

基于视/力多源信息融合的机器人精密装配研究

崔坤坤,段晋军,姜锦程,孙伟栋,郭安,王国栋,俞宇航

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:以实现机器人智能精密装配为目标,搭建一套基于视/力多源信息融合的机器人精密装配系统。基于YOLOv5深度学习框架目标检测算法实现对目标物的识别检测,通过HSV+Canny分割算法实现对目标物的精确定位,结合力反馈导纳控制模型以及基于等距螺旋线的搜索策略,实现多种典型场景下的精密装配任务。

关键词:智能精密装配;视/力多源信息融合;深度学习框架;导纳控制

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0006-05

Research on Robot Precision Assembly Based on Vision/Force Multi-source Information Fusion

CUI Kunkun, DUAN Jinjun, JIANG Jincheng, SUN Weidong, GUO An, WANG Guodong, YU Zhouhang
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To implement robot intelligent precision assembly, a robot precision assembly system based on vision/force multi-source information fusion is built. Recognition and detection of the target are fulfilled by using target detection algorithm based on YOLOv5 deep learning framework. Precise positioning of target is achieved based on HSV+Canny segmentation algorithm. Combined with the force feedback admittance control model and the search strategy based on the isometric helix, the precision assembly tasks under various typical scenarios are realized.

Keywords: intelligent precision assembly; vision/force multi-source information fusion; deep learning framework; admittance control

0 引言

随着科学技术的不断发展,工业生产中机器人代替手工装配的应用场景越来越多,对机器人智能化的要求也越来越高。机器人智能装配技术可以大大减少人工的工作量,对提高工业生产的智能化水平、生产效率和经济效益具有重要的研究和应用价值。

目前国内外已有较多学者进行关于智能装配的研究。ROVEDA L等^[1]使用扩展卡尔曼滤波器实现在线估计环境刚度,提出一种协同装配的策略。BUCHHOLZ D等^[2]利用激光扫描工件获得点云数据,通过点云匹配,设计了能够抓取任意物体的bin-pick系统。INOUE T等^[3]利用强化学习Q-learning框架实现了轴孔搜索、装配。RAFIQ A等^[4]提出了一种基于三维TOF传感器的钉孔装配机器人机械手自动路径规划策略,借助具有深度信息的三维点云定位装配环境中可能发生碰撞的障碍物。北京航空航天大学季旭全等^[5]借助X角点辅助标记结合SVM支持向量机分类实现星载设备智能装配。重庆大学陈平等^[6]提出采用单目视觉实现孔定位,3D点云轴线估计算法的导纳控制轴孔装配方法。北京航空航天大学国文韬

等^[7]根据线结构光在曲率不同表面上的成像特点,结合图像处理技术实现精密导电滑环的装配。山东大学的宋锐等^[8]针对柔性弱刚度零件易变形的问题,结合深度学习框架,提出技能学习型机器人装配方法。浙江工业大学的支乐威等^[9]针对花键装配,构建抓取偏角经验库结SVDD算法实时更新和完成对偏角的感知和识别。

在智能装配过程中,机器人依靠视觉相机完成对目标的感知、识别与定位,主要可分为基于二维图像和基于三维点云两大类,而现有的基于二维图像的识别定位方法又可分为传统视觉方案和深度学习方案两大类。

传统视觉方案是指借助目标的几何形状、颜色、纹理等特征进行对象的分割和识别。传统视觉方案有着计算速度快、算法简单易部署等优点,但是算法的泛化性、鲁棒性较差,同时受到环境光照的干扰严重。XU F等^[10]提出一种改进的Hough变换圆检测算法,基于二维图像完成齿轮减速器和底座的准确识别和定位,定位精度可达 ± 0.5 mm,同时相较于普通的Hough圆检测算法提高了精度和速度。姚冬艳等^[11-12]结合遗传算法和迁移学习对模板匹配进行优化改进,完成了轴套类零件的抓取和放置。

不同于传统视觉方案,深度学习方案舍弃了图像中的

基金项目:国家青年科学基金项目(52205017);之江实验室开放课题资助项目(K2022NBOAB08)

第一作者简介:崔坤坤(1997—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,研究方向为多机器人协作技术,kkcui@nuaa.edu.cn。

通信作者简介:段晋军(1988—),男,山西太原人,讲师,工学博士,研究方向为机器人柔顺控制、遥操作技术、多机器人协作与位置力协调控制等,duan-jinjun@nuaa.edu.cn。

目标的宏观特征,着眼于每一个像素,通过大量的样本训练来得到像素与定位目标之间的关系,实现图像的识别定位。目前主流的深度学习目标检测方案主要分为单阶段(one-stage)检测算法和双阶段(two-stage)检测算法^[13]。前者主要是R-CNN^[14]系列,后者主要是YOLO(you only look once)^[15]、SSD(single shot Multi-Box detector)^[16]等。褚文杰^[17]采用基于注意力转移机制对YOLOv5算法进行优化,提高了小目标物体识别定位的准确率。袁利恒^[18]提出一种使用Mask-RCNN完成先验抓取框定位,Y-Net实现细节抓取角度的确定,Q-Net进行可行性分析的识别定位抓取策略。

然而目前机器人智能装配有以下难点:1)视觉识别定位算法的准确率较低,鲁棒性较差,受环境干扰严重;2)诸如传统定导纳主动柔顺控制方式对装配约束环境适应性弱,易产生不可控的装配应力。

针对上述难点问题,本文提出结合传统视觉方案以及深度学习的视觉识别定位算法,提高视觉识别定位的准确率和鲁棒性;融合自适应变导纳控制和基于等距螺旋线位置控制的力位混合控制策略实现柔顺装配。

1 面向轴孔装配的视觉识别与定位

1.1 基于YOLOv5深度学习框架的数据集训练

YOLO系列模型是最具代表性的One-stage目标检测模型,需要完成特征提取、特征分类和定位回归3个步骤来完成对目标的检测。YOLO系列算法将每个图像划分成S×S的网格单元,每个网格单元只负责预测网格中心的目标。该算法舍去了候选区域生成阶段,大大简化了网络结构,将特征提取、回归和分类放在一个卷积神经网络中,极大地提高了检测速度。YOLOv5是YOLO系列One-stage深度学习检测算法的第5代,检测速度和准确率高于前几代。

下面针对轴孔装配任务对圆孔轴承和光轴支座进行数据集制作和训练。

使用RealSense D435i拍摄不同位置、不同光线下的样本图片50余张,同样使用MakeSense网站进行在线标注,如图1所示。之后送入YOLOv5网络中进行训练,得到权重。

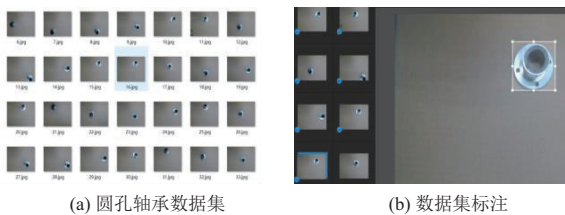


图1 圆孔轴承数据集制作

在工控机中搭建YOLOv5环境,具体配置为Ubuntu16.04+python 3.6+Pytorch 1.7.1(CPU),实际部署检测如图2所示。

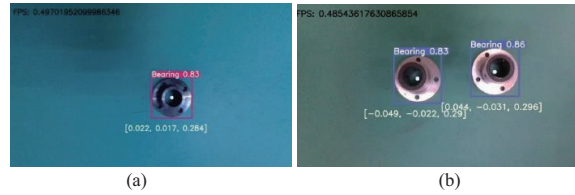


图2 圆轴承检测结果

1.2 HSV+Canny边缘检测的目标检测定位算法

本文提出了一种基于HSV颜色分割以及Canny边缘检测的圆检测算法。具体的算法流程如图3所示。

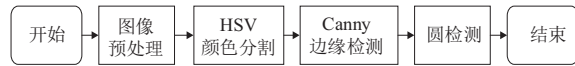


图3 基于HSV+Canny分割的圆检测算法流程图

图像预处理是图像分析的基础。其主要目的是削弱或消除图像中的无关信息,增强有用信息,从而提高后续图像处理的精度。

本文借助OpenCV对RealSense D435i获取的同一图像帧分别进行均值滤波、中值滤波和高斯滤波,3种滤波算法的演示效果如图4所示。不难看出,均值滤波和高斯滤波会使得凸台和内孔的轮廓边缘变得模糊,而中值滤波使得凸台和内孔轮廓锐化、边缘增强,便于后期进行边缘检测。从原理上分析,中值滤波算法不依赖邻域内差别很大的值,且很难选上噪声,可以在较小程度影响原有图像的情况下去除噪声,因此本文选择中值滤波作为图像预处理滤波方式。

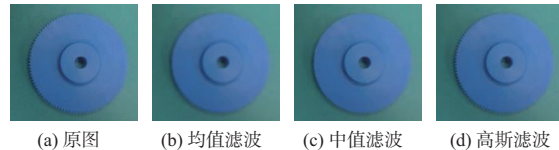


图4 3种滤波算法效果展示

Canny边缘检测算法是1986年CANNY JOHN F提出的一种通过多级边缘检测算法来检测图像边缘的方法。本文使用的Canny边缘检测实现步骤如图5所示。



图5 Canny边缘检测流程图

1) 图像平滑处理(高斯滤波)

高斯滤波器是一种平滑线性滤波,广泛应用于图像处理降噪的过程。本文使用高斯滤波器与图像进行卷积,该步骤可使图像变得平滑,以减少噪声对边缘检测结果的影响。

2) 计算差分梯度的幅度与方向

图像的边缘可以指向不同方向,经典的Canny算法用了4个梯度算子来计算水平、铅锤和两个45°对角线方向的梯度。为了简化计算,本文使用常用的边缘差分算子(Rober, Prewitt, Sobel)来计算图像边缘水平和垂直方向的差分梯度 G_x 和 G_y 。根据式(1)和式(2)计算梯度和方向。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (2)$$

3) 非极大值抑制细化边缘

非极大值抑制(non-maximum suppression, NMS)是一种去除非极大值的算法,在Canny边缘检测算法中用于细化边缘。对图像进行梯度计算后,只考虑基于梯度值提取的边缘很复杂,存在许多杂乱的干扰,而非极大值抑制NMS则可以将局部最大值之外的所有梯度值抑制为0。

4) 双阈值算法确定边缘

使用非极大值抑制NMS后,可以采用双阈值算法解决仍然存在的零散边缘像素,双阈值算法如表1所示。最终将会抑制弱梯度值的边缘像素,保留具有高梯度值的边缘像素。

表1 双阈值算法判断处理

| 边缘像素梯度 G 取值范围 | 判断处理 |
|-----------------|-------|
| $G >$ 高阈值 | 强边缘像素 |
| 低阈值 $< G <$ 高阈值 | 弱边缘像素 |
| $G <$ 低阈值 | 抑制 |

本文采用椭圆检测算法加圆度限制来筛选出符合条件的圆轮廓,具体的流程如图6所示。

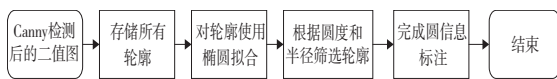


图6 圆检测算法流程图

经过图像预处理、HSV分割后Canny检测出的轮廓数量较少,因此使用圆度和半径限制能够较好、较快速地筛选出目标轮廓。其中圆度的定义为拟合得到的椭圆长轴与短轴之比,这个值越接近1,代表检测到的椭圆越圆,越符合目标。由于相机视角的透视原理,处于画面边缘位置的圆会存在透视偏差,因此需要设定合适的圆度阈值来检测出所有需要的圆轮廓。

采用尼龙凸台齿轮进行算法验证,目标是获得所有齿轮孔的中心坐标。采用RealSense D435i相机拍摄获取一帧图像数据如图7(a)所示,经过中值滤波后进行HSV分割,通过OpenCV的滑块不断调整得到HSV分割的阈值为Hue[100,125],Saturation[206,255],Value[153,255],分割后的结果如图7(b)所示。之后对分割后的图像进行Canny边缘检测勾勒出轮廓,最后设定圆度阈值为1.1,半径阈值为20,进行目标圆筛选,并将相关的信息标注在图像上,得到最终结果如图7(d)所示。

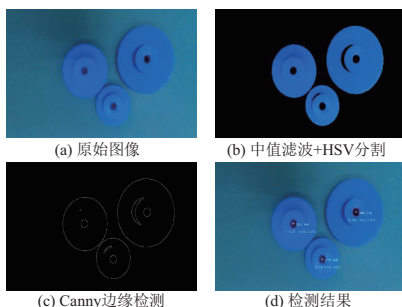


图7 检测算法实现

2 融合视/力多源信息的机器人柔顺精密装配

在实际的装配过程中,仅仅依靠相机对目标的识别和粗定位难以实现精准装配的目标,因为基于视觉的位置控制没有考虑环境装配接触力的干扰。因此,要想实现精准装配,就必须引入柔顺控制和搜索算法,进行力位混合控制,从而实现装配轨迹和装配速度的自适应修正。

2.1 基于轴孔装配的等距螺旋搜索算法

在实际的精准装配过程中,由于受到相机等硬件设备性能的限制,视觉无法获得更精确的深度信息,意味着此时需要设计一种能够实现精准装配的方法来模仿人为轴孔装配时的寻孔过程。

针对轴孔装配问题,本文设计了一种基于等距螺旋线的搜索策略。如图8所示,图8(a)演示的是孔搜索过程,其将轴与孔抽象为一个点;图8(b)展示的是孔搜索的模拟过程,虚线圆内的部分表示孔搜索的总范围,实线圆范围代表轴孔装配的公差范围,意味着只要代表轴的黑点搜索进入这个范围,即可顺利地完轴孔装配。

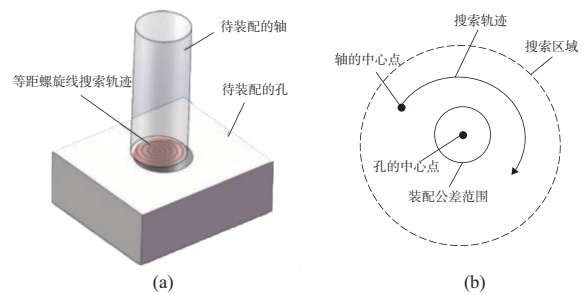


图8 轴孔装配搜索示意图

通过对该螺旋线极坐标方程的分析,获得了等距螺旋线搜索轨迹,如图9所示。

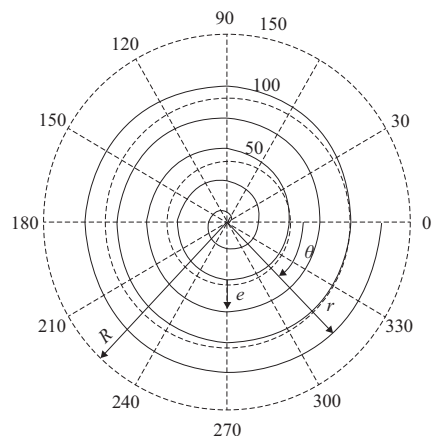


图9 等距螺旋线搜索轨迹

图9中: R 为搜索区域的半径; r 为螺旋线的半径; θ 为当前搜索扫过的角度值; e 为中心点搜索的跨距。

该算法的具体原理如下:假设从起始点由外向里以恒定的线速度 v 和角速度 w 进行搜索,则在笛卡儿坐标系下的运动方程为

$$\begin{cases} x=R\cos\theta=vt\cos\omega t \\ y=R\sin\theta=vt\sin\omega t \end{cases} \quad (3)$$

对于跨距 e 有 3 种选择方式,其中 d 代表了轴孔公差,如表 2 所示,展示了 3 种 e 的取值的优缺点对比。其中, $e=d$ 时理论上兼顾了精准度和效率,但在实际的搜索过程中会存在一些问题,例如刚好两次搜索轨迹与孔相切就会导致孔位错过。因此 e 的值应该略小于轴孔公差 d 。

表 2 3 种 e 的取值对比表

| e 的取值 | 优点 | 缺点 |
|---------|--------------|--------------|
| $e>d$ | 缩短搜索时间,效率高 | 易错过孔的位置,精准度低 |
| $e=d$ | 理论上兼顾精准度和效率 | 存在相切等问题 |
| $e<d$ | 多次经过孔位置,精准度高 | 效率较低 |

2.2 结合视觉引导的机器人柔顺精密装配方法

实现轴孔精密装配工作,不仅需要设计合理的搜孔策略,还必须要引入柔顺控制,从而实现装配轨迹和速度的自适应修正。

根据机器人与环境接触时力量传递将力控算法分为阻抗控制和导纳控制两种方式。本质上是通过“质量-阻尼-弹簧”的二阶微分方程来建立位置偏差 X 和力偏差 F 之间的一种动态关系。

对于阻抗控制这一概念,常见的一维“质量-阻尼-弹簧”模型的动力学方程见下式。

$$m\ddot{x}+b\dot{x}+kx=f \quad (4)$$

式中: x 为位移; m 为质量; b 为系统阻尼; k 为系统刚度; f 为作用力。对式(4)进行拉普拉斯变换后可以得到

$$(ms^2+bs+k)X(s)=F(s) \quad (5)$$

导纳控制则是阻抗控制的倒数。由定义可知,当导纳很小的时候,力的变化 ΔF 将产生很小的位移变化量 ΔX 。导纳控制通过末端产生的力偏差 ΔF 计算系统内环位置控制对应的位置修正量 ΔX 来控制系统位置和力的关系,达到柔顺控制的目的。总而言之,导纳控制期望的是通过控制的手段将外力转化为相对期望位移的偏差位移。导纳控制的示意图如图 10 所示。

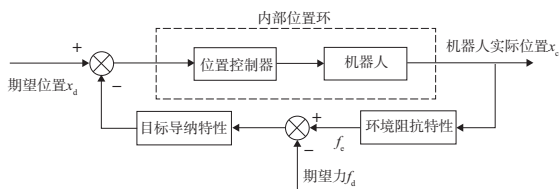


图 10 动态虚拟墙与零力接触线

常见的导纳控制公式如下:

$$M(\ddot{x}_c - \ddot{x}_d) + B(\dot{x}_c - \dot{x}_d) + K(x_c - x_d) = f_e - f_d \quad (6)$$

$$\ddot{x}_c = \frac{1}{M} [f_e - f_d - B(\dot{x}_c - \dot{x}_d) - K(x_c - x_d)] + \ddot{x}_d \quad (7)$$

式中: M 为质量系数; B 为阻尼系数; K 为弹性系数; f_e 为外界输入力;下标 c 和 d 分别为实际测量的反馈值和期望值。

通过迭代法建立了输出轨迹与上一时刻的轨迹以及

这一时刻目标速度的关系;对式(6)进行两次积分可得到

$$x_c(t) = x_c(t-1) + \dot{x}_c(t) \times T \quad (8)$$

式中 T 为控制器和伺服系统的通信周期。

3 机器人轴孔装配实验验证

本文以实现机器人智能装配为目标,基于 Rokae×Mate3 Pro 七自由度柔性协作臂平台,融合双目视觉相机以及六维力传感器,构建视觉和力觉的手眼协调系统,最终搭建一套完整的智能装配实验平台。硬件设备整体系统如图 11 所示。



图 11 智能装配硬件系统

实验一为工业场景中最常见的轴孔装配,装配目标为光轴和轴承孔,表面光滑且带有金属光泽,纹理特征较难提取,但有明显的圆几何形状,使用训练的模型权重进行实验验证。轴孔装配实验器材如图 12 所示。

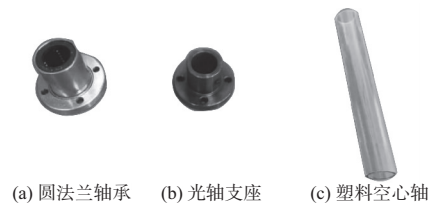


图 12 轴孔装配实验器材

轴孔装配实验流程如图 13 所示。首先系统进行初始化,包括机器人和相机初始化,在初始点进行目标识别定位,检测到光轴支座的位置后运动到目标位置进行抓取,抓取完成后运动到过渡点,进行圆法兰轴承的识别定位,检测完成后运动到目标点完成装配。其中识别定位算法使用 YOLOv5 目标检测算法,部署训练的圆轴承模型权重,可以十分鲁棒地完成识别定位任务。轴孔装配过程如图 14 所示。

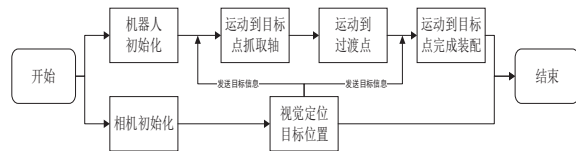


图 13 轴孔装配实验流程图



图 14 轴孔装配过程图

实验二中装配目标为齿轮与齿轮箱,单个齿轮与轴体的安装类似于轴孔装配,但多个齿轮装配需要考虑到齿轮间的啮合干扰。齿轮装配实验器材如图 15 所示,整个实验流程如图 16 所示,齿轮装配过程如图 17 所示。

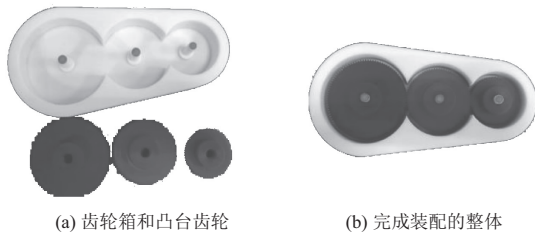


图 15 齿轮装配实验器材

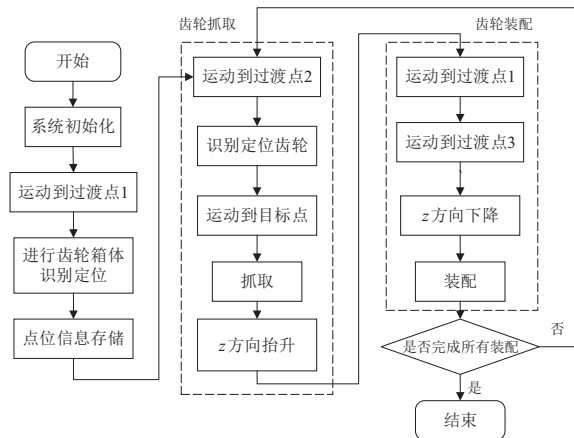


图 16 齿轮装配实验流程图

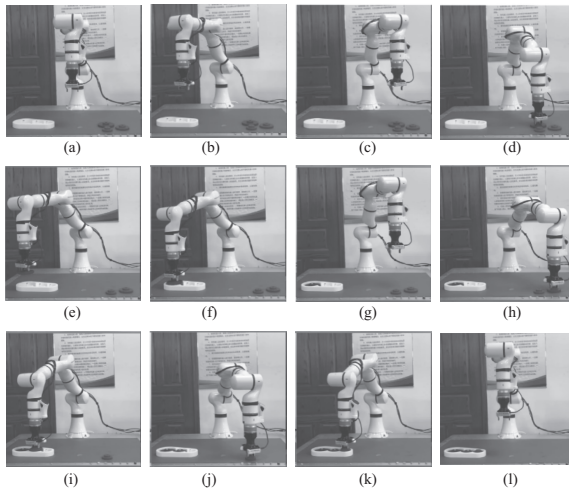


图 17 齿轮装配过程图示

本文所构建的精密装配系统,视觉识别定位精度可达 ± 0.5 mm,力跟踪控制精度可达 ± 0.5 N,最终能实现紧配合下零部件的精密装配任务。

4 结语

本文以实现机器人智能装配为目标,基于视/力多源信息融合技术搭建了一套智能装配机器人平台,实现了对工控机外设接口的识别检测,并完成了对多级啮合齿轮的

装配任务。所设计的智能装配机器人平台可以实现基于视觉和力觉融合控制的机器人智能柔顺装配,可以提高机器人智能装配的准确度、精度和柔顺性。

参考文献:

- [1] ROVEDA L, VICENTINI F, TOSATTI L M. Deformation-tracking impedance control in interaction with uncertain environments[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2014: 1992-1997.
- [2] BUCHHOLZ D, WINKELBACH S, WAHL F M. RANSAM for industrial Bin-picking [C]//ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) and ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics). Munich, Germany: VDE, 2011: 1-6.
- [3] INOUE T, DE MAGISTRIS G, MUNAWAR A, et al. Deep reinforcement learning for high precision assembly tasks[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2017: 819-825.
- [4] RAFIQ A, PETER P. Safe and automated assembly process using vision assisted robot manipulator[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 771-776.
- [5] 季旭全,王君臣,赵江地,等.基于机器人与视觉引导的星载设备智能装配方法[J].机械工程学报,2018,54(23):63-72.
- [6] 陈平,李灿,雷学军.3D视觉结合图像检测与导纳控制的圆轴孔零件机器人装配[J].控制与决策,2023,38(4):963-970.
- [7] 国文韬,王玉亮,廉兆鑫,等.基于线结构光的精密装配位置检测方法研究[J].激光与红外,2021,51(6):720-726.
- [8] 宋锐,李凤鸣,权威,等.多约束条件下机器人柔性装配技能自学习[J].控制与决策,2022,37(5):1329-1337.
- [9] 支乐威,陈教料,王佳才,等.基于参数优化的机器人花键装配偏角感知识别方法[J].浙江大学学报(工学版),2022,56(3):452-461.
- [10] XU F, WANG S, LI B Y. Industrial robot base assembly based on improved Hough transform of circle detection algorithm[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang: IEEE, 2015: 2446-2450.
- [11] 姚冬艳,刘广瑞,王钊,等.根据迁移策略并行遗传算法的模板匹配研究[J].机电工程技术,2019,48(8):115-117.
- [12] 姚冬艳.基于模板匹配的机器视觉装配机器人理论及应用研究[D].郑州:郑州大学,2019.
- [13] 许德刚,王露,李凡.深度学习的典型目标检测算法研究综述[J].计算机工程与应用,2021,57(8):10-25.
- [14] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Columbus, OH, USA: IEEE, 2014: 580-587.
- [15] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: unified, real-time object detection [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2016: 779-788.
- [16] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector [M]//Computer Vision - ECCV 2016. Cham: Springer International Publishing, 2016: 21-37.
- [17] 褚文杰.基于YOLOv5的坦克装甲车辆目标检测关键技术的研究[D].北京:北京交通大学,2021.
- [18] 袁利恒.基于智能感知与学习的机器人抓取与装配方法[D].大连:大连理工大学,2021.

收稿日期:2022-12-07