

可重构机械臂 分散控制及主动容错控制 方法研究

杜艳丽 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

可重构机械臂分散控制及 主动容错控制方法研究

杜艳丽 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

可重构机械臂分散控制及主动容错控制方法研究/杜艳丽著. —武汉:武汉大学出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-307-16286-0

I. 可… II. 杜… III. ①机械手—分散控制—控制方法—研究 ②机械手—自适应控制—容错技术—控制方法—研究 IV. TP241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 148128 号

责任编辑:刘小娟 王小倩 责任校对:方竞男 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:7.5 字数:150千字

版次:2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷

ISBN 978-7-307-16286-0 定价:42.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

有别于传统机械臂,可重构机械臂能够根据任务需要组合成不同构形去完成不同的任务,其模块化的特点使其具有适应性强、成本低、容错性好、稳定性高等特点。现今,可重构机械臂已被广泛应用于危险环境作业、军事、空间探测、工业、医学、娱乐等领域,代替人类去完成很多其无法完成的工作。因此,对可重构机械臂进行研究具有重要的理论价值和实际意义。

基于可重构机械臂模块化的思想,当其在自由空间运动时,需要对各关节进行分散轨迹跟踪控制。方法是将原本复杂的机械臂动力学系统分解为多个关节子系统,再分别为各个关节子系统设计控制器,且关节子系统控制器只需要自身关节的局部信息。因此,如何抑制各子系统间的耦合关联作用,就成为了分散控制的关键问题。在应用 Lyapunov 稳定性理论证明控制系统稳定性时,没有一个构造 Lyapunov 函数的通用算法。反演控制方法的出现解决了 Lyapunov 函数缺乏构造的问题,但如何解决其“计算膨胀”问题一直是制约其发展的瓶颈。当各关节期望轨迹出现大的跳变时,可能会出现由状态跳变引起的速度跳变问题(在速度跳变点需要很大的加速度来实现,相应的驱动力或力矩就会很大,这往往会超出电动机本身所能达到的最大值),如何解决该问题,关系着实际应用中可重构机械臂是否能平滑地跟踪期望轨迹。可重构机械臂在代替人类完成诸如航天任务、维护核设施等遥操作和危险工作的同时,其传感器、执行器等部件常会发生不可避免的故障,这些故障如不及时识别和排除,将严重影响可重构机械臂完成任务的质量,甚至导致不可预知的严重后果。为了提高可重构机械臂的作业可靠性,故障辨识及容错控制技术已成为其迫切研究的课题。当可重构机械臂在执行精密装配、抓取、搬运等任务时,除对关节角及末端位置进行控制外,还要求控制其与环境的接触力。可重构机械臂各关节没有力矩传感器,这势必会影响反馈控制效果。此外,传统的鲁棒控制要求控制器必须精确实现,这使得控制器自身的鲁棒性较差,因此如何提高控制器自身的鲁棒性成为了影响可重构机械臂实际应用的关键因素。

本书针对以上问题,主要研究了可重构机械臂运动学与动力学模型的建立、基于改进 PSO 的可重构机械臂逆运动学的求解、基于 ESO 和 DSC 的反演分散控制、基于生物启发策略的自适应反演快速终端模糊滑模控制、基于迭代学习故



障跟踪观测器的可重构机械臂执行器故障主动容错控制、多故障同发的可重构机械臂主动容错控制、基于非线性关节力矩观测器的可重构机械臂双闭环分散力控制及基于 LMI 的可重构机械臂非脆弱鲁棒分散力/位置控制等。

本书反映了本领域的研究前沿和主流方法,其中给出的设计方法在工程领域有一定的应用前景,可供工程技术人员参考。对于相关理论问题,也给出了详尽的推导和证明,适合博士生、硕士生在进行学位论文研究中学习、参考。

本书在撰写过程中得到了吴勇、关海爽、赵莹三位老师的帮助和指导,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中缺点和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2015 年 5 月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 国外研究现状	(2)
1.2.2 国内研究现状	(5)
1.3 可重构机械臂研究的关键问题	(6)
1.3.1 运动学建模	(7)
1.3.2 动力学建模	(8)
1.3.3 轨迹跟踪控制	(8)
1.3.4 力控制	(9)
1.3.5 主动容错控制	(10)
1.3.6 构形优化	(11)
1.4 本书的主要内容	(11)
2 可重构机械臂运动学与动力学建模	(13)
2.1 引言	(13)
2.2 基于旋量理论的可重构机械臂正运动学的指数积公式	(13)
2.3 可重构机械臂的逆运动学	(15)
2.3.1 目标函数	(15)
2.3.2 基于改进粒子群优化算法的逆运动学求解	(16)
2.3.3 仿真研究	(17)
2.4 基于运动旋量的可重构机械臂动力学分析	(19)
2.5 本章小结	(25)
3 可重构机械臂分散轨迹跟踪控制	(26)
3.1 引言	(26)
3.2 基于 ESO 的分散自适应模糊控制	(27)



3.2.1	问题描述	(27)
3.2.2	基于 ESO 的分散自适应模糊控制器设计及稳定性分析	(27)
3.2.3	仿真研究	(30)
3.3	基于 ESO 和 DSC 的反演分散控制	(31)
3.3.1	控制器设计及稳定性分析	(31)
3.3.2	ESO 参数 $\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}$ 的粒子群算法训练流程	(34)
3.3.3	仿真研究	(35)
3.4	基于生物启发策略的自适应反演快速终端模糊滑模控制	(37)
3.4.1	生物启发模型简介	(37)
3.4.2	自适应反演快速终端模糊滑模控制器设计	(38)
3.4.3	仿真研究	(41)
3.5	本章小结	(46)
4	可重构机械臂分散主动容错控制	(47)
4.1	引言	(47)
4.2	故障描述	(48)
4.3	基于迭代故障观测器的可重构机械臂执行器故障主动容错控制	(49)
4.3.1	迭代故障观测器设计及其收敛性分析	(49)
4.3.2	控制器设计	(54)
4.3.3	仿真研究	(56)
4.4	多故障同发的可重构机械臂主动容错控制	(61)
4.4.1	问题描述	(61)
4.4.2	基于滑模观测器的故障重构及容错控制律设计	(61)
4.4.3	仿真研究	(68)
4.5	本章小结	(73)
5	可重构机械臂分散力/位置控制	(74)
5.1	引言	(74)
5.2	基于非线性关节力矩观测器的可重构机械臂双闭环分散力控制	(75)
5.2.1	问题描述	(75)



5.2.2 基于辅助变量的非线性关节力矩观测器设计	(76)
5.2.3 双闭环分散力控制器设计	(78)
5.2.4 仿真研究	(80)
5.3 基于 LMI 的可重构机械臂非脆弱鲁棒分散力/位置控制	(85)
5.3.1 非脆弱鲁棒分散力/位置控制器设计	(86)
5.3.2 仿真研究	(91)
5.4 本章小结	(96)
6 全书总结	(97)
参考文献	(99)

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

传统的工业机械臂是根据具体的工作环境和任务来开发的,对于装配、焊接等单一、具体的任务来说,构形固定的机械臂已能满足实际需要。然而在工作空间受限或复杂多变的环境(如空间探测、核废料回收和军事侦察等)下,设计一个满足此类工作要求的机械臂系统是不切实际的,可重构机械臂就是在这种工业应用背景下应运而生的,它能根据任务需要组合成不同构形去完成不同的任务。可重构机械臂根据改变构形方法的不同分为静态可重构机械臂和动态可重构机械臂。静态可重构机械臂是由工作人员干预来完成构形的设计、装配的,而动态可重构机械臂构形的变化则是依靠其自身模块间的运动来实现的,所以其又被称为自重构机械臂。本书研究的是静态可重构机械臂。

与传统的机械臂相比,可重构机械臂具有适应性强、成本低、稳定性高等特点。近年来,可重构机械臂的应用领域正随着计算机、微电子和网络等技术的快速发展而逐步扩展。现在,可重构机械臂已被广泛应用于危险环境作业、军事、空间探测、工业、医学、娱乐等领域。例如,当发生核泄漏或海上原油泄漏事故时,可重构机械臂借助自身高度的灵活性与柔性,能够代替人去完成危险任务;在军事领域,由于可重构机械臂能够根据实地环境自动重构成能适应不同环境和任务的最好构形,因此其可代替人完成探测、攻击、排爆等多种不同的任务;在空间探测领域,航天器的有限载荷限制使其不能将大量构形固定的机械臂都运送到空间站,可重构机械臂可以很好地解决此类问题且可以避免人类探索外太空所会遇到的各种危险;在医学领域,医生利用吞服式机器人更易接近患者伤口。患者先将多块 ARES 机器人(可重构装配腔内手术系统)吞入腹中,或者通过自然切口由医生一块块插入人体,ARES 机器人进入人体受损部位后,按照要求自行组装成一个完整的手术工具。随着人工智能、仿生学等领域的不断发展,可重构机械臂系统的研究范围也在不断扩大,势必将更加广泛地应用于自动控制、工业、农业及军事等领域。



目前,国内外针对可重构机械臂的研究主要包括运动学与动力学的建模、自由空间的轨迹跟踪控制、容错控制、受限空间的力/位置控制及构形设计等几个方面。因为可重构机械臂逆运动学解并不唯一,所以如何求其逆运动学解一直是研究的热点及难点。近年来,国内外有很多文献对可重构机械臂在自由空间的轨迹跟踪控制进行了研究,但在可重构机械臂关节分散控制方面的研究成果并不多,在进行分散控制时对各关节间的耦合关联项及建模不确定性等进行处理时没有好的办法,且没有考虑到由状态跳变所引起的速度跳变问题。在主动容错控制方面,当可重构机械臂执行器发生故障时,如何实现执行器故障的实时辨识将直接影响容错控制器的控制性能。目前,对整个可重构机械臂系统的容错控制主要考虑的是每一时刻只有一个故障发生时的控制,对多个故障同时发生时的故障辨识及主动容错控制器设计还需要进一步研究。现有的可重构机械臂各关节没有关节力矩传感器,仅在末端执行器安装有力/力矩传感器,这势必会影响反馈控制的效果,在此情况下,应对各关节力矩进行观测。以往的鲁棒控制是指允许被控对象模型在一定范围内存在不确定性,它的前提是控制器必须准确实现,但在实际操作过程中,由于软、硬件等因素的影响,可能导致控制器本身出现脆弱性,所以研究可重构机械臂系统的非脆弱鲁棒分散力/位置控制具有重要的实际意义。因此,针对上述问题对可重构机械臂进行研究具有重要的理论和实际意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

国外对可重构机械臂的研究起步较早。20世纪80年代末,美国卡内基·梅隆大学机器人研究所研制出世界上第一台工业用可重构模块化机器人RMMS。日本东芝公司也研制了一个比较典型的可重构机器人系统TOMMS,它的组成包括关节模块和连杆模块、带有操纵杆的控制单元,使用长度可调的连杆模块和关节模块能够装配成各种构形去完成不同的任务。加拿大多伦多大学的MMS系统包括移动和旋转两种单自由度的主关节模块、三种单自由度的末端操作器关节模块和连杆模块。德国AMTEC公司生产了Power Cube模块,目前,为满足各种生产需要已研制出各种特定的机器人。新加坡南洋理工大学采用德国AMTEC公司的Power Cube模块,重构了Puma机器人、四自由度SCARA模块机器人及模块机器人工作站。加拿大Engineering Services Inc.公



司生产了可重构机器人系列模块(简称 MRR),其中的转动模块、三自由度手腕及由 MRR 系列模块构成的 SCARA 机械臂,如图 1.1 所示。该公司还开发了几种不同功率的模块以适应不同场合的应用。Palo Alto 研究中心(PARC)的 Yim 等人开发出一种链式可重构机器人系统 PolyBot G3,如图 1.2 所示。该系统中的每个模块均为边长约 50 mm 且具有一个转动自由度的立方体,它们能够动态地构成 PolyBot 可重构机器人去实现多种模式的运动。美国华盛顿大学的 Eric 等人为研究多个可编程部件如何进行自重构,研制出了一种测试平台,如图 1.3 所示。在气动工作台上,若干个可编程部件随机地受到气动激励而运动,各部件在碰撞、连接时相互能够通信并决定是否与其他部件结合或分离及何时结合或分离。

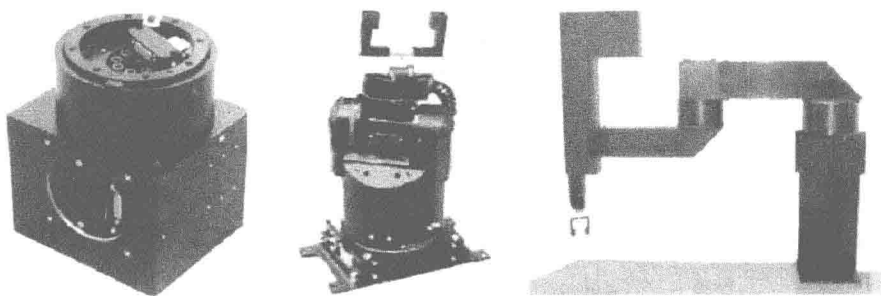


图 1.1 转动模块、三自由度手腕及由 MRR 系列模块构成的 SCARA 机械臂

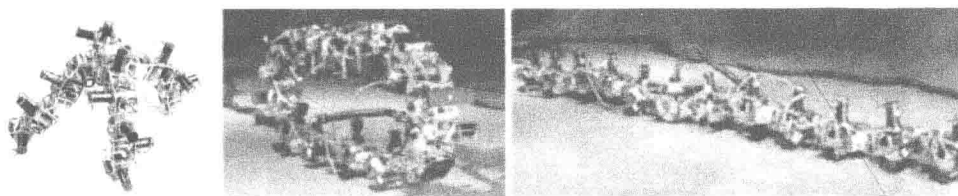


图 1.2 PARC 的 PolyBot G3

美国麻省理工学院的 Kyle 等人研发出一种能够组成任意构形的点阵晶格式模块化系统 Mice,如图 1.4 所示。该系统可实现自重构并通过多次实验证明了它具有超强的操作能力。各个模块配有带红外系统的通信装置,以此来检测其他相邻模块的存在。当组合成某种构形时,该模块体系参照信息传输和存储最小化准则能够决定保留或剔除哪个模块,被剔除的模块将在外力的作用下退出模块体系。2010 年,巴西保利斯塔大学的 Alexandre da Silva Simões 等人



提出了一种开放式的机器人系统 TORP,该机器人系统由具有一定标准化的电气和机械模块组成,适用于不同构形的机器人。2011 年,卡内基·梅隆大学的 Chytra Pawashed 等人研发出一套微型可重构模块 Mag- μ Mods,该模块是尺寸为 $900\text{ }\mu\text{m}\times 900\text{ }\mu\text{m}\times 270\text{ }\mu\text{m}$ 的永磁铁,其拆卸和组装主要依靠外磁场和静电锚固。

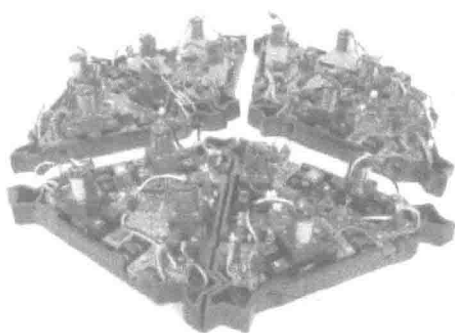


图 1.3 华盛顿大学的自重构可编程部件



图 1.4 麻省理工学院研发的 Miche

Harada 等人开发了一种由 12 个 2-DOF 模块组成的可重构腔内手术机器人,如图 1.5 所示。手术所需要的各种器械可由模块根据需要携带,该机器人在

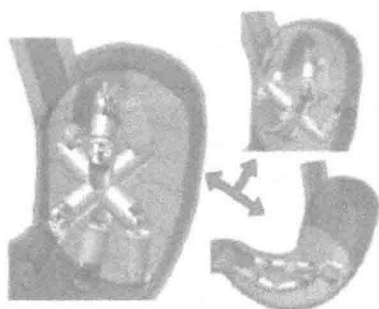


图 1.5 可重构腔内手术机器人

进入病人体内后可根据手术要求在患处进行重组以完成多种特定的手术。R. Gro 等人研发了 S-Bots 机器人群。S-Bots 机器人群中的每个机器人都是独立的 9-DOF 机器人,具备轮式和履带式两种移动平台并配备夹持器和机械臂。H. B. Brown 在 R. Gro 等人的基础上提出了一种模块机器人系统 Millibots,如图 1.6 所示。该模块需通过一个 SMA 驱动锁定机构来手动完成重新配置。A. Lyder 等人对 Odin 模块机器人(图 1.7)进行了研究,它通过模块的扩张和

收缩来形成晶格结构,晶格在柔性连杆扩张或收缩时可形成三维空间构形。H. Kurokawa 等人在满足自适应移动的前提下提出了一种高度灵活的混合形态态机器人 M-TRAN,如图 1.8 所示。它由半圆柱模块连接在一起形成晶格或链式结构,其中的每一个模块都是由能绕关节转动的半圆形被动模块和主动模块组成的。

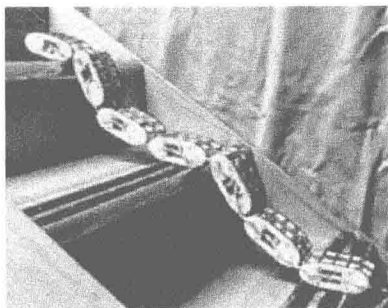
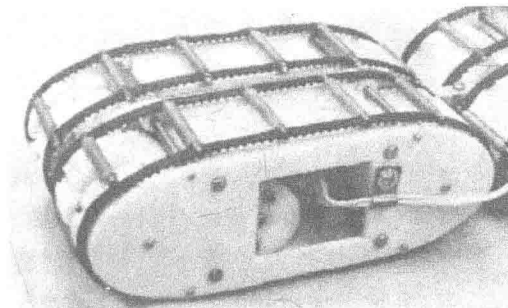


图 1.6 Millibots 模块和七个 Millibots 模块串联的构形

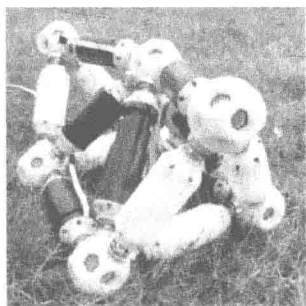


图 1.7 Odin 模块机器人

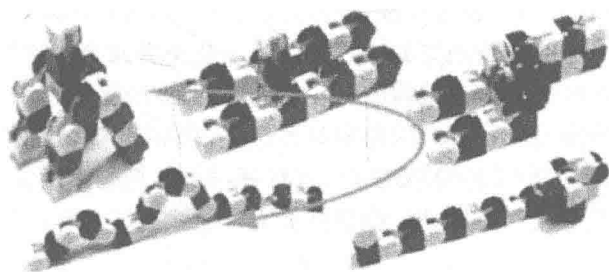


图 1.8 M-TRAN 机器人

1.2.2 国内研究现状

国内可重构机械臂的研究工作目前还处于探索阶段。清华大学的郑浩峻等人将可重构单元分为旋转单元、摆动单元和辅助单元,并建立了可重构机器人模块单元的几何模型,通过组合数学理论分析了机器人的组合装配特性。上海交通大学的费燕琼等人重点研究了可重构机械臂模块的结构、正逆运动学求解和动力学等方面。Sun Yi 等人设计出了一种腿部和身体都能进行重构的模块化机器人 MiniQuard I,如图 1.9 所示,它通过不同的模块配置可重组成四足或六足爬行机器人。

东北大学的李树军等人重点研究可重构模块化机器人的模块结构,给出了七种具有独立功能的模块,两种辅助模块、两种连杆模块和三种单自由度的关节模块。中国科学院沈阳自动化研究所的王明辉等人研制出了星球探测可重构机器人。该机器人包括三角履带轮(子机器人)和车体(主机器人),其中,三角履带轮根据探测需要还带有一只机械臂,可完成越障、搬运、采样、测绘等工作。北京航空航天大学的王田苗等人开发了一种可重构履带机器人,其组成包括四种基

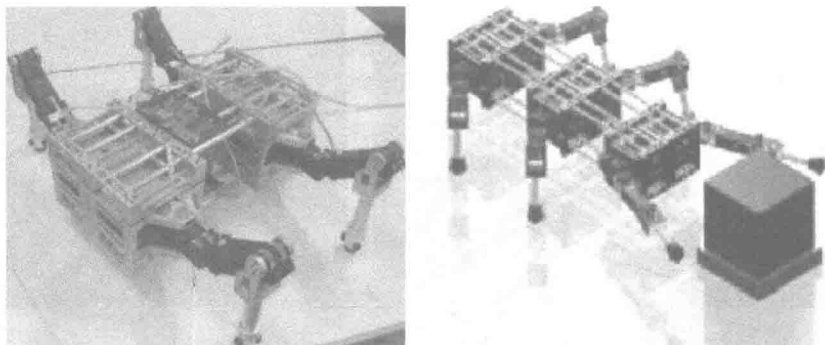


图 1.9 MiniQuard I 四足及六足爬行机器人

础模块、三种连杆模块和两种转动关节模块,各模块可组合成不同构形的机器人去完成复杂地形的侦察作业。上海交通大学的蒋东升等人提出了一种具有特殊对接机构的自重构 DES 模块机器人 M-Lattice,如图 1.10 所示,该对接机构能快速完成各模块间的分离和连接。华南理工大学的周雪峰等人开发了一个模块化的可重构机械臂平台,可搭建多种不同构形的机器人及机械臂,如双足步行机器人、工业操作臂、爬壁机器人及轮式机器人等。

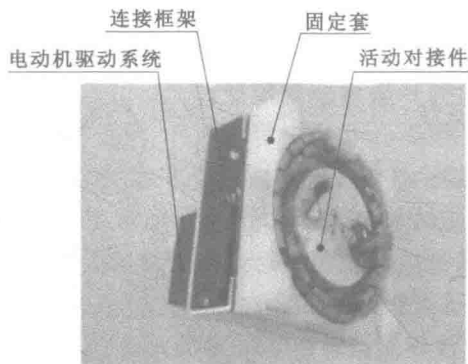


图 1.10 M-Lattice 的对接机构

1.3 可重构机械臂研究的关键问题

可重构机械臂研究的关键问题包括运动学及动力学的建模、轨迹跟踪控制、力控制、主动容错控制及构形优化等几个方面。

1.3.1 运动学建模

1.3.1.1 正运动学建模

在运动学建模方面, Jamwal 等人应用改进的模糊推理系统, 提出了与机械臂构形无关的正运动学算法, 其中, 模糊推理系统通过梯度下降法(GD)、遗传算法(GA)和改进的遗传算法(MGA)三种方法达到最优。Wang Xueqian 等人针对在轨运行的空间机器人提出了一种运动学辨识方法。在初始阶段, 机器人的非线性模型通过 PSO 算法离线辨识; 随后在运动学参数变化不剧烈的情况下, 用最小二乘法在线辨识其参数。Jaime 等人针对三腿并联机械臂, 提出了一种基于螺旋理论的运动学解法。在单一几何条件约束下, 正运动学解由一种新方法以递推形式给出, 并应用螺旋理论分析了机械臂的速度和加速度。Thomas 等人应用乘子计算均值法求解任意构形机械臂的正运动学解, 该方法并没有对正运动学和逆运动学做一个严格的区分, 所以能够很好地求解二者的解。Rohitash 等人提出应用混合方法求解 3RPR 并联机器人的正运动学解, 这种混合方法实际上是将遗传算法和模拟退火算法融入两个普通的混合启发式算法中。

1.3.1.2 逆运动学建模

魏延辉等人通过构形平面匹配方法求解可重构机器人的逆运动学。该方法将机器人在目标位置点的位置分解成多个构形平面, 通过匹配三级构形平面, 得到具有串联形式的可重构机器人运动学的单一逆解; Yin Feng 等人给出了基于仿电磁学算法和改进 DFP 算法的机械臂逆运动学解。仿电磁学算法采用吸引-排斥机制使得采样点快速逼近最优解, 基于这个最优解, 采用改进 DFP 算法在期望的精度下求逆运动学解。Rasit 基于误差最小化原则, 提出将神经网络和遗传算法结合去求解六关节机械臂的逆运动学解, 所提出的方法利用了神经网络和进化算法的特点以获得更多的精确解。Ali 等人针对带有构形奇异和不确定性机器人的逆运动学求解问题, 提出了一种基于神经网络的计算方法: 首先用一组对应期望位置的关节角去训练神经网络, 再用另外一组数据去验证该神经网络的泛化性。Mahmoud 等人针对参数冗余的七自由度仿真机器人的逆运动学求解问题提出了一种新的求解方法, 该方法应用了关节角向量和相应的末端位置(由正运动学解获得), 所产生的数据被分成不同的逆运动学解流形, 这些流形随后被分开以便逆运动学解能以等式的形式给出, 该等式的参数能够进行快速在线计算。



1.3.2 动力学建模

在动力学建模方面, Li Yangmin 等人提出一种基于模糊逻辑在线辨识模块机器人关节参数的算法, 在辨识过程中有可能产生局部最优解, 为了避免此类情况发生, 采用遗传算法对模糊逻辑系统进行优化。杨建新等人提出了一种基于虚功原理和等价树状结构的并联机器人动力学建模方法, 推导出了具有封闭形式的逆动力学和正动力学模型。栾楠等人提出了一种基于神经网络的机械臂动力学建模方法。该方法引入积分单元构成动态网络, 并分别应用 Kane 法及神经网络动态建模方法对高尔夫挥杆机器人进行了建模, 同时比较了二者的建模结果。Gautier 等人分别应用扩展卡尔曼滤波器和加权最小二乘法辨识逆动力学模型参数, 并对二者的辨识结果进行了比较。王卫忠等人利用 Lagrange 方程建立了可重构机器人的动力学方程。通过对可重构机器人各连杆建立统一的坐标系实现了末端执行器上力/力矩在不同关节坐标系间的转换及力/力矩与各关节力矩间的映射。Trung 等人基于第一类 Lagrange 方程, 利用坐标分割方法推导冗余并联机器人的动力学方程。最小动力学参数的设置是通过 Lagrange 函数和虚功原理自动获得的, 并应用直接模式搜索技术去计算最优轨迹以获得可靠的动力学参数。

1.3.3 轨迹跟踪控制

在轨迹跟踪控制方面, Ahmed 等人为三自由度机器人设计了基于监督模糊机制的自适应模糊滑模控制器, 其中滑模面为 PID 滑模面, 且模糊滑模控制器的输出增益由一个监督模糊系统在线调节。Zafer 等人和 Mohammad 等人分别采用基于粒子群优化的模糊控制算法和神经网络算法设计轨迹跟踪控制器, 其中用粒子群算法去优化模糊隶属度参数、规则和神经网络权值。Eddie 等人和 Wang Hongbin 等人针对机器人的轨迹跟踪问题提出了一种自适应模糊控制方法, 应用模糊系统去逼近系统的非线性函数项, 控制器参数自适应进行调节。

近年来, 分散控制以其控制结构简单、鲁棒性强等特点迅速发展。Huang Yishao 等人针对一类不确定非线性大系统, 提出了一种 H_∞ 分散混合自适应模糊控制方法。所提出的控制器将 H_∞ 控制器和自适应模糊控制器混合使用, 充分利用了二者在控制上的优势, 为提高控制性能, 附加了一个误差补偿项。Liu Yanjun 等人为不确定非线性 MIMO 系统设计了基于状态观测器的自适应模糊轨迹控制器。文中用模糊系统去逼近非线性函数, 且针对控制增益符号(控制方向)未知的情况, 提出将 Nussbaum 增益方法引入自适应模糊输出反馈控制



中。Fernando 等人利用回归神经网络辨识系统模型,并将辨识结果作为控制器输入之一,神经网络权值调整采用扩展卡尔曼滤波器,离散控制律基于滑模控制进行设计。陈国栋设计了基于扩张状态观测器(ESO)的分散鲁棒控制器去解决多关节机器人的轨迹跟踪问题。其利用多个并联的 ESO 分别对各关节的未知模态与外扰进行实时的估计和补偿,使得各关节的控制完全独立。

1.3.4 力控制

在力控制方面,Bellakehal 等人采用一个视觉系统作为感知机器人姿态的工具,从而代替运动学模型,能直接给出测量值而不用求解一系列非线性不等式,位置和力控制器均采用 PID 控制方法。孟庆涛等人在对灵巧手指进行力/位置控制时,力回路的控制采用模糊系统,位置控制则采用 CTC 方法。其利用神经网络实时调整模糊控制器中的量化因子和比例因子,加入积分环节以便减小稳态误差。Truong 等人针对压力机的高精度力控制,提出了一种基于鲁棒扩展卡尔曼滤波器的在线调节模糊 PID 控制方法。为了减少模糊 PID 控制器中需在线调整的参数数量,引入了一个智能选择机制。Karayiannidis 等人针对机器人与非刚性物体在摩擦接触情况下的力和位置控制进行了研究,提出在线估计表面的切线方向(表面变形情况),以动态调整控制目标的方法。魏立新等人设计了一种基于自适应模糊系统与 CMAC 的机器人力/位置控制器,前馈控制通过 CMAC 实现,反馈控制则采用自适应模糊控制器来实现,从而提高了机器人末端执行器与外界环境接触时对接触刚度不确定性的自适应能力。

Antonio 等人为小型并联六自由度机器人设计了阻抗控制器。该控制器包括三部分:非线性力控制器(修正期望位置以控制接触力)、阻抗控制器(为内环提供加速度参考信号)、内部加速度轨迹控制器。Toshio 等人提出用神经网络调整末端执行器的阻抗参数(参考位置),应用 4 个神经网络分别进行位置、速度、力控制及环境的辨识。首先,在自由运动时训练位置和速度控制器神经网络,在与环境接触后训练力控制器和环境辨识网络,此时位置和速度控制器神经网络的权值保持不变,这样在离开接触面后能够保持对期望轨迹的跟踪能力。Heon 等人针对阻抗参数可变和触觉感知接口动力学模型不确定的情况,提出了一个新的自适应阻抗控制算法去自适应调节接触阻抗参数,在推导过程中引入了拉普拉斯变换。Ashish 等人为机器人夹持器设计了三种不同的阻抗控制系统(惯量和阻尼不同的阻抗模型),分别为惯量和阻尼恒定、惯量和阻尼根据平均速度而变化、随运动速度自适应变化这三种情况,并通过仿真比较了三种控制方法的有效性,其中第三种情况下的控制方法具有最佳性能。