

机器人柔顺关节研究综述^①

蔡世波^② 鲍官军 胥 芳 张立彬^③

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室 杭州 310014)

摘 要 随着机器人应用向智能工厂、助老助残服务、医疗、教育娱乐等领域不断扩展,机器人的柔顺性和主动适应性设计需求越来越受到研究人员的关注。本文综述了机器人柔顺关节的机构原理,包含了弹性元件被动柔顺关节、气动主动柔顺关节、磁场力柔顺关节和智能材料柔顺关节。进一步分析了当前机器人柔顺关节研究中存在的结构、建模与控制、动力供给等方面的问题。最后指出机器人柔顺关节的研究趋势主要表现在驱动与结构创新、数学建模与控制、多学科交叉与合作研发等方面。

关键词 柔顺关节, 刚度控制, 磁流变液, 智能材料

0 引 言

传统关节型机器人依靠高刚度的传动结构设计和高位置精度的控制器设计,充分满足了结构化环境中高效率、高精确度的工作要求,但是在面向人机协作、人机共融及易损对象交互工作时,却无法充分保证协作对象或操作对象的绝对安全^[1],特别是随着应用领域的不断扩展,机器人的柔顺性和主动适应性需求显得尤为重要。科研工作者主要从两个方面做出了努力,一是冗余感知技术,即通过力觉、视觉、结构光等多维感知通道采集和反馈环境信息;二是可变刚度传动技术,结合新型材料、智能材料、弹性结构件等创新设计柔顺传动部件,实现可变刚度或刚度自适应控制^[2]。

传统工业机器人的使用安全性是依靠设计防护装置、加强操作人员安全教育而实现^[3],然而这种工作方式只能是把机器人与周围环境和工作人员进行物理上的隔离,彼此独立,难以实现机器人与周边设备的协作,人机合作更无从谈起。随着新一代协作机器人需求的提出,采用冗余感知与反馈控制技

术成为提高传统刚性结构工业机器人的工作安全性和适应性的必然手段^[4]。但这一技术的实现严重依赖传感器、多维度多源信息融合、非结构化环境的建模与动态感知、智能控制等多学科技术的发展,在传感技术、信号处理、环境感知、人机协同、智能控制等方面依然有大量的基础性科学问题和技术问题处于探索研究阶段,尚未解决^[5]。所以,采用冗余感知技术实现传统刚性结构工业机器人的作业安全性和柔顺性控制尚有待时日。

另外一条途径是从机器人本体结构入手,改变机器人的驱动关节特性,从源头上实现机器人的柔顺性和安全性,即研发可变刚度的机器人柔顺驱动关节^[6]。机器人柔顺关节在其自身内部嵌入了主动或被动弹性、适应性元件,或采用电磁调控的可变刚度部件,或采用新型智能材料实现柔顺性控制,在不依赖外部冗余传感器的情况下,即可实现机器人的操作适应性和安全性。

本文总结分析了机器人柔顺关节的结构原理和分类,讨论了目前研究中存在的问题,并展望了未来发展的趋势和方向。

① 国家自然科学基金(51605434,51775499,U1509212)资助项目。
② 男,1981年生,硕士,助理研究员;研究方向:协作机器人系统;E-mail:ccc@zjut.edu.cn
③ 通信作者,E-mail:lbz@zjut.edu.cn
(收稿日期:2018-01-18)

1 机器人柔顺关节机构原理

1.1 弹性元件被动柔顺关节

变刚度机构设计的目标是实现线性变刚度特性。基于等刚度弹簧的变刚度机构实现方法可分成 5 类^[7],即:三角形结构变刚度机构、四杆结构变刚度机构、杠杆结构变刚度机构、具有特殊曲面/斜面零件的变刚度机构和 S 型旋转结构变刚度机构等。

弹性元件柔顺关节在结构内设置了螺旋弹簧、弹簧片或其他新型结构的弹性体,借助杠杆原理、拮抗原理等为关节提供变刚度特性。其中嵌入弹簧而改变关节的输出特性是最简单易行的实施方案。例如,图 1 所示的结构中,在电机输出端面设置弹性环,通过弹性环的挤压变形实现关节输出的可变刚度特性^[8]。另外一种常用的方法是采用双电机驱动模式,主电机作为动力输出,刚度调节电机通过螺旋弹簧预紧力的调控而实现变刚度调控。如图 2 所示双电机并联结构的柔顺关节结构^[9],只需要功率相对很小的电机即可实现关节输出刚度的调节以实现仿人行走步态中的仿生控制^[10]。图 3 所示则是双电机串联结构的柔顺关节^[11]。为了达到更宽频带的刚度调节和安全性控制,还可以将弹簧机构进行级联^[12],如图 4 所示,通过不同的机构组合而实现更大范围内的输出刚度调节,尤其适用与人体接触的穿戴式外骨骼机器人^[13]。

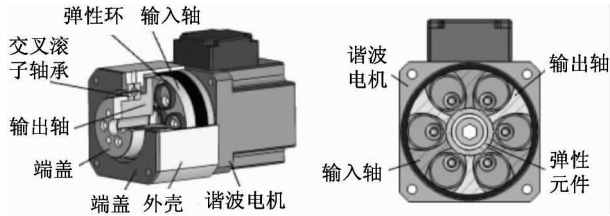


图 1 通过弹性环实现的柔顺关节结构

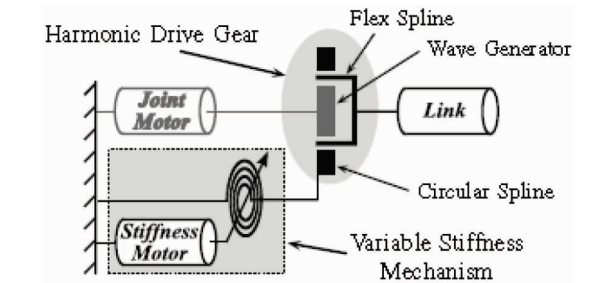


图 2 双电机并联实现的柔顺关节结构

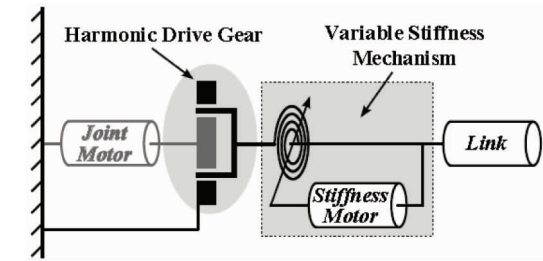
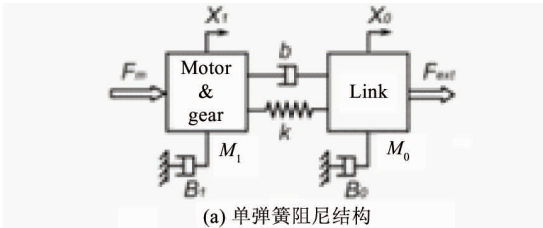
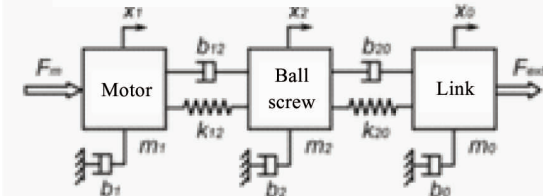


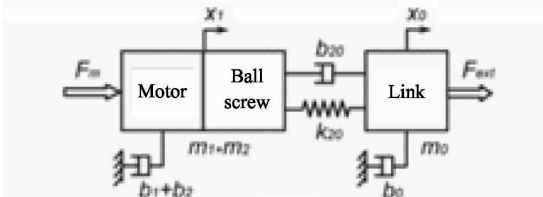
图 3 双电机串联实现的柔顺关节结构



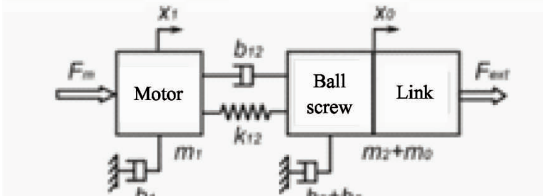
(a) 单弹簧阻尼结构



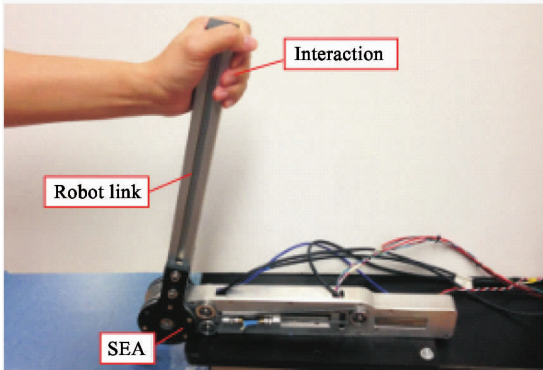
(b) 级联弹簧结构



(c) 组合型I



(d) 组合型II



(e) 实验样机

图 4 级联动态刚度柔顺关节

为了减小弹簧调节刚度结构的尺寸,采用扭转弹簧替代螺旋弹簧是一种有效的方法。如图 5 所示的柔顺关节结构中^[14],通过一个由直流电机驱动的丝杆调整负载支点与输入支点的相对位置来实现对刚度的调节,当负载支点与输入支点重合时,刚度达到最大,整个传动关节近似刚性,当输出支点移动到弹簧轴线上时,刚度几近于 0。

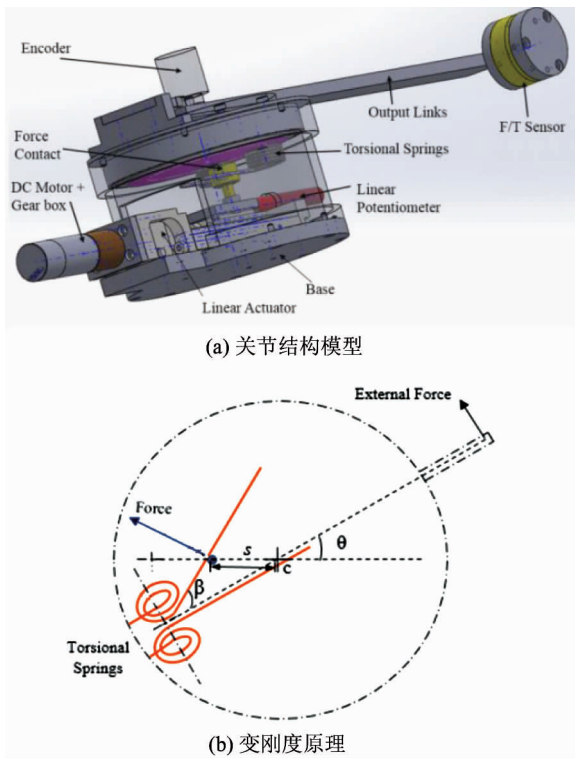


图 5 扭转弹簧实现的柔顺关节

薄壁弹性元件除了可以像弹簧一样产生和调节弹性力之外,还具有结构简单、尺寸更小的特点。但因其过于单薄、具有刚度小和失稳性等问题,常常成组使用。如图 6 所示的采用拮抗原理构建的基于柔性杆的仿人机械手臂肘关节^[15],采用微型致动器驱动一对镜像装配的非线性弹性传动模组 (nonlinear elastic transmissions, NETS) 而实现输出刚度的调节,该传动模组由柔性四杆机构组成。图 7 所示的采用 4 组对称弹簧片结构设计的柔顺关节^[16]也是基于上述同样的原理。

橡胶是近年来被广泛用于机器人柔性机构研究的材料之一。利用橡胶材料设计出形状各异的气密封腔体结构并安装于电机驱动盘和输出盘之间,通过改变密封腔内的气压,利用硅胶垫摩擦力的变化

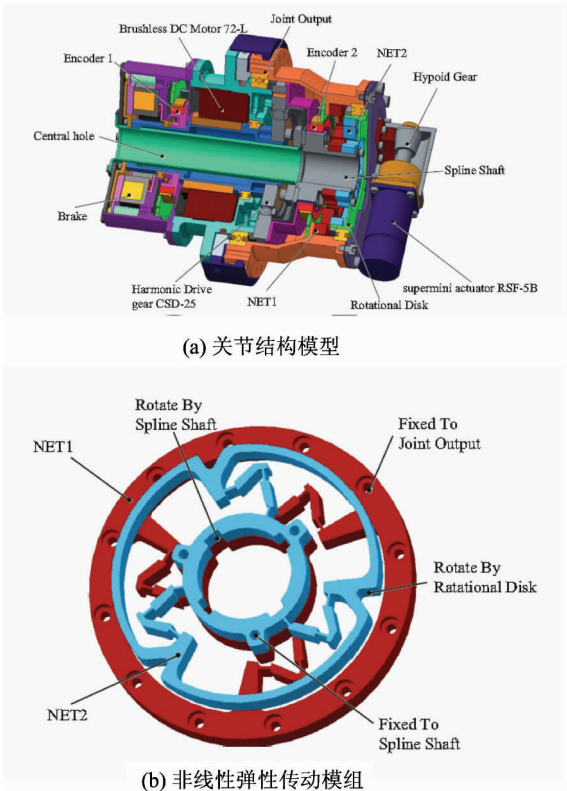


图 6 柔性杆机构实现的柔顺关节

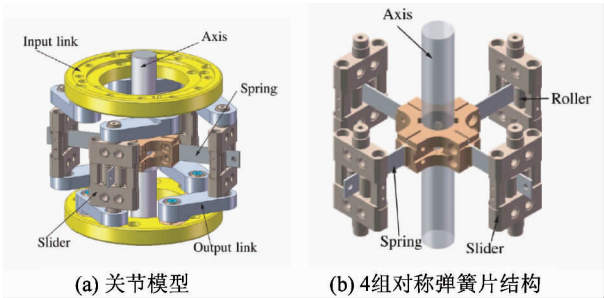
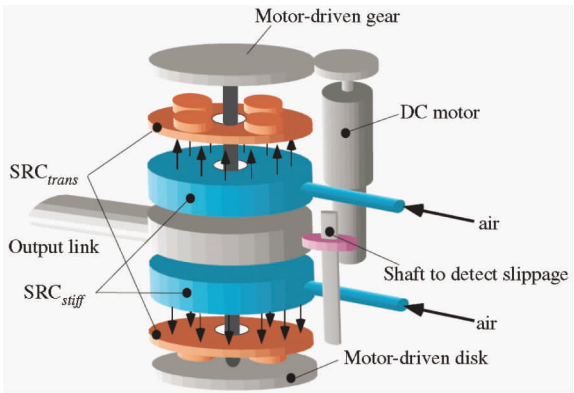


图 7 对称弹簧片结构实现的柔顺关节

来调节传递的扭矩,从而获得传动的柔顺性^[17,18],如图 8 所示。



1.2 气动主动柔顺关节

由于橡胶材料具有各向形变特性,科研人员往往将其与相应支撑机构结合使用,基于支撑机构的约束作用,通过改变密封腔内的气压,从而获得弯曲、伸缩等定向形变特性,基于此设计的驱动关节由压缩气体主动驱动,不再需要电机来提供转矩,而直接通过改变气压来获得输出力或力矩,是近年来软体机器人领域的主要柔顺驱动形式之一。典型的气动主动柔顺关节包括 McKibben 型 PMA 拮抗关节、3

自由度 FMA、旋转型气动柔性驱动器、柔性流体驱动器及柔性气动致动器 FPA 及驱动关节等^[19,20]。

随着软体机器人研究的兴起,各种结构形式的气动主动柔顺关节被开发出来并被应用于各种新型结构的机器人设计。其中备受关注的是哈佛大学 Whitesides 课题组开发的一系列气驱动关节^[21-29],如图 9 所示。类似的气驱动可变刚度柔顺关节结构层出不穷^[30-34],但单纯依靠驱动气压调节只能实现关节的被动柔顺性。虽然如图 10 所示采用独立的

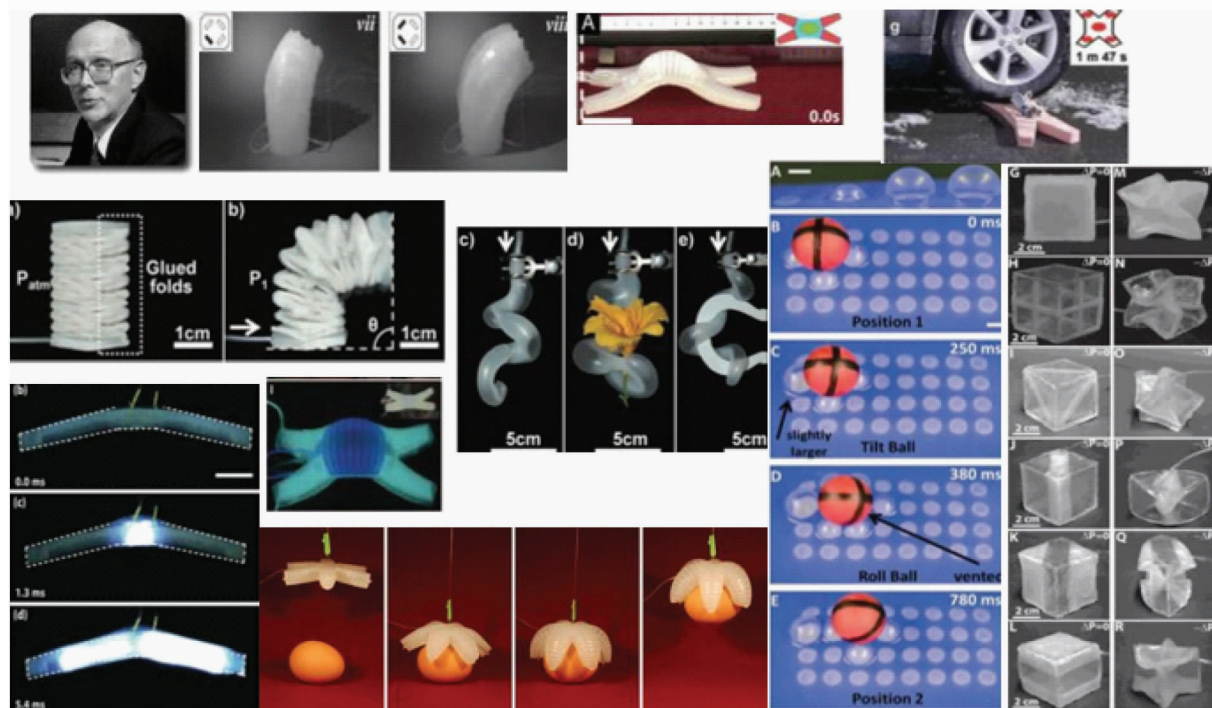


图9 Whitesides 及其课题组研发的各种新型气动柔顺关节

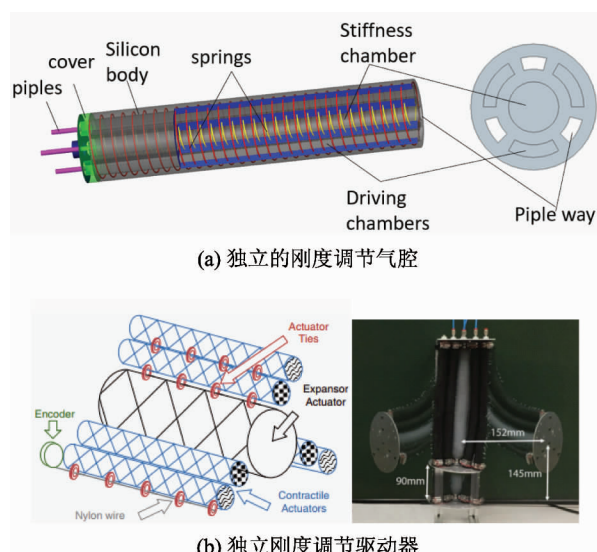


图 10 刚度可调控的气驱动柔顺关节

刚度调节气腔^[35,36]或独立的刚度调节驱动器^[37]可以实现主动的变刚度控制,但是刚度调节机构与驱动机构之间的强耦合关系给建模和控制带来技术挑战。引入颗粒介质,采用负压控制颗粒的聚合状态以主动适应目标的外形,同时可以保持抓持刚度,典型结构如图 11 所示的 Jamming Gripper^[38]和 Jam-Joint^[39]。但刚度与输出力同样存在耦合关系。将颗粒腔作为完全独立刚度控制并另行设计驱动控制腔^[40,41],如图 12 所示,可实现刚度与输出力在结构上的解耦,从而实现刚度的独立控制和驱动力的独立控制,即主动的柔顺控制。

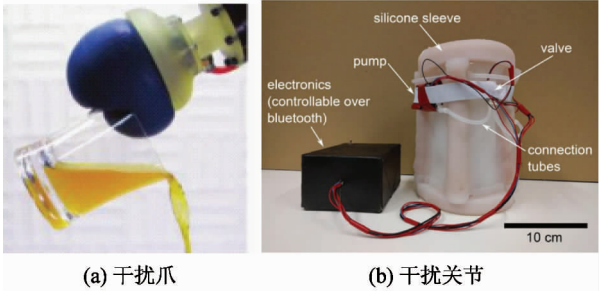


图 11 颗粒型可变刚度气动柔顺关节

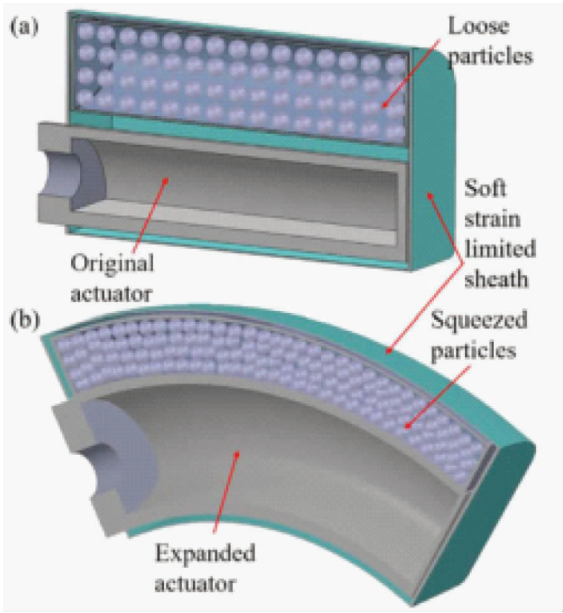


图 12 颗粒刚度独立控制的气动柔顺关节

1.3 磁场力柔顺关节

磁场力的非接触特性为变刚度装置的设计提供了一种实现手段,两个磁体之间的距离变化以及电磁体励磁线圈的电流变化,都能有效改变磁场力的大小,进而实现机器人关节的刚度调节。

采用永磁材料设计的柔顺关节结构里,需要通过调整两个磁体之间的距离以实现磁场力和刚度的调节。如图 13 所示,磁体间距的调整有电机驱动^[42]、机构调整^[43,44]等方式。相对而言,采用电磁方式的磁场力调整方法^[45]在结构和控制上都更为简洁和方便,如图 14 所示的各种机构,只需要改变励磁线圈的输入电流,即可改变线圈与永磁体之间的磁力,从而达到调节刚度的目的。上述两种方法各有优点,所以将两种调节方式相结合,可以实现更大范围的刚度调节和力矩输出^[46],如图 15 所示。

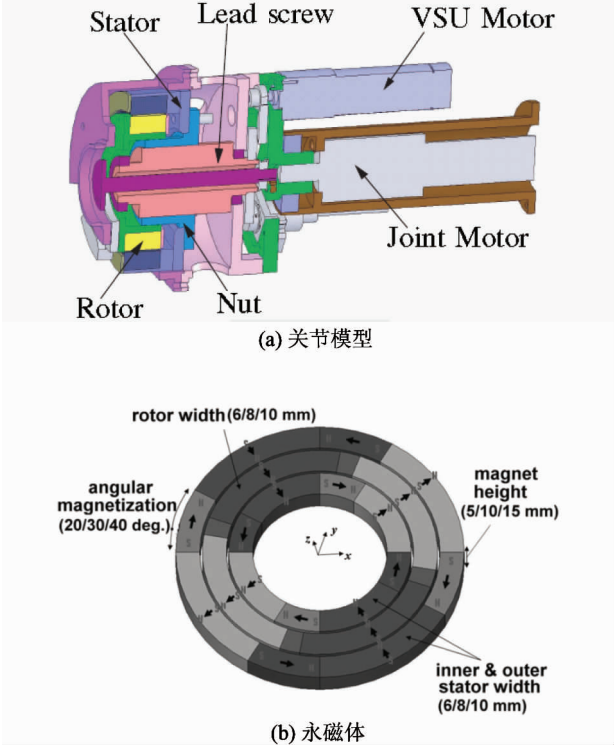


图 13 磁场力柔顺关节的磁场间距调节方式

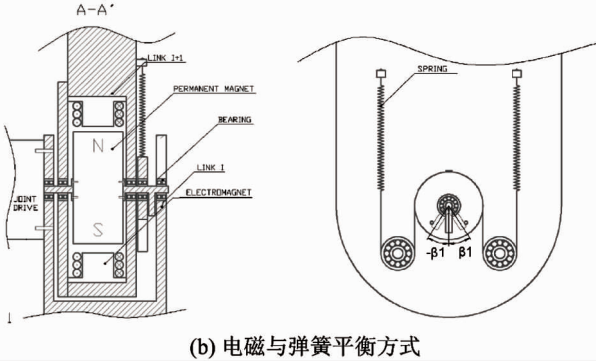
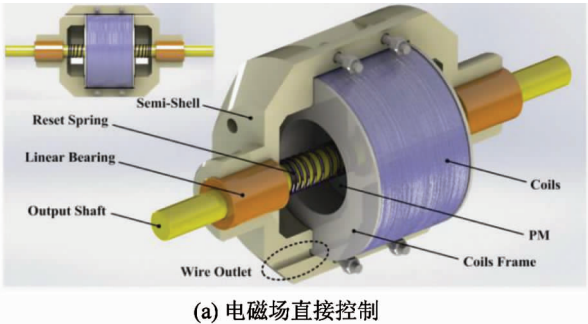


图 14 磁场力柔顺关节的励磁电流调节方式

1.4 智能材料柔顺关节

近年来,一些新型的智能材料逐渐进入机器人研究开发人员的视野,例如具有温度响应特性的形

状记忆合金 SMA, 具有电响应特性的离子聚合物 EAP、介电高弹体聚合物 IPMC 等^[47], 同时, 具有磁响应特性的磁流变液、磁致伸缩材料也逐渐被研究人员尝试应用于机器人柔顺关节的设计开发。

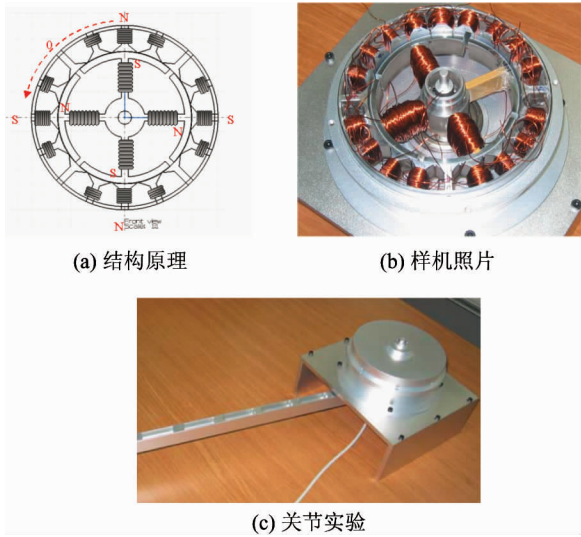


图 15 电磁与永磁结合的柔顺关节

智能材料在电、磁、热、光等外激励的作用下, 会发生相应的形态变化, 一类是发生宏观的结构变化, 如磁致伸缩材料、介电高弹体聚合物、形状记忆合金等。该类智能材料柔顺关节已有文献^[48-51]分别进行了深入的综述分析, 这里不再赘述。

另一类智能材料柔顺关节是利用材料的相变过程实现, 如磁流变液等。磁流变液的主要应用形式是磁流变液阻尼器^[52]和离合器^[53,54], 多见于车辆工程和常规机械系统应用。近年来, 研究人员将磁流变技术引入机器人领域。磁流变液的自身相变连续性改变了传统刚性机械机构的固有传动刚性和频响特性, 故而可以利用磁流变结构的连续柔性达到机器人的振动抑制效果^[55]。更进一步的研究将磁流变液阻尼器或离合器融合于机器人关节结构^[56-59], 实现机器人关节的主动柔顺性。考虑到机器人对关节结构尺寸的约束, 将磁流变液直接嵌入到机器人关节的传动系统内部^[60,61], 在实现关节柔顺性的同时, 尽量保持了关节结构的轻量化。

2 研究现状分析

新一代机器人的发展对柔顺关节提出了迫切的

需求, 然而目前所知的各种柔顺关节都还处于实验室样机阶段, 并不能应用于实际的商业系统。分析其原因, 大致包括结构设计、建模与控制、动力供给等方面。

2.1 结构设计有待优化

关节结构是对机器人本体结构的尺寸和重量等起决定性作用的因素, 新一代机器人及智能装备轻量化设计的趋势要求机器人的驱动关节首先要做到轻量化设计。基于刚性结构的柔顺关节由于增加了弹簧、磁铁、磁流变装置等辅助结构, 反而会带来其在基本结构尺寸和重量上的增大。对于此类柔性关节, 研究其机械结构的优化设计^[62], 实现小型化和轻量化设计是实现其进一步推广应用的基础和前提。

而对于 1.3 节所述的气动柔顺关节以及 1.4 节描述的基于磁致伸缩材料、介电高弹体聚合物、形状记忆合金等智能材料的柔顺关节而言, 它们在驱动传动原理和结构形式上都完全不同于传统的刚性结构机器人关节。这一类关节的应用场合也有别于传统的工业机器人, 例如微型机器人^[63]、仿生机器人^[64]、软体机器人^[65]等。机器人应用场景的差异导致了其对驱动关节的要求在结构形式上的巨大差异, 故应用于具体对象的智能材料柔顺关节需要根据其具体应用要求而进行结构优化设计。

2.2 柔顺关节物理模型不准确

传统电机驱动、减速机传动的机器人关节属于常规的机械系统, 因而容易建立相对准确的物理模型。而新型的柔顺关节由于引入了弹性元件或智能材料而导致建模困难^[66], 即使建立了数学模型, 其中的一些参数也难以确定或具有时变非线性^[67,68]。

物理模型的不准确必然导致对柔顺关节特性的不明确, 关节特性的不确定性是导致此类关节控制品质相对低下的主要因素^[69]。另外, 关节的柔顺性实现是基于其自身刚度的可变性, 换言之, 关节的刚度特性决定了其柔顺性。而基于单一柔性元件或材料所设计的柔顺关节由于其材料自身特性限制而难以实现大范围的刚度调节^[70]。使用多个弹性元件及其机构组合变形扩大刚度调节范围^[71]是一种巧妙的方法, 但给控制带来了新的挑战, 同时其刚度依

然是分段式可调^[72],适应性存在较大的局限性。采用组合智能材料设计柔顺关节可以实现刚度的大范围调控,但是其物理模型的构建更为困难。

2.3 动力源问题

任何运动的实现都离不开动力源,柔顺关节亦然,尤其是主动型柔顺关节。基于弹簧刚度主动调节的柔顺关节需要增加刚度调控电机,磁场调控型柔顺关节需要外加励磁电路,气压驱动柔顺关节需要高压气源系统,SMA、DE 以及 IPMC 等新型智能材料需要驱动电压,部分材料甚至需要上千伏特的高压激励^[49]。虽然柔顺关节本体结构可以通过优化设计实现轻量化以达到使用目的,但是其驱动动力源所固有的系统复杂、体积重量大、电压高等问题都是制约柔顺关节进入实际应用的障碍。

3 未来研究展望

3.1 驱动与结构创新

传统的工业机器人关节采用伺服电机和减速机组成,其驱动和传动结构相对成熟。适用于更为复杂的工作任务和未知工作环境的新一代机器人柔顺关节尚处于研发起始阶段,在驱动和结构上都需要不断创新以满足特定场合的应用需求。驱动与结构的创新设计从以下几个方面入手:(1)根据具体应用目标环境进行需求分析设计。不同的应用环境对机器人的要求差异巨大,只有目标明确具体,才能设计出具有实际应用价值的机器人柔顺关节。(2)引入最新的智能驱动和材料技术。智能驱动在很大程度上也是依赖于智能材料技术的发展,智能材料往往集成了驱动、传动和传感的部分甚至全部功能。采用最新的智能材料技术,可以实现电机驱动无法胜任的应用,例如软体蠕动、本体大变形驱动、微观尺度运动、输出刚度的主动或被动适应、本体轻量化等。(3)采用设计方法学原理。机械系统设计方法学具有一套相对成熟的理论和方法,依据设计方法学原理进行机器人柔顺关节的驱动与结构创新设计,将有助于在设计过程中牢固把握设计目标,广泛吸收已有的机器人关节相关创新设计成果和最新的驱动技术,输出相对合理有效的创新结构设计结果。

3.2 数学模型与控制

建立系统的数学模型是进行系统特性仿真分析和优化设计的前提,也是进行系统控制的基础。就柔顺关节而言,由于采用各种新结构或智能材料,其物理过程变得非常复杂而造成建模困难,传统的基于力学和电磁学原理的建模方法已不再适用。学术界因此也逐渐形成两种观点,即基于复杂模型的智能控制和不依赖模型的仿生进化控制^[73]。

基于复杂模型的智能控制沿袭了机电系统研究的惯有思路,为广大的科研人员所理解和沿用。新型的机器人柔顺关节的突出优点在于其刚度的可变甚至可调节性,这里的刚度含义不同于传统意义上的机械系统刚度概念。如何准确阐述柔顺关节的刚度内涵、进行数学化的刚度概念定义是进行柔顺关节建模的前提和物理基础。其次,柔顺关节中的诸多非线性甚至时变的参数如何进行定义和实时辨识,也是数学模型建立过程中必须克服的难点问题。如此建立的柔顺关节模型在数学上是相当复杂的,基于这样的模型进行实时准确的控制,对控制算法及其计算复杂度都是极大的挑战。

不依赖于模型的仿生进化控制是另外一种智能控制理论体系,主要根据生物在未知环境中不依赖于先验知识和模型而与环境实时互动,将自身融入环境,在自身与环境的互动中实施有效的控制^[74]。这种控制思想对于与人体互动、未知环境探索等类型的机器人应用极具应用价值。对于采用传统的数学和物理手段难以建立准确数学模型的新型柔顺关节,尤其是采用了新型智能材料(DE、IPMC、气动软体材料)且与对象环境因素密切耦合的柔顺关节,采用不依赖于模型的仿生进化控制不失为一种有效的途径。

3.3 多学科交叉合作研发

虽然部分柔顺关节是针对康复训练机器人而设计,但是多数的柔顺关节研究,特别是采用新型智能材料的柔顺关节研究仅仅是尝试将新技术和新材料应用于机器人的设计,尚未有针对性地研发适用于特定应用的机器人柔顺关节。比如哈佛大学 Whitesides 团队研发的一系列气动柔顺关节,结构新颖、运动形式多样,但是并没有针对某一种特定的机器

人而设计。这些新型的气动柔顺关节在哪些领域可以得到有效的应用也尚未明确,仅仅停留在原型样机和实验室阶段。

由于应用牵引的缺失,多数的柔顺关节结构都没有得到持续性的研究和开发。造成这一现象的原因在于研究人员的学科背景限制。材料学科的研究人员往往不了解机器人的应用需求,机器人领域的科研人员不能及时掌握智能材料的最新研究成果。同样,控制领域的学者也需要综合掌握智能材料的特性和应用需求才能有效地将智能控制方法应用于柔顺关节的控制系统设计。所以,本文认为柔顺关节的持续研发并达到最终应用的目的,需要应用领域、机械工程、控制工程、材料科学、仿生工程甚至医学工程的深度合作和联合研发。

4 结 论

采用柔顺关节实现机器人的内在适应性是新一代机器人研究的一个重要方向。在努力挖掘传统机器人关节柔顺性再设计的同时,引入智能材料和创新结构进行全新的机器人关节设计更为广大的科研人员所采用。创新设计的机器人柔顺关节具有传统关节所无法比拟的柔顺性和主动适应性优势。然而,动力源、智能材料、创新结构、运动形式的多样化、运行参数的多变性、输出特性的非线性和时变性等又给新型的柔顺关节建模和控制带来巨大挑战,阻碍了这类机器人柔顺关节的应用推广。同时,针对具体应用对象和环境研究的欠缺也是导致类似研究停留在原型样机和实验室研究阶段的主要原因之一。因此,机器人柔顺关节的深入研发与推广应用需要进一步加强基于应用的结构创新、建模与控制、以及多学科交叉合作。

参考文献

[1] Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. *Nature*, 2015, 521(7553):467-475

[2] 刘亚威. 美国国防部推进人机协作机器人发展[J]. 国际航空, 2017(5):74-76

[3] 赵志瑛. 工业机器人安全分析[J]. 安全与环境学报, 1997(5):31-33

[4] 丁汉. 共融机器人的基础理论和关键技术[J]. 机器人产业, 2016 (6):12-17

[5] 刘辛军, 于靖军, 王国彪, 等. 机器人研究进展与科学挑战[J]. 中国科学基金, 2016 (5):425-431

[6] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人:结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13):1-13

[7] 王颜, 房立金. 机械式仿骨骼肌变刚度机构原理及设计[J]. 机器人, 2015, 37(4):506-512

[8] 张亚平, 周建军, 陈耀, 等. 含弹性环的机器人关节变刚度驱动器设计分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(2):199-203

[9] Wolf S, Hirzinger G. A new variable stiffness design: matching requirements of the next robot generation[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008. 1741-1746

[10] 魏慧, 帅梅, 王中宇, 等. 仿人机器人可变刚度柔性关节设计[P]. 中国专利, CN101934525A. 2011-1-5

[11] Wolf S, Eiberger O, Hirzinger G. The DLR FSJ: energy based design of a variable stiffness joint[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China, 2011. 5082-5089

[12] Sariyildiz E, Chen G, Yu H. An acceleration-based robust motion controller design for a novel series elastic actuator[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(3):1900-1910

[13] Li X, Pan Y, Chen G, et al. Adaptive human-robot interaction control for robots driven by series elastic actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(1):1-14

[14] Awad M I, Gan D, Cempini M, et al. Modeling, design & characterization of a novel passive variable stiffness joint(pVSJ)[C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, Korea, 2016. 323-329

[15] Cui S, Liu Y, Sun Y, et al. Design of a series variable stiffness joint based on antagonistic principle[C]. In: International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Wuhan, China, 2017. 238-249

[16] Choi J, Hong S, Lee W, et al. A robot joint with variable stiffness using leaf springs[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(2):229-238

[17] Kajikawa S, Yonemoto Y. Joint mechanism with a multi-

- directional stiffness adjuster[C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Taipei, China, 2010. 4194-4200
- [18] Kajikawa S, Ito T, Hase H. Stiffness control of variable stiffness joint using electromyography signals[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013. 4928-4933
- [19] 张立彬, 鲍官军, 杨庆华, 等. 气动柔性驱动器及其在灵巧手中的应用研究综述[J]. 中国机械工程, 2008, 19(23):2891-2897
- [20] Bao G, Cai S, Wang Z, et al. Flexible pneumatic robotic actuator FPA and its applications[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenzhen, China, 2013. 867-872
- [21] Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(51): 20400
- [22] Martinez R V, Branch J L, Fish C R, et al. Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(2): 205-212
- [23] Stokes A A, Shepherd R F, Morin S A, et al. A Hybrid Combining Hard and Soft Robots[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1):70-74
- [24] Kwok S W, Morin S A, Mosadegh B, et al. Magnetic assembly of soft robots with hard components[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 24(15): 2180-2187
- [25] Tolley M T, Shepherd R F, Mosadegh B, et al. A resilient untethered soft robot[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(3):213-223
- [26] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15): 2163-2170
- [27] Mosadegh B, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Control of soft machines using actuators operated by a braille display[J]. *Lab Chip*, 2014, 14(1):189-199
- [28] Shepherd R F, Stokes A A, Freake J, et al. Using explosions to power a soft robot[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2013, 125(10): 2964-2968
- [29] Martinez R V, Fish C R, Chen X, et al. Elastomeric origami: programmable paper-elastomer composites as pneumatic actuators[J]. *Advanced Functional Materials*, 2012, 22(7):1376-1384
- [30] Yan T, Shuai G. Stiffness characteristic of elongation type pneumatic compliance actuator[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(5):76-80
- [31] 李苏宁, 滕燕, 杨罡, 等. 双向柔性的膝关节主-被动康复训练装置[P]. 中国专利, CN101829004A. 2010-9-15
- [32] Deshpande A R, Tsez T H, Ren H. Origami-inspired bi-directional soft pneumatic actuator with integrated variable stiffness mechanism[C]. In: IEEE International Conference on Advanced Robotics, Hong Kong, China, 2017. 417-421
- [33] 王宁扬, 孙昊, 姜皓, 等. 一种基于蜂巢气动网络的软体夹持器抓取策略研究[J]. 机器人, 2016, 38(3): 371-377
- [34] Li Y T, Chen Y H, Yang Y, et al. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers[J]. *IEEE Transaction on Robotics*, 2017, 33(2):446-455
- [35] 鲍官军, 李昆, 马小龙, 等. 仿生软体机器人的可变刚度模块[P]. 中国专利, CN104227721A. 2014-12-24
- [36] 鲍官军, 李昆, 马小龙, 等. 主动可变刚度长臂式仿生软体机器人[P]. 中国专利, CN104440918A. 2015-3-25
- [37] Giannaccini M E, Xiang C, Atyabi A, et al. Novel design of a soft lightweight pneumatic continuum robot arm with decoupled variable stiffness and positioning[J]. *Soft Robotics*, 2018, 5(1):54-70
- [38] Amend J, Cheng N, Fakhouri S, et al. Soft robotics commercialization: jamming grippers from research to product[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(4): 213
- [39] Hauser S, Robertson M, Ijspeert A, et al. JammJoint: a variable stiffness device based on granular jamming for wearable joint support[J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2017, 2(2):849-855
- [40] Wei Y, Chen Y H, et al. A novel variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(3):134-143
- [41] Yang Y, Chen Y H, Li Y, et al. Novel variable-stiffness robotic fingers with built-in position feedback[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(4):338-352
- [42] Choi J, Park S, Lee W, et al. Design of a robot joint with variable stiffness[C]. In: IEEE International Con-

- ference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008. 1760-1765
- [43] Hyun M W, Yoo J, Hwang S T, et al. Optimal design of a variable stiffness joint using permanent magnets[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(6):2710-2712
- [44] Yoo J, Hyun M W, Choi J H, et al. Optimal design of a variable stiffness joint in a robot manipulator using the response surface method[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2009, 23(8):2236-2243
- [45] Zhao Y, Yu J, Wang H, et al. Design of an electromagnetic prismatic joint with variable stiffness[J]. *Industrial Robot*, 2017, 44(2):222-230
- [46] Yun S, Kang S, Kim M, et al. A novel design of high responsive variable stiffness joints for dependable manipulator [C], In: Proceedings of ACMD, Tokyo, Japan, 2006. A00695
- [47] Manti M, Cacucciolo V, Cianchetti M. Stiffening in soft robotics: a review of the state of the art[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(3):93-106
- [48] Suo Z G. Theory of dielectric elastomers[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 23(6):549-578
- [49] Gu G Y, Zhu J, Zhu L M, et al. A survey on dielectric elastomer actuators for soft robots[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(1):011003
- [50] 王延杰, 汝杰, 赵东旭, 等. 离子聚合物-金属复合材料(IPMC)的电极界面研究进展[J]. *材料导报*, 2017, 31(15):24-29
- [51] 杭观荣, 曹国辉, 王振龙, 等. SMA驱动的仿生机器人研究现状及其展望[J]. *微特电机*, 2006, 34(11):4-8
- [52] Mahmudru R, Zhi C, Sabariah J L, et al. A review of advances in magnetorheological dampers: their design optimization and applications [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2017, 18(12):991-1010
- [53] 张浩, 胡元, 李志雄, 等. 多盘式磁流变离合器的理论研究[J]. *机械工程师*, 2014(1):132-133
- [54] Shafer A S, Kermani M R. On the feasibility and suitability of MR fluid clutches in human-friendly manipulators [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2011, 16(6):1073-1082
- [55] 戴金桥, 王爱民, 宋爱国. 基于磁流变液的柔性机器人振动控制阻尼器[J]. *机器人*, 2010, 32(3):358-362
- [56] 李志海, 韩建达, 吴镇炜, 等. 机械阻抗参数可调的机器人柔性驱动旋转关节[P]. 中国专利, CN203611260U. 2014-5-28
- [57] 王斌锐, 金英连, 许宏, 等. 机器人仿生膝关节的计算力矩加比例微分反馈控制[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(1):179-183
- [58] 吴波. 基于磁流变阻尼器的动力型智能假肢动力特性分析:[硕士学位论文][D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院, 2015
- [59] 蒋楠. 基于磁流变液的机器人腿设计及实验研究:[硕士学位论文][D]. 合肥:中国科学技术大学工程科学学院, 2016
- [60] 蔡世波, 李昆, 钱振, 等. 机器人关节的磁流变柔顺控制器[P]. 中国专利, CN104552312A. 2015-1-9
- [61] 景甜甜, 莫岸, 张文增, 等. 磁流变液间接自适应欠驱动机器人手指装置[P]. 中国专利, CN104802177A. 2015-5-11
- [62] Han J, Chen Y H, Zhao X, et al. Optimal design for robust control of uncertain flexible joint manipulators: a fuzzy dynamical system approach[J]. *International Journal of Control*, 2017, 91(1):1-28
- [63] Kortschack A, Fatikow S. Smart materials for actuation in microrobotics[C]. In: SPIE's International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro- Smart Systems, Melbourne, Australia, 2002, 4935:1-14
- [64] Yang Y, Chen Y, Li Y, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(2):147-162
- [65] Han M W, Ahn S H. Smart materials: blooming knit flowers: loop-linked soft morphing structures for soft robotics[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(13):1606580
- [66] Pfeifer R, Lungarella M, Iida F. Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics [J]. *Science*, 2007, 318(5853):1088-93
- [67] Jones B A, Walker I D. Practical kinematics for real-time implementation of continuum robots [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6):1087-1099
- [68] 田柳滨, 蔡世波, 鲍官军, 等. 磁流变液柔顺关节的设计和运动学建模研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(5):432-437
- [69] 夏旭. 基于串联弹性驱动器的并联柔顺手腕的设计:[硕士学位论文][D]. 北京:北京交通大学机械与电子工程学院, 2016

- [70] Manti M, Cacucciolo V, Cianchetti M. Stiffening in soft robotics: a review of the state of the art [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(3):93-106
- [71] Li X, Pan Y, Chen G, et al. Adaptive human-robot interaction control for robots driven by series elastic actuators [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, (99): 1-14
- [72] Li X, Pan Y, Chen G, et al. Continuous tracking control for a compliant actuator with two-stage stiffness [J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2018, 15(1):57-66
- [73] Laschi C, Cianchetti M. Soft robotics: new perspectives for robot bodywear and control[J]. *Frontiers in Bioengineering & Biotechnology*, 2014, 2(7):3
- [74] Pfeifer R. Embodied artificial intelligence 10 years back, 10 years forward[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2001, 149(1):294-310

Review on compliant joint research for robots

Cai Shibo, Bao Guanjun, Xu Fang, Zhang Libin

(Key Laboratory of E&M (Zhejiang University of Technology), Ministry of Education
& Zhejiang Province, Hangzhou 310014)

Abstract

When robots continuously extend their applications in fields of intelligent plant, service, medical treatment, education, entertainment, unknown circumstances, the design of robot compliance and active adaptability has attracted more and more interests from researchers. This paper reviews the structure principles of robot compliant joint, including passive compliant joint of elastic element, pneumatic active compliant joint, magnetic-based compliant joint and intelligent material based compliant joint. Furthermore, the existing problems of robot compliant joint research and application are analyzed, such as structure, modeling and control, power supply. Finally, the researching trend of robot compliant joint is proposed in aspects of driving and structure innovation, mathematical modeling and control, interdisciplinary cooperative research and development.

Key words: compliant joint, stiffness control, magnetorheological fluid, smart material