

基于点约束的工业机器人标定系统研究

Research on industrial robot calibration system based on point constraint

邓志辉^{1,2}丁晨阳³张西良¹DENG Zhi-hui^{1,2} DING Chen-yang³ ZHANG Xi-liang¹

(1. 江苏大学, 江苏 镇江 212013; 2. 常州信息职业技术学院, 江苏 常州 213164;

3. 扬州职业大学, 江苏 扬州 225009)

(1. Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China; 3. Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

摘要:设计了基于点约束的工业机器人标定系统,其主要原理是通过控制工业机器人末端执行器上的激光指针,使得激光束在 4 处位置分别能够照射到第 1 个位置传感装置(PSD)中心,并反射到第 2 个位置传感装置中心,实现激光束校准,获取 4 组关节角,并通过关节角分别计算出末端执行器位姿的线性方程,根据各线性方程的交点为同一点(点约束),运用 Isqnonlin 函数搜索出工业机器人关节角偏差。试验在建立标定系统模型的基础上,以 ABB 公司的 IRB120 型工业机器人作为试验平台,进行了 6 次标定试验,试验结果表明:基于点约束的工业机器人标定系统可以快速、精确地计算出工业机器人的 J2~J6 关节角偏差,由于变换矩阵原因,关节角 J1 暂不能标定。

关键词:点约束;模型;关节角;标定;工业机器人

Abstract: In order to calibrate the joint angle of industrial robot quickly and accurately, a calibration system of industrial robot based on point constraint is designed. The principle is to calibrate the laser beam to irradiate in the center of the first PSD (Position Sensing Device) and reflected to the second PSD center in four positions by controlling the laser pointer on the end-effector of the industrial robot, and obtain four groups of joint angles, and calculate the linear equations of the position and orientation of the end-effector by the joint angles respectively. According to the fact that the intersection point of each linear equation is the same point (point constraint), the Isqnonlin function is used to search the angle deviation of industrial robot joint. Based on the model of calibration system, six calibration experiments are carried out

with ABB Company's IRB120 industrial robot as the experimental platform. The experimental results show that the industrial robot calibration system based on point constraints can calculate the J2~J6 joint angle deviation of the industrial robot quickly and accurately, and the joint angle J1 cannot be calibrated temporarily because of the transformation matrix.

Keywords: point constraint; model; joint angle; calibration; industrial robot

在现代食品生产工业体系中,对自动化、智能化的需求不断提高,工业机器人作为一种智能化装备在食品生产过程中具有举足轻重的作用,但工业机器人存在重复定位精度高、绝对定位精度低的特性,近年来食品工业中对于绝对定位精度要求高的应用场合越来越多,工业机器人的绝对定位精度远远不能满足要求^[1-2]。

影响工业机器人绝对定位精度的因素很多,主要有热膨胀、减速器齿轮啮合误差、机械结构变形、连杆和关节的 D-H 参数误差等^[3],而工业机器人运动学模型的参数误差是影响其绝对定位精度的主要因素之一。工业机器人的大部分运动学参数(如连杆长度、连杆扭角等)与机械结构有关,这些参数在工业机器人生产调试过程中被设置并保持^[4]。另一些运动学参数,如关节偏移角,在长时间运行后或当电机、编码器被更换时,实际值会发生改变,从而偏离设定值^[5]。据统计^[6-7],工业机器人大约 88% 的绝对定位误差是由于初始设定的关节角零位偏差值和实际的零位偏差值之间的误差造成的。因此,必须对工业机器人的关节角零位进行重新标定来提高其绝对定位精度。

当前工业机器人标定方法主要有立体视觉法、虚拟闭合运动链法、协进化网络法、伪误差法等,所使用的仪器包括经纬仪^[8]、激光束投影^[9]、二维机器视觉^[10]、便携式坐标测量机^[11]等,然而,这些方法要么受到环境的影

基金项目:国家自然科学基金(编号:51575248);江苏省高校“青蓝工程”项目资助;扬州市自然科学基金(编号:YZ2016124)

作者简介:邓志辉(1979—),男,常州信息职业技术学院副教授,江苏大学在读博士研究生。

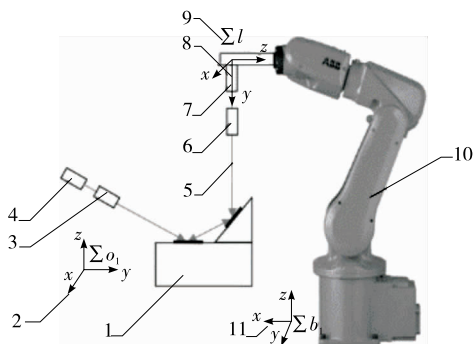
E-mail: dengzh1979@126.com

收稿日期:2018-12-26

响,要么耗时且昂贵,在实际应用场合很难推广。时定兵等^[12-13]提出了基于点约束的机器人运动学参数标定方法,但此方法存在 2 个缺陷:① 需要同时控制待标定的工业机器人和二自由度平台,保证激光束能垂直射到位置传感装置(PSD)中心点,操作不方便且耗时较长;② 系统采用非固定式单 PSD,存在一定的误差,准确度低。本试验提出了一种全新的基于点约束的工业机器人关节角零位标定系统,采用固定式双 PSD 配置,通过对工业机器人的正、逆运动学和相应搜索算法的研究,实现快速、自动、准确的工业机器人的关节角的标定。

1 标定原理

基于双 PSD 点约束的工业机器人零位自标定系统工作原理如图 1 所示,首先控制工业机器人的末端执行器到位置 1,并调整方向,使激光照射在第 1 个位置传感器(PSD)中心,并反射到第 2 个位置传感器(PSD)中心,从而获得 1 组工业机器人关节角(6 个),同理,在位置 2、3、4 同样获得 3 组关节角,按照工业机器人正运动学公式,可以计算出 4 组末端执行器的位置和姿态,从理论上来说,位置 1、2 处激光的线性方程应该相同,位置 3、4 处激光的线性方程应该相同,因此,位置 1 和 3、位置 1 和 4、位置 2 和 3、位置 2 和 4 等 4 组线性方程形成的 4 个交点理论上应该是同一点,这样形成了点的约束,建立约束方程,通过搜索算法而获得工业机器人初始关节角的零位偏差。



1. 位置传感固定装置(PSCF) 2. 位置传感固定装置坐标系 3. 位置 1 4. 位置 2 5. 激光束 6. 位置 3 7. 位置 4 8. 激光指针 9. 激光指针坐标系 10. 工业机器人 11. 工业机器人基坐标系

图 1 工业机器人标定原理图

Figure 1 Schematic diagram of industrial robot calibration

2 标定模型的建立

2.1 激光校正模型

如图 1 所示, $\sum o_1$ 为 PSCF 坐标系, $\sum b$ 为工业机器人的基坐标系, $\sum l$ 为固定在工业机器人末端执行器上的激光指针坐标系,且 y 轴与激光方向一致。FSCF 坐

标系 $\sum o_1$ 和工业机器人基坐标系 $\sum b$ 的转换关系是未知的。

假设在工业机器人的基坐标系 $\sum b$ 中,关节角速度为 $\dot{q}, \dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4, \dot{q}_5, \dot{q}_6]^T$,末端执行器的位姿速度为 $\dot{Y}_b, \dot{Y}_b = [\dot{x}_b, \dot{y}_b, \dot{z}_b, \dot{\gamma}_b, \dot{\rho}_b, \dot{\phi}_b]^T$,可得出:

$$\dot{Y}_b = J_r(q)\dot{q}, \quad (1)$$

式中:

$J_r(q)$ ——基坐标系 $\sum b$ 中工业机器人关节角和末端执行器位姿的雅可比矩阵。

在 FSCF 坐标系 $\sum o_1$ 中,工业机器人末端执行器的位姿速度为 $\dot{Y}_p, \dot{Y}_p = [\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p, \dot{\gamma}_p, \dot{\rho}_p, \dot{\phi}_p]^T$ 激光束在 2 个 PSD 上的位置坐标为 $\dot{\eta}_p, \dot{\eta}_p = [\dot{x}_1, \dot{y}_1, \dot{x}_2, \dot{y}_2]^T$,可得出:

$$\dot{\eta}_p = J_p(Y_p)\dot{Y}_p, \quad (2)$$

式中:

$J_p(Y_p)$ ——FSCF 坐标系 $\sum o_1$ 中工业机器人末端执行器和激光点位置的雅可比矩阵。

假设工业机器人的基坐标系 $\sum b$ 和 FSCF 坐标系 $\sum o_1$ 的转换矩阵为 T 。

$$A(T) = \begin{pmatrix} R & S \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

可得:

$$\dot{Y}_p = A(T)\dot{Y}_b = \begin{pmatrix} R & \\ & R \end{pmatrix} \dot{Y}_b, \quad (4)$$

$$Y_p = f(Y_b, T), \quad (5)$$

由式(1)、(2)、(4)和(5),可以得到完整的系统模型。

$$\dot{\eta}_p = J_p[f(Y_b, T)]A(T)J_r(q)\dot{q}. \quad (6)$$

基于点约束的工业机器人标定系统第一步必须进行激光校准,给定 2 个 PSD 上激光点的理想位置(PSD 中心点)如下:

$$\dot{\eta}_p^d = [x_1^d, y_1^d, x_2^d, y_2^d]^T. \quad (7)$$

由式(6)可以推导出:

$$\dot{q} = \{J_p[f(Y_b, T)]A(T)J_r(q)\}^{-1}[k(\eta_p^d - \eta_p)], \quad (8)$$

式中:

k ——系统增益。

由于 T 是未知的,假设预估变换矩阵为 $\hat{T}$,对于任何一个矢量 e ,如果矢量 $\{J_p[f(Y_b, \hat{T})]A(\hat{T})J_r(q)\}^{-1}e$ 中的元素符号和矢量 $\{J_p[f(Y_b, T)]A(T)J_r(q)\}^{-1}e$ 中元素符号保持一致,预估矩阵 $\hat{T}$ 能使 η_p 到达 η_p^d ,即预估矩阵的位置符号与实际变换矩阵的位置符号必须相同,预估矩阵的旋转角和实际变换矩阵的旋转角误差不能超过 90° ,这样可以快速使得激光束照射在第 1 个 PSD 中心,

并反射到另 1 个 PSD 中心,从而可以分别获得 4 个位置工业机器人关节角,分别为 q_1, q_2, q_3, q_4 。

2.2 零位搜索模型

假设工业机器人的关节角零位偏差值为 $\Delta q, \Delta q = [\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3, \Delta q_4, \Delta q_5, \Delta q_6]^T$, 可以获得 4 个位置的工业机器人实际关节角为 $(q_1 + \Delta q), (q_2 + \Delta q), (q_3 + \Delta q), (q_4 + \Delta q)$, 根据工业机器人的 D-H 参数, 可以计算出在 4 组关节角下工业机器人末端执行器的位姿状态, 并根据位姿状态获得相应的线性方程, 获得相应的交点。

计算出的工业机器人末端执行器的位姿线性方程是带 Δq 的函数, 因此, 求出的交点也是带 Δq 的函数。位置 1、2 和 3、4 两两组合, 形成 4 个交点 p_1, p_2, p_3, p_4 。求出 4 个交点的坐标平均数 $p = [x_a, y_a, z_a]^T$, 根据点约束原则, 4 个交点应为同一点, 因此, 得出方程:

$$f_1 = p_1 - p, \quad (9)$$

$$f_2 = p_2 - p, \quad (10)$$

$$f_3 = p_3 - p, \quad (11)$$

$$f_4 = p_4 - p. \quad (12)$$

运用最小二乘法原理, 使得函数 f 的均方误差最小, 运用 Isqnonlin 方法进行搜索, 从而获得 Δq , 最终得到工业机器人的关节角零位偏差值, 完成标定工作。

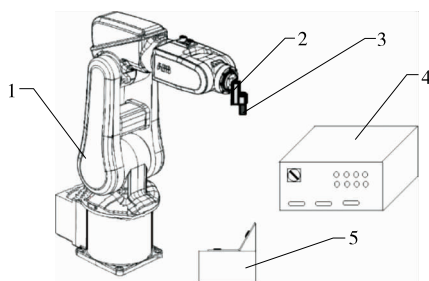
3 试验硬件配置

3.1 硬件组成

基于点约束的工业机器人关节角零位标定系统的硬件配置如图 2 所示, 主要由六自由度的 ABB 工业机器人 (IRB120)、工业机器人控制器 (IRC5 M2004)、固定在工业机器人末端执行器上的激光指针、固定在激光指针附近照相机以及位置传感固定装置 (PSCF) 组成。照相机主要作视觉伺服以确定激光指针的初始位置和角度。

3.2 位置传感固定装置

位置传感固定装置如图 3 所示, 包括信号放大电路、



1. ABB 工业机器人 (IRB120) 2. 照相机 3. 激光指针 4. 控制器 (IRC5 M2004) 5. 位置传感固定装置 (PSCF)

图 2 双 PSD 工业机器人标定系统硬件配置

Figure 2 Hardware configuration of industrial robot calibration system

数据采集模块、USB 无线传输模块、电源模块。PSD 作为核心部件, 选择了 OSI 系统公司的 SPOT 系列产品, 其分辨率为 $0.1 \mu\text{m}$ 。即使在试验条件下, 其分辨率仍可达 $2 \mu\text{m}$, 因此, 完全能满足校准系统的要求。

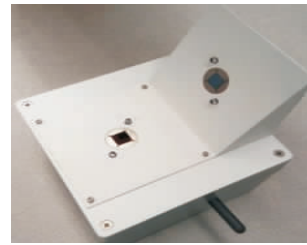


图 3 位置传感固定装置

Figure 3 Position sensing fixing device

3.3 试验工业机器人 D-H 参数

本文采用 ABB 公司的 IRB120 型工业机器人作为试验对象, 其 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 IRB120 型工业机器人 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of IRB120 industrial robot

连杆	d/mm	a/mm	α/rad
L_1	290.0	0	-1.571
L_2	0.0	270	0.000
L_3	0.0	-70	1.571
L_4	302.0	0	-1.571
L_5	0.0	0	1.571
L_6	108.8	108	0.000

4 试验与分析

4.1 激光校正试验

基于点约束的工业机器人标定试验第一步必须假设预估矩阵, 并且要求预估矩阵的位置符号与实际变换矩阵的位置符号必须相同, 预估矩阵的旋转角和实际变换矩阵的旋转角误差不能超过 90° , 这样才能保证快速的获取 4 个位置工业机器人关节角。因此, 试验前必须恰当摆放位置传感装置的位置。

本试验中, 摆放位置传感装置的位置, 使得 PSCF 标系和工业机器人基坐标系的角度近似为 0° , 并测量出 2 个坐标系之间的位移近似为 $P = [-341, 0, -125]^T$, 从而获得预估变换矩阵为:

$$\hat{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -341 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

利用固定在工业机器人末端执行器上激光指针附近的照相机, 通过视觉伺服功能, 使得激光束能够照射到第

1 个 PSD 上,并且反射到第 2 个 PSD 上,再运用本文建立的标定模型和预估变换矩阵,实现激光束的 PSD 中心校准,如图 4 所示,由于预估变换矩阵和真实变换矩阵存在一定误差,收敛过程中存在一些振动,但整体趋势会迅速收敛,同时由于工业机器人精度的限制,收敛后的存在一定微小的振动,但不影响整体标定系统。

4.2 试验数据与分析

运用激光束校准方法,通过试验测量了 6 组数据,如表 2 所示。

对表 2 的数据分别运用 MATLAB 中的 Isqnonlin 函数进行搜索,设置迭代初值 $x_0=[0,0,0,0,0,0]^T$,设置函数值的终止容限为 $1e-5$,最大迭代次数为 2 000,根据本试验用 IRB120 型工业机器人状况,关节角误差不会超过 $\pm 4.5^\circ(0.078\ 5\ \text{rad})$,因此,设定目标的上下限值分别为:

$$V_1=[0.078\ 5,0.078\ 5,0.078\ 5,0.078\ 5,0.078\ 5,0.078\ 5]^T, \tag{14}$$

$$V_2=[-0.078\ 5,-0.078\ 5,-0.078\ 5,-0.078\ 5,-0.078\ 5,-0.078\ 5]^T. \tag{15}$$

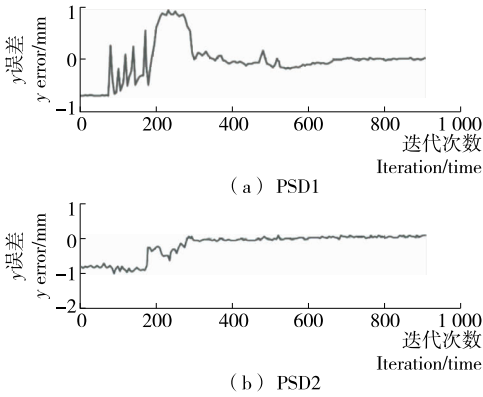


图 4 激光束校准 y 轴位置误差
Figure 4 Laser beam calibration y axis position error

从表 3 可以看出,6 组数据获得的工业机器人关节角偏差值中,除了 J2 和 J3 完全一样,其他都存在一定的差异。比较 Isqnonlin 函数的参数设置,可知 J2 和 J3 的偏差值已经到了目标设定的上限值,虽然在 6 组数据中计算出的偏差值一致,但并不能说明为其真实的偏差值。

表 2 激光校准测量数据

Table 2 The measurement data of laser calibration rad

关节角	第 1 组数据				第 2 组数据			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
J1	-0.931 7	-0.910 7	-0.016 3	-0.015 9	-0.892 2	-0.877 7	-0.015 6	-0.015 3
J2	1.089 7	0.999 4	0.019 0	0.017 4	0.943 4	0.921 2	0.016 5	0.016 1
J3	-0.794 6	-0.595 1	-0.013 9	-0.010 4	-0.467 7	-0.408 7	-0.008 2	-0.007 1
J4	1.789 4	1.873 9	0.031 2	0.032 7	1.930 8	1.960 9	0.033 7	0.034 2
J5	0.970 1	0.978 6	0.016 9	0.017 1	0.986 0	0.988 3	0.017 2	0.017 2
J6	-0.919 2	-1.053 2	-0.016 0	-0.018 4	-1.142 5	-1.186 8	-0.019 9	-0.020 7
关节角	第 3 组数据				第 4 组数据			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
J1	-0.934 0	-0.909 3	-0.016 3	-0.015 9	-0.880 4	-0.875 9	-0.015 4	-0.015 3
J2	1.040 1	0.958 6	0.018 2	0.016 7	0.894 3	0.890 0	0.015 6	0.015 5
J3	-0.696 3	-0.510 8	-0.012 2	-0.008 9	-0.355 0	-0.343 1	-0.006 2	-0.006 0
J4	1.832 0	1.913 7	0.032 0	0.033 4	1.989 3	1.994 8	0.034 7	0.034 8
J5	0.977 9	0.987 3	0.017 1	0.017 2	0.998 3	0.998 5	0.017 4	0.017 4
J6	-0.981 8	-1.109 5	-0.017 1	-0.019 4	-1.223 2	-1.232 5	-0.021 3	-0.021 5
关节角	第 5 组数据				第 6 组数据			
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
J1	-0.918 8	-0.880 7	-0.016 0	-0.015 4	-0.880 7	-0.948 2	-0.016 5	-0.016 0
J2	1.183 1	1.013 8	0.020 6	0.017 7	1.013 8	1.116 2	0.019 5	0.017 2
J3	-0.974 4	-0.611 2	-0.017 0	-0.010 7	-0.611 2	-0.858 5	-0.015 0	-0.009 9
J4	1.709 3	1.855 6	0.029 8	0.032 4	1.855 6	1.765 5	0.030 8	0.032 9
J5	0.958 7	0.965 2	0.016 7	0.016 8	0.965 2	0.973 3	0.017 0	0.017 1
J6	-0.804 8	-1.043 9	-0.014 0	-0.018 2	-1.043 9	-0.876 3	-0.015 3	-0.018 7

表 3 工业机器人关节角标定结果

Table 3 Calibration results of Industrial robot joint angles rad

关节角	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	数据最大偏差
J1	0.059 6	0.078 1	0.070 0	0.066 2	0.072 3	0.076 5	0.018 5
J2	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.000 0
J3	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.078 5	0.000 0
J4	-0.063 8	-0.078 5	-0.067 8	-0.062 4	-0.069 2	-0.065 8	0.016 1
J5	0.032 0	0.025 7	0.030 4	0.024 9	0.031 5	0.028 2	0.007 1
J6	0.025 3	0.033 8	0.030 8	0.038 5	0.036 2	0.036 9	0.013 2

通过对图 1 进行分析,工业机器人第 1 关节角 J1 的偏差可以当作工业机器人基坐标系围绕 z 轴旋转 J1 偏差角度,从而直接影响 PSCF 坐标系和工业机器人基坐标系之间的真实变换矩阵,即 J1 的偏差可以融入到 2 个坐标系的真实变换矩阵中,并不影响 J2~J6 关节角的标定。因此,假设 J1 的偏差值为 0,运用 Isqnonlin 函数重新计算

J2~J6 的偏差,结果如表 4 所示。

从表 4 可知,在假设关节角 J1 的偏差为 0 时,分别以 6 组数据搜索计算得出的关节角 J2~J6 偏差值基本一致,虽然没有通过其他方法来测量试验用工业机器人关节角的真实偏差,但从 6 组数据的一致性,基本可以证实基于点约束的工业机器人标定系统的有效性和精确性。

表 4 工业机器人关节角标定结果

Table 4 Calibration results of Industrial robot joint angles ($\Delta J1=0$) rad

关节角	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	数据最大偏差
J2	0.052 6	0.052 4	0.051 8	0.052 7	0.052 2	0.052 4	0.000 9
J3	-0.066 5	-0.065 9	-0.066 7	-0.066 5	-0.066 1	-0.065 6	0.000 8
J4	-0.049 3	-0.049 2	-0.049 5	-0.049 0	-0.049 5	-0.049 5	0.000 5
J5	0.000 4	0.000 5	0.000 5	0.000 4	0.000 3	0.000 4	0.000 2
J6	0.057 3	0.056 5	0.056 6	0.056 9	0.057 3	0.056 8	0.000 8

5 结论

(1) 基于点约束的工业机器人标定系统能够快速精确地标定出工业机器人关节角的零位偏差(J1 除外)。

(2) 系统对硬件的依赖程度较低,对操作人员的要求也不高,能够大大降低工业机器人标定的成本,有效克服了传统标定方法依赖昂贵的仪器设备、耗时较长、对标定人员要求较高、精度较低等缺陷。

(3) 目前,系统在激光束的定位效率、搜索计算效率等方面还有待提高,下一步工作需要在降低激光束迭代次数(多目标控制)和搜索算法方面做进一步研究。

随着工业机器人的应用领域不断增多,对精度要求越来越高,工业机器人的关节角标定显得越来越重要,基于点约束的工业机器人标定系统具有易操作、低成本、易携带的特点,对促进工业机器人在食品行业的进一步推广和应用,提高工业机器人的绝对定位精度具有十分重要的意义。

参考文献

[1] MARKO S, BOJAN S, FILIP S, et al. Calibration of an industrial robot using a stereo vision system[J]. DAAAM Vi-

enna, 2014, 3(12): 459-463.
[2] ZHANG Dan, GAO Zhen. Optimal kinematic calibration of parallel manipulators with pseudo error theory and cooperative coevolutionary network[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2012, 8(59): 3 221-3 231.
[3] 李璐陈, 曾谊晖. 六关节工业机器人工作空间及轨迹规划仿真[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 98-103.
[4] 王惠. 基于 PSD 的工业机器人无标定位系统[J]. 机床与液压, 2017, 45(3): 106-108.
[5] 黄冠成, 陈新度. 工业机器人末端执行器的柔顺示教研究[J]. 机械设计与制造, 2017(12): 255-257.
[6] NUBIOLA A, BONEV A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29: 236-245.
[7] DENG Xun, CHEN Zhong, LIANG Jia-hui. Calibration of a robot vision system coupled with structured light: method and experiments[J]. Intelligent Robotics and Applications, 2014, 8 918: 256-264.
[8] NUBIOLA A, BONEV A. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar[J]. Precision Engineering, 2014, 38: 472-480.

(下转第 143 页)

- [17] ARIZMENDICOTERO D, GOMEZESPINOSA R M, DUBLAN G O, et al. Electron paramagnetic resonance study of hydrogen peroxide/ascorbic acid ratio as initiator redox pair in the inulin-gallic acid molecular grafting reaction[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 136: 350-357.
- [18] LIU Jun, LU Jian-feng, KAN Juan, et al. Synthesis of chitosan-gallic acid conjugate: structure characterization and in vitro anti-diabetic potential[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62(11): 321-329.
- [19] LIU Jun, MENG Cheng-guang, YAN Ye-hua, et al. Protocatechuic acid grafted onto chitosan: characterization and antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 89(1): 518-526.
- [20] ARIZMENDICOTERO D, VILANUEVA-CARVAJAL A, GOMEZESPINOSA R M, et al. Radical scavenging activity of an inulin-gallic acid graft and its prebiotic effect on Lactobacillus acidophilus in vitro growth [J]. Journal of Functional Foods, 2017, 29: 135-142.
- [21] LI Jing-lei, SU Y K, CHEN Xi-guang, et al. Calcium-alginate beads loaded with gallic acid: preparation and characterization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68(132): 667-673.
- [22] CHENG Yi, LUO Xiao-long, BETZ J, et al. Mechanism of anodic electrodeposition of calcium alginate [J]. Soft Matter, 2011, 7(12): 5 677-5 684.
- [23] CAMPOS-VALLETTE M M, CHANDIA N P, CLABIJO E, et al. Characterization of sodium alginate and its block fractions by surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2010, 41(7): 758-763.
- [24] POMPEU D R, LARONDELLE Y, ROGEZ H, et al. Characterization and discrimination of phenolic compounds using Fourier transform Raman spectroscopy and chemometric tools[J]. Biotechnology Agronomy & Society & Environment, 2018, 22(1): 13-28.
- [25] CADILLA C L, HARP J, FLANAGAN J M, et al. Preparation and characterization of microcapsules of Pterodon pubescens Benth. By using natural polymers [J]. Brazilian Journal of Pharmaceutical Science, 2014, 50(4): 919-930.
- [26] GONIL P, SAJOMSANG W, RUKTANONCHAI U R, et al. Novel quaternized chitosan containing β -cyclodextrin moiety: synthesis, characterization and antimicrobial activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 905-913.
- [27] PASANPHAN W, BUETTNER G R, CHIRACHANCHAI S. Chitosan gallate as a novel potential polysaccharide antioxidant: an EPR study [J]. Carbohydrate Research, 2010, 345(1): 132-140.
- [28] 吴昊, 王艺颖, 甄天元, 等. 壳聚糖没食子酸衍生物酶法催化条件优化及抗氧化活性和细胞毒性[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 227-232.
- [29] 赵珊, 贡汉生, 田亚晨, 等. 苯乳酸-海藻酸钠涂膜保鲜剂的制备及其在甜樱桃保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 221-226.

(上接第 57 页)

- [15] EZQUERRO Ó, PONS B, TENA M T. Development of a headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry method for the identification of odour-causing volatile compounds in packaging materials[J]. Journal of Chromatography A, 2002, 963(1): 381-392.
- [16] 魏长庆, 周琦, 刘文玉. HS-SPME-GC-MS 分析新疆胡麻油挥发性成分的技术优化[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 151-157.
- [17] 艾对, 张富新, 于玲玲, 等. 羊奶中挥发性成分顶空固相微萃取条件的优化[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(1): 40-46.
- [18] 薛妍君, 张丽, 冯莉, 等. 芥菜芳香成分的固相微萃取条件优化与分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 328-333.
- [19] 王双. 利用全二维气质联用仪对剑南春白酒中吡嗪类生理活性物质的研究[J]. 酿酒, 2016, 43(5): 49-50.
- [20] 孙惜时, 李文华, 李荣, 等. 芝麻香型白酒中硫化物和吡嗪类成分的抗氧化活性[J]. 酿酒, 2013, 40(4): 57-60.

(上接第 93 页)

- [9] NUBIOLA A, SLAMANI M, BONEV A. A new method for measuring a large set of poses with a single telescoping ballbar[J]. Precision Engineering, 2013, 2(37): 451-460.
- [10] RADKHAH K, HEMKER T, STRYK O. Self-calibration for industrial robots with rotational joints[J]. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 2010, 3(4): 187-209.
- [11] VUOLA A, TUOKKO R. Accuracy measurements of miniature robot using optical CMM [J]. Precision Assembly Technologies and Systems, 2012(371): 126-133.
- [12] 时定兵. 基于点约束的机器人运动学参数标定技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2014: 10-24.
- [13] 丁吉祥. 工业机器人运动学参数标定技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 17-26.