

缺陷药片智能识别与分拣机器人研究

张骁哲, 刘成清

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 针对药片表面质量检测主要依靠人工肉眼判断、检测效率低和漏检等问题, 开展了缺陷药片智能识别定位与分拣机器人技术研究, 进行了机器人系统总体设计和结构设计, 采用 Halcon 机器视觉开发平台编写了图像识别与处理软件对缺陷药片进行识别和定位, 对机器人进行了正运动学和逆运动学分析, 编写了药片位置信息解算软件, 通过指令驱动机器人各关节运动对缺陷药片进行准确抓取, 实现了缺陷药片的智能化分拣; 通过所设计的缩比机器人系统对药片进行分拣, 验证了缺陷药片智能识别定位与分拣的功能, 该机器人系统具有成本低、工作范围大、智能识别定位准确、通用性好的优势。

关键词: 机器人; 视觉; 表面缺陷; 识别; 定位; 分拣

Research on Intelligent Recognition and Sorting Robot for Defect Tablets

Zhang Xiaozhe, Liu Chengqing

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the problems of the tablets surface quality detection mainly depending on artificial naked eye judgment, low detection efficiency and missing detection, the research on intelligent identification, location and sorting robot technology for defective tablets was carried out, and the overall structure of the robot system was designed. The image recognition and processing software which written by Halcon is used to identify and locate the defective tablets, and the forward and inverse kinematic analysis of the robot is carried out. The software is compiled to calculate the position information of tablets, and the robot joints are driven by instructions to grasp the defective tablets accurately, so as to realize the intelligent sorting of the defective tablets. The function of intelligent identification, location and sorting of defective tablets is validated by a practical scaling robot system. The robot system has the advantages of low cost, wide working range, accurate intelligent identification and location, and good generality.

Keywords: robot; vision; surface defect; identification; location; sorting

0 引言

制药企业在药片的生产加工过程中, 不可避免地会产生各种缺陷, 例如断裂、缺角、漏印、异色等, 一些生产企业仍然采用人工肉眼观察的方法分拣出有缺陷的药片^[1-2]。由于检验人员的视觉疲劳, 以及对细微部分的识别局限, 很容易造成漏检, 并且检验速度很慢^[3-4]。人工分拣缺陷药片, 不但效率低, 而且很难保证产品的整批质量。对缺陷药片进行高效拣出、高合格率出厂, 是目前中小型制药企业面临的低成本智能制造难题。虽然国外已经有专用的药片检验设备, 但几百万元甚至上千万元的售价过于昂贵。国内专用药片检验设备的技术受到国外核心技术的封锁, 进展较慢, 所研发的专用药片检验与分拣设备同样也是价格昂贵, 而且通用性差、适用范围也不理想。

研制缺陷药片智能分拣机器人, 代替人工分拣, 对于提高生产效率和产品质量具有重要意义。目前专用检验设备不能普遍被采用, 一个重要瓶颈问题就是设备成本过高

问题, 所以研制成本低廉的机器人分拣系统, 对于中小型制药企业实现低成本智能制造、代替人工分拣以及降低人工成本, 意义重大。已有一般设备虽然可以实现缺陷药片的检验, 但其专用性的特点注定了适用产品型号单一^[5], 而且用户不能进行二次开发以满足不同工况的使用需求。所以, 本文提出的智能分拣机器人技术适用范围广、通用性好、智能化程度高, 对于在中小企业中推广低成本应用具有重要意义。

1 机器人系统结构及原理

分拣机器人系统由关节型机器人本体、电动手爪、传送带、控制器、驱动器、电机、工业相机、计算机及视觉软件系统等组成。视觉系统通过机器视觉^[6]来获取目标物体的特征点, 由机器人根据目标位置, 完成快速动态的抓取任务。将相机布置在药片输送带上方, 机器人位于传送带侧面。药片在图像识别区时, 经相机采集图像, 图像经视觉处理系统处理后, 将得出的轮廓和位置等数据结果传给机器人控制器, 机器人对其进行分类抓取, 并放在药片规定的终检区域。智能分拣机器人系统整体原理设计缩比结构图见图 1 所示。

2 药片的图像采集与分析处理

为了对缺陷药片进行快速定位, 对拍摄到的图像进行

收稿日期: 2019-10-07; 修回日期: 2019-12-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778538); 国家留学基金委项目(201707005100)。

作者简介: 张骁哲(2001-), 男, 北京市人, 大学本科, 主要从事智能机器人技术研究、土木工程设计方向的研究。

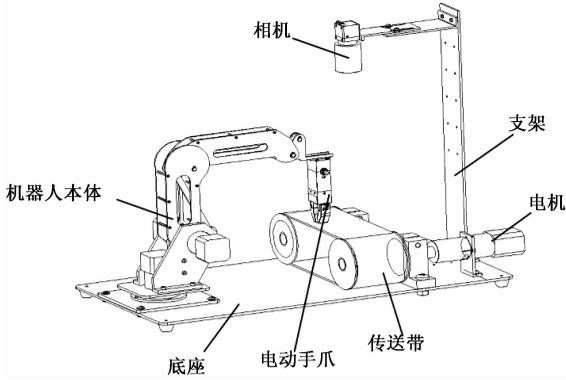


图 1 机器人系统组成原理结构图

预处理是必不可少的工作。基于 Halcon 视觉开发平台^[7]进行图像处理，包括图像分割、区域连通、圆拟合、获得中心等^[8-9]。对将要分拣的药片进行目标检测时，首先利用 gen_rectangle1 对需要分析的区域进行选定。目前，对于目标物体的检测方法主要有：帧间差分法、光流法、背景减除法和阈值分割法^[10-11]。通过对比和结合实际药片分拣工作环境，最终选择了简单易行的阈值分割法中的固定阈值分割法。采用 thread 函数对图像进行阈值分割。处理函数：threshold (ho _ Image, out ho _ Region, grayValueMin, grayValueMax)；这个函数的输入为图片即用户想要处理的图像，输出的区域即想要得到的特征区域，两个参数 grayValueMin 与 grayValueMax 是需设置的最小与最大阈值，这个值的选取通过图片的灰度直方图获得。然后利用物体的圆度和面积腐蚀出圆形结构，最后得到物体的坐标中心点，具体如下：

```

grab_image(Image,FGHandle) //获取图像
dev_display(Image) //显示图像
gen_rectangle1 ( ROI, Row111, Column111, Row222,
Column222) //选择区域
reduce_domain (Image, ROI, ImageROI) //减少到选择的区域
threshold(ImageROI, write, 131, 255) //阈值分割
fill_up_shape(write, RegionFillUp, 'area', 1, 100) //形状填充
opening_circle(RegionFillUp, RegionOpening, 1)
connection(RegionOpening, SingleBalls) //区域连通
select_shape (SingleBalls, IntermediateBalls, 'circularity', 'and',
0.8, 1.0) //用圆度区分
select_shape(IntermediateBalls, SelectedRegionsWhite, 'area', 'and',
7000, 10000) //用面积区分
erosion_circle ( SelectedRegionsWhite, RegionErosionWhite,
3.5) //腐蚀一个圆形结构基础的一个区域
dev_display(RegionErosionWhite)
count_obj(RegionErosionWhite, NumberWhite) //得到物体的个数
area_center ( RegionErosionWhite, AreaWhite, Row1,
Column1) //获得物体中心点。
    
```

3 机器人正运动学求解

分拣机器人系统所设计的关节型机器人具有 4 个旋转关节，从底座至末端依次为 0~3 关节，其中 1~3 关节轴线相互平行，0~2 的 3 个关节由电机驱动，第 4 个关节为被动关节，受第 2 个关节和第 3 个关节电机控制，保持自身姿态为 0°。因此，被动关节 4 运动的末端执行器工具保持水平，即保持自身与水平面平行。利用 D-H 坐标变换法^[12]研究机器人运动学，确定机器人各连杆之间的坐标系，建立坐标系如下图 2 所示。

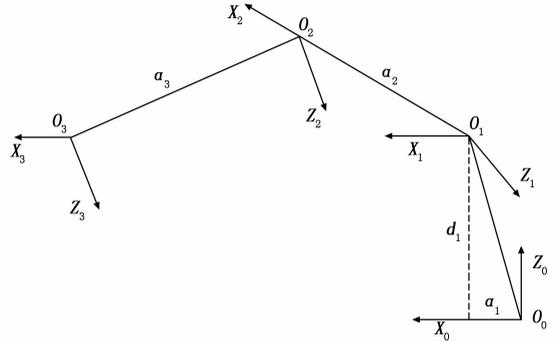


图 2 机器人连杆坐标系

关节轴 $i-1$ 和关节轴 i 之间的公垂线的长度为 a_i ，即为连杆长度；垂直于 a_i 所在的平面内的两轴线之间的夹角用连杆扭角 α_i 表示；两条公法线 a_{i-1} 与 a_i 为两连杆之间的偏置用 d_i 表示；两条公法线 a_{i-1} 与 a_i 之间的夹角为关节角，用 θ_i 表示。首先对机器人每一个杆件上分别固定一个坐标系进行编号，基座即为杆件 0 号，坐标系 $\{0\}$ ，第一个有相对运动的刚体为杆件 1，其坐标系为 $\{1\}$ ，以此类推。

(1) 中间连杆坐标系 $\{i\}$ ：

坐标轴 Z_i ：与关节轴 $i+1$ 共线，指向任意；

坐标轴 X_i ：沿连杆 i 两关节轴线之公垂线，指向由 i 关节到 $i+1$ 关节；

坐标轴 Y_i ：按照右手法则确定。

(2) 首、末连杆坐标系：

基础坐标系 $\{0\}$ 与基座固接，常用它来描述操作臂与其他连杆的运动。

机器人系统原理样机的缩比机械结构尺寸如图 3 所示(单位 mm)。

根据图 2 建立的机器人的连杆坐标系，从而确定连杆参数表。

表 1 连杆参数表

关节	$\theta/(\text{°})$	d/mm	a/mm	$\alpha/(\text{°})$
1	θ_1	90	65	-90
2	θ_2	0	135	0
3	θ_3	0	170	0
4	θ_4	0	0	0

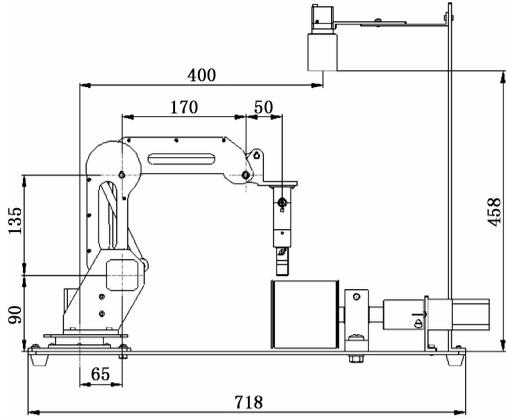


图 3 机器人系统原理缩比结构图

根据 D-H 参数, 可以得到相邻连杆之间的变化矩阵

${}^i T_{i+1} (i=1, 2, 3, 4)$.

$${}^i T_{i+1} = \begin{bmatrix} c_i & -s_i \cos \alpha_i & s_i \sin \alpha_i & a_i c_i \\ s_i & c_i \cos \alpha_i & -c_i \sin \alpha_i & a_i s_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$. 可以求出 i 关节相对 $i+1$ 关节的变化矩阵。

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & a_1 c_1 \\ s_1 & 0 & c_1 & a_1 s_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

可得位姿方程为:

$${}^0 T_4 = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 {}^3 T_4 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & c_1(a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) \\ s_1 & 0 & c_1 & s_1(a_1 + a_3 c_{23} + a_2 c_2) \\ 0 & -1 & 0 & d_1 - a_3 s_{23} - a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据机器人的 D-H 参数, 建立如下 MATLAB 程序:

```
L1=link([-pi/2 65 0 90], 'standard');
L2=link([0 135 -pi/2 0], 'standard');
L3=link([0 170 pi/2 0], 'standard');
```

```
r=robot({L1 L2 L3 });
r.name='Robot';
drivebot(r)
```

为了验证变换矩阵的准确性, 在 MATLAB 中给定初始角度: $\theta_1=0$, $\theta_2=-\pi/2$, $\theta_3=\pi/2$, 得到末端坐标点 $X=235$, $Y=0$, $Z=225$, 与机器人结构尺寸一致, 也验证了上述算法的正确性。

通过 MATLAB 机器人工具箱, 输入关节位置后, 得到机器人的仿真图如图 4 所示。

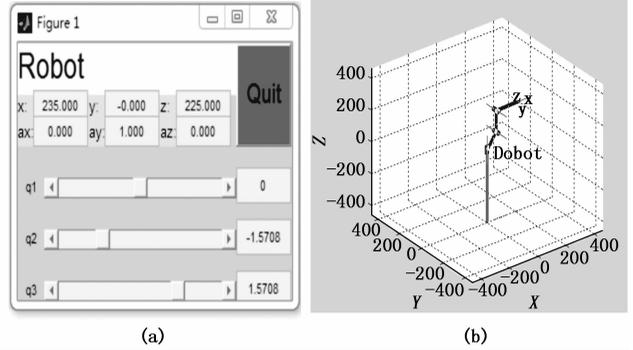


图 4 机器人正解仿真图

4 分拣机器人逆运动学求解

在药片分拣实际工程中, 是根据视觉系统识别的药片位置规划机器人末端运动位置和姿态, 根据药片位置计算每个关节角度的相应值, 驱动各个关节电机运动, 完成运动轨迹, 求解各个关节角度值的过程称为逆运动学。

求解关节变量 θ_1 , 根据式 (6) 可得:

$${}^0 T_3^{-1} {}^0 T_4 = {}^1 T_3 {}^2 T_4 \quad (7)$$

从而得出:

$${}^0 T_3^{-1} {}^0 T_4 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & u_{14} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} & u_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中: $u_{14}=a_3 c_{23}+a_2 c_2$, $u_{24}=a_3 s_{23}+a_2 s_2$, $u_{34}=0$ 。

根据方程两端的元素 (3, 4) (1, 4) 和 (2, 4) 分别对应相等, 得出如下方程:

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 = a_3 c_{23} + a_2 c_2 - \\ p_z + d_1 = a_3 s_{23} + a_2 s_2 \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (9) 得到 θ_1 :

$$\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x) \quad (11)$$

根据式 (10) 的联立方程, 可得到 θ_2 和 θ_3 的值。

$$c_3 = \frac{(c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)^2 + (-p_z + d_1)^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}$$

$$s_3 = \sqrt{1 - c_3^2}$$

得出：

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_3}{\cos\theta_3}\right) \quad (12)$$

根据式 (12) 已求出 θ_3 的值，将式 (10) 展开，求解 θ_2 。得到 θ_2 的值：

$$c_2 = \frac{(c_1 p_x + s_1 p_y - a_1)(a_2 + a_3 c_3) + (-p_z + d_1)(a_3 s_3)}{(a_2 + a_3 c_3)^2 + (a_3 s_3)^2}$$

$$s_2 = \sqrt{1 - c_2^2}$$

得出：

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2}\right) \quad (13)$$

从而得出：

$$\theta_4 = -(\theta_2 + \theta_3) \quad (14)$$

因此，根据药片位置，得到通过运动学逆解计算的机器人各关节的运动角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 的值。

根据机器人自身结构特征及逆解特点，通过 Halcon 程序，利用 atan2 函数可以确定 θ_1 的运动角度。其次对 θ_2 进行判断，选择与上一路径点相近的关节变量 θ_2 ，确定 θ_2 以后，依次类推求解 θ_3 。利用“最短行程”求解降低机器人运动能量消耗、缩短运动时间。对运动学逆解的实时性选择优化，大大提高了机器人的工作效率。

5 机器人抓取过程求解

机器人手爪与机器人末端的位置关系如图 5 所示，可以看出，T_03 和 T_04 的位置关系为：

$$X0 = X1 - L \times \cos(\beta_1) \quad (15)$$

$$Y0 = Y1 - L \times \sin(\beta_1) \quad (16)$$

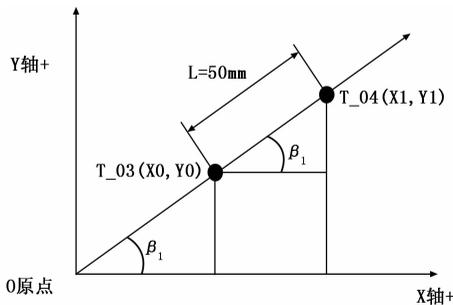


图 5 机器人手爪与末端的位置关系图

相机安放于固定位置，当药片运行到相机视野范围时，相机进行拍照。经实验，机器人手爪在相机坐标系下像素点为 (1 069, 1 314)。被抓取的物体位置在视野中是任意的，设为 (Row1 [0], Column1 [0])，同时测得 Column 方向上 65.4 个像素代表 10 mm，Row 方向上 63.9 个像素代表 10 mm。由于机器人电动手爪在图像中的位置为定值，这样即可得到物体与手爪在实际坐标系下的相对位置。关系如下：

$$\text{CharX}_i = (\text{round}(-(\text{Row1}[0] - 1069) / 63.9)) * 10$$

$$\text{CharY}_i = (\text{round}(-(\text{Column1}[0] - 1314) / 65.4)) * 10$$

根据图 3，得到 T_04 初始的位置为：

$X = 235 + 50 = 285$ ， $Y = 0$ ， $Z = 225 - 14 - 85 = 126$ （其中 85 是指电动手爪的高度）。在实现物体快速抓取的过程中，相机采集到物体图像进行分析后，得出 CharX 和 CharY 这两个偏移量，即可计算出：

$$X1 = 285 + \text{CharX}$$

$$Y1 = 0 + \text{CharY}$$

根据式 (15) 和式 (16) 得到机器人 T_03 的位置 (X0 和 Y0)，再经过逆解求得每个轴当前的角度，记为 theta1、theta2、theta3。

根据电机转 1 圈发 20000 个脉冲，可以得到电机转 1° 发 56 个脉冲。每个轴电机应发的脉冲数为：

$$\text{Pulse1} = \text{round}(\text{theta1} * 56)$$

$$\text{Pulse2} = \text{round}((90 + \text{theta2}) * 56)$$

$$\text{Pulse3} = \text{round}(\text{theta3} * 56)$$

其中，round 是取整，theta1 - theta3 是抓取位置时电机的角度，并不是从原点到抓取位置所需走过角度值。因此需要根据当前角度值减去建模时的初始值 (0, -90, 90)。并且根据机器人特殊的机械结构，theta3 等于 theta2 与 theta3 的和。发送给控制器的代码如下：

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'MOVE', 13], To)
```

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'SH', 13], To)
```

send_data(Socket, 'czc', [10, 'AC320,320,320', 13], To) // 每个轴的加速度值

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'DC320,320,320', 13], To) // 每个轴的减速度值
```

send_data(Socket, 'czc', [10, 'SP220,220,220', 13], To) // 每个轴的速度值

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'PR'+ords(Pulse1)+';'+ords(-Pulse2)+';'+ords(Pulse3), 13], To) // 发送每个轴的脉冲数
```

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'BGXYZ', 13], To) // 开始运行
```

```
send_data(Socket, 'czc', [10, 'AMXYZ', 13], To) // 等待动作完成
```

6 机器人动作规划

系统上电完成后，机器人末端先到达预设定的位置等待，传送带上放置药片启动运行，相机开始拍照识别，当进入相机视野范围并识别出传送带上的缺陷药片后，机器人控制器发送指令，控制传送带停止，机器人开始运行抓取。机器人执行端运动到待分拣的药片位置后，电动手爪闭合抓取。抓取完成后，机器人到达指定药片放置位置，电动手爪自动松开释放，机器人回到初始位置，以此循环抓取缺陷药片。视野范围内无缺陷药片时，机器人运动在初始原点位置等待下一次的识别与抓取。若传送带无缺陷药片，传送带一直运行，机器人无动作，完整药片流放到规定区域。

7 实验结果与分析

根据上述的方法研究，机器人分拣缺陷药片的实现程

序在 Halcon 视觉开发软件平台中完成, 整个程序包括图像识别算法、机器人正逆解算法、电机驱动、数据通讯与交互等。PC 端与机器人控制器创建通讯连接使用 open_socket_connect ('192.168.1.2', 3000, 'protocol', 'TCP4', Socket), 打开相机使用 open_framegrabber ('GenICamTL', 1, 1, 0, 0, 0, 'default', -1, 'default', -1, 'default', 'default', 'default', -1, 1, FGHandle)。

机器人工作时, 首先从任意位置回到原点初始位置, 传送带运行, 相机开始采集图像, 在 Halcon 中利用第 2 节图像分析方法进行图像处理与分析, 缺陷药片图像处理算法与检测分析处理结果如图 6 所示。

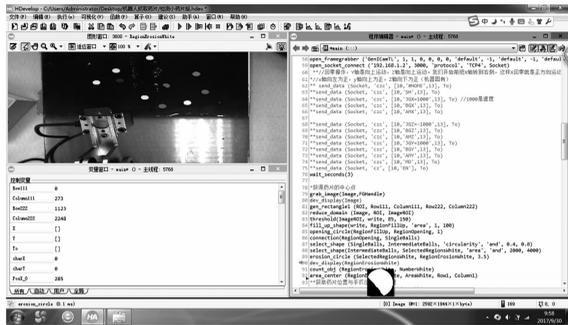


图 6 基于 Halcon 的缺陷药片识别定位系统

从图 6 右下角可以看出已检测出缺陷药片, 药片在图像坐标系下的位置为 (572, 1423), 从而可以计算得出药片所在位置处机器人手爪的 X1 和 Y1 数值。

$$X1 = 362.778$$

$$Y1 = -16.6667$$

根据式 (15), (16) 可以计算出机器人末端处的位置, Z0 的高度根据传送带的高度得出, 按照机器人可抓取到药片末端的高度为 195 mm, 由此可得:

$$X0 = 314, Y0 = -14, Z0 = 195$$

经逆解式 (11), (12), (13) 可以得到每个轴相对于初始位置转动的角度, 从而可得每个轴应该发送的脉冲数, 然后根据第 5 节的控制指令, 将数据发送到机器人控制器中, 驱动电机进行运动, 以此计算驱动机器人进行缺陷药片分拣工作, 脉冲数计算结果如下:

$$Pulse1 = -147, Pulse2 = 2016, Pulse3 = 79$$

经实验验证与反复测试, 通过以上算法, 机器人可以准确定位识别抓取药片, 并实现智能分拣功能。

8 结束语

针对中小型制药企业对缺陷药片准确高效且低成本分拣的迫切需求, 研究了缺陷药片视觉智能识别与定位技术、关节机器人位置和姿态解算技术、机器人系统结构优化设计技术等关键技术, 研制出具有缺陷药片智能识别定位与分拣功能的机器人原理缩比样机, 通过对药片分拣的实际验证, 具有成本低、工作范围大、智能识别定位准确、通用性好的特点, 具备缺陷药片智能识别定位与分拣功能, 为中小型制药企业提高药片分拣效率和药品质量、降低成本奠定了技术基础。

参考文献:

[1] 侯海飞. 基于机器视觉的胶囊表面缺陷的识别与分拣技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[2] 许江淳, 岳秋燕, 任向阳, 等. 基于机器视觉的药片表面缺陷识别与分拣系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36 (6): 90-93.

[3] 王军海. 残损胶囊图像检测系统的研究与设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.

[4] 吴德. 基于图像处理的胶囊检测系统的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2011.

[5] 左奇, 史忠科. 基于机器视觉的胶囊完整性检测系统研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36 (12): 1263-1265.

[6] 张广军. 视觉测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[7] 刘国华. HALCON 数字图像处理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2018.

[8] 伍济钢, 宾鸿赞. 机器视觉的薄片零件尺寸检测系统 [J]. 光学精密工程, 2007, 1 (15): 125-130.

[9] 刘兴洪, 汪林林. 一种图像边缘保持的改进方向平滑算法 [J]. 计算机科学, 2006, 33 (10): 210-212.

[10] 谭优, 王泽勇. 图像阈值分割算法实用技术研究 [J]. 微计算机信息, 2007, 3 (24): 298-299.

[11] 阴国富. 基于阈值法的图像分割技术 [J]. 现代电子技术, 2007, 2 (23): 107-108.

[12] 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

[12] 艾波, 邢达波. 网络化机载测试系统中网络性能测量 [J]. 中国科技信息, 2016, 530 (z1): 45.

[13] 王建军, 彭国金, 陈惠君. 飞行试验多源 iNET 数据精密分析技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016 (6): 248-250.

[14] 彭国金. 基于类 PCM 结构过程的试飞多科目 iNET 处理技术 [J]. 计算机测量与控制, 23 (10): 306-308.

[15] 彭国金, 王建军, 刘嫚婷. 基于预留缓存的飞行试验 iNET 数据处理技术 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (12): 48-50.

(上接第 226 页)

[8] 霍朝晖, 魏建新, 覃燕. 飞行试验机载网络数据采集与分析技术 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (11): 144-147.

[9] 宗思瑶. 机载实时数据处理系统设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

[10] 房瑾, 霍朝晖, 聂睿, 等. 机载网络数据实时处理软件的设计与实现 [J]. 电子设计工程, (12): 60-62.

[11] 满源. 网络化机载测试系统时间同步精度研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.