

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.05.023

一种并联多指灵巧手的设计与运动学分析

Design and analysis of a parallel multi-fingered dexterous hand

方跃法 周思远

FAND Yue-fa ZHOU Si-yuan

(北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

摘要:针对串联灵巧手的不足,利用并联机构的优势,设计并分析了一种新型多指灵巧手。根据构型综合方法,提出了一种三自由度的并联手指机构并对其进行运动学分析;基于手指机构的构型,设计出相适应的手掌,将其组合成多指灵巧手;分析并联多指灵巧手抓取能力和可达工作空间,与串联灵巧手的性能进行对比。结果表明,以并联机构设计的多指灵巧手具有良好的运动性能和工程应用前景。

关键词:灵巧手;并联机构;运动学分析;抓取能力;工业生产

Abstract: Aiming at the shortcomings of series dexterous hand, a new multi-fingered dexterous hand is designed and analyzed based on the advantage of parallel mechanism. Firstly, according to the method of configuration synthesis, a three-degree-of-freedom parallel finger mechanism is proposed and its kinematics is analyzed. Then, based on the configuration of finger mechanism, a suitable palm is designed and combined into a multi-fingered dexterous hand. Finally, the grasping ability and reachable workspace of the parallel multi-fingered dexterous hand are analyzed and compared with the performance of the series dexterous hand. The results show that the multi-fingered dexterous hand based on parallel mechanism has good motion performance and engineering application prospects.

Keywords: dexterous hand; parallel mechanism; kinematic analysis; carrying capability; industrial production

机械手与人手相比具有更强的负载能力和精确度,因此在大量重复性动作的工业生产活动中具有明显的优势,如食品工业中的采摘、抓放、装载等操作,机械手被广泛应用工业生产中。但大部分机械手不具有自适应性,

只能应用于某一类形状相同或相似的物品的操作,如果物体表面形状与机械手相差太大,就会影响抓持的稳定性。同时,机械手不能在抓持状态下对物体进行操纵,在加工过程中若想改变物体的位姿,必须先放下物体再重新抓持。随着工业生产的精细化和智能化,此类机械手已很难满足部分生产需求,如食品加工行业中,存在各种形状不一致、尺寸差别大的操作对象^[1],加工方式也多种多样,如果根据不同的产品,不同的加工方式对机械手进行重新设计,其成本非常高。故多指灵巧手应运而生,与机械手相比,多指灵巧手能够抓持不同形态的物体,且能在抓持物体的情况下对物体改变物体姿态,这些特点被称为灵巧特性^[2]。

上世纪 80 年代,斯坦福大学研究发现,多指灵巧手至少需要 3 个手指以及 9 个自由度才能具有灵巧特性。此后,诸如 Okada 灵巧手^[3], Stanford/JPL 灵巧手^[4], Utah/MIT 灵巧手^[5]等一系列著名的灵巧手被设计出来。近年来,大多数灵巧手研究主要集中于发动机、传动装置、传感器和控制系统,让灵巧手更像人手,随着传感技术与控制技术的进步,灵巧手的智能化程度越来越高,比如 Shadow 灵巧手^[6], Gifu-III 灵巧手^[7], UBH3 灵巧手^[8]等,许多研究者对传统类人灵巧手进行深入研究,并取得丰硕的成果。国内高校和研究机构在多指灵巧手领域做了大量工作,主要成果有北京航空航天大学研发的 BH 系列,哈尔滨工业大学与德国宇航中心合作研发的 DLR/HIT 系列。

目前大部分多指灵巧手采用串联设计,主要通过电机、弹簧或者齿轮进行驱动,也有部分设计采用了记忆金属或气缸进行驱动。串联灵巧手的结构相对简单,成本低,易于控制,但仍存在一些缺陷。通过电机驱动的灵巧手,需要在所有手指关节处内置电机,严重影响灵巧手的速度、精确度、运载能力;通过弹簧或者其他弹性组件作为驱动补偿的欠驱动灵巧手,运动精度低,不能运载重

基金项目:国家自然科学基金(编号:51675037)

作者简介:方跃法(1958—),男,北京交通大学教授,博士。

E-mail: yffang@bjtu.edu.cn

收稿日期:2019-03-02

物;通过齿轮传动的多指灵巧手,齿轮的传动比也被灵巧手的尺寸所限制^[9-11],降低了运载能力;而记忆金属和气缸驱动成本高昂,金属疲劳和气密性等问题也限制了其广泛应用。

综合上述考虑,针对多指灵巧手设计方面存在的不足,根据并联机构原理,参考人手的运动能力,拟设计出一种具有高灵巧性、大工作空间、高精度、高运载能力的并联多指灵巧手,并对其运动性能进行探索,为多指手运动控制提供理论基础。

1 一种并联多指灵巧手的设计

1.1 人手的运动学模型

如图 1 所示,人手由骨骼、肌肉、神经等构成,手指和手掌包括 19 块骨骼和 16 个关节^[12]。骨骼相当于机构的构件,关节相当于连接构件的运动副,肌肉作为驱动源在神经的控制下带动构件完成运动,实现人手的各种运动和姿态。其中 5 根掌骨 P_{01} 、 P_{10} 、 P_{20} 、 P_{30} 、 P_{40} 被肌肉包裹为一体,形成手掌,食指、中指、无名指、小指有 3 段指节,拇指有 2 段指节。

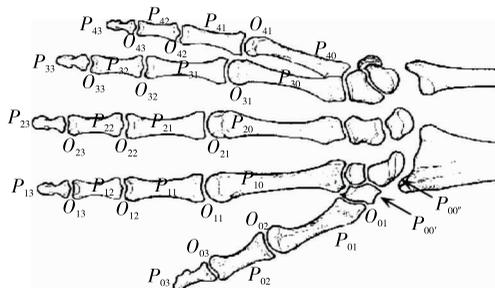


图 1 人手的骨骼模型

Figure 1 The skeletal model of hand

将骨骼当做零件,可以将骨骼模型转化为机构简图,如图 2 所示。以食指为例,远指节 P_{13} ,中指节 P_{12} ,近指节 P_{11} 这三个指节由 2 个转动副 O_{13} 、 O_{12} 相连,整根手指与手掌由 O_{11} 相连,由于掌骨之间能进行小幅度的内聚和外展, O_{11} 可以视为球销副,它的 2 个转动轴互相垂直。总的来说,食指由 3 根连杆组成,有 2 个转动副和 1 个球销副,共 4 个自由度,指尖运动为 2R2T。为简化设计,大部分多指灵巧手都略去了掌骨内聚和外展的自由度,即将 O_{11} 视为转动副,故指尖运动便是 2R1T。

1.2 并联多指灵巧手构型

多指灵巧手设计如图 3 所示,若将远指节当做并联机构的动平台,则动平台具有 3 个自由度,包括 2 个平动 1 个转动。为了减少支链数量和支链干涉,本文采用了 3-RRR 并联机构,手指成为并联机构的 1 条主动支链,并增加 2 个 P 副来限制关节转角的大小,所有电机均在手掌上安装,降低了手指上的负载。通过主动支链转动副

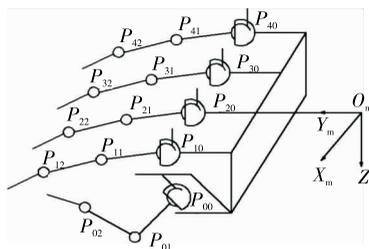
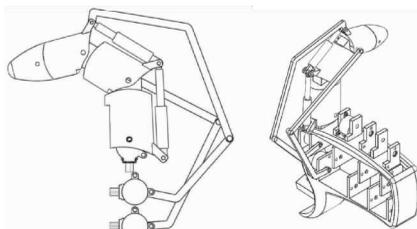


图 2 人手的机构简图

Figure 2 The sketch of the structure of hand



(a) 手指三维模型 (b) 手掌三维模型

图 3 并联多指灵巧手的三维模型

Figure 3 The 3D model of parallel multi-fingered dexterous hand

的运动来确定远指节的位姿,进一步确定中指节、近指节的位姿。多指灵巧手采用的仿人五指手设计,拇指有 2 个自由度,其他四指为 3 个自由度。手掌同样仿照人手进行了优化设计,确定了各个手指的位置与间距,并在手掌内部预留了电机的安装位置,进一步降低了手指机构运转时的负载。

2 单指运动性能分析

2.1 位置反解

以食指为例,其机构简图如图 4 所示,将坐标原点放在 A 点,三角形 CDE 为动平台,D 点坐标 (x, z) ,CD 与 z 轴正半轴的夹角为 α 。3 个驱动电机放在 A、H、G 3 点,近指节 AB 与 z 轴正半轴的夹角为 θ_1 ,杆 HK 与 x 轴负半轴的夹角为 θ_2 ,杆 JI 与 x 轴负半轴的夹角 θ_3 。AB 长 l_1 ,BC 长 l_2 ,HK 长 l_3 ,KE 长 l_4 ,JI 长 l_5 ,IC 长 l_6 。A 点坐标 $(0, 0)$,H 点坐标 $(-k_2, -m_2)$,J 点坐标 $(-k_3, -m_3)$ 。CE 长 d ,BC 长 a_3 , $\angle DCE$ 为 120° 。

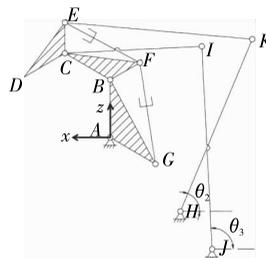


图 4 并联手指机构简图

Figure 4 The sketch of parallel finger structure

位置反解即已知 x, z, α , 求电机转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 。假设 C 点坐标 (x_C, z_C) , E 点坐标 (x_E, z_E) , B 点坐标 (x_B, z_B) , I 点坐标 (x_I, z_I) , K 点坐标 (x_K, z_K) , 由几何关系可知:

$$\begin{cases} x_C = x - a_3 \sin \alpha; \\ z_C = z - a_3 \cos \alpha; \\ x_E = x - a_3 \sin \alpha - d \cos(\pi/6 - \alpha); \\ z_E = z - a_3 \cos \alpha + d \sin(\pi/6 - \alpha); \\ x_B = l_1 \sin \theta_1; \\ z_B = l_1 \cos \theta_1; \\ x_I = -l_3 \cos \theta_2 - k_2; \\ z_I = l_3 \sin \theta_2 - m_2; \\ x_J = -l_5 \cos \theta_3 - k_3; \\ z_J = l_5 \sin \theta_3 - m_3. \end{cases} \quad (1)$$

利用 BC 、 IC 、 KE 杆长为定值, 可以得到如下 3 个等式:

$$\begin{cases} (x_C - l_1 \sin \theta_1)^2 + (z_C - l_1 \cos \theta_1)^2 = l_2^2; \\ (x_E + l_3 \cos \theta_2 + k_2)^2 + (z_E - l_3 \sin \theta_2 + m_2)^2 = l_4^2; \\ (x_C + l_5 \cos \theta_3 + k_3)^2 + (z_C - l_5 \sin \theta_3 + m_3)^2 = l_6^2. \end{cases} \quad (2)$$

3 个方程解法相似, 以解第一个方程为例, 展开:

$$l_1^2 - l_2^2 + x_C^2 + z_C^2 - 2l_1 z_C \cos \theta_1 - 2l_1 x_C \sin \theta_1 = 0, \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} e_{11} = -2l_1 x_C; \\ e_{12} = -2l_1 z_C; \\ e_{13} = l_1^2 - l_2^2 + x_C^2 + z_C^2; \\ \sin \theta_1 = \frac{2t_1}{1+t_1^2}; \\ \cos \theta_1 = \frac{1-t_1^2}{1+t_1^2}; \\ t_1 = \tan \frac{\theta_1}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

式(4)代入式(3)后化简得:

$$(e_{13} - e_{12})t^2 + 2e_{11}t + e_{12} + e_{13} = 0, \quad (5)$$

解得:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{e_{11} + \sqrt{e_{11}^2 + e_{12}^2 - e_{13}^2}}{e_{12} - e_{13}}; \\ \theta_1 = 2 \arctan \frac{e_{11} + \sqrt{e_{11}^2 + e_{12}^2 - e_{13}^2}}{e_{12} - e_{13}}. \end{cases} \quad (6)$$

同理可以解得:

$$\begin{cases} \theta_2 = 2 \arctan \frac{e_{21} + \sqrt{e_{21}^2 + e_{22}^2 - e_{23}^2}}{e_{22} - e_{23}}; \\ \theta_3 = 2 \arctan \frac{e_{31} + \sqrt{e_{31}^2 + e_{32}^2 - e_{33}^2}}{e_{32} - e_{33}}. \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} e_{21} = -2l_3 z_{E1}; \\ e_{22} = -2l_3 x_{E1}; \\ e_{23} = l_3^2 - l_4^2 + x_{E1}^2 + z_{E1}^2; \\ x_{E1} = x_E + k_2; \\ z_{E1} = z_E + m_2; \\ e_{31} = -2l_5 z_{C1}; \\ e_{32} = -2l_5 x_{C1}; \\ e_{33} = l_5^2 - l_6^2 + x_{C1}^2 + z_{C1}^2; \\ x_{C1} = x_C + k_3; \\ z_{C1} = z_C + m_3. \end{cases} \quad (8)$$

2.2 位置正解

位置正解即已知电机转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 求 x, z, α 。可以先求解中间量 C 点坐标 (x_C, z_C) , 将式(2)变形:

$$x_C - l_1 \sin \theta_1 = \sqrt{l_2^2 - (z_C - l_1 \cos \theta_1)^2}, \quad (9)$$

$$x_C + l_5 \cos \theta_3 + k_3 = \sqrt{l_6^2 - (z_C - l_5 \sin \theta_3 + m_3)^2}. \quad (10)$$

式(9)、(10)相减后平方两次消去根号, 并以针对 z_C 进行同类项合并得式(11)。

$$d_{12} z_C^2 + d_{13} z_C + d_{14} = 0, \quad (11)$$

解一元二次方程, 由于限位机构的限制, 可得式(12)。

$$z_C = \frac{-d_{13} + \sqrt{d_{13}^2 - 4d_{12}d_{14}}}{2d_{12}}, \quad (12)$$

将式(12)代入式(2)可得式(13)。

$$x_C = \sqrt{l_2^2 - (z_C - l_1 \cos \theta_1)^2} + l_1 \sin \theta_1, \quad (13)$$

将 z_C, x_C 代入式(1), 可以解得:

$$\begin{cases} \alpha = 2 \arctan \frac{d_{31} - \sqrt{d_{31}^2 + d_{32}^2 - d_{33}^2}}{e_{32} - e_{33}} + \frac{\pi}{6}; \\ x = x_C + a_3 \sin \alpha; \\ z = z_C + a_3 \cos \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

2.3 工作空间

机器人工作空间是机器人末端操作器在工作空间活动的最大范围^[13], 利用运动学正解和驱动电机的转动范围, 取 $\theta_{\min} \leq \theta_i \leq \theta_{\max}$, 结合表 1, 可以在 Matlab 中绘制出 2T1R 并联手指机构的工作空间, 如图 5 所示。

为了验证并联灵巧手的工作空间是否满足需求, 可以与同尺寸的串联灵巧手进行对比。三自由度串联手指的机构简图如图 6 所示。

原点设置在 A , 近指节 AB 、中指节 BC 、远指节 CD 的长度分别为 a_1, a_2, a_3 , 关节 A, B, C 处的转角为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 。由平面几何的关系, 可以得出指尖 D 的坐标 (x, z) 及远指节转动的角度 σ , 由式(15)表示。

表 1 手指机构的零件参数

Table 1 Parameters of finger structure mm

l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6
31	28	55	95	70	82

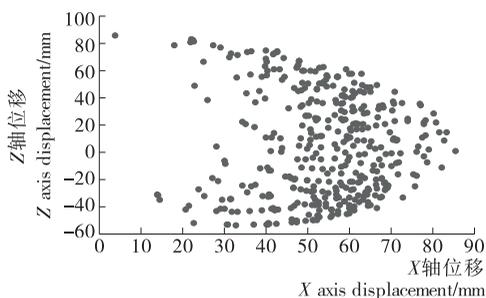


图 5 并联手指机构的工作空间

Figure 5 The workspace of parallel finger structure

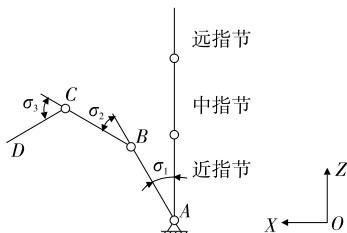


图 6 串联手指机构简图

Figure 6 The sketch of serial finger structure

$$\begin{cases} x = a_1 \times \sin\omega_1 + a_2 \times \sin(\omega_1 + \omega_2) + a_3 \times \sin(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3); \\ z = a_1 \times \cos\omega_1 + a_2 \times \cos(\omega_1 + \omega_2) + a_3 \times \cos(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3); \\ \sigma = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3. \end{cases} \quad (15)$$

其中 $\omega_1 \in (0, 90^\circ), \omega_2 \in (0, 90^\circ), \omega_3 \in (0, 90^\circ)$;

将食指的尺寸参数代入其中, 利用 Matlab 可以得到食指末端的工作空间, 如图 7 所示, 将其与并联灵巧手的工作空间进行对比, 得图 8, 可见同尺寸的并联灵巧手和串联灵巧手的工作空间基本一致。

3 多指灵巧手运动性能分析

3.1 抓取模式

该部分讨论五指灵巧手的抓取模式, 按接触位置划分, 抓取模式包括两类: 指尖接触式、指节接触式, 如图 9 所示。指尖接触式中的小方块, 它在两根手指的抓持下保持静止, 当两根手指配合运动时, 小球能小范围内实现

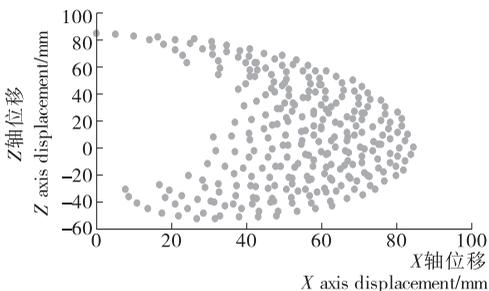


图 7 串联手指机构的工作空间

Figure 7 The workspace of serial finger structure

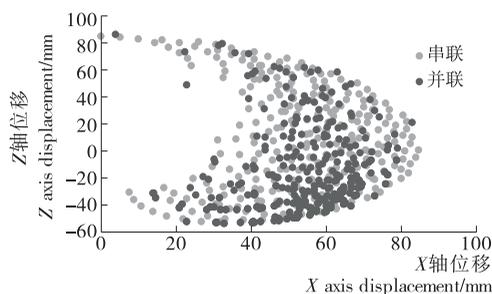


图 8 串并联手指机构工作空间复合图

Figure 8 The composite image of workspace between serial and parallel finger structure

平移和旋转。指节接触式中的易拉罐, 能在五根手指的握取下保持静止, 在五根手指的配合运动下进行小幅度的旋转。按接触面类型划分, 抓取模式包括 3 类: 点点接触、点线接触、点面接触。当物体表面是球面时, 抓取模式是点点接触, 当物体表面是圆柱面时, 抓取模式是点线接触, 当物体表面是平面时, 抓取模式是点面接触。

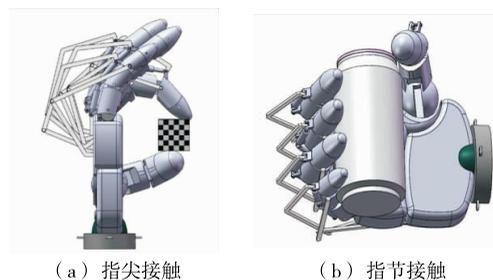


图 9 多指灵巧手的抓取模式

Figure 9 Grabbing models of multi-fingered dexterous hand

3.2 抓持运动

抓持运动针对的是指尖接触式的抓取模式, 用指尖接触方式抓取时, 人能对被抓持物体进行操作, 类似的, 多指手也能对抓持物体进行操作, 在两根手指抓持时能进行小范围运动。为了研究在两根手指的配合运动下, 被抓持物体的运动情况, 可用尺寸一致的串联手指进行替代, 将手掌当做定平台, 两根手指等价于 RR 支链, 所抓持物体当做定平台。同时, 指尖接触式抓取模式, 能归类为点摩擦式接触, 当用这种抓取模式抓持物体时, 接触点等价于球关节。因此, 在灵巧手进行两根手指抓持时, 其等价于 2-RPS 并联机构, 其机构简图如图 10 所示, 其支链螺旋系如图 11 所示。该机构的运动类型可以通过运用螺旋理论解出, 分支运动螺旋系:

$$\begin{cases} \$_1 = (1, 0, 0; 0, 0, 0); \\ \$_2 = (0, 0, 0; 0, e, f); \\ \$_3 = (1, 0, 0; 0, f, -e); \\ \$_4 = (0, 1, 0; -f, 0, 0); \\ \$_5 = (0, 0, 1; e, 0, 0). \end{cases} \quad (16)$$

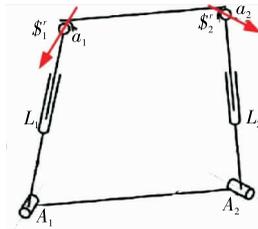


图 10 2-RPS 并联机构简图

Figure 10 The sketch of 2-RPS parallel mechanism

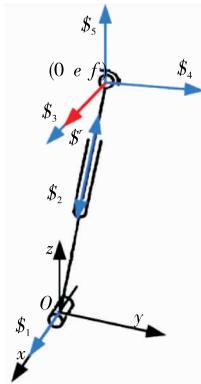


图 11 RPS 支链螺旋系

Figure 11 The screw system of RPS branch

可以解出约束螺旋系为:

$$\begin{cases} \$ \zeta_1 = (1, 0, 1; 0, f, -e); \\ \$ \zeta_2 = (0, 0, 0; 0, 1, 0). \end{cases} \quad (17)$$

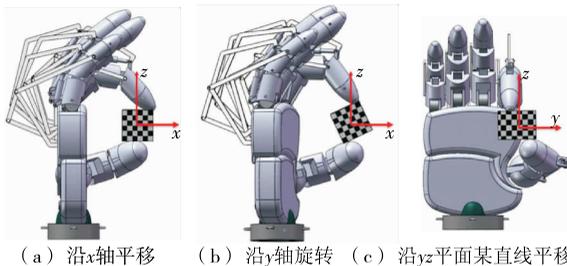
同理,另一个分支的约束螺旋系为:

$$\begin{cases} \$ \zeta_3 = (1, 0, 1; 0, m, -n); \\ \$ \zeta_4 = (0, 0, 0; 0, 1, 0). \end{cases} \quad (18)$$

机构的约束螺旋系为:

$$\begin{cases} \$ \zeta_1 = (1, 0, 1; 0, e, -f); \\ \$ \zeta_3 = (1, 0, 1; 0, m, -n); \\ \$ \zeta_4 = (0, 0, 0; 0, 1, 0). \end{cases} \quad (19)$$

3 个约束力线性无关,约束了平台的 3 个自由度,包括 2 个转动和 1 个移动,即在两指抓持下,被抓持物体能进行 2 个方向的平移和 1 个方向的转动,运动方式如图 12 所示。



(a) 沿x轴平移 (b) 沿y轴旋转 (c) 沿yz平面某直线平移

图 12 多指灵巧手的抓持运动模式

Figure 12 Motion types of the after-grabbing configuration of multi-fingered dexterous hand

4 结论

基于人类手指的运动模式设计了一种基于并联机构的五指灵巧手,且其能够实现对物体进行抓取和操作。在多根手指的抓持下,能对物体进行 2R1T 平面操纵。由于限位机构的限制,该多指灵巧手的运动正解和运动反解具有唯一性,便于控制。同时,由于并联机构的优势,该多指灵巧手具有高灵活性、高精度度和高运载能力,其工作空间与同等尺寸的串联灵巧手相当。因此,该多指灵巧手在工业生产中具有应用潜力。为了使得并联多指灵巧手能够投入实际应用,还需对零部件进行优化,并设计出相应的控制系统和控制方案。

参考文献

[1] 孙沂琳, 张秋菊, 陈宵燕. 气动软体驱动器设计与建模[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 101-105.

[2] MASON M T, SALISBURY J K. Robot Hands and the Mechanics of Manipulation[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 75(8): 1 134.

[3] OKADA T. Computer control of multijointed finger system for precise object-handling[J]. IEEE Trans on Smc, 1982, 12(3): 289-299.

[4] SALISBURY J K, CRAIG J J. Articulated hands force control and kinematic issues[J]. International Journal of Robotics Research, 1982, 1(1): 4-17.

[5] 裴九芳, 许德章, 王海. 基于旋量理论的三指机器人灵巧手逆运动学分析[J]. 中国机械工程, 2017, 28(24): 2 975-2 980.

[6] 靳果, 邱兵涛, 韩枫. Shadow 仿人灵巧手动力学研究[J]. 电子设计工程, 2016, 24(24): 102-104.

[7] ALVAREZ D, LUMBIER A, GOMEZ J V, et al. Precision grasp planning with Gifu Hand III based on fast marching square [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. 2013: 10-11.

[8] 王珺. 多指灵巧手主从控制系统的软件设计[J]. 机电信息, 2011(27): 166-167.

[9] 朱玉乐, 郭冰菁. 人工肌肉驱动的多指灵巧手运动学计算与分析[J]. 机械设计与制造, 2013(11): 224-227.

[10] 孟明辉, 周传德, 陈礼彬, 等. 工业机器人的研发及应用综述[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(S1): 98-101.

[11] 刘杰, 张玉茹, 刘博. 人手到灵巧手的运动映射实现[J]. 机器人, 2003, 25(5): 444-447, 451.

[12] 马翔宇, 杨武成, 李阿为. 仿生机械灵巧手的手指设计[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(11): 117-121.

[13] 谢斌, 蔡自兴. 基于 MATLAB Robotics Toolbox 的机器人学仿真实验教学[J]. 计算机教育, 2010, 1(19): 140-143.