

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.05.022

# 奶油蛋糕远程 3D 打印机器人数控 协同机电系统设计

Design of robot NC cooperative electromechanical system  
for remote 3D cake printer

安嘉强 汤晓华 吴婧 杨泗萍 李天骄

AN Jia-qiang TANG Xiao-hua WU Jing YANG Si-ping LI Tian-jiao

(北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048)

(School of Material and Mechanical Engineering, Beijing Technology and  
Business University, Beijing, 100048, China)

**摘要:**在分析奶油蛋糕成形规律、制作工艺基础上,提出由 1 台三自由度机械臂和 1 台四轴的运动台协同构成奶油蛋糕加工机械本体,控制系统上采用 ARM 微控制器和 MCX514 运动控制芯片作为控制系统核心硬件;软件层面上,以 FreeRTOS 嵌入式操作系统和 GRBL 数控系统作为控制系统软件框架。经接触式三点握手的基坐标系标定可实现控制机械臂和运动台协同完成奶油蛋糕成形加工。

**关键词:**蛋糕; 3D 打印; 机器人; 数控系统; 协同

**Abstract:** Based on the analysis of the forming law and manufacturing technology of butter cake, a new butter cake processing machine body was proposed, consisting of a three-degree-of-freedom manipulator and a four-axis motion platform. In the control system, ARM microcontroller and MCX514 motion control chip were used as the core hardware of the control system. At the software level, FreeRTOS embedded operating system and GRBL numerical control system were used as the software framework of the control system. Through the calibration of the basic coordinate system of the contact three-point handshake, the manipulator and the motion table were cooperated to complete the butter cake processing and shaping.

**Keywords:** cake; 3D printing; robot; numerical control system; coordination

一般的奶油蛋糕制作过程先选用一定形状规格的蛋糕坯料,然后将奶油平整地涂抹在坯料上,此过程称为抹

坯,最后再做各种装饰,装裱花型,完成蛋糕加工工艺流程<sup>[1]</sup>。传统上这些工作都是由手工完成,效率、效果也因技师的技能不同而差别甚大。随着 3D 打印技术的不断成熟,其应用范围也随之扩展,在食品行业已有以巧克力、奶油、糖浆、面糊、果酱等为打印材料的 3D 食品打印机出现<sup>[2-3]</sup>。这种食品打印机通常是由 X、Y、Z 3 个方向的移动副构成,其中 X、Y 轴组成平面操作平台,带动喷嘴在平面内扫描,Z 轴在电机的带动下做垂直运动,X、Y 轴每扫描完 1 层,Z 轴移动 1 个厚度,X、Y 轴重新扫描,如此重复逐层堆积完成整个模型的成型<sup>[4]</sup>。逐层堆积的这种成型方式喷嘴始终垂直向下,这就要求模型下方不能出现悬空结构,否则就要在下面设计支撑结构,这对于食品打印来说后期的拆除不但麻烦而且还会造成食物浪费。

随着工业化程度的提高,特别是成型路径要求的提高,双机器人或者多机器人协同工作的优势越来越受到专家学者的关注<sup>[5-7]</sup>。目前的奶油蛋糕 3D 打印成型工艺中都是采用传统逐层扫描堆积成型<sup>[8-9]</sup>,没有出现双机器人或者多机器人协同完成奶油蛋糕成型加工,传统的逐层扫描堆积成型方式由于喷嘴的姿态不可调整,限制了蛋糕裱花造型的多样性。为了满足蛋糕成型加工运动的复杂性,尤其是装裱花型成型运动路径的多样性、复杂性,扩大机器的加工工艺范围,本设计拟采用 1 台三轴机械臂和 1 台四自由度的运动台协同完成蛋糕成型加工,对机器人以及运动台的结构进行设计,并使用微控制器加运动控制芯片的结构对控制器进行设计,开发了相应的上位机,最后对控制器及整个机电系统进行测试,以期提升蛋糕装裱造型加工的复杂程度和制作效率提供基础支撑。

**作者简介:**安嘉强,男,北京工商大学在读硕士研究生。

**通信作者:**汤晓华(1963—),男,北京工商大学教授,博士。

E-mail: tangxiaohua@th.btbu.edu.cn

**收稿日期:**2019-03-06

### 1 系统分析及规划

手工进行奶油蛋糕的加工是在转台上完成,操作者一手拿抹刀或者裱花袋,另一只手旋转转台,裱花时的成型轨迹一般是 1 个半径渐缩的 S 形螺旋,如图 1 所示。要完成这个造型运动轨迹需要 4 个自由度,其中 3 个联动完成锥螺旋插补,另外 1 个自由度控制半径的尺寸。按照这种加工思路,使用三轴的机械臂来模拟拿抹刀或者裱花袋的一只手,使用四自由度的运动台来带动坯料运动。

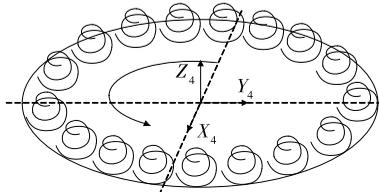


图 1 蛋糕裱花成形轨迹

Figure 1 Forming trajectory of cake mounting flower

裱花时的运动方程:

$$x = a \cos t, \tag{1}$$

$$y = a \sin t, \tag{2}$$

$$z = bt, \tag{3}$$

$$\alpha = ct, \tag{4}$$

式中:

$a$ ——螺旋最大半径,mm;

$b$ ——螺旋上升速度,mm/s;

$c$ ——A 轴旋转角速度,rad/s;

$t$ ——时间,s;

$x$ ——X 轴位移方程,mm;

$y$ ——Y 轴位移方程,mm;

$z$ ——Z 轴位移方程,mm;

$\alpha$ ——A 轴旋转角度,(°)。

为实现上述成形运动,设计蛋糕加工机械结构如图 2 所示。机械臂 3 个关节从左到右可以分别绕  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$  坐标系中的  $Z_1$  轴、 $Y_1$  轴、 $X_1$  轴转动以控制机械臂末端位姿。机械臂的基坐标系为  $O_1$ ,末端坐标系为  $O_3$ 。运动台系统可以沿  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$  坐标系下的  $X_2$  轴、 $Y_2$  轴、 $Z_2$  轴 3 个方向移动,并且可以绕  $Z_4$  轴转动,其基坐标系为  $O_2$ ,末端坐标系为  $O_4$ 。

机器人数控系统在协同工作时需要知道彼此末端的位置,采用末端三点握手的方式实现基坐标系标定。坐标系  $O_3$  相对于  $O_1$  的位姿为  ${}^{0_1}T_{0_3}$ ,坐标系  $O_4$  相对于  $O_2$  的位姿为  ${}^{0_2}T_{0_4}$ ,通过握手使  $O_3$  和  $O_4$  重合,利用式(5)即可确定  $O_1$  和  $O_2$  的关系。

$${}^{0_2}T_{0_4} = {}^{0_2}T_{0_3} \times {}^{0_3}T_{0_4} = {}^{0_1}T_{0_2}^{-1} \times {}^{0_1}T_{0_3} \tag{5}$$

当前市场上的运动控制器通常只针对单个机器人,

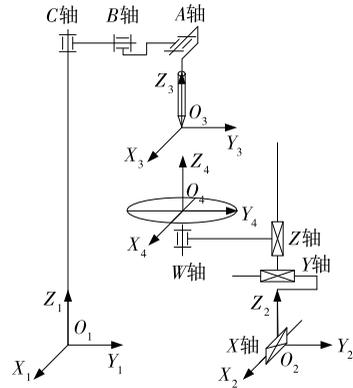


图 2 机械系统运动原理图

Figure 2 Motion schematic diagram of mechanical system

为了能同时控制机械臂和运动台协同工作,需要开发一款协同运动控制器作为该系统的控制部分。

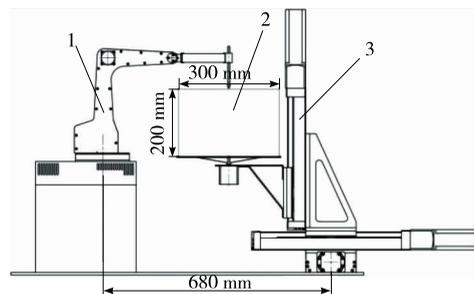
通常运动控制器的硬件架构有 3 种。第 1 种是以嵌入式微控制为核心,这种控制器结构简单,开发周期短,计算能力相对较弱;第 2 种是以微控制器加专用的运动控制芯片,这种结构由于使用了专用的运动控制芯片,计算能力较强,并且能够有效缩短开发周期;另外 1 种是微控制器加 FPGA 的结构,这种结构计算能力强,而且开放性好,但是通常开发周期比较长<sup>[10]</sup>。从开发周期以及控制器需要完成的计算量等方面考虑,选用第 2 种方案,使用 STM32F1 系列微控制搭配 MCX514 四轴运动控制芯片作为控制器的核心硬件进行控制器的开发。

### 2 机械系统设计

机械系统是完成蛋糕加工的执行部分,由于蛋糕的加工载荷小,故免强度校核,重点在于实现相应的运动。图 3 是依据图 2 实现的结构设计:左部为 1 台三自由度关节机器人系统,右部为一四自由度运动台,蛋糕加工空间为  $\Phi 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。机器人机座回转中心至数控台机座中心距离  $O_1 O_2$  为 680 mm。

#### 2.1 机器人结构设计

机器人系统主要实现夹持带动奶油喷嘴以及抹刀运



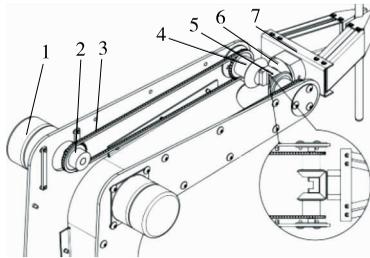
1. 机械臂 2. 工作空间 3. 四轴运动台

图 3 机械系统设计

Figure 3 Mechanical system design

动,见图 4。变换其末端的位姿以协同数控运动台完成预定轨迹及奶油流量,完成预期造型工作。整个机械臂由下方步进电机带动绕基座转动,为了降低手臂的复杂程度,减小机器人占用空间,机器人手腕采用差动轮系结构以控制手腕的 A 轴和 B 轴 2 个自由度。

机械手的手腕结构是由锥齿轮组成的差动轮系,差动轮系的 2 个输入是由步进电机经过链传动输入,运动输出由行星轮 6 输出,当 2 个输入齿轮同向转动时,末端绕 A 轴转动,当 2 个输入齿轮反向转动时,末端绕 B 轴转动。



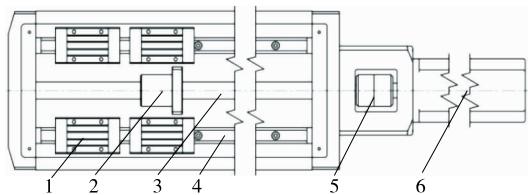
1. 步进电机 2. 链轮 3. 链条 4. 锥齿轮 5. 行星架 6. 行星轮 7. 末端手爪

图 4 手腕结构

Figure 4 Wrist structure

### 2.2 运动台结构设计

运动台主要是带动蛋糕胚体运动,图 5 为运动台 1 个移动轴的结构,用 3 个类似结构进行叠加构成三轴方向的移动。各轴均由 1 台伺服电机带动,行程为 200 mm,由于 Z 轴受重力作用,故 Z 轴电机需要有自锁功能,结构参数如表 1 所示。圆盘的转动由 1 个步进电机带动,圆盘直径为 320 mm。



1. 滑块 2. 丝杠螺母 3. 丝杠 4. 导轨 5. 联轴器 6. 伺服电机

图 5 运动台结构

Figure 5 Motion platform structure

表 1 运动台部件参数

Table 1 Component parameters of the motion platform

项目	型号	规格
丝杠	—	Φ16 mm×5 mm×380 mm
导轨	HGR15H 53400-1	15 mm×360 mm
滑块	HGH15CAC 53121-4	—
X、Y 轴电机	SGMAH-04AAA41	400 W
Z 轴电机	SGMAH-04AAA4C	400 W
伺服驱动器	SGDM-04ADA	400 W

## 3 控制系统设计

### 3.1 控制器硬件

考虑到系统对运算速度以及稳定性、开发周期等方面的要求,控制器硬件系统采用微控制加运动控制芯片的方案。使用日本 NOVA 公司的 MCX514 四轴运动控制芯片控制四轴运动台<sup>[11-12]</sup>;STM32F103 微控制器通过 FSMC 总线对运动控制芯片各个寄存器进行读写实现 2 个芯片间的通信。STM32F103 通过自身的定时器实现对三自由度的机械臂进行控制,同时输出 PWM 波控制奶油泵流量。为了能够实现远程个性化定制蛋糕以及后期功能扩展的需要,将 STM32 的 4 个串口引出,其中串口 1 用来和上位机进行通信,串口 2 接 SIM800A DTU 模块用来接收远程发来的蛋糕模型加工代码,串口 3 和串口 4 分别转换成 RS232 和 RS485 作为预留接口备用。控制器硬件结构框图如图 6 所示。

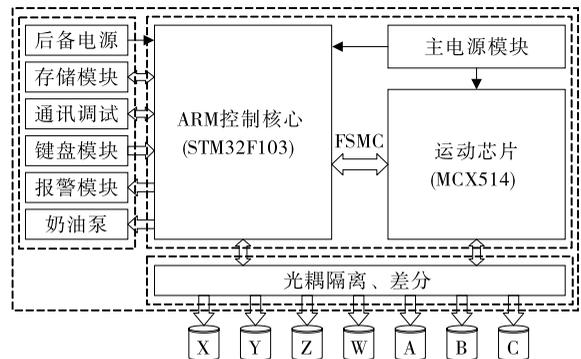


图 6 控制器硬件结构框图

Figure 6 Controller hardware block diagram

### 3.2 控制器软件

控制器软件结构以 FreeRTOS 嵌入式操作系统为依托,采用多线程编程模式实现各任务间并行处理以减低各任务间的耦合度。控制器的软件结构框图如图 7 所示,共 6 个并行任务。MCX514 通过内部的 8 个 16 位写寄存器以及 8 个 16 位读寄存器实现四轴运动台的直线、圆弧以及 S 形螺旋插补功能,由于对 MCX514 的控制就是对其寄存器的读写,所以可以将其作为 1 个存储器挂在 STM32 的 FSMC 总线下作为 STM32 的外部存储器<sup>[13]</sup>。然后,依据寄存器的功能和命令码等,将 MCX514 的内部功能封装成运动控制函数供外部调用。机械臂的控制采用开源的 GRBL 数控系统<sup>[14]</sup>,实现对 3 个关节的控制。

### 3.3 上位机

上位机用于加工系统的人机交互,主要有坐标显示、控制器加工控制、通信设置、控制器状态查看、机器人和运动台协同标定等功能,使用 Qt 框架开发<sup>[15]</sup>。控制器和上位机使用串口进行通信,上位机通过串口发送命令行指令用于设置查看控制器状态,图 8 为协同标定窗口。

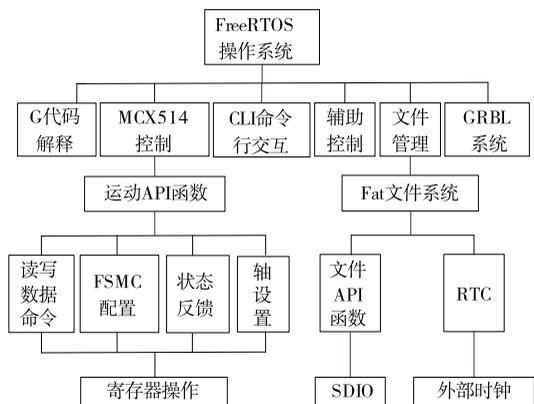


图 7 控制器软件结构框图

Figure 7 Controller software block diagram



图 8 协同标定窗口

Figure 8 Collaborative calibration interface

### 3.4 远程通信

用户在远程客户端完成蛋糕定制后,需要将加工代码传给控制器。由于基于 TCP/IP 协议的 GPRS 网络拥有传输速度快、永远在线、支持透传等优势<sup>[16]</sup>,使用 SIM800A DTU 模块来完成数据的传输,控制器接收到数据后将其保存到内部存储单元,并通过串口 1 发出接收到新文件的提示。远程通信的结构如图 9 所示,为了避免数据传输过程中出现数据丢失、出错等问题,需要在传输时加入校验等保证数据传输可靠。

## 4 系统搭建与测试

系统设计完成后,搭建如图 10 所示实验测试系统验证系统的可行性。确认接线无误后,首先使用串口将控制器和上位机建立通信连接,让机器人和运动台各轴都回到原点,再手动控制让机器人和运动台完成 3 次握手进行标定,标定完成之后即可将测试程序发给控制器启

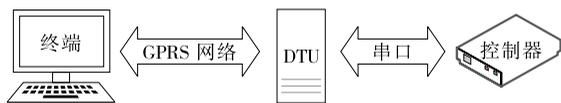
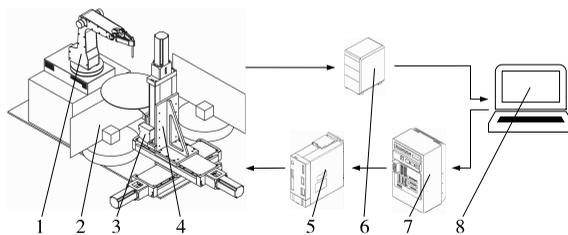


图 9 远程通信

Figure 9 Telecommunications

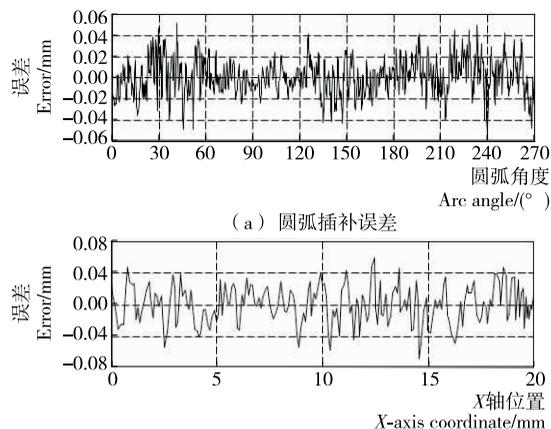
动加工。这里控制运动台进行一段圆弧和一段直线插补,并使用激光位移传感器对位移数据采集,将采集到的数据处理得到插补偏移距离误差,结果如图 11 所示。



1. 机械臂 2. 反光板 3. 激光位移传感器 4. 运动台 5. 驱动器 6. 数据接收器 7. 控制器 8. 上位机

图 10 系统测试

Figure 10 System test



(a) 圆弧插补误差

(b) 直线插补误差

图 11 插补测试结果

Figure 11 The result of interpolation test

## 5 结论

在分析奶油蛋糕加工制作的操作行为以及奶油蛋糕成形轨迹的基础上,提出使用 1 台三自由度的机器人和 1 台四轴的运动台协同完成奶油蛋糕的抹坯、裱花等工序,这样不但可以扩大加工范围,而且由于喷嘴的位姿可以调整,避免了传统 3D 打印只能在垂直方向上逐层扫描堆积加工所带来的局限性,可以完成更复杂的成型轨迹,同时采用微控制器加专用运动控制芯片的结构设计了相应的控制器以及上位机系统,经测试整个系统的精度可以达到 0.11 mm 以内。本设计与传统的 3D 奶油打印机相比虽然能完成抹坯以及更加复杂的裱花造型,但在喷嘴、抹刀的自动清洗、更换以及多色奶油喷涂等方面有待进一步升级优化。

### 参考文献

[1] 陈洪华, 李祥睿. 西点制作教程[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012: 2-23.

(下转第 143 页)

- 技术, 2006, 26(4): 204-207.
- [2] 李承献. 明胶在胶囊中的应用(一)[J]. 明胶科学与技术, 2012, 32(1): 40-46.
- [3] 王跃猛. 明胶-矿物质空壳硬胶囊壳的研制[D]. 天津: 天津科技大学, 2014: 1-7.
- [4] 张青. 褐藻胶钙离子交联体系肠溶空心硬胶囊制备技术[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 1-22.
- [5] 王丽媛, 侯梦奇, 李晓, 等. 4种改性方式对明胶膜性能的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 40-44.
- [6] 丁丁. 淀粉-明胶共混法改性明胶硬胶囊[J]. 明胶科学与技术, 2014, 34(1): 1-8.
- [7] CIPER M, BODMEIER R. Modified conventional hard gelatin capsules as fast disintegrating dosage form in the oral cavity[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2006, 62(2): 178-184.
- [8] 余家会, 杜予民, 郑化. 壳聚糖-明胶共混膜[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1999, 45(4): 440-444.
- [9] ROBERT S, SINT N, DOMINQUE C, et al. Pullulan film compositions: US, 006887307B1[P]. 2005-05-03.
- [10] 刘国军. 普鲁兰多糖-卡拉胶基硬胶囊囊材的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 38-53.
- [11] 高丹丹, 徐学玲, 江连洲, 等. 普鲁兰多糖-明胶可食性膜的特性[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 69-73.
- [12] 张东. 褐藻胶肠溶空心硬胶囊制备技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 18-32.
- [13] 路春玲, 冯强, 陈虹, 等. 一次性成型肠溶空心胶囊的制备及性能测试[J]. 中国药学杂志, 2015, 50(23): 2 057-2 063.
- [14] 国家药典委员会. 中国药典: 四部[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 522.
- [15] 姚遥, 肖满, 严文莉, 等. 魔芋葡甘聚糖-普鲁兰多糖复合膜的制备与性能研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 312-315.
- [16] WANG Zhe, SUN Xiu-xiu, LIAN Zi-xuan, et al. The effects of ultrasonic/microwave assisted treatment on the properties of soy protein isolate /microcrystalline wheat- bran cellulose film[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 114(2): 183-191.
- [17] 高丹丹, 张超, 马越, 等. 甘油对明胶-普鲁兰多糖复合材料性能的影响[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(10): 108-111.
- [18] 马慧婷. 低酰基结冷胶/明胶复合食用膜的制备、性能与应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018: 17-22.
- [19] LIU Fei, CHIOU B S, AVENA R J, et al. Study of combined effects of glycerol and transglutaminase on properties of gelatin films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 65: 1-9.
- [20] CHO S W, ULLSTEN H, GALLSTEDT M, et al. Heat-sealing properties of compression-molded wheat gluten films[J]. *Journal of Biobased Material and Bioenergy*, 2007, 1(1): 56-63.
- [21] TONG Qun-yi, XIAO Qian, LIM L T. Preparation and properties of pullulan-alginate-carboxymethylcellulose blend films[J]. *Food Research International*, 2008, 41(10): 1 007-1 014.
- [22] ZHU Gui-lan, SHENG Long, TONG Qun-yi. Preparation and characterization of carboxymethyl-gellan and pullulan blend films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35: 341-347.
- [23] VALENZUELA C, ABUGOCH L, TAPIA C. Quinoa protein-chitosan-sunflower oil edible film: mechanical, barrier and structural properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 531-537.
- [24] TONGNUANCHAN P, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Structural, morphological and thermal behaviour characterisations of fish gelatin film incorporated with basil and citronella essential oils as affected by surfactants[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41(1): 33-43.

(上接第 126 页)

- [2] 赖燕娜, 马顺, 李莺, 等. 从专利申请看 3D 打印技术在食品工业中的应用进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 163-166.
- [3] 洪健, 王栋彦, 李飞, 等. 基于 3D 打印技术的个性化冰激凌成型机设计[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 101-103, 194.
- [4] 姚青华. 3D 打印技术应用在奶油食品工业中的方案设计[J]. 食品与机械, 2016, 32(2): 98-100, 110.
- [5] 刘永信, 王玲琳, 韩晓爽, 等. 双机械臂协调控制综述[J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2017(4): 471-480.
- [6] 甘亚辉, 戴先中. 多机械臂协调控制研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(3): 321-333.
- [7] 姚桐兴. 双工业机器人协调运动控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 45-46.
- [8] 李小丽, 马剑雄, 李萍, 等. 3D 打印技术及应用趋势[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 1-5.
- [9] 周涛, 徐书洁, 杨继全. 3D 食品打印技术研究的最新进展[J]. 食品工业, 2016(12): 208-212.
- [10] 马永超, 罗亮, 刘知贵. 六轴焊锡机器人运动控制器的设计[J]. 机械设计与制造, 2015(10): 168-171.
- [11] 叶纯杰, 吴洪涛, 陈柏, 等. 基于 DSP 和 MCX312 的六轴运动控制器设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(5): 92-95.
- [12] SHI Yu-nong, YE Chun-sheng. Dual-core multi-axes controller based on STM32 and MCX314[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2014, 42(3): 517-520.
- [13] 李玉琳, 郝巨东, 刘开源, 等. 基于单片机与 FPGA 的多通道数字 I/O 电路设计[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(8): 176-180.
- [14] 伍文进, 徐中云, 严帅. 基于 Arduino 两轴激光雕刻机的研究与实现[J]. 机床与液压, 2018, 46(8): 15-18.
- [15] 李一雄, 刘建群, 陈新度, 等. Qt 环境下基于 PMAC 运动控制器的控制系统开发与应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(1): 114-116, 120.
- [16] 郑龙安, 汤晓华, 安嘉强, 等. 胚芽米机终端与云服务器通信交互系统设计[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(2): 83-87.