

基于遗传算法的包装机械臂位置精度控制方法

曹华¹, 李伟²

(1.广西机电职业技术学院, 南宁 530007; 2.桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要: **目的** 为提高包装机械臂运行精度, 解决视觉伺服控制系统中手眼标定问题, 基于遗传算法设计一种机械臂运动学参数标定方法。**方法** 在明确手眼视觉坐标的基础上, 给出不同坐标系之间的变换关系。通过对比机械臂末端执行器理论位置 and 实际位置, 确定其运动学参数标定误差模型。基于遗传算法基本原理, 搭建了相关适应度函数, 根据计算所得误差补偿量更新末端执行器位姿。最后, 对机械臂运动控制系统进行联合调试以及实验分析。**结果** 实际位置和理论位置之间偏差绝对值的平均值大约为 0.8 mm, 偏差最大值只有 1.2 mm, 精度比较高。**结论** 所述手眼标定方法可以显著提高机械臂运动精度, 可满足相关包装行业要求。

关键词: 包装机械臂; 手眼标定; 遗传算法; 多变量

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)09-0249-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.09.035

Position Accuracy Control Method of Packaging Manipulator Based on Genetic Algorithm

CAO Hua¹, LI Wei²

(1.Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China;
2.Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

ABSTRACT: In order to improve the running accuracy of the packaging mechanical arm and solve the hand-eye calibration problem in the visual servo control system, a method for calibrating kinematics parameters of the manipulator was designed based on genetic algorithm. Based on the definition of hand-eye visual coordinates, the transformation relations between different coordinate systems were given. By comparing the theoretical position with the actual position of the manipulator end-effector, the calibration error model of kinematics parameters was determined. Based on the basic principle of genetic algorithm, the fitness function was constructed and the pose of end-effector was updated according to the error compensation. Finally, the joint debugging and experimental analysis of the manipulator motion control system were carried out. The mean absolute value of the absolute deviation between the actual position and the theoretical position is about 0.8 mm, and the maximum deviation is only 1.2 mm, so the accuracy is relatively high. The hand-eye calibration method can significantly improve the motion accuracy of the mechanical arm and meet the requirements of the relevant packaging industry.

KEY WORDS: packaging mechanical arm; hand-eye calibration; genetic algorithm; multivariate

在整个包装行业中, 包装机械占据着十分重要的位置。在某种程度上, 包装机械水平直接决定了整个

包装行业的发展水平^[1-3]。近几年, 为提高包装作业效率, 针对智能机器人的研究越来越多, 特别是柔性

收稿日期: 2020-10-12

作者简介: 曹华 (1977—), 女, 硕士, 广西机电职业技术学院副教授, 主要研究方向为信号与信息处理。

机械臂。机械臂在包装流水线中的应用十分广泛,考虑到分拣工序对流水线相当重要,因此对机械臂的要求越来越高,例如:高柔性、高可靠性、快速响应、高稳定性等^[5-8]。随着机器视觉技术的不断发展,其在包装行业的应用逐步深入。将机器视觉与机器人相结合,同时利用先进智能算法可以更加快速、准确地完成相关分拣工作^[9-10]。智能分拣工作流程可以描述为:通过视觉传感器获取传送带上待分拣物关键信息,包括质心、形状等;将所获取信息反馈给机器人,利用机器人运动学逆解计算关节角的具体数值,控制机械臂末端执行器抓取目标物;最后,完成包装、码垛等工序。在整个包装过程中,影响机械臂抓取的关键因素就是手眼标定精度^[11-13]。

对于机器人视觉伺服系统来说,比较常用的手眼标定方法主要包括机器人标定、摄像机标定、手眼关系标定等,但是这些方法存在一定局限性,例如:机器人本身的不确定性和非线性、摄像头本身畸变等^[14-17]。为解决不确定性和非线性问题,文中拟设计一种机械臂变量修正方法。基于遗传算法实现机械臂参数修正以减小末端执行器位姿误差,进而提高包装分拣精度,并通过具体试验验证所述方法的可行性和有效性。

1 视觉坐标关系

以 6-DOF 包装机械臂普遍采用的单目视觉伺服系统为研究对象,所述视觉伺服系统内部的工业相机是固定的,各坐标系之间的对应关系见图 1。

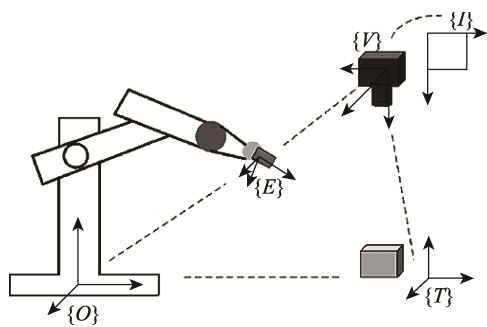


图1 视觉坐标关系
Fig.1 Visual coordinate relation

如图 1 所示,包装机械臂基座坐标系可用 $\{O\}$ 表示,包装机械臂末端执行器坐标系可用 $\{E\}$ 表示,待分拣物体坐标系可用 $\{T\}$ 表示,工业相机坐标系可用 $\{V\}$ 表示,工业相机成像平面坐标系可用 $\{I\}$ 表示。上述坐标系之间的变换关系可描述为:末端执行器坐标系 $\{E\}$ 和基座坐标系 $\{O\}$ 之间的齐次变换可表示为 ${}^O T_E$,工业相机坐标系 $\{V\}$ 和末端执行器坐标系 $\{E\}$ 之间的齐次变换可表示为 ${}^E T_V$,工业相机成像平面坐

标系 $\{I\}$ 和工业相机坐标系 $\{V\}$ 之间的齐次变换可表示为 ${}^V T_I$,待分拣物体坐标系 $\{T\}$ 和工业相机坐标系 $\{V\}$ 之间的齐次变换可表示为 ${}^V T_T$,待分拣物体坐标系 $\{T\}$ 和基座坐标系 $\{O\}$ 之间的齐次变换可表示为 ${}^O T_T$ 。

为便于研究,文中认为工业相机的成像不存在畸变,即理想针孔模型,见图 2。图 2 中 C 表示工业相机坐标系原点, z_C 为相机光轴; q 点位于成像平面坐标系内;成像平面坐标系平行于工业相机坐标系的 $x_C O y_C$ 平面。定义工业相机焦距为 f ,在成像平面内,图像特征坐标可用 (u, v) 表示。

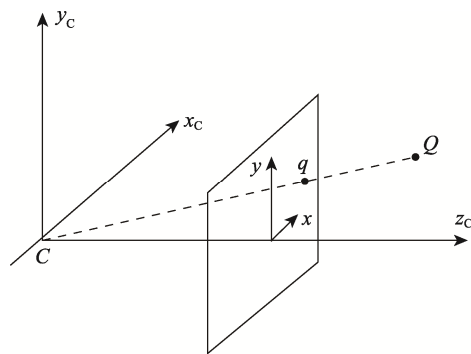


图2 相机成像模型
Fig.2 Camera imaging model

假设待分拣物体的图像特征坐标为 (u_0, v_0) ,其在包装机械臂基座坐标系下的坐标可表示为 (x_0, y_0, z_0) ,那么二者之间转换关系可描述为:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $H = {}^O T_E {}^E T_V {}^V T_I$ 为工业相机成像平面坐标系和包装机械臂基座坐标系之间的映射关系矩阵。

一般情况下,需要首先创建矩阵 H 的具体模型,然后利用相关算法拟合矩阵 H ,实际效果在很大程度上取决于各转换矩阵内部参数的绝对精度。在实际应用过程中,受到加工、制造、安装、标定等众多因素的影响,机械臂的绝对精度并不高。另外,摄像头畸变同样会造成误差。为解决此问题,文中考虑使用遗传算法对各参数进行预测并实时修正,以确保执行末端精度。

2 基于遗传算法的机械臂运动学参数标定

2.1 标定模型

以 6 自由度包装机械臂为例,采用 D-H 方法对其进行正运动学分析,可得连杆 i 相对于连杆 $i-1$ 变换为:

$${}^{i-1}T = R_x(\alpha_{i-1})D_x(a_{i-1})R_z(\theta_i)D_z(d_i) \quad (2)$$

式中: a_{i-1} 为连杆长度; d_i 为连杆转矩; α_{i-1} 为连杆转角; θ_i 为关节角。通过矩阵相乘重新计算式 (2), 可以得到机械臂变换公式 ${}^{i-1}T$ 的通用形式, 即:

$${}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在研究包装机械臂定位误差过程中, 可以将各连杆参数的微小变量视作误差因子。根据末端执行器的实际位姿和指令位姿之间的偏差确定定位误差模型。由式 (3) 可以看出, 末端执行器的变换矩阵肯定包含 α_{i-1} , a_{i-1} , d_i 和 θ_i 等参数, 同时这些参数均存在偏差。考虑到上述偏差均比较小, 可以利用微分运动学模型近似代替误差模型, 进而确定 D-H 误差模型。

在基座坐标系下, 包装机械臂执行末端的理论位置可用 P 表示; 受参数偏差影响, 其实际位置可用 P' 表示。定义实际位置和理论位置之间偏差为 ΔP , 可表示为:

$$\begin{cases} \Delta P = P' - P \\ \Delta P = N_a \Delta a + N_\alpha \Delta \alpha + N_d \Delta d + N_\theta \Delta \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δa 为连杆长度误差, N_a 则为对应系数矩阵; $\Delta \alpha$ 为连杆转角误差, N_α 则为对应系数矩阵; Δd 为连杆偏距误差, N_d 则为对应系数矩阵; $\Delta \theta$ 为关节角误差, N_θ 则为对应系数矩阵。

其中:

$$\begin{cases} \Delta a = [\Delta a_1 \ \Delta a_2 \ \cdots \ \Delta a_n]^T \\ \Delta \alpha = [\Delta \alpha_1 \ \Delta \alpha_2 \ \cdots \ \Delta \alpha_n]^T \\ \Delta d = [\Delta d_1 \ \Delta d_2 \ \cdots \ \Delta d_n]^T \\ \Delta \theta = [\Delta \theta_1 \ \Delta \theta_2 \ \cdots \ \Delta \theta_n]^T \end{cases} \quad (5)$$

机械臂运动学标定的 D-H 误差模型见式 (5), 下标表示关节标号。

2.2 遗传算法

从上述包装机械臂末端执行器误差模型推导过程可以发现, 该模型中包含比较多的未知变量, 如果仅仅采用传统方法很难适用于全部工况, 特别是大规模、大范围问题求解。考虑到遗传算法具有并行搜索功能, 操作简便、实时高效、容错性强, 因此利用遗传算法解决多参数优化问题具有一定的优势。

所述遗传算法将实际误差变量 $\Delta \alpha_i$, Δa_i , Δd_i , $\Delta \theta_i$ 作为个体, 以生成的误差变量 $\Delta \alpha'_i$, $\Delta a'_i$, $\Delta d'_i$, $\Delta \theta'_i$ 作为补偿量修正包装机械臂运动学参数, 进而更新运动学模型。

遗传算法的适应度函数可用更新运动学模型对理论位姿和实际位姿之间差值来表示。

遗传算法目标就是寻找位姿误差最小值所对应的染色体, 即参数最佳修正值。

假定数据包含 N 组, 包装机械臂第 i 组实际位姿数据可表示为 $[x_i, y_i, z_i, \phi_i, \psi_i, \phi'_i]$, 经更新运动模型计算的理论位姿可表示为 $[x'_i, y'_i, z'_i, \phi'_i, \psi'_i, \phi'_i]$, 那么遗传算法的适应度函数 F 可表示为:

$$F = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{x_i - x'_i}{x_i} \right)^2 + \left(\frac{y_i - y'_i}{y_i} \right)^2 + \left(\frac{z_i - z'_i}{z_i} \right)^2 + \left(\frac{\phi_i - \phi'_i}{\phi_i} \right)^2 + \left(\frac{\psi_i - \psi'_i}{\psi_i} \right)^2 + \left(\frac{\phi_i - \phi'_i}{\theta_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

综上所述, 基于遗传算法的包装机械臂标定算法可以描述如下。

1) 利用 D-H 法将包装机械臂各连杆实际参数表示为 α_i , a_i , d_i 和 θ_i 的形式。

2) 设定包装机械臂末端执行器的位姿数值, 利用逆运动学方程计算不同位姿数值所对应各连杆关节的变量值。

3) 利用正运动学模型求解包装机械末端执行器的理论位姿 P 。

4) 根据各连杆关节驱动变量控制各连杆运动, 同时测量包装机械臂末端执行器实际位姿 P' , 同时记录各连杆实际驱动变量值, 存储为数据样本。

5) 计算包装机械臂末端执行器的位姿误差 ΔP 。

6) 将实际误差变量 $\Delta \alpha_i$, Δa_i , Δd_i , $\Delta \theta_i$ 作为个体, 随机选取多个个体构成初始种群。文中将初始种群视作遗传算法的第 1 代种群, 通过选择、交配和突变可以产生新一代种群。

7) 以步骤 6 生成的误差变量 $\Delta \alpha'_i$, $\Delta a'_i$, $\Delta d'_i$, $\Delta \theta'_i$ 作为补偿量, 同时更新机械臂设计参数, 并计算最新的末端执行器位姿。

8) 利用遗传算法适应度函数验证最新位姿是否满足精度要求。如果满足, 则结束操作; 如果不满足要求, 则重复步骤 5—8。包装机械臂标定流程见图 3。

3 试验研究

为验证所述手眼标定方法对包装机械臂运动精度的影响, 文中选定 RERot-V-6R 型六自由度包装机器人作为试验对象进行了相关试验研究, 试验平台见图 4。将上述手眼标定方法应用到试验平台中, 随机选取笛卡尔空间中 2 点作为目标位置。在自动模式下, 验证机械臂运行精度。

影响包装机械臂运行精度的因素非常多, 除上述误差来源外, 还包括电机驱动误差、温湿度造成的误差、机械惯性造成的误差、测量手段造成的误差等, 这些都会直接导致机械臂控制精度降低。遗传算法恰恰可以解决众多不良因素带来的影响。

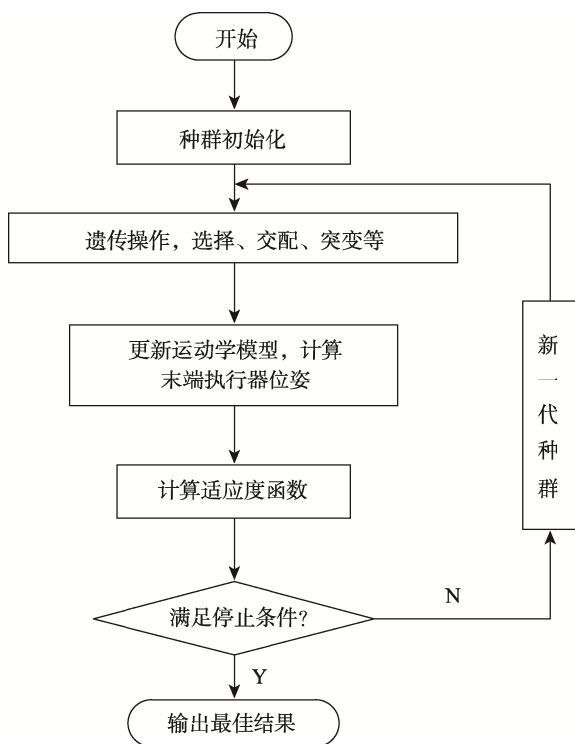


图3 包装机械臂标定流程

Fig.3 Packaging mechanical arm calibration process



图4 试验平台

Fig.4 Test platform

在整个试验过程中, 可以进行若干次重复试验, 实际测量末端执行器位置并与理论位置相比较, 试验结果见表1。去掉表格中的最大误差和最小误差, 然后取平均值。实际位置和理论位置之间的距离偏差绝对值的平均值大约为 0.8 mm, 最大值只有 1.2 mm。对比而言, 常规手眼标定方法的距离偏差绝对值的平均值约为 3.2 mm, 最大值约为 5 mm。试验结果表明:

所述基于遗传算法的手眼标定方法可以显著提高机械臂运动精度, 有利于提高包装质量和品质。

表1 试验结果

Tab.1 Test results

序号	目标点位置/mm	距离偏差绝对值/mm	
		文中方法	常规方法
1	A=(515.5, 0, 132.5)	0.6	4.6
2	A=(515.5, 0, 132.5)	0.7	5
3	A=(515.5, 0, 132.5)	1.2	3.2
4	A=(515.5, 0, 132.5)	1.1	1.0
5	A=(515.5, 0, 132.5)	0.2	2.6
6	B=(432.3, 256.7, 132.5)	0.5	3.0
7	B=(432.3, 256.7, 132.5)	0.7	1.8
8	B=(432.3, 256.7, 132.5)	0.6	3.7
9	B=(432.3, 256.7, 132.5)	0.8	4.2
10	B=(432.3, 256.7, 132.5)	1.0	2.4

4 结语

以提高包装机械臂运行精度为研究对象, 在常规视觉手眼标定系统中引入遗传算法实现机械臂多参数预测和优化。文中重点论述了机械臂 D-H 误差模型构建方法以及遗传算法的实现过程。通过具体试验验证所述控制方法的有效性。试验结果表明: 所述基于遗传算法的手眼标定方法可以先提高机械臂运动精度, 可在一定程度上提高包装质量和效率。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王琨, 骆敏舟, 曹毅, 等. 基于多变量预测补偿的机械臂精度提升方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1213—1221.
WANG Kun, LUO Min-zhou, CAO Yin, et al. Promoting Method for Manipulator Accuracy Based on Multi-variable Prediction and Compensation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(11): 1213—1221.
- [3] 肖帆, 李光, 游雨龙. 空间 3R 机械臂逆向运动学的多模块神经网络求解[J]. 中国机械工程, 2019, 30(10): 1233—1238.

- XIAO Fan, LI Guang, YOU Yu-long. Multiple Module Neural Network Solving for Inverse Kinematics of Space 3R Manipulators[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(10): 1233—1238.
- [4] 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.
- [5] 齐杨. 六轴工业机械臂运动控制系统设计与实现[D]. 柳州: 广西科技大学, 2019: 35—46.
- QI Yang. Design and Implementation of Motion Control System for Six-axis Industrial Robot Manipulator[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2019: 35—46.
- [6] 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.
- [7] 李牧. 机器人无标定视觉伺服关键技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 45—60.
- LI Mu. Research on Robot Uncalibrated Visual Servoing Key Technique[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 45—60.
- [8] 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.
- [9] 杨诚, 匡森, 宋彩温. 基于动态 BFGS 法的无标定视觉伺服控制[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(1): 1—8.
- YANG Cheng, KUANG Sen, SONG Cai-wen. Dynamic BFGS Method for Uncalibrated Visual Servoing[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(1): 1—8.
- [10] SATISH C V, VORUGANTI H K. Trajectory Planning of Redundant Manipulators Moving Along Constrained Path and Avoiding Obstacles[J]. Procedia Computer Science, 2018(133): 627—634.
- [11] LIU L, CHEN C, ZHAO X, et al. Smooth Trajectory Planning for a Parallel Manipulator with Joint Friction and Jerk Constraints[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(4): 1022—1036.
- [12] 彭西. 基于深度学习的柔性装配机械臂零件动态识别与定位研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2019: 33—48.
- PENG Xi. Research on Dynamic Identification and Positioning of Flexible Assembly Manipulator Parts Based on Deep Learning[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2019: 33—48.
- [13] 刘志, 赵正大, 谢颖, 等. 考虑结构变形的机器人运动学标定及补偿[J]. 机器人, 2015, 37(3): 376—384.
- LIU Zhi, ZHAO Zheng-da, XIE Ying, et al. Kinematic Calibration and Compensation for a Robot with Structural Deformation[J]. Robot, 2015, 37(3): 376—384.
- [14] 廖柏林, 梁平元, 杨喜. 基于伪逆的冗余机械臂运动控制的优化方案[J]. 信息与控制, 2013, 42(5): 645—651.
- LIAO Bo-lin, LIANG Ping-yuan, YANG Xi. Pseudoinverse-Based Optimization Scheme for Motion Control of Redundant Robot Manipulators[J]. Information and Control, 2013, 42(5): 645—651.
- [15] 雪增红, 刘兴发, 白小榜, 等. 离心泵轴向力测试系统的设计[J]. 流体机械, 2018, 46(2): 46—49.
- XUE Zeng-hong, LIU Xing-fa, BAI Xiao-bang, et al. The System Design of Axial Force Test for Centrifugal Pump[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(2): 46—49.
- [16] LIAO Y H, LI D K, TANG G J. Translational Zero-Disturbance Curve and Its Application to Zero-Disturbance Motion Planning of Space Manipulator System[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(5): 1234—1239.
- [17] GAO G B, SUN G Q, NA J, et al. Structural Parameter Identification for 6 DOF Industrial Robots[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017(8): 1—11.