

基于机器视觉的汽车装配协作机器人机械故障图像识别系统

李润泽¹,钱仕德¹,逯汉宁²

(1. 北京奔驰汽车有限公司,北京 100176; 2. 农业农村部 国际交流服务中心,北京 100125)

摘要:为了避免汽车装配协作机器人故障发现不及时而导致的生产效率低下,设计一种基于机器视觉的汽车装配协作机器人机械故障图像识别系统。以典型机械故障识别系统为基础,建立具有故障图像采集、故障图像处理、故障图像特征提取和故障图像分类四大模块的汽车装配协作机器人机械故障图像识别系统;利用机器视觉技术获取机械故障图像特征,根据 Saulola 算法实现机械故障图像彩色增强,通过 Niblack 算法确定协作机器人机械故障节点位置,得到机械故障图像识别系统的机械故障图像分类结果,实现汽车装配协作机器人机械故障图像识别。实验结果表明:该方法识别效果好、识别效率高。

关键词:汽车协作机器人;汽车总装制造;机器视觉;图像识别

中图分类号:TP391 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0189-04

Mechanical Fault Image Recognition System of Automobile Assembly Cooperative Robot Based on Machine Vision

LI Runze¹, QIAN Shide¹, LU Hanning²

(1. Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176, China;

2. Center of International Cooperation Service, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: In order to avoid the low production efficiency caused by late fault detection of automobile assembly cooperative robot, a mechanical fault image recognition system based on machine vision is designed. Based on the typical mechanical fault recognition system, the mechanical fault image recognition system of automobile assembly cooperative robot consisting of fault image acquisition, fault image processing, fault image feature extraction and fault image classification is established. Machine vision technology is applied to obtain mechanical fault image characteristics, Saulola algorithm is implemented to realize mechanical failure image color enhancement, and by Niblack algorithm, collaborative robot mechanical fault node position is determined to get the mechanical failure image recognition system of mechanical fault classification result and realize car assembly collaborations robot mechanical fault recognition. Experiment results show that the designed method has good recognition effect and high recognition efficiency.

Keywords: automotive collaborative robots; automotive assembly manufacturing; machine vision; image recognition

0 引言

随着科学技术的快速发展,交通工具也在不断更新换代,为了满足社会对车辆的庞大需求,汽车协作机器人应运而生。汽车协作机器人作为汽车生产总商和产品设计师钟爱的新型科技产品,已全面投入到汽车总装制造工作当中,成为监督汽车零部件改装、调试整装发动机、变速器升级,合理控制汽车装配、调整、路试、装箱、重修、入库等多环节的高效率协作机器人^[1]。汽车协作机器人在给人们生活带来便利的同时,仍存在较多的安全隐患。举例来说,汽车协作机器人机械故障不仅意味着厂商出厂的汽车零部件装配及其制造工序的不合理,还意味着汽车整体质量的不达标,这种由于汽车协作机器人故障发现不及时所造成的公共安全事件,将会威胁驾驶人员的生命安全。因此,国内外相关人员已投入到汽车协作机器人机械故障图

像识别方法的研究中。

王博磊等^[2]通过集合经验模态分解(EEMD)提取机械故障原始振动信号,并根据信号频率带能耗比将信号划分为若干个本征模态矩阵,通过计算单位矩阵的奇异值特征向量和故障特征向量,实现机械故障图像识别,但该方法存在识别效果差的问题。张文斌等^[3]通过本质模态函数获取机械转频信号,并利用自适应局部迭代滤波优化机械转频信号所表达的模糊熵,通过在不同工况条件下观察信号所表达的模糊熵与不同故障类型之间的灰色关联度,实现机械故障图像识别。程月华等^[4]通过卫星遥测控制系统采集机械故障相关的学习信息,并结合深度森林算法提取学习信息的特征向量,通过将特征向量输入机构故障识别模型,实现机械故障图像识别。上述两种方法存在识别效率低的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,提出基于机器视觉的汽车协作机器人机械故障图像识别系统的方法。

1 汽车协作机器人机械故障图像识别系统的硬件结构

要建立能够诊断汽车协作机器人机械故障的系统,需要参考典型机械故障识别系统,并以此为基础,添加汽车总装制造相关知识。典型机械故障识别系统框架如图 1 所示。

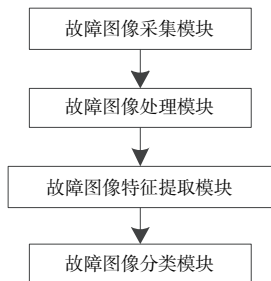


图 1 典型机械故障识别系统

现以图 1 为基础,向其中添加汽车总装制造相关知识。

1) 故障图像采集模块

故障图像采集模块的核心操作就是建立汽车协作机器人机械故障图像数据库。首先分析汽车协作机器人的汽车总装制造过程,并筛选最易发生故障的节点,通过在此节点处结合具有图像采集能力的编码程序和 Adode 控件,实现汽车协作机器人机械故障图像数据库的建立。从工厂生产线概况分析汽车协作机器人的汽车总装制造过程,该过程可以分为发动机、变速器、仪表板的内部总装和车灯、车门、车身的外部总装。汽车协作机器人总装车辆的全过程作为把控产品质量的重要工序,将直接影响汽车总装工艺水平,即出厂车辆的质量和性能。根据总装线报价和检修部门反馈信息,可知汽车协作机器人易在发动机内部总装和车身外部总装两处节点发生机械故障,因此将发动机和车身视为一级预警节点,其他总装步骤视为次级预警节点,向其中添加具有图像采集能力的编码程序和 Adode 控件。故障图像采集模块的操作流程如图 2 所示。

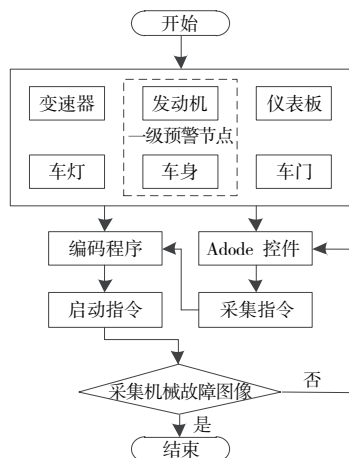


图 2 故障图像采集模块的操作流程

系统采用 ActiveX Data Objectde 微软应用程序编写,设定总装过程启动指令和采集指令,当汽车协作机器人在

总装制造过程中出现机械故障时,启动指令会操纵连接字符接收汽车协作机器人故障图像的数码符号,并存储于 Adode 控件中。值得注意的是,Adode 控件并不仅作为存储汽车协作机器人故障图像的空间,它还能释放采集指令作用于微软应用程序的上行文件,督促该编码程序长期释放启动指令。

2) 故障图像处理模块

故障图像采集模块中编码程序的粗糙性和 Adode 控件的容量限制决定了已采集的与汽车协作机器人总装制造相关故障图像的失帧。这种不受控制的图像缺陷会对后续机械故障图像识别造成较为恶劣的影响。为了提升机械故障图像识别的精确性,需要对采集到的机械故障图像预处理,这就是故障图像处理模块的主要工作。系统发布的图像处理任务会通过分析汽车协作机器人总装制造过程中可能承受的外界作用力和作用因子,确定修正机械故障图像的方法。故障图像处理模块操作流程如图 3 所示。

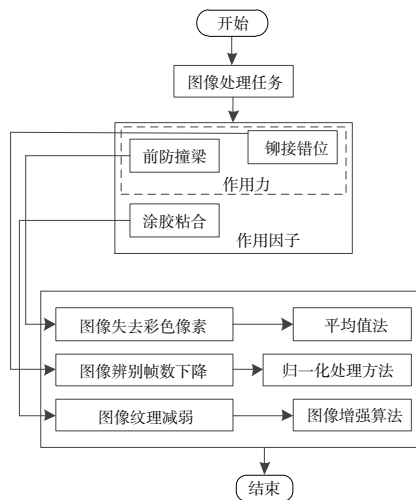


图 3 故障图像处理模块的操作流程

汽车协作机器人总装制造过程中参与的作用力和作用因子较为复杂,忽略人为失误导致的机械故障,仅关注汽车协作机器人所造成的工程学失误,与汽车总装制造过程相关的作用力和作用因子包括前防撞梁、铆接错位、涂胶粘合等。其中,前防撞梁是汽车协作机器人在完成拾取、放置等工作时承受的来自人机协作零件的力,该作用力会直接影响机械故障图像的像素表达。针对这个问题,可以通过平均值法解决。铆接错位是汽车协作机器人在定位铆钉位置时承受的来自于垂直方向的拉铆力,该作用力会直接影响机械故障图像的辨别帧数。针对这个问题,可以通过彩色图像加密算法^[5]解决。涂胶粘合是汽车协作机器人在对玻璃器皿涂胶时由于胶水溢出所产生的作用因子,该作用因子会直接影响机械故障图像的纹理。针对这个问题,可以通过图像增强算法^[6]解决。确定故障图像处理模块的各种优化方法后,该模块将输出更为清晰、辨别帧数更高的汽车协作机器人机械故障图像,为后续的图像识别工作奠定坚实的基础。

3) 故障图像特征提取模块

想要通过分类的方法实现汽车协作机器人机械故障图像的有效识别,图像特征提取是十分重要的一步。机

机械故障图像经过优化后表现出极高的特征提取积极性。将机械故障图像导入该模块,即可通过机器视觉^[7]提取机械故障图像的特征向量。指导该模块特征提取工作的是系统 CCR 中控层发送的下线工位 HMI 执行信号,当优化图像作为管控元件前往该模型时,最先感知图像映射地址的中控层发送执行信号,待优化图像完全进入该模块后,执行信号引导优化图像移动至待命点,直至一次汽车协作机器人总装制造过程结束,机器视觉开始提取机械故障图像特征。故障图像特征提取模块的操作流程如图 4 所示。

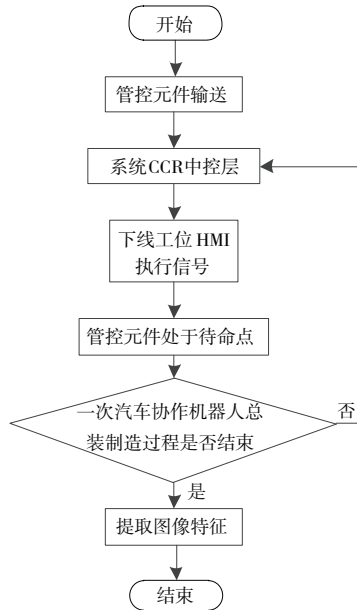


图 4 故障图像特征提取模块的操作流程

机器视觉作为多领域内图像特征的提取手段,已被证实能够通过模拟人类视线扫描待提取图像的关键信息,进而达到获取图像特征向量的目的。故障图像特征提取模块结合机器视觉能够显著提升系统对汽车协作机器人机械故障图像的识别效率。

4) 故障图像分类模块

故障图像分类模块作为整个系统的核心模块,主要负责根据 Updatable 属性规划机械故障图像类别。指导该模块运行的上行 AGV 服务端通过释放 AGV 调度信号记录、统计、分类机械故障图像,以达到追踪汽车协作机器人总装制造过程任意故障节点,实现汽车协作机器人机械故障图像识别的目的。故障图像分类模块的操作流程如图 5 所示。

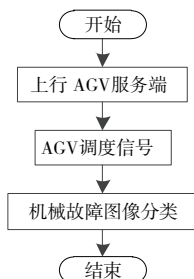


图 5 故障图像分类模块的操作流程

2 汽车协作机器人机械故障图像识别系统的软件算法

以上述系统硬件结构为基础,分模块探讨汽车协作机器人机械故障图像识别系统的软件算法。

1) 故障图像采集模块

汽车协作机器人总装制造过程中的故障节点通过 Niblack 算法和 Saulola 算法依次结合编码程序和 Adode 控件。在具备图像采集能力的两项系统程序和控件中,编码程序通过 Hough 变换^[8]释放启动指令,Adode 控件通过 AprilTag 算法释放采集指令。Niblack 算法的表达式如下:

$$Q = g_n \times h_0(\delta) \quad (1)$$

式中: g_n 表示编码程序的时间序列; h_0 表示一次汽车总装制造所花费的时间; δ 表示编码连接速度。

Saulola 算法的表达式如下:

$$T = \frac{w^2}{\sum_{q \neq 0}^4 t_0 - t_q} \quad (2)$$

式中: w^2 表示 Adode 控件的数量; t_0 表示故障节点判定条件; t_q 表示系统访问权限。

Hough 变换的表达式如下:

$$R = s \times \left(\frac{1}{r} - \sin \lambda \right) \quad (3)$$

式中: s 表示启动指令的释放频率; r 表示启动代码; $\sin \lambda$ 表示启动指令的属性赋值。

AprilTag 算法的表达式如下:

$$Y = \int_0^{+\infty} \left| i - \frac{\varphi}{2} \right|^2 + y^2 \quad (4)$$

式中: i 表示采集指令的释放频率; φ 表示采集代码; y^2 表示采集指令的封闭窗口。

2) 故障图像处理模块

参与处理机械故障图像的方法包括平均值法、彩色图像加密算法和图像增强算法。平均值法的表达式如下:

$$H = \sqrt{f_n^2 + f_m^2} / \arctan \frac{\sigma}{2} \quad (5)$$

式中: f_n^2 表示图像三基色; f_m^2 表示图像缩放程度; σ 表示像素点方差。

彩色图像加密算法的表达式如下:

$$E = \frac{\exp(M)}{2\vartheta} \quad (6)$$

式中: M 表示初始图像辨别帧数; ϑ 表示邻域像素点灰度差。

图像增强算法的表达式如下:

$$L = \sum_{i \neq 0}^{x_1} \sum_{j \neq 0}^{x_2} \eta_{ij} - \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (7)$$

式中: η_{ij} 表示图像空域滤波; x_2 表示单通道纹理强度; x_1 表示纹理色光分量。

3) 故障图像特征提取模块

除系统 CCR 中控层发送的下线工位 HMI 执行信号外,故障图像特征提取主要依靠机器视觉。机器视觉提取汽车协作机器人机械故障图像特征的具体过程如下:首先按照图像轮廓规划扫描路线,然后开始分区域获取图像特

征向量,一个区域获取结束后跳转至另一区域的过程受到机器视觉提取机制的限制,即只有在上一区域内的特征向量整合结束且不存在多余信息时,才会开启下一区域的跳转,这种限制机制极大程度降低了图像特征的冗余度和特征向量的误判率。利用机器视觉技术获取机械故障图像特征,具体提取函数为

$$G = \beta / y_z \quad (8)$$

式中: β 表示图像特征梯度; y_z 表示机器视觉扫描范围。

4)故障图像分类模块

故障图像分类模块涉及的软件算法主要与AGV调度信号有关。AGV调度信号利用加权平均法标注机械故障图像,并通过调节信号幅值的方式驱使图像向权重统一的位点移动,直至模块内所有图像全部位于符合自身权重的位点,AGV调度信号对机械故障图像的分类结束。加权平均法的表达式如下:

$$K = \int_0^c kv(e) \quad (9)$$

式中: k 表示图像边缘特征; v 表示分类调度对标注图像的识别误差; e 表示机械故障图像的周长数据。

根据汽车协作机器人机械故障图像识别系统输出的图像分类结果,即可实现汽车协作机器人机械故障图像的有效识别。

3 实验与结果

3.1 实验准备

为了验证基于机器视觉的汽车协作机器人机械故障图像识别系统的整体有效性,需要对其进行测试。

现随机选择某汽车生产厂作为试验背景,取其中一台存在机械故障的汽车协作机器人作为试验对象,汽车协作机器人参数设置如表1所示。

表1 汽车协作机器人参数设置

机器人参数	数值
重复精度	+0.03
温度范围/(°)	0~50
功率消耗/W	150
有效载荷/kg	5
最大工作范围/mm	850
噪声/db	72

选取文献[2]方法和文献[3]方法为对比方法,与所提方法对比其在不同光照条件下的识别效果,验证所提方法性能。

3.2 强光下的识别效果

已知选取的试验对象在第6关节处存在裂纹,分别采用3种方法在不同光照条件下的试验对象进行故障图像采集。通过对比3种方法在强光、正常光和弱光条件下对试验对象的识别效果,判断不同方法的故障识别性能。强光、正常光和弱光条件下不同方法对试验对象的识别效果,如图6—图8所示。

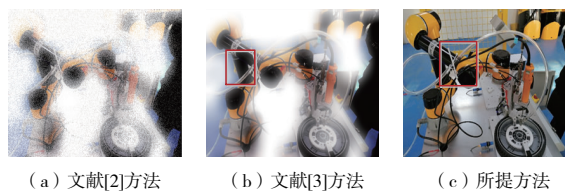


图6 不同方法在强光下的识别效果

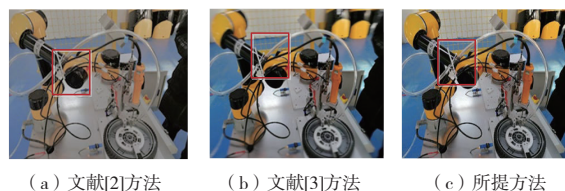


图7 不同方法在正常光下的识别效果



图8 不同方法在弱光下的识别效果

如图6—图8可见,所提方法在强光、正常光和弱光条件下对汽车协作机器人机械故障图像的识别效果均较好。因为所提方法采用平均值法、彩色图像加密算法和图像增强算法优化故障图像采集模块获取的机械故障图像,并将优化成功的机械故障图像输入故障图像分类模块中,这样使根据优化图像获取的识别结果准确度更好,效果更好。文献[2]方法和文献[3]方法在强光、正常光和弱光条件下对汽车协作机器人机械故障图像的识别效果均不佳,甚至文献[2]方法在强光条件下无法对其故障进行判断,识别效果较差。经上述对比可知,所提方法对汽车协作机器人机械故障图像识别效果明显优于传统方法。

3.3 识别消耗时间

为了进一步验证所提方法的实用性,分别采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法识别试验对象,并记录机械故障图像所有帧数识别结束后所消耗的时间,通过对比不同方法所消耗的时间,判断不同方法的识别效率。不同方法所消耗的时间如图9所示。

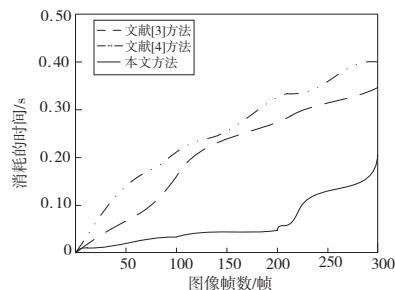


图9 不同方法所消耗的时间

(下转第248页)

型的处理时间。RF 与 ELM 形成了相近的识别结果,都比 BP 诊断精度更高。采用 ELM 分类器处理时只需设置简单的结构和系统参数,可以消除人为因素造成的误差波动,用户也可以自主设置隐层节点的个数,极大地增加了系统的适应性。

4 结语

1)通过 EMD 完成空化状态的分解,再对 IMF 分量样本熵实施归一化,完成空化处理,形成了不同的样本熵,提高样本熵值后,形成了更复杂变化特征的样本序列。

2)通过与 BP 神经网络、随机森林(RF)方法进行比较,表明采用 ELM 分类器处理时只需设置简单的结构和系统参数,可以消除人为因素造成的误差波动,用户也可以自主设置隐层节点的个数,极大地增加了系统的适应性。

参考文献:

- [1] 齐晓轩,都丽,张国山. 小波包近似熵特征的机动车声识别方法[J]. 南京理工大学学报,2020,44(1):67-73,79.
- [2] AHMADI M, THIMMAIAH P, BAHRAMI M, et al. Experimental and numerical investigation of a solar eductor - assisted low - pressure water desalination system[J]. Science Bulletin, 2016,

61(12):959-973.

- [3] 杨大为,冯辅周,赵永东,等. VMD 样本熵特征提取方法及其在行星变速箱故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击,2018,37(16):198-205.
- [4] 赵鹏军,谷立臣,孙昱,等. 基于小波包的柱塞泵压力脉动信号提取与分析[J]. 机械设计与制造,2019(7):161-164.
- [5] DULAR M, POŽAR T, ZEVNIK J, et al. High speed observation of damage created by a collapse of a single cavitation bubble[J]. Wear, 2019, 418/419:13-23.
- [6] 蒲道林. 空化诱发离心泵振动特性的试验研究[J]. 水泵技术,2015(3):6-8.
- [7] 骆斌,刘德祥,陈捷. 离心泵汽蚀振动特性研究[J]. 水电与新能源,2015(6):34-38,42.
- [8] 贺国,曹玉良,明廷锋,等. 基于改进倍频带特征的离心泵空化状态识别[J]. 哈尔滨工程大学学报,2017,38(8):1263-1267,1302.
- [9] 刘志奇,崔金元,董洪全,等. 高压轴向柱塞泵配流盘抗空化结构研究[J]. 计算机仿真,2020,37(11):227-231.
- [10] 高殿荣,索晓宇,蔡倩玲,等. 水压柱塞泵关键结构参数对泵内空化的影响[J]. 中国机械工程,2018,29(4):434-440.

收稿日期:2021-12-08

(上接第 192 页)

分析图 9 可知,当图像帧数为第 100 帧时,文献[3]方法所消耗的时间为 0.16 s,文献[4]方法所消耗的时间为 0.21 s,所提方法所消耗的时间为 0.03 s;当图像帧数为第 300 帧时,文献[3]方法所消耗的时间为 0.33 s,文献[4]方法所消耗的时间为 0.40 s,所提方法所消耗的时间为 0.21 s;采用所提方法识别汽车协作机器人机械故障图像,其消耗的时长不超过 0.21 s。采用文献[3]方法和文献[4]方法识别汽车协作机器人机械故障图像,二者消耗的时长均与所提方法存在较大差距。经上述对比,进一步验证了所提方法对汽车协作机器人机械故障图像识别效率明显优于传统方法。

3.4 机械故障图像特征识别的误判率

为了进一步验证所提方法的识别效果,分别采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法识别试验对象,得到不同方法下机械故障图像特征识别的误判率结果如表 2 所示。

表 2 机械故障图像特征识别的误判率

图像帧数/帧	机械故障图像特征识别的误判率/%		
	文献[3]方法	文献[4]方法	所提方法
100	9.2	8.6	0.20
200	12.6	11.0	0.36
300	16.9	16.3	0.82
400	15.2	13.8	0.12

分析表 2 可知,采用本文方法机械故障图像特征识别的误判率远低于其他两种方法,表明机械故障图像特征识

别效果较好。

4 结语

汽车协作机器人作为 21 世纪最伟大的发明之一,已全面进入车辆生产车间。汽车协作机器人在提高汽车总装制造效率的同时,其自身机械故障也不容忽视,因此业内专家展开对汽车协作机器人机械故障图像识别方法的研究。如何在保证汽车协作机器人机械故障图像识别性能的同时,对汽车协作机器人机械故障图像的识别过程实时监控,是研究人员下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 王畅,王国辉,施智平,等. 协作机器人逆运动学形式化建模与验证[J]. 小型微型计算机系统,2021,42(7):1353-1359.
- [2] 王博磊,曹伟,邢红涛,等. 基于 EEMD 多维特征的旋转机械故障识别方法研究[J]. 机床与液压,2021,49(21):201-204.
- [3] 张文斌,江洁,普亚松,等. 自适应局部迭代滤波与模糊熵在齿轮系统故障识别中的应用[J]. 机械传动,2021,45(5):146-152.
- [4] 程月华,江文建,杨浩,等. 基于深度森林的卫星 ACS 执行机构与传感器故障识别[J]. 航空学报,2020,41(增刊 1):723778.
- [5] 方鹏飞,黄陆光,娄苗苗,等. 基于四维超混沌系统的彩色图像加密算法[J]. 计算机工程与设计,2022,43(2):361-369.
- [6] 陆涛. 基于统计特征分类耦合自适应 Gamma 校正的图像增强算法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(6):154-162.
- [7] 李建鑫,陈鸿,王晋祺. 基于机器视觉轮廓提取的平滑处理算法[J]. 电子技术应用,2021,47(4):116-120,131.
- [8] 洪庆,宋乔,杨晨涛,等. 基于智能视觉的机械零件图像分割技术[J]. 机械制造与自动化,2020,49(5):203-206.

收稿日期:2022-06-15