

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.043

视觉校对约束下生产线搬运机械手抓取定位控制

孙文革

(新疆职业大学 机械电子工程学院,新疆 乌鲁木齐 830013)

摘要:针对智能生产线环境中存在的随机振动、噪声等干扰因素会对机械手的传感器精度产生影响,导致生产线搬运机械手抓取定位控制精度低的问题,提出智能视觉约束的生产线搬运机械手抓取定位控制方法。分析生产线搬运机械手的动作流程,了解机械手在进行抓取操作时需要确定目标物体位置存在的问题;通过改进的 YOLOv2 模型识别待搬运物体的位置,估计出待搬运物体的大小;使用改进 K-means 聚类算法通过聚类过程估计出待搬运物体与机械手之间的相对距离和大小,改进单纯依靠传感器的弊端。设计 PLC 控制器来实现对机械手的定位控制;同时引入小脑模型神经网络模拟人类小脑的运动控制能力,优化 PID 控制算法,使机械手在抓取和定位控制中更加稳定和精确。实验结果表明:所提方法使生产线搬运机械手抓取定位时抗干扰性较强,精度较高,抓取定位控制效率较好。

关键词:生产线搬运机械手;PLC 控制器;PID 控制算法;小脑模型神经网络;抓取定位控制

中图分类号:TP241 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0203-06

Grasping and Positioning Control of Production Line Handling Manipulator under Visual Proofreading Constraints

SUN Wenge

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Xinjiang Vocational University, Urumqi 830013, China)

Abstract:In order to improve the low grasping and positioning control accuracy of production line handling manipulator caused by random vibration, noise and other confounding existing in intelligent production line environment, which affects the sensor accuracy of manipulator, a research on grasping and positioning control method of the production line handling manipulator with intelligent visual constraints is proposed. The movement process of the production line handling manipulator is analyzed and the problems that the manipulator needs to determine the position of the target object during grasping operations are comprehended. With the improved YOLOv2 model, the position of the object ready for transportation is identified and its size is estimated. The improved K-means clustering algorithm is applied to estimate the relative distance between the object to be moved and the robotic arm through the clustering process to remedy the drawbacks of sole reliance on sensors. A PLC controller is designed to achieve positioning control of the robotic arm, and with the introduction of cerebellar model neural network, the motion control ability of the human cerebellum is simulated and the PID control algorithm is optimized, which enable the robotic arm to be more stable and accurate in grasping and positioning control. The experimental results show that the proposed method has strong anti-interference ability, high accuracy and good grasping and positioning control efficiency for the production line handling robot arm.

Keywords:production line handling manipulator; PLC controller; PID control algorithm; cerebellar model neural network; grab positioning control

0 引言

随着工业自动化技术的发展,生产线搬运机械手凭借搬运成本低、智能化、效率高的优点被广泛应用在工业自动化生产、医疗技术、汽车生产等多个领域。生产线搬运机械手的抓取定位控制影响着生产线工作效率及效果。传统的生产线搬运机械手存在抓取精度低、控制速度慢等问题。如何获取高质量的生产线搬运机械手抓取定位控制是当下工业领域研究的重点问题之一,故提出

基于 PLC 的生产线搬运机械手抓取定位控制方法。该方法的研究有望为电力领域带来新的技术与支持,具有重要意义^[1-2]。

史亚贝^[3]对机械手运动学原理展开分析,建立了基于 DSP 的机械手控制系统,通过 DSP 机械手控制系统完成机械手控制。该方法存在机械手抓取定位控制精度不佳的问题。沈孝龙等^[4]根据机械手动力学方程建立机械手定点 PD 控制器,通过改进差分进化算法优化机械手规划器性能;通过样条插值法生成机械手运动轨迹,完成机械

作者简介:孙文革(1967—),男,甘肃武山人,副教授,研究方向为电子技术及自动控制技术,fangxia7411@163.com。

手的抓取定位控制。该方法存在机械手抓取定位控制时间长的问题。马金茹等^[5]设计机械手非线性扰动观测器,通过自适应观测器滑膜控制方法完成机械手抓取定位控制。该方法存在机械手抓取定位控制准确率低的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出基于智能视觉约束的生产线搬运机械手抓取定位控制方法。

1 生产线搬运机械手动作中的问题分析

首先,分析生产线搬运机械手的结构和动作流程^[6-7]。生产线搬运机械手由基座、大臂、小臂、爪子4个部分组成,具有腰部左右旋转、垂直手臂上下移动、水平手臂伸缩和机械手抓取与松开4个自由度^[8-9]。生产线搬运机械手结构如图1所示。

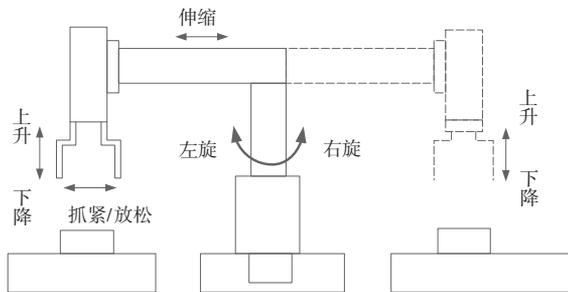


图1 生产线搬运机械手

生产线搬运机械手动作流程如下:

- 1) 旋转生产线搬运机械手的腰部,使其旋转朝向待搬运物体方向;
- 2) 在气缸的推动下垂直机械臂和水平机械臂做伸缩动作,同时使垂直机械臂对准待搬运物体;
- 3) 在气缸作用下,机械爪完成物体抓取动作;
- 4) 旋转生产线搬运机械手的腰部,使其旋转朝向搬运物体待放置的方向;
- 5) 在气缸的作用下,垂直和水平机械臂进行伸展,同时使垂直机械臂对准物体待放置的目标区域;

6) 在气缸作用下,机械爪完成物体放置动作。

通过上述流程可以看出,在完成定位过程中,需大量地使用传感器,传感器的精度变得至关重要。智能生产线环境中存在的随机振动、噪声等干扰因素,会对机械手的传感器精度产生影响,导致生产线搬运机械手抓取定位控制精度降低。

2 搬运物体的大小、距离的视觉估计

在生产线搬运机械手动作流程下,通过改进

YOLOv2 模型和改进 K-means 算法完成待搬运物体的大小和距离估计。

2.1 定位目标的大小视觉估计方法设计

通过改进 YOLOv2 模型完成待搬运物体的大小估计。传统的 YOLOv2 目标检测模型针对复杂环境下物体的检测,会因物体距离太近导致检测效果不佳的问题,故提出改进的 YOLOv2 目标检测模型^[10-11]。

将原 YOLOv2 模型的输出边界框的高、宽缩小为原来的 $1/l_h$ 和 $1/l_w$ 。

宽缩小倍数 l_w 、高缩小倍数 l_h 计算步骤如下:

标注用于 YOLOv2 目标检测模型的 N 个训练物体边界框为 t_{w-x-o} ($o=1, 2, \dots, N$), t_{h-x-o} ($o=1, 2, \dots, N$), 其中, o 为训练物体序号。

通过 YOLOv2 目标检测模型获取 N 个训练物体边界框大小为 t_{w-o}, t_{h-o} 。

进一步获取最终的边界框高、宽的缩小倍数,其公式表达如下:

$$\begin{cases} l_w = \sum_{i=1}^N \frac{t_{w-o}}{N} \\ l_h = \sum_{i=1}^N \frac{t_{h-o}}{N} \end{cases} \quad (1)$$

通过边界框缩小方法降低了复杂环境下大量物体检测时的物体边界框的重合率,从而提高检测性能。物体大小估计模型如图2所示。

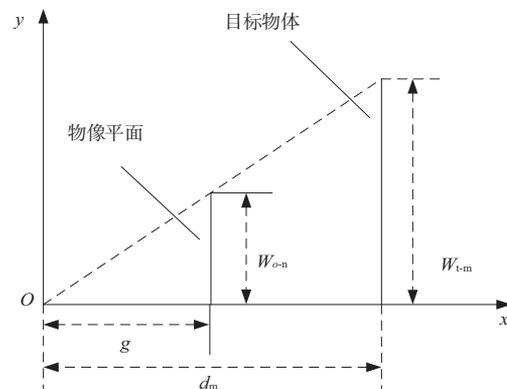


图2 物体大小估计模型

根据改进 YOLOv2 目标检测模型获取待搬运目标物体的边界框宽 u_{m-w} 、高 u_{m-h} , 待搬运目标物体所在图像面的坐标系宽度值公式表达如下:

$$W_{o-m} = \begin{cases} u_{m-w}, u_{m-w} < u_{m-h} \\ u_{m-h}, u_{m-h} < u_{m-w} \end{cases} \quad (2)$$

根据图2模型中的三角形性质得出坐标系宽度和摄像机焦距的关系为

$$\frac{W_{o-m}}{g} = \frac{W_{l-m}}{d_m} \quad (3)$$

式中: g 表示摄像机焦距; d_m 表示真实物体距摄像机距离; W_{l-m} 表示待搬运物体的真实宽度。

进一步推算出待搬运物体的真实宽度 W_{l-m} 公式表达如下:

$$W_{l-m} = \frac{W_{o-m}g}{l_h d_m} \quad (4)$$

2.2 距离视觉估计方法设计

通过改进 K-means 算法完成待搬运物体的距离估计,该算法通过尽可能远离彼此初始中心点的策略保证机械臂抓取物体的实时性^[12]。

选择一个初始化空集合 Q 以存储所选的中心点。随机选取一个数据(深度值)的中心点 $v(k), k = \{1, 2, \dots, k\}$ 放入空集合 Q 中。

找到集合外一个物体 $c(o)$ 与集合 Q 内平方距离最小物体的最小平方距离 $f(c(o), Q)^2$ 公式表达如下:

$$f(c(o), Q)^2 = \|c(o) - Q\|^2 \quad (5)$$

计算物体(样品)成为下一个聚类中心的概率为

$$A_o = \frac{f(c(o), Q)^2}{\sum_{o=1}^n f(c(o), Q)^2} \quad (6)$$

在空集合 Q 中加入通过轮盘赌法选择的下一个聚类中心点。

重复上述步骤,直至获取 l 个聚类中心点。

将样本点分割到离该样本点最近中心点 $i(k)$ 的簇内。不断使用新簇中的中心点代替原始中心点,直到距内部错误的平方和 SSE 最小。此时待搬运物体到聚类中心的距离即待搬运物体与机械手之间的相对距离:

$$S_j = A_o \sum_{o=1}^n \sum_{k=1}^l e(o, k) \|c(o) - i(k)\|_2^2 \quad (7)$$

式中 $e(o, k)$ 表示系数。

依据 YOLOv2 算法获取的待搬运物体边界框,通过改进聚类算法聚类边界框内每个像素对应的深度值,按照从小到大的顺序排列所获取的 3 个深度值聚类中心,得到的第 2 个深度聚类中心即为物体到摄像机的距离。

3 基于 PLC 的机械手抓取定位控制方法设计

通过估计物体的大小和距离,机械手可以据此来调整抓取力度,规划运动路径,并通过同步的

物体大小和距离估计,校正传感器反馈信号,提高定位的准确性和稳定性。在此基础上,基于 PLC 控制完成生产线搬运机械手的抓取定位控制。

3.1 PLC 控制器设计

PLC 控制器是一种可编程逻辑控制器,可以根据需要进行编程,结合利用 YOLOv2 模型识别到的待搬运物体的位置,控制机械手的运动,实现对机械手的准确定位。PLC 控制器是生产线搬运机械手抓取定位控制的核心控制器,其含有多个传感器^[13],通过对各种传感器信号的采集和判断,发起机械手的抓取定位控制指令^[14-15]。基于 PLC 的机械手抓取定位控制原理如图 3 所示。

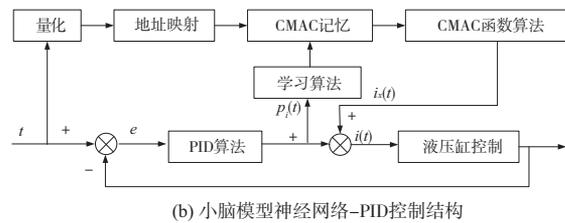
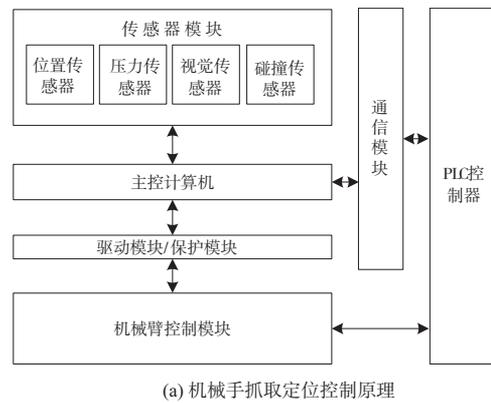


图 3 基于 PLC 的机械手抓取定位控制

在 PLC 控制器上使用 PID 控制算法完成生产线搬运机械手抓取定位控制。

3.2 抓取定位控制算法设计

使用小脑模型神经网络(CMAC)-PID 控制算法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制。小脑模型神经网络模拟人类小脑的运动控制能力,结合优化后的 PID 控制算法,可以通过学习和反馈机制不断优化和调整控制策略,以适应不同的运动任务和环境条件,使机械手在抓取和定位控制过程中更加稳定和精确,提高操作效率。

小脑神经网络在复杂的动态环境下具有良好的非线性函数能力,PID 控制算法具有良好的控制能力,故将两者结合用于生产线搬运机械手的抓取定位控制。

小脑模型神经网络-PID 控制结构如图 3(b) 所示。

在小脑神经网络上完成概念映射,即将输入区间 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 按照 $M+2V$ 个量化分隔,其公式表达如下:

$$b_o = \begin{cases} D_{\min}, & o=1, 2, \dots, M \\ b_{o-1} + \frac{D_{\max} - D_{\min}}{M-1}, & o=V+1, \dots, V+M \\ D_{\max}, & o=V+M+1, \dots, V+M+2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 b_o 表示映射分量。

基于物体的大小和估计的视觉距离,设计 PID 控制算法,将期望信号 $y(t)$ 和实际信号 $u(t)$ 之间的偏差作为输入, PID 控制算法输出信号和期望信号为小脑模型神经网络的输入,最后得到的 PID 控制算法输出信号与小脑模型神经网络的输出信号之和,即为小脑模型神经网络-PID 控制结构的控制信号。

期望信号和实际信号误差 $r(t)$ 公式表达如下:

$$r(t) = \frac{y(t) - u(t)}{b_o} \quad (9)$$

PID 控制算法输出 $i_p(t)$ 公式表达如下:

$$i_p(t) = L_b r(t) + L_j \int_0^t r(t) dt + L_w \frac{dr(t)}{dt} \quad (10)$$

式中: L_b 、 L_j 、 L_w 分别表示比例、积分、微分系数; $r(t)$ 表示期望信号和实际信号的误差。

小脑模型神经网络的输出 $i_x(t)$ 公式表达如下:

$$i_x(t) = \alpha \sum_{o=1}^v e_o s_o \quad (11)$$

式中: α 表示网络泛化系数; s_o 表示二进制选择向量; e_o 表示权值。

得到小脑模型神经网络-PID 控制结构的输出控制信号 $i(t)$ 公式表达如下:

$$i(t) = i_x(t) + i_p(t) \quad (12)$$

基于此,完成生产线机械手抓取定位控制。

4 实验与分析

为了验证基于 PLC 的生产线搬运机械手抓取定位控制方法研究的有效性,对其完成如下测试。

实验以 YH-JQ 型号搬运上下料四轴机械手为对象,进行纸壳箱搬运实验,生产线包括以下环节。

1) 进料区:在进料区域,原材料纸张或制作好的纸壳箱通过输送带或滚筒输送到生产线上。

2) 自动叠箱机:自动叠箱机用于将纸张按照特定方式折叠和粘合成纸壳箱。机器会自动折叠箱体,并使用胶水将箱子的底部和侧面粘合在一起。

3) 灌装区:将产品填充到纸壳箱中。根据具体需求,可以设置多个灌装站点以适应不同的产品需求。常见的灌装设备有自动包装机、流水线等。

4) 封箱机:在封箱机之后,纸壳箱的顶部经过胶水或其它方式进行密封,确保产品在运输和储存过程中的安全性。

5) 输送系统:输送系统利用 YH-JQ 型号搬运上下料四轴机械手,将已封好的纸壳箱从生产线运送到下一个环节,比如打码、标签、包装等。已封好的纸壳箱会被输送到仓库或运输区域,等待进一步的包装和运输处理。

生产线搬运机械手抓取定位控制现场如图 4 所示。



图 4 生产线搬运机械手抓取定位控制现场图

在生产线搬运机械手上安装位移传感器来检测物料的位置、姿态等信息,确定机械手的初始位置和姿态以及抓取的目标物料的位置和姿态,以便机械手能够准确地执行抓取和定位操作。

在上述实验设置的基础上,采用基于 PLC 的生产线搬运机械手抓取定位控制方法(所提方法)、基于 DSP 的生产线搬运机械手抓取定位控制方法(文献[3]方法)和基于改进差分进化算法的生产线搬运机械手抓取定位控制方法(文献[4]方法)完成实验测试。

1) 控制器鲁棒性对比

通过阶跃响应曲线评价控制器的鲁棒性。

在生产线搬运机械手抓取定位控制时间为

6 s 时加入一个 $1 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 的方波扰动,采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制,3种方法的扰动响应曲线如图5所示。

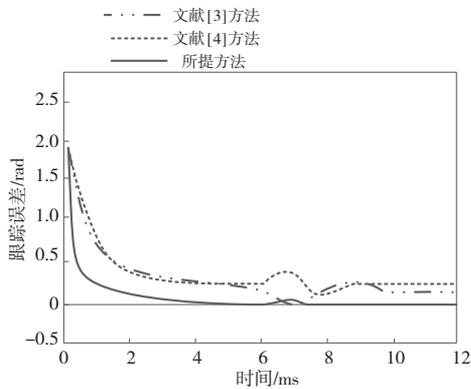


图5 3种方法控制器的鲁棒性对比

分析图5可知,受到噪声干扰后,文献[3]方法在9.6ms后实现生产线搬运机械手抓取定位稳定控制,跟踪误差为0.15rad;文献[4]方法在8.8ms后实现生产线搬运机械手抓取定位稳定控制,跟踪误差为0.25rad;所提方法在4.5ms后实现生产线搬运机械手抓取定位稳定控制,跟踪误差为0.01rad。所提方法在受到噪声干扰后,干扰响应耗时及跟踪误差均明显小于文献[3]方法和文献[4]方法,表明所提方法的鲁棒性能更好。所提方法通过改进的YOLOv2模型识别待搬运物体的位置,能够快速且精确地进行物体检测,提供机械手抓取的目标位置和大小信息。在此基础上使用改进的K-means聚类算法通过聚类过程估计待搬运物体与机械手之间的相对距离和大小,更好地估计出物体与机械手之间的关系,从而更准确地进行定位和抓取操作。

2) 机械手定位控制精度对比

在100s控制时间内,采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制,记录3种方法的抓取定位控制精度如图6所示。

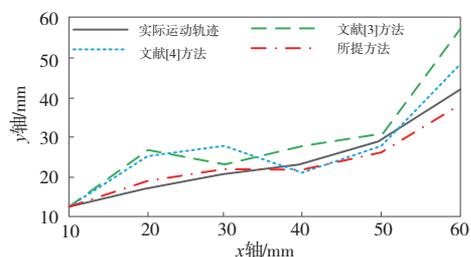


图6 机械手定位控制精度对比

由图6可知,两种对比方法与实际运动轨迹之间的偏差较大。在100s时,目标位置为(60,41),文献[3]方法、文献[4]方法和所提方法定位位置分别为(60,58)、(60,49)和(60,39)。由此可知,3种方法在x轴方向不存在偏差,y轴偏差较大。因此,以100s时的位置为基准,得到文献[3]方法、文献[4]方法和所提方法3种方法在y轴方向上的机械手定位误差量化结果为:17mm、8mm和2mm。这证实了所提方法的生产线机械手抓取定位的实际轨迹较目标轨迹偏差较小,表明所提方法的生产线机械手抓取定位控制精度更高。

3) 抓取定位控制时间对比

采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制,记录3种方法的抓取定位控制时间如图7所示。

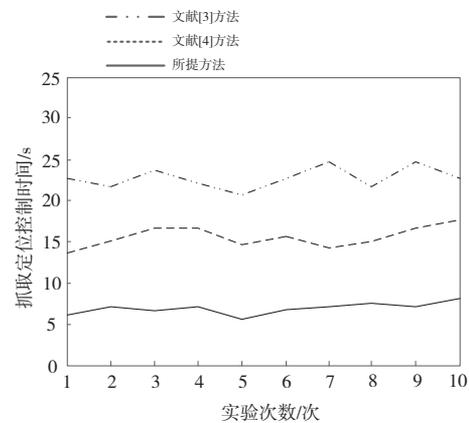


图7 机械手抓取定位控制时间对比

分析图7可知,在10次实验过程中,文献[3]方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制时间在21.0~25.0s之间,文献[4]方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制时间在14.0~16.5s之间,所提方法完成生产线搬运机械手的抓取定位控制时间在5.5~7.5s之间。所提方法的生产线搬运机械手的抓取定位控制时间均低于文献[3]方法和文献[4]方法,表明所提方法的生产线搬运机械手的抓取定位控制效率高。

通过上述实验可知,所提方法首先通过改进YOLOv2模型和改进K-means算法对待搬运物体展开大小及距离识别,准确定位了待搬运物体位置,为机械手的抓取定位控制提供了准确的目标,提高了抓取定位的准确性;其次,基于PLC的生产线搬运机械手抓取定位控制,提高了机械手抓取定位精度,使生产线机械手抓取定位性能更优。

5 结语

研究生产线搬运机械手的抓取定位控制方法是工业领域研究的重点问题之一。针对生产线搬运机械手抓取精度低的问题,提出基于 PLC 的生产线搬运机械手抓取定位控制方法。实验结果表明:所提方法受到噪声干扰后阶跃响应波动较小,体现了所提方法的鲁棒性能更好;该方法抓取定位的实际轨迹较目标轨迹偏差较小,体现了该方法定位控制精度较好。同时,该方法抓取定位控制耗时较短,体现了该方法的控制效率较高。由此可见,所提方法解决了传统方法中存在的问题,具有现实应用意义。

参考文献:

[1] 孟祥斌,张雅彬,田卫华,等. 基于重力感应传感器的六自由度车载机械手控制系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2022(8):80-84.

[2] 任工昌,王乐,桓源,等. 针对机械手抓取皮革位置的研究[J]. 中国皮革,2022,51(5):31-35.

[3] 史亚贝. 基于 DSP 的三自由度采摘机械手控制系统研究[J]. 农机化研究,2022,44(2):34-38.

[4] 沈孝龙,王吉芳,秦宇飞,等. 基于改进差分进化算法的机械手轨迹控制[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(5):105-108,112.

[5] 马金茹,高文华,祁宇明. 一种自适应扰动观测器的机械手滑模控制研究[J]. 机床与液压,2022,50(3):54-60.

[6] 孙锐,薛勃,王鑫,等. 人造板上下料机械手的动力学

分析及仿真[J]. 包装工程,2022,43(17):130-139.

[7] 胡义华. 抓取机械手的动力学性能及结构有限元仿真[J]. 济南大学学报(自然科学版),2021,35(5):508-512.

[8] 杨智勇,谢迪,王君,等. 带传动式仿人机械手抓取规划及稳定性分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2021(2):57-61.

[9] 王琦,唐术锋,张慧杰,等. 连杆型欠驱动机械手指设计及抓取稳定性分析[J]. 机械设计与研究,2023,39(1):59-62,70.

[10] 詹道桦,王晗,林健,等. 对机械手定位的全相位傅里叶变换相位式激光测距系统[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(5):135-140.

[11] 王兰,陈兆学,王朝晖. 基于单目视觉的中医诊疗机械手三维坐标定位和变换方法[J]. 光学技术,2022,48(2):229-236.

[12] 雷翔鹏,刘业峰. 欠驱动多指机械手抓取能力分析与优化研究[J]. 控制工程,2022,29(4):730-737.

[13] 朱银龙,赵虎,苏海军,等. 四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):434-442.

[14] 王聪,张子扬,陈言壮,等. 基于深度强化学习与多参数域随机化的水下机械手自适应抓取研究[J]. 信息与控制,2022,51(6):651-661.

[15] 苏建华,刘传凯,王智伟,等. 面向 3 维物体的三指机械手“包笼抓取”方法[J]. 机器人,2021,43(2):129-139.

收稿日期:2023 - 07 - 18

(上接第 170 页)

[5] SHAN T X, ENGLLOT B. LeGO-LOAM: lightweight and ground - optimized lidar odometry and mapping on variable terrain [C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain; IEEE, 2018:4758-4765.

[6] SHAN T X, ENGLLOT B, MEYERS D, et al. LIO-SAM: tightly-coupled lidar inertial odometry via smoothing and mapping[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, USA: [s.n.], 2020:5135-5142.

[7] 付林,郑佳楠,何洪磊,等. 面向大型室内场景的无人机三维激光雷达解耦 SLAM 方法[J]. 电子测量技术,2022,45(13):96-103.

[8] 刘振宇,惠泽宇,郭旭,等. 基于滑动窗口优化的激光雷达惯性测量单元紧耦合同时定位与建图算法[J]. 科学技术与工程,2022,22(21):9167-9175.

[9] 袁艳,李峰,王东. 基于开关卡尔曼滤波的叶轮故障振动信号特征提取[J]. 机械制造与自动化,2024,53(2):67-70.

收稿日期:2024 - 05 - 21