

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2020.0003.004

微创手术机械臂的可控刚度技术综述*

于潇潇, 张帆**, 陈龙凯, 吴凯宇, 蒋家鹏

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:针对微创手术中所使用的机械臂存在的灵活性和负载能力之间的矛盾,提出了手术机械臂要具有可控刚度这一特性;材料和构型对微创手术机械臂性能有着很大的影响,目前现有的微创手术机械臂的可控刚度技术原理,主要包含了冗余驱动、材料变刚度、颗粒阻塞、层干扰、型锁合等可控刚度方法;通过文献分析法,分析研究了不同可控刚度方法的基本原理和研究现状,在安全性、响应时间等方面验证了上述可控刚度变刚度方法是否可以安全用于微创手术中;基于目前微创手术机械臂存在的问题,提出了可控刚度技术的未来发展方向,主要包括结构创新、建模控制以及安全性等。

关键词:微创手术机械臂;可控刚度;响应时间;安全性

中图分类号:TH777 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-058X(2020)03-0029-08

0 引言

微创手术(Minimally Invasive Surgery, MIS)是指通过腹腔镜和胸腔镜等现代医疗设备在人体内进行手术的新技术,可用于鼻窦手术、眼科手术、介入手术和神经外科手术等领域,主要具有创口小、疼痛轻、恢复快、出血少、住院时间短^[1-2]等特点。在微创手术中,机械臂必须是灵活的,防止进入人体造成损伤,另外它们还需要足够的刚性,在抓取时传递力量。以射频导管消融为例,在灵巧性动作阶段,器械需提供足够的自由度数和柔顺性,在保护重要血管及神经前提下满足在工作空间内的位姿需求;在剥离、牵引等精确操作阶段,需要机械臂具有更高的刚性和稳定性来保持组织操作稳定性。由于微创手术机械臂不能在灵活运动的同时具有高刚度,导致手术时间加长。以经自然腔道内镜手术(Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery,

NOTES)^[3]为例,手术中使用的仪器是通过较柔软的内窥镜经过人体自然通过腔道而进入体内,当仪器通过灵活的内窥镜拉出组织时,由于内窥镜太灵活,无法抵抗这些力量,导致内窥镜向组织弯曲形成典型的 N 环^[3],对人体软组织造成一定的拉伤。由于微创手术的特点是伤口小,所需要的机械臂尺寸就必须微型化,但机械臂尺寸越小它所承受的负载能力相较来说就越弱。由于机器人手臂尺寸和驱动方法的限制,机器人难以在灵活操作和高负载能力之间找到适当的平衡,这使得医生在操作中具有一定的困难^[4]。

本文介绍了可控微创医疗机械臂的研究前景,总结分析了目前微创手术器械可控刚度原理,对现有的方案进行了比较分析,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 手术机械臂变刚度原理

随着医疗机器人不断发展,对医疗器械的要求

收稿日期:2019-12-26;修回日期:2020-01-27.

* 基金项目:上海市科委生物医药领域科技支撑计划资助(17441901200).

作者简介:于潇潇(1993—),女,江苏宿迁人,硕士研究生,从事机器人变刚度研究.

** 通讯作者:张帆(1980—),女,河南平顶山人,博士,副教授,从事机构学与并联机器人理论研究. Email: pdszhangfan@sues.edu.cn.

也不断提高。如何对手术器械实现可控刚度成了研究热点,对目前现有的机械臂变刚度方法的原理进行了介绍。

1.1 冗余驱动

冗余驱动一般指利用机械臂本身结构在不同方向产生拮抗,使结构达到耦合从而实现可控刚度。国外圣安娜高等学校的仿章鱼软体机械臂^[5-6],所使用的就是“横向肌”与“纵向肌”,通过使其同时收缩的方式达到变刚度。还有一些学者利用钢丝绳张力和刚性连杆之间的摩擦,让机械手达到变刚度效果,但是由于钢丝张紧力很大,加强力仅仅由连杆之间的摩擦产生,所以连杆必须足够坚固以承受高张力,从而导致机械手很难变得紧凑。麻省理工学院提出了一种新的具有可变中性线机构的超冗余管式机械手^[7],采用肌腱和连杆的非对称排列,既实现了机械手的铰接,又实现了连续的刚度调制。此外中国科学院刘浩团队同样也提出了单自由度和双自由度的变中性线柔性机器人。柔性机器人的刚度调控主要是通过对驱动丝的张紧力控制,使结构左右产生不对称变化,机构左右两侧产生拮抗作用,实现变刚度^[4]。

1.2 材料变刚度

现有的材料形式主要有,电流变液、磁流变液^[8-10]、低熔点合金(Low Melting Point Alloy, LMPA)^[11-12]、形状记忆聚合物(Shape Memory Polymer, SM)^[13-14]、电活性聚合物(Electroactive Polymer, EAP)^[15]和热塑性聚合物(Thermoplastic Polymer, TP)^[16-17]等。研究学者利用这些材料通过控制磁场、电场、温度等一定条件使其在液相和固相之间相互转化,从而调整机械手的刚度。Cheng等^[18]和Telleria等^[19]已经使用焊料的材料构建了具有热激活关节的机器人。由于材料使用的是焊料,这类材料有着较高的熔点,而人体安全温度为37℃左右,使用焊料变刚度,安全性较低。天津大学团队发明了一种基于相变材料的变刚度单孔机器人操作臂,变刚度腕部可以在手术中实现刚柔转化。它们采用结构材料一体化设计,即可变刚度材料融入柔性关节,使其成为柔性关节的一部分,可变刚度腕部可在手术过程中实现刚性-柔性转换^[20]。根据刚性调控机制,主要可分为3种主要机制:相变转变、玻璃化转变和流变液。表1列举了这3种材料具体的典型代表。

表 1 基于材料变刚度典型材料对比

Table 1 Comparison of typical materials based on material stiffness

| 材料类别 | 材 料 | 转化时间/s | 杨氏模量 | 变形模式 | 文 献 |
|------|--------------|--------|----------------------|------|------|
| 相变转化 | 低熔点合金(LMAP) | 17~18 | 3.659 GPa | 弯曲变形 | [11] |
| | 热塑性聚合物(TP) | >50 | 0.296 GPa~1.172 GPa | 拉伸变形 | [17] |
| | 焊料 | 15 | — | 拉伸变形 | [19] |
| 玻璃转化 | 形状记忆合金 | 6~7 | 弹性较大 | 弯曲变形 | [44] |
| | 电活性聚合物(EAP) | — | <3 000 MPa | 弯曲变形 | [15] |
| 流变液 | 形状记忆聚合物(SMP) | 环境温度决定 | 9.9~928 MPa | 拉伸变形 | [14] |
| | 电流变材料 | — | 3 kPa~5 kPa(屈服强度) | 弯曲变形 | [10] |
| | 磁流变材料 | — | 50 kPa~100 kPa(屈服强度) | 弯曲变形 | [10] |

1.3 型锁合

针镜手术(NS)也是微创手术中的一种,指的是使用直径小于3 mm的器械和端口。因为针镜手术使用的器械的直径很小,轴的刚度也较低,很容易弯曲导致器官损伤。研究人员为了解决这个问题,开发了使用可锁定和放松的混合步态的系统。Robert等^[21]首次将这个想法应用到医学应用中。然而,由于这些设备使用钢丝张力来锁住轴的形状,它们经常出现钢丝断裂的问题,因此不能安全

使用^[22]。为了解决这些问题,Zuo等^[23]开发了一种外护套的新装置。这种护套采用一种新型的“龙皮”结构和一种负气动锁形机构,可以在柔性和刚性模式之间切换。当鞘接近目标时,外科医生锁定形状,然后通过鞘所创建的路径很容易地插入灵活的器械。

另外,Yagi等^[24]研制了一种用于内窥镜手术的带有气动驱动滑块连接锁的外护套。该护套可切换柔性和刚性两种状态,并为插入机械手提供一条

刚性弯曲路径。如果内部通道为空,则所有部件都保持柔性模式,柔性模式可以弯曲成所需的形状。相反,如果将空气注入流体通道,则会达到刚性状态,刚性模式可以保持护套的形状,然后保持仪器的路径。

1.4 颗粒阻塞

柔性内窥镜是一种长而柔性的插入管,它常被用于消化道等医疗手术中。在手术中,需要一个简单的轴导向装置来支撑柔性内窥镜轴。这种轴导杆在插入人体时必须是有挠性的,在正确定位以后,轴导杆必须是刚性的。控制挠性轴刚度的一种相对简单的方法是利用真空将体积较小的颗粒紧密地包裹起来^[25],如图 1 所示。

这种方法是通过往机械臂中增大气压,从而加大颗粒状介质之间的摩擦力。使颗粒介质由原先流动状态变成固态状态,发生可逆刚柔转换。另外操作系统如果与末端执行器工具相结合,整个系统可以通过套管针孔并弯曲病人腹腔内的器官,为外科医生提供更好的视野^[26]。

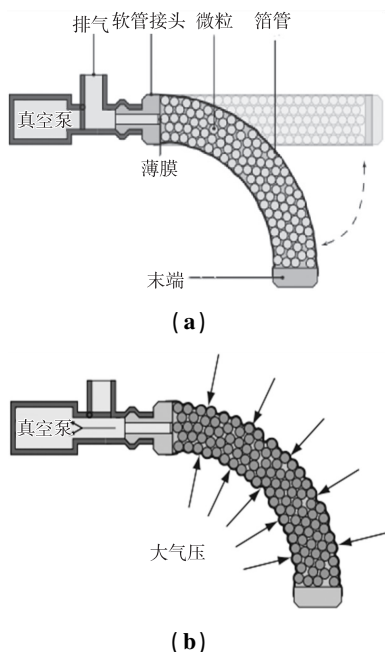


图 1 颗粒阻塞变刚度法^[25]

Fig. 1 Particle blocking variable stiffness method^[25]

在文献[27-28]中的微创手术机械臂以及“FP7 STIFF-FLOP 计划”手术机器人^[29]都以这种方式实现了可变刚度。Ranzani 等^[30]设计了由单模块组成的柔性变刚度机械手,用于微创手术中。该模块利用灵活的流体驱动,以获得多向弯曲和延伸能力,采用颗粒干扰机制对模块的刚度进行调整。为了

解决微创手术中单端口介入和刚性仪器的缺点,Cianchetti 等^[31]开发了一种使用颗粒干扰的可调刚度仪器。这些机械手在柔性状态下具有较高的变形能力,在固态下具有较高的刚度。康奈尔大学的 Brown 等^[32]创新性地提出了一种粒子干扰技术,通过改变粒子之间的摩擦来改变机械手的刚度。

此外,香港大学的 Li 等^[33]进一步提出了一种被动粒子干扰方法,如图 2 所示。虽然简化了可变刚度结构,但这种方法增加了机器人的尺寸和质量。

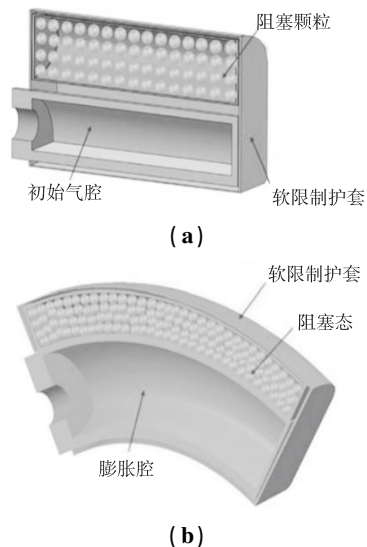


图 2 被动颗粒阻塞变刚度法^[33]

Fig. 2 Passive particle blocking variable stiffness method^[33]

1.5 层干扰

同颗粒阻塞变刚度原理相似,层干扰是利用负气压增大薄层之间的摩擦力来实现刚柔转换。Kim 等^[34]提出了一种基于层干扰的蛇形机械手^[34]。之后三星先进技术研究所在 2013 年提出了“层干扰”可控刚度这个概念,原理如图 3 所示。他们设计了一种可调刚度的薄壁管状机构,由于薄壁管状内部为空心管,里面可以用来作为引导管放入一个或多个微创手术工具。在手术操作过程中,当机械手进入身体时,它处于非常柔性的状态从而避免对人体造成不必要的伤害,当处于准确位置时,它会处于非常刚性的状态以达到维持期望的构造^[35]。

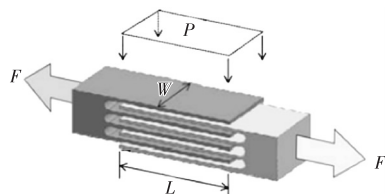


图 3 层干扰原理图^[35]

Fig. 3 Layer interference schematic diagram^[35]

在此基础上西安交通大学团队研究发明了软机器人的新型层间干扰变刚度技术——静电层间干扰(Electrostatic Layer Jamming, ELJ),主要是通过静电吸引挤压材料层产生摩擦,从而实现刚度可控。ELJ 技术具有占用空间小、重量轻、设计和制造简单、成本低和大的刚度变化能力等特点。可以用来改变软机械手的操作方向,保持柔软的机身姿势^[36]。

1.6 并联冗余驱动机构

微创手术器械需达到纤细尺寸、灵活运动和整体刚度的多目标要求,并且有中空腔道,为末端执行器和能量设备提供通道。因此实现灵活运动的关节常见于器械圆周上分布,通过两侧对称的转动铰链或滚动接触等方式实现上下部分的相对运动,实质上是并联冗余机构(Parallel Redundant Mechanism, PRM)。

与串联运动机构相比,并联运动机构具有更高的刚度、更高的敏捷性和较高的有效载荷能力等优点。因此许多研究学者将他们应用于工业制造、病人康复、飞行模拟器、机器人手术等领域。目前,并联冗余机构可分为驱动冗余和结构冗余 2 类^[37]。驱动冗余是指基于共同的并联机构将机构的一些被动关节转换为活动关节,使得机构的驱动器的数量大于自由度的数量。结构冗余通过在结构外部将驱动单元或运动分支添加到运动分支来实现。在机构中增加结构冗余可以避免运动奇异性,优化工作空间,提高局部和整体灵活性,结构冗余机制可以执行一些特殊的运动。

在过去的 30 年,并联冗余机构受到了越来越多的学者关注,随着后来可变阻抗执行器(Variable Impedance Actuator, VIA)的出现,Christoph Stoeffler

等将 PRM 和 VIA 两者组合,研究了一种新的变刚度机制(Variable Stiffness Mechanism, VSM)。通过 3 个具有柔性元件的执行器实现 2 自由度(DOF)的刚度和位置控制,应用于人形脚踝机构,但是需要更加复杂的数学描述^[38]。因此未来实施于医疗手术中有一定的困难,需要研究人员进一步的探讨。

1.7 阻抗控制

机器人系统分为导纳系统和阻抗系统,在微创手术中,机械手和人体内部环境之间的关系相当于阻抗和导纳。在机械手进入人体内时,体内环境视为对机械手的一种“干扰”,当机械手偏离手术工作途径时给以阻抗形式的扰动响应。Hogan 等^[39-40]首先提出阻抗控制的概念,阻抗控制的目标是在机器人的期望位置和接触力之间建立动态响应关系。可以通过改变阻抗来调节机器人和环境之间的动态相互作用,而不是跟踪运动和力的轨迹^[41]。Salisbury 等^[42]提出了一种基于阻抗控制的机械臂刚度的主动控制方法。这两种阻抗控制方法需要复杂的数学关系,且参数优化过程非常复杂,难以确保机械臂在各个方向和部件上具有良好的柔性。所以目前一般用在工业机器、服务类机器以及康健医疗机器中较多,如果用在医疗手术中需要研究出精准的控制算法,人体安全性得以保证。

2 可控刚度方案比较

可控刚度手术机械臂,在医疗有着重要作用和良好发展前景。针对上述变刚度方法,综合文献对上述提到的现有变刚度方法做了总结对比,如表 2 所示。

表 2 可控刚度方法对比表

Table 2 Comparison table of controllable stiffness methods

| 变刚度方法 | 可控刚度范围 | 整体体积 | 响应时间 | 安全性 | 文献 |
|--------|--------|------|------|-----|--------------|
| 冗余驱动 | 小 | 小 | 快 | 高 | [4]、[5-7] |
| 低熔点合金 | 大 | 小 | 一般 | 高 | [11-12]、[20] |
| 磁流体变刚度 | 小 | 较大 | 一般 | 低 | [8-10] |
| 形状锁合 | 大 | 大 | — | 低 | [21]、[23-24] |
| 颗粒阻塞 | 一般 | 大 | 快 | 高 | [25-33] |
| 层干扰 | 大 | 一般 | 快 | 高 | [34-35] |

目前这些变刚度方法都在实验检验阶段,并不能完全应用于医疗等领域中,参考文献分析其主要原因,包括刚柔转化时间较长、力传感器不灵敏以及结构设计等方面。

在微创手术中,刚性-柔性转换时间越短,手术安全性越高。在外科手术中发生紧急情况时,最短的刚性-柔性转换时间允许可变刚度臂以最快的速度从腹腔抽出,以确保安全操作^[20]。但是在目前研究阶段,刚柔转化时间还不是很理想。虽然颗粒阻塞和层干扰有着较快的刚柔转化时间,但是他们有着各自的缺陷,颗粒阻塞由于大量的固体颗粒改变了微创手术机械臂的弹性特性,并且通过增加诸如真空泵的附加装置,导致结构变得复杂并且不容易小型化。在微创手术中,不利于微型化和轻量化,操作起来具有一定的风险。在此基础上,层干扰优化了整体结构,但多层片材结构对软体臂的柔韧性有一定的影响,实施起来困难。另外,磁性流体的可变刚度通过施加的磁场而改变,但是所需的磁场非常高,并且难以确保操作期间的安全性。低熔点合金的方法是使用低熔点合金作为骨架,使合金在温度的作用下,通过固体、液体和过渡状态之间转换以改变刚度,具有广泛的刚度可控范围,但具有一般响应。

在阻抗控制中,尽管主动顺应性控制方法可以调节臂的端部或关节处的刚度,但是通常存在时间延迟的问题。当医生在外科手术过程中同时需要灵活性和强度时,灵活性和强度如何匹配,取决于力传感器。但是现有的变刚度方案中,对于力反馈这一方面研究甚少,并没有精准的力反馈方案。研究变刚度操作臂力感应及力反馈方式变得尤其重要,通过力反馈的方式,进而提高手术操作安全性^[20]。虽然微创手术机械臂可以实现无限自由度的运动,但是由于驱动方式和制动器数量的局限性,为了精确控制机器人的运动,需要大量的传感器信息和数据反馈,这很难保证其在实际应用过程中的实时性能。

有必要深入了解机器人构型的特点,整合各种机器人构型的优点,以便在保证灵活性的前提下设计新结构,增强机器人的刚性^[4]。在上述可控刚度方案中,目前最合适的可控刚度方法是低熔点合金变刚度,因为它的刚度变化范围大、占用体积小、安全性高。另外马家耀等^[43]针对 NOTES 对手术机械臂需求的刚度矛盾和尺度矛盾,设计了一种具有可

变刚度及可变尺度的折展变刚度机械臂。在柔态下具有良好的柔顺性和径向折展特性,能够安全顺利进出人体形状复杂的自然腔道,在刚态下,能够为手术末端器械提供足够的支撑力^[43]。杨百翰大学教授 Larry Howell 的团队和直观视觉公司合作研发的 3 mm 手术器械折纸可展机构做为微创手术器械关节具有免维护、无摩擦、结构紧凑的优势,并且机构结构紧凑。这种折纸可展机构为实现微创手术器械可控关节的紧凑结构设计提供新思路。

3 总结与展望

刚-柔可切换(可控刚度)机械臂对微创手术的重要价值已经得到学术界、医学界的普遍认同。采用可控刚度的微创手术机器人是新一代医疗机器人研究的一个重要方向。本文主要针对可控刚度原理进行了方法归类整理,主要可分为材料可控刚度方法、结构可控刚度方法以及阻抗控制可控刚度方法。介绍了上述不同类型变刚度基本原理和研究现状,在安全性、响应时间等方面讨论了各种变刚度方法的优缺点。材料变刚度方法中最适合的材料为低熔点合金,像焊料材料由于较高熔点很难安全用于人体中,还有磁流变液体由于外加磁场、电场的干涉很容易对人体造成伤害。颗粒阻塞由于大量的固体颗粒改变了机械臂的弹性特性,并且通过增加诸如真空泵的附加装置,结构变得复杂并且不容易小型化。层干扰对整体结构进行了优化,但是需要设计复杂的层结构,多层片状结构会对软体机械臂的柔顺性造成一定影响,实现难度高。冗余并联机构和阻抗控制目前还没有被用于微创手术中,要想成功应用于微创手术中还得解决目前存在的一些困难。

从目前来看,可控刚度机械臂还存在一些问题没有解决。由于手术操作路径不是线性的,操作人员如何时刻知道机械臂负载情况以及如何在灵活性和负载能力之间找到合适的平衡点,这都需要研究人员进一步探讨。另外对结构进行优化设计,需要建立精确的物理模型,而建立物理模型又面临着许多困难。虽然已经有很多学者尝试对连续型机构进行运动学和动力学建模,仍旧存在着一些问题。动力学模型能够较好地模拟章鱼触手的受力情况,但动力学模型过于复杂,不易满足实时控制,

用于安全性较高的手术中还是有一定的危险。研究出适合软体材料大变形的建模方法也是目前可控刚度机械臂急需解决的问题之一。在材料可控刚度方法中,由于人体舒适温度在 37 ℃ 左右,寻求适合人体温度的熔点材料也是重要研究方向之一。但是手术中最为重要的还是保证病人的安全,任何可控刚度技术的改进都得以人类安全为第一出发点,这样才能更好地适用于微创手术中。

设计机械臂主要先考虑材料和结构,之后根据它的结构和材料对控制和传感器做出相对应的变化。然而,驱动源、智能材料、创新结构、运动形式的多样化、运行参数的多变性等又给可变刚度的微创手术机器人建模和控制带来巨大挑战。因此,可变刚度的微创手术机器人深入研发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(References):

- [1] 林良明. 机器人辅助微创外科手术的发展[J]. 中国医疗器械信息, 2003, 9(2):16—18
LIN L M. The Development of Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery[J]. China Medical Devices Information, 2003, 9(2):16—18(in Chinese)
- [2] 付宜利, 潘博. 微创外科手术机器人技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1):7—21
FU Y L, PAN B. Research Progress of Surgical Robot for Minimally Invasive Surgery[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1):7—21(in Chinese)
- [3] TOMIKAWA M, XU H, HASHIZUME M. Current Status and Prerequisite Sites for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery (NOTES) [J]. SurgToday, 2010, 40(1):909—916
- [4] 纪竹青. 柔性手术机器人的刚度调控技术研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学, 2018
JI Z Q. The Research on Stiffness Controlling Technology of the Flexible Surgical Robot [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2018(in Chinese)
- [5] MAHL T, HILDEBRANDT A, SAWODNY O. A Variable Curvature Continuum Kinematics for Kinematic Control of the Bionic Handling Assistant[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(4):935—949
- [6] Bioinspired Locomotion and Grasping in Water; the Soft Eight-arm OCTOPUS Robot [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(3):035003
- [7] KIM Y J, CHENG S, KIM S, et al. A Stiffness-Adjustable

- Hyperredundant Manipulator Using a Variable Neutral-Line Mechanism for Minimally Invasive Surgery [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(2):382—395
- [8] TANIGUCHI H, MIYAKEM, SUZUMORIK. Development of New Soft Actuator Using Magnetic Intelligent Fluids for Flexible Walking Robot [C]// International Conference on Control Automation & Systems. IEEE, 2010
- [9] PARK G, BEMENT M T, HARTMAN D A, et al. The Use of Active Materials for Machining Processes: A Review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(15):2189—2206
- [10] YALCINTAS M, DAI H. Magnetorheological and Electrorheological Materials in Adaptive Structures and Their Performance Comparison [J]. Smart Materials and Structures, 1999, 8(5):560—573
- [11] ZHAO R, YAO Y, LUO Y. Development of a Variable Stiffness over Tube Based on Low-melting-point-alloy for Endoscopic Surgery [J]. Journal of Medical Devices, 2016, 10(2):021002
- [12] NAKAI H, KUNIYOSHI Y, INABA M, et al. Metamorphic Robot Made of Low Melting Point Alloy [C]//IEEEERSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2002, 2:2025—2030
- [13] FIROUZEH A, SALEHIAN S S M, BILLARD A, et al. An Actuated Robotic Arm with Adjustable Stiffness Shape Memory Polymer Joints [C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015:2536—2543
- [14] CHEN Y, SUN J, LIU Y, et al. Variable Stiffness Property Study on Shape Memory Polymer Composite Tube [J]. Smart Materials and Structures, 2012, 21(9):094021
- [15] HENKE M, JÖRG S, GERLACH G. Multi-layer Beam with Variable Stiffness Based on Electroactive Polymers [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8340(26):83401P—83401P
- [16] YUEN C S, BILODEAU R A, KRAMER R. Active Variable Stiffness Fibers for Multifunctional Robotic Fabrics [J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2016:1—1
- [17] DONG H, WALKER G M. Adjustable Stiffness Tubes Via Thermal Modulation of a Low Melting Point Polymer [J]. Smart Mater Struct, 2012, 21(4):042001
- [18] CHENG N, ISHIGAMI G, HAWTHORNE S, et al. Design and Analysis of a Soft Mobile Robot Composed of Multiple Thermally Activated Joints Driven by a Single Actuator [C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2010

- [19] TELLERIA M J, HANSEN M, CAMPBELL D, et al. Modeling and Implementation of Solder-activated Joints for Single-Actuator, Centimeter-scale Robotic Mechanisms [C]//Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010
- [20] 王建辰. 变刚度单孔手术机器人系统设计与主从控制策略研究[D]. 天津:天津大学, 2017
WANG J C. Design and Master-Slave Control Strategy of A Single-Port Surgical Robot with Controllable Stiffness Manipulation Arms [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017 (in Chinese)
- [21] STURGES R H, LAOWATTANA S. A Flexible, Tendon-Controlled Device for Endoscopy [C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 1991
- [22] NOTASH L. Failure Recovery for Wrench Capability of Wire-actuated Parallel Manipulators [J]. *Robotica*, 2012, 30(6):941—950
- [23] ZUO S, IJIMA K, TOKUMIYA T, et al. Variable Stiffness Outer Sheath with “Dragon Skin” Structure and Negative Pneumatic Shape-locking Mechanism [J]. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2014, 9(5):857—865
- [24] YAGI A, MATSUMIYA K, MASAMUNE K, et al. Rigid-Flexible Outer Sheath Model Using Slider Linkage Locking Mechanism and Air Pressure for Endoscopic Surgery [C]// Proceedings of the 9th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - Volume Part I. PubMed, 2006
- [25] LOEVE A J, VEN O S V D, VOGEL J G, et al. Vacuum Packed Particles as Flexible Endoscope Guides with Controllable Rigidity [J]. *Granular Matter*, 2010, 12(6):543—554
- [26] JIANG A, SECCO E, WURDEMANN H, et al. Stiffness-controllable Octopus-like Robot Arm for Minimally Invasive Surgery [C]// Workshop on New Technologies for Computer/Robot Assisted Surgery, 2013
- [27] 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
- [28] DE FALCO I, CIANCHETTI M, MENCIASSI A. A Soft Multi-module Manipulator with Variable Stiffness for Minimally Invasive Surgery [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017
- [29] AREZZO A, MINTZ Y, ALLAIX M E, et al. Total Mesorectal Excision Using A Soft and Flexible Robotic Arm: A Feasibility Study in Cadaver Models [J]. *Surgical Endoscopy*, 2016, 31(1):1—10
- [30] RANZANI T, GERBONI G, CIANCHETTI M, et al. A Bioinspired Soft Manipulator for Minimally Invasive Surgery [J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(3):035008
- [31] 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
- [32] BROWN E, RODENBERG N, AMEND J, et al. Universal Robotic Gripper Based on the Jamming of Granular Material [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(44):18809—18814
- [33] LI Y, CHEN Y, YANG Y, et al. Passive Particle Jamming and Its Stiffening of Soft Robotic Grippers [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2017, 33(2):446—455
- [34] KIM Y J, CHENG S, KIM S, et al. Design of a Tubular Snake-like Manipulator with Stiffening Capability by Layer Jamming [C]// IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2012
- [35] KIM Y J, CHENG S, KIM S, et al. A Novel Layer Jamming Mechanism with Tunable Stiffness Capability for Minimally Invasive Surgery [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 29(4):1031—1042
- [36] WANG T, ZHANG J, LI Y, et al. Electrostatic Layer Jamming Variable Stiffness for Soft Robotics [J]. *IEEE ASME Transactions on Mechatronics*, 2019:1—1
- [37] EBRAHIMI I, CARRETERO J A, BOUDREAU R. 3-PRRR Redundant Planar Parallel Manipulator: Inverse Displacement, Workspace and Singularity Analyses [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2007, 42(8):1007—1016
- [38] STOEFFLER C, KUMAR S, PETERS H, et al. Conceptual Design of a Variable Stiffness Mechanism in a Humanoid Ankle Using Parallel Redundant Actuation [C]// 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2018:462—468
- [39] HOGAN N. On the Stability of Manipulators Performing Contact Tasks [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(6):677—686
- [40] HOGAN N. Impedance Control—An Approach to Manipulation I—Theory II—Implementation. III—Applications [J]. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 1985, 107(1):1—24

- [41] KAZEROONI H, SHERIDAN T, HOUP T P . Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I: The Fundamental Concepts of Compliant Motion[J]. Robotics and Automation, IEEE Journal, 1986, 2(2):83—92
- [42] SALISBURY J K . Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates [C]// Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control, 1980
- [43] 张国凯, 马家耀, 尚祖峰, 等. 具有折展与变刚度特征的 NOTES 手术器械臂[J]. 机械工程学报, 2018, 54 (17):28—35
- ZHANG G K, MA J Y, SHANG Z F, et al. Deployable Manipulator with Tunable Stiffness for Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (17): 28—35 (in Chinese)
- [44] WANG Z, SUN Z, PHEE S J . Haptic Feedback and Control of a Flexible Surgical Endoscopic Robot [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2013, 112(2):260—271

Review of Controllable Stiffness Techniques for Minimally Invasive Surgical Manipulator

YU Xiao-xiao, ZHANG Fan, CHEN Long-kai, WU Kai-yu, JIANG Jia-peng

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

Abstract: In view of the contradiction between the flexibility and load capacity of the robotic arm used in minimally invasive surgery, it is proposed that the surgical robot arm has the characteristics of controllable stiffness. The material and configuration have a great influence on the performance of the minimally invasive surgical manipulator. The current controllable stiffness technology of the minimally invasive surgical manipulator mainly includes redundant drive, material stiffness, particle blockage, layer interference, type locking, and equal controllable stiffness method. Through the literature analysis method, the basic principle and research status of different controllable stiffness methods are analyzed and reviewed. It is verified whether the above controllable stiffness and stiffness method can be safely used in minimally invasive surgery in terms of safety and response time. Based on the existing problems of minimally invasive surgical manipulators, the future development direction of controllable stiffness technology is proposed, including structural innovation, modeling control, and safety.

Key words: minimally invasive surgical manipulator; controllable stiffness; response time; security

责任编辑: 罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

于潇潇, 张帆, 陈龙凯, 等. 微创手术机械臂的可控刚度技术综述[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2020, 37(3):29—36

YU X X, ZHANG F, CHEN L K, et al. Review of Controllable Stiffness Techniques for Minimally Invasive Surgical Manipulator [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2020, 37(3):29—36