

软体机器人气压驱动结构研究综述^①

鲍官军^② 张亚琪 许宗贵 蔡世波 胥 芳 杨庆华 张立彬^③

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310014)

摘 要 气压驱动是最早的软体机器人驱动方式。本文综述了软体机器人气压驱动的主要结构形式和工作原理,包括形约束型驱动结构、纤维约束型驱动结构、织网约束型驱动结构、颗粒增强型驱动结构等,并进一步从结构设计创新、智能材料与驱动结构的深度融合、建模与仿真技术、制造技术等方面分析讨论了气压驱动软体机器人研究中存在的技术难题,指出了气压驱动结构在设计、智能材料、建模仿真、加工制造等方面需要亟待解决的关键问题和研发方向。气压驱动软体机器人是目前最广泛研究和最有可能率先得到应用的软体机器人形式,具有相对良好的相关技术基础,机器人、机械工程、材料科学、智能控制、计算机图形学等多学科交叉和深度合作将有助于促进该方向的快速发展。

关键词 软体机器人,驱动器,结构创新,变刚度机器人

0 引 言

近年来,软体机器人是机器人领域的研究热点,并且被学术界认为是最有潜力成为全新一代机器人的方向^[1],甚至将对机器人在工业和社会领域的应用产生革命性的作用^[2]。不同于传统的刚性机器人,软体机器人的结构形式各式各样,相互之间差异巨大,主要原因之一是其驱动结构和形式不同。软体机器人驱动形式主要包括基于线缆变长度的欠驱动、基于流体的变压驱动和基于智能材料变形的驱动^[3]。其中基于流体的变压(气压)驱动是最早的软体机器人驱动方式,也是目前研究中最广泛采用和最有可能率先得到应用的软体机器人形式。

基于流体的变压驱动采用不同的型腔结构设计、通过改变型腔内的流体(一般为气体)的压力而实现不同的驱动形式和运动特性。最早的气压驱动软体机器人是 1950 年代美国原子物理学家 McKibben^[4]设计的 PMA (pneumatic muscle actuator)。

之后,PMA 被广泛研究^[5-8]和应用于各种机器人驱动结构设计^[9-14]。另外一位较早从事气压驱动软体机器人研究的是现任东京工业大学教授 Koichi Suzumori。Suzumori 教授^[15,16]于 1986 年研发了第一个三腔驱动的软体机器人 FMA (flexible microactuator)。在之后的数十年里,Suzumori 教授相继开发出多款气压驱动软体机器人。在软体机器人研究兴起之前的数十年间,基于气体的变压驱动形式以 PMA 和 FMA 为主流。近年来,各种新型结构形式的气压驱动结构被相继提出,极大地促进了气压驱动型软体机器人的基础研究和应用研究。

本文综述分析了基于气体的变压驱动型软体机器人各种结构、工作原理及其特点,并进一步讨论研究现状中存在的问题和需要攻克的共性关键问题。

1 形约束型驱动结构

日本岗山大学设计了一种微型气动软体驱动器^[17],在驱动器的中间层两侧设置线性阵列式驱动

① NSFC-浙江两化融合联合基金(U1509212)和国家自然科学基金(51605434,51775499)资助项目。
② 男,1979 年生,博士,教授,博士生导师;研究方向:机器人与智能装备,软体机器人;E-mail: gjbao@zjut.edu.cn
③ 通信作者,E-mail: robot@zjut.edu.cn
(收稿日期:2018-07-22)

单元体,当向各个单元体内充入正压气体或负压气体时,每个驱动单元体发生膨胀或收缩。邻近单元体互相挤压或牵引,形成正反双向弯曲运动,如图 1 所示。该驱动器直径只有 $400\text{ }\mu\text{m}$ ^[18],主要材料是具有非线性的硅橡胶,作者采用三阶 Mooney-Rivlin 函数对其建模和控制^[19],并基于该微型气动软体驱动器制作了一个由三指构成的柔性手。

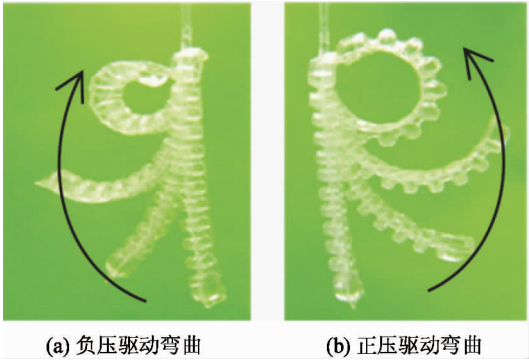


图 1 微型气动软体驱动器

常见的一体式驱动腔在大变形时因产生较大的弹性内力而需要很大的驱动气体压力才能抵消。这种线性阵列式驱动单元的新型结构设计克服了这个问题,在较小的气压作用下即可产生很大范围的弯曲动作,因此后续众多的气压驱动结构都与之类似。例如哈佛大学 Whitesides 研究组^[20]利用硅橡胶材料制造的可由气压快速驱动的 Pneu-Net 软体驱动器即是采用线性阵列式驱动单元结构,如图 2 所示。不同之处在于该驱动器采用具有不同伸展性的双层材料层叠而成,驱动层采用 Ecoflex 材料,可延展性

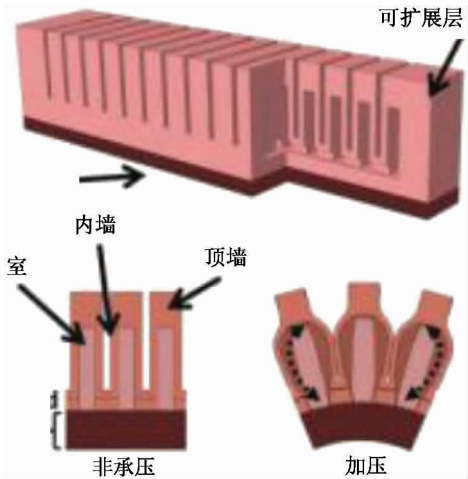


图 2 Pneu-Net 软体驱动器

高,应变限制层采用 PDMS 材料,可伸展性差。充入高压气体时,由于延展性不同,驱动层产生的形变远大于应变限制层,宏观上导致材料向应变限制层一侧弯曲运动。基于 Pneu-Net 软体驱动器,Whitesides 研究组开发了四足充气式蠕动软体机器人(图 3(a))^[21]、软体抓取机械手(图 3(b))^[22]等。

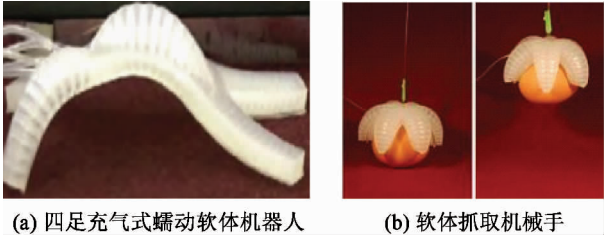


图 3 Pneu-Net 软体驱动器应用

康奈尔大学仿生机器人实验室设计的软体驱动器同样采用线性阵列式驱动结构。如图 4 所示,由液态有机硅橡胶浇铸而成的一系列相互独立的球形气室设置在一个不能伸展的尼龙织物同侧,当给气室充入高压气体时,驱动执行器会发生弯曲^[23]。该驱动器可用于医疗康复手,套在患者手背上,作为一个主动辅助机构,帮助每个手指独立弯曲^[24]。

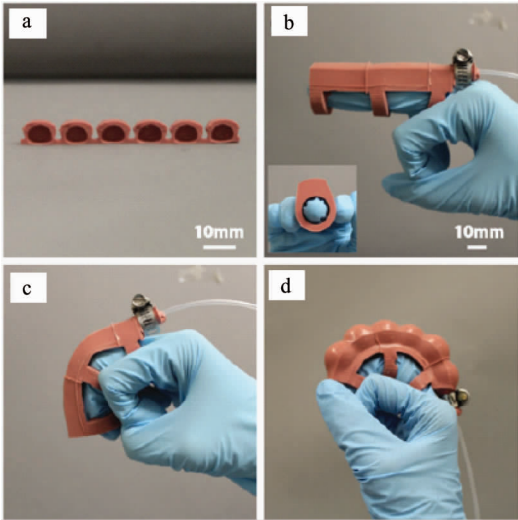


图 4 球形阵列软体驱动器及其应用

采用线性阵列式驱动原理设计的软体驱动器还包括麻省理工学院设计的软体驱动器(图 5)^[25,26],立命馆大学设计的用于抓取食品包装盒的软体驱动

器^[27,28],北京航空航天大学研制的通用气动软体机械手(图7)^[29]等。

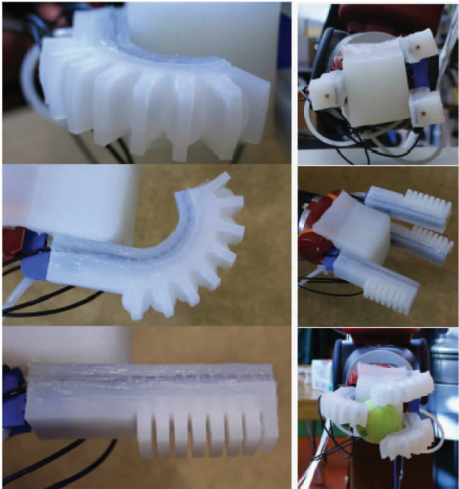


图5 麻省理工学院设计的软体驱动器

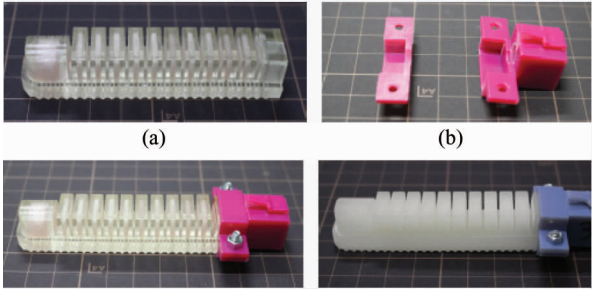


图6 立命馆大学设计的软体驱动器

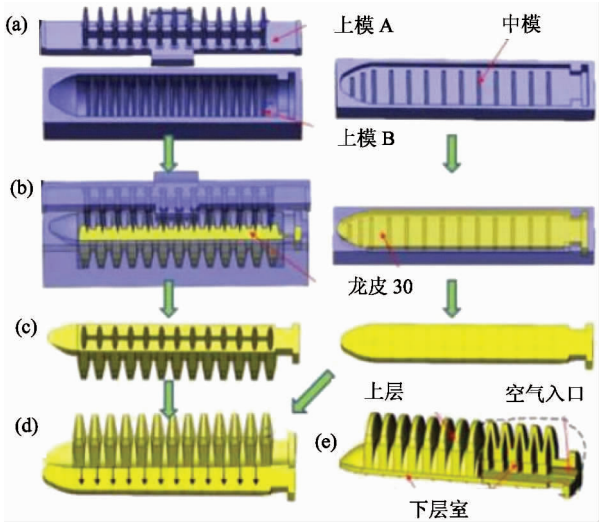


图7 北京航空航天大学的通用气动软体机械手

线性阵列式驱动的软体驱动器只能实现平面内的弯曲运动,采用空间阵列式驱动结构则可以实现更为复杂的空间运动。如哈佛大学 Whitesides 研究

组开发的 flexible tentacles(图8)^[30],特别是如图9所示的弹性“积木”元件 elastomeric brick^[31]和 elastomeric tile^[32],可以根据需要灵活地搭建各种气动软体机器人结构。

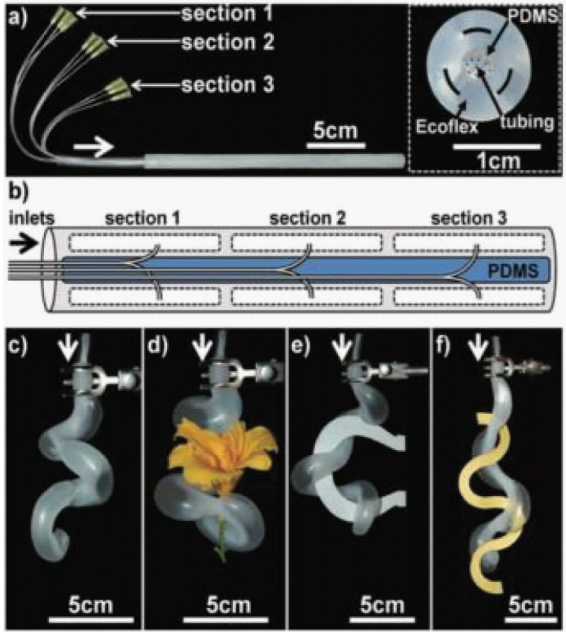


图8 flexible tentacles

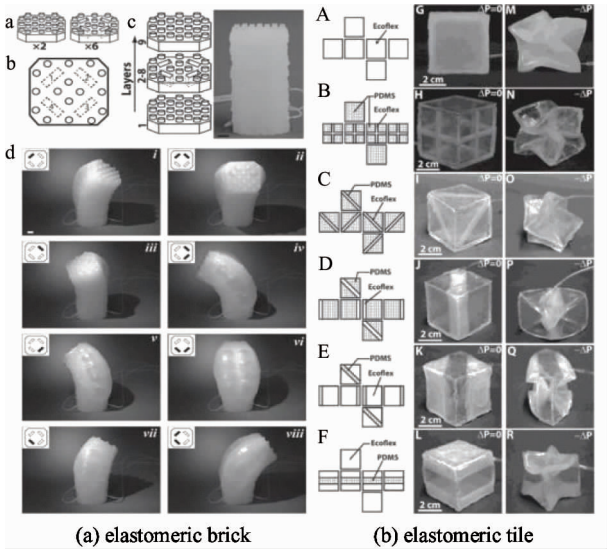


图9 弹性“积木”元件

另外一种形约束气压驱动采用折叠型结构。例如中国科技大学陈小平团队研发的蜂巢气动网络驱动器(图10)^[33]、弹性波纹管驱动柔性关节(图11)^[34]以及哈佛大学 Whitesides 研究组开发的 biased bellows actuator(图12)^[35]等。

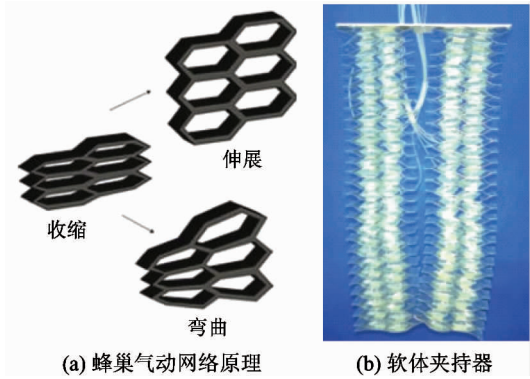


图 10 蜂巢气动网络驱动器

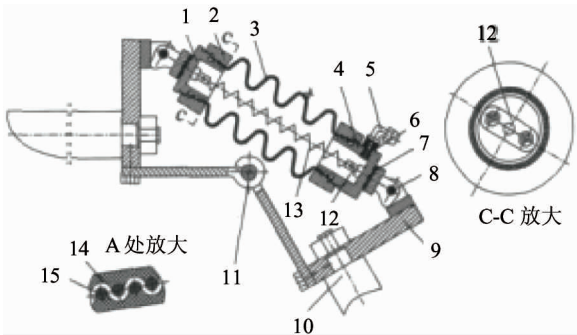


图 11 弹性波纹管驱动柔性关节

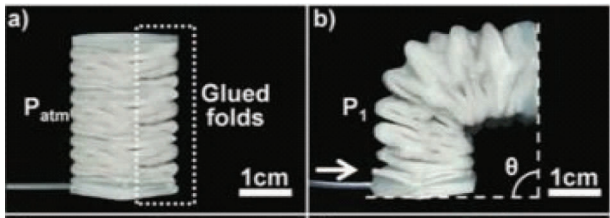


图 12 biased bellows actuator

2 纤维约束型驱动结构

采用单一材料(硅橡胶)设计的气压驱动结构在工作时往往存在非预期的受压膨胀变形,采用纤维约束可以有效克服这一问题。

Noritsug 等开发了一种旋转型气动柔性驱动器,由两个边板和中间的可伸缩部分组成。这些组成部分皆由硅橡胶制成,其中可伸缩部分内部沿径向设有加强纤维以限制其非设计方向的膨胀^[36],如图 13 所示。

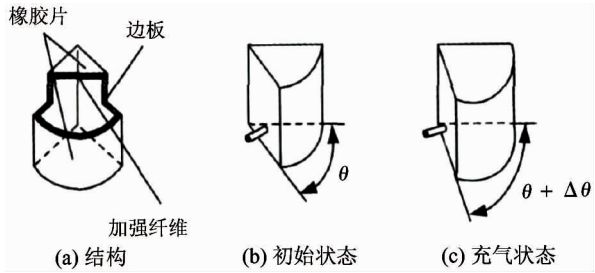


图 13 旋转型气动柔性驱动器

Fras 和 Althoefer^[37] 通过比较不同截面和不同匝数加强纤维的旋转型驱动器,发现圆形截面是该类驱动器的最佳选择,并开发了自然状态下呈扇形的旋转型驱动器,用聚酯线进行加强以限制其径向的膨胀,如图 14 所示。

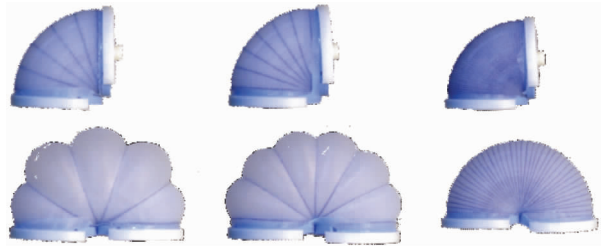


图 14 圆形截面旋转型驱动器

最为典型的纤维约束型驱动结构是 Suzumori 教授在 20 世纪 80 年代研制的 3 自由度 FMA(flexible microaotuator)^[38,39],其结构如图 15 所示。其主要部分为硅橡胶制成的橡胶管,橡胶管芯部均匀分布 3 个气室,橡胶管外壁的尼龙纤维起约束和加强作用。并且,尼龙纤维走向与圆周方向存在夹角 α 。当 $\alpha = 0$ 时,FMA 具有伸长、偏转、弯曲 3 个自由度; $\alpha \neq 0$ 时,除了上述 3 种运动形式外,FMA 还可以绕中心轴做旋转运动。基于该驱动器,Suzumori 团队^[40]研制了四指手、蛇形机器人等。

Suzumori 等人^[41]还研发了一种两腔软体驱动器,其结构如图 16 所示,该驱动器有两个气压腔,压力通过气管独立控制,用尼龙帘线沿圆周方向加强橡胶,以抵抗径向膨胀变形。基于该驱动器设计了模仿蝠鲼的外形和推进机理的气动软体机器鱼,能在水下自由移动,速度可达 100 mm/s。

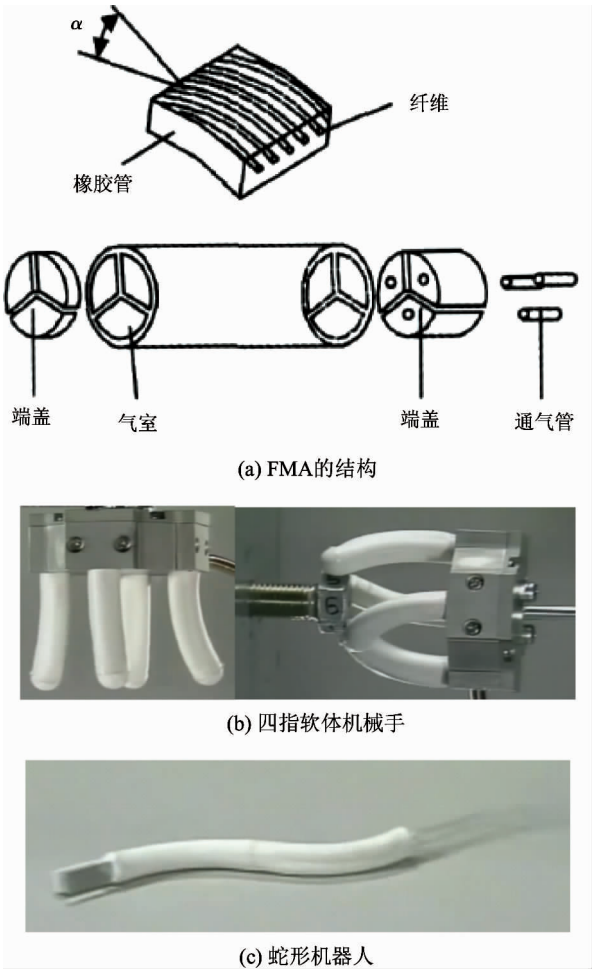


图 15 flexible microactuator 及应用

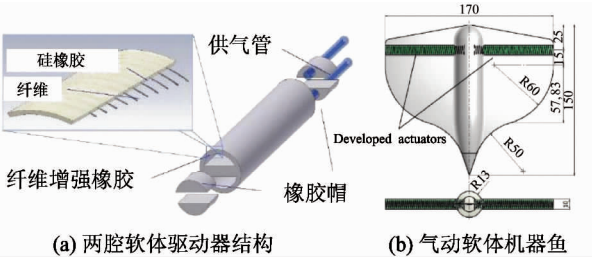


图 16 纤维约束型两腔软体驱动器及应用

Walsh 等人设计了一种单腔驱动纤维增强驱动器。如图 17 所示,两次铸造过程中在气腔壁内嵌入纵向的纤维和横向缠绕的纤维。纵向纤维的作用是限制其所在侧面的伸长,横向缠绕纤维约束圆周方向膨胀变形^[42-44]。类似的结构还有洛桑联邦理工学院研制的软体驱动器^[45]、浙江工业大学研制的气动柔性弯曲关节^[46]、天津大学设计的一种软体弯曲驱动器^[47]、上海交通大学研制的纤维增强型驱动

器^[48]、柏林大学研制的气动驱动器^[49]以及哈尔滨工业大学研制的纯扭转软体驱动器^[50]等。

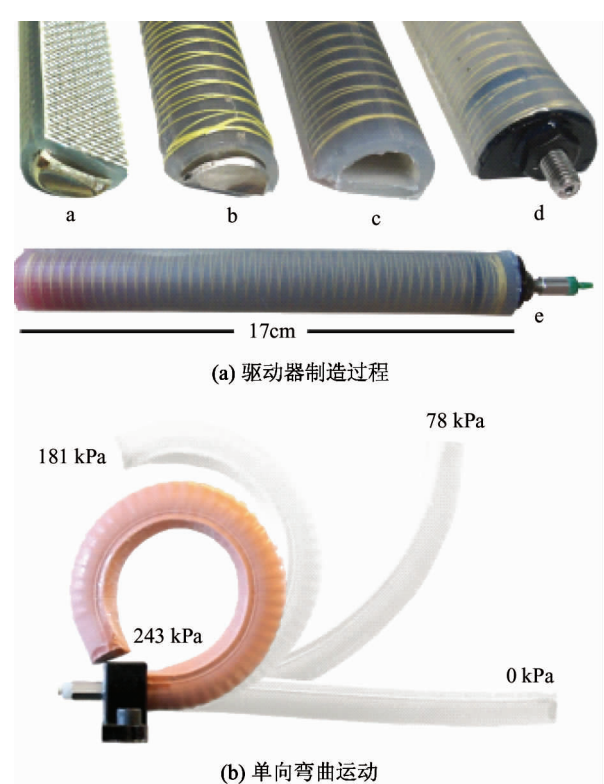


图 17 单腔驱动纤维增强驱动器

3 织网约束型驱动结构

如前所述,采用纤维约束可以限制气动驱动器的非设计变形、提高内腔的承压能力,实现更大程度的变形和运动。但是从各种样机的演示实验可以看出,在较大变形的情况下,由于纤维间隙的存在并被拉大,驱动器的非设计变形依然很大。采用间隙更为致密的编织网进行驱动器的约束具有更好的效果。例如 McKibben 型气动人工肌肉驱动器 PMA^[4, 51]。如图 18 所示,PMA 由相互交织在一起的螺旋编织网覆盖在柱状橡胶气囊外面,然后两端用金属接头卡紧,形成一个密闭容腔。当充气时,其内部体积增大,但由于编织网的长度保持不变,而与橡胶管轴线夹角增大,导致其在轴向收缩,径向膨胀。康奈尔大学研制气动软体多指灵巧手时,即采用尼龙编织网约束的硅橡胶管作为软体手指的主体结构^[52],如图 19 所示。

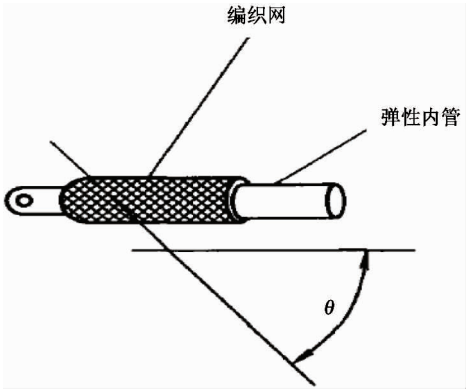


图 18 McKibben PMA

PMA 的运动形式还与外层编织网的角度密切相关。当角度小于 54.5° 时, PMA 充气后将产生收缩运动; 而角度大于 54.5° 时则会产生伸长运动^[53]。利用编织网大角度的伸长特性, NASA 研发了 OCT-BOT 长臂式捕获机器人^[54-57], 如图 20 所示。

由于 PMA 的驱动特性接近于生物肌肉的特性, 使得它十分适合用作机器人的执行元件。在 20 世纪 80 年代到 90 年代, BridgeStone, Shadow 以及 FESTO 3 家公司先后推出商品化的气动肌肉产品。其中 BridgeStone 和 Shadow 公司的气动肌肉是基于 McKibben 的结构^[58]。而 FESTO 公司还推出了一款气动肌肉产品, 把尼龙纤维编织网嵌入到橡胶囊中, 使得编织网随着橡胶囊一起运动, 消除了两者之间

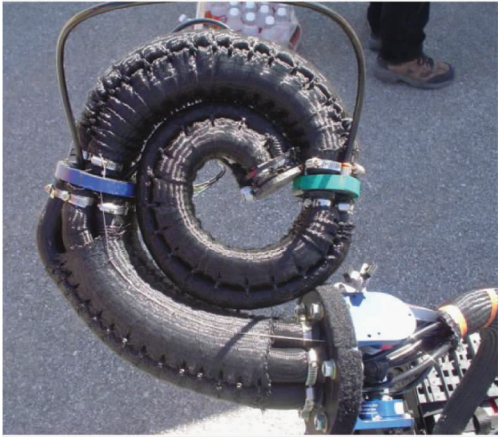


图 20 NASA OCTBOT

由于相对运动而产生的摩擦^[59]。Ahmad 等^[60-61]提出的软驱动器结构则更为巧妙, 将不同编织角度的组合应用于单腔柔性驱动器以产生弯曲运动, 如图 21 所示。

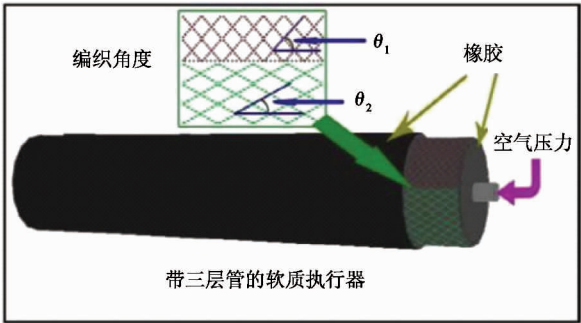


图 21 内嵌多角度编织网的软体驱动器

4 颗粒增强型驱动结构

密闭柔性容器内存放细小颗粒, 在承受负压的情况下, 柔性容器受外界大气压的挤压作用而收缩压紧内部的颗粒, 形成具有一定强度的固定形状。康奈尔大学 Brown 等人^[62]基于这一原理研发了球形软体驱动器, 如图 22 所示。当驱动器压在抓取目标物体上时, 内部的颗粒物受到挤压会根据物体形状而移动, 使驱动器包裹在物体表面。然后再施加负压, 根据阻塞原理内部颗粒快速收缩以夹住物体。在快速抓取复杂外形的物体时具有明显优势^[63]。

香港大学陈永华等人设计的可变刚度软体驱动器 Variable Stiffness Robotic Gripper 可延展的一侧附加了一个颗粒腔, 充气时会对颗粒腔施加压力, 致使

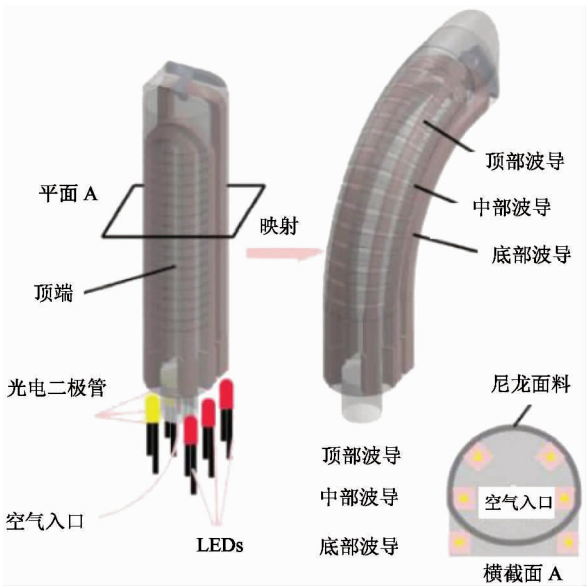


图 19 康奈尔大学气动软体手指

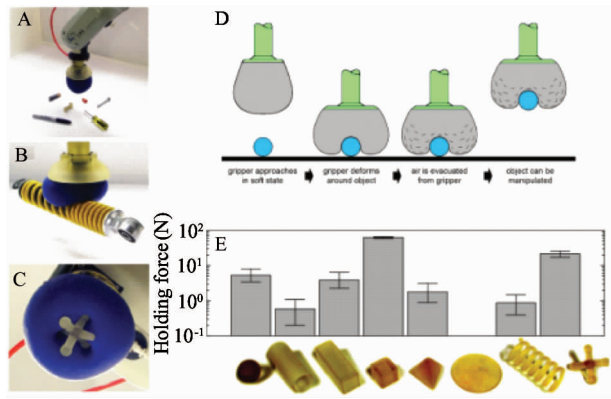


图 22 球形软体驱动器

颗粒腔内部的颗粒发生挤压,从而增加手指的刚度^[64],如图 23 所示。手指的刚度是可控的,它与驱动器的空气压力成比例,驱动器空气压力越大,刚度越大。然后在较高的气压下变硬,刚度变化可以超过原型的 6 倍^[65]。基于类似的原理,陈永华还设计了一种刚度可调的仿生软体脊椎骨^[66],类似的结构还可以应用于微创手术机器人^[67]。

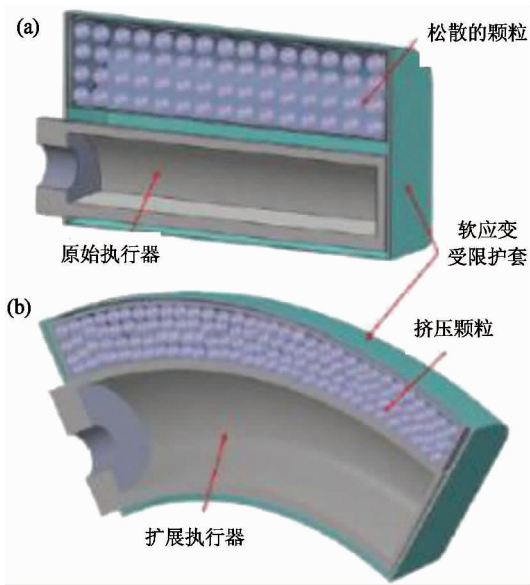


图 23 Variable Stiffness Robotic Gripper

在欧洲 STIFF-FLOP(可变刚度软体手术操作驱动器)项目中,研究者大体上沿用了 3 自由度 FMA 结构,但在驱动器的中间增加了刚度主动调节气腔,气腔中放入颗粒物,通过给刚度调节腔抽负压导致颗粒物挤压的方式来调节驱动器的刚度^[68-70],如图 24 所示。

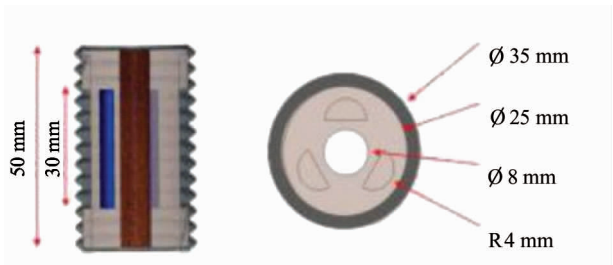


图 24 可变刚度软体手术操作驱动器

5 分析与讨论

5.1 结构设计创新

驱动器是机器人的核心部件之一,而驱动结构又是驱动器的核心。由于构型和运动形式的特殊性,软体机器人的创新设计在很大程度上取决于驱动结构的创新。软体机器人驱动结构的创新设计主要从 2 个方面入手,即仿生和应用驱动。

软体机器人的产生和发展过程始终与仿生概念和仿生技术相伴而行。最早的 PMA 驱动器即是模仿动物肌肉的运动形式和机械特性而设计,之后的软体机器人设计大多采用仿生学原理,模仿章鱼、象鼻、海星、各种鱼、虫类、鸟类等^[71],实现了跳跃、蠕动、伸长/缩短、游动、伸展、弯曲、适应性抓取、自愈等仿生特性^[72],不少软体机器人可以做到在结构和运动形式上接近仿生对象。随着仿生学科和仿生机器人技术的发展^[73],软体机器人的仿生设计将会向更深层次发展,气压驱动软体机器人也将在结构上日益趋近生物体的结构和组织构成,在功能上逼近生物体的运动特性和能效特性。

软体机器人兴起的一个重要原因是传统工业机器人在服务、医疗、救援等新兴领域的应用存在诸多技术难题,而软体机器人正好可以弥补工业机器人的不足。所以应用驱动是软体机器人研究的原动力,也是今后研发和应用中需要遵循的准则。以具体的应用对象和环境作为设计目标,综合运用当前可用的智能材料、动力源形式和设计手段进行新型的软体机器人气压驱动结构设计,将会是产生具有实用价值和商品化可能性的软体机器人的有效途径和方法。以应用驱动为导向的软体机器人设计同时要求所设计的机器人尤其是驱动器性能需以应用对

象和环境为目标,针对实际目标任务进行实验设计,以实际应用技术指标的达成度为考量依据。

5.2 智能材料与驱动结构的深度融合

将智能材料嵌入到机器人本体中,通过控制材料的变形来模仿生物的运动^[74],是智能材料与驱动结构融合设计的一种有效形式。文献[75]提出的 SMP(形状记忆聚合物材料)和气压组合驱动的软体驱动器,通过施加气压和调节 SMP 的刚度,驱动器可以实现正向弯曲、反向弯曲和伸长这三种动作。可见,采用多种材料共同构成气压驱动的软体结构^[76-79]可以有效利用各种智能材料的特性而巧妙地实现软体机器人的驱动和控制。除此之外,智能材料还可以解决软体机器人的一个难题,即传感技术。利用液体金属应变材料与硅胶材料组合制造的气压驱动软体驱动器可以实时感知抓持物体的形状甚至力度^[80],采用导电液可以感知大变形软体材料的弯曲变形^[81],颜色随形变量变化的智能材料可用于软体机器人驱动变形的检测^[82],将光纤材料埋置于气压驱动的软体手指内部可以检测其变形情况^[83],等等。

尽管目前智能材料在气压驱动软体机器人结构中已经得到应用尝试,然而在结构设计、制造成型以及功能上智能材料与基础材料依然是相对独立的。由于结构上的相对独立,甚至会出现工作过程中的多种材料彼此分离等情况。所以,智能材料如何与驱动机构进行深层次的融合设计和制造成型是今后研究中需要重点解决的问题。当然这在很大程度上依赖于智能材料技术、材料机理模型、多种材料混合制造与加工技术、结构创新设计和智能结构建模与仿真技术等。材料科学与工程设计学科的科研人员和技术人员的深度交流与合作将有助于更快更有效地实现智能材料在软体机器人驱动结构中的深度融合应用。

5.3 建模与仿真技术

传统工业机器人的设计和集成有相对成熟的建模与仿真软件辅助,大型机器人公司甚至拥有自己的机器人建模与仿真分析软件系统,大大提高了设计效率和成功率、降低失败风险。然而,对于软体机器人这一新兴领域而言,既没有专用的建模仿真软

件^[84],也不能直接使用工业机器人的仿真系统。因为软体机器人的驱动与运动原理和形式完全不同于传统的工业机器人电机驱动和刚性传动原理,常规的驱动与传动理论不适用。现有的有限元分析方法和商业化软件只能做静态的变形模拟而且其仿真的准确性严重受制于模拟参数的调试设置^[85,86],无法应用于设计分析。所以研究软材料特性、气致驱动与软材料变形耦合机理并建立其基本数学模型^[87],是进行软体机器人驱动建模与仿真的基础,然而这方面的研究工作特别是结合机器人的运动需求的软材料建模研究才刚刚起步。

同时,软体机器人建模与仿真系统研究与开发离不开计算机图形学技术。计算机图形学技术将软体机器人驱动结构的变形过程以图像和动画的形式展示出来,创建有效的视觉交流效果。但是与一般的 3D 软件不同,科学计算的可视化必须以对象的物理模型为基础,按照软体机器人驱动的机理和规律进行图形化和视频展示。所以,如何将软体机器人气压驱动器的基本原理和物理模型用计算机图形学方法进行描述,并构建合理的图像和动画进行虚拟现实展示是需要解决的关键问题。同时,图形化动画演示过程中软体机器人的运动学和动力学特性参数及其曲线的实时计算、展示和存储也是必须具备的功能。更高层次的需求是在给定用户需求和约束条件的前提下,建模与仿真软件可以进行自主计算分析和优化设计,给出软体机器人的自动化设计结果和分析数据。

5.4 制造技术

PMA 型气动肌肉已经被多家公司实现产品化,其加工工艺也已成熟。Jamming gripper^[63]和气动抓持器^[88]等结构相对简单的气压驱动软体机器人也实现了商品化,解决了制造技术问题。而采用新型结构的软体机器人气压驱动结构复杂、材料特性不一,特别是内部多为复杂腔道结构,很难用传统机加工工艺加工^[3]。目前的文献资料中所描述的各种类型气压驱动结构多数都是实验室内手工制作成型,效率低、成品率低、一致性差、成本高等问题难以避免。3D 打印甚至 4D 打印技术的发展使得制造内腔结构复杂的气压驱动型软体机器人成为可能并

且极大程度地简化了制造工艺^[89,90]。但是目前的3D打印效率依然不高、适用材料种类有限,能够打印硅胶材料、混合材料的3D打印机成本昂贵,难以实现批量化的制造应用。

软体机器人的制造技术困难来源于材料、设计、成形技术与设备等多方面因素,解决的途径也有赖于多学科领域的技术发展和深度交叉合作。

6 结 论

作为软体机器人领域最早的一个分支,气压驱动软体机器人的研究具有深厚的研究基础、广泛的研究群体和良好的应用前景。但是实现产品化应用之前还有诸多技术难题需要克服,其中驱动技术与结构是关键。

软体机器人气压驱动的基本原理是利用封闭型腔的受压膨胀或收缩特性而形成致动力,所以型腔的结构设计、拓扑布置、材料选择和驱动介质特性是关键因素。多样化的应用需求促使研究人员提出了各种新型的气压驱动结构,并对材料提出了更高的要求;同时,智能材料科学和技术的发展在很大程度上改进、简化和优化了气压驱动器的结构,甚至于实现结构与功能的融合。与一般机电一体化系统设计类似,软体机器人气压驱动结构的设计过程建模与分析是验证设计目标达成度、提高设计效率、节约时间和成本的有效手段。软体机器人气压驱动器的制造有赖于先进加工技术的发展及其与结构、智能材料、控制等相关领域的交叉融合。

气压驱动的软体机器人可以作为独立的驱动元件产品,如PMA型气动肌肉、气动手指等。更多的新型气压驱动软体机器人被尝试应用于各种不同的领域,如手部运动康复器^[91-93],助力外骨骼机器人^[94-96],探测搜救机器人^[97],多指灵巧手^[98-101],内腔手术机器人^[102-103],等等。相比于IPMC、DE、SMA等电致驱动而言,气压驱动软体机器人在驱动源、材料、制造、成本、安全性等相关技术方面具有优势,最有可能率先得到应用。尽管如此,如何解决文中所述的问题需要来自相关学科领域的科研人员和工程技术人员共同努力。

参考文献

- [1] Laschi C, Cianchetti M. Soft robotics: new perspectives for robot bodyware and control[J]. *Frontiers in Bioengineering & Biotechnology*, 2014, 2(7):3
- [2] Majidi C. Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1): 5-11
- [3] 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
- [4] Nickel V L, Perry J, Garrett A L, et al. Development of useful function in the severely paralyzed hand[J]. *Journal of Bone & Joint Surgery*, 1963, 45(5):933-952
- [5] Caldwell D G, Medranocerda G A, Goodwin M. Control of pneumatic muscle actuators[J]. *IEEE Control Systems*, 2002, 15(1):40-48
- [6] Tsagarakis N, Caldwell D G. Improved modelling and assessment of pneumatic muscle actuators[C]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, USA, 2002. 3641-3646
- [7] Davis S, Tsagarakis N G, Canderle J, et al. Enhanced modelling and performance in braided pneumatic muscle actuators[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2003, 22(3-4):213-228
- [8] Lilly J H. Adaptive tracking for pneumatic muscle actuators in bicep and tricep configurations[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2003, 11(3):333-339
- [9] Lilly J H, Yang L. Sliding mode tracking for pneumatic muscle actuators in opposing pair configuration[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, 13(4):550-558
- [10] Aschemann H, Schindele D. Sliding-mode control of a high-speed linear axis driven by pneumatic muscle actuators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11):3855-3864
- [11] Caldwell D G, Medrano-Cerda G A, Goodwin M. Characteristics and adaptive control of pneumatic muscle actuators for a robotic elbow[C]. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Diego, USA, 1994. 3558-3563
- [12] Tsagarakis N, Caldwell D G, Medrano-Cerda G A. A 7 DOF pneumatic muscle actuator (pMA) powered exoskeleton[C]. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction*, Pisa, Italy, 1999. 327-333

- [13] Martens M, Passon A, Boblan I. A sensor-less approach of a torque controller for pneumatic muscle actuator driven joints[C]. In: Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Robotics, Nagoya, Japan, 2017. 477-482
- [14] Renn J C, Li B H, Renn J C, et al. An artificial flexible robot arm based on pneumatic muscle actuators[C]. In: Proceedings of the Matec Web of Conferences EI, Wuhan, China, 2017. 00020
- [15] Suzumori K, Tanaka H. Flexible Microactuator[J]. *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1991, 94(872):600-602
- [16] Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, USA, 1991. 1622-1627
- [17] Wakimoto S, Ogura K, Suzumori K, et al. Miniature soft hand with curling rubber pneumatic actuators[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2009. 556-561
- [18] Yoshioka R, Wakimoto S, Suzumori K, et al. Development of pneumatic rubber actuator of 400 μ m in diameter generating bi-directional bending motion[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Hong Kong, China, 2014. 1-6
- [19] Kou F, Deng M, Wakimoto S. A miniature pneumatic bending rubber actuator controlled by using the PSO-SVR-based motion estimation method with the generalized Gaussian kernel[J]. *Actuators*, 2017, 6(1):6
- [20] Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(15):2109-2109
- [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] Ilievski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for Chemists[J]. *Angewandte Chemie International Ed.*, 2011, 50(8):1890-1895
- [23] Zhao H, Li Y, Elsamadisi A, et al. Scalable manufacturing of high force wearable soft actuators[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, 3:89-104
- [24] Zhao H, Jalving J, Huang R, et al. A helping hand: soft orthosis with integrated optical strain sensors and EMG control[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(3):55-64
- [25] Homborg B S, Katzschmann R K, Dogar M R, et al. Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper[C]. In: International Conference on Intelligent Robots and Systems, Seoul, Korea, 2015. 1698-1705
- [26] Katzschmann R K, Marchese A D, Rus D. Autonomous object manipulation using a soft planar grasping manipulator[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(4):155-164
- [27] Wang Z, Zhu M, Kawamura S, et al. Comparison of different soft grippers for lunch box packaging[J]. *Robotics & Biomimetics*, 2017, 4(1):10
- [28] Matsuno T, Wang Z, Hirai S. Grasping state estimation of printable soft gripper using electro-conductive yarn. [J]. *Robotics & Biomimetics*, 2017, 4(1):13
- [29] Hao Y, Gong Z, Xie Z, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]. In: Proceedings of the Control Conference, Nanjing, China, 2016. 6109-6114
- [30] 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
- [31] Morin S A, Shevchenko Y, Lessing J, et al. Using ‘click-e-bricks’ to make 3D elastomeric structures[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(34):5991
- [32] Morin S A, Kwok S W, Lessing J, et al. Elastomeric tiles for the fabrication of inflatable structures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(35):5541-5549
- [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+384.
- [34] 王芳,章军,刘光元. 弯曲与直线膨胀弹性波纹管驱动柔性关节的对比分析[J]. *液压与气动*, 2013(2):53-56
- [35] 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
- [36] Noritsugu T. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber[J]. *Journal of Robotics & Mechatronics*, 2001, 13(1):17-22
- [37] Fras J, Noh Y, Wurdemann H, et al. Soft fluidic rotary actuator with improved actuation properties[C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Petersburg, Russia, 2017. 5610-5615
- [38] Suzumori K. Flexible microactuator: 1st report, static characteristics of 3 DOF actuator[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C*, 1989, 55

- (518):2547-2552
- [39] Suzumori K. Flexible microactuator : 2nd report, dynamic characteristics of 3 DOF actuator[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C*, 1990, 56 (527):1887-1893
- [40] Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms[J]. *IEEE Control Systems*, 1992, 21(1):21-27
- [41] Suzumori K, Endo S, Kanda T, et al. A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007. 4975-4980
- [42] Galloway K C, Polygerinos P, Walsh C J, et al. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators[C]. In: International Conference on Advanced Robotics, Seattle, USA, 2013. 1-6
- [43] Polygerinos P, Wang Z, Overvelde J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(3):778-789
- [44] Wang Z, Polygerinos P, Overvelde J, et al. Interaction forces of soft fiber reinforced bending actuators [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, 22 (2):717-727
- [45] Firouzeh A, Salerno M, Paik J. Soft pneumatic actuator with adjustable stiffness layers for multi-DoF actuation [C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Seoul, Korea, 2015. 1117-1124
- [46] Zhang L, Bao G, Yang Q, et al. Static model of flexible pneumatic bending joint [C]. In: International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Roma, Italy, 2007. 1-5
- [47] 王华, 康荣杰, 王兴坚, 等. 软体弯曲驱动器设计与建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(5):1053-1060
- [48] 魏树军, 王天宇, 谷国迎, 等. 基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (13):29-38
- [49] Deimel R, Brock O. A compliant hand based on a novel pneumatic actuator [C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, USA, 2013. 2047-2053
- [50] Yan J, Xu B, Zhang X, et al. Design and Test of a New Spiral Driven Pure Torsional Soft Actuator[C]. In: Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications, St. Petersburg, Russia, 2017. 127-139
- [51] Krishna S, Nagarajan T, Rani A M A. Review of current development of pneumatic artificial muscle [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2011, 11(10): 1749-1755
- [52] Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1):eaai7529
- [53] K Iwata , K Suzumori , S Wakimoto. Development of contraction and extension artificial muscles with different braid angles and their application to stiffness changeable bending rubber mechanism by their combination[J]. *Robotics and Mechatronics*, 2011, 8: 582-588
- [54] Pritts M B, Rahn C D. Design of an artificial muscle continuum robot[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA, 2004. 4742-4746
- [55] Mcmahan W, Chitrakaran V, Csencsits M, et al. Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator [C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, China, 2006. 2336-2341
- [56] Giri N, Walker I. Continuum robots and underactuated grasping[J]. *Mechanical Sciences*, 2011, 2(1):51-58
- [57] Kapadia A D, Walker I D, Dawson D M, et al. A model-based sliding mode controller for extensible continuum robots[C]. In: Wseas International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), Cambridge, UK, 2010. 113-120
- [58] Pack R T, Christopher J L J, Kawamura K. A Rubbertuator-based structure-climbing inspection robot [C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Tokyo, Japan, 1997. 1869-1874
- [59] Boblan I, Maschuw J, Engelhardt D. A human-like robot hand and arm with fluidic muscles; modelling of a muscle driven joint with an antagonistic setup[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3139: 160-179
- [60] Faudzi A A M, Razif M R M, Nordin I N A M, et al. Development of bending soft actuator with different braided angles [C]. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Kaohsiung, China, 2012. 1093-1098
- [61] Mohd Nordin I N A, Muhammad Razif M R, Faudzil A A M, et al. 3-D finite-element analysis of fiber-reinforced soft bending actuator for finger flexion [C]. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Seattle, USA, 2013. 128-133
- [62] Brown E, Meiron D. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*

- ica, 2010, 107(44):18809
- [63] Amend J, Cheng N, Fakhouri S, et al. Soft robotics commercialization: jamming grippers from research to product [J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(4):213-222
- [64] Yang Y, Chen Y H, Wei Y, et al. Novel design and 3D printing of variable stiffness robotic grippers[J]. *Journal of Mechanisms & Robotics*, 2016, 8(6), doi:10.1115/1.4033728
- [65] Li Y, Chen Y, Wei Y. Passive particle jamming and its stiffening of soft robotic grippers[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2):446-455
- [66] Wei Y, Chen Y, Yang Y, et al. A soft robotic spine with tunable stiffness based on integrated ball joint and particle jamming[J]. *Mechatronics*, 2016, 33:84-92
- [67] Jiang A, Althoefer K, Dasgupta P, et al. Granular jamming for minimally invasive surgeries[J]. *Journal of Endourology*, 2012, 26(5):403-404
- [68] Cianchetti M, Ranzani T, Gerboni G, et al. STIFF-FLOP surgical manipulator: mechanical design and experimental characterization of the single module[C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Seattle, USA, 2013. 3576-3581
- [69] Malekzadeh M S, Calinon S, Bruno D, et al. Learning by imitation with the STIFF-FLOP surgical robot: a biomimetic approach inspired by octopus movements[J]. *Robotics & Biomimetics*, 2014, 1(1):13
- [70] Ranzani T, Cianchetti M, Gerboni G, et al. A soft modular manipulator for minimally invasive surgery: design and characterization of a single module[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, 32(1):187-200
- [71] Trivedi D, Rahn C D, Kier W M, et al. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research [J]. *Applied Bionics & Biomechanics*, 2008, 5(3):99-117
- [72] Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. 2016, 1(1):eah3690
- [73] 王国彪, 陈殿生, 陈科位, 等. 仿生机器人研究现状与发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13):27-44
- [74] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. *力学学报*, 2016, 48(4):756-766
- [75] Firouzeh A, Salerno M, Paik J. Soft pneumatic actuator with adjustable stiffness layers for Multi-DoF Actuation [C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Seoul, Korea, 2015. 1117-1124
- [76] Yang Y, Chen Y, Li Y, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material. [J]. *Soft Robot*, 2017, 4(2):147-162
- [77] Deimel R, Brock O. A compliant hand based on a novel pneumatic actuator[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seattle, USA, 2013. 2047-2053
- [78] 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
- [79] Wall V, Zöller G, Brock O. A method for sensorizing soft actuators and its application to the RBO hand 2[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Petersburg, Russia, 2017. 4965-4970
- [80] Park Y L, Chen B R, Wood R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(8):2711-2718
- [81] Morin S A, Shepherd R F, Kwok S W, et al. Camouflage and display for soft machines[J]. *Science*, , 2012, 337(6096):828-832
- [82] Robinson S S, O'Brien K W, Zhao H, et al. Integrated soft sensors and elastomeric actuators for tactile machines with kinesthetic sense[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, 5:47-53
- [83] Iida F, Laschi C. Soft robotics: challenges and perspectives[J]. *Procedia Computer Science*, 2011, 7(29):99-102
- [84] Moseley P, Florez J M, Sonar H A, et al. Modeling, design, and development of soft pneumatic actuators with finite element method[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 18(6):978-988
- [85] Hiller J, Lipson H. Dynamic simulation of soft multimaterial 3D-printed objects[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(1):88-101
- [86] Trivedi D, Lotfi A, Rahn C D. Geometrically exact models for soft robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, 24(4):773-780
- [87] Hao Y F, Gong Z Y, Xie Z X, et al. Fabrication, modeling and experiments of a soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(2):220-235
- [88] Hong K Y, Hui Y N, Yeow C H. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications[J]. *Adv. Mater. Technol*, 2016, 3(3):144-158
- [89] 张进华, 王韬, 洪军, 等. 软体机械手研究综述[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13):19-28
- [90] Yang Q H. Motion identification based on sEMG for flexi-

- ble pneumatic hand rehabilitator[J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2015, 42(1):25-35
- [91] Jeong U, In H K, Cho K J. Implementation of various control algorithms for hand rehabilitation exercise using wearable robotic hand[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2013, 6(4): 181-189
- [92] Kang B B, Lee H, In H, et al. Development of a polymer-based tendon-driven wearable robotic hand[C] In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nanjing, China, 2016. 3750-3755
- [93] Robertson M A, Sadeghi H, Florez J M, et al. Soft Pneumatic actuator fascicles for high force and reliability[J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(1):23-32
- [94] Park Y L, Chen B, Young D, et al. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2014, 9(1):016007
- [95] Menguc Y, Park Y L, Pei H, et al. Wearable soft sensing suit for human gait measurement[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(14):1748-1764
- [96] Hawkes E W, Blumenschein L H, Greer J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth[J]. *New Phytologist*, 2017, 2(8):3028
- [97] 王志恒, 钱少明, 杨庆华, 等. 气动机器人多指灵巧手——ZJUTHand[J]. *机器人*, 2012, 34(2):223-230
- [98] Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides[J]. *Advanced Materials*, 2016, 1(1): eaai7529
- [99] Deimel R, Brock O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 35(1-3): 161-185
- [100] Gupta A, Eppner C, Levine S, et al. Learning dexterous manipulation for a soft robotic hand from human demonstration[C]. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nanjing, China, 2016. 3786-3793
- [101] Cianchetti M, Ranzani T, Gerboni G, et al. Soft robotics technologies to address shortcomings in today's minimally invasive surgery: the STIFF-FLOP approach[J]. *Soft Robotics*, 2014, 1(2):122-131
- [102] Deng T, Wang H S, Chen W D, et al. Development of a new cable-driven soft robot for cardiac ablation[C]. In: IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Shenzhen, China, 2013. 728-733

Review on pneumatic-driven structure for soft robot

Bao Guanjun, Zhang Yaqi, Xu Zonggui, Cai Shibo, Xu Fang, Yang Qinghua, Zhang Libin
(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract

Pneumatic actuation is the earliest actuating manner of soft robots. In this paper, we review the structures and working principles of pneumatic-driven soft robots, which are classified into shape-restricted, fiber-reinforced, net-reinforced, and particle-jamming. We analyse and discuss the technical problems existing in the current research of pneumatic-driven soft robots, such as structural design innovation, deep integration of intelligent material and driving structure, modelling and simulation, and manufacturing technology, etc. Then the key problems and research directions of pneumatic-driven soft robots in design, intelligent materials, modelling and simulation, and manufacturing technology are proposed. At present, the pneumatic-driven soft robots are the most widely studied and most likely to be the first coming into practical applications, because of their relatively good supporting technology foundations. The interdisciplinary of robot, mechanical engineering, materials science, intelligent control, computer graphics and their deep cooperation will help to promote the rapid development of this direction.

Key words: soft robot, actuator, structural innovation, variable stiffness robot