doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.007

仿蛇嘴咬合式柑橘采摘末端执行器设计与实验

王　毅[1,2]　许洪斌[1,2]　张　茂[2]　马冀桐[2]　刘　波[2]　何　宇[2]

(1.重庆大学机械工程学院,重庆 400044;2.重庆理工大学机械工程学院,重庆 400054)

摘要:提出了通过改进采摘机器人的末端执行器来实现未知柑橘果柄空间方位的柑橘采摘,以提高采摘机器人的采摘能力。对柑橘果柄生长情况进行了调研,定义了果柄倾角并进行了统计,对果柄极限位置的剪切要求进行了分析并得出了末端执行器的设计要求。根据蛇的咬合动作和蛇嘴骨骼的特殊结构,通过仿照蛇嘴结构设计咬合式末端执行器能够满足设计要求。对蛇头骨骼结构进行了简化,提出了两种设计思路,并据此分别设计了两种机构的初步模型,经过运动学分析确定了较优方案,并对初步模型进行了优化,确定了末端执行器的三维模型。根据三维模型建立了末端执行器的运动学模型,并进行了运动学分析和仿真,保证了机构设计合理。制造了咬合式末端执行器样机并通过课题组自行研制的柑橘采摘机器人进行了实验室环境和自然环境的实验验证。实验结果表明,在实验室环境下,果柄倾角为 0°、气压为 0.6 MPa、果柄直径不超过 4.0 mm 条件下的切断成功率不小于 95%,不同果柄倾角的总体切断成功率为 97.5%;在室外环境下,收获柑橘的总成功率为 87.5%,基本实现了未知果柄空间方位下对柑橘的采摘。

关键词:柑橘;采摘机器人;末端执行器;仿生学;咬合式;果柄倾角

中图分类号:S225.93　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2018)10-0054-11

Design and Experiment of Bite-model End-effector for Citrus Harvesting by Simulating with Mouth of Snake

WANG Yi[1,2]　XU Hongbin[1,2]　ZHANG Mao[2]　MA Jitong[2]　LIU Bo[2]　HE Yu[2]

(1. *College of Mechanical Engineering*, *Chongqing University*, *Chongqing* 400044, *China*

2. *College of Mechanical Engineering*, *Chongqing University of Technology*, *Chongqing* 400054, *China*)

Abstract: Aiming to improve the picking ability of the harvesting robot, a bite-model end-effector for citrus was designed. The design requirements of the end-effector were obtained by first investigation of the growth of citrus stem, the inclination of the stem and doing statistics was defined, and the shearing requirements of the stem extreme position was lastly analyzed. That the design of the bite-model end-effector can meet the design requirements by simulating the snake mouth structure which followed the snake's biting action and the special structure of the snake's mouth bones. Two design ideas were proposed by simplifying the structure of the snakehead skeleton. Based on this, the initial model of the two kinds of mechanism was designed respectively. After the preliminary kinematics analysis, the optimal scheme was determined and the initial model was optimized, and the three-dimensional model of the end-effector was determined. According to the three-dimensional model, the kinematics model of the end-effector was established, and the kinematics analysis and simulation were carried out to ensure the reasonable design of the mechanism. A bite-model end-effector prototype was manufactured, and then it was verified by the citrus harvesting robot developed by the research group in laboratory and outdoor environment. In laboratory environment, the experimental results showed that the cutting success rate was not less than 95% under the condition that the air pressure was 0.6 MPa, the inclination of the stem was 0°, the stem diameter was no more than 4.0 mm, and the overall cutting success rate for different stem inclinations was 97.5%. The total success rate of harvesting citrus in the outdoor environment was 87.5%.

Key words: citrus; harvesting robot; end-effector; bionics; bite-model; inclination of stem

收稿日期:2018-04-23　修回日期:2018-05-17

基金项目:重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztzx70003)、重庆市基础研究与前沿探索(一般)项目(cstc2018jcyjAX0071)和重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2016jcyjA0444)

作者简介:王毅(1981—),男,博士生,重庆理工大学副教授,主要从事智能农业机械研究,E-mail:wangyi@cqut.edu.cn

通信作者:许洪斌(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业机械、机械装备制造技术研究,E-mail:cqhb_dragon@163.com

0　引言

采摘机器人的概念于 1968 年由 SCHERTZ 和 BROWN 提出后，世界各国学者对采摘机器人纷纷开展了研究[1-2]。但是，由于采摘机器人缺乏强大的果实识别能力和精确采摘能力，目前为止仍然处在实验室阶段[1,3]。末端执行器作为采摘机器人的一个关键部件，直接对果蔬进行操作，对果蔬的成功采摘起着关键作用，直接影响采摘机器人的采摘能力。

当前对末端执行器的研究，大多针对大棚中生长的水果和蔬菜[4-11]，针对室外环境的研究较少。在大棚中生长的水果和蔬菜，其生长状态相对可控，对末端执行器的要求相对简单。在室外环境中生长的果蔬，如柑橘，其生长情况是随机的，对末端执行器要求更高。目前，末端执行器的采摘原理有利用剪刀剪断果柄[7,12]、通过 3 根或 4 根手指抓住果实扭断或切断果柄[7,13-14]以及通过机构夹持住果实再切断果柄[6,9,15]等。对于自然环境下生长的柑橘来说，果柄的生长方位是随机的，在自然环境下较难通过视觉系统精确判断每一个柑橘果实其果柄的空间方位信息。通过剪刀剪断果柄的方式由于果柄空间方位信息未知则难以准确切断果柄，通过手指扭断果柄的方式容易在果柄与果实分离时造成果实表皮破损，通过夹持果实的方式则容易造成果实表面淤伤等问题。因此，对于柑橘采摘机器人来说，有必要设计一款对果实表面损伤较小、未知柑橘果柄空间方位就能进行采摘的末端执行器，以提高柑橘采摘机器人的采摘能力。

本文基于仿生学原理，模拟蛇嘴的咬合动作及其结构设计仿蛇嘴的咬合式末端执行器，对末端执行器进行运动学分析和仿真，研制末端执行器样机并进行实验室环境和室外环境的实验验证。

1　仿蛇嘴咬合式末端执行器结构设计

1.1　仿蛇嘴咬合式末端执行器的设计目标和要求

为实现在未知柑橘果柄空间方位情况下就能对柑橘果实进行采摘这一技术要求，本文模拟动物吞食咬合动作来设计柑橘采摘末端执行器，即设计的末端执行器的形态类似于动物的嘴部结构，同样具有上下颚，通过类似于动物咬合的方式剪断果柄实现柑橘采摘。本文把这种具有上下颚咬合功能的末端执行器称之为咬合式末端执行器。

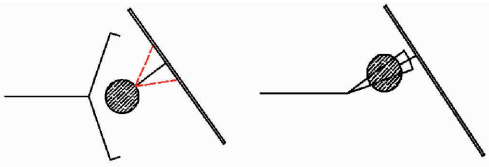
在众多生物中，蛇类的颚部骨骼与其他动物相比有着很大的不同，蛇类颚部骨骼的特殊结构使得蛇嘴能够扩张 3 倍，使得蛇能够捕食体积比自身还大的猎物[16-17]，这样的结构特点同样有利于吞咽果实，方便机器人采摘。受蛇嘴结构的启发，本文根据仿生学原理，仿照蛇嘴的结构设计采摘机器人末端执行器。

一般情况下，柑橘都是自然生长的，其果柄的生长方位也是杂乱无章的（图 1），而仿蛇嘴咬合式末端执行器的设计目标是在未知柑橘果柄空间具体方位的情况下通过末端执行器实现对柑橘果柄的剪切。通过观察与分析发现，对于咬合式末端执行器来说，在未知果柄空间方位的情况下剪断果柄的关键有两点：一是末端执行器张角足够大，足以包容任何生长方位的柑橘果柄而不与果柄发生碰撞（图 2a）；二是末端执行器能够在果柄生长范围内的任意角度实现咬合动作，从而实现对任意生长方位果柄的剪断（图 2b）。这要求末端执行器的张角要尽可能大，且其上下颚能够在果柄生长范围内的任意角度实现咬合动作。



图 1　柑橘果柄生长情况

Fig. 1　Growth condition of citrus stem



(a) 张角效果图　　(b) 咬合效果图

图 2　咬合式末端执行器剪切过程示意图

Fig. 2　Schematic diagrams of shearing process of bite-model end-effector

以上要求都和果柄与水平面在空间中的夹角有关，为更加清楚地描述柑橘果柄空间方位，定义柑橘果柄与水平面在空间中的夹角为果柄倾角 θ_{car}。针对果柄倾角的分布情况在某柑橘栽培基地进行了实地测量和统计，统计方式如图 3 所示，得到果柄倾角与果实密度的关系图，如图 4 所示，其中 μ 为倾角范围内的果实数所占百分比。

由图 4 可以发现，果柄倾角的范围分布较广，从 5°～90°都有分布，在 30°～90°范围分布较多，但无明显集中的区域。每 5°取一个采样点，在每个采样点附近的柑橘算作此采样点处的样本。通过分析还发现，当果柄倾角为 5°时，果柄接近水平位置，此时实现果柄的剪切较为容易，末端执行器只要能够顺



图 3 果柄倾角测量图

Fig. 3 Measurement diagram of stem inclination

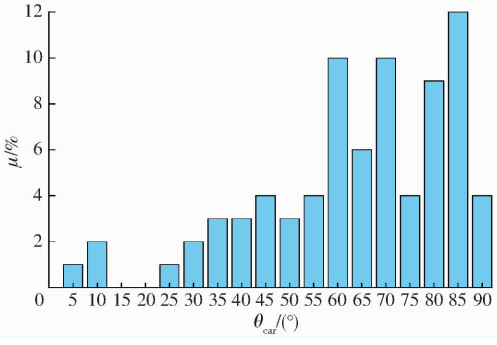


图 4 果柄倾角与果实密度直方图

Fig. 4 Histogram of relationship between inclination of stem and fruit density

利吞入果实并在水平位置附近咬合即可完成对果柄的剪切(图 5a)。倾角逐渐增大,末端执行器剪切的难度也随之逐渐增大,当倾角为 90°时,剪切难度达到最大(图 5b)。此时果柄与水平面垂直,若要求果柄在采摘前不与末端执行器发生碰撞,则要求末端执行器上颚同样也与水平面垂直,即要求末端执行器张角为 180°,在此位置能够实现咬合。

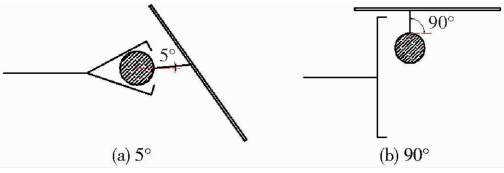


图 5 不同果柄倾角下末端执行器剪切情况

Fig. 5 End-effector shear condition at different stem inclinations

1.2 结构设计

1.2.1 蛇嘴咬合过程与蛇头骨结构分析

蛇嘴的咬合过程大致可分为对准、伸出、张嘴与咬合 4 个步骤(图 6)。咬合式末端执行器采摘果实时大致也分为这 4 个步骤,其中对准与伸出动作可由机械臂完成,而张嘴与咬合动作由咬合式末端执行器完成。

KARDONG 等[18]将蛇类中具有代表性的响尾蛇头部作为研究对象,发现蛇头部上颚各骨骼可组成一个封闭的机构,而下颚与上颚的运动则相对独立,蛇头骨骼结构如图 7a 所示。进一步对该结构进行简化,用连杆表示各骨骼,用铰链表示骨骼的连接部,将蛇头结构简化为一个通过各关节铰接的铰链



图 6 蛇嘴的咬合过程

Fig. 6 Snake bite process

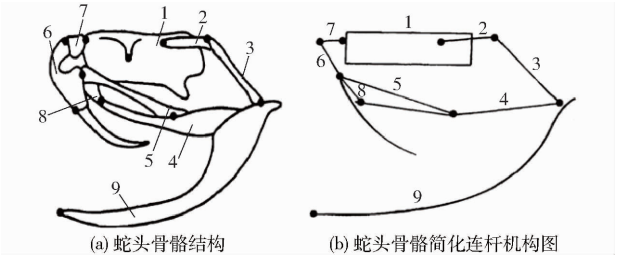


图 7 蛇头骨骼结构图[18]

Fig. 7 Snake head skeleton map [18]

1. 脑颅骨 2. 上颞骨 3. 方形骨 4. 翼状骨 5. 外翼状骨 6. 上颌骨 7. 前额 8. 上颚骨 9. 下颌骨

连杆机构,如图 7b 所示。

1.2.2 蛇头骨骼结构简化与仿蛇嘴咬合结构设计

根据末端执行器的设计目标和要求,对蛇头骨骼结构进行分析和简化。由图 7b 所示的蛇头骨骼简化连杆结构图可知,杆件 9(下颌骨)运动相对独立,杆件 8(上颚骨)和杆件 5(外翼状骨)均和杆件 6(上颌骨)及杆件 4(翼状骨)连接,连接关系上有一定的重叠。据此,本文提出 2 种设计思路:

(1)忽略杆件 8,蛇头骨骼的上颚部分可简化为如图 8a 所示的 7 连杆机构。

(2)忽略杆件 5,同时将杆件 6 与杆件 8 视为一个杆件,蛇头骨骼的上颚部分可简化为如图 8b 所示的 6 连杆机构。

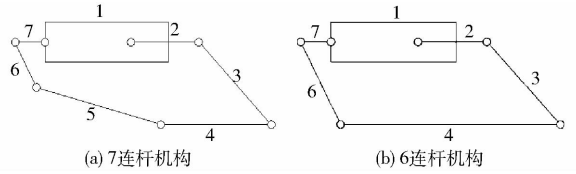


图 8 蛇头骨上颚部分简化机构图

Fig. 8 Simplified mechanisms of upper jaw part of snake skull

对设计思路(1)提出的 7 连杆机构进行分析,如图 8a 所示,共有 7 个杆件,同时有 7 个转动副,但没有确定活动构件数、原动件类型和数目。若确定一个杆件为机架,则剩下 6 个杆件为活动件,同时具有 7 个转动副,根据自由度计算公式

$$F = 3n - 2p_5 - p_4 \tag{1}$$

式中 F——自由度 n——活动构件数

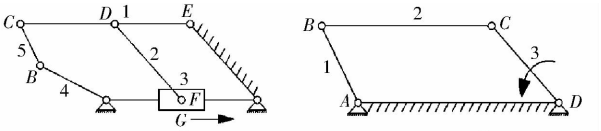
p_5——5 级平面低副数

p_4——4 级平面高副数

可计算得自由度为 4,而原动件不可能为 4 个,此机构运动不能确定。若确定两个杆件如杆件 4 和杆件

5 为机架，此时活动构件数为 5 个，但转动数也相应减少 1 个，变为 6 个，由式(1)计算得自由度为 3，运动同样不能确定。因此，必须对该结构进行一定的改进。

考虑到末端执行器的总重量不能超过机械臂的负重限制，末端执行器不能选用过重的设备和材料，因此选择动力输入设备为质量较小的气缸，则有输入为直线移动的直线气缸和输入为回转运动的手指气缸可供选择。将杆件 3 和杆件 4 铰接处的转动副改为移动副，作为直线气缸的输入，将杆件 3 带动此移动副提前至杆件 1 处，将杆件 7 和杆件 2 视为同一杆件，将杆件 4 和原杆件 3 视为机架，则有了改进后的上颚机构 a，如图 9a 所示。此机构共有 5 个活动构件，7 个平面低副，由式(1)计算得自由度为 1，由直线气缸作为原动件。



(a) 上颚机构a　　(b) 上颚机构b

图 9　改进后的上颚机构

Fig. 9　Improved upper jaw mechanisms

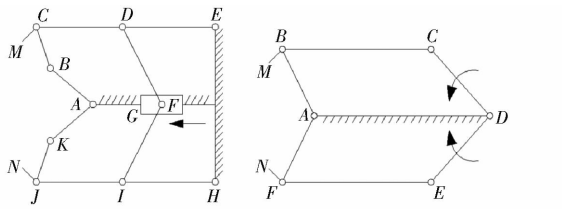
对设计思路(2)提出的 6 连杆机构进行分析，如图 8b 所示，若指定杆件 4 为机架，则有 5 个活动杆件和 6 个转动副，由式(1)计算得自由度为 3。若指定 2 个杆件如杆件 4 和杆架 3 为机架，则有 4 个活动杆件和 5 个转动副，由式(1)计算得自由度为 2，在只有一个原动件的条件下机构运动无法确定，同样需对该结构进行一定的简化和改进。

通过观察发现，构件 1 为蛇头的脑颅骨，而杆件 2 和杆件 7 均为连接脑颅骨的构件，这 3 个构件之间的相对运动对主要运动影响不大，于是将这 3 个构件简化为 1 个杆件，则蛇头骨骼机构可简化为 1 个平面四杆机构，为改进后的上颚机构 b，如图 9b 所示。确定杆件 4 为机架，则有 3 个活动件和 4 个转动副，由式(1)计算得自由度为 1，由手指气缸作为原动件。

1.2.3　咬合式末端执行器结构仿真

咬合式末端执行器要实现咬合剪断果柄，必须要上下颚以相同轨迹同时运动，而蛇头骨骼结构的下颚运动则相对独立，为保证剪切效果，本文对咬合式末端执行器的下颚采用与上颚相同且对称的机构，根据前文提出的两种设计思路，设计出咬合式末端执行器的两种机构，机构简图如图 10a 和图 10b 所示，机构运动仿真图如图 11 和图 12 所示。

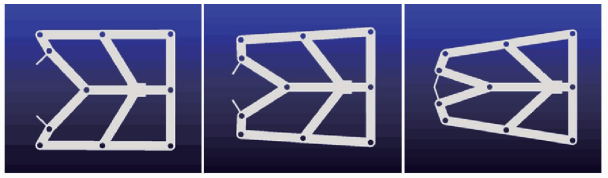
根据机构简图，结合柑橘尺寸，利用几何图形法对机构尺寸进行优化，在 Solidworks 软件中建立两



(a) 机构a　　(b) 机构b

图 10　咬合式末端执行器机构简图

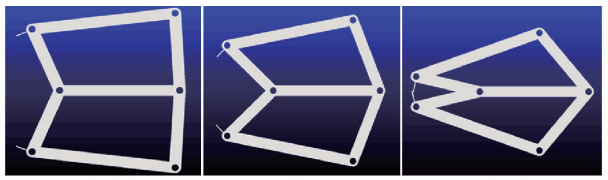
Fig. 10　Schematic diagrams of bite-model end-effector mechanism



(a) 初始状态　　(b) 剪切中　　(c) 最终状态

图 11　咬合式末端执行器机构 a 运动仿真图

Fig. 11　Motion simulation diagram of bite-model end-effector mechanism a



(a) 初始状态　　(b) 剪切中　　(c) 最终状态

图 12　咬合式末端执行器机构 b 运动仿真图

Fig. 12　Motion simulation diagram of bite-model end-effector mechanism b

种末端执行器的初步模型，如图 13 和图 14 所示。

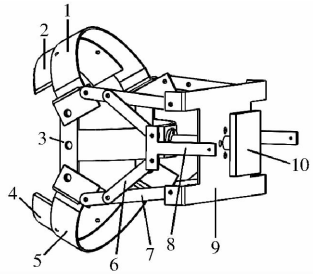


图 13　咬合式末端执行器初步模型 a

Fig. 13　Initial model a of bite-model end-effector

1. 上颚支架　2. 上颚刀片　3. 主架　4. 下颚刀片　5. 下颚支架　6. 传动杆　7. 支撑长杆　8. 动力推杆　9. 随动支撑钣金　10. 基座

将模型 a 和模型 b 导入 ADAMS 软件中进行初步运动分析，设置运动时间，分别导出两种模型的末端执行器执行咬合动作时上、下颚的速度与加速度变化曲线以及角速度与角加速度变化曲线，如图 15 和图 16 所示。

通过分析对比图 15、16，模型 a 在运动过程中上下颚刀片的速度、加速度、角速度和角加速度均存在突变，容易造成较大的冲击。而模型 b 的运动曲线除了启动瞬间，其余阶段均较为平稳，无明显突

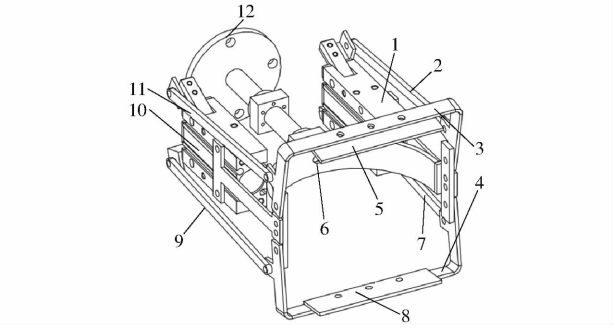


图 14 咬合式末端执行器初步模型 b

Fig. 14 Initial model b of bite-model end-effector

1、10. 手指气缸 2、7、9、11. 传动杆 3. 上颚 4. 下颚 5. 上刀片 6. 主架 8. 下刀片 12. 连接法兰

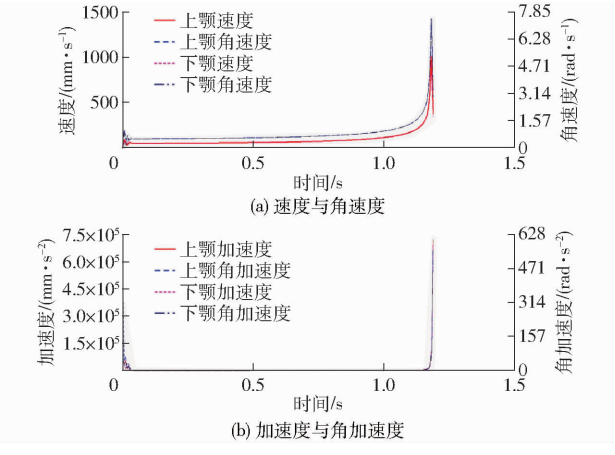


图 15 模型 a 上、下颚速度与角速度及加速度与角加速度变化曲线

Fig. 15 Changing curves of velocity and angular velocity, acceleration and angular acceleration of upper and lower jaws in model a

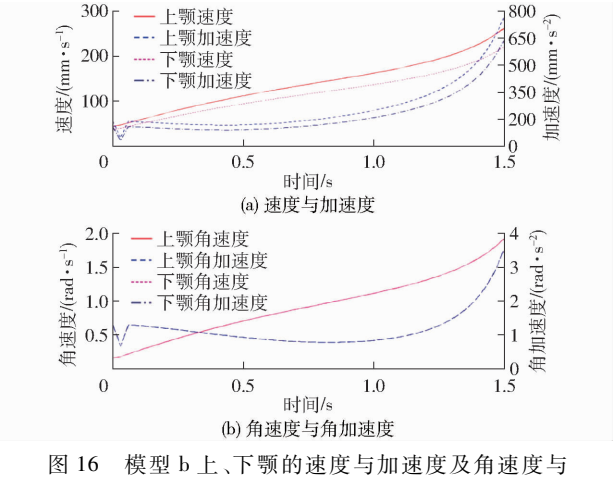


图 16 模型 b 上、下颚的速度与加速度及角速度与角加速度变化曲线

Fig. 16 Changing curves of velocity and acceleration, angular velocity and angular acceleration of upper and lower jaws in model b

变,具有较好的运动特性;比较 2 个模型的张角,模型 b 的张角明显比模型 a 的张角要大,更符合设计要求;同时模型 b 的结构更简单。经综合比较,根据模型 b 的结构设计咬合式末端执行器。

1.3 仿蛇嘴咬合式末端执行器机构建模

以图 14 所示的模型 b 为基础,对末端执行器机构进行细化。咬合式末端执行器的上、下颚分别为平面四杆机构,如图 10b 所示,点 B 处连接剪切刀片,杆 AB 为执行剪切动作的从动杆,杆 CD 为主动杆,杆 AD 为机架,杆 BC 为连架杆。选用 SMC MHY2 - 16D 型气动手指气缸为末端执行器动力源,安装在机架 AD 上,其尺寸参数见文献[19]。手指气缸的初始状态为手指与缸体平行,最终状态为手指与缸体垂直。而作为剪切杆件的从动杆,其初始状态为保证张角为 180°,需与机架垂直,最终的剪切状态为与机架平行的水平状态。据此,画出末端执行器连杆初始状态和最终剪切状态的机构图,如图 17 所示。

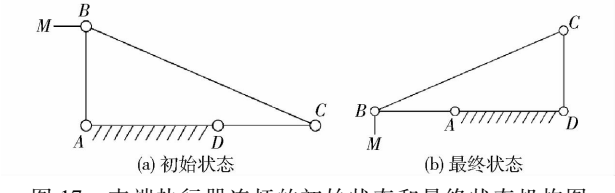


图 17 末端执行器连杆的初始状态和最终状态机构图

Fig. 17 Initial and final state mechanism diagrams of end-effector linkage

杆 AB 需要完全包络柑橘,因此杆 AB 长度需大于柑橘半径,但又不能过大致使无法剪切到果柄。经调研得到的柑橘实际尺寸,设定杆 AB 长度为 40 mm。同时根据手指气缸大小和柑橘直径确定机架 AD 长度为 75 mm,可计算出 CD 杆长为 40 mm,BC 杆长为 122 mm,同时根据果柄直径和工作实际确定其他零件尺寸,得出咬合式末端执行器三维模型,如图 18 所示。

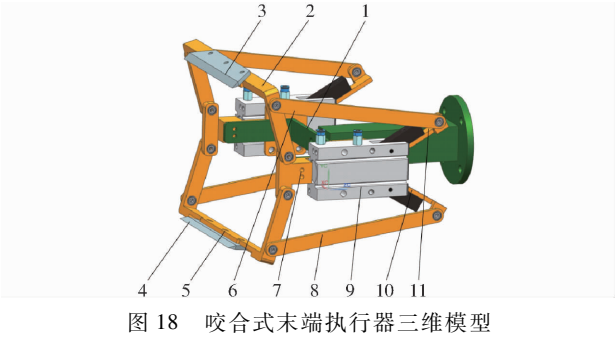


图 18 咬合式末端执行器三维模型

Fig. 18 Three-dimensional model of bite-model end-effector

1. 机架 2. 上颚支架 3. 上刀片 4. 下刀片 5. 下颚支架 6. 上颚连杆 7. 气缸支架 8. 下颚支架 9. 手指气缸 10. 下颚驱动杆 11. 上颚驱动杆

1.4 仿蛇嘴咬合式末端执行器机构优化

将末端执行器三维模型导入 ADAMS 软件进行

咬合剪切运动的仿真，在进行咬合动作时发现，由于果柄存在倾角，上颚会先于下颚接触果柄，而上颚在接触果柄后，由于作为动力源的手指气缸的两个手指为同时运动，上颚接触果柄后不再运动，使连接上颚的手指停下，从而使连接下颚的手指也停下，造成下颚也停止运动，无法形成咬合剪切动作，造成剪切果柄失败。咬合动作仿真图如图 19 所示。

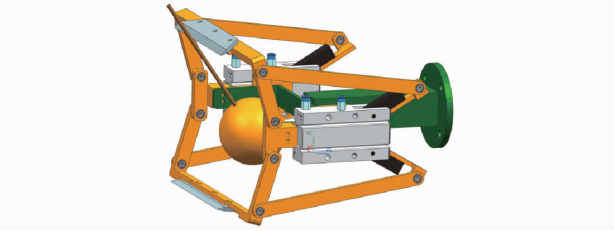


图 19　模型咬合动作仿真图

Fig. 19　Simulation diagram of model bite motion

仔细分析蛇头骨骼机构，发现蛇头骨骼的下颚部分与上颚的运动相对独立，能够保证上颚在咬住猎物的同时下颚继续运动形成咬合。对比所设计的末端执行器，上下颚的运动完全同步是造成无法咬合的主要原因。将咬合机构与主架的连接由两颗螺钉连接变为一个轴承连接，可释放咬合机构自行运动的自由度。自由度释放后，由于重力作用，手指气缸会带动咬合机构沿此轴承形成摆动，同时在主架上增加一个挡块形成限制摆动的位置。根据前期研究成果，采摘姿态在 45° 左右时有较好的采摘效果，调整挡块位置，将摆动的角度限定在 45°，可具有较好的采摘效果。优化后的末端执行器三维模型如图 20 所示。

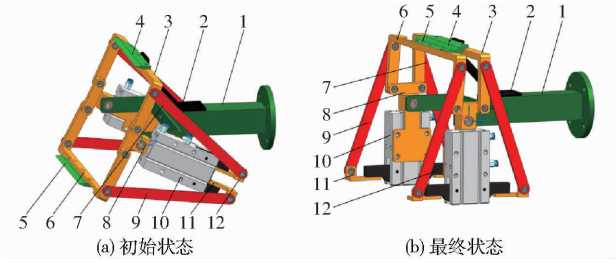


图 20　优化后的末端执行器三维模型

Fig. 20　Three-dimensional model of optimized end-effector

1. 机架　2. 挡块　3. 上颚支架　4. 上刀片　5. 下刀片　6. 下颚支架　7. 上颚连杆　8. 气缸支架　9. 下颚支架　10. 手指气缸　11. 下颚驱动杆　12. 上颚驱动杆

2　仿蛇嘴咬合式末端执行器运动分析

2.1　平面模型的建立

根据末端执行器的三维模型，建立末端执行器的平面连杆机构模型，如图 21 所示，两个相同的四连杆机构带动刀片作为咬合式末端执行器的上下颚执行剪切咬合动作，两个四杆机构共用机架和动力源。

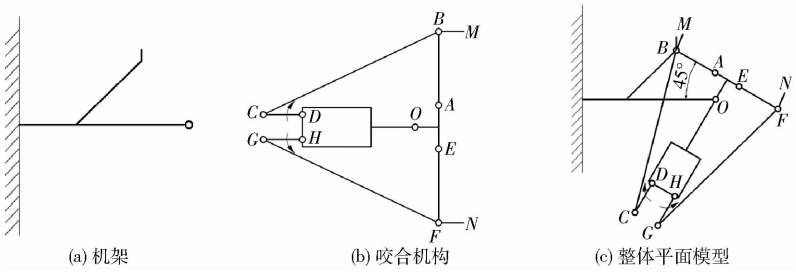


图 21　末端执行器平面连杆机构模型

Fig. 21　Model of end-effector plane link mechanism

2.2　咬合式末端执行器上颚运动学分析

由 2.1 节可知，设计的末端执行器是由两个相同的四连杆机构组成的咬合机构和机架构成，咬合机构能够在机架上转动，M 点和 N 点为上、下颚刀尖，M 和 N 点重合时即对果柄进行剪切，M 点和 N 点一方面由气缸驱动进行剪切运动，另一方面随同咬合机构在重力作用下进行旋转运动，为两个运动的合成。由于 M 点和 N 点的运动过程类似，仅列出 M 点的计算方程。

首先考虑咬合机构在气缸驱动下进行剪切运动时 M 点的运动特性，图 22 所示为咬合机构上半部分机构图，CD 杆为原动件。

以角速度 ω 驱动四连杆机构运动，其加速度为 ε，则有

$$\alpha = \omega t \tag{2}$$

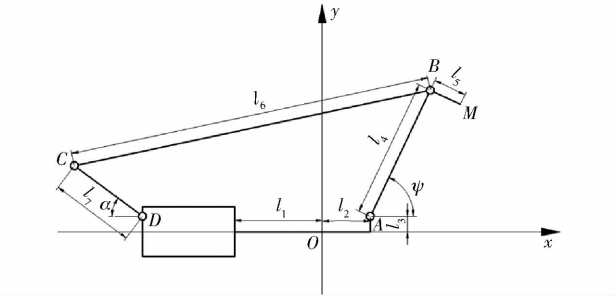


图 22　咬合机构上颚部分机构简图

Fig. 22　Upper jaw mechanism sketch of occlusion mechanism

式中　α——CD 轴与 x 反方向的夹角

t——运动时间

根据前文设计要求，有

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \omega t \tag{3}$$

式中 ψ——杆 AB 与 x 轴的夹角

则 B 点位移为

$$x_B = l_4\cos\psi + l_2 \tag{4}$$

$$y_B = l_4\sin\psi + l_3 \tag{5}$$

式中 x_B、y_B——B 点在 x、y 轴方向位移

l_2——A 点距原点的 x 轴方向距离

l_3——A 点距原点的 y 轴方向距离

l_4——杆 AB 的长度

B 点速度为

$$v_{B_x} = \dot{x}_B = -l_4\dot{\psi}\sin\psi = l_4\omega\sin\psi \tag{6}$$

$$v_{B_y} = \dot{y}_B = l_4\dot{\psi}\cos\psi = -l_4\omega\cos\psi \tag{7}$$

式中 v_{B_x}、v_{B_y}——B 点在 x、y 轴方向速度

$\dot{\psi}$——杆 AB 的角速度

B 点加速度为

$$a_{B_x} = \ddot{x}_B = l_4(\varepsilon\sin\psi - \omega^2\cos\psi) \tag{8}$$

$$a_{B_y} = \ddot{y}_B = -l_4(\varepsilon\cos\psi + \omega^2\sin\psi) \tag{9}$$

式中 a_{B_x}、a_{B_y}——点 B 在 x、y 轴方向的加速度

ε——杆 CD 的初始加速度

则由 B 点的运动学方程可求出 M 点的运动学方程，M 点位移为

$$x_M = x_B + l_5\sin\psi \tag{10}$$

$$y_M = y_B - l_5\cos\psi \tag{11}$$

式中 x_M、y_M——点 M 在 x、y 轴方向的位移

l_5——杆 BM 的长度

M 点速度为

$$v_{M_x} = \dot{x}_M = v_{B_x} - l_5\omega\cos\psi \tag{12}$$

$$v_{M_y} = \dot{y}_M = v_{B_y} - l_5\omega\sin\psi \tag{13}$$

式中 v_{M_x}——点 M 在 x 轴方向的速度

v_{M_y}——点 M 在 y 轴方向的速度

M 点加速度为

$$a_{M_x} = \ddot{x}_M = a_{B_x} - l_5(\varepsilon\cos\psi + \omega^2\sin\psi) \tag{14}$$

$$a_{M_y} = \ddot{y}_M = a_{B_y} - l_5(\varepsilon\sin\psi - \omega^2\cos\psi) \tag{15}$$

式中 a_{M_x}——点 M 在 x 轴的加速度

a_{M_y}——点 M 在 y 轴的加速度

再考虑咬合机构在重力作用下进行旋转运动的运动特性，如图 23 所示为咬合机构在机架上转动示意图，将咬合机构视为一个整体，其质心为 P，质量为 m，质心距原点 O 的距离为 l，质心 P 与原点 O 的连线与 y 轴的夹角为 α'，则在开始咬合动作的时间为 t，ω'为机架在 t 时间内转动的角速度，ε'为机架在 t 时间内转动的角加速度，则有

$$\begin{cases}\omega' = \dfrac{\mathrm{d}\alpha'}{\mathrm{d}t}\\ \varepsilon' = \dfrac{\mathrm{d}\omega'}{\mathrm{d}t}\end{cases} \tag{16}$$

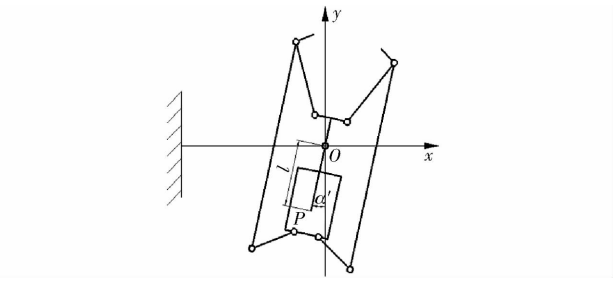


图 23 咬合机构在机架上转动示意图

Fig. 23 Schematic diagram of occlusion mechanism rotating on frame

其势能 V 为

$$V = mgl(1 - \cos\alpha') \tag{17}$$

式中 g——重力加速度

动能 T 为

$$T = \frac{1}{2}J_C\omega'^2 = \frac{1}{2}ml^2\omega'^2 \tag{18}$$

式中 J_C——咬合机构绕 O 点旋转的转动惯量

根据机械能守恒定律，有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(V + T) = 0 \tag{19}$$

将式(17)、(18)代入式(19)，有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[mgl(1 - \cos\alpha') + \frac{1}{2}ml^2\omega'^2\right] = 0 \tag{20}$$

则有

$$mgl\sin\alpha'\frac{\mathrm{d}\alpha'}{\mathrm{d}t} + ml^2\omega'\frac{\mathrm{d}\omega'}{\mathrm{d}t} = 0 \tag{21}$$

解得

$$\varepsilon' = -\frac{g\sin\alpha'}{l} \tag{22}$$

对 ε'进行时间的积分，可得

$$\omega' = \int_0^t \varepsilon'\mathrm{d}t = \frac{g}{l}\cos\alpha' t \tag{23}$$

由于 α'的初始值为 45°，则有

$$\alpha' = \frac{\pi}{4} - \omega' t = \frac{\pi}{4} - \frac{g}{l}\cos\alpha' t^2 \tag{24}$$

式(24)为 α'关于时间 t 的函数，对应每一个时间即有确定的 α'，即可确定咬合机构在重力下旋转的运动规律。

最后考虑两个运动的合成。机架坐标系为 x_aOy_a 坐标系，咬合机构坐标系为 x_bOy_b 坐标系，咬合机构在机架上的运动即为咬合机构坐标系在机架坐标系中的运动，如图 24 所示。

由于咬合机构上下完全对称，其质心在 x_bOy_b 坐标系的 x 轴上，因此 α'为 x_bOy_b 坐标系的 x 轴与 x_aOy_a 坐标系的 y 轴的夹角，x_bOy_b 坐标系可认为是 x_aOy_a 坐标系绕 z 轴旋转了 θ，则同一矢量由 x_bOy_b 坐标系转换到 x_aOy_a 坐标系的转换关系为[21]

$$\boldsymbol{P}_a = \boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_b \tag{25}$$

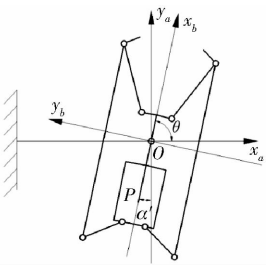


图 24　咬合机构在机架上的运动合成示意图

Fig. 24　Schematic diagram of movement of occlusion mechanism on frame

其中

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta & 0\\ \sin\theta & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{26}$$

$$\theta=\frac{\pi}{2}-\alpha' \tag{27}$$

式中　$\boldsymbol{P}_a$——x_aOy_a 坐标系中的矢量

$\boldsymbol{P}_b$——x_bOy_b 坐标系中的矢量

$\boldsymbol{R}$——x_bOy_b 坐标系相对于 x_aOy_a 坐标系的表达

根据式(14)、(15)、(24)、(25)，即可求出 M 点在 x_aOy_a 坐标系中的运动规律。

2.3　咬合式末端执行器上下颚运动学仿真

2.3.1　运动学参数仿真结果

将优化后的末端执行器三维模型导入 ADAMS 软件，并设置约束条件和驱动，分别导出末端执行器动作时上、下颚的位移、速度和加速度曲线，如图 25 所示。

由图 25 可以看出，下颚位移比上颚大，上、下颚速度和加速度变化基本同步，但下颚速度大于上颚速度，剪切瞬间下颚加速度变化较为剧烈，这都与咬合机构在机架上的运动合成和剪切瞬间的碰撞有关，与预期基本相符。

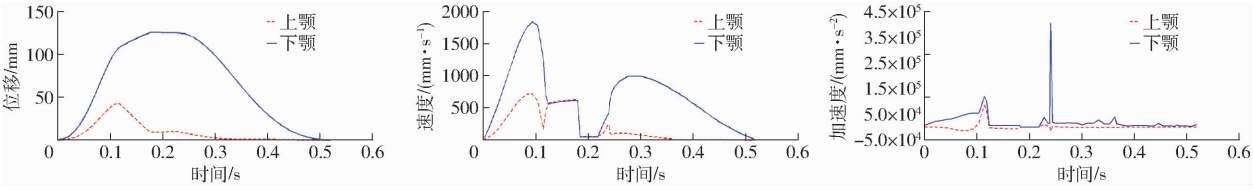


图 25　上、下颚的位移、速度和加速度曲线

Fig. 25　Displacement, velocity and acceleration curves of upper and lower jaws

2.3.2　完整咬合周期运动学仿真

通过 ADAMS 软件对末端执行器模型进行完整剪切周期的运动学仿真，仿真效果如图 26 所示，由图可以看出，末端执行器开始剪切任务后，先完成剪切运动、再完成旋转运动，完成旋转运动后剪切机构与机架垂直，机构复位运动顺利，整个运动过程平稳无干涉现象，能够顺利完成剪切周期的剪切动作和复位动作。

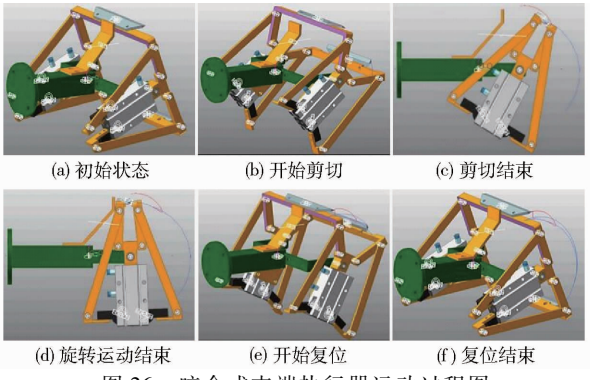


图 26　咬合式末端执行器运动过程图

Fig. 26　Movement process diagram of bite-model end-effector

3　末端执行器制作与实验

3.1　实验平台搭建

根据分析结果制作末端执行器，图 27 为末端执行器俯视图与左视图。

将末端执行器安装在课题组自行研制的柑橘采摘机器人上进行实验验证。柑橘采摘机器人的控制系统框图如图 28 所示，该系统基于机器人操作系统(Robot operation system，ROS)在 Ubuntu 操作系统下为机械臂和末端执行器搭建运动控制系统，同时基于 QT 开发平台搭建双目视觉平台，机械臂选用敖博(北京)智能科技有限公司研制的 AUBO－i5 型六自由度机械臂。工作原理为视觉平台利用 OpenCV 3.2.0 视觉开源库对柑橘进行识别，基于双目立体视觉原理，计算出柑橘表面形心在机械臂坐标系的三维坐标，完成柑橘果实的定位。上位机利用 ROS 软件开发平台，接收视觉系统提供的果实空间信息后，对机械臂进行运动学求解、完成场景规划、运动规划等工作。由驱动接口将 ROS 输出的数据通过 CAN 总线发送给驱动器，由驱动器驱动电动机转动完成机械臂的运动。机械臂上的传感器将采集的位置、速度等信息实时反馈给上位机，上位机根据反馈

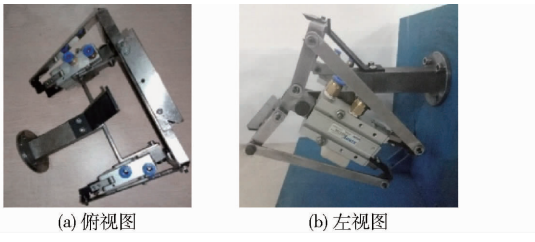


图 27　末端执行器

Fig. 27　End-effector prototype

信息与根据逆运动学求解所得的各关节值进行比较,判断机械臂当前位置是否处于终点位置,进而通过串口发送控制信号给下位机 Arduino,通过 Arduino 实现对末端执行器的咬合控制。

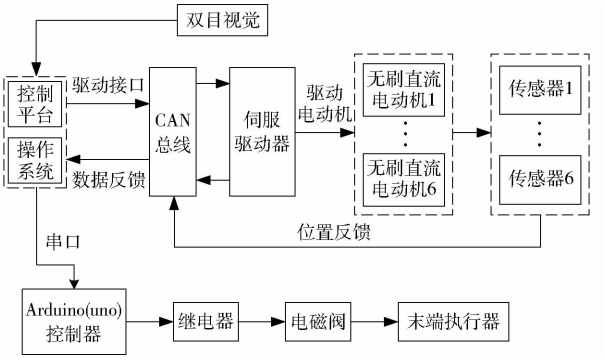


图 28 采摘机器人控制系统框图

Fig. 28 Control system block diagram of picking robot

末端执行器驱动系统的构成元件主要包括气动三联件、电磁阀、节流阀、执行气缸以及空气压缩机等,具体见图 29。

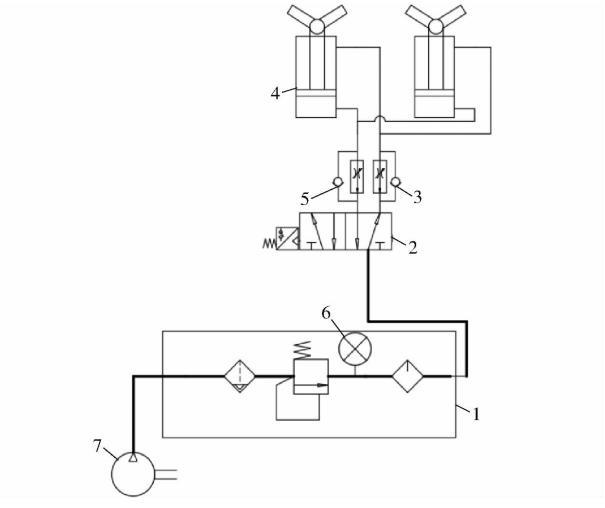


图 29 柑橘采摘末端执行器驱动气路

Fig. 29 Pneumatic driving of end-effector

1. 气动三联件 2. 电磁阀 3、5. 调速阀 4. 手指气缸 6. 压力表 7. 空气压缩机

在执行器作业过程中,控制系统需要同时完成执行器两个执行气缸的控制,以期执行末端执行器的咬合动作,从而切断柑橘果柄,完成收获任务。采用 Arduino 作为电磁阀的控制芯片,将其接入 ROS 软件开发平台,完成执行器的硬件系统搭建。

实验平台搭建完成后的柑橘采摘机器人如图 30 所示。

3.2 实验室环境下实验与结果分析

3.2.1 果柄倾角为 0°时的实验结果与分析

根据柑橘果柄生长的实际情况,将柑橘果柄直径按每间隔 0.5 mm 为一组分为 6 个组,分别进行实验。同时,由于剪切的动力由气压系统提供,而气压

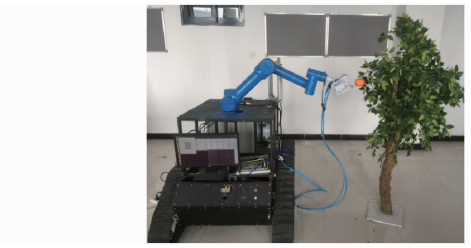


图 30 柑橘收获机器人实验平台

Fig. 30 Citrus harvesting robot experiment platform

系统能够提供的气压总是在一个范围内波动,本文同时也对气压大小与采摘成功率的关系进行了实验,由于选用的 SMC MHY2 - 16D 型气动手指气缸的操作压力为 0.1 ~ 0.6 MPa,因此将气压系统提供的气压以 0.1 MPa 为间隔,从小于 0.4 MPa 到等于 0.6 MPa 分为 4 组,对不同的柑橘果柄直径分别进行实验,共进行了 24 组实验,每组剪切相应直径的果柄 20 次,统计一次性切断果柄的成功率,结果如表 1 所示。

表 1 不同直径区间的果柄在不同气压范围内的切断成功率

Tab. 1 Success rate of fruit stem cutting with different diameters in different pressure ranges %

气压/MPa	果柄直径/mm					
	[0, 2.0)	[2.0, 2.5)	[2.5, 3.0)	[3.0, 3.5)	[3.5, 4.0)	≥4.0
0.6	100	100	100	100	95	90
[0.5,0.6)	100	100	85	95	85	10
[0.4,0.5)	100	100	90	90	10	0
[0,0.4)	95	100	80	25	0	0

实验结果表明,当果柄倾角为 0°、气压系统提供压力为 0.6 MPa、果柄直径不超过 4.0 mm 时,切断成功率不小于 95%。根据调查统计结果,一般柑橘果柄直径均不超过 4.0 mm,即本文设计的咬合式末端执行器在执行实际收获任务时,具有较好的切断成功率,能够较好地完成收获的切断任务。

3.2.2 不同果柄倾角的实验结果与分析

由统计数据得知,果柄倾角分布范围较广,因此将果柄倾角(0,90°]的分布范围按照 15°间隔分为 6 个组,即(0°,15°]、(15°,30°]、(30°,45°]、(45°,60°]、(60°,75°]、(75°,90°],分别进行剪切实验,根据上节实验结果,剪切时气压设定为 0.6 MPa,果柄直径不超过 4 mm,每组实验 20 次,统计每组成功率如表 2 所示,计算得总体成功率为 97.5%。

3.3 室外环境下实验与结果分析

课题组于 2018 年 3 月在重庆某果园内进行了室外环境的采摘实验,实验环境如图 31 所示,末端执行器作业过程如图 32 所示,由于受到条件限制,

表 2　不同果柄倾角的剪断成功率

Tab. 2　Shear success rate of different inclinations of stem

%

	果柄倾角/(°)					
	(0,15]	(15,30]	(30,45]	(45,60]	(60,75]	(75,90]
成功率	100	100	100	100	90	95

共对 40 个自然生长的柑橘果实进行了采摘实验，采摘前首先对每个柑橘的果柄直径、果柄倾角、果实纵、横径等具体参数进行了测量，每个柑橘的具体参数和采摘结果如表 3 所示。



图 31　室外实验环境

Fig. 31　Outdoor experiment environment



图 32　末端执行器采摘作业过程图

Fig. 32　Process diagram of end-effector picking operation

由实验结果可以看出，对于果柄倾角较大或较小的柑橘，使用本文设计的咬合式末端执行器进行采摘时切断成功率仍然有待提高，对于果柄倾角在中间部分的柑橘，则有比较好的切断成功率。室外实验的总体成功率达 87.5%，比实验室环境下实验的成功率有所降低，但基本可以实现在未知柑橘果柄方位下对柑橘的采摘。

4　结论

(1)提出了通过模拟蛇嘴结构设计咬合式末端执行器来实现未知柑橘果柄空间方位下对柑橘进行采摘，增强了采摘机器人的采摘能力。

(2)对柑橘果柄生长情况进行了调研，定义了果柄倾角并进行了统计，对果柄极限位置的剪切要求进行了分析，并得出了末端执行器的设计要求，一是咬合式末端执行器的张角尽可能大，二是咬合式末端执行器上下颚能够在果柄生长范围内的任意角度实现咬合动作。

(3)对蛇头骨骼的结构进行了简化，提出了两种设计思路，分别设计了机构初步模型，经过分析确定了较优方案并进行了优化和运动学分析，根据三维模型制作了咬合式末端执行器样机。

(4)在实验室环境和自然环境下分别进行了采摘实验。在实验室环境下，果柄倾角为 0°，气压为

表 3　室外采摘实验数据及结果

Tab. 3　Outdoor picking experimental data and results

编号	果柄直径/mm	果柄倾角/(°)	果实纵径/mm	果实横径/mm	实验结果
1	2.10	80	45	56	失败
2	2.50	83	53	65	成功
3	2.90	46	48	57	成功
4	2.80	75	50	60	成功
5	2.20	58	45	54	成功
6	2.70	51	49	58	成功
7	2.10	47	47	55	成功
8	2.80	67	52	59	成功
9	2.70	67	47	55	成功
10	3.10	61	46	58	成功
11	2.13	46	53	56	成功
12	3.15	44	53	65	成功
13	2.63	75	48	57	成功
14	2.15	73	50	60	成功
15	2.43	68	45	54	成功
16	2.73	48	49	58	成功
17	2.40	81	56	59	成功
18	2.70	73	53	63	成功
19	2.50	85	59	59	失败
20	3.20	72	45	59	失败
21	3.07	55	65	55	成功
22	3.44	43	56	63	成功
23	2.57	67	68	58	成功
24	2.63	35	59	57	成功
25	2.79	34	60	63	成功
26	3.56	72	60	62	失败
27	2.86	46	60	64	成功
28	2.69	77	62	65	成功
29	3.16	22	60	60	成功
30	3.20	28	61	66	成功
31	2.75	49	68	67	成功
32	3.07	27	66	66	失败
33	2.33	8	67	63	成功
34	2.63	63	67	66	成功
35	2.03	82	60	67	成功
36	3.20	35	64	65	成功
37	3.94	58	61	67	成功
38	2.48	40	61	64	成功
39	4.82	31	65	65	成功
40	2.57	45	68	65	成功

0.6 MPa、果柄直径不超过 4.0 mm 条件下的切断成功率不小于 95%;对于不同倾角果柄,总体切断成功率为 97.5%。在自然环境下,柑橘采摘总体成功率为 87.5%。实验结果表明,本文设计的咬合式末端执行器能够实现未知柑橘果柄空间方位下的柑橘采摘。

参 考 文 献

1 ZHAO Y, GONG L, HUANG Y, et al. A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 311 – 323.

2 BAC C W, ROORDA T, RESHEF R, et al. Analysis of a motion planning problem for sweet pepper harvesting in a dense obstacle environment[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 85 – 97.

3 BECHAR A, VIGNEAULT C. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 94 – 111.

4 ZHONG H, NOF S Y, BERMAN S. Asynchronous cooperation requirement planning with reconfigurable end-effectors[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 34: 95 – 104.

5 WANG G H, YU Y B, FENG Q C. Design of end-effector for tomato robotic harvesting[C]// 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture, 2016: 190 – 193.

6 KONDO N, YATA K, LIDA M, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1): 20 – 24.

7 JIA B Z, ZHU A M, YANG S X, et al. Integrated gripper and cutter in a mobile robotic system for harvesting greenhouse products[C]// Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009:1778 – 1783.

8 LI J, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Characterizing apple picking patterns for robotic harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 633 – 640.

9 LIU J Z, LI Z G, WANG F Y, et al. Hand-arm coordination for a tomato harvesting robot based on commercial manipulator[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013:2715 – 2720.

10 韩绿化,毛罕平,缪小花,等. 基于穴盘苗力学特性的自动取苗末端执行器设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 260 – 265. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131144&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.044.
HAN Lühua, MAO Hanping, MIAO Xiaohua, et al. Design of automatic picking up seedling end-effector based on mechanical properties of plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11):260 – 265. (in Chinese)

11 刘继展,李茂, 李男,等. 草莓穴盘苗移栽末端执行器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11):49 – 58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20161107&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.007.
LIU Jizhan, LI Mao, LI Nan, et al. Design and test of end-effector for automatic transplanting of strawberry plug seedlings[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):49 – 58. (in Chinese)

12 陈燕,蒋志林,李嘉威, 等.夹剪一体的荔枝采摘末端执行器设计与性能试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(1):35 – 41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180104&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.004.
CHEN Yan, JIANG Zhilin, LI Jiawei, et al. Design and testing of litchi picking end-effector integrated clamping and cutting performance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(1):35 – 41. (in Chinese)

13 DAVIDSON J R, SILWAL A, HOHIMER C J, et al. Proof-of-concept of a robotic apple harvester[C]// 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016:634 – 639.

14 李建伟,陈艳艳, 苹果采摘机器人末端执行器的原理及试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(9):139 – 142.
LI Jianwei, CHEN Yanyan. Structural principle and experimental research on the end effector of apple picking robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(9): 139 – 142. (in Chinese)

15 尹建军,陈永河,贺坤, 等, 抓持旋切式欠驱动双指手葡萄采摘装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017,48(11): 12 – 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20171102&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.002.
YIN Jianjun, CHEN Yonghe, HE Kun, et al. Design and experiment of grape-picking device with grasping and rotary-cut type of underactuated double fingered hand[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 12 – 19. (in Chinese)

16 刘子娟,费健,付庄,等, 仿生蛇嘴的机构原理与设计[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(增刊 1):478 – 482.
LIU Zijuan, FEI Jian, FU Zhuang, et al. Mechanical principle and design of bionic snake mouth[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011,42(Supp.1): 478 – 482. (in Chinese)

17 FRAZZETTA T H. Studies on the morphology and function of the skull in the Aoidae (Serpentes). Part II. morphology and function of the jaw apparatus in *Phython sebae* and *Python molurus*[J]. Morph, 1966, 118:217 – 296.

18 KARDONG K V, DULLEMEIJER P, FRANSEN J A M. Feeding mechanism in the rattlesnake crotalus durissus[J]. Amphibia-Reptilia, 1986, 7(3):271 – 302.

19 SMC 中国[EB]. http://www.smc.com.cn/PDF/subchoice03.htm.

20 张哲,王毅,付瞬,等.基于咬合型末端执行器的柑橘采摘机器人采摘姿态研究[J]. 中国农业科技导报,2018,20(5):75 – 82.
ZHANG Zhe, WANG Yi, FU Shun, et al. Study on the picking posture of the citrus harvesting robot based on occlusal end-effector[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018,20(5):75 – 82. (in Chinese)

21 CRAIG J J. 机器人学导论[M]. 3 版. 负超,译. 北京:机械工业出版社,2006.