

DOI: 10.3901/JME.2018.13.025

多杆连续体机构：构型与应用*

徐凯^{1,2} 刘欢³

- (1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;
2. 上海交通大学机器人研究所 上海 200240;
3. 上海交通大学密西根学院 上海 200240)

摘要：在若干刚性杆件机器人作业困难的场合，柔性机器人可轻易完成操作，因而在近十余年成为研究热点。从柔性铰链机器人到连续体机器人再到柔体机器人，柔性机器人通过逐步引入更多的弹性元件及其变形模态而不断发展。柔性机器人中的连续体机器人通常由连续体机构及其驱控、传感组件构成，其形状可描述为平面或空间曲线。介绍多杆连续体机构的多种构型及其应用。自其狭义构型到广义构型，再到广义构型的组合和连接，多种多杆连续体机构的新构型构成了手术机器人、深腔机械臂、康复外骨骼和欠驱动假肢手等新系统，并于其针对的应用场合展示出了优异的作用性能，体现了连续体机构广泛的应用前景。期望所述范例可启发连续体机构在手术治疗、康复服务和工业生产等领域更多的创新设计和应用，从而进一步拓展机器人机构学的研究范畴和理论体系。

关键词：连续体机构；差分机构；手术机器人；深腔机械臂；假肢手；外骨骼
中图分类号：TP24

Multi-backbone Continuum Mechanisms: Forms and Applications

XU Kai^{1,2} LIU Huan³

- (1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. Robotics Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
3. UM-SJTU Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Research on flexible robots prospers in the past decades, possibly due to the consensus that flexible robots might be capable to achieve tasks that are challenging for traditional rigid-linked robots. Flexible robots came into being by gradually introducing more flexible components and deformation patterns: from robots with flexural joints, to continuum robots and soft-bodied robots. Continuum robots consist of continuum mechanisms and their control with actuation and sensing, whose shapes are usually represented by curves. Various forms and applications of a multi-backbone continuum mechanism are presented in this paper. From its basic form, to its general form and the general form's combinations in various ways, the continuum mechanisms constitute several novel robotic systems such as surgical robots, intra-cavity manipulators, exoskeletons and prosthetic hands, demonstrating superior performances. Following the presented design examples, it is expected that new forms of multi-backbone continuum mechanisms could be designed for new applications in services, healthcare practices and various industries.

Key words: continuum mechanism; differential mechanism; surgical robot; intra-cavity manipulator; prosthetic hand; exoskeleton

0 前言

相比传统刚性杆件机器人，柔性体机器人(柔性体机器人包括下文所述的连续体机器人和柔体机器人)具有多项明显的优势，例如可以与环境实现安全交互、在受限空间内实现灵巧操作以及抓取非结构化物体等，因而在最近十余年成为了研究热点^[1-8]。

相关研究的主要集中于如何高效地实现可控和(或)适应性的变形以满足机器人的运动功能，其中涵盖了从材料到力学以及构型综合、传感、驱动、控制等各个方面的大量相关研究。

从柔性铰链机器人到连续体机器人再到柔体机器人，柔性体机器人是通过逐步引入更多的弹性元件及其变形模态而不断发展的。两篇里程碑式的综述论文^[9-10]对“连续体机器人”和“柔体机器人”这两个术语提出了相对严格的定义。一般来说，连续体机器人不具有可分辨的旋转关节，其形状由连

* 国家自然科学基金资助项目(51435010, 51722507, 91648103, 51375295), 20170725 收到初稿, 20171127 收到修改稿

续的平面或空间曲线表征^[10-11]。而根据第一届 RoBoSoft 会议^[12]和最近的综述论文^[9, 13], 柔体机器人则由低弹性模量的材料所构成, 在机器人的运动过程中可承受大变形。

在与领域内的共识保持一致的情况下从力学的角度进行分析, 我们可以进一步对离散杆件机器人、连续体机器人和柔体机器人加以区分。连续体机器人的形状通常可以用串联或并联的曲线来表征, 其弯转结构的截面一般假设为刚性^[10, 14]。而柔体机器人通常承受体变形, 其形状用连续应变场来描述。尽管柔性铰链机器人的运动通过关节处的变形来实现, 但柔性铰链往往用旋转关节来近似建模(例如借助伪刚体模型), 因此柔性铰链机器人通常仍被认为是离散杆件机器人。又诸如著名的气动象鼻机器人^[10], 虽然其结构整体变形, 但其形状通常由串联的空间曲线来表示, 所以它一般被归类为连续体机器人。

不管是连续体机器人还是柔体机器人, 都通过其结构形变来实现机器人功能。因此, 众多研究集中着眼于探索新型材料以激变形变、尝试新型结构以实现形变、建立计算模型以描述形变、以及集成驱动传感以控制形变。

弯曲变形是所有变形之中最基本和常见的形式^[13]。本文主要介绍的多杆连续体机构, 其最初设计目的也是为了实现机器人远端的弯曲变形。

连续体机器人中实现各种运动功能的连续体机构, 是连续体机器人的重要研究对象。连续体机构的机构学研究主要在结构分析和构型综合两个方面开展。结构分析主要研究其形变产生机理、弹性体动力学建模、变形标定、驱动补偿等; 而构型综合以弹性体动力学和形变模型为基础, 设计满足特定力、位、功能需求的连续体机构, 研究范畴主要包括机构综合、运动学-动力学建模、刚度建模、参数优化等。

本文从一种多杆连续体机构的基础构型着眼, 通过运动学分析, 提出了这种多杆连续体机构的广义构型; 通过广义构型的组合和连接, 构造出了多个具有迥异输入、输出运动特性的多杆连续体机构。如图 1 所示, 以不同构型的多杆连续体机构作为核心元件, 设计出了内窥镜和腹腔镜手术机器人^[15-16], 工业深腔机械臂^[17], 单侧和双侧康复外骨骼^[18-20], 以及基于欠驱动和运动合成的假肢手^[21-23]。

正如采用旋转关节可以构成任意结构的刚性运动链, 以多杆连续体机构广义构型作为基本单元, 也可以设计出各种具有不同运动功能的连续体机

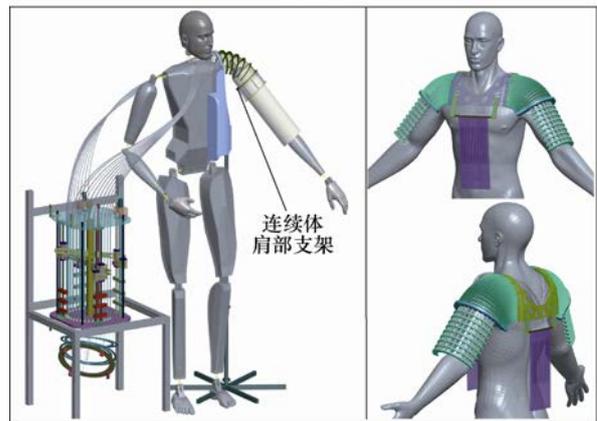
构。期望本文所述范例可启发连续体机构在手术治疗、康复服务和工业生产等领域更多的创新设计和应用, 从而进一步拓展机器人机构学的研究范畴和理论体系。



(a) 内窥镜和腹腔镜手术机器人



(b) 深腔机械臂



(c) 单侧和双侧康复外骨骼



(d) 欠驱动和运动合成的假肢手

图 1 多杆连续体机构在多种机器人系统中的应用

1 多杆连续体机构

SIMAAN 等^[24]于 2004 年提出了如图 2a 所示的多杆连续体机构的基础构型, 用作喉部微创手术机器人的末端灵巧单元。图 2a 中所示的连续体机构作为一个弯曲单元, 往往被称为一个构节, 多个构节串联组合可实现更灵巧的运动。

如图 2a 所示,一个连续体构节的基础构型由一个末端盘、一个基座盘、一根主杆、三根次杆和多个间隔盘组成。三根次杆以主杆为圆心,相隔 120° 均匀分布。所有的杆件均由超弹性镍钛合金制成,主杆的两端与基座盘、末端盘分别固连;所有次杆均与末端盘固连,并可在间隔盘和基座盘上的孔内滑动。用三根次杆的推拉实现两个自由度的弯曲,其优势在于可以提供一定的驱动冗余性,同时减少主杆受压失稳的风险^[25]。理论分析及试验验证均表明,连续体构节的弯曲形状可以用圆弧表示^[26]。作用在次杆上驱动力的大小,可以用于感知构节末端的受力情况^[27]。

将多杆连续体机构的基础构型推广可得到其广义构型,广义构型可以更充分展示出连续体机构的优势和潜力。从基础构型到广义构型的推广,基于连续体机构的两条基本性质。一是主杆和次杆都可以承受推力或拉力,他们本质上具有相同的重要性:使构节形成弯曲形状。将主杆固连在基座盘上,相当于保持其驱动量始终为零。二是只要满足构节弯曲变形的协调条件,结构中可以在任意位置布置任意数量的杆件,并不要求一根杆件在中心,另外三根杆件在周围。

因此多杆连续体构节的广义构型如图 2b 所示,其运动学模型基于以下三条假设。

(1) 构节的形状和长度由一根虚拟主杆来表示,如图 2b 中所示的虚线。该虚拟主杆可认为是弯曲构节的中性轴,可以假设在任意位置,且并不一定是圆弧形。

(2) 代表着构节截面形状的刚性间隔盘与虚拟主杆处处垂直。

(3) 构节中各杆件的形状,由间隔盘沿虚拟主杆切线方向运动时,间隔盘中各杆件截面扫过的轨迹来表征。

构节(或虚拟主杆)的形状可以由 L , θ_L 和 δ 三个参数表示,其中 L 是构节的长度, θ_L 和 δ 表示末端盘的指向。在机器人系统中应用时,构节在无负载情况下的形状通常用圆弧来近似。而在外载荷或外约束条件下,构节的形状则可能不再呈圆弧形。但需要指出的是,即使构节呈非常曲率变形,前述的三条假设仍可成立。

前述假设下,对于一个具有 m 根杆件的构节,第 i 根杆件的长度可表示为(具体推导参见文献[19])

$$L_i = L - r_i \theta_L \cos(\delta + \beta_i) \quad (1)$$

式中, i 表示杆件序号; r_i 表示第 i 根杆件到虚拟主杆的距离; θ_L 表示构节弯曲的角度; δ 是从弯

曲平面旋转到 \hat{x}_b 的角度,其中 \hat{x}_b 经过虚拟主杆及第 1 根杆件; β_i 是从第 i 根杆到第 1 根杆之间的分布角。

根据第三条假设,各杆件在弯曲平面上的投影可由虚拟主杆偏移得到,因此第 i 根杆件的驱动长度 q_i (推或拉)可由式(2)给出

$$q_i \equiv L_i - L = -r_i \theta_L \cos(\delta + \beta_i) \quad (2)$$

通过分析式(2)中的连续体构节驱动运动学,可以总结出以下四条特征。应用这四条特征,将多杆连续体机构的广义构型以不同的方式进行连接,可以创成下文所述的具有各异运动特征的各种连续体机构构型。

(1) 驱动量与虚拟主杆的确切形状无关。根据式(2)驱动连续体构节,理论上可使末端盘的指向达到由 θ_L 和 δ 确定的方向;但在外力的作用或限制下,虚拟主杆的形状可以任意。

(2) q_i 与 r_i 和 θ_L 成比例关系。在同时改变 r_i 和 θ_L 的情况下, q_i 可以保持不变。这一特征使得多个连续体构节之间可简单有效地连接。

(3) 同时推/拉次杆可以改变虚拟主杆的长度;

(4) 只要各杆件的协同驱动关系满足式(2),多杆连续体构节中可以包括任意数量的杆件。

部分连续体机器人采用的是图 2c 中所示的绳驱动连续体构节^[10],由于驱动绳的长度取决于中央杆件的形状和间隔盘的分布,因此这一类机构并不具有上述的前两条特征。尽管绳驱动连续体构节理论上也可以实现本文所述的各种应用,但如何保持驱动绳的张力始终是一个难题。此外,将张力保持元件嵌入到传动系统中可能会影响传动系统的精度,增加运动控制的难度,同时也可能会进一步降低连续体机构的承载能力。

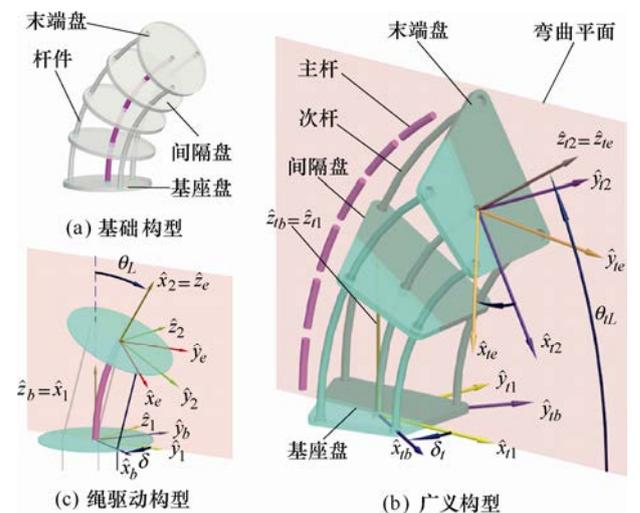


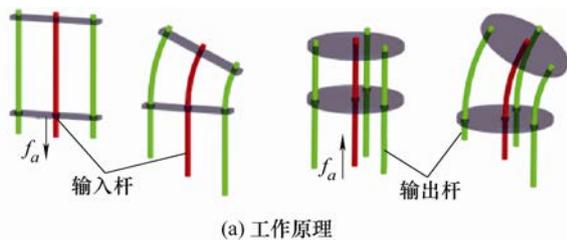
图 2 多杆连续体机构的结构与描述

2 连续体差分机构

连续体构节的弯曲形状是由协同推/拉各杆件实现的, 如果单独驱动一根杆件, 那么该构节可以形成一种连续体差分机构^[22-23]。如图 3a 所示, 驱动力 f_a 作用在平面或空间连续体差分机构的输入杆上, 如果各个输出杆上的负载大小不相等, 持续驱动输入杆将会使所有杆件同时弯曲, 从而产生差分输出。多数差分机构将一个驱动输入分解为两个差分输出, 而空间连续体差分机构可以将一个驱动输入分解为三个差分输出, 这一发现拓展了 IFToMM (国际机构学与机器科学联合会)对差分机构的定义。

在设计如图 3b 所示的单驱动假肢手时, 作者首次提出了平面连续体差分机构^[22]。随后, 作者深入研究了空间连续体差分机构^[23], 同时将连续体差分机构定义为依靠材料的变形或重新分布来产生差分输出的机构。与此相反, 大多数现有的差分结构依靠运动副之间的相对运动来产生差分输出, 可以称之为运动副差分机构。

连续体差分机构的输入杆可以承受推力或者拉力, 这一特征使得组合多级平面和/或空间连续体差分机构变得十分简单。如图 2b 所示的二级连续体差分机构可以同时产生 4 个差分输出, 该机构被应用于单驱动假肢手^[22], 可以使假肢手产生各种自适应的抓取动作。而基于空间连续体差分机构的三指机械手^[23]由于采用连续体机构, 结构简洁, 可以形成自适应的抓取动作, 如图 3c 所示。



(a) 工作原理



(b) 在假肢手中的应用

(c) 在机械手中的应用

图 3 倒置连续体机构的应用

3 连续体机构广义构型的互连

多杆连续体机构的广义构型可以通过多种方式互相连接, 以实现迥异的运动功能。如图 2 所示, 一个连续体构节中的运动元件包括末端盘和杆件。将末端盘相互连接可以得到合成连续体机构, 而将杆件相互连接则可以得到对偶连续体机构及其一系列衍生的连续体机构。

由于多杆连续体机构具有反向可驱动性, 允许连续体之间相互连接和互相驱动, 使得连续体机构的互连更加灵活。不管虚拟主杆的是否变形为圆弧形, 驱动末端盘总可以使连续体的杆件产生推/拉平移运动输出, 而这些输出可以用于驱动其他连续体机构。并且, 根据式(2)可知, 输出量仅取决于连续体的状态变量 L 、 θ_L 和 δ 。

3.1 合成连续体机构

如果将两个连续体构节的末端盘相互连接, 可以得到一个合成连续体机构。如图 4 所示, 合成连续体机构包含一个内部构节和一个外部构节, 内外构节的末端盘互相固连。当外部构节的杆件驱动使该构节弯曲到特定形态时, 内部构节的末端盘也随之运动, 从而使得内部构节的杆件上产生相应的推/拉平移运动输出, 满足式(2)。因为两个连续体构节末端盘的指向(由 θ_L 和 δ 确定)保持一致, 输出量系输入量的线性合成, 线性合成的系数取决于杆件的分布位置(由 r_i 和 β_i 确定)。

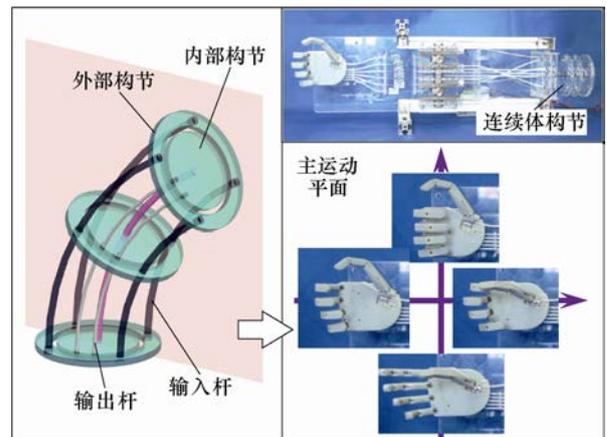


图 4 合成多杆连续体机构用于线性运动合成及应用

继续推广这一概念, 显然并不需要将合成连续体机构区分为内部和外部两个构节, 实际上对于一个具有多根杆件的构节来说, 任意驱动三根杆件就可以使连续体构节弯曲和/或伸长, 形成特定的姿态, 而其余的杆件上即可产生合成的运动输出。

作者将该构型应用于一种多关节仿人假肢手^[21],

以实现基于主运动合成的手势控制。如果采集截肢者的两路生理信号控制两个伺服电动机,采用机械传动的方式实现主运动的合成,可以将两路输入线性地合成映射到多个输出,从而控制多关节假肢手。虽然通过滑轮或齿轮亦可实现主运动的机械方式合成,而合成连续体机构提供了一种结构更简洁的新解决方案。作者设计搭建了如图4所示的原理样机^[21],由两个伺服电动机驱动连续体构节弯曲,从而产生两项主运动线性合成的运动输出以驱动多关节假肢手,实现了多种抓取动作。

3.2 对偶连续体机构

如果直接将两个连续体构节广义构型中的杆件对向相连,可以得到对偶连续体机构。如图5a所示,对偶连续体机构的每根杆件从远端构节经导向管连接到近端构节。两个构节中的杆件的分布位置相似:每根杆件在远端构节中的位置为 r_i 和 β_i ,在近端构节中的位置则为 kr_i 和 β_i 。当远端构节弯曲的状态为 θ_L 和 δ 时,则近端构节弯曲的状态为 θ_L/k 和 $\delta+\pi$ 。根据式(2)给出的驱动运动学关系,近端构节中任意一根杆件的推动距离等于远端构节中对应杆件的拉动距离。因此,不管两个构节中设置有多少根杆件,驱动近端构节总是可以相应地驱动远端构节向相反的方向弯曲,缩短近端构节则可以相应地伸长远端构节。远端构节的3个自由度(2个弯曲自由度和1个伸缩自由度)可以通过驱动近端构节来实现。同理,驱动远端构节也可以相应地控制近端构节的形态。

根据这一特点,我们可以将一对偶连续体机构的近端构节装配至一个驱动构节之中:驱动构节通过3~4根杆件的推拉来实现弯曲和伸缩。由于近端构节与驱动构节的运动保持一致,驱动构节因而驱动了远端构节。

对偶连续体机构的近端构节可在驱动构节之中拆装,可以布置任意数量的构节杆件,这些特点使得对偶连续体机构有三个明显的优点:模块化、大负载、可消毒。远端构节可以设计成不同长度、不同截面形状,同时可集成各种末端执行器。只要近端构节与远端构节结构相似,近端构节总是可以驱动远端构节。唯一需要进行的调整,是在控制系统中选用相应的结构参数,即可实现对末端构节的驱动控制。由于驱动构节相对独立,不受近端构节与远端构节中杆件的数量的影响,因此近端与远端构节可以增加杆件的配置,实现安全冗余,以提高结构的刚度、强度和可靠性。此外,由于对偶连续体机构为纯机械结构,将其从驱动构节之中拆下后还可方便地对其进行消毒。

基于对偶连续体机构的工作原理,作者提出了一种新型的康复外骨骼^[19-20]。在康复运动中,理想的条件是外骨骼与病人的肢体应具有运动相容性。临床条件下,多个病人往往共用一套康复外骨骼。如果外骨骼使用刚性杆件结构(例如文献[28-31]),治疗师则需要频繁调整外骨骼的结构参数以适用于不同的病人。

根据式(2)的驱动运动学,只要末端盘的指向不变,即使连续体机构弯曲形状各不相同,各杆件的驱动量也保持不变。因此,可使用连续体机构协助病人肢体的运动;对不同的病人提供相同的驱动量,尽管由于病人解剖结构差异导致连续体构节弯曲形状不同,但是肢体仍可得到相同的辅助。

基于这一原理,作者设计了如图5b所示的连续体外骨骼。肩部支架作为远端构节,协助病人的肩关节运动。远端构节内布置有多根直径较细的杆件,使之具有设定的柔性,既能产生自适应病人解剖学特征的变形,又具有一定强度以实现病人肢体运动的辅助。系统采用对偶连续体机构原理,以伺服电动机配以滚珠丝杠推拉驱动构节中杆件,以实现驱动构节的弯曲,从而带动近端构节,继而使远端构节即肩部关节实现相应的运动。试验证明,肩部支架可以被动地适应不同肩宽,以实现解剖学上的自适应辅助。

根据连续体机构广义构型的特点,杆件的分布并不一定要包括整个圆周。如图5b所示,在腋窝位置并没有布置杆件。

对偶连续体机构在图1a和图5c所示的内窥镜手术机器人^[15]和单孔腹腔镜手术机器人^[16]中也得到了应用。

如图5c上图所示,内窥镜手术机器人包括一支视觉引导臂和两支柔性操作臂;为了最大程度地利用内窥镜的截面空间,操作臂的截面都设计成了不规则形状。而由于多杆连续体机构广义构型的有效性,即使这样非圆截面的构节仍实现常曲率弯曲。

在如图5c下图所示的单孔腹腔镜手术机器人系统的柔性操作臂中,远端构节外径为6.35 mm,其中杆件经导管连接到近端构节,在中段被集束成不规则的截面形状。通过这样的特殊设计,两支外径均为6.35 mm的柔性操作臂可以依次通过内径仅为11.6 mm的腹腔镜鞘套通道。

在上述的两套手术机器人系统中,两段远端构节串联,增加了柔性操作臂的自由度。对于手术机器人来说,柔性操作臂的刚度、强度和可靠性至关重要。为了提高这三项性能,上述手术机器人系统中的柔性操作臂都在远端构节中配置了数量上高度

冗余的杆件，分别达到每构节 7 根和 9 根。

对偶连续体机构的远端构节具有两个弯转自由度和一个伸缩自由度。对于该伸缩自由度，主要有两种方式可以实现。

一种方式是伸缩近端构节：由于近端构节与远端构节以弹性杆直接相连，近端构节的伸长对应于远端构节的缩短，反之亦然。在前述的单孔腹腔镜手术机器人系统^[16]中就采用的是这种方式。但这种方式有一个弊端是伸缩范围较小。

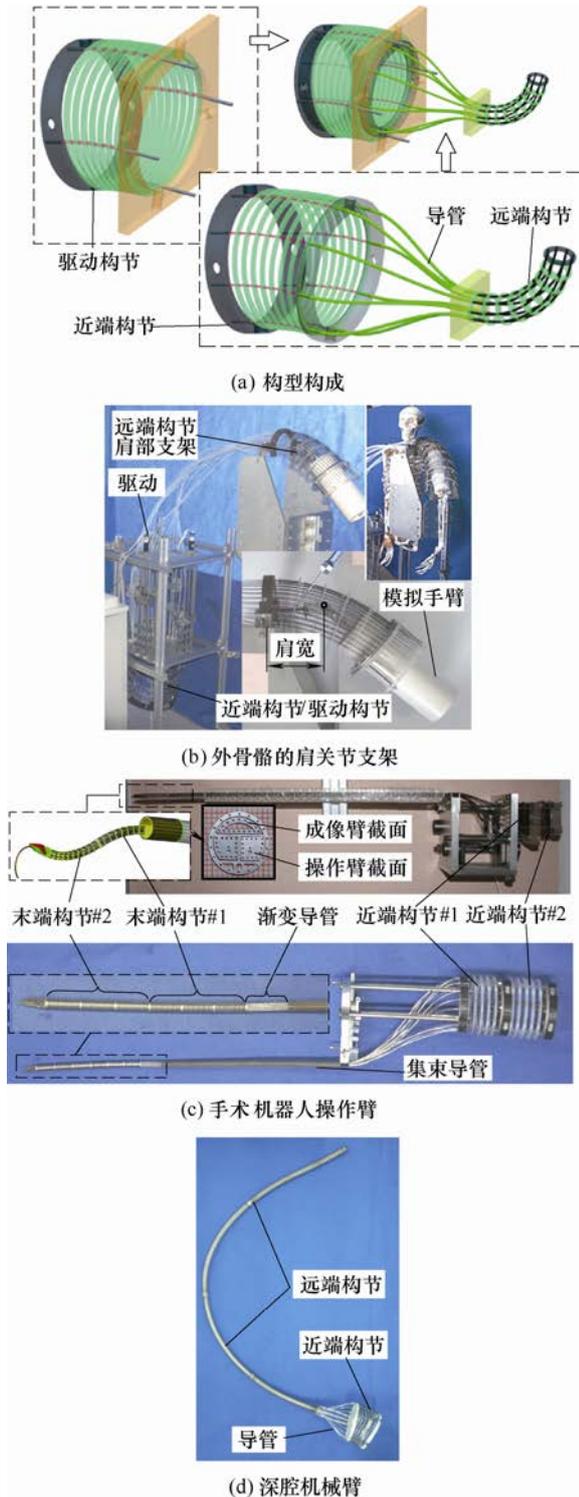


图 5 对偶连续体机构及其应用

另一种方式是将远端构节设置得较长，并束缚在一支套管中；再对对偶连续体机构实施整体进给，伸出的部分成为有效的弯曲部，从而实现了远端构节弯曲部分的长度变化。在如图 1b 中所示的用于深腔作业的柔性机械臂系统中^[17]，作者就采用了后一种方式。该深腔机械臂采用了两组同心嵌套的对偶连续体机构，图 5d 展示了其中一组。远端构节设计为长度足以满足作业需求，但在作业时只有伸出部分才能弯曲。通过对构节中弹性杆的布置优化，实现其构节弯曲时的弹性势能高于其重力势能，使得重力对深腔机械臂弯曲形态的影响相对较小。

此外，在此深腔机械臂内部还设计有一个通道，可供其他工具通过，可实现复杂深腔内的多余物控制和维修、探查。

3.3 杆件同向连接的对偶连续体机构

在对偶连续体机构中，远端构节和近端构节的弹性结构杆是对向直接相连的；在实际样机中通常布置一根弹性杆从头至尾贯穿近端构节和远端构节。如果将两个连续体构节的杆件同向固连在一起，并通过线性导轨导向，则构成如图 6a 所示的同向对偶连续体机构。当构节#1 弯曲到 θ_L 和 δ 时，位置参数为 r_i 和 β_i 的杆件与构节#2 中位置参数为 kr_i 和 β_i 具有相同的推拉位移量，所以构节#2 弯曲状态为 θ_L/k 和 α (即两个构节、以 δ 确定的弯曲方向相同)。相比之下，当对偶连续体机构的其中一个构节弯曲到 δ 时，另一构节则弯曲到 $\delta+\pi$ (弯曲方向相反)。

根据同向对偶连续体机构的特点，作者设计了一种用于双侧康复训练的外骨骼^[20]。已有研究表明，双侧训练使健侧与患侧同时运动，可以明显提高康复效果。现有的康复训练机器人系统实现双侧训练的标准方式是通过运动捕捉系统来捕捉健侧运动，然后通过机器人去带动患侧肢体实现相应的运动，方案较复杂、昂贵。

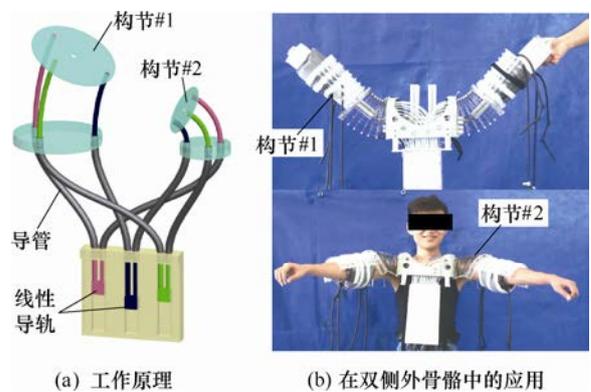


图 6 同向对偶连续体机构

在图 6b 所示的双侧外骨骼的原理样机中，作者使用了同向对偶连续体机构，两个构节分别作为双

侧外骨骼中两个肩关节支架。健侧肢体带动健侧的连续体构节弯曲，从而驱动患侧的连续体构节弯曲，并实现患侧肢体的辅助运动。该设计实现病人自身的健侧肢体辅助患侧肢体，是一种自助式的双侧康复训练。相比标准的机器人双侧训练的系统设置，明显降低了成本。

此外，双侧外骨骼同时也保留了解剖学上自适应辅助的特点。在不同病人使用时，两侧的构节将会形成不同形状的弯曲；但是健侧肢体的指向总是会传递到患侧，从而辅助患侧肢体运动。

3.4 倒置的对偶连续体机构

将连杆机构中的不同杆件作为机架可以得到不同形式的倒置。通过同样的方式，也可以得到倒置对偶连续体机构。如图 5a 所示，一般情况下对偶连续体机构的构节基座盘和导管被设计为机架，是固定不动的。通过机构倒置，可将近端构节的末端盘作为机架。

以图 7a 所示的平面连续体机构为例，近端构节的末端盘作为机架固定不动。近端构节与远端构节具有相同的结构参数，所以远端构节的末端盘总是与近端构节的末端盘平行。通过推拉杆件使驱动构节弯曲，近端构节也随之弯曲。在本例中，因为两根驱动杆件方向相反距离相等，故实际上只需要一个自由度的独立运动输入即可使该连续体机构工作。

倒置对偶连续体机构可用于设计一种扫描机构，如图 7b 所示。假设一个扫描头固定在远端构节的末端盘上，在运动过程中其指向保持不变。该 2D 扫描设计也可以方便的扩展为 3D 扫描，只需要将空间对偶连续体机构进行倒置即可。

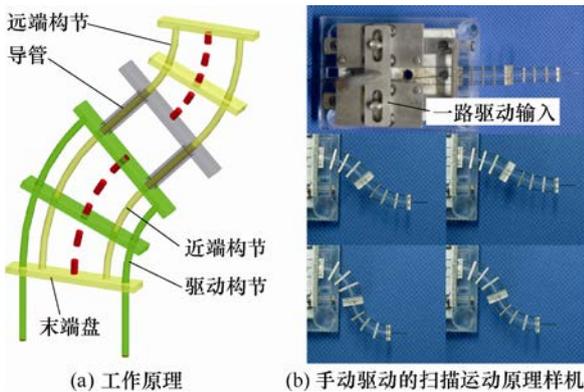


图 7 倒置对偶连续体机构

3.5 耦合的对偶连续体机构

将对偶连续体机构进行耦合，可得到耦合对偶连续体机构，可用于设计一种用于深腔检测的远心机构。

远心机构实现末端执行器绕远端固定一点的旋

转，如果将该机构安装在内窥镜的末端，可用于定位摄像头、实现绕物体的环形检视。现有的内窥镜所带有的弯曲探头一般不能实现类似的运动。

这样的远心运动可以通过图 8a 所示的耦合连续体机构实现。远端构节#1 和远端构节#2 都连接到近端构节，但是其中远端构节#1 的导向管在连接到近端构节的过程中相互交叉，因此当操纵手柄使近端构节弯曲时，远端构节#1 和远端构节#2 总是向相反的方向弯曲。

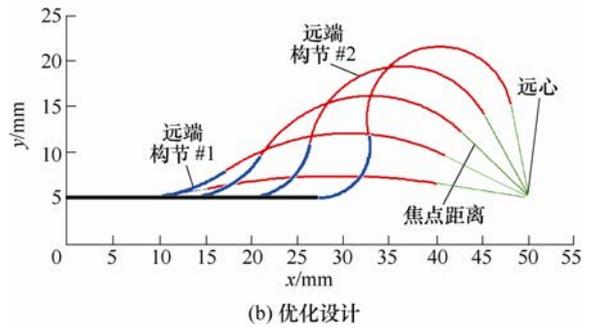
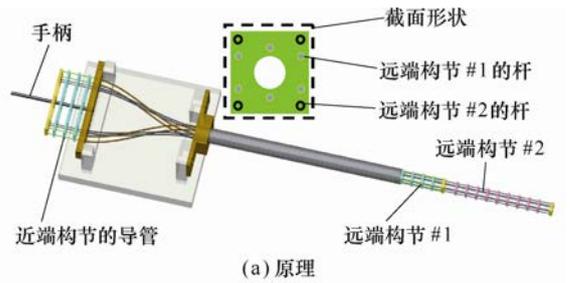


图 8 耦合对偶连续体机构

从末端盘中心向外延伸一定长度的一点，假设该点为摄像头焦点，理想情况下，该点应为远心运动中的不动点，从而实现对一物体清晰的环绕检视。在耦合连续体机构运动过程中，该点与理想的不动点在进给方向上的误差可以通过机构的整体进给来补偿，在水平方向上的误差则可通过优化设计来消除。

该优化设计的目标函数是运动过程中，该点与理想的远心运动不动点之间的水平方向误差；优化

变量包括两个远端构节的长度, 以及耦合的弯曲比例。采用优化后的结构参数, 经如图 8b 所示的仿真验证, 作者搭建了如图 8c 所示的原理样机, 通过驱动手柄及整体进给, 可以实现如图所示的远心运动。

4 结 论

本文展示了多杆连续体机构的多种构型及其应用。在充分理解连续体结构与驱动特点的基础上, 多杆连续体机构实现了超预期的结构功能性。

单个多杆连续体构节通过反向作用, 可以用作连续体差分机构, 能将一路输入分解为两路或三路输出。将两个多杆连续体构节通过不同形式相连, 可以得到合成连续体机构、对偶连续体机构和同向对偶连续体机构, 已于手术机器人、深腔机械臂、外骨骼和假肢手等多种机器人系统上成功应用。上述应用建立在多杆连续体机构的两条基本性质之上: ① 弹性杆件的结构平等性: 所有杆件对连续体形成弯曲变形的贡献是相等的; ② 反向可驱动性: 通过弯曲连续体构节而使杆件产生位移输出, 这些输出继而可以用于驱动其他连续体构节。

从本文所述示例可见, 多杆连续体机构具有许多独特优势, 已可应用于多种实际的场合。增加构节中弹性杆件的数量可以在不降低构节弯曲能力的情况下, 显著提高多杆连续体机构的刚度、负载能力和可靠性。且冗余杆件的植入使得构节弯曲形状在一定负载下仍接近圆弧, 从而使得常曲率变形假设的应用范围更加广泛, 这也使得多杆连续体机构的运动学模型简洁, 更易于控制实现。运动中, 无须为杆件提供张紧力; 构节受外力后, 在杆件上产生的额外压缩/拉伸力会被动的分布在所有杆件上, 这提高了构节的负载能力。多杆连续体机构不再需要中心主杆, 因此构节内部总可以留出通道, 以供额外的工具或末端执行器通过。

多杆连续体机构的构型与应用仍有相对广阔的拓展空间。除了将连续体机构互连, 还可以与刚性运动链集成, 构成连续体-刚体混链机构, 从而进一步调节其机械特性^[32]。将本文展示的多杆连续体机构作为基本单元, 可设计出功能各异的各型机构。期望本文所述范例可启发多杆连续体机构在手术治疗、康复服务和工业生产等领域更多的创新设计和应用, 从而进一步拓展机器人机构学的研究范畴, 促进机构学理论体系的丰富和发展。

参 考 文 献

- [1] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. 机械工程学报, 2015, 51(13): 45-52.
- [2] NI Ziqiang, WANG Tianmiao, LIU Da. Survey on medical robotics[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 45-52.
- [3] 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.
- [4] WANG Guobiao, CHEN Diansheng, CHEN Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44.
- [5] 徐凯. 连续体机构在单腔镜微创手术机器人系统中的应用[J]. 机器人技术与应用, 2011(4): 28-32.
- [6] XU Kai. Applications of continuum mechanism in single-port laparoscopic surgical robotic systems[J]. Robot Technique and Application, 2011(4): 28-32.
- [7] 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.
- [8] WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [9] 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.
- [10] LI Tiefeng, LI Guorui, LIANG Yiming, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756-766.
- [11] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 25-33.
- [12] CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshan, et al. Review of soft-bodied robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 25-33.
- [13] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots [J]. Nature, 2015, 521(7553): 467-475.
- [14] WEBSTER R J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. International Journal of Robotics Research, 2010, 29(13): 1661-83.
- [15] TRIVEDI D, RAHN C D, KIER W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2008, 5(3): 99-117.
- [16] WALKER I D. Continuous backbone "Continuum" robot manipulators[J]. ISRN Robotics, 2013, 2013(726506): 1-19.
- [17] ROBINSON G, DAVIES J B. Continuum robots - a state of the art[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 10-15, 1999, Detroit, Michigan. New York: IEEE, 1999: 2849-2853.
- [18] LASCHI C. RoboSoft working paper[R]. Scuola

[1] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J].

- Superiore Sant'Anna, 2014.
- [13] WANG L, IIDA F. Deformation in soft-matter robotics: A categorization and quantitative characterization[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(3): 125-139.
- [14] BRYSON C E, RUCKER D C. Toward parallel continuum manipulators[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-Jun 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2014: 778-785.
- [15] ZHAO J, ZHENG X, ZHENG M, et al. An endoscopic continuum testbed for finalizing system characteristics of a surgical robot for NOTES procedures[C]// IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), July 9-12, 2013, Wollongong, Australia. New York: IEEE/ASME, 2013: 63-70.
- [16] 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.
- [17] LIU S, YANG Z, ZHU Z, et al. Development of a dexterous continuum manipulator for exploration and inspection in confined spaces [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2016, 43(3): 284-295.
- [18] XU K, QIU D. Experimental design verification of a compliant shoulder exoskeleton[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 6-10, 2013, Karlsruhe, Germany. New York: IEEE, 2014: 3894-3901.
- [19] XU K, ZHAO J, QIU D, et al. A pilot study of a continuum shoulder exoskeleton for anatomy adaptive assistances[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(4): 041011.
- [20] XU K, WANG Y, YANG Z. Design and preliminary experimentation of a continuum exoskeleton for self-provided bilateral rehabilitation[C]// IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), July 28-30, 2014, Hailar, Inner Mongolia, China. New York: IEEE, 2014: 327-332.
- [21] XU K, LIU H, DU Y, et al. Mechanical implementation of postural synergies using a simple continuum mechanism[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31 - June 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2014: 1348-1353.
- [22] XU K, LIU H, LIU Z, et al. A single-actuator prosthetic hand using a continuum differential mechanism[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 26-30, 2015, Seattle, Washington. New York: IEEE, 2015: 6457-6462.
- [23] XU K, LIU H. Continuum differential mechanisms and their applications in gripper designs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(3): 754-762.
- [24] SIMAAN N, TAYLOR R H, FLINT P. A dexterous system for laryngeal surgery[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), April 26 - May 1, 2004, New Orleans, Louisiana. New York: IEEE, 2014: 351-357.
- [25] SIMAAN N. Snake-like units using flexible backbones and actuation redundancy for enhanced miniaturization[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2005: 3012-3017.
- [26] XU K, SIMAAN N. Analytic formulation for the kinematics, statics and shape restoration of multibackbone continuum robots via elliptic integrals[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2010, 2(011006-1): 1-13.
- [27] XU K, SIMAAN N. Intrinsic wrench estimation and its performance index of multi-segment continuum robots[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(3): 555-61.
- [28] LI Z, XIE H, LI W, et al. Proceeding of human exoskeleton technology and discussions on future research[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(3): 437-447.
- [29] ZHANG J, FU H, DONG Y, et al. Novel 6-DOF wearable exoskeleton arm with pneumatic force-feedback for bilateral teleoperation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 21(3): 58-65.
- [30] 饶玲军, 谢叻, 朱小标. 下肢外骨骼行走康复机器人研究与设计 [J]. 机械设计与研究, 2012, 28(3): 24-26. RAO Lingjun, XIE Le, ZHU Xiaobiao. Research and design on lower exoskeleton rehabilitation robot[J]. Machine Design and Research, 2012, 28(3): 24-26.
- [31] 史小华, 王洪波, 孙利, 等. 外骨骼型下肢康复机器人结构设计与动力学分析[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 41-48. SHI Xiaohua, WANG Hongbo, SUN Li, et al. Design and dynamic analysis of an exoskeletal lower limbs rehabilitation robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 41-48.
- [32] XU K, FU M, ZHAO J. An experimental kinesthetic comparison between continuum manipulators with structural variations[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 31-Jun 7, 2014, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2014: 3258-3264.

作者简介: 徐凯(通信作者), 男, 1979年出生, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为连续体机构及其在机器人系统创新应用方面的研究, 包括手术机器人、深腔机械臂、智能假肢、外骨骼等。

E-mail: k.xu@sjtu.edu.cn

刘欢, 男, 1986年出生, 博士。主要研究方向为连续体机构, 欠驱动假肢手以及机械手。

E-mail: liuhuan_2013@sjtu.edu.cn