

多杆仿形式茶枝柑剥皮取肉装置设计与试验

莫嘉嗣, 谭莹, 何惠琪, 陈秋烁, 周锡恩, 闫国琦*

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 广东新会一带的茶枝柑是“南药”广陈皮唯一来源, 其初加工过程中剥皮取肉环节自动化程度低、并容易产生“汁溅”导致腐蚀广陈皮(俗称“烧皮”), 为了实现茶枝柑初加工全程自动化, 该研究研发一种新型茶枝柑自动剥皮取肉装置以解决上述问题。首先采用3D扫描与重构技术, 获得人手剥皮时果皮真实轨迹和姿态数据, 建立人手剥皮位姿数学模型; 然后以人手剥皮位姿信息为目标, 设计多杆仿形机构并使其轨迹和姿态逼近人手剥皮位姿; 最后对设计好的多杆仿形机构进行仿真验证和分析, 并加工装配出样机进行实际剥皮试验。试验结果表明, 该装置可较好模拟人手剥皮时的位姿曲线, 配合真空吸盘吸附, 可实现茶枝柑机械式自动剥皮, 然后配合包络式柔顺机械爪, 实现了茶枝柑无损剥皮取肉, 试验结果显示剥皮无损率为80%。该研究结果可为柑橘类水果剥皮初加工提供了理论和试验参考。

关键词: 初加工; 茶枝柑; 多杆仿形机构; 机械爪; 剥皮; 3D扫描; 运动轨迹

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403035

中图分类号: S23

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0283-09

莫嘉嗣, 谭莹, 何惠琪, 等. 多杆仿形式茶枝柑剥皮取肉装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 283-291. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202403035 <http://www.tcsae.org>

MO Jiashi, TAN Ying, HE Huiqi, et al. Design and experiment of multi-link profiling *Citrus reticulata* 'Chachi' peeling mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 283-291. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202403035 <http://www.tcsae.org>

0 引言

广陈皮产于广东新会一带^[1-3], 由茶枝柑新鲜果皮干燥陈化而成^[4-7]。广陈皮制作过程中, 茶枝柑剥皮、取肉工序自动化程度低, 仅依靠人工操作^[8], 在人工操作过程中, 会因操作不规范, 导致取肉时容易将酸性较强果汁滴落到果皮上, 导致“汁溅”后广陈皮晒制出现“烧皮”腐蚀现象^[9-11], 降低了其成品价格^[12-13]。因此, 亟需开发茶枝柑剥皮、取肉自动化设备。

茶枝柑剥皮、取肉是广陈皮制作的关键步骤^[14-15], 因其剥皮取肉生产环节机械化难度大, 柑橘类水果的剥皮、取肉装置仍处于初步研发阶段^[16-17]。从20世纪60年代起, 国外针对柑橘类水果剥皮机械开始研究, 研发了许多类型的剥皮机械^[18-19], 但是由于茶枝柑这类柑橘水果较特殊^[20-22], 与其他柑橘水果剥皮要求不同(茶枝柑保皮去肉, 其他柑橘类保肉去皮), 因此国外针对柑橘类水果剥皮的机械难以适用于茶枝柑无损剥皮^[23-24]。而国内针对茶枝柑剥皮取肉工艺, 开发了一些加工机械, 如苏其宏设计了一种柑橘剥皮装置^[25], 该装置使用半圆弧形破皮刀开皮, 但是该装置没有完全实现皮肉分离, 后续还需要人工进行剥皮, 效率较低。吴国荣设计了一

种柑橘果皮果肉自动分离装置^[26], 可以实现果肉与果皮分离, 但对果肉存在一定程度损伤, 导致酸性较强的果汁滴落在果皮上, 大大增加“烧皮”风险, 降低了广陈皮品质。闫国琦设计了一种离心式茶枝柑自动剥皮去肉装置^[27], 开皮刀开完三刀后, 使用一个圆弧形结构去皮刀抵住果柄处内囊果皮, 进行旋转运动, 利用果肉离心力大于果络约束力, 将果肉与果皮分离, 但是茶枝柑果络约束力比一般柑橘类水果大得多^[28-29], 在旋转过程中易将果皮撕裂, 达不到无损剥皮效果。现有设备大多针对柑橘类水果去皮留肉操作, 无法满足广陈皮初加工去皮留皮需求^[30]。目前虽然已有部分广陈皮初加工设备, 但均未解决剥皮取肉过程“汁溅”导致“烧皮”问题。

为了加快推进农产品初加工机械化高质量发展^[31], 本文针对上述茶枝柑剥皮机械所存在的问题, 研制一种采用多杆仿形机构模拟人工剥皮取肉加工设备。与上述茶枝柑初加工机械相比, 本设备具有灵活性高、结构简单、效率高、成本低等优势, 在确保不损伤果皮表面和果肉前提下, 该设备能够有效实现果皮和果肉分离, 得到满足广陈皮生产需要的三瓣状鲜皮^[32], 以期为茶枝柑初加工全程自动化提供参考。

1 茶枝柑人工剥皮位姿建模

1.1 人工剥皮位姿三维扫描与重构

广陈皮以果柄有无来区分鲜采果(有果柄)和落地果(无果柄), 茶枝柑传统开皮方法是在保留果柄基础上, 将茶枝柑从果脐处向果柄处均匀划分三刀, 常被开成三瓣并与果蒂相连、向外卷且形状整齐。图1为开皮

收稿日期: 2024-03-05 修订日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.52205266)

作者简介: 莫嘉嗣, 博士, 副教授, 研究方向为农业机器人。

Email: mo_jiasi@scau.edu.cn

*通信作者: 闫国琦, 博士, 副教授, 研究方向为事南药加工机械。

Email: ygq1978@scau.edu.cn

刀在果脐处切三刀后茶枝柑的状态,此时需要人工从开三刀交界处将果皮三瓣剥开。

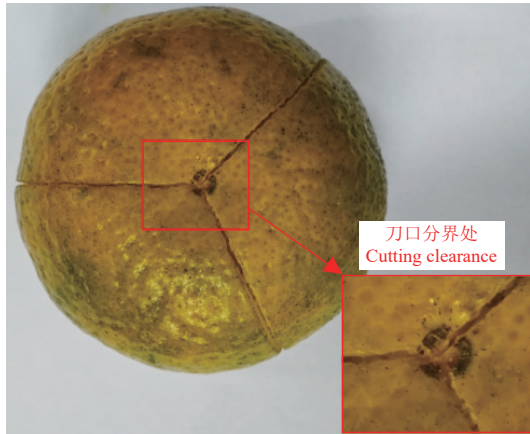


图1 开完三刀后的茶枝柑

Fig.1 *Citrus reticulata* 'Chachi' after three cuts

人工剥皮取肉往往能避免果皮和果肉受损,避免因“汁溅”后广陈皮晒制出现“烧皮”腐蚀现象,如图2所示。为获取人工剥皮时果皮真实轨迹和姿态(位姿)数据,利用3D扫描仪(领创三维, G5-630)对人工剥茶枝柑时果皮状态进行扫描。为保证本研究设计的剥皮取肉设备能够适应大部分茶枝柑尺寸(通常在55~80 mm左右),统计并选取了茶枝柑尺寸中位数的果实作为扫描样本(俯视直径为68 mm、高为56 mm)。



图2 “汁溅”对广陈皮质量的影响

Fig.2 The effect of juice splashing on the quality of *Citrus reticulata* 'Chachi'

对人工剥皮过程进行扫描,由于三瓣对称,只对其中一瓣进行扫描。扫描过程分成6个状态,为了表示每个状态果皮位置和姿态,在果皮扫描时引入姿态参照物(木棒),与果皮开皮分界处端部垂直连接,木棒与果皮交点为剥皮轨迹坐标 (x, y) ,而木棒轴向与坐标系夹角为剥皮姿态角 (θ) 。通过扫描和三维重构,获取茶枝柑在剥皮时6个关键点的位置和姿态,如图3所示。根据图3三维重构后的位姿图,进行人工剥皮的茶枝柑果皮受力分析可知,作用力垂直于果皮表面,并与剥皮位置和姿态高度相关。扫描得到的人工剥皮位姿曲线,可为后续模拟人工剥皮设备设计提供重要数据支撑。

1.2 人工剥皮位姿曲线拟合

将所得姿态参照物6个关键点处位置和姿态绘制曲线如图4所示,即人工剥皮位姿曲线。拟合数据点可以得到目标位置和姿态曲线方程如下所示:

曲线位置方程如式(1):

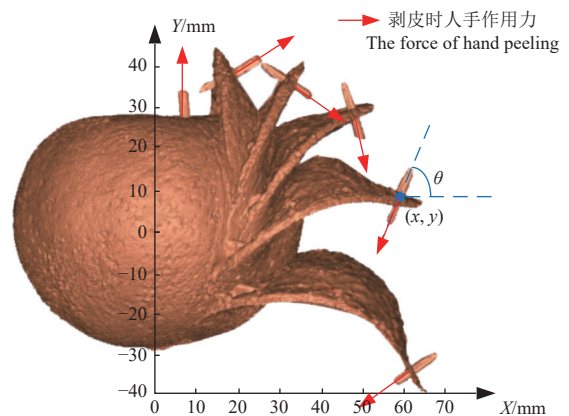
$$y = -25.55x^2 - 27.58x + 36.26 \quad (1)$$

曲线姿态方程如式(2):

$$\theta = 1.421t^5 - 2.031t^4 + 22.79t^3 - 33.44t^2 - 65.43t + 129.2 \quad (2)$$

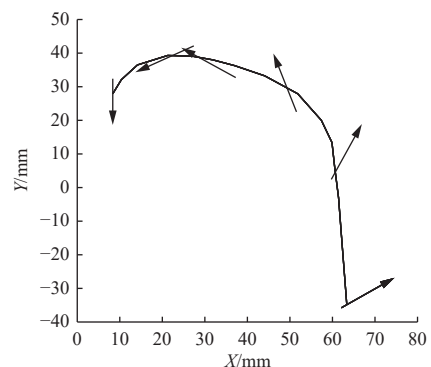
式中 t 为时间, s; θ 为姿态角, ($^\circ$); x, y 为剥皮轨迹坐标, mm。

结合图4和拟合方程可知,在茶枝柑剥皮过程中,姿态参照物从茶枝柑开三刀交界处附近开始向果柄处运动,运动轨迹呈现出开口向下的右半边二次函数形式,较光滑,并且随着姿态参照物运动,其与 X 轴正方向夹角逐渐减小。这表明在茶枝柑剥皮过程中,果皮位置和姿态是同时变化的耦合关系。因此,在后续设计中,不仅要考虑到机构运动轨迹设计,也需充分考虑机构运动过程中的姿态设计。



注: θ 为剥皮姿态角, ($^\circ$); (x, y) 为剥皮轨迹坐标, mm。
Note: θ is the peeling angle, ($^\circ$), and (x, y) is the peeling trajectory, mm.

图3 茶枝柑剥皮位姿三维重构与受力分析
Fig.3 3D reconstruction of the peeling position and force analysis of *Citrus reticulata* 'Chachi'



注: 箭头指向为柑皮内囊。
Note: The arrow points to the inner of the peel.

图4 茶枝柑手工剥皮位姿曲线

Fig.4 Hand peeling position and orientation curve of *Citrus reticulata* 'Chachi'

2 多杆仿形式茶枝柑剥皮机构设计

茶枝柑剥皮取肉机构由两部分构成,一是剥皮所用到的多杆仿形机构,二是取肉用到的包络式柔顺机械爪。其中关键部件为多杆仿形剥皮机构。

2.1 机构理论设计

本文旨在设计一种能够模拟人工剥皮位姿的多杆仿形机构。根据图 3 所示，茶枝柑剥皮时姿态参照物位置与姿态是同时变化的，因此需要设计一种能同时满足二者变化的多杆仿形机构。

通过对多种连杆机构位姿进行观察研究，确定以交叉式双摇杆机构作为多杆仿形机构原型，再通过尺寸优化，设计出一种能够逼近于目标位姿（人工剥皮位姿）的机构。由于茶枝柑开皮是 120°均布的三刀，所以可以在空间上以 120°均布三处多杆仿形机构。为了更高效实现茶枝柑剥皮，使用一个电机同时控制三处多杆仿形机构从而实现同步运动，可选用摇杆滑块机构进行剥皮机构行程驱动。

交叉式双摇杆机构由于两个摇杆运动轨迹固定，均为圆周运动，因此只对连杆上运动轨迹进行设计。首先，通过建立运动学方程来描述交叉式双摇杆机构运动，然后调整交叉式双摇杆机构上连杆长度、角度和关节位置，使其运动轨迹逼近目标位姿曲线（人工剥皮位姿曲线，图 4），以确保交叉式双摇杆机构运动能够准确模拟人工剥皮位姿。

为实现模拟人工剥皮以达到无损剥皮目标，相较于传统机械剥皮方法，真空吸盘吸附在茶枝柑表面对果皮损伤较小，因此本文采用真空吸盘进行茶枝柑吸附式剥皮。为了确保剥皮成功率，进行了茶枝柑皮肉分离力大小试验。多次试验结果表明，剥离茶枝柑单瓣皮肉所需最大力可达 32 N，且最大力发生在开三刀交界处。吸盘拉力可根据式（3）进行测算。

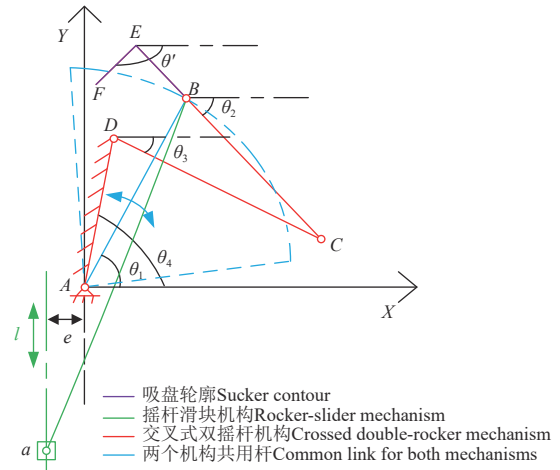
$$F = S \cdot P / \mu \quad (3)$$

式中 F 为吸盘吸力，N； S 为吸盘口面积， cm^2 ； P 为真空度，MPa； μ 为安全系数，无量纲。

本文选用真空度为 0.093 MPa 的真空泵（藤原 750D），配合吸盘口面积为 9.6 cm^2 的薄形花纹唇边吸盘，取安全系数为 2，则可测算出吸盘拉力为 44.64 N，大于最大分离力 32 N，满足使用要求。

采用真空吸盘和多杆仿形机构结合，模拟人工剥皮同时确保果皮在剥离过程中保持完整，从而实现无损剥皮的目标。以其中一瓣为例对设计过程进行分析，图 5 为多杆仿形式茶枝柑剥皮机构运动简图，绿色实线部分是用于驱动的摇杆滑块机构部分，摇杆滑块机构由摇杆 AB （共用）、连杆 Ba 和滑台 a 组成，红色部分是交叉式双摇杆机构部分，交叉式双摇杆机构是由摇杆 AB （共用）、连杆 BC 、摇杆 CD 、机架 DA 组成，两个机构中共用一根杆 AB ，因此本文设计机构为以摇杆滑块机构和交叉式双摇杆机构串联而成的多杆机构。在设计多杆仿形茶枝柑剥皮机构时将真空吸盘安装在交叉式双摇杆机构延长线 l_{CB} 上，压缩至最小时真空吸盘外轮廓画成图中杆 EF 和杆 BE ，并安装在交叉式双摇杆机构连杆 BC 上，点 F 为真空吸盘压缩至最小时真空吸盘吸附面最高点。由于要规避连杆与茶枝柑之间干涉问题，故需将杆 AD

旋转一定角度 (θ_4)，使其不与 Y 轴平行。图中以摇杆滑块机构中滑块 a 运动距离作为输入量，摇杆 AB 作为输出量，交叉式双摇杆机构中输入量是摇杆滑块机构输出量（杆 AB ），摇杆（杆 BC ）作为输出量，通过调整交叉式双摇杆上连杆形状和位置来逼近目标曲线和姿态。对于这一运动学问题分析涉及以下运动学方程。



注：A、B、C、D 为多杆机构的各个转动副；BEF 为吸盘轮廓；a 为摇杆滑块机构中的滑块； θ' 为杆 FE 与 X 轴夹角，($^\circ$)； θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 分别为 AB 、 BC 、 CD 和 DA 各杆矢量方位角，($^\circ$)； e 为摇杆滑块机构偏置距离，mm； l 为摇杆滑块机构中连杆长度，mm。
Note: A, B, C, D are the rotation pairs of multi-bar mechanism; BEF is the contour of the sucker. a is the slider in the rocker-slider mechanism; θ' is the angle between link FE and positive direction of the X -axis, ($^\circ$); θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 are the angle of link AB , BC , CD and DA , ($^\circ$). e is the offset distance of the rocker-slider mechanism, mm; l is the length of the link in the rocker-slider mechanism, mm.

图 5 多杆仿形式茶枝柑剥皮机构运动简图

Fig.5 Schematic diagram of the multi-link profiling *Citrus reticulata* 'Chachi' peeling mechanism

在摇杆滑块机构中，根据图 5 坐标系，输入量被定义为 Ya ，输出量表示为 θ_1 ，输出量 θ_1 可表示为式（4）：

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{l^2 - e^2 - Ya^2 - l_1^2}{2l_1\sqrt{e^2 + Ya^2}}\right) + \arctan\left(\frac{Ya}{e}\right) \quad (4)$$

交叉式双摇杆机构中，输入量被定义为摇杆滑块机构输出量 θ_1 ，而输出量则表示为 θ_2 ，通过闭环矢量法，可得输出量 θ_2 的表达式（5）：

$$\theta_2 = 2 \arctan\left(\frac{A_1 \pm \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - C_1^2}}{B_1 - C_1}\right) \quad (5)$$

上式的中间变量 A ， B ， C 具体如下：

$$A_1 = 2l_1l_2 \sin \theta_1 - 2l_2l_4 \sin \theta_4$$

$$B_1 = -2l_1l_2 \cos \theta_1 + 2l_2l_4 \cos \theta_4$$

$$C_1 = l_1^2 + l_2^2 + l_4^2 - l_3^2 - 2l_1l_4 \cos(\theta_1 - \theta_4)$$

通过 θ_2 推出 θ 表达式，得到式（6）：

$$\theta = \frac{\pi}{2} + \theta_2 = \frac{\pi}{2} + 2 \arctan\left(\frac{A \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B - C}\right) \quad (6)$$

式（5）~（6）中 l_1 为杆 AB 长度， l_2 为杆 BC 长度， l_3 为杆 CD 长度， l_4 为杆 DA 长度，mm；杆 BE 和杆 EF 模

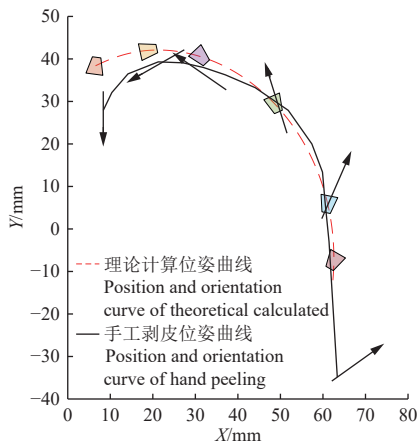
拟真空吸盘外轮廓, Y_a 为滑台 a 的轴坐标。

2.2 机械设计

2.2.1 参数寻优与结构设计

吸盘的仿形剥皮位姿是设计的关键, 为了确保剥皮顺利进行, 需要对结构参数进行寻优。将机构运动学方程输入 Matlab 中进行计算, 对多杆仿形机构进行尺寸寻优。对多根杆的角度进行调整, 即调整交叉式双摇杆机构运动开始前角度 θ_1 大小, 对多根杆铰链位置进行调整, 即调整 A 点位置和偏置距离 e 的大小, 经过对交叉式双摇杆机构各根杆的角度和位置进行调整, 将末端运动位姿无限逼近于目标位姿。将上述调整结果整合, 即可对交叉式双摇杆机构进行参数寻优。综合考虑加工、安装等实际问题, 最终得到 $l_1=52$ mm, $l_2=32$ mm, $l_3=41$ mm, $l_4=26.5$ mm, $l_{BA}=152$ mm, $e=7.85$ mm, $l_{BE}=7.5$ mm, $l_{EF}=9.5$ mm 时, 末端杆点 F (吸盘位置) 运动位姿与目标曲线最接近。

将上述寻优所得杆长代入运动学方程进行 Matlab 仿真, 得到点 F 理论计算位姿曲线, 并与人工剥皮位姿曲线对比 (图 6), 通过图上对比可知理论计算位姿曲线与人工剥皮位姿曲线较接近, 其起点误差较大 (绝对误差 10.64 mm), 是因为点 F 是按照吸盘被压缩到最短距离进行设计, 而吸盘具备一定柔性和伸缩, 能较好地适应茶枝柑轮廓。其他点误差较小 (平均误差 2.19 mm), 说明所设计机构在理论上具备模拟人手剥皮茶枝柑能力。



注: 梯形下底为吸盘吸附方向。
Note: The bottom of trapezoid is the adsorption direction of the sucker.

图 6 理论计算位姿与手工剥皮位姿对比

Fig.6 Position and orientation curve comparison of theoretical calculated with hand peeling

使用 Solidworks 对多杆仿形机构进行机械设计和装配, 然后将 Matlab 中理论寻优所得杆长参数代入每根杆, 得到特定尺寸和位置装配体如图 7 所示。采用 Solidworks 的 Motion 功能将装配体上真空吸盘被压缩至最短时的理论仿真位姿曲线导出后与理论计算位姿曲线进行对比, 如图 8 所示。以弗雷歇 (Frechet) 距离为评判指标, 计算出两根曲线的弗雷歇距离为 0.862, 表明理论计算位姿曲线与理论仿真位姿曲线很接近, 证明理论计算的正确性和准确性, 这为多杆仿形机构实施提供了理论支撑。

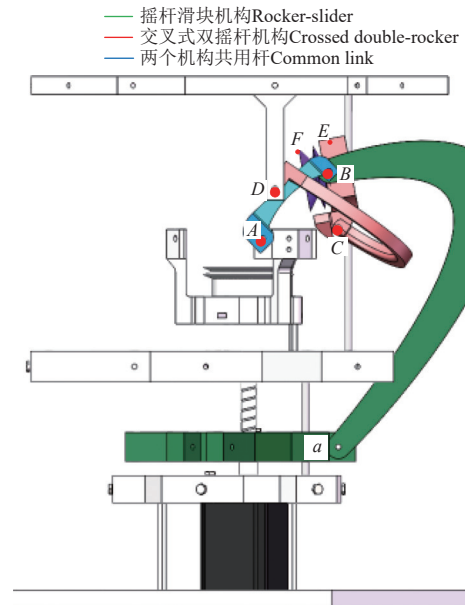


图 7 多杆仿形式茶枝柑剥皮机构装配图

Fig.7 Assembly diagram of the multi-link profiling *Citrus reticulata* 'Chachi' peeling mechanism

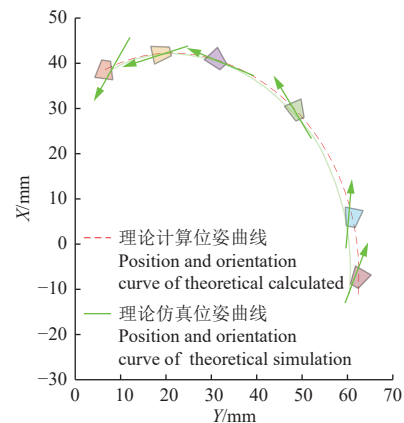


图 8 理论计算与理论仿真位姿曲线对比

Fig.8 Position and orientation curve comparison of theoretical calculated with simulation

在设计交叉式双摇杆机构时, 由于交叉式双摇杆机构在运动时会产生干涉, 使其轨迹无法完全覆盖 3D 扫描中姿态参照物第 6 个点, 也就是行程有约束。尽管存在这一差距, 但在后续试验中发现, 行程已经足够覆盖剥皮操作, 所设计的交叉式双摇杆机构仍然具备足够行程来实现茶枝柑剥皮目标。

2.2.2 试验装置搭建

多杆仿形机构从设计到真实的机械设计, 需要考虑加工、装配和干涉等问题, 尤其杆与杆之间的干涉, 杆与柑果之间的干涉, 都是需要在机械设计中优先考虑的问题。因此本文将考虑多方面的因素, 规避干涉现象。在设计时考虑到平面交叉式双摇杆机构运动时所得位姿曲线与目标位姿曲线相近, 但是由于茶枝柑是扁球型, 平面直杆会与之发生碰撞干涉, 因此采用了空间异形杆进行规避。

在空间 120° 均布三处交叉式双摇杆机构, 单边连接

在运动过程中容易产生额外力矩和侧向力，为解决此问题，可采用对称设计，交叉式双摇杆机构在三处都呈现出左右两侧对称结构。这种对称性有助于平衡在剥皮过程中可能产生的侧向压力，保持整个系统稳定。同时，这样对称布局还有助于均匀分布在剥皮过程中可能产生的力，减少了结构内力不平衡可能导致的果皮损坏风险。避免干涉后设计的剥皮机构实物如图 9 所示，平面零件采用亚克力激光切割加工，空间异形杆采用 3D 打印技术加工，材料为聚乳酸（PLA, polylactic acid）。

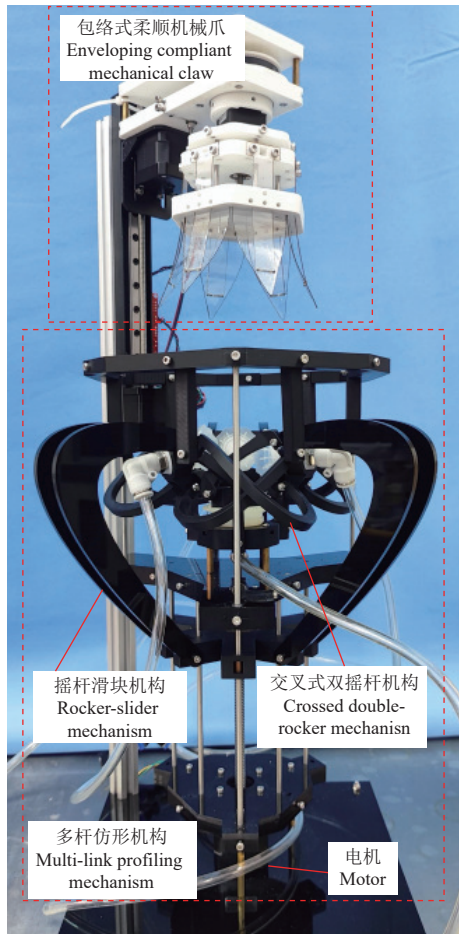


图 9 多杆仿形式茶枝柑剥皮机构实物图

Fig.9 Actual picture of the multi-link profiling *Citrus reticulata* 'Chachi' peeling mechanism

茶枝柑在完成剥皮操作后，果肉仍与果柄处主果络连接，需要额外机械爪进行果肉的取走。传统机械爪通过抓取果肉扯断果络以破坏果肉与果络之间连接从而完成取果，夹持式机械爪对于脆弹果肉而言，极易破坏果肉，从而导致酸性较强的果汁溅射在果皮上产生腐蚀“烧皮”，影响广陈皮晒制后的产品质量。

故本文采用了课题组设计的一款通过弹性薄片（PET 材料）并联指驱动连续体包络式柔顺机械爪，用于取肉操作。弹性薄片具有被动柔性，采用弹性薄片构件组成柔顺机械爪同时具备变轮廓、变刚度特性，可适应茶枝柑大小与形状差异，适用于果络切割和皮肉分离。包络式柔顺机械爪由 6 个并联指组成，每个并联指由两片

不规则弹性薄片组成，形成二自由度连续体并联结构。两片弹性薄片末端近似铰接，根部分别连接固定支架和步进电机滑块，滑块运动带动机械爪收张；机械爪上部连接一步进电机，其可带动机械爪进行旋转运动；机械爪侧边连接另一步进电机滑台，滑块运动可带动机械爪进行上下运动。如图 9 所示。在取肉时，机械爪一边下降、一边旋转和收缩，弹性薄片并联指呈现螺旋收缩轨迹从果肉间隙处切入，由于弹性薄片的被动柔性，会约束在果肉间隙中运动，通过旋切果络从而切断果肉和果皮的连接，然后收缩形成一个包络腔，最后将果肉提起，从而皮肉分离。由于不存在夹持，因而可无损地取肉。

本装置由电机、摇杆滑块机构、交叉式双摇杆机构、包络式柔顺机械爪等部分组成。如图 9 所示，多杆仿形机构部分先通过步进电机带动摇杆滑块机构的运动，滑块为原动件，摇杆为被动件，在一定范围内摆动，从而带动与之串联的交叉式双摇杆机构被动运动。真空吸盘安装在 BC 杆上，外轮廓为杆 EF 和杆 BE，其中控制 BC 杆的运动位姿即可实现真空吸盘位姿的变化，控制 θ_1 的角度变化来控制 θ_2 的角度变化，实现剥皮操作的位姿变化，从而实现茶枝柑的剥皮。包络式柔顺机械爪部分利用 3 个步进电机分别控制机械爪的旋转、升降和开合动作，三者配合实现机械爪抓取果肉的动作。多杆仿形机构和柔顺机械爪结合，通过控制共 4 个步进电机的运动，便可实现茶枝柑的无损自动剥皮取肉，详情可查阅视频链接 (<https://v.douyin.com/iL77KV2C/> mda:/ I@I.iC 07/01)。

3 试验与分析

3.1 仿形位姿曲线验证试验

为了验证所设计的多杆仿形茶枝柑剥皮机构可以实现模拟人工剥皮的目的，将实物化的多杆仿形机构通过控制步进电机从而实现剥皮操作，使用工业相机将多杆仿形机构的剥皮过程拍摄出来，并进行图像处理，得到多杆仿形机构的实际剥皮位姿曲线，如图 10 所示。

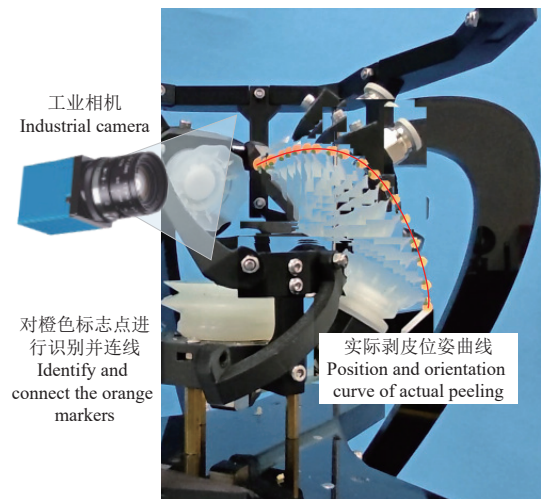


图 10 实际剥皮位姿曲线测量

Fig.10 Measurement of actual position and orientation curve

由于理论仿真位姿曲线与理论计算位姿曲线相似度较高,因此可以将理论计算位姿曲线代替理论仿真位姿曲线,下面将理论计算位姿曲线、实际剥皮位姿曲线、和人工剥皮位姿曲线三者同时绘制在图11中,可以发现三者相似度较高,其中理论计算位姿曲线与实际剥皮位姿曲线的弗雷歇距离为1.94,证明了所设计的多杆仿形机构可以实现模拟人工剥皮的目的。

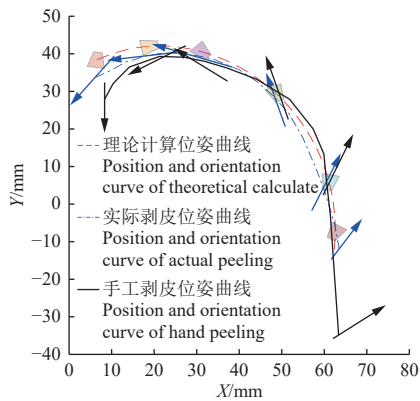


图11 3种位姿曲线对比图

Fig.11 Comparison of three positions and orientations curve

3.2 茶枝柑剥皮有效性验证试验

用于制作广陈皮的茶枝柑直径一般在55~80 mm范围之间,而直径在65~72 mm之间的茶枝柑较为普遍。为了确保试验代表性和有效性,本文随机选取了10个直

径在65~72 mm茶枝柑进行剥皮有效性测试。这样选择不仅考虑到广陈皮实际尺寸分布,同时也有助于评估装置在处理常见茶枝柑尺寸的性能表现。本试验旨在测试装置在各种茶枝柑直径条件下的适用性和稳定性。图12为装置剥皮取肉过程,试验步骤如下:1)使用开皮刀对茶枝柑进行开三刀处理,并将茶枝柑果柄朝下放置在装有固定吸盘的多杆仿形茶枝柑剥皮机构上,打开真空泵,吸附固定茶枝柑在装置上,为后续茶枝柑剥皮做准备。

(图12a)。2)启动电机,带动摇杆滑块机构的滑块向上运动,与此同时,滑块连接的杆件充当交叉式双摇杆机构中的摇杆,将滑块的上下运动转换成交叉式双摇杆机构的往复运动。小吸盘安装在交叉式双摇杆机构末端杆的延长线上,从而实现小吸盘吸附茶枝柑果皮,在机构的运动带动下对茶枝柑进行剥皮操作。(图12b~12e)。3)采用3个步进电机分别控制包络式柔顺机械爪的旋转、升降以及开合动作。在取肉阶段,张开包络式柔顺机械爪,并精准地降低到果肉与果皮的空隙之间,然后一边旋转切断果络并同时收缩包络果肉,包络果肉后,先一边旋转一边抬升高度,扭断主果络的同时包络提升果肉,避免夹持,从而实现果皮与果肉的无损分离。(图12f~12g)。

表1为剥皮有效性试验结果,皮肉均分离成功(成功率100%),大部分情况下能无损剥皮取肉,但在当茶枝柑直径较大时(大于71 mm直径),茶枝柑果皮分瓣处会出现轻微破损(无损率80%)。

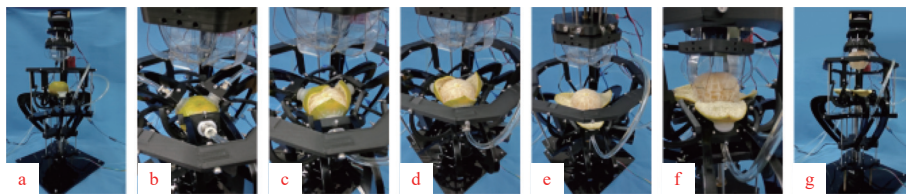


图12 机构剥皮取肉过程

Fig.12 The process of peeling and extracting fruit pulp

表1 试验结果

Table 1 Experimental results

样本编号 Sample No.	样本直径 Sample diameter /mm	样本高 Sample height /mm	果皮是否破损 Whether the peel is broken
1	65	51	完整
2	67	50	完整
3	68	52	完整
4	69	56	完整
5	69	54	完整
6	70	55	完整
7	70	54	完整
8	71	53	完整
9	72	57	轻微破损
10	72	60	轻微破损

主要原因是设计的杆件为刚性杆,剥皮位姿是固定的,其适应性表现在小吸盘具备一定的柔性实现容错,但当茶枝柑尺寸跟设计尺寸相差较大时,适应性欠佳。因此,在后续工业生产的机械化剥皮过程中,可以先根据茶枝柑尺寸进行大小分选后,依据尺寸范围将茶枝柑投入到适应不同果实尺寸的流水线进行作业,就可规避

适应性问题。

试验表明本文设计的装置剥皮成功率较高,有一定的适应性,能够较好的完成任务,确保高效剥皮,本文试验结果为本装置在实际生产中应用提供了有力的数据支持。

4 结论

本文根据人手剥皮茶枝柑过程设计了一款多杆仿形式剥皮取肉装置,主要由多杆仿形剥皮机构和包络式柔顺机械爪两部分组成,可以实现茶枝柑无损剥皮取肉。茶枝柑剥皮有效性验证试验表明:多杆仿形式剥皮取肉装置对试验样品的剥皮成功率为100%,无损率为80%,当茶枝柑直径大于71 mm时,果皮会出现轻微破损,在本文设计尺寸下的装置能完成65~71 mm直径的茶枝柑剥皮取肉的任务。

本装置结构简单成本低,剥皮成功率和无损率较高,为柑橘类水果的初加工提供了一种新思路。本装置易于

集成到现有茶枝柑初加工机械生产线上, 对广陈皮初加工全程自动化具有积极意义。

[参 考 文 献]

- [1] 刘雯雯, 韦婉, 陈岩, 等. 陈皮产地溯源及鉴伪技术研究进展[J]. 食品科学, 2023, 45 (8): 1-14.
LIU Wenwen, WEI Wan, CHEN Yan, et al. Research progress on geographical origin traceability and authentication of *Citri reticulatae pericarpium*[J]. Food Science, 2023, 45 (8): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王亚荣, 凡强, 吴鸿, 等. 陈皮基源考证及药材种植史简述[J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(5): 453-464.
WANG Yarong, FAN Qiang, WU Hong, et al. Textual research on the basic source of chenpi and a brief introduction to the planting history of medicinal material[J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(5): 453-464. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王亚荣, 凡强, 吴鸿, 等. 南药广陈皮(茶枝柑)种植技术规范[J]. 亚热带植物科学, 2023, 52(6): 540-546.
WANG Yarong, FAN Qiang, WU Hong, et al. Technical specification for planting guangchenpi (*Citrus reticulata* 'Chachi')[J]. Subtropical Plant Science, 2023, 52(6): 540-546. (in Chinese with English abstract)
- [4] 闫国琦, 陈东宜, 莫嘉嗣, 等. 广陈皮含水率动态特性试验研究[J]. 现代农业装备, 2022, 43(3): 31-38.
YAN Guoqi, CHEN Dongyi, MO Jiasi, et al. Experimental study on dynamic characteristics of moisture content of *Citrus reticulata* 'Chachi'[J]. Modern Agricultural Equipments, 2022, 43(3): 31-38. (in Chinese with English abstract)
- [5] 闫国琦, 屈佳蕾, 欧国良, 等. 广陈皮干燥和仓储技术及装备的现状与对策[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2543-2553.
YAN Guoqi, QU Jialei, OU Guoliang, et al. Current situation and countermeasures of drying and storage technology and equipment of *Citrus reticulata* 'Chachi'[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(9): 2543-2553. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 1-28.
WANG Leyi, LI Changhe, LIU Mingzheng, et al. Research status of drying technology and equipment for Chinese medicinal materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 1-28. (in Chinese with English abstract)
- [7] 巨浩羽, 张卫鹏, 张鹏飞, 等. 基于毕渥数的果蔬阶段降温热风干燥特性[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 317-324.
JU Haoyu, ZHANG Weipeng, ZHANG Pengfei, et al. Hot drying characteristics of fruits and vegetables during heat and mass transfer using Biot numbers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(12): 317-324. (in Chinese with English abstract)
- [8] 苑严伟, 白圣贺, 牛康, 等. 林果机械化采收技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 53-63.
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress on mechanized harvesting technology and equipment for forest fruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 53-63. (in Chinese with English abstract)
- [9] 严霞, 刘基柱, 张福君. 新会陈皮传统制作工艺及品质辨识[J]. 中国药事, 2022, 36(1): 41-44.
YAN Xia, LIU Jizhu, ZHANG Fujun. Traditional production techniques and quality identification of Xinhui *Citri reticulatae pericarpium*[J]. Chinese Pharmaceutical Affairs, 2022, 36(1): 41-44. (in Chinese with English abstract)
- [10] 牛坡, 张良, 王攀, 等. 橘皮的干燥特性研究与品质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(20): 205-214.
NIU Po, ZHANG Gen, WANG Pan, et al. Study on drying characteristics and quality of orange peel[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(20): 205-214. (in Chinese with English abstract)
- [11] 江少磊. 论陈皮干制的新工艺及实际运用[J]. 中国高科技, 2022(3): 33-34.
JIANG Shaolei. The new technology and practical application of dried orange peel were discussed[J]. China High-Tech, 2022(3): 33-34. (in Chinese with English abstract)
- [12] 梁奕尧, 陈柏忠, 杨玉华, 等. 《中国药典》2020 版陈皮质量标准修订的研究[J]. 中国医院药学杂志, 2022, 42(2): 142-146.
LIANG Yiyao, CHEN Bozhong, YANG Yuhua, et al. Study on the quality standards of *citri reticulatae pericarpium* in Chinese Pharmacopoeia (2020 edition)[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2022, 42(2): 142-146. (in Chinese with English abstract)
- [13] 龙华清. 新会陈皮的品质特征、鉴别技术要点及审评方法[J]. 广东茶业, 2021(4): 25-29.
LONG Huaqing. Quality characteristics, identification techniques and evaluation methods of Xinhui citrus peel[J]. Guangdong Tea Industry, 2021(4): 25-29. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陈红, 万琛, 潘海兵, 等. 蒸烫处理对宽皮柑橘去皮的影响及作用机制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 326-332.
CHEN Hong, WAN Chen, PAN Haibing, et al. Effects and mechanism of blanching treatment on peeling of *Citrus reticulata* Blanco[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(18): 326-332. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘洁, 李燕, 肖黎明, 等. 基于改进 YOLOv4 模型的橙果识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(12): 173-182.
LIU Jie, LI Yan, XIAO Liming, et al. Recognition and location

- method of orange based on improved YOLOv4 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(12): 173-182. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘桥辉, 闫国琦, 屈佳蕾, 等. 茶枝柑(广陈皮)初加工机械装备技术现状与对策[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(7): 91-98.
LIU Qiaohui, YAN Guoqi, QU Jialei, et al. Current status and countermeasures of primary processing machinery technology for *Citrus reticulata* Blanco (*Citrus reticulata* 'Chachi')[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(7): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- [17] 潘海兵, 王振亚, 陈红, 等. 宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 239-245.
PAN Haibing, WANG Zhenya, CHEN Hong, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for satsuma mandarin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(12): 239-245. (in Chinese with English abstract)
- [18] 朱广飞, 任嘉嘉, 王振, 等. 油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(7): 19-27.
ZHU Guangfei, REN Jijia, WANG Zhen, et al. Design of shelling machine for camellia oleifera fruit and operating parameter optimization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(7): 19-27. (in Chinese with English abstract)
- [19] DEEPIKA K, SINGH C, DAYAL M V, et al. Advances in peeling techniques for fresh produce[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(10): e13826.
- [20] 徐强, 黄跃, 邓秀新. 基于全基因组信息的“柑”“橘”定义、分类与演化[J]. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(3): 525-536.
XU Qiang, HUANG Yue, DENG Xiuxin. The definition, classification and evolution of citrus based on whole genome sequence information[J]. *Science China: Life Sciences*, 2024, 54(3): 525-536. (in Chinese with English abstract)
- [21] 罗政, 郭媛媛, 陈飞平, 等. 广陈皮原料茶枝柑与其他典型柑橘成分差异分析[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(1): 174-179.
LUO Zheng, GUO Yuanyuan, CHEN Feiping, et al. Difference between ingredients of citrus chachiensis tanaka and other typical citrus[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(1): 174-179. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李丹丹, 韦惠莹, 齐军茹. 不同柑橘类果胶分子的理化特性、结构及凝胶性能[J]. *农业工程学报*, 2024: 1-10.
LI Dandan, WEI Huiying, QI Junru. Physicochemical, structural and gel properties of different citrus pectins[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024: 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [23] LU J Q, CHEN W D, LAN Y B, et al. Design of citrus peel defect and fruit morphology detection method based on machine vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 219: 108721.
- [24] 陈红, 余豹, 王振亚, 等. 宽皮柑橘剥皮机对辊式剥皮装置工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 293-298.
CHEN Hong, YU Bao, WANG Zhenya, et al. Process parameter optimization of dual-roller peeling device for satsuma mandarin peeling machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(4): 293-298. (in Chinese with English abstract)
- [25] 苏其宏. 柑橘剥皮装置: CN207125282U [P]. 2018-03-23.
- [26] 吴国荣. 一种柑桔的果皮果肉自动分离装置: CN207285110U [P]. 2018-05-01.
- [27] 闫国琦, 刘桥辉, 吴鸿, 等. 一种离心式茶枝柑自动剥皮去肉装置及方法: CN110720646B [P]. 2023-08-29.
- [28] HUANG J Y, LIAO J S, QI J R, et al. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 110: 106140.
- [29] 陈红, 徐翔宙, 尹伊君, 等. 宽皮柑橘移动夹持剥皮力学特性与果皮分离特性试验研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 25-31.
CHEN Hong, XU Xiangzhou, YIN Yijun, et al. Physicochemical, structural and gel properties of different citrus pectins[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(14): 25-31. (in Chinese with English abstract)
- [30] 谭伟超. 全自动环形三刀开皮机的设计[J]. *现代制造技术与装备*, 2021, 57(10): 175-177.
TAN Weichao. Design of automatic ring three knife peeling machine[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2021, 57(10): 175-177. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张婧娴. 新会陈皮产业扶持政策实施效果及优化对策[J]. *乡村科技*, 2023, 14(10): 53-56.
ZHANG Jingxian. The implementation effectiveness of support policies for the Xinhui Chenpi industry and optimization countermeasures[J]. *Rural science and technology*, 2023, 14(10): 53-56. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈霖虹, 傅曼琴, 徐玉娟, 等. 不同贮藏方式陈皮品质及香气差异分析[J/OL]. *食品与发酵工业*, 2024:1-13.[2024-05-13]<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037831>
CHEN Linhong, FU Manqin, XU Yujuan, et al. Analysis on the quality and aroma differences of Chenpi in different storage methods[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 2024: 1-13.[2024-05-13]<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037831> (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of multi-link profiling *Citrus reticulata* ‘Chachi’ peeling mechanism

MO Jiasi , TAN Ying , HE Huiqi , CHEN Qiushuo , ZHOU Xi'en , YAN Guoqi^{*}

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: *Citrus reticulata* ‘Chachi’ cultivated in Xinhui, Guangdong, is the sole source of "Southern Medicine" pericarp of dried tangerine. This processed product has been known as the pericarp of *Citrus reticulata* ‘Chachi’. There are functions of drying dampness, resolving phlegm, regulating Qi, and invigorating the spleen, particularly for its excellent health benefits in cardiovascular, respiratory, endocrine, gastrointestinal, and cosmetic aspects, according to the concept of medicinal food homology. These characteristics have endowed the *Citrus reticulata* ‘Chachi’ with high medicinal and economic value, thus resulting in the ever-increasing production and output value in recent years. However, the traditional processing of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ in peeling and flesh extraction has suffered from low automation and the juice splashing onto the peel for corrosion failure (commonly known as "burning the peel"). In this study, an automatic device of peeling and flesh extraction was developed for the *Citrus reticulata* ‘Chachi’, according to the profiling mechanism. Initially, advanced 3D scanning and reconstruction were employed to acquire the real motion trajectory and posture data of fruit peel during manual peeling. Due to the three-fold symmetry, only one-third of the peel was scanned during manual peeling. Six key positions and postures were then selected to establish the curve model of profiling target posture. The coupling relationship between the position and posture of fruit peel during *Citrus reticulata* ‘Chachi’ peeling was deduced, according to the posture curve and fitting equation. A mathematical model was then established for the posture of manual peeling in the accurate design of subsequent devices. Subsequently, the conceptual design was combined with the mechanical design to devise a set of multi-link profiling mechanisms. According to the postures of various linkages, a cross-type double rocker mechanism was determined as the prototype of the multi-link profiling mechanism. A mechanism approximating the target posture (manual peeling posture) was designed using dimensional synthesis. A rocker-slider and a cross-type double rocker mechanism in series were coordinated with the vacuum sucker adsorption. The motion trajectory of manual peeling was simulated to closely approximate the position and posture during real peeling. The efficiency and accuracy of the device were verified after precise design and optimization. Subsequently, simulation analysis was conducted to validate the performance of the multi-link profiling mechanism. The simulation has verified the stability and reliability of the device during peeling. Furthermore, a physical device was manufactured to conduct the actual peeling experiments. The experimental results demonstrate that the device accurately performed the mimic manual peeling postures, thus achieving mechanical peeling of *Citrus reticulata* ‘Chachi’. Additionally, an enveloping flexible mechanical claw was designed for the damage-free peeling and flesh extraction of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ after peeling operation with the multi-link profiling device’. The peel of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ was greatly protected to enhance the efficiency of flesh extraction. The test results show that the nondestructive rate of peeling was 80%. The peeling and flesh extraction were optimized to successfully improve the initial processing of *Citrus reticulata* ‘Chachi’. The non-destructive mechanical peeling and flesh extraction of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ were integrated into the industrial production lines, thus significantly improving production efficiency and cost savings. Therefore, the findings can provide valuable references for similar fruit processing. The profiling mechanism was integrated with the processing techniques. The non-destructive peeling and flesh extraction were achieved for the modernization and intelligence of agricultural product processing. Thus, practical technical support and valuable experience were offered for the *Citrus reticulata* ‘Chachi’ industry.

Keywords: initial processing; *Citrus reticulata* ‘Chachi’; multi-link profiling mechanism; mechanical claw; peeling; 3D scanning; motion trajectory