

DOI: 10.3901/JME.2018.17.036

基于厚板折纸理论的微创手术钳*

杨名远^{1,2} 马家耀^{1,2} 李建民^{1,2} 陈焱^{1,2} 王树新^{1,2}

(1. 天津大学机构理论与装备设计教育部重点实验室 天津 300072;

2. 天津大学机械工程学院 天津 300072)

摘要: 微创手术操作器械, 作为微创手术机器人的重要组成部分, 其性能的优劣直接影响手术的质量。目前的微创手术器械大多是针对手术过程中的夹取、缝合等基本操作设计的, 但由于它们通常是通过简单地将传统外科手术工具小型化获得的, 造成现有微创器械普遍存在着机械效益低、磨损严重、运动不协调等问题。为了提高手术操作的高效性和稳定性, 基于厚板折纸理论设计了一种专门用于微创手术的新型手术钳, 分析与试验表明其可提供多于传统微创手术钳 1.5 倍的夹持力, 并具有更大的张角和更好的运动协调性, 同时增加了手术操作的灵活性。动物试验表明其夹持组织更加稳定可靠。

关键词: 微创手术; 手术夹持工具; 刚性折纸; 厚板折纸; 机械效益

中图分类号: TH112

Thick-panel Origami Inspired Forceps for Minimally Invasive Surgery

YANG Mingyuan^{1,2} MA Jiayao^{1,2} LI Jianmin^{1,2} CHEN Yan^{1,2} WANG Shuxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mechanism Theory and Equipment Design of the Ministry of Education,

Tianjin University, Tianjin 300072;

2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300372)

Abstract: Minimally invasive surgical instruments, as an essential component of surgical robots, play a critical role in the minimally invasive surgery (MIS). Currently most instruments for MIS are designed to realize basic operations such as clipping and stitching. They are often developed by miniaturization of traditional surgical tools, and therefore have the problems of low mechanical efficiency, severe wearing, and poor movement coordination. In order to improve the efficiency and stability of MIS, new surgical tweezers are designed based on origami of thick panel. Analytical and experimental studies show that the new design can offer 1.5 times more clamping force than its conventional counterpart. Furthermore, it has a larger opening angle and better movement coordination, thereby providing better flexibility of operation. Animal trials are also conducted, which confirms that the new device can clamp tissues in a more stable and reliable manner.

Key words: minimally invasive surgery; surgical clamping tools; rigid origami; thick-panel origami; mechanical efficiency

0 前言

微创外科(Minimally invasive surgery, MIS)是通过微小创伤或人体自然腔道, 将特殊器械、物理能量或化学药剂送入人体内部, 完成对人体内病变、畸形、创伤的灭活、切除、修复或重建等外科手术操作, 以达到治疗目的的医学科学分支^[1]。1987年法国医生 MOURET 完成第一例腹腔镜胆囊切除术, 标志着新的微创外科医学的诞生。微创手术相比于传统外科手术具有创伤小、术中出血少、疼痛轻、手术风险低等

诸多优点, 被广泛应用于各个外科领域。

随着机器人相关技术的发展, 微创手术机器人也逐渐被应用于微创手术中, 用于辅佐医生进行微创手术, 从而提高了手术的精确性, 降低了手术风险和医生的疲劳强度。在国际上, 技术相对成熟的微创手术机器人有美国 Intuitive Surgical 公司研制的 Da Vinci(达芬奇)外科手术机器人系统^[2]和 Computer Motion 公司研制的 ZEUS 系统^[3]。国内在微创手术机器人系统的研制上起步较晚, 由天津大学研制的“妙手”系统^[4]——一种主从式操作机器人, 已做过多次动物试验和临床试验, 具有很好的发展前景。

微创手术器械是微创手术机器人的重要组成部分, 在手术过程中手术器械直接作用于患者体内的

* 国家自然科学基金资助项目(51290293, 51575377, 51422506)。20180119 收到初稿, 20180508 收到修改稿

组织或器官以完成特定的手术任务,因此其性能的好坏直接影响手术的质量^[5]。微创手术的手术方式区别于传统外科手术,因此微创手术器械的设计要求也区别于传统手术器械。微创手术钳是微创手术过程中常用的手术器械之一,在尺寸方面:一般的开放外科手术操作空间大,配合医生双手操作,手术钳尺寸较大,长度一般在十几到二十几厘米的范围内;而用于微创手术机器人的手术钳,通常安装于灵活的蛇形关节末端,由于手术开口和器械通道非常小,手术钳的外接圆直径一般在10 mm以内,为增加手术钳在患者体内的操作灵活性,其长度一般在4 cm以内。在功能上:一般的手术钳大致分为持针钳、止血钳、组织钳、帕巾钳、阑尾肠钳、海绵钳、宫颈钳等,不同的手术钳用于不同的手术操作,其缺点是功能单一,需手动更换来满足不同手术操作的需求;微创手术机器人手术钳在手术过程中动作复杂,此外由于其安装于操作臂末端,通过金属丝驱动其在患者体内完成手术操作,这就需要多种功能集成在一种手术钳上,以减少工具切换等复杂操作。

现有微创手术中使用的手术器械存在着结构复杂、功能单一、制造使用成本高等缺点。此外微创手术钳还存在着机械效益低、磨损严重、消毒困难等问题。因此微创手术器械的创新设计对微创手术和微创手术机器人的发展起着不可忽视的作用。

折纸是一项古老的东方艺术,起源于中国,可追溯到公元583年^[6]。折纸科学与工程是一门新兴的前沿研究领域,它可将二维平面材料,如纸张、板壳等通过不同方式的折叠,转变成三维空间结构。

刚性折纸作为折纸的一个子集,在其折叠过程中只发生绕折痕处的转动而不会发生面内变形,因此折痕可视为旋转铰链(R),由折痕包围的纸张可视为连杆^[7]。在折纸图案顶点处,折痕交于一点,可将其视为球面机构,而含有多顶点的折纸折痕则看作是由多个球面机构形成的多环路网格。

由于在工程结构中使用的大部分材料是相对刚性的,所以刚性折纸结构应用潜力巨大,比如在卫星的太阳能电池板、太空天线、飞机机翼、机器人等的设计中。

在医疗器械方面,杨百翰大学(Brigham Young University)HOWELL团队设计了一个名为Oriceps^[8]的折纸手术钳,它由四个球面四杆组成,并通过3D打印制成了连续型模型。该手术钳结构简单,可整体加工,但由于几何设计造成其在闭合情况下机械

效益仅有0.063 2,在金属丝所能承受的极限牵引力下不能满足实际微创手术操作对夹持力的需求。

刚性折纸的球面机构运动学模型是基于纸张的零厚度特征建立的。然而实际工程结构所使用的板材均具有一定的厚度,如果将传统的折纸方法直接用于折叠厚板,则会引起严重的物理干涉,所以现有刚性折纸的运动学模型不能直接用于折叠厚板。

考虑纸张厚度的影响,本文作者^[7]摆脱了原有的折纸运动学模型,通过将顶点处的球面机构替换成空间过约束机构,开创性地提出了全新的厚板折展机构学理论模型。通过对不同折痕顶点及对应厚板模型的运动学分析,发现四、五和六折痕顶点对应的厚板模型可分别等效为Bennett机构^[9-10]、Myard机构^[11]和Bricard机构^[12-13],使得零厚度的折痕分布可以直接应用于折叠厚板;通过对多机构网格逆问题的解析,精确地描述了厚板的折展过程,证明了折纸结构与厚板结构运动学的等价,解决了厚板折纸问题。同时该模型可将多自由度的零厚度折纸模型转化成单自由度的厚板折纸模型,有效简化了结构折展过程所需的驱动与控制。该研究成果具有广阔的应用潜力,可直接用于卫星太阳能帆板、空间天线反射面、建筑结构,以及人体自然腔道狭小空间下手术器械折展机构等的设计^[14]。

在本文中,我们将厚板折纸机构引用到微创手术器械的设计中,开发了一种基于厚板折纸的新型手术钳,有效解决了微创手术钳机械效益低、夹持力不足的问题。

1 新型折纸微创手术钳设计

1.1 折痕分布

现有微创手术钳通过建立在人体自然腔道或微型创口上的器械通道抵达病灶,进而进行一系列手术操作,如夹持组织,缝合伤口等,因此对其外形尺寸以及所能提供的夹持力等有严格的要求,需要保证其闭合状态外接圆直径在10 mm以内,至少能提供10 N的夹持力,并具有40°以上的张角。此外,还需要保证运动具有很好的协调性、精确性和稳定性。

根据上述要求我们设计了由两个对称的五折痕顶点组成的刚性折纸手术钳,其折痕排布和几何尺寸如图1所示。其中,实线表示山线,虚线表示谷线。从图1中可以看出,该折纸手术钳几何上主要由两个梯形、四个三角形及两个五边形组成。定义 d_1 为梯形下底长, d_2 为其高, d_4 为其上底长。 d_3 为五边形顶点到底边长度, d_6 为底边宽,与顶点相邻

两边边长为 d_5 。定义梯形底角 α_{12} ，三角形顶角 α_{23} ，五边形顶角 α_{34} 。至此，此手术钳的几何尺寸可完全确定。

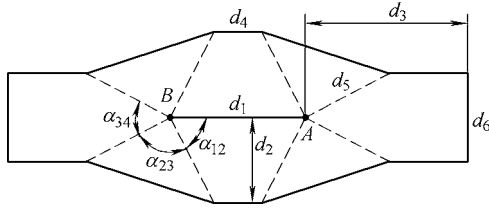
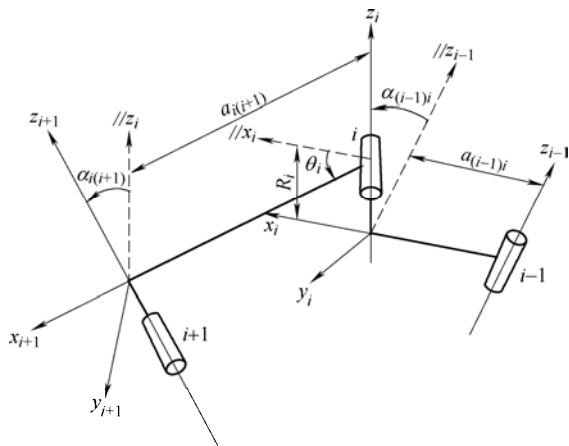
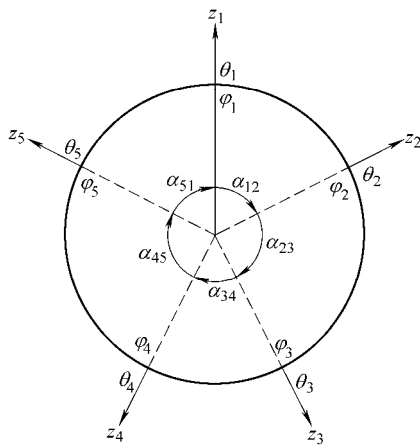


图 1 折纸手术钳平面展开图及几何尺寸

采用 DENAVIT 等^[15]提出的矩阵方法分析刚性折纸的运动，其铰链连杆坐标系如图 2a 所示，其中 z_i 轴沿铰链方向， x_i 轴是 z_i 与 z_{i-1} 的公垂线，正方向指向 z_i ， y_i 通过右手定则确定；连杆的长度 $a_{i(i+1)}$ 是沿 x_{i+1} 方向 z_i 与 z_{i+1} 之间的垂直距离；偏距 R_i 是沿 z_i 方向 x_i 与 x_{i+1} 之间的距离；机构运动变量 θ_i 表示沿 z_i 方向从 x_i 转到 x_{i+1} 所转过的角度， $\alpha_{i(i+1)}$ 是连杆上两个转动副之间的扭角，即沿 x_{i+1} 方向从 z_i 转到 z_{i+1} 所转过的角度。



(a) 铰链连杆坐标系



(b) 五折痕顶点坐标系

图 2 连杆坐标系

对于 n 杆闭合连杆机构，相邻两坐标系间的变换矩阵为

$$T_{(i+1)i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & s\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & a_{i(i+1)}c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & -s\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & a_{i(i+1)}s\theta_i \\ 0 & s\alpha_{i(i+1)} & c\alpha_{i(i+1)} & R_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$T_{i(i+1)} = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 & -a_{i(i+1)} \\ -c\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & c\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & s\alpha_{i(i+1)} & -R_i s\alpha_{i(i+1)} \\ s\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & -s\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & c\alpha_{i(i+1)} & -R_i c\alpha_{i(i+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1b)$$

式中， $T_{(i+1)i}$ 表示从坐标系 $i+1$ 变换到 i 的变换矩阵，当 $i+1 > n$ 时， $i+1$ 变为 1。s, c, t 表示三角函数 sin, cos, tan。

对单闭环五杆机构，闭环方程为

$$T_{21}T_{32}T_{43}T_{54}T_{15} = I \quad (2a)$$

或

$$T_{21}T_{32}T_{43} = T_{51}T_{45} \quad (2b)$$

对于由转动铰链组成的球面连杆机构，其轴线交于一点，各杆长和偏距均为零，则变换矩阵可简化为

$$Q_{i(i+1)} = \begin{bmatrix} c\theta_i & s\theta_i & 0 \\ -c\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & c\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & s\alpha_{i(i+1)} \\ s\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & -s\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & c\alpha_{i(i+1)} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$Q_{(i+1)i} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_{i(i+1)}s\theta_i & s\alpha_{i(i+1)}s\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_{i(i+1)}c\theta_i & -s\alpha_{i(i+1)}c\theta_i \\ 0 & s\alpha_{i(i+1)} & c\alpha_{i(i+1)} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

式(2b)变为

$$Q_{21}Q_{32}Q_{43} = Q_{51}Q_{45} \quad (4)$$

根据零厚度刚性折纸理论可将五折痕顶点等效为球面五杆机构，如图 2b 所示，其中 z_i 代表折痕铰链 i 所在坐标系的 z 轴轴线。 φ_i 表示该折痕铰链所在两平面的二面角， θ_i 表示铰链旋转的角度，即运动变量；如果折痕为山线，则 $\theta_i = \pi - \varphi_i$ ，如果折痕为谷线，则 $\theta_i = \pi + \varphi_i$ 。 $\alpha_{i(i+1)}$ 表示折痕 i 与 $i+1$ 所夹的扇形角，其中

$$\alpha_{51} = \alpha_{12} \quad \alpha_{23} = \alpha_{45} = \frac{\pi}{2} \quad \alpha_{34} = \pi - 2\alpha_{12} \quad (5)$$

通常球面五杆机构具有两个自由度，而图 1 中的薄板折纸手术钳由两个共用一条山线 AB 的球面五杆机构组成，具有多个自由度和多种运动方式，如图 3 所示，而在这些运动方式中，只有图 3a 中的运动方式是夹持功能需要的。

在薄板手术钳折叠过程中，可通过保持山谷线的设定和对称性来约束其运动使其准确地按照预定方式运动，即使铰链旋转角度满足下面的关系

$$\theta_4 = \theta_3 \quad \theta_5 = \theta_2 \quad (6)$$

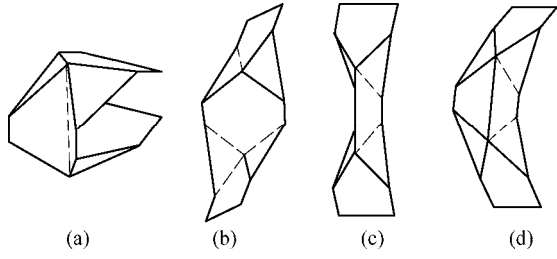


图3 薄板折纸手术钳多种运动方式

代入闭环方程式(4)可得

$$\frac{t \frac{\theta_3}{2}}{t \frac{\theta_2}{2}} = \frac{1 - s\alpha_{12}}{c\alpha_{12}} \quad (7a)$$

$$t^2 \frac{\theta_2}{2} - \frac{2t \frac{\theta_2}{2}}{t \frac{\theta_1}{2}} \frac{c\alpha_{12}}{1 - s\alpha_{12}} - \frac{1 + s\alpha_{12}}{1 - s\alpha_{12}} = 0 \quad (7b)$$

其中铰链旋转角度 θ_i 和二面角 φ_i 具有如下关系

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \pi - \varphi_1 & \theta_2 &= \pi + \varphi_2 & \theta_3 &= \pi + \varphi_3 \\ \theta_4 &= \pi + \varphi_4 & \theta_5 &= \pi + \varphi_5 \end{aligned} \quad (8)$$

将其代入式(6)、(7)中, 可得到五折痕顶点在运动过程中各二面角间的关系

$$\varphi_4 = \varphi_3 \quad \varphi_5 = \varphi_2 \quad (9a)$$

$$t \frac{\varphi_2}{2} = \frac{1 - s\alpha_{12}}{c\alpha_{12}} t \frac{\varphi_3}{2} \quad (9b)$$

$$\frac{1}{t^2 \frac{\varphi_2}{2}} - \frac{2t \frac{\varphi_1}{2}}{t \frac{\varphi_2}{2}} \frac{c\alpha_{12}}{1 - s\alpha_{12}} - \frac{1 + s\alpha_{12}}{1 - s\alpha_{12}} = 0 \quad (9c)$$

1.2 单自由度厚板模型

在实际工程应用中, 对称性的约束需要通过给定多个协调的输入来实现, 对于外形尺寸极小的微创手术器械来说很难实现。因此, 我们考虑引入厚板模型^[7]来替代原有的球面机构运动学模型, 从而将折纸微创手术钳从多自由度机构转变为单自由度机构。通过保持各顶点处的扇形角不变, 并将铰链分布于厚板的上下平面, 可将该手术钳转换成如图4所示的厚板模型。

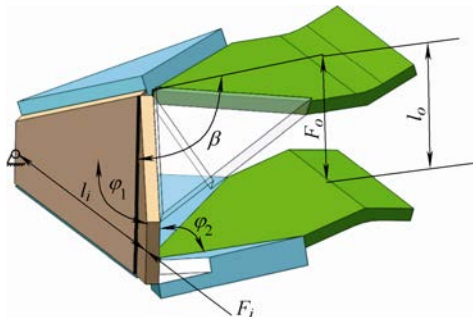


图4 折纸手术钳厚板模型

五折痕顶点对应的厚板模型为 Myard 机构, 如图5所示, 其几何参数为

$$\begin{aligned} \alpha_{23}^{My} &= \frac{\pi}{2} & \alpha_{34}^{My} &= 2\alpha_{12}^{My} - \pi \\ \alpha_{45}^{My} &= \frac{\pi}{2} & \alpha_{51}^{My} &= \pi - \alpha_{12}^{My} \end{aligned} \quad (10a)$$

$$a_{12} = a_{51} \quad a_{23} = a_{45} \quad a_{34} = 0 \quad (10b)$$

$$\frac{a_{12}}{a_{23}} = \frac{s\alpha_{12}^{My}}{s\alpha_{23}^{My}} \quad (10c)$$

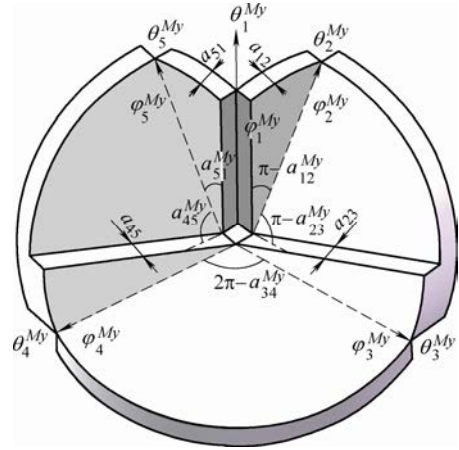


图5 Myard 厚板折纸模型

代入式(2), 推导出闭环方程为

$$\theta_3^{My} = \pi + \theta_4^{My} \quad \theta_2^{My} + \theta_5^{My} = 2\pi \quad (11a)$$

$$t \frac{\theta_3^{My}}{2} = -\frac{1 - s\alpha_{12}^{My}}{c\alpha_{12}^{My}} \cdot t \frac{\theta_2^{My}}{2} \quad (11b)$$

$$t^2 \frac{\theta_2^{My}}{2} - \frac{2c\alpha_{12}^{My}}{1 - s\alpha_{12}^{My}} \cdot t \frac{\theta_1^{My}}{2} \cdot t \frac{\theta_2^{My}}{2} - \frac{1 + s\alpha_{12}^{My}}{1 - s\alpha_{12}^{My}} = 0 \quad (11c)$$

考虑其运动变量 θ_i^{My} 和各二面角 φ_i^{My} 具有以下关系式

$$\theta_1^{My} = 2\pi - \varphi_1^{My} \quad \theta_2^{My} = \pi - \varphi_2^{My} \quad \theta_3^{My} = \pi + \varphi_3^{My} \quad (12a)$$

$$\theta_4^{My} = \varphi_4^{My} \quad \theta_5^{My} = \pi + \varphi_5^{My} \quad (12b)$$

可得到该厚板模型各二面角的关系为

$$\varphi_4^{My} = \varphi_3^{My} \quad \varphi_5^{My} = \varphi_2^{My} \quad (13a)$$

$$t \frac{\varphi_2^{My}}{2} = \frac{1 - s\alpha_{12}^{My}}{c\alpha_{12}^{My}} t \frac{\varphi_3^{My}}{2} \quad (13b)$$

$$\frac{1}{t^2 \frac{\varphi_2^{My}}{2}} - \frac{2t \frac{\varphi_1^{My}}{2}}{t \frac{\varphi_2^{My}}{2}} \frac{c\alpha_{12}^{My}}{1 - s\alpha_{12}^{My}} - \frac{1 + s\alpha_{12}^{My}}{1 - s\alpha_{12}^{My}} = 0 \quad (13c)$$

对比式(13)、(9)发现, 它们具有相同的形式, 即除了将 α_i , φ_i 替换成 α_i^{My} , φ_i^{My} 之外, 其他均相同。因此该厚板模型与约束了对称性的零厚度折纸模型具有运动等价性, 即此厚板手术钳(图4)与薄板

折纸手术钳(图 3a)运动等价。此外,不同于球面 5R 机构, Myard 机构属于空间过约束机构,自身就具有单自由度的对称运动。这一设计大大简化了手术钳的输入控制,可通过控制 AB 折痕的夹角以实现夹持操作。

2 折纸手术钳性能分析及参数优化

新型折纸微创手术钳设计目的是提高输出力机械效益,以解决传统手术钳在夹取组织过程中夹持力不足的问题,现分析其闭合状态下的机械效益。

如图 4 所示,定义输入力 F_i , 输出力 F_o , 输入力作用点与固定点之间距离 l_i , 输出力作用点之间距离 l_o 。

假设输入力 F_i 水平输入, 输出力 F_o 则是夹持物体时物体给手术钳的反作用力。根据虚功原理

$$F_i \cdot dl_i = F_o \cdot dl_o \quad (14a)$$

求得机械效益 E

$$E = \frac{F_o}{F_i} = \frac{dl_i}{dl_o} \quad (14b)$$

在不考虑板厚的情况下

$$l_i = 2d_2 s \frac{\varphi_1}{2} \quad (15a)$$

$$l_o = d_1 - 2d_3 c\beta \quad (15b)$$

式中, β 为中间轴线与五边形面板所成夹角(图 6)。

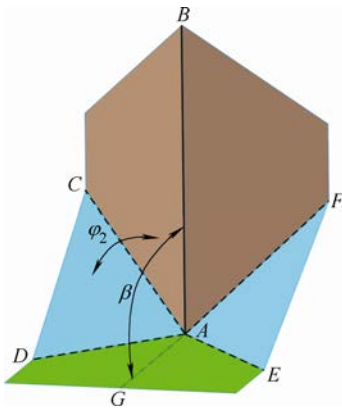


图 6 折纸手术钳节点 A 部分薄板模型

根据球面三角几何

$$c\angle BAD = c\angle BAC \cdot c\angle CAD + s\angle BAC \cdot s\angle CAD \cdot c\varphi_2 \quad (16a)$$

$$c\angle BAD = c\angle DAG \cdot c\beta + s\angle DAG \cdot s\beta \cdot c\psi \quad (16b)$$

式中, $\angle CAD=90^\circ$; AG 为 $\angle DAE$ 角平分线, ψ 表示平面 ADG 与平面 ABG 所成二面角, 且 ψ 恒为 90° ; $\angle BAC + \angle CAD + \angle DAG = \pi$ 。

整理化简式(16)可得 $\beta = \varphi_2$ 。

式(15)分别对 φ_1 、 φ_2 求导得

$$\frac{dl_i}{d\varphi_1} = d_2 c \frac{\varphi_1}{2} \quad (17a)$$

$$\frac{dl_o}{d\varphi_2} = 2d_3 s\varphi_2 \quad (17b)$$

由式(9c)推导出

$$t \frac{\varphi_1}{2} = -\frac{1}{2 \frac{c\alpha_{12}}{1-s\alpha_{12}}} \left(\frac{1}{t \frac{\varphi_2}{2}} - \frac{1+s\alpha_{12}}{1-s\alpha_{12}} t \frac{\varphi_2}{2} \right) \quad (18a)$$

$$\varphi_2 = \arcc \frac{d_1}{2d_3} \quad (18b)$$

则不考虑板厚的机械效益 E_1 为

$$E_1 = \frac{dl_i}{dl_o} = \frac{\frac{dl_i}{d\varphi_1}}{\frac{dl_o}{d\varphi_2}} \cdot \frac{d\varphi_1}{d\varphi_2} \quad (19a)$$

$$\frac{d\varphi_1}{d\varphi_2} = \frac{2}{1+t^2 \frac{\varphi_1}{2}} \cdot \frac{1}{2 \frac{c\alpha_{12}}{1-s\alpha_{12}}} \cdot \left(\frac{1}{2t^2 \frac{\varphi_2}{2}} \cdot \frac{1}{1+\left(\frac{\varphi_2}{2}\right)^2} + \frac{1+s\alpha_{12}}{2(1-s\alpha_{12})} \cdot \frac{1}{1+\left(\frac{\varphi_2}{2}\right)^2} \right) \quad (19b)$$

厚板模型在顶点处所有轴线实际上没有完全交于一点(图 7), 有些轴线位于厚板上层边线, 有些位于下层边线。考虑板厚对机械效益的影响

$$a = \sqrt{t_1^2 + t_2^2 - 2t_1 t_2 c\varphi_2} \quad (20a)$$

$$b = t_1 s \frac{\varphi_1}{2} \quad (20b)$$

$$c = \sqrt{t_2^2 - t_2^2 s \frac{\varphi_1}{2}} \quad (20c)$$

$$c\gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \quad (20d)$$

t_1 , t_2 分别对应式(10b)、(10c)中的 a_{12} , a_{23}

$$l_{o_offset} = a \cdot s\gamma \quad (21a)$$

$$l_{o_T} = l_o - 2l_{o_offset} \quad (21b)$$

$$\frac{dl_{o_T}}{dl_i} = \frac{dl_o}{dl_i} - 2 \frac{dl_{o_offset}}{dl_i} \quad (21c)$$

式中, l_{o_offset} 表示由于板厚影响, 厚板模型实际输出力作用点间距离 l_{o_T} 与薄板模型中 l_o 的差值。

$$E = \frac{dl_i}{dl_{o_T}} = \frac{1}{\frac{dl_o}{dl_i} - 2 \frac{dl_{o_offset}}{dl_i}} \quad (22)$$

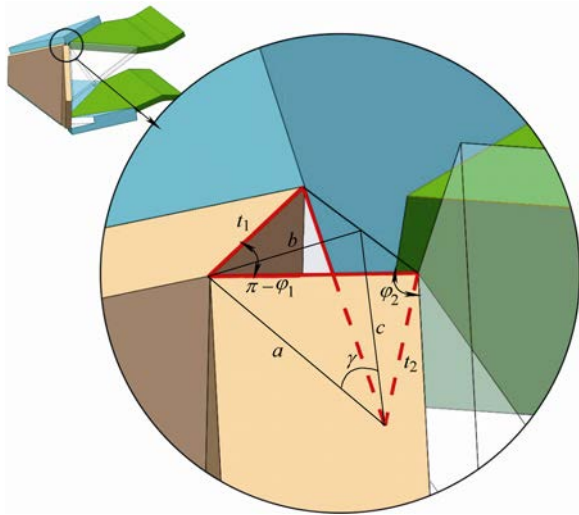


图7 厚板模型单个顶点局部图放大图

整理式(17a)~(19c)以及式(20a)~(22)得出结论： $d_1, d_2, d_3, \alpha_{12}, t_1$ 这五个结构设计参数对输出力(即末端夹持力)机械效益有影响。

受外形尺寸以及铰链安装等条件的限制，各参数取值范围为： $d_1 = 6 \sim 10 \text{ mm}$ ， $d_2 = 4 \sim 10 \text{ mm}$ ， $d_3 = 5 \sim 10 \text{ mm}$ ， $\alpha_{12} = 45^\circ \sim 90^\circ$ ， $t_1 = 0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 。现对其进行参数优化，改变其中一个参数，保持其他参数为定值，并取为变化范围的中间值，即得到输出力机械效益与该参变量之间的关系曲线。各参数与机械效益关系曲线见图8。

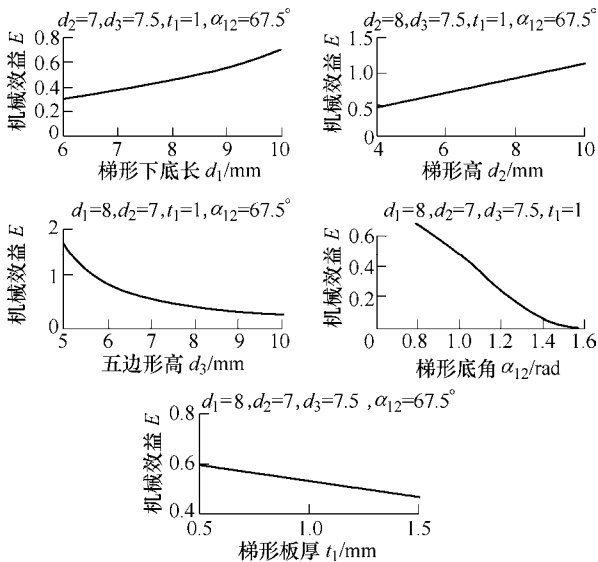


图8 各参数与输出力机械效益间关系曲线

综合考虑铰链安装以及自然腔道手术器械整体尺寸的限制，优化后各几何参数为 $d_1 = 8 \text{ mm}$ ， $d_2 = 7 \text{ mm}$ ， $d_3 = 8 \text{ mm}$ ， $\alpha_{12} = 53.13^\circ$ ， $t_1 = 0.8 \text{ mm}$ 。该几何尺寸下的机械效益与张角之间关系曲线如图9所示，在完全闭合时其机械效益为0.728。

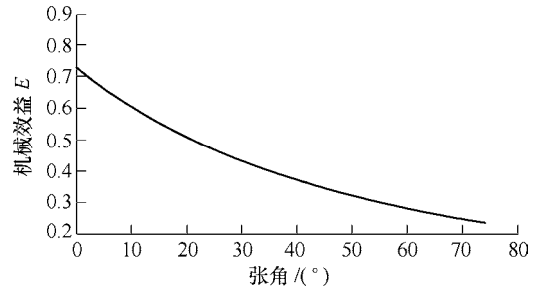
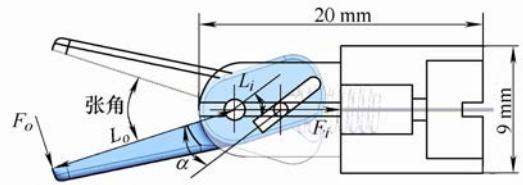


图9 折纸微创手术钳机械效益与张角间关系曲线

3 折纸微创手术钳的组装与驱动

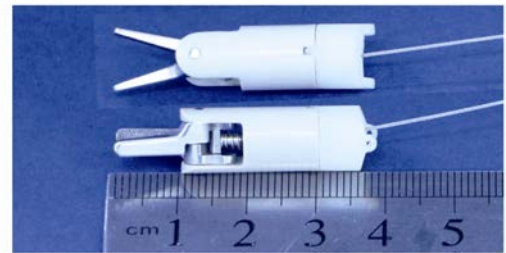
为使新型手术钳可直接装配到现有的微创手术机器人操作臂末端来替代原有的手术钳，我们对新型手术钳后端固定及驱动装置进行了设计。

原始手术钳通过单根金属丝牵引实现手术钳闭合，通过弹簧恢复弹力打开。其具体尺寸如图10a所示，在不产生干涉情况下其大张角为 33° 。其在不同张角下的机械效益见图10c。在完全闭合情况下，其机械效益为0.143 1。

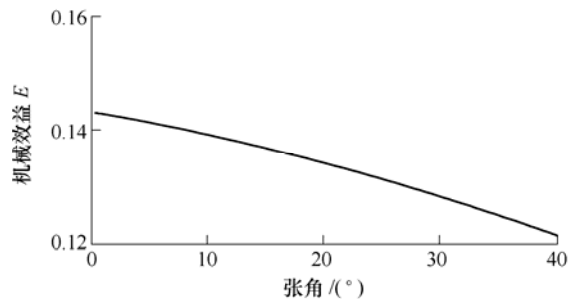


$L_0=13.5 \text{ mm}$, $L_1=2 \text{ mm}$, $\alpha=15^\circ$

(a) 传统微创手术钳结构尺寸图



(b) 传统微创手术实物主视图与俯视图



(c) 传统微创手术钳机械效益与张角间关系曲线

图10 传统微创手术钳

为使手术钳在开合过程中具有很好的协调性和对称性，我们选用了简单有效的平面滑块摇杆机构，

原理图如图 11a 所示。手术钳通过金属丝牵引滑块，然后通过拉杆驱动手术钳闭合，最后通过弹簧恢复弹力打开。采用这种驱动方式可将拉块固定在滑道中，从而防止手术钳绕固定圆柱轴旋转，并且可以直接安装在现有微创手术机器人操作臂末端。但该驱动方式的输入力不是水平施加，而是沿拉杆施加，从而导致输入力减小，相应的机械效益也就会减小。

$$F_i = \frac{F_s}{2} \cdot \tan \frac{\lambda}{2} \quad (23a)$$

$$E_f = \frac{F_o}{F_s} \quad (23b)$$

式中， λ 为手术钳完全闭合时两拉杆所成夹角。其大小与拉杆长度有关。

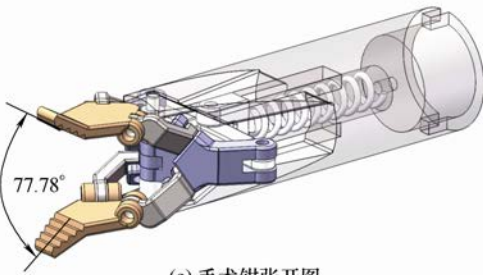
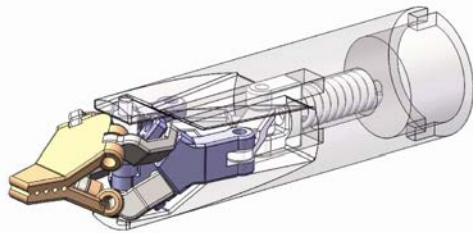
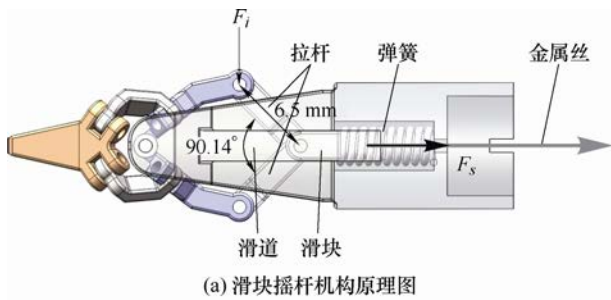


图 11 手术钳整体装配图

微创手术钳末端夹持平台最大张角的有效范围为 $40^\circ \sim 90^\circ$ ，张角太小不利于夹持组织，过大也不会产生更好的使用效果，还会降低机械效益。通过绘出拉杆长度与最大张角和机械效益之间的关系曲线(图 12)，选取了两曲线交点处对应拉杆长度 6.5 mm，此时的最大张角为 77.78° 。联立式(14b)、(23)，代入相关参数求得最终机械效益为 0.364。在不考虑金属丝拉伸变形的情况下，金属丝牵引距离 l_s 与手术钳末端距离 l_o 具有以下关系曲线(图 13)。

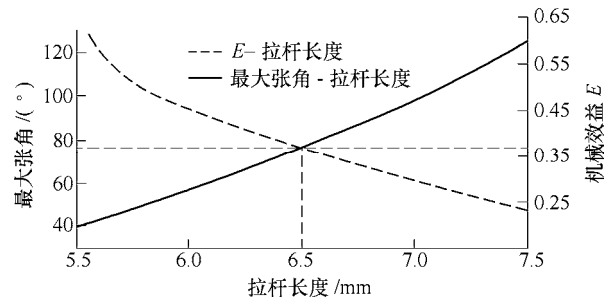


图 12 拉杆长度与最大张角和机械效益关系曲线

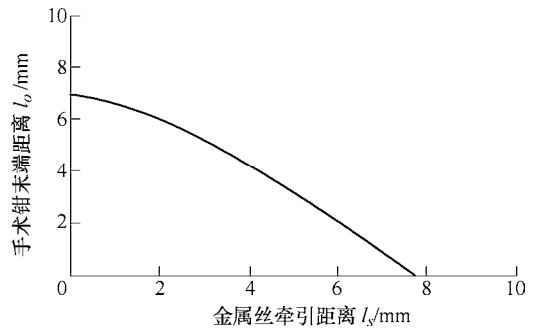


图 13 l_o 与 l_s 之间关系曲线

在实际手术操作过程中，金属丝的最大拉力范围通过限制驱动电机的最大电流来实现。在已知医生需要夹持力的情况下，根据试验测量的机械效益，可求出手术钳所需金属丝的拉力，从而得出电机的上限电流。达到上限电流后电机停转，保证其稳定地夹持人体组织。

我们先通过 3D 打印制作出比例为 3:1 的实物模型验证了其运动可行性，并且该模型可实现夹持物体等基本操作。随后加工出了 1:1 金属实物模型用于试验测量和后续的动物试验，见图 14。

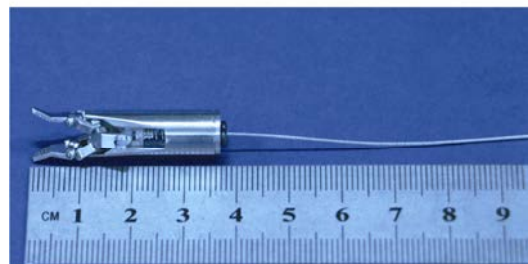
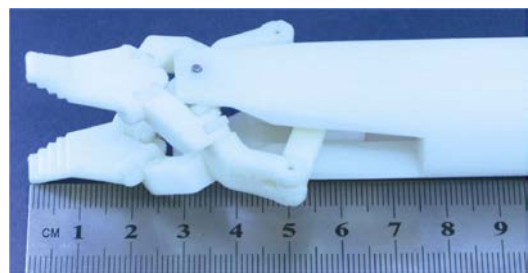


图 14 手术钳实物模型

4 试验

为验证设计的手术钳是否符合夹持力要求，以及实际机械效益是否与理论值相符，我们对 1:1 金属实物模型进行试验测量。

如图 15 所示，将手术钳通过固定座固定到传感器上，金属丝穿过固定座固定在测力机下端。输出力是使普通金属镊子闭合所需要的力，可通过测力计直接测量。通过让手术钳夹持普通镊子令其闭合，测出此时需要的金属丝拉力即为对应的输入力。不同的输出力可通过在镊子中间加一个圆柱棒来获得，圆柱棒直径不同，所在的位置不同，让其闭合所需的力就不同。利用这种方法，我们测量了几组传统微创手术钳和新型微创手术钳在不同输出力下对应的输入力，并得出了相应的机械效益。



图 15 新型微创手术钳试验测力图

传统微创手术钳机械效益测试结果如表 1 所示。

表 1 传统微创手术钳机械效益测试结果表

	输出力/N	输入力/N	机械效益
试验 1	1.2	14.20	0.084 5
试验 2	5.2	41.19	0.119 7
试验 3	8.6	68.26	0.126 0
试验 4	13.2	96.62	0.136 6

新型微创手术钳机械效益结果如表 2 所示。

表 2 新型微创手术钳机械效益测试结果表

	输出力/N	输入力/N	机械效益
试验 1	1.2	10.676 5	0.112 4
试验 2	5.2	21.996 0	0.236 4
试验 3	8.6	26.330	0.326 6
试验 4	13.2	38.530	0.342 6

在不考虑弹簧处损失的输入拉力的情况下，传统微创手术钳理论机械效益为 0.143 1，新型微创手术钳理论机械效益为 0.364。由表 1、2 中数据以及图 16 中关系线图可知，随着输入力的增大，其在弹簧处损失的输入拉力占实际输入力比重逐渐减小，对整体机械效益的影响也就相应减小。当输出力为 13.2 N 时，传统微创手术钳实际机械效益为 0.136 6，与理论值之间的误差为 4.54%。新型微创手术钳实际机械效益为 0.342 6，与理论值之间的误差为 5.88%。新型微创手术钳实际机械效益是传统手术钳的 2.5 倍。

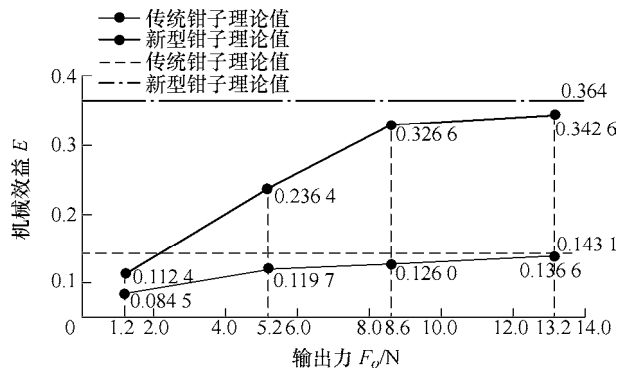
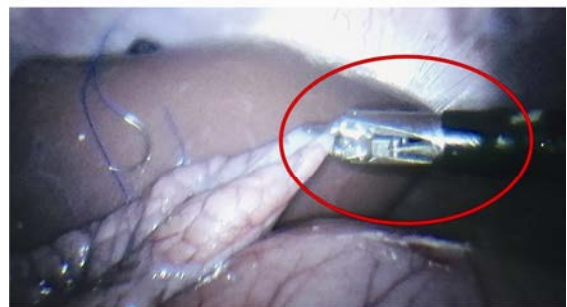


图 16 微创手术钳机械效益与输出力关系线图

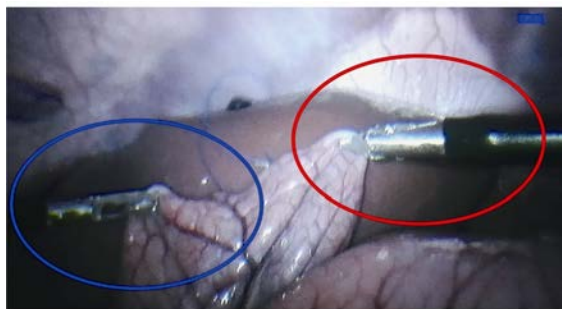
通过动物微创手术试验验证(图 17)，新型微创手术钳可以实现稳定夹持动物体内组织的基本功能，相比于传统微创手术钳，在相同驱动力牵引下，其夹持更稳定可靠，张角更大，操纵更灵活。



(a) 动物试验中的传统微创手术钳



(b) 动物试验中的新型微创手术钳



(c) 动物试验中新型微创手术钳(右)与传统微创手术钳(左)
夹持组织情况对比

图 17 动物试验

5 结论

(1) 本文基于刚性折纸原理,设计了一种包含两个五折痕顶点的折纸手术钳。通过引用厚板折纸,将手术钳的运动降低到单自由度。其外形小巧,可整体夹持组织,运动容易控制,协调性好;参照现有微创手术机器人操作臂末端设计,可直接替换现有微创手术钳,互换性高。试验结果表明,新型折纸手术钳相比于传统微创手术钳具有更高的机械效益,可达传统微创手术钳机械效益的 2.5 倍,在动物试验中夹持更稳定可靠。此外,由于其夹持平台张角大,增加了手术操作过程的灵活性。

(2) 现在使用的驱动方式简单有效,可靠性高,但对机械效益有所降低,如何能获得更高机械效益的驱动方式可作为未来的一个研究方向。另一方面,新型连续型手术钳可通过一体成型加工得到,可以解决传统零件配合所存在的零件磨损以及运动过程中摩擦损耗的问题。此外连续型手术钳可以通过注射模成型,批量生产,制作加工成本低,因此折纸连续型手术钳的设计与制造将是我们下一步的研究发展方向。

参 考 文 献

- [1] 王国彪,彭芳瑜,王树新,等. 微创手术机器人研究进展[J]. 中国科学基金, 2009, 23(4): 209.
WANG Guobiao, PENG Fangyu, WANG Shuxin, et al. A perspective on medical robotics for minimally invasive surgery[J]. Science Foundation in China, 2009, 23(4): 209.
- [2] SATAVA R M. Surgical robotics: The early chronicles: A personal historical perspective[J]. Surgical Laparoscopy Endoscopy & Percutaneous Techniques, 2002, 12(1): 6-16.
- [3] BUTNER S E, GHODOUSSI M. A real-time system for tele-surgery[C]//Distributed Computing Systems, 2001.

- 21st International Conference on. IEEE, 2001: 236-243.
- [4] 王树新, 贡今天, 李群智, 等. 显微外科手术机器人-“妙手”系统的研究[J]. 机器人, 2006, 28(2): 130-135.
WANG Shuxin, YUN Jintian, LI Qunzhi, et al. A robotic system for microsurgery: The “MicroHand” system[J]. Robot, 2006, 28(2): 130-135.
- [5] 付宜利, 冯美, 潘博, 等. 基于钢丝传动的腹腔微创手术机器人手术器械的设计和实现[J]. 高技术通讯, 2011, 21(10): 1062-1067.
FU Yinli, FENG Mei, PAN Bo, et al. Design and implementation of a surgical instrument for minimally invasive celiac surgical robots based on steel wire transmission[J]. Chinese High Technology Letters, 2011, 21(10): 1062-1067.
- [6] 徐明. 被忽略的古老艺术——折纸艺术[J]. 艺术科技, 2014(6): 377-378.
XU Ming. Origami-A neglected ancient art[J]. Art Science and Technology, 2014(6): 377-378.
- [7] CHEN Yan, PENG Rui, YOU Zhong. Origami of thick panels[J]. Science, 2015, 349(6246): 396-400.
- [8] EDMONDSON B J, BOWEN L A, GRAMES C L, et al. Oriceps : Origami-inspired forceps[C]// ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, September 16-18, 2013, Utah, USA. ASME, 2013: SMASIS2013-3299.
- [9] BENNETT G T. A new mechanism[J]. Engineering, 1903, 76(12): 777-778.
- [10] BENNETT G T. The skew isogram mechanism[J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1914, 2(1): 151-173.
- [11] MYARD F E. Contribution à la géométrie des systèmes articulés[J]. Bulletin de la Société Mathématique de France, 1931, 59: 183-210.
MYARD F E. Contribution to the geometry of articulated systems[J]. Bulletin de la Société Mathématique de France, 1931, 59: 183-210.
- [12] BRICARD R. Leçons de Cinématique, T. II[M]. Paris: Gauthier-Villars, 1927.
BRICARD R. Cinematic Lessons, T. II[M]. Paris: Gauthier-Villars, 1927.
- [13] BAKER J E. An analysis of the Bricard linkages[J]. Mechanism and Machine Theory, 1980, 15(4): 267-286.
- [14] 王国彪, 赖一楠, 何柏岩. 天津大学陈焱教授团队在厚板折展机构学理论方面取得重要研究进展[EB/OL]. [2015-7-27]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab38/info48757.htm>.
WANG Guobiao, LAI Yinan, HE Baiyan. Yan Chen from

Tianjin University has achieved a major breakthrough in the theory of thick-panel origami [EB/OL]. [2015-7-27]. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab38/info48757.htm>.

- [15] BEGGS J S. Advanced mechanism[M]. Washington: Macmillan, 1966.

作者简介: 杨名远, 男, 1995年出生。主要研究方向为可展结构、机械智能等。

E-mail: jack_yang@tju.edu.cn

马家耀, 男, 1986年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为折纸结构, 微创手术医疗器械等。

E-mail: jiyao.ma@tju.edu.cn

李建民, 男, 1984年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人学、计算机辅助手术技术等。

E-mail: mjli@tju.edu.cn

陈焱(通信作者), 女, 1974年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为可展结构、机构学和可重构机构等。

E-mail: yan_chen@tju.edu.cn

王树新, 男, 1966年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械系统动力学、水下机器人与医疗手术机器人等。

E-mail: shuxinw@tju.edu.cn