

基于线阵相机的巧克力棒上料系统设计

Design of chocolate Bar feeding system based on linear array camera

郑晨旭 李 亚

ZHENG Chen-xu LI Ya

(天津科技大学天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

(Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-Line Monitoring For Light Industry & Food Machinery and Equipment Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

摘要:设计了一套基于线阵相机的巧克力棒自动上料系统。针对线阵相机难以进行手眼标定的问题,提出了通过传送带实现动态扫描成像的手眼标定方法;对采集到的图像进行预处理后,使用模板匹配识别目标,对追踪轨迹进行优化后发送给机器人实施抓取摆放。试验结果表明,机器人抓取误差 <0.5 mm,上料速度满足需求,且具有良好的适用性和扩展性。

关键词:线阵相机;巧克力棒;上料系统;手眼标定;模板匹配

Abstract: A set of automatic feeding system of chocolate bar based on line array camera was designed. Design and select hardware system according to functional requirements; Aiming at the difficulty of hand-eye calibration for linear array cameras, a hand-eye calibration method for dynamic scanning imaging was proposed. After preprocessing the collected images, the template matching was used to identify the target, and the tracking trajectory was optimized and then sent to the robot to grasp and place. The experimental results showed that the grasping error of the robot was less than 0.5 mm, and the feeding speed met the requirements. The system had good applicability and expansibility, which provided ideas for the application of machine vision in food production industry.

Keywords: linear array camera; chocolate handle; feeding system; hand-eye calibration; template matching

为迎合市场需求,以巧克力为核心的产品也走向了多元化,其中带有塑料手柄的巧克力棒产品以其新颖的外形和干净卫生的食用体验受到市场青睐。由于其制作工艺需要在巧克力浇筑前将塑料手柄放入模具中,目前

传统的生产线主要依靠人力摆放,劳动力成本高,效率低下。少数企业采用自动化设备上料摆放,但由于巧克力塑料手柄外型的多样性与不规则性,上料错误率较高。近年来,机器视觉技术逐渐被应用于物体识别与引导机器人完成抓取^[1-2],海潮等^[3]提出了基于机器视觉的在线监测技术;邱素贞等^[4]设计了基于机器视觉的码垛机器人控制系统;杨新海^[5]提出了生产线目标同步抓取的方法。上述研究机器视觉均基于面阵相机,对线阵相机配合机器人抓取的系统研究不足。

相较于面阵相机,线阵相机检测精度更高,拍照速度更快,更适用于一维动态目标^[6]。试验拟以某巧克力生产线为例,结合现场实际需求,设计基于线阵相机的巧克力棒自动上料摆放系统。针对线阵相机难以进行手眼标定的问题,提出利用传动带运动扫描成像的手眼标定思路;为提高生产效率,设计多目标抓取的机器人末端手爪,优化追踪路线以提高追踪效率。

1 系统总体设计

通过对现场情况和实际需求的调研,明确系统需要满足以下几点要求:① 确保巧克力塑料手柄上料摆放准确率;② 与现场流水线节奏配合;③ 每盘模具(8个工位)完成时间 <10 s。根据以上要求对系统进行设计选型。

1.1 系统架构设计

系统采用模块化设计,系统架构如图 1 所示。振动給料盘将巧克力塑料手柄输送到传送带上,工业相机拍照获取图像通过 GigE 接口发送给上位工控机,上位机界面采用 QT 开发,经过特征检测和模板匹配原理获得巧克力塑料手柄实时位姿信息,通过 TCP 协议与下位机通讯,将结果发送给下位机机器人,驱动机器人进行追踪抓取,机器人对现场流水线情况判断后,最终摆放到模具中,系统工作流程如图 2 所示。

1.2 給料模块设计

給料模块由振动給料盘和传送带组成。由于振动给

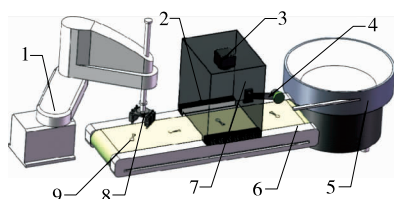
基金项目:天津市科技计划项目(编号:18ZXRHGX0020)

作者简介:郑晨旭,男,天津科技大学在读硕士研究生。

通信作者:李亚(1973—),男,天津科技大学教授,博士。

E-mail: tustly@tust.edu.cn

收稿日期:2020-12-28



1. SCARA 机器人 2. 条形光源 3. 工业相机 4. 编码器
5. 振动给料盘 6. 传送带 7. 暗箱 8. 四工位手爪 9. 目标

图 1 系统架构图

Figure 1 System architecture diagram

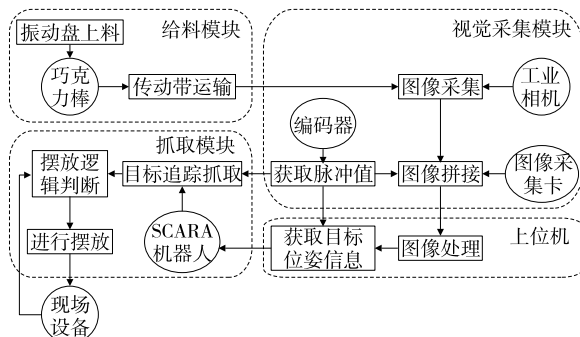


图 2 系统工作流程图

Figure 2 System work flow diagram

料盘可能出现上料速度不均的情况,为保证摆放质量,上料留有 30% 余量,设定振动给料盘出料速度为 90 个/min。线阵相机成像依赖物体与相机相对运动,成像质量与传送带速度有关,故传动带采用步进电机驱动,且电机驱动器采用专用电机控制 DSP 芯片和应用矢量型闭环控制技术以保证传动带运行速度的稳定性。为避免巧克力塑料手柄在传送带上发生堆叠,根据塑料手柄尺寸计算选定传送带速度为 1 m/s。

1.3 视觉采集模块设计与选型

视觉采集模块包括工业相机、光源、图像采集卡、编码器等硬件。线阵相机工作区域宽度设定为 300 mm,检测精度设定为 0.2 mm,相机与传送带距离约为 300 mm。根据条件选择 2K 分辨率线阵相机,型号为大恒公司的 LA-GC-02K05B-00-R,帧频为 26 kHz,镜头焦距选择为 16 mm,光源采用条形 LED 光源。当线阵相机图像拼接方向与传送带运行方向不同或相机采集频率与传送带速度不匹配时均会影响相机成像^[7],两种情况下拼接得到的标定板图像如图 3 和图 4 所示。

故相机在安装时需垂直传送带方向安装,使相机传感器 Y_c 轴与传送带运行方向一致。相机拍照通过传送带编码器进行外触发,为保证图像不被压缩,图片纵向分辨率与横向分辨率相等,可得:

$$P_x = P_y = \frac{V \times T}{V_c \times T_c}, \quad (1)$$

式中:

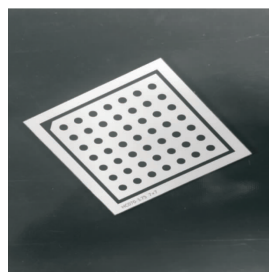


图 3 传送带速度与采集频率不符导致图像压缩

Figure 3 Image compression due to the inconsistency between the conveyor belt speed and the acquisition frequency

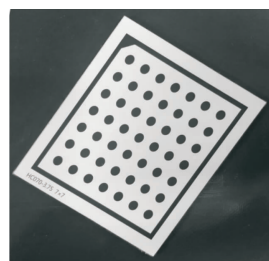


图 4 传送带与相机有夹角导致图像平移

Figure 4 Image translation due to the included angle between the conveyor belt and the camera

P_x, P_y ——图像横向、纵向分辨率, m/pix;

V ——传送带运行速度, m/s;

V_c ——相机拍照频率, Hz;

T, T_c ——扫描一帧图像传送带运行时间和相机拍照时间, s。

根据传送带实际运行速度与相机参数计算求得相机拍照频率。

1.4 抓取模块

抓取模块由 SCARA 机器人和机器人控制器组成。机器人手臂最大运动速度为 375°/s, 抓取与摆放时大臂角度间隔约为 90°, 由于每盘模具工位较多, 往返耗时较长, 故根据模具尺寸设计由 4 个气缸组成的气动手爪, 实现多个巧克力塑料手柄的抓取, 减少机器人往复次数, 提高上料效率。机器人控制器与现场 PLC 连接获取现场流水线运动状态。机器人抓取逻辑图如图 5 所示。

2 手眼标定

手眼标定是为了获得像素坐标系与机器人坐标系之间的转换关系, 使图像处理结果能够以机器人坐标系的形式发送给机器人, 通常的手眼标定都通过相机视野与机器人工作空间交集内的点来求得二者的映射关系, 由于线阵相机获得的是一维图像, 无法获得与机器人末端交集的特征点, 故提出一种利用传动带运动扫描成像进行线阵相机与机器人的手眼标定方法。设定传送带所在平面为基准平面, 以传送带运动方向为图像坐标系 Y_i 轴

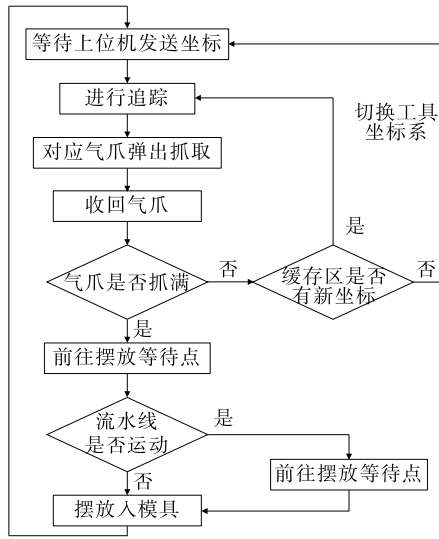


图5 抓取逻辑图

Figure 5 Grab logic diagram

方向,通过传送带使标定板与相机产生相对运动进行标定,建立手眼标定模型,如图6所示。

2.1 相机标定

镜头在制造过程中的精度误差会使直线投影发生偏移产生畸变^[8-9],由于线阵相机畸变较面阵相机更小,且目标集中在图像中间区域,可忽略相机畸变带来的影响。可以将线阵相机看作是面阵相机图像中的一列,根据相机成像原理建立像素坐标系(UOV)、图像坐标系($X_iO_iY_i$)、相机坐标系($X_cO_cY_c$)和世界坐标系($X_wO_wY_w$)的坐标关系,为方便理解计算,将图像坐标系倒立翻转投影至与相机坐标系同侧,如图7所示。

光源发出的光线照到巧克力塑料手柄上的点 P 后经过光心将图像投影到像平面上形成像点 P_i ,经过 CMOS 感光元件将光信号转化为电信号后形成一维图像,将一维图像按帧排列拼接得到二维图像。

图像坐标系原点 O_i 在像素坐标系中对应坐标为 $(u_0,$

$0)$,根据坐标关系 $u = u_0 + \frac{x_i}{dx_i}, v = S_{yi}y_i$,可得:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx_i} & 0 & u_0 \\ 0 & S_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

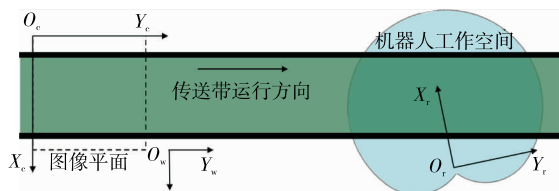


图6 手眼标定模型

Figure 6 Hand-eye calibration model

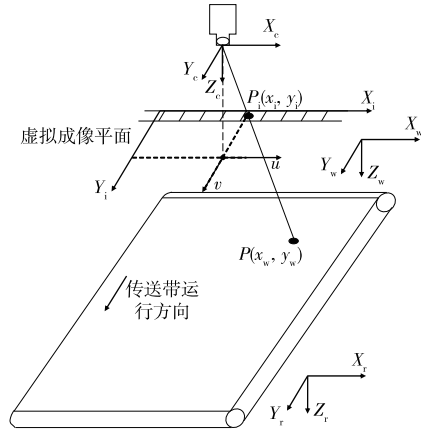


图7 成像原理与坐标系关系

Figure 7 Imaging principle and coordinate system relation

式中:

dx_i ——像素在 X_i 方向上物理尺寸;

S_{yi} ——缩放比例因子(由传送带运行速度和相机拍照频率获得)。

通过移动传送带使标定板与相机相对移动,获取每一帧图像后,对图像进行拼接得到标定板图像。光心到像平面距离为相机焦距 f ,此时 $x_i = f \frac{X_c}{Z_c}, y_i = S_{yc} \frac{X_c}{Z_c}$,可得:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{Z_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_{yc} S_{yi}}{Z_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:

S_{yc} ——比例因子;

Z_c ——光心到传送带平面的距离(忽略误差将其看作固定值),mm。

将传送带运动切向方向设定为 X_w 正方向,取图像中心点为世界坐标系原点 O_w ,安装时调整相机平面与传送带水平面平行,可得相机坐标系与世界坐标系的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中:

$r_{3 \times 3}$ ——矩阵旋转向量;

$t_{1 \times 3}$ ——矩阵平移向量。

合并得到像素坐标系到世界坐标系的转换矩阵:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx_i} & 0 & u_0 \\ 0 & S_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{f}{Z_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_{yc}S_{yi}}{Z_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

得到物像之间变换关系,通过移动标定板获取多组数据,根据待定系数法可求得相机内外参数。

2.2 相机和机器人标定

相机与机器人的标定本质是求相机坐标系(X_c, O_c, Y_c)与机器人坐标系(X_r, O_r, Y_r)的转换矩阵,而相机坐标系与世界坐标系的关系已在相机标定中得到结果,接下来求解世界坐标系与机器人坐标系之间的关系。通过传送带的运动将标定板送至机器人的工作区域内,拼接后得到二维图像,通过相机标定结果可得到图像中标定板每个点在世界坐标系坐标(x_{ci}, y_{ci}),依次将机器人末端指向标定板上每个点并记录其在机器人坐标系的坐标(x_{ri} ,

y_{ri})。由于机器人和传送带都在水平面上安装,将机器人坐标系与世界坐标系看作同一平面,根据标定板上的点分别在两个坐标系内的坐标可求得转换矩阵:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & T_x & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & T_y & 0 \\ 0 & 0 & T_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:

θ ——机器人与传送带间的夹角,rad;

T_x, T_y, T_z —— X_w, Y_w, Z_w 轴方向上的平移距离,mm。

整理得到手眼标定的转换结果:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & T_x & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & T_y & 0 \\ 0 & 0 & T_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{f}{Z_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{S_{yc}S_{yi}}{Z_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{dx_i} & 0 & u_0 \\ 0 & S_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 图像处理

图像处理的任务是为了定位巧克力塑料手柄的位姿信息,发送给机器人进行抓取。先对图像进行预处理消除图像噪声后,采用基于几何形状特征的模板匹配找到巧克力塑料手柄的位置与姿态。

3.1 图像预处理

工业相机采集的图像会因为光照、现场干扰等因素产生噪声^[10-11]。将 RGB 通道下的图像经过平均法获得灰度图像后,以式(8)为高斯低通滤波器对得到的灰度图像进行卷积,可以有效消除噪声干扰。

$$H(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

式中:

σ ——标准偏差。

标准偏差决定了滤波通带的宽度,取 σ^2 为 10,最后进行对比度增强突出目标轮廓。

3.2 模板匹配

模板匹配算法是通过创建图像模板,移动模板遍历整个图像,通过相似度函数判断后获取目标位置的一种算法^[12]。首先建立图像模板,通过 Canny 算子获取目标轮廓,由于巧克力塑料手柄是厚度相同的均匀目标,对塑料手柄轮廓坐标进行积分可以获得质心坐标^[13],以其质心与外接最小矩形短边方向为正方向,获取目标与像素

坐标夹角,对模板图像进行仿射变换得到角度为 0 的模板图像,如图 8 所示。

巧克力塑料手柄从振动给料盘传输到传送带上的位置和角度是随机的,所以需从模板图像的不同角度创建模板用来搜索不同位姿的目标。由于使用模板遍历原图像时,每个位置都会产生一个 ROI 图像,完全遍历原图像耗时较长,故采用基于图像金字塔的模板匹配方法。经效率对比,设置图像金字塔层数为 4 层,创建对应的金字塔图像,采用均值波对创建好的图像进行平滑处理以消除采样形成的锯齿。利用 Sobel 算子分别计算图像横向与纵向边缘特征点梯度向量:

$$g(u, v) \times \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \approx \frac{\partial g(u, v)}{\partial v} = g_u(u, v), \quad (9)$$

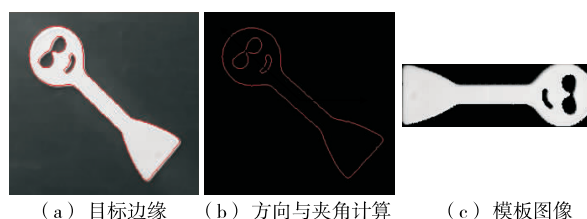


图 8 模板图像的建立

Figure 8 The establishment of template image

$$g(u, v) \times \frac{1}{10} \begin{bmatrix} -1 & -3 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 3 & 1 \end{bmatrix} \approx \frac{\partial g(u, v)}{\partial v} = g_v(u, v)。(10)$$

将得到的 u, v 方向的边缘梯度向量合并为单位向量,得:

$$m_a(u_i, v_j) = \frac{[g_u(u_i, v_j), g_v(u_i, v_j)]}{\sqrt{g_u^2(u_i, v_j) + g_v^2(u_i, v_j)}}。(11)$$

记 ROI 图像轮廓的梯度单位向量为 $t_a(u_i, v_i)$,选取 N 个模板特征点,通过模板图像和 ROI 图像梯度单位向量的内积衡量二者之间的匹配度,则:

$$s(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [m_a(u_i, v_j), t_a(u_i, v_j)]。(12)$$

遍历图像后得到每个目标的位置与姿态,放入队列中等待发送给机器人实施抓取,图像处理结果如图 9 所示。

4 追踪算法

根据图像处理的结果与编码器的反馈,可对目标计算得到其实时位置,当满足在工作空间且机器人有需求时,控制系统发送目标位姿信息至机械臂,机械臂开始执行追踪过程。由于传送带在不断运动,取追踪过程中任意时刻 t 为例,如图 10 所示,实时反馈的追踪算法的速度分量时刻指向当前时刻目标位置,由于目标的移动和反馈的滞后性,实时反馈追踪不断更新塑料手柄的实时位

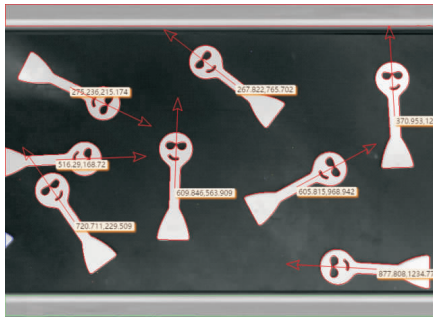


图 9 图像处理结果

Figure 9 Image processing results

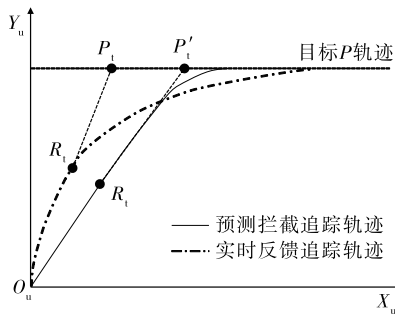


图 10 追踪示意图

Figure 10 Tracing diagram

置并进行逆运动学求解,计算量大而且追踪路径变长,影响抓取效率。文章采用一种对目标位置的阶段式预测拦截算法进行抓取。

由于机器人运动轨迹与加速度曲线参数很难精确获取,难以由机器人运动轨迹结合目标运动轨迹预测出实际抓取点,但传送带采用步进电机驱动,传送带速度 V 比较平稳,且利用机器人控制器的时钟可获取机器人到达当前点的时刻记为 T ,末端执行器在上一个点的时刻为 T_{i-1} ,移动到当前点的时刻记为 T_i ,则下一个追踪点相对当前点的偏移 S 为:

$$S = \int_{T_{i-1}}^{T_i} V d(t)。(13)$$

由于传送带坐标系和机械臂坐标系存在角度 θ ,则在机器人坐标系 X 轴与 Y 轴的偏移分别为 $S \cos \theta$ 和 $S \sin \theta$ 。机器人要在两个维度计算偏移量,为了提高执行效率,在机器人工作空间以三点法建立工件坐标系 ($X_u O_u Y_u$),工件坐标系 X_u, Y_u 轴方向与传送带坐标系 X_c, Y_c 轴一致,将发送至机器人的坐标转换至工件坐标系上。由此当机器人移动到发送点并开始追踪时,由于传送带方向与机器人工件坐标系方向一致,则只需 X 轴一个维度的计算量,降低了程序冗余。

追踪第一阶段是机器人末端未进入传送带上空间时,提前预测目标将要到达的大致位置,将机器人开始追踪时刻目标坐标加追踪偏移量得到位置如式(14)所示。

$$X_1 = x_{t1} + D_1, (14)$$

式中:

X_1 ——追踪第一阶段位移, mm。

x_{t1} ——目标发送时的坐标;

D_1 ——超前偏移量(根据经验得到)。

追踪第二阶段是机器人末端靠近目标后,利用编码器反馈提高抓取精度,但由于反馈的滞后性,在反馈的坐标后加入速度积分补偿得到追踪点坐标如式(15)所示。

$$X_2 = x_t + \int_{T_0}^T V d(t), (15)$$

式中:

X_2 ——追踪第二阶段位移, mm。

x_t ——根据编码器返回的目标实时坐标;

V ——传送带运行速度, mm/s;

T ——当前时刻时钟数值, s;

T_0 ——机器人进入第二段追踪时的时刻, s。

机器人末端执行器经过两个阶段追踪拦截到目标,在抓取等待点经过位移 $X_1 + X_2$ 到达捕获点。

5 试验结果分析

为验证系统的效率与精度,搭建试验平台,固定模具位置。对传动带上的巧克力塑料手柄进行抓取摆放试验,通过目标摆放结果验证系统精度和稳定性。对塑料手柄质心进行标记,记录抓取后机器人末端与理论抓取

位置之间的误差,并通过定时器记录机器人一个抓取周期的时间,共进行 20 盘摆放试验,对每盘模具数据平均后得到试验结果,见图 11。

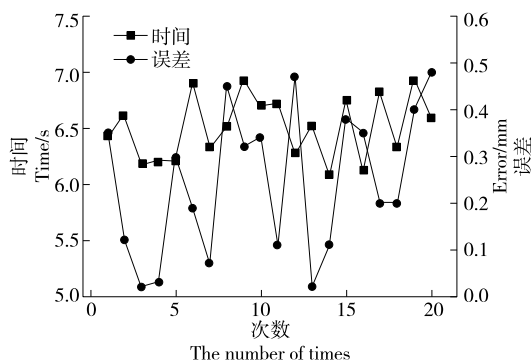


图 11 试验结果数据

Figure 11 Experimental data

由图 11 可知,系统抓取误差 <0.5 mm,误差主要来源于坐标系平面不完全平行等因素;系统每盘完成时间 <7 s,满足企业需求。通过目标摆放是否到位置验证系统精度和稳定性,共统计 20 盘(160 个工位),摆放成功个数为 154 个,其成功率 $>95\%$ 。

6 结论

系统将视觉系统与控制系统相结合,提出了线阵相机手眼标定思路,优化了追踪轨迹算法,实现巧克力塑料手柄的自动上料摆放。经大量样本试验结果表明,系统摆放成功率 $>95\%$,平均每盘摆放时间相较企业生产要求时间 10 s 缩短至 7 s 以内,符合生产需求。而且系统具有良好的可移植性,基于模板匹配的物体识别算法具有很好的开放性,可以胜任其他领域目标抓取工作。

参考文献

- [1] 刘杨, 杨乐. SCARA 机器人运动学和动力学仿真[J]. 现代机械, 2020(5): 15-19.
- [2] 杜友田, 陈峰, 徐文立, 等. 基于视觉的人的运动识别综述[J]. 电子学报, 2007(1): 84-90.
- [3] 海潮, 赵凤霞, 孙烁. 基于 Blob 分析的红枣表面缺陷在线检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 126-129.
- [4] 邱素贞, 李庆年, 卢志翔, 等. 基于机器视觉检测的码垛机器人控制系统设计[J]. 包装工程, 2019, 40(3): 207-211.
- [5] 杨新海. 自动化生产线工件同步抓取方法研究与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 25-36.
- [6] SONG Shuang, YANG Guo-peng, ZHOU Xin. Line array time delay integral CCD sweep image non-uniformity correction method[J]. Procedia Computer Science, 2020, 174: 216-223.
- [7] 王国琿, 钱克矛. 线阵相机标定方法综述[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 181-193.
- [8] 杨必武, 郭晓松. 摄像机镜头非线性畸变校正方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2005(3): 6-11.
- [9] JAMIL Draréni, SÉBASTIEN Roy, PETER Sturm. Plane-based calibration for linear cameras[J]. International Journal of Computer Vision, 2011, 91(2): 146-156.
- [10] 王桥, 孟志军, 付卫强, 等. 基于机器视觉的玉米苗期多条作物行线检测算法[J/OL]. 农业机械学报. [2021-02-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210204.1858.010.html>.
- [11] 吴成刚, 杨尘, 谢崇泉, 等. 基于机器视觉的卷接机接装纸图像检测系统[J]. 食品与机械, 2020, 36(1): 150-156.
- [12] 徐伟峰, 刘山. 基于机器视觉的接头组件表面缺陷检测系统研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(16): 72-77.
- [13] 赵晓花, 霍龙龙. 基于遗传迭代和模糊控制的采摘机器人目标追踪算法[J]. 农机化研究, 2021, 43(7): 235-239.
- [4] 曾静, 时逸吟, 张孝刚, 等. 固相萃取-气相色谱法测定婴幼儿配方奶粉中肌醇含量[J]. 检验检疫学刊, 2014, 24(2): 40-43, 34.
- [5] 周玮婧, 何平, 王澍, 等. 婴幼儿配方奶粉中肌醇的测定及稳定性研究[J]. 中国乳品工业, 2018, 46(1): 48-51.
- [6] 张宁, 范迪, 杨燕, 等. 食品中肌醇测定用菌株的筛选及检测方法建立及应用[J]. 食品科学, 2020, 41(10): 88-93.
- [7] 戴传波, 李建桥, 李健秀. 示差折光检测法检测肌醇含量[J]. 食品工业科技, 2007(4): 222-223.
- [8] 景丽洁, 王建刚, 王树清, 等. 反相高效液相色谱法测定肌醇[J]. 色谱, 2000(3): 259-260.
- [9] 杨莉, 曲彩红, 王新亚. 气相色谱-质谱联用测定肌醇含量[J]. 药物分析杂志, 2009, 29(3): 387-389.
- [10] 金梦, 谢守新, 林海丹, 等. 婴幼儿配方奶粉中肌醇的液相色谱串联质谱法测定[J]. 中国乳品工业, 2014, 42(12): 34-36.
- [11] 侯建霞, 汪云, 程宏英, 等. 毛细管电泳电化学检测分离测定荞麦中的手性肌醇和肌醇[J]. 分析测试学报, 2014, 42(12): 34-36.
- [12] 王波, 刘阿静, 王彦淳, 等. 在线渗析-双柱串联离子色谱法直接检测婴幼儿乳粉中的肌醇[J]. 分析试验室, 2015, 34(2): 212-215.
- [13] TAGLIAFERRI E G, BONETTI G, BLAKE C J, et al. Ion chromatographic determination of inositol in infant formulae and clinical products for enteral feeding[J]. J Chromatogr A, 2000, 879(2): 129-135.
- [14] ANAB B, ROSA M J, ROSAM A. Simultaneous determination of five 1,4-dihydropyridines in pharmaceutical formulations by high-performance liquid chromatography-amperometric detection[J]. J Chromatogr A, 2004, 1 031(1/2): 275-280.
- [15] 黄伟雄, 梁富荣. 肌醇硅烷化反应的质谱研究[J]. 华南预防医学, 2002(6): 52-53.
- [16] 廖燕芝, 黄辉, 梁锋. 气相色谱法测定婴幼儿配方食品中肌醇的衍生方法的比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(17): 4 639-4 644.
- [17] 房子峰, 黄传峰. 食品中肌醇的检测方法研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(1): 14-18.

(上接第 81 页)