

一种基于逆向运动学分析的物料抓取 机器人自导航系统

Research on self-navigation system of material grabbing robot based on the inverse kinematics analysis

李峰¹ 张雪松¹ 岳云² 张忠美³

LI Feng¹ ZHANG Xue-song¹ YUE Yun² ZHANG Zhong-mei³

(1. 中原工学院信息商务学院机械工程系, 河南 郑州 450007; 2. CATERPILLAR(郑州)有限公司, 河南 郑州 450007; 3. 河南汇金智能装备有限公司, 河南 郑州 450001)

(1. Department of Mechanical and Electric Engineering, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450007, China; 2. Caterpillar (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450007, China; 3. Henan Huijin Intelligent Equipment Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:为了能够实现机器人的自导航,以食物物料抓取机器人为平台,以 D-H 方法逆运动学求解为基础,对机器人进行导航定位分析,得到了机器人导航定位解。通过机器人硬件和软件的结合,以 STL 语句表形式描述机器人的自动导航控制原理,实现了机器人的定位解算;将导航系统应用于实际生产,验证了物料抓取机器人导航系统的高效性和稳定性,能够很好地适用于生产线的物料抓取。

关键词:机器人;逆向运动学;导航;控制

Abstract: In order to achieve robot self-navigation, based on the inverse kinematics solution of D-H method, the navigation analysis of food material grabbing robot is carried out and the robot navigation positioning solutions were obtained. Through the combination of hardware and software of the robot, the automatic navigation control principle of the robot is described in the form of STL statement, realizing the robot positioning calculation. The efficiency and stability of robot navigation system are verified by practical production, which proves that it was well suited to food material grabbing production line.

Keywords: robot; inverse kinematic; navigation; control

随着社会的高速发展,产品的生产也越来越高速和自动化^[1],为实现食品生产线的自动化生产,提高生产效率,通常

使用物料抓取机器人完成对目标物料的自动拾放动作^[2-4],但大部分物料抓取机器人采用人工导引和示教盒示教来进行路径控制,实现导航,完成机器人工作,虽然效率比单纯的人工导引有所提高,但机器人需要凭记忆运行,而且还需要人工首先示范达到预期的目标才能实现导航^[5]。

机器人的导航技术主要包括机器人的定位技术和控制技术,定位技术是准确获取当前位置或者相对目标路径的位置,控制技术是控制执行机构,使执行机构沿着目标路径进行作业^[6]。机器人系统根据规范化的目标物体空间坐标进行运动轨迹控制,在这个过程中,目标物体的位置信息的自动化计算及实施是最重要的环节^[7]。现在机器人逆向运动学分析方面的研究较多^[6,8-11],但由于物料抓取机器人控制的复杂性、特殊性,物料抓取机器人的自导航却未有研究。本研究以食物物料抓取机器人为例,通过 D-H 方法逆运动学求解得到物料抓取机器人导航定位解;将机器人硬件和软件结合,介绍物料抓取机器人的自动导航控制原理,实现机器人的定位解算;将导航系统应用于实际生产,以提高物料抓取机器人运行的高效性和稳定性。

1 机器人导航定位原理分析

该机器人的导航定位原理分析基于逆向运动学,先用 D-H 法建立机器人运动学简图,见图 1。由图 1 可知,各连杆利用关节连接在一起,各个关节为转动副,分别为 1、2、3^[9]。

1.1 连杆的 D-H 参数及关节变量

由机器人逆向运动学可知, A_i 为描述连杆坐标系相互之间相对平移、旋转的齐次变换矩阵。 A_1 表示第一个连杆相对机身的位姿, A_2 表示第二个连杆相对第一个连杆的位姿。

基金项目:河南省科技攻关计划项目(编号:122102210506);河南省教育厅重点科研项目(编号:15A460042)

作者简介:李峰(1981—),男,中原工学院讲师,硕士。

E-mail: fengli001@126.com

收稿日期:2016-02-23

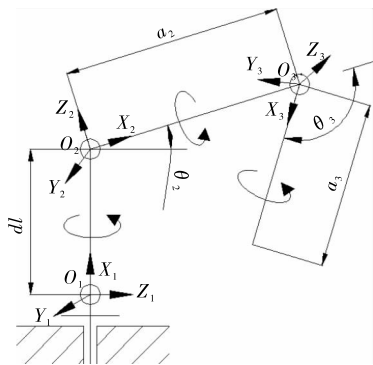


图1 机器人基本结构简图

Figure 1 The basic structure sketch of the robot

以此类推,机器人末端到基础坐标系的变换矩阵即为 $A_1 A_2 \dots A_n$ [9-11]。机器人腰部关节、肩部关节、肘部关节都属于转动关节(见图1),因此,机器人末端执行器相对于机身坐标系的齐次变换矩阵(T_3)为:

$$T_3 = A_1 A_2 A_3. \tag{1}$$

根据图1,可得机器人D-H参数见表1。

表1 机器人D-H参数

Table 1 Robot D-H parameters

连杆	θ	$\alpha / (^\circ)$	a / mm	d / mm	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$
腰部	θ_1	90	0	L_1	0	1
肩部	θ_2	0	L_2	0	1	0
肘部	θ_3	0	L_3	0	1	0

1.2 位姿矩阵 A_i 及逆矩阵

根据运动学分析方法,由D-H参数和齐次变换矩阵公式可求得:

$$A_1^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 & -L_2 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 & -L_3 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & L_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & L_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

1.3 机器人逆向运动分析

设机器人运动方程为:

$$T_3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 A_2 A_3, \tag{2}$$

其中:

$$\begin{aligned} n_x &= \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3); n_y = \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3); n_z = \sin(\theta_2 + \theta_3); \\ o_x &= -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3); o_y = -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3); o_z = \cos(\theta_2 + \theta_3); \\ a_x &= 0; a_y = -\cos\theta_1; a_z = 0; P_x = L_3 \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_1 \cos\theta_2; \\ P_y &= L_3 \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_1 \cos\theta_2; \\ P_z &= L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_2 + L_1. \end{aligned}$$

由于需要到达的末端抓取装置的位姿已知,则 n, o, a, p 已知,为了求得机器人到达该位置时3个关节的旋转角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$,用未知的连杆逆矩阵左乘到方程式两边,将关节变量分离,继而求解。

1.3.1 求 θ_1 用 A_1^{-1} 左乘式(2),可得:

$$\begin{aligned} A_1^{-1} T_3 &= A_2 A_3 = \\ \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -L_1 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(o) & f_{11}(a) & f_{11}(P) \\ f_{12}(n) & f_{12}(o) & f_{12}(a) & f_{12}(P) \\ f_{13}(n) & f_{13}(o) & f_{13}(a) & f_{13}(P) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & \tag{3} \end{aligned}$$

其中: $f_{11}(i) = \cos\theta_1 \cdot i_x + \sin\theta_1 \cdot i_y; f_{12}(i) = i_z - L_1; f_{13}(i) = \sin\theta_1 \cdot i_x - \cos\theta_1 \cdot i_y; i = n, o, a, p$ 。

$$A_3 A_3 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式(4)中第3行第4列的元素为常数,将式(3)中对应元素与之等同,可得:

$$f_{13}(P) = \sin\theta_1 P_x + \cos\theta_1 P_y = 0. \tag{5}$$

采用三角代换, $P_x = \rho \cos\varphi, P_y = \rho \sin\varphi$, 其中: $\rho = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}, \varphi = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x}$; 进行三角代换后,可解得: $\sin(\theta_1 - \varphi) = 0$ 或 $\cos(\theta_1 - \varphi) = \pm 1$, 则: $\theta_1 - \varphi = 0$ 或 π 。

由此可得, $\theta_1 = \varphi = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x}$ 或 $\theta_1 = \pi + \varphi = \pi + \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x}$ 。

综上所述, θ_1 有两个不同的解, 结合工程实际, 取式(16):

$$\theta_1 = \varphi = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x} \quad (6)$$

1.3.2 求 θ_3 确定 θ_1 的一个解后, 令式(4)中的第 1 行, 第 4 列的元素及第 2 行第 4 列的元素, 分别与式(3)中对应的元素相等, 得到如下方程:

$$\cos\theta_1 P_x + \sin\theta_1 P_y = L_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \cos\theta_2, \quad (7)$$

$$P_z - L_1 = L_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_2. \quad (8)$$

求式(7)和式(8)的平方和, 得:

$$\mathbf{A}_3^{-1} \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_3 =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & \sin(\theta_2 + \theta_3) & -L_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) - L_2 \cos\theta_3 - L_3 \\ -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & -L_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + L_2 \sin\theta_3 \\ \sin\theta_1 & -\cos\theta_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)等式两端第 1 行第 4 列及第 2 行第 4 列的元素分别对应相等, 则:

$$\cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) P_x + \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) P_y + \sin(\theta_2 + \theta_3) P_z - \sin(\theta_2 + \theta_3) L_1 - L_2 \cos\theta_3 - L_2 = 0, \quad (13)$$

$$\cos(\theta_2 + \theta_3) = \frac{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}{(P_z - L_1)^2 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)^2}, \quad (15)$$

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) = \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{(P_z - L_1)^2 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)^2}. \quad (16)$$

令 $\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3$, 则

$$\tan(\theta_2 + \theta_3) = \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}, \quad (17)$$

即:

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3 = \tan^{-1} \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}, \quad (18)$$

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 = \tan^{-1} \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)} - \theta_3. \quad (19)$$

1.4 机器人导航定位解

综上所述, 机器人导航可能存在多解的情况, 但在实际工作中, 机器人运行只需要一组确定的解, 选取式(6)、(10)和(19)确定导航定位解。

通过以上分析, 依靠逆向运动分析已将机器人所要到达的目标坐标 (P_x, P_y, P_z) 转换为各个关节的导航的参数 $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$, 实现了机器人的导航定位分析, 以上分析对于简图如图 1 的机器人都是通用的。

2 机器人导航控制原理分析

2.1 物料抓取机器人动作流程

在程序中设置机器人末端终点坐标值以及各个臂的长度, 按下启动按钮 SB1, 程序自动计算每个臂的旋转角度, 并将旋转角度给到对应关节中; 机器人循环运行或单向运行并进行抓取; 在运行过程中按下 SB2, 程序会立即停止, 机器人停止运行。因篇幅限制, 本研究只分析其导航控制。

2.2 I/O 口分配

操作人员根据 PLC 的 I/O 口分配表编写程序和电路接线, 分配表见表 2; 主要用于食品物料抓取机器人运行状态的

$$P_x^2 + P_y^2 + (P_z - L_1)^2 = L_3^2 + L_2^2 + 2L_3 L_2 \sin\theta_2 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 2L_3 L_2 \cos\theta_2 \cos(\theta_2 + \theta_3). \quad (9)$$

由式(9)解得:

$$\theta_3 = \cos^{-1} \frac{1}{2L_3 L_2} [(p_z - L_1)^2 + \cos^2 \theta_1 P_x^2 + 2\cos\theta_1 \sin\theta_1 P_x P_y + \sin^2 \theta_1 P_y^2 - L_3^2 - L_2^2]. \quad (10)$$

1.3.3 求 θ_2 将之前所求得的 θ_1, θ_3 代入 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_3$ 中, 再在矩阵两边依次左乘 $\mathbf{A}_1^{-1}, \mathbf{A}_2^{-1}, \mathbf{A}_3^{-1}$, 得:

$$\mathbf{A}_3^{-1} \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{T}_3 = \mathbf{E}, \quad (11)$$

$$-\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) P_x + \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) P_y + \cos(\theta_2 + \theta_3) P_z - \cos(\theta_2 + \theta_3) L_1 + L_2 \sin\theta_3 = 0. \quad (14)$$

联立式(13)和式(14), 可得:

$$\cos(\theta_2 + \theta_3) = \frac{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}{(P_z - L_1)^2 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)^2}, \quad (15)$$

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) = \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{(P_z - L_1)^2 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)^2}. \quad (16)$$

$$\tan(\theta_2 + \theta_3) = \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}, \quad (17)$$

$$\theta_{23} = \theta_2 + \theta_3 = \tan^{-1} \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)}, \quad (18)$$

$$\theta_2 = \theta_{23} - \theta_3 = \tan^{-1} \frac{(P_z - L_1)(L_2 \cos\theta_3 + L_3) + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y) L_2 \sin\theta_3}{-(P_z - L_1) L_2 \sin\theta_3 + (\cos\theta_1 \cdot P_x + \sin\theta_1 \cdot P_y)(L_2 \cos\theta_3 + L_3)} - \theta_3. \quad (19)$$

控制, 包括到达目标各个关节所要运行的角度运算, 设备之间的控制顺序等。根据生产工艺的要求, 可实现手动控制与自动控制的转换。系统根据相应动作信号, 完成对应指令动作^[12-13]。

2.3 PLC 硬件接线图

该装置的电气原理见图 2。该电气系统主要由 PLC 主机、直流继电器、电机、电机驱动器、执行装置继电器、开关等

表 2 I/O 口分配表

Table 2 I/O port allocation table

输入端口			输出端口		
名称	代码	地址编号	名称	代码	地址编号
运行按钮	SB1	I0.0	脉冲信号		Q0.0
停止按钮	SB2	I0.1	脉冲信号		Q0.1
			方向信号		Q0.2
			继电器	KM1	Q0.3
			继电器	KM2	Q0.4
			方向信号		Q0.5
			方向信号		Q0.7

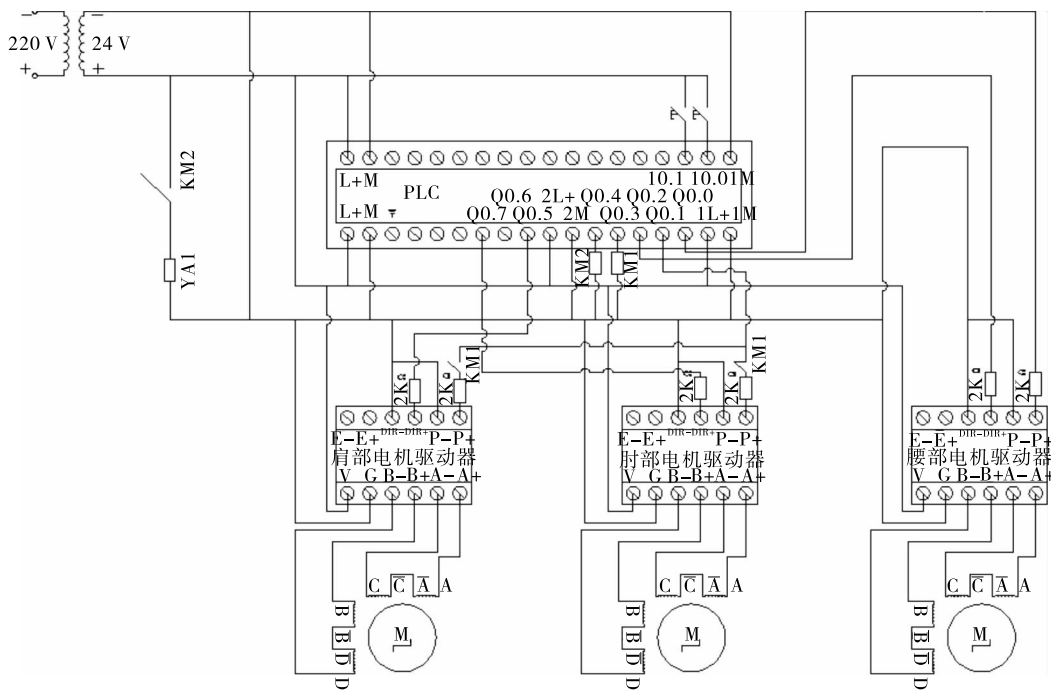


图2 电气原理图

Figure 2 Electrical schematic

组成,考虑到系统的需求和可扩展性,选择了 S7-200-CPU224,由于食品物料抓取机器人多为轻载运行,且要求运行精度高,所以腰部和肩部电机选用 86HS45 步进电机,驱动器采用 DM556 驱动器,肘部采用雷赛 57HS09 步进电机,驱动器采用 DM442 驱动器^[14-16]。

2.4 自动驾驶控制原理

STL(语句表)是一种文本编程语言,适合于经验丰富的程序员使用。可以实现其他编程语言不能实现的功能,语句表可供习惯汇编语言的用户使用,在运行时间和要求的存储空间方面最优。在设计通信、数学运算等高级应用程序时建议使用语句表^[17-19]。本研究通过 STL 语言来说明机器人的自动驾驶控制原理。

2.4.1 数据采集控制原理 机器人导航的数据采集主要是用来调整末端终点坐标参数的,根据用户输入的目的地坐标值不同,机器人可以有不同的位姿和运动。假定机器人末端终点坐标参数为 (P_x, P_y, P_z) ,本研究取 $(100, 100, 600)$ 为例,其控制语句图见图 3。

2.4.2 θ_1 角度控制原理 因为 $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{P_y}{P_x}$, θ_1 为腰部关节旋转参数,其中, P_x 和 P_y 的值由用户设定,所以使用在不同的场所,对应的值也不同。在求出 θ_1 后,还需要将角度转

LD	上电置1
MOVD	100,VD0
MOVD	100,VD4
MOVD	600,VD8

图3 数据采集控制原理

Figure 3 Principle of data acquisition and control

换成 PTO 脉冲数,才能使步进电机完成相应动作,所以,在程序中还需要加上如式(20)的转换方程:

$$c = \frac{\theta_1}{360} \times 4000, \tag{20}$$

式中:

c ——理论旋转角度对应的 PTO 脉冲数。

根据式(6)和式(20),可得 θ_1 角度导航原理,见图 4。

LD	上电置1
MOVR	VD4,VD12
/R	VD0,VD12
CALL	ARCTAN,VD12,VD12
/R	360.0,VD12
MOVR	VD12,VD16
AENO	
*R	4000.0,VD16
AENO	
ROUND	VD16,VD16

图4 θ_1 控制原理

Figure 4 Principle of θ_1 control

2.4.3 θ_2 角度控制原理 同理,根据终点坐标值能够得出 θ_2 , θ_2 为肩部关节旋转参数。

按式(19)计算出 θ_2 的值后,根据式(21)进行转换。

$$c = \frac{\theta_2}{360} \times 4000. \tag{21}$$

根据式(19)和式(21),可得 θ_2 角度导航原理,见图 5。

2.4.4 θ_3 角度控制原理 θ_3 为肘部关节旋转参数,按式(10)计算。

计算出 θ_3 的值后,根据式(22)进行转换。

$$c = \frac{\theta_3}{360} \times 4000, \tag{22}$$

根据式(10)和式(22),可得 θ_3 角度导航原理,见图 6。

```

MOVR VD104, VD110 +R VD84, VD88 COS VD12, VD56
-R VD106, VD110 AENO SIN VD12, VD60
LRD MOVR VD68, VD92 COS VD48, VD64
MOVR VD100, VD114 AENO SIN VD48, VD68
AENO *R 310.0, VD92 MOVR 310.0, VD68
/R VD110, VD114 AENO MOVR VD88, VD96
AENO *R VD64, VD68
CALLARCTAN, VD114, AENO AENO
LRD *R VD92, VD96 +R 200.0, VD68
MOVR VD114, VD118 AENO LRD
AENO MOVR VD76, VD100 MOVR VD8, VD72
-R VD48, VD118 +R VD96, VD100 AENO
AENO LRD -R 660.0, VD72
/R 360.0, VD118 MOVR VD68, VD104 AENO
AENO AENO MOVR VD68, VD76
MOVR VD118, VD122 *R VD88, VD104 *R VD72, VD76
*R 4000.0, VD122 AENO LRD
LPP MOVR VD72, VD106 MOVR VD56, VD80
ROUNDVD122, VD122 AENO AENO
*R VD4, VD84 *R VD92, VD106 *R VD0, VD80
AENO AENO AENO
MOVR VD80, VD88 LD 上电置1 AENO VD60, VD84
AENO LPS AENO
    
```

图 5 θ_2 控制原理

Figure 5 Principle of θ_2 control

```

LD 上电置1 AENO AENO MOVR VD176, VD28
LPS *R VD4, VD200 +R VD216, VD44 *R VD176, VD28
COS VDD0, VD180 AENO AENO *R VD32, VD44 LRD
AENO MOVR VD196, VD24 -R VD32, VD44 MOVR 310.0, VD32
MOVR VD180, VD184 *R VD200, VD24 -R VD36, VD44 *R 310.0, VD32
AENO LRD LRD MOVR 200.0, VD36
AENO MOVR VD192, VD204 LRD MOVR 200.0, VD36
AENO *R VD180, VD204 AENO *R 200.0, VD36
AENO MOVR VD204, VD208 AENO /R LRD
AENO AENO CALL ARCCOS, VD48, VD48 *R 310.0, VD40
AENO *R VDD0, VD188 AENO MOVR VD44, VD48 MOVR 310.0, VD40
AENO MOVR VD184, VD20 *R VDD0, VD208 LRD +R VD40, VD40
AENO *R VD188, VD20 AENO MOVR VD208, VD212 LRD MOVR VD40, VD40
LRD AENO LPP MOVR VD48, VD52 LRD
SIN VDD0, VD192 AENO *R VD4, VD212 AENO *R 4000.0, VD52 MOVR VD212, VD216 AENO
AENO MOVR VD192, VD196 AENO *R 2.0, VD216 ROUNDVD52, VD52 +R VD24, VD44
AENO *R VD192, VD196 LRD AENO AENO
MOVR VD4, VD200 MOVR VD8, VD176 AENO -R 660.0, VD176 AENO
    
```

图 6 θ_3 控制原理

Figure 6 Principle of θ_3 control

3 应用与调试

为了进一步验证该机器人导航系统的可靠性和稳定性,选取 10 对坐标,分别输入进行试验,试验用机器人相关参数见表 3。

由表 3 可知,试验用物料抓取机器人臂长分别为 660, 310, 200 mm,由于各个关节旋转角度细分数为 4 000,则各关节旋转精度在没有扰动的情况下可达到 0.09°。目标坐标的输入可采用人机界面或 PC 机输入,输入后按下启动,则机器人自动导航,按照机器人导航定位原理求出的参数运行,实现机器人的循环或者单向工作。经过实际操作,试验用机器人实际导航参数见表 4。

在相关调试试验中,该导航控制系统可以根据需求,通过调整控制系统目标参数来进行导航,由于每次输入抓取物料坐标后,导航系统可以自行导航,节省了以往机器人需要人工导引和示教盒示教的时间,使工作量大大降低,生产效率有所提高。试验工作状况良好,能够很好地适用于食品生产线的食品抓取^[20-21]。

表 3 试验用机器人相关参数

Table 3 Experimental robot parameters

连杆	θ	$\alpha / (^{\circ})$	a / mm	d / mm	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	步距角/ $(^{\circ})$	精度/ $(^{\circ})$
腰部	θ_1	90	0	660	0	1	1.8	0.09
肩部	θ_2	0	310	0	1	0	1.8	0.09
肘部	θ_3	0	200	0	1	0	1.8	0.09

表 4 试验用机器人导航参数

Table 4 Experimental robot parameters

试验组号	目标坐标 x / mm	目标坐标 y / mm	目标坐标 z / mm	腰部转 角/ $(^{\circ})$	肩部转 角/ $(^{\circ})$	肘部转 角/ $(^{\circ})$
1	100	100	600	45	190.20	-155.13
2	100	200	600	63.43	205.14	-131.7
3	100	300	600	71.57	26.10	-105.19
4	200	100	600	26.57	205.14	-131.71
5	200	200	600	45	26.83	-115.05
6	200	300	600	56.31	23.72	-91.16
7	200	400	600	63.43	14.19	-57.02
8	200	500	600	68.2	无解	无解
9	300	200	600	33.69	23.72	-91.20
10	300	300	600	45	17.5	-67.48

4 结论

(1) 构建了一种基于逆向运动学分析的物料抓取机器人的导航定位系统,得到了这种机器人的导航定位解。

(2) 针对机器人的导航提出了一种控制系统,通过语句表实现对机器人的导航控制,为机器人导航控制提供了理论依据。

(3) 将导航系统应用于物料抓取机器人系统,响应速度快,导航效果好,降低了操作工人的工作量,提高了生产效率,可以满足食品物料抓取作业要求。

(4) 本导航系统导航精度高,导航精度每关节可达到 0.09°,而且导航精度可以通过适当更改语句表而提高。

参考文献

- [1] 周灿宇. 基于 PLC 的椭圆形鱼罐头机器人自动装箱生产线[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 87-89.
- [2] 陈岩, 朱峰. CZC-1 新型片状物料抓取叠片机械手系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 88-90.
- [3] 高铁红, 石凯, 南雅芳, 等. 块状食品拾放并联机械手视觉系统及其实现[J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(6): 35-38.
- [4] 韩肖. 人工成本倒逼企业转型餐饮食品业机器人或将爆发[EB/OL]. (2015-9-18) [2016-2-24]. http://www.ce.cn/cyisc/sp/info/201509/18/t20150918_6515592.shtml.
- [5] 百度百科. 示教再现机器人[EB/OL]. (2016-2-11) [2016-2-24]. http://baike.baidu.com/link?url=i9XKHq79tLb-j3ezbwatuO_lTWTGTzY5i3_4yWtVWDh3ndOrGH_5mDKKpqH9_flxHuP8bDgXK0-CXAoFvfrfq.
- [6] 孟庆宽, 仇瑞承, 张漫, 等. 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 29-37.
- [7] 朱加雷, 金嘉怡, 乔溪, 等. 工业焊接机器人空间定位技术研究[J]. 电焊机, 2014, 44(1): 5-8.
- [8] 李增科, 王坚, 高井祥. 精密单点定位在 GPS/INS 组合导航中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2013, 38(1): 48-51.
- [9] Wang Jin-song, Liu Xin-jun, Wu Chao. Optimal design of a new spatial 3-DOF parallel robot with respect to a frame-free index[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4): 986-999.

贝壳有破损率仅为1%，满足损伤率低于2%的设计要求，2 h后扇贝存活率为98%。试验证明无论是除杂程度，还是损伤率均满足要求，而且能够保持海湾扇贝的活性。

4 结论

本试验针对国内外扇贝清洗现状及海湾扇贝生物特点，设计一种上下层毛刷辊交错布置，结合高压喷气装置的扇贝清洗机。通过正交试验对影响清洗效果的主要参数进行了优化，得到了上下两层相邻毛刷辊的辊芯距为111 mm，下排两边毛刷辊的转速 v_1 为120 r/min，下排中间毛刷辊的转速 v_2 为360 r/min，上排毛刷辊的转速 v_3 为200 r/min的最优参数组合。该机采用双层毛刷辊和高压喷气，解决了采用高压水清洗扇贝存活率降低的问题，充分保证了扇贝在后续加工中的鲜活性，符合节能、节水的设计要求。对扇贝清洗设备的研制具有现实意义。

参考文献

[1] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 630-632.

(上接第70页)

- [8] Slaughter D C. Nondestructive determination of internal quality in peaches and nectarines[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(2): 617-623.
- [9] 陈香维. 猕猴桃近红外光谱无损检测技术研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2009: 119-129.
- [10] Schmilovitch Z, Mizrach A, Hollmun A, et al. Determination of mango physiological indices by near-infrared spectrometry [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 5(19): 245-252.
- [11] 李东华, 纪淑娟, 重腾和明. 南国梨糖、酸度近红外光谱模型适用的贮藏研究[J]. 农业工程学, 2009, 25(4): 270-275.
- [12] 李建平, 傅霞萍, 周莹, 等. 近红外光谱定量分析技术在枇杷可溶性固形物无损检测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(9): 1 605-1 609.
- [13] Fu Xia-ping, Li Jian-ping, Zhou Ying, et al. Determination of soluble solid content and acidity of loquats based on FT-NIR spectroscopy[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2009, 10(2): 120-125.

(上接第85页)

- [10] 管小清, 吕志强. 工业码垛机器人动力学仿真分析与研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 149-151, 176.
- [11] 李峰, 张雪松, 程敏, 等. 一种3R1P机器人的关节驱动方程及其运动状态研究[J]. 机械工程师, 2015(9): 10-13.
- [12] 李宏, 花勇. 机械装瓶布料控制系统 PLC 设计[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 114-118.
- [13] 杨伯金, 张跃明, 牟宏明, 等. 基于 PLC 刀库控制系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(2): 107-109.
- [14] 杨志成, 朱永林, 耿瑞芳, 等. 运用 PLC 的电气控制系统在真空封口机中的应用[J]. 现代制造工程, 2015(2): 131-135.
- [15] 李胜多, 尚书旗, 王东伟. 基于 PLC 的种禽料量调节系统的设计[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 141-144, 159.

- [2] 滕桂君, 弋景刚, 刘江涛, 等. 毛刷辊式扇贝清洗机[J]. 食品与机械, 2015, 31(2): 168-170.
- [3] 弋景刚, 尹欣玲, 孔德刚, 等. 一种扇贝清洗机: 中国, CN204104660U[P]. 2015-01-21.
- [4] 满桂富, 邓海钦, 熊东生, 等. 一种芒果核清洗机: 中国, CN103504451A[P]. 2014-01-15.
- [5] 陈培欣, 宋曙光. 一种电磁调速电动机控制装置: 中国, CN200953540[P]. 2007-09-26.
- [6] 陆玉, 冯立艳. 机械设计课程设计[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 10-14.
- [7] 蔡春园. 新编机械设计手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1993: 368.
- [8] 三浦宏文. 机电一体化实用手册[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 222-232.
- [9] 滕桂君, 弋景刚, 李娜, 等. 一种清洗海湾扇贝装置的设计[J]. 农机化研究, 2015(4): 91-94.
- [10] 王万中, 崑诗松. 试验的设计与分析[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1997: 37-46.
- [11] 汪仁官, 陈荣昭. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 1998: 136-145.

- [14] Fu Xia-ping, Ying Yi-bin, Zhou Ying, et al. Application of probabilistic neural networks in qualitative analysis of near infrared spectra: Determination of producing area and variety of loquats[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, 598(1): 27-33.
- [15] 王元秀, 庄海燕. 微量滴定法测定猕猴桃中维生素 C 的含量[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2001, 15(4): 374-375.
- [16] 闵顺耕, 李宁, 张明祥. 近红外光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(10): 1 205-1 209.
- [17] Bedrick E. Graphical modelling and the mahalanobis distance [J]. Journal of Applied Statistics, 2005, 32(9): 959-967.
- [18] 牛智有, 韩鲁佳, 苏晓鸥, 等. 鱼粉中肉骨粉含量的近红外反射光谱分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(8): 126-129.
- [19] Malley DF, Rönicke H, Findlay D, et al. Feasibility of using near-infrared reflectance spectroscopy for the analysis of C, N, P and diatoms in lake sediments[J]. Journal of Paleolimnology, 1999, 21(3): 295-306.
- [16] 余梅, 刘国巍. 基于 PLC 矿用喷涂机械手控制系统设计[J]. 煤炭工程, 2015, 47(1): 130-132.
- [17] 韩慧, 倪荣军, 孙计赞. 基于 PLC 食品检测实验室自动加液装置的设计与实现[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 130-132.
- [18] 张浩栋, 张燕, 曾小英, 等. 基于 PLC 的香蕉秸秆自动打包机的设计和控制研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(4): 115-118.
- [19] S7-200 系列 PLCSTL(语句表)语言[EB/OL]. (2015-01-28) [2016-2-24]. http://www.aitmy.com/news/201501/28/news_78732.html.
- [20] 韩浩定, 张燕, 闫二乐. 香蕉秸秆切片装置及其控制系统设计[J]. 食品与机械, 2014, 30(2): 106-108.
- [21] 廖育武. 基于 PT/PLC 的瓜果去皮生产线智能控制系统设计[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 161-164.