doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.001

荔枝采摘机器人拟人指受力分析与夹持试验*

叶 敏 邹湘军 杨 洲 刘 念 陈炜文 罗陆锋 (华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室,广州 510642)

摘要:阐述了采摘机器人的新型拟人夹指机构,分析了夹持的力封闭性,建立了扰动条件下的荔枝母枝夹持模型, 导出了一种夹持力计算方法;用压力机对结果母枝进行了夹持试验,建立了夹持力、母枝直径等与抓举重力间的关 系,给出了定量描述;用机器人在野外环境下进行动态采摘试验,验证了夹指的可靠性。结果表明:所设计夹指结 构能适合不同直径母枝的稳定夹持,对母枝损伤小;所建立的回归方程有效,夹指在外力扰动情况下可以实现稳定 夹持;野外环境下使用15N夹持力采摘荔枝果串,夹持成功率为100%。 关键词:采摘机器人 荔枝 结果母枝 拟人夹指 合理夹持力 中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)09-0001-08

平图万尖方:11242 又顾怀识码:A 又草编号:1000-1298(2015)09-0001-08

Clamping Experiment on Humanoid Fingers of Litchi Harvesting Robot

Ye Min Zou Xiangjun Yang Zhou Liu Nian Chen Weiwen Luo Lufeng

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Fruit branch clamping used in robot harvesting has advantages of universal use and little damage on fruit, but the clamping stability and reasonable clamping force are the bottlenecks of finger design. Firstly, the novel humanoid fingers were elaborated and the clamping force closure was analyzed. Clip-model in the condition of disturbance was developed, and a new clamping force calculation method was deduced. Secondly, the branch clamping test was operated on press machine. The relationships among clamping force, branch diameter, and maximum snatch force were built, and the quantitative description was also established. Finally, tests were performed to verify the clamp reliability by harvesting robot in the field. Results showed that the novel humanoid fingers can realize stable clamping on different sizes of branches and have little damage on them. The clamping force model was valid. The stable clamping can be achieved with disturbance. The success rate was 100% when clamping force was 15N. This will provide some theory evidences for harvesting method and universal fruit picking manipulator. **Key words**: Harvesting robot Litchi Bearing branch Humanoid fingers Reasonable clamping force

引言

用机器人收获水果时,常用的机械夹持^[1]水 果表面方式易造成果实组织损伤^[2],因此,人们用 柔性衬垫、真空吸盘、磁流变等技术^[3-5]来改进夹 持机构。这种夹持单个果实表面的方式也无法用 于采摘串状的水果,例如荔枝果串。为采摘串状 水果及避免夹伤果实, 邹湘军等提出了拟人夹指 夹持结果母枝的采摘方式和结构^[6-7], 并用多类型 水果采摘机器人及其末端执行机构完成了荔枝、 柑桔和黄瓜的采摘试验。但为了优化夹指夹持 力, 不损伤压扁母枝, 确定结果母枝的夹持力与损 伤机制成为难题。

夹持稳定性及合理的夹持力是衡量机器人性能

收稿日期: 2015-02-13 修回日期: 2015-03-01

^{*}国家自然科学基金资助项目(31171457)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B10-2-1)

作者简介:叶敏,博士生,主要从事农业机器人、智能设计与制造研究,E-mail: yemin_scau@163.com

通讯作者: 邹湘军,教授,博士生导师,主要从事农业机器人、智能设计与制造研究, E-mail: xjzoul@163.com

的重要指标。夹持机构要求在扰动环境中能始终输 出合适的夹持力,平衡果串所受到的自然风力、机器 振动等外部载荷的干扰,防止被夹持果串从指间滑 落,产生跌落损伤^[8-9]。同时,夹持力应避免超过母 枝的生物组织阈值,引起母枝表皮破裂^[10]、影响新 果枝发芽生长、减产、降低水果品质^[11-12]。通过研 究发现,目前对夹持器的研究主要集中在对称夹指 对规则工件的抓取研究上^[13-19]。文献[20-23]针 对果蔬设计了柔顺抓持控制方法,对结果母枝的力 学特性^[24-27]研究也已引起关注,但母枝的几何参数 与生物机械属性差异性较大。目前,人们还较少研 究扰动环境下采摘机器人对荔枝结果母枝的机械夹 持与损伤机制。

本文从稳定夹持和结果母枝的生物力学特性入 手,先给出拟人指的结构,分析夹指与母枝间力学关 系和建模,提出一种母枝夹持力的计算方法。然后 通过夹持试验对夹指夹持能力、夹指对生物组织友 好夹持特性进行探索,得到相关量化参数。进一步 地,用自行研制的末端执行器在扰动环境中进行采 摘试验,验证夹指设计的可靠性,为拟人指夹持性能 优化和控制策略提供依据。

1 拟人指夹持的力封闭性分析

拟人夹指为左右两指结构。模拟了人类二指 夹持小型圆柱体状态,食指弯曲一角度,母指配 合,合作完成夹持。本文左夹指模拟食指,采用 V 型块结构,其夹角为2α,右夹指模拟母指为平板结 构,两指配合进行夹持(图1),拟人指处安装力传 感器。



图 1 夹指机械结构 Fig. 1 Mechanical structure of humanoid fingers (a) 俯视示意图 (b)正视示意图 1. 右夹指 2. 左夹指 3. 末端执行器

夹持接触点的布局直接影响到夹持的封闭 性^[28]。当母枝截面为圆形时,夹指 V 槽指面构成轮 廓的曲率半径小于被夹持的母枝截面的曲率半径, 夹指与母枝横截面间的接触点为 3 点,可看作多指 夹持。依据多指抓取的力封闭条件判断是否为力封 闭抓取。

力封闭的充要条件:当且仅当力螺旋空间的原

点在集合 *S* 的凸包的内部时, 抓取是力封闭的, 即 0 ∈ int conv(*S*) ⇔*S* 是力封闭的。其中 conv(·) 和 int(·)分别代表集合的凸包和内部^[29]。

如图 2 所示, P_1 和 P_3 为左夹指与母枝的接触 点, P_4 为右夹指与母枝的接触点。 n_1 、 n_3 和 n_4 分别 为接触点 P_1 、 P_3 和 P_4 处的内法向矢量, n_{11} 和 n_{12} 、 n_{31} 和 n_{32} 、 n_{41} 和 n_{42} 分别为接触点 P_1 、 P_3 和 P_4 处摩 擦锥的边界矢量对, S 为接触点 P_1 、 P_3 和 P_4 处摩擦 锥的二维平面交集域(阴影部分), P_1O 、 P_3O 和 P_4O 分别为接触点 P_1 、 P_3 和 P_4 处的力矢量, O 为所有力 矢量的焦点。 θ 为摩擦锥的锥角。



图 2 拟人夹指夹持结果母枝示意图 Fig. 2 Top view of fruit bearing branch grasped by humanoid fingers

由图2可看出,力螺旋空间的原点在集合S的 凸包的内部,满足力封闭的充要条件,故该新型夹持 机构能保证母枝得到稳定夹持。

当母枝截面是近似圆形或不规则形状时,会造成 P₁、P₃ 和 P₄ 沿指面方向有微小偏移,夹指与母枝 各接触点的摩擦锥最小交集域仍为非空集,满足力 封闭夹持条件。该设计提高了夹指对不规则截面母 枝的夹持适应能力。同时,龙眼、柑橘等果枝与荔枝 母枝相近,该结构可适合多种水果的采摘。

2 夹持力的计算

2.1 静态环境下的夹持力

不夹伤母枝的合理夹持力是拟人指结构设计的 重要依据。当两夹指夹紧母枝时,母枝受到果串的 自身重力、压力、接触面的摩擦力和力矩等作用。设 作用在两夹指上的压力 *F*。为夹持力,力水平作用于 接触点,夹指夹紧母枝且不滑动的条件为

$$\sum f_i = G \tag{1}$$

式中 *f_i*——单个接触点上的摩擦力 *G*——果串重力

2.2 扰动环境下的夹持力

夹指夹持时,夹指表面与母枝接触形成弹性压

痕,使得夹指镶嵌在母枝中。因受到局部扰动力,夹 指承受母枝施加的重力和扭矩,其夹持力还需要克 服该阻力。模型的坐标系建立见图3。将各空间力 分别向坐标系的 xOy 及 zOy(或 zOx)平面上投影表 示。假设母枝为刚体,着重讨论母枝的 x、y 轴 2 个 方向受外力时的夹持力,提出一种扰动环境下夹指 夹持母枝的夹持力计算方法。



Fig. 3 Coordinate system 1. 左夹指 2. 右夹指 3. 结果母枝 4. 果串

2.2.1 y 轴方向扰动下的母枝受力模型

当果串在 y 轴受到的外力 F_b 为负时,其受力情况如图 4 所示。A、B 为右、左夹指与母枝的接触点。 当夹指处于夹持临界状态时,也即母枝为不滑落状态。因外力作用,夹指 B 侧承受正压力 F_M,A 侧不承受正压力。由图 4 可知

$$F_{Bz} = F_{By} \cot \alpha_1 \tag{2}$$

$$f_B = \mu F_B \tag{3}$$

$$F_A = F_B \tag{4}$$

式中 α1----夹指边沿斜角

μ——摩擦因数,当夹指指面材料为铝材时,
 其静摩擦因数为0.2~0.6



(a) zOy 面 (b) xOy 面

根据母枝夹持状态受力简图(图 4a),分别对 A、B 点为转轴(转轴分别通过 A、B 点且垂直 zOy 面)列力矩平衡方程可得

$$\begin{cases} \sum M_{A} = 0 \\ G \frac{y_{1}}{2} + F_{B_{z}}y_{1} + F_{By}L_{1} + f_{By}L_{1} + \\ F_{NIy} \frac{L_{1}}{2} - F_{D} \left(L_{0} + \frac{L_{1}}{2}\right) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum M_{B} = 0 \\ - G \frac{y_{1}}{2} + F_{Az}y_{1} + F_{Ay}L_{1} + f_{Ay}L_{1} - \\ F_{NIy} \frac{L_{1}}{2} - F_{D} \left(L_{0} - \frac{L_{1}}{2}\right) = 0 \end{cases}$$

$$(6)$$

由图4中的几何关系有

$$L_1 = h \tan \alpha_1 + a \tag{7}$$

$$y_1 = D_1 \cos\alpha \tag{8}$$

其中
$$D_1 = D_g - 2h$$

式中 a ——夹指顶宽
 h ——夹指压入母枝深度
 D_1 ——直径
 D_g ——结果母枝的几何平均直径
将式(2)、(3)、(4)、(7)、(8)代入式(5)、(6)
解得

$$F_{B} = \frac{F_{D}L_{0}}{D_{1}\cos\alpha\cot\alpha_{1} + (h\tan\alpha_{1} + a)(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}$$
(9)

$$F_{N1} = \frac{F_D(h\tan\alpha_1 + a) - GD_1\cos\alpha}{\cos\alpha(h\tan\alpha_1 + a)}$$
(10)

故有预紧力
$$F_B$$
 在 x 方向的分力
 $F_x = \frac{F_B \sin(\alpha - \varphi_1)}{(11)}$

 $\cos \varphi_1$

其中 $\varphi_1 = \arctan \mu$

正压力在 x 方向的分力

$$F_{R_{1x}} = F_x + F_{N1} \sin\alpha \qquad (12)$$

果串受到y轴负方向扰动时夹指的夹持力

$$F_{C1} = 2(F_{R_{1x}} + F_x) \tag{13}$$

当果串受干扰外力 F_D 为正时,夹指夹持力可 参考该方法求得。

2.2.2 x 轴方向扰动下的母枝受力模型

当外力 F_D 为负时,夹指处于临界状态的受力 情况如图 5 所示。 G_1 、H 分别为右、左夹指与母枝的 接触点。根据母枝夹持状态受力简图(图 5a),分别 以 G_1 、H 点为转轴(转轴分别通过 G_1 、H 点且垂直 zOx 面)列力矩平衡方程可得

$$\begin{cases} \sum M_{G} = 0 \\ G \frac{D_{1}}{2} + 2F_{H_{2}}x_{1} + 2F_{H_{x}}L_{1} + \\ 2F_{N2x} \frac{L_{1}}{2} - F_{D}\left(L_{0} + \frac{L_{1}}{2}\right) = 0 \end{cases}$$
(14)



$$\begin{cases} \sum M_{H} = 0 \\ -G \frac{D_{1}}{2} \sin \alpha + F'_{2} x_{1} + F'_{x} L_{1} - \\ 2F_{N2x} \frac{L_{1}}{2} - F_{D} \left(L_{0} - \frac{L_{1}}{2} \right) = 0 \end{cases}$$
(15)

同理可解得

$$F_{H} = \frac{2F_{D}L_{0} - \frac{GD_{1}}{2}(1 - \sin\alpha)}{2x_{1}\cot\alpha_{1}(1 + \sin\alpha) + 4L_{1}\sin\alpha}$$
(16)

$$F_{N2} = \frac{F_D \left(L_0 + \frac{L_1}{2} \right) - \frac{GD_1}{2}}{L_1 \sin \alpha} -$$

$$\frac{(x_1\cot\alpha_1 + L_1\sin\alpha)\left[4F_DL_0 - GD_1(1 - \sin\alpha)\right]}{L_1\sin\alpha\left[2x_1\cot\alpha_1(1 + \sin\alpha) + 4L_1\sin\alpha\right]}$$
(17)

预紧力
$$F_H$$
 在 x 方向的分力
 $F_{Hx} = F_H \sin \alpha$ (18)
正压力在 x 方向的分力

$$F_{R_{2x}} = F_{Hx} + F_{N2} \sin\alpha \qquad (19)$$

当果串受到 x 轴负方向干扰时夹指的夹持力

$$F_{C2} = 2(F_{Hx} + F_{R_2}) \tag{20}$$

当果串外力 F_D为正时,夹指处于临界状态的 受力情况如图6所示。J、I分别为右、左夹指与母枝 的接触点。同理可得,夹指的夹持力为



Fig. 6 Disturbance in x-axis direction (F_D is positive) (a)zOx 面 (b)xOy 面

2.2.3 夹持力计算模型

2.2.2 节已导出了不同坐标方向的外力下的夹 持力 *F_{c1}、F_{c2}、F_{c3}*。此时,夹指设计夹持力 *F_c*取上 述各情况下计算夹持力中的较大值,故由式(13)、 (20)、(21)可得

$$F_{c} = \max(F_{c1}, F_{c3}, F_{c3})$$
(22)

3 夹持规律的试验验证与分析

3.1 静态夹持试验

3.1.1 材料与方法

荔枝结果母枝采自华南农业大学果园,直径 2~8 mm、长10~15 mm、无损伤。测量和计算加载 点处的几何平均直径、圆度等参数,根据图7模型, 在精密微控电子万能试验机(力值精度±0.5%,位 移精度±0.3%,分辨率±1/120000)上模拟夹指的 工况试验。设压力机对母枝的静压力为夹持力,推 拉力计对母枝的拉力为当前夹持力下夹指所能承受 的果串最大重力。



图 7 夹持模拟试验

Fig. 7 Clamping simulation experiment 1. 拉力计 2. 压力机 3. V型夹块 4. 平板夹块 5. 结果母枝

在单因素试验的基础上进行夹持结果母枝的正 交试验,讨论夹指的静态夹持性能。试验指标为夹 持特性参数:果串最大重力 F_s和压缩能 E_c。加载 后,依据记录仪上的母枝夹持与变形数据,计算各试 样的压缩能,该压缩能是指从夹指接触母枝开始,到 预定夹持力时吸收的能量,即夹持力对其位移的积 分。用拉力计把被夹母枝水平拉出,记录拉力。正 交试验的因素与水平如表1所示。

表	1	正交试验的因素水平表
ah 1	De	sign of orthogonal experimen

		因素	
水平	夹指夹持力	夹指加载速度	母枝直径
	F_c/N	$V/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	D_g/mm
1	10	10	小于4
2	15	15	4~5
3	20	20	大于5

按照正交表 L₉(3⁴)试验,每组试验重复 10 次, 共做 90 次夹持-卸载试验。方案见表 2。

Tab. 2 Test scheme and values of clamping property parameters

		F-sF-s5 F-s			
- Ard-(因素		果串最	
 山短	夹持	加载速度	几何平均	大重力	压珀 台(I
岁	力/N	$/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	直径/mm	/N	月E∕mJ
1	10	10	小于4	5.59	0.002
2	10	15	4~5	5.41	0.001
3	10	20	大于5	5.63	0.001
4	15	10	4~5	9.67	0.003
5	15	15	大于5	7.19	0.001
6	15	20	小于4	11.26	0.003
7	20	10	大于5	8.64	0.007
8	20	15	小于4	13.39	0.011
9	20	20	4~5	13.77	0.008

3.1.2 夹持阶段变化规律

夹持单因素试验结果分析如下:

(1)该夹指能适应不同直径结果母枝的夹持, 夹持过程无明显生物屈服现象。

(2)相同夹持力夹持不同平均几何直径的结果 母枝时,其夹持力与变形量之间具有相似的曲线关 系。由图8可知该曲线存在明显拐点,夹持过程分 为夹紧阶段与稳定加载阶段。随着两夹块合拢结果 母枝发生形变并产生变形抗力,夹紧阶段曲线存在 抖动,此阶段力增加的幅度远小于变形量增加幅度。 拐点后试样被压实,曲线迅速上升。在稳定加载阶 段,夹紧力与变形量呈近似直线关系,直到加载完 成。





(3)结果母枝几何平均直径对夹持有一定影响,从式(13)、(20)、(21)等也可以看出,夹持力与母枝直径相关。试验表明,较小直径结果母枝在被夹紧前大部分已位于V槽的定位范围内,基本完成定位夹持。随着结果母枝直径的增加,较小的V槽对粗大结果母枝的定位及结果母枝弹性变形过程变长,导致夹紧阶段变形量增加。

(4) 从图9可知,随着载荷的增加母枝变形也

相应增加。不同夹持力下的曲线斜率相近且均呈正 相关关系,表明不同夹持力下母枝压缩性能较接近。



3.1.3 结果分析

夹持正交试验结果的平均值如表2所示。

对夹持特性参数影响显著的因素由大到小的顺 序为:夹持力、几何平均直径、加载速度。根据表 2 结果建立结果母枝夹持特性回归方程如表 3 所示。

表 3 夹持特性参数的回归方程 Tab. 3 Regression equations of clamping property parameters

回归方程	R^2	F	Р
$F_g = 0.639 F_c + 0.225 V - 1.463 D_g + 3.302$	0. 970	26. 572	0.002
$E_c = 0.\ 001 F_c + 5.\ 8 \times 10^{-5} V -$ $0.\ 001 D_g - 0.\ 002$	0. 918	8.964	0. 019

在 *P* = 0.05 置信水平下,上述夹持特性与试验 因素的回归方程均呈显著, *R*²均在 0.9 以上,表明 所建立的回归方程是有效的。

通过回归方程可以看出,使用10~15N的夹持 力即能满足果实收获要求。而夹持力继续增大,结 果母枝将继续吸收压缩能并导致破裂损伤,无益于 采摘作业效率的提高。

在实际采摘过程中,可依靠视觉拍摄的目标图 像获取母枝直径、果串体积等数据,为预测果串重 力、夹持力大小提供信息。结合回归方程实现基于 视觉反馈的夹持力计算,提高机器人实用程度和智 能。

3.2 扰动夹持试验

3.2.1 材料与方法

使用自行研制的多果型果蔬采摘末端执行器^[7]进行扰动环境下的荔枝果串采摘试验(图10), 以评估夹持可靠性。使用的夹指为拟人的二指结构,采用电动机驱动。其上安装微型力传感器(精 度0.01 N)以实现不同的夹持力加载。试验地点在



图 10 拟人夹指采摘荔枝试验照片 Fig. 10 Photo of end-effector grasping litchi experiment

华南农业大学果园。

试验时夹持力为 10 N, 荔枝果串质量取 100 ~ 600 g。将目标果串夹紧高举 1 min, 然后将果串放置 在指定回收位置。若该过程中夹指与母枝没有发生 相对运动,则评定夹指能实现稳定夹持。

3.2.2 采摘试验结果分析

试验结果见表4。当夹持力为10N时采摘夹持 试验的成功率为90%。其中,3号试验失败的原因 是母枝较细,夹持部位过于靠近切割断面,机械臂在 运动回收过程中抖动较大,产生较大幅度的晃动,从 指间跌落。9号试验失败的原因是由于夹持界面上 的母枝表面树眼突出,导致夹指与母枝的接触不理 想,在外力扰动下跌落。

试验编号	母枝平均几何直径/mm	果串质量/g	试验结果
1	4.85	378	成功
2	5.65	523	成功
3	4. 29	513	失败
4	3.99	405	成功
5	3.75	252	成功
6	3.76	431	成功
7	4.82	508	成功
8	5.70	528	成功
9	5.66	423	失败
10	3.77	387	成功
11	5.36	346	成功
12	4.38	491	成功
13	3.83	288	成功
14	4. 21	495	成功
15	4. 21	260	成功
16	3.89	274	成功
17	4. 43	524	成功
18	5.84	342	成功
19	5.16	546	成功
20	4.80	378	成功

表 4 拟人夹指采摘试验结果 Tab. 4 Test results of humanoid fingers grasping

夹持力为15N时,重复上述试验,增大夹持力 后提高了母枝抵抗外力和力矩的能力,同时,母枝受 力变形加大,夹持界面中的突起形成的不稳定接触 面进一步挤压变形,增加了摩擦锥的作用数量,将不 稳定夹持转变为稳定夹持,完成了夹持收获作业。

结果表明,当夹指夹持力为15N时,该拟人夹 指能成功实现500g左右的荔枝果串采摘,且夹持 成功率为100%,荔枝果实损伤率为零。

3.3 夹持损伤

为了观测母枝夹持后的内部损伤^[10]情况,参照 文献[30-31]的方法计算其损伤度。

损伤体积为母枝观察端面中损伤面积占端面总 面积的大小。测量时选取适当 RGB 分量作为特征 分割尺度区分损伤面与正常组织面,并使用 Matlab 对两区域面积进行统计,从数值上定量表征母枝内 部受损程度。因拍摄同一试样的观察端面时,试样 与相机的相对位置始终相同,因此在相同条件下拍 摄的结果具备可比性。

对比母枝受损观察端面可知(表5),母枝受损 情况与母枝平均直径、夹持力相关。

表 5 结果母枝观察端面实物图

Tab. 5 End surface of bearing brand



大直径母枝的内部损伤多为木质部与表皮剥 离。小直径母枝除该缺陷外,还包括髓心处的细微 裂纹。将夹持后的母枝端面与未受载的初始端面对 比可知,随着夹持力增大,损伤体积增大,但增长幅 度较小。损伤体积平均增长8%,表明该新型夹指 的结构与尺寸设计较优,对母枝的机械夹持损伤小。

4 结论

(1) 拟人夹指具有多指抓取特性,夹持稳定性

好,简化了机构的自由度和控制难度。

(2)夹指工作时与母枝形成充分的凹凸镶嵌作用,所建立夹持模型能为机器人控制系统的设计提供理论依据。

(3)试验结果表明,该拟人夹指能有效控制作 用在荔枝果串上的外部扰动力和力矩。在10N的 夹持力下采摘成功率为90%,15N的夹持力下采摘成功率为100%。夹持效果良好,对荔枝果实无损伤。

(4)研究结果对夹持结果母枝的采摘方式具 有借鉴作用,为通用采摘机器人提供了新的理论 依据。

参考文献

- 1 Zhao Dean, Lv Jidong, Ji Wei, et al. Design and control of an apple harvesting robot [J]. Biosystems Engineering, 2011, 110 (2): 112-122.
- 2 刘继展,白欣欣,李萍萍,等. 果实快速夹持复合碰撞模型研究[J]. 农业机械学报, 2014,45(4):49-54. Liu Jizhan, Bai Xinxin, Li Pingping, et al. Complex collision model in high-speed gripping of fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):49-54. (in Chinese)
- 3 Hayashi S, Takahashi K, Yamamoto S, et al. Gentle handling of strawberries using a suction device[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 348 356.
- 4 Pettersson A, Davis S, Gray J O, et al. Design of a magnetorheological robot gripper for handling of delicate food products with varying shapes[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 332-338.
- 5 Li P, Lee S, Hsu H. Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems [J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 351-366.
- 6 叶敏,邹湘军,蔡沛锋,等.水果采摘机器人通用夹持机构设计[J].农业机械学报,2011,42(增刊):177-180. Ye Min, Zou Xiangjun, Cai Peifeng, et al. Clamping mechanism of fruits harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.): 177-180. (in Chinese)
- 7 邹湘军,邹海鑫,孙权,等. 多果型多功能果蔬采摘轻量化末端执行器及其机器人:中国, ZL 201010565235.7[P]. 2012-07-04.

Zou Xiangjun, Zou Haixin, Sun Quan, et al. Multi-fruits and multifunction manipulator and robot in lightweight design: China, ZL 201010565235.7[P]. 2012-07-04. (in Chinese)

- 8 Nahavandi S, Jashim Uddin M, Saadat M, et al. Heavy tools manipulation by low powered direct-drive five-bar parallel robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(11): 1450 - 1461.
- 9 李智国. 基于番茄生物力学特性的采摘机器人抓取损伤研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011. Li Zhiguo. Study on the grasp damage of harvesting robot based on the biomechanical properties of tomato fruits[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)
- 10 邵卓平.木材损伤断裂与木材细观损伤基本构元[J].林业科学,2007,43(4):107-110.
 Shao Zhuoping. Wood damage-fracture and wood meso-damage elements[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(4):107-110.
 (in Chinese)
- 11 van Henten E J, Hemming J, van Tuijl B, et al. An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses [J]. Autonomous Robots, 2002, 13(3): 241-258.
- 12 李建国. 荔枝学[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- 13 秦庆华. 重载锻造操作机夹持接触力分析及动态特性研究[D]. 长沙:中南大学, 2011. Qin Qinghua. Analysis of contact forces anddynamical characters of the heavy forge[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese)
- 14 Bicchi A, Kumar V. Robotic grasping and contact: a review [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000,1:348-353.
- 15 Ramakrishna K, Sen D. Curvature based mobility analysis and form closure of smooth planar curves with multiple contacts [J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 75: 131 - 149.
- 16 Stückler J, Steffens R, Holz D, et al. Efficient 3D object perception and grasp planning for mobile manipulation in domestic environments[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(10): 1106-1115.
- 17 Nikandrova E, Laaksonen J, Kyrki V. Towards informative sensor-based grasp planning[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(3): 340-354.
- 18 Kragten G A, van der Helm F C, Herder J L. A planar geometric design approach for a large grasp range in underactuated hands [J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(8): 1121-1136.
- 19 Kragten G A, Herder J L. The ability of underactuated hands to grasp and hold objects [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(3): 408-425.
- 20 姬伟,罗大伟,李俊乐,等. 果蔬采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. 农业工程学报, 2014,30(9): 19-26. Ji Wei, Luo Dawei, Li Junle, et al. Compliance grasp force control for end-effector of fruit-vegetable picking robot[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(9):19-26. (in Chinese)

- 21 王学林,姬长英,周俊,等. 基于灰色预测控制的果蔬抓取系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010,26(3): 112-117. Wang Xuelin, Ji Changying, Zhou Jun, et al. Design and experiment of fruit and vegetable grasping system based on grey prediction control[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 112-117. (in Chinese)
- 22 Li Z, Li P, Yang H, et al. Stability tests of two-finger tomato grasping for harvesting robots [J]. Biosystems Engineering, 2013, 116(2): 163-170.
- 23 周俊,朱树平.农业机器人果蔬抓取中滑觉检测研究[J].农业机械学报,2013,44(2):171-176. Zhou Jun, Zhu Shuping. Slippage detection in gripping fruits and vegetable for agricultural robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(2):171-176. (in Chinese)
- 24 吴良军,杨洲,洪添胜,等. 荔枝树枝力学特性的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012,28(16): 68-73.
 Wu Liangjun, Yang Zhou, Hong Tiansheng, et al. Experimental study on mechanical properties of litchi branches [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 68-73. (in Chinese)
- 25 Xavier J, de Jesus A, Morais J, et al. Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 207-215.
- 26 陈燕,蔡伟亮,向和平,等. 面向机器人采摘的荔枝果梗力学特性[J]. 农业工程学报, 2012,28(21): 53-58. Chen Yan, Cai Weiliang, Xiang Heping, et al. Mechanical properties of litchi stem for harvesting robots[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 53-58. (in Chinese)
- 27 Benjamin A Hook, Carolyn A Copenheaver. Compression wood formation in *Pinus strobus* L. following ice storm damage in southwestern Virginia, USA[J]. Journal of the Torrey Botanical Society, 2011, 138(1): 52-61.
- 28 文双全. 机器人多指手抓取规划算法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- Wen Shuangquan. Multi-fingered robotic hand grasp planning[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- 29 Xiong Y. Theory of point contact restraint and qualitative analysis of robot grasping [J]. Science in China, Series A-Mathematical, Physical, Astronomical and Technical Sciences, 1994, 37(5): 629-640.
- 30 Saldaña E, Siche R, Luján M, et al. Review: computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables[J]. Brazilian Journal of Food Technology, 2013, 16(4): 254 272.
- 31 杨晓清,王春光. 河套蜜瓜机械特性与静载损伤关系的研究[J]. 农业工程学报. 2008,24(3): 31-37. Yang Xiaoqing, Wang Chunguang. Relationship between mechanical properties and damage of Hetao muskmelons under static compression[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(3):31-37. (in Chinese)

(上接第38页)

- 6 陈海燕,张爱华,胡世亚. 基于局部纹理差异性算子的高原鼠兔目标跟踪[J]. 农业机械学报,2015,46(5):20-25. Chen Haiyan, Zhang Aihua, Hu Shiya. The object tracking of *Ochotona curzoniae* based on the local texture difference operator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):20-25. (in Chinese)
- 7 Li Peihua. A novel color based particle filter algorithm for object tracking [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(12):2454 2463.
- 8 Isard M, Blake A. ICONDENSATION: unifying low-level and high-level tracking in a stochastic framework [C] // Proceedings of European Conference on Computer Vision, 1998: 893 - 908.
- 9 Khan Z, Balch T, Dellaert F. MCMC-based particle filtering for tracking a variable number of interacting targets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(11): 1805-1819.
- 10 Zhao Tao, Nevatia R. Tracking multiple humans in crowded environment [C] // Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004, 2:406 413.
- 11 Roberts G O, Rosenthal J S. Examples of adaptive MCMC[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2009,18(2): 349-367.
- 12 Kwon J, Lee K M. Tracking of abrupt motion using Wang Landau Monte Carlo estimation [C] // Proceedings of the10th European Conference on Computer Vision, 2008: 387 – 400.
- 13 Kwon J, Lee K. Wang Landau Monte Carlo-based tracking methods for abrupt motions [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(4): 1011 - 1024.
- 14 Zhou Xiuzhuang, Lu Yao. Abrupt motion tracking via adaptive stochastic approximation Monte Carlo sampling [C] // Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2010:1847 - 1854.
- 15 Wang F G, Landau D P. Efficient multiple-range random walk algorithm to calculate the density of states [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(10): 2050 - 2053.
- 16 Su Yingya, Zhao Qingjie, Zhao Liujun. Abrupt motion tracking using a visual saliency embedded particle filter [J]. Pattern Recognition, 2014, 47:1826-1834.
- 17 Li Xucheng, Wang Fasheng, Lu Mingyu. Performance evaluation of abrupt motion trackers [C] // IEEE International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics, 2014:20-23.

8