

低成本自适应仿人假肢手设计

徐睿^{1,2,3} 郑悦^{1,2} 匡星^{1,2} 景晓蓓^{1,2} 方鹏^{1,2} 李光林^{1,2}

¹(中国科学院人机智能协同系统重点实验室 深圳 518055)

²(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

³(中国科学院大学深圳先进技术学院 深圳 518055)

摘要 中国肢体残疾患者数量巨大,佩戴智能仿生假肢是改善和提高患者日常生活活动能力的重要手段之一。针对目前商业化多功能假肢手价格昂贵、实用性低,单自由度假肢手功能单一等缺点,提出了一种低成本自适应假肢手的设计,兼顾假肢手的成本、功能与外观。该假肢手仅用单个电机驱动,完成力量抓取、精确抓取、侧捏这三种日常生活活动能力中最常用的手部动作,并且其手指在一定程度上能自适应被抓取物体的形状,增强抓取动作的稳定性。通过理论分析与软件仿真,证实了所设计的新结构假肢手能完成预定的动作。本研究能为后续假肢手的生产使用奠定基础。

关键词 假肢; 低成本; 自适应

中图分类号 TH 12 **文献标志码** A

Design of a Low-Cost and Adaptive Prosthetic Hand

XU Rui^{1,2,3} ZHENG Yue^{1,2} KUANG Xing^{1,2} JING Xiaobei^{1,2} FANG Peng^{1,2} LI Guanglin^{1,2}

¹(Key Laboratory of Human-Machine Intelligence-Synergy Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

³(Shenzhen College of Advanced Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract The number of amputees is huge in China. Wearing a bionic prosthesis is one of important approaches to improve the activity ability of daily life for patients. The commercial prostheses are either too expensive or only with single degree of freedom which works awkward. In this paper, a shape adaptive prosthetic hand was proposed to meet the growing need for a low-cost, multifunction and humanoid appearance of a prosthetic hand. It can achieve three most common hand movements in activities of daily life, such as power grasp, precision grasp and lateral grasp, with only one driven motor. With the shape adaptive finger, the prosthetic hand can hold objects in a more robust way. Analysis and simulation of the designed prosthetic hand

收稿日期: 2015-11-03 修回日期: 2015-12-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA042303); 国家自然科学基金青年项目(61203209); 广东省自然科学基金杰出青年项目(2014A030306029); 深圳市知识创新计划项目(JCYJ20130402113127532); 深圳市孔雀计划海外高层次人才创新创业专项资金项目(KQCX20130628112914295); 深圳市技术创新计划技术开发项目(CXZZ20150505093829781)

作者简介: 徐睿, 硕士研究生, 研究方向为假肢手机械设计与控制; 郑悦, 硕士, 研究方向为神经假肢控制设计等; 匡星, 硕士, 研究方向为医疗器械的结构设计; 景晓蓓, 硕士, 研究方向为肌电假肢设计; 方鹏, 博士, 硕士生导师, 研究方向为功能材料——驻极体/压电驻极体的材料及器件应用, 机器人(假肢)控制、触觉检测与反馈; 李光林(通讯作者), 博士, 博士生导师, 研究方向为神经康复工程、神经机器接口技术、生物医学信息处理与仪器、生物医学模型与计算, E-mail: gl.li@siat.ac.cn.

suggest that it can accomplish the desired movements.

Keywords prosthetics; low-cost approach; adaptive

1 引言

疾病及自然灾害、工伤、交通事故等意外伤害产生了大量肢体残疾患者。根据第六次全国人口普查和第二次全国残疾人抽样调查结果,目前我国各类残疾人总数约 8 502 万人,其中肢体残疾患者 2 472 万人^[1]。肢体残疾给患者及其家人生活带来严重不便,佩戴智能仿生假肢是帮助肢体残疾患者提高日常生活活动能力(Activities of Daily Life, ADL)水平甚至部分恢复劳动能力的最重要手段之一。

目前商业化的多自由度假肢手如 i-limb^[2]、Bebionic Hand^[3]、Shadow Hand^[4]等具有 5 个以上的自由度,大多数手指都能够单独完成弯曲/伸展运动,实现多种手部动作,虽然功能完备,但其昂贵的价格令国内大多数截肢患者难以承受,同时也在一定程度上存在重量过大的问题;而单自由度假肢手仅能实现假肢手张开/闭合动作,功能单一,且外形不够美观,难以真正被患者日常使用。以 i-limb 为例,其共有 5 个自由度,包括 4 个由电机驱动的主动自由度以及被动的拇指内/外旋自由度,因此,该假肢手能够比较灵活地完成人手所能完成的大多数动作。但由于自由度数目过多,i-limb 所需电机数量也较多,共安排了 5 个微型电机,最终导致整手重量较大、成本较高。Pylatiuk 等^[5]进行的关于截肢患者对假肢手的要求调查表明,截肢患者对假肢手的要求主要有:重量轻、功能实用与外形美观等。上述情况表明,目前尚没有既成本低廉、外形美观,又能满足残疾人日常生活需要的商业化假肢手。因此,一款实用的、低成本的假肢手具

有巨大的市场需求和广阔的应用前景。

本文提出了一种低成本自适应假肢手的设计,兼顾假肢手的成本、功能与外观等不同方面的要求。文章主要从设计原则与整体方案、手指的机构设计以及初步仿真结果三个方面介绍假肢手的设计。

2 设计原则与整体方案

考虑现有假肢手产品与实际使用需求间的差距,设计假肢手的基本原则定为成本低、实用性强、重量轻和外形美观。分析设计原则,对于假肢手在成本与实用性方面的要求是互相矛盾的,因此设计假肢手需要具体分析实际情况,取舍设计原则,平衡不同的设计要求。

目前假肢手按照传动原理主要可以分成连杆传动和腱传动两类^[6,7]。其中,连杆传动的假肢手^[8]主要利用连杆传动,假肢手具有较大的刚度,能够准确控制其运动位置、运动速度;而腱传动方式的假肢手多采用绳索、弹簧等柔性单元牵拉的方式传动,机构简单、重量轻、体积小,然而受传动部件本身的柔性影响,腱传动假肢手的刚度较低,不能进行准确的速度、位置控制,其抓取力大小也有限。

在日常生活中,手的主要功能是抓握物体。资料显示,ADL 中手部最常用的动作有三个:力量抓取(35%)、精确抓取(30%)以及侧捏(20%)^[9-11]。分析实现这三类动作所需要的手指动作发现:三个动作都需要手指完成屈/伸动作,且实现侧捏动作还需要拇指额外进行内/外旋动作。而假肢手只要两个自由度就可以完成

ADL 中最常用的三个动作。降低手部动作自由度数目意味着减少假肢手中的驱动器数量,进而带来假肢手成本、重量的降低——假肢手设计原则中对成本与实用性方面的要求达成平衡。

从进一步降低成本和减轻重量的角度考虑,仅使用一个电机驱动手指屈/伸自由度,而拇指内/外旋自由度将通过手动的方式实现;从假肢手电池续航方面以及手指传动的方便程度考虑,采用能够实现自锁的梯形丝杠传动;拇指与其余四指由梯形丝杠通过曲柄滑块机构传动;另外,还在手指内部设置了扭簧使假肢手能一定程度自适应抓取物体的外形。

在加工工艺方面,将 3D 打印技术应用在假肢手领域^[8,12],能够低成本加工外形美观、性能优良的假肢手。因此本假肢手除主要的受力零件采用金属材料机加工以外,其余零件均采用 3D 打印方式加工,减轻整手重量,降低加工成本,使假肢手外形更仿人美观。

3 假肢手机构设计

假肢手手掌内部空间有限,单电机驱动五根手指实现屈/伸动作的机构要求尽量小巧、简单。另外,从延长电池续航时间的角度考虑,手指完成抓握动作以后能够自行保持抓取力,电机可以断电以降低能耗,这需要传动机构具备反向自锁功能,即传动机构仅能单向传递动力。基于上述两点,最终选择丝杠螺母机构作为传动机构。手掌内部布置电机、同步带及带轮、丝杠螺母机构作为假肢手的传动系统。通过丝杠螺母机构驱动 5 根手指完成屈/伸运动。

电机驱动 5 根手指完成屈/伸动作,同时兼顾整手的体积与重量,要求选择功率密度较大的电机。结合对手指抓取力的初步预期,使用 maxon RE-max24 电机,该电机是满足设计功率与力矩要求下体积最小的电机。电机与行星齿轮

减速箱通过传动比为 2:1 的同步带将运动传递到丝杠螺母机构,根据假手工作需要的强度与刚度设计中径为 6 mm 的梯形丝杠(能自锁)。

所设计的螺母及其他一同移动的零件自重较小,因此不单独考虑导向移动件的摩擦力,将这部分的影响折算到丝杠的效率中。计算丝杠螺母机构在所选择的电机驱动下最大对外输出的轴向力 F 的大小。

$$F = \frac{2\pi T}{P} \eta$$

$$= \frac{2\pi T_1 n_1 n_2 \eta_1 \eta_2 \eta_3}{P} \eta = 156.4 \text{ N} \quad (1)$$

其中, F 为丝杠螺母的轴向力大小; T 为丝杠的输入转矩; P 为丝杠的导程,本设计中丝杠导程为 1 mm; η 为梯形丝杠的传动效率,一般为 30%~40%,在此取较小值 30%; T_1 为电机的连续输出最大转矩,为 11.6 mN·m; n_1 为电机减速器的减速比 5.4:1; n_2 为同步带减速比 2:1; η_1 、 η_2 、 η_3 分别是电机、电机减速器以及同步带的效率, $\eta_1=83\%$ 、 $\eta_2=84\%$ 、 $\eta_3=95\%$ 。

丝杠螺母的轴向力驱动假手的 5 根手指共同完成屈/伸运动,因此拇指或者其他四指的输入载荷不能直接将丝杠螺母总轴向力带入计算。为安全起见,将轴向力预留 10% 的余量后,按照拇指与其余四指各 50% 的比例对轴向载荷进行分配,即拇指与其余四指输入载荷各 70 N。

3.1 手指机构设计与分析

为叙述方便起见,本文中的“手指”指的是除拇指以外的其余四指。同步带具有质量轻、传动效率高的特点,因此设计采用同步带进行手指动力的传递。

如图 1 所示,所设计的假肢手手指采用同步带与齿轮组合的方式实现近指节与中指节的耦合运动,使手指运动规律仿人。手指一共由 3 个指节构成,按照其与手掌之间距离,由近及远的顺序依次称为近指节、中指节和远指节。假手的食指、中指、无名指与小指的运动原理与机构一

致, 仅按照人手手指尺寸对其部分零件的尺寸进行调整使之外形仿人、美观。



图1 手指机构原理图及实物照片

Fig. 1 Mechanism of finger and photo of prototype

手指近指节与中指节能耦合实现手指屈/伸动作, 而远指节与中指节之间通过扭簧连接, 因此一般状态下远指节相对中指节呈现一定角度弯曲的状态, 其并不会随着近、中指节的屈/伸运动而运动。

在抓取物体时, 当某一根手指指尖接触到物体而其他手指并没有接触到物体时, 手掌电机将继续运动, 控制所有手指继续屈曲。已经与物体接触的手指的远指节与中指节之间的扭簧会因此而被扭转蓄能, 指尖角度弯曲状态发生改变, 并使该手指指尖输出更多的抓取力, 其余手指继续屈曲与物体表面接触, 实现多点抓握, 提高了抓取动作的稳定性。

为验证手指传动机构的可行性, 采用3D打印加工了单根手指样机。由样机证明: 手指的动作与人类手指运动动作近似, 且手指远指节的扭簧能使手指对被抓取物体的形状有一定的适应性。

手指运动的原动力来自位于手掌中的丝杠螺母。通过偏心曲柄滑块机构驱动手指内部同步带轮实现屈/伸运动, 其运动简图如图2所示。 AB 杆 l_1 在 B 点的力 F_1 是驱动手指近指节内同步带轮转动的主动动力, 很容易通过 F_1 的大小与 l_1 长度求得手指近指节运动的输入力矩 M 大小。手指内部的传动如图1所示, 其近指节与中指节之

间耦合运动通过同步带与齿轮传动。

图2所示的曲柄 AB 是驱动近指节同步带轮转动的原动件, 滑块 C 为丝杠螺母机构, 为手指传动机构的原动件。受整手厚度的限制, 以及手掌内零件尺寸, 丝杠螺母的偏心距 $e=2.5$ mm。受手指尺寸的限制, 曲柄 AB 尺寸不应超过手指近指节同步带轮的半径, 以保证手指外形美观。经过上述考虑, 最终确定曲柄 AB 长度 $l_1=12$ mm; 另外根据丝杠的行程与手指转动角度范围进一步确定了连杆 BC 的长度 $l_2=43$ mm。

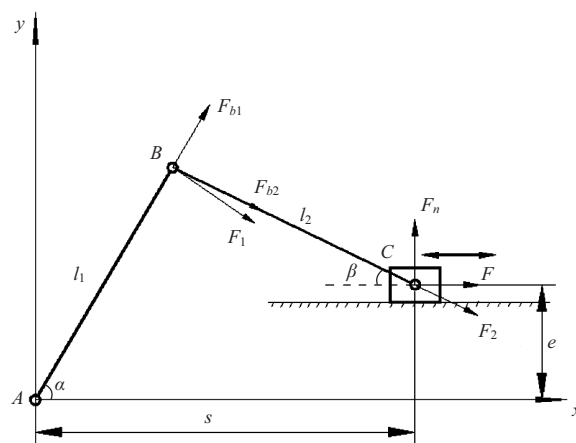


图2 手指机构运动简图

Fig. 2 The mechanism of finger

图2中杆 AB 为曲柄, 长度 $l_1=12$ mm; BC 为连杆, 长度 $l_2=43$ mm; 滑块 C 为原动件, 也即假手中的丝杠螺母机构, 偏心距 $e=2.5$ mm, C 到原点之间的水平距离为 s ; 在运动过程中的任意时刻, 曲柄 AB 与水平方向之间的夹角为 α , 随着手指屈/伸运动, α 在 $12^\circ \sim 90^\circ$ 内连续变化; 连杆 BC 与水平方向之间夹角为 β 。 B 点受到沿杆 AB 方向的力 F_{b1} 与沿杆 BC 方向的力 F_{b2} 共同作用, 其中 F_{b2} 垂直于杆 AB 方向的分量 F_1 是驱动 AB 杆转动的主动动力; 对所设计机构进行分析, C 点受到丝杠螺母的轴向力 F 、径向力 F_n 以及沿连杆 BC 方向的力 F_2 共同作用。

根据机构各部分的几何关系, 可以列出几何方程:

$$\begin{cases} s=l_1 \cos \alpha+l_2 \cos \beta & (2) \\ \sin \beta=\frac{l_1 \sin \alpha-e}{l_2} & (3) \end{cases}$$

根据的力的几何关系以及滑块 C 的受力平衡, 有

$$\begin{cases} F_2 \cos \beta=F & (4) \\ F_1=F_2 \sin(\alpha+\beta) & (5) \end{cases}$$

计算得到最终 F_1 , 以及通过 F_1 及 l_1 换算手指的输入转矩 M 如图 3 所示。

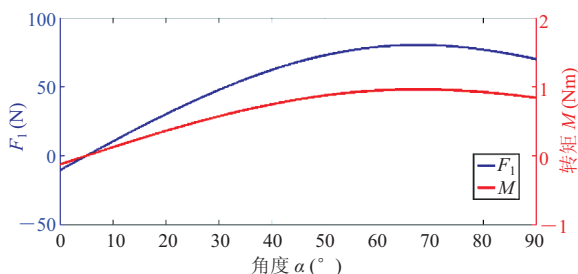


图 3 手指输入力 F_1 与输入转矩 M

Fig. 3 Input force F_1 and input torque M of finger

通过理论分析, 手指在屈/伸过程中最大的输入转矩大约为 $1 \text{ N}\cdot\text{m}$, 能够基本满足残疾人日常生活中对假手使用的需求。

3.2 拇指机构设计与分析

根据丝杠螺母的运动形式, 设计拇指的屈/伸运动通过曲柄滑块机构实现。另外, 与手指设计类似, 拇指的远指节与近指节之间一样设置了扭簧, 使拇指一样能够适应抓取物体的形状; 假手在完成精确抓取动作时能够通过拇指与对侧手指远指节内的扭簧扭转提供额外的抓取力, 提升假肢手的实用性。

忽略拇指的远指节扭簧, 将拇指远、近指节作为一个整体考虑, 拇指机构运动简图如图 4 所示。其中, 拇指的指节为曲柄 BC 的一部分 (BD 段), 滑块 A 相当于丝杠螺母机构中的螺母, 为拇指机构的原动件。曲柄 BC 尺寸应尽可能小, 以保证拇指外形美观, 另外根据丝杠的行程与拇指转动角度范围确定连杆 AB 的长度 $l_1=13 \text{ mm}$, 而 BD 的长度则是直接根据人手拇指指节长度确定

的, $l_2=14 \text{ mm}$ 。

图 4 中, 滑块 A 实际上是假手掌中的丝杠螺母, 是拇指机构的原动件。 BD 杆为拇指的指节, 为假拇指实际运动的部分。 C 为固定于手掌上的机架, AB 与 BC 为实现传动所必须的连杆。根据曲柄滑块运动规律, 当滑块 A 上下运动的时候, BD 杆会随之绕 C 点旋转, 也即拇指在丝杠螺母的驱动下实现了屈伸运动。

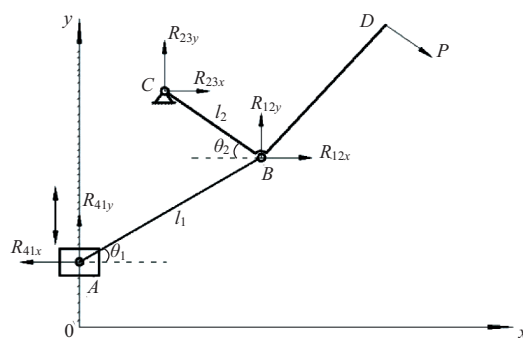


图 4 拇指机构运动简图

Fig. 4 The mechanism of thumb

在假手的使用过程中, 假肢手的抓取力大小是衡量其性能的一个重要指标。因此对所设计的拇指进行受力分析, 确保其指尖力足够大, 能抓取一定重量的物体。如图 4 所示, 拇指指尖受到指尖力大小为 P , 方向垂直指尖向外; 另外, 拇指机构中的各绞支点 A 、 B 、 C 受到的支反力分别为 R_{41} 、 R_{12} 和 R_{23} 。以水平方向为 x 轴, 竖直方向为 y 轴, 滑块 A 运动过程中的最低点为原点, 建立坐标系, 将支反力沿 x 与 y 方向分解之后得到如图 4 所示的结果, 分别为 R_{41x} 、 R_{41y} 、 R_{12x} 、 R_{12y} 、 R_{23x} 、 R_{23y} 。杆 AB 与水平方向的夹角为 θ_1 , BC 与水平方向的夹角为 θ_2 。

设滑块向上滑动的距离为 $a \text{ mm}$, 则 A 的坐标为 $(0, a)$; B 点位置在拇指屈伸运动过程中不断变化, 因此设 B 点坐标为 (x, y) ; 根据设计, C 点坐标为 (x_0, y_0) , 其中, $x_0=-9.75$, $y_0=23.45$ 。 AB 杆长 $l_1=13 \text{ mm}$, BC 杆长 $l_2=14 \text{ mm}$ 。

首先, 可以根据几何关系列出几何方程:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan[(y-a)/(x-0)] & (6) \\ \theta_2 = \arctan[(y-y_0)/(x-x_0)] & (7) \\ (x-0)^2 + (y-a)^2 = l_1^2 & (8) \\ (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = l_2^2 & (9) \end{cases}$$

根据上述几何方程, 可以确定拇指机构在运动过程中的每根连杆在每一时刻的位置。其中, 联立(8)(9)可以解出点 B 的坐标 (x, y) 。由于四连杆机构存在不确定性, 因此该方程组存在双解, 但是结合实际运动情况判断, 可以排除不符合设计条件的解, 解得合理的 B 点坐标。因此, 通过求解几何方程可以确定拇指机构运动过程中各个时刻机构中各连杆的位置。

根据 AB 杆、 BCD 杆受力平衡以及分别对 B 点和 C 点列力矩平衡方程, 可得

$$\overline{R_{41}} + \overline{R_{12}} = 0 \quad (10)$$

$$\overline{R_{12}} + \overline{R_{23}} + \overline{P} = 0 \quad (11)$$

$$\overline{R_{12}} \times \overline{CB} - \overline{P} \times \overline{CD} = 0 \quad (12)$$

$$-R_{41x}l_1 \sin \theta_1 + R_{41y}l_1 \cos \theta_1 = 0 \quad (13)$$

将所设计的拇指尺寸等已知参数带入上式, 并进行化简, 消去中间变量, 即可得到:

$$P = \frac{14}{47.426} \left(\frac{R_{41y}}{\tan \theta_1} \sin \theta_2 + R_{41y} \cos \theta_2 \right) \quad (14)$$

综上所述, 通过平衡方程(10)~(13)得到了拇指指尖力 P 与拇指机构运动角度 θ_1 和 θ_2 之间的关系, 而通过几何方程(6)~(9)解出拇指运动角 θ_1 和 θ_2 与滑块机构运动距离 a 之间方程。因此, 最终建立指尖力 P 与拇指滑块的轴向力 R_{41y} 与其运动距离 a 之间的方程: $P=f(R_{41y}, a)$ 。

根据所选电机及传动系统的效率等计算, R_{41y} 最大能达到 70 N。将此数据带入上述方程组中, 对拇指指尖力进行求解。得到拇指指尖力 P 随滑块运动距离 a 的变化而变化的关系(图 5)。

根据实际设计, 拇指滑块行程为 12 mm, 对应的拇指指尖力最大可以达到 21 N。这是满足设计要求的。

需要说明的是, 因为对拇指输出指尖力大小

的分析和计算是在简化了的拇指运动机构模型的基础上进行的, 实际拇指输出指尖力还受到其远指节与近指节指尖安装的扭簧的影响。因此上述分析结果并不完全与实际拇指输出指尖力大小相同。但是由于按照将拇指运动过程中的主要指尖力来源考虑, 因此分析结果与拇指实际受力情况很接近。

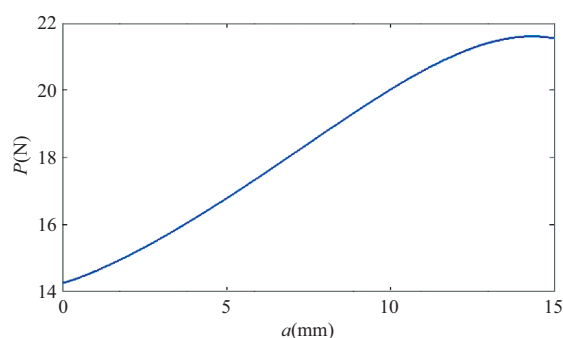
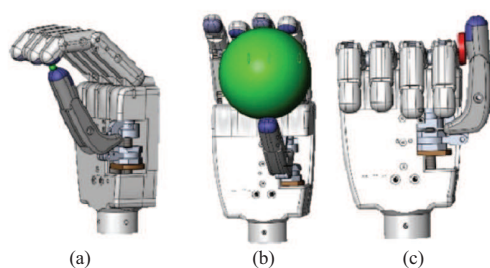


图 5 拇指指尖力

Fig. 5 Tip force of thumb

4 结果与讨论

最终设计的假肢手, 并且在 SolidWorks 软件中进行抓取仿真, 结果如图 6 所示。



(a) 直径 5 mm 的小球 (b) 直径 80 mm 的球 (c) 厚度 4 mm 的硬币

图 6 假肢手抓取物体仿真

Fig. 6 Simulation of prosthetic hand grasp

从图 6 可以看出, 所设计的假肢手能够抓取不同大小的物体, 同时完成侧捏动作。并且在抓取物体时能够一定程度上自适应物体的外形。

将所设计的假肢手与国内外常见的商业化假肢手进行比较, 结果如表 1 所示。

表 1 与国内外商业化假肢手的比较

Table 1 Comparison with domestic and abroad commercialized prosthetic hands

假肢名称	自由度数 (电机数)	能否完成 ADL 中 80% 以上的动作	重量 (g)	价格*(万元)
i-limb	5 (5)	能	533 ^[6]	>10
Shadow Hand	24 (20)	能	4 200 ^[4]	>10
Ottobock Hand	1 (1)	不能	420 ^[6]	<10
本文设计的假肢手	2 (1)	能	380	<5

注: *假肢手价格属于商业机密, 不宜公开

所设计的假肢手与商业化假肢手相比, 仅使用单个电机驱动假手完成三种 ADL 中 85% 的手部动作, 降低了成本、减轻重量, 同时还具备一定的实用性。i-limb 与 Shadow Hand 设计了过多的自由度数目, 虽然功能强大, 但是过大的重量以及高昂的价格限制了其推广, 而 Ottobock Hand 又过于简单, 仅单个自由度, 不能补偿残疾人日常生活中手的大部分缺失功能。本设计平衡了对成本、外观以及功能三个方面的要求。

本文提出了一种低成本自适应假肢手, 并对其手指抓取力进行理论分析与计算仿真; 通过软件对所设计的假肢手进行运动学仿真。通过理论计算与仿真验证了设计的可行性, 该假肢手设计方案还有待通过样机进行实际性能的检验。

以后将在本假肢手样机的基础上对假肢手的运动与力控制方法进行研究, 并利用此假肢手进行实际物体的抓取实验验证其实用性。

参 考 文 献

- [1] 赵燕潮. 中国残联发布我国最新残疾人口数据 [J]. 残疾人研究, 2012, 1: 11.
- [2] Touch bionics.i-limb ultra [EB/OL]. [2015-10-22]. <http://www.touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-ultra>.
- [3] RSL Steeper. Bebionic hand [EB/OL]. [2015-10-22]. http://bebionic.com/the_hand.
- [4] Shadow Robot Company LTD. Shadow dexterous hand [EB/OL]. [2015-10-22]. <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand>.
- [5] Pylatiuk C, Schulz S, Döderlein L. Results of an Internet survey of myoelectric prosthetic hand users [J]. *Prosthetics and Orthotics International*, 2007, 31 (4): 362-370.
- [6] Belter JT, Segil JL, Dollar AM, et al. Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review [J]. *Journal of Rehabilitation Research Development*, 2013, 50 (5): 599-618.
- [7] 张可科. 具有自适应抓取能力的欠驱动假肢手的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [8] Omarkulov N, Telegenov K, Zeinullin M, et al. Design and analysis of an underactuated anthropomorphic finger for upper limb prosthetics [C] // *Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015: 2474-2477.
- [9] Controzzi M, Cipriani C, Carrozza MC. Mechatronic design of a transradial cybernetic hand [C] // *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2008: 576-581.
- [10] Cipriani C, Controzzi M, Carrozza MC. Objectives, criteria and methods for the design of the SmartHand transradial prosthesis [J]. *Robotica*, 2010, 28 (6): 919-927.
- [11] Hoshigawa S, Jiang Y, Kato R, et al. Structure design for a Tow-DoF myoelectric prosthetic hand to realize basic hand function in ADLs [C] // *Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015: 4781-4784.
- [12] Yoshikawa M, Sato R, Higashihara T, et al. Rehand: realistic electric prosthetic hand created with a 3D printer [C] // *Proceedings of the 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015: 2470-2473.