

人机时空共享协作装配技术研究综述

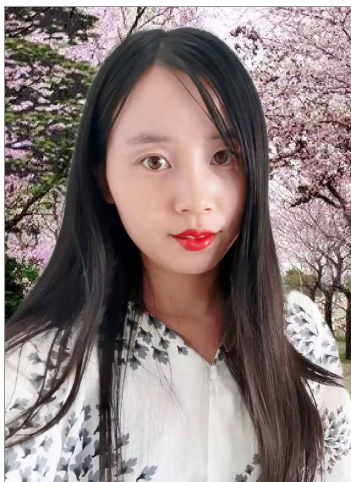
肖明珠,朱文敏,范秀敏

(上海交通大学机械工程与动力学院,上海 200240)

[摘要] 在智能制造发展趋势下产品生产过程越来越柔性化,具备高度灵活性和自动化水平的人与机器人协作已成为制造业关注的研究热点。在产品装配中,灵活性要求较高以及操作复杂的装配仍然需要人完成,而机器人具有操作可重复性好、高负载、准确性高的优势。在时间和/或空间共享环境下,利用机器人辅助工人装配,减少人体工程学压力和工人工作负荷,实现优势互补。基于这些认识,本文对时空共享的人机协作装配的研究进行综述。梳理了近年学者围绕4个热点,即人机协作之间的任务分配、人机协作意图识别、人机协作路径规划、人机协作装配系统的安全设置展开的现状研究,并对这4方面研究内容的发展趋势进行了探讨和展望。

关键词: 人机协作; 装配; 任务分配; 意图识别; 路径规划; 安全

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.18.024



肖明珠

博士研究生,研究方向为智能装配/数字孪生、人机工程等。

技术要求,机器人与人类在协作区域内一起将零件或部件进行配合和连接,使之成为半成品或成品的过程,是人机协作在装配领域的具体应用。人机协作装配的主要目标是协助人装配而不是取代人,根据机器人与人类的协作方式,人机协作装配可分为空间共享(Workplace Sharing)和时空共享(Workplace Sharing and Time Sharing)两类^[2]。空间共享指机器人与人类在共同的工作空间中工作,但工作内容相互独立,它强调工作空间的共享;而时空共享指机器人与人类在共同的工作空间中交互、合作完成工作,它强调双方的同时参与(图1)。人机空间共享协作主要应用于产品的流水线装配,是人机协作装配的主流形式,它通过部分工位的“机器换人”来提高生产线的自动化水平,由于装配任务是由机器人

与人类依次完成,因而二者间的交互十分有限。但随着产品个性化需求特征的日益明显,流水线装配方式将不再合适,需要的是能在一个工位上完成整个产品装配过程的装配单元,为了提高装配单元的生产效率,机器人与人必须进行密切的交互与合作,强调人机同时参与装配的人机时空共享协作就显得尤为重要。

人机协作装配是一种半自动化过程,即混合自动化,在带来高度灵活性和自动化水平的同时,人机共存会使生产系统变得十分复杂^[3]。人机协作装配系统中的人机交互方式与交互程度决定了执行装配任务的效率,要设计一个完善的人机协作装配系统,要解决诸如安全性、人机工效学、经济适用性、智能性等多方面的问题^[4]。

为了实现安全有效的人机协作,

随着工业4.0的发展,生产车间中机器人协助工人装配逐渐成为现实^[1]。人机协作装配是根据规定的

许多学者对人机协作装配系统进行了广泛的研究,本文基于近10年来与人机协作装配有关的文章进行了筛选、仔细阅读,详细探讨了人机协作装配研究现状以及未来的发展趋势。

检索与筛选

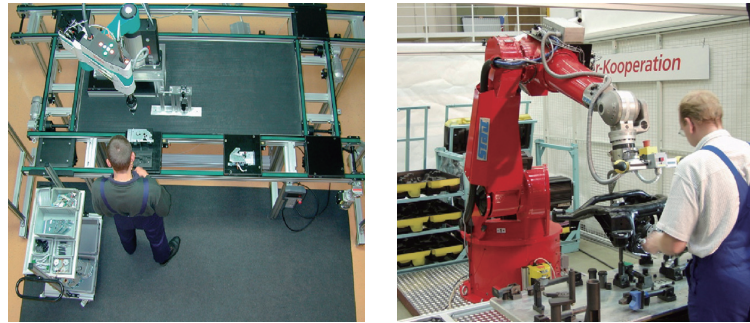
本文在中英文文献资源库如Scopus、ScienceDirect、IEEE、Google Scholar、中国知网等利用搜索关键词和标题的方法(表1),得到了1998~2018年有关人机协作装配的论文。根据是否应用在工程领域、研究重点是否是人机协作装配等对这些论文进行了筛选,最后剩下64篇论文。

对这些论文整理研究后发现,在1998年就已经有学者开始了对人机协作装配的研究,而且最近5年论文数量呈显著增长趋势(图2)。其中,2016~2018年的论文数量几乎占据论文总数的一半,由此说明研究学者认为在生产系统中应用人机协作装配很有研究价值,对这种新型协作方式提高生产效率抱有希望。而部分生产系统也从全手工操作装配向半自动化协作装配过渡。对这些论文分类(图3),可看到人机协作装配的研究重点是人机协作之间的任务分配、人机协作意图识别、人机协作路径规划、人机协作装配系统的安全设置等。因此本文重点对这4个热点进行了系统阐述,总结这4类问题的研究现状以及发展趋势。

人机协作任务分配

1 人机协作任务描述

人机协作装配的首要任务是明确装配目标,分析要完成目标所需要执行的装配操作。人机协作任务描述是将人机协作装配任务分解为一系列能被人或机器人执行的操作^[5]。为了系统、清晰地描述人机协作装配任务,常用的方法有层级任务分析(Hierarchical Task Analysis)^[6]、Human Robot Time and Motion (CHRTM)^[7]



(a) 空间共享

(b) 时空共享

图1 人机协作装配方式

Fig.1 Methods of human-robot collaborative assembly method

表1 论文检索的关键词分布

Table 1 Distribution of keywords retrieved from papers

关键词	中英文关键词分布
中文关键词	人机协作, 装配
英文关键词	human robot collaborative assembly, human robot cooperative assembly

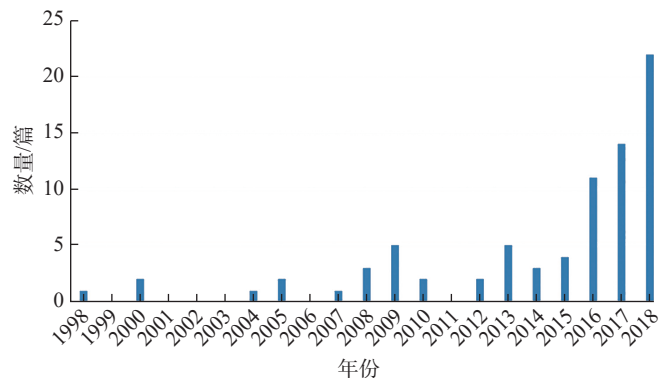


图2 有关人机协作装配类论文统计情况

Fig.2 Statistics of papers on human-robot collaborative assembly

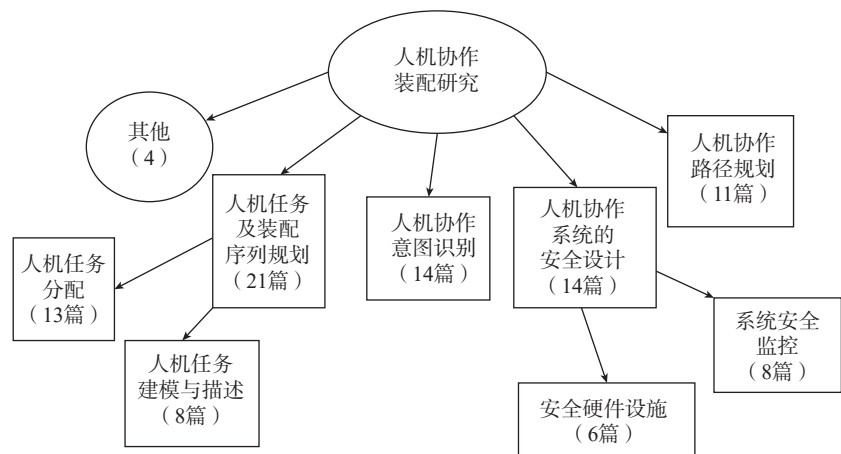


图3 有关人机协作装配类论文研究关注点分布

Fig.3 Focuses of papers about human-robot collaborative assembly

和/或图表(AND/OR graphs)等。

HTA (Hierarchical Task Analysis) 将装配任务分解成几个要完成的子目标,而完成每个子目标所需要的操作构成了子目标的内容。通过将装配任务分解,不仅详细了解了装配流程,而且可以根据每个单元的操作步骤来规划适于人机协作的子任务^[8-9],图4描述了一个线束装配的部分层级任务分析模型^[10]。

MTM (Methods Time Measurement) 将装配任务分解为若干个基本动作,根据基本动作制定时间标准的一种

方法。技术人员可以根据 MTM 建立自动装配线上工人的基本装配流程,也可建立机器人的基本装配流程 RTM (Robot Time and Motion)^[7]。HRTM 的目标是将 MTM 和 RTM 合并在一起,加入工具单元和协作单元形成协作的基本元素,如图 5^[7]所示。通过将装配任务分解,根据人和机器人对各个基本动作执行时间的长短可对装配顺序进行规划。

AND/OR graphs 能够描述平行的多种装配序列,并保持了各自执行时间的独立性。图 6^[11]描述了由 8

个零件 ABCDEFGH 所组成装配体的 AND/OR graphs,蓝线代表 OR,红线代表 AND。AND/OR graphs 可通过将整个装配体拆卸为各孤立零部件得到,由 AND/OR graphs 可直观获得产品各种可能的装配顺序。

2 人机协作任务分配

在人机协作装配中,装配任务分配不合理会影响生产系统的生产效率、生产节拍及人机协作的流畅性,从而增加生产系统的装配成本^[12-13]。合理的任务分配方案十分重要,常见的人机协作任务分配方法或依据有:(1)按照人和机器人的技能分配;(2)减少人机协作装配中工人的等待时间;(3)协调人机之间的信赖度优化任务分配;(4)减少人机协作装配中工人的人体工程学风险等。

所谓人和机器人的技能分配,指将人机协作生产系统中的人和机器人视为包含某些装配技能的资源^[14]。利用问卷或专家对工人进行技能评估,从而得到工人的装配技能;同时对机器人技能分析,得到机器人的技能,如工人可能具备抓取、放置、旋转零件的能力,而机器人可能只具备抓取、放置的能力,这些技能构成了生产系统的资源。在任务分配时,分析完成任务所需要的能力,利用任务-资源匹配完成人机协作任务分配^[15-18]。

在混合生产系统中,工人具有较强触觉及感知能力,以及较强的适应

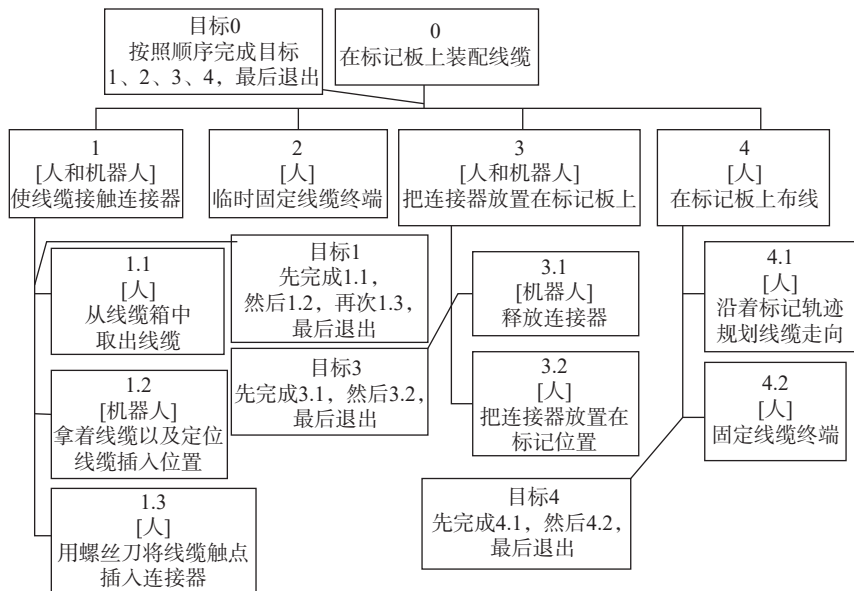


图4 线缆任务分析模型
Fig.4 HTA model of a cable harness assembly

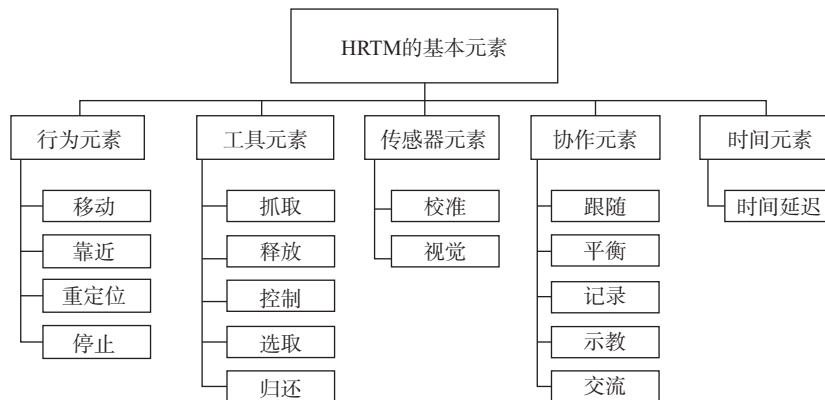


图5 HRTM元素
Fig.5 Elements of HRTM

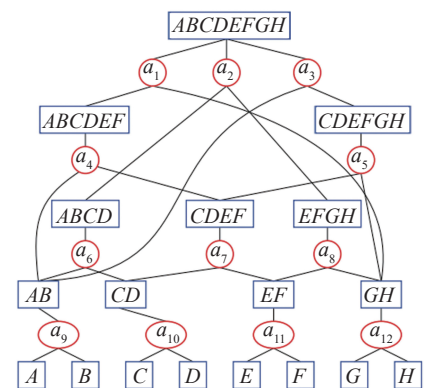


图6 一个装配体的AND/OR graphs
Fig.6 AND/OR graphs of an assembly

性和灵活性。必须充分利用工人的能力,减少工人在人机协作中的等待时间,使得机器人“及时”给工人提供协助^[19-20]。因此,需要预测人机协作中工人接受机器人协助的装配任务时间点,从而规划在该时间内机器人及时给工人提供协助,提高生产效率,这就是预测时间的策略进行人机任务分配。

工人之间协作完成生产任务的时候,如果彼此信任对方的能力,配合会更默契,生产效率也会随之提高。在协作装配系统中,人与机器人之间的信任程度代表了人机协作系统的有效程度。如果工人对机器人拥有充分的信任,会减少工人对机器人的不确定性,提高工人的生产节拍^[21]。通过对人机之间的信任进行建模,实时获取双方对彼此的信任值,如果双方的信任值下降的时候,则将装配任务再分配,使其得达到一个比较合理的信任值区间^[22]。在生产系统中,某些装配任务存在人体工程学风险,若频繁切换装配步骤,会使工人不断适应新的人体工程学条件,对工人本身会造成危害,容易出现工作疲劳,使得生产效率变低,生产成本增高^[23]。在人机协作装配任务中,引入风险模型来评估装配步骤中对工人的人体工程学风险从而进行任务分配,不仅减少了对工人的身体危害,又对生产系统的良好运行提供了保障。

针对人机协作装配任务分配还有其他算法,比如用遗传算法进行任务分配^[24]等。从上述的方法中能看到如何将装配任务合理分配给人和机器人,不仅可以从物理层面考虑进行任务分配,还能从心理层面优化任务分配结果。

人机协作意图识别

有些生产车间产品装配环境嘈杂,传统的语音传达方式无法发挥作用。而工人之间协作装配时,工人可

通过某些指定手势或者特定动作传达装配任务信息^[25-26]。如果机器人在辅助工人进行产品装配的时候,能够像人一样通过工人的装配动作识别工人的意图,及时给与工人支持,适应工人的工作节奏,既保证了人机协作顺畅进行,又提高了生产效率^[27-29]。

图7为人机协作装配意图识别,将装配任务建模为工人的动作序列,一般是通过识别装配者的动作来预测工人的装配意图,机器人根据工人的装配意图为工人提供协助。经文献分析,常见的动作识别方法有隐马尔科夫模型(Hidden Markov Model, HMM)、有限状态机(Finite-State Machine, FSM)、近邻算法(kNN, k-NearestNeighbor)等。

作为最常用的动作识别方法HMM,用它来描述含有隐含未知参数的马尔科夫过程。难点是从可观察的参数中确定该过程的隐含参数,然后利用这些参数进一步分析。图8描述了通用的隐马尔科夫动作识别算法流程。首先利用Kinect等摄像头采集工人的装配动作视频或图像,再从图像中提取静态或动态特征,用于模板训练隐马尔科夫模型。在实际生产车间人机协作装配任务时,将摄像头采集到工人的装配动作作为输入,利用隐马尔科夫模型库中的每个模型依次计算出相应的概率值,结果中识别概率最高的装配动作则代表对工人装配动作识别的结果。不同的工人装配动作序列代表了不同的工人操作意图^[30]。在利用隐马尔科夫模型进行工人装配动作识别预测时,训练数据决定了隐马尔科夫模型的质量。特征提取通常有以下方法:使用从头部到肩部手部连接的最短路径的矩阵作为训练输入;抽取骨骼连接点的位置、方向等特征向量,用随机森林对特征向量分类,根据最终分类的骨骼帧数训练^[31];如果出现了新的状态(即装配动作),将新的状态加入到隐马尔科

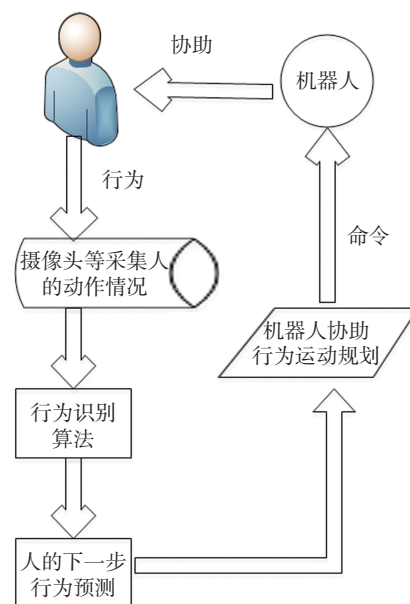


图7 机器人识别人意图工作流程
Fig.7 Workflow of human's intention recognition by robot

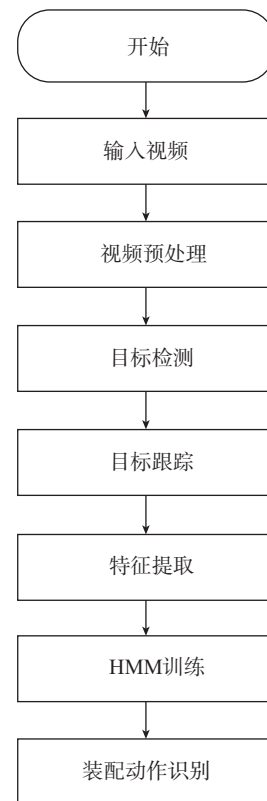


图8 隐马尔科夫模型动作识别算法
Fig.8 Hidden Markov model motion recognition algorithm

夫的训练模型中,实现隐马尔科夫模型实时更新^[32]。

FSN,又称有限状态自动机,简称状态机,是表示有限个状态以及在这些状态之间的转移和动作等行为的数学模型。状态存储关于过去的信息,利用摄像头捕获的装配过程中物体的三维位姿等视觉信息,作为有限状态机的观察值更新有限状态机,只有当对工人装配意图识别概率大于阈值时,才被认为识别了工人的意图^[33-34]。

kNN 是通过测量不同特征值之间的距离进行分类。应用于人机协作对工人意图识别上,通常利用摄像头采集工人手势或者姿势的坐标,作为动作模板,利用 kNN 方法进行分类。当工人姿态与模板差异在设定阈值范围内时,机器人对工人提供相应协助;而当工人出现和模板差异较大的动作的时候,机器人认为工人处于异常状态,此时机器人对工人提供其他支持^[35]。

在人机协作装配过程中,机器人通过对人意图的识别,提高了机器人对周围环境的认知,保证了机器人作业的协调性。除了考虑机器人对人的意图识别,从另一个角度也可将工人间的常见的装配交流动作应用于人机之中从而形成直觉化的人机协作。从应用方法统计结果来看,对动作的识别多采用隐马尔科夫 kNN、RNN 以及神经网络^[36-37] 等机器学习的方法实现,因此在工程领域应用扩展神经网络等机器学习的方法也

是未来的方向。除了上述介绍的方法,近年也出现了使用人脑电信号来控制工业机器人实现人机交流^[38] 等较新颖的方法,因此跨生物学科考虑人机意图识别也有重要研究意义。

人机协作路径规划

在人机共享的环境中,对机器人的避障研究是必不可少的。而在人机协作装配系统中出于装配的目的,对机器人的路径规划将不同于传统工业机器人的路径规划。传统工业机器人的路径规划主要以防撞为目的,即是为了保证工人安全或减少对装配环境的伤害为目的进行的,而协

作机器人的路径规划不仅要保障工人的安全,还需考虑装配任务执行时间^[39]。在人机协作装配过程中,对机器人有效的运动规划,不仅保障了人的安全,又实现了对人机资源的有效调度^[40]。通常有以下几种方法实现人机协作装配中机器人的路径规划。

(1) 实时计算工人身体占据工作空间的置信区间,通过估计不同的机器人轨迹经过人附近所需执行时间的置信区间,从而优化路径。如图 9^[41] 所示,机器人如果穿过工人工作区域,运动会减慢或停下,在该轨迹实际执行时间会变长;而当机器人在远离工人工作区域穿行时,路

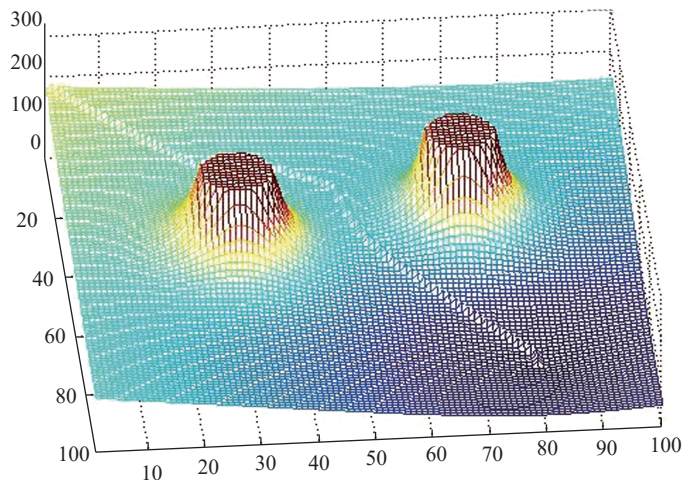


图10 机械臂的路径规划结果三维图
Fig.10 3D map of the path planning result of the manipulator

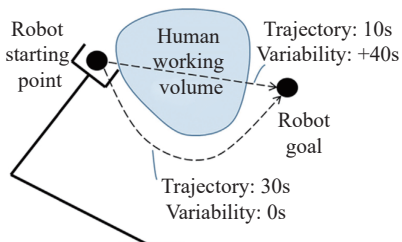


图9 机器人实现目标的不同轨迹
Fig.9 Different paths for robots to achieve their goals

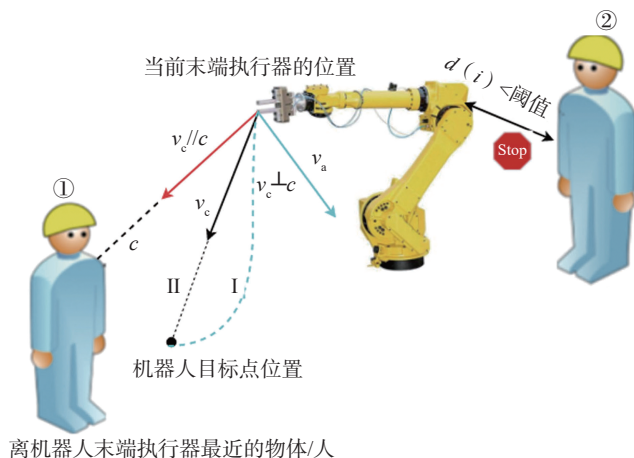


图11 避障模型
Fig.11 Obstacle avoidance model

程较长,但无需等待。

(2)可通过多传感器实时感知监测人机协作装配区域,对获取到的环境数据进行防撞计算,将计算结果用于机器人的路径规划。比如可采用具有高分辨率的深度传感器,测量人体和机器人之间的距离,通过人工势场计算排斥力用于避免人机碰撞,从而生成机器人的路径,如图10所示^[42]。应用势场法规划出来的路径一般是比较平滑并且安全的^[43],但是这种方法存在局部最优点问题。

(3)通过增强现实的方法实现人机路径规划。在增强现实环境下,处理由真实传感器驱动的机器人的虚拟模型和障碍物的三维点云数。实时检测人或障碍物的深度图像与虚拟机器人的三维模型之间的碰撞情况,根据碰撞情况进行路径修正,编程控制机器人主动避障,实现路径规划,如图11所示^[44]。

(4)上述算法,在面对一个新的路径规划问题时,都要从零开始计算,进行迭代,对于路径规划问题本身没有智能化的认识,缺乏泛化的能力。应用有监督学习的神经网络来创建动态避障所需的路径点,这些点与用于平滑运动的五次多项式函数连接,该函数使用最小二乘法来优化以计算最优轨迹。监督学习的研究进展使得在原始图像上进行路径规划,实现端到端的具有学习泛化能力的模型成为可能,如图12所示^[45]。

对于人机协作装配系统,尽管工人知道机器人会按照自动规划的路径运动,不会伤害到自己,但面对逼近的机器人仍旧会感到焦虑或害怕。基于此,在路径规划的同时,机器人可通过视觉或声音将机器人的行为信息反馈给人,让人对机器人的行为有所了解,缓解人的不安情绪^[46]。同时,人机协作生产系统中,对与机器人的路径规划问题,可将其与对人意图识别问题一起考虑^[47]。比如若机器人知道工人下一阶段的动作意图,那么机

器人会对自身的目标路径有更合理的规划^[48-50]。上述方法通常用于较单一的一人一个机器人的协作装配模式,实际生产系统环境复杂,未来可能会有多人多机器人一起协作,一对一的路径规划不适用于这种情况,因此而对多人多机器人的路径规划问题有很大的研究空间。未来应对复杂的装配环境和装配任务,人机协作路径规划应更具灵活性和适应性。

人机协作装配系统安全设计

1 硬件设施

在人和机器人协作的装配区域,保障人的安全是最重要的。传统的工业生产中,人和机器人是被隔离开的,人机协作则要求机器人与工人在同一空间中工作,打破了以往的相互隔离,同时也不可避免地给工人安全带来了威胁。为了在工业制造环境中安全地使用机器人,国际标准化组织已制定了一系列相关安全标准,比如针对工业机器人的ISO 10218-1和ISO 10218-2^[51],以及针对协作机器人的ISO/TS 15066^[52]。在满足上述安全标准的前提下,防止人机协作装配过程中机器人对工人造成伤害,主要有以下3条措施。

(1)在硬件设施上安装光幕/激

光扫描仪或安全围栏^[53],安全围栏一般带有光电传感器,光幕和激光扫描仪常用来提示系统工人要进入机器人的工作区域。

(2)将生产系统区域划分为工人操作区、机器人工作区以及人机协作区3个区域,通过设置不同区域的机器人的运动速度保障人的安全^[54]。

(3)在人机协作装配过程中,人和机器人会不可避免发生身体接触,为防止对人体造成伤害,对机器人本身的功率和力限制是十分必要的^[54]。如图13中的KUKA iiwa机器人可以检测到外围的碰撞或者挤压,因此在装配时不会由于操作人员的介入而对人体造成伤害。

2 生产系统安全监控

除了对协作区域进行规划之外,在系统的安全监控上有以下3种方法。

(1)计算工人和机器人之间的最小距离作为安全距离,依赖安全距离实时调节机器人的速度从而保障工人的安全^[55-58],最小距离可通过二者之间的点云或追踪工人骨骼位置和机器人模型得到。

(2)引入系统监控模型,通过对系统实时监控,利用摄像头跟踪工人身体位姿,当工人装配操作姿势不符

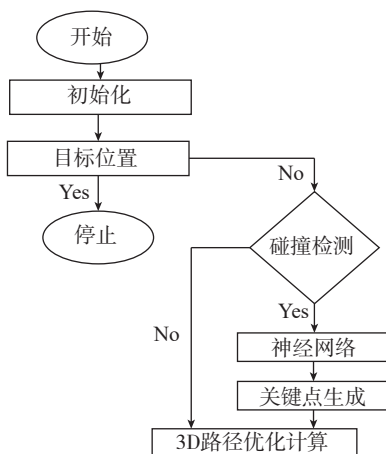


图12 神经网络避障算法
Fig.12 Neural network obstacle avoidance algorithm



图13 对机器人的力和功率限制
Fig.13 Limitations on power and force of the robot

合安全规范时,对工人提出警告^[59]。

(3)对系统进行风险评估,风险评估是在机械和机器人系统的安全标准的指导下,以生产线上的工人的安全为目的,评估人着重于应对风险的实际解决方案的过程^[60]。记录系统中所有可能的风险,如设备故障等,以方便采取相应措施来减少对工人安全的威胁^[61]。

在生产系统中的人机协作装配任务,应时刻保障工人的生命安全,在系统中添加硬件设施保护是第一道屏障,在装配任务过程中对生产系统进行安全监控是第二道屏障。双重屏障之下,人机协作会更为安全有效,在安全的环境下工作,人会感觉更舒适,也会提高工作效率^[62]。

结论

本文通过对近 10 年的人机协作装配类的论文的总结,归纳了近年来人机协作装配研究的重点/热点,对这 4 个热点的现状进行了展开描述,并对它们的发展趋势进行了分析。要实现一个完整有效的人机协作系统还有以下方面需要深入研究。

(1)从多维度思考人机协作装配任务分配策略,不仅考虑实际物理装配情况,还需参考装配工人和机器人一起协作时的心理状态,在进行任务分配时引入信任等模型也是很有价值的。

(2)设计人机协作装配系统时,综合考虑这 4 个问题,如在进行人机任务分配时,为了方便机器人移动,考虑机器人的路径规划等。

(3)保障人类的安全是第一前提,而如何在系统的设计阶段将人的安全问题考虑进去,实现系统的安全运行也是值得考虑的方向。

(4)人机共融是未来的趋势,人和机器人以更加紧密、协调的关系完成装配任务,未来的机器人发展一定是人、机、环境共融的机器人。人发挥人的优势,机器发挥机器的优势,

各种环境、操作者和机器人自然交互,完成复杂的工作。

总体来说,人机协作应用在生产系统装配上还不足以满足工业要求的鲁棒性和可靠性。因此,在保证工人安全的前提下,提高人机协作系统的稳定性和机器人的智能性至关重要。同时,如何评估人机协作系统尚未有国际标准,未来的工作也会将重点放在人机协作系统的评估上。

参考文献

- [1] MATTHIAS S, RAINER M. Modular configuration and control concept for the implementation of human-robot-cooperation in the automotive assembly line[J]. IFAC-Papers OnLine, 2017, 50(1): 5694–5699.
- [2] ROLF B, DRAGOLJUB S, VOLKER K, et al. Flexible assembly systems through workplace-sharing and time-sharing human-machine cooperation (PISA)[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2007, 40(1): 85–89.
- [3] LEMMERZ K, GLOGOWSKI P, HYPKI A, et al. Functional integration of a robotics software framework into a human simulation system[C]// Proceedings of ISR 2018—50th International Symposium on Robotics. Frankfurt: VDE, 2016.
- [4] FECHTER M, SEEBER C, CHEN S J. Integrated process planning and resource allocation for collaborative robot workplace design[J]. Procedia CIRP, 2018, 72: 39–44.
- [5] PANAGIOTA T, SOTIRIS M, GEDRGE M, et al. ROS based coordination of human robot cooperative assembly tasks—an industrial case study[J]. Procedia CIRP, 2015, 37: 254–259.
- [6] HEYDARYAN S, BEDOLLA J S, BELINGARDI G. Safety design and development of a human-robot collaboration assembly process in the automotive industry[J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 344–365.
- [7] SCHÖBERGER D, LINDORFER R, FROSCHAUER R. Modeling workflows for industrial robots considering human-robot-collaboration[C]// Proceedings of 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics. New York: IEEE, 2018.
- [8] TAN J, DUAN F, ZHANG Y, et al. Task modeling approach to enhance man-machine collaboration in cell production[C]// Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2009.
- [9] DARVISH K, BRUNO B, SIMETTI E, et al. An adaptive human-robot cooperation framework for assembly-like tasks[C]// Proceedings of 3rd Workshop on Artificial Intelligence and Robotics. New York: IEEE, 2016.
- [10] TAN J T C, DUAN F, ZHANG Y, et al. Task decomposition of cell production assembly operation for man-machine collaboration by HTA[C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics. New York: IEEE, 2008.
- [11] JOHANNSMIEIER L, HADDADIN S. A hierarchical human-robot interaction-planning framework for task allocation in collaborative industrial assembly processes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(1): 41–48.
- [12] HAYAKAWA Y, OGATA T, SUGANO S. Flexible assembly work cooperating system based on work state identifications by a self-organizing map[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004, 9(3): 520–528.
- [13] ARGYROU A, GIANNOULIS C, PAPAKOSTAS N, et al. A uniform data model for representing symbiotic assembly stations[J]. Procedia CIRP, 2016, 44: 85–90.
- [14] DUAN F, TAN J T C, TONG J G, et al. Application of the assembly skill transfer system in an actual cellular manufacturing system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(1): 31–41.
- [15] RAINER M, MATTHIAS V, OOTWIN M. Process-oriented task assignment for assembly processes with human-robot interaction[J]. Procedia CIRP, 2016, 44: 210–215.
- [16] MATEUS J E C, AGHEZZAF E H, CLAEYS D, et al. Method for transition from manual assembly to human-robot collaborative assembly[J]. IFAC-Papers OnLine, 2018, 51(11): 405–410.
- [17] MICHALOS G, KOUSI N, KARAGIANNIS P, et al. Seamless human robot collaborative assembly an automotive case study[J]. Mechatronics, 2018, 55: 194–211.
- [18] MULLER R, VETTE M, GEENEN A. Skill-based dynamic task allocation in human-robot-cooperation with the example of welding application[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 11: 13–21.

- [19] HUBER M, LENZ C, WENDT C, et al. Increasing efficiency in robot-supported assemblies through predictive mechanisms: An experimental evaluation[C]// Proceedings of 2013 IEEE RO-MAN. New York: IEEE, 2013.
- [20] SADRIFARIDPOUR B, WANG Y. Collaborative assembly in hybrid manufacturing cells: an integrated framework for human-robot interaction[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(3): 1178–1192.
- [21] WU B, HU B, HAI L. Toward efficient manufacturing systems: a trust based human robot collaboration[C]// Proceedings of American Control Conference. New York: IEEE, 2017.
- [22] FABER M, KUZ S, MERTENS A, et al. Model-based evaluation of cooperative assembly processes in human-robot collaboration[M]. Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future. West Berlin: Springer, 2016.
- [23] BLANKEMEYER S, RECKER T, STUKE T, et al. A method to distinguish potential workplaces for human-robot collaboration[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 171–176.
- [24] CHEN F, SEKIYAMA K, CANNELLA F, et al. Optimal subtask allocation for human and robot collaboration within hybrid assembly system[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(4): 1065–1075.
- [25] LIU T T, WANG J L, MENG Q H. Evolving hidden Markov model based human intention learning and inference[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. New York: IEEE, 2016.
- [26] ANDREA M Z, ROCCO P. Probabilistic inference of human arm reaching target for effective human-robot collaboration[C]// Proceedings of 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2017.
- [27] ZANCHETTIN A, CASALINO A, PIRODDI L, et al. Prediction of human activity patterns for human-robot collaborative assembly tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(7): 3934–3942.
- [28] KIMURA H, HORIUCHI T, et al. Human robot cooperation for mechanical assembly using cooperative vision system[C]// Proceedings of 2nd International Workshop on Cooperative Distributed Vision. 1998.
- [29] ZHU H J, VOLKER G, DIRK W. Legible action selection in human-robot collaboration[C]// Proceedings of 26th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. New York: IEEE, 2017.
- [30] COUPETÉ E, MOUTARDE F, MANITSARIS S. Gesture recognition using a depth camera for human robot collaboration on assembly line[J]. Procedia Manufacturing, 2015, 3: 518–525.
- [31] BERG J, RECKORDT T, RICHTER C, et al. Action recognition in assembly for human-robot-cooperation using hidden Markov models[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 205–210.
- [32] LIU H Y, WANG L H. Human motion prediction for human-robot collaboration[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 44: 287–294.
- [33] DING H, SCHIPPER M, MATTHIAS B. Collaborative behavior design of industrial robots for multiple human-robot collaboration[C]// Proceedings of International Symposium on Robotics. New York: IEEE, 2013.
- [34] LIU T T, WANG J L, MENG Q H. Human robot cooperation based on human intention inference[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. New York: IEEE, 2014.
- [35] HAYAKAWA Y, OGATA T, SUGANO S. A robotic cooperation system based on a self-organization approached human work model[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2000.
- [36] 常玉青. 人机协作中基于多 Kinect 的人体行为识别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- CHANG Yuqing. The Research on human behavior recognition based on multi-kinect in human-machine cooperation[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [37] BROOKS C, ATREYA M, SZAFIR D. Proactive robot assistants for freeform collaborative tasks through multimodal recognition of generic subtasks[C] // Proceedings of 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2018.
- [38] MOHAMMED A, WANG L H. Brainwaves driven human-robot collaborative assembly[J]. CIRP Annals, 2018, 67(1): 13–16.
- [39] PELLEGRINELLI S, ORLANDINI A, PEDROCCHI N, et al. Motion planning and scheduling for human and industrial-robot collaboration[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 1–4.
- [40] SADRIFARIDPOUR B, SAEIDI H, WANG Y. An integrated framework for human-robot collaborative assembly in hybrid manufacturing cells[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. New York: IEEE, 2016.
- [41] PELLEGRINELLI S, MORO F L, PEDROCCHI N, et al. A probabilistic approach to workspace sharing for human-robot cooperation in assembly tasks[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 57–60.
- [42] CHEN F, DI P, HUANG J, et al. Evolutionary artificial potential field method based manipulator path planning for safe robotic assembly[C]// Proceedings of International Symposium on Micro-nanomechanics & Human Science. New York: IEEE, 2009.
- [43] 刘维惠, 陈殿生, 张立志. 人机协作下的机械臂轨迹生成与修正方法[J]. 机器人, 2016, 38(4): 504–512.
- LIU Weihui, CHEN Diansheng, ZHANG Lizhi. Manipulator trajectory generation and correction method under man-machine cooperation[J]. Robot, 2016, 38(4): 504–512.
- [44] SCHMIDT B, WANG L H. Depth camera based collision avoidance via active robot control[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2014, 33(4): 711–718.
- [45] MAHER A, SANIKA G, FILLIA M. A collaborative assembly task to assess worker skills in robot manufacturing environments[C]// Proceedings of the 11th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments Conference. New York: ACM, 2018.
- [46] MEZIANE R, OTIS M, EZZAIDI H. Human-robot collaboration while sharing production activities in dynamic environment: SPADER system[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 48: 243–253.
- [47] 陈龙新, 曾翔, 吴鸿敏, 等. 基于模仿学习的人机协作的研究[J]. 机械工程与自动化, 2018(5): 15–17.
- CHEN Longxin, ZENG Xiang, WU Hongmin, et al. An imitation-learning based human-robot collaboration[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2018(5): 15–17.
- [48] BOLANO G, ROENNAU A, DILLMANN R. Transparent robot behavior by adding intuitive visual and acoustic feedback to motion replanning[C]// Proceedings of 2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication. New York: IEEE, 2018.
- [49] VAIBHAV V U, PRZEMYSŁAW A

L, TYROLLER Q, et al. Human-aware robotic assistant for collaborative assembly: integrating human motion prediction with planning in time[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. 2018, 3(3): 2394–2401.

[50] MAINPRICE J, BERENSON D. Human-robot collaborative manipulation planning using early prediction of human motion[C] // Proceedings of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2014.

[51] WOJTARA T, UCHIHARA M, MURAYAMA H, et al. Human-robot collaboration in precise positioning of a three-dimensional object[J]. Automatica, 2009, 45(2): 333–342.

[52] GOPINATH V, ORE F, GRAHN S, et al. Safety-focussed design of collaborative assembly station with large industrial robots[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 25: 503–510.

[53] GOPINATH V, JOHANSEN K, GUSTAFSSON A, et al. Collaborative assembly on a continuously moving line—an automotive case study[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 17: 985–992.

[54] SCHAFT R D, MEYER C, PARLITZ C, et al. PowerMate-A safe and

intuitive robot assistant for handling and assembly tasks[C]// Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2005.

[55] MARTIN J R, TESSA J P, JORG K. Human robot collaboration-using kinect v2 for ISO/TS 15066 speed and separation monitoring[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 183–186.

[56] BOBKA P, GERMANN T, HEYN J K, et al. Simulation platform to investigate safe operation of human-robot collaboration systems[J]. Procedia CIRP, 2016, 44: 187–192.

[57] 姚湘, 徐平平, 王华君. 基于深度图像检测的机器人碰撞避免方案[J]. 控制工程, 2017, 24(7): 1514–1518.

YAO Xiang, XU Pingping, WANG Huajun. Design of robot collision avoidance security scheme based on depth image detection[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(7): 1514–1518.

[58] JHEN J H, HUANG CH N, WANG H W, et al. Safety-based human-robot collaboration in cellular manufacturing: a case study of power protector assembly[C]// Proceedings of 2013 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems.

New York: IEEE, 2013.

[59] CARLOS W M, KRISHNANAND N K, SATYANDRA K G. System state monitoring to facilitate safe and efficient human-robot collaboration in hybrid assembly cells[C]// Proceedings of ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2017.

[60] NICKOLAY B. Image based 3D surveillance for flexible man-robot-cooperation[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 19–22.

[61] GOPINATH V, ORE F, JOHANSEN K. Safe assembly cell layout through risk assessment—an application with hand guided industrial robot[J]. Procedia CIRP, 2017, 63: 430–435.

[62] BERG J, RECKORDT T, RICHTER C, et al. Action recognition in assembly for human-robot-cooperation using hidden markov models[J]. Procedia CIRP, 2018, 76: 205–210.

通讯作者: 范秀敏, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为数字化装配、虚拟/增强现实、智能制造等, E-mail: mfan@sjtu.edu.cn.

A Review on Human-Robot Time-Space Sharing Collaborative Assembly Technology

XIAO Mingzhu, ZHU Wenmin, FAN Xiumin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] With the development trend of intelligent manufacturing, the production process of products is becoming more and more flexible. Human-robot collaboration with high flexibility and automation level has become a research hotspot of manufacturing industry. In product assembly, the assembly operation with high flexibility and complex operation still needs to be finished by human, while the robot has the advantages of good repeatability, high load and high accuracy. In time and/or space sharing environment, robots are used to assist workers in assembly, which will reduce ergonomic pressure and workload, and achieve complementary advantages. Based on these understandings, this paper summarizes the research of human-robot collaborative assembly with time-space sharing. This paper reviews the current research status of the four hot spots developed around by scholars in recent years, namely, task allocation for human-robot collaboration, intention recognition for human-robot collaboration, path planning for human-robot collaboration, and safety design for human-robot collaborative assembly system. The development trend of these four aspects is discussed and prospected.

Keywords: Human-robot collaboration; Assembly; Task allocation; Intention recognition; Path planning; Safety

(责编 知舟)