

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.02.011

Yoshimura 折痕的双指机械手设计与分析

蒋天赐¹, 杨 慧², 唐 蕾¹, 乔尚岭³

(1. 安徽大学 电气工程与自动化学院, 合肥 230601; 2. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004;
3. 北京精密机电控制设备研究所 航天伺服驱动与传动技术实验室, 北京 100076)

摘 要:折纸的连续弯曲、扭转、伸展收缩和线性运动的特性,使得折纸构型比较适合机械手机构设计;然而,折纸在机械手方面的应用特别是对非柱状的机械手应用较少。基于图论和折痕分配算法提出了一种基于 Yoshimura 折痕的双指机械手机构,该机构由对应折痕等效形成的销杆连接构成。通过对折痕进行几何分析研究了该机构的运动特性,发现双指机械手机构能够实现弯曲抓取,具有弯曲程度大、抓取适应性强和结构刚度大的优点。对 Yoshimura 折痕的双指机械手机构进行了三维结构设计,通过对双指机械手机构进行自由度分析和几何分析,发现双指机械手单元具有 3 个自由度,机械手每个单元上的杆间角度越大可抓取物体的半径越小,且随着机械手横向和纵向单元数目增加其可抓取物体的半径变大。

关键词:机构学;机械手;Yoshimura 折痕;几何分析;运动学分析

中图分类号:TN253;V443

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2023)02-0066-10

Design and analysis of two-finger manipulator based on Yoshimura origami

JIANG Tianci¹, YANG Hui², TANG Lei¹, QIAO Shangling³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601;
2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;
3. Laboratory of Aerospace Servo Actuation and Transmission,
Beijing Institute of Precision Mechatronics and Controls, Beijing 100076)

Abstract:The characteristics of continuous bending, torsion, stretching and linear movement of origami make the origami configuration more suitable for the manipulator mechanism. However, the application of origami in manipulators is less common, especially for non-columnar manipulators. Based on the graph theory and origami crease allocation algorithm, this paper proposes a two-finger manipulator mechanism based on the Yoshimura origami crease, which is connected by pin rods. Through the geometric analysis of the crease, the motion characteristics of the mechanism are studied. It is found that the two-finger manipulator mechanism can achieve bending and grasping, which has the advantages of large bending degree, great capturing adaptability and high stiffness. The two-finger manipulator of the Yoshimura origami crease is designed in three dimensions. Through the analysis of the degrees of freedom and geometric analysis of the two-finger manipulator mechanism, the two-finger manipulator unit had three degrees of freedom, and the larger the angle between the rods on each unit of the manipulator, the smaller the radius of the object that can be grasped. As the number of transverse and longitudinal units of the manipulator increased, the radius of the object that can be grasped became larger.

收稿日期:2022-07-04; 修回日期:2022-11-30

基金项目:国家自然科学基金(编号:52105014, 51975001);安徽省自然科学基金(编号:2108085QE221)

引用格式:蒋天赐,杨慧,唐蕾,等. Yoshimura 折痕的双指机械手设计与分析[J]. 空间电子技术, 2023, 20(2): 66-75. JIANG T C, YANG H, TANG L, et al. Design and analysis of two-finger manipulator based on Yoshimura origami[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(2): 66-75.

Key words: theory of mechanism; manipulator; Yoshimura origami; geometric analysis; kinematic analysis

0 引言

利用不同折痕折纸具有的不同特性解决不同性质的工程问题,对折纸的分析、研究与应用,与多个学科领域形成交叉。无论是在生物医学、建筑、机器人空间结构还是工程领域等等,折纸机构得到更多学者的关注。在生物医学方面,Mehner 等^[1]通过 2D 支架的折叠和定向细胞装配来设计人体组织;Kim 等^[2]研究了折纸设计在组织工程中的适用性,提出了一种用于受损组织再生的圆柱形纸基支架;在建筑学方面,Babilio 等^[3]提出了创新的基于折纸的自适应包络,研究了一种新型混合折纸张拉整体系统的性能,极大降低了后续运营成本。在机器人方面,Kamrava 等^[4]研究了具有可编程轨迹的细长结构折纸,该结构由多组重复元素构成,可应用于夹持器和仿生手;Pagano 等^[5]提出了一种基于折纸的爬行机器人,根据 Kresling 折痕折叠纸张而成;Zhakypov 和 Paik 等^[6]提出了一种基于折纸的机器人,能够爬行和跳跃;在结构方面,Suh 等^[7]提出了一种形成 Yoshimura 柱状结构的方法。在超材料方面,Wickeler 和 Naguib 等^[8]研究了两种新型折纸基超材料的建模过程和力学测试;Zhai 等^[9]提出了一种机械折纸超材料,具有按需可展开性和选择性可折叠性。这种可展开性除了在折纸上,在空间折展机构中也有应用,周晓涛等^[10]针对于壳膜结构,综述了壳单元、膜结构单元建模的理论研究和建模方法。总的来说,无论是由折纸形成的特定折痕具有的连续弯曲、扭转和线性运动的特点,还是折纸结构具有的可重构性、双稳态和多稳态性、自折叠等特性,都使得折纸在多个领域得到应用。

虽然关于折纸机械手已经有了很多研究,但是总体来说,应用还是偏少,并且现有折纸机械手大都是柱状机械手。东南大学陈耀等^[11]使用无向图和有向图来表达折痕及其相应桁架框架,折痕图案若是一组满足可折叠条件^[12]的无向或有向折痕线,则该折痕图案可以由两个独立子图的特定图积精确表示。

在图论分析方法的基础上,文章提出了一种基于 Yoshimura 折痕的机械手,对折痕进行了峰谷线的分配,进行了几何分析,并对其进行三维设计和

运动学分析。

1 Yoshimura 折痕设计

利用图论设计出多种折痕方案,并从多种设计方案中择取折叠性能较优的一种作为基本单元。利用算法为其分配峰谷线^[12],通过实物验证折叠特性,并装配成整个机械手单元。

1.1 Yoshimura 折痕图案设计

采用有向积设计折痕,即将每个子图的节点和其成员的关联关系用邻接矩阵 $A(S)$ 表示,通过 $A(S)$ 与对应单位矩阵 I_n 的“ $\otimes$ ”乘积形式来表达新的折痕^[10]。如图 1 所示,通过两个子图的有向图积形式表达出特定的折痕。每个子图若分别有 n_1 和 n_2 个节点,那么就会有 $2^{n_1+n_2-2}$ 个笛卡尔积形式。子图节点基数越大,可以得到的折痕数量就越多。但由于这种图案的重复性,往往大多数的折痕图案都十分相似,且大多数折纸的折展特性与 Kresling 的图案特点基本类似,这里仅提出 3 种明显有区别于经典折痕的图案。通过 Type I 图积可以得到 3 种不同图案,如图 2 所示。有向子图还有其它的指向,但不同的地方表现在上下层基本单元间交替方向不同,可通过配置每个折痕的子图的边长和夹角来得到不同折叠性能的折痕。

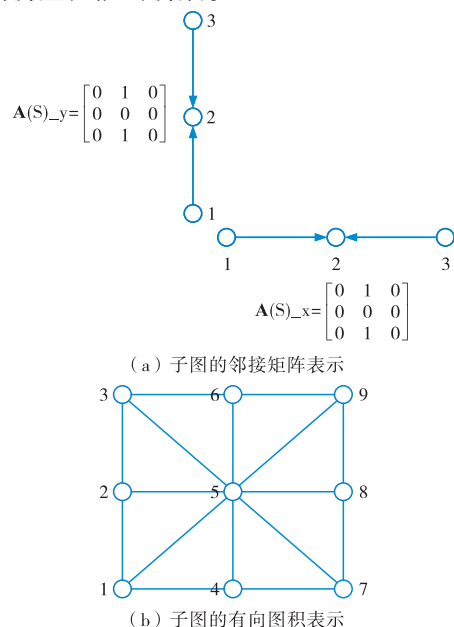


图 1 折痕的有向图积表示

Fig. 1 Directed plot product representation of creases

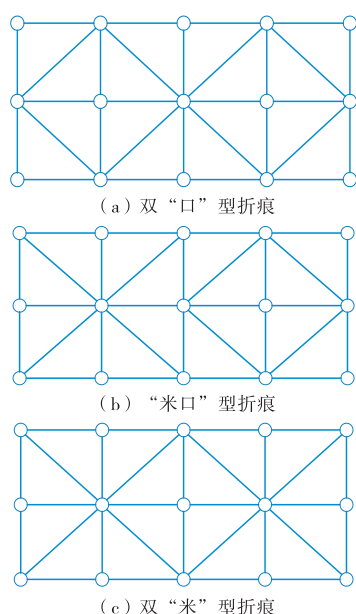


图 2 3 种混合折痕有向图

Fig. 2 Three types of mixed crease directed diagrams

1.2 Yoshimura 折痕峰谷线的分配

混合型整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 峰谷线分配算法^[13]流程如图 3 所示,以折数、顶点数以及子图的邻接矩阵作为输入,首先得到未分配峰谷线的折痕几何图的邻接矩阵,然后利用图论深度优先算法 (deep first search, DFS) 检测出折痕几何图中的面和边线,最后利用 MILP 模型分配折痕图的峰谷线。

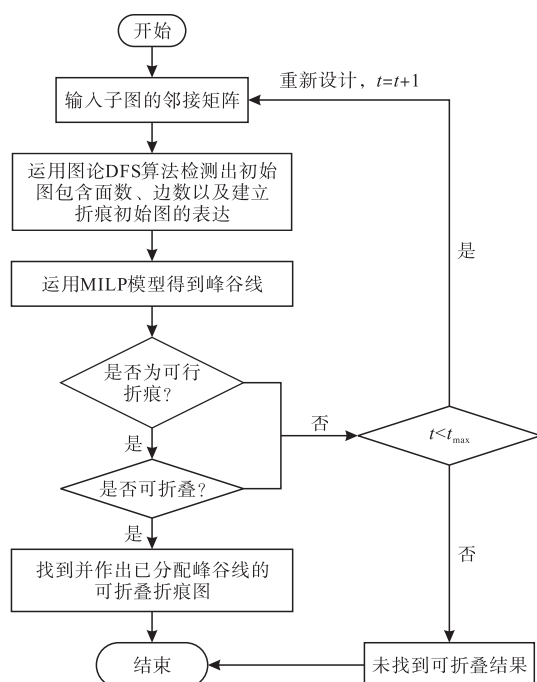


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

1.2.1 3 种基本单元图案的峰谷分配

在对组合单元进行峰谷分配之前,先对 3 种基本单元的图案进行组合,因组合单元采用的叠加和单向扩展的方法所得图案具有重复和对称性。运用第 1 节中峰谷线分配算法对 3 种基本单元作峰谷线分配如图 4 所示。图中黑色实线代表外部边界线,蓝色实线代表峰线,红色虚线代表谷线。

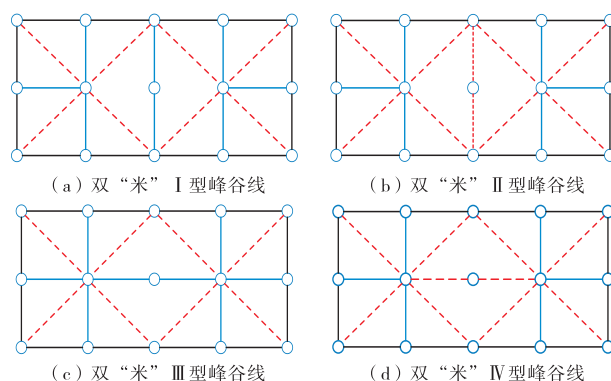


图 4 双“米”型峰谷线分配

Fig. 4 Double “meter” type peak-to-valley line distribution

图 4(a)在折展过程中会出现轴向的移动和扭转;图 4(b)峰谷线内部 4 条边界边由峰线变成了谷线,有一定角度的弯曲;图 4(c)折展过程中会出现扭转运动和小角度的弯曲;图 4(d)与图 4(c)的运动特性相似,只是其弯曲的角度更大,其径向膨胀和收缩更明显。

1.2.2 基本单元形成的柱状折纸

由于基本单元边界的连接可能形成不同折数的内部顶点,基本单元的折叠特性反应在柱状折纸上不一定有相同的折叠特性。针对这 12 种峰谷线分配,经过手动折纸试验选择了较优的 3 种折痕分配方式,在更大的平面上进行峰谷分配。其中“双米”I 型和“米口”I 型的混合折痕仅仅能形成柱状折纸,无法实现完全可折叠。“双口”I 型折痕能在一定宽度范围内实现完全可折叠,能实现线性、弯曲和扭转运动,分配的折痕与 Yoshimura 折痕相似,如图 5 所示。其折叠机械手形态如图 6 所示。

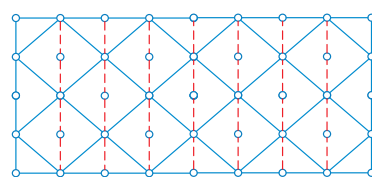


图 5 “双口”I 型折痕分配的新折痕

Fig. 5 New crease assigned by the “double-mouthed” type I crease

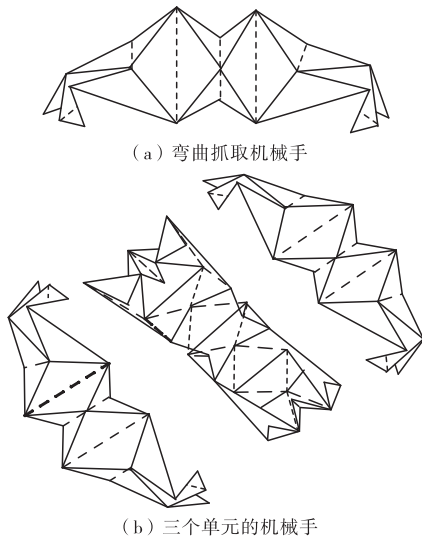


图 6 “双口” I 型折痕机械手

Fig. 6 “Double-mouthed” type I crease manipulator

2 折痕运动和几何分析

2.1 Yoshimura 折痕几何分析

取机械手中的基本单元进行研究,该单元由六条折痕组成,如图 7 所示,实线表示山峰,虚线表示山谷。部分折叠状态基本单元在 3 个平面内的投影如图 8 所示,顶角与投影角之间的关系如图 9 所示。

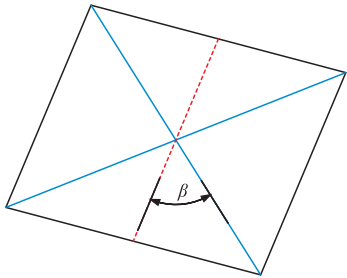


图 7 基本单元的几何形状

Fig. 7 The geometry of the base unit

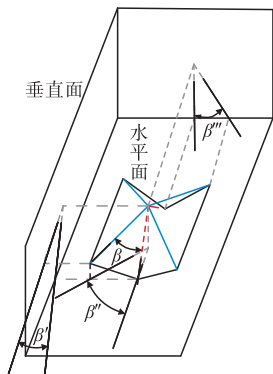


图 8 基本单元的投影

Fig. 8 The projection of the base unit

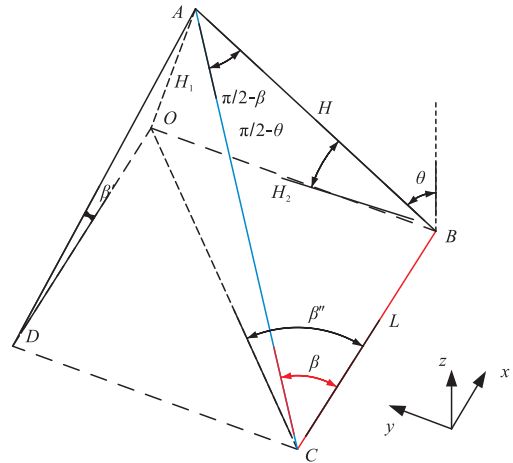


图 9 顶角与投影角之间的关系

Fig. 9 The relationship between the top angle and the projection angle

假设在水平面上的投影为 β' , 在垂直面上的投影为 β'' , 在法平面的投影为 β''' 。在直角三角形 $\triangle ABC$ 中, 有:

$$H = L \tan \beta \quad (1)$$

式(1)中, 峰线和谷线的夹角 β 为基本单元的顶角, 在基本单元折叠的过程中 β 值恒定, 但是其在水平面和垂直面的投影角度发生变化。

在直角三角形 $\triangle OAB$ 中, 有:

$$H_1 = H \cos \theta \quad (2)$$

式(2)中, θ 为峰线与谷线形成的刚性板与垂直面之间的夹角。当基本单元处于完全折叠的状态时 $\theta = 0^\circ$, 当基本单元处于完全展开的状态下 $\theta = 90^\circ$ 。

在直角三角形 $\triangle OAD$ 中, 有:

$$H_1 = L \tan \beta' \quad (3)$$

结合式(1)~式(3), 可以推导出顶角在垂直面上的投影角为:

$$\tan \beta' = \tan \beta \sin \theta \quad (4)$$

同理, 可以得到:

$$H_2 = L \tan \beta'' \quad (5)$$

$$\tan \beta'' = \tan \beta \cos \theta \quad (6)$$

$$\beta'' = \frac{\pi}{2} - \theta \quad (7)$$

2.2 Yoshimura 折痕运动学分析

折纸图案基本单元在横向和纵向两个方向上分别排列如图 10 所示, 矩形框中为基本单元。对于基本单元, 除了可以将它简化为由杆和销轴组成的桁架结构, 也可以将它看成是由一系列三角形板组成。为了便于分析, 假设三角形板通过接头连接,

允许每块三角形板沿相交线旋转,图 10 中虚线为添加的辅助边界线。折痕运动过程几何示意图如图 11 所示。

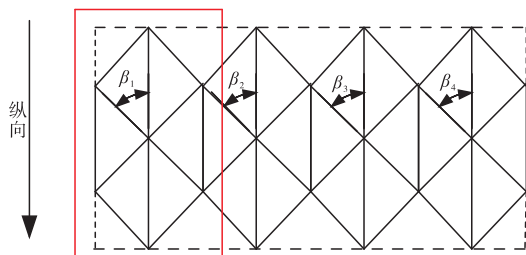


图 10 基本单元完全展开状态时的三角形板分布

Fig. 10 Triangular plate distribution when the base cell is fully expanded

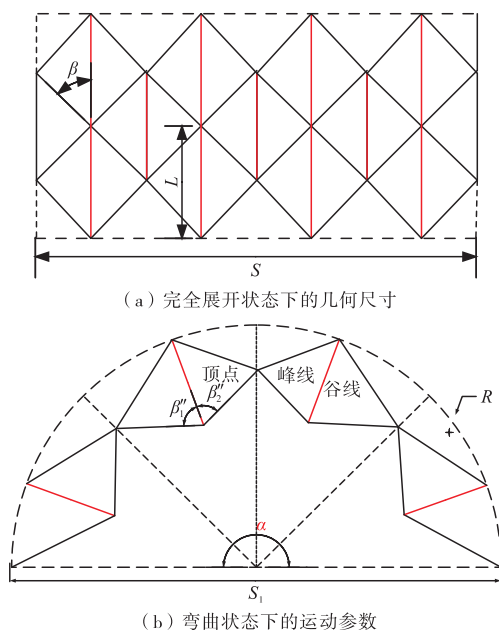


图 11 折纸的运动几何参数

Fig. 11 Motion geometric parameters of origami

折叠状态中心角 α 为:

$$\alpha = (p-1)(\beta_1'' + \beta_2'') \quad (8)$$

式(8)中, p 为横向的三角形板数。

圆弧半径 R 为:

$$R = \frac{2L}{\sin(\beta_1'' + \beta_2'')} \quad (9)$$

式(9)中, L 为谷线的长度。

折叠状态的水平跨距 S 为:

$$S = 2R \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

把式(9)和式(10)代入式(11)可得水平跨距 S_1 为:

$$S_1 = \frac{2L}{\sin(\beta_1'' + \beta_2'')} \sin\left(\frac{(p-1)(\beta_1'' + \beta_2'')}{2}\right) \quad (11)$$

折叠过程中基本单元的弯曲程度 H 为:

$$H = \frac{L}{\sin(\beta_1'' + \beta_2'')} \left[1 - \cos\left(\frac{(p-1)(\beta_1'' + \beta_2'')}{2}\right) \right] \quad (12)$$

纵向上基本单元的宽度 v 为:

$$v = L \tan \beta'' = L \tan \beta \sin \theta \quad (13)$$

因此,在整个折纸的折叠运动过程中,总的纵向宽度 V 为:

$$V = mv = mL \tan \beta \sin \theta \quad (14)$$

式(14)中, m 为纵向的三角形板数,根据假设有 $p = 8, m = 3, 4$ 个基本单元仅考虑顶角相等时的运动。

根据建立的模型,假设 $p = 8, m = 3$, 顶角 $\beta = 45^\circ$, 运动过程中发生变化的量是结构的半径 R 、横向跨距 S_1 、弯曲程度 H 和纵向宽度 V 。假设 $\beta_1'' = \beta_2''$, 折叠状态下和完全展开状态下折叠角的函数关系式为:

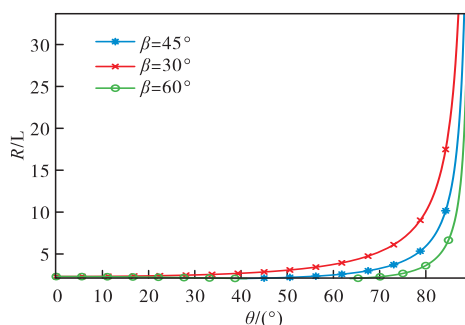
$$\beta'' = \arctan(\sin \theta) \quad (15)$$

$$R = \frac{L}{\sin 2\beta''} = \frac{L(1 + \cos^2 \theta)}{\cos \theta} \quad (16)$$

假设横向纵向三角形板数和顶角为已知量,研究运动过程中的几何参数的变化。对于抓取半径 R 、横向跨距 S_1 和弯曲程度 H ,其数值越大,对应可抓取物体的半径就越大,决定了能抓多粗的物体;对于纵向宽度 V ,其数值越大对应可抓取物体的整体大小,决定了能抓多长的物体。为了表示方便,研究各个几何参数与 L 的比值 K 和 θ 之间的关系。

1) 顶角的影响

不同顶角运动过程中的半径 R 、横向跨距 S_1 、弯曲程度 H 和纵向宽度 V 的影响如图 12 所示。研究的顶角有 $30^\circ, 45^\circ$ 和 60° , 分别用红色实线、蓝色实线和绿色实线表示。



(a) 半径的变化情况

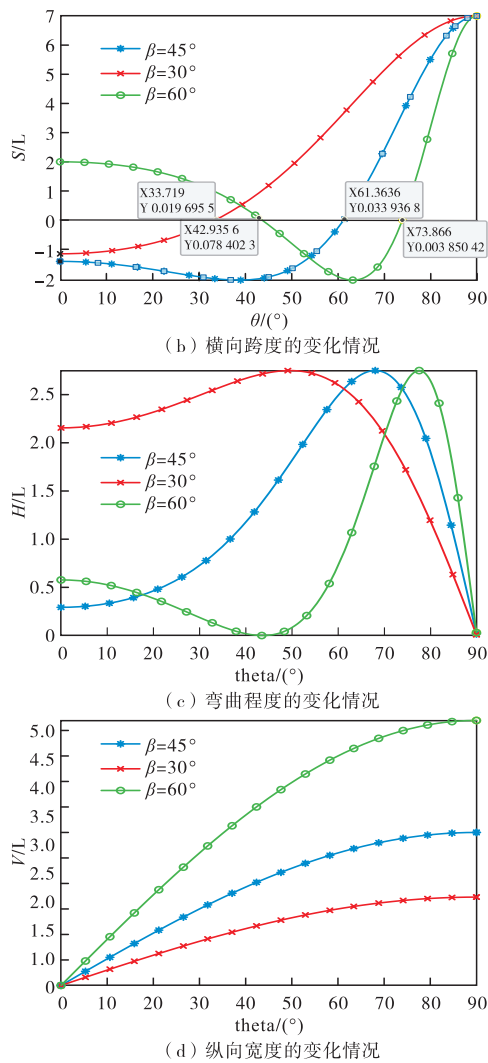


图 12 不同顶角运动几何参数的变化

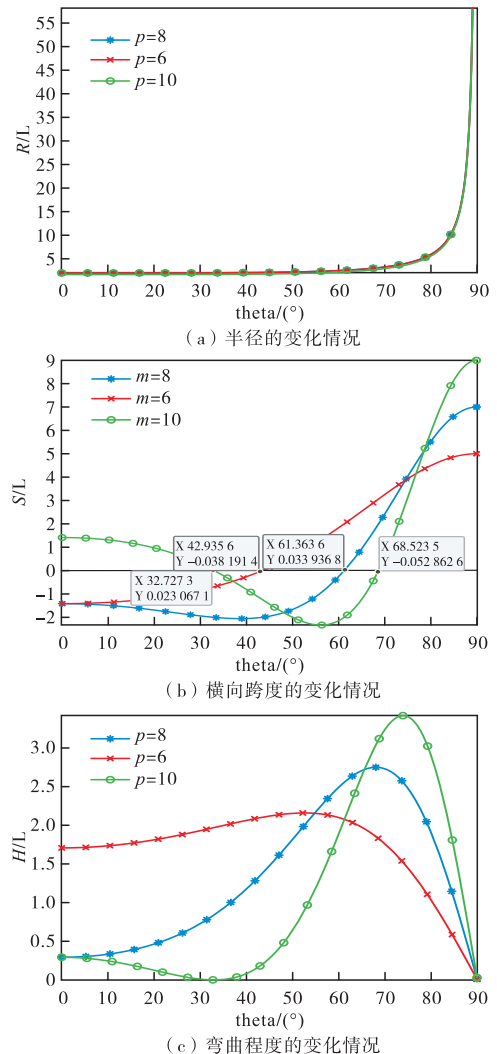
Fig. 12 Changes in geometric parameters of motion for different apex angles

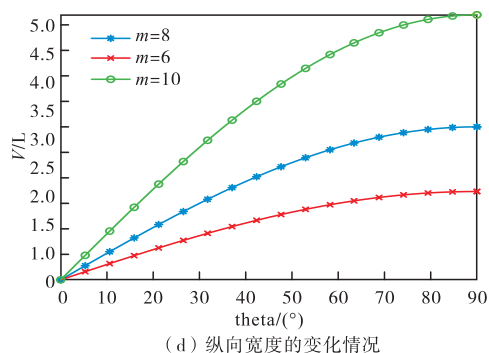
从图 12(a)中可以看出,随着折叠角度的增大,基本单元完全展开,半径从 0 逐渐趋于无穷大, θ 的值从 0° 增加到 90° 。无论是在折叠状态还是完全展开的状态,在相同的折叠角度下,半径都随着顶角的减小而增大,即相同折叠角度下,半径越大,可以抓取物体的半径越大。从图 12(b)中可以看出随着折叠角 θ 的增加,横向跨度因顶角的不同,有两种变化情况:第 1 种是随着折叠角的增大,先逐渐减小再显著增大;第 2 种是随着折叠角的增大而增大。可以发现,相同折叠角度下横向跨度越大,可抓取物体的半径越大。故当顶角小于一定值时,横向跨度随着折叠角的增大逐渐增大,可以抓取更大的物体。横向跨度在不同顶角的情况下都出现了负值,表示折纸单元发生干涉。这显然是不能出现的,因此实际折叠角度是有一定限制。

从图 12(c)中可以看出随着折叠角度的增加,弯曲程度有两种变化情况,第 1 种是随着折叠角度的增加,弯曲程度先逐渐增加到最大值,再迅速减小到 0;第 2 种是弯曲程度先减小到最小值,再增加到最大值,最后快速减小到 0,表示弯曲程度越大抓取物体的半径就越小。弯曲程度的最大值随着顶角的不同而不同,顶角越大最大弯曲程度的值越大,对应的折叠角度也越大。从图 12(d)中可以看出,随着折叠角的增大,纵向宽度逐渐增大。如果不考虑材料的厚度,在折纸处于完全折叠状态时,纵向跨度为 0;随着 θ 角的增大横向跨度呈线性增加,之后增加速度逐渐变慢直至最大值。对应的实际情况是,纵向宽度越大可以抓取更大的物体。顶角影响折纸折叠过程的纵向宽度,顶角越大纵向宽度也越大。

2) 横向三角板数的影响

研究的横向三角板数有 6、8 和 10,对应机械手基本单元的数目,不同横向三角板数对运动几何参数的变化曲线如图 13 所示。





(d) 纵向宽度的变化情况

图 13 不同横向三角板数运动几何参数的变化

Fig. 13 Changes in the geometric parameters of the motion of different transverse triangular plates

由图 13(a) 可知不同数量三角形板对半径没有影响。由图 13(b) 可知随着折叠角度的增大, 横向跨度有两种变化情况。当横向三角板数较少时横向跨度随着折叠角的增大而不断增大, 且不同的横向三角形板数对折展过程中的横向跨度的大小有影响。由图 13(c) 可知当横向三角形板数较多时, 弯曲程度随着折叠角的增大先逐渐减小, 再增加到最大值, 最后减小到 0。横向三角形板数对折叠过程中弯曲程度的数值大小有影响。由图 13(d) 可知横向三角形板数对纵向宽度没有影响。

3) 纵向三角板数的影响

纵向三角形板数只影响折纸的纵向宽度, 因此只对三角形板数和纵向宽度进行分析。研究的纵向三角板数为 3、6 和 9, 纵向宽度随 m 的变化规律如图 14 所示。

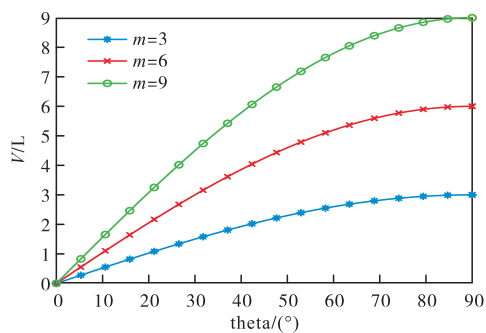


图 14 纵向宽度的变化情况

Fig. 14 Changes in vertical width

由图 14 可知, 纵向宽度满足随着折叠角度的增大而增大的变化规律。此外, 随着纵向三角形板数的增加, 即单元层数的增加整个折叠过程中的纵向宽度增加。即纵向三角形板数越多, 可以抓取的物体长度越长。

3 Yoshimura 折痕三维设计

折纸实物如图 15 所示, 将实物中的各峰谷折痕线用桁架杆代替, 连接多个峰谷线或边界边的顶点用销接代替, 桁架杆和销接处都可安装滑轮。



图 15 对应的多单元实物

Fig. 15 Corresponding multi-unit physical objects

鉴于此, 提出一种索杆桁架式机械手设计方案, 如图 16 所示, 绳索分别绕过滑轮缠绕在卷筒上, 驱动卷筒回转可实现张力索的收放运动。当张力索 1 收紧时, 在上面 3 个滑轮的作用下, 两销将向着中间的杆靠拢, 假想是多个单元串联在一起, 整个机械手将会沿逆时针方向弯曲实现抓取动作; 反之当张力索 1 放松, 机构由于自身的回复力, 将沿顺时针方向转动。因此, 可通过张力索 1 的协调收放运动驱动机构的弯曲运动。当张力索 2 和 3 (沿张力索 1 所在平面, 与 2 成对称分布) 收紧时, 在下面 3 个滑轮的作用下, 两滑轮将沿轴向向中间的销接靠拢, 串联单元均将沿着轴向收缩, 实现线性运动; 反之张力索 2 放松时, 机构由于自身的回复力, 将沿着轴向展开。因此, 可通过张力索 2 的协调收放运动驱动机构的轴向线性运动。

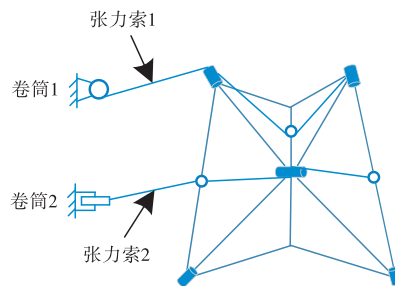


图 16 单个单元的绳索驱动结构

Fig. 16 Rope drive structure for a single unit

绳索驱动机械手的等效模型如图 17 所示, 张力索绕过滑轮, 驱动力通过绳索、滑轮及转动关节传递到每个单元上, 当驱动力产生的力矩大于关节总阻力矩时, 机构发生运动。

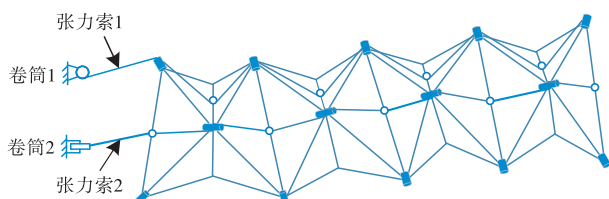


图 17 绳索驱动机械手的等效模型

Fig. 17 Equivalent model of a rope-driven manipulator

以圆柱物体为目标,若可抓取最大目标半径 R_0 和机械手关节机构的长度 L_0 (抓取后的,相对较小),并假设抓住圆柱的 $3/4$ 即可稳定抓取,则有:

$$R = \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{L_0}{2}\right)^2} \alpha \quad (17)$$

$$L = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{4} \pi R_0 - L_0 \right)$$

考虑到抓取目标时,实际包络圆柱面表面的线只是内表面串联接起的三角形几何面,假设已知抓取过程中两面的夹角为 θ ,一个机械手共有 n 个单元,则有:

$$\begin{cases} s = \frac{L}{2n \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \\ a = \sqrt{2}s, b = 2s \end{cases} \quad (18)$$

由于该机构捕获目标时需要由机构单元包络目标,且考虑到机构设计要求具有可扩展性,每个单元基本尺寸相同。假定可抓取最大目标半径 R_0 为 40 mm,关节机构长度 L_0 为 10 mm,抓取物体后两面夹角为 60° ,每根手指共有 6 个基本单元,则其他参数如表 1 所列。

表 1 机械手尺寸

Tab. 1 Manipulator size

物理量/mm	R	L	s	a	b
数值	40.3	42.1	14	19.8	28

4 机械手三维结构设计

第 3 节确定了各轴的长度,但由于接头的尺寸,轴的长度略微有所变化,经修正后的基本单元三维图如图 18 所示。主接头与 6 根轴相连接,4 根短轴分别与 4 个副接头 A 相连,两根长轴分别与两个副接头 B 相连接。

在设计好基本单元之后双指机械手就是基本单元模块化拓展,图 19 和图 20 分别是机械手展开状态和抓取物体状态的情况。在受到静载时,机械

手会沿着两根长轴优先向中间折叠收缩,减小机构本身的变形,因此具有结构刚度大的特点。

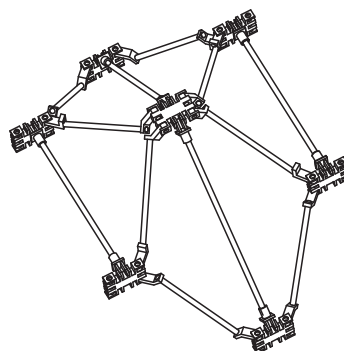


图 18 单个单元的三维图

Fig. 18 3D diagram of a single unit

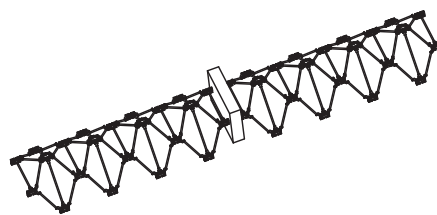


图 19 双指机械手展开状态

Fig. 19 Two-finger manipulator unfolded state

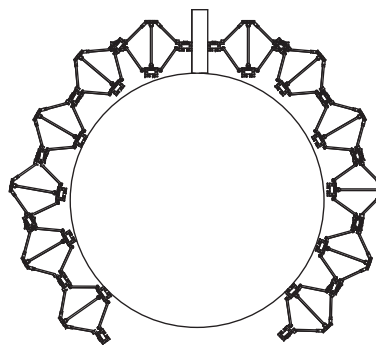


图 20 双指机械手抓取状态

Fig. 20 Two-finger manipulator grasping status

对于折纸的自由度分析,先将折痕单元看作刚性平板,折痕当作转动副,整体机构可当作空间连杆计算。基于螺旋理论计算机构中的公共约束和过约束,借用修正的 G-K 公式^[13]得到机构的自由度 M 为:

$$M = 6 - c \cdot q + \lambda(p - 1) + \nu \quad (19)$$

式(19)中, c 为并联分支数, q 为分支向动平台施加的结构约束, λ 为机构的公共约束数, ν 为冗余约束。

单个折纸单元如图 21 所示,基本折纸单元建立如图 22 所示的坐标系,8 条折痕对应 8 个转动副的螺旋量,可表示为:

$$\begin{cases} S_1 = (0, 1, 0; x_1, 0, z_1) \\ S_2 = (x_2, y_2, z_2; 0, 0, 0) \\ S_3 = (x_3, y_3, 0; 0, 0, 0) \\ S_4 = (x_4, y_4, z_4; 0, 0, 0) \\ S_5 = (x_5, y_5, z_5; 0, 0, 0) \\ S_6 = (x_6, y_6, 0; 0, 0, 0) \\ S_7 = (x_7, y_7, z_7; 0, 0, 0) \\ S_8 = (0, 1, 0; x_8, 0, -z_8) \end{cases} \quad (20)$$

根据式(20)可得该坐标系的约束螺旋系为:

$$S_1^T = (0, 1, 0; 0, 0, 0) \quad (21)$$

式中, S_1^T 表示的是一个平行于 y 轴, 且过分支坐标系原点, 即机构中心点的一个约束力线矢。

动平台受到 6 个分支施加的 6 个约束力线矢的作用, 几个约束力线矢各自平行于其分支中的第一个转动副轴线且汇交于各自折板处中心, 所以不存在公共约束, 即 $\lambda = 0$, 且这 6 个约束力线矢共面不汇交。6 个并联对称分支的约束力矢共面, 空间中共面的多个线矢秩为 3, 即 $k = 3$, 可以计算得到:

$$v = c \cdot q - \lambda c - k = 3 \quad (22)$$

每个基本单元的自由度为:

$$M = 6 + \lambda(2c - 1) - k = 3 \quad (23)$$

说明了机械手结构单元有两个转动自由度和一个移动自由度。

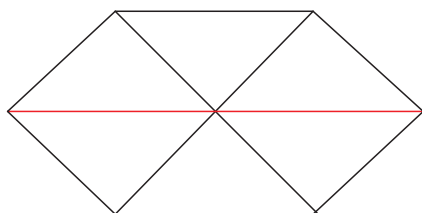


图 21 单个折纸单元

Fig. 21 Origami unit

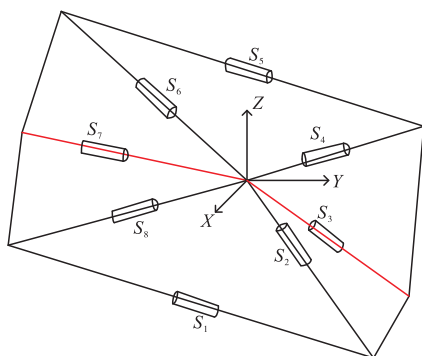


图 22 折纸等效结构

Fig. 22 Origami equivalent structure

5 结论

文章基于 Yoshimura 折痕提出了一种新型双指空间抓捕机械手, 主要结论包含以下两点:

1) 提出了基于 Yoshimura 折痕的双指机械手, 该结构由折痕等效形成的销杆连接构成, 具有弯曲程度大、抓取适应性强和结构刚度大的优点, 并进行了三维结构设计。

2) 基于投影原理对 Yoshimura 折痕的双指机械手进行了自由度分析和几何分析, 发现双指机械手单元有 3 个自由度; 机械手每个单元上的杆之间角度越大, 可抓取物体的半径越小; 机械手中横向和纵向单元数目增加, 可抓取物体的半径越大。

弯曲双指机械手是对 Yoshimura 折痕的应用, 并且脱离了传统的柱状机械手抓取模式。虽然折纸的实物有优良的抓取性能, 但运动学分析还有待完善, 抓取可行性也有待验证。

参考文献:

- [1] MEHNER P J, LIU T, KARIMI M B, et al. Toward engineering biological tissues by directed assembly and origami folding [M]. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society, 2015: 545-555.
- [2] KIM S H, LEE H R, YU S J, et al. Hydrogel-laden paper scaffold system for origami-based tissue engineering [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(50): 15426-15431.
- [3] BABILIO E, MIRANDA R, FRATERALI F. On the kinematics and actuation of dynamic sunscreens with tensegrity architecture [J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 7.
- [4] KAMRAVA S, MOUSANEZHAD D, FELTON S M, et al. Programmable structures: Programmable origami strings (adv. mater. technol. 3/2018) [J]. Advanced Materials Technologies, 2018, 3(3): 1870012.
- [5] PAGANO A, YAN T X, CHIEN B, et al. A crawling robot driven by multi-stable origami [J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(9): 094007.
- [6] ZHAKYPOV Z, PAIK J. Design methodology for constructing multimaterial origami robots and machines [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(1): 151-165.
- [7] SUH J E, KIM T H, HAN J H. New approach to folding a thin-walled yoshimura patterned cylinder [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2020, 58(2): 516-530.
- [8] WICKELER A L, NAGUIB H E. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling [J]. Materials and Design, 2020, 186: 108242.

- [9] ZHAI Z R, WANG Y, JIANG H Q. Origami-inspired, on-demand deployable and collapsible mechanical metamaterials with tunable stiffness[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(9):2032-2037.
- [10] 周晓涛,王栋,马小飞. 空间可展开结构中壳膜结构的建模分析研究综述[J]. 空间电子技术, 2019, 16(3): 15-25.
- [11] CHEN Y, SAREH P, YAN J Y, et al. An integrated geometric-graph-theoretic approach to representing origami structures and their corresponding truss frameworks[J]. Journal of Mechanical Design, 2019, 141(9):091402.
- [12] CHEN Y, FAN L Z, BAI Y T, et al. Assigning mountain-valley fold lines of flat-foldable origami patterns based on graph theory and mixed-integer linear programming[J]. Computers and Structures, 2020, 239:106328.
- [13] 郭鑫. 基于折纸原理的可展式机械手设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019:22-25.

作者简介:蒋天赐(2001—),安徽巢湖人,本科在读。主要研究方向为折纸机构设计与分析。E-mail:jitici666@163.com

通讯作者:杨慧(1986—),安徽亳州人,博士,副教授,硕士生导师。主要研究方向为空间超弹折展机构,变形翼骨架机构和空间抓捕机械手设计。E-mail: huiyang_0431@163.com