

机器人视觉搬运系统构建与软件开发

张德红, 代艳霞

(宜宾职业技术学院, 宜宾 644003)

摘要: **目的** 基于双目 CCD 相机、机器人、搬运手爪构建机器人视觉识别与搬运平台, 引导机器人实现自动抓取。**方法** 利用 OPENCV 库函数, 由二次开发完成相机的标定, 经图像采集、预处理, 研究了立体匹配、边缘提取等算法, 提取物体的轮廓特征点, 并计算物体质心点的三维坐标, 换算成机器人的关节转角信息, 为机器人抓取提供视觉定位。**结果** 基于 VS2012 开发平台, 将视觉图像处理、机器人控制、数据传输集成于 PC 端, 便于人机交互和软件集成, 正交实验表明空间不同方向的定位误差在 0.5~1.5 mm 范围内。**结论** 所提视觉引导方案能提高机器人动作的精确度, 满足工业搬运要求。

关键词: 机器人; 双目视觉; 图像处理; 误差; 搬运

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)01-0149-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.024

Construction of Robot Vision Handling System and Software Development

ZHANG De-hong, DAI Yan-xia

(Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China)

ABSTRACT: The work aims to build a robot visual recognition and handling system based on stereo CCD camera, robot and gripping claws to instruct the robot to achieve automatic grabbing. The OPENCV library functions were used to complete the camera calibration based on the secondary development. Through image acquisition and pre-processing, the algorithms of stereo matching and edge extraction were studied, and the feature contour points of the objects were also extracted to calculate the 3D coordinates of centroid points. The 3D coordinates of the centroid points were converted into robot's joint angle data to provide visual positioning for robotic grasping. Based on VS2012 development platform, visual image processing, robot control and data transmission were integrated into the PC to facilitate human-computer interaction and software integration. The orthogonal experiment indicated that the positioning error in different directions of the space was within the range of 0.5~1.5 mm. The proposed visual guidance scheme can improve the accuracy of robotic motion, and meet the requirements of industrial handling.

KEY WORDS: robot; stereo vision; image processing; error; handling

随着产业升级与发展, 机械手广泛地应用于汽车、手机等生产线的装配、零件搬运、物料码垛等工况, 是实现自动化、智能化的重要装备。视觉定位和识别技术已经应用于机器人、无人驾驶、外观瑕疵检测等领域。目前大多数的机器人能够实现复杂的动作, 但是工业应用仍然停留在示教再现方式, 适用于

结构固定的生产环境, 缺少与外界环境之间的交互能力和智能感知, 机器人的生产效率还无法满足柔性制造的智能需求^[1]。将视觉技术引入到机器人的控制领域, 能够使机器人增加视觉测距和定位引导功能, 使之主动适应变化的生产环境, 对工业应用有重要的意义。

收稿日期: 2018-01-23

作者简介: 张德红(1974—), 男, 硕士, 宜宾职业技术学院副教授, 主要研究方向为数控技术与工业机器人等。

罗炳军等^[1]以一台小型 ABB 机械手搭建视觉搬运平台,采用单目视觉定位技术,基于 OPENCV 开发了控制软件。因单目视觉只能应用于 2 维平面对零件进行定位和特征识别,应用的场景受限。熊健等^[2]搭建的机器人视觉识别及搬运系统,单目双目 CCD 相机视场与目标零件不垂直,识别精度容易受设备条件限制,且 RS232 的通信速率低,影响生产线的机械手搬运效率。黄松梅等^[3]研究了双目视觉标定,图像立体匹配等技术,求解了物体点的三维坐标,运用视差原理实现了物体与相机距离的视觉测量。李肖等^[4]在双目 CCD 相机的不同位置组合,利用最小二乘法研究了双目立体视觉的外参数矩阵问题,但其矩阵运算复杂,目前尚不适用于在线快速计算并引导机器人动作。

文中构建的基于立体视觉定位的机器人搬运系统,采集目标图像通过图像处理与校正、ROI 提取、立体匹配等求出视差,计算出目标物体和相机的空间距离^[5-9],从而引导机器人定位和实现工件的智能搬运。在 VS 平台进行软件开发,集成于 PC 端程序控制机器人运行,实现智能抓取和搬运。

1 系统设计及构成

1.1 硬件结构

一套完整的工业系统分为硬件和软件 2 部分^[10-12]。基于视觉技术的机器人搬运平台见图 1。系统的硬件组成包括:双目 CCD 相机、ABB 机器人、图像采集装置、PC 机、搬运手爪等。双目 CCD 相机固定在与工作台垂直的方向,通过数据线连接到 PC 机,LED 光源提供图像采集所需光照环境,经过图像采集、处理等分析,计算工件定位坐标,将之传送给机器人,驱动机器人末端的机械手开合以执行搬运动

作。在视觉智能定位搬运过程中,双目 CCD 相机最大可获得 1032×772 的图像分辨率,提供目标零件的空间信息;OPENCV 函数算法判别工件位置和计算工件质心坐标;机器人完成搬运动作;PC 机主要是人机交互功能,完成数据传输、转换与发布指令。

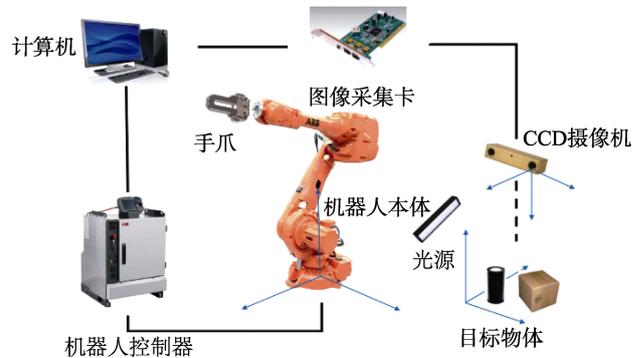


图 1 机器人视觉搬运系统的硬件组成
Fig.1 Hardware components for robot vision handling system

1.2 软件开发

机器人视觉搬运系统集成了视觉信息、机器人控制、软件开发等多种技术^[13-15]。视觉模块以 VS2012 为开发平台、C++作为开发语言,集成 OPENCV 库函数、双目 CCD 相机开发包 Vision SDK 等实现了工件的识别与定位,最终得到工件在机器人坐标系下的三维坐标数据。基于 Robot Studio 对机器人控制器进行开发,将搬运指令集成于 PC 端。双目 CCD 相机识别的空间物体质心坐标,传送给 PC 并保存;在 PC 端转换数据(相机坐标系和机械手坐标系,需要通过一个转换矩阵计算,内置在程序中),发送指令控制机械手运动。机器人搬运系统的软件开发界面及控制流程见图 2。

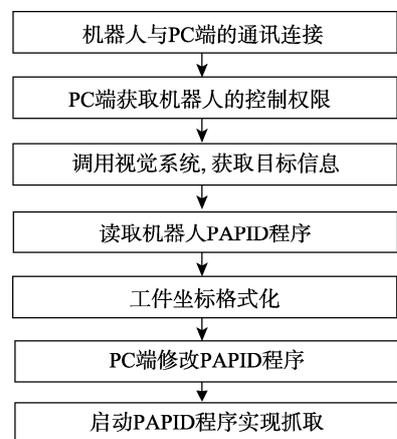
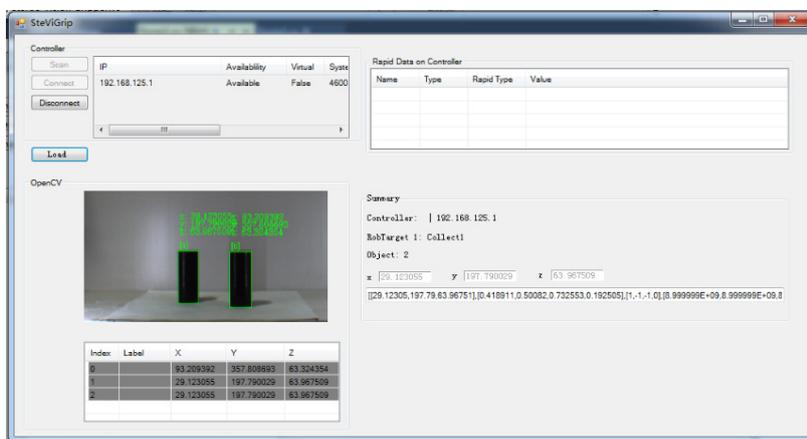


图 2 机器人搬运系统的软件开发及控制流程
Fig.2 Software development and control process of robot handling system

2 视觉定位原理

2.1 相机标定

相机图像是二维的，机器人空间运动是三维的，标定是视觉技术从二维图像中提取三维信息不可或缺的一步，也是视觉测距的基础。相机的标定方法有很多种，文中采用基于 OPENCV 的标定方法^[6-7]，通过 OPENCV 库函数 cvStereoCalibrate() 可以快速进行标定过程，节省系统开发的进程。

2.2 立体匹配

双目 CCD 相机的左、右 2 个相机生成 2 幅图像，但对同一目标物体而言，左右 2 幅图像中会出现视图区的重叠，要将图像中重叠像素的几何约束表达式建立起来，将目标物体点在左右 2 幅图像中的映射点对应起来。立体匹配算法一般可分为全局匹配算法和局部匹配算法，由于全局匹配的算法复杂度高，耗时较长，文中采用基于累积偏差最小化的局部匹配算法。

对于重叠区域的像素，按照给定的一个尺寸确定遍历领域，如 3×3 领域，5×5 领域，领域越小遍历计

算越快，算法耗时越少。在确定的领域内，沿着同一行与另一幅图像的对应领域像素比较，累积偏差达到最小值时，认为找到局部匹配的最优解。OpenCV 提供的立体匹配函数 cvFindStereoCorrespondenceBM() 和 cvFindStereoCorrespondenceGC() 可二次开发完成图像的立体匹配计算。

累积偏差最小的局部匹配算法原理为：

$$\min_{d=d_{\min}}^{d_{\max}} \left(\sum_{i=-m/2}^{m/2} \left(\sum_{j=-m/2}^{m/2} |I_{\text{right}}[x+i][x+j] - I_{\text{left}}[x+i+d][x+j]| \right) \right), d_{\min}, d_{\max}$$

分别为最小视差和最大视差； m 为方形邻域的尺寸； $I_{\text{left}}, I_{\text{right}}$ 分别为双目 CCD 相机的左图像和右图像； x, y 分别为图像的像素坐标。

2.3 双目测距原理

双目测量是在相机标定的基础上，根据三角形的数学原理，计算目标物体的深度信息。如图 3 所示，相机的 2 个镜头，其光轴沿 z 向平行，焦距 f 相同，故此实现视觉空间测量。左、右相机同时获取同一场景物体的图像，同一特征点在左、右图像平面对应有 2 个不同的位置，其坐标差值称为视差^[3,11]。

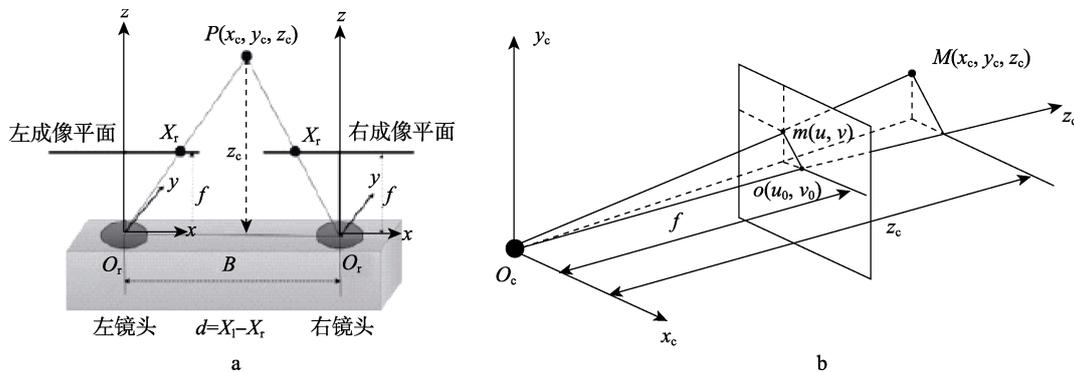


图 3 双目视觉测距原理
Fig.3 Distance measurement principle of stereo vision

双目 CCD 相机的 2 个镜头获取物体同一特征点 $P(x_c, y_c, z_c)$ 的左、右 2 幅图像，它们的图像坐标分别记为 $p_l(x_l, y_l)$, $p_r(x_r, y_r)$ 。双目 CCD 相机的图像在同一平面上，则特征点 P 的图像 y 坐标相同，即 $Y_l = Y_r = Y$ ，则由三角形相似得到：

$$d = X_l - X_r \tag{1}$$

$$\frac{B}{z_c} = \frac{B - (X_l - X_r)}{z_c - f} = \frac{X_l - X_r}{f} = \frac{d}{f} \tag{2}$$

其中式 (3) 是左、右图像的视差； f 为相机焦距； B 为基线距离，即 2 个镜头的投影中心连线的距离。设图像坐标 $u = X_l$, $v = Y$ ，由式 (2) 可得空间点的三维坐标：

$$\frac{f}{z_c} = \frac{u}{x_c} = \frac{v}{y_c} \tag{3}$$

$$\begin{cases} x_c = u \frac{B}{d} \\ y_c = v \frac{B}{d} \\ z_c = f \frac{B}{d} \end{cases} \tag{4}$$

据此遍历计算左、右相机两图像平面所有的特征点，即可得到整幅图像每个特征点的三维坐标信息，并保存成深度图像数据。

2.4 图像边缘提取

由于在一幅图像中，既包含所需要的目标物体信息，同时还包含图像背景或者其他多余的信息，在提取目标物体的坐标时，仅需计算目标物体的轮廓点数据即

可,其他图像信息是冗余的,会大大拖累计算效率,因此可用图像分割法提取目标所在的图像区域。文中使用经典的 Canny 边缘提取算法,快速提取图像中物体的

轮廓点像素特征,通过腐蚀-膨胀运算进一步得到目标物体的精确轮廓点数据。圆柱体和长方体板初始图像的分割和目标物体的边缘轮廓点提取效果,见图4。



图4 双目 CCD 相机初始图像与边缘提取后的图像
Fig.4 Initial image and edge-extracted image of stereo CCD camera

3 图像处理与坐标计算

3.1 图像处理

视觉图像处理为机器人智能搬运系统提供目标零件的坐标数据,机器人能否准确且稳定地抓住工件,很大程度上依赖于图像处理算法的精确性,视觉识别过程见图5。双目 CCD 相机首先拍摄物体的

左、右 2 幅图像,经相机标定后获得矫正图像,由立体匹配算法得到整个物体的三维数据信息。另一方面,图像经过预处理后,提取包含目标特征点的感兴趣区域(ROI 分割区域,减少图像处理的计算量),经图像边缘提取算法获取目标物体的轮廓,最后调用三维深度数据得到相机坐标系下的目标位置(这里计算目标物体的质心坐标和角点坐标),继而通过坐标转换得到机器人坐标系下物体的三维坐标。

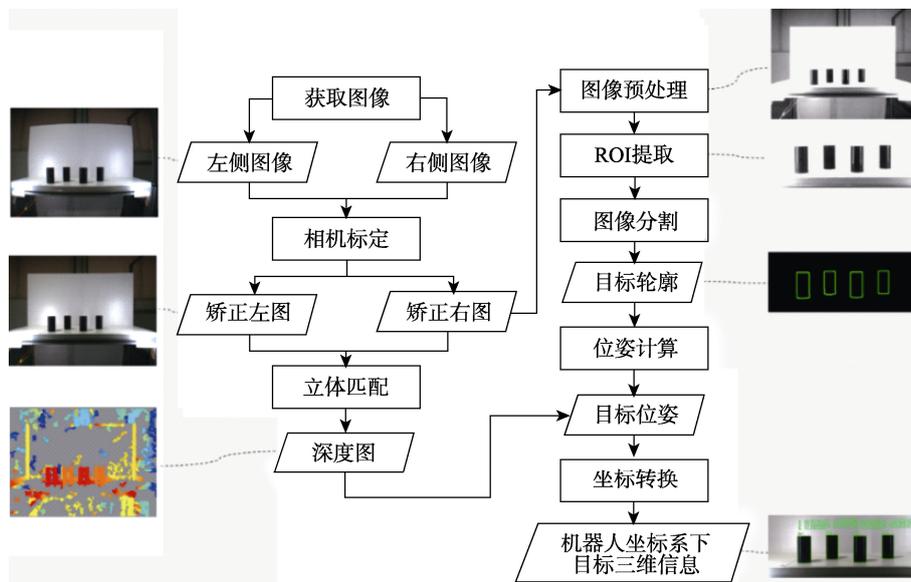


图5 图像处理与质心三维坐标计算过程
Fig.5 Image processing and calculation process of 3D coordinates of the centroid point

3.2 目标物体的坐标计算

要实现机器人的准确抓取,获取目标在三维空间的精确位置显得至关重要。识别出抓取目标后,基于

得到的目标轮廓数据点,通过特征计算得到目标的坐标信息。实验选取的圆柱体对象在图像中的轮廓为矩形(含有4个角点),可通过区域重心法来提取所求目标的质心位置。区域重心法的目的是求出已知区域

的重心坐标，设区域 R ，面积为 A ，则其重心可由式 (5) 计算。

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{A}, \bar{y} = \frac{\sum y}{A}, \bar{z} = \frac{\sum z}{A} \quad (5)$$

式 (5) 计算得到的是双目 CCD 相机坐标系下目标物体的角点坐标和质心坐标，还需要转换为机器人（末端关节）坐标系的数据信息，才是对抓取和搬运动作有效的数据。如图 6 所示，2 个空间坐标系分别是工件坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 和摄像机坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ ，两坐标系之间坐标原点不一致，存在 3 个平移参数 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ；坐标轴之间也相互不平行，存在 3 个旋转参数 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 。同一点在 2 个坐标系中的坐标分别是 (X_w, Y_w, Z_w) 和 (X_c, Y_c, Z_c) 。两坐标系可通过坐标轴的平移和旋转变换成为一致，坐标间的转换关系为：

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (6)$$

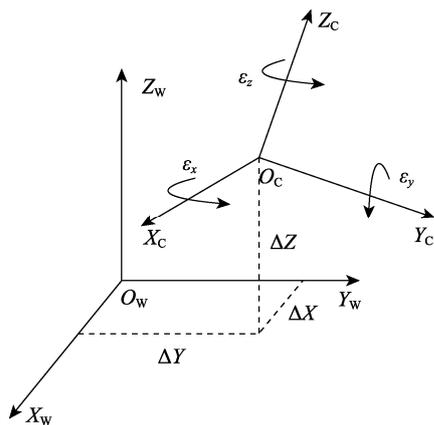


图 6 双目 CCD 相机坐标系和机器人坐标系转换
Fig.6 Conversion between the stereo CCD camera and the robot coordinate systems

这里采用基于罗德里格矩阵的坐标转换方法。式中： λ 为两坐标系间的比例因子（默认为 1）； \mathbf{R} 为旋转矩阵； \mathbf{T} 为平移矩阵。

经过坐标矩阵转换后，得到的即是机器人坐标系下的目标物体的角点坐标和质心坐标数据，程序算法将坐标数据显示并传输在 PC 机的开发软件上，如图 2 所示，确认无误后传输至机器人控制器，由机械手执行抓取动作，完成指令。

4 抓取实验

将双目 CCD 相机在工作台前方 1 m 处（相机镜头与工作台面平行）固定，相机线缆与计算机连接，机器人调试正常。规划一个坐标系 X_w-Y_w 平面与桌面平行， Z_w 垂直于桌面正方向朝上。采用正交实验方法设计分组，在规划坐标系平面的不同位置摆放物体，识别并计算目标物体的质心点三维坐标，根据相机坐标与机器人坐标数据比较，以确定机器人视觉抓取系统的定位精度。机器人视觉抓取实验布局见图 7，实验分组及数据见表 1。

目标物体距离相机镜头端面最远 1.45 m，最近 1.05 m，即 X_w 值在 $-100 \sim 300$ mm 范围内。在实验区域内，相机深度方向定位结果即目标物体的 X_w 方向的定位误差 Δx 主要与 X_w 有关， X_w 实际值越小即目标距离相机越远时误差随之增大，最大误差在 1.50 mm 以内。三因素在实验区域内对目标 Y_w, Z_w 方向的定位误差 $\Delta y, \Delta z$ 影响不大， $|\Delta y|, |\Delta z|$ 在 0.50 mm 左右，最大不超过 0.80 mm，精度较高，可以保证机器人抓取系统的顺利抓取。此外，实验室环境光照不同时间段，视觉系统定位均能保持较高的精度。

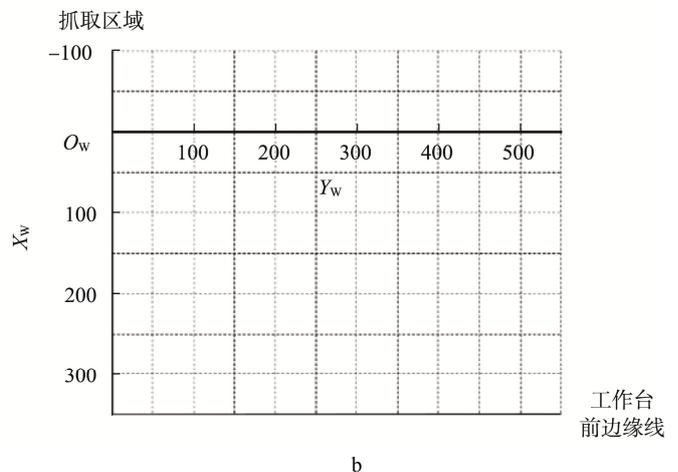
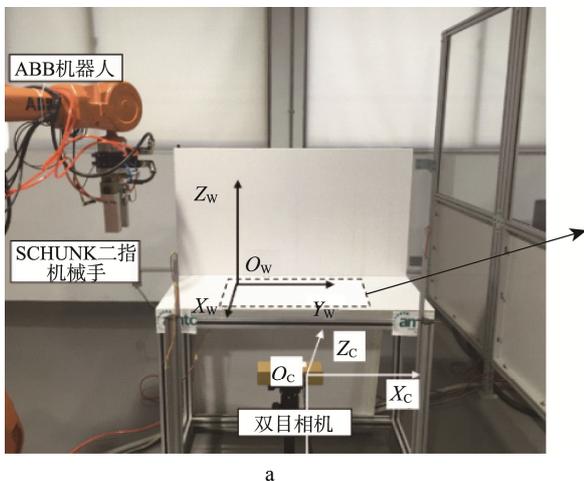


图 7 视觉引导及抓取实验
Fig.7 Visual guidance and grasping experiments

表1 正交实验方案及实验数据
Tab.1 Orthogonal experiment scheme and data
mm

实验 编号	距离因素		实验精度		
	X_w	Y_w	$ \Delta x $	$ \Delta y $	$ \Delta z $
1		0	1.25	0.66	0.47
2		100	1.11	0.55	0.58
3	-100	200	1.42	0.54	0.51
4		300	1.22	0.62	0.53
5		400	1.38	0.60	0.42
6		0	1.29	0.50	0.46
7		100	0.88	0.64	0.67
8	0	200	1.13	0.57	0.44
9		300	0.99	0.67	0.56
10		400	1.05	0.48	0.53
11		0	0.95	0.62	0.44
12		100	0.73	0.51	0.51
13	100	200	0.82	0.57	0.53
14		300	0.90	0.55	0.45
15		400	0.78	0.63	0.68
16		0	0.67	0.57	0.46
17		100	0.61	0.54	0.52
18	200	200	0.64	0.61	0.57
19		300	0.58	0.44	0.71
20		400	0.69	0.63	0.49
21		0	0.59	0.59	0.55
22		100	0.44	0.48	0.57
23	300	200	0.50	0.52	0.66
24		300	0.57	0.56	0.48
25		400	0.49	0.57	0.54

5 结语

基于双目 CCD 相机搭建了机器人视觉识别与抓取平台,利用 OPENCV 完成相机标定、立体匹配和图像边缘提取,通过 VS2012 平台集成了图像采集、预处理、立体匹配、边缘提取等算法,提取物体的轮廓特征点,并计算物体的质心点三维坐标,为机器人抓取提供视觉引导。

视觉控制和机器人运动控制是相互独立的,在 PC 机开发集成、并能够人机交互控制。抓取实验表明,系统的视觉定位的精度在 0.5~1.5 mm 范围内,对于机器人的抓取动作而言已经足够,所提的视觉方案能提高机器人的抓取效率和准确度,可广泛适应工业生产需要。

参考文献:

- [1] 罗炳军,黄本法,郭联金,等.搬运机器人视觉引导定位技术的研究[J].新型工业化,2017,7(3):12—19.
LUO Bing-jun, HUANG Ben-fa, GUO Lian-jin, et al. Research on Visual Guide Positioning Technology of Handling Robot[J]. Journal of New Industrialization, 2017, 17(3): 12—19.
- [2] 熊健,余飞,王高,等.搬运机器人多目标识别系统的研究[J].湖北工业大学学报,2016,31(2):35—38.
XIONG Jian, YU Fei, WANG Gao, et al. A Multiple Target Recognition System of Workpiece Handling Robots[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2016, 31(2): 35—38.
- [3] 黄松梅,毕远伟,刘殿通,等.双目立体视觉非接触式测量研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2017,30(4):323—327.
HUANG Song-mei, BI Yuan-wei, LIU Dian-tong, et al. Non-Contact Measurement with Binocular Stereo Vision[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2017, 30(4): 323—327.
- [4] 李肖,葛宝臻,罗其俊,等.自由双目立体视觉摄像机动态外参数的获取[J].计算机应用,2017,37(10):2888—2894.
LI Xiao, GE Bao-zhen, LUO Qi-jun, et al. Acquisition of Camera Dynamic Extrinsic Parameters in Free Binocular Stereo Vision System[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(10): 2888—2894.
- [5] 兰佳,叶文华.基于立体视觉的工件识别与定位系统研究[J].机械制造与自动化,2017,46(5):188—193.
LAN Jia, YE Wen-hua. Research on Parts' Recognition and Orientation Algorithm Based on Stereo Vision[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2017, 46(5): 188—193.
- [6] 兰佳.基于立体视觉的搬运机器人工件识别与定位方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.
LAN Jia. Research on the Part Recognition and Location of Handling Robot Based on Stereo Vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [7] 黄晓城.基于双目立体视觉的工件测距的研究[D].广州:广东工业大学,2016.
HUANG Xiao-cheng. Research on Workpiece Ranging Distance Based on Stereo Vision[D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2016.
- [8] 贾晓敏.基于视觉信息的工业机器人搬运技术研究[D].洛阳:河南科技大学,2013.
JIA Xiao-min. Research on Industrial Robot Handling Technology Based on Visual Information[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
- [9] 李双全,章国宝.基于ORB算法的双目立体视觉测距系统[J].工业控制计算机,2017,30(6):42—44.
LI Shuang-quan, ZHANG Guo-bao. Binocular Stereo Vision Ranging System Based on ORB Algorithm[J].

- Industrial control computer, 2017, 30(6): 42—44.
- [10] 陈琨. 基于机器视觉的在线 PE 瓶检测与分拣系统设计与实现[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
CHEN Kun. Design and Implementation of Online PE Bottle Testing and Sorting System Based on Machine Vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [11] 江士雄, 曹丹华, 吴裕斌. 面向机器人抓取的双目视觉系统标定与目标位姿估计算法[J]. 仪表技术与传感器, 2016(11): 110—113.
JIANG Shi-xiong, CAO Dan-hua, WU Yu-bin. Binocular Vision System Calibration and Object Pose Estimation Method for Robot Fetching[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(11): 110—113.
- [12] 陈甦欣, 王正阳, 张晓峰, 等. 基于视觉的 SCARA 机器人抓取平台与实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(11): 53—56.
CHEN Su-xin, WANG Zheng-yang, ZHANG Xiao-feng, et al. Fetching Platform of SCARA Robot and Experimental Research Based on Vision[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(11): 53—56.
- [13] 游继强. GSK RB08 工业机器人的视觉定位系统的设计与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
YOU Ji-qiang. Design and Application of GSK RB08 Industrial Robot Vision Positioning System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [14] 卢冠男. 基于机器视觉的工业机器人抓取系统的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
LU Guan-nan. Research on Industrial Robot Crawling System Based on Machine Vision[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [15] 龚斌. 基于单目视觉的卸砖机器人智能抓取技术的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
GONG Bin. Study on a Technique of Unloading Brick Robot Intelligent Grasp Based on Monocular Vision[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.