# 基于模糊神经网络的包装机械臂定位方法研究

### 田勇,李俊霞

(河南机电职业学院,河南 新郑 451191)

摘要:目的 为提高包装机械臂的抓取精度,文中基于模糊神经网络设计一种包装机械臂定位方法。 方法 将激光测距仪与工业相机融合,可实现目标点的初步定位并得到位姿偏差。以机械臂末端位置误 差补偿为例,设计一种模糊神经网络控制器,可实现 PID 控制关键参数的在线调整以提高误差补偿精度。 进一步地,采用果蝇优化算法实现神经网络控制器初始值的优化,可提高控制系统性能。最后,进行实 验研究。结果 实验结果表明,机械臂定位算法可使最大绝对误差从 7.704 9 mm 下降到 1.424 2 mm; 平 均绝对定位误差降低约 82.5%; 机械臂执行效率与对照组相当。结论 该定位方法可以大幅度提高包装 机械臂定位精度,可满足包装、化工、食品等相关行业要求。

关键词: 包装机械臂; 机器视觉; 定位控制; 模糊神经网络

中图分类号: TB486; TP247 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)09-0171-05

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.023

#### Positioning Method of Packaging Mechanical Arm Based on Fuzzy Neural Network

TIAN Yong, LI Jun-xia

(Henan Mechanical and Electrical Vocational College, Henan Xinzheng 451191, China)

ABSTRACT: This paper aims to improve the grasping precision of the packaging manipulator through a positioning method of the packaging manipulator based on fuzzy neural network. By combining laser rangefinder with industrial camera, the initial positioning of the target point and the attitude deviation could be achieved. A fuzzy neural network controller was designed to improve the accuracy of error compensation by adjusting the key parameters of PID control. Furthermore, fruit fly optimization algorithm was used to optimize the initial value of neural network controller, which could improve the performance of the control system. Finally, experimental research was carried out. The experimental results showed that the maximum absolute error could be reduced from 7.704 9 mm to 1.424 2 mm. The average absolute positioning error was reduced by about 82.5%. The execution efficiency of the manipulator was similar to that of the control group. The positioning method can greatly improve the positioning accuracy of robots and meet the requirements of packaging, chemical, food and other related industries.

KEY WORDS: packaging manipulator; machine vision; positioning control; fuzzy neural network

机械臂在包装行业的应用十分广泛,为进一步拓宽其应用范围,机械臂在许多方面需要进一步提升,例如定位精度<sup>[1-3]</sup>。通常来讲,机械臂定位精度包括重复定位精度和绝对定位精度,大多数包装机械臂的重复定位精度比较高,可满足许多行业的工艺需

求,但是,绝对定位精度往往无法达到高精度要求。随着工业自动化程度和智能化水平不断提高,现有定位精度很难满足一些作业要求。另外,受作业环境和诸多干扰因素影响,实际操作过程定位精度肯定会降低<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期: 2021-05-07

为解决此问题,众多研究者进行了误差补偿研究。参考相关文献可以发现,机械臂的误差补偿方法 大体可以分为 2 类。一是末端位置检测,通过反馈实现全闭环控制。这种方法大多采用嵌入式控制方法,通过集成控制器、驱动器、激光跟踪仪实现末端位姿的实时反馈和调节,进而确保机械臂的定位精度。该方法的定位精度比较高,但是投入成本也很高。二是通过标定来提高机械臂的绝对定位精度,使用该方法可使定位精度达到±1 mm,可用于精度要求不是很高的场合<sup>[7-10]</sup>。总体来说,较常用的研究方法包括:运动学模型参数标定、神经网络正标定和逆标定、模糊控制、遗传算法等<sup>[11-12]</sup>。

文中在现有研究的基础上,结合单目摄像机和激 光测距仪来建立机械臂末端位姿误差模型,采用模糊 神经网络控制实现包装机械臂末端位置误差补偿,利 用果蝇优化算法实现网络初始值优化以进一步提高 系统控制性能。

# 1 末端位姿误差模型

### 1.1 摄像机模型标定

文中以单目摄像机和激光测距仪组合的三维定位系统为研究对象,摄像机和激光测距仪是固定在一起且确保二者光轴基本一致。定位系统结构见图 1。其中  $P(X_c,Y_c,Z_c)$  表示空间任意一点;  $O_cX_cY_cZ_c$  表示摄像机坐标系;  $O_mX_mY_mZ_m$  表示末端执行器坐标系;  $O_wX_wY_wZ_w$  表示机械臂世界坐标系。另外,可定义点 P 在摄像机平面的投影坐标为(u,v); 在世界坐标系下的坐标可用  $P(X_w,Y_w,Z_w)$  表示。那么齐次变换描述见式(1)。

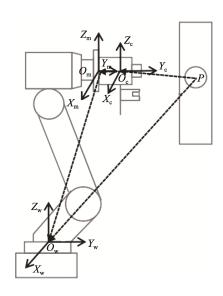


图 1 定位系统结构 Fig.1 Positioning system structure

$$k \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{x} & 0 & u_{0} & 0 \\ 0 & a_{y} & v_{0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^{T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{w} \\ y_{w} \\ z_{w} \\ 1 \end{bmatrix} = HX_{w} \quad (1)$$

式中: k 为比例因子;  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $u_0$ 、 $v_0$ 和 R、T 分别为摄像机的内部参数和外部参数; H 为一种变换矩阵。

### 1.2 误差描述

一般来说,机械臂位姿误差由2部分组成,即: 末端位置误差和姿态误差。其中,末端误差可用末端 理论位置和实际位置之差表示,见式(2)。

$$e = T - T_0 \tag{2}$$

式中: T 为末端实际位置;  $T_0$  为末端理论位置。同时, 机械臂末端姿态误差可用四元数进行描述, 见式(3)。

$$q = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] =$$

$$[\cos(\theta/2) \quad a_x \sin(\theta/2) \quad a_y \sin(\theta/2) \quad a_z \sin(\theta/2)]$$
(3)

式中:  $\begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \end{bmatrix}$ 为欧拉旋转轴;  $\theta$ 为欧拉旋转角。上述四元数为末端执行器实际姿态和理论姿态的 差值。 在 当前 姿态下, 机 械 臂 如 果 围 绕  $\begin{bmatrix} a_x & a_y & a_z \end{bmatrix}$ 旋转  $\theta$  角度就可以到达理论姿态。

# 2 位姿补偿算法

### 2.1 模糊神经网络控制器

模糊神经网络控制器工作原理:利用位置偏差及其变化率,通过模糊神经网络算法实时调整 PID 控制器的关键参数(比例系数、积分系数和微分系数),进而得到包装机械臂的控制量,如此便可以提高包装机械臂的控制精度。考虑到位置误差和姿态误差补偿原理一致,文中以位置误差补偿为例进行说明。以REF 神经网络和模糊控制理论为基础,设计了一种模糊神经网络位置控制器。该控制器一共 4 层,即:输入层、模糊化层、模糊推理层和输出层,具体结构见图 2。

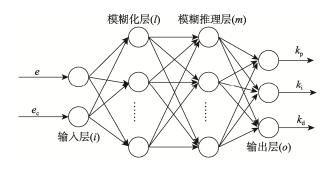


图 2 模糊神经网络结构 Fig.2 Fuzzy neural network structure

由图 2 可以看出,位置控制器的输入变量为位置偏差 e 和位置偏差变化率  $e_c$ 。

模糊推理函数可用式(4)表示。

$$f_l(i,j) = \exp\left\{-\frac{\left[f_i(i) - \delta_{ij}\right]^2}{\xi_{ij}^2}\right\}$$
(4)

式中:  $\xi_{ij}$  和  $\delta_{ij}$  分别为第 j 个模糊集合的第 i 个输入变量的宽度和中心位置。

基于模糊推理规则就可以完成节点配对,那么则有:

$$f_m(j) = \prod_{j=1}^{N} f_l(i,j)$$
 (5)

式中:  $N = \prod_{i=1}^{n} N_i$ ,  $N_i$  为输入变量的模糊分割数。

输出层输出变量分别对应  $k_p$  、  $k_i$  和  $k_d$  的整定结果<sup>[13]</sup>,见式(6)。

$$f_{o} = f_{m} \cdot \mathbf{W} = \sum_{i=1}^{N} f_{m} \left[ j \cdot w(j, i) \right]$$
 (6)

式中: W 为连接权矩阵。

系统控制量可描述为:

采用增量式 PID 算法用于包装机械臂位置控制,那么则存在:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{8}$$

文中选用位置偏差积累量作为评价函数,为实现较好的控制效果,连接权 $w_{ij}$ 、中心函数 $\delta_{ij}$ 和宽度函数 $\xi_{ij}$ 的更新公式 $^{[14]}$ 见式(9)。

$$\begin{cases} w_{ij}(k) = w_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + \alpha \left[ w_{ij}(k-1) - w_{ij}(k-2) \right] \\ \delta_{ij}(k) = \delta_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial \delta_{ij}} + \alpha \left[ \delta_{ij}(k-1) - \delta_{ij}(k-2) \right] \\ \xi_{ij}(k) = \xi_{ij}(k-1) - \eta \frac{\partial E}{\partial \xi_{ij}} + \alpha \left[ \xi_{ij}(k-1) - \xi_{ij}(k-2) \right] \end{cases}$$

$$(9)$$

式中: $\eta$ 为学习速率; $\alpha$ 为惯性系数,且满足 $0 < \alpha < 1$ 。

定义网络拟合误差为  $e_i$ , 其满足式 (10) 所示表达式。

$$e_i = y_i - \sum_{i=1}^{M} f_i \left( X_i, \delta_j, \xi_j \right) w_j \tag{10}$$

式中:  $y_i$  为期望输出;  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T$ ; M 为样本数量。

定义累积方差贡献率为 $\rho_i$ ,其满足式(11)所示

表达式。

$$\rho_i = \sum_{j=1}^i e_j > \rho \tag{11}$$

由式 (11) 可以看出,如果网络拟合误差  $e_i$  累积 到设定值  $\rho$ ,算法就会迭代终止并输出权值矩阵。

## 2.2 初始值优化

- 一些参考文献表明,如何选择控制器初始值可在 很大程度上影响整个系统的性能,所以可通过优化初始值来提高神经网络的预测精度。综合考虑,文中采 用果蝇优化算法,参考果蝇寻食特性实现控制器初始 值优化,具体步骤如下。
- 1)果蝇优化算法参数初始化,例如:果蝇种群规模大小、迭代次数最大值、果蝇种群初始位置、初始浓度值等。
- 2)果蝇位置更新,果蝇会利用嗅觉感知食物具体位置并向该位置聚拢<sup>[15]</sup>,其满足式(12)。

$$\begin{cases} m(t+1) = m(t) + R_x \\ n(t+1) = n(t) + R_y \end{cases}$$
(12)

式中:  $R_x$  和  $R_y$  分别为 x 、 y 方向的随机搜索 距离。

3)果蝇飞行距离计算,即果蝇当前位置和原点之间距离  $d_i$ ,见式(13)。

$$d_{i} = \sqrt{m_{i}^{2} + n_{i}^{2}} \tag{13}$$

定义浓度判别值为  $s_i$ , 其可用  $d_i$  倒数来描述, 见式 (14)。

$$s_i = \frac{1}{d_i} \tag{14}$$

4) 求解浓度值 S<sub>i</sub>, 其表达式见式 (15)。

$$S_i = F(s_i) \tag{15}$$

式中: F()表示目标函数。

5)根据浓度值大小判断最佳果蝇个体,其满足式(16)。

$$\begin{bmatrix} B_{\rm S} & B_{\rm I} \end{bmatrix} = \min(S) \tag{16}$$

6)最佳果蝇个体标记,最佳浓度值  $B_s$  存储<sup>[16]</sup>, 见式 (17)— (19)。

$$S_{\text{best}} = B_{\text{S}} \tag{17}$$

$$x_{\text{best}} = x(B_{\text{I}}) \tag{18}$$

$$y_{\text{best}} = y(B_{\text{I}}) \tag{19}$$

7)步骤 2—5 循环执行,如果满足最大迭代次数同时果蝇浓度最优,则执行步骤 6。利用该算法可以较好地解决 RBF 神经网络初始值优化问题。

## 3 实验研究

为验证所述包装机械臂定位方法的有效性,文中进行了相关实验研究。将定位算法移植到 JAKA 机械

臂控制系统,在机械臂作业空间随机挑选 10 个测试点,并计算其理论位置。机械臂按照一定顺序循环运动。在每个测试点机械臂需要停留 5~10 s,利用激光跟踪仪实时测量机械臂末端的实际位置,将实际位置和理论位置比较就可以得到每个点的定位误差。实验场景见图 3。

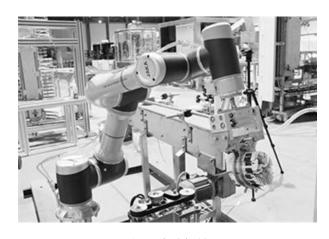


图 3 实验场景 Fig.3 Experimental scene

为便于对比,可配置未使用文中定位算法的实验 装置作为对照组。除算法外,其余条件完全相同。实 验结果见表 1。

表 1 实验结果 Tab.1 Experimental results

序号	绝对定位误差/mm	
	未采用文中算法	文中算法
1	5.063 5	0.538 8
2	6.782 9	1.424 2
3	7.704 9	1.290 4
4	4.020 2	1.029 8
5	2.401 6	0.156 5
6	3.568 9	0.563 2
7	4.216 5	1.023 3
8	6.112 5	1.128 6
9	7.247 9	0.765 9
10	2.458 8	0.654 8
平均值	4.957 8	0.857 6

从实验结果可以看出,如果采用所述定位算法可使最大绝对误差从 7.704 9mm 下降到 1.424 2mm; 平均绝对定位误差降低约 82.5%。在运行速度方面,该算法并没有降低机械臂响应速度,同对照组的执行效率相当。实验结果表明,该定位方法可以大幅度提高包装机械臂定位精度,可满足包装、化工、食品等相

关行业要求。

## 4 结语

以包装机械臂为研究对象,设计了一种基于模糊神经网络的机械臂末端定位方法。利用模糊神经网络控制器实现包装机械臂末端位置误差补偿,采用果蝇优化算法实现了网络初始值优化可进一步提高控制系统性能。实验结果表明,所述方法可使包装机械臂平均绝对定位精度提高80%,并且不会降低机械臂执行效率,可满足相关行业的控制需求。

#### 参考文献:

- [1] 王闯闯,何智成,成艾国.基于机器视觉和支持向量机的汽车焊点定位研究[J].汽车工程学报,2019,9(1):13-20.
  - WANG Chuang-chuang, HE Zhi-cheng, CHENG Ai-guo. Research on Positioning of Welding Spots Based on Machine Vision and Support Vector Machine[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(1): 13-20.
- [2] 杨马英,郑亚飞. 基于视觉反馈的机械臂预测控制 [J]. 浙江工业大学学报, 2016, 44(3): 260-265. YANG Ma-ying, ZHENG Ya-fei. Predictive Control of Manipulators Based on Visual Feedback[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2016, 44(3): 260-265.
- [3] ZENG Yuan-fan, TIAN Wei, LIAO Wen-he. Positional Error Similarity Analysis for Error Compensation of Industrial Robots[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 42: 113-120.
- [4] 孙玥, 魏欣. 基于五次多项式的码垛机器人轨迹规划 [J]. 包装工程, 2017, 38(21): 159-163. SUN Yue, WEI Xin. Trajectory Planning of Palletizing Robot Based on Quintic Polynomial[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 159-163.
- [5] 董航,杜广胜,刘冬,等.基于遗传算法的码垛机器人关节路径规划[J].组合机床与自动化加工技术,2017(5):29-31.
  - DONG Hang, DU Guang-sheng, LIU Dong, et al. Joint-Space Trajectory Planning for Palletizer Robot Based on the Genetic Algorithm[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(5): 29-31.
- [6] TRASLOSHEROS A, SEBASTIÁN J M, TORRIJOS J, et al. An Inexpensive Method for Kinematic Calibration of a Parallel Robot by Using one Hand-Held Camera as Main Sensor[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2013, 13(8): 9941-9965.
- [7] 孟庆宽, 张漫, 仇瑞承, 等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航线检测[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10):

39-46.

- MENG Qing-kuan, ZHANG Man, QIU Rui-cheng, et al. Navigation Line Detection for Farm Machinery Based on Improved Genetic Algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 39-46.
- [8] 章晓峰, 李光, 肖帆, 等. 基于 BP 神经网络的包装分拣 机器 人 视 觉 标 定 算 法 [J]. 包 装 学 报 , 2019, 11(4): 74-81.
  - ZHANG Xiao-feng, LI Guang, XIAO Fan, et al. Calibration of Packaging Sorting Robot Based on BP Neural Network[J]. Packaging Journal, 2019, 11(4): 74-81.
- [9] 王宪伦,安立雄,张海洲.基于运动学参数标定方法的机械臂误差分析与仿真研究[J].机电工程,2019,36(2):109-116.
  - WANG Xian-lun, AN Li-xiong, ZHANG Hai-zhou. Error Analysis and Simulation of Manipulator Based on Kinematics Parameter Calibration Method[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(2): 109-116.
- [10] 周炜,廖文和,田威.基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报,2013,49(3):42-48.
  - ZHOU Wei, LIAO Wen-he, TIAN Wei. Theory and Experiment of Industrial Robot Accuracy Compensation Method Based on Spatial Interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 42-48.
- [11] ARCHAVIBOONYOBUL T, CHAVEESUK R, SINGH J, et al. An Analysis of the Influence of Hand Hole and Ventilation Hole Design on Compressive Strength of Corrugated Fiberboard Boxes by an Artificial Neural

- Network Model[J]. Packaging Technology and Science, 2020, 33(4/5): 171-181.
- [12] 董耀辉, 王陆一, 赵远扬, 等. 微型球形压缩机的几何模型与运动学分析[J]. 流体机械, 2021, 49(8): 64-70.
  - DONG Yao-hui, WANG Lu-yi, ZHAO Yuan-yang, et al. Geometric Model and Kinematics Analysis of Miniature Spherical Compressor[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(8): 64-70.
- [13] 匡毅, 夏平. 基于 SimMechanics 机械臂自适应模糊 PID 控制仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(12): 41-44.
  - KUANG Yi, XIA Ping. Simulation Research on Self-Tuning Fuzzy-PID Control Based on Sim Mechanics of Dual-Arm[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(12): 41-44.
- [14] 顾冬华, 周振. 无菌包装预热系统温度控制方法研究 [J]. 包装工程, 2019, 40(23): 162-166. GU Dong-hua, ZHOU Zhen. Temperature Control Method of Aseptic Packaging Preheating System[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(23): 162-166.
- [15] 陈栋梁, 华云松, 吴莹. 基于视觉反馈的机械手运动控制研究[J]. 信息技术, 2015, 39(9): 98-102. CHEN Dong-liang, HUA Yun-song, WU Ying. Research of Manipulator Motion Control Based on Visual Feedback[J]. Information Technology, 2015, 39(9): 98-102.
- [16] 庄开岚, 王吉忠, 周洁. 机器视觉技术在角度检测方面的应用研究[J]. 装备制造技术, 2011(4): 9-10. ZHUANG Kai-lan, WANG Ji-zhong, ZHOU Jie. Application of Machine Vision in Angle Inspection[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(4): 9-10.

责任编辑:曾钰婵