进行验证对比。从表中可以看出：X 方向最大的误差为 0.34 mm，Y 方向最大的误差为 0.33 mm，对比原先数据 X 方向最大的误差为 0.59 mm，Y 方向最大的误差为 0.61 mm，提高了精确度，符合分拣要求。

表 2 标定结果

k	u _k	v _k	X _{wk} /mm	Y _{wk} /mm	X _k /mm	Y _k /mm	X 误差/mm	Y 误差/mm
1	405	1 534	846.44	-72.51	846.33	-72.70	0.11	0.19
2	812	1 330	1 050.14	-161.76	1 049.95	-161.99	0.19	0.23
3	984	1 124	1 125.42	-251.48	1 125.49	-251.29	-0.07	-0.19
4	989	918	1 127.61	-341.60	1 127.93	-341.63	-0.32	0.03
5	993	714	1 129.26	-430.95	1 129.01	-431.35	0.25	0.40
6	998	510	1 131.55	-519.90	1 131.30	-520.13	0.25	0.23
7	1 002	307	1 133.30	-608.61	1 133.64	-608.28	-0.34	-0.33
8	1 005	307	1 134.61	-608.51	1 134.92	-608.26	-0.31	-0.25
9	1 011	105	1 137.24	-696.88	1 137.37	-697.09	-0.13	0.21
10	1 016	99	1 139.43	-699.80	1 139.51	-700.02	-0.08	0.22

3 传送带控制设计

在动态分拣过程中，传送带运行精度也会对最终的机器人分拣精度造成影响。分析传送带系统现状可得，传送带速度的精确控制主要取决于步进电机控制的精确度；因此，研究步进电机精确控制是

实现杏果动态分拣的重要环节之一。

控制步进电机的常用方式有开环控制和闭环控制 2 种。步进电机的开环控制系统简单，仅对步进电机输入脉冲使用了步进驱动器进行控制，没有加入步进电机的运动反馈；因此，在输入脉冲的过程

中会造成过冲、震荡或者失步的问题^[8], 控制精度不高, 无法在动态分拣系统中使用; 步进电机的闭环控制系统加入对步进电机转速或者传送带位置等参数检测并反馈的环节, 能将反馈信息处理后实时改变驱动脉冲从而实现精确控制。综上所述, 步进电机系统选用闭环控制方式进行搭建。

3.1 传送带电机数学模型建立

系统中使用 86BYGH280-4504A 型两相混合式步进电机, 在 PID 控制中通过改变电流环进行控制调节, 首先对步进电机的 A、B 相电动势建立数学模型

$$\left. \begin{aligned} E_A &= K\omega \sin(Z\theta) \\ E_B &= K\omega \sin(Z\theta - \pi) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中: K 为电机的固有属性常数; ω 为角速度; Z 为齿数; θ 为旋转角度。

在忽略高次谐波的情况下, 根据基尔霍夫定律将式(13)代入可得 A、B 相电压为:

$$\left. \begin{aligned} U_A &= L \frac{dI_A}{dt} + L_M \frac{dI_B}{dt} + RI_A - K\omega \sin(Z\theta) \\ U_B &= L \frac{dI_B}{dt} + L_M \frac{dI_A}{dt} + RI_B - K\omega \sin(Z\theta - \pi) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中: L 为两相的自感值; L_M 为两相的互感值; R 为两相内阻; I_A 、 I_B 为流过各相电流。

假设步进电机扭矩不随负载变化, 根据式(14)可得电机运动学方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_R = KI_A \sin(Z\theta) + KI_B \sin(Z\theta - \pi) \quad (15)$$

其中: J 为转动惯量; D 为阻尼常量; T_R 为负载转矩。

令步进电机理论转动角度为 θ_1 , 实际转动角度为 θ_s , 可得传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_s(s)}{\theta_1(s)} \quad (16)$$

假设步进电机为单向励磁的空载状态^[9], 且 $\theta \approx 0^\circ$ 时 $\sin \theta \approx \theta$, 转子在平衡位置即 $\omega=0$ 时, 由式(14)、式(15)可得

$$J \frac{d^2\theta_s}{dt^2} + D \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{Z^2 LI_A^2}{2} (\theta_s - \theta_1) = 0 \quad (17)$$

整理式(16), 将 86BYGH280-4504A 型两相步进电机实际参数代入可得传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_s(s)}{\theta_1(s)} = \frac{Z^2 LI_A^2}{2Js^2 + 2Ds + Z^2 LI_A^2} = \frac{22}{s^2 + 0.18s + 22} \quad (18)$$

3.2 传送带 PID 模型建立及测试

PID 控制以其适用范围广、便于搭建和调试的特点, 适用于大部分的控制对象, 而对于存在非线性、时变、干扰等问题的系统, 可以加入诸如遗传算法、神经网络算法、模拟退火算法、专家 PID 控制算法等^[10-11]。

在动态分拣系统中, 传送带要求控制精度高且系统简单, 但遗传算法庞大的计算量会占用大量系统资源, 神经网络算法调试训练周期较长, 模拟退火算法实时性差, 而专家 PID 控制算法很好地避免了前面 3 个算法的缺点; 因此, 选用专家 PID 控制算法搭建步进电机的数学模型^[12]。专家 PID 控制器是在基本的 PID 控制环节上加入参数组模块和控制规则模块搭建而成^[13], 针对不同的情况, 基本 PID 控制环节调用不同的参数和控制规则对步进电机进行控制。专家 PID 控制结构如图 9 所示。

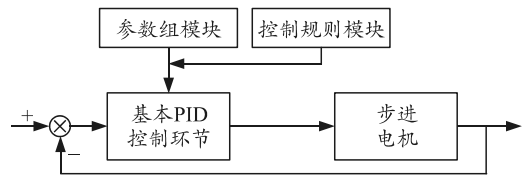


图 9 专家 PID 控制结构

假设步进电机实际转速与理论转速之间的误差为 $e(k)$, 误差变化率为 $\Delta e(k)$ 。设定最大误差 E_{\max} 、最小误差 E_{\min} 、平均误差 E_{eq} 3 个阈值参数。根据步进电机的具体情况, 设定专家 PID 控制规则如下:

1) 绝对误差 $|e(k)|$ 大于最大误差 E_{\max} 时。

该情况出现时, 说明绝对误差 $|e(k)|$ 无论如何变化, PID 控制系统都应该快速调整输出, 使得误差 $e(k)$ 迅速变小。在这种情况下使用开环控制即可^[14]。

2) 绝对误差 $|e(k)|$ 增大时。

绝对误差增大, 则意味着 $e(k) \cdot |e(k)| > 0$ 。当绝对误差 $|e(k)|$ 大于平均误差 E_{eq} 时, 说明误差较大, 需要降低误差, 故 PID 控制系统输出^[15]为:

$$u(k) = u(k-1) + k_1 \{k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]\} \quad (19)$$

其中 k_1 为增益放大系数。当绝对误差 $|e(k)|$ 小于平均误差 E_{eq} 时, 说明存在一定误差, 只需要使用基本 PID 控制策略即可, 故 PID 控制系统输出为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (20)$$

3) 当绝对误差 $|e(k)|$ 等于零时。

此时误差 $e(k)$ 等于零, 或者 $\Delta e(k) \cdot \Delta e(k-1) < 0$ 时, 输出恒定, PID 控制系统输出保持不变。

4) 误差 $e(k)$ 处于极值状态时。

此时绝对误差 $|e(k)|$ 数值很大, 加入增益放大系数 k_1 , 加强控制策略:

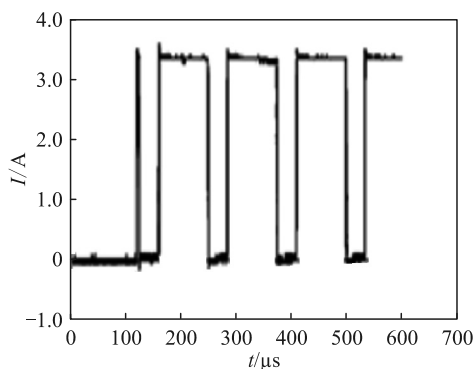
$$u(k) = u(k-1) + k_1 k_p e(k)。 \quad (21)$$

5) 绝对误差 $|e(k)|$ 小于最小误差 E_{\min} 时。

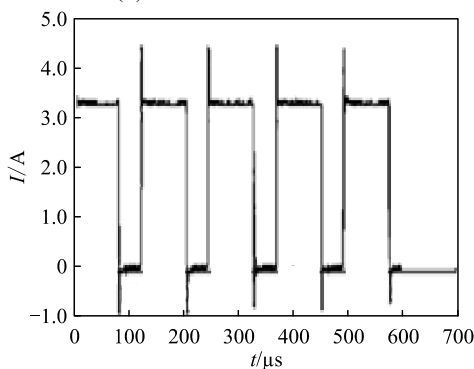
此时绝对误差 $|e(k)|$ 数值很小, 加入抑制减弱系数 k_2 , 削弱控制策略:

$$u(k) = u(k-1) + k_2 k_p e(k)。 \quad (22)$$

使用示波器对步进电机的性能进行测试, 可以看到: 在加入专家 PID 控制之前, 运行时会产生偶尔的丢步现象, 尤其在启动时最为明显; 而在加入专家 PID 控制之后, 丢步现象消失。步进电机脉冲波形前后对比如图 10 所示。



(a) 加入专家 PID 之前

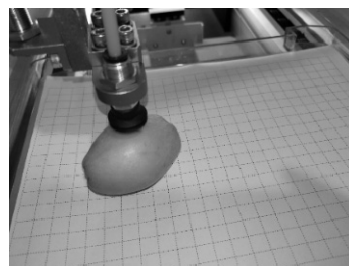


(b) 加入专家 PID 之后

图 10 步进电机脉冲波形前后对比

4 机器人轨迹规划实验与分析

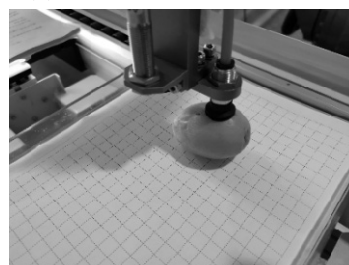
在系统优化之前, 需要在有标定纸的托盘上测试在每一种速度下, 吸取工件时工装离工件中心点的距离, 其中滞后抓取距离记为“+”, 超前抓取距离记为“-”。不同速度情况下的动态抓取效果如图 11 所示, 测量结果如表 3 所示。



(a) 速度 100 mm/s 吸取情况



(b) 速度 120 mm/s 吸取情况



(c) 速度 140 mm/s 吸取情况

图 11 不同速度情况下的动态抓取效果

表 3 传送带速度与偏移值 mm

编号	v/(mm/s)		
	100	120	140
1	+0.60	+0.75	+0.95
2	+0.42	+0.74	+0.93
3	+0.48	+0.68	+0.82
4	+0.54	+0.69	+0.89
5	+0.55	+0.71	+0.84
6	+0.49	+0.64	+0.91
平均偏移量	+0.513	+0.701	+0.89

从表可知: 全部为滞后吸取, 并且速度越快, 滞后吸取的距离越远。其中: 100 mm/s 平均偏移量约 0.513 mm; 120 mm/s 平均偏移量约 0.701 mm; 140 mm/s 平均偏移量约 0.890 mm, 拾取率仅有 93.4%。

4.1 补偿策略

经过以上分析和计算, 发现吸取误差的 2 个显著特点: 1) 都为滞后吸取; 2) 传送带速度越快, 吸取精度越差。

经过总结分析可知, 误差的产生是由于设备响应时间以及脉冲的计数误差造成。设备的响应时间是由 PLC 时钟以及各设备响应、机器人伺服电机响应加速时间等情况所决定, 传送带不同速度响应的

平均延迟时间为：100 mm/s 约 0.005 13 s，120 mm/s 约 0.005 84 s，140 mm/s 约 0.006 35 s。

一部分误差为响应的延迟时间，响应时间延迟使用数学逼近法可以得到，即将传送带速度降到接近于 0，根据滞后的距离计算延迟时间，该时间经测量为 0.004 22 s。

另一部分误差为脉冲计数出现的误差，产生原因是因为脉冲当量精度不高，以及脉冲不足一周周期被当作一周周期处理。此处误差与速度变化有关，因此根据数据进行计算，得到该系数为 1.12。脉冲误差原理如图 12 所示。

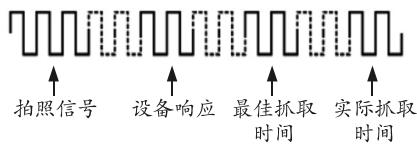


图 12 脉冲误差原理

基于以上测算，将等待的脉冲数量 N 公式修改为

$$N = \frac{s}{d} = \frac{(140 - v_0) \times t - v_0 \times (0.004\ 22 + v_0 \times 1.12)}{d} \quad (23)$$

4.2 优化结果

在系统优化之后，再次测试在每一种速度下，吸取工件时工装离工件中心点的距离，其中滞后抓取距离记为“+”，超前抓取距离记为“-”。测试结果如表 4 所示。

表 4 传送带速度与偏移值 mm

编号	v/(mm/s)		
	100	120	140
1	+0.10	+0.05	-0.15
2	+0.12	+0.04	-0.03
3	+0.18	-0.18	-0.12
4	+0.04	-0.09	+0.19
5	+0.05	+0.11	-0.04
6	+0.19	+0.14	-0.11
平均偏移量	+0.115	+0.012	-0.043

从上表可知：全部为滞后吸取，并且速度越快，滞后吸取的距离越远。其中：100 mm/s 平均偏移量约+0.115 mm，120 mm/s 平均偏移量约+0.012 mm，140 mm/s 平均偏移量约-0.043 mm。如图 13 所示，将经过补偿策略后的结果与补偿前的结果进行比较，其中实线为补偿后各个速度的位置，虚线为各个速度的原始位置。

经过补偿发现：误差接近于 0 mm 附近，但是出现了 120, 140 mm/s 超前误差，但总体都在 0.2 mm 范围以内，拾取率达到 99.1%。经分析，该误差产生的原因很大程度上是气动吸盘吸取的误差，不可

避免。

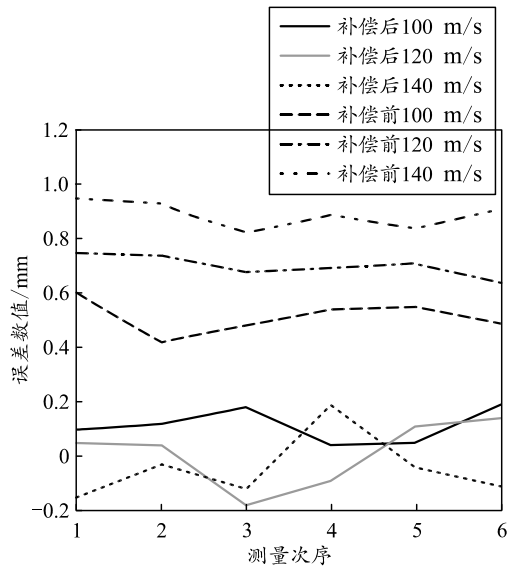


图 13 补偿前后对比测量

5 结论

笔者针对杏果体积小、分拣精度低的难点，对工业机器人系统进行视觉系统标定误差修正和传送带步进电机专家 PID 控制改造。验证结果表明：将系统拾取率最终提高到 99.1%，能够很好地满足实际生产要求。

参考文献：

- [1] 吕之谓. 人工智能在计算机网络技术中的应用研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(3): 73-75.
- [2] 蔡自兴. 中国人工智能 40 年[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 12-32.
- [3] 王玉柱. 我国林果产业发展形势与未来趋势[J]. 中国农村科技, 2015(2): 34-35.
- [4] 李梅. 水果分拣技术的研究现状与发展[J]. 江苏理工学院学报, 2018, 24(2): 121-124.
- [5] 刘明涛, 刘亚, 郭俊先. 水果无损检测技术的研究与应用[J]. 农业科技与装备, 2017(6): 51-55.
- [6] 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008(3): 295-298.
- [7] 梅江平, 王浩, 张舵, 等. 基于单目视觉的高速并联机器人动态目标跟踪算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(2): 138-146.
- [8] 吴恩来. 以 PID 算法为基础的步进电机位置控制探究[J]. 自动化应用, 2019(2): 5-6, 19.
- [9] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. 步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(1): 37-42, 52.