doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.013

基于 RPU－RPR－UPR 并联腕关节草莓断柄采摘柔顺控制研究

李月婵[1]　马锃宏[1,2]　杜小强[1,3]

(1.浙江理工大学机械工程学院,杭州 310018;2.浙江省种植装备技术重点实验室,杭州 310018;
3.浙江省农业智能感知与机器人重点实验室,杭州 310018)

摘要:针对草莓采摘机器人作业中跟踪精度低、柔顺性差等问题,本文设计了 RPU－RPR－UPR 解耦并联腕关节,并建立逆运动学模型。为提升腕关节定位精度,构建完整动力学模型,引入自适应滑模控制算法,实时估计并补偿模型不确定性,使 α、β、h 3 自由度平均跟踪误差降至 0.075 8°、0.077 1°和 0.041 4 mm,显著优于 PID 与传统滑模控制。为增强采摘柔顺性,设计模糊变导纳控制器动态调整导纳参数,仿真结果表明,在扰动 10、20 N 下,其超调量较固定参数导纳控制分别降低 12.5%、17.8%,稳定时间分别缩短 0.14、0.25 s。将并联腕关节集成于草莓采摘机器人平台,加速度响应试验结果表明,末端负载变化时,柔顺控制较位置控制加速度平均波动幅度降低 45.5%,体现出良好的动态柔顺性。草莓断柄采摘试验结果表明,采摘成功率达 93%,单果平均采摘时间为 15 s,满足草莓采摘要求。

关键词:草莓;并联机构;腕关节;采摘;滑模控制;导纳控制

中图分类号:S225.99　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)04-0128-10　　**OSID**:

Compliance Control for Strawberry Stem-breaking Harvesting Based on RPU－RPR－UPR Parallel Wrist Joint

LI Yuechan[1]　MA Zenghong[1,2]　DU Xiaoqiang[1,3]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Aiming to address the challenges of dynamic end-effector payload variation, insufficient environmental interaction compliance, and limited trajectory tracking accuracy in strawberry harvesting robots, a fully decoupled parallel wrist joint based on an RPU－RPR－UPR configuration was designed, and its inverse kinematic model was established. To improve the positioning accuracy of the manipulator's end-effector, a complete system dynamics model was developed, and an adaptive sliding mode control (ASMC) algorithm was implemented. Model uncertainties were estimated and compensated in real time by the ASMC, effectively alleviating the chattering phenomenon associated with conventional sliding mode control. As a result, the average tracking errors of the wrist joint's α, β, and h degrees of freedom were reduced to 0.075 8°, 0.077 1°, and 0.041 4 mm, respectively, significantly outperforming both PID control and traditional sliding mode control (SMC) in terms of trajectory tracking accuracy and system robustness. To enhance harvesting smoothness, a fuzzy inference-based variable admittance controller was developed. Admittance parameters were dynamically adjusted according to interaction forces and system state errors, enabling autonomous modulation of the robot's stiffness-compliance characteristics and thereby improving its disturbance rejection capability and environmental adaptability. Simulation results showed that, under external disturbances of 10 N and 20 N, the proposed fuzzy variable admittance control reduced overshoot by 12.5% and 17.8%, and shortened settling time by 0.14 s and 0.25 s, respectively, compared with fixed-parameter admittance control-demonstrating superior dynamic

收稿日期:2025－12－07　修回日期:2025－12－26

基金项目:浙江省自然科学基金重大项目(LD24E050006)和国家自然科学基金项目(52475288)

作者简介:李月婵(1997—),女,博士生,主要从事农业机器人研究,E-mail:941016828@qq.com

通信作者:杜小强(1978—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机器人研究,E-mail:xqiangdu@zstu.edu.cn

performance. The designed parallel wrist joint was integrated into a mobile strawberry harvesting platform. Acceleration response tests revealed that, during end-effector load variations, compliant control reduced the average acceleration fluctuation amplitude by 45.5% compared with position control, indicating excellent dynamic compliance. In harvesting trials, a success rate of 93% was achieved with an average cycle time of 15 s per fruit, satisfying practical requirements for harvesting efficiency and reliability.

Key words: strawberry; parallel mechanism; wrist joint; picking; sliding mode control; admittance control

0　引言

随着智能农业技术的迅速发展，自动化采摘机器人逐渐成为果蔬采摘作业的重要工具[1-3]。腕关节作为连接采摘机器人末端执行器与机械臂关键部件，为机械臂末端提供精细调整能力，使其能够在狭小空间内高效、精准地对准果实，腕关节控制精度与柔顺性能直接影响果实采摘成功率和系统稳定性。该要求对于草莓这类高附加值、易损伤的浆果尤为突出，其果柄纤细、生长密集且常被遮挡，对机器人腕部定位补偿与自适应控制提出了更高要求。

并联机构能有效克服串联式设计中常见的运动误差累积与惯性冲击传递等固有问题，因而在多自由度空间精密操作任务中得到广泛应用，有助于显著提升机器人系统整体灵活度与作业精确性[4-6]。国内外对机器人并联式腕关节研究较广泛[7-9]。在农业采摘领域中，杨启志等[10]将三平移并联机构用于移栽机器人，解决了传统龙门式移栽机体积庞大、移栽速度低等问题。李志鹏等[11]以脐橙为采摘对象，设计了解耦的串、并混联结构机械臂，其腕关节采用 2SPS－RPR 构型，提高了采摘位姿精度。文献[12]设计了以 3－RRS 为末端的串并混联番茄采摘臂，但存在机构体积较大、实用性不足问题。现有并联式腕关节体积大、适应性弱，难以应对非结构化采摘环境。

为实现果实精准采收，末端执行器应在严格姿态约束下实现精确定位并保证采摘过程的稳定，这对腕关节位姿控制精度与柔顺性提出了极高要求。在并联机构跟踪精度控制方面，梁栋等[13]针对高速重载并联机构，提出模糊非线性计算力矩控制，有效抑制扰动并提升轨迹精度。范其明等[14]采用计算力矩法与滑模控制相结合，在抑制抖振的同时提高了机械臂跟踪精度与能效。张海峰等[15]通过计算力矩控制实现了冗余并联机器人高响应与高精度的轨迹跟踪。QIN 等[16]设计了有限时间二阶滑模控制器，实现了毫秒级精确定位。JIN 等[17]基于 2P(RPS－UPS)并联机构设计了一种基于终端滑模控制的鲁棒控制器，有效抑制外部扰动和模型误差。DUC 等[18]针对变负载与执行器故障的 4 自由度并联机器人，提出了基于时间延迟估计的同步滑模控制方法，提升了在不确定性下系统跟踪鲁棒性。在并联机构柔顺控制方面，BAI 等[19]提出一种基于混合运动-阻抗控制的反驱球形手腕，在保证精度的同时提升交互柔顺性。刘磊等[20]提出一种非接触与接触一体化的导纳控制方法，用于实现空间包络式抓捕机构对非合作目标的柔顺捕获。倪涛等[21]提出一种基于外力估计的并联机器人柔顺控制策略，通过动力学模型和电机电流反馈实现精确柔顺作业。HADDADIN 等[22]提出基于阻抗的接触稳定方法，防止接触丢失时的危险运动。张国龙等[23]提出鲁棒自适应力跟踪导纳控制，实现法向力快速精确跟踪。在农业采摘场景中，果实力学特性不确定性较强，混合控制策略在动态、非结构化环境中的实时适应能力仍需提升。

本文设计一种 3 自由度的 RPU－RPR－UPR 并联机构腕关节，引入自适应滑模控制策略，在线辨识与补偿系统参数变化，以增强控制器对模型摄动与外部扰动的鲁棒性。设计模糊变导纳控制策略，通过模糊推理动态整定导纳参数，以完成系统刚柔特性自主调节。以期提升系统在复杂非结构化环境下的综合性能。

1　并联腕关节设计

1.1　草莓采摘过程

在采摘过程为最大限度降低草莓物理损伤，采用非接触式断柄采摘策略，即作业时执行器直接作用于果柄，避免与果实本体发生接触。由于果实生长方位多样且常受枝叶遮挡，采摘系统需在复杂环境中灵活调整末端姿态。为此，采用串联与并联复合构型：首先由具有三移动自由度的串联机械臂实现大范围定位，将末端执行器运抵预采摘点位；随后通过并联腕关节进行精细姿态调整，使其精准对齐果柄方向，最终完成采摘作业。采摘过程示意图如图 1 所示。

在采摘作业中，机械臂末端负载随作业阶段呈瞬时突变特性：在果实果柄断裂瞬间，原本机械臂与

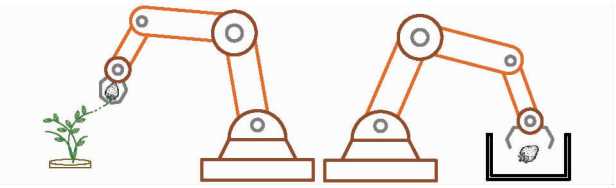

图 1 草莓采摘过程示意图

Fig. 1 Schematic of strawberry picking process

植株受到的果实重力与果柄拉力重新分配,果柄连接力突变为 0,果实完全转由末端执行器承载,导致末端等效负载及动力学参数在极短时间内突变;而在将果实移送至果箱并张开夹爪完成放置的瞬间,末端执行器与果实之间的接触力迅速消失,机械臂末端负载由携带果实状态突变为空载状态。上述 2 个关键时刻负载突变在系统中引起明显瞬态扰动,易激发腕关节与机械臂振动与加速度波动,从而对末端轨迹稳定性与采摘过程的平顺性提出更高要求。

1.2 RPU - RPR - UPR 腕关节设计

在并联机构构型选择中,自由度直接影响系统控制复杂度。为实现控制可行性与操作简便性,在满足采摘需求的前提下尽量减少自由度。常见的少自由度并联机构通常指具有 2 ~ 5 个自由度构型。综合考量采摘作业对结构可靠性、承载能力与控制简便性的要求,选用 3 自由度并联机构作为腕关节设计方案。该机构需具备绕 X 轴与 Y 轴转动自由度,以及沿 Z 轴移动自由度,即满足“两转一移”(2R1T)的运动需求。

针对两转一移自由度要求,提出一种 RPU - RPR - UPR 构型的全解耦并联机构,并将其应用于草莓采摘场景。该机构通过特定的支链布置与运动学设计,可实现 3 个自由度运动解耦,简化运动学建模与控制系统设计,提高机构响应速度与定位精度,为高效、精准的非接触式草莓采摘提供可靠的硬件基础。

RPU - RPR - UPR 并联机构简图如图 2 所示。机构为非对称型并联机构,由定平台 $A_1A_2A_3$、动平台 $B_1B_2B_3$、3 条结构形式各异的支链构成,各支链构型分别为 RPU、RPR 与 UPR 型支链(R 表示转动副,P 表示移动副,U 表示虎克铰),在定平台与动平台上,3 个铰链安装点空间位置呈等腰直角三角形分布,其顶点分别对应于铰点 A_1、B_1。为便于机构运动学分析,在定平台 $A_1A_2A_3$ 和动平台 $B_1B_2B_3$ 上分别建立固定坐标系 A_1XYZ 和 B_1xyz,各坐标轴方向如图 2 所示。

1.3 运动学逆解分析

RPU - RPR - UPR 并联机构具备 3 个运动自由

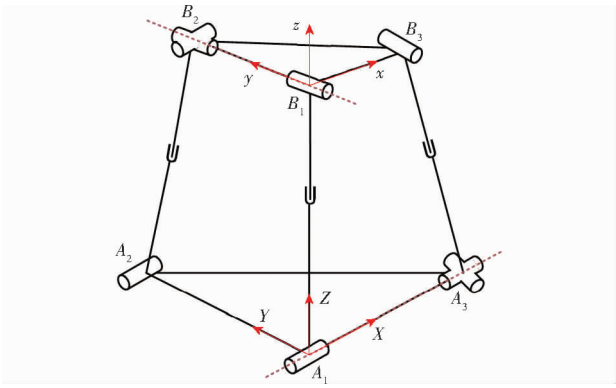

图 2 RPU - RPR - UPR 并联机构简图

Fig. 2 Schematic of RPU - RPR - UPR parallel mechanism

度,能够驱动末端动平台在空间内实现指定的姿态调整。为描述其运动学行为,可将动平台相对于定平台的位姿分解为 3 个独立的基本运动分量:绕 X 轴方向旋转角度 α、沿 y 轴方向旋转角度 β 以及 Z 轴方向平移距离 h。基于该分解方式,复杂的空间位姿变换可表示为上述基本运动的组合,相应的齐次变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为

$$\boldsymbol{T}=\mathrm{Rot}(\alpha)\mathrm{Trans}(h)\mathrm{Rot}(\beta)=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中

$$r_{11}=\cos\beta$$

$$r_{12}=r_{14}=r_{41}=r_{42}=r_{43}=0$$

$$r_{21}=\sin\alpha\sin\beta \quad r_{22}=\cos\alpha \quad r_{23}=-\sin\alpha\cos\beta$$

$$r_{24}=-h\sin\alpha \quad r_{31}=-\cos\alpha\sin\beta$$

$$r_{32}=\sin\alpha \quad r_{33}=\cos\alpha\cos\beta$$

$$r_{34}=h\cos\alpha \quad r_{44}=1$$

则可求得机构逆运动学方程为

$$\begin{cases} q_1=h-l_1 \\ q_2=\sqrt{a^2+b^2+(h-l_1)^2-2ab\cos\alpha-2bh\sin\alpha}-l_2 \\ q_3=\sqrt{a^2+b^2+(h-l_1)^2-2ab\cos\beta-2bh\sin\beta}-l_3 \end{cases} \tag{2}$$

式中 q_1、q_2、q_3——第 1 支链、第 2 支链、第 3 支链驱动副输入

a——动平台 $B_1B_2B_3$ 直角边长

b——定平台 $A_1A_2A_3$ 直角边长

l_1、l_2、l_3——第 1 支链、第 2 支链、第 3 支链初始杆长

分析表明,RPU - RPR - UPR 并联机构逆运动学方程呈显著的解耦特性。其数学结构反映了驱动变量与末端位姿参数之间的独立映射关系:第 1 支链驱动量仅与动平台竖直位移 h 相关,而与姿态角

无关；第 2、3 支链驱动量由姿态角 α 与 β 决定，表达式中不包含任何姿态角与位移耦合项。在逆运动学层面的完全解耦，意味着 3 个自由度可被独立控制，从而简化了逆解计算过程，并为设计简化而高效的控制策略奠定了坚实基础。

2　并联腕关节位置控制

2.1　动力学建模

并联机器人动力学模型揭示了系统驱动输入与末端执行器运动状态之间的内在关联，是分析机构在动态过程中力学行为、动量特性与能量转换的基础，也为实现高精度轨迹跟踪与平稳运动控制提供了关键理论依据。

基于虚功原理对 RPU－RPR－UPR 机构进行动力学建模。在该原理框架下，系统所有主动力在虚位移上所作虚功之和为零。在综合考虑关节摩擦与外部负载情况下，可推导得系统动力学方程为

$$\boldsymbol{M}(q)\ddot{q}+\boldsymbol{C}(q)\dot{q}+\boldsymbol{G}(q)+\boldsymbol{f}+\boldsymbol{\tau}_d=\boldsymbol{\tau} \tag{3}$$

式中　$\boldsymbol{M}$——惯性矩阵　　q——实际轨迹

$\boldsymbol{C}$——离心力与科氏力系数矩阵

$\boldsymbol{G}$——重力项　　$\boldsymbol{f}$——摩擦项

$\boldsymbol{\tau}_d$——外部负载及未建模扰动

$\boldsymbol{\tau}$——关节驱动力向量

上述方程中，并联机构关节驱动力（$\boldsymbol{\tau}$）与任务空间中的广义力通过式（4）进行映射，即

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{F} \tag{4}$$

式中　$\boldsymbol{F}$——末端广义力向量

$\boldsymbol{J}$——关节空间到任务空间力雅可比矩阵

在实际系统中，外部扰动 $\boldsymbol{\tau}_d$ 是影响控制性能的关键不确定性因素，主要包括时变负载、未建模摩擦、参数漂移及外部环境干扰等。这类扰动通常难以精确建模，易导致跟踪精度下降甚至失稳。因此，在控制器设计中须引入有效的鲁棒或自适应补偿策略，以抑制其不利影响。

2.2　自适应滑模控制

针对系统动态中不可避免地存在的未建模动态、参数摄动及外部扰动等不确定性因素，为确保控制性能的可靠性，需设计具备强鲁棒性的控制策略。为此，引入一种自适应滑模控制方法，在无需预先获知不确定性上界的情况下，实现对时变扰动的在线估计与动态补偿，从而显著增强系统在非结构化环境下轨迹跟踪精度与运行稳定性。

末端平台轨迹跟踪误差 e 为

$$e=q-q_d \tag{5}$$

式中　q_d——期望轨迹

为确保误差 e 收敛，构建滑模面 s，其表达式为

$$s=\dot{e}+\boldsymbol{\Lambda}e \tag{6}$$

其中　$\boldsymbol{\Lambda}=\mathrm{diag}(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3)$

式中　$\boldsymbol{\Lambda}$——正定对角参数矩阵

其元素决定系统状态趋近滑模面的收敛速度。

参考轨迹速度 $\dot{q}_r$ 与加速度 $\ddot{q}_r$ 为

$$\begin{cases}\ddot{q}_r=\ddot{q}_d-\boldsymbol{\Lambda}\dot{e}\\ \dot{q}_r=\dot{q}_d-\boldsymbol{\Lambda}e\end{cases} \tag{7}$$

未建模动态和外部扰动等不确定因素 $\boldsymbol{d}$ 为

$$\boldsymbol{d}=\boldsymbol{M}_{\Delta}\ddot{q}_r+\boldsymbol{C}_{\Delta}\dot{q}_r+\boldsymbol{G}_{\Delta}q+\boldsymbol{f}_{\Delta}+\boldsymbol{\tau}_{d\Delta} \tag{8}$$

滑模控制核心思想是设计控制律，为使系统状态在有限时间内到达并维持在滑模面 $s=0$ 上，此时系统呈期望的稳定误差动态特性，实现轨迹的渐近跟踪。当不确定上界 D 已知时，则传统滑模控制自适应律可表示为

$$\boldsymbol{u}_{sm}=\boldsymbol{u}_{eq}-\boldsymbol{K}s-\boldsymbol{\rho}\mathrm{sgn}(s) \tag{9}$$

其中　$\boldsymbol{K}=\mathrm{diag}(k_1,k_2,k_3)$

式中　$\boldsymbol{u}_{eq}$——基于动力学模型的前馈控制项，用于补偿机构惯性力、重力和各移动副摩擦力

$\boldsymbol{K}$——线性反馈增益项，用于控制系统收敛速度

$\boldsymbol{\rho}$——切换增益矩阵

传统滑模控制依赖于对系统不确定性上界 D 的先验知识，该条件在实际工程中往往难以满足。过度保守的估计会加剧固有抖振，而估计不足则可能导致系统失稳。为克服此局限，在传统滑模控制框架中引入自适应机制。通过设计自适应律在线估计并实时补偿不确定项 $\boldsymbol{d}$，从而摆脱对不确定项上界的先验依赖。同时，该方法以自适应估计值 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 替代传统控制律中不连续的切换项 sgn(s)，平滑控制输入，抑制抖振，其控制结构图如图 3 所示。

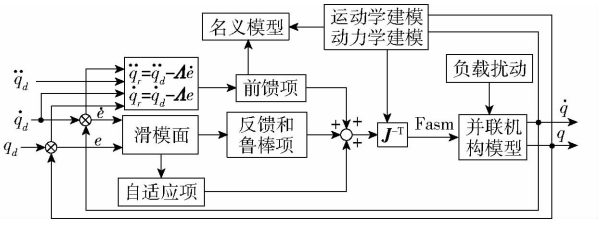

图 3　自适应滑模控制结构图

Fig. 3　Schematic of adaptive sliding mode control strategy

设计的自适应滑模控制律为

$$\boldsymbol{u}_{asm}=\boldsymbol{u}_{eq}-\boldsymbol{K}s-\hat{\boldsymbol{d}} \tag{10}$$

自适应律通过在线更新参数 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 补偿系统中的未知干扰，其更新规则为

$$\hat{\boldsymbol{d}}=\boldsymbol{\gamma}s \tag{11}$$

其中　$\boldsymbol{\gamma}=\mathrm{diag}(\gamma_1,\gamma_2,\gamma_3)$

式中　$\boldsymbol{\gamma}$——自适应增益矩阵

该增益矩阵决定自适应更新响应速度。通过对 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 的估计，能够有效补偿扰动对系统的影响，从而提高系统鲁棒性和精度。

2.3 稳定性

为证明自适应滑模控制器稳定性，选取 Lyapunov 函数

$$V=\frac{1}{2}s^2+\frac{1}{2\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}^2 \tag{12}$$

其中 $$\tilde{\boldsymbol{d}}=\boldsymbol{d}-\hat{\boldsymbol{d}}$$

式中 $\tilde{\boldsymbol{d}}$——扰动估计误差

对 Lyapunov 函数求导，得到

$$\begin{aligned}\dot{V}&=s\dot{s}+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}\dot{\tilde{\boldsymbol{d}}}=\\&s(-\boldsymbol{K}s+\tilde{\boldsymbol{d}})+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}(\dot{\boldsymbol{d}}-\boldsymbol{\gamma}s)=\\&-\boldsymbol{K}s^2+s\tilde{\boldsymbol{d}}+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}\dot{\boldsymbol{d}}-\tilde{\boldsymbol{d}}s=-\boldsymbol{K}s^2+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}\dot{\boldsymbol{d}}\end{aligned} \tag{13}$$

(1) $\boldsymbol{d}$ 为时不变扰动

若 $\boldsymbol{d}$ 为常数，则 $\dot{\boldsymbol{d}}=0$，可得

$$\dot{V}=-\boldsymbol{K}s^2\leqslant 0 \tag{14}$$

由于所构造的 Lyapunov 函数 V 有界且单调不增，可知系统滑模变量 s 及扰动估计误差 $\tilde{\boldsymbol{d}}$ 均保持有界。由 $\dot{V}=0$ 可推导 $s=0$，结合 LaSalle 不变原理可得系统轨迹最终收敛到不变集 $\{s=0\}$，即滑模面可被渐近到达并保持。在此基础上，自适应律能够对常值扰动进行在线辨识，使扰动估计值 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 收敛至某一常数；当滑模面满足足够的激励条件时，还可进一步证明 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 渐近收敛于真实扰动 $\boldsymbol{d}$。综上，在时不变不确定项作用下，所设计的自适应滑模控制律可保证闭环系统渐近稳定，滑模变量 s 收敛至零。

(2) $\boldsymbol{d}$ 为时变扰动

若 $\boldsymbol{d}=\boldsymbol{d}(t)$ 随时间变化，假定存在常数 d_1 使得 $|\dot{\boldsymbol{d}}(t)|\leqslant d_1$，则

$$\dot{V}=-\boldsymbol{K}s^2+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}\tilde{\boldsymbol{d}}\dot{\boldsymbol{d}}\leqslant-\boldsymbol{K}s^2+\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}|\tilde{\boldsymbol{d}}||\dot{\boldsymbol{d}}| \tag{15}$$

利用 Young 不等式，对任意 $\varepsilon>0$ 有

$$\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}|\tilde{\boldsymbol{d}}||\dot{\boldsymbol{d}}|\leqslant\varepsilon\tilde{\boldsymbol{d}}^2+\frac{1}{4\varepsilon\boldsymbol{\gamma}^2}\dot{\boldsymbol{d}}^2\leqslant 2\varepsilon\boldsymbol{\gamma}V+\frac{d_1^2}{4\varepsilon\boldsymbol{\gamma}^2} \tag{16}$$

于是

$$\dot{V}\leqslant-\boldsymbol{K}s^2+2\varepsilon\boldsymbol{\gamma}V+\frac{d_1^2}{4\varepsilon\boldsymbol{\gamma}^2} \tag{17}$$

通过适当增大控制增益 $\boldsymbol{K}$ 并合理选取自适应增益 $\boldsymbol{\gamma}$ 与参数 ε，可使不等式中关于 V 的负项在绝大部分状态空间中占据主导，从而保证 $\dot{V}$ 在除原点邻域外为严格负定，仅在一个有界小区域内可能为零或略大于零。由此可以推得：一方面，滑模变量 s 与扰动估计误差 $\tilde{\boldsymbol{d}}$ 一致有界；另一方面，系统状态最终收敛至原点附近的有限小邻域，该邻域大小与扰动 $\boldsymbol{d}(t)$ 变化速率以及自适应增益 $\boldsymbol{\gamma}$ 密切相关：$|\dot{\boldsymbol{d}}|$ 越小、$\boldsymbol{\gamma}$ 取值越大，该邻域越小，系统稳态性能越优。

综上，对于变化速率有界的时变不确定项，所设计的自适应滑模控制律能够保证闭环系统一致最终有界稳定，使滑模面误差及扰动估计误差始终约束在较小范围内。

2.4 位置控制仿真

为了验证所提控制算法优越性，对比分析在 PID 控制、传统滑模控制与自适应滑模控制作用下，并联腕关节 3 个自由度 (α,β,h) 的轨迹响应及其跟踪误差。在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型，设定期望轨迹为：$\alpha(t)=\pi/4\sin t$，$\beta(t)=\pi/4\cos t$，$h(t)=20+\cos(0.5t)$。

外部时变负载为

$$\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}15\sin(2t)\\-18\cos(2t)\\-5-30\sin(1.5t)\end{bmatrix} \tag{18}$$

初始位姿设置为

$$\begin{cases}[\alpha_0,\beta_0,h_0]=[\pi/60,4\pi/15,23]\\[\dot{\alpha}_0,\dot{\beta}_0,\dot{h}_0]=[0,0,0]\end{cases} \tag{19}$$

仿真运行时间为 10 s，步长为 0.001 s。仿真得 3 种控制算法下并联腕关节轨迹跟踪与误差如图 4 所示。

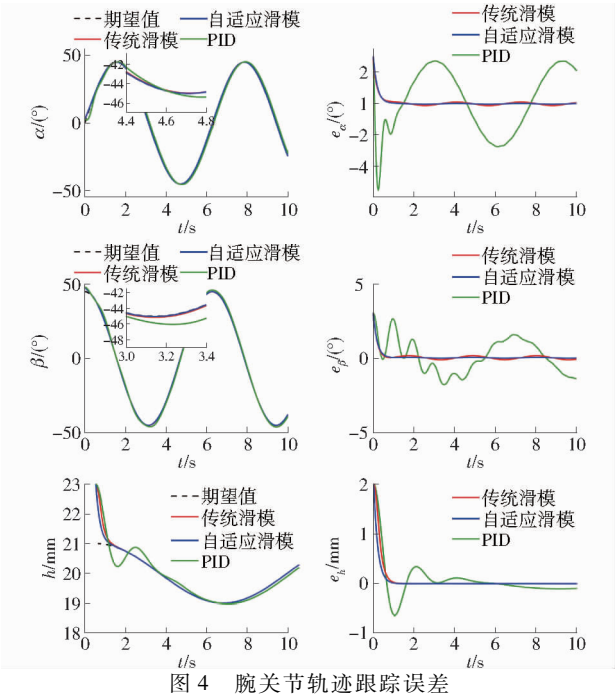

图 4 腕关节轨迹跟踪误差

Fig. 4 Wrist joint trajectory tracking error

由图 4 可得，在存在外部扰动情况下，PID 控制

曲线波动较为明显，且在方向变换处存在一定滞后；传统滑模控制有效改善了跟踪性能，但在扰动峰值处仍存小幅偏离。相比之下，自适应滑模控制所得响应曲线与期望轨迹基本重合，在 0 ~ 10 s 的全时段内未出现明显相位滞后或幅值衰减，体现出其对系统参数摄动与外部扰动具有更优的补偿能力，有效提升了腕关节运动连续性与一致性。

由图 4 可知，在初始阶段，受初始偏差影响，各自由度最大跟踪误差分别约为 3°、3°和 3 mm。误差迅速衰减，在 0.5 s 内降至 10^{-1} 量级。对比发现，PID 控制稳态误差受噪声影响较大，波动频繁；传统滑模控制虽降低了误差，但由于切换增益固定，仍存在细微震荡。自适应滑模控制不仅显著降低了稳态误差幅值，还有效抑制了滑模固有的抖振现象，使系统响应更加平滑稳定。3 种算法平均跟踪误差如表 1 所示。

表 1　跟踪误差对比

Tab. 1　Comparison of tracking errors

控制方法	e_α/(°)	e_β/(°)	e_h/mm
PID	1.799 1	0.971 2	0.186 4
传统滑模	0.124 1	0.135 4	0.065 0
自适应滑模	0.075 8	0.077 1	0.041 4

PID 控制由于难以完全抵消系统非线性扰动，其 α、β 方向平均跟踪误差 e_α、e_β 达 1.799 1°和 0.971 2°；传统滑模控制凭借其鲁棒性，将上述误差显著降低至 0.124 1°与 0.135 4°；而自适应滑模控制通过实时估算并补偿外部扰动，使误差进一步减小至 0.075 8°和 0.077 1°。在平移自由度 h 方向，自适应滑模控制所得平均误差仅为 0.041 4 mm，较传统滑模控制和 PID 控制分别降低 36.3% 和 77.8%。

综合数据表明，相较于传统滑模控制，自适应滑模控制使跟踪误差平均降低 36.3% ~43.1%。表明自适应滑模控制在确保系统快速收敛的同时，能够有效抑制抖振并消除稳态偏差。综上所述，自适应滑模控制显著增强了并联腕关节在参数不确定性与外界干扰下的轨迹跟踪精度与鲁棒性能，能够更好地满足腕关节高精度位置控制的实际需求。

3　并联腕关节柔顺控制

3.1　导纳控制模型

草莓采摘过程中，机械臂末端执行器处于典型变载荷工况，负载呈显著的时变与突变特性。其动态过程主要包括 3 个阶段：在接近果实阶段，末端与枝叶随机接触会引入瞬时力/力矩，导致负载短时波动；在抓取分离阶段，果实脱离果柄的瞬间因接触力骤减而产生负载阶跃下降，形成强烈瞬态冲击；在转运放置阶段，果实的释放同样引发负载突变。整个作业流程构成复杂的高动态负载序列，对控制系统的动态稳定、柔顺交互与鲁棒性能提出了严峻挑战。因此需要采用柔顺控制策略，通过导纳控制提升机构柔顺性。期望导纳模型为

$$\boldsymbol{M}_d(\ddot{X}_d-\ddot{X})+\boldsymbol{B}_d(\dot{X}_d-\dot{X})+\boldsymbol{K}_d(X_d-X)=E \tag{20}$$

其中　　$E=F_r-F_o$

式中　$\boldsymbol{M}_d$——等效惯量

$\boldsymbol{B}_d$——阻尼

$\boldsymbol{K}_d$——刚度矩阵

X_d——期望位移

X——实际位移

E——导纳模型输入力

F_r——参考输入力

F_o——环境接触力

由式(20)可得，机构加速度调整量表示为

$$\ddot{X}_e=\boldsymbol{M}_d^{-1}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{B}_d\dot{X}_e^i-\boldsymbol{K}_dX_e^i) \tag{21}$$

其中　　$X_e=X_d-X$

对加速度调整量进行积分可得到速度与位姿关系为

$$X_e^{i+1}=X_e+\dot{X}_e^{i+1}\Delta t \tag{22}$$

对导纳模型等式两边做拉氏变换得到导纳控制的传递函数为

$$\boldsymbol{G}(s)=\frac{\Delta X(s)}{\Delta F(s)}=\frac{1}{\boldsymbol{M}s^2+\boldsymbol{B}s+\boldsymbol{K}} \tag{23}$$

导纳控制系统框图如图 5 所示，包括位置内环与力外环 2 部分。

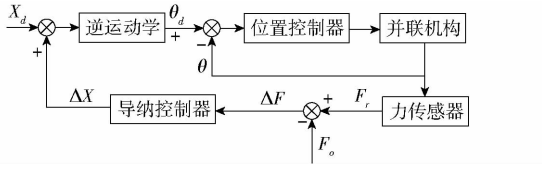

图 5　导纳控制结构图

Fig. 5　Schematic of admittance control framework

设计的导纳控制器实现了从力信息到位置指令的动态映射。该控制器通过力闭环对交互信息进行处理：实时检测并计算机器人与环境之间的接触力偏差；该偏差作为输入被馈入期望的导纳模型，其输出为一个轨迹补偿信号 ΔX；此信号最终与原始位置指令 X_d 叠加，共同构成内环位置控制器跟踪目标。将导纳控制器与位置控制器融合，为系统引入可调的阻抗特性，使其能够根据交互力自适应地调整运动轨迹。

3.2 模糊变导纳控制

导纳控制参数是影响导纳控制器的关键,固定导纳控制参数不能很好地满足腕关节的使用,通常需要实时调整导纳参数。模糊变导纳通过实时感知交互状态,动态调整阻尼系数 B_d,从而在自由运动与环境接触阶段自适应地优化机器人动态性能与稳定性。

模糊控制规则的设计依据系统跟踪误差及其变化率自适应调整导纳阻尼系数,在响应速度与轨迹稳定性之间实现折中。当力误差 E 及其变化率 E_d 较大时,系统处于偏离期望状态或快速变化阶段,若阻尼系数偏小,易产生较大的超调与振荡。因而在该阶段适当增大阻尼系数 B_d,以增强对外力扰动的抑制能力,改善系统稳定性。当误差及其变化率较小时,系统已接近期望轨迹,此时可减小阻尼系数 B_d,降低阻尼效应,以提高末端柔顺性并加快动态响应。基于上述原则,构建以跟踪误差及其变化率为输入、以阻尼系统修正量为输出的模糊推理机制,实现导纳参数在线自适应整定。

采用模糊控制策略对上述输入变量进行等级划分,模糊规则如表 2 所示,共划分为 7 个模糊等级,并分别通过模糊语言变量和三角形隶属函数进行描述,各等级表示为正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)、负中(NM)以及负大(NB)。模糊规则输出曲面如图 6 所示。

表 2 模糊规则

Tab. 2 Fuzzy rules

E_d	E				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NS	Z	PS	PS	PM
NM	NM	NS	Z	PS	PS
NS	NB	NM	NS	Z	PS
Z	NB	NM	NM	Z	Z
PS	NB	NM	NS	Z	PS
PM	NM	NS	Z	PS	PM
PB	NS	Z	PS	PM	PB

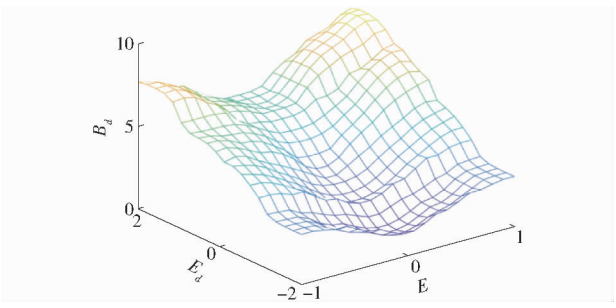

图 6 模糊规则输出曲面

Fig. 6 Output surface of fuzzy rules

3.3 柔顺控制仿真

基于 Matlab 设计扰动响应仿真试验,以对比固定参数导纳控制与模糊变阻尼导纳控制算法下并联腕关节抗负载冲击特性。采样周期 1 ms,总仿真时长 10 s。在 1.5 ~ 1.6 s 对机构动平台法向方向施加 10 N 外力扰动,在 6.0 ~ 6.1 s 对机构施加 20 N 外力扰动。对比两种柔顺控制策略下动平台竖直位移 h 的跟踪精度、抗扰动能力和动态响应特性,仿真结果如图 7 所示。

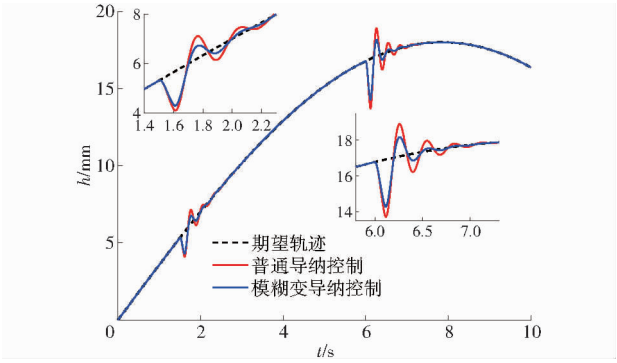

图 7 柔顺控制轨迹跟踪

Fig. 7 Wrist joint trajectory tracking error

由图 7 可知,在受到 10 N 力扰动后固定参数导纳控制最大超调量为 1.60 mm,稳定时间为 0.41 s;模糊变导纳控制最大超调量为 1.40 mm,调整量降低 12.5%,稳定时间为 0.27 s,稳定时间减少 0.14 s。在受到扰动 20 N 后固定参数导纳控制最大超调量为 3.21 mm,稳定时间为 0.57 s;模糊变导纳控制最大超调量为 2.64 mm,调整量降低 17.8%,稳定时间为 0.32 s,稳定时间减少 0.25 s。通过模糊逻辑实时调整导纳阻尼参数,在保证系统稳定性的同时,显著提升了对外部扰动的鲁棒性和轨迹跟踪精度。

4 试验结果与分析

4.1 样机设计与采摘系统集成

为验证所提出并联腕关节可行性,设计了并联腕关节样机,如图 8 所示。各支链均采用微型电推杆驱动,所有旋转副(R)与虎克铰(U)均选用微型精密标准件或定制件,静平台与动平台则通过 3D 打印工艺加工制成。在满足工作空间需求条件下尽可能实现结构紧凑化,设计中对各部件尺寸进行了最小化处理。腕关节整体高度为 155 mm,静平台铰链安装孔分布圆半径为 40 mm,动平台对应分布圆半径为 50 mm。运动测试结果表明,腕关节在 α 与 β 方向最大极限转角分别为 70°和 88°,均满足草莓采摘作业实际角度要求。

将并联腕关节集成于一个具有 3 平移自由度的垄作草莓采摘机器人上,构建了一套完整采摘机器



图 8　RPU－RPR－UPR 并联腕关节样机

Fig. 8　RPU－RPR－UPR parallel wrist joint prototype

1. 加速度计　2. UPR 支链　3. 静平台　4. 动平台　5. RPR 支链　6. RPU 支链

人系统，如图 9 所示。草莓采摘机器人系统主要包括行走机构、直线模组、电源、腕关节、末端执行器等组成[24]。在该采摘机器人系统中，腕关节静平台与 Z 轴方向移动的机械臂相连接，动平台则连接具备力控功能的电动夹爪作为末端执行器，从而完成对草莓果实抓取与分离操作。

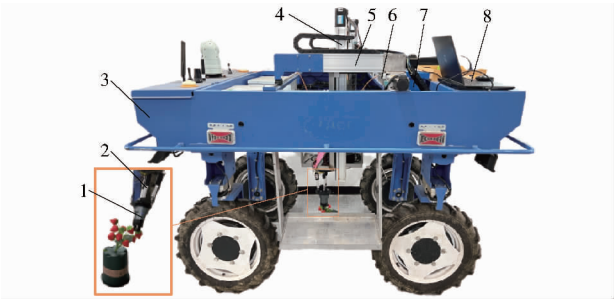

图 9　草莓采摘机器人系统

Fig. 9　Robotic strawberry harvesting platform

1. 末端执行器　2. 腕关节　3. 行走机构　4. Z 轴方向直线模组　5. Y 轴方向直线模组　6. X 轴方向直线模组　7. 电源　8. 计算机

在采摘过程中，通过视觉系统基于深度学习的目标检测与定位算法识别成熟草莓果实并确定其三维空间坐标，进而驱动直线模组将腕关节移动至预采摘位置。并联腕关节根据草莓果实实际生长姿态进行快速、精准的位姿调整，使电动夹爪能够以最优角度夹紧果柄，最终腕关节与直线模组配合完成扭转拉拽动作完成草莓采摘。

4.2　加速度响应试验

为验证柔顺控制策略在外力突变场景下动态响应性能，在并联腕关节末端安装 WT901SDCL－BT50 型加速度计（采样频率为 50 Hz），分别采集系统在位置控制与柔顺控制下，当负载移除后动平台法向加速度响应信号。每种控制方法试验 5 次，试验结果如图 10、11 所示。对试验数据进行统一整理，提取峰值、谷值、稳态平均值、峰–峰幅值及响应时间等关键动态指标，分析柔顺控制对系统抗扰性能的影响。

由图 10 可知，负载突变时系统呈现典型欠阻尼

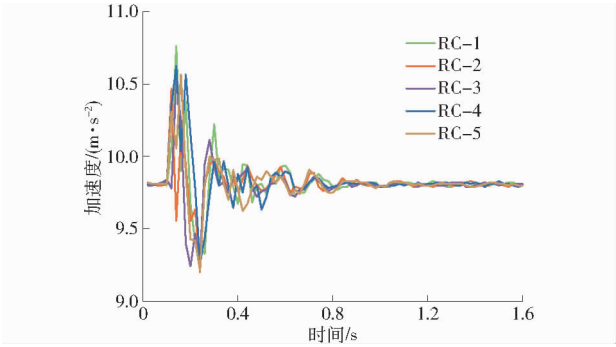

图 10　位置控制下系统加速度响应曲线

Fig. 10　Acceleration response curve of system under position control

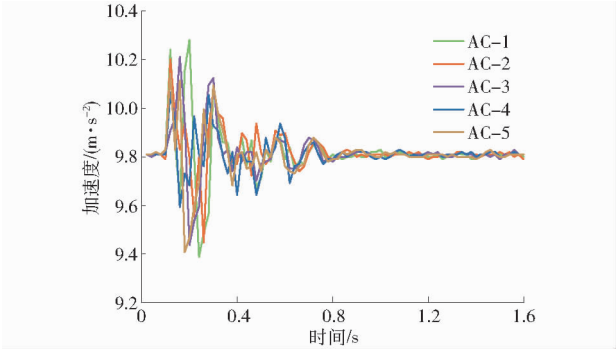

图 11　柔顺控制下系统加速度响应曲线

Fig. 11　Acceleration response curves of system under compliance control

特性，导致显著的瞬态冲击响应。超调量达 6.8% ~ 9.8%，峰–峰值振幅为 1.23 ~ 1.43 m/s^2，并伴随 2 ~ 4 次明显振荡。系统约在 0.9 s 收敛至稳定值（9.8 ± 0.01）m/s^2，但衰减速度中等，振荡持续较长，反映出固有阻尼不足，难以有效吸收突变动能。

由图 11 可知，与位置控制相比，柔顺控制显著提升了系统抗干扰性能。将最大超量调抑制在 2.7% ~4.9%，瞬态加速度峰值被有效限制（10.06 ~ 10.28 m/s^2），低谷值亦收窄（9.39 ~ 9.59 m/s^2），系统约在 0.8 s 收敛至稳定值（9.8 ± 0.01）m/s^2。峰–峰值振幅为 0.47 ~ 0.89 m/s^2，较位置控制平均降低约 45.5%，表明动态波动显著收敛。结果表明，柔顺控制显著改善了并联腕关节在负载突变下的动态响应性能，通过引入主动阻尼，从而大幅抑制瞬态振动、加速衰减过程，为机器人柔顺作业提供了关键动态基础。

4.3　草莓断柄采摘试验

为进一步评估并联腕关节在负载变化条件下的综合性能，设置不同果柄分离力水平下采摘任务。由于自然环境中草莓果柄断裂力存在显著差异，将分离力设为 0 ~ 22 N，以更真实地模拟实际采摘工况。针对每种姿态条件，均进行 10 次重复试验，试验结果如表 3 所示。

表 3 不同果柄分离力采摘试验结果

Tab. 3 Strawberry picking data for different peduncle separation forces

采摘姿态/(°)	果柄分离力/N									
第 1 组(50,50)	/	21.56	19.20	12.99	10.34	14.42	13.73	7.82	6.58	4.08
第 2 组(30,30)	11.37	7.62	13.47	8.96	3.90	10.55	11.02	18.21	9.54	14.14
第 3 组(10,10)	8.60	/	5.28	13.04	12.36	17.58	15.90	19.87	9.13	6.99

由表 3 可知,30 次有效试验中有 28 次试验成功采摘,平均采摘成功率达到 93%,该集成化采摘系统单果平均采摘时间为 15 s。当果柄分离力为 0 ~ 22 N 时,并联腕关节能够正确完成姿态调整并实现夹爪对果柄的精准夹持,系统均能稳定完成采摘任务。未出现因腕关节输出力不足导致的失效情况,表明腕关节结构及其控制策略能够适应常见果柄分离力。

试验过程中观察到,采摘失败主要与机械干涉和夹持稳定性 2 类问题相关。在第 1 组第 1 次试验中,采摘失败源于动作顺序规划不当。具体表现为腕关节在夹爪接近植株时同步调整姿态,导致夹爪与枝叶发生干涉,引发目标果实位姿偏移,影响夹持精度。结果表明在密集植株环境中,动作时序对操作稳定性至关重要。通过优化策略,改为在高位先完成姿态调整再接近果实,有效避免了机械干涉。另一失败案例出现于第 3 组第 2 次试验,主要由于夹持面积不足。当夹爪与果柄接触位置偏移或夹持深度不够时,产生的摩擦力无法克服分离力,导致果柄滑脱。这表明夹持位置及有效接触面积对稳定性具有关键影响,需确保夹持面与果柄充分贴合。

此外,当果柄分离力超过 25 N 时,现有电动夹爪所能提供的最大有效摩擦力已无法满足稳定夹持需求,导致果柄滑脱使得采摘过程中断。说明在面对高分离力品种时,需进一步提升夹爪力控性能。

5 结论

(1)提出了一种面向草莓采摘的 RPU - RPR - UPR 并联腕关节构型,该机构具备两转一移自由度,为完全解耦机构,并建立了其运动学与动力学模型。

(2)针对动力学模型不确定性问题,自适应滑模控制性能优于 PID 与传统滑模。α、β 和 h 方向平均误差分别降至 0.075 8°、0.077 1°和 0.041 4 mm,有效抑制了抖振,提升了轨迹跟踪精度与稳定性。

(3)构建了模糊变导纳控制,仿真结果表明,在不同外力干扰下超调量与调整时间均优于固定参数导纳控制。受到扰动力 10 N 后,超调量降低 12.5%,稳定时间减少 0.14 s;受到 20 N 扰动力后,超调量降低 17.8%,稳定时间减少 0.25 s。

(4)试验结果表明,柔顺控制使腕关节受扰动后,加速度波动范围明显收窄,平均波动幅度降低 45.5%,显著提升了系统抗扰性能。当果柄分离力 0 ~ 22 N 时,草莓断柄采摘成功率为 93%,单果平均采摘时间为 15 s,可以满足草莓采摘要求。

参 考 文 献

[1] 陈天赐, 张世昂, 付根平, 等. 热带水果采摘机器人研究进展综述[J]. 农业机械学报, 2025, 56(5):184 - 201.
CHEN Tianci, ZHANG Shiang, FU Genping, et al. Review of research progress on tropical fruit harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5):184 - 201. (in Chinese)

[2] 雷志龙, 刘畅, 王权. 设施番茄采摘机器人识别定位与采摘方法研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(7):219 - 226.
LEI Zhilong, LIU Chang, WANG Quan. Recognition-localization and picking methods of facility tomato picking robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(7):219 - 226. (in Chinese)

[3] PARASA S, DEBNATH B, KHAN M A, et al. Modular autonomous strawberry picking robotic system[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(7):2226 - 2246.

[4] 孙鹏, 戴显永, 李研彪, 等. 基于 3 - RRP 并联机构的腕关节设计与分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(5): 112 - 120.
SUN Peng, DAI Xianyong, LI Yanbiao, et al. Design and analysis of wrist joint based on 3 - RRP parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(5):112 - 120. (in Chinese)

[5] XU P, CHEUNG C F, LI B, et al. Kinematics analysis of a hybrid manipulator for computer controlled ultra-precision freeform polishing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 44: 44 - 56.

[6] XU P, CHEUNG C F, WANG C J, et al. Novel hybrid robot and its processes for precision polishing of freeform surfaces[J]. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, 2020, 64: 53 - 62.

[7] WU Q X, WANG Y A, FU Y, et al. Design and kinematic modeling of wrist-inspired joints for restricted operating spaces[J]. Journal of Field Robotics, 2025, 42(6): 2878 - 2891.

[8] HU B Q, QU H B, LARIBI M A, et al. Design and analysis of a redundant actuated humanoid wrist joint parallel mechanism

[J]. Mechanism and Machine Theory, 2025, 215:106175.

[9] 张邦成, 刘帅, 喻俊志, 等. 绳索驱动腕部并联康复机构设计与逆运动学分析[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 57－68.
ZHANG Bangcheng, LIU Shuai, YU Junzhi, et al. Design and inverse kinematics analysis of wrist parallel rehabilitation mechanism:a rope driven-based method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 57－68. (in Chinese)

[10] 杨启志, 孙梦涛, 蔡静, 等. 温室穴盘苗并联高速移栽机器人运动误差分析与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 18－27.
YANG Qizhi, SUN Mengtao, CAI Jing, et al. Kinematic error analysis and test of high-speed plug seeding transplanting machine for greenhouse based on parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):18－27. (in Chinese)

[11] 李志鹏, 罗玉峰, 石志新, 等. 脐橙采摘机械臂的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(3):188－194.
LI Zhipeng, LUO Yufeng, SHI Zhixin, et al. Design and research of manipulator for naval orange harvesting[J]. Machine Design and Research, 2020, 36(3):188－194. (in Chinese)

[12] 河南农业大学. 一种多末端串并联番茄采摘机械臂及其采摘方法:202110755574.X[P]. 2023－03－17.

[13] 梁栋, 张珺鹏, 姚福林, 等. 高速大承载 Schönflies 并联机构动力学建模、性能分析及控制策略[J]. 机械工程学报, 2024, 60(23):114－129.
LIANG Dong, ZHANG Junpeng, YAO Fulin, et al. Dynamic modeling, performance analysis and control strategy for a Schönflies parallel mechanism with high-speed and large-load capacity[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(23):114－129. (in Chinese)

[14] 范其明, 韦洪良, 郜夯, 等.基于计算力矩法的机械臂滑模鲁棒控制[J]. 制造技术与机床, 2025(10):138－148.
FAN Qiming, WEI Hongliang, GAO Hang, et al. Sliding mode robust control for robotic manipulators based on computed torque method[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2025(10):138－148. (in Chinese)

[15] 张海峰, 何其臻, 陈巧红, 等. 3－P(RR－RRR)SR 运动冗余并联机器人动力学系统分解建模与控制[J]. 机械工程学报, 2025, 61(17):66－79.
ZHANG Haifeng, HE Qizhen, CHEN Qiaohong, et al. 3－P(RR－RRR)SR kinematic redundant parallel robot dynamics decomposition modeling and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(17):66－79. (in Chinese)

[16] QIN H B, JING H X, HOU Z L, et al. Dynamic modeling and sliding mode control of 3－RSS coaxial layout polishing robot [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2022, 44(6):1－12.

[17] JIN L, ZOU T Q, XU Y D, et al. 2P(RPS－UPS) parallel mechanism sliding mode control and trajectory tracking method[C]// Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2025:1－6.

[18] DUC T T, XUAN T N, THANH N N, et al. Practical synchronous sliding mode control with time delay estimation for a 4－DOF parallel manipulator with unknown dynamics and variable payload[J]. ISSS Journal of Micro and Smart Systems, 2025, 13:102758－102770.

[19] BAI K, CHEN W, LEE K M, et al. Spherical wrist with hybrid motion-impedance control for enhanced robotic manipulations [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 38(2):1174－1185.

[20] 刘磊, 张涛. 空间包络式抓捕机构非接触/接触一体化导纳控制[J]. 宇航学报, 2024, 45(1):91－100.
LIU Lei, ZHANG Tao. Integrated contact and non-contact admittance control for spatial envelope capture mechanism[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(1):91－100. (in Chinese)

[21] 倪涛, 孙旭, 李东, 等. 基于外力估计的并联机器人柔顺控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8):443－451.
NI Tao, SUN Xu, LI Dong, et al. Compliance control strategy of parallel robot based on external force estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8):443－451. (in Chinese)

[22] HADDADIN S, SHAHRIARI E. Unified force-impedance control[J]. The International Journal of Robotics Research, 2024, 43(13):2112－2141.

[23] 张国龙, 杨桂林, 邓益民, 等. 三平动力控末端执行器鲁棒自适应力跟踪导纳控制方法[J]. 机械工程学报, 2023, 59(1):71－81.
ZHANG Guolong, YANG Guilin, DENG Yimin, et al. Robust adaptive force tracking admittance control for 3-DOF translational force-controlled end-effector[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(1):71－81. (in Chinese)

[24] DU X Q, CHENG H C, MENG Z C, et al. DSW－YOLO: a detection method for ground-planted strawberry fruits under different occlusion levels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214:108304.