

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2024.04.005

多材料 3D 打印柔性关节的设计与测试

吕坤勇, 冯奕逍

(上海科技大学信息科学与技术学院, 上海 201210)

【摘要】 柔性关节是微创外科手术器械提高灵巧度和增加活动空间的关键部件。为了降低柔性关节及器械的制造难度, 该文利用多材料 3D 打印技术设计了新型柔性关节并进行了初步验证。新型柔性关节由硬材料与软材料交替连接组成, 弯曲时形变集中在软材料区域。该文对柔性关节的结构和运动学模型进行了详细的描述, 并探索了柔性关节在放大驱动和多级串联中的应用。该文还对新型柔性关节的弯曲性能进行了测试。测试结果表明, 多材料 3D 打印柔性关节具有 2 个自由度, 可实现约 90° 的弯曲。实际弯曲角度与理论模型的变化趋势一致, 单平面测试最大弯曲角度误差为 8°, 空间测试最大偏转角度误差为 9°, 弯曲角度误差为 9°。测试结果还表明, 柔性关节在放大驱动和多级串联应用中的样品符合预期。柔性关节采用多材料 3D 打印技术制作, 不仅具有较好的弯曲性能, 还能有效避免材料疲劳, 降低制造难度, 在新型智能微创手术器械开发中具有潜在的应用价值。

【关键词】 微创外科手术器械; 多材料 3D 打印; 柔性关节; 运动学模型

【中图分类号】 R612、TH122

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2024) 04-0325-10

Design and Test of a Multi-material 3D Printing Compliant Joint

LYU Kunyong, FENG Yixiao

(School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

【Abstract】 Compliant joint is the crucial part to improve the dexterity and workspace of minimally invasive surgical instrument. In order to overcome the limitation of the traditional manufacturing methods, multi-material 3D printing is employed to design new compliant joint and primary validation is carried out. The novel cable-driven multi-material compliant joint integrates the hard and soft materials. The deformation happens in the soft material area which can significantly avoid material fatigue. The structure and kinematic model are described in detail. Prototypes of a flexible surgical instrument frame and a series continuum arm based on the novel joint are presented. The bending performance is evaluated. The results indicate that a single segment of multi-material 3D printing compliant joint has 2 degrees of freedom and can be bent up to approximate 90 degrees. The experimental results vary consistently with the kinematic model. In single-plane test, the maximum bending angle error is 8 degrees, while in spatial test, the maximum shift angle error and maximum bending angle error are both 9 degrees. The prototypes of a flexible surgical instrument frame and a series continuum arm work successfully as desired. The novel compliant joint not only has good flexural property, but also overcomes the material fatigue and manufacturing difficulty. It has potential application in the development of

收稿日期: 2023-09-04。

作者简介: 吕坤勇 (1986—), 男, 安徽省界首市人, 高级工程师, 从事微创外科手术器械研究; 电话 (Tel.): 021-20685410; 邮箱 (E-mail): lvky@shanghaitech.edu.cn。

minimally invasive surgical instrument.

【Key words】 Minimally Invasive Surgical Instrument; Multi-material 3D Printing; Compliant Joint; Kinematic Model

0 引言

微创外科手术相比传统的开放手术,手术切口小,具有微创、安全、伤口感染少、术后恢复快等优点。为了减少创伤,微创外科手术朝着进一步减少手术切口的单切口腹腔镜手术和经自然腔道内径手术的方向发展^[1,2]。然而,传统手术器械为细长的直器械,在新术式中的应用有很大的局限性:器械在通道处拥挤,器械之间相互碰撞干涉,不易形成操作三角等^[3,4]。可弯曲的器械提高了器械的自由度,增加了器械的活动空间,在新术式中有着潜在的应用价值。特别是在经自然腔道内镜手术中,器械需要灵活地经过人体弯弯曲曲的自然腔道,到达病灶位置进行操作^[5]。柔性关节是可弯曲器械中的关键部件。传统的内窥镜前端柔性关节采用蛇骨结构,由若干微小的半环形薄片通过销钉连接而成,在钢丝绳的牵引下实现两个自由度的弯曲^[6];徐凯等^[7,8]设计了镍钛合金管驱动的主骨与次骨柔性关节,若干薄片通过镍钛合金管连接起来,通过牵引镍钛合金管实现多段弯曲的功能;Webster等^[9]提出了用于经鼻内镜手术的微小柔性关节,其由多段预先弯曲的同心管组成,通过控制同心管旋转或移动形成不同的弯曲姿态。贾英伟等^[10]设计了新型的经鼻颅底手术器械弯曲结构,通过在镍钛合金管上切槽实现柔性关节的弯曲功能。

上述柔性关节由于尺寸小、精度要求高等原因,加工装配难度较大。3D打印技术为柔性关节的制造提供了新的方案,Breedveld等^[11,12]设计了多段弯曲的柔性关节,采用多螺旋绕主骨的结构,利用3D技术将结构整体打印出来。该结构装配简单,在钢丝绳的牵引下能实现多个自由度的弯曲。Roppenecker等^[13]研究了选择性激光烧结3D打印技术制造多种柔性关节的结构,对比了它们的弯曲性能,并讨论了将它们应用于蛇形机器人的可能性。Sun等^[14]介绍了一种受十字韧带启发的3D打印柔性关节,该柔性关节在钢丝绳的驱动下能实现一个

自由度的弯曲。Feng等^[15]设计了单螺旋结构的柔性关节,通过选择不同的打印材料,可以设置柔性关节的不同刚度。以上几种结构用同一种材质打印而成,通过结构设计,如设置多段螺旋、多关节、仿生结构或类弹簧结构等,提升整体的弯曲性能。对于单一材料的柔性关节,通常需要进行复杂的优化和计算,无法有效避免应力集中,弯曲结构易发生疲劳,使用寿命不长。

随着3D打印技术的发展,不同性质的材料能够被同时打印出来^[16,17]。将不同硬度的材料结合起来,在恰当的位置选择弹性模量低的材料,利于结构弯曲,且不易发生疲劳。本研究介绍了一种新型的多材料3D打印柔性关节,设计了柔性关节的结构,建立了柔性关节的运动学模型,搭建平台测试了柔性关节的弯曲性能,并基于此柔性关节初步探索了其在微创外科手术器械中的潜在应用。

1 实验方法与材料

1.1 柔性关节设计

多材料柔性关节结构设计如图1所示,由若干薄片和连接体相互交替串接而成。薄片为硬性材料,上面设置4个钢丝绳通道,均匀分布。连接体为软材料,为了使软材料和硬材料更好地连接,将连接体嵌入薄片内。相邻的连接体相互垂直,可实现两个自由度的弯曲。柔性关节的中心留有通道,可用作器械通道,或者用作末端执行器的驱动部件通道。柔性关节的一些关键设计参数如表1所示。

由于连接体位于基本弯曲单元的中心位置,发生弯曲变形时,连接体的中心面为中性层,其长度不变。相邻两个薄片相互接触时为基本弯曲单元的最大变形状态,在该状态下,基本弯曲结构的弯曲角度为 $2h_f/D$,约 22.9° ,为实现执行端任意方向的 90° 弯曲,执行端有8段相互垂直的柔性连接体,长度32mm,任意方向弯曲可达 91.7° 。柔性材料的最大变形发生在离中性层最远的地方,计算公式为

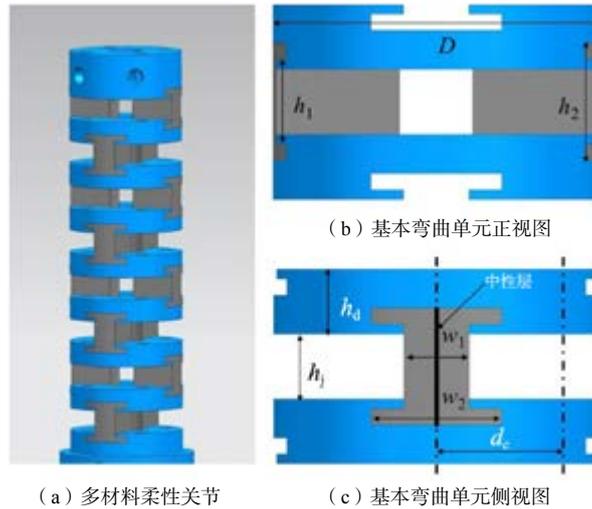


图1 多材料柔性关节结构设计

Fig.1 Structure design of the multi-material compliant joint

表1 柔性关节设计参数

Tab.1 Design parameters of the compliant joint

参数	符号	数值 /mm
硬性圆形薄片直径	D	10
驱动钢丝绳与圆形薄片中心之间的距离	d_c	3.75
圆形薄片厚度	h_d	2
相邻圆形薄片之间的初始高度	h_j	2
柔性连接体高度 1	h_1	2.6
柔性连接体高度 2	h_2	3.6
柔性连接体宽度 1	w_1	2
柔性连接体宽度 2	w_2	4

$$\varepsilon = \frac{h_j - h_j \left(\frac{D}{2} - \frac{w_1}{2} \right) / \left(\frac{D}{2} \right)}{h_j} = \frac{w_1}{D} \quad (1)$$

选择合适的柔性材料，可以保证柔性材料的最大变形量在其弹性范围内，延长柔性关节的使用寿命。柔性材料选择 Stratsys 公司的 VeroBlue

RGD840、VeroBlackPlus RGD875 与 TangoBlackPlus FLX980，其参数如表 2 所示。硬性材料选择 VeroBlue RGD840 材料，柔性材料由 VeroBlackPlus RGD875 与 TangoBlackPlus FLX980 混合而成，混合后的断裂伸长率和邵氏硬度分别设置为 50% 与 95HA。

表2 柔性材料的参数

Tab.2 Parameters of the compliant materials

参数	VeroBlue RGD840	VeroBlackPlus RGD875	TangoBlackPlus FLX980
抗拉强度 /MPa	50 ~ 60	50 ~ 65	0.8 ~ 1.5
弹性模量 /MPa	2000 ~ 3000	2000 ~ 3000	—
断裂伸长率 /%	10 ~ 25	10 ~ 25	170 ~ 220
邵氏硬度	83 ~ 86HD	83 ~ 86HD	26 ~ 28HA

1.2 运动学模型

采用常曲率法^[18]建立柔性关节的运动学模型，如图 2 所示。以底部薄片的中心为原点，以中心与钢丝绳通道中心的连线分别为 x_0 和 y_0 方向，建立

坐标系 $Ox_0y_0z_0$ 。柔性关节弯曲后，其中心线在平面 Ox_0y_0 的投影为 x_1 方向，与 x_0 的夹角为 θ 。 z_1 与 z_0 重合，建立坐标系 $Ox_1y_1z_1$ 。

根据常曲率法理论，柔性关节的中心线弯曲后

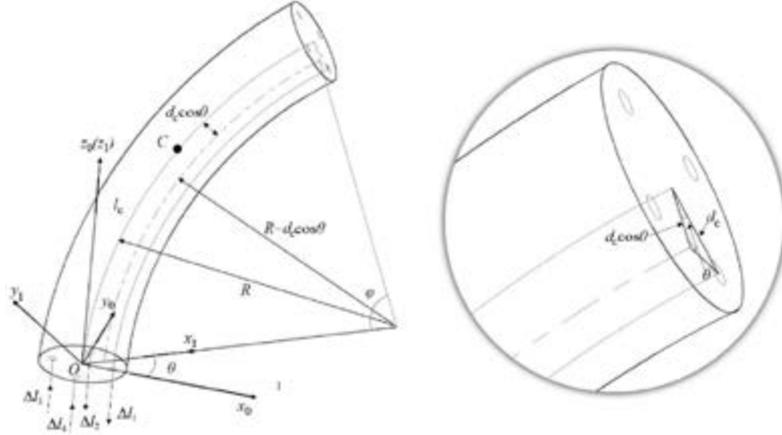


图 2 柔性关节运动学模型
Fig.2 Kinematic model of the compliant joint

的弧形半径为 R ，弧长恒定为 l_c 。柔性关节的弯曲角度为 φ ，则

$$l_c = R\varphi = n(h_d + h_j) \quad (2)$$

柔性关节的弯曲由 4 根钢丝绳驱动完成，钢丝绳对称分布，钢丝绳的变化量分别记为 Δl_1 、 Δl_2 、 Δl_3 和 Δl_4 ，分别为钢丝绳 1、2、3 和 4 的变化量。在图 2 中，钢丝绳 1 和钢丝绳 2 拉伸，钢丝绳 3 和钢丝绳 4 放松。以钢丝绳 1 为例，其在 Ox_1z_1 平面的投影如图 2 中虚线所示，该投影与柔性关节中心线之间的距离为 $d_c \cos \theta$ ，如图 2 中放大示意图所示。则钢丝绳 1 的变化量可表示为

$$\Delta l_1 = l_c - (R - d_c \cos \theta)\varphi = d_c \varphi \cos \theta \quad (3)$$

同理，可得出钢丝绳 2 的变化量为

$$\Delta l_2 = l_c - (R - d_c \sin \theta)\varphi = d_c \varphi \sin \theta \quad (4)$$

式 (3) 和式 (4) 分别平方后相加，可得

$$\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 = d_c^2 \varphi^2 \quad (5)$$

根据式 (2) ~ 式 (5)，可得

$$\varphi = \frac{\sqrt{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2}}{d_c} \quad (6)$$

$$R = \frac{l_c d_c}{\sqrt{\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2}} \quad (7)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{\Delta l_2}{\Delta l_1}\right), & \Delta l_1 > 0 \\ \pi + \arctan\left(\frac{\Delta l_2}{\Delta l_1}\right), & \Delta l_1 < 0 \end{cases} \quad (8)$$

在 $Ox_1y_1z_1$ 坐标系中，末端中心点坐标为

$$\begin{cases} x_{1c} = R(1 - \cos \varphi) \\ y_{1c} = 0 \\ z_{1c} = R \sin \varphi \end{cases} \quad (9)$$

将方程组 (9) 绕 z_1 轴顺时针旋转 θ 后，可得到末端中心点在 $Ox_0y_0z_0$ 坐标系的坐标为

$$\begin{cases} x_{0c} = \cos \theta R(1 - \cos \varphi) \\ y_{0c} = \sin \theta R(1 - \cos \varphi) \\ z_{0c} = R \sin \varphi \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 即柔性关节运动学模型，模型中的参数 φ 、 R 、 θ 分别由式 (6) ~ 式 (8) 计算得出， Δl_1 和 Δl_2 为变量， l_c 和 d_c 为柔性关节的设计参数。钢丝绳的拉伸量决定了柔性关节的末端位姿，即偏转角度 θ 、弯曲角度 φ 、末端点的坐标等参数。

柔性关节钢丝绳为 4 根，均匀分布。对称的两根钢丝绳运动状态相反，即一段拉伸，另一段放松，且变化量相等，即

$$\begin{cases} \Delta l_3 = -\Delta l_1 \\ \Delta l_4 = -\Delta l_2 \end{cases} \quad (11)$$

该设计在理论上可以避免弯曲过程中的钢丝松弛，简化控制结构。

1.3 柔性关节的制作与测试

柔性关节使用 Objet 260 Connex 3 打印机 (Stratasys Ltd., 瑞泽渥特, 以色列) 制作而成。打印机采用 PolyJet 打印技术, 将光敏聚合物液滴喷射到打印平台并使用紫外光照射固化来构建零件^[19]。设备有多个打印头, 每层可同时喷射出不同性质的材料, 在紫外光照射下发生光聚反应, 变成固体。支撑材料、不同颜色和硬度的材料可同时被打出来, 通过层层累加, 构建成所设计的立体结构。

柔性关节及辅助测量装置等使用 3D 打印制作而成。驱动钢丝绳直径为 0.6mm, 钢丝绳的固定采用了热缩套管或铝套末端固定的方式。柔性关节的钢丝绳通过导引装置平滑导引成平行的 4 根线, 导引后的钢丝绳可以通过调节螺丝固定或放松。在钢丝绳附近放置与之平行的标尺, 并标记钢丝绳标定点。根据柔性关节的运动学模型, 设置 $\Delta l_1 \sim \Delta l_4$ 的值, 牵引钢丝绳, 使之符合设置。用相机拍摄柔

性关节的正视图、侧视图与俯视图, 如图 3 所示。将照片导入 MATLAB 软件进行处理, 弯曲角度 φ 、偏转角度 θ 分别在正视图和俯视图中测量, 根据运动学模型计算末端测量点的 (x, y, z) 坐标。

在进行 Ox_0z_0 单平面弯曲测试时, 只改变 Δl_1 和 Δl_3 , 可以驱动柔性关节在 Ox_0z_0 平面上弯曲。根据式 (3), 缓慢拉伸 Δl_1 , 使其值分别为 $\frac{\pi}{6}d_c$ 、 $\frac{\pi}{4}d_c$ 、 $\frac{\pi}{3}d_c$ 和 $\frac{\pi}{2}d_c$, 分别对应弯曲 30° 、 45° 、 60° 和 90° 。将柔性关节恢复至初始位置, 随后拉伸 Δl_3 , 使其值分别为 $\frac{\pi}{6}d_c$ 、 $\frac{\pi}{4}d_c$ 、 $\frac{\pi}{3}d_c$ 和 $\frac{\pi}{2}d_c$, 柔性关节反向弯曲。每组重复测试 3 次, 取平均值。

在进行空间弯曲测试时, 根据式 (3)、式 (4) 和式 (11), 调整 $\Delta l_1 \sim \Delta l_4$ 的值, 使柔性关节弯曲形成的平面与 x_0 的夹角分别为 30° 、 60° 、 120° 、 150° 、 210° 、 240° 、 300° 和 330° , 在每个偏转角度下, 柔性关节的弯曲角度 φ 均设为 30° 和 60° , 共计 16 种姿态。在这些姿态下测量并计算柔性关节的实际偏转角度 θ 、弯曲角度 φ 、末端测量点的 (x, y, z) 坐标。每组重复测试 3 次, 取平均值。

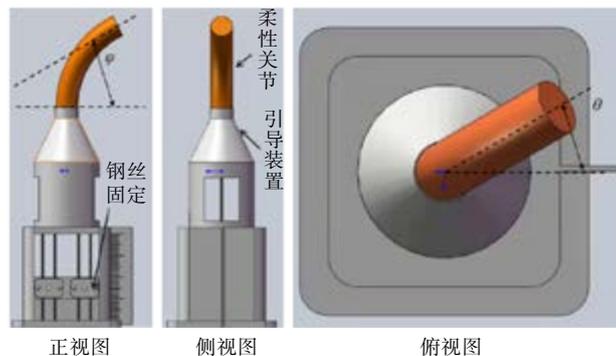


图 3 测试装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the test platform

2 结果

弯曲测试结果如表 3 所示。 $\Delta l_1 \sim \Delta l_4$ 的值根据式 (3)、式 (4) 和式 (11) 设置, 将目标偏转角度和目标弯曲角度分别设置为特定的角度。表 3 中的第 2 ~ 5 列为 $\Delta l_1 \sim \Delta l_4$ 的值, 第 6 列、第 8 列为理论偏转角度和理论弯曲角度, 第 7 列、第 9

列为实际偏转角度和实际弯曲角度, 第 10 列、第 11 列为实际值与理论值的偏差。表 3 中未列出末端点坐标 (x, y, z) 的值, 该值可在表 3 的基础上, 根据式 (10) 计算得出。

2.1 Ox_0z_0 单平面弯曲

图 4 为柔性关节在 Ox_0z_0 平面弯曲测试结果,

表 3 弯曲测试结果
Tab.3 Results of the flexural test

	拉伸量 Δl_1 / mm	拉伸量 Δl_2 / mm	拉伸量 Δl_3 / mm	拉伸量 Δl_4 / mm	理论偏转角 度 $\theta / (^\circ)$	实际偏转角 度 $\theta / (^\circ)$	理论弯曲角 度 $\varphi / (^\circ)$	实际弯曲角 度 $\varphi / (^\circ)$	偏转角度误 差 $/ (^\circ)$	弯曲角度误 差 $/ (^\circ)$
Ox_0z_0 平面弯曲	1.96	0.00	-1.96	0.00	0	0	30	30	0	0
	2.94	0.00	-2.94	0.00	0	0	45	40	0	-5
	3.93	0.00	-3.93	0.00	0	0	60	52	0	-8
	5.89	0.00	-5.89	0.00	0	0	90	82	0	-8
	-1.96	0.00	1.96	0.00	180	180	30	32	0	2
	-2.94	0.00	2.94	0.00	180	180	45	41	0	-4
	-3.93	0.00	3.93	0.00	180	180	60	56	0	-4
	-5.89	0.00	5.89	0.00	180	180	90	84	0	-6
	1.70	0.98	-1.70	-0.98	30	32	30	29	2	-1
	3.40	1.96	-3.40	-1.96	30	22	60	61	-8	1
Ox_0z_0 空间弯曲	0.98	1.70	-0.98	-1.70	60	69	30	34	9	4
	1.96	3.40	-1.96	-3.40	60	54	60	51	-6	-9
	-0.98	1.70	0.98	-1.70	120	119	30	35	-1	5
	-1.96	3.40	1.96	-3.40	120	123	60	55	3	-5
	-1.70	0.98	1.70	-0.98	150	153	30	34	3	4
	-3.40	1.96	3.40	-1.96	150	143	60	59	-7	-1
	-1.70	-0.98	1.70	0.98	210	217	30	29	7	-1
	-3.40	-1.96	3.40	1.96	210	209	60	58	-1	-2
	-0.98	-1.70	0.98	1.70	240	236	30	28	-4	-2
	-1.96	-3.40	1.96	3.40	240	244	60	53	4	-7
0.98	-1.70	-0.98	1.70	300	305	30	28	5	-2	
1.96	-3.40	-1.96	3.40	300	298	60	62	-2	2	
1.70	-0.98	-1.70	0.98	330	327	30	25	-3	-5	
3.40	-1.96	-3.40	1.96	330	324	60	52	-6	-8	

该结果显示了柔性关节中心轴上的理论特征点和实际特征点，这些特征点的坐标由式 (10) 基于表 3 中的数据计算得出。结果显示，实际值与理论值的变化趋势一致，弯曲角度最大误差为 8° 。弯曲角度越大，实际值与理论值误差越大。针对这一现象，选取 30° 和 90° 两种弯曲状态对柔性关节的形状做进一步分析。在柔性关节弯曲的正视图中添加数字量角器，保持量角器的直径与柔性关节底部薄片重合，量角器边缘环形与柔性关节近端重合。测试结果如图 5 所示，当弯曲角度为 30° 时，柔性关节的形状近似圆弧形；当弯曲角度为 90° 时，柔性关节的形状与圆弧形偏差较大。

2.2 $Ox_0y_0z_0$ 空间弯曲

由于弯曲角度越大，实际值与理论值误差越大，因此在随后的空间弯曲测试中取消了 90° 弯曲测试。

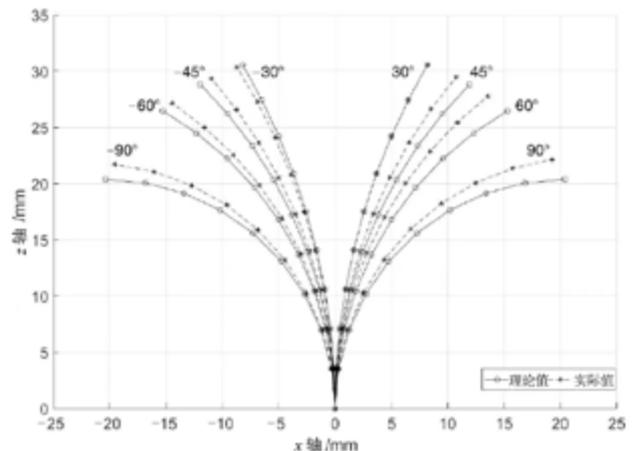


图 4 Ox_0z_0 单平面弯曲测试结果
Fig.4 Test results of the joint flexion in single plane Ox_0z_0

测试结果如图 6 所示，该结果显示了柔性关节中心轴上的理论特征点和实际特征点，这些特征点的坐标由式 (10) 基于表 3 中的数据计算得出，在轴测

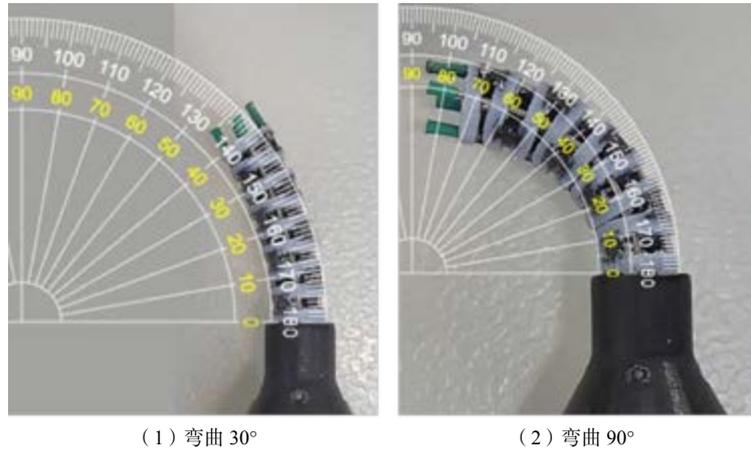


图5 柔性关节弯曲形状测试
Fig.5 Test of the curve shape for the compliant joint

图中可以观察弯曲角度 φ 的误差，在俯视图中可以观察偏转角度 θ 的误差。结果显示，实际值与理论值的变化趋势一致。当弯曲角度为 60° 时，弯曲角度实际值与理论值的最大误差为 9° ，偏转角度实际值与理论值的最大误差为 8° 。当弯曲角度为 30° 时，弯曲角度实际值与理论值的误差最大为 5° ，偏转角度实际值与理论值的最大误差为 9° 。弯曲角度 φ 的实际值与理论值误差在弯曲 60° 状态下明显大于

弯曲 30° 状态下，偏转角度 θ 的误差在两种状态下则没有明显区别。

3 柔性关节的应用

下面介绍柔性关节的两种应用形式：放大驱动和多级串联。放大驱动的预期效果是通过控制端小角度的弯曲实现执行端大角度的弯曲，达到放大驱动的目的，在腔镜手术器械中有潜在的应用价值。多级串联的预期是每级柔性关节的弯曲形状可独立

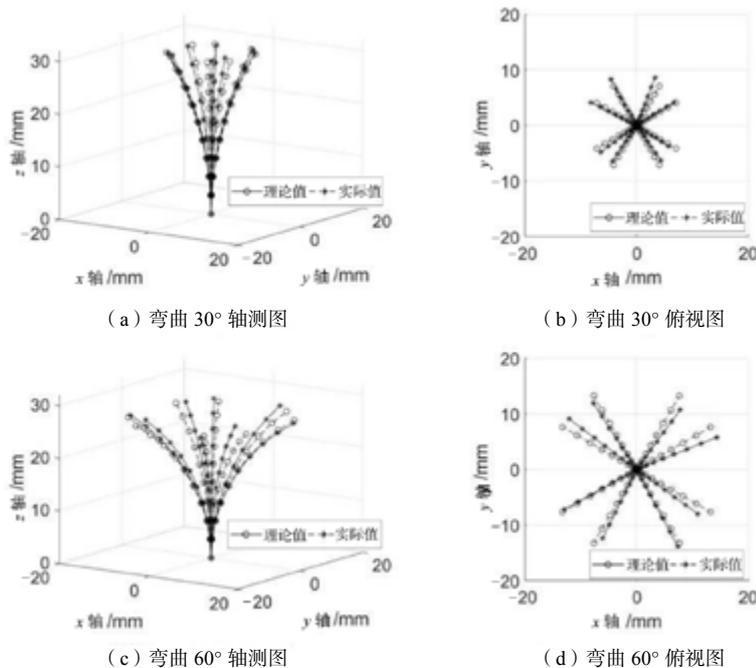


图6 柔性关节空间弯曲测试结果
Fig.6 Test results of the joint flexion in spatial space

控制，相互串联，可实现整体不同形状的弯曲效果，在新型经自然腔道内镜手术（Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery, NOTES）的手术器械中有潜在的应用价值。

3.1 放大驱动

手术器械在实际使用过程中，执行端的弯曲角度通常较大，而控制端为了操作方便，通常不允许有大范围的活动，即控制端的弯曲角度小于执行端的弯曲角度。钢丝绳的变化量与 d_c 和 φ 成正比，见式（3）。在驱动过程中，控制端与执行端钢丝绳的变化量相等，为使驱动端弯曲角度小，驱动端的 d_c 必然要增大。所设计的放大驱动结构如图 7（a）所示，其由执行端、套管、放大装置、控制端等部分组成。放大装置将对称的两根钢丝绳之间的距离从执行端的 7.5mm（ $d_{执行}$ ）平滑导引放大到控制端的 22.5mm（ $d_{驱动}$ ），即可实现 3 倍放大驱动，执行端弯曲角度是控制端弯曲角度的 3 倍。实际加工

的放大驱动样品如图 7（b）所示。

3.2 多级串联

为进一步拓展柔性关节的应用，在控制端和执行端串联若干段柔性关节，不同的柔性关节实现独立控制，可形成蛇形驱动效应。多级串联结构如图 7（c）所示，同样由执行端、套管、放大装置、控制端等部分组成。执行端和控制端均由三级柔性关节串联而成，控制端对称的两根钢丝绳之间的距离为执行端对称的两根钢丝绳之间距离的 3 倍。SEG-A 控制 SEG-a 段，SEG-B 控制 SEG-b 段，SEG-C 控制 SEG-c 段。为使钢丝绳均匀分布，相邻柔性关节偏转 60°，每段柔性关节由 4 根钢丝绳驱动，总计 12 根钢丝绳，可实现三段独立控制。各柔性关节之间相互组合，可实现不同形状的弯曲。多级串联样品的两种弯曲示例如图 7（d）~（e）所示。在图 7（d）中，控制端只弯曲一个小角度（约 30°），即可实现执行端大角度弯曲（约 90°）。在

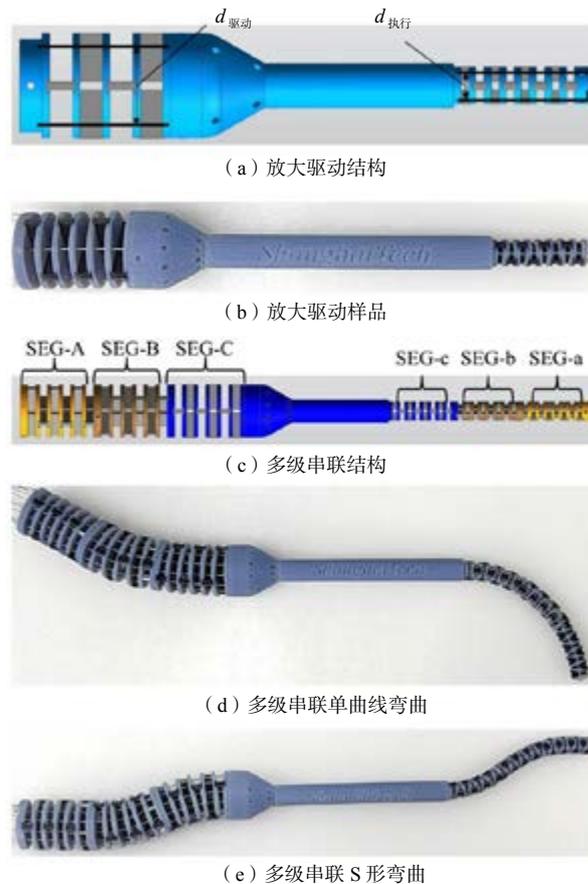


图 7 柔性关节的应用

Fig.7 Application of the compliant joint

图7(e)中,调整控制端呈S形,执行端即呈S形弯曲,弯曲形状与控制端相似,但弯曲幅度更大。

4 讨论与结论

多材料柔性关节是一个新概念。传统的柔性关节采用单一硬质材料制作而成,由多个零件组成的柔性关节尺寸微小、精度要求高、装配难度大^[6-9]。这种关节通常由多个尺寸微小的金属零件装配而成,金属零件的制作采用机械加工方式,由钢丝绳、镍钛合金管、小连杆等不同的方式驱动,除驱动部件外,其他部件近似为刚体,各部件相互转动或滑动从而实现柔性关节的弯曲。一体成型的柔性关节可简化加工装配,但是无论利用传统的机械加工工艺还是利用3D打印技术,单一材料一体成型的柔性关节设计都需要复杂的有限元分析或理论计算^[10-12,14,15],且柔性关节易发生疲劳,使用寿命不长。究其根本,乃是材料力学问题。器械需要一定的刚度,因此柔性关节应采用硬质材料制作而成。但硬质材料弹性模量大,不易弯曲,需要在材料上设计各种去除材料的方案,如中心切除、镂空切除、螺旋切除、双侧对称切除、单侧切除等,切除后的模型仍是同材质的材料,切除方案是否合适还需要经过复杂的计算或有限元分析来验证和优化。本文设想,柔性关节主体仍以硬质材料为主,用于器械的装配和功能实现,在需要发生弯曲的地方以软材料代替。这样既可以轻松实现弯曲的目标,又因软材料的弹性模量小而不宜发生疲劳,从而有效延长柔性关节的寿命。本文利用多材料3D打印技术对该设想做验证,以圆柱模型中心切除和双侧对称切除构建柔性关节,在需要弯曲的地方以软材料代替。从结果来看,采用多种材料设计和制作柔性关节是可行的,基本实现了柔性关节既容易弯曲变形又不宜发生疲劳的目的,但尚有一些细节需要优化和改进。

首先,运动学模型需要进一步优化。本文采用常曲率法^[18]建立柔性关节的运动学模型,而常曲率是一种近似假设。在硬质材料和软材料交替出现的场景下,硬质材料也被假设发生了均匀一致的变形,这会导致一定的误差。另外,软材料虽然易发生弯曲变形,但也易发生压缩变形,常曲率法假设这种情况不会发生。以上这些因素都会造成实验测

试结果与理论模型之间的误差。后续将对运动学模型做进一步测试和优化。

其次,测试方法需要改进。本文开展了柔性关节在单平面与空间范围内的弯曲测试,测试结果与理论模型的变化趋势一致,但测试方法和测试精度有待进一步提高。由于本文旨在验证多材料柔性关节的概念,因此采用了标尺、量角器、MATLAB图形处理等方法采集处理数据,数据的精度和准确度还有待提高。后续将采用电机控制、光学捕捉等精密控制测量手段,改进测试方法,提高测试精度。

最后,柔性关节的应用需要进一步探索。本文基于多材料柔性关节设计开发了放大驱动和多级串联的模型样机,效果基本符合预期,但离真正的器械尚有很远的距离。放大驱动最直接的应用是腔镜手术器械,多级串联可用于连续体手术机器人。后续将继续优化多材料柔性关节的结构设计,拓展柔性关节的制作方法,完善器械的整体设计,开发出能用于模型或临床测试的器械样机。

综上,本文提出了一种用于微创外科手术器械的多材料3D打印的柔性关节,该新型柔性关节由软材料和硬材料一体打印制作而成,解决了传统柔性关节在设计优化、装配等方面的难题。本文建立了柔性关节的运动学模型,搭建了测试平台并开展了初步的性能测试,测试结果与运动学模型的理论结果变化趋势一致。本文还初步探讨了柔性关节的一些应用,并制作了样机。结果表明,多材料3D打印柔性关节具有较好的弯曲性能,在微创外科手术器械中有潜在的应用价值。未来将对柔性关节做进一步优化与测试,开发基于此柔性关节的新型智能手术器械。

参考文献

- [1] 马锋, 锁瑞洋, 高乐, 等. 单孔腹腔镜的临床应用与研究进展[J]. *西安交通大学学报(医学版)*, 2021, 42(3): 339-344.
MA Feng, SUO Ruiyang, GAO Le, *et al.* Clinical application and research progress of single-hole laparoscopy[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Medical Sciences)*, 2021, 42(3): 339-344.
- [2] 徐佳昕, 李全林, 周平红. 经自然腔道内镜手术的发展与展望[J]. *中国临床医学*, 2018, 25(2): 161-166.
XU Jiaxin, LI Quanlin, ZHOU Pinghong. Perspective on natural orifice transluminal endoscopic surgery[J]. *Chinese Journal of Clinical*

- Medicine*, 2018, 25(2): 161-166.
- [3] TANG B, HOU S, CUSCHIERI S A. Ergonomics of and technologies for single-port laparoscopic surgery[J]. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 2011, 21(1): 46-54.
- [4] RATTNER D, KALLOO A. ASGE/SAGES working group on natural orifice transluminal endoscopic surgery[J]. *Surgical Endoscopy*, 2006, 20(2): 329-333.
- [5] 刘孝忠, 杨玉婷, 宋成利. 内镜电动缝合器的设计与研究[J]. *生物医学工程学进展*, 2020, 41(1): 10-14.
LIU Xiaozhong, YANG Yuting, SONG Chengli. Design and research of electric suturing device for endoscopic surgery[J]. *Progress in Biomedical Engineering*, 2020, 41(1):10-14.
- [6] BREEDVELD P, SHELTERES J S, BLOM E M, *et al.* A new, easily miniaturized steerable endoscope[J]. *Engineering in Medicine & Biology Magazine IEEE*, 2005, 24(6):40-47.
- [7] XU K, ZHAO J, FU M. Development of the SJTU unfoldable robotic system (SURS) for single port laparoscopy[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(5): 2133-2145.
- [8] 徐凯, 刘欢. 多杆连续体机构: 构型与应用[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(13): 25-33.
XU Kai, LIU Huan. Multi-backbone continuum mechanisms: forms and applications[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(13): 25-33.
- [9] WEBSTER R J, ROMANO J M, COWAN N J. Mechanics of pre-curved-tube continuum robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(1):67-78.
- [10] 贾英伟, 毛琳, 宋成利, 等. 经鼻颅底手术器械弯曲结构的优化设计[J]. *生物医学工程学进展*, 2019, 40(1): 6-10.
JIA Yingwei, MAO Lin, SONG Chengli, *et al.* Optimization design of a novel flexible instrument for endoscopic skull base surgery[J]. *Progress in Biomedical Engineering*, 2019, 40(1): 6-10.
- [11] HENSELMANS P W J, BREEDVELD C, JAGER D J, *et al.* The MemoFlex II, a non-robotic approach to follow-the-leader motion of a snake-like instrument for surgery using four predetermined physical tracks[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2020(86): 86-95.
- [12] BREEDVELD C, HENSELMANS P W J, STARKENBURG R I B V, *et al.* Exploring non-assembly 3D printing for novel compliant surgical devices[J]. *PLoS One*, 2020, 15(5): e0232952.
- [13] ROPPENECKER D B, PFAFF A, COY J A, *et al.* Multi arm snake-like robot kinematics[C]//Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference. Tokyo: IEEE, 2013: 5040-5045.
- [14] SUN Y, LUETH T C. Cruciate-ligament-inspired compliant joints: application to 3D-printed continuum surgical robots[C]//Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Osaka: IEEE, 2021: 4645-4648.
- [15] FENG F, HONG W, XIE L. Design of 3D-printed flexible joints with presettable stiffness for surgical robots[J]. *IEEE Access*, 2020 (8): 79573-79585.
- [16] 施建平, 杨继全, 王兴松. 多材料零件 3D 打印技术现状及趋势[J]. *机械制造与自动化*, 2016, 45(6): 1-5.
SHI Jianping, YANG Jiquan, WANG Xingsong. Status and trend of 3D printing technology for heterogeneous objects[J]. *Machine Building and Automation*, 2016, 45(6): 1-5.
- [17] SKYLAR-SCOTT M A, JOCHEN M, VISSER C W, *et al.* Voxelated soft matter via multimaterial multinozzle 3D printing[J]. *Nature*, 2019, 575(7782): 330-335.
- [18] ROBERT I, WEBSTER J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: a review[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2010, 29(13):1661-1683.
- [19] CUELLAR J S, SMIT G, PLETTENBURG D, *et al.* Additive manufacturing of non-assembly mechanisms[J]. *Additive Manufacturing*, 2018(21):150-158.