



工业机器人运用技术*

文 / 杨桂林

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 宁波 315201

【摘要】工业机器人运用技术是指在现有工业机器人的基础上所研发的应用技术,其主要目的是增强工业机器人的感知适应能力、降低用户使用难度、缩短示教与编程时间、提高工业机器人的运动精度以及拓宽其应用范围。然而,工业机器人运用技术一直以来没有得到足够的重视,造成工业机器人的设计制造与应用需求脱节,不仅限制了工业机器人的应用和普及,也制约了工业机器人产业自身的大规模发展。文章针对现有工业机器人在制造自动化应用中所存在的问题,系统地归纳和分析了工业机器人运用技术的重点研究方向,主要包括:提高易用性的直觉示教与快捷编程、提高绝对定位精度的运动标定与误差补偿以及拓宽应用范围的力-运动混合控制等关键共性技术。部署和实施相关技术的研发对于提高我国工业机器人的运用水平、加快制造业向智能化升级的步伐具有重要的意义。

【关键词】工业机器人,运用技术,示教编程,误差补偿,力-运动混合控制

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.06.012

1 研发背景

机器人产业已被普遍认为是继汽车、计算机之后又一个能够改变人类工作和生活的重大高新技术产业,已成为世界主要发达国家的战略必争之地。作为机器人领域的排头兵,工业机器人具有灵活度高、工作空间大、运动平稳性好、重复定位精度高等优点,从20世纪60年代问世以来就显示出了极强的生命力,已在制造自动化领域得到了

非常广泛的应用。经过多年的不断完善和发展,工业机器人的几个主要技术性能指标(如工作空间、承载能力、运动速度和重复定位精度等)都有了大幅度的提升,而产品价格只有20世纪90年代的1/4。因此,如果只把工业机器人作为一个多自由度的运动控制系统进行重复性的点到点定位操作或是实现简单的连续轨迹运动,其技术性能指标以及性能-价格比已达到了一个比较合理的程度。然而,如图1所示,当今制造业对机器人自动化的需求已不仅仅是只实现一些

* 修改稿收到日期:2015年11月4日



图1 工业机器人应用

简单的运动,有更多的任务是需要机器人实现复杂运动轨迹、连续接触式操作以及小批量、多品种的柔性化生产。因此,工业机器人不仅要有良好的运动性能,还要有对工作对象和环境的感知适应能力、实现复杂运动轨迹的快速示教编程功能、接触力控制功能以及多机器人协调控制功能。由于现有工业机器人还存在着一些技术上的问题和不足(图2),难于满足当今制造业尤其是中小企业对机器人自动化的应用需求,在很大程度上限制了工业机器人的应用范围和产业自身的发展。



图2 工业机器人存在的主要技术问题

据国际机器人联合会统计^[1],虽然经过近几年两位数的高速增长,2014年全世界工业机器人的总销售量也只有22.9万台,其中我国的销量为5.7万台。另一方面,我国每1万个工人拥有的机器人只有36台,比韩国(478台)、日本(374台)、德国(292台)和美国(164台)少很多。原因之一就是当今的工业机器人仍难于使用,而我国制造业尤

其是中小企业又缺乏熟练使用工业机器人的员工,有些甚至出现了“买的起,不会用”的局面^[2]。正因如此,国际机器人联合会在2015年的年报中也将能够简化工业机器人使用的技术列为未来几年的重点发展方向。

综上所述,为了充分发挥工业机器人在我国制造业转型升级中的核心地位,除了加快发展工业机器人产业以外,还要重点研发工业机器人的运用技术,以提高我国工业机器人的运用水平。当前,工业机器人运用技术的主要研发方向包括:直觉示教与快捷编程、运动标定与误差补偿和力-运动混合控制等共性关键技术。

2 直觉示教与快捷编程技术

工业机器人的编程方式主要有离线编程和在线编程两种,其中离线编程是基于工件数模生成机器人的运动轨迹和控制程序,具有编程效率高的优点。除了工业机器人的生产商所提供的专用离线编程软件以外,还有许多通用的第三方离线仿真和编程软件(如RobCAD、Delmia Robotwork、Workspace等)以及一些开源软件^[3],但其实用性依赖于两个先决条件:一是要有工件的三维数字模型,二是机器人的绝对定位精度和工件的安装精度要非常高。而上述两个条件尤其是第二个条件在实际工作中很难满足。因为工业机器人虽然重复定位精度高,但受制于机器人零部件的制造、装配以及整机的现场安装误差等因素,其绝对定位精度差。此外,工件的安装也会存在一定的误差。因此,如果不进行机器人的标定和误差补偿,离线编程方法难于在高精度作业中得到实际的应用。而基于示教器的在线编程模式虽然不依赖于上述两个条件,但传统的手持示教器示教效率低,例如,大型汽车车体生产厂商通常要花费几个月的时间进行电弧焊接机器人的编程,而整个焊接过程中机器人的工作时间却仅为十几个小时。虽然这种情况对于大批量汽车制造还勉强能够接受,但对于制造业中越来越普遍的多品种、小批量的柔性化生产则难于得到有效实施。再有,

传统的示教方法还存在示教精度差和安全性不好等缺点,无法胜任高精度连续运动轨迹的快捷示教和编程。

近年来,随着视觉、触觉及激光测距等传感器技术的进步,多传感信息融合技术和增强现实技术都得到了快速发展,从而为研发高效、准确、直观的示教和编程技术提供了良好的条件。目前直觉在线示教与快捷编程技术的研究主要集中在以下3个方向。

(1)基于手动牵引的直觉示教方法。该方法的基本工作原理是将操作者的手动牵引力通过安装于机器人关节或末端的力/力矩传感器按操作者施力的大小和方向转换成机器人速度或位置控制信号,这样机器人就可以随着操作者的手动牵引而运动,同时记录运动轨迹,从而实现手动牵引的直觉示教^[4]。目前美国的 Barreel、德国 KUKA 的 IIWA 及日本 YASKAWA 的 Motoman 等机器人都采用以力/力矩传感器为基础的手动牵引示教方法^[5]。但这种示教方法通常需要配置价格较为昂贵的力/力矩传感器,而且由于操作人员必须与机器人直接接触,因此对机器人操作安全性有较高的要求。此外,该方法的示教编程精度也较低。

(2)基于多传感器融合的示教方法。为了提高示教的效率、精度和操作安全性,多传感信息融合技术已经被应用于工业机器人的示教编程,比如融合了视觉传感器与激光测距传感器信息的示教方法在没有工件三维数字模型的情况下,也可以通过一个具有人机交互功能的图形界面,直觉、方便地进行机器人的示教编程^[6-9];而融合了视觉、激光测距和工件数模信息的示教方法则实现了增强现实技术在工业机器人准确示教和快速编程上的应用^[10],该方法还可以进一步与离线编程的方法相结合,进一步提高编程效率,而且无需进行机器人的标定。

(3)基于人工演示的直觉示教方法。此方法主要以示教笔代替传统的示教器,通过在示教笔上加装定位用的标识,当操作者手持示教笔沿着目标轨迹运动时,示教笔的实际运动就可以被一个基于视觉的运动追踪系统捕获,实现运动轨迹的直觉示教。最近的研究开始将手势、语音、触觉等信息^[11,12]引入人工演示,实现了多模态接口,使得示教编程输入方法更直观和自然。然而,由于人工演示的精度偏低,该方法尚不适合高精度的示教编程。随着机器人在抛光打磨等连续接触性操作领域的应用,如何捕捉和转化技工的实际操作技巧实现力-运动混合的示教和编程是未来工业机器人示教的重要研究方向。

在国外,基于手动牵引的直觉示教方法已经应用了部分工业机器人产品,而基于多传感器融合的示教方法以及基于人工演示的示教编程方法,也开始受到了相当程度的重视。而在国内,虽然针对基于手动牵引^[13]以及基于视觉信息等的示教方法^[14]开展了一些研究工作,但这些方法尚停留在实验室阶段,还未得到实际的工业应用。

3 运动标定与误差补偿技术

工业机器人通常具有较高的重复定位精度(0.1毫米左右),但是由于机器人组成零部件的制造和装配误差、现场的安装误差以及工件的安装误差等,使得工业机器人的绝对定位精度较差(一般为几个毫米),严重影响了机器人离线编程的运动控制精度,因此必须设法予以补偿。传统上是采用基于机器人误差模型的离线运动学标定方法找出机器人系统的几何误差^[15,16],而后根据这些辨识的误差对机器人运动学模型进行修正。然而,这种方法的主要问题是:(1)难于直接修正机器人控制器内建立的运动学模型;(2)需要精密仪器测量机器人的实际



中国科学院

位姿。针对第一个问题,研究人员提出了一种基于机器人标定参数的目标位姿前处理算法,实现了在不改变机器人运动学模型前提下进行在线补偿误差^[15]。针对第二个问题,当前的研发热点是建立新的误差模型并研制面向误差模型的便携式测量装置^[17],从而达到简化标定方法、降低测量装置成本的目的。

近年来,随着三维数字化扫描技术在机器人领域的应用,研究人员开始研究基于工件几何特征的机器人在线误差补偿方法^[18]。该方法类似于移动式机器人的定位导航方法,首先需要在机器人的末端安装一个三维数字化扫描装置,当机器人末端接近工件时,三维数字化扫描装置就会得到实际工件的局部几何特征或是云点坐标,进而通过比对在理论模型条件下工件的局部几何特征或是云点坐标在三维扫描装置坐标系的描述,可以较为准确地确定机器人末端相对于实际工件的运动误差,而这一误差可以直接用来对机器人系统进行在线误差补偿,提高运动控制精度。这是一种无需机器人误差模型,简单实用的局部误差补偿方法,具有广泛的应用前景。

当前的机器人标定和误差补偿主要是针对机器人系统的几何误差,很少考虑机器人刚度和外载荷对机器人定位精度的影响。为了进一步提高机器人的绝对定位精度,最新的研究开始考虑机器人的刚度、载荷等非几何误差对机器人的精度影响。通过采用机器学习算法建立机器人系统的综合误差模型,实现了工业机器人几何误差与非几何误差的一体化补偿^[19,20]。

国内在机器人标定和误差补偿方面的研究工作比较欠缺,已开展的研究主要集中在机器人运动学离线标定方法方面,虽有学者提出采用视觉的方法实现机器人在线误差标定,但是效果还不理想,而基于三维扫描装置和云点匹配的在线误差补偿方法的研究工作尚未见报道。

4 力-运动混合控制技术

现有的工业机器人基本上是为了执行运动学

任务而设计的,主要用于如上下料、焊接和喷涂等非连续接触式的工作。随着工业机器人技术的发展,制造业开始尝试利用工业机器人进行一些连续接触式的表面加工和后处理任务^[21,22],如去毛刺、抛光和打磨等。因材料的去除率和刀具与工件的接触力大小直接相关,完成高质量的连续接触式加工任务不仅要实现刀具沿接触面法线方向的力控制,同时也要实现其他方向的运动控制,也就是要实现力-运动混合控制。然而,现有的工业机器人大多没有力控制功能,在很大程度上限制了机器人在连续接触式加工方面的应用。

工业机器人力控制的方法主要有两种,即通过控制机器人操作臂的驱动关节的力矩实现直接力控制和通过控制一个附加的末端力控装置实施的间接力控制。两种方法各有其优缺点:前者主要是通过机器人系统的力控制算法实现的,需要针对具体的机器人结构建立准确的机器人动力学模型,并开发实时、鲁棒的力控制算法;而后者则需要增加一个具有力控制功能的末端执行装置,虽然系统成本略有增加,但由于特别设计的末端执行器具有良好的动力学特性(如质量小、动态响应快),易于实现高性能的接触力控制,而且通用性好。在一定程度上,前者更适用于新一代轻量化机器人的力控制,而后者更适用于传统的高速重载工业机器人系统。

机器人操作臂的力-运动混合控制主要有两种方法,即基于关节空间动力学模型的阻抗控制方法和基于操作空间动力学模型的直接力控制方法。阻抗控制方法的特点是在建立了机器人末端位移与接触力关系的基础上,通过调节驱动关节的阻尼或者刚度等参数实现机器人末端的力-运动混合控制。德国宇航局(DLR)的轻量化机器人是采用这类阻抗控制方法的典型代表,通过动力学模型将需要控制的力与位置映射至驱动关节空间,并采用PD控制器调整驱动关节的阻抗(包括刚度),实现了系统的力-运动混合控制。当阻抗很小时为力控制模式,而当阻抗很大时即为位置

控制模式。然而,由于关节阻抗控制对于工况(转速和载荷)变化较为敏感,如果控制器参数选择不好,系统会出现振动等不稳定现象。

基于操作空间动力学模型的直接力控制方法通常是由一个闭环力-运动混合控制器直接采集工作空间的力与运动参数进行反馈控制实现的。由于是通过操作空间动力学模型确定关节空间的控制量,这样大大减少了关节控制的扰动因素,因而达到了较好的力控制效果,提高了系统的控制精度和稳定性^[23]。此外,该力-运动混合控制方法的通用性好,既适用于非冗余机器人也适用于冗余机器人。然而,实施该方法的主要难度是需要有较为精确的操作空间动力学模型,因而机器人系统动力学参数的准确辨识尤为重要。

由于工业机器人制造商出于安全等因素的考虑,机器人的控制器是不开放给用户的。此外,对于高速重载机器人,即便是采用系统辨识的方法也很难得到精确的动力学模型。因此,要实现工业机器人的高精度力控制,在机器人的末端加上一个专门设计的力控装置是较为实用的解决方案。通过采用简单的主仆控制策略,即机器人操作臂的运动控制为“主”而末端执行器的力控制为“仆”,既可避免改变操作臂运动控制器的麻烦,也简化了末端力控装置的控制算法。结合已有的机器人运动规划方法和所需接触力控制的要求,机器人系统的力-运动混合控制可实现局部的解耦控制,提高了系统的通用性和易用性。

目前实际应用的末端力控装置主要有主动式和被动式两种:被动式末端力控装置属于开环控制,不能在线调整力的大小,它只能用于精度要求不高的材料去除加工场合;而主动式的末端力控装置则不同,它可以通过闭环控制器主动调节接触力的大小

以实现高精度力控制,可适用于精度要求高的表面后处理加工。然而,现有的末端力控装置一般采用单自由度的气动驱动机构,其灵活度不高,响应速度较慢,存在较为严重的迟滞,力控制精度也较低。目前的研究主要集中在基于并联机构的电动式多自由度末端力控装置,它具有质量小,转动惯量小,精度高和动态相应快的优点,在系统中即可实现方向可调的主动力控制,又可用来补偿机器人系统的运动误差,提高位置控制精度。为了达到更高的精度要求,提高系统的动态响应,新型的末端力控装置通常采用压电陶瓷及音圈电机等驱动方式。在执行机构方面,基于柔性并联机构超高精度末端力控装置也开始得到重视。

国内在力-运动混合控制技术的研发方面起步较晚,虽然最近在力-运动混合控制技术方面也开展了一些研究工作,如在未知环境下的力位置混合控制技术以及力-位置控制过程中的冲击震荡问题,但尚未得到实际的工业应用,末端力控装置的研究方面也没有实用的研究成果。

5 工业机器人运用技术的新趋势

随着信息技术,特别是互联网技术、感知技术和传感器网络技术的快速发展,工业机器人运用技术也在不断地更新,它呈现了以下主要趋势。

(1)网络化特征增强。传统的工业机器人仅局限于本地操作,而当今的工业机器人不仅需要通过互联网实现远程在线监控和故障诊断,更多的要通过互联网实现远程控制与操作。

(2)群体作业能力增强。对于复杂的作业任务,往往需要多机器人的互相配合才能完成,因此基于局域网的多机器人信息共享和协调控制将得到更普遍的应用。

(3)对半结构化作业环境的适应能力增



中国科学院

强。传统的工业机器人对作业环境的感知能力差,仅适用于工况确定的结构化环境。先进的感知技术(如低成本的三维快速扫描与重构技术)将有效地增强工业机器人对半结构化作业环境的感知和适应能力。

(4)虚实融和能力增强。虚实融合技术已经开始在工业机器人的直觉示教与快速编程中得到初步的应用,而今后虚实融合技术将与工业机器人离线仿真编程软件结合,实现硬件在线的仿真、编程与控制,从而提高机器人的动态调整和适应能力。

(5)模块化应用程序增多。随着工业机器人的不断普及产业竞争加剧,工业机器人制造商将逐步开放控制器,从而催生由第三方开发的各类模块化应用程序,提高机器人的易用性。

6 结论

机器人与智能制造技术代表着一个国家制造业的发展水平,已成为世界发达国家的重点发展领域和产业必争之地。然而,作为工业机器人技术重要组成部分的运用技术却未得到足够的重视,影响了工业机器人的应用和普及,也制约了工业机器人产业自身的大规模发展。虽然我国从2013年开始就成为了工业机器人销量最大的国家,并出现了大规模投资机器人产业的热潮,然而国内大多数的企业尤其是中小型企业工业机器人的应用上仍处于较低的水平,难于有效发挥机器人的功用。这种局面如不尽快改善,将影响我国制造业向智能化升级的步伐,同时对我国机器人产业的健康发展也将产生不利的影响。因此,国家相关部门应从资源配置和政策扶持两个层面大力推进工业机器人运用技术的研发,从而降低工业机器人的使用难度、增强其技术性能,拓展其应用范围,早日解决我国机器人产业发展所面临的瓶颈问题。

参考文献

1 Litzenberger G. World Robotics Survey: industrial robots are conquering the world. Frankfurt: IFR Statistical Department Press Re-

lease, 2015.

- 2 Xi N, Yang Y. The rise of the robot industry in China. HKIE Transactions, 2015, 22(2): 98-102.
- 3 Pan Z, Polden J, Larkin N, et al. Recent progress on programming methods for industrial robots. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(2): 87-94.
- 4 Park C, Kyung J H, Do H M, et al. Development of direct teaching robot system. International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence. Korea: IEEE 2011: 730-732.
- 5 Schraft R D, Meyer C. The need for an intuitive teaching method for small and medium enterprises.//International Symposium on Robotics. Munich, Germany: 2006.
- 6 Fang H, Ong S C, Nee A Y. Orientation planning of robot end-effector using augmented reality. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2013, 67(9): 2033-2049.
- 7 Ng C L, Ng T C, Nguyen T A N, et al. Intuitive robot tool path teaching using laser and camera in augmented reality environment.//11th Conference of control, automation, robotics and vision. Singapore: IEEE, 2010:114-119.
- 8 李金泉, 陈善本, 吴林. 基于手眼立体视觉的弧焊机器人平面工件定位系统. 焊接学报, 2003, (04): 9-12.
- 9 李鹤喜. 基于视觉反馈的焊接机器人自主示教关键技术研究. 华南理工大学, 2010.
- 10 Luo H, Ng T C, Yang G, Teck Chew N, Guilin Y. Workpiece Re-Localization for Automatic Robot Path Correction.//The 3rd IF-TOMM International Symposium on Robotics and Mechatronics. Singapore: ISRM, 2013.
- 11 Lambrecht J, Kleinsorge M, Rosenstrauch M, et al. Spatial programming for industrial robots through task demonstration. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10:254-255.
- 12 Jacopo A, Giorgio M, Caselli S. Object interaction and task programming by demonstration in visuo-haptic augmented reality. Multimedia Systems, 2015:1-17.
- 13 游有鹏, 张宇, 李成刚. 面向直接示教的机器人零力控制. 机械工程学报, 2014, (03): 10-17.
- 14 倪自强, 王田苗, 刘达. 基于视觉引导的工业机器人示教编程系统. 北京航空航天大学学报, 2015.

- 15 Tao P Y, Mustafa S K, Yang G, et al. Robot work cell calibration and error compensation//Handbook of manufacturing engineering and technology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014:1-35.
- 16 Yang G, Chen I M, Yeo S H, et al. Simultaneous base and tool calibration for self-calibrated parallel robots. Robotica, 2002, 20:367-374.
- 17 Albert N, Ilian A B. Absolute robot calibration with a single telescoping ballbar. Precision Engineering, 2013, 38: 472-480.
- 18 Tao P Y, Yang G, Tomizuka M. A calibration framework for industrial robotic work cells//IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. Australia: IEEE 2013: 1637-1642.
- 19 Tao P Y, Yang G, Tomizuka M. A Sensor-Based approach for error compensation of industrial robotic workcells// IEEE International conference on robotics and automation riverCentre. Saint Paul, Minnesota: IEEE, 2012: 5240-5245.
- 20 Li P, Hu Y, Chen T. Error compensation for 3D laser scanning system based on neural network //Control and decision conference(CCDC). China: IEEE, 2012:3875-3878.
- 21 Vuong N D, Lim T M, Yang G. Simulation and off-line programming for contact operations//Handbook of manufacturing engineering and technology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014:1-18.
- 22 Vuong N D, Ang V M H, Lim T M, et al. Multi-Rate operational space control of compliant motion in robotic manipulators//IEEE international conference on systems, man and cybernetics. San Antonio: IEEE, 2009:3175-3180.

Applied Industrial Robotics

Yang Guilin

(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences,
Ningbo 315201, China)

Abstract Applied Industrial Robotics(AIR) refers to the application technologies developed on the basis of existing industrial robots. The major research and development objective of AIR is to enable the existing industrial robots with enhanced sensing and adaptability, user-friendly human-machine interface, shortened preparation and deployment time, improved positioning accuracy, and expanded applications. However, AIR has not been received sufficient attention in robotics community, which results in a big technology gap between robot manufacturing and industrial applications. Such a situation not only affects the adoption and application of industrial robots, but also limits the growth of the industrial robot manufacturing industry. Based on the technical problems encountered in utilization of industrial robots for manufacturing automation, this paper introduced the major research and development works as well as future directions pertaining to AIR, such as intuitive teaching and rapid programming (ease of use), kinematic calibration and error compensation (improvement of accuracy), and hybrid force-motion control (expansion of application) technologies. The existing teaching and offline programming methods of industrial robots have the limitations of neither efficient nor accurate, which make the industrial robots difficult to use. As such, three major intuitive teaching and rapid programming approaches have been investigated, i.e., lead through teaching, teaching and programming based on multi-sensor fusion, and programming by demonstration. Current research efforts are focused on intuitive programming with an



中国科学院

augmented environment through the fusion of the workpiece CAD model and the sensor information. It is well known that the industrial robots have high repeatability but low absolute accuracy, which makes the off-line programming method inaccurate. A variety of robot calibration and error compensation techniques have been studied, such as the error model based offline calibration, tool-based in-situ calibration, and sensor guided on-line error compensation. Current research efforts are focused on the machine learning method for the calibration and compensation of non-geometric errors due to the robot stiffness, gravity and loading effects so as to future improve the absolute accuracy of industrial robots. Most of the industrial robots are short of force control functionality, which makes them difficult to perform continuous contact-type operations, such as chamfering, deburring, and polishing. To expand the applications of industrial robots from the conventional non-contact type positioning applications to advanced contact type applications, two major force approaches have been investigated, i.e., through the arm approach and around the arm approach. The former refers to the direct force control methods based on the dynamics model of robotic arm which are more suitable for light-weight industrial robots; while the later refers to the force control methods based on add-on force-controlled end-effector modules, which are especially suitable for heavy-duty industrial robots. To achieve safe human-robot interaction, current research efforts are focused on variable stiffness(or impedance) control of robotic manipulators based on their operational-space dynamics and joint-space compliant motion control schemes. With the advances of network communication technologies, sensing technologies, and artificial intelligence, future research and development directions pertaining to AIR will be explored to achieve: (1) enhanced networking features for online remote monitoring, control, and diagnoses; (2) effective multi-robot collaboration through online information sharing, coordination and control; (3) adaptability to semi-structured and unstructured working environments through advanced 3D sensing and intelligent perception techniques; (4) user-friendly human-robot interface based on augmented reality technologies for intuitive simulation, teaching, programming, and control; and (5) modular and task-oriented application programs to shorten the preparation and deployment time. However, most the AIR technologies being investigated are still not ready for industrial applications. Therefore, to initiate major R&D programs pertaining to AIR technologies to advance their technology readiness levels are of great importance, which will not only improve the utilization level of industrial robots, but also speed up the pace of upgrading our nation's manufacturing industries towards intelligent manufacturing.

Keywords industrial robot, applied industrial robotics, teaching and programming, error compensation, hybrid force-motion control

杨桂林 中科院宁波材料技术与工程研究所所属先进制造技术所所长、研究员, 浙江省机器人与智能制造装备技术重点实验室主任, 国家“千人计划”特聘专家。1998年毕业于新加坡南洋理工大学机械工程专业, 获博士学位。长期从事机器人及制造自动化的研究工作, 已发表学术论文200余篇, 2014年获美国“百大科技研发奖”(R&D 100 Awards)。E-mail: glyang@nimte.ac.cn

Yang Guilin, Director and Professor of Institute of Advanced Manufacturing Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Director of Zhejiang Provincial Key Lab of Robotics and Intelligent Manufacturing Equipment Technology, and an awardee of “the Thousand Talents Plan”. He received his PhD in Mechanical Engineering from Nanyang Technological University, Singapore, in 1998. He has many years of R&D experience in robotics and manufacturing technology. He has published 200 over technical papers in refereed journals and conference proceedings. He received the US R&D 100 Awards in 2014. E-mail: glyang@nimte.ac.cn