

自锁式茶梗夹持器设计*

何雪军¹ 王进¹ 陆国栋¹ 唐小林²

(1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027;

2. 中华全国供销合作总社杭州茶叶研究所, 杭州 310016)

摘要:为实现梗叶分离过程中茶鲜叶的整列夹持,设计了一种由曲柄滑块机构和RRR杆组构成的自锁式夹持器。理论分析表明,当机构参数选取不当时,可能产生夹爪回缩现象,不利于小直径物体的夹持,通过限制回缩高度可避免这一问题。通过机构分析,建立了夹持器各参数之间的依赖关系,在此基础上给出了夹持器关键参数的确定方法,将问题转变为一个超越方程组并用粒子群算法加以求解。试验结果表明,采用该方法设计的夹持器能较好地实现夹紧自锁的功能,且茶梗的夹持长度在5~15 mm之间较为适宜。

关键词:茶梗 夹持器 末端执行器 设计 自锁

中图分类号: TH12; S571.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0157-06

引言

春茶中后期,茶叶的生长十分迅速,呈现出叶片肥大、茶梗粗老的特点。茶梗的存在,严重影响了成品茶的品质。为此,一些传统名茶,如六安瓜片、铁观音等专门设有扳片工艺,以获取优良的鲜叶原料。但这种方法效率较低,且容易疲劳,采用机械进行梗、叶分离是一种可能的方法,但其首要问题是实现茶鲜叶的正确夹持及有序输送,因此涉及夹持器的设计。

作为机械手的末端执行元件,夹持器能够代替人手,在高温、高压、有毒等恶劣环境下工作,极大地提高了生产率和工厂的自动化水平。然而,夹持器一般不具备通用性,它总是与特定的对象紧密结合。近年来,随着新兴科学技术的发展,各种新颖的夹持器被开发出来。在食品科学领域,研究人员利用磁流变液、充气橡胶开发出能自适应物体形状的夹持器^[1-2];在半导体领域,利用旋流、伯努利原理,开发出非接触式夹持器^[3-4];在微机械领域,利用形状记忆合金、压电效应,开发出微型夹持器^[5-6]。在农业机械领域,用于果蔬采摘、嫁接、幼苗移栽的夹持器更是层出不穷^[7-10]。此外,通用性更强的仿人型多指灵巧手^[11],以及成本低廉、控制简单的欠驱动手爪也从未停止过研究^[12-13]。

传统的两指式夹持器由于结构简单可靠、技术

成熟,目前在工业中仍占主导地位。Chen较为全面地总结了这类夹持器的受力分析及设计问题^[14]。Belfiore等列出了64种可能的构型^[15],但它们多适用于较大物体的夹持,且一次所能夹持的物体数量有限。

本文设计一种自锁式夹持器,实现整排茶鲜叶的夹持,为梗、叶分离创造条件。

1 茶梗夹持器方案设计

图1为茶梗夹持器的两种工作方案。第1种方案(图1a),夹持器在A位置夹住茶梗,然后沿逆时针旋转,将茶鲜叶带到水平位置B进行梗、叶分离,完成后夹持器继续转动,到达C位置后释放茶梗,最后沿原路返回。上述动作采用常规的气动夹持器即可完成。但当茶鲜叶不只一根,而是一排时,夹持器的数量相应增加,控制成本急剧上升。为此,在方案2(图1b)中,延长了夹爪宽度,使之一次能夹持多根茶鲜叶,并增加了夹持器的数量(如6个)。当夹持器到达C位置后不再原路返回,而是继续前进。这样,当夹持器I夹取茶梗的同时,夹持器II已在运送途中,而夹持器III则处于梗叶分离工序,夹持器IV释放茶梗,从而提高了加工效率。但每个夹持器作360°回转,采用气动控制会使管线发生缠绕。采用电动机驱动^[16],存在同样的问题。为确保夹紧力撤消后仍能实现可靠夹紧,要求夹持器具有自锁

收稿日期:2013-05-22 修回日期:2013-07-05

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD01B03-4)

作者简介:何雪军,博士生,主要从事农业机械自动化及图像处理研究,E-mail:hexuejun@zju.edu.cn

通讯作者:王进,副教授,主要从事CAD/CG研究,E-mail:dwjcom@zju.edu.cn

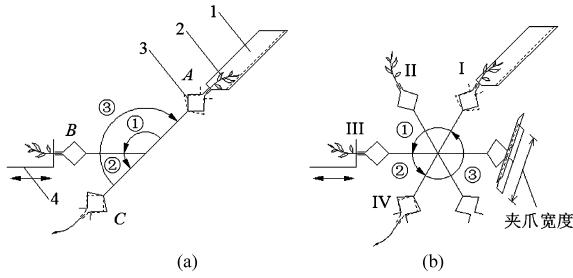


图1 夹持器的工作方案
Fig.1 Work scheme of gripper
(a) 方案1 (b) 方案2

1. 倾斜滑槽 2. 茶鲜叶 3. 夹持器 4. 梗叶分离装置

功能。

本文采用如图2所示的组合式夹持机构。该机构由曲柄滑块机构和RRR杆组构成,且两者的运动平面互相垂直。当曲柄与连杆共线时,实现物体的夹紧并可靠自锁。

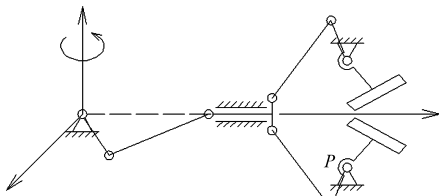


图2 组合式夹持器
Fig.2 Combinatorial gripper

2 夹爪回缩现象及规避方法

2.1 小直径物体夹持中的夹爪回缩现象

由于夹爪和机架在 P 点铰接(图2),在顺利夹持大物体的情况下,有可能漏夹小物体(图3a)。这是由于夹爪在向内转动的同时产生了回缩。定义夹爪从松开到夹紧的过程中,夹爪最外侧点沿竖直方向的下降高度为回缩高度 H (图3b)。当茶梗的伸入长度 h 小于夹爪的回缩高度时,茶梗不能被夹住。当 $\alpha = \pi/2$ 时, H 值已远超许可范围,难以实现夹持(图3c)。因此,一般取 $\alpha < \pi/2$ 。从图中还可以看出,夹爪回缩受夹爪半长 e 、支撑臂长度 l 、方位角 α 等参数的影响。

从图3b可推导出

$$H = l \cos(\gamma - \alpha) + e \sin \gamma - l \cos \alpha - e \quad (1)$$

其中,参数 γ 决定了夹持器的张开角度,为使结构紧凑,一般在 $\pi/4$ 附近取值。

2.2 支撑臂长度 l 对回缩高度的影响

当 $\gamma = \pi/4, e = 8 \text{ mm}$, l 分别取 10、15、20、25 mm 时, H 随 α 的变化曲线如图4所示。从图中可以看出, l 越小,曲线越平坦。当 $H = 0$ 时, l 越小, α 越大。 $H < 0$ 意味着尺寸关系发生了翻转,有利于夹住茶梗。因此,当 $l = 10 \text{ mm}$ 时, α 的值应取在 M 点左

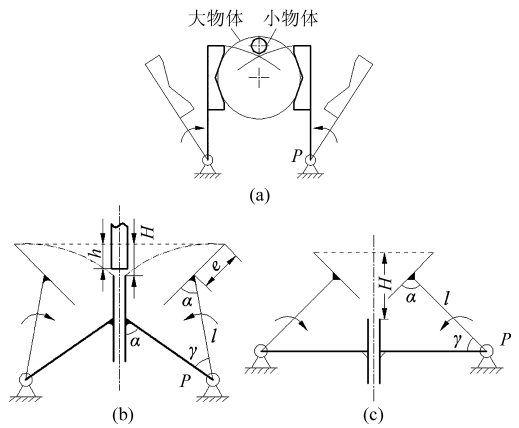


图3 夹爪的回缩现象

Fig.3 Clamping jaws' retraction phenomenon
(a) 不同大小物体的夹持 (b) 回缩高度的定义 (c) 回缩较为明显的情况

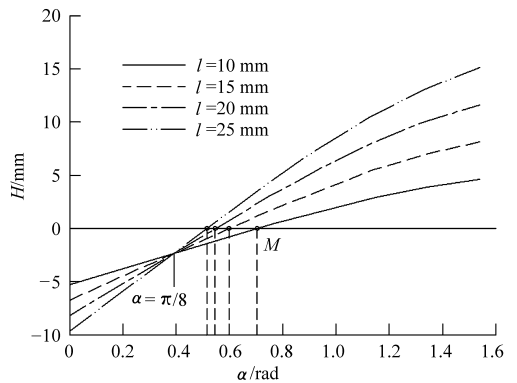


图4 在不同支撑臂长度 l 下回缩高度 H 与方位角 α 的关系曲线

Fig.4 Relation curve between retraction height and azimuth angle at different support arm lengths

侧。另外,当 $\alpha = \pi/8$ 时,由式(1)可得 $H = (\sqrt{2}/2 - 1)e$,而 $e = 8 \text{ mm}$,因此 H 与 l 无关,在图4中表现为4条曲线交于一点。

2.3 夹爪半长 e 对回缩高度的影响

当 $\gamma = \pi/4, l = 20 \text{ mm}, e$ 分别取 5、8、10、15 mm 时, H 随 α 的变化曲线如图5所示。从图中可以看出,当 α 一定时, e 越大, H 越小。当 $H = 0$ 时, e 越大, α 越大。在图5中,4条曲线为上、下平移关系。

2.4 夹爪回缩现象的规避

为避免出现夹爪回缩,只需保证

$$H < 0 \quad (2)$$

由图4可知, α 越小,式(2)越容易满足。例如,图4中 $l = 20 \text{ mm}$ 的曲线,取 $\alpha = 20^\circ = 0.35 \text{ rad}$ 即可满足要求,图6a给出了对应的机构形式。另外,当 $\alpha \rightarrow 0$ 或 $l \rightarrow 0$ 时, P 点位置无限趋近中心线,对应的机构退化为图6b。其中,粗实线和细实线分别代表闭合及张开位置。

设驱动力为 F ,在上述两种情况中,分力 F' 对 P

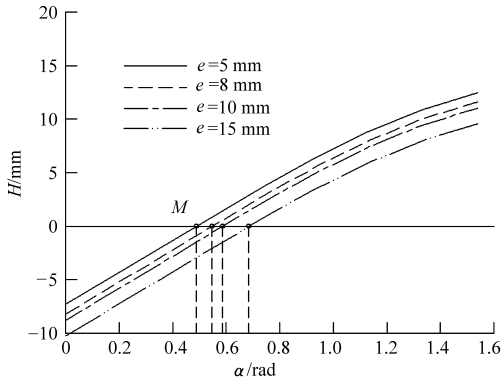


图 5 在不同夹爪半长 e 下回缩高度 H 与方位角 α 的关系曲线

Fig. 5 Relation curve between retraction height and azimuth angle at different half jaw-lengths

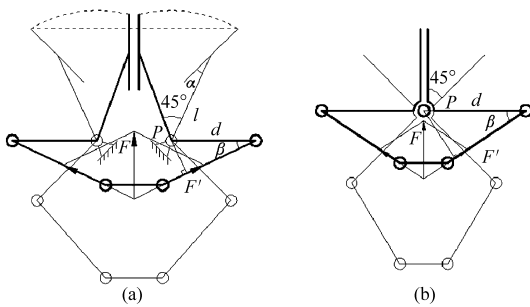


图 6 典型构型与极端情况

Fig. 6 Typical configuration and extreme case

(a) 夹爪无回缩 (b) 极端情况

点的力矩 T 均与 β 角无关, 仅 P 点位置有所不同, 即

$$T = F' d \sin \beta = \frac{F}{2 \sin \beta} d \sin \beta = \frac{F d}{2} \quad (3)$$

由图 6b 可知, 在极端情况下, 夹持范围更大, 结构更加紧凑, 但铰链不易布置。

3 夹持器尺寸参数确定方法

3.1 夹持器机构尺寸参数分析

将曲柄滑块机构所在平面旋转至夹爪所在平面, 并不影响机构的运动特性, 如图 7 所示。

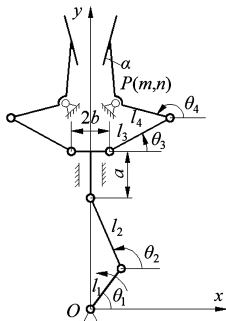


图 7 夹持器尺寸参数分析

Fig. 7 Analysis of gripper's size parameters

以曲柄与机架的铰接点为原点, 滑块导路方向

为 y 轴, 建立坐标系 Oxy 。

由图 7 可知

$$l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (4)$$

故 $l_2 \sin \theta_2 = \sqrt{l_2^2 (1 - \cos^2 \theta_2)} = \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \cos^2 \theta_1}$, 由此可得

$$\theta_2 = \arcsin \sqrt{1 - (l_1/l_2)^2 \cos^2 \theta_1} \quad (5)$$

设 P 点坐标为 (m, n) , 则

$$\overline{OP} = l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} + ai + b + l_3 e^{i\theta_3} + l_4 e^{i\theta_4} \quad (6)$$

其中, 尺寸 b 主要考虑到安装方便, 尺寸 a 则是为了使滑块获得正确的导向。

将实部和虚部展开得

$$\begin{cases} l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + a + l_3 \sin \theta_3 + l_4 \sin \theta_4 = n \\ b + l_3 \cos \theta_3 + l_4 \cos \theta_4 = m \end{cases} \quad (7)$$

令 $m - b = M$, $n - l_1 \sin \theta_1 - \sqrt{l_2^2 - l_1^2 \cos^2 \theta_1} - a = N$, 则式 (7) 变为

$$\begin{cases} l_4 \sin \theta_4 = N - l_3 \sin \theta_3 \\ l_4 \cos \theta_4 = M - l_3 \cos \theta_3 \end{cases} \quad (8)$$

$$l_4^2 = (N - l_3 \sin \theta_3)^2 + (M - l_3 \cos \theta_3)^2 = M^2 + N^2 + l_3^2 - 2Nl_3 \sin \theta_3 - 2Ml_3 \cos \theta_3$$

整理得 $N \sin \theta_3 + M \cos \theta_3 = C$

$$C = \frac{M^2 + N^2 + l_3^2 - l_4^2}{2l_3}$$

用半角公式展开, 可解得

$$\theta_3 = 2 \arctan \frac{N - \sqrt{N^2 + M^2 - C^2}}{M + C} \quad (9)$$

由式 (6) 可得

$$\theta_4 = \arccos \frac{M - l_3 \cos \theta_3}{l_4} \quad (10)$$

从式 (5)、(9)、(10) 可以看出, 当 P 点坐标及各杆长确定后, θ_2 、 θ_3 、 θ_4 均为 θ_1 的单值函数。

3.2 基于粒子群算法的夹持器尺寸参数求解

首先以 l_1 为基准, 将长度尺寸归一化 (令 $l_1 = 1$)。考虑到安装条件, 取 $a = 2, 2b = 0.65$ 。假设 θ_1 从 30° 转至 90° 的过程中, θ_4 从 140° 转到 180° ($\gamma = 40^\circ$)。根据端点条件可得

$$\begin{cases} l_3 \cos \theta_3 |_{\theta_1=30^\circ} + l_4 \cos \theta_4 |_{\theta_4=140^\circ} = m - b \\ l_3 \cos \theta_3 |_{\theta_1=90^\circ} + l_4 \cos \theta_4 |_{\theta_4=180^\circ} = m - b \end{cases} \quad (11)$$

在剩下的 5 个待定参数 l_2 、 l_3 、 l_4 、 m 、 n 中, 只有 3 个是独立的。其中, l_2 一般为 $1.2 \sim 2.0l_1$, m 应尽量取小值, 而 n 的数值决定了夹持器的总体尺寸 ($n > l_1 + l_2 + a$)。作为实例, 取 $l_2 = 1.4l_1, m = 0.35, n = 5$, 则由式 (9) 可知, 式 (11) 中的 $\cos \theta_3 |_{\theta_1=30^\circ}$ 和 $\cos \theta_3 |_{\theta_1=90^\circ}$ 是关于 l_3 、 l_4 的复杂函数, 式 (11) 是一个二元的超越方程组, 可通过数值方法求解。这里, 将它转换为如下优化问题

$$\begin{cases} \min f(l_3, l_4) = \\ (l_3 \cos \theta_3 |_{\theta_1=30^\circ} + l_4 \cos \theta_4 |_{\theta_4=140^\circ} - m + b)^2 + \\ (l_3 \cos \theta_3 |_{\theta_1=90^\circ} + l_4 \cos \theta_4 |_{\theta_4=180^\circ} - m + b)^2 \\ \text{s. t. } 0 \leq l_3 \leq 2 \quad 0 \leq l_4 \leq 2 \end{cases} \quad (12)$$

该优化问题可通过粒子群算法求解。粒子群算法是一种基于群体智能的随机优化方法。在一个拥有 m 个粒子的 D 维粒子群中,假设第 i 个粒子的位置为 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$,速度为 $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$,第 i 个粒子的历史最优位置为 $\mathbf{p}_{bi} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})$,整个种群的历史最优位置为 $\mathbf{g}_{bi} = (g_1, g_2, \dots, g_D)$,则第 i 个粒子的位置和速度按以下方程变化^[17]

$$\mathbf{x}_{id}^{k+1} = \mathbf{x}_{id}^k + \mathbf{v}_{id}^{k+1} \quad (13)$$

$$\mathbf{v}_{id}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id} - \mathbf{x}_{id}^k) + c_2 r_2 (g_d - \mathbf{x}_{id}^k) \\ (i = 1, 2, \dots, m; d = 1, 2, \dots, D) \quad (14)$$

式中 ω ——惯性权重 c_1, c_2 ——学习因子
 r_1, r_2 —— $[0, 1]$ 之间的随机数

粒子位置优劣用适应值来评价,迭代的结果是种群的不断优化。

在本文中,粒子的位置 $\mathbf{x}_i = (l_3, l_4)$,位置和速度的初值取 $[0, 2]$ 之间的随机数。适应值取目标函数,其值越小越好。设定求解参数如下: $\omega = 0.7$, $c_1 = c_2 = 1.2$, $m = 200$, $D = 2$,最大进化代数 50。图 8 给出了 10 次求解过程中适应值的变化过程,求得相同最优解: $l_3 = 1.089$, $l_4 = 0.883$ 。

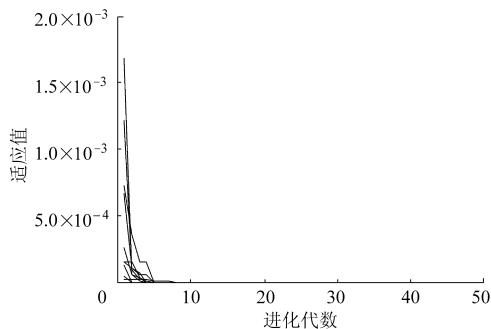


图 8 种群进化过程

Fig. 8 Population evolutionary process

3.3 设计实例

根据 3.2 节的求解结果,当 $l_1 = 20$ mm 时, $l_2 = 20 \times 1.4 = 28$ mm,同理可得 $l_3 = 21.8$ mm, $l_4 = 17.7$ mm, $a = 40$ mm, $b = 6.5$ mm, $m = 7$ mm, $n = 100$ mm。

前端夹持部分,根据第 2 节结果,取 $\alpha = 20^\circ$, $e = 8$ mm,则 $l = m / \sin \alpha = 0.35 \times 20 / \sin 20^\circ = 20.47$ mm。此时,由于 $\gamma = 40^\circ$,容易验证 H 值满足式(2),夹爪无回缩现象。根据这些参数,给出了单

个夹持器的设计(图 9a),以及虚拟样机模型(图 9b)。其中,夹持部位设有橡胶条,在保证夹紧的前提下,允许发生适量的弹性变形。

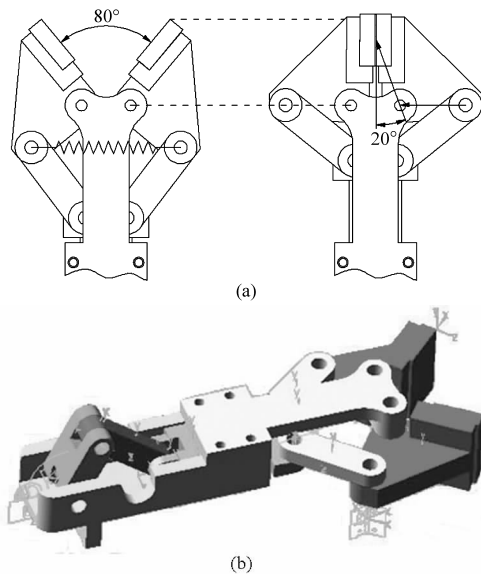


图 9 设计实例

Fig. 9 Design example

(a) 夹持器的张开与夹紧状态 (b) 夹持器的虚拟样机模型

图 10a 为夹持器在梗叶分离机上的应用。为提高工效,同一圆周上安装了 6 套夹持器(图中仅表示出 3 对),每两个夹持器的夹爪在延长后相连,形成夹板形状。夹持器由两侧气缸通过第 1 推动臂和第 2 推动臂驱动(图 10b)。第 1 推动臂驱动上侧夹持器夹紧并自锁;第 2 推动臂给下侧夹持器施加一个冲量,使自锁解除,并在弹簧作用下张开(图 9a)。当主轴旋转时,夹持器随之旋转,且夹紧状态能够保持。为避免运转时发生干涉,气缸的作用力通过平行四边形机构传递到夹持器的曲柄。

图 10c 为夹持器的实物模型,图中给出了夹持 4 根茶叶的情况(夹持根数可扩展)。夹住茶叶后,机构自锁,将茶叶带到另一工位,实施梗叶分离。

4 试验及分析

为验证夹持器的性能,取一芽 3~4 叶茶鲜叶 100 根,沿 50° 斜槽滑下,测定茶梗没入夹板的深度,其结果如图 11 所示。其中,夹持长度在 5~15 mm 之间的点较为合适。小于 5 mm 时,由于夹持长度过短,夹持力不够;大于 15 mm 时,梗部第一片叶子会被夹住,不利于分离。从图中还可以看出,夹持长度大于 15 mm 的情况占了较大部分,这是由于夹板张开形成间隙所致,为改善这一情况,只需在夹板底部设置挡板即可。对于未被夹住的茶鲜叶,有专门的回收装置,此处不再展开。

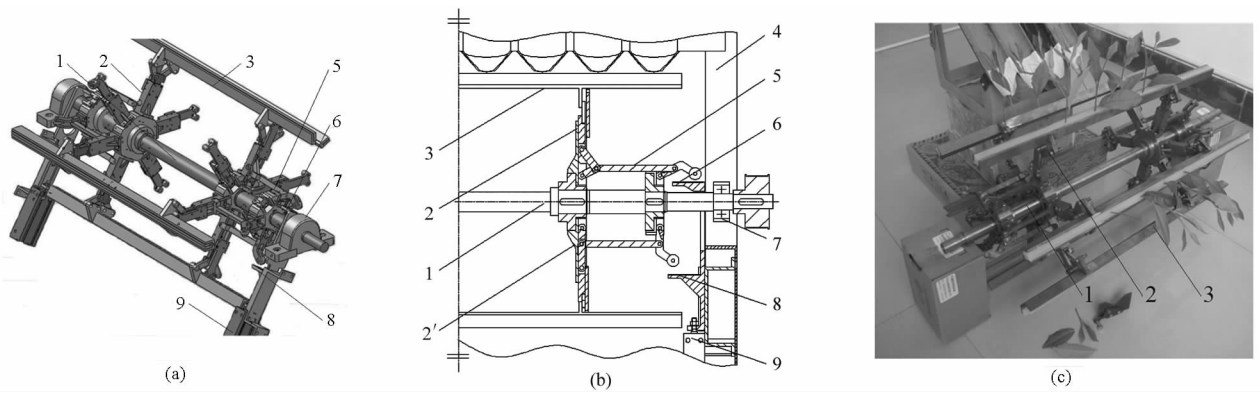


图10 茶梗夹持器的安装及驱动方式

Fig. 10 Installation and actuation of tea stalk grippers

(a) 夹持器应用实例 (b) 夹持器剖面图 (c) 夹持器实物模型

1. 主轴 2. 夹持器 3. 夹爪 4. 机架 5. 平行四边形机构 6. 第1推动臂 7. 轴承 8. 第2推动臂 9. 气缸

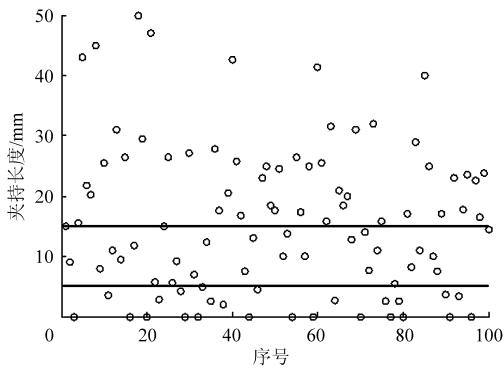


图11 茶梗的夹持长度

Fig. 11 Clamping length of tea stem

5 结论

(1) 设计了一种自锁式夹持器,解决了茶梗的整列夹持问题。

(2) 在夹取小直径物体时,存在夹爪回缩现象,回缩高度与支撑臂长度、方位角呈正相关,与夹爪半长呈负相关,且方位角的影响最为显著。合理选择参数,可以消除回缩现象。

(3) 建立了夹持器的尺寸参数计算模型,将夹持器的设计问题归结为一个二元超越方程组,并引入粒子群算法进行求解,结合实例,验证了设计计算方法的可行性。

参 考 文 献

- 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.
- Choi H, Koç M. Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2006, 46(12-13):1350-1361.
- Li Xin, Kagawa T. Development of a new noncontact gripper using swirl vanes [J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2013, 29(1):63-70.
- Davis S, Gray J O, Caldwell D G. An end effector based on the Bernoulli principle for handling sliced fruit and vegetables [J]. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 2008, 24(2):249-257.
- Kyung J H, Ko B G, Ha Y H, et al. Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges [J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 141(1):144-150.
- Agnus J, Hériban D, Gauthier M, et al. Silicon end-effectors for microgripping tasks [J]. *Precision Engineering*, 2009, 33(4):542-548.
- 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)
- 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(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(12):65-67. (in Chinese)
- 谭妮克,张铁中,杨丽. 蔬菜嫁接机器人砧、穗木套管工接合装置的设计[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(5):85-88.
Tan Nike, Zhang Tiezhong, Yang Li. Tube jointing device of grafting robot [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(5):85-88. (in Chinese)
- 孙国祥,汪小岳,何国敏,等. 穴盘苗移栽机末端执行器设计与虚拟样机分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(10):48-53.

- Sun Guoxiang, Wang Xiaochan, He Guomin, et al. Design of the end-effector for plug seedlings transplanter and analysis on virtual prototype [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 48–53. (in Chinese)
- 11 Kurita Y, Ono Y, Ikeda A, et al. Human-sized anthropomorphic robot hand with detachable mechanism at the wrist [J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(1): 53–66.
- 12 Gosselin C, Pelletier F, Laliberté T. An anthropomorphic underactuated robotic hand with 15 DOFs and a single actuator [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 749–754.
- 13 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.
- 14 Chen F Y. Force analysis and design considerations of grippers [J]. Industrial Robot: An International Journal, 1982, 9(4): 243–249.
- 15 Belfiore N P, Pennestrì E. An atlas of linkage-type robotic grippers [J]. Mechanism and Machine Theory, 1997, 32(7): 811–833.
- 16 文怀兴, 柳建华, 鲁剑啸, 等. 基于 ADAMS 的夹持机械手虚拟设计及其结构优化 [J]. 机械设计与制造, 2010(3): 75–77. Wen Huaixing, Liu Jianhua, Lu Jianxiao, et al. Virtual design and structural optimization of a kind of robot gripper based on ADAMS [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(3): 75–77. (in Chinese)
- 17 于颖, 李永生, 於孝春. 粒子群算法在工业优化设计中的应用 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 226–231. Yu Ying, Li Yongsheng, Yu Xiaochun. Application of particle swarm optimization in the engineering optimization design [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 226–231. (in Chinese)

Design of Self-locking Gripper for Tea Stalks

He Xuejun¹ Wang Jin¹ Lu Guodong¹ Tang Xiaolin²

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Hangzhou Tea Research Institute, China CO-OP, Hangzhou 310016, China)

Abstract: In order to realize column clamping of fresh tea in tea leaf and stalk separation, a self-locking gripper consisted of slider-crank mechanism and RRR assur group was designed. Analysis showed that, retraction phenomenon might happen if parameters were not suitably selected, which make it difficult to grip small diameter objects. However, it could be avoided by the constraining of retraction height. Secondly, relations between parameters were deduced, based on which an appropriate method was proposed on the determination of design parameters. The design problem was attributed to a transcendental equation, which was solved by particle swarm optimization method. Experimental results showed that grippers designed with this method can realize clamping and self-locking successfully, and a clamping length of 5 ~ 15 mm was suitable.

Key words: Tea stalk Gripper End-effector Design Self-locking