DOI: 10.3901/JME.2019.11.069

基于弹性体材料仿生手的设计、制造及其控制*

罗召俊¹ 王 帅² 程广贵^{1,2} 袁宁一² 丁建宁^{1,2}

(1. 江苏大学微纳米科学技术研究中心 镇江 212013;

2. 常州大学江苏省光伏科学与工程协同创新中心 常州 213164)

摘要: 软体机器人是近年来的研究热点, 涉及信号检测、控制、驱动等多个方面。基于弹性体材料设计制备了一种符合人体手指运动规律的弯曲致动器及其仿生手和电容式可拉伸传感器。仿生手总共设计有 14 个弯曲关节, 且每个弯曲关节都由外部管道独立控制, 当外部气压达到 50 kPa 时, 手指关节能够实现 90° 的弯曲变形, 最大指尖压力为 210 mN。可拉伸应变传感器在 200% 应变下表现出良好的稳定性和可逆性, 将传感器贴在手指关节上具有监测手指运动的功能。最后, 将传感器贴于手套上作为可穿戴器件, 通过单片机控制系统采集手套上传感器由于手指弯曲产生的信号, 信号经蓝牙传输, 实现对气动回路的有效控制, 最终完成对仿生手的远程实时操控。研究结果可应用于远程交互、生命科学等领域。

关键词: 弯曲致动器; 仿生手; 可拉伸传感器; 控制

中图分类号: TB17, U464, TB3, TP3

Designing, Manufacturing and Controlling of the Elastic Materials Based Bionic Hand

LUO Zhaojun¹ WANG Shuai² CHENG Guanggui^{1,2} YUAN Ningyi² DING Jianning^{1,2}

(1. Micro/Nano Science & Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013;

2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164)

Abstract: Soft robotics, involving many fields such as signal detection, control, execution, and so on, has been a research focus in recent years. Based on elastic materials, a kind of bending actuator conforming to the regulation of human's finger movement, bionic hand of bending actuator and a stretchable capacitive sensor have been designed. There are 14 bending joints altogether being designed for each bionic hand, and every joint is independently controlled by external air-tube. When external pressure reaches 50 kPa, finger joints can achieve 90 degree's bending deformation, and at the meantime the pressure of fingertip is 210 mN. The stretchable capacitive sensor shows good performance of stability and reversibility at 200% strain, and pasting it on finger joints the function of finger movement can be detected. Finally, the sensor on a glove as wearable device, the signal of the sensor produced by fingers bend through single-chip microcomputer control system can be collected. Transferred by bluetooth, the signal gains an effective control of pneumatic circuit. Ultimately, the remote real-time control of bionic hand is achieved. It can be applied in remote interaction and life sciences etc.

Key words: bending actuator; bionic hand; stretchable sensor; control

0 前言

生物系统的复杂性和智能性一直是科学家们持续不断的灵感来源^[1]。软体机器人作为一种新型的仿生机器人, 主要由与软体生物材料模量($10^4 \sim 10^9$ Pa)相当的超弹性体材料(如: 聚合物、硅胶、橡胶

或其他软体材料)通过 3D 打印机或 3D 模具制造而成^[2]。采用与生物材料相似的柔顺性软材料制造的软体机器人可以显著减小系统自损伤, 改善人机交互环境, 在康复医疗、生物医学、抢险救灾等方面都有潜在的应用前景。随着近几年软体机器人的快速发展, 由柔性和柔软部件制成的软体机械手也得到了广泛的运用与发展, 这种软体机械手由于自身的柔软性可以在非结构化的复杂环境下适应物体的形状和尺寸达到抓取和操纵物体的目的^[3-6]。

* 国家自然科学基金资助项目(91648109, 51675236)。20180827 收到初稿, 20190403 收到修改稿

目前,关于软体机械手抓取和操纵物体的方法主要有两大研究方向,一种是通过致动器来主动控制软体机械手的弯曲变形实现抓取和操纵物体。一些典型的致动方法包括:流体弹性致动器、电活性聚合物和形状记忆聚合物等。流体弹性致动器^[7-9]由于具有易获得、低成本等特点广泛用于各种软体机器人当中,主要通过嵌入在弹性体内部腔室结构发生的膨胀变形,而流体弹性致动器的结构通常是几何不对称或者材料各向异性,使得腔室的膨胀转化为整个致动器朝特定方向的弯曲变形。电活性聚合物,例如介电弹性体聚合物^[10-11]和离子交换聚合物金属复合材料^[12]响应于电刺激而产生的伸缩、弯曲变形。一些材料的形状记忆效应也可用于柔性致动,这些材料主要包括形状记忆合金^[13-14]和形状记忆聚合物^[15-16]。另外还有一些刺激响应性聚合物和水凝胶也经常作为柔性致动用于软体机械手当中,这种聚合物在受到外界环境的刺激(pH 值^[17-18]、温度^[19]、光^[20-21]、热^[22]、电^[23]、磁^[24-25])发生膨胀或弯曲变形。对于这种通过致动抓取和操纵物体的软体机械手,如何控制力的大小和分布成为了研究的重点,尤其是操纵一些可变形的柔性物体。通过变刚度抓取和操纵物体的方法是利用一些材料在外界条件的刺激下刚度发生较大的改变来操纵物体,在抓握的任务中,先需要以较低的刚度来适应物体的形状尺寸,然后需要提高刚度来确保有足够的抓握力。另一种操纵方法是变刚度法,如颗粒阻塞^[26]、磁流变液^[27]、电流变液^[28]、形状记忆聚合物^[29]和低熔点合金^[30]等。

论文利用超弹性体材料制备了一种可拉伸电容式传感器以及气动仿生手,并通过单片机控制系统采集电容传感器在弯曲时产生的信号,驱动气动回路实现人手对仿生手的实时控制。

1 柔性器件制备

1.1 仿生手指的结构设计、制备

气动弯曲致动器如:Pneu-Nets 致动器^[31]和纤维增强的弯曲致动器^[32]广泛用于手指致动和手指康复的外骨骼应用当中,虽然这些致动器可以致动手指实现弯曲变形,但是这类致动器在致动时其弯曲形状呈现准圆形,并且在弯曲变形时与手指实际的运动方式存在差距。因此,论文在前期研究的基础上^[33-35],根据手指的结构和运动特点优化设计出一种新型的弯曲致动器如图 1 所示,弯曲致动器主要由三个柔性指骨(远节指骨、中节指骨、近节指骨)和三个柔性关节组成;其中柔性关节由连续排列的

内部腔室组成,这些内部腔室在外部气压和底部限制层的作用下会发生弯曲变形。

图 1 弯曲致动器的结构示意图

弯曲致动器的柔性指骨和柔性关节采用拉伸率大,弹性好的软体材料 Ecoflex 00-30,底部的限制层采用硬度大,延展率小的聚二甲基硅氧烷(PDMS)做为材料。弯曲致动器的整体结构采用模板法制备,首先通过 3D 打印机制备出相应的成型模具如图 2a 所示,包括底部模具和顶部模具两部分,然后其制备过程如图 2b 所示:① 准备好底部模具,同时为了后面的拔模方便,可以事先往模具表面喷涂一层脱模剂;② 将配好的硅橡胶 Ecoflex 00-30 溶液放入真空干燥皿除气后,缓慢倒入模具内;③ 合上顶部模具,制备出柔性关节的内部腔室和管路结构,并在 60 °C 的条件下完成固化;④ 脱模后,在连接面浸入一层薄薄的未固化的硅橡胶溶液,最后和 PDMS 限制层粘接在一起完成固化。制备好的弯曲致动器和致动后的弯曲致动器效果如图 2c 所示。

(a) 弯曲致动器的制备模具

(b) 弯曲致动器制备 (c) 弯曲致动器致动前后的实物图

图 2 弯曲致动器制备过程

为了使仿生手的外形与人手完全一致,将制备好的弯曲致动器在手指内部弯曲致动器制备完成以后,用克隆粉制作出人体手指的模具,将弯曲致动器放入手指模具中定位完成后,向模具中浇注液态硅胶完成外形修饰,待其固化完成以后,拆掉模具,同时为了限制仿生手指的径向膨胀变形,在手

指关节处施加外部约束(缠绕一层纤维线)。

仿生制动器及仿生手制备完成后采用空气压缩机提供一定压力的气体对其弯曲致动行为进行表征测试。

1.2 电容式可拉伸应变传感器制备

图 3a 是电容式应变传感器的制作过程。将商用 VHB 4910 双面胶带(厚度为 0.4 mm, 购自美国 3M 公司)用去离子水清洗 5 min 使其黏性降低, 然后在 40 °C 干燥箱中干燥 30 min。将干燥后的 VHB 胶带剪裁成长 3 cm×2 cm 的长方形作为中间介电层。将剪裁好的 VHB 胶带拉伸至 300%应变, 并用夹具夹住两端将其固定。接着将碳膜(carbon nanotube sheet)从硅片上拉出(碳膜长 6 cm, 宽 1 cm), 并附着在载玻片上。利用胶带本身的黏性将碳膜从载玻片上粘至胶带, 重复上述操作, 使胶带的两面都附着碳膜, 并保持两个碳膜正对。用手指轻轻按压使碳膜与胶带接触紧密, 放松夹具使胶带与碳膜自然收缩, 放松后碳膜形成褶皱如图 3b 所示, 这种褶皱结构赋予了碳膜可拉伸性。最后在两侧上的碳膜尾端涂覆银膏以附接铜线。文中使用的碳膜为化学气相沉积法(CVD)生长的多壁碳纳米管(MWNT)阵列(碳管内径为 6 nm, 外径约为 9 nm, 长约为 330 μm)。图 3c 是 VHB 胶带(长 20 mm, 宽 10 mm)的应力-应变图, 可以看出, VHB 胶带可拉伸至 950%, 断裂应力高达 800 kPa, 具有优异的机械性能。并且其本身自带的粘附性使其与碳膜牢固结合。最后得到的可拉伸电容式传感器实物图如图 3d 所示。

图3 电容式可拉伸应变传感器制备过程

借助扫描电子显微镜(FESEM, Hitachi S-4800)获得预拉伸释放后碳膜的表面形貌。传感器的应变

通过自制的电机模组来实现精确控制, 通过 LCR 测试仪(TH2829, 1~20 MHz, Tonghui)测量电容的变化。使用万能试验机(QT-6203S, Qian Tong)进行拉伸性能测试, 拉伸速率为 50 mm·min⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 弯曲致动器的致动性能

通过空气压缩机及气压调节阀, 使输出气体压力在 0~50 kPa 范围内变化, 图 4 所示为弯曲致动器通入不同压力气体时的弯曲变形图。选取初始状态致动器为参考点, 测量致动器在每个压力下的变形角度, 如图 5a 可知, 在一定的气体压力范围内(0~40 kPa), 仿生手指的弯曲角度与外部气压呈近似线性关系, 当气压超过 40 kPa 时, 随着气压的匀速增长, 手指的弯曲量有明显减缓的趋势, 最大弯曲角度达到 90°。图 5b 所示为仿生手指的指尖载荷能力, 可见仿生手指的指尖载荷与外部气压的大小也呈近似线性关系, 当输入气压达到 50 kPa 时, 指尖压力为 210 mN。由图 5 可见, 输入压力会显著改变弯曲致动器的弯曲行为和指尖压力值, 而不同材料的最大耐压值会因其硬度和弹性模量不同而不同, 若选用硬度较高的硅胶材料, 将会得到更高的指尖压力和变形量。

图4 不同气压下仿生手指各关节的弯曲实物图

(a) 不同关节处弯曲转角特性

(b) 不同气压下手指的指尖载荷

图 5 弯曲致动器的力学性能

2.2 可拉伸传感器的输出性能分析

当传感器发生应变时，介电层两面碳膜正对面积(S)以及介电层厚度 d 产生变化，从而导致电容的变化。图 6a 展示出了拉伸和释放期间的相对电容变化 $\Delta C/C$ 与拉伸应变之间的关系。应变传感器表现

(a) 拉伸和释放期间的相对电容变化 $\Delta C/C$ 与拉伸应变之间的关系(实线为数据的线性拟合)

(b) 200%应变下的多次拉伸/释放循环性能

(c) 传感器对手指运动的监测

图 6 可拉伸传感器的输出性能

出良好的线性和可逆性，在 200% 大应变的情况下依然保持良好的线性关系，并且通过数据线性拟合得到传感器灵敏度约为 0.47。此外，传感器在 200% 应变下的多次拉伸/释放循环中表现出优异的稳定性，如图 6b 所示。图 6c 显示了传感器贴在手指关节上具有监测手指运动的功能。当手指弯曲到不同角度时，传感器被拉伸到不同的应变，导致碳膜正对面积增加同时电容的介电层厚度减小，从而产生电容的变化。当保持一定角度固定时，传感器的电容维持稳定。更重要的是，当手指回复至初始状态时电容依然可以很好地恢复到原始数值并维持稳定。这种优异的恢复性能主要归因于 VHB 胶带强的粘附性，使碳膜非常好地附着在胶带上不易受到外部环境的影响而导致测量数据的不稳定。

2.3 仿生手

仿生手的总质量为 0.25 kg，其总体结构如图 7a 所示，仿生手根据人体手指关节总共设计有 14 个单向弯曲关节，且每个弯曲关节都由外部管道独立控制。如图 7b 所示，给大拇指关节两个关节分别充入大气压 50~60 kPa，其运动轨迹与人体手指大拇指的实际运动轨迹相吻合；图 7c 展示是食指的两个关节分别充入大气压 50~60 kPa，其食指的运动轨迹与人体食指的实际运动轨迹相吻合。仿生手指的每个关节的弯曲角度约为 $80^\circ \sim 100^\circ$ ，其弯曲的运动轨迹符合人体手指关节的运动规律。

图 7 仿生手的结构和手指关节的运动轨迹图

可拉伸的电容式应变传感器与软体机器人相结合，将应变传感器粘接的数据手套的每个关节部位，通过图 8a 所示的控制系统采集手指弯曲信号实现对软体机器人的直接控制。目前仿生手所采用的控制系统是开环控制系统，其控制原理如图 8b 所示，通过可拉伸的应变传感器检测出手指的弯曲信号，将检测出的弯曲信息送入单片机中处理放大后实现

对气动执行系统的控制, 从而控制致动器的弯曲变形。后期工作将在仿生手指的表面集成传感器构成闭环反馈系统, 当仿生手指弯曲的时候, 实时检测手指的弯曲程度, 与人体手指的实际弯曲信号进行比较, 从而实现对仿生手的精准控制。图 8c 为控制系统工作流程图。

(a) 仿生手控制系统实物图

(b) 仿生手的控制原理

(c) 控制系统流程图

图 8 仿生手的控制系统设计

图 9 为借助可拉伸电容传感器及其气动控制系统实现仿生手运动的照片。仿生手的每个手指都相

图 9 仿生手的姿势演示及抓取试验

对比较灵活, 可以完成人体手的一些基本动作, 且能够承受一定的载荷, 可以抓取不同形状的物体(铅笔、剪刀、杯子、吸耳球等)。但是由于仿生手全身都是由软体材料制备, 所以手指的载荷能力较小, 相对较重的物体目前还难以实现有效抓握, 今后将通过改变材料、致动压力等方式解决。

3 结论

论文根据人体手指的运动规律, 提出了一种拥有三个关节独立控制的弯曲致动器, 弯曲致动器每个关节的最大弯曲角度大约为 90° , 在此基础上设计制备出仿生手。通过化学气相沉积法生长出多壁碳纳米管, 利用碳纳米管制备出可以用于监测手指弯曲运动的可拉伸的电容式应变传感器。在 200% 应变下可拉伸应变传感器表现出良好的线性和可逆性。仿生手指具有良好的灵活性、柔软性以及可控性, 且通过贴有可拉伸应变传感器的手套实现仿生手指与人体手指的同步弯曲运动, 这在康复医疗和极端恶劣的环境下都有潜在的应用价值。随着软体机器人和柔性传感器领域的快速发展, 将软体机器人与柔性传感器如何有机结合在一起制备出完全软体的机器人将成为未来热门的研究方向。

参 考 文 献

- [1] DICKINSON M H, FARLEY C T, FULL R J, et al. How animals move: An integrative view [J]. Science, 2000, 288(5463): 100-106.
- [2] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [3] DEIMEL R, BROCK O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping[J]. Sage Publications, Inc., 2016, 35(1): 161-185.
- [4] TERRY S, BRANCART J, LEFEBER D, et al. Self-healing soft pneumatic robots[J]. Science Robotics, 2017, 2(9): 4268.
- [5] NASAB A M, SABZEZHAR A, TATARI M, et al. A soft gripper with rigidity tunable elastomer strips as ligaments[J]. Soft Robotics, 2017, 4(4): 411-420.
- [6] FENG N, SHI Q, WANG H, et al. A soft robotic hand: design, analysis, control, and experiment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1-4): 319-333.
- [7] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, DANIELA R. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 7-25.

- [8] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 50(8): 1890-1895.
- [9] HAO Y, GONG Z, XIE Z, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length[C]// 35th Chinese Control Conference, July 27-29, 2016, Chengdu, China: IEEE, 2016: 6109-6114.
- [10] DUDUTA M, WOOD R J, CLARKE D R. Multilayer dielectric elastomers for fast, programmable actuation without prestretch[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(36): 8058-8063.
- [11] MARETTE A, POULIN A, BESSE N, et al. Flexible zinc-tin oxide thin film transistors operating at 1 kv for integrated switching of dielectric elastomer actuators arrays[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(30): 1700880.
- [12] MUST I, KAASIK F, PÖLDSALU I, et al. Ionic and capacitive artificial muscle for biomimetic soft robotics[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2015, 17(1): 84-94.
- [13] SHE Y, LI C, CLEARY J, et al. Design and fabrication of a soft robotic hand with embedded actuators and sensors[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2015, 7(2): 021007.
- [14] SHE Y, CHEN J, SHI H, et al. Modeling and validation of a novel bending actuator for soft robotics applications[J]. *Soft Robotics*. 2016, 3(2): 71-82.
- [15] BEHL M, KRATZ K, ZOTZMANN J, et al. Reversible bidirectional shape-memory polymers[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(32): 4466-4469.
- [16] GE Q, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(31110): 1-11.
- [17] ZHAO L, HUANG J, ZHANG Y, et al. Programmable and bidirectional bending of soft actuators based on janus structure with sticky tough paa-clay hydrogel[J]. *Acs Appl. Mater Interfaces*, 2017, 9(13): 11866-11873.
- [18] LI X, CAI X, GAO Y, et al. Reversible bidirectional bending of hydrogel-based bilayer actuators[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2017, 5(15): 10.1039/C7TB00426E.
- [19] TACCOLA S, GRECO F, SINIBALDI E, et al. Toward a new generation of electrically controllable hygromorphic soft actuators[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(10): 1668-1675.
- [20] WANI O M, ZENG H, PRIIMAGI A. A light-driven artificial flytrap[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15546-15552.
- [21] ZOLFAGHARIAN A, KOUZANI A, NASRINAS-RABADI B, et al. 3D Printing of a Photothermal Self-folding Actuator[J]. *KnE Engineering*, 2017, 2: 15-22.
- [22] PACCHIEROTTI C, ONGARO F, BRINK F V D, et al. Steering and control of miniaturized untethered soft magnetic grippers with haptic assistance[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017(99): 1-17.
- [23] HU Y, LIU J, CHANG L, et al. Electrically and sunlight-driven actuator with versatile biomimetic motions based on rolled carbon nanotube bilayer composite[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(44): 1704388.
- [24] DILLER E, SITTI M. Three-dimensional programmable assembly by untethered magnetic robotic micro - grippers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24(28): 4377-4377.
- [25] SCHMAUCH M M, MISHRA S R, EVANS B A, et al. Chained iron microparticles for directionally controlled actuation of soft robots[J]. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 2017, 9(13): 11895-11901.
- [26] WEI Y, CHEN Y, REN T, et al. A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. *Soft Robot*, 2016, 3(3): 134-143.
- [27] MAJIDI C, WOOD R J. Tunable elastic stiffness with microconfined magnetorheological domains at low magnetic field[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16): 1841-1846.
- [28] SADEGHI A, BECCAI L, MAZZOLAI B. Innovative soft robots based on electro-rheological fluids[C]// *Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE*, 2012: 4237-4242.
- [29] YANG Y, CHEN Y, LI Y, et al. Novel variable-stiffness robotic fingers with built-in position feedback[J]. *Soft Robot*, 2017, 4(4): 338-352.
- [30] KAZEM N, HELLEBREKERS T, MAJIDI C. Soft multifunctional composites and emulsions with liquid metals[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] WANG Run, JIANG Nan, SU Jian, et al. A bi-sheath fiber sensor for giant tensile and torsional displacements[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27(35): 1702134.

- [34] LIU Zhunfeng, FANG Shaoli, FRANCISO A M, et al. Hierarchically buckled sheath-core fibers for superelastic electronics, sensors, and muscles[J]. Science, 2015, 349: 400
- [35] HAN Libiao, DING Jianning, WANG Shuai, et al. Multi-functional stretchable and flexible sensor array to determine the location, shape, and pressure: Application in a smart robot[J]. Science China (Technological Sciences), 2018, 61(8): 1137-1143.
-
- 作者简介: 罗召俊, 男, 1994 年出生。主要研究方向为软体机器人技术。
E-mail: zhaojunluo1994@163.com
- 丁建宁(通信作者), 男, 1966 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向为弹性体材料与器件。
E-mail: dingjn@ujcs.edu.cn