[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.003

一种欠驱动柔性机械手的抓取力研究

李秋苹[1],章 军[1],崔 军[2]

(1.江南大学 机械工程学院,江苏 无锡 214122;2.常熟开关制造有限公司,江苏 常熟 215500)

摘 要:为满足农产品(食品)行业中尺寸范围大、形状复杂、物性多样的复杂对象抓取需求,提出了一种欠驱动柔性机械手。设计了欠驱动柔性机械手的的结构,介绍了其工作原理;采用2个电机驱动串联双铰链柔性关节;以直径为20,40和60 mm的圆柱铝块为抓持对象,建立了静态力学方程和几何平衡方程;运用MATLAB软件中fsolve函数求出机械手在负载状态下驱动杆行程与抓取力的关系。计算结果表明通过控制驱动杆行程,可以实现调节抓取力的大小,在不损坏物体表面的前提下,有效抓取复杂对象。

关 键 词:柔性机械手;串联双铰链;双电机驱动;MATLAB软件

中图分类号:TP241 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2895(2018)03-0014-05

Grasping Force Study of Underactuated and Flexible Manipulator

LI Qiuping[1],ZHANG Jun[1],CUI Jun[2]

(1. School of Mechanical Engeering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;
2. Changshu Switch Manufacturing Co., Ltd., Changshu, Jiangsu 215500, China)

Abstract: In order to meet the demands of complex objects with large scale, complex shapes and complex physical properties in the agricultural products industry, this paper proposed a kind of underactuated and flexible manipulator. This paper introduced the structure and working principle of this manipulator, the manipulator used two motors to drive the tandem two hinges joints. The static mechanical equation and the geometric equilibrium equation were established by grasping the cylindrical aluminum block with diameters of 20, 40 and 60 mm. The relationship between the driver stroke and grasping force was found out by the fsolve function of MATLAB software under the load state. The calculations results indicate that grasping force is adjusted by the stroke of drive rod. The manipulator can effectively grasp complex objects without damaging the surface of the object.

Keywords: compliant manipulator; tandem two hinges; twin motor drive; MATLAB software

轻工、农产品(食品)等行业的原料供送、生产包装与仓储运输中存在分拣、包装、搬运、仓储和配送等环节,为满足对尺寸范围大、形状复杂、物性多样的复杂对象抓取需求[1-2],急需可抓取复杂对象的机械手。FESTO公司的MultiChoiceGripper是一种新型的柔性机械手,有2种快换的手指结构,其中一种手指机构以人类大拇指为灵感,具有Fin Ray ®结构,可灵活针对抓取对象形状进行调整,具有极好的抓取自适应性[3];其缺点是抓取力比较小,且由橡胶材料制成,容易老化,寿命短。

柔性关节一般意义上是指由大柔度杆或柔性铰链等构成的柔性系统与刚性系统所组成的混合系统[4]。串联双铰链柔性机械手是指尖节驱动,针对具体复杂抓取对象,优化中指节前、后铰链上2个扭弹簧参数和机械手结构尺寸的一类欠驱动机械手[5-6]。通过2个含扭弹簧铰链的弹性协调转动,满足抓持力和抓持范围的需求,而不必精确控制各铰链角位移。课题组提出的双步进电机[7]驱动串联双铰链柔性机械手,与电动推杆驱动的柔性机械手[8]相比,指跟节的角度可调控,扩大了抓取范围的同时,通过精确控制驱动行程,

收稿日期:2017-09-01;**修回日期**:2017-11-10

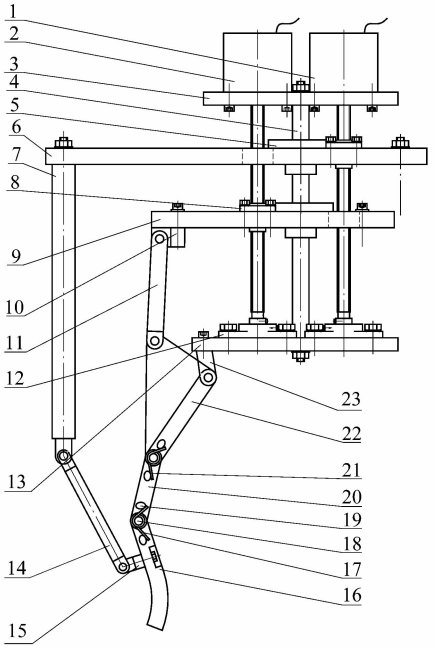
基金项目:江苏省数控一代机械产品创新区域应用示范工程(2015BAF25B00)。

第一作者简介:李秋苹(1991),女,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事欠驱动柔性机械手结构设计研究。E-mail:18262282187@163.com

调节抓取力。

1　机械手结构及工作原理

机械手的结构如图1所示,主要由驱动传动机构和手指结构两部分组成。



1—指尖丝杠周边步进电机;2—指跟丝杠轴步进电机;3—驱动固定盘;4—支撑导柱;5—直线轴承;6—指尖驱动盘;7—指尖驱动杆;8—丝杆螺母;9—指根驱动盘;10—推杆座;11—推杆;12—丝杆固定轴承;13—手指座固定盘;14—二力杆;15—二力杆座;16—指尖节;17—小扭弹簧;18—销轴;19—旋钮;20—中指节;21—大扭弹簧;22—指根节;23—指跟座。

图1　机械手结构

Figure 1　Structure of manipulator

驱动传动机构:驱动固定盘3与手指座固定盘13通过两根支导撑柱4连接,支撑导柱4通过两个直线轴承5分别穿过指尖驱动盘6和指跟驱动盘9。指尖丝杠周边步进电机1和指跟丝杠轴步进电机2用螺钉固定在驱动固定盘3上,丝杆的另一端分别固定在手指座固定盘13的丝杆固定轴承12上;指尖丝杠周边步进电机1的丝杆穿过指跟驱动盘9上的孔,通过丝杆螺母8与指尖驱动盘6连接,3根指尖驱动杆7一端通过螺母连接在指尖驱动盘6上,另一端通过销轴连接在二力杆14上,二力杆14通过销轴连接在二力杆座15上;指跟丝杠轴步进电机2的丝杆穿过指尖驱动盘6上的孔,用丝杆螺母8与指跟驱动盘9连接,3根推杆11一端通过推杆座10连接在指跟驱动盘9上,另一端通过销轴连接在指跟节22上。

手指结构:柔性机械手3个指尖节16通过螺钉与二力杆座15连接,指跟节22通过销轴安装在指跟座23上,指跟座23用螺钉固定在手指座固定盘13上,指尖节16、中指节20和指根节22用销轴18连接,两个销轴18上分别装有小扭弹簧17和大扭弹簧21,中指节20上装有可调节小扭弹簧17初始预紧角的旋钮19。

电机2带动丝杆转动,由于支撑导柱4对丝杆螺母8有限制作用,丝杆螺母带动指跟驱动盘9上下运动,从而带动推杆11运动,改变指跟节和手指座固定盘的夹角。电机1正转时,丝杆螺母带动指尖驱动盘6向下运动,指尖驱动杆7则推动手指克服小扭弹簧和大扭弹簧的弹性力,使两个串联活页铰链转动,指尖的曲面段接触被抓物体,从而抓持物品;电机1反转时,丝杆螺母带动指尖驱动盘6向上运动,机械手手指张开。电机断电,其内部螺杆螺母机构自锁,可保持抓取力不变。

2　机械手负载状态抓取力分析

2.1　物体静止机械手负载状态抓取力分析

机械手结构可简化如图2所示,B、C点为两个串联活页铰链手指关节的中心,以通过机械手手掌中心的垂线为y轴,过A点的水平线为x轴,z轴垂直于纸面向外,建立坐标系。

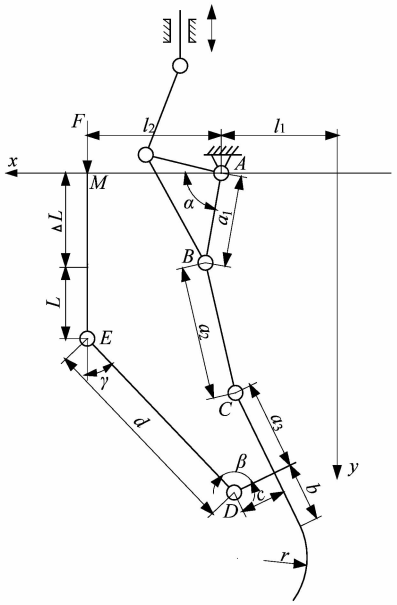


图2　机械手示意图

Figure 2　Diagram of manipulator

机械手指根节与手指固定盘的夹角为α;手指连接处A点到机械手中心的水平距离为l_1;指跟节关节中心B点到手指连接处A点的长度为a_1;关节B与C中心距为a_2;指尖节关节中心C点到手指末端驱动固

定座的距离为 a_3;手指末端驱动固定座的长度为 c;手指连接处 A 点到机械手指驱动杆中心距离为 l_2;指尖圆弧的半径为 r;圆弧切点沿指尖节到手指末端驱动固定座中心的距离为 b;二力杆的长度为 d;手指驱动推行程为 $\triangle L$;手指驱动杆超出手指固定盘的长度为 L;二力杆与机械手指驱动杆的夹角为 γ;二力杆与手指末端驱动固定座的夹角为 β。

课题组分别以直径为 20,40 和 60 mm 的圆柱铝块儿为抓持对象,取机械手指根节与手指固定盘的夹角 α 为 60°,70°和 80°时,对抓持系统进行受力分析,求驱动杆运动行程和抓取力大小的关系。假设各运动副摩擦力和各部件重力均忽略不计;除扭弹簧外,其余部件为刚体。图 3 所示为物体静止机械手负载示意图,铰链 O_1 与 O_2 扭矩平衡方程为:

$$k_1(\varphi_1+\varphi_{01})=F_d c\sin\beta-F_d a_3\cos\beta-F_n d_{11}; \quad (1)$$

$$k_2(\varphi_2+\varphi_{02})=F_d c\sin\beta-F_d a_3\cos\beta-F_d a_2\cos(\varphi_1+\beta)-F_n d_{21}。 \quad (2)$$

式中:k_1、k_2 为弹簧的刚度,N·mm/rad;φ_{01}、φ_{02} 为扭弹簧预紧角,rad;φ_1、φ_2 为扭弹簧扭转角,rad;F_d 为二力杆的推力,N;F_n 为械手手指对铝块儿的抓取力的反作用力,N;d_{11} 为抓取力 F_n 对 O_1 点的力臂,mm;d_{21} 为抓取力 F_n 对 O_2 点的力臂,mm[9]。

且有

$$d_{11}=(b+a_3)\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-r\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2);$$

$$d_{21}=a_2\sin(\alpha+\varphi_2)+(b+a_3)\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-r\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)。$$

抓持对象为半径为 R 的圆柱型铝块,则有

$$R=l_1+a_1\cos\alpha+a_2\cos(\alpha+\varphi_2)+(b+a_3)\cdot\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-r+r\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)。 \quad (3)$$

在 x-y 坐标系中,由解析几何可知:

$$\beta=\pi+\gamma-\alpha-\varphi_1-\varphi_2; \quad (4)$$

$$d\sin\gamma=l_2-a_1\cos\alpha-a_2\cos(\alpha+\varphi_2)-a_3\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-c\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)。 \quad (5)$$

机械手驱动杆行程

$$\Delta L=a_1\sin\alpha+a_2\sin(\alpha+\varphi_2)+a_3\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-c\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)-d\cos\gamma'。 \quad (6)$$

式中 γ' 有

$$d\sin\gamma'=l_2-(a_1+a_2+a_3)\cos\alpha-c\sin\alpha。$$

2.2 物体悬停机械手负载状态抓取力分析

以直径为 20,40 和 60 mm 的圆柱铝块儿为抓持对象,取机械手指根节与手指固定盘的夹角 α 为 60°、70°和 80°时,对抓持系统进行受力分析,求机械手驱动杆运动行程和抓取力大小的关系。

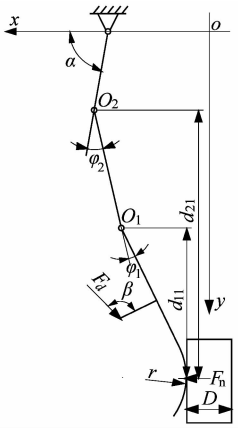


图 3 物体静止机械手负载示意图

Figure 3 Object static manipulator load diagram

图 4 所示为物体悬停机械手负载示意图。假设各运动副摩擦力和各部件重力均忽略不计;除扭弹簧外,其余部件为刚体,铰链 O_1 与 O_2 扭矩平衡方程为:

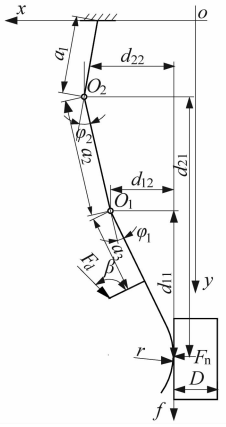


图 4 物体悬停机械手负载示意图

Figure 4 Object suspension manipulator load diagram

$$k_1(\varphi_1+\varphi_{01})=F_d c\sin\beta-F_d a_3\cos\beta-F_n d_{11}-f d_{12}; \quad (7)$$

$$k_2(\varphi_2+\varphi_{02})=F_d c\sin\beta-F_d a_3\cos\beta-F_d a_2\cos(\varphi_1+\beta)-F_n d_{21}-f d_{22}。 \quad (8)$$

式中:f 为手指与铝块儿之间的静摩擦力,N;d_{12} 为摩擦力 f 对 O_1 点的力臂,mm;d_{22} 为摩擦力 f 对 O_2 点的力臂,mm。

且有

$$d_{12}=-(b+a_3)\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)+r-r\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2);$$

$$d_{22}=-a_2\cos(\alpha+\varphi_2)-(b+a_3)\cos(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)+r-r\sin(\alpha+\varphi_1+\varphi_2)。$$

摩擦力 f 与抓取力 F_n 的关系:

$$f=\mu\times F_n。$$

式中:μ 为机械手指与铝块儿之间的静摩擦因数。

摩擦力 f 与铝块儿的质量 m 之间的关系:

$$f=m\times g/3。$$

式中:g 为重力系数。

给定一个安全系数 s,所以 $f\times s=m\times g/3$。

3　模型的数学计算

机械手尺寸:$a_1=26.7$ mm;$a_2=26.7$ mm;$a_3=26.7$ mm;$b=20.0$ mm;$c=11.3$ mm;$l_2=59.3$ mm;$d=60.0$ mm,$r=36.0$ mm。扭弹簧参数:$k_1=429.94$ N·mm/rad;$k_2=859.87$ N·mm/rad;$\varphi_{01}=0.398$ rad;$\varphi_{02}=0.22$ rad。铝块儿参数:直径为 20,40 和 60 mm 的圆柱形铝块质量分别为 0.035,0.150 和 0.315 kg。其他参数:$\mu=0.61$[10];$g=9.8$ N/kg;$s=0.8$。

运用 MATLAB 中的 fsolve 函数,通过对机械手驱动杆行程 ΔL 赋值,计算出物体静止机械手负载状态时及物体悬停机械手负载状态时驱动杆行程 ΔL 和抓取力 F_n 的关系[11-13]。在物体静止机械手负载状态和物体悬停机械手负载状态时,分别以半径为 10,20 和 30 mm 的圆柱形铝块为抓持对象。图 5 所示为 $R=10$,20 和 30 mm 的铝块在 α 取不同值时机械手驱动杆行程和抓取力的关系。

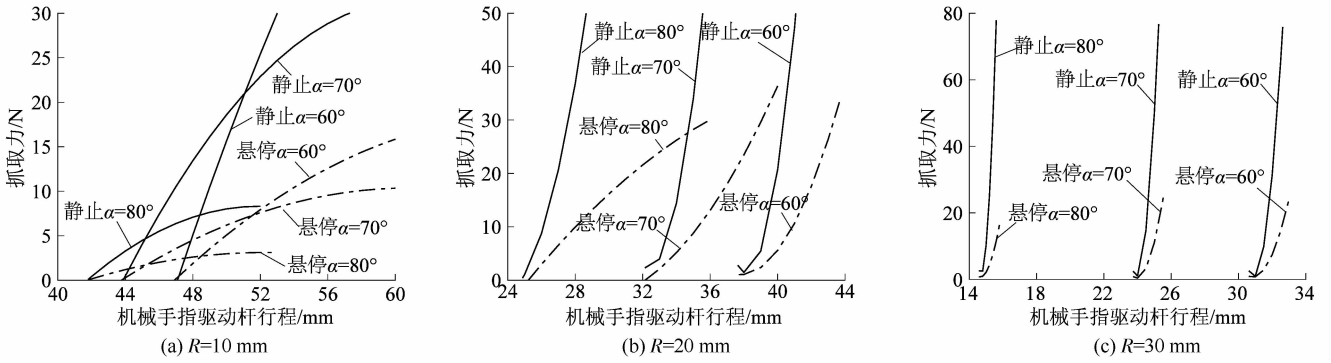


图 5　不同半径的铝块驱动杆行程与抓取力关系

Figure 5　Relation of drive rod stroke and grasping force of cylindrical aluminum block with different radius

在物体悬停机械手负载状态,$R=10$ mm 的铝块所需抓取力 $F_{n2}=0.234$ N。从抓取效率方面看,图 5(a)中当 $\alpha=60°$时,抓取较快,效率最高。同理,$R=20$ mm 的铝块所需抓取力为 $F_{n2}=1.004$ N。图 5(b)中当 $\alpha=60°$、70°和 80°时,抓取效率都较高。$R=30$ mm 的铝块所需抓取力为 $F_{n2}=2.109$ N,图 5(c)中当 $\alpha=80°$时,抓取效率最高。

在铝块的实际抓取过程中,物体静止机械手负载过程的结束状态就是物体悬停机械手负载过程的开始状态,为保证物体悬停时机械手能够提供足够大的抓取力,则物体静止时的驱动杆行程最小为物体悬停时所要求的驱动杆行程,且抓取力变化越小越好。由图 5~7 可知,$R=10$ mm 的铝块所需抓取力 $F_{n2}=0.234$ N,在 $\alpha=60°$时,$\Delta L=46.7$ mm,对应的 $F_{n1}=0.6$ N;在 $\alpha=70°$时,$\Delta L=43.9$ mm,对应的 $F_{n1}=0.63$ N;在 $\alpha=80°$时,$\Delta L=42.1$ mm,对应的 $F_{n1}=0.65$ N。

$R=20$ mm 的铝块所需抓取力 $F_{n2}=1.004$ N,在 $\alpha=60°$时,$\Delta L=38.1$ mm,对应的 $F_{n1}=2.6$ N;在 $\alpha=70°$时,$\Delta L=32.6$ mm,对应的 $F_{n1}=2.9$ N;在 $\alpha=80°$时,$\Delta L=25.3$ mm,对应的 $F_{n1}=3.1$ N。

$R=30$ mm 的铝块所需抓取力 $F_{n2}=2.109$ N,在 $\alpha=60°$时,$\Delta L=31.1$ mm,对应的 $F_{n1}=5.9$ N;在 $\alpha=70°$时,$\Delta L=24.2$ mm,对应的 $F_{n1}=7.1$ N;在 $\alpha=80°$时,$\Delta L=14.9$ mm,对应的 $F_{n1}=8.8$ N。

综上,对于 $R=10$,20 和 30 mm 的铝块,在 $\alpha=60°$时,抓取力变化最小;$\alpha=80°$时,抓取力变化最大。

4　结语

双电机驱动串联双铰链柔性机械手以步进电机为驱动,与以电动推杆为驱动的柔性机械手相比,指跟节角度可调,抓取范围更大。采用步进电机驱动,可以精确控制驱动杆行程。

课题组通过对串联双铰链柔性机械手的结构设计,以及在物体静止机械手负载状态下和物体悬停机械手负载状态下的受力分析,运用 MATLAB 中的 fsolve 函数,得到抓取力随驱动杆行程的变化关系,就抓取效率和抓取力变化角度看,得到较好的 α,为尺寸范围大、形状复杂、物性多样的复杂对象的抓取提供了参考。

(下转第 23 页)