

DOI:10.11784/tdxbz202303024

变构型微创手术机器人系统设计与实现

孔 康¹, 代迎凯¹, 杨英侃^{1,2}, 苏 赫¹

(1. 天津大学机械工程学院, 天津 300350; 2. 天津威高德泰医疗科技有限公司, 天津 300308)

摘要: 高性能微创手术机器人有利于实施复杂危难手术, 推动微创外科实现高质量发展. 在深入分析现有手术机器人特点和临床需求的基础上, 提出了一种变构型微创手术机器人系统. 基于刚柔混合结构设计了构型可变的手术操作臂, 通过构型变换可实现工作空间的变换, 从而提高操作臂的灵活性. 手术操作臂采用丝传动结构, 针对变曲率丝鞘传动下的张力和弹性伸长量等问题进行了分析, 确定了开合关节的丝鞘传动特性. 基于刚体和柔性关节运动学, 分析了手术操作臂在不同构型下的工作空间, 通过调整伸缩关节移动量, 实现操作臂工作空间可变功能. 此外, 设计了与操作臂适配的主手操作臂, 该主手配置有两个主从调节关节, 以保证主手与从手腕点姿态的一致性. 随后, 解析了主手与从手关节量之间的映射关系, 并建立了基于位姿分离的主从运动映射算法, 从而确保了操作舒适性及精准性. 最后, 研制了物理样机, 进行了大工作空间下的刚性测试实验、运动性能、主从运动性能与缝合操作性能评价实验, 全面验证了所提出的手术机器人系统的可行性.

关键词: 微创手术机器人; 操作臂; 主从控制; 实验研究

中图分类号: TP242.3

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2024)10-1030-14

Design and Development of a Variable-Configuration Minimally Invasive Surgical Robot System

Kong Kang¹, Dai Yingkai¹, Yang Yingkan^{1,2}, Su He¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin WEGO Detai Medical Technology Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: A high-performance, minimally invasive surgical robot is advantageous for complex and critical surgeries and promotes high-quality development in minimally invasive surgery. Based on an in-depth analysis of the characteristics of existing surgical robots and clinical needs, a variable-configuration minimally invasive surgical robot system was proposed. A manipulator with a variable configuration was designed based on a rigid-flexible hybrid structure. The flexibility of the manipulator was improved by transforming the workspace using configuration transformation. The surgical manipulator adopted a wire-driven structure. The tension and elastic elongation of the cable-driven structure were analyzed under variable-curvature cable-sheath transmission, and transmission characteristics of opening and closing joints were determined. On the basis of rigid and flexible joint kinematics, the workspace of the surgical manipulator was analyzed under different configurations. The variable function of the manipulator workspace was achieved by adjusting the movement of the telescopic joint. In addition, a master manipulator compatible with the manipulator was designed. The master manipulator was equipped with two master-slave adjustment joints to ensure consistency of the master and slave wrist postures. Subsequently, a master-slave motion mapping algorithm based on pose separation was established to determine the relationship between the master and slave joint angles, thus ensuring the comfort and accuracy of the operation. Finally, a physical prototype was developed, and comprehensive experi-

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-04-19.

作者简介: 孔 康 (1987—), 男, 博士, 副教授, kongkang103@tju.edu.cn.

通信作者: 杨英侃, yang_yingkan@163.com.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1311502); 国家自然科学基金资助项目(52175028).

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFB1311502), the National Natural Science Foundation of China (No. 52175028).

ments, including rigidity testing in a large workspace, motion performance testing, master-slave motion performance testing, and suturing operation performance evaluation, were conducted to fully verify the feasibility of the proposed surgical robot system.

Keywords: minimally invasive surgical robot; manipulator; master-slave control; experimental study

随着医疗技术的进步,开腹手术逐渐被创伤更小的微创手术所取代。微创手术一般采用微型手术器械,通过患者体表微小切口进入体内,并在图像引导下实施手术操作。与开腹手术相比,微创手术具有创伤小、出血少、疼痛少、恢复时间短等特点^[1]。然而,微创手术由于受到微小切口的约束,增加了医生的操作难度,具有如下局限性:①器械运动灵活性低;②医生操作手眼不协调;③医生的手部抖动会在器械末端被放大;④操作易疲劳^[2]。

为突破传统微创手术技术的约束限制,微创手术机器人技术应运而生。微创手术机器人是机器人技术与微创手术技术发展融合的硕果,在操作模式上,其克服了传统微创手术的多方面局限,可实现高沉浸感的直觉操作,使得医生操作更为舒适自然,手术动作更为灵活精准,从而实现微创手术的精细化和复杂手术的微创化。

近年来,微创手术机器人技术蓬勃发展,多款手术机器人系统相继问世,主要包括 Computer Motion 公司的 Zeus 手术机器人系统^[3]、Intuitive surgical 公司的 da Vinci 系统^[4]、Medtronic 公司的 Hugo 系统^[5]、天津大学和威高集团研制的“妙手”系统^[6-7]、术锐公司的手术机器人系统^[8]。这类系统一般由 3~4 个操作臂组成,临床应用广泛,可满足泌尿、普外、妇科、胸外等多类型手术需求。然而,该类机器人操作臂结构复杂、体积庞大、使用成本高昂,限制了其推广与应用。

为进一步降低手术机器人系统的体积与成本,研究者开发了以单孔手术机器人为代表的小型化机器人系统。这类系统的多个操作臂可通过单一切口探入患者体内实施手术操作。Titan 公司研制的 SPORT 系统,由两组直径 8 mm 的操作臂和一个内窥镜臂组成,通过一个直径 25 mm 的切口入路体内实施操作^[9-10]。MIRA 系统由两组操作臂和一个内窥镜组成,其整体质量为 0.907 2 kg (2 英镑)^[11]。伦敦帝国理工学院研制的 micro-IGES 系统由两组直径 5 mm 操作臂和内窥镜组成,整体质量约为 3 kg^[12-13]。类似系统还有 Vicarious^[14]、Hominis 等^[15]。该类手术机器人体积小、运动灵活,但其运动空间小,承载能力低,适用手术范围窄。

综上所述,研制兼具小型化和术式普适化特性的微创手术机器人对于弥补现有手术机器人技术的不足和促进机器人辅助微创手术的发展具有重要意义。

本文基于临床实际需求,提出一种变构型微创手术机器人设计方案:首先,基于刚柔混合关节设计了变构型手术操作臂机构,在此基础上,设计并分析了其丝传动结构,构建了运动学模型并分析了其多构型下的工作空间;其次,设计了主手操作臂,构建了基于位姿分离的主从运动映射;最后,研制了系统样机,并对其运动性能、主从跟踪性能和缝合操作性能进行了测试与评价。

相较于传统的多孔或单孔手术机器人系统,本文提出的变构型微创手术机器人方案采用全关节体内运动模式和多切口约束方式,从而避免了切口运动约束和体外操作臂的碰撞干涉,减小了操作臂的体积。同时,由于操作臂具有不同的构型,构建“操作三角”更为容易,使得手术操作更加灵活。此外,通过控制操作臂长度的变化,可以获得不同的工作空间,从而满足不同种类手术的需求。

1 系统概述

为实现操作的精准性和舒适性,本文所提出的变构型微创手术机器人采用主从操作模式,由主操作手(主手)、从操作手(从手)和控制系统组成,如图 1 所示。主手由主操作臂和显示器组成,为手术操作提供运动输入和视觉反馈;从手由变构型操作臂、3D 腹腔镜和支撑臂组成,提供手术图像,执行手术操作。主手是手术机器人的运动输入单元,从手是机器人的运动执行单元。

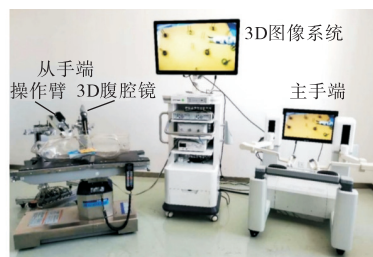


图 1 变构型手术机器人系统

Fig.1 Variable-configuration surgical robot system

2 变构型手术操作臂

2.1 操作臂设计

手术机器人操作臂用于在患者体腔内实施手术操作,需要具备良好的运动灵活性、足够的运动空间和较高的承载能力. 微创手术机器人操作臂主要有两种构型方式,分别为多孔操作臂(图 2(a))和单孔操作臂(图 2(b)). 多孔操作臂由在体外运动的操作臂和在体内运动的手术器械组成,通过多切口构建“操作三角”. 体外操作臂控制手术器械围绕切口运动,实现操作的大工作空间和高灵活性,适用手术范围广. 体外操作臂由被动调整臂、主动调整臂组成,体积庞大、结构复杂,且易产生干涉,影响手术操作质量. 单孔操作臂通过单一切口进入体内构建“操作三角”,其操作臂由多个串联关节组成,运动灵活柔顺、体积小. 但其关节刚度较低、工作空间较小,适用手术范围窄.

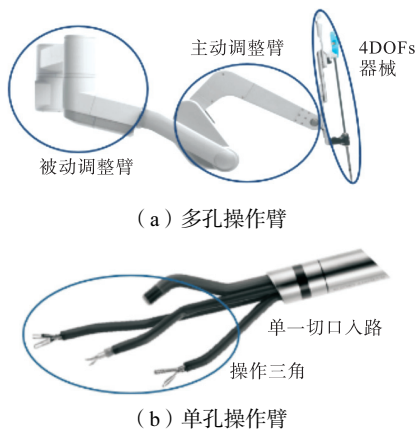


图 2 操作臂工作模式

Fig.2 Working modes of the manipulators

为推动实现手术机器人小型化并扩展其临床适应症范围,本研究提出一种变构型微创手术操作臂设计. 所提出的手术操作臂采用多切口入路方式和全关节体内运动模式,含有多个运动关节,具备构型可变换能力. 其构型变换包括两个方面:①随着操作臂进入体腔内的关节数量变化,自由度相应发生变化,操作臂构型随之改变,如图 3(a)所示;②根据手术操作空间需求,臂关节长度可由定长转为变长,触发操作臂构型变换,如图 3(b)所示. 操作臂的构型变化,引发工作空间的变化. 因此,所提出的操作臂具备构型与工作空间可变的特点.

术中操作臂各关节均在体内运动以实现位姿调整,体外无运动关节,避免了切口约束限制和体外臂间碰撞干涉的发生,并减小了操作臂体积;各操作臂

通过多切口入路体腔,易于构建“操作三角”,获得工作空间,并执行灵活手术动作;操作臂腕关节进入体内后即可执行手术操作,随着操作臂诸关节的循序进入,操作臂相继呈现不同构型,并获得不同形式及尺度的运动空间,如图 3(a)所示,突破了操作臂进入体内一定长度后才能操作的限制,提升了操作臂对于不同大小体腔的临床适应性;其长度变换可获得相对应的工作空间,以满足不同类型手术对工作空间的需求,如图 3(b)所示.

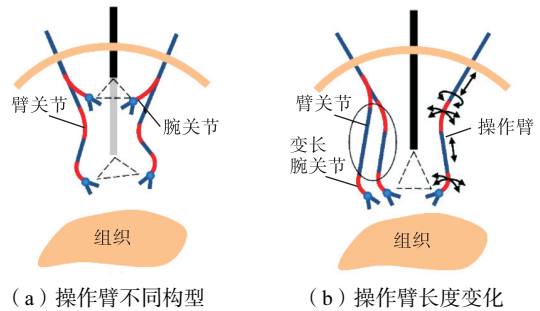


图 3 变构型手术操作臂工作模式
Fig.3 Working modes of the variable-configuration surgical manipulator

本文所提出的变构型手术操作臂由伸缩臂关节、腕关节和末端执行器组成,如图 4 所示,其具有 7 + 1 个自由度,即 7 个运动自由度和 1 个功能自由度. 伸缩臂由 4 运动自由度(移动 + 旋转 + 摆动 + 伸缩关节)组成,用以实现操作臂的空间位置调整,其中,伸缩关节可根据手术所需操作空间进行调整,实现操作臂的工作空间变换;摆动关节为可实现单向偏摆的柔性关节,其与伸缩关节构成可变工作空间关节. 通过伸缩关节的变化,摆动关节沿操作臂轴线移动,且臂长度保持不变,由此,在不改变操作臂入体深度的情况下,可实现其自身工作空间的变化,如此不仅可实现较大运动范围的手术操作,还可有效降低手术过程中因操作臂伸长而引发组织损伤的风险,有利于提高手术安全性.

腕关节为“偏转-俯仰-自转”式构型的柔性关节,能够实现操作臂末端三维空间姿态调整,其中,末端自转自由度可在不改变其他关节位置的情况下,灵活调节执行器朝向,有助于提高手术操作灵活性. 执行器具备 1 个功能自由度,可实现开闭功能,用以执行夹持、分离等手术动作.

操作臂经由穿刺器探入腹腔过程中相继可呈现 4 种构型,如图 5 所示. 构型 1: 腕关节经穿刺器入腹腔后,操作臂可实现 2 个偏转和 1 个末端自转运动,即 3 自由度构型,如图 5(a)所示. 构型 2: 当腕关节和伸缩关节经穿刺器入腹腔后,操作臂具备 4 个运动

自由度,即沿臂轴线的移动,2 个偏转和末端自转,臂运动范围相应增大,如图 5(b)所示. 构型 3:当腕、伸缩、摆动和旋转 4 关节进入腹腔后,在伸缩关节保持锁止时,操作臂具备 5 个运动自由度,工作空间大小固定,当伸缩关节运动时,摆动关节位置改变,操作臂具备 6 个运动自由度,工作空间可变,如图 5(c)所示. 构型 4:当操作臂所有关节均进入腹腔后,在伸缩关节保持锁止时,操作臂具有 6 个运动自由度,工作空间大小固定,当伸缩关节运动时,操作臂具备 7 个运动自由度,工作空间可变,且操作臂运动范围达到最大,如图 5(d)所示.

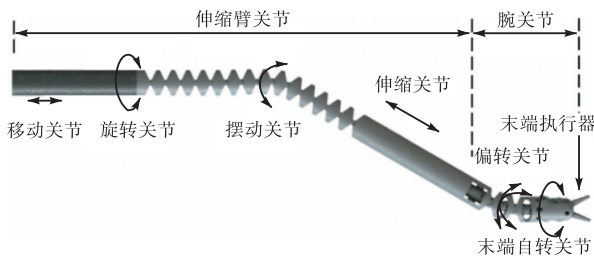


图 4 变构型手术操作臂

Fig.4 Variable-configuration surgical manipulator



图 5 操作臂构型

Fig.5 Configurations of the manipulator

2.2 操作臂传动系统

本文所提出手术操作臂的 7 + 1 自由度结构需经穿刺器探入体内实施手术操作,因此,需要满足体表微小切口和体内狭小空间的约束,并可实现精准传动以及力传递.为满足上述设计需求,操作臂采用丝传动方式设计实现,其具有传动背隙小、易于布置的特点,有利于实现狭长空间内的远距离传动.

操作臂传动结构如图 6 所示,开合关节采用开环丝传动形式,其余关节均采用闭环丝传动形式.自转、臂摆动、末端自转 3 关节均分别由一组对偶布列的钢丝驱动,腕偏转关节由两组垂直布列的对偶镍钛合金丝驱动,并均与对应的驱动轴组成闭环丝传动结构;伸缩关节布置在操作臂的中心处,可沿臂轴线滑动,其传动由等效齿轮齿条功能的闭环丝传动结构实现;开合关节传动结构由一根带有复位弹簧的钢丝与

对应驱动轴组成,其钢丝布列于操作臂的中心线上,因此该关节与其余关节传动互不影响,实现机械传动解耦.操作臂伸缩关节运动时,由于摆动关节长度不变,伸缩臂的整体长度不变,因此,各关节传动丝的长度不因操作臂的伸缩运动而发生变化,从而实现伸缩臂与腕及开合关节的传动解耦.臂旋转关节传动相对独立,因此不与其他关节耦合.末端自转、偏转和摆动 3 关节间存在线性耦合,通过驱动补偿可实现关节间传动解耦.

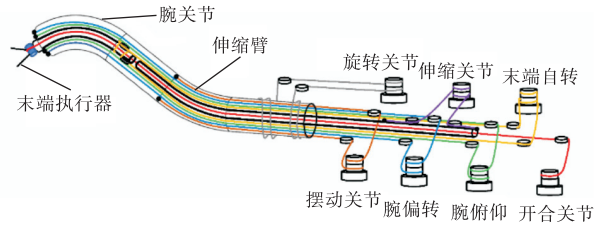


图 6 操作臂传动系统

Fig.6 Drive system of the manipulator

操作臂的主要传动形式为闭环丝传动,其中丝轮结构控制臂旋转,传动丝经由关节中丝孔的导向与传动控制开合、末端自转、腕偏转、臂摆动、臂伸缩等运动,传动丝与丝孔可以看作丝鞘传动结构.开合关节的传动丝布置于操作臂的中心位置,是行程最大的丝传动结构,其传动精度和传递效率受到丝与鞘之间的传动摩擦及丝的弹性伸长量的影响最大,因此,本文从开合关节入手对操作臂的丝鞘传动特性进行分析.

丝鞘传动可以分为定曲率丝鞘传动与变曲率丝鞘传动,具体结构示意如图 7 所示.首先对定曲率丝鞘传动进行受力分析,如图 8 所示.由力平衡关系可知输入端传动丝张力与任意位置处传动丝张力的关系为

$$T(x) = T_m e^{-\frac{\mu}{r_s} x} \tag{1}$$

式中: $T(x)$ 为传动丝 x 位置处的张力; T_m 为输入端传动丝张力; r_s 为丝鞘曲率半径; μ 为丝轮间摩擦系数.

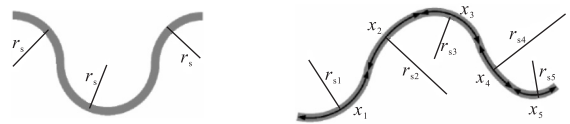


图 7 丝鞘传动结构

Fig.7 Structure of cable-sheath transmission

考虑传动丝内有预紧力 T_0 时,定曲率丝鞘结构中传动丝的弹性伸长量为

$$\delta(x) = \int_0^x \frac{T(x) - T_0}{EA} dx =$$

$$\frac{r_s}{\mu EA}(T_{in} - T_{out}) - \frac{T_0 x}{EA} \quad (2)$$

式中: T_{out} 为输出端传动丝的张力; E 表示传动丝的弹性模量; A 表示传动丝的等效截面积.

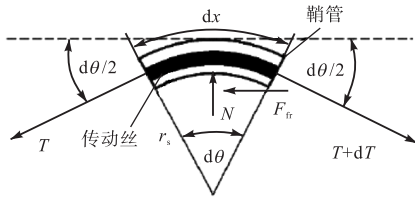


图 8 丝鞘传动结构的受力分析

Fig.8 Force analysis of the cable-sheath transmission structure

变曲率丝鞘传动结构由 n 段不同曲率的弯曲单元组成, 每个弯曲单元对应的曲率半径为 r_{si} , 由丝鞘输入端到任意位置的长度可表示为 x_i . 变曲率丝鞘结构可视为多个定曲率丝鞘结构的叠加, 因此, 由式 (1), 可推导出变曲率丝鞘结构输入端传动丝张力与任意位置处传动丝张力的关系为

$$T(x) = T_{in} e^{-\frac{\mu}{r_{s1}}x_1 - \frac{\mu}{r_{s2}}(x_2-x_1) - \dots - \frac{\mu}{r_{s(n-1)}}(x_{n-1}-x_{n-2}) - \frac{\mu}{r_{sn}}(x-x_{n-1})} \quad (3)$$

$x_{n-1} < x < x_n$

由式 (2), 可推导传动丝在变曲率丝鞘结构中的弹性伸长量为

$$\delta(x) = \begin{cases} \frac{r_{s1}}{\mu EA}(T_{in} - T_{o1}) - \frac{T_0 x}{EA} = \frac{r_{s1} T_{in}}{\mu EA} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{s1}}x}\right) - \frac{T_0 x}{EA} & 0 < x \leq x_1 \\ \frac{r_{s1}}{\mu EA}(T_{in} - T_{o1}) + \frac{r_{s2}}{\mu EA}(T_{o1} - T_{o2}) - \frac{T_0 x}{EA} = \frac{T_{in}}{\mu EA} \left(r_{s1} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{s1}}x_1}\right) + r_{s2} e^{-\frac{\mu}{r_{s1}}x_1} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{s2}}(x-x_1)}\right) \right) - \frac{T_0 x}{EA} & x_1 < x \leq x_2 \\ \vdots \\ \frac{T_{in}}{\mu EA} \left(r_{s1} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{s1}}x_1}\right) + \sum_{j=1}^{n-1} r_{sj} e^{-\mu \sum_{j=1}^i (x_{j-1} - x_{j-2})} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{sj}}(x-x_{j-1})}\right) + r_{sn} e^{-\mu \sum_{j=1}^n (x_{j-1} - x_{j-2})} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{r_{sn}}(x-x_{n-1})}\right) \right) - \frac{T_0 x}{EA} & x_{n-1} < x \leq x_n \end{cases} \quad (4)$$

式中 $T_{o1}, T_{o2}, \dots, T_{on}$ 分别为丝鞘 x_1, x_2, \dots, x_n 处的传动丝张力.

操作臂开合关节的丝鞘传动结构为变曲率丝鞘传动结构, 如图 9 所示. 该结构可分为 4 段: 第 1 段为长度 $l_1 - \Delta l$ 的直线段; 第 2 段为长度 l_e 的曲线段, 其半径与弯曲角度分别为 r_c 与 θ_{s3} ; 第 3 段为长度 $l_2 + \Delta l$ 的直线段; 第 4 段为长度 l_w 的曲线段, 其半径与弯曲角度分别为 r_w 与 θ_{s6} .

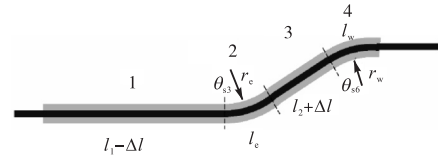


图 9 开合关节丝鞘传动结构

Fig.9 Cable-sheath transmission structure of open and closed joints

基于丝鞘受力分析和胡克定律, 推导出操作臂开合关节丝鞘传动的输出力 T_{mcout} 和弹性伸长量 δ_{mc} 关系为

$$T_{mcout} = T_{mcin} e^{-\mu_{mc}(|\theta_{s3}| + |\theta_{s6}|)} \quad (5)$$

$$\delta_{mc} = \frac{r_c T_{mcin}}{\mu_{mc} E_{mc} A_{mc}} \left(1 - e^{-\mu_{mc} |\theta_{s3}|}\right) + \frac{r_w T_{mcin} e^{-\mu_{mc} |\theta_{s3}|}}{\mu_{mc} E_{mc} A_{mc}} \left(1 - e^{-\mu_{mc} |\theta_{s6}|}\right) + \frac{1}{E_{mc} A_{mc}} (T_{mcin} (l_1 - \Delta l) + T_{mcin} e^{-\mu_{mc} |\theta_{s3}|} (l_2 + \Delta l) - T_{mc0} (l_1 + l_e + l_2 + l_w)) \quad (6)$$

式中: T_{mcin} 为输入力; T_{mc0} 为丝鞘预紧力; μ_{mc} 为丝鞘的摩擦系数; E_{mc} 为丝鞘的弹性模量; A_{mc} 为丝鞘的等效截面积.

操作臂开合关节丝鞘传动设计参数如表 1 所示. 通过将上述参数代入式 (5)、(6) 中, 可以对摩擦系数、弯曲角度、预紧力对丝鞘特性的影响进行分析.

表 1 开合关节丝鞘传动设计参数

Tab.1 Design parameters of the cable-sheath transmission structure for the open and closed joints

参数	数值
$l_1, l_2, \Delta l, l_e, l_w / \text{mm}$	314, 59.4, 10, 19, 18
$\theta_{s3} / (^\circ)$	-80 ~ 80
$\theta_{s6} / (^\circ)$	-80 ~ 80
s_{mc} / mm	5
T_{mcin} / N	77
E_{mc} / MPa	193 000
A_{mc} / mm^2	0.196 2

由式 (5) 可知, 当输入张力一定, 输出力随着摩擦系数和丝鞘弯曲角度的增加而逐渐减小. 从图 10 中可得, δ_{mc} 与 μ_{mc} 、 θ_{s3} 、 θ_{s6} 和 T_{mc0} 呈负相关, 因此, 可以通过增加摩擦系数、弯曲角度和预紧力的方式降低弹性伸长量; 由 θ_{s6} 对于 δ_{mc} 的影响小于 θ_{s3} 对于 δ_{mc} 的

影响可知：越靠近输入端，丝鞘弯曲对弹性伸长量的影响越大； θ_{s3} 、 θ_{s6} 对 δ_{mc} 的影响随着 μ_{mc} 的减小而逐

渐减小，因此，当摩擦系数较小时，弯曲角度对弹性伸长量只有有限的影响。

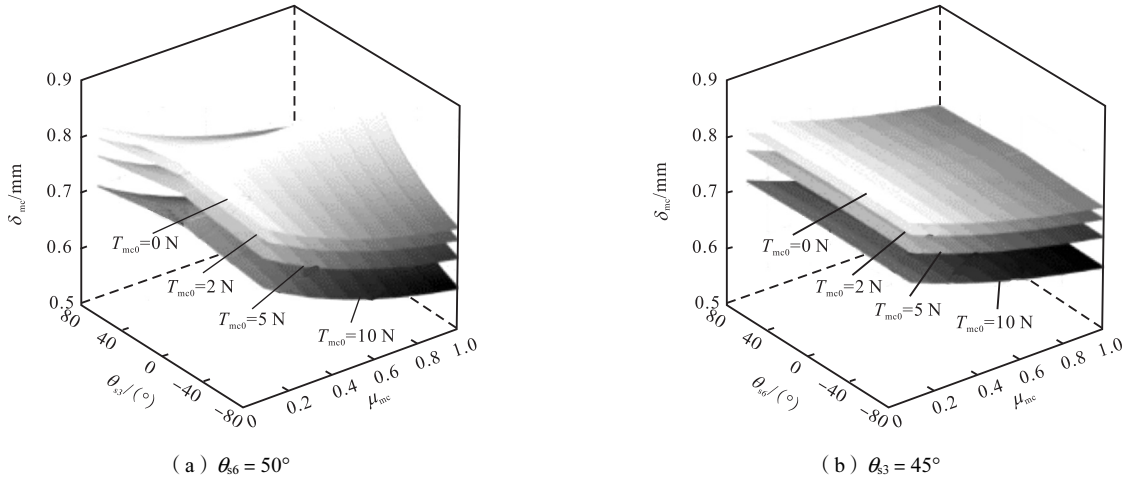


图 10 丝鞘弹性伸长量变化

Fig.10 Variation in elastic elongation of the cable-sheath structure

2.3 工作空间分析

手术操作臂具有 7 + 1 个自由度，其自由度分布及坐标系建立如图 11 所示，其中 d_{s1} 为移动关节的平移量， θ_{s2} 为操作臂整体旋转角度， θ_{s3} 为臂摆动关节的弯曲角度， ϕ_{s5} 和 θ_{s6} 为腕偏转关节的弯曲方向角度和弯曲角度， θ_{s7} 为末端旋转角度， Δl 为伸缩关节的变化长度， l_e 为臂摆动关节的长度， l_w 为腕关节的长度，

l_1 为基座距臂摆动关节的初始长度， l_2 为臂摆动关节距腕关节的初始长度， l_3 为末端自转关节距执行器的长度。操作臂在进入腹腔的过程中相继呈现 4 种构型，操作臂在不同构型状态下的正运动学方程可由坐标齐次变换矩阵求得，如表 2 所示。由于操作臂的工作空间以穿刺点为起点，在腹腔中展开，所以以穿刺点为基准点，设置 $l_1 = 0$ 。

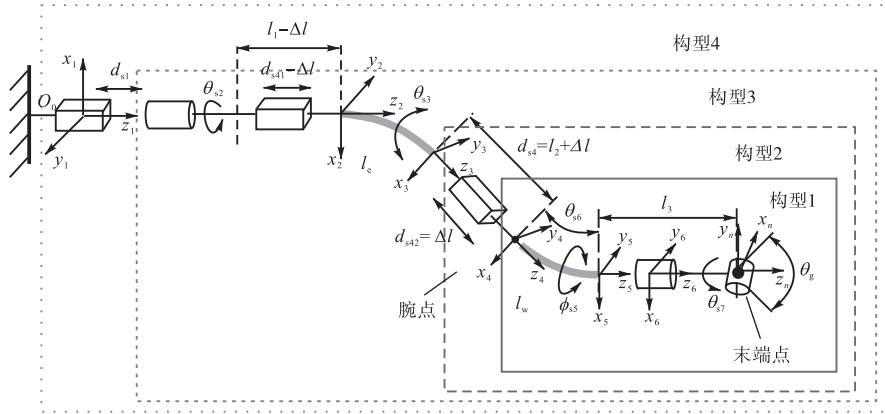


图 11 变构型手术操作臂关节布置和坐标系

Fig.11 Layout and coordinates of the variable-configuration surgical manipulator

表 2 变构型操作臂正运动学模型

Tab.2 Forward kinematic models of the variable-configuration manipulator

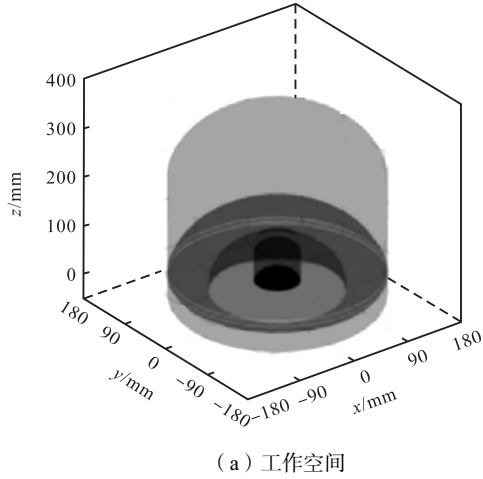
操作臂构型	正运动学模型
构型 1	$T_1 = T_5^4 T_6^2 T_n^6$
构型 2	$T_2 = T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_n^6$
构型 3	$T_3 = T_2^{1'} T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_n^6$
构型 4	$T_4 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_n^6$

变构型手术操作臂的工作空间由正运动学模型

取得，如图 12 所示。其中：①表示操作臂为构型 1(图 5(a) 所示)时的工作空间，空间顶部为一个圆弧面，可适应小范围灵活作业；②表示操作臂为构型 2(图 5(b) 所示)时的工作空间，空间为两侧为圆弧面的柱形空间；③表示操作臂为构型 3(图 5(c) 所示)时的工作空间，空间为内凹半球形；④表示操作臂为构型 4(图 5(d) 所示)时的工作空间，空间下表面为类圆弧面的柱形空间，上表面为圆弧面。构型 1 和构型 2 的工作空间明显小于构型 3 和构型 4 的工作空间；构型

3 的工作空间完全容纳于构型 4 的工作空间内,而构型 1 和构型 2 的工作空间在构型 4 的工作空间外,它们彼此独立且互补.

图 13 所示为伸缩关节移动量分别取 $\Delta l = 0 \text{ mm}$,



$\Delta l = 20 \text{ mm}$ 和 $\Delta l = 40 \text{ mm}$ 时,操作臂在构型 3 和构型 4 下的工作空间示意. 由图中可以看出,操作臂工作空间的大小可以通过改变伸缩关节的长度而变化,从而实现操作臂工作空间可变功能.

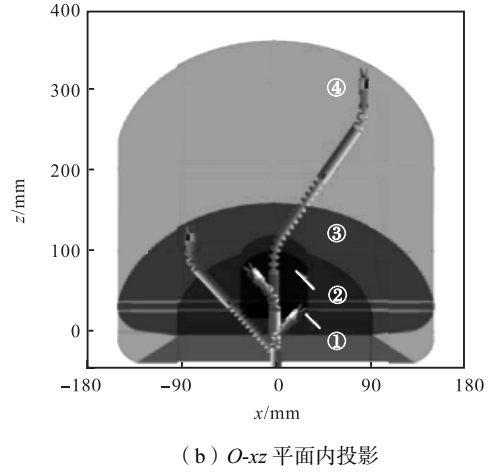


图 12 变构型手术操作臂工作空间
Fig.12 Workspace of the variable-configuration surgical manipulator

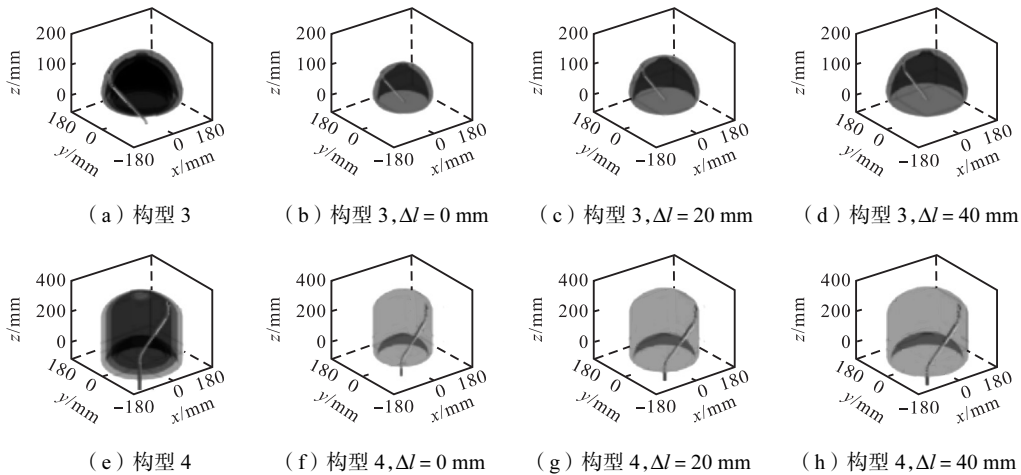


图 13 手术操作臂可变工作空间
Fig.13 Variable workspace of the surgical manipulator

3 主从映射模型

本文基于所提出的手术操作臂的构型特点,设计了与之相适配的主操作臂,建立了基于位姿分离的主从运动映射模型,构建了手术机器人系统主从运动控制流程.

3.1 主操作臂设计

为实现精确、实时、安全的主从操作,本文设计了一种与从操作臂腕关节同构的主操作臂,如图 14 所示,该操作手主要由 3 自由度肩部关节与 3 自由度腕部关节组成,前者用于位置调整,后者用于姿态调整. 图中, $\theta_{m1} \sim \theta_{m3}$ 为肩关节转动角度, θ_{m41} 、 θ_{m42} 为

主动调整关节转动角度, $\theta_{m5} \sim \theta_{m7}$ 为腕部关节转动角度. 在构型上,腕部关节与从操作臂腕部保持一致,且各自关节轴线都相交于一点. 臂部关节和腕部关节之间设置了 2 个主动调整关节,上述关节由驱动电机驱动且轴线垂直相交,交点与主操作臂的腕点重合. 这两个主动关节用于保证主手腕点姿态与从手腕点姿态的一致性,以实现在关节空间内主从姿态映射. 从手末端执行器的开闭由腕关节末端的开合关节进行控制. 主手的臂部关节与腕部关节均为由操作者实时控制的被动关节,为整个机器人系统提供运动输入;2 个主动关节根据从手腕点的姿态信息实时调整主手的腕部关节姿态,可使主从腕点姿态始终保持一致;在各个关节上均安装有编码器用来实时采集

关节的转角信息。

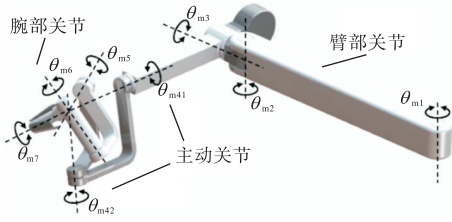


图 14 主手操作臂结构

Fig.14 Structure of the master manipulator

本文所设计的主手的特点有：①主手腕部关节与从手腕部关节的自由度一一对应；②设置有两个主从调节关节，保证了主手腕点姿态与从手腕点姿态实时一致；③主手腕部 3 关节汇交于一点，满足运动学逆解的求解条件，实现了主手位置控制与姿态控制的解耦，降低了主从控制算法的复杂程度。

3.2 基于位姿分离的主从映射方法

所提出的变构型手术操作臂为含有柔性关节和刚性关节的冗余自由度操作臂，具有高度的非线性和复杂的耦合性，运动学求解过程复杂，不适合直接用于对实时性要求很高的主从运动映射中。

在实际手术操作过程中，随着手术类型的确定，其所需手术工作空间范围也基本确定。所以，在术前可以根据所需要的手术工作空间，对操作臂的工作空间进行调整，使其覆盖手术操作范围。在进行术中操作时，若操作臂可覆盖整个手术范围，则无需对伸缩关节进行调整，此时操作臂拥有 6+1 个自由度；若操作臂不能覆盖手术范围，则需保持末端位置不变，对伸缩关节进行调整，当调整到合适的位置后，仍可锁定伸缩关节，然后进行手术操作。基于上述操作流程，在对主从进行映射分析时，从手设定为 6+1 个自由度的构型，这样既消除了操作臂冗余自由度的影响，又简化了主从运动映射算法，提高了主从控制的效率。

针对主从式手术机器人在实时性、精确性方面的需求，结合变构型手术操作臂和主操作臂的工作特点，本文提出一种基于位姿分离的主从运动映射方法。主从手操作臂映射关系如图 15 所示。基于变构型手术操作臂在术中的操作特点，可将其看作由 3 自由度臂关节和 3 自由度腕关节组成的操作臂；与主手的设计相结合，使主从操作臂腕关节拥有同样的自由度布置，并利用主手的两个主动调整关节，使主从操作臂的腕点姿态实时地保持一致；从手末端点的空间位姿可由主手的输入和主从映射关系得到。在此基础上，可知在主从腕关节的自由度分布相同且主从手

腕点姿态一致的情况下，要使主从手末端点姿态保持一致，就必须使从手腕关节的关节量与主手腕关节的关节量相等，即主从手腕部关节在主从操作中完全“一一对应”，进而完成主从手姿态在关节空间内的映射。关节空间指的是主端关节与从端关节直接进行对应，而不需要经过运动学与矩阵变换在笛卡尔空间中对应。在已知从手末端点位姿和腕关节姿态的前提下，可确定腕点空间位姿，并根据腕点位姿求出臂关节的关节量，进而实现笛卡尔空间中主从位置的映射。

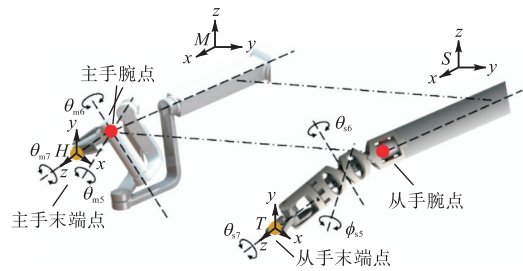


图 15 主从操作臂映射关系

Fig.15 Mapping between the master and slave manipulators

基于上述分析结果，并结合主从位置比例增量映射算法，变构型手术机器人系统的主从运动映射关系可表示为

$$\begin{cases} \Delta p_T^S = K_{MS} \left((R_S^E)^{-1} \cdot R_M^D \cdot \Delta p_H^M \right) \\ \theta_{sw5} = \theta_{m5} \\ \theta_{sw6} = \theta_{m6} \\ \theta_{sw7} = \theta_{m7} \end{cases} \quad (7)$$

式中：\$\Delta p_T^S\$ 表示从手端位置增量在从手端基坐标系 \$S-xyz\$ 下的描述；\$R_S^E\$ 表示从手端基坐标系 \$S-xyz\$ 到内窥镜坐标系 \$Q-xyz\$ 的转换矩阵；\$R_M^D\$ 表示主手端基坐标系 \$M-xyz\$ 到显示器坐标系 \$D-xyz\$ 的转换矩阵；\$\Delta p_H^M\$ 表示主手端位置增量在主手端基坐标系 \$M-xyz\$ 下的描述；\$K_{MS}\$ 为主从位置映射比例；\$\theta_{sw5}\$、\$\theta_{sw6}\$ 和 \$\theta_{sw7}\$ 分别表示从手腕部 3 个关节的期望关节量；\$\theta_{m5}\$、\$\theta_{m6}\$ 和 \$\theta_{m7}\$ 分别表示主手腕部 3 个关节的实际关节量。主从姿态之间的直觉映射在关节空间中完成，而主从位置调整运动在笛卡尔空间内实现直觉性、比例与增量映射。主从控制中添加有不同大小的主从运动比例系数，以满足不同种类手术的操作需求，主从运动比例系数 \$K_{MS}\$ 可设定为 1:1、3:1 和 5:1。

通过布置于主手关节处的编码器，采集主手各关节的运动信息，并通过主手正运动学解算其末端点的位姿，根据图像下的主从映射表达式 (7) 便可以得到从手的期望位姿 \$T_n^0\$。由于主手直接控制从手的姿态

变化,确定了操作臂末端坐标系到操作臂腕点坐标系的变化 T_n^4 ,操作臂的腕点位姿便唯一确定. T_n^4 可表示为

$$T_n^4 = \begin{bmatrix} n_x^{4n} & s_x^{4n} & o_x^{4n} & d_x^{4n} \\ n_y^{4n} & s_y^{4n} & o_y^{4n} & d_y^{4n} \\ n_z^{4n} & s_z^{4n} & o_z^{4n} & d_z^{4n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} n_x^{4n} &= \sin \theta_{s7} ((\cos \theta_{s6} - 1) \cos^2 \phi_{s5} + 1) - \cos \phi_{s5} \cos \theta_{s7} \sin \phi_{s5} (\cos \theta_{s6} - 1) \\ n_y^{4n} &= \cos \phi_{s5} \sin \phi_{s5} \sin \theta_{s7} (\cos \theta_{s6} - 1) - \cos \theta_{s7} (\cos \theta_{s6} - \cos^2 \phi_{s5} (\cos \theta_{s6} - 1)) \\ n_z^{4n} &= \sin(\phi_{s5} - \theta_{s7}) \sin \theta_{s6} \\ s_x^{4n} &= \cos \theta_{s7} ((\cos \theta_{s6} - 1) \cos^2 \phi_{s5} + 1) + \cos \phi_{s5} \sin \phi_{s5} \sin \theta_{s7} (\cos \theta_{s6} - 1) \\ s_y^{4n} &= \cos \phi_{s5} \sin \phi_{s5} \cos \theta_{s7} (\cos \theta_{s6} - 1) + \sin \theta_{s7} (\cos \theta_{s6} - \cos^2 \phi_{s5} (\cos \theta_{s6} - 1)) \end{aligned}$$

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} -\cos \theta_{s2} \cos \theta_{s3} & \sin \theta_{s2} & -\cos \theta_{s2} \sin \theta_{s3} & l_e \cos \theta_{s2} (\cos \theta_{s3} - 1) / \theta_{s3} - \cos \theta_{s2} \sin \theta_{s3} (l_2 + \Delta l) \\ -\sin \theta_{s2} \cos \theta_{s3} & -\cos \theta_{s2} & -\sin \theta_{s2} \sin \theta_{s3} & l_e \sin \theta_{s2} (\cos \theta_{s3} - 1) / \theta_{s3} - \sin \theta_{s2} \sin \theta_{s3} (l_2 + \Delta l) \\ -\sin \theta_{s3} & 0 & \cos \theta_{s3} & l_1 - \Delta l + d_{s1} + \cos \theta_{s3} (l_2 + \Delta l) + l_e \sin \theta_{s3} / \theta_{s3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由式(11)与式(12)对应元素相等,由此可求得操作臂前3个关节的关节量,即

$$\begin{cases} d_{s1} = d_z^{04} - l_1 + \Delta l - \cos \theta_{s3} (l_2 + \Delta l) - l_e \sin \theta_{s3} / \theta_{s3} \\ \theta_{s2} = a \tan [2(s_x^{04}, -s_y^{04})] \\ \theta_{s3} = a \tan [2(-n_z^{04}, o_z^{04})] \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)便可得到在从手末端的期望位姿下,操作臂前3个关节的关节量.

为保证主从姿态实时一致,并能够在关节空间内实现运动映射,需要确保主操作臂腕点的姿态与从操作臂腕点的姿态一致,其姿态对应关系可表示为

$${}^M R_4^0 = ({}^R_M D)^{-1} \cdot {}^R_S E \cdot {}^S R_4^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{21} & r_{21} \\ r_{31} & r_{31} & r_{31} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: ${}^M R_4^0$ 为主操作臂腕点坐标系在其基座坐标系下的描述; ${}^S R_4^0$ 为从操作臂腕点坐标系在其基座坐标系下的描述. 由于显示器与主手和内窥镜与从手的相对位置固定,因此, ${}^R_M D$ 和 ${}^R_S E$ 为确定的变换矩阵. 可由式(14)得到参数 d_{s1} 、 θ_{s2} 与 θ_{s3} , 且 d_{s4} 为常量,可由从手的正运动求得 ${}^S R_4^0$, 进而求得式(14)的右侧. 通过式(14)两侧对应元素相等,可求得主操作臂两个主动调

$$\begin{aligned} s_z^{4n} &= -\cos(\phi_{s5} - \theta_{s7}) \sin \theta_{s6} \\ o_x^{4n} &= \cos \phi_{s5} \sin \theta_{s6} \\ o_y^{4n} &= \sin \phi_{s5} \sin \theta_{s6} \\ o_z^{4n} &= \cos \theta_{s6} \\ d_x^{4n} &= l_3 \cos \phi_{s5} \sin \theta_{s6} - (l_w \cos \phi_{s5} (\cos \theta_{s6} - 1)) / \theta_{s6} \\ d_y^{4n} &= l_3 \sin \phi_{s5} \sin \theta_{s6} - (l_w \sin \phi_{s5} (\cos \theta_{s6} - 1)) / \theta_{s6} \\ d_z^{4n} &= l_3 \cos \theta_{s6} + l_w \sin \theta_{s6} / \theta_{s6} \end{aligned}$$

由坐标间的变换矩阵可知:

$$T_n^0 = T_4^0 T_n^4 \quad (9)$$

$$T_4^0 = T_n^0 (T_n^4)^{-1} \quad (10)$$

式中 T_4^0 为操作臂腕点坐标系到操作臂基坐标系的变换. 进而可以求得 T_4^0 为

$$T_4^0 = \begin{bmatrix} n_x^{04} & s_x^{04} & o_x^{04} & d_x^{04} \\ n_y^{04} & s_y^{04} & o_y^{04} & d_y^{04} \\ n_z^{04} & s_z^{04} & o_z^{04} & d_z^{04} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

另外,根据坐标间的齐次变换可得

整关节的运动量为

$$\begin{cases} \theta_{m41} = \arccos(r_{33} / \cos \theta_{m3}) \\ \theta_{m42} = \arctan \left[2 \left(\frac{r_{31} \cos \theta_{m3} \sin \theta_{m41} + r_{32} \sin \theta_{m3}}{r_{32} \cos \theta_{m3} \sin \theta_{m41} - r_{31} \sin \theta_{m3}} \right) \right] \end{cases} \quad (15)$$

基于上述分析,在主从运动中 ${}^S R_4^0$ 实时变化,而 ${}^M R_4^0$ 随 ${}^S R_4^0$ 实时调整,由运动学求取主操作臂2个主动调整关节的运动量,并利用电机驱动关节运动,实现主从式关节的实时同步一致,从而保证了主从姿态关节空间内映射的准确性.

所提出的基于位姿分离的主从运动映射方法,通过对主从操作臂腕关节的同自由度配置设计及主从手腕点姿态的保持,实现了主从运动中位置和姿态的分离,使主从手姿态在关节空间内实现一一映射,降低了运动学的计算量,提高了主从实时控制精度,而主从位置映射则通过运动学计算在笛卡尔空间内实现. 比例和增量控制用于主从位置映射,实现主从位置的精准控制,确保医生操作的舒适性和精准性.

4 实验研究

基于本文提出的变构型手术操作臂设计理念和方方法,研制了变构型手术机器人系统的物理样机. 其

操作臂直径为 9.5 mm, 总长为 560 mm, 其中传动装置尺寸为 125 mm × 60 mm × 40 mm, 采用医用不锈钢、铝合金、碳纤维管等材料, 总质量为 230 g; 操作臂驱动电机为 Maxon DC-16, 控制器为 Delta Tau Data System 公司的 Turbo PMAC, 采用网电源供电. 基于物理样机对其运动性能、主从运动性能、操作性能进行了测试, 以验证系统的运动灵活性、操作精准性、实施复杂手术操作的安全性和有效性.

4.1 刚度性能实验

本文所提出的变构型手术操作臂中, 臂摆动关节与腕偏转关节为柔性关节, 而这种关节对于机械臂整体的刚度有着重要的影响. 因此, 本节旨在对该操作臂的刚度性能进行测试与分析.

刚度性能测试装置如图 16 所示, 主要由操作臂、驱动装置、计算机以及测力计组成. 测力计与操作臂末端通过竖直布置的钢丝相连, 测试负载被设定为 2 N. 在关节不产生塑性变形的情况下, 测试关节的最大承载能力, 并记录操作臂末端的力-位移曲线. 腕关节具有 2 个自由度, 分别为 ϕ_{s5} 与 θ_{s6} . 选取表 3 中的自由度组合进行刚度测试, 测试结果如图 17 所示. 从测试结果可以看出, 在腕关节处于水平位置时, 即 $\phi_{s5} = 0^\circ$, $\theta_{s6} = 0^\circ$ 时, 关节刚度最低, 为 0.71 N/mm, 此时最大承载力为 5 N; 当 $\phi_{s5} = 0^\circ$, $\theta_{s6} = 60^\circ$ 时, 关节刚度最高, 为 2.73 N/mm.

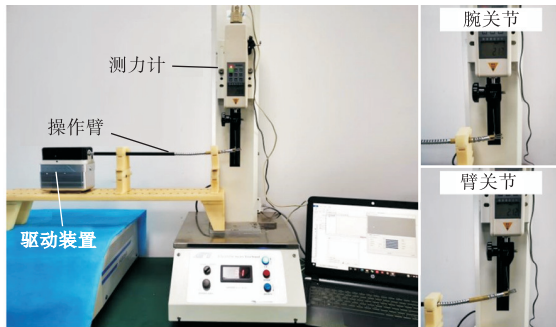


图 16 操作臂刚度测试
Fig.16 Manipulator stiffness test

表 3 腕关节刚度测试姿态
Tab.3 Postures of the wrist stiffness test

组合编号	$\phi_{s5}/(^\circ)$	$\theta_{s6}/(^\circ)$
1	0	0
2	0	30
3	0	60
4	45	45
5	90	45
6	135	45
7	180	45

在对臂摆动关节进行刚度测试时, 需要将伸缩关

节伸展到最长值, 即使臂摆动关节到达执行末端的最远位置. 如果在此位置下, 操作臂的刚度能够满足要求, 那么操作臂的其余长度也会满足刚度要求. 测试将针对不同臂摆动关节角度 (60° 、 30° 、 0° 、 -30° 、 -60°) 下的刚度进行. 测试结果如图 18 所示, 当臂摆动关节角度为 0° 时, 关节刚度达到最低值, 为 0.21 N/mm. 随着关节角度的增大, 关节刚度逐渐增加, 当角度为 60° 时, 关节刚度可达到 0.57 N/mm. 摆动关节处于水平位置时, 最大承载力为 4 N.

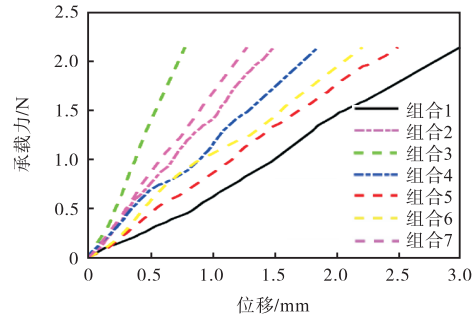


图 17 腕关节刚度
Fig.17 Stiffness of the wrist joint

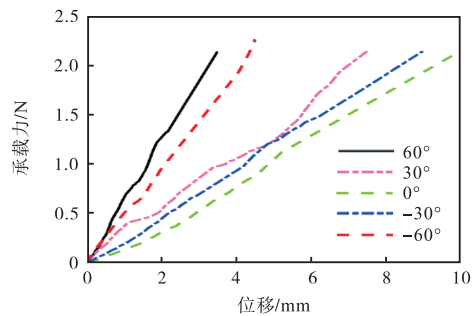


图 18 臂摆动关节刚度
Fig.18 Stiffness of the arm deflection joint

根据相关文献^[16-17]所述, 手术中实施钝性分离操作时, 通常需要施加约 5 N 的操作力, 而提起 1/3 的人类肝脏则需要牵引力达到 4 N 及以上. 因此, 操作臂的腕关节和臂摆动关节的刚度满足临床手术的要求.

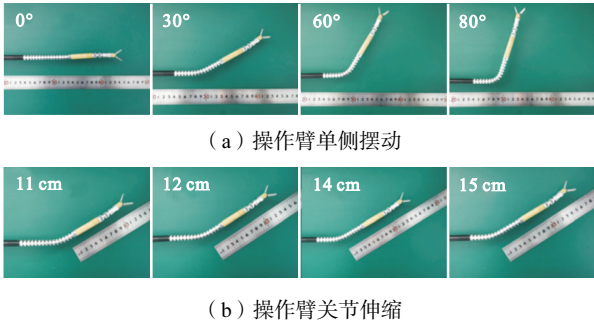
4.2 运动性能

微创手术机器人运动的可达性、灵活性和精准性是实现精细手术操作的关键, 因此, 本文以变构型手术操作臂为研究对象, 验证其运动性能.

所设计的变构型手术操作臂具有 7 + 1 个自由度, 其中操作臂的摆动关节和伸缩关节的运动范围直接决定了操作臂工作空间的大小, 是操作臂实现工作空间变换的关键, 因此, 本文主要测试摆动关节和伸缩关节的运动范围.

操作臂在单侧的摆动范围为 (0° , 80°), 如图 19(a) 所示, 具有较大的操控范围. 在图 19(b) 中, 通

过改变伸缩关节的长度,使摆动关节相对于操作臂末端的位置发生改变,其位置边界为(11 cm, 15 cm),在上述伸缩关节运动的过程中,操作臂的整体长度并不会发生改变,仅改变了摆动关节的相对位置.在图 20 所示的实验中,对 4 种构型的操作臂进行了验证.通过控制经过穿刺器不同的关节数目,实现了构型之间的变换,实验结果表明,本文提出的操作臂具有变换能力强、可运动空间大的特点.



(a) 操作臂单侧摆动

(b) 操作臂关节伸缩

图 19 关节运动范围

Fig.19 Ranges of joint motion

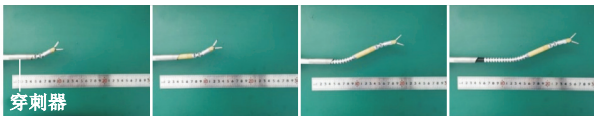


图 20 操作臂构型变换验证

Fig.20 Verification of the manipulator configuration transformation

4.3 主从运动性能实验

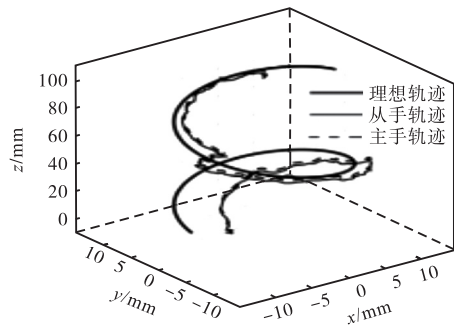
为评估机器人的主从运动性能,本文设计了主从轨迹跟踪实验,如图 21 所示.使用 3D 打印工艺制备了螺旋曲线模型,其直径为 20 mm,导程为 60 mm,线程为 3 mm,高为 9 mm.选取 5 名惯用右手并且没有手术机器人操作经验的人员,对其进行 30 min 的培训,随后参与人员操作主操作手控制机器人从端按照螺旋线的轨迹运动.实验中,机器人主从映射比例系数设置为 1 : 1,并且在主手与从手的结构末端布置 NDI Aurora 电磁传感器用来记录二者的运动轨迹.在从手运动过程中,电磁传感器始终碰触螺旋模型,以保证记录数据的准确性.上述实验过程,每组重复 3 次,以实际轨迹与标准螺旋线之间的偏差作为评价指标.

如图 22 所示,将一位实验人员的主从运动轨迹数据置于同一坐标系中进行分析,从图中可以看到,主从端的运动轨迹一致、平滑且连续,表明该机器人

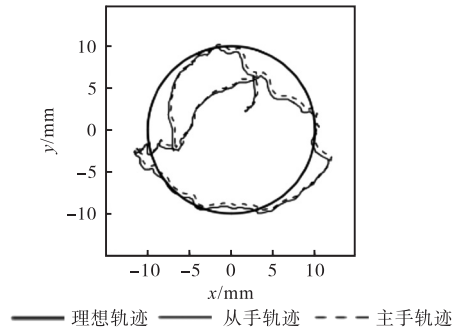


图 21 主从轨迹跟踪实验

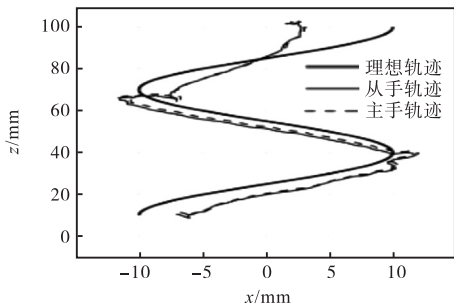
Fig.21 Master-slave trajectory tracking experiment



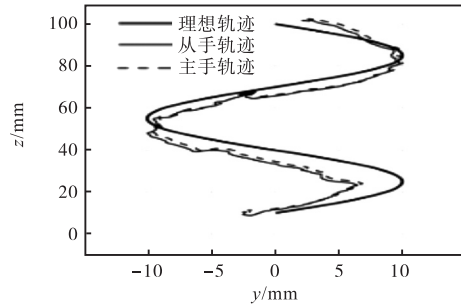
(a) 空间内运动轨迹



(b) O-xy 坐标平面内轨迹投影



(c) O-xz 坐标平面内轨迹投影



(d) O-yz 坐标平面内轨迹投影

图 22 主从运动轨迹跟踪结果

Fig.22 Result of master-slave trajectory tracking

可以将操作者手部的动作准确地传递到从端,操作者可以控制该机器人完成复杂的空间曲线运动,表现出了较好的灵活性与主从一致性,证明了主从映射模型的可行性。

考虑到螺旋模型的线径为 3 mm,模型表面与其中心线之间存在 1.5 mm 的固有偏差,所以去掉上述固有偏差之后即为机器人的运动精度。如表 4 所示,机器人的平均跟踪精度为 (2.46 ± 0.16) mm。相关研究^[18]对手持式手术机器人与普通腹腔镜器械的螺旋运动轨迹跟踪精度进行了测定,分别为 (3.22 ± 0.33) mm 与 (3.81 ± 0.37) mm,均小于本文提出的手术机器人系统的精度。相关实验^[19]也对 da Vinci 系统的主从运动精度进行了测定,结果显示其平均定位精度为 (1.02 ± 0.58) mm,最大定位误差为 2.72 mm,略高于本机器人系统。分析原因为:①本文设计的螺旋线较为复杂,增加了控制难度,影响了测试结果;②机器人在制造、装配以及控制上的误差,最终造成了系统的误差。

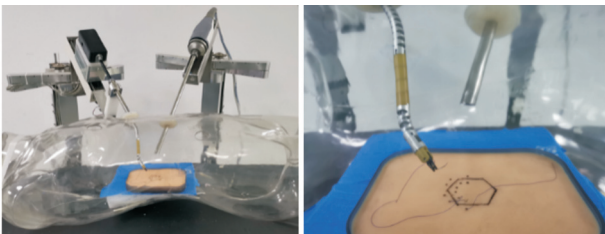
表 4 机器人轨迹跟踪精度

Tab.4 Trajectory tracking accuracy of the robot

实验编号	精度/mm
第 1 次实验组	2.62 ± 0.87
第 2 次实验组	2.84 ± 0.84
第 3 次实验组	2.42 ± 0.61
第 4 次实验组	2.72 ± 0.72
第 5 次实验组	2.59 ± 0.65
平均精度	2.64 ± 0.16

4.4 缝合操作性能评价实验

通过六边形缝合操作评价实验,可以验证手术机器人处理诸如缝合、打结等复杂手术操作的能力,如图 23 所示。为了最大限度地模拟手术操作环境,本实验将类软组织的仿真组织放置于手术模拟器中,采用具有持针器的操作臂进行缝合操作,同时为了适配操作空间,操作臂在构型 4 下实施操作。



(a) 缝合实验场景 (b) 局部放大

图 23 缝合实验场景

Fig.23 Scene of suturing test

实验任务为:沿着六边形两侧标记点完成 6 次连续缝合(缝合针规格:圆针, 1/2, 5 × 12 mm; 缝线规格:

格: 4-0, 20 cm),如图 24 所示,时间限制为 4 min,然后对缝合的质量与数量进行评价。数量分为 0 ~ 12 分,一次缝合记 2 分。质量分为 0 ~ 4 分:0 分为不能实施缝合操作;1 分为能够缝合但是没有穿过任何标记点;2 分为缝合穿过的标记点小于 50%;3 分为缝合穿过的标记点大于 50%;4 分为缝合穿过所有标记点。总技能分为 0 ~ 48 分,总技能分 = 数量分 × 质量分。选取 5 名惯用右手并且没有腹腔镜及手术机器人操作经验的实验者进行本次实验,在实验前对每个参与者进行腹腔镜与手术机器人使用规范培训,时长均为 30 min。

机器人六边形缝合实验如图 25 所示。机器人操作的数量分为 (10.80 ± 1.10) ,质量分为 (3.20 ± 0.45) ,总技能分为 (34.4 ± 4.36) 。基于前期研究^[18],将上述数据与使用手持式机器人与普通腹腔镜器械的结果进行对比,如表 5 所示,并且数据采用 Wilcoxon 符号秩检验对比,当 $p < 0.05$ 时可以视为显著。手持式机器人器械直径 8 mm,长度 385 mm,如图 25(a)所示。普通腹腔镜器械直径 5 mm,长度 330 mm,如图

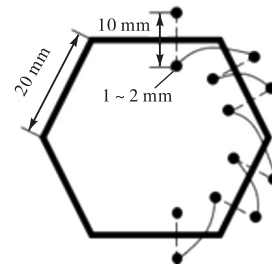


图 24 六边形缝合任务

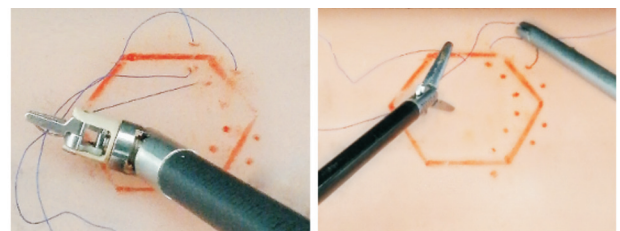
Fig.24 Hexagonal suture task



(a) 手持式机器人器械



(b) 普通腹腔镜器械



(c) 手持式机器人缝合 (d) 普通腹腔镜器械缝合

图 25 手持式机器人与普通腹腔镜器械

Fig.25 Hand-held surgical robot and conventional laparoscopic instrument

25(b)所示,手持式机器人与普通腹腔镜器械缝合操作如图 25(c)、(d)所示。

表 5 六边缝合操作性能对比

Tab.5 Comparison of hexagonal suture performance

实验方式	数量分	质量分	总技能分
机器人	10.80 ± 1.10	3.20 ± 0.45	34.40 ± 4.36
手持式	10.40 ± 1.67, $p = 0.655$	2.80 ± 0.45, $p = 0.157$	28.80 ± 5.02, $p = 0.034$
普通器械	7.60 ± 1.67, $p = 0.046$	2.20 ± 0.45, $p = 0.025$	17.20 ± 7.43, $p = 0.041$

实验结果表明,机器人可以完成复杂情况下多角度缝合操作,并且机械臂持针稳定,其最终缝合效果要好于手持式机器人与普通器械,体现出机器人优越的灵活性与准确性。基于上述实验,本文提出的手术机器人具有灵活度高、可操作性强的特点,并且主从一致性表达准确,可完成复杂的空间运动与手术操作,这些都为后续的临床试验奠定了基础。

5 结 语

机器人辅助微创手术因其操作的精准性、舒适性和安全性而受到医生和患者的青睐,成为微创外科发展的重要路径。本文在分析现有微创手术机器人特点和临床需求的基础上,提出一种变构型微创手术机器人系统,其由变构型手术操作臂、姿态同构的主手和主从控制组成,具有体积小、工作空间范围广、运动精准等特点,满足了临床对机器人体积小且工作空间大的需求,提升了临床术式适应性,对拓展手术机器人临床应用和促进机器人辅助微创手术发展具有重要意义。

微创手术机器人作为医疗装备,需要满足临床安全性和有效性要求。因此,将来的研究工作将围绕生物相容性、承载能力、电气电磁安全性、系统稳定性、疲劳寿命等开展进一步研究,为后续的临床研究奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] Tonutti M, Elson D S, Yang G, et al. The role of technology in minimally invasive surgery: State of the art, recent developments and future directions[J]. Postgraduate Medical Journal, 2017, 93: 159-167.
- [2] Li J M, Wang S X, Wang X F, et al. Optimization of a novel mechanism for a minimally invasive surgery robot [J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2010, 6(1): 83-90.
- [3] Marescaux J, Rubino F. The Zeus robotic system: Experimental and clinical application[J]. Surgical Clinics of North America, 2003, 83: 1305-1315.
- [4] Tamhankar A S, Jatal S, Saklani A. Total robotic radical rectal resection with da Vinci Xi system: Single docking, single phase technique[J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2016, 12(4): 642-647.
- [5] Pennoyer R, Reardon S. Robotic Surgical Systems and Drapes for Covering Components of Robotic Surgical Systems: US, 16638889[P]. 2018-08-16.
- [6] Wang W, Li J M, Wang S X, et al. System design and animal experiment study of a novel minimally invasive surgical robot[J]. International Journal of Medical Robotics & Computer Assisted Surgery, 2016, 12(1): 73-84.
- [7] Li J M, Zhu S H, Juan J, et al. Preliminary exploration of robotic complete mesocolic excision for colon cancer with the domestically produced Chinese minimally invasive Micro Hand S surgical robot system[J]. International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2020, 16(6): 1-8.
- [8] Wang Y, Zheng Y, Wang L, et al. Manipulability-oriented configuration transition control of continuum surgical manipulators based on velocity polytopes[C]// 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Sanya, China, 2021: 533-538.
- [9] Seeliger B, Diana M, Ruurda J P, et al. Enabling single-site laparoscopy: The SPORT platform[J]. Surgical Endoscopy, 2019, 3696-3703.
- [10] Robert R, Zithick D A, Cameron P J K, et al. Articulated Tool Positioner and System Employing Same: US, 10278683[P]. 2019-05-07.
- [11] Wilson J, Shasho J, Kumar N, et al. Robotic Surgical Devices, Systems and Related Method: US, 13833605 [P]. 2020-03-10.
- [12] Shang J Z, Leibrandt K, Giataganas P, et al. A single-port robotic system for transanal micro-surgery—Design and validation[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(3): 1510-1517.
- [13] Leibrandt K, Wisanuvej P, Gras G, et al. Effective manipulation in confined spaces of highly articulated ro-

- botic instruments for single access surgery[J]. IEEE Robotics & Automation Letters, 2017, 2(3): 1704-1711.
- [14] Sachs A, Albert E V, Khalifa S, et al. Devices and Methods for Robotic Assemblies: US, 17236906[P]. 2021-04-21.
- [15] Lowenstein L, Matanes E, Weiner Z, et al. Robotic transvaginal natural orifice transluminal endoscopic surgery for bilateral salpingo oophorectomy[J]. European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology: X, 2020, 7: 100113.
- [16] Golahmadi A K, Khan D Z, Mylonas G P, et al. Tool-tissue forces in surgery: A systematic review[J]. Annals of Medicine and Surgery, 2021, 65: 102268.
- [17] Zhang B Y, Liao Z X, Yang P H, et al. Robotic visible forceps manipulator with a novel linkage bending mechanism[J]. ASME Journal of Mechanisms & Robotics, 2019, 11(1): 011012.
- [18] Yang Y K, Li J M, Kong K, et al. Design and evaluation of a dexterous and modular hand-held surgical robot for minimally invasive surgery[J]. ASME Journal of Medical Device, 2019, 13(4): 041005.
- [19] Kwartowitz D M, Herrell S D, Galloway R L. Toward image-guided robotic surgery: Determining intrinsic accuracy of the da Vinci robot[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2006, 1(3): 157-165.

(责任编辑: 王晓燕)