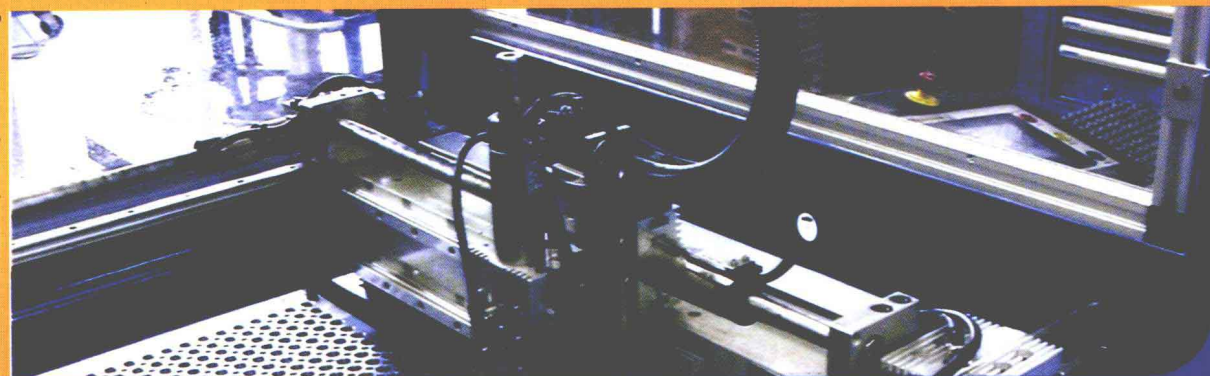


仿人欠驱动作业手 及其动态控制技术

FANGREN QIANQUDONG ZUOYESHOU
JIQI DONGTAI KONGZHI JISHU

黄海 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

仿人欠驱动作业手 及其动态控制技术

黄海 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是一部系统探讨仿人欠驱动作业手与控制技术的学术专著。是作者在哈尔滨工程大学和哈尔滨工业大学多年从事欠驱动作业手、仿人假手和水下作业技术的研究成果的总结,许多成果都是近年来最新取得的,在国内外都具备较先进的水平。

本书主要分为7章,包括仿人欠驱动手的机构设计,仿人欠驱动手的驱动系统设计,欠驱动手指的运动学、静力学分析,欠驱动作业手的实验设计,欠驱动手的动态轨迹跟踪与柔顺控制和欠驱动手的应用实例与分析等几个部分。本书在讲解中结合了大量的实例,具有结构合理、新颖性和前沿性、多学科交叉、理论与实际密切结合、系统性强等特点。

本书可以作为硕士研究生和博士研究生在欠驱动手和机器人方面的教材,也可作为广大大学教师、科研人员和工程师在机器人和机械手领域研究和开发的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

仿人欠驱动作业手及其动态控制技术/黄海著. —
北京:国防工业出版社,2011.10
ISBN 978-7-118-07756-8

I. ①仿… II. ①黄… III. ①机械手—动态控制
IV. ①TP241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 207244 号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

·*

开本 787×1092 1/16 印张 7¼ 字数 200 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

仿人欠驱动作业手又称为仿人自适应手。它是近年来机器人领域的一个重要的前沿和热点。传统的单自由度商用作业手只能进行简单的抓握,与人手还有很大的差距,远远满足不了现实生产和生活中的需要;而多自由度灵巧手结构比较复杂,质量和体积大,造价昂贵;相比之下仿人欠驱动作业手的结构简单、质量小、体积小、可靠性高、控制简单、操作灵活且具有广泛的使用空间。特别是近年来,仿人欠驱动作业手已经广泛地应用到服务机器人、航天、航海和残疾人欠驱动手等多个领域,表现出了广阔的应用前景。

本书主要包括下面几个方面的内容:

介绍仿人机电一体化欠驱动手的设计方法和基本流程。按照该方法设计出的新型仿人欠驱动作业手,其外形和人手相似,共有5个手指,15个活动关节,通过3个步进电机驱动,总质量约为500g。其手指根据欠驱动和耦合原理采用模块化思想设计,具有很强的运动灵活性和可靠性;设计了仿人拇指机构,该拇指在一个电机的驱动下,能够沿空间的锥面实现抓握,球轴承的使用使欠驱动原理在空间机构上得到了实现,拇指的具体布置位置由ADAMS进行仿真实验得到,以保证作业时抓取不同物体的有效性;同时设计了仿人欠驱动三指联动机构,该机构由一个电机驱动,能完成对复杂物体的自适应抓取。

基于DSP介绍欠驱动手的控制系统设计方法,并对直流电机和步进电机驱动器系统的优缺点进行详细的比较和论证。在此基础上设计基于应变测量的、可以互换使用的基关节力矩传感器。基于集成化的思想设计欠驱动手的本体结构,实现欠驱动手的机构、传感、驱动和微处理器系统的集成。

为了完成手指连杆机构的参数设计和运动控制,本书给出了手指连杆机构的运动学、静力学和动力学分析方法,同时针对具体的实例进行分析并分别在ADAMS和MATLAB虚拟环境下进行了仿真验证,给出了实验验证的方法和结果。

欠驱动手的手指控制性能直接影响到其操作性能,是设计的重要一环。单手指可以看作一个小机器人,手指的运动学和动力学分析,也是为手指的控制做好了准备。在控制方面,首先结合控制系统平台,介绍了欠驱动手的计算力矩控制方法,并结合具体的实例与传统的PID轨迹跟踪进行比较,其结果和大大减小了的误差,提高了动态性能,取得了良好的轨迹跟踪效果,消除了在运动控制中扭簧造成的不可控性;基于手指动力学模型介绍速度观测器的建立方法,并结合具体实例,在只有位置传感器的欠驱动手指上建立该观测器,该观测器运用在手指的控制中可以通过手指

的位置传感器信号和动力学模型准确获得速度信号,弥补了欠驱动手没有速度传感器的缺点,大大减小了控制误差。加入速度观测器的计算力矩轨迹跟踪算法,进一步减小了跟踪误差;结合了速度观测器的自适应控制器,补偿动力学模型中的不确定因素,减小了速度误差,使手指的动态控制效果比较理想。

当欠驱动手在完成与环境接触的作业时,手指的柔顺性十分重要,阻抗控制是实现手指主动柔顺的主要方法之一,得到深入研究和广泛应用。本书分别介绍了基于位置和基于力的阻抗控制方法,并结合具体实例,在基于力的阻抗控制中使用速度观测器,实现了欠驱动手的动态抓取控制。

最后,本书将给出欠驱动手的几个具体的应用实例,包括我国的服务机器人操作手、水下欠驱动机械手、仿生残疾人欠驱动手和加拿大的空间机械手等。

自2003年以来作者先后参加国家自然科学基金项目(项目编号:50435040, 60675045)、国家高技术研究发展(863)计划(项目编号:2008AA092301)和哈尔滨工程大学引进人才项目(编号:HEUCFR1101)。在此向国家自然科学基金、863计划基金委和哈尔滨工程大学表示衷心感谢。本书是作者多年从事欠驱动作业手、仿人欠驱动手和水下作业技术的研究成果总结,许多成果都是近年来最新取得的,在国内外都具备较先进水平,是一部系统探讨仿人欠驱动作业手与控制技术的学术著作。

本书得到了哈尔滨工业大学-德国宇航中心(HIT-DLR)联合实验室的大力支持。该书的大量实例和研究成果研究过程中尤其得到了该实验室学术带头人刘宏教授和姜力教授的大力支持。同时,哈尔滨工程大学智能水下机器人国防重点实验室的庞永杰教授、苏玉民教授和万磊教授也给予本书以大量的关怀与帮助。作者的同窗师兄弟以及同事(哈尔滨工业大学的樊绍威、杨大鹏、王新庆和李楠博士,哈尔滨工程大学的王卓副教授、赵大威博士后)协助参加了相关章节的编写工作,作者在此向他们一并表示由衷感谢。

仿人欠驱动作业手及其动态控制技术的理论和应用还处在快速发展阶段,相关的研究不断推陈出新。由于作者水平有限,难免存在不足之处,敬请读者批评指正。作者将充分汲取读者的意见和建议,结合自身的科研工作,不断修改和完善本书,为仿人欠驱动作业手及其动态控制技术及相关技术领域的发展贡献绵薄之力。有讨论之处请联系:jtwang@ndip.cn。

目 录

第1章 引言	1
1.1 引言	1
1.2 人手骨骼结构和欠驱动原理分析	2
1.2.1 人手骨骼结构和抓握方式的研究	2
1.2.2 欠驱动和耦合原理分析	3
1.3 仿人型欠驱动手发展综述	4
1.3.1 单自由度商业用手	4
1.3.2 键驱动的多自由度欠驱动手	5
1.3.3 连杆驱动的多自由度欠驱动手	8
1.4 如何阅读本书	10
1.5 小结和补充读物	11
参考文献	11
第2章 仿人欠驱动手的机构设计	14
2.1 引言	14
2.2 仿人机电一体化欠驱动手的设计方法和基本流程	14
2.3 仿人欠驱动手的总体结构	15
2.4 欠驱动手的手指设计	16
2.4.1 设计实例一:食指、中指、无名指、小拇指的设计	16
2.4.2 设计实例二:拇指结构设计	17
2.5 欠驱动三指联动机构设计	22
2.6 小结和补充读物	24
参考文献	25
第3章 仿人欠驱动手的驱动系统设计	26
3.1 引言	26
3.2 欠驱动手控制系统的设计方法	26
3.3 欠驱动手控制系统的设计实例	26
3.3.1 控制器系统结构	26
3.3.2 硬件实现与微处理器	27
3.3.3 电源系统	29
3.4 欠驱动手的驱动器系统	29

3.4.1 步进电机系统及其控制策略	30
3.4.2 直流电机系统及其控制策略	31
3.4.3 两类驱动器的性能比较	32
3.5 传感器系统的设计	33
3.5.1 基关节力矩传感器	33
3.5.2 基关节位置传感器	35
3.5.3 压力传感器	37
3.6 欠驱动手的集成和优化设计	37
3.7 小结和补充读物	39
参考文献	39
第4章 欠驱动手指的运动学、静力学分析	40
4.1 引言	40
4.2 欠驱动手指运动学分析的基本方法	41
4.3 欠驱动手指机构的实例分析	41
4.3.1 食指欠驱动连杆的分析	41
4.3.2 食指耦合连杆的分析	42
4.3.3 Adams 仿真验证	45
4.3.4 拇指近指节空间连杆机构的运动学分析和仿真	46
4.4 欠驱动手指的静力学分析	49
4.5 欠驱动手指的动力学分析方法	52
4.6 欠驱动手指的动力学建模实例与仿真验证	53
4.6.1 手指的动力学建模实例	53
4.6.2 欠驱动手指的动力学仿真与分析	60
4.7 小结和补充读物	66
参考文献	66
第5章 欠驱动作业手的实验设计	69
5.1 引言	69
5.2 欠驱动作业手的实验系统设计	69
5.3 欠驱动作业手的实例实验与分析	71
5.3.1 负载实验	71
5.3.2 适应性抓取实验	71
5.4 欠驱动手指静力学模型的实验验证方法	72
5.4.1 欠驱动手的基关节纯力控制	72
5.4.2 手指静力学模型验证实验	73
5.5 动力学模型的实验验证	75
5.6 小结和补充读物	76
参考文献	76

第6章 欠驱动手的动态轨迹跟踪与柔顺控制	78
6.1 引言	78
6.2 欠驱动手的计算力矩控制	78
6.2.1 欠驱动手的计算力矩控制方法	78
6.2.2 实例与实验分析	79
6.3 基于速度观测器欠驱动手动态控制	81
6.3.1 基于模型的速度观测器设计方法	81
6.3.2 基于速度观测器的计算力矩控制器实例	82
6.3.3 基于速度观测器的自适应控制器设计实例	83
6.4 欠驱动手的基关节阻抗力跟踪	86
6.4.1 基于位置的手指基关节阻抗控制	86
6.4.2 基于力矩的手指基关节阻抗力跟踪	87
6.4.3 阻抗力跟踪的实例	89
6.5 小结和补充读物	92
参考文献	92
第7章 欠驱动手的应用实例与分析	94
7.1 引言	94
7.2 服务机器人操作手	94
7.3 水下欠驱动作业手	96
7.4 仿生残疾人假手	99
7.4.1 假手的外观美化设计	99
7.4.2 肌电信号控制	100
7.4.3 抓取力感觉反馈	102
7.4.4 电池管理系统和蓝牙语音控制	103
7.5 加拿大的太空机械手	104
7.6 小结和补充读物	105
参考文献	105
附录 欠驱动手手指动力学表达式各参数	107

第 1 章 引 言

1.1 引 言

20 世纪 90 年代的新技术革命加快了由单一技术支撑的传统行业向多技术集成的现代行业的步伐。机器人作为现代行业的结晶不但具有按照人类的意愿执行特定功能的能力,更具有结合人类的意愿自主解决实际问题的能力。

目前,随着智能技术和现代制造技术的发展,机器人出现了两个发展方向,即工业机器人和智能机器人。工业机器人的主要特点是结构集成度低,执行的工作简单固定,智能程度要求不高。当前,工业机器人的发展已经成熟,且广泛应用于制造领域中。智能机器人是目前各国学者和研究机构重点研究的具有局部自主功能的机器人。它的出现使机器人的应用领域从制造领域横跨到非制造领域,像海洋开发、宇宙探测、采掘、建筑、医疗、农林业、服务、娱乐等行业都出现了机器人的身影。这些行业与制造业相比,其工作环境的非结构化和不确定性要求智能机器人要具有灵活的操作能力,对外感知能力以及局部的自主规划能力。从另一面也可以看出,智能机器人的发展实际上是解放了人类四肢而且进一步拓展了其工作范围。结合这种思想,参照人类的肢体便出现了机器人灵巧手、机器人手臂、机器人腿及机器人头等智能机器人系统,串联上述结构一种仿人型的复合式机器人便应运而生。该仿人型机器人外形同人形相似,具有良好的感知能力和多自由度结构的特点,可以较好地弥补传统机器人的不足。仿人型机器人是多学科的结晶,代表了机器人领域的尖端技术。因此智能机器人的发展能够体现出一个国家高新技术的集成能力及在人类生产、生活中的实际应用能力。

目前的工业机械手尽管具有 3 个~5 个手指,但是大部分只有 1 个自由度,只能实现简单的张合运动,很难完成复杂的动作,而且其对外界的感知能力也极其有限,越来越难以满足现代人生产生活的需要。人类进化为统治这个星球的种群,很大程度上是由于他们的多指手具有灵活的操作技能。人手具有 5 个手指,21 个自由度,每个手指由很多骨骼组成,它主要实现 3 种重要的功能:探索物体、限制物体和操纵物体。近几十年来,为了模拟人手的功能,国内外许多研究机构在机械手的设计、分析和控制等方面做出了卓有成效的研究,机械手的研究也被认为是最有挑战性的工作之一。

20 世纪 80 年代以来,航天宇航技术的迅速发展,智能多指灵巧手技术有了飞速的发展,其典型代表是美国宇航局的 NASA 灵巧手和德国宇航中心的 DLR-I、II 型灵巧手等。这些手的主要特点传感器丰富,驱动器多,功能强大,但其结构比较复杂,质量和体积大,造价昂贵;相比之下仿人欠驱动作业手的结构简单、质量小、体积小、可靠性高、控制简单、操作灵活具有广泛的使用空间。特别是近年来,仿人欠驱动作业手已经广泛地应用到服

务机器人、航天、航海和残疾人欠驱动手等多个领域,表现出了广阔的应用前景。

1.2 人手骨骼结构和欠驱动原理分析

1.2.1 人手骨骼结构和抓握方式的研究

由人体构造学可知,人手是由5个手指构成,每个手指都有很多骨骼组成,手指各个关节的运动都有一定的顺序,手指的运动也是有一定范围的,它们是靠各个关节处限制手指无序运动的骨骼构造来完成的,从机械学的角度我们称为运动限位。手指的运动方式包括手指的外展/并拢、内收/外放等动作,欠驱动手要想完全模仿人手的运动非常困难。人手的骨骼构造,其几个主要的特征可以用图1-1描述,除了拇指以外,每个手指有3个关节,每个关节的名称在图1-1中给出。腕关节(TP)有两个自由度,掌骨关节(MCP)有两个自由度,其他几个指骨关节(IP)、近指骨关节(PIP)、远指骨关节(DIP)分别有1个自由度,所以整个人手可以由21个自由度来描述。对应于每个手指来说,拇指有3个自由度,其他手指分别有4个自由度,人手的腕关节对应两个自由度。

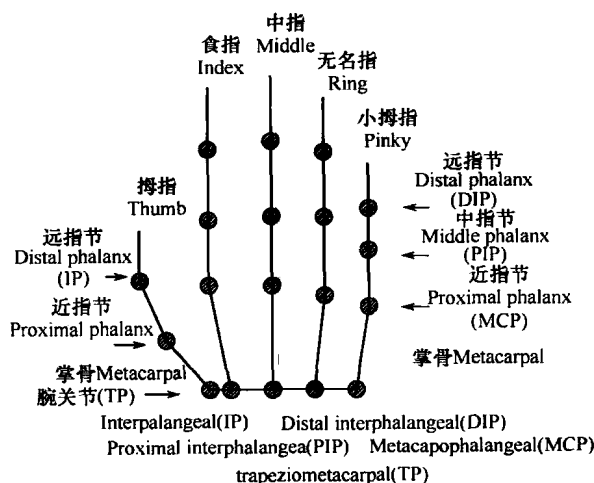


图 1-1 人手骨骼构造简图

Fig. 1-1 Sketch map of the hand skeleton structure

人手抓握物体一般可分为手掌抓握和非手掌抓握,包括精确抓取、力量抓取、捏拿等,抓握方式如图1-2所示。图1-2(a)为柱状抓握,图1-2(b)为手指侧向捏取,图1-2(c)为手指正向捏取,图1-2(d)为三指捏取,图1-2(e)为手心拿取。了解人手的骨骼结构对于欠驱动手的设计有非常重要的意义。

对人手的骨骼和抓握方式的研究表明,人手的自由度较多,对物体外形的适应能力很强,而且其骨骼外形保证了欠驱动手能对不同物体实现不同方式的抓取,其灵活性较强。这就启发我们在设计仿人欠驱动手时要设计和人手相近,自由度相对较多,适应性强的欠驱动手,而这点正和前面提到的欠驱动手发展趋势相呼应,也是目前仿人欠驱动手研究的一个主要瓶颈所在。

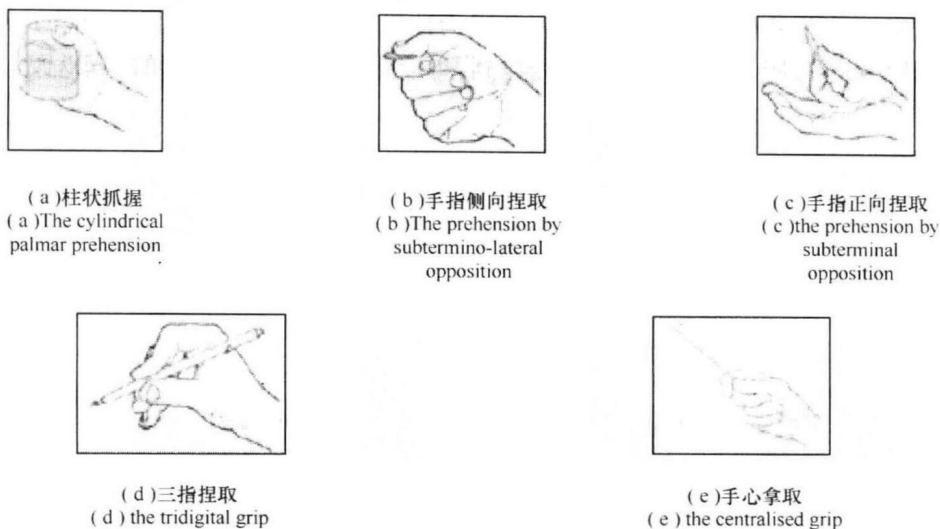


图 1-2 人手抓握物体的方式
Fig. 1-2 The functional grasps of the human hand

1.2.2 欠驱动和耦合原理分析

20 世纪最后 20 年,国际上有人提出欠驱动的概念,用来解决欠驱动手的机构复杂性和灵活性之间的矛盾。所谓欠驱动,即驱动器的数量少于自由度的数量,这样的机构保证了手指的运动灵活性,也限制了手的质量和体积,是当前欠驱动手机构研究的一个新的突破。欠驱动手一般采用两种运动传递方式:键驱动和连杆驱动。键驱动可以减小手的结构尺寸,但是传递力较小;而连杆驱动用于传递较大的力。

欠驱动机构是指在机构中独立控制变量(驱动单元)少于系统的自由度数(关节数),其概念最早是在被动机器人中提出的,主要用于实现机器人的自身保护功能。本书提出采用欠驱动原理和耦合原理解决欠驱动手结构复杂性和灵活性之间的矛盾,同时实现欠驱动手外观的仿人化设计。

欠驱动手的设计过程中,为了做到与人手保持一致,就需要设计很多的关节,每个关节相当于一个自由度,传统的驱动方式就是每个自由度一个驱动器,这样的设计会增加欠驱动手的质量,给使用者带来很大的不便,不能满足使用者的要求;如果减少手指的关节数,减少驱动器的数目,这样欠驱动手又不能像人手一样灵活,也同样不能满足使用者的要求。为了解决上述问题,欠驱动原理给我们提出了一种解决办法。

为了获得静定系统,在欠驱动机构中需引入弹性元件和限位装置。手指的抓握形式是由被抓握物体施加在手指上的约束力决定的,这是由二者的相对位置和物体的形状决定的。欠驱动系统的抓握过程如图 1-3 所示。当没有受到外力作用时,整个手指以单一刚体绕支点运动,各指节在弹簧力与机械限位的作用下保持在一条直线上,可以避免手指的弯曲和其他干扰的影响,如图 1-3(a)所示。当近指节首先受到外力时,中指节向物体方向弯曲,由于耦合连杆,远指节也同时向物体方向弯曲,最后 3 个指节均与物体接触,手

指完成对物体形状的适应阶段,驱动器的驱动力传递到3个指节上,如图1-3(b)、图1-3(c)和图1-3(d)所示。如果远指节先碰到物体,那么手指将不再弯曲,可以实现物体的精确抓取。

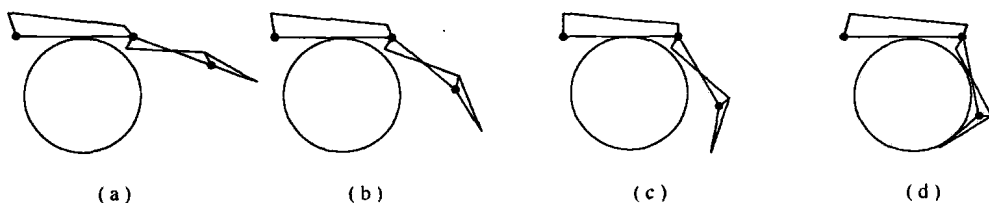


图1-3 欠驱动和耦合系统的抓握过程示意图

Fig. 1-3 Grasping process sketch map of the under-actuated system

1.3 仿人型欠驱动手发展综述

最早的欠驱动手出现于1509年,当时人们为在战争中失去一只手的年轻战士 Berlichingen 制作了通过弹簧驱动的欠驱动手。这只欠驱动手在战斗中发挥了很大的作用,但是在生活中却很不方便。

在 Berlichingen 手之后人们又相继研究了许多欠驱动手,有些欠驱动手至今仍在使用。Chilidress 将手划分为装饰型、被动型、身体驱动型和外部动力型4种,其中外部动力型手从1920年开始流行,在20世纪30年代开始得到广泛的应用。由 Tomovic 和 Boni 于1962年研制的 Belgrade 手最初就是为南斯拉夫的一位伤寒病患者而设计的,它被认为是世界上最早的灵巧手。

在太空和无人环境作业的要求下,各国对灵巧手的发展极为重视,各国都相继研制成功各种不同类型的机器人灵巧手,如美国麻省理工学院和犹他大学于1980年联合研制成功的 Utah/MIT 手,它是一种拟人化的灵巧手,美国斯坦福大学研制的 Stanford/JPL 手(又称 Salisbury 手),日本在1984年研制成功了 Hitachi 手,20世纪90年代以后,以德国和意大利为代表的欧洲在灵巧手方面的研究非常活跃,典型代表是意大利研制的 DIST 手、UB 手和德国宇航中心研制的 DLR 手等。美国国家航空和宇航局约翰逊空间中心于1999年研制成功的 NASA 多指灵巧手等。

由于灵巧手的结构复杂,质量和体积都比较大,还不能够直接用作欠驱动手,但在灵巧手技术推动下,欠驱动手的研制工作近年来也取得了很大进展。目前欠驱动手主要分为单自由度和多自由度两种类型;而由于功能需要,多自由度化是欠驱动手发展的必然趋势,在多自由度欠驱动手的研究中,国内外主要采用键驱动和连杆驱动两种方式。当前多自由度欠驱动手研究的一大难题是:设计出质量小、体积小、输出力大、噪声低、与人手接近以及足够灵活的多自由度欠驱动手。

1.3.1 单自由度商业用手

德国 Otto Bock 公司单自由度手(图1-4)是目前商业上运作最成功,实际运用中最

广泛的手。Otto Bock 外观、大小和人手相近,具有多个(3 或者 5)手指,由一个电机驱动。该手的特点是肌电信号的处理与控制比较成熟,使用性能稳定,有滑觉传感器,最大抓取力可达 90N。其缺点是自由度少、灵活性较差。该手主要用于残疾人假手。

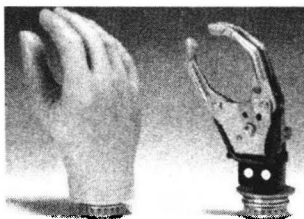


图 1-4 Otto Bock 公司研制的单自由度手

Fig. 1-4 The prosthetic hand developed by Otto Bock Company

1.3.2 键驱动的多自由度欠驱动手

键驱动手主要是通过绳索和弹簧机构实现其驱动功能的。

美国 IOWA 州立大学开发出了一种新颖的欠驱动手,如图 1-5 所示。与以往欠驱动手不同的是,它采用的手指机构是由弹簧、压缩连杆、绳索和导管。每个弹簧就是一个手指的指节,压缩连杆的作用是用来作为弹簧的连接支架和抑制弹簧的移动使弹簧完成伸缩和弯曲变形,从而达到模拟手指的弯曲。绳索连在手指的末端指节上,通过驱动绳索使手指的 3 个指节同时完成弯曲变形,从而实现抓握物体的运动。该欠驱动手相比以前的欠驱动手有了很大的优点,过去的欠驱动手大多是只有拇指和食指是主动弯曲的,其他的手指多为从动式,这使得手指的弯曲不能完全模仿人手的运动,而且受自由度的限制,不能实现手指的外展和并拢。而该手的 5 个手指都是主动式的,由于弹簧是弹性元件,可以完成各个方向的移动,它能随物体形状的变化产生各种各样的包络形式,从而完成对物体的抓握。由于弹簧的质量比较轻,相比以前的欠驱动手而言,该手的质量要轻很多。但是也因为弹簧是弹性元件,控制较难,同样也是因为靠绳索驱动,运动不平稳,精度较低。

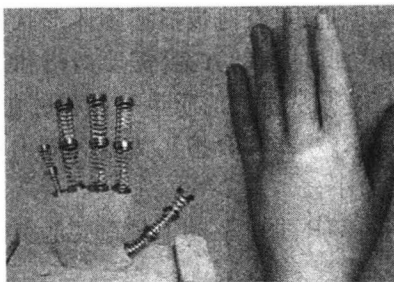


图 1-5 美国 IOWA 州立大学研制的欠驱动手

Fig. 1-5 The IOWA hand prosthesis developed by the university of Iowa

意大利的博洛尼亚大学近年来在机器人手方面的研究取得了很有价值的成果,他们最新提出的采用刚性连杆作为骨架,有弹性铰链连接的键驱动仿人机器人手可以看作欠

驱动手和灵巧手的一个新的研究领域。基于上述方法于 2005 年设计的 UB hand 3 仿机器人手结构简单、质量小,有很高的灵巧性,运动很接近人手。图 1-6 是 UB hand 3 机器人手和人手比较的图片。



图 1-6 UB Hand 3 手和其手指结构图

Fig. 1-6 The UB Hand 3 and its fingers mechanism

2006 年意大利 ARTS LAB 研制了 Soft hand, 如图 1-7 所示。该手手指采用键驱动, 5 个手指共用一个直流电机驱动, 内有一个差速机构, 各手指的弯曲速度不同。手指复位采用柔顺关节。柔顺关节结构为活性铰链(living hinge), 用薄的聚合物连接前后指节, 使它们能弯曲和伸展。这个手质量小, 形状和人手外形逼真, 结构简单, 可以完成捏拿抓取和包络抓取, 但 5 个手指不能单独动、自由度较少、控制简单、功能不强。

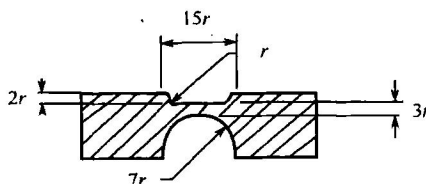
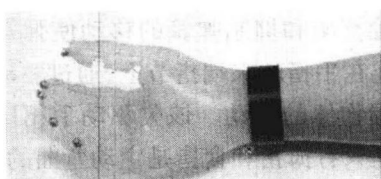


图 1-7 ARTS LAB 实验室的 Soft hand 和活性铰链设计原理

Fig. 1-7 The soft hand fabrication and living hinge design guidelines

意大利三手指多关节欠驱动手(图 1-8)是一种新型的肌电信号控制的欠驱动手。可实现精确抓取和力量抓取,丰富的传感系统控制保证了不需使用者的意识而可以达到稳定的抓取。该手基于欠驱动原理,具有对被抓握物体形状的自适应能力。实现抓取功能最主要的是要解决好三手指之间的运动方案,需要拇指和其余手指有独立的运动链和控制,因此至少需要两个电机驱动,从机构的质量和体积的角度考虑,该手采用两个微直线电机分别控制拇指和两个手指(中指和食指),为增大输出力,还使用了齿轮箱减速器。该电机的缺点是速度慢、输出力小。

为了更好地实现抓取任务,RTR II 欠驱动手最重要的突破是设计了机械调整器。机械调整器有两个作用:

(1) 协调中指和食指之间的运动。例如,抓取过程中如中指碰到物体,随着手的运动手指受到的反力逐渐增大,超过食指上弹簧回复力后,拉动食指向物体运动,直至在食指指尖也产生一样大小的反力。

(2) 调整拇指相对于两手指的位置。使用一个自由度来调整手指和拇指的反方向运动,使它们与物体的接触面平行(这是实现稳定抓取的必要条件)。

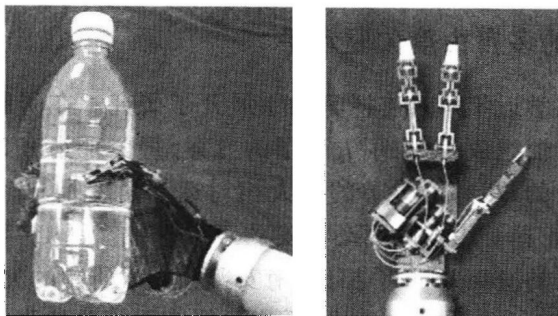


图 1-8 意大利 RTR II 欠驱动手
Fig. 1-8 The RTR II prosthetic hand of Italy

RTR II 欠驱动手具有丰富的传感系统,集成了力、手掌、运动觉和滑觉传感器。力传感器安放于指尖位置,它的形状可以再次在它内部安放滑动传感器。手掌传感器的用途是分辨手掌和物体的接触情况,从而确定抓取的类型(精确抓取或力量抓取)。运动传感器的作用在于通过记录手指关节的旋转信息,以向控制系统提供抓取类型的几何信息。滑觉传感器的作用是感知物体的滑动趋势,从而增大或减小抓取力,实现稳定抓取,而不需人的意识去控制。

意大利 2006 年研制的新型 RTR II 改进手,如图 1-9 所示,就是基于 RTR II 和欠驱动原理的设计的键驱动欠驱动手。该手有 3 个欠驱动手指组成(食指、中指、拇指),每个手指都用一个直流电机驱动,为了美观,外带硅树脂手套,同时加上无名指和小指这两个被动手指。整个手掌用碳纤维材料制成,具有强度大和质量小的显著特点。同时每个手指做成圆柱状,有利于优化接触点,手指材料采用铝合金,质量小、强度大。该手还有一个显著特点:拇指除了由一个电机完成各指节的驱动,同时采用了一种蜗轮蜗杆传动机构,该机构单独采用一个电机驱动,即由两个电机共同驱动,两者运动合成实现拇指仿人运动轨迹,如图 1-10 所示。该手尺寸小、结构简单、质量小。同时该手有着丰富的传感器系统:手指每个关节处一个霍尔位置传感器,共 9 个;有 4 个增量编码器,每个手指一个;两个三维力矩传感器,分别在拇指和食指指尖,还有 8 个霍尔开关。在这些传感器的基础上,欠驱动手的控制水平很高,智能化程度也很高,达到国际最先进水平。

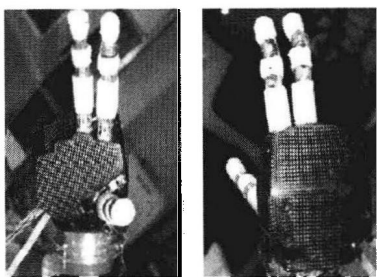


图 1-9 意大利 RTR II 欠驱动手
Fig. 1-9 The RTR II prosthetic hand of Italy

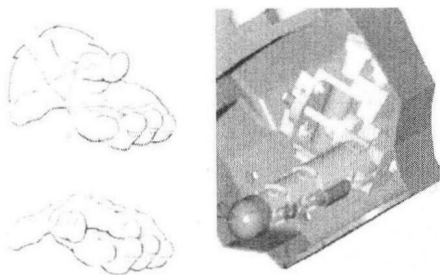


图 1-10 自适应抓取机械调整装置
Fig. 1-10 Adaptive grasp mechanism schematization

1.3.3 连杆驱动的多自由度欠驱动手

英国南安普顿大学近年来对连杆驱动手展开了研究。在研制过程中,他们充分考虑了人手的特点和骨骼组成,采取了五手指的方案,每个手指有 3 个关节,其中末端两个关节的运动是耦合的,相邻两关节的最大相对运动角度是 90° 。每个手指各有一个电机驱动,电机和齿轮箱等组成的驱动器安放于手掌中。图 1-11 是其在抓握灯泡时的照片。同上文提到的 Otto bock 手相比,南安普顿大学研制的欠驱动手在功能上模仿了人手的功能,而 Otto bock 手自由度少,手指只能完成简单的张合运动,手指缺乏必要的灵活性和操作能力。当然,英国南安普顿大学研制的欠驱动手也有缺点,即驱动器较多,质量较大。

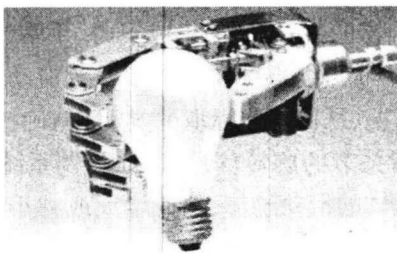


图 1-11 英国南安普顿大学研制的欠驱动手

Fig. 1-11 Prosthetic hand developed by Southampton

国际上有很多欠驱动手都采用连杆传动,其中做得比较突出的是 2001 年多伦多大学研制成功的多手指从动自适应控制式欠驱动手,即 TBM 手,如图 1-12 所示。该手主要是为儿童患者所研制,具有机构简单小巧(可达一般孩童手的尺寸),控制方便、质量小、外形好的优点。这种使用机械结构来取代力传感和触觉传感器构成的力反馈系统,从而实现稳定抓取,减少了信号处理所使用的电路,减小了手的质量和体积,简化了控制方法。但由于手指之间的耦合,每个手指缺乏足够的灵活度;同时因为 5 个手指靠一个电机驱动,在抓取物体时存在着力的不平衡问题。

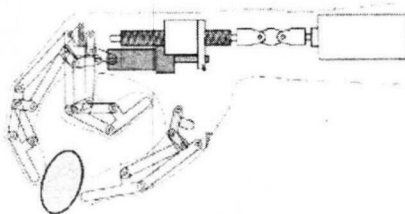


图 1-12 多伦多大学研制的多手指从动自适应控制式欠驱动手

Fig. 1-12 Passive adaptive grasp prosthetic hand developed by Toronto university

我国的清华大学在 20 世纪 80 年代初引进了德国 Otto Bock 的肌电控制手,在此基础上,于 1996 年对其结构作了一定的改进工作,设计了双螺旋传动的增力机构,没有使用超越离合器,机构较以前简单、可靠,抓取力也得到增强。同时清华大学还研制成功了指物

之间的压觉和滑觉传感器,压觉传感器检测握力的大小,滑觉传感器实现欠驱动手握力的自适应控制。此外,在2003年,他们又研制出具有欠驱动功能随动自适应仿人手,如图1-13所示。该手具有两个手指,拇指有一个外展/内收自由度,单电机驱动,其弯曲依靠欠驱动机构。食指被做成4个手指形状,双电机驱动。该手结构比较简单、但灵活性较差。

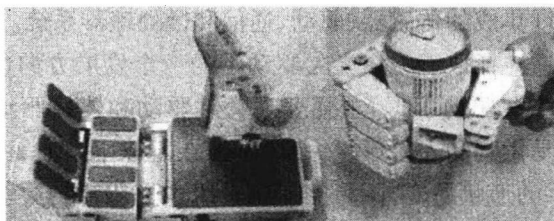


图1-13 清华TH-1欠驱动手

Fig. 1-13 Tsinghua TH-1 prosthetic hand

综观近几年欠驱动手的发展,为了解决欠驱动手手指的驱动器与自由度(灵活性)的矛盾,国内外的研究人员先后都提出了采用具有自适应抓取物体能力的欠驱动机构欠驱动手。哈尔滨工业大学机器人研究所于2001年开始研制仿人型欠驱动手,哈尔滨工业大学在灵巧手和欠驱动手上工作了大量的研究工作,先后研制了第一代欠驱动手样机和第二代HIT-DLR仿人欠驱动手,如图1-14。基于欠驱动原理,第二代HIT-DLR仿人欠驱动手具有抓取自适应能力;尺寸小、质量小(500g左右);仿人手结构设计,具有5个手指,拇指有两个关节,其他4个手指完全相同,有3个关节;采用3个微型电机驱动;拇指和食指可以独立运动,拇指可以沿锥面运动,其他三指联动。具有关节位置传感器和力矩传感器;传感、驱动和微处理器系统高度集成。欠驱动手主要采用肌电和脑电控制,同时辅以语音控制。



图1-14 HIT欠驱动手

Fig. 1-14 HIT prosthetic hand

但是HIT-DLR的第一代和第二代仿人欠驱动手的外形和运动形式和人手还有一定差别,其三指联动抓取预紧力较小,拇指和小指只有两个指节,和人手尚有一定差别,另外手指的抓取可靠性和传感器系统的不高,本文研究的新一代欠驱动手将在这些方面予以改进,并着重加强欠驱动手的仿人化外观设计。

综观欠驱动手的发展情况和趋势,本文可以得到以下结论:

(1) 欠驱动手应该具有人手的外形、尺寸和质量,而现在欠驱动手的尺寸和质量相对