

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.08.018

基于双目视觉的机械手识别、定位、抓取系统研究

陈立挺, 聂晓根*

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:针对多类堆叠工件分类和提取三维位姿困难的问题,对随机摆放规则物体的机器识别、三维定位和自动抓取等方面进行了研究,采用一种基于 MLP 分类器的视觉算法实现了工件识别。利用识别结果选取合适的透视可变形模板匹配将堆叠工件与背景分离,结合双目视觉中的立体匹配、深度计算和坐标变换完成了三维位姿估计,通过 Halcon 和 Visual Studio 联合编程的方式,进行了工件识别定位抓取实验系统的软件开发,设计了实验平台,对矩形工件和圆柱体对象进行了位姿提取和抓取实验。实验结果表明:该系统具有较好的分类效果和较高的识别定位精度,可以满足机器人对工件的在线抓取需求。

关键词:多类堆叠工件;三维位姿;双目视觉;MLP;Halcon

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)08-0862-06

Robot recognition, location and grabbing system based on binocular vision

CHEN Li-ting, NIE Xiao-gen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of classifying and extracting three-dimensional pose of multi-class stacked workpieces, experimental study on the robot recognition, three dimensional location and automatic grabbing of randomly placed of regular objects were carried out. A visual algorithm based on MLP classifier was used to realize workpieces recognition, and a perspective deformable template matching algorithm based on recognition result was used to separate the stacked workpieces from the background, the three-dimensional pose estimation was further completed by combining stereo matching, depth calculation and coordinate transformation in binocular vision, based on the above research the software were carried out under the environment of Halcon and Visual Studio. Experiments to realize the pose extraction and grabbing of rectangular and cylindrical objects were carried out using the platform. The experimental results show that the system has good classification effect and high recognition and positioning accuracy, and can meet the real-time online grasping requirements.

Key words: multi-class stacked workpieces; three-dimensional pose; binocular vision; MLP; Halcon

0 引言

目前,工业机械人机器视觉的发展,对复杂环境下机器视觉的应用提出了更高要求。世界各国的研究人员对此进行了大量研究。日本大阪大学研制了一种自适应双目立体视觉系统,实现了对运动方式未知目标的自适应跟踪^[1];彭泽林^[2]提出了一种改进的随机 Hough 变换椭圆拟合算法,实现了对圆形堆叠目标图

像的边缘检测与拟合;田石详^[3]将视觉伺服控制集成到冲裁上料机器人中,提出了一种基于 BP 神经网络的工件识别算法,实现了对三角形、矩形和圆形工件的识别;李鹏飞、朱鹏飞等人^[4]通过 Halcon 和 VC++ 联合编程的形式设计了一套双目机器人织物抓取系统;江士雄、曹丹华等人^[5]提出了一种基于灭点一致性约束的相机标定算法和改进的迭代最近点算法,实现了双目视觉系统估计目标位姿。然而,在当前的实际工业应用中,采用较多的还是配备单目视觉的机械手,只

收稿日期:2019-02-21

作者简介:陈立挺(1994-),男,福建莆田人,硕士研究生,主要从事机器视觉和自动化控制方面的研究。E-mail:277305300@qq.com

通信联系人:聂晓根,男,副教授,硕士生导师。E-mail:nxg@fzu.edu.cn

能获取目标工件的二维信息,无法应对实际工况中工件姿态多样和堆叠复杂的情况。

本文将对基于双目视觉的机械手定位抓取系统进行研究,通过搭建 Eye-to-hand 的双目视觉四轴机械手实验平台,对堆叠的多类型工件进行识别定位和抓取。

1 定位抓取系统构成

基于双目视觉的机械手定位抓取系统硬件部分由威洛博四轴悬臂机器人、imi-tech 相机、图丽镜头、双目支架、PARKER 电动手指、PC 上位机和控制柜等组成,如图 1 所示。

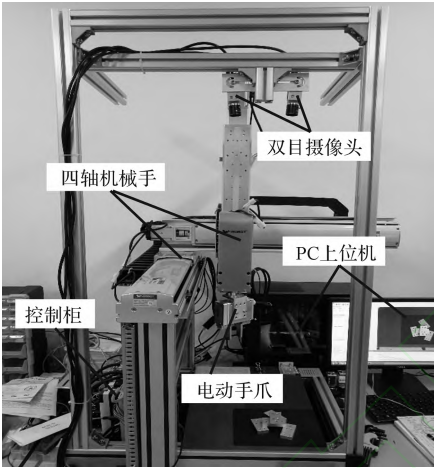


图 1 系统图 1 总体布局

定位抓取系统总体分为视觉系统和运动控制系统两部分。其中,视觉系统由双目摄像头和 PC 上位机(含视觉处理软件)组成,主要负责图像采集、手眼标定、图像预处理、立体校正与匹配、三维信息提取等视觉信息的获取和处理。算法开发环境采用德国 MVTec 公司的 Halcon 软件;运动控制系统由 PC 机搭配运动控制卡和控制柜组成,用以控制四轴机械手的末端位置、姿态和电动手爪的开合;运动控制软件使用 VS2017 开发,通过调用运动控制卡和 Halcon 软件的函数库,以及相机的 SDK 等实现视觉系统与上位机、上位机与控制柜之间的通信以及对机械手的运动控制功能,基于 Halcon 和 VC++ 联合编程方式实现了两种运行环境下数据的相互协调。

2 视觉系统

对于多类型工件杂乱摆放复杂环境下工件的智能抓取问题,可以简化为识别和定位两个问题,即对多类型工件的分类识别和对堆叠工件的 3D 位姿估计。

2.1 工件的分类与识别

在实际抓取应用中,通常要求视觉机械手能够对目标工件进行分类识别,如自动分拣、自动装配和自动搬运等作业。机器视觉中常用的分类器有多层神经网络(multi-layer perceptron, MLP)、支持向量机(SVM)、K-最邻近(K-N)和高斯混合类型(GMM)等。由于 MLP 分类器特别适合于需要快速分类并能接受离线训练样本慢的场合,本文选择 MLP 分类器对对象进行分类识别。

MLP 是一种前向结构的人工神经网络,映射一组输入向量到一组输出向量。

MLP 处理单元如图 2 所示。

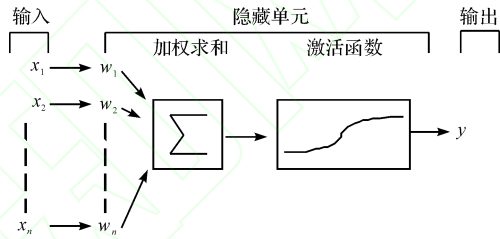


图 2 MLP 处理单元

x_i —输入层向量; w_i —权重系数; y —输出层向量; $i \in (1, 2, \dots, n)$

在使用 MLP 分类时,需要调整网络权重,通过使用已知类别的图像去训练 MLP 网络,形成处理单元,数据插入输入层经过隐藏层处理,输出与期望的结果对比,不匹配则调整网络权重^[6]。

隐藏层的输出 $f(a)$ 为双曲正切函数,即:

$$f(a) = \tanh(a) = \frac{e^a - e^{-a}}{e^a + e^{-a}} \tag{1}$$

式中: a —激活函数的线性组合。

a 如下式所示:

$$a = \sum_{i=1}^n \omega_i^1 x_i + m_i^1 \tag{2}$$

式中: ω_i^1 —隐藏层权重系数; m_i^1 —隐藏层偏置系数。

输出层使用 softmax 回归,将输出结果转换到 $[0, 1]$ 的值域,输出用 $Y(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 表示,即:

$$y_i = g(b_i) \tag{3}$$

式中: g —softmax 函数。

g 如下式所示:

$$g(b_i) = \frac{e^{b_i}}{\sum_{j=1}^n e^{b_j}} \tag{4}$$

式中: b_i —隐藏层输出结果的线性组合。

b_i 如下式所示:

$$b_i = \sum_{i=1}^n \omega_i^2 f(a) + m_i^2 \tag{5}$$

式中: ω_i^2 —输出层权重系数; m_i^2 —输出层偏置系数。

本文选用常见的长方体工件和两种规格的滚珠轴承为研究对象。首先使用 Halcon 算子 `create_class_mlp` 创建 MLP 分类器,再使用算子 `add_samples` 添加训练样本,然后使用算子 `train_class_mlp` 进行训练学习,最后使用算子 `classify_class_mlp` 测试添加的样本。

MLP 分类器分类结果如图 3 所示。

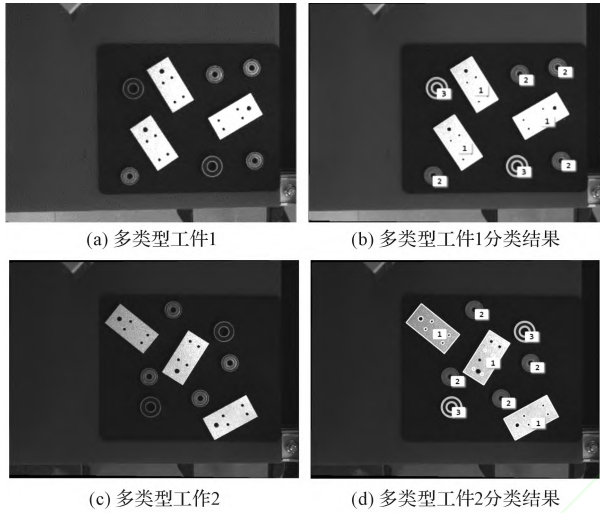


图 3 MLP 分类器分类结果

1 - 矩形工件;2 - 大号轴承;3 - 小号轴承

图 3 所示的分类结果表明:该算法实现了不同工件的准确分类。

2.2 工件的 3D 位姿估计

为了实现堆叠工件位置信息的获取,该系统采用双目相机的手眼系统,各系统坐标系如图 4 所示。

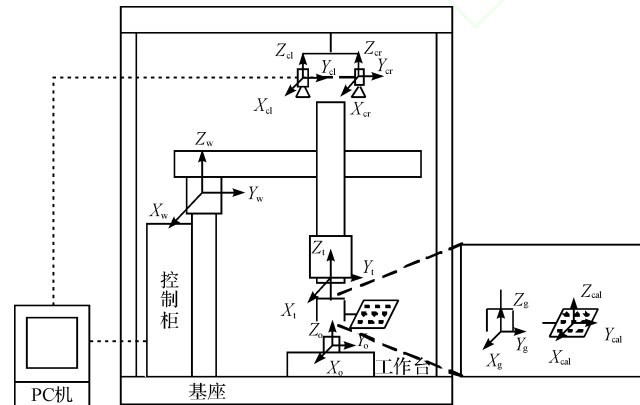


图 4 各系统坐标系

图 4 中:双目相机采用固定安装方式,以工作台为参考面建立工件坐标系 obj ,其中, $X_o - Y_o$ 平面与桌面平行, Z_o 轴垂直于桌面正方向向上;以标定板中心点为原点建立标定板坐标系 cal ;以电动手爪中心点为原点建立手爪坐标系 $grip$;以连接手爪和机械手的法兰

盘中心点为原点建立机械手末端坐标系 $tool$;以机械手基座建立基座坐标系 $base$;以相机光学中心点为原点建立相机坐标系 $camera$ 。

空间坐标系之间的转换可由坐标轴的平移和旋转完成,坐标系转换示意图如图 5 所示。

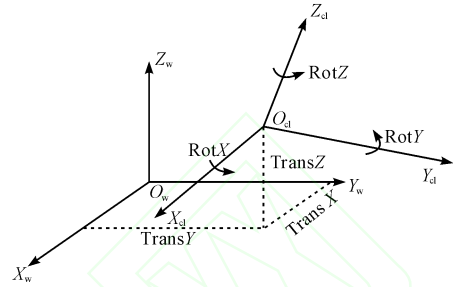


图 5 坐标系转换示意图

设某一点在两个坐标系的坐标分别为 (X_w, Y_w, Z_w) 和 (X_{cl}, Y_{cl}, Z_{cl}) ,则坐标间的转换关系为:

$$\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{pmatrix} = H \cdot \begin{pmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{cl} \\ Y_{cl} \\ Z_{cl} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: H —4 * 4 齐次变换矩阵; R —3 * 3 旋转矩阵, T —平移向量。

具体展开式为:

$$R = Rx(RotX) \cdot Ry(RotY) \cdot Rz(RotZ), T = \begin{pmatrix} TransX \\ TransY \\ TransZ \end{pmatrix}$$

$$Rx(RotX) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos RotX & -\sin RotX \\ 0 & \sin RotX & \cos RotX \end{bmatrix}$$

$$Ry(RotY) = \begin{bmatrix} \cos RotY & 0 & \sin RotY \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin RotY & 0 & \cos RotY \end{bmatrix}$$

$$Rz(RotZ) = \begin{bmatrix} \cos RotZ & -\sin RotZ & 0 \\ \sin RotZ & \cos RotZ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

为了便于理解坐标系变换,本研究使用 3D 位姿 ($TransX, TransY, TransZ, RotX, RotY, RotZ$) 代替描述具有 16 个元素的齐次变换矩阵 H ,相互转换过程使用算子 `hom_mat3d_to_pose` 和 `pose_to_hom_mat3d` 实现。图像坐标系到机械手坐标系的转换过程按以下步骤进行:

(1) 使用 Halcon 进行双目手眼标定得到位姿 $BaseInCamPose$ 和 $CalplateInToolPose$ ^[7-9],读取连接手爪和机械手的法兰盘 CAD 图纸得到位姿 $GripperInToolPose$;

(2) 使用算子 `image_points_to_world_plane` 将图像中的二维坐标转换为相机坐标系下的三维坐标,再使用算子 `create_pose` 创建位姿 `ObjInCamPose`;

(3) 使用算子 `pose_invert` 将位姿 `BaseInCamPose` 转换为 `CamInBasePose`,再使用算子 `pose_compose` 对位姿 `CamInBasePose` 和 `ObjInCamPose` 相乘得到 `ObjInBasePose`;

(4) 由于在标定过程中使用的工具坐标系放置在工具的安装点处,不是在夹具的手指之间,最后在转换链中加上位姿 `GripperInToolPose`。

位姿转换表达式为:

$${}^{base}H_{tool}(grip. pos) = {}^{base}H_{obj} \cdot ({}^{tool}H_{gripper})^{-1} \quad (8)$$

式中: ${}^{base}H_{tool}$ — 位姿 `ToolInBasePose`; ${}^{base}H_{obj}$ — 位姿 `ObjInBasePose`; ${}^{tool}H_{gripper}$ — 位姿 `GripperInToolPose`。

本研究使用算子 `pose_compose` 对位姿 `ObjInBasePose` 和 `ToolInGripperPose` 相乘得到位姿 `ToolInBase`,即为最终控制机械手手爪抓取物体所需的位姿信息。

在实际抓取过程中,依据“从上至下,从左至右”的原则,需要首先定位到最高堆叠位置的工件并提取其三维位姿,其核心是立体匹配技术。目前的主流方法分别是偏重于实时性的局部特征法和偏重于算法准确性的全局匹配算法^[10-12]。

根据待抓取工件通常位于最高点,具有不会被其他工件遮挡这个特点,可以利用 2.1 节的识别结果从模板库中选择合适的模板,再通过左右相机分别对工件进行模板匹配,将 TOP 工件与其他背景分离出来,单独进行立体匹配,以缩小立体匹配的区域,缩短匹配时间,提高实时性;同时排除周围工件的干扰,提高立体匹配的成功率。

通常,评估对象的三维姿态方法有 3D 形状匹配和基于表面的 3D 匹配。由于本文研究的对象具有明显的平面特征部分,笔者采用透视可变形模板匹配方法,从目标对象中自动导出外形轮廓,通过模板评估来确定目标对象的 3D 姿态,该方法的优点在于匹配速度快。

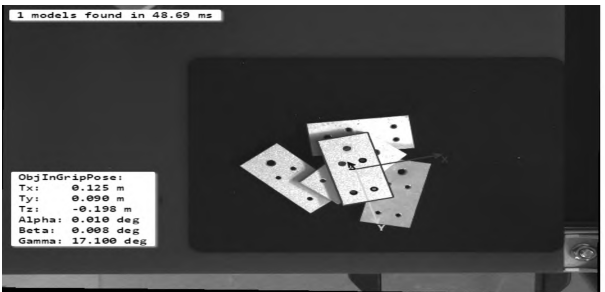
匹配得到目标对象在相机坐标系中的位姿,再通过坐标系转换为所需的目标对象在手爪坐标系中的位姿。

TOP 工件立体匹配图如图 6 所示。

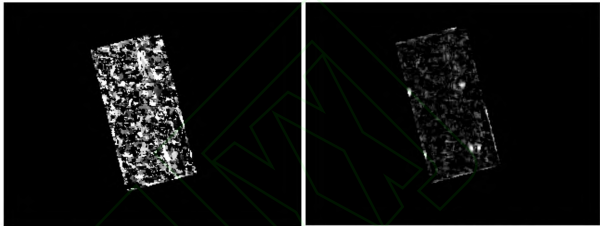
视差图中各点的灰度值代表该点的视觉差,需要计算出点到立体相机系统的距离 z^c ,即:

$$z^c = -\frac{f \cdot b}{d} \quad (9)$$

式中: f —焦距; b —两个相机光轴之间的距离; d —视觉差。



(a) 定位TOP工件



(b) TOP工件视差图 (c) TOP工件得分图

图 6 TOP 工件立体匹配图

以上视觉算法在 Halcon 软件环境下开发完成,再导出为 C++ 程序,便于和后续的机械手运动控制系统进行集成。

3 运动控制系统

运动控制系统主要负责在得到视觉系统提供的目标坐标信息后,控制机械手末端的移动和电动手爪的开合。

3.1 机械手末端位置控制

为了实现机械手末端的位置控制,本研究采用“PC+运动控制卡”的控制方式。本研究选用小墨公司的 MT-283 运动控制卡搭建机器人控制系统。该系统主要包括运动控制卡模块、驱动器模块、电源模块和电路保护模块等。

控制系统框架图如图 7 所示。

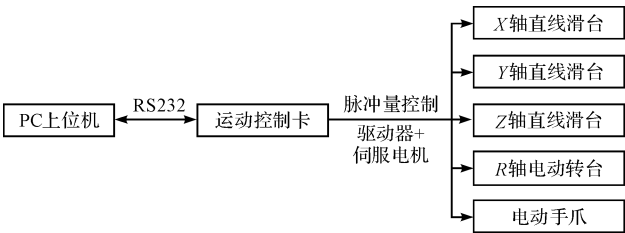


图 7 控制系统框架图

控制系统以 PC 作为上位机,通过运动控制卡提供的软件包中的库函数来实现机械手的运动控制,以 VS2017 作为上位机软件开发平台实现人机界面和控制程序开发,采用脉冲量控制的方式控制三轴直线滑台和单轴转台的组合运动,机械手以增量位置控制指

令按给定速度到达指定位置和姿态。

3.2 电动手爪开合控制

为了实现电动手爪开合控制,对要抓取的多种工件建立模板库,包括对应的模板图像、夹持力和夹持点等,以便于根据抓取对象类型设定手爪夹持力大小和张开距离。其中,夹持力大小调节通过手爪内置电流调节实现;手爪张开距离通过修改参数 PIO 模式实现,该模式采用 8421 码,运用 3A-8A 组合点位,最多可支持 64 点点位数据。

4 抓取实验

根据功能需求,本文开发了控制系统软件界面,如图 8 所示。



(a) 运动控制界面



(b) 监控和图像处理结果显示画面

图 8 控制系统界面

控制系统软件界面主要功能包括通讯、绝对运动控制、相对运动控制、实时监控、抓取、相机采集画面显示和消息框输出等。

在抓取实验中,为了模拟工件在生产线上的不同

位姿,笔者使用四轴机械手配合电动手爪控制工件进行平移和旋转运动,综合两种运动得到工件已知的位姿信息,该信息包括沿 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的平移 x 、 y 、 z ,以及绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的转动角度 α 、 β 、 γ 。

将视觉系统处理得到的位姿参数与实际参数进行对比即可得到误差,误差分为平均误差和最大误差。计算公式为:

$$error_{ave,j} = \frac{\sum_{i=1}^n error_{i,j}}{n}$$

$$error_{max,j} = \text{MAX}\{error_{i,j}\}$$

$$error_{i,j} = |j_{cal} - j_{real}|, j \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (10)$$

式中: $error_{ave,j}$ —位姿参数 j 的平均误差; $error_{max,j}$ —位姿参数 j 的最大误差; $error_{i,j}$ —第 i 组实验的位姿参数 j 的绝对误差; j_{cal} —位姿参数计算值; j_{real} —位姿参数实际值; n —实验次数。

通过多组实验,本文得到了 30 对不同姿态的姿态估计误差。

位姿参数中,6 个自由度的平均误差和最大误差如表 1 所示。

表 1 位姿估计误差

| 误差类别 | 平移/mm | | | 旋转角/(°) | | |
|------|-------|------|------|----------|---------|----------|
| | x | y | z | α | β | γ |
| 平均误差 | 0.89 | 0.87 | 0.98 | 0.04 | 0.02 | 0.02 |
| 最大误差 | 1.18 | 1.37 | 1.28 | 0.07 | 0.03 | 0.04 |

实验结果表明:本文设计的机械手定位抓取系统最大平移误差为 1.37 mm,最大旋转误差为 0.07°。对抓取误差进行分析可知,误差成因主要包括:(1)双目标定误差;(2)图像畸变误差;(3)模板匹配误差;(4)立体匹配中误匹配误差等。

5 结束语

针对基于双目视觉的机械手定位抓取系统,本文结合双目视觉系统和 MLP 分类算法,对杂乱摆放的多类型工件进行了抓取实验。实验结果表明:该系统可以较好地实现工件分类,抓取精度也满足一般工业机械手的抓取需求;研发的系统贴近实际工厂应用生产环境。

下一步研究将针对抓取误差来源对视觉算法进行

(下转第 872 页)

本文引用格式:

陈立挺,聂晓根. 基于双目视觉的机械手识别、定位、抓取系统研究[J]. 机电工程,2019,36(8):862-866,872.

CHEN Li-ting, NIE Xiao-gen. Robot recognition, location and grabbing system based on binocular vision[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(8):862-866,872.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

5 结束语

为解决传统两相 4/2 极高速开关磁阻电机运行过程中转矩死区和大转矩波动这一问题,本文提出了多阶梯气隙优化方法,在保持定子极不变的情况下,对转子极进行了优化,完成了理论研究和仿真,并得到以下结果:

(1)提出的极弧优化方法,可以适用于不同弧度定转子极的 4/2 极开关磁阻电机设计优化;

(2)该极弧优化方法只对转子极弧形状进行一定的调整,不影响制造工艺和成本。

但是该极弧优化方法没有考虑到实际运行中电机电流的变化情况,下一步研究中将结合电流变化,进一步优化电感设计,以期获得更好的结果。

参考文献 (References):

- [1] BARNES M, MICHAELIDERS A M, POLLOCK C. The design and performance of a self-starting 2-phase switched reluctance drive[C]. International Conference on Power Electronics & Variable Speed Drives, Nottingham: IET, 1996.
- [2] LEE J Y, LEE G H, LEE J J, et al. An improved 2-phase snail-cam type fan motor design[C]. International Conference on Electrical Machines & Systems, Beijing: IEEE, 2003.
- [3] 丁伟东. 两相 4/2 极高速开关磁阻电机设计及其噪声振动的抑制[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2014.
- [4] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [5] 吴红星, 嵇恒, 倪天, 等. 新型开关磁阻电机发展综述[J]. 微电机, 2011, 44(1): 78-83.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

郑翌成, 吴建华. 两相 4/2 极高速开关磁阻电机多阶气隙设计优化[J]. 机电工程, 2019, 36(8): 867-872.

ZHENG Yi-cheng, WU Jian-hua. Optimal design of multi-stepped air gap based on two phase 4/2 poles high speed switched reluctance motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(8): 867-872.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 866 页)

优化;同时,考虑到本文采用的 MLP 分类算法对光照变化鲁棒性和复杂工件适应性的不足,后续研究将采用深度学习相关的物体检测算法来扩大应用场景范围,以达到更好的效果。

参考文献 (References):

- [1] ASADA M, TANAKA T, HOSODA K. Visual tracking of unknown moving object by adaptive binocular visual servoing[C]. Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Intelligent Systems, Taipei: IEEE, 1999.
- [2] 彭泽林. 机器人堆叠目标识别与定位抓取系统研究[D]. 广州:华南理工大学机械与汽车工程学院, 2018.
- [3] 田石祥. 冲裁上料机器人设计与视觉伺服系统的研究[D]. 上海:东华大学机械工程学院, 2011.
- [4] 李鹏飞, 朱鹏飞, 张蕾, 等. 基于 HALCON 和 VC++ 的双目机器人织物抓取系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2016, 31(6): 772-777.
- [5] 江士雄, 曹丹华, 吴裕斌, 等. 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.

- [6] MVTec Software GmbH. Solution_guide_ii_d_classification[M]. München: MVTec Software GmbH, 2008.
- [7] 田春林, 陈李博, 马国庆, 等. 基于 Halcon 的工业机器人手眼标定方法研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(3): 16-18.
- [8] 于春和, 祁乐阳. 基于 HALCON 的双目摄像机标定[J]. 电子设计工程, 2017, 25(19): 190-193.
- [9] 叶卉, 张为民, 张欢, 等. 机器人智能抓取系统视觉模块的研究与开发[J]. 组合机床与自动化技术, 2016(12): 1-5.
- [10] 祝世平, 李政. 基于改进梯度和自适应窗口的立体匹配算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 1-9.
- [11] 周龙, 徐贵力, 李开宇. 基于 Census 变换和改进自适应窗口的立体匹配算法[J]. 航空学报, 2012, 33(5): 886-892.
- [12] 门宇博, 马宇, 张国印. 非参数变换和改进动态规划的立体匹配算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 60-65.

[编辑:周昱晨]