

苹果被动抓取柔性机械手的结构与分析

李增强，章军，刘光元

(江南大学，无锡 214122)

摘要：为了满足包装生产线上分拣不同大小苹果的要求，设计了一种气动绳牵引的被动抓取的柔性机械手。在满足苹果抓取力的情况下，以抓取最大和最小苹果的力的差值最小为目标函数，采用 Matlab 软件的 fmincon 函数优化，得出了 2 个结构尺寸(a, δ)、扭弹簧的刚度(k)和预紧角(ϕ_{10})及抓取最小苹果时机械手关节的角度(ϕ_2)，并给出了机械手的初始状态和气动控制方法。

关键词：绳牵引；柔性关节；机械手；被动抓取；Matlab 优化

中图分类号：TB486⁺.03 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2011)15-0014-04

Structure and Analysis of Flexible Manipulator for Apple Passive Grasp

LI Zeng-qiang, ZHANG Jun, LIU Guang-yuan

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A kind of cable-driven pneumatic flexible manipulator for apple passive grasp was designed to satisfy the requirements of packaging production lines in sorting different sizes of apples. The objective function was determined by the minimum change range of apple grasp strength. Matlab software fmincon function was applied to optimize the function. Two structure sizes a and δ , the stiffness of hydropneumatic twist spring k , pre-loaded angle ϕ_{10} , and the angle for grasping the smallest apples ϕ_2 were resolved. The initial state of manipulator and pneumatic control method was put forward.

Key words: cable-driven; flexible joint; manipulator; passive grab; Matlab optimization

我国是世界第一大苹果生产国，苹果主产区优质果率已经达到 35%~50%，但达到出口标准的高档果率仅为 5%~8% 左右^[1]。为了提高我国苹果产业在世界上的竞争力，发展苹果深加工产品，对苹果的产后分级处理，必将采用机械化手段^[2]。高效的苹果抓取机械手，值得研究人员关注。

大多数机器人末端执行器的设计都是针对某种具体抓取物的形状、尺寸和位置不变化的场合来设计的，通用性差，这样不但耗费大量的人力物力，性价比也不高。随着物流、包装等行业的不断发展，对末端执行器的要求也越来越高，出现了多指、多自由度、多关节的末端执行器，最后发展到在一些特定的行业出现了类似人手的多指灵巧手，满足了人们对于机器人灵巧手的灵活性的要求^[3]。

收稿日期：2011-05-26

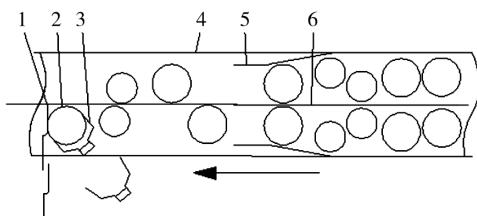
作者简介：李增强(1985—)，男，西安人，江南大学硕士生，主攻研究高效仿生机构以及仿生机构的分析与综合理论。

通讯作者：章军(1965—)，男，江苏溧水人，江南大学副教授、硕导，主要研究方向为柔性机械手、机器人。

目前，机械手多以电动机驱动，这种方式是刚性结构，一般只能有动作位置的初始、终了状态，难以工作在任一中间位置状态；同时结构复杂，体积较大，惯性较大，电气伺服控制要求高、成本高^[4]。绳牵引指关节构成的机械手，具有手部结构紧凑、关节功率体积比大的特点^[5~6]。文中所设计的机械手是以伺服电机驱动气压缸，再由气压缸驱动绳牵引的关节构成的两指机械手，在机械手的关节处安装有扭弹簧，在抓取物体的过程中，牵引绳不受力，处于松弛状态，手指在扭弹簧作用下弯曲抓取苹果；手指需要伸直时，才受牵引绳的作用，属于被动抓取。因此，基于新颖的抓取方式，在抓取大小物体的适应性等方面有一定的研究价值。

1 苹果抓取机械手结构和气动原理

见图1, 经过刷板处理过的苹果大部分都是果柄

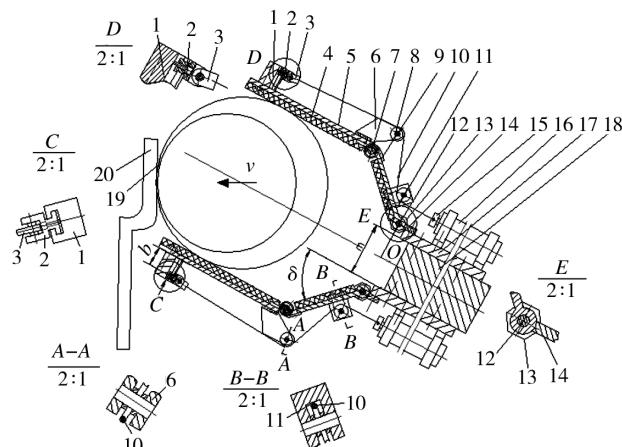


1—挡板;2—苹果;3—机械手;4—传送带;5—锥形斗;6—分隔板

图1 机械手工作示意

Fig. 1 Vertical view of working manipulator

向上, 并随着传送带4慢慢来到锥形斗5处, 在锥形斗5的作用下, 苹果在传送带上的排列呈现图1中的方式。当挡板1上的传感器感应到有苹果接触时, 机械手3迅速将苹果抓取, 同时挡板随机械手撤离, 为下次抓取做准备。图中箭头所示为传送带运动方向, 即苹果移动方向。机械手及挡板初始位置处于传送带外面, 见图2。



1—导槽座;2—小铰链支座;3—小铰链;4—缓冲橡胶;5—二活页串联铰链;6—导轮支架;7—二活页串联铰链芯轴导轮;8—导轮;9—扭弹簧;10—牵引绳;11—导轮座;12—可调铰链芯轴;13—可调铰链锁紧螺母;14—可调铰链支座;15—牵引绳固定螺母;16—气缸;17—底板;18—厚度可换式机械手底座;19—苹果;20—挡板

图2 绳牵引关节机械手结构及抓取方式

Fig. 2 Grasping mode and structure of cable-driven joint manipulator

关节的结构和灵活性直接影响着机械手的空间尺寸和抓取功能。二活页串联铰链5是柔性手指的

骨架与关节, 它由2个活页板、1个二活页串联铰链芯轴7组成, 缓冲橡胶4粘贴在二活页串联铰链5的2个活页板上; 二活页串联铰链芯轴7上装有扭弹簧9, 扭弹簧9的扭矩均作用在抓取物方向, 产生抓持力, 牵引绳10牵引克服扭弹簧9扭矩, 使二活页串联铰链5反向转动, 松开抓取物; 二活页串联铰链5最下部活页板的端部卷成圆孔, 与可调铰链芯轴12、可调铰链支座14构成可调铰链, 调整好角度后用可调铰链芯轴12上的可调铰链锁紧螺母13锁紧, 可调铰链支座14固定在底板17上; 导槽座1、导轮支架6、导轮座11均安装在二活页串联铰链5的活页上, 牵引绳10的一端固定在小铰链3上, 小铰链3的小铰链支座2的导向部分在导槽座1的T形导槽中定向, 小铰链支座2位置调整好后用内六角螺钉固定在导槽座1上; 经过安装在导轮支架6上的导轮8和安装在导轮座11上导轮8导向, 牵引绳10的另一端被固定在牵引绳固定螺母15上; 牵引绳固定螺母15安装在气缸16的活塞杆的螺纹上, 气缸16固定在底板17上。上述零件构成了一个柔性手指部件。图中垂直指向挡板20的箭头v是苹果在传送带上的运动方向。

机械手气动原理见图3, 抓取物体时, 二位通断阀21的电磁铁1DT失电, 二位通断阀25的电磁铁

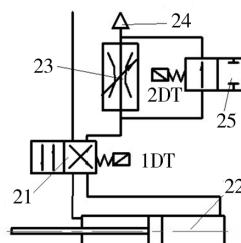


图3 机械手气动原理

Fig. 3 Schematic of pneumatic manipulator

2DT失电, 压缩空气通过二位四通阀21的右位进入气缸22活塞的右部, 使活塞杆快速左移, 气缸22活塞左部气体通过二位四通阀21的右位和二位通断阀25左位, 经过消声器24后直接排出; 活塞左移一段距离后, 电磁铁2DT延时得电(上移距离和延时时间需要试验确定), 气缸左部气体通过二位通断阀25的右位, 还通过可调节流阀23的阻尼孔后(开口大小需要试验确定), 再经消声器24后排出; 由于可调节流阀23的作用, 手指接近被抓物体时, 活塞杆左移速度

大大减慢,对抓取物的冲击较小。

由于安装在关节处的扭弹簧在安装时经过预紧,因此会对手指产生持续的扭矩,手指伸直时扭矩最大,这个扭矩是使手指趋于弯曲方向的,用来抓取物体;而一端固定在手指端部,一端经过导轮,连接在气缸活塞杆上的牵引绳(随着活塞杆的伸出与缩进,牵引绳上的力变小、变大),则对手指也产生持续的扭矩(手指弯曲抓紧物体时为零),但是与扭弹簧对手指产生的扭矩相反,这个扭矩是使手指趋向张开方向的。随着气缸活塞杆的伸出与缩进,安装在关节处的扭弹簧产生的扭矩以及牵引绳产生的扭矩,彼此之间大小的变化,就产生了手指的弯曲与张开。

抓持物体时,气缸活塞杆左移已到终点,机械手在关节扭弹簧的扭矩作用下,牵引绳 10 无作用力,仅靠套在二活页串联铰链 5 的铰链芯轴上的扭弹簧 9 作用,产生和保持抓取力,以抓持物体。

松开物体时,二位通断阀 21 的电磁铁 1DT 得电,二位通断阀 25 的电磁铁 2DT 失电,压缩空气通过二位四通阀 21 的左位直接进入气缸 22 活塞的左部,使活塞杆快速右移,气缸 22 活塞右部气体通过二位四通阀 21 的左位和二位通断阀 25 左位,直接经消声器 24 后排出。靠气缸动力、牵引绳 10 作用力,二活页串联铰链的活页板反向运动,松开被抓取物体,并回到初始位置。二活页串联铰链的初始位置不是三活页串联铰链的伸直状态,而是满足抓取要求空间的位置,这样可减少抓取运动时间。

2 机械手初始状态

关节受力见图 4,在牵引绳作用下,不抓取、无外

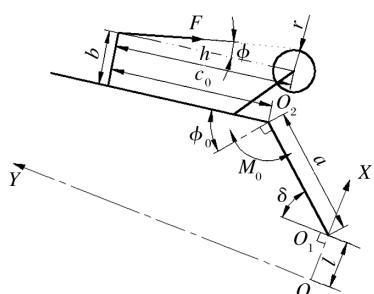


图 4 关节受力分析

Fig. 4 Mechanics analysis of the joint

载时,在 O_2 点克服扭弹簧的扭矩平衡方程为:

$$M_0 = k(\phi_0 + \phi_{10}) = Fb \cos \omega + Fc_0 \sin \omega \quad (1)$$

$$F = \pi d^2 p / 4 \quad (2)$$

$$\sin \omega = r/h \quad (3)$$

式中: M_0 是 O_2 铰链处扭弹簧的扭矩; ϕ_{10} 是安装在 O_2 处扭弹簧的预紧角; k 是安装在 O_2 处扭弹簧的扭转刚度系数; ϕ_0 是关节在铰链 O_2 处的角位移; F 是牵引绳上的拉力; b 是 F 作用点到手指的距离; c_0 是 F 作用力到铰链 O_2 处的力臂; r 是导轮的半径; h 是 F 力作用点到导轮圆心距离; d 是气缸的内壁直径; p 是气缸内气体压力; ω 是 F 与作用力点和导轮圆心连线的夹角。

3 苹果抓取柔性机械手抓取力分析及结构优化

建立抓取模型的直角坐标系,见图 5。假设苹果

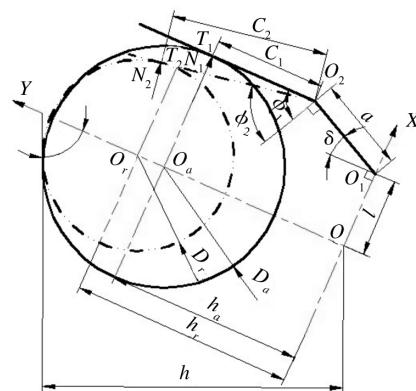


图 5 苹果大小与关节角位移的关系

Fig. 5 The relation between apple's size

and joint angle displacement

最大横径为圆形; l 为 O_1 铰链到手掌中心 O 的距离; a 是 O_1 铰链关节到 O_2 铰链关节的距离; T_1, T_2 分别为抓取大小苹果的最大横径时的抓取点; c_1, c_2 分别为 T_1, T_2 点到 O_2 铰链关节的距离; N_1, N_2 分别为抓取大小苹果最大横径的抓取力; O_a, O_r 分别为大小苹果的中心; D_a, D_r 分别为大小苹果最大横径的直径; ϕ_1, ϕ_2 分别为抓取大小苹果时 O_1 铰链关节处的角度移; h_a, h_r 分别为手掌中心 O 到 O_a, O_r 的距离; h 为手掌中心 O 到挡板的距离; δ 为 O_1 铰链的开度。此两指两关节的机械手,抓取大小苹果最大横径时,手掌中心 O 与挡板的距离均为 h ,手掌 Y 轴与挡板的夹角为 60° ,手抓抓取平面始终与挡板平面垂直。由图中几何关系可知, O_1, O_2, T_1, T_2 点的坐标分别为(l ,

$0), (l + a \sin \delta, a \cos \delta), (l + a \sin \delta, a \cos \delta + c_1), [l + a \sin \delta - c_2 \cos(\phi_2 + \delta), a \cos \delta + c_2 \sin(\phi_2 + \delta)]$ 。

抓取大苹果时,铰链 O_1 处扭矩平衡方程为:

$$N_1 c_1 = k(\phi_1 + \phi_{10}) \quad (4)$$

抓取小苹果时,铰链 O_1 处扭矩平衡方程为:

$$N_2 c_2 = k(\phi_2 + \phi_{10}) \quad (5)$$

优化的目标函数: $\min(N_1 - N_2)$; 优化变量为: $(k, \phi_2, \phi_{10}, a, \delta)$; 等式约束条件为式(6)~(12)。

在图 5 中,沿 Y 轴方向 O_1 到 N_1 的距离,等于手掌中心 O 到 O_a 的距离,因此有:

$$a \cos \delta + c_1 = h_a \quad (6)$$

在抓大横径苹果时,手指末端指节与 Y 轴平行,由几何关系可得:

$$\phi_1 + \delta = \pi/2 \quad (7)$$

沿 X 轴方向有 O 到 O_2 的距离等于 O_a 到 T_1 的距离,因此有:

$$l + a \cos \delta = D_a / 2 \quad (8)$$

在挡板与 Y 轴的夹角为 60° 的情况下, h_a, h_r 有:

$$h_r = h_a + D_a - D_r \quad (9)$$

T_2 点的 Y 坐标值与 h_r, D_r 则:

$$a \cos \delta + c_2 \sin(\phi_2 + \delta) = h_r + [D_r \cos(\phi_2 + \delta)]/2 \quad (10)$$

T_2 点到小横径苹果 O_r 的距离,有如下几何关系:

$$[l + a \sin \delta - c_2 \cos(\phi_2 + \delta)]^2 + [a \cos \delta + c_2 \sin(\phi_2 + \delta) - h_r]^2 = (D_r/2)^2 \quad (11)$$

抓取大横径苹果时,铰链 O_1 处扭矩平衡方程为:

$$N_1 c_1 = k(\phi_1 + \phi_{10}) \quad (12)$$

不等式约束条件为式(13)和(14)。

在图 5 中,大小横径苹果的抓取力有如下关系:

$$N_2 \leq N_1 \quad (13)$$

在抓取小横径苹果时, ϕ_2 与 δ 存在如下关系:

$$\phi_2 + \delta < \pi/2 \quad (14)$$

4 算例

4.1 机械手尺寸及弹簧参数优化

苹果的尺寸 $D_a = 0.095$ m, $D_r = 0.075$ m^[3]。手指尺寸: $l = 0.02$ m, $h_a = 0.06$ m。抓持力 $N_1 = 4$ N。考虑到机械手尺寸不能太大, a 的取值范围取为 $0 \leq a \leq 0.08$ m; 弹簧扭转刚度范围取为 $0 \leq k \leq 3$ N · m/rad; 关节最大转角 $\pi/2$, 因此 $0 \leq \phi_2 \leq \pi/2$, $0 \leq \delta \leq \pi/2$;

预紧角度范围取为 $0 \leq \phi_{10} \leq \pi$ 。

运用 Matlab 中的 fmincon 函数编写优化程序, 优化结果为 $k = 0.068$ N · m/rad, $\phi_2 = 0$, $\phi_{10} = 3.1416$, $a = 0.0278$ m, $\delta = 1.4234$, $N_2 = 3.0153$ N。通过计算得出: $c_1 = 0.055914$ m, $c_2 = 0.070848$ m, $h = 0.09946$ m, $\phi_1 = 0.14748$ 。

经过结构优化后,使得在满足抓取力变化最小的情况下,机械手的各部分尺寸达到了最理想的设计,满足在不损坏苹果的情况下受力要求^[7]。

4.2 机械手初始状态

初始状态见图 6, 由于优化后 $c_2 = 0.070848$ m,

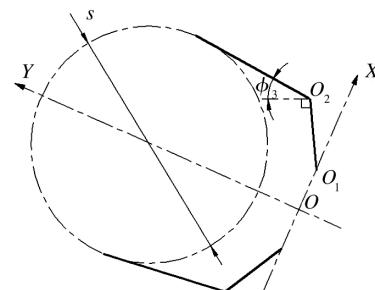


图 6 机械手初始状态

Fig. 6 The initial state diagram of the manipulator

那么取指尖到 O_2 铰链的距离为 0.072 m。考虑到大苹果的最大横径 $D_a = 0.095$ m, 取图 6 中 $s = 0.100$ m, 由于以 s 为直径的圆是大小不同横径苹果所能分布的最大范围,因此为了能让机械手抓取处于传送带上的苹果,机械手初始开口大小应该为 0.100 m。机械手其余尺寸数值均来源于上述优化数值。通过几何计算并取一定比例系数,求出了 $\phi_3 = 0.2443$ 。

5 结语

提出了一种新型机械手的模型,以气缸间接驱动,关节铰链处安装有扭弹簧。抓取苹果时完全依靠扭弹簧产生的扭矩,松开苹果时由安装在气缸活塞上的牵引绳产生的拉力使机械手反向张开,完成此动作。以抓取大小苹果力变化最小为目标函数,对机械手的结构尺寸进行了优化,得出了满意的模型尺寸,抓取力分别是 $N_1 = 4$ N, $N_2 = 3.0153$ N, 抓取力变化较小,并且不会对苹果造成损坏。给出了机械手气缸的控制方法,最后计算了机械手的初始状态 O_2 铰链处的角度。

(下转第 47 页)

3 实际样品检测

用建立的方法对市售食品的包装材料中邻苯二甲酸酯类危害因子进行了筛查和确证,结果表明:BBP,DCHP 在检测的几种包装材料中使用较为普遍,某包装材料中超过 200 $\mu\text{g}/\text{kg}$,DBEP 在所检测的包装材料中并未发现。

4 结论

以 ASE 技术作为样品前处理手段,以 11 种邻苯二甲酸酯类化合物为例,成功地建立了 HPLC-LTQ-Orbitrap 高分辨质谱方法用于食品接触材料中邻苯二甲酸酯类化合物的筛查和确证。方法简便快捷、准确,灵敏度高,可用于实际样品中邻苯二甲酸酯类危害因子的检测。

参考文献:

- [1] AMIR S ,HAFIDI M, MERLINA G, et al. Porc Bio, 2005,40:2183—2190. (余不详)
- [2] SHEN H Y. Simultaneous Screening and Determination Eight Phthalates in Plastic Products for Food Use by Sonication-assisted Extraction/GC-MS Methods[J]. Talanta,2005(66):734—739.
- [3] GUO B Y,WEN B,SHAN X Q, et al. Separation and Determination of Phthalates by Micellar Electrokinetic Chromatography[J]. Journal of Chromatography A,2005 (1095):189—192.
- [4] CHINGIN K,CHEN H W,GAMEZ G, et al. Detection of Diethyl Phthalate in Perfumes by Extractive Electrospray Ionization Mass Spectrometry [J]. Anal, Chem, 2009,81:123—129.
- [5] BLOUNT B C, MILGRAM K E, SILVA M J, et al. Quantitative Detection of Eight PhthalateMetabolites in Human Urine Using HPLC-APCI-MS/MS [J]. Anal Chem,2000,72: 4127—4134.
- [6] LVAN O,RADOMIR C, KUBINEC R, et al. Determination of Phthalate Sum in Fatty Food by Gas Chromatography[J]. Food Chemistry,2011(124):392—395
- [7] 柴丽月,辛志宏,蔡晶,等. 食品中邻苯二甲酸酯类增塑剂含量的测定,2008(7):51—63.
- [8] PRAPATPONG P,KANCHANAMAYOON W. Determination of Phthalate Esters in Drinking Water using Solid-phase Extraction and Gas Chromatography[J]. J Applied Sci,2010,10(17):1987
- [9] 廖艳,余煜棉,赖子尼. 气相色谱法测定 6 种邻苯二甲酸酯痕量组分的固相萃取条件研究[J]. 化学试剂, 2010, 32(3):239
- [10] NOUR K,FEMANDO G,TAMAYO A, et al. Determination of Diethylhexyl Phthalate in Water by Solid Phase Microextraction Coupled to High Performance Liquid Chromatography[J]. Talanta,2006(69):1095—1099.
- [11] 肖乃玉,陆杏春,郭清兵,等. 塑料食品包装中邻苯二甲酸酯类增塑剂迁移研究进展[J]. 包装工程,2010,31(11):123—127.
- [12] 李伟. 塑料包装材料中邻苯类化合物提取方法的比较 [J]. 包装工程,2011,32(7):47—50.

(上接第 17 页)

此种苹果抓取机械手无需力反馈,因此结构简单,控制方便,制造成本很低,并且使用方便、简单。

参考文献:

- [1] 王金政,薛晓敏,路超. 我国苹果生产现状与发展对策 [J]. 山东农业科学,2010(6):117—119.
- [2] 翟衡,史大川,束怀瑞. 我国苹果发展现状与趋势 [J]. 果树学报,2007,24(3):355—360.
- [3] 章军. 六关节三指苹果抓取机械手的自适应柔性分析 [J]. 农业工程学报,2010(1):141—144.

- [4] 章军,须文波,杨宏建. 气动式柔性限自由度机械手指 [J]. 液压与气动,2004(8):44—46.
- [5] YANG Jing-zhou,PITARCH E P,ABDEL-MALEK K. A Multi-fingered Hand Prosthesis [J]. Mechanism and Machine Theory(S0094—114X),2004,39:555—581.
- [6] 张立彬,杨庆华,胥芳,等. 机器人多指灵巧手及其驱动系统研究的现状 [J]. 农业工程学报,2007,43(4):12—20.
- [7] 杨庆华,金寅德,钱少明,等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究 [J]. 农业机械学报,2010(9):154—158.