

混联式四足紫苏播种机器人构型设计与研究

田宝俊¹, 韩喜英², 宋国将³, 王芮雪³

(1. 山西电子科技学院 智能制造工程学院, 山西 临汾 041000; 2. 中北大学 人力资源部, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 机械工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对目前紫苏播种人工成本高等问题, 本文提出了一种基于(2-UPU/RPU)&U混联机构的紫苏四足播种机器人, 并对其进行了运动机理与空间的验证, 使其代替人工完成紫苏播种作业。首先利用螺旋理论及K-G公式求解验证了2-UPU/RPU并联机构的自由度特征; 然后应用封闭矢量法对并联机构进行了逆解分析, 建立了速度雅可比矩阵模型, 分析了机构奇异性存在条件; 接着利用极限边界搜索法求解了机器人足端工作空间, 并进行了运动/力传递的性能分析; 最后设定不同播种点位并利用SOLIDWORKS中的MOTION对其进行了移动仿真。结果表明, 该机构工作空间内部连续, 且不存在奇异位置, 传递性能良好, 具备对足端株距、行距调整的灵活性及地形适应能力。该研究为紫苏种植的机械化、智能化发展提供了新的解决方案。

关键词: 紫苏; 四足播种机器人; 运动学; SOLIDWORKS

中图分类号: TP242

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.07.0016

引用格式: 田宝俊, 韩喜英, 宋国将, 等. 混联式四足紫苏播种机器人构型设计与研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 421-430.

Tian Baojun, Han Xiyang, Song Guojiang, et al. Configuration design and research of a hybrid quadruped perilla sowing robot[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(4): 421-430.

Configuration Design and Research of a Hybrid Quadruped Perilla Sowing Robot

Tian Baojun¹, Han Xiyang², Song Guojiang³, Wang Ruixue³

(1. Intelligent Manufacturing Engineering College, Shanxi University of Electronic Science and Technology, Linfen 041000, China;

2. Human Resources Department, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Regarding the current issue of high labor costs associated with perilla seed sowing, a perilla quadruped seeding robot based on the (2-UPU/RPU) & U mixed coupling mechanism was proposed, so as to enable it to complete the perilla seeding operation instead of manual work. Firstly, the spiral theory and K-G formula were used to solve and verify the degree of freedom characteristics of the 2-UPU/RPU parallel mechanism. And the inverse solution analysis of the parallel mechanism was applied by the closed vector method to establish the velocity Jacobi matrix model and analyze the existence conditions of the mechanism's singularity. Then the workspace at the foot end of the robot was solved by the limiting boundary search method, and the motion/force transfer performance analysis was carried out. Finally, different sowing point positions were set, and MOTION in SOLIDWORKS was utilized to simulate its movement. The results show

收稿日期: 2025-07-31

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202202150401018)

作者简介: 田宝俊(1971—), 男, 副教授, 博士, 主要从事机器人的研究。E-mail: tianbaojun@sxdzkj.edu.cn。

that the mechanism's workspace is internally continuous, and there is no singular position, the transfer performance is good, and it has the flexibility of adjusting the foot-end plant spacing and row spacing as well as the ability of adapting to the terrain. It provides a new solution for the mechanization and intelligent development of perilla planting.

Key words: perilla; quadruped seeding robot; kinematics; SOLIDWORKS

0 引言

紫苏作为一种重要的经济作物,广泛应用于食品、医药和化妆品等领域,其种植过程对播种精度、作业效率以及环境适应性提出了较高要求^[1]。传统的紫苏播种方式主要依赖人工或简单的机械设备,普遍存在播种不均、深度不一、效率低下等问题,严重制约了紫苏种植的规模化发展。因此,开发一种能够适应复杂地形环境、实现精准播种的紫苏播种机器人,具有重要的现实意义。

Sang等^[2]基于仿生学原理设计了一款新型载人四足移动机器人,采用2-UPS+UP并联机构作为四足机器人的腿部结构。Zhang等^[3]设计了一种新型的多运动轮腿分离式四足机器人,能够适应结构化及非结构化地面等多种地形状况。丰玉玺^[4]研制了一款移动机器人,该机器人可应用于外星地表等复杂地形环境,其腿部采用2-UPS/(S+SPR)R并联机构。马世豪等^[5]提出了一种2-SPR/RUPR并联机构的四足步行机器人,可以实现平稳灵活步态控制。Wu等^[6]设计了一种新型的四足机器人BJTUBOT,该机器人可完成全向移动、转弯、跳跃等动作过程。高海豹^[7]提出一种四足穴播机器人,采用R+(3-CPR)+U混联机构作为腿部结构,并结合足端地形识别装置和直插穴播装置,实现了机器人行走时抬脚、落脚播种过程及调整间距、行距功能,提高了播种的灵活性与准确性。

穴播相比条播和撒播,具有较高的播种精度及资源利用效率。王伟才等^[8]基于传统直插播种机构设计了一种垂直入土式穴播装置,采用平行四连杆机构控制成穴器鸭嘴实现垂直入土、出土过程。赵武云团队^[9-12]设计了一种精量直插式穴播机构,提出一种非圆柱齿轮驱动的速度补偿机构,保证了穴播器播种过程中水平分速度为零,有效避免了膜上播种时存在的挑膜、撕膜问题。王芮雪等^[13]设计了一种3-UPS/PPR机构,可实现2T1R自由度,无伴随运动,提高运动的稳定性。李沐桐等^[14]设计了一款旱地回转穴播装置,利用凸轮滑道与回位压簧完成

打孔投种过程,解决了排种管堵塞、重播等现象,适用于覆膜穴播、平播作业方式。衣淑娟等^[15]针对籽粒作物设计了勾链式导种装置,通过约束种子运动解决种子弹跳问题,同时设计了排种装置,将正负气压与型孔轮相结合,减少了排种孔堵塞问题,提高了排种均匀性。

目前,多数穴播机构在播种过程中无法灵活调整播种间距、行距,实现作物的合理密植;在农田、沟壑等复杂地形条件下,四足移动机器人运动灵活,具备良好的地形适应能力,且可通过抬脚、落脚动作实现水平方向零速移动^[16]。因此,基于四足移动机器人这一运动特性,并结合直插式穴播装置垂直入土、垂直出土的播种作业方式,本文提出一种基于(2-UPU/RPU)&U混联机构的紫苏四足播种机器人,以实现紫苏作物的合理密植,并提高播种精度。

1 四足紫苏播种机器人构型设计

1.1 四足紫苏播种机器人整体构型

四足紫苏播种机器人主要包括机身、四条(2-UPU/RPU)&U混联腿部结构、播种足及覆土足,如图1所示。四足播种机器人的大腿部分采用2-UPU/RPU并联机构,其静平台与机身固连,呈四角分布,小腿为刚性结构,足端通过U副与腿部相连,前足端安装直插穴播装置,用于实现机器人的播种功能;后足端安装膜上覆土装置,用于实现播种后的覆土功能。

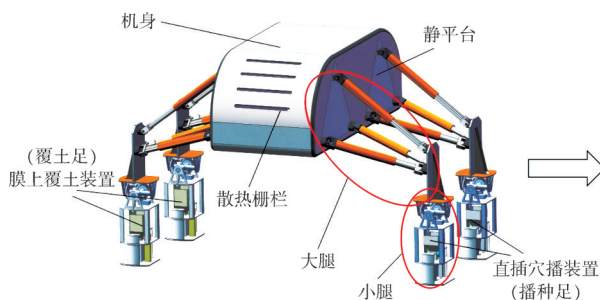


图1 混联式四足播种机器人

Fig. 1 Quadruped seeding robot with hybrid coupling mechanism

1.2 直插穴播装置与膜上覆土装置

直插穴播装置如图 2 所示。活动底板两侧固定安装直线导轨与导向柱,并穿过足端上部形成 P 副,同时导向柱周围安装压力弹簧,使足端上部与活动底板存在分开趋势,限位块 1 防止活动底板脱离足端上部;排种轮安装于种箱下方,拨杆固定于活动底板,排种轮上的拨轮盖与拨杆相配合,在四足机器人落脚过程中,扭转弹簧 1 使活动鸭嘴与固定鸭嘴呈闭合状态,推杆在移动导轨和弹簧 1 的作用下向活动鸭嘴顶端中部移动,拨杆使拨轮盖转动从而带动排种轮转动,使排种轮型腔内种子落入闭合的鸭嘴成穴器中,同时,直插式鸭嘴成穴器以闭合状态进入土壤,限位块 2 限制鸭嘴成穴器的入土深度。

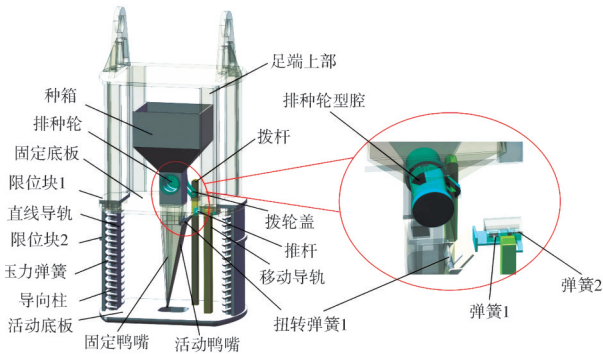


图 2 直插穴播装置

Fig. 2 Direct insertion seeding device

膜上覆土装置如图 3 所示。活动底板和足端上部的连接方式与直插穴播装置一致,同样采用直线导轨和导向柱形成 P 副连接,并在导向柱周围安装压力弹簧;直线凸轮与限位块 3 固定于活动底板,扭转弹簧 2 使挡板 2 与出土通道形成封闭状态。

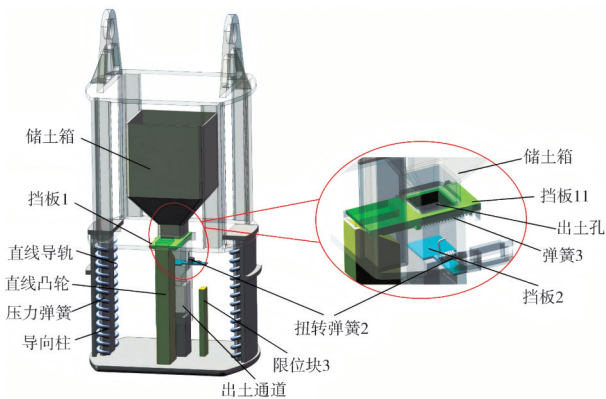


图 3 膜上覆土装置

Fig. 3 Membrane mulching device

在四足机器人落脚过程中,在直线凸轮与弹簧 3 的作用下挡板 1 上出土孔移出储土箱孔处,此时,挡板 1 与挡板 2 之间形成的密闭空间可控制单次出土量。随着足端继续下落,限位块 3 对扭转弹簧 2 进行挤压,挡板 2 发生扭转,与出土通道呈开启状态,土顺着出土通道覆盖于地膜之上,完成覆土过程。

1.3 2-UPU/RPU 构型及坐标系

如图 4 所示,该并联机构由 RPU、UPU- I、UPU- II 三个支链和动平台、静平台构成,其中, RPU 支链、UPU- I 支链、UPU- II 支链呈逆时针均匀分布于静平台上,各运动分支相隔 120° 。RPU 支链中 U 副与动平台相连, U 副轴线构成的平面始终与动平台平面相垂直且与边 A_2A_3 平行(见图 5); UPU- I 支链、UPU- II 支链呈对称布置,其中,两 U 副轴线构成的平面始终与静平台、动平台平面相垂直且分别与边 B_1B_3 、 B_1B_2 平行(见图 5)。

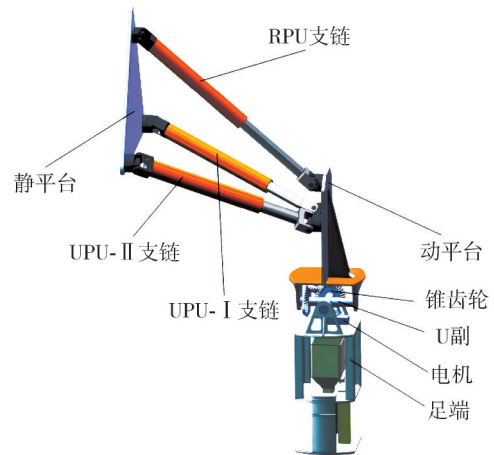


图 4 2-UPU/RPU 混联机械腿

Fig. 4 Hybrid mechanical legs of 2-UPU/RPU

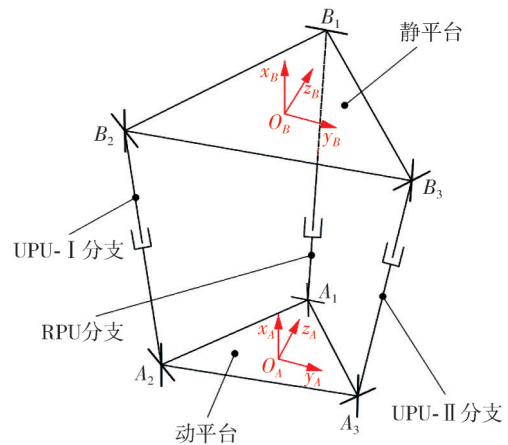


图 5 2-UPU/RPU 并联机构坐标系

Fig. 5 Coordinate system of 2-UPU/RPU parallel mechanism

在静平台中心 O_B 处建立静坐标系 $O_B-x_B y_B z_B$, x_B 轴竖直向上, y_B 轴平行于 $B_2 B_3$, 坐标原点 O_B 到各顶点距离为 $2b$; 动坐标系 $O_A-x_A y_A z_A$ 建立于动平台几何中心 O_A 处, x_A 轴竖直向上, y_A 轴平行于 $A_2 A_3$, 坐标原点 O_A 到各顶点的距离为 $2a$, 初始位姿时, 动、静坐标系各轴线方向一致。

1.4 自由度分析

通过使用螺旋理论^[17]对 2-UPU/RPU 机构进行自由度分析来建立 RPU 坐标系 $O_1-x_1 y_1 z_1$, 如图 6 所示。其中, x_1 竖直向上, 与静坐标系 y_B 平行的 R 副轴线方向为 y_1 , z_1 符合右手定则。

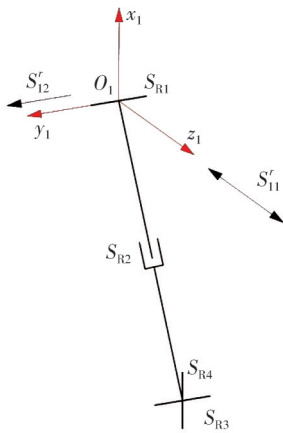


图 6 RPU 分支简图

Fig. 6 3 RPU branching sketch

RPU 支链的运动螺旋如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{S}_{R1} = (0 & 1 & 0; 0 & 0 & 0), \\ \dot{S}_{R2} = (0 & 0 & 0; e & 0 & -f), \\ \dot{S}_{R3} = (0 & 1 & 0; f & 0 & e), \\ \dot{S}_{R4} = (1 & 0 & 0; 0 & f & 0). \end{cases} \quad (1)$$

RPU 支链的约束螺旋根据约束螺旋和运动螺旋互易积为 0 来计算, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{S}_{11} = (0 & 0 & 0; 0 & 0 & 1), \\ \dot{S}_{12} = (0 & 1 & 0; -f & 0 & 0), \end{cases} \quad (2)$$

式中: S_{11} 和 S_{12} 分别为 RPU 分支坐标系沿着 z_1 轴的约束力偶和沿着 y_1 轴的约束力。

UPU 支链的运动螺旋系如式(3)所示。

$$\begin{cases} \dot{S}_{U1} = (0 & b & c; 0 & 0 & 0), \\ \dot{S}_{U2} = (1 & 0 & 0; 0 & 0 & 0), \\ \dot{S}_{U3} = (0 & 0 & 0; l & -m & n), \\ \dot{S}_{U4} = (0 & b & c; n-m & l & l), \\ \dot{S}_{U5} = (1 & 0 & 0; 0 & n & -m), \end{cases} \quad (3)$$

式中: b, c 分别为虎克铰在 y_2 轴、 z_2 轴上的方向余弦; l, m, n 分别为移动副在 x_2 轴、 y_2 轴、 z_2 轴上的单位矢量分量。

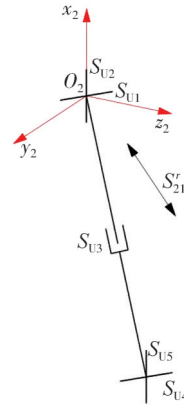


图 7 UPU 分支简图

Fig. 7 UPU branching sketch

RPU 支链约束螺旋如式(4)所示。

$$S_{21} = (0 \ 0 \ 0; 0 \ -c \ b). \quad (4)$$

综合 RPU 支链、UPU-I 支链、UPU-II 支链的约束螺旋可得该并联机构的运动螺旋, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{S}_{11} = (0 & 0 & 0; 1 & 0 & 0), \\ \dot{S}_{12} = (0 & 0 & 0; 0 & 0 & 1), \\ \dot{S}_{13} = (1 & 0 & 0; 0 & f & 0). \end{cases} \quad (5)$$

由此可得, 该机构的动平台可以沿 x_B 、 z_B 轴移动和绕 x_B 轴转动, 具有 2T1R 三自由度。

该机构的自由度通过式(6)计算得出 $F=3$, 这与螺旋理论计算结果一致。

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v - \xi, \quad (6)$$

式中: F 为自由度总数; d 为机构阶数; n 为活动构件总数; g 为运动副总数; f_i 为 i 运动副的自由度数; v 为冗余约束; ξ 为局部自由度数。其中 2-UPU/RPU 机构无局部自由度和公共约束, 所以 $d=0$; 通过约束螺旋计算得出该机构存在过约束 1 个, 所以 $v=1$ 。

综上所述, 具有 2T1R 的 2-UPU/RPU 机构能够满足四足机器人腿部完成前伸、落地、迈步等基本动作所需自由度要求, 同时, 配合静平台处串联的 U 副, 形成 (2-UPU/RPU)&U 混联腿部结构, 可使四足机器人足端进行灵活位姿调整, 从而完成播种、覆土动作。

2 3-UPS/PPR 并联机构运动学分析

2.1 位置逆解

并联机构位置逆解分析是通过动平台某一确

定位置的运动位姿参数来得到机构中各驱动副输入参数的过程。

已知静坐标系 $O_B-x_B y_B z_B$ 、动坐标系 $O_A-x_A y_A z_A$, 动、静平台原点至各顶点距离分别为 $2a$ 、 $2b$ 。静平台上各点 B_i 在静坐标系中可表示为 $B_i(i=1, 2, 3)$, 则

$$\begin{cases} B_1=[0 & 0 & 2b]^T, \\ B_2=[0 & -\sqrt{3}b & -b]^T, \\ B_3=[0 & \sqrt{3}b & -b]^T. \end{cases} \quad (7)$$

$$R=R_{ZYX}(\alpha \quad \beta \quad \gamma)=\begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由于在 y_B 、 z_B 方向动平台无转动, 所以该旋转矩阵表示为

$$R=R_{ZYX}(\alpha \quad \beta \quad \gamma)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (10)$$

$$\begin{cases} A'_1=[X, Y-2a \sin \gamma, Z+2a \cos \gamma]^T, \\ A'_2=[X, Y+a \sin \gamma - \sqrt{3}a \cos \gamma, Z-a \cos \gamma - \sqrt{3}a \sin \gamma]^T, \\ A'_3=[X, Y+a \sin \gamma + \sqrt{3}a \cos \gamma, Z-a \cos \gamma + \sqrt{3}a \sin \gamma]^T. \end{cases} \quad (12)$$

该机构驱动杆杆长可表示为

$$l_i=|A'_i-B_i|, \quad (13)$$

$$\begin{cases} l_1=[X^2+(Y-2a \sin \gamma)^2+(Z+2a \cos \gamma-2b)^2]^{\frac{1}{2}}, \\ l_2=[X^2+(Y+a \sin \gamma - \sqrt{3}a \cos \gamma + \sqrt{3}b)^2 + (Z-a \cos \gamma - \sqrt{3}a \sin \gamma + b)^2]^{\frac{1}{2}}, \\ l_3=[X^2+(Y+a \sin \gamma + \sqrt{3}a \cos \gamma - \sqrt{3}b)^2 + (Z-a \cos \gamma + \sqrt{3}a \sin \gamma + b)^2]^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (14)$$

根据机构本身存在的约束关系可知向量 B_1O_A 始终与动平台对边 $A'_2A'_3$ 相垂直, 由此建立约束方程, 如式(15)和式(16)所示。

$$B_1O_A \cdot A'_2A'_3=0, \quad (15)$$

$$Y=(2b-Z) \tan \gamma. \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)可得

动平台上各点 A_i 在动坐标系中可表示为 $A_i(i=1, 2, 3)$, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} A_1=[0 & 0 & 2a]^T, \\ A_2=[0 & -\sqrt{3}a & -a]^T, \\ A_3=[0 & \sqrt{3}a & -a]^T. \end{cases} \quad (8)$$

动平台中动坐标系可通过 Z-Y-X 型欧拉角 (α, β, γ) 将各点姿态变换至静坐标系中。其中, α 、 β 、 γ 分别为动坐标系绕 z_B 、 y_B 、 x_B 轴的旋转角度, 所以该姿态变换矩阵 R 表示为

动平台上各 A_i 点在静坐标系中可表示为

$$A'_i=RA_i+P, \quad (11)$$

式中: $P=[X \quad Y \quad Z]^T$ 为动坐标系原点在静坐标系中的位置矢量。

因此, 动平台上各点在静坐标系中可表示为

$$\begin{cases} l_1=[X^2+((2b-Z) \tan \gamma - 2a \sin \gamma)^2 + (Z+2a \cos \gamma - 2b)^2]^{\frac{1}{2}}, \\ l_2=[X^2+(2b-Z) \tan \gamma + a \sin \gamma - \sqrt{3}a \cos \gamma + \sqrt{3}b)^2 + (Z-a \cos \gamma - \sqrt{3}a \sin \gamma + b)^2]^{\frac{1}{2}}, \\ l_3=[X^2+(2b-Z) \tan \gamma + a \sin \gamma + \sqrt{3}a \cos \gamma - \sqrt{3}b)^2 + (Z-a \cos \gamma + \sqrt{3}a \sin \gamma + b)^2]^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (17)$$

播种过程中的机构位置的控制可通过式(17)得到驱动杆杆长的位移变化来实现。

2.2 速度分析

机构末端输出与输入的速度映射可用影响系数为一阶的速度雅可比矩阵直观表示, 所以机构速度分析就是求解速度雅可比矩阵的过程。

将该并联机构的逆解方程式两端对时间 t 求导, 如式(18)所示。

$$J_t \begin{bmatrix} \dot{l}_1 \\ \dot{l}_2 \\ \dot{l}_3 \end{bmatrix} = J_x \begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{X} \\ \dot{Z} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: $[\dot{l}_1 \ \dot{l}_2 \ \dot{l}_3]^T$ 为驱动副的输入速度; $[\dot{Y} \ \dot{X} \ \dot{Z}]^T$ 为动平台末端响应速度; J_t 为驱动输入到关节空间的映射矩阵, J_x 为关节空间到末端笛卡尔空间的映射矩阵, 表达式分别如式(19)和式(20)所示。

$$J_t = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$J_x = \begin{bmatrix} J_{x11} & J_{x12} & J_{x13} \\ J_{x21} & J_{x22} & J_{x23} \\ J_{x31} & J_{x32} & J_{x33} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

当 J_t 非奇异时, 在式(18)两边同时左乘 J_t , 则2-UPU/RPU 并联机构的速度雅可比矩阵可表示为

$$J = J_t^{-1} J_x. \quad (21)$$

在实际播种中为了使其更精准地完成相应动

作, 需要根据四足机器人的运动动作需求, 合理规划机构的运动速度。

3 3-UPS/PPR 并联机构运动性能分析

3.1 足端工作空间分析

机构动平台的某一参考点能够到达的空间所有位姿集合即为机构工作空间。本文利用极限边界搜索法求解工作空间, 如式(22)所示。

$$D = [0 \ 0 \ d_p]^T, \quad (22)$$

式中: D 为足端点相对于动坐标系 $O_A-x_A y_A z_A$ 的位置矢量; d_p 为足端点到动坐标系原点 O_A 的距离, d_p 取 200 mm。

将该足端点转换到静坐标系 $O_B-x_B y_B z_B$ 中, 如式(23)所示。

$$D' = RD + P. \quad (23)$$

该2-UPU/RPU 并联机构的结构参数及约束条件范围如表1所示。

表1 结构参数及约束条件范围

Tab. 1 Range of structural parameters and constraints

静平台外半径 R/mm	动平台半径 R/mm	转动副极限转角 $\theta_{R\max}/(^{\circ})$	虎克副极限转角 $\theta_{U\max}/(^{\circ})$	支链杆长 L_i/mm
200	100	45	45	200~500

利用Matlab绘制2-UPU/RPU 并联机构足端工

作空间范围, 如图8所示。

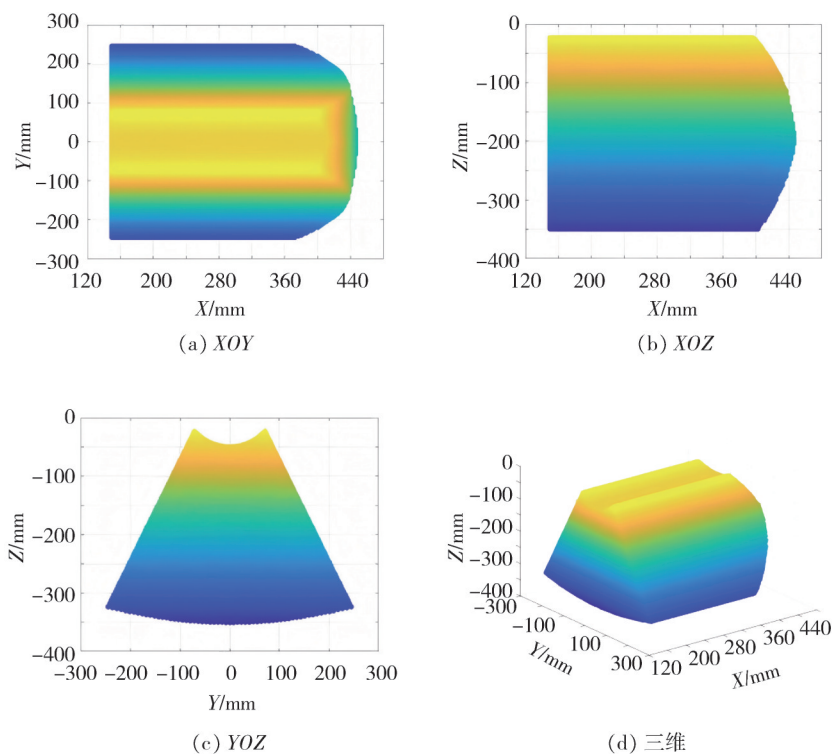


图8 播种机器人足端工作空间

Fig. 8 Workspace at the foot end of the seeding robot

图 8(a)、图 8(b)、图 8(c) 分别为该并联机构足端工作空间 XOY 平面、 XOZ 平面、 YOZ 平面投影, 图 8(d) 为该并联机构三维工作空间图。由图 8 可知: 播种机器人足端在 X 轴方向上的运动范围为 150~450 mm; 在 Y 轴方向上的运动范围为 -250~250 mm; 在 Z 轴方向上的运动范围为 -30~-350 mm。四足机器人足端工作空间范围较大, 可满足对于紫苏作物播种行距 400~600 mm、株距 200~250 mm 的农艺范围需求^[18]。足端工作空间关于 XOZ 平面呈对称分布, 符合并联机构各支链对称布置形式。

3.2 运动/力传递性能分析

对 RPU 驱动支链而言, RPU 支链的杆长方向经过分支虎克铰中心的纯力即为单位传递力旋量, 如式(24)所示。

$$S_{T1} = (B_1 A'_1 / |B_1 A'_1|; A'_1 \times B_1 A'_1 / |B_1 A'_1|), \quad (24)$$

式中: $B_1 A'_1$ 为 RPU 驱动支链杆长的方向向量。

对 UPU-I、UPU-II 驱动支链而言, UPU-I、UPU-II 分支杆长方向的纯力即为均过分支虎克铰中心的单位传递力旋量 S_{T2} 、 S_{T3} , 表示为

$$S_{T2} = (B_2 A'_2 / |B_2 A'_2|; A'_2 \times B_2 A'_2 / |B_2 A'_2|), \quad (25)$$

$$S_{T3} = (B_3 A'_3 / |B_3 A'_3|; A'_3 \times B_3 A'_3 / |B_3 A'_3|), \quad (26)$$

式中: $B_2 A'_2$ 、 $B_3 A'_3$ 分别为 UPU-I、UPU-II 驱动支链杆长的方向向量。

单位输入运动旋量 S_{li} 可表示为

$$S_{li} = (0; B_i A'_i / |B_i A'_i|). \quad (27)$$

2-UPU/RPU 该并联机构的约束螺旋系 $\{W_c\}$ 为

$$\{W_c\} = \left\{ \begin{array}{l} S_{C1} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0) \\ S_{C2} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ S_{C3} = (0 \ 1 \ 0 \ -f \ 0 \ 0) \end{array} \right\}. \quad (28)$$

将第 i 个单位传递力旋量 S_{Ti} 刚化后, 单位输出旋量 S_{Oi} 满足式(29)。

$$\begin{cases} S_{Oi} \circ S_{Ci} = 0, \\ S_{Oi} \circ S_{Tk} = 0, \end{cases} \quad (29)$$

式中: $i, k = 1, 2, 3; k \neq i$ 。

由式(29)可得第 i 个单位输出旋量 S_{Oi} 为

$$S_{Oi} = (s_i; r_i \times s_i), \quad (30)$$

式中: s_i 和 r_i 分别为单位输出旋量 S_{Oi} 的方向向量和该旋量到静坐标系原点的矢径。

该并联机构的输出端传递性能指标 κ_o 和输入端传递性能指标 κ_i 分别为

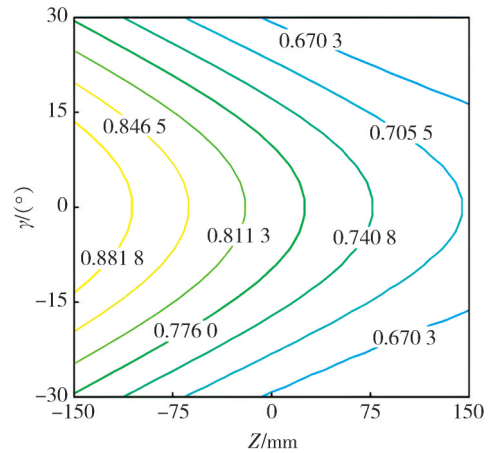
$$\kappa_o = \min \left\{ \frac{|S_{Ti} \circ S_{Oi}|}{|S_{Ti} \circ S_{Oi}|_{\max}} \right\}, \quad (31)$$

$$\kappa_i = \min \left\{ \frac{|S_{Ti} \circ S_{li}|}{|S_{Ti} \circ S_{li}|_{\max}} \right\}. \quad (32)$$

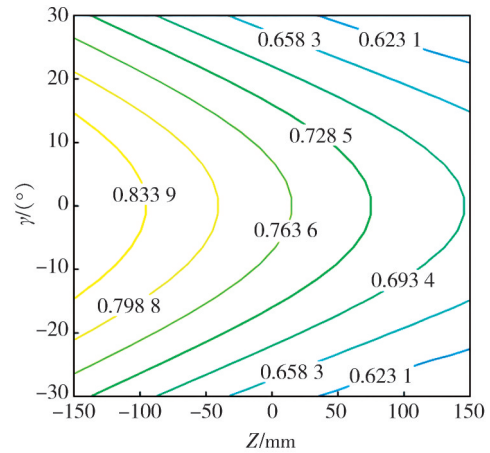
由于该机构输入端传递性能指标 $\kappa_i = 1$, 所以局部运动/力传递性能指标只由输出端运动/力传递性能指标 κ_o 决定, 则局部传递性能指标 κ 表示为

$$\kappa = \min \{\kappa_i, \kappa_o\} = \kappa_o. \quad (33)$$

X 分别取 200, 300 和 400 mm 时, 绘制 2-UPU/RPU 并联机构运动/力传递性能图谱, 如图 9 所示。由图 9 可知: 2-UPU/RPU 并联机构的运动/力传递性能指标大致分布于 $[0.57, 0.88]$ 之间, 且运动/力传递性能图谱关于 $\gamma = 0$ 对称分布; 当并联机构动平台越靠近 z_B 轴负方向时, 其传递性能指标数值越高; 当机构处于 $\gamma = 0$ 时, 同一位置条件下其运动/力传递性能数值达到峰值。



(a) $X=200$ mm



(b) $X=300$ mm

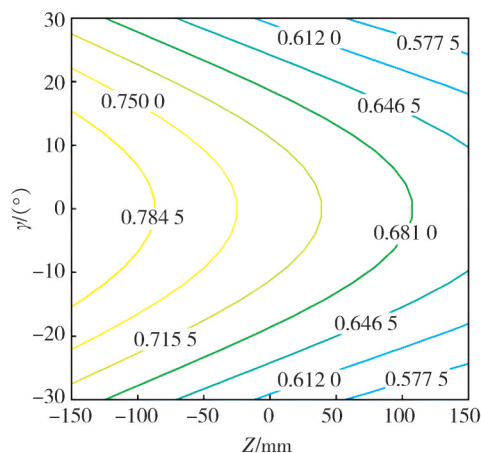


图9 2-UPU/RPU并联机构的运动/力传递性能

Fig. 9 Motion/force transfer performance of 2-UPU/RPU parallel mechanism

在实际应用过程中,应使并联机械腿在轴方向移动距离适中。除此之外,避免机构动平台转角过大出现极限位置,应使四足机器人腿部机构保持小转角姿态,以保障四足播种机器人在运动过程中更加稳定,保持良好的运动性能。

4 四足播种机器人运动仿真分析

为验证播种机器人运动过程中是否能够根据具体地形情况灵活调整其播种株距及行距,其足端是是否能够满足垂直入土、垂直出土的播种农艺要求,对四足机器人平地行走动作进行了仿真分析。

图10为四足播种机器人平地行走模拟场景,机器人在行走过程中将按照最优步态2-1-3-4步序进行移动,取四足机器人足端单步最大抬高距离为150 mm,步长为250 mm。

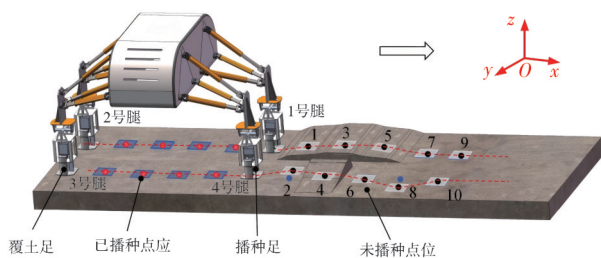


图10 四足播种机器人平地行走示意图

Fig. 10 Schematic diagram of quadruped seeding robot walking on flat ground

设置不同目标播种点模拟行走过程中遇到的各类情况,其目标播种点位姿参数如表2所示。

1~10号点位用于模拟目标播种点位,1、3、4、5号点位用于模拟播种机器人存在斜坡播种情况;其中,1、3、5号点位模拟绕Y轴方向斜坡播

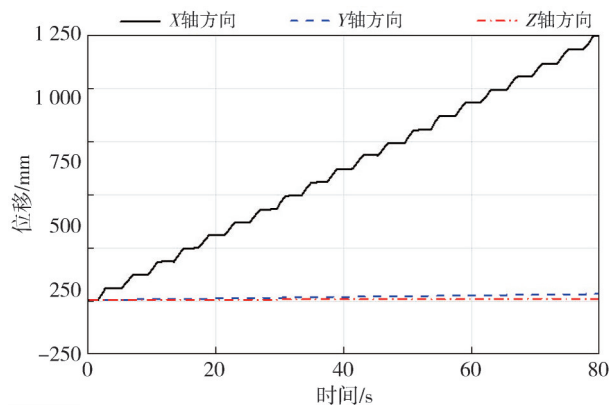
种,4号点位模拟绕X轴方向斜坡播种;1、2、5、7、8号点位机器人模拟遇到障碍物时播种,其中1、5、7号点位模拟调节株距播种,2、8号点位模拟调节行距播种;6、9、10号点位模拟正常播种状态。给四足机器人腿部驱动副添加驱动,然后对四足机器人平地行走运动进行仿真。

表2 目标播种点位位姿参数

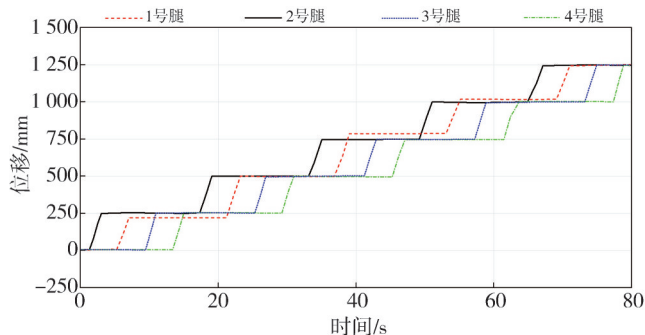
Tab. 2 Positional parameters of target seeding sites

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm	α/rad	β/rad	γ/rad
1	240	-200	45	0.139	0	0
2	250	120	0	0	0	0
3	500	-200	68	0	0	0
4	500	200	58	0	0.314	0
5	770	-200	38	0.209	0	0
6	750	200	0	0	0	0
7	1100	-200	0	0	0	0
8	1000	290	0	0	0	0
9	1250	-200	0	0	0	0
10	1250	200	0	0	0	0

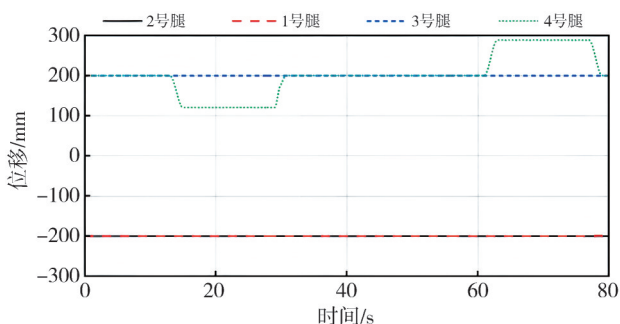
四足播种机器人平地行走时质心和足端位移变化曲线,如图11所示。四足播种机器人在运动过程中,质心沿X轴方向上的位移呈周期性运动,且曲线光滑无间断点,质心沿Z轴方向基本无位移变化,沿Y轴方向上质心有所波动,但该波动范围保持10 mm内,抖动在允许范畴,未对四足机器人整体运动状况产生影响。



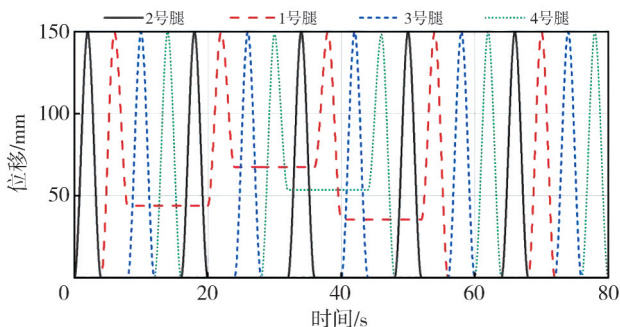
(a) 四足机器人机身质心位移变化曲线



(b) 四足机器人腿部沿X轴方向位移变化曲线



(c) 四足机器人腿部沿 Y 轴方向位移变化曲线



(d) 四足机器人腿部沿 Z 轴方向位移变化曲线

图 11 四足机器人平地行走位移变化

Fig. 11 Variation of displacement for level walking of quadruped robot

图 11(b) 中, 四足机器人 1 号腿在 4~8 s、36~40 s 和 52~56 s 时, 沿 X 轴方向位移发生变化, 符合 1、5、7 号目标播种点位株距变化情况。在图 11(c) 中, 四足机器人 4 号腿在 12~16 s 和 60~64 s 时, 沿 Y 轴方向位移发生变化, 符合 2 号和 8 号目标播种点位行距变化情况。在图 11(d) 中, 四足机器人 1 号腿在 4~8 s、20~24 s 和 36~40 s 以及 4 号腿在 28~32 s 时, 沿 Z 轴方向位移发生变化, 符合 1、3、4、5 号目标播种点位地形变化, 且各腿部位移曲线平滑且呈周期性变化, 遵循相应变化规律, 表明机器人在前进时冲击较小, 这为播种作业稳定开展提供了有利条件。

5 结 论

本文设计了一种基于 (2-UPU/RPU)&U 混联机构的紫苏播种机器人, 并进行了运动学分析及仿真, 主要结论如下:

1) 2-UPU/RPU 腿部并联机构具有 2T1R 三自由度, 分别为沿 x_B 轴、 z_B 轴的移动以及绕 x_B 轴的转动, 可满足紫苏播种的自由度要求。

2) 在给定参数条件下, 机构奇异性分析的结果表明, 机构不存在奇异位置。机构工作空间分析表明足端在 X 轴方向上的运动范围为 150~450 mm, 在 Y 轴方向上的运动范围为 -250~250 mm, 在 Z 轴

方向上的运动范围为 -30~-350 mm。根据传递性能图谱可知, 该机器人运动/力传递性能良好。

3) 设定不同的播种点位, 对四足机器人进行移动仿真, 证实了其具备较强地形适应能力, 可依不同地形灵活调整足端株距、行距以完成播种、覆土作业。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 郑梅琴, 肖清铁, 吕荣海, 等. 紫苏生长与产量对种植密度、施肥及种植方式的响应[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(1): 15-23.
Zheng Meiqin, Xiao Qingtie, Lü Ronghai, et al. Response of growth and yield of perilla *frutescens* (L.) britt to its planting density, fertilization and planting patterns[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2018, 40(1): 15-23. (in Chinese)
- [2] Sang L F, Wang H B, Yu H N, et al. A novel human-carrying quadruped walking robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14(4): 1729881417716592.
- [3] Zhang J Z, Li M, Cao J D, et al. Research on bionic jumping and soft landing of single leg system in quadruped robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(5): 2088-2107.
- [4] 丰玉玺. 四足轮腿式移动机器人的设计与性能分析[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [5] 马世豪, 李瑞琴, 米文博, 等. 基于 2-SPR/RUPR 并联机构的四足步行机器人轨迹规划与步态分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 397-404.
Ma Shihao, Li Ruiqin, Mi Wenbo, et al. Trajectory planning and gait analysis of quadruped walking robot based on 2-SPR/RUPR parallel mechanism[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 397-404. (in Chinese)
- [6] Wu Y F, Guo S, Li L Q, et al. Design of a novel side-mounted leg mechanism with high flexibility for a multi-mission quadruped earth rover BJTUBOT[J]. Frontiers of Mechanical Engineering, 2023, 18(2): 24.
- [7] 高海豹. 基于 R+(3-CPR)+U 混联机构的四足穴播机器人构型设计及轨迹规划[D]. 太原: 中北大学, 2022.

- [8] 王祎才, 杨正, 李晓军, 等. 基于平行四连杆机构的垂直入土式玉米穴播机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(10): 18-24.
- Wang Yicai, Yang Zheng, Li Xiaojun, et al. Design and experiment of vertical submerged corn hole seeder based on parallel four-bar linkage mechanism[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(10): 18-24. (in Chinese)
- [9] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91-97.
- Zhao Wuyun, Dai Fei, Yang Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91-97. (in Chinese)
- [10] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 32-38.
- Shi Linrong, Zhao Wuyun, Sun Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 32-38. (in Chinese)
- [11] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 电驱式玉米膜上直插穴播机前进速度补偿机构参数优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 87-94.
- Shi Linrong, Zhao Wuyun, Sun Wei, et al. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 87-94. (in Chinese)
- [12] 石林榕, 赵武云, 孙步功, 等. 非圆齿轮驱动式玉米直插穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 157-167.
- Shi Linrong, Zhao Wuyun, Sun Bugong, et al. Design and experiment of non-circular gear-driven maize hole seeder with vertical insertion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 157-167. (in Chinese)
- [13] 王芮雪, 田宝俊, 李瑞琴, 等. 基于3-UPS/PPR的推拿机器人运动学分析及仿真[J]. 机械传动, 2025, 49(2): 161-169.
- Wang Ruixue, Tian Baojun, Li Ruiqin, et al. Kinematics analysis and simulation of massage robots based on 3-UPS/PPR[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2025, 49(2): 161-169. (in Chinese)
- [14] 李沐桐, 李天宇, 官晓东, 等. 旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 48-57.
- Li Mutong, Li Tianyu, Guan Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48-57. (in Chinese)
- [15] 衣淑娟, 孙亭瀚, 陈涛, 等. 谷子穴播机勺链式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 39-52.
- Yi Shujuan, Sun Tinghan, Chen Tao, et al. Design and test of spoon chain seed guide device for grain hole seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 39-52. (in Chinese)
- [16] 梁美彦. 基于STM32的四足仿生机器人设计与实验研究[J]. 测试技术学报, 2019, 33(1): 34-42.
- Liang Meiyuan. Design and experimental research on quadruped bionic robot based on STM32[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(1): 34-42. (in Chinese)
- [17] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [18] 田世刚, 陈俊铨, 沈奇, 等. 紫苏不同种植方式的产量及经济效益分析[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(2): 202-206.
- Tian Shigang, Chen Junkun, Shen Qi, et al. Yield and economic benefit of perilla with different cultivation methods [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2016, 38(2): 202-206. (in Chinese)