

手指康复外骨骼机器人的结构优化设计

王 杰<sup>1</sup> 管声启<sup>1</sup> 夏齐霄<sup>2</sup>

1.西安工程大学机电工程学院,西安,710048  
2.北京联合大学机器人学院,北京,100020

**摘要:**为满足手指功能损伤患者康复的需要,设计了一种基于平面连杆机构的手指康复外骨骼机器人。通过分析仿生手指运动的自由度,建立了机器人运动学模型;以主要机械构件和手指关节转动角度为空间向量元素,求解了机器人的工作空间,在此基础上,得到各机械构件的最佳尺寸,从而完成对机械构件的结构优化设计。仿真实验表明,该机器人能带动手指在一定角度范围进行弯曲拉伸运动,可以满足手指损伤患者的康复训练需求。

**关键词:**康复;平面连杆机构;运动学;工作空间;结构优化设计

**中图分类号:** TP242 **DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2018.02.015

Structural Design of Finger Rehabilitation Exoskeleton Robots

WANG Jie<sup>1</sup> GUAN Shengqi<sup>1</sup> XIA Qixiao<sup>2</sup>

1.School of Mechatronics Engineering,Xi'an Polytechnic University,Xi'an,710048  
2.School of Robotic,Beijing Union University,Beijing,100020

**Abstract:** In order to meet rehabilitation needs of patients with finger injury, a finger-supported exoskeletal robot was designed based on planar linkages. Firstly, a kinematics model of the robot was established by analyzing the degrees of freedom of bionic finger movements. Secondly, main mechanical components and rotation angles of finger joints were used as space vector elements to solve robot workspace. Based on these, optimum sizes of each mechanical structures were obtained, and structural optimization designs of mechanical components were completed. Simulation results show that the robot may carry out bending and stretching movements in a certain range of angles, and may meet rehabilitation training of patients with finger injury.

**Key words:** rehabilitation; planar linkage mechanism; kinematics; workspace; optimized design of structure

0 引言

随着疾病灾难导致的肢体运动障碍患者越来越多,康复医学与机器人学结合的康复机器人技术正逐渐成为国内外研究的热点<sup>[1]</sup>。手指康复外骨骼机器人是外骨骼机器人在医疗领域中的一项应用,其主要任务是辅助中风患者活动锻炼手指或手外伤患者进行术后的康复训练<sup>[2-6]</sup>。文献[7]以一种欠驱动式手指康复训练装置为例,分析了其机械机构,对手指运动学模型空间状态进行了结构的优化。德国特里尔大学研制的食指康复机械手优化了驱动方式,实现了机构的轻量化<sup>[8]</sup>。北京航空航天大学设计的四自由度精巧外骨骼式手指运动功能康复机器人通过钢丝绳对手指的各个关节进行单独双向驱动,利用移动轴承座上附

带的滑动槽来调节各模块间距,以使执行系统的某些长度可调节<sup>[9]</sup>。哈尔滨工业大学设计的由 3 个外骨骼关节(基于对称齿轮齿条平行滑动机构)串联而成的手指运动的矫形装置<sup>[10]</sup>,不仅可以实现手指各关节的良好转动,而且可以通过调节个别机械构件的位置,使其与不同长度的手指相匹配。意大利热那亚大学研制的 HEXOSYS 手指康复外骨骼机器人不仅实现了食指和拇指独立的屈伸动作和之间的闭合运动,还可以通过独立的驱动器控制每个关节<sup>[11]</sup>。手指康复外骨骼机器人结构多样,但普遍存在结构笨重、控制系统结构复杂的问题,限制了手指康复机器人的应用范围<sup>[12]</sup>。

针对以上问题,通过了解人手结构特点,基于平面连杆机构,设计了一种可适用于不同手指长度的欠驱动式手指康复外骨骼机器人,并对该机

机器人进行运动学分析,得到了一定机械尺寸在对应手指长度下的所有空间状态,进而对关键机械结构进行了优化。

1 结构建模

1.1 手指运动特性分析

一般情况下,手部至多能完成的两种运动是弯曲拉伸和内收外展。手指关节的弯曲伸展运动与内收外展运动之间有着特定的约束关系,即弯曲伸展运动完成之后,通常不会再有内收外展运动<sup>[8]</sup>。

如图 1 所示,除大拇指外,其他 4 个手指的关节可分为掌指关节 MP、近侧指间关节 PIP、远侧指间关节 DIP,每个手指的 MP 处含有 2 个自由度,PIP 和 DIP 处各含有 1 个自由度,大拇指共含 2 个自由度,因此整个手指共 18 个自由度<sup>[13]</sup>。

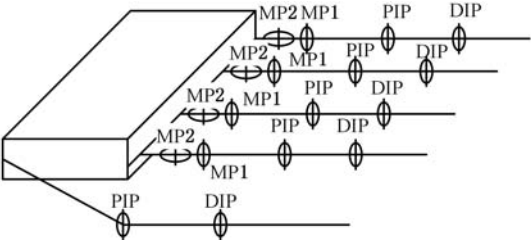


图 1 手指自由度分析模型

Fig.1 Analysis model of finger freedom

生物医学研究表明,手指运动的特点包括:①各段手指骨在同一平面内运动;②大拇指外伸的两段指骨在同一平面内运动;③MP 处屈伸的轴线和内收外展的轴线几乎垂直;④ PIP 和 DIP 在运动时会相互影响;⑤各手指关节的弯曲范围和内收外展范围有限,例如掌指关节的弯曲角度一般都小于 90°<sup>[11]</sup>。根据正常男女手指功能模型库,可得手指各个关节的运动角度,如表 1 所示。

表 1 正常成人手指活动范围

Tab.1 Finger movement range of normal adults

手指关节	MP2	MP1	PIP	DIP
运动方式	内收/外展	弯曲	弯曲	弯曲
活动范围 (°)	-20~20	0~90	0~110	0~70

1.2 机构组成与工作原理

该手指康复外骨骼机器人主要基于一种欠驱动连杆机构,其结构如图 2 所示,自由度为 2。

人的手指运动具有相同的特性,因此本文以食指为实验研究对象进行分析。如图 3 所示,手指的相关运动主要由掌骨、近指骨、中指骨、远指骨共同决定,并依次由掌指关节、近端指关节和远端指关节连接。根据前文提到的手指关节运动特点,基于平面连杆机构,设计了图 3 所示的一种由

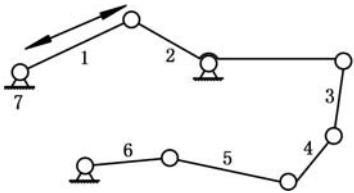


图 2 机器人机构简图

Fig.2 Schematic diagram of mechanism of robot

直线电机、弧形架、连杆及指套构成的终端牵拉式手指康复外骨骼机器人。康复训练中,该机器人通过和患者手指末端固连,从而带动手指其他关节实现目标屈伸运动,其中,A、I、B、G、F 连接点均由铰链连接。

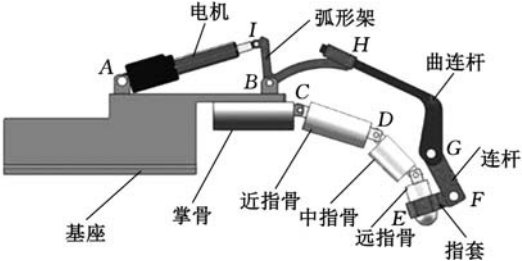


图 3 机器人的设计模型

Fig.3 Design model of robot

由机器人结构和手指组成系统的原动件数目小于自由度数,因此决定了该手指康复外骨骼机器人含有不确定的终端运动,从而可以减小在康复过程中突发痉挛时机械结构带给患者的二次创伤。

2 优化设计

2.1 机械系统前端尺寸设计与优化

2.1.1 模型简化

将图 3 所示的手指康复外骨骼机器人中的前端机械构件(弧形架、曲连杆、连杆及指套)和手指各个关节简化为图 4 所示的运动学模型。其中,近端指关节和掌指关节的转轴中心分别用 C、D 两点表示,E 点是手指末端与手指套的垂足。由实际情况知,人手指的远指骨较短,因此,为了计算方便,可以忽略远指骨长度。掌指关节和近

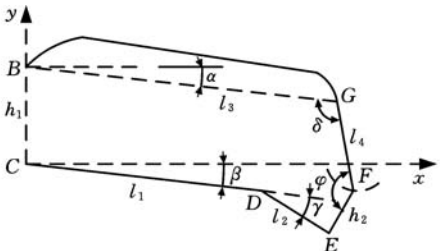


图 4 前端机械结构及手指的简化运动模型

Fig.4 Front end of the mechanical structure and simplified motion model of the finger

端指关节的弯曲角度分别用 $\beta$ 、 $\gamma$ 表示, $\alpha$ 表示弧形架的转动角度, $\delta$ 表示弧形架与连杆之间的夹角。向量 $(\beta_i, \gamma_i, \alpha_i, \delta_i)$  ( $i$ 表示不同的状态,  $i=1, 2, \dots, n$ )表示手指康复外骨骼机器人的前端机械构件和手指在空间的任一瞬时状态,把所有存在的空间瞬时状态称为空间瞬时状态集 $R$ 。

因此,对手指康复外骨骼机器人的机械构件尺寸进行优化设计就可以转化为:使任一空间瞬时状态组成的空间状态集 $R$ 包含手指在拉伸和弯曲过程中所有可能存在的空间状态。

### 2.1.2 运动学分析

直线电机正常工作时,只要在合理范围内改变 $\alpha$ ,就可以根据图 4 中的几何关系并结合下式

$$\left. \begin{aligned} x_G &= l_3 \cos \alpha \\ y_G &= l_3 \sin \alpha + h_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由 $\alpha$ 唯一确定 $G$ 点的坐标。由下式可知,

$$\left. \begin{aligned} (x_F - x_G)^2 + (y_F - y_G)^2 &= l_4^2 \\ l_{GB} &= (-x_G, h_1 - y_G) \\ l_{GF} &= (x_F - x_G, y_F - y_G) \\ l_{GB} \cdot l_{GF} &= l_3 l_4 \cos \delta \\ y_F &< y_G \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$F$ 点的位置可由 $\delta$ 确定。由于中指骨长度 $l_2$ 和指套高度 $h_2$ 为定值,且两者互相垂直,所以 $D$ 、 $F$ 两点的距离为

$$d_{DF} = \sqrt{l_2^2 + h_2^2} \quad (3)$$

又 $C$ 、 $D$ 两点间的距离为 $l_1$ ,从而有

$$\left. \begin{aligned} (x_D - x_F)^2 + (y_D - y_F)^2 &= l_2^2 + h_2^2 \\ x_D^2 + y_D^2 &= l_1^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 三点间的距离关系可得

$$\left. \begin{aligned} (x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2 &= h_2^2 \\ y_E &< y_D \\ (x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2 &= l_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在 $\triangle BCD$ 和 $\triangle CDE$ 中,由余弦定理可得

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \arccos \frac{h_1^2 + l_1^2 - l_{BD}^2}{2h_1 l_1} - 90^\circ \\ \gamma &= 180^\circ - \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 - l_{CE}^2}{2l_1 l_2} \\ l_{BD}^2 &= x_D^2 + (y_D - h_1)^2 \\ l_{CE}^2 &= x_E^2 + y_E^2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

手指关节及前端机械结构的运动状态集 $R$ 的求解过程为:①预设一 $\alpha$ 值,得 $G$ 点坐标;②预设一 $\delta$ 值,并结合 $G$ 点坐标,求得 $F$ 点坐标;③根据 $F$ 点坐标可以确定 $D$ 、 $E$ 点的坐标;④根据各点的位置关系可得 $\beta$ 、 $\gamma$ ;⑤令 $\delta \leftarrow \delta + \Delta\delta$ ,重复过程②~④;⑥令 $\alpha \leftarrow \alpha + \Delta\alpha$ ,重复过程①~⑤。经过上述过程,就可以得到手指及前端机械结构运动简化模型中的所有可能的向量 $(\beta, \gamma, \alpha, \delta)$ ,从

而得到了空间瞬时状态集 $R$ 。

手指及前端机械结构的各空间状态即空间瞬时状态集 $R$ 由式(1)~式(6)确定。其中, $\alpha$ 由直线电机直接控制,弧形架转动的范围越大,手指及前端机械结构的各空间状态就越多,越接近手指康复外骨骼机器人的理想状态,能适用于手指所有空间状态的可能性就越大。

### 2.1.3 数值计算

给定手指长度,利用 MATLAB 对运动学模型的数值进行计算,求解出不同尺寸参数对应机械结构的运动学模型下的所有空间状态,并且从中找到某一组合的尺寸,使得空间状态集 $R$ 尽可能多地包含手指在屈伸过程中所有可能的空间状态。

对于事先给定的手指长度 $l_1$ 、 $l_2$ 和连杆长度 $l_4$ ,在确定手指康复外骨骼机器人的机械构件尺寸 $l_3$ 、 $h_1$ 和 $h_2$ 时,由于式(1)~式(6)中的变量较多,因此需要根据各个机械构件的实际情况对其尺寸进行预先的设定。由于要充分考虑手指康复外骨骼机器人的美观性和可穿戴性,所以应尽量减小 $h_1$ 和 $h_2$ ,为避免机械冲突和干涉,设定 $h_1 = 25 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 20 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 40 \text{ mm}$ 。以 $l_1 = 45 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 30 \text{ mm}$ ,  $60^\circ \leq \delta \leq 120^\circ$ 为例,求得在式(1)~式(6)的限定条件下,不同 $l_3$ 对应手指的所有可能存在的空间瞬时状态,只取 $(\beta, \gamma, \alpha, \delta)$ 中的 $\beta$ 、 $\gamma$ 绘制不同 $l_3$ 对应的手指空间状态,如图 5 所示。

假定手指在自然状态下屈伸时, $\beta = -20^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ,即图 5 中的点 $(-20^\circ, 0^\circ)$ 。手指在目标屈伸状态时, $\beta = 60^\circ$ ,  $\gamma = 80^\circ$ ,即图 5 中的点 $(60^\circ, 80^\circ)$ 。由计算结果可以看出: $l_3 \leq 60 \text{ mm}$ 或 $l_3 \geq 80 \text{ mm}$ 时,对于当前给定手指长度,手指无法达到理想目标屈伸状态和自然状态下屈伸状态; $65 \text{ mm} \leq l_3 \leq 75 \text{ mm}$ 时,手指可在自然状态下屈伸及目标屈伸状态之间活动。因此,在自然状态下,当给定一康复目标状态时, $l_3$ 的长度必须有一定的范围,以保证不同手指长度的患者使用。

## 2.2 机械系统后端尺寸设计与优化

### 2.2.1 模型简化与运动学分析

在实际工作情况中,直线电机只可在一定范围内推动弧形架转动有限的角度,因此很有必要对该手指康复外骨骼机器人的终端机械构件(直线电机、弧形架 $IB$ 段及基座)进行结构优化,以便得到直线电机可推动弧形架转动足够大的角度,进而能满足达到前端机械结构所需。如图 6 所示, $K_1$ 、 $K_2$ 分别为直线电机在该系统中工作时

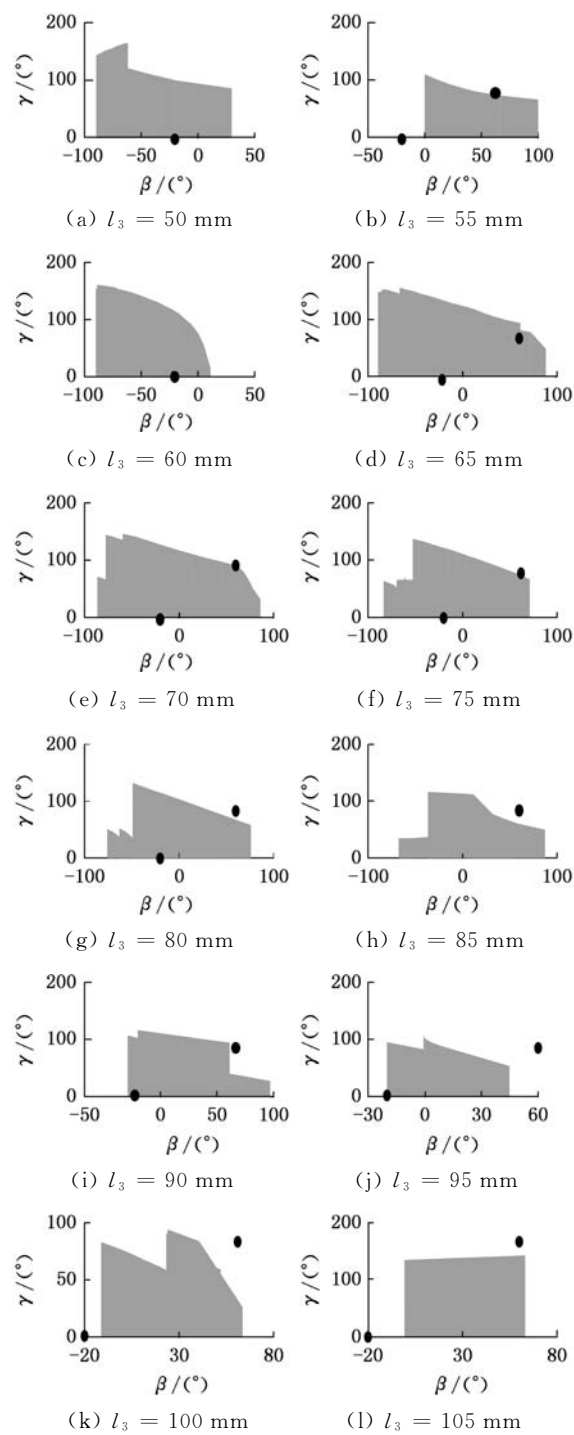


图 5 不同弧形架长度对应的手指空间状态  
Fig.5 Different arcs of corresponding length of finger space

的两极限位置,  $\theta$ 、 $\eta$  分别为直线电机工作到两极限位置时与 X 轴的夹角, 直线电机推动弧形架的实际转动角度为  $\eta - \theta$ 。由图 6 可知, 手指及终端机械结构应满足以下关系:

$$\left. \begin{aligned} x_A &= -l_5 \\ y_A &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} (x_K - x_A)^2 - y_K^2 &= l_7^2 \\ y_A &= 0 \\ x_K^2 + y_K^2 &= l_6^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

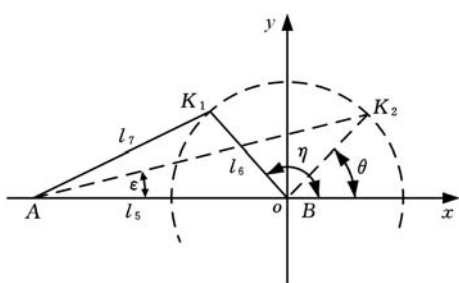


图 6 终端机械结构及手指的简化运动模型  
Fig.6 Simplified motion model of finger and terminal mechanical structure

在  $\triangle ABK_1$  中, 由余弦定理可得

$$\angle ABK_1 = \arccos \frac{l_5^2 + l_6^2 - l_7^2}{2l_5l_6} \quad (9)$$

在研究设计该手指康复外骨骼机器人的过程中要充分考虑其可穿戴性, 且机械结构应该紧凑, 所以应限定  $l_5$ 、 $l_6$  的尺寸满足:  $l_{5\min} < l_5 < l_{5\max}$  和  $l_{6\min} < l_6 < l_{6\max}$ 。此外, 定值  $(\eta - \theta)_{\min}$  应为直线电机推动弧形架转动的角度的最小值, 且直线电机推动弧形架转动的平均输出转矩应最大, 即

$$\max T = \int_{\eta}^{\theta} F_M h d\theta \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \eta - \theta \geq (\eta - \theta)_{\min}$$

式中,  $F_M$  为电机的输出力;  $h$  为直线 AK 到原点 B 的距离,  $h = l_5 y_K / l_7$ 。

2.2.2 数值计算

直线电机的位置由  $l_5$ 、 $l_6$  确定, 且必须满足式 (6) ~ 式 (9) 限定的条件。直线电机完全回缩状态下的长度为 78 mm, 完全伸出时的长度为 108 mm。考虑到真实装置的美观性和可穿戴性, 实际制作的机械结构尺寸不宜过大, 因此限定  $l_5 < 125$  mm,  $l_6 < 50$  mm,  $\eta - \theta > 88^\circ$ , 为了便于计算, 在此设定  $\eta - \theta = 90^\circ$ 。  $F_M$  由电机自身决定, 且为定值 15 N。利用 MATLAB 对式 (7) ~ 式 (9) 进行了数值计算, 从而得到不同  $l_5$ 、 $l_6$  组合下直线电机推动弧形架的平均输出转矩和直线电机可推动弧形架转动角度的关系图(图 7、图 8)。考虑到输出扭矩和电机推动弧形架的转动角要尽可能的大, 可得  $l_5$ 、 $l_6$  的最佳值 115 mm 和 50 mm, 此时电机可推动弧形架转动的角度  $\eta = 180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$ 。

3 模型装配与仿真分析

当合理的机械机构尺寸确定后, 对原拟定的尺寸进行修改以确定合理的机械构件, 利用 Solidworks 来对手指康复外骨骼机器人进行虚拟装配和运动仿真。得到了图 9 所示的手指康复外骨骼机器人, 该机器人不仅可以以“握手”的形式



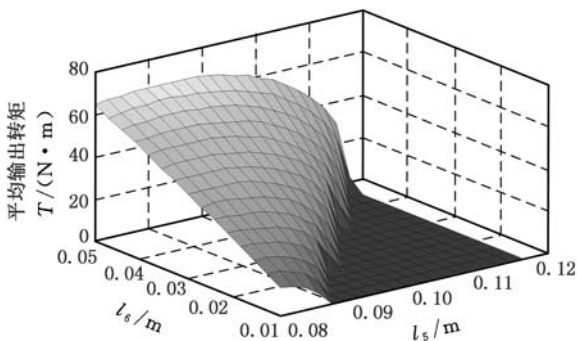


图 7 平均输出转矩与  $l_5$ 、 $l_6$  的变化关系

Fig.7 Relationship between average output torque and  $l_5$ ,  $l_6$

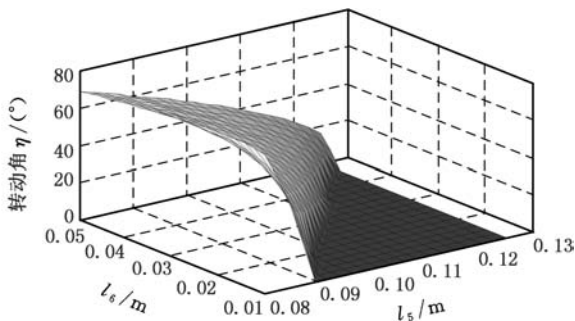


图 8 转动角与  $l_5$ 、 $l_6$  的变化关系

Fig.8 Relationship between angle of rotation and  $l_5$ ,  $l_6$

牵拉手指终端,带动手指各个关节完成弯曲和伸展运动,而且可适用于不同长度的手指进行康复活动和锻炼,能够很好地完成对患者手指的被动训练任务。

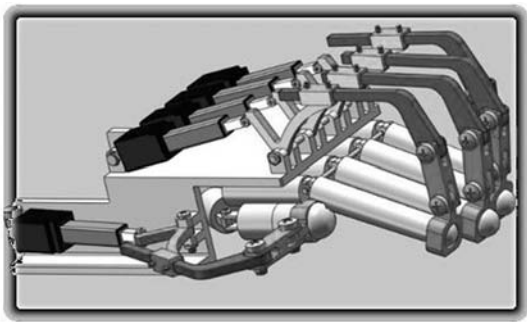


图 9 手指康复外骨骼机器人装置

Fig.9 Structure of finger rehabilitation exoskeleton robot

机械运动仿真对后期物理样机制作和控制系统的的设计具有极其重要的意义<sup>[14]</sup>,因此,本文采用 Solidworks 中的 Motion 工具箱对该机器人带动手指进行康复训练,进行了运动学仿真,仿真界面及手指末端轨迹如图 10 所示。

Motion 工具箱的主要仿真参数如下:直线电机速度 5 mm/s;仿真时间 5 s,仿真帧数 100。仿真结果如图 11 所示,其中包含该机器人在带动手指完成弯曲/拉伸动作时,手指的角位移、角速

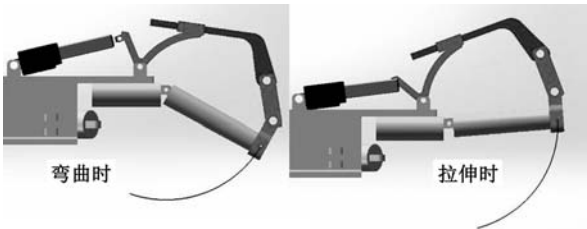


图 10 手指末端的运动轨迹

Fig.10 Movement trajectory of the end of the finger

度和角加速度等相关数据。由图 11 可以得到,在设定的运动参数中,机器人带动手指做弯曲运动时,手指末端在  $yz$  平面的最大角位移为  $79^\circ$ ,最大角速度为  $20^\circ/\text{s}$ ,最大角加速度为  $7^\circ/\text{s}^2$ ;机器人带动手指做拉伸运动时,手指末端在  $yz$  平面的最大角位移为  $78^\circ$ ,最大角速度为  $19^\circ/\text{s}$ ,最大角加速度为  $2.2^\circ/\text{s}^2$ 。仿真结果表明,该机器人能按照预期给定的参数进行运动。从位移曲线也可以看出,该机器人运动平稳,能带动手指在预期的活动范围内运动,因此可以用于辅助手指损伤患者进行康复训练。

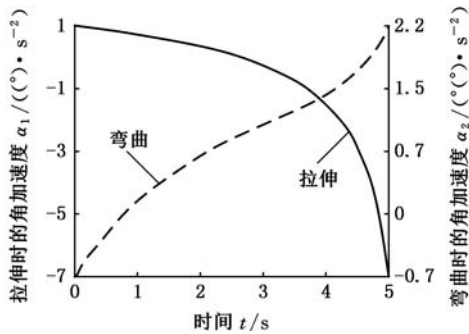
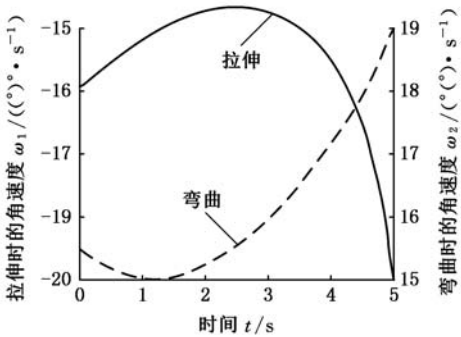
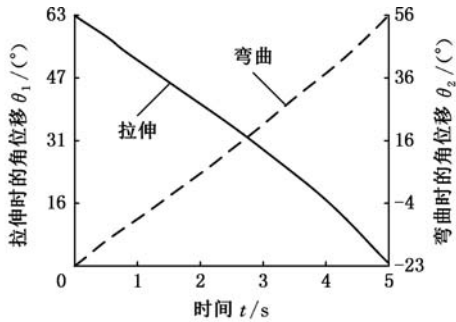


图 11 手指末端运动情况

Fig.11 The movement of the end of the finger

# 4 结语

通过对国内外手指康复外骨骼机器人研究现状的综合分析,设计优化了一种手指康复外骨骼机器人;在对手指康复外骨骼机器人建模的基础上,对其机械系统进行运动学分析,得到了各构件的最佳尺寸;经过运动仿真,得到了机器人的运动轨迹和机器人末端的运动参数曲线。从结果可以看出,该机器人能带动手指能按照一定范围角度进行弯曲/拉伸运动,能够满足手指损伤患者的康复训练,验证了设计的合理性,具有一定的使用价值。

## 参考文献:

- [1] GEZGIN E, CHANG P H, AKHAN A F. Synthesis of a Watt II Six-bar Linkage in the Design of a Hand Rehabilitation Robot[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 104: 177-189.
- [2] 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.  
CHEN Xuebin, GAO Haipeng, LIU Wenyong, et al. Research on the Development of Hand Exoskeleton as a Rehabilitation Technology [J]. China Medical Devices, 2016, 31(2): 86-91.
- [3] 易荣武,王爱民.手指远程康复训练机器人系统设计[J].电子测量技术,2016,39(9):128-132.  
YI Rongwu, WANG Aimin. Design of Remote Rehabilitation Training Robotic System for Fingers [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(9):128-132.
- [4] 张帆,郭书祥,魏巍.欠驱动式外骨骼手指康复机器人的设计和仿真 [J].天津理工大学学报,2015,31(2):30-34.  
ZHANG Fan, GUO Shuxiang, WEI Wei. The Design and Simulation of the under Actuation Exoskeleton Finger Rehabilitation Robot [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2015,31(2):30-34.
- [5] 杨成阳,尤跃东,赵岩.手指康复机器人串联弹性驱动器的设计与仿真[J].机械制造,2016,54(7):4-7.  
YANG Chengyang, YOU Yuedong, ZHAO Yan. Design and Simulation of a Series of Flexible Elastic Actuator for Finger Rehabilitation [J]. Machinery, 2016,54(7):4-7.
- [6] 李超,袁锐波,丘世因,等.外骨骼康复机械手的结构设计及仿真分析[J].机械与电子,2016,34(2):16-19.  
LI Chao, YUAN Ruibo, QIU Shiyin, et al. Design and Kinematical Analysis of Exoskeletal Rehabilitation Robot Hand [J]. Machinery & Electronics, 2016,34(2):16-19.
- [7] 郑杨,陈垒,王刚,等.欠驱动式手指康复训练装置

的结构优化设计[J].西安交通大学学报,2008,29(4):151-156.

ZHENG Yang, CHEN Lei, WANG Gang, et al. A Structure Optimal Design of Training Devices for the Under-actuated Hand Rehabilitation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 29 (4): 151-156.

[8] SOEKADAR S R, WITKOWSKI M, VITIELLO N, et al. An EEG/EOG-based Hybrid Brain-neural Computer Interaction(BNCI) System to Control an Exoskeleton for the Paralyzed Hand[J]. Biomedizinische Technik Biomedical Engineering, 2015, 60 (3): 199-205.

[9] WANG J, LI J, ZHANG Y, et al. Design of an Exoskeleton for Index Finger Rehabilitation [C]// Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.. Minnesota, USA, 2009: 5957-5960.

[10] 刘洪山.手创伤康复机械手结构设计与分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.  
LIU Hongshan. Structure Desing and Analysis of Mechanical Hand for Rehabilitation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[11] IQBAL J, TSAGARAKIS N G, FIORILLA A E, et al. A Portable Rehabilitation Device for the Hand.[C]// Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Engineering in Medicine & Biology Society. Chengdu, 2010: 3694-3697.

[12] POLOTTO A, MODULO F, FLUMIAN F, et al. Index Finger Rehabilitation/Assistive Device [C]// The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. Roma, 2012: 1518-1523.

[13] 于美丽.基于 ADAMS 外骨骼康复机械手的设计和仿真分析[D].青岛:青岛大学,2012:11-12.  
YU Meili. The Design and Simulation of Exoskeleton Hand Rehabilitation Manipulator Based on ADAMS [D]. Qingdao: Qingdao University, 2012:11-12.

[14] 贾先,赵升吨,范淑琴,等.双动压力机用压边滑块串联四连杆工作机构的优化[J].中国机械工程,2016,27(9):1223-1228.  
JIA Xian, ZHAO Shengdun, FAN Shuqin, et al. Optimization of Pressure Side Slider Series Four-bar Linkage Working Mechanism Used by Double-action Press [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1223-1228.

(编辑 张 洋)

作者简介:王 杰,男,1993 年生,硕士研究生。研究方向为医疗机器人。E-mail: wangxiaomujerry@163.com。