

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.043

单自由度平面六杆手指机构解域综合方法

韩建友 蔡营疆

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

摘要: 为适应机器人手指多用途、多尺寸的设计要求,提出一种基于单自由度平面六杆机构解域的手指机构设计综合方法。根据平面六杆机构4个给定的运动位置可得到无穷多机构解,将这些机构解表示在一个平面域上,该域称为解域。本文给定平面六杆机构的4个运动位置,限制待求铰链点的坐标范围,通过给出的铰链点曲线求解方法,得到铰链点解曲线和可行段,对可行段进行分段,得到解域,在此基础上,引入力传递性能指标 K ,限定其范围,对解域进行进一步的筛选,得到新的可行解域,并得到 K 在解域上的分布规律,最终可在新解域中选择满足全部条件的机构作为机构解。 K 值的引入使得所得的机构具有较好的力学性能。解域上的每一点均为满足要求的平面六杆机构,可根据设计的目的(如仿生手指、康复手指等)选择不同的机构进行手指的设计。从新可行解域中选择一个机构设计手指样机,该样机证明了所提出方法的正确性和有效性。

关键词: 解域; 手指; 平面六杆机构; 力传递性能指标

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0367-07

Solution-region Synthesis Method of Single-degree-of-freedom Planar Six-bar Mechanisms for Robotic Fingers

HAN Jianyou CAI Yingjiang

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A solution region design method based on planar six-bar mechanisms for robotic fingers was proposed to achieve the goal of obtaining diversified fingers with different dimensions. An infinite number of solutions of planar six-bar mechanisms can be obtained by predefining four moving positions, and all these solutions can be expressed on a planar region, which was called the solution region. Firstly, the planar six-bar mechanisms had five moving links, and three of them simulated the proximal, middle and the distal knuckle of human fingers, respectively. Four moving positions of the three links, which expressed the bending motion of a finger, were predefined. The coordinates of unknown joints, which were located inside the finger, were limited to restrict them in the knuckle. According to the theory of motion generation in four moving positions of planar six-bar mechanisms, the solution curves and feasible segments of the known joints were obtained. After segmenting the feasible segments, a solution region of planar six-bar mechanisms, expressed by the coordinates of two joints, was established. The parameter K , an index that measured the force transmission property of a mechanism, was introduced to filter the feasible segments. Then a feasible solution region was obtained, and the distribution law of K on the feasible solution region was analyzed. Finally, A planar six-bar mechanism was selected on the feasible solution region to design a finger prototype. The new feasible solution region expressed actual coordinates of the joints, and showed the force transmission property of planer six-bar mechanisms directly, which contributed to the selection of mechanisms that satisfied all the requirements. Each point on the feasible solution region was a planar six-bar mechanism. Therefore, appropriate planar six-bar mechanisms can be selected on the solution region according to different design objectives, such as anthropomorphic fingers, rehabilitation fingers. And the prototype proved the validity and availability of the solution region design method for robotic fingers design.

Key words: solution region; robotic fingers; planar six-bar mechanisms; force transmission property index

收稿日期: 2018-06-14 修回日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775035, 51275034)

作者简介: 韩建友(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事机构分析与综合理论研究, E-mail: jyhan@ustb.edu.cn

0 引言

仿生手的发展给残疾人的生活带来极大的便利。为实现人手指的功能,许多手指被发明出来,比如采用记忆合金的手指^[1-3]具有无噪声的特点。POTRATZ等^[4]采用弹簧来减轻手指的质量,但其具有5个自由度,需要较多的驱动电机。LOTTI等^[5]采用由弹性铰链构成的连杆机构,其自由度为4,成本较高。还有采用单晶硅的手指^[6]和欠驱动多自由度手指,比如Belgrade/USC手指^[7]、TBM手指^[8]和SPRING手指^[9],这些手指采用腱驱动其中的几个关节即可实现运动,没有被驱动的关节的运动则取决于抓取物体的外形。除此之外,欠驱动手指理论也有一定的发展^[10-12]。欠驱动手指分为两类,一种是采用肌腱驱动的手指,一种是采用连杆驱动的手指,如文献[13]中的手指同时采用平面五杆机构和平面四杆机构,其成本较低。也有根据人手骨骼结构设计的手指^[14],然而这种手指结构比较复杂,加工较难。另外,也有采用气动柔性驱动器进行驱动的手指^[15-16],但其仿生程度不高。连杆机构可以应用于康复手指的设计,但是在已有的康复手指中,文献[17-18]根据初始的条件只得到一个确定的机构。本文采用单自由度平面六杆机构设计手指机构,其控制简单,采用1个电机即可实现控制,易加工,且通过解域法得到满足初始条件的无穷多机构,每个机构都可以应用于手指的设计,因此可达到机器人手指多用途、多尺寸、易控制的要求。同时为得到较好的力学性能,引入力传递性能指标 K ^[19]。本文在文献[20-21]的基础上进行改进和扩展,对解域的形成给出不同的生成方法,该方法能更明确地表示出解域上连续变化的性能,从而形成所需要的各种曲线,并引入力传递性能指标。

1 手指机构综合

本文首先给出手指机构的3个指节的4个运动位置,并给定手指关节的坐标限制范围,据此得到铰链点的可行曲线段,对可行曲线段进行分段,形成解域,然后引入力传递性能指标 K ,对解域进行筛选,得到可行解域,最后在解域中选择一个平面六杆机构,得到手指机构的全部参数,并根据选择的机构给出手指的设计示例,整个过程如图1所示。

1.1 运动生成综合理论

如图2所示为2个连杆平面 π^1 、 π^2 ,其位置由其上的一点 $b(m)$ 和一条通过该点的直线 $bl_b(ml_m)$ 来确定。两连杆平面在第 $i(i=1, 2, 3, 4)$ 运动位置时分别用 π_i^1 和 π_i^2 表示,其中 b 点坐标为 $b_i(x_{b_i},$

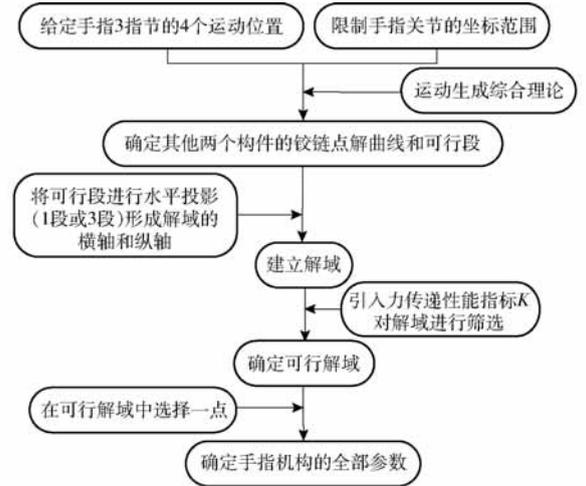


图1 手指机构设计过程

Fig. 1 Design process of finger mechanisms

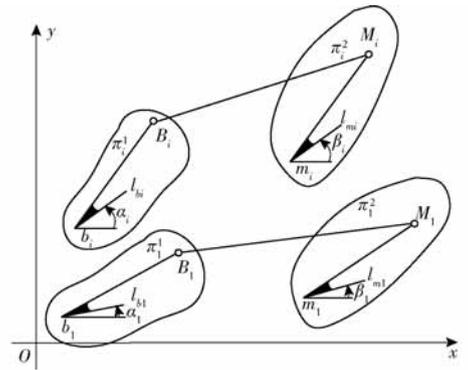


图2 连杆平面运动示意图

Fig. 2 Diagram of links planar motion

y_{b_i}), m 点坐标为 $m_i(x_{m_i}, y_{m_i})$, 直线 $b_i l_{b_i}$ 的方位角为 α_i , 直线 $m_i l_{m_i}$ 的方位角为 β_i 。铰链点 B 和 M (2个待求铰链点, 构成连杆 BM)分别位于连杆平面 π^1 、 π^2 上, 其在4个位置的坐标分别为 $B_i = (x_{B_i}, y_{B_i})^T$ 和 $M_i = (x_{M_i}, y_{M_i})^T$ 。

设连杆平面 π^1 、 π^2 从运动位置1到运动位置 i ($i=2, 3, 4$)的位移矩阵分别为 D_{1i}^1 和 D_{1i}^2 。则

$$\begin{bmatrix} B_i \\ 1 \end{bmatrix} = D_{1i}^1 \begin{bmatrix} B_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} M_i \\ 1 \end{bmatrix} = D_{1i}^2 \begin{bmatrix} M_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据杆长不变原理, 连杆 BM 的长度不变, 即 $[B_i - M_i]^T [B_i - M_i] = [B_1 - M_1]^T [B_1 - M_1]$

将式(1)、(2)代入式(3), 整理可得

$$C_i x_{B_1} + E_i y_{B_1} + F_i = 0 \quad (i=2, 3, 4) \quad (4)$$

把 x_{B_1} 和 y_{B_1} 看作未知数, 则式(4)有解的条件为

$$\begin{vmatrix} C_2 & E_2 & F_2 \\ C_3 & E_3 & F_3 \\ C_4 & E_4 & F_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

整理可得铰链点 M 满足的三次曲线方程^[22-24]

$$H_1x_{M1}^3 + H_2y_{M1}^3 + H_1x_{M1}y_{M1}^2 + H_2x_{M1}^2y_{M1} + H_3x_{M1}^2 + H_4y_{M1}^2 + H_5x_{M1}y_{M1} + H_6x_{M1} + H_7y_{M1} + H_8 = 0 \quad (6)$$

曲线(6)为广义布尔梅斯特曲线,在曲线(6)上取得一点,可得铰链点 M 在运动位置1的坐标,代入式(4)即可得到对应的铰链点 B 在运动位置1的坐标。若其中一个连杆平面为固定平面,则对应的位移矩阵为单位矩阵,此时曲线(6)为布尔梅斯特曲线。利用本节求曲线方程的方法,可对平面六杆机构进行综合。

1.2 解曲线及解域生成

本文采用 Watt-I 型平面六杆机构设计手指。平面六杆机构需要实现人手指弯曲的动作,同时,当有外力施加到机构上时,机构需要具有良好的力学传递性能。文献[20]根据 Watt-I 型平面六杆机构4位置运动生成理论得到解域,其表达了所有 Watt-I 型平面六杆机构在解域中的位置,但未能表达机构的力学性能和铰链点的实际坐标,本文在此基础上,给出新的解域生成方法,对曲线分段,按铰链点的实际坐标生成3部分解域,将铰链点坐标直接表达在解域上,除此之外,引入力传递性能指标 K ,得到 K 在解域上的分布规律,使得解域中机构的力学性能更加直观。

图3为单自由度平面六杆机构,其通过4个预定的运动位置(位置1、2、3、4)。铰链点 a_0 和铰链点 d_0 为固定铰链点,其他铰链点为动铰链点,且铰链点 a_0 位于所选坐标系的原点,铰链点 $d、e、f、d_0$ 为待求铰链点。 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 分别为 $a_0a、ab、bc$ 与 x 轴的夹角(按右手法则,逆时针为正)。 $L_1、L_2、L_3$ 分别为 $a_0a、ab、bc$ 的长度。 F 为施加在连杆 bce 上的外力(为简化受力状态,将外力施加在1个连杆上), T 为施加在连杆 a_0ad 上的力矩。在运动过程中 F 的大小不变(为方便计算,示例中设置为1 N),驱动力矩 T 为

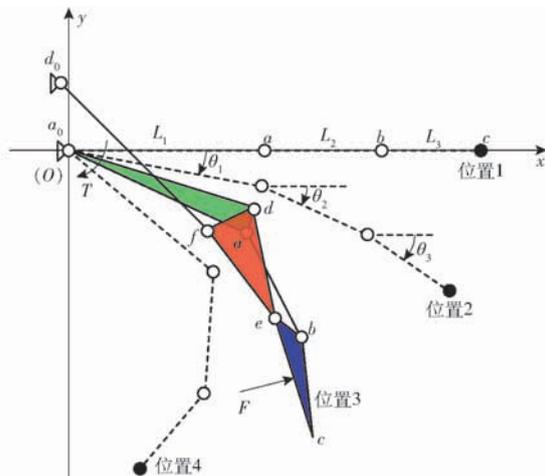


图3 单自由度平面六杆机构

Fig. 3 Planar six-bar mechanism with one DOF

待求量。

根据人手指3个指节的长度,给定 $L_1、L_2、L_3$ 的值,如表1所示。给定 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 在4个运动位置的值,如表2所示,给定铰链点 $d_0、d、e、f$ 的坐标限制范围,如表3所示。通过连架杆 a_0a 的4个位置和连杆 bc 的4个位置,即2个连杆平面,采用1.1节求铰链点曲线的方法,得到在运动位置1处铰链点 d 的解曲线(C_d)及可行段,也可得到铰链点 e 的解曲线(C_e)和可行段,此时 $a_0、a$ 分别对应图2中的 $b、m$ 。 $\theta_1、\theta_2$ 分别对应图2中的 $\alpha、\beta$ 。 $d、e$ 分别对应图2中的 $B、M$,通过计算整理得 C_d 和 C_e ,其与式(6)具有相同的形式。图4显示了解曲线 C_d 和可行段。由于 C_d 可行段上的点和 C_e 可行段上的点需同时满足各自的坐标限制范围, C_d 可行段并不连续。

表1 $L_1、L_2、L_3$ 的值

Tab.1 Values of L_1, L_2 and L_3 mm

参数	L_1	L_2	L_3
数值	50	30	25

表2 $\theta_1、\theta_2、\theta_3$ 在4个运动位置的值

Tab.2 Values of θ_1, θ_2 and θ_3 in four moving positions ($^\circ$)

参数	位置1	位置2	位置3	位置4
θ_1	0	-10	-25	-40
θ_2	0	-24	-62	-98
θ_3	0	-35	-84	-130

表3 待求铰链点坐标限制范围

Tab.3 Limited ranges of coordinates of unknown joints mm

铰链点	x_{min}	x_{max}	y_{min}	y_{max}
d_0	-10	10	-20	20
d	30	70	-20	20
f	30	70	-20	20
e	50	90	-20	20

C_d 可行段上的点和 C_e 可行段上的点有一一对应的关系。在 C_d 可行段上选择一点后,与该点对应的铰链点 e 也确定,即确定连杆 de 在运动位置1处的位置,通过铰链点 d 和铰链点 e 可得到连杆 a_0ad 和连杆 bce 的尺寸,基于此,得到铰链点 d 和铰链点 e 在其他运动位置的坐标,通过连杆 de 的4个位置和机架,采用1.1节求铰链点曲线的方法,得到铰链点 d_0 在运动位置1处的解曲线(C_{d_0})和可行段,也可得到铰链点 f 的解曲线(C_f)和可行段。此时原点 $O、d$ 分别对应图2中的 $b、m$ 。 de 为图2中的 l_{m1} 且 α

为 0° 。 d_0, f 分别对应图2中的 B, M ,通过计算整理得到 C_{d_0} 和 C_f ,其与式(6)具有相同的形式。

在 C_d 可行段上选择不同的点会得到不同的解曲线 C_{d_0} 和可行段,图5和图6分别为当选择图4中点 A 和点 B 后得到的铰链点 d_0 的解曲线和可行段。 C_{d_0} 可行段上的点和 C_f 可行段上的点也有一一对应的关系。在 C_{d_0} 上选择一点后,就确定了连杆 d_0f 在运动位置1的位置,结合连杆 de 在运动位置1处的位置,就确定了1个平面六杆机构。

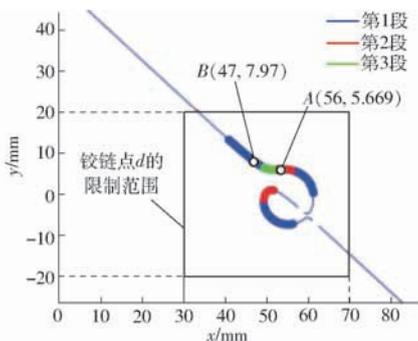


图4 铰链点 d 解曲线和可行段

Fig. 4 Solution curve and feasible curves of joint d

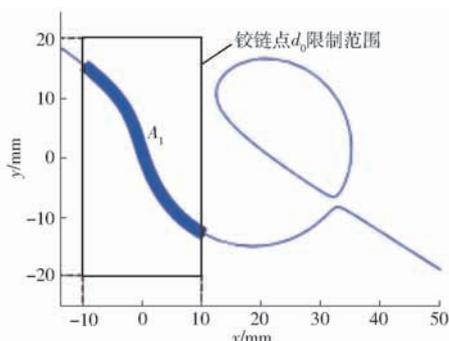


图5 图4中取 A 点得到的铰链点 d_0 解曲线及可行段

Fig. 5 Solution curve and feasible segments for joint d_0 corresponding to point A in Fig. 4

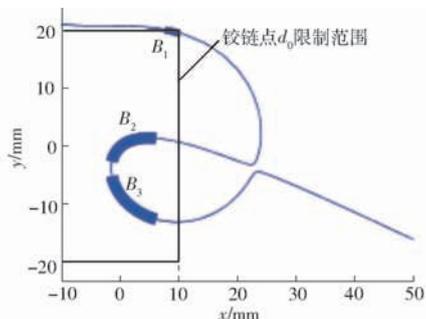


图6 图4中取 B 点得到的铰链点 d_0 解曲线及可行段

Fig. 6 Solution curve and feasible segments for joint d_0 corresponding to point B in Fig. 4

连杆 de 和连杆 d_0f 的位置分别由4个坐标分量(d_x, d_y, e_x, e_y)之一和4个坐标分量(d_{0x}, d_{0y}, f_x, f_y)之一决定,因此,可采用 d_x 和 d_{0x} 分别为横坐标和纵坐标生成解域。当 x 为一定值时,三次曲线方程

变为关于 y 的一元三次方程,其可能有1个或3个实根。因此,对曲线按如下规则进行分段:当只有1个实根时,点 (x, y) 分入第1段曲线;当有3个实根时,按照 y 从小到大的顺序把点 (x, y) 分别分入第1、第2、第3段曲线。根据此分段规则, C_d 可行段被分为3段,其横坐标范围分别为 $41.2 \sim 61.6$ 、 $49.6 \sim 56.4$ 、 $49.6 \sim 52.0$,如图4所示。 C_{d_0} 被分为1段或者3段。在 C_d 可行段上选择一点,得到点 (d_x, d_y) ,并在得到的 C_{d_0} 可行段上选择一点,得到点 (d_{0x}, d_{0y}) ,则解域点为 (d_x, d_{0x}) ,令 m ($m = 1, 2, 3$)和 n ($n = 1, 2, 3$)分别表示点 (d_x, d_y) 和点 (d_{0x}, d_{0y}) 所在的曲线段标号,则解域点 (d_x, d_{0x}) 在图7中的区域 (m, n) (即图7中圆圈中的数字)。从横坐标41.2到56.4按照步长0.2选择 C_d 可行段上的每一点,并选择得到的 C_{d_0} 可行段上的每一点,得到如图7所示的解域。解域中的 A_1 (一条实线)对应图5可行段 A_1 。 B_1, B_3 组成图6可行段的第1段, B_2 为图6可行段的第2段。

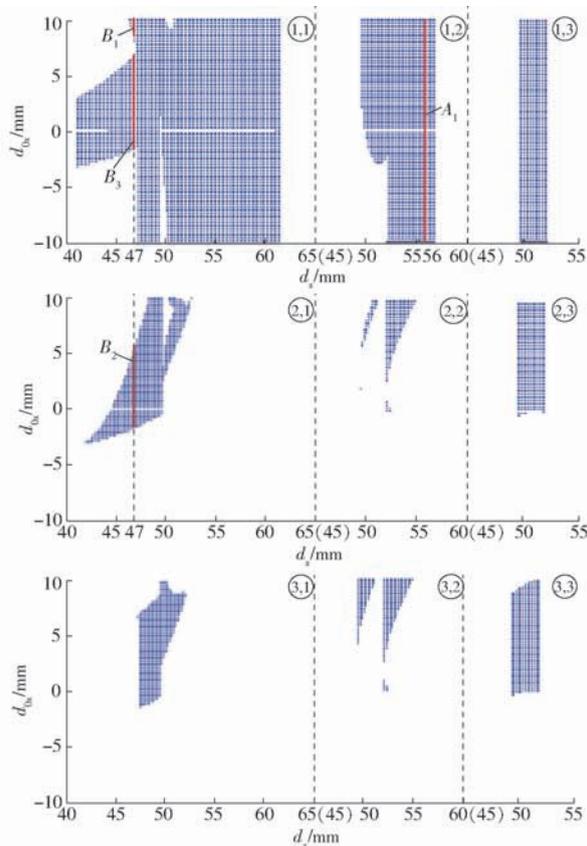


图7 平面六杆机构解域

Fig. 7 Solution region for planar six-bar mechanisms

1.3 力传递性能指标的确定和可行解域生成

为得到力学性能较好的机构,引入力传递性能指标。压力角可衡量一个机构的力传递性能,但只有当外力施加在连架杆上时,压力角才适用^[19]。本文中外力 F 施加在连杆 bce 上,而不是连架杆 d_0f 或

者连架杆 a_0ad , 故此时压力角并不适用于衡量机构的力传递性能, 故本文引入 K 。

如图3所示, 在运动过程中, 假设外力 F 总是垂直于边 ec , 并位于边 ec 的中点。为方便计算, 设外力 F 为 1 N。在 θ_1 从 0° 连续变化到 -40° 的过程中, 令 F_{\max_j} ($i = a, b, d, e, f, a_0, d_0$) 表示铰链点 i 的内力最大值, 令 F_{\max} 表示 F_{\max_j} ($i = a, b, d, e, f, a_0, d_0$) 中的最大值, 则参数 K 表示为^[19]

$$K = \left| \frac{F_{\max}}{F} \right| \quad (7)$$

根据手指的设计目的(如康复手指、仿生手指等), 限制 K 的大小。康复手指对力学性能要求较高, 可取较小的 K , 而仿生手如果仅着重于外形, 则可取较大的 K 。本文限制 $K \leq 20$ 。利用 K 对图7中的所有机构进行筛选, 可得到筛选后的铰链点可行段。图8为引入 K 后铰链点 d 的解曲线和可行段。当选择图8中可行段上的 C 点后, 得到筛选后的铰链点 d_0 可行段, 如图9所示。根据上文提到的曲线分段规则重新对可行段进行分段, 得到如图10所示的新的可行解域。图10中解域1和解域2为后文选择平面六杆机构的区域, 图中点 E, F, G 和 H 坐标分别为 $(48, -4)$ 、 $(50, 0)$ 、 $(54, -10)$ 和 $(57, -2)$ 。

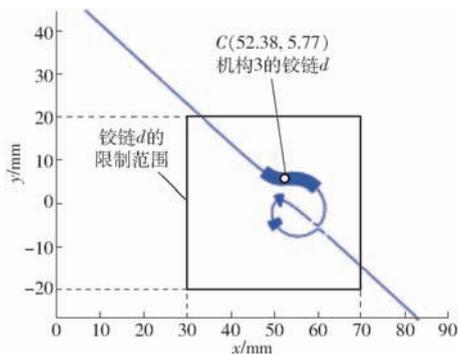


图8 引入 K 后的铰链点 d 解曲线及可行段
Fig.8 Solution curve and feasible segments for joint d with parameter K

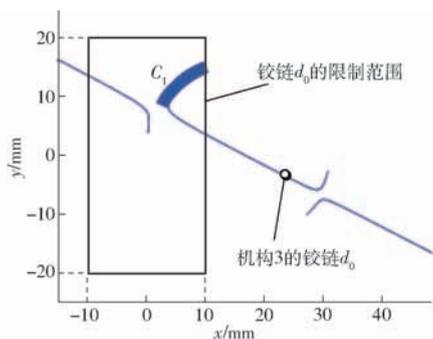


图9 图8中取 C 点得到的铰链 d_0 解曲线及可行段
Fig.9 Solution curve and feasible segments for joint d_0 corresponding to point C in Fig. 8

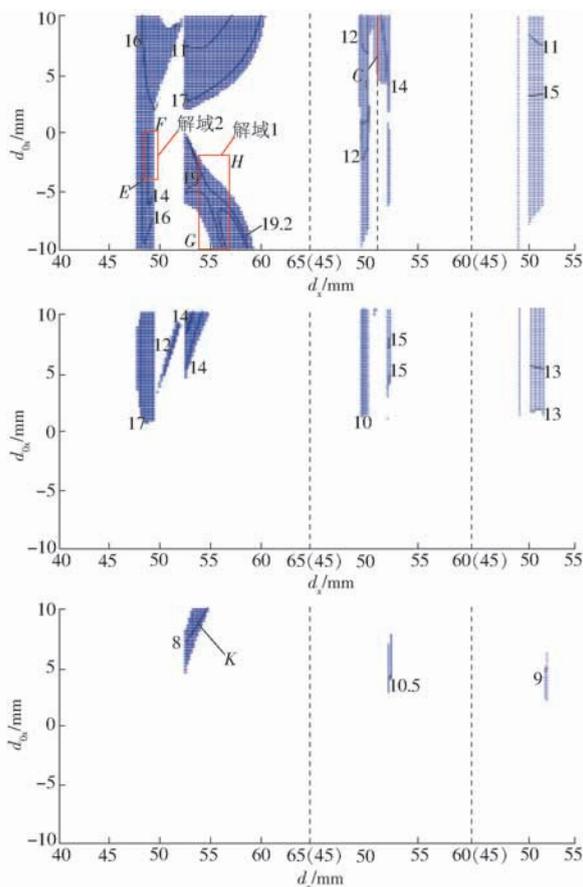


图10 引入 K 后的解域

Fig.10 Solution region with parameter K

2 机构选择和设计示例

采用单自由度平面六杆机构进行手指的设计, 机构铰链点间的距离可影响手指的外形, 因此, K 较低的平面六杆机构由于其力学性能较好, 可用来设计对力学性能要求高的手指, 如康复手指, 而铰链间距离较小的平面六杆机构其结构更加紧凑, 可用来设计仿生手指等对外形要求高而对力学性能要求较低的手指, 但也要考虑结构上能否实现。图11为3个具有不同外形和 K 的平面六杆机构。

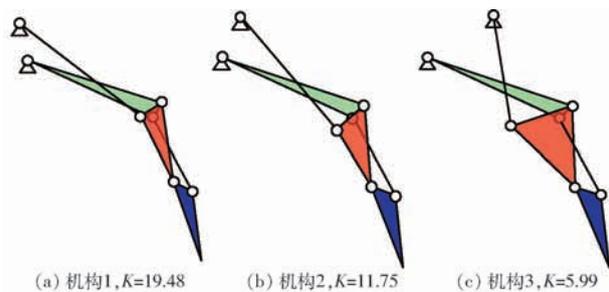


图11 3个具有不同形状和 K 的平面六杆机构

Fig.11 Three planar six-bar mechanisms with different shapes and K values

将图10中的解域1和解域2进行放大, 更清楚地显示机构在解域中的位置, 如图12和图13分别

显示机构 1 和机构 2 在解域中的位置。机构 3 的铰链 d 和铰链 d_0 在曲线上的位置分别如图 8 和图 9 所示。由于机构 3 的铰链 d_0 在限制范围外面,因此解域不包含机构 3。

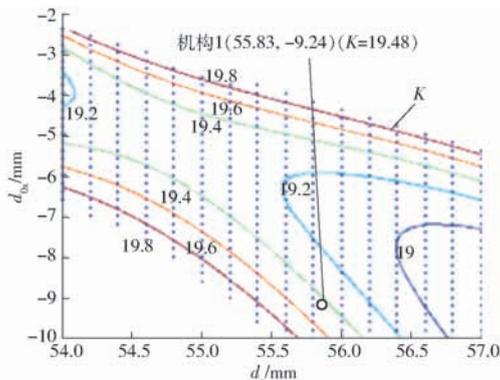


图 12 机构 1 在图 10 解域 1 中的位置

Fig. 12 Location of mechanism 1 in solution region 1 shown in Fig. 10

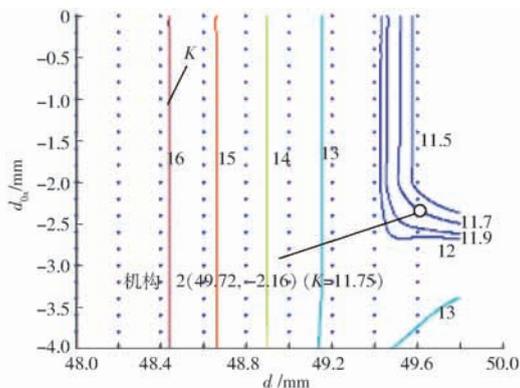


图 13 机构 2 在图 10 解域 2 中的位置

Fig. 13 Location of mechanism 2 in solution region 2 shown in Fig. 10

机构 2 和机构 3 的 K 小于机构 1 的 K , 而机构 1 的结构更加紧凑, 故机构 2 和机构 3 具有较好的力传递性能, 用于康复手指的设计可更好地帮助人手指的运动康复, 而机构 1 用于设计仿生手指可得到更好的手指外形。本文利用机构 1 给出仿生手指设计示例, 机构 1 的铰链点坐标如表 4 所示。

设计出的仿生手指包含 3 个指节和 2 个隐藏在内部的连杆。如图 14 所示, 图 14a 为手指外形示意图, 图 14b 为手指内部结构。图 15 为 3D 打印样机示例。图中手指依次通过 4 个预定的运动位置, 采用 1 个驱动电机即可驱动该手指。

表 4 机构 1 的铰链点坐标

Tab. 4 Coordinates of mechanism 1 mm

a_0	a	b	c
(0,0)	(50,0)	(80,0)	(105,0)
d_0	d	e	f
(-6.4,12.1)	(51.4,5.8)	(76.1,-7.7)	(50.5,-1.2)

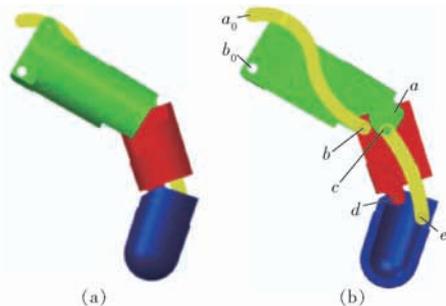


图 14 仿生手指结构

Fig. 14 Structure of anthropomorphic finger

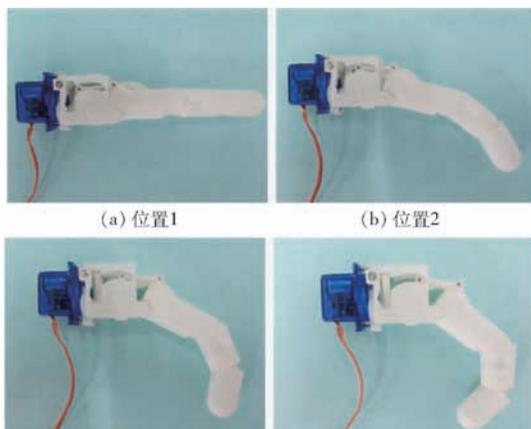


图 15 仿生手指 3D 打印样机

Fig. 15 Prototype of anthropomorphic finger

3 结论

(1) 手指虚拟样机的运动过程能通过给定的 4 个运动位置, 证明设计理论和设计方法是正确有效的。手指样机能实现预期目标, 证明了结构上也是可行的, 且能满足各种性能要求。

(2) 采用单个驱动电机即可驱动手指, 证明力传递性能指标的引入有利于得到具备较好力学性能的机构, 并有利于手指功能的实现。解域能给出所有满足要求的机构解, 可根据不同的设计目的选择合适的结构, 满足机器人手指多尺寸、多用途的设计要求, 同时, 也为进一步优化手指结构提供了可能。

参考文献

- BUNDHOO V, PARK E J. Design of an artificial muscle actuated finger towards biomimetic prosthetic hands [C] // ICAR'05. Proceedings 12th International Conference on Advanced Robotics, IEEE, 2005:368-375.
- MAENO T, HINO T. Miniature five-fingered robot hand driven by shape memory alloy actuators [C] // Proceedings of the 12th IASTED International Conference on Robotics and Applications, 2006: 174-179.

- 3 LAN C C, YANG Y N. A computational design method for a shape memory alloy wire actuated compliant finger[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(2):021009–021009–9.
- 4 POTRATZ J, YANG J, ABDEL-MALEK K, et al. A light weight compliant hand mechanism with high degrees of freedom[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2005, 127(6): 934–945.
- 5 LOTTI F, TIEZZI P, VASSURA G, et al. Development of UB hand 3: early results[C]//2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2005: 4488–4493.
- 6 CARROZZA M C, CAPPIELLO G, STELLIN G, et al. A cosmetic prosthetic hand with tendon driven under-actuated mechanism and compliant joints: ongoing research and preliminary results[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2006:2661–2666.
- 7 BEKEY G A, LIU H, TOMOVIC R, et al. Knowledge-based control of grasping in robot hands using heuristics from human motor skills[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2015, 9(6):709–722.
- 8 DECHEV N, CLEGHORN W L, NAUMANN S. Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2001, 36(10): 1157–1173.
- 9 CARROZZA M C, SUPPO C, SEBASTIANI F, et al. The SPRING hand: development of a self-adaptive prosthesis for restoring natural grasping[J]. *Autonomous Robots*, 2004, 16(2): 125–141.
- 10 PENTA F, ROSSI C, SAVINO S. An underactuated finger for a robotic hand[J]. *International Journal of Mechanics and Control*, 2014, 15(2): 63–68.
- 11 PENTA F, ROSSI C, SAVINO S. Gripping analysis of an underactuated finger[M]//Advances in Robot Design and Intelligent Control. Springer, Cham, 2016: 71–78.
- 12 PENTA F, ROSSI C, SAVINO S. Analysis of suitable geometrical parameters for designing a tendon-driven under-actuated mechanical finger[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2016, 11(2): 184–194.
- 13 YOON D, LEE G, LEE S, et al. Underactuated finger mechanism for natural motion and self-adaptive grasping towards bionic partial hand[C]//2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2016: 548–553.
- 14 SHIRAFUJI S, IKEMOTO S, HOSODA K. Development of a tendon-driven robotic finger for an anthropomorphic robotic hand [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2014, 33(5): 677–693.
- 15 王志恒, 杨庆华, 钱少明, 等. 气动柔性灵巧手输出力控制技术[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(10): 207–214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121037&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.037.
WANG Zhiheng, YANG Qinghua, QIAN Shaoming, et al. Output force control of pneumatic flexible dexterous hand[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(10): 207–214. (in Chinese)
- 16 钱少明, 都明宇, 杨庆华. 3自由度气动柔性手指包络抓持力模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 66–72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.012.
QIAN Shaoming, DU Mingyu, YANG Qinghua. Static model of envelop grasping for 3-DOF flexible pneumatic finger[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 66–72. (in Chinese)
- 17 BATALLER A, CABRERA J A, CLAVIJO M, et al. Evolutionary synthesis of mechanisms applied to the design of an exoskeleton for finger rehabilitation[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 105: 31–43.
- 18 ZHANG F, HUA L, FU Y, et al. Design and development of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2014, 73: 103–116.
- 19 NORTON R L, WANG S L. Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines [M]. 4th ed. McGraw-Hill Professional, 2004: 602–603.
- 20 韩建友, 崔光珍, 杨通. 六杆机构四位置运动生成的解域综合理论与方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(9): 1170–1175.
HAN Jianyou, CUI Guangzhen, YANG Tong. Solution region synthesis theory and method of six-bar linkages with 4-position motion generation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(9): 1170–1175. (in Chinese)
- 21 杨通, 韩建友, 崔光珍, 等. 给定两连杆运动面的 Watt-I 六杆机构空间解域综合方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(10): 307–312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141048&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.048.
YANG Tong, HAN Jianyou, CUI Guangzhen, et al. Synthesis of Watt-I six-bar linkage based on spatial solution region for given two coupler planes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(10): 307–312. (in Chinese)
- 22 HAN Jianyou, QIAN Weixiang. On the solution of region-based planar four-bar motion generation[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2009, 44(2): 457–465.
- 23 YANG Tong, HAN Jianyou, YI Lairong. A unified synthesis method based on solution regions for four finitely separated and mixed “point-order” positions[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2011, 46(11): 1719–1731.
- 24 HAN Jianyou, YANG Tong. On the solution of region-based planar six-bar motion generation for four finitely separated position [C]//ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2012: 441–449.