

# 多柔性指滚筒菠萝采收机构工作原理及设计

刘天湖<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 曾霆俊<sup>1</sup>, 齐龙<sup>1</sup>, 赵文锋<sup>2</sup>, 程一丰<sup>1</sup>, 张迪<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642)

**摘要:** 菠萝机械化收获的研究目前处于初期阶段。该研究设计了一种多柔性指滚筒菠萝采收机构, 模拟人工采收方式形成折断力矩使水果与植株分离。首先, 提出一种通过两组柔性指与菠萝作用形成折断力矩使菠萝花萼处脱落层断裂的采收方法, 并测量了该采收方法下脱落层的折断力矩; 其次基于柔性指与菠萝作用时产生大变形的特点, 确定了以伪刚体模型表征柔性指大变形的的方法; 根据采收机构模型和菠萝物理、力学特性建立了采收力学模型, 确定了菠萝临界损伤条件下的收获评价函数, 并基于所建立的模型求出了采收机构的最佳结构参数和收获可能性区域。最后, 结合理论分析试制了样机进行台架试验, 试验结果表明: 当菠萝处于收获可能性区域内时, 两滚筒相对倾角为 35°, 左侧柔性指长度为 120 mm、相邻两指间隙为 30 mm, 右侧柔性指长度为 150 mm、相邻两指间隙为 10 mm 的采收机构能成功采收菠萝, 收获率为 85%, 损伤率为 5%, 单个果实平均采收时间约为 1 s。该研究结果可用于指导双柔性指滚筒菠萝采收机构的开发。

**关键词:** 农业机械; 试验; 菠萝收获; 柔性指; 滚筒

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.003

中图分类号: S229.53

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-08-0021-06

刘天湖, 刘伟, 曾霆俊, 等. 多柔性指滚筒菠萝采收机构工作原理及设计[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 21-26.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.003 <http://www.tcsae.org>

Liu Tianhu, Liu Wei, Zeng Tingjun, et al. Working principle and design of the multi-flexible fingered roller pineapple harvesting mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 21-26. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.08.003 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

水果的生产成本高, 收获严重依赖人工。由于人工收获的成本增加, 水果收获机械化变得越来越重要<sup>[1]</sup>。使用快速、高效的收获系统可降低收获成本<sup>[2-3]</sup>, 各国对果蔬收获机械展开了广泛的技术研究<sup>[4-8]</sup>。

菠萝在热带农业经济作物中占据着重要地位<sup>[9]</sup>, 是仅次于香蕉和芒果的第三大热带水果。目前菠萝收获机械化的研究还处于初期阶段<sup>[10]</sup>。部分研究者针对菠萝的识别、定位<sup>[11-12]</sup>和采摘末端执行器做了研究<sup>[13-15]</sup>, 对于菠萝收获过程中的水果与植株分离的关键环节研究主要集中在切割菠萝植株茎秆上, 结果表明切割茎秆方式可以轻松采摘菠萝, 但是切割器需要准确定位菠萝的茎秆位置, 此方法采摘效率较低且目前没有较好的方法在避免伤害植株的同时准确切割茎秆。研究如何在减少菠萝损伤的情况下提高菠萝的采收效率十分必要。

本文基于菠萝具有椭球几何形状、坚硬的蜡质果皮等生物特性, 设计了多柔性指滚筒菠萝批量采收机构, 并以神湾菠萝为收获对象进行了相关试验。该采收机构模拟人工掰折菠萝的收获方式, 通过倾斜的两对柔性橡胶指与菠萝作用提供折断力矩实现水果与植株分离。

## 1 菠萝物理特性与力学特性测量

### 1.1 菠萝果实和植株物理特性

根据联合国欧洲经济委员会<sup>[9]</sup>制定的标准, 菠萝成熟度分为 5 个阶段定义为 C0、C1、C2、C3、C4 阶段, C0 阶段表皮无黄色, C1 阶段表皮包含 0~25%黄色, 成熟度以 25%表皮黄色依次递增, C4 阶段表皮包含 75%~100%黄色。2021 年 10 月, 于广东省中山市神湾镇, 采用随机选择的方法测量了菠萝的大小(直径, 长度)和株高, 所选取的样本均无虫害且种植间隙合理。从统计数据中可知菠萝株高分布比较分散, 最大值为 930 mm, 大部分集中在 650~850 mm 之间。菠萝果实的大小分布比较集中, 直径和长度最大值分别为 142 mm、152 mm, 直径集中在 100~110 mm 之间, 长度主要集中在 120~150 mm 之间。

### 1.2 菠萝花萼处脱落层的力学特性

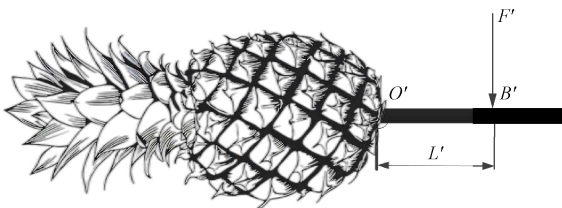
水果一般存在 4 个脱落区<sup>[16]</sup>, 脱落层位于脱落区, 脱落层的存在使果实与植株更容易分离。结合切割器定位难, 且容易损伤植株等特点, 该论文设计的采收装置的收获方式主要模拟人工采摘, 即给菠萝花萼处脱落层提供力矩使菠萝与植株分离。因此需要测量水果花萼处脱落层断裂所需的力矩。从广东省中山市神湾镇菠萝种植园随机选取了 100 株成熟度为 C1 和 C2 阶段的整株菠萝, 运输过程采用保鲜膜包覆, 以减少运输过程中果实花萼处脱落层横向受力。所有试验均在 20~25 °C 的室温范围于一天内进行, 试验前所有果实均打好标签。

收稿日期: 2021-01-20 修订日期: 2021-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175229)

作者简介: 刘天湖, 博士, 副教授, 研究方向为水果机械化采收, 采摘机器人。Email: liuparalake@scau.edu.cn

试验在微机控制电子万能试验机上进行,精度±0.5%,分辨率为1/500 000,由微机自动控制加载与卸载,并自动完成数据采集。试验前,果实分为两组,每组50个,一组成熟度区间为C1(表皮0~25%黄色),另一组成熟度区间为C2(表皮25%~50%黄色)。菠萝的一端固定在夹具上,夹紧后各个方向不产生位移,整个菠萝水平放置,试验之前茎与压头保持垂直。试验过程中选择250 N量程力传感器,加载速率为20 mm/min;力矩测量方式可以简化成图1所示模型。



注:  $O'$ 为果实花萼脱落层处;  $B'$ 为压头在茎上的加载位置;  $F'$ 为加载载荷,  $N$ ;  $L'$ 为力臂,  $m$ 。

Note:  $O'$  is the abscission zone-calyx layer;  $B'$  is the position of the indenter loading on the stem;  $F'$  is the load,  $N$ ;  $L'$  is the arm of load,  $m$ 。

图1 菠萝花萼处脱落层弯曲试验示意图

Fig.1 Simplified force diagram for bending test of abscission zone-calyx layer

通过测量  $O'$ 点到  $B'$ 点的长度  $L'$ 求出果实花萼脱落层所需要的折断力矩  $M'$ , ( $N \cdot m$ )。被测样品的茎均从果实花萼处脱落层断裂,所需要的折断力矩由式(1)得出

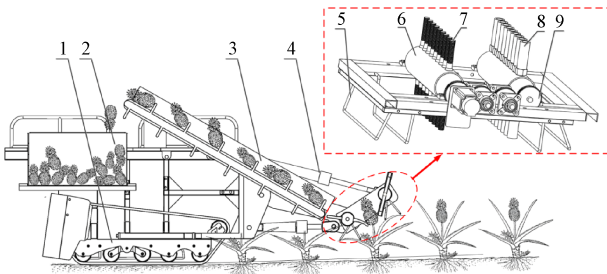
$$M' = F'L' \quad (1)$$

成熟度为C1的菠萝果实花萼处脱落层断裂时的平均力矩和最大力矩分别为3.67、4.96  $N \cdot m$ , C2成熟度的平均力矩和最大力矩分别为2.41、3.02  $N \cdot m$ 。试验数据表明C1阶段的平均力矩和最大力矩均大于C2阶段。主要原因是菠萝果实成熟过程中,脱落层在各种催化酶作用下诱导果实脱落。

## 2 菠萝采收机构

### 2.1 工作原理

柔性材料包括橡胶、塑料等,由于其超弹性和减震性已经广泛应用于各种柔性夹具中,柔性材料能够很好的防止水果等软质物体的损伤<sup>[4]</sup>。由超弹性材料制造的柔性指减少了菠萝果实的损伤。图2为菠萝采收机构示意图。



1.履带自走式高床作业机 2.菠萝收集箱 3.输送带 4.液压杆 5.压叶架  
6.滚筒 7.左侧柔性指 8.右侧柔性指 9.齿轮  
1.Tracked self-propelled high bed machine 2.Pineapple collection box  
3.Conveyor 4.Hydraulic rod 5.Pressing leaf shelf 6.Roller 7.Left flexible finger 8.Right flexible finger 9.Gear

图2 多柔性指滚筒菠萝采收机构示意图

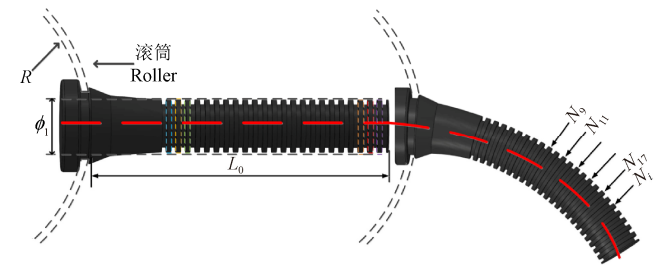
Fig.2 Diagram of multi-flexible fingered roller of pineapple harvesting mechanism

多柔性指滚筒菠萝采收机构主要由3个部分组成,包括柔性指滚筒、压叶架和框架。两个滚筒对称布置在框架上,单个滚筒布置有两排对称的柔性指,两滚筒以相同角速度反方向旋转,进而带动柔性指提供折断力矩实现菠萝快速、批量化采收。基于机构设计的紧凑和轻量化原理,两滚筒半径  $R$  设置为55 mm,厚度为5 mm。为了防止菠萝果实过大而导致采收装置无法正常采收,根据所测的菠萝直径,两滚筒中心距离  $L$  设置为400 mm。

采收过程主要包括4步:1)两滚筒相对倾斜,柔性指与地面垂直,压叶架压入植株合适位置,菠萝位于两滚筒中间;2)果叶被压下,两滚筒以相同角速度反向旋转;3)左侧柔性指先接触菠萝,菠萝植株在左侧力作用下向右侧倒伏,随后右侧柔性指接触菠萝,施加右侧力,两侧柔性指共同拨动菠萝,产生折断力矩;4)在两侧力的共同作用下,果实花萼处脱落层断裂实现采收。

### 2.2 柔性指设计与力-变形分析

左侧柔性指设计成实心圆截面柔性杆,如图3;左侧柔性指材料采用天然橡胶,长度  $L_0$  为120 mm,直径  $\phi$  为22 mm。



a. 左侧柔性指  
a. Left flexible finger  
b. 变形后的左侧柔性指  
b. Left flexible finger after deformation  
注:  $R$  为滚筒半径,  $mm$ ;  $N_i$  为压力,  $N$ ;  $i$  为连续弯曲单元;  $L_0$  和  $\phi$  分别为左侧柔性指长度和直径,  $mm$ 。  
Note:  $R$  is the radius of the roller,  $mm$ ;  $N_i$  is the pressure,  $N$ ;  $i$  is the continuous bending unit;  $L_0$  and  $\phi$  are the length and diameter of the left flexible finger, respectively,  $mm$ 。

图3 左侧柔性指结构图

Fig.3 Structure diagram of left flexible finger

右侧柔性指采用空心圆截面硅橡胶管套入尼龙杆的结构,如图4a所示;图4b表示右侧柔性指受力后扁平的硅橡胶管,其中  $F_i$  表示分散在接触面上的力。硅橡胶管内腔套入尼龙螺杆,尼龙螺杆通过螺栓与滚筒固定,右侧柔性指硅橡胶管的长度  $L_1$  为150 mm,内径  $\phi_2$  为16 mm,外径  $\phi_3$  为36 mm;尼龙螺杆直径与硅橡胶管内径大小一致,长度  $L_2$  为120 mm。

尼龙螺杆和硅橡胶管的组合减少了滚筒转动时柔性指对菠萝的短暂冲击碰撞力。左侧柔性指前部分具有凸峰以增大与菠萝接触表面的摩擦系数,提供足够的摩擦力。左侧柔性指对菠萝产生的作用力分散在每一个对应的接触单元上。右侧柔性指受到挤压后圆截面变形形成椭圆截面,压扁后的硅橡胶管增大了与菠萝之间的接触面积,在一定程度上减少了右侧柔性指与菠萝接触部分的应力集中。

在本研究中,把橡胶柔性指与菠萝接触时发生的变

形等效为固定在滚筒上的柔性悬臂梁的受力变形。Howell 等<sup>[17]</sup>应用伪刚体方法在考虑梁的大变形等力学特性时对柔性梁进行分析，并且提出了柔性悬臂梁的伪刚体模型。柔性悬臂梁伪刚体模型如式 (2) ~ (8) 所示。

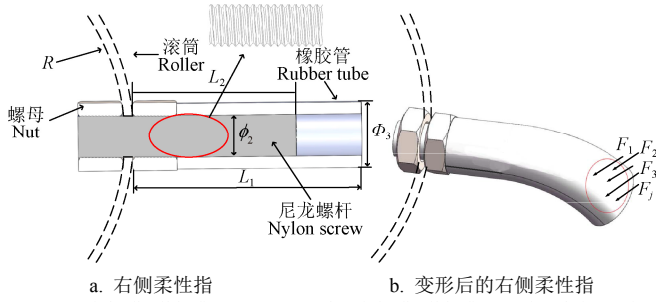


图 4 右侧柔性指结构图  
 注:  $R$  为滚筒半径, mm;  $F_j$  为压力, N;  $j$  为接触单元;  $L_1$  和  $\phi_3$  分别为右侧柔性指长度和直径, mm;  $L_2$  和  $\phi_2$  分别为尼龙螺杆的长度和直径, mm.  
 Note:  $R$  is the radius of the roller, mm;  $F_j$  is the pressure, N;  $j$  is the contact unit;  $L_1$  and  $\phi_3$  are the length and diameter of the right flexible finger, respectively, mm;  $L_2$  and  $\phi_2$  are the length and diameter of the nylon screw, respectively, mm.

Fig.4 Structure diagram of right flexible finger

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \quad (2)$$

$$K = \frac{\gamma K_\theta EI}{l} \quad (3)$$

$$P = \frac{K\Theta}{\eta\gamma l \sin(\frac{\pi}{2} - \Theta)} \quad (4)$$

$$F = \eta P \quad (5)$$

其中

$$n = -\frac{1}{\tan \phi} \quad (6)$$

$$\eta = \sqrt{1+n^2} \quad (7)$$

$$\Theta = \arcsin \frac{l_y}{\gamma l} \quad (8)$$

式中  $I$  为圆截面惯性矩,  $m^4$ ;  $K$  为扭转常数;  $\Theta$  为伪刚体角, ( $^\circ$ );  $F$  为施加在梁上的载荷, N;  $P$  为力  $F$  的分力, N;  $r$  为圆截面柔性指的半径, m;  $K_\theta$  为扭转系数;  $l$  为未变形前悬臂梁的长度, m;  $l_y$  为变形后的悬臂梁末端与未变形前悬臂梁之间的距离, m;  $\gamma$  为悬臂梁的特征半径系数;  $E$  为材料杨氏模量, MPa;  $\phi$  为力  $F$  的作用角, ( $^\circ$ );  $K_\theta$ ,  $\gamma$  为常量, 可以根据  $\phi$  查表得出。

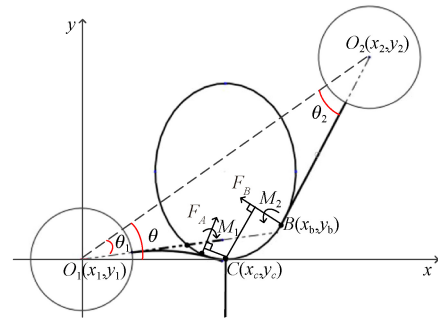
当橡胶邵氏硬度处于 20~80 HA 之间时, 橡胶的杨氏模量  $E$  可以近似用邵氏硬度表示<sup>[18]</sup>。用 SYNTEK 数显邵氏硬度测量计进行测量, 取平均值作为最后橡胶柔性指的邵氏硬度值。橡胶柔性指的邵氏硬度为 53.5 HA, 因此橡胶杨氏模量  $E=4.19$  MPa。

为了验证上述伪刚体模型同样适用于圆截面柔性指, 把圆截面柔性指一端固定, 在距离固定端  $l=0.096$  m 处施加垂直于圆截面柔性指的载荷, 试验在微控电子万能试验机上进行, 加载速度为 20 mm/min。获取力-位移

曲线及相关数据后, 把采集的每一个位移点代入  $l_y$ , 将  $r=0.011$  m、 $l=0.096$  m、 $E=4.19$  MPa 等数值代入式 (2) ~ (8) 中, 求出对应位移下的理论力  $F$ 。以位移为横坐标, 绘出理论力  $F$  和测量力的力-位移曲线图, 两者曲线近似。通过计算理论力与测量力之间的拟合优度, 置信度为 0.998。因此可以用伪刚体模型表征圆截面柔性指。

### 2.3 柔性指作用下临界断裂状态力学分析

菠萝的几何形状可近似为椭球状<sup>[10]</sup>, 以下的研究将把菠萝的中心竖直剖面近似为椭圆形状, 最大直径、长度分别作为椭圆的短轴、长轴, 满足椭圆曲线方程。根据拓扑学, 几何形状在连续变形下保持不变<sup>[19]</sup>。假设右侧柔性指末端与菠萝接触时始终保持相切状态且柔性指未发生变形。在采收过程中, 两滚筒以相同角速度反向旋转, 左侧柔性指先接触菠萝, 当滚筒旋转一定角度后, 右侧柔性指末端与菠萝接触, 拨动菠萝回到初始位置附近。以左侧滚筒中心为坐标原点建立了如图 5 所示的坐标系, 假设菠萝初始位置在  $x$  轴方向处于两滚筒中心,  $y$  轴方向不固定。根据图 5, 忽略左右侧柔性指对菠萝的摩擦力, 左侧柔性指与菠萝接触产生的作用力  $F_A$  和右侧柔性指与菠萝接触产生的作用力  $F_B$  的共同作用下形成折断力矩  $M$ 。



注:  $O_1$ 、 $O_2$  和  $C$  分别为两滚筒中心和菠萝花萼;  $B$  点为右侧柔性指与菠萝的交点;  $\theta_1$  为左侧未变形柔性指与  $O_1O_2$  直线, ( $^\circ$ );  $\theta$  为  $O_1O_2$  直线与  $x$  轴的夹角, ( $^\circ$ );  $\theta_2$  为右侧柔性指与  $O_1O_2$  直线的夹角, ( $^\circ$ );  $F_A$ 、 $F_B$  和  $M_1$ 、 $M_2$  分别为左右两侧给菠萝的力, N, 和力矩, N·m.  
 Note:  $O_1$ ,  $O_2$  and  $C$  are the center of the two rollers and the pineapple calyx, respectively; point  $B$  is the intersection of the right flexible finger and the pineapple.  $\theta_1$  is the angle between the left undeformed flexible finger and the  $O_1O_2$  line, ( $^\circ$ );  $\theta$  is the angle between  $O_1O_2$  line and the  $x$ -axis, ( $^\circ$ );  $\theta_2$  is the angle between the right flexible finger and the  $O_1O_2$  line, ( $^\circ$ );  $F_A$ ,  $F_B$  and  $M_1$ ,  $M_2$  are the force, N, and moment, N·m, on the two sides to the pineapple, respectively.

图 5 双柔性指作用下菠萝受力图

Fig.5 Force diagram of pineapple under the double flexible fingers

图 6 为左侧柔性指受力状态图。通过几何关系可以得出  $A(x_a, y_a)$ ,  $B(x_b, y_b)$ ,  $D(x_d, y_d)$ ,  $\theta_1$  和  $\theta_A$  都为自变量  $\theta$  和  $y_c$  的函数。通过计算得出  $d$ 、 $l_d$  和  $\phi'$  值, 将其分别代入 2.2 小节的伪刚体模型  $l_y$ 、 $\gamma l$  和  $\phi$  中, 可得出作用力  $F$  的表达式, 如式 (9)。

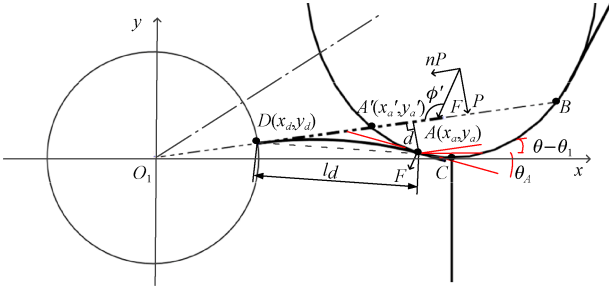
$$F = \frac{K\Theta}{l_d \sin(\frac{\pi}{2} - \Theta)} \quad (9)$$

其中

$$\Theta = \arcsin \frac{d}{l_d} \quad (10)$$

$$K = \frac{\gamma^2 K_\theta EI}{l_d} \quad (11)$$

根据图 5、图 6 和几何关系, 分别求出力矩  $M_1$ 、 $M_2$  如式 (12) 和 (13) 所示。两力矩的矢量和为对菠萝花萼处脱落层所产生的折断力矩。



注:  $A$  点为变形后的左侧柔性杆与菠萝的交点;  $A'$  为未变形左侧柔性指与菠萝的交点;  $D$  为左侧柔性指与滚筒的连接点;  $d$  和  $l_d$  分别为  $A$  点与直线  $DA'$  的距离和特征半径,  $m$ ;  $\theta_A$  为过  $A$  点的椭圆切线角度, ( $^\circ$ );  $\phi$  为力  $F$  与直线  $DA'$  的作用角, ( $^\circ$ );  $F$ 、 $nP$  和  $P$  分别为菠萝对左侧柔性指的作用力和力  $F$  的分力,  $N$ 。

Note:  $A$  is the intersection of the deformed left flexible finger and pineapple;  $A'$  is the intersection of the undeformed left flexible finger and pineapple;  $D$  is the connection between the left flexible finger and roller;  $d$  and  $l_d$  are distance between point  $A$  and  $DA'$  line, characteristic radius, respectively,  $m$ ;  $\theta_A$  is the ellipse tangent angle passing through point  $A$ , ( $^\circ$ );  $\phi$  is the angle between force  $F$  and  $DA'$  line, ( $^\circ$ );  $F$ ,  $nP$  and  $P$  are the force of the pineapple on the left flexible finger and the component of the force  $F$ , respectively,  $N$ .

图 6 左侧柔性指受力分析

Fig.6 Forced analysis of the left flexible finger

$$M_1 = F_A [-\cos \theta_A |0.5L \cos \theta - x_a| - \sin \theta_A |y_a - y_c|] \quad (12)$$

$$M_2 = F_B [\cos(\theta_2 + \theta) |x_b - 0.5L \cos \theta| + \sin(\theta_2 + \theta) |y_b - y_c|] \quad (13)$$

式中  $L$  为两滚筒中心的距离,  $m$ 。

由于  $F$  和  $F_A$  为等效反作用力, 因此  $F=F_A$ 。合力矩  $M$  可以由式 (14) 表示

$$M = M_1 + M_2 = f(\theta, y_c, F_B) \quad (14)$$

#### 2.4 菠萝临界损伤条件下采收装置参数设计

为防止菠萝损伤<sup>[20]</sup>, 两侧柔性指与菠萝之间最大的相互作用力为 50 N。左侧柔性指对菠萝产生的作用力  $F_A$  为  $(\theta, y_c)$  的函数, 右侧柔性指对菠萝的作用力  $F_B$  达到 50 N 时, 两柔性指所形成的力矩需大于菠萝花萼处脱落层断裂所需要的力矩, 因此根据式 (14) 可以得出避免菠萝采收受损的约束模型评价函数, 如式 (15), 其中  $M_{测}$  为实际测得的菠萝花萼处脱落层断裂所需要的力矩。

$$M = M_1 + M_2 = f(\theta, y_c, 50) \geq M_{测} \quad (15)$$

采收的关键在于菠萝是否能放入两滚筒之间的容腔中, 因此两倾斜滚筒之间的横向距离与相对倾斜角度必须满足式 (16), 通过计算得出最大倾斜角度  $\theta$  为  $57^\circ$ 。

$$(L \cos \theta - 2R) > 2b \quad (16)$$

式中  $R$  为滚筒的半径,  $m$ ;  $b$  为椭圆短轴长度,  $m$ 。

将相关参数代入式 (15), 通过 MATLAB 软件计算。根据  $\theta$  的定义, 在  $\theta$  为  $0^\circ \sim 57^\circ$  的范围内以  $0.5^\circ$  为角度间隔代入式 (15) 中遍历求解, 高度  $y_c$  的范围为  $-30 \sim$

$20 \text{ mm}$ , 以  $1 \text{ mm}$  为间隔嵌套在  $\theta$  中遍历。通过计算得出, 当倾斜角度为  $35^\circ$  和  $40^\circ$  时, 左侧柔性指对菠萝产生的作用力  $F_A < 50 \text{ N}$ , 单对柔性指提供的合力矩  $M$  都在  $2 \text{ N}\cdot\text{m}$  以上, 结合机构设计的紧凑性原则, 最终确定多柔性指滚筒菠萝采收机构的滚筒倾斜角度  $\theta$  为  $35^\circ$ , 采收机构的收获可能性区域如图 5 中  $C$  点坐标  $(x_c, y_c)$  的范围,  $x_c$  的范围为  $154 \sim 167 \text{ mm}$ ,  $y_c$  的范围为  $-30 \sim 20 \text{ mm}$ 。

根据 1.2 节中分离菠萝与植株所需要的平均力矩, 左右两侧分别至少有两根柔性指与菠萝作用时才能提供足够的折断力矩, 因此两根柔性指之间的距离需要小于菠萝的直径, 满足式 (17)。

$$L_f \leq 2b \quad (17)$$

式中  $L_f$  为相邻两柔性指之间的距离,  $m$ 。根据菠萝的大小, 式 (17) 和采收器必须收获大部分菠萝的条件, 滚筒上左侧相邻两柔性指之间的间隙设置为  $30 \text{ mm}$ , 右侧相邻两柔性指之间的间隙设置为  $10 \text{ mm}$ 。

### 3 采收试验

#### 3.1 试验设计

根据第 2 章节得出的结果, 菠萝采收机构的主要参数: 滚筒直径为  $110 \text{ mm}$ ; 两滚筒倾斜角度为  $35^\circ$ ; 两滚筒相对距离为  $400 \text{ mm}$ ; 左右两侧相邻两柔性指之间间隙分别为  $30 \text{ mm}$ 、 $10 \text{ mm}$ ; 左右两侧柔性指的长度分别为  $120 \text{ mm}$  和  $150 \text{ mm}$ 。试验样机如图 7 所示。

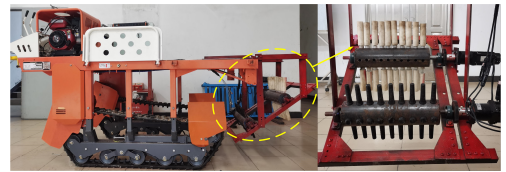


图 7 菠萝采收试验机

Fig.7 The experimental pineapple harvesting machine

在此次采收试验中, 为了防止碰撞力造成果实损伤, 同时防止转速过慢导致采收效率低。在没有确定电机的转速之前, 选择几个不同的转速进行前期试验。当转速不高于  $100 \text{ r/min}$  时 ( $100$ 、 $75$ 、 $50$ 、 $25 \text{ r/min}$ ) 成功率较高。当转速高于  $100 \text{ r/min}$  时 ( $125$ 、 $150 \text{ r/min}$ ) 柔性指与菠萝果实之间容易打滑, 且菠萝受到短暂的冲击能大, 传递给菠萝的动能大, 菠萝与植株分离后, 菠萝掉落的位置远, 且垂直高度大, 菠萝易损伤。因此最终选择  $100 \text{ r/min}$  的转速。为进一步明确菠萝与柔性指的实际接触状态, 试验过程用相机全程记录。

采收试验的菠萝样本成熟度为 C1 和 C2 阶段, 样本个数为  $400$  个, 直径为  $90 \sim 120 \text{ mm}$ , 长度为  $100 \sim 140 \text{ mm}$ 。在试验时, 菠萝均处于收获可能性区域内。放置三天后损伤的菠萝果肉为褐色, 无损伤的菠萝果肉与采收前果肉颜色基本一致。采收后的菠萝在恒温  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下储藏三天后以  $20 \text{ mm}$  为切割深度、以可能损伤范围为界限切开菠萝, 观察果肉是否变色。

在采收试验中以采收率、损坏率和作业效率 3 个评价标准分析采收器的性能指标。单个样本采收成功的标

准是菠萝与植株完全分离。在这项研究中, 采收后菠萝必须完全完好无损, 并且在小损伤(损伤直径为 0~30 mm)的情况下被算作 50% 的损坏, 在较大的损伤的情况下被算作 100% 的损坏<sup>[8]</sup>。在本文中, 两种情况的菠萝均被视为损伤。作业效率是指单个菠萝平均采收所需要的时间。

### 3.2 试验结果与分析

采收器收获果实过程如图 8 所示。在收获可能性区域内, 收获样本总个数为 400 个, 收获成功的个数为 336 个, 损伤个数为 18 个。菠萝的采收率约为 85%, 损伤率约为 5%, 单个菠萝平均采收所需要的时间约为 1 s。

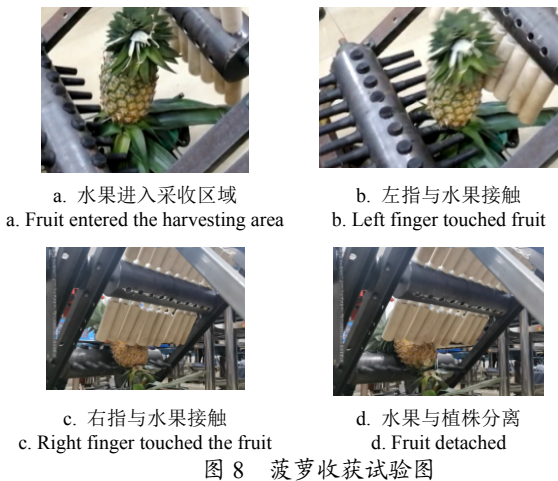


Fig.8 Diagram of harvesting pineapple fruits test

采收试验过程中, 大部分采收成功的菠萝在柔性指的作用下, 在花萼处脱落层与植株分离, 极少数采收成功的菠萝由于茎节断裂而与植株分离。对于不成功的收获, 其采收失败的原因与柔性指的长度、菠萝的直径和采收位置有关。果实直径过小导致柔性指与菠萝的接触不充分, 无法提供相应的折断力矩; 菠萝的采收位置过高导致两柔性指与菠萝的接触位置在同一水平高度, 无法形成力矩, 作用效果类似于拉拔菠萝造成采收无法成功。菠萝的采收损伤主要由于少数果实过大, 接触过程柔性指与菠萝作用形成过大的挤压力导致的。这些结果表明利用柔性指与菠萝作用提供折断力矩方法能成功用于菠萝采收。该研究结果可用于指导多柔性指滚筒菠萝采收机构的开发, 为菠萝机械化采收提供理论指导。

## 4 结 论

根据菠萝的物理特性和力学特性, 通过理论模型建立了菠萝临界损伤条件下的评价函数, 并求解了多柔性指滚筒菠萝采收机构的结构参数和该采收装置下的菠萝收获可能性区域。结果表明两滚筒相对距离为 400 mm、相对倾角为 35°, 两柔性指长度分别为 120 mm、150 mm, 相邻两指间隙分别为 30 mm、10 mm 时能提供相应的折断力矩。以左侧滚筒中心为原点建立的坐标系, 菠萝纵向位置位于-30~20 mm 区间内, 横向位置位于 154~167 mm 区间内的收获区域, 试验表明该采收机构能成功分离菠萝和植株。

根据理论分析和计算结果, 开发了采收机构样机进行试验。当菠萝位于收获区域内时, 基于试验结果表明采收机构能采收大部分直径 90~120 mm 和长度 100~140 mm 的菠萝, 平均成功收获率约为 85%, 损伤率约为 5%, 单个菠萝平均采收所需要的时间约为 1 s。

### [参 考 文 献]

- [1] Davidson J, Bhusal S, Mo C, et al. Robotic manipulation for specialty crop harvesting: A review of manipulator and end-effector technologies[J]. *Global Journal of Agricultural and Allied Sciences*, 2020, 2(1): 25-41.
- [2] Sarkar P. Use of shaking mechanism and robotic arm in fruit harvesting: A comprehensive review[J]. *Journal of Crop and Weed*, 2021, 17(2): 1-9.
- [3] O'Brien M, Cargill B F, Fridley R B. Economic aspects related to the fruit industry[M]// *Principles and Practices for Harvesting and Handling Fruits and Nuts*. Connecticut, US: AVI Press, 1983: 47-70.
- [4] Navas E, Fernández R, Sepúlveda D, et al. Soft grippers for automatic crop harvesting: a review [J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2689.
- [5] Zhang Z, Igathinathane C, Li J, et al. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 175: 105606.
- [6] Liu J, Li Z, Li P. History and present situations of robotic harvesting technology: a review [M]// *Rapid Damage-Free Robotic Harvesting of Tomatoes*. Singapore: Springer Press, 2021: 1-106.
- [7] Shi Y, Wang Y, Zhang Z. Design, test, and improvement of a low-cost fresh market apple harvest-assist unit[M]// *Mechanical Harvest of Fresh Market Apples: Progress Over the Past Decades*. Singapore: Springer Press, 2022: 23-37.
- [8] Roshanianfard A, Noguchi N. Pumpkin harvesting robotic end-effector[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 174: 105503.
- [9] Hossain M F, Akhtar S, Anwar M. Nutritional value and medicinal benefits of pineapple[J]. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, 2015, 4(1): 84-88.
- [10] Bhat K, Chayalakshmi C L. Microcontroller-based semiautomated pineapple harvesting system[C]// *International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics*. Lalitpur: Springer, 2020: 383-392.
- [11] 李斌, Ning Wang, 汪懋华, 等. 基于单目视觉的田间菠萝果实识别[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 345-349.  
Li Bin, Ning Wang, Wang Maohua, et al. In-field pineapple recognition based on monocular vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(10): 345-349. (in Chinese with English abstract)
- [12] 何东健, 张连兆, 李响, 等. 基于双目机器视觉的菠萝自动采收机设计[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(13): 207-210.  
He Dongjian, Zhang Lianzhao, Li Xiang, et al. Design of automatic pineapple harvesting machine based on binocular machine vision[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(13): 207-210. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姜涛, 郭安福, 程学斌, 等. 菠萝自动采摘收集机结构设计

- 计与分析[J]. 工程设计学报, 2019, 26(5): 577-586.
- Jiang Tao, Guo Anfu, Cheng Xuebin, et al. Structural design and analysis of pineapple automatic picking-collecting machine[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(5): 577-586. (in Chinese with English abstract)
- [14] 马兴灶, 连海山, 弓满锋, 等. 菠萝采摘机械手结构与试验[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(4): 727-732.
- Ma Xingzao, Lian Haishan, Gong Manfeng, et al. Structural Design and experiment of pineapple picking manipulator[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(4): 727-732. (in Chinese with English abstract)
- [15] Kurbah F, Marwein S, Marngar T, et al. Design and development of the pineapple harvesting robotic gripper[M]//Communication and Control for Robotic Systems. Singapore: Springer Press, 2022: 437-454.
- [16] Goren R. Anatomical, physiological, and hormonal aspects of abscission in citrus[J]. Horticultural Reviews, 1993, 15: 145-182.
- [17] Howell L L, Midha A. A method for the design of compliant mechanisms with small-length flexural pivots[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(1): 280-290.
- [18] Qi H J, Joyce K, Boyce M C. Durometer hardness and the stress-strain behavior of elastomeric materials[J]. Rubber Chemistry and Technology, 2003, 76(2): 419-435.
- [19] 杨姝. 复杂机械结构拓扑优化若干问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- Yang Shu. Study on Topology Optimization of Complex Mechanics Structures[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [20] Du X, Yang X, Ji J, et al. Design and test of a pineapple picking end-effector [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(6): 1045-1055.

## Working principle and design of the multi-flexible fingered roller pineapple harvesting mechanism

Liu Tianhu<sup>1</sup>, Liu Wei<sup>1</sup>, Zeng Tingjun<sup>1</sup>, Qi Long<sup>1</sup>, Zhao Wenfeng<sup>2</sup>, Cheng Yifeng<sup>1</sup>, Zhang Di<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Pineapple has been the third-largest yield of tropical fruit after banana and mango in recent years. Current mechanical harvesting of pineapple cannot fully meet the large-scale production during this time, particularly in the early stage. In this study, a multi-flexible fingered roller mechanism was proposed for pineapple harvesting to simulate the fruit detachment process after the manual breaking. The breaking moments of the pineapple abscission layer were measured in the solution by the universal electronic testing machine. A mechanized pineapple harvesting was conducted to evaluate the bending moment for the break of the abscission layer at the calyx of the pineapple under the action of two rows of flexible fingers. Then, the large deformation of a flexible finger was characterized using the pseudo-rigid body theory, when the flexible finger interacted with the pineapple. The load was applied on the end of the flexible finger to record the force-displacement data, and further compare the experimental and simulation data. Furthermore, the harvesting mechanical model and the evaluation function under the critical damage condition of pineapple were established, according to the harvesting mechanism model, as well as the physical and mechanical features of the pineapple. The feasible parameters of the harvesting mechanism were calculated for enabling harvesting. An experimental device was also developed for the trial. The harvesting experimental device was mounted on the high ground clearance tractor for testing. The performance indicators of the harvester were analyzed, according to the three evaluation criteria of harvesting rate, damage rate, and operation efficiency. Experimental results showed that the most pineapple fruits were harvested successfully, where the two rollers of the harvesting machinery inclining at the angle of the 35°, the length of the left flexible fingers was 120 mm, the clearance between each of the left flexible fingers was 30 mm, the length of the right flexible fingers was 150 mm, and the clearance between each of the right flexible fingers was 10 mm. The harvesting and damage rates were 85% and 5%, respectively, where the average harvest time of a single fruit was about 1s, indicating the harvesting machinery was fully meet the requirement of pineapple harvesting. In the unsuccessful harvesting, the failure resulted from the mismatched flexible finger length, fruit size, harvesting posture, and position. Specifically, the relatively small fruit diameter probably led to the insufficient contact between the flexible finger and the pineapple, further requiring the too small bending moment for the break of the abscission layer at the calyx of the pineapple. If the harvesting position was too high, the contact position between the two flexible fingers and the pineapple was almost at the same horizontal height, where the bending moment cannot be formed. The harvest damage was mainly attributed to the excessive size of some pineapple fruits and an excessive extrusion force formed when fingers interacted with pineapple fruit. This finding can provide a strong reference for the pineapple harvesting machinery.

**Keywords:** agricultural machinery; experiment; pineapple harvester; flexible fingers; roller