

DOI: 10.7652/xjtuxb201503023

欠驱动式手指康复训练装置的结构优化设计

郑杨^{1,2}, 陈垒^{1,2}, 王刚^{1,2}, 刘新蓉^{1,2}, 董晓彤^{1,2}, 王珏^{1,2}

(1. 西安交通大学生物医学信息工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 国家保健器具工程技术研究中心西安交通大学分部, 710049, 西安)

摘要: 为了使欠驱动式手指康复训练装置可提供的手指关节活动范围满足训练需求,以某一连杆机构为例,通过分析运动学模型空间状态进行结构优化。首先建立机械机构与手指的简化空间模型,以关键构件及手指关节的旋转角度作为空间向量元素,求得某一机械尺寸及手指长度下所有可能的空间向量,形成空间状态集;然后通过考察空间状态集选择最佳机构尺寸,使得手指关节活动范围满足训练需求。仿真及样机佩戴测试结果表明,经过优化设计后的连杆式机构能够辅助手指在所需的关节活动范围内进行屈曲伸展运动,对手指长度变化的适应能力较强。所提结构优化方法对于欠驱动式肢体康复训练装置的结构优化设计具有一定的参考价值。

关键词: 手指康复;欠驱动;结构优化;终端牵拉

中图分类号: R318.04 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)03-0151-06

A Structure Optimal Design of Training Devices for the Under-Actuated Hand Rehabilitation

ZHENG Yang^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, WANG Gang^{1,2}, LIU Xinrong^{1,2}, DONG Xiaotong^{1,2}, WANG Jue^{1,2}

(1. The Key Laboratory of Biomedical Information Engineering of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. National Engineering Research Center of Health Care and Medical Devices, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A method for the optimization of mechanical structure of the under-actuated hand rehabilitation training system is proposed to expand the motion range of its finger joints and to satisfy training requirements and it is based on analyzing spatial states of kinematic models. Simplified spatial models for the mechanical components and fingers are established. All possible spatial vectors under some mechanical size and finger length are calculated to form a set of spatial states by regarding the rotation angles of key mechanical components and finger joints as the elements of spatial vectors. Then, the optimal mechanical sizes are determined by investigating different state sets to make the motion range of finger joints meet the needs of clinical training. A software is used to build a 3D entity model for kinematic analysis. The results from simulation and prototype wear tests show that the proposed device can assist fingers to finish flexion and extension within required motion ranges and is capable of adapting the changes in finger length. It can be concluded that the proposed method is helpful for the structure optimal design of under-actuated limb rehabilitation training devices.

Keywords: finger rehabilitation; under-actuated; structure optimal design; end-effector type

康复训练机器人可以辅助患者进行肢体关节活动,其优点是可以保证稳定的训练效率和强度,能够

提供与训练效果相关的客观评价参数^[1]。研究表明,康复训练机器人能够显著改善患者的肢体运动

功能^[2]。欠驱动式机器人是指独立控制输入少于系统自由度的机器人,可用于手指关节的康复训练。欠驱动式康复训练机器人通常以“握手”的形式牵拉手指终端,从而带动手指各个关节的运动^[3-5]。由于手指运动的不确定度更多,穿戴这种设备的时间是最少的^[6],因此在临床上的应用较多。由于欠驱动式机器人通常带有一个或多个可自由转动的被动关节,因此自身的运动具有一定的不确定度,这种不确定度使得即使在佩戴后手指关节仍可在一定范围内自主运动,从而减小了在突发痉挛时机械机构对手指造成的伤害。

康复训练机器人需要带动手指在足够大的关节活动范围内进行训练,这对于防止关节粘连具有重要意义^[7]。当欠驱动式机器人以终端牵拉的形式带动手指进行关节训练时,手指各关节的活动范围实际是由机械机构及手指骨共同组成的运动学模型来确定的,任何一个因素的改变都可能改变最终手指关节的活动范围。这就对机械结构提出了两个层次的要求:首先,对于给定的某一手指长度,机械结构应保证在此运动学模型下有足够的手指关节活动范围;其次,当手指长度发生变化时,机械结构应能(或通过简单调节后)重新建立与之匹配的运动学模型,保证所需的指关节活动范围。本文利用欠驱动连杆机构设计了一种终端牵拉式五指康复训练装置,通过对机械结构及手指骨构成的运动学模型进行分析,得到机械机构及手指所有可能的空间状态,即空间状态集,通过考察空间状态集来确定与手指相匹配的最佳机械结构尺寸。同时,通过观察不同手指长度下空间状态集的变化规律,证明了所设计的机构能够适应手指长度的变化,始终保持所需的手指关节活动范围。

1 结构与运动学分析

1.1 结构设计

与手指运动相关的手部骨骼主要包括掌骨、近指骨、中指骨及远指骨(见图1),并依次由掌指关节、近端指关节和远端指关节连接。依据手指关节运动规律,设计了四连杆终端牵拉式手指康复训练装置,由直线电机、弧形架、连杆及指套构成,连接点G、K、B、A、F均为铰链结构。A点有限位销,用于限定弧形架与连杆间的夹角范围,防止沿连杆方向的推力过小甚至消失。弧形架、连杆及指套构成3自由度系统,1个独立的输入控制量,因此属于欠驱动式系统,其终端运动具有一定的不确定度。当指

套与远指骨固定后,手指及机械机构共同构成了六连杆结构,决定了手指关节的活动范围。

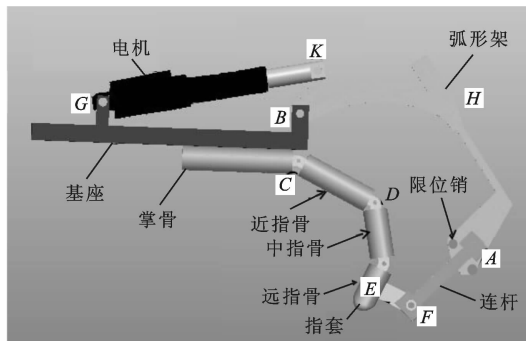


图1 手指关节示意图与康复训练装置设计模型

1.2 运动学分析

康复训练装置必须能够带动手指在所需的范围内进行屈曲伸展运动,这需要对机械构件的各个尺寸进行优化设计。将图1中手指及前端机械构件(弧形架BA段、连杆及指套)简化为图2所示的运动学模型。C、D两点分别位于掌指关节与近端指关节转轴中心,E位于指套与手指终端接触点,且指套与远指骨相互垂直。由于远端指骨较短,所以为了便于计算忽略其长度。角 β 、 γ 分别为掌指关节和近端指关节的弯曲角度,弧形架转动角度用 α 表示,弧形架与连杆间夹角用 δ 表示,则向量 $(\beta_0, \gamma_0, \alpha_0, \delta_0)$ 实际代表了手指及前端机械构件的空间状态,所有存在的空间状态构成状态集M。对机械构件尺寸进行优化设计的目的是使M包含手指在屈曲伸展过程中所有可能的空间状态。

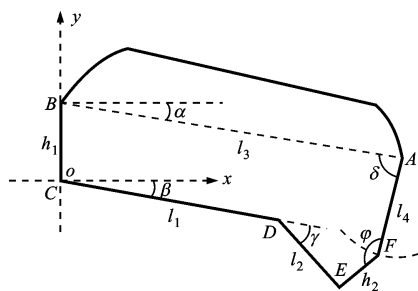


图2 手指及前端机械构件简化运动模型

当电机做伸缩运动时,改变 α 值,A点坐标可由 α 唯一确定

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

A点由铰链连接,因此连杆与弧形架间可发生自由转动,又由于限位销的存在,因此有

$$\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max} \quad (2)$$

F点位置由 δ 确定,可通过方程组求得

$$\left. \begin{aligned} (x_F - x_A)^2 + (y_F - y_A)^2 &= l_4^2 \\ \mathbf{l}_{AB} \cdot \mathbf{l}_{AF} &= l_3 l_4 \cos \delta \\ y_F &< y_A \\ \mathbf{l}_{AB} &= (-x_A, h_1 - y_A) \\ \mathbf{l}_{AF} &= (x_F - x_A, y_F - y_A) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于中指骨长度 l_2 及指套高度 h_2 固定,且两者垂直,因此 D 点到 F 点距离为 $(l_2^2 + h_2^2)^{1/2}$,又因为 D 点到 C 点距离为 l_1 ,因此有

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

由 E 点到 D 点及 F 点的距离关系可知

$$\left. \begin{aligned} (x_E - x_D)^2 + (y_E - y_D)^2 &= l_2^2 \\ (x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2 &= h_2^2 \\ y_E &< y_D \\ ab(x_D - x_F)(ax_E + by_E + c) &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中两不等式依据人手指骨骼结构特点及 D 、 E 、 F 3 点的位置关系得到, a 、 b 和 c 为 D 、 F 点所确定的直线方程 $ax + by + c = 0, a > 0$ 的系数。

综上所述,手指关节及前端机械构件的状态空间集求解过程为:①给定某一 α 值,求得 A 点坐标;②给定某一 δ 值,求得 F 点坐标;③由 F 点坐标确定 D 、 E 点位置,由式(5)可知,其解的个数可能为 1、2 或者 0,其中 0 表示此种状态不存在;④当状态存在时,由各点坐标求得角度 β 、 γ ;⑤在 $[\delta_{\min}, \delta_{\max}]$ 内,令 $\delta = \delta + \Delta\delta$,重复过程②③④;⑥令 $\alpha = \alpha - \Delta\alpha$,重复过程②③④⑤。经过上述过程,求得所有可能的向量 $(\beta, \gamma, \alpha, \delta)$ 构成的空间状态集。

手指及前端机械构件的空间状态集 M 由式(1)~式(5)确定,此状态集中 α 受电机直接控制。弧形架的转动范围越大,空间状态集越大,包含所有手指空间状态的可能性越大。然而,由于直线电机可推动弧形架转动的角度有限,因此需要对机械构件后端(电机、弧形架 KB 段及基座)进行结构优化设计,使得电机推动弧形架转动的角度满足前端所需。图 3 所示是电机及机械构件后端的运动学模型,其中 K_1 、 K_2 分别为电机完全回缩及伸出时的终端位置, θ_1 、 θ_N 分别为完全回缩与伸出时 KB 段与 x 轴的夹角,则电机实际可推动弧形架转动的角度为 $\theta_1 - \theta_N$ 。

由图 3 可知,各点坐标满足方程

$$\left. \begin{aligned} x_G &= -l_5 \\ y_G &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} (x_K - x_G)^2 + y_K^2 &= l_7^2 \\ x_K^2 + y_K^2 &= l_6^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

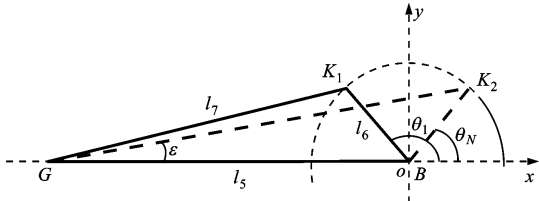


图 3 手指及后端机械构件简化运动模型

考虑到训练装置的可穿戴性,其尺寸大小应该有所限定,因此应有 $l_{5\min} < l_5 < l_{5\max}$ 及 $l_{6\min} < l_6 < l_{6\max}$ 。另一方面,直线电机推动弧形架转动的角度需要大于一定值 θ_{1N} ,且电机的推动弧形架的平均输出扭矩应该最大化,即

$$\begin{aligned} \max: \quad T &= \int_{\theta_1}^{\theta_N} fh \, d\theta \\ \text{subject to:} \quad \theta_1 - \theta_N &\geq \theta_{1N} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: f 为电机输出力,且为定值; h 为直线 GK 到原点 B 的距离。

2 数值计算与仿真测试

2.1 空间状态集分析

对于特定的手指长度,利用 Matlab 进行数值计算,求解不同尺寸机械构件下运动学模型的 M ,找寻某一尺寸组合使得 M 包含手指屈伸过程中所有可能的空间状态。对于给定的手指长度 l_1 、 l_2 ,需要确定机械构件尺寸 l_3 、 l_4 、 h_1 及 h_2 。由于变量较多,可以通过某些构件的实际情况进行预先的尺寸设定。考虑到设备的可穿戴性及美观性,应尽量减小 h_1 、 h_2 ,同时为避免机械冲突,设定 $h_1 = 2.5 \text{ cm}$, $h_2 = 2 \text{ cm}$ 。依据初步计算结果, $l_4 = 4 \text{ cm}$ 通常可取得较好效果。以 $l_1 = 4.5 \text{ cm}$ 、 $l_2 = 3 \text{ cm}$ 、 $60^\circ \leq \delta \leq 120^\circ$ 为例,求得在式(1)~式(5)限定下不同 l_3 所对应的 M ,仅取其中的 β 及 γ 、绘制手指空间状态图,如图 4 所示(阴影部分)。设定手指完全伸展时 β 与 γ 均为 0° ,图 4 中 $(0, 0)$ 点,而目标屈曲状态时 β 与 γ 分别为 60° 、 80° ,即图 4 中 $(60, 80)$ 点。从计算结果可以看出:当 $l_3 \leq 7.5 \text{ cm}$ 时,手指无法达到目标屈曲状态;当 $l_3 \geq 9 \text{ cm}$ 时,手指无法达到完全伸展状态;当 $8 \text{ cm} \leq l_3 \leq 8.5 \text{ cm}$ 时,对于当前给定的手指长度,手指可在完全伸展及目标屈曲状态间运动。

M 包含了弧形架转动过程中所有可能的手指及机械构件空间状态。为了观察各个角度随弧形架转动的变化情况,不失一般性地选择从伸展状态 $(0, 0)$ 点到目标屈曲状态 $(60, 80)$ 点的直线 L 作为手指状态变化的轨迹。利用空间状态搜寻法来实现这一

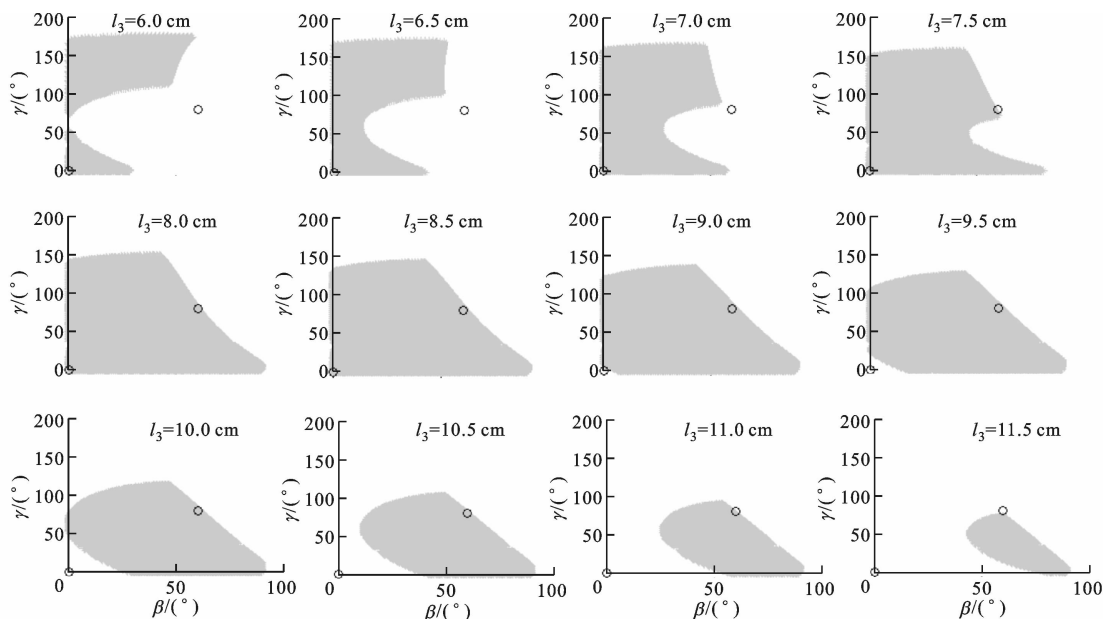


图4 不同弧形架长度对应的手指空间状态

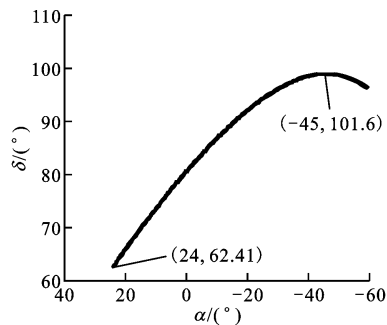
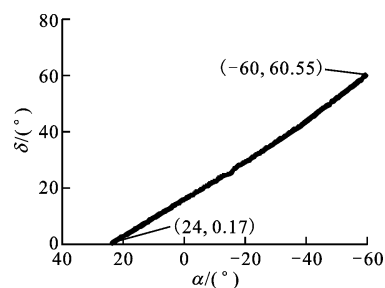
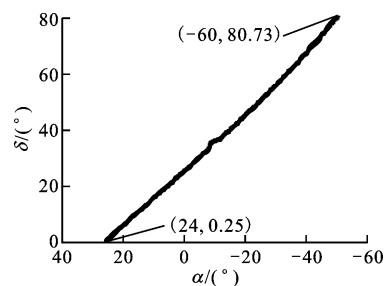
过程,仅考察元素 β, γ ,找寻 M 中离伸展状态 $(0,0)$ 点最近的点 m_0 ,并记录 α 的值为弧形架的初始状态 α_0 。在第 $i(i=1,2,3,\dots)$ 步中,令 $\alpha_i = \alpha_0 - i\alpha$,找寻 M 中元素 α 等于 α_i 且离直线 L 最近(仅考察元素 β, γ)的点 m_i ,直至达到目标屈曲状态 $(60,80)$ 点。

由上述所得的一系列状态点可得夹角 δ 及角度 β, γ 随 α 变化的曲线,如图5所示。 β 从 0.17° 变化到 60.55° (见图5b), γ 从 0.25° 变化到 80.73° (见图5c), δ 在 60° 与 120° 范围内连续变化(见图5a),满足设计要求。同时,整个过程弧形架转动 84° ,即 $\theta_{1N} = 84^\circ$ 。

电机位置由尺寸 l_5, l_6 确定,满足式(6)~式(8)所描述的限定条件。电机回缩状态下的长度为 8.25 cm ,完全伸出时的长度为 11.25 cm 。实际制作的机械构件尺寸不可能过大,考虑可穿戴性及美观性,在此限定 $l_5 < 14\text{ cm}, l_6 < 5\text{ cm}$ 。由于 f 为定值,为 1 N ,则可得不同 l_5 与 l_6 组合下电机输出平均扭矩(见图6a)及可推动弧形架旋转的角度(见图6b),其中值为0的区域表示此点对应的 l_5, l_6 尺寸与电机尺寸 l_7 无法构成三角形。

以图5所示结果为例, $\theta_1 - \theta_2$ 应该大于 84° ,在此设定为 90° ,另外考虑输出扭矩最大化,则最优点对应的 l_5, l_6 分被为 $2.9, 8.4\text{ cm}$,此时电机可推动弧形架旋转 90.59° 。

从上述分析可知,前端机械构件的尺寸必须与手指长度匹配才能够使手指有足够的关节活动范围。为每位患者定制一套机械构件显然是不现实的,

(a) δ 随 α 的变化曲线(b) β 随 α 的变化曲线(c) γ 随 α 的变化曲线图5 屈曲过程各角度随弧形架转动角度 α 的变化曲线

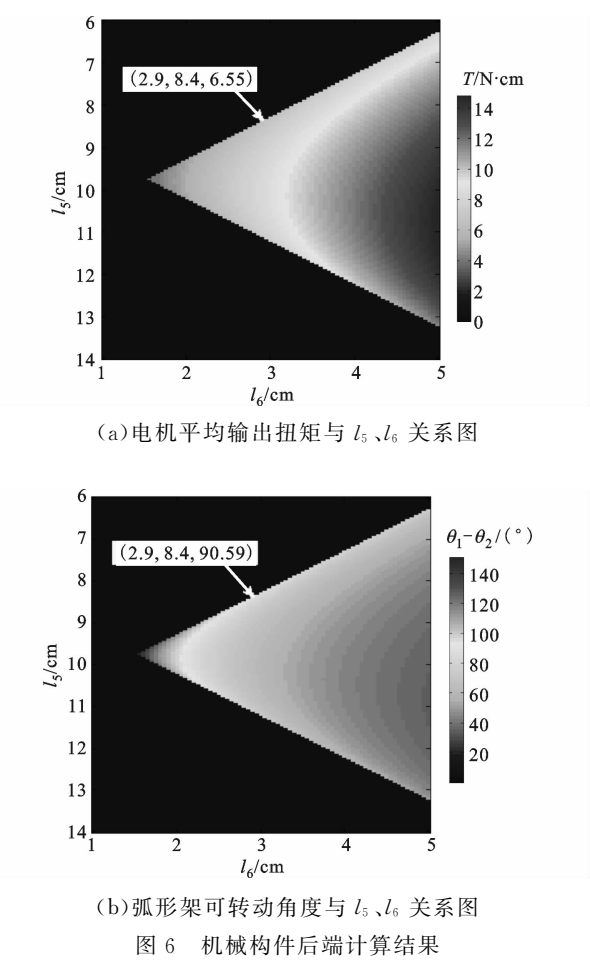


图 6 机械构件后端计算结果

本文所提的结构方案仅需通过调整弧形架的长度,便可适应手指长度的变化。由图 7 可见,当长度 l_1 、 l_2 增加,其他参数 h_1 、 h_2 及 l_4 保持不变时,通过简单增加弧形架长度即可重新获得所需的关节活动

范围。弧形架上设置有通孔(图 1 中 H 点处),可用于调节弧形架长度。

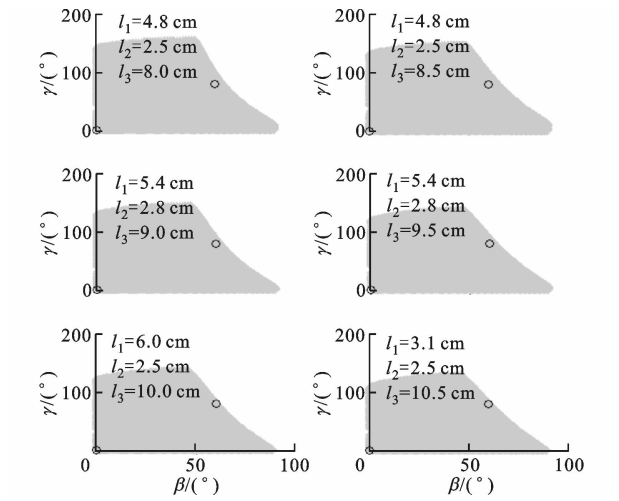


图 7 不同手指长度在最佳弧形架长度下的手指空间状态图

2.2 机构运动仿真与样机佩戴测试

为进一步确定各机械构件尺寸,利用 Pro/E 进行运动仿真。依据人手的解剖学结构建立单根手指的仿真模型,根据 Matlab 计算结果设定关键部件尺寸,建立零件的三维模型,然后通过装配模块完成各零件的组装。通过建立运动分析文件,考察手指关节活动范围是否满足要求,并通过机构的动态干涉检查,对零件尺寸外形进行修改。不失一般性地限定角度 β 与 γ 的运动速度比为 3:4,则一次运动仿真下 δ 、 β 及 γ 的变化曲线如图 8 所示。依据 δ 的变化规律可确定弧形架上限位销的位置。

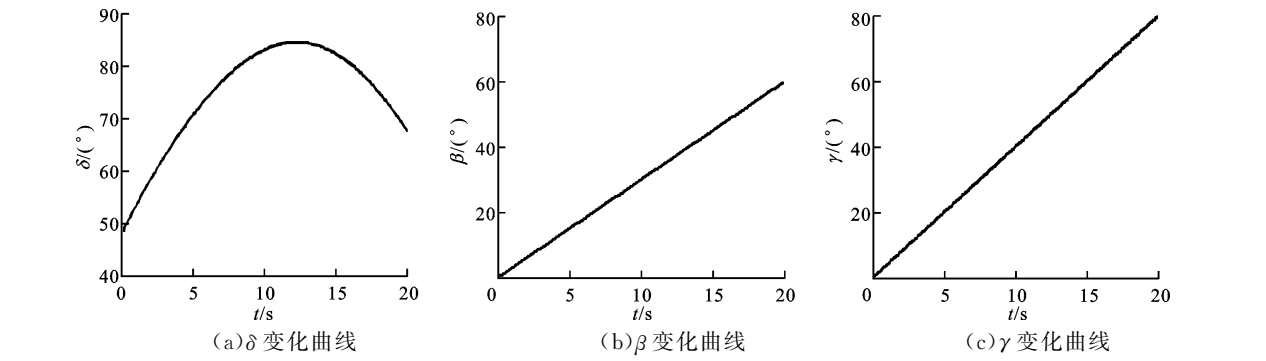


图 8 机构运动仿真结果

本文所设计的康复训练机器人实物佩戴效果图如图 9 所示。选取 6 名在校研究生(其中包含两名女性)进行佩戴运动测试,测得示指可屈曲伸展的最大范围如表 1 所示。由测试结果可得,每位受试者的示指长度虽然不同,但掌指关节及近端指关节均可达到所设计的关节活动范围。

3 结 论

由于欠驱动式机器人通常含有可自由转动的关节,且本身的运动具有不确定性,因此将其作为肢体康复训练装置用于肢体关节运动时,需要对机械机构与肢体共同构成的系统进行运动学分析,以便确

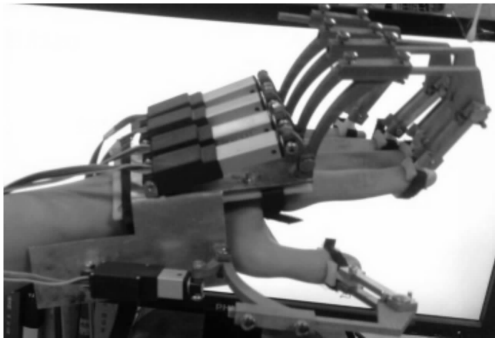


图 9 实物佩戴效果图

定肢体活动能否满足训练要求^[8]。本文以终端牵拉式手指康复训练装置为例,分析了机械机构,对手指运动学模型空间状态进行了结构的优化。仿真及样机佩戴测试表明:所用的结构优化方法能够有效提高训练装置带动手指关节活动的范围,特别是对于控制输入量有限的情况(例如直线电机行程有限),能够通过计算分析得到最佳机械尺寸以满足训练需求。本文所提结构优化设计方法对于终端牵拉式欠驱动肢体康复训练机器人的设计具有一定的参考价值。相比于全驱动式结构,患者在佩戴欠驱动式康复训练装置后,肢体关节仍然能够在一定范围内自由活动,其优劣性以及实际康复训练效果将是下一步研究的重点。

表 1 佩戴测试结果

受试者	示指长度/ cm	掌指关节活动 范围/(°)	近端指关节活 动范围/(°)
1	7.4	0~70	0~89
2	7.5	0~73	0~85
3	7.1	0~78	0~85
4	6.8	0~74	0~85
5	6.9	0~68	0~82
6	6.8	0~75	0~92

参考文献:

[1] 李会军, 宋爱国. 上肢康复训练机器人的研究进展及前景 [J]. 机器人技术与应用, 2006, 4: 32-36.
LI Huijun, SONG Aiguo. The research progress of upper limb rehabilitation training robot and prospects [J]. Robot Technique and Application, 2006, 4: 32-36.

[2] CHANG W H, KIM Y H. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation [J]. Journal of Stroke, 2013, 15 (3): 174-181.

[3] GLATZ A H, MADLE R, SATTLER J. Robot [J].

Ergotherapie, 2013, 4: 25-29.

[4] IQBAL J, KHAN H, TSAGARAKIS N G, et al. A novel exoskeleton robotic system for hand rehabilitation-conceptualization to prototyping [J]. Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2014: 34: 79-89.

[5] IQBAL J, TSAGARAKIS N G, CALDWELL D G. A multi-dof robotic exoskeleton interface for hand motion assistance [C]// 33rd Annual International Conference of the IEEE. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1575-1578.

[6] 励建安, 毕胜, 黄晓琳. 物理医学与康复医学理论与实践 [M]. 5 版. 北京: 人民卫生出版社, 2013.

[7] 马培谨, 齐艳, 金岩. 持续被动运动在肢体关节功能恢复中的应用 [J]. 中国临床康复, 2005, 9(30): 190-191.
MA Peijin, QI Yan, JIN Yan. Application of continuous passive exercise in the functional recovery of limb joints [J]. Chinese Journal of Clinical Rehabilitation, 2005, 9(30): 190-191.

[8] IQBAL J, TSAGARAKIS N G, FIORILLA A E, et al. A portable rehabilitation device for the hand [C]// 32nd Annual International Conference of the IEEE. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 3694-3697.

[本刊相关文献链接]

郑杨, 王刚, 徐进, 等. 大脑皮层-肌肉交互作用与注意力关系的实验研究. 2014, 48(6): 134-138. [doi: 10.7652/xjtuxb201406023]

文键, 杨辉著, 王斯民, 等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟. 2014, 48(11): 8-14. [doi: 10.7652/xjtuxb201411002]

袁通, 刘志镜, 刘慧, 等. 多核处理器中基于 MapReduce 的哈希划分优化. 2014, 48(11): 97-102. [doi: 10.7652/xjtuxb201411017]

韩宾, 文灿, 于渤, 等. 泡沫填充波纹夹芯梁的面内压缩破坏模式分析. 2014, 48(11): 37-43. [doi: 10.7652/xjtuxb20141107]

田寅, 贾利民, 董宏辉, 等. 列车通信网络设计问题中的双层规划模型. 2014, 48(4): 133-138. [doi: 10.7652/xjtuxb201404023]

张鸿, 张牡丹, 张杰, 等. 用于植入式医疗装置的逐次逼近式模数转换器. 2015, 49(2): 43-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201502008]

梁法春, 王栋, 杨桂云, 等. 气液两相流临界分配特性及相分离控制. 2015, 49(1): 53-58. [doi: 10.7652/xjtuxb201501009]

丁正龙, 徐月同, 傅建中. 深孔内径的在线精密测量原理及系统. 2015, 49(1): 65-71. [doi: 10.7652/xjtuxb201501011]

(编辑 赵炜 杜秀杰)