苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真*

崔鹏陈志张小超

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室,北京100083)

【摘要】 提出了一种应用于苹果采摘机器人末端执行器的仿生机械手。采用腱传动式仿生机械手取代了简 单的夹具,提高了末端执行器在复杂环境中抓取苹果的适应性。建立了腱传动式机械手开环控制的驱动力和抓握 力间的力学模型。仿真结果表明,在相同的驱动力下,腱传动仿生机械手的抓握力与其机构参数相关。其中,有效 抓握力由手指的长度和厚度决定;抓握力的分布由各指节的长度比例决定;手指的初始张角决定了其可抓取苹果 的半径范围;随着苹果半径的增大,有效抓握力将减小。摩擦力能够改善抓握力在各指节的分布,使抓握力分布均 匀化,同时使有效抓握力变大。

关键词:苹果 采摘机器人 仿生机械手 静力学分析 中图分类号:S126;TP34 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2011)02-0149-05

Statics Analysis of Apple-picking Robot Humanoid Manipulator

Cui Peng Chen Zhi Zhang Xiaochao

(State Key Laboratory of Soil – Plant – Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract

A humanoid manipulator applying to the end effector of an apple picking robot was introduced. Substituting a tendon-actuated manipulator for the simple gripper can improve the adaptability for the end effector to catch apples in intricate surroundings. To realize the open-loop control of the tendon-actuated manipulator, the relationship model of the actuating force and grasping force is necessary. By simulation, the model was established in this paper. Under the same actuating force, the grasping force of the tendon-actuated humanoid manipulator was related to the parameters of mechanism. The virtual grasping force was determined by the length and thickness of fingers. The distribution of grasping force was determined the radius range of the apples. As the radius of apples increased, the virtual grasping force decreased. Frictions could homogenize the distribution of grasping force as well as enlarge the virtual force.

Key words Apple, Picking robot, Humanoid manipulator, Statics analysis

引言

苹果采摘机器人研究的一个重点是末端执行器的设计。目前,国内外研制的一些末端执行器动作比较简单,分为吸入式和切割式两种。Setiawan等^[1]设计的吸入式机构采用吸筒将苹果吸入,不设置切割装置,这种方式的困难在于某些苹果的果梗

不易和树枝分离。马履中等^[2]设计的切割式机构 采用一个夹具将苹果固定,用刀具将树枝切断,这种 方式的缺点是夹具构造简单,在果树这种复杂环境 中的通过性和适应性较差。

采用欠驱动仿生机械手替代夹具,其优点是可 以适应复杂环境,提高抓取成功率。欠驱动机械手 有连杆式和腱传动式两种。连杆式机械手抓握力

收稿日期: 2010-03-22 修回日期: 2010-04-19

^{*}国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006 AA10 A305、2006 AA10 Z254)

作者简介:崔鹏,硕士生,主要从事苹果采摘机器人末端执行器研究,E-mail: chaerim0421@126.com

通讯作者:张小超,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail: zzc@ caams. org. cn

大,控制精度高,既可以实现包络抓取,也可实现末 关节捏取抓取^[3-4],但是其机构比较复杂,体积较 大,不易加工装配^[3,5];腱传动式机械手体积小,价 格低,便于加工装配,但是抓取过程中受到摩擦力的 影响较大。

在苹果采摘过程中,抓取苹果的过程可能会对 苹果造成损坏,因此欠驱动机械手与苹果的接触力 不能过大,需要对其进行力控制^[6-9]。用于测量机 械手接触力的传感器价格昂贵,量程有限,多用于末 梢指节捏取抓取方式的多指灵巧手^[10-15]。因此研 究开环控制方法十分必要。本文建立驱动力和抓握 力间的数学模型,为仿生机械手的开环控制设计提 供依据。

1 静力学分析

腱传动手指的机构如图 1 所示,3 个指节间用 铰连接,腱与末梢指节连接固定,穿过中间指节和第 一指节。本文分析二维平面内的情况,两手指对称 分布在手掌两侧,将苹果近似为圆形,如图 2 所示。



Fig. 2 Planar grasping model

设定偏度函数 $g = llg(F_2/F_1)l$,手指接触点不能提供拉力,因此限定单向条件, $F_1 > 0, F_2 > 0, F_y > 0$ 。g 是衡量握力在不同指节间分布均匀性的函数, g 值越大,则握力分布越不均匀。阻止苹果与机械 手脱离的有效力为 F_y, F_y 是接触力和摩擦力在 y 方 向上的合力。 F_y 越大,则认为有效的抓握力越大;若 $F_y \leq 0$,则手指无法提供防止脱离的力,苹果与手指 将脱离,后文均称 F_y 为有效力。

考虑二维抓取类型,分析二维的牛顿-欧拉方程。

$$\boldsymbol{GF} = \boldsymbol{0} \tag{1}$$

其中,G为平衡关系矩阵,由G可以得到3N个等式。本例中只需求中间关节和末梢关节的未知力,即N=2,共有6个方程^[3]。F为各连杆受到的外力。

矩阵 G 由手指和苹果的几何参数决定。F 可 以分为外力 F_{ι} 和内力 F_{I} 。本例中外力包括接触力 $F_{i}(i=1,2)$ 、接触摩擦力 t_{i} 、基座反力 F_{r} 、中间关节 与基座间腱的张力 T_{b} 。内力则包括复位弹簧的恢 复力 M_{ri} 、铰的相互作用力 F_{li} 以及中间与末稍指关 节间腱的张力 T_{I} 。

计算抓握力时,需要对抓取模型作合理的简化。 ①由于抓取的动作不会产生高速运动,所以可以不 考虑手指的惯性力和对苹果的冲击载荷。②认为某 一手指的接触力和其他手指和手掌以及苹果受到的 其他外力平衡,故认为苹果已处于抓取稳定状态。 ③静力计算时,不考虑抓取过程^[16],只计算一根手 指的静力平衡位置。④苹果和手存在相对运动趋 势,计算静止到运动的临界状态,摩擦力计算取最大 静摩擦因数。⑤腱上的传动力在整根腱上大小相 等,且等于电动机提供的驱动力。⑥末梢指关节的 长度可变,能保证其与被抓苹果接触。

由于不需求出第一指节对中间指节的支座反 力,所以只需求解 3N-2 个方程,即4 个方程。得 到的静力平衡方程为

$$F_2 d_2 + \mu F_2 b_{21} + k_2 \theta_2 - T_I f_2(\theta_2) = 0$$
 (2)

$$T_{I2x} + F_2 \cos\theta_{F2} + T_I \cos\theta_{TI} + \mu F_2 \cos\theta_{t2} = 0 \quad (3)$$

$$F_{I_{2y}} + F_2 \sin\theta_{F_2} + T_I \sin\theta_{T_I} + \mu F_2 \sin\theta_{I_2} = 0 \quad (4)$$

$$T_{I}l_{1}\sin\left|\left|\theta_{TI}+\frac{\pi}{2}-\theta_{0}-\theta_{1}\right|\right|-F_{I2x}l_{1}\sin\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)-F_{I2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{I2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)+T_{b}f_{1}\left(\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{1}-\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{1}-\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\sin\left(\pi-\theta_{0}-\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta_{1}-\theta_{1}\right)-F_{L2x}l_{1}\cos\left(\pi-\theta$$

$$T_{1} f_{2}(\theta_{2}) - k_{2}\theta_{2} + k_{1}\theta_{1} - F_{1}d_{1} - \mu F_{1}b_{11} = 0 \quad (5)$$

式中
$$\theta_{T_1}, \theta_{t_2}, \theta_{F_1}, \theta_{F_2}$$
 — T_1, t_2, F_1, F_2 与 x 轴正方
向本角

 θ_0 、 θ_1 、 θ_2 ——关节角位移

*l*₀、*l*₁——第一指节和中间指节长度

b11、b21——中间指节和末梢指节厚度

 $f_i(\theta_i) - \theta_i$ 相对应腱的作用力臂

μ——摩擦因数 d₀、d₁、d₂——接触点位置 第一指节、中间指节和末梢指节与苹果接触,抓 取力由中间指节和末梢指节提供。所以

$$F_{\gamma} = F_1 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F1} + F_2 \sin \theta_{F2} + F_2 \sin \theta_{F2$$

 $\mu F_1 \sin(\theta_0 + \theta_1) + \mu F_2 \sin(\theta_0 + \theta_1 + \theta_2) \quad (6)$ 选定手掌和手指的长度,则手指接触力是苹果 半径的函数。考虑手指和手掌连接的关节采用一个预置的位置,即 $\theta_0 = C_0$ 固定时,苹果半径 $R \in [R_{\min}, R_{\max})$,才能保证苹果与3个指节均接触。其中

$$R_{\min} = \frac{R_0 + l_0 \cos\theta_0}{(1 + \cos\theta_0) \tan\frac{\theta_0}{2}} \quad R_{\max} = \frac{R_0}{\tan\frac{\theta_0}{2}}$$

式中 R_0 是手掌半径,仿真过程中可以取任意值,不 影响讨论结果,本文一律选取 R_0 = 40 mm。正常人 手3个指节均可运动,可抓取半径范围下限为零。 对于腱传动机械手机构来说,若采用一根腱驱动 3个指节,则对于同一种抓取形式,存在多种位形, 抓取不稳定。由于苹果半径变化范围有限,所以将 θ_0 固定进行仿真,则 F_0 和第一指节对中间指节的作 用力属于支座反力。

以 R = R_{min}时手指的位形作为机械限位,即若 R < R_{min},手指将停留在 R = R_{min}时的位形上,则当 R < R_{min}时,将产生机械限位力矩,并且苹果将脱离 中间指节,只与末端指节接触。此时则不必考虑握 力在不同指节间的分配,所以本文不讨论这种情况。 当 R > R_{max}时,苹果将脱离第一指节,由于假设末梢 指节足够长,所以末梢指节可与苹果接触。但实际 中末梢指节的长度是有限的,这样末梢指节与苹果 是否接触取决于中间指节的长度。这种位形比较少 见,本文不作讨论。

2 仿真与分析

骆敏舟^[5]、Laliberte^[3]等所作的模拟均没有考 虑摩擦力的影响,本文先讨论 $\mu = 0$,然后增大 μ 的 值,分析摩擦力对于抓握力的影响。仿真过程中,腱 中的驱动力 T 固定,以苹果半径 R 为变量,得到 R 与偏度函数 g 的关系曲线和 R 与有效力 F,的关系 曲线。其中,每组仿真仅改变 θ_0 、 l_0 与 R₀的比值 p 和 l_1 与 l_0 的比值 m 中的一个值。计算时忽略弹簧的恢 复力,取 $k_i = 0$ 。

2.1 关节角位移 θ_0

图 3 为不同 θ_0 时模拟曲线。每条曲线都是 $R \in [R_{\min}, R_{\max})$ 区间上的一段。由图可以看出, R_{\min} 和 R_{\max} 随 θ_0 的递减而递增,手可抓取的苹果半径随 θ_0 的减小而增大。由于手指的初始张角也是 θ_0 的减函数,手指初始张角越大,抓取苹果的半径就越大。随着 R的增大, F_1 、 F_2 、 F_2 的值都将减小。随着 θ_0 的增大, F_1 和 F_2 的比值无明显变化。本组实验的偏度函数 $g = |lg(F_2/F_1)|$ 的最小值大于 2,所以本组实验抓握力不均匀,需要通过其他手段改善抓握力的分布。

图 3c 为 $R \in [R_{\min}, R_{\max})$ 区间上, 对应于 $\theta_0 =$ 0.45 π 和 0.47 π 的两条曲线, $F_y > 0$, 其值随 R 的增 大而减小; 对应于 θ_0 为 0.43 π 的曲线, 随 R 增大到 一定值时, $F_y \leq 0$, 此时手将与苹果脱离。当 θ_0 为 0.47 π 时, F_y 最大。因此手指的 θ_0 越大, 第一指节的 初始张角越小, 可提供的有效力 F_y 越大。



2.2 比值 m

图 4 是不同 m 值时模拟曲线。由图 4b 可知, 当 m 增大时,F,增大。说明中间指节相对于第一指 节的长度越大,有效力 F,越大。由图 4a 可知,随着 m 值增大,偏度函数值将增大,导致握力分布的均匀 性变差。



2.3 比值 p

图 5 是不同 p 值时模拟曲线。当 p 值增大时, R_{min} 不变, R_{max} 增大,即手可抓取的半径变化范围变 大了。图 5a 中,对于相同的苹果半径,若 p 值增大, 则偏度函数 g 的值将减小,握力分布均匀性变差。 图 5b中,对于相同的苹果半径,若 p 值增大,有效力



2.4 摩擦因数 μ

如图 6a 所示,考虑摩擦力时 g 随 µ 的增大有所 减小,说明摩擦力可以改善抓握力在各指节上的分 布,其中摩擦力越大,分布的均匀性就越好。如



图 6b所示,有效力 F_y 随 μ 的增大而增大,说明摩擦 力的存在能够使阻止脱离的有效力变大,摩擦力越 大,有效力就越大。当 $\mu \ge 0.2$ 时,有效力 F_y 已经不 随 R的增大而减小。

3 结论

(1)随着被抓苹果半径 R 的增大,偏度函数 g值将增大,手对苹果的抓握力会呈现不均匀的趋势。 接触力会随 R 的增大而增大。当 R 趋近于 R_{max} 时, d_0 趋近于 l_0 ,接触点无限接近铰点,接触力趋于无穷 大。实际中,由于手指厚度的存在, d_0 无法趋近 l_0 , min($l_0 - d_0$)趋于一个非零常数。因此手指中的任 何作用力都不会趋于无穷大。

(2)对于尺寸相同的手指,初始张角不同,则可 抓取苹果的半径范围不同。初始张角越大,可抓取 的苹果半径变化范围越大,手的适应性越强,但提供 的有效力 *F*,将变小。对于相同的初始张角和手掌 半径,第一指节越长,接触力越大,有效力 *F*,也越 大,且握力分布越均匀;中间指节越长,接触力越大, 有效力 *F*,也越大,但握力分布均匀性变差。

(3)摩擦力的存在可以改善抓握力在各指节上 的均匀性,摩擦力越大,均匀性越好。摩擦力的存在 能够使阻止脱离的有效力变大,摩擦力越大,有效力 也越大。当摩擦因数 $\mu \ge 0.2$ 时,有效力 F_y 已经不 随 R 的增大而减小。

参考文献

- 1 Achmad Irwan Setiawan, Tomonari Furukawa, Adam Preston. A low-cost gripper for an apple picking robot [C] // Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA, 2004,5: 4448 ~4453.
- 2 马履中,杨文亮,王成军,等.苹果采摘机器人末端执行器的结构设计与试验[J].农机化研究,2009,31(12):65~67. Ma Lüzhong, Yang Wenliang, Wang Chengjun, et al. Structure design and experiment of the end effector for apple-harvesting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 65~67. (in Chinese)
- 3 Thierry Laliberte, Clement M Gosselin. Simulation and design of underactuated mechanical hands [J]. Mechanism and Machine Theory, 1998,33(1~2): 39~57.
- 4 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报,2008,39(3):175~179.
 Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(3):175~179. (in Chinese)
- 5 骆敏舟,梅涛,卢朝洪,等. 多关节欠驱动机器人手爪包络抓取稳定性分析与仿真[J]. 光学精密工程,2004,12(5):510~517.

Luo Minzhou, Mei Tao, Lu Chaohong, et al. Analysis and simulation of enveloping grasp stability of the multi-phalange underactuated robot hand[J]. Optics and Precision Engineering, 2004,12(5):510~517. (in Chinese)

- 6 Xu Jijie, Wang M Y, Wang H, et al. Force analysis of whole hand grasp by multifingered robotic hand [C] // Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007:211 ~216.
- 7 Xia Youshen, Wang Jun, Lo Ming Fok. Grasping-force optimization for multifingered robotic hands using a recurrent neural network [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3):549 ~ 554.
- 8 Li Junquan, Shan Jinjun. Passivity control of underactuated snake-like robots [C] // Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 2008:485 ~ 490.

- 9 Thomas Wimbock, Christian Ott, Gerd Hirzinger. Analysis and experimental evaluation of the intrinsically passive controller (IPC) for multifingered hands [C] // Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, 2008:278 ~ 284.
- 10 Keiji Miyake, Futoshi Nakamura, Satoshi Komada, et al. Fast decision of contact points of multifingered robot hands using an optimization index of fingertip force [C] // Proceedings of International Conference on Mechatronics, Kumamoto, Japan, 2007:1~6.
- 11 Keisuke Ichida, Kiyotaka Izumi, Keigo Watanabe, et al. Control of three-link underactuated manipulators using a switching method of fuzzy energy regions [J]. Artificial Life and Robotics, 2008, 12(1 ~ 2):258 ~ 263.
- 12 Aydan M Erkmen, Ismet Erkmen, Erman Tekkaya. Optimal initialization of manipulation dynamics by vorticity model of robot hand preshaping [J]. Journal of Robotic Systems, 2000,17(4):199 ~ 212.
- 13 Xuan Thu Le, Wn Goo Kim, Byong Chang Kim. Design of a flexible multifingered robotics hand with 12 DOF and its control applications [C] // SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, Korea, 2006:3 461 ~ 3 465.
- 14 Guan Yisheng, Zhang Hong. Kinematic feasibility analysis of 3-D multifingered grasps [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3):507 ~ 513.
- 15 Arlene B A Cole, John E Hauser, S Shankar Sastry. Kinematics and control of multifingered hands with rolling contact[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(4): 398 ~ 404.
- 16 Ying Li, Yong Yu, Showzow Tsujio. An analytical grasp planning on given object with multifingered hand [C] // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington DC, 2002,4:3749 ~ 3754.
- 17 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,2010,41(9):154~158,204.

Yang Qinghua, Jin Yinde, Qian Shaoming, et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9):154 ~158,204. (in Chinese)