

机器人控制的现状与问题

卢桂章

(南开大学计算机与系统科学系, 天津)

摘要 机器人学是一个多学科交叉的领域, 它关联着传感技术, 计算机科学, 控制理论与方法, 以及人工智能. 近年来已经发表了大量有关机器人控制的研究成果. 本文的目的是对机器人控制的现状作一评述并指出若干有待解决的问题.

关键词: 机器人学; 机器人控制

1. 前言

机器人是一种具有某种拟人功能的自动机器, 机器人的出现, 打破了机器—功能—任务之间的单义的确定的关系, 也就是说要完成一定的任务, 就要具有特定功能的机器. 机器人则不同, 它可以通过编程和自动更换末端效应器(工具)而具有不同的功能去完成不同的任务. 这就深化了“自动化”的概念, 由传统的“刚性”自动化, 借助于机器人发展到“柔性”自动化. 从而有了柔性生产过程, 这种更深刻的自动化概念的形成以及相应技术的付诸实施已经和正在对整个生产活动产生深刻的影响, 在这一进程中机器人扮演着关键的角色.

目前工业上大量应用的机器人主要是示教再现型和各种遥控操作器, 这就是通常所谓的第一代机器人. 为了进一步提高机器人的功能, 增加了各种传感系统(如视觉, 触觉、接近觉……)以提高对环境的感知能力, 在这些传感系统的支持下, 机器人就可以完成像焊缝跟踪、精密装配、元件检查, 环境探测等更为复杂的任务, 机器人本身也发展到一个更高的层次——带有传感系统可离线编程的机器人, 即所谓第二代机器人. 感知功能的加强使机器人技术产生了一个飞跃.

随着生产和技术的进步, 对机器人又提出了新的要求, 如要求机器人在水下、空间以及其他不适合于人类生活的环境中进行作业, 在救灾、排险等复杂的非结构环境中完成一些不能预料的任务, 这就要求机器人不仅要有感知功能, 而且还要有很强的动作能力, 同时还需要有一定的决策及规划能力, 即按照所处的环境及任务要求能自主地规划机器人的自身的运动, 这种类型的机器人就是智能机器人, 也就是所谓第三代机器人.

伴随着智能机器人的发展, 由计算机科学、机械电子学、信息科学、控制理论等多个学科交叉发展而形成的一门新兴的边缘学科——机器人学(Robotics)已经成为当今高技术发展的前沿之一. 它以智能机器人为背景, 涉及到多个学科, 是一个面很广的研究领域, 这一学科的核心是由以下三个方面构成的.

(1) 感知 由于智能机器人所要完成的任务的复杂性, 简单的传感信息已经不够了, 它需要更强的感知功能, 不仅能从环境中获取和处理多种信息, 还要通过这些信息去识别、理解环境的景物和变化, 要有自己的环境知识和模型, 并能对它进行实时修正. 要有在各种特

殊环境中的感知能力. 通过这种感知系统所得到的信息正是智能机器人控制系统中各个层次的输入和反馈信号.

(2) 思维 智能机器人要在非结构环境或人不可能介入的环境中完成一些非预定的任务, 例如在水下或外层空间进行设备检查和维修, 排险, 救灾中的事故处理等等, 需要机器人除了能识别理解环境外, 还要能在环境信息的基础上, 根据需要作出决策并规划自身的行动. 在遇到意外时有自救能力. 这就是它的自主性. 这种能力实质上是在各个智能层次上的控制.

(3) 动作 智能机器人所面临的任务往往是很复杂的, 完成这些任务往往需要机器人有更强的拟人功能. 工业机器人主要是手臂, 要加强对外界环境的作用能力, 拟人功能也要扩大到其他部分, 特别是模仿人腿和脚的功能的各种移动式机构成了智能机器人技术的一个重要组成部分. 由此而带来了一系列新的控制课题成为智能机器人控制的一个重要组成部分.

在机器人学这样一个广阔的背景下来看机器人控制有可能更好地抓住问题的实质和看清发展的方向.

智能机器人控制所要完成的任务可能是复杂的, 而最后实现动作的物理机构却是比较简单(如电机). 另一方面对智能机器人的控制要多种技术结合才能实现. 这样就形成了机器人控制系统的多层次、多模块结构的特点. 这种层次一般是按智能水平来划分的. 这种多层结构并没有一个统一的模式, 但是还是有一定的规律可循, 图 1 给出的是一个典型的、完整的智能控制系统的体系结构^[4]. 每一层分成三个模块: 任务分解模块 H, 将上一层的命令分解为下一层执行的子命令, 从而实现将复杂的任务逐层分解到物理执行机构能接受的命令(如电机电压); 世界建模模块 M, 它将根据传感器输入信息建立环境模型; 传感信息处理模块 G, 接受外界环境的信息并进行处理. 系统有一全局存贮器来存贮并交换信息, 每一层的输出对下一层起作用, 下层可以有信息反馈到上面的层.

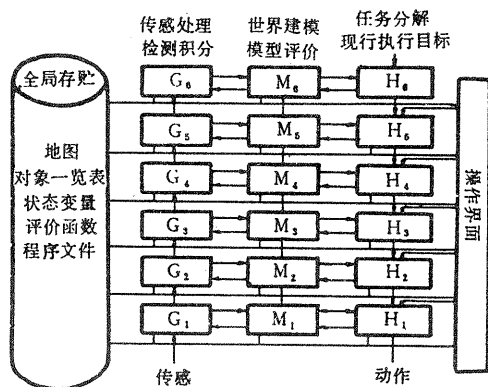


图1 多层递阶的智能控制结构

通过这样的系统就可以从时间和空间上逐步将复杂的目标分解成一些较简单的任务, 然后再规划完成这些任务的程序与途径. 一个具体的系统究竟分几层要视任务复杂程度而定. 但是不论什么系统, 最底层一定是执行机构的伺服控制层.

智能机器人的这种多层结构的特点, 贯穿在智能机器人的控制中.

2. 多关节机械臂的控制

目前, 控制理论应用于机器人大多数是针对多关节机械臂的关节伺服控制^[8,10], 这些工作除个别例外, 都还只有仿真结果. 由于目前的机器人控制器的能力(主要是运算速度)的限制, 同时也缺乏可供各种控制方法进行试验的环境, 真正的动态控制在实际中还未见有

2期

应用. 对 n 个关节的机械臂, 其动力学方程 (拉格朗日形式) 一般可表示为

$$\tau = D\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G, \quad (1)$$

或者写成分量形式

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n D_{ij}(\theta)\ddot{\theta}_j + I_{ai}\ddot{\theta}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk}(\theta)\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k + G_i(\theta), \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中 D_{ii} 表示第 i 个关节处的有效惯量, D_{ij} 表示关节 i 和 j 之间的耦合惯量, C_{ijk} 表示由于关节 j 的速度在关节 i 处产生的离心力, C_{ijk} 表示由于关节 j 和 k 处的速度产生的 Coriolis 力, G_i 表示关节 i 处承受的重力, I_{ai} 表示驱动装置的惯性, τ_i 是加到关节 i 上的力或力矩。

目前的机械臂 (直接驱动的除外) 是通过一套减速装置来驱动的。而减速系统的摩擦是消耗有效力矩的一个重要方面。对摩擦力建模是很困难的, 这也是模型 (1) 或 (2) 的仿真结果有时会 and 实际情况相距甚远的原因。

D_{ij}, C_{ijk}, G_i 都是关节角 θ (对平移关节则为位移量) 的非常复杂的非线性函数。在关节运动速度比较低的情形, D_{ii} 和 G_i 是优势项, 只有在高速运动时, 其他的项才会起显著的作用。

目前在商品化的机器人的伺服控制系统中都是用基于运动学模型的 PID 控制。这种控制在低速运动时可以达到一般工业应用的要求精度。但是在高速下的轨迹跟踪精度是没有保证的。

为了改善控制品质需要从两个方面着手: 改进控制策略以提高控制性能和改善控制器的环境 (提高运算速度和通讯能力) 以便执行更复杂的控制算法。控制算法的研究焦点在于如何从机器人的高度非线性、强耦合的动态特性出发去实现高性能控制。目前这方面的文章已非常多^[10], 这里将择其精要作一概括的讨论。

2.1 非线性反馈控制及补偿技术

目前已有的结果中相当大部分是针对如何用非线性反馈或某种非线性补偿技术将动力学模型中的非线性部分补偿掉, 使系统变成一个解耦的线性系统, 然后再用线性控制的办法去处理。典型的结果有计算力矩方法^{[10] - [14]}, 重解加速度方法^[15], 非线性反馈方法^{[16] - [18]}, 这些方法的基本问题都是如何寻找一种合适的反馈或补偿项。以计算力矩方法为例, 它是通过测量得到的 θ 和 $\dot{\theta}$, 在线计算补偿项

$$\hat{\tau} = C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta), \quad (3)$$

以及 $D(\theta)$, 再令

$$\tau = Du + \hat{\tau}. \quad (4)$$

于是系统变成

$$D(\ddot{\theta} - u) = 0. \quad (5)$$

只要不处于机器人的奇异位态, D 是正定的。所以上述系统很容易用线性方法去控制。

〔17〕,〔18〕是用微分几何的方法寻找非线性反馈以状态变换使机器人系统等价于一个输入输出解耦的线性系统.对此系统可用线性控制的方法去处理.

以上的方法在动力学模型精确的条件下可以达到很好的控制效果.另一方面,也存在着严重的问题.首先是真正精确的动力学方程是很难得到的,其次是那些方法都要求很大的在线计算量,这时目前的机器人控制计算机是难以胜任的.

2.2 变结构控制^{〔20〕-〔22〕}

近年来有不少人在这方面做工作.变结构控制的优点是它不需要知道精确的动力学方程,它在切换曲面上有滑模,在滑模上运动有很好的鲁棒性,但是它在接近目标点时容易产生抖动以及由于驱动功率的约束而可能造成的饱和非线性,使误差产生累积而造成大的偏差,所以迄今还不能在实际机器人上应用.

2.3 适应控制

由于机器人的模型往往不能精确地得到,适应控制就有可能成为机器人控制的一种适用的方法.因此近年来许多人在这方面做工作,一时成了机器人控制的热门课题之一^{〔23〕-〔30〕}.

应用于机器人的适应控制是针对参数不确定性的适应,模型参考适应控制^{〔25〕,〔26〕},自校正控制^{〔27〕},以及扰动适应控制^{〔29〕}等方法都有应用.

无论哪种方法,目前都还处于计算机仿真阶段,似乎还没有十分满意的结果.如自校正控制由于在线参数估计出现的正负误差交替而造成的抖动.在有减速系统的机械臂,由于未建模部分较严重,适应控制也难以奏效.虽然适应控制的思路应该是切合机器人控制的实际要求,但已有方法并不能达到这个目的,需要有新的概念和方法.

2.4 其他方法

其他如最优控制^{〔31〕,〔32〕},分散控制^{〔33〕,〔34〕},鲁棒控制^{〔35〕,〔36〕},学习控制^{〔37〕,〔38〕}等等都在机器人控制系统中有应用.但是,迄今为止,这些方法由于各方面的原因(计算量太大或控制品质不能满足要求)都未能真正应用到实际的机器人系统中去.

2.5 弹性臂控制

当手臂向长臂、轻型、重载发展,要保证高的定位精度就必须考虑到臂的弹性.目前已经研制成功有冗余自由度的6连杆的机械臂,总长26米,可抓重1.5吨,末端的重复定位精度 ± 15 毫米.这是应用了弹性臂控制的成功的例子.

弹性臂本质上是一无穷维系统,为了要对它进行控制,首先要考虑建模问题.目前所用的方法主要是通过模态(mode)分析,略去高阶模态得到简化模型,用一有限维系统来设计控制策略.已见发表的结果^{〔39〕-〔42〕}大多是针对一个杆来进行研究,并未有十分满意的结果.在实现上也受传感器和执行机构的限制,有限个位移的测量,单个驱动装置控制,存在困难较多.另一方面,从建模到控制在理论上还存在不少问题有待解决,因此引起了人们广泛的兴趣.

总之,多关节机械臂伺服控制已做了大量的工作,但真正在系统中能应用的是很少的.当前一个重要的任务是在真实的机器人系统上对现有的成果进行实验评价,从而做出有价值的结论性意见.

3. 基于传感器的信息的控制

众所周知, 控制系统中反馈信息对提高控制品质是十分重要的. 目前的多关节机器人控制基本上只有关节位置反馈, 由于检测技术的困难, 对工作空间的绝对位置而言只是开环控制. 也就是说, 在工作空间的位置控制精度是不清楚的. 因此, 大力发展传感技术是提高机器人控制的一个重要方面. 只要能增加反馈信息就有可能大大改善控制品质, 如能在关节上增加加速度传感器, 即有加速度信号反馈, 则伺服控制就会有明显的改善. 又如靠开环 (没有空间位置信号反馈) 控制跟踪和定位精度需要付出很大的代价 (提高机械精度和改进控制系统). 如果能通过某种传感系统增加位置反馈, 就很容易提高精度.

在精密装配作业中, 发将一轴插入孔内, 轴径与孔径公差是微米级. 如果只靠定位系统去完成这一任务, 定位精度要求很高, 即使加上视觉信息的帮助也很困难的. 但是, 在加上力/力矩传感器后, 靠力觉信息反馈, 完成这一任务就比较容易了.

基于传感器信息的控制是第二代机器人的重要特征, 也是智能机器人的必不可少的组成部分. 传感信息是机器人智能的基础, 在当前传感技术发展的水平上, 最受重视的视觉和触觉 (包括力觉).

机器人视觉涉及图象处理、模式识别等多个学科的知识, 这里就不再深入地讨论了.

另一种重要的感觉是力觉, 它是当机器人与环境接触时力的测量. 对许多作业, 如开关阀门, 拧螺栓, 擦玻璃, 抛光, 装配等都需要凭借力的反馈来完成. 所以力控制是机器人控制中的一个重要课题, 对力的控制意味着机器人控制进入一个新的水平.

力的控制目前主要有两种: 阻抗控制即将力的控制转化为位置控制^{[43], [44]}, 当位置偏离给定值后, 形成一恢复力. 它在控制中不具体地要求位置或力, 而是要求它们之间的一个动态关系.

对于一般误差情形, 令 $e = x - x_d$, 表示在工作空间实际位置与要求位置之差. 考虑到经动态补偿后的系统 (5), 可用控制律

$$\tau = G(q) - J^T(q)(K_p e + K_d \dot{e}). \quad (6)$$

注意在速度不太大时, 补偿项中的 $C(q, \dot{q})$ 较小故略去. $K_p e + K_d \dot{e}$ 是表示工作空间的力, K_p 是刚性矩阵, K_d 是阻尼矩阵. 通过 $J(q)$ 将工作空间的力转换到关节空间. 为了在接触时保持较好的刚性希望 K_p 能大一些. 要使

得 (6) 有好的效果, 需要有反馈信号 e 和 $\dot{e}$,

而这在目前是有困难的. 从 (6) 可以看出阻抗控制是将力的控制转化为位置的控制.

另一种是真正的接触力的控制, 阻抗控制中机器人末端和环境的接触是一种软接触.

在末端和环境真正有刚性接触时控制就比较复杂. 由于接触环境和机器人末端都可能产生形变 (如图 2), 这种形变可以用一个向量 $\tilde{x}_E$ 来表示

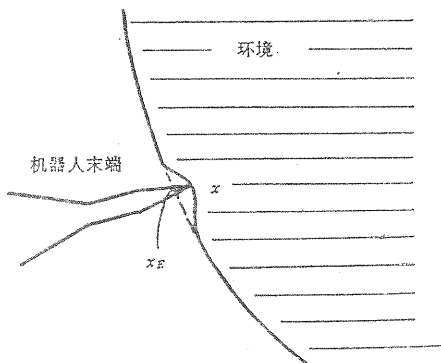


图 2 力控制

$$\begin{aligned}\tilde{x}_E &= x - x_E && \text{当接触时} \\ &= 0 && \text{其他}\end{aligned}$$

这时的恢复力可以表示为

$$F_E = -K_E \tilde{x}_E, \quad (7)$$

其中正定矩阵 K_E 指出了环境的刚性. 当机械臂末端和环境的刚度都很大时, 系统是很难控制稳定的. 当系统从不接触进入接触时, 恢复力有一很强的非线性变化. 为了控制稳定必须将终端位置控制得非常精确, 这在目前的光码盘位置反馈控制回路中是做不到的, 而且其他的因素也将起严重的影响. 在刚性接触中力控制的稳定性在目前的腕力传感器条件下还是难以解决的. 但这个问题是很重要的, 需要付出更多的努力去研究.

除了力控制外, 还有一种力与位置混合控制^{[47], [48]}, 即将机器人的自由度分成力控制的和位置控制的. 力控制的自由度用腕力传感器取出反馈信号. 当然这些自由度是在工作空间划分的. 目前存在的问题是取到工作空间的位置误差和速度误差信号十分困难.

这里以力控制为中心对基于传感器的控制作了一些剖析. 对于不同的传感信息控制的内容也会有不同, 但是总的思路是类似的. 为了提高机器人的智能水平, 目前正在发展多传感器系统. 对这种系统就要很好的考虑多个传感器的协调, 以及传感器信息的融合(处理有矛盾的信息), 这些都是高层次控制系统要完成的重要任务.

4. 移动式机器人的控制

移动性是机器人发展的重要趋势, 因此移动式机器人就成为当前机器人技术发展的一个热点. 由于移动给控制带来了一系列新的问题, 特别是步行式(多足)机器人的控制还有许多问题需要解决^{[1], [2]}.

步行机器人的控制是比较复杂的, 例如美国研制的6足山地搬运车的样机, 控制计算机是18个CPU组成的多处理器系统, 而机载软件达2M字节.

移动式机器人总是要在某种环境中运动, 如在地面、水下、空间……, 这时就需要将某种支撑功能和某种推进功能联系起来.

两腿或多腿系统几乎可以在所有的能支撑它们的地面上运动并且可以克服大多数障碍物. 所以研究多腿系统引起了越来越大的兴趣.

多腿步行机器人控制的基本问题是在地面上寻求能支撑它自身并能保持稳定的方式, 同时再沿着要求的方向运动. 要解决这种控制问题是比较复杂, 因为控制策略不仅要给出一条运动的轨迹, 而且还要给出为了保持稳定腿和身体的移动方式. 而这种移动方式(即步行机器人的步幅、步态)又与腿和身体的结构有关, 也与路面的情况有关.

概括地说, 步行机器人(有些问题对其他移动式机器人也是适用的)需要研究的问题有:

(1) 从任务出发, 步行机器人的综合问题. 即需要多少条腿? 每条腿需要多少个自由度? 用什么样的足和地面接触? 需要哪些传感信息.

(2) 从运动的稳定性出发, 对步行机器人的步幅、步态的控制. 特别是动态步态的控制, 即当步行机器人的运动速度较快时, 将会产生整个机器人的重心移出支撑区域的情形, 这样显然是不稳的, 机器人控制就要用稳-不稳-稳的过程来获得较快的运动速度.

- (3) 步行机器人建模, 即它的运动学和动力学研究。
- (4) 障碍物的识别以及躲避障碍的运动规划。这里还需要注意到, 是否能躲避障碍与机器人本身的结构与功能有关。例如是否具有爬高的能力对躲避障碍就有很大关系。
- (5) 由于机器人本身的柔性 (为了增强运动的能力是必需的) 而带来的适应控制问题。
- (6) 在多传感器基础上对环境的识别、理解, 并由此而进行的自动导航。非结构环境中的自动导航从技术上和理论上都还有许多问题需要解决。

5. 多肢体机器人的控制

人在完成各种作业时一般都是多肢体同时使用的, 例如双手并用, 多指同时工作等。机器人为了增强功能, 提高拟人化的程度, 朝多肢体发展是一个重要的方面。多肢体机器人控制当前感兴趣的研究领域主要是多手指系统和多臂系统。

多手指系统^[52] 每一个手指类似于一个多关节机械臂, 关于臂关节的伺服控制可以应用到手指上来, 但多手指系统还有其自身的特点。首先, 由于多手指并用完成同一任务, 所以存在多手指协调运动的问题。其次, 多手指系统运动的主要目的是进行抓取, 而抓取的对象是不固定的。抓一种物体, 系统就处于一种特定的模式。对这种模式如何描述, 对特定的物体如何确定相应的抓取模式? 如何控制多手指去实现要求的抓取模式? 这些都是感兴趣的问题。在一定程度上是传感信息、人工智能和控制相结合的问题。

对于多臂系统, 在机器人的应用场合已提出许多要求, 如复杂的装配, 水下作业, 外层空间的维修服务等等。多臂作业相互之间有影响, 它们的运动需要在更高层次上进行协调 (和多手指类似)。由于受约束, 一些基本概念, 如自由度, 运动学, 动力学, 需要重新研究。

双臂协调控制是目前机器人学研究的热点之一。主要关心的控制问题^[3] 是: 协调运动的规划和躲避障碍; 建模与控制策略。重点的问题是要对约束能准确地描述。从控制系统来看, 要在伺服控制级上建立一个协调控制器, 研究各种协调控制策略, 将是这一级的目标。这里的协调包括多传感信息的协调 (融合), 多臂运动的协调, 适应控制策略, 双臂协调的体系结构和传感器等等。

6. 结 束 语

机器人学的研究和机器人技术的发展已经成为当今高技术的前沿领域之一。机器人控制是机器人学的一个重要的方面, 近十余年来, 有了很大的发展。面对浩如烟海的文献, 要做一个全面的分析和恰当的评价是十分困难的。本文仅从最近几年我国高技术发展所涉及的有关的几个方面对机器人控制的现状作一分析, 提出一些值得研究的问题, 它不是一个文献综述, 所以没有去全面地引述有关的文献, 好在这方面每年都有专门的学术会议, 可以查阅它们的论文集^[10]。

机器人控制是以机器人为特定对象, 所以深入了解机器人技术的各个方面, 对研究机器人控制是十分重要的。机器人技术涉及面很广, 而控制又渗透到机器人技术的各个方面, 所以各个学科的结合是推动机器人控制发展的必要的基础。

参 考 文 献

- (1) Coiffet, P., Research Trends in Advanced Robotics, 3rd Int. Conf. on Advanced Robot, (1987).
- (2) Brady, M., Things to Work on in Robotics, Introduction of "Robotics Science"(Brady ed.), (1989).
- (3) Koivo, A. J., and G. Bekey, Report of Workshop, on Control and Applications, (1987).
- (4) Albus, J. S., H. G. McCain, and R. Lumia, NASA/NBS Standard Reference Model for Tele robot Control System Architecture(NASREM), NBS Technical Note 1235, (1987).
- (5) Saridis, G. N., Intelligent Robotic Control, IEEE Trans on Automatic Control, AC-28, (1983).
- (6) Nitzan, D., Development of Intelligent Robots: Achievements and Issues, IEEE E. J. of Robotics and Automation RA-1, (1985).
- (7) Rembold, W., and R. Dillmann, Design of the Structured Robot Language(SRL), Annual Report of Institute for Real-time Computer Control Systems and Robotics, Univ. of Karlsruhe, FRG, (1987).
- (8) Fu, K. S., R. C. Gonzalez, and C. S. G. Lee, Robotics: Control Sensing, Vision, and Intelligence, McGraw-hill, (1987).
- (9) Wolovich, W. A., Robotics: Basic Analysis and Design, Holt, Rinehart and Winston, (1987).
- (10) Proceedings of 1st-7th IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation.
- (11) Paul, R. P., Modelling, Trajectory Calculation and Servoing of A Computer Controlled Arm, Stanford AI Lab. Memo AM-177, (1972).
- (12) Bejczy, A. K., Robot Arm Dynamics and Control, J. P. L. TM 33-669, (1974).
- (13) An, C. H., C. G. Atherton, J. d. Griffiths, and J. M. Hollerback, Experimental Evaluation of Feedforward and Computed Torque Control, IEEE Conf. on Robotics and Automation, (1987).
- (14) Khosla, P. K., and T. Kanade, Real-time Implementation and Evaluation of Model-based Controls on CMU DD Arm II, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1986).
- (15) Luh, J. Y. S., M. Walker, and R. Paul, Resolved-Acceleration Control of Mechanical Manipulators, IEEE Trans. on Automatic Control, AC-25, (1980).
- (16) Freund, E., Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole Placement for Industrial Robots and Manipulators, Int. J. of Robotics Research, 1, (1982).
- (17) Tarn, T. J., A. K. Bejczy, A. Isidori, and Y. L. Chen, Nonlinear Feedback in Robot Control, Proc. 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, (1984).
- (18) Tarn, T. J., A. K. Bejczy, and X. Yun, Nonlinear Feedback Control of Multiple Robot Arms: Closed Chain and Force Feedback Formulations, Proc. of the NASA Workshop on Tele robotics, JPL, (1987).
- (19) Hsia, T. C., T. A. Lasky, and Z. Y. Guo, Robust Independent Robot Joint Control: Design and Experimentation, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1988), 1329-1334.
- (20) Young, K. K. D., Controller Design for a Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, SMC-8, (1978).
- (21) Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Applications to Robot Manipulators, Int. J. of Control, 38, (1983).
- (22) Slotine, J. J. E., Robustness Issue in Robot Control, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1985).

- (23) Hsia, T. C., Adaptive Control of Robot Manipulators ——A Review, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1986).
- (24) Dubowsky, S., and D. T. Desforge, The Application of Model Reference Adaptive Control to Robotic Manipulators, Trans. ASME J. of DSC, 101, (1979).
- (25) Nicosia, S., and P. Tomei Model Reference Adaptive Control Algorithm for Industrial Robots, Automatica, (1984), 635—644.
- (26) Lim, K. Y., and M. Eslami New Controller Design for Robot Manipulator Systems, Proc. ACC, (1985), 38—43.
- (27) Koivo, A. J., and T. M. Guo, Adaptive Linear Controller for Robotic Manipulators IEEE Trans. AC—28, (1983), 162—171.
- (28) Leininger, G. G., Adaptive Control of Manipulators Using Self-tuning Methods, CH. 9, "Robotics Research" ed. by M. Brady and R. Paul, (1984).
- (29) Takesaki, M., and S. Artimoto, An Adaptive Trajectory Control of Manipulators, Int. J. Control, 34, (1981), 201—217.
- (30) Lu, G. Z., and G. Gao A New Combination Controller for Robot Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on System, Man, and Cybernetics, (1988), 75—78.
- (31) Shin, K. G., and N. Mcday, Minimum Time Control of A Robotic Manipulator with Geometric Path Constraints, IEEE Trans., AC—30, (1985).
- (32) Dubowsky, S., Nirris, M. A., and Z. Shiller, Time Optimal Trajectory Planning for Robot Manipulators with Obstacle Avoidance: A CAD Approach, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1986).
- (33) Arimoto, S., and Miyazaki, F., Stability and Robustness of PID Feedback Control for Robot Manipulators and Sensory Capability, 1st Int. Symp. of Robot Research, (1983).
- (34) Vukobratovic, M., and D. Stokic, One Engineering Concept of Dynamic Control Algorithms of Manipulation Robots, Springer-verlag, 1982. Robot Control, Proc. 4th Yale Workshop on Applications of Adaptive Systems Theory, (1985).
- (35) Spong, M. W., and Vidyasagar, Robust Nonlinear Control of Robot Manipulators, Proc. 24th IEEE Conf. on Decision and Control, (1985).
- (36) Spong, M. W., J. S. Thorp, and J. M. Kleinwaks, The Control of Robot Manipulators with Bounded Input, Part II: Robustness and Disturbance Rejection, Proc. 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, (1984).
- (37) Arimoto, S., Mathematical Theory of Learning with Applications to Robot Control, Proc. of 4th Yale Workshop on Applications of Adaptive Systems Theory, (1985).
- (38) Kawamura, S., F. Miyazaki, and S. Arimoto, Applications of Learning Method for Dynamic Control of Robot Manipulators, Proc. 24th IEEE Conf. on Decision and Control, (1985).
- (39) Biswas, S., and R. Kjafter, Dynamic Modeling and Optimal Control of Flexible Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1988).
- (40) De Luca, A., Dynamic Control of Robots with Joint Elasticity, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1988).
- (41) Korolov, V., and Y. Chen, Robust Control of a Flexible Manipulator Arm, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1988).
- (42) Menq, C. H., and J. S. Chen, Dynamic Modelling and Payload Adaptation of a Flexible Manipulator, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1988).

- (43) Hogan, N., Impedance Control: An Approach to Manipulator, Trans. ASME J. DSC, 107, (1985).
- (44) Khatib, O., The Operational Space Formulation and the Analysis, Design and Control of Robot Manipulators, 3rd Int. Symp. on Robotics Research, Gouvieux, (1985).
- (45) Craig, J. J., Introduction to Robotics: Mechanics and Control, Addison-Wesley, (1986).
- (46) Asada, H., and J. J. E. Slotine, Robot Analysis and Control, John Wiley and Sons, (1986).
- (47) An, C. H., and J. M. Hollerbach, Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1986).
- (48) Paul, R. P., Problems and Research Issues Associated with the Hybrid Control of Force and Displacement, Proc. IEEE Int. on Robotics and Automation, (1987), 1966—1971.
- (49) Lim, S. Y., J. Y. S. Luh and Y. F. Zheng, An Experimental System of Intelligent Robots with Multiple Sensors, Res. Report of Dept, ECE, Clemson University, (1988).
- (50) Zheng, Y. F., Stability Practical Biped Robots Disturbed by External Impacts, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1987).
- (51) Devjanin, E. A., S. W. Zhitomirskij, D. N. Zhiharev, and A. V. Lenskij, Control of Adaptive Walking Robot, Proc. IFAC 10th World Congress, (1987), 218—225.
- (52) Kriegman, D. J., D. M. Siegel, and G. E. Gerpheide, Computational Architecture for the UTAH / MIT Hand, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, (1985), 918—924.
- (53) 蒋新松. 机器人及机器人学中的控制问题. 中国自动化学会年会, (1987) .
- (54) 郭传繁、冯元琨. 一种新的机器人控制方法——非线性补偿综合离散模型跟踪自适应. 全国控制理论及其应用年会论文集, (1986) .
- (55) 曲道奎、蒋新松. 一种新的机器人自适应控制方式. 机器人, 1, 3, (1987) .
- (56) 刘勇、程勉、高为炳. 机械臂的动态混合控制. 机器人, 1, 3, (1987) .
- (57) 董太全、干东英. 六足步行机爬步态和运动干涉问题的研究. 机器人, 3, 1, (1989) .
- (58) 钱涛、张融甫. 可用作步行机腿的机构研究. 机器人, 3, 1, (1989) .

The State-of-art and Problems in Robot Control

Lu Guizhang

(Department of Computer and System Science, Nankai University, Tianjin)

Abstract: Robotics is an interdisciplinary field that ranges in scope from sensing technology, computer science control theory and artificial intelligence. Numerous results addressing aspects of the robot control have been reported in the literature in recent years. The purpose of this paper is to present a review of these existing developments and some open problems in robot control.

Key words: robotics; robot control