

# 面向现代柔性制造的工业机器人 高精度控制方法\*

任永杰,尹仕斌,郝继贵

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

[摘要] 近年来,我国正大力发展航空航天事业,以工业机器人为基础构建柔性制造单元或柔性生产线,实现产品快速化、柔性化、自动化生产,对航空航天制造企业生产模式转型升级、提升装备制造能力和产品性能具有重要意义和价值。然而,由于本体结构及使用环境限制,工业机器人绝对定位精度低、长期稳定性差,尚无法直接适应现代新型制造环境下各行业的新应用、新需求。梳理并总结了当前国内外在提高机器人定位精度方面的研究方法和技术,提出未来工业机器人定位精度提升方法的研究思路,对于工业机器人在航空航天业的应用发展有一定指导意义。

关键词: 柔性制造; 工业机器人; 运动学模型; 精度控制; 动态精度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.016



任永杰

博士、副教授,从事激光及光电测试技术、机器人自动化测量、大尺寸测量等方面的研究工作。作为负责人承担国家自然科学基金项目等 10 余项,参与国家 863、科技支撑、国家重大仪器课题多项,曾荣获国家技术发明二等奖(排名 4)、教育部自然科学一等奖(排名 4)。

经过几十年的改革开放,中国工业得到了飞速发展,社会财富极大积累,代表国际竞争力水平的制造业也正在经历一场从“中国制造”到“中国创造”的巨变。虽然如此,我国制造业的整体水平还是比较落后,仍然处在国际产品链体系的底端。综合来看,产业结构不合理、加工制造的信息化驱动能力不强、产品质量和创新性设计有待提高等仍是我们今后一个时期面临的重点问题,跨越式发展的任务依然严峻。

在此背景之下,中国版的工业 4.0 规划——《中国制造 2025》规划在 2015 年正式公布。新规划明确了制造业在国民经济中的主体地位,强调制造业是有效提升综合国力、建设世界强国的根本保障。不仅如此,在新的规划中也重点突出了智能制造对工业制造的引领作用,把发展智能装备和产品放在了突出的位置<sup>[1]</sup>。在国家大力倡导智能制造的背景之下,面向多品种、批量生产的柔性制

造系统代表了先进制造模式的未来发展方向。其中,以工业机器人(机械臂)为代表的自动化设备平台具有高度灵活性,通过轨迹编程可实现多产品的快速更换,满足目前产品小批量多品种的需求。因此,如何将工业机器人很好地利用起来,构建快速、灵活的生产线成为现在制造系统发展的重中之重<sup>[2-3]</sup>。

## 国内外工业机器人应用现状

随着产业结构的调整和转型升级以及持续的人口红利消减,近年来中国机器人市场一直保持高速增长,并已经连续 5 年成为全球头号工业机器人应用市场,其应用规模已居全球第一。在 2017 年 8 月底世界机器人大会上发布的《中国机器人产业发展报告(2017 年)》显示:2017 年中国机器人市场规模预计将达到 62.8 亿美元,2012~2017 年的平均增长率将达到 28%,而同期全球机器人市场的平均增长率为 17%<sup>[4]</sup>。

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475329)。

在航空企业中,柔性机器人所具备的减少成本支出、提高生产效率和产品可靠度等特性已为大家所公认,然而航空产品的制造与传统机器人应用领域(例如汽车制造),有着很大的不同。就现在看来,在航空制造过程中存在的工作程序繁杂、工作环境恶劣、劳动分布密集以及手工制造为主等问题,已成为制约航空产品制造效率和质量的瓶颈。因此,航空制造对工业机器人的结构、可靠性、开放性、运动精度和动态特性等核心性能提出了更高要求<sup>[5]</sup>。早在1994年欧盟就已明确提出,要研究适合航空产品生产线特点的柔性装配及制造系统,该系统的一个突出特点就是要基于协作性多功能操作机器人。2012年底,德国、奥地利、西班牙等国家在欧盟第七框架计划(FP7)“未来工厂”项目的资助下又联合发起VALERI计划<sup>[6]</sup>,其目的是在3年内将机器人集成到航空部件生产中,并能实现先进识别和人机协作,使机器人能与人进行更好的合作。在未来探索(FUTURASSY)项目中,空客也在飞机组装方面做出了大胆尝试,将人型双臂机器人应用于A380方向舵组装平台,该机器人由日本川田工业株式会社研制,可以与线上操作工一起进行装配铆接工作。一些世界著名的航空公司在发展数字化柔性装配制造技术方面也已经走在了世界前列,如美国Electroimpact公司与波音公司设计开发了一套机器人自动钻削系统ONCE(ONe-sided Cell End effector)<sup>[7]</sup>,用于波音F/A-18E/F的机翼后缘襟翼的钻孔和检测;Brötje公司为A320、A340等机型复合材料结构装配研制的双机器人多功能协同钻铆系统可高效完成自动钻孔、自动插钉、自动连接等装配工作<sup>[8]</sup>。在我国积极推进柔性制造和航空航天的大局之下,生产中使用工业机器人来提高自动化程度、提高产品质量及效益、改进生产模式将表现

出巨大的价值和潜力。然而不同于通用加工机床,现场自动化应用的机器人多为多关节串联机构(以6自由度居多,一般属于开环控制机构),传统的机器人在制造业中主要担任着一些重复性的简单工作,而且多采用示教再现的模式。这类工作的特点仅需要机器人多次重复到达同一位置,因此机器人的高重复定位精度起了很大作用。

然而,未来柔性制造品种多、批量可控的特点要求工业机器人以运动学模型为基础,采用离线编程方式来进行轨迹规划,进而缩短线上调整时间,而工业机器人绝对定位精度一般不高,离线获得的程序在现场应用时存在很大偏差,很难满足柔性制造的精度需求。比如,对于一个普通的机器人系统来讲,如果其重复定位精度为 $\pm 0.05\text{mm}$ ,那它的绝对定位精度通常情况下只能达到 $\pm 2\sim 3\text{mm}$ ,甚至更低,其绝对和重复定位精度相差数十倍<sup>[9-10]</sup>,而航空制造通常要求制孔系统的钻孔位置精度在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内,沉头孔深度误差在 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内。另一个重要问题是:工业机器人系统作为自动化装备,使用环境中存在许多无法控制的因素,比如温度和湿度等,再加上机器人上安装的关节电机受温度影响较大,这样在长期使用中会大幅度降低机器人的定位精度,产品的质量也没办法得到有效保障<sup>[11-12]</sup>。可见,柔性制造对机器人系统的高精度控制提出了更严格的要求,与其现有的绝对定位精度及定位稳定性之间存在异常突出的矛盾。国内外学者及科研院所就柔性机器人平台精度提高的问题,给出了多种解决思路,并取得了丰硕的成果及进步。本文立足于如何提高现场机器人的运动控制精度,分析和梳理了该领域的通用方法和关键技术,为工业机器人更好地服务于现代航空航天制造现场提供了研究思路。

## 国内外工业机器人精度提升方法

工业机器人绝对定位精度低、长期稳定性差已成为制约其在柔性制造中广泛应用的关键因素。综合来看,影响机器人绝对定位精度的因素众多、相互关系复杂。通常将影响机器人定位误差的因素按照来源及相互作用机理分成4类:(1)参数因素,机器人运动学模型的参数,包括常见的DH运动学模型中的机器人杆件长度误差、关节码盘的零位偏差、相邻轴线的倾斜程度等,在有些特殊结构形式的机器人中还包含并联机构尺寸误差等;(2)负载因素,机器人杆件力学柔性形变、机器人高速运动过程中附加内应力、末端执行器工作过程中与待加工零件的受力变形等;(3)结构误差,齿轮齿形传动误差、齿轮及轴承关节间隙、安装偏心等;(4)环境因素,外界环境的温度、湿度、振动等因素对于尺寸和结构不同的工业机器人有着较为不同的影响和作用方式,例如大型机器人相较于小型机器人受温度变化的影响更敏感等。为突破机器人柔性制造过程中的精度问题,国内外的学者和技术人员对机器人应用中的定位误差补偿这一问题开展了多方面的研究工作,提出了多种改善或提高机器人运动控制精度的方法,取得了大量的研究成果<sup>[13-22]</sup>,根据误差补偿方法原理上和思路上的差异,其主要方法可概括为3类。

### 1 基于模型的标定方法

这类方法现在已经比较成熟,并逐步形成了一整套流程规范,包括建模、测量、参数识别和校准补偿,并有多款应用比较广泛的商业化产品。比如,美国DynaLog公司与FARO公司合作研制的DynaCal补偿系统、瑞士ABB公司的Caliware误差标定软件、日本Motoman公司的Motocal标定软件<sup>[23]</sup>、Metris公司的Rocal标定

软件等都是较有代表性的产品,在一些需要离线编程或者提高绝对定位精度的场合取得了成功应用。这些方法在基本原理上都是基于现有机器人运动学模型,认为误差主要是由这些确定的误差因素引起的,需要借助高精度的外部测量设备获得实测数据和理论数据的偏差,从而辨识机器人实际模型与理论模型之间的误差,达到补偿绝对定位精度的目的。国内学者和研究人员针对运动学模型的标定问题,也开展了大量研究工作,取得了丰硕的成果<sup>[24-30]</sup>。

通常的工业机器人,其运动学模型是从控制的角度建立的,不适合直接用于定位误差修正,模型中没有突出引起定位误差的有效因素,模型中的相关参数都是非线性耦合的,这些参数互相影响,很难做到有效分离与辨识,其可靠性和精度不易保证。多数情况下以此建立的模型,在精度提高的可靠性上存在一定的使用概率问题。为了最大可能地提高机器人的定位精度,可以采用分层、多级的补偿策略,逐层逐级地进行补偿和修正。通过误差建模方法对参数因素、负载因素引起的定位误差进行标定:(1)试验表明参数因素引起的误差占机器人总定位误差的80%左右,需要建立合理的运动学误差模型来准确描述真实误差情况。模型因素愈多,其相互耦合的概率愈大,参数辨识的难度愈大,为了增加鲁棒性及增加参数辨识的可靠性,可从运动学参数中解析分离出对末端精度影响巨大的因素进行辨识和补偿。(2)机器人自重和外加负载将导致关节和杆件发生柔性变形,从而引起机器人柔性误差,可通过力学分析的方法建立相应模型来准确描述柔性误差,并在应用过程中,合理分析和控制机器人的运动姿态达到力学最优效果。(3)对于运行时温度的影响可以构建工作空间中的基准长度或者基准点,通过这种附加的约束来弥补运行

过程中的环境因素影响。

## 2 非模型标定方法

由于影响机器人定位精度的因素多而复杂,参数间相互耦合,试图通过解析模型来描述所有误差因素的影响是难以实现的。为此,很多学者提出了非模型的机器人定位精度标定方法。非模型标定法无须解析参数建模和误差识别,只通过曲线拟合、神经网络、空间插值等方法对局部空间内位姿误差进行估计与补偿。根据标定原理的不同,可以大致分为3类。

(1)基于曲线拟合的定位误差标定。基于曲线拟合的误差标定法通常包含误差测量、曲线拟合、误差插补3个步骤。其实现的基本原理是:首先测量机器人作业空间中多个姿态下的位姿误差,再通过曲线拟合法建立整个作业空间内的位姿误差分布曲线,最后根据误差分布曲线估计目标位姿处的定位误差,并将其补偿至目标位姿上。例如,Alici等<sup>[14]</sup>提出通过傅里叶级数和正交多项式对多自由度机器人的位姿误差进行拟合。选择合适的多项式级数,根据被测姿态处的位姿误差,通过曲线拟合方法可以确定多项式系数。基于曲线拟合结果,可以估计机器人工作空间中任意位置的末端位姿误差。

(2)基于空间插值的定位误差标定。基于空间插值的定位误差标定是将机器人作业空间划分为一系列等间隔的立方体网格,并通过测量设备测得各网格节点处的位姿误差,以此建立机器人正交空间中的定位误差数据库。该方法的定位误差标定通常分为以下几步:网格划分、误差测量、空间插值。实际工作时,对于工作空间中任意目标点,首先查找包含目标点在内的最小立体网格,利用网格节点处的定位误差并通过空间插值计算,得到目标点处定位误差。有学者提出了一种基于模糊插值的误差估计方法,并对比了基于模

型和基于空间插值的误差标定方法,结果表明基于空间插值标定方法的效果优于基于模型的标定效果<sup>[31-33]</sup>。南京航空航天大学的周炜等<sup>[34-35]</sup>也研究了基于空间插值的机器人精度补偿方法,并提出了误差相似度的插值权重度量方法。

(3)基于神经网络的定位误差标定。人工神经网络是近年发展起来的一门新型技术,具有自学习能力强、自适应范围广、容错率高等优点,能够完成自适应推理,在工作过程中也可以通过多次自适应学习提高识别效率。通常意义上,神经网络方法可以处理那些难以用数学模型描述的系统,因此对于多参数耦合的工业机器人运动学模型可以选用神经元网络来描述。这类方法利用神经元网络,通过给出多组不同关节角度的末端执行器的空间位姿,利用这些信息来训练机器人生成基于神经网络的控制网,对关节角进行对应的补偿,以此达到提高绝对定位精度的目的<sup>[36-37]</sup>。该方法虽然克服了参数辨识不足和建模复杂的缺陷,有效提高了校准精度,但仍然存在研究不够成熟、标定过程计算量大和校准效果在奇异点处表现不佳等缺点,依旧没有形成一套能够应用于实际场合的可操作系统化标定方法。

以上机器人的非模型误差标定属于一种综合补偿方法,无需对机器人误差生成机理及作用规律进行深入分析,直接将位姿误差归结为关节角误差。从原理上讲,机器人非模型误差标定方法是一种数学上的估值补偿方法,利用曲线拟合、神经网络等数学估值方法实现对末端位姿误差的估计与补偿。由于该方法没有考虑多关节型机器人的结构特点和运动特性,以及机器人的位姿误差分布特点及作用规律,因此据已有文献资料显示,其补偿效果欠佳。

## 3 基于高精度外部观测设备的实时精确定位

前两类误差补偿方法都是基于机器人的运动学模型或非模型给出的离线校准方案,都无法克服现场环境下机器人系统在连续运行过程中的定位漂移问题。目前,针对机器人定位漂移,一个切实可行的补偿方法是通过高精度外部观测设备对机器人的末端工具进行实时的精确定位,从而实现对其定位漂移的有效校正,如图1所示。应用比较成功的案例是利用原 Metris 生产的 K 系列光学三坐标测量机,实现对机器人末端执行器位置的实时校正<sup>[38-39]</sup>。

目前来看,外部测量手段主要采用非接触的测量传感器。以测量范围分类,大范围测量主要使用激光跟踪仪、iGPS、摄影测量等,而单双目视觉、激光测距传感器等多用于局部小范围测量中,电感电容与声觉、力觉传感器在某些特殊的应用场合下也可以使用。在很多情况下,利用单一的测量设备很难取得满意的效果,通过融合多种传感器的多维数据信息可以助力提高机器人末端定位精度。图2所示为通过全局摄影测量相机对机器人的末端执行工具进行精确控制:多个(>2)测量相机,构成摄影交汇空间测量网络;在机器人末端工具上安装高质量控制光源,引导测量相机实时进行高精度跟踪,精确定位测量传感器;克服机器人系统定位精度的限制,同时保留高度柔性。在机器人的具体运动过程中,诸如运动学插补、末端刚度变化、部件间隙、机器人负载和热效应等都会不同程度地影响机器人的末端定位精度,可以在机器人末端构建精密的三轴位移平台系统,通过局部的精密测量系统将偏差信息传递给三轴位移平台,带动末端执行器提供伺服修正,进而减少直接调控机器人控制器带来的因环节过多引起的不确定性。

基于外部观测设备的补偿方法,对于大型、多维机器人补偿效果特别明显,但这类方法实现成本较高、设

备维护相对困难。在此类应用中机器人仅作为高度柔性的自动化载体,其末端工具的定位精度与机器人本体无关而仅由外部精密测量设备获得,机器人运动平台与测量设备是相对独立的,缺乏有效的联系和融合。

综合以上分析,在目前主流的机器人高精度控制方法中,基于运动学模型的方法是最成熟简单的一种,但是受限于模型的不定性,在机器人工作空间的某些方位不能进行有效的补偿。而基于外部测量设备的精度提高方法,又不能充分发挥机器人本身的某些特性,测量系统和工业机器人间明显脱节。因此,可以通过构建机器人关节空间精密网格阵列及网格阵列精度控制点的思路,来满足机器人工作空间中的高精度控制需求,如图3所示。结合精密测量、误差分析理论以及机器人定位误差在关节空间中的分布规律,采取多级分层次的误差补偿策略,逐级提高机器人的定位精度。一方面,结合多关节结构机器人的运动特性,构建基于关节空间高精度网格阵列,在基础的层面上提升机器人绝对定位精度;另一方面,基于多重几何约束或观测量约束构建网格阵列精度控制点,将精密测量设备与工业机器人进行深度融合,有效提高机器人的控制精度。此类研究方法中精细网格均是通过高精度外部测量设备进行观测,由于节点数目较多,测量的工作量比较大,需要借助一些自动化的测量手段,例如激光跟踪仪或者视觉相机,来自动辨识节点数据,并建立残差数据库。通过该方法,能够在很大程度上提高机器人的静态绝对定位精度,甚至可以达到重复定位精度的水平。

现场环境下,工业机器人动态工作过程中的定位精度维持成为主要问题,可参照上述方法思路,通过布置稳定性好的基准器,利用几何约束(定点、定长等)建立局部区域精度控制点。根据定位漂移分布模型及演

化规律,以控制点处的定位漂移估算周边网格节点处的定位漂移,进而修正网格阵列的误差残差库,以新的残差库进行关节空间插值,重新估计机器人轨迹点处的误差。柔性制造现场机器人定位漂移精度控制点构建方法如图4所示。



图1 KUKA机器人协同外部K600测量工具的加工制造

Fig.1 Manufacturing of robot KUKA with external measurement tool K600

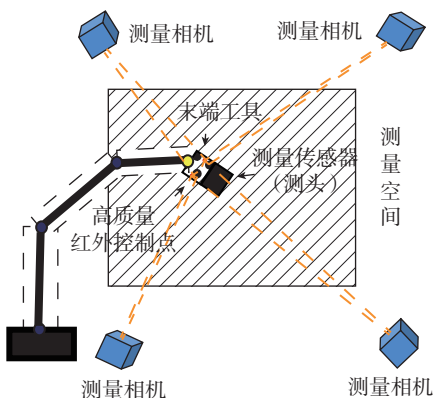


图2 全局空间控制的高精度机器人定位方法  
Fig.2 High accuracy positioning method of robot in global space control

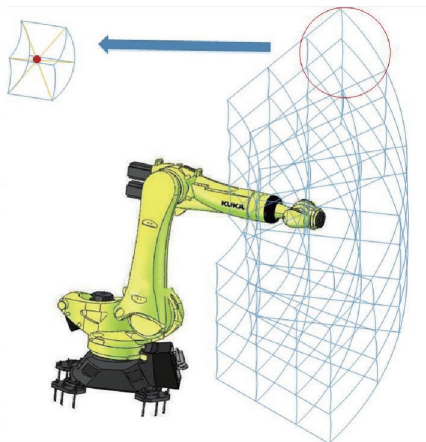


图3 关节空间精细网格阵列示意图  
Fig.3 Diagram of exquisite grid array of joints in space

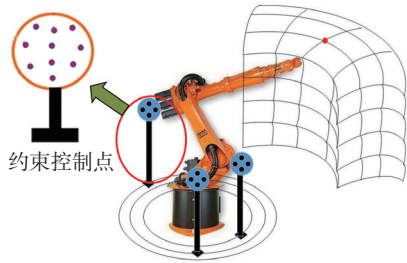


图4 机器人动态条件下的定位漂移控制示意图

Fig.4 Sketch of control of robot positioning drifting on dynamic condition

## 结论

针对航空航天制造业规模大、产品种类多、批量小、精度高等特点,如何有效降低成本、提高产品质量和响应速度,是航空航天企业发展所要面对的重大考验。在新一轮的工业结构调整过程中,工业机器人的应用成熟度将是企业先进制造能力及水平的重要体现。探索研究新的机器人精度补偿技术,提高机器人的柔性制造水平,将为航空航天制造领域的跨越式发展提供新动能。可以预见,在航空航天领域爆发式技术发展及智能制造的带动下,工业机器人将展现出巨大的发展潜力和应用价值。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知[EB/OL]. (2015-05-19)[2017-11-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).

National Assembly of the PRC. Notice of the state council on printing and distributing "China Manufacturing 2025" [EB/OL]. (2015-05-19)[2017-11-20]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content\\_9784.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm).

[2] 邓宏筹. 面向21世纪的柔性制造技术[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 12-23.

DENG Hongchou. Flexible manufacturing technology faced 21 century[J]. Engineering Science, 2000, 2(9): 12-23.

[3] 中华人民共和国科学技术部. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)[EB/OL]. (2006-02-09)[2017-11-20]. [http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129\\_65774.htm](http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129_65774.htm).

Ministry of Science and Technology of the

PRC. Outline of the national medium and long term science and technology development (2006-2020) [EB/OL]. (2006-02-09)[2017-11-20]. [http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129\\_65774.htm](http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/200811/t20081129_65774.htm).

[4] 张星. 中国工业机器人市场应用规模已居全球第一[EB/OL]. (2017-10-13)[2017-11-20]. <http://news.sina.com.cn/c/nd/2017-10-13/doc-ifymuukv1870108.shtml>.

ZHANG Xing. China's industrial robot market has been the largest in the world[EB/OL]. (2017-10-13)[2017-11-20]. <http://news.sina.com.cn/c/nd/2017-10-13/doc-ifymuukv1870108.shtml>.

[5] 王国磊, 吴丹, 陈恳. 航空制造机器人现状与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 26-30.

WANG Guolei, WU Dan, CHEN Ken. Current status and development trend of aviation manufacturing robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 26-30.

[6] Valeri Project. Validation of advanced, collaborative robotics for industrial applications[EB/OL]. [2017-11-20]. <http://www.valeri-project.eu/>.

[7] DEVLIEG R, SITTON K, FEIKERT E, et al. ONCE (ONe-sided Cell End effector) robotic drilling system[R]. SAE Technical Paper 2002-01-2626, 2002. <https://doi.org/10.4271/2002-01-2626>.

[8] Brötje Automation. Robot assembly cell—robot riveting system[EB/OL]. [2017-11-20]. <http://www.broetje-automation.de/en/solutions-customer-benefit/equipment/automated-assembly/drilling-fastening/trace/>.

[9] SHIAKOLAS P S, CONRAD K L, YIH T C. On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots[J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2002, 22(4): 245-254.

[10] SLAMANI M, NUBIOLA A, BONEV I. Assessment of the positioning performance of an industrial robot[J]. Industrial Robot, 2012, 39(1): 57-68.

[11] HEISEL U, RICHTER F, WURST K H. Thermal behaviour of industrial robots and possibilities for error compensation[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 283-286.

[12] SANTOLARIA J, YAGÜE J A, JIMÉNEZ R, et al. Calibration-based thermal error model for articulated arm coordinate measuring machines[J]. Precision Engineering, 2009, 33(4): 476-485.

[13] MOTTA J M S T, CARVALHO C C D, MCMMASTER R S. Robot calibration using a 3D

vision-based measurement system with a single camera[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001, 17(6): 487-497.

[14] ALICI G, SHIRINZADEH B. A systematic technique to estimate positioning errors for robot accuracy improvement using laser interferometry based sensing[J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(8): 879-906.

[15] NUBIOLA A, BONEV I A. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(1): 236-245.

[16] PARK I W, LEE B J, CHO S H, et al. Laser-based kinematic calibration of robot manipulator using differential kinematics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1059-1067.

[17] WANG L F, WANG T M, TANG P F, et al. A new hand-eye calibration approach for fracture reduction robot[J]. Computer Assisted Surgery (Abingdon, England), 2017, 22(S1): 113-119.

[18] MESSAY T, ORDÓÑEZ R, MARCIL E. Computationally efficient and robust kinematic calibration methodologies and their application to industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 33-48.

[19] JOUBAIR A, ZHAO L F, BIGRAS P, et al. Use of a force-torque sensor for self-calibration of a 6-DOF medical robot[J]. Sensors, 2016, 16(6): 798.

[20] 刘常杰, 班荣兴, 郭寅, 等. 基于双目视觉机器人TCP校准方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1912-1916.

LIU Changjie, BAN Rongxing, GUO Yin, et al. Calibration method of TCP based on stereo vision robot[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(6): 1912-1916.

[21] 何晓煦, 田威, 曾远帆, 等. 面向飞机装配的机器人定位误差和残差补偿[J]. 航空学报, 2017, 38(4): 1-6.

HE Xiaoxu, TIAN Wei, ZENG Yuanfan, et al. Robot positioning error and residual error compensation for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(4): 1-6.

[22] 史晓佳, 张福民, 曲兴华, 等. KUKA工业机器人位姿测量与在线误差补偿[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 1-7.

SHI Xiaojia, ZHANG Fumin, QU Xinghua, et al. Position and attitude measurement and online errors compensation for KUKA industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 1-7.

[23] Yaskawa Aemerica, inc. MotoCalv EG[EB/OL]. [2017-11-20]. <https://www.>

motoman.com/hubfs/PDFs/MotoCalV\_EG.pdf?t=1508273115461.

[24] 王东署, 迟健男. 机器人运动学标定综述[J]. 计算机应用研究, 2007, 24(9): 8-11.

WANG Dongshu, CHI Jiannan. Survey on robot kinematics calibration[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(9): 8-11.

[25] 韩翔宇, 都东, 陈强, 等. 基于运动学分析的工业机器人轨迹精度测量的研究[J]. 机器人, 2002, 24(1): 1-5.

HAN Xiangyu, DU Dong, CHEN Qiang, et al. Study of measurement of trajectory precision for industrial robot based on kinematics analysis[J]. Robot, 2002, 24(1): 1-5.

[26] 刘振宇, 陈英林, 曲道奎, 等. 机器人标定技术研究[J]. 机器人, 2002, 24(5): 447-450.

LIU Zhenyu, CHEN Yinglin, QU Daokui, et al. Research on robot calibration[J]. Robot, 2002, 24(5): 447-450.

[27] REN Y J, YIN S B, ZHU J G. Calibration technology in application of robot-laser scanning system[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11): 1142041.

[28] YIN S B, REN Y J, ZHU J G, et al. A vision-based self-calibration method for robotic visual inspection systems[J]. Sensors, 2013, 13(12): 16565-16582.

[29] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 基于距离精度的测量机器人标定模型及算法[J]. 计量学报, 2008, 29(3): 198-202.

REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. Measurement robot calibration model and

algorithm based on distance accuracy[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(3): 198-202.

[30] 任永杰, 郝继贵, 杨学友, 等. 机器人柔性视觉检测系统现场标定技术[J]. 机器人, 2009, 31(1): 82-87.

REN Yongjie, ZHU Jigui, YANG Xueyou, et al. On-line calibration technique of robot flexible visual inspection system[J]. Robot, 2009, 31(1): 82-87.

[31] BAI Y. On the comparison of model-based and modelless robotic calibration based on a fuzzy interpolation method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 31(11-12): 1243-1250.

[32] BAI Y, WANG D L. On the comparison of trilinear, cubic spline, and fuzzy interpolation methods in the high-accuracy measurements[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2010, 18(5): 1016-1022.

[33] WANG D L, BAI Y, ZHAO J Y. Robot manipulator calibration using neural network and a camera-based measurement system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2010, 32(4): 105-121.

[34] 周炜, 廖文和, 田威. 基于空间插值的工业机器人精度补偿方法理论与试验[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 42-48.

ZHOU Wei, LIAO Wenhe, TIAN Wei. Theory and experiment of industrial robot accuracy compensation method based on spatial interpolation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 42-48.

[35] 周炜. 飞机自动化装配工业机器人

精度补偿方法与实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

ZHOU Wei. Compensation method of industrial robot accuracy and experimental research for aircraft automated assembly[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.

[36] MAZDARANI H, FARROKHI M. Adaptive neuro-predictive control of robot manipulators in work space[C]// Proceedings of 2012 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR). IEEE, 2012: 349-354.

[37] RIGATOS G G. Model-based and model-free control of flexible-link robots: a comparison between representative methods[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009, 33(10): 3906-3925.

[38] Nikon Metrology. Kuka uses Metris K600 measurement systems for robot calibration[EB/OL]. [2009-11-04]. <http://blog.nikonmetrology.com/kuka-uses-metris-k600-measurement-systems-for-robot-calibration/>.

[39] SCHNEIDER U, POSADA J R D, DRUST M, et al. Position control of an industrial robot using an optical measurement system for machining purposes[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Manufacturing Research (ICMR2013). Cranfield: Cranfield University, 2013: 307-312.

通讯作者: 任永杰, E-mail: yongjieren@tju.edu.cn.

## High Precision Control Method of Industrial Robot for Modern Flexible Manufacturing

REN Yongjie, YIN Shibin, ZHU Jigui

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**[ABSTRACT]** In recent years, China is making great efforts to develop aerospace industry. The building of flexible manufacturing units or production lines and the realization of rapid, flexible and automated production based on industrial robots play important roles in transforming and upgrading the production mode of aerospace manufacturing enterprises and upgrading equipment manufacturing capabilities and product performance. However, due to limitation of the structure of the base and environment, the absolute positioning accuracy of the industrial robot is low and the long-term stability is poor. Therefore, the industrial robot can not directly adapt to the applications and demands of various industries in the modern new manufacturing environment. This paper reviews and summarizes the current research methods and technologies in improving robot positioning accuracy at home and abroad, and puts forward the research ideas of improving the positioning accuracy of industrial robots. It has a certain guiding significance for the application and development of industrial robots in aerospace industry.

**Keywords:** Flexible manufacturing; Industrial robot; Kinematics model; Precision control; Dynamic accuracy (责编 逸飞)