

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.06.001

考虑5指差异化的外骨骼康复机械手结构设计

宋栓军, 郭晓虎, 曹佳豪

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710600)

摘要:针对传统外骨骼康复机械手结构臃肿、适配性低的问题,课题组设计了一款考虑人手5指差异化的连杆滑槽式外骨骼康复机械手。课题组根据人手生物学特征设计了单根手指的结构,并通过分析各关节间的运动关系,构建了单根手指的数学模型;以机械手指关节和人手关节的旋转中心在运动过程中始终保持重合,及人手运动特性为约束,把机械手指各杆长之和最短作为优化目标,设计了求解该模型的粒子群算法,得到满足康复训练需求且结构紧凑的手指尺寸最优解;在单指优化的基础上改变近端指节长度,保持各手指运动特性不变前提下做出5指差异化设计,经过多次算例计算后得到5指尺寸最优解;最后根据优化结果构建了样机模型,并对模型进行运动学仿真。仿真结果表明:设计的外骨骼机械手指的运动参数符合设计要求,指间运动轨迹特征符合人手运动规律。该机械手满足康复训练要求。

关键词:康复训练;外骨骼;连杆滑槽;粒子群算法;单指优化

中图分类号:TP242;TH112

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2023)06-0001-08

Design of Exoskeleton Rehabilitation Manipulator Considering Five-Finger Differentiation

SONG Shuanjun, GUO Xiaohu, CAO Jiahao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

Abstract: Aiming at the problem of bloated structure and low adaptability of traditional exoskeleton rehabilitation manipulator, a connecting rod chute exoskeleton rehabilitation manipulator considering the differentiation of five fingers of human hand was designed. According to the biological characteristics of human hand, the structure of single finger was designed, and the mathematical model of single finger was constructed by analyzing the motion relationship between joints. With the constraint that the rotation centers of the finger joint of the manipulator and the human finger joint always coincide during the movement process and the motion characteristics of the human hand, the shortest sum of the lengths of each rod of the mechanical finger was taken as the optimization goal, and the particle swarm optimization algorithm for solving the model was designed to obtain the optimal solution of the finger size that meets the needs of rehabilitation training and had a compact structure. On the basis of single finger optimization, the length of the proximal knuckle was changed, and the differential design of the five fingers was made under the premise of keeping the motion characteristics of each finger unchanged. After many examples, the optimal solution of the five fingers size was obtained. Finally, the prototype model was constructed according to the optimization results, and the kinematics simulation of the model was carried out. The results show that the motion parameters of the designed exoskeleton mechanical finger meet the design requirements, and the motion trajectory characteristics between fingers conform to the law of human hand motion and meet the requirements of rehabilitation training.

Keywords: rehabilitation training; exoskeleton; connecting rod chute; particle swarm optimization; single finger optimization

收稿日期:2023-03-20;修回日期:2023-09-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(61701384);西安市科技计划先进制造业技术攻关项目(21XJZZ0016);陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-349)。

第一作者简介:宋栓军(1974),男,陕西宝鸡人,博士,副教授,主要研究方向为机器人技术、生产系统优化等。E-mail: songshuanjun@126.com

人手在日常生活、科研学习和工作时都是使用频率较高的、不可或缺的人体结构组织^[1-2]。因脑卒中、意外事故、神经系统功能障碍等引起手部运动功能丧失的人口数量逐年上升。康复机械手的主要功能就是帮助手部功能受损者进行肌肉训练和运动功能恢复,因此康复机械手具有重要的应用价值和广阔的发展前景^[3-4]。康复机械手主要分为外骨骼式和柔性穿戴式 2 类^[5]。外骨骼式康复机械手的优点主要是其运动传递精确、控制精准,和存在机械限位保护。与外骨骼式康复机械手相比,柔性穿戴式康复机械手具有质量轻,与人手适配性高的优点^[6-7],但其运动传递不够精确、控制难度较高,需要专业人员进行操作,不适合普通人群独自使用。

王杰等^[8]通过以关键构件及手指关节旋转角度作为空间向量元素建立机械构件与手指各关节简化空间模型,对欠驱动式手指康复训练装置进行了结构优化;但在优化过程中将多个杆长设为定值,手指结构部分只优化了弧形架的长度,且是一个范围值,最终设计的机械手对近端指间关节 (proximal interphalangeal joint, PIP) 没有确定的训练角度。Taheri 等^[9]研发了一款名为 FINGER 的康复机械手,该机械手手指由 8 杆机构组成,拥有 1 个自由度,该机械手运行稳定且有较好适配性,但只包含中指和食指,且整体尺寸较大使得整体训练效果不佳。Soekadar 等^[10]研制的康复机械手是通过优化驱动方式来实现了机构的轻量化。钟思灵等^[11]是利用 ADAMS 优化分析模块进行参数化设计,经过仿真校验最终达到较好的优化效果,但其控制电机数量较多,且在 4 指模块中只对单指进行了优化,并没有对其他手指逐一进行差异化设计。

针对上述问题,课题组设计一种基于滑槽连杆机构的外骨骼康复机械手,并使用粒子群算法从结构紧凑性和 5 指差异化 2 个方面对其进行设计,设计过程中考虑诸多约束,以此提高与人手的适配性和训练过程的安全性,最后利用仿真来验证机械手运动指标满足设计要求。

1 外骨骼机械手结构设计

1.1 人手生物学特性分析

由于外骨骼康复机械手和人手是一对运动耦合的

主体,因此在设计前首先要对人手的生物学特性进行分析。人手的结构较为复杂,自由度至少有 21 个。考虑到实用性和可穿戴性等因素,在设计机械手时只考虑康复训练比较重要的屈伸方向的自由度。手指在屈伸时涉及到的自由度特性:拇指的掌指关节 (metacarpophalangeal joint, MP) 和指间关节 (interphalangeal joint, IP) 各有 1 个自由度,拇指腕掌关节 (carpometacarpal joint, CM) 处包含 3 个自由度,其它 4 个手指各拥有 3 个自由度,包括掌指关节 (metacarpophalangeal joint, MCP)、近端指间关节 (PIP) 和远端指间关节 (distal interphalangeal joint DIP) 各有 1 个自由度^[12]。人手关节如图 1 所示,除拇指有 2 个指骨外,其余 4 指都有 3 个指骨,包括远端指骨、中指骨和近端指骨。

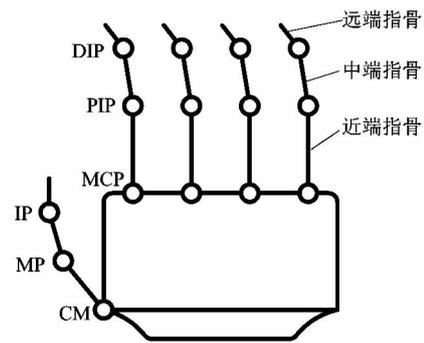


图 1 人手关节示意图

Figure 1 Sketch of human hand joint

在设计康复机械手时,如果不考虑正常人手指在运动时的活动度,可能会导致机械手每个指节的活动范围不在正常人手指的活动度之内,进而在带动人手进行康复训练时会对患者产生二次伤害^[13]。人手指关节的屈伸角度^[14]各不相同,人手指关节屈伸角度如表 1 所示。

表 1 人手指关节屈伸角度

Table 1 Flexion and extension angle of human finger joints

手指关节	屈伸角度/(°)
MP	0 ~ 70
IP	0 ~ 80
PIP	0 ~ 90
DIP	0 ~ 90
MCP	0 ~ 80

通过研究人手关节运动特性可知, MCP 关节和 PIP 关节可以独立运动,属于主动关节; DIP 关节是会因一定耦合关系被 PIP 关节带动进而运动的,属于被动关节^[15]。为简化机械结构,课题组综合考虑决定忽略对 DIP 关节的设计。

另外,在设计机械手时除了要考虑不同手指关节的屈伸角度外,还应该考虑到 5 根手指长度的差异。综合分析 GB/T 16252—1996《成年人手部号型》和自测人手尺寸得出各手指近端指骨的长度如表 2 所示。

表 2 各手指近端指骨长度

Table 2 Length of proximal phalanx of each finger

手指	近端指骨长度/mm	近端指骨平均长度/mm
拇指	33 ~ 37	35
食指	38 ~ 42	40
中指	43 ~ 48	46
无名指	39 ~ 46	43
小指	33 ~ 38	35

1.2 基本结构及工作原理

外骨骼康复机械手设计的首要任务是机械结构的设计。为了能更好完成康复训练,结构设计要考虑以下 3 点:①保证机械手结构的紧凑性和运动的双向性;②手指关节屈伸范围要符合康复标准;③机械手指每个关节的旋转中心在运动过程中应始终保持与手指关节的转动中心重合。

设计的外骨骼康复机械手指模块主体是由滑槽连杆机构构成,每根手指只需 1 个直线电机就可完成对 MCP 和 PIP 2 个关节的训练。把 5 个手指分为拇指模块和 4 指模块,手指设计模型如图 2 所示。

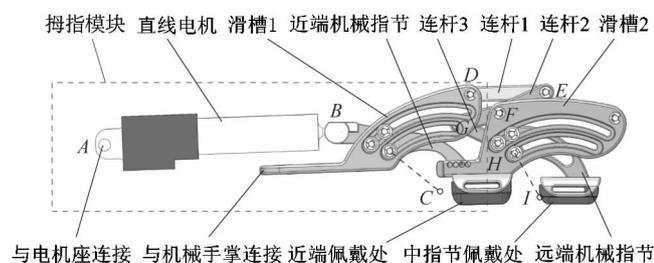


图 2 手指设计模型

Figure 2 Design model of finger

直线电机与近端机械指节连接,滑槽 1 的一端与机械手掌固定连接,电机运行时推动近端机械指节沿

滑槽 1 运动,近端机械指节与滑槽 2 固定连接,通过连杆带动远端机械指节沿滑槽 2 运动,人手近端指节和中指节佩戴在相对应的位置。佩戴处可以进行前后调节以适应不同指长。拇指模块结构与 4 指模块近端指节部分结构相同,所以课题组只对 4 指模块进行运动过程分析。

2 优化设计

2.1 手指模型简化

为了方便对机械手指进行分析,将图 2 的手指模型简化为图 3 所示的手指结构简图,其中虚线代表虚拟杆。图 3 中 A 点为电机基座, l_{AB} 的长度是可变的,初始长度为 l_1 ,电机伸长量为 d ,故 l_{AB} 长度为 $l_1 \sim (l_1 + d)$ 。当直线电机推动时,通过连杆分别将运动传递给手指近节和手指中节,带动手指近节、手指中节运动会分别使 MCP 和 PIP 关节处弯曲,其中 MCP 和 PIP 的关节角度即为 $\angle ACB$ 和 $\angle FHI$ 的变化量。

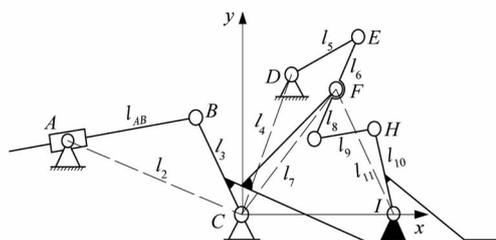


图 3 机械手指结构

Figure 3 Structure of mechanical finger

2.2 运动学分析

因为机械手指的连杆较多,整体分析较为复杂,所以将传动过程拆分为 3 个部分进行分析,即三连杆 ABC 结构、四连杆 CDEF 结构和四连杆 FGHI 结构。

如图 4 所示, B 和 B_1 分别是电机完全缩回和完全伸出的 2 个极限位置,在三连杆 ABC 结构中,利用余弦定理即可求出 MCP 关节角位移:

$$\alpha = \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - (l_1 + d)^2}{2l_2l_3} - \arccos \frac{l_2^2 + l_3^2 - l_1^2}{2l_2l_3} \quad (1)$$

康复机械手指的推杆推力为 f ,推杆在不同位置沿滑轨切向力 f_t 不同,切向力越大对应的滑轨处摩擦力就越小,所以在整个运动过程中应使沿滑轨切向力尽量大,即:

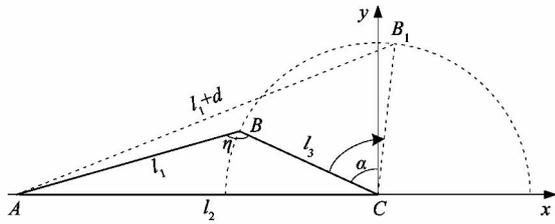


图 4 三连杆 ABC 结构
Figure 4 Structure of three-link ABC

$$\max f_1 = \int_{\eta_2}^{\eta_1} f \times \sin \eta d\eta \quad (2)$$

式中： η_1 和 η_2 分别为运动过程中 η 的初始值和终止值。

因为 C 点和 D 点皆为定点, F 点和 I 点相对固定, 所以分别以 CD 和 FI 方向定为 y 轴方向建立直角坐标系, φ 为 PIP 关节角位移。如图 5 和图 6 所示, 四杆矢量组成一个封闭矢量多边形, 将其构件用矢量来表示, 使其矢量之和等于零, 建立四连杆 CDEF 结构和四连杆 FGHI 结构的闭环矢量方程, 即:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{CF} + \mathbf{FE} &= \mathbf{CD} + \mathbf{DE}; \\ \mathbf{FG} + \mathbf{GH} &= \mathbf{FI} + \mathbf{IH}。 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{CF}, \mathbf{FE}, \mathbf{CD}, \mathbf{DE}, \mathbf{FG}, \mathbf{GH}, \mathbf{FI}, \mathbf{IH}$ 对应的杆长分别为 $l_7, l_6, l_4, l_5, l_8, l_9, l_{11}, l_{10}$ 。

将式(3)表示为分量方程, 则有:

$$\left. \begin{aligned} l_7 \cos(\beta_1 + \alpha) + l_6 \cos(\beta_2 - \gamma) &= l_4 + l_5 \cos \beta_3; \\ l_7 \sin(\beta_1 + \alpha) + l_6 \sin(\beta_2 - \gamma) &= l_5 \sin \beta_3; \\ l_8 \cos(\beta_4 - \theta) + l_9 \cos \beta_6 &= l_{11} - l_{10} \cos(\beta_5 + \varphi); \\ l_9 \sin \beta_6 - l_8 \sin(\beta_4 - \theta) &= l_{10} \sin(\beta_5 + \varphi); \\ \theta &= \alpha + \gamma。 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

计算得出:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \beta_2 - \arcsin\left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) + \arctan\left(\frac{a}{b}\right); \\ \varphi &= \arcsin\left(\frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2}}\right) - \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right) - \beta_5。 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中:

$$\begin{aligned} a &= 2l_6[l_7 \cos(\beta_1 + \alpha) - l_4]; b = 2l_7l_6 \sin(\beta_1 + \alpha); \\ c &= l_5^2 - l_7^2 - l_4^2 - l_6^2 + 2l_7l_4 \cos(\beta_1 + \alpha); \\ a_1 &= 2l_{10}[l_8 \cos(\beta_4 - \theta) - l_{11}]; \end{aligned}$$

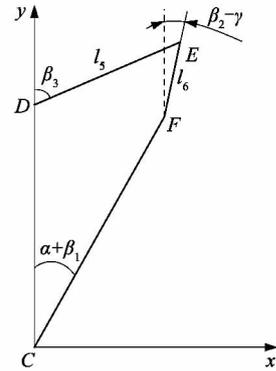


图 5 四连杆 CDEF 结构
Figure 5 Structure of four-link CDEF

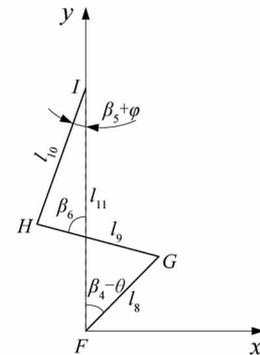


图 6 四连杆 FGHI 结构

Figure 6 Structure of four-link FGHI

$$\begin{aligned} b_1 &= 2l_8l_{10} \sin(\beta_4 - \theta); \\ c_1 &= l_9^2 - l_{11}^2 - l_{10}^2 - l_8^2 + 2l_8l_{11} \cos(\beta_4 - \theta)。 \end{aligned}$$

根据式(3)得到角速度方程为:

$$\left. \begin{aligned} l_5 \omega_5 \sin \beta_3 - l_6 \omega_6 \sin(\beta_2 - \gamma) &= l_7 \omega_7 \sin(\beta_1 + \alpha); \\ l_6 \omega_6 \cos(\beta_2 - \gamma) - l_5 \omega_5 \cos \beta_3 &= -l_7 \omega_7 \cos(\beta_1 + \alpha); \\ l_{10} \omega_{10} \sin(\beta_5 + \varphi) - l_9 \omega_9 \sin \beta_6 &= l_8 \omega_8 \sin(\beta_4 - \theta); \\ l_9 \omega_9 \cos \beta_6 - l_{10} \omega_{10} \cos(\beta_5 + \varphi) &= -l_8 \omega_8 \cos(\beta_4 - \theta)。 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

由式(5)可得:

$$\left. \begin{aligned} \omega_6 &= -\omega_7 l_7 \sin(\beta_1 + \alpha - \beta_3) / [l_6 \sin(\beta_2 - \gamma - \beta_3)]; \\ \omega_{10} &= \omega_8 l_8 \sin(\beta_4 - \theta - \beta_5 - \varphi) / [l_{10} \sin(\beta_6 - \beta_5 - \varphi)]。 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： ω_5 为杆 l_5 绕 D 点旋转角速度, ω_6 为杆 l_6 绕 F 点旋转角速度, ω_7 为杆 l_7 绕 C 点旋转角速度, ω_8 为杆 l_8 绕 F 点旋转角速度, ω_9 为杆 l_9 相对 l_{11} 旋转角速度, ω_{10} 为

杆 l_{10} 绕 I 点旋转角速度。

在三连杆 ABC 结构中对杆 BC 角速度进行分析:

$$\left. \begin{aligned} \angle ABC &= \arccos \alpha_2; \\ v_B &= \frac{v_{AB}}{\sin \angle ABC} = \omega_3 l_3. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

计算得出杆 BC 的角速度为:

$$\omega_3 = \frac{v_{AB}}{l_3 \sqrt{1 - a_2^2}} \quad (9)$$

式中: $a_2 = \frac{(l_1 + d)^2 + l_3^2 - l_2^2}{2(l_1 + d)l_3}$; v_{AB} 表示电机推杆的速度。

2.3 构建数学模型

2.3.1 设计变量

外骨骼康复机械手的设计变量为各连杆的杆长和连杆间初始状态时的夹角,即 l_4, l_5, \dots, l_{11} 8 个变量及 $\beta_1, \beta_2, \beta_4, \beta_5, \beta_7$ 5 个变量,共 13 个变量,其中 $\beta_7 = \angle CFI$ 。

2.3.2 目标函数

对外骨骼康复机械手进行结构优化时,应尽量保证机械手紧凑轻便,在不计材料因素影响的基础上,使各连杆的杆长尽可能的短,因此目标函数为:

$$\min F(X) = \sum_{j=4}^{11} l_j \quad (10)$$

2.3.3 约束条件

根据正常人的手指尺寸设置机械手指的设计变量范围由 $[L, U]$ 表示,其中:

$$\begin{aligned} L &= [20, 10, 10, 20, 10, 10, 20, 25, 0, 0, 90, -30, 45]; \\ U &= [35, 25, 20, 35, 20, 20, 35, 40, 45, 45, 270, 30, 135]。 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} 3 \text{ mm} < l_{11} - l_{10} < 10 \text{ mm}; \\ 0 \text{ mm} < l_6 - l_8 < 5 \text{ mm}; \\ |l_4 - l_7| < 10 \text{ mm}; \\ l_5 - l_6 > 0 \text{ mm}。 \end{aligned} \right\}$$

为保证机械手指可以正常完成屈伸运动,其中杆 DE 和杆 EF 的极限位置是在 2 杆平行时,所以 DF 的长度应该小于杆 DE 和杆 EF 长度之和,同理 FH 的长度应该小于杆 FG 和杆 GH 长度之和, GI 的长度应该小于杆 GH 和杆 HI 长度之和,可得约束条件:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{l_4^2 + l_7^2 - 2l_4l_7 \cos(\alpha + \beta_1)} - (l_5 + l_6) < 0; \\ \sqrt{l_{11}^2 + l_{10}^2 - 2l_{11}l_{10} \cos(\varphi + \beta_5)} - (l_8 + l_9) < 0; \\ \sqrt{l_8^2 + l_{11}^2 - 2l_8l_{11} \cos \beta_4} - (l_8 + l_9) < 0。 \end{aligned} \right\}$$

MCP 和 PIP 关节角位移约束条件为:

$49^\circ < \alpha < 50^\circ; 50^\circ < \varphi < 55^\circ$, 且 $d=0$ 时, $\gamma=0, \varphi=0$ 。

$v_{AB}=6.5 \text{ mm/s}$ 时, MCP 和 PIP 关节角速度 ω_3 和 ω_{10} 约束条件为: $\omega_3 < 18 (\text{°/s}); \omega_{10} < 18 (\text{°/s})$ 。

由于 C 点和 I 点分别对应手部 MCP 和 PIP 2 个关节的位置,所以机械手指在佩戴的初始状态时 CI 相对手掌应该保持水平,且 l_{CI} 长度等于对应手指的近端指骨长度,其约束条件为:

$$l_7 \sin \beta_1 + l_{11} \sin(\beta_7 - \beta_1) - l_{CI} \cos \beta_8 = 0。$$

式中: l_{CI} 为近端指骨的设计长度, β_8 为图 3 中 CD 与 y 轴夹角。

2.4 优化方法

外骨骼康复机械手的结构优化问题具有高维、非线性和多约束等特点。粒子群算法没有遗传算法的交叉、变异等过程,所以其计算速度更快,优化能力相对较强^[16]。因此,课题组选择使用粒子群算法对以上优化问题进行求解。

粒子群算法是以粒子来模拟鸟类捕食现象进而解决优化问题的,每个粒子用速度和位置 2 个属性来表示,其中速度为矢量,表示粒子移动的速率和方向,位置是所求问题的 1 个可能解。该问题中设计变量共有 13 个,所以空间维数 $d=13$ 。考虑到优化问题是高维多约束问题,将粒子数 N 设置为 500,则第 i 个粒子的速度和位置可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_i &= (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i13}); \\ \mathbf{X}_i &= (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i13})。 \end{aligned} \right\}$$

式中: $i=1, 2, \dots, 500$ 。

粒子位置和速度在更新后要要进行边界处理,将超出边界的粒子放置在邻近的边界上,位置限制范围为 $[L, U]$,速度限制范围 $[\mathbf{V}_{\min}, \mathbf{V}_{\max}]$ 为:

$$\mathbf{V}_{\max} = [1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1];$$

$$\mathbf{V}_{\min} = -[1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]。$$

根据目标函数式(10)可以计算出每个粒子的位置对应的适应度值,根据对适应度值的判断来更新个体最佳位置和种群最佳位置,2 种最佳位置可表示为:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{best}} &= (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i13}); \\ g_{\text{best}} &= (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{g13})。 \end{aligned} \right\}$$

在每次迭代过程中,粒子通过个体最佳位置和种群最佳位置去更新速度和位置,可表示为:

$$\left. \begin{aligned} v_{id,k} &= w * v_{id,(k-1)} + c_1 r_1 (p_{id,k} - x_{id,k}) + c_2 r_2 (p_{gd,k} - x_{id,k}); \\ x_{id,k} &= x_{id,(k-1)} + v_{id,(k-1)} \circ \end{aligned} \right\}$$

式中: w 是惯性权重, c_1 和 c_2 为学习因子, k 为当前迭代次数, r_1 和 r_2 为分布在 $[0,1]$ 的随机数。

为了增强寻优效果,将惯性权重和学习因子改为动态值,则有:

$$\left. \begin{aligned} w_k &= w_s - (w_s - w_e) * \left(\frac{k}{T}\right)^2; \\ c_{1,k} &= c_{1,s} + (c_{1,e} - c_{1,s}) * \frac{k}{T}; \\ c_{2,k} &= c_{2,s} + (c_{2,e} - c_{2,s}) * \frac{k}{T} \circ \end{aligned} \right\}$$

式中: w_s 是惯性权重初始值, w_e 是惯性权重终止值, $c_{1,s}$ 和 $c_{1,e}$ 分别是个体学习因子初始值和终止值, $c_{2,s}$ 和 $c_{2,e}$ 分别是社会学习因子初始值和终止值, T 是最大迭代数。

2.5 单指优化结果与分析

驱动电机是安装在外骨骼的手背上,由于受手大小的限制,不宜选用具有大行程的线性电机,所以考虑选用较小行程的线性电机,确定 $l_1 = 85.0 \text{ mm}$, $d = 30.0 \text{ mm}$ 。由式(2)可得 $l_2 = 116.1 \text{ mm}$, $l_3 = 37.6 \text{ mm}$ 时切向力 f_1 最大,此时 $f_1 = 0.89f$,如图 7 所示。又 $l_{cl} = 40.0 \text{ mm}$, $\beta_8 = 13.5^\circ$,在算例中设置 $w_s = 0.9$, $w_e = 0.4$, $c_{1,s} = 2.50$, $c_{1,e} = 0.50$, $c_{2,s} = 1.00$, $c_{2,e} = 2.25$,最终得到目标函数的收敛曲线如图 8 所示。

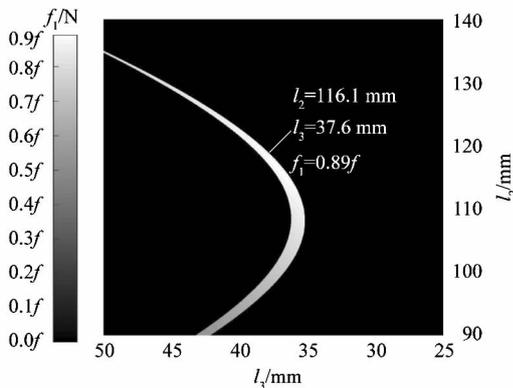


图 7 切向力与 l_2 和 l_3 的关系

Figure 7 Relationship between tangential force and l_2 and l_3

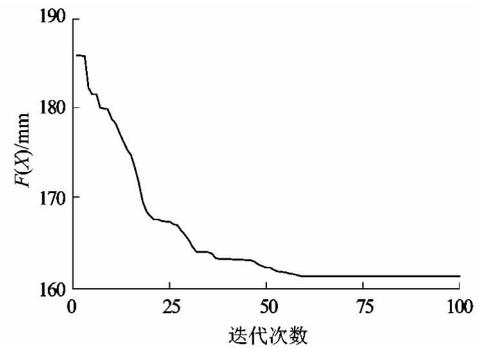


图 8 目标函数收敛曲线

Figure 8 Convergence curve of objective function

考虑到优化问题具有高维多约束的特性,为使优化结果达到最优,进行多次求解,最终选择一组最优解作为优化结果,食指各杆尺寸优化结果如表 3 所示。

表 3 食指各杆件优化尺寸

Table 3 Optimized size of each rods of index finger

杆件	杆长/mm
l_4	24.8
l_5	17.8
l_6	12.0
l_7	26.1
l_8	10.5
l_9	12.4
l_{10}	24.8
l_{11}	33.0

2.6 手指差异化设计

正常情况下人手的 5 指长度是各不相同的,所以在设计外骨骼康复机械手时也要考虑 5 指的差异,以提高机械手佩戴的柔性。为避免人手在训练过程中造成二次损伤,人手 MCP 与 PIP 关节转动中心应该与机械手指的滑槽圆心重合。机械手指可以根据不同指长进行调节,但是可调节范围较小;当相同长度的机械手指佩戴在长度不同的手指上时,会使得长度调节范围更加有限。为了进一步提高机械手的适配性,以表 2 中各手指近端指骨的长度为参考,进行 5 指长度差异化设计。如果根据近端指骨长度独立去优化每一根机械手指,其最后的优化结果可能是不同手指相同位置的杆件尺寸都略有不同,给后续制作样机与装配增加了难度,所以要在尽量少改变杆件长度的情况下,实现手指长度差异化的设计。

通过对机械手指结构的研究发现,使远端机械指节和滑槽 2 部分整体沿水平方向移动,即仅改变 l_5 和

l_7 的长度就可设计出长度不同的手指,而 l_7 是图 3 中设置的虚拟杆长,所以实际只需要改动杆 l_5 的长度即可。按照优化食指的过程,仅把 l_5 和 l_7 作为设计变量,其他杆件长度都设置为定值,中指、无名指和小指的近端指骨长度 l_{cl} 分别设置为 46.0、43.0 和 35.0 mm。3 指优化后的 l_5 和 l_7 长度如表 4 所示,各手指关节屈伸角度如表 5 所示。

表 4 3 指杆件优化尺寸

Table 4 Optimized size of 3 fingers rod components

手指	杆件序号	长度/mm
中指	l_5	23.9
	l_7	30.4
无名指	l_5	20.8
	l_7	28.3
小指	l_5	13.5
	l_7	24.8

表 5 各手指关节屈伸角度

Table 5 Flexion and extension angle of each finger joints

关节	手指	屈伸角度/(°)
MCP(MP)	5 指	49.6
	食指	50.8
PIP	中指	52.6
	无名指	51.6
	小指	51.3

3 模型建立与仿真结果分析

3.1 样机模型建立

根据优化后的机构尺寸在 SolidWorks 中创建机械手样机模型如图 9 所示,该机械手可以带动手指关节完成屈伸运动,适应不同长度手指的训练。

3.2 仿真结果分析

将各个手指模型分别导入到 ADAMS 软件中进行运动学仿真,仿真模型如图 10 所示。设置好仿真环境,在直线电机处添加平移驱动,将其速率设置为 6.5 mm/s,设置电机工作行程 $d = 30$ mm,根据行程与速率设置手指弯曲与伸展的仿真时间为 4.7 s,仿真步数设置为 100。

因为 5 指近端的结构设计都是相同的,所以在对 MCP 关节进行仿真时仅对 1 根手指进行分析即可,仿真结果如图 11 所示。由图 11 可知,MCP 关节在整个运动过程中最大角位移为 $50^\circ \sim 55^\circ$,角速度为 $10 \sim 15$ ($^\circ/\text{s}$),且角速度曲线平稳,符合设计预期。



图 9 外骨骼康复机械手样机模型

Figure 9 Prototype model of exoskeleton rehabilitation manipulator

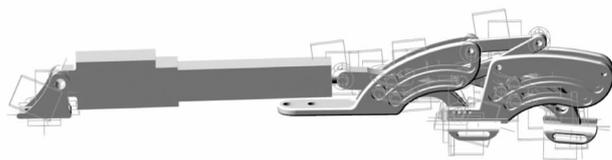


图 10 手指仿真模型

Figure 10 Simulation model of finger

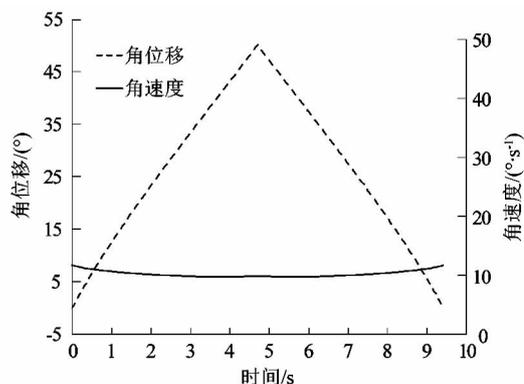


图 11 MCP 关节角位移和角速度仿真结果

Figure 11 Simulation results of MCP joint angular displacement and angular velocity

在 4 指模块中每个机械手指远端的结构都略有不同,所以分别对 4 指的 PIP 关节逐个进行仿真。PIP 关节角位移与角速度的仿真结果如图 12 所示。4 指在整个运动过程中角速度和角位移都非常接近,综合重复误差 $< 5\%$,符合正常人的运动规律,4 指最大角位移为 $50^\circ \sim 55^\circ$,角速度为 $7 \sim 18$ ($^\circ/\text{s}$),角速度曲线平稳连续无突变,在运行初期和末期时速度略大,但仍

符合设计要求。PIP 关节运动轨迹如图 13 所示。由图 13 可知,手指长度的不同产生的关节运动轨迹随之不同,但关节运动轨迹的形状基本相同,符合正常人手指间的运动规律。

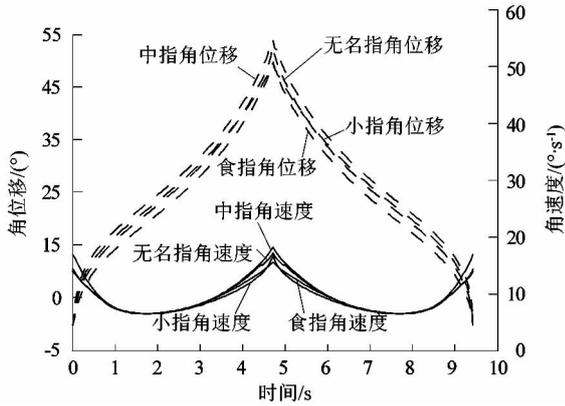


图 12 PIP 关节角位移和角速度仿真结果

Figure 12 Simulation results of PIP joint angular displacement and angular velocity

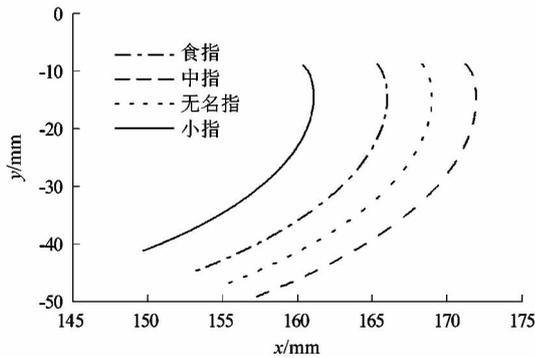


图 13 PIP 关节运动轨迹

Figure 13 Motion trajectory of PIP joint

4 结语

为提高手部康复外骨骼结构的紧凑性和适配性,课题组提出了一种考虑 5 指差异化的连杆滑槽式外骨骼手机构。该外骨骼每根手指由独立电机驱动,可以进行单指和多指康复训练。在康复过程中机械手指每个关节的旋转中心始终保持与人手指关节的转动中心重合,有效避免了对关节的二次损伤,并根据手指结构特性建立了运动模型。并以运动学规律为约束,使用粒子群算法得出了结构紧凑的单指尺寸最优解。设计 5 指差异化同时考虑降低加工难度,在算例中改变 1 根杆件长度,并多次计算分别得出具有差异化特征的

5 指尺寸最优解,提高了外骨骼手的适配性。仿真结果可以看出,在进行 5 指差异化后各手指关节的角位移、角速度综合重复误差 < 5%,运动轨迹亦符合要求,验证了设计的可靠性,表明该外骨骼机械手能够满足康复要求。

参考文献:

- [1] 陈学斌,高海鹏,刘文勇,等. 手外骨骼康复技术研究进展 [J]. 中国医疗设备,2016,31(2):86-91.
- [2] CHANG W H, KIM Y H. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation [J]. Journal of Stroke,2013,15(3):174-181.
- [3] 项世传,孟巧玲,喻洪流,等. 柔顺外骨骼康复机械手的研究现状 [J]. 中国康复医学杂志,2018,33(4):461-465.
- [4] 易安东,张定国. 一种基于直线电机驱动的轻型手部外骨骼 [J]. 机械设计与研究,2019,35(5):18-23.
- [5] 吕赢,孟青云,喻洪流. 手部康复机器人技术研究进展 [J]. 北京生物医学工程,2018,37(6):650-656.
- [6] DU J Z, TIAN Y, ZHANG D G, et al. Mechanism design and performance analysis of a wearable hand rehabilitation robot [J]. Machines,2022,10(12):1211.
- [7] GUO K, LU J X, LIU C, et al. Development research optimization and experiment of exoskeleton robot for hand rehabilitation training. [J]. Applied Sciences,2022,12(20):10580.
- [8] 王杰,管声启,夏齐霄. 手指康复外骨骼机器人的结构优化设计 [J]. 中国机械工程,2018,29(2):224-229.
- [9] TAHERI H, ROWE J B, GARDENR D, et al. Design and preliminary evaluation of the finger rehabilitation robot; controlling challenge and quantifying finger individuation during musical computer game play [J]. Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation,2014,11(1):10.
- [10] SOEKADAR S R, WITKOWSKI M, VITIELLO N, et al. An EEG/EKG-based hybrid brain-neural computer interaction (BCI) system to control an exoskeleton for the paralyzed hand [J]. Biomedizinische Technik Biomedical Engineering,2015,60(3):199-205.
- [11] 钟思灵,于随然. 手部功能康复外骨骼的结构设计与分析 [J]. 机械设计与研究,2020,36(3):12-18.
- [12] 王扬威,吕佩伦,郑舒方,等. 形状记忆合金驱动手指功能康复外骨骼设计 [J]. 浙江大学学报(工学版),2022,56(12):2340-2348.
- [13] 马文章,肖飞云,王勇. 一种穿戴式康复外骨骼机械手的设计和 分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):307-314.
- [14] 戴红. 人体运动学 [M]. 北京:人民卫生出版社,2008:109-110.
- [15] 刘博,张玉茹,任大伟,等. 人手食指运动学建模 [J]. 机器人,2007,29(3):214-218.
- [16] 黄裘俊,张凯,宋锦春,等. 基于改进粒子群算法的取件机械手轨迹综合优化设计 [J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(11):1636-1641.