

基于视觉反馈的包装机械手定位控制

袁飞¹, 周文彬²

(1.常州轻工职业技术学院, 江苏 常州 213000;

2.飞利浦医疗(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215024)

摘要: **目的** 为了解决全自动食品包装机的块状食品抓取问题, 以拾放并联机械手为研究对象, 结合视觉反馈和预测控制, 提出一种机械手定位控制方法。**方法** 给出了视觉反馈机械手总体设计方案, 包括机械手本体、双目视觉系统和控制系统。研究输送带上运动食品的机器视觉定位算法。在考虑目标可见性约束和机械手执行器约束的前提下, 将预测控制算法引入机械手的视觉伺服控制中, 用于实现机械手末端位姿控制。最后, 通过实验验证机械手的定位精度。**结果** 结果表明, 平均误差可控制在 0.7%, 符合运动拾取精度要求。**结论** 所述控制方法可满足包装工艺要求, 提高了包装过程自动化程度。

关键词: 包装机械手; 机器视觉; 预测控制; 定位

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)17-0204-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.030

Packaging Manipulator Positioning Control Based on Visual Feedback

YUAN Fei¹, ZHOU Wen-bin²

(1.Changzhou Vocational Institute of Light Industry, Changzhou 213000, China;

2.Philips Healthcare (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215024, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a manipulator positioning control method by taking the pick-and-place parallel manipulator as the research object and combining visual feedback with predictive control, in order to solve the problem of bulk food grabbing of the automatic food packaging machine. The overall design scheme of the visual feedback manipulator was given, including the manipulator body, binocular vision system and control system. The machine vision localization algorithm of moving food on conveyor belt was studied. The predictive control algorithm was introduced into the visual servo control of the manipulator on the premise of considering the visual constraints of the target and the constraints of the manipulator effector. Finally, the positioning accuracy of the manipulator was verified by experiments. The results showed that, the average error could be controlled at 0.7%, which met the requirements of motion pickup accuracy. The proposed control method can meet the requirements of packaging technology and improve the automation degree of packaging process.

KEY WORDS: packaging manipulator; machine vision; predictive control; positioning

为应对日益激烈的市场竞争, 食品包装行业发展十分迅速, 对设备的自动化和智能化程度要求越来越

高^[1-3]。当前, 我国绝大多数食品包装企业都是通过人工操作实现高度重复性的拾放工作。人工拾放容易

收稿日期: 2018-11-22

基金项目: 江苏省青蓝工程资助项目(2017); 常州市科技支撑计划(工业)项目(CE20170069)

作者简介: 袁飞(1980—), 男, 硕士, 常州轻工职业技术学院副教授, 主要研究方向为机械设计及其自动化、虚拟样机技术。

造成食品二次污染，不仅降低了包装合格率，同时会增加企业管理成本、用人成本^[4-7]。为解决此问题，必须提高食品包装生产线的自动化程度。另外，如果在全自动包装生产线的基础上，由机械手实现对食品的自动抓取、摆放，则能够进一步提高包装自动化程度^[8-10]。通常情况下，机械手可分为串联形式和并联形式等 2 种。二者相比，并联机械手整体质量轻、响应速度快、动态性能好，更加适合块状食品包装。另外，针对块状食品在传送过程中无规则排列的情况，众多研究将视觉系统引入到机械手控制系统中^[11-12]。视觉系统的使用可使机械手根据块状食品图像分辨其具体位置，控制执行机构快速响应，从而完成拾放任务^[13-16]。

在现有研究的基础上，以基于视觉系统的包装机械手为研究对象，结合视觉反馈和伺服控制，设计一种定位方法，并搭建测试平台，通过具体实验验证所述方法的有效性。

1 总体方案设计

基于视觉反馈的包装机械手定位控制系统包括：视觉系统、机械手本体以及控制系统。系统整体架构见图 1。

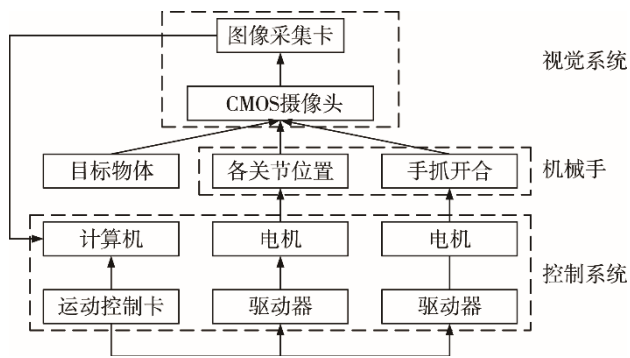


图 1 控制系统整体架构
Fig.1 Overall architecture of control system

视觉系统由 CMOS 摄像头和图像采集卡组成，负责目标物体和机械手末端位置原始图像的获取和处理等工作。机械手本体，即并联机械手，被控对象包括各关节位置和抓手开合等。控制系统由计算机、运动控制卡、驱动器和电机组成，其中计算机通过图像处理获取机械手末端和目标物的空间位置，根据运动学逆解原理得出机械手动力学和运动学约束条件，并求解各关节对应旋转角度；运动控制卡则根据计算机控制程序生成脉冲信号并作用于电机驱动器，实现各关节的运动以及抓手的抓、放动作。另外，摄像头会实时采集机械手的实际位置，与理论位置进行对比，不断修正直到末端执行器完成抓取任务为止。

2 算法研究

2.1 视觉定位算法

并联机械手自动定位原理见图 2—3，其中图 2 为自动定位三维效果，图 3 为自动定位原理。在分拣过程中，在输送带的作用下，食品位置会不断变化。为便于分析，可假设块状食品 z 轴方向不会发生姿态变化；假设在位置 A 处，工业相机捕捉到食品图像。通过机器视觉软件对所采集图像进行分析处理，完成食品边缘特征提取，进而确定该食品的特征点 A 以及转角 θ ，即食品的位置和姿态。假设延迟时间为 Δt ，此时食品到达位置 A'，同时并联机械手末端夹持器也到达此位置，从输送带上抓取食品然后放到指定位置。

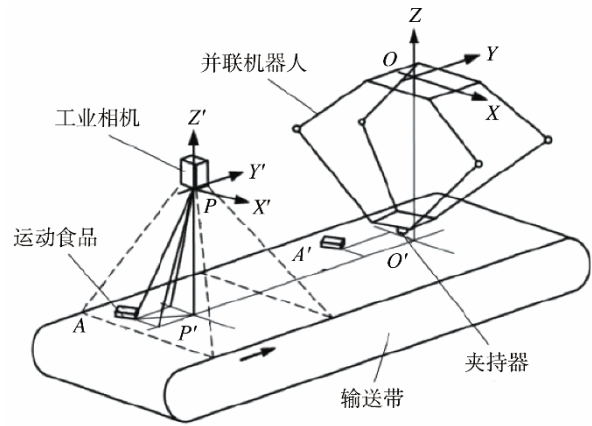


图 2 自动定位三维效果
Fig.2 Three-dimensional renderings of automatic positioning

如图 2 所示，定义并联机器人静平台中心为 O，即坐标系 O-XYZ 原点，该点在输送带上的投影可定义为 O'， $OO' = H$ ；定义工业相机镜头平面中心为 P，即坐标系 P-X'Y'Z' 原点，该点在输送带上的投影可定义为 P'；定义平面 O'-XZ 和 P'-X'Z' 之间的距离为 L；传送速度为 v；输送带宽度为 W。

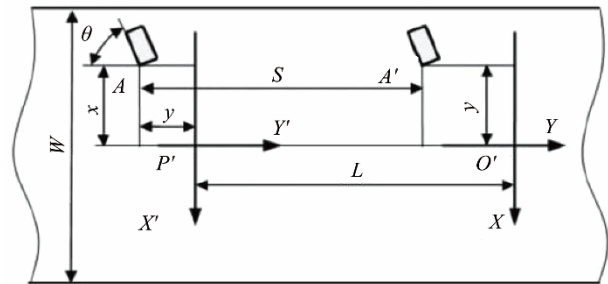


图 3 自动定位原理
Fig.3 Schematic diagram of automatic positioning

如图 3 所示，位置 A 和位置 A' 之间距离 S 可表示为：

$$S = v\Delta t \tag{1}$$

由于所选用工业相机为面阵视觉传感器,可通过图像标定食品的偏移距离 Δx 和 Δy 。那么坐标系 $O-XYZ$ 下,位置 A' 的坐标值可表示为:

$$\begin{cases} y = -L - \Delta y + S = -L - \Delta y + v\Delta t \\ x = -\Delta x \\ z = -H \end{cases} \tag{2}$$

2.2 视觉伺服预测控制

机械手定位控制容易受外部因素影响,具有一定的时变性、随机性,采用传统控制方法很难取得理想控制效果。为解决此问题,文中引入了模型预测控制。模型预测控制诸多方面具有十分明显的优势,例如:降低建模难度、提高系统抗干扰性和减小控制误差等。另外,模型预测控制在解决某个优化问题时主要依靠当前时刻采样数据,不仅能够得到当前采样时刻控制量,而且可以得到未来时刻的控制量。不过,只会把当前采样时刻控制量作用于控制系统。根据参考文献[1],采用内部模型控制结构,见图4。

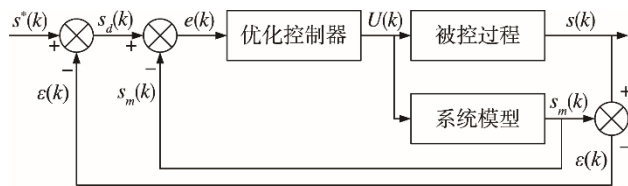


图4 内部模型控制结构
Fig.4 Internal model control structure

图4中被控过程包含两部分,即机械臂运动过程和视觉系统识别过程。定义过程输入量为 $U(k)$,即机械臂关节角度;定义输出量为 $s(k)$,即机械臂当前位置;定义参考值为 $s^*(k)$,即期望位置;定义系统模型预测位置为 $s_m(k)$;定义当前位置和系统模型预测位置之间的误差为 $\varepsilon(k)$ 。上述各控制量可表示为:

$$\varepsilon(k) = s(k) - s_m(k) \tag{3}$$

$$s_d(k) = s^*(k) - \varepsilon(k) = s^*(k) - (s(k) - s_m(k)) \tag{4}$$

$$e(k) = s_d(k) - s_m(k) = s^*(k) - s(k) \tag{5}$$

由图4可知:被控过程输出量 $s(k)$ 趋向于参考值 $s^*(k)$, 等同于系统模型输出量 $s_m(k)$ 趋向于期望值 $s_d(k)$ 。在参考值 $s^*(k)$ 已知的情况下,基于有限预测域 N_p 内模型就能够判断下一时刻位置信息 $s_m(k)$ 变化趋势。整个预测过程中,需考虑以下3种约束条件。

第1种,控制量约束,即对执行机构速度 U 进行限定,需满足:

$$U_{\min} \leq U \leq U_{\max}$$

第2种,可视性约束,即确保可视区 V 一直处于像素平面内,需满足:

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$$

第3种,机械约束,即对机械臂关节角度 q 进行限制,需满足:

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$$

综合分析,上述约束条件可以描述为一个非线性方程,即:

$$\begin{cases} C(U) \leq 0 \\ C_{eq}(U) = 0 \end{cases} \tag{6}$$

并且定义约束域 K 。

定义优化目标为使期望轨迹 $s_d(k)$ 和预测模型输出 $s_m(k)$ 之间的偏差最小,即:

$$\min_{U \in K} J(U) \tag{7}$$

$$J(U) = \sum_{i=k+1}^{k+N_p} [s_d(i) - s_m(i)]^T Q(i) [s_d(i) - s_m(i)] \tag{8}$$

式中: $Q(i)$ 为一个对角阵。通过性能指标方程 J 能够获得预测时域 N_p 内的最优控制序列 U , 不过仅将第一个控制量 $U(k)$ 作用于被控过程。基于视觉伺服预测控制的算法流程见图5。

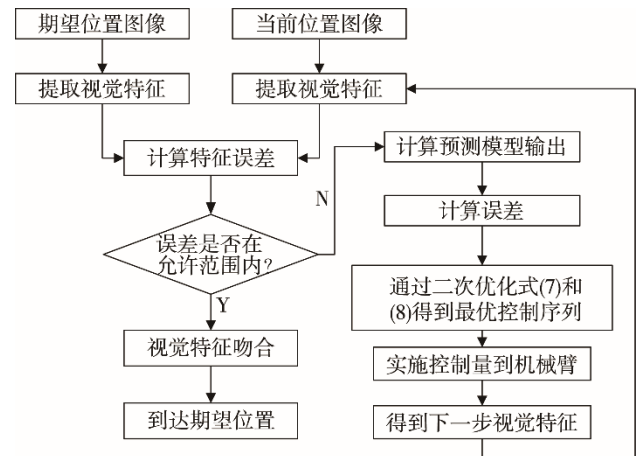


图5 控制算法流程
Fig.5 Control algorithm flow

3 实验

为验证所述算法的可行性和有效性,搭建测试平台并进行相关实验。测试平台选用一种基于 PCI 总线的高性能 4 轴运动控制卡,具体型号为雷赛 DMC-5480。该运动控制卡脉冲频率可达到 10 MHz,能够实现步进电机、伺服电机的控制;指令缓存最高为 512;支持直线、圆弧和样条插补;另外,该运动控制卡最多可接受 4 路位置锁存信号以及编码器信号,所以其在多轴运动控制领域的应用比较广泛。机械手由 4 个电机驱动,3 个用于驱动旋转关节、1 个用于驱动手爪开合。通过接线板实现运动控制卡和电机的连接。

所选工业相机型号为 DALSA 公司 Genie 系列，该相机基于千兆以太网进行通信，通信速率完全满足生产要求；分辨率可以达到 640×480、帧/行频 64 fps，可用于高速运动物体图像的采集。

测试平台见图 6。

机械手抓取实验主要用于测试机械手拾放块状食品过程中的定位精度。首先，设定理论坐标值并将其传送至计算机；然后，计算机根据设定值和反馈值生成控制信号并作用于运动控制卡；接着，运动控制卡驱动伺服电机动作，完成机械手的轨迹运动；最后，记录机械手实际拾取位置，通过实验结果分析机械手定位精度。

实验中，输送带速度保持在 1 m/s，设定 15 个测量点，具体结果见表 1。通过观察，所采集图像质量较高，能够满足视觉定位算法要求。经过统计发现：X 方向，测量数据平均误差为 0.656%；Y 方向，测量

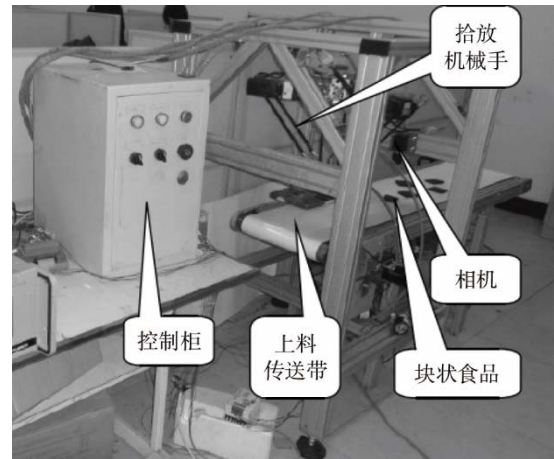


图 6 测试平台
Fig.6 Test platform

数据平均误差为 0.73%，能够满足食品包装对机械手运动精度的要求。

表 1 实验结果
Tab.1 Experimental results

序号	设定值		实际值		绝对误差		误差比	
	$X_{理}$	$Y_{理}$	$X_{实}$	$Y_{实}$	X	Y	$X/X_{理}$	$Y/Y_{理}$
1	0	50	0	50.4	0	0.4	0	0.008
2	0	-50	0	-50.4	0	0.4	0	0.008
3	50	0	50.5	0	0.5	0	0.01	0
4	-50	0	-50.5	0	0.5	0	0.01	0
5	50	50	50.5	50.4	0.5	0.4	0.01	0.008
6	50	50	50.4	50.4	0.4	0.4	0.008	0.008
7	50	50	50.3	50.3	0.3	0.3	0.006	0.006
8	50	-50	50.3	-50.3	0.3	0.4	0.006	0.008
9	30	20	30.3	20.2	0.3	0.2	0.01	0.01
10	35	-20	34.8	-20.2	0.3	0.2	0.0086	0.01
11	18	32	17.9	32.2	0.1	0.2	0.0056	0.006 25
12	18	32	18.1	31.8	0.1	0.2	0.0056	0.006 25
13	28	16	28.2	16.2	0.2	0.2	0.0071	0.0125
14	40	25	39.7	25.2	0.3	0.3	0.0075	0.012
15	25	15	25.1	15.1	0.1	0.1	0.004	0.0067
平均值							0.006 56	0.0073

4 结语

以包装机械手的定位控制为研究对象，基于视觉反馈设计了一种块状食品拾放定位方法。重点论述了定位算法以及视觉预测控制方法，能够提高机械手定位精度。实验测试结果表明：X 方向上测量数据平均误差为 0.656%；Y 方向上测量数据平均误差为 0.73%，精度上能够满足包装生产线要求。文中所述模型预测控制方法对机械手的运动控制具有一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 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.
- GAO Tie-hong, SHI Kai, NAN Ya-fang, et al. The Vision System and Realization of Pick-and-place Parallel Robot for Blocky Food[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2013, 42(6): 35—38.
- [3] 倪鹤鹏, 刘亚男, 张承瑞, 等. 基于机器视觉的Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016, 38(1): 49—55.
- NI He-peng, LIU Ya-nan, ZHANG Cheng-rui, et al. Machine Vision Delta Based on Robot Sorting System[J]. Algorithm Robot, 2016, 38(1): 49—55.
- [4] 晏祖根, 李明, 徐克非, 等. 高速机器人分拣系统机器视觉技术的研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(1): 28—31.
- YAN Zu-gen, LI Ming, XU Ke-fei, et al. High-speed Robot Auto-sorting System Based on Machine Vision[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(1): 28—31.
- [5] 郎需林, 靳东, 张承瑞, 等. 基于实时以太网的DELTA 并联机械手控制系统设计[J]. 机器人, 2013, 35(5): 576—581.
- LANG Xu-lin, JIN Dong, ZHANG Cheng-rui, et al. Control System Design of DELTA Parallel Manipulator Based on Real-time Ethernet[J]. Robot, 2013, 35(5): 576—581.
- [6] 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(9): 98—101.
- CHEN Dong-liang, HUA Yun-song, WU Ying. Research of Manipulator Motion Control Based on Visual Feedback[J]. Information Technology, 2015(9): 98—101.
- [7] 张铨伟, 王彪, 徐贵力. 摄像机标定方法研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(11): 174—179.
- ZHANG Cheng-wei, WANG Biao, XU Gui-li. Camera Calibration Method of Research[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(11): 174—179.
- [8] 王攀峰, 梅江平, 陈恒军, 等. 基于多并联机械手的锂离子电池自动分拣装备控制系统设计[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 63—68.
- WANG Pan-feng, MEI Jiang-ping, CHEN Heng-jun, et al. Control System Design for Automatic Sorting of Lithium Ion Battery Using Multiple Parallel Manipulators[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 63—68.
- [9] 晏祖根, 王立权, 孙智慧, 等. 面向食品生产的高速自动分拣系统的研究[J]. 包装工程, 2009, 30(7): 16—18.
- YAN Zu-gen, WANG Li-quan, SUN Zhi-hui, et al. Study of High-speed Auto-sorting System for Food Production[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 16—18.
- [10] 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.
- [11] 胡俊峰, 张宪民, 朱大昌, 等. 柔性并联机器人动力学建模[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 209—213.
- HU Jun-feng, ZHANG Xian-min, ZHU Da-chang, et al. Dynamic Modeling of Flexible Parallel Robot[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 209—213.
- [12] 方泳, 袁召云. 基于网络图法的卷烟分拣排程的算法与应用[J]. 烟草科技, 2011(1): 18—22.
- FANG Yong, YUAN Zhao-yun. Algorithm of Cigarette Sorting Scheduling Basing on Network Graph and Its Application[J]. Tobacco Science & Technology, 2011(1): 18—22.
- [13] 张策. 高速包装机械手视觉控制系统研究与开发[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHANG Ce. R & D of Vision Control System for a High Speed Packaging Robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [14] 王保升, 汪木兰. 基于货单的多品种产品自动分拣系统[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 109—112.
- WANG Bao-sheng, WANG Mu-lan. Automatic Sorting System for Multi-variety Product Based on Manifest[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 109—112.
- [15] 邓明星, 刘冠峰, 张国英. 基于Delta 并联机器人的传送带动态跟踪[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 153—154.
- DENG Ming-xing, LIU Guan-feng, ZHANG Guo-ying. Dynamic Conveyor Tracking for Delta Robot[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(1): 153—154.
- [16] 张文昌. Delta 高速并联机器人视觉控制技术及其视觉标定技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- ZHANG Wen-chang. Control Technique and Kinematic Calibration of Delta Robot Based on Computer Vision[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.