

大容差高效草莓采摘末端执行器设计与试验^{*}

王粮局¹ 张铁中¹ 褚佳¹ 杨丽¹ 张洁¹ 段运红²
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京卓众出版有限公司农机事业部, 北京 100083)

摘要: 针对目前草莓果实视觉识别中的定位重叠和被遮挡果实的算法复杂、耗时长,末端执行器对定位精度要求高且无法采摘重叠果实和被遮挡果实等问题,设计了一次可采摘多粒果实的大容差末端执行器。该末端执行器采用从下向上拢起果实、在避开障碍后再进行夹持和切割果梗的采摘方式,主要由机械爪拢夹切断机构和垄壁仿形机构组成。将末端执行器安装在采摘机械臂上进行了果实采摘试验。试验结果表明:该末端执行器在定位误差 $\pm 7\text{ mm}$ 范围内都能完成采摘,容差范围大;无需进行重叠成熟果实的分割和目标果梗位置的计算,可一次采摘3粒重叠成熟草莓;对含1、2、3粒果实的果实域,采摘一次平均耗时分别为2.00、2.13、2.28 s,采摘成功率不低于97.7%。

关键词: 草莓 采摘机器人 末端执行器 大容差

中图分类号: TP242.6; S668.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0252-07

引言

选择性的果实采摘是农业上最为耗时费力的作业环节,30年来人类一直试图采用机器人从事该类作业。由于采摘果实所处环境复杂、果实数量繁多、生熟掺杂以及果实形态各异且质地脆弱,因此,精准、高效的末端执行器成为农业果实采摘机器人的研究重点之一^[1-4]。

针对草莓采摘机器人末端执行器,国内外均进行了一些研究。目前草莓果实采摘所使用的主要方法是检测或计算出果梗位置后再进行夹持并用刀片切断或用电热丝烧断果梗^[5-9];检测到草莓的位置后采用夹持、吸附或将其收在采集盒里,再用刀片切断果梗^[10-13]。前者需要获得果梗的准确位置,定位精度要求高,对枝叶遮挡和果实粘连的目标果实采摘难度大、成功率低;后者虽不用识别或测算果梗位置,对定位精度要求相对低一些,但夹持草莓果实对果实品质有一定的损伤。两者都是一次只能采摘一粒草莓果实,对多粒粘连果实基本都无法进行采摘。而实际生产中草莓多为簇状分布,单粒采摘不仅增加了图像识别的难度和耗时,同时更增加了机器人的采摘难度,而且一次一粒果实的采摘方式不利于实现机器人的高效采摘。

末端执行器较大的抓捕容差可以弥补由于视觉

定位和机械臂等因素引起的末端执行器定位精度误差,提高采摘的稳定性和可靠性;同时也可降低对采摘定位精度的要求,减轻机械臂和视觉运算的负担,提高作业速度^[14-15]。本文针对目前草莓果实视觉识别中的定位重叠和被遮挡果实的算法复杂、耗时长,末端执行器对定位精度要求高且无法采摘重叠果实和被遮挡的果实等问题,设计一种一次可采摘多粒果实的大容差末端执行器。

1 总体结构与工作原理

以垄作栽培模式的草莓为研究对象,根据成熟草莓果实在垄壁的分布特点,设计的末端执行器如图1所示,主要包括垄壁仿形装置和机械爪装置。垄壁仿形装置为一组导轨滑块以及开关型传感器组成的自由伸缩结构,可使末端执行器夹指的前端仿形垄壁。机械爪装置又包括拢果装置和果梗夹剪装置,采用电动机驱动齿轮齿条机构实现夹指开闭。

其工作原理为垄壁仿形装置感知垄壁以控制机械臂沿Z方向即垂直于垄壁方向的运动,使机械爪装置夹指前端对垄壁进行仿形;当末端执行器沿X方向运动到达采摘区域下方时,夹指张开并沿Y方向由下向上运动到目标果实域(成熟的单粒或多粒靠近的草莓果实)顶部,草莓即落入两夹指与拢果绳之间;末端执行器沿Z方向后退一段距离,将草

收稿日期: 2014-07-31 修回日期: 2014-08-20

^{*} 国家自然科学基金资助项目(61375089)

作者简介: 王粮局, 博士生, 主要从事农业机器人研究, E-mail: wangliangju@gmail.com

通讯作者: 张铁中, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机器人研究, E-mail: zhangtz56@163.com

莓拉离垄壁,两夹指闭合剪断并夹持果梗;末端执行器运动到果实收纳处,夹指张开,果实脱落,完成对草莓的采摘收集。

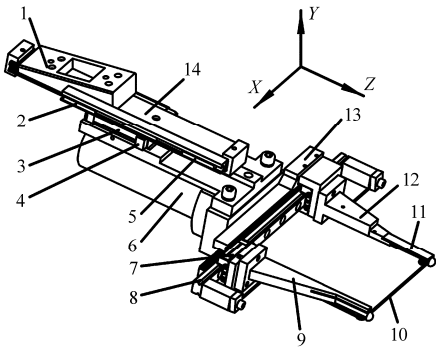


图1 草莓采摘机器人末端执行器主体结构图

Fig.1 Body structure of end-effector for strawberry harvesting robot

1. 固定座 2. 传感器2 3. 仿形滑块 4. 传感器感应磁铁 5. 传感器1 6. 电动机 7. 手爪滑块 8. 手爪导轨 9. 刀槽夹指 10. 拢果绳 11. 剪刀刀片 12. 切刀夹指 13. 齿轮齿条机构 14. 仿形导轨

2 关键机构参数设计

2.1 拢果装置

草莓果实多生熟夹杂,相互靠近;被枝叶遮挡的情况也会出现。拢果装置将成熟的果实从复杂的环境中取出再剪切,减少了对未成熟果实和枝叶的损伤,提高了采摘成功率。另外,对于相互靠近的成熟果实,将成熟果实域的果实拢出收集后一同剪切,就不需对粘连果实分别进行识别定位,减少视觉算法的复杂度,提高了采摘效率。

草莓果实呈倒锥椭圆形,当悬在垄壁上时,一般为果实的中间接触垄面;所以果实尖端和垄壁的距离较大,一般大于草莓直径的 1/3;且靠近的两果实的尖端距离也较大,一般大于两果实的半径之和。利用这个特点来拢出果实可降低对定位精度的要求,增大末端执行器的容差。

2.1.1 拢果方式

当末端执行器到达目标果实域下方时,手指处于张开状态,夹指前端贴着垄壁上升,拢果绳从果实和垄壁之间通过;当拢果绳到达果实域上方的剪切点后,末端执行器后退一段距离,目标果实即被拉离垄壁从而实现了将果实分离出复杂背景和收集成簇果实的功能。

为不受末端执行器张开闭合的影响,拢果绳应始终处于拉紧状态,设计了如图2(图中实线和虚线分别为不同的开合状态)的钢丝绳和滑轮组成的拢果装置。其中 A、F 为钢丝绳的两端,固定在导轨的

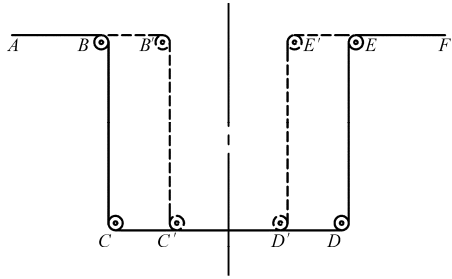


图2 夹指不同开合状态时拢果绳示意图

Fig.2 Collecting fruits rope when grippers in different opening and closing states

两挡块上;钢丝绳分别绕过固定于两夹指上的滑轮 B、C 和 D、E;AB、CD、EF 均与导轨平行。可知,在末端执行器张合过程中,因

$$l_{BB'} = l_{CC'} \quad l_{E'E} = l_{D'D}$$

故 $l_{CD} = l_{CC'} + l_{C'D'} + l_{D'D} = l_{BB'} + l_{C'D'} + l_{E'E}$

又因 $l_{BC} = l_{B'C'} \quad l_{DE} = l_{D'E'}$

故 $l_r = l_{AB} + l_{BC} + l_{CD} + l_{DE} + l_{EF} =$
 $l_{AB} + l_{B'C'} + l_{BB'} + l_{C'D'} + l_{E'E} + l_{D'E'} + l_{EF} =$
 $l_{AB} + l_{BB'} + l_{B'C'} + l_{C'D'} + l_{D'E'} + l_{E'E} + l_{EF} =$
 $l_{AB'} + l_{B'C'} + l_{C'D'} + l_{D'E'} + l_{E'F}$

式中 l_r ——初始时的绳总长度

又因 $l'_r = l_{AB'} + l_{B'C'} + l_{C'D'} + l_{D'E'} + l_{E'F}$

式中 l'_r ——张合后的绳总长度

故 $l_r = l'_r$,即钢丝绳的总长度始终不变;另外,钢丝绳各转折点安装有滑轮,所以在末端执行器工作过程中,钢丝绳各点所受拉力基本相等且保持不变,始终处于张紧状态。

2.1.2 夹指间距

两夹指间距过大,易将目标果实域外的草莓收拢进去;但是必须至少稍大于目标果实域的宽度,设该差值为 Δ ,因果实域最外侧点完全在同一高度,即同时接触两夹指的可能性较小,取差值为 2 mm。如图3所示,当目标果实域两侧分别有生果实紧靠的时候,对定位精度要求最高。目标果实域最外侧草莓的重心需在两夹指间,即满足

$$W_{2g}/2 - \Delta_x > (W_s - D_r)/2 \tag{1}$$

式中 W_{2g} ——两夹指间距

W_s ——果实域宽度

Δ_x ——水平方向定位误差

D_r ——成熟草莓果实直径,取 30 mm

非目标草莓重心需在两夹指外,即满足

$$(W_s + D_g)/2 > W_{2g}/2 + W_g/2 + \Delta_x \tag{2}$$

式中 W_g ——夹指宽,取 4 mm

D_g ——生草莓果实直径,取 20 mm

这样当末端执行器贴着垄壁上升时,在重力作用下,目标草莓将掉落在两夹指间,非目标草莓不落

入两夹指内。由式(1)、(2)得

$$\Delta_x < (D_s - W_g - \Delta)/2 = 7\text{ mm} \tag{3}$$

即在当前草莓果实和夹指几何尺寸下,定位误差小于 7 mm,即可实现准确采摘,所以容差比较大。

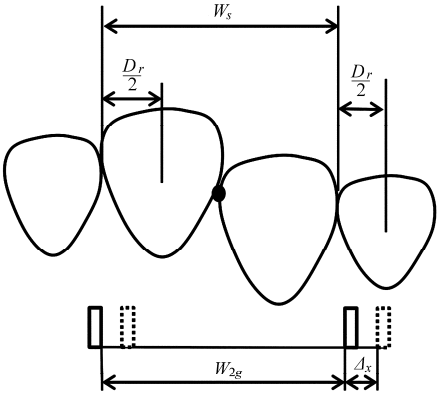


图 3 不同定位误差下夹指和果实的相对位置
Fig. 3 Relative position of grippers and fruit in a different location error

2.2 夹剪果梗装置

果梗的剪切与夹持由两夹指的一次闭合实现。夹指的开闭由电动机带动齿轮齿条机构实现,运动控制卡对其进行伺服控制。

电动机型号为 maxon RE35,24 V 工作电压下额定转矩为 0.093 3 N·m,额定转速为 6 910 r/min,额定电流 3.36 A,堵转电流为 39.7 A。电动机驱动器为 galil 公司的 AMP19540,最大输出电流为 10 A,该电流下,电动机最大转矩约为 0.277 N·m。运动控制卡采用的是 galil 公司的 DMC2280,可实现对伺服电动机的位置控制、速度控制和力矩控制。

位置控制过程中,在即将到达定位点时电动机作减速运动。因剪断果梗后要将其夹持住,电动机要停止,所以该控制方式下剪切速度很低。而在其他剪切条件相同的情况下,不同的剪切速度,切断果梗所耗能量基本一致^[16],所以速度越低,所需剪切力则越大。如果出现剪切所需的电动机转矩大于电动机的最大转矩,将造成果梗无法被剪断的情况。为提高剪切的可靠性,采用速度控制,保持较高的剪切速度;同时配合力矩控制,碰撞时保持最大力矩,减小因碰撞作用产生的回弹现象,碰撞结束后保持较小力矩以夹持草莓梗。

2.2.1 果梗剪切力试验

为选择一合适的剪切速度,分别对 1、2、3 根草莓果梗进行 10 次剪切试验,得出相应的剪切力和剪切功。试验材料为甜查理草莓成熟果实上 1~3 cm 间的果梗;刀片为得力小号美工刀片。试验方法为将试验样品放置于刀槽间隙为 3 mm 的底座上;采用 instron 公司的型号为 3342 的材料试验机以

0.5 mm/s 的速度垂直进入刀槽剪切样品。试验结果如表 1 所示。根据试验结果,果梗根数越多,剪切力峰值越大,所需剪切功也越大。剪切力峰值最大为 20.17 N;剪切功最大为 29.01 mJ;果梗直径最大为 1.72 mm,最小为 1.07 mm。

表 1 草莓果梗剪切力试验
Tab.1 Cutting force test of strawberry stems

参数	1 根	2 根	3 根
直径/mm	最大值	1.72	
	最小值	1.07	
	平均值	1.36	
剪切力峰值/N	最大值	6.67	13.37
	平均值	5.74	10.43
剪切功/J	最大值	9.86×10^{-3}	1.642×10^{-2}
	最小值	5.25×10^{-3}	1.127×10^{-2}
	平均值	7.19×10^{-3}	1.339×10^{-2}

2.2.2 夹剪果梗方式

文献[6]中设计的末端执行器可以实现剪切并夹持住单粒果梗。但当其同时夹持多于 2 根果梗时,如果其中 2 根直径相差很大,即使夹持过程中粗的果梗会被压缩,也可能存在不能将其压缩至达到较细果梗直径的情况,因此较细的果梗将不能被夹持而脱落。针对这种问题,设计了图 4 中的果梗夹

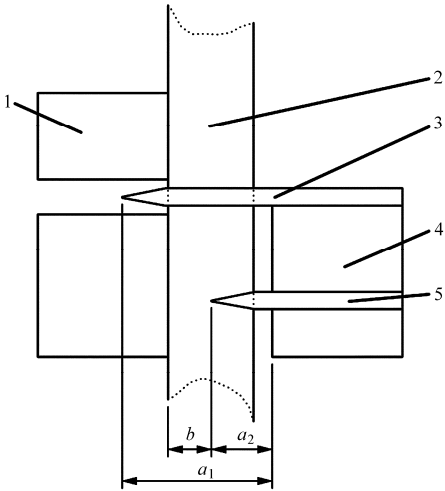


图 4 果梗夹剪装置示意图
Fig. 4 Device of clamping-cutting stems

1. 刀槽夹指 2. 果梗 3. 剪切刀片 4. 刀片夹指 5. 夹持刀片

剪装置。在刀槽夹指偏上位置开细窄刀槽,刀槽间隙取 0.8 mm。另一根夹指上端面安装剪切刀片,采用厚为 0.38 mm 的小号美工刀片,其刀刃与刀槽中心面高度相同以便剪切刀片能进入刀槽;靠下位置安装夹持刀片,采用同样的刀片。夹持刀片尖端与剪切刀片尖端不在同一竖直线上,两刀片突出夹指边缘的宽度关系为 $a_1 > a_2$ 。

剪切时,由于刀片和夹指对果梗的压力,2 根以

上果梗时不会重叠起来而是并排在刀片和夹指间。这样只需剪切刀片突出夹指的宽度 a_1 不小于单根果梗的最大直径,夹指闭合后就可以将所有果梗剪断。果梗直径一般都在 $1 \sim 2.4 \text{ mm}$ 范围内^[6],故取 a_1 为 2.5 mm 。两夹指闭合时,使夹持刀片尖端到对面夹指内壁的距离 b 稍小于最细果梗的直径,这样在剪切完毕后夹持刀片就可以切入所有果梗又不会将其切断,则所有果梗即被卡在夹持刀片与夹指之间,实现对草莓的夹持,取 b 为 0.8 mm 。

2.2.3 剪切速度

在剪切功一定的情况下,剪切速度过小,所需电动机转矩过大,将造成果梗不能被剪断;相反,剪切速度过大,夹指动能不能被完全吸收,致使两夹指碰撞后弹开,会造成果梗脱落。因此需选择合适的剪切速度。

末端执行器的刀槽间隙为 0.8 mm ,而果梗直径大于 1 mm ;所以剪切过程中梗的弯曲可以忽略,这样切割位移即为果梗直径。根据能量守恒定律,切断果梗要满足

$$F_f d_c + W_c < \frac{1}{2} m v^2 \times 2 + T_c \frac{d_c}{d_g} \tag{4}$$

式中 m ——夹指及相应的滑块和齿条总质量,为 0.16 kg

- W_c ——切断果梗所需功,取 0.03 J
- T_c ——电动机剪切转矩,取 $0.093 \text{ N} \cdot \text{m}$
- d_g ——齿轮节圆直径,取 9 mm
- d_c ——果梗直径,取 2.4 mm
- F_f ——摩擦力和滑轮阻力等之和,取 2 N
- v ——剪切前的手指运行速度

为提高执行效率和剪切的可靠性,让电动机以额定转矩运转。由式(4)可知,克服最大剪切功,并切断最大直径的果梗时所需的速度,即可满足剪断所有果梗的要求。由式(4)可得

$$v > \sqrt{\frac{F_f d_c + W_c - T_c \frac{d_c}{d_g}}{m}} \tag{5}$$

将相关参数代入可知, $v > 249 \text{ mm/s}$ 时可满足要求。

剪断果梗后,两夹指将相撞。夹指材料均为 6061 铝合金,碰撞恢复系数 e 取 0.8 ^[17];该碰撞为非完全弹性正面碰撞。碰撞过程中,夹指碰撞前的能量等于电动机保持转矩做的功、能量损耗以及碰撞后夹指动能。因碰撞瞬间摩擦力等阻力做功相对很少,故只考虑两夹指非完全弹性碰撞过程中的能量损耗。若使碰撞后夹指回弹距离小于容许弹开间隙,则需满足

$$m v^2 - T_k \frac{\Delta s}{d_g} - m [(1 - e) v]^2 < 0 \tag{6}$$

式中 T_k ——电动机保持转矩
 Δs ——夹指容许弹开间隙

夹指开始碰撞后,电动机堵转,其转矩将迅速增大到设定的保持转矩 T_k ;为使弹开间隙小, T_k 应取较大值。碰撞时间短,且直流电动机可以短时内过载,故取保持转矩为能获得的最大转矩 $0.277 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。碰撞弹开后,两夹指将在该转矩作用下迅速闭合,可得

$$m a_c = \frac{T_k}{d_g} \tag{7}$$

式中 a_c ——弹开后闭合加速度

即
$$a_c = \frac{T_k}{m d_g} = 192 \text{ m/s}^2 \tag{8}$$

a_c 远大于重力加速度,所以果梗弹开后到再被夹持期间下落距离小于夹指容许弹开间隙。故夹指容许弹开间隙取 0.5 mm 时,果梗完全不会脱落。

由式(6)可得

$$v < \frac{1}{e} \sqrt{\frac{T_k \Delta s}{m d_g}} = 387 \text{ mm/s} \tag{9}$$

因末端执行器刀槽间隙小于剪切试验中的刀槽,故末端执行器实际剪切中剪切力峰值和剪切功都会相对减小;此外在剪切过程中电动机容许短时过载;所以由式(5)计算得到的最小剪切速度可以满足剪断果梗的要求。因由式(9)计算剪切速度最大值时忽略了果梗的剪切功和运动阻力,所以最大剪切速度时可以确保弹开距离小于容许间隙。综上,为提高执行效率,取剪切速度为 387 mm/s 。

2.3 垄壁仿形装置

垄壁仿形装置主要实现机械爪装置对垄壁的仿形,并感应垄壁和机械臂间的相对位置。

草莓果实生长在垄沟内,作业环境狭小;果实小,易损伤,紧贴垄壁;对深度方向的定位精度要求高。目前一般采用的定位方式有双目视觉系统^[7-8]和传感器辅助的单目视觉伺服系统^[6];其对象一般为高架栽培的草莓,一个原因是该情况下的草莓一般悬空,对深度方向定位精度要求不高。如果将这些视觉系统用于垄作草莓,需加相应的垄壁探测传感器^[5],否则末端执行器可能撞垄壁。

2.3.1 工作原理

草莓果实一般生长在垄壁的偏上部分,且成熟果实的正下方一般没有别的果实。因此将机械爪装置和固定座通过导轨滑块单元连接,采摘果实前使末端执行器处于垄壁下侧,采摘时末端执行器上升,在重力作用下,末端执行器将沿导轨下滑,从而实现

对垄壁的仿形。

如图 5 所示,在导轨前后端分别安装传感器 1 和 2。导轨通过固定座与机械臂相连,机械爪装置与滑块固连。自然状态下滑块处于导轨最前端的挡块处。采摘时机械臂带动机械爪使其贴到垄壁上,机械臂继续靠近垄壁,导轨沿滑块向前运动触发传感器 2,传感器 2 发出信号,机械臂停止靠近垄壁的运动,在此位置采集图像进行识别定位可以使得相机外参基本一致;机械爪到达果梗采摘点后,机械臂带动机械爪远离垄壁,在重力作用下滑块沿导轨下滑触发传感器 1,传感器 1 发出信号,机械臂再后退一设定距离,此时拢果装置将草莓拉离垄壁。如果传感器换为光栅等传感器更能实时检测机械壁和垄壁的相对位置,提高相机外参的准确性。

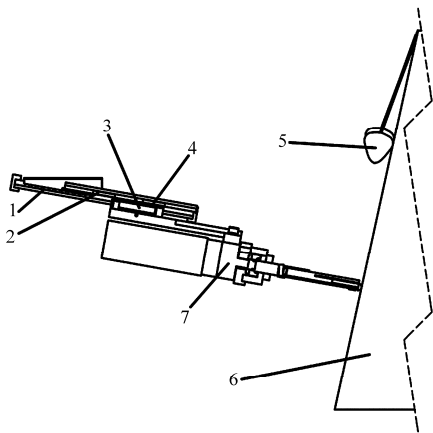


图 5 垄壁仿形装置工作原理示意图

Fig. 5 Working principle of profiling ridge device

1. 仿形导轨 2. 传感器 2 3. 仿形滑块 4. 传感器 1 5. 果实域
6. 垄壁 7. 机械爪装置

2.3.2 仿形装置俯角

如果末端执行器和垄壁间压力太小,滑块沿导轨下滑分力太小,将下滑不可靠,不能确保夹指前端始终贴着垄壁;此外,末端执行器在向垄壁运动的时候,应使其和机械臂同步前进。因导轨和滑块间摩擦因数很小,只需保证后者即可,即需满足

$$F_D > m_s a_m \cos \beta \tag{10}$$

式中 F_D ——末端执行器沿导轨方向的受力
 β ——导轨和水平方向夹角,即仿形装置俯角
 m_s ——末端执行器质量
 a_m ——机械臂的向垄时加速度,取 0.8 m/s^2
对末端执行器进行受力分析,如图 6 所示。

$$F_N = m_s g \cos \beta \tag{11}$$

$$F_D = m_s g \sin \beta - \mu_s F_N \tag{12}$$

式中 F_N ——滑块在导轨垂直方向的支持力
 μ_s ——导轨和滑块间摩擦因数,取 0.01
由式(10)~(12),可知当满足

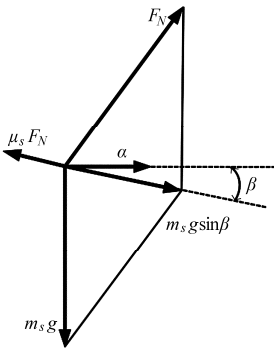


图 6 末端执行器受力示意图

Fig. 6 Force of end-effector

$$\beta > \arctan \left(\mu_s + \frac{a_m}{g} \right) = 5.24^\circ \tag{13}$$

时,末端执行器在机械臂加速度时才会和其同步运动。

在满足式(13)的情况下,末端执行器对垄壁的压力越小对垄壁破坏越小,取 β 为 6° 。

3 试验与结果分析

3.1 试验设计

在实验室搭建平台,采用文献[18]中的采摘执行机构,按照文献[6]中的视觉识别定位方法进行末端执行器的采摘试验。试验中用仿真草莓模型替代草莓,用直径在 1~2.5 mm 范围内的和草莓梗力学性质相似的爬山虎藤作草莓梗,用泡沫板作垄,且垄面坡度为 88° 。生熟夹杂的果实按照图 3 随机分布在垄顶往下 25 cm 范围内。在试验中,设定电动机的速度和加速度,使得手指以 $5\,000 \text{ mm/s}^2$ 的加速度加速到 387 mm/s ,然后匀速运动,直到开始剪切果梗。

以目标果实域草莓粒数和对它的定位误差为试验因素安排试验;以采摘耗时和采摘成功率为评价指标。每组试验进行 10 次,每次记录从给出果实域最终定位位置到采摘完成所用时间和当前采摘成功率,即采摘成功的粒数与应采摘总粒数的比值;如果出现剪不断或夹持不住果梗的现象则该粒果实采摘失败;如果出现采摘生果实的现象则该次果实采摘失败。采摘耗时取 10 次采摘时间的平均值;采摘成功率取 10 次采摘成功率的平均值。

3.2 试验结果与分析

试验结果如表 2 所示。如果果实域的果实数目相同,采摘所需时间基本一致;主要是因为采用的果实模型大小基本一致,故相同数量果实的果实域的宽度相似;采摘该果实域时夹指张开距离基本一致,剪切速度相同,故闭合所需时间也一致。因为夹指距离越大,闭合时间越长,所以当果实域的果实越



图7 末端执行器采摘试验

Fig.7 Harvesting test scene of end-effector

多,采摘所需时间越长。另外,果实在垄壁上的垂直位置也是影响采摘时间的一个原因,所以相同粒数果实的采摘时间也有差异。机械臂的末端定位误差对采摘时间影响不大;因为采摘过程中,各个动作基本固定,而动作的执行时间和执行速度都和定位误差无关。

表2 草莓末端执行器采摘试验结果

Tab.2 Test results of harvesting strawberries by end-effector

定位 误差/mm	1 粒果实		2 粒果实		3 粒果实	
	采摘	成功	采摘	成功	采摘	成功
	时间/s	率/%	时间/s	率/%	时间/s	率/%
±3	1.99	100	2.14	100	2.29	97
±5	2.02	100	2.13	100	2.30	100
±7	1.98	95	2.13	90	2.26	97

当定位误差在±7 mm 范围内时,采摘含 1 粒和 3 粒果实的果实域时,分别出现一粒果实脱落;原因是采摘完成后收集果实时,有一部分木质化严重的果梗卡断在了剪切刀片和夹持刀片之间,下次再采摘时,新的果梗不能再被夹持刀片切入到最终位置,所以剪切刀片剪断果梗后,较细的果梗可能就直接脱落了。采摘含 2 粒果实的果实域时,有 1 粒生草莓进入两夹指间,造成误采;其原因因为定位误差较大时,如果生草莓的重心在夹指上或者重心不在几何中心时则有可能会落入两夹指间。当定位误差在±3 mm 范围内时,采摘含 3 粒果实的果实域时有

1 粒果实脱落,其原因和上述一致;定位误差对采摘成功率几乎没有影响。采摘含 1、2、3 粒果实的果实域成功率分别为 98.3%、96.7%、98.0%,总成功率为 97.7%。

可见试验中采摘果实失败的主要原因是两刀片间卡断的部分果梗无法排出影响下次采摘时两夹指完全闭合到位。此外在采摘试验过程中,有剪切刀片不能完全将果梗剪切断的现象,而是末端执行器剪切完成后退过程中二次切断的;其原因和果实脱落的原因类似。针对这个问题,可将剪切位置处的两刀片间留出排出断梗的空间,或者将夹指刀片安置在刀槽夹指上来解决。

虽然采摘含 1、2、3 粒果实的果实域分别平均耗时 2.00、2.13、2.28 s,即采摘时间随着果实域中果实的数量增多而增加,但是采摘含多粒果实的果实域时,末端执行器采摘效率相对提高很多。

4 结论

(1) 在夹持剪切草莓果梗前,末端执行器前端贴着垄壁,能实现将 3 粒以下相互靠近的目标果实拢出来;如果提供枝叶遮挡果实的识别算法,也可将其拢出。这样可以减少目标果实外的枝叶和生果实的影响,提高末端执行器的容差。当定位误差在±5 mm 内时,可以完全将目标果实拢离垄壁。

(2) 采用夹持刀片进行对果梗夹持,提高了对不同直径果梗的适应性;对电动机采用速度和力矩控制方式,可以实现高速剪切,剪断并夹持住 3 粒以内果实的果梗。

(3) 垄壁仿形装置可以确保末端执行器前端按要求贴着垄壁,并且在机械臂到合适的图像采集位置发出相应的信号,确保图像采集处和垄壁的相对位置基本一致。

(4) 室内试验表明:从给出草莓位置信息到采摘完成,采摘含 1、2、3 粒果实的果实域平均耗时为 2.00、2.13、2.28 s,总成功率为 97.7%。

参 考 文 献

1 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 158 – 162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 158 – 162. (in Chinese)

2 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, 186.
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, 186. (in Chinese)

3 徐丽明,张铁中. 果蔬果实收获机器人的研究现状及关键问题和对策[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 38 – 42.
Xu Liming, Zhang Tiezhong. Present situation of fruit and vegetable harvesting robot and its key problems and measures in application[J]. Transactions of the CASE, 2004, 20(5): 38 – 42. (in Chinese)

4 张铁中,杨丽,陈兵旗,等. 农业机器人技术研究进展[J]. 中国科学:信息科学, 2010(增刊 1): 71 – 87.
Zhang Tiezhong, Yang Li, Chen Bingqi, et al. Research progress of agricultural robot technology[J]. Scientia Sinica

Informationis, 2010(Supp.1): 71 – 87. (in Chinese)

5 张凯良,杨丽,张铁中. 草莓收获机器人末端执行器的设计[J]. 农机化研究, 2009(4): 54 – 56.

6 张凯良,杨丽,王粮局,等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012,43(9): 165 – 172.
Zhang Kailiang, Yang Li, Wang Liangju, et al. Design and experiment of elevated substrate culture strawberry picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9): 165 – 172. (in Chinese)

7 Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160 – 171.

8 冯青春,郑文刚,姜凯,等. 高架栽培草莓采摘机器人系统设计[J]. 农机化研究, 2012(7): 122 – 126.

9 Hayashi S, Yamamoto S, Tsubota S, et al. Automation technologies for strawberry harvesting and packing operations in Japan[J]. Journal of Berry Research, 2014, 4(1): 19 – 27.

10 Wickham J S. Robot with 3D grasping capability: US,8306663B2[P]. 2010 – 5 – 11.

11 Dimeas F, Sako D V, Moulanianis V C, et al. Towards designing a robot gripper for efficient strawberry harvesting [C] // Proceedings of the RDDA 2013, 2013:1 – 7.

12 Yamamoto S, Hayashi S, Yoshida H, et al. Development of a stationary robotic strawberry harvester with a picking mechanism that approaches the target fruit from below[J]. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ, 2014, 48(3): 261 – 269.

13 Kondo N, Ninomiya K, Hayashi S, et al. A new challenge of robot for harvesting strawberry grown on table top culture [C] // 2005 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 053138, 2005.

14 谭益松,任立敏,张海波. 空间大型末端执行器抓捕容差优化及其仿真[J]. 机器人, 2012(6): 715 – 721.
Tan Yisong, Ren Limin, Zhang Haibo. Grapple tolerance optimization and simulation of large-scale space end-effector [J]. Robot, 2012(6): 715 – 721. (in Chinese)

15 丰飞,刘伊威,刘宏,等. 空间三指-三瓣式大容差末端执行器容差分析[J]. 机械设计与制造, 2014(4): 252 – 255.
Feng Fei, Liu Yiwei, Liu Hong, et al. Misalignment tolerance research of three fingers – three petals space end-effector with large misalignment tolerance[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(4): 252 – 255. (in Chinese)

16 李小城,刘梅英,牛智有. 小麦秸秆剪切力学性能的测试[J]. 华中农业大学学报, 2012, 31(2): 253 – 257.
Li Xiaocheng, Liu Meiyong, Niu Zhiyou. Test of shear mechanical properties of wheat stalks [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2012, 31(2): 253 – 257. (in Chinese)

17 Ruiz-Angulo A, Hunt M L. Measurements of the coefficient of restitution for particle collisions with ductile surfaces in a liquid [J]. Granular matter, 2010, 12(2): 185 – 191.

18 张铁中,张凯良,王粮局,等. 草莓采摘机器人精准采摘执行机构及垄作草莓采摘机器人:中国, ZL201210037967.8[P]. 2012 – 7 – 18.

An Efficient Strawberry Harvesting End-effector with Large Misalignment Tolerance

Wang Liangju¹ Zhang Tiezhong¹ Chu Jia¹ Yang Li¹ Zhang Jie¹ Duan Yunhong²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Agricultural Machinery, Beijing Prominion Publishing Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: For strawberry harvesting, when strawberries are overlapping or covered by leaves, high positional accuracy of end-effector is required and the recognition and detection algorithm is very complex and time-consuming, otherwise the strawberries will be abandoned. To solve the problem mentioned above, a large misalignment tolerance end-effector, which can be used for picking up multi-strawberries at one time, was designed. The end-effector, using the harvesting method of collecting strawberries down to up and away from obstacle, clamping and cutting stems, was composed of a collecting-clamping-cutting device and profiling ridge device. The end-effector was mounted on harvesting manipulators. Experiments were conducted and results showed that the proposed end-effector had satisfactory performance when positional error in the range of $\pm 7\text{ mm}$, and could pick up three ripe strawberries at one time without separating overlapped ripe strawberries; while fruits area containing single fruit, two fruits, or three fruits, the average time of picking one time respectively was 2.00 s, 2.13 s, 2.28 s, and the success ratio of harvesting was no less than 97.7%.

Key words: Strawberry Harvesting robot End-effector Large misalignment tolerance