

智能机器力觉及力控制研究综述

殷跃红¹ 朱剑英²

¹(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州, 310027)

²(南京航空航天大学机电工程学院, 南京, 210016)

FORCE SENSING & CONTROL FOR INTELLIGENT MACHINE: AN OVERVIEW

Yin Yuehong¹, Zhu Jianying²

¹(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission & Control of Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

²(Mechatronics Engineering Institute of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016)

摘要 回顾了智能机器力觉及力控制研究历史, 介绍了目前的研究现状, 详细分析了现有的 4 种研究策略: 阻抗控制、力/位混合控制、现代控制、智能控制。提出了智能机器力觉及力控制研究的 4 大关键问题: 机器本体及位置伺服; 碰撞冲击及稳定性研究; 未知环境的约束研究; 力传感器及力/位反馈融合, 展望了智能机器力觉及力控制研究趋势和应用前景。

关键词 机器人 智能机器 柔顺性 智能控制 力控制 模糊神经网络 多传感器融合

中图分类号 TP23

Abstract The past and present of force sensing & control for intelligent machine are reviewed. Four strategies, Impedance control, Force and Position Hybrid Control, Modern Control and Intelligent Control, of the study on force control are analyzed in detail. Four key problems of force sensing and control are described. It is pointed out that integration of AI & intelligent control and synthesis of passive and active compliance are the trend of the future, and good application prospect is viewed.

Key words robotics, intelligent machine, compliance, intelligent control, force control, fuzzy neural network, multi-sensor fusion

智能化是自动化的最高表现, 智能的研究已成为科学技术发展的一个主要方向。研究高智能机器, 即追求给机器赋予智能和自律性, 已成为现代社会进一步发展的迫切需要。在学术上, 如何把高度发达的计算机应用场所, 从封闭的逻辑符号世界, 扩展到时时刻刻变化的、开放的、物理的实际世界, 是一项重大研究。从社会学的观点来看, 希望让智能机器来完成人不想干的体力劳动, 是早期开展智能机器研究的根本动力。而随着社会的加速发展, 人类对智能机器的要求发生了根本的变化: 希望让智能机器实现人类智能的扩展, 从事人类想干的脑力劳动或辅助人的智能活动。可见, 社会向往的智能机器是一个综合系统, 它需要具备信息集成性、智能性、动作性、通用性、柔性、个体性以及现实世界中的高度实时性。对智能机器系统来讲, 主要有这样 2 个核心内容: 一是在行动中系统对环境的感知; 二是感知后机器的实时行动, 感觉和行动高度统一是智能机器研究的必然要求。

对环境和对象的感知、适应和行动, 是机器智能化的重要特征。对环境的感知、理解和认识是为了行动, 而行动又可以使认识有效化和深化; 智能可以控制认识和行动, 而行动和认识又使智能发展。机器智能是在机器与外界环境相互作用中被发现的本质内容, 并从中评价智能的高低。而智能机器与外界环境的物理作用必然会产生相互作用力, 因此智能机器力觉和力控制研究是智能机器系统基于感觉和行动综合的智能发生机理研究的重要组成部分, 属于智能机器研究的基础。

智能机器的触觉, 和视觉一样, 是必不可少的的基本方式, 本质是对人体触觉功能一定程度的模仿。人类对外界环境的感知, 70% 由视觉获得, 但人类的大脑功能有 2/3 用于管理触觉信息。触觉应具备 4 种基本功能: 接触觉、压觉、滑觉和力觉。所谓力觉是作业过程中来自外部的力感知, 因此是三维力和三维力矩。它和压觉的不同在于压觉力是垂直于力接触表面的一维力; 与滑觉的不同是滑觉是平行于接触表面的一维力。因此, 力觉是触觉最复杂、最综合、应用最广泛的感知形式。智能机器的触觉是基于机器与对象物体直接接触所

产生的感觉,可以在光线条件特差或者工作范围受限制的情况下代替视觉的功能;而且可以在操作过程中实时提供确切的信息,而视觉信息只能出现在操作之前,或操作之后,因为视觉受光线和障碍物的限制;再有,力觉所产生的力和力矩的信息,则是视觉无法获取的。总之,智能机器视觉和触觉各有特点,互为补充。在实际工作中,它们经常配合使用,例如装配过程中,可能用视觉信息来粗定位,用触觉信息来精确定位。

力觉是智能机器触觉的主要内容,力控制研究是力觉研究之核心,力觉和力控制贯穿于智能机器作业全过程。力控制也叫主动柔顺控制,其典型特点是力/位强耦合,是一种极其复杂的混合控制,与智能机器研究紧密联系着,一直是当今世界研究热点。

1 智能机器柔顺性

在智能机器研究中,核心矛盾之一为:智能机器在特定接触环境操作时对可以产生任意作用力的柔性的高要求和智能机器在自由空间操作时对位置伺服刚度及机械结构刚度的高要求之间的矛盾。智能机器能够对接触环境顺从的这种能力被称之为柔顺性(compliance)。为解决这一矛盾,国内外智能机器专家进行了大量的研究,被称之为柔顺控制研究。

柔顺性被分为主动柔顺性和被动柔顺性两类。智能机器凭借一些辅助的柔顺机构,使其在与环境接触时能够对外部作用力产生自然顺从,被称为被动柔顺性;智能机器利用力的反馈信息采用一定的控制策略去主动控制作用力,被称为主动柔顺性。

1.1 被动柔顺机构

被动柔顺机构,即利用一些可以使智能机器在与环境作用时能够吸收或储存能量的机械器件如弹簧、阻尼器等构成的机构。一种典型的最早的被动柔顺装置RCC(Remote Compliance Center)是由MIT Draper实验室设计的,它用于机器人装配作业时,能对任意柔顺中心进行顺从运动。RCC实为1个由6只弹簧构成的能顺从空间6个自由度的柔顺手腕,轻便灵巧。用RCC进行机器人装配的实验结果为:将直径40mm的圆柱销在倒角范围内且初时错位2mm的情况下,于0.25s内插入配合间隙为0.01mm的孔中^[1-4]。

智能机器采用被动柔顺装置进行作业,显然存在一定的问题:无法根除智能机器高刚度与

高柔顺性之间的矛盾;被动柔顺装置的专用性强,适应能力差,使用范围受到限制;智能机器加上被动柔顺装置,其本身并不具备控制能力,给智能机器控制带来了极大的困难,尤其在既需要控制作用力又需要严格控制定位的场合中,更为突出;无法使智能机器本身产生对力的反应动作,成功率较低等等。也正是这些被动柔顺方法的不足之处,决定了智能机器专家们探索新的研究方法。因此,为克服被动柔顺性存在的极大不足,主动柔顺控制应需而生,进而成为,乃至今日仍为智能机器研究的一个主要方向。

1.2 主动柔顺控制概述

主动柔顺控制也就是力控制,随着智能机器在各个领域应用的日益广泛,许多场合要求智能机器具有接触力的感知和控制能力,例如在智能机器的精密装配、修刮或磨削工件表面、抛光和擦洗等操作过程中,要求保持其端部执行器与环境接触,必须具备这种基于力反馈的柔顺控制能力。

自第1台机器人问世以来,研制出刚柔相济、灵活自如的智能机器,一直为几代智能机器专家努力的目标,而主动柔顺控制正为实现这一目标重要环节,为此大家围绕控制策略、控制理论和控制方法等一系列问题,开展了颇有成效的研究工作。

最早的主动柔顺控制研究可以追溯到50年代,当时Goertz^[5]针对放射性实验工场的恶劣环境,在电液式主从机械臂上装上力反馈装置,当操作者在主操作机上操作时,就可以感受到从操作机上与环境的接触作用力,实质也就是力遥感。

60年代,Mann主持研制了具有力反馈能力的人造肘^[6]。关节电机由“肌肉”电极信号和关节应变仪信号驱动,这样电流将发挥肌肉作用效果。但由于当时控制条件的限制,控制系统实时性差,系统不易稳定。

自70年代,随着计算机、传感器、控制技术和智能机器的飞速发展,智能机器力控制发生了根本变化,发展成为智能机器研究的1个主要方向:智能机器力觉及力控制。

2 力觉及力控制策略

设计智能机器力控制结构,处理力和位置控制二者之间的关系,也就是智能机器柔顺控制之策略,为力觉及力控制研究中的首要问题。大凡有关力控制的研究首先集中于此,都是从不同的角度对控制策略进行阐述,虽然观点各异,但从实现

依从运动的特点来看,一般可归结为4大类:阻抗控制策略、力/位混合控制策略、自适应控制策略和智能控制策略。

2.1 阻抗控制

其特点是不直接控制智能机器与环境的作用力,而是根据智能机器执行端部的位置(或速度)和端部作用力之间的关系,通过调整反馈位置误差、速度误差或刚度来达到控制力的目的,此时接触过程的弹性变形尤为重要,因此,也有人狭义地称为柔顺性控制。其中以Whitney^[7], Salisbury^[8], Hogan^[9], Kazerooni^[10]等人的工作具有代表性。Mables和Becker^[11]进行了总结:这类力控制不外乎基于位置和速度的两种基本形式。当把力反馈信号转换为位置调整量时,这种力控制称为刚度控制^[8];当把力反馈信号转换为速度修正量时,这种力控制称为阻尼控制^[7];当把力反馈信号同时转换为位置和速度的修正量时,即为阻抗控制。

阻抗控制的核心为力/运动转换矩阵 K 的设计,运动修正矩阵 $\delta x = K \cdot F$,从力控角度,希望 K 阵中元素越大越好,则系统柔一些;从位控来看,希望 K 中元素越小越好,则系统刚一些。可见刚柔相济矛盾体现在 K 的确定之中,也是阻抗控制的困难之处。

2.2 力/位混合控制

从具有代表性的Mason, Paul, Raibert, Craig和Mills等人的研究可以看出力/位混合控制的提出有一个过程。

智能机器力控制的最佳方案是以独立的形式同时控制力和位置,理论上力自由空间和位置自由空间是2个互补正交子空间,在力自由空间进行力控制,而在剩余的正交方向上进行位置控制,此时的约束环境被当作不变形的几何问题考虑,因而也有人狭义地称为约束运动控制。

Mason于1979年最早提出同时非矛盾地控制力和位置的概念和关节柔顺的思想,他的方法是对机器人的不同关节根据具体任务要求分别独立地进行力控制和位置控制,明显有一定局限性。1981年Raibert和Craig在Mason的基础上提出力/位混合控制,即通过雅可比矩阵将作业空间任意方向的力和位置分配到各个关节控制器上,可这种方法计算复杂。为此H. Zhang^[12]等人提出了把操作空间的位置环用等效的关节位置环代替的改进方法,但必须根据精确的环境约束方程来实时确定雅可比矩阵并计算其坐标系,要实时地用

反映任务要求的选择矩阵来决定力和位控方向。总之,力/位混合控制理论明确但付诸实施难^[12-15]。

2.3 自适应控制策略

力控制目的是为了有效控制力和位置。上述2种策略广义上属于经典控制的范畴,为力控制研究发展打下了坚实的基础,但从适用范围和控制效果看仍有不足,更无法使其推广应用。机器人本身的多自由度、位姿的不确定性、力/位强耦合、外部环境的极大模糊性,以及阻抗控制和力/位混合控制策略的局限性,决定了众多学者进行自适应研究尝试的必然性。具有代表性的是:Chung Jack和Leininger Gay^[16]直接在多任务坐标系统中,用学习进行重力、动摩擦力和柔顺反作用力补偿,以插孔为目标,进行自适应实验;KucTae-Yong, Lee Jin S和Park Byung Hyun^[17]采用自适应学习的混合控制方法,进行了约束运动控制尝试,在逆动力学求解、收敛性及抗干扰方面获得满意的效果。Nicoletti Guy M^[18]用Lyapunov稳定理论,针对约束运动,对模型参考自适应PD控制的稳定性条件和判据进行了研究。另外,针对力控制特点众多学者进行了变结构力控制尝度。从现有的成果来看,自适应控制和变结构控制大部分处于理论研究和仿真实验的水平,并没有取得突破,付诸实现还有待时日。

2.4 智能控制新策略

上述3种控制策略,存在一个共同的建模难题。就智能机器本身讲,时变、强耦合以及不确定性给智能机器带来了困难,再加上力反馈的输入,更增加了建模的难度。从现有的研究成果来看,上述3种策略各有优缺点,但大多处于理论探索和仿真阶段,无法寻找一策略彻底解决力控制问题。另外智能机器研究已进入智能化阶段,决定了智能力控制策略出现的必然性。具有代表性的研究:Connolly Thomas H.等^[19]将多层前向神经网络用于力/位混合控制,根据检测到的力和位置由神经网络计算选择矩阵和人为约束,并进行了插孔实验;日本的福田敏男等^[20]用4层前馈神经网络构造了神经伺服控制器,进行了细针刺纸实验,能将力控制到不穿破纸的极小范围,此后不久,又将之用于碰撞试验,取得了一定的成果,但机构简单,针对性强,尚缺少普遍性;Xu Yangsheng等^[21]提出了主动柔顺和被动柔顺相结合的观点,研制了相应的机械腕,采用模糊控制的方法,实施插孔。从研究成果来看,智能控制仍处于起步阶

段, 尚未形成独立的控制策略, 仅仅将智能控制原理如模糊和神经网络理论对以往研究中无法解决的难题进行新的尝试, 仍具有一定的局限性。

从智能机器力控制的特点来看, 它是在模拟人的力感知的基础上进行的控制, 因而智能控制具有很强的研究价值。作者详细分析了各种各样的研究方法, 提出了基于大系统理论、模糊理论和神经网络的“智能力/位并环控制策略”^[22~24]。

模糊数学是模拟人类思维的数学, 人工神经网络是对生物神经网络的抽象、简化和功能模拟, 且智能机器本身就是一个复杂的巨大系统, 将其作为大系统研究有其优越性。因此, 对智能机器大系统进行模糊和神经网络力控制研究不失为模拟人类智能的最佳控制, 且为智能机器力控制研究开辟了崭新的途径。模糊、神经网络控制器是一种并行非线性系统, 具有极强的信息综合判断决策

能力, 其特有的学习、自组织和联想记忆能力能较好地解决输入信息之间的互补性、冗余性及容错性。

智能力/位并环控制策略的基本原理如图 1 所示。首先将力控制大系统分解成相关子系统, 力/位并行输入, 通过力/位混合运动学分析, 力/位混合控制系统被解耦成力控和位控子系统, 再利用神经网络进行综合, 在模糊递阶协调下, 由位置伺服系统实施有效力控制。这样, 保证了智能机器位置伺服系统的独立性, 并充分利用了智能机器的优良位置控制性能。该策略既具有阻抗控制的优点, 又具有力/位控制的特点。尤其基于智能知识库的模糊神经力控制有效提高了力控制大系统的实时性。通过在 AdeptThree 机器人上进行的一系列验证试验表明, 智能力/位并环控制策略行之有效。

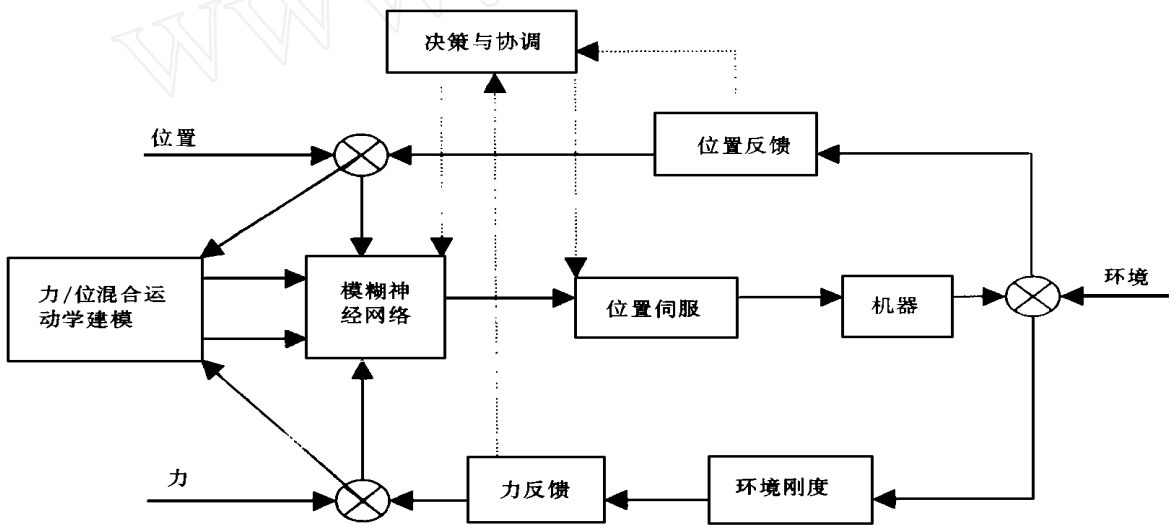


图 1 智能机器智能力/位并环控制原理图

另外, 国内清华大学、上海交通大学、华中理工大学、东南大学分别提出了相应的研究方法, 南京航空航天大学曾提出“力环包容位置环”的控制结构^[25]。

3 力觉及力控制中的关键问题

纵观智能机器主动柔顺控制研究, 确定控制策略, 设计控制结构为首要。而就研究内容而言, 存在 4 大关键问题: 机器本体及位置伺服; 碰撞冲击及稳定性; 未知环境的约束; 力传感器及其力/位反馈融合。以下将详细论述。

3.1 机器本体及位置问题

智能机器的力控制最终是通过位置控制来实现, 所以位置伺服是智能机器实施力控制的基础

础^[26]。力控制研究的目的之一是实现精密装配; 另外约束运动中智能机器执行终端与刚性环境相接触时, 微小的位移往往产生较大的环境约束力。因此, 位置伺服的高精度是智能机器力控制的必要条件。经过几十年的发展, 单独的位置伺服已达到较高水平, 就力控制中力/位之间的强耦合而言, 必须有效解决力/位混合后的位置伺服。

3.2 碰撞冲击及稳定性

就稳定性本身而言, 就是智能机器研究中的难题, 再加入力反馈, 难度更大, 因此, 力控制稳定性为智能机器力控制中的重要环节。现有的研究主要从碰撞冲击和稳定性两方面进行突破。

(1) 碰撞冲击 智能机器力控制过程中, 必然存在智能机器与环境从非接触到接触的自然转

换,理想状况是当接触到环境后立即停止运动,尽可能避免大的冲击,但由于惯性大且实时性差,极难达到。狭义上,主动柔顺和被动柔顺本身就是一对矛盾,如果没有足够的被动柔顺环节来吸收能量,为避免碰撞冲击带来的破坏,只能是适当减小接触前的运动速度。因而碰撞冲击本质上制约着力控制的稳定性。目前的研究主要考虑冲击产生后力控制系统动力学稳定性问题,其中 K. Youcef-Toumi^[27]和 Mills^[28]等人的工作具有代表性。K. Youcef-Toumi 根据能量关系建立起碰撞冲击力学模型并设计出力调节器,其实质用比例力控制器加上积分控制器和一个平行速度反馈补偿器,有望获得较好的力跟踪特性。Mills 用 Lyapunov 稳定性理论对接触切换过程的广义动力学模型进行了分析,提出了把非连续控制律用于从非接触到接触过程的力控制方法。但他们大多处于理论分析阶段。

(2) 稳定性 力控制中普遍存在响应速度和系统稳定矛盾,因此提高系统响应速度和防止系统不稳定是力控制研究中急待解决的问题之一。Whitney^[29]研究了力控制中数字采样系统对稳定性影响的条件,但忽略了机器本身动力学问题,只把机器与环境的作用简化为弹簧来考虑。Roberts^[30]研究了腕力传感器刚度对力控制中动力学的影响,提出了在高刚度环境中使用柔软力传感器,能获得稳定的力控制,并和 Stepien^[31]一起研究了驱动刚度在动力学模型中的作用。Kazeroni^[32]提出了一种用于阻抗控制器的稳定性分析和设计方法,但实验仅限于单关节的机械手上。Eppinger^[33]利用常规的建模和分析方法,针对机器人结构、腕力传感器和环境等主要环节动力学问题,对力控制稳定性和动力学关系作了较全面的分析。另外, Mills, McClamroch 等还进行了大量研究。总之,智能机器力控制存在极高的非线性,现有的稳定性研究工作大多是建立在局部线性化的基础上进行的。

3.3 未知环境的约束

力控制研究中,表面跟踪为极为常见的典型依从运动。但环境的几何模型往往不能精确得到,多数情况是未知的。因此,对未知环境的几何特征作在线估计,或者根据智能机器在该环境下作业时的受力情况实时确定力控方向(表面法向)和位控方向(表面切向),实际为智能机器力控制的重要问题。有关于此的研究: Blander^[34]等利用 Kalman 滤波理论来估计约束表面的几何参数:

Whitney^[35]等利用 AR 模型对表面跟踪的运动轨迹进行建模; Kazanzides^[36]等利用测量力和端部速度来估计表面的法向和切向; Meriet^[37]利用测量力来估计表面法向等等。但这些研究都忽略了摩擦力的影响。

3.4 力传感器

智能机器力觉传感器主动柔顺控制研究必不可少的工具,传感器直接影响着力控制性能,精度高(分辨率、灵敏度和线性度等)、可靠性好和抗干扰能力强是智能机器力传感器研究的目标。就安装部位而言,可分为关节式传感器、腕部式传感器和手指式传感器。

关节式力/力矩传感器使用应变片进行力反馈,具有代表性的是 Wu, Paul, Luh 和 Fisher 等人的工作^[38,39]。从控制结构看,由于力反馈是直接加在被控制关节上,且所有的硬件用模拟电路实现,避开了复杂计算难题,响应速度快。从实验结果看,控制系统具有高增益和宽频带。但通过实验和稳定性分析发现,减速机构摩擦力影响力反馈精度,因而是使得关节控制系统产生极限环。另外, R. P. Paul, B. Shimano 和 H. Zhang^[12,13,40]进行了通过测量关节电机的电流信号来计算关节力矩的实验,虽然方法实现简便,但由于信噪比低且非线性的缘故,极难成功。总之,制造困难且必须通过转换测量关节力的缘故,关节式力反馈的应用和再研究发展受到限制^[41,42]。

手腕式腕力传感器被安装于智能机器与执行器的联接处,它能够获得智能机器实际操作时的大部分力信息;另外,由于精度高(分辨率、灵敏度和线性度等),可靠性好,使用方便的缘故。尽管结构形式繁多,但一般都是通过应变片来测量内部弹性体的变形,再解耦而产生多维力信号。常用的几种结构为十字梁式^[7]、轴架式^[7]和非径向三梁式^[43],其中十字梁结构应用最为广泛。

手指式力传感器,一般通过应变片测量而产生多维力信号,常用于小范围作业如灵巧手抓鸡蛋等实验,精度高,可靠性好,渐渐成为力控制研究的一个重要方向。但多指协调复杂。

相比较而言,腕力传感器以其特有的优势,为柔顺控制研究所常用。

一般情况下,在智能机器动态过程中力传感器常受干扰,必须进行力反馈预处理,否则可能造成力控制失稳。从现有的资料看,直流偏差项的补偿、随机干扰的钝化处理、模糊和神经网络的聚类 and 数字滤波常常被使用^[23,44,45]。

4 智能机器力觉及力控制研究前景

智能机器力觉及力控制是新兴智能制造中的一项关键技术,也是柔性装配自动化中的难点和“瓶颈”,它集传感器、计算机、机械、电子、力学和自动控制等众多学科于一身,其理论研究和技术的实现都面临着不少急待解决的难题。研究成果不仅在理论上具有重要意义,而且在技术上也可以实现曲面跟踪、牵引运动和精密装配等依从运动控制。因此,智能机器力觉及力控制研究成果具有十分广阔的应用前景,典型的应用如下:

(1) 空间交会对接 航天飞行器交会对接(RVD)是未来空间站、空间平台等在轨装配、回收、补给和维修作业的先决条件,也是载人航天的关键技术之一。两飞行器的最后停靠和对接是极其复杂的主动和被动柔顺集成的过程。

(2) 高速高精仿型加工 逆向工程(IE)是由模型到产品的过程。通过力觉和力控制精确理解模型,快速生成加工信息,直接生产产品。

(3) 自动装配操作 典型作业包括插销入孔、旋拧螺钉、摇转曲柄、搬运堆放重物等。控制效果的评价指标一般为装配间隙、受力状况和操作时间等方面。

(4) 表面清洁和加工 典型作业包括擦洗飞机、括擦玻璃、修理工件表面(去毛刺、磨削或抛光等)、跟踪焊缝、智能数控机床研制等。

(5) 双手协调 要求两个或两个以上的机械臂在相互约束的条件下能够协调地工作。通常一臂主动,另一臂在力控制下随动。双手协调为未来多臂机器人研究的基础。

(6) 灵巧手 多手指协调,控制抓拿物体(如鸡蛋、乒乓球等)力的大小。

智能机器的主动柔顺控制研究,实为智能机器基本功能之一——力觉的研究。主动和被动的有机结合,对避免机器与环境从非接触到接触的自然转换时的碰撞冲击,具有决定性作用。因此,为智能机器柔顺控制的必然趋势。智能力控制策略中的记忆、运算、比较、鉴别、判断、决策、学习和逻辑推理等概念和方法必须有效融合一起,作为人工智能的重要部分,本质实现人工智能技术和智能控制的有效统一,也是智能机器力觉和力控制的发展方向。

总而言之,智能机器力觉及力控制是一项综合性技术,现只处于理论研究阶段,技术实现正处于摸索阶段,离推广实用尚有一定距离。但随着计

算技术、智能控制理论和信息技术等的飞速发展,基于主动柔顺和被动柔顺有机结合、人工智能技术和智能控制有效统一的智能机器力觉及力控制研究必将取得满意的结果。

参 考 文 献

- Whitney D E, Nevins J L. Robot Sensors, Vol 2: Tactile and non-Vision. IFS Publication Ltd, 1986
- Whitney D E. Trans ASME J of DSC, 1972, 122
- Whitney D E. IEEE Trans on Man-Machine System, 1969, MMS-10
- Alan Pugh. International Trends Manufacturing Technology Robot Sensors. IFS Ltd, UK: 1986 2
- Goertz R C. Manipulators Used for Handling Radioactive Materials. Human Factors in Technology. McGraw Hill Book Company, 1963
- Rothchild R A, Mann R W. Proc Sgmp On Biomedical Engineering, 1966
- Whitney D E. Trans ASME J of Dyn Systems and Control, 1977
- Salisbury J K. Proc 19th IEEE Conf on Decision & Control 1980
- van Brussel H, Simons J. 9th Int Symp on Industrial Robots, 1979
- Kazerooni H, Sheridan T B, Houpt R K. IEEE J RA, 1986, 2 (2)
- Maples J A, Becker J J. Proc IEEE Conf on Robotics & Automation, 1986
- Zhang H, Paul R P. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 1985
- Paul R P. Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation. 1987
- Craig J J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control Addison-Wesley Publishing Company, 1986
- Whitney D E. Int J Robotics Research, 1987, 6(1)
- Chung J C H, Leininger G G. International Journal of Robotics Research, 1990, 9(3): 63~ 73
- Kuc T Y, Lee J S, Park B H. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics v 3 1994, 2057~ 1062
- Nicoletti G M. proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics v 2 Piscataway, NJ, USA: Publy IEEE, IEEE Service Center, 1991. 967~ 971
- Connelly T H, Pfeiffer F. 1993 International Conference on Intelligent Robots and Systems Piscataway, NJ, USA: Publy IEEE, IEEE Service Center, 1993 240~ 244
- Fukuda T, Kurihara T, Tokita M, et al. (1st Report, application of neural servo controller to stabbing control). Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C, 1990, 56 (527): 1854~ 1860
- Xu Y, Paul R P. Journal of Engineering for Industry, 1992,

- 114(1): 120~ 123
- 22 Yin Y H, Zhu J Y, Wei Z X. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(1)
- 23 殷跃红, 尉忠信, 朱剑英. *航空学报*, 1997, 18(4): 501~ 504
- 24 殷跃红, 尉忠信, 朱剑英. *航空学报*, 1997, 18(6): 687~ 692
- 25 Huang X X, Li S C, Zhu J Y. *Joint Proceedings on Aeronautics and Astronautics(Japp)*. 1993 209~ 213
- 26 Arimoto, Suguru. *Robotica*, 1995, 13(1): 19~ 27
- 27 Toumi K Y. *Proc IEEE Conf on Robotics & Automation* 1989
- 28 Mills J K. *Proc IEEE Conf on Robotics & Automation* 1990
- 29 Whitney D E. *Int J Rototics resrarch*, 1987, 6(1)
- 30 Robert R K, Paul R P. *Proc IEEE conf on Robotics and Automation* 1985
- 31 Stepien TM. *Proc IEEE Conf on Robotics & Automation* 1985
- 32 Kazerrooni H. *Dynamic Stability for Impendence Control of Constrained Dynamic Systems: [thesis]*. MIT, 1985
- 33 Eppinger S S, Seering W P. *IEEE Control System Magazine* 1987
- 34 Blauler M, Belanger P R. *IEEE Trans on Automatic Control* 1987
- 35 Whitney D E, Edsall A C. *Proc American Control Conf* 1984
- 36 Kazanzides P, *et al.* *Dual Drive force/Velocity Control: Implementation and Experimental results*
- 37 Merlet J P. *IEEE Conf of RA*: 1987
- 38 Wu C H, Paul R P. *IEEE Trans on System Man and Cybernetics*, SMC-12, 1982
- 39 Luh J Y S, Fisher W D, Paul R P. *Proc 20th IEEE Conf on Decision and Control* San Diego, 1981
- 40 Paul R P, Shimano B. *Joint automatic Control Conf* 1976
- 41 Vukobratovich M, Stojkovich D. *Izvestiya Akademii Nauk* Tekhnicheskaja Kibernetika, 1992, 6(6): 175~ 190
- 42 Stokic D, Vukobratovic M. *Robotica*, 1993, 11(2): 149~ 157
- 43 A STEK Engineering Inc Report, 1986
- 44 殷跃红, 尉忠信, 朱剑英. *南京航空航天大学学报*, 1997, 29(2)
- 45 殷跃红. *智能机器系统力控制基础研究: [学位论文]*. 南京: 南京航空航天大学, 1997

殷跃红, 生于 1968 年 2 月, 浙江大学博士后, 讲师, 研究方向: 机械电子控制工程, 现已发表论文 15 篇。

朱剑英, 1937 年 7 月生, 教授, 博士生导师, 江苏南通人。国务院政府特殊津贴享受者, 国际生产工程学会(CIRP)中国理事, 中国航空学会副理事长, 国务院学位委员会学科评议组成员。主要贡献: 提出 10 余项国际首创的模糊理论与方法; 提出我国载人航天器交会对接动力学与控制的仿真方案, 建立了数学模型和力反馈控制系统, 在模拟系统上实现了间隙为 10 微米的对接, 达到国际先进水平; 在智能机器的语音、视觉、力觉等方面提出了 20 多项具有独创性的理论和方法, 建立了世界上第 1 个语音输入、自动编程的 CNC 机床系统, 开辟了智能制造研究的新领域。获光华科技基金 1 等奖, 省部级科技进步 2 等奖 5 项, 3 等奖 3 项, 获江苏省国防科技进步特等奖 1 项。出版专著及教材 15 部, 发表论文 120 多篇。被评为航空工业部有突出贡献的出国留学人员。

中国科协将在港举办 《香港 2000 年科技博览》展览会

为庆祝香港回归两周年, 经国务院批准, 中国科学技术协会将于 1999 年 7 月 1 日~ 4 日在香港会议展览中心举办“香港 2000 年科技博览”展览会。本届展览会得到新华通讯社香港分社、香港科技界、工商界等十几家机构的大力支持。大会除邀请中国内地及香港特别行政区各界参展外, 还特别邀请欧洲、美洲、日本、东南亚等国家和台湾地区的客商和投资商参展。

本次展览会将集中为企业介绍市场、产品, 组织适宜的保销、采购和贸易洽谈活动。展览会展出规模一万平方米, 其中内地展区占地四千平方米。参展项目精选在科研开发和生产方面具有世界先进水平和国内领先水平的科研成果及产品, 尤其欢迎多年来在高新实用技术方面有创新的成果以及具有良好贸易前景的项目参展。本届展览会在筛选展品方面除注重展品水平外, 同时, 格外关注贸易前景。有关展出时间的安排、展出内容、参展条件、费用等事宜, 可与“香港 2000 年科技博览”展览会的承办机构中国技术引进咨询公司联系。

(李铁柏)